

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289333

研究課題名(和文) 実海域波浪環境下で優れた耐空・耐航性能を有する地面効果翼機の開発

研究課題名(英文) A development of WIG with superior seakeeping and airworthiness in the real sea condition

研究代表者

岩下 英嗣 (Iwashita, Hidetsugu)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60223393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：地面効果を受ける翼(WIG)の空力特性を推定する理論計算法を開発した。その方法は、境界要素法に基づく3次元計算法に、2次元CFDを組み合わせた手法である。また、水槽曳航試験により、WIG直下の地面上圧力分布の計測法を開発し、定常圧力のみならず非定常な圧力の計測に成功した。加えて、風洞試験においては、小型のWIG模型表面の圧力分布の計測に成功した。WIGの離水時流体力を推定するため、周波数領域ランキンパネル法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A theoretical calculation method was developed to estimate aerodynamics of WIG. The method is based on the 3D boundary element method and the 2D CFD. A measurement system of pressure distributions over the ground induced by the flight of WIG was also established and not only the steady but also the unsteady pressure distributions over the ground were measured. In addition, the pressure on the WIG surface was measured successfully in the wind tunnel test. A Rankine panel method was also developed to estimate hydrodynamics acting on WIG when it advances in waves. The method can be applied for low speed and low frequency region, and its efficiency was confirmed through the comparisons with experimental results.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：地面効果 前翼式WIG 境界要素法 水槽試験 風洞試験 圧力

## 1. 研究開始当初の背景

地面効果翼機とは、翼と地面との空力干渉によりその揚抗比が増大することを利用して、少ない翼面積で高速に、すなわち高効率で輸送を行う特殊航空機(船舶)であり、1920年代辺りから航空分野で基礎的な研究が始められている。その後、1935年に地面効果翼機として開発されて以降、ソ連やドイツなどを中心に Lippish 翼やタンデム翼など様々なコンセプトに基づく機体が提案され、小型レベルでの実機も生産されて来ているが、一般航空機のように機体形状が集約されるまでには至っていない。

昨今特にアジア圏諸国において地面効果翼機の実現へ向けての研究開発が活発化して来ている。韓国では2006年春から5ヵ年計画で総予算201億円をかけた300tクラスの実機の開発が行われ、その成果を受けて既に小型機の製造販売が行われているし、ベトナムやインドネシアでも本格的な実機開発がスタートしようとしている。我が国でもエアロトレインなど地面効果を利用した陸上輸送機の研究開発が精力的に行われている。また、昨今では地面効果翼機と同様に海面から離発着する海難飛行艇 US-2 の活躍が話題となったニュースもあり、こうした特殊航空機の災害時緊急輸送活動での利用価値も再認識されている。このように、次世代高効率新型輸送機への期待とニーズは環境問題の観点からも高まっており、地面効果翼機の実用化へ向けてその航空工学および船舶工学の視点からの研究が新たに切望されて来ている。

## 2. 研究の目的

本研究では過去に行ってきた基礎的な研究(離水性を高める前翼式機体の提案と性能検証)を踏まえ、波浪中飛行性能の向上を目指した新たな機体形状について探究するものであり、2mクラスの模型による空力データ取得と理論数値計算法の開発およびその推定精度の検証を実施する。特に、これまでに取得されていない地面上や翼表面圧力分布の計測データ取得に注力し、加えて着水時における耐航性能を、低速・低周波数域でも推定できる理論計算法の開発も目指している。

## 3. 研究の方法

研究は、以下4つの項目に分けて遂行している。

(1) 境界要素法をベースとした理論解析  
境界要素法を揚力体に適用し、地面効果翼に作用する空力推定ツールを開発する。粘性に起因する摩擦抗力の推定においては、翼断面に2次元CFDを適用し、揚力係数、レイノルズ数をパラメータとした摩擦抗力係数のデータベースを作成する。3次元翼の各断面に作用する揚力係数とレイノルズ数を用いて、構築したデータベースから摩擦抗力係数を算出し、それを翼スパン方向に積分することで3次元翼全体の摩擦抗力を見積もる。非定

常状態の空力推定用に、時間領域の境界要素法も開発する。

(2) 水槽曳航試験による地面上圧力計測  
既往の研究では地面効果翼に作用する空力を計測したデータは一般的であるが、圧力レベルの計測データはほとんど存在しない。そこで、水中に圧力ゲージを埋め込んだ床を設置し、その上を地面効果翼模型を曳航することで、地面効果直下の地面上の圧力分布を計測することを試みる。計測法として、船舶の非定常波形計測法を適用し、定常圧力分布のみならず非定常分布も計測する。同時に翼模型に作用する流体力(空力)も計測し、理論計算の検証に用いる。

(3) 風洞試験による翼表面圧力分布計測  
地面効果を受ける翼の圧力分布の計測例も稀少である。そこで、矩形翼や地面効果翼主翼の模型表面上の圧力分布の計測を実施し、圧力レベルでの地面効果について探求する。模型製作に際しては3次元プリンターを利用して圧力の導管を模型内に埋め込むことで、小型模型でも詳細な圧力分布計測が行えるように工夫する。この手法により地面効果翼に取り付けられる翼端板周りの圧力分布についても計測可能になる。

(4) 周波数領域ランキンパネル法の開発  
地面効果翼の耐航性能を論じるためには、一般の船舶同様に波浪中を航走する際の流体力、運動、抵抗が推定できなくてはならない。これを可能とするために、低速・低周波数域でも無限遠条件を高精度に満足できる周波数領域ランキンパネル法を新たに開発する。そこには結合積分方程式法を簡易化した手法を適用することで、精度を維持しつつも高速な計算が行えるようにする。

## 4. 研究成果

研究方法で示した4つの項目ごとに得られた研究成果を概説する。

(1) 境界要素法をベースとした理論解析  
揚力体用に作成された3次元境界要素法に、2次元CFDを組み合わせた計算法を確立した。供試模型に対して風洞試験や水槽試験で得られた計測による空力特性と比較することで、開発した計算法の精度検証を行ったところ、摩擦抗力の推定も含めて極めて高い精度での空力推定が行えることが確認された。

加えて、時間領域境界要素法も別途開発し、翼後流面の幾何学的な変形が空力に及ぼす影響についても調べた。水槽試験においてタフト法で計測された後流形状が、開発した計算法で高精度に推定できることが確認されている。地面効果により、後流面は幅方向に広がる傾向があることなど、数値計算と計測結果からは、これまでに知られていなかった新たな知見も得られている。

(2) 水槽曳航試験による地面上圧力計測  
地面効果を受ける翼が地面上を飛行した際の地面上の圧力分布を計測した例はこれまでにない。前節の研究方法(2)に記した方法

により、地面床上の定常および非定常な圧力分布の計測に成功した。前者は地面効果翼が定常飛行した際の圧力、後者は地面効果翼が周期的にヒープ運動しながら飛行する際の圧力に該当する。例として図1に矩形翼が低高度で飛行する際の地面上圧力分布を理論計算結果と比較して示している。翼端に沿う計測圧力は粘性の影響で翼端渦が消滅する理由から理論計算よりも値が小さいが、全体的には理論計算が計測結果を良く説明していることが分かる。また、図2には、midspanおよび翼端に沿う非定常圧力分布を示している。時間領域境界要素法による理論計算が非定常圧力分布を高精度に推定していることが確認できる。これらの計測データは世界初である。

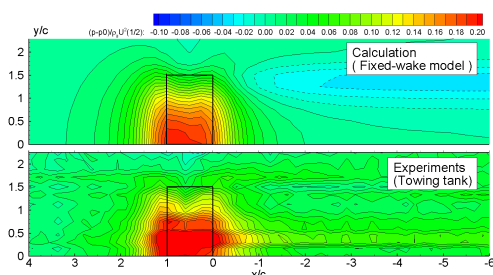


図1 矩形翼下の定常圧力分布

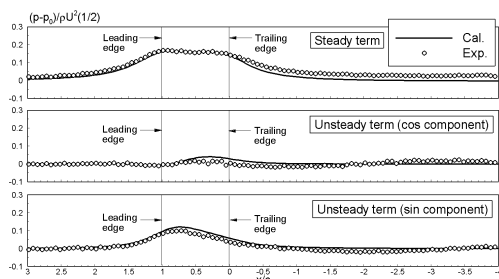


図2 矩形翼下の非定常圧力分布

(3) 風洞試験による翼表面圧力分布計測  
3D プリンターを用いて模型を製作することで、小型模型においても高精度に翼表面上の圧力分布を計測できるようになった。図3は、前翼式地面効果翼にマウントされる翼端板付き主翼表面の圧力分布を示している。飛行高度が低くなると地面効果が促進され、それは圧力レベルでは翼下面の正圧の増加として現れることが分かった。また、対称翼断面を持つ翼端板表面には、あたかも翼内側から外側へ向かう流速場が形成されたような圧力が作用していることも確認できる。これは翼端板が翼下面の流れを堰き止めるように作用し、結果として翼下面の正圧を増加させ、地面効果を促進していると考察することができる。理論計算と計測結果の合致は、翼表面の圧力分布の視点からも良好に一致していることも確認できる。

この他、風洞試験では、模型を支持するス

トラットと翼との干渉影響により、翼上面の負圧が僅かながら大きめに計測されることも確認されている。

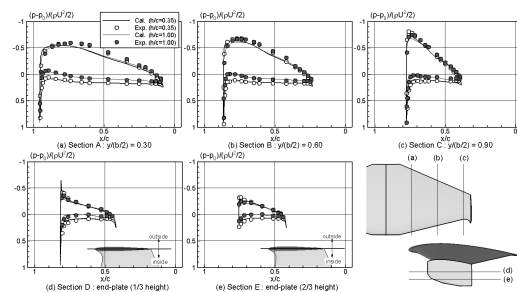


図3 翼端板付き主翼上の定常圧力分布

#### (4) 周波数領域ランキンパネル法の開発

従来の周波数領域ランキンパネル法は、高速・高周波数域においては有効であるものの、低速・低周波数域では推定精度が不十分であることが知られていた。これは数値的に付加される無限遠条件が不適切であることに起因しているが、これまでその対策は講じられていなかった。この問題を解決するために、研究方法(4)に記した簡易結合積分方程式法を適用したランキンパネル法を開発した。開発した方法は、単一特異点周りの非定常流場の解析を通じて詳細に精度検証されている。また、既存の計算法との比較を通じて、本手法が最も高精度であることも確認している。加えて、コンテナ船型やバルクキャリアー船型の供試模型を用いた水槽試験を実施し、流体力、船体運動、非定常波動場、非定常圧力分布という多くの計測値との比較を通じて本手法が有効であることが示されている。特に、前進速度なし、追い波中など、これまでの計算法では推定が困難であった条件に対しても高精度推定ができるようになったことが確認されたことは極めて有益な成果である。

上記研究成果の(1)~(3)については、主として5節に記した雑誌論文1~3に、また(4)については雑誌論文4,5に詳細に報告している。雑誌論文1~3に関しては、第一著者である伊藤悠真氏(研究当時研究代表者の指導下にあった博士課程後期学生)が日本船舶海洋工学会平成29年度奨励賞(乾賞)を受賞しており、研究内容が高く評価されている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

1. Ito Yuma, Iwashita Hidetsugu, Influence of the Wake Deformation and the Free-Surface on Steady Aerodynamics of

Wings in the Ground Effect, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 査読有, Vol.24, 2017, pp51-68

2.Ito Yuma, Iwashita Hidetsugu, Characteristics of Unsteady Aerodynamics and Pressure Fields of Wings Flying with Heave Motion in the Ground Effect, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 査読有, Vol.24, 2017, pp69-83

3.伊藤悠真, 岩下英嗣, 地面効果内を巡航する3次元翼の翼表面圧力分布と空力特性, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 第24号, 2017, pp85-103

4.岩下英嗣, 周波数領域ランキンパネル法における無限遠条件の数値処理について, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 第24号, 2017, pp105-127

5.岩下英嗣, 柏木正, 伊藤悠真, 関裕太, 周波数領域ランキンパネル法による低速/低周波数域での耐航性能計算, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 第24号, 2017, pp129-146

6.Yoshida Motoki, Iwashita Hidetsugu, Kanda Masamitsu, Kihara Hajime, Kinoshita Takeshi, Unsteady Characteristics of Lift Generated by Small Underwater Control Fin, International Journal of Maritime Engineering, 査読有, Vol.158(Part A1), 2016, ppA51-A61

7.Liu Yingyi, Hu Changhong, Sueyoshi Makoto, Iwashita Hidetsugu, Kashiwagi Masashi, Motion Response Prediction by Hybrid Panel-Stick Models for a Semi-Submersible with Bracings, Journal of Marine Science and Technology, 査読有, Vol.21(No.4), 2016, pp742-757

8.Liu Yingyi, Iwashita Hidetsugu, Hu Changhong, A Calculation Method for Finite Depth Free-Surface Green Function, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 査読有, Vol. 7(2), 2015, pp375-389

9.Yoshida Motoki, Kihara Hajime, Iwashita Hidetsugu, Kanda Masamitsu, Kinoshita Takeshi, Superior Seaworthiness of a Resonance-Free Oceangoing SWATH, International Journal of Maritime Engineering, 査読有, Vol.156(Part A4), 2014, pp315-332

〔学会発表〕(計16件)

1.Ito Yuma, Iwashita Hidetsugu, Characteristics of Steady Aerodynamics of the Canard-Configuration WIG Flying in the Ground Effect, International RIAM Symposium on Ocean Renewable Energy Technologies and related fluid dynamics researches, 2017年1月23-24日, 九州大

学応用力学研究所(福岡県・春日市)

2.Ito Yuma, Iwashita Hidetsugu, Pressure Distributions and Aerodynamic Properties of Wings in the Ground Effect, 日本船舶海洋工学会西部支部国際ワークショップ WETNAOE2016, 2016年12月8-9日, 広島大学国際協力研究科114会議室(広島県・東広島市)

3.Seki Yuta, Kashiwagi Masashi, Iwashita Hidetsugu, Ito Yuma, Yoshida Junki, Katano Akira, Wakahara Masahito, Improvement in estimation of pressure distribution on ship hull surface, 日本船舶海洋工学会西部支部ワークショップ WETNAOE2016, 2016年12月8-9日, 広島大学国際協力研究科(広島県・東広島市)

4.Katano Akira, Iwashita Hidetsugu, Kashiwagi Masashi, Ito Yuma, Seki Yuta, Yoshida Junki, Wakahara Masahito, Measurement of Unsteady Pressure Distribution of a Ship in Waves, 日本船舶海洋工学会西部支部国際ワークショップ WETNAOE2016, 2016年12月8-9日, 広島大学国際協力研究科114会議室(広島県・東広島市)

5.伊藤悠真, 岩下英嗣, 地面効果翼の空力特性と翼表面圧力分布について, 日本航空宇宙学会第54回飛行機シンポジウム, 2016年10月24-26日, 富山国際会議場(富山県・富山市)

6.岩下英嗣, 柏木正, 伊藤悠真, 関裕太, 吉田準基, 若原正人, 波浪中を航走する船の非定常圧力分布計測, 日本船舶海洋工学会平成28年春季講演会, 2016年5月26-27日, 福岡県中小企業振興センター(福岡県・福岡市)

7.伊藤悠真, 岩下英嗣, 地面効果翼の翼表面圧力分布に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成28年春季講演会, 2016年5月26-27日, 福岡県中小企業振興センター(福岡県・福岡市)

8.白澤克年, 南潤一郎, 岩下英嗣, 新竹積, 海流水槽における海流発電ブレードの性能評価, 日本風力エネルギー学会第37回風力エネルギー利用シンポジウム, 2015年11月26-27日, 科学技術館サイエンスホール(東京都)

9.Ito Yuma, Iwashita Hidetsugu, Unsteady Aerodynamic Behaviors of a Wing in Ground Effect and Pressure Field around it, 日本船舶海洋工学会西部支部国際ワークショップ WETNAOE2015, 2015年11月2-3日, 広島大学工学研究科B4-117講義室(広島県・東広島市)

10.伊藤悠真, 岩下英嗣, 地面効果翼機の非定常空力特性と翼周りの非定常圧力場について, 日本船舶海洋工学会平成27年春季講演会, 2015年5月25-26日, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市)

11.伊藤悠真, 岩下英嗣, 地面効果翼の定常

及び非定常空力特性について，日本船舶海洋工学会平成 26 年秋季講演会，2014 年 11 月 20-21 日，長崎市プリックホール(長崎県・長崎市)

12. Ito Yuma, Iwashita Hidetsugu, On Steady and Unsteady Aerodynamics of Rectangular Wing Flying in the Ground Effect, 日本船舶海洋工学会西部支部国際ワークショップ WETNAOE2014, 2014 年 11 月 14-15 日，広島大学工学研究科 B4-106 講義室(広島県・東広島市)

13. Kataoka Shiro, Iwashita Hidetsugu, A Time-Domain Hybrid Method for Seakeeping Quality Analysis, 日本船舶海洋工学会西部支部国際ワークショップ WETNAOE2014, 2014 年 11 月 14-15 日，広島大学工学研究科 B4-106 講義室(広島県・東広島市)

14. 伊藤悠真, 岩下英嗣, 地面効果翼の自由表面干渉影響と非定常空力特性について, 日本航空宇宙学会第 52 回飛行機シンポジウム, 2014 年 10 月 8-10 日，長崎市プリックホール(長崎県・長崎市)

15. 伊藤悠真, 岩下英嗣, 地面効果内を飛行する 3 次元翼と全機空力に関する自由表面干渉影響と後流影響について, 日本船舶海洋工学会平成 26 年春季講演会, 2014 年 5 月 26-27 日，仙台国際センター(宮城県・仙台市)

16. Ito Yuma, Iwashita Hidetsugu, A Study on the Aerodynamic Properties of a Canard-Configuration WISES, 29th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 2014 年 4 月 1-2 日，ホテル阪急エキスポパーク(大阪府・吹田市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩下 英嗣 (IWASHITA HIDETSUGU)

広島大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60223393