

スキージャンプ競技の姿勢制御に関する バイオメカニクス的研究

— 飛行後期局面に着目して —

水 崎 一 良
(2004年9月30日受理)

Biomechanical study on the postural control of ski-jumping
— Focused on the second half of the flight phase —

Kazuyoshi Mizusaki

The goal of the flight phase in ski jumping is to get the best posture to maximize the flight distance. We focused on the second half of flight for discussing the relationship between the kinematical data from the field study and the aerodynamic data from the wind tunnel experiment.

The two jumpers were selected, F.K. and A.S. in FIS Grand Prix (2000/8/26, Hakuba). Using the pan & tilt video system for 3-D motion analysis (PEAK Co.Ltd.), we filmed the posture in the second half of flight (from 64% flight to landing). The variables of attack angle (α), shank-ski angle (θ), trunk-thigh angle (σ) and ski-ski angle (λ) were measured. A full size ski-jumper model was mounted in the 3m low speed wind tunnel with the wind speed of 20 or 25 m/s. The lift, the drag and the pitching moment were measured.

In this study, differences of motion in the same V jumping techniques were demonstrated between the two jumpers. The both jumpers changed the flight position 0.6s before landing. The average angles from the flight position to 0.6s before landing were shown as follows: F.K.; $\alpha = 35.3^\circ$, $\theta = 28.1^\circ$, $\sigma = 14.0^\circ$, $\lambda = 26.0^\circ$. A.S.; $\alpha = 34.3^\circ$, $\theta = 27.6^\circ$, $\sigma = 16.9^\circ$, $\lambda = 21.0^\circ$. From these results, σ was set as 14.0° and θ was set as 28.1° . When λ was 38.0° , the polar curve reached to the maximum. When increasing λ , the pitching moment decreased. Therefore it was reported that the best ski-ski angle was 38° . The more opened ski-ski angle should be recommended to these two jumpers for getting the better flight, still the nose down pitching moment will effect negatively to jumpers.

Key words : Ski-jumping, Postural control, 3-D motion analysis, Wind tunnel experiment

キーワード : スキージャンプ, 姿勢制御, 3次元画像解析, 風洞実験

I. 目的

スキージャンプ競技は、スタートから着地までが

本論文は、課程博士候補論文を構成する論文の一部として、以下の審査員により審査を受けた。

審査委員：渡部和彦(主任指導教員), 岩重博文,
奥田誠, 磨井祥夫, 池田秀雄(国際協力研究科)

10秒ほどの一連の動作で構成されており、助走、踏切、空中、着地の4局面に分けられる。この競技の特性のひとつに、約25m/sでの飛び出し、着地時には約30m/sにもおよぶスピードがあげられる。このような高速下の運動では、空気力学的作用が競技成績を決定する重要な要因となる。すなわち、スキージャンプ競技においては、いずれの局面においても空気力学的に効率の良い姿勢をとることが求められる。とくに飛行

局面においては、人体ならびにスキーに作用する力は、重力を除くと空気力学的な力のみであるので、その重要性は高い。また、スキージャンプ競技は力学的法則に従う要因が大きく、技術面に関する科学的な評価は明解であり、実際の競技場面に応用し得るといえる(佐々木, 1999)。

これまで、スキージャンプ競技に関する研究は、キネマティクス・キネティクス・筋電図学・シミュレーションなどのバイオメカニクス的方法論に基づいて行われている(Schwamederら, 2001)。飛行局面については、シミュレーションならびにキネマティクス的な方法論に基づく研究が中心である。

シミュレーションについては、Straumann (1927)の報告に始まり、谷ら(1971), Ward-Smith (1982), Remizov (1984), 小早川ら(1985), Denothら(1987), 渡部ら(1992), 渡部(1992), Watanabeら(1993), Jinら(1995), Müllerら(1996), Yoshida (1998), Seoら(2002)に至るまで、風洞実験から得られたデータを用いて、スキーを含む姿勢条件の違いによる飛距離への影響を報告している。シミュレーションの有用性はいうまでもないが、問題点も残されている。谷(1971), Ward-Smith (1982), Remizov (1984), 小早川ら(1985), Denothら(1987), 渡部ら(1992), 渡部(1992), Watanabeら(1993), Müllerら(1996), Schmölzerら(2002)については、飛行局面において姿勢が一定であるという仮定のもとに計算が行われている。また、Jinら(1995), Yoshida (1998), Seoら(2002)については、小早川ら(1985)の踏切後0.4秒に定常飛行にいたるといふ報告に基づき計算を行っている。いずれの報告も、実際のジャンプにおける姿勢の過渡期(踏切から比較的安定した局面, および飛行後期から着地局面)にみられる身体運動による空気力の変化への考察が不十分である。この原因として、現在のところ十分な空気力学的なデータの蓄積がなく、計算を簡略化せざるをえないということがあげられる。すなわち、シミュレーションにおいては、姿勢などの条件に制限を加えることで評価せざるをえないのである。この点においては、実際のジャンプを対象としたキネマティクスの分析から得られる姿勢データを用いる必要性があるといえる。

Komiら(1974), Baumann (1979), Arndtら(1995)などのキネマティクス的方法論に基づく研究においては、競技成績を決定する重要な要素である空気力学的な力を十分に考察していない。これは、キネマティクスの分析から得られるデータから空気力学的な力を算出することが困難だからである。仮に得ら

れたとしても、そのデータは風洞実験から得られたものより正確性に欠ける(とくにモーメントにおいて)。この点において、風洞実験から得られるデータは重要であるといえる。

本研究では、姿勢の過渡期である飛行後期局面について着目し、実際の競技場面におけるキネマティクスの分析を行う。その分析によって得られた姿勢データに基づき、風洞実験の条件を設定し、空気力学的なデータにより評価することを目的とした。これにより、空中姿勢の指導およびトレーニングにおける評価の基礎資料が蓄積できると考えた。

II. 研究方法

A. 画像解析

1. 対象

FIS Grand Prix白馬大会(2000年8月26日, K=120)の参加選手2名(F.K.選手およびA.S.選手)の1本目のジャンプを対象とした。なお、対象選手のデータグループ(参加者48名)における相対的な位置は、F.K.選手が95.7%, A.S.選手が27.6%であった。すなわち、F.K.選手は上位選手, A.S.選手は下位選手といえる。

対象選手の競技成績および身体特性(身長・体重・BMI)を表1に示した。

表1. 対象選手の形態および競技成績

選手名	身長 ^{*)} (cm)	全装備体重 ^{*)} (kg)	助定速度 ^{*)} (km/h)	飛距離 ^{*)} (m)	飛型点 ^{*)} (Point)	順位 ^{*)} (1本目)
F.K.	174	72.7	90.1	129.0	55.5	3
A.S.	169	63.9	89.6	98.5	52.5	35

^{*)} World Cup プラニカ大会(2000年3月18日)にてFIS(Fédération Internationale de Ski)が計測したデータより

^{*)} FIS Grand Prix 白馬大会公式トレーニング(2000年8月25日)にて実測した

^{*)} FIS Grand Prix 白馬大会公式記録より

2. 実験方法

a. 撮影方法

本研究では、パン・アンド・チルト動作解析システム(PEAK社製)を用いた。図1のように、2台のビデオカメラ(Panasonic Digital 5000)をジャンプ台側方に設置し、飛行後半局面における選手の動作を撮影した(シャッタースピード:1/500秒)。同期された2台のビデオカメラにパン・アンド・チルト方式のエンコーダヘッド(PEAK社製)を取り付け、NTSC方式で30Hzのビデオレコーダで収録した。

キャリブレーションは競技終了後に行い、測量用の計測棒を図1のように設置し、校正点が映るようにパンニングおよびチルティングしながら撮影した。な

お、水平方向については、ランディングバーンから約3～4 mまでの範囲を撮影した。

また、撮影時の気象条件を表2に示した。

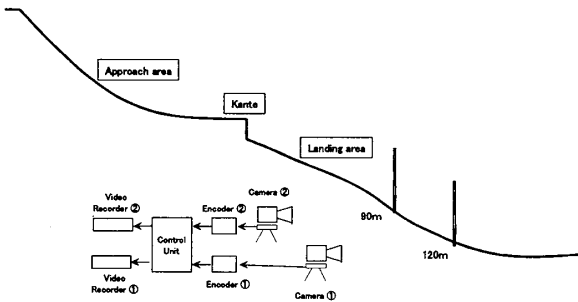


図1. 3次元画像解析における実験構成図

表2. 撮影時の気象条件

時刻	天気	気温 (°C)	湿度 (%)	風速 (m/s)		
				最小	最大	平均
14:30	曇り	31.2	45.0	0.4	4.3	2.2

b. 分析方法

本研究では、撮影した映像のうち全飛行時間の64%から着地までを分析範囲とし、これを飛行後期局面と定義した。画像解析ソフトPeak Motus3.1 (PEAK社製)を用いて、右側面の肩峰点、大転子点、膝関節点、足関節点、左右のスキートのトップおよびテールの計8点の3次元座標を求めた。これらの座標から、以下の変数を求めた。

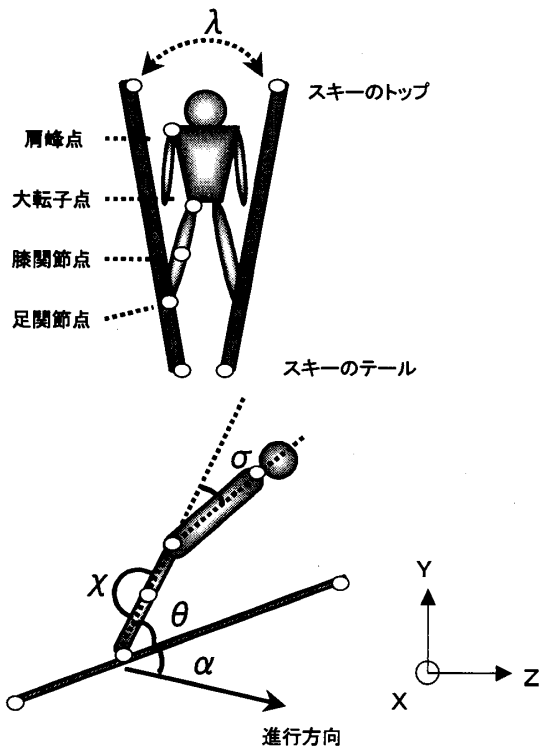


図2. 3次元座標およびモデルの定義

- 1) 迎角 (α): 進行方向 (YZ平面の速度ベクトル) とスキートのなす角度
- 2) 屈身角 (σ): 躯幹中心線と下肢中心線のなす角度
- 3) 下肢前傾角 (θ): 下肢中心線とスキートのなす角度
- 4) スキー開き角 (λ): 左右に開いたスキートのなす角度
- 5) 膝関節角 (χ): 大腿と下腿のなす角度

なお、座標系は固定座標系とし、水平方向をZ軸、鉛直方向をY軸、左右方向をX軸とした (図2参照)。

c. データの平滑化

得られた3次元座標値は、遮断周波数6 Hzの特性を持つバターワースデジタルフィルタを用いて平滑化した。

B. 風洞実験

1. 実験期日

実験1: 2001年3月1日～3月6日

実験2: 2001年4月29日～5月4日

実験3: 2001年12月2日～12月8日

2. 実験方法

東京大学先端科学技術研究センターの協力を得て、直径3 mの円形噴流の風洞実験装置を用いて、吊り線方式での計測を行った。ジャンパー模型は実物大 (175cm) であり、スキー、ヘルメット、ゴーグルなどすべて選手が実際に用いる装備を着用させた (図3参照)。

姿勢条件として、屈身角 (σ) を $0 \sim 40^\circ$ 、下肢前傾角 (θ) を $0 \sim 50^\circ$ 、スキー開き角 (λ) を $0^\circ \cdot 24^\circ \cdot 27.2^\circ \cdot 38^\circ$ 、膝関節角 (χ) を 180° に設定し、それぞれの姿勢について迎角 (α) を $0 \sim 55^\circ$ で変化させた。なお、風洞実験における迎角 (α) は、気流の方向 (図2の進行方向の正反対) とスキートのなす角と定義される。

姿勢条件を設定した後、気流速度20m/sまたは25m/sにおける3分力 (抗力D・揚力L・モーメントM) を1024Hzで2秒間計測し、その平均値を求めた。なお、モーメントは頭上げの回転方向を正とした。

計測で得られた3分力は、以下に示す抗力面積 (S_D)・揚力面積 (S_L)・モーメント容積 (Q_M) に変換した。

$$S_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad S_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad Q_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

ρ : 空気密度, U : 気流速度

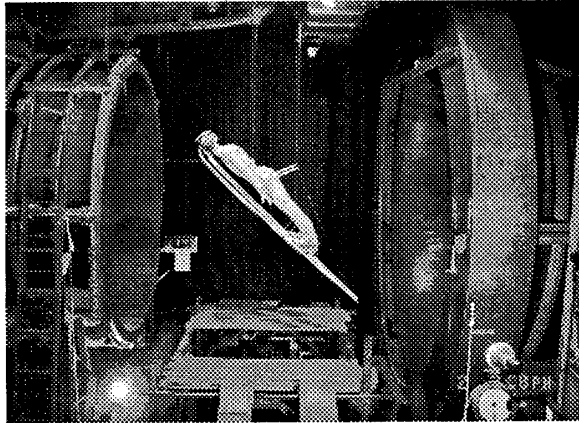


図3. 風洞実験風景

III. 結果

A. 飛行後期局面における姿勢変化

飛行後期局面における姿勢変化を図4および図5に示した。先行研究において、選手間には技術の相違がみられることが報告されている (Komiら, 1974; Baumann, 1979; Arndtら, 1995)。本研究においても、姿勢を決定する各変数について選手間に相違がみられた。すなわち、飛行後期局面において選手間に技術の相違がみられた。

また、いずれの変数も、両選手ともに着地前0.6秒までは比較的変動が少なく、その後顕著な変動がみられた。

そこで、サンプリング開始から着地前0.6秒における各変数の平均値の比較を行ったところ、F.K.選手が迎角 (α): $35.3 \pm 2.8^\circ$, 屈身角 (σ): $14.0 \pm 8.1^\circ$, スキー開き角 (λ): $26.0 \pm 2.9^\circ$, 下肢前傾角 (θ): $28.1 \pm 3.3^\circ$, 膝関節角 (χ): $172.0 \pm 4.0^\circ$, A.S.選手が迎角 (α): $34.3 \pm 0.7^\circ$, 屈身角 (σ): $16.9 \pm 1.9^\circ$, スキー開き角 (λ): $21.0 \pm 2.2^\circ$, 下肢前傾角 (θ): $27.6 \pm 6.7^\circ$, 膝関節角 (χ): $172.8 \pm 3.0^\circ$ であった (図6参照)。

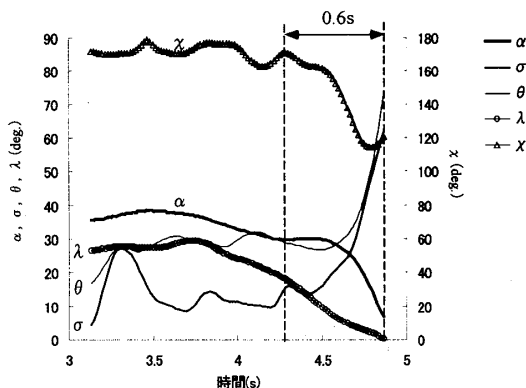


図4. F.K.選手の飛行後期局面における姿勢変化
 α : 迎角, σ : 屈身角, θ : 下肢前傾角, λ : スキー開き角, χ : 膝関節角とした。

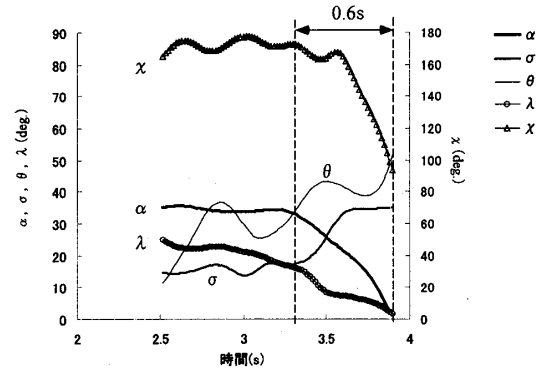


図5. A.S.選手の飛行後期局面における姿勢変化
 α : 迎角, σ : 屈身角, θ : 下肢前傾角, λ : スキー開き角, χ : 膝関節角とした。

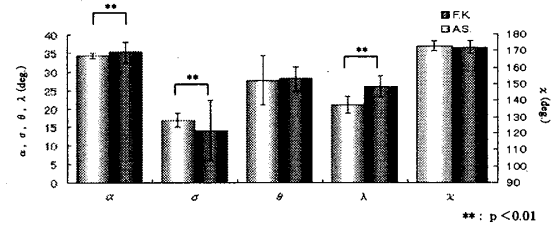


図6. 飛行後期局面(サンプリング開始〜着地前0.6秒)における選手(F.K.およびA.S.)の各変数の平均値
 α : 迎角, σ : 屈身角, θ : 下肢前傾角, λ : スキー開き角, χ : 膝関節角とした。

統計処理は、対応のないT検定を行った。その結果、迎角 (α) およびスキー開き角 (θ) については、F.K.選手の方が有意に大きく、屈身角 (σ) については、A.S.選手の方が有意に大きかった。なお、危険率5%水準を統計学的に有意とした。

B. 飛行後期局面における空気力学的評価

1. 選手間の空気力の比較

競技場面におけるキネマティクスの分析から得られた姿勢データ (迎角, 屈身角, スキー開き角, 下肢前傾角, 膝関節角) に基づき、風洞実験によって得られた空気力学的データを用いて、飛行後期局面における各変数の違いによる抗力面積 (S_D)・揚力面積 (S_L)、モーメント容積 (Q_M) の比較を行った (図7参照)。なお、両選手ともに膝関節角 (χ) を 180° とした。

抗力面積 (S_D) は、A.S.選手が大きな値を示し、揚力面積 (S_L) および揚抗比 (L/D) は、F.K.選手の方が大きな値を示した。また、モーメント容積 (Q_M) は、F.K.選手の方が負の方向 (頭下げ) に大きな値を示した。

以下のIII.B.2. ~ B.5. (角度の違いによる空気力の変化) については、上位選手であるF.K.選手のキネマティクスのデータに基づき、空中姿勢について空気力学的評価を行うことにより、競技力向上のための基礎資料の蓄積を図ることとした。

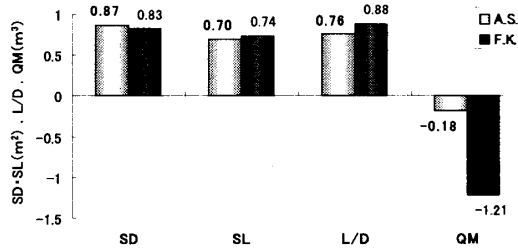


図7. 飛行後期局面(サンプリング開始~着地前0.6秒)における選手(F.K.およびA.S.)に及ぼす空気力の比較
SD: 抗力面積, SL: 揚力面積, L/D: 揚抗比, QM: モーメント容積とした。

2. スキー開き角 (λ) の違いによる空気力の変化

迎角 (α): 35.0° , 屈身角 (σ): 14.0° , 下肢前傾角 (θ): 28.1° , 膝関節角 (χ): 180.0° として, スキー開き角の違いによる抗力面積 (S_D), 揚力面積 (S_L), モーメント容積 (Q_M) の変化を示した (図8参照)。

揚力面積 (S_L) は, スキー開き角が大きいほど大きな値を示した。抗力面積 (S_D) は, スキー開き角が $24 \sim 38^\circ$ の範囲でほぼ同じ値を示し, クラシックスタイルである 0° の方が小さい値を示した。揚抗比 (L/D) は, クラシックスタイルとスキー開き角 24° がほぼ同じ値であったが, スキー開き角が大きいほど大きな値を示した。モーメント容積 (Q_M) は, スキー開き角 24° が 27.2° よりわずかに大きな負の値を示したが, 傾向としてはスキー開き角が大きいほど大きな負の値 (頭下げ方向) を示した。

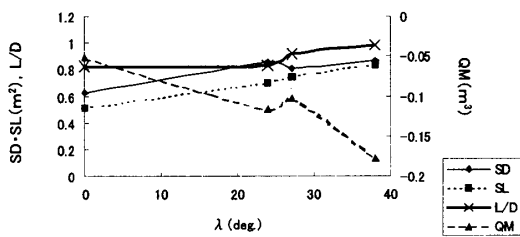


図8. 飛行後期局面におけるスキー開き角の違いによる空気力の変化
F.K.選手のキネマティクスのデータに基づき, 迎角 (α) = 35.0° , 屈身角 (σ) = 14.0° , 下肢前傾角 (θ) = 28.1° , 膝関節角 (χ) = 180° とした。また, SD: 抗力面積, SL: 揚力面積, L/D: 揚抗比, QM: モーメント容積とした。

3. 屈身角 (σ) の違いによる空気力の変化

迎角 (α): 35.0° , スキー開き角 (λ): 26.0° , 下肢前傾角 (θ): 28.1° , 膝関節角 (χ): 180.0° として, 屈身角の違いによる抗力面積 (S_D), 揚力面積 (S_L), モーメント容積 (Q_M) の変化を示した (図9参照)。

抗力面積 (S_D) は, 屈身角 10° まで減少し, その後増加し, 全体としては増加傾向にあった。揚力面積

(S_L) および揚抗比 (L/D) は, 屈身角が大きいほど大きな値を示した。また, モーメント容積 (Q_M) は, 屈身角が大きいほど大きな負の値 (頭下げ方向) を示した。

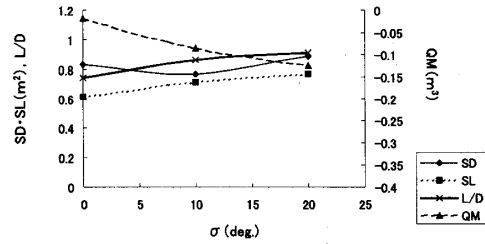


図9. 飛行後期局面における屈身角の違いによる空気力の変化
F.K.選手のキネマティクスのデータに基づき, 迎角 (α) = 35.0° , スキー開き角 (λ) = 26.0° , 下肢前傾角 (θ) = 28.1° , 膝関節角 (χ) = 180° とした。また, SD: 抗力面積, SL: 揚力面積, L/D: 揚抗比, QM: モーメント容積とした。

4. 下肢前傾角 (θ) の違いによる空気力の変化

迎角 (α): 35.0° , スキー開き角 (λ): 27.2° , 屈身角 (σ): 20.0° , 膝関節角 (χ): 180.0° として, 下肢前傾角の違いによる抗力面積 (S_D), 揚力面積 (S_L), モーメント容積 (Q_M) の変化を示した (図10参照)。

揚力面積 (S_L) は, 下肢前傾角 20° まで増加し, その後は下肢前傾角が大きいほど小さな値を示した。抗力面積 (S_D) は, 下肢前傾角 50° が 30° よりわずかに小さな値を示したが, 傾向としては下肢前傾角が大きいほど大きな値を示した。揚抗比 (L/D) は, 下肢前傾角が小さいほど大きな値を示した。また, モーメント容積 (Q_M) については, 下肢前傾角が小さいほど大きな負の値 (頭下げ方向) を示した。

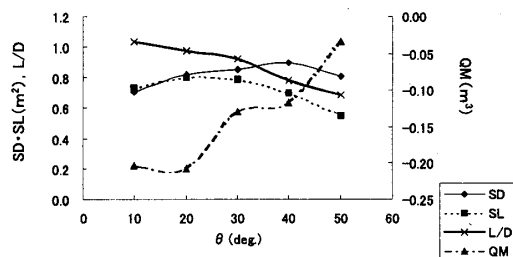


図10. 飛行後期局面における下肢前傾角の違いによる空気力の変化
F.K.選手のキネマティクスのデータに基づき, 迎角 (α) = 35.0° , スキー開き角 (λ) = 27.2° , 屈身角 (σ) = 20.0° , 膝関節角 (χ) = 180° とした。また, SD: 抗力面積, SL: 揚力面積, L/D: 揚抗比, QM: モーメント容積とした。

5. 迎角 (α) の違いによる空気力の変化

スキー開き角 (λ): 27.2° , 屈身角 (σ): 20.0° , 下肢前傾角 (θ): 30.0° , 膝関節角 (χ): 180.0° として, 下肢前傾角の違いによる抗力面積 (S_D), 揚力面積 (S_L), モーメント容積 (Q_M) の変化を示した (図

11参照)。

先行研究において、抗力面積(S_D)は迎角とともに増加し、揚力面積(S_L)は迎角とともに増加するが、約40°で失速が始まり、その後は減少するとしている(Straumann, 1927; 谷ら, 1971; Ward-Smith, 1982; 小早川ら, 1985; 渡部ら, 1992; 渡部, 1992; Watanabeら, 1993; Mullerら, 1996; Yoshida, 1998; Schmolzerら, 2002; Seoら, 2002)。本研究においても、同様の結果が得られた。揚抗比(L/D)は、迎角15°までは増加し、その後は迎角が大きいかほど小さな値を示した。また、モーメント容積(Q_M)については、迎角が大きいかほど大きな負の値(頭下げ方向)を示した。

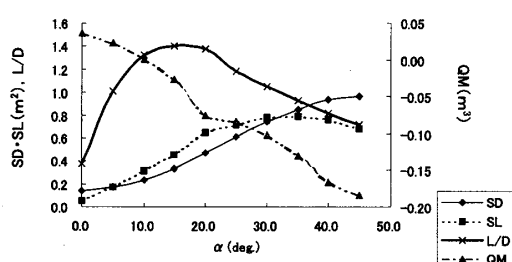


図11. 飛行後期局面における迎角の違いによる空気力の変化
F.K.選手のキネマティクスデータに基づき、スキー開き角(λ)=27.2°, 屈身角(σ)=20.0°, 下肢前傾角(θ)=30.0°, 膝関節角(χ)=180°とした。また、SD:抗力面積, SL:揚力面積, L/D:揚抗比, QM:モーメント容積とした。

IV. 考察

A. 飛行後期局面における選手間の姿勢制御の相違について

キネマティクス的な方法論に基づき、飛行後期局面における選手の姿勢制御について比較検討した。図4および図5に示すとおり、競技成績の異なる選手間において、姿勢制御、すなわち技術の相違がみられた。また、両選手ともに着地前0.6秒までは比較的姿勢の変動が少なかった。飛行後期局面において、選手は比較的姿勢の安定した状態から着地局面に移行しなければならないことから、着地前0.6秒から着地動作が始まっていると考えた。しかし、サンプル数が少ないので、今後さらに検討を要す。

上位選手と下位選手の姿勢制御の違いを明らかにするため、サンプリング開始から着地前0.6秒における各変数の平均値の比較を行った。図6に示すとおり、迎角(α)およびスキー開き角(θ)については、上位選手の方が有意に大きな値を示し、屈身角(σ)については有意に小さな値を示した。

迎角(α)については、上位選手の方が統計的に大きな値を示したのは、上位選手の数値に変動がみられ

たことによると考えられる。本研究では、ほぼ同じ値(35°)であったと捉え空気力学的に検討する。

スキー開き角(λ)については、38°までの範囲であればスキーを開いた方が飛距離に対する効果が上がるとの報告がなされている(渡部ら, 1992; 渡部, 1992; Watanabeら, 1993)。上位選手のスキー開き角の方が大きな値を示したことは、この知見を支持している。

屈身角(σ)については、直伸(屈身角:0°)させた条件による報告が多いが、Schmolzerら(2002)は、0~30°の範囲について報告している。この報告において、屈身角は20°までの範囲であれば大きな方が飛距離に対する効果が上がるとしている。下位選手の屈身角の方が大きな値を示したことは、他の姿勢条件が影響していると考えられるので、本研究においてさらに空気力学的に検討する。

得られたキネマティクス的なデータに基づき、空気力学的に選手の姿勢制御について比較検討した。図7に示すとおり、抗力面積(S_D)は、下位選手が大きな値を示し、揚力面積(S_L)および揚抗比(L/D)は、上位選手の方が大きな値を示した。内藤(1970)によれば、最長滑空距離を得るには、最大揚抗比の姿勢で滑空すべきだとしている。また、アスペクト比(翼の縦横比)が大きい方が有利だとしている。本研究において、上位選手においては、揚抗比およびスキー開き角が下位選手に比べ大きいことから、上位選手は飛距離に対して効率の良い姿勢制御を行っていることが示唆された。ただし、内藤(1970)は、最大滑空時間を得る姿勢は、揚抗比最大とは一致せずとしている。これについては、渡部(1992)の揚抗比最大が必ずしも飛距離を最大としないという報告と一致しており、今後検討すべき点である。モーメント容積(Q_M)は、上位選手の方が負の方向(頭下げ)に大きな値を示した。モーメント容積(Q_M)が0となる点は静安定であり、飛行は安定するといえる。すなわち、上位選手の方が不安定な姿勢制御を行っていたことが示唆された。

B. 飛行後期局面における姿勢制御の違いにおける空気力への影響について

上位選手であるF.K.選手のキネマティクス的なデータに基づき、空中姿勢について空気力学的評価を行うことにより、競技力向上のための基礎資料を蓄積することとした。

図8に飛行後期局面におけるスキー開き角の違いによる空気力の変化を示した。スキー開き角が大きいかほど、揚抗比(L/D)は増加した。本研究においても、

38°までの範囲であればスキーを開いた方が飛距離に対する効果が上がるという報告(渡部ら, 1992; 渡部, 1992; Watanabeら, 1993)と同様の結果が得られた。すなわち, 飛行後期局面において, スキー開き角が38°までの範囲で拡大することが, 空気力学的に効率の良い姿勢である。本研究において対象とした選手は, スキー開き角(26.0°)をさらに拡大することが飛距離の延長につながると考えられる。しかし, モーメント容積(Q_M)は, スキー開き角が大きいほど大きな負の値(頭下げ方向)を示すので, 姿勢が不安定になることに留意しなければならない。なお, 本研究においては, スキー開き角38°以上については検討していない。これは, スキー開き角を38°以上にしても, 脚の骨格の影響によりスキーのローリング角が大きくなり, 揚力が上がらないという渡部ら(1992)の報告に基づいた。

図9に飛行後期局面における屈身角の違いによる空気力の変化を示した。抗力面積(S_D), 揚力面積(S_L)および揚抗比(L/D)ともに, 屈身角が大きいほど増加する傾向にあった。スキー開き角および下肢前傾角の条件が異なるSchmölzerら(2002)の報告同様, 屈身角20°で揚抗比が最大となった。本研究では, 屈身角20°以上の条件についての検討はできない。しかし, 対象とした選手は, 屈身角(14.0°)を20°まで屈曲させることで飛距離の延長につながるといえる。しかし, モーメント容積(Q_M)は, スキー開き角が大きいほど大きな負の値(頭下げ方向)を示すので, 姿勢が不安定になることに留意しなければならない。

図10に飛行後期局面における下肢前傾角の違いによる空気力の変化を示した。抗力面積(S_D)は, 下肢前傾角が大きいほど増加する傾向にあった。揚力面積(S_L)および揚抗比(L/D)は, 下肢前傾角が小さいほど大きな値を示した。Seoら(2002)は, シミュレーションにより下肢前傾角を約10°に維持するべきだとしている。本研究においても, 下肢前傾角10°で揚抗比が最大となった。すなわち, 屈身角20°で揚抗比が最大となることを踏まえると, スキーを体幹と平行になる位置よりやや体幹に近い下肢前傾角10°とすると, 飛距離に対する効率が上がると考えられる。対象とした選手は, 下肢前傾角(28.1°)を小さくし, 身体全体の前傾を深めることが飛距離の延長につながるといえる。しかし, モーメント容積(Q_M)は, 下肢前傾角が小さいほど大きな負の値(頭下げ方向)を示すので, 姿勢が不安定になることに留意しなければならない。

図11に飛行後期局面における迎角の違いによる空気力の変化を示した。抗力面積(S_D)は迎角とともに

増加した。揚力面積(S_L)も迎角とともに増加するが, 約40°で失速が始まり, その後は減少した。揚抗比(L/D)は, 迎角15°までは増加し, その後は迎角が大きいほど小さな値を示した。迎角15°で揚抗比が最大となるので, 選手は進行方向に対してスキーが15°になるまで前傾を深めることにより飛距離に対する効率が上がると考えられる。しかし, これについては, 着地局面への移行を考えると現実的ではないように思われる。ここでは, 迎角を大きくすることにより, 揚抗比が減少し, モーメント容積(Q_M)も大きな負の値(頭下げ方向)を示すことに着目すべきである。すなわち, 過度に大きな迎角は, 姿勢が不安定になるとともに, 失速を招くと考えられる。

C. 飛行後期局面における姿勢制御の生理学的考察

前述のとおり, 飛行局面において, 人体ならびにスキーに作用する力は, 重力を除くと空気力学的な力のみである。高速下の運動である上に, 風などの自然条件も加わり, 選手は不安定な状態であるといえる。また, 飛行後期局面において, 選手は比較的姿勢の安定した状態から着地局面に移行しなければならないため, 身体運動の変化による姿勢の乱れが予想される。実際のジャンプ競技における姿勢の乱れは競技成績への影響のみならず, 転倒につながる可能性がある。本研究において, 飛行の効率を良くするため, 揚抗比を大きくするような空中姿勢をとることにより, モーメントの絶対値が大きくなった。すなわち, 効率の良い空中姿勢をとることにより, 頭下げ方向のモーメントが強くなり, 姿勢が不安定になることが示唆された。このような姿勢の乱れを防ぐ方法として, 渡部ら(1997)は, 外乱条件に対する適応と予測的な制御をあげている。この報告において, 空中姿勢の乱れは不随意的な現象であり, 姿勢反射によるとしている。

D. 飛行後期局面の技術指導におけるバイオメカニクスの意義について

結城(2000)によれば, バイオメカニクス的な研究の成果は, 目指すべき運動課題を明確にすることや, 正しい運動解釈の基準を与えることによって経験的な観察のみに陥りやすい技術指導の錯覚を修正することに役立つとしている。

本研究においては, 飛行後期局面における空中姿勢について, キネマティクスの分析により得られた姿勢データ(スキー開き角, 屈身角, 下肢前傾角, 迎角)を空気力学的データ(揚力, 抗力, モーメント)により, 定量的に評価することができたと考えられる。すなわち, 指導およびトレーニングにおいて, 過去の運

動経験や運動観察に加えて、科学的な裏付けによる客観的な評価の基礎資料を蓄積することができた。

V. まとめ

本研究では、スキージャンプ国際大会の参加選手2名を対象として、飛行後期局面の動作について、実際の競技場面で得られたキネマティクスのデータに基づき、風洞実験で得られた空気力学的データによる評価を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 迎角, 屈身角, 下肢前傾角, スキー開き角, および膝関節角の各変数は, 着地前0.6秒までは比較的変動が小さく, その後顕著な変動がみられた。すなわち, 着地前0.6秒で着地動作が始まっていることが推察された。
- 2) 飛行後期局面において, 上位選手の方が, 迎角およびスキー開き角については有意に大きく, 屈身角については有意に小さかった。上位選手においては, 揚抗比およびスキー開き角が下位選手に比べ大きいことから, 上位選手は飛距離に対して効率の良い姿勢制御を行っていることが示唆された。しかし, モーメント容積 (Q_M) は, 上位選手の方が負(頭下げ)で絶対値が大きな値を示し, 下位選手に比べ不安定な姿勢制御を行っていたことが示唆された。
- 3) 上位選手であるF.K.選手のキネマティクスのデータに基づき, 飛行後期局面における空中姿勢について空気力学的評価を行うことにより, 競技力向上のための基礎資料の蓄積を図ることとした。本研究において対象とした選手は, スキー開き角を 38° まで拡大することが飛距離の延長につながると考えられる。屈身角については 20° まで屈曲させることで飛距離の延長につながるといえる。下肢前傾角については 10° まで小さくし, 前傾を深めることが飛距離の延長につながるといえる。しかし, 効率の良い姿勢を求めることにより, モーメント容積 (Q_M) は負(頭下げ)で絶対値が大きな値を示すので, 姿勢が不安定になることに留意しなければならない。

本研究において, キネマティクスおよび空気力学的データを用いることにより, 飛行後期局面における空中姿勢について定量的に評価することができたと考えられる。すなわち, 指導およびトレーニングにおいて, 過去の運動経験や運動観察に加えて, 評価のための客観的な基礎資料を得ることができた。しかし, 競技現場により質の高いフィードバックを行うために,

競技場面でのキネマティクスの分析を再度実施し, 姿勢データについて追証する必要がある。また, 空気力学的データについては, 屈身角 40° 以上および下肢前傾角 50° 以上の条件における計測など, さらに広範囲な姿勢データを網羅する必要がある。

【文 献】

- Arndt A., Brüggemann G.P., Virnavirta M., Komi P.V.(1995) Techniques used by Olympic ski jumpers in transition from takeoff to early flight. *Journal of Applied Biomechanics* 11 .224-237
- Baumann W.(1979) The biomechanical study of ski-jumping. *Proceedings of International Symposium of Science of Skiing, Japan* .70-95
- Deoth J., Luethi S.M., and Gasser H.H. (1987) Methodological Problems in Optimization of the Flight Phase in Ski Jumping. *International Journal of Sport Biomechanics*.3.404-418
- Hubbard M., Hibbard R.L., Yeadon M.R. and Komor A.(1989) A Multisegment Dynamic Model of Ski Jumping. *International Journal of Sport Biomechanics* 5.5(2).258-274
- Jin H., Shimizu S., Watanuki T., Kubota H. and Kobayashi K.(1995) Desirable gliding styles and techniques in ski jumping. *Journal of Applied Biomechanics* 11 .460-474
- 小早川 命, 近藤 善彦 (1985) スキージャンプの飛行力学. *科学*. 55 (3). 185-190
- Komi P.V., Nelson R.C. and Pulli M. (1974) Biomechanics of skijumping. *Studies in Sport, Physical Education and Health, Univ. Jyväskylä* 5. 1-53
- Müller W., Platzer D. and Schmolzer B. (1996). Dynamics of human flight on skis: Improvements in safety and fairness in ski jumping. *Journal of Biomechanics*.29(8).1061-1068
- 内藤 子生 (1970) 飛行力学の実際. 日本航空技術協会. 88-89
- Remizov L.P. (1984) Biomechanics of optimal flight in ski-jumping. *Journal of Biomechanics*. 17(3). 167-171
- 佐々木 敏 (1999) スキージャンプとバイオメカニクス. *バイオメカニクス研究概論 (第14回日本バイオメカニクス学会大会論集)*. 34-40
- Schmolzer B. and Müller W.(2002) The importance of being light : aerodynamic forces and weight in ski

- jumping. *Journal of Biomechanics* 35. 1059-1069
- Schwameder H. and Muller E. (2001) Biomechanics in ski jumping-A review. Müller E., Dimitriou M., Komi P.V. (eds.). *Current Issues on Biomechanics of Ski Jumping. Abstract Book.* 42 - 57
- Seo K. and Ohta K. (2002) The optimization of flight distance in ski jumping. *The engineering of sport.* 4. 408-414
- Straumann R. (1927) Vom Skiweitsprung und seiner Mechanik. *Jahrbuch des Schweizerischen Ski-Verbandes* 22. 34-64
- 谷 一郎, 三石 智 (1971) スキー飛躍の空気力学 II. *日本のスキー科学*, 日立製作所, 64-78
- Ward-Smith A.J. and D. Clements (1982) Experimental determination of the aerodynamic characteristics of ski-jumpers. *Aeronautical Journal*, 384-391
- 渡部 勲, 渡部 和彦, 谷田 好通 (1992) スキー飛躍の空気力学 (開脚の効果). *日本航空宇宙学会第23期年会講演集*, 206 - 207
- 渡部 和彦 (1992) ジャンプ: V字飛行の研究と競技への応用. *体育の科学*, 42 (5) .375-379
- Watanabe K. and Watanabe I. (1993) Aerodynamics of ski-jumping-Effect of "V style" to distance. In *Proceeding of the International Society of Biomechanics XIVth Congress*, 1452-1453, Paris : International Society of Biomechanics
- 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期年会講演論文集*, 104-109
- Yeadon M.R. (1989) A method for obtaining three-dimensional data on ski jumping using pan and tilt cameras. *International Journal of Sport Biomechanics*. 5. 238-247
- Yoshida K. (1998) Investigation of Optimal Ski Jump Flight on basis of Aerodynamic data, Master Thesis, Univ. of Tsukuba
- 結城 匡啓 (2000) スピードスケートのスキル指導におけるバイオメカニクス研究の意義と役割. *バイオメカニクス研究*, 4 (3), 179-185
(主任指導教員 渡部和彦)