

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：37115

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K00744

研究課題名（和文）飛行安定性に優れた地面効果翼機のデザイン

研究課題名（英文）Design of Wing in Ground Effect Vehicle for High Flight Stability

研究代表者

東 大輔（AZUMA, DAISUKE）

久留米工業大学・工学部・教授

研究者番号：20461543

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：離島の海洋交通手段として実用化が期待される地面効果翼機について、未来的でありながら高い空力性能も有する先鋭的な機体デザインの研究を風洞試験と空力シミュレーションを用いて行った。機体全体を翼のような形状でデザインしたリフティングボデーを基本とし、さらに翼下面の圧力上昇と地面効果を効率よく得る目的で主翼を前進翼形状とし、さらに水平垂直尾翼を機体前方に配置することで先鋭的なデザインと飛行安定性を両立する地面効果翼機デザインの方向性を見出すことができた。また、国内および海外の現地調査を行い、地面効果翼機を用いたビジネスモデルと事業戦略の検討も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

四方を海に囲まれた我が国には空港を持たない離島が多数存在し、そこに暮らす人々は通院、通勤、通学で主に船舶を利用している。船舶での移動は航空機の5倍以上の時間を要することから、船舶よりも速く、航空機のように空港を必要としない地面効果翼機の実用化が期待されており、本研究では実現可能性のあるシンプルなデザインと、飛行安定性を高い次元で融合した先鋭的な地面効果翼機のデザインの方向性を見出すことができた。さらに、国内外のフィールド調査を実施し、自走可能なビジネスモデルの検討と事業戦略の検討を行うことができた。本サービスが実用化されれば、離島に暮らす人々のQOLを大きく高めることが可能と考える。

研究成果の概要（英文）：A ground effect wing aircraft, which is expected to be put to practical use as a means of marine transportation on islands, has been researched on a futuristic and high aerodynamic performance design using wind tunnel tests and aerodynamic simulations. In order to appeal the advanced design, the entire fuselage has a forward wing shape as a wing-like lifting body, and the idea is to place the horizontal and vertical stabilizers in front of the fuselage. We were able to propose a suitable design. In addition, field surveys were conducted in Japan and overseas, and business models for ground effect wing aircraft were also examined.

研究分野：航空機デザイン

キーワード：航空宇宙工学 デザイン 地面効果翼機

1. 研究開始当初の背景

四方を海に囲まれた我が国において海洋交通は経済の要であると同時に、離島に暮らす人々にとっては通勤、通学、通院、買出しなど、まさに生活に欠かせないインフラであり、その移動速度とエネルギー効率の向上は重要課題である。ただ、我が国の海洋交通は事業性や輸送量の観点から船舶による交通が多く、速度の点で大きな課題がある。実際に、船舶と航空機の両方の路線がある対馬-福岡間の路線では、フェリーでは片道に4時間30分を費やすのに対し、航空機ではわずか30分で移動することが可能であり、速度の観点では圧倒的に航空機が勝っている。しかし、航空機の運航には、空港などを作る広い土地や航空燃料や整備にかかるコストの高さなどの問題も多く、現在の有人島の中で航空機を運航する設備があるのは約40ヶ所しかなく、多くの島々での実質的な海上交通は船舶だけというのが現状である。このような背景から、我々は空港などの大型施設を新設せず、既存の港湾施設に入港可能な小型航空機のデザインに着目し、特に、航空機が地面や海面の近傍を飛行する際にエネルギー効率が高くなる「地面効果」を利用して飛行する新しい小型航空機「地面効果翼機」のデザインの研究を進めてきた（図1）。

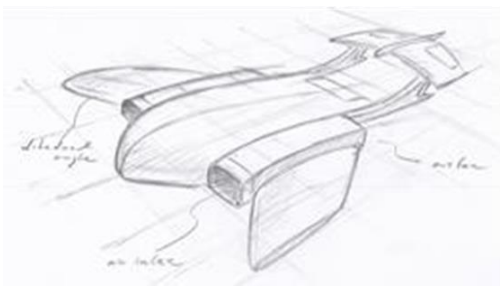


図1. これまでの研究で提案した地面効果翼機のコンセプトデザイン

2. 研究の目的

これまでの研究では風洞試験や空力シミュレーション（CFD）を利用し、揚抗比(L/D)が高くなる機体デザインの研究をデザインと工学を融合した視点で進めてきた（図1）。本研究ではさらに発展させ、実用化で最も重要な課題になる「離陸（離水）した後の飛行の安全性」を高める機体デザインの研究を行う。

また、地面効果翼機を用いた持続可能なビジネスモデルの検討も行う。具体的には、国内外の海上輸送運用団体へヒアリングを実施し、運航海域、飛行高度、速度、港湾施設、機体デザインなどへの助言を受ける。その上で機体の仕様やデザインを総合的に検討する。

3. 研究の方法

(1) 風洞試験装置

風洞試験には、2009年にJARI（日本自動車研究所）から寄贈された回流式のゲッチングン型風洞を用いた。本研究では風速15.5[m/s]、レイノルズ数 $Re=2.07 \times 10^5$ で試験を行い、機体に生ずる空気抵抗や揚力、横力といった力に加え、ピッチング、ヨーイング、ローリングの各モーメントの計測を行った。

(2) 空力シミュレーション装置

CFD（Computational Fluid Dynamics）システムにはCRADLE社のSCRUYU/Tetraを用いた。CADデータの取り込みから解析実行までの作業をシームレスに行える極めて操作性の高いCFDシステムである。本研究では定常計算とし（迎角変化は非定常計算）、圧力項は修正SIMPLEC、移流項はMUSCLE、時間項は1次精度陰解法を用いている。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。解析空間分割数はおよそ1400万。風洞試験結果と定性的に空力性能変化の傾向が一致する条件で解析している。

(3) ビジネスモデル検討

国内外の海上輸送運用団体へヒアリングを実施し、運航海域、飛行高度、速度、港湾施設、機体デザインなどへの助言を受ける。具体的には、国内は離島交通に着目し、鹿児島県から沖縄県に跨る南西諸島に分布する離島を中心に海洋交通の実態調査を実施した。また、国外については海洋国家であるシンガポール、港湾都市であるオーストラリアのシドニー市の現地調査を実施した。

4. 研究成果

(1) 地面効果翼機のデザイン提案

① デザイン自由度を高める新たな空力制御デバイスの空力目標値設定

本事業の目的は、未来的でありながら高い空力性能を有する次世代地面効果翼機デザインの研究を進め、実現可能性のある機体デザインの提案を行うことである。そこで、はじめに風洞試験を用いて航空機のエネルギー効率を評価する上で重要な指標となる揚抗比や、飛行時の縦安定性を示すピッチングモーメントを改善する基本デザイン検討を進めた。具体的には、ピッチングモーメントの制御には水平尾翼が有効であることを確認し、それを取り入れたフライトモデルを製作したが、テストフライトを行うと離陸後のピッチングモーメントは改善されたものの、機体が横方向やロール方向に回転し、墜落する現象が発生してしまった。その改善には垂直尾翼の設置が効果的であるが、機体の後方に水平尾翼や垂直尾翼を設置すると既存の港湾施設に入港しづらいことや、低速高迎角時に尾翼が着水して流体抵抗が増えるなどの技術的な課題に加え、デザインの新規性が失われるという課題もあり、我々は垂直尾翼に頼らない新たな空力制御デバイスの研究を進めることにした。

そこで、この新たな空力デバイスの要求性能仕様を確認する目的で、コンベンショナルな水平・垂直尾翼が発生するモーメント値を調査した。具体的には、フライトモデルのテストフライトで飛行を安定化する水平および垂直尾翼の形状を見出し、その尾翼が発生している各モーメント値を風洞試験で確認した（図2）。この調査により、主翼などに設置する新たな空力デバイスの発生すべきローリングモーメントやピッチングモーメントの目標値を設定することができた。

② 新たな空力制御デバイスのシステム

新たな空力制御デバイスの実現には、機体姿勢を正確に計測するジャイロセンサや翼上面圧力センサ、それらをセンシングしてデバイスを作動させる制御アルゴリズム、さらに、デバイスを作動させるアクチュエータ、などのシステムが必要である。そこで、基本フライトモデルを用いて制御システムの基本設計と試作開発を行った（図3、4）。

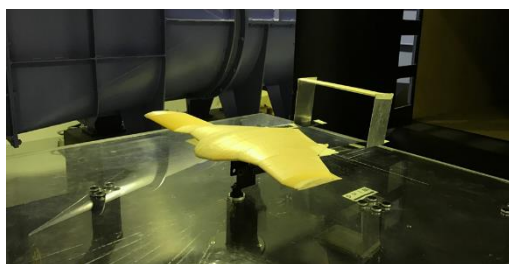


図2. 水平尾翼の風洞試験の様子



図3. フライトモデルの外観

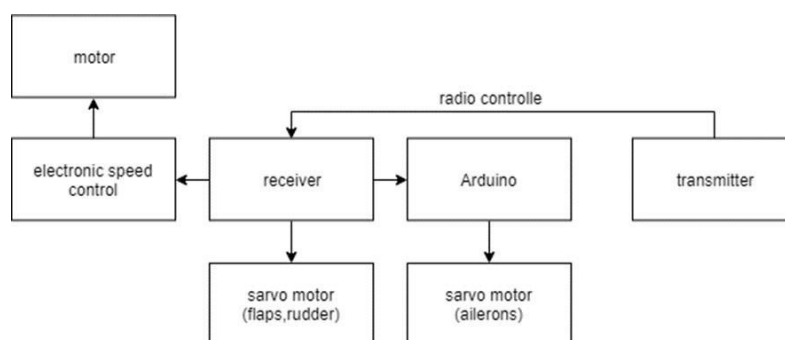


図4. フライトモデルの制御システム概要

③ 新たな空力制御デバイスの空力性能調査

空力デバイスが発生すべきローリングモーメントやピッチングモーメントの目標値を設定できたため、その要件を満たす新たな空力デバイスの検討を風洞試験で行った。具体的にはSTOL機(Short Takeoff and Landing Airplane)などに見られる境界層制御装置に着想を得て、巡航状態にある地面効果翼機の主翼の上面に回転可能な支柱を取り付けて左右の主翼の境界層と揚力をそれぞれコントロールし、飛行安定性を高める新たな空力デバイス検討を進めた。しかし、従来のフラップや垂直尾翼のようにローリングモーメントやヨーイングモーメントなどの飛行安定性を十分に高める効果を得ることはできなかった。

④ 先鋭的な印象を与える先尾翼モデルの提案

上述のように、主翼上面に設置する回転可能な円柱でピッチングモーメントやローリングモーメントを制御するシステムでは十分な飛行安定効果を得ることはできなかったため、固定式の垂直尾翼や水平尾翼の設置は避けられないと判断した。しかし、従来のように機体後方にする尾翼で飛行安定性を高めようとする、尾翼を機体の重心から十分に後方に配置せねばならず、海面近傍を飛行する地面効果翼機の場合、離着水時の低速高迎角飛行時に水面に着水し、大きく減速して失速に至る危険性がある。そこで、ヨー方向の飛行安定性を高める垂直尾翼を機体前方に配置し、水平尾翼も合わせて前方に配する固定型空力デバイスの検討を行った。一般的に先尾翼と呼ばれるデザインに近くなるが、本事業で検討している機体の主翼が、翼下面の圧力を効率よく向上させる目的で前進翼に下反角のついた先鋭的なデザインとなっているため、機体全体のデザインとしては次世代航空機として十分に斬新かつ先鋭的な印象が得られている。また、巡航時の飛行安定性を高める効果も確認でき、低速高迎角時のリヤエッジの着水を避けることもできるため、地面効果翼機として機能とデザインを融合する重要な方向性を見出せたと考えている（図5）。

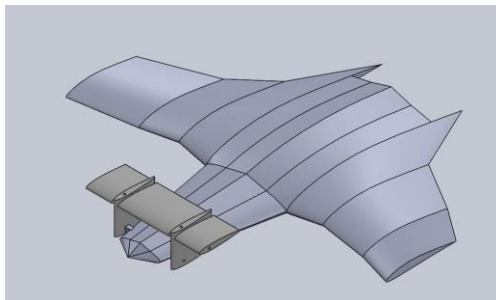


図5. 先尾翼を活かしたデザインモデル

⑤ 水中翼を活用する機体デザインの検討

これまでの検討から、機体デザインに求められる技術要件を大きく2つにまとめた。一つは飛行安定性に優れること。すなわち、飛行中のピッチングモーメントやヨーイングモーメントの安定性を高めることである。そしてもう一つが低速飛行時の揚力確保である。前者は風洞試験による空力調査で機体前方に取り付ける先尾翼が有効であることを見出し、次世代航空機らしい先鋭的なデザインと空力性能を両立するデザインの方向性を示すことができた。もう一つの技術要件である低速飛行時の揚力確保については、機体が発生する揚力を水中翼で補うアイデアを提案し、低速飛行時の揚力不足を解消するとともに、ピッチングモーメントなどの飛行姿勢の安定化も可能にする新たな機体デザインの提案を行った。水中翼技術は比較的シンプルである点や自動姿勢制御などの技術の進歩などの点から、民間企業による水中翼船開発において世界的に増加傾向にあり、水中翼船のプライベート利用や水上タクシーなどを想定した水中翼船の開発が更に増加していくと考えられる。我々は、水中翼船の自動姿勢制御技術と、地面効果翼機の揚力を活用して、上記2点の技術要件を満足する新たな地面効果水中翼機のデザイン検討を進めた。

(2) ビジネスモデルの検討

① 国内市場調査

地面効果翼機を用いた交通サービスの市場分析として、沖縄および鹿児島、長崎五島などの離島における交通サービスの現状を調査した。現地の航空会社やフェリー運航会社の職員や現地住民へのヒアリングから、離島での交通需要は主に通院、通勤、買出し、通学などがあるが、特に高齢者の通院には大きな課題があるとのことであった。例えば、沖縄には多数の離島があるが、空港があるのは限られた大きな島のみで、その他の島の島民は船で大きな島の病院に通院している。航空機ならば1時間足らずで病院のある大きな島へ行けるが、船舶だと半日近くかかってしまう。病気の高齢者にとって、半日近く船で揺られる移動は、身体に対する負担が極めて大きい。実際に、船舶と航空機の両方の路線がある島の一つである対馬と福岡間の路線では、フェリーでは片道4時間30分かかるのに対し、航空機では約30分で移動することが可能であり、圧倒的に航空機のほうが便利であることが分かる。とは言え、上述のように空港があるのは大きな島のみであり、航空機とフェリーの中間的な移動手段として活躍しているのが水中翼船である。水中翼船とは、水中翼を用いて水上に船体を浮上させることにより、これまで船舶の課題とされていた水中の抵抗を少なくする事で高速での航行を可能にした船舶で、近年の日本では、ボーイングが開発し、川崎重工によって製造・販売が行われているジェットフォイルが九州エリアなどで運航されており、先ほどの対馬ー福岡間においてもジェットフォイルは従来のフェリーの半分程度の2時間15分で運航可能である。令和3年に国土交通省のまとめた「九州運輸局管内において運航しているジェットフォイルの今後の在り方に関する基礎調査」によると、壱岐・対馬、五島・種子島・屋久島の3区間の航路におけるジェットフォイル利用者数は平成26年以降上昇傾向

にあり、高速移動に対する需要の高さが伺える。ただ、それでも航空機の数には遠く及ばず、現地の方々からも、空港がなくても運行可能な地面効果翼機に大きな期待を寄せる声が多数聞かれた。

② 海外市場調査

コロナが落ち着きを見せた 2022 年度に海洋国家であるシンガポールと、湾内の海洋交通が発達しているシドニーで地面効果翼機に対する市場調査を実施した。シンガポールではプロダクトデザインの領域で近年大きな注目を集めている Singapore University of Technology and Design (SUTD) を訪問し (図 6)、現地のエンジニアや学生に地面効果翼機や高速海洋交通の需要などについてヒアリング調査を実施した。シンガポールは鉄道網が発達しており、例えばチャンギ国際空港から都心まで電車で 30 分程度と国内を移動する上では地面効果翼機の需要はそれほど高くないと感じた。ただ、近隣のインドネシアやマレーシアに移動する需要は高く、現在は船舶で数時間かけて移動しているようだが、ここに地面効果翼機があれば富裕層を中心に需要が期待できるとの貴重な意見を得た (図 7)。



図 6. SUTD 校舎



図 7. シンガポール海洋交通の様子

シドニーでは New South Wales Government や The University of Sydney、University of Technology Sydney などの学術研究期間、さらに現地住民らのヒアリング調査を実施した。The University of Sydney では Senior Research Fellow の Dr. Stewart Worrall 氏から、海洋だけでなく河川内での利用に需要があるのではとの助言を得た (図 8)。また、New South Wales Government の Alex N.T Lai 氏からは、湾内はフェリーや各種船舶が多く危険だが、オーストラリア内陸部の高大な砂漠エリアでの活用に大きな可能性を感じるといった助言を得た。さらに、シドニーの富裕層が多く居住する Rose Bay エリアにある SYDNEY SEAPLANES 社で、飛行艇フライトサービスの調査と事業主体者へのヒアリング調査を実施した (図 9)。我々の地面効果翼機のテストフライトでは機体の一部 (車輪や尾翼) が地面に設置して大きく姿勢を崩す様子が頻繁に見られたため、飛行艇が離着水する際に海面に着水している部位が流体抵抗を受けて機体姿勢が大きく変化する様子を中心に調査した。飛行艇は離水する前に十分な加速を行い、垂直尾翼が十分に機能する速度域まで着水していることに加え、図 9 に見られるように海面に設している部分 (通常飛行艇の車輪部分) がボート形状になっていて流体抵抗が小さいため、波に断続的に着水する際の上方向の衝撃はあるものの、左右の非対称によってヨーイングやローリング方向に機体姿勢が大きく変化する様子はほぼ感じられなかった。我々の地面効果翼機では左右の主翼の中央付近が海面と着水する想定だが、その部位をボート形状にして十分に流体抵抗を下げる必要がある。また、本サービスは富裕層向け、もしくは新婚旅行等の特別なセレモニーを想定したサービスである。我々の地面効果翼機のサービスも、初期は 10 人乗り程度の小型機体として同様のサービスでビジネス基盤を固め、その上で離島の移動サービスに展開していくという事業戦略が、自走可能なビジネスモデル構築を可能にすると思われる。

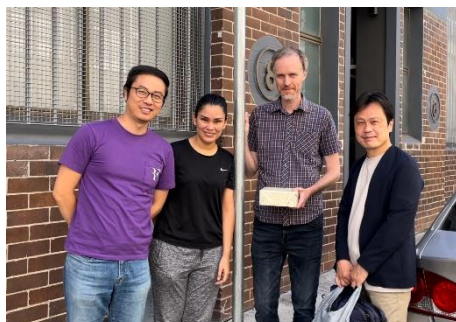


図 8. シドニー大学研究者らと



図 9. SYDNEY AIRPLANES 社の飛行艇

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大谷亮太郎、服部雄紀、福島啓祐、東 大輔
2. 発表標題 斬新なデザインを実現する地面効果翼機の空力デバイスの先行研究
3. 学会等名 日本デザイン学会研究発表大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立優貴、大谷亮太郎、服部雄紀、東 大輔
2. 発表標題 地面効果翼機の翼上アクティブフェンスの効果
3. 学会等名 芸術工学会2019年度秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東大輔、服部雄紀、金子寛典
2. 発表標題 地面効果を利用した 次世代航空機の空力デザイン開発
3. 学会等名 ソフトウェアクレイドルユーザーカンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東 大輔, 山下涼太, 赤司宣之
2. 発表標題 飛行安定性に優れる 地面効果翼機の空力デザイン
3. 学会等名 日本デザイン学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東 大輔, 山下涼太, 赤司宣之
2. 発表標題 地面効果翼機の揚抗比を高める エアロデバイスのデザイン研究
3. 学会等名 芸術工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東 大輔
2. 発表標題 環境にやさしい空力デザイン
3. 学会等名 久留米市エコなモノづくり協議会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東 大輔
2. 発表標題 地面効果翼機デザイン研究の紹介
3. 学会等名 自動車技術会流体技術部門委員会見学会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東 大輔
2. 発表標題 自動車デザインにおける空力デザイン
3. 学会等名 自動車技術会デザイン部門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------