

博士學位論文

スキージャンプ踏み切り局面が初期飛行局面に及ぼす影響

—バイオメカニクスの観点から—

山辺 芳

目次

1	序論	1
1.1	先行研究の検討	3
1.1.1	踏み切り動作に伴う力学量が飛距離に及ぼす影響	4
1.1.2	踏み切り動作の多様性について	6
1.1.3	飛行姿勢の研究について	7
1.2	研究の目的および課題	13
2	踏み切り局面における力学的諸変量が飛距離に及ぼす影響（実験1）	15
2.1	目的	15
2.2	方法	15
2.2.1	床反力計	15
2.2.2	被検者	16
2.2.3	測定手順	18
2.2.4	床反力の解析	21
2.2.5	統計処理	21
2.3	結果	22
2.3.1	力学的諸変量と飛距離との相関関係	22
2.3.2	上位群と下位群の比較	26
2.3.3	上位選手間の比較	28
2.4	考察	32
2.4.1	助走速度と総質量について	32
2.4.2	発揮された力学的諸変量と飛距離との関係	33
2.4.3	上位選手間の比較	34
2.5	小括	36
3	一流ジャンプ選手における床反力発揮の特徴（実験2）	37
3.1	目的	37
3.2	方法	37
3.2.1	被検者	37
3.2.2	測定手順	39
3.2.3	データ処理	40
3.2.4	統計処理	43

3.3	結果	44
3.3.1	床反力波形の再現性	44
3.3.2	床反力発揮様式	46
3.3.3	床反力発揮様式と最大上昇速度との関係	46
3.3.4	床反力発揮様式と身体重心変位との関係	49
3.3.5	床反力発揮様式が異なる選手の比較	52
3.3.6	床反力発揮様式と踏み切り姿勢との関係	54
3.4	考察	57
3.4.1	床反力波形/パターンの再現性	57
3.4.2	床反力発揮様式	58
3.4.3	床反力発揮様式と力学的諸変量との関係	58
3.4.4	床反力発揮様式と踏み切り姿勢との関係	61
3.5	小括	62
4	踏み切り時の股関節角度の大きさが初期飛行局面に及ぼす影響（実験3）	64
4.1	目的	64
4.2	方法	64
4.2.1	被検者	64
4.2.2	測定手順	65
4.2.3	映像の解析	65
4.2.4	統計処理	68
4.3	結果	70
4.3.1	踏み切り時の股関節角度の大きさが初期飛行局面の姿勢制御に及ぼす影響	70
4.3.2	初期飛行局面における姿勢制御の違いが飛行速度および経路に及ぼす影響	80
4.4	考察	84
4.4.1	初期飛行局面における姿勢制御と空気力との関係	84
4.4.2	初期飛行局面における姿勢制御の違いが飛行速度および経路に及ぼす影響	93
4.4.3	初期飛行局面における姿勢制御の違いが前傾姿勢に及ぼす影響	96
4.5	小括	104
5	初期飛行姿勢を対象とした風洞実験および飛行シミュレーション（実験4）	106
5.1	目的	106
5.2	方法	107
5.2.1	実寸大の人形模型を用いた風洞実験による空気力の測定	107
5.2.2	飛行姿勢を独立変数とした空気力係数の回帰モデル	113

5.2.3	スキージャンプ飛行中の股関節角度制御に着目した飛行シミュレーション	114
5.3	結果	123
5.3.1	初期飛行局面における空気力係数	123
5.3.2	空気力係数の回帰モデル	129
5.3.3	初期飛行局面の飛行シミュレーション	137
5.4	考察	150
5.4.1	初期飛行局面における空気力係数	150
5.4.2	空気力係数の回帰モデルについて	153
5.4.3	股関節角度制御の違いが初期飛行局面に及ぼす影響	154
5.5	小括	166
6	総括	170
6.1	結論	170
6.2	今後の研究課題	173
	謝辞	174
	付録	175
A.1	風洞実験データを用いた補間データの作成方法	175
A.2	飛行姿勢による空気力係数の回帰モデル（多次元多項式）の係数表	179
A.2.1	揚力面積（ S_L ）回帰モデルの係数表	179
A.2.2	抗力面積（ S_D ）回帰モデルの係数表	186
A.2.3	ピッチングモーメント容積（ Q_M ）回帰モデルの係数表	193
	文献	200

図のタイトル一覧

- Figure 1 Schematic diagram of the force measurement system installed in the take-off platform (Normal hill: K=90, Hakuba jumping stadium). p. 17
- Figure 2 Schematic diagram of experimental setup for the experiment. In this diagram, the force measurement system and the camera setting are depicted. The high speed camera was used in experiment. In video analysis, two joint angles (Knee and Hip) during take-off were calculated. p. 19
- Figure 3 The force curve and photocell signal. $F_{z_{peak}}$ refers to maximal forces and F'_{6-0m} refers to averaged force levels and I_{6-0m} refers to impulse of the force. Photocell signal was recorded to identify the position of a ski jumper running on the take-off platform. These variables were given by using photocell signals for 6m distance before take-off edge. p. 20
- Figure 4 Flight distance and averaged force level (F'_{6-0m}) for the first round (a) and the second round (b). p. 24
- Figure 5 Flight distance and peak force value ($F_{z_{peak}}$) for the first round (a) and the second round (b). p. 25
- Figure 6 Flight distance and impulse of the force (I_{6-0m}) for the first round (a) and the second round (b). p. 26
- Figure 7 The difference of the force production between M.H. (solid line) and M.S. (dotted line). Figure 7a : M.H. was the first place (98.0m) and M.S. was the second place (92.0m) for the first round. Figure 7b : M.H. was the first place (98.5m) and M.S. was the second place (94.0m) for the second round. p. 31
- Figure 8 Force curve (a, b), the displacement of the center of gravity and photocell signals (c). Measured force (F_a) includes the body weight (B_w) during all the part of the take-off platform and also includes the centrifugal force (F_r) during the 10-6.2m before the take-off edge (a). Then a net force (F) generated by the jumper was calculated by subtracting these forces (b). F_{max1} and F_{max2} is the maximal value of the force. DCG_{min} and DCG_{0m} refer to the displacement of the center of gravity at the minimal value and at the instant of take-off respectively. $T1$ refers to the time duration from the point of DCG_{min} to the edge of the take-off. A starting point of integration is shown as T_s . p. 42
- Figure 9 Multiple plots of ground reaction forces (GRF) by three subjects (N.K., K.F., M.H.). GRF is expressed as a relative value for each subject's total body weight. For the take-off time, 0% indicates the instant that GRF increased to the total body weight level, while 100% indicates the instant that GRF decreased to the total body weight level. p. 45
- Figure 10 F_{max1} and F_{max2} for twelve subjects. p. 48
- Figure 11 Maximal vertical velocity of the center of gravity (V_{max}) and quotient of F_{max2} to F_{max1} ($F2/F1$). p. 48

- Figure 12 Minimal value of displacement of the center of gravity (DCG_{min}) and quotient of F_{max2} to F_{max1} ($F2/F1$). p. 50
- Figure 13 Timing of DCG_{min} ($T1$) and quotient of F_{max2} to F_{max1} ($F2/F1$). p. 50
- Figure 14 Displacement of the center of gravity at the edge of take-off (DCG_{0m}) and quotient of F_{max2} to F_{max1} ($F2/F1$). p. 51
- Figure 15 Ground reaction force (a), velocity (b), displacement (c) of the center of gravity and joint angular displacements of knee and hip (d) of three jumpers, K.F. (solid line), N.K.(broken line) and M.H.(dotted line). The time 0 sec means the point that the jumper passing the photocell arranged at the end of the take-off platform (0m). p. 55
- Figure 16 Relationship between the joint angles at the take off and quotient of F_{max2} and F_{max1} ($F2/F1$). Figure (a) refers to the knee joint angle (Knee-0m) and figure (b) refers to the the hip joint angle (Hip-0m). p. 56
- Figure 17 The coordinate system, definition of the angles and velocity during flight. The origin of the X - Y coordinate system is fixed on the edge of a jumping platform. Positions of the jumper and skis are defined as angles (α , β , γ , ε , θ , κ and τ). The velocity of the jumper (V) is divided into horizontal (V_x) and vertical (V_y) components. DCG_y means displacement of the center of gravity (CG) of the jumper. p. 69
- Figure 18 Changes in hip joint angle (ε), leg-ski angle (θ), attack angle (α) and ski angle (γ) with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker, while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker. p. 72
- Figure 19 Changes in the forward leaning angles (a, c) and their angular velocities (b, d) with flight distance. The leg angle (τ) means the angle between the leg segment and the horizontal line, while the trunk angle (κ) means the angle between the trunk segment and the horizontal line. The angular velocity of the leg angle is shown as τ' and the angular velocity of the trunk angle is shown as κ' respectively. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker. p. 75
- Figure 20 Relationship between the hip joint angle at the instant of take-off (ε_{0m}) and the quantitative changes (increase or decrease) in the forward leaning angles during the early flight phase (0m to 5m) in twelve subjects. The quantitative changes in the leg angle and the trunk angle are shown as ($\Delta\tau$) and ($\Delta\kappa$) respectively. p. 77
- Figure 21 Changes in the posture and the hip joint angle (ε) with flight distance during early flight. Subject M. H. were selected from the same group (Hip_Large). Subject M. H. showed the largest value of the hip joint angle between twelve subjects. p. 79
- Figure 22 Horizontal (V_x) and vertical (V_y) velocities of the center of gravity (a, c), and the amount of change (b, d) in these velocities with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker. p. 81

- Figure 23 The direction of the flight path of the center of gravity with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker. p. 83
- Figure 24 Displacement of center of gravity (DCGy) with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker. p. 83
- Figure 25 The effect of the attack angle (α), ski to leg angle (θ) and hip joint angle (ε) on the Lift area: S_L (a) and the drag area: S_D (b). (Figure adapted from (Tani et al. 1951)). p. 89
- Figure 26 The effect of the arm position (φ) on the lift area (S_L) with increasing the ski to leg angle (θ). The markers painted white and black mean the arms raised up forward position ($\varphi=18^\circ$) and the arms fitted to the trunk position ($\varphi=165^\circ$) respectively. Hip joint angle (ε) was fixed at 140° . Attack angle (α) was varied at (0, 5 and 10°). (Data adapted from (Tani et al. 1971)). p. 90
- Figure 27 The plane view of the wind tunnel (The University of Tokyo). p. 108
- Figure 28 The ski jumper model. Each photo shows the frontal view (a), the side view (b) and the back view (c) of the model. p. 108
- Figure 29 A set up for the wind tunnel experiment. p. 109
- Figure 30 Measured aerodynamic parameters (lift (L), drag (D) and pitching moment (M)), and the body configuration of a ski jumper model and skis in the wind tunnel test. p. 110
- Figure 31 Histograms of a frequency of each flight position (α , θ , σ , λ and ϕ) of a ski jumper model in the wind tunnel test and the interpolated data. p. 112
- Figure 32 The coordinate system and definition of the angles and aerodynamics forces. The origin of the X - Y coordinate system is fixed on the edge of a jumping platform. The X axis is parallel to the horizontal line. β means the angle of the velocity vector of center of gravity (C. G.) to the horizontal line. The aerodynamic forces lift, drag and pitching moment are depicted as L, D and M respectively. The gravitational force is depicted as mg. Velocity is depicted as V and divided into two velocity components V_x and V_y . p. 115
- Figure 33 Position control of four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M. H. and M. H. case study) for computer simulation. These flight models have the same movement pattern in the ski to leg angle (θ), the ski to ski angle (λ) and the attack angle (α) as depicted in figure 33(a). The arm angle (φ) which is not shown here is set as a constant (170°) in each model. Figure 33(b) shows the difference in the hip bending angle (σ) between the models. These markers indicate experimental data, while the lines indicate interpolated data by using cubic spline function. p. 121

- Figure 34 The relationship between the ski to leg angle θ and the lift area S_L when the arms fitted to the trunk (arm angle $\phi = 170^\circ$). Each plot show different condition of angle of attack ($\alpha : -5 \sim 20^\circ$). The other positions of the jumper-ski model were set as follows, hip bending angle $\sigma = 40^\circ$ and ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$. p. 124
- Figure 35 The relationship between the ski to leg angle θ and the aerodynamic forces (drag area S_D , lift area S_L and pitching moment volume Q_M). Each plot show different condition of angle of attack ($\alpha : -5 \sim 20^\circ$). The other positions of the jumper-ski model were set as follows, hip bending angle $\sigma = 70^\circ$, ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$ and arm angle $\phi = 170^\circ$. p. 126
- Figure 36 The relationship between the hip bending angle σ and the aerodynamic forces (drag area S_D , lift area S_L and pitching moment volume Q_M). Each plot show different condition of angle of attack ($\alpha : -5 \sim 20^\circ$). The other positions of the jumper-ski model were set as follows, ski to leg angle $\theta = 80^\circ$, ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$ and arm angle $\phi = 170^\circ$. p. 128
- Figure 37 An example of the measured and the calculated the aerodynamic coefficients (S_L , S_D and Q_M). p. 130
- Figure 38 The relationship between the aerodynamic coefficients (S_L , S_D and Q_M) which were measured by the wind tunnel experiment (ordinate) and those which were calculated by the regression model (abscissa). p. 132
- Figure 39 The distribution of the residual of the aerodynamic coefficients (S_L , S_D and Q_M) between those which were calculated by the regression model and those which were measured by the wind tunnel experiment. p. 133
- Figure 40 The frequency of the residual of each aerodynamic coefficient (S_L , S_D and Q_M). The residual means the difference in the aerodynamic coefficients between the calculated value by the regression models and the measured value by the wind tunnel experiments. A curve line in each diagram shows the normal distribution. p. 134
- Figure 41 Flight positions and the aerodynamic coefficients (S_D and S_L). A comparison between this study (noted "Calculated") and the precedent study (noted "Schmölzer") about lift area (b) and drag area (c) respectively. Flight positions (a), lift area (b) and drag area (c) were adapted from Schmölzer et al. (2002). p. 136
- Figure 42 Calculated aerodynamic coefficients of four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M. H. and M. H. Case Study) by using the regression models which were established in this study. p. 140
- Figure 43 The horizontal velocity of the center of gravity which was calculated by simulation for the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study). p. 143
- Figure 44 The vertical velocity of the center of gravity which was calculated by simulation for the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study). p. 143
- Figure 45 Velocity of the center of gravity during the early flight phase for the flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study). These diagrams depict horizontal (V_x) and vertical (V_y) component of the velocity at 0.2 (a), 0.6 (b) and 1.0 (c) second after take-off respectively. p. 144

- Figure 46 The velocity of the center of gravity which was calculated by simulation for the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study). p. 145
- Figure 47 Stick pictures of the early flight phase of the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study) which were calculated by simulation. The dotted lines mean the flight path of the center of gravity of the four models respectively. The duration of the simulation was 1.0 second. The interval of each picture is 0.1 second. p. 148
- Figure 48 Displacement of the center of gravity during the early flight phase for the flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study). These diagrams depict horizontal (DCG_x) and vertical (DCG_y) displacement of the center of gravity at 0.2 (a), 0.6 (b) and 1.0 (c) second after take-off respectively. p. 149
- Figure 49 The effect of the hip bending angle (σ) on the lift area (S_L) between two conditions of the ski to leg angle (θ) (a: $\theta = 70^\circ$ and b: $\theta = 50^\circ$) with different conditions of the attack angles (α) (a: $-5 \sim 10^\circ$ and b: $-5 \sim 20^\circ$). These data were measured by the wind tunnel test. The ski to ski angle (λ) and the arm angle (φ) were fixed at 0° and 170° respectively. p. 158
- Figure A1 An example of the interpolation result between the attack angles α in an experimental case. The other positions of the jumper-ski model were fixed as follows, ski to leg angle $\theta = 70^\circ$, hip bending angle $\sigma = 70^\circ$, ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$ and arm angle $\varphi = 170^\circ$. Open circle markers mean the data of the wind tunnel experiment. Painted circle markers mean the calculated values by Piecewise Cubic Hermite interpolation method. p. 176
- Figure A2 An example of the interpolation result between two experimental cases which have a difference in ski to ski angle λ . The other positions of the jumper-ski model were fixed as follows, ski to leg angle $\theta = 80^\circ$, hip bending angle $\sigma = 60^\circ$ and arm angle $\varphi = 170^\circ$. Open circle and triangle markers mean the data of the wind tunnel experiment. Lines mean the calculated values by linear interpolation method. p. 177
- Figure A3 An example of the interpolation result between four experimental cases which have a difference in hip bending angle σ . The other positions of the jumper-ski model were fixed as follows, ski to leg angle $\theta = 70^\circ$, ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$ and arm angle $\varphi = 170^\circ$. Four types of markers mean the data of the wind tunnel experiment. Lines mean the calculated values by Piecewise Cubic Hermite interpolation method. p. 178

表のタイトル一覧

Table 1	The selected variables of 50 subjects in the first and the second round.	p. 23
Table 2	The selected variables of the two groups in the first round (a) and the second round (b).	p. 28
Table 3	The selected variables between two groups in the first round (a) and the second round (b).	p. 29
Table 4	Age, body height and body mass of twelve subjects.	p. 38
Table 5	Statistics of $F_{\max 1}$, $F_{\max 2}$ and a quotient of $F_{\max 2} / F_{\max 1}$ ($F2/F1$).	p. 47
Table 6	Anthropometric characteristics of the jumper - ski model which was used in the flight simulation.	p. 118
Table 7	The initial conditions of simulation for each flight model (Hip_Large, Hip_Small, subject M.H. and Subject M.H. case study).	p. 122
Table A1	Coefficients a_{ijklm} of equation ⑦ for S_L	pp. 180–185
Table A2	Coefficients b_{ijklm} of equation ⑧ for S_D	pp. 187–192
Table A3	Coefficients c_{ijklm} of equation ⑨ for Q_M	pp. 194–199

1 序論

スキージャンプは、飛距離から得られた飛距離点と、飛型審判員の採点による飛型点との合計点を争う競技である。スキージャンプの飛距離は競技が行われるジャンプ台の規格によってかなり異なる。ジャンプ台は、国際スキー連盟 (International Ski Federation : FIS) の規定で、以下の 5 つの規格に分類されている (International Ski Federation 2008)。

スモールヒル： $W \leq 44 \text{ m}$

ミディアムヒル： $45 \text{ m} \leq W \leq 74 \text{ m}$

ノーマルヒル： $75 \text{ m} \leq W \leq 99 \text{ m}$

ラージヒル： $100 \text{ m} \leq W$

フライングヒル： $170 \text{ m} \leq W$

ここで、 W はジャンプ台の建築基準点 (K 点) までの飛距離を意味する。スキージャンプの飛距離は、概ねこの K 点の大きさにしたがって大きくなる。オリンピック冬季競技大会の正式種目となっているノーマルヒルおよびラージヒルにおける飛距離 (優勝記録) は、用具 (スキー板、衣服など) や、近年の「V 字姿勢」に代表される飛行技術の改良によって近年増大傾向にあるが、それぞれ約 100 m および 130 m である (山辺 2006)。一方で、スキージャンプの飛距離と飛型点との間には、正の相関関係が見られることが知られており (浅見 1993; 渡部ら 1997; Greimel ら 2009)、この関係が崩れるのは着地に失敗した場合にほぼ限定される。したがって、スキージャンプの成績は飛距離の大きさによって決まると言ってよい。以下では、スキージャンプの飛距離を最大化するためにどのような要因があるのかを取り上げる。

スキージャンプの動作をスタートから着地まで概観すると、まず助走路を滑走し

(助走局面) , 助走路の終端付近で踏み切り動作を行い (踏み切り局面) , その後空中に飛び出し (飛行局面) , 着地する (着地局面) という経過を辿る。これらの局面において, スキージャンプの飛距離に影響を及ぼすと考えられている技術的要因を以下に挙げてみる。

まず, 助走局面においては, 低くしゃがみ込んだ姿勢 (クラウチング姿勢) を取ることで空気抵抗をできるだけ小さくし, 大きな助走速度を獲得することが重要となる。選手がジャンプ台の助走路を飛び出す際の速度は非常に大きく, ラージヒルにおいては $90\sim 95\text{ km/h}$ ($25\sim 26.4\text{ m/s}$) に達する。

次に, 踏み切り局面においては, 股関節および膝関節の伸展によって, 身体重心に大きな上昇速度を与えることが課題となる。その理由は, 踏み切り局面終了時の上昇速度が大きいほど, 身体重心の速度ベクトル (上昇速度ベクトルおよび助走速度ベクトルの合成速度ベクトル) の角度を上向きにし, その後の飛行局面の飛行軌跡を高くするためである。この上昇速度は, 踏み切り動作による床反力 (助走路に対して垂直方向の力) の積分値, すなわち力積で決定されることを考慮すると, 踏み切り局面において大きな上昇速度を獲得するためには, 大きな力積を得ることが必要であることが分かる。さらに, 踏み切り局面では, 身体を前傾させた飛行姿勢に素早く移行するため, 身体重心周りに前回り方向の角運動量を与えておく必要がある。それらに加え, 股関節および膝関節の過剰な伸展によって, 助走局面で得られた速度を減少させないような工夫も必要とされる。

最後に, 飛行局面においては, その飛行軌跡が一つの鉛直面上であると仮定すると (飛行軌跡が選手の左右方向にずれないと仮定すると) , 飛行中の選手に作用する力は重力と, 空気から受ける揚力, 抗力およびピッチングモーメントのみである。これらの空気力の大きさは飛行姿勢によって決定されることを考慮すると, 飛距離を最大化するためには, これらの空気力を最適化すべく姿勢制御を行うことが必要

であることが分かる。

このように、スキージャンプの飛距離は様々な技術的要因によって決定されている。これらの技術的要因の他に、環境的要因も、飛距離に影響を与えることが知られている。例を挙げると、高所環境における空気密度の減少は、揚力および抗力などの空気力を小さくし、助走速度を大きくするものの、最終的な飛距離を小さくすることがシミュレーションの結果から明らかにされている (Virmavirta ら 2001e; Schmölzer ら 2005; Virmavirta ら 2005)。また、飛行局面における向かい風も飛距離を増大させることが、シミュレーションの結果から明らかにされている (Müller ら 1996; Schmölzer ら 2002; 瀬尾ら 2002; Seo ら 2004b)。例えば、Schmölzer ら (2002) は、規格の異なるジャンプ台 ($K = 90 \text{ m}$, 120 m および 185 m) を想定した飛行シミュレーションを行い、 3 m/s の向かい風条件は、無風時に比してそれぞれ約 10, 16 および 20 m の飛距離の増大をもたらすことを示している。

本研究は、スキージャンプの踏み切り局面に着目し、バイオメカニクスの側面から検討を行う。すなわち、踏み切り局面において発揮された床反力の大きさが、飛距離に及ぼす影響を明らかにし、さらに、優れた選手の床反力発揮様式とその力学的特徴を明らかにする。最後に、床反力発揮様式の違いに伴う姿勢の差違が、その後の初期飛行局面に及ぼす影響を空気力学観点から明らかにする。

本研究の結果から、一流選手が行っている踏み切り技術を類型化し、それらの踏み切り技術に伴う利益と不利益、または注意が必要な事柄が明らかになれば、選手に対する踏み切り技術指導の指針となる知見を得ることが出来るものと考えられる。

1.1 先行研究の検討

ここでは、本研究と関連するスキージャンプ踏み切りおよび飛行局面に関するバイオメカニクスの研究を概観し、本研究で取り扱う課題を明確にする。

1.1.1 踏み切り動作に伴う力学量が飛距離に及ぼす影響

まず、踏み切り動作の特徴について見てみる。踏み切り動作は、助走姿勢で屈曲していた膝関節および股関節を伸展することによって遂行される。一般的な跳躍動作である垂直跳びにおいては、膝関節および股関節の伸展以外に、足関節の底屈も身体重心の上昇速度を得るために重要であることが知られている (Hubley ら 1983; Soest ら 1985; Nagano ら 2000)。しかしながら、スキージャンプにおいては、下腿上部にまで達するジャンプブーツが、足関節の可動域を制限するため、足関節の底屈はほとんど行われていない (Schwameder ら 1997)。助走姿勢から踏み切り動作終了に至るまでに、膝関節角度は約 80° から 140° まで (Virmavirta ら 1993b)、股関節角度は約 40° から 140° まで (Arndt ら 1995; Schwameder ら 1995) 変化することが知られている。これらの関節が伸展する際の角速度は非常に大きく、それぞれの関節における角速度の最大値は、膝関節で 12 rad/s (約 688 deg/s)、そして股関節で 10 rad/s (約 573 deg/s) に達する (Virmavirta ら 1993b)。このような素早い動きによって、実際の踏み切り動作に要する時間は非常に短く、 $0.25 \sim 0.30 \text{ s}$ 程度となっている (Komi ら 1974; Schwameder ら 1995)。このような素早い動きが行われている理由の一つは、踏み切り時間を短くすることで、股関節および膝関節を伸展している時間を短くし、空気抵抗による助走速度の減少を防ぐためである (Baumann 1979)。もう一つの理由は、素早い動作によって大きな上昇速度を獲得するためである。以下では、踏み切り動作による身体重心の上昇速度が、飛距離に与える影響について検討した研究を概観する。

踏み切り動作によって得られる、身体重心の上昇速度の大きさが、スキージャンプの飛距離に影響を与えることは、コンピュータシミュレーションを用いた研究によって理論的に確かめられてきた (Ward-Smith ら 1983; Denoth ら 1987; Hubbard ら 1989; Müller ら 1996)。これらの研究は、助走路に対して垂直方向の上昇速度が 1 m/s

増大すると、飛距離が 7 m (Hubbard ら 1989) から 20 m (Denoth ら 1987) 程度増大することを示している。それぞれの研究で用いられたジャンプ台の形状やジャンパーのモデルなどの条件が異なるため、これらの研究から得られた値はそれぞれ異なるが、いずれの研究も、踏み切り動作による上昇速度の大きさが、飛距離を決定する上で重要な役割を果たすことを示している。また、実際の競技場面においても、映像解析によって得られた身体重心の上昇速度と飛距離との間に、正の相関関係が観察されたことが示されている (Komi ら 1974; Schwameder 1993; Schwameder ら 1995)。

助走路に対して垂直上向きの上昇速度を身体重心に与えるためには、踏み切り動作によって、助走路に対して垂直下向きに力を発揮し、その反力である床反力を得ることが重要となる。その理由は、床反力の積分値 (力積) を身体質量で除した値が、身体重心の上昇速度を意味するからである。

このように、踏み切り動作における床反力の発揮は、身体重心の上昇速度獲得に深く関わっているため、その発揮方法を知るために様々な計測が行われてきた。Tveit ら (1981) は、踏み切り動作によって発揮された床反力ベクトルの作用点 (圧力中心点) を知るため、ジャンプブーツのつま先および踵の 2 箇所に力センサーを埋め込み、実際のスキージャンプ踏み切り動作において力を計測した。その結果、踏み切り動作中に、圧力中心点が踵からつま先へと移動することを明らかにした。その後、足底部のどこに力を伝えているのかを調べる研究は、近年の計測器の小型化に伴い発展してきており、最近では 16~85 個の圧力センサーを備えた中敷きをジャンプブーツに挿入して、実際のスキージャンプ踏み切り動作に伴う足底部の圧力分布をより精密に知ることができるようになってきた (Schwameder ら 1995; Virmavirta ら 2001a; Virmavirta ら 2001c; Virmavirta ら 2001d)。

また、実際のジャンプ台に床反力計を埋設し、選手が発揮した床反力を計測する

試みが行われてきた (Sobotka ら 1977; Troxler ら 1979; Sägesser ら 1981; Vaverka ら 1981; Virnavirta ら 1989; Vaverka ら 1991; Vaverka ら 1993; Virnavirta ら 1993a; Virnavirta ら 1993b; Virnavirta ら 1993c)。Virnavirta ら (1989, 1993a, 1993b) は、床反力の大きさが飛距離に影響を与えたことを示した。しかし、これらの研究では床反力の平均値や最大値などの変数が用いられ、身体重心の上昇速度に深く関与する力積に関する検討は行われていない。また、これらの実験が行われた 1980 年代後半はスキーを平行に揃えて飛行する技術が広く用いられていた時期であり、最近のスキー板を V 字に開く飛行技術 (いわゆる V 字姿勢) が用いられるようになってからの研究は極めて少ない。

1.1.2 踏み切り動作の多様性について

優れたスキージャンプ選手が踏み切り動作で発揮する床反力のパターン (床反力発揮様式) は、同一選手内で再現性が高く、選手間で非常に異なることが、踏み切り動作の模擬トレーニング (シミュレーションジャンプ) の分析から明らかにされてきた (渡辺 1970; 渡辺ら 1971; 渡辺 1972; 渡辺 1974; Pedotti ら 1987)。同様に、実際のスキージャンプの踏み切り動作でも、このような傾向が観察されることが報告されている。実際のスキージャンプ踏み切り動作の多様性を指摘した先行研究を以下に示す。

オリンピック冬季競技大会およびワールドカップなどの国際競技会の上位入賞者を対象とした踏み切り動作の解析から、踏み切り動作には、選手個々の特徴があることが示されてきた。まず、踏み切り動作の姿勢に関しては、踏み切り局面終了時の体幹部と水平線とのなす角度 (Vaverka ら 1996; Vaverka ら 1997; Janura ら 2007; Virnavirta ら 2009)、および下腿と水平線とのなす角度 (Virnavirta ら 2009) について上位選手間でも角度に大きな違いが見られたことが報告されている。一方で、

前述のシミュレーションジャンプと同様に、床反力発揮様式にも選手個々の特徴があることが示されてきた（Virmavirta ら 1993a; Virmavirta ら 1993b）。

これらの研究結果は、被検者を一流選手に限定した場合でも、踏み切り局面における動作様式や床反力発揮様式が被検者間で異なることを示すものである。しかしながら、それぞれの床反力発揮様式が、身体重心の上昇速度などの力学量にどのような影響を与えるのか検討されていない。また、床反力発揮様式の違いが、踏み切り動作の姿勢、特に踏み切り局面終了時の姿勢に与える影響は検討されていない。ここで、踏み切り局面に続く飛行局面では、飛行姿勢が空気力（抗力、揚力およびピッチングモーメント）を決定すること（Straumann 1927; 谷ら 1951）を考慮すると、床反力発揮様式の違いが、踏み切り局面終了時の姿勢にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることは重要であると考えられる。

1.1.3 飛行姿勢の研究について

前述のように、踏み切り局面終了時の姿勢は、その後続く初期飛行局面の姿勢でもある。ここでは、まず飛行局面を対象とした先行研究について概観し、本研究で取り扱う初期飛行局面に関する課題を抽出する。次に飛行姿勢の空気力を測定する手法について検討する。

1.1.3.a 飛行姿勢と空気力との関係について

スキージャンプの飛行局面に関する研究は、「最も良く飛ぶ飛行姿勢」とは何かを追求してきた。飛行姿勢に関する研究では、映像解析を用いたキネマティクスの研究、風洞実験の手法を用いた空気力学的研究、および空気力学的資料を用いたシミュレーション研究の3つの分析手法が主に用いられてきた。以下にこれらの研究を取り上げる。

キネマティクスの研究は、優れた選手の飛行局面における身体の姿勢（関節角度など）から、良い飛行姿勢を定義するものである。ごく初期の研究から、身体の前傾について着目した分析が行われており、成績の優れた選手は成績の悪い選手に比べ、飛行中の下肢または身体全体の前傾の角度が小さく（前傾が深く）、身体または下肢とスキーとのなす角度が小さいことが明らかにされてきた（Hochmuth 1958; Komi ら 1974; Gisler ら 1977; Baumann 1979）。

一方で、前傾姿勢の有効性を理論的に明らかにしてきたのは、風洞実験を用いた空気力学的研究とシミュレーション研究である（Straumann 1927）。Straumann が風洞実験を行った当時は、下肢とスキーとのなす角度は現在より大きく（下肢の前傾が少なく）、肩関節を屈曲した（上肢を頭の上に伸ばした）飛行姿勢であったが（村上ら 2007; Müller 2009）、Strauman が下肢とスキーとのなす角度を小さくし、抗力を小さくする姿勢の優位性をシミュレーションによって示したことにより、下肢を前傾させた姿勢が定着したと言われている（村上ら 2007）。その後、上肢を体側に沿わせた姿勢が、上肢を頭上に挙上した姿勢よりも揚力が大きいという谷ら(1951, 1971)の研究によって、上肢を体側に沿わせた姿勢が一般的になった。これらの研究の中で、飛行技術に最も大きな変化をもたらしたものは、スキーの先端を開いた姿勢（V字姿勢）が、従来のスキーを平行に揃えた姿勢よりも揚力および揚抗比が増し、飛距離に有利であることを示した一連の研究(Mahnke ら 1990; 神ら 1992; 渡部 1992; 渡部ら 1992; Watanabe ら 1993; 渡部ら 1993)であろう。その後の飛行姿勢の空気力資料の蓄積により（瀬尾ら 1999; Seo ら 2004a）、飛距離を最大化させるためにはどのように姿勢を変化させればよいのかを、最適化制御問題として解くことが行われるようになった（吉田ら 1996; 瀬尾ら 2000; Seo ら 2004b）。

本研究で着目する初期飛行局面は、ジャンプ台を飛び出してから安定した飛行姿勢に至るまでの 0.4~1.0 s の間（15~30 m）と定義されている（Arndt ら 1995;

Schwameder ら 1995; Schwameder ら 2005; Virmavirta ら 2005)。初期飛行局面の終盤におけるスキーと身体とのなす角度と、飛距離との間には有意な負の相関関係があることが報告されていることから (Arndt ら 1995; Schwameder ら 1995; Virmavirta ら 2005)、この局面では素早く身体を前傾させて安定した飛行姿勢に移行することが優れた技術であると考えられる。このように、素早い身体の前傾を実現させるためには、踏み切り動作において、身体重心周りに前回りの角運動量を事前に与えておく必要がある。しかしながら、ジャンプ台を飛び出した直後に身体—スキー系に作用するピッチングモーメントの大きさは不明であるため、適切な前傾姿勢を得るためには、どの程度の角運動量を踏み切り動作で与えておけばよいのか知られていない。

また、初期飛行局面における空気力の増大が、飛距離に影響を与えることが報告されている (Müller 1996)。Müller (1996) は、フライングヒル (Planica, $K = 185 \text{ m}$) を想定したシミュレーションの結果、初期飛行局面 (0.4 s) における抗力を 10% 減少させると飛距離は 186.6 m から 194.2 m (約 4%) に増大し、揚力を 10% 増大させると飛距離は 192.4 m (約 3%) に増大すること報告している。この結果は、初期飛行局面における 10% 程度の空気力の変化であっても、飛距離の増大をもたらすことを示している。しかしながら、このような空気力の増減がどのような姿勢変化によってもたらされるのかについては明らかにされていない。

このように、初期飛行局面の空気力 (揚力、抗力およびピッチングモーメント) は、飛距離に大きな影響を及ぼすものと考えられるが、初期飛行局面の姿勢を対象とした空気力学的資料は非常に少ないのが現状である。現時点で利用できる初期飛行局面の空気力学的資料は、ある一つの飛行姿勢について空気力を計測したものである (Luhtanen ら 1997; Schmolzer ら 2002; Schmolzer ら 2005)。そのため、これらの研究で用いられた姿勢固有の空気力は知ることができても、迎え角、股関節角

度、下肢とスキーとのなす角度およびスキーの V 字角度などの空気力に影響を及ぼすと考えられる姿勢を変化させた場合の空気力を知ることができない。そのため、スキージャンプの飛行シミュレーション研究においては、踏み切り局面終了時からその後 0.4 s までの姿勢変化の大きい局面を、空気力の働かない放物運動として取り扱うことしかできなかつた（小早川ら 1985; Jin ら 1995; 吉田ら 1996; 瀬尾ら 2000; Seo ら 2004b）。

さらに、踏み切り局面終了時の姿勢については、優れた成績を収めた選手に限定しても、股関節角度および体幹部分の前傾角度に個人間の変動が大きいことが示されている（Vaverka ら 1996; Vaverka ら 1997; Janura ら 2007）。したがって、優れた選手であっても、初期飛行局面においては多様な姿勢変化を伴いながら、安定した飛行姿勢に移行していると推察される。

以上のような背景から、初期飛行局面の多様な姿勢変化に対応した空気力資料を蓄積し、飛行姿勢（迎え角、股関節角度、下肢とスキーとのなす角度およびスキーの V 字角度など）の変化による空気力の変化を推定する回帰モデルを構築することが重要であると考えられる。

1.1.3.b 飛行局面の空気力測定手法について

ここでは、スキージャンプ飛行姿勢の空気力を測定する手法について検討を行う。これまでに行われてきた研究は、その手法から、1) 風洞実験による空気力学的研究、2) 映像解析による研究、3) 加速度計とジャイロセンサーによる研究、4) 数値流体力学的研究、の 4 つに分類される。以下にそれぞれの研究を示す。

1) 風洞実験による空気力学的研究は、これらの 4 つの研究の中で最も古くから行われてきた（Straumann 1927; 谷ら 1951; Tani ら 1971; 谷ら 1971; 渡部 1981; Ward-Smith ら 1982; Watanabe 1983; 小早川ら 1985; 神ら 1992; 渡部 1992; 渡部ら

1992; Tavernier ら 1993; Watanabe ら 1993; 渡部ら 1993; 渡部ら 1994; Jin ら 1995; Müller ら 1996; 瀬尾ら 1999; 瀬尾ら 2000; Schmölder ら 2002; Reisenberger ら 2004; Seo ら 2004a; Meile ら 2006; Maryniak ら 2009)。風洞実験では、人工的に発生させた一様な気流の中に測定対象（模型または実物）を固定し、測定対象に取り付けた計測器（ロードセルまたはストレインゲージ方式）によって作用した空気力を測定する方法を用いる（東 1993）。実験室において測定ができるため、模型の姿勢を厳密に決めることが可能であり、また気流速度も任意に設定できることが利点である。ただし、模型を使用する場合には、実物の形状をできるだけ忠実に再現した模型を使用する必要がある。また、測定上の問題ではないが、一つの姿勢変化毎に模型の設定を変更しなくてはならないため、広範囲の姿勢変化を対象に空気力を測定する際には、後述する 3 つの研究手法よりも多くの時間を要する。

2) 映像解析による研究は、実際のジャンプの飛行姿勢を撮影し、2次元または3次元的に映像解析を行うことで、身体-スキー系の加速度とその進行方向から空気力を算出する方法を用いる（Sasaki ら 2001; 平井ら 2006; 平井ら 2007; Gasser ら 2008; Murakami ら 2008）。この手法は、原理的には全飛行局面の飛行姿勢に作用する空気力を計測することができる。ただし、飛行中の風向きおよび風速の変化による空気力の影響を差し引くことが困難であるため、精度良く空気力を測定するためには無風であることが条件となる。しかしながら、自然環境下でこの条件を満たすことは非常に困難である。また、高解像度（1024×512 pixels）の高速度ビデオ映像を用いて、手動デジタイズによる入力誤差を最小限にしても、映像解析で得られた座標の2回微分操作によって加速度を算出する過程で、高周波ノイズが増幅するため、実際には空気力推定が困難であることが報告されている（Sasaki ら 2001; 平井ら 2006; 平井ら 2007; Gasser ら 2008; Murakami ら 2008）。

3) 加速度計とジャイロセンサーによる研究は、選手に取り付けた加速度計とジ

ジャイロセンサーによって、実際に飛行している選手の加速度の変化から空気力を測定する方法を用いる。まだ例数は少ないが、最近の計測機器の軽量化・小型化と無線による選手の非拘束化によってこの方法が実用されるようになってきた (Ohgi ら 2008)。この方法は、原理的には全飛行局面の飛行姿勢に作用する空気力を計測することができ、さらに、センサーの利用によって前述の2つの研究手法よりも即時に分析結果が得られるという利点がある。しかながら、前述の映像解析による研究と同様に、風の影響を除去することが困難である。また、センサーの取り付け位置によっては、身体ースキー系の加速度に加えて身体の挙動による加速度（例えば股関節の伸展など）も空気力の作用として計測されてしまう恐れがある。

4) 数値流体力学的研究 (Computational Fluid Dynamics: CFD) は、身体ースキー系の周りを流れる流体 (空気) の挙動を記述したレイノルズ平均ナビエ・ストークス (Reynolds Averaged Navier-Stokes: RANS) 方程式と呼ばれる偏微分方程式を数値的に解くことで空気力を推定する方法を用いる (Asai ら 1997; 浅井ら 1998; Meile ら 2006; Meile ら 2008)。CFD は計算によって空気力を推定する手法として非常に強力であり、比較的単純な構造物 (平板など) に作用する空気力を精度良く知ることができる (ファーツィガーら 2008)。一方で、ヒトの身体のように複雑な曲面で構成された物体に関しては、CFD で得られた空気力の大きさが風洞実験で得られた空気力の 65.8~88.4%程度の大きさであったという報告もある (Meile ら 2006)。すなわち、身体ースキー系のような複雑の形状を対象とした場合、CFD によって空気力を高い精度で得られるとは限らない。また、計算された空気力がどの程度正しいのか判断するためには、前述の風洞実験によって得られた空気力との比較が必要であるため、結局は風洞実験を行うことが必要となる。

これらの研究手法の特徴から、2) 映像解析による研究、および3) 加速度計とジャイロセンサーによる研究は、空気力の精度に問題があると考えられる。次に、

4) 数値流体力学的研究は、測定結果の精度を風洞実験によって確認する必要があるため、結果的には、1) 風洞実験による空気力学的研究を行うことが、これらの研究手法の中で最も妥当であると考えられる。

1.2 研究の目的および課題

本研究は、スキージャンプの4局面の中でも踏み切り局面に着目し、その直後の飛行局面（初期飛行局面）に及ぼす空気力学的な影響を考慮しつつ、踏み切り局面に固有の技術的要因と飛距離との関係を明らかにすることを目的とした。

この目的を達成するために、本研究の課題を以下のように設定した。

- 1) 踏み切り局面において発揮される床反力の力学的特徴と、飛距離との関係を明らかにする。このため、競技者の技術水準が高く、助走速度および風の影響がよくコントロールされているスキージャンプ国際競技会の参加選手を対象に、踏み切り局面において発揮された床反力を測定し、その力学量（平均床反力、最大床反力、力積）と飛距離との関係を検討する（第2章 実験1）。
- 2) 一流スキージャンプ選手の踏み切り動作を、発揮した床反力発揮様式から分類し、その力学的特性を明らかにする。このため、世界一流の技術を持つ複数のスキージャンプ選手を対象に、踏み切り局面における床反力の測定および映像解析を行い、床反力発揮様式の違いが身体重心の上昇速度および、踏み切り局面終了時の姿勢に与える影響を検討する（第3章 実験2）。
- 3) 踏み切り局面終了時の姿勢の違いが、その後の初期飛行局面の飛行姿勢制御にどのような影響を与えるのか明らかにする。このため、踏み切り局面終了時の

姿勢の差違が，その後の初期飛行局面の姿勢制御，飛行速度および飛行軌跡に与える影響を，映像解析の手法（第 4 章 実験 3），および風洞実験から得られた空気力資料を用いた飛行シミュレーション手法（第 5 章 実験 4）から検討する。

2 踏み切り局面における力学的諸変量が飛距離に及ぼす影響（実験1）

2.1 目的

本研究では競技者の技術レベルが高く、さらに助走速度や風の影響がよくコントロールされているスキージャンプ国際競技会の参加選手を対象に、踏み切り局面において発揮された床反力を測定し、平均床反力、最大床反力および力積と、スキージャンプの飛距離との関係を明らかにすることを目的とした。

2.2 方法

実験1では、国際ジャンプ競技会において踏み切り動作における床反力を測定し、床反力から算出された変数と飛距離との相関関係を解析した。また、助走速度と体重が飛距離に及ぼす影響も補足的に解析した。以下に測定および解析方法について述べる。

2.2.1 床反力計

本研究では実際のスキージャンプにおいて、選手が踏み切り動作によって発揮した床反力をジャンプ台に埋設された床反力計を用いて測定した。測定された床反力は助走路に垂直方向の成分である。この床反力計は長野県白馬村の白馬村ジャンプ競技場ノーマルヒルジャンプ台（K=90 m）に設置されており、助走路の終端10 mの区間に埋設されている。Fig. 1に床反力計の模式図を示す。上から順に側面図、俯瞰図、前面図をそれぞれ示す。床反力計は、ロードセルを左右に1つずつ備えたForce barが助走路に沿って1 m間隔で11本配置された構造となっている。2本のForce barから得られた信号を1台の床反力計として（最下部の1台のみForce bar

を3本使用) , 合計5台の床反力計がそれぞれ増幅器に接続されている。最終的な出力は, これら5台の床反力計の総和となる。この床反力計はフィンランドのP.V. Komiらの研究グループ(Jyväskylä Univ., Finland)によって設計・開発され, REUTE PRECISION OY社(Finland)が作成したものである。埋設される前に行われたロードセルの特性試験では, 直線誤差およびヒステリシス誤差は0.05%以下, 適正負荷240kg(2354N), 最大負荷300kg(2943N)であった。これらの値は, 今回の実験で測定された床反力の範囲を十分にクリアするものであった。

2.2.2 被検者

被検者は1996年9月21日に長野県白馬村において開催されたサマージャンプ競技会:FIS Continental Cup Asia Series NTT Cup Summer Jumping Gamesの参加者50名である(ノーマルヒル競技 K=90m)。参加者の中にはオリンピック冬季競技大会(リレハンメル, 1994年)の日本代表選手も含まれている。日本人選手以外にノルウェー, フィンランド, 中国, スイス, ポーランド, ドイツ, オーストリア, 韓国, チェコスロヴァキアからの参加選手も含まれる。データの収集は1本目および2本目の競技中に行われた。

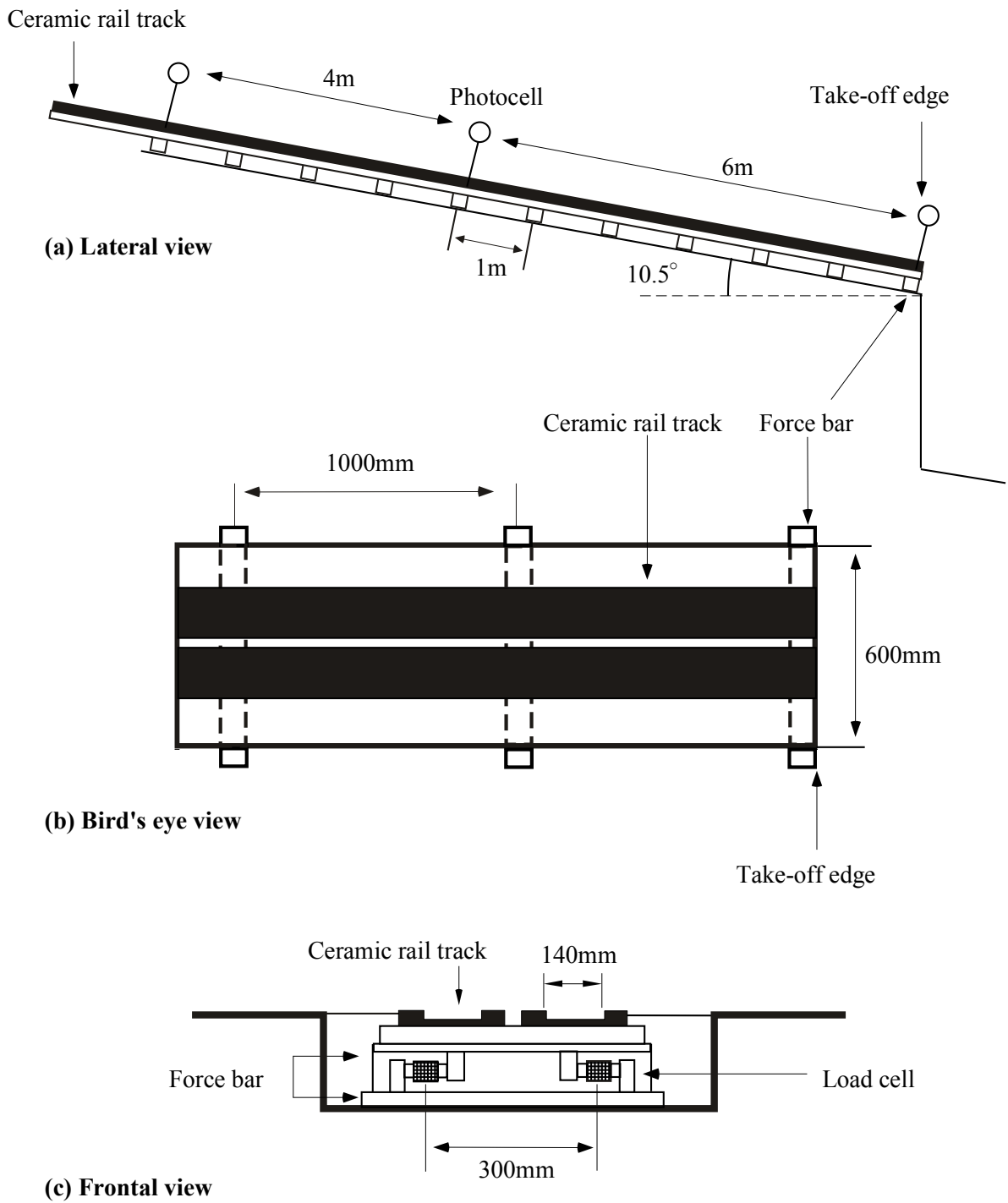


Figure 1 Schematic diagram of the force measurement system installed in the take-off platform(Normal hill:K=90, Hakuba jumping stadium).

2.2.3 測定手順

白馬ジャンプ競技場ノーマルヒルジャンプ台の助走路に埋設された長さ 10 m のロードセル方式床反力計を用いて、助走路に垂直方向に発揮された床反力を測定した。実験模式図を Fig. 2 に示す。試合終了直後に助走路の終端から 1 m 毎に較正用の荷重負荷をかけて床反力計 (10 m) の較正を行った。床反力計の前半 3.8 m は R1 と呼ばれる曲線部分 (曲率半径 85 m) を含み、後半の 6.2 m は下向き 10.5° の勾配を持つ直線部分にあたる。ジャンプ台の終端から 10 m の区間に対して 1 m 間隔で 60kg, 150kg, 200kg の 3 段階の荷重負荷を用いて、各較正点の勾配 ($10.5\sim 13.1^\circ$) を考慮に入れた上で、助走路に対して垂直方向について較正を行った。また、選手の滑走位置を知るために、助走路の終端からスタート地点に向かって 0 m, 6 m, 10 m, 13 m の 4 ヶ所に光電管を設置し、選手が光電管を通過したときの光電管の電圧変化を記録した。

上記の床反力および光電管からの位置情報は、アナログデータレコーダ (日本光電社製, RMG-5204) を用いて記録した。アナログデータレコーダによって記録されたデータは、後日研究室にて A/D 変換ボードを用いてサンプリング周波数 1000 Hz にてコンピュータに取り込んだ。試技終了直後に、スキー板、ヘルメットなどジャンプ競技に用いる装備を全て装着した状態で各選手の総質量を計測した。

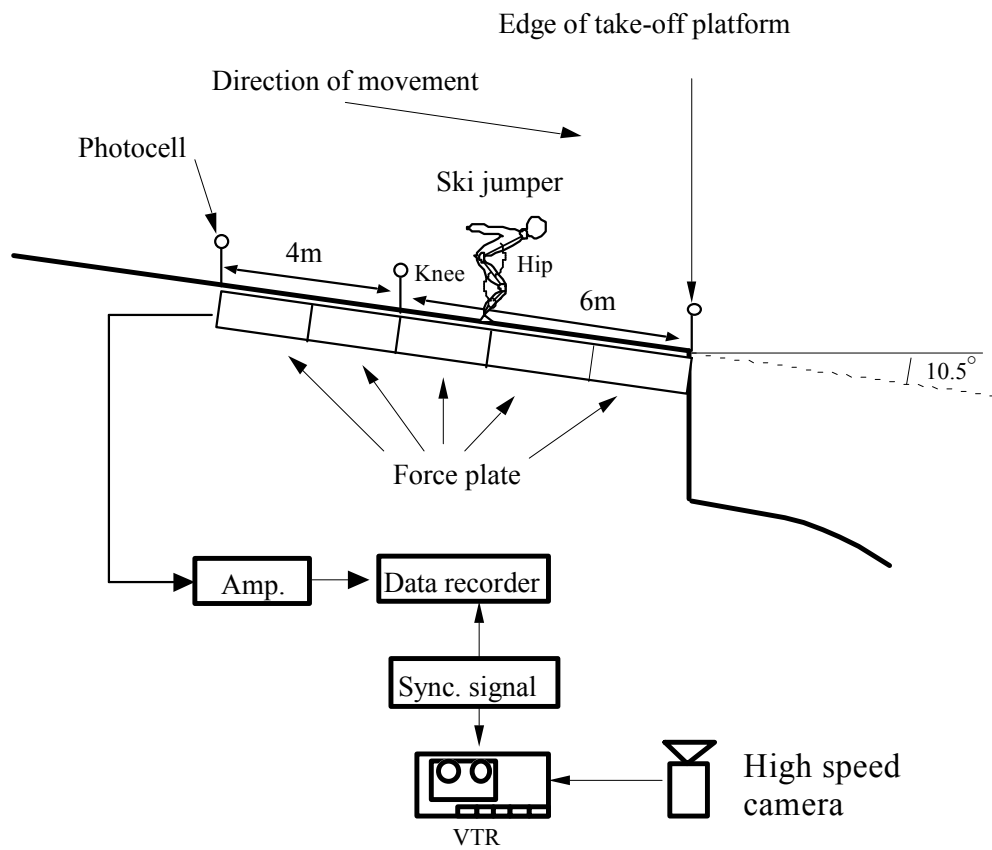


Figure 2 Schematic diagram of experimental setup for the experiment. In this diagram, the force measurement system and the camera setting are depicted. The high speed camera was used in experiment. In video analysis, two joint angles (Knee and Hip) during take-off were calculated.

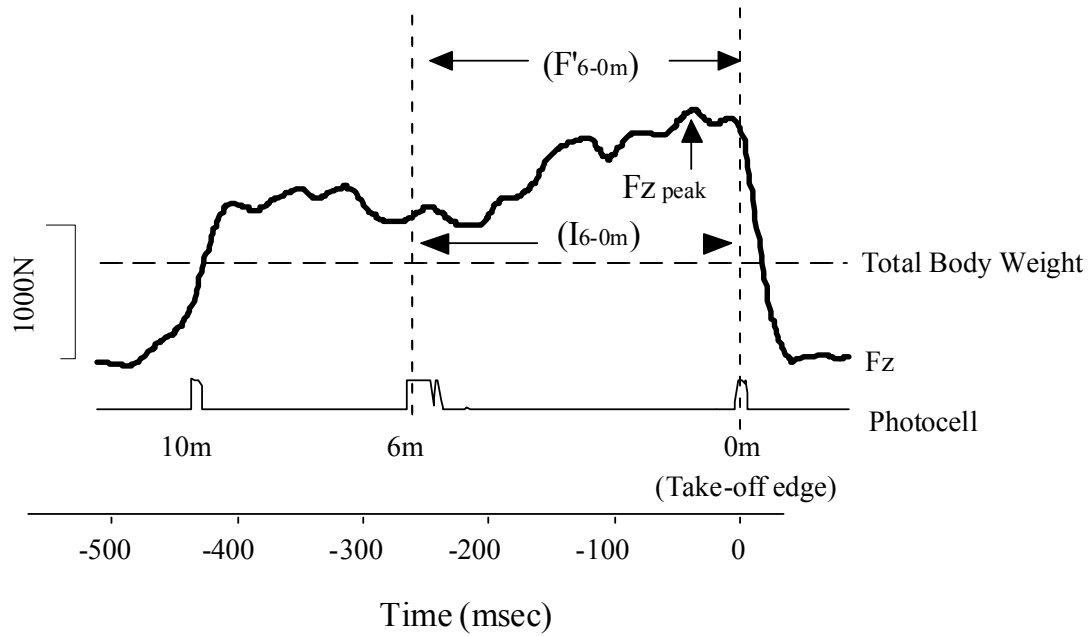


Figure 3 The force curve and photocell signal.

$F_{Z_{peak}}$ refers to maximal forces and F'_{6-0m} refers to averaged force levels and I_{6-0m} refers to impulse of the force. Photocell signal was recorded to identify the position of a ski jumper running on the take-off platform. These variables were given by using photocell signals for 6m distance before take-off edge.

2.2.4 床反力の解析

まず、ジャンプ台に埋設された床反力計から得られた信号から高周波のノイズを除去するために遮断周波数 50Hz の特性を持つ 2 次のバターワース型ローパスフィルタをデータの両端から用いて平滑化を行った後に、以下の解析を行った。

先行研究（渡部 1983）によると、選手が踏み切り動作を開始する位置は助走路の終端から約 3 m 手前の位置であったと報告されている。そこで本研究では、踏み切り動作の開始時点を十分に含むと思われる助走路の終端から 6 m 手前の地点から助走路の終端を選手が通過するまでの区間（助走路の直線部分に当たる）について解析を行った。

床反力データから以下の項目を算出した（Fig. 3 参照）

- 1) F'_{6-0m} : 助走路の終端を基準 (0 m) として床反力計の 6-0m の区間で発揮された床反力の平均値 (N) を選手の総質量 (kgBw) で割った値 (N/kgBw)
- 2) Fz_{peak} : 6-0m の区間で発揮された床反力の最大値 (N) を選手の総質量 (kgBw) で割った値 (N/kgBw)
- 3) I_{6-0m} : 6-0m の区間において発揮された床反力の積分値 (Ns) を選手の総質量 (kgBw) で割った値 (Ns/kgBw) (力積の算出にあたっては、得られた床反力データ (N) から各選手の総重量 (N) を引いた値を積分した。)

2.2.5 統計処理

1 本目および 2 本目の各試技において、床反力計から得られた 3 変数 (F'_{6-0m} , Fz_{peak} , I_{6-0m}) と、選手の総質量および助走速度を加えた合計 5 変数と、飛距離との相関係数を求めた。なお、助走速度は大会公式速度を使用した。

また上位群と下位群の比較として、上位 10 名 (longest 10) と最下位から 10 名 (shortest 10) の 2 群を 1 本目および 2 本目の試技からそれぞれ飛距離を基準に抽出

し、2群の平均値を比較した。統計処理には対応のないt検定を用いた。

さらに1本目および2本目の試技より抽出された上位10名について、1～5位をtop5群(n=5)、6～10位をnext5群(n=5)に分類し、2群間の床反力変数の比較を行った(対応のないt検定を使用)。なお、F検定によって2群の分散が等しくないと判断された場合には、ノンパラメトリックテスト(Mann-WhitneyのU-test)を用いた。統計パッケージとしてStatview5.0(SAS Institute Inc.)を使用した。すべての統計処理において危険率5%水準を統計学的有意とした。

2.3 結果

ここでは、踏み切り動作に伴って選手が発揮した床反力から算出した変数(平均床反力、最大床反力および力積)と飛距離との関係を中心に検討する。

2.3.1 力学的諸変量と飛距離との相関関係

2.3.1.a 総質量および公式速度について

Table 1 に1本目および2本目の試技における飛距離(m)、助走速度(km/h)、総質量(kg)の平均値および標準偏差を示す。なお、助走速度は大会公式速度をもって助走速度とした。

Table 1 The selected variables of 50 subjects in the first and the second round.

VARIABLES	First round (n=50)		Second round (n=50)	
	Mean	SD	Mean	SD
Distance of Jump (m)	79.39	5.84	79.58	6.78
Official Velocity (km/h)	81.23	0.51	80.79	0.49
Total Body Weight (kg)	73.17	5.07	73.17	5.07

ジャンプの飛距離については、1本目と2本目の試技においてほぼ同値であり、統計学的に有意な差は見られなかった (79.39 ± 5.84 m VS 79.58 ± 6.78 m)。

飛距離と総質量の間には、1本目の試技において有意な負の相関関係が見られたが ($r = -0.39, p < 0.01, n = 50$)、2本目の試技においては有意な相関関係は見られなかった ($r = -0.14, N.S., n = 50$)。

飛距離と助走速度の間には、1本目の試技においては有意な相関関係は見られなかったが ($r = 0.18, N.S., n = 50$)、2本目の試技において両者の間には有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.36, p < 0.05, n = 50$)。

総質量と助走速度の間には有意な正の相関関係が見られた (1本目 : $r = 0.30, p < 0.05, n = 50$, 2本目 : $r = 0.35, p < 0.05, n = 50$)。

2.3.1.b 平均床反力について

1本目の試技における50名の選手の平均床反力 (F'_{6-0m}) の平均値と標準偏差は 18.97 ± 0.80 N/kgBw であった。2本目の試技における F'_{6-0m} の平均値と標準偏差は 19.21 ± 0.72 N/kgBw であった。

Fig. 4aおよびFig. 4bはそれぞれ1本目と2本目の試技における飛距離と平均床反力 (F'_{6-0m}) の関係を示したものである。それぞれ縦軸は飛距離を、横軸は平均床反

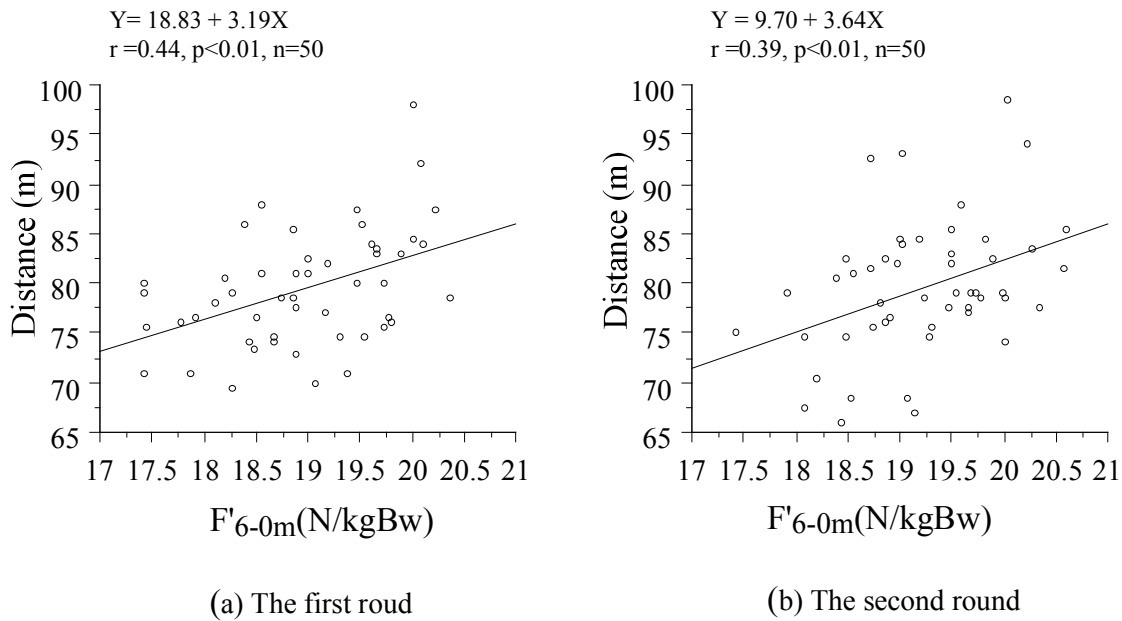


Figure 4 Flight distance and averaged force level (F'_{6-0m}) for the first round (a) and the second round (b).

力を示す。Fig. 4a に示されるように、1 本目の試技において飛距離と F'_{6-0m} の間には有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.44, p < 0.01, n = 50$)。また Fig. 4b に示されるように、2 本目の試技においても飛距離と F'_{6-0m} の間には有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.39, p < 0.01, n = 50$)。

2.3.1.c 最大床反力について

1 本目の試技における 50 名の最大床反力 ($F_{Z_{peak}}$) の平均値と標準偏差は 22.45 ± 1.41 N/kgBw であった。2 本目の $F_{Z_{peak}}$ の平均値と標準偏差は 22.69 ± 1.55 N/kgBw であった。

Fig. 5a および Fig. 5b はそれぞれ飛距離と最大床反力 ($F_{Z_{peak}}$) の関係を示したものである。それぞれ縦軸は飛距離を、横軸は最大床反力を示す。Fig. 5a に示されるように、1 本目の試技において飛距離と $F_{Z_{peak}}$ の間には有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.36, p < 0.05, n = 50$)。しかしながら、Fig. 5b に示されるように、2 本目

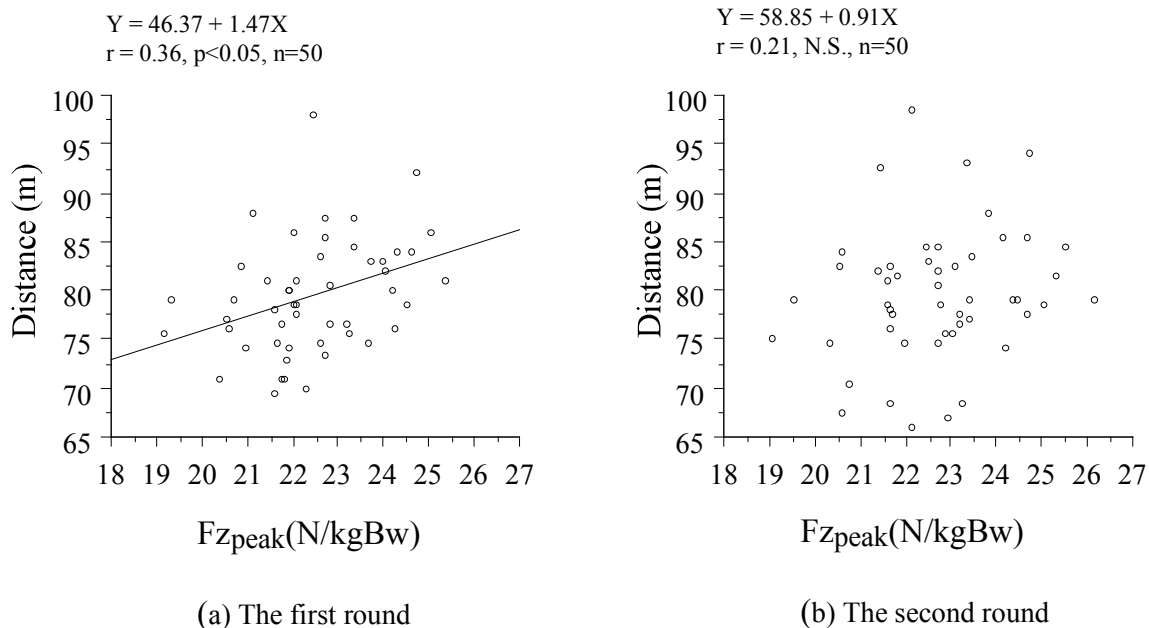


Figure 5 Flight distance and peak force value (Fz_{peak}) for the first round (a) and the second round (b).

の試技においては飛距離と Fz_{peak} との間に有意な相関関係は見られなかった (r = 0.21, N.S., n = 50)。

2.3.1.d 力積について

1 本目の試技における 50 名の力積 (I_{6-0m}) の平均値と標準偏差は 2.37 ± 0.21 Ns/kgBw であった。また、2 本目の試技における I_{6-0m} の平均値と標準偏差は 2.42 ± 0.18 Ns/kgBw であった。Fig. 6a および Fig. 6b はそれぞれ 1 本目と 2 本目の試技における飛距離と力積 (I_{6-0m}) の関係を示すものである。縦軸は飛距離を、横軸は力積 (I_{6-0m}) をそれぞれ示す。Fig. 6a に示されるように、1 本目の試技における飛距離と I_{6-0m} の間に有意な正の相関関係が見られた (r = 0.48, p < 0.001, n = 50)。また Fig. 6b に示されるように、2 本目の試技における飛距離と I_{6-0m} の間にも有意な正の相関関係が見られた (r = 0.35, p < 0.05, n = 50)。

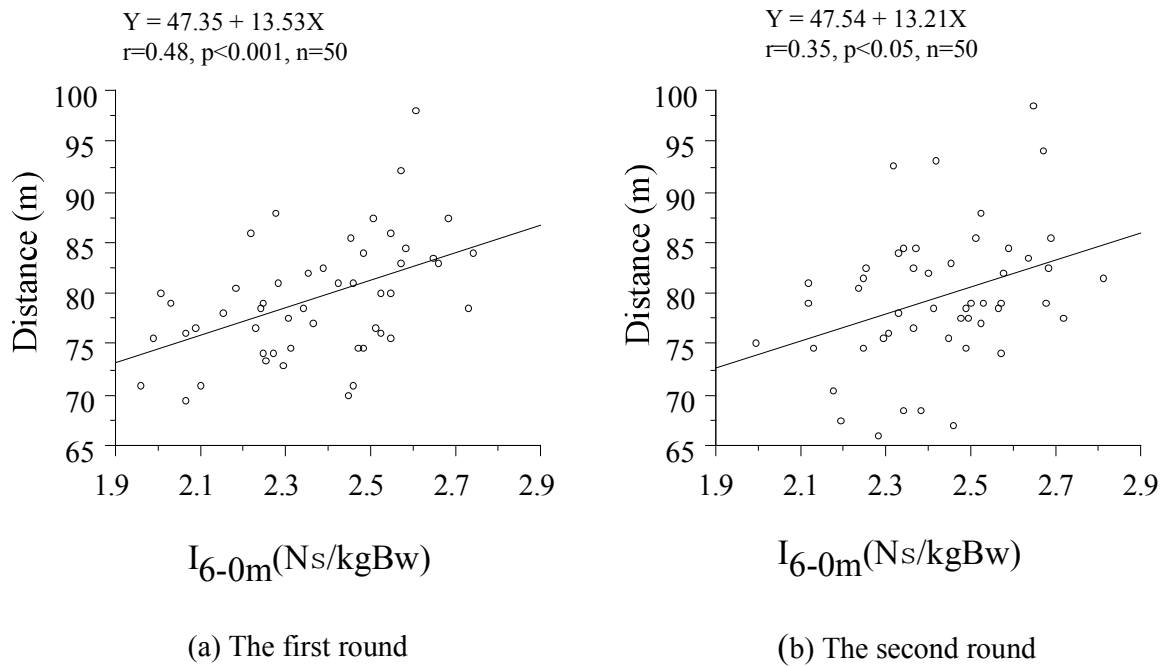


Figure 6 Flight distance and impulse of the force (I_{6-0m}) for the first round (a) and the second round (b).

2.3.2 上位群と下位群の比較

競技成績の異なる被検者群での比較を行うために、1本目および2本目の試技において、飛距離を基準に1位から10名と最下位から10名の2群を抽出した。上位群 (Longest 10) と下位群 (Shortest 10) の飛距離、助走速度、総質量、平均床反力、最大床反力および力積について、平均値と標準偏差を Table 2a (1本目の試技) と Table 2b (2本目の試技) に示す。

2.3.2.a 飛距離、総質量および助走速度について

Table 2 に示したように、1本目および2本目の両試技において、飛距離は上位群が下位群よりも有意に高い値を示した (1本目: 87.90 ± 4.20 m VS 72.15 ± 1.84 m, $p < 0.001$, 2本目: 89.05 ± 5.05 m VS 70.55 ± 3.49 m, $p < 0.0001$)。助走速度は1本目の試技において上位群と下位群に有意な差は見られなかったが (81.41 ± 0.55 km/h VS

81.24±0.53 km/h, N.S.) , 2本目の試技においては上位群が有意に高い値を示した (81.05±0.14 km/h VS 80.55±0.56 km/h, $p < 0.05$) 。 1本目および2本目の試技において, 上位群と下位群の間で総質量に有意な差は見られなかった。

2.3.2.b 平均床反力について

Table 2 に示したように, 平均床反力 (F'_{6-0m}) について上位群と下位群を比較した結果, 1本目の試技において F'_{6-0m} は上位群が下位群より有意に高い値を示した (19.48±0.66 N/kgBw VS 18.52±0.57 N/kgBw, $p < 0.01$) 。 また, 2本目の試技においても同様に F'_{6-0m} は上位群が下位群より有意に高い値を示した (19.56±0.60 VS 18.74±0.63 N/kgBw, $p < 0.01$) 。

2.3.2.c 最大床反力について

Table 2 に示したように, 床反力の最大値 ($F_{z_{peak}}$) について上位群と下位群を比較した結果, 1本目における $F_{z_{peak}}$ は上位群が下位群より有意に高い値を示した (23.21±1.27 N/kgBw VS 21.70±0.64 N/kgBw, $p < 0.01$) 。 2本目の試技においても同様に $F_{z_{peak}}$ は上位群が下位群より有意に高い値を示した (23.50±1.30 N/kgBw VS 22.05±1.25 N/kgBw, $p < 0.05$) 。

2.3.2.d 力積について

Table 2 に示したように, 床反力の力積 (I_{6-0m}) について上位群と下位群を比較した結果, 1本目における I_{6-0m} は上位群が下位群より有意に高い値を示した (2.49±0.15 Ns/kgBw VS 2.24±0.16 Ns/kgBw, $p < 0.01$) 。 2本目の試技においても同様に I_{6-0m} は上位群が下位群より有意に高い値を示した (2.51±0.14 Ns/kgBw VS 2.33±0.15 Ns/kgBw, $p < 0.05$) 。

Table 2 The selected variables of the two groups in the first round (a) and the second round (b).

(a) The first round	Longest 10 (n=10)		Shortest 10 (n=10)		
	Mean	SD	Mean	SD	
VARIABLES					
Distance of Jump (m)	87.90	4.20	72.15	1.84	***
Official Velocity (km/h)	81.41	0.55	81.24	0.53	
Total Body Weight (kg)	71.14	4.31	75.40	4.76	
F' _{6-0m} (N/kgBw)	19.48	0.66	18.52	0.57	**
Fz _{peak} (N/kgBw)	23.21	1.27	21.70	0.64	**
I _{6-0m} (Ns/kgBw)	2.49	0.15	2.24	0.16	**

(b) The second round	Longest 10 (n=10)		Shortest 10 (n=10)		
	Mean	SD	Mean	SD	
VARIABLES					
Distance of Jump (m)	89.05	5.05	70.55	3.49	****
Official Velocity (km/h)	81.05	0.14	80.55	0.56	*
Total Body Weight (kg)	72.38	5.87	71.70	5.05	
F' _{6-0m} (N/kgBw)	19.56	0.60	18.74	0.63	**
Fz _{peak} (N/kgBw)	23.50	1.30	22.05	1.25	*
I _{6-0m} (Ns/kgBw)	2.51	0.14	2.33	0.15	*

Note. Longest 10 means the subjects group ranked 1st to 10th place and Shortest 10 means the subjects group ranked 41st to 50th place each round.

**** : Significant difference (p < 0.0001)

*** : Significant difference (p < 0.001)

** : Significant difference (p < 0.01)

* : Significant difference (p < 0.05)

2.3.3 上位選手間の比較

2.3.3.a 上位選手間における床反力の比較

1本目および2本目の Longest10 グループについて、飛距離を基準に 1~5 位を top5 群 (n=5) , 6~7 位を next5 群 (n=5) にそれぞれ分類し、各試技について飛距

Table 3 The selected variables between two groups in the first round (a) and the second round (b).

(a) The first round	top5 (n=5)		next5 (n=5)		
	Mean	SD	Mean	SD	
VARIABLES					
Distance of Jump (m)	90.60	4.55	85.20	0.91	*
Official Velocity (km/h)	81.61	0.18	81.22	0.76	
F'6-0m (N/kgBw)	19.67	0.69	19.28	0.65	
FZpeak (N/kgBw)	22.88	1.31	23.55	1.27	
I 6-0m (Ns/kgBw)	2.53	0.16	2.46	0.14	

(b) The second round	top5 (n=5)		next5 (n=5)		
	Mean	SD	Mean	SD	
VARIABLES					
Distance of Jump (m)	93.20	3.75	84.90	0.55	*
Official Velocity (km/h)	81.07	0.18	81.04	0.14	
F'6-0m (N/kgBw)	19.51	0.65	19.61	0.63	
FZpeak (N/kgBw)	23.09	1.31	23.91	1.29	
I 6-0m (Ns/kgBw)	2.51	0.15	2.50	0.15	

Note. The group of top5 means the subjects group ranked 1st to 5th place and next5 means the subjects group ranked 6th to 10th place each round.

*: Significant difference (p<0.01)

離, 助走速度および床反力変数 (FZ_{Peak}, F'_{6-0m}, I_{6-0m}) の比較を行った (Table 3)。

統計処理の結果, 1 本目 (Table 3a) および 2 本目 (Table 3b) の両試技において, top5 群が next5 群よりも有意に飛距離が大きかったが (1 本目: 90.60±4.55 m VS 85.20±0.91 m, p < 0.01, 2 本目: 93.20±3.75 m Vs 84.90±0.55 m, p < 0.01), 助走速度および床反力変数には有意な差が認められなかった。

2.3.3.b 上位2選手の比較

Fig. 7は、上位選手の中でほぼ同じ力積 (I_{6-0m}) を記録した2名の選手 (M.H. と M.S.) の床反力波形の例である。ここでは両者の床反力の発揮方法の違いを見ていきたい。Fig. 7aは1本目の試技を、Fig. 7bは2本目の試技を示す。飛距離は1本目の試技において M.H.:98.0 m , M.S.:92.0 m であり、2本目の試技においては M.H.:98.5 m , M.S.:94.0 m であった。それぞれ縦軸は床反力 (N) , 横軸は時間 (msec) を示す。図中の約 600 N 付近に引かれている水平線は選手の総重量を示す。2名の総重量はそれぞれ M.H.:645.5N, M.S.:680.8 N であった。 I_{6-0m} の値を見ると1本目の試技において M.H.:2.61 N·s/kgBw, M.S.:2.57 Ns/kgBw であり、2本目の試技では M.H.:2.65 Ns/kgBw, M.S.:2.67Ns/kgBw とほぼ同じ値であった。助走速度は1本目の試技において M.H.:81.6km/h, M.S.:81.7km/h, 2本目の試技では M.H., M.S.の両者とも81.1km/h であった。

図の10 m から6 m まではR1 と呼ばれる助走路の曲線部分である(曲率半径85 m)。両者とも遠心力 (mv^2/r) の影響を受けて床反力は一旦高いレベルに達し、その後6 m 付近で、曲線部分が終了して直線部分に移行するのに伴い減少していた。

6 m から0 m までは直線部分である。この区間における両者の積分値は同じであったが、床反力波形はそれぞれ異なる特徴を見せた。M.H.はM.S.に比べてより早い時期から床反力が増大し、その後比較的变化の少ない波形を見せた。M.S.の床反力は、この区間の前半部分ではM.H.に比べて低いレベルであったが、助走路の終端(0 m) まで次第に床反力を増大させていた。

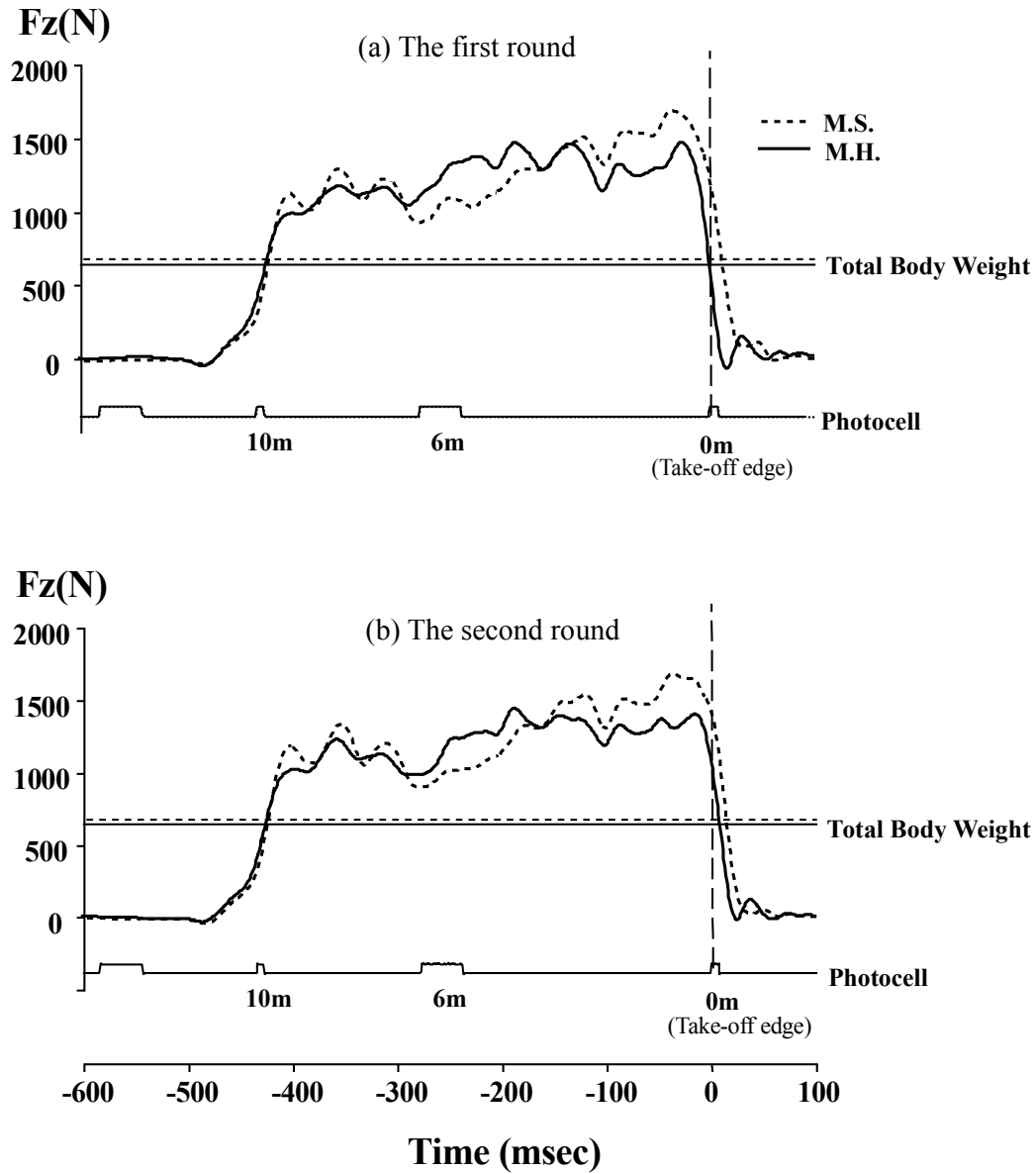


Figure 7 The difference of the force production between M.H. (solid line) and M.S. (dotted line).

Figure 7a : M.H. was the first place (98.0m) and M.S. was the second place (92.0m) for the first round. Figure 7b : M.H. was the first place (98.5m) and M.S. was the second place (94.0m) for the second round.

2.4 考察

ここでは、踏み切り局面において選手が発揮した床反力から算出された力学的諸変量（平均床反力，最大床反力および力積）と飛距離との関係を中心に検討していく。

2.4.1 助走速度と総質量について

踏み切り動作の変化による飛距離への影響を検討する前に、助走速度および選手とスキーなどの装備を加えた総質量について検討しておく。その理由は、助走速度の増大は飛距離を増大させ（Ward-Smith ら 1983），総質量の増大は飛距離を減少させることが、コンピュータシミュレーションを用いた理論的研究で示されているからである（Müller ら 1996）。実際の競技場面を対象とした場合でも（Komi ら 1974），助走速度と飛距離との間に正の相関関係が見られたことが報告されている（ $r = 0.54$, $p < 0.05$, $n = 30$ ）。また Virmavirta ら（1989）も同様に、助走速度とジャンプの飛距離との間に正の相関関係を認めている（ $r = 0.282$, $p < 0.05$, $n = 58$ ）。

本研究では2本目の試技においてのみ、助走速度と飛距離との間に正の相関関係が認められ（ $r = 0.36$, $p < 0.05$, $n = 50$ ），1本目の試技においては両変数間に有意な相関関係は認められなかった。実験1で用いた助走速度は、大会公式速度（助走路の終端より18 m上方の地点から、8 m滑走する間の平均速度）であり、ジャンプ台を飛び出した時点の瞬間速度ではないことに加え、踏み切り動作や飛行局面における姿勢制御の失敗や成功が、飛距離に影響を与えていることも、このような結果を招いた要因であると思われる。

また本研究では1本目および2本目の試技において助走速度と総質量との間に正の相関関係が見られた（1本目： $r = 0.30$, $p < 0.05$, $n = 50$ ，2本目： $r = 0.35$, $p < 0.05$, $n = 50$ ）。これは木下（1971）や山辺ら（2008）によって報告されたように、空

気抵抗を考慮した場合には、体重が大きいほど滑走速度を高めるのに有利であるという示唆に符合するものである。

2.4.2 発揮された力学的諸変量と飛距離との関係

本研究において得られた平均床反力と飛距離との間には1本目と2本目の両試技において有意な正の相関関係が見られた (Fig. 4)。また最大床反力と飛距離の間には、1本目の試技において有意な正の相関関係が見られた (Fig. 5)。さらに、上位群と下位群との間で平均床反力および最大床反力を比較した結果、上位群が下位群よりも有意に高い値を示した (Table 2)。すなわち、飛距離の大きい選手ほど、踏み切り動作で発揮した床反力の平均値および最大値が大きかった。これらの結果はスキー板を平行に揃える飛行技術が行われていた時期になされた研究 (Virmavirta ら 1989; Virmavirta ら 1993a; Virmavirta ら 1993b) の結果を裏付けると同時に、スキーをV字に開いて飛行する技術が主流となった今日においても、踏み切り動作による力の発揮は、ジャンプの飛距離を大きくするために重要であることを示唆するものである。しかしながら、踏み切り動作に限らず、助走路局面、飛行局面、着地局面の各局面における技術要因がスキージャンプの飛距離の決定に深く関わっているため (Hubbard ら 1989; Arndt ら 1995; Virmavirta ら 1997)、本研究で取り扱っている踏み切り局面における床反力の影響だけが強調されることは注意すべきであり、あくまで飛距離増大の一要因として考慮されるべきであろう。

本研究においては、助走路終端から6 m手前の地点に設置された光電管を選手が通過した時点から、助走路終端の光電管を通過するまでの時間を用いて床反力の力積を算出した。本研究で得られた力積の単位 (Ns/kgBw) は速度と同じ次元 (m/s) となる。すなわち本研究で得られた力積の値は、踏み切り動作が助走路の終端から6 m手前の地点から始まったという仮定の下で、助走路の終端 (0 m) における身体

重心の上昇速度を表している。得られた力積とジャンプの飛距離との間には、有意な正の相関関係が見られた (Fig. 6)。さらに上位群と下位群の比較を行った結果、上位群が有意に下位群より高い値を示した (Table 2)。これらの結果は、ジャンプ台を飛び出した時点の身体重心の上昇速度が大きいほどジャンプの飛距離が大きいという研究結果 (Komi ら 1974; Schwameder 1993; Schwameder ら 1995) を支持するものである。しかしながら、身体重心の上昇速度を高めるために股関節を大きく伸展するような踏み切り動作を行えば、進行方向に対する投射面積が増大し、空気抵抗を増加させるために、進行方向速度の減少につながるという指摘 (Baumann 1979; Virmavirta ら 2001e; 山本ら 2003; 山本ら 2004) にも注意する必要がある。

2.4.3 上位選手間の比較

1本目および2本目の各試技について、1~5位のグループ (top5) と6~10位のグループ (next5) の2群間の飛距離には有意な差が認められたものの、2群間の平均床反力、最大床反力、力積には有意な差が認められなかった (Table 3)。この結果は、スキージャンプの踏み切り技術を評価する際の問題点を示している。すなわち、技術 (飛距離) に差がある多数の被検者を対象とした場合には、床反力変数の大きさは技術 (飛距離) の優劣を推測する指標の1つとして捉えることができるが、高い技術水準を持つ被検者を対象とした場合には、選手間の床反力変数の差が小さくなるため、飛距離を推測することが困難になるものと考えられる。

したがって、高い技術水準を持つ選手の踏み切り技術を評価する際には、これまでに述べてきたような床反力変数と飛距離との関係をふまえた上で、選手が発揮した床反力波形の特徴からその踏み切り技術を明確にしていくことが必要であると考えられる。そこで、上位群の中からほぼ等しい力積を記録した2名 (M.H.とM.S.) の床反力波形を取り上げて比較検討を行った (Fig. 7)。M.H.は1本目と2本目の総

合成績で1位、M.S.は同様に2位の成績を納めた選手であった。

実験室内で、スキージャンプ選手に実際のスキージャンプ動作をイメージさせて踏み切り動作を行わせた場合、発揮された床反力波形は同一被検者内でよく類似することが報告されている（渡辺ら 1971; Schwameder ら 1997; Schwameder 2007）。本研究でも同様に、同一被検者の床反力波形は2回の試技において類似したパターンを示した。この結果は、よく鍛錬されたスキージャンプ選手は個々の踏み切り動作の型を持っており、実際のジャンプ競技場面においてもその型を再現する能力があることを意味するものと考えられる。また、この2名はそれぞれ異なる床反力の発揮パターンでありながら同等の力積を得ていた。床反力波形を見ると、M.H.は助走路が曲線路から直線路に移行する地点、すなわち助走路の終端から約6 m手前の地点（約-300 msec）から床反力を増大させ、その後床反力を持続的に発揮していた。M.S.については、助走路の直線路の前半部分（約-300~-150 msec）ではM.H.に比べて低いレベルであったが、徐々に床反力を増大させ、約-150 msec以降はM.H.よりも大きな床反力を示し、助走路の終端（0 m）まで次第に床反力を増大させていた。Komi（1974）やBaumann（1979）はジャンプ動作の開始について、助走路の終端に近いほどよいとしており、短い時間で大きな力を発揮させて身体重心に上昇速度を与えるような踏み切り動作を良い技術として提唱しているが、M.H.が示した床反力の発揮パターンは、そのような技術とは異なる踏み切り技術の可能性を示唆するものと思われる。つまり、助走路の直線部分全体を使って十分な力積を得るだけの床反力を持続的に発揮するという方法である。この方針に従えば、最大の床反力を踏み切り動作の最終局面で瞬間的に発揮する必要はなく、さらに床反力を発揮するタイミングに柔軟性（時間的な幅）が与えられることになる。これは、踏み切り動作を選手に指導する際に離床地点を「線」として意識させるのではなく、「面」として、ある区間で踏み切り動作を行うように意識させる必要があるとい

う渡部（1983）の指摘に符合するものである。

2.5 小括

本章では、スキージャンプ国際競技会（サマージャンプ）の参加選手を対象に、踏み切り局面において発揮された床反力を測定し、平均床反力、最大床反力および力積などの床反力の要素とスキージャンプのパフォーマンスすなわち、飛距離との関係を明らかにすることを目的とした。以下にその結果をまとめる。

技術水準に差がある選手群を被検者とした場合、踏み切り動作によって発揮された床反力の平均値、最大値、力積が大きい選手ほど、その飛距離が大きいという傾向が見られた（Fig. 4 ～ Fig. 6）。すなわち、これらの床反力変数は飛距離を推測する指標として捉えることができるものと考えられる。しかし、上位 10 名の選手に被検者を限定した場合、これらの床反力変数は、1～5 位（top 5）と 6～10 位（next 5）とのグループ間で差が見られなかった（Table 3）。この結果から、上位の選手は画一的な床反力発揮を行っているかと思われたが、上位選手間の床反力波形はむしろ多様性を有することが示唆された（Fig. 7）。したがって、特に高い技術水準を持つ選手の踏み切り技術を理解するためには、前述の力学量のみならず、選手が発揮した床反力波形に現れる床反力発揮様式の特徴からその踏み切り技術を明らかにしていく必要があるものと考えられる。

第 3 章では、上記の課題を解決するために、高い技術水準を有する選手を対象として、選手の床反力発揮の特徴を検討していく。

3 一流ジャンプ選手における床反力発揮の特徴（実験2）

3.1 目的

第2章に示したように、実際の競技場面における踏み切り動作の床反力を分析した結果から、上位の選手は画一的な床反力発揮を行っているわけではなく、選手それぞれが個別の床反力の発揮様式を持っていることが観察された。そこで本章では、優れた技術を有すると考えられる選手群を対象に、個々の選手が持つ床反力発揮様式を明らかにし、床反力発揮様式の違いが踏み切り動作に関連する力学量（重心の上昇速度、重心位置の変位、踏み切り動作のタイミング）にどのような影響を与えているのか明らかにすることを目的とした。

3.2 方法

実験2では、日本代表チームのサマージャンプ合宿（長野県白馬村ジャンプ競技場：1997年7月8日～7月15日）において、ジャンプ競技場における床反力の測定と同時に、高速度ビデオカメラによる撮影を行った。実験に用いられたジャンプ台および床反力計は実験1で用いたものと同じであった。

3.2.1 被検者

1997年7月8日から7月15日の間に長野県白馬村にて行われた全日本ジャンプチーム強化合宿の参加者12名を対象とした。各選手の年齢、身長そして身体質量をTable 4に示す。H.M., M.S., K.S., K.Y.の4名は日本国内大会において優勝経験を持ち、その他の8名はワールドカップ優勝経験を持つ（測定当時までの記録から）。本実験を実施した当時は日本ジャンプチームの国別ランキングは第1位であり、彼らの技術は一流と考えられる。

Table 4 Age, body height and body mass of twelve subjects.

Subjects	Age(year)	Body Height(cm)	Body mass (kg)
A.H.	25	163.2	58.6
H.M.	23	171.0	58.2
H.S.	26	172.7	60.4
J.N.	28	180.1	62.8
K.F.	22	172.5	66.0
K.S.	31	169.0	58.2
K.Y.	18	170.2	58.0
M.H.	29	173.0	58.9
M.S.	22	166.5	59.4
N.K.	25	174.4	63.0
N.Y.	27	177.0	66.2
T.O.	26	163.0	51.8

Note. These data were measured by the Ski Association of Japan in 1997.

3.2.2 測定手順

3.2.2.a 床反力の測定

実験 1 と同じ施設（白馬ジャンプ競技場ノーマルヒルジャンプ台）を利用して、助走路に垂直方向に発揮された床反力を測定した（Fig. 1 および Fig. 2 参照）。床反力計の較正も実験 1 と同じ手法を用いた。選手の位置情報を得るために、助走路の終端（0 m）からスタート地点に向かって助走路に平行に 0 m, 6 m, 10 m, 12 m の 4 ヶ所に光電管を設置した。床反力計および光電管からの信号をアナログデータレコーダ（日本光電社製，RMG-5204）にて記録した。アナログデータレコーダによって記録されたデータは、後に研究室にて A/D 変換ボードを介し、サンプリング周波数 2000 Hz にてコンピュータに取り込んだ。測定日毎に、スキー板，ヘルメットなどジャンプ競技に用いる装備を全て装着した状態で被検者の総質量を測定した。12 名の被検者がそれぞれ 4～11 回のジャンプを行い，合計 95 回のジャンプについて床反力の測定を行った。

3.2.2.b 映像の撮影

高速度ビデオカメラ（Photron 社製，FASTCAM-Rabbit）を，カメラの光軸が助走路の進行方向に対して直交するように設置した。カメラの設置場所は，助走路の終端とほぼ同じ高さで，助走路から約 10 m 離れた位置である。カメラを固定した状態で，選手の右側面の映像を撮影した（240fps）。撮影範囲は，踏み切り動作からジャンプ台を飛び出した後約 5 m までの範囲であった。選手が最初の光電管（12 m）を通過した際の光電管信号をビデオ記録開始のトリガーとすることで，床反力データと映像とを同期した。12 名の選手による，それぞれ 1～3 回のジャンプを撮影した（合計 17 試行）。

3.2.3 データ処理

3.2.3.a 床反力の解析

床反力データの高周波ノイズを除去するために、遮断周波数 20 Hz の特性を持つ 2 次のバターワース型ローパスフィルタをデータの両端から用いて平滑化を行った後に、以下の分析を行った。

埋設された床反力計は全長 10 m であるが、その前半 3.8m の区間は R1 と呼ばれる助走路の曲線部分（曲率半径 85 m）を含んでいる。すなわち、この区間で測定された床反力（Fa）は、踏み切り動作によって発揮された正味の床反力（F）、選手の総重量（ $mg\cos\theta$ ）および遠心力（ $F_r : mv^2/r$ ）の総和である。そこで、下記①式を用いて選手が発揮した正味の床反力（F）を算出した（Fig. 8 参照）。

$$F = Fa - mg\cos\theta - mv^2/r \quad \text{①}$$

ここで、 m は選手の装備を含めた総質量（kg）、 g は重力加速度（ 9.81m/s^2 ）、 θ （ t ）は助走路の傾斜（ 13.1 から 10.5° ）を時間 t の関数で示したもの、 v は助走速度（m/s）、そして r は R1 の曲率半径（85m）を示す。

床反力計の後半部分（6.2m）は直線であり、測定された床反力（Fa）は踏み切り動作によって発揮された正味の床反力（F）と選手の総重量（ $mg\cos\theta$ ）の総和である。そこで、下記②式を用いて選手が発揮した正味の床反力（F）を算出した。

$$F = Fa - mg\cos\theta \quad \text{②}$$

ここで、 m は選手の装備を含めた総質量（kg）、 g は重力加速度（ 9.81m/s^2 ）、 θ は助走路の傾斜（ 10.5° ）を示す。選手が助走路を通過する際に、助走路に対して

垂直方向に働く力としてこれらの他に揚力がある。揚力については助走姿勢で約 40N、直立に近い踏み切り姿勢で約 80 N 程度の揚力が選手を上方に引き上げるように働くことが示されているが (Baumann 1979) , 本研究では揚力を無視した。これらの処理を経て床反力データから以下の項目を解析した。

- 1) $F_{\max 1}$: 助走路の曲線部分 (10-6.2m) における床反力 (Fa) の最大値を選手の総質量 (m) で除した値 (N/kgBw)
- 2) $F_{\max 2}$: 助走路の直線部分 (6.2-0m) における床反力 (Fa) の最大値を選手の総質量 (m) で除した値 (N/kgBw)
- 3) $F2/F1$: $F_{\max 2}$ を $F_{\max 1}$ で除した値 (この値が大きいほど、助走路の後半部分で相対的に大きな力を発揮したことを意味する。)
- 4) V_{\max} : 床反力 (F) から得られた加速度の積分から算出した身体重心上昇速度の最大値 (m/s) (なお、積分開始位置を 10m の光電管通過の時点とすると、脛の前傾、あるいは圧力センサーの過渡特性に由来すると思われる荷重の遅れが見られたため、床反力波形を二次微分して変曲点 (Ts) を求め、Ts を積分開始点とした。積分開始時点 (Ts) の助走路上の位置は助走路の終端から 9.53~9.40m 手前の範囲であった。)
- 5) DCG_{\min} : 床反力 (F) から得られた加速度を 2 回積分して得た重心変位の最小値 (m)
- 6) $T1$: DCG_{\min} が観察された時点から選手が助走路の終端を通過した時点までの時間 (s) (DCG_{\min} が助走路の終端以前に現れた場合 (-) の符号で表示した。)
- 7) DCG_{0m} : ジャンプ台の終端の光電管を通過した時点における重心変位 (m)

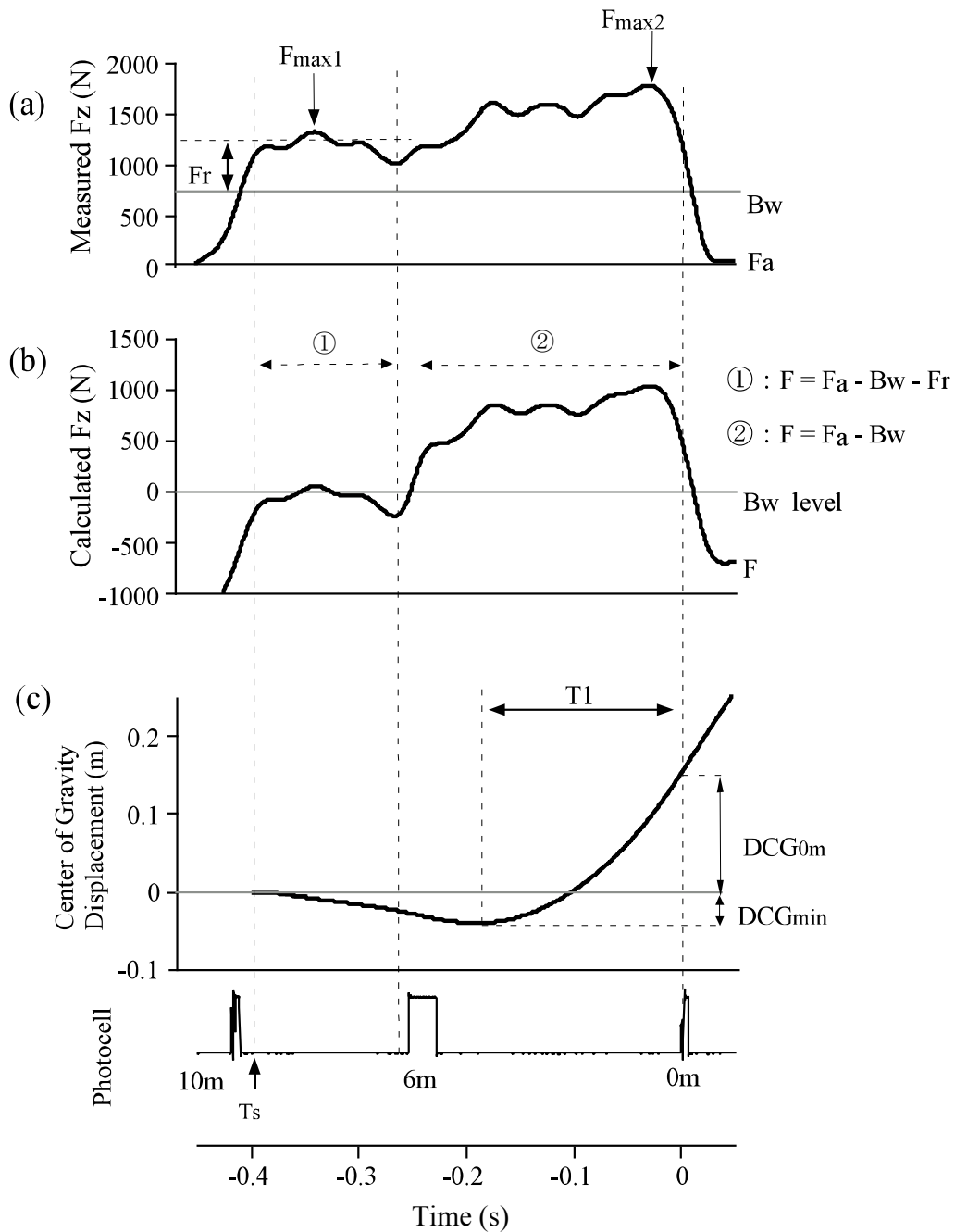


Figure 8 Force curve (a, b), the displacement of the center of gravity and photocell signals (c). Measured force (F_a) includes the body weight (Bw) during all the part of the take-off platform and also includes the centrifugal force (Fr) during the 10-6.2m before the take-off edge (a). Then a net force (F) generated by the jumper was calculated by subtracting these forces (b). F_{max1} and F_{max2} is the maximal value of the force. DCG_{min} and DCG_{0m} refer to the displacement of the center of gravity at the minimal value and at the instant of take-off respectively. $T1$ refers to the time duration from the point of DCG_{min} to the edge of the take-off. A starting point of integration is shown as T_s .

3.2.3.b 映像の解析

映像解析ソフトウェア（ベルテックジャパン社製，WinAnalyze Ver. 1.4）によって，選手の矢状面（右側面）における身体部位の2次元平面座標を求めた。映像解析によって得られた2次元座標値に対して，遮断周波数6 Hzの特性を持つ2次のバターワース型ローパスフィルタをデータの両端から用いて平滑化を行った後に，以下の解析を行った。

肩関節中点，大転子，膝関節中点，足関節外踝の4点のデジタイズを行った。足関節については，助走路全域に沿って設置された高さ約20 cmの遮蔽物のために足部が観察できず，脛の下部を足関節外踝の代わりにデジタイズした。デジタイズされた座標から膝関節角度（Knee）および股関節角度（Hip）を求めた（Fig. 2 参照）。さらに，助走路の終端に設置した光電管を通過した時点における膝関節角度（Knee-0m）および股関節角度（Hip-0m）をそれぞれ求めた。試技終了後に縦横2 mの正方形の較正用フレームを助走路の中央に設置し，水平および鉛直方向の較正を行った。較正点より手前500 mmの遠近誤差は水平方向で33.42 mm（1.7%），鉛直方向で23.59 mm（1.2%）であった。

3.2.4 統計処理

床反力の最大値（ $F_{\max 1}$ ， $F_{\max 2}$ ）およびその比（ $F2/F1$ ）とその他の変数間の相関係数（スピアマンの相関係数）を求めた。また3名の選手について $F2/F1$ の平均値を比較するために分散分析およびポストホックテストとしてFisherのPLSD法を用いた。統計ソフトウェアにはStatview5.0（SAS Institute Inc.）を使用した。すべての統計処理において危険率5%水準を統計学的有意とした。

3.3 結果

ここでは、一流の技術を有する選手を被検者として、床反力発揮様式の特徴を明らかにし、さらに床反力発揮様式が身体重心の上昇速度や変位にどのような影響を及ぼすのかを検討する。また床反力発揮様式の違いが踏み切り姿勢にどのような影響を与えているのか検討する。

3.3.1 床反力波形の再現性

Fig. 9 は 3 名の選手 (N.K., K.F., M.H.) がそれぞれ (6~8 回) 発揮した床反力を示す。縦軸には相対化した床反力を示す。相対化に際しては、選手が発揮した床反力から選手の総重量を引き、さらに総質量で除した値を用いた (N/kgBw)。横軸は規格化された踏み切り時間を示す。規格化に際しては、各選手の体重レベルまで床反力が増加した時点を踏み切り時間の 0% として表示し、床反力が体重レベルにまで減少した時点を 100% として表示した。Fig. 9 に示されるように、同一選手が発揮した床反力には高い再現性が観察された。その他の 9 名の選手においても同様に高い再現性が観察された。

Relative Fz (N/kgBw)

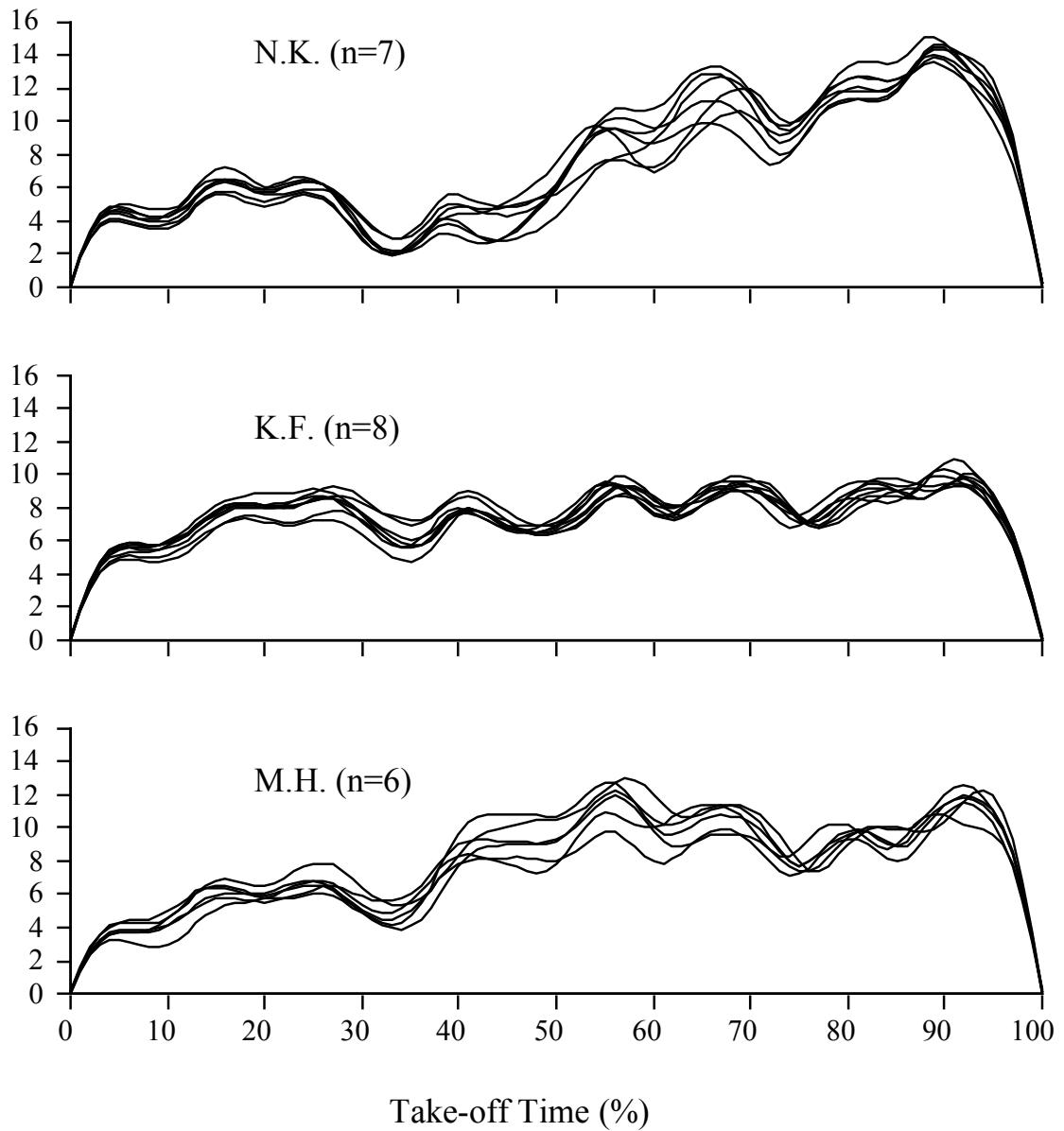


Figure 9 Multiple plots of ground reaction forces (GRF) by three subjects(N.K., K.F., M.H.). GRF is expressed as a relative value for each subject's total body weight. For the take-off time, 0% indicates the instant that GRF increased to the total body weight level, while 100% indicates the instant that GRF decreased to the total body weight level.

3.3.2 床反力発揮様式

まず、Table 5 に 12 名の選手の $F_{\max 1}$ 、 $F_{\max 2}$ および $F2/F1$ の試行数、平均値および標準偏差を示す。 $F_{\max 1}$ は床反力計の前半部分の曲線路で発揮された床反力の最大値を意味し、 $F_{\max 2}$ は床反力計の後半部分の直線路で発揮された床反力の最大値を意味する。 $F2/F1$ は $F_{\max 2}$ を $F_{\max 1}$ で除した値であり、床反力発揮様式の指標として用いた。すなわち、 $F2/F1$ の値が高いほど床反力計の前半の曲線路よりも後半の直線路で相対的に大きい床反力を発揮したことを意味する。全試行 ($n = 95$) において $F_{\max 2}$ は $F_{\max 1}$ よりも高い値を示した。Fig. 10 には 12 名の選手の $F_{\max 1}$ および $F_{\max 2}$ の平均値の散布図を示す。縦軸は $F_{\max 1}$ 、横軸は $F_{\max 2}$ の平均値をそれぞれ示す。また誤差線はそれぞれの変数の標準偏差を示している。各選手の平均値を用いて両変数間の相関係数を求めた結果、 $F_{\max 1}$ と $F_{\max 2}$ との間には有意な負の相関関係が見られた ($r = -0.63, p < 0.05, n=12$)。

3.3.3 床反力発揮様式と最大上昇速度との関係

床反力の積分から得られた身体重心の最大上昇速度 (V_{\max}) と $F2/F1$ の散布図を Fig. 11 に示す。各選手の平均値を用いて両変数間の相関係数を求めた結果、 V_{\max} と $F2/F1$ との間には有意な相関関係は見られなかった ($r=0.31, N.S., n=12$)。 $F2/F1$ の最も低かった K.F. と最も高かった N.K. について分散分析を行った結果、両者の V_{\max} についても有意な差が見られなかった (2.17 ± 0.13 m/s VS 2.22 ± 0.15 m/s)。また、 V_{\max} は $F_{\max 1}$ および $F_{\max 2}$ との間に有意な相関関係が見られなかった ($r=0.13, r=0.56, N.S., n=12$)。

Table 5 Statistics of Fmax1, Fmax2 and a quotient of Fmax2 / Fmax1 (F2/F1).

Subjects	n	Fmax1(N/kgBw)		Fmax2(N/kgBw)		F2/F1	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
A.H.	10	16.42	0.41	20.34	0.65	1.24	0.05
H.M.	7	16.86	0.22	21.38	0.75	1.27	0.05
H.S.	4	17.16	0.27	20.84	0.29	1.21	0.01
J.N.	8	16.59	0.65	20.60	0.56	1.24	0.05
K.F.	8	18.17	0.65	19.74	0.37	1.09	0.04
K.S.	11	16.04	0.33	21.39	0.44	1.33	0.04
K.Y.	11	17.64	0.29	19.81	0.52	1.12	0.03
M.H.	6	17.11	0.66	21.91	0.65	1.28	0.05
M.S.	6	17.51	0.31	21.22	0.51	1.21	0.02
N.K.	7	16.01	0.52	23.99	0.51	1.50	0.03
N.Y.	10	16.67	0.77	22.30	0.60	1.34	0.05
T.O.	7	16.57	0.40	21.52	0.66	1.30	0.05
Total	95	16.86	0.80	21.19	1.25	1.26	0.11

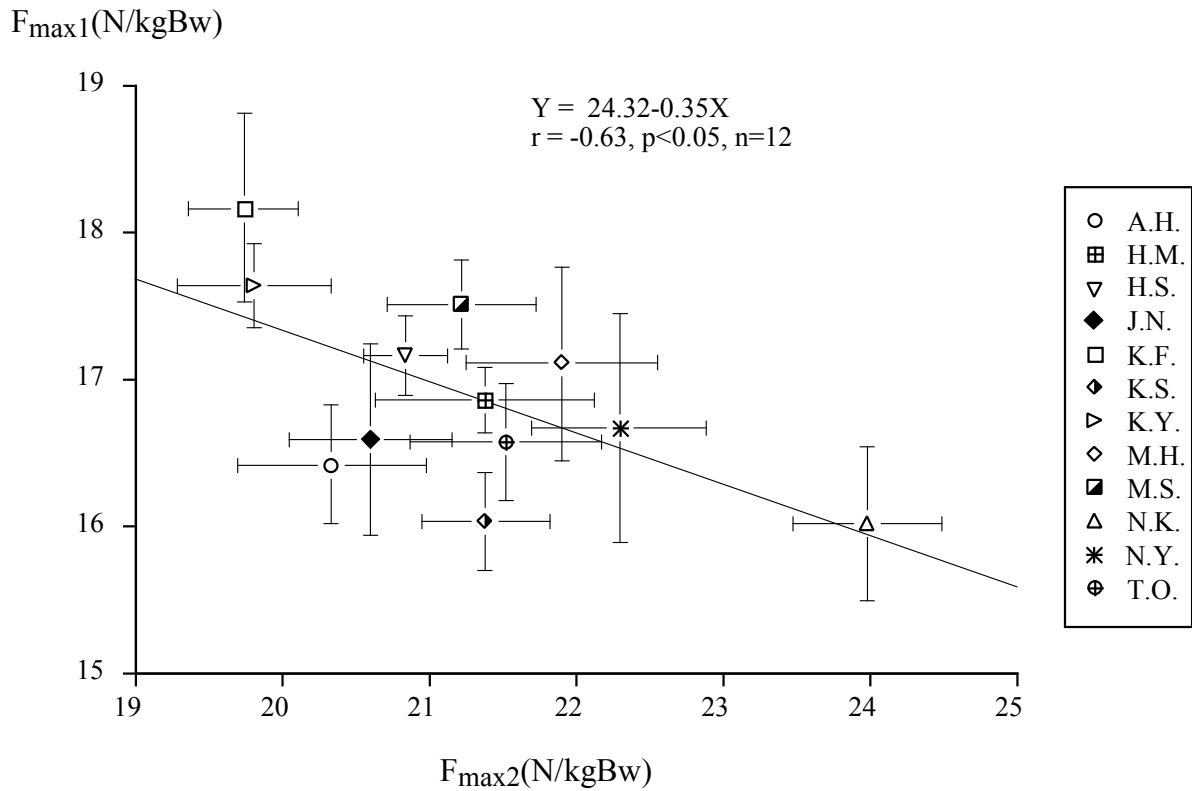


Figure 10 F_{max1} and F_{max2} for twelve subjects.

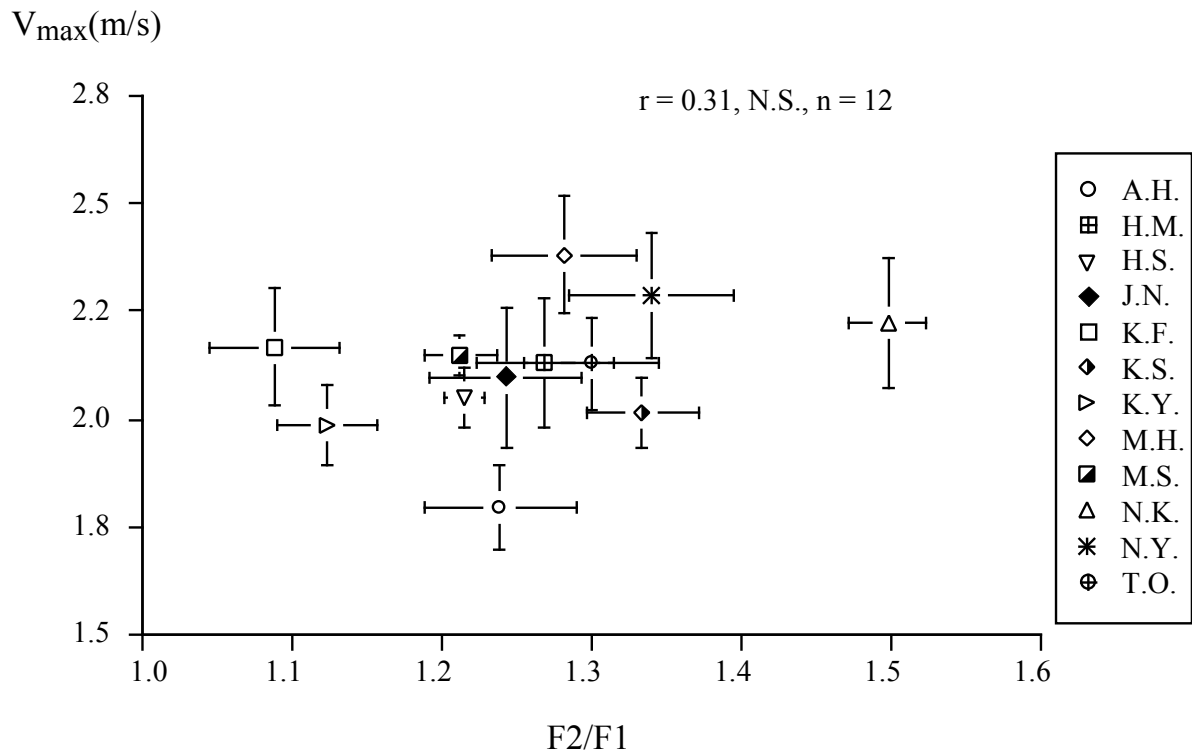


Figure 11 Maximal vertical velocity of the center of gravity (V_{max}) and quotient of F_{max2} to F_{max1}(F₂/F₁).

3.3.4 床反力発揮様式と身体重心変位との関係

積分開始時点 (T_s) を初期値 (0 m) として算出した身体重心変位を見ると、身体重心の軌跡は R1 と呼ばれる助走路の曲線部分 (10 m から 6.2 m) から直線部分 (6.2 m から 0 m) の前半までの間で一旦下降し、その後上昇していた (Fig. 8 参照)。このような一時的な重心高の下降はすべての選手に観察され、その範囲は -0.04 から -0.00 m であった。Fig. 12 に身体重心変位の最小値 (DCG_{min}) と F_2/F_1 との散布図を示す。各選手の平均値を用いて両変数間の相関係数を求めた結果、 DCG_{min} と F_2/F_1 との間には有意な負の相関関係が見られた ($r = -0.89, p < 0.0001, n=12$)。また DCG_{min} は F_{max1} との間に有意な正の相関関係が見られ ($r = 0.93, p < 0.0001, n=12$)、 F_{max2} との間に有意な負の相関関係が見られた ($r = -0.72, p < 0.01, n=12$)。 F_{max1} の値が最も高かった K.F. と次に高い値を示した K.Y. については、 DCG_{min} の平均値が -5 mm 以下であり、重心の下降はほとんど見られなかった。

次に、 DCG_{min} のタイミング (T_1) と F_2/F_1 との散布図を Fig. 13 に示す。助走路の終端を通過した時刻を 0 s としており、 DCG_{min} の発現が助走路の終端よりも手前であるほど T_1 の値は小さくなる。 T_1 の範囲は $-0.34 \sim -0.18$ s であり、助走路の終端からの距離で示すと $8.00 \sim 4.11$ m となった。各選手の平均値を用いて両変数間の相関係数を求めた結果、 T_1 と F_2/F_1 との間には有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.84, p < 0.001, n=12$)。また T_1 は F_{max1} との間に有意な負の相関関係が見られ ($r = -0.93, p < 0.0001, n=12$)、 F_{max2} との間に有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.67, p < 0.05, n=12$)。なお助走速度と T_1 との間には有意な相関は見られなかったため、助走速度の影響はなかったと考えられる。高い F_{max1} を示した 2 名の選手 (K.F., K.Y.) は、非常に早いタイミングで T_1 が現れていた。

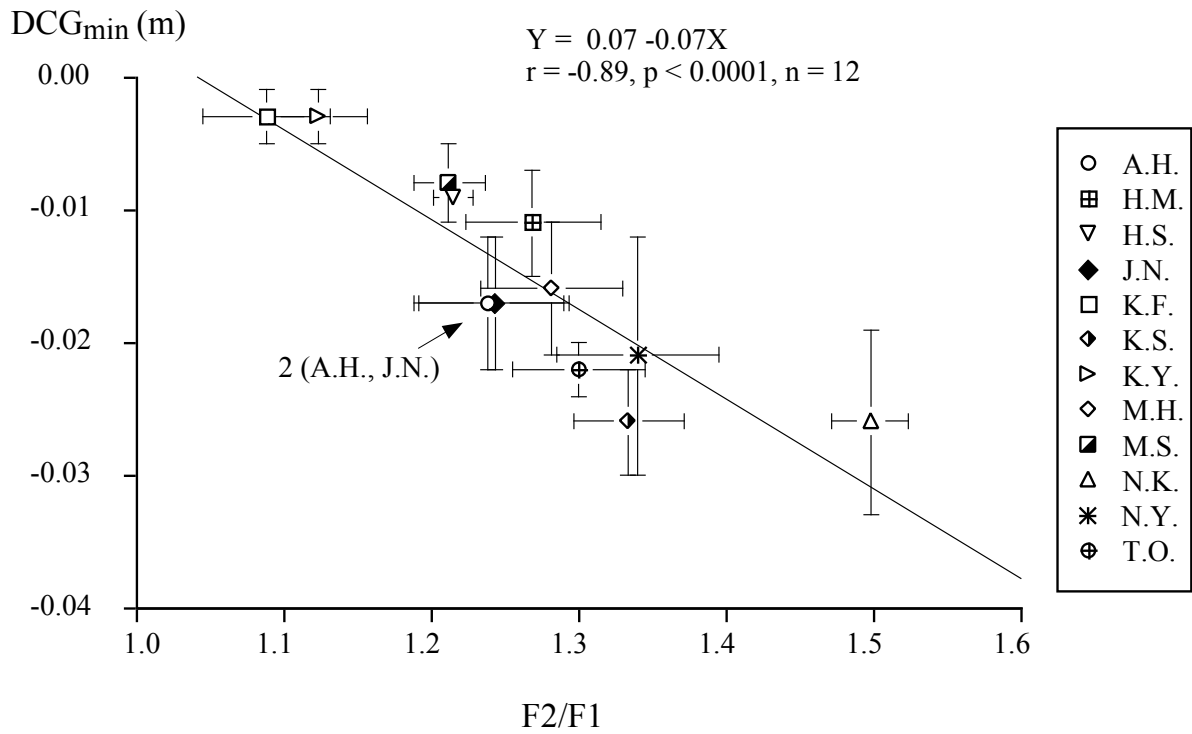


Figure 12 Minimal value of displacement of the center of gravity (DCG_{min}) and quotient of F_{max2} to F_{max1} ($F2/F1$).

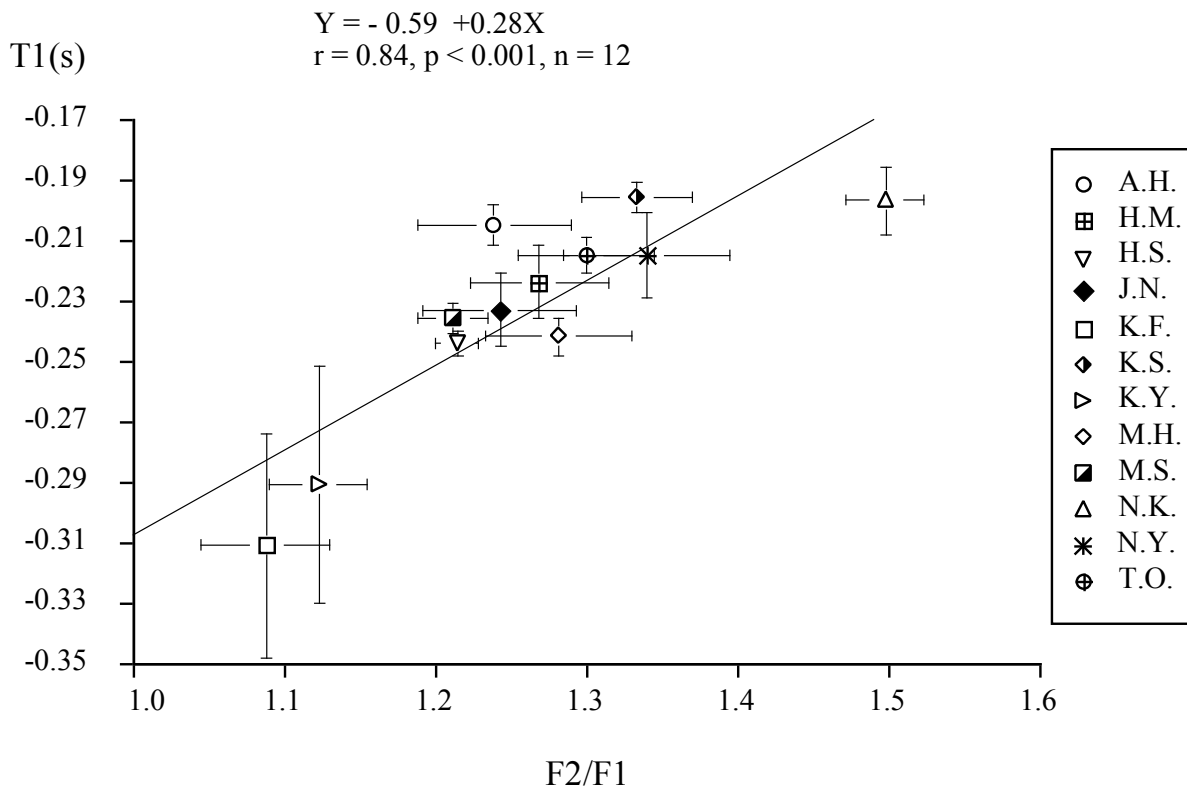


Figure 13 Timing of DCG_{min} ($T1$) and quotient of F_{max2} to F_{max1} ($F2/F1$).

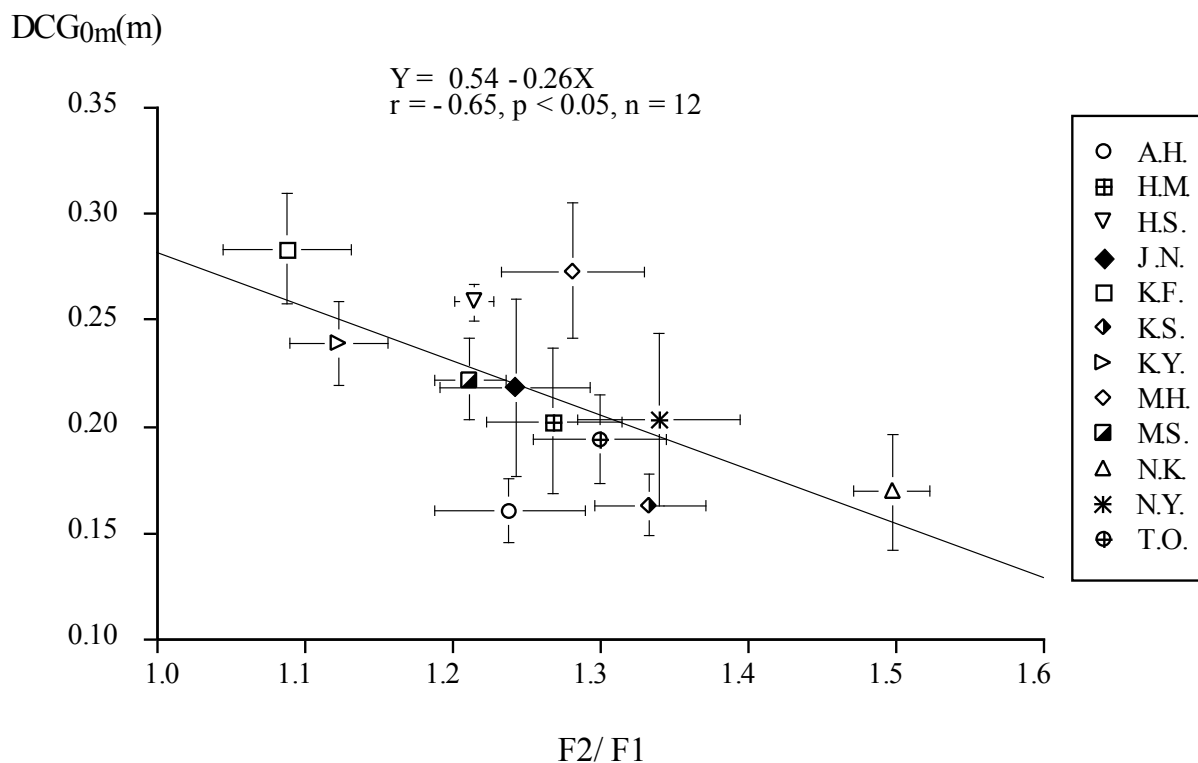


Figure 14 Displacement of the center of gravity at the edge of take-off (DCG_{0m}) and quotient of F_{max2} to F_{max1} ($F2/F1$).

助走路の終端における身体重心の変位 (DCG_{0m}) と $F2/F1$ との散布図を Fig. 14 に示す。各選手の平均値を用いて両変数間の相関係数を求めた結果、 DCG_{0m} と $F2/F1$ との間には有意な負の相関関係が見られた ($r = -0.65, p < 0.05, n=12$)。この結果は、相対的に前半部分で大きい床反力を発揮した選手ほど、助走路の終端における重心変位が大きかったことを示している。また DCG_{0m} は F_{max1} との間に有意な正の相関関係が見られたが ($r=0.85, p < 0.001, n=12$) , F_{max2} との間には有意な相関関係は見られなかった ($r = -0.42, N.S., n=12$)。

3.3.5 床反力発揮様式が異なる選手の比較

床反力発揮様式の異なる選手を比較するために、F2/F1 の値が小さい選手 (K.F. : 1.09 ± 0.04) , 大きい選手 (N.K. : 1.50 ± 0.03) , そして中間の選手 (M.H. : 1.28 ± 0.05) の 3 名を抽出した。分散分析およびポストホックテストとして Fisher の PLSD 法を用いて、各選手間の F2/F1 にはそれぞれ有意な差があることを確認した ($p < 0.0001$)。比較に用いられた試行における $F_{\max 1}$ および $F_{\max 2}$ の値はそれぞれ K.F. (18.76 N/kgBw, 19.59 N/kgBw) , N.K. (16.14 N/kgBw, 23.98 N/kgBw) , M.H. (16.48 N/kgBw, 21.12 N/kgBw) , であった。K.F., N.K., M.H. の F2/F1 の値はそれぞれ, (1.04 , 1.49 , 1.28) であった。また、各選手の助走速度と飛距離はそれぞれ K.F. (23.72 m/s, 95 m) , N.K. (23.75 m/s, 93 m) , M.H. (23.31 m/s, 90 m) であった。

Fig. 15 は床反力、身体重心の上昇速度、変位そして関節角度の時系列変化をそれぞれ示す。横軸には各選手が助走路の終端に設置された光電管を通過した時点基準点 (0s) とした時間の経過を示す。

Fig. 15a は床反力波形と光電管の波形を示す。Fig. 15a の縦軸は発揮された床反力から選手の総重量を引き、さらに選手の総質量で除した相対値が表示されている。算出された値は加速度と同じ次元となる (m/s^2)。縦軸から引かれた 2 本の水平線は、選手が R1 を通過するときに受ける遠心力 (K.F. と N.K. : 6.60 , M.H. : 6.40 N/kgBw) を示す。R1 を含む助走路の曲線区間において、この水平線よりも高いレベルで床反力が発揮されていれば、身体重心が助走路に対して垂直上向きに加速度を与えられていることを示す。K.F. は R1 を含む $10 \sim 6$ m の区間において、算出された遠心力よりも大きい床反力を発揮した。一方で M.H. と N.K. は遠心力の値とほぼ同等か、やや小さい床反力を発揮した。その後、K.F. は前半とほぼ同じ値の床反力を助走路の終端まで持続的に発揮した。M.H. は約 -0.30 s までは N.K. とほぼ同じ値の床反力を発揮し、その後約 -0.15 s まで床反力を増大させ、その後助走路の終端

までほぼ同じ値の床反力を発揮していた。N.K.の床反力の値は約 -0.20 s までは低かったが、 -0.20 s を過ぎてから助走路の終端まで床反力を増大させていた。

Fig. 15b は、床反力を積分して得られた身体重心の上昇速度の変化を示す。積分開始時点における重心の上昇速度を 0 m/s と仮定して速度変化を示した。積分値の算出には、前半部分で受ける遠心力の影響を考慮に入れた (Fig. 8 参照)。約 -0.25 s 付近で速度が急激に上昇するが、これは助走路が曲線 (R1) から直線へ移行する時点を示している。K.F.が R1 通過中から大きい床反力を発揮して、身体重心を加速しているのに比べて M.H.と N.K.はわずかながら減速傾向にあった。その後、助走路の終端付近で3名ともほぼ同レベルの上昇速度に達しており、K.F., N.K., M.H.の V_{\max} はそれぞれ、 2.30 m/s, 2.36 m/s, 2.37 m/s であった。

Fig. 15c は Fig. 15b の上昇速度を積分して得られた重心変位を示すグラフである。なお、積分開始時点における重心位置を初期値 (0 m) とした。図中の記号 (Δ) は各選手の身体重心が最下点 (DCG_{\min}) を示した時点 ($T1$) を示す。K.F., N.K., M.H.の DCG_{\min} はそれぞれ、 -0.00 m, -0.02 m, -0.02 m であった。N.K.と M.H.の DCG_{\min} は同じであったが K.F.は2名よりも高い値を示した。K.F., N.K., M.H.の $T1$ はそれぞれ、 -0.33 s, -0.20 s, -0.24 s であった。これは F2/F1 の高い選手ほど $T1$ が助走路の終端に近かったことを示している。K.F., N.K., M.H.の DCG_{0m} はそれぞれ、 0.30 m, 0.18 m, 0.25 m であり、F2/F1 の低い選手ほど高い値を示した。

Fig. 15d は股関節角度 (Hip) および膝関節角度 (Knee) の変化を示す。本研究では、助走路の終端から約 6 m 上方までの範囲を撮影したため、各関節角度のプロットは約 -0.30 s 付近から開始している。Hip については、約 -0.30 ~ -0.10 s の間で K.F.は他の2名に比べて高い値であった。N.K.は約 -0.30 s の時点で K.F.とほぼ同じ値であったが、約 -0.20 s 付近までわずかながら減少していた。その後 N.K.と M.H.は約 -0.20 s 以降に増加し始め、N.K.が M.H.よりやや高い値を保ちながら、2名と

もほぼ同様な角度変化を見せた。K.F.も約-0.20 s以降から角度の増大が見られたが、M.H.やN.K.に比べると角度の増大は緩やかであった。助走路の終端における Hip の値は N.K.と M.H.がほぼ同じ値 (94.3° , 91.3°) であったのに比べて、K.F.は低い値を示した (77.1°)。Knee については、M.H.と N.K.は約-0.30~-0.20 s までわずかに減少していた。3名とも約-0.05 s 付近から急激な角度の増大が見られ、助走路の終端における K.F., N.K., M.H.の Knee の値には大きな差が見られなかった (118.1° , 124.0° , 121.1°)。

3.3.6 床反力発揮様式と踏み切り姿勢との関係

踏み切り局面終了時の選手の姿勢を分析するため、助走路の終端に設置した光電管を選手が通過した時点の膝関節角度 (Knee-0m) および股関節角度 (Hip-0m) をそれぞれ求め、F2/F1 との相関関係を検討した。ここでは、12名の被検者による17試行の踏み切り動作および床反力のデータを個人内で平均化し、計12試行のデータとして解析を行った。

Fig. 16 は Knee-0m および Hip-0m と F2/F1 との散布図をそれぞれ示す。Fig. 16a に示されるように、Knee-0m と F2/F1 との間には有意な相関関係は見られなかった ($r=0.27$, N.S., $n=12$)。一方で、Fig. 16b に示されるように、Hip-0m と F2/F1 との間には有意な正の相関関係が見られた ($r=0.60$, $p < 0.05$, $n=12$)。

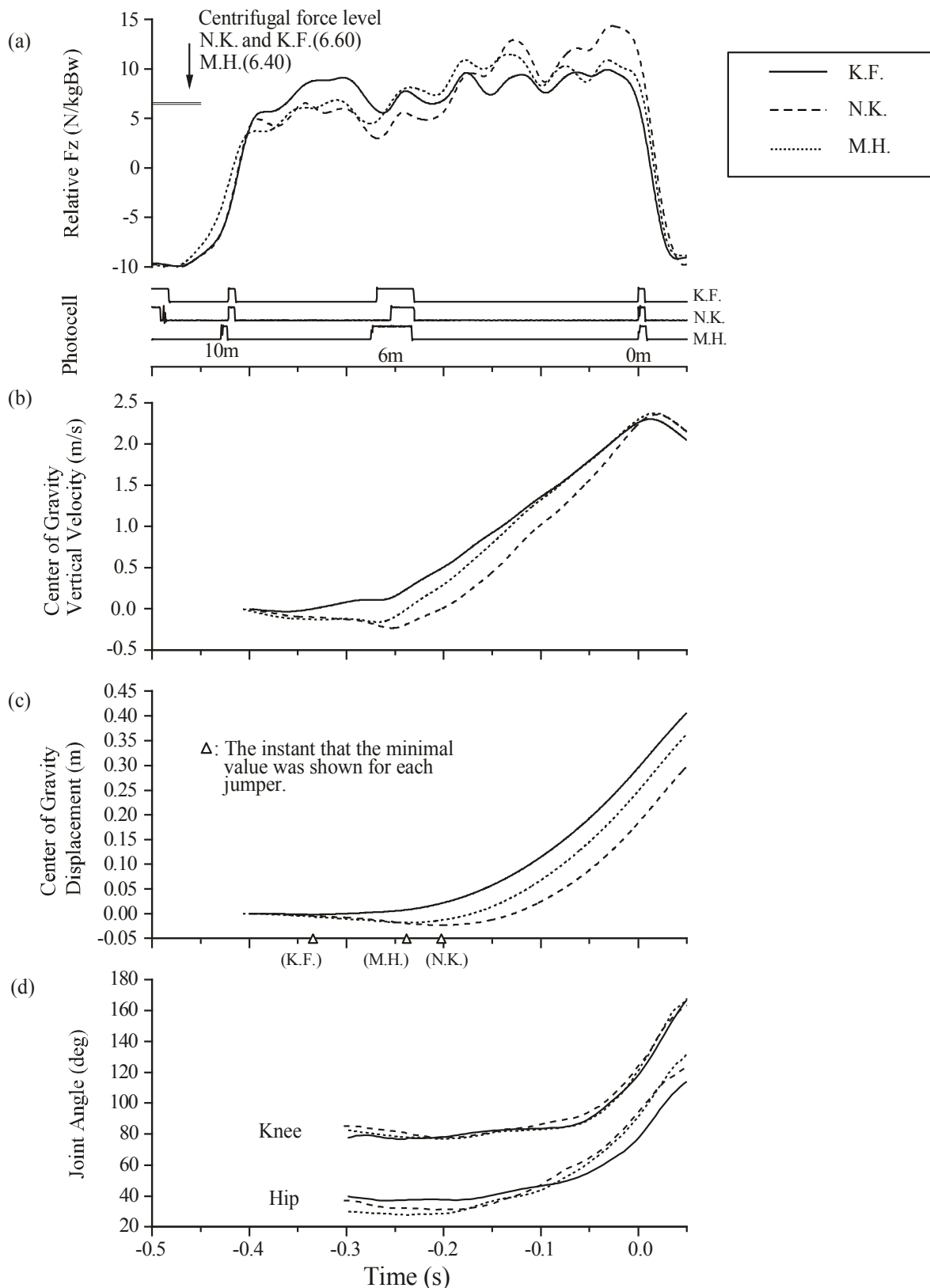


Figure 15 Ground reaction force (a), velocity (b), displacement (c) of the center of gravity and joint angular displacements of knee and hip (d) of three jumpers, K.F.(solid line), N.K.(broken line) and M.H.(dotted line). The time 0 sec means the point that the jumper passing the photocell arranged at the end of the take-off platform (0m).

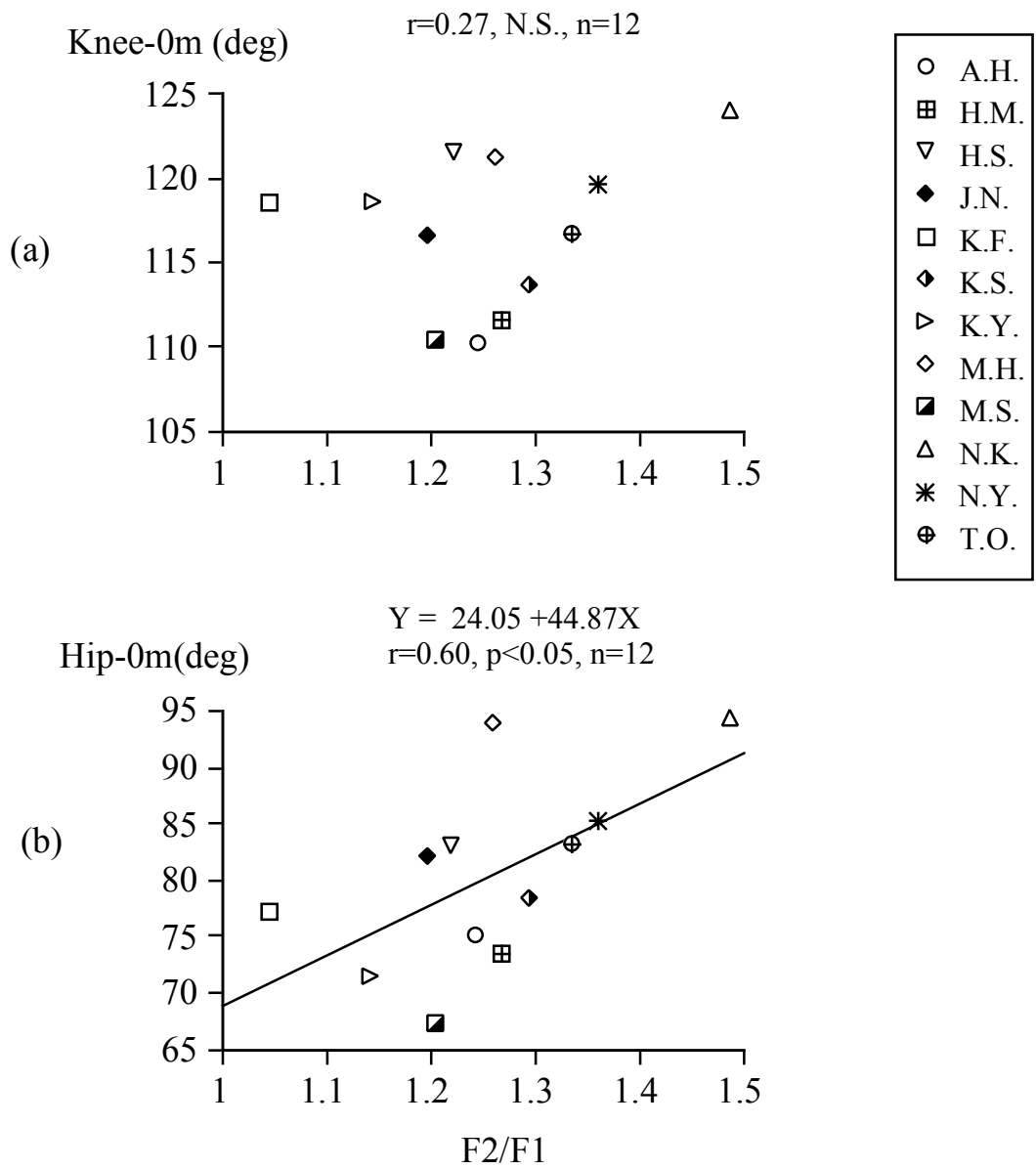


Figure 16 Relationship between the joint angles at the take off and quotient of Fmax2 and Fmax1 (F2/F1). Figure (a) refers to the knee joint angle (Knee-0m) and figure (b) refers to the the hip joint angle (Hip-0m) .

3.4 考察

前述のように、競技成績の優れた選手の間では、床反力変数（平均床反力、最大床反力、力積）には差が見られないものの、各選手の床反力発揮様式にはそれぞれ特徴があることが示唆された（第2章参照）。ここでは、一流の技術を有する選手を被検者として、床反力発揮様式の特徴を明らかにし、さらに床反力発揮様式が身体重心の上昇速度や変位にどのような影響を及ぼすのかを検討していく。

3.4.1 床反力波形パターンの再現性

Fig. 9 に示したように、測定された床反力には定期的な高周波成分が見られた。このような定期的な波形は、本研究と同様に助走路に床反力計を埋設した先行研究（Virmavirta ら 1989; Vaverka ら 1991）においても観察されている。しかし、圧力センサーを備えた中敷きをジャンプブーツに挿入し、足部の底屈に伴う圧力分布を測定した研究（Virmavirta ら 2001c）ではこのような定期的な波形は見られなかった。これらの結果から、この定期的な波は選手が踏み切り動作によって発揮した床反力に、スキー板の振動成分が加えられたものと推察される。本研究で用いたフィルタの特性では、これらの振動に由来すると思われる雑音成分を十分に除去することはできなかった。

そのような振動の成分を含んでいるものの、床反力波形は同一選手においてほぼ同じパターンを示した。すでに実験1（2.3.3）において、同一選手による2回の試技における床反力波形に再現性が見られたことを示したが、この実験2においても同様に、個人内における床反力波形の再現性が確認されたことから、熟練したジャンプ選手は踏み切り動作を再現する能力を有するものと考えられる。

3.4.2 床反力発揮様式

床反力計の前半部分の曲線路で発揮された床反力の最大値 ($F_{\max1}$) および後半部分の直線路で発揮された床反力の最大値 ($F_{\max2}$) との関係を見ると (Table 5), 全試行 ($n=95$) において $F_{\max2}$ が $F_{\max1}$ よりも高い値を示した (21.19 ± 1.25 N/kgBw VS 16.86 ± 0.80 N/kgBw)。この結果から、踏み切り動作の主動作は床反力計の後半の直線路において行われたものと考えられる。また $F_{\max1}$ と $F_{\max2}$ との間には有意な負の相関関係が見られた (Fig. 10)。この結果から、床反力計の前半の曲線路で比較的大きい床反力を発揮する選手 (例えば K.F.) は、床反力計の後半の直線路で比較的小さい床反力を発揮する傾向があり、逆に前半の曲線路で比較的小さい床反力を発揮する選手 (例えば N.K.) は、後半の直線路で比較的大きい床反力を発揮する傾向があるものと考えられる。

このような床反力発揮様式の特徴を捉える指標として、 $F_{\max2}$ を $F_{\max1}$ で除した値 ($F2/F1$) を試行毎に算出した。 $F2/F1$ が大きいということは、床反力計の前半部分の曲線路に比べて後半部分の直線路において、相対的に大きな床反力を発揮したことを意味する。この $F2/F1$ を用いて、踏み切り局面における床反力発揮様式が、身体重心の上昇速度および変位に及ぼす影響を以下で議論していく。

3.4.3 床反力発揮様式と力学的諸変量との関係

本研究では踏み切り動作によって発揮された床反力を積分することで、身体重心の上昇速度を求めた。身体重心の上昇速度の最大値 (V_{\max}) の平均値と標準偏差は 2.10 ± 0.19 m/s であった。この値は Baumann (1979) および Schwameder ら (1995) が、それぞれ映像解析から算出した身体重心の上昇速度 (2.33 ± 0.23 m/s および 2.07 ± 0.14 m/s) の範囲内であることから、踏み切り動作における身体重心の上昇速度としては、妥当な値が得られたものと考えられる。

12名の被検者の平均値を用いて、 V_{max} と床反力発揮様式の指標 (F_{max1} , F_{max2} , $F2/F1$)との相関関係を検討した結果、 V_{max} は F_{max1} , F_{max2} そして $F2/F1$ の3変数との間に有意な相関関係が見られなかった (Fig. 11)。さらに、 $F2/F1$ の大きさが異なる3名の被検者を比較した結果、 V_{max} の値はほぼ同じであった (Fig. 15b)。すなわち、床反力計の前半部分と後半部分のそれぞれで発揮された床反力の最大値および床反力発揮様式では、選手間の V_{max} の変動を説明し得なかった。これらの結果は、本実験に参加した一流選手の間では、床反力の発揮様式は決まったパターンに集約されるわけではなく、選手それぞれが、床反力計の前半もしくは後半のどちらかで大きな力を発揮することによって同等の力積を発揮していたことを意味する。

ここで、床反力発揮様式が異なるK.F.とN.K.の力積獲得の方法を詳細に検討するため、床反力 (Fig. 15a) と上昇速度の時系列変化 (Fig. 15b) を取り上げる。床反力計の前半部分の曲線路において、K.F.はN.K.よりも大きい床反力を発揮することによって、N.K.よりも大きい上昇速度を得ていた。しかし、後半の直線路において、K.F.はN.K.に比べて床反力が小さいため、上昇速度の増加がN.K.よりも小さくなり、助走路の終端ではN.K.とK.F.の上昇速度はほぼ同じとなった。つまり、K.F.は前半の曲線路で、N.K.は後半の直線路で大きい床反力を発揮することによって、最終的に得られた力積の大きさ、すなわち上昇速度が同じになったものと考えられる。

次に、身体重心変位について見てみると、踏み切り動作による身体重心の上昇に先立ち、一時的な身体重心の下降 (反動動作) が、すべての試行で観察された。その最小値、すなわち身体重心変位の最小値 (DCG_{min}) は、 $-0.04 \sim -0.00m$ の範囲であった。この DCG_{min} と発揮された床反力との関係を検討した結果、 F_{max2} および $F2/F1$ が大きいほど、 DCG_{min} が小さくなる (一時的な身体重心の下降が大きくなる) 傾向が見られた (Fig. 12)。また、 F_{max2} および $F2/F1$ が大きいほど、 DCG_{min} が発現するタイミングが遅くなる (ジャンプ台の終端に近くなる) 傾向が見られた (Fig. 13)。

これらの結果は、床反力計の後半部分の直線路において大きな床反力を発揮した選手ほど反動動作が大きく、さらに主動作の開始タイミングが遅くなることを示している。

このような反動動作は、実験室内でスキージャンプ選手に擬似ジャンプ動作（シミュレーションジャンプ）を行わせた際に見られることが報告されている（Hochmuth 1958; Komi ら 1997）。Hochmuth（1958）は反動動作を伴う踏み切り動作が、反動動作を伴わない踏み切り動作よりも、離床時の身体重心の上昇速度が大きくなることを示し、その原因は反動動作によって身体重心が下降した分だけ、加速軌道が延長されるためであると指摘している。

一方で、実際のスキージャンプにおける踏み切り動作は、実験室内におけるシミュレーションジャンプとは異なり、高速度で移動しているため、踏み切り動作に利用できる時間が 0.25～0.30s に制限されること（Komi ら 1974; Schwameder 1993; Schwameder ら 1995）を考慮する必要がある。このような制限の中で、反動動作を伴う踏み切り動作を行うとすれば、反動動作のない踏み切り動作に比べ、主動作に利用できる時間は非常に短いと考えられる。したがって、反動動作を伴う踏み切り動作を遂行し、かつ十分な上昇速度（力積）を得るためには、短時間で大きい床反力を発揮する能力が必要となる。以上の考察より、反動動作を用いた踏み切り技術は、直線路の後半で大きい床反力を短時間に発揮できる選手に適した技術であると考えられる。また、できるだけ助走路の終端近くまで身体重心を低く保つことにより、空気抵抗の少ない助走姿勢を長く維持でき、助走速度の減速を防ぐという利点があると推察される。

一方で、K.F.のように前半から比較的大きい床反力を持続的に発揮する選手は、N.K.のように大きい床反力を短時間に集中して発揮せずとも上昇速度を高めることができるといえよう。しかしながら、踏み切り動作の開始タイミングが早く (Fig. 13),

その後の踏み切り動作中の重心変位が大きくなる傾向があることから (Fig. 14) , 踏み切り動作中に空気抵抗が増大することが予想される。ここで, Fig. 15d に示した股関節の角度変化を見ると, 助走路の終端における K.F.の股関節角度 (Hip) は他の 2 名の選手よりも小さいことが分かる。すなわち, K.F.は早いタイミングで床反力発揮を開始する一方で, 股関節の伸展を抑制し, 空気抵抗の増大を防ぐ動作を行っていたものと推察される。

複数の被検者を対象とした場合には, 踏み切り動作における反動動作の大きさが, 飛距離に影響を与えなかったことが報告されているが (Troxler ら 1979; Virnavirta ら 1993b) , 本研究で得られた結果から考えて, 反動動作の利用の有無は高い技術水準を有する選手間においても, 選手の床反力の発揮様式に影響されることを考慮する必要がある。

3.4.4 床反力発揮様式と踏み切り姿勢との関係

F2/F1 と踏み切り局面終了時の姿勢 (膝関節角度と股関節角度) との相関関係について検討した結果, F2/F1 は膝関節角度との間には有意な相関関係が見られなかったが (Fig. 16a) , 股関節角度との間に有意な正の相関関係が見られた (Fig. 16b) 。これらの結果から, 助走路の終端付近で大きな床反力を発揮する際には, 股関節の大きな伸展を伴うものと考えられる。踏み切り局面終了時の姿勢は, その直後の初期飛行局面における飛行姿勢に影響を与えられられることから, 飛行中の空気力にも影響を与えるものと推測される。

スキージャンプ飛行姿勢の変化に伴う空気力の変化を風洞実験によって測定した研究 (谷ら 1971) によれば, 股関節角度の増大は, 抗力, 揚力および頭上げのピッチングモーメントの増大をもたらすことが示されている。このような抗力の増大は進行方向速度を減少させるために飛行距離を減ずる要因となる一方で, 揚力の増大

は重力による落下速度の増大を抑制し、飛行軌跡を高く維持し飛距離の増大に貢献するものと予想される。さらに、身体—スキー系の重心周りのピッチングモーメント（頭上げ方向を正とする）が大きいことは、選手が素早く前傾姿勢に移行することを困難にするものと推察される。

以上の議論より、助走路の終端近くで大きな床反力を発揮するような選手は、股関節角度が大きくなる傾向があるため、その後の初期飛行局面において進行方向速度と前傾姿勢への移行に不利益が生ずる一方で、飛行軌跡が高くなる利益も得られる可能性がある。実際のジャンプの際に、踏み切り局面終了時の股関節角度が初期飛行局面にどのような影響を与えるのかについては、第4章で改めて考察する。

3.5 小括

本章では、優れた技術を有すると考えられる一流スキージャンプ選手群を対象に、全長 10m の床反力計を用いて、個々の選手が持つ床反力発揮様式を明らかにし、床反力発揮様式の違いが踏み切り動作に関連する力学量（重心の上昇速度、重心位置の変位、踏み切り動作のタイミング）にどのような影響を与えているのか明らかにすることを目的とした。以下にその結果をまとめる。

床反力計の前半 4m 部分で大きな床反力を発揮した選手は、後半 6m 部分における床反力が小さく、前半部分で小さな床反力を発揮した選手は後半部分における床反力が大きいという傾向が見られた。このように選手間で床反力発揮様式は異なるものの、身体重心の上昇速度はこれらの床反力発揮様式では説明できなかった。この結果から、前半部分の曲線路から比較的大きな床反力を持続的に発揮する方法によっても、助走路の終端付近で大きな床反力を瞬発的に発揮する方法と同等の上昇速度を得ることができるものと考えられる。

身体重心変位については、後半部分で大きな床反力を発揮した選手ほど、重心高

の一時的な下降量が大きかったことから、反動動作を有効に利用していたものと考えられる。加えて、これらの選手は踏み切り動作の開始が遅れる傾向が見られたことから、空気抵抗の少ない助走姿勢を長く維持していたものと推察される。一方で、床反力計の前半部分から大きな床反力を発揮した選手ほど、踏み切り動作の開始が早く、空気抵抗を受けやすいものと考えられる。しかし、これらの選手は踏み切り局面終了時の股関節角度を小さくすることで空気抵抗の増大を防ぐための動作を行っていたものと推察される。

また、床反力計の後半部分で大きな床反力を発揮した選手ほど、踏み切り局面終了時の股関節角度が大きくなる傾向が見られた。飛行局面においては股関節角度の大きさは、飛行速度に影響を及ぼす抗力と揚力、また前傾姿勢への移行に影響を及ぼすピッチングモーメントなどの空気力学的な要素に影響を及ぼすことが知られている(谷ら 1971)。そのために、実際の踏み切り動作に伴う股関節伸展の大きさが、その後の飛行局面における水平および鉛直方向速度、さらに前傾姿勢への移行にどの程度影響を及ぼすのか検討する必要があると考えられる。

第4章では上記の課題を検討するため、踏み切り局面終了時の股関節角度がその後の初期飛行局面における飛行速度、飛行経路にどのような影響を与えているのかを、実際の飛行局面の映像分析を通して検討する。

4 踏み切り時の股関節角度の大きさが初期飛行局面に及ぼす影響（実験3）

4.1 目的

第3章に示したように、床反力計の後半部分の直線路において相対的に大きな床反力を発揮した選手ほど、踏み切り局面終了時の股関節角度（Hip-0m）が大きい、という傾向が見られた（3.4.4 参照）。本章では、撮影された飛行姿勢の映像資料を基に、踏み切り局面終了時の股関節角度の大きさの違いが、初期飛行局面（0～5 m）における姿勢制御、飛行速度および飛行経路にどのような影響を与えるのか明らかにすることを目的とした。

4.2 方法

本章では初期飛行局面における選手の側面映像を用いて2次元映像解析を行った。映像資料には、第3章の実験2において高速度ビデオカメラを用いて撮影したものをを用いた。以下に詳細を記す。

4.2.1 被検者

第3章の実験2と同じ被検者（12名）を分析対象とした（3.2.1, Table 4 参照）。踏み切り局面終了時（0 m）の股関節角度の大きさ ϵ_{0m} （角度の定義は4.2.3に後述）が、初期飛行局面に及ぼす影響を検討するため、12名の選手を ϵ_{0m} の大きい群（Hip_Large 群：n=6）と、小さい群（Hip_Small 群：n=6）の2群に分類した。Hip_Large 群と Hip_Small 群の ϵ_{0m} の平均値と標準偏差はそれぞれ $126.0 \pm 4.8^\circ$ および $113.7 \pm 6.0^\circ$ であり、対応のない t 検定の結果、2群の平均値の間には有意な差が見られた（ $p < 0.001$ ）。また、5 m 飛行するのに要した時間の平均値と標準偏差

はそれぞれ、Hip_Large 群 : 0.223 ± 0.002 s および Hip_Small 群 : 0.221 ± 0.003 s であり、2 群の間に有意な差は認められなかった。なお、形態的な特徴について、Hip_Large 群と Hip_Small 群の身長 の 平均値と標準偏差はそれぞれ Hip_Large 群 : 173.3 ± 5.8 cm および Hip_Small 群 168.8 ± 3.4 cm であり、2 群の間に有意な差は認められなかった。また、装備を含めた総質量の平均値と標準偏差はそれぞれ、Hip_Large 群 : 72.5 ± 5.6 kg および Hip_Small 群 : 70.5 ± 1.4 kg であり、2 群の間に有意な差は認められなかった。

4.2.2 測定手順

高速度ビデオカメラ (Photron 社製, FASTCAM-Rabbit) を、カメラの光軸が助走路の進行方向に対して直交するように設置した。カメラは助走路の終端とほぼ同じ高さで、助走路から約 10 m 離れた位置に設置した。カメラを固定した状態で、選手の右側面の映像を撮影した (240 fps)。撮影範囲は、助走路の終端より手前約 7 m からジャンプ台を飛び出した後約 5 m までであった。選手が最初の光電管 (12 m) を通過した際の光電管信号をビデオ記録開始のトリガーとすることで、床反力資料と映像資料とを同期した。12 名の選手が 1~3 回のジャンプを行い、合計 17 試行の踏み切り動作の撮影を行った。本実験では、データを個人内で平均し、計 12 試行のデータとして解析を行った。

4.2.3 映像の解析

映像解析には映像解析ソフトウェア (ベルテックジャパン社製, WinAnalyze Ver. 1.4) を使用した。デジタイズによって得られた 2 次元座標値に対して、遮断周波数 6 Hz の特性を持つ 2 次のバターワース型ローパスフィルタをデータの両端から用いることで高周波ノイズを除去した (Winter 1990)。

選手の矢状面（右側面）における身体部位の2次元平面座標を求めた。試技終了後に縦横2 mの正方形の較正用フレームを助走路の中央に設置し、水平および鉛直方向の較正を行った。較正点より手前500 mmの遠近誤差は水平方向で33.42 mm（1.7%）、鉛直方向で23.59 mm（1.2%）であった。

空中における座標系の設定に際し、身体－スキー系の合成重心の描く飛行経路は、横風その他の影響がないとすれば、1つの鉛直面の中にある。この鉛直面を（X, Y）平面とし、座標系を設定した（Fig. 17 参照）。座標系の原点は助走路の終端とし、X軸を水平に前向きに、Y軸を鉛直上向きに設定した。

次に肩関節中点、大転子、膝関節中点、足関節外踝、つま先およびスキーの前端、スキーの後端の計7点のデジタイズを行った。デジタイズされた座標から5セグメント剛体リングモデル（セグメント1：頭部、上肢および体幹部、セグメント2：大腿、セグメント3：下腿、セグメント4：足部、セグメント5：スキー）を作成した。

この身体－スキー系の合成重心を算出するにあたり、身体各セグメントの質量中心点および質量比にはWinter（1990）の資料を使用し、2本のスキーの質量（約10 kg）は足部の質量に加えた。なお、合成重心算出には、デジタイズされていない左側面の座標を右側面と同じ座標であると仮定した。このモデルから下記の変数を算出した。

- 1) V_x : 身体－スキー系の合成重心の水平方向速度 (m/s)
- 2) V_y : 身体－スキー系の合成重心の鉛直方向速度 (m/s)
- 3) β : 身体－スキー系の合成重心の速度ベクトルと水平線とのなす角度 (deg)

(以下の③式で算出し、常に負の値をとる)

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad \text{③}$$

- 4) DCG_y : 身体－スキー系の合成重心の Y 軸上の変位 (m)
- 5) ε : 股関節角度 (deg)
- 6) θ : 下肢とスキーとのなす角度 (deg)
- 7) γ : スキーと水平線とのなす角度 (deg) *
- 8) α : 迎え角, スキーと β とのなす角度 (deg) *
- 9) κ : 体幹と水平線とのなす角度 (deg) *
- 10) τ : 下肢と水平線とのなす角度 (deg) *

(*角度は反時計回りを正として算出)

また, 上記の 9) および 10) の角度について, 角速度をそれぞれ算出した (κ' および τ')。さらに, 5m 地点の角度と 0 m 地点の角度との差をそれぞれ $\Delta \kappa$ および $\Delta \tau$ として算出した。すなわち, $\Delta \kappa$ および $\Delta \tau$ はジャンプ台を飛び出してから 5 m 飛行するまでの角度変化量 (増加量または減少量) を意味する。なお, 本章では先行研究による風洞実験の結果 (谷ら 1951; 谷ら 1971) を利用するため, これらの先行研究に倣い股関節角度 ε を肩－腰－踝の 3 点によって定義した。

12 名の被検者による 17 試行のデータを個人内で平均し, 計 12 試行のデータとして解析を行った。変数の比較に際して, 選手の右踝の水平方向の移動距離を基準点とした。すなわち, 選手の右踝が助走路の終端を通過した時点を基準点 (0 m) とし, その後 5 m まで, 1 m 毎に変数を比較した。

なお, 映像解析から得られた座標を 2 回微分することによって得られる加速度を算出することで, より直接的に揚力と抗力を求める方法がある (平井ら 2007; Murakami ら 2008)。しかしながら, 高解像度 (1024×512 pixels) の高速度ビデオ映像を用いて, デジタイズによる入力誤差を最小限にしても, 2 回微分操作により

高周波ノイズが増幅するため、実際には空気力推定が困難であることが報告されている（平井ら 2007; Murakami ら 2008）。本研究においても、2回微分による空気力の推定を試みたが、高周波ノイズの影響が大きく、抗力が負の値をとるなど理論的には考えられないような空気力の値が得られた。これは、本研究で用いた映像の解像度が、前述の平井ら（2007）に比べ低かった（640×480 pixels）ことに起因するものと推察される。そこで、本研究では直接的に抗力と揚力を求める代わりに、速度の変化量を空気力の作用として捉えることとした。

4.2.4 統計処理

画像分析で求めた角度および角速度の平均値を Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で比較するために、対応のない t 検定を用いた。なお、F 検定によって 2 群の分散が等しくないと判断された場合には、ノンパラメトリックテスト（Mann-Whitney の U-test）を用いた。また踏み切り局面終了時の股関節角度（ ε_{0m} ）と、身体姿勢の角度変化量（ $\Delta \kappa$ および $\Delta \tau$ ）との間の相関係数を求めた。

統計ソフトウェアには Statview5.0（SAS Institute Inc.）を使用した。すべての統計処理において危険率 5% 水準を統計学的有意とした。

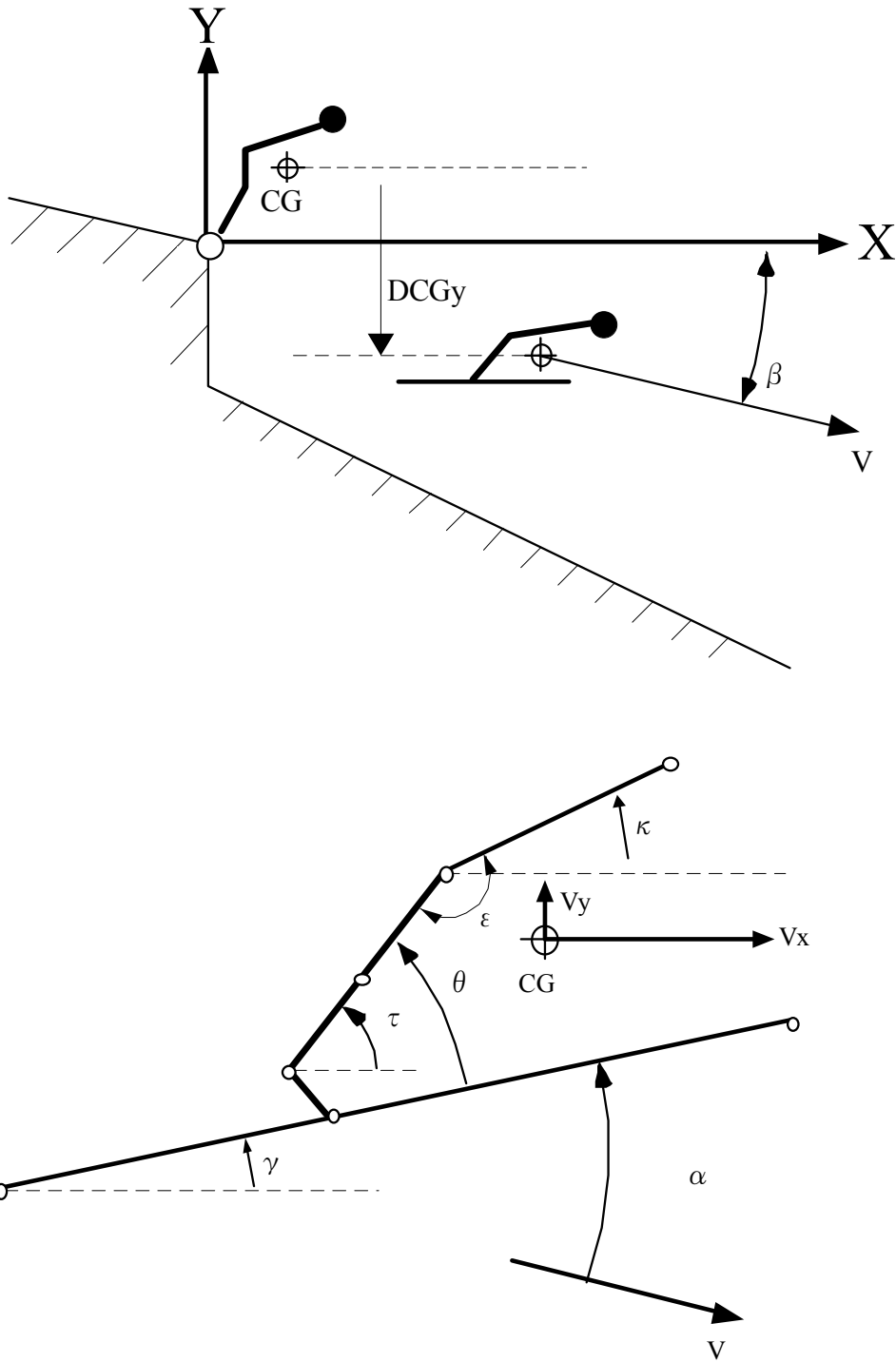


Figure 17 The coordinate system, definition of the angles and velocity during flight. The origin of the X - Y coordinate system is fixed on the edge of a jumping platform. Positions of the jumper and skis are defined as angles (α , β , γ , ϵ , θ , κ and τ). The velocity of the jumper (V) is divided into horizontal (V_x) and vertical (V_y) components. DCG_y means displacement of the center of gravity (CG) of the jumper.

4.3 結果

本節では、まず踏み切り局面終了時の股関節角度の大きさの違いが、初期飛行局面（0 m～5 m）における初期飛行局面における姿勢制御にどのような影響をもたらすのか検討する。次にそのような姿勢制御の違いが、飛行速度と飛行経路にどのような影響を及ぼすのか検討する。

4.3.1 踏み切り時の股関節角度の大きさが初期飛行局面の姿勢制御に及ぼす影響

4.3.1.a 身体関節角度およびスキーの角度について

ここでは、助走路を飛び出した後の初期飛行局面（0 m～5 m）における姿勢変化を検討していく。まず12名の選手を、踏み切り局面終了時の股関節角度（ ε_{0m} ）が大きいグループ（Hip_Large 群, n=6）, と小さいグループ（Hip_Small 群, n=6）の2群に分類し、股関節角度（ ε ）, 下肢とスキーとのなす角度（ θ ）, 迎え角（ α ）, そしてスキーと水平線とのなす角度（ γ ）の計4角度を比較した。

Fig. 18の縦軸は上記の4角度の変化をそれぞれ示し、横軸は選手の移動距離を1 m間隔で示している。各地点において、Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で、角度の平均値を比較した。

まず、股関節角度（ ε ）の変化（Fig. 18a）を見ていく。 ε の値が大きいほど、股関節が伸展していたことを示す。2群とも、0 m地点から5 m地点までの間に ε は次第に増大していた。2群間で ε の平均値を比較した結果、ジャンプ台を飛び出した地点から2m地点まではHip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に大きい値を示した（0m地点： $126.0 \pm 4.8^\circ$ VS $113.7 \pm 6.0^\circ$, $p < 0.01$, 1m地点： $135.3 \pm 5.1^\circ$ VS $123.4 \pm 5.9^\circ$, $p < 0.01$, 2m地点： $142.1 \pm 4.8^\circ$ VS $134.4 \pm 5.6^\circ$, $p < 0.05$ ）。

また、その変化の様子について見てみると、2 m 地点から 5 m 地点までの間で、Hip_Large 群は Hip_Small 群に比べて ε の増加量は小さく、4 m 地点および 5 m 地点では Hip_Small 群と Hip_Large 群との間に ε の差は見られなくなった。

次に、下肢とスキーとのなす角度 (θ) の変化 (Fig. 18b) を見ていく。 θ の値が小さいほど、下肢とスキーとがよく引きつけられていたことを意味する。2 群とも θ はジャンプ台を飛び出してから 5m 地点まで次第に減少していた。2 群間で θ の平均値を比較した結果、0 m 地点において Hip_Large 群は Hip_Small 群よりも有意に小さい値を示した ($83.4 \pm 1.5^\circ$ VS $88.7 \pm 3.2^\circ$, $p < 0.01$)。その後 1m 地点から 5 m 地点までの間で、2 群間の θ には有意な差が見られなかった。

次に、迎え角 (α) の変化 (Fig. 18c) を見ていく。 α はスキーと合成重心の進行方向 (β) とのなす角度を意味する。 α の経過を見ると、0 m 地点から 1 m 地点まではわずかに減少していたが、1 m 地点から 5 m 地点まで増大していた。この経過はスキーと水平線のなす角度 (γ) の経過とよく類似していた。2 群間で α の平均値を比較した結果、1 m 地点および 3 m 地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に小さい値を示した (1m 地点 : $-6.4 \pm 1.4^\circ$ VS $-4.7 \pm 0.9^\circ$, $p < 0.05$, 3m 地点 : $-1.2 \pm 4.3^\circ$ VS $3.3 \pm 1.9^\circ$, $p < 0.05$)。

最後に、スキーと水平線とのなす角度 (γ) の変化 (Fig. 18d) を見ていく。ジャンプ台を飛び出した地点では、12 名の被検者の γ の平均値と標準偏差は $-9.1 \pm 0.8^\circ$ であった。これは助走路の傾斜 (-10.5°) とほぼ等しい。その後 γ は、0 m 地点から 1 m 地点まではわずかに減少していたが、1 m 地点から 5 m 地点までは増大し、5 m 地点でほぼ水平 ($-0.4 \pm 3.9^\circ$) となった。2 群間で γ の平均値を比較した結果、全ての地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群より小さい値を示したものの、2 群間の γ には統計学的に有意な差は見られなかった。

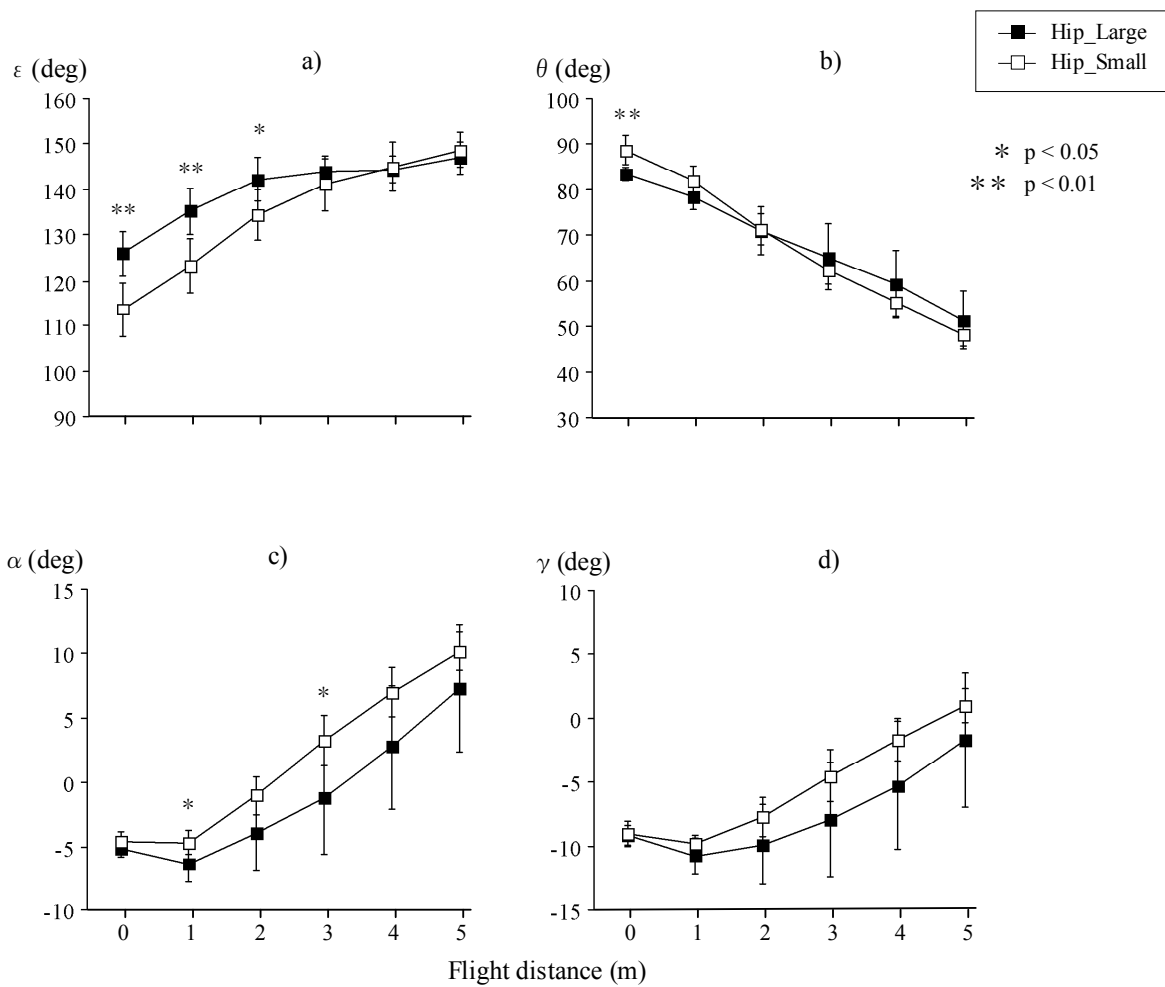


Figure 18 Changes in hip joint angle (ϵ), leg-ski angle (θ), attack angle (α) and ski angle (γ) with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker, while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker.

4.3.1.b 身体の前傾を示す角度について

次に、身体の前傾を示す2つの角度を、Hip_Large群とHip_Small群との間で比較した。ここで検討する下肢と水平線とのなす角度 (τ) は下肢の前傾を示し、体幹と水平線とのなす角度 (κ) は、体幹部分の前傾を示すものである。さらに、これらの2角度について、それぞれ角速度を算出し (τ' および κ')、同様に2群間で比較を行った。

Fig. 19a および Fig. 19c の縦軸は τ および κ の角度変化をそれぞれ示し、Fig. 19b および Fig. 19d の縦軸は τ' および κ' の角速度変化を示す。横軸は選手の水平方向の移動距離 (0 m~5 m) を 1 m 間隔で示している。各地点において、Hip_Large群とHip_Small群の2群間の角度および角速度の平均値を比較した。

まず下肢と水平線のなす角度 (τ) の変化 (Fig. 19a) を見ていく。 τ の値が小さいほど下肢が前傾していたことを示す。2群ともジャンプ台を飛び出してから5m地点までの間に τ は次第に減少しており、下肢の前傾が行われていたことが分かる。2群間で τ の平均値を比較した結果、0 m 地点および1 m 地点においてHip_Large群がHip_Small群よりも有意に小さい値を示した (0m 地点 : $74.3 \pm 0.9^\circ$ VS $79.6 \pm 2.7^\circ$, $p < 0.001$, 1m 地点 : $67.5 \pm 1.9^\circ$ VS $72.0 \pm 3.4^\circ$, $p < 0.05$)。その後2 m 地点から5 m 地点まで、2群間の τ に有意な差は見られなかった。

Fig. 19b は τ の角速度 (τ') の変化を示す。ジャンプ台を飛び出してから5m地点まで、2群の τ' の平均値は常に負の値を示していた。本研究において、 τ は頭上げ方向を正としているため、この結果は、頭下げ方向の角速度が得られていたことを示すものである。0m 地点と5 m 地点との間で τ' を比較すると、5m 地点では τ' の絶対値が減少していたことから、飛行中に角速度が減少していたことが分かる。特に、0 m 地点から3 m 地点までは、2群とも角速度が急激に減少していた。2群間で τ' の平均値を比較した結果、踏み切り局面終了時点では、2群の τ' は約-200

deg/s で、ほぼ同じ値を示したが、その後 1 m 地点から 4 m 地点までは Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも角速度が小さく、特に 1 m 地点および 2 m 地点では Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に角速度が小さかった (1m 地点: -157.6 ± 36.9 deg/s VS -199.8 ± 16.1 deg./s, $p < 0.05$, 2m 地点: -114.6 ± 37.9 deg/s VS -159.7 ± 30.8 deg/s, $p < 0.05$)。その後 5 m 地点では 2 群間の τ' の平均値に有意な差は見られなかった。

次に体幹と水平線とのなす角度 (κ) の変化 (Fig. 19c) を見ていく。 κ の値が小さいほど体幹部分が前傾していたことを示す。 κ の変化を見ると、Hip_Large 群は、ジャンプ台を飛び出してから 2 m 地点まで一時的に増大し、2 m 地点から 5 m 地点まで減少していた。Hip_Small 群については、ジャンプ台を飛び出してから 3 m 地点まで κ の値が一時的に増大し、3 m 地点から 5 m 地点までわずかに減少していた。

2 群間で κ の平均値を比較した結果、ジャンプ台を飛び出した地点から 2m 地点までは Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に大きい値を示した (0m 地点: $20.3 \pm 4.4^\circ$ VS $13.3 \pm 4.3^\circ$, $p < 0.05$, 1m 地点: $22.8 \pm 4.8^\circ$ VS $15.5 \pm 4.2^\circ$, $p < 0.05$, 2m: $23.3 \pm 4.1^\circ$ VS $18.0 \pm 3.8^\circ$, $p < 0.05$)。その後 3 m, 4 m, 5 m 地点では、2 群の κ に有意な差は見られなかった。

Fig. 19d は κ の角速度 (κ') の変化を示す。Hip_Large 群の κ' はジャンプ台を飛び出してから 1 m 地点までは正の値を示し、2 m 地点から 5 m 地点までは負の値を示した。一方で Hip_Small 群の κ' は、ジャンプ台を飛び出してから 3 m 地点までは正の値を示し、4 m 地点から 5 m 地点までは負の値を示した。すなわち、Hip_Large 群の方が Hip_Small 群よりも早い段階で体幹部分の前傾を開始していた。2 群間で κ' の平均値を比較した結果、2 m, 3 m, 4 m 地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に小さい値を示した (2m 地点: -17.9 ± 27.1 deg/s VS 43.8 ± 34.7 deg/s, $p < 0.01$, 3m 地点: -64.8 ± 39.9 deg/s VS 2.1 ± 31.7 deg/s, $p < 0.01$, 4m 地点: -58.4 ± 29.5 deg/s VS -15.3 ± 23.6 deg/s, $p < 0.05$)。

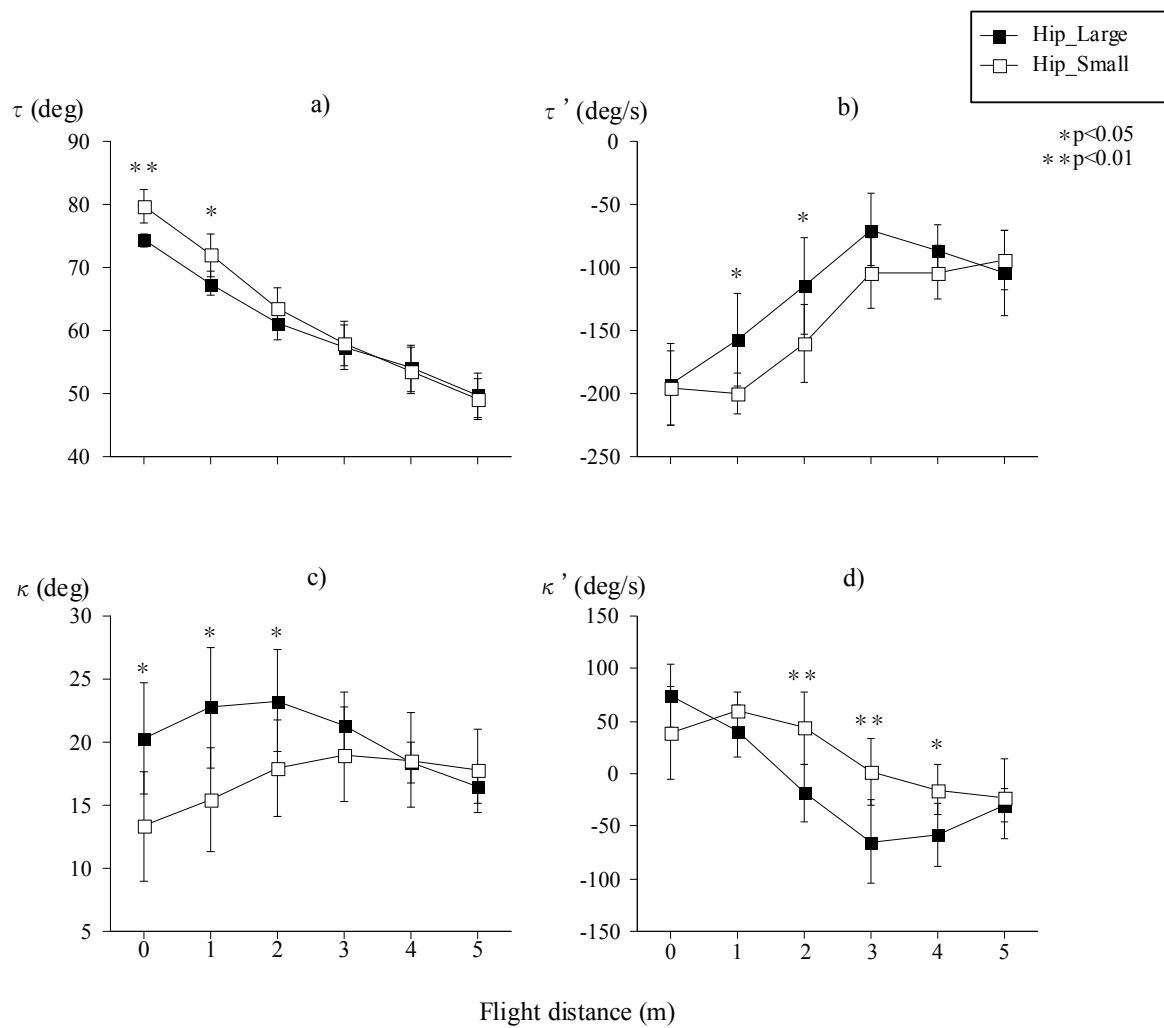


Figure 19 Changes in the forward leaning angles (a, c) and their angular velocities (b, d) with flight distance. The leg angle (τ) means the angle between the leg segment and the horizontal line, while the trunk angle (κ) means the angle between the trunk segment and the horizontal line. The angular velocity of the leg angle is shown as τ' and the angular velocity of the trunk angle is shown as κ' respectively. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip__Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip__Small) was expressed by the white square marker.

下肢と水平線とのなす角度 (τ) および体幹と水平線とのなす角度 (κ) の 2 角度について、5 m 地点の角度と 0 m 地点の角度との差をそれぞれ $\Delta \tau$ および $\Delta \kappa$ として算出した。すなわち、 $\Delta \tau$ および $\Delta \kappa$ はジャンプ台を飛び出してから 5m 飛行する間の角度変化量（増加または減少量）を意味する。ここでは、得られた角度変化量と、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) との相関関係を検討した (Fig. 20)。

Fig. 20a は、0 m 地点から 5 m 地点までの τ の角度変化量 ($\Delta \tau$) と、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) との関係を示す。12 名の選手の $\Delta \tau$ が負の値をとっていたことから、全ての選手について τ は飛行中に減少していたことが分かる。 ε_{0m} と $\Delta \tau$ との間には有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.85, p = 0.0001, n = 12$)。この結果は、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が大きいほど、その後 5 m 飛行する間の τ の角度減少量が小さいことを示している。

Fig. 20b は、0 m 地点から 5 m 地点までの κ の角度変化量 ($\Delta \kappa$) と、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) との関係を示す。 $\Delta \kappa$ の分布が正負にわたることから、5 m の飛行中に κ が増加した選手と、減少した選手がいたことが分かる。 ε_{0m} と $\Delta \kappa$ との間には有意な強い負の相関関係が見られた ($r = -0.91, p < 0.0001, n = 12$)。この結果は、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) が大きいほど、その後 5 m 飛行する間の κ の角度減少量が大きいことを示しており、特に ε_{0m} が大きい選手については、 $\Delta \kappa$ が負の値を示したことから、体幹部分の前傾を積極的に行っていたことが分かる。

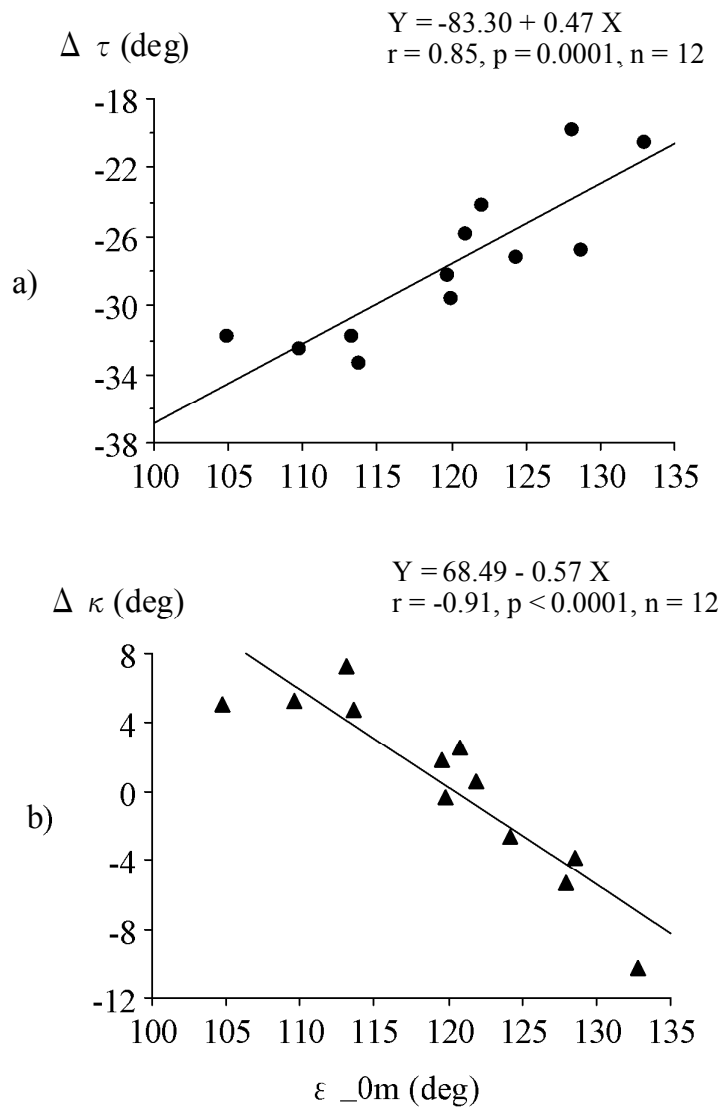


Figure 20 Relationship between the hip joint angle at the instant of take-off (ε_{0m}) and the quantitative changes (increase or decrease) in the forward leaning angles during the early flight phase (0m to 5m) in twelve subjects. The quantitative changes in the leg angle and the trunk angle are shown as ($\Delta \tau$) and ($\Delta \kappa$) respectively.

4.3.1.c ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が特に大きい選手について

ここでは、特殊なケースとして、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ϵ_{0m}) が最も大きかった選手 (M.H.) を Hip_Large 群から抽出した。Fig. 21 はスティックピクチャーによる身体姿勢の変化 (Fig. 21a) , および股関節角度 (ϵ) の変化 (Fig. 21b) を 0m 地点から 5m 地点まで 1 m 毎に示す。Fig. 21 は M.H.が行った 1 試行分のデータを示す。

すでに Fig. 18a に示したように、Hip_Small 群および Hip_Large 群は、ジャンプ台を飛び出してから 5 m 飛行する間に ϵ を漸増させていたが、M. H.は 2 m 地点から ϵ を減少させていた (Fig. 21b) 。M. H.は計 3 回の試行を行ったが、全ての試行において約 2 m 地点から ϵ を減少させていた。また、12 名の被検者の中でこのように ϵ を減少させていたのは M. H.のみであった。

Subject M.H.

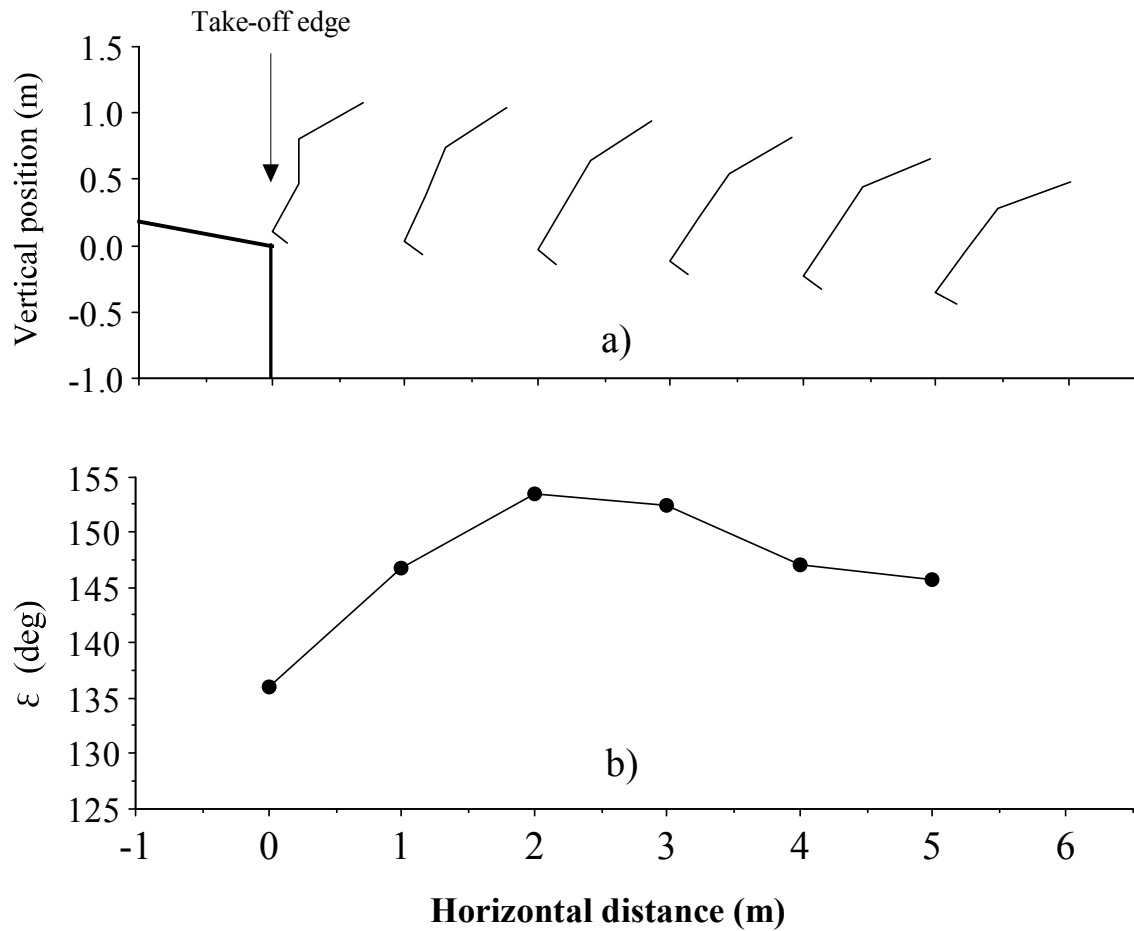


Figure 21 Changes in the posture and the hip joint angle (ϵ) with flight distance during early flight. Subject M. H. were selected from the group of “Hip_Large”. Subject M. H. showed the largest value of the hip joint angle between twelve subjects.

4.3.2 初期飛行局面における姿勢制御の違いが飛行速度および経路に及ぼす影響

初期飛行局面における選手とスキーの合成重心（以下合成重心と略）について、水平方向速度（ V_x ）および鉛直方向速度（ V_y ）の変化を Fig. 22a および Fig. 18c にそれぞれ示す。横軸は選手の水平方向の移動距離を 0～5 m まで 1 m 間隔で示している。

V_x は 2 群とも 0 m 地点から 5 m 地点までわずかに減少していた。0 m 地点から 5 m 地点までの各地点において、Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で V_x の平均値を比較した結果、4 m 地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群より有意に小さい値を示した（ 23.49 ± 0.27 m/s VS 23.84 ± 0.26 m/s, $p < 0.05$ ）。その他の地点では、有意ではないものの Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも小さい V_x を示した。また、ジャンプ台を飛び出した地点の V_x の値を基準値（0 m/s）として、飛行中の V_x の変化量（ ΔV_x ）を求めた結果、1m～5m までの各地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも小さな値を示したものの、有意な差は見られなかった（Fig. 22b）。

Fig. 22c は V_y の変化を示す。ジャンプ台を飛び出した地点（0 m）で、 V_y はすでに負の値を示した。その後 5 m 地点まで V_y は次第に減少していた。2 群間で V_y の平均値を比較した結果、1 m, 3 m, 4 m 地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に大きい値を示した（1m 地点： -1.88 ± 0.13 m/s VS -2.17 ± 0.25 m/s, $p < 0.05$, 3m 地点： -2.80 ± 0.19 m/s VS -3.26 ± 0.14 m/s, $p < 0.001$, 4m 地点： -3.30 ± 0.16 m/s VS -3.65 ± 0.14 m/s, $p < 0.01$ ）。その他の地点では、有意ではないものの Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも大きな V_y を示した。また、ジャンプ台を飛び出した地点の V_y の値を基準値（0 m/s）として、飛行中の V_y の変化量（ ΔV_y ）を求めた結果（Fig. 22d），3m 地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に大きい値を示した（ -1.14 ± 0.08 m/s VS -1.42 ± 0.21 m/s, $p < 0.05$ ）。

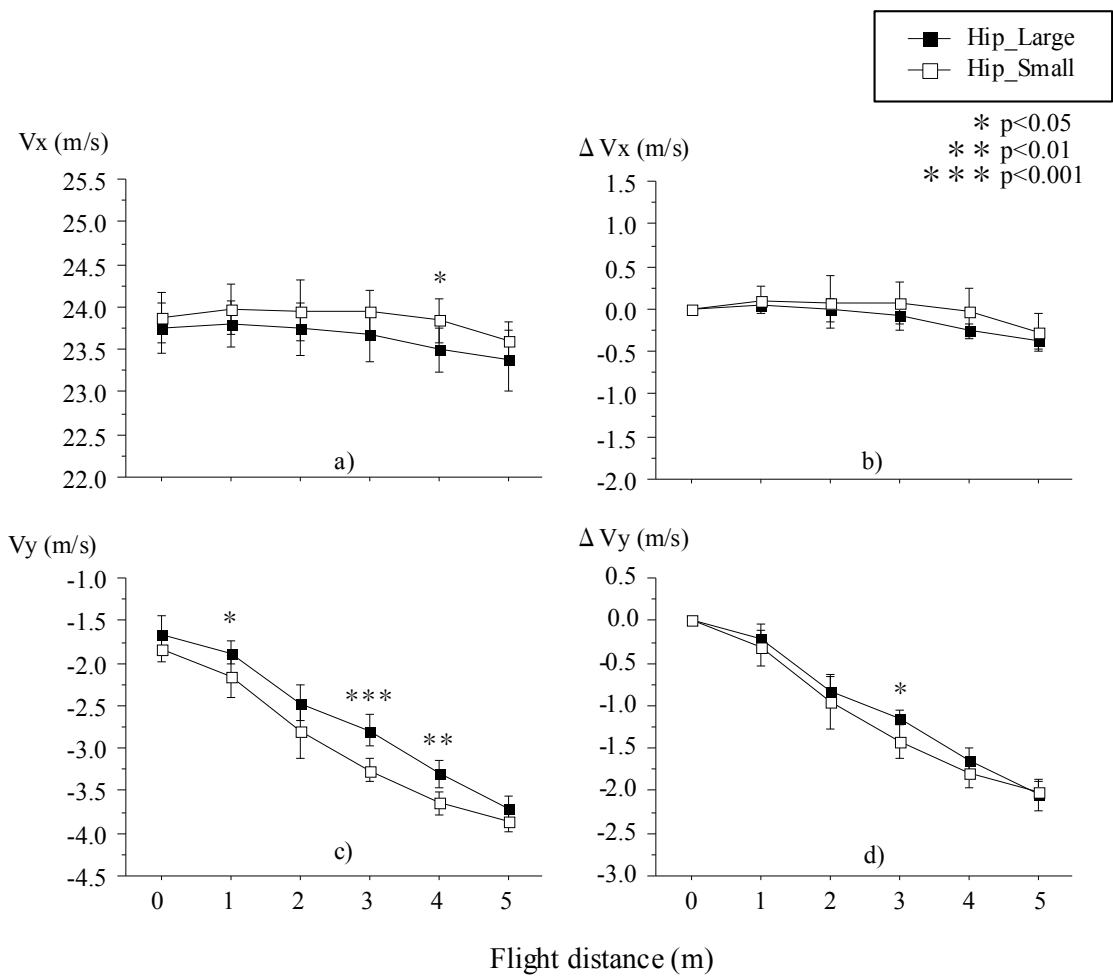


Figure 22 Horizontal (V_x) and vertical (V_y) velocities of the center of gravity (a, c), and the amount of change (b, d) in these velocities with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker.

Fig. 23 は合成重心の速度ベクトルと水平線のなす角度 (β) を示す。すなわち、合成重心の進行方向を意味している。 β は鉛直方向速度 (V_y) と水平方向速度 (V_x) の逆正接として求めた (③式)。ジャンプ台を飛び出した地点の β が負の値を示していることから、この地点ですでに合成重心の進行方向ベクトルは水平線よりも下向きであることが分かる。ジャンプ台を飛び出してから 5m 地点まで、 β は約 -4° から -9° まで次第に減少していた。2 群間で β の平均値を比較した結果、1 m, 3 m, 4 m の地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に大きい値を示した (1m 地点: $-4.5 \pm 0.3^\circ$ VS $-5.2 \pm 0.6^\circ$, $p < 0.05$, 3m 地点: $-6.7 \pm 0.4^\circ$ VS $-7.8 \pm 0.4^\circ$, $p < 0.001$, 4m 地点: $-8.0 \pm 0.4^\circ$ VS $-8.7 \pm 0.3^\circ$, $p < 0.01$)。

最後に、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) の大きさが、飛行経路に及ぼす影響を検討する。飛行経路の指標としては、合成重心の Y 軸上の変位 (DCGy) を用いた。DCGy は、ジャンプ台を飛び出した時の合成重心の Y 座標を初期値 (0 m) としている。ここでは Hip_Large 群と Hip_Small 群の DCGy について比較を行った。

Fig. 24 は合成重心の鉛直方向の変位 (DCGy) を示す。横軸は助走路の終端を 0m とした選手の水平方向の移動距離 (0~5 m) を示す。DCGy はジャンプ台を飛び出してから減少を続け、5m 地点では約 -0.6 m であった。2 群間で DCGy を比較した結果、3 m, 4 m, 5 m の地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に大きい値を示した (3m 地点: -0.29 ± 0.02 m VS -0.33 ± 0.03 m, $p < 0.05$, 4m 地点: -0.42 ± 0.03 m VS -0.48 ± 0.04 m, $p < 0.01$, 5m 地点: -0.58 ± 0.03 m VS -0.64 ± 0.04 m, $p < 0.01$)。すなわち、Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも高い飛行軌跡を獲得していた。

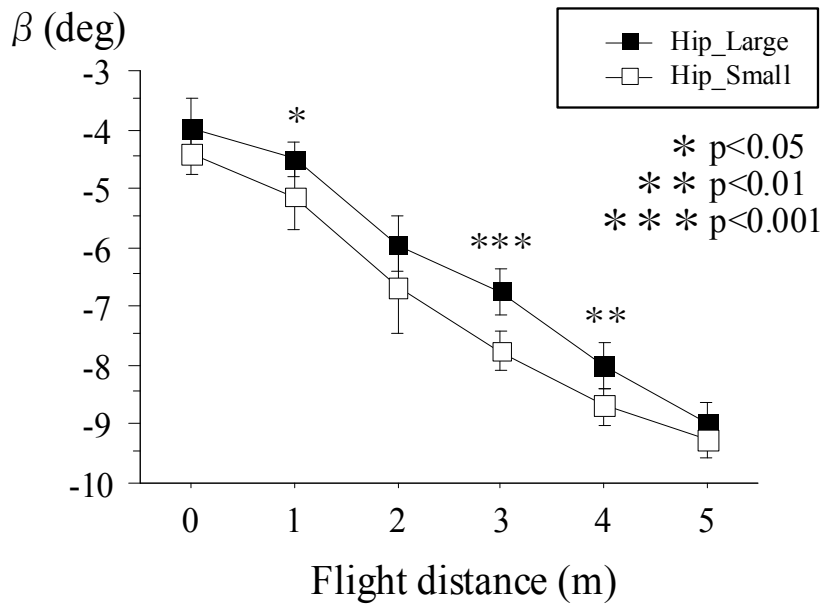


Figure 23 The direction of the flight path of the center of gravity with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off(Hip_Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker.

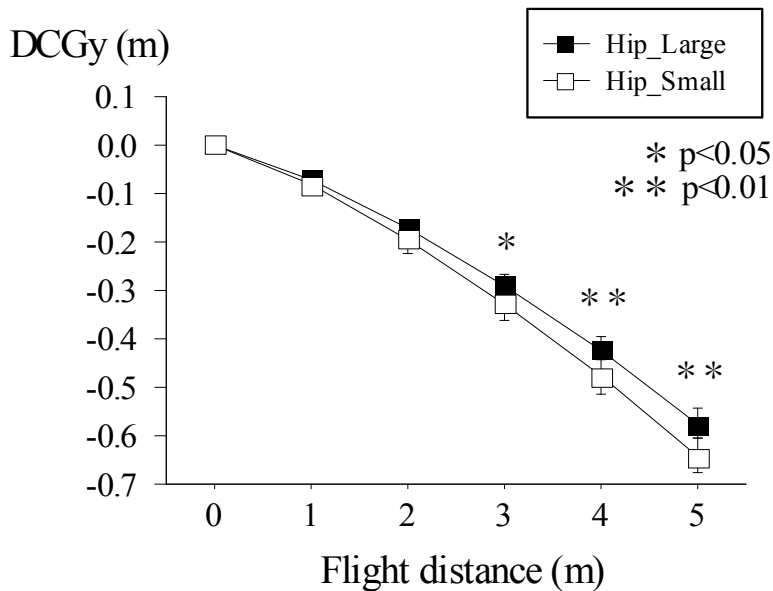


Figure 24 Displacement of center of gravity (DCGy) with flight distance. The subjects group with the large hip joint angle at the instant of take-off (Hip_Large) was expressed by the black square marker while the subjects group with the small hip joint angle (Hip_Small) was expressed by the white square marker.

4.4 考察

第3章において、床反力計の後半部分の直線路で大きな床反力を発揮した選手ほど、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度（Hip-0m）が大きくなる傾向があることを示した（3.4.4 参照）。これを受けて本節では、ジャンプ台を飛び出したときの股関節角度の大きさの違いが、その後の初期飛行局面における姿勢制御にどのような影響を与えているのか検討する。さらに、先行研究による風洞実験資料を用いることで、それらの姿勢制御が空気力学的にどのような意味を持つのか検討する。

最後に、これらの姿勢制御の違いが実際の飛行速度、飛行経路および前傾姿勢にどのような影響を及ぼすのか検討する。

4.4.1 初期飛行局面における姿勢制御と空気力との関係

ここでは、先行研究による空気力学的資料（谷ら 1951; 谷ら 1971）を用いて、飛行局面における姿勢変化が空気力（揚力、抗力およびピッチングモーメント）にどのような影響を及ぼすのか概観する。その上で、本研究で得られた初期飛行局面の姿勢変化について、その姿勢制御が空気力学的にどのような意味を持つのか考察する。

4.4.1.a 飛行局面における空気力について

飛行局面における選手の飛行姿勢を分析した研究によると、安定した飛行局面の姿勢は、股関節角度（ ε ） = 約 160° ，下肢とスキーとのなす角度（ θ ） = 約 20° ，迎え角（ α ） = 約 40° ，スキーと水平線とのなす角度（ γ ） = 約 0° と、報告されている（Schmölzer ら 2005）。実際には、ジャンプ台を飛び出した直後に選手がこのような姿勢をとることはなく、ジャンプ台を飛び出してから安定した飛行局面に到るまでには、0.4~0.8 s（距離にして15~20 m程度）の移行期間を要すること

が知られている(渡部 1984; 小早川ら 1985; Arndt ら 1995; Song ら 2004; Schmölzer ら 2005; Schwameder ら 2005; Virmavirta ら 2005)。すなわち、本研究の分析対象とした 0~5 m の区間はこの移行期間に該当するものと考えられる。

本研究で分析を行った 5m 地点における飛行姿勢について、股関節角度 (ε)、下肢とスキーとのなす角度 (θ)、迎え角 (α) そしてスキーと水平線とのなす角度 (γ) の値は、それぞれ $\varepsilon : 147.8 \pm 3.6^\circ$ 、 $\theta : 49.8 \pm 4.9^\circ$ 、 $\alpha : 8.7 \pm 3.8^\circ$ そして $\gamma : -0.4 \pm 3.9^\circ$ であった (いずれも $n=12$)。これらの値は、前述の Schmölzer ら (2005) が示した安定飛行局面の姿勢と比べて、 ε と α については小さく、 θ については大きく、 γ はほぼ同じであった。したがって 5m 以降については、 ε と α はさらに増大、 θ についてはさらに減少、そして γ についてはほとんど変化しないものと推測される。

ここで、飛行姿勢の変化が飛行中に選手に作用する空気力(揚力、抗力およびピッチングモーメント)にどのような影響を及ぼすのか検討するため、先行研究による風洞実験結果を参照する。これまでに、スキージャンプの飛行姿勢に関する風洞実験を行った研究は非常に多い (Straumann 1927; 谷ら 1951; Tani ら 1971; 谷ら 1971; 渡部 1981; Ward-Smith ら 1982; Watanabe 1983; 小早川ら 1985; 神ら 1992; 渡部 1992; 渡部ら 1992; Tavernier ら 1993; Watanabe ら 1993; 渡部ら 1993; 渡部ら 1994; Jin ら 1995; Müller ら 1996; 瀬尾ら 1999; 瀬尾ら 2000; Schmölzer ら 2002; Seo ら 2004a; Meile ら 2006)。しかしながら、これらの研究のほとんどは、安定した飛行局面における飛行姿勢を対象としている。すなわち、安定した飛行局面に比べ、小さな ε ($110 \sim 150^\circ$)、かつ大きな θ ($50 \sim 90^\circ$) を含んだ初期飛行局面の姿勢を対象とした風洞実験を行った研究は少ない。このような姿勢を含んだ風洞実験を行っているのは、1/5 スケール (0.35m) の人形模型を用いた谷ら (1951)、および実寸大 (1.73m) の人形模型を用いた谷ら (1971) の研究のみである。以下

に、これら2つの研究結果を示す。

谷ら(1951)は、上肢回転角： ϕ (ϕ の角度定義については5.2.1のFig. 30に後述)、股関節角度 (ε)、下肢とスキーとのなす角度 (θ)、および迎え角 (α)をそれぞれ、 $\phi : 30^\circ$ 、 $\varepsilon : 130 \sim 175^\circ$ 、 $\theta : 20 \sim 80^\circ$ 、および $\alpha : 0 \sim 30^\circ$ の範囲で組み合わせて風洞実験を行った (Fig. 25)。Fig. 25において、揚力および抗力はそれぞれ動圧で除し、揚力面積 (S_L) および抗力面積 (S_D) として示されている。ここでは、4.3.1で得られた初期飛行局面における飛行姿勢を参考に (Fig. 18)、各飛行姿勢の角度 (ε 、 θ 、 α) について、それぞれ ($130 \sim 145^\circ$ 、 $50 \sim 90^\circ$ 、 $0 \sim 15^\circ$) の範囲を参照する。

まず、揚力面積 (S_L) について見てみると (Fig. 25a)、 θ が大きいほど S_L が小さくなっていることが分かる。また、 α が大きいほど S_L が大きくなっている。 ε については、 ε が 130° と 145° との間で S_L に大きな変化が見られない。次に、抗力面積 (S_D) について見てみると (Fig. 25b)、 θ が大きいほど、 S_D が大きくなることが分かる。次に、 ε が 130° と 145° との条件を比較すると、 ε が大きいほど S_D が大きくなることが分かる。そして、 α が大きいほど S_D が大きくなることが分かる。

一方で、谷ら(1971)は ϕ 、 ε 、 θ および α の範囲をそれぞれ、 $\phi : 18^\circ$ および 165° 、 $\varepsilon : 140 \sim 170^\circ$ 、 $\theta : 15 \sim 40^\circ$ 、そして $\alpha : 0 \sim 30^\circ$ に設定した上で風洞実験を行った。その結果、 θ 、 ε および α が大きいほど、 S_D 、 S_L 、およびピッチングモーメントを動圧で除したピッチングモーメント容積 (Q_M) が大きくなることを示した。

これら2つの研究結果の間で、 θ が揚力面積 (S_L) に及ぼす影響について異なった結果が得られた点について、谷ら(1951)の実験結果 (Fig. 25a) からその原因を探る。Fig. 25aに示したとおり、 θ を増大していくと、 θ のある値で S_L は最大となり、それ以上 θ を増せば S_L はかえって減少している。このような S_L の減少は、航

空機の迎え角を増大させた場合にも見られることが知られている。航空力学では、この S_L の減少を失速と呼び、 S_L が最大となる時の迎え角の大きさを失速角と定義している（落合 1999）。さらに詳細に S_L の変化について見てみると、いずれの ε の条件においても、 α が小さくなるほど、失速が起こる θ の値は増大している。これは、 α が小さい場合は θ の増大によって身体に作用する S_L を大きくすることができるが、 α が大きい場合にはスキーが失速角に近付いており、この状態でさらに θ を大きくすると、身体の見え角 ($\theta + \alpha$) が失速角に達し、身体-スキー系全体の S_L が減少することを意味する（瀬尾ら 1999）。

以上の議論から、 θ を増大させると S_L が単調に増大した、という谷ら (1971) の結果は、 θ が比較的小さいため ($15 \sim 40^\circ$)、身体の見え角 ($\theta + \alpha$) が失速に至らなかったことが理由であると考えられる。

一方で、Fig. 25a に示した θ と S_L の失速との関係は、上肢を前方に挙上した姿勢 ($\phi = 30^\circ$) から得られたことに注意する必要がある。上肢の位置の違いが S_L に及ぼす影響について、谷ら (1971) は、 ϕ を 18° (上肢挙上位)、および 165° (上肢側位) の 2 条件に設定した上で S_L を比較した。その結果、上肢側位の方が上肢挙上位に比べて S_L が大きくなることを示した (Fig. 26)。さらに、 θ を 30° から 40° まで増大させたときの S_L の変化量を比較すると、 α が 0° では S_L はほぼ同様に増大しているが、 α が 5° および 10° の条件では、上肢挙上位の方が上肢側位よりも S_L の増加量が小さくなっていることが分かる。谷ら (1971) は、 S_L が失速に至るまで θ を増大していないが、前述の結果を外挿し、 S_L が失速する程度までさらに θ を大きくした場合を想定すると、 S_L の失速を引き起こす θ の値は、上肢側位の方が、上肢挙上位に比して大きくなるのではないかと推察される。ここで、本研究で対象とした被検者は、すべて上肢側位であったことを考慮すると、 S_L の失速を引き起こす θ の値は、Fig. 25a に示した値よりも大きくなる可能性がある。

このように、上肢体側位の場合は S_L がまだ失速に至らないと仮定すると、谷ら (1971) が示したように股関節角度 (ε) の増大によって、 S_L を増大することも可能であるものと推察される。ただし、揚力の失速が起こるかどうかを判断する ε および θ の大きさやその組み合わせ方について、姿勢から直接読み取ることは難しい。

ここまでの議論より、谷らの研究結果 (谷ら 1951; 谷ら 1971) を以下のようにまとめる。まず、抗力面積 S_D と揚力面積 S_L について、迎え角 (α) を増大すると S_D および S_L が増大する。股関節角度 (ε) を増大すると S_D が増大し、失速が起っていない条件では S_L も増大する。下肢とスキーとのなす角度 (θ) を増大すると、 S_D については単調に増大し、 S_L はある程度までは増大するが、それ以降は減少する。次に、ピッチングモーメント容積 Q_M に関しては、 ε 、 θ および α が増大すると Q_M が (頭上げ方向に) 増大する。

ただし、これらの研究における飛行姿勢が、初期飛行局面に十分対応していない点に注意する必要がある。すなわち、谷ら (1951) の研究は、 ε を 130° 以上に設定しているため、当該局面の ε としては大きい。一方で、谷ら (1971) の研究は、 ε を 140° 以上に設定し、 θ を $15\sim 40^\circ$ までしか用いていないことから、当該局面の ε としては大きく、同じく θ としては小さい。これらの注意点を踏まえた上で、本研究で得られた飛行姿勢の変化を空気力学的に検証する。

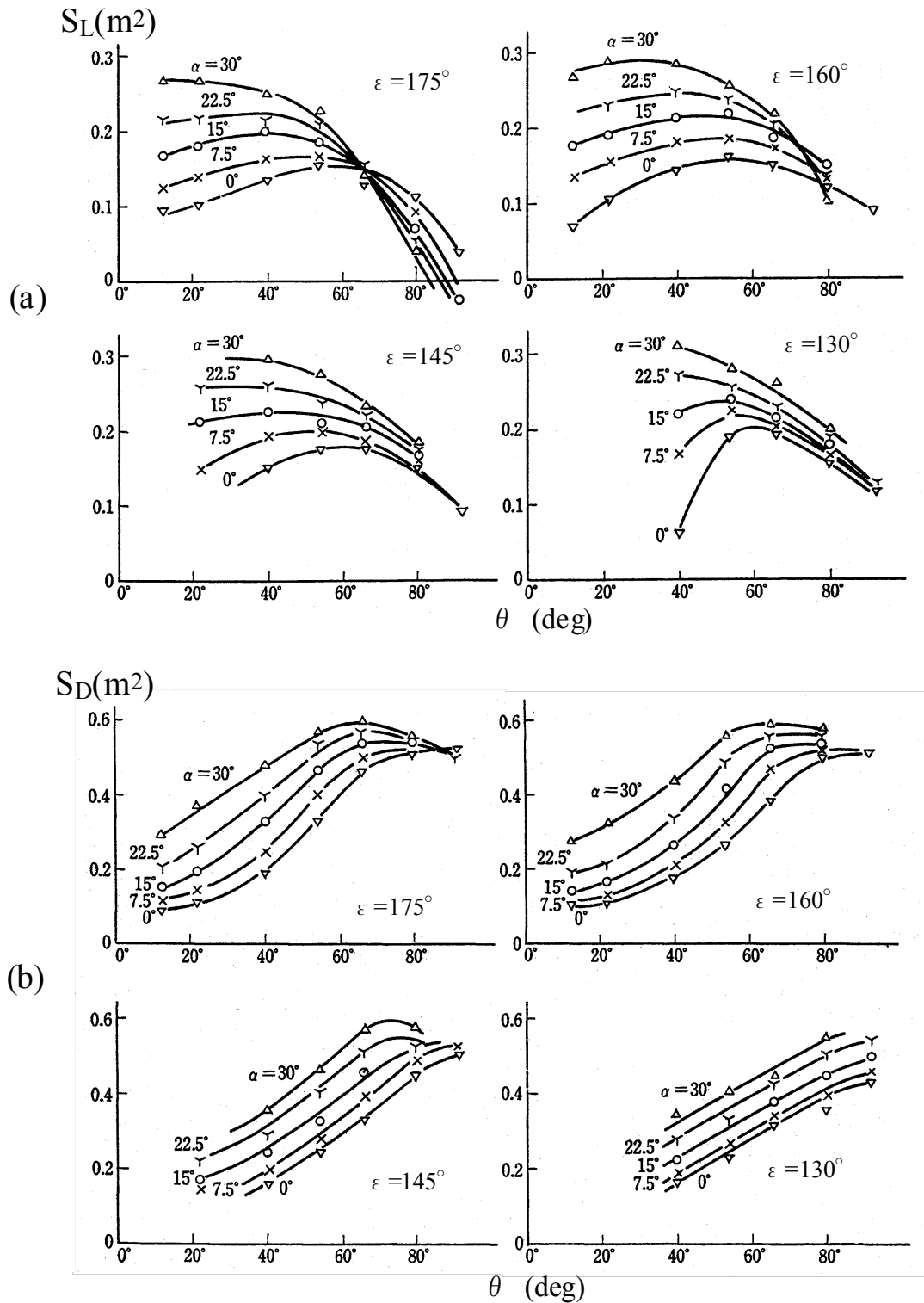


Figure 25 The effect of the attack angle (α), ski to leg angle (θ) and hip joint angle (ϵ) on the Lift area: S_L (a) and the drag area: S_D (b). (Figure adapted from (Tani et al. 1951)).

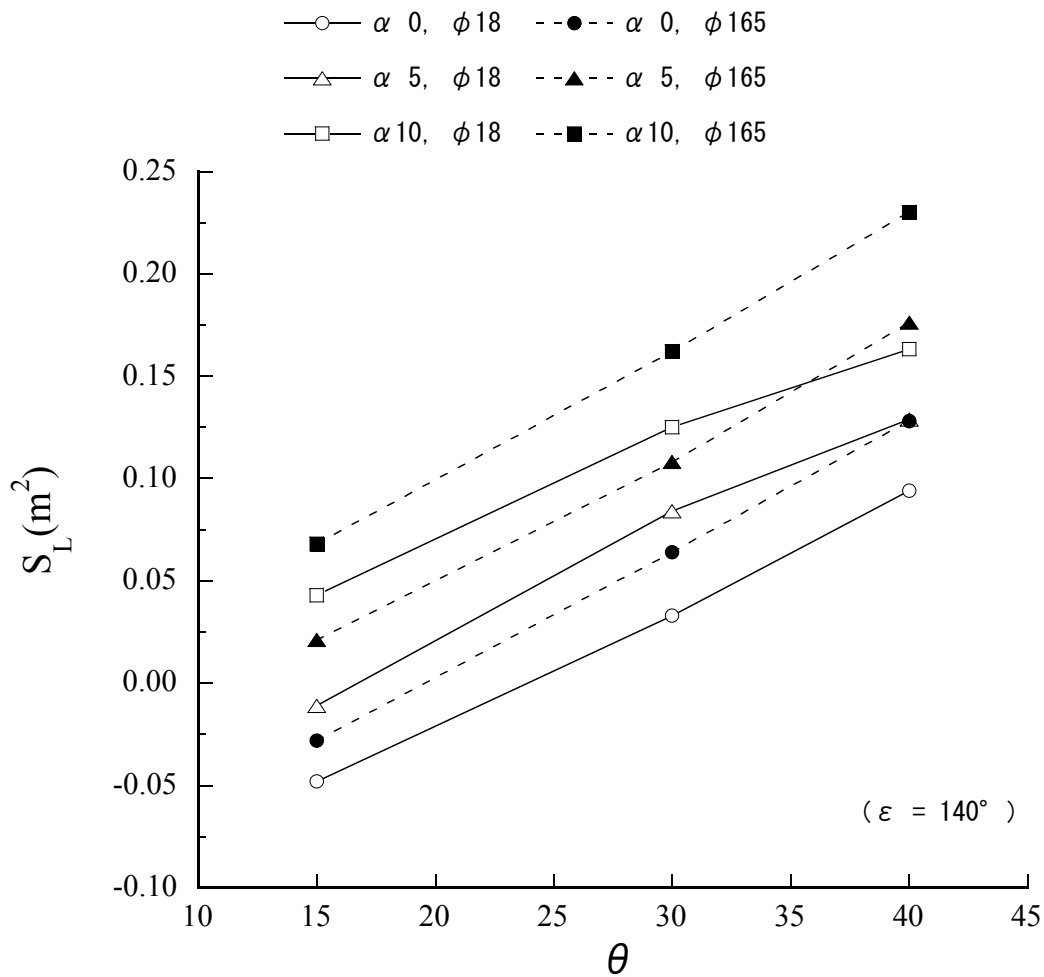


Figure 26 The effect of the arm position (ϕ) on the lift area (S_L) with increasing the ski to leg angle (θ). The markers painted white and black mean the arms raised up forward position ($\phi = 18^\circ$) and the arms fitted to the trunk position ($\phi = 165^\circ$) respectively. Hip joint angle (ϵ) was fixed at 140° . Attack angle (α) was varied at (0, 5 and 10°). (Data adapted from (Tani et al. 1971)).

4.4.1.b 初期飛行局面における姿勢制御の違いによる空気力推定

前述の先行研究の風洞実験結果をふまえて、改めて本研究で得られた股関節角度 (ε)、下肢とスキーとのなす角度 (θ) および迎え角 (α) の変化による空気力変化を推定することを試みる。ただし、上記の風洞実験結果(谷ら 1951; 谷ら 1971) は、これらの角度の内の1つが単独で変化した場合の空気力の変化を示しており、「他の角度の大きさが一定であれば」という仮定の上に成り立つ関係である。そのため、本節では Hip_Large 群と Hip_Small 群の飛行姿勢 (ε , θ および α) について、1つの角度を2群間で比較することにより、両群に作用した空気力の大きさを推定する。

まず股関節角度 (ε) を見てみると (Fig. 18a), Hip_Large 群は 0m 地点から 2 m 地点まで Hip_Small 群よりも有意に ε が大きいことから、Hip_Small 群よりも大きい抗力が作用していたものと推察される。揚力が失速に至っていなければ、Hip_Large 群には Hip_Small 群よりも大きな揚力が作用していたものと推察される。また、Hip_Large 群には Hip_Small 群よりも大きなピッチングモーメントが作用していたものと推察される。その後、2 m 地点以降の ε の変化を見てみると、Hip_Large 群は ε の増大がほとんど見られず、一方で Hip_Small 群は ε を増大させることで、2 群の ε の値がほぼ同じとなった。そのため、Hip_Small 群はこの区間で Hip_Large 群に比して、作用する空気力 (抗力、揚力およびピッチングモーメント) をより増大させ、最終的には同程度の空気力が2群に作用したものと推察される。

次に、下肢とスキーとのなす角度 (θ) を見てみると (Fig. 18b), Hip_Large 群は 0m 地点から 1 m 地点まで、 θ を Hip_Small 群よりも小さくしていたため、抗力については、Hip_Small 群よりも小さかったものと推察される。Hip_Large 群の揚力については、失速に至っていなければ、Hip_Small 群より小さく、逆に失速していれば、Hip_Small 群よりも大きかったものと推察される。ピッチングモーメントに

については, Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも小さかったものと推察される。その後, 3 m 地点から 5 m 地点までは有意ではないものの, Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも大きな θ を示していた。この区間においては Hip_Large 群の方が Hip_Small 群よりも大きな抗力が作用し, 揚力については, 失速に至っていなければ Hip_Small 群よりも大きく, 失速していれば Hip_Small 群よりも小さいと推察される。同区間のピッチングモーメントについては, Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも大きなピッチングモーメントを受けたものと推察される。

最後に, 迎え角 (α) について見てみると (Fig. 18c), 1m 地点から 5m 地点まで Hip_Small 群よりも α を小さくしており, Hip_Large 群は Hip_Small 群に比べ, 抗力, 揚力およびピッチングモーメントが小さかったものと推察される。

ここまで, 谷らの風洞実験結果 (谷ら 1951; 谷ら 1971) を用いて, Hip_Small 群と Hip_Large 群の飛行姿勢に作用する空気力 (揚力, 抗力およびピッチングモーメント) の大きさを推測しようと試みた。しかしながら, 2 群間における飛行姿勢の違いは, ε , θ , および α のうちの 1 つに限定されたものではなく, これら 3 つの角度にわたる複雑なものであった。したがって, 他の角度を一定とした条件で ε , θ , および α のうち 1 つを変化させた谷らの風洞実験結果 (谷ら 1951; 谷ら 1971) を用いて, これら 2 群の飛行姿勢に作用する空気力の大きさを推定することは困難であることが分かった。そのため, これらの姿勢制御方法が揚力および抗力に及ぼす影響については, 後述する 4.4.2 において, 総合的な空気力の結果と考えられる速度および飛行経路の変化を考慮した上で改めて議論する。同様に, ピッチングモーメントに及ぼす影響については, 4.4.3 において身体の前傾姿勢の変化を考慮した上で改めて議論する。

4.4.2 初期飛行局面における姿勢制御の違いが飛行速度および経路に及ぼす影響

前述のように 4.4.1 では、Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で、初期飛行局面における姿勢制御の違いを示し、その空気力学的な影響を推測してきた。ここでは、作用した空気力（揚力および抗力）の総合的な結果であると考えられる、飛行速度および経路の違いから、Hip_Large 群および Hip_Small 群に作用した空気力を推定することによって、4.4.1 で議論された飛行姿勢の変化が空気力に与える影響について再び議論する。

まず、抗力の影響を受けると考えられる、合成重心の水平方向速度 (V_x) について見てみると (Fig. 22a), 2 群とも 5 m の飛行中にわずかに減少していた。Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で V_x の比較を行った結果、4 m 地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群より有意に小さい値を示した。また、4 m 地点以外においても、有意ではないものの、Hip_Large 群が Hip_Small 群より小さい V_x を示した。また、 V_x の変化量 (ΔV_x) を Hip_Large 群が Hip_Small 群との間で比較した結果、有意ではないものの、1~5 m までの各地点において、Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも小さな値を示した (Fig. 22b)。

これらの結果から、Hip_Large 群が示した姿勢制御は Hip_Small 群のそれと比して、わずかながら水平方向速度の減少が大きかったものと考えられる。したがって、Hip_Large 群は Hip_Small 群に比べて、より大きな抗力が作用したものと考えられる。この原因を、4.4.1.b で示した姿勢変化と空気力との関係で説明することを試みる。Hip_Large 群は飛行中の迎え角 (α) が Hip_Small 群に比べて常に小さく、また下肢とスキーとのなす角度 (θ) を 0~1 m 地点まで小さくしていたことから、抗力を受けにくい姿勢ではあった。しかしながら、それらの抗力減少作用よりも、Hip_Large 群が Hip_Small 群より股関節角度 (ε) を 0~2 m 地点まで大きくしていたことによ

る抗力増大作用の方が大きく、この前半部分（0～2 m 地点）においては Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも大きな抗力を受けたものと推察される。その後 ε は 2 群ともほぼ同じ値となり、 θ は 3～5 m 地点まで Hip_Large 群の方が Hip_Small 群よりも大きい値を示したことから、 θ による抗力増大の影響が現れたものと推察される。

次に、揚力の影響を受けると考えられる、合成重心の鉛直方向速度 (V_y) について見てみると (Fig. 22c) , 2 群とも 5 m の飛行中に落下速度が増大していた。2 群の V_y を比較した結果、0 m 地点においては、有意な差は見られなかったものの、1、3 および 4 m の各地点で Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも有意に大きい値を示した。さらに、その他の地点において有意ではないものの、Hip_Large 群が Hip_Small 群より大きな V_y を示した。しかしながら、 V_y の変化量 (ΔV_y) を 2 群間で比較した結果、有意な差が見られたのは 3 m 地点のみであり、その後 5m 地点までその差は小さくなっていた (Fig. 22d) 。

これらの結果から、Hip_Large 群が示した姿勢制御は Hip_Small 群のそれと比して、3m 地点までは落下速度の増大を防ぐことができたものと考えられる。したがって、Hip_Large 群には Hip_Small 群よりも大きな揚力が作用していたものと推察される。この原因を 4.4.1.b で示した姿勢変化と空気力との関係で説明することを試みる。Hip_Large 群の迎え角 (α) は Hip_Small 群のそれに比べて常に小さく、揚力を受けにくい姿勢であったと考えられる。一方で、下肢とスキーとのなす角度 (θ) について、0～1m 地点まで Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも θ を小さくしていた。すでに 4.4.1.b で示したように、揚力が失速していなければ、 θ が小さいことは、揚力を小さくする要因となり、逆に失速していれば、揚力を大きくする要因になる。ここで、Hip_Large 群は股関節角度 (ε) を 0～2m 地点まで Hip_Small 群よりも大きくしていながらも、結果として揚力が大きかったことを考慮すると、この時点においてまだ揚力は失速していなかったものと推察される。したがって、Hip_Large 群

は θ が小さいために、揚力を得にくい姿勢ではあったが、 ε を大きくすることで揚力の作用が Hip_Small 群よりも総合的に大きかったものと推察される。その後 3m 地点から 5m 地点までの間で ΔV_y に差が見られらなくなっていたことから、この区間では逆に Hip_Large 群に作用する揚力が Hip_Small 群のそれよりも小さくなっていったものと推察される。この区間において、2 群の ε はほぼ同じ値となり、 θ は Hip_Large 群の方が Hip_Small 群よりも大きい値を示したことから、失速していなければ θ による揚力が大きくなる姿勢ではあった。一方で Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも α を小さくしていたことを考慮すると、Hip_Large 群は θ の大きさに由来する揚力増大作用よりも、 α の小さいことによる揚力減少作用の方が大きくなり、総合的に作用した揚力が小さくなったものと推察される。

次に、合成重心の進行方向 (β) について見てみる。 β は合成重心の鉛直方向速度 (V_y) と水平方向速度 (V_x) の逆正接として求めたので (③式) , V_y と V_x の大きさの比率によって決定する。すなわち、仮に合成重心の鉛直方向速度 (V_y) が小さくとも、それを補うほど大きな水平方向速度 (V_x) を得ていれば、 β に変化は生じない。本研究の結果から、 β の値は 1 m, 3 m, 4 m の地点において Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも大きな値を示した (Fig. 23) 。また、その他の地点においても、有意ではないが Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも大きな β を示した。すでに、Hip_Small 群の V_x は、有意ではないものの常に Hip_Large 群よりも大きいことを示したが (Fig. 22a) , この結果を考慮すると、その V_x の大きさは V_y の小ささを補うほどではなく、飛行中の進行方向は Hip_Large 群よりやや下向きになるものと考えられる。

最後に、飛行経路の指標として用いた DCGy を見てみる。DCGy はジャンプ台を飛び出した時の選手の合成重心の高さを原点 (0m) とした飛行経路の高さの変化を意味している。Fig. 24 に示したように、ジャンプ台を飛び出してから 5m 地点まで

DCGy の値は減少していたことから、飛行中の選手全員の合成重心は常に落下していた。Hip_Large 群は 3 m, 4 m, 5 m 地点において Hip_Small 群よりも大きな DCGy を示したことから、Hip_Small 群よりも高い飛行経路であったことが分かる。このような DCGy の差が生じた原因は、すでに述べたように Hip_Large 群の鉛直方向速度 (V_y) が Hip_Small 群よりも常に大きかったことによるものであると考えられる。ただし、2 群間の DCGy の差は 3m 地点で約 0.04 m, 4m 地点で約 0.06 m, 5m 地点で約 0.06 m であり、それほど大きくはなかった。

以上の議論より、Hip_Large 群と Hip_Small 群との間の飛行姿勢制御の違いが、合成重心の水平方向速度 (V_x)、鉛直方向速度 (V_y) および飛行経路 (β および DCG) に及ぼす影響を以下のようにまとめる。

Hip_Large 群が示した飛行姿勢制御は Hip_Small 群に比して、飛行中に作用する抗力が大きかったものと推察される。そのため、Hip_Small 群に比してわずかではあったが、 V_x の減少量が大きくなっていったものと推察される。一方で、飛行中に作用する揚力は Hip_Small 群のそれよりも大きかったものと推察される。そのため、Hip_Small 群に比してわずかではあったが V_y の減少量 (落下速度の増大) が抑制されたものと推察される。

このような Hip_Large 群と Hip_Small 群の飛行中の速度変化の特徴を反映して、飛行軌跡の方向を意味する合成重心の進行方向 (β)、および飛行経路の高さの変化を意味する (DCGy) についても、Hip_Large 群が Hip_Small 群より高い飛行軌跡であったことが明らかとなった。ただし、5m 地点における 2 群の DCGy の平均値の差は、およそ 0.06m であり、大きな差ではなかった。

4.4.3 初期飛行局面における姿勢制御の違いが前傾姿勢に及ぼす影響

ここでは、Hip_Large 群と Hip_Small 群との間の身体およびスキーの前傾姿勢に

ついて比較することで、飛行中の前傾姿勢をとるために必要と考えられるピッチングモーメントの作用を推定する。その上で、4.4.1.b で議論した、姿勢制御方法の違いによる飛行中のピッチングモーメントの変化を改めて議論する。なお、映像解析で得られた角度の2回微分を行うことで角加速度を算出し、選手個々の慣性モーメントと角加速度との積によるピッチングモーメントを用いる方がより直接的ではあるが、すでに4.4.2 で述べたように、2回微分によるノイズの増大の影響が大きかったため、本研究では角速度の変化量をピッチングモーメントの作用として捉えることとした。

4.4.3.a スキーの前傾を示す角度について

最初に、スキーと水平線とのなす角 (γ) について見てみる (Fig. 18c)。 γ は下肢とスキーとのなす角度 (θ)、およびスキーと進行方向とのなす角度 (α) の両方の大きさに影響を与える角度である。ここで、 θ と α は空気力に影響を与える要因であることを考慮すると、 γ を制御することの重要性が理解できる。Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で、0m 地点から 5m 地点まで γ は有意な差が見られなかった。この結果から、2 群の γ の制御方法に差が見られなかったことを示すものであると考えられる。 γ と α との関係を見てみると、 γ と α の変化パターンが類似しており、さらに、その変化量はほぼ同じであった。すなわち、初期飛行局面における α の変化は主に γ の変化によって決定されたものと考えられる。次に、 γ と θ との関係を見てみると、12名の被検者から得られた θ の平均値について、0 m 地点および 5 m 地点では、それぞれ $86.1 \pm 3.7^\circ$ および $49.8 \pm 4.9^\circ$ であり、5m 飛行する間に 36° 減少していた (Fig. 18b)。同じ間に γ は $-9.1 \pm 0.8^\circ$ から $-0.4 \pm 3.9^\circ$ まで 9° の増大を示した。これは θ の全変化量 (36°) の 25%程度に過ぎない。すなわち、0 m 地点から 5 m 地点までの θ の減少の大部分は、下肢と水平線のなす角度 (τ) を減少

させることによってもたらされたものと考えられる。

このような下肢の前傾の重要性をふまえた上で、身体の前傾を示す2つの角度(体幹と水平線とのなす角度 (κ) および下肢と水平線とのなす角度 (τ) の変化について、以下 4.4.3.b で検討していく。

4.4.3.b 身体の前傾を示す角度について

初期飛行局面において身体を前傾させるためには、踏み切り動作によって前回りの角運動量を与えておくことに加え、飛行中に身体を前方に回転させる空気力(ピッチングモーメント)を得ることが重要である(Tveit ら 1981; Arndt ら 1995; Jin ら 1995; Komi ら 2000; 瀬尾ら 2000)。このピッチングモーメントについて、頭を上げる方向を正と定義すると、身体を前傾させるためには負のピッチングモーメントが必要となる。

本研究で得られた下肢と水平線のなす角度 (τ) について見ると、ジャンプ台を飛び出してから 5 m 飛行する間に、Hip_Large および Hip_Small 群の τ が減少していたため、2 群とも飛行中に下肢の前傾が行われていたことが分かる (Fig. 19a)。また、 τ の角速度 (τ') の変化を見ると (Fig. 19b)、2 群とも 0m 地点における τ' の値がほぼ同じ値 (-200 deg/s) であった。この結果は、2 群とも踏み切り動作によって前回りの角速度を同程度に与えていたことを示唆するものである。また、2 群の τ' は 0 m 地点から 3 m 地点までの区間で、その絶対値が急激に小さくなっていった。この結果より、この区間においては τ' を減ずるように作用する正の(頭上げ方向の)ピッチングモーメントが働いていたものと推察される。その後 3m 地点から 5m 地点までの τ' の絶対値の変化は、それまでの変化に比べて緩やかであった。これらの結果から、3m 地点以降に作用したピッチングモーメントの大きさは、ジャンプ台を飛び出してから 3m 地点まで飛行する区間のそれと比べ、2 群とも小さく

なっていたものと推察される。

次に、Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で、それぞれに作用したピッチングモーメントの大きさを推測してみる。まず、2 群の間で τ' を比較した結果、0m 地点においては差が見られなかったものの、1m 地点および 2m 地点において Hip_Large 群の τ' は Hip_Small 群よりも有意に小さい値（絶対値）を示した（Fig. 19b）。特に、0m から 1m 地点までの飛行の間に Hip_Large 群の τ' の絶対値は減少し、一方で Hip_Small 群のそれは、ほとんど変化していなかった。これらの結果から、0m 地点から 1m 地点までの間で、Hip_Large 群には Hip_Small 群よりも大きな頭上げのピッチングモーメントが作用したものと推察される。その後 3 m まで τ' の絶対値は、Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも小さい値ではあったが、その変化量は 2 群ともほぼ同じであったことから、この区間において作用したピッチングモーメントの大きさは、2 群の間で大きな違いがなかったものと推察される。3m 地点以降は、それまで観察された τ' の絶対値の急激な減少は見られず、Hip_Small 群は緩やかに減少し、Hip_Small 群は緩やかに増大していた。すなわち、2 群に作用したピッチングモーメントの大きさは小さいものの、Hip_Large 群には頭下げのピッチングモーメントが作用し、一方で Hip_Small 群には頭上げのピッチングモーメントが作用したものと推察される。

この原因を 4.4.1.b で示した姿勢変化と空気力との関係で説明することを試みる（Fig. 18）。まずジャンプ台を飛び出した直後（0～1 m）の迎え角（ α ）について、Hip_Large 群は Hip_Small 群に比べ、0 m 地点ではほぼ同じであったが、1 m 地点では Hip_Small 群よりも小さい値を示し、ピッチングモーメントを受けにくい姿勢であったと考えられる。一方で、下肢とスキーとのなす角度（ θ ）について、0～1 m 地点まで Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも θ を小さくしていたため、同様にピッチングモーメントを受けにくい姿勢であった。しかしながら、それらのピッチングモ

ーメント減少作用よりも、Hip_Large 群が Hip_Small 群より股関節角度 (ε) を 0～1 m 地点まで大きくしていたことによるピッチングモーメント増大作用の方が大きく、結果として Hip_Large 群には Hip_Small 群よりも大きなピッチングモーメントがもたらされたものと推察される。

その後 1 m 地点から 3 m 地点まで、2 群の Hip_Large 群は ε の増大を抑制しており、 ε の増加量は Hip_Small 群に比べて小さかった。その一方で、Hip_Small 群は ε を次第に増大させることで、2 群間の ε の差は次第に減少していた。さらに、Hip_Small 群の θ の値を Hip_Large 群と比べると、1 m 地点では θ がやや大きく、2 m 地点ではほぼ同じ値となり、3m 地点では小さくなっていた。ただし、これらの角度には統計学的に有意な差は見られなかった。すなわち、いずれの地点でも、2 群の θ はほぼ同程度の大きさであった。これらの結果から、この 1～3 m 地点において、2 群間の θ の大きさに差はなく、一方で ε の差が小さくなっていたことが示唆される。したがって、これら ε および θ の大きさに由来するピッチングモーメントの大きさも同程度の大きさに収束したものと推察される。

最後に 3 m 地点以降は、2 群の ε はほぼ同じ大きさであった。 θ については Hip_Large 群が Hip_Small 群よりもやや大きい値を示したものの、その差は統計学的に有意ではなかった。また、 α については Hip_Large 群が Hip_Small 群よりも小さい値を示したものの、3m 地点以外で統計学的に有意な差は見られなかった。Hip_Large 群に Hip_Small 群よりも小さなピッチングモーメントが作用していた理由は、 α がこの区間で Hip_Large 群よりも小さかったためと推察される。しかしながら、Hip_Large 群が示したピッチングモーメントが Hip_Small 群よりも小さいのみならず、負の値であったことは谷ら (1971) の資料からは説明ができない。このような負のピッチングモーメントが発生する要因として、両スキーの開き角度 (いわゆる V 字姿勢) の影響があったものと推察される。(Tavernier ら 1993) は、 α が

20° 以上の条件で風洞実験を行い、両スキーを平行に揃えた飛行姿勢と、スキーの先端を開いた姿勢との間でピッチングモーメントを比較した結果、スキーを平行に揃えた姿勢ではピッチングモーメントが正の値を示し、スキーの先端を開いた姿勢では負の値を示すことを報告している。さらに、初期飛行局面の3次元映像分析を行った研究により (Arndt ら 1995) , ジャンプ台を飛び出してから約 2 m を経過した地点から、スキーの先端が急激に開き始めることが示されている。これら2つの結果を考慮すると、本研究において、Hip_Large 群に 3~5 m 地点で負のピッチングモーメントが観察された要因の一つに、Hip_Large 群が Hip_Small 群よりもスキーの開き角度が大きかった可能性を挙げることができよう。しかしながら、本研究では選手の矢状面における2次元映像分析しか行っていないため、両スキーの開き角度は不明である。ただし、この 3 m 地点以降の下肢と水平線のなす角度 (τ) について (Fig. 19a) , 2群の τ の減少はほぼ同量であったことから、これらのピッチングモーメントの大きさの違いが下肢の前傾に与える影響は実質上ほとんどないものと考えてよいだろう。

ここまでの下肢の前傾に関する議論から、本研究で取り扱った初期飛行局面 (0~5m) において、下肢の前傾を阻害する頭上げのピッチングモーメントの作用が大きいの、ジャンプ台を飛び出してから 3 m までの範囲であり、その後は比較的小さなピッチングモーメントが作用していたものと推察される。さらに、Hip_Large 群と Hip_Small 群との間で τ ' の変化量の差が見られた 0~1 m 地点においては作用したピッチングモーメントの差が特に大きかったものと推察される。

そこで、ジャンプ台を飛び出してから 5 m 飛行するまでの下肢と水平線のなす角度 (τ) の角度変化量を $\Delta \tau$ として求め、実際にジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) が、 $\Delta \tau$ にどの程度の影響を及ぼしたのかを検討した (Fig. 20a) 。その結果、 ε_{0m} と $\Delta \tau$ との間に有意な正の相関関係が見られた。得られた回帰式

より、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) が 10° 増大すると、5m 飛行する間の $\Delta \tau$ は約 5° 増大することが示された。この結果は、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が大きいほど、その後 5 m 飛行する間の下肢の前傾量が小さくなることを示唆している。

この結果から、Hip_Large 群が示した飛行姿勢制御およびジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) の大きさは、飛行中に下肢を前傾させることを困難にする要因であると推察されるため、ジャンプ台を飛び出した時点で、下肢をより前傾させておくことが必要であると考えられる。実際に、Hip_Large 群は 0m 地点において Hip_Small 群よりも小さな τ を示していたことから (Fig. 19a), 踏み切り動作において股関節を大きく伸展すると同時に下肢の前傾も行っていたものと考えられる。

次に、体幹部分の前傾を示す角度として、体幹と水平線のなす角度 (κ) について見ていく (Fig. 19c)。まず、 κ は下肢と水平線のなす角度 (τ) とは異なり、ジャンプ台を飛び出してから一時的に増大し、その後減少していた。2 群の κ を比較した結果、Hip_Large 群は 0 m 地点から 2 m 地点まで Hip_Small 群よりも有意に大きかったが、2 m 地点から 5 m 地点まで急激に κ を減少させ、3 m 地点以降は 2 群間の κ に差が見られなくなった。また、 κ の角速度 (κ') の変化を見ると (Fig. 19d), Hip_Large 群は Hip_Small 群よりも早い段階で κ' が負の値を示していた。この結果は、体幹部分の前傾を開始するタイミングが Hip_Small 群よりも早かったことを示すものである。前述のように、Fig. 18a で Hip_Large 群が示した股関節伸展の抑制は、この体幹部分の前傾によってもたらされたものと考えられる。つまり、Hip_Large 群はジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) が大きいため、大きな正のピッチングモーメントを受けやすいが、2m 以降は、体幹と水平線のなす角度 (κ) を減少させることで股関節の伸展を抑制し、ピッチングモーメントを過剰に受けな

いようにしているものと推察される。そこで、ジャンプ台を飛び出してから 5m 飛行するまでの体幹と水平線のなす角度 (κ) の角度変化量を $\Delta \kappa$ として求め、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) が、 $\Delta \kappa$ にどの程度の影響を及ぼしたのかを検討した (Fig. 20b)。その結果、 ε_{0m} と $\Delta \kappa$ との間には有意な負の相関関係が見られた。得られた回帰式より、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) が 10° 増大すると、 $\Delta \kappa$ は約 6° 減少することが示された。この結果は、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が大きいほど、その後 5m 飛行する間の体幹の前傾量が大きくなることを示唆している。

これらの結果から、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が大きい選手ほど、ピッチングモーメントを低減するために、その後 5 m 飛行する間に体幹部分をより前傾させていたものと推察される。

ここまでの身体の前傾に関する議論をまとめると、Hip_Large 群は飛行中に大きな正のピッチングモーメントを受けるために、飛行中に下肢の前傾を行うことが難しく、踏み切り動作において下肢の前傾を事前に行っておく必要があるものと推察される。また Hip_Large 群はピッチングモーメントを小さくするために、飛行中に体幹部分の前傾を積極的に行っていたものと推察される。

4.4.3.c 踏み切り時の股関節角度が特に大きい選手について

ジャンプ台を飛び出したときの股関節角度が特に大きい選手について、その初期飛行局面における姿勢制御の特徴を明らかにするため、Hip_Large 群から 1 名の選手 (M. H.) を抽出し、飛行中のスティックピクチャーと股関節角度 (ε) の変化を検討した (Fig. 21)。M. H. はジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) が 12 名の被検者の中で最も大きかった選手である。

Hip_Large 群は飛行中に股関節角度 (ε) の増大を抑制していたことをすでに示

したが (Fig. 18a) , M. H.は 2 m 地点以降, 股関節角度 (ε) の増大を抑制するに留まらず, さらに減少させていた。この結果に加え, 前述のように股関節角度の大きさが, 初期飛行局面におけるピッチングモーメントの大きさに影響していることを考慮すると (谷ら 1971) , 特に大きな股関節伸展を伴う踏み切り動作を行った M. H.の場合は, 飛行中に股関節を屈曲させることによって, 空気から受ける頭上げのピッチングモーメントを抑制していたものと推察される。

4.5 小括

本章では, ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度 (ε_{0m}) の大きさの違いが, 初期飛行局面 (0 m~5 m) における姿勢制御, 飛行速度および飛行経路にどのような影響を与えるのか明らかにすることを目的とした。以下にその結果をまとめる。

Hip_Large 群は Hip_Small 群に比して, わずかではあったが, V_x の減少量が大きくなっていったことから (Fig. 22a, Fig. 22b) , 飛行中に作用する抗力が Hip_Small 群より大きかったものと推察される。また, Hip_Large 群は Hip_Small 群に比して, わずかではあったが V_y の減少量 (落下速度の増加量) が小さかったため (Fig. 22c, Fig. 22d) , 飛行中に作用する揚力は Hip_Small 群よりも大きかったものと推察される。このような Hip_Large 群と Hip_Small 群の飛行中の速度変化の特徴を反映して, Hip_Large 群が Hip_Small 群より高い飛行軌跡となる結果が得られた (Fig. 24) 。

また, 2 群の間で飛行中の身体の前傾について検討した結果, Hip_Large 群は Hip_Small 群よりも飛行中に下肢の前傾を行うことが困難になることが明らかとなった (Fig. 19, Fig. 20) 。この結果から, Hip_Large 群は Hip_Small 群よりも大きな頭上げ方向のピッチングモーメントを受けたものと推察される。その一方で, Hip_Large 群は踏み切り動作において下肢の前傾を事前に行うことに加え (Fig. 19a) , 飛行中に体幹部分の前傾を積極的に行うことにより (Fig. 19c) , 抗力および頭上げ

方向のピッチングモーメントを小さくする姿勢制御を行っていたものと推察される。

ただし、Hip_Large 群と Hip_Small 群との飛行姿勢制御の違いは、股関節角度のみに限定できるものではなく、下肢とスキーとのなす角度 (θ) および迎え角 (α) にも及んでいた (Fig. 18)。したがって、前述の空気力の違いは、ジャンプ台を飛び出した時の股関節の大きさのみならず、 ε 、 θ および α の姿勢制御方法にも影響を受けていたものと推察される。さらに、本研究で用いた先行研究による風洞実験の空気力学的資料 (谷ら 1951; 谷ら 1971) は、初期飛行局面の飛行姿勢に対応していなかったため、初期飛行局面の空気力推定にはいくつかの仮定を用いざるを得なかった。したがって、より正確な空気力の推定を行うためには、 ε 、 θ および α の姿勢変化から空気力を推定する回帰モデルを作成することが必要であると考えられる。

また、本研究で行ったように、映像解析から得られた速度や軌跡から、飛行中の選手に作用した空気力を正確に推定する際には、各選手の助走速度および風の向きや強さなどの空気力に影響を及ぼす要因を一定に保つことが必要となるが、これらの要因を一定に制御するのは非常に困難である。

第 5 章ではこれらの問題を解決するため、改めて初期飛行局面の飛行姿勢を対象とした風洞実験を行い、 ε 、 θ および α を独立変数とした空気力係数の回帰モデルを作成する。次に、自然環境や姿勢制御の方法を一定に保った上で、この空気力回帰モデルを用いたコンピュータシミュレーションを行うことで、初期飛行局面における股関節角度制御の違いが空気力係数、飛行速度および飛行軌跡に及ぼす影響を明らかにする。

5 初期飛行姿勢を対象とした風洞実験および飛行シミュレーション（実験4）

5.1 目的

第4章において、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度の大きさ（ ε_{0m} ）が初期飛行局面に及ぼす影響について、実際のジャンプ映像の分析を行った。その結果、 ε_{0m} の大きさの違いは、初期飛行局面における身体―スキー系の合成重心速度および飛行軌跡に影響を及ぼし、さらに初期飛行局面の姿勢制御方法に影響を及ぼすことを示した。これらの初期飛行局面における姿勢制御の違いを、風洞実験による空気力資料（谷ら 1951; 谷ら 1971）を用いて検討した結果、股関節角度の増大が揚力、抗力および頭上げ方向のピッチングモーメント増大に寄与していたものと推察した。

ただし、谷ら（1951）および谷ら（1971）の風洞実験で用いられた姿勢は、初期飛行姿勢を十分に含んでいないため、これらの先行研究で得られた知見から、空気力の推定を行う際には、いくつかの仮定が必要であった。さらに、初期飛行局面における姿勢制御の違いは股関節角度のみに限定できるものではなかった。したがって、初期飛行局面における空気力の推定を正確に行うためには、複数の姿勢変化を考慮した空気力推定方法の確立が必要となった。

そこで本章では、1) まず、風洞実験によって、先行研究（谷ら 1951; 谷ら 1971）を利用する際に用いた仮定が、初期飛行局面の姿勢において成立するのか確認すること、2) 次に、飛行姿勢を独立変数とした空気力係数の回帰モデルを確立すること、3) 最後に、得られた空気力係数の回帰モデルを用いて、股関節角度の変化が初期飛行局面の空気力係数、飛行速度および飛行軌跡に与える影響を明らかにすること、の以上3点を目的とした。

5.2 方法

本節では、人形模型を用いたスキージャンプ飛行姿勢の風洞実験、得られた空気力係数を飛行姿勢（角度）によって回帰する数式モデル、および得られた空気力係数の数式モデルを用いたコンピュータシミュレーション方法について述べる。

5.2.1 実寸大の人形模型を用いた風洞実験による空気力の測定

東京大学先端科学技術研究センターのゲッチンゲン式大型低速風洞を用いた (Fig. 27)。本風洞の吹き出し口の形状は直径 3m の円形で、500 馬力の電動機を駆使し、最大風速 50m/s を発生する性能を持つ。本実験では風速を 20m/s または 25m/s に設定し、測定中は一定とした。

風洞実験では実寸大（身長 1.75 m）の人形模型を用いた (Fig. 28)。この人形模型の四肢および体幹部分の代表的な長さおよび周囲は、スキージャンプの日本代表選手 3 名から得られた形態データの平均値を基準としている（エアロエンジニアリング社製）。人形模型の肩関節、股関節、膝関節および足関節は可動式で、スキージャンプの飛行姿勢で用いられる姿勢を十分にとることができる。この人形模型に、ジャンプスーツ、グローブ、ヘルメットおよびスキー板 (2.6 m) などの実際のジャンプ競技で使用されている装備を全て装着した状態で、ワイヤーによって風洞に吊り下げられ、ワイヤーの上端に接続されたストレインゲージによって、模型にかかる揚力、抗力、ピッチングモーメントを計測した (Fig. 29)。

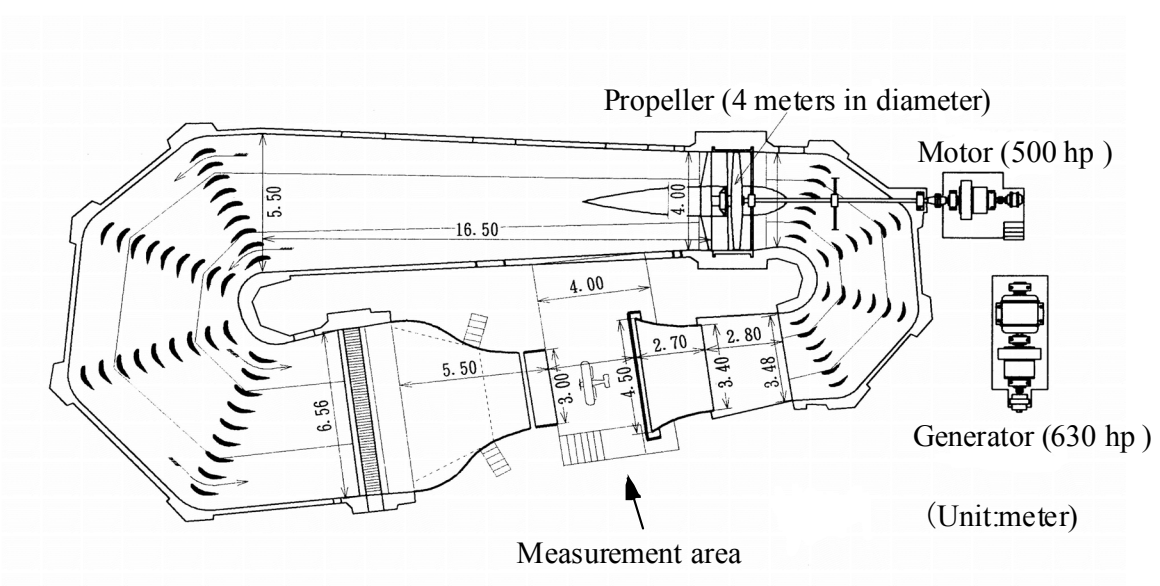


Figure 27 The plane view of the wind tunnel (The University of Tokyo).

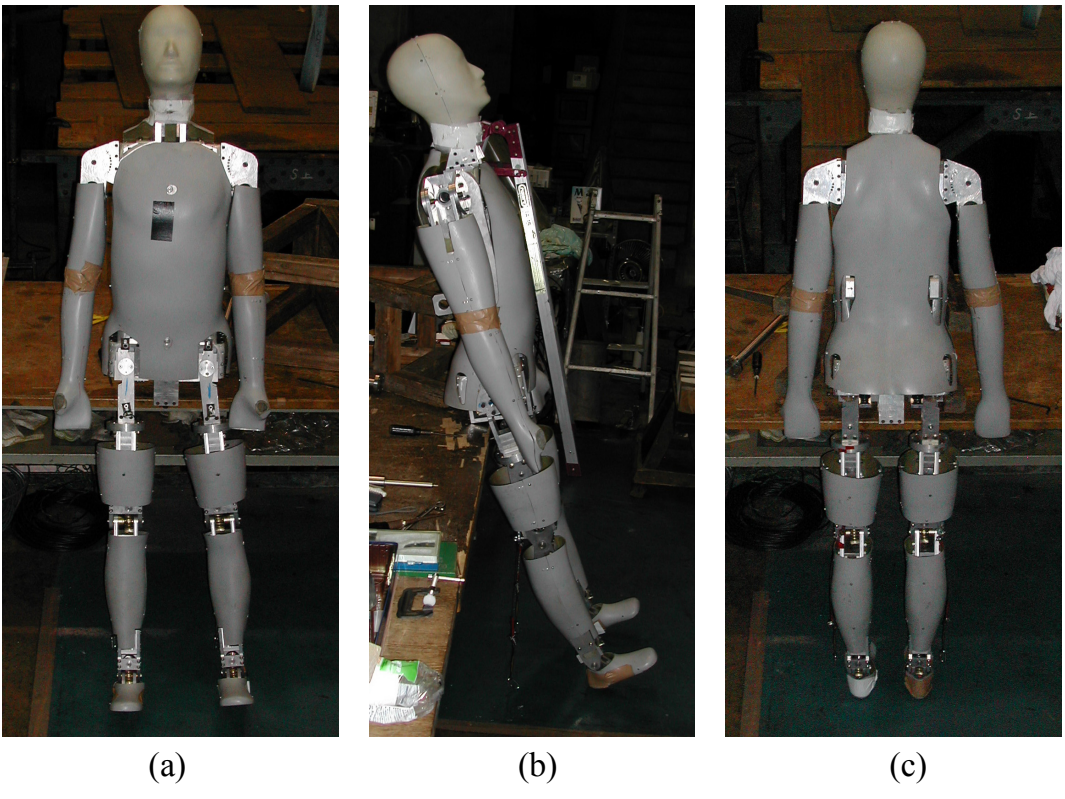


Figure 28 The ski jumper model. Each photo shows the frontal view (a), the side view (b) and the back view (c) of the model.

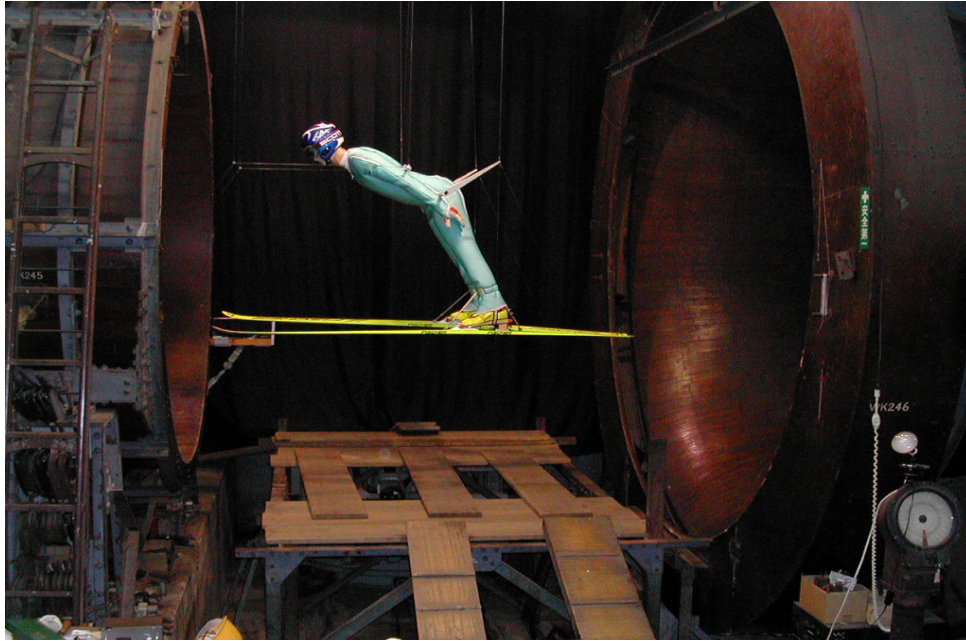


Figure 29 A set up for the wind tunnel experiment.

人形模型の飛行姿勢について、上肢回転角度 (ϕ) を 170° および 201° , 股関節前屈角度 (σ) を $0\sim 90^\circ$, 下肢とスキーとのなす角度 (θ) を $0\sim 90^\circ$, スキーの開き角度 (λ) を $0\sim 20^\circ$, そして迎え角 (α) を $-5\sim 60^\circ$ の角度を組み合わせた。なお、スキーの開き角 (λ) の設定に際し、 $\lambda = 0^\circ$ の条件 (2本のスキーを平行に揃えた状態) では、スキーの後端を板の中心から 300 mm 離して設置し (内側間の距離 190 mm) , λ が 0 より大きい条件では両スキーの後端の内側部分を付けた状態で計測を行った (Fig. 30) 。

測定された空気力には人形を吊り下げるのに用いられたワイヤーの影響が含まれるため、ワイヤー単体による空気力を差し引くことで空気力を校正した。ピッチングモーメントについては姿勢変化に伴う合成重心位置の変化を考慮し、重心周りのピッチングモーメント (頭上げ方向を正とする) を求めた。

測定された揚力 (L) , 抗力 (M) , およびピッチングモーメント (M) は測定時の気象条件の変化に伴う空気密度 (ρ) の大きさに影響を受けるため、それぞれ測

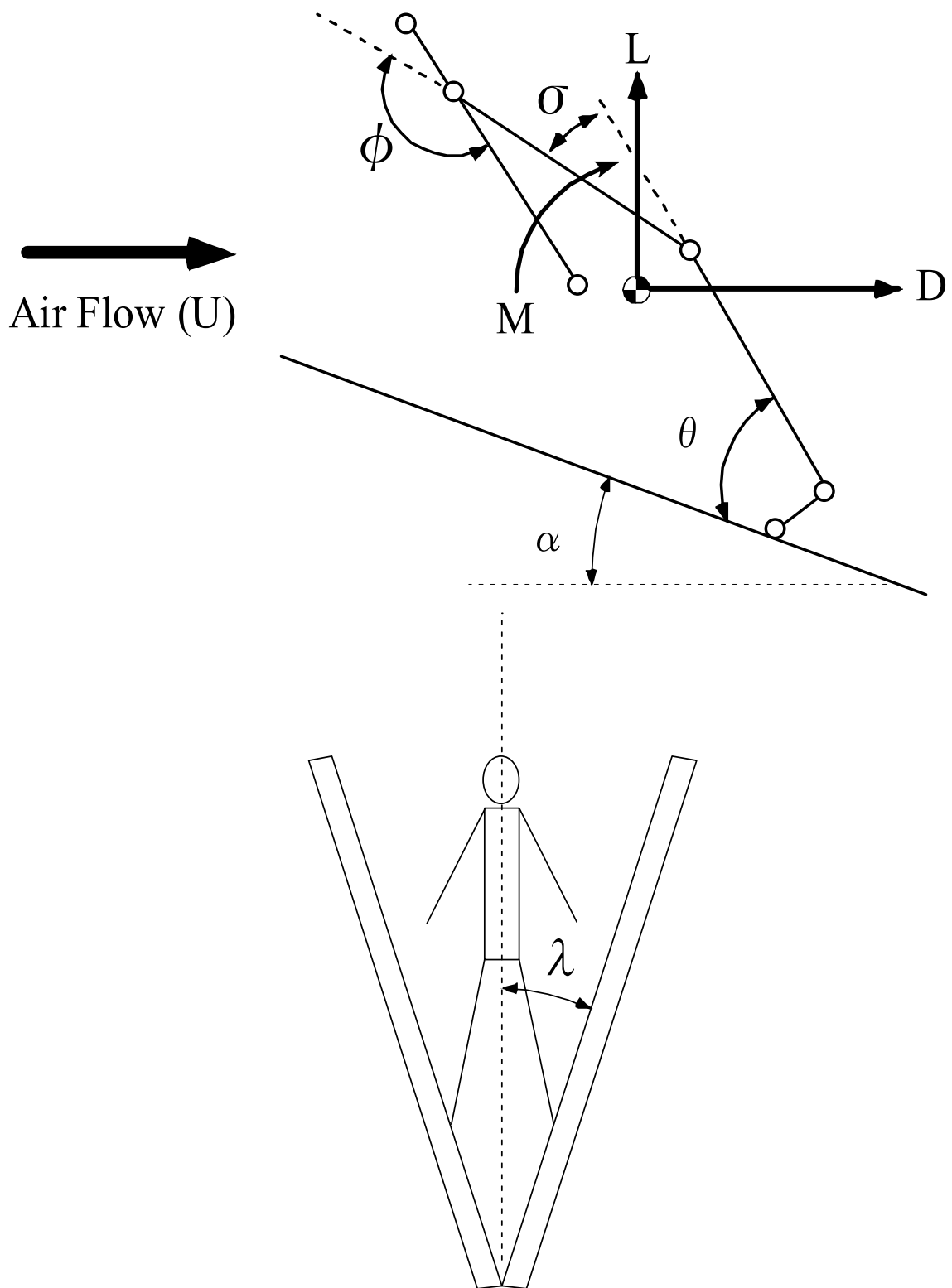


Figure 30 Measured aerodynamic parameters (lift (L), drag (D) and pitching moment (M)), and the body configuration of a ski jumper model and skis in the wind tunnel test.

定時の動圧 ($1/2 \rho U^2$) で除し、揚力面積 (S_L) , 抗力面積 (S_D) , そしてモーメント容積 (Q_M) として表した。本研究ではこれらの S_L , S_D および Q_M を, L , M および D と区別し, 空気力係数と呼ぶこととする。なお, これらの空気力係数の算出には以下④～⑥式を用いた。

$$S_L = \frac{L}{1/2\rho U^2} \quad \text{④}$$

$$S_D = \frac{D}{1/2\rho U^2} \quad \text{⑤}$$

$$Q_M = \frac{M}{1/2\rho U^2} \quad \text{⑥}$$

ここで, U は風速 (m/s) を示す。上記の飛行姿勢について, 計 1920 組の姿勢について空気力係数 (S_L , S_D , Q_M) の収集を行った。さらに補間操作によって 2937 組のデータを作成し, 実測値と補間データと合わせて計 4857 組の姿勢に関する空気力係数データベースを作成した。実測値を用いた補間データ算出方法については付録 A.1 に記載した。風洞実験および補間データに関するすべての人形模型の飛行姿勢 (α , σ , θ , λ および ϕ) について, それぞれの角度の度数を Fig. 31 に示す。

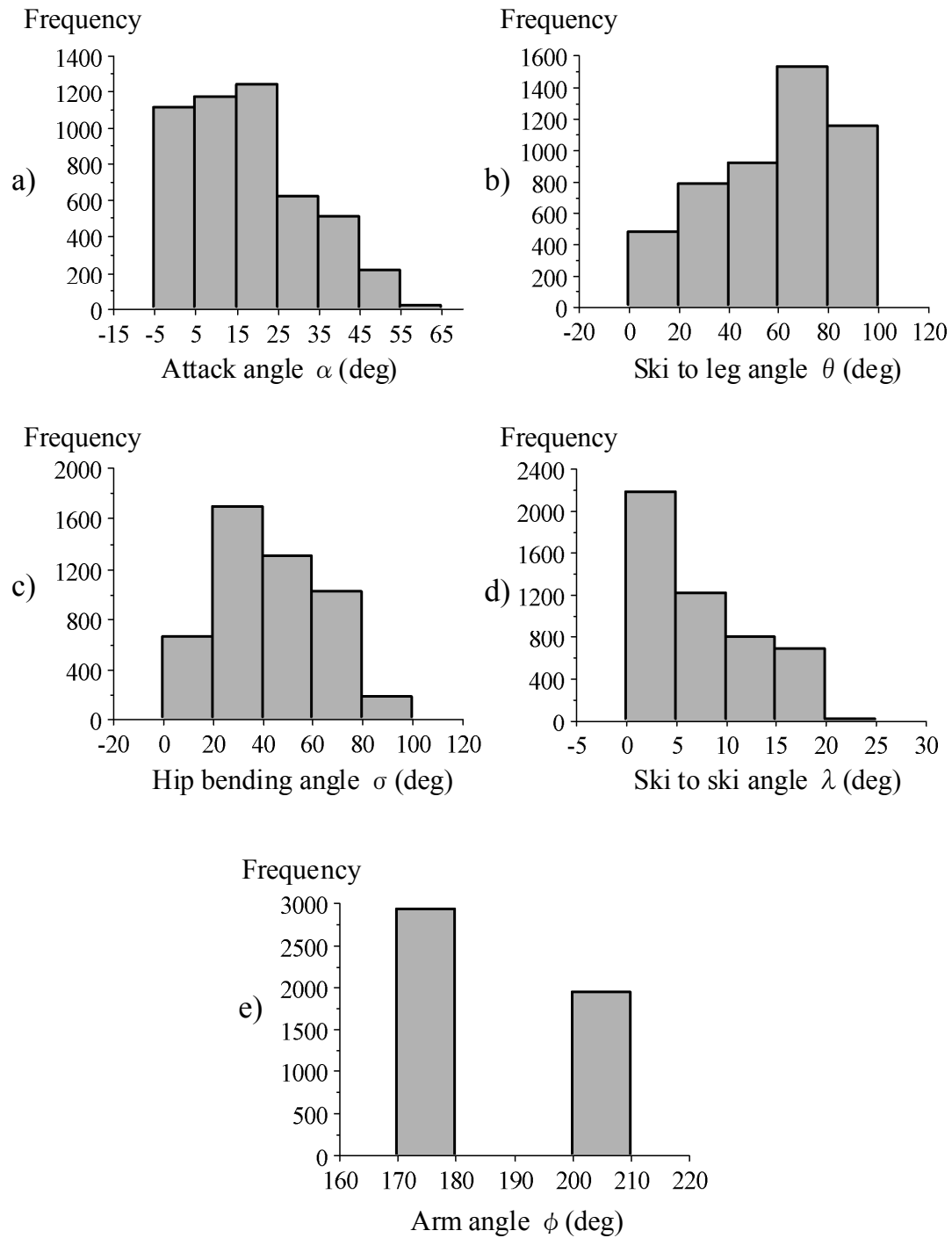


Figure 31 Histograms of a frequency of each flight position (α , θ , σ , λ and ϕ) of a ski jumper model in the wind tunnel test and the interpolated data.

5.2.2 飛行姿勢を独立変数とした空気力係数の回帰モデル

風洞実験で得られた空気力係数データベースは、設定された姿勢毎に値を持つ離散的な構造である。したがって、実際のスキージャンプのように複数の姿勢（角度）が連続的に変化する場合には、それぞれの姿勢に対する空気力係数をこのデータベースから直接的に読み取ることが困難となる。そこで、得られた空気力係数（ S_L , S_D , Q_M ）を従属変数とし、Fig. 30 に示した飛行姿勢の角度（ α , θ , σ , λ , ϕ ）を独立変数とした回帰モデルによって表現した。回帰モデルについては以下⑦～⑨式の多項式を用いた。

$$S_L(\alpha, \theta, \sigma, \lambda, \phi) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^5 \sum_{l=0}^4 \sum_{m=0}^1 a_{ijklm} \alpha^i \theta^j \sigma^k \lambda^l \phi^m \quad (7)$$

$$S_D(\alpha, \theta, \sigma, \lambda, \phi) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^5 \sum_{l=0}^4 \sum_{m=0}^1 b_{ijklm} \alpha^i \theta^j \sigma^k \lambda^l \phi^m \quad (8)$$

$$Q_M(\alpha, \theta, \sigma, \lambda, \phi) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^5 \sum_{l=0}^4 \sum_{m=0}^1 c_{ijklm} \alpha^i \theta^j \sigma^k \lambda^l \phi^m \quad (9)$$

上記の⑦, ⑧および⑨式は、いずれも 1800 項の多項式となる。多項式の係数 a_{ijklm} , b_{ijklm} および c_{ijklm} は最小二乗法を用いてそれぞれ算出した（付録 A.2 に記載）。

5.2.3 スキージャンプ飛行中の股関節角度制御に着目した飛行シミュレーション

ここでは、スキージャンプの初期飛行局面を対象とした飛行シミュレーションについて説明する。本研究においては、第4章で議論した股関節角度制御方法の違いが、空気力係数にもたらす影響に着目してシミュレーションを行った。まず、スキージャンプ飛行の運動方程式およびジャンプ台の数式モデルを定義し、次に対象となる飛行動作を定義する。最後にシミュレーションによって飛行速度および飛行経路の算出を行った。以下にその詳細を示す。

5.2.3.a スキージャンプ飛行の運動方程式

ここでは、前述した空気力係数を用いて飛行速度や飛行経路を算出する方法について説明する。横風その他の影響がないとすれば、飛行中の身体ースキー系の合成重心は、1つの鉛直面内を移動する。この鉛直面を (X, Y) 平面とし、ジャンプ台の助走路の先端を原点として、 X 軸を水平に前向きに、 Y 軸を鉛直上向きに設定した (Fig. 32)。

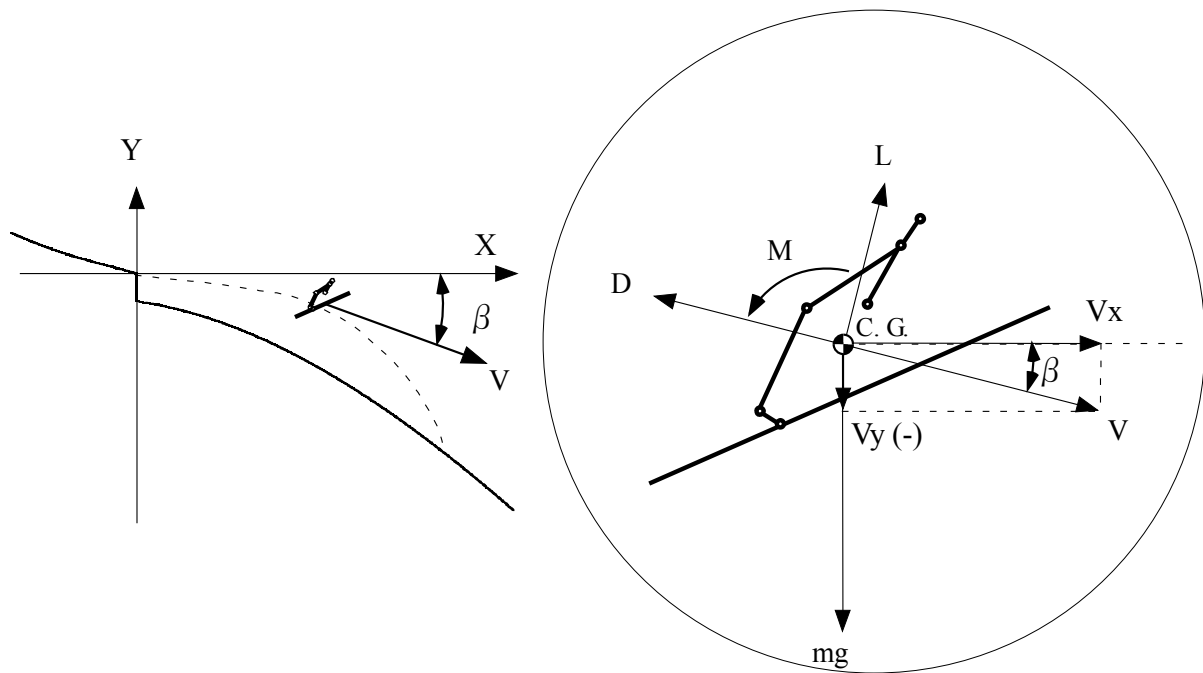


Figure 32 The coordinate system and definition of the angles and aerodynamics forces. The origin of the X - Y coordinate system is fixed on the edge of a jumping platform. The X axis is parallel to the horizontal line. β means the angle of the velocity vector of center of gravity (C. G.) to the horizontal line. The aerodynamic forces lift, drag and pitching moment are depicted as L, D and M respectively. The gravitational force is depicted as mg . Velocity is depicted as V and divided into two velocity components V_x and V_y .

上記の (X, Y) 座標系における身体-スキー系の並進運動は、下記⑩および⑪式の並進運動を示す運動方程式によって記述できる。なお、本研究で用いたシミュレーション手法 (Müller ら 1996; Schmölder ら 2002; Schmölder ら 2005) では回転運動を無視しているため、ピッチングモーメント (M) を考慮していない。回転運動を無視した理由は、ピッチングモーメントの作用によってスキーの前傾角に変化が生じるため、スキーと合成重心の速度ベクトルとのなす角度で決定される迎え角 (α) の値が、規定された動作モデル (5.2.3.c に後述) と同じにできないからである。

$$\dot{V}_x = \frac{(-D \cos \beta - L \sin \beta)}{m} \quad (10)$$

$$\dot{V}_y = \frac{(-D \sin \beta + L \cos \beta)}{m} - g \quad (11)$$

ここで、 V_x および V_y は、合成重心速度 (V) の X および Y 軸方向成分をそれぞれ示す。 m は身体ースキー系の質量 (72.1 kg) , g は重力加速度 (9.81m/s^2) , そして β は身体ースキー系の合成重心の速度ベクトルと水平線のなす角度を示す (4.2.3 の③式で定義した) 。 L および D は揚力および抗力をそれぞれ示す。これらの空気力は前述の空気力係数回帰モデル (⑦式および⑧式) から算出された S_L および S_D を用いて以下⑫および⑬式で求めた。

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_L \quad (12)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_D \quad (13)$$

ここで、 ρ は空気密度 (1.225 kg/m^3) , V は合成重心速度を示す。シミュレーション時間は、ジャンプ台を飛び出した時 (踝の x 座標が 0 m となる時点) から 1.0 s 後までの 1 秒間 とした。身体ースキー系の合成重心の座標 (x, y) は、以下⑭および⑮式を 4 次のルンゲークッタ法で 0.01 秒 毎に解くことによって求めた。

$$\dot{x} = Vx \quad \text{⑭}$$

$$\dot{y} = Vy \quad \text{⑮}$$

なお、コンピュータシミュレーションに用いた身体-スキー系のモデルは、身長 1.75 m、装備 10.5 kg を含む総身体質量 72.1 kg とした（全日本スキー連盟の強化選手の平均値を参考とした）。この身体-スキー系モデルは剛体リンクモデルとして作成した。身体各セグメント長はモデルの身長（1.75m）に対する相対比（Winter 1990）を用いて算出し、スキーの長さは国際スキー連盟の規定により身長 1.46 倍の 2.56 m とした。また身体各セグメントの質量配分および質量中心位置の算出には、先行研究による係数（Winter 1990; 阿江ら 1992）を用いた。上記の手法により算出された各セグメントの諸元を Table 6 に示した。上記の運動方程式をコンピュータで実行するためのプログラムは、数値解析ソフトウェア（The MathWorks inc. 製, Simulink Ver. 6.3 および Matlab Ver. 7.1）を用いて作成した。

Table 6 Anthropometric characteristics of the jumper - ski model which was used in the flight simulation.

Segment	Length (m)	Mass ^a (kg)	Position of center of mass ^b (m)
Skis	2.56	6.1 (1.0: bindings)	1.08
Feet (Lateral malleolus / Head metatarsal II)	0.23	4.0 (2.2: boots)	0.11
Lower legs (Femoral condyles / Medial malleolus)	0.43	6.0 (0.3: suit)	0.19
Thighs (Greater trochanter / Femoral condyles)	0.43	12.6 (0.3: suit)	0.19
Trunk (Greater trochanter / Glenohumeral joint)	0.50	31.3 (0.6: suit)	0.25
Head and neck (C7-T1 and 1st rib / Ear canal)	0.21	5.7 (0.7: helmet & goggle)	0.21
Arms (Glenohumeral joint / Ulnar styloid)	0.58	6.4 (0.3: suit & gloves)	0.31

Note . These segment parameters except skis were basically calculated by using parameters from "Biomechanics and motor control of human movement," by D.A. Winter, 1990, pp.52-57.

^aMass of the segment was including the mass of equipment which is enclosed in parentheses.

^bMeasured from the proximal end.

5.2.3.b ジャンプ台形状の関数化

本研究では、国際スキー連盟の公認ジャンプ台である大倉山ジャンプ台（K = 120m）を用いた。大倉山ジャンプ台の形状を、前述の（X, Y）平面上で x 座標の関数として表すと、以下⑩式のようになる。

$$0 < x \leq 87.418$$

$$y = 0.0000197063x^3 - 0.0062929337x^2 - 0.1051042353x - 3.3$$

$$87.418 < x \leq 103.391$$

$$y = -0.753554(x - 87.418) - 47.413$$

$$103.391 < x \leq 120.058$$

$$y = -(\sqrt{163.702^2 - (x - 201.909)^2} - 71.289)$$

$$120.058 < x \leq 180.058$$

$$y = -(\sqrt{120^2 - (x - 180.058)^2} - 33.442)$$

⑩

5.2.3.c スキージャンプ飛行動作モデルおよび初期条件

ここでは、飛行シミュレーションに用いる飛行動作モデルを定義する。前述のように、本研究ではジャンプ台を飛び出してから 1 秒後までの飛行シミュレーションを行う。

飛行動作モデルには 4.3.1 で示した、Hip_Large 群、Hip_Small 群および M. H. 選手の股関節角度を模擬した、Hip_Large モデル、Hip_Small モデルおよび M. H. モデルを用いた。第 4 章で示したとおり、M. H. 選手はジャンプ台を飛び出した時点の股関節角度が 12 名の被検者の中で最も大きく、ジャンプ台を飛び出してから 0.1～0.2 s の区間で股関節の一時的な屈曲を行っていた選手である。これらのモデルに加

え、ケーススタディとして、M. H. モデルを変形し、股関節屈曲動作を制限した動作モデルを作成した（M. H. Case Study モデル）。すなわち、股関節が最大伸展した後（0.09 s）に一時的な屈曲を行わないように制限した。このモデルは、M. H. 選手のようにジャンプ台を飛び出した際の股関節角度が大きい選手が、その後一時的な股関節の屈曲を行わない場合に、初期飛行局面にどのような影響を受けるのか検討するものである。

これらの動作モデルの中でも、股関節角度の姿勢制御のみに着目するため、迎え角（ α ）、下肢とスキーとのなす角度（ θ ）、スキーの開き角（ λ ）および上肢回転角度（ ϕ ）は規定の動作モデル（M. H. 選手の姿勢）と同じとし（Fig. 33a）、それぞれの飛行動作モデルに固有の姿勢変化は、股関節前屈角度（ σ ）のみとした（Fig. 33b）。時刻 0.0 s から約 0.2 s までに示した 6 点のプロットは、第 4 章の M. H. 選手の分析結果（0, 1, 2, 3, 4 および 5 m）に対応している。

なお、4.3.1 で定義していなかった λ および ϕ について、 λ は Schmölder ら（2002）の角度データを用い、 ϕ は 170° の定数とした。また、4.3.1 では飛行動作を 5m（約 0.2 s）までしか分析していないため、ジャンプ台を飛び出してから 0.7 s および 1.0 s 後の姿勢についても、前述の Schmölder ら（2002）の角度データを用いた。したがって、時刻 0.7 s 以降の σ は、いずれの動作モデルにおいてもほぼ同じとなる（Fig. 33b）。

これらの飛行動作モデルの姿勢（角度）を、シミュレーションの入力値として用いる際には、計算ステップ時間（0.01 s）に合わせ、3 次スプライン関数を用いて 0.01 s 毎に角度データを内挿した。

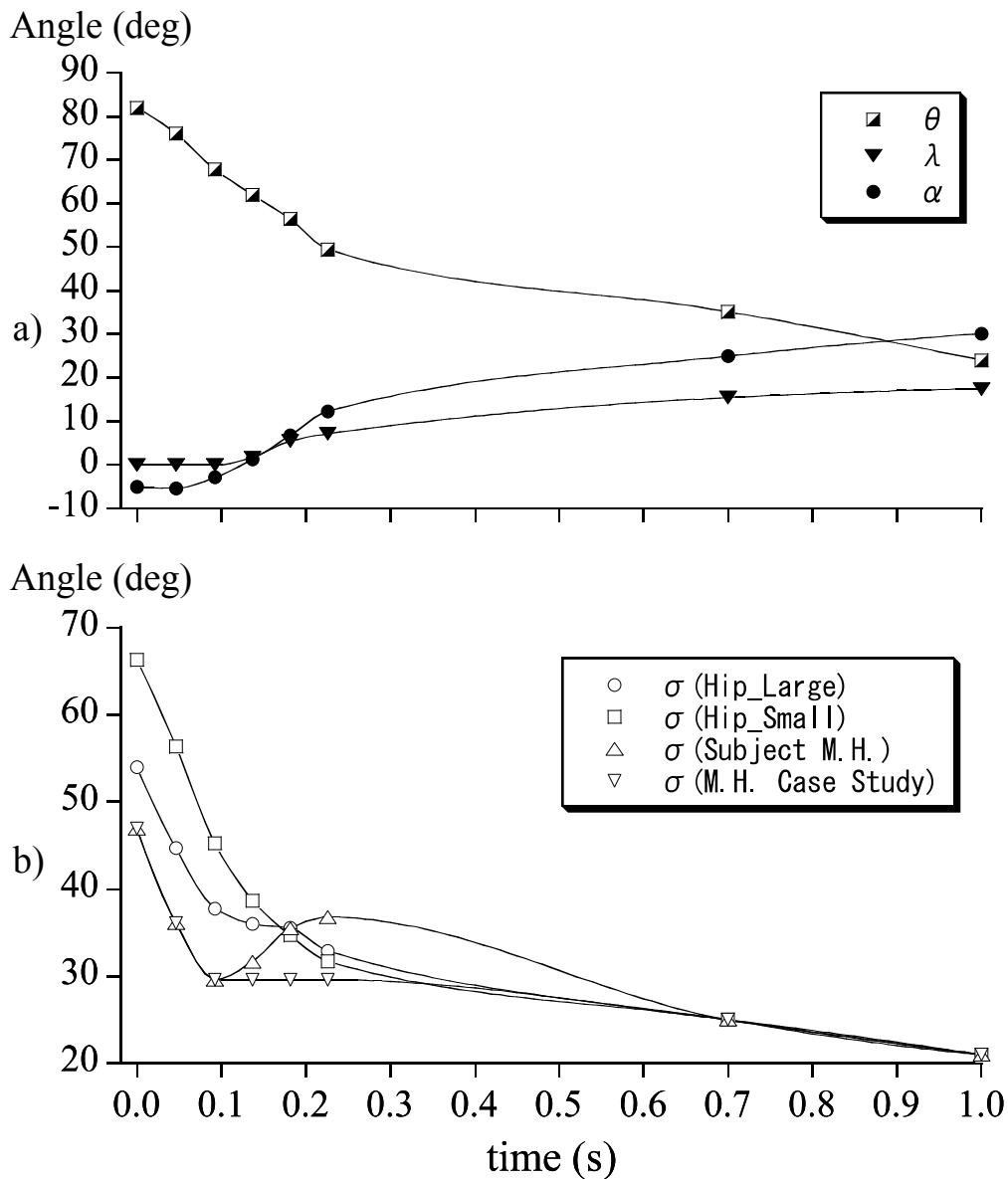


Figure 33 Position control of four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M. H. and M. H. case study) for computer simulation. These flight models have the same movement pattern in the ski to leg angle (θ), the ski to ski angle (λ) and the attack angle (α) as depicted in figure 33(a). The arm angle (ϕ) which is not shown here is set as a constant (170°) in each model. Figure 33(b) shows the difference in the hip bending angle (σ) between the models. These markers indicate experimental data, while the lines indicate interpolated data by using cubic spline function.

Table 7 The initial conditions of simulation for each flight model (Hip_Large, Hip_Small, subject M.H. and Subject M.H. case study).

	Unit	Hip_Large	Hip_Small	Subject M.H.	Subject M.H._case study
CGx	m	0.41	0.42	0.40	0.40
CGy	m	0.72	0.68	0.74	0.74
Vx	m/s	25.02	25.02	25.02	25.02
Vy	m/s	-2.32	-2.32	-2.32	-2.32
β	deg	-5.3	-5.3	-5.3	-5.3

Note. CGx and CGy means the horizontal and vertical coordinates of center of gravity (CG) of the jumper - ski model respectively. Vx and Vy mean the horizontal and vertical components of CG velocities respectively. β means the angle of CG velocity vector to horizontal line.

次に、シミュレーションの初期条件について述べる。各モデル（Hip_Large, Hip_Small, M. H.および M. H. Case Study）の合成重心位置（CGx, CGy）、身体ースキー系の合成重心速度（Vx, Vy）および合成重心の速度ベクトルと水平線とのなす角度（ β ）の初期条件を Table 7 に示す。合成重心の算出には、ジャンプ台を基準とした座標系 (X, Y) において、足関節中心の x 座標が 0 m となる姿勢を用いた。

ジャンプ台を飛び出す際の速度について、助走路に対して平行成分は、ラージヒル競技で一般的な助走速度である 90 km/h (25m/s) に設定し、同じく垂直成分は先行研究 (Komi ら 1974; Virnavirta ら 1993a; Schwameder ら 1995) より、2.5 m/s に設定した。Table 7 に示した Vx および Vy は、これらの速度を本研究で使用した座標系に変換した値である。なお、CGx および CGy 以外の初期条件は、すべての動作モデルで同じ値に設定した。

5.2.3.d スキージャンプ飛行シミュレーションによる算出項目

本研究で実施するシミュレーションによって算出した項目を以下に示す。

- 1) S_L : 揚力面積 (m^2)
- 2) S_D : 抗力面積 (m^2)
- 3) Q_M : ピッチングモーメント容積 (m^3)
- 4) V : 身体－スキー系の合成重心速度 (m/s)
- 5) V_x : 身体－スキー系の合成重心の水平方向速度 (m/s)
- 6) V_y : 身体－スキー系の合成重心の鉛直方向速度 (m/s)
- 7) CG_x : 身体－スキー系の合成重心の x 座標 (m)
- 8) CG_y : 身体－スキー系の合成重心の y 座標 (m)

5.3 結果

初期飛行局面における空気力について、まず、人形模型を用いた風洞実験の結果を示す。次に、飛行姿勢を独立変数として空気力係数を推定する回帰モデルの精度について示す。次に、前述の飛行動作モデルに、この空気力係数の回帰モデルを適用して空気力を推定した結果を示す。最後に、シミュレーション手法を用いて、飛行中の股関節角度の制御方法の違いが、飛行速度および飛行軌跡にどのような影響を及ぼすのかを示す。

5.3.1 初期飛行局面における空気力係数

第4章において、初期飛行局面の姿勢変化が、空気力に及ぼす影響を推定する際に、先行研究（谷ら 1951; 谷ら 1971）の風洞実験の結果を利用した。しかしながら、谷らの用いた姿勢が、初期飛行局面の姿勢と異なっていたため、いくつか仮定を必要とした。ここでは、それらの仮定が初期飛行局面においても成立するのか、

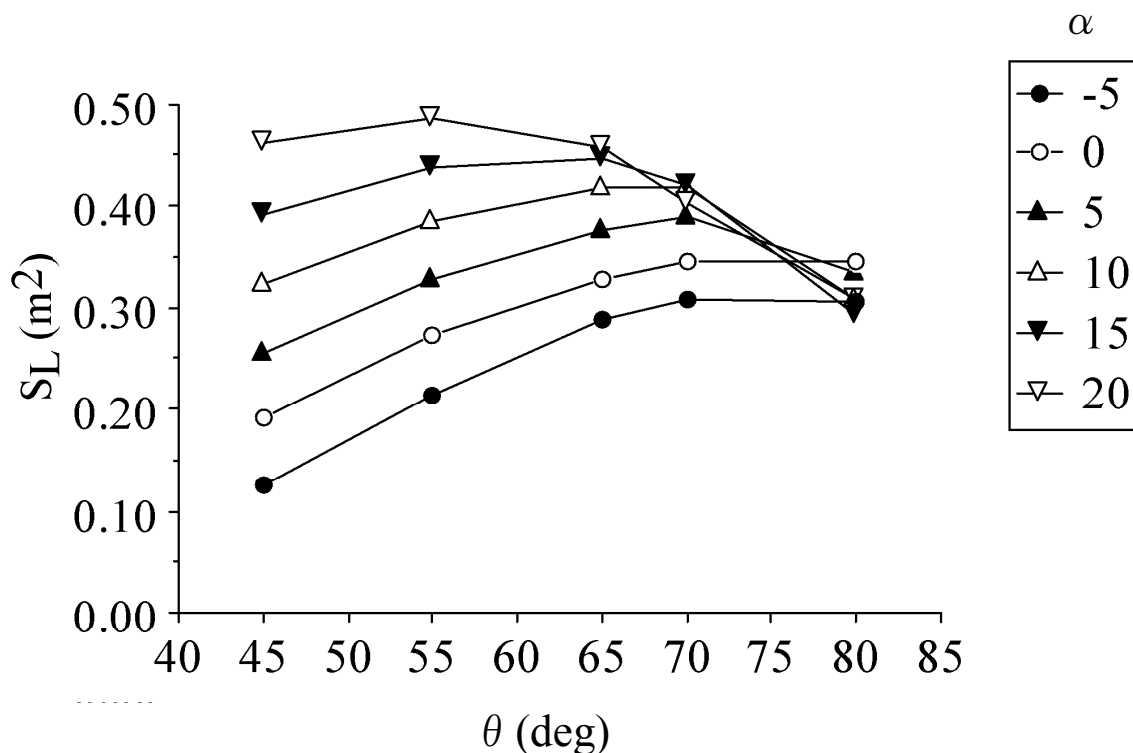


Figure 34 The relationship between the ski to leg angle θ and the lift area S_L when the arms fitted to the trunk (arm angle $\phi=170^\circ$). Each plot show different condition of angle of attack ($\alpha:-5\sim 20^\circ$). The other positions of the jumper-ski model were set as follows, hip bending angle $\sigma=40^\circ$ and ski to ski angle $\lambda=0^\circ$.

風洞実験による検証を行う。まず第1点は、上肢を体側に配置した条件では上肢を挙上した姿勢に比べ、下肢とスキーとのなす角度 (θ) の増大による揚力の減少が抑制されることである。第2点は、股関節が屈曲した初期飛行姿勢において、 θ の増大によって抗力、揚力およびピッチングモーメントが増大することである。第3点は、 θ が大きい初期飛行局面において、股関節角度の増大によって抗力、揚力およびピッチングモーメントが増大することである。

まず第1点に関する風洞実験の結果を示す。Fig. 34は、人形模型の姿勢について、股関節前屈角度 (σ) を 40° (4.2.3の Fig. 17における股関節角度 ε の 140° 相当)、スキーの開き角度 (λ) を 0° , そして上肢回転角度 (ϕ) を 170° (上肢を体側に沿わせた条件) に固定し、迎え角 (α) および下肢とスキーとのなす角度 (θ) を、

それぞれ $-5\sim 20^\circ$ および $45\sim 80^\circ$ まで変化させた場合の揚力面積 (S_L) の変化を示すものである。この条件は、4.4.1.a の Fig. 25a における股関節角度 $\varepsilon = 145^\circ$ ($\sigma = 35^\circ$ 相当) または $\varepsilon = 130^\circ$ ($\sigma = 50^\circ$ 相当) の姿勢条件と比較して、上肢回転角度 ($\phi = 30^\circ$) 以外はほぼ等しい姿勢である。

Fig. 34 に示したように、 α が $-5\sim 0^\circ$ までの条件で、 θ を $45\sim 70^\circ$ まで増大させると、 θ の増大に伴い S_L は増大し、さらに θ を 80° まで増大させても S_L はほとんど変化していなかった。一方で、 α が 5° 以上の条件では、 θ の増大に伴い S_L は一時的に増大し、その後 θ がある値に達すると、却って θ の増大に従い S_L は減少していた。ただし、 α が $5\sim 15^\circ$ までであれば、 θ を 45° から 65° まで増大させても S_L の減少は見られなかった。

次に、第2点に関する風洞実験の結果を Fig. 35 に示す。ここで示す飛行姿勢は、股関節角度 (ε) が前述の谷ら (1951) および谷ら (1971) の報告よりも小さい姿勢である。人形模型の姿勢は、股関節前屈角度 (σ) を 70° (股関節角度 ε の 110° 相当) に固定し、スキーの開き角度 (λ) および上肢回転角度 (ϕ) を、それぞれ 0° および 170° に固定した。この状態で、下肢とスキーとのなす角度 (θ) を $45\sim 80^\circ$ まで変化させ、迎え角 (α) を $-5\sim 20^\circ$ まで変化させた場合の抗力面積 (S_D)、揚力面積 (S_L) およびピッチングモーメント容積 (Q_M) を Fig. 35a, Fig. 35b および Fig. 35c にそれぞれ示す。Fig. 35 はいずれも α をパラメータとし、 θ を独立変数、そして空気力係数 (S_D , S_L , Q_M) を従属変数としてそれぞれ示している。

まず抗力面積 S_D の変化を見てみると (Fig. 35a)、いずれの θ の条件においても、 α が大きいほど S_D は大きい値を示した。また、同一の α において θ を増大させると、 S_D が増大していた。次に、揚力面積 S_L について見てみると (Fig. 35b)、いずれの θ の条件においても、 α が大きいほど S_L は大きい値を示した。また、同一の α において θ を増大させると、 S_L が増大していた。最後に、ピッチングモーメント容積

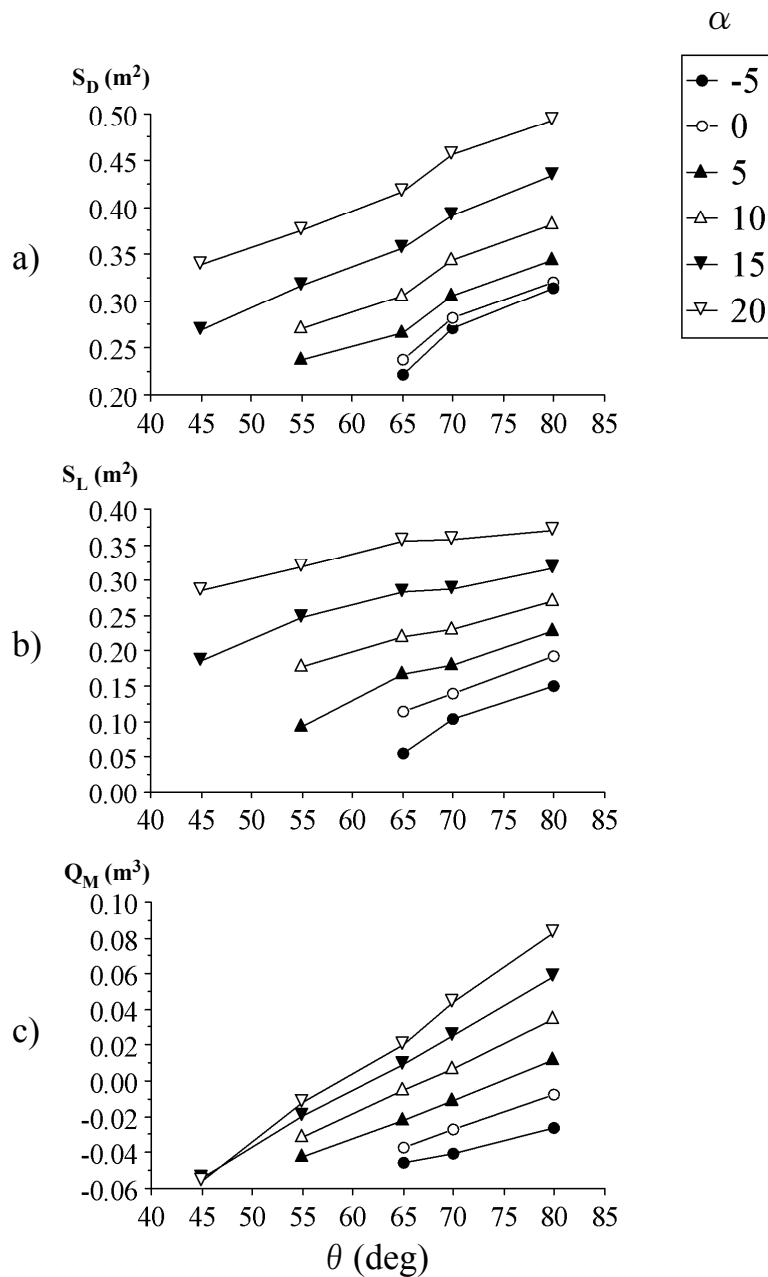


Figure 35 The relationship between the ski to leg angle θ and the aerodynamic forces (drag area S_D , lift area S_L and pitching moment volume Q_M).

Each plot show different condition of angle of attack (α :-5 $^{\circ}$ ~20 $^{\circ}$). The other positions of the jumper-ski model were set as follows, hip bending angle $\sigma=70^{\circ}$, ski to ski angle $\lambda=0^{\circ}$ and arm angle $\phi=170^{\circ}$.

Q_M について見てみると (Fig. 35c), いずれの θ の条件においても, α が大きいほど Q_M は大きい値を示した。また, 同一の α において θ を増大させると, Q_M が増大していた。

最後に、第3点に関する風洞実験の結果を Fig. 36 に示す。股関節前屈角度 (σ) の大きさが空気力に及ぼす影響を検討するため、人形模型の姿勢を以下のように設定した。すなわち、下肢とスキーとのなす角度 (θ) を 80° に固定し、スキーの開き角度 (λ) および上肢回転角度 (ϕ) を、それぞれ 0° および 170° に固定した。股関節前屈角度 (σ) を $30\sim 90^\circ$ (第4章の股関節角度 ε $150\sim 90^\circ$ 相当) まで変化させ、迎え角 (α) を $-5\sim 20^\circ$ まで変化させた場合の抗力面積 (S_D)、揚力面積 (S_L) およびピッチングモーメント容積 (Q_M) の変化を Fig. 36a, Fig. 36b および Fig. 36c にそれぞれ示す。Fig. 36 はいずれも α をパラメータとし、 σ を独立変数、そして空気力 (S_D , S_L , Q_M) を従属変数としてそれぞれ示している。

まず S_D の変化を見てみると (Fig. 36a), いずれの σ の条件においても、 α が大きいほど S_D は大きい値を示した。また、同一の α の条件において σ を減少させていくと、 S_D が増大していた。次に、 S_L について見てみると (Fig. 36b), α が -5° の条件においてのみ、 σ の減少に伴い S_L は増大していた。一方で α が 0° 以上の条件では、ある程度までは σ の減少に伴い S_L は増大していたが、 σ の大きさがある点よりも小さくなると、却って減少していた。最後に、 Q_M について見てみると (Fig. 36c), 前述の S_L と同様に、 α が -5° の条件においてのみ、 σ の減少に伴い Q_M は増大していた。一方で α が 0° 以上の条件では、ある程度までは σ の減少に伴い Q_M は増大していたが、 σ の大きさがある点よりも小さくなると、却って減少していた。

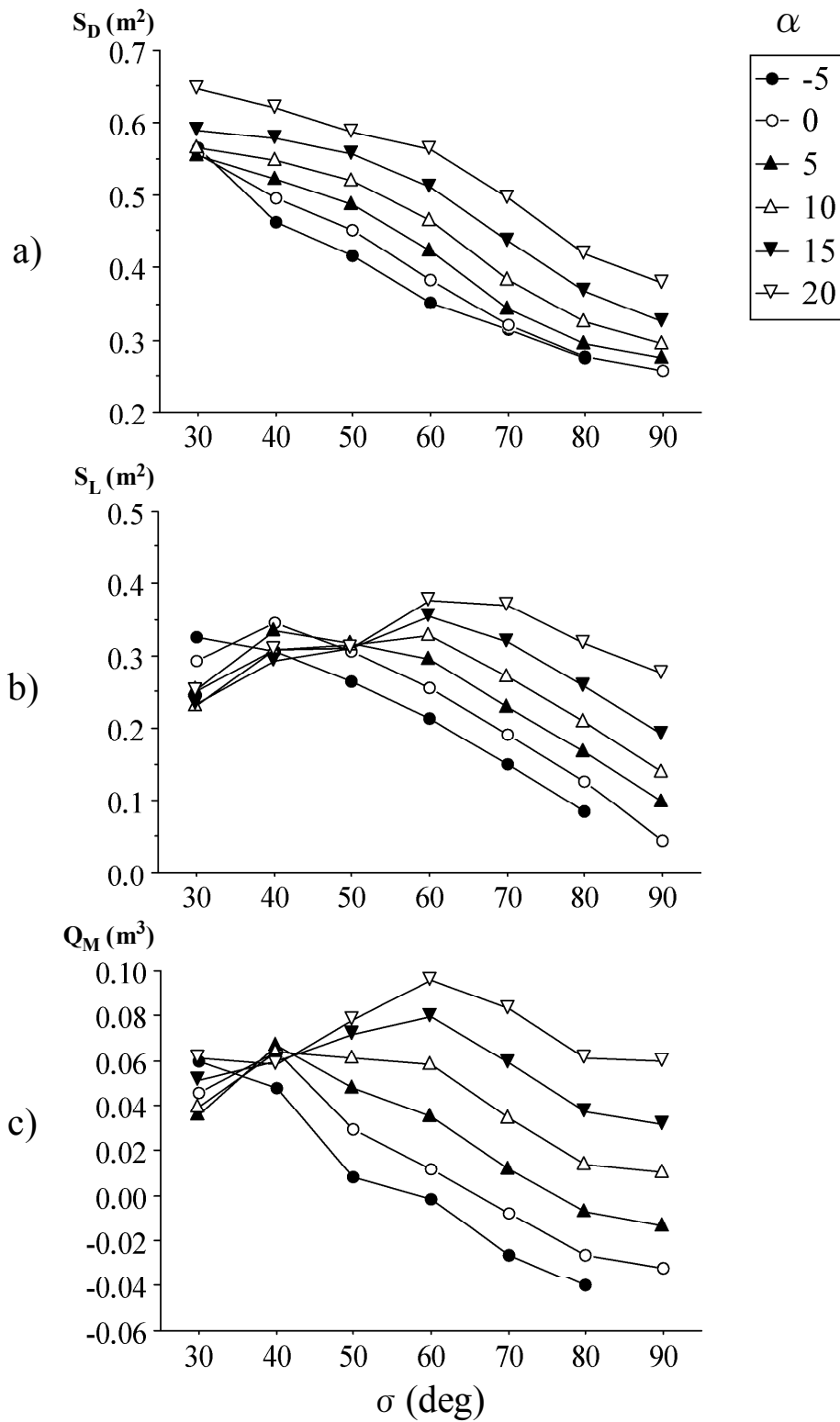


Figure 36 The relationship between the hip bending angle σ and the aerodynamic forces (drag area S_D , lift area S_L and pitching moment volume Q_M).

Each plot show different condition of angle of attack (α : $-5 \sim 20^\circ$). The other positions of the jumper-ski model were set as follows, ski to leg angle $\theta = 80^\circ$, ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$ and arm angle $\phi = 170^\circ$.

5.3.2 空気力係数の回帰モデル

前節では、 θ や σ の大きさが単独で変化した場合の空気力係数の変化を検討した。ここでは、複数の姿勢変化を組み合わせた場合の空気力係数の変化を定量的に推定する方法として、 α 、 θ 、 σ 、 λ および ϕ を独立変数とした空気力係数の回帰モデルの確立を試みた。

まず、風洞実験による空気力係数 (S_L 、 S_D および Q_M) の測定値と、前述の⑦～⑨式による空気力係数の回帰モデルによる推定値との比較を行うことで、回帰モデルの精度を検討する。最後に、先行研究 (Schmölzer ら 2002) による風洞実験結果との比較を行う。

5.3.2.a 空気力係数の回帰モデルの精度

Fig. 37 は風洞実験による測定値と回帰モデルによる推定値を比較したものである。なお、飛行姿勢について、 θ 、 σ 、 λ および ϕ の角度は、それぞれ 75、70、0 および 170° に設定し、 α を $-5 \sim 45^\circ$ まで変化させた。Fig. 37 に示したとおり、⑦～⑨式による空気力係数の推定値 (S_L 、 S_D および Q_M) は、風洞実験によって得られた測定値を良く反映していた。

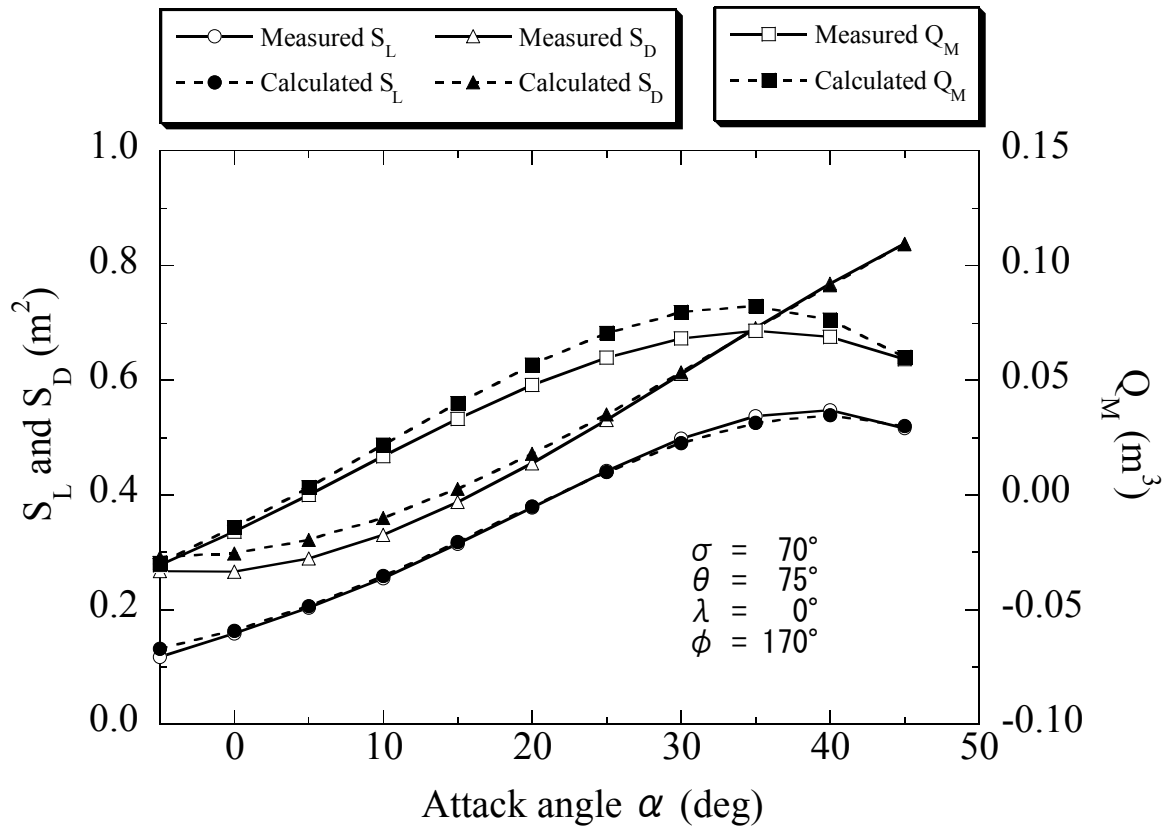


Figure 37 An example of the aerodynamic coefficients (S_L , S_D and Q_M) which were measured (white markers) and calculated (black markers).

次に、風洞実験によるすべての測定値（補間データを含む）と、回帰モデル（⑦、⑧および⑨式）による推定値との直線回帰分析結果を Fig. 38 に示す。S_L、S_DおよびQ_Mの回帰式の傾きはいずれも 1.00 であり、その決定係数(R²)は、それぞれ 0.999、0.999 および 0.997 であった。この結果から、本研究の回帰モデルは風洞実験による空気力係数の変化をよく反映していたものと考えられる。

また Fig. 39 には、回帰モデルによる推定値と風洞実験による測定値との差（残差）を、風洞実験による S_L、S_D および Q_M に対して示した。Fig. 39 に示したとおり、S_L、S_D および Q_M のいずれにおいても、その残差は 0 を中心に正負に偏りなく分布していた。また空気力係数の増大に伴う残差の系統的な増大および減少は認められなかった。なお、Fig. 40 には残差を度数分布として示した。残差の標準偏差として求められる標準誤差推定量（Estimated Standard Error）は、それぞれ（S_L： ±0.006 m²，S_D： ±0.006 m²，Q_M： ±0.003 m³）であった。

これら⑦、⑧および⑨式の多項式の係数 a_{ijklm}、b_{ijklm} および c_{ijklm} は、それぞれ Table A1、Table A2 および Table A3 として付録 A.2 に示した。

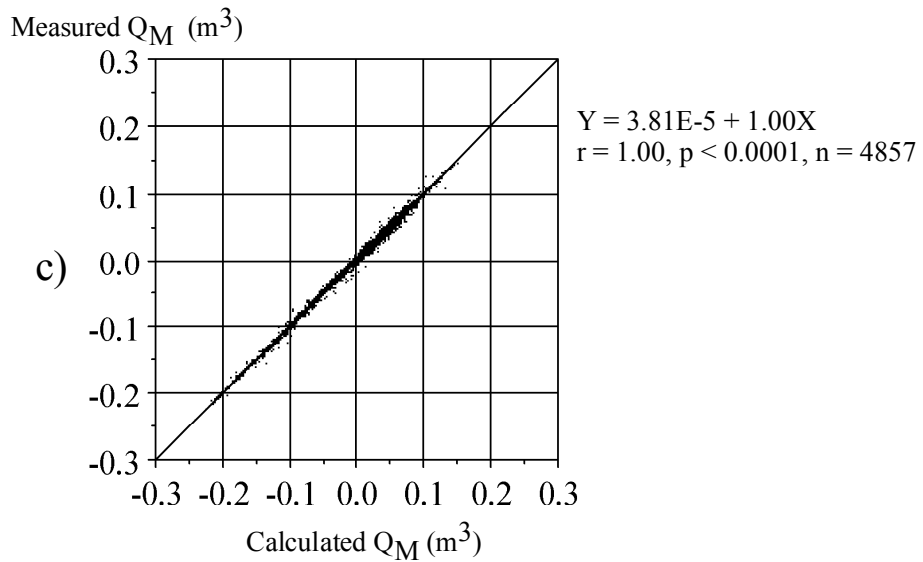
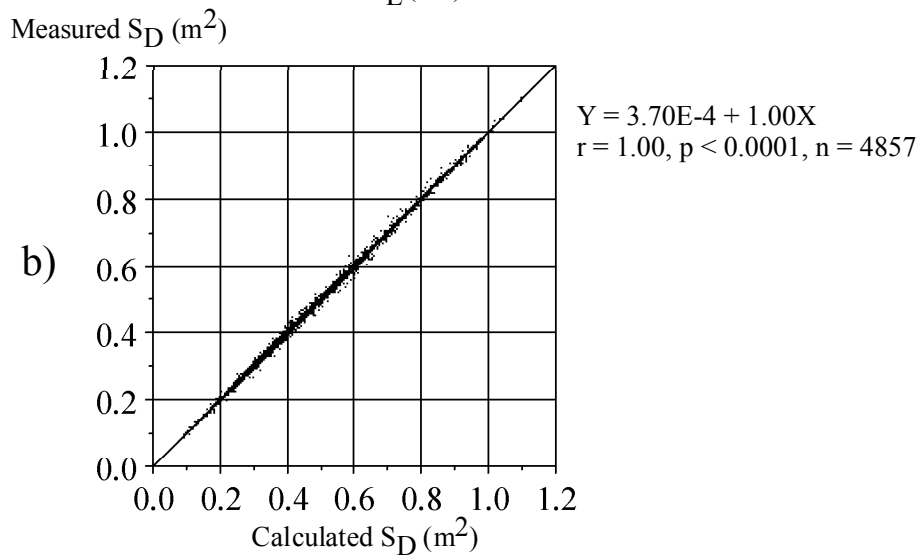
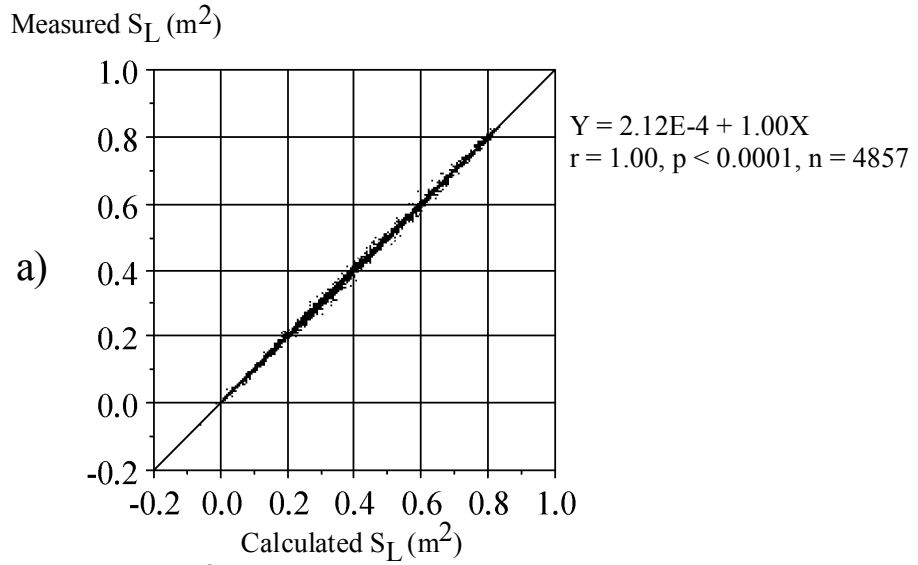


Figure 38 The relationship between the aerodynamic coefficients (S_L , S_D and Q_M) which were measured by the wind tunnel experiment (ordinate) and those which were calculated by the regression model (abscissa).

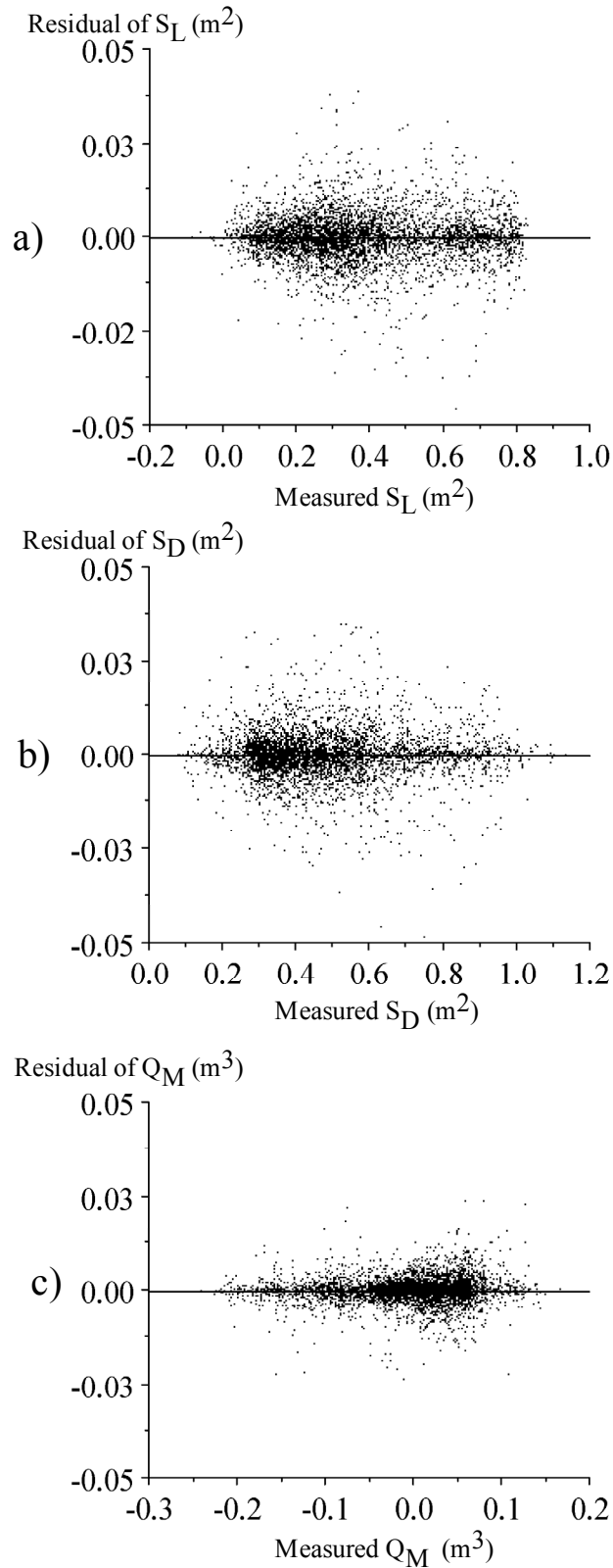


Figure 39 The distribution of the residual of the aerodynamic coefficients (S_L , S_D and Q_M) between those which were calculated by the regression model and those which were measured by the wind tunnel experiment.

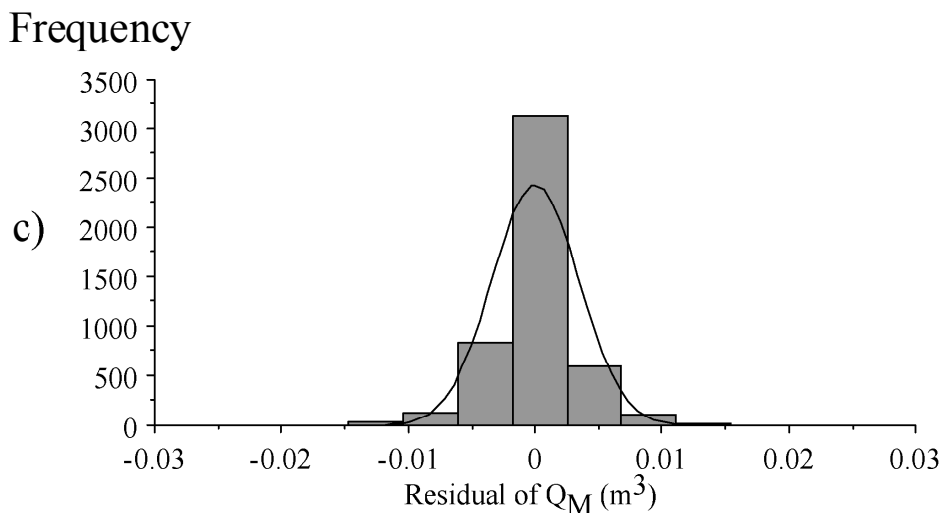
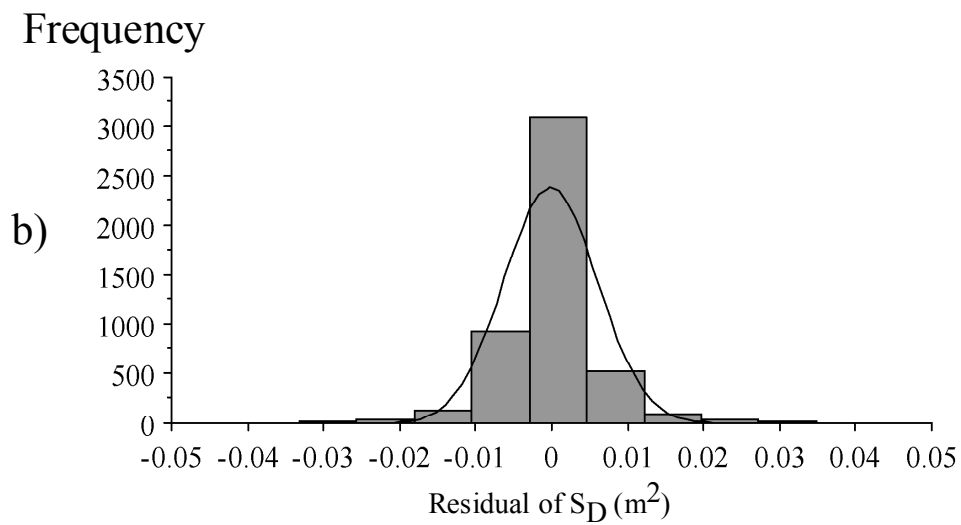
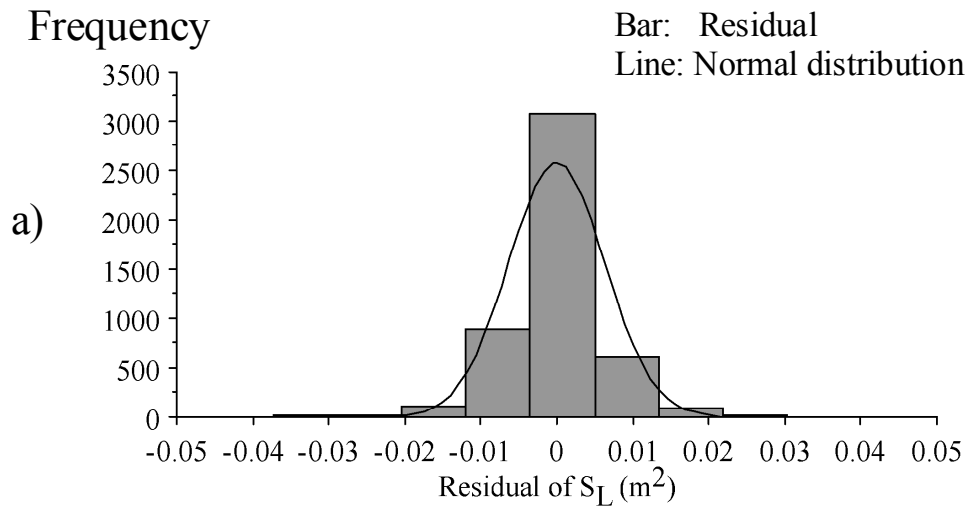


Figure 40 The frequency of the residual of each aerodynamic coefficient (S_L , S_D and Q_M). The residual means the difference in the aerodynamic coefficients between the calculated value by the regression models and the measured value by the wind tunnel experiments. A curve line in each diagram shows the normal distribution.

5.3.2.b 先行研究による風洞実験結果への当てはめ

先行研究 (Schmölzer ら 2002) による風洞実験の結果に対し、本研究で得られた空気力係数の回帰モデルをそれらの姿勢に当てはめて、空気力係数 (S_L および S_D) を算出した (Fig. 41)。空気力係数の算出にあたり、Schmölzer ら (2002) の人形模型の身長 (1.78 m) と、本研究で使用した人形模型の身長 (1.75 m) の大きさの違いを考慮し、本研究の回帰モデルによって出力された空気力係数に身長比の二乗 (1.017^2) を乗じた。また、Schmölzer ら (2002) の報告では、下肢とスキーとのなす角度 (θ) を肩峰と足関節外果を結んだセグメントとスキーとのなす角度で定義されており、本研究の定義 (腰と足関節外果を結んだセグメントとスキーとのなす角度) と異なっていた。そこで、身長から各身体セグメント長を推定する方法 (Winter 1990) を用いて、体幹部分および下肢のセグメント長をそれぞれ 0.51 m および 0.87 m と推定した上で、改めて本研究の定義にしたがって θ を算出した。

Fig. 41b に示したように、 S_L については、本研究の回帰モデルによる出力値が、Schmölzer ら (2002) の風洞実験の結果よりやや大きいものの、ほぼ同じ値を示した。一方で、 S_D については (Fig. 41c)、本研究の回帰モデルによる出力値と Schmölzer ら (2002) の風洞実験の結果は、約 1 秒まではほぼ同じ値であったが、その後迎え角 (α) が約 30° を越えるようになると、回帰モデルによる出力値が Schmölzer ら (2002) の風洞実験の結果よりも大きな値を示した。なお、Schmölzer ら (2002) は Q_M の資料を示していないため、本研究で得られた空気力係数の回帰モデルによる出力との比較を行っていない。

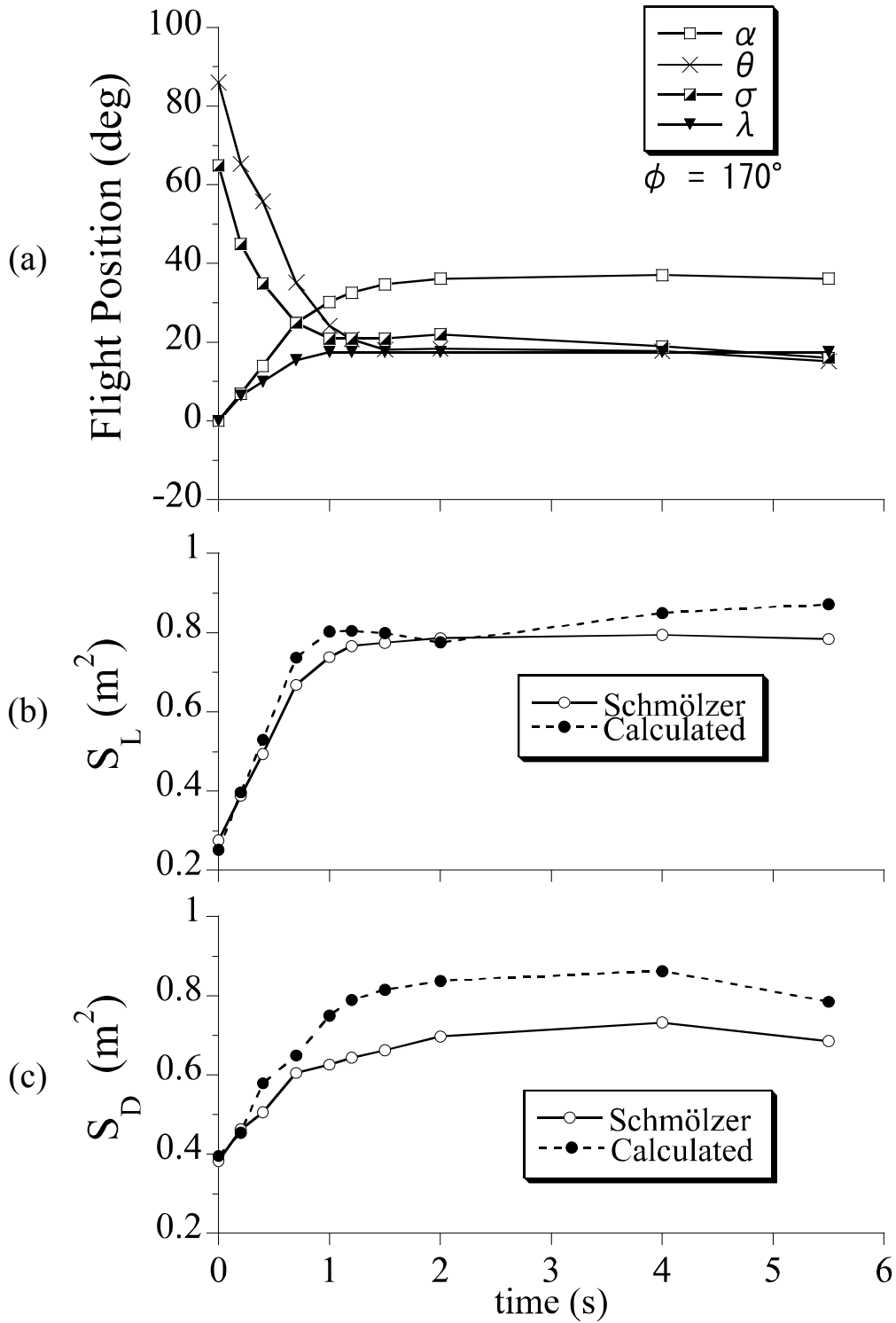


Figure 41 Flight positions and the aerodynamic coefficients (S_D and S_L). A comparison between this study (noted “Calculated”) and the precedent study (noted “Schmölzer”) about lift area (b) and drag area (c) respectively. Flight positions (a), lift area (b) and drag area (c) were adapted from Schmölzer et al. (2002).

5.3.3 初期飛行局面の飛行シミュレーション

ここでは、4つのモデル化された飛行姿勢を対象に、シミュレーションを行った結果を示す。まず、空気力係数の回帰モデルを用いて、これらの飛行動作モデルに作用する空気力係数（揚力面積、抗力面積およびピッチングモーメント容積）の大きさを推定し、各飛行動作モデル間で比較する。次に、得られた空気力係数を用いたシミュレーションによって、飛行速度および飛行軌跡を算出し、各飛行動作モデル間で比較する。

5.3.3.a 股関節角度制御の違いが空気力係数に及ぼす影響

飛行姿勢から空気力係数を推定する回帰モデル（5.2.2の⑦、⑧および⑨式）を用いて、5.2.3.cのFig. 33で示した4つの飛行動作モデル（Hip_Large, Hip_Small, M. H.およびM. H. Case Study）に作用する空気力係数（揚力面積 S_L 、抗力面積 S_D およびピッチングモーメント容積 Q_M ）を推定した。

Fig. 42は横軸に時間、縦軸に S_L （Fig. 42a）、 S_D （Fig. 42b）および Q_M （Fig. 42c）をそれぞれ示す。まず、 S_L について見てみると（Fig. 42a）、ジャンプ台を飛び出してから約0.10 sまではM. H.およびM. H. Case Studyの S_L が最も大きく、Hip_Smallが最も小さな値を示し、Hip_Largeはその中間の値を示した。この局面における、各飛行動作モデルの σ を見てみると（Fig. 33b参照）、 σ が小さいほど大きな S_L が作用していたことが分かる。その後、約0.10~0.15 sにおいて、4つの飛行動作モデルの S_L はほぼ同じ大きさに収束した。ただし各飛行動作モデル間の σ の大きさが収束していたわけではなく、0.15 sにおける各飛行動作モデル間の σ は、 29.6° （M. H. Case Study）から 37.3° （Hip_Small）までであった。その後、約0.15~0.20 sの局面で、M. H. Case Studyは、その他のいずれの飛行動作モデルよりも大きな S_L を示した。一方で、その他の3つの飛行動作モデルの S_L は、ほぼ同じ値を示した。この

局面において、M. H., Hip_Large および Hip_Small の σ の値は、ほぼ同じ値に収束していた。また、M. H. Case Study は、その他の飛行動作モデルよりも小さい σ を示した。その後、約 0.20~0.30 s において、4 つの飛行動作モデルの S_L は、再びほぼ同じ値になった。0.30 s における σ の値を見てみると、M. H. Case Study が最も小さく (29.4°)、M. H. が最も大きい値であった (36.2°)。その後、約 0.30~0.70 s において、M. H. は、M. H. Case Study, Hip_Large および Hip_Small よりも小さな値を示した。この局面において、M. H. Case Study, Hip_Large および Hip_Small の σ はほぼ同じ値であり、M. H. はそれらの動作モデルよりも大きな σ を示した。最後に、すべての動作モデルの σ がほぼ同じ値となる 0.70~1.00 s において、4 つの飛行動作モデル間で S_L の差は見られなかった（この傾向は S_D および Q_M においても同様に観察された）。

次に S_D について見てみる (Fig. 42b)。ジャンプ台を飛び出してから約 0.20 s までは Hip_Large が Hip_Small よりも大きい値を示したものの、その後 1.00 s までは両者の S_D に差は見られなかった。M. H. および M.H. Case Study を見ると、ジャンプ台を飛び出してから約 0.10 s までは両モデルの S_D は同じ値で、かつ Hip_Large よりも大きかった。その後約 0.10~0.70 s において M. H. は M.H. Case Study よりも小さい S_D を示した。特に約 0.20~0.70 s において M. H. が示した S_D は、Hip_Large および Hip_Small のそれよりも小さい値であった。また、前述の通り 0.70~1.00 s において、4 つの飛行動作モデル間で S_D の大きさに差は見られなかった。

最後に、 Q_M について見てみる (Fig. 42c)。ジャンプ台を飛び出してから約 0.20 s までは Hip_Large が Hip_Small よりも大きな Q_M を示した。特に 0.00~0.10 s の局面には、Hip_Small の Q_M は負の値を示した。その後約 0.20~0.40 s では、わずかながら Hip_Small が Hip_Large よりも大きな Q_M を示した。その後約 0.40~1.00 s において、両者の Q_M に差は見られなかった。M. H. および M.H. Case Study を見ると、ジ

ジャンプ台を飛び出してから約 0.10 s までは両モデルの Q_M は同じ値で、かつ Hip_Large よりも大きかった。その後、M.H. Case Study は約 0.10~0.30 s において M. H., Hip_Large および Hip_Small のいずれの飛行動作モデルよりも大きな Q_M を示した。その後約 0.30~1.00 s において、M.H. Case Study の Q_M は Hip_Large とほぼ同じ値を示した。一方で M. H. は、0.20~0.70 s において 4 つの飛行動作モデルの中で最も小さな Q_M を示した。なお、0.70~1.00 s では 4 つの飛行動作モデル間で Q_M に差は認められなかった。

ここで、時間経過に伴う Q_M の変化の様子を見てみると、ジャンプ台を飛び出してから一時的に増大し、約 0.10~0.20 s 後に最大かつ正の値となり、それ以降 1.00 s まで減少し続け、負の値になっていた。すなわち、ピッチングモーメントは正（頭上げ）から負（頭下げ）へとその極性が変化していた。この、 Q_M が正から負へ転ずる時刻を見てみると、Hip_Large, Hip_Small および M.H. Case Study のでは約 0.40 s であり、M. H. では 0.26 s であった。すなわち、M. H. には、4 つの飛行動作モデル中最も早いタイミングで、前回りのピッチングモーメントが作用していた。

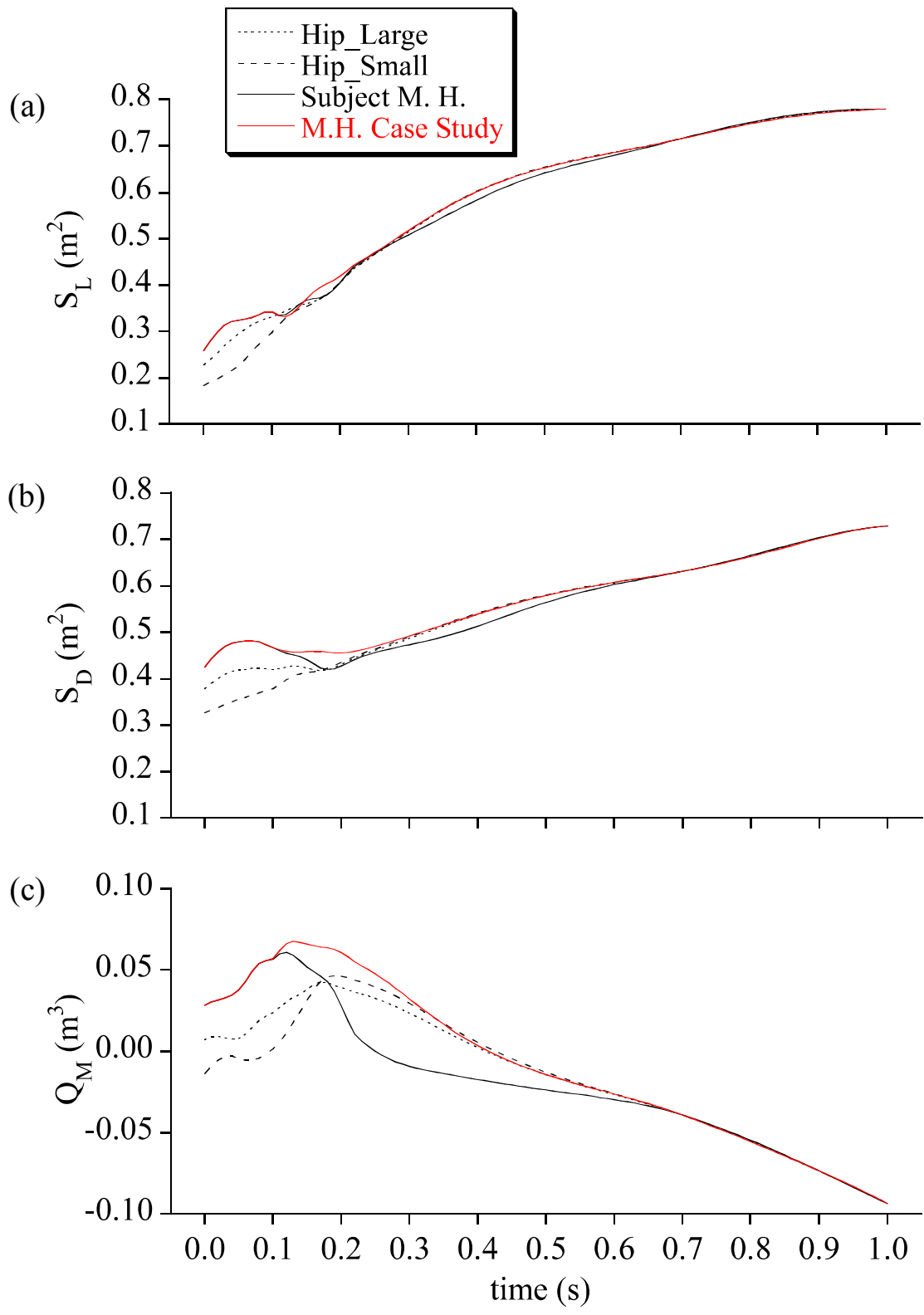


Figure 42 Calculated aerodynamic coefficients of four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M. H. and M. H. Case Study) by using the regression models which were established in this study.

5.3.3.b 股関節角度制御の違いが飛行速度に及ぼす影響

ここでは、4つの飛行動作モデルにおける飛行速度を示す。まず身体—スキー系の合成重心の水平方向速度 (V_x) および鉛直方向速度 (V_y) について見てみると (Fig. 43 および Fig. 44) , いずれの飛行動作モデルにおいても、 V_x および V_y は時間の経過とともに減少していた。Fig. 43 に示したように、約 0.20 s において V_x は Hip_Small, Hip_Large の順に大きな値を示し、M. H. と M. H. Case Study がほぼ同じ値で Hip_Large に続いた。その後 1.00 s までの間も同様に、 V_x は Hip_Small, Hip_Large, M. H. Case Study の順に大きい値を示したが、M. H. の V_x はこの局面において次第に M. H. Case Study よりも大きくなり、1.00 s の時点では Hip_Large とほぼ同じ値になっていた。

また、Fig. 44 に示したように、各飛行動作モデル間の V_y の違いは飛行中の変化に比して小さいため、明瞭ではなかった。そこで、各飛行動作モデル間の速度の違いを詳細に見るため、いくつかの局面を抽出して V_x および V_y を各飛行動作モデル間で比較した。すなわち、Hip_Large, Hip_Small および M. H. の飛行動作モデルの股関節前屈角度 (σ が) ほぼ同じ値に収束する 0.2 s 時点、途中経過点の 0.6 s 時点、そして最終局面である 1.0 s 時点において、各飛行動作モデル間の速度を比較した (Fig. 45) 。

まず、0.2 s 時点の速度を見ると (Fig. 45a) , Hip_Large, Hip_Small, M. H. および M. H. Case Study の V_x はそれぞれ (24.62, 24.65, 24.59 および 24.58 m/s) であった。同様に、 V_y はそれぞれ (-3.88, -3.92, -3.86 および -3.86 m/s) であった。

次に、0.6 s 時点の速度を見ると (Fig. 45b) , Hip_Large, Hip_Small, M. H. および M. H. Case Study の V_x はそれぞれ (23.80, 23.82, 23.79 および 23.75 m/s) であった。同様に、 V_y はそれぞれ (-6.39, -6.41, -6.40 および -6.36 m/s) であった。

最後に、1.0 s 時点の速度を見ると (Fig. 45c) , Hip_Large, Hip_Small, M. H. およ

び M.H. Case Study の V_x はそれぞれ (22.96, 22.99, 22.95 および 22.91 m/s) であつた。同様に, V_y はそれぞれ (-8.45, -8.47, -8.46 および -8.44 m/s) であつた。

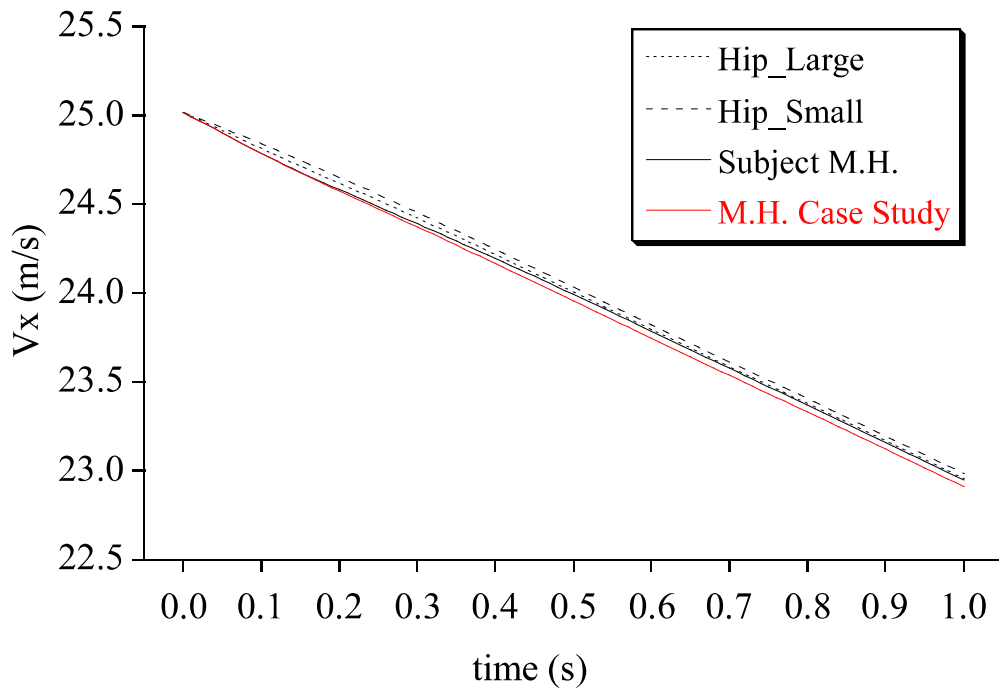


Figure 43 The horizontal velocity of the center of gravity which was calculated by simulation for the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study).

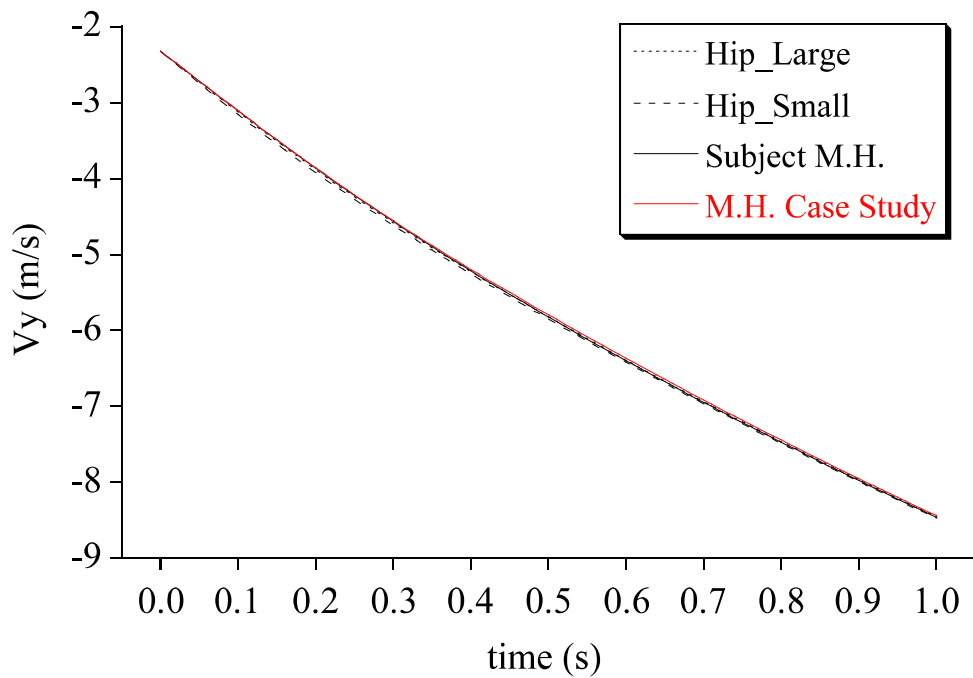


Figure 44 The vertical velocity of the center of gravity which was calculated by simulation for the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study).

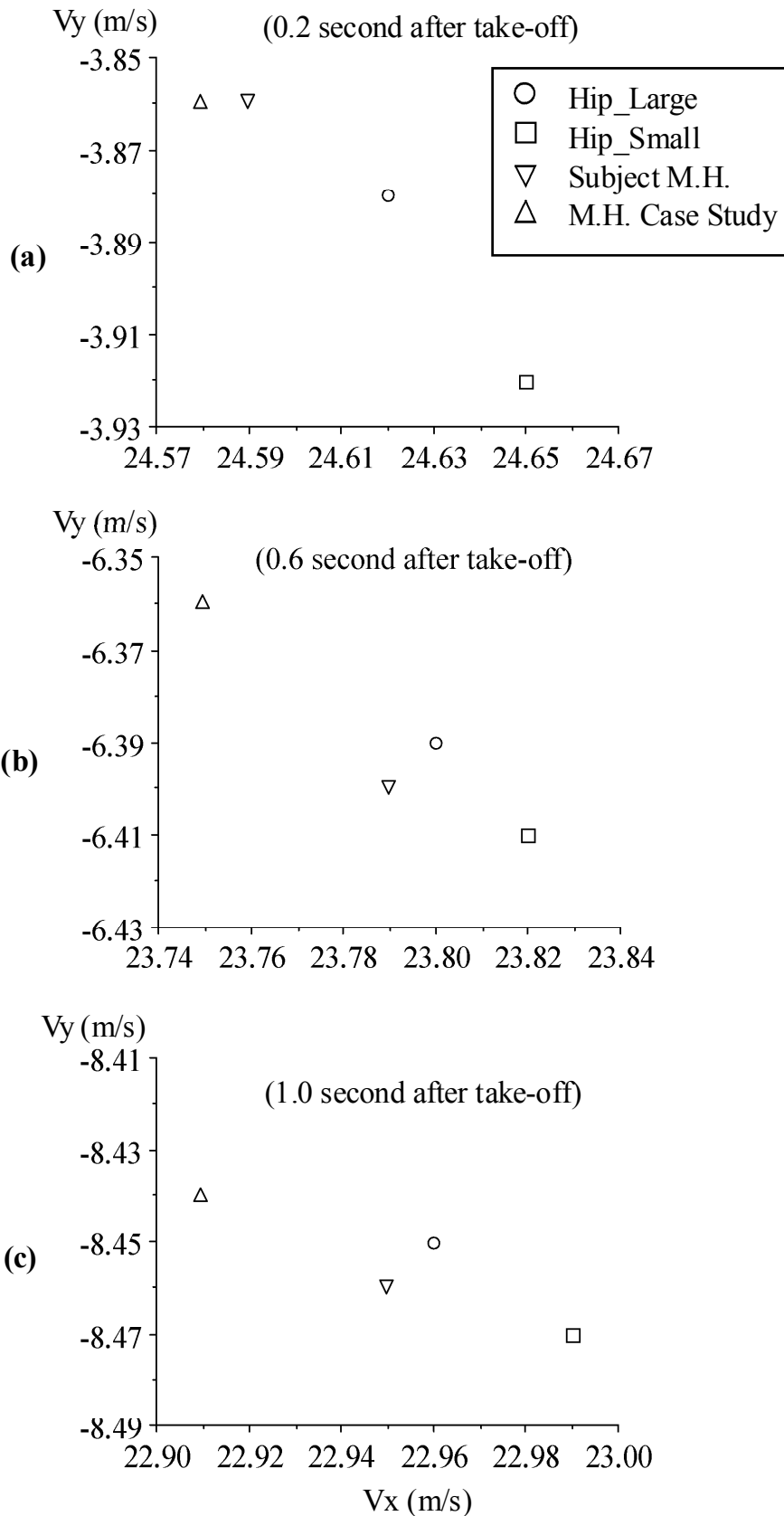


Figure 45 Velocity of the center of gravity during the early flight phase for the flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study). These diagrams depict horizontal (V_x) and vertical (V_y) component of the velocity at 0.2 (a), 0.6 (b) and 1.0 (c) second after take-off respectively.

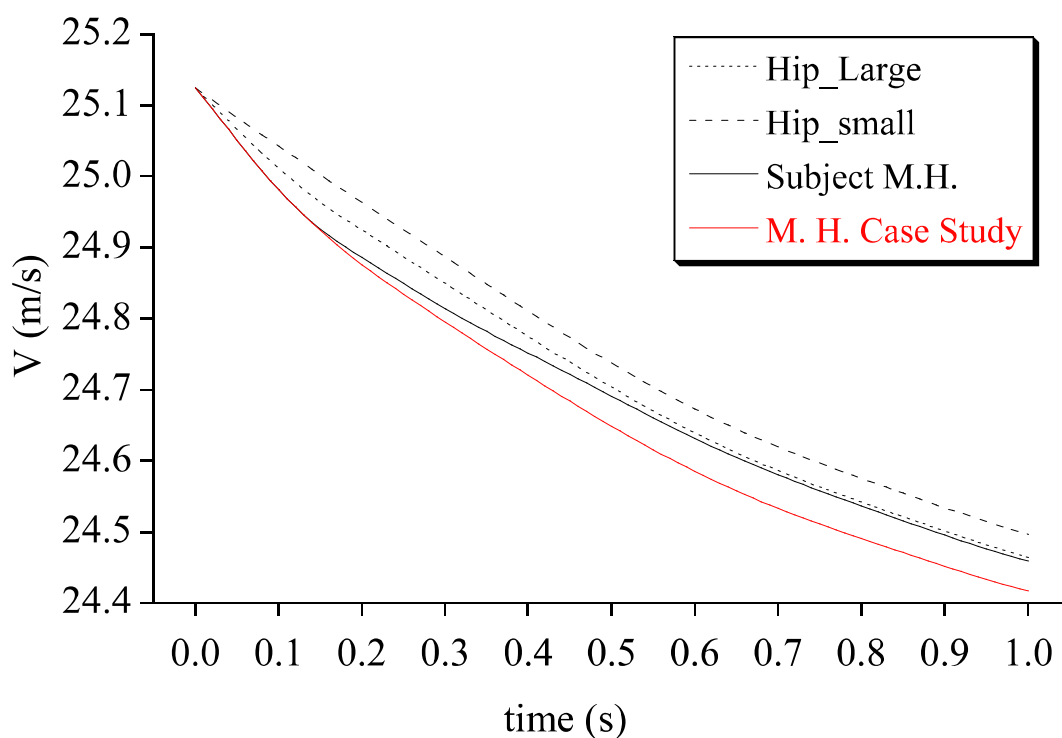


Figure 46 The velocity of the center of gravity which was calculated by simulation for the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study).

次に合成重心速度 (V) の変化をしてみる (Fig. 46)。⑫および⑬式で示したように、揚力面積 (S_L) および抗力面積 (S_D) が同じ大きさであれば、V の大きさの二乗に比例して揚力 (L) および抗力 (S_D) が大きくなる。すなわち、V がこれらの空気力に与える影響は大きいと言えよう。Fig. 46 に示したように、いずれの飛行動作モデルにおいても、時間の経過とともに V は減少していた。

Fig. 46 に示したように、約 0.20 s において、V は Hip_Small, Hip_Large の順に大きな値を示し、M. H. と M. H. Case Study がほぼ同じ値で Hip_Large に続いた。その後 1.00 s までの間も同様に、V は Hip_Small, Hip_Large, M. H. Case Study の順に大きい値を示した。一方で、この局面において M. H. の V は、次第に M. H. Case Study よりも大きくなり、1.00 s の時点では Hip_Large とほぼ同じ値になっていた。

5.3.3.c 股関節角度制御の違いが飛行軌跡に及ぼす影響

ここでは、4つの飛行動作モデル（Hip_Large, Hip_Small, M. H.および M.H. Case Study）における飛行軌跡の違いを見る。飛行シミュレーションの結果をスティックピクチャーで示した（Fig. 47）。各飛行動作モデルにおいて、スティックピクチャーは0.1 s 間隔で描画した。各飛行動作モデルに示した丸印は、合成重心位置を示す。またこれらの丸印を結ぶ点線は、合成重心の軌跡を意味する。本研究では、この合成重心の軌跡を飛行軌跡として取り扱う。ただし、ジャンプ台を飛び出す際の合成重心の位置（CGx, CGy）は、それぞれの飛行動作モデルの股関節前屈角度（ σ ）によって異なる（Table 7）。すなわち、シミュレーションによって算出された飛行軌跡にはこれらの初期条件の影響がある。そこで、これらの初期条件の影響を打ち消すために、CGx および CGy の初期値を飛行軌跡から差し引き（4.2.3 の Fig. 17 参照）、変位としてそれぞれ DCGx および DCGy を求めた（Fig. 48）。すなわち、DCGx の大きさは、ジャンプ台を飛び出した直後から合成重心がどの程度 X 軸方向に進んだのかを意味する。一方で、DCGy は常に負の値を示したことから、DCGy の絶対値の大きさは、合成重心がどの程度 Y 軸方向に落下したのかを意味する。

ここでも 5.3.3.b と同様に、各飛行動作モデルの 0.2 s, 0.6 s および 1.0 s 時点における DCGx および DCGy を比較した（Fig. 48a, Fig. 48b および Fig. 48c）。

まず、0.2 s 時点における Hip_Large, Hip_Small, M. H. および M.H. Case Study の DCGx はそれぞれ、（4.96, 4.97, 4.96 および 4.96 m）であった（Fig. 48a）。同様に、DCGy はそれぞれ、（-0.62, -0.63, -0.62 および -0.62 m）であった。

次に、0.6 s 時点における Hip_Large, Hip_Small, M. H. および M.H. Case Study の DCGx はそれぞれ、（14.65, 14.67, 14.64 および 14.62 m）であった（Fig. 48b）。同様に、DCGy はそれぞれ、（-2.70, -2.72, -2.69 および -2.69 m）であった。

最後に、1.0 s 時点における Hip_Large, Hip_Small, M. H. および M.H. Case Study

の DCG_x はそれぞれ, (24.00, 24.03, 23.98 および 23.96 m) であった (Fig. 48c)。

同様に, DCG_y はそれぞれ, (-5.68, -5.71, -5.68 および -5.66 m) であった。

また, 1.00 s 以降は姿勢 (α , θ , σ , λ および ϕ) を変化させずに, 着地までシミュレーションを継続した場合の最終的な飛距離を求めた。なお, 着地点を求める際には, 先行研究 (谷ら 1971; Seo ら 1999; Seo ら 2004b) を参考に, ジャンプ台と身体-スキー系の合成重心との交点を用いた。その結果, 各飛行動作モデルの飛距離は, それぞれ Hip_Large (91.8 m), Hip_Small (91.8 m), M. H. (91.6 m), および M. H. Case Study (91.1 m) であった。これらの飛距離をスキージャンプ競技規則 (飛距離は 0.5 m 単位で計測され, 端数は切り捨てられる) に照らすと, Hip_Large, Hip_Small および M. H. の飛距離は 91.5 m, そして M. H. Case Study は 91.0 m であった。

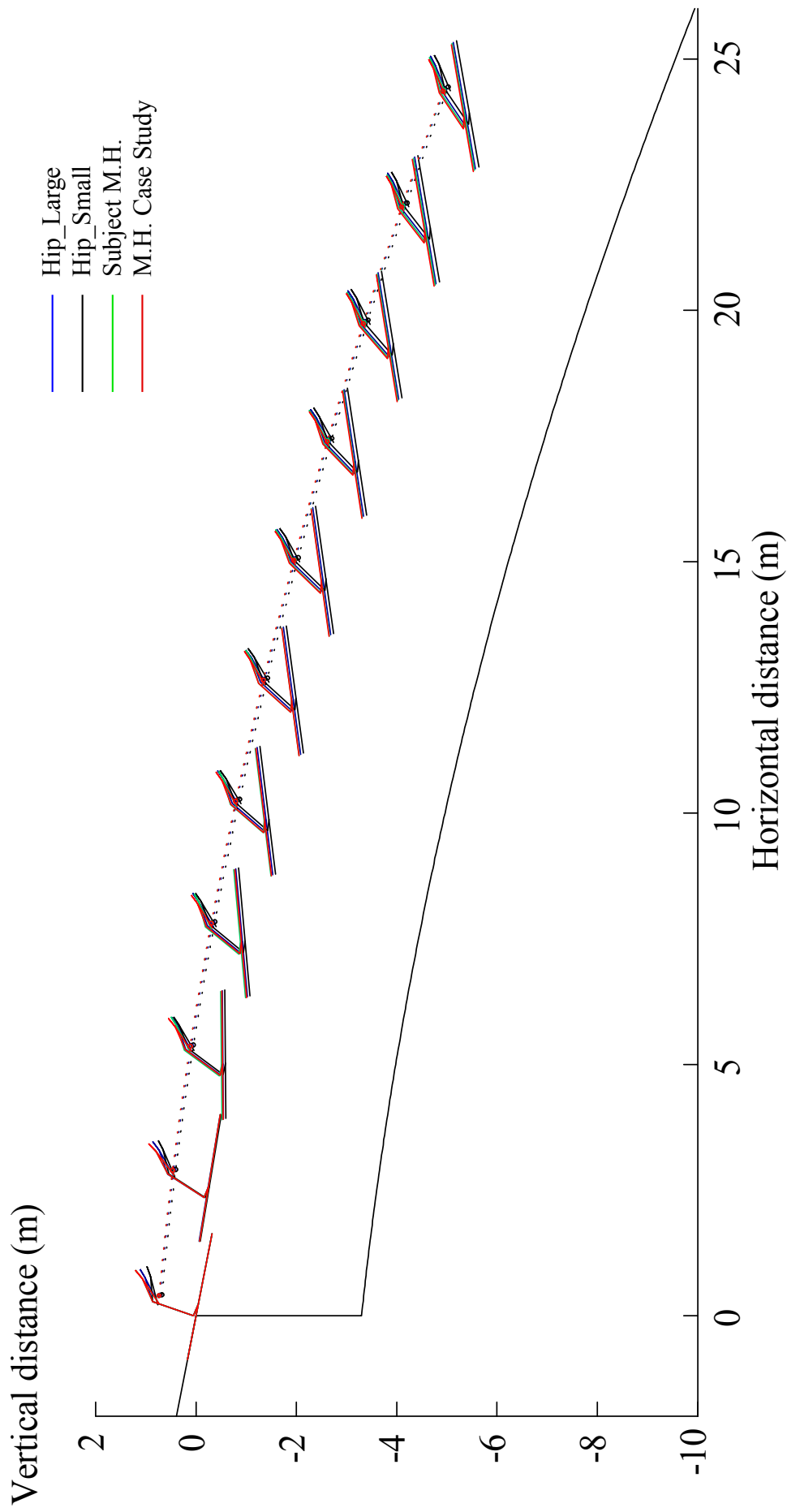


Figure 47 Stick pictures of the early flight phase of the four flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study) which were calculated by simulation. The dotted lines mean the flight path of the center of gravity of the four models respectively. The duration of the simulation was 1.0 second. The interval of each picture is 0.1 second.

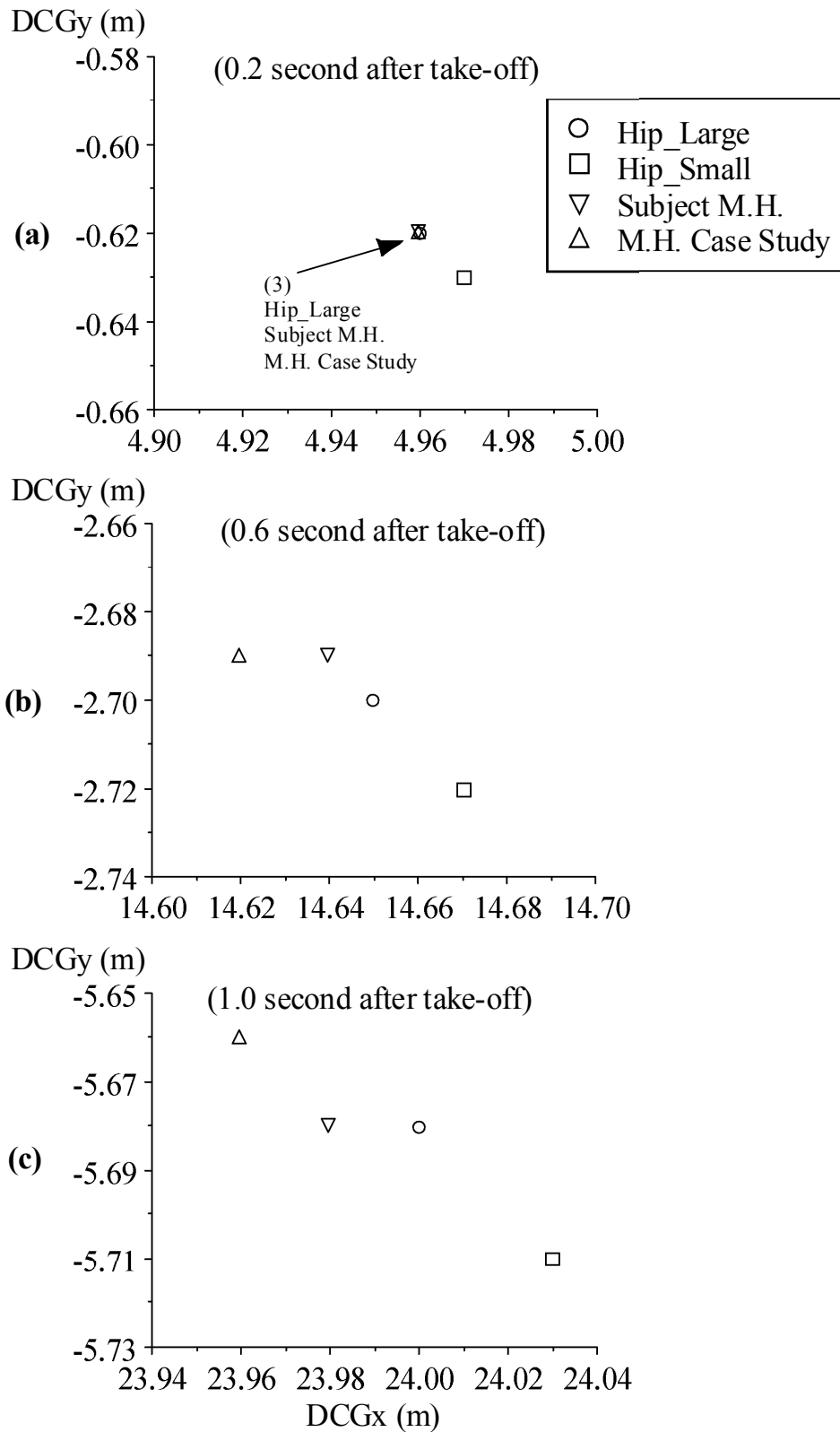


Figure 48 Displacement of the center of gravity during the early flight phase for the flight models (Hip_Large, Hip_Small, Subject M.H. and M.H. Case Study). These diagrams depict horizontal (DCGx) and vertical (DCGy) displacement of the center of gravity at 0.2 (a), 0.6 (b) and 1.0 (c) second after take-off respectively.

5.4 考察

まず、本研究で行ったスキージャンプ初期飛行局面の風洞実験結果と、先行研究（谷ら 1951; 谷ら 1971）との比較を行い、初期飛行局面の姿勢変化が空気力係数に及ぼす影響を定性的に明らかにする。次に、飛行姿勢を独立変数として空気力係数を推定する回帰モデルについて、その推定精度について示す。最後に、モデル化された飛行動作に作用する空気力係数を推定し、コンピュータシミュレーションによって、各飛行動作モデルの飛行速度および飛行軌跡を比較する。

5.4.1 初期飛行局面における空気力係数

第4章で、先行研究（谷ら 1951; 谷ら 1971）の知見を、初期飛行局面の姿勢に拡張するためにいくつかの仮定を行った。それらの仮定は、谷らの用いた姿勢が、初期飛行局面の姿勢と異なっていたことに由来するものであった。仮定の第1点は、上肢を体側に配置した条件では上肢を挙上した姿勢に比べ、下肢とスキーとのなす角度（ θ ）の増大による揚力の減少が抑制されることである。第2点は、股関節が屈曲した初期飛行姿勢において、 θ の増大によって抗力、揚力およびピッチングモーメントが増大することである。第3点は、 θ が大きい初期飛行局面において、股関節角度の増大によって抗力、揚力およびピッチングモーメントが増大することである。ここでは、それらの仮定が初期飛行局面においても成立するのか、初期飛行局面の飛行姿勢を対象とした風洞実験の結果から検討する。

まず第1点について、谷ら（1971）の風洞実験資料を利用し、人形模型の上肢を体側に配置した飛行姿勢（上肢回転角 $\phi = 165^\circ$ ）と、上肢を前方に挙上した姿勢（ $\phi = 18^\circ$ ）との比較を行った（4.4.1.aの Fig. 26）。その結果、上肢を体側に配置した飛行姿勢は、上肢を挙上した姿勢に比べ、下肢とスキーとのなす角（ θ ）の増大による揚力の減少（失速）が起こりにくいと推察した。ただし、谷ら（1971）の

実験では θ の角度を 40° までしか用いていないため、 θ が 80° に至る初期飛行局面において、その効果を実験的に明らかにする必要がある。

そこで、上肢を体側に配置 ($\phi = 170$) した条件で、 θ を 80° まで増大させた場合、揚力面積 S_L の減少が抑制されるか否かについて風洞実験による検証を行った (Fig. 34)。ここでは本研究の結果と、谷ら (1951) による上肢を挙上 ($\phi = 30^\circ$) した姿勢から得られた結果 (4.4.1.a の Fig. 25a) を比較する。

Fig. 34 に示したように、上肢を体側に配置した場合、迎え角 (α) が 5° 以上であれば、Fig. 25a の $\varepsilon 145^\circ$ および 130° の結果と同様に、ある程度まで θ の増大は S_L を増大させ、さらに θ を増大させるとかえって S_L は減少していた。ただし、Fig. 34 に示したとおり、 α が $5\sim 15^\circ$ の範囲では、 θ を 45° から 65° まで増大させても S_L の減少は見られなかった。これに比して、4.4.1.a の Fig. 25a に示したように、 $\varepsilon 145^\circ$ および 130° の条件では、 α が $7.5\sim 15^\circ$ であれば、 θ を約 50° 以上に増大させると、 S_L は減少し始めていた。

さらに、Fig. 34 において α が 0° 以下であれば、 θ を 45° から 70° まで増大させると S_L も増大しており、さらに θ を 80° まで増大させても、 S_L はほとんど変化しなかった。一方で上肢を挙上させた風洞実験では (谷ら 1951)、 α が 0° の条件でも、 θ を約 60° 以上増大させると S_L が減少し始めていた (4.4.1.a の Fig. 25a の $\varepsilon 145^\circ$ および 130° 参照)。

これらの結果をまとめると、上肢を体側に配置した姿勢は、 α が $5\sim 15^\circ$ の条件において、 θ を増大していくと、上肢を挙上した姿勢よりも大きな θ の値で S_L が減少を始めたことが分かる。さらに、上肢を体側に配置した姿勢は、 α が 0° 以下の条件であれば、 θ を 80° 程度まで増大させても揚力の減少には至らなかったことが分かる。すなわち、上肢を体側に配置した姿勢は、上肢を挙上した姿勢に比して、 θ の増大による S_L の減少を抑制する作用があるものと推察される。

次に第2点について、股関節が屈曲した（股関節前屈角度 $\sigma = 70^\circ$ ）初期飛行姿勢において、下肢とスキーとのなす角度 θ の増大によって S_D 、 S_L および Q_M が増大するか否か検討した（Fig. 35）。その結果、 θ の増大に伴い、 S_L 、 S_D および Q_M は増大していた。これらの結果は、谷ら（1971）が示した、 θ が大きいほど S_L 、 S_D および Q_M が増大するという関係が、初期飛行局面のような股関節を屈曲した姿勢においても成立することを示すものである。さらに、Fig. 35b に示した S_L の変化を、この姿勢よりも股関節を伸展した姿勢（ $\sigma = 40^\circ$ ）のそれと比較してみると（Fig. 34）、Fig. 35b では Fig. 34 と異なり、 α が 5° 以上の姿勢であっても、 θ の増大による S_L の減少が見られなかった。すなわち、股関節を屈曲することによって、 θ の増大に起因する S_L の減少（失速）が抑制されたものと推察される。

最後に第3点について、 θ が大きい（ $\theta = 80^\circ$ ）初期飛行局面において、 σ の減少（股関節角度の増大）によって S_L 、 S_D および Q_M が増大するか否かについて検討した（Fig. 36）。Fig. 36a に示したとおり、股関節前屈角度（ σ ）が小さいほど、 S_D は大きい値を示した。この結果は、股関節角度が大きいほど、 S_D が大きくなることを示している。次に、 S_L （Fig. 36b）および Q_M （Fig. 36c）の変化を見てみる。 α が 0° 以上の条件では σ の値が約 $40\sim 60^\circ$ で S_L および Q_M は最大に達し、それ以上 σ を減少させると、却って S_L および Q_M は減少していた。特に S_L の減少は、 θ の増大でも生ずることをすでに示した（Fig. 34）。すなわち、過度に θ を大きくすること、および σ を過度に減少する（股関節を伸展する）ことは、むしろ S_L の減少をもたらすものと考えられる。

ただし、 α が $0\sim 5^\circ$ の場合、 σ を 40° まで減少させても S_L および Q_M の減少は見られなかった。また、 α が最も小さい条件である $\alpha = -5^\circ$ の条件では、前述の S_D と同様に、 σ の減少に伴い S_L および Q_M は単調に増大しており、減少は見られなかった。これらの結果から、 α が 5° 以下であれば、下肢とスキーとのなす角度（ θ ）

が最大で 80° 程度となる初期飛行局面においても、股関節前屈角度 (σ) を 40° 程度 (股関節角度 $\varepsilon = 140^\circ$ 相当) まで伸展することで S_D , S_L および Q_M を増大することができるものと考えられる。

ここまでの議論から、4章で用いた3つの仮定はいずれも成立するものと考えられる。ただし、前述のように実際の飛行姿勢においては、複数の姿勢変化が同時におこるため、空気力への影響を定量的に知るためには、これらの複数の姿勢変化を考慮した空気力係数の回帰モデルが必要となる。次項では、複数の姿勢を用いた空気力係数の回帰モデルの構築について述べる。

5.4.2 空気力係数の回帰モデルについて

本研究では、風洞実験で得られた空気力係数 (S_L , S_D および Q_M) を、5つの飛行姿勢 (角度) を用いた1800項の多次元多項式によって回帰する数式モデルを作成した (⑦, ⑧および⑨式)。これらのモデルによる出力結果は、風洞実験による測定値をよく反映していた (Fig. 37)。また、すべてのデータを対象として直線回帰分析を行った結果、両者の間には非常に高い直線性が見られたことから、本研究の回帰モデルは、風洞実験による測定値を推定する能力があると考えられる (Fig. 38)。また、本研究の回帰モデルによる出力結果と、風洞実験による測定値との間の残差を検討した結果、 S_L , S_D および Q_M の残差はいずれも0を中心として正負に均等に分散しており (Fig. 39)、正規分布と比較しても大きなずれは認められなかった (Fig. 40)。

これらの結果から、本研究において導出した空気力係数の回帰モデルは、風洞実験の空気力係数を推定するにあたり、十分な精度を持つものと考えられる。

先行研究による風洞実験の結果 (Schmölzer ら 2002) に、これらの空気力係数の回帰モデルを当てはめて空気力係数を推定してみると、 S_L についてはほぼ同じ値を

示した。一方で、 S_D については、迎え角 (α) が約 30° よりも大きくなると、本研究の回帰モデルによる出力が Schmölzer ら (2002) の実験結果よりも大きな値を示した。すなわち、本研究による回帰モデルの出力は Schmölzer ら (2002) の風洞実験結果よりも小さな揚抗比 (揚力を抗力で割った値) を示す傾向が見られた。

身体のセグメントを四角柱で単純化したモデルを使用して風洞実験を行い、角柱の厚みを変化させた場合の空気力係数の変化を測定した結果、セグメントの厚みが薄いほど揚抗比が大きくなることが示されている (Reisenberger ら 2004)。この結果は、セグメントの厚みが薄いほど、同程度の揚力が作用する際の抗力の大きさが小さくなることを意味する。さらに、迎え角 (α) が $30\sim 40^\circ$ と比較的大きい条件において、このセグメントの厚みの影響がより顕著になることを示している。これらの結果を考慮すると、本研究の風洞実験で用いた人形モデルは、前述の Schmölzer のモデルよりも形状的な厚みが大きかったために、比較的大きな α の条件で彼らの風洞実験の結果よりも揚抗比が小さくなったものと推察される。また、人形に装着したジャンプスーツの素材および表面加工の違いが、空気力係数に影響を及ぼすこと (Meile ら 2006; 村上ら 2007) を考慮すると、本研究で用いたジャンプスーツは Schmölzer ら (2002) が使用したものと異なっていた可能性がある。

5.4.3 股関節角度制御の違いが初期飛行局面に及ぼす影響

ここでは、股関節角度のみを変化させた 4 つの飛行動作モデル (5.2.3.c) を対象に、飛行中に作用する空気力係数 (揚力面積, 抗力面積およびピッチングモーメント容積) を、5.2.2 で定義した回帰モデルによって推定する。次に、推定された揚力面積および抗力面積を用いて、スキージャンプ飛行の運動方程式を解くことにより、飛行速度および飛行軌跡を算出し、股関節角度の初期飛行局面に及ぼす影響を検討する。

5.4.3.a 空気力係数に及ぼす影響

本研究で用いた4つの飛行動作モデル (Hip_Large, Hip_Small, M. H.および M. H. Case Study) における飛行姿勢の違いは、股関節前屈角度 (σ) のみであった。したがって、各モデル間の空気力係数の差違は (Fig. 42) , 股関節角度の大きさに起因するものとして考察を始める。

まず、揚力面積 (S_L) および抗力面積 (S_D) について見てみると (Fig. 42a および Fig. 42b) , 約 0.00~0.10 s において, M. H. (M. H. Case Study) , Hip_Large, Hip_Small の順に大きな S_L および S_D が作用していたことが分かる。すでに Fig. 33 に示したように、この局面における σ は、M. H. (M. H. Case Study) , Hip_Large, Hip_Small の順に小さかった。これらの結果から、 σ が小さい (股関節角度が大きい) ほど、 S_L および S_D が大きいことが分かる。

その後約 0.10~0.15 s において、4つの飛行動作モデルの S_L は、 σ の大きさにかかわらず、ほぼ同じ値を示した。一方で、 S_D については、 σ が小さいほど大きい値を示した。すなわち、この局面においては、 σ の大きさが S_L と S_D に与える影響がそれぞれ異なっていた。しかしながら、その後 0.15~0.20 s では、 σ が小さいほど S_L および S_D は大きな値を示した。このように、 σ が S_L に与える影響が、0.00~0.10 s の局面と 0.10~0.15 s の局面との間で変化した原因を以下で考察する。

改めて 0.10 , 0.15 および 0.20 s の飛行姿勢を見てみると、下肢とスキーとのなす角度 (θ) は 66.7, 60.4 および 53.2° , スキーの開き角度 (λ) は 0.1, 2.8 および 6.4° , そして迎え角 (α) は -2.2, 2.9 および 9.5° であった。また、各飛行動作モデルの、0.10, 0.15 および 0.20 s における σ の値は、Hip_Large : 37.3, 35.8 および 34.5° , Hip_Small : 43.8, 37.3 および 33.2° , M. H. : 29.7, 32.8, 36.3° そして M. H. Case Study : 29.6, 29.6 および 29.6° であった。

これらの姿勢を模擬した風洞実験の結果を Fig. 49 に示す。Fig. 49a および Fig. 49b

は、それぞれ θ を 70° および 50° に設定し、 σ を変化させたときの S_L の変化を示す。すなわち、Fig. 49a は θ が大きい $0.10\sim 0.15$ s の局面を、Fig. 49b は θ の小さい $0.15\sim 0.20$ s の局面をそれぞれ模擬した風洞実験の結果である。なお、 λ については簡単のため 0° の条件で統一した。Fig. 49a に示したとおり、 θ が 70° の条件においては、 σ を 60° から 40° まで減少させると、 α の大きさにかかわらず S_L が増大していた。しかし、 σ を 40° から 30° まで減少させると、 α が 5° 以上の条件で、 σ の減少に従い S_L が減少し、 α が 0° 以下の条件では、 σ の減少に従い S_L が増大していた。

これらの結果に加え、 0.10 s から 0.15 s の間に α が -2.2° から 2.9° へと増大していたことを考慮すると、M. H. Case Study のように、 σ が 29.6° に至る場合では、 S_L は減少していた可能性がある。このように、 σ の過度の減少（股関節角度の過度の増大）が、 S_L の減少をもたらしたと仮定すると、 σ が最も小さい M. H. Case Study と、 σ が最も大きい Hip_Small との間でさえ、 S_L の値に差が見られなかったことが説明できる。

一方で、より θ が小さかった ($\theta = 50^\circ$)、 0.20 s における姿勢を模擬した風洞実験の結果 (Fig. 49b)、 α が 20° 以下であれば、 σ を 40° から 30° まで減少させると、 S_L は単調に増大していた。ただし、 α が 20° の条件では、 σ を 40° から 30° まで減少させても S_L の増大は大きくはなく、さらに σ を 20° まで減少させると、かえって S_L は減少していた。ここで、 0.20 s における α の値が 9.5° であり、 σ が 29.6° (M. H. Case Study) から 36.3° (M. H.) までの範囲であったことを考慮すると、この局面 ($0.15\sim 0.20$ s) における σ の減少は単調に S_L の増大をもたらしたものと推察される。

その後、 $0.20\sim 0.30$ s において4つの飛行動作モデル間の S_L の差が、再び小さくなっていった。その一方で、 S_D は σ が小さいほど大きな値を示していた。ここで、 0.30

sの姿勢を見てみると、 θ 、 λ および α の値は、それぞれ45.6、9.0および15.8°であった。また、 σ は29.4°（M. H. Case Study）から36.2°（M. H.）までの範囲であった。すなわち、この局面は前述の0.15~0.20 sの局面と比べ、 σ の範囲はほぼ同じであり、 α および λ は大きく、 θ は小さかった。すでにFig. 49aおよびFig. 49bの比較から、 θ が小さいほど、 S_L が減少し始める σ の値が小さくなることを示した。しかしながら、 α が大きくなるほど、 S_L が減少し始める σ の値が大きくなっていた点にも注意する必要がある（Fig. 36bおよびFig. 49）。これらの結果を考慮すると、この局面では、 θ の減少よりも、むしろ α の増大による影響が強く、 σ を小さくすることによって大きな S_L を得ることが難しい条件となっていたため、各飛行動作モデル間の S_L に差が見られなかったものと推察される。

その後の0.30~0.70 sの局面では再び、 σ が小さいほど大きな S_L および S_D を示した。この局面の姿勢を前述の0.20~0.30 sの局面と比較すると、 α は増大し、 θ は減少していた。ここで、この局面では α の増大による作用（ S_L が減少し始める σ の値が大きくなること）よりも、 θ の減少による作用（ S_L が減少し始める σ の値が小さくなること）が強く影響したものと仮定すると、 σ の減少によって S_L を増大することができたものと理解できる。

その後、0.70~1.00 sの局面では4つの飛行動作モデルの σ がほぼ同じ大きさであったため、各飛行動作モデルの S_L および S_D は同じ値を示したものと考えられる。

以上の議論より、 σ の大きさが S_D および S_L に及ぼす影響を以下にまとめる。まず、 σ が小さい（股関節角度が大きい）ほど、 S_D は大きくなるものと考えられる。一方で、 S_L については、ある程度までは σ の減少に伴い S_L は大きくなるが、 α または θ が大きい条件下で、過度に σ を減少させると、かえって S_L は減少するものと考えられる。具体的には、初期飛行局面の中でも θ が十分に減少していない、ごく

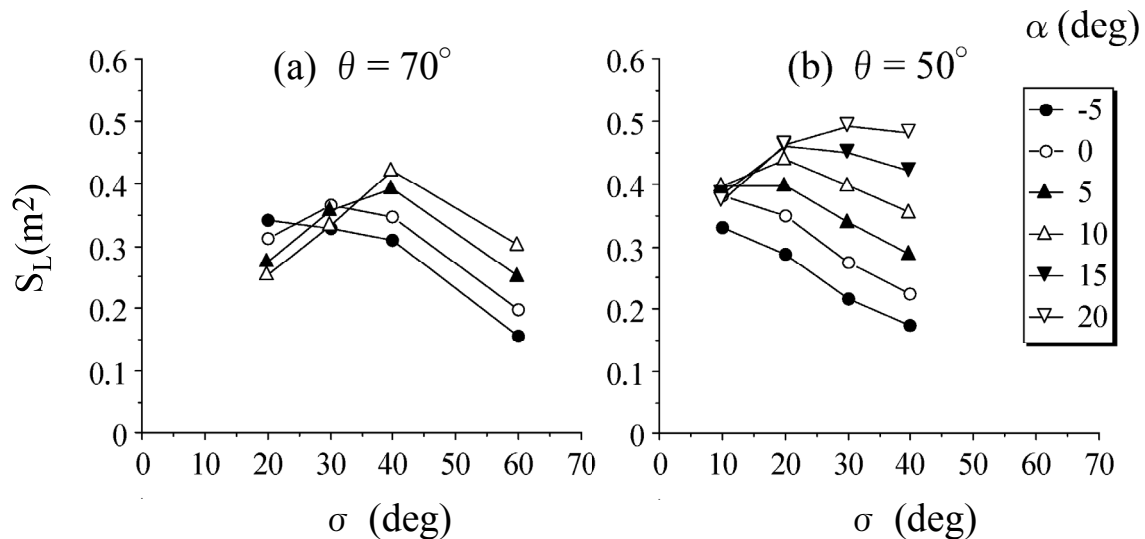


Figure 49 The effect of the hip bending angle (σ) on the lift area (S_L) between two conditions of the ski to leg angle (θ) (a: $\theta = 70^\circ$ and b: $\theta = 50^\circ$) with different conditions of the attack angles (α) (a: $-5 \sim 10^\circ$ and b: $-5 \sim 20^\circ$). These data were measured by the wind tunnel test. The ski to ski angle (λ) and the arm angle (ϕ) were fixed at 0° and 170° respectively.

初期の局面や、その後 α が増大し始める局面においては、 σ の減少が S_L の減少を引き起こす可能性があるものと考えられる。

最後に、ピッチングモーメント容積 (Q_M) について見てみると (Fig. 42c), 前述の S_D と同様に、ジャンプ台を飛び出してから 0.70 s まで、 σ が小さいほど Q_M が大きい値を示した。すなわち、本研究で取り扱った初期飛行局面において、股関節を伸展した姿勢は、股関節を屈曲した姿勢よりも大きなピッチングモーメントを受けることが明らかとなった (なお、0.70~1.00 s の局面では、4 つの飛行動作モデルの σ をほぼ同じ値に設定したため、 Q_M もほぼ同じ値を示した)。

ただし、いずれの飛行動作モデルにおいても、飛行中に作用していた Q_M の極性は一定ではなく、正から負まで分布していたことに注意する必要がある。この結果は、初期飛行局面において選手に作用するピッチングモーメントが、姿勢変化に伴い、頭上げまたは頭下げのどちらかの方向に変化することを意味する。例えば、0.00~0.10 s の局面において最も σ が大きかった (股関節角度が小さかった) Hip_Small

には、わずかながら負の Q_M が作用していた。一方で、Hip_Small よりも σ が小さかった（股関節角度が大きかった）Hip_Large, M. H. および M. H. Case Study の Q_M は正の値であった。これらの結果から、踏み切り動作終了時に股関節を伸展させた姿勢でジャンプ台を飛び出す選手には、頭上げ方向のピッチングモーメントが作用し、逆に股関節を屈曲させた姿勢で飛び出す選手には、頭下げ方向のピッチングモーメントが作用する可能性があるものと考えられる。

ここで、第4章で行った画像分析の結果 (Fig. 19b) , Hip_Small の下肢と水平線のなす角度 (τ) の角速度 (τ') が、ジャンプ台を飛び出してから 1 m までの区間でほとんど変化しておらず、Hip_Large の τ' が減少していたことを想起すると、Hip_Small のように股関節を屈曲した姿勢には、作用したモーメントの大きさがほぼ 0 であったために、 τ' の減少が抑制されたものと考えられる。一方で、Hip_Large のように股関節を伸展させてジャンプ台を飛び出す姿勢は、ジャンプ台を飛び出した直後に、頭上げ方向のピッチングモーメントが作用したため、 τ' が減少したものと考えられる。すなわち、Hip_Small のように股関節を屈曲させてジャンプ台を飛び出す姿勢は、飛行中に素早く前傾姿勢をとることに貢献するものと考えられる。一方で、Hip_Large のように股関節を伸展させてジャンプ台を飛び出す姿勢は飛行中に素早い前傾姿勢をとるには不利な姿勢であると考えられる。このように、股関節を伸展させた姿勢は、飛行中に下肢を前傾することが困難であるため、Hip_Large 群は踏み切り動作によって事前に下肢の前傾を行うことで、前傾不足を補っていたものと推察される (4.3.1.b の Fig. 19a) 。

一方で、M. H. のように、ジャンプ台を飛び出す際の股関節角度が特に大きいものの、飛行中に一時的に股関節を屈曲させた場合には (Fig. 33b) , 股関節角度が一時的に減少した約 0.10~0.20 s 局面において、 Q_M の急激な減少が観察された (Fig. 42c) 。この結果から、股関節角度の一時的な減少によって、頭上げ方向のピッチングモー

メントの増大を抑制できるものと考えられる。その後 0.20~0.70 s の局面において、いずれの飛行動作モデルにおいても、 Q_M は正の値から負の値まで減少していたが、この区間で最も σ が大きい（股関節角度が小さい）M. H. は、最も早いタイミングで Q_M を負の値まで減少させていた（Fig. 42c）。この結果から、前述の一時的な股関節屈曲の後（0.20~0.70 s）も股関節の伸展を抑制することによって、頭下げ方向のピッチングモーメントをより早く利用することができるものと考えられる。ただし、本研究では約 0.20~0.70 s の局面における飛行姿勢の実測値が欠損していたため、3 次スプライン関数による内挿操作によって飛行姿勢をモデル化したことに注意する必要がある（5.2.3.c 参照）。特に、M. H. モデルにおいては、 σ の一時的な減少後、その他の飛行動作モデルが示した減少傾向とはやや異なる波形で σ が減少していた。すなわち、M. H. モデルの 0.20~0.70 s における σ の値は、実際の飛行姿勢に比べて大きい（股関節角度がより小さい）姿勢であった可能性がある。

ここまでの空気力係数に関する議論を踏まえた上で、M. H. 選手が実際に行っていた飛行中の一時的な股関節屈曲動作について、その空気力学的な意味を検討してみたい。まず、M. H. 選手の飛行姿勢の特徴は、股関節を極端に伸展させてジャンプ台を飛び出すことにあった。これまでの議論より、このように股関節を伸展した飛行姿勢には、大きな S_D および Q_M が作用するものと考えられる。ここで、前述の S_L に関する議論を想起すると、過剰な股関節伸展によって S_L が小さくなるような局面においては、M. H. が示した股関節の一時的な屈曲は、 S_L の減少を伴うことなく（Fig. 42a）、 S_D のみを減少させ（Fig. 42b）、さらに Q_M （頭上げ方向）を減少させる効果が期待できる（Fig. 42c）。

これまで、初期飛行局面において身体-スキー系に作用するピッチングモーメントは、常に頭上げ方向と考えられてきた。そのため、素早く前傾姿勢へ移行するには、踏み切り動作によって合成重心周りに前方回転のモーメントを発生させ、角運

動量を獲得することが重要とされてきた (Tveit ら 1981; Virmavirta ら 1993a; Virmavirta ら 1993b; Arndt ら 1995; Jin ら 1995; Komi ら 2000; Virmavirta 2000; Virmavirta ら 2001b; Schwameder 2007)。しかしながら、踏み切り動作において身体合成重心周りの回転モーメントを最大にすべく、床反力ベクトルを身体合成重心から後方にずらして発揮すると、合成重心の上昇速度を大きくすることが困難になるという問題点も指摘されている (Virmavirta 2000)。本研究で得られた結果は、踏み切り動作による前回りの角運動量を利用する方法の他に、飛行中の股関節屈曲による空気力 (負のピッチングモーメント) を利用して、前傾姿勢を獲得する方法の可能性を示唆するものである。

ただし、股関節屈曲のタイミングが早すぎれば (約 0.00~0.10 s), S_D のみならず, S_L も減少してしまう可能性がある (Fig. 42a)。一方でタイミングが遅れ, 約 0.15~0.20 s まで股関節を伸展したままであれば, M. H. Case Study が示したように, 大きな S_D を受けることになる (Fig. 42b)。すなわち, 飛行中の一時的な股関節屈曲によって, 前述の空気力学的利益を得るには, そのタイミングが非常に重要であると考えられる。

5.4.3.b 飛行速度に及ぼす影響

本研究における飛行シミュレーションの結果, 身体-スキー系の合成重心の水平方向速度 (V_x) および鉛直方向速度 (V_y) は, 時間の経過とともに減少していた (Fig. 43 および Fig. 44)。このような速度の減少は, 実際のスキージャンプ飛行局面の映像解析 (Komi ら 1974; Arndt ら 1995; Schwameder ら 2005; Virmavirta ら 2005), およびコンピュータによる飛行シミュレーション (Jin ら 1995; Müller 1996; Müller 1997; Schmölzer ら 2002; Schmölzer ら 2005) による研究でも報告されている。したがって, 本研究のシミュレーションによって得られた V_x と V_y の減少は, これらの

研究結果を支持するものと考えられる。

また、身体―スキー系の合成重心速度 (V) も、時間の経過とともに減少していた (Fig. 46)。この傾向は先行研究によって報告されたものと同じであった (Komi ら 1974; Jin ら 1995; Müller ら 1996; Müller 1996; Müller 1997; Schmölzer ら 2002; Schmölzer ら 2005; Virmavirta ら 2005)。ただし、これらの先行研究によれば、このような V の減少は約 1.0 s までで、その後は重力加速度による落下速度の増大により、 V は増大していくことが明らかにされている。すなわち、本研究のシミュレーションによって得られた V の減少は、初期飛行局面においてのみ生ずることに注意する必要がある。

ここで、各飛行動作モデル間で V_x および V_y の違いをしてみる (Fig. 45)。Hip_Small と Hip_Large を比較すると、Hip_Small は 0.2, 0.6 および 1.0 s の時点において、Hip_Large より大きい V_x および、Hip_Large より小さい V_y を示した (Fig. 45)。すでに 5.4.3.a で議論したように、Hip_Small は、ジャンプ台を飛び出した直後 (約 0.00~0.10 s) の S_D および S_L が、その他の飛行動作モデルに比して小さかった (Fig. 42a および Fig. 42b)。したがって、Hip_Small は S_D が小さいために V_x の減少を抑制したものの、 S_L が小さいために V_y の減少が大きくなったものと考えられる。一方で Hip_Large は S_D が大きいために V_x の減少が大きくなったものの、 S_L が大きいために V_y の減少を抑制したものと考えられる。

次に、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が最も大きかった M. H. および M. H. Case Study について見てみる。M. H. Case Study は 0.2, 0.6 および 1.0 s の時点において、4 つの飛行動作モデルの中で最も小さな V_x を示し、最も大きな V_y を示した (Fig. 45)。一方で M. H. は 0.2 s においては M. H. Case Study とほぼ同じ V_x および V_y を示したが (Fig. 45a), その後 0.6 および 1.0 s において、M. H. Case Study より大きな V_x を示し、M. H. Case Study より小さい V_y を示した (Fig. 45b および

Fig. 45c)。これは、M. H.が示した一時的な股関節屈曲（0.10～0.20 s）および、その後0.20～0.70 sの股関節伸展の抑制（Fig. 33b）による、 S_D および S_L の減少に起因するものと考えられる（Fig. 42a および Fig. 42b）。すなわち、 S_D の減少が V_x の減少を抑制し、 S_L の減少が V_y の減少を大きくしたものと考えられる。

次に、前述の V_x および V_y を合成した合成重心速度（ V ）の変化を見てみる（Fig. 46）。約0.2 sにおける各飛行動作モデルの V は、Hip_Small, Hip_Largeの順に大きな値を示し、M. H.とM. H. Case StudyとがHip_Largeに続いた。この結果は、ジャンプ台を飛び出した直後のわずかな期間であっても、股関節角度を大きくすることによって、 V の減少量が大きくなることを示唆するものである。一方で、M. H.は約0.2 s以降の V の減少量をM. H. Case Studyよりも小さくすることで、1.0 sにおけるM. H.の V はM. H. Case Studyよりも大きく、Hip_Largeとほぼ同じ値となった。この結果から、M. H.は一時的な股関節屈曲、およびその後の股関節伸展の抑制によって（Fig. 33b）、 V の減少を抑制したものと考えられる。

ここまでの議論より、股関節角度の大きさの違いが、初期飛行局面の速度に及ぼす影響を以下にまとめる。ジャンプ台を飛び出してから約0.20 sまでという短い時間であっても、この局面で股関節角度が大きい場合、その後の V_x は小さく、 V_y は大きくなるものと考えられる。また V_x および V_y の合成速度である V は小さくなる。ただし、M. H.のように、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が最も大きい場合でも、飛行中に股関節を一時的に屈曲させ、その後股関節伸展を抑制することにより、 V_y の減少量の増大を伴うものの、 V_x および V の減少量を抑制できるものと考えられる。

5.4.3.c 飛行軌跡に及ぼす影響

4つの飛行動作モデルを用いたシミュレーションの結果を見ると（Fig. 47）、ジ

ジャンプ台を飛び出した時点 (0.0 s) では、各飛行動作モデルの身体—スキー系の合成重心 (CGx, CGy) は、ほぼ一点に集まっていたが、時間の経過とともに、CGx, CGy のばらつきが大きくなっていった。この飛行軌跡の違いを詳細に検討するため、各飛行動作モデルの CGx および CGy の変位を、それぞれ DCGx および DCGy として算出し、0.2, 0.6 および 1.0 s 時点で比較した (Fig. 48a, Fig. 48b および Fig. 48c)。

まず、Hip_Small と Hip_Large との間で DCGx および DCGy をそれぞれ比較した結果、0.2, 0.6 および 1.0 s のいずれの局面においても、Hip_Small は Hip_Large よりも DCGx が大きく、DCGy が小さかった (Fig. 48)。これらの差は、時間の経過とともに、わずかではあるが増大していた。すでに 5.4.3.b で、Hip_Small は Hip_Large に比して V_x が大きく、 V_y が小さいことを示した。これらの結果から、Hip_Small は V_x が大きいために DCGx が大きく、また V_y が小さい (落下速度が大きい) ために DCGy が小さく (落下量が大きく) なったものと考えられる。

次に、M. H. と M. H. Case Study との間で DCGx および DCGy をそれぞれ比較した結果、0.2 s では 2 つの飛行モデル間で DCGx および DCGy に差は認められなかった (Fig. 48a)。その後、0.6 および 1.0 s において M. H. は M. H. Case Study よりも大きな DCGx を示した (Fig. 48b および Fig. 48c)。また、0.6 s における DCGy の大きさは、M. H. と M. H. Case Study との間で差が見られなかったが (Fig. 48b)、その後、1.0 s において M. H. が M. H. Case Study よりも小さい DCGy を示した (Fig. 48c)。これらの結果から、一時的な股関節の屈曲を行わせた M. H. モデルは、股関節屈曲を伴わない M. H. Case Study に比して、より低く、より遠くに到達する飛行軌跡となる姿勢制御であると考えられる。そして、このような軌跡の差違は、前述のように M. H. が M. H. Case Study に比べ、 V_x および V を大きく、 V_y を小さくしていたこと (5.4.3.b) に起因するものと考えられる。

ここで、これらの飛行軌跡および前述の飛行速度が飛距離に及ぼす影響を検討す

る。本研究におけるシミュレーションの結果、Hip_Large および Hip_Small の飛距離はいずれも 91.8 m であった。前述のように、Hip_Small は Hip_Large に比して、飛行軌跡が低いものの (Fig. 48) , V_x および V を Hip_Large より大きくすることによって (Fig. 45 および Fig. 46) , Hip_Large と同等の飛距離を得ることができたものと考えられる。実際に、飛行軌跡の低さを、速度の大きさに補う選手が存在することは、オリンピック冬季競技大会 (ソルトレイク, 2002 年) の参加者を対象とした初期飛行局面 (0~約 1.4 s) の映像解析によって確認されている (Virmavirta ら 2005)。すなわち Virmavirta ら (2005) は、1 位の選手 (A 選手 : 133 m) と 2~6 位の選手 (G1 群 : 126.4 ± 3.1 m) の平均値とを比較した結果、A 選手は、G1 群よりも低い飛行軌跡にもかかわらず、飛行速度 (V) を G1 群より大きくすることによって、大きな飛距離を獲得していたことを示している。

一方で、Hip_Large は Hip_Small に比して、飛行速度 (V_x および V) が小さいものの (Fig. 45 および Fig. 46) , 飛行軌跡を Hip_Small より高くすることによって (Fig. 48) , Hip_Small と同等の飛距離を得ることができたものと考えられる。この結果は、実際のジャンプの初期飛行局面の映像解析から、飛行軌跡の高さがジャンプの飛距離を決定する要因の一つであると指摘した報告 (Komi ら 1974; Puumala ら 1995) を支持するものである。

これらの結果を総合すると、飛行速度 (V_x および V) の大きさと飛行軌跡の高さとは、相補的に飛距離を増大することができる要因であると考えられる。すなわち、一方が不足していても、もう一方がそれを補うほど大きければ、飛距離を増大できるものと考えられる。実際の競技会における成績上位の選手を対象とした場合、これらの変数と飛距離との間に相関関係が見られなかったという事例が報告されているが (Arndt ら 1995; Janura ら 2007) , 本研究のシミュレーション結果から、これらの先行研究で対象とした選手群にも、飛行軌跡の高さ、または飛行速度のいずれ

かを利用して飛距離の増大を行っていた選手が存在していたことが、これらの変数と飛距離との間の因果関係を希薄にした原因の一つであると推察される。

しかしながら、本研究で取り扱った飛行動作モデルの中で、最も高い飛行軌跡を示した M. H. Case Study の飛距離は 91.1 m であり、Hip_Small および Hip_Large の飛距離 (91.8 m) よりも小さくなっていた。前述のように、M. H. Case Study は V_x および V が最も小さかったことを考慮すると (5.4.3.b) , M. H. Case Study は、飛行軌跡が高いことによる利益よりも、 V_x および V が小さいことによる損失が上回った結果、飛距離が小さくなったものと推察される。すなわち、M. H. Case Study のように過剰に股関節を伸展させた姿勢は、飛距離を減少させる可能性があると考えられる。

一方で、M. H. Case Study と同様に、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が最も大きかった M. H. の飛距離 (91.6 m) は、M. H. Case Study の飛距離 (91.1 m) より大きかった。この結果は、M. H. が示した一時的な股関節屈曲によって、 V_x および V の減少を抑制したため (5.4.3.b 参照) , M. H. Case Study よりも飛距離の減少を抑制できたものと考えられる。

ここまでの議論より、M. H. Case Study および M. H. のように、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が特に大きい場合には、M. H. 選手が実際に行っていたように、初期飛行局面において股関節を一時的に屈曲することによって (4.3.1.c の Fig. 21 参照) , 飛行軌跡の高さを犠牲にしても、飛行速度 (V_x および V) の減少を防ぐことが飛距離増大に貢献するものと考えられる。

5.5 小括

本章では、初期飛行局面における股関節角度制御の変化が、空気力係数、飛行速度および飛行経路に与える影響を明らかにするため、以下の 3 つを目的とした。す

なわち， 1) 第 4 章で先行研究（谷ら 1951; 谷ら 1971）を利用する際に用いた仮定が， 初期飛行局面において成立するのか風洞実験によって確認すること， 2) 次に， 飛行姿勢を独立変数とした空気力係数の回帰モデルを確立すること， 3) 最後に， 得られた空気力係数の回帰モデルを用いて， 股関節角度の変化が初期飛行局面の空気力係数， 飛行速度および飛行軌跡に与える影響を明らかにすること， の 3 つであった。以下にその結果をまとめる。

1) の目的について， 初期飛行局面に適応した姿勢， すなわち， 上肢を体側に配置し， 股関節角度を小さく， かつ下肢とスキーとのなす角度 (θ) を大きくした姿勢による風洞実験を行った結果， 上肢を体側に配置した姿勢は， 上肢を挙上させた姿勢に比して， θ の増大による S_L の減少を抑制することが明らかとなった (Fig. 34)。また， 迎え角の比較的小さい初期飛行局面においては， ある程度までは， θ の増大あるいは σ の減少によって S_L ， S_D および Q_M を増大させることができることが明らかとなった (Fig. 35, Fig.36)。これらの結果は， 第 4 章で用いた仮定が初期飛行局面の姿勢においても成立することを示すものである。

2) の目的について， 上肢回転角度 (ϕ)， 股関節角度 (σ)， 下肢とスキーとのなす角度 (θ)， スキーの開き角度 (λ)， そしてスキーの迎え角度 (α) の 5 つの角度を用いて， 空気力係数 (S_L ， S_D および Q_M) を推定する回帰モデルを構築した。その結果， 本研究で得られた空気力係数の回帰モデルによって推定された空気力係数は， 風洞実験で得られた空気力係数との間で強い直線性を示し (Fig. 38)， その残差の分布も正規分布と比較して大きなずれは認められなかった (Fig. 40)。したがって， 本研究で構築した空気力係数の回帰モデルは， 風洞実験の空気力係数を推定するのに十分な精度を持つものと考えられる。

3) の目的について， 股関節角度の制御方法が異なる飛行動作モデル (Hip_Large, Hip_Small, M. H. および M. H. Case Study) を作成し， 前述の空気力係数の回帰モ

デルを用いて、初期飛行局面（0.0～1.0 s）のコンピュータシミュレーションを行った。これらの飛行動作モデルは、実際のジャンプ選手 12 名の映像解析より求められたものであった（4.2.1 参照）。Hip_Large は Hip_Small よりもジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が大きい飛行動作モデルであり、M. H. は 12 名の選手の中で最も股関節角度が大きい選手をモデルとしている。M. H. Case Study は、M. H. の特徴である飛行中の一時的な股関節屈曲を制限したモデルである。

その結果、初期飛行局面においては、股関節角度が大きいほど、空気力係数 (S_L , S_D および Q_M) が大きくなることが明らかとなった。ただし、0.10～0.15 s および 0.20～0.30 s の局面では、股関節角度の大きさにかかわらず、 S_L の大きさがほぼ同じになる結果が得られた。これらの局面では、それぞれ、下肢とスキーとのなす角度 (θ) が大きく、および迎え角 (α) が大きいという特徴があった。これらの局面を模擬した風洞実験の結果、上記の条件下で股関節角度を増大すると、却って S_L は減少（失速）することが明らかとなった。これらの結果から、 θ および α の変化が大きい初期飛行局面においては、股関節角度の増大によって常に S_L が大きくなるわけではないことが明らかとなった。

このような股関節角度制御の違いによる空気力係数の差違が、身体—スキー系の合成重心の速度および飛行軌跡に及ぼす影響を検討した。その結果、股関節角度が大きい姿勢（Hip_Large）は、股関節角度が小さい姿勢（Hip_Small）に比して、高い飛行軌跡であったものの、進行方向の速度（水平方向速度 (V_x) および合成重心速度 (V)）が小さいことが明らかとなった。一方で、股関節角度が小さい姿勢（Hip_Small）は、股関節角度が大きい姿勢（Hip_Large）に比して、低い飛行軌跡であったものの、進行方向の飛行速度 (V_x および V) が大きいことが明らかとなった。

このように、Hip_Large と Hip_Small はそれぞれ、飛行速度および飛行軌跡の高さ

について、対照的な違いが見られたが、シミュレーションで求められた最終的な飛距離は同じ (91.8 m) であった。これらの結果から、進行方向の飛行速度 (V_x および V) の大きさと飛行軌跡の高さとは、相補的に飛距離を増大することができる要因であると考えられる。すなわち、一方が不足していても、もう一方がそれを補うほど大きければ、飛距離を増大できるものと考えられる。

しかしながら、ジャンプ台を飛び出した時の股関節角度が最も大きかった選手 (M. H.) の飛行動作モデル (M. H.) と、M. H. の特徴である飛行中の一時的な股関節屈曲を制限した飛行動作モデル (M. H. Case Study) の飛距離は、それぞれ 91.6 m および 91.1 m であったことから、前述の Hip_Large および Hip_Small よりも小さくなっていた。すなわち、過剰に股関節を伸展した姿勢は、飛行軌跡を高くする利益よりも、進行方向速度 (V_x および V) の減少による損失が上回っていたために、飛距離が小さくなったものと考えられる。ただし、M. H. が示したように、飛行中の一時的な股関節屈曲を行うことによって、M. H. は M. H. Case Study よりも、進行方向速度 (V_x および V) の減少を抑制し、結果的に飛距離の減少を抑制できたものと考えられる。

6 総括

6.1 結論

本研究の目的は、スキージャンプの4局面の中でも踏み切り局面に着目し、その直後の飛行局面（初期飛行局面）に及ぼす空気力学的な影響を考慮しつつ、踏み切り局面に固有の技術的要因と飛距離との関係を明らかにすることであった。

本研究の結果および考察から以下のように結論する。

1) 踏み切り局面において発揮される床反力の力学的特徴と、飛距離との関係について

第2章では、スキージャンプの国際大会において、踏み切り局面における床反力の測定を行い、発揮された床反力が飛距離に及ぼす影響を検討した。その結果、参加選手すべてを分析対象とした場合、踏み切り局面において発揮された床反力の最大値、平均値、力積が大きい選手ほど、その飛距離が大きいという傾向が見られた。しかし、被検者を上位10名に限定した場合、これらの床反力変数は1～5位（top 5）と6～10位（next 5）とのグループ間で統計学上有意な差が見られなかった。

これらの結果から、スキージャンプ技術指導に関して以下の示唆が得られよう。

- ①踏み切り局面においては、大きな床反力を発揮し、大きな力積を獲得することが、飛距離を獲得するために重要である。
- ②非常に熟練した選手群で踏み切り動作を評価する際には、前述の力学的諸変量のみを用いるのは不十分である。

2) 一流スキージャンプ選手の踏み切り動作の床反力発揮様式およびその力学的特性について

第3章では、一流スキージャンプ選手12名を対象に、スキージャンプ踏み切り局面における床反力の測定と、踏み切り動作の2次元映像解析を行った。床反力から得られた身体重心の上昇速度および変位、そして膝関節および股関節の角度変化を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

床反力発揮様式について、前半の曲線路および後半の直線路で発揮された床反力の最大値を検討した結果、前半部分で大きな床反力を発揮した選手は後半部分における床反力が小さく、前半部分で小さな床反力を発揮した選手は後半部分における床反力が大きい、という傾向が見られた。

前述のように、床反力発揮様式は選手の間で異なっていたものの、前半の曲線路および後半の直線路で発揮された床反力の最大値とその比では、選手の間の最大上昇速度の変動を説明し得なかった。

身体重心変位について、床反力計の後半部分で大きな床反力を発揮した選手ほど、主動作の前に起こる一時的な重心高の下降量が大きかったことから、反動動作をより積極的に利用したものと推察された。

また、踏み切り局面終了時の姿勢について、床反力計の後半部分で大きな床反力を発揮した選手ほど、踏み切り局面終了時の股関節角度が大きくなる傾向が見られた。

これらの結果から、スキージャンプ技術指導に関して、以下の示唆が得られよう。

①前半部分の曲線路から持続的に床反力を発揮する方法によっても、助走路の終端付近で大きな床反力を瞬発的に発揮する方法と同等の上昇速度を得ることができる。

②スキージャンプ踏み切り局面における床反力発揮方法を指導する際には、選手の

身体能力，特に瞬発的な下肢伸展能力に応じて，踏み切り技術を指導する必要があるものと考えられる。すなわち，瞬発的な下肢伸展能力に優れた選手であれば，反動動作を利用し，助走路の後半で瞬発的に大きな力を発揮する方法が適していると考えられ，一方で，瞬発的な下肢伸展能力に劣る選手は，反動動作を用いずに，曲線路から持続的に床反力を発揮する方法が適しているものと考えられる。

3) 踏み切り局面終了時の姿勢の違いが，その後の初期飛行局面の飛行姿勢制御に与える影響について

第3章で示したとおり，助走路の終端付近で相対的に大きな床反力を発揮した選手ほど，踏み切り局面終了時の股関節角度が大きいことが分かった。そこで，踏み切り局面終了時の股関節角度の大きさの違いが，その後の初期飛行局面に及ぼす影響を，2次元映像解析（第4章）およびコンピュータシミュレーション（第5章）によって検討した結果，以下のことが明らかとなった。

踏み切り局面終了時の股関節角度が大きいほど，水平方向速度および合成速度が小さいものの，飛行軌跡が高くなった。ただし，踏み切り局面終了時の股関節角度が $113.7\sim 126.0^\circ$ までであれば，最終的な飛距離は同じであった。

しかしながら，踏み切り局面終了時の股関節角度をさらに大きくした場合（ 133.0° ），飛距離は小さくなることが明らかとなった。このように，踏み切り局面終了時に過度に股関節を伸展させた場合には，ジャンプ台を飛び出してから $0.2\sim 1.0\text{ s}$ 以内に一時的に股関節角度を減少させることにより，飛距離を増大できることが明らかとなった。

これらの結果から，スキージャンプ技術指導に関して，以下の示唆が得られよう。

①踏み切り局面終了時の股関節角度が $113.7\sim 126.0^\circ$ の範囲であれば，初期飛行局面における飛行速度および軌跡の高さに影響を及ぼすものの，最終的な飛距離に

は大きな影響を及ぼさない。

②しかしながら、踏み切り局面終了時の股関節角度が 133° を超えるような、非常に大きな股関節伸展を用いる選手にとっては、飛距離を最大化するために、初期飛行局面において一時的な股関節屈曲および飛行中の股関節伸展の抑制を行う必要がある。

6.2 今後の研究課題

本研究において、踏み切り局面における床反力発揮様式は、優れた選手群においても画一的ではなく、それぞれの選手に固有のパターンがあることが明らかとなった。本研究ではこれらの床反力発揮様式と、股関節および膝関節の伸展パワーなどの体力要因との関係を検討していない。今後、これらの床反力発揮様式と、脚伸展にかかわる体力要因との関係が明らかになれば、選手は自らの脚伸展能力に応じて、最も適した踏み切り動作を選択することができるようになると思われる。

本研究において、初期飛行局面の飛行シミュレーションに用いられた飛行動作モデルは、主に2次元映像解析によって実際のジャンプから抽出された姿勢であったため、3次元映像解析を要するスキーの開き角度を測定することができなかった。今後、初期飛行局面のみならず、全飛行局面についての詳細な飛行姿勢が3次元的に得られるようになれば、本研究で構築された空気係数の回帰モデルを用いて、飛行中に作用する空気力の変化をより忠実に再現することができるものと考えられる。優れた選手の空気力の利用方法が明らかになれば、これまで試行錯誤的に行われていた技術指導を、空気力学的な理論に基づく指導へと導くことに貢献するものと期待できる。

謝辞

本稿の執筆にあたり、広島大学大学院教育学研究科、黒川隆志 教授に終始ご指導を賜りました。同じく、渡部和彦 教授（現名誉教授）には、私が大学院入学以来現在に至るまでご指導を賜りました。

風洞実験に際し、東京大学先端科学技術研究センターには、多大なご協力を賜りました。また同センターの渡部勲 元技官には、風洞実験および空気力学データの解析についてご指導賜りました。国立スポーツ科学センターの平野裕一 主任研究員には、長期にわたる風洞実験に対し常に理解と支援とを賜りました。

実際のジャンプ競技におけるデータ収集に際し、（財）全日本スキー連盟ジャンプチームには、被検者としてご協力を賜りました。また、同連盟ノルディック複合チームの河野孝典氏には、指導者の立場から、スキージャンプ全般の技術指導についてご意見を賜りました。これにより、本研究に実際的な観点を取り込むことができました。

白馬村ジャンプ競技場における床反力の測定に際し、白馬村ジャンプ競技場スタッフのご協力を賜りました。床反力計の測定手法について、湯本電気の湯本進氏にご指導賜りました。また、（株）林魏建築設計事務所の赤羽吉人氏には、白馬村ジャンプ競技場の形状について設計図などの資料提供を賜りました。

大倉山ジャンプ競技場の関数化にあたり、（株）札幌振興公社の高梨茂実氏および（財）全日本スキー連盟の島野敏幸氏には、設計図などの資料を賜りました。

そして、物心両面において支えてくれた私と妻の両親に感謝いたします。最後に、日々私を励まし、支えてくれた妻の松子に感謝します。彼女の献身的な協力によって、本研究を遂行することができました。

ここに心よりお礼申し上げます。ありがとうございました。

付録

A.1 風洞実験データを用いた補間データの作成方法

本研究では、初期飛行局面から安定した飛行局面まで、広範囲の飛行姿勢を対象として、風洞実験を行った (5.2.1 参照)。ただし、広範囲の姿勢を対象とするために、それぞれの角度 (α , θ , σ , λ , ϕ) の設定ピッチをある程度広げて実験をせざるを得なかった。そこで、より密な角度分布に対する空気力を得ることを目的に、実験データ間のデータを補間関数によって推定した。補間関数について、2点間の補間では直線補間法を用い、4点以上のデータを用いて補間を行う際には、Piecewise Cubic Hermite 補間法 (Fritsch ら 1980) を用いた。本研究で、補間関数としてよく使われる 3 次スプライン関数を使わなかった理由は、3 次スプライン関数による補間は、実験データのような不連続データに対する応答が安定しないことが知られており (Fritsch ら 1980)、なめらかさに欠けるものの、安定した応答を示す Piecewise Cubic Hermite 補間法の方が好ましいと判断したためである。

風洞実験では α 以外の姿勢を固定した上で、気流速度を一定にした状態で、 α をおよそ -5° から 40° までの範囲で 5° ピッチで変化させ、それぞれの α について空気力を計測した。この一連の測定を「実験ケース」と定義する。Fig. A1 には、同一実験ケース内における α の補間結果を示す。Fig. A2 には、 λ の大きさのみ異なる 2 つの実験ケース ($\lambda = 4.2$ および 8.2°) を用いて、 λ の補間を行った結果を示す。Fig. A3 には、 σ の大きさのみ異なる 4 つの実験ケース ($\sigma = 30, 40, 60$ および 70°) を用いて、 σ の補間を行った結果を示す。

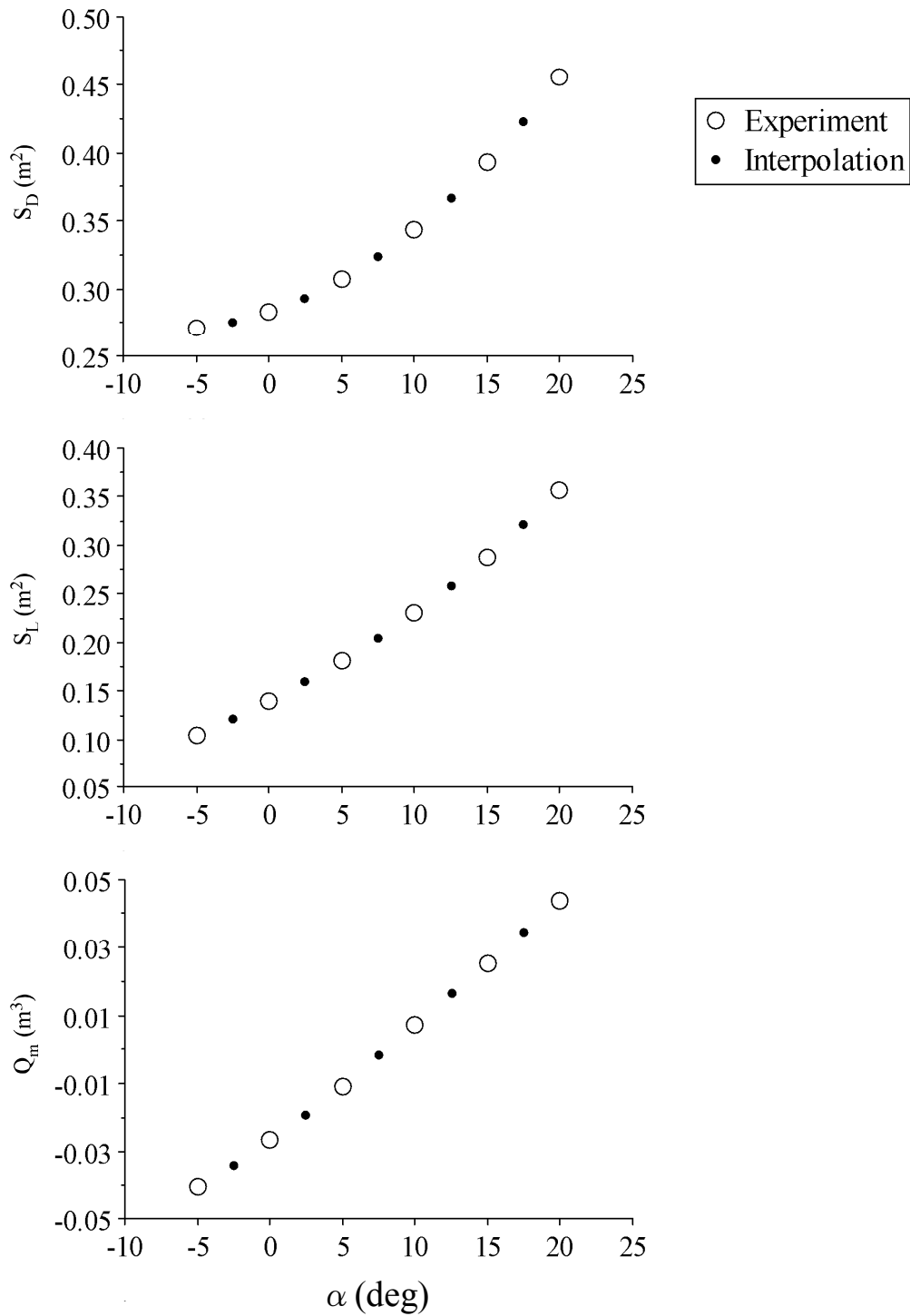


Figure A1 An example of the interpolation result between the attack angles α in an experimental case. The other positions of the jumper-ski model were fixed as follows, ski to leg angle $\theta = 70^\circ$, hip bending angle $\sigma = 70^\circ$ ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$ and arm angle $\phi = 170^\circ$. Open circle markers mean the data of the wind tunnel experiment. Painted circle markers mean the calculated values by Piecewise Cubic Hermite interpolation method.

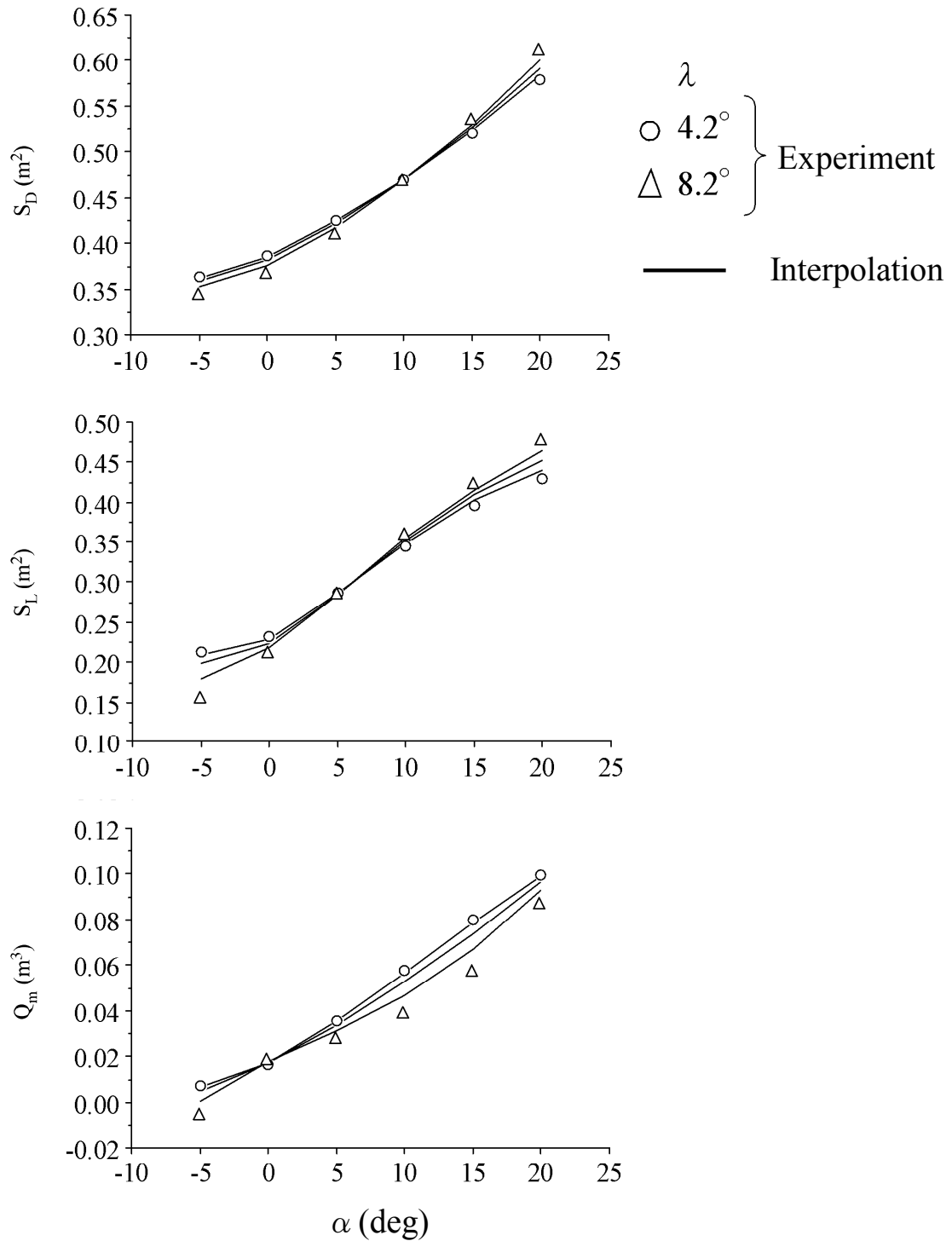


Figure A2 An example of the interpolation result between two experimental cases which have a difference in ski to ski angle λ . The other positions of the jumper-ski model were fixed as follows, ski to leg angle $\theta = 80^\circ$, hip bending angle $\sigma = 60^\circ$ and arm angle $\phi = 170^\circ$. Open circle and triangle markers mean the data of the wind tunnel experiment. Lines mean the calculated values by linear interpolation method.

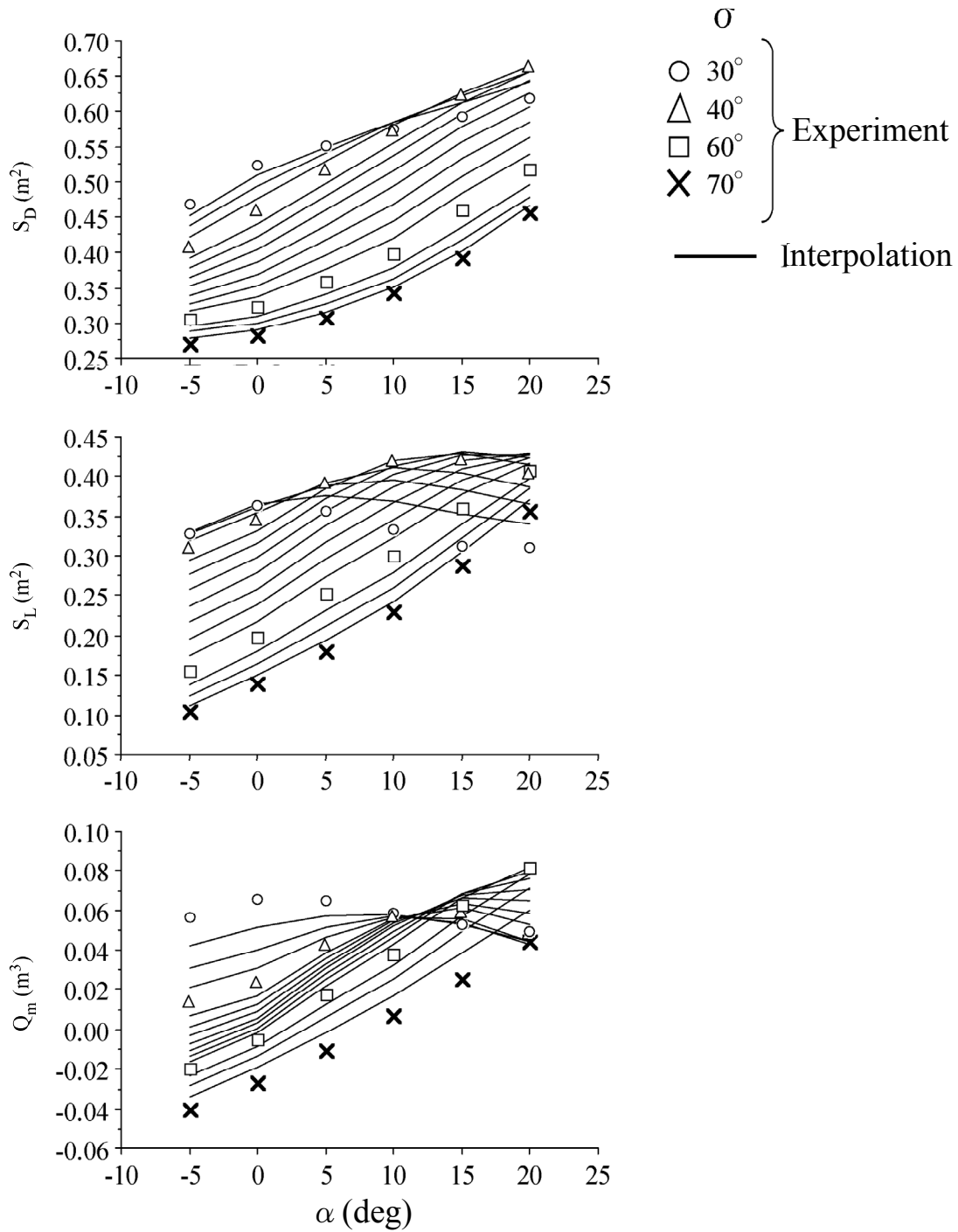


Figure A3 An example of the interpolation result between four experimental cases which have a difference in hip bending angle σ . The other positions of the jumper-ski model were fixed as follows, ski to leg angle $\theta = 70^\circ$, ski to ski angle $\lambda = 0^\circ$ and arm angle $\phi = 170^\circ$. Four types of markers mean the data of the wind tunnel experiment. Lines mean the calculated values by Piecewise Cubic Hermite interpolation method.

A.2 飛行姿勢による空気力係数の回帰モデル（多次元多項式）の係数表

5.2.2 において、揚力面積 S_L 、抗力面積 S_D およびピッチングモーメント容積 Q_M を、飛行姿勢（ α 、 θ 、 σ 、 λ および ϕ ）の多次元多項式として、それぞれ⑦、⑧ および⑨式で表現するモデルを構築した。ここでは⑦、⑧ および⑨式の係数をそれぞれ Table A1、同 A2 および同 A3 に示す。

A.2.1 揚力面積（ S_L ）回帰モデルの係数表

5.2.2 の⑦式で表した揚力面積（ S_L ）回帰モデルについて、その係数 a_{ijklm} を Table A1 に示した。

Table A1-1 Coefficients a_{ijklm} of equation (7) for S_L

a_{00000}	2.29082801627E-01	a_{01000}	7.40129478200E-01	a_{02000}	-2.19354885015E-01	a_{03000}	8.73500295833E-03	a_{04000}	-1.17702380068E-04
a_{00001}	-1.22420398313E-03	a_{01001}	-4.46624564387E-03	a_{02001}	1.31652788254E-03	a_{03001}	-5.27917774602E-05	a_{04001}	7.21235095568E-07
a_{00010}	-9.82236604747E-02	a_{01010}	4.33354137956E-01	a_{02010}	5.44354108865E-02	a_{03010}	-2.23826025371E-03	a_{04010}	2.02250110188E-05
a_{00011}	4.95929614963E-03	a_{01011}	-7.23181392924E-03	a_{02011}	-1.80761696468E-04	a_{03011}	1.35823959749E-05	a_{04011}	-1.65920180138E-07
a_{00020}	1.41305339116E-01	a_{01020}	-3.15837748091E-02	a_{02020}	-1.18539456603E-02	a_{03020}	5.30827900152E-04	a_{04020}	-5.63631067540E-06
a_{00021}	-1.56010245482E-03	a_{01021}	1.20399679460E-03	a_{02021}	2.86786151120E-05	a_{03021}	-2.64480555725E-06	a_{04021}	3.35020709725E-08
a_{00030}	7.20598203467E-03	a_{01030}	1.54313807267E-02	a_{02030}	5.36950664339E-04	a_{03030}	-4.39191853304E-05	a_{04030}	4.63353425970E-07
a_{00031}	-3.01772478091E-06	a_{01031}	-1.62867990452E-04	a_{02031}	3.37827531350E-07	a_{03031}	1.93388868530E-07	a_{04031}	-2.21041160529E-09
a_{00040}	1.93432937384E-03	a_{01040}	-1.55847847149E-03	a_{02040}	5.05331507537E-05	a_{03040}	-9.47610386391E-07	a_{04040}	2.68267772180E-08
a_{00041}	-1.20776418545E-05	a_{01041}	1.08280154871E-05	a_{02041}	-3.88403670873E-07	a_{03041}	7.63419592391E-09	a_{04041}	-1.79540652917E-10
a_{00100}	2.00677364734E-01	a_{01100}	5.72513495775E-01	a_{02100}	-1.47058674767E-02	a_{03100}	-1.35638561471E-04	a_{04100}	5.49310856184E-06
a_{00101}	2.31499379161E-04	a_{01101}	-3.44637455306E-03	a_{02101}	8.59827289857E-05	a_{03101}	9.26907869839E-07	a_{04101}	-3.53581332513E-08
a_{00110}	8.49559750292E-02	a_{01110}	-2.14759209931E-01	a_{02110}	6.07705439151E-03	a_{03110}	6.62088804391E-06	a_{04110}	-9.21714595772E-07
a_{00111}	5.38765820276E-03	a_{01111}	1.65315059835E-03	a_{02111}	-5.71121591121E-05	a_{03111}	2.13400012758E-07	a_{04111}	5.70636909397E-09
a_{00120}	-4.85183309684E-03	a_{01120}	1.82077543074E-02	a_{02120}	-8.86706682824E-04	a_{03120}	-2.94815257894E-06	a_{04120}	2.12032270073E-07
a_{00121}	-1.36367548061E-03	a_{01121}	-1.34949658188E-02	a_{02121}	7.50981105509E-06	a_{03121}	-1.84933962226E-08	a_{04121}	-1.01712206881E-09
a_{00130}	-4.54996114398E-02	a_{01130}	-8.08235922668E-04	a_{02130}	7.48131763044E-05	a_{03130}	1.29790737334E-06	a_{04130}	-3.1091726697E-08
a_{00131}	3.74000473885E-04	a_{01131}	3.79037597974E-06	a_{02131}	-4.97304018759E-07	a_{03131}	-5.29110441098E-09	a_{04131}	1.37587277829E-10
a_{00140}	2.34158990048E-03	a_{01140}	7.44946203206E-05	a_{02140}	-4.85783485325E-06	a_{03140}	6.48943185600E-08	a_{04140}	-1.79237129834E-09
a_{00141}	-1.63577947548E-05	a_{01141}	-3.70396715333E-07	a_{02141}	2.86331577782E-08	a_{03141}	-4.55918578523E-10	a_{04141}	1.25338939240E-11
a_{00200}	-7.25535012387E-01	a_{01200}	-1.25399849165E-03	a_{02200}	9.85053644216E-04	a_{03200}	-1.57777607555E-05	a_{04200}	4.14919670571E-08
a_{00201}	3.94698902966E-03	a_{01201}	3.12779961172E-05	a_{02201}	-6.41905779017E-06	a_{03201}	9.76588192339E-08	a_{04201}	-1.99499152765E-10
a_{00210}	1.35218814172E-01	a_{01210}	-5.96733090961E-03	a_{02210}	6.16549509924E-05	a_{03210}	-1.64174935510E-06	a_{04210}	3.10897946003E-08
a_{00211}	-1.34655988060E-03	a_{01211}	2.34539549585E-05	a_{02211}	8.18793977289E-07	a_{03211}	-1.18398677612E-08	a_{04211}	-4.30312955947E-11
a_{00220}	-1.31486962560E-02	a_{01220}	2.40415831322E-03	a_{02220}	-2.99252610605E-05	a_{03220}	1.02845277296E-07	a_{04220}	-8.25107188893E-10
a_{00221}	1.51798945795E-04	a_{01221}	-1.32309423365E-05	a_{02221}	1.05071416190E-07	a_{03221}	7.95498943077E-11	a_{04221}	7.15760471597E-13
a_{00230}	5.50511430277E-03	a_{01230}	-2.62276180576E-04	a_{02230}	1.67074270301E-07	a_{03230}	-9.34387078587E-09	a_{04230}	4.93181227588E-10
a_{00231}	-3.60212596771E-05	a_{01231}	1.59697117058E-06	a_{02231}	-5.20530032417E-09	a_{03231}	1.64259647822E-10	a_{04231}	-3.00004926810E-12
a_{00240}	-2.49140110259E-04	a_{01240}	4.17030867366E-06	a_{02240}	9.56929051306E-08	a_{03240}	-6.33410461199E-10	a_{04240}	3.82980427471E-11
a_{00241}	1.53209510711E-06	a_{01241}	-2.83733312753E-08	a_{02241}	-3.06091223988E-10	a_{03241}	-7.92973715974E-13	a_{04241}	-2.36964133169E-13
a_{00300}	4.47558324004E-02	a_{01300}	-1.98585786652E-03	a_{02300}	2.77229241176E-05	a_{03300}	-1.53613156312E-07	a_{04300}	7.01752551139E-10
a_{00301}	-2.41946202846E-04	a_{01301}	1.00039904354E-05	a_{02301}	-1.12945141046E-07	a_{03301}	2.22888056160E-10	a_{04301}	-5.03461746269E-13
a_{00310}	5.94880194817E-03	a_{01310}	-1.26492460621E-04	a_{02310}	1.08798210441E-06	a_{03310}	1.80498619885E-08	a_{04310}	-5.28872513026E-10
a_{00311}	-7.29426034381E-06	a_{01311}	1.06504980585E-07	a_{02311}	-1.44454614368E-08	a_{03311}	2.59196943649E-10	a_{04311}	-7.93029488343E-13
a_{00320}	-1.32035711857E-03	a_{01320}	-1.32784318582E-05	a_{02320}	2.70445048811E-07	a_{03320}	3.39061988652E-09	a_{04320}	-5.30988767379E-11
a_{00321}	7.08622110784E-06	a_{01321}	-1.40967954378E-08	a_{02321}	2.01055787917E-09	a_{03321}	-6.55379193332E-11	a_{04321}	6.93462463491E-13
a_{00330}	-1.18835813516E-04	a_{01330}	7.27098879509E-06	a_{02330}	3.07961392118E-09	a_{03330}	-6.11988398972E-10	a_{04330}	-4.65647979175E-12
a_{00331}	5.34921322866E-07	a_{01331}	-2.79962028069E-08	a_{02331}	-3.23594560292E-10	a_{03331}	6.08073277007E-12	a_{04331}	-3.5665859998E-15
a_{00340}	5.96146595232E-06	a_{01340}	-4.53470413447E-08	a_{02340}	-4.66318998474E-09	a_{03340}	1.04116777009E-11	a_{04340}	-3.56800454257E-14
a_{00341}	-2.88080646101E-08	a_{01341}	-1.32646022002E-10	a_{02341}	3.27281761105E-11	a_{03341}	-6.66044194287E-14	a_{04341}	8.67392636284E-16
a_{00400}	-3.57422885339E-04	a_{01400}	1.60968873888E-05	a_{02400}	-1.98718301965E-07	a_{03400}	1.51861573249E-10	a_{04400}	9.08145393126E-12
a_{00401}	1.56523400409E-06	a_{01401}	-5.13416695187E-08	a_{02401}	-1.77052132935E-10	a_{03401}	1.90767744239E-11	a_{04401}	-1.91133511351E-13
a_{00410}	-2.37748061962E-04	a_{01410}	8.31959024356E-06	a_{02410}	-1.18155027417E-07	a_{03410}	5.81753668719E-10	a_{04410}	3.28741471398E-12
a_{00411}	7.89776187616E-07	a_{01411}	-1.72597340900E-08	a_{02411}	4.02721740029E-11	a_{03411}	2.94442415530E-12	a_{04411}	-4.19601687336E-14
a_{00420}	6.88476540979E-06	a_{01420}	7.85660171980E-07	a_{02420}	-1.28417802430E-08	a_{03420}	-5.47859955504E-11	a_{04420}	1.66468662524E-12
a_{00421}	-6.29506847432E-08	a_{01421}	-2.68219399028E-09	a_{02421}	3.56959950711E-11	a_{03421}	5.96457948981E-13	a_{04421}	-1.19309509950E-14
a_{00430}	3.10776361845E-06	a_{01430}	-1.75541763636E-07	a_{02430}	7.85165674656E-10	a_{03430}	1.75964567413E-11	a_{04430}	-9.45776376657E-14
a_{00431}	-1.12466278700E-08	a_{01431}	6.13348480859E-10	a_{02431}	3.49304291813E-12	a_{03431}	-1.73905845792E-13	a_{04431}	1.11753789598E-15
a_{00440}	-4.53856757847E-08	a_{01440}	-9.05404962036E-10	a_{02440}	8.47819916376E-11	a_{03440}	1.19545669061E-13	a_{04440}	-1.16559778467E-14
a_{00441}	5.86805220838E-11	a_{01441}	1.61866618026E-11	a_{02441}	-6.49573425137E-13	a_{03441}	-5.96068936778E-16	a_{04441}	7.05131877181E-17
a_{00500}	-3.45990743122E-07	a_{01500}	5.51152503011E-08	a_{02500}	-2.43301481298E-09	a_{03500}	4.39067545105E-11	a_{04500}	-3.52642625187E-13
a_{00501}	6.20156705794E-09	a_{01501}	-6.66303127589E-10	a_{02501}	2.51391787996E-11	a_{03501}	-4.23806836118E-13	a_{04501}	3.28833090873E-15
a_{00510}	1.8696982358E-06	a_{01510}	-6.86592585692E-08	a_{02510}	9.38856422353E-10	a_{03510}	-3.71241575116E-12	a_{04510}	-3.26550492472E-14
a_{00511}	-6.79485254333E-09	a_{01511}	1.07007945243E-10	a_{02511}	2.92526822964E-12	a_{03511}	-9.59100347823E-14	a_{04511}	9.66476505697E-16
a_{00520}	-4.81164132876E-08	a_{01520}	-2.95259150595E-09	a_{02520}	1.16759457472E-11	a_{03520}	1.3606626507E-12	a_{04520}	-1.63495030334E-14
a_{00521}	6.77092201031E-10	a_{01521}	3.24438942667E-12	a_{02521}	-1.06170770644E-13	a_{03521}	-2.01692869642E-15	a_{04521}	3.32250738521E-17
a_{00530}	1.56204701459E-08	a_{01530}	-4.85956187636E-10	a_{02530}	1.64723273083E-11	a_{03530}	-1.43555670717E-13	a_{04530}	-9.62985454857E-16
a_{00531}	-1.53348859045E-10	a_{01531}	5.37929017267E-12	a_{02531}	-1.14753203688E-13	a_{03531}	4.64936621658E-16	a_{04531}	1.05768187989E-17
a_{00540}	-1.85318388330E-09	a_{01540}	6.88066897965E-11	a_{02540}	-6.62773133263E-14	a_{03540}	-3.57240140585E-14	a_{04540}	5.27533365107E-16
a_{00541}	1.22861009355E-11	a_{01541}	-4.40242152806E-13	a_{02541}	-5.68577366029E-16	a_{03541}	2.50888466595E-16	a_{04541}	-3.54200143402E-18

Table A1-2 Coefficients a_{ijklm} of equation (7) for S_L

a_{05000}	5.08374926430E-07	a_{10000}	1.11228612227E-01	a_{11000}	4.23605298606E-01	a_{12000}	-2.70554707295E-02	a_{13000}	5.79793168262E-04
a_{05001}	-3.18508217478E-09	a_{10001}	-6.20771197883E-04	a_{11001}	-2.48112757336E-03	a_{12001}	1.57919827990E-04	a_{13001}	-3.35280910408E-06
a_{05010}	-9.12531146706E-09	a_{10010}	-8.85622867194E-01	a_{11010}	-1.48069020654E-03	a_{12010}	1.08173261874E-02	a_{13010}	-4.45993911431E-04
a_{05011}	4.32663516667E-10	a_{10011}	4.59012309138E-03	a_{11011}	6.80918731840E-04	a_{12011}	-8.39721560373E-05	a_{13011}	2.47647413605E-06
a_{05020}	8.57642751040E-09	a_{10020}	1.37801034810E-02	a_{11020}	-9.68723720894E-03	a_{12020}	-1.58685039506E-04	a_{13020}	1.37611974045E-05
a_{05021}	-7.79044622148E-11	a_{10021}	2.46408270119E-05	a_{11021}	-8.62648507836E-05	a_{12021}	6.29818611550E-06	a_{13021}	-9.87731366868E-08
a_{05030}	-5.50288328268E-11	a_{10030}	-1.65620040439E-02	a_{11030}	1.26703216831E-03	a_{12030}	-1.18093722761E-04	a_{13030}	3.81498839676E-06
a_{05031}	-7.52984605881E-13	a_{10031}	9.15239158025E-05	a_{11031}	2.53516640256E-06	a_{12031}	2.62230289042E-07	a_{13031}	-1.84182062449E-08
a_{05040}	-2.63264762957E-10	a_{10040}	6.59330094600E-04	a_{11040}	1.63602174372E-05	a_{12040}	2.21573281932E-06	a_{13040}	-7.54335843854E-08
a_{05041}	1.62958295845E-12	a_{10041}	-3.76870820651E-06	a_{11041}	-3.23360702546E-07	a_{12041}	-2.15135898020E-09	a_{13041}	3.02122618437E-10
a_{05100}	-3.20165407276E-08	a_{10100}	-3.07974121532E-01	a_{11100}	1.56646492061E-02	a_{12100}	-2.48406471098E-05	a_{13100}	3.67970870460E-06
a_{05101}	2.09309376481E-10	a_{10101}	1.74647913364E-03	a_{11101}	-9.51857734983E-05	a_{12101}	7.09509593308E-07	a_{13101}	-4.28202863047E-08
a_{05110}	2.96289376974E-09	a_{10110}	-3.67263548698E-01	a_{11110}	6.16222522202E-03	a_{12110}	-2.23262785436E-04	a_{13110}	6.57974844070E-06
a_{05111}	-3.14001551327E-11	a_{10111}	6.86347040126E-04	a_{11111}	-1.53888273247E-05	a_{12111}	2.12350633616E-06	a_{13111}	-3.32080043391E-08
a_{05120}	-6.87232733941E-10	a_{10120}	9.15372398014E-02	a_{11120}	-2.87603506653E-03	a_{12120}	5.70573526240E-05	a_{13120}	2.75812929724E-07
a_{05121}	3.69732266795E-12	a_{10121}	-2.42473536637E-04	a_{11121}	1.08581632162E-05	a_{12121}	-4.67834571631E-07	a_{13121}	-9.99341451056E-10
a_{05130}	5.10244520282E-11	a_{10130}	7.84891598610E-04	a_{11130}	4.42087615479E-05	a_{12130}	2.34570354352E-06	a_{13130}	-2.63348881134E-07
a_{05131}	-1.41779464377E-14	a_{10131}	-2.46718855182E-05	a_{11131}	2.68247414597E-07	a_{12131}	-5.79607683194E-09	a_{13131}	1.33809551324E-09
a_{05140}	2.03258804749E-11	a_{10140}	-1.95244089114E-04	a_{11140}	-2.42621815762E-06	a_{12140}	4.57272631805E-09	a_{13140}	6.81282550765E-09
a_{05141}	-1.33811037333E-13	a_{10141}	1.59129755758E-06	a_{11141}	1.57281435442E-09	a_{12141}	-2.88481607919E-10	a_{13141}	-2.85912872258E-11
a_{05200}	2.47936634933E-10	a_{10200}	-7.51462544502E-03	a_{11200}	-2.25755212251E-04	a_{12200}	-1.32287286104E-05	a_{13200}	2.99527317006E-07
a_{05201}	-2.05825007826E-12	a_{10201}	6.52205412291E-05	a_{11201}	3.13766666049E-07	a_{12201}	7.46148542995E-08	a_{13201}	-8.4008474736E-10
a_{05210}	-1.22015972765E-10	a_{10210}	2.67262555898E-02	a_{11210}	-4.36690854949E-04	a_{12210}	4.01350882818E-06	a_{13210}	7.92529799773E-08
a_{05211}	5.18895834482E-13	a_{10211}	-5.71174640630E-05	a_{11211}	-1.33576627606E-06	a_{12211}	-4.67915168476E-09	a_{13211}	-3.77621104615E-10
a_{05220}	-7.43979652210E-12	a_{10220}	-5.52359152149E-03	a_{11220}	1.44755493893E-04	a_{12220}	-4.02086496753E-06	a_{13220}	3.37077022033E-08
a_{05221}	7.38331905251E-14	a_{10221}	1.48314725971E-05	a_{11221}	-1.91145967840E-08	a_{12221}	1.42233832406E-08	a_{13221}	-1.58684583900E-10
a_{05230}	1.61516618251E-13	a_{10230}	-1.74655684470E-04	a_{11230}	3.07012511841E-06	a_{12230}	1.87245531342E-07	a_{13230}	1.81248950747E-09
a_{05231}	-8.63152975452E-15	a_{10231}	2.16767549008E-06	a_{11231}	-8.34333306762E-08	a_{12231}	-4.67487193294E-11	a_{13231}	-1.37103275731E-11
a_{05240}	-6.14009422138E-13	a_{10240}	1.52474461962E-05	a_{11240}	3.97590051580E-09	a_{12240}	-1.51560246964E-08	a_{13240}	-6.53390330743E-11
a_{05241}	4.06456099450E-15	a_{10241}	-1.14157700332E-07	a_{11241}	1.50473516472E-09	a_{12241}	6.59667763309E-11	a_{13241}	1.85569645030E-13
a_{05300}	-3.63637996515E-12	a_{10300}	4.70705404703E-04	a_{11300}	3.28664045225E-05	a_{12300}	-9.12979562242E-07	a_{13300}	4.18989859886E-09
a_{05301}	1.93106746691E-14	a_{10301}	-4.36818338586E-06	a_{11301}	-8.64812517255E-08	a_{12301}	3.06970933205E-09	a_{13301}	-1.44735540646E-11
a_{05310}	2.58407356487E-12	a_{10310}	-5.69425837204E-04	a_{11310}	5.25858933813E-06	a_{12310}	-1.25543796850E-07	a_{13310}	2.38269324325E-09
a_{05311}	-1.36130987528E-15	a_{10311}	1.64001750640E-06	a_{11311}	8.32400917803E-08	a_{12311}	-1.27193185708E-09	a_{13311}	2.30477821223E-12
a_{05320}	3.81227101059E-13	a_{10320}	9.21082434084E-05	a_{11320}	-8.53910855700E-07	a_{12320}	4.05526345581E-08	a_{13320}	-4.41263451861E-10
a_{05321}	-4.36757829924E-15	a_{10321}	-4.11277289318E-07	a_{11321}	-9.05516237720E-09	a_{12321}	9.02132325294E-11	a_{13321}	-4.89985706186E-13
a_{05330}	5.96596960315E-15	a_{10330}	9.01127151884E-06	a_{11330}	-3.16885804509E-07	a_{12330}	-2.90337255851E-09	a_{13330}	-3.0597118635E-11
a_{05331}	2.57749893256E-16	a_{10331}	-5.71016775436E-08	a_{11331}	2.83832840931E-09	a_{12331}	-1.37216610386E-11	a_{13331}	4.51378925548E-13
a_{05340}	7.15355636267E-15	a_{10340}	-3.09671711791E-07	a_{11340}	1.43073901710E-09	a_{12340}	6.44271807567E-10	a_{13340}	-4.07734555241E-12
a_{05341}	-5.31159859216E-17	a_{10341}	1.82424605194E-09	a_{11341}	-2.44764965628E-11	a_{12341}	-3.33497896594E-12	a_{13341}	2.68048963784E-14
a_{05400}	-3.68259885748E-14	a_{10400}	-2.13033588221E-05	a_{11400}	6.07853831057E-08	a_{12400}	8.97461608906E-09	a_{13400}	-4.65004767505E-11
a_{05401}	5.49582677767E-16	a_{10401}	1.67913682829E-07	a_{11401}	-3.48455048211E-09	a_{12401}	3.14351889289E-11	a_{13401}	-6.95450634595E-13
a_{05410}	-2.96940285637E-14	a_{10410}	1.24215305023E-06	a_{11410}	1.94080400485E-07	a_{12410}	-3.39522552497E-09	a_{13410}	2.64492172078E-12
a_{05411}	1.58968349443E-16	a_{10411}	-3.13410553551E-08	a_{11411}	-7.31613100506E-10	a_{12411}	2.42494927273E-11	a_{13411}	-2.12205055554E-13
a_{05420}	-8.40849225042E-15	a_{10420}	1.01477192980E-06	a_{11420}	-4.08895582367E-08	a_{12420}	-2.65490971806E-10	a_{13420}	6.43668008864E-12
a_{05421}	7.04359035609E-17	a_{10421}	3.21559802297E-09	a_{11421}	-7.85373729222E-11	a_{12421}	4.55161598615E-12	a_{13421}	-2.13127101671E-14
a_{05430}	1.64817282178E-16	a_{10430}	-1.92850326272E-07	a_{11430}	3.86479747234E-09	a_{12430}	1.46724664847E-10	a_{13430}	-1.60574168042E-12
a_{05431}	-4.91124601744E-18	a_{10431}	5.04663015565E-10	a_{11431}	-4.95198083713E-12	a_{12431}	-7.95350202363E-13	a_{13431}	3.26943907411E-15
a_{05440}	2.46048188183E-18	a_{10440}	-6.92128537757E-10	a_{11440}	-1.15760434193E-10	a_{12440}	-4.71619542651E-12	a_{13440}	3.89940597230E-14
a_{05441}	5.36990532302E-20	a_{10441}	1.93128414712E-11	a_{11441}	4.81452410970E-14	a_{12441}	3.51849319596E-14	a_{13441}	-2.83413118458E-16
a_{05500}	1.07189296277E-15	a_{10500}	2.74025473442E-08	a_{11500}	5.46933785104E-09	a_{12500}	-2.12139136047E-10	a_{13500}	2.41201251445E-12
a_{05501}	-9.67331694707E-18	a_{10501}	-4.82372590808E-10	a_{11501}	-7.60406269840E-12	a_{12501}	5.39284455830E-13	a_{13501}	-4.79897051388E-15
a_{05510}	2.56549256996E-16	a_{10510}	3.56685765196E-09	a_{11510}	-3.51083586370E-10	a_{12510}	-4.02682676525E-12	a_{13510}	1.73292760840E-13
a_{05511}	-3.33975732513E-18	a_{10511}	5.30049798845E-10	a_{11511}	-2.24486601279E-11	a_{12511}	4.26293900218E-13	a_{13511}	-3.39774750599E-15
a_{05520}	5.39480307386E-17	a_{10520}	-1.86919936612E-08	a_{11520}	3.42931913585E-10	a_{12520}	7.10680039610E-12	a_{13520}	-1.48083510026E-13
a_{05521}	-1.69260745722E-19	a_{10521}	-2.16794560089E-11	a_{11521}	4.04675134699E-12	a_{12521}	-1.35770985360E-13	a_{13521}	1.21658314222E-15
a_{05530}	9.91926586447E-18	a_{10530}	1.93664889398E-09	a_{11530}	-6.75947082180E-11	a_{12530}	1.43976513001E-13	a_{13530}	2.98362189719E-15
a_{05531}	-6.74101643663E-20	a_{10531}	-3.66280290970E-12	a_{11531}	8.70562898140E-14	a_{12531}	1.61891599592E-15	a_{13531}	3.25014914416E-17
a_{05540}	-2.03145937168E-18	a_{10540}	7.31783224111E-12	a_{11540}	5.95258309760E-12	a_{12540}	-1.80223025853E-13	a_{13540}	2.36878299017E-15
a_{05541}	1.33067492598E-20	a_{10541}	-2.27774042766E-13	a_{11541}	-2.46959164604E-14	a_{12541}	8.38665504310E-16	a_{13541}	-1.17760928864E-17

Table A1-3 Coefficients a_{ijklm} of equation (7) for S_L

a_{14000}	-5.46860677854E-06	a_{15000}	2.10474316779E-08	a_{20000}	5.19252526818E-02	a_{21000}	-4.61025495470E-02	a_{22000}	2.23232131085E-03
a_{14001}	3.11132931941E-08	a_{15001}	-1.17476128597E-10	a_{20001}	-3.02376607404E-04	a_{21001}	2.69320619592E-04	a_{22001}	-1.28055863252E-05
a_{14010}	6.81842956764E-06	a_{15010}	-3.56765986261E-08	a_{20010}	-4.89829634557E-02	a_{21010}	2.96850114820E-03	a_{22010}	-4.41635043325E-04
a_{14011}	-3.12981409341E-08	a_{15011}	1.46531228693E-10	a_{20011}	3.19779493676E-04	a_{21011}	-5.59746952743E-05	a_{22011}	4.32703373213E-06
a_{14020}	-3.58276842218E-07	a_{15020}	2.62751006132E-09	a_{20020}	2.39754926591E-02	a_{21020}	-9.19314834823E-04	a_{22020}	7.99590854775E-05
a_{14021}	9.88117728606E-10	a_{15021}	-5.78401221791E-12	a_{20021}	-1.46495068575E-04	a_{21021}	1.34499816523E-05	a_{22021}	-8.61289619023E-07
a_{14030}	-2.51851719216E-08	a_{15030}	-5.86839698703E-11	a_{20030}	-1.05459374995E-03	a_{21030}	5.21775302999E-05	a_{22030}	-1.69333296851E-06
a_{14031}	1.83610923697E-10	a_{15031}	-1.17699606408E-13	a_{20031}	6.51824254142E-06	a_{21031}	-8.57681003813E-07	a_{22031}	3.83486912564E-08
a_{14040}	-6.14049967810E-10	a_{15040}	1.43856658762E-11	a_{20040}	4.24682102349E-06	a_{21040}	-1.58818359888E-06	a_{22040}	-3.31791888919E-08
a_{14041}	3.57538544553E-12	a_{15041}	-7.79241587617E-14	a_{20041}	-3.10565100738E-08	a_{21041}	2.16917785327E-08	a_{22041}	-4.71952839220E-10
a_{14100}	-1.53511136608E-07	a_{15100}	1.02736634361E-09	a_{20100}	3.42032865482E-02	a_{21100}	9.54258836289E-04	a_{22100}	-8.75987951261E-05
a_{14101}	1.21298356359E-09	a_{15101}	-7.62909713603E-12	a_{20101}	-2.01951818803E-04	a_{21101}	-5.53714750826E-06	a_{22101}	4.93172943730E-07
a_{14110}	-1.13065663874E-07	a_{15110}	7.00922850446E-10	a_{20110}	5.64581660420E-03	a_{21110}	6.87638918579E-04	a_{22110}	-1.16584487236E-05
a_{14111}	9.24806019575E-11	a_{15111}	5.01392409206E-13	a_{20111}	8.87046794013E-06	a_{21111}	-3.76734363669E-06	a_{22111}	2.88610361791E-09
a_{14120}	-5.09638802281E-09	a_{15120}	-2.09361736485E-11	a_{20120}	-2.65818632356E-03	a_{21120}	-5.34117595847E-05	a_{22120}	6.10130955573E-07
a_{14121}	1.01243922281E-10	a_{15121}	-5.39796034595E-13	a_{20121}	8.40641177480E-06	a_{21121}	2.74602702284E-07	a_{22121}	8.47016187483E-09
a_{14130}	2.35804006265E-09	a_{15130}	3.31824116876E-12	a_{20130}	-3.62251792939E-05	a_{21130}	6.39470848703E-06	a_{22130}	-9.79594029051E-08
a_{14131}	-1.47404637190E-11	a_{15131}	9.13251879009E-16	a_{20131}	7.00298981285E-07	a_{21131}	-4.16791930571E-08	a_{22131}	-3.17123842411E-11
a_{14140}	1.58023575735E-11	a_{15140}	-1.07983905509E-12	a_{20140}	6.75123235962E-06	a_{21140}	-1.49348335493E-07	a_{22140}	2.01153848029E-09
a_{14141}	-2.09723558765E-13	a_{15141}	6.76305651639E-15	a_{20141}	-5.09408924477E-08	a_{21141}	1.08636943408E-09	a_{22141}	8.08775469802E-13
a_{14200}	1.53286826268E-09	a_{15200}	-2.96118903354E-11	a_{20200}	-1.62920767263E-03	a_{21200}	1.54802469909E-05	a_{22200}	1.36045494224E-06
a_{14201}	-2.57774825566E-11	a_{15201}	2.64967656050E-13	a_{20201}	9.76491324690E-06	a_{21201}	-9.20777985679E-08	a_{22201}	-8.26259810151E-09
a_{14210}	-1.91090934827E-09	a_{15210}	9.88039879875E-12	a_{20210}	-6.16547635339E-04	a_{21210}	-2.12660410687E-05	a_{22210}	5.82701188843E-07
a_{14211}	2.09672076600E-11	a_{15211}	-1.64354225320E-13	a_{20211}	1.55911674529E-06	a_{21211}	1.48766237744E-07	a_{22211}	-4.32155367102E-10
a_{14220}	-1.98284670944E-10	a_{15220}	1.94143344798E-12	a_{20220}	1.55932282758E-04	a_{21220}	-6.07387428238E-08	a_{22220}	-5.60546873028E-08
a_{14221}	-1.52853474820E-13	a_{15221}	1.91448931140E-15	a_{20221}	-7.35608050337E-07	a_{21221}	4.96231764628E-10	a_{22221}	-1.45986739899E-10
a_{14230}	-1.01981470448E-11	a_{15230}	-4.04722773403E-13	a_{20230}	1.68544480267E-07	a_{21230}	-8.61757245671E-08	a_{22230}	2.64374713463E-09
a_{14231}	1.98093149930E-14	a_{15231}	2.61592257574E-15	a_{20231}	-1.37179795067E-08	a_{21231}	1.24569693941E-09	a_{22231}	-1.76126493148E-11
a_{14240}	2.61993675501E-13	a_{15240}	2.56937047560E-14	a_{20240}	-1.63675565369E-07	a_{21240}	4.31540074064E-09	a_{22240}	-2.31908037021E-10
a_{14241}	6.33116019808E-15	a_{15241}	-2.08026042881E-16	a_{20241}	1.32748108566E-09	a_{21241}	-5.62214265071E-11	a_{22241}	1.84708022485E-12
a_{14300}	-6.24726668542E-13	a_{15300}	1.44831803021E-13	a_{20300}	2.48887710626E-05	a_{21300}	-1.33294147147E-06	a_{22300}	1.26150190937E-08
a_{14301}	2.00482715748E-13	a_{15301}	-2.54345211937E-15	a_{20301}	-1.56915938232E-07	a_{21301}	8.20749348647E-09	a_{22301}	-5.14142450327E-11
a_{14310}	-1.01939774710E-11	a_{15310}	-3.44078827489E-14	a_{20310}	1.42100386860E-05	a_{21310}	3.49588090876E-07	a_{22310}	-1.13313795388E-08
a_{14311}	-1.30109060638E-13	a_{15311}	1.65912744432E-15	a_{20311}	-4.20953660236E-08	a_{21311}	-4.30753916354E-09	a_{22311}	4.03431903861E-11
a_{14320}	6.15034894297E-12	a_{15320}	-6.56205883573E-14	a_{20320}	1.06784815791E-07	a_{21320}	-5.33096043093E-08	a_{22320}	1.78473671489E-09
a_{14321}	-1.46653815321E-14	a_{15321}	2.72293050927E-16	a_{20321}	4.37300128155E-09	a_{21321}	1.69986675109E-10	a_{22321}	2.17667918237E-12
a_{14330}	5.45064769674E-13	a_{15330}	4.99326282963E-15	a_{20330}	-2.26981188811E-08	a_{21330}	-4.88271269665E-09	a_{22330}	1.90168355940E-10
a_{14331}	-2.30712541697E-15	a_{15331}	-4.74669884686E-17	a_{20331}	-1.28276768330E-10	a_{21331}	1.37532894003E-11	a_{22331}	-7.84658802718E-13
a_{14340}	-2.28266207622E-14	a_{15340}	-8.62168265240E-17	a_{20340}	-1.47552154696E-08	a_{21340}	2.68891391487E-10	a_{22340}	5.02493448922E-12
a_{14341}	-6.35818088479E-17	a_{15341}	2.19938533040E-18	a_{20341}	8.96453414354E-11	a_{21341}	-1.01557425580E-12	a_{22341}	-4.35796082630E-14
a_{14400}	-7.97786704278E-13	a_{15400}	5.09145413226E-15	a_{20400}	4.45033696386E-07	a_{21400}	4.65255370252E-09	a_{22400}	-4.87879910734E-10
a_{14401}	8.53673826675E-15	a_{15401}	-2.76215868516E-17	a_{20401}	-2.27898435324E-09	a_{21401}	-4.96354235984E-11	a_{22401}	2.94955108316E-12
a_{14410}	3.09910655470E-13	a_{15410}	-1.94582664596E-15	a_{20410}	-1.40984151620E-07	a_{21410}	3.51849323712E-09	a_{22410}	-4.56362172916E-11
a_{14411}	1.14069983153E-15	a_{15411}	-5.58510469795E-18	a_{20411}	9.24882529775E-10	a_{21411}	2.05705475148E-11	a_{22411}	-4.82227899331E-13
a_{14420}	-7.10249837647E-14	a_{15420}	7.77456196739E-16	a_{20420}	-1.06144331064E-07	a_{21420}	2.14097188814E-09	a_{22420}	8.76502700128E-12
a_{14421}	-3.93866560537E-17	a_{15421}	-2.43343517619E-18	a_{20421}	3.68560401212E-10	a_{21421}	-7.01891793333E-12	a_{22421}	-1.99475347941E-13
a_{14430}	8.57241314945E-17	a_{15430}	-2.85043002400E-17	a_{20430}	3.86994933923E-09	a_{21430}	-6.86582143671E-11	a_{22430}	-2.26290031805E-12
a_{14431}	5.31075286610E-17	a_{15431}	1.15660263415E-19	a_{20431}	-1.2554848712E-11	a_{21431}	5.83216897833E-13	a_{22431}	3.47045717016E-15
a_{14440}	4.58674101669E-16	a_{15440}	-2.08211587860E-18	a_{20440}	6.37996871013E-10	a_{21440}	-3.56854536427E-12	a_{22440}	-2.96704806719E-13
a_{14441}	-1.53608763497E-18	a_{15441}	-4.73293360264E-22	a_{20441}	-3.94828616566E-12	a_{21441}	2.60636270080E-14	a_{22441}	1.49675814713E-15
a_{14500}	-7.39488096478E-15	a_{15500}	-1.31241027699E-17	a_{20500}	-7.73532549331E-09	a_{21500}	2.35232259751E-10	a_{22500}	-2.51331716348E-12
a_{14501}	-1.12787877169E-17	a_{15501}	1.76551108994E-19	a_{20501}	3.83676898782E-11	a_{21501}	-8.37202640356E-13	a_{22501}	1.32147301340E-15
a_{14510}	-2.46593278235E-15	a_{15510}	1.58146980629E-17	a_{20510}	-7.39573725061E-10	a_{21510}	-2.67754373115E-11	a_{22510}	8.49277266847E-13
a_{14511}	8.41233300375E-18	a_{15511}	-2.58288306184E-21	a_{20511}	-7.22968769791E-12	a_{21511}	2.87546429575E-13	a_{22511}	-1.74602635413E-15
a_{14520}	1.13767794705E-15	a_{15520}	-6.34096459356E-18	a_{20520}	1.65962541897E-09	a_{21520}	-3.73637964219E-11	a_{22520}	-4.65852623517E-14
a_{14521}	-2.58051717848E-18	a_{15521}	8.18413950965E-21	a_{20521}	-6.50414580421E-12	a_{21521}	1.26258748530E-13	a_{22521}	1.37955895129E-15
a_{14530}	-2.49661457311E-17	a_{15530}	4.28899950785E-19	a_{20530}	-1.65889099998E-10	a_{21530}	6.93797428008E-12	a_{22530}	-9.67717525934E-14
a_{14531}	-7.49535615529E-19	a_{15531}	1.13860096201E-21	a_{20531}	8.62984147754E-13	a_{21531}	-3.95116815213E-14	a_{22531}	6.00586034105E-16
a_{14540}	-1.35175397491E-17	a_{15540}	1.50489698087E-20	a_{20540}	-5.69874450387E-12	a_{21540}	9.61305817879E-14	a_{22540}	-1.02271500735E-15
a_{14541}	6.97936021901E-20	a_{15541}	-5.72852387837E-23	a_{20541}	3.7264277320E-14	a_{21541}	-9.06352458548E-16	a_{22541}	1.91366568914E-17

Table A1-4 Coefficients a_{ijklm} of equation (7) for S_L

a_{23000}	-4.20984151002E-05	a_{24000}	3.67341591842E-07	a_{25000}	-1.20582843892E-09	a_{30000}	-6.98025400293E-03	a_{31000}	7.83264106135E-04
a_{23001}	2.30712200454E-07	a_{24001}	-1.86732741336E-09	a_{25001}	5.57270348925E-12	a_{30001}	4.09908724937E-05	a_{31001}	-4.52338279888E-06
a_{23010}	1.13328190681E-05	a_{24010}	-8.56494022846E-08	a_{25010}	1.35807474163E-10	a_{30010}	2.40476278232E-03	a_{31010}	2.05546831224E-04
a_{23011}	-9.09322424389E-08	a_{24011}	6.35157185214E-10	a_{25011}	-1.11675317063E-12	a_{30011}	-1.48183001080E-05	a_{31011}	-3.18370041523E-07
a_{23020}	-1.93551651052E-06	a_{24020}	1.01169495477E-08	a_{25020}	4.75581597317E-11	a_{30020}	-7.87137436804E-04	a_{31020}	-2.04564699343E-06
a_{23021}	1.76549123990E-08	a_{24021}	-1.05610494588E-10	a_{25021}	-1.02299236200E-13	a_{30021}	4.74900461867E-06	a_{31021}	-1.80414310923E-07
a_{23030}	-4.92733414503E-08	a_{24030}	2.49105181021E-09	a_{25030}	-2.40381077275E-11	a_{30030}	5.01674048678E-05	a_{31030}	-2.15589502692E-06
a_{23031}	-2.00937774903E-10	a_{24031}	-1.05956628987E-11	a_{25031}	1.24130435374E-13	a_{30031}	-3.02161049126E-07	a_{31031}	2.62024877385E-08
a_{23040}	4.17067132388E-09	a_{24040}	-1.10537576829E-10	a_{25040}	9.84131902371E-13	a_{30040}	-1.11775330217E-06	a_{31040}	1.20315069221E-07
a_{23041}	-1.23174639565E-11	a_{24041}	5.40540756164E-13	a_{25041}	-5.28999454933E-15	a_{30041}	6.71532166417E-09	a_{31041}	-1.01727512028E-09
a_{23100}	1.69701673371E-06	a_{24100}	-1.43500758440E-08	a_{25100}	4.64214992571E-11	a_{30100}	4.05245649025E-04	a_{31100}	-1.53570964952E-04
a_{23101}	-8.27042284074E-09	a_{24101}	4.88452536876E-11	a_{25101}	-6.29792879904E-14	a_{30101}	-2.41165128457E-06	a_{31101}	9.14917356815E-07
a_{23110}	4.34904186692E-08	a_{24110}	-3.01750647634E-09	a_{25110}	3.61892256106E-11	a_{30110}	-7.39979779277E-05	a_{31110}	9.29597419968E-06
a_{23111}	1.29730123755E-10	a_{24111}	2.70608086160E-11	a_{25111}	-2.76266499870E-13	a_{30111}	-4.04368238066E-08	a_{31111}	-5.66501584971E-08
a_{23120}	4.94647513234E-08	a_{24120}	-4.21090731788E-10	a_{25120}	-4.04692711210E-12	a_{30120}	1.94323660120E-05	a_{31120}	9.79824359922E-07
a_{23121}	-3.66178285791E-10	a_{24121}	1.23264316222E-12	a_{25121}	2.87730829153E-14	a_{30121}	-6.54784197408E-08	a_{31121}	-6.12522273160E-09
a_{23130}	4.50767675071E-10	a_{24130}	-4.77861169263E-11	a_{25130}	1.01378735918E-12	a_{30130}	2.35001067002E-06	a_{31130}	-3.48678886896E-08
a_{23131}	2.21180890313E-12	a_{24131}	2.92649243968E-13	a_{25131}	-5.51858485249E-15	a_{30131}	-1.70953750002E-08	a_{31131}	4.49258306503E-10
a_{23140}	6.23356510460E-11	a_{24140}	-2.97871814623E-13	a_{25140}	-2.98109844632E-14	a_{30140}	-1.06029747574E-07	a_{31140}	-9.45418393672E-09
a_{23141}	-6.20952633919E-13	a_{24141}	5.90476403692E-15	a_{25141}	1.28891490908E-16	a_{30141}	7.18961129080E-10	a_{31141}	4.53017771742E-11
a_{23200}	-2.64542406987E-08	a_{24200}	1.59251676799E-10	a_{25200}	-2.20500954342E-13	a_{30200}	6.51727382633E-05	a_{31200}	7.24012032053E-07
a_{23201}	1.18504299620E-10	a_{24201}	2.53299861019E-13	a_{25201}	-7.00985428470E-15	a_{30201}	-3.87402512767E-07	a_{31201}	-5.79795709561E-09
a_{23210}	-2.07857537382E-09	a_{24210}	7.54057511047E-11	a_{25210}	-1.21528739110E-12	a_{30210}	-1.84881415559E-05	a_{31210}	2.12174623291E-07
a_{23211}	-2.69046262010E-11	a_{24211}	-5.79181151135E-13	a_{25211}	8.90453484593E-15	a_{30211}	1.16187717546E-07	a_{31211}	-3.44306554841E-10
a_{23220}	-6.88694854458E-10	a_{24220}	2.12494124212E-11	a_{25220}	4.08585591668E-14	a_{30220}	1.60792049893E-06	a_{31220}	-5.23270355006E-08
a_{23221}	7.29025202368E-12	a_{24221}	-7.73685305299E-14	a_{25221}	-3.69831351622E-16	a_{30221}	-2.06924863728E-09	a_{31221}	-3.28018311437E-11
a_{23230}	-1.46051648014E-11	a_{24230}	-7.50411214621E-13	a_{25230}	-1.29454207377E-14	a_{30230}	-2.19061612044E-07	a_{31230}	1.94128561668E-09
a_{23231}	3.45443425098E-13	a_{24231}	2.03941372926E-15	a_{25231}	4.36234728416E-17	a_{30231}	7.64816729938E-10	a_{31231}	-1.04083433553E-11
a_{23240}	4.07814123619E-13	a_{24240}	9.26798512078E-14	a_{25240}	1.88355710192E-16	a_{30240}	7.06981905373E-09	a_{31240}	6.44029923037E-10
a_{23241}	-7.13054503879E-15	a_{24241}	-7.13269729205E-16	a_{25241}	1.89973027721E-18	a_{30241}	-3.32598482641E-11	a_{31241}	-3.21382013941E-12
a_{23300}	7.65010978187E-11	a_{24300}	-1.44844813639E-12	a_{25300}	3.53458459077E-15	a_{30300}	-1.92107464279E-06	a_{31300}	-1.14208453333E-08
a_{23301}	-4.99633289904E-13	a_{24301}	-6.20156620042E-15	a_{25301}	1.15841685441E-16	a_{30301}	1.20435468947E-08	a_{31301}	8.39538926585E-11
a_{23310}	7.21182319460E-12	a_{24310}	-2.34390280563E-13	a_{25310}	1.61538047521E-14	a_{30310}	7.21475326819E-07	a_{31310}	-1.50421674381E-08
a_{23311}	9.45322734844E-13	a_{24311}	-3.90067255415E-15	a_{25311}	-8.35987578575E-17	a_{30311}	-4.76681014701E-09	a_{31311}	1.10331564664E-10
a_{23320}	-2.56668161075E-11	a_{24320}	7.13592874972E-14	a_{25320}	-2.22957435255E-15	a_{30320}	-1.08910794834E-07	a_{31320}	2.85385095141E-09
a_{23321}	-3.27526094561E-14	a_{24321}	6.12869811231E-16	a_{25321}	3.82257429017E-18	a_{30321}	2.45004726053E-10	a_{31321}	2.31782416004E-13
a_{23330}	2.04541739311E-13	a_{24330}	-1.03819975041E-14	a_{25330}	3.23124505046E-16	a_{30330}	4.81633310601E-09	a_{31330}	7.28676629098E-11
a_{23331}	-8.87587940768E-15	a_{24331}	3.79129998989E-17	a_{25331}	-3.49613244449E-19	a_{30331}	-1.95450743358E-12	a_{31331}	-9.93600402094E-13
a_{23340}	-2.25561953726E-13	a_{24340}	1.80661150865E-15	a_{25340}	-2.08532418254E-17	a_{30340}	-2.13365406791E-10	a_{31340}	-2.73686529892E-11
a_{23341}	1.46690455989E-15	a_{24341}	-4.85275484868E-18	a_{25341}	2.98927018700E-20	a_{30341}	8.37368767784E-13	a_{31341}	1.55155239404E-13
a_{23400}	7.08721974883E-12	a_{24400}	-3.13084986617E-14	a_{25400}	1.21851942542E-17	a_{30400}	3.91856419816E-08	a_{31400}	-5.28321591596E-10
a_{23401}	-4.00003085074E-14	a_{24401}	2.76932265166E-16	a_{25401}	-1.17066324569E-18	a_{30401}	-2.67638229361E-10	a_{31401}	4.82186196164E-12
a_{23410}	-2.47243738753E-13	a_{24410}	2.38179970926E-14	a_{25410}	-2.74623962098E-16	a_{30410}	-4.98104230950E-09	a_{31410}	-2.33615758474E-12
a_{23411}	2.90352419927E-15	a_{24411}	-9.30683836854E-17	a_{25411}	1.16494100087E-18	a_{30411}	2.64237694565E-11	a_{31411}	-1.09768579820E-12
a_{23420}	-1.03016860854E-13	a_{24420}	-2.7039533542E-15	a_{25420}	4.61541422168E-17	a_{30420}	3.77337949118E-10	a_{31420}	-1.45311636335E-11
a_{23421}	3.17408532687E-15	a_{24421}	-1.51988841800E-17	a_{25421}	-2.86422533623E-20	a_{30421}	7.13670694163E-12	a_{31421}	-1.90027678002E-13
a_{23430}	2.39081920417E-14	a_{24430}	-1.54659467292E-17	a_{25430}	-3.46418797786E-18	a_{30430}	1.58081827681E-11	a_{31430}	-1.35511391214E-12
a_{23431}	3.49410451070E-17	a_{24431}	4.46590570057E-19	a_{25431}	-2.68120416332E-21	a_{30431}	-4.98305727937E-13	a_{31431}	1.17203099333E-14
a_{23440}	5.69874405529E-15	a_{24440}	-4.56240286532E-17	a_{25440}	3.698156622439E-19	a_{30440}	9.47144814423E-12	a_{31440}	7.67286646983E-14
a_{23441}	-2.87610124803E-17	a_{24441}	1.46959639831E-19	a_{25441}	-8.53946809873E-22	a_{30441}	-5.20896627429E-14	a_{31441}	-2.79173843386E-16
a_{23500}	2.20778468797E-14	a_{24500}	-2.91242401935E-16	a_{25500}	1.63236251470E-18	a_{30500}	-3.91238455071E-10	a_{31500}	1.07545736878E-11
a_{23501}	3.99504038961E-17	a_{24501}	2.20247546765E-19	a_{25501}	-2.47487347452E-21	a_{30501}	2.96537140926E-12	a_{31501}	-1.08633255559E-13
a_{23510}	1.09144921203E-14	a_{24510}	-3.88017109274E-16	a_{25510}	2.63459990176E-18	a_{30510}	-4.59761756899E-11	a_{31510}	1.84664845188E-12
a_{23511}	-1.39926622338E-16	a_{24511}	2.74603903711E-18	a_{25511}	-1.51822037603E-20	a_{30511}	9.84600060459E-13	a_{31511}	-3.51742283151E-14
a_{23520}	4.33056330985E-15	a_{24520}	-8.91104064851E-18	a_{25520}	-2.02556440307E-19	a_{30520}	-1.41987270773E-12	a_{31520}	2.25139277458E-13
a_{23521}	-2.99495294384E-17	a_{24521}	9.52034421332E-20	a_{25521}	3.87440212195E-22	a_{30521}	-1.54300823787E-13	a_{31521}	4.42107382340E-15
a_{23530}	4.54748374939E-16	a_{24530}	1.85505365509E-18	a_{25530}	-4.89380702339E-21	a_{30530}	3.20377247993E-12	a_{31530}	-6.88659022515E-14
a_{23531}	-3.98998127214E-18	a_{24531}	-3.04754823740E-21	a_{25531}	8.93762617163E-23	a_{30531}	-1.31353399347E-14	a_{31531}	3.17202917798E-16
a_{23540}	4.14002560393E-17	a_{24540}	-5.70242279664E-19	a_{25540}	1.20143846455E-21	a_{30540}	-2.29544824825E-13	a_{31540}	3.66949176997E-15
a_{23541}	-4.52542162867E-19	a_{24541}	5.16678813875E-21	a_{25541}	-1.60445707289E-23	a_{30541}	1.28539998439E-15	a_{31541}	-2.15746747003E-17

Table A1-5 Coefficients a_{ijklm} of equation (7) for S_L

a ₃₂₀₀₀	1.31909799870E-05	a ₃₃₀₀₀	-1.21843388713E-06	a ₃₄₀₀₀	2.09775318922E-08	a ₃₅₀₀₀	-1.22052902425E-10	a ₄₀₀₀₀	-8.58724057438E-05
a ₃₂₀₀₁	-9.29481757602E-08	a ₃₃₀₀₁	7.95089783202E-09	a ₃₄₀₀₁	-1.36286849952E-10	a ₃₅₀₀₁	7.77439191394E-13	a ₄₀₀₀₁	5.05457067623E-07
a ₃₂₀₁₀	-2.45558165153E-05	a ₃₃₀₁₀	8.76903468077E-07	a ₃₄₀₁₀	-1.18994005593E-08	a ₃₅₀₁₀	3.84800902410E-11	a ₄₀₀₁₀	4.02093618474E-05
a ₃₂₀₁₁	9.87390705410E-08	a ₃₃₀₁₁	-4.24085968419E-09	a ₃₄₀₁₁	5.77281170516E-11	a ₃₅₀₁₁	-1.49423255388E-13	a ₄₀₀₁₁	-2.31440430528E-07
a ₃₂₀₂₀	1.16649300814E-06	a ₃₃₀₂₀	-5.89899904212E-08	a ₃₄₀₂₀	1.07717095569E-09	a ₃₅₀₂₀	-2.54264023090E-12	a ₄₀₀₂₀	1.53446617791E-06
a ₃₂₀₂₁	4.55980332893E-09	a ₃₃₀₂₁	5.16596042882E-11	a ₃₄₀₂₁	-1.53377889535E-12	a ₃₅₀₂₁	-1.67289313183E-14	a ₄₀₀₂₁	-9.94665110021E-09
a ₃₂₀₃₀	4.73795035273E-08	a ₃₃₀₃₀	3.54423080274E-09	a ₃₄₀₃₀	-1.12127247011E-10	a ₃₅₀₃₀	5.21577712788E-13	a ₄₀₀₃₀	-2.91220882841E-07
a ₃₂₀₃₁	-1.16023882139E-09	a ₃₃₀₃₁	4.77053708438E-12	a ₃₄₀₃₁	2.15091849864E-13	a ₃₅₀₃₁	-1.02692415110E-16	a ₄₀₀₃₁	1.76917359836E-09
a ₃₂₀₄₀	-2.25973917365E-09	a ₃₃₀₄₀	-1.01271297754E-10	a ₃₄₀₄₀	4.13479887887E-12	a ₃₅₀₄₀	-3.02910910917E-14	a ₄₀₀₄₀	1.29840165886E-08
a ₃₂₀₄₁	3.49238771286E-11	a ₃₃₀₄₁	-8.05456296087E-14	a ₃₄₀₄₁	-1.21702353963E-14	a ₃₅₀₄₁	9.65920062104E-17	a ₄₀₀₄₁	-7.75159868837E-11
a ₃₂₁₀₀	4.40905321445E-06	a ₃₃₁₀₀	-4.92939626363E-08	a ₃₄₁₀₀	2.12862797694E-10	a ₃₅₁₀₀	7.99714458670E-13	a ₄₀₁₀₀	9.06978242106E-06
a ₃₂₁₀₁	-2.56973555347E-08	a ₃₃₁₀₁	2.25331577549E-10	a ₃₄₁₀₁	2.39322844701E-13	a ₃₅₁₀₁	-1.32719394682E-14	a ₄₀₁₀₁	-5.19879367652E-08
a ₃₂₁₁₀	-7.28686780858E-08	a ₃₃₁₁₀	-1.05487452074E-08	a ₃₄₁₁₀	2.75919482399E-10	a ₃₅₁₁₀	-6.32800814376E-13	a ₄₀₁₁₀	-1.66147949082E-06
a ₃₂₁₁₁	1.68414490565E-10	a ₃₃₁₁₁	1.13187048862E-10	a ₃₄₁₁₁	-2.22136471275E-12	a ₃₅₁₁₁	3.79943545425E-15	a ₄₀₁₁₁	1.67473873101E-08
a ₃₂₁₂₀	-2.52312581623E-08	a ₃₃₁₂₀	1.10489159450E-10	a ₃₄₁₂₀	-2.24909189592E-11	a ₃₅₁₂₀	1.60650953281E-14	a ₄₀₁₂₀	-5.07624024884E-07
a ₃₂₁₂₁	2.44458818027E-10	a ₃₃₁₂₁	-6.45667641855E-12	a ₃₄₁₂₁	5.70174646661E-14	a ₃₅₁₂₁	1.64493032361E-15	a ₄₀₁₂₁	2.50140131857E-09
a ₃₂₁₃₀	-8.98270769629E-09	a ₃₃₁₃₀	1.65179671561E-10	a ₃₄₁₃₀	1.72103144168E-12	a ₃₅₁₃₀	-1.39064533300E-14	a ₄₀₁₃₀	-1.12880831317E-10
a ₃₂₁₃₁	4.15553435109E-11	a ₃₃₁₃₁	-9.15216832983E-13	a ₃₄₁₃₁	8.53319913191E-15	a ₃₅₁₃₁	-1.52882581404E-16	a ₄₀₁₃₁	1.58590587678E-11
a ₃₂₁₄₀	4.61392239497E-10	a ₃₃₁₄₀	-1.14853405268E-11	a ₃₄₁₄₀	2.93670046560E-14	a ₃₅₁₄₀	8.43215101596E-16	a ₄₀₁₄₀	-5.65849131331E-11
a ₃₂₁₄₁	-2.42412851012E-12	a ₃₃₁₄₁	7.65189259749E-14	a ₃₄₁₄₁	-9.30338513968E-16	a ₃₅₁₄₁	3.10418801317E-18	a ₄₀₁₄₁	-6.71577941330E-14
a ₃₂₂₀₀	1.60293471348E-09	a ₃₃₂₀₀	-5.49645254582E-10	a ₃₄₂₀₀	6.31002873762E-13	a ₃₅₂₀₀	9.31082125194E-15	a ₄₀₂₀₀	-2.13628646481E-06
a ₃₂₂₀₁	9.83063585899E-11	a ₃₃₂₀₁	2.91998403272E-12	a ₃₄₂₀₁	-3.99224518533E-14	a ₃₅₂₀₁	2.48239309525E-16	a ₄₀₂₀₁	1.24596203335E-08
a ₃₂₂₁₀	7.18471543180E-09	a ₃₃₂₁₀	-3.66308823623E-10	a ₃₄₂₁₀	2.19666838170E-12	a ₃₅₂₁₀	-2.12142533292E-14	a ₄₀₂₁₀	2.11393197269E-07
a ₃₂₂₁₁	-7.75116249997E-11	a ₃₃₂₁₁	9.21196586299E-14	a ₃₄₂₁₁	2.32064986971E-14	a ₃₅₂₁₁	5.07911846467E-17	a ₄₀₂₁₁	-2.06575518488E-09
a ₃₂₂₂₀	1.52366466243E-09	a ₃₃₂₂₀	3.40903839740E-11	a ₃₄₂₂₀	-8.34301166411E-14	a ₃₅₂₂₀	5.26887743622E-16	a ₄₀₂₂₀	6.37264030851E-08
a ₃₂₂₂₁	-1.15391047732E-11	a ₃₃₂₂₁	3.81984250077E-13	a ₃₄₂₂₁	-2.24060078505E-15	a ₃₅₂₂₁	-5.43554337547E-17	a ₄₀₂₂₁	-3.91367632329E-10
a ₃₂₂₃₀	1.89453126236E-10	a ₃₃₂₃₀	-4.98800995563E-12	a ₃₄₂₃₀	-3.57262085662E-15	a ₃₅₂₃₀	2.36751974449E-16	a ₄₀₂₃₀	-9.30041337799E-10
a ₃₂₂₃₁	1.88550957945E-13	a ₃₃₂₃₁	-1.58522565782E-14	a ₃₄₂₃₁	-2.81596214533E-16	a ₃₅₂₃₁	7.64867023173E-18	a ₄₀₂₃₁	1.05965623093E-11
a ₃₂₂₄₀	-5.44818348156E-12	a ₃₃₂₄₀	8.12303394936E-14	a ₃₄₂₄₀	-1.64856253551E-15	a ₃₅₂₄₀	-1.45026186588E-17	a ₄₀₂₄₀	1.00639837797E-11
a ₃₂₂₄₁	-1.91472981203E-14	a ₃₃₂₄₁	4.50193060394E-16	a ₃₄₂₄₁	3.11687333040E-17	a ₃₅₂₄₁	-2.64534838611E-19	a ₄₀₂₄₁	-1.78843105613E-13
a ₃₂₃₀₀	-1.07852080283E-10	a ₃₃₃₀₀	1.65978329288E-11	a ₃₄₃₀₀	-2.67895235087E-14	a ₃₅₃₀₀	-6.77975346041E-16	a ₄₀₃₀₀	7.54929875583E-09
a ₃₂₃₀₁	-3.58297356756E-12	a ₃₃₃₀₁	-1.65196991334E-14	a ₃₄₃₀₁	5.13684003023E-17	a ₃₅₃₀₁	7.27459331542E-19	a ₄₀₃₀₁	-4.78921625040E-11
a ₃₂₃₁₀	2.55283152840E-10	a ₃₃₃₁₀	2.49807406336E-12	a ₃₄₃₁₀	-2.81091518735E-14	a ₃₅₃₁₀	1.47670697412E-16	a ₄₀₃₁₀	-5.21901973348E-09
a ₃₂₃₁₁	-1.28521922420E-13	a ₃₃₃₁₁	-7.84643560686E-15	a ₃₄₃₁₁	-1.84321700900E-16	a ₃₅₃₁₁	-9.26296512411E-19	a ₄₀₃₁₁	7.62926594434E-11
a ₃₂₃₂₀	-7.27342463116E-11	a ₃₃₃₂₀	-2.41999704508E-13	a ₃₄₃₂₀	-1.61604803708E-15	a ₃₅₃₂₀	8.77127192379E-17	a ₄₀₃₂₀	-1.38022556537E-09
a ₃₂₃₂₁	7.67944898534E-14	a ₃₃₃₂₁	-4.88444981683E-15	a ₃₄₃₂₁	2.98323970044E-17	a ₃₅₃₂₁	7.41293551253E-19	a ₄₀₃₂₁	9.54135848715E-12
a ₃₂₃₃₀	-4.85980571972E-12	a ₃₃₃₃₀	5.64601487114E-14	a ₃₄₃₃₀	8.59167771280E-16	a ₃₅₃₃₀	-1.51673141739E-17	a ₄₀₃₃₀	-8.81677629004E-11
a ₃₂₃₃₁	1.70360509785E-14	a ₃₃₃₃₁	5.51534632759E-16	a ₃₄₃₃₁	1.86844646365E-18	a ₃₅₃₃₁	-1.21393069073E-19	a ₄₀₃₃₁	2.26497392072E-13
a ₃₂₃₄₀	1.83752867684E-13	a ₃₃₃₄₀	8.61951379271E-15	a ₃₄₃₄₀	-1.54738904614E-16	a ₃₅₃₄₀	1.45554133056E-18	a ₄₀₃₄₀	6.86325851411E-13
a ₃₂₃₄₁	1.38173412380E-17	a ₃₃₃₄₁	-7.81905410952E-17	a ₃₄₃₄₁	4.82061015875E-19	a ₃₅₃₄₁	-3.55881383678E-22	a ₄₀₃₄₁	2.07892636332E-15
a ₃₂₄₀₀	7.94008185075E-12	a ₃₃₄₀₀	-1.78427146522E-13	a ₃₄₄₀₀	-2.81748423413E-16	a ₃₅₄₀₀	1.24125401772E-17	a ₄₀₄₀₀	5.67168332239E-10
a ₃₂₄₀₁	-3.14860779634E-14	a ₃₃₄₀₁	4.93281519405E-17	a ₃₄₄₀₁	8.74498490367E-18	a ₃₅₄₀₁	-6.97824368348E-20	a ₄₀₄₀₁	-2.87246459797E-12
a ₃₂₄₁₀	-1.37420950672E-12	a ₃₃₄₁₀	-7.56890788980E-15	a ₃₄₄₁₀	-1.97473426927E-16	a ₃₅₄₁₀	4.37336402908E-18	a ₄₀₄₁₀	4.92102503542E-10
a ₃₂₄₁₁	1.82891601552E-14	a ₃₃₄₁₁	-9.85518310165E-17	a ₃₄₄₁₁	2.41688038427E-18	a ₃₅₄₁₁	-7.43064949846E-21	a ₄₀₄₁₁	-2.91983452809E-12
a ₃₂₄₂₀	9.66646499018E-13	a ₃₃₄₂₀	2.46827680072E-15	a ₃₄₄₂₀	5.24004552506E-18	a ₃₅₄₂₀	-1.89888043868E-18	a ₄₀₄₂₀	-3.21928251957E-11
a ₃₂₄₂₁	6.19442019821E-16	a ₃₃₄₂₁	-1.16466926622E-17	a ₃₄₄₂₁	5.19032831195E-19	a ₃₅₄₂₁	-6.07521033574E-21	a ₄₀₄₂₁	-3.12131053694E-15
a ₃₂₄₃₀	-3.10047218443E-14	a ₃₃₄₃₀	5.5299178640E-16	a ₃₄₄₃₀	-1.84713526205E-17	a ₃₅₄₃₀	3.09161652546E-19	a ₄₀₄₃₀	5.63921328884E-12
a ₃₂₄₃₁	2.84685677515E-16	a ₃₃₄₃₁	-1.12800208291E-17	a ₃₄₄₃₁	2.88185712545E-21	a ₃₅₄₃₁	7.39693637373E-22	a ₄₀₄₃₁	-2.03817921359E-14
a ₃₂₄₄₀	1.38412794010E-16	a ₃₃₄₄₀	-5.09527212791E-17	a ₃₄₄₄₀	1.63964776821E-18	a ₃₅₄₄₀	-2.40907859475E-20	a ₄₀₄₄₀	1.01299467074E-13
a ₃₂₄₄₁	-1.51193827486E-17	a ₃₃₄₄₁	7.13023843198E-19	a ₃₄₄₄₁	-5.74024726278E-21	a ₃₅₄₄₁	4.68058425511E-23	a ₄₀₄₄₁	-7.81865232933E-16
a ₃₂₅₀₀	-8.78722166455E-14	a ₃₃₅₀₀	-7.94359679068E-16	a ₃₄₅₀₀	2.66209166115E-17	a ₃₅₅₀₀	-1.65018019308E-19	a ₄₀₅₀₀	-4.72102913033E-12
a ₃₂₅₀₁	1.50989575565E-15	a ₃₃₅₀₁	-4.62746532300E-18	a ₃₄₅₀₁	-1.08151730637E-19	a ₃₅₅₀₁	7.98240917821E-22	a ₄₀₅₀₁	1.76375050114E-14
a ₃₂₅₁₀	6.35029465101E-16	a ₃₃₅₁₀	-4.36247552120E-17	a ₃₄₅₁₀	3.79740456073E-19	a ₃₅₅₁₀	-2.23870308399E-20	a ₄₀₅₁₀	-7.36054785378E-12
a ₃₂₅₁₁	4.01517879120E-16	a ₃₃₅₁₁	-1.92375707625E-18	a ₃₄₅₁₁	-5.87565566586E-21	a ₃₅₅₁₁	8.67495460018E-23	a ₄₀₅₁₁	1.80687923623E-14
a ₃₂₅₂₀	-1.25427595807E-14	a ₃₃₅₂₀	6.94121140949E-17	a ₃₄₅₂₀	-3.14238302718E-20	a ₃₅₅₂₀	1.01233878810E-20	a ₄₀₅₂₀	5.94246485926E-13
a ₃₂₅₂₁	-4.77457818946E-18	a ₃₃₅₂₁	-6.23709675782E-19	a ₃₄₅₂₁	5.65800115121E-21	a ₃₅₅₂₁	-2.53777232305E-23	a ₄₀₅₂₁	2.05987700546E-15
a ₃₂₅₃₀	5.37831778974E-16	a ₃₃₅₃₀	4.93344258754E-18	a ₃₄₅₃₀	2.15955002889E-20	a ₃₅₅₃₀	-1.90447427383E-21	a ₄₀₅₃₀	-8.38869682873E-14
a ₃₂₅₃₁	-5.99300627030E-18	a ₃₃₅₃₁	1.17622964103E-19	a ₃₄₅₃₁	-1.13326951923E-21	a ₃₅₅₃₁	6.17178891870E-24	a ₄₀₅₃₁	2.10672014382E-16
a ₃₂₅₄₀	-1.26750556546E-17	a ₃₃₅₄₀	-2.54316680163E-19	a ₃₄₅₄₀	-7.11371584647E-21	a ₃₅₅₄₀	1.66334268610E-22	a ₄₀₅₄₀	-5.89193574724E-15
a ₃₂₅₄₁	2.48169742081E-19	a ₃₃₅₄₁	-5.67283374074E-21	a ₃₄₅₄₁	9.85912333237E-23	a ₃₅₅₄₁	-8.70447755086E-25	a ₄₀₅₄₁	3.85135470152E-17

Table A1-6 Coefficients a_{ijklm} of equation (7) for S_L

a_{41000}	1.30172906423E-05	a_{42000}	-1.71922587150E-06	a_{43000}	6.15327187269E-08	a_{44000}	-9.05115672378E-10	a_{45000}	4.95239719118E-12
a_{41001}	-7.75772784649E-08	a_{42001}	1.02951669472E-08	a_{43001}	-3.70828538041E-10	a_{44001}	5.45221943110E-12	a_{45001}	-2.95202450482E-14
a_{41010}	-8.62477321390E-06	a_{42010}	5.46825638693E-07	a_{43010}	-1.54032921808E-08	a_{44010}	1.44270331924E-10	a_{45010}	2.65645543350E-13
a_{41011}	4.61371371460E-08	a_{42011}	-3.29428249965E-09	a_{43011}	1.06193908380E-10	a_{44011}	-1.12524979496E-12	a_{45011}	-2.45957174769E-16
a_{41020}	9.26145999389E-07	a_{42020}	-4.28349974479E-08	a_{43020}	1.18620621195E-09	a_{44020}	-1.12111744178E-11	a_{45020}	-1.25074336700E-13
a_{41021}	-4.24581439391E-09	a_{42021}	2.16986887449E-10	a_{43021}	-7.22415387360E-12	a_{44021}	5.70476815003E-14	a_{45021}	9.27812937881E-16
a_{41030}	-1.34998488402E-08	a_{42030}	-5.11036954108E-10	a_{43030}	-2.67549856372E-11	a_{44030}	7.82514799786E-13	a_{45030}	7.10281013370E-15
a_{41031}	-1.62705362404E-11	a_{42031}	8.20038913006E-12	a_{43031}	1.11049569000E-14	a_{44031}	-3.99618863786E-16	a_{45031}	-7.98334711495E-17
a_{41040}	-1.17690540701E-09	a_{42040}	7.91264994219E-11	a_{43040}	-7.79454199855E-13	a_{44040}	-1.46399749042E-14	a_{45040}	-9.88541464078E-18
a_{41041}	9.31531625667E-12	a_{42041}	-6.33707172773E-13	a_{43041}	1.08797942812E-14	a_{44041}	-7.43327260891E-17	a_{45041}	1.36905872283E-18
a_{41100}	2.14590531336E-06	a_{42100}	-7.04463207793E-08	a_{43100}	7.45932420693E-10	a_{44100}	2.62147077807E-12	a_{45100}	-8.59122387802E-14
a_{41101}	-1.29060996134E-08	a_{42101}	4.16897233861E-10	a_{43101}	-3.67893964806E-12	a_{44101}	-3.18792041119E-14	a_{45101}	5.85875556551E-16
a_{41110}	-1.86945993772E-07	a_{42110}	8.88739827146E-09	a_{43110}	-5.41982913159E-11	a_{44110}	2.32981825570E-13	a_{45110}	-5.25614731914E-14
a_{41111}	1.12126850741E-09	a_{42111}	-4.19078360078E-11	a_{43111}	-1.67728346310E-12	a_{44111}	3.66946857563E-14	a_{45111}	1.22683401262E-16
a_{41120}	-3.91650425805E-08	a_{42120}	1.41836256273E-09	a_{43120}	-3.11395385211E-11	a_{44120}	8.35478432409E-13	a_{45120}	4.32738523407E-15
a_{41121}	2.26326642542E-10	a_{42121}	-1.08560428254E-11	a_{43121}	4.48754080224E-13	a_{44121}	-7.12427265014E-15	a_{45121}	-3.57412706177E-17
a_{41130}	2.93094884981E-09	a_{42130}	1.04828652669E-10	a_{43130}	-1.90791296356E-12	a_{44130}	-5.83887305861E-14	a_{45130}	-6.41137044395E-17
a_{41131}	-1.92138409077E-11	a_{42131}	-4.06791348212E-13	a_{43131}	2.96396607326E-15	a_{44131}	1.34637308055E-16	a_{45131}	4.10247755876E-18
a_{41140}	6.26270385158E-11	a_{42140}	-7.59769996214E-12	a_{43140}	1.81866395554E-13	a_{44140}	-2.34132953955E-17	a_{45140}	-1.11208936545E-17
a_{41141}	-2.63113508620E-13	a_{42141}	3.96669056598E-14	a_{43141}	-1.11640441804E-15	a_{44141}	1.26198702873E-17	a_{45141}	-8.22449693499E-20
a_{41200}	3.63950236643E-08	a_{42200}	-7.31008014663E-10	a_{43200}	-6.72741847948E-12	a_{44200}	3.24414899098E-13	a_{45200}	-1.08407967460E-15
a_{41201}	-1.73066364620E-10	a_{42201}	2.00837364239E-12	a_{43201}	5.92685363224E-14	a_{44201}	-1.59910819893E-15	a_{45201}	3.56073371654E-18
a_{41210}	4.34428109002E-09	a_{42210}	-1.34052160807E-10	a_{43210}	4.91804569643E-12	a_{44210}	-6.06729208616E-14	a_{45210}	1.59157961640E-15
a_{41211}	-2.12580703892E-11	a_{42211}	3.40751033072E-12	a_{43211}	-3.73933830330E-14	a_{44211}	-2.54624853373E-16	a_{45211}	-5.50221520120E-18
a_{41220}	-1.25219056824E-09	a_{42220}	-3.74781879198E-11	a_{43220}	-5.92711503495E-13	a_{44220}	-9.32187878600E-15	a_{45220}	-5.54872323824E-17
a_{41221}	1.20291142252E-11	a_{42221}	-1.19380465604E-13	a_{43221}	5.79242019529E-16	a_{44221}	8.33897790688E-17	a_{45221}	1.08212731311E-18
a_{41230}	-5.94699079938E-11	a_{42230}	2.55679997179E-12	a_{43230}	1.28243680227E-13	a_{44230}	1.55406185687E-15	a_{45230}	-1.48693835750E-17
a_{41231}	1.26700801456E-13	a_{42231}	2.05013036152E-14	a_{43231}	-4.00519439140E-16	a_{44231}	-1.54073037143E-18	a_{45231}	-8.13265769908E-20
a_{41240}	-2.39382557038E-12	a_{42240}	6.08066067484E-14	a_{43240}	-5.24206938807E-16	a_{44240}	-6.27109002849E-17	a_{45240}	1.33075532606E-18
a_{41241}	1.28270678032E-14	a_{42241}	-7.96093556636E-17	a_{43241}	-5.39571746726E-18	a_{44241}	-6.44279187356E-20	a_{45241}	-1.20349355356E-21
a_{41300}	1.36123259583E-09	a_{42300}	-7.31782477261E-13	a_{43300}	-1.84188229676E-13	a_{44300}	-4.75410189201E-15	a_{45300}	4.07581654361E-17
a_{41301}	-9.16008077209E-12	a_{42301}	1.03048282757E-13	a_{43301}	-8.10027273237E-16	a_{44301}	3.69095949750E-17	a_{45301}	-2.30753635122E-19
a_{41310}	-5.30052248297E-10	a_{42310}	7.68849168360E-13	a_{43310}	1.26778523392E-13	a_{44310}	-1.65976057859E-15	a_{45310}	-9.60799248014E-18
a_{41311}	3.31199522361E-13	a_{42311}	-4.98827420008E-14	a_{43311}	6.74787531780E-16	a_{44311}	3.14580965902E-18	a_{45311}	6.46498706547E-20
a_{41320}	9.35376392644E-11	a_{42320}	1.74067027204E-12	a_{43320}	-2.30465859107E-15	a_{44320}	-4.15699204958E-17	a_{45320}	1.96807062729E-19
a_{41321}	-5.59501469264E-13	a_{42321}	1.26032085671E-15	a_{43321}	-3.87065806547E-17	a_{44321}	1.81811026327E-19	a_{45321}	-1.75139341224E-20
a_{41330}	1.77569898175E-12	a_{42330}	-3.70768794067E-14	a_{43330}	-1.24259459949E-15	a_{44330}	-3.49083168834E-17	a_{45330}	6.46438559269E-19
a_{41331}	-3.07914134373E-15	a_{42331}	-1.53465707331E-16	a_{43331}	-3.10446709534E-18	a_{44331}	1.72282572226E-19	a_{45331}	-8.43262479251E-22
a_{41340}	-3.44100738045E-14	a_{42340}	4.27347658499E-16	a_{43340}	-2.24758340835E-17	a_{44340}	1.89539291457E-18	a_{45340}	-4.50508853589E-20
a_{41341}	2.15560798824E-16	a_{42341}	-1.08875243487E-17	a_{43341}	6.75358040616E-19	a_{44341}	-7.60984068220E-21	a_{45341}	1.42127692829E-22
a_{41400}	-5.25026315078E-11	a_{42400}	5.05036858343E-13	a_{43400}	5.16672197610E-15	a_{44400}	-3.30437143858E-17	a_{45400}	-1.53931058748E-19
a_{41401}	2.97482184554E-13	a_{42401}	-3.84869542811E-15	a_{43401}	-2.25371962667E-18	a_{44401}	-4.45476971533E-20	a_{45401}	1.44694120310E-21
a_{41410}	1.00035579012E-12	a_{42410}	-1.16235092321E-13	a_{43410}	1.10412407803E-15	a_{44410}	1.51286729087E-19	a_{45410}	4.89012616697E-20
a_{41411}	4.87924332295E-14	a_{42411}	6.78832336421E-17	a_{43411}	-7.77649994979E-18	a_{44411}	-7.13601671433E-21	a_{45411}	-1.94015024786E-22
a_{41420}	-1.42995665564E-12	a_{42420}	-6.04279273846E-15	a_{43420}	1.48558879518E-17	a_{44420}	1.91062921491E-18	a_{45420}	8.56255011853E-21
a_{41421}	1.09700694534E-14	a_{42421}	-5.88301591561E-17	a_{43421}	-1.82824898449E-18	a_{44421}	3.37588813900E-20	a_{45421}	-1.29954102619E-22
a_{41430}	-4.35338255870E-14	a_{42430}	-1.7877640568E-15	a_{43430}	6.78021861632E-17	a_{44430}	-1.59280530516E-19	a_{45430}	-8.59697478582E-21
a_{41431}	3.41970816596E-17	a_{42431}	1.21560307299E-17	a_{43431}	-2.37237904419E-20	a_{44431}	-3.78368550935E-21	a_{45431}	4.60843616882E-23
a_{41440}	2.91343918675E-15	a_{42440}	1.97502065281E-17	a_{43440}	-5.75061422175E-18	a_{44440}	7.67606551318E-20	a_{45440}	1.86336982180E-22
a_{41441}	-1.97397486109E-17	a_{42441}	2.90167499206E-19	a_{43441}	1.47672799090E-20	a_{44441}	-3.03774595229E-22	a_{45441}	-5.52934810213E-25
a_{41500}	3.34750602801E-13	a_{42500}	-2.91243278574E-15	a_{43500}	-5.40289335924E-17	a_{44500}	6.82541770066E-19	a_{45500}	-1.54026892963E-21
a_{41501}	-1.32495291220E-15	a_{42501}	4.94888783242E-18	a_{43501}	3.90538286049E-19	a_{44501}	-4.01097903988E-21	a_{45501}	8.45891483227E-24
a_{41510}	2.16580491376E-13	a_{42510}	-3.16627297266E-15	a_{43510}	1.61692259475E-17	a_{44510}	9.31417949260E-20	a_{45510}	-9.89980715544E-22
a_{41511}	-3.70301790645E-16	a_{42511}	1.85381702204E-18	a_{43511}	3.54775306272E-20	a_{44511}	-3.27428823850E-22	a_{45511}	1.33396048032E-24
a_{41520}	1.75421839751E-15	a_{42520}	-7.34404938959E-17	a_{43520}	3.51372251904E-18	a_{44520}	-6.87701273059E-20	a_{45520}	2.25861635290E-22
a_{41521}	-2.28362083521E-16	a_{42521}	4.05735894082E-18	a_{43521}	-1.77217314197E-20	a_{44521}	-1.50200304505E-22	a_{45521}	1.55945624759E-24
a_{41530}	1.99271837468E-15	a_{42530}	-6.88169865380E-18	a_{43530}	-7.46887159091E-19	a_{44530}	1.09298056145E-20	a_{45530}	-5.72331328328E-24
a_{41531}	-2.67709755812E-18	a_{42531}	-1.29736282895E-20	a_{43531}	-1.55687138936E-22	a_{44531}	1.45452273925E-23	a_{45531}	-2.56705740563E-25
a_{41540}	5.60209054498E-17	a_{42540}	2.13816134666E-18	a_{43540}	1.10248588463E-20	a_{44540}	-8.15664280409E-22	a_{45540}	2.62570552776E-24
a_{41541}	-3.39109634914E-19	a_{42541}	-1.98438195660E-20	a_{43541}	2.33756116321E-22	a_{44541}	1.27835233871E-24	a_{45541}	-5.27393006484E-27

A.2.2 抗力面積 (S_D) 回帰モデルの係数表

5.2.2 の⑧式で表した揚力面積 (S_D) 回帰モデルについて、その係数 b_{ijklm} を Table A2 に示した。

Table A2-1 Coefficients b_{ijklm} of equation (8) for S_D

b_{00000}	-1.37786464033E-02	b_{01000}	1.38553429508E-01	b_{02000}	-1.54568124165E-02	b_{03000}	1.30922089895E-03	b_{04000}	-2.58339918047E-05
b_{00001}	5.53557372953E-04	b_{01001}	-8.72679279246E-04	b_{02001}	1.03043126525E-04	b_{03001}	-8.29014039908E-06	b_{04001}	1.63123475456E-07
b_{00010}	1.38729703589E-01	b_{01010}	-5.75734986835E-01	b_{02010}	6.33413880777E-02	b_{03010}	-1.11042476584E-03	b_{04010}	-4.30774993894E-06
b_{00011}	1.85122634751E-02	b_{01011}	9.58367454316E-04	b_{02011}	-4.47810415498E-04	b_{03011}	1.32882968507E-05	b_{04011}	-1.00279678826E-07
b_{00020}	3.34918874953E-02	b_{01020}	1.39586982588E-01	b_{02020}	-1.08162775172E-02	b_{03020}	-1.18692832171E-04	b_{04020}	9.58473215609E-06
b_{00021}	-4.22764273830E-03	b_{01021}	-2.81007875180E-04	b_{02021}	7.34977572622E-05	b_{03021}	-5.54505021164E-07	b_{04021}	-3.09258847616E-08
b_{00030}	1.36403034558E-01	b_{01030}	-2.44897400234E-03	b_{02030}	2.89132138007E-05	b_{03030}	4.19071106230E-05	b_{04030}	-1.30168272391E-06
b_{00031}	-5.26191493037E-04	b_{01031}	-2.45045974699E-05	b_{02031}	-5.16090124088E-07	b_{03031}	-1.69370696812E-07	b_{04031}	5.94851282262E-09
b_{00040}	-7.14993813271E-03	b_{01040}	-5.27477835473E-04	b_{02040}	3.87818636533E-05	b_{03040}	-2.08230563432E-06	b_{04040}	4.36951917026E-08
b_{00041}	3.58588895000E-05	b_{01041}	4.01127675740E-06	b_{02041}	-2.26527396973E-07	b_{03041}	1.06825684653E-08	b_{04041}	-2.19453028248E-10
b_{00100}	1.34525364708E-01	b_{01100}	-9.92179355311E-02	b_{02100}	4.30269748521E-03	b_{03100}	-1.63070616699E-04	b_{04100}	2.79930181607E-06
b_{00101}	7.72559197479E-04	b_{01101}	4.23445517103E-04	b_{02101}	-2.02208725376E-05	b_{03101}	9.24529528684E-07	b_{04101}	-1.70951771147E-08
b_{00110}	-3.32657967860E-01	b_{01110}	-4.33743807985E-02	b_{02110}	1.25031835729E-03	b_{03110}	-7.00842737281E-06	b_{04110}	2.01273705158E-07
b_{00111}	1.48611923688E-03	b_{01111}	6.63517657449E-04	b_{02111}	-9.20176078563E-06	b_{03111}	-4.31673411536E-07	b_{04111}	9.00115111465E-09
b_{00120}	-8.27350062045E-02	b_{01120}	1.01195968780E-02	b_{02120}	3.05144238713E-04	b_{03120}	-6.96092536580E-07	b_{04120}	-3.16461121497E-07
b_{00121}	2.80139857723E-04	b_{01121}	-1.13050128969E-04	b_{02121}	-1.58540527749E-06	b_{03121}	7.95719680600E-08	b_{04121}	1.48568191165E-10
b_{00130}	-4.37881208405E-02	b_{01130}	6.77081253300E-05	b_{02130}	-3.44347468005E-05	b_{03130}	-2.15116589492E-07	b_{04130}	3.48971466173E-08
b_{00131}	2.73718639506E-04	b_{01131}	2.97008005303E-06	b_{02131}	1.34948982711E-07	b_{03131}	-1.16985626661E-09	b_{04131}	-1.28228660106E-10
b_{00140}	2.88300943771E-03	b_{01140}	-3.92122206674E-06	b_{02140}	-3.05244509895E-07	b_{03140}	2.53198669425E-08	b_{04140}	-6.81626573961E-10
b_{00141}	-1.72664695329E-05	b_{01141}	-5.10292429227E-08	b_{02141}	4.38007423892E-09	b_{03141}	-1.51546572587E-10	b_{04141}	3.25325797267E-12
b_{00200}	-1.76579658105E-03	b_{01200}	4.90662202694E-03	b_{02200}	-7.13791912447E-05	b_{03200}	6.45258899464E-07	b_{04200}	-1.87256908247E-08
b_{00201}	-2.67801618971E-04	b_{01201}	-7.12762388963E-07	b_{02201}	-6.33911597103E-07	b_{03201}	1.29621284653E-08	b_{04201}	7.44704683455E-12
b_{00210}	8.16770782976E-02	b_{01210}	-6.53186543475E-03	b_{02210}	2.06517997612E-05	b_{03210}	3.00339017752E-06	b_{04210}	-3.70269943124E-08
b_{00211}	-6.69002326360E-04	b_{01211}	1.60780514459E-05	b_{02211}	6.14197483205E-07	b_{03211}	-1.58965897704E-08	b_{04211}	1.14742394137E-11
b_{00220}	-5.48622112725E-04	b_{01220}	1.85473632990E-04	b_{02220}	-1.03679993932E-05	b_{03220}	-7.17162020767E-08	b_{04220}	4.88389376350E-09
b_{00221}	6.05590807372E-05	b_{01221}	2.32114120957E-07	b_{02221}	-3.46988720590E-09	b_{03221}	9.10814062750E-11	b_{04221}	-4.15473040396E-12
b_{00230}	5.10712644391E-03	b_{01230}	-1.20361357096E-04	b_{02230}	2.18533660723E-06	b_{03230}	-1.99093637121E-08	b_{04230}	3.27117356819E-11
b_{00231}	-3.25488535948E-05	b_{01231}	6.03180567433E-07	b_{02231}	-6.58325218608E-09	b_{03231}	1.25296901598E-11	b_{04231}	4.56249696515E-13
b_{00240}	-2.98368145882E-04	b_{01240}	5.75167565519E-06	b_{02240}	-9.33093586793E-08	b_{03240}	2.01814958181E-09	b_{04240}	-4.18350793113E-11
b_{00241}	1.77718222762E-06	b_{01241}	-3.23040298756E-08	b_{02241}	4.93005433885E-10	b_{03241}	-1.05135364541E-11	b_{04241}	2.20080103104E-13
b_{00300}	6.34175784290E-03	b_{01300}	-6.42871783538E-04	b_{02300}	1.87264336410E-05	b_{03300}	-2.42144972152E-07	b_{04300}	1.43101329816E-09
b_{00301}	-2.09647031237E-05	b_{01301}	2.20138719903E-06	b_{02301}	-5.12363765056E-08	b_{03301}	4.13380118929E-10	b_{04301}	-5.95331776606E-13
b_{00310}	3.63595726419E-03	b_{01310}	1.48222433009E-04	b_{02310}	-5.617711892605E-06	b_{03310}	1.82808731866E-08	b_{04310}	1.65934604743E-10
b_{00311}	-4.51520739800E-06	b_{01311}	-8.73385881324E-07	b_{02311}	1.88860916857E-08	b_{03311}	5.21344044506E-11	b_{04311}	-3.09175560971E-13
b_{00320}	-1.06638327275E-03	b_{01320}	2.43660839076E-05	b_{02320}	3.31672417802E-08	b_{03320}	-1.06141271338E-09	b_{04320}	5.03273980698E-11
b_{00321}	3.34825198390E-06	b_{01321}	-7.7465700093E-08	b_{02321}	-4.41384156284E-10	b_{03321}	1.17153465923E-12	b_{04321}	-2.08895625315E-13
b_{00330}	-1.31019311108E-04	b_{01330}	3.43948818149E-06	b_{02330}	-4.77174148734E-08	b_{03330}	2.17698186584E-10	b_{04330}	-8.29012061291E-12
b_{00331}	7.92955398634E-07	b_{01331}	-1.76001835809E-08	b_{02331}	1.78060612997E-10	b_{03331}	1.33355561536E-12	b_{04331}	4.58645734014E-15
b_{00340}	8.63770636206E-06	b_{01340}	-9.81011293438E-08	b_{02340}	3.57047842796E-10	b_{03340}	-2.32719262503E-11	b_{04340}	9.35951755138E-13
b_{00341}	-4.75370734655E-08	b_{01341}	4.77998997728E-10	b_{02341}	-7.67126095934E-12	b_{03341}	3.49872296706E-13	b_{04341}	-7.59737596450E-15
b_{00400}	-7.92205930152E-05	b_{01400}	2.91611012995E-06	b_{02400}	-1.86713460915E-08	b_{03400}	-5.73629497735E-10	b_{04400}	1.14341817583E-11
b_{00401}	8.66489089337E-08	b_{01401}	1.84479268005E-08	b_{02401}	-1.19249077099E-09	b_{03401}	2.59472903074E-11	b_{04401}	-2.51013596577E-13
b_{00410}	-1.14703552484E-04	b_{01410}	3.38107211330E-07	b_{02410}	6.25746720631E-08	b_{03410}	-4.93494792359E-10	b_{04410}	6.24096254076E-13
b_{00411}	4.27697521571E-07	b_{01411}	-1.42071978441E-10	b_{02411}	-2.02614847614E-10	b_{03411}	-2.56634870620E-13	b_{04411}	1.49441671256E-14
b_{00420}	5.74983270472E-06	b_{01420}	1.84050612313E-07	b_{02420}	-1.04694357741E-08	b_{03420}	6.45758957847E-11	b_{04420}	-5.29303295939E-13
b_{00421}	-2.90133301261E-08	b_{01421}	-5.86611191559E-10	b_{02421}	5.39169922350E-11	b_{03421}	-4.25990344792E-13	b_{04421}	2.76657865988E-15
b_{00430}	2.41451824701E-06	b_{01430}	-8.78493783015E-08	b_{02430}	1.54688551101E-09	b_{03430}	-2.84703927591E-12	b_{04430}	-6.60073283497E-14
b_{00431}	-8.27878043541E-09	b_{01431}	1.77196941403E-10	b_{02431}	-4.06195675119E-12	b_{03431}	1.30801346063E-14	b_{04431}	1.24572122453E-16
b_{00440}	-1.15509904298E-07	b_{01440}	-1.41507223226E-09	b_{02440}	1.01797423289E-10	b_{03440}	-1.91336903100E-12	b_{04440}	1.71275445124E-14
b_{00441}	4.09538382901E-10	b_{01441}	1.99333652058E-11	b_{02441}	-5.43674888518E-13	b_{03441}	2.87184651017E-15	b_{04441}	2.31215273756E-17
b_{00500}	3.85291842067E-06	b_{01500}	-1.76658856487E-07	b_{02500}	2.98700549651E-09	b_{03500}	-2.06336494427E-11	b_{04500}	1.80722751509E-14
b_{00501}	-1.99567973192E-08	b_{01501}	7.86773752117E-10	b_{02501}	-8.40143545462E-12	b_{03501}	-3.80143202034E-14	b_{04501}	1.21402456821E-15
b_{00510}	2.94290402494E-07	b_{01510}	1.40824076032E-08	b_{02510}	-7.43007430683E-10	b_{03510}	8.29268633376E-12	b_{04510}	-3.57563846579E-14
b_{00511}	-2.71547028427E-09	b_{01511}	6.36555422947E-11	b_{02511}	-7.70530111218E-13	b_{03511}	2.72784198666E-14	b_{04511}	-3.18300789343E-16
b_{00520}	5.01056787821E-08	b_{01520}	-4.56013130626E-09	b_{02520}	1.20604500574E-10	b_{03520}	-6.42744985424E-13	b_{04520}	-2.85068826753E-15
b_{00521}	6.33499210900E-10	b_{01521}	-3.67889611717E-11	b_{02521}	8.12734909405E-13	b_{03521}	-1.27191554220E-14	b_{04521}	1.03372129811E-16
b_{00530}	-3.92391085980E-09	b_{01530}	1.47557571162E-10	b_{02530}	-9.21995809009E-12	b_{03530}	8.77077832464E-14	b_{04530}	7.18746699330E-16
b_{00531}	-1.14519775861E-10	b_{01531}	7.67585882868E-11	b_{02531}	-1.26829877505E-13	b_{03531}	9.18871508999E-16	b_{04531}	-5.42625072237E-18
b_{00540}	1.54525976042E-09	b_{01540}	-4.74764570693E-12	b_{02540}	1.05878519626E-12	b_{03540}	-9.74953484767E-15	b_{04540}	-5.41597528095E-17
b_{00541}	-4.23758697713E-12	b_{01541}	4.54944265540E-15	b_{02541}	-2.28092173217E-15	b_{03541}	8.59496055215E-17	b_{04541}	-7.00218947658E-19

Table A2-2 Coefficients b_{ijklm} of equation (8) for S_D

b_{05000}	1.41153707759E-07	b_{10000}	9.92148846179E-02	b_{11000}	9.40157040258E-02	b_{12000}	-1.61190215722E-02	b_{13000}	5.76446141170E-04
b_{05001}	-9.01425379412E-10	b_{10001}	-5.96637247072E-04	b_{11001}	-5.54744966323E-04	b_{12001}	9.60183534208E-05	b_{13001}	-3.4708099784E-06
b_{05010}	1.38611370259E-07	b_{10010}	-3.30431411284E-01	b_{11010}	9.86804696580E-02	b_{12010}	-2.47915162650E-03	b_{13010}	5.30366136340E-05
b_{05011}	-8.62735675600E-11	b_{10011}	-4.93537433604E-04	b_{11011}	-1.83868329193E-04	b_{12011}	1.05028040952E-05	b_{13011}	-5.05830370558E-07
b_{05020}	-9.09389981927E-08	b_{10020}	5.48419820934E-02	b_{11020}	-2.50585602861E-02	b_{12020}	6.28493823785E-04	b_{13020}	-4.22589939300E-07
b_{05021}	3.76855375535E-10	b_{10021}	1.86354379022E-04	b_{11021}	5.93212913048E-05	b_{12021}	-1.94676390276E-06	b_{13021}	1.59123902761E-08
b_{05030}	1.04005333596E-08	b_{10030}	-1.05902248569E-02	b_{11030}	1.02986555410E-03	b_{12030}	1.12988403542E-05	b_{13030}	-1.90719296873E-06
b_{05031}	-4.99518980830E-11	b_{10031}	2.73815556415E-05	b_{11031}	2.69247308927E-07	b_{12031}	-2.36327055962E-07	b_{13031}	1.17449698044E-08
b_{05040}	-2.98755634919E-10	b_{10040}	3.54317142665E-04	b_{11040}	4.35812898713E-05	b_{12040}	-4.00714791423E-06	b_{13040}	1.18713412481E-07
b_{05041}	1.49886437450E-12	b_{10041}	-1.29988394410E-06	b_{11041}	-4.03299912534E-07	b_{12041}	2.82459505761E-08	b_{13041}	-7.33748727424E-10
b_{05100}	-1.51550476068E-08	b_{10100}	-1.77946326112E-01	b_{11100}	3.74834068210E-02	b_{12100}	-9.97770651054E-04	b_{13100}	1.88940078038E-06
b_{05101}	9.61675975246E-11	b_{10101}	1.04956932184E-03	b_{11101}	-2.15550240498E-04	b_{12101}	5.42193762637E-06	b_{13101}	6.07709596905E-09
b_{05110}	-4.45809724710E-09	b_{10110}	-6.95882568769E-02	b_{11110}	-5.07834323886E-03	b_{12110}	-1.77818388071E-04	b_{13110}	5.55132456066E-06
b_{05111}	-3.46420309785E-11	b_{10111}	2.14846544450E-04	b_{11111}	5.02348134640E-06	b_{12111}	7.27775375002E-07	b_{13111}	1.36719350050E-08
b_{05120}	3.85968012847E-09	b_{10120}	2.56556755290E-02	b_{11120}	7.79859791058E-04	b_{12120}	1.67064117486E-05	b_{13120}	-7.91122613321E-07
b_{05121}	-1.17624839749E-11	b_{10121}	-9.35632571798E-05	b_{11121}	-2.15525760126E-06	b_{12121}	-5.37355134048E-09	b_{13121}	-3.31463152551E-09
b_{05130}	-3.76456277106E-10	b_{10130}	1.13485715573E-03	b_{11130}	-9.33925517860E-05	b_{12130}	-1.08374470402E-07	b_{13130}	-2.81451513566E-09
b_{05131}	1.64941651783E-12	b_{10131}	-1.09577407702E-05	b_{11131}	4.40645622078E-07	b_{12131}	-1.16085061865E-09	b_{13131}	2.89389023670E-10
b_{05140}	5.00905010274E-12	b_{10140}	-1.37871185706E-04	b_{11140}	-2.21565575154E-07	b_{12140}	2.10237555241E-07	b_{13140}	-8.87693582252E-10
b_{05141}	-2.23712760822E-14	b_{10141}	9.12078743651E-07	b_{11141}	2.80841311971E-09	b_{12141}	-1.29577502453E-09	b_{13141}	5.18593624167E-12
b_{05200}	1.40335183410E-10	b_{10200}	-1.93976438534E-02	b_{11200}	1.41037802108E-05	b_{12200}	1.90806295043E-05	b_{13200}	-1.70913546666E-07
b_{05201}	-7.14008043591E-13	b_{10201}	1.0822242558E-04	b_{11201}	-5.81744344454E-08	b_{12201}	-9.62160448389E-08	b_{13201}	2.87046074988E-10
b_{05210}	1.43950955111E-10	b_{10210}	5.52933020919E-03	b_{11210}	8.32487123160E-04	b_{12210}	-1.29586052236E-05	b_{13210}	-9.28565860222E-08
b_{05211}	6.62020392955E-13	b_{10211}	3.03500340281E-06	b_{11211}	-3.93508305500E-06	b_{12211}	5.17968003229E-08	b_{13211}	-5.6519108692E-10
b_{05220}	-5.27765399934E-11	b_{10220}	-1.14336085927E-03	b_{11220}	-1.22987797189E-04	b_{12220}	1.36217612843E-06	b_{13220}	3.5705326694E-08
b_{05221}	1.20167103512E-13	b_{10221}	-5.18396469515E-07	b_{11221}	6.97647367185E-07	b_{12221}	-8.63027920605E-09	b_{13221}	3.90860497440E-11
b_{05230}	1.05523219674E-12	b_{10230}	-2.24023803505E-04	b_{11230}	1.32337604722E-05	b_{12230}	-1.13127807852E-07	b_{13230}	3.44178310543E-10
b_{05231}	-6.34077757589E-15	b_{10231}	1.74239067594E-06	b_{11231}	-7.68092068985E-08	b_{12231}	5.34771869613E-10	b_{13231}	-6.82342235617E-12
b_{05240}	3.64168680695E-13	b_{10240}	1.69256418280E-05	b_{11240}	-4.47403893398E-07	b_{12240}	-5.12983692095E-09	b_{13240}	7.58273068205E-11
b_{05241}	-1.94955519577E-15	b_{10241}	-1.08011589350E-07	b_{11241}	2.74517799875E-09	b_{12241}	2.69835081643E-11	b_{13241}	-3.40952734472E-13
b_{05300}	-2.64611404179E-12	b_{10300}	4.57170485834E-04	b_{11300}	-2.28812569645E-05	b_{12300}	3.11320449245E-07	b_{13300}	-4.58134929991E-09
b_{05301}	-5.55157329417E-15	b_{10301}	-2.28776797426E-06	b_{11301}	1.18114610901E-07	b_{12301}	-1.74273869744E-09	b_{13301}	3.44912713312E-11
b_{05310}	4.62186452370E-13	b_{10310}	-7.40997020442E-04	b_{11310}	4.59926276511E-06	b_{12310}	6.55418370209E-08	b_{13310}	2.46706239497E-09
b_{05311}	-1.40807632707E-14	b_{10311}	2.47764250921E-06	b_{11311}	-4.82786153457E-09	b_{12311}	-1.17818413205E-11	b_{13311}	-1.77844765787E-12
b_{05320}	-5.36829790581E-13	b_{10320}	1.06074257559E-04	b_{11320}	-1.52741959249E-06	b_{12320}	2.27340642645E-08	b_{13320}	-9.47309162564E-10
b_{05321}	2.76928055969E-15	b_{10321}	-2.98809215071E-07	b_{11321}	3.93002949428E-09	b_{12321}	-1.48246932959E-10	b_{13321}	2.62246082654E-12
b_{05330}	1.11522981767E-13	b_{10330}	4.94392322642E-06	b_{11330}	-1.36227644416E-07	b_{12330}	4.56241571908E-10	b_{13330}	-6.83382586373E-12
b_{05331}	-3.83043836928E-16	b_{10331}	-4.51254813275E-08	b_{11331}	8.266711411339E-10	b_{12331}	1.02380173626E-11	b_{13331}	-8.70742713592E-14
b_{05340}	-1.04189016746E-14	b_{10340}	-5.48471106440E-07	b_{11340}	1.53150682662E-08	b_{12340}	3.30046830664E-12	b_{13340}	-3.18454272651E-12
b_{05341}	6.55771263835E-17	b_{10341}	3.44121210276E-09	b_{11341}	-8.97953620746E-11	b_{12341}	1.08243765396E-13	b_{13341}	8.00404032937E-15
b_{05400}	-6.57130645450E-14	b_{10400}	9.05591532486E-06	b_{11400}	-3.22131760561E-08	b_{12400}	-7.12660616297E-09	b_{13400}	1.98178354711E-10
b_{05401}	9.45070031343E-16	b_{10401}	-6.18932919270E-08	b_{11401}	6.18429041158E-10	b_{12401}	3.41757199428E-11	b_{13401}	-1.12428104824E-12
b_{05410}	-2.01172281904E-14	b_{10410}	9.18374280580E-06	b_{11410}	-1.46992915555E-07	b_{12410}	-3.06658808227E-10	b_{13410}	-5.54171401693E-13
b_{05411}	9.09183909224E-17	b_{10411}	-3.15834859684E-08	b_{11411}	7.30914129236E-10	b_{12411}	-1.44997123134E-11	b_{13411}	1.58441254639E-13
b_{05420}	9.18291230256E-15	b_{10420}	-1.00711685878E-07	b_{11420}	7.91556326866E-09	b_{12420}	1.66291657328E-10	b_{13420}	-6.81544614482E-12
b_{05421}	-4.18091601169E-17	b_{10421}	-4.56804865224E-09	b_{11421}	5.94506951853E-11	b_{12421}	-6.30405708544E-14	b_{13421}	4.03230661964E-14
b_{05430}	-4.25563354082E-16	b_{10430}	-1.32274595336E-07	b_{11430}	-1.67323468606E-10	b_{12430}	4.26878922572E-12	b_{13430}	1.36508866557E-12
b_{05431}	2.92107706182E-18	b_{10431}	1.12741260751E-09	b_{11431}	-5.25475766938E-12	b_{12431}	-1.42970526741E-13	b_{13431}	-7.03474804071E-15
b_{05440}	-2.21578920096E-17	b_{10440}	9.65727137737E-09	b_{11440}	-2.16682738674E-10	b_{12440}	2.49542508075E-12	b_{13440}	-6.02445027167E-15
b_{05441}	-4.03189391469E-19	b_{10441}	-6.08507238635E-11	b_{11441}	1.24776718083E-12	b_{12441}	-1.83487554601E-14	b_{13441}	3.84263905869E-16
b_{05500}	3.07456155108E-16	b_{10500}	-2.61887890196E-07	b_{11500}	9.76522592187E-09	b_{12500}	-1.19218339208E-10	b_{13500}	3.37935226850E-14
b_{05501}	-5.97569425090E-18	b_{10501}	1.60866224017E-09	b_{11501}	-6.11831975523E-11	b_{12501}	7.84666345958E-13	b_{13501}	-1.17546761463E-15
b_{05510}	1.52973202757E-16	b_{10510}	-1.45954977303E-08	b_{11510}	4.45228108728E-10	b_{12510}	-9.81842039196E-12	b_{13510}	3.05981653400E-13
b_{05511}	5.77112679492E-19	b_{10511}	7.60652169258E-12	b_{11511}	-2.76012535109E-12	b_{12511}	1.38417662234E-13	b_{13511}	-2.32413875455E-15
b_{05520}	-8.28093386487E-19	b_{10520}	-5.76724423181E-09	b_{11520}	-3.35185083042E-10	b_{12520}	1.40911885523E-11	b_{13520}	-2.01894862286E-13
b_{05521}	-2.02104008581E-19	b_{10521}	1.04691584083E-10	b_{11521}	-2.17951423886E-12	b_{12521}	2.42756811164E-14	b_{13521}	-5.73058684630E-16
b_{05530}	-6.27473992255E-18	b_{10530}	5.98061253991E-10	b_{11530}	6.09858915528E-11	b_{12530}	-1.91443383943E-12	b_{13530}	1.88713058922E-14
b_{05531}	1.54245853887E-20	b_{10531}	-1.13195478334E-11	b_{11531}	1.22590680721E-13	b_{12531}	-1.81428027493E-15	b_{13531}	1.06031756196E-16
b_{05540}	7.10223816322E-19	b_{10540}	-1.37850561433E-10	b_{11540}	3.09175283191E-12	b_{12540}	2.06789080229E-15	b_{13540}	-1.14332544870E-15
b_{05541}	1.53711275093E-21	b_{10541}	9.55429001702E-13	b_{11541}	-2.60401787443E-14	b_{12541}	2.54635430215E-16	b_{13541}	9.56942362054E-20

Table A2-3 Coefficients b_{ijklm} of equation (8) for S_D

b_{14000}	-7.48442414608E-06	b_{15000}	3.27204512045E-08	b_{20000}	1.74522028306E-01	b_{21000}	-7.08708544364E-03	b_{22000}	6.69197242621E-04
b_{14001}	4.57663575298E-08	b_{15001}	-2.04294358878E-10	b_{20001}	-1.02375804828E-03	b_{21001}	4.12599130636E-05	b_{22001}	-3.88714240040E-06
b_{14010}	-4.36959501697E-07	b_{15010}	-2.33013826947E-09	b_{20010}	-3.51982248986E-02	b_{21010}	-3.14002742871E-03	b_{22010}	2.95605254280E-04
b_{14011}	6.51849051788E-09	b_{15011}	-8.19275141468E-12	b_{20011}	3.17609834567E-04	b_{21011}	-5.24298575347E-06	b_{22011}	-6.51418318102E-07
b_{14020}	-3.39561382118E-07	b_{15020}	4.54094415291E-09	b_{20020}	-6.31646487493E-03	b_{21020}	1.63159144144E-03	b_{22020}	-9.66691705107E-05
b_{14021}	1.39090747048E-09	b_{15021}	-2.18928652879E-11	b_{20021}	1.40418819282E-05	b_{21021}	-4.38399049184E-06	b_{22021}	2.97594371507E-07
b_{14030}	6.25311073934E-08	b_{15030}	-6.19027941778E-10	b_{20030}	9.47565452198E-04	b_{21030}	-1.20544777583E-04	b_{22030}	4.49813916573E-06
b_{14031}	-3.35793146022E-10	b_{15031}	3.26818377996E-12	b_{20031}	-3.98566777863E-06	b_{21031}	3.38944979907E-07	b_{22031}	-5.70880667194E-09
b_{14040}	-2.24085955480E-09	b_{15040}	1.88476808934E-11	b_{20040}	-1.96712666033E-05	b_{21040}	5.08667370832E-07	b_{22040}	6.89403136585E-08
b_{14041}	1.25692554195E-11	b_{15041}	-1.01144039513E-13	b_{20041}	8.00129385164E-08	b_{21041}	5.50907843569E-09	b_{22041}	-9.05377391720E-10
b_{14100}	1.22834005330E-07	b_{15100}	-7.50097755853E-10	b_{20100}	1.65686697015E-02	b_{21100}	-2.48386919081E-03	b_{22100}	1.18318503797E-04
b_{14101}	-1.01955797129E-09	b_{15101}	6.19951780095E-12	b_{20101}	-9.85293622559E-05	b_{21101}	1.42797646285E-05	b_{22101}	-6.71893958643E-07
b_{14110}	-3.13464295194E-08	b_{15110}	1.66362142259E-10	b_{20110}	5.50492861915E-03	b_{21110}	-3.30416143411E-04	b_{22110}	1.08359576727E-05
b_{14111}	-5.94277255455E-10	b_{15111}	2.95287122511E-12	b_{20111}	-1.87545503667E-05	b_{21111}	2.39481731146E-06	b_{22111}	-4.88796243925E-08
b_{14120}	1.74317652595E-08	b_{15120}	-2.16230340804E-10	b_{20120}	-9.96689452838E-04	b_{21120}	5.56792846793E-05	b_{22120}	-3.43756392560E-07
b_{14121}	2.68364729452E-11	b_{15121}	5.83204072963E-13	b_{20121}	2.14613912266E-06	b_{21121}	-2.97024693777E-07	b_{22121}	-1.95111815938E-09
b_{14130}	-7.02555734119E-10	b_{15130}	1.72868782037E-11	b_{20130}	3.84877044023E-05	b_{21130}	8.78464561524E-07	b_{22130}	-4.61709267776E-08
b_{14131}	-4.31502143923E-13	b_{15131}	-7.43428344739E-14	b_{20131}	1.17568741512E-07	b_{21131}	-1.39039440624E-08	b_{22131}	4.17215291046E-10
b_{14140}	-3.28436823117E-11	b_{15140}	4.74587136498E-14	b_{20140}	-8.24262999487E-07	b_{21140}	-8.87503595291E-10	b_{22140}	-5.10412090598E-09
b_{14141}	1.90608910925E-13	b_{15141}	-3.26004464874E-16	b_{20141}	-5.08860704039E-09	b_{21141}	3.71212591613E-10	b_{22141}	2.73303518261E-11
b_{14200}	-9.29882919960E-10	b_{15200}	6.85052037285E-12	b_{20200}	-1.12291900581E-03	b_{21200}	1.84621207156E-05	b_{22200}	-2.16230035210E-06
b_{14201}	1.82404642712E-11	b_{15201}	-1.17985674736E-13	b_{20201}	7.27074607978E-06	b_{21201}	-1.17625133959E-07	b_{22201}	1.14255538109E-08
b_{14210}	1.51232456232E-09	b_{15210}	-5.14543344316E-12	b_{20210}	-1.18670176529E-04	b_{21210}	2.68822099213E-06	b_{22210}	-1.75828239275E-07
b_{14211}	1.72004034491E-11	b_{15211}	-1.14835644400E-13	b_{20211}	-1.25337043818E-06	b_{21211}	-1.00072648456E-08	b_{22211}	1.22046467930E-09
b_{14220}	-7.15054916762E-10	b_{15220}	5.68289044043E-12	b_{20220}	2.21187401396E-05	b_{21220}	-1.87713037429E-06	b_{22220}	1.50786559899E-08
b_{14221}	-3.17058922143E-13	b_{15221}	-1.00731843606E-14	b_{20221}	2.42552918920E-07	b_{21221}	3.70651371193E-09	b_{22221}	8.2554596735E-11
b_{14230}	-1.45452490858E-11	b_{15230}	-2.54655802577E-14	b_{20230}	-2.50394296762E-06	b_{21230}	3.32702402272E-08	b_{22230}	3.05894919808E-09
b_{14231}	1.63597741335E-13	b_{15231}	-1.09023925238E-16	b_{20231}	-1.85387093383E-08	b_{21231}	9.36852212920E-10	b_{22231}	-3.38015885310E-11
b_{14240}	2.52197835115E-12	b_{15240}	-2.69283123880E-14	b_{20240}	1.71907450633E-07	b_{21240}	-1.00047792061E-09	b_{22240}	1.69176481651E-10
b_{14241}	-1.40464919998E-14	b_{15241}	1.40076387226E-16	b_{20241}	-7.37520958272E-12	b_{21241}	-4.43363780216E-11	b_{22241}	1.84035006841E-13
b_{14300}	5.75901102190E-11	b_{15300}	-1.94617870939E-13	b_{20300}	7.51416952685E-05	b_{21300}	-1.09816968433E-06	b_{22300}	2.05088227197E-08
b_{14301}	-5.28364629714E-13	b_{15301}	2.44593152779E-15	b_{20301}	-4.89699126989E-07	b_{21301}	8.70888341514E-09	b_{22301}	-1.34186342863E-10
b_{14310}	-3.54901881711E-11	b_{15310}	9.24269572678E-14	b_{20310}	8.28976889495E-06	b_{21310}	-2.20744850119E-07	b_{22310}	5.70394799302E-09
b_{14311}	-1.96398795826E-13	b_{15311}	1.89965231252E-15	b_{20311}	4.34854219951E-08	b_{21311}	-1.83165545602E-09	b_{22311}	4.24631612286E-12
b_{14320}	1.39030911183E-11	b_{15320}	-8.30289417341E-14	b_{20320}	-8.22618170050E-07	b_{21320}	9.07733528403E-08	b_{22320}	-9.59709543905E-10
b_{14321}	-1.35239417537E-14	b_{15321}	1.25890390617E-16	b_{20321}	-8.11835395926E-09	b_{21321}	-7.14391605071E-11	b_{22321}	2.47371181836E-13
b_{14330}	5.47527903220E-13	b_{15330}	-4.45314973950E-15	b_{20330}	8.22378863634E-08	b_{21330}	-7.80641949101E-09	b_{22330}	-5.51841242886E-11
b_{14331}	-2.77015935404E-15	b_{15331}	2.07803916409E-17	b_{20331}	7.46733028470E-10	b_{21331}	-1.82184609423E-12	b_{22331}	6.20519206131E-13
b_{14340}	-3.11792404909E-15	b_{15340}	3.92568007045E-16	b_{20340}	-1.13686983312E-08	b_{21340}	1.92649870043E-10	b_{22340}	-4.27308522718E-12
b_{14341}	1.40164261391E-16	b_{15341}	-2.46013073581E-18	b_{20341}	2.88898627334E-11	b_{21341}	7.99903097023E-13	b_{22341}	-2.18363633912E-14
b_{14400}	-2.12298725136E-12	b_{15400}	7.50267655591E-15	b_{20400}	-5.80466217916E-07	b_{21400}	7.00854811146E-10	b_{22400}	-4.77503072576E-11
b_{14401}	1.31810712965E-14	b_{15401}	-5.20155930543E-17	b_{20401}	4.56340084389E-09	b_{21401}	-7.56674796829E-11	b_{22401}	1.76750072720E-12
b_{14410}	1.37072769485E-13	b_{15410}	-4.66739082511E-16	b_{20410}	3.67157067925E-08	b_{21410}	-4.27811643526E-09	b_{22410}	-3.80348530091E-11
b_{14411}	8.62058025017E-16	b_{15411}	-1.45567294449E-17	b_{20411}	-8.65706142937E-10	b_{21411}	5.76653724883E-11	b_{22411}	-2.54648759586E-13
b_{14420}	3.52047644476E-14	b_{15420}	1.95378950336E-16	b_{20420}	-2.20552201091E-08	b_{21420}	-1.33666614428E-10	b_{22420}	5.97288413277E-12
b_{14421}	-6.83444485380E-16	b_{15421}	2.10363287974E-18	b_{20421}	1.83084143551E-10	b_{21421}	-1.07412594623E-12	b_{22421}	-1.05477335887E-13
b_{14430}	-2.08546496771E-14	b_{15430}	9.52376578965E-17	b_{20430}	9.97968429113E-10	b_{21430}	1.48231907637E-10	b_{22430}	-9.00259249731E-13
b_{14431}	1.39576889287E-16	b_{15431}	-6.52194856634E-19	b_{20431}	-2.51480296821E-11	b_{21431}	-1.85430006778E-13	b_{22431}	1.20177397896E-14
b_{14440}	-2.38253411576E-16	b_{15440}	7.31352527802E-20	b_{20440}	2.88787460410E-10	b_{21440}	-1.61727813327E-12	b_{22440}	-1.40058992851E-13
b_{14441}	-4.21531724602E-18	b_{15441}	2.37339502058E-20	b_{20441}	-1.04965201151E-12	b_{21441}	-1.33774745650E-14	b_{22441}	1.08307479625E-15
b_{14500}	9.43291031663E-15	b_{15500}	-4.86916885779E-17	b_{20500}	-7.59377113896E-09	b_{21500}	4.32640869970E-10	b_{22500}	-6.01597506419E-12
b_{14501}	-5.07586351445E-17	b_{15501}	2.87721171131E-19	b_{20501}	3.56309064519E-11	b_{21501}	-1.90852545984E-12	b_{22501}	1.87280088947E-14
b_{14510}	-4.76569805604E-15	b_{15510}	2.46469238211E-17	b_{20510}	-1.98066333823E-09	b_{21510}	1.19770898980E-10	b_{22510}	-9.02351721115E-13
b_{14511}	1.56053039456E-17	b_{15511}	-3.67601646523E-20	b_{20511}	5.32744895967E-12	b_{21511}	-4.62982110436E-13	b_{22511}	1.17696655866E-15
b_{14520}	1.89026784890E-15	b_{15520}	-9.53507750455E-18	b_{20520}	1.20691163135E-10	b_{21520}	4.04374859269E-13	b_{22520}	-2.24847753344E-13
b_{14521}	5.82144638337E-18	b_{15521}	-1.03762266772E-20	b_{20521}	-1.06541975691E-12	b_{21521}	5.21196230480E-14	b_{22521}	1.13758700936E-17
b_{14530}	-1.31550142170E-16	b_{15530}	6.72298905458E-19	b_{20530}	2.60131113758E-12	b_{21530}	-1.00036430783E-12	b_{22530}	1.86973028362E-14
b_{14531}	-1.25465062907E-18	b_{15531}	3.62848889155E-21	b_{20531}	3.02089720086E-13	b_{21531}	-1.16091893732E-14	b_{22531}	1.60573027237E-16
b_{14540}	2.02334563921E-17	b_{15540}	-1.04850281028E-19	b_{20540}	-3.49505856385E-12	b_{21540}	-1.00760096092E-14	b_{22540}	2.19841576069E-15
b_{14541}	-3.69922790000E-20	b_{15541}	2.57341922514E-22	b_{20541}	1.16470578907E-14	b_{21541}	3.78351396645E-16	b_{22541}	-1.47691410846E-17

Table A2-4 Coefficients b_{ijklm} of equation (8) for S_D

b_{23000}	-3.98192708696E-05	b_{24000}	7.04917513760E-07	b_{25000}	-3.70000228411E-09	b_{30000}	-1.89384271213E-02	b_{31000}	4.53050941820E-04
b_{23001}	2.32759854079E-07	b_{24001}	-4.15301979614E-09	b_{25001}	2.20706605419E-11	b_{30001}	1.11378344907E-04	b_{31001}	-2.63856449940E-06
b_{23010}	-9.34794588818E-06	b_{24010}	1.36776238923E-07	b_{25010}	-8.09090871990E-10	b_{30010}	7.11996402559E-03	b_{31010}	-6.39108023021E-05
b_{23011}	1.80207614210E-08	b_{24011}	-1.27072335072E-10	b_{25011}	4.13013815550E-13	b_{30011}	-4.40234253553E-05	b_{31011}	9.02744186728E-07
b_{23020}	2.44893659132E-06	b_{24020}	-2.91758301163E-08	b_{25020}	1.27014223263E-10	b_{30020}	-6.03732382017E-04	b_{31020}	-2.66703014786E-05
b_{23021}	-5.33122417381E-09	b_{24021}	1.73264158034E-11	b_{25021}	1.65722073673E-13	b_{30021}	4.00068865963E-06	b_{31021}	4.26304974998E-08
b_{23030}	-9.14851887647E-08	b_{24030}	1.03310201338E-09	b_{25030}	-2.26249918878E-12	b_{30030}	1.70255855312E-05	b_{31030}	2.85687651759E-06
b_{23031}	-1.41745404553E-10	b_{24031}	4.79070144664E-12	b_{25031}	-4.60794780063E-14	b_{30031}	-1.31084332598E-07	b_{31031}	-8.82440472496E-09
b_{23040}	-1.82491578556E-09	b_{24040}	2.45265770091E-11	b_{25040}	-3.20953568106E-13	b_{30040}	-3.39186898567E-07	b_{31040}	-2.13163742340E-08
b_{23041}	2.67482887653E-11	b_{24041}	-3.86721942332E-13	b_{25041}	3.10991474981E-15	b_{30041}	2.69081166575E-09	b_{31041}	-5.51147945366E-11
b_{23100}	-7.61144410622E-07	b_{24100}	-1.69713093012E-08	b_{25100}	1.47494091627E-10	b_{30100}	1.44025891656E-03	b_{31100}	-2.21293199941E-05
b_{23101}	3.98115348805E-09	b_{24101}	1.05568627121E-10	b_{25101}	-9.08783146641E-13	b_{30101}	-8.49927042298E-06	b_{31101}	1.35669721939E-07
b_{23110}	-1.55271548734E-07	b_{24110}	-6.73297942697E-11	b_{25110}	2.14370317788E-11	b_{30110}	-7.84793127160E-04	b_{31110}	3.67857320948E-05
b_{23111}	5.67400209220E-10	b_{24111}	-1.09053561080E-11	b_{25111}	3.53735852319E-14	b_{30111}	4.68820950172E-06	b_{31111}	-2.29607124103E-07
b_{23120}	-9.61486829837E-09	b_{24120}	4.28670249479E-10	b_{25120}	-5.58263007106E-12	b_{30120}	9.72730346574E-05	b_{31120}	-5.24346882008E-06
b_{23121}	5.88739680465E-11	b_{24121}	1.23425342317E-12	b_{25121}	-7.30604639700E-15	b_{30121}	-5.67211607055E-07	b_{31121}	3.11343890157E-08
b_{23130}	2.29071014726E-10	b_{24130}	-4.35653023712E-11	b_{25130}	5.33314546767E-13	b_{30130}	-6.14701339368E-06	b_{31130}	1.70703346475E-07
b_{23131}	8.78765568741E-12	b_{24131}	-1.71307828254E-13	b_{25131}	4.61339457157E-16	b_{30131}	3.23088872512E-08	b_{31131}	-7.67421238206E-10
b_{23140}	6.41413747432E-11	b_{24140}	1.30074736359E-12	b_{25140}	-5.07891353421E-15	b_{30140}	1.67469054951E-07	b_{31140}	-2.63222342519E-09
b_{23141}	-7.72708463964E-13	b_{24141}	5.20767558491E-15	b_{25141}	-6.96180105931E-17	b_{30141}	-8.05998414184E-10	b_{31141}	3.14286870043E-12
b_{23200}	2.53353634300E-08	b_{24200}	2.41920707923E-10	b_{25200}	-2.54081290119E-12	b_{30200}	-6.27387721185E-06	b_{31200}	3.20413783243E-06
b_{23201}	-1.10576627150E-10	b_{24201}	-1.85362176279E-12	b_{25201}	1.71877650227E-14	b_{30201}	3.63249806829E-08	b_{31201}	-1.95699582246E-08
b_{23210}	3.61498989614E-09	b_{24210}	-2.18668278475E-11	b_{25210}	-5.21852246523E-13	b_{30210}	1.40784168390E-05	b_{31210}	-2.48803479220E-07
b_{23211}	-1.24474254060E-11	b_{24211}	2.60834855572E-13	b_{25211}	-3.51105448613E-16	b_{30211}	-9.39626019194E-08	b_{31211}	4.06336250404E-09
b_{23220}	-7.54148680970E-10	b_{24220}	1.29181459631E-11	b_{25220}	6.87788836365E-14	b_{30220}	-5.12143858151E-07	b_{31220}	5.89455304245E-09
b_{23221}	9.83071170532E-14	b_{24221}	-9.97742718714E-14	b_{25221}	3.86756520060E-16	b_{30221}	6.98595018565E-09	b_{31221}	-4.23736638616E-10
b_{23230}	6.09288802028E-11	b_{24230}	-6.80284396550E-13	b_{25230}	-1.04508733997E-14	b_{30230}	1.56618077185E-07	b_{31230}	7.15841096221E-10
b_{23231}	-3.40834058777E-13	b_{24231}	1.18340230097E-14	b_{25231}	-3.24974886567E-17	b_{30231}	-8.35764686118E-10	b_{31231}	-8.97441242779E-12
b_{23240}	-5.18645471818E-12	b_{24240}	-1.10473933472E-15	b_{25240}	5.41155738998E-17	b_{30240}	-9.73072913735E-09	b_{31240}	-5.31960913363E-11
b_{23241}	1.60466270335E-14	b_{24241}	-6.80947194873E-17	b_{25241}	1.68792289732E-18	b_{30241}	4.38946475223E-11	b_{31241}	1.42033060794E-12
b_{23300}	-9.14588619052E-11	b_{24300}	-4.45940335822E-12	b_{25300}	2.74744087137E-14	b_{30300}	-3.35265338010E-06	b_{31300}	2.27198897412E-08
b_{23301}	2.80088881006E-14	b_{24301}	3.47037726680E-14	b_{25301}	-2.07793734211E-16	b_{30301}	1.98691380085E-08	b_{31301}	-1.15722460262E-10
b_{23310}	3.20519625246E-11	b_{24310}	-1.58677477414E-12	b_{25310}	1.81838297584E-14	b_{30310}	-1.35764994793E-07	b_{31310}	-1.05086551307E-08
b_{23311}	-3.50115415925E-13	b_{24311}	5.37644514866E-15	b_{25311}	-4.77924217034E-17	b_{30311}	8.69468341958E-10	b_{31311}	2.01484553121E-11
b_{23320}	4.86860699261E-12	b_{24320}	-2.96979919603E-13	b_{25320}	3.63189476307E-16	b_{30320}	-4.5898435826E-09	b_{31320}	1.52574522625E-09
b_{23321}	4.40776006980E-14	b_{24321}	1.41603545985E-15	b_{25321}	-8.34829634861E-18	b_{30321}	-2.43586597763E-10	b_{31321}	5.39237658336E-12
b_{23330}	9.66156608944E-13	b_{24330}	2.47410905169E-14	b_{25330}	-9.48874968239E-17	b_{30330}	-2.26708172437E-10	b_{31330}	-1.19765707146E-11
b_{23331}	-3.89346816131E-15	b_{24331}	-1.99589357725E-16	b_{25331}	1.36289713187E-18	b_{30331}	5.64374493152E-12	b_{31331}	9.40832246444E-14
b_{23340}	2.44210097225E-13	b_{24340}	-3.51958029389E-15	b_{25340}	3.2666596482E-17	b_{30340}	2.33071604252E-10	b_{31340}	-6.54231349329E-13
b_{23341}	-3.69252392074E-16	b_{24341}	7.92123842625E-18	b_{25341}	-9.32479158504E-20	b_{30341}	-9.93307627642E-13	b_{31341}	-3.11671452087E-14
b_{23400}	1.60672366827E-12	b_{24400}	7.45366638381E-15	b_{25400}	-3.05212423482E-17	b_{30400}	3.71452434720E-08	b_{31400}	-4.75165017285E-10
b_{23401}	-2.27717902952E-14	b_{24401}	1.32188361927E-18	b_{25401}	2.43852823783E-19	b_{30401}	-2.22918800356E-10	b_{31401}	2.87536732510E-12
b_{23410}	2.62560504677E-13	b_{24410}	1.75970224159E-14	b_{25410}	-2.07592486610E-16	b_{30410}	2.81926663348E-09	b_{31410}	8.16714599306E-11
b_{23411}	-1.54525685530E-15	b_{24411}	-3.46394055110E-17	b_{25411}	6.02651608058E-19	b_{30411}	-2.60141143071E-11	b_{31411}	-7.59674430333E-13
b_{23420}	7.38516915828E-14	b_{24420}	2.33254925682E-15	b_{25420}	-1.70271272943E-17	b_{30420}	-1.22907312749E-09	b_{31420}	2.22456534483E-11
b_{23421}	1.35317036367E-15	b_{24421}	-2.30988950722E-17	b_{25421}	1.27978516001E-19	b_{30421}	1.50965052866E-11	b_{31421}	-3.26492334548E-13
b_{23430}	-3.59890726901E-14	b_{24430}	9.70591654001E-17	b_{25430}	1.54231773921E-18	b_{30430}	-7.63339688394E-11	b_{31430}	-2.28143095960E-12
b_{23431}	-8.70556854599E-17	b_{24431}	1.27350206461E-18	b_{25431}	-1.16072000179E-20	b_{30431}	3.23792880747E-13	b_{31431}	1.15938396237E-14
b_{23440}	-2.03109454842E-16	b_{24440}	3.75797223633E-17	b_{25440}	-3.48180707509E-19	b_{30440}	-1.11478607259E-12	b_{31440}	-1.53711320351E-14
b_{23441}	-9.46571987463E-18	b_{24441}	1.39762985791E-20	b_{25441}	6.86679846501E-22	b_{30441}	6.29571728249E-16	b_{31441}	3.27066822563E-16
b_{23500}	1.28910794502E-14	b_{24500}	2.14219888824E-16	b_{25500}	-1.40952301973E-18	b_{30500}	1.83797648805E-10	b_{31500}	-7.01698286161E-12
b_{23501}	1.40725430170E-16	b_{24501}	-2.70005203872E-18	b_{25501}	1.20189383642E-20	b_{30501}	-1.03183739867E-12	b_{31501}	3.73512189901E-14
b_{23510}	-1.11564128856E-14	b_{24510}	1.38201591214E-16	b_{25510}	-1.19770983597E-19	b_{30510}	4.91410113051E-11	b_{31510}	-2.16470782827E-12
b_{23511}	1.15329362304E-16	b_{24511}	-1.24915309191E-18	b_{25511}	2.84724216625E-21	b_{30511}	-1.53457114270E-13	b_{31511}	1.96772417168E-14
b_{23520}	6.09505355143E-15	b_{24520}	-8.96676373286E-17	b_{25520}	4.67958812539E-19	b_{30520}	4.36269747353E-12	b_{31520}	7.81472214649E-14
b_{23521}	-2.01476095954E-17	b_{24521}	3.70104222624E-19	b_{25521}	-1.99140430531E-21	b_{30521}	-5.63257519546E-14	b_{31521}	-2.00278657663E-15
b_{23530}	-2.15664260294E-16	b_{24530}	4.40310203273E-18	b_{25530}	-3.30422038642E-20	b_{30530}	1.38047786009E-12	b_{31530}	-1.73207435338E-14
b_{23531}	-1.74363127689E-19	b_{24531}	-1.89522359627E-20	b_{25531}	1.43143769108E-22	b_{30531}	-1.24673405984E-14	b_{31531}	3.96684972049E-16
b_{23540}	4.36352784040E-18	b_{24540}	-5.28548432011E-19	b_{25540}	3.59605707167E-21	b_{30540}	1.00166394716E-14	b_{31540}	4.58932661243E-15
b_{23541}	-1.92584294496E-20	b_{24541}	2.39081670310E-21	b_{25541}	-1.48654060131E-23	b_{30541}	9.80933347585E-17	b_{31541}	-2.87089036043E-17

Table A2-5 Coefficients b_{ijklm} of equation (8) for S_D

b_{32000}	-2.27655445624E-06	b_{33000}	8.13977450488E-07	b_{34000}	-1.79833816631E-08	b_{35000}	8.88940687243E-11	b_{40000}	2.25577801930E-04
b_{32001}	9.14874012224E-09	b_{33001}	-4.61060321514E-09	b_{34001}	1.04283057984E-10	b_{35001}	-5.29913192661E-13	b_{40001}	-1.32693585878E-06
b_{32010}	-1.33206905365E-05	b_{33010}	4.19144640855E-07	b_{34010}	-4.25963202735E-09	b_{35010}	1.26641018397E-11	b_{40010}	-7.86203784212E-05
b_{32011}	4.79241159718E-08	b_{33011}	-1.28715178556E-09	b_{34011}	2.71331778658E-10	b_{35011}	7.3593088064E-14	b_{40011}	4.77522528283E-07
b_{32020}	3.52945823876E-06	b_{33020}	-8.68173934729E-08	b_{34020}	5.64517546867E-12	b_{35020}	2.19237109916E-12	b_{40020}	7.01336224517E-06
b_{32021}	-1.37682528319E-08	b_{33021}	2.57723513398E-10	b_{34021}	9.74588675550E-13	b_{35021}	-3.78600002072E-14	b_{40021}	-4.44248190648E-08
b_{32030}	-1.72907983614E-07	b_{33030}	3.21089167271E-09	b_{34030}	2.91330687462E-12	b_{35030}	-5.41999599418E-13	b_{40030}	-3.28885263725E-07
b_{32031}	5.17111863601E-10	b_{33031}	-2.05917065419E-12	b_{34031}	-2.70644423502E-13	b_{35031}	4.40937616627E-15	b_{40031}	2.15316962837E-09
b_{32040}	-1.66431670995E-09	b_{33040}	7.32909640323E-11	b_{34040}	-2.20074032490E-12	b_{35040}	3.21542522649E-14	b_{40040}	7.72990145076E-09
b_{32041}	2.11900195611E-11	b_{33041}	-7.88488702706E-13	b_{34041}	1.76437410066E-14	b_{35041}	-2.05717433243E-16	b_{40041}	-5.03851127147E-11
b_{32100}	-3.21530717768E-06	b_{33100}	2.85049468564E-08	b_{34100}	4.98829234336E-10	b_{35100}	-3.46322708443E-12	b_{40100}	-2.47586644898E-05
b_{32101}	1.90612640085E-08	b_{33101}	-1.92414793323E-10	b_{34101}	-2.51407776631E-12	b_{35101}	1.91962948574E-14	b_{40101}	1.46156465121E-07
b_{32110}	-6.59880839511E-07	b_{33110}	8.84445197016E-09	b_{34110}	-8.28665526644E-11	b_{35110}	2.60148723669E-14	b_{40110}	1.41130098156E-05
b_{32111}	2.81148838991E-09	b_{33111}	-1.62227741619E-11	b_{34111}	4.48884022362E-13	b_{35111}	-3.62544344899E-15	b_{40111}	-7.88876417251E-08
b_{32120}	6.03949421129E-08	b_{33120}	3.78271093769E-10	b_{34120}	-1.96312317802E-11	b_{35120}	1.10754654859E-13	b_{40120}	-1.62621522547E-06
b_{32121}	-1.73402491958E-10	b_{33121}	-5.77911550598E-12	b_{34121}	6.96224716650E-14	b_{35121}	1.89158634888E-16	b_{40121}	8.73948354160E-09
b_{32130}	-2.74134141934E-09	b_{33130}	-1.09937218784E-11	b_{34130}	2.00418337832E-12	b_{35130}	-3.67879922570E-15	b_{40130}	1.12708968587E-07
b_{32131}	4.29731879565E-12	b_{33131}	9.95394080658E-14	b_{34131}	-5.70355158024E-15	b_{35131}	-4.21569909023E-17	b_{40131}	-5.85800071635E-10
b_{32140}	3.34456985797E-10	b_{33140}	-6.69210503271E-12	b_{34140}	4.36231663382E-14	b_{35140}	-1.25553860475E-15	b_{40140}	-2.63551292565E-09
b_{32141}	-1.60976190675E-12	b_{33141}	3.97624895090E-14	b_{34141}	-4.13457846069E-16	b_{35141}	8.77078582683E-18	b_{40141}	1.31336924845E-11
b_{32200}	4.12194639063E-08	b_{33200}	-1.16060752854E-09	b_{34200}	-1.09369201141E-12	b_{35200}	3.87418440673E-15	b_{40200}	3.85234219958E-07
b_{32201}	-2.08867270216E-10	b_{33201}	7.18849682525E-12	b_{34201}	-1.03348744438E-14	b_{35201}	5.68395539636E-17	b_{40201}	-2.37825921382E-09
b_{32210}	-2.16835030539E-10	b_{33210}	-1.79704346827E-10	b_{34210}	4.27647612636E-12	b_{35210}	-5.44031995731E-15	b_{40210}	-3.29960388334E-07
b_{32211}	-4.95564020330E-11	b_{33211}	3.84388009161E-13	b_{34211}	-9.40358199743E-15	b_{35211}	1.29203078552E-17	b_{40211}	2.00519385354E-09
b_{32220}	9.92865707259E-10	b_{33220}	7.48665740558E-12	b_{34220}	1.63477761803E-13	b_{35220}	-5.57501880029E-15	b_{40220}	-1.31312105404E-08
b_{32221}	-1.12393224306E-13	b_{33221}	7.77745837088E-14	b_{34221}	-2.82956009891E-15	b_{35221}	2.89609903308E-17	b_{40221}	4.25351692267E-11
b_{32230}	-8.36525161897E-11	b_{33230}	-2.25810532972E-12	b_{34230}	-1.13781512399E-14	b_{35230}	5.97472267736E-17	b_{40230}	-9.90498165268E-10
b_{32231}	8.33151969731E-13	b_{33231}	-1.04882516702E-15	b_{34231}	2.01351321151E-16	b_{35231}	-9.48636413562E-20	b_{40231}	5.54479663842E-12
b_{32240}	-4.98988792895E-12	b_{33240}	2.25604801884E-13	b_{34240}	-1.29242312801E-15	b_{35240}	4.65306616484E-17	b_{40240}	4.17833417913E-11
b_{32241}	-1.39984376205E-14	b_{33241}	-2.56387249069E-16	b_{34241}	-4.47373399257E-18	b_{35241}	-2.31711517639E-19	b_{40241}	-1.50594214330E-13
b_{32300}	-6.51468959020E-10	b_{33300}	8.05285031035E-12	b_{34300}	3.87833806821E-14	b_{35300}	6.62023250526E-16	b_{40300}	1.36610405306E-08
b_{32301}	2.26461165196E-12	b_{33301}	-3.18338319684E-14	b_{34301}	-6.10201276933E-17	b_{35301}	-5.33398696386E-18	b_{40301}	-7.35950310259E-11
b_{32310}	3.58902143727E-10	b_{33310}	-3.70010299820E-12	b_{34310}	-3.29191455109E-16	b_{35310}	-2.33265975638E-16	b_{40310}	6.35069624137E-09
b_{32311}	2.57604495017E-13	b_{33311}	-1.35992210014E-14	b_{34311}	1.03071882984E-16	b_{35311}	1.33643018942E-18	b_{40311}	-6.25633550582E-11
b_{32320}	-5.99841266768E-11	b_{33320}	2.93893107265E-13	b_{34320}	-1.82722882086E-15	b_{35320}	8.37839968780E-17	b_{40320}	1.10617445992E-09
b_{32321}	-5.98747483189E-14	b_{33321}	1.71092828406E-15	b_{34321}	3.61116268947E-17	b_{35321}	-6.91370866542E-19	b_{40321}	-3.56550434120E-13
b_{32330}	5.70828411802E-12	b_{33330}	-5.62038186640E-14	b_{34330}	2.92972585677E-16	b_{35330}	6.78316614503E-18	b_{40330}	-4.27007760019E-11
b_{32331}	-3.40063759718E-14	b_{33331}	6.94845240103E-16	b_{34331}	-1.16599798993E-17	b_{35331}	2.00402824249E-20	b_{40331}	6.47558627077E-16
b_{32340}	-2.52834194709E-14	b_{33340}	-1.26587693719E-15	b_{34340}	-3.21660279085E-17	b_{35340}	-7.28472977901E-19	b_{40340}	5.54479663842E-12
b_{32341}	1.62551348290E-15	b_{33341}	-4.14295118336E-17	b_{34341}	9.97160151153E-19	b_{35341}	-2.88365343207E-22	b_{40341}	-1.17992960337E-14
b_{32400}	5.75638184749E-12	b_{33400}	7.41189043012E-14	b_{34400}	-2.25805026229E-15	b_{35400}	-5.12856299237E-19	b_{40400}	1.98635669812E-10
b_{32401}	-2.12639744925E-14	b_{33401}	-6.34615453264E-16	b_{34401}	1.22699845584E-17	b_{35401}	1.68838401540E-20	b_{40401}	-1.31284723547E-12
b_{32410}	-1.16143406527E-12	b_{33410}	4.57462157008E-14	b_{34410}	-8.91488509193E-16	b_{35410}	7.45282850796E-18	b_{40410}	3.95293560165E-11
b_{32411}	8.41707923159E-15	b_{33411}	-1.86600748287E-17	b_{34411}	2.59503957275E-18	b_{35411}	-3.71482606853E-20	b_{40411}	9.53201242551E-13
b_{32420}	-4.72681069061E-14	b_{33420}	6.86453404415E-15	b_{34420}	-1.53518002646E-16	b_{35420}	5.84984980919E-19	b_{40420}	-2.17338875319E-11
b_{32421}	2.69900202915E-15	b_{33421}	-4.67065006979E-17	b_{34421}	2.16857322941E-19	b_{35421}	2.67035326243E-21	b_{40421}	-7.33919073863E-14
b_{32430}	4.52265807206E-14	b_{33430}	-9.81750571948E-16	b_{34430}	1.53787149907E-17	b_{35430}	-2.11016329237E-19	b_{40430}	1.27962276737E-12
b_{32431}	-2.79055638774E-16	b_{33431}	2.11511396185E-18	b_{34431}	7.15273230066E-20	b_{35431}	-5.52527576017E-23	b_{40431}	-1.30785473656E-15
b_{32440}	-8.77579881546E-16	b_{33440}	7.57731672363E-17	b_{34440}	6.29385941290E-19	b_{35440}	-1.03576640796E-21	b_{40440}	-9.02025479606E-14
b_{32441}	5.36091271781E-19	b_{33441}	-4.67429563267E-20	b_{34441}	-1.41359239497E-20	b_{35441}	7.97858461056E-23	b_{40441}	5.26090802603E-16
b_{32500}	-2.96702025748E-15	b_{33500}	8.41670784011E-16	b_{34500}	2.42680790127E-19	b_{35500}	8.73966977942E-21	b_{40500}	-7.73745992181E-12
b_{32501}	8.39154842588E-17	b_{33501}	-5.80944359023E-18	b_{34501}	1.39645398920E-20	b_{35501}	-1.42224571235E-22	b_{40501}	4.62334373263E-14
b_{32510}	-1.37780354723E-14	b_{33510}	4.15308710832E-16	b_{34510}	2.67321968742E-18	b_{35510}	-4.78753192365E-20	b_{40510}	-5.33459403999E-12
b_{32511}	-2.63207105230E-16	b_{33511}	1.29808631486E-18	b_{34511}	-2.67473198415E-20	b_{35511}	2.75166655977E-22	b_{40511}	1.60856390081E-14
b_{32520}	-4.03404522201E-16	b_{33520}	-1.06624875495E-16	b_{34520}	1.82140978319E-18	b_{35520}	-8.48468571543E-21	b_{40520}	7.50279110440E-13
b_{32521}	8.55310082970E-17	b_{33521}	-6.22263878324E-19	b_{34521}	-3.66311168066E-22	b_{35521}	4.12015104955E-24	b_{40521}	-2.95394511072E-15
b_{32530}	-4.16940723686E-16	b_{33530}	1.82002311469E-17	b_{34530}	-1.53703568597E-19	b_{35530}	6.83023625721E-22	b_{40530}	1.32015554372E-14
b_{32531}	-1.49541727034E-18	b_{33531}	-1.15595598253E-19	b_{34531}	9.48213869850E-22	b_{35531}	-1.51277223329E-24	b_{40531}	-4.64319115917E-17
b_{32540}	-1.37517010780E-16	b_{33540}	8.39403895142E-19	b_{34540}	-1.35818264794E-20	b_{35540}	1.20075706405E-22	b_{40540}	-9.26903386473E-16
b_{32541}	5.58005933718E-19	b_{33541}	1.98522883217E-21	b_{34541}	2.59524505338E-23	b_{35541}	-6.33747246857E-25	b_{40541}	3.00858534342E-18

Table A2-6 Coefficients b_{ijklm} of equation (8) for S_D

b_{41000}	1.03330712527E-06	b_{42000}	-4.50454411464E-07	b_{43000}	4.62939442300E-09	b_{44000}	-2.79175293816E-11	b_{45000}	6.11933732152E-13
b_{41001}	-6.49988567388E-09	b_{42001}	2.71933059467E-09	b_{43001}	-3.01767524307E-11	b_{44001}	1.87007876031E-13	b_{45001}	-3.42422608866E-15
b_{41010}	-3.26119392339E-06	b_{42010}	3.80616411311E-07	b_{43010}	-1.14496063690E-08	b_{44010}	1.56413574038E-10	b_{45010}	-9.82608367640E-13
b_{41011}	1.47629684171E-08	b_{42011}	-1.91025102976E-09	b_{43011}	5.22701047334E-11	b_{44011}	-5.90890502519E-13	b_{45011}	3.14457739059E-15
b_{41020}	6.40019364466E-07	b_{42020}	-4.77961975902E-08	b_{43020}	9.76664742879E-10	b_{44020}	-7.09411043848E-12	b_{45020}	4.05926902594E-14
b_{41021}	-2.87871584386E-09	b_{42021}	2.20905046770E-10	b_{43021}	-3.3528899829E-12	b_{44021}	-5.67963456961E-15	b_{45021}	1.37012066182E-16
b_{41030}	-3.94033941937E-08	b_{42030}	1.62453056145E-09	b_{43030}	-8.45678814152E-12	b_{44030}	-5.05711022129E-13	b_{45030}	4.15134606607E-15
b_{41031}	1.74355335133E-10	b_{42031}	-6.11809083617E-12	b_{43031}	-5.88514152053E-14	b_{44031}	4.74848104437E-15	b_{45031}	-3.83309613684E-17
b_{41040}	3.28592783393E-10	b_{42040}	3.13705147239E-11	b_{43040}	-1.59098425120E-12	b_{44040}	3.91086833288E-14	b_{45040}	-3.21150433014E-16
b_{41041}	-7.18014914953E-13	b_{42041}	-2.46933197387E-13	b_{43041}	1.06650829858E-14	b_{44041}	-2.40208264443E-16	b_{45041}	1.96354177180E-18
b_{41100}	7.43249114184E-07	b_{42100}	1.91400088883E-08	b_{43100}	1.24692319836E-10	b_{44100}	-5.56889600080E-12	b_{45100}	-1.90665700529E-14
b_{41101}	-4.33470696863E-09	b_{42101}	-1.24410737916E-10	b_{43101}	-9.31799708834E-14	b_{44101}	2.38253386464E-14	b_{45101}	1.31916768979E-16
b_{41110}	-5.41973086618E-07	b_{42110}	1.16891955312E-08	b_{43110}	-8.30557071986E-11	b_{44110}	-2.86786156082E-12	b_{45110}	5.67199194078E-14
b_{41111}	2.52460586721E-09	b_{42111}	-2.73241509784E-11	b_{43111}	-3.60340883937E-13	b_{44111}	1.86049572410E-14	b_{45111}	-2.54390946956E-16
b_{41120}	7.89355247245E-08	b_{42120}	-2.38744816610E-09	b_{43120}	3.86662269258E-11	b_{44120}	6.09734139569E-15	b_{45120}	-7.25365011776E-15
b_{41121}	-3.38340474673E-10	b_{42121}	7.67978663664E-12	b_{43121}	-1.14368837305E-13	b_{44121}	-2.01776279681E-16	b_{45121}	2.99230752308E-17
b_{41130}	-4.09911269342E-09	b_{42130}	1.33718761940E-10	b_{43130}	-1.77352489032E-12	b_{44130}	7.90998742834E-15	b_{45130}	2.11511665509E-16
b_{41131}	1.47520195719E-11	b_{42131}	-4.15399711391E-13	b_{43131}	4.00883505037E-15	b_{44131}	-6.30786149630E-18	b_{45131}	-8.30841043649E-19
b_{41140}	6.90113518186E-11	b_{42140}	-5.78432990544E-12	b_{43140}	1.22079605800E-13	b_{44140}	-1.94306616819E-15	b_{45140}	1.71684085210E-17
b_{41141}	-1.61889548480E-13	b_{42141}	2.56905389167E-14	b_{43141}	-5.57315824780E-16	b_{44141}	9.33453370113E-18	b_{45141}	-9.78421892892E-20
b_{41200}	-4.20615386792E-08	b_{42200}	-2.60098677152E-10	b_{43200}	-7.28246374915E-12	b_{44200}	1.99080975435E-13	b_{45200}	9.16582275773E-16
b_{41201}	2.54344416388E-10	b_{42201}	1.69955144780E-12	b_{43201}	1.58330143771E-14	b_{44201}	-6.70171599728E-16	b_{45201}	-7.32936961115E-18
b_{41210}	-7.02991207981E-10	b_{42210}	7.01876024090E-11	b_{43210}	3.13558701426E-12	b_{44210}	-2.36785738874E-14	b_{45210}	-1.14015542844E-15
b_{41211}	2.82426182451E-11	b_{42211}	-2.05673696602E-12	b_{43211}	2.26705630566E-14	b_{44211}	-2.56624785291E-16	b_{45211}	6.52481662522E-18
b_{41220}	2.04238859046E-09	b_{42220}	-3.97563053599E-11	b_{43220}	-3.49404141616E-13	b_{44220}	9.59474154865E-15	b_{45220}	1.57443280617E-16
b_{41221}	-1.60815550835E-11	b_{42221}	4.23161876764E-13	b_{43221}	-5.34854875718E-16	b_{44221}	-3.96700518023E-17	b_{45221}	-7.22826210032E-19
b_{41230}	-4.88204642769E-11	b_{42230}	2.31590984005E-12	b_{43230}	-5.67545676444E-14	b_{44230}	-4.73030672694E-16	b_{45230}	4.09113861538E-18
b_{41231}	7.08498020304E-13	b_{42231}	-2.53627879238E-14	b_{43231}	4.36837011430E-16	b_{44231}	6.65223995526E-19	b_{45231}	-1.80651849992E-20
b_{41240}	2.78354066878E-12	b_{42240}	-1.51544463158E-14	b_{43240}	2.37442742510E-16	b_{44240}	3.95690424742E-17	b_{45240}	-8.54958701335E-19
b_{41241}	-3.11276646076E-14	b_{42241}	4.94879874135E-16	b_{43241}	-8.39345725684E-18	b_{44241}	-6.57418885538E-20	b_{45241}	3.90400692348E-21
b_{41300}	4.22753721583E-10	b_{42300}	1.15447298445E-12	b_{43300}	3.08965314606E-13	b_{44300}	-5.43582294101E-15	b_{45300}	-1.33235561054E-17
b_{41301}	-2.95183312834E-12	b_{42301}	4.04816879129E-15	b_{43301}	-1.49545449469E-15	b_{44301}	2.22660880951E-17	b_{45301}	1.26499481974E-19
b_{41310}	-8.34419937098E-11	b_{42310}	2.00313091870E-12	b_{43310}	-5.90428818216E-14	b_{44310}	8.82236894992E-16	b_{45310}	1.21933168667E-17
b_{41311}	2.62560746465E-13	b_{42311}	2.39218939818E-14	b_{43311}	-2.84166869168E-16	b_{44311}	4.02942315376E-19	b_{45311}	-7.58568476139E-20
b_{41320}	-2.44216364352E-11	b_{42320}	3.10353637269E-13	b_{43320}	-1.82072265140E-14	b_{44320}	1.21146002495E-16	b_{45320}	-2.49116439925E-18
b_{41321}	1.70110779896E-13	b_{42321}	-5.77612756929E-15	b_{43321}	7.50249863838E-17	b_{44321}	1.90256189576E-19	b_{45321}	8.79288470494E-21
b_{41330}	-3.01565908984E-12	b_{42330}	3.01056448530E-14	b_{43330}	3.46281276923E-15	b_{44330}	-2.25599206390E-17	b_{45330}	-1.77076571021E-19
b_{41331}	9.78867246330E-15	b_{42331}	6.50282540023E-17	b_{43331}	-1.69351177513E-17	b_{44331}	1.28996405644E-19	b_{45331}	6.24451259245E-22
b_{41340}	-2.32333003344E-14	b_{42340}	-8.76367916510E-16	b_{43340}	-5.49596871121E-17	b_{44340}	1.41697057244E-18	b_{45340}	3.93238637796E-21
b_{41341}	4.47143884157E-16	b_{42341}	-1.65090067581E-18	b_{43341}	3.54362461252E-19	b_{44341}	-1.20427731623E-20	b_{45341}	1.96094996007E-23
b_{41400}	-9.58160568890E-12	b_{42400}	-7.21237602869E-14	b_{43400}	-2.37988135315E-15	b_{44400}	6.74194157802E-17	b_{45400}	-7.06409473262E-21
b_{41401}	6.36863570044E-14	b_{42401}	2.37273402342E-16	b_{43401}	1.22308734319E-17	b_{44401}	-3.06489246893E-19	b_{45401}	-4.75182574946E-22
b_{41410}	5.99577590829E-13	b_{42410}	-8.71137067123E-14	b_{43410}	3.72980777285E-16	b_{44410}	2.28834566884E-18	b_{45410}	-1.02429731888E-19
b_{41411}	-2.39340110714E-14	b_{42411}	3.33995429552E-17	b_{43411}	8.36255022310E-18	b_{44411}	-8.20481939512E-20	b_{45411}	6.80356262392E-22
b_{41420}	-3.94926661303E-13	b_{42420}	2.44279201127E-14	b_{43420}	-7.97263886633E-17	b_{44420}	2.01464534140E-18	b_{45420}	-1.64146650952E-20
b_{41421}	3.08306532539E-15	b_{42421}	1.00998593854E-17	b_{43421}	-7.63278257349E-19	b_{44421}	-1.91320211168E-20	b_{45421}	1.61878410650E-22
b_{41430}	5.73966651961E-14	b_{42430}	-6.08330521703E-16	b_{43430}	-2.00432748956E-17	b_{44430}	-3.11608871043E-19	b_{45430}	7.01972407621E-21
b_{41431}	-1.68222108910E-16	b_{42431}	-4.61440614792E-18	b_{43431}	8.65199959910E-20	b_{44431}	2.61139699403E-21	b_{45431}	-3.80492375815E-23
b_{41440}	3.27910171962E-15	b_{42440}	-6.91452754925E-18	b_{43440}	-2.12710037523E-18	b_{44440}	4.41027299716E-21	b_{45440}	7.67022000201E-23
b_{41441}	-2.19935795173E-17	b_{42441}	-7.10754681037E-20	b_{43441}	2.03542397739E-20	b_{44441}	-9.59004632617E-23	b_{45441}	-4.94671504550E-25
b_{41500}	1.85742300804E-13	b_{42500}	1.74480639393E-15	b_{43500}	-4.70051615346E-17	b_{44500}	1.42938842021E-19	b_{45500}	-5.57717457713E-22
b_{41501}	-1.10340873097E-15	b_{42501}	-1.04615329805E-17	b_{43501}	2.99012665022E-19	b_{44501}	-1.31573545799E-21	b_{45501}	5.76270482847E-24
b_{41510}	1.71808262347E-13	b_{42510}	-1.22258182848E-15	b_{43510}	2.97730950523E-18	b_{44510}	-6.36733075865E-20	b_{45510}	6.91673010347E-22
b_{41511}	-4.57953646373E-16	b_{42511}	1.00075751532E-18	b_{43511}	3.57387510495E-20	b_{44511}	-2.44881944386E-22	b_{45511}	-7.13759655235E-25
b_{41520}	-1.31197233098E-14	b_{42520}	-1.58003506723E-16	b_{43520}	3.45539107400E-18	b_{44520}	-2.95293893509E-20	b_{45520}	1.47315804390E-22
b_{41521}	7.71538595468E-17	b_{42521}	-5.03132604413E-19	b_{43521}	-8.44314755472E-21	b_{44521}	2.85855737105E-22	b_{45521}	-1.89559197749E-24
b_{41530}	-1.74595086081E-15	b_{42530}	1.99286092319E-17	b_{43530}	2.91466850672E-19	b_{44530}	-5.15417168120E-21	b_{45530}	1.31726830265E-23
b_{41531}	5.72609429572E-18	b_{42531}	-3.63383440038E-20	b_{43531}	-1.03715111162E-22	b_{44531}	-7.49127455594E-24	b_{45531}	9.21058036613E-26
b_{41540}	-2.66868825623E-17	b_{42540}	2.09163671190E-18	b_{43540}	-2.76474649283E-20	b_{44540}	5.59428460505E-22	b_{45540}	-5.1643111577E-24
b_{41541}	2.18649339015E-19	b_{42541}	-7.76710677570E-21	b_{43541}	-5.77347830850E-23	b_{44541}	-2.57849842501E-25	b_{45541}	1.71147769570E-26

A.2.3 ピッチングモーメント容積 (Q_M) 回帰モデルの係数表

5.2.2 の⑨式で表したピッチングモーメント容積 (Q_M) 回帰モデルについて、その係数 c_{ijklm} を Table A3 に示した。

Table A3-1 Coefficients C_{ijklm} of equation ⑨ for Q_M

C_{00000}	3.70053033218E-02	C_{01000}	2.08891688415E-01	C_{02000}	-6.46466294967E-02	C_{03000}	2.10901338046E-03	C_{04000}	-2.43931404508E-05
C_{00001}	-2.43081588945E-04	C_{01001}	-1.17509769617E-03	C_{02001}	3.73640471479E-04	C_{03001}	-1.20769859414E-05	C_{04001}	1.38191017451E-07
C_{00010}	7.83960002494E-04	C_{01010}	1.58405909358E-01	C_{02010}	-2.55239410328E-02	C_{03010}	1.26308147095E-03	C_{04010}	-2.54932555653E-05
C_{00011}	-6.38688882503E-03	C_{01011}	4.92713184706E-05	C_{02011}	5.83773735404E-05	C_{03011}	-3.38322534576E-06	C_{04011}	7.75690553717E-08
C_{00020}	-7.39201490663E-02	C_{01020}	2.27079165190E-01	C_{02020}	-7.58180760269E-03	C_{03020}	7.64424058119E-05	C_{04020}	2.57215111596E-07
C_{00021}	1.65183663171E-03	C_{01021}	-1.39154698794E-03	C_{02021}	5.14390729633E-05	C_{03021}	-9.04283543317E-07	C_{04021}	8.19673080451E-09
C_{00030}	8.86452942883E-02	C_{01030}	-3.51334519351E-02	C_{02030}	1.69708794985E-03	C_{03030}	-3.75901252688E-05	C_{04030}	4.31119002323E-07
C_{00031}	-5.97768505559E-04	C_{01031}	2.01786062846E-04	C_{02031}	-9.72878709701E-06	C_{03031}	2.29283705581E-07	C_{04031}	-2.88331113434E-09
C_{00040}	-7.69385697426E-03	C_{01040}	1.37704085588E-03	C_{02040}	-6.83563275730E-05	C_{03040}	1.43753858295E-06	C_{04040}	-1.55053307103E-08
C_{00041}	4.68303428924E-05	C_{01041}	-7.83035109585E-06	C_{02041}	3.83049709372E-07	C_{03041}	-8.21287250709E-09	C_{04041}	9.30748369729E-11
C_{00100}	1.44199329286E-02	C_{01100}	2.06353521807E-01	C_{02100}	-4.28577626859E-03	C_{03100}	-1.98448971939E-05	C_{04100}	9.60511847756E-07
C_{00101}	-5.01047968537E-04	C_{01101}	-1.19568741855E-03	C_{02101}	2.57302822869E-05	C_{03101}	6.27182677624E-08	C_{04101}	-4.58327900129E-09
C_{00110}	-2.69579681169E-02	C_{01110}	-3.70226448376E-02	C_{02110}	1.37301491711E-03	C_{03110}	-2.56277421127E-05	C_{04110}	6.36840913299E-07
C_{00111}	9.79789451696E-04	C_{01111}	4.34429288405E-04	C_{02111}	-2.24372861128E-05	C_{03111}	3.69890871947E-07	C_{04111}	-3.62793509059E-09
C_{00120}	-1.20059013650E-01	C_{01120}	-6.93935826986E-03	C_{02120}	4.60236570498E-05	C_{03120}	4.43010376779E-06	C_{04120}	-6.87992628349E-08
C_{00121}	6.55532184691E-04	C_{01121}	-1.96735501200E-03	C_{02121}	3.40653423780E-06	C_{03121}	-8.81450322667E-08	C_{04121}	5.90218709436E-10
C_{00130}	1.10263825375E-03	C_{01130}	1.32106696201E-03	C_{02130}	-5.36998767213E-05	C_{03130}	9.37889282007E-07	C_{04130}	-1.47177212811E-08
C_{00131}	-7.00578066758E-06	C_{01131}	-3.40503016273E-06	C_{02131}	6.65312329282E-08	C_{03131}	-1.46303899964E-09	C_{04131}	7.62778634744E-11
C_{00140}	6.69659603000E-04	C_{01140}	-5.13658351036E-05	C_{02140}	2.86502826279E-06	C_{03140}	-4.46166446108E-08	C_{04140}	4.09401371366E-10
C_{00141}	-3.85969115561E-06	C_{01141}	2.05314657202E-07	C_{02141}	-1.17547634080E-08	C_{03141}	1.90183522857E-10	C_{04141}	-2.45038928576E-12
C_{00200}	-2.69885762505E-01	C_{01200}	-1.24235135612E-03	C_{02200}	1.83176578270E-04	C_{03200}	-5.25102524246E-07	C_{04200}	-3.45284483023E-08
C_{00201}	1.67848292316E-03	C_{01201}	1.15216745057E-06	C_{02201}	-9.32679327961E-07	C_{03201}	3.09158740440E-09	C_{04201}	1.67781824599E-10
C_{00210}	1.15925104819E-01	C_{01210}	-2.76533105439E-03	C_{02210}	1.73422933332E-05	C_{03210}	-1.29059372653E-06	C_{04210}	2.32583197225E-08
C_{00211}	-9.85874623350E-04	C_{01211}	2.06268373129E-05	C_{02211}	3.78640268659E-07	C_{03211}	-5.61095726393E-09	C_{04211}	-5.20175329432E-11
C_{00220}	-9.43529834397E-03	C_{01220}	1.04383693892E-03	C_{02220}	-2.04078896764E-05	C_{03220}	3.85044117801E-08	C_{04220}	3.94233257589E-10
C_{00221}	1.14948940963E-04	C_{01221}	-6.49176660948E-06	C_{02221}	1.65466741147E-08	C_{03221}	2.09533218698E-09	C_{04221}	-1.16560346839E-11
C_{00230}	1.15979187380E-03	C_{01230}	-5.09239486909E-05	C_{02230}	1.94423608004E-06	C_{03230}	-1.79315228769E-08	C_{04230}	1.85879893949E-10
C_{00231}	-1.04740877144E-05	C_{01231}	3.21833703069E-07	C_{02231}	-7.38392454611E-09	C_{03231}	7.31533883026E-11	C_{04231}	-2.29014253203E-12
C_{00240}	-6.42510771715E-05	C_{01240}	-2.47895695884E-06	C_{02240}	2.89490906741E-08	C_{03240}	-8.03825388037E-10	C_{04240}	1.71448282698E-11
C_{00241}	4.37686702777E-07	C_{01241}	1.50435061465E-08	C_{02241}	-1.87421671402E-10	C_{03241}	2.79786624517E-12	C_{04241}	-3.05504366825E-14
C_{00300}	1.5454515007E-02	C_{01300}	-3.19186855695E-04	C_{02300}	-1.93790562968E-06	C_{03300}	6.09917764285E-08	C_{04300}	1.08776495819E-10
C_{00301}	-9.72350247341E-05	C_{01301}	2.32514663162E-06	C_{02301}	-1.59180691766E-09	C_{03301}	-2.01259649689E-10	C_{04301}	-1.09514788087E-12
C_{00310}	-5.9889805416E-03	C_{01310}	1.67821920178E-04	C_{02310}	7.20964045178E-07	C_{03310}	-3.59870125673E-08	C_{04310}	4.85777406091E-11
C_{00311}	4.75030484614E-05	C_{01311}	-1.38988957493E-06	C_{02311}	-6.61871573758E-09	C_{03311}	3.78350541780E-10	C_{04311}	-1.27947784854E-12
C_{00320}	4.52972009593E-04	C_{01320}	-1.40493462605E-05	C_{02320}	1.67994378831E-07	C_{03320}	2.79395909395E-09	C_{04320}	-4.86402680795E-11
C_{00321}	-6.03029722962E-06	C_{01321}	1.98911217646E-07	C_{02321}	-1.79593249157E-09	C_{03321}	-7.92473218124E-12	C_{04321}	-1.42446347101E-13
C_{00330}	-8.48868638782E-05	C_{01330}	-1.51155117815E-06	C_{02330}	2.18339648723E-08	C_{03330}	2.07676495038E-10	C_{04330}	-3.18375049290E-12
C_{00331}	7.28390370214E-07	C_{01331}	1.09122603520E-09	C_{02331}	3.00097614505E-11	C_{03331}	-6.79338747839E-12	C_{04331}	1.25806921155E-13
C_{00340}	5.13478673663E-06	C_{01340}	2.18532290639E-07	C_{02340}	-5.58487538110E-09	C_{03340}	5.54848920775E-11	C_{04340}	-6.31916355447E-13
C_{00341}	-3.33577426291E-08	C_{01341}	-1.27980432548E-09	C_{02341}	3.26166841442E-11	C_{03341}	-1.84630913311E-13	C_{04341}	3.47986007899E-16
C_{00400}	-2.93365882606E-04	C_{01400}	9.02261817504E-06	C_{02400}	-4.67894086450E-08	C_{03400}	-7.9592846488E-10	C_{04400}	5.76603243330E-12
C_{00401}	1.90027714686E-06	C_{01401}	-6.53206049127E-08	C_{02401}	6.34410039508E-10	C_{03401}	-3.75982540544E-13	C_{04401}	-2.86224511568E-15
C_{00410}	8.61909858794E-05	C_{01410}	-3.20051235821E-06	C_{02410}	1.91796976624E-08	C_{03410}	3.49713838771E-10	C_{04410}	-3.2270422180E-12
C_{00411}	-6.77127783804E-07	C_{01411}	2.11690735752E-08	C_{02411}	4.88910846714E-11	C_{03411}	-6.19515847592E-12	C_{04411}	4.52568525981E-14
C_{00420}	-1.33271775013E-05	C_{01420}	-4.93236015739E-09	C_{02420}	2.40398568288E-09	C_{03420}	1.08395232359E-11	C_{04420}	-2.70457016619E-13
C_{00421}	1.57868500544E-07	C_{01421}	-2.56610800458E-09	C_{02421}	1.05246253902E-12	C_{03421}	-9.00445067576E-14	C_{04421}	6.76770762944E-15
C_{00430}	4.34805232021E-06	C_{01430}	1.95037472567E-09	C_{02430}	-1.25996192123E-09	C_{03430}	2.21368455115E-12	C_{04430}	9.19556017087E-14
C_{00431}	-3.12447624598E-08	C_{01431}	1.24074372283E-10	C_{02431}	7.43018575789E-12	C_{03431}	9.88801237947E-15	C_{04431}	-1.60065243294E-15
C_{00440}	-2.62067892430E-07	C_{01440}	4.82001840683E-10	C_{02440}	4.18527827298E-11	C_{03440}	4.95043483133E-13	C_{04440}	-8.76638331309E-15
C_{00441}	1.58246520898E-09	C_{01441}	3.22914023323E-12	C_{02441}	-5.60506165436E-13	C_{03441}	1.23980040496E-15	C_{04441}	4.59872419929E-17
C_{00500}	1.01098813542E-06	C_{01500}	-1.44280741586E-08	C_{02500}	-7.05860079342E-10	C_{03500}	1.93226048592E-11	C_{04500}	-1.57038679619E-13
C_{00501}	-7.60167000555E-09	C_{01501}	1.99894558082E-10	C_{02501}	8.33188545388E-13	C_{03501}	-6.59879936158E-14	C_{04501}	5.96503620965E-16
C_{00510}	-4.11173987541E-07	C_{01510}	2.20283768553E-08	C_{02510}	-4.85166323229E-10	C_{03510}	5.72115900785E-12	C_{04510}	-3.89598628928E-14
C_{00511}	3.99958427502E-09	C_{01511}	-1.54018570464E-10	C_{02511}	1.53797772080E-12	C_{03511}	3.38921424124E-15	C_{04511}	-6.70176718520E-17
C_{00520}	1.99724475041E-07	C_{01520}	2.96671571359E-10	C_{02520}	-1.18431771074E-10	C_{03520}	1.47519537682E-12	C_{04520}	-6.07275428339E-15
C_{00521}	-2.14253869091E-09	C_{01521}	3.77028474073E-11	C_{02521}	2.26724817780E-13	C_{03521}	-7.28693115666E-15	C_{04521}	2.63793773956E-17
C_{00530}	-6.88389006633E-08	C_{01530}	1.06543600508E-09	C_{02530}	4.57409116201E-12	C_{03530}	-7.60623407939E-14	C_{04530}	-5.35560480282E-16
C_{00531}	4.74494106810E-10	C_{01531}	-8.18284316428E-12	C_{02531}	-3.85869007646E-14	C_{03531}	1.11933529707E-15	C_{04531}	-1.18608553330E-18
C_{00540}	3.69556713285E-09	C_{01540}	-7.71789657084E-11	C_{02540}	1.09500300293E-12	C_{03540}	-2.70974019843E-14	C_{04540}	3.36050888846E-16
C_{00541}	-2.2006841080E-11	C_{01541}	3.51820816213E-13	C_{02541}	-5.14234923496E-16	C_{03541}	4.21745258078E-17	C_{04541}	-1.00669416468E-18

Table A3-2 Coefficients C_{ijklm} of equation (9) for Q_M

C_{05000}	9.50991467249E-08	C_{10000}	-8.15667746702E-02	C_{11000}	4.13712986261E-02	C_{12000}	-1.56457736017E-02	C_{13000}	6.71300021440E-04
C_{05001}	-5.36429194676E-10	C_{10001}	5.07015344247E-04	C_{11001}	-2.44730579983E-04	C_{12001}	9.19675912613E-05	C_{13001}	-3.93759129099E-06
C_{05010}	1.75266831916E-07	C_{10010}	-3.18793379669E-01	C_{11010}	-2.13634058177E-02	C_{12010}	6.10860533265E-03	C_{13010}	-2.48850303778E-04
C_{05011}	-5.92938005628E-10	C_{10011}	2.70430062944E-03	C_{11011}	7.60060427861E-06	C_{12011}	-2.63417942010E-05	C_{13011}	1.10909033010E-06
C_{05020}	-7.48681199119E-09	C_{10020}	-8.70326481257E-02	C_{11020}	-1.16031661702E-02	C_{12020}	2.67980163539E-04	C_{13020}	5.54525433763E-06
C_{05021}	-1.99795550748E-11	C_{10021}	3.53713215171E-04	C_{11021}	7.36473057477E-05	C_{12021}	-2.00131431372E-06	C_{13021}	-6.79143499863E-09
C_{05030}	-1.85532613149E-09	C_{10030}	3.29728782175E-03	C_{11030}	1.84148665114E-03	C_{12030}	-9.15465183884E-05	C_{13030}	1.26447171076E-06
C_{05031}	1.36986876458E-11	C_{10031}	-9.48684717553E-06	C_{11031}	-1.00666557339E-05	C_{12031}	4.74517277986E-07	C_{13031}	-6.29655780095E-09
C_{05040}	6.65903556256E-11	C_{10040}	3.86941038123E-04	C_{11040}	-7.89672630595E-05	C_{12040}	3.61660021432E-06	C_{13040}	-3.86016877690E-08
C_{05041}	-4.24262473577E-13	C_{10041}	-2.47997002224E-06	C_{11041}	4.26110448201E-07	C_{12041}	-1.80873079945E-08	C_{13041}	1.46430152677E-10
C_{05100}	-5.44119766629E-09	C_{10100}	3.80440298376E-02	C_{11100}	3.83810018225E-02	C_{12100}	-1.35960699726E-03	C_{13100}	9.80323411275E-06
C_{05101}	2.61068057155E-11	C_{10101}	-2.00071472293E-04	C_{11101}	-2.22133054204E-04	C_{12101}	7.58807772255E-06	C_{13101}	-4.47571686321E-08
C_{05110}	-6.40910675279E-09	C_{10110}	1.26432571367E-01	C_{11110}	-1.17597097633E-02	C_{12110}	2.23704777768E-04	C_{13110}	2.44967663737E-06
C_{05111}	2.37753589567E-11	C_{10111}	-7.93560172388E-04	C_{11111}	6.00824443876E-05	C_{12111}	-9.95846589591E-07	C_{13111}	-5.12328636182E-09
C_{05120}	4.23990644800E-10	C_{10120}	1.35104463630E-02	C_{11120}	1.07823928086E-03	C_{12120}	-3.53981114658E-05	C_{13120}	-3.69071951808E-08
C_{05121}	-6.82890522914E-13	C_{10121}	-9.87902456426E-05	C_{11121}	-7.01914161093E-07	C_{12121}	-4.43653071170E-08	C_{13121}	2.91320107652E-09
C_{05130}	9.59672893421E-11	C_{10130}	-3.92665429348E-04	C_{11130}	-8.36013783947E-05	C_{12130}	2.77096234267E-06	C_{13130}	1.94186792128E-08
C_{05131}	-6.96899359691E-13	C_{10131}	4.40249467443E-06	C_{11131}	1.46598064371E-08	C_{12131}	5.41135072196E-09	C_{13131}	-4.12535400076E-10
C_{05140}	-2.15004045497E-12	C_{10140}	-4.56347451632E-05	C_{11140}	2.94270057234E-06	C_{12140}	-9.96403420707E-08	C_{13140}	-9.52934483990E-10
C_{05141}	1.71123932057E-14	C_{10141}	2.15373988698E-07	C_{11141}	-6.01708711928E-09	C_{12141}	8.45980691589E-11	C_{13141}	1.23395743625E-11
C_{05200}	2.63979053338E-10	C_{10200}	-4.94493928412E-02	C_{11200}	1.40400146674E-03	C_{12200}	-1.26884345371E-05	C_{13200}	8.08270624841E-08
C_{05201}	-1.28325385930E-12	C_{10201}	2.79616904843E-04	C_{11201}	-7.78622610242E-06	C_{12201}	8.18907737850E-08	C_{13201}	-1.11790992682E-09
C_{05210}	-6.77861553291E-11	C_{10210}	-2.11453799885E-03	C_{11210}	3.71673140882E-05	C_{12210}	1.19465325344E-06	C_{13210}	-9.44870447758E-08
C_{05211}	4.73912829755E-13	C_{10211}	2.96773693042E-05	C_{11211}	-7.02388827695E-07	C_{12211}	-1.35040841674E-08	C_{13211}	3.03196314498E-10
C_{05220}	1.56233685930E-12	C_{10220}	-1.35660438624E-03	C_{11220}	-7.93473156743E-06	C_{12220}	1.60494141592E-06	C_{13220}	-1.90824826534E-08
C_{05221}	-6.70167571953E-14	C_{10221}	6.72084734863E-06	C_{11221}	-7.51748960186E-08	C_{12221}	3.80758532126E-10	C_{13221}	1.47750299761E-12
C_{05230}	-1.92974410685E-12	C_{10230}	-5.14763288845E-06	C_{11230}	4.18850788263E-06	C_{12230}	-1.77244961355E-07	C_{13230}	7.52170506716E-10
C_{05231}	2.43817922416E-14	C_{10231}	6.88741275213E-08	C_{11231}	-1.53180647876E-08	C_{12231}	4.89207830909E-10	C_{13231}	-2.15471528393E-12
C_{05240}	-7.68206889515E-14	C_{10240}	1.81416391681E-06	C_{11240}	9.50471995940E-08	C_{12240}	-2.69319879086E-09	C_{13240}	8.18501961606E-11
C_{05241}	-7.82337892736E-17	C_{10241}	-1.01995641619E-08	C_{11241}	-8.38775581025E-10	C_{12241}	2.64262299117E-11	C_{13241}	-3.76752811068E-13
C_{05300}	-3.95383124326E-12	C_{10300}	1.33752569844E-03	C_{11300}	-4.10957385127E-05	C_{12300}	5.25776310437E-07	C_{13300}	-3.70063587532E-09
C_{05301}	2.08992469878E-14	C_{10301}	-6.96358500049E-06	C_{11301}	1.82829478382E-07	C_{12301}	-1.81758247734E-09	C_{13301}	1.58310065663E-11
C_{05310}	9.57771277771E-13	C_{10310}	3.11104189275E-04	C_{11310}	-1.02207103758E-05	C_{12310}	1.56482658170E-07	C_{13310}	-6.58730824343E-10
C_{05311}	-8.94290242033E-15	C_{10311}	-2.08499386549E-06	C_{11311}	6.66645847278E-08	C_{12311}	-3.87201690885E-10	C_{13311}	-1.69032885829E-12
C_{05320}	1.25537219468E-13	C_{10320}	4.26514606095E-05	C_{11320}	-1.10633276786E-06	C_{12320}	-1.68842309353E-08	C_{13320}	3.07803951797E-10
C_{05321}	3.13335862585E-15	C_{10321}	-2.08272880741E-07	C_{11321}	5.70790113141E-09	C_{12321}	-1.45053664788E-11	C_{13321}	-1.16216549392E-12
C_{05330}	1.91165529054E-14	C_{10330}	6.40019128481E-07	C_{11330}	2.2114806854E-09	C_{12330}	1.15772119777E-09	C_{13330}	2.52033130984E-11
C_{05331}	-7.76899281731E-16	C_{10331}	-7.58561174271E-09	C_{11331}	2.97371663450E-10	C_{12331}	-1.65486246131E-11	C_{13331}	3.09028240586E-13
C_{05340}	3.60780112258E-15	C_{10340}	-5.36801243797E-08	C_{11340}	-8.72627960875E-09	C_{12340}	2.89040391729E-10	C_{13340}	-5.13612505646E-12
C_{05341}	3.82448902047E-19	C_{10341}	2.68460364811E-10	C_{11341}	5.62161494285E-11	C_{12341}	-1.74142608471E-12	C_{13341}	1.88896840275E-14
C_{05400}	1.22731633458E-14	C_{10400}	-1.97534832777E-05	C_{11400}	5.74828337566E-07	C_{12400}	-6.07444343383E-09	C_{13400}	2.62928512525E-11
C_{05401}	-1.27730768559E-16	C_{10401}	9.05529168392E-08	C_{11401}	-1.57939795065E-09	C_{12401}	-1.32313844065E-11	C_{13401}	4.42500656088E-13
C_{05410}	3.14922121697E-15	C_{10410}	-3.95687757797E-06	C_{11410}	1.21352744208E-07	C_{12410}	-3.49759185593E-09	C_{13410}	5.96425909920E-11
C_{05411}	-1.79759451607E-17	C_{10411}	1.52492838303E-08	C_{11411}	-1.68193347823E-10	C_{12411}	-4.94188105598E-12	C_{13411}	6.14903756131E-14
C_{05420}	5.76815684771E-16	C_{10420}	-3.24236202492E-07	C_{11420}	1.08940091597E-08	C_{12420}	3.09294975687E-10	C_{13420}	-1.45596620052E-12
C_{05421}	-5.52597886442E-17	C_{10421}	2.09931210615E-09	C_{11421}	-3.90151076707E-11	C_{12421}	-1.68948558180E-12	C_{13421}	2.56964316391E-14
C_{05430}	-3.44911825838E-16	C_{10430}	-9.84339088060E-08	C_{11430}	2.74556182280E-09	C_{12430}	-3.06472107221E-11	C_{13430}	-1.43961295430E-12
C_{05431}	1.01548432466E-17	C_{10431}	5.70980557936E-10	C_{11431}	-2.05290256151E-11	C_{12431}	4.01940620210E-13	C_{13431}	-3.33274527166E-16
C_{05440}	1.59414810267E-17	C_{10440}	4.88509631677E-09	C_{11440}	-1.50445161585E-10	C_{12440}	4.96548424437E-12	C_{13440}	-5.52730748691E-14
C_{05441}	-2.23102708828E-19	C_{10441}	-2.03346006383E-11	C_{11441}	1.35902567454E-13	C_{12441}	-4.71965895949E-15	C_{13441}	9.45068909035E-17
C_{05500}	3.68055934278E-16	C_{10500}	1.53774476922E-07	C_{11500}	-5.77555096004E-09	C_{12500}	9.08759729187E-11	C_{13500}	-7.98729337959E-13
C_{05501}	-1.33963231030E-18	C_{10501}	-6.69491235631E-10	C_{11501}	1.72813284788E-11	C_{12501}	-6.06634025506E-14	C_{13501}	-1.80788706186E-15
C_{05510}	1.18570206749E-16	C_{10510}	-8.46471088799E-09	C_{11510}	1.11275406097E-09	C_{12510}	-8.83335535153E-12	C_{13510}	-3.07935399663E-13
C_{05511}	-1.10255076598E-19	C_{10511}	1.32343412009E-10	C_{11511}	-1.09535052660E-11	C_{12511}	2.22074711007E-13	C_{13511}	-1.17655287573E-15
C_{05520}	1.03031952157E-17	C_{10520}	6.76510861032E-09	C_{11520}	-3.30807597032E-10	C_{12520}	7.96950279565E-13	C_{13520}	4.28075546580E-14
C_{05521}	9.13474259332E-20	C_{10521}	-4.02918222322E-11	C_{11521}	1.47514103491E-12	C_{12521}	6.10793010778E-15	C_{13521}	-4.56625893476E-16
C_{05530}	4.46817642580E-18	C_{10530}	-3.74786300165E-11	C_{11530}	1.66687643980E-11	C_{12530}	-6.33596753342E-14	C_{13530}	1.78402083405E-15
C_{05531}	-2.89901118641E-20	C_{10531}	1.45946894661E-12	C_{11531}	-1.84936209385E-13	C_{12531}	3.61316610374E-15	C_{13531}	-4.93330073738E-17
C_{05540}	-1.34235268077E-18	C_{10540}	2.08020606966E-11	C_{11540}	-1.22228813315E-12	C_{12540}	-3.75150326876E-14	C_{13540}	1.50489405500E-15
C_{05541}	5.09880183160E-21	C_{10541}	-3.07684663350E-13	C_{11541}	2.57640842960E-14	C_{12541}	-4.81772002593E-16	C_{13541}	2.91279596202E-18

Table A3-3 Coefficients C_{ijklm} of equation (9) for Q_M

C_{14000}	-1.02976316027E-05	C_{15000}	5.41663267846E-08	C_{20000}	1.26228891531E-01	C_{21000}	-1.20179936126E-02	C_{22000}	1.22982516841E-03
C_{14001}	6.02195478990E-08	C_{15001}	-3.15705397066E-10	C_{20001}	-7.45008531309E-04	C_{21001}	7.12554761117E-05	C_{22001}	-7.29822404694E-06
C_{14010}	3.93024438264E-06	C_{15010}	-2.24766419516E-08	C_{20010}	-1.18430341673E-01	C_{21010}	8.77630804242E-03	C_{22010}	-4.24322473657E-04
C_{14011}	-1.76864842177E-08	C_{15011}	1.04000997399E-10	C_{20011}	6.57320502524E-04	C_{21011}	-4.66954174828E-05	C_{22011}	2.17920964897E-06
C_{14020}	-2.17360553651E-07	C_{15020}	2.01673916325E-09	C_{20020}	1.92962378318E-02	C_{21020}	-3.85917713729E-04	C_{22020}	-2.80999736204E-06
C_{14021}	8.16494384262E-10	C_{15021}	-9.15484506549E-12	C_{20021}	-1.05995982347E-04	C_{21021}	2.05507303026E-06	C_{22021}	2.52256013486E-08
C_{14030}	6.04323108703E-10	C_{15030}	-1.14339811150E-10	C_{20030}	-9.81947205136E-04	C_{21030}	-2.63990755158E-05	C_{22030}	3.92981014609E-06
C_{14031}	-1.10942441744E-11	C_{15031}	6.69543177035E-13	C_{20031}	5.30693958792E-06	C_{21031}	1.20941031040E-07	C_{22031}	-2.02648830447E-08
C_{14040}	-2.98733735952E-10	C_{15040}	6.07136687139E-12	C_{20040}	1.83210334073E-06	C_{21040}	2.14636623071E-06	C_{22040}	-1.43320824185E-07
C_{14041}	2.66866689668E-12	C_{15041}	-3.90951240949E-14	C_{20041}	-1.16513428898E-09	C_{21041}	-1.09282080604E-08	C_{22041}	7.14496766149E-10
C_{14100}	1.23635302624E-07	C_{15100}	-1.44277923018E-09	C_{20100}	-4.50344313974E-03	C_{21100}	-1.49976073081E-03	C_{22100}	3.80680980543E-05
C_{14101}	-8.79872915256E-10	C_{15101}	9.06788723924E-12	C_{20101}	2.65158713447E-05	C_{21101}	8.73378756208E-06	C_{22101}	-2.16031660377E-07
C_{14110}	-1.11854700299E-07	C_{15110}	9.22529002806E-10	C_{20110}	2.72902450005E-04	C_{21110}	2.78303149646E-04	C_{22110}	-4.83737002040E-07
C_{14111}	3.47888648332E-10	C_{15111}	-3.34204019292E-12	C_{20111}	-1.05185876646E-05	C_{21111}	-1.15362192932E-06	C_{22111}	1.43804979882E-08
C_{14120}	9.24400171290E-09	C_{15120}	-1.07017727147E-10	C_{20120}	-7.29586848891E-04	C_{21120}	-1.83027536413E-05	C_{22120}	1.25996008669E-06
C_{14121}	-4.71981177718E-11	C_{15121}	4.59094161482E-13	C_{20121}	6.35124750065E-06	C_{21121}	-3.37580733068E-08	C_{22121}	-6.25628223026E-09
C_{14130}	-1.08675753545E-09	C_{15130}	1.15776216486E-11	C_{20130}	1.38179580110E-05	C_{21130}	5.98425179639E-07	C_{22130}	-1.58568371945E-07
C_{14131}	7.36927281950E-12	C_{15131}	-6.27659151619E-14	C_{20131}	-2.06277792663E-07	C_{21131}	6.23589414756E-09	C_{22131}	6.96544079260E-10
C_{14140}	4.90986889948E-11	C_{15140}	-5.02903658847E-13	C_{20140}	1.87671670203E-06	C_{21140}	-1.12595261748E-07	C_{22140}	7.93041280554E-09
C_{14141}	-3.07079955335E-13	C_{15141}	2.77502462140E-15	C_{20141}	-8.75011600840E-09	C_{21141}	4.48962187167E-10	C_{22141}	-3.86865052266E-11
C_{14200}	-1.80923181972E-09	C_{15200}	1.82293578521E-11	C_{20200}	1.47992019560E-03	C_{21200}	-2.23928420858E-05	C_{22200}	3.53277254864E-07
C_{14201}	2.07271005676E-11	C_{15201}	-1.54508459174E-13	C_{20201}	-8.66677487083E-06	C_{21201}	1.38755948631E-07	C_{22201}	-2.60899169000E-09
C_{14210}	2.30580853821E-09	C_{15210}	-2.00137146612E-11	C_{20210}	-7.09474337771E-05	C_{21210}	-6.68991997460E-06	C_{22210}	-1.93183016888E-07
C_{14211}	-2.37335541091E-12	C_{15211}	3.48551343205E-14	C_{20211}	7.89435811700E-07	C_{21211}	9.77171870507E-09	C_{22211}	1.62969632166E-09
C_{14220}	1.09733042154E-11	C_{15220}	1.65738917842E-12	C_{20220}	3.50077090719E-05	C_{21220}	-7.93281395118E-07	C_{22220}	2.23895485031E-08
C_{14221}	-6.93506962703E-13	C_{15221}	3.99107403364E-16	C_{20221}	-3.08818953210E-07	C_{21221}	1.05277630850E-08	C_{22221}	-2.29523391324E-10
C_{14230}	1.26955457585E-11	C_{15230}	-2.00031208071E-13	C_{20230}	2.39160410455E-06	C_{21230}	-3.09106780515E-08	C_{22230}	2.98615970542E-09
C_{14231}	4.28890198935E-14	C_{15231}	9.60166041728E-17	C_{20231}	-9.21765721378E-09	C_{21231}	7.96577376040E-11	C_{22231}	-1.66978176218E-11
C_{14240}	-4.66168973141E-13	C_{15240}	2.83417911065E-15	C_{20240}	-8.21157160200E-08	C_{21240}	8.34640586025E-10	C_{22240}	-2.05901094387E-10
C_{14241}	-2.74644179918E-15	C_{15241}	2.53873857851E-17	C_{20241}	4.08674413366E-10	C_{21241}	-4.31891638398E-12	C_{22241}	1.15559640027E-12
C_{14300}	9.81926765014E-12	C_{15300}	-2.31390079452E-14	C_{20300}	-2.50251489888E-05	C_{21300}	1.29053504430E-07	C_{22300}	-1.12285528395E-08
C_{14301}	-1.54249540000E-13	C_{15301}	9.27486979026E-16	C_{20301}	1.40906566673E-07	C_{21301}	-8.06502782354E-10	C_{22301}	7.60709189977E-11
C_{14310}	-2.15286367476E-11	C_{15310}	2.79306387979E-13	C_{20310}	-4.56803483811E-06	C_{21310}	4.86392289794E-07	C_{22310}	-9.76929721143E-09
C_{14311}	-9.01943350762E-15	C_{15311}	-1.71805117546E-16	C_{20311}	2.03194945640E-08	C_{21311}	-2.36021931484E-09	C_{22311}	2.66255630081E-11
C_{14320}	3.50895653173E-13	C_{15320}	-3.00138616763E-14	C_{20320}	-2.13942503039E-07	C_{21320}	3.94719903089E-09	C_{22320}	9.41267474730E-10
C_{14321}	3.45538937515E-14	C_{15321}	-1.69004245556E-16	C_{20321}	3.26905814445E-09	C_{21321}	-5.36318361598E-11	C_{22321}	-4.0058725602E-12
C_{14330}	-4.57671734587E-13	C_{15330}	2.51556993694E-15	C_{20330}	-6.67908003563E-08	C_{21330}	4.12638206609E-10	C_{22330}	-7.82110623541E-11
C_{14331}	-6.06716523792E-15	C_{15331}	3.78822714092E-17	C_{20331}	3.90279214538E-10	C_{21331}	-1.80330329675E-11	C_{22331}	9.74540331856E-13
C_{14340}	1.44600644995E-14	C_{15340}	1.37512847863E-16	C_{20340}	-2.97653253152E-09	C_{21340}	2.02133883047E-10	C_{22340}	-1.20183353897E-12
C_{14341}	1.89722220386E-16	C_{15341}	-2.58558186797E-18	C_{20341}	1.88488548078E-11	C_{21341}	-1.07360609578E-12	C_{22341}	1.92850280817E-15
C_{14400}	1.24005343900E-13	C_{15400}	-1.39674099770E-15	C_{20400}	2.93209092679E-07	C_{21400}	5.55310455859E-09	C_{22400}	-1.34745264194E-10
C_{14401}	-3.66638785152E-15	C_{15401}	1.12238646210E-17	C_{20401}	-1.50643707928E-09	C_{21401}	-3.45263173952E-11	C_{22401}	6.33498778887E-13
C_{14410}	-2.63955190530E-13	C_{15410}	-1.44190689316E-15	C_{20410}	8.89445710638E-08	C_{21410}	2.13202581093E-09	C_{22410}	-4.94640259928E-11
C_{14411}	2.93696577234E-18	C_{15411}	2.13155663034E-18	C_{20411}	-6.02518701644E-10	C_{21411}	1.63865997020E-12	C_{22411}	2.60175571885E-13
C_{14420}	-1.0790668826E-13	C_{15420}	1.02426312905E-15	C_{20420}	-2.40587114122E-08	C_{21420}	-6.07919782521E-10	C_{22420}	1.41394886955E-12
C_{14421}	-6.89193803352E-17	C_{15421}	-6.85180102096E-19	C_{20421}	1.45275263679E-10	C_{21421}	2.35628165663E-13	C_{22421}	5.01014683858E-14
C_{14430}	2.91641467333E-14	C_{15430}	-1.46785905021E-16	C_{20430}	4.29764067199E-10	C_{21430}	8.43525747196E-11	C_{22430}	-1.18729076657E-12
C_{14431}	-1.94400951981E-17	C_{15431}	-6.78683781972E-21	C_{20431}	-3.78846454375E-12	C_{21431}	-1.40732410458E-13	C_{22431}	-2.62525947095E-15
C_{14440}	4.35254292999E-16	C_{15440}	-2.88756638736E-18	C_{20440}	4.11089665756E-11	C_{21440}	-2.48301409268E-13	C_{22440}	-9.42609754149E-14
C_{14441}	-3.54902435981E-18	C_{15441}	3.42129973052E-20	C_{20441}	-4.44801349073E-13	C_{21441}	2.11251552972E-14	C_{22441}	-1.15599761557E-16
C_{14500}	3.47705528675E-15	C_{15500}	-3.43031698478E-18	C_{20500}	-5.40256093851E-09	C_{21500}	1.80327902089E-10	C_{22500}	-3.28119741606E-12
C_{14501}	2.17764215418E-17	C_{15501}	-8.13887931220E-20	C_{20501}	3.01434492470E-11	C_{21501}	-1.07955002565E-12	C_{22501}	2.22932681650E-14
C_{14510}	3.92276205240E-15	C_{15510}	-6.57788869614E-18	C_{20510}	-3.62186167691E-09	C_{21510}	4.56980523954E-11	C_{22510}	1.76483026034E-13
C_{14511}	-4.24924794977E-18	C_{15511}	2.13149802028E-20	C_{20511}	2.47755243838E-11	C_{21511}	-6.61379732695E-13	C_{22511}	8.77683158114E-15
C_{14520}	1.11922893312E-16	C_{15520}	-4.39673327945E-18	C_{20520}	5.15384794172E-10	C_{21520}	5.94375945197E-12	C_{22520}	-2.55110086280E-13
C_{14521}	3.18160011241E-18	C_{15521}	-1.13744565017E-22	C_{20521}	-3.59621727712E-12	C_{21521}	3.04468510114E-14	C_{22521}	3.50263074840E-17
C_{14530}	-8.27100947817E-17	C_{15530}	5.91055353271E-19	C_{20530}	7.04944978752E-12	C_{21530}	-1.57577369701E-12	C_{22530}	9.71375627034E-15
C_{14531}	4.55802992810E-19	C_{15531}	-1.53003078967E-21	C_{20531}	-3.89845330698E-14	C_{21531}	9.05571223434E-15	C_{22531}	-1.14698534350E-16
C_{14540}	-1.71660994830E-17	C_{15540}	7.09189816569E-20	C_{20540}	1.35801601475E-12	C_{21540}	-5.34570168368E-14	C_{22540}	2.49268872416E-15
C_{14541}	1.42655873127E-20	C_{15541}	-2.00391523400E-22	C_{20541}	-2.84758790181E-15	C_{21541}	-2.73570767229E-16	C_{22541}	7.81683359111E-18

Table A3-4 Coefficients C_{ijklm} of equation (9) for Q_M

C ₂₃₀₀₀	-4.05289720017E-05	C ₂₄₀₀₀	5.35838014203E-07	C ₂₅₀₀₀	-2.55592886686E-09	C ₃₀₀₀₀	-6.64626931796E-03	C ₃₁₀₀₀	2.93976916194E-04
C ₂₃₀₀₁	2.42094682114E-07	C ₂₄₀₀₁	-3.23681401369E-09	C ₂₅₀₀₁	1.56829150492E-11	C ₃₀₀₀₁	3.91475952050E-05	C ₃₁₀₀₁	-1.75183055515E-06
C ₂₃₀₁₀	9.63967348250E-06	C ₂₄₀₁₀	-1.14586973519E-07	C ₂₅₀₁₀	6.24736013885E-10	C ₃₀₀₁₀	5.58764261693E-03	C ₃₁₀₁₀	-2.68239219214E-04
C ₂₃₀₁₁	-4.76798213003E-08	C ₂₄₀₁₁	5.60051509942E-10	C ₂₅₀₁₁	-3.16255179442E-12	C ₃₀₀₁₁	-3.20709671732E-05	C ₃₁₀₁₁	1.54377643091E-06
C ₂₃₀₂₀	4.82436821032E-09	C ₂₄₀₂₀	6.37295053771E-09	C ₂₅₀₂₀	-1.07403599187E-10	C ₃₀₀₂₀	-7.37390407882E-04	C ₃₁₀₂₀	3.00606705849E-05
C ₂₃₀₂₁	-6.05157121141E-10	C ₂₄₀₂₁	-2.13491413794E-11	C ₂₅₀₂₁	4.90051987390E-13	C ₃₀₀₂₁	4.18528825149E-06	C ₃₁₀₂₁	-1.83543182006E-07
C ₂₃₀₃₀	-7.21171280115E-08	C ₂₄₀₃₀	-5.84067318521E-11	C ₂₅₀₃₀	1.05405856876E-11	C ₃₀₀₃₀	4.42452206088E-05	C ₃₁₀₃₀	-2.07881379566E-06
C ₂₃₀₃₁	3.86403150549E-10	C ₂₄₀₃₁	-3.50766387153E-13	C ₂₅₀₃₁	-4.96501671549E-14	C ₃₀₀₃₁	-2.50772144626E-07	C ₃₁₀₃₁	1.35386549335E-08
C ₂₃₀₄₀	9.34906524344E-10	C ₂₄₀₄₀	4.79586130162E-11	C ₂₅₀₄₀	-7.53500269547E-13	C ₃₀₀₄₀	-7.87563591061E-07	C ₃₁₀₄₀	5.14009889974E-08
C ₂₃₀₄₁	-3.25188812586E-12	C ₂₄₀₄₁	-2.72154749452E-13	C ₂₅₀₄₁	4.08248315299E-15	C ₃₀₀₄₁	4.43889824030E-09	C ₃₁₀₄₁	-3.47666373298E-10
C ₂₃₁₀₀	-9.59121705264E-08	C ₂₄₁₀₀	-4.53924054637E-09	C ₂₅₁₀₀	4.02085701864E-11	C ₃₀₁₀₀	6.41250339240E-04	C ₃₁₁₀₀	7.39842527181E-06
C ₂₃₁₀₁	1.88989074002E-10	C ₂₄₁₀₁	3.41516706956E-11	C ₂₅₁₀₁	-2.88241284743E-13	C ₃₀₁₀₁	-3.75591750415E-06	C ₃₁₁₀₁	-5.28024505749E-08
C ₂₃₁₁₀	-5.11361086290E-08	C ₂₄₁₁₀	6.48715093520E-10	C ₂₅₁₁₀	-1.10510605210E-11	C ₃₀₁₁₀	-3.21483624967E-04	C ₃₁₁₁₀	5.41416662506E-06
C ₂₃₁₁₁	-6.65186595844E-10	C ₂₄₁₁₁	1.29731182798E-11	C ₂₅₁₁₁	-2.46642573615E-14	C ₃₀₁₁₁	2.19019063180E-06	C ₃₁₁₁₁	-3.65296032370E-08
C ₂₃₁₂₀	-3.09415050459E-08	C ₂₄₁₂₀	2.62955745603E-10	C ₂₅₁₂₀	3.34220785796E-12	C ₃₀₁₂₀	2.59429291041E-05	C ₃₁₁₂₀	-4.50855702377E-07
C ₂₃₁₂₁	2.68753260914E-10	C ₂₄₁₂₁	-3.80306905333E-12	C ₂₅₁₂₁	-2.90260167043E-15	C ₃₀₁₂₁	-1.89370537598E-07	C ₃₁₁₂₁	1.88637455960E-09
C ₂₃₁₃₀	2.69834166796E-09	C ₂₄₁₃₀	-3.54318549459E-13	C ₂₅₁₃₀	-6.71321375733E-13	C ₃₀₁₃₀	-8.37136946587E-07	C ₃₁₁₃₀	1.50752352073E-07
C ₂₃₁₃₁	-1.49885745189E-11	C ₂₄₁₃₁	7.22904161589E-14	C ₂₅₁₃₁	2.97183242069E-15	C ₃₀₁₃₁	5.76288569900E-09	C ₃₁₁₃₁	-7.51483812544E-10
C ₂₃₁₄₀	-2.49553409063E-11	C ₂₄₁₄₀	-3.61210010362E-12	C ₂₅₁₄₀	6.17269079311E-14	C ₃₀₁₄₀	-8.23659485926E-09	C ₃₁₁₄₀	-4.00323027839E-09
C ₂₃₁₄₁	1.54011296529E-14	C ₂₄₁₄₁	2.08395592855E-14	C ₂₅₁₄₁	-3.40709641446E-16	C ₃₀₁₄₁	6.07255946963E-11	C ₃₁₁₄₁	1.95671091935E-11
C ₂₃₂₀₀	-2.55106270920E-10	C ₂₄₂₀₀	-1.39049555081E-10	C ₂₅₂₀₀	9.73875082386E-13	C ₃₀₂₀₀	-2.11103775994E-05	C ₃₁₂₀₀	-1.24398343012E-06
C ₂₃₂₀₁	2.25572326972E-11	C ₂₄₂₀₁	4.58527116828E-13	C ₂₅₂₀₁	-3.56704039838E-15	C ₃₀₂₀₁	1.31230094750E-07	C ₃₁₂₀₁	7.22836576513E-09
C ₂₃₂₁₀	5.54033164262E-09	C ₂₄₂₁₀	-1.49889309193E-11	C ₂₅₂₁₀	8.09640158237E-14	C ₃₀₂₁₀	1.11965350268E-05	C ₃₁₂₁₀	-1.40665336687E-07
C ₂₃₂₁₁	-1.70146129751E-11	C ₂₄₂₁₁	-3.78523930843E-13	C ₂₅₂₁₁	2.54170038344E-15	C ₃₀₂₁₁	-8.48096435517E-08	C ₃₁₂₁₁	1.96903611803E-09
C ₂₃₂₂₀	-5.49938934598E-10	C ₂₄₂₂₀	-1.56941223406E-12	C ₂₅₂₂₀	-6.86756993041E-14	C ₃₀₂₂₀	-5.24089213006E-07	C ₃₁₂₂₀	5.85744736365E-08
C ₂₃₂₂₁	1.85908694040E-12	C ₂₄₂₂₁	6.45821977603E-14	C ₂₅₂₂₁	-4.82880310365E-17	C ₃₀₂₂₁	4.32411781652E-09	C ₃₁₂₂₁	-3.43477627598E-10
C ₂₃₂₃₀	1.72995275858E-11	C ₂₄₂₃₀	-3.05186675886E-13	C ₂₅₂₃₀	1.74242207717E-14	C ₃₀₂₃₀	-7.58300895233E-08	C ₃₁₂₃₀	-6.85299131422E-09
C ₂₃₂₃₁	-1.60579608359E-13	C ₂₄₂₃₁	2.54808093070E-15	C ₂₅₂₃₁	-9.55439795273E-17	C ₃₀₂₃₁	5.79308934224E-10	C ₃₁₂₃₁	2.51536177687E-11
C ₂₃₂₄₀	2.08530796971E-12	C ₂₄₂₄₀	4.31289579361E-14	C ₂₅₂₄₀	-1.58336262099E-15	C ₃₀₂₄₀	1.88077439131E-09	C ₃₁₂₄₀	1.13718558132E-10
C ₂₃₂₄₁	-7.13277033077E-15	C ₂₄₂₄₁	-3.36919428994E-16	C ₂₅₂₄₁	9.39156635287E-18	C ₃₀₂₄₁	-1.80728300923E-11	C ₃₁₂₄₁	-1.22183194992E-13
C ₂₃₃₀₀	2.13463986822E-10	C ₂₄₃₀₀	1.96991187441E-12	C ₂₅₃₀₀	-2.72727187974E-14	C ₃₀₃₀₀	5.90822026294E-07	C ₃₁₃₀₀	2.30621216996E-08
C ₂₃₃₀₁	-1.68704645055E-12	C ₂₄₃₀₁	-4.16854679509E-15	C ₂₅₃₀₁	1.17395745368E-16	C ₃₀₃₀₁	-4.11969629560E-09	C ₃₁₃₀₁	-8.84626323463E-11
C ₂₃₃₁₀	7.13392892574E-11	C ₂₄₃₁₀	-3.98279066412E-13	C ₂₅₃₁₀	-1.23575697975E-15	C ₃₀₃₁₀	-1.22779416754E-07	C ₃₁₃₁₀	-4.53465231243E-09
C ₂₃₃₁₁	4.24108196051E-14	C ₂₄₃₁₁	2.69049883968E-15	C ₂₅₃₁₁	-1.87192443811E-17	C ₃₀₃₁₁	6.84568713488E-10	C ₃₁₃₁₁	1.48722973631E-11
C ₂₃₃₂₀	1.91889502034E-13	C ₂₄₃₂₀	-6.37178472982E-14	C ₂₅₃₂₀	1.51726212877E-15	C ₃₀₃₂₀	-2.73694331771E-08	C ₃₁₃₂₀	7.83592016580E-11
C ₂₃₃₂₁	-1.97205601996E-14	C ₂₄₃₂₁	1.05786823749E-16	C ₂₅₃₂₁	-4.62273221022E-18	C ₃₀₃₂₁	2.67162335761E-10	C ₃₁₃₂₁	-4.70942887681E-12
C ₂₃₃₃₀	-1.59295454590E-12	C ₂₄₃₃₀	1.58234628622E-14	C ₂₅₃₃₀	-2.23230407313E-16	C ₃₀₃₃₀	3.36496883323E-09	C ₃₁₃₃₀	5.44765213867E-11
C ₂₃₃₃₁	4.43175006390E-15	C ₂₄₃₃₁	-1.01049806485E-16	C ₂₅₃₃₁	1.43325406849E-18	C ₃₀₃₃₁	-3.83186640565E-11	C ₃₁₃₃₁	7.20532705759E-13
C ₂₃₃₄₀	2.95778067975E-14	C ₂₄₃₄₀	5.93952639464E-17	C ₂₅₃₄₀	1.65454085656E-17	C ₃₀₃₄₀	4.50886459281E-11	C ₃₁₃₄₀	-4.03427254074E-12
C ₂₃₃₄₁	-6.49738162763E-17	C ₂₄₃₄₁	-1.39360643901E-18	C ₂₅₃₄₁	-8.99776220210E-20	C ₃₀₃₄₁	3.31578741606E-13	C ₃₁₃₄₁	-8.58991398806E-15
C ₂₃₄₀₀	2.72871247088E-13	C ₂₄₄₀₀	-2.68701277866E-14	C ₂₅₄₀₀	2.89614233939E-16	C ₃₀₄₀₀	-1.06616471316E-08	C ₃₁₄₀₀	-3.30459341159E-10
C ₂₃₄₀₁	4.55295361833E-15	C ₂₄₄₀₁	6.58702199831E-17	C ₂₅₄₀₁	-1.21901761177E-18	C ₃₀₄₀₁	8.38011913501E-11	C ₃₁₄₀₁	3.78780570281E-14
C ₂₃₄₁₀	-1.95358687734E-13	C ₂₄₄₁₀	3.83271107372E-15	C ₂₅₄₁₀	3.24988855581E-17	C ₃₀₄₁₀	-5.98908246189E-10	C ₃₁₄₁₀	1.60969204173E-10
C ₂₃₄₁₁	-4.62687756013E-15	C ₂₄₄₁₁	2.98621848301E-17	C ₂₅₄₁₁	-2.12055968849E-19	C ₃₀₄₁₁	1.80514721620E-11	C ₃₁₄₁₁	-1.56502673737E-12
C ₂₃₄₂₀	-4.17349619042E-14	C ₂₄₄₂₀	2.15928584691E-15	C ₂₅₄₂₀	-2.50112563891E-17	C ₃₀₄₂₀	1.00522947317E-09	C ₃₁₄₂₀	-2.46182937822E-11
C ₂₃₄₂₁	9.85615336088E-17	C ₂₄₄₂₁	-1.15270158514E-17	C ₂₅₄₂₁	1.14976012602E-19	C ₃₀₄₂₁	-1.02490166858E-11	C ₃₁₄₂₁	2.79556429868E-13
C ₂₃₄₃₀	5.93941791969E-14	C ₂₄₄₃₀	-6.82488600609E-16	C ₂₅₄₃₀	3.58679148048E-18	C ₃₀₄₃₀	1.61490125112E-11	C ₃₁₄₃₀	-1.25668450618E-12
C ₂₃₄₃₁	-2.27561167949E-16	C ₂₄₄₃₁	3.06539435956E-18	C ₂₅₄₃₁	-1.68282236835E-20	C ₃₀₄₃₁	4.37582018826E-13	C ₃₁₄₃₁	-1.53011166974E-14
C ₂₃₄₄₀	3.61149148008E-16	C ₂₄₄₄₀	5.59403503350E-18	C ₂₅₄₄₀	-1.87451091414E-19	C ₃₀₄₄₀	-4.94310795710E-13	C ₃₁₄₄₀	5.78075636911E-14
C ₂₃₄₄₁	3.33168823312E-18	C ₂₄₄₄₁	1.50977947852E-20	C ₂₅₄₄₁	5.07159910136E-22	C ₃₀₄₄₁	-1.05606432636E-14	C ₃₁₄₄₁	9.63351046588E-17
C ₂₃₅₀₀	3.66076817110E-14	C ₂₄₅₀₀	-9.93891125694E-17	C ₂₅₅₀₀	-6.67390161898E-19	C ₃₀₅₀₀	1.08902956016E-10	C ₃₁₅₀₀	3.34013336529E-13
C ₂₃₅₀₁	-2.90276900870E-16	C ₂₄₅₀₁	1.40326922233E-18	C ₂₅₅₀₁	5.17600475389E-22	C ₃₀₅₀₁	-9.07258436507E-13	C ₃₁₅₀₁	2.26192212690E-14
C ₂₃₅₁₀	1.58533121446E-15	C ₂₄₅₁₀	-5.57256062270E-17	C ₂₅₅₁₀	-1.64233763697E-20	C ₃₀₅₁₀	-2.08206638922E-11	C ₃₁₅₁₀	8.86578652763E-13
C ₂₃₅₁₁	-1.04096632363E-16	C ₂₄₅₁₁	7.67804242814E-19	C ₂₅₅₁₁	-1.20944892140E-21	C ₃₀₅₁₁	7.32770394614E-15	C ₃₁₅₁₁	1.05214512322E-15
C ₂₃₅₂₀	1.75975962140E-15	C ₂₄₅₂₀	-6.26024132392E-18	C ₂₅₅₂₀	8.46177860042E-20	C ₃₀₅₂₀	-1.28896117059E-11	C ₃₁₅₂₀	2.72658097278E-13
C ₂₃₅₂₁	2.17591661190E-18	C ₂₄₅₂₁	-3.07611558299E-20	C ₂₅₅₂₁	-1.54107145450E-22	C ₃₀₅₂₁	1.09522305233E-13	C ₃₁₅₂₁	-2.64108175870E-15
C ₂₃₅₃₀	2.15005841467E-16	C ₂₄₅₃₀	-2.88418269737E-18	C ₂₅₅₃₀	4.03801239644E-21	C ₃₀₅₃₀	4.70325217997E-13	C ₃₁₅₃₀	9.88166182870E-15
C ₂₃₅₃₁	1.47141172707E-19	C ₂₄₅₃₁	9.83941642097E-21	C ₂₅₅₃₁	-4.10528632674E-23	C ₃₀₅₃₁	-6.89495694122E-15	C ₃₁₅₃₁	1.06818312911E-16
C ₂₃₅₄₀	-4.01162671894E-17	C ₂₄₅₄₀	2.03114279811E-19	C ₂₅₅₄₀	6.84614466309E-22	C ₃₀₅₄₀	-1.65124119595E-13	C ₃₁₅₄₀	2.80887162002E-15
C ₂₃₅₄₁	-9.25011716193E-20	C ₂₄₅₄₁	3.75507914359E-22	C ₂₅₅₄₁	-3.36051685259E-24	C ₃₀₅₄₁	1.03353148286E-15	C ₃₁₅₄₁	-1.48513006123E-17

Table A3-5 Coefficients C_{ijklm} of equation ⑨ for Q_M

C_{32000}	-2.64989000950E-05	C_{33000}	8.49298711720E-07	C_{34000}	-1.10645543047E-08	C_{35000}	5.52162910323E-11	C_{40000}	1.41954400052E-04
C_{32001}	1.59321792614E-07	C_{33001}	-5.21763424604E-09	C_{34001}	7.03122776046E-11	C_{35001}	-3.64052686666E-13	C_{40001}	-8.35402258478E-07
C_{32010}	7.41040358619E-06	C_{33010}	-9.79071294489E-08	C_{34010}	-3.23515741502E-10	C_{35010}	1.66760262261E-11	C_{40010}	-8.33993010568E-05
C_{32011}	-4.90674788687E-08	C_{33011}	1.02216816122E-09	C_{34011}	-6.72459375361E-12	C_{35011}	-4.08564891173E-14	C_{40011}	4.84747666783E-07
C_{32020}	-6.95230166302E-07	C_{33020}	1.24780609461E-08	C_{34020}	1.50769379007E-10	C_{35020}	-3.73984638268E-12	C_{40020}	8.31062554832E-06
C_{32021}	5.91467355238E-09	C_{33021}	-1.64686820323E-10	C_{34021}	4.45792867024E-13	C_{35021}	1.48734371373E-14	C_{40021}	-4.7727517132E-08
C_{32030}	4.33431395675E-09	C_{33030}	1.25778989667E-09	C_{34030}	-4.96562173201E-11	C_{35030}	3.64623140494E-13	C_{40030}	-3.72231573959E-07
C_{32031}	-1.91380866173E-10	C_{33031}	-1.34189930348E-12	C_{34031}	2.31958163659E-13	C_{35031}	-1.97949972618E-15	C_{40031}	2.12031480225E-09
C_{32040}	-4.39021455880E-10	C_{33040}	-1.03269253971E-11	C_{34040}	5.25311496478E-13	C_{35040}	3.62652566187E-15	C_{40040}	6.97543485879E-09
C_{32041}	6.99112295121E-12	C_{33041}	-6.43525788622E-14	C_{34041}	-2.53271320343E-15	C_{35041}	-1.69924610905E-17	C_{40041}	-3.96202562827E-11
C_{32100}	3.98000671359E-07	C_{33100}	-2.22342938608E-08	C_{34100}	2.95326462334E-10	C_{35100}	-1.69355269436E-12	C_{40100}	-2.33435906786E-05
C_{32101}	-1.66102516415E-09	C_{33101}	1.18853897739E-10	C_{34101}	-1.75185486405E-12	C_{35101}	1.10770046242E-14	C_{40101}	1.36394340176E-07
C_{32110}	-1.42215445733E-07	C_{33110}	2.38959820200E-09	C_{34110}	-2.42864126972E-11	C_{35110}	-3.36135765426E-13	C_{40110}	2.48107146444E-06
C_{32111}	2.47012196678E-10	C_{33111}	-9.85382096683E-12	C_{34111}	2.00514981878E-13	C_{35111}	1.13595486180E-15	C_{40111}	-2.62402773532E-08
C_{32120}	2.33840568343E-09	C_{33120}	-1.04987279863E-09	C_{34120}	1.81379968916E-11	C_{35120}	-4.27125422254E-14	C_{40120}	5.64732023409E-07
C_{32121}	1.34949388590E-10	C_{33121}	4.69320714420E-12	C_{34121}	-8.41726686958E-14	C_{35121}	4.73134960705E-17	C_{40121}	-1.65282418044E-09
C_{32130}	-1.11843259335E-09	C_{33130}	1.36158328162E-11	C_{34130}	3.17824134635E-13	C_{35130}	8.08922195905E-15	C_{40130}	-6.29982013782E-08
C_{32131}	-2.01456483301E-12	C_{33131}	-5.41632427221E-14	C_{34131}	-4.02819870944E-15	C_{35131}	-1.61708917603E-17	C_{40131}	3.00197488483E-10
C_{32140}	7.45939464785E-11	C_{33140}	-3.43235988100E-12	C_{34140}	8.49360159615E-14	C_{35140}	-1.75247896203E-15	C_{40140}	1.40980160086E-09
C_{32141}	-3.07177444955E-13	C_{33141}	2.13334681094E-14	C_{34141}	-4.31678388345E-16	C_{35141}	9.14025835263E-18	C_{40141}	-7.49176432480E-12
C_{32200}	2.04657481256E-08	C_{33200}	-4.28271254610E-11	C_{34200}	1.87624279667E-12	C_{35200}	-6.40468141406E-15	C_{40200}	9.10936125659E-07
C_{32201}	-1.52168849083E-10	C_{33201}	1.28799615724E-12	C_{34201}	-2.11749085866E-14	C_{35201}	6.02471186331E-17	C_{40201}	-5.38676564165E-09
C_{32210}	8.44935372214E-09	C_{33210}	2.63992151848E-11	C_{34210}	-1.55501400551E-12	C_{35210}	1.36369781813E-14	C_{40210}	-2.12800050824E-07
C_{32211}	-5.61961103724E-11	C_{33211}	1.88441912535E-13	C_{34211}	5.52957722903E-15	C_{35211}	-7.66695800266E-17	C_{40211}	2.09714258370E-09
C_{32220}	-8.08169145058E-10	C_{33220}	-2.44875619241E-12	C_{34220}	-7.09717130123E-14	C_{35220}	2.24706859308E-15	C_{40220}	8.72348144835E-09
C_{32221}	-5.73065898399E-13	C_{33221}	3.15333658091E-14	C_{34221}	-2.57067528644E-16	C_{35221}	-1.14427654655E-18	C_{40221}	-1.52822322609E-10
C_{32230}	2.80917238866E-11	C_{33230}	3.05687204555E-12	C_{34230}	-5.28972770639E-14	C_{35230}	-4.91181848644E-16	C_{40230}	1.27151622284E-09
C_{32231}	3.18554130334E-13	C_{33231}	-1.17334249850E-14	C_{34231}	2.51359271091E-16	C_{35231}	2.22617174057E-18	C_{40231}	-5.34431046424E-12
C_{32240}	2.69326707079E-12	C_{33240}	-8.05646726441E-14	C_{34240}	-5.59661543035E-16	C_{35240}	6.81307352700E-17	C_{40240}	-1.29231500628E-11
C_{32241}	-6.27860178773E-14	C_{33241}	2.21707360760E-16	C_{34241}	5.39500215731E-18	C_{35241}	-3.79565406076E-19	C_{40241}	1.16534357513E-13
C_{32300}	-1.30050925580E-10	C_{33300}	-7.66645888667E-12	C_{34300}	4.300514907525E-14	C_{35300}	1.16597338176E-16	C_{40300}	-2.01768817393E-08
C_{32301}	2.59549399345E-13	C_{33301}	3.40293297856E-14	C_{34301}	7.35060608658E-17	C_{35301}	-1.68279412238E-18	C_{40301}	1.24446520977E-10
C_{32310}	-1.81811346555E-10	C_{33310}	4.51404764291E-13	C_{34310}	4.23271944236E-14	C_{35310}	-3.14065078621E-16	C_{40310}	1.46008220254E-08
C_{32311}	1.17569973293E-12	C_{33311}	-1.56460105582E-14	C_{34311}	-1.06470957639E-16	C_{35311}	1.81393967840E-18	C_{40311}	-9.13238188853E-11
C_{32320}	3.25194925203E-12	C_{33320}	4.20294727227E-13	C_{34320}	-6.61701504083E-15	C_{35320}	-1.51954354514E-17	C_{40320}	-1.86490854012E-09
C_{32321}	1.24917452994E-13	C_{33321}	-1.94041974193E-15	C_{34321}	4.24635293154E-17	C_{35321}	-1.76414126985E-19	C_{40321}	9.84854129701E-12
C_{32330}	-1.37012546235E-12	C_{33330}	-1.77984842406E-14	C_{34330}	1.24173922550E-15	C_{35330}	6.16202065361E-18	C_{40330}	6.94145172002E-11
C_{32331}	-1.32963175271E-14	C_{33331}	-3.89704564192E-17	C_{34331}	-4.78573137077E-18	C_{35331}	-2.79168886851E-20	C_{40331}	-1.40936336348E-13
C_{32340}	-1.24484729275E-14	C_{33340}	1.07737434396E-15	C_{34340}	-2.72064429833E-17	C_{35340}	-9.95110506188E-19	C_{40340}	-3.27960932940E-12
C_{32341}	8.19400213347E-16	C_{33341}	-1.17692970406E-17	C_{34341}	2.65879704681E-19	C_{35341}	4.63830561225E-21	C_{40341}	9.76861966205E-15
C_{32400}	1.00254133090E-11	C_{33400}	-6.36040969591E-14	C_{34400}	6.42054836389E-16	C_{35400}	-3.71891629038E-18	C_{40400}	2.90622206747E-10
C_{32401}	-7.69624681048E-15	C_{33401}	-1.96346136449E-16	C_{34401}	-1.35961092256E-18	C_{35401}	2.06856012743E-20	C_{40401}	-1.92353238302E-12
C_{32410}	9.05403296380E-13	C_{33410}	-3.87026238373E-14	C_{34410}	1.46126392763E-16	C_{35410}	3.54478881688E-19	C_{40410}	-2.69200562325E-10
C_{32411}	1.17596192303E-14	C_{33411}	1.16210602076E-16	C_{34411}	-2.64923891481E-19	C_{35411}	-1.14497207563E-20	C_{40411}	1.28676034762E-12
C_{32420}	2.40029163223E-13	C_{33420}	-1.45974111303E-15	C_{34420}	1.27326664068E-17	C_{35420}	3.15383189025E-19	C_{40420}	1.41591268355E-11
C_{32421}	-2.71579410227E-15	C_{33421}	-1.87758222028E-17	C_{34421}	-7.71316666715E-20	C_{35421}	2.28694786318E-21	C_{40421}	8.03010302934E-16
C_{32430}	8.52402195290E-15	C_{33430}	-2.60538093940E-16	C_{34430}	-9.57575557557E-18	C_{35430}	-2.63140374775E-20	C_{40430}	-6.97430704393E-13
C_{32431}	2.58788533644E-16	C_{33431}	2.33752804998E-18	C_{34431}	6.94925975343E-20	C_{35431}	-2.87512790296E-22	C_{40431}	-4.99982661905E-15
C_{32440}	1.88129512339E-15	C_{33440}	-3.37273459744E-17	C_{34440}	3.99813880494E-19	C_{35440}	8.68432063375E-21	C_{40440}	1.32314722964E-15
C_{32441}	-1.95867007104E-17	C_{33441}	5.22993887209E-19	C_{34441}	-1.03069801729E-20	C_{35441}	5.80312389953E-24	C_{40441}	2.45618801420E-16
C_{32500}	-1.04068174540E-13	C_{33500}	2.18843403147E-15	C_{34500}	-2.16921726954E-17	C_{35500}	8.13087983311E-20	C_{40500}	1.81823330335E-12
C_{32501}	-1.60520690010E-16	C_{33501}	-1.59705042920E-18	C_{34501}	4.91223741872E-20	C_{35501}	-2.69630809718E-22	C_{40501}	-7.85133191178E-15
C_{32510}	-3.32361758209E-14	C_{33510}	5.59172967264E-16	C_{34510}	-5.67647502691E-18	C_{35510}	2.80229708953E-20	C_{40510}	2.20066373142E-12
C_{32511}	-1.64395828736E-17	C_{33511}	3.03483283148E-19	C_{34511}	-4.90775981123E-21	C_{35511}	3.63028586367E-23	C_{40511}	-1.31268612556E-14
C_{32520}	-3.91903216409E-15	C_{33520}	1.36832012854E-17	C_{34520}	7.39670013709E-19	C_{35520}	-8.26909397369E-21	C_{40520}	1.31458021268E-13
C_{32521}	3.39618295615E-17	C_{33521}	-1.94812626018E-19	C_{34521}	1.23380180129E-21	C_{35521}	-6.47977591698E-24	C_{40521}	-8.67565109265E-16
C_{32530}	-5.71311054332E-17	C_{33530}	1.85840095507E-18	C_{34530}	-5.51729235197E-20	C_{35530}	9.03096679824E-22	C_{40530}	-6.32530026319E-15
C_{32531}	-2.16153786200E-18	C_{33531}	3.17077605567E-20	C_{34531}	-7.26290323246E-22	C_{35531}	2.97895672251E-24	C_{40531}	7.16373633849E-17
C_{32540}	-1.72454572701E-17	C_{33540}	-2.91802128703E-19	C_{34540}	1.00616124524E-20	C_{35540}	-1.17496445717E-22	C_{40540}	2.91907854107E-15
C_{32541}	1.42105830807E-20	C_{33541}	-4.93538581528E-22	C_{34541}	3.06102493431E-23	C_{35541}	3.54928404122E-26	C_{40541}	-1.80626161962E-17

Table A3-6 Coefficients C_{ijklm} of equation (9) for Q_M

C ₄₁₀₀₀	-2.80895568358E-06	C ₄₂₀₀₀	1.55140871268E-07	C ₄₃₀₀₀	-5.28743264327E-09	C ₄₄₀₀₀	8.60686703205E-11	C ₄₅₀₀₀	-6.19794580758E-13
C ₄₁₀₀₁	1.68628160148E-08	C ₄₂₀₀₁	-9.73964681501E-10	C ₄₃₀₀₁	3.50170728240E-11	C ₄₄₀₀₁	-5.94933277720E-13	C ₄₅₀₀₁	4.27253982128E-15
C ₄₁₀₁₀	3.56138743099E-06	C ₄₂₀₁₀	-6.64479505140E-08	C ₄₃₀₁₀	-3.44613912937E-10	C ₄₄₀₁₀	4.25977763091E-11	C ₄₅₀₁₀	-5.45076513352E-13
C ₄₁₀₁₁	-2.18284473118E-08	C ₄₂₀₁₁	6.25057393018E-10	C ₄₃₀₁₁	-1.06709102214E-11	C ₄₄₀₁₁	-5.01074738187E-14	C ₄₅₀₁₁	2.14612157147E-15
C ₄₁₀₂₀	-5.38652929940E-07	C ₄₂₀₂₀	1.85922801545E-08	C ₄₃₀₂₀	-1.56890608354E-10	C ₄₄₀₂₀	-1.01497079493E-11	C ₄₅₀₂₀	1.48340364727E-13
C ₄₁₀₂₁	3.44462688445E-09	C ₄₂₀₂₁	-1.61313856296E-10	C ₄₃₀₂₁	3.40909147914E-12	C ₄₄₀₂₁	2.57368310213E-14	C ₄₅₀₂₁	-7.19005474466E-16
C ₄₁₀₃₀	4.01642098659E-08	C ₄₂₀₃₀	-9.86021914175E-10	C ₄₃₀₃₀	-2.68070791769E-11	C ₄₄₀₃₀	1.68583677848E-12	C ₄₅₀₃₀	-1.50624110199E-14
C ₄₁₀₃₁	-2.60899631495E-10	C ₄₂₀₃₁	9.52530938363E-12	C ₄₃₀₃₁	-7.31288996237E-16	C ₄₄₀₃₁	-8.12179012209E-15	C ₄₅₀₃₁	8.27645822584E-17
C ₄₁₀₄₀	-1.25159022176E-09	C ₄₂₀₄₀	3.15909146534E-11	C ₄₃₀₄₀	1.42459718703E-12	C ₄₄₀₄₀	-7.60883455762E-14	C ₄₅₀₄₀	5.78726929448E-16
C ₄₁₀₄₁	8.01510897300E-12	C ₄₂₀₄₁	-2.70228645689E-13	C ₄₃₀₄₁	-5.21739705741E-15	C ₄₄₀₄₁	4.21807462436E-16	C ₄₅₀₄₁	-3.40303919306E-18
C ₄₁₁₀₀	5.05793166087E-07	C ₄₂₁₀₀	-9.53782126458E-09	C ₄₃₁₀₀	2.74473163298E-11	C ₄₄₁₀₀	1.05055336801E-12	C ₄₅₁₀₀	5.42422721046E-15
C ₄₁₁₀₁	-2.71366888421E-09	C ₄₂₁₀₁	3.83933856987E-11	C ₄₃₁₀₁	2.13374888521E-13	C ₄₄₁₀₁	-8.26429965533E-15	C ₄₅₁₀₁	-3.65920064224E-17
C ₄₁₁₁₀	1.58965171608E-07	C ₄₂₁₁₀	-4.42650566624E-09	C ₄₃₁₁₀	9.44744103341E-11	C ₄₄₁₁₀	-1.49296685161E-12	C ₄₅₁₁₀	1.75768806502E-14
C ₄₁₁₁₁	-3.31805679184E-10	C ₄₂₁₁₁	1.68846324493E-11	C ₄₃₁₁₁	-6.83793814840E-14	C ₄₄₁₁₁	1.92869991093E-15	C ₄₅₁₁₁	-7.92217851211E-17
C ₄₁₁₂₀	-4.57317738192E-08	C ₄₂₁₂₀	4.36086703575E-10	C ₄₃₁₂₀	2.22205009218E-11	C ₄₄₁₂₀	-2.44540524539E-13	C ₄₅₁₂₀	-1.42958181725E-15
C ₄₁₁₂₁	2.00961451041E-10	C ₄₂₁₂₁	-2.12229748612E-12	C ₄₃₁₂₁	-2.06458249382E-13	C ₄₄₁₂₁	2.15032583611E-15	C ₄₅₁₂₁	9.88545628623E-18
C ₄₁₁₃₀	1.54497118486E-09	C ₄₂₁₃₀	9.64475476188E-12	C ₄₃₁₃₀	-1.15360562348E-12	C ₄₄₁₃₀	-1.19141137432E-14	C ₄₅₁₃₀	7.95247056600E-17
C ₄₁₁₃₁	-7.37743541809E-12	C ₄₂₁₃₁	-4.18220779856E-14	C ₄₃₁₃₁	-2.16244851979E-14	C ₄₄₁₃₁	5.21692613970E-17	C ₄₅₁₃₁	-9.43116509702E-19
C ₄₁₁₄₀	3.24146992731E-11	C ₄₂₁₄₀	-4.22863380811E-12	C ₄₃₁₄₀	1.07432249679E-13	C ₄₄₁₄₀	1.60321555492E-15	C ₄₅₁₄₀	-1.28449856267E-17
C ₄₁₁₄₁	-1.82920324261E-13	C ₄₂₁₄₁	2.40141695151E-14	C ₄₃₁₄₁	-7.29079026702E-16	C ₄₄₁₄₁	-9.95665325004E-18	C ₄₅₁₄₁	9.72857397490E-20
C ₄₁₂₀₀	-7.51963146865E-09	C ₄₂₂₀₀	1.95993784470E-10	C ₄₃₂₀₀	-6.69028973133E-14	C ₄₄₂₀₀	-9.50887781722E-14	C ₄₅₂₀₀	3.47961024746E-16
C ₄₁₂₀₁	3.43231208334E-11	C ₄₂₂₀₁	-1.73000934059E-14	C ₄₃₂₀₁	-3.33503416310E-14	C ₄₄₂₀₁	9.41194999106E-16	C ₄₅₂₀₁	-3.52857789486E-18
C ₄₁₂₁₀	-7.34690203947E-09	C ₄₂₂₁₀	-3.18713372310E-11	C ₄₃₂₁₀	-3.53112143498E-13	C ₄₄₂₁₀	3.39367192037E-14	C ₄₅₂₁₀	-3.46804602586E-16
C ₄₁₂₁₁	-1.87144130122E-11	C ₄₂₂₁₁	9.86541590376E-13	C ₄₃₂₁₁	-1.29510499061E-14	C ₄₄₂₁₁	-8.42557601509E-17	C ₄₅₂₁₁	2.37358139745E-18
C ₄₁₂₂₀	5.67772184304E-10	C ₄₂₂₂₀	-2.81662360614E-12	C ₄₃₂₂₀	-1.06271766667E-13	C ₄₄₂₂₀	4.40517291728E-15	C ₄₅₂₂₀	-3.48799344043E-17
C ₄₁₂₂₁	4.22548742970E-12	C ₄₂₂₂₁	-2.77841748858E-14	C ₄₃₂₂₁	2.91933665938E-15	C ₄₄₂₂₁	-3.48681583498E-17	C ₄₅₂₂₁	-4.33921200993E-20
C ₄₁₂₃₀	-2.06397608257E-11	C ₄₂₂₃₀	2.51394808460E-12	C ₄₃₂₃₀	-6.06802745070E-14	C ₄₄₂₃₀	6.56133906715E-16	C ₄₅₂₃₀	8.62587480112E-18
C ₄₁₂₃₁	-8.59840085465E-14	C ₄₂₂₃₁	-1.53691516447E-14	C ₄₃₂₃₁	1.10041717863E-16	C ₄₄₂₃₁	-2.28068434741E-18	C ₄₅₂₃₁	-3.09134407458E-20
C ₄₁₂₄₀	-1.61588291676E-12	C ₄₂₂₄₀	1.41256135254E-14	C ₄₃₂₄₀	-3.55519993132E-15	C ₄₄₂₄₀	-2.31905724930E-17	C ₄₅₂₄₀	2.66293197467E-20
C ₄₁₂₄₁	8.82955799565E-15	C ₄₂₂₄₁	7.13692802370E-19	C ₄₃₂₄₁	2.67781171046E-17	C ₄₄₂₄₁	1.17316583016E-19	C ₄₅₂₄₁	-9.15216224442E-22
C ₄₁₃₀₀	-1.38053442527E-10	C ₄₂₃₀₀	1.47456313823E-12	C ₄₃₃₀₀	7.67744944841E-14	C ₄₄₃₀₀	2.66287843692E-16	C ₄₅₃₀₀	-1.51006023753E-18
C ₄₁₃₀₁	5.53609855379E-13	C ₄₂₃₀₁	-2.31162517503E-14	C ₄₃₃₀₁	2.81556244460E-16	C ₄₄₃₀₁	-1.19832158877E-17	C ₄₅₃₀₁	5.81830356261E-20
C ₄₁₃₁₀	1.19342166612E-10	C ₄₂₃₁₀	1.07751391348E-12	C ₄₃₃₁₀	-1.12297514507E-14	C ₄₄₃₁₀	-9.84140392494E-16	C ₄₅₃₁₀	8.97807343203E-18
C ₄₁₃₁₁	6.43414037161E-13	C ₄₂₃₁₁	-1.59324026787E-14	C ₄₃₃₁₁	4.42199911811E-17	C ₄₄₃₁₁	7.70110953632E-18	C ₄₅₃₁₁	-8.08346411294E-20
C ₄₁₃₂₀	2.72201670118E-11	C ₄₂₃₂₀	-1.77135136804E-13	C ₄₃₃₂₀	-8.25144434178E-15	C ₄₄₃₂₀	1.09328074922E-16	C ₄₅₃₂₀	2.17098519369E-19
C ₄₁₃₂₁	-3.38295533815E-13	C ₄₂₃₂₁	2.55631422667E-15	C ₄₃₃₂₁	2.65368498418E-18	C ₄₄₃₂₁	-5.12272386408E-19	C ₄₅₃₂₁	4.57623897090E-21
C ₄₁₃₃₀	-1.77679234801E-12	C ₄₂₃₃₀	-7.10814617832E-14	C ₄₃₃₃₀	1.43241079340E-15	C ₄₄₃₃₀	-1.15184859096E-17	C ₄₅₃₃₀	-2.02742425034E-19
C ₄₁₃₃₁	1.23326245741E-14	C ₄₂₃₃₁	3.75363771229E-16	C ₄₃₃₃₁	-3.70350687449E-19	C ₄₄₃₃₁	-8.55430618756E-21	C ₄₅₃₃₁	9.64558095955E-22
C ₄₁₃₄₀	1.79516411605E-13	C ₄₂₃₄₀	2.61983986428E-15	C ₄₃₃₄₀	5.00077975050E-17	C ₄₄₃₄₀	2.44142364257E-19	C ₄₅₃₄₀	-8.13520762630E-22
C ₄₁₃₄₁	-9.00362519825E-16	C ₄₂₃₄₁	-1.93496942219E-17	C ₄₃₃₄₁	-3.61981622792E-19	C ₄₄₃₄₁	-2.09040156501E-21	C ₄₅₃₄₁	2.73817171100E-23
C ₄₁₄₀₀	-6.55506573823E-13	C ₄₂₄₀₀	2.67956120004E-14	C ₄₃₄₀₀	-2.43246485514E-15	C ₄₄₄₀₀	2.22895441085E-17	C ₄₅₄₀₀	-9.01518351850E-20
C ₄₁₄₀₁	2.21740190103E-14	C ₄₂₄₀₁	-5.11916405458E-16	C ₄₃₄₀₁	1.37868906185E-17	C ₄₄₄₀₁	-6.48060728906E-20	C ₄₅₄₀₁	8.00093826157E-23
C ₄₁₄₁₀	-1.95352348176E-12	C ₄₂₄₁₀	2.41492243623E-14	C ₄₃₄₁₀	7.22441555699E-16	C ₄₄₄₁₀	1.93453711549E-20	C ₄₅₄₁₀	-6.66869312637E-20
C ₄₁₄₁₁	-6.67033144155E-16	C ₄₂₄₁₁	-5.83366482384E-17	C ₄₃₄₁₁	-5.07957727131E-19	C ₄₄₄₁₁	-7.87206740486E-20	C ₄₅₄₁₁	9.65596704043E-22
C ₄₁₄₂₀	-7.07141620359E-15	C ₄₂₄₂₀	1.16680457412E-15	C ₄₃₄₂₀	-9.63815819755E-17	C ₄₄₄₂₀	1.07535085779E-18	C ₄₅₄₂₀	-6.72850252559E-21
C ₄₁₄₂₁	3.25427373843E-15	C ₄₂₄₂₁	-1.11445109861E-16	C ₄₃₄₂₁	2.19659647668E-18	C ₄₄₄₂₁	-1.20115353198E-20	C ₄₅₄₂₁	-2.77356486612E-23
C ₄₁₄₃₀	4.86317985235E-14	C ₄₂₄₃₀	6.67705847942E-16	C ₄₃₄₃₀	-3.42993040544E-18	C ₄₄₄₃₀	-7.98426957841E-20	C ₄₅₄₃₀	2.21357485766E-21
C ₄₁₄₃₁	-3.54993734804E-16	C ₄₂₄₃₁	2.75989384035E-18	C ₄₃₄₃₁	-1.48437057465E-19	C ₄₄₄₃₁	1.34442447640E-21	C ₄₅₄₃₁	-7.78168795912E-24
C ₄₁₄₄₀	-4.80716199987E-15	C ₄₂₄₄₀	-8.95177161883E-17	C ₄₃₄₄₀	1.47847659384E-18	C ₄₄₄₄₀	-1.55491330729E-20	C ₄₅₄₄₀	6.66267905523E-23
C ₄₁₄₄₁	2.78917924132E-17	C ₄₂₄₄₁	4.81405618153E-19	C ₄₃₄₄₁	-1.03503419306E-20	C ₄₄₄₄₁	1.81652314260E-22	C ₄₅₄₄₁	-1.19406160522E-24
C ₄₁₅₀₀	-1.50242211487E-13	C ₄₂₅₀₀	2.83588922009E-15	C ₄₃₅₀₀	-1.28373020308E-17	C ₄₄₅₀₀	-6.78288481163E-20	C ₄₅₅₀₀	6.68544360939E-22
C ₄₁₅₀₁	6.24399070912E-16	C ₄₂₅₀₁	-9.05842449126E-18	C ₄₃₅₀₁	-1.92675468660E-20	C ₄₄₅₀₁	8.51844681292E-22	C ₄₅₅₀₁	-4.14688927253E-24
C ₄₁₅₁₀	-2.95573908076E-15	C ₄₂₅₁₀	-8.23501893541E-16	C ₄₃₅₁₀	1.08301200036E-17	C ₄₄₅₁₀	-6.73935056388E-20	C ₄₅₅₁₀	2.85777819054E-22
C ₄₁₅₁₁	3.18419718627E-16	C ₄₂₅₁₁	-2.36049320928E-18	C ₄₃₅₁₁	-2.71893727469E-20	C ₄₄₅₁₁	8.72783844501E-22	C ₄₅₅₁₁	-6.36853476938E-24
C ₄₁₅₂₀	-2.95265705891E-15	C ₄₂₅₂₀	5.37119498160E-17	C ₄₃₅₂₀	7.38566156769E-20	C ₄₄₅₂₀	-1.85202546247E-22	C ₄₅₅₂₀	1.55664059205E-22
C ₄₁₅₂₁	-4.94406251555E-17	C ₄₂₅₂₁	1.59212285700E-18	C ₄₃₅₂₁	-1.65198617010E-20	C ₄₄₅₂₁	4.99363756903E-23	C ₄₅₅₂₁	1.97117751915E-25
C ₄₁₅₃₀	-1.57174715486E-15	C ₄₂₅₃₀	2.95477195409E-17	C ₄₃₅₃₀	-3.04395710895E-19	C ₄₄₅₃₀	4.10443691971E-21	C ₄₅₅₃₀	-3.24662834519E-23
C ₄₁₅₃₁	1.20570317537E-17	C ₄₂₅₃₁	-2.58903608164E-19	C ₄₃₅₃₁	2.01889810757E-21	C ₄₄₅₃₁	-6.57803035238E-24	C ₄₅₅₃₁	3.03423099304E-26
C ₄₁₅₄₀	-6.53908477853E-18	C ₄₂₅₄₀	1.40165646890E-18	C ₄₃₅₄₀	-3.50808754758E-20	C ₄₄₅₄₀	1.93659459116E-22	C ₄₅₅₄₀	2.93990214713E-25
C ₄₁₅₄₁	-3.33403111102E-20	C ₄₂₅₄₁	-6.78076468851E-21	C ₄₃₅₄₁	2.56870451522E-22	C ₄₄₅₄₁	-2.74890148787E-24	C ₄₅₅₄₁	9.41484098942E-27

文献

- 阿江 通良, 湯 海鵬, 横井 孝志 (1992): 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム* 11, 23-33, 東京大学出版会
- Arndt A, Brüggemann GP, Virnavirta M, Komi PV (1995): Techniques used by Olympic ski jumpers in the transition from takeoff to early flight. *Journal of Applied Biomechanics* 11: 224-237
- Asai T, Kaga M, Akatauka T (1997): Computer simulation of the V style technique in ski jumping using computational fluid dynamics. *Congress of the ISB, abstract book, Tokyo*: 250
- 浅井 武, 村上 広高 (1998): スキーの V 字ジャンプに関する数値流体解析. *デサントスポーツ科学* 19: 246-253
- 浅見 俊雄 (1993): 形とスポーツパフォーマンス — スポーツのフォームを中心として—. *Japanese Journal of Sports Sciences* 12: 260-264
- 東 昭 (1993): *流体力学*. 朝倉書店, 東京
- Baumann W (1979): The biomechanical study of ski-jumping. *Proceedings of International Symposium on Science of Skiing, Zao*: 70-95
- Denoth J, Luethi SM, Gasser HH (1987): Methodological problems in optimization of the flight phase in ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics* 3: 404-418
- ファーツィガー JH, ペリッチ M: 小林 敏夫ら 訳 (2008): *コンピュータによる流体力学*. 11-19, シュプリンガー・ジャパン株式会社, 東京
- Fritsch FN, Carlson RE (1980): Monotone piecewise cubic interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 17: 238-246
- Gasser HH, Denoth J, Gerber H (2008): Auswertung der Videoaufnahmen vom Weltcupsspringen in Engelberg (SUI). 1-45, Retrieved November 3, 2009, from <http://www.fis-ski.com/data/document/auswertung-videoaufnahmen-wc-engelberg-06.pdf>
- Gisler E, Nigg BM, Waser J (1977): Biomechanische Untersuchungen im Skispringen. *Zur Biomechanik des Skilaufs*, Fets F (Ed), 98-107, Inn-Verlag, Innsbruck
- Greimel F, Virnavirta M, Schwameder H (2009): Kinematic analysis of the landing phase in ski jumping. *Science and Skiing IV*, Müller E et al. (Eds), 721-727, Meyer & Meyer Sport Ltd., Oxford

- 平井 伸幸, 村上 正秀, 瀬尾 和哉, 仰木 裕嗣 (2006): 高速度ビデオカメラの画像解析を基にしたスキージャンプの空力特性の研究. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集: 88-93
- 平井 伸幸, 村上 正秀, 瀬尾 和哉, 仰木 裕嗣 (2007): 高速度ビデオカメラの画像解析を用いたスキージャンプの空力解析. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集: 348-353
- Hochmuth G (1958): Untersuchungen über den Einfluß der Absprungbewegung auf die Sprungweite beim Skispringen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Deutschen Hochschule für Körperkultur, 29-59, Leiptig
- Hubbard M, Hibbard RL, Yeadon MR, Komor A (1989): A multisegment dynamic model of ski jumping. International Journal of Sport Biomechanics 5: 258-274
- Hubley CL, Wells RP (1983): A work-energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump performance. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology 50: 247-254
- International Ski Federation (2008): International Ski Competition Rules. Book III, Ski Jumping, (art. 411.1), 43, Jost Druck AG, Switzerland
- Janura M, Svoboda Z, Elfmark M, Uhlář R (2007): Comparison of ski jump execution among the best jumpers. Science and Nordic Skiing, Linnamo V et al. (Eds), 205-214, Meyer & Meyer Sport Ltd., Oxford
- 神 博, 清水 俊助, 久保田 弘敏, 綿貫 忠晴, 小林 一敏 (1992): スキージャンプにおける空中フォームの相違と飛距離に関する研究. 日本航空宇宙学会第 23 期講演論文集: 208-209
- Jin H, Shimizu S, Watanuki T, Kubota H, Kobayashi K (1995): Desirable gliding styles and techniques in ski jumping. Journal of Applied Biomechanics 11: 460-474
- 木下 是雄 (1971): スキーの力学. 日本のスキー科学, スキー科学研究会 (編), 45-56, 日立製作所
- 小早川 命, 近藤 義彦 (1985): スキージャンプの飛行力学. 科学 55: 185-190
- Komi PV, Nelson RC, Pulli M (1974): Biomechanics of skijumping. Studies in Sport Physical Education and Health, 5, University of Jyväskylä, Jyväskylä
- Komi PV, Virmavirta M (1997): Ski-jumping take-off performance: determining factors and methodological advances. Science and Skiing, Müller E et al. (Eds), 3-26, E & FN SPN, London

- Komi PV, Virmavirta M (2000): Determinants of successful ski-jumping performance. *Biomechanics in Sport*, Zatsiorsky VM (Ed), 349-362, Blackwell Science Ltd., London
- Luhtanen P, Pulli M, Kemppainen PP (1997): Drag, lift, lift - to - drag ratio and pitching moment during early flight in ski jumping measured using a 2/3 scale model in wind tunnel. *Congress of the ISB, abstract book*, Tokyo: 158
- Mahnke R, Hochmuth G (1990): Recent findings concerning aerodynamic effects in ski-jumping. *Proceedings of 8th ISBS*, Prague: 99-105
- Maryniak J, Ładyżyńska-Kozdraś E, Tomczak S (2009): Configurations of the Graf-Boklev (V-Style) Ski jumper model and aerodynamic parameters in a wind tunnel. *Human Movement* 10: 130-136
- Meile W, Reisenberger E, Mayer M, Schmölzer B, Müller W, Brenn G (2006): Aerodynamics of ski jumping: experiments and CFD simulations. *Experiments in Fluids* 41: 949-964
- Meile W, Müller W, Reisenberger E (2008): Ski-jumping aerodynamics: Model-experiments and CFD-simulations. *Sport Aerodynamics*, Nørstrud H (Ed), 183-216, Springer Wien NewYork, Italy
- Müller W, Platzer D, Schmölzer B (1996): Dynamics of human flight on skis: improvements in safety and fairness in ski jumping. *Journal of Biomechanics* 29: 1061-1068
- Müller W (1996): Physics of ski jumping: the lift and drag forces in the early flight phase have a pronounced impact on the performance. *9th Biennial Conference of the Canadian Society for Biomechanics*, Vancouver: 246-247
- Müller W (1997): Biomechanics of ski-jumping - scientific jumping hill design. *Science and Skiing*, Müller E et al. (Eds), 37-48, E & FN SPN, London
- Müller W (2009): Determinants of ski-jump performance and implications for health, safety and fairness. *Sports Medicine* 39: 85-106
- 村上 正秀, 瀬尾 和哉 (2007): スキージャンプ技術・用具の革新. *スポーツ工学* 2: 11-18
- Murakami M, Hirai N, Seo K, Ohgi Y (2008): Aerodynamic study of ski jumping flight based on high-speed video image. *The Engineering of Sport* 7, Estivalet M et al. (Eds), 449-456, Springer Verlag, Paris
- Nagano A, Fukashiro S (2000): Relationships between mechanical output from individual joints and jump height in sub-maximal to maximal effort vertical jumps. *バイオメカニクス研究* 4: 16-20

- 落合 一夫 (1999): 航空力学. (社) 日本航空技術協会, 東京
- Ohgi Y, Hirai N, Murakami M, Seo K (2008): Aerodynamic study of ski jumping flight based on inertia sensors. *The Engineering of Sport* 7, Estivalet M et al. (Eds), 157-164, Springer Verlag, Paris
- Pedotti A, Rodano R (1987): Evaluation of biomechanical motor patterns in ski jumpers during simulations of takeoff. *Biomechanics X-B*, Johnson B (Ed), 679-684, Human Kinetics
- Puumala R, McPherson M (1995): A kinematic analysis of the flight phase of ski jumping. *Proceedings of 13th ISBS*, Thunder Bay, Canada: 257-260
- Reisenberger E, Meile W, Brenn G, Müller W (2004): Aerodynamic behaviour of prismatic bodies with sharp and rounded edges. *Experiments in Fluids* 37: 547-558
- Sägesser A, Neukomm PA, Nigg BM, Rüegg P, Troxler G (1981): Force measuring system for the take-off in ski jumping. *Biomechanics VII-B*, Morecki A et al. (Eds), 478-482, University Park Press
- Sasaki T, Tsunoda K, Hoshino H, Ono M (2001): Aerodynamic force during flight phase in ski jumping. *Science and Skiing II*, Müller E et al. (Eds), 115-128, Verlag Dr. Kovač, Hamburg
- Schmölzer B, Müller W (2002): The importance of being light: aerodynamic forces and weight in ski jumping. *Journal of Biomechanics* 35: 1059-1069
- Schmölzer B, Müller W (2005): Individual flight styles in ski jumping: results obtained during Olympic Games competitions. *Journal of Biomechanics* 38: 1055-1065
- Schwameder H (1993): Dreidimensionale biokinematische Bewegungsanalyse der Absprung- und ersten Flugphase im Skispringen. *Symposiumsbericht 25 Jahre Sportwissenschaften in Innsbruck*, Kornex E et al. (Eds), 379-401, Innsbruck
- Schwameder H, Müller E (1995): Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen. *Spectrum der Sportwissenschaften* 7: 5-36
- Schwameder H, Müller E, Raschner C, Brunner F (1997): Aspects of technique-specific strength training in ski-jumping. *Science and Skiing*, Müller E et al. (Eds), 309-319, E & FN SPN, London
- Schwameder H, Müller E, Lindenhofer G, De Monte G, Potthast W, Brüggemann GP, Virravirta M, Isolehto J, Komi PV (2005): Kinematic characteristics of the early flight phase in ski jumping. *Science and Skiing III*, Müller E et al. (Eds), 381-391, Meyer & Meyer Sport Ltd., Oxford

- Schwameder H (2007): Current and future aspects of ski-jumping biomechanics. Science and Nordic Skiing, Linnamo V et al. (Eds), 225-236, Meyer & Meyer Sport Ltd., Oxford
- 瀬尾 和哉, 渡部 勲, 村上 正秀, 池口 拓也, 木村 真吾, 相澤 剛 (1999): スキージャンプ飛翔における揚力・抗力・モーメントの迎え角および前傾角依存性. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集: 83-86
- Seo K, Kimura S, Watanabe I, Murakami M (1999): Wind tunnel experiments and optimization study on ski jumping. Congress of the ISB, abstract book, Calgary: 77
- 瀬尾 和哉, 渡部 勲, 村上 正秀, 池口 拓也, 三浦 明子, 五十嵐 真貴 (2000): スキージャンプ飛翔における前傾角の最適化. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集: 135-139
- 瀬尾 和哉, 村上 正秀 (2002): 環境を利用してジャンプの飛距離を伸ばす 一向かい風・追い風への最適な適応方. バイオメカニクス研究 6: 292-295
- Seo K, Watanabe I, Murakami M (2004a): Aerodynamic force data for a V-style ski jumping flight. Sports Engineering 7: 31-39
- Seo K, Murakami M, Yoshida K (2004b): Optimal flight technique for V-style ski jumping. Sports Engineering 7: 97-104
- Sobotka R, Kastner J (1977): Registrierung des Kraftimpulses beim Skiabsprung. Zur Biomechanik des Skilaufs, Fets F (Ed), 90-97, Inn-Verlag, Innsbruck
- Soest AJV, Roebroek ME, Bobbert MF, Huijing PA, van Ingen Schenau GJ (1985): A comparison of one-legged and two-legged countermovement jumps. Medicine and Science in Sports and Exercise 17: 635-639
- Song JH, Moon YJ, Kwon YH (2004): A comparative study on the takeoff and early flight phases in ski jumping. International Journal of Applied Sports Sciences 16: 60-71
- Straumann R (1927): Vom Skiweitsprung und seiner Mechanik (Teil 2). Jahrbuch des Schweizerischen Ski Verbandes, 34-64, Selbstverlag des SSV
- 谷 一郎, 三石 智 (1951): スキー飛躍の空気力学. 科学 21: 117-122
- Tani I, Iuchi M (1971): Flight-mechanical investigation of ski jumping. Scientific Study of Skiing in Japan, Kinoshita K (Ed), 33-52, Hitachi Ltd.

- 谷 一郎, 井内 松三郎, 渡部 勲 (1971): スキー飛躍の空気力学 II. 日本のスキー科学, スキー科学研究会 (編), 64-77, 日立製作所
- Tavernier M, Cosserat P (1993): Flight simulation in ski jumping comparison of two styles of flight. Congress of the ISB, abstract book, Paris: 1328-1329
- Troxler G, Rüegg P (1979): Skispringen Kraftmessung auf dem Schanzentisch. Diplomarbeit in Biomechanik ETH, Zürich
- Tveit P, Pedersen PO (1981): Forces in the take-off in ski jumping. Biomechanics VII-B, Morecki A et al. (Eds), 472-477, University Park Press
- Vaverka F, Salinger J, Novosad J (1981): K problematice biomechanicke analyzy odrazu lyzare skokana pomoci dynamometrie. Sbornik K 25 Vyroci Zalozeni FTVS: 359-366
- Vaverka F, Krskova M, Elfmark M, Salinger J (1991): Effects of take-off vigour and accuracy on jump length. *Biology of Sport* 8: 151-159
- Vaverka F, Janura M, Salinger J, Brichta J (1993): Comparison of the take-off measured under laboratory and jumping hill conditions. Congress of the ISB, abstract book, Paris: 1406-1407
- Vaverka F, Janura M, Elfmark M, McPherson M, Puumala R (1996): A general versus individual model of the ski jumping technique. Proceedings of 14th ISBS, Portugal: 293-296
- Vaverka F, Janura M, Elfmark M, Salinger J (1997): Inter- and intra- individual variability of the ski jumper's take-off. *Science and Skiing*, Müller E et al. (Eds), 61-71, E & FN SPN, London
- Virmavirta M, Komi PV (1989): The takeoff forces in ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics* 5: 248-257
- Virmavirta M, Komi PV (1993a): Measurement of take-off forces in ski jumping Part I. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 3: 229-236
- Virmavirta M, Komi PV (1993b): Measurement of take-off forces in ski jumping Part II. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 3: 237-243
- Virmavirta M, Komi PV (1993c): Takeoff analysis of a champion ski jumper. Congress of the ISB, abstract book, Paris: 1418-1419
- Virmavirta M, Komi PV, Perttunen J (1997): Simulated and actual ski jumping take-offs differ in plantar pressure and muscle activation patterns. Congress of the ISB, abstract book, Tokyo: 260

- Virmavirta M (2000): Limiting factors in ski jumping take-off. *Studies in Sport, Physical Education and Health*, 73, University of Jyväskylä, Jyväskylä
- Virmavirta M, Perttunen J, Komi PV (2001a): EMG activities and plantar pressures during ski jumping take-off on three different sized hills. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 11: 141-147
- Virmavirta M, Komi PV (2001b): Factors influencing the "explosiveness" of ski jumping take off. *Science and Skiing II*, Müller E et al. (Eds), 14-29, Verlag Dr. Kovač, Hamburg
- Virmavirta M, Komi PV (2001c): Plantar pressure and EMG activity of simulated and actual ski jumping take-off. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 11: 310-314
- Virmavirta M, Komi PV (2001d): Ski jumping boots limit effective take-off in ski jumping. *Journal of Sports Sciences* 19: 961-968
- Virmavirta M, Kivekäs J, Komi PV (2001e): Take-off aerodynamics in ski jumping. *Journal of Biomechanics* 34: 465-470
- Virmavirta M, Isolehto J, Komi PV, Brüggemann GP, Müller E, Schwameder H (2005): Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition. *Journal of Biomechanics* 38: 2157-2163
- Virmavirta M, Isolehto J, Komi PV, Schwameder H, Pigozzi F, Massazza G (2009): Take-off analysis of the Olympic ski jumping competition (HS-106m). *Journal of Biomechanics* 42: 1095-1101
- Ward-Smith AJ, Clements D (1982): Experimental determination of the aerodynamic characteristics of ski-jumpers. *Aeronautical Journal* 86: 384-391
- Ward-Smith AJ, Clements D (1983): Numerical evaluation of the flight mechanics and trajectory of a ski-jumper. *Acta Applicandae Mathematicae* 1: 301-314
- 渡部 勲, 渡部 和彦, 谷田 好通 (1992): スキー飛躍の空気力学(開脚姿勢の効果). *日本航空宇宙学会第23期講演論文集*: 206-207
- 渡部 和彦 (1981): 風洞実験によるスキージャンプ姿勢の解析: 上肢の姿勢変化の影響. *日本体育協会スポーツ医・科学研究報告集*: 325-327
- Watanabe K (1983): Aerodynamic investigation of arm position during the flight phase in ski jumping. *Biomechanics VIII-B*, Matsui H et al. (Eds), 856-860, Human Kinetics

- 渡部 和彦 (1983): 特集 スキー・スケートの動作の科学 ジャンプ競技から一サツの動作分析. 体育の科学 33: 884-889
- 渡部 和彦 (1984): スキージャンプ動作の解析: サツから空中局面への移行. 日本体育協会スポーツ医・科学研究報告集: 353-356
- 渡部 和彦 (1992): ジャンプ: V字型飛行の研究と競技への応用. 体育の科学 42: 375-379
- Watanabe K, Watanabe I (1993): Aerodynamics of ski-jumping effect of "V-style" to distance. Congress of the ISB, abstract book, Paris: 1452-1453
- 渡部 和彦, 渡部 勲 (1993): 「V字飛行」の効果に関する空気力学的研究. 日本体育協会スポーツ医・科学研究報告集: 224-227
- 渡部 和彦, 渡部 勲, 磨井 祥夫 (1994): 「V字飛行」における上肢の構えの違いが飛距離に及ぼす影響: 上肢を前方に伸展する効果について. 日本体育協会スポーツ医・科学研究報告集: 29-32
- 渡部 和彦, 渡部 勲 (1997): スキージャンプと流体力学: オリンピックへの貢献. 日本航空宇宙学会第28期講演論文集: 104-109
- 渡辺 俊男 (1970): スキー・ジャンプ動作を分析する. 体育の科学 20: 775-778
- 渡辺 俊男, 川原 ゆり (1971): 荷重測定と軌跡描写法による Ski-Jump の踏切動作分析. 体育学研究 15: 33-37
- 渡辺 俊男 (1972): スキー・ジャンプ. 札幌オリンピックスポーツ科学研究報告, 日本体育協会(編), 9-56
- 渡辺 俊男 (1974): Ski-Jump のキネシオロジー. 身体運動の科学 I, 178-202, 杏林書院
- Winter DA (1990): Biomechanics and motor control of human movement. 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York
- 山本 敬三, 大原 久依, 川初 清典, 下岡 聡行, 清水 孝一, 晴山 紫恵子, 上杉 尹宏 (2003): 表面タフト法によるスキージャンパー近傍気流解析のための基礎的検討. バイオメカニクス研究 7: 10-16
- 山本 敬三, 後藤 佳緒理, 川初 清典, 下岡 聡行, 清水 孝一, 横山 真太郎, 上杉 尹宏, 高倉 政寛, 堤 拓哉 (2004): 空気力学的解析によるスキージャンプ・テイクオフ動作の評価. バイオメカニクス研究 8: 94-104

山辺 芳 (2006): スキージャンプ. 体育の科学 56: 981-985

山辺 芳, 渡部 勲, 松尾 彰文, 高松 潤二, 平野 裕一 (2008): スキージャンプ助走速度に関するシミュレーション研究 -初速度の影響を中心に-. バイオメカニクス研究 12: 164-182

吉田 和代, 村上 正秀, 渡部 勲, 大塚 敏之 (1996): スキージャンプにおける空力特性に基づいた飛行曲線の最適化. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集: 126-130