



2023年度

船体と帆による風力利用の高度化システムの技術開発

成果報告書

2024年3月

一般社団法人 日本船用工業会



## はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、2022年度及び2023年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「船体と帆による風力利用の高度化システムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、2022年度、2023年度の2年計画で、商船三井テクノトレード株式会社に委託して実施しており、その2年度分の報告書をここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

2024年3月  
(一社)日本船用工業会



## 目 次

### 第 I 部 2022 年度

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 1. 事業の目的                           | 1  |
| 1.1 社会的背景                          | 1  |
| 1.2 目的                             | 1  |
| 2. 事業の目標                           | 3  |
| 2.1 本事業の最終目標                       | 3  |
| 2.2 2022 年度の目標                     | 3  |
| 3. 2022 年度の実施内容                    | 4  |
| 3.1 CFD 解析による単独翼・複合翼の形状検討          | 4  |
| 3.1.1 はじめに                         | 4  |
| 3.1.2 解析の概要                        | 4  |
| 3.1.3 3分割翼帆の断面形状の検討                | 5  |
| 3.1.4 2分割翼帆の形状の検討                  | 8  |
| 3.1.5 解析精度の検証（風洞試験結果との比較）          | 11 |
| 3.1.6 3分割単独翼帆の空力特性の評価              | 13 |
| 3.1.7 翼端板の検討                       | 14 |
| 3.1.8 3分割翼帆の複数配置（複合翼）の検討           | 20 |
| 3.1.9 3分割翼帆のキャンバーの効果の検討            | 22 |
| 3.1.10 2分割翼帆のキャンバーの効果の検討           | 23 |
| 3.1.11 北米航路航行時の GHG 削減効果           | 25 |
| 3.1.12 まとめ                         | 26 |
| 3.2 低風圧抵抗船型の船型およびコンテナ船小型風防カバーの設計検討 | 27 |
| 3.2.1 低風圧抵抗船型の設計検討                 | 27 |
| 3.2.1.1 概要                         | 27 |
| 3.2.1.2 対象船                        | 27 |
| 3.2.1.3 CFD 解析                     | 27 |
| 3.2.1.4 風圧抵抗低減船型の検討                | 29 |
| 3.2.1.5 CFD 解析結果                   | 30 |
| 3.2.1.6 まとめ                        | 35 |
| 3.2.2 コンテナ船小型風防カバーの検討              | 36 |
| 3.2.2.1 概要                         | 36 |
| 3.2.2.2 対象船                        | 36 |
| 3.2.2.3 CFD 解析                     | 37 |
| 3.2.2.4 風圧抵抗低減風防形状の検討              | 37 |

|             |                                |    |
|-------------|--------------------------------|----|
| 3.2.2.5     | CFD 解析結果                       | 38 |
| 3.2.2.6     | まとめ                            | 43 |
| 3.3         | 低風圧抵抗船型の船体と単独翼・複合翼システムの設計検討    | 44 |
| 3.3.1       | 概要                             | 44 |
| 3.3.2       | CFD 解析                         | 44 |
| 3.3.3       | 翼配置パターンの検討                     | 45 |
| 3.3.4       | CFD 解析結果                       | 45 |
| 3.3.5       | まとめ                            | 46 |
| 3.4         | 風洞試験の実施によるシステム検証               | 47 |
| 3.4.1       | 概要                             | 47 |
| 3.4.2       | 試験の種類                          | 47 |
| 3.4.3       | 供試模型                           | 47 |
| 3.4.4       | 試験施設                           | 48 |
| 3.4.5       | 試験状態                           | 49 |
| 3.4.6       | 計測・解析方法                        | 51 |
| 3.4.7       | 試験結果                           | 53 |
| 3.4.8       | まとめ                            | 65 |
| 4.          | 2022 年度の目標の達成状況                | 66 |
| 4.1         | 2022 年度の目標の達成度                 | 66 |
| 4.2         | 2022 年度の目標の達成度に関する考察           | 66 |
| 5.          | 2022 年度の実施内容の概要                | 67 |
| 第Ⅱ部 2023 年度 |                                |    |
| 6.          | 2023 年度の実施内容                   | 68 |
| 6.1         | CFD 解析による単独翼・複合翼の性能向上の検討       | 68 |
| 6.1.1       | はじめに                           | 68 |
| 6.1.2       | 解析の概要                          | 68 |
| 6.1.3       | キャンバー角の検討                      | 70 |
| 6.1.4       | 2 分割翼帆の形状の再検討                  | 72 |
| 6.1.5       | 揚抗比が高い形状条件の検討                  | 74 |
| 6.1.6       | 複数配置（複合翼）の検討                   | 75 |
| 6.1.7       | 北米航路航行時の GHG 削減効果              | 79 |
| 6.1.8       | まとめ                            | 82 |
| 6.2         | 低風圧抵抗船型の船型およびコンテナ船小型風防カバーの詳細検討 | 83 |
| 6.2.1       | 低風圧抵抗船型の設計検討                   | 83 |
| 6.2.1.1     | 概要                             | 83 |

|         |                             |     |
|---------|-----------------------------|-----|
| 6.2.1.2 | 対象船                         | 83  |
| 6.2.1.3 | CFD解析                       | 83  |
| 6.2.1.4 | 風圧抵抗低減船型の検討                 | 85  |
| 6.2.2   | コンテナ船小型風防カバーの検討             | 86  |
| 6.2.2.1 | 概要                          | 86  |
| 6.2.2.2 | 対象船                         | 86  |
| 6.2.2.3 | CFD解析                       | 87  |
| 6.2.2.4 | 風圧抵抗低減風防形状の検討               | 88  |
| 6.2.2.5 | CFD解析結果                     | 89  |
| 6.2.2.6 | 小型風防カバーによるGHG削減効果の算定        | 93  |
| 6.2.2.7 | まとめ                         | 93  |
| 6.3     | 低風圧抵抗船型の船体と単独翼・複合翼システムの詳細検討 | 94  |
| 6.3.1   | 概要                          | 94  |
| 6.3.2   | 船体及び翼帆によるGHG削減効果の算定         | 94  |
| 6.3.3   | まとめ                         | 95  |
| 6.4     | プロトタイプモデル製作                 | 96  |
| 6.4.1   | 翼帆の試設計（構造強度）                | 96  |
| 6.4.2   | プロトタイプモデル製作                 | 100 |
| 7.      | 2023年度の目標の達成状況              | 102 |
| 7.1     | 2023年度の目標の達成度               | 102 |
| 7.2     | 2023年度の目標の達成度に関する考察         | 102 |
| 8.      | 2023年度の実施内容の概要              | 103 |
| 9.      | 今後の予定                       | 104 |
| 10.     | まとめ                         | 105 |
| 11.     | 謝辞                          | 106 |





## 第 I 部 2022 年度

### 1. 事業の目的

#### 1.1 社会的背景

GHG 削減は世界的な要請になっているが、風利用の高度化は途に就いたばかりである。GHG 削減の潮流の下、様々な風力利用提案がなされており、安価、シンプル、信頼性の高い、かつ、効率に優れた製品の開発が強く望まれている。翼帆やローターセールなどの風力利用システムでは、操帆制御や甲板上設備の複雑化(甲板作業の障害)や旋回/伸縮装置など安全性への配慮も必要となってくる。

現在商品化されている帆は、効率追求を目的として、高いアスペクト比を持った背の高い帆が主流である。例えば、商船三井のウインドチャレンジャーなどは 50[m]近い高さの帆を実装する。大きな帆の面積により推進力の増大が見込めるという利点はあるものの、帆の高さによる転倒モーメント、即ち、乾舷の高い船への適用に対する制限が生じうる事が挙げられる。乾舷の高い船舶にも高効率の推進力を得られる代替システムの開発が今後の課題の一つである。

また、現在 2 万 TEU などの超大型コンテナ船では船首部のコンテナは高さ約 20[m]になり風圧抵抗が大きくなる。日本の造船所で作られた超大型コンテナ船が、スエズ運河を斜めに封鎖した事故も記憶に新しい。大型コンテナ船は風圧抵抗が大きいので、急な砂嵐で流されたものと推察できる。また、船首コンテナ高さが高いので、構造的にも重くなり風防が実現していない。製品化するには小型で性能の良い風防を開発する必要がある。6,700TEU のコンテナ船の小型風防は実装しているので、その知見を活かし、超大型コンテナ船向けの小型風防カバーの実用化が期待されている。

#### 1.2 目的

前記の社会的背景を勘案し、風力利用の高度化により、特に乾舷の高い船に適用可能な軽量・安価・高性能な帆を実用化させることを本事業の目的とする。今回の開発では船体も風力利用に適した形状を用い、船体で加速された風をフラップ付きの低アスペクト比の翼で受けることで、効率化と軽量化・低コスト化を両立させたシステム開発を行う。GHG 削減は社会的な一大要請であるので、風利用の効率向上と容易に製作可能で信頼性の高い帆走技術の製品化が社会的要請として期待されている。これを船舶流体力学の専門家に加え、航空宇宙学の専門家の知見も入れ、新たな視点を取り入れて共同開発を行う。

また、2 万 TEU などの大型コンテナ船の風圧抵抗削減に資する小型風防カバーの開発も上記船体形状の船首部形状の応用として同時に行い、多数の船種にこの技術を応用する。

本事業の目的は以上のとおりであるが、個別の事項について補足すると以下のとおりである。

#### ・船体を翼にして推進力にする技術

(株) 商船三井 (以下、MOL) 、(株) 三井造船昭島研究所 (以下、アキケン) 、商船三井テ

クノトレード（株）（以下、MOLTECH）で共同研究した、自動車船・客船・フェリーなどに適用できる ISHIN 船型（注 1）が既に開発されている。現在本船型を採用した 1 番船が建造中である。

この船型は、風抵抗を減少させるだけでなく、風向が約 60 度前後の時に正面抵抗の約 2 倍の推進力が生じる優れたものである。ただし、船首部の推進力を最大化する形状の追求が不十分であり、これを追究することが喫緊の課題となっている。

- ・背が低く高揚力の帆の開発

背が低く低アスペクト比の帆で軽量化を図り、同時に高揚力化を図ることが風力利用拡大のための開発の要点である。

- ・船体を翼にする形状と高さの低い帆の組み合わせ

翼形状にした ISHIN 船型は最上層のデッキ上を高速の風が吹き抜ける。この風を有効活用して、複数の低アスペクト比の帆で高推力を生み出す研究と製品化を行う。

- ・超大型コンテナ船の小型風防カバーの開発

現在 2 万 TEU などの大型コンテナ船では船首部のコンテナは高さ約 20[m]となる。一方、NK、MOL、アキケン、MOLTECH で共同研究し開発した小型風防は 6700TEU のコンテナ船に実装している。その知見と東海大学の航空宇宙学の知見を基に、新しい発想で船首部 20[m]のコンテナ高さを低い風防でカバーする開発を成功させたい。

（注 1）ISHIN 船型とは：PCC や Ro-Ro 船など水面上船体が巨大な箱状の船体で風圧抵抗を大きく受ける船型に対し、船体前後面、側面、上甲板を流線形に成形して船体周りの空気流れを整えて、風圧を低減、さらに一定の風迎角の範囲においてはその船体形状による下流への風の流れ込みを促し、翼効果を得て船体自身で推進力を生むもの。

特許を取得し、現在は対象船に実装開発を進めている。同様に、コンテナ船に対して、MOLTECH、アキケン、日本海事協会で共同開発を行ない、上記効果を得る形状の船首風防を開発して実証試験を行なった。

以上、本思想で計画された船体形状をここでは「低風圧抵抗船型」と呼ぶ。

## 2. 事業の目標

### 2.1 本事業の最終目標

- 1) 実装・製品化に向けコンセプト設計を完成し、船体と翼合わせて、北米航路航行時に往復平均 15[%]以上の GHG を削減する。
- 2) 高効率（揚力係数  $C_L$  1.3 以上）の単独翼・複合翼を開発する。
- 3) コンテナ船の小型風防カバーで、正面抵抗係数  $C_{fx}$  を相対風向 0（向風）～60 度の平均でオリジナル（原コンテナ船型）の 20[%]削減を達成し、北米航路航行時に往復平均 3[%]の GHG を削減する。

### 2.2 2022 年度の目標

- 1) 実装・製品化に向けコンセプト設計を完成し、船体と翼を合わせた「低風圧抵抗船型と風力活用による翼」にて、北米航路航行時に往復平均 12[%]以上の GHG を削減する。
- 2) 高効率（揚力係数  $C_L$  1.1 以上）の単独翼・複合翼を開発する。
- 3) 低風圧抵抗船型に関し、現在 ISHIN 船型では北米航路就航のシミュレーション結果で往復平均 5[%]の GHG 削減の性能であるが、それを 6.5[%]に向上させる。
- 4) コンテナ船の小型風防カバーで、正面抵抗係数  $C_{fx}$  を相対風向 0（向風）～60 度の平均でオリジナル（原コンテナ船型）の 15[%]削減を達成する。

### 3. 2022 年度の実施内容

#### 3.1 CFD 解析による単独翼・複合翼の形状検討

##### 3.1.1 はじめに

本節では、CFD 解析により行った翼帆の形状の検討と空力特性の把握について述べる。船舶に用いる帆としては、布で帆を構成する布帆や硬い翼構造で帆を構成する翼帆などいくつかの形態があるが、本解析では翼帆を対象としている。翼帆の形状は、東海大学・福田研究室が有する航空宇宙工学分野の知見に基づき検討を行い、図 3.1.1 に示すように、NACA0021 翼型をベースとした分割無しの翼帆形状、翼弦長の方向に 2 分割、3 分割した 2 分割翼帆、3 分割翼帆、それぞれについて検討を行った。NACA0021 翼型は航空機のためにアメリカ航空諮問委員会 (National Advisory Committee for Aeronautics : NACA) により開発された翼型である。実際の船舶の航行を考慮した場合、流入風の風向が変わりやすいと考えられるため、迎角の影響を受けにくい厚翼の NACA0021 翼型をベース形状として採用した。また、図 3.1.1 に示すような分割部を設けることにより、高压面側の流れを低压面へと流入させることで、低压面での離層を抑制できるだけでなく、分割部前後で迎角を変えることで、翼帆全体でキャンバーを付けることが可能となると期待できる。

本解析では、翼帆を 1 枚だけ配置した単独翼と翼帆を 2 枚配置した複合翼のそれぞれについて解析を行い、空力特性の評価を行った。翼帆で大きな推力を出すためには、発生する揚力を大きくする必要があるため、本年度は、高さ 10[m]以内で  $C_L=1.10$  以上の空力性能を有する翼帆を開発するという目標を立てている。さらに、抗力が小さくなるほど、空力効率が高くなるため、揚抗比  $C_L/C_D$  についてもできるだけ高い値とすることを目指した。

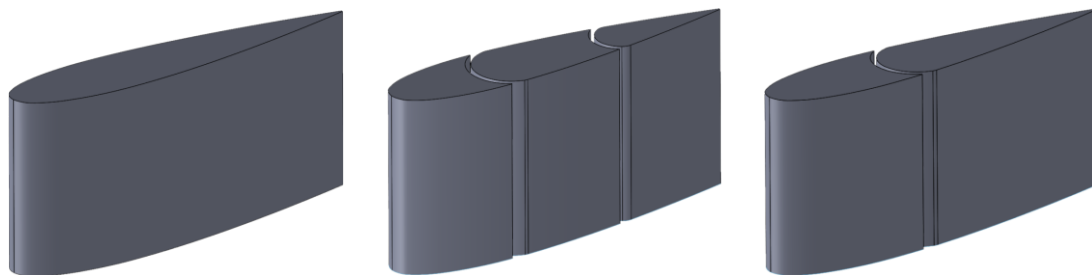


図 3.1.1 評価した翼帆の形状 (左から NACA0021 (分割無し), 2 分割翼, 3 分割翼)

##### 3.1.2 解析の概要

解析に用いる 3D モデルの作成には、株式会社ダッソー・システムズ製 3 次元 CAD ソフトウェア「SOLIDWORKS 2022」を使用した。「SOLIDWORKS 2022」は容易に複雑形状モデルの作成が可能であり、分割部などを有する複雑形状のモデル作成が必要な本解析に適したソフトウェアであるため採用した。また、CFD 解析には、株式会社ソフトウェアクレイドル製の 3 次元熱流体解析ソフトウェア「scFLOW Version2021」を使用した。「scFLOW Version2021」は非構造格子を採用しており、複雑形状を再現することが可能で、八分木法により計算要素の生成を自動で行うことができるという特長があり、分割部などを有する複雑形状の解析が必要な本解析に適したソフトウェアであるため採用した。

解析手法の概要を以下に示す。今回の解析では、空力特性に優れた翼帆の形状検討を行う必要があったため、検討する形状モデルの数を増やすことを最優先にして、迅速にシミュレーション結果の算出が可能な RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 解析 (定常解析) を実施した。

解析手法：

|   |            |                          |
|---|------------|--------------------------|
| ✓ | 解析方法       | ： RANS 定常解析              |
| ✓ | 支配方程式      | ： 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 |
| ✓ | 乱流モデル      | ： SST $k-\omega$ モデル     |
| ✓ | 離散化手法      | ： 有限体積法                  |
| ✓ | 格子タイプ      | ： 非構造格子                  |
| ✓ | 圧力場・速度場の解法 | ： SIMPLEC 法              |
| ✓ | 空間離散化スキーム  | ： 2 次精度 MUSCL 法          |
| ✓ | 時間離散化スキーム  | ： 2 次精度陰解法               |

### 3.1.3 3 分割翼帆の断面形状の検討

翼帆の形状の検討の第一段階として、3 分割翼帆の断面形状の検討を行った。3 分割翼帆において、空力特性に対する影響が大きい形状パラメータである、前後分割部の隙間幅・位置・曲率半径の影響を評価し、最適形状の検討を行った。

解析領域を図 3.1.2 に示す。翼帆の翼弦長  $C$  (20[m]) を基準として、流れ方向に  $18C$ 、高さ方向に  $8C$ 、奥行方向に  $1C$  を取り、準 2 次元解析を行うことで、断面形状の検討を行った。入口条件は速度規定として、今回対象としている ISHIN 船型の北米航路における航行速度を想定して 20 [knot] (=10.29 [m/s]) と決めた。出口条件は圧力規定 (大気圧) としており、翼帆表面は粘性壁として、すべりなし条件を課している。解析領域側面の境界面はスリップ壁とした。速度条件は、船速を基に 20 [knot] と決めており、密度  $\rho$  は 1.206[kg/m<sup>3</sup>] とした。解析格子の断面図を図 3.1.3 に示す。総要素数は約 1 億 1000 万点であり、分割部の隙間や翼帆表面近傍に関しては、詳細な流れ場を再現する為、格子サイズを小さくし、翼帆から離れていくにつれて格子サイズが徐々に大きくなるように設定した。また、ここでは、3 分割翼帆の断面形状の影響のみを評価するため、迎角は 25[deg] で固定して解析を行った。

まず始めに、図 3.1.4 に示すように、前後分割部の隙間幅を変えた解析を行い、その影響を評価した。解析結果を表 3.1.1 に示す。これらの結果より、今回評価した条件においては、隙間幅を小さくするほど、抗力係数  $C_d$  は減少し、揚力係数  $C_L$ 、揚抗比  $C_L/C_d$  は増加することが確認された。次に、図 3.1.5 に示すように、隙間幅が最も小さな①の状態でも前後分割部の位置を変えた解析を行い、その影響を評価した。解析結果を表 3.1.2 に示す。これらの結果より、今回評価した条件においては、隙間位置を後退させるほど、抗力係数  $C_d$  は減少し、揚力係数  $C_L$ 、揚抗比  $C_L/C_d$  は増加することが確認された。さらに、図 3.1.6 に示すように、隙間幅①、隙間位置②の状態でも前後分割部の曲率半径を大きくした解析を行い、その影響を評価した。解析結果を表 3.1.3 に示す。これらの結果より、今回評価した条件において

は、曲率半径が小さいほど、抗力係数  $C_D$  は減少し、揚力係数  $C_L$ 、揚抗比  $C_L/C_D$  は増加することが確認された。

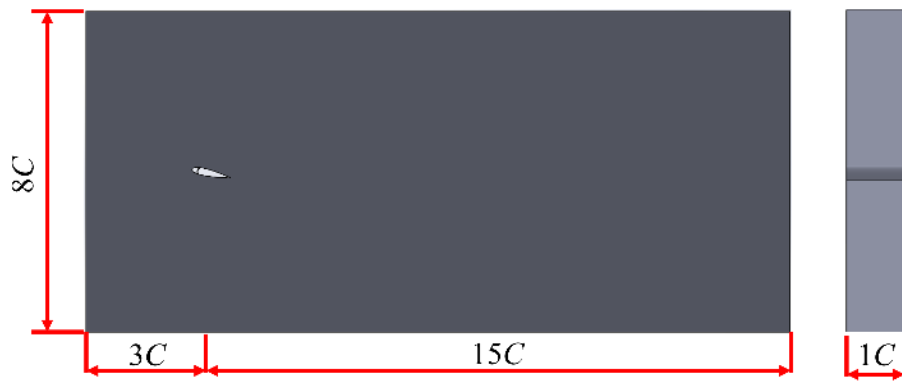


図 3.1.2 断面形状の検討解析における解析領域

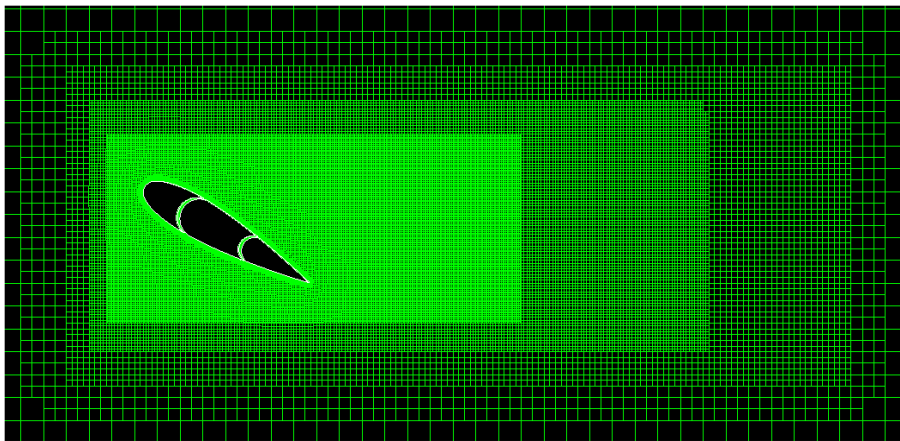


図 3.1.3 断面形状の検討解析に用いた解析格子

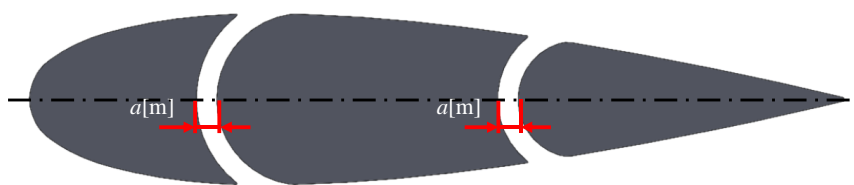


図 3.1.4 3分割翼帆前後分割部の隙間幅の影響評価パラメータ

表 3.1.1 前後分割部の隙間幅の影響評価 (3分割翼、空力係数の比較、隙間幅：①<②<③)

|      |           | NACA0021<br>分割なし | ①     | ②     | ③     |
|------|-----------|------------------|-------|-------|-------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.326            | 0.263 | 0.265 | 0.267 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.111            | 1.212 | 1.173 | 1.121 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 3.408            | 4.608 | 4.426 | 4.199 |

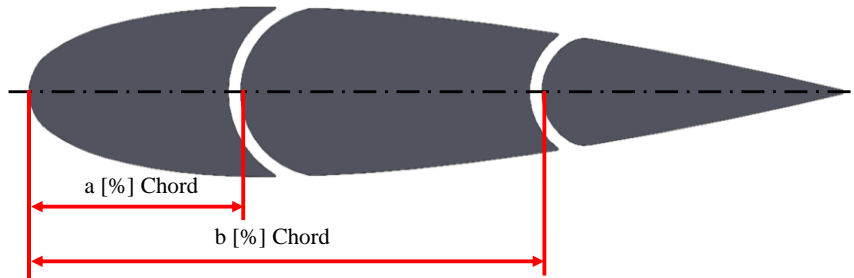


図 3.1.5 3分割翼帆前後分割部の隙間位置の影響評価パラメータ

表 3.1.2 前後分割部の隙間位置の影響評価

(3分割翼帆、空力係数の比較、隙間位置は前後ともに①②③の順番に後方に移動)

|      |           | NACA0021<br>分割なし | ①     | ②     | ③     |
|------|-----------|------------------|-------|-------|-------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.326            | 0.267 | 0.263 | 0.260 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.111            | 1.204 | 1.212 | 1.243 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 3.408            | 4.509 | 4.608 | 4.781 |

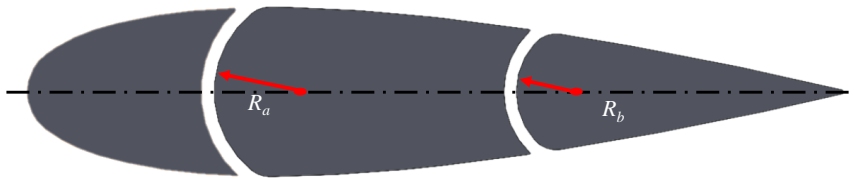


図 3.1.6 3分割翼帆前後分割部の曲率半径の影響評価パラメータ

表 3.1.3 前後分割部の曲率半径の影響評価

(3分割翼、空力係数の比較、分割部の曲率半径は前後ともに①②③の順番に大きくなる)

|      |           | NACA0021<br>分割なし | ①     | ②     | ③     |
|------|-----------|------------------|-------|-------|-------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.326            | 0.263 | 0.294 | 0.338 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.111            | 1.212 | 1.105 | 1.031 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 3.408            | 4.608 | 3.759 | 3.050 |

上記の結果より、分割部の隙間幅、隙間位置、曲率半径それぞれの条件の中で、最も、揚力係数  $C_L$ 、揚抗比  $C_L/C_D$  が高く、抗力係数  $C_D$  が低い条件を組み合わせた形状（隙間幅①、隙間位置③、曲率半径①）を作成し解析を行った。表 3.1.4 および図 3.1.7 に解析結果を示す。表 3.1.4 の結果を見ると、3 分割し隙間部を設けることによって、揚力係数  $C_L$ 、揚抗比  $C_L/C_D$  ともに増加していることが確認できる。また、図 3.1.7 を見ると、翼帆後方の低圧部が減少していることも確認できる。

表 3.1.4 選定された 3 分割翼の解析結果（空力係数の比較）

|      |           | NACA0021<br>分割なし | 3分割翼  |
|------|-----------|------------------|-------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.326            | 0.260 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.111            | 1.243 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 3.408            | 4.781 |

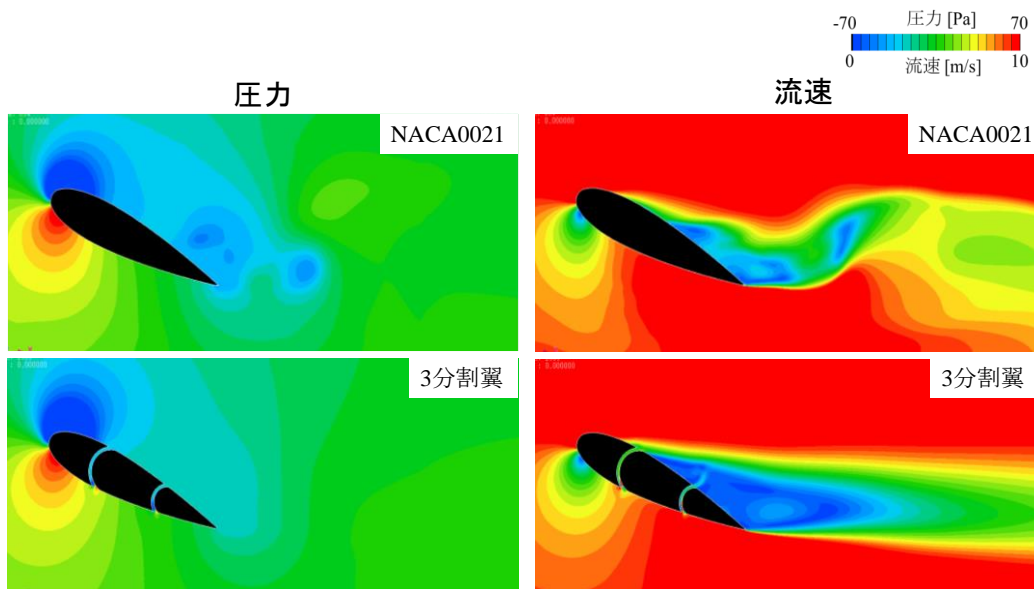


図 3.1.7 選定された 3 分割翼帆の解析結果

### 3.1.4 2 分割翼帆の形状の検討

3 分割翼帆の断面形状の検討に引き続き、2 分割翼帆の断面形状の検討を行った。ここでは、空力性能に対する影響が大きい形状パラメータである分割位置の影響の評価を行った。解析領域を図 3.1.8 に示す。翼帆の寸法、翼弦長  $C$  (20[m])、高さ  $H$  (10[m])、幅  $W$  (4.21[m]) を基準として、流れ方向に  $25C$ 、高さ方向に  $10H$ 、幅方向に  $57W$  を取り解析を行った。入口条件は速度規定 (20 [knot] (=10.29 [m/s]))、出口条件は圧力規定 (大気圧) としており、翼帆表面は粘性壁として、すべりなし条件を課している。解析領域側面の境界面はスリップ壁とした。速度条件は、今回対象としている ISHIN 船型の北米航路における航行速度を基に 20 [knot] と決めており、密度  $\rho$  は 1.206 [kg/m<sup>3</sup>] とした。解析格子の断面図を図 3.1.9 に示す。総要素数は約 1 億 2000 万点であり、分割部の隙間や翼帆表面近傍に関しては、詳細な流れ場を再現する為、格子サイズを小さくし、翼帆から離れていくにつれて格子サイズ



が徐々に大きくなるように設定した。ここでは、3次元形状を対象とした3次元解析を行ったため、3.1.3で示した3分割翼帆の断面形状の検討解析（準2次元解析）と比べて総要素数が増えている。なお、ここでは、分割位置の影響のみを検討したため、分割部の隙間幅、分割部の曲率半径、迎角（35[deg]）は固定して解析を行った。迎角に関しては、3.1.3では、25[deg]としたが、解析の結果、35[deg]でも失速しないことが確認されたため、ここでは、より性能が高い35[deg]での解析を行った。解析結果を表3.1.5に示す。これらの結果より、今回評価した条件においては、隙間位置が中間の②の条件において揚力係数  $C_L$  が最も高く、揚抗比  $C_L/C_D$  は隙間位置が最も前方の①の条件において最も高くなることが確認された。図3.1.10および図3.1.11に示す各断面の圧力分布および流速分布を見ると、低い断面においては、翼帆後方の低速領域が減少していることも確認できる。一方で、高い方の断面では、NACA0021翼型との差異が小さくなっていることが分かる。これは後述する翼端における巻き上がり渦の発生が要因であると考えられる。

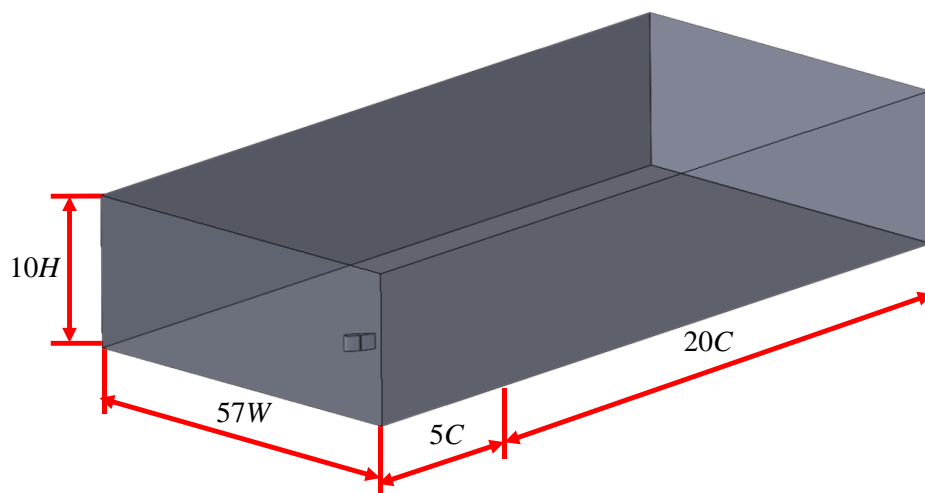


図 3.1.8 解析領域

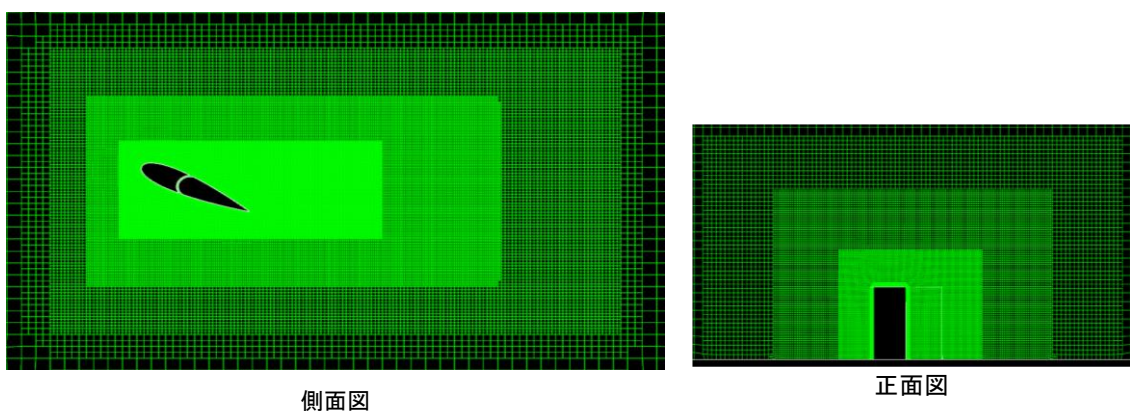


図 3.1.9 解析格子

表 3.1.5 分割部の隙間位置の影響評価

(2分割翼、空力係数の比較、隙間位置は①②③の順番に後方に移動)

| 分割位置 |             | ①     | ②     | ③     |
|------|-------------|-------|-------|-------|
| 抗力係数 | $C_D$       | 0.529 | 0.551 | 0.545 |
| 揚力係数 | $C_L$       | 1.110 | 1.153 | 1.143 |
| 揚抗比  | $C_L / C_D$ | 2.098 | 2.093 | 2.097 |

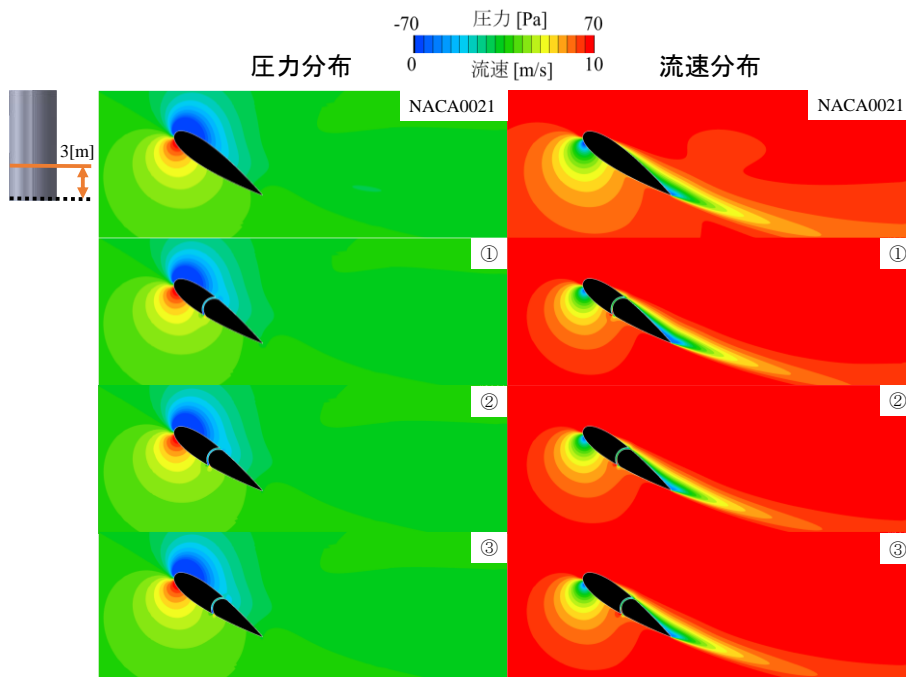


図 3.1.10 2分割翼帆分割部の隙間位置の影響評価結果 (断面1)

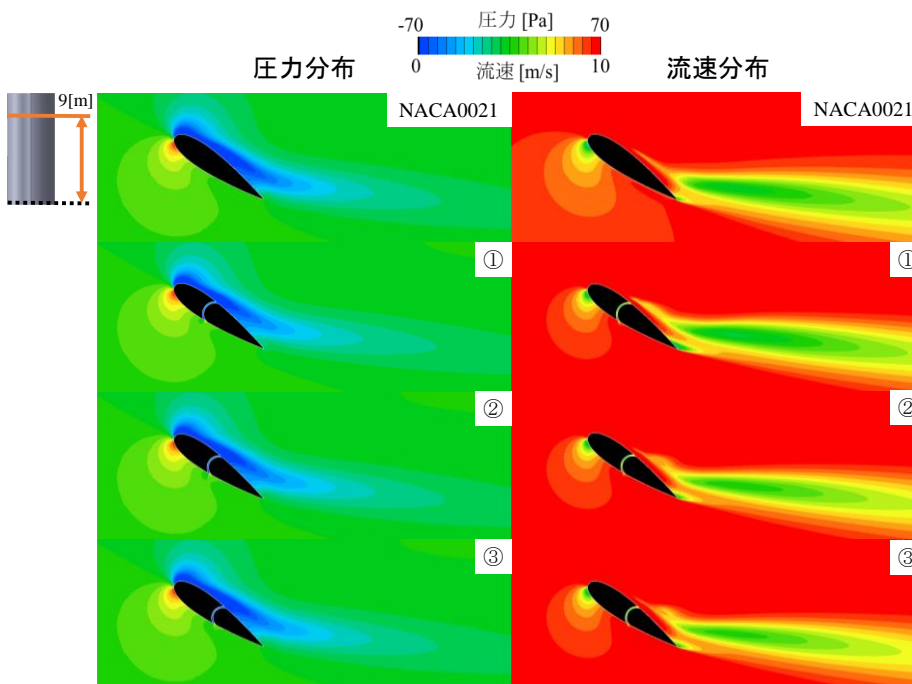


図 3.1.11 2分割翼帆分割部の隙間位置の影響評価結果 (断面2)

### 3.1.5 解析精度の検証（風洞試験結果との比較）

CFD 解析の解析精度の検証を行うために、3.1.3 および 3.1.4 で評価した 3 分割翼帆、2 分割翼帆の断面形状の中で最も揚抗比  $C_L / C_D$  が高かった条件を基に 3 次元翼帆の形状モデルを作成して CFD 解析を行い、風洞試験で得られた実験値との比較を行った。解析は、3.4 に示す風洞試験と同条件での解析を行った。解析領域としては、翼帆の寸法、翼弦長  $C$  (0.40[m])、高さ  $H$  (0.084[m])、幅  $W$  (0.20[m]) を基準として、流れ方向に  $25C$ 、高さ方向に  $10H$ 、幅方向に  $57W$  を取り解析を行った。入口条件は速度規定 (18.0 [m/s])、出口条件は圧力規定 (大気圧) としており、翼帆表面は粘性壁として、すべりなし条件を課している。解析領域側面の境界面はスリップ壁とした。密度  $\rho$  は 1.206 [kg/m<sup>3</sup>] とした。流速と翼弦長より求めたレイノルズ数は  $Re=4.82 \times 10^5$  となる。風洞試験の場合、流速およびモデルサイズの制約があるため、速度が低くなるだけでなく、レイノルズ数も実船の航行を想定したレイノルズ数の条件 ( $Re=1.36 \times 10^7$ ) より低い値となるが、まずは、風洞試験の条件で CFD 解析の解析精度の検証を行い、その後に、実船の航行を想定した条件 ( $Re=1.36 \times 10^7$ ) で翼帆の形状検討の解析を行った。

NACA0021 (分割なし)、3 分割翼、2 分割翼それぞれの風洞試験による測定結果と CFD 解析の結果をそれぞれ、図 3.1.12-14、表 3.1.6-8 に示す。これらの結果を見ると、解析時間の制約から風洞試験で測定した迎角の条件全ての解析は行ってはいないが、解析を行った条件においては、揚力係数  $C_L$ 、抗力係数  $C_D$  とともに、失速する迎角 (失速角) の 35[deg]までの範囲で CFD 解析結果と実験値は近い値を示しており、高精度に解析ができていることが確認できる。一方で、失速角よりも大きい 40[deg]では差異が見られているが、帆として活用するのは、失速角よりも迎角が低い条件であることから、本解析においては十分な精度となっていると考えられる。そこで、これ以降の実船の航行を想定した条件 ( $Re=1.36 \times 10^7$ )での解析に関しては、ここで設定した条件を基に、解析格子のサイズ、解析領域、解析条件等を決めて解析を行った。

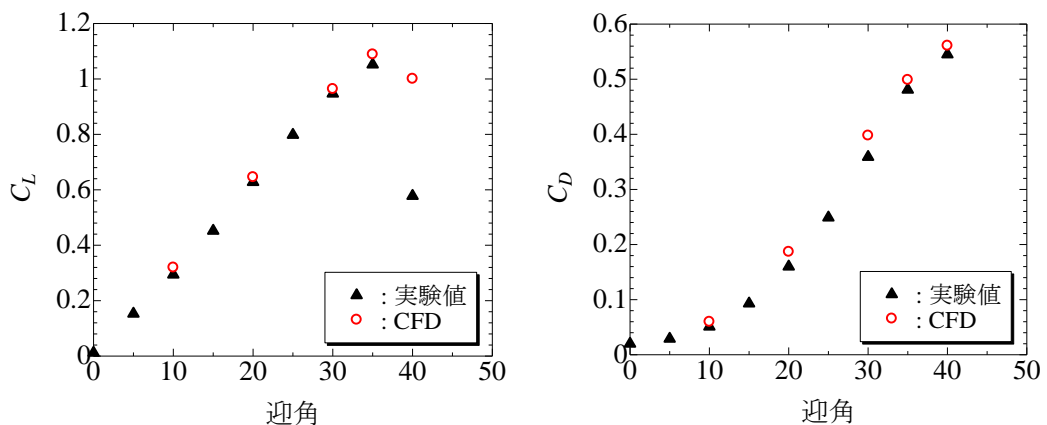


図 3.1.12 実験値と CFD の空力係数の比較 (NACA0021 翼型)

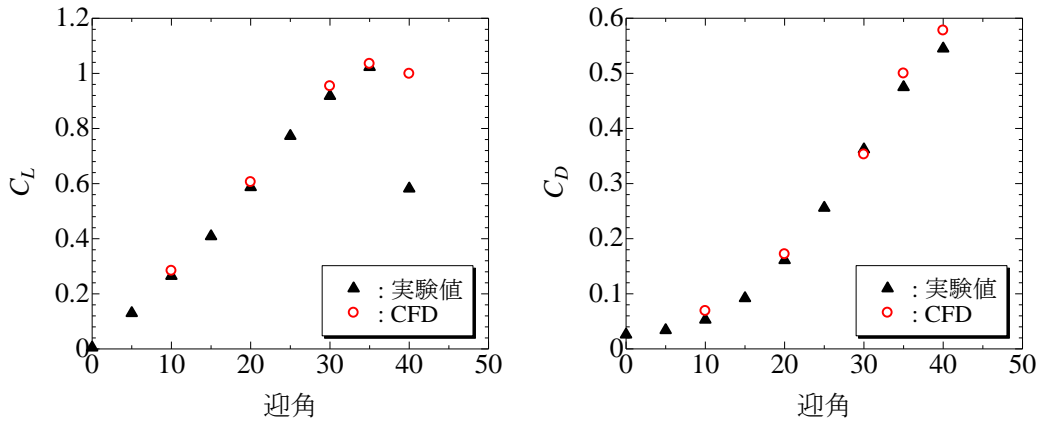


図 3.1.13 実験値と CFD の空力係数の比較 (3 分割翼帆)

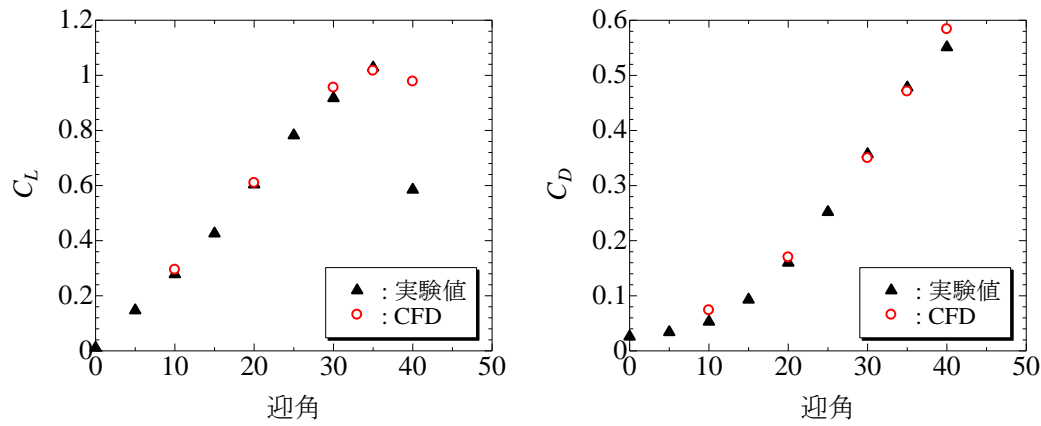


図 3.1.14 実験値と CFD の空力係数の比較 (2 分割翼帆)

表 3.1.6 実験値と CFD の空力係数の比較 (NACA0021 翼型)

| 迎角   |            | 0 [deg] | 5 [deg] | 10 [deg] | 15 [deg] | 20 [deg] | 25 [deg] | 30 [deg] | 35 [deg] | 40 [deg] |
|------|------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CFD  | 抗力係数 $C_D$ |         |         | 0.060    |          | 0.187    |          | 0.398    | 0.499    | 0.561    |
|      | 揚力係数 $C_L$ |         |         | 0.320    |          | 0.646    |          | 0.946    | 1.089    | 1.001    |
| 風洞試験 | 抗力係数 $C_D$ | 0.020   | 0.029   | 0.051    | 0.093    | 0.160    | 0.249    | 0.359    | 0.481    | 0.545    |
|      | 揚力係数 $C_L$ | 0.012   | 0.153   | 0.294    | 0.452    | 0.628    | 0.798    | 0.947    | 1.052    | 0.578    |

表 3.1.7 実験値と CFD の空力係数の比較 (3 分割翼)

| 迎角   |            | 0 [deg] | 5 [deg] | 10 [deg] | 15 [deg] | 20 [deg] | 25 [deg] | 30 [deg] | 35 [deg] | 40 [deg] |
|------|------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CFD  | 抗力係数 $C_D$ |         |         | 0.069    |          | 0.172    |          | 0.353    | 0.500    | 0.578    |
|      | 揚力係数 $C_L$ |         |         | 0.284    |          | 0.606    |          | 0.954    | 1.035    | 0.999    |
| 風洞試験 | 抗力係数 $C_D$ | 0.026   | 0.034   | 0.053    | 0.092    | 0.161    | 0.256    | 0.362    | 0.475    | 0.545    |
|      | 揚力係数 $C_L$ | 0.005   | 0.130   | 0.265    | 0.409    | 0.587    | 0.773    | 0.918    | 1.023    | 0.582    |

表 3.1.8 実験値と CFD の空力係数の比較 (2 分割翼)

| 迎角   |            | 0 [deg] | 5 [deg] | 10 [deg] | 15 [deg] | 20 [deg] | 25 [deg] | 30 [deg] | 35 [deg] | 40 [deg] |
|------|------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CFD  | 抗力係数 $C_D$ |         |         | 0.074    |          | 0.170    |          | 0.350    | 0.471    | 0.584    |
|      | 揚力係数 $C_L$ |         |         | 0.295    |          | 0.610    |          | 0.956    | 1.017    | 0.978    |
| 風洞試験 | 抗力係数 $C_D$ | 0.026   | 0.034   | 0.053    | 0.093    | 0.160    | 0.252    | 0.357    | 0.478    | 0.551    |
|      | 揚力係数 $C_L$ | 0.011   | 0.147   | 0.278    | 0.426    | 0.604    | 0.782    | 0.917    | 1.028    | 0.585    |

### 3.1.6 3 分割単独翼帆の空力特性の評価

3.1.3 および 3.1.4 で評価した 3 分割翼帆、2 分割翼帆の断面形状の中で最も空力性能が高かった形状を基に、実際の 3 次元帆形状モデルを作成して、実際の船舶の航行速度および実装状態の帆のサイズを想定した CFD 解析を行うことで、空力性能の評価を行った。解析領域としては、翼帆の寸法、翼弦長  $C$  (20[m])、高さ  $H$  (10[m])、幅  $W$  (4.21[m]) を基準として、流れ方向に  $25C$ 、高さ方向に  $10H$ 、幅方向に  $57W$  を取り解析を行った。入口条件は速度規定 (20 [knot] (=10.29 [m/s]))、出口条件は圧力規定 (大気圧) としており、翼帆表面は粘性壁として、すべりなし条件を課している。解析領域側面の境界面はスリップ壁とした。速度条件は、今回対象としている ISHIN 船型の北米航路における航行速度を基に 20 [knot] と決めており、密度  $\rho$  は  $1.206 [\text{kg}/\text{m}^3]$  とした。解析格子の総要素数は約 1 億 2000 万点であり、分割部の隙間や翼帆表面近傍に関しては、詳細な流れ場を再現する為、格子サイズを小さくし、翼帆から離れていくにつれて格子サイズが徐々に大きくなるように設定した。

図 3.1.15 および表 3.1.9-10 に示す解析結果を見ると、実際の 3 次元帆形状モデルによる解析においても、若干ではあるが、隙間部を設けることで空力特性が改善していることが確認できる。一方で、図 3.1.16 に示す迎角 25[deg] の条件における解析結果 (圧力分布および流速分布) を見ると、翼端で巻き上がり渦が発生しており、このために、抗力が増大して、隙間部の効果が小さくなったと考えられる。そこで、翼端での巻き上がり渦の発生を抑制する翼端板の設置を検討した。

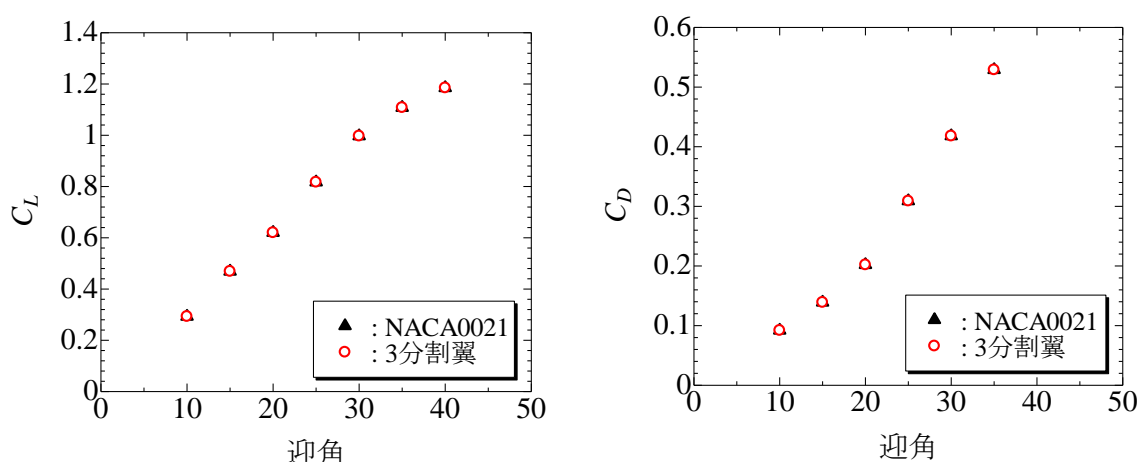


図 3.1.15 NACA0021 と 3 分割翼帆の空力係数の比較

表 3.1.9 NACA0021 の解析値（空力係数比較）

| 迎角   |       | 10 [deg] | 15 [deg] | 20 [deg] | 25 [deg] | 30 [deg] | 35 [deg] | 40 [deg] |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 抗力係数 | $C_D$ | 0.091    | 0.140    | 0.201    | 0.311    | 0.418    | 0.530    | 0.664    |
| 揚力係数 | $C_L$ | 0.317    | 0.492    | 0.625    | 0.817    | 0.988    | 1.103    | 1.178    |

表 3.1.10 3分割翼帆の解析値（空力係数比較）

| 迎角   |       | 10 [deg] | 15 [deg] | 20 [deg] | 25 [deg] | 30 [deg] | 35 [deg] | 40 [deg] |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 抗力係数 | $C_D$ | 0.092    | 0.139    | 0.202    | 0.309    | 0.418    | 0.529    | 0.664    |
| 揚力係数 | $C_L$ | 0.293    | 0.469    | 0.620    | 0.817    | 0.997    | 1.108    | 1.185    |

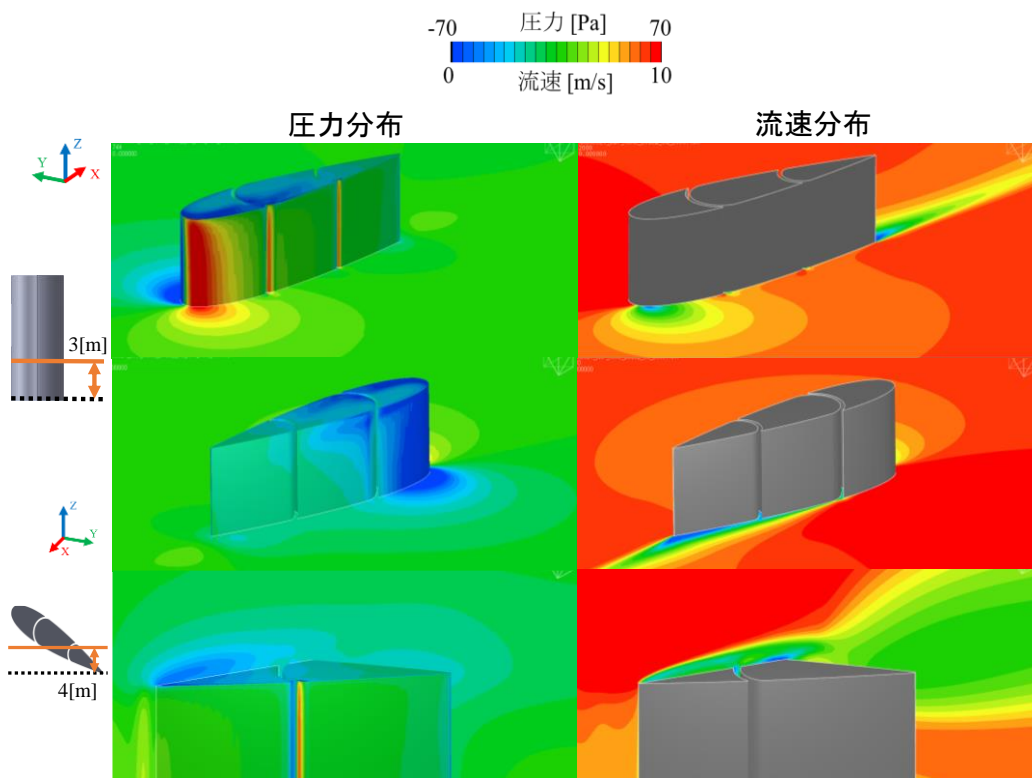


図 3.1.16 3分割翼帆の解析結果（迎角 25[deg]）

### 3.1.7 翼端板の検討

3.1.6 で述べた通り、3分割翼帆では翼端で巻き上がり渦が発生しており、このために、隙間部の効果が小さくなったと考えられる。そこで、翼端での巻き上がり渦の発生を抑制する翼端板の設置を検討した。解析格子、解析領域、解析条件等に関しては、3.1.6 と同様に設定した。ここでは、図 3.1.17 に示す 2つのタイプの翼端板の評価を行った。分割部でキャンバー角を変えることを想定して、翼端板は、翼帆の中央部のみに設置して、幅を変えた 2つの形状 Winglet 1 及び Winglet 2 (Winglet 1 より多少幅広) で評価を行った。図 3.1.18 および図 3.1.19 に示す圧力分布および流速分布を見ると、翼端板を設置することで、翼端部での巻き上がり渦の発生が抑制できていることが分かる。また、図 3.1.20 および図 3.1.21

に示す空力係数の解析結果を見ると、翼端板を設置することで、特に迎角が大きな条件において、抗力が減少していることが分かる。表 3.1.11 および表 3.1.12 を見ると、抗力が減少しているだけでなく、揚力も若干増加しており、翼端板の効果が確認できる。2つのタイプの翼端板の比較をすると、Winglet 2の方がより効果が高いことも確認できる。図 3.1.22-25 に各断面の圧力分布および流速分布を示す。これらの結果を見ると、特に高さが高い断面において、翼端板を設置することで翼帆後方の低圧領域が小さくなっていることが確認でき、翼端板の効果が分かる。

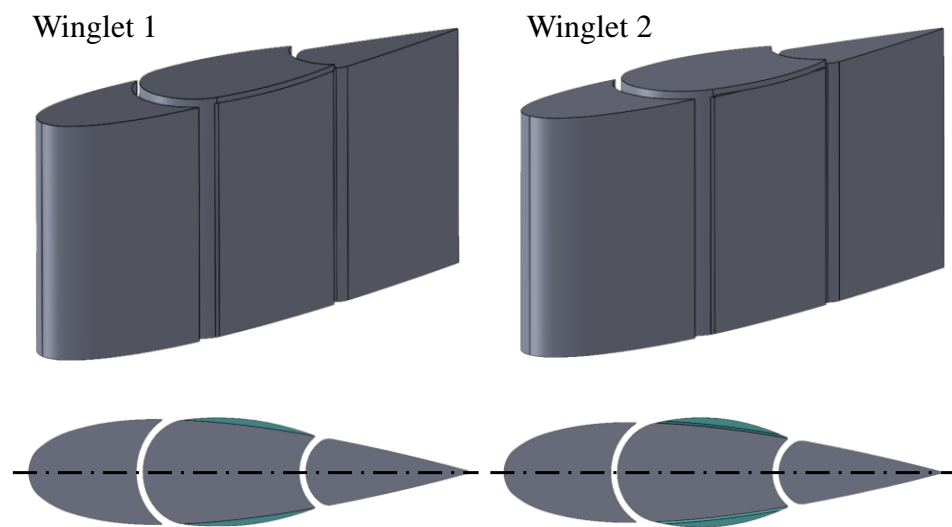


図 3.1.17 翼端板の検討

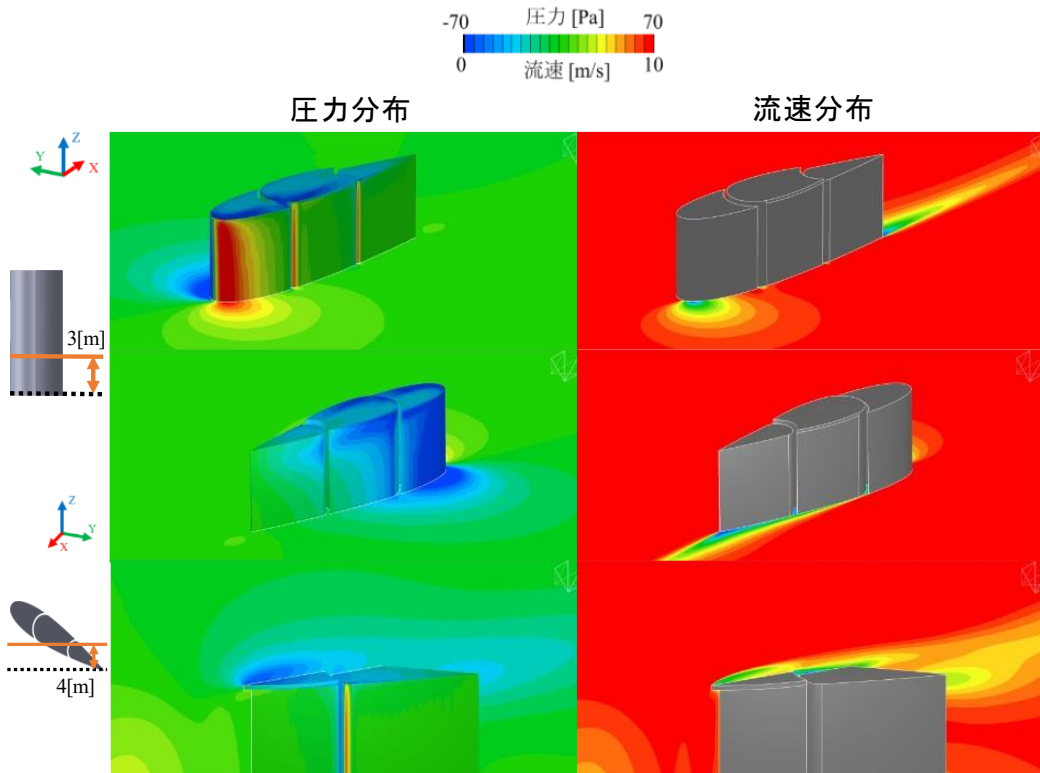


図 3. 1. 18 翼端板を設置した 3 分割翼帆の解析結果 (Wingle 1, 迎角 25[deg])

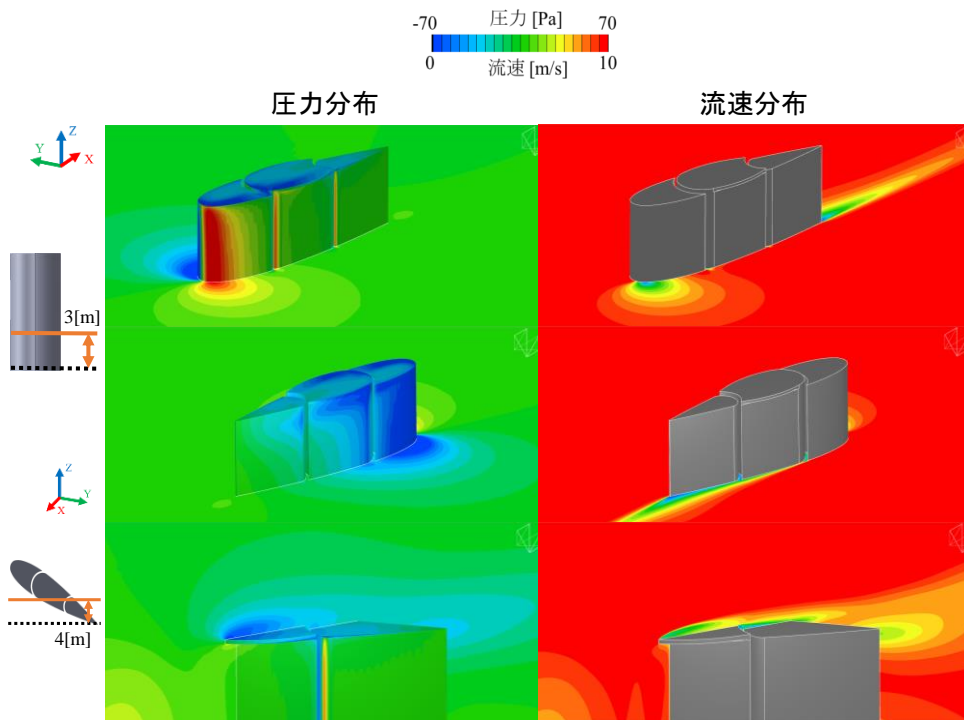


図 3. 1. 19 翼端板を設置した 3 分割翼の解析結果 (Wingle 2, 迎角 25[deg])



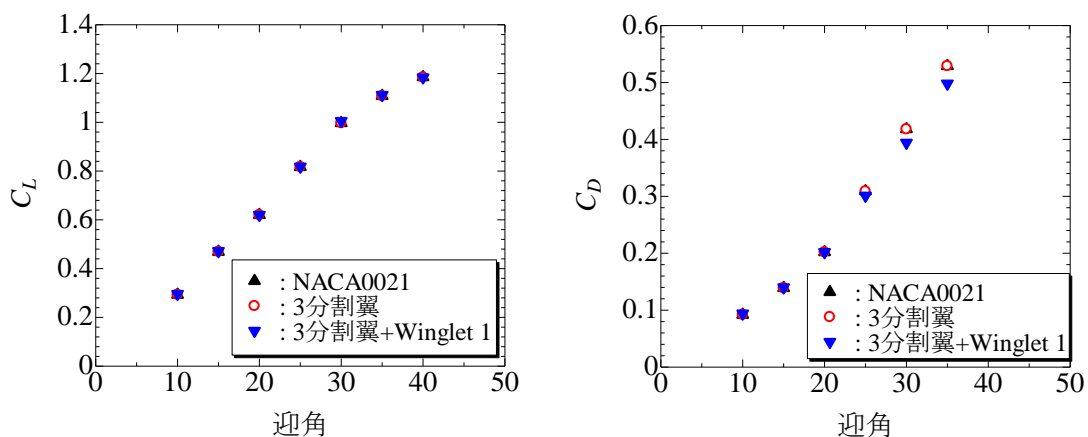


図 3.1.20 NACA0021 と翼端板付き 3 分割翼の空力係数の比較 (Winglet 1)

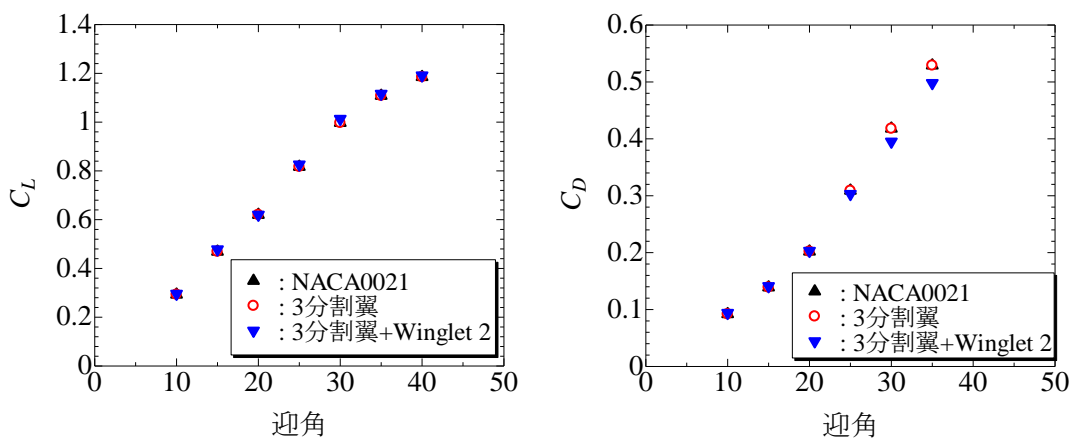


図 3.1.21 NACA0021 と翼端板付き 3 分割翼帆の空力係数の比較 (Winglet 2)

表 3.1.11 翼端板付き 3 分割翼帆の空力係数の比較 (Winglet 1)

| 迎角                 |      |       | 10 [deg] | 15 [deg] | 20 [deg] | 25 [deg] | 30 [deg] | 35 [deg] | 40 [deg] |
|--------------------|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| NACA0021<br>(分割無し) | 抗力係数 | $C_D$ | 0.091    | 0.140    | 0.201    | 0.311    | 0.418    | 0.530    | 0.664    |
|                    | 揚力係数 | $C_L$ | 0.317    | 0.492    | 0.625    | 0.817    | 0.988    | 1.103    | 1.178    |
| 3分割翼<br>Winglet 1  | 抗力係数 | $C_D$ | 0.094    | 0.140    | 0.202    | 0.301    | 0.394    | 0.498    | 0.649    |
|                    | 揚力係数 | $C_L$ | 0.296    | 0.472    | 0.620    | 0.818    | 1.005    | 1.112    | 1.184    |

表 3.1.12 翼端板付き 3 分割翼帆の空力係数の比較 (Winglet 2)

| 迎角                 |      |       | 10 [deg] | 15 [deg] | 20 [deg] | 25 [deg] | 30 [deg] | 35 [deg] | 40 [deg] |
|--------------------|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| NACA0021<br>(分割無し) | 抗力係数 | $C_D$ | 0.091    | 0.140    | 0.201    | 0.311    | 0.418    | 0.530    | 0.664    |
|                    | 揚力係数 | $C_L$ | 0.317    | 0.492    | 0.625    | 0.817    | 0.988    | 1.103    | 1.178    |
| 3分割翼<br>Winglet 2  | 抗力係数 | $C_D$ | 0.094    | 0.141    | 0.203    | 0.303    | 0.395    | 0.498    | 0.657    |
|                    | 揚力係数 | $C_L$ | 0.296    | 0.478    | 0.620    | 0.826    | 1.013    | 1.116    | 1.191    |

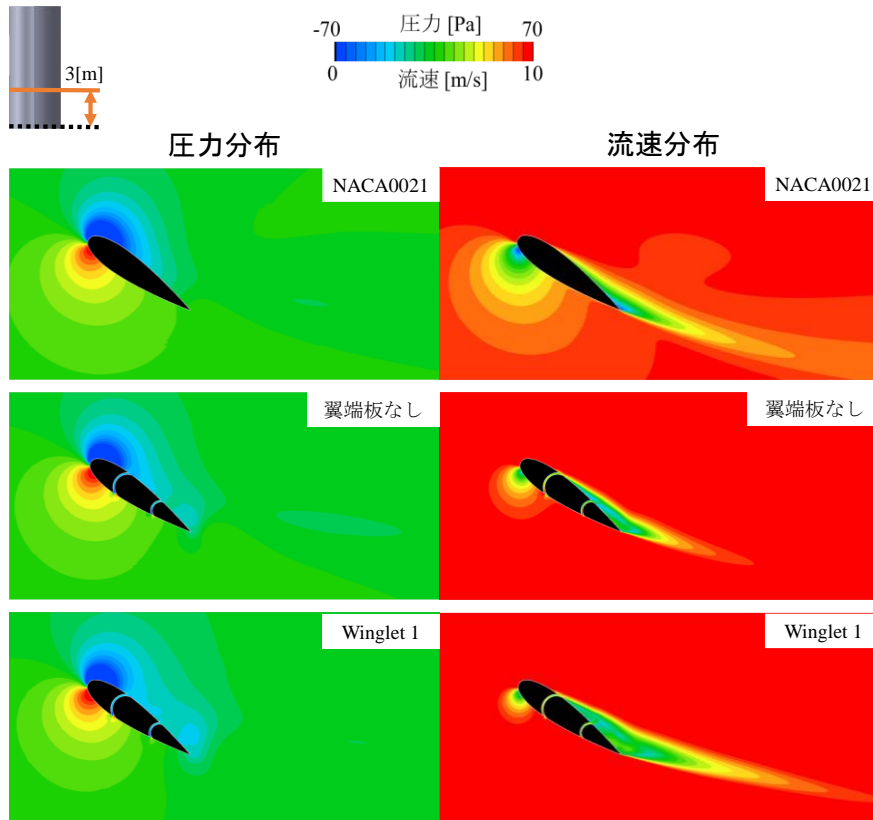


図 3.1.22 翼端板を設置した 3 分割翼の解析結果 (Winglet 1, 迎角 35[deg], 断面 1)

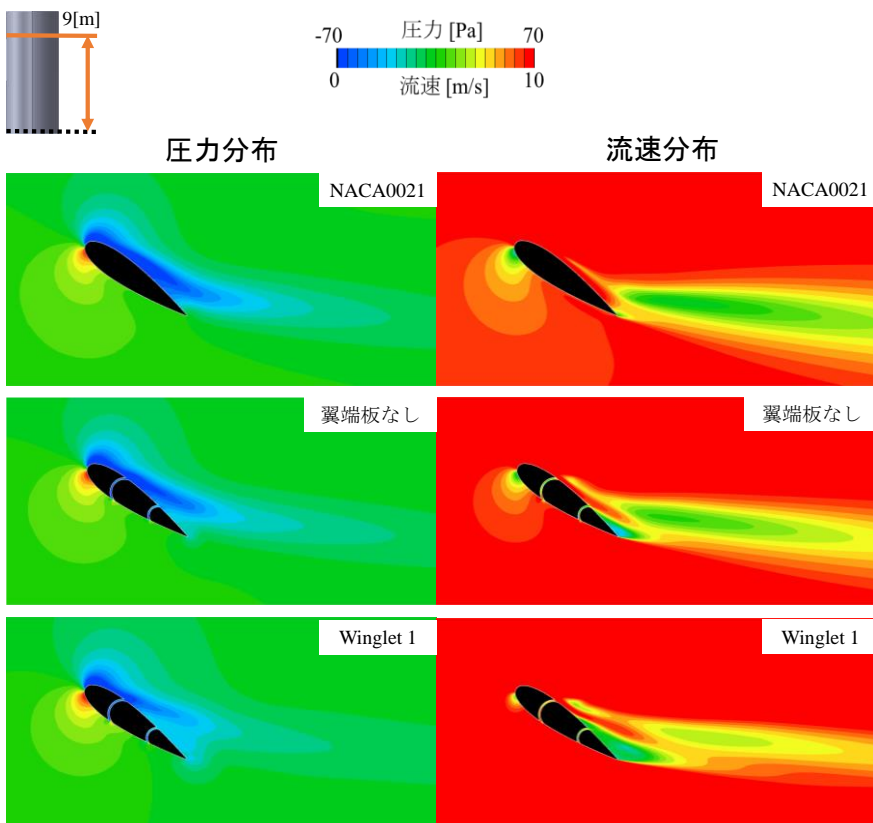


図 3.1.23 翼端板を設置した 3 分割翼の解析結果 (Winglet 1, 迎角 35[deg], 断面 2)

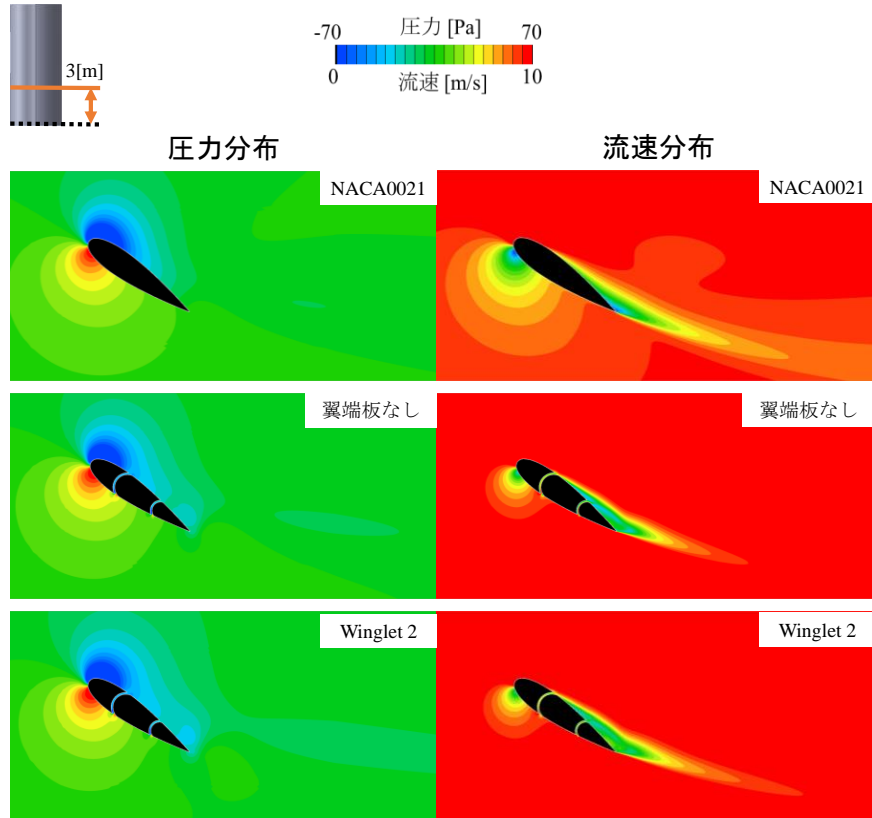


図 3.1.24 翼端板を設置した 3 分割翼の解析結果 (Winglet 2, 迎角 35[deg], 断面 1)

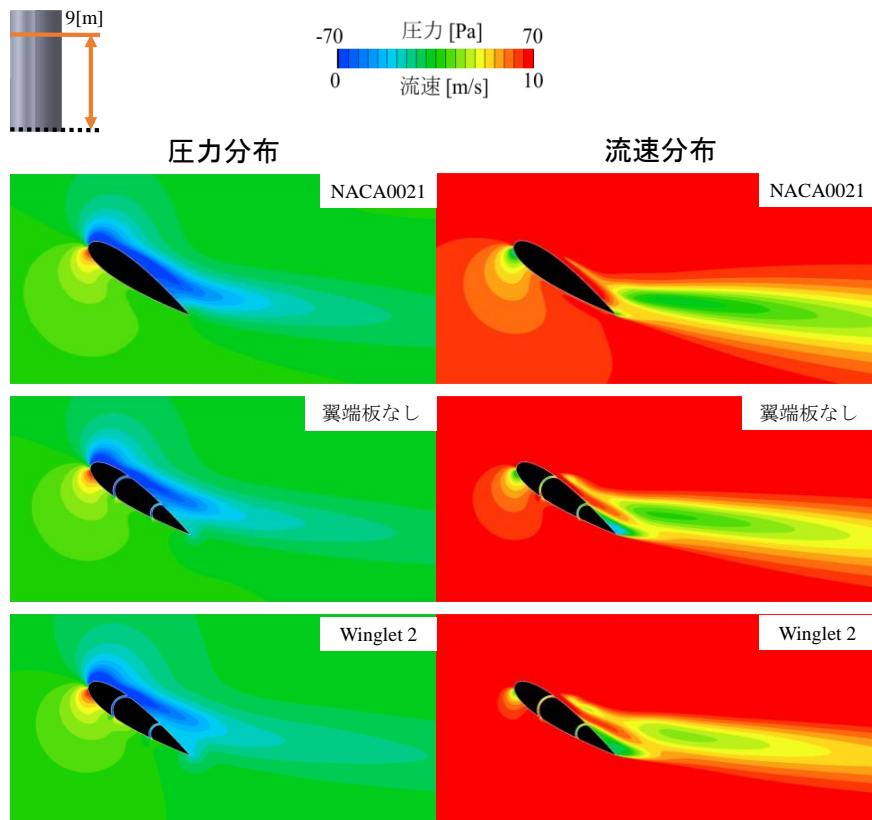


図 3.1.25 翼端板を設置した 3 分割翼の解析結果 (Winglet 2, 迎角 35[deg], 断面 2)

### 3.1.8 3分割翼帆の複数配置（複合翼帆）の検討

実際の船舶への帆装を想定した場合は、翼帆を単独で設置するのではなく、複数の帆を設置することになる。そこで、前後に帆を並べた配置（複合翼）の検討を行った。図 3.1.26 に検討したレイアウトを示す。図に示すように、想定している船舶の風力推進力が最も出ると考えられる、60[deg]からの流入を想定してその流入風に対して、40[deg]の迎角として、船尾に向けて翼帆を2枚直列に並べることを想定する。対象とした翼帆は3.1.6で評価を行った翼端板無しの3分割翼帆である。検討したレイアウトは、図 3.1.26 に示す2つのレイアウトであり、解析により得られた空力係数を表 3.1.13 および表 3.1.14 に示す。これらの結果を見ると、Position 1、Position 2とも、前側の翼帆は、単独帆の場合よりも揚力、抗力ともに増加していることが分かる。また、Position 1、Position 2ともに、2枚の翼帆の揚力係数の平均値は、単独帆の場合より若干低い値となっているが、1.10 を超えていることも分かる。図 3.1.27 および図 3.1.28 に示す圧力分布および流速分布を見ると、Position 1 では前後の翼帆の周りの流れが若干異なっているが、Position 2 では前後の翼帆の周りの流れ場の差異が小さくなっていることも確認できる。

今後は、翼帆をどの程度近づけることができるかについて調べるとともに、より効率的な配置についても検討を進める予定である。さらに、翼帆同士を近づけて干渉効果により、より高い性能を出す試みについても検討を始めており、来年度に向けて、さらに検討を進める方針である。

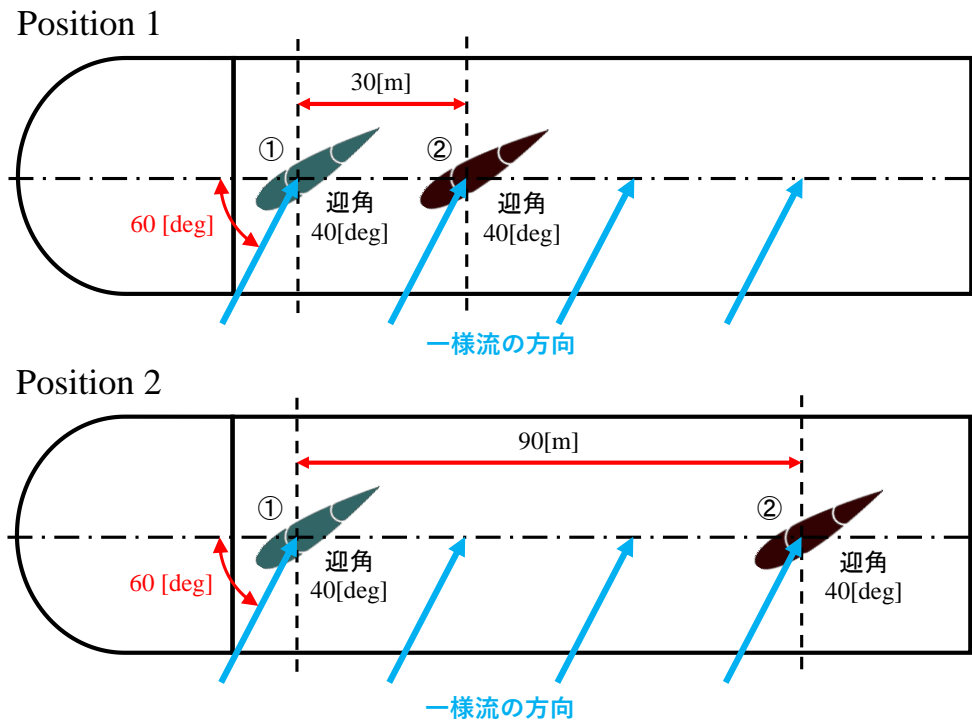


図 3.1.26 複数翼帆のレイアウトと船体の関係

表 3.1.13 複数翼帆レイアウトによる空力係数の比較 (Position 1)

|      |           | 単独翼   | 複合翼   |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|
|      |           |       | 翼帆①   | 翼帆②   |
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.664 | 0.754 | 0.645 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.185 | 1.233 | 1.030 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 1.785 | 1.635 | 1.597 |

表 3.1.14 複数翼帆レイアウトによる空力係数の比較 (Position 2)

|      |           | 単独翼   | 複合翼   |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|
|      |           |       | 翼帆①   | 翼帆②   |
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.664 | 0.678 | 0.672 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.185 | 1.189 | 1.174 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 1.785 | 1.754 | 1.747 |

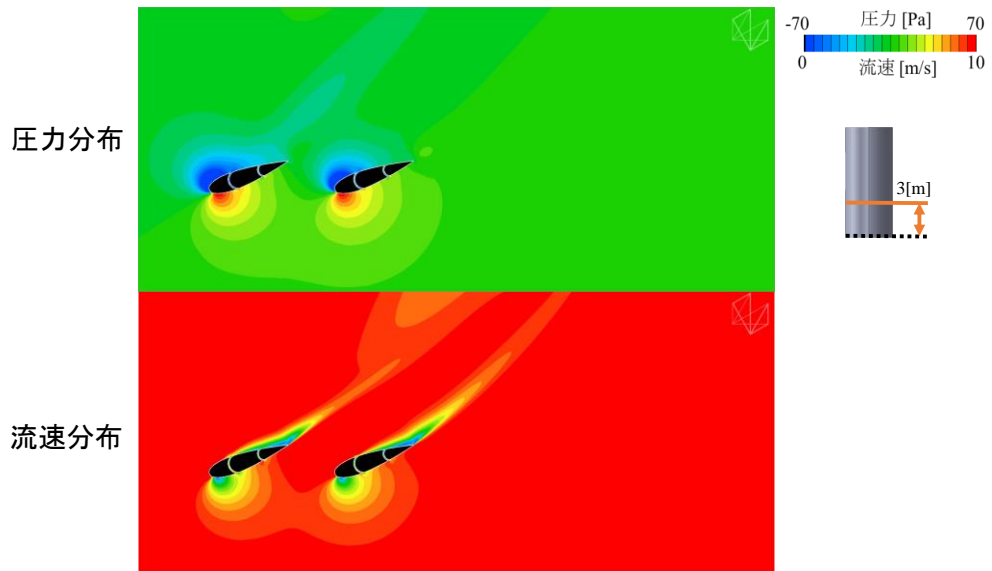


図 3.1.27 複数帆レイアウトの解析結果 (Position 1)

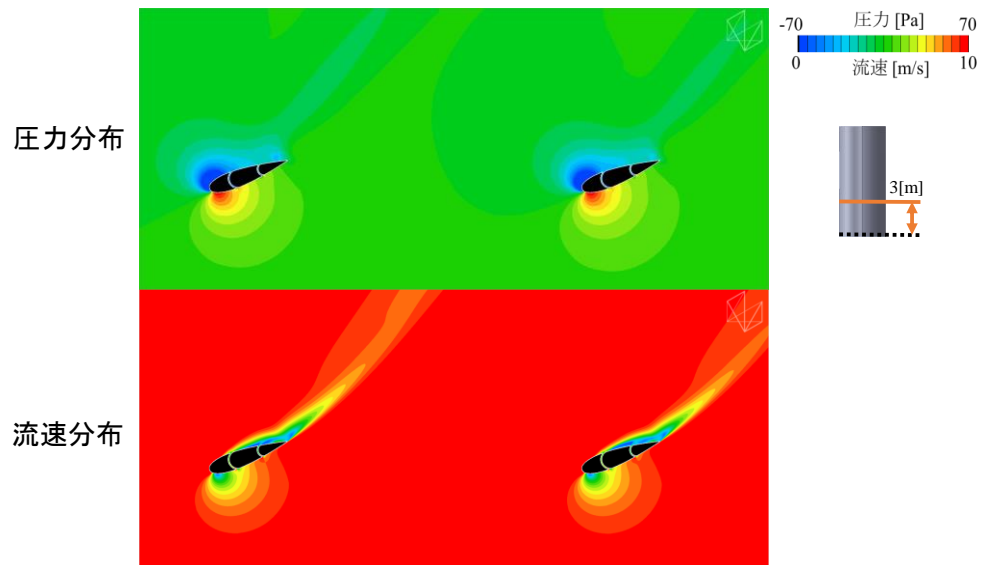


図 3.1.28 複数帆レイアウトの解析結果 (Position 2)

### 3.1.9 3分割翼帆のキャンバーの効果の検討

3分割翼帆の空力性能のさらなる改善を目指し、翼帆の分割部でキャンバーを付けることで揚抗比の改善を試みた結果について報告する。図3.1.29に示すように、中央部に対して、前方部、後方部の角度を変えて、翼帆全体を反らせることでキャンバーを付けた形状の準2次元解析を行った。前部・後部のキャンバーはそれぞれ別に設定可能であり、今回は、表3.1.15に示す6つの条件で評価を行った。表3.1.16に示す解析結果を見ると、揚力係数は②の条件で最も高くなっており、揚抗比は④の条件で最も高くなっていることが分かる。図3.1.30に示す圧力分布および流速分布を見ると、キャンバーを付けた②、④、⑥の条件では、キャンバー無しの結果に比べて、翼帆後方の低速領域は広がっているが、翼帆上面前縁部の低圧領域および翼帆下面の高圧領域が広がっており、このことにより、揚力が増していることが分かる。

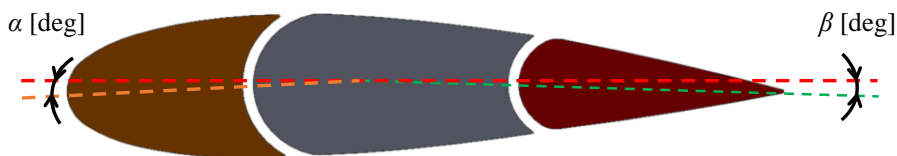


図 3.1.29 3分割翼帆によるキャンバー角の変化

表 3.1.15 3分割翼帆におけるキャンバー角

|                        | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|
| 前方キャンバー $\alpha$ [deg] | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| 後方キャンバー $\beta$ [deg]  | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 |

表 3.1.16 3分割翼帆におけるキャンバー角変化による空力係数の比較

|      |           | キャンバー無し | ①     | ②     | ③     | ④     | ⑤     | ⑥     |
|------|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.260   | 0.306 | 0.344 | 0.264 | 0.264 | 0.275 | 0.286 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.243   | 1.295 | 1.414 | 1.238 | 1.252 | 1.227 | 1.246 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 4.781   | 4.232 | 4.110 | 4.698 | 4.742 | 4.462 | 4.357 |

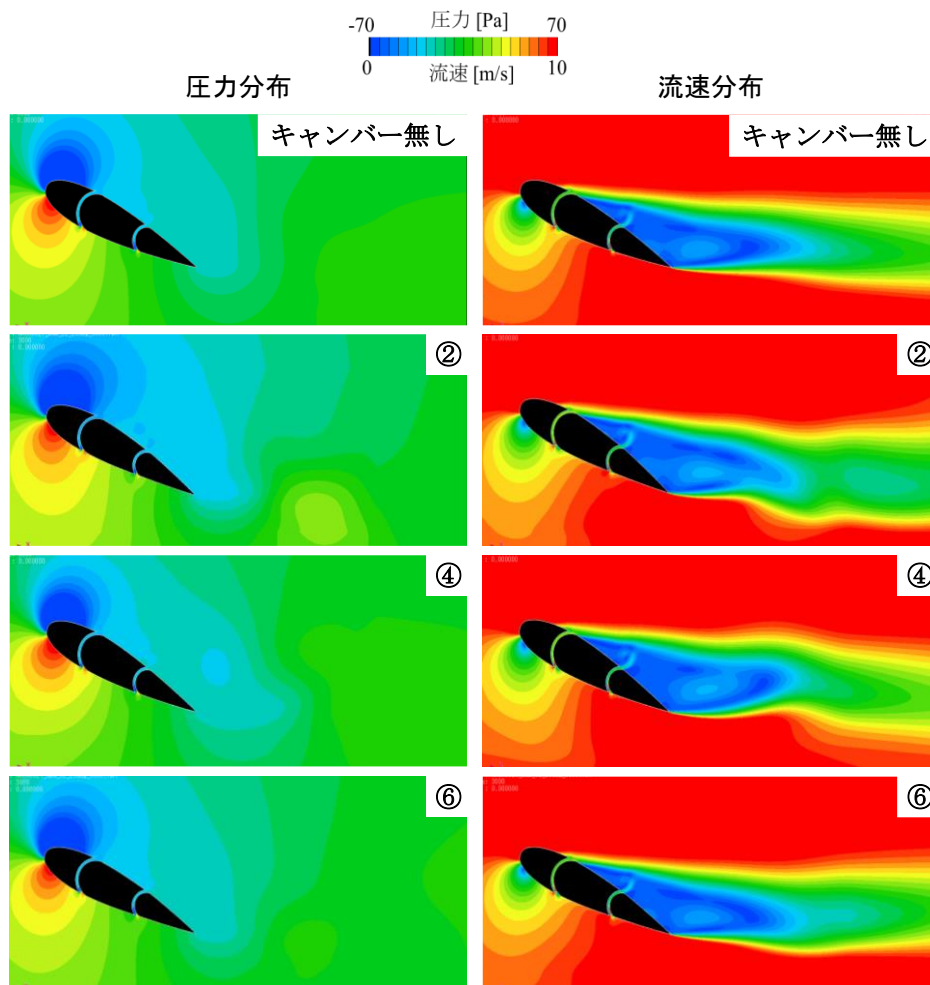


図 3.1.30 3分割翼帆によるキャンバー角の変化

### 3.1.10 2分割翼帆のキャンバーの効果の検討

翼帆の空力性能のさらなる改善を目指し、2分割翼帆の分割部でキャンバーを付けることで揚抗比の改善を試みた結果についても報告する。図 3.1.31 に示すように、3.1.4において、最も揚力係数  $C_L$  が高かった形状に対して、前方部より後方部を下方に 5 [deg] 傾けることでキャンバーを設けた形状の 3次元解析を行いキャンバーの効果の評価した。本解析では迎角は 40 [deg] として、キャンバー有り無しの比較を行った。図 3.1.32 および図 3.1.33 に示す圧力分布および流速分布を見ると、キャンバーを付けることにより、翼帆後方の低速領域は広がっているが、翼帆上面の低圧領域および翼帆下面の高圧領域が広がっており、このことにより、揚力が増していることが分かる。また、表 3.1.17 に示す解析結果を見ると、キャンバーを付けた場合、キャンバー無しの場合に比べて揚力係数、抗力係数とも増加しているが、揚抗比は悪化していることが分かる。揚力係数としては、1.30 を超える値となっており、今後は、最適なキャンバー角の選定を行うことで、さらなる検討を行う予定である。

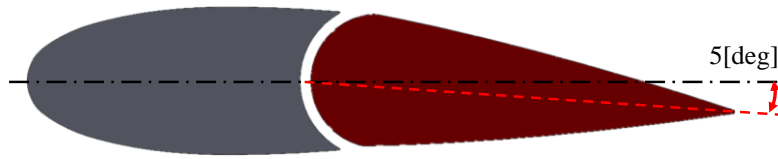


図 3.1.31 2分割翼帆によるキャンバー角の変化

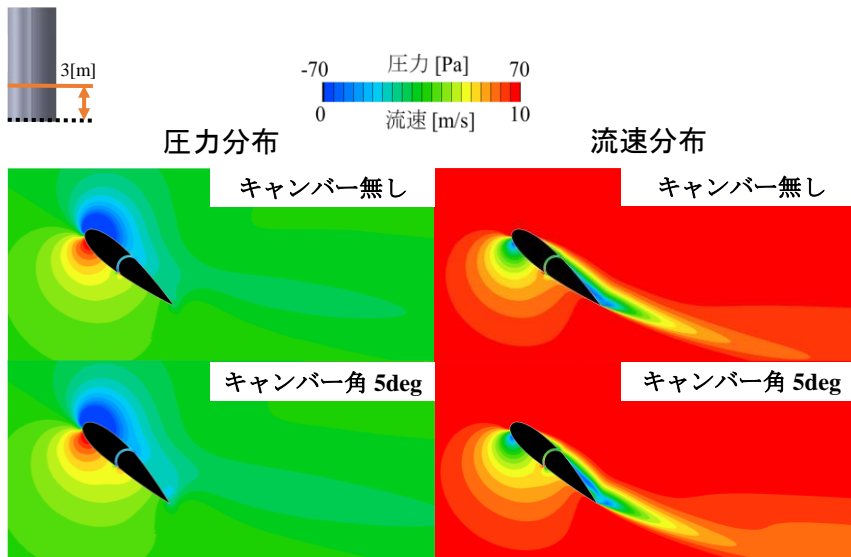


図 3.1.32 2分割翼帆によるキャンバー角の変化 (断面1)

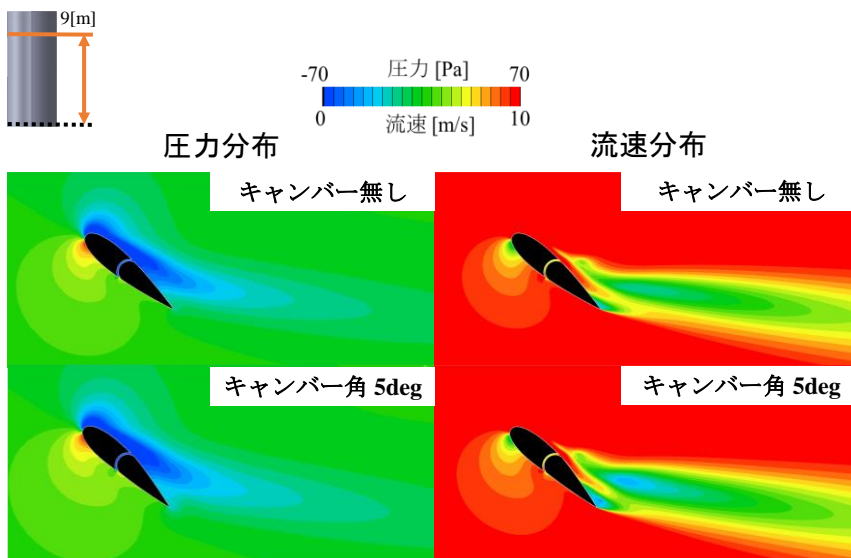


図 3.1.33 2分割翼によるキャンバー角の変化 (断面2)



表 3.1.17 2分割翼におけるキャンバー角変化による空力係数の比較

|      |           | キャンバー角 0 [deg] | キャンバー角 5 [deg] |
|------|-----------|----------------|----------------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.673          | 0.766          |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.242          | 1.303          |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 1.845          | 1.701          |

### 3.1.11 北米航路航行時の GHG 削減効果

#### 1) 北米航路の風向風速分布

気象庁が電力中央研究所と共同で、季節予報モデルの高度化や気候研究のための高精度の気候データセットとして作成したデータベース「JRA-25」の風速分布図を図 3.1.34 に示す。また、北太平洋航路中間点であるアリューシャン列島南部（北緯 50 度 東経 180 度）の風向・風速分布を図 3.1.35 に示す。

図 3.1.35 の風向分布は、偏西風の影響により西風の頻度が高く、逆に東風の頻度が少ない。往復の北米航路を勘案すると、風向の発生頻度は風向によらずほぼ同等になるため、本研究における北米航路の風向は 360 度均一分布とし、図 3.1.35 に示す風速分布を基にしたシミュレーションを行った。

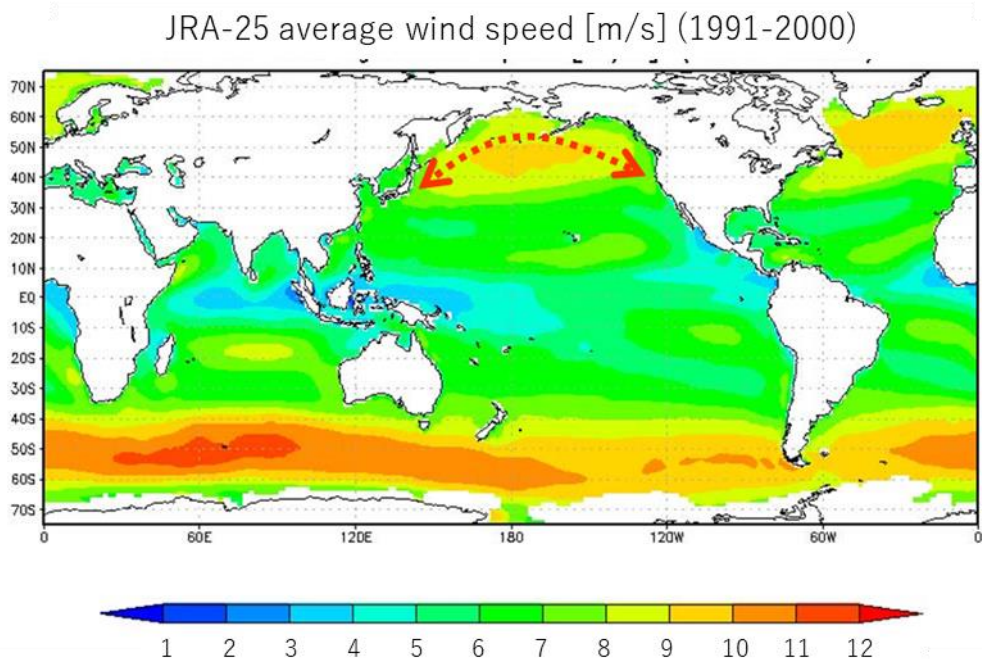


図 3.1.34 JRA-25 の風速分布図（北米航路：赤点線矢印）

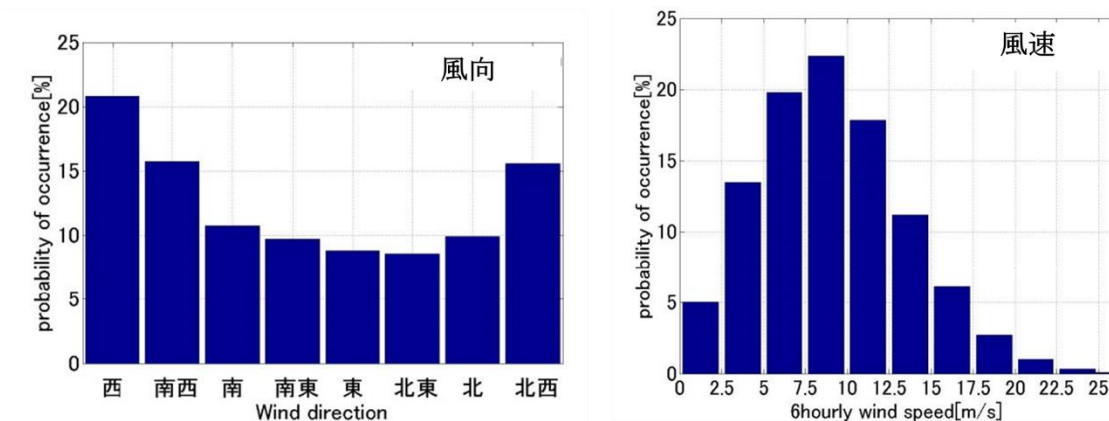


図 3.1.35 北太平洋航路中間点での風向・風速分布

## 2) GHG 削減効果

3.1.7 で示した「翼端板 (Winglet 2) を付けた 3 分割翼帆」をオリジナルの原型 PCC 船型 (図 3.2.12 参照) に迎角 35[deg]となるように 1 本配置し、北米航路を航行する場合 (前節に示す北太平洋航路中間点での風向・風速分布を使用してシミュレーション)、翼帆による効果として GHG 排出量を往復平均で 3.6[%]削減できることが確認された。

### 3.1.12 まとめ

以上のように、CFD 解析を実施した結果、翼端板 (Winglet 2) を設置した 3 分割翼帆において、 $C_L=1.19$  の性能が実現可能なことが確認できた。また、キャンバー角を付けた 2 分割翼帆においては、 $C_L=1.30$  を超える性能が実現可能なことが確認できた。さらに、2 枚の 3 分割翼帆を並べた複数配置 (複合翼) の解析においても、平均  $C_L=1.10$  以上の空力性能が実現可能なことが確認できた。

さらに、上記の結果を基に、翼帆による GHG 排出量削減効果を評価した結果、翼端板 (Winglet 2) を付けた 3 分割翼帆をオリジナルの原型 PCC 船型に 1 本配置し、北米航路を航行する場合、GHG 排出量を往復平均で 3.6[%]削減できることが確認された。

従って、高さ 10[m]以内で  $C_L=1.10$  以上の空力性能を有する翼帆を開発するという本年度の目標を達成する事ができた。

### 3.2 低風圧抵抗船型の船型およびコンテナ船小型風防カバーの設計検討

#### 3.2.1 低風圧抵抗船型の設計検討

##### 3.2.1.1 概要

低風圧抵抗船型に関し、船首部などの推進力を最大化、抵抗を最小化する形状の追求をCFD解析で行う。具体的には、詳細な流れ場の把握をCFD解析で行い、その結果に基づき形状の検討を行う。2022年度の性能目標はオリジナルの原型PCC船型に対してISHIN船型では3.1.11と同様の北米航路就航の往復平均シミュレーション結果で5[%]のGHG削減の性能であるが、それを6.5[%]に向上させる。

##### 3.2.1.2 対象船

対象とする船は自動車運搬船で要目を表3.2.1に示す。

表 3.2.1 自動車運搬船の主要目とモデル寸法

|                               | 実船      | モデル    |
|-------------------------------|---------|--------|
| 全長 $L$ [m]                    | 190.00  | 0.9479 |
| 船幅 $B$ (mld.) [m]             | 32.20   | 0.1610 |
| 正面投影面積 $AT$ [m <sup>2</sup> ] | 924.88  | 0.0230 |
| 側面投影面積 $AL$ [m <sup>2</sup> ] | 5652.96 | 0.1407 |

##### 3.2.1.3 CFD解析

現状の低風圧抵抗船型をベースに、CFD解析による風圧抵抗低減の検討を実施した。CFD解析ツールとしては、OpenFOAMv2106を使用した。OpenFOAMv2106については、三井造船昭島研究所において、商船の上部構造に対する空力の解析の実績ならびに風洞試験での検証の実績があるため、これを用いた。解析手法及び解析条件を以下に示す。また計算格子を図3.2.1に示す。

- ✓ 解析方法 : RANS 定常解析
- ✓ 支配方程式 : 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式
- ✓ 乱流モデル :  $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) モデル
- ✓ 離散化手法 : 有限体積法
- ✓ 格子タイプ : 非構造格子
- ✓ 格子数 :  $1.5 \times 10^6$
- ✓ 流速 : 15[m/s]
- ✓ レイノルズ数 :  $1.0 \times 10^6$

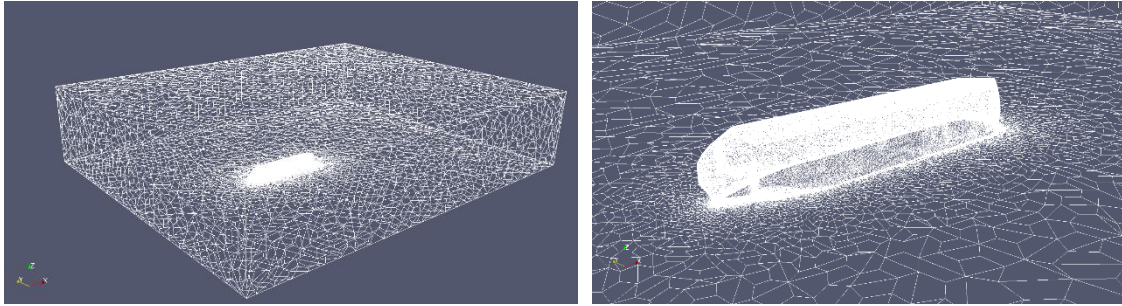


図 3.2.1 計算格子(左：領域全体，右：船体近傍)

#### 1) 使用メッシュとメッシュ仕様

メッシュは、STAR-CCM+を使用して生成を行った。STAR-CCM+はシーメンス社が開発元となる汎用の流体解析ソフトウェアであり、複雑形状でも安定したメッシュ生成が可能であることからこれを利用した。今回は計算負荷と計算安定性に優れたポリヘドラルメッシュと、船体表面近傍においては境界層付近の流れを解析できるようレイヤーメッシュを組み合わせ使用した。

#### 2) 解析仕様

解析は流体を密度一定の空気とし定常解析で実施した。流体解析に用いる計算ツール(ソルバー)についてはポテンシャル計算 (potentialFoam) により初期流場を計算し、その後粘性解析ソルバ (simpleFoam) を用いて計算を行った。収束判定基準は最大ステップ数 4000 を基本とし、風圧力特性 (抵抗係数、横力係数、ヨーモーメント係数) がほぼ一定となるまで計算をおこなった。

#### 3) 物性値

空気の物性値は動粘性係数として、 $1.56659207 \times 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>/s] と設定した。

#### 4) 境界条件

図 3.2.2 に示すように、境界条件を設定した。

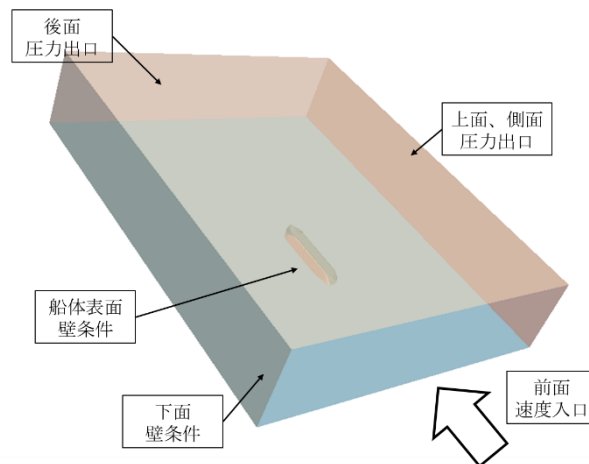


図 3.2.2 境界条件

#### 3.2.1.4 風圧抵抗低減船型の検討

風圧抵抗低減船の検討としては、船体の風圧抵抗低減と帆の推進効率の向上を得るためのデッキ上部における加速流場の発達を考慮して船型改良を実施した。

船首形状の改良、船側上部の隅切り部の改良および船尾形状の改良について CFD 解析を用いて実施した。船型検討を行った船型一覧を表 3.2.2 に示す。全体で 33 船型について検討を行った。船型改良結果として、特に正面風圧抵抗係数に優れ、デッキ上の流速が大きく、また流向が安定している d011、d019 および d023 の 3 船型（表 3.2.2 赤字）に絞って CFD 解析結果を説明する。原船型とした ISHIN 船型を含め、これらの船型を図 3.2.3 に示す。

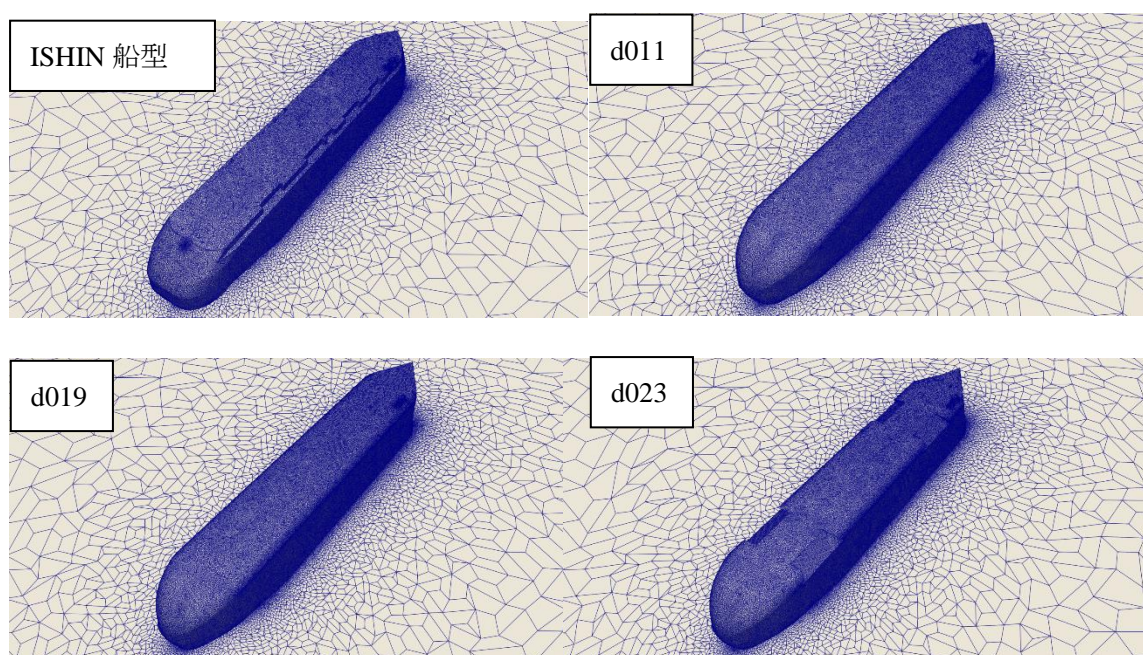


図 3.2.3 原船型（ISHIN 船型）及び改良船型（3 船型）

表 3.2.2 検討船型一覧

| 船型名  | 船型の特徴                        |                 |                | 狙い                                   |                      |                        |         |                      |
|------|------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|---------|----------------------|
|      | 船首形状                         | 隅切り形状           | 船尾形状           |                                      |                      |                        |         |                      |
| 原船型  | 原船型                          | 原船型             | 原船型            | 原船型                                  |                      |                        |         |                      |
| b000 | 船首中央部の平行部の長さ、<br>船首直線部の角度の変更 | 原船型             | 原船型            | 船体抵抗の低減(0deg)                        |                      |                        |         |                      |
| b001 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| b002 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| b003 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| c000 | 原船型                          | 船側隅切り部を削除       | 原船型            | 船体抵抗の低減(0deg~90deg)                  |                      |                        |         |                      |
| c001 | 船首部へのエアインテークの設置              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| c003 | 船首側面部への<br>3次元流れ抑制用の付加物設置    | 原船型             |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| c004 | 船側隅切り部を斜めに面取り                |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| c005 | 原船型                          | 船側隅切り部をR付け      |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| c006 | 原船型                          | 船側隅切り部を突出させる    |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d000 | 流れが滑らかに流れる船首形状               | 原船型             | 原船型            | 船体抵抗の低減(0deg~90deg)、<br>帆設置位置での流速の増幅 |                      |                        |         |                      |
| d001 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d002 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d003 |                              |                 |                | 船首上端で剥離しにくい形状                        |                      |                        |         |                      |
| d004 | 船首上端に溝を設けた形状                 | 流れが滑らかに流れる隅切り形状 | 原船型            | 帆設置位置での流速の増幅                         |                      |                        |         |                      |
| d005 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d006 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d007 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d008 | 流れが滑らかに流れる船首形状               |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d009 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d010 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d011 | d011と同様                      | d011と同様         | 流れが滑らかに流れる船尾形状 | 原船型                                  | 船体抵抗の低減(60deg,90deg) |                        |         |                      |
| d012 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d013 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d014 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d015 |                              |                 |                |                                      |                      | 隅切り形状を<br>乱流を促進する形状に変更 |         |                      |
| d016 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d017 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d018 |                              |                 |                |                                      |                      | 隅切り形状の変更               |         |                      |
| d019 |                              |                 |                |                                      |                      | d011と同様                | 船尾形状の変更 | 船体抵抗の低減(60deg,90deg) |
| d020 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d021 | 船側隅切り部への<br>エアインテークの設置       | 原船型             | 原船型            | 帆設置位置での風向の安定化                        |                      |                        |         |                      |
| d022 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |
| d023 |                              |                 |                |                                      |                      |                        |         |                      |

### 3.2.1.5 CFD解析結果

船体の風圧抵抗を低減する視点から船体表面の圧力分布の状況、帆の推進効率の向上を得るためのデッキ上部における加速流場の発達を考慮して船型改良を実施した。

CFD解析による風圧抵抗低減影響を確認するための情報として船体表面圧力分布を確認しながら船型改良を進めた。図3.2.4に風向0[deg]（向い風）に対する正面の船体表面圧力分布、図3.2.5に風向30[deg]に対する船体表面圧力分布、図3.2.6に風向60[deg]に対する船体表面圧力分布、図3.2.7に風向90[deg]に対する船体表面圧力分布を示す。図3.2.4～図3.2.7のいずれについても、赤く表示されている部分で圧力が増大しており、一方で青く表示されている部分で圧力が減少している。船体を正面から見た場合、赤い領域が小さく青い領域が大きいほど、抵抗が小さい（推力が大きい）船型である。いずれの改良船型も原船型と比較して、船首部の正圧の領域が小さくなり、風向30[deg]～90[deg]においては負圧の領域が大きくなっていることから、抵抗性能が改善されていると考えられる。

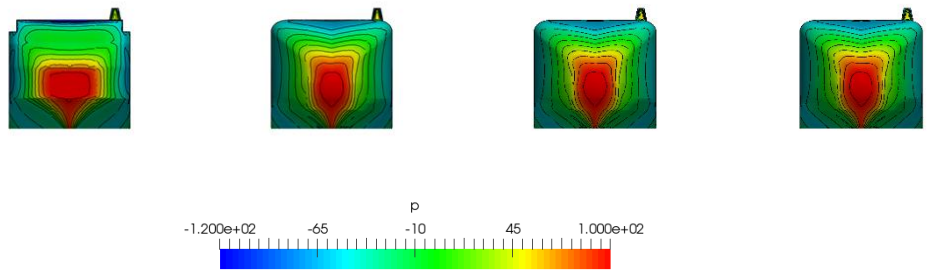


図 3.2.4 正面船体表面圧力分布(風向 0[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)

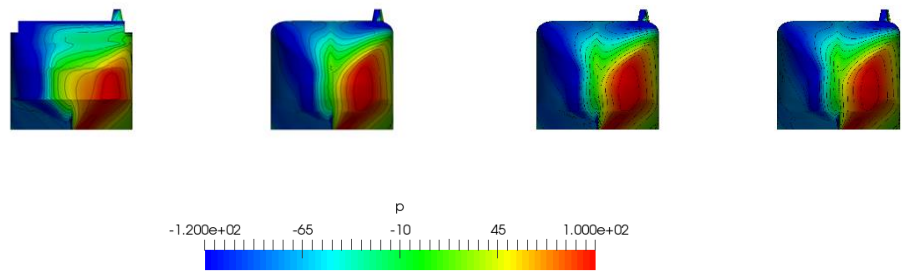


図 3.2.5 正面船体表面圧力分布(風向 30[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)

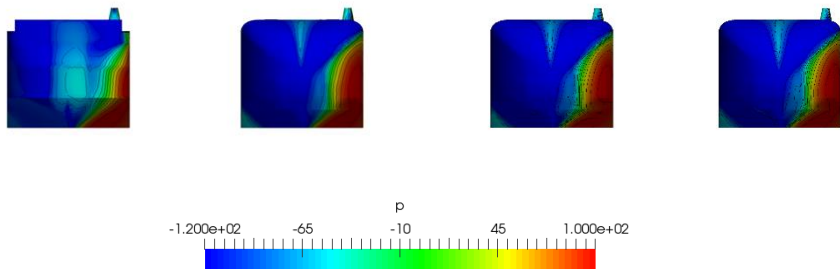


図 3.2.6 正面船体表面圧力分布(風向 60[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)

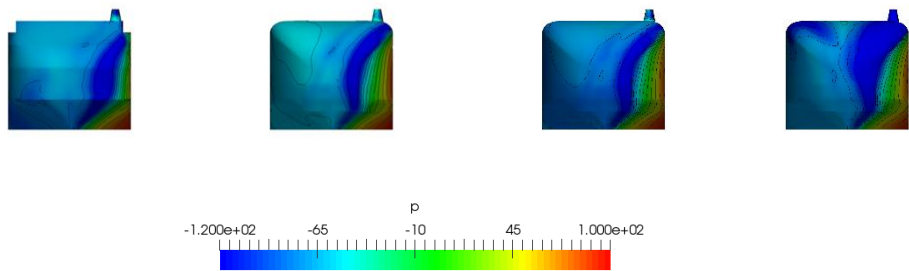


図 3.2.7 正面船体表面圧力分布(風向 90[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)

また、帆の推進効率の向上を得るため船体周りの流場、特にデッキ上部における加速流場の発達を考慮し船型改良を実施した。図 3.2.8 には風向 0[deg]に対するデッキ上面から 5[m] 高さ位置での風速分布、図 3.2.9 には風向 30[deg]に対するデッキ上面から 5[m] 高さ位置での風速分布、図 3.2.10 には風向 60[deg]に対するデッキ上面から 5[m] 高さ位置での風速分布、図 3.2.11 には風向 90[deg]に対するデッキ上面から 5[m] 高さ位置での風速分布を示す。図 3.2.8～図 3.2.11 のいずれについても、赤く表示されている部分で流速が加速され、一方で青く表示されている部分で流速が減少している。デッキ上面を上方から見た場合、赤い領域が大きく青い領域が小さいほど、デッキ上面での流速が加速される船型である。いずれの改良船型も原船型と比較して、風速が小さい領域が減少していることから、デッキ上部における流場が加速され改善していると考えられる。

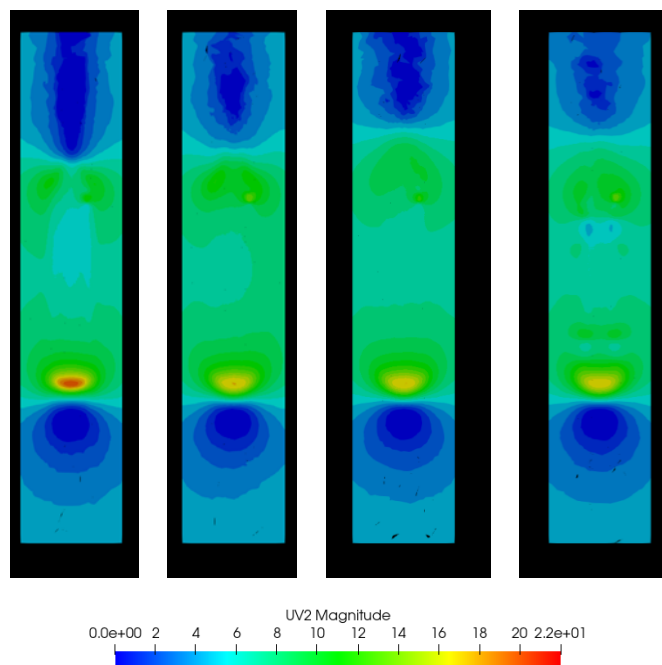


図 3.2.8 デッキ高さ 5[m]位置平面内流速分布  
(図下方が船首 風向 0[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)



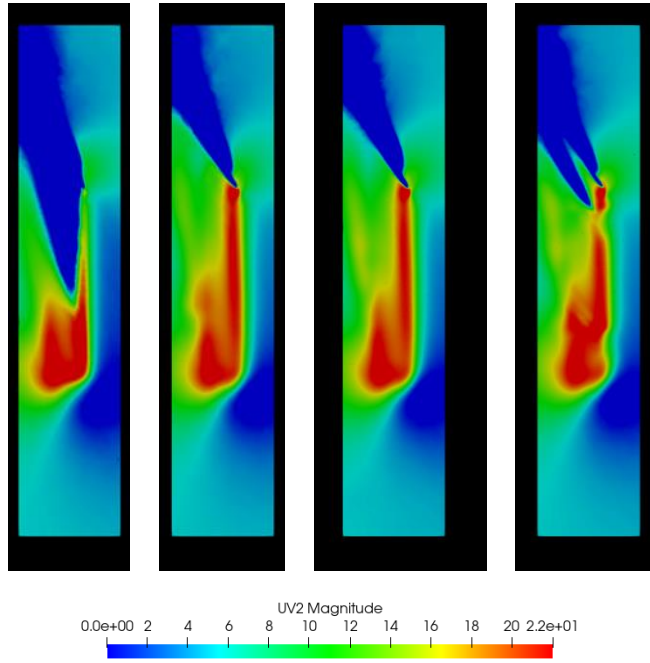


図 3. 2. 9 デッキ高さ 5[m]位置平面内流速分布  
 (図下方が船首 風向 30[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)

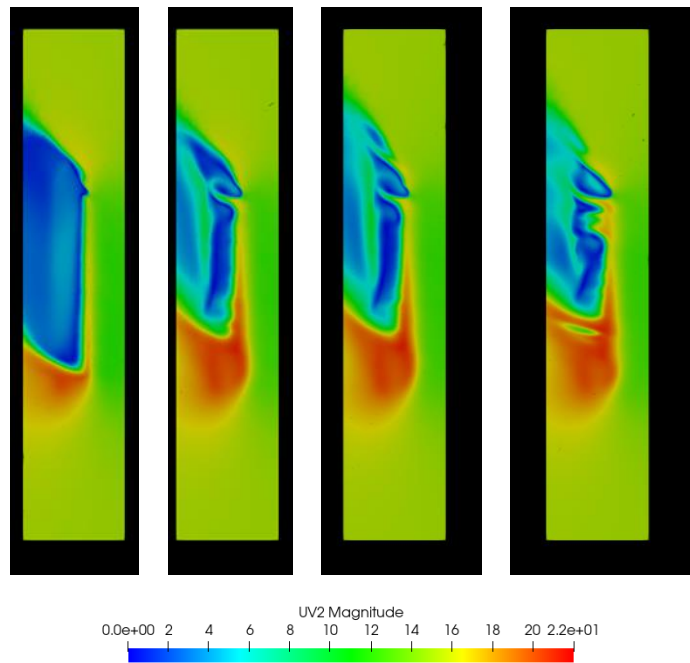


図 3. 2. 10 デッキ高さ 5[m]位置平面内流速分布  
 (図下方が船首 風向 60[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)

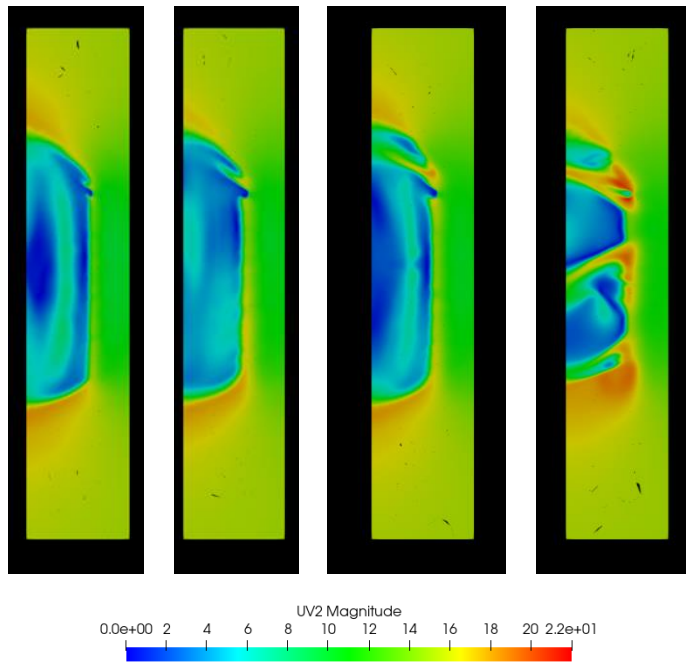


図 3.2.11 デッキ高さ 5[m]位置平面内流速分布  
(図下方が船首 風向 90[deg] 左から原船型、d011、d019、d023)

本節の計算は原船型の ISHIN 船型と比較してきたが、GHG 削減の比較対象は 3.1.11 に示す原型 PCC 船型であるため、抵抗係数については原型 PCC 船型と比較する。原型 PCC 船型を図 3.2.12、原型 PCC 船型との正面抵抗係数  $C_{rx}$  の比較を表 3.2.4 と図 3.2.13 に示す。これらの比較より、改良船型 d019 では、斜め向い風 60[deg]の時に、向い風時風圧抵抗係数の約 2.5 倍の推力が発生することが確認できる。

つまり、帆に流入する流れすなわち甲板上の流れの分布を改善しつつ、船体抵抗も低減できる改良船型を、CFD 解析を用いて設計することができた。

また、表 3.2.4 に示すように、設計検討された低風圧抵抗船型が原型 PCC 船型に対して、北米航路就航の往復平均シミュレーション結果 (3.1.11 参照) で最大 9.8[%]GHG が削減されることが確認できた。従って、6.5[%]以上 GHG 削減可能な低風圧抵抗船型を開発するという目標を達成する事ができた。



図 3.2.12 原型 PCC 船型

表 3.2.4 正面風圧抵抗係数及び GHG 削減率 (CFD 解析)

| Ship Type | $C_{FX}$ 迎角 [deg] |       |        |        | GHG削減 [%] |
|-----------|-------------------|-------|--------|--------|-----------|
|           | 0                 | 30    | 60     | 90     |           |
| 原型PCC船型   | 0.332             | 0.365 | -0.213 | 0.062  | --        |
| d011      | 0.254             | 0.042 | -0.542 | -0.393 | 9.3       |
| d019      | 0.263             | 0.035 | -0.645 | -0.338 | 9.8       |
| d023      | 0.263             | 0.124 | -0.502 | -0.464 | 8.3       |

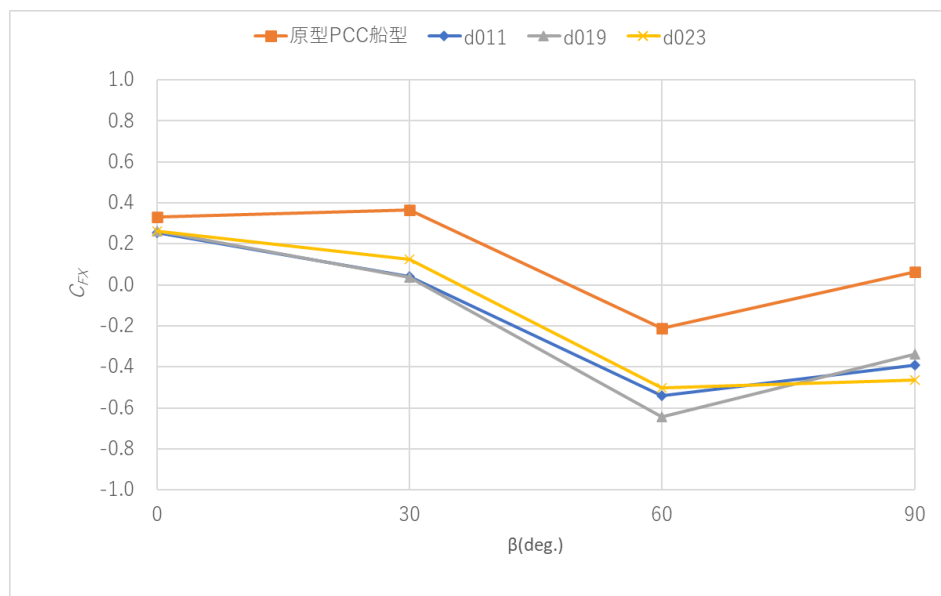


図 3.2.13 正面風圧抵抗係数  $C_{FX}$  の比較 (CFD 解析)

### 3.2.1.6 まとめ

CFD 解析を実施した結果、設計検討された低風圧抵抗船型が原型 PCC 船型に対して、北米航路就航の往復平均シミュレーション結果 (3.1.11 参照) で最大 9.8[%]GHG が削減されることが確認できた。従って、6.5[%]以上 GHG 削減可能な低風圧抵抗船型を開発するという目標を達成する事ができた。

### 3.2.2 コンテナ船小型風防カバーの検討

#### 3.2.2.1 概要

コンテナ船の小型風防カバーについても上記応用として形状を開発し、CFD 解析で性能確認する。2022 年度は正面抵抗係数  $C_{fx}$  を相対風向 0 (向風) ~60[deg] の平均でオリジナル (風防無し) の 15[%] 削減を目標とする。コンテナ船船首部に搭載する風防の小型化を目指し、CFD で風防形状の検討を実施した。

#### 3.2.2.2 対象船

対象船とする船の要目を表 3.2.5 に示す。風防無しおよび標準風防設置時の船型を図 3.2.14~図 3.2.15 に示す。ここで、標準風防は図 3.2.17 に示す「小型風防形状 1」を示す。

表 3.2.5 コンテナ船主要目とモデル寸法

|                               | 実船       | モデル    |
|-------------------------------|----------|--------|
| 全長 $L$ [m]                    | 383.00   | 1.0000 |
| 船幅 $B$ (mld.) [m]             | 58.80    | 0.1540 |
| 正面投影面積 $AT$ [m <sup>2</sup> ] | 3138.00  | 0.0214 |
| 側面投影面積 $AL$ [m <sup>2</sup> ] | 17796.00 | 0.1213 |

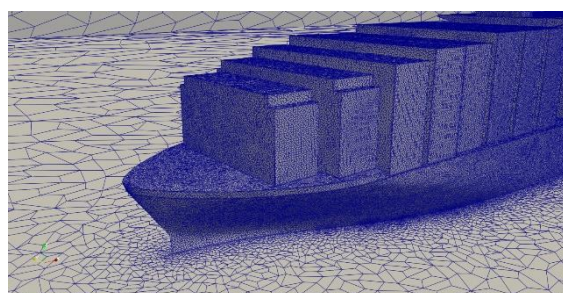


図 3.2.14 現コンテナ船型 (風防無し)

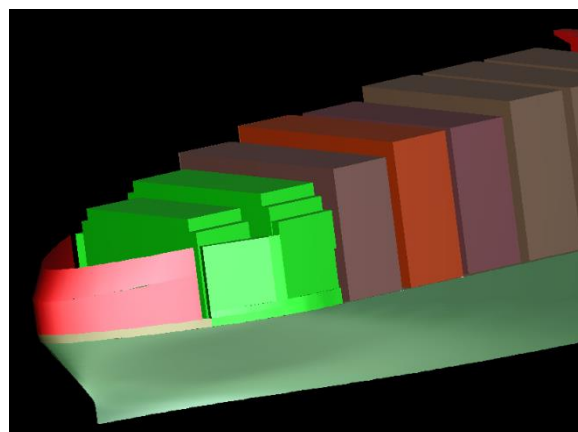


図 3.2.15 標準風防

### 3.2.2.3 CFD 解析

現状の低風圧抵抗船型をベースに、CFD 解析による風圧抵抗低減の検討を実施した。

CFD 解析ツールとしては、低風圧抵抗船型と同様に OpenFOAMv2106 を使用した。解析手法と解析条件を以下に示す。また計算格子を図 3.2.16 に示す。

- ✓ 解析方法 : RANS 定常解析
- ✓ 支配方程式 : 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式
- ✓ 乱流モデル :  $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) モデル
- ✓ 離散化手法 : 有限体積法
- ✓ 格子タイプ : 非構造格子
- ✓ 格子数 :  $3.8 \times 10^6$
- ✓ 流速 : 15 [m/s]
- ✓ レイノルズ数 :  $1.0 \times 10^6$

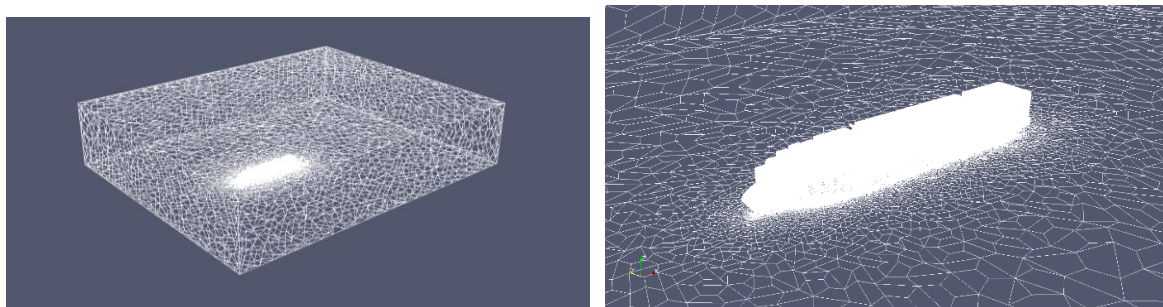


図 3.2.16 計算格子(左：領域全体，右：船体近傍)

#### 1) 使用メッシュとメッシュ仕様

解析メッシュの構成は低風圧抵抗船型と同様の設定とし、STAR-CCM+を使用してメッシュを作成した。

#### 2) 解析仕様

低風圧抵抗船型と同様の仕様とした。

#### 3) 物性値

低風圧抵抗船型と同様の物性値とした。

#### 4) 境界条件

低風圧抵抗船型と同様の条件設定とした。

### 3.2.2.4 風圧抵抗低減風防形状の検討

#### 1) 平均抵抗低減率 15 [%] を目標とした風防形状の検討 (風防形状 1)

まず、目標とした平均抵抗低減率 15 [%] を達成する風防形状を選定した。CFD 計算で 0 [deg] ~ 60 [deg] において、風防無しと比較して、平均抵抗低減率 14.6 [%] となった。

以下、検討した風防形状を図 3.2.17 に示す。

## 2) 平均抵抗低減率 15[%]を目標とした小型風防形状の検討（小型風防形状 1）

1)の風防形状を小型化した。正面風防形状および側面風防形状の小型化で風防無しと比較して、平均抵抗低減率は 12.2[%]となった。

## 3) 小型風防形状の性能向上（小型風防形状 2）

小型風防形状の性能向上を実施した。側面の風防形状を変更することで平均抵抗低減率は 16.1[%]となり、目標とする風防無しとの比較で平均抵抗低減率 15[%]を達成した。

## 4) 小型風防形状 1 と抵抗低減ダミーコンテナとの組み合わせの検討

小型風防形状 1 と抵抗低減ダミーコンテナを組み合わせた。ダミーコンテナは図 3.2.17 に赤丸で示す、コンテナ上部に搭載される付加物のことを指す。ダミーコンテナとの組み合わせにより風防無しと比較して、平均抵抗低減率は 26.8[%]となり、目標とする平均抵抗低減率 15[%]を達成した。

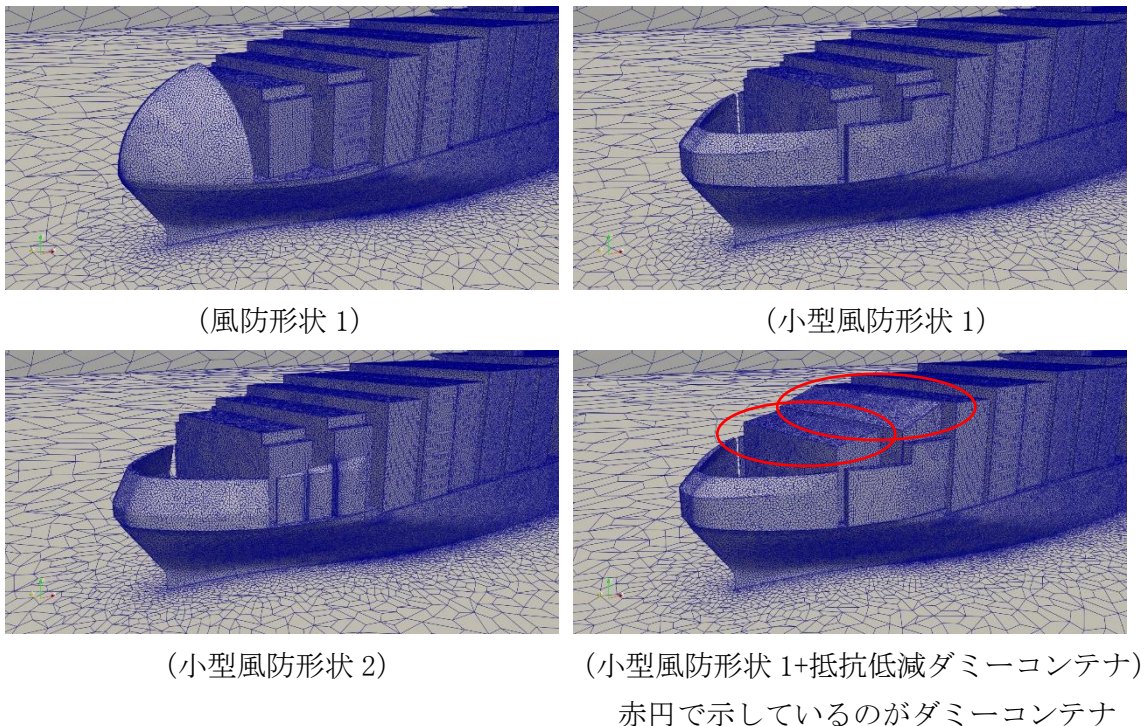


図 3.2.17 風防形状

### 3.2.2.5 CFD 解析結果

各風防形状の抵抗改善率を表 3.2.6 に示す。また風防無しと再検討した小型風防について、図 3.2.18 に風向 0[deg]に対する風速分布および圧力分布、図 3.2.19 に風向 30[deg]に対する風速分布および圧力分布、図 3.2.20 に風向 60[deg]に対する風速分布および圧力分布を示す。圧力分布から、小型風防は風防無しと比較して、風防の曲面により圧力の船体正面方向成分が小さくなり、抵抗が小さくなっていると考えられる。

表 3.2.6 抵抗改善率

| 原船型0degCFXを基準(100)とした抵抗 [%] |       |       |         |         |                         |
|-----------------------------|-------|-------|---------|---------|-------------------------|
| 風向 [deg]                    | 原船型   | 風防形状1 | 小型風防形状1 | 小型風防形状2 | 小型風防形状1<br>+抵抗低減ダミーコンテナ |
| 0                           | 100.0 | 96.6  | 91.0    | 94.7    | 78.1                    |
| 30                          | 224.9 | 205.3 | 212.4   | 206.2   | 192.4                   |
| 60                          | 128.9 | 107.8 | 113.8   | 104.6   | 103.0                   |
| 平均抵抗改善率 [%]                 |       | 14.6  | 12.2    | 16.1    | 26.8                    |

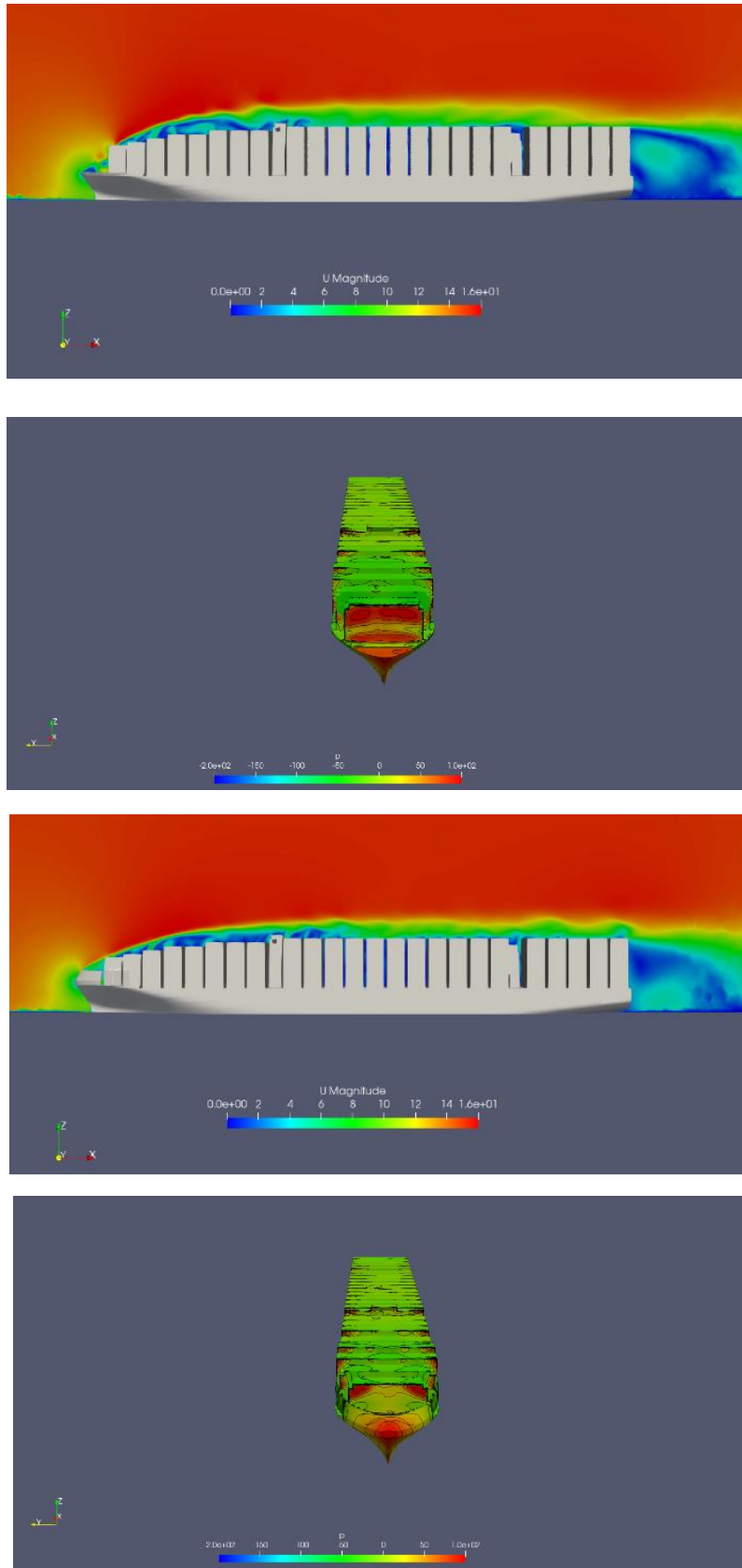


図 3. 2. 18 船体中央面流速分布及び圧力分布  
(風向 0[deg]、上段：風防無し、下段：小型風防形状 2)



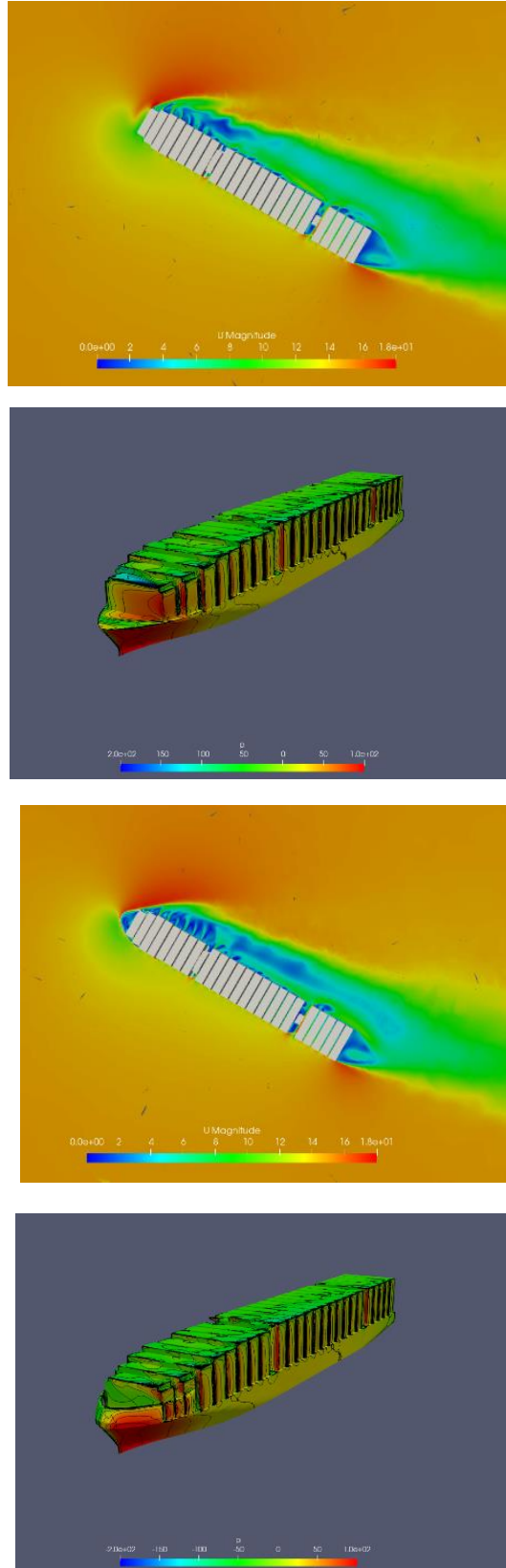


図 3. 2. 19 船体中央面流速分布及び圧力分布  
 (風向 30[deg]、上段：風防無し、下段：小型風防形状 2)

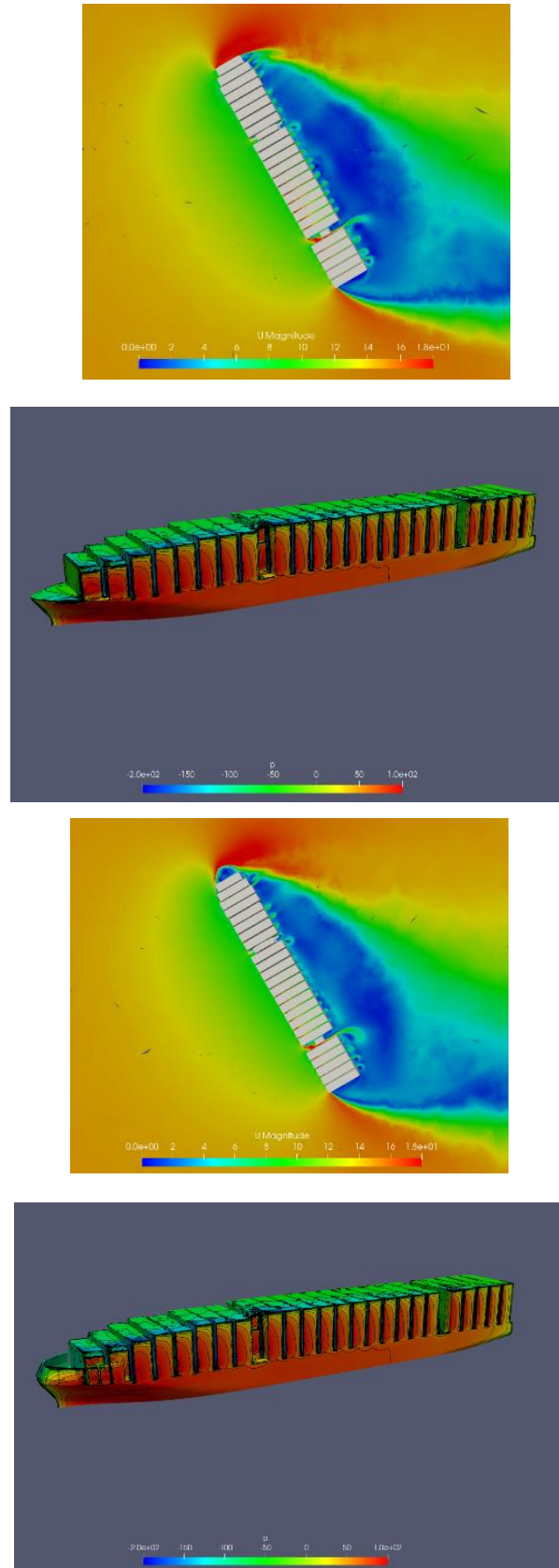


図 3. 2. 20 船体中央面流速分布及び圧力分布  
 (風向 60[deg]、上段：風防無し、下段：小型風防形状 2)

#### 3.2.2.6 まとめ

CFD解析を実施した結果、改良検討されたコンテナ船の小型風防カバー(小型風防形状2)が風防無しと比較して、相対風向0(向風)~60[deg]の平均で抵抗低減率16.1[%]となり、ダミーコンテナを搭載した場合には平均抵抗低減率26.8[%]になることが確認できた。従って、風防無しと比較して平均抵抗低減率15[%]以上を実現可能な機器を開発するという目標を達成する事ができた。

### 3.3 低風圧抵抗船型の船体と単独翼・複合翼システムの設計検討

#### 3.3.1 概要

3.1 で設計した単独翼、および、複合翼を用い、3.2.1 の低風圧抵抗船型デッキ上の風を利用して、効果を最大化する小型翼の開発を行う。3.1 にて開発された、前縁フラップを備えた 2 分割翼、および、前縁、中央と後縁の 3 分割翼で相乗効果が出るシステムを 2 通り設計し、CFD 解析により性能確認する。2022 年度の性能改善目標は、原型 PCC 船型に対し、北米航路航行時平均 12[%]以上の GHG 削減とする。

#### 3.3.2 CFD 解析

3.2.1 で検討した低風圧抵抗船型 d011 をベースに 3.1 で検討した単独翼 NACA0021 を搭載した数値モデルで、CFD 解析による風圧抵抗低減の検討を実施した。解析では、所要時間、計算の安定性を考慮し、分割なしの翼型で評価した。

CFD 解析ツールとしては、OpenFOAMv2106 を使用した。解析手法と解析条件を以下に示す。また計算格子を図 3.3.1 に示す。

- ✓ 解析方法 : RANS 定常解析
- ✓ 支配方程式 : 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式
- ✓ 乱流モデル :  $k$ - $\omega$ SST (Shear Stress Transport) モデル
- ✓ 離散化手法 : 有限体積法
- ✓ 格子タイプ : 非構造格子
- ✓ 格子数 :  $3.8 \times 10^6$
- ✓ 流速 : 15[m/s]
- ✓ レイノルズ数 :  $1.0 \times 10^6$

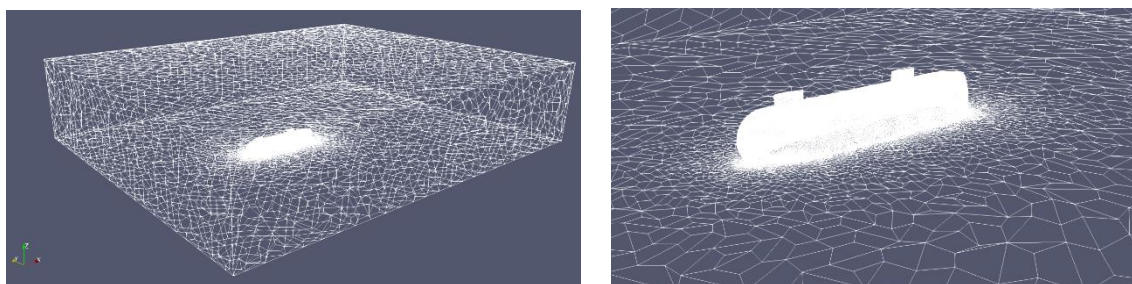


図 3.3.1 計算格子(左：領域全体，右：船体近傍)

#### 1) 使用メッシュとメッシュ仕様

解析メッシュの構成は 3.2.1 と同様の設定とし、STAR-CCM+を使用してメッシュ作成を行った。

#### 2) 解析仕様

3.2.1 と同様に設定した。

#### 3) 物性値

3.2.1 と同様に設定した。

#### 4) 境界条件

3.2.1と同様に設定した。

#### 3.3.3 翼配置パターンの検討

デッキ上に配置する単独翼の配置について、以下の検討を実施した。なおそれぞれの配置パターンを図3.3.2に示す。

##### 1) 翼配置数の検討

デッキ上に配置する翼数を1枚と2枚で、翼同士の相乗効果が出るかを確認した。

##### 2) 翼配置位置の検討

デッキ上に配置する翼の設置位置を船首側に移動させ、翼への流入風速を増大させ、推力が増大するかを確認した。

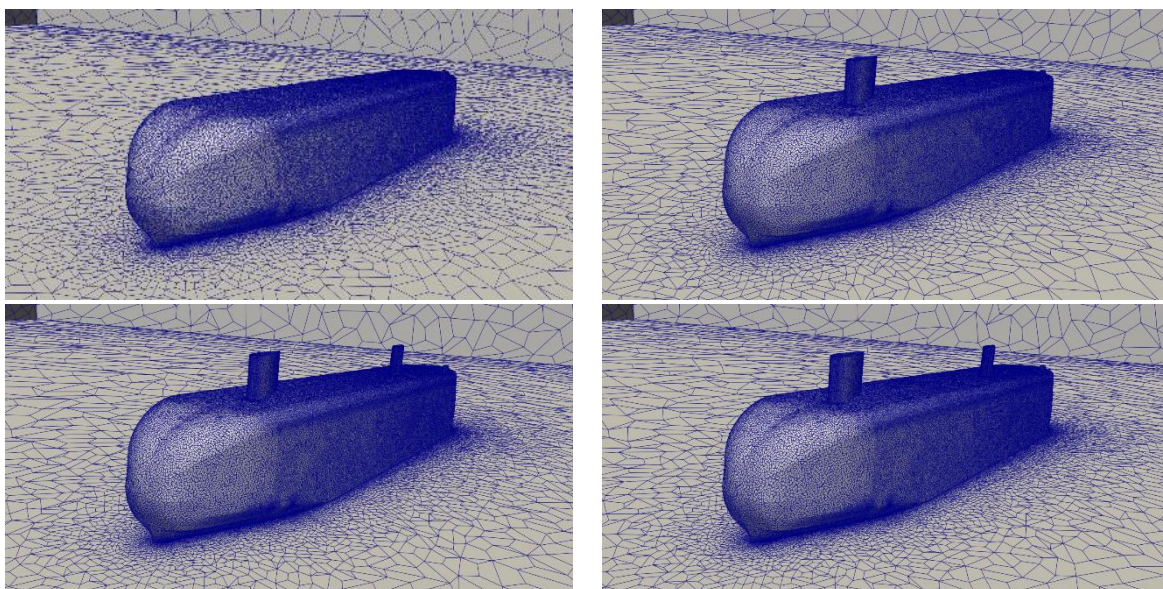


図 3.3.2 翼の配置パターン (左上：d011 単独 右上：d011+NACA0021(1 枚)  
左下：d011+NACA0021(2 枚) 右下：d011+NACA0021(2 枚位置変更))

#### 3.3.4 CFD 解析結果

図 3.3.3 に d011 単独、翼 1 枚配置、翼 2 枚配置、翼 2 枚配置(翼の設置位置を船首側に移動)での流線を示す。翼によって船首側の流れが整流されている様子がわかる。

表 3.3.1 に CFD 結果から算出した原船型に対する燃費改善率 (GHG 削減率) を示す。船体に翼 2 枚を搭載することで、今年度目標である北米航路航行時平均燃費削減率 12.8[%]の達成を確認した。

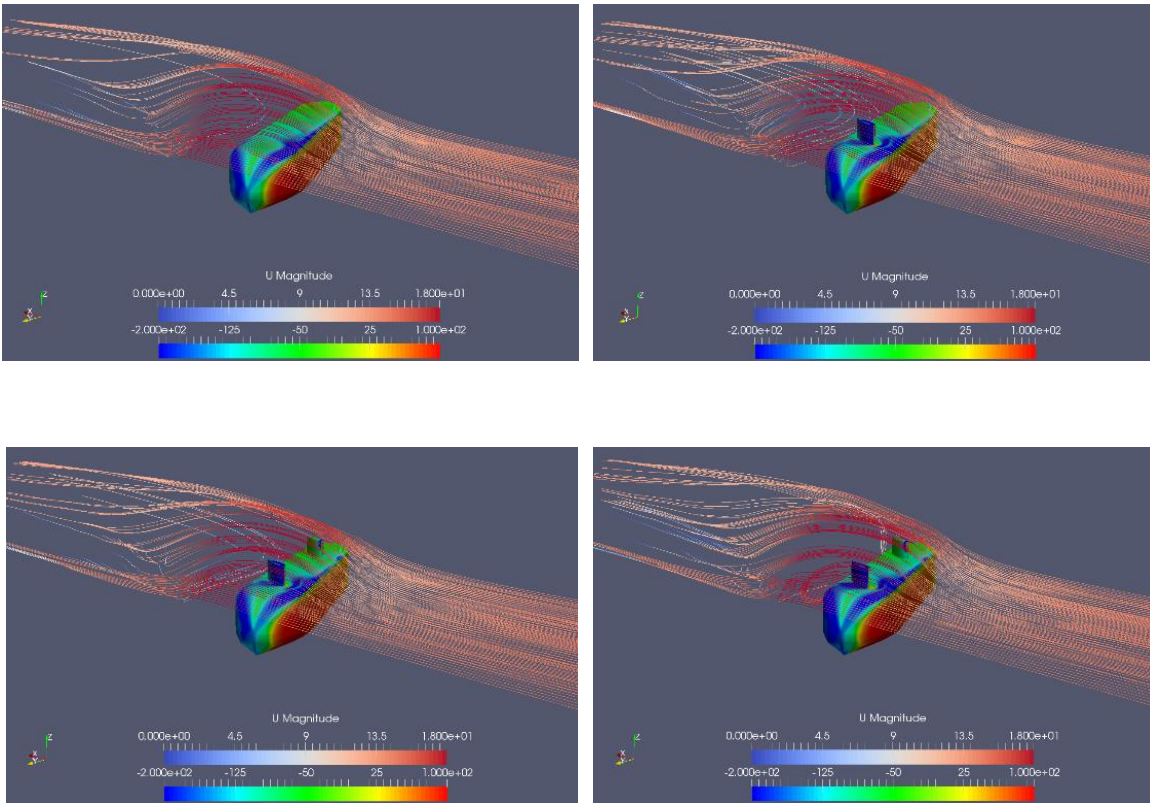


図 3.3.3 船体+翼回り流線(左上：d011 単独 右上：d011+NACA0021 (1 枚)  
左下：d011+NACA0021 (2 枚) 右下：d011+NACA0021 (2 枚位置変更))

表 3.3.1 北米航路航行時平均燃費改善率(CFD 解析)

| 帆配置パターン       | 燃費改善率 [%] |
|---------------|-----------|
| 帆なし           | 9.3       |
| 帆1枚配置         | 11.4      |
| 帆2枚配置         | 12.2      |
| 帆2枚配置(配置位置変更) | 12.8      |

### 3.3.5 まとめ

CFD 解析を実施した結果、船体と翼を合わせた「低風圧抵抗船型と風力活用による翼」を備えた船体に対して帆 2 枚配置 (配置位置改良) にて北米航路航行時平均 12.8[%]となることが確認できた。従って、燃費改善率 12[%]以上を実現可能な機器を開発するという目標を達成する事ができたので、続く 3.4 章で縮尺模型を用いた風洞試験を行い、検証を実施した。

### 3.4 風洞試験の実施によるシステム検証

#### 3.4.1 概要

風洞試験を行い、3.1～3.3 で実施した CFD 計算結果の精度を検証すると共に、数値目標達成の確認を行う。

尚、CFD は圧力分布などの見える化ができ、設計改善には必須のツールであるが、定量的な数値（計測結果）に関しては風洞試験の信頼性が高い。したがって、CFD 計算と風洞試験結果を比較し、必要であれば計算モデルを見直し、CFD 計算の精度を高めて今後の設計に活用することとする。

本試験は、単独翼、複合翼の揚力特性、風圧抵抗低減船型(PCC)の抵抗特性、及び船体と単独翼・複合翼を組み合わせた性能特性を把握、また、CFD 計算精度検証のため実施するものである。

#### 3.4.2 試験の種類

・静的空力測定試験：各船型、各翼の性能特性の確認、及び、船体と翼を組み合わせた性能特性の確認

・可視化試験(スモークワイヤー)：CFD 解析との流場の比較

#### 3.4.3 供試模型

単独翼・複合翼の供試模型は 3.1 で設計された NACA0021 ベースの翼型とし、計測精度及び風洞設備との取り合いを考慮して、実施する試験毎にスケールを変更した模型を使用した。各試験に用いた単独翼・複合翼の要目を示す。翼と船体の供試模型の主要目を表 3.4.1 および表 3.4.2 に示す。図 3.4.1 に単独翼と船体の供試模型を示す。

表 3.4.1 単独翼・複合翼 供試模型要目

|                 | 実機換算   | 帆単独試験用<br>モデル | 船体+帆試験用<br>モデル |
|-----------------|--------|---------------|----------------|
| 帆の投影面積 $S[m^2]$ | 200.00 | 0.08          | 0.005          |
| 翼弦長 $C[m]$      | 20.00  | 0.4000        | 0.1000         |
| 翼高さ $H[m]$      | 10.00  | 0.2000        | 0.0500         |

表 3.4.2 実船主要目とモデル寸法

|                               | 実船      | モデル    |
|-------------------------------|---------|--------|
| 垂線長 $L_{pp}$ [m]              | 190.00  | 0.9479 |
| 全長 $Loa$ [m]                  | 202.45  | 1.0100 |
| 船幅 $B$ (mld.) [m]             | 32.20   | 0.1610 |
| 喫水 $d$ [m]                    | 9.1     | 0.0454 |
| 乾舷 $f$ [m]                    | 25.50   | 0.1272 |
| 正面投影面積 $AT$ [m <sup>2</sup> ] | 924.88  | 0.0230 |
| 側面投影面積 $AL$ [m <sup>2</sup> ] | 5652.96 | 0.1407 |

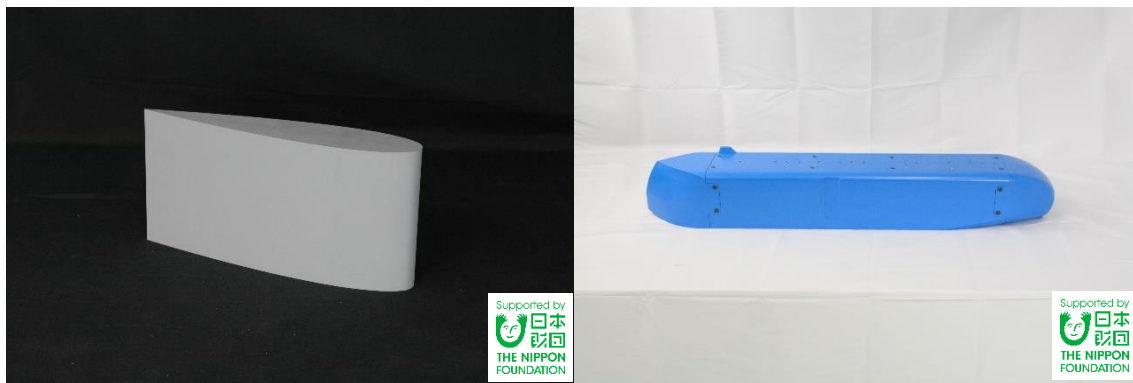


図 3.4.1 供試模型（左：単独翼模型(NACA0021)，右：船体模型(d011)）

#### 3.4.4 試験施設

試験は三井造船昭島研究所構造物用低速風洞において、開放型として実施した。

- 型式 : 水平回流型 (ゲッチングン型)
- 測定部寸法 : 幅 2[m] × 高さ 3[m] × 長さ 20[m]
- 最大風速 : 20 [m/s]

風洞の主要目を表 3.4.3 に示す。また、風洞装置の概観を図 3.4.2 に示す。



表 3. 4. 3 風洞装置主要目

| 項 目   | 主 要 目  |
|-------|--|
| 名 称   | 三井造船昭島研究所 構造物用低速風洞   |
| 型 式   | 水平回流開放型および閉鎖型  |
| 測定部寸法 | 3[m]高×2[m]幅×20[m]長 (上流側 5[m]が可動カート式)                                   |
| 風速範囲  | 0.3[m/s]～20[m/s] (開放型では、0.5[m/s]～30[m/s])                              |
| 乱れ強さ  | 0.1[%]以下 (閉鎖型)   |
| 風速分布  | ±0.2[%]以下 ( " )  |
| 静圧勾配  | 1.9[%]以下 ( " )   |
| 付属設備  | 放風扉・吸込扉・昇降作業台・補助ダクト・ベルマウス 他  |
| 付属装置  | ばね支持試験装置・静的空力測定装置・ターンテーブル装置<br>非定常空力測定装置・トラバース装置・電磁加振減衰装置<br>データ処理装置 他 |

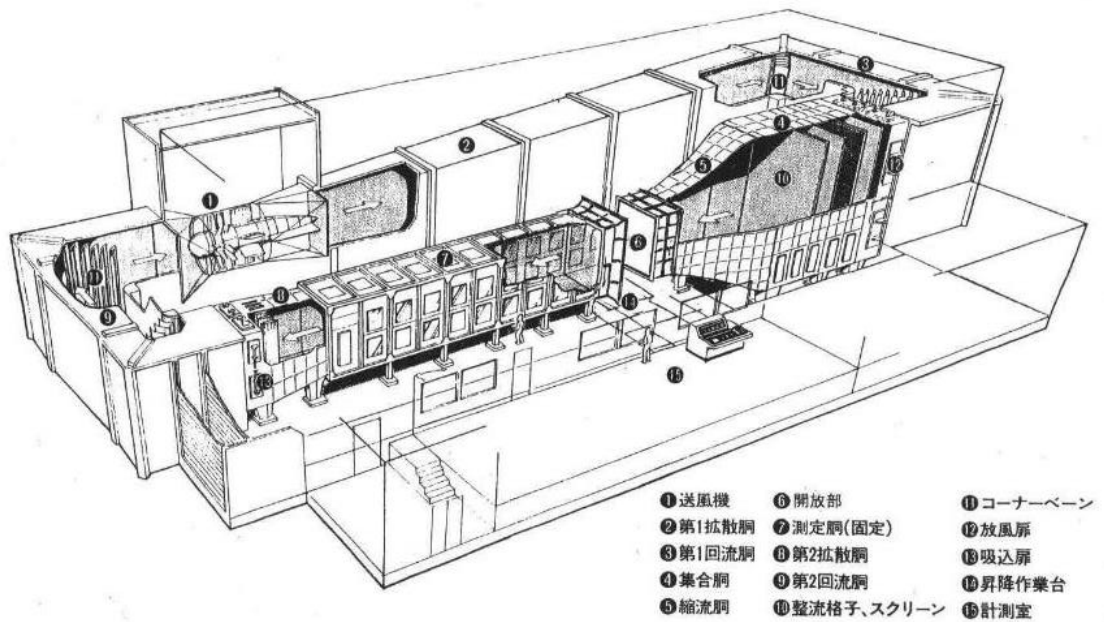


図 3. 4. 2 開放型風洞装置概観図

### 3. 4. 5 試験状態

#### 1) 単独翼の静的空力測定試験

単独翼に対する静的空力測定試験を、分割なし (3. 1. 3)、2 分割 (3. 1. 4)、2 分割キャンバー (3. 1. 10)、3 分割 (3. 1. 6)、3 分割+Winglet 1 (3. 1. 7)、3 分割+Winglet 2 (3. 1. 7) の合計 6 状態に対し実施した。ここで、模型試験では風速 18[m/s]で計測を実施した。風向は模型の正面が風上を向いた状態を風向 0[deg]として、入射角 0[deg]から 60[deg]の範囲を 5[deg]ピッチで試験を実施した。また分割無しの単独翼については風速を 1.8[m/s]、

3.6[m/s]、 7.1[m/s]、 14.0[m/s]と変化させた場合の計測も実施し、レイノルズ数の変化による単独翼の特性への影響を調査した。

## 2) 船体の静的空力測定試験

船首、船尾、隅切り形状の組合せ下記 H01、H03、H05 のそれぞれの状態において、試験風速 18[m/s]で計測を実施した。風向は模型の正面が風上を向いた状態を風向 0[deg]として、入射角 0[deg]から 360[deg]の範囲を 10[deg]ピッチで試験を実施した。

H01 : d019

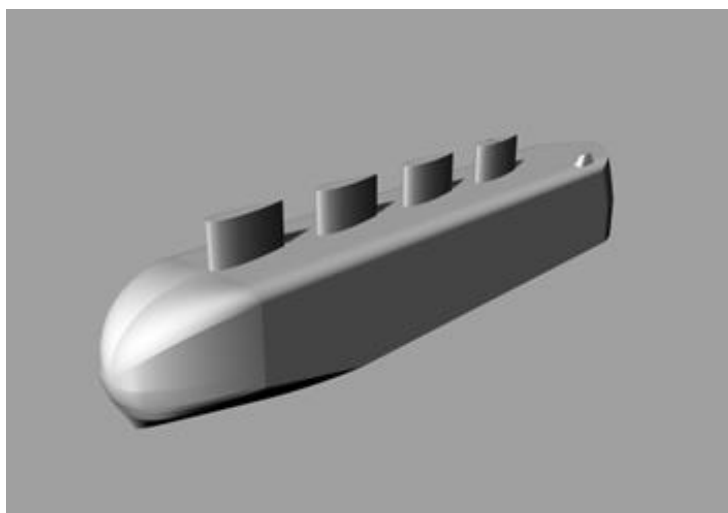
H03: d011

H05 : d023

(注) 船体形状については、「表 3.2.2 検討船型一覧」ご参照

## 3) 船体+単独翼・複合翼の静的空力測定試験

船体単独静的空力測定試験において選定した船体と、単独翼・複合翼単独静的空力測定試験において選定した単独翼・複合翼を組み合わせて、試験風速 18[m/s]で計測を実施した。風向は模型の正面が風上を向いた状態を風向 0[deg]として、入射角 0[deg]から 90[deg]の範囲を 30[deg]ピッチで試験を実施した。また船体に取り付けた単独翼・複合翼の迎角について、各単独翼・複合翼の設置位置の初回計測時は、各風向に対し、基本的に 0~30[deg]の範囲を 15[deg]ピッチで変更した。2回目以降の計測時は、各風向に対し、最も推力が出る迎角で試験を実施した。単独翼・複合翼は船体の上部に直列に配置する。船体に直列に取り付ける単独翼・複合翼の配置位置を図 3.4.3 に示す。船首側から船尾側に向けて配置 1、配置 2、配置 3、配置 4 とする。



各帆間の距離は実機サイズで30m

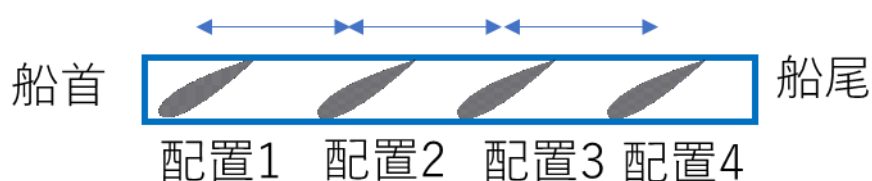


図 3.4.3 単独翼・複合翼直列配置パターン

#### 4) 可視化試験(スモークワイヤー)

船体供試模型及び単独翼・複合翼供試模型を用いて、スモークワイヤーによる可視化試験を実施した。なお、試験は模型船単独、模型船+単独翼・複合翼(1本(配置1)、2本(配置1、配置4)、3本(配置1、配置2、配置4)、4本)の5状態において、風速1.5[m/s]、2[m/s]の2風速で実施した。風速は、目視可能な風速として静的空力測定試験時より小さな風速とした。

#### 3.4.6 計測・解析方法

単独翼・複合翼の静的空力測定試験は、図3.4.2の開放型風洞において、供試模型に作用する風荷重を、静的空力測定装置(6分力計)により、図3.4.4に示す船体固定座標系における6分力(抵抗: $F_x$ 、横力: $F_y$ 、上下力: $F_z$ 、ロールモーメント: $M_x$ 、ピッチモーメント: $M_y$ 、ヨーモーメント: $M_z$ )について、模型のコード長の中心を原点として計測し、計測したデータを平均化してデータ解析を行った。抵抗と横力を除く各成分については、計測時の船体固定座標系を使用した解析値をそのまま使用して、次に示す無次元化によりまとめた。抵抗と横力については、船体固定座標系を使用した解析値から、空間固定座標系を使用する揚力( $L$ )及び抗力( $D$ )を算出して、次に示す無次元化によりまとめた。

|            |   |   |
|------------|---|---|
| 揚力係数       | : | $C_L = L / (1/2\rho V^2 \cdot S)$             |
| 抗力係数       | : | $C_D = D / (1/2\rho V^2 \cdot S)$             |
| 上下力係数      | : | $C_{Fz} = Fz / (1/2\rho V^2 \cdot S)$         |
| ロールモーメント係数 | : | $C_{Mx} = Mx / (1/2\rho V^2 \cdot S \cdot C)$ |
| ピッチモーメント係数 | : | $C_{My} = My / (1/2\rho V^2 \cdot S \cdot C)$ |
| ヨーモーメント係数  | : | $C_{Mz} = Mz / (1/2\rho V^2 \cdot S \cdot C)$ |

ここで、

|          |   |  |
|----------|---|--|
| $q$      | : | 動圧 ( $\rho V^2 / 2$ )                              |
| $\rho$   | : | 空気密度   |
| $V$      | : | 風洞風速   |
| $S$      | : | 単独翼・複合翼の投影面積                                       |
| $C$      | : | 翼弦長  |
| $H$      | : | 翼高さ  |
| $\alpha$ | : | 風向 (入射角[deg])                                      |
| $L$      | : | 揚力 ( $Fy \cdot \cos\alpha - Fx \cdot \sin\alpha$ ) |
| $H$      | : | 抗力 ( $Fy \cdot \sin\alpha + Fx \cdot \cos\alpha$ ) |

#### 1) 船体単独静的空力測定試験、船体+単独翼・複合翼の静的空力測定試験

試験は、模型の水線面の中央(midship)を原点とし、船体固定座標系における3分力として模型に作用する空力を解析する。一様流中における模型に作用する純粋な六分力は平均化を行い、次に示す無次元係数により求める。

- ・ 抵抗係数 :  $C_{FX} = F_X / q \cdot AF$
- ・ 横力係数 :  $C_{FY} = F_Y / q \cdot AS$
- ・ ヨーモーメント係数 :  $C_{Mz} = M_z / q \cdot AS \cdot L_{pp}$

ここで、

|          |   |                       |
|----------|---|-----------------------|
| $q$      | : | 動圧 ( $\rho V^2 / 2$ ) |
| $\rho$   | : | 空気密度                  |
| $V$      | : | 風洞風速                  |
| $AF$     | : | 正面代表面積                |
| $AS$     | : | 側面代表面積                |
| $L_{pp}$ | : | 代表長さ (垂線間長)           |

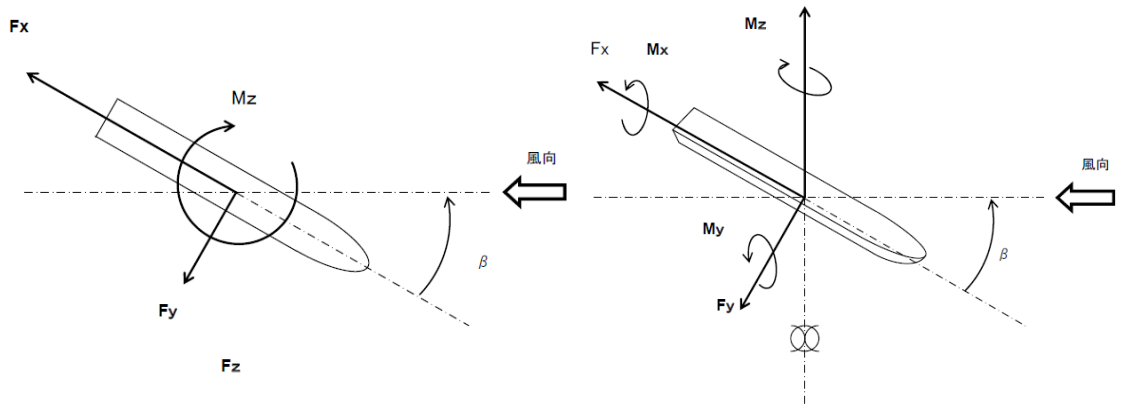


図 3.4.4 計測座標系

## 2) 可視化試験

試験では、風上側開放部にスモークワイヤーを設置して、供試模型周辺の流場について観察を行った。試験中は横方向と上方向からビデオカメラにより動画として撮影し、状況を記録した。

### 3.4.7 試験結果

図 3.4.5 に単独翼および船体+単独翼・複合翼の静的空力測定試験の状況を示す。

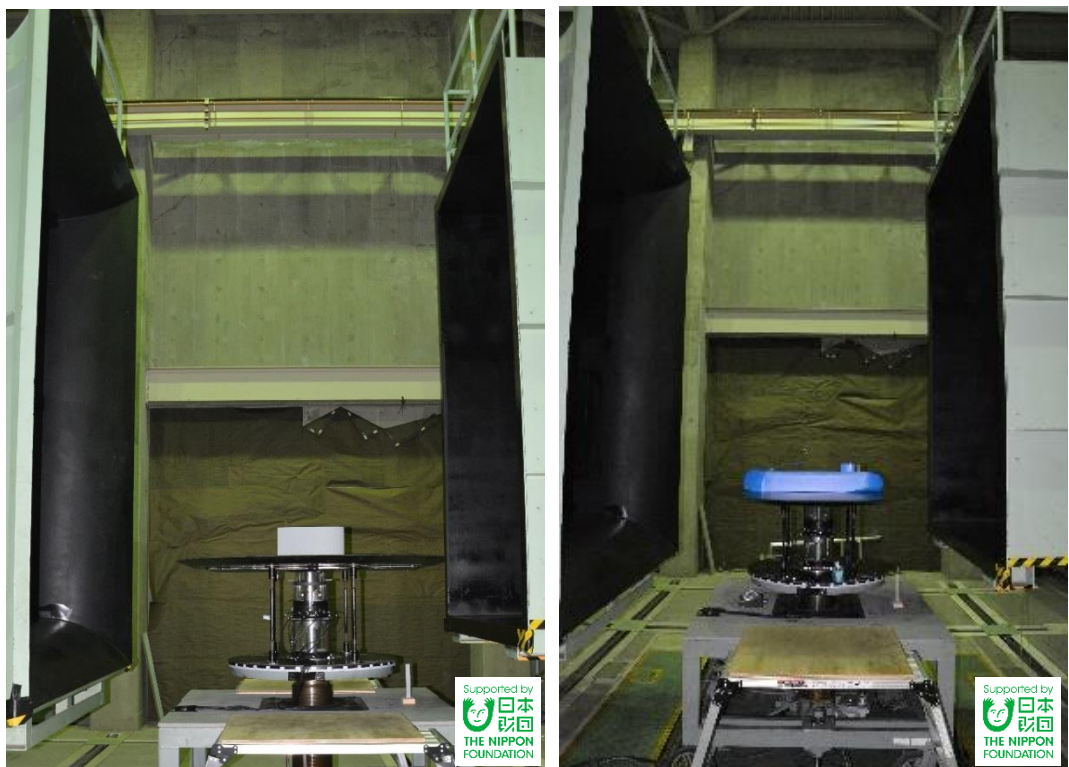


図 3.4.5 試験状況(左：単独翼・複合翼単独，右：船体単独)

図 3.4.6 に単独翼の空力測定試験結果(レイノルズ数影響確認)を示す。試験結果から、NACA0021 翼型の揚力係数  $C_L$  および抗力係数  $C_D$  に関して、低速であるほど抗力係数が大きく、失速角が小さくなることが確認でき、これはレイノルズ数影響によるものであると考えられる。ただし、風速 14[m/s] 以上ではレイノルズ数影響がないことが分かる。そこで空力計測は風速 18[m/s] で実施した。

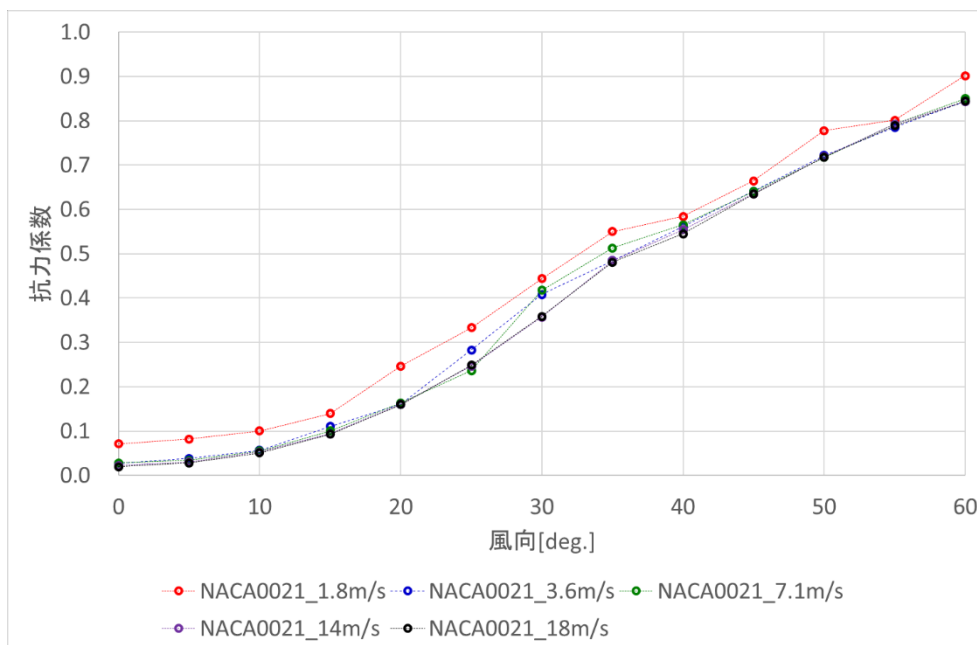
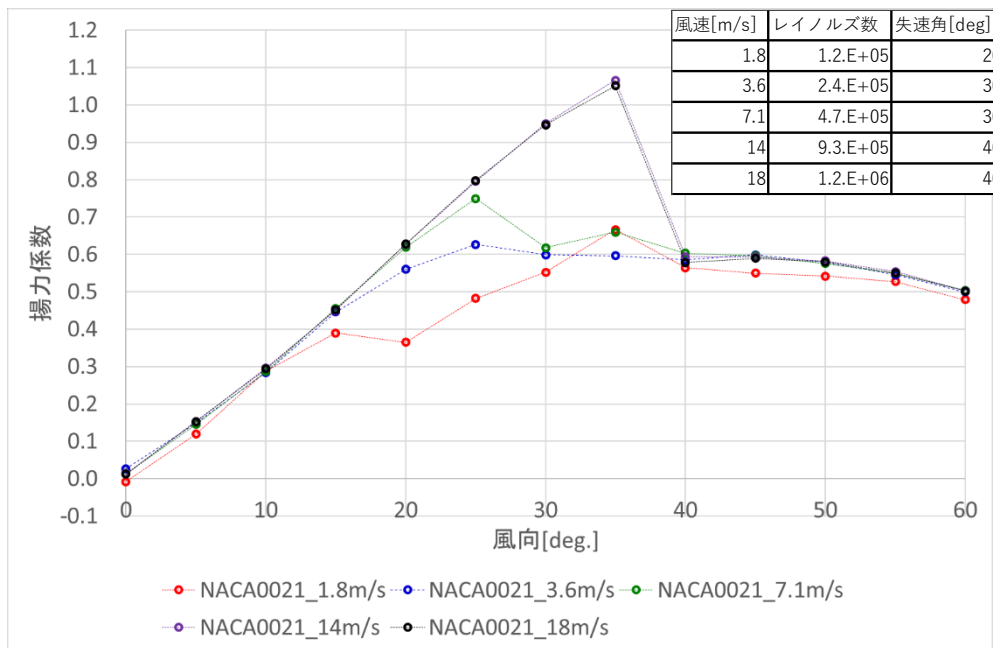


図 3.4.6 単独翼の空力測定試験結果(レイノルズ数影響確認)  
(上: 揚力係数  $C_L$ 、下: 抗力係数  $C_D$ )

図 3.4.7 に単独翼の分割なし、2 分割、2 分割キャンバー、3 分割、3 分割+Winglet 1、3 分割+Winglet 2 それぞれに関する揚力係数  $C_L$  と抗力係数  $C_D$  の比較を示す。計測結果から、2 分割キャンバーの優位性が確認できる。

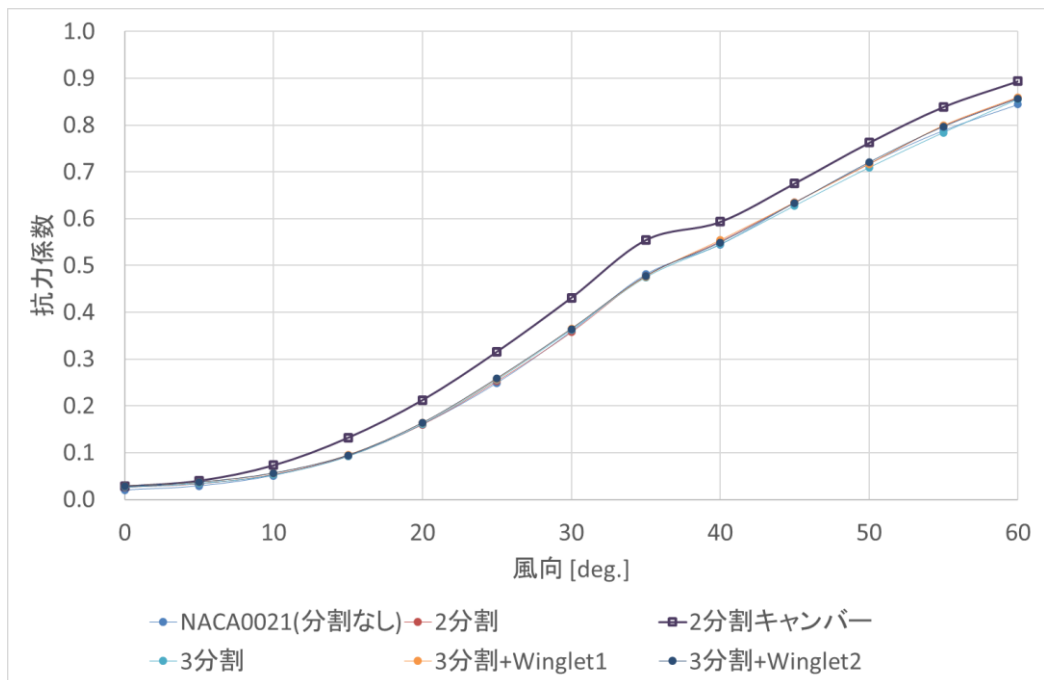
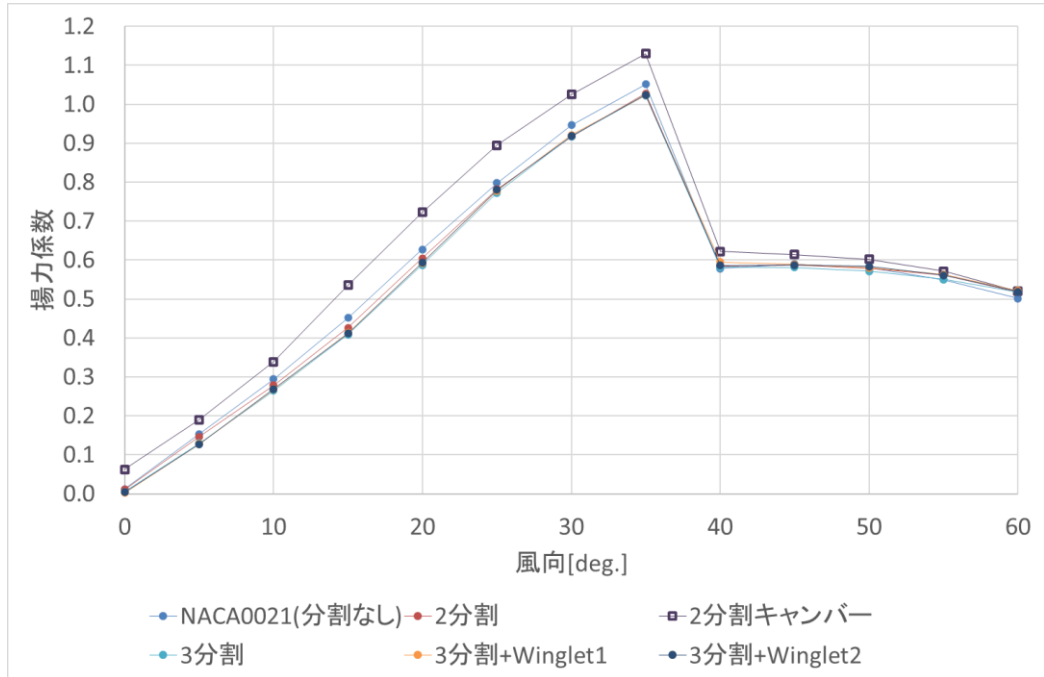


図 3.4.7 単独翼の空力測定試験結果  
(上：揚力係数  $C_L$ 、下：抗力係数  $C_D$ )

図 3.4.8 に船体単独 (H01 : d019、H03 : d011、H05 : d023) の空力測定試験結果を示す。計測結果から、遭遇頻度の高い風向  $0 \sim 30$  [deg] において  $C_{Fx}$  が最も小さい H03 が最も優位な船型であることが確認できる。

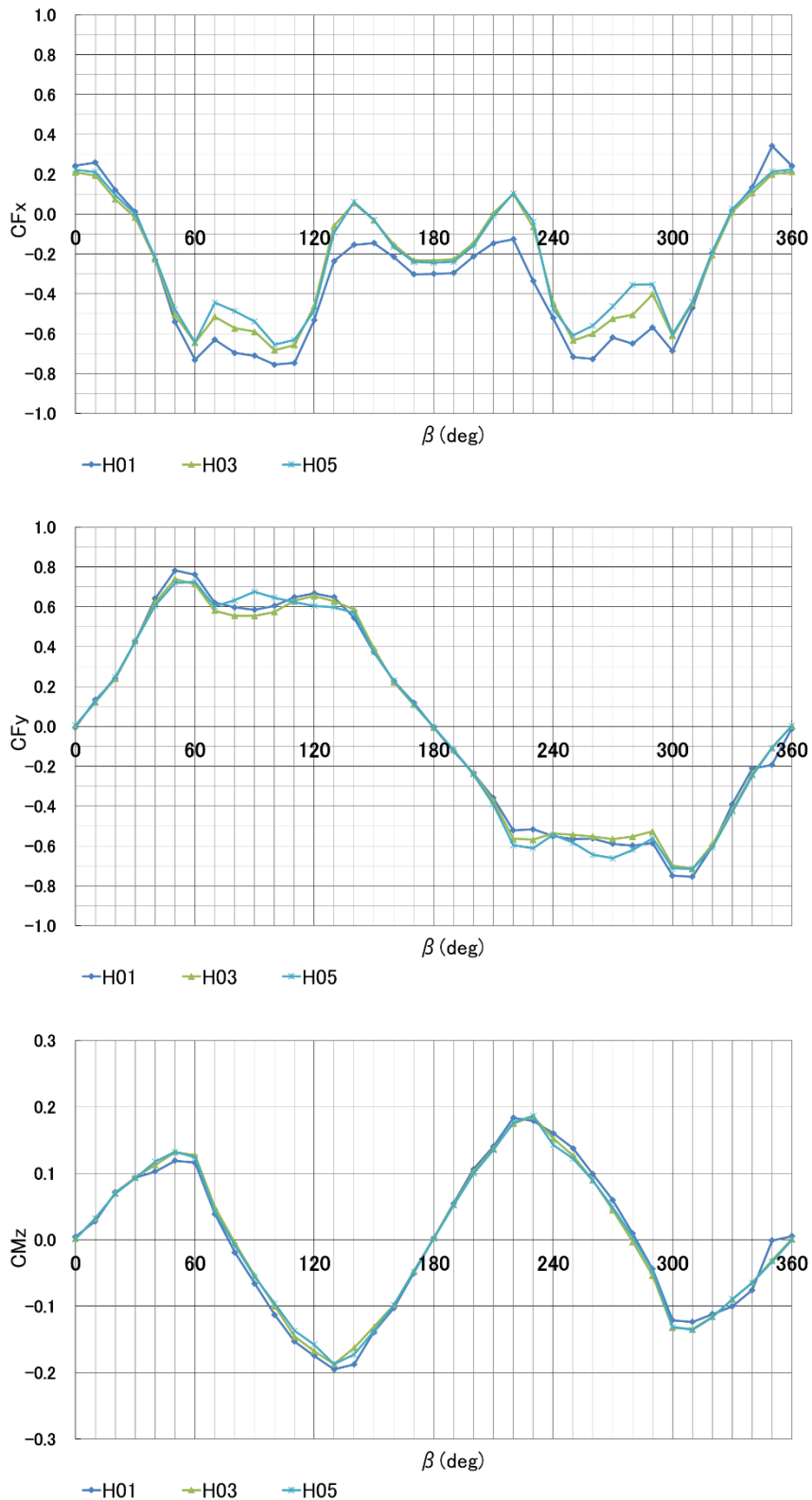




図 3.4.8 船体単独の空力測定試験結果 (0 ~ 360[deg] : 各船型の比較)

図 3.4.9 に船体+単独翼 (配置 1) の空力  $C_{Fx}$  の測定試験結果を示す。各風向条件において翼による推力が発生していることが確認でき、翼迎角が 15[deg]付近で最大推力が発生していることが分かる。

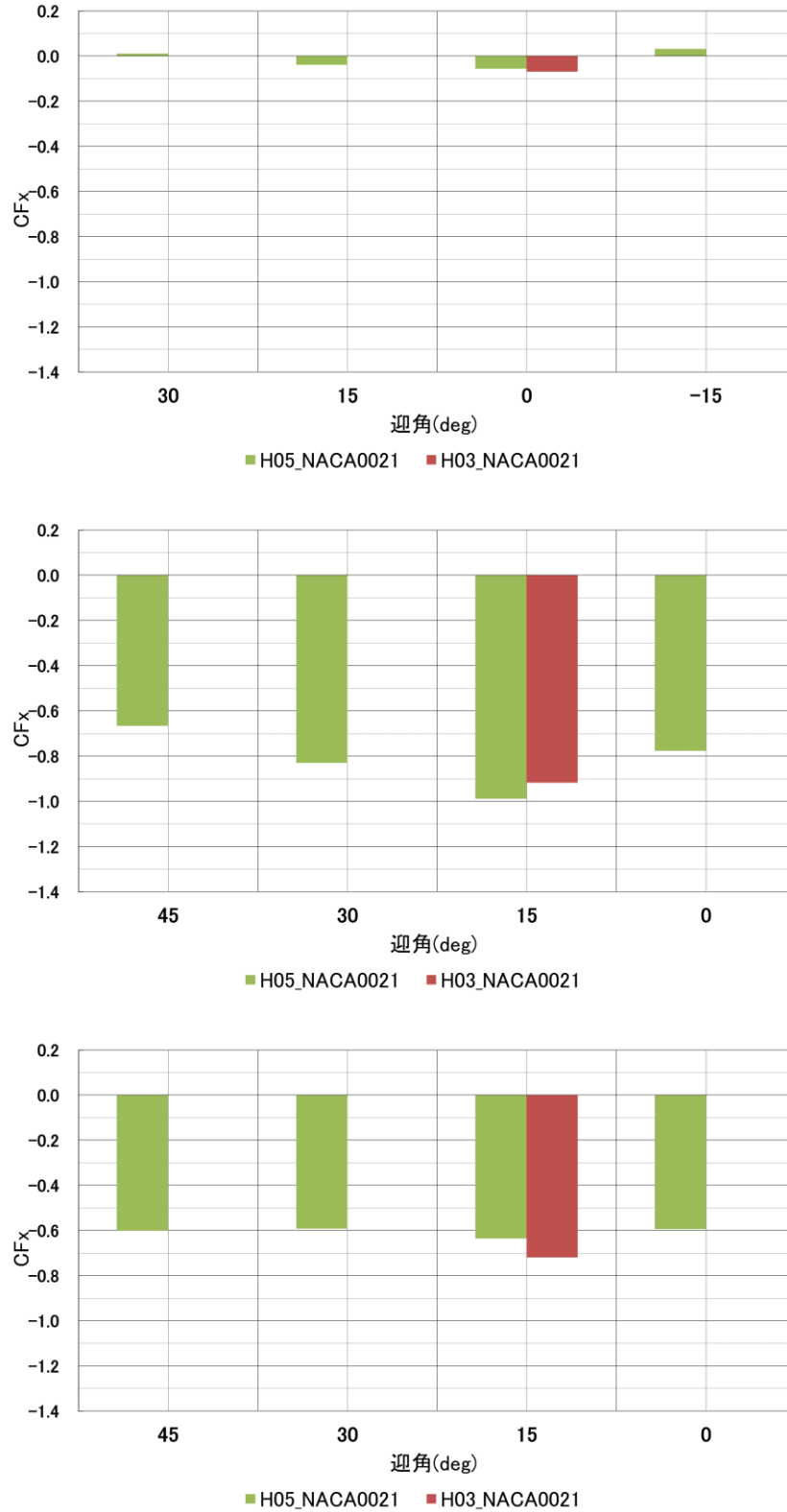


図 3.4.9 船体+単独翼の空力  $C_{Fx}$  測定試験結果

(上：風向 30[deg]、中：風向 60[deg]、下：風向 90[deg])

図 3.4.10 に船体+複合翼(2 翼配置)の空力  $C_{Fx}$  の測定試験結果を示す。2 翼配置により単独翼よりも推力が増加していることが確認できる。また、単独翼と比較して、推力が減少する結果がないことから、翼間干渉による悪影響はないことが確認できる。

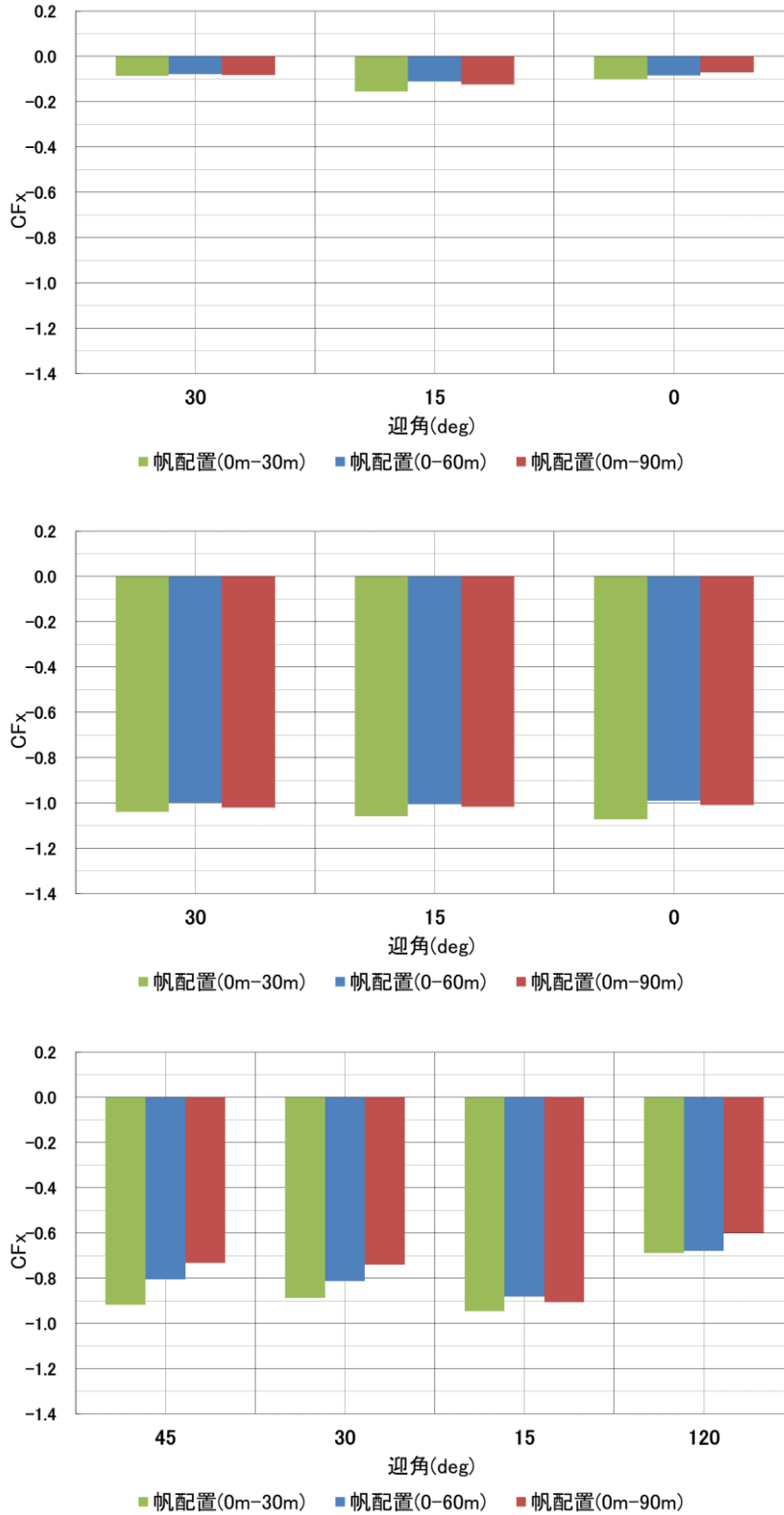


図 3.4.10 船体+複合翼(2 枚配置)の空力  $C_{Fx}$  測定試験結果

(上：風向 30[deg]、中：風向 60[deg]、下：風向 90[deg])

図 3.4.11 に船体+複合翼(2 翼配置)の各風向に対する最大推力迎角における空力測定試験結果を示す。翼配置が変更されても各風向に対して安定した推力が得られていることが分かる。また、横力  $C_{Fy}$  と回頭モーメント  $C_{Mz}$  に関しても差が無いことを確認した。

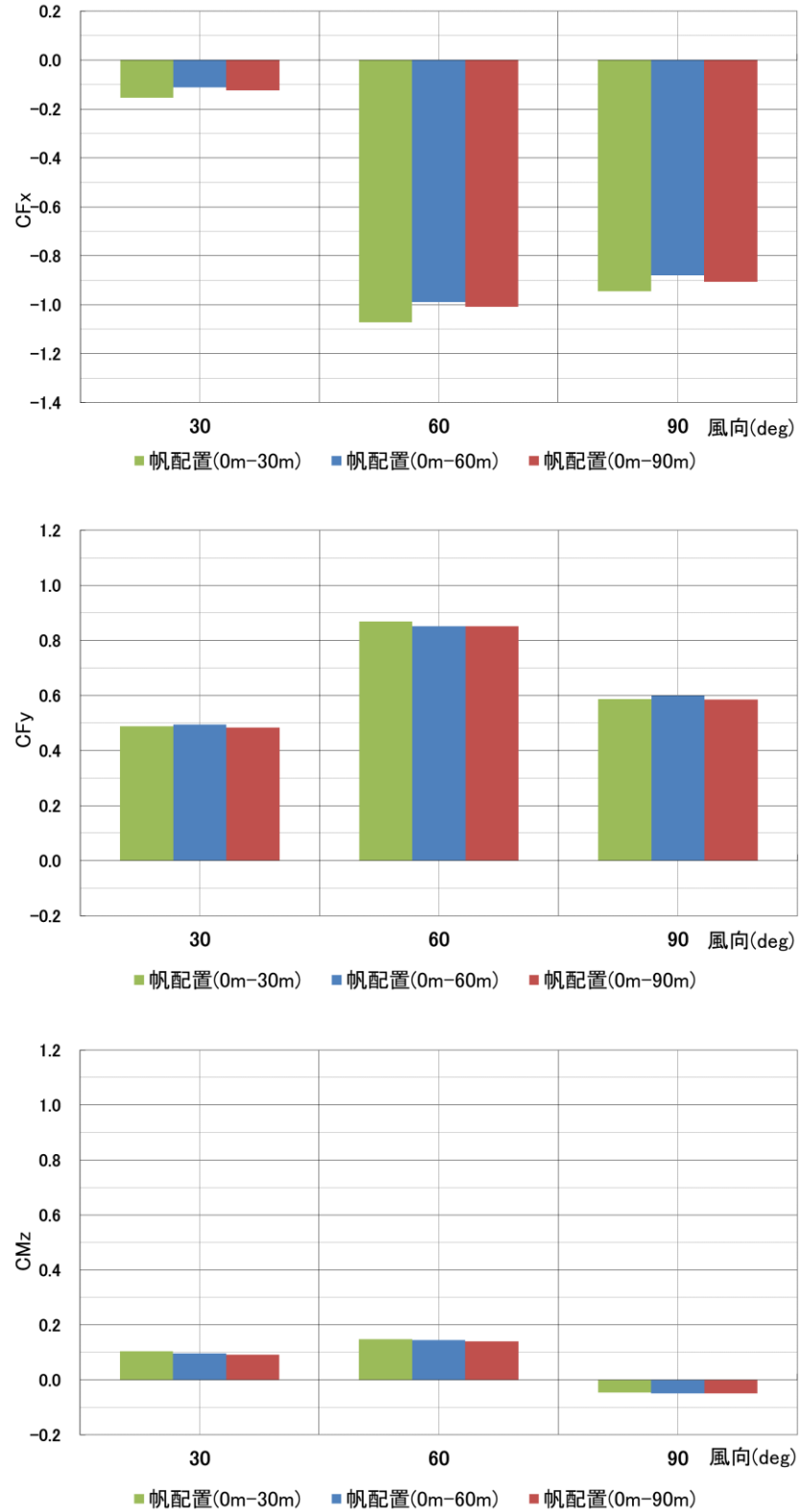


図 3.4.11 船体+複合翼(2 枚配置)の空力測定試験結果

(各風向の最大推力配置位置での比較)

図 3.4.12 に船体+複合翼(3,4 翼配置)の各風向に対する最大推力迎角における空力測定試験結果を示す。搭載する翼数に比例して推力が得られることが確認できる。また、翼数が増加しても横力  $C_{Fy}$  と回頭モーメント  $C_{Mz}$  に関して差が小さいことを確認した。

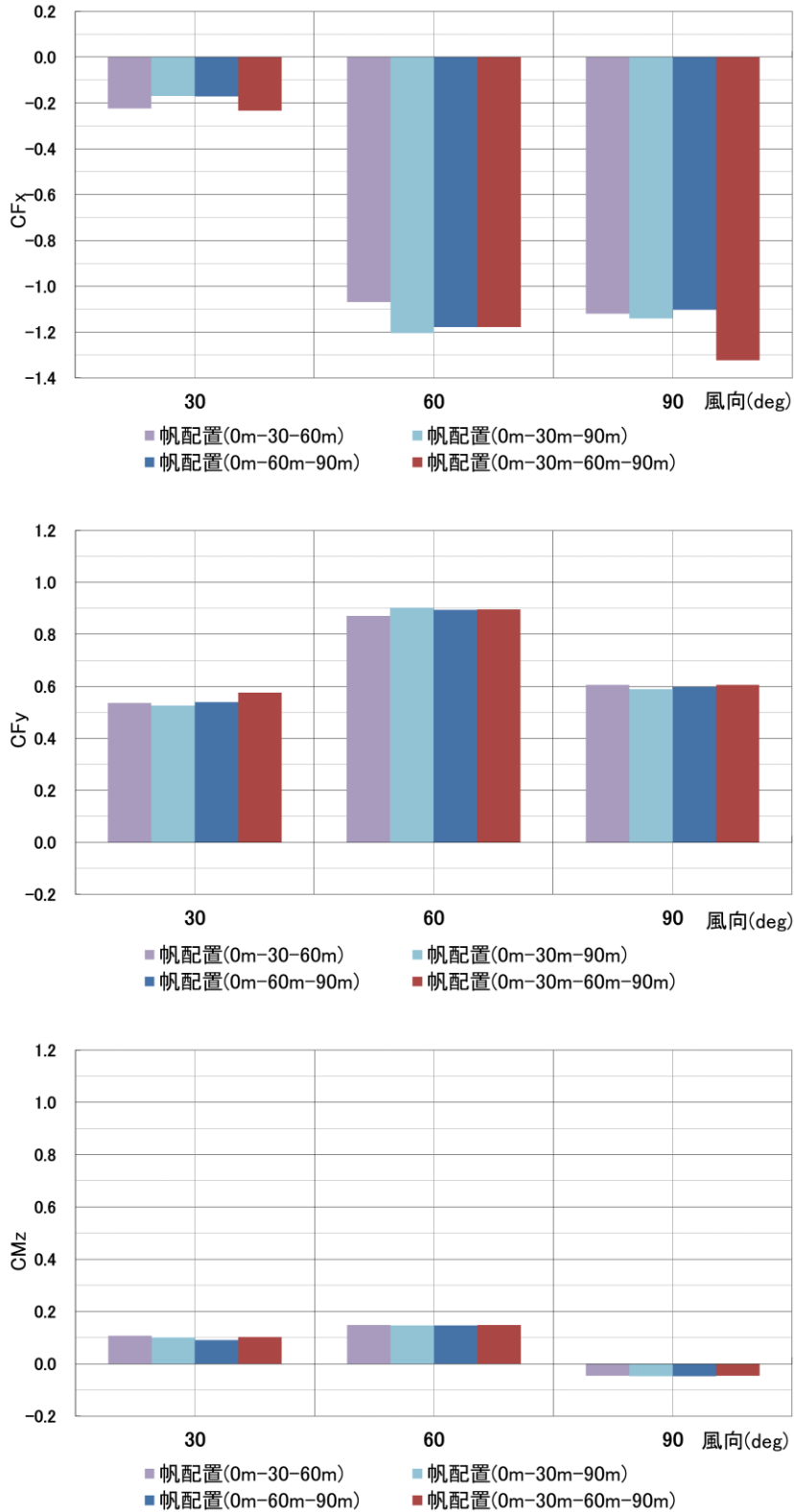


図 3.4.12 船体+複合翼(3,4 枚配置)の空力測定試験結果

(各風向の最大推力配置位置間での比較)

図 3.4.13 に複合翼 (2 翼配置) および図 3.4.14 に複合翼 (3, 4 翼配置) のみの各風向に対する最大推力迎角における空力測定試験結果を示す。2 翼配置および 3、4 翼配置とも船体上に配置した状態に比べて推力の発生が小さいことが分かる。この結果より、船体による加速流が発生する相乗効果で大きな推力が得られていることが確認できた。なお 3.3 で実施した CFD 計算において、翼の取り付け角は 3.1 の結果を参考に固定値として設定していた。それに対し、風洞試験では風向に応じ最適な取り付け角を実験的に求めており、CFD 計算に基づく推定以上の燃費改善効果が風洞試験にて得られた。

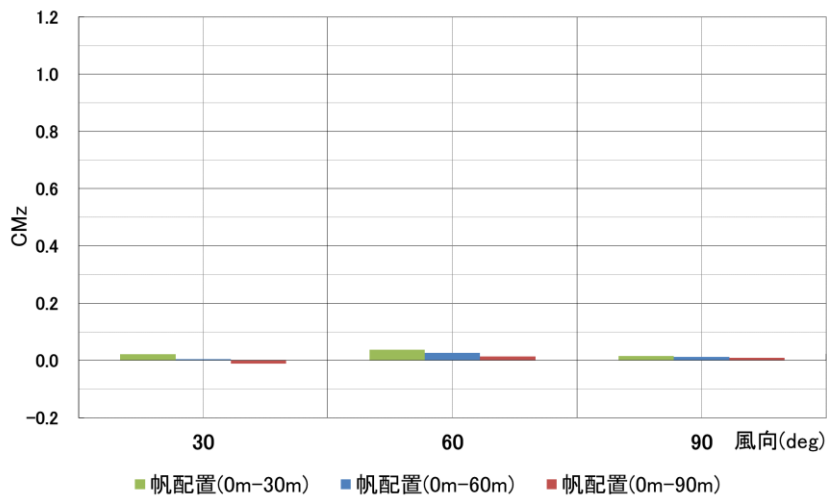
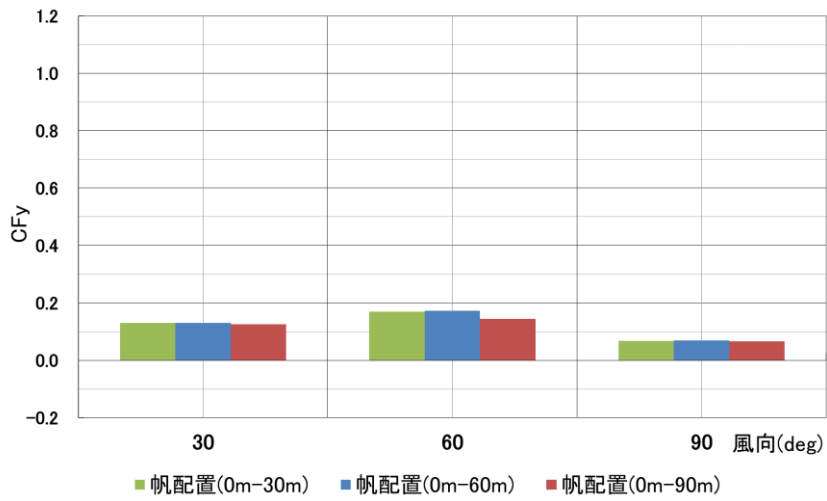
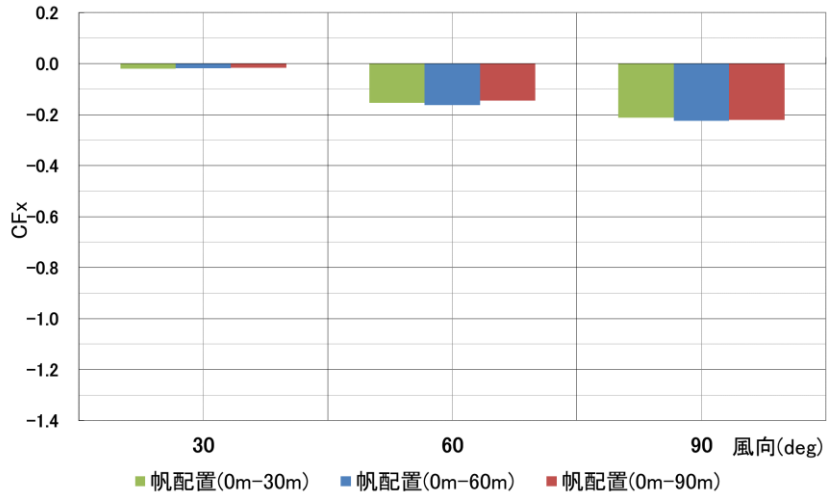


図 3.4.13 複合翼(2枚配置)の空力測定試験結果  
(各風向の最大推力：複合翼配置位置間での比較)

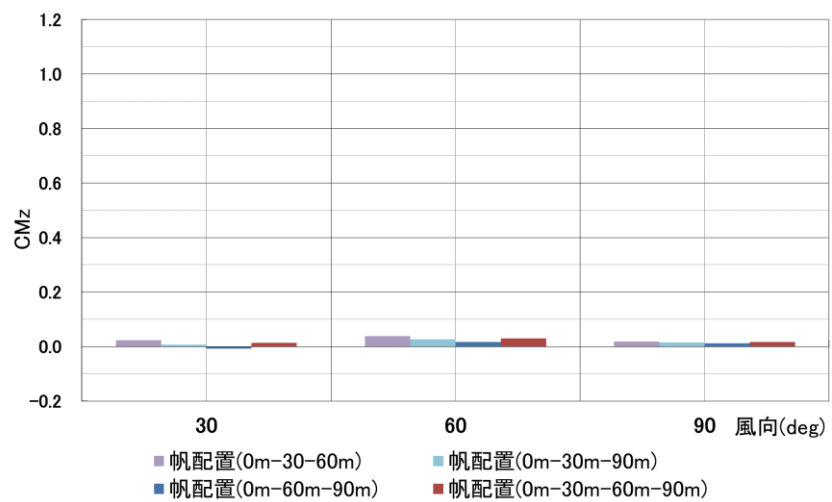
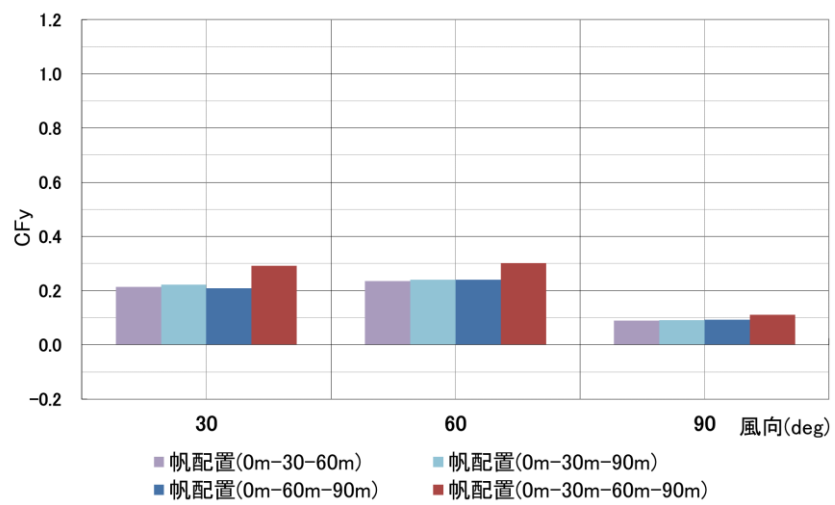
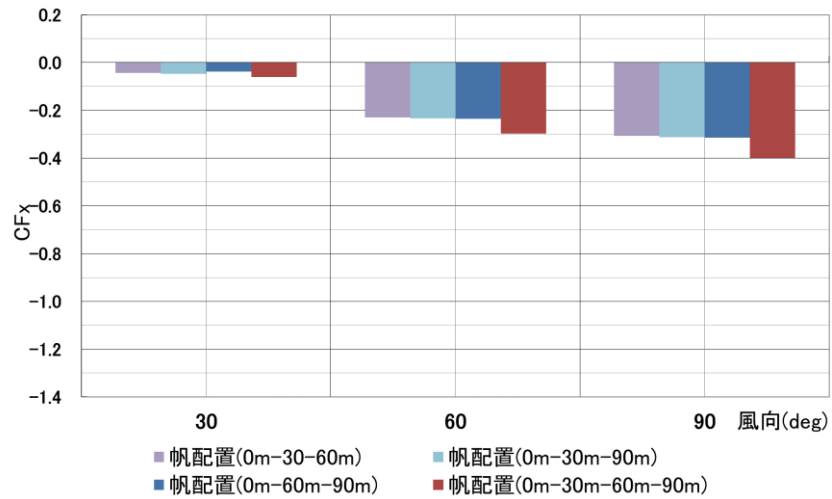


図 3. 4. 14 複合翼(3、4 枚配置)の空力測定試験結果  
(各風向の最大推力：複合翼配置位置間での比較)

図 3. 4. 15 にスモークワイヤーの可視化試験状況を示す。

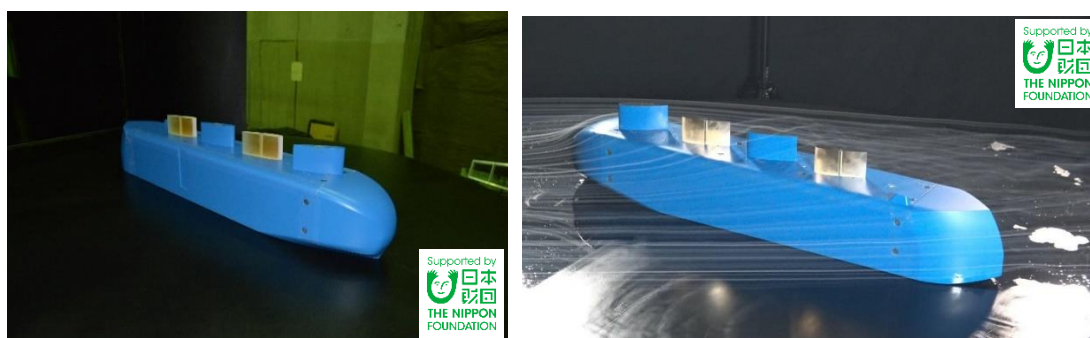


図 3. 4. 15 試験状況(船体+ 単独翼・複合翼 配置 1、2、3、4)  
(左：静的空力測定試験，右：可視化試験)

また、表 3. 4. 4 に北米航路就航の往復平均シミュレーションによる燃費改善率を示す。風洞試験を実施した結果、船体と翼帆を合わせた「低風圧抵抗船型と風力活用による翼」を備えた船体として帆 1 枚配置条件でオリジナルの原型 PCC 船型と比較し、北米航路往復平均で燃費改善率 13. 8[%]となることを確認できた。(3. 1. 11 記載の北米航路シミュレーション参照)さらに、帆 4 枚配置条件で北米航路往復平均燃費改善率 18. 7[%]となることを確認できた。従って、今年度の目標北米航路平均燃費改善率 (GHG 削減率) 12[%]以上、という目標を達成できた。

表 3. 4. 4 北米航路就航のシミュレーション燃費改善率結果

| 帆配置パターン | 燃費改善率 [%] |
|---------|-----------|
| 帆なし     | 11.5      |
| 帆1枚配置   | 13.8      |
| 帆2枚配置   | 16.2      |
| 帆3枚配置   | 17.7      |
| 帆4枚配置   | 18.7      |

図 3. 4. 16 に風洞試験結果と CFD 解析の比較を示す。正面向かい風 (風向 0[deg]) から斜め向かい風 (風向 60[deg]) については、H05 以外については、横風 (風向 90[deg]) において各船型とも試験結果と CFD 結果とに差異が認められるが、可視化試験の結果(図 3. 4. 17) から確認できるように、これは他の風向きと比較して流れが大きく剥離することによるもので、現在使用している計算モデルによる粘性流れの平均化が一因であると考えられる。実現象に対し CFD ではより強く剥離を評価することになるが、性能評価の観点では安全側の評価となるため、今後の開発においてはこの相関関係を考慮したうえでの評価を行えばよいと考える。

従って、本システムの性能開発に対する CFD 解析の妥当性を確認することができた。今年



度得られた風洞試験結果との相関影響を考慮して、今後の性能開発は CFD 解析を用いて実施する。

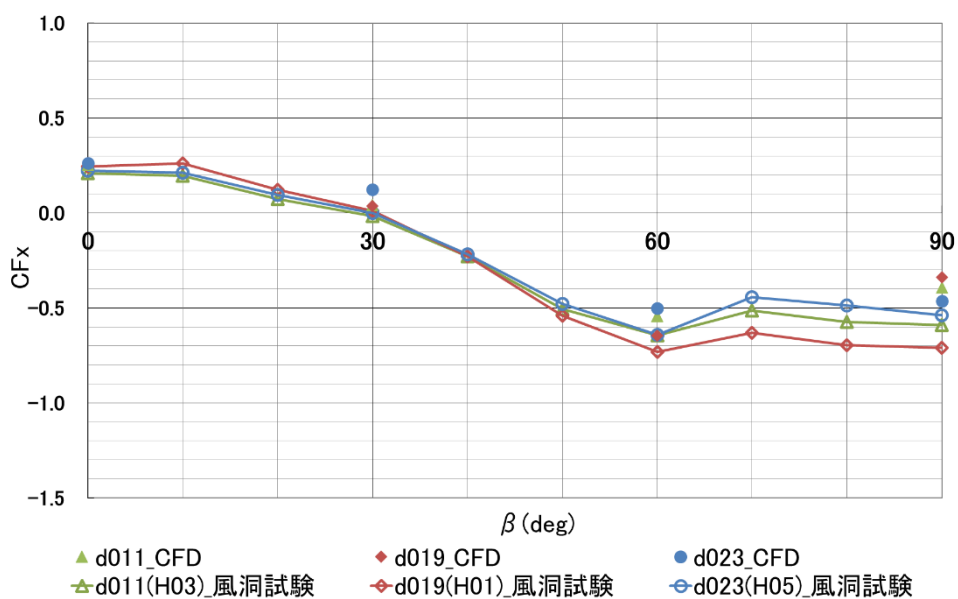


図 3.4.16 船体単独正面風圧力係数 (CFD と風洞試験結果比較)

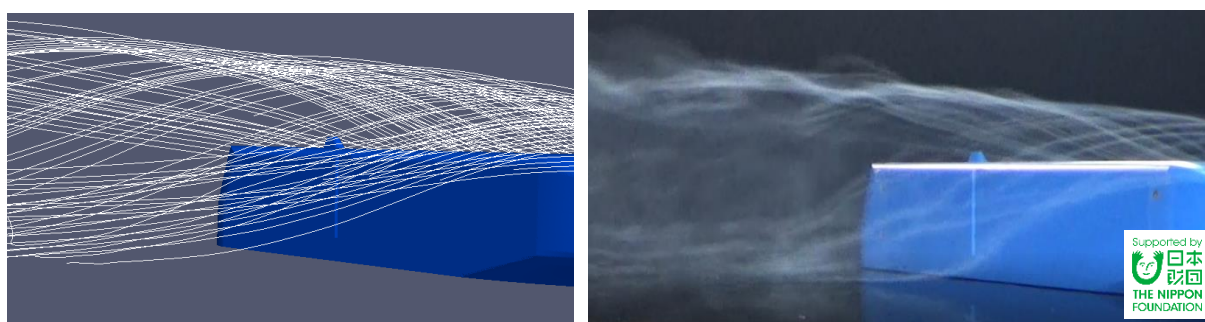


図 3.4.17 船体周りの流れの可視化 (CFD と風洞試験結果比較, 剥離の様子)  
(左: CFD 解析, 右: 可視化試験)

### 3.4.8 まとめ

システムの性能開発に対する CFD 計算と風洞試験結果の比較により、CFD 計算の妥当性を確認することができた。今年度得られた風洞試験結果との相関影響を考慮して、今後の性能開発は CFD 解析を用いて実施する予定である。

また、CFD 解析を実施した結果、船体と翼帆を合わせた「低風圧抵抗船型と風力活用による翼」を備えた船体として帆 1 枚配置条件でオリジナルの PCC 船型と比較し、北米航路平均燃費改善率 13.8[%]となることが確認できた。(3.1.11 記載の北米航路シミュレーション参照)さらに、帆 4 枚配置条件で北米航路平均燃費改善率 18.7[%]となることが確認できた。従って、今年度の目標北米航路平均燃費改善率 12[%]以上、という目標を達成できた。

#### 4. 2022 年度の目標の達成状況

##### 4.1 2022 年度の目標の達成度

2022 年度の目標は以下の 1)～4)に記載した通りである。

- 1) 実装・製品化に向けコンセプト設計を完成し、船体と翼を合わせた「低風圧抵抗船型と風力活用による翼」にて、原型 PCC 船型と比較し、北米航路航行時に平均 12[%]以上の GHG を削減する。
- 2) 高効率（揚力係数  $C_L$ 1.1 以上）の単独翼・複合翼を開発する。
- 3) 低風圧抵抗船型に関し、原型 PCC 船型と比較し、現在 ISHIN 船型では北米航路就航のシミュレーション結果で 5[%]の GHG 削減の性能であるが、それを 6.5[%]に向上させる。
- 4) コンテナ船の小型風防カバーで、正面抵抗係数  $C_{fx}$ を相対風向 0（向風）～60 度の平均でオリジナル（風防無し）の 15[%]削減を達成する。

3 章に記載した CFD 解析、模型による風洞試験結果のように、以下の 1)～4)に記載した通りに 2022 年度の全ての目標を達成したことを確認した。

- 1) 船体と翼を合わせた「低風圧抵抗船型と風力活用による翼」にて、CFD 計算値が北米航路航行時に帆 2 枚配置のとき平均 12.8[%]の GHG 削減となり、目標の 12[%]を達成した。風洞試験結果では帆 4 枚配置で 18.7[%]の GHG 削減と目標を大幅に超える成果を得た。
- 2) 2 分割翼帆（単独翼）において揚力係数  $C_L$ の CFD 計算値が 1.30 となり、さらに、2 枚の 3 分割翼帆を並べた複数配置（複合翼）の解析においても、平均  $C_L$ =1.10 以上の空力性能が実現可能なことが確認でき、2022 年度の目標 1.1 以上を達成した。
- 3) 低風圧抵抗船型の CFD 計算に関し、北米航路就航のシミュレーション結果で平均 9.8[%]の GHG 削減となり、目標の 6.5[%]を達成した。
- 4) 超大型コンテナ船向け小型風防カバーで、正面抵抗係数  $C_{fx}$ の CFD 計算値が相対風向 0（向風）～60 度の平均で風防無し時の 16.1[%]削減となり、目標の 15[%]削減を達成した。さらに小型風防カバーとダミーコンテナを組み合わせて 26.8[%]削減と目標を大幅に超える成果を得た。

##### 4.2 2022 年度の目標の達成度に関する考察

4.1 節に記載の通りに 2022 年度の目標をすべて達成した。また、同じレイノルズ数で実施した CFD 解析と模型による風洞試験の結果は良い一致を示しており、CFD 計算の精度が検証できたと考えられる。今後は本システムを実用化すべく、この CFD 計算を使用して船体や帆の設計改善を進めていく計画である。

## 5. 2022年度の実施内容の概要

### 1) CFD解析による単独翼・複合翼の形状検討

CFD解析により、翼単体(単独翼・複合翼)での最適な翼形状を開発した。翼については重量削減の為、高さ10[m]以内で効果が最大(揚力係数CLを1.1以上)になるように設計した。前縁フラップを備えた2分割翼帆(単独翼)で効果が出る翼形状、および、前縁、中央と後縁の3分割翼帆(単独翼)で相乗効果が出るシステムを2通り設計し、CFD解析により検証した。その結果、キャンバー角を付けた2分割翼帆において、揚力係数CLが1.30となる翼形状の開発に成功し目標を達成することができた。

### 2) 低風圧抵抗船型の船型およびコンテナ船小型風防カバーの設計検討

低風圧抵抗船型に関し、船首部などの推進力を最大化、抵抗を最小化する形状の追求をCFD解析で行った。具体的には、詳細な流れ場の把握をCFD解析で行い、その結果に基づき形状の検討を行った。性能目標は現在北米航路就航のシミュレーション結果で5[%]のGHG削減の性能であるが、それを6.5[%]に向上させることとした。その結果、9.8[%]のGHG削減効果のある船型の開発に成功し、目標を達成することができた。

コンテナ船の小型風防カバーについても上記応用として形状を開発し、CFD解析で性能確認を行った。正面抵抗係数 $C_{rx}$ を相対風向0(向風)~60度の平均でオリジナルの15[%]削減を目標としたところ、16.1[%]削減可能な小型風防カバーの開発に成功し、目標を達成することができた。

### 3) 低風圧抵抗船型の船体と単独翼・複合翼システムの検討

前項1)で設計した単独翼、および、複合翼を用い、前項2)の低風圧抵抗船型デッキ上の風を利用して、効果を最大化する小型翼の開発を行った。前項1)同様、前縁フラップを備えた2分割翼帆(単独翼)、および、前縁、中央と後縁の3分割翼帆(単独翼)で相乗効果が出るシステムを2通り設計し、CFD解析により性能確認した。性能の目標は、北米航路航行時平均12[%]以上のGHG削減とした。その結果、帆2枚配置のとき平均12.8[%]のGHG削減となり、目標の12[%]を達成した。

### 4) 風洞試験の実施によるシステム検証

風洞試験を行い、前項1)~3)で実施したCFD計算結果の精度を検証すると共に、上記数値目標の確認を行った。その結果、システムの性能開発に対するCFD計算と風洞試験結果の比較により、CFD計算の妥当性を確認することができた。また、妥当性が検証されたCFD計算により、上記数値目標は全て達成することを確認した。今年度得られた風洞試験結果との相関影響を考慮して、今後の性能開発はCFD解析を用いて実施する予定である。

### 5) 報告書作成

事業内容に基づき、初年度の成果報告書を作成した。

## 第Ⅱ部 2023年度

### 6. 2023年度の実施内容

#### 6.1 CFD解析による単独翼・複合翼の性能向上の検討

##### 6.1.1 はじめに

本節では、2023年度に実施した、CFD解析による単独翼・複合翼の性能向上の検討の結果について述べる。3.1で述べたように、2022年度においては、東海大学・福田研究室が有する航空宇宙工学分野の知見に基づき翼帆の検討を行い、以下の成果を得ることができた。

1. CFD解析を実施した結果、翼端板(Winglet 2)を設置した3分割翼帆において、 $C_L=1.19$ の性能が実現可能なことが確認できた。
2. キャンバー角を付けた2分割翼帆においては、 $C_L=1.30$ を超える性能が実現可能なことが確認できた。
3. 2枚の3分割翼帆を並べた複数配置(複合翼)の解析においても、平均 $C_L=1.10$ 以上の空力性能が実現可能なことが確認できた。
4. さらに、上記の結果を基に、翼帆によるGHG排出量削減効果を評価した結果、翼端板(Winglet 2)を付けた3分割翼帆をオリジナルの原型PCC船型に1本配置し、北米航路を航行する場合、翼帆による効果としてGHG排出量を往復平均で3.6[%]削減できることが確認された。
5. 上記1.-4.の結果から、高さ10[m]以内で $C_L=1.10$ 以上の空力性能を有する翼帆を開発するという2022年度の目標を達成する事ができた。

2023年度は、この2022年度の成果に基づき、2分割翼帆について、キャンバー角および隙間位置の再検討を行い、さらなる性能向上を目指した。

##### 6.1.2 解析の概要

2022年度と同様に、3Dモデルの作成には、株式会社ダッソー・システムズ製3次元CADソフトウェア「SOLIDWORKS 2022」を使用し、CFD解析には、株式会社ソフトウェアクレイドル製(Hexagon製)の3次元熱流体解析ソフトウェア「scFLOW Version2021」を使用した。解析手法も2022年度と同様に、迅速にシミュレーション結果の算出が可能なRANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)解析(定常解析)を実施した。解析手法の概要を以下に示す。

解析手法：

- |              |                          |
|--------------|--------------------------|
| ✓ 解析方法       | : RANS 定常解析              |
| ✓ 支配方程式      | : 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 |
| ✓ 乱流モデル      | : SST $k-w$ モデル          |
| ✓ 離散化手法      | : 有限体積法                  |
| ✓ 格子タイプ      | : 非構造格子                  |
| ✓ 圧力場・速度場の解法 | : SIMPLEC 法              |

- ✓ 空間離散化スキーム : 2次精度 MUSCL 法
- ✓ 時間離散スキーム : 2次精度陰解法

2022年度に行った風洞試験の実験値と解析結果の比較により精度の確認を行った解析領域および解析格子を用いて2023年度の解析を行った。図6.1.1に解析に用いた解析領域を示す(図3.1.8と同一)。翼帆の寸法、翼弦長 $C$ (20[m])、高さ $H$ (10[m])、幅 $W$ (4.21[m])を基準として、流れ方向に $25C$ 、高さ方向に $10H$ 、幅方向に $57W$ を取り解析を行った。入口条件は速度規定(20[knot](=10.29[m/s]))、出口条件は圧力規定(大気圧)としており、翼帆表面は粘性壁として、すべりなし条件を課している。解析領域側面の境界面はスリップ壁とした。速度条件は、今回対象としているISHIN船型の北米航路における航行速度を基に20[knot]と決めており、密度 $\rho$ は1.206[kg/m<sup>3</sup>]とした。解析格子の断面図を図6.1.2に示す。総要素数は約1億2000万点であり、分割部の隙間や翼帆表面近傍に関しては、詳細な流れ場を再現する為、格子サイズを小さくし、翼帆から離れていくにつれて格子サイズが徐々に大きくなるように設定した。

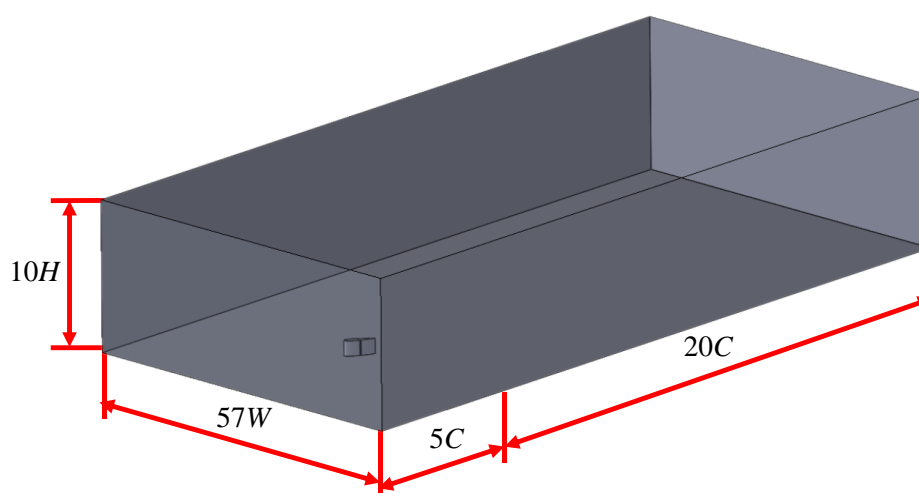


図 6.1.1 解析領域

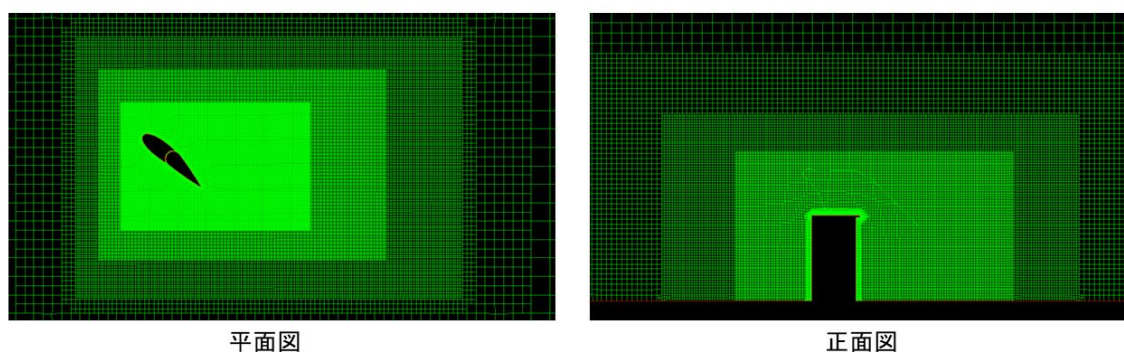


図 6.1.2 解析格子

### 6.1.3 キャンバー角の検討

3.1 で述べたように、2022 年度の成果としては、CFD 解析を実施した結果、翼端板 (Winglet 2) を設置した 3 分割翼帆において、 $C_L=1.19$  の性能が実現可能なことが確認できた。また、キャンバー角を付けた 2 分割翼帆においては、 $C_L=1.30$  を超える性能が実現可能なことが確認できている。2023 年度は、さらなる性能向上を実現するために、2 分割翼帆の形状の再検討を行った。まず始めに、キャンバー角の検討を行った。迎角は 2022 年度の解析で最も揚力係数が高かった 40 [deg] として、図 6.1.3 および表 6.1.1 に示すように 3 つのキャンバー角について検討を行った。表 6.1.1 に示す流体力係数の解析結果を見ると、揚力係数は 7 [deg] の条件で最も高くなっており、 $C_L=1.322$  と 2022 年度の結果を超える性能となっていることが確認できる。一方で、揚抗比は、この 3 つの条件では 6 [deg] の条件で最も高くなっていることが分かる。図 6.1.4、図 6.1.5、図 6.1.6 に示す圧力分布および流速分布を見ると、キャンバー角が 7 [deg] の条件では、他の 2 つの条件に比べて、若干ではあるが、翼帆上面の低圧領域および翼帆下面の高圧領域が広がっていることが確認できる。このことにより、揚力が増加していることが分かる。

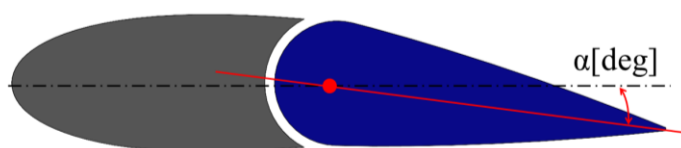


図 6.1.3 2 分割翼帆によるキャンバー角の変化

表 6.1.1 2 分割翼帆におけるキャンバー角変化による空力係数の比較

| キャンバー角 $\alpha$ |           | 6 [deg] | 7 [deg] | 8 [deg] |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|
| 抗力係数            | $C_D$     | 0.798   | 0.819   | 0.829   |
| 揚力係数            | $C_L$     | 1.311   | 1.322   | 1.320   |
| 揚抗比             | $C_L/C_D$ | 1.643   | 1.614   | 1.592   |

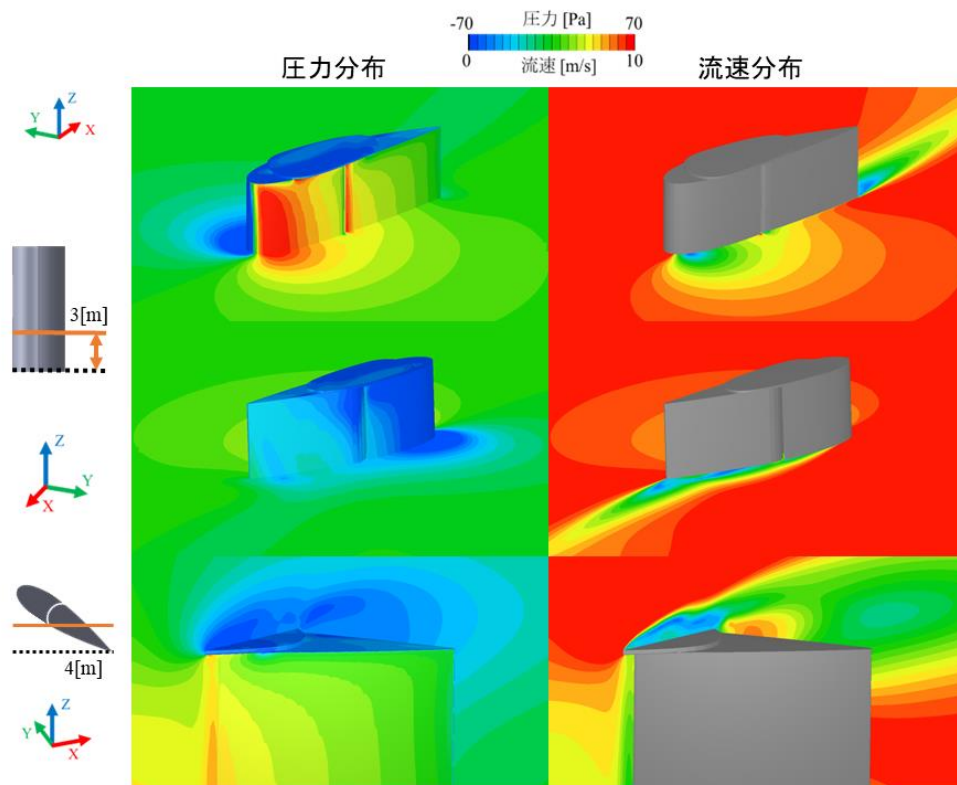


図 6.1.4 2分割翼帆によるキャンバー角の影響（キャンバー角：6 [deg]）

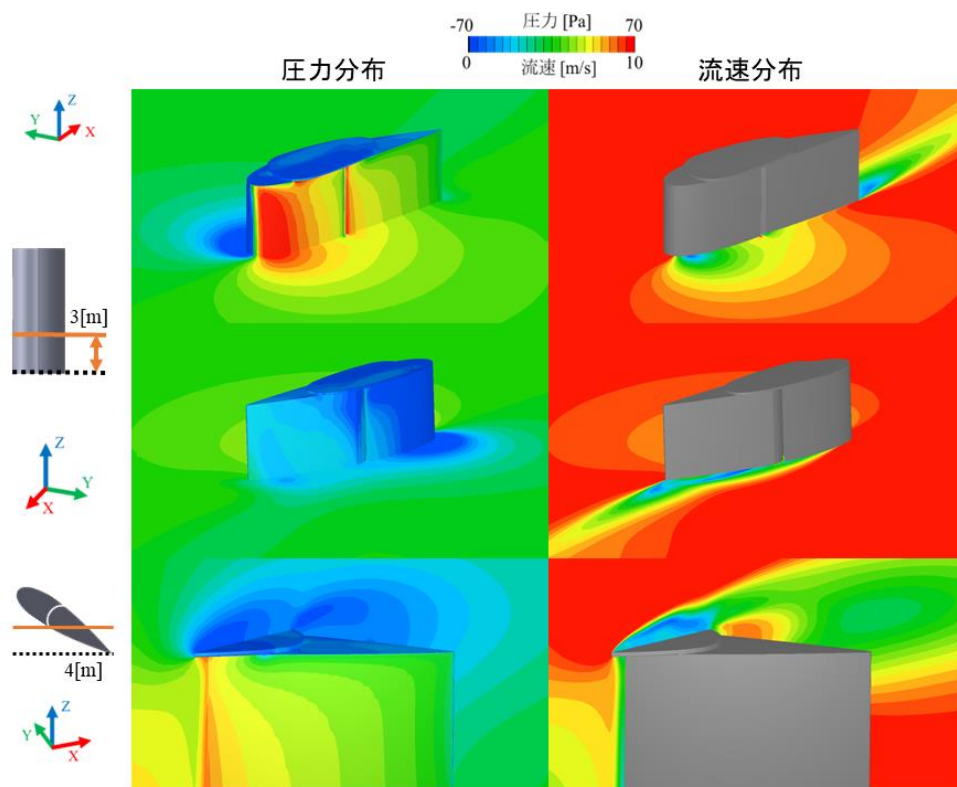


図 6.1.5 2分割翼帆によるキャンバー角の影響（キャンバー角：7 [deg]）

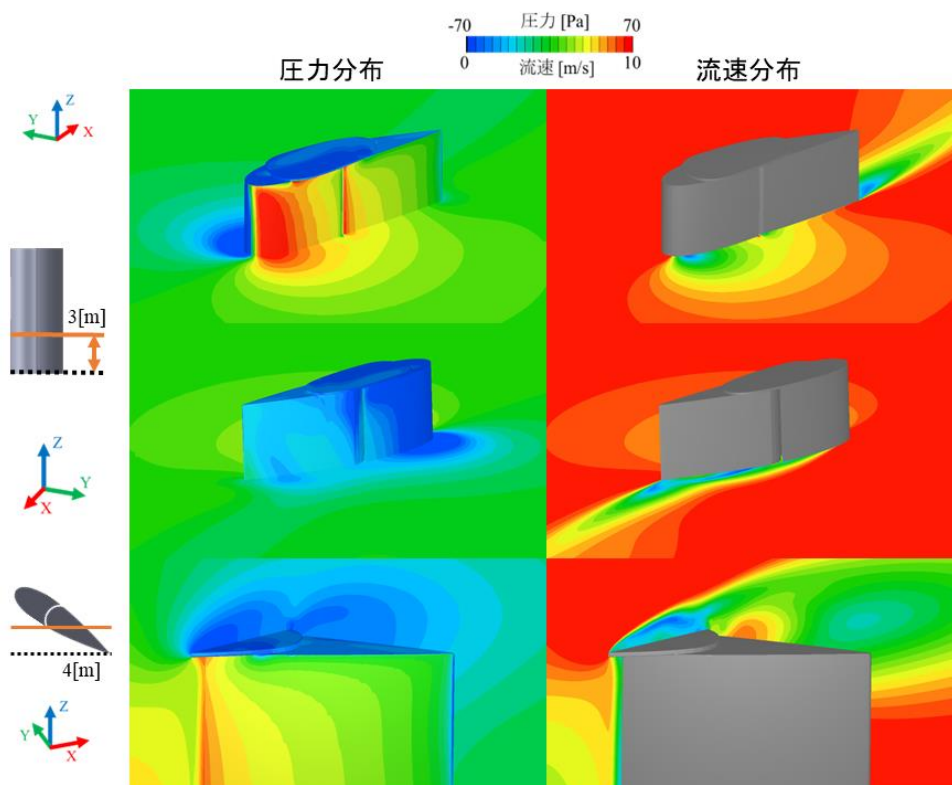


図 6.1.6 2分割翼帆によるキャンバー角の影響（キャンバー角：8 [deg]）

#### 6.1.4 2分割翼帆の形状の再検討

次に、さらなる性能向上を実現するために、2分割翼帆の隙間位置の再検討を行った。迎角は、6.1.3と同様に、2022年度の解析で最も揚力係数が高かった40 [deg]として、キャンバー角は6.1.3で最も性能が高かった7 [deg]として解析を行った。表6.1.2に解析を行った条件と解析結果を示す。隙間位置①は、6.1.3で示した形状と同じ隙間位置となっており、隙間位置を後方に移動させて、その効果を確認した。表6.1.2の解析結果を見ると、揚力係数は③の条件で最も高くなっており、 $C_L=1.335$ と6.1.3で示した結果をさらに上回る性能となっていることが確認できる。揚抗比も③の条件で最も高くなっていることが分かる。図6.1.7および図6.1.8に示す圧力分布および流速分布を見ると、若干ではあるが、隙間位置が③の条件では翼帆上面の低圧領域および翼帆下面の高圧領域が広がっていることが確認できる。このことにより、揚力が増していることが分かる。

表 6.1.2 2分割翼帆における隙間位置変化による空力係数の比較  
(隙間位置は①②③④の順番に後方に移動)

| 隙間位置 |           | ①     | ②     | ③     | ④     |
|------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.819 | 0.818 | 0.827 | 0.827 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.322 | 1.319 | 1.335 | 1.333 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 1.614 | 1.612 | 1.614 | 1.612 |



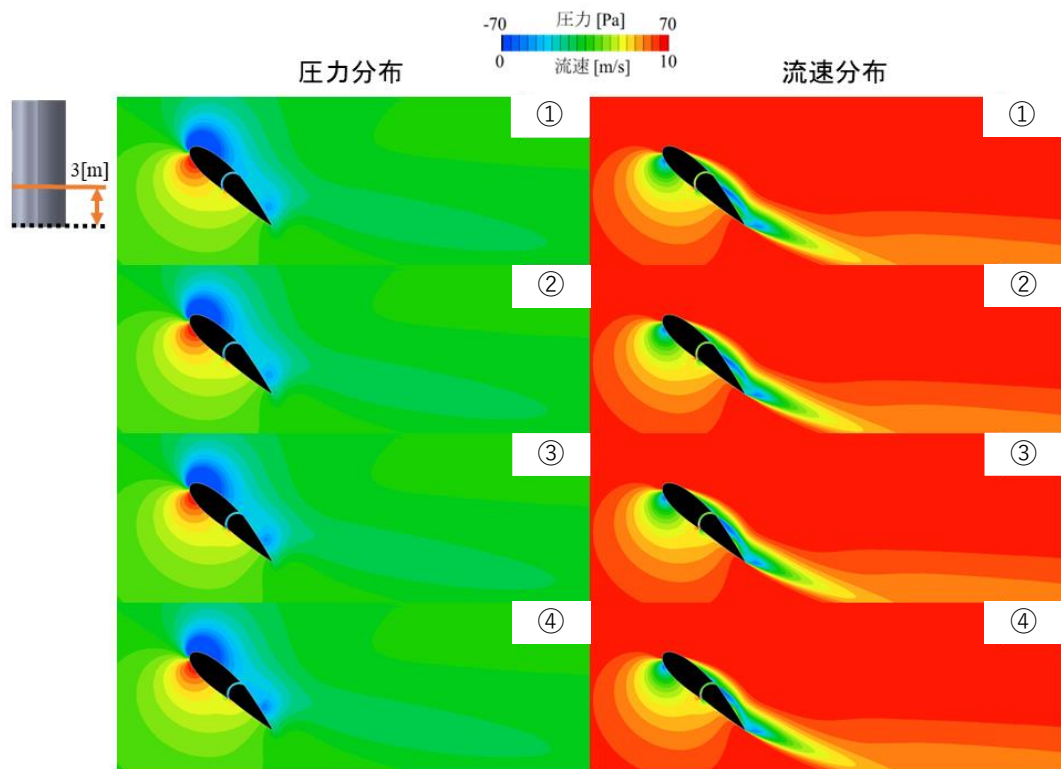


図 6.1.7 2分割翼帆による隙間位置の影響（断面位置：3 [m]）

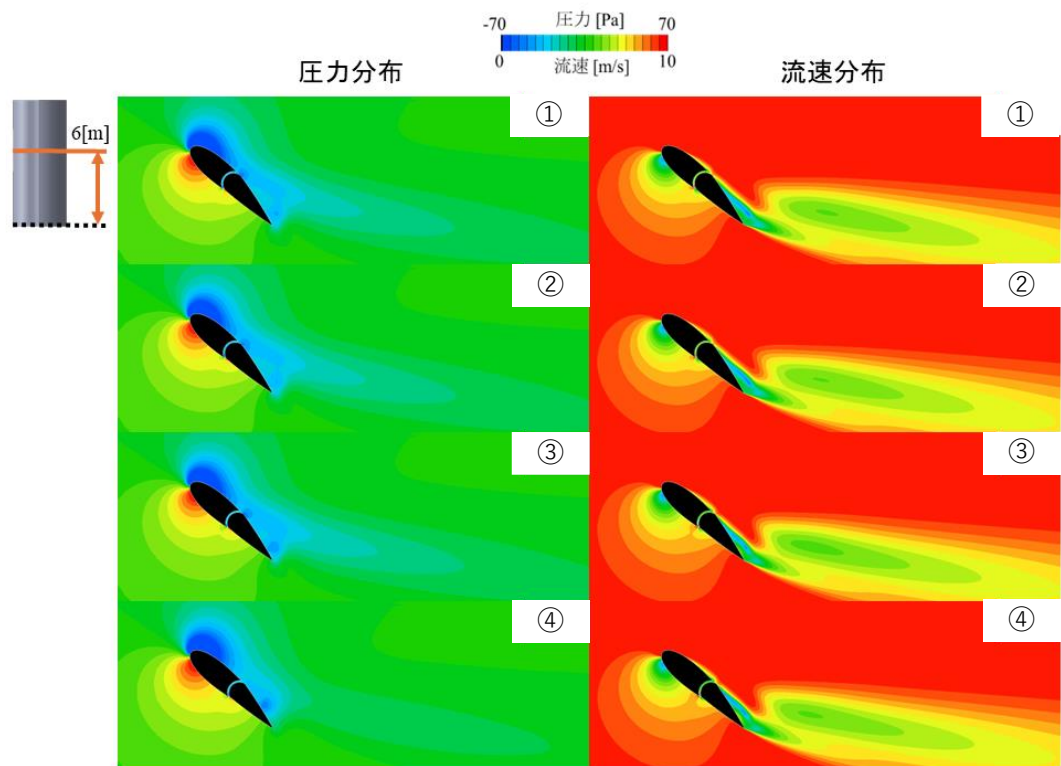


図 6.1.8 2分割翼帆による隙間位置の影響（断面位置：6 [m]）

### 6.1.5 揚抗比が高い形状条件の検討

前節までに報告をした通り、2023 年度に行った解析で、揚力係数  $C_L=1.335$  の性能が実現できており、2023 年度の目標を超える性能となっていることが確認された。一方で、これまでの解析結果を見ると、キャンバー角を付けることで、揚力係数は増加するが、同時に、抗力係数も増加することが分かる。ここで、実際の帆装による推力の発生を考えた場合、船体に対する流入風の角度（偏揺角）が大きい場合は、揚力係数が高い方が推力および推力係数が大きくなるが、流入風の角度が小さい場合は、揚抗比が高い方が推力および推力係数が大きくなる。そこで、揚抗比が高い条件の検討を追加で行った。表 6.1.3 に解析を行った条件と解析結果を示す。形状は 6.1.4 で示した揚力係数  $C_L=1.335$  の性能が実現できた 2 分割翼帆のキャンバー角を 0[deg]に変更した形状となっている。表 6.1.3 に示す解析結果を見ると、迎角 30[deg]において、揚抗比が 2.430 と高くなっていることが確認できる。図 6.1.9 および図 6.1.10 に示す圧力分布および流速分布を見ると、6.1.3 および 6.1.4 で示した解析結果に比べると翼帆上面の低圧領域および翼帆下面の高圧領域が狭くなっていることが分かるが、はく離は抑えられており、その結果、揚抗比が向上していることが確認できる。

表 6.1.3 揚抗比に関する検討解析における空力係数の比較

|      |           | 迎角 30 [deg] | 迎角 33 [deg] |
|------|-----------|-------------|-------------|
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.421       | 0.491       |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.023       | 1.083       |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 2.430       | 2.206       |

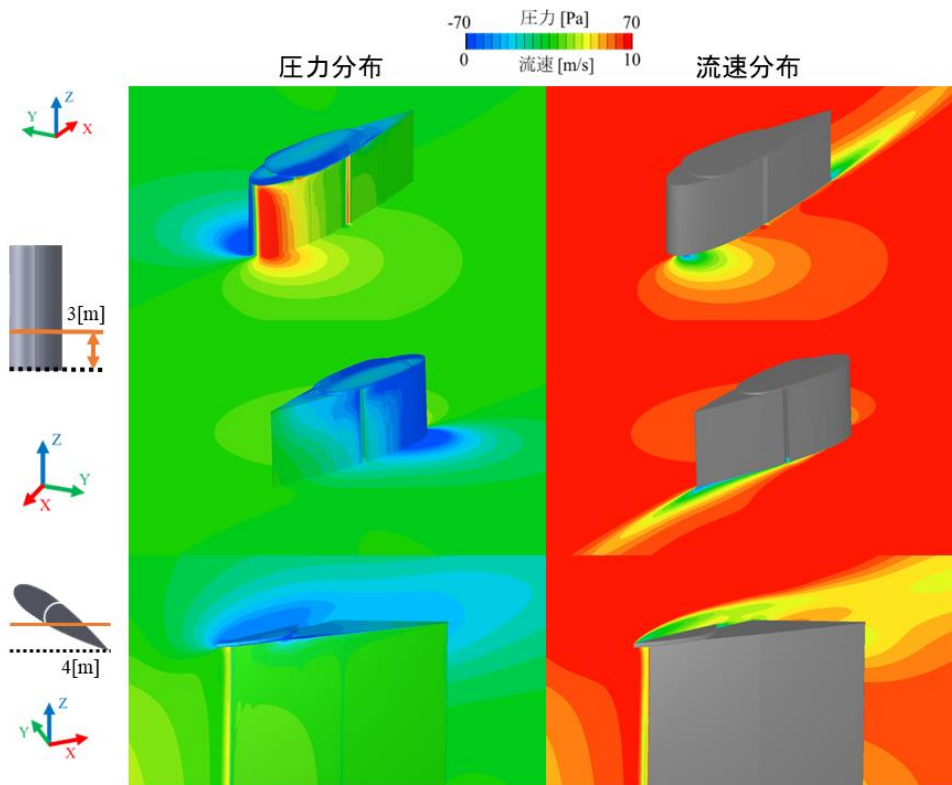


図 6.1.9 揚抗比に関する検討解析結果（迎角 30 [deg]）

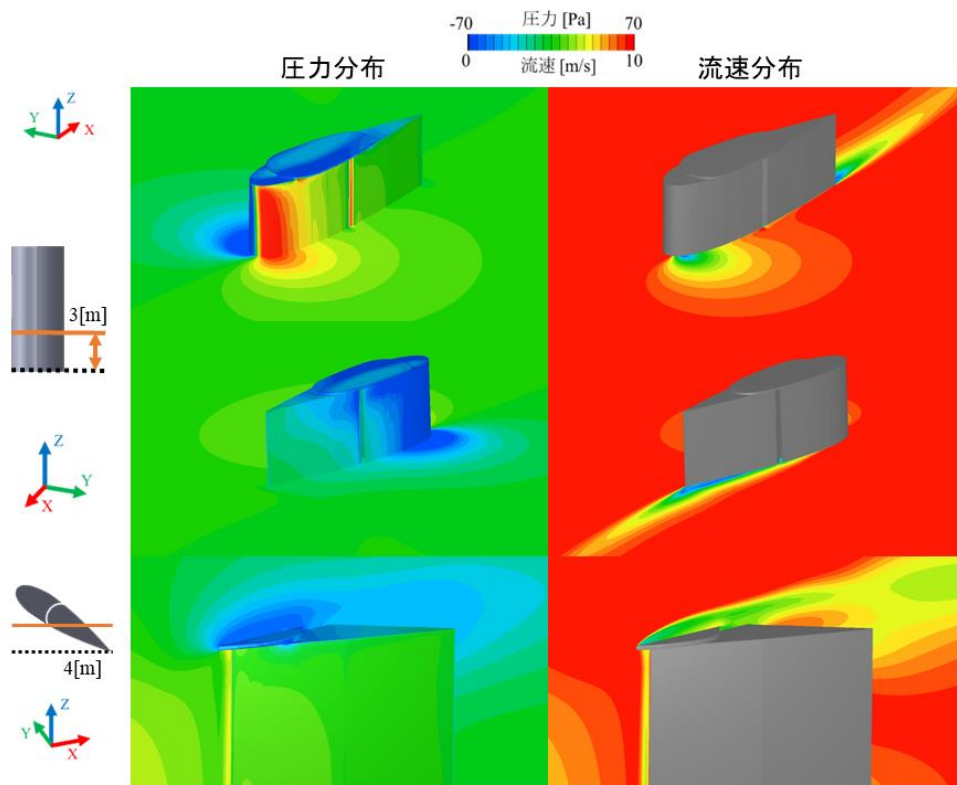


図 6. 1. 10 揚抗比に関する検討解析結果（迎角 33 [deg]）

#### 6. 1. 6 複数配置（複合翼帆）の検討

実際の船舶への帆装を想定した場合は、翼帆を単独で設置するのではなく、複数の帆を設置することになる。そこで、前後に帆を並べた配置（複合翼帆）の検討を行った。図 6. 1. 11 に検討したレイアウトを示す。図 6. 1. 11 に示すように、想定している船舶の風力推進力が最も出ると考えられる 60[deg]からの流入を想定して、船尾に向けて翼帆を 2 枚直列に並べた配置での解析を行った。6. 1. 4 で評価を行った揚力係数  $C_L=1.335$  の性能が実現できた 2 分割翼帆（キャンバー角：7[deg]）を直列に 2 枚配置して行った解析で得られた空力係数を表 6. 1. 4 および表 6. 1. 5 に、図 6. 1. 12 および図 6. 1. 13 に圧力分布および流速分布を示す。また、6. 1. 5 で評価を行った揚抗比  $C_L/C_D=2.430$  の性能が実現できた 2 分割翼帆（キャンバー角：0[deg]）を直列に 2 枚配置して行った解析で得られた空力係数を表 6. 1. 6 および表 6. 1. 7 に、圧力分布および流速分布を図 6. 1. 14 および図 6. 1. 15 にそれぞれ示す。

これらの結果を見ると、キャンバー角を 7 [deg]とした 2 分割翼帆を直列に配置した場合は、Position 1、Position 2 とも、前側の翼帆は、単独帆の場合よりも揚力が増加していることが分かる。また、Position 2 に関しては、2 枚の翼帆の揚力係数の平均値は、単独帆の場合より若干低い値となっているが、1.30 を超えていることも分かる。キャンバー角を 0 [deg]とした 2 分割翼帆を直列に配置した場合も、Position 1、Position 2 とも、前側の翼帆は、単独帆の場合よりも揚力が増加しており、Position 2 に関しては、2 枚の翼帆の揚力係数の平均値は、単独帆の場合より若干低い値となっているが、揚抗比は 2 枚とも

2.42 を超えていることも分かる。図 6.1.12-15 に示す圧力分布および流速分布を見ると、Position 1 では前後の翼帆の周りの流れが若干異なっているが、Position 2 では前後の翼帆の周りの流れ場の差異が小さくなっていることも確認できる。

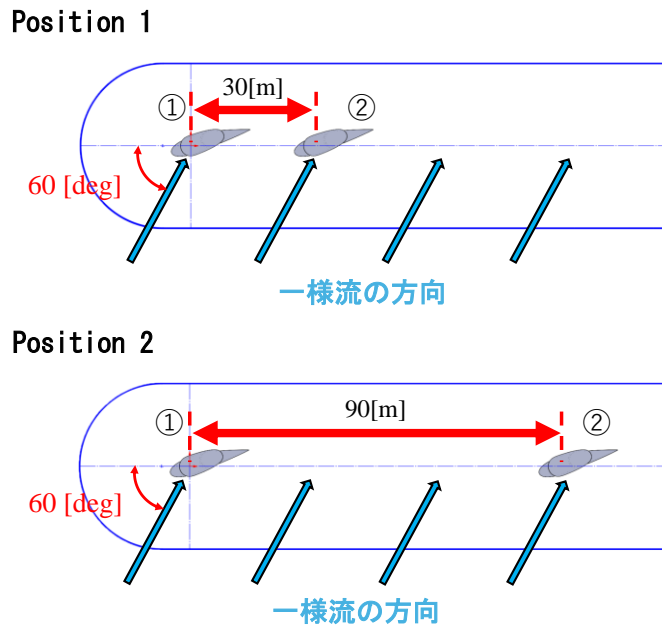


図 6.1.11 複数翼帆のレイアウトと船体の関係

表 6.1.4 複数翼帆レイアウトによる空力係数の比較（キャンバー角 7 [deg]、Position 1）

|      |           | 単独翼   | 複合翼   |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|
|      |           |       | 翼帆①   | 翼帆②   |
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.827 | 0.949 | 0.763 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.335 | 1.516 | 1.087 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 1.613 | 1.597 | 1.426 |

表 6.1.5 複数翼帆レイアウトによる空力係数の比較（キャンバー角 7 [deg]、Position 2）

|      |           | 単独翼   | 複合翼   |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|
|      |           |       | 翼帆①   | 翼帆②   |
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.827 | 0.819 | 0.815 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.335 | 1.337 | 1.329 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 1.613 | 1.633 | 1.631 |

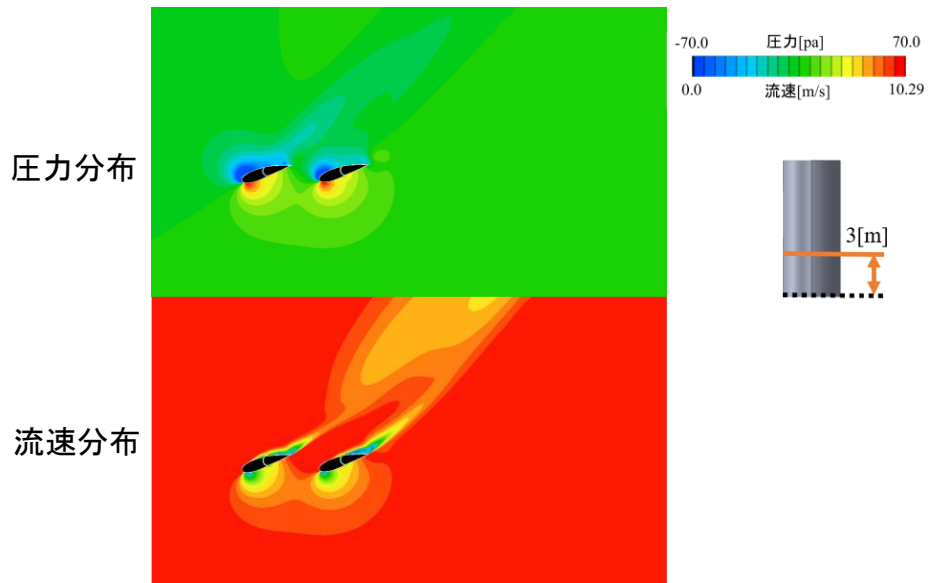


図 6.1.12 複数帆レイアウトの解析結果（キャンバー角 7 [deg]、Position 1）

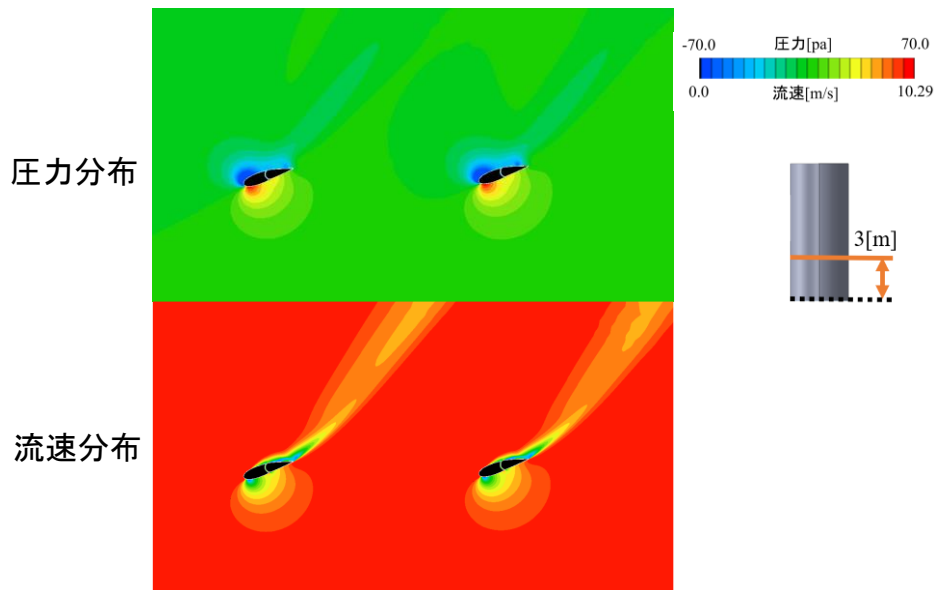


図 6.1.13 複数翼帆レイアウトの解析結果（キャンバー角 7 [deg]、Position 2）

表 6.1.6 複数翼帆レイアウトによる空力係数の比較（キャンバー角 0 [deg]、Position 1）

|      |           | 単独翼   | 複合翼   |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|
|      |           |       | 翼帆①   | 翼帆②   |
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.421 | 0.448 | 0.402 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.023 | 1.071 | 0.892 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 2.430 | 2.390 | 2.221 |

表 6.1.7 複数翼帆レイアウトによる空力係数の比較 (キャンバー角 0 [deg]、Position 2)

|      |           | 単独翼   | 複合翼   |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|
|      |           |       | 翼帆①   | 翼帆②   |
| 抗力係数 | $C_D$     | 0.421 | 0.423 | 0.412 |
| 揚力係数 | $C_L$     | 1.023 | 1.028 | 1.000 |
| 揚抗比  | $C_L/C_D$ | 2.430 | 2.431 | 2.427 |

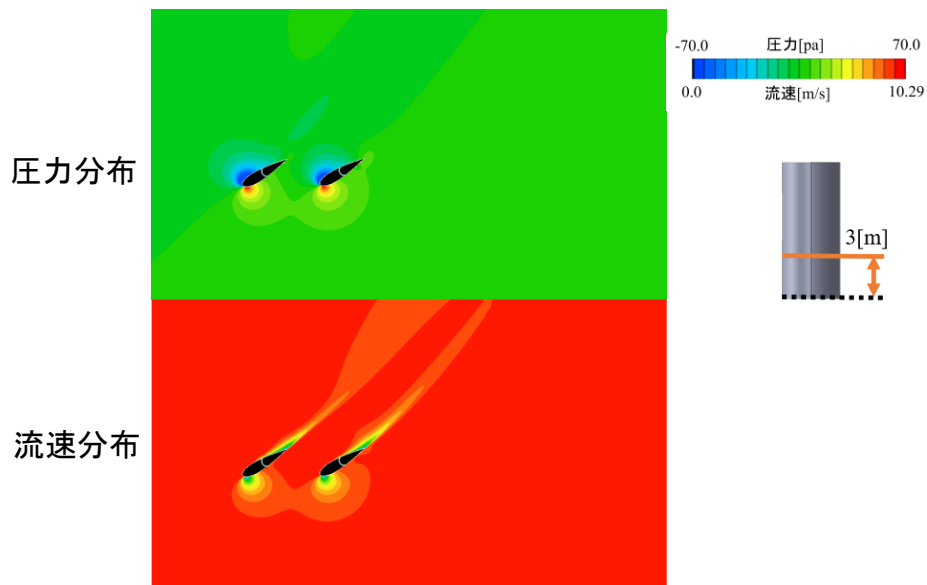


図 6.1.14 複数翼帆レイアウトの解析結果 (キャンバー角 0 [deg]、Position 1)

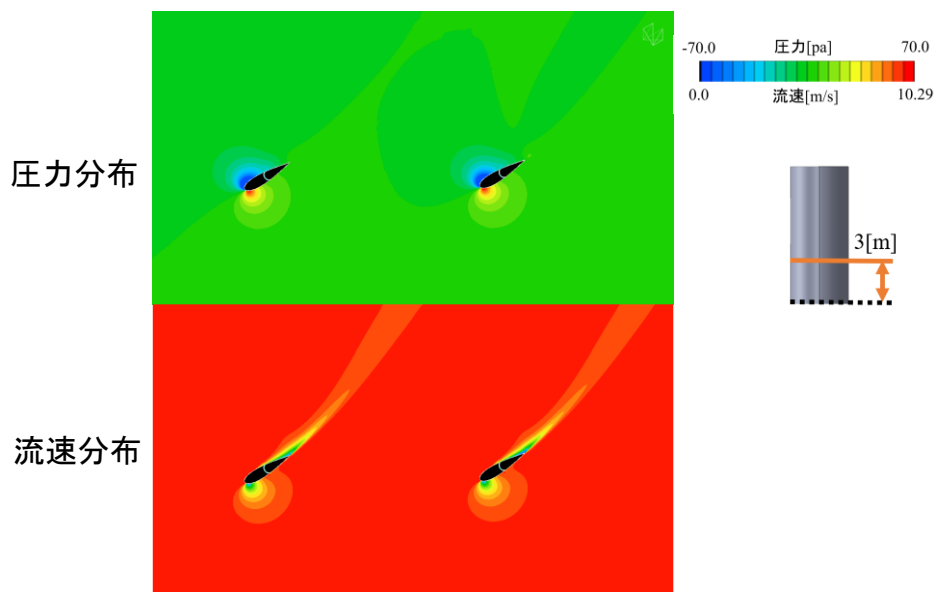


図 6.1.15 複数翼帆レイアウトの解析結果 (キャンバー角 0 [deg]、Position 2)

## 6.1.7 北米航路航行時の GHG 削減効果

### 1) 北米航路の風向風速分布

3.1.11 記載の様に、2022 年度はデータベース「JRA-25」における北太平洋航路中間点（アリューシャン列島南部）での風向・風速分布を使用し、さらに、往復の北米航路を勘案すると、風向の発生頻度は風向によらずほぼ同等になるため、風向は 360 度均一分布を採用した。2023 年度は「JRA-25」同様のデータベースである、(独) 海上技術安全研究所によりまとめられたインターネット版海象データベースを用い、北米航路全域での風向・風速分布を使用して、計算の高度化を行った。また高度化した手法を用いて、6.1.4 および 6.1.5 で示した 2 分割翼帆をオリジナルの原型 PCC 船型（図 3.2.12 参照）に 1 本配置した場合の GHG 削減効果を算定した。

### 2) 算定手法の高度化

#### ① 北米航路各点における風向風速分布

北米航路航行時の GHG 削減効果算定方法は、2022 年度においては海域上の中間点における風向風速分布から削減効果を算定する手法であったが、2023 年度はその高度化のために、風向風速分布を航路上の各点に拡張する。図 6.1.16 に北米航路における風速の頻度分布を示す。また図 6.1.17 に各 Beaufort Scale（風速を示す指標）に対応する北米航路における風向の発生頻度を示す。（北風 0 度、西風 270 度）図 6.1.16 より、Beaufort Scale が 4 程度の風況に遭遇する頻度が高いものの、それ以上の比較的荒天な風況に遭遇する頻度も大きいことがわかる。

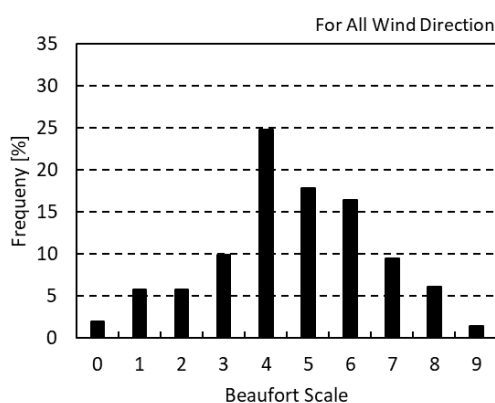


図 6.1.16 北米航路上の Beaufort scale 発生頻度分布

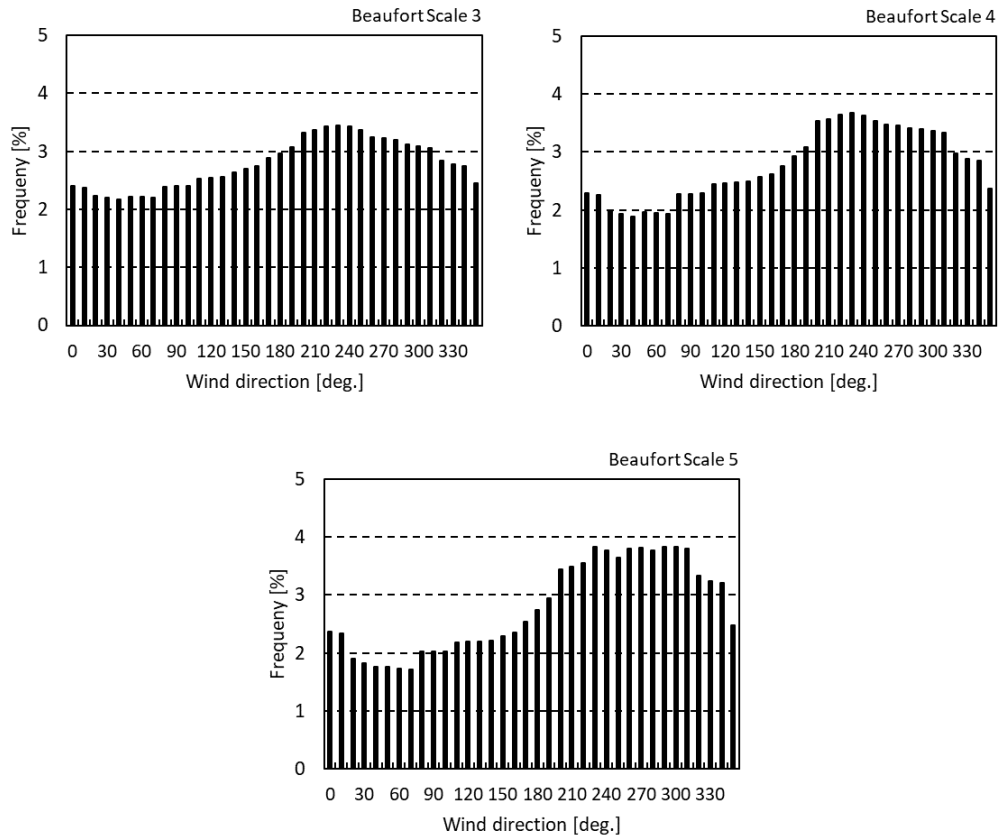


図 6.1.17 北米航路上の Beaufort Scale (BF) ごとの風向分布  
(左上 : BF 3, 右上 : BF 4, 下 : BF 5)

## ② 算定手法

計算の流れを図 6.1.18 に示す。船体に作用する平水中抵抗・風による抵抗・斜航による抵抗・当舵による抵抗を求め、前後力・横力・回頭モーメントの釣合方程式を解くことで各外乱条件下における所要馬力を算出している。得られた船速－馬力の関係を用い、各風況・風向での必要馬力を求める。その変化と北米航路上の各点における風向分布との積をとることで、風況の発現頻度を考慮した所要馬力増減の期待値を求める。



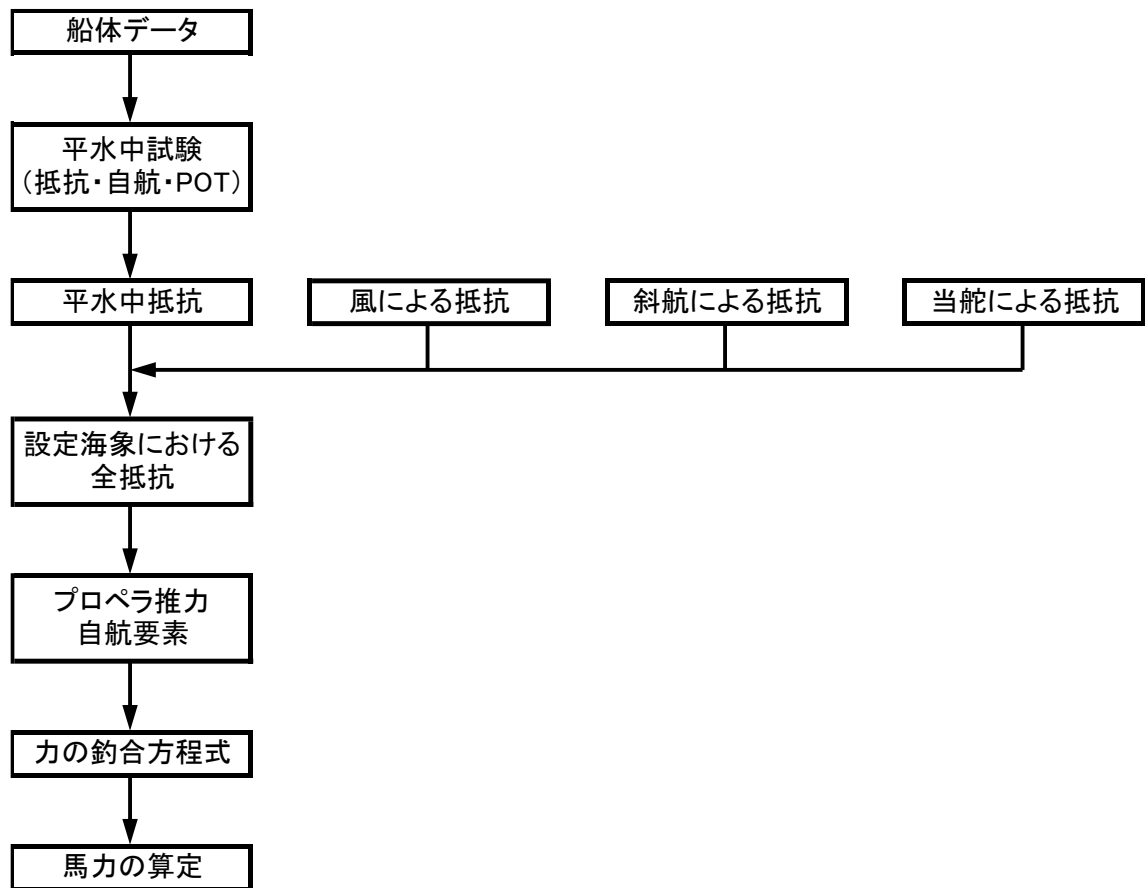


図 6.1.18 所要馬力の計算フロー

### 3) 帆による GHG 削減効果の算定

前述のように、実際の帆装による推力の発生を考えた場合、船体に対する流入風の角度（偏揺角）が大きい場合は、揚力係数が高い方が推力および揚力係数が大きくなるが、流入風の角度が小さい場合は、揚抗比が高い方が推力および揚力係数が大きくなる。そこで、6.1.4 および 6.1.5 で示した 2 分割翼帆をオリジナルの原型 PCC 船型（図 3.2.12 参照）に 1 本配置し、船体に対する流入風の角度（偏揺角）が 0 [deg] の場合は、キャンバー角、迎角とも 0 [deg] とし、流入風の偏揺角が小さい場合は、6.1.5 で評価を行った揚抗比  $C_L / C_D = 2.430$  の性能が実現できたキャンバー角：0 [deg]、迎え角：30 [deg] として、偏揺角が大きい場合は、6.1.4 で評価を行った揚力係数  $C_L = 1.335$  の性能が実現できたキャンバー角：7 [deg]、迎え角：40 [deg] として、北米航路を航行する場合（前節に示す北太平洋航路上各点での風向・風速分布を使用してシミュレーション）、翼帆による効果として GHG 排出量を往復平均で 3.8 [%] 削減できることが確認された。

なお、2022 年度に用いた、北米航路中間点での風向・風速分布を使用した手法に基づき GHG 削減量を算出すると、翼帆による効果として GHG 排出量を往復平均で 3.7 [%] 削減できることが確認された。2023 年度に高度化した手法においては、中間点以外の風向風速分布を加味できるため、より高精度に GHG 削減効果期待値を計算できていると考えられる。

#### 6.1.8 まとめ

以上のように、CFD解析を実施した結果、2分割翼帆において、 $C_L=1.335$ の性能が実現可能なことが確認できた。また、同じ形状で、キャンバー角：0 [deg]、迎え角：30 [deg]とした場合、揚抗比  $C_L/C_D=2.430$  の性能が実現できることが確認された。さらに、2枚の2分割翼帆をキャンバー角：7 [deg]、迎え角：40 [deg]で並べた複数配置（複合翼）の解析においても、平均  $C_L=1.30$  以上の空力性能が実現可能なことが確認できた。

さらに、上記の結果を基に、翼帆によるGHG排出量削減効果を評価した結果、2分割翼帆をオリジナルの原型PCC船型に1本配置し、北米航路を航行する場合、翼帆による効果としてGHG排出量を往復平均で3.8[%]削減できることが確認された。

従って、高さ10[m]以内で  $C_L=1.30$  以上の空力性能を有する翼帆を開発するという本年度の目標を達成する事ができた。

## 6.2 低風圧抵抗船型の船型およびコンテナ船小型風防カバーの詳細検討

### 6.2.1 低風圧抵抗船型の設計検討

#### 6.2.1.1 概要

低風圧抵抗船型に関し、船首部などの推進力を最大化、抵抗を最小化する形状の追求をCFD解析で行い、北米航路就航の往復平均シミュレーション結果で6.5[%]のGHG削減を目標とする。本項目については、すでに2022年度の検討において設計検討された低風圧抵抗船型が原型PCC船型に対して、北米航路就航の往復平均シミュレーション結果(3.2.1.5参照)で最大9.8[%]GHGが削減されることが確認できている。そこで2023年度はさらなる性能向上のために、デッキ上の流速をさらに加速させることができる形状の検討を実施した。

#### 6.2.1.2 対象船

対象とする船は自動車運搬船で要目を表6.2.1に示す。(表3.2.1と同一)

表 6.2.3 自動車運搬船の主要目とモデル寸法

|                               | 実船      | モデル    |
|-------------------------------|---------|--------|
| 全長 $L$ [m]                    | 190.00  | 0.9479 |
| 船幅 $B$ (mld.) [m]             | 32.20   | 0.1610 |
| 正面投影面積 $AT$ [m <sup>2</sup> ] | 924.88  | 0.0230 |
| 側面投影面積 $AL$ [m <sup>2</sup> ] | 5652.96 | 0.1407 |

#### 6.2.1.3 CFD解析

現状の低風圧抵抗船型をベースに、CFD解析による風圧抵抗低減の検討を実施した。CFD解析ツールとしては、OpenFOAMv2106を使用した。解析手法及び解析条件を以下に示す。また計算格子を図6.2.1に示す。(図3.2.1と同一)

- ✓ 解析方法 : RANS 定常解析
- ✓ 支配方程式 : 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式
- ✓ 乱流モデル :  $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) モデル
- ✓ 離散化手法 : 有限体積法
- ✓ 格子タイプ : 非構造格子
- ✓ 格子数 :  $1.5 \times 10^6$
- ✓ 流速 : 15[m/s]
- ✓ レイノルズ数 :  $1.0 \times 10^6$

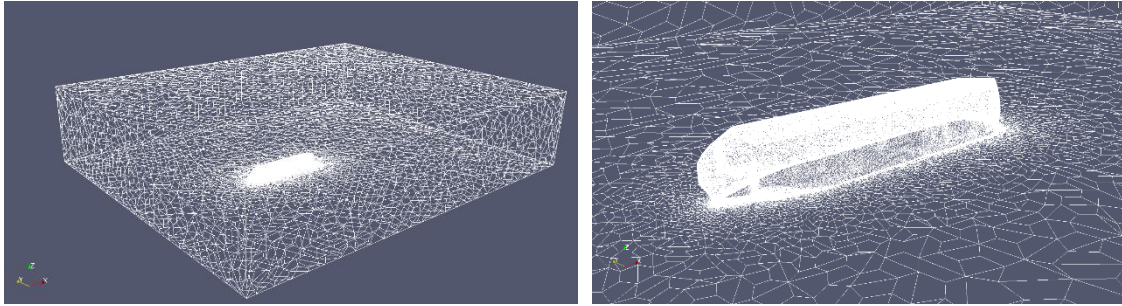


図 6.2.1 計算格子(左：領域全体，右：船体近傍)

#### 1) 使用メッシュとメッシュ仕様

メッシュは、STAR-CCM+を使用して生成を行った。STAR-CCM+はシーメンス社が開発元となる汎用の流体解析ソフトウェアであり、複雑形状でも安定したメッシュ生成が可能であることからこれを利用した。今回は計算負荷と計算安定性に優れたポリヘドラルメッシュと、船体表面近傍においては境界層付近の流れを解析できるようレイヤーメッシュを組み合わせ使用した。

#### 2) 解析仕様

解析は流体を密度一定の空気とし定常解析で実施した。流体解析に用いる計算ツール(ソルバー)についてはポテンシャル計算 (potentialFoam) により初期流場を計算し、その後粘性解析ソルバ (simpleFoam) を用いて計算を行った。収束判定基準は最大ステップ数 4000 を基本とし、風圧力特性 (抵抗係数、横力係数、ヨーモーメント係数) がほぼ一定となるまで計算をおこなった。

#### 3) 物性値

空気の物性値は動粘性係数として、 $1.56659207 \times 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>/s] と設定した。

#### 4) 境界条件

図 6.2.2 に示すように、境界条件を設定した。(図 3.2.2 と同一)

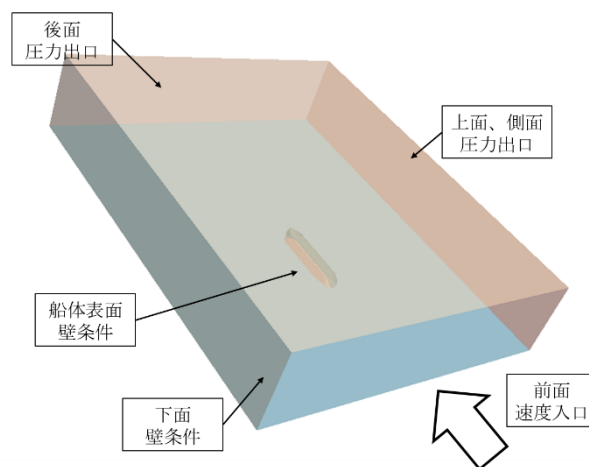


図 6.2.2 境界条件

#### 6.2.1.4 風圧抵抗低減船型の検討

2022 年度で検討を行った結果を基に、CFD 計算結果をさらに解析考察することで船体および風防の改良形状について検討を行った。特に船体と翼との最適配置位置を検討するため、船体周りの流場に関する干渉影響について考察を行った。

図 6.2.3 に、甲板上における風速がより加速される船型を示す。また、それに対する甲板上の風速分布を図 6.2.4 に示す。図中の緑線が甲板上前端、赤線が甲板上前端から 40[m]の位置で、黒線が船体中心を示している。風速分布は図 6.2.5 に示すように、甲板上に設置した帆の高さ方向中央位置(甲板から高さ方向 5[m])となる断面のものである。風向 30[deg]、風向 60[deg]において昨年度報告船型と比較して、甲板上増速船型は船首部前端～前端から 40[m]位置において、平均約 2.5[%]程度の増速効果がある。これはこの位置における帆の推力が約 5[%]大きくなることに相当する。

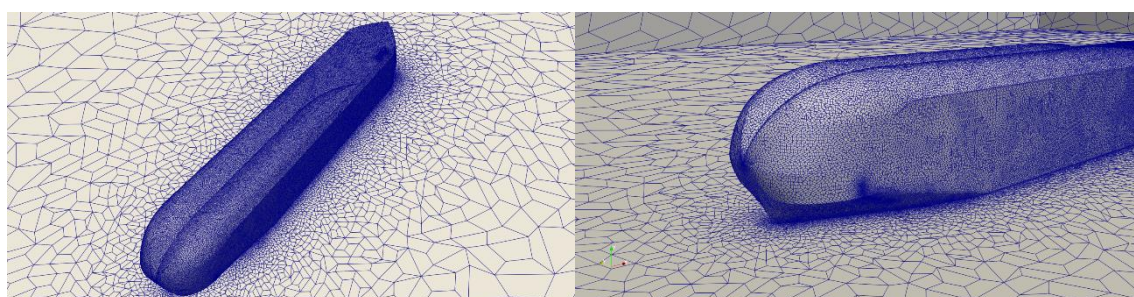


図 6.2.3 甲板上増速船型

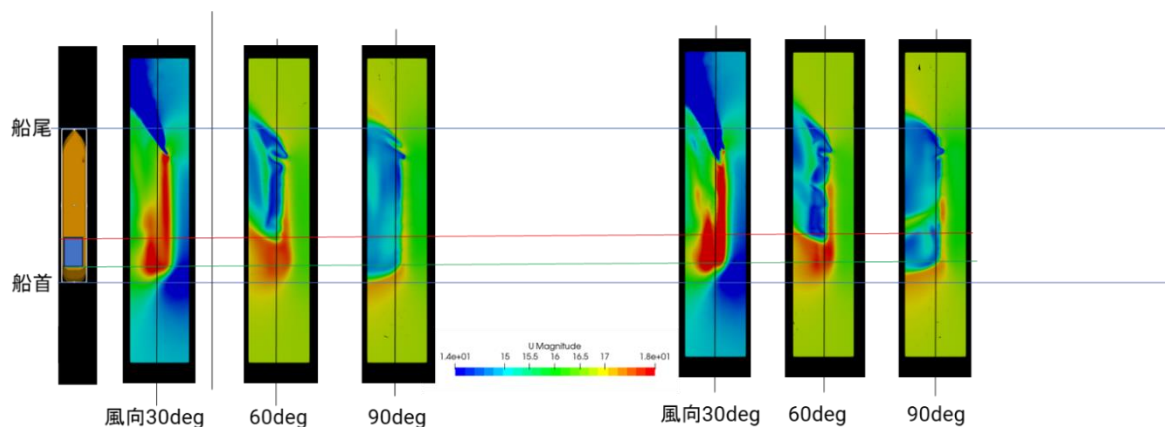


図 6.2.4 甲板上速度分布(左：昨年度報告船型 右：甲板上増速船型)

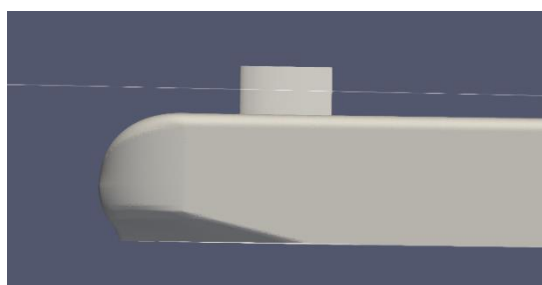


図 6.2.5 風速分布描画位置

## 6.2.2 コンテナ船小型風防カバーの検討

### 6.2.2.1 概要

コンテナ船の小型風防カバーについても上記応用として形状を開発し、CFD解析で性能確認する。2023年度はさらなる抵抗低減について、2022年度に行ったCFD解析結果をもとに改良する。正面抵抗係数  $Cfx$  を相対風向 0(向風)～60度の平均でオリジナルの20[%]削減を目標とする。

2022年度の検討の結果、改良検討されたコンテナ船の小型風防カバー(小型風防形状2)が風防無しと比較して、相対風向 0(向風)～60[deg]の平均で抵抗低減率 16.1[%]となり、ダミーコンテナを搭載した場合には平均抵抗低減率 26.8[%]になることが確認できている。従って、風防無しと比較して、正面抵抗係数  $Cfx$  を相対風向 0(向風)～60度の平均でオリジナルの20[%]削減という目標は達成できている。そこで2023年度の検討では、コンテナ船船首部のコンテナ上方に設置したダミーコンテナを用いない場合においても、正面抵抗係数  $Cfx$  を相対風向 0(向風)～60度の平均でオリジナルの20[%]削減を達成するために、風防形状の改良と小型化を目指し、CFDで風防形状の検討を実施した。すなわち、コスト的により現実的な風防形状で20[%]削減可能な風防形状の検討を実施した。

### 6.2.2.2 対象船

対象船とする船の要目を表 6.2.2 に示す。(表 3.2.5 と同一) 風防無し、標準風防設置時および2022年度検討の改良型風防(小型風防とダミーコンテナの組み合わせ)の船型を図 6.2.6～図 6.2.8 に示す。(図 6.2.6、6.2.7 はそれぞれ図 3.2.14、3.2.15 と同一)

表 6.2.2 コンテナ船主要目とモデル寸法

|                               | 実船       | モデル    |
|-------------------------------|----------|--------|
| 全長 $L$ [m]                    | 383.00   | 1.0000 |
| 船幅 $B$ (mld.) [m]             | 58.80    | 0.1540 |
| 正面投影面積 $AT$ [m <sup>2</sup> ] | 3138.00  | 0.0214 |
| 側面投影面積 $AL$ [m <sup>2</sup> ] | 17796.00 | 0.1213 |

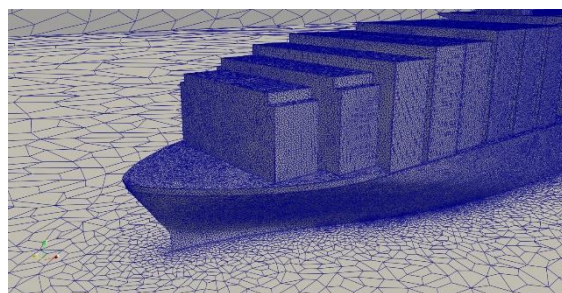


図 6.2.6 現コンテナ船型(風防無し)

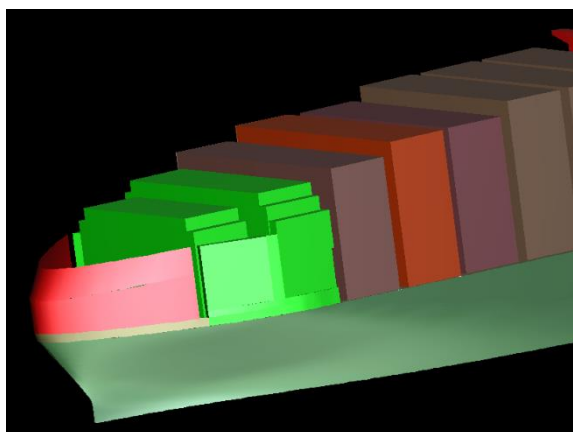


図 6.2.7 標準風防

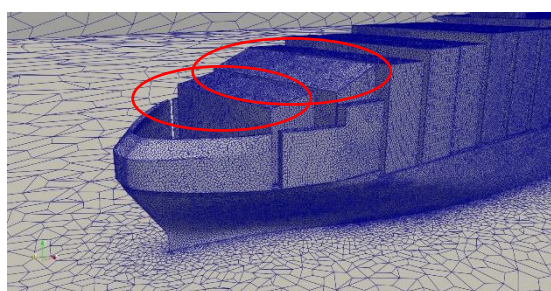


図 6.2.8 2022 年度検討の改良型風防  
(小型風防とダミーコンテナ (赤丸部) の組み合わせ)

### 6.2.2.3 CFD 解析

現状の低風圧抵抗船型をベースに、CFD 解析による風圧抵抗低減の検討を実施した。

CFD 解析ツールとしては、低風圧抵抗船型と同様に OpenFOAMv2106 を使用した。解析手法と解析条件を以下に示す。また計算格子を図 6.2.9 に示す。

- ✓ 解析方法 : RANS 定常解析
- ✓ 支配方程式 : 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式
- ✓ 乱流モデル :  $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) モデル
- ✓ 離散化手法 : 有限体積法
- ✓ 格子タイプ : 非構造格子
- ✓ 格子数 :  $3.8 \times 10^6$
- ✓ 流速 : 15[m/s]
- ✓ レイノルズ数 :  $1.0 \times 10^6$

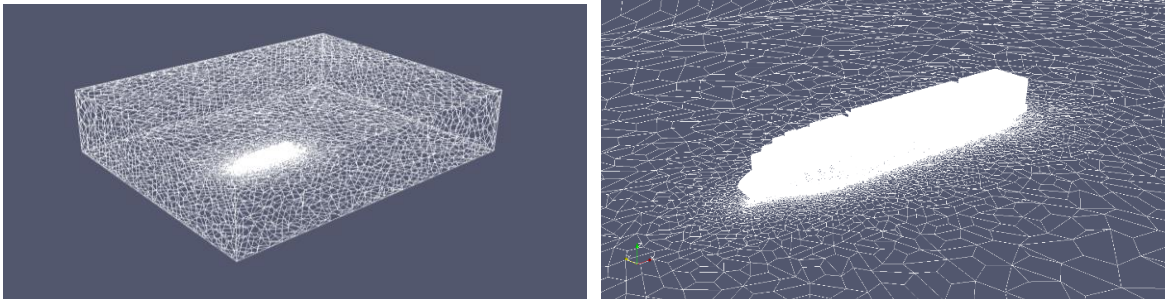


図 6.2.9 計算格子(左：領域全体，右：船体近傍)

1) 使用メッシュとメッシュ仕様

解析メッシュの構成は 6.2.1 と同様の設定とし、STAR-CCM+を使用してメッシュ作成を行った。

2) 解析仕様

6.2.1 と同様に設定した。

3) 物性値

6.2.1 と同様に設定した。

4) 境界条件

6.2.1 と同様に設定した。

6.2.2.4 風圧抵抗低減風防形状の検討

以下、検討した風防形状を図 6.2.10 に示す。

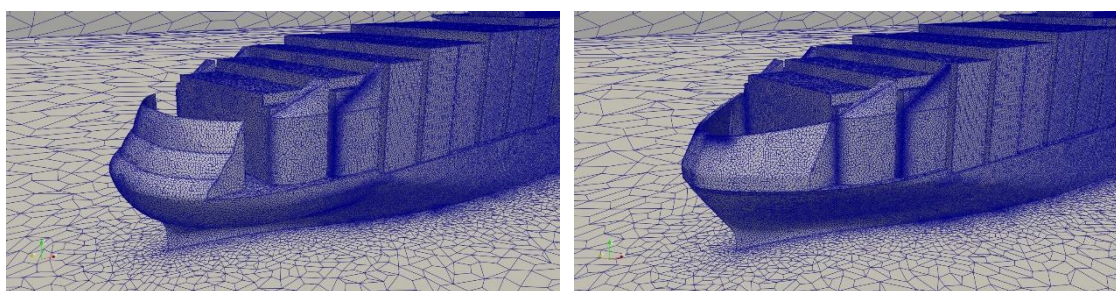
6) 平均抵抗低減率 20[%]を目標とした風防形状の検討（風防形状 2）

まず、船首コンテナ上部に設置したダミーコンテナがない場合においても、目標とした平均抵抗低減率 20[%]を達成するような風防形状を選定した。CFD 計算で相対風向 0~60[deg]において、風防無しと比較して、平均抵抗低減率 23.2 [%]となった。

2) 平均抵抗低減率 20[%]を目標とした小型風防形状の検討（小型風防形状 3）

1)の風防形状を小型化した。正面風防形状および側面風防形状を改良し小型化することで、風防無しと比較して、平均抵抗低減率は 23.3[%]となり、目標とする平均抵抗低減率 20[%]を達成した。





(風防形状 2)

(小型風防形状 3)

図 6.2.10 風防形状

#### 6.2.2.5 CFD 解析結果

各風防形状の抵抗改善率を表 6.2.3 に示す。また風防無しと再検討した小型風防について、図 6.2. に風向 0[deg]に対する風速分布および圧力分布、図 6.2. に風向 30[deg]に対する風速分布および圧力分布、図 6.2. に風向 60[deg]に対する風速分布および圧力分布を示す。風速分布は図 6.2. に示す断面のものである。流速分布から、船首付近(図中の黒円)を比較すると、風防なしに比べ、小型風防形状 3 の方は、流れの剥離が抑えられていることがわかる。圧力分布から、小型風防形状 3 は風防無しと比較して、風防の曲面により圧力の船体正面方向成分が小さくなり、抵抗が小さくなっていると考えられる。

表 6.2.3 抵抗改善率

| 原船型0degCFXを基準(100)とした抵抗 [%] |       |               |       |         |
|-----------------------------|-------|---------------|-------|---------|
| 風向 [deg]                    | 原船型   | 昨年度報告<br>風防形状 | 風防形状2 | 小型風防形状3 |
| 0                           | 100.0 | 94.7          | 87.1  | 90.2    |
| 30                          | 224.9 | 206.2         | 199.6 | 193.0   |
| 60                          | 128.9 | 104.6         | 97.7  | 100.8   |
| 平均低減改善率 [%]                 |       | 16.1          | 23.2  | 23.3    |

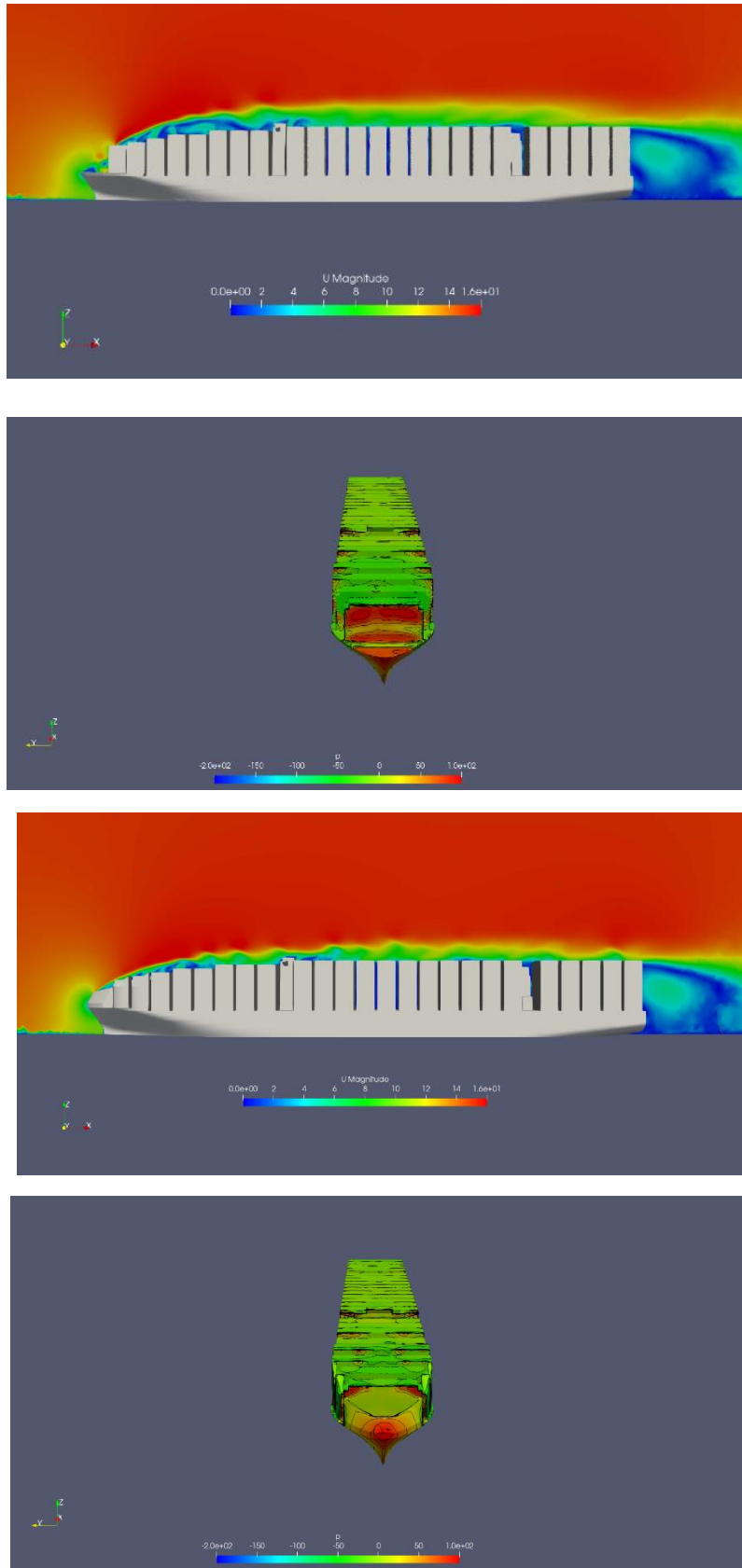


図 6.2.11 船体中央面流速分布及び圧力分布  
(風向 0[deg]、上 2 段：風防無し、下 2 段：小型風防形状 3)

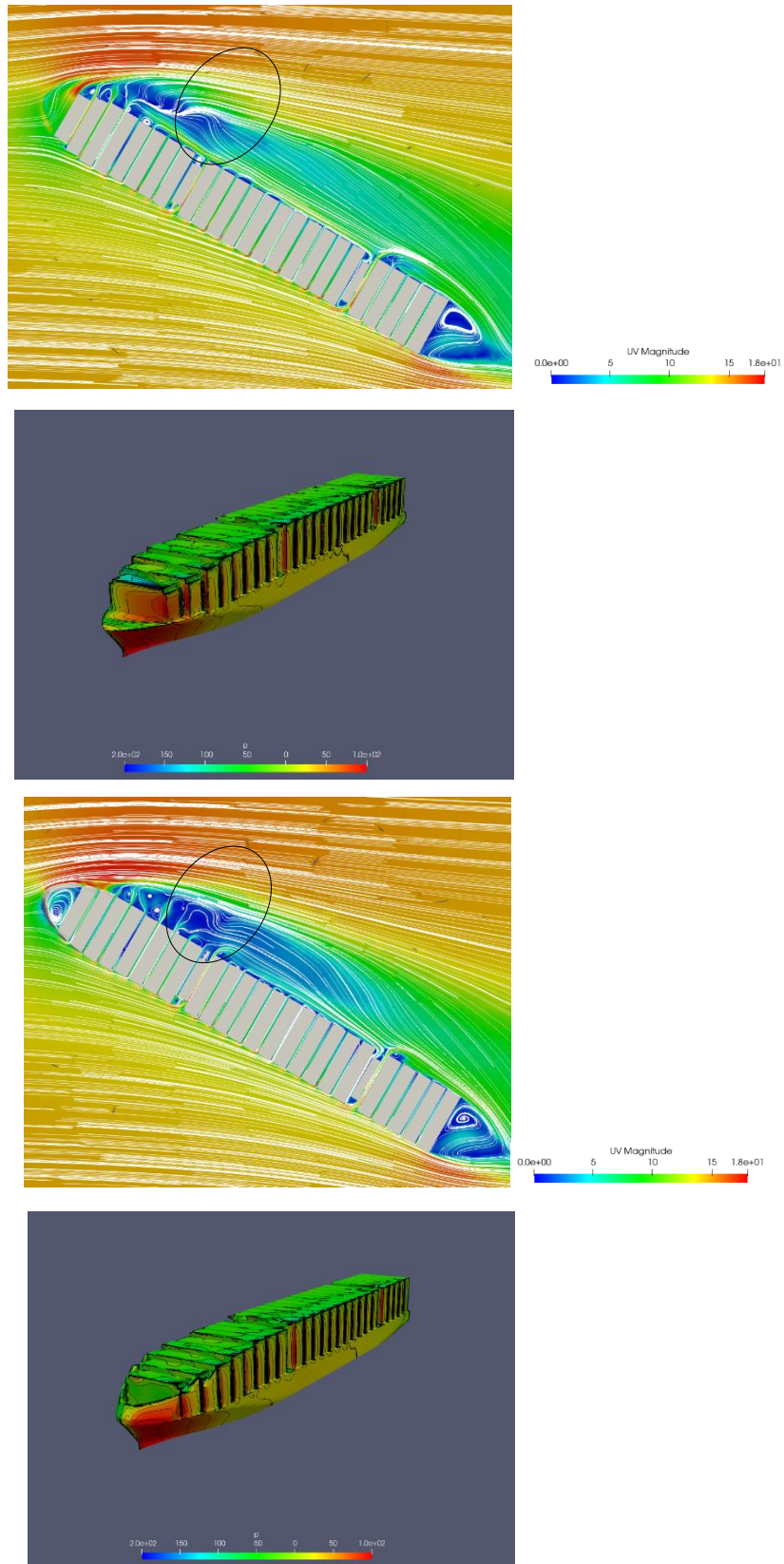


図 6.2.12 船体中央面流速分布及び圧力分布  
 (風向 30[deg]、上 2 段：風防無し、下 2 段：小型風防形状 3)

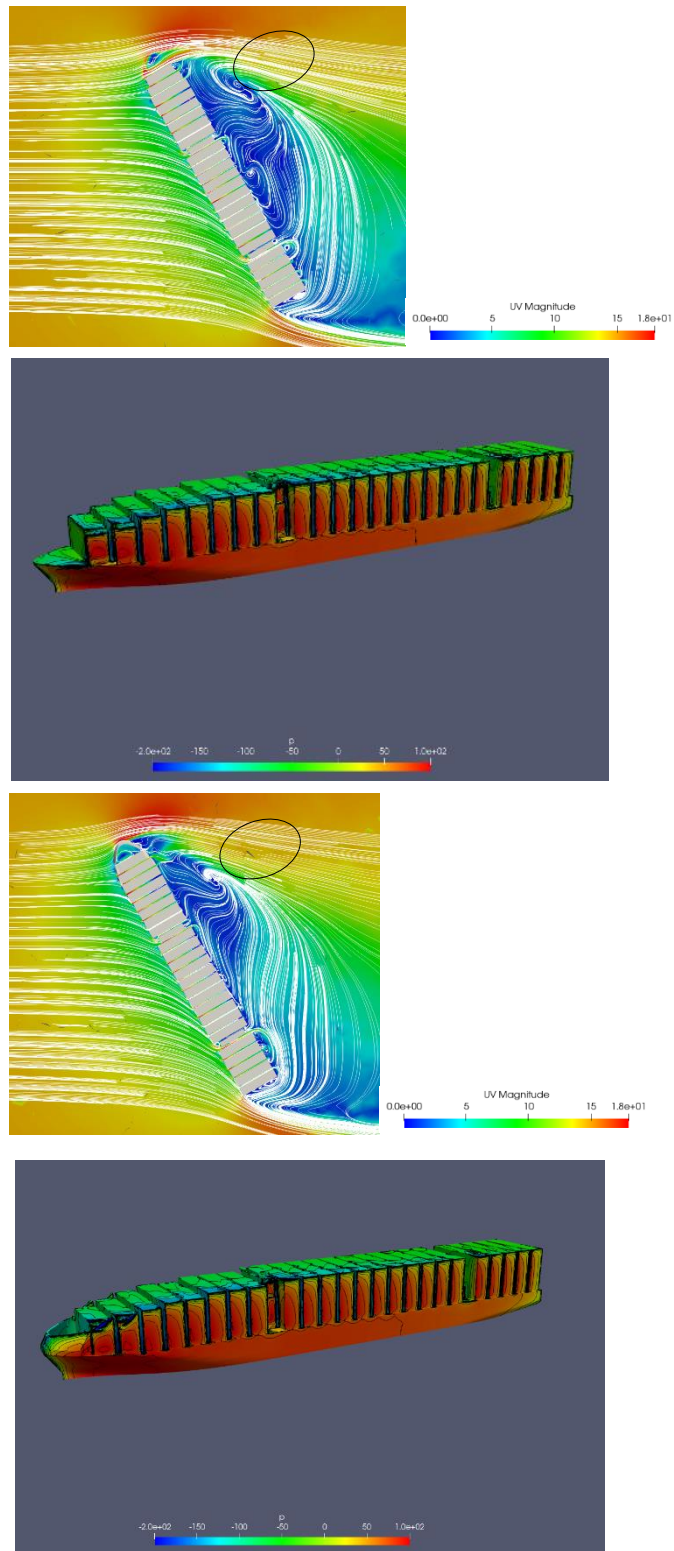


図 6.2.13 船体中央面流速分布及び圧力分布  
(風向 60[deg]、上 2 段：風防無し、下 2 段：小型風防形状 3)

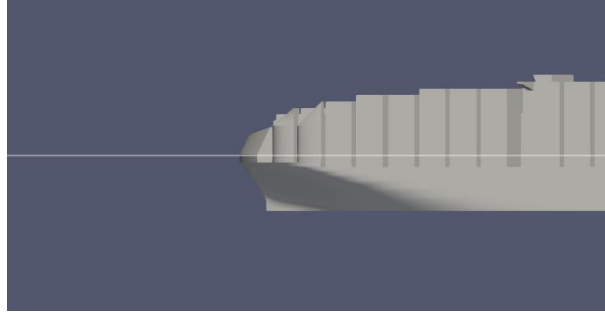


図 6.2.14 風速分布描画位置

#### 6.2.2.6 小型風防カバーによる GHG 削減効果の算定

6.1.7 に示す手法を用いることで、北米航路上の各点における風況頻度を考慮したうえで、GHG 削減効果の試算を行うことが可能である。小型風防カバーを搭載していないコンテナ船を基準にとり、小型風防カバーを搭載した場合における GHG 削減効果の推定結果を表 6.2.4 に示す。結果として、小型風防カバーによる GHG 削減効果は約 3.1[%]になり、目標である 3[%]を達成している。なお同表 6.2.4 に、2022 年度に用いた、北米航路中間点での風向・風速分布を使用した手法に基づき GHG 削減量を併記している。2023 年度に高度化した手法においては、中間点以外の風向風速分布を加味できるため、より高精度に GHG 削減効果期待値を計算できていると考えられる。

表 6.2.4 GHG 削減効果の算定

|              | GHG削減効果 [%]   |              |
|--------------|---------------|--------------|
|              | (2023年度高度化手法) | (2022年度従来手法) |
| 小型風防カバーによる効果 | 3.1           | 2.3          |

#### 6.2.2.7 まとめ

CFD 解析を実施した結果、改良検討されたコンテナ船の小型風防カバー(小型風防形状 3)が風防無しと比較して、相対風向 0 (向風) ~60[deg]の平均で抵抗低減率 23.3[%]となることが確認できた。また、小型風防カバーは北米航路航行時に 3.1[%]の GHG を削減することが確認できた。従って、風防無しと比較して平均抵抗低減率 20[%]以上で、北米航路航行時に平均 3[%]の GHG 削減を実現可能な機器を開発するという目標を達成する事ができた。

### 6.3 低風圧抵抗船型の船体と単独翼・複合翼システムの詳細検討

#### 6.3.1 概要

2022 年度に実施した CFD 計算および風洞試験結果を反映し、低風圧抵抗船型の船体と単独翼・複合翼システムのマッチングを確認し、相互の影響を最適にするような組み合わせを追求する。2023 年度の性能の目標は、北米航路航行時平均 15[%]以上の GHG 削減とする。

2022 年度に実施した風洞試験の結果、船体と翼帆を合わせた「低風圧抵抗船型と風力活用による翼」を備えた船体として、帆 2 枚配置条件で北米航路平均燃費改善率 16.2[%] (3.1.11 記載の北米航路シミュレーション参照)、さらに帆 4 枚配置条件で北米航路平均燃費改善率 18.7[%]となることが確認できている(同 3.1.11 記載の北米航路シミュレーション参照)。従って、2023 年度の目標北米航路平均燃費改善率 15[%]以上、という目標を達成できている。

6.1.7 と同様に、2023 年度は北米航路全域での風向・風速分布を使用して、計算の高度化を行った。また高度化した手法を用いて、6.1 で開発した改良型分割帆と、6.2 で開発した改良型船体との組み合わせにより得られる GHG 削減効果を算定した。

#### 6.3.2 船体及び翼帆による GHG 削減効果の算定

6.1.7 に示す手法を用いることで、北米航路上の各点における風況頻度を考慮したうえで、GHG 削減効果の試算を行うことが可能である。対象とした船型は以下の通りである。

- ① 船体は 2022 年度風洞試験における H03 船型で、翼帆を 1 枚搭載
- ② 船体は 6.2.2 に示す甲板上流速増速船型で、6.1 に示す改良型翼帆を 1 枚搭載

それぞれの GHG 削減効果の推定結果を表 6.3.1 に示す。ここで、①については、船体と帆のシステムとしての GHG 削減効果の目標である 15[%]を達成している。さらに船体及び帆を改良し②の組み合わせとすることで、GHG 削減効果が上積みされ、さらなる性能改善の可能性が示された。なお同表 6.3.1 に、2022 年度に用いた、北米航路中間点での風向・風速分布を使用した手法に基づき GHG 削減量を併記している。2023 年度に高度化した手法においては、中間点以外の風向風速分布を加味できるため、より高精度に GHG 削減効果期待値を計算できていると考えられる。

表 6.3.1 GHG 削減効果の算定

|              | GHG削減効果 [%]   |              |
|--------------|---------------|--------------|
|              | (2023年度高度化手法) | (2022年度従来手法) |
| ①船体+翼帆(H03)  | 15.9          | 13.8         |
| ②改良型船体+改良型翼帆 | 16.8          | 15.7         |

### 6.3.3 まとめ

北米航路航行時の GHG 削減効果の算定手法について、海域上の 1 点における風向風速分布から削減効果を算定する従来評価手法を高度化し、北米航路上の各点における風向風速分布に基づく GHG 削減効果算定手法を開発した。また開発した手法を用い、6.1 で開発した改良型分割帆と、6.2 で開発した改良型船体との組み合わせにより得られる GHG 削減効果を算定した。その結果、北米航路航行時平均 15[%]以上の GHG 削減目標に対し、船体と帆 1 枚の組み合わせにて GHG 削減効果が 15.9[%]、改良型船体と改良型帆の組み合わせにて GHG 削減効果が 16.8[%]となり、目標を達成していることを確認した。

## 6.4 プロトタイプモデル製作

### 6.4.1 翼帆の試設計（構造強度）

高い乾舷を持つ船に搭載する翼帆として、受ける風圧や発生する高揚力に対して満足する強度を有するとともに、特殊翼形状による、風の整流・揚力効果を発揮する、高性能かつ軽量／低コスト化を両立する構造の実現を目的とする。

大きな発生揚力による安定した推進力を維持し翼の空力特性を安定させるために、常に最適な翼形状の保持は必要であり、翼構造体には強い剛性と構造形態が求められるため、帆船のような布帆ではなく、翼帆を採用する。

翼帆に使用する素材は、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）やGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）、アルミニウム等も考えられたが、大型の構造物において連続かつ平滑な表面を実現するには、加工が容易であること、さらに安価で強い剛性が得られることから、本件では鋼鉄製を採用する。

尚、本研究のコンセプトは、船体に受けた風を加速させ上甲板に流し込み、設置された背の低い小型の翼帆に推進力を発生させることであり、伸縮機能はもたせず、翼帆の作動角可動部機構は最小限として信頼性をあげることを念頭に、試設計を行なっている。

#### (1) 設計条件

翼帆に対する基本的設計要件としては、前述のとおり、以下とする。

##### 設計前提

- ・高さ：風利用船型（Ishin 船型）の上甲板までの水面上高さを考慮し、その上甲板上に搭載される現実的かつ効率的な高さの翼帆とし、10[m]を条件とした。
- ・翼弦長：現実的かつ、効率的に風を受け整流できる長さとし、20[m]を条件とした。
- ・構造：鋼材を材料とした、受ける風を整流し揚力を発生させるための連続的で平滑な翼帆表面を実現する、前後2分割の構造体。
- ・重量：造船所における搭載工事に支障のない重量（～50[t]程度）
- ・翼帆の旋回角度：本開発で研究した相対風向を前提とし、前翼±90[deg]、後翼±10[deg]（フラップ角）とする。

翼帆に対する基本的機能としては、以下が挙げられる。

- ① 発生する揚力を船体へ効果的に前進力として確実に（強度的に問題なく）伝達する架台部強度を確保すること
- ② 停泊時、港内操船時、暴風雨時に邪魔にならないこと  
(船橋からの視界／航海灯・レーダの死角に影響しないこと、暴風雨時等でも損傷しない強度を有していること)
- ③ 帆の操作性および保守を最小とすること

構造上の設計条件としては、以下のガイドラインを遵守した。



## (2) 構造試設計

翼型断面形状は、前述のとおり、単独翼 NACA0021 を採用し、左右対称翼として、2分割翼（キャンバー付き）にて、以下の寸法にて試設計を実施した。

翼弦長に対する厚さ比は約 20[%]（翼厚 4.21[m]）の厚翼として、迎え角を大きくしても背面からの剥離が起こりにくい形状としている。

機能要件①に対し、翼構造は、想定する運行上の風荷重（当該ガイドラインにおける“設計荷重ケース 1”に相当する設計風速による荷重）に、船体運動によって発生する加速度や船体傾斜を加味した動揺荷重に対する力学的モーメントの各成分に対し 1 次構造材として機能し、また、後翼は、ねじりモーメントの発生を最小とするよう上下に旋回駆動機構を設け、翼全体のねじりモーメントに対しては、前翼のフレームおよび軸構造で負担し旋回環へ伝達する機構としている。

前後翼とも、ブレース&トラス構造で構成して軸機構に連結し、また座屈強度および疲労強度の面からも強度を満足する構造とした。翼の受風空力中心と前翼の旋回中心をできるだけ近づけて発生応力が最小となる配置とし、2分割翼の隙間部効果に寄与する翼端板を前翼の天板構造と一体化して軽量化を図っている。

強度検討の結果、当該翼帆装置の総重量が約 40[t]に収まる見込みを得た。

前述に記載の失速する迎角（失速角）が 35[deg]であることも考慮し、可動範囲として、全翼を±90[deg]、後翼のキャンバー角の操作を±10[deg]とした。

突風発生に伴う風荷重の瞬時変動等に対しては、油圧制御における保護機構にて対応する。

機能要件②に対し、当該ガイドラインにおける“荷重ケース 2”として航行中の強風を想定した最大設計風速 51.5[m/s]の風荷重条件に、船体運動による荷重を加味し、各部材に発生する組み合わせ荷重に対する強度を求め、同じく当該ガイドラインに記載の安全率を確保した構造強度を実現している。

原則、時化時（暴風雨時）等においては、揚力最小モードとして、船体から加速してくる風の影響が最小とする迎角位置にて停止（原則 船長方向向き）／固定して、その位置で翼を畳むことなく、基部に発生する荷重やモーメントを保持する構造としている。

当該の停止位置においては、停泊時の保持にも流用するものとして、翼重量を保持する支持架台を設置する。

当該の揚力最小モードは、無風時等で翼揚力の発生が期待できない状態に対する迎角を調整にも流用する。

船橋からの視界／航海灯・レーダの死角への影響や橋下通過時の高さ制限等に対して、翼帆は船体の船尾マストより低く位置し、翼の折り畳みをする事のない翼高さを

設定している。

設計条件③に対し、防錆対策として翼帆構造をほぼ閉囲構造とし、駆動機構も内部に収めることで、メンテナンス性を向上させている。

以上の結果として、試設計図を以下に示す。

図 6.4.1 全体配置図（中央断面図）

図 6.4.2 前翼 基本構造図

図 6.4.3 後翼 基本構造図

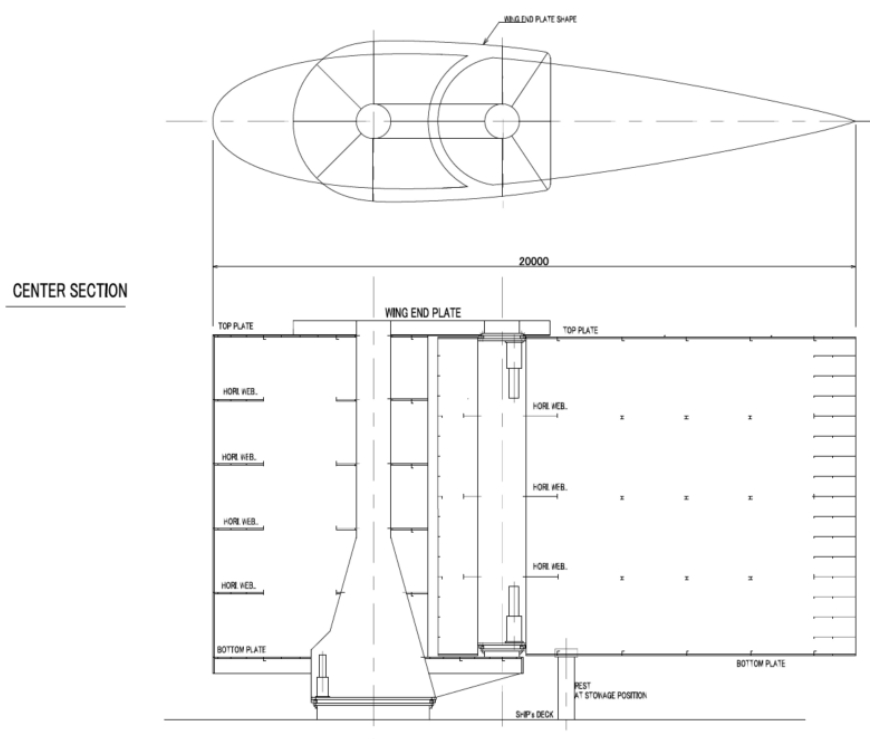


図 6.4.1 全体配置図（中央断面図）

|      |                               |
|------|-------------------------------|
| 翼高さ  | 約 10.0[m]                     |
| 翼弦長  | 約 20.0[m]                     |
| 翼厚   | 約 4.0[m]                      |
| 材質   | 鋼製                            |
| 重量   | 約 40[t]                       |
| 旋回角度 | 全翼 ±90[deg]／後翼（フラップ角）±10[deg] |

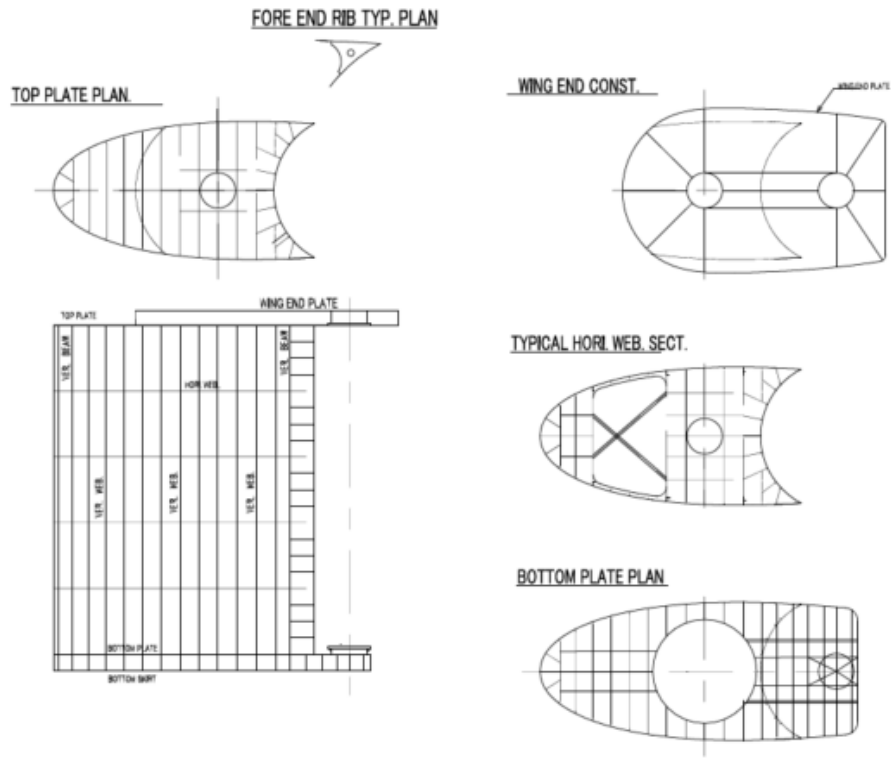


图 6.4.2 前翼 基本构造图

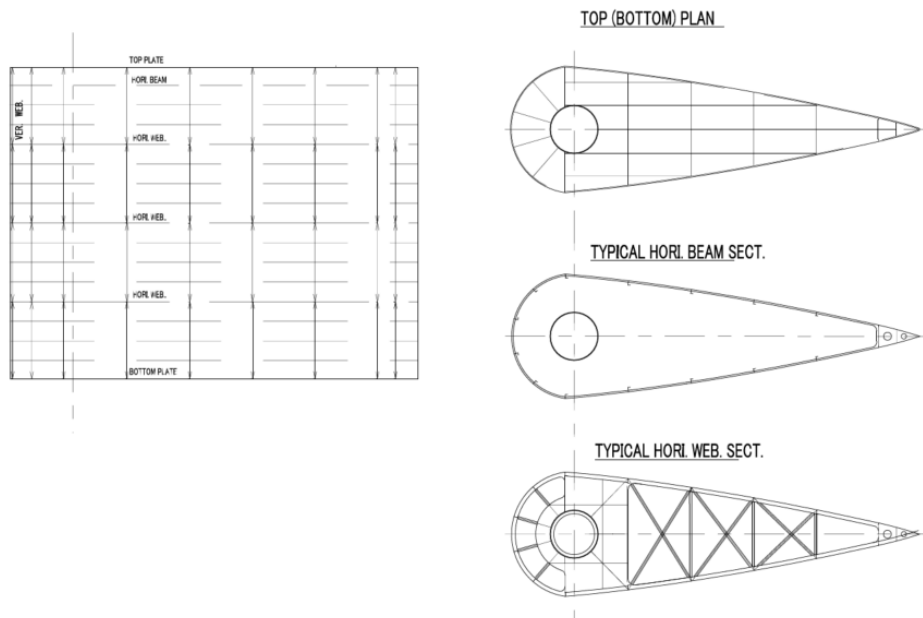


图 6.4.3 後翼 基本构造图

## 6.4.2 プロトタイプモデル製作

### 1) 模型仕様

上記 6.4.1 における試設計結果を踏まえ、システムのプロトタイプモデルの作成を行った。実機と模型のスケール比は 100 分の 1 と設定した。また、プロトタイプモデルの可搬性を考慮し、一方で本製品開発における重要な要素である船首形状および甲板上の帆をモデルとして再現すべく、船体前半部を対象にモデル化を行った。さらに、甲板上での帆の稼働イメージを把握するために、帆は 2 分割翼とし、帆全体及び帆後半部がそれぞれモーターにより可動できる形式とした。

### 2) プロトタイプモデル模型

図 6.4.4 に模型の全体写真を示す。また、図 6.4.5 に帆の稼働イメージを示す。模型は船体部分が全長 1m となっており、可動翼は 1 枚当たりコード長さ 0.2m、高さ 0.1m となっている。



図 6.4.4 プロトタイプモデル全景（上：左舷前方から、下：左舷側面から）



図 6.4.5 プロタイプモデル、帆の稼働イメージ  
(上：翼後半部キャンバーなし、下：翼後半部キャンバーあり)

### 3) 製品化における課題

上記構造検討及びプロタイプモデル製造を通して、製品化における課題として以下を上げることができる。

#### ① 揚力最小モード制御の実現

暴風雨時等荒れた海象や、無風時等で翼揚力の発生が期待できない状態に対する、翼帆の揚力最小モードの制御の実現が必要である。具体的には、船体による加速風の影響が最小となる迎角位置に帆を保持する応答制御を策定する必要がある。

#### ② 帆と甲板とのクリアランスの確保

停止時の点検・修理及び稼働中の翼旋回に対する安全性を考慮した、後翼下端から船体上設置甲板上からのクリア高さの策定が必要である。

なお、事業計画書において「設計した帆のシステムのプロタイプを製作し、製品化における課題を明らかにすると共に、要すれば見直しを行い、設計をブラッシュアップさせる。」旨記載した。課題は上記の通りであるが、見直しの必要性はなかった。

## 7. 2023 年度の目標の達成状況

## 7.1 2023 年度の目標の達成度

本事業の最終目標は以下の 1)～3)に記載した通りである。

- 1) 実装・製品化に向けコンセプト設計を完成し、船体と翼合わせて、北米航路航行時に平均 15[%]以上の GHG を削減する。
- 2) 高効率（揚力係数  $CL1.3$  以上）の単独翼・複合翼を開発する。
- 3) コンテナ船の小型風防カバーで、正面抵抗係数  $C_{fx}$  を相対風向 0（向風）～60 度の平均でオリジナルの 20[%]削減を達成し、北米航路航行時に平均 3[%]の GHG を削減する。

6 章に記載した CFD 解析の結果のように、以下の 1)～3)に記載した通りに全ての目標を達成したことを確認した。

- 1) 翼帆及び低風圧抵抗船型の性能面の検討に加え、翼帆の構造設計を実施し、実装・製品化に向けコンセプト設計を完成させた。また、北米航路航行時の GHG 削減効果の従来評価手法を高度化し、実測データに基づく GHG 削減効果算定手法を開発し、改良型船体と改良型帆 1 枚の組み合わせにて GHG 削減効果が 16.8[%]となることを確認できた。
- 2) CFD 解析を実施した結果、2 分割翼帆において、 $CL=1.335$  の性能が実現可能なことが確認できた。
- 3) コンテナ船小型風防カバーで正面抵抗係数  $C_{fx}$  を相対風向 0（向風）～60 度の平均でオリジナルの 23.3[%]削減することを確認できた。また、北米航路航行時に平均 3[%]以上の GHG を削減できた。

## 7.2 2023 年度の目標の達成度に関する考察

7.1 節に記載の通りに 2023 年度の目標をすべて達成した。また、プロトタイプモデルの製作を通じて、本システムの製品化に向けた検討を進められている。今後の製品化と実証において、製造と施工の観点から設計にフィードバックがなされると想定されるが、高効率で軽量な信頼性の高い帆の実現に向けての素案を作成できたと評価する。

## 8. 2023 年度の実施内容の概要

### 1) CFD 解析による単独翼・複合翼の性能向上の検討

2022 年度に実施した CFD 解析及び風洞試験結果を反映して、さらに高効率の単独翼および複合翼を開発し、CFD 解析を実施した結果、2 分割翼帆において、 $CL=1.335$  の性能が実現可能なことが確認できた。

### 2) 低風圧抵抗船型の船型およびコンテナ船小型風防カバーの詳細検討

低風圧抵抗船型の船型およびコンテナ船小型風防カバーのさらなる抵抗低減について、2022 年度に行った CFD 解析結果をもとに改良し、正面抵抗係数  $C_{fx}$  を相対風向 0（向風）～60 度の平均でオリジナルの 23.3[%]削減することを確認できた。

### 3) 低風圧抵抗船型の船体と単独翼・複合翼システムの詳細検討

2022 年度に実施した CFD 計算の結果、4 枚帆配置条件で北米航路航行時平均 18.7[%] の GHG 削減を確認していた。2023 年度は北米航路航行時の GHG 削減効果の従来評価手法を高度化し、実測データに基づく GHG 削減効果算定手法を開発し、改良型船体と改良型帆 1 枚の組み合わせにて GHG 削減効果が 16.8[%]となることを確認できた。

### 4) プロトタイプモデル作成

1) から 3) で実施した最適形状を考慮し、ClassNK のガイドラインを遵守して、信頼性の高い軽量で高揚力な帆の試設計を行った。さらに、設計した帆のシステムのプロトタイプモデルを製作し、製品化における課題を明らかにした。

### 5) 報告書作成

事業内容に基づき、最終の成果報告書を作成した。

## 9. 今後の予定

本研究開発は2022-2023年度の2年間で、2.1に示す「本事業の最終目標」を満足する下記のコンセプト設計を完了することが出来た。

- ・低アスペクト比翼帆を組み合わせた低風圧抵抗船型
- ・2万TEUクラスの超大型コンテナ船向け小型風防

「低アスペクト比翼帆を組み合わせた低風圧抵抗船型」については、製品として、シンプルで低コスト、信頼性が高く、かつ効率に優れた製品の開発を目指しており、本開発事業においてその目標を満足させる、船体形状のコンセプト設計、およびそれに組み合わせる翼帆の設計が完成した。

今後の製品化においては、船体形状コンセプト設計を実船の一般配置図や構造図と整合させた実設計の実施、翼帆については可動部とその制御システムの詳細設計を行なうことになる。さらには、最終的に最適な効果を得るためには操船制御と翼帆の制御をハーモナイズさせた統合制御システムの構築も検討することになる。また、本製品は主に新造船を対象としているが、レトロフィットにも対応する方針であり、今後はレトロフィットに関する検討を実施する計画である。これから立ち上がる新コンセプトの省エミッション船の新規計画にあわせるべく商品化を目指し、前述の課題解決をしたうえで、商品化の目標年度は2027年度を想定している。

また、「2万TEUクラスの超大型コンテナ船向け小型風防」については、コンセプト設計が完了した。基本設計については、個々の案件ごとに設計を実施することになるので、既に製品化済みの6,700TEUのコンテナ船向け小型風防を含め、直ちに販売開始する予定である。



## 10. まとめ

洋上風力エネルギーにより推進する帆船は、産業革命によるディーゼル機関が導入されると下火となり、帆船に関する技術開発も停滞していたが、2018年にIMOにより国際海運のGHG排出削減目標が採択されて以降、海事産業における洋上風力利用技術への注目が再び集まっている。斯様な状況下において、商船三井テクノトレード、商船三井、三井造船昭島研究所、東海大学の4社による下記の開発体制で、低コスト、シンプル、信頼性の高い、かつ、効率に優れた風力推進システムとして、低風圧抵抗船型と高さ10m以下の低アスペクト比翼を組み合わせ、北米航路航行時に平均15[%]以上のGHGを削減するコンセプト設計を完了するという最終目標を掲げた。この目標値は、世界各国で技術開発が進められる様々な風力推進デバイスと比較して野心的であるが、船舶工学の専門家に加え、航空工学の専門家による空力の評価およびそのCFD解析、風洞試験を実施することにより目標値を上回る結果を確認した。また、翼システムの構造設計を実施し、さらにプロトタイプモデルを製造してコンセプト設計を完結することが出来た。

また、本技術開発では、船舶工学の専門家だけでなく、航空工学の専門家が加わった異業種連携プロジェクトであり、有効な成果が得られただけでなく、相互に新たな知見が加わった有意義な開発事業であった。

### <開発体制>

- ・ 商船三井テクノトレード  
プロジェクト取りまとめ、商品化検討
- ・ 商船三井  
実船適用検討、市場性評価
- ・ 三井造船昭島研究所  
船型および風防形状の設計検討、模型製作、風洞試験による検証  
単独翼、複合翼と船体翼のシステム検討および詳細設計検討  
プロトタイプモデル製作
- ・ 東海大学  
航空工学をベースとした空力CFD解析の実施・評価、船体形状・複数帆形状の提案

## 1 1. 謝辞

本事業における研究開発は、一般社団法人日本船用工業会並びに、公益財団法人日本財団の助成事業による受託開発である。

本技術開発は、コンセプトの構築から始まり、異業種との技術交流による従来の船舶工学の知見を超えた技術開発を行うことができた。

本事業の実現においての公益財団法人日本財団からの助成をいただいたこと、実施に当たる東海大学・工学部航空宇宙学科・福田研究室の学生様のご協力、および、構造試設計の実施において各方面からのご助言をいただいておりますこと、ここに深く感謝の意を表す。

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<https://www.jsmea.or.jp>