

# 論文の要旨

題目：地面効果内を飛行する 3 次元翼及び前翼式地面効果翼機の定常・非定常空力特性  
(Characteristics of Steady and Unsteady Aerodynamics of 3-D Wings and  
a Canard-Configuration WIG Flying in the Ground Effect)

氏名：伊藤 悠真

日本は島国であり、海を隔てた輸送は主として船舶と航空機のみで成り立っている。しかし、この 2 つの輸送機関は速度・運賃・積載量などに大きな隔りがあり、100 km/h~500 km/h の間を担う海上輸送システムに空白の速度領域が存在している。この速度帯を埋めることができれば、効率的な海上輸送が可能となり、わが国に及ぼす経済効果も高まると考えられる。そこで、この速度帯を埋める新しい高速海上輸送機関として、地面効果翼機 (Wing-In-Ground effect : WIG)、または表面効果翼船 (Wing-In-Surface Effect Ship : WISES) が着目されている。本論文では、かつて、久保・秋元らによって提案された離水性能の向上を狙った前翼式地面効果翼機を踏襲して新たに設計した機体と、それに搭載される翼端板付き主翼、矩形翼を取り上げ、それらの定常・非定常な空力特性について、実験と理論計算によって詳細に論じるものである。

これまでの地面効果に関する研究は、2 次元翼について扱われた例が多く、空気力や圧力といった物理量について理論計算と実験の両観点から詳細に論じられた例が少ない。特に、理論面のみで調査された例が多く、理論計算の検証に資する詳細な実験データの構築が望まれるところである。本論文では、これまでの WIG に関する研究の中で未成熟な点を補完し、翼単体を対象とした地面効果内での基礎的な空力特性の調査に加え、新たに設計した前翼式地面効果翼機の静的な安定性を満足する空力特性、推進器との干渉影響に関する調査までを網羅し、具体的な実機性能について示していく。

空力特性の理論計算については、非圧縮・非粘性・非回転の理想流体を仮定したポテンシャル理論に基づく境界要素法に 2 次元 CFD 解析による摩擦抗力の推定を組み合わせた方法を適用する。また、非定常な空気力の理論計算については、時間領域境界要素法を適用し、それらの妥当性を翼の水中曳航試験と風洞試験により検証していく。

本論文は全 7 章から構成されている。第 2 章~第 3 章において、矩形翼と翼端板の付いた主翼単体における定常・非定常な空力特性、翼表面圧力分布についてそれぞれ述べ、主として理論計算の推定精度について検証を行っていく。そして、第 4 章~第 6 章において、提案する前翼式地面効果翼機の定常・非定常な空力特性について議論を展開していく。以下に各章の具体的な内容について述べる。

第 1 章では、地面効果に関する研究の背景及び、これまでに開発された地面効果翼機について紹介し、本研究の位置付けについて説明している。

第 2 章では、矩形翼と翼端板付き主翼の定常な空力特性について論じている。これまで WIG に関する理論計算のほとんどが、自由表面を平らな剛体壁とし、翼後流の変形を考慮しないといった仮定に立脚して行われているにも関わらず、それらの仮定の妥当性が実験によって実証された例はない。そこで、WIG の理論計算を行う前段階として、翼と自由表面による空力干渉影響と、翼後流の変形が空力特性に及ぼす影響について調査し、その妥当性を、翼の水中曳航試験によって証明している。水中に設置した地面板には、17 本の圧力センサーが埋め込まれており、翼を曳航させた時の流体力と同時に地面上に作用する定常な圧力分布の計測も行うことで間接的に自由表面の隆起量推定法の妥当性を検証している。水中で計測することで、高精度な力やモーメントの計測が可能であることに加えて、タフト法により後流の可視化を行うことで、理論計算によって得られた翼後流の変形の検証も行うことができる。これらの結果から、自由表面は平らな剛体壁として扱える、後流は主流に沿って平行に流出すると見なせるという 2 つの仮定が妥当であることを理論計算と実験により確認している。これにより、以降全ての理論計算において、これら 2 つの仮定を取り入れた空力特性と圧力分布の推定が可能となる。

第 2 章の後半部では、風洞試験により、翼の定常な空力特性や翼端板が揚抗比に及ぼす効果、翼が heel した時の非対称な空力特性について明らかにしている。また、翼表面圧力分布を同時計測することによって、翼端部圧力といった局所的な物理量の推定精度の検証を行っている。翼表面の圧力分布の計測値から、ストラットと翼との空力干渉影響についても明らかにしており、第 2 章の最終節では、風洞試験において空力干渉を低

減できるストラットの形状について提案している。空気力といった積分量、圧力といった局所量の両面から理論計算の妥当性が示されており、本論文で提案する空力推定手法が、定常な空力特性を高精度で推定できることを示している。

第3章では、時間領域境界要素法に関する定式化を行い、地面効果内を heave 運動する振動翼の非定常な空力特性について、曳航水槽での強制動揺試験により調査し、理論の妥当性について検証している。また、水中に設置した地面板の翼中央部と翼端部の進行方向に埋め込んだ計12本の圧力センサーを用いて、翼が heave 運動を伴って飛行した際に地面上に誘起する非定常な圧力分布の計測も同時に行っている。計測手法では、船舶の非定常波形計測法である 'Multifold method' を地面上の圧力分布計測に応用している。これは当該分野において初めての試みであり、WIG が高速飛行した際に水面上に及ぼす影響を示した実験データとして学術的な観点から貴重である。第2章と第3章を通して、本論文で提案する理論計算は、翼単体における定常・非定常な空力特性、および圧力といった局所量についても精度良く推定できることを示しており、これを踏まえて第4章以降で前翼式地面効果翼機について議論を展開していく。

第4章では、前翼式地面効果翼機の定常な空力特性について論じている。全機に作用する空力の理論計算は、第2章で示した方法を用いている。その際、胴体の摩擦抗力は平板の摩擦抗力を用いて推定している。風洞試験用のモデルは、前翼と水平尾翼の迎角が変えられるようになっており、全機の静的な縦の安定性を満たす各翼の迎角について調査している。次に、適切な前翼と水平尾翼の迎角に設定した状態で、全機が水面上を高速飛行したときに発生する造波を推定している。理論計算結果からは、胴体との空力干渉影響によって波の隆起量は主翼単体のときよりも小さくなり、全機が高速飛行しても造波は微量であることを示している。さらに第2章で行った翼単体の後流影響の調査を全機形状に適用し、後流変形による影響を調査している。また、前翼、胴体、主翼、水平尾翼間の空力干渉影響について理論計算を用いて調査することにより、胴体と主翼との空力干渉が最も顕著であることを明らかにしている。

第5章では、全機が地面効果内を heave 運動及び、pitch 運動しながら飛行する場合と、進行波面上を飛行する場合の非定常な空力特性について時間領域境界要素法を用いて調査している。全機が運動した場合に生じる非定常な空気力は飛行高度に大きく依存しないが、進行波面上を飛行する場合に生じる非定常な空気力は飛行高度の増加により極端に小さくなることを明らかにしている。

第6章では、2つの推進器を主翼の上面にマウントし、それらを稼働させた状態で風洞試験を行うことで、巡航状態における機体の空力特性について論じている。推進器の稼働によって揚力が若干向上し、頭下げ方向のモーメントが誘起されるが、推進器の噴流による水平尾翼の下向き揚力の増加によって、頭下げモーメントが小さく抑えられていることを理論計算と風洞実験により明らかにしている。推進器を主翼上面にマウントした形態は、水平尾翼との干渉影響を生かせることから、機体の運動を抑制するための効果的なマウント位置であることを示している。最後に、第4章から第6章で得られた知見を用いて想定する実機の主要目を概算し、その結果を既存の一般航空機と比較することによって、船舶と航空機の間位置する輸送機としての成立性を示している。

第7章は結言であり、第2章から6章で得られた結果を総括している。

以上、本論文では、船舶流体力学の観点から自由表面影響について考察し、航空力学の観点から翼や機体の空力特性について論じている。翼単体に関する地面効果内での基礎的な実験データは、様々な計算手法の妥当性の検証に資する貴重なデータであると考えられる。また、本研究で提案した理論計算法は、今後より性能の高い地面効果翼機の最適設計に適用できると期待される。