

補助事業番号 2024M-454

補助事業名 2024年度 表面効果翼船を利用した高速貨物輸送システム開発のための基礎
研究 補助事業

補助事業者名 熊本高等専門学校 井山 裕文

1 研究の概要

2024年問題とされている、物流システムの社会的問題解決に貢献できるように、貨物の高速輸送のために表面効果翼船を用いた海上輸送を提案し、本研究においては、プロトタイプモデルを製作するための風洞実験や数値シミュレーションに基づく設計開発を行った。

2 研究の目的と背景

近年、ネットワーク通販の急激な増加により物流システムへの負荷が高まり、トラック輸送への負荷が大きくなってきている¹⁾。更にその一方で自動車運転業務の時間外労働の上限が960時間に制限された^{2) 3)}。このような要因から、貨物輸送における諸問題が発生することが懸念されている。また、国土交通省によると2022年度の貨物輸送における二酸化炭素排出量は、日本国内の総排出量の約18.5%を占めており、環境への影響も問題として挙げられている⁴⁾。そこで、表面効果翼船を物流輸送に活用することが提案され、これらの輸送システムの新たな問題解決策としての取り組みが行われている⁵⁾。

表面効果翼船は、20世紀から研究開発に取り組みられてきた。しかし、未だ輸送手段としての本格的な実用化はされていない。そこで、本研究ではこの貨物輸送に向けた表面効果翼船のプロトタイプ開発を最終的な目標としている。これまでの研究において、陸上を飛行するモデルの設計、製作が行われた。しかし、理論的、数値的な解明がなされていないため、風洞実験や数値シミュレーションによる解明が必要であると考えられ、本研究ではこれらの実験および数値解析を行った。

3 研究内容 (<https://y-page.y.kumamoto-nct.ac.jp/u/eyama/WIESE.htm>)

(1) 風洞試験装置の製作と評価

全長3810mm、断面は高さ400mm×幅800mmの風洞実験装置を製作した。

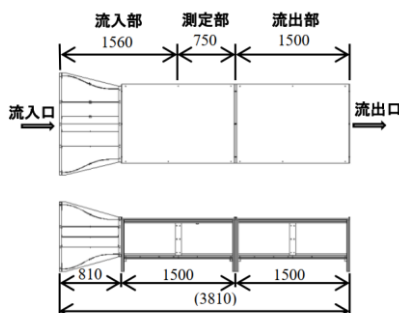


図1 風洞実験装置

揚力係数 C_l と抗力係数 C_d と迎角の関係プロットしたグラフを図2, 図3に示す. Clark-Y翼型の低レイノルズ数における性能評価⁶⁾と比較し, 以下のように結果をまとめる.

- a) C_l の直線部分の傾きが文献のものより小さい. これは, 実験模型に翼端板を付けていないことによる誘導抗力の影響である.
- b) 参考文献⁶⁾では迎角 8deg 程度で失速しているが, 実験結果からは失速の様子が確認できない. これは, 実験模型の表面粗さによる違いによるものと考えられる. C_d の値が全体的により大きい結果となった.
- c) C_l の実験結果のうち, 迎角が 0° と 10.5° の時の値が直線から大きく外れた. これは, 測定に使用したロードセルと実験中の模型の振動によるものと考えられる.

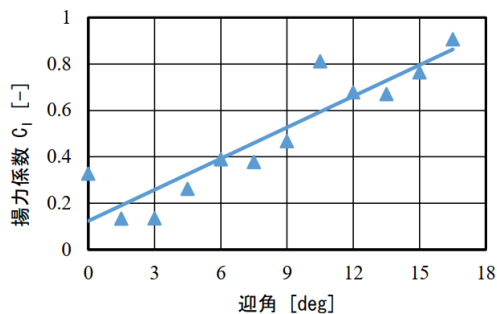


図2 揚力係数の迎角による変化

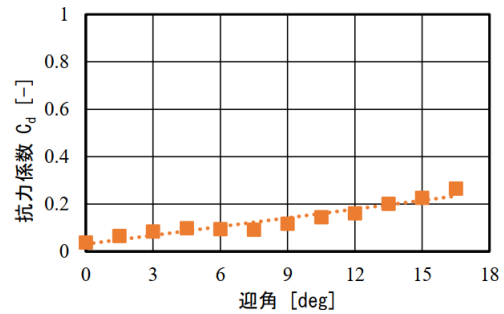


図3 抗力係数の迎角による変化

(2) 数値シミュレーションによる表面効果翼船の空力特性の評価

数値シミュレーションではRANS (Reynolds Average Navier-Stokes) モデルの基礎方程式とレイノルズ応力のモデル化としてSST $k-\omega$ モデルを用いた⁷⁾. 図3は2次元の翼断面形状に対してのx-y座標系を示している. 一様流の代表速度をU, 翼弦長cを代表長さとし, 迎え角を α , この迎え角における地面から翼の後端までの高さをhとしている. また, 空力中心は前端から $0.25c$ の点とし, モーメントは機首上げ方向を正としている. 解析に用いた翼型モデルはNACA4412とNACA6412を採用した⁸⁾.

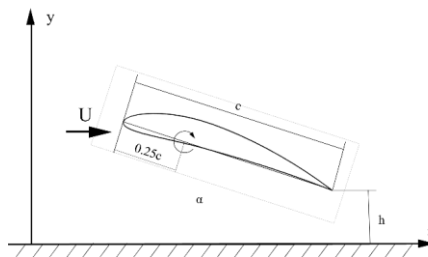


図3 x-y 座標系

地面付近において、高度の違いによる翼の空力特性への影響を検証し、地面から翼後端までの距離が異なる計算格子を作成し、NACA4412 と NACA6412 における空力特性について数値シミュレーションを行った。翼弦長 200mm で、レイノルズ数を $Re=3.0 \times 10^6$ とした場合、高さの違いによる抗力係数の変化を図 4 に、揚力係数の変化を図 5 に示す。揚力係数は $h/c=0.2$ 以下で上昇率が增大している。これは動圧による揚力上昇の効果が大きくなっているためだと考えられる。このことから表面効果を十分に活用するためには $h/c=0.2$ 以下での航行を行う必要があるといえる。 $h/c=0.2$ 以下の領域において、翼が地面に近づくほど、飛行高度の変化に対するモーメント係数の変化が大きくなるため、ピッチング方向の動作が不安定となる。

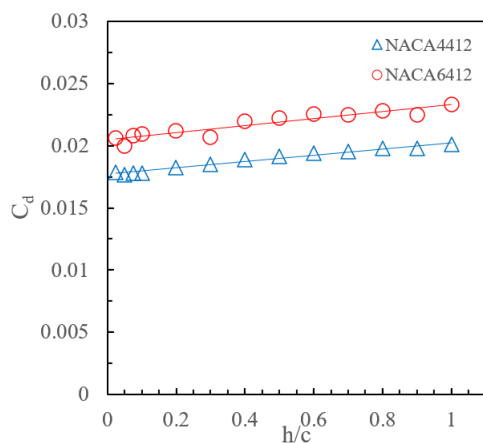


図 4 高度変化による抗力係数への影響

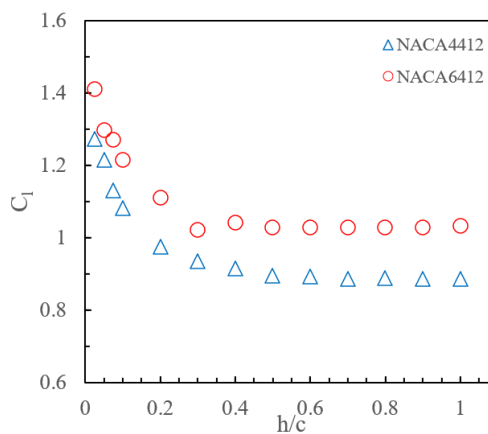


図 5 高度変化による揚力係数への影響

(3) 結合全翼型表面効果翼船の自航模型製作

自航模型の寸法は、主翼と胴体翼に翼型 DHMTU を、尾翼に翼型 Clark-Y を選択した。機体サイズは、製作の容易さから $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 程度に設定した。表 1 に自航模型の仕様を示す。また、図 6 に自航模型の外観図面を示す。自航模型は 13 m/s で巡行することを想定しており、自航時のレイノルズ数は約 4.0×10^5 となる。主翼にフラップ、尾翼にエレベータを取り付けており、サーボモータを用いて姿勢制御を行う。

表 1 自航模型の仕様

外形寸法	長さ 1 m × 幅 0.95 m × 高さ 0.4 m
重量	3.1 kg
バッテリー	リチウムイオンポリマーバッテリー (Lipo バッテリー) 4s 3300 mAh
動力	ダクテッドファン D2836 3500kv-4s
重心位置	$0.4c$

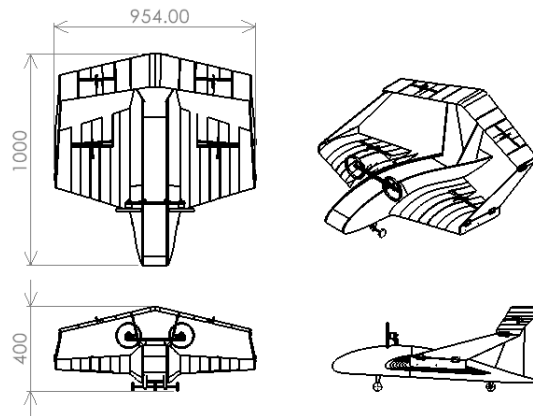


図6 自航模型の外観図面 単位 (mm)

揚力係数と抗力係数のグラフを図7に示す。角度変化に比例して揚力、抗力ともに増加している。揚力の変化量と比較して抗力の変化量が少いため、実験条件の範囲では迎角を上げるほど揚抗比が高くなった。測定結果の中で最も揚抗比が高い迎角 8° の値でも4程度であり既存の航空機等と比較して、低い値となった。原因として尾翼に揚力係数が大きい翼型を使用したため、反揚力が大きくなり、総揚力の低下につながったと考える。それに付随して、抗力のグラフでも述べたように、抗力が大きくなったことで、揚抗比が低い値になったと考えられる。

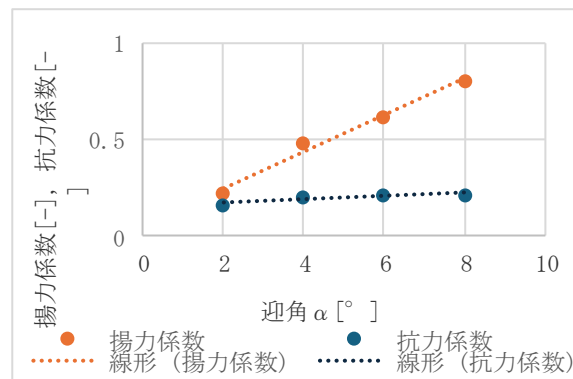


図7 測定揚力係数と測定抗力係数

迎角 4° で自航試験を行った結果、滑走距離が不足したため、必要速度まで加速することができなかった。その後、エレベータを調整し、尾翼の発生揚力を落とした状態で再度試験を実施した。機体は浮上したものの急激に反り上がるように上昇しほぼ垂直状態まで回転し、動力を停止させると頭から墜落する結果となった。迎角 4° の試験結果から、想

定より機首上げモーメントが大きいことが判明した。これを踏まえ、走行時の機首下げモーメントを増加させるため、迎角を 8° に設定し、重心位置を $0.36c$ に変更し、再実験を行った。その結果、速度 12.3 m/s に達した後、機体が浮上した。浮上後は迎角 4° の試験時より復元力が観測されたものの依然として、機首上げモーメントが発生し、浮上が継続した。空力試験で得た迎角 8° の揚力係数に基づき、自航模型の発生揚力を推定すると、 31.85 N となる。一方、自航模型の重量は 3.1 kg (30.38 N) であり、離陸速度に関してはほぼ想定通りの結果となった。浮上後も機首上げが続いた原因として、ダクトファンによる気流が尾翼の揚力を増加させたことに加え、主翼および胴体翼の発生揚力のバランスが変化したことで、圧力中心が変化したことが考えられる。

参考文献

- 1) 「2023 年 家計消費状況調査 結果の概況」,
<https://www.stat.go.jp/data/joukyou/2023ar/gaikyou/pdf/gkall.pdf>, 2024 年 4 月 20 日アクセス.
- 2) 首藤若菜：「2024 年問題」とは、連合総研レポート D10, 36 巻 6 号, pp. 6-9, 2023.
- 3) 福本明彦：トラックドライバーの働き方改革と 2024 年問題, 連合総研レポート D10, 36 巻 6 号, pp. 15-21, 2023.
- 4) 「環境：運輸部門における二酸化炭素排出量-国土交通省」,
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html, 2025 年 1 月 20 日アクセス.
- 5) 久保昇三, 秋元博路：表面効果翼艇の現状と展望, 日本航空宇宙学会誌, 50 巻 585 号, 2002.
- 6) J. F. Marchman III et al., Clark-Y Airfoil Performance at Low Reynolds Numbers, Papers. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-84-0052 (1984), 1-6.
- 7) 山本誠：RANS モデルの過去・現在・未来(特集 RANS), 日本流体力学会誌 35 巻 3 号, pp. 215-220, 2016.
- 8) 岡本 哲史：N. A. C. A. 層流翼型, 日本航空学会 誌, pp. 178-181, 1956.

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では、表面効果翼船を高速輸送船として活用するための基礎研究として実施したものである。そのプロトタイプ機の開発を試みるどころまで実施することができた。表面効果翼船は、高速で且つ省力のエネルギーで自走することが可能なものであり、現在のト

ラックによる陸上貨物運送での問題解決のためにオートパイロットを含めた技術開発に繋がるものとなると期待できる。通常のドローン輸送では、比較的大きな貨物や重量物の輸送、長距離飛行を行うことが困難であり、表面効果翼船を利用した海上輸送の方が有利なものとなると考えられ、それぞれのメリットを活用しながら現在の貨物輸送の問題解決に繋がるものとする。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代は材料力学，機械設計，CAEなどの機械工学分野の授業を担当している。また，主な研究分野は衝撃工学を基盤とした衝撃波の応用技術に関するものである。これらの業績では，流体と構造体の境界領域(Fluid-Structure Interaction)での問題を対象としているものがほとんどであった。今回の研究内容は，これらの内容を応用した開拓，チャレンジ研究と位置づけて取り組んだものである。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- ・研究協力者：日本機械学会九州支部九州学生会第56回学生員卒業研究発表講演会 (<https://www.jsme.or.jp/conference/kyconf25-2/>)にて発表
- ・国際会議での発表予定
- ・投稿論文を執筆予定

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

表面効果翼船の自航模型 (<https://y-page.y.kumamoto-nct.ac.jp/u/eyama/WIESE.htm>)

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：熊本高等専門学校(クマモトコウトウセンモンガッコウ)

住 所：〒866-8501

熊本県八代市平山新町2627

担 当 者：教授 井山裕文(イヤマヒロフミ)

担 当 部 署：生産工学教育部門MI分野(セイサンコウガクキョウイクブモンエムアイブンヤ)

E - m a i l: eyama@kumamoto-nct.ac.jp

U R L: <https://y-page.y.kumamoto-nct.ac.jp/u/eyama/>