

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：17102
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2012～2015
課題番号：24603017
研究課題名(和文) 日本の地理的条件に適した地面効果翼機の提案

研究課題名(英文) Design proposal of WIG in Japan

研究代表者

石井 明 (ISHII, Akira)

九州大学・芸術工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80325571

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：地面効果翼機は、地面又は水面等の上を滑空する輸送機器である。航空機が上空を飛行する場合は、翼の両端から翼端渦と呼ばれる大きな渦が発生し、これが抵抗となってエネルギーロスに繋がっている。この翼端渦を減少させるため、ウィングレットという翼端を折り曲げた翼も出現しているが、地面効果翼機は大きな燃費改善が可能である。

研究成果の概要(英文)：A ground-effect wing machine is transportation equipment gliding on the ground or the surface of the water. When a plane flies the sky, the big vortex called the wingtip whirlpool occurs from the both ends of the wing and this becomes the resistance and is connected for energy loss. The wing which bent the wingtip called the wing let appears to decrease this wingtip whirlpool, but, as for the ground-effect wing machine, big mileage improvement is possible.

研究分野：トランスポーテーションデザイン

キーワード：地面効果 翼端渦 燃費

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化、環境破壊、化石燃料の枯渇などの問題が深刻化し、自動車に限らず航空機や船舶などの輸送機器メーカーはエネルギー効率に優れた輸送機器の開発に多大な労力とコストを費やしている。輸送機器の燃費を向上させる方法には機体の軽量化、エンジンの燃焼効率改善など様々あるが、デザインに密接に関連する空気抵抗低減技術（空力デザイン技術）はその中でも特に重要な要素の一つである。この空力デザインが最も重要な輸送機器は航空機である。航空機は大量の物資を高速に移動することが可能だが、船舶に比べるとエネルギー効率は低い。言い換えれば、船舶はエネルギー効率は高いがスピードは航空機に比べて圧倒的に遅いと言え、このスピードとエネルギー効率を高い次元で融合する輸送機器として期待されるのが地面効果機（GEV）である。地面効果（Ground Effect）とは航空機が地面付近を航行する際に揚抗比（揚力/抗力）が向上する現象である。そもそも航空機は翼の上面が負圧、下面が正圧になることで揚力を得ているが、この圧力差によって翼端では下面から上面に回り込む流れが生じ、翼端渦と呼ばれる縦渦が形成される。この翼端渦は翼上面の流れを下方に偏向し、翼に働く空気力（合力）の向きを後方に傾けてしまうため、抗力を大きくしてしまう（誘導抗力）。ところが地面や水面付近を航行する際は翼端渦によるダウンウォッシュ（流れの下方偏向）が抑えられるため誘導抗力が小さくなり、揚抗比が向上する。これが地面効果であり、この現象を巧みに利用した輸送機器が地面効果機である。

地面効果機は水上利用に期待されており、ロシアのエクランプランなど実用化された例もある。ところが波の高いところでは運行できないなどの問題もあり、大きく発展しているとは言い難い。しかし、四方を海に囲まれ

る我が国には波の穏やかな入り江や湾が多く存在し、地面効果機が有効に機能する可能性は高い。また、翼を可動式にしてコンパクトにできれば既存の港湾施設を有効に利用できると考えた。

2. 研究の目的

移動軌道のインフラの整備が不要で、機体自身のコストが航空機に対して安価な地面効果機について、工学の立場からの好適な翼形状の選定指針を考察し、デザインの視点からの用途に適した機体外観、機体内部の配置を提案する。

3. 研究の方法

地面効果範囲での翼の揚効力と翼形状との関係を実験と数値シミュレーションとを相補的に活用して調べた。

実験的研究では、複数の翼モデルを製作し、久留米工業大学のゲッチング型風洞を利用して幅広い迎え角範囲で揚抗力を測定した。合わせて表面タフト法により当該翼周りの流れを可視化して、迎え角と流体力との関係を考察した。風洞設備の制限から、床面は固体表面である。

数値シミュレーションでは、CRADLE社のSCRYU/Tetraを用いて、翼単体およびリフティングボディ状態での揚抗力特性を調べた。数値シミュレーションの条件設定の柔軟性を活用して、水面上で地面効果範囲にある翼・リフティングボディの特性を調べた。

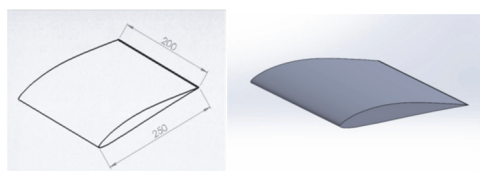
地面効果機の運転においては、離水・着水時の姿勢安定性が課題である。本研究では、上記の翼特性・翼形状の実験・シミュレーションの結果をもとに選定した好適な機体形状のモデルを製作し、離水・着水を含んだ飛行試験を行って、姿勢の安定性をはじめとする動作特性を確認する。

デザイン提案では、地面効果機の需要調査に基づいて用途を選定して外観ならびに内部座席の配置を検討する。需要調査では、現在の交通機関との比較に加え、専門家・研究者へのインタビューも行う。

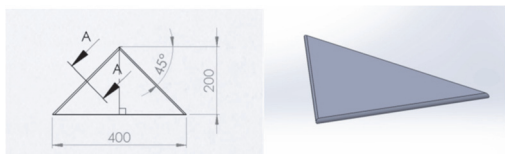
4. 研究成果

(1) 風洞試験

空力性能調査に用いた風洞試験装置は日本自動車研究所（JARI）から久留米工業大学に移設したゲッチング型（回流式）風洞で最大風速は50m/sである。本研究では試験風速を15.5m/sとした。風洞試験では模型に働く空気力の測定とタフト（気流糸）による流れの可視化を行った。



(a) E193 翼型モデル



(b) デルタ翼モデル

図1 翼の供試モデル（一部）



(a) E193 翼型モデル



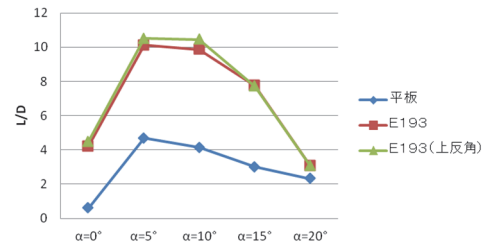
(b) E193 上反角モデル

図 2 翼の供試モデル (一部)

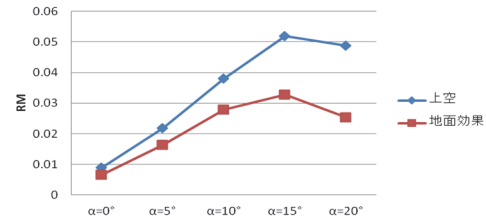
供試モデルは、新しい地面効果機のデザイン展開を進めるにあたり、翼形状を対象としたモデル (図 1 に一部を示す) と運航時の機体の姿勢安定評価も含める全機体モデル (図 2 に一部を示す) とした。風洞試験用モデルは CFD 解析に用いる 3D-CAD データを使用し、Roland 製 3D モデラ MDX-40A で発砲材を切削して製作した。

地面効果の得られる高度における E193 翼型モデルとデルタ翼モデルの各迎角に対する揚抗比の風洞試験結果を図 3 (a) に示す。迎角 (Angle of Attack: 流れに対する翼弦の角度) が 20° というケースは必ずしも現実的ではないが、E193 翼型モデルが翼端渦とアスペクト比の影響で迎角 35° まで明確な失速をしなかったため測定を行ったものである。ただし、通常の航行では迎角は $5^\circ \sim 10^\circ$ までを想定しており、その範囲で見ると E193 翼型モデルの揚抗比の最大値は 5.0、後退角 45° のデルタ翼モデルの揚抗比は 3.0 程度である。また、翼断面形状を平板から E193 翼型に変更することで大幅に揚抗比が改善する。なお、E193 翼型モデルと上反角を付けた E193 上反角モデルの差は最大でも 6% 程度と小さかった。したがって、高いエネルギー効率を求める本プロジェクトでは E193 翼型モデルをベースにデザイン展開を進めることにした。

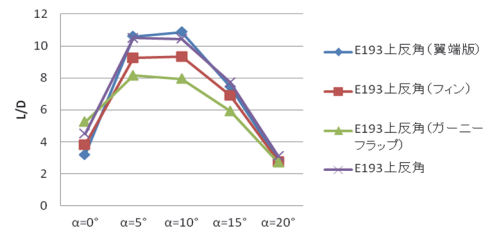
図 3 (b) には、地面効果状態でロール角 10° における E193 翼型および E193 上反角モデルのローリングモーメントである。地面効果状態でも上反角を付けることで 20% 程度ローリングモーメントを低減できることが分か



(a) 地面効果状態での揚抗比



(b) 地面効果のローリングモーメントへの影響



(c) 空力デバイスの揚抗比への影響

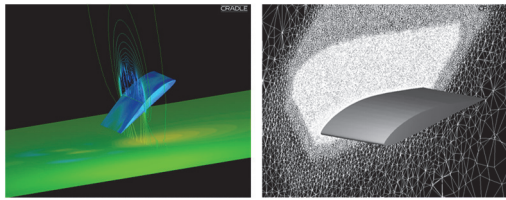
図 3 供試翼モデルの揚抗比

った。

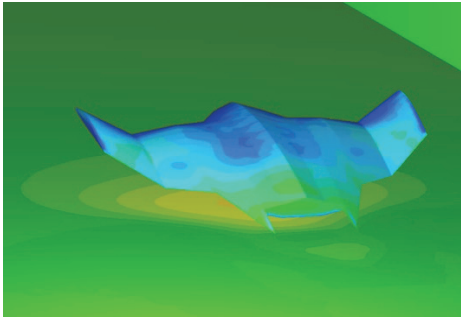
図 3 (c) は、地面効果状態にある E193 上反角モデルに対して翼端板、翼下面フィン、ガーニーフラップの空力デバイスが揚抗比に与える影響である。翼端板を付加により、E193 上反角モデルに対して揚抗比が迎角 10° において 4% だけ向上したものの、有効な改善は見られなかった。その他の空力デバイスの使用で揚力は増加したものの、抗力係数の増分がそれを上回り、結果として揚抗比は改善しなかった。

(2) 数値シミュレーション

CFD (Computational Fluid Dynamics) システムには自動車メーカーなどでの使用実績が豊富で高い信頼性を誇る CRADLE 社の SCRYU/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。本研究では流れは定常とし、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。図 4 は (a) 翼単体ならび (b) リフティングボディとして胴体部の断面も翼形とした機体の表面と地面の圧力分布のシミュレーション結果の例である。床面と翼・機体との距離、ピッチ・ローリングの角度を広範囲に変えた計算を行い、



(a) 計算格子と計算結果の可視化



(b) 機体面および水面の圧力分布

図4 CFD解析

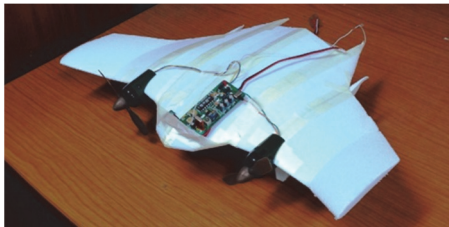


図5 全機モデル

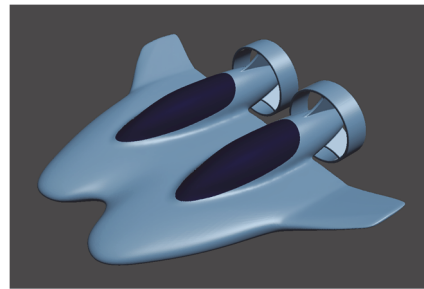
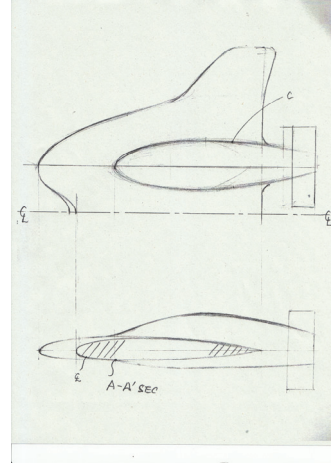
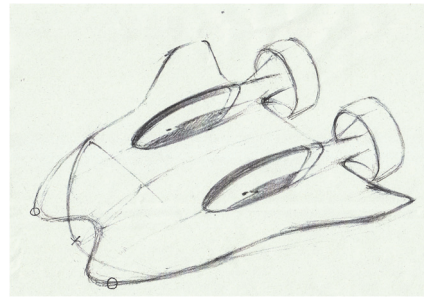


図6 ラジオコントロール模型による飛行試験（右端が離水の瞬間）

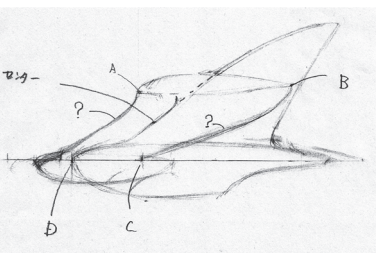
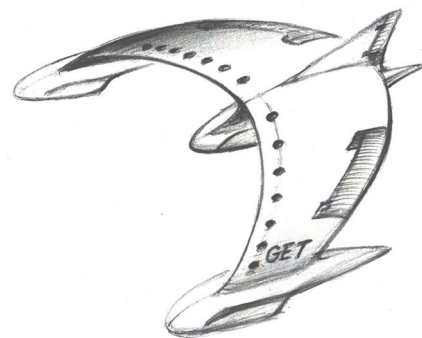
揚力特性、推進のエネルギー効率、モーメントに基づく機体の安定性を検討した。

(3) 模型試験

図5は、風洞試験および数値シミュレーションの結果から、エネルギー効率が高いと判断した E193 翼型モデルを機体の胴体デザインのベースにして、左右に主翼を伸ばしたデザインのラジオコントロールモデルである。胴体部から翼まで E193 翼形断面として機体全体で揚力を発生する「リフティングボディ」である。本デザイン案は、風洞試験により良



(a) パーソナル機のデザインスケッチと3Dデジタルモデル



(b) 大型機のデザインスケッチ

図7 デザイン提案

好な揚力が得られることを確認した。

図5のモデルに加え、翼の前進・後退、上反角の有無を変えたモデルを複数製作し、体育館の床上でのUコントロール式支持での地面効果内飛行試験や河川において助走から離水さらに飛行に到る運転試験を行った。CFD、風洞試験はともに定常飛行状態を対象としているので、本飛行試験は、水上走行から地面効果状態での航行への遷移過程を検討するための補完的調査として実施した。機体形状によっては、離水時の姿勢不安定が強く生じる場合があることを確認でき、有効であった。

(4) デザイン提案

地面効果機を交通システムやレジャーに向けて展開・実用化するための基礎研究として、需要調査に基づいて用途を決めて仕様を設定し、アイデア展開を行って制作した複数のイメージスケッチから、3Dデジタルモデルを作成した。

図7は、それらのイメージスケッチの一部で、(a)は並列分離型の搭乗室を持つレジャー用途の小型機、(b)は公共交通機関として位置付ける大型機である。形状の理解を助けるために、前述の3Dデジタルモデルを、粉末積層式ならびに熱溶融積層式の3Dプリンタで出力した。

(5) 研究者、事業者からの意見聴取

フランス、イタリアのデザイン事務所および研究所を訪問し、従来の交通機関に替わる用途での意見を聴取した。個人主義が強いためか新たな公共交通機関としての利用よりも、Xゲームのような特殊なレースでの利用に対する期待が大きく、検討の余地はある。本課題の代表者および分担者の個人的な意見としては緊急医療利用の検討を進めたい。

また、高速船の運用業者との研究相談を行ったところ、日本の湾内は船舶が密集していること、離水に1,000m程度の助走が必要なことから、比較的波の穏やかな外洋を水中翼船の倍程度の速度で航行できるなら魅力的であり、安価な地面効果翼機が開発されるなら強く興味があるとの意見が得られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[学会発表] (計4件)

- (1) 村口詩織、石井 明, 「地面効果理論に基づいた水上モビリティの研究」, 日本デザイン学会, 2012年10月.
- (2) 鶴殿真帆、石井 明, 「地面効果翼機における前進翼の適合性の研究」, 芸術工学会, 2012年12月.
- (3) 東 大輔、石井 明、中井孝信, 「揚抗比に

優れた地面効果機デザインの基礎研究」, 日本デザイン学会, 2014年7月.

- (4) 中井孝信、石井 明, 「高速海上輸送における水面効果翼船のデザイン研究」, 芸術工学会, 2014年10月.

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 明 (Akira, ISHII)
九州大学・芸術工学研究院・教授
研究者番号: 80325571

(2) 研究分担者

東 大輔 (Daisuke, AZUMA)
久留米工業大学・工学部・教授
研究者番号: 20461543

竹之内 和樹 (Kazuki, TAKENOUCHI)
九州大学・芸術工学研究院・准教授
研究者番号: 90207001