

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月14日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760636

研究課題名（和文） ゼロエミッション風力推進船に向けた多帆装船の空力性能向上に関する研究

研究課題名（英文） A study on aerodynamic improvement of a multi-sailed ship toward a zero-emission wind driven vessel

研究代表者

中島 卓司（NAKASHIMA TAKUJI）

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40444707

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ゼロエミッション風力推進船の実現に向け、翼型の硬帆を多数配置した船舶の空力性能について調査し、その性能向上技術を開発した。複数の翼帆を列状に並べた翼帆列を対象に数値解析と風洞模型試験を実施し、翼帆同士の相互作用による風力推進性能の低下特性を明らかにした。また、その相互作用を抑制し推力を向上する手法を提案した。加えて、船舶の所要エネルギー推定プログラムを構築し、航行状態における風力推進性能の向上についても評価した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, toward the realization of a zero-emission wind driven vessel, aerodynamic characteristics of several hard sails with wing section arranged in line have been investigated and a technique for its performance increase has been developed. Numerical simulation and wind tunnel measurement of hard wing sails arranged in line have been conducted and an interaction between the sails, which decreases the wind thrust performance, has been clarified. Then, a technique to suppress the decrease of thrust and to improve sail's performance has been proposed. Additionally, an energy prediction program of a wind driven vessel has been constructed and applied to evaluate the performance of the sails in ocean navigation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：風力推進船、翼型硬帆、空力干渉、翼間干渉、数値流体力学、EPP

1. 研究開始当初の背景

世界的な高まりを見せるCO2排出削減要求によって外航船における洋上風力の利用が再び注目を集めており、その状況には研究開

始当初から現在にかけて大きな変化はない。これまでも、風力利用を想定した次世代省エネ船の提案や大型帆の利用がなされるとともに、高効率帆の開発や次世代型帆装船の

効率の検討など多くの研究がなされてきたが、帆装船「新愛徳丸」をはじめとする関連研究のほとんどが風力を補助的推力（主機帆従）として捉えており、好風況化に風力のみで推進するような風力を主推力（帆主機従）とする検討はなされてこなかった。これに対し近年、大内らによりゼロエミッションを視野に入れた帆主機従型風力推進船の概念設計がなされ、その実現可能性が示された。本研究の開始当初はその概念設計に基づく詳細な技術的検討が期待される状況にあった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、これまで検討されていなかったゼロエミッションを視野に入れた帆主機従型風力推進船を実現するために必要な空気学的帆装・帆制御技術の開発を目指した。そのような大推力を得るための帆面積を実現するには、限られた甲板上のスペースに非常に多数の帆装が必要であることから、従来単独の帆で行われてきた検討とは異なる帆間の相互干渉を積極的に利用した翼列（翼群）としての空力の解明と性能向上の検討が必要である。さらに、多数の翼帆を別個な迎角に連動制御することにより、外乱を含んだ実海域条件における安定な推力や船体運動上より効率的な風圧力・風圧モーメントを得ることを検討し、運用時を想定した空力特性の総合的な評価も行うこととした。

3. 研究の方法

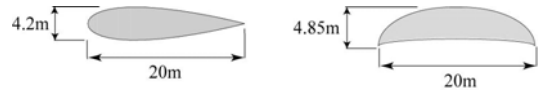
(1) 対象翼帆列

はじめに、本研究の対象とした翼帆列について述べる。本研究では、NACA0021翼型を持つ矩形翼と三日月翼型を持つ矩形翼の2種類を対象翼帆として設定した。両翼帆の翼型を図1に示す。実機における想定寸法は、両翼帆ともに翼弦長20m、翼幅50mであり、翼厚はNACA0021翼型で4.2m、三日月翼型では4.86mとした。

これらの翼帆は、1/100スケール風洞試験において図2のような流体力特性を示した。NACA0021翼型と三日月翼型の翼帆模型は、それぞれ迎角 17° 、 20° において、それぞれの最大揚力係数0.93、1.74を示した。

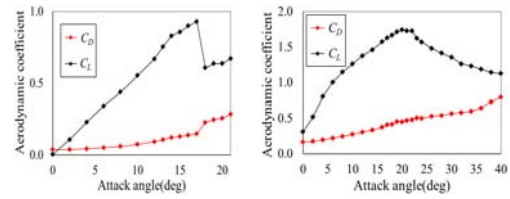
対象翼帆を、その翼弦中心が直線上に並ぶよう一列に翼帆を配置することで「翼帆列」を構成することとし、隣接する翼帆の中心間距離は翼弦長の1.18倍とした。また、船体の影響を検討する際には、仮想的な船体に見立てた半円柱を前後に付加した直方体の台座上に翼帆列を配置した。図3にNACA0021翼型翼帆とその3枚翼帆列、および船体影響考慮時の仮想船体上の3枚翼帆列を示す。

本研究では、考慮する風条件として、航行船速と大気風の合成による航行船舶基準の相対風向風速を基準とし、図4のような風向



(a) NACA0021 翼型 (b) 三日月翼型

図1 翼帆断面形状



(a) NACA0021 翼型 (b) 三日月翼型

図2 単独翼帆模型の空力特性

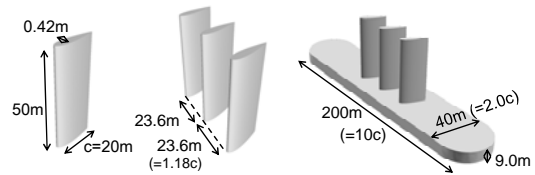


図3 対象翼帆列 (NACA0021 翼型：左から翼帆単体, 3枚翼帆列, 仮想船体付3枚翼帆列)

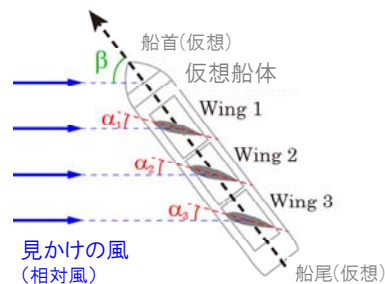


図3 対象翼帆列と風向角の定義

角 α 、 β を定義した。翼帆列中心線を仮想船体の中心軸と見立て、その軸と相対風向がなす角 β を船体風向角、各翼帆と相対風向がなす角 α を各翼帆の迎角とした。各翼帆は船首側から順に番号付けることとし、迎角の添え字は翼帆の番号を表す。

(2) 風洞試験

翼帆列の空力特性を明らかにするため、広島大学所有の大型風洞試験装置を使用して風洞模型試験を実施した。図5に試験時の概観写真を示す。

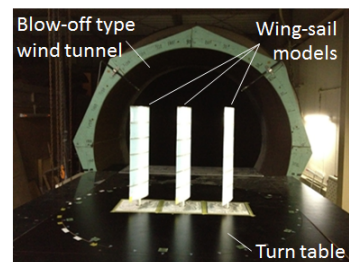


図5 風洞試験装置

使用した風洞の開口部は1.65mであり、風洞開口部から1.0m下流のターンテーブル中央に対象翼帆模型を配置した。

模型と風洞計測部の寸法から、翼帆列を構成する翼帆枚数は最大で3枚とした。各翼帆はそれぞれが独立してターンテーブルと接続されており、迎角を個別に設定することが可能である。また各翼帆の基部には検力計を接続してあり、それぞれの翼帆に作用する空気力の計測を行った。吹き出し風速は12.7 m/sとした。対象模型の翼弦長0.2mを代表長さとした Reynolds 数は 1.74×10^5 である。

(3) 数値解析手法

翼帆周囲流れの数値解析を実施し、実機スケールにおける翼帆列の空力性能を明らかにした。なお、解析手法は目的に応じて使い分けることとした。翼帆列の基本的な空力特性の解明や、船体との相互干渉などを明らかにするための解析では、乱流モデリング手法に Large Eddy Simulation (LES) を用いた非定常解析を行った。一方、翼帆列のパラメータに対する空力特性の変化を調査のための解析では、乱流モデリング手法に Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) を用いて定常流場の数値予測を行うことで計算負荷を抑制した。解析ソフトウェアには、次世代乱流解析ソフトウェア FrontFlow/red ver. 3.1, およびオープンソース CFD ツールボックス OpenFOAM ver. 2.1.0 を使用した。前者では、速度場・圧力場のカップリング手法に SMAC 法を用い、後者では定常流場の収束解法に SIMPLE 法を用いた。

解析領域として、図6に例示するような矩形流路を設定し、翼帆列を床面境界上に配置して、その周囲流れを予測した。同図は、実機スケールで、3枚の翼帆からなる翼帆列を仮想船体上に配置した解析時の解析領域を示している。流入流速は、風洞模型条件、実機条件共に12.7 m/sとし、流入境界に一定かつ一様な流速を与えた。これは、翼帆列に対する見かけの風速である。翼面境界上には、壁面摩擦を評価するために対数則に基づいた壁モデルを用いた。また、出口境界は自由流出境界、その他の流路壁面はすべり壁条件とした。

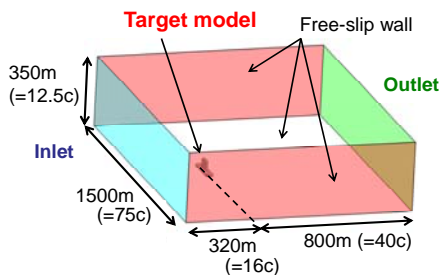


図6 数値解析領域の例

(4) 所要エネルギー推定プログラム (EPP)

翼帆列が発生する推力による、航行中の風力推進船の帆走性能を評価するためのツールとして、所要エネルギー推定プログラム

(Energy Prediction Program: EPP) を構築した。EPPでは、与えられた洋上風条件に対して、船体の進行方向の力、横方向の力、ヨーモーメントの3方向の釣り合いを満足する船速、舵角、斜航角を求める。本研究では、船体、舵、翼列に働く流体力をそれぞれモデル化し、3方向の運動方程式を準ニュートン法によって求める方法を用いた。

各流体力モデルについては、当て舵と斜行による流体力の評価に貴島らによるモデル、波による流体力の評価には佐々木らによるモデル、船体に作用する風圧力の評価には藤原らによるモデルを、それぞれ用いた。また、釣り合い計算により算出された船速から制動馬力を算出し、設定速力に必要な制動馬力で除した値を、翼帆の帆装によって得られる燃費削減率の近似値として算出した。

4. 研究成果

(1) 翼帆列の空力特性と翼間空力干渉

はじめに、近接する翼帆同士の空力干渉が翼帆性能にどのような影響を与えるのか調査するため、3枚のNACA0021翼型を持つ翼帆模型を対象として、風洞試験計測を実施した。翼帆列中の翼帆の迎角はすべて $\alpha_i = 15^\circ$ とし、 $\beta = 30^\circ$ から 150° の計測で得られた各風向角に対する推力係数及び横力係数を図7に示す。翼帆同士の空力干渉の結果、翼帆列の推力係数、横力係数共にすべての風向角で低下することが示された。また、図8には翼帆列中の各翼帆における推力係数と、単独翼帆の推力係数の比較を示す。

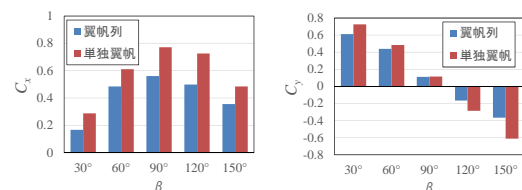


図7 翼帆列と単独翼帆の空力特性比較 (左：推力係数，右：横力係数)

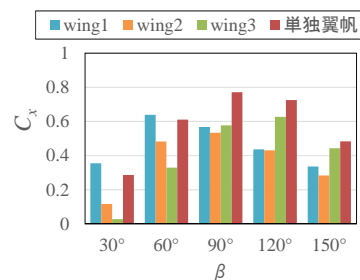


図8 翼帆列中の各翼帆の推力係数 (風洞)

図より、向かい風状態となる $\beta=30^\circ$, 60° の2条件では仮想船体船首側の翼帆「wing1」が単独翼帆よりも高い揚力係数を示しているものの、その他の条件では、翼帆列中のいずれの翼帆も、翼帆間の空力干渉によって単独翼帆よりも推力が低下することが示された。また、翼帆列の中で風上側に位置する翼帆、すなわち $\beta < 90^\circ$ ではwing1, $\beta > 90^\circ$ ではwing3が最も高い推力係数を発揮することも示された。

加えて、風洞条件 ($Re=O(10^5)$) ならびに実機条件 ($Re=O(10^7)$) におけるLES乱流モデリングによる数値解析も実施し、風洞試験結果との比較を行った。図9に風洞条件での数値解析により得られた翼帆列中の各翼帆の推力係数と風洞試験結果との比較を示す。両者は定量的には2割程度の差異を示しているものの、翼帆列中における各翼帆の推力の大小関係については定性的に良い一致を示しており、本研究で用いた数値解析手法の翼帆間空力干渉影響の評価における妥当性が示された。

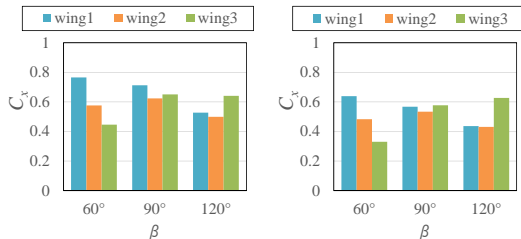


図9 翼帆列中の各翼帆の推力係数 (左：風洞試験，右：数値解析)

(2) 非一様迎角による空力性能向上

次に、明らかとなった翼帆間干渉による推力の低下を抑制するため、翼帆列中の翼帆迎角を個別に与え、非一様な迎角条件とすることで推力低下の抑制を試みた。

前項と同じく、3枚のNACA0021翼型翼帆による翼帆列中で、各翼帆の迎角を 2° 間隔で独立に変更し、その空力特性を計測した。図10に示す計測結果より、非一様迎角条件を用いることによって推力が向上し、さらには $\beta=60^\circ$ の向かい風条件から $\beta=90^\circ$ の横風条件にかけては単独翼帆の推力係数を上回ることが示された。また、翼帆列中の迎角を同一とした翼帆列においても、その迎角が単独翼帆の失速角を上回る迎角において、より高い推力を示す結果が得られた。

これは、翼帆間干渉によって各翼帆における見かけの迎角が変化し、各翼帆が単独翼とは異なる迎角で最大推力や失速を生じたために、迎角一様の翼帆列でも単独翼帆の失速角以上で最大推力を示したものと考えられた。さらに、見かけの迎角変化量は各翼帆間で互いに異なり、各翼帆が最大推力を発揮する見かけの迎角を個別に与える非一様迎角条件では、より推力が増大したと考えられた。

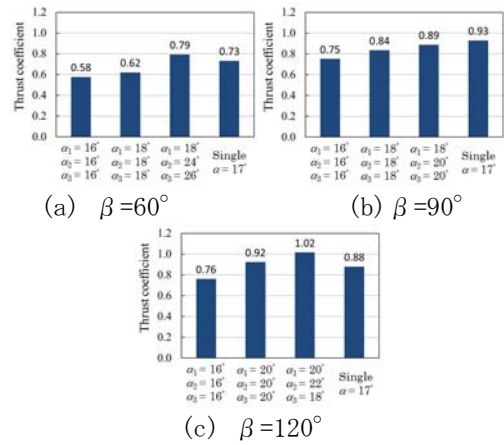


図10 非一様迎角による推力係数の向上

(3) 翼帆列の空力特性に対する船体影響

次に、翼帆性能に対する船体の影響について、LESを用いた数値解析に基づき実機スケールでの検討を加えた。図11は仮想船体デッキ上の鉛直断面上流速分布を示しており、 $\beta=90^\circ$ において船体側端部からの流れの剥離が生じ、翼帆の空力性能に影響することが示された。

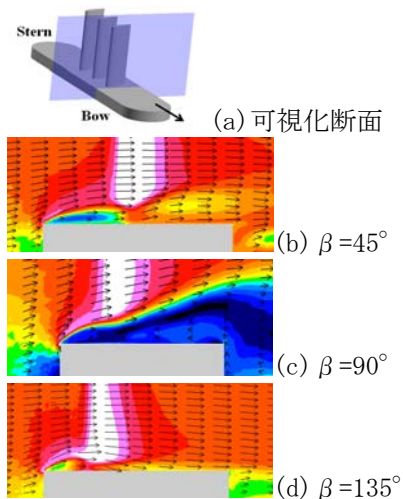


図11 鉛直断面上平均流速分布

一方で、相対風向角が45度や135度のような斜め風の場合には、船体側端部からの流れの剥離は小さく、船体影響はデッキ上の風向変化を生じて翼帆下部の見かけの迎角を変化させるという形で現れた。

このとき、解析により示された船体影響による翼帆列推力係数の変化は $\beta=90^\circ$ の条件において最大3割程度の低下であった。

そこで、このような翼帆列の空力性能に対する船体影響を低減する手法として、船体側端部に隅切り形状を加え、図12のように船側上端からの大規模剥離を抑制することを検討した。その結果、同手法により推力低下量を1割以下に抑制できることが示された。

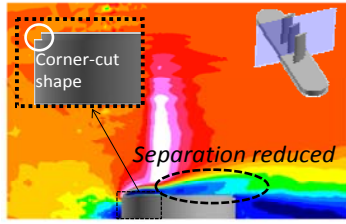


図 12 船体側端部隅切りによる船体影響抑制

(4) 翼帆列空力特性のパラメータ依存性

次に、翼帆列の空力特性のパラメータ依存性について調査した。その内、ここでは翼帆枚数と翼型への依存性について報告する。

翼帆枚数の変化に伴う翼帆列空力性能の変化の傾向について、単独翼帆ならびに2～3枚の翼帆からなる翼帆列を対象とした風洞試験結果に基づき検討を加えた。この時、いずれの条件でも合計の推力係数が最大となるよう、翼帆列では非同一迎角条件を適用した。

図 13 は $\beta=60^\circ \sim 120^\circ$ の3条件における各条件の翼帆もしくは翼帆列における各翼帆の推力係数の比較を示している。図より、3枚翼帆列では翼帆列端となる wing1 と wing3 に挟まれた wing2 がいずれも単独翼帆よりも高い推力係数を示しており、翼帆枚数の増加で中央部の翼帆が増えると、翼帆列は単独翼帆よりも高い推力を発揮することが推測された。

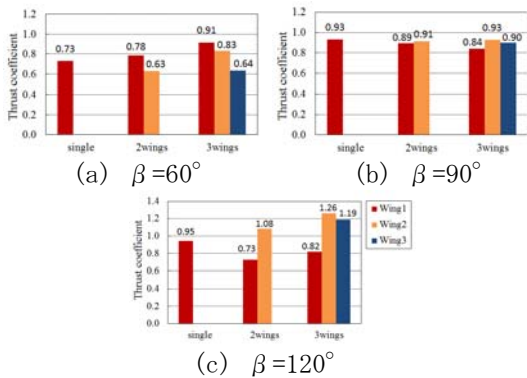


図 13 翼帆枚数変化に伴う各翼帆の推力変化

続いて、翼型による翼帆の空力特性の変化と翼帆間干渉影響の変化について、これまでに述べたNACA0021翼型の翼帆に加え、三日月翼型の翼帆を追加して、調査した。両翼型の3枚翼帆列による推力係数と横力係数の比較を図14に示す。また、翼帆列の推力を単独翼帆により正規化した干渉係数を図15に示す。

図より、単独翼帆性能の高い三日月翼型は、翼帆列を構成しても推力および横力がNACA0021翼型と比べ大きいことが示されると同時に、発生空気力の増大に伴って翼帆間の干渉影響も増大し、干渉に伴う推力低下量が相対的に増加することが示された。

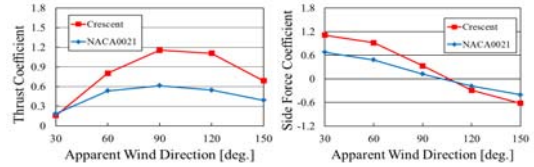


図14 翼型による翼帆列空力特性の比較 (翼帆迎角 $\alpha=15^\circ$ 一様)

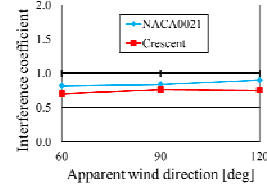


図15 干渉係数の比較 ($\alpha=15^\circ$ 一様)

(5) EPP による帆走性能評価

最後に、EPP を用いた航行時の風力推進性能評価について示す。ここでは、実機スケールの9枚翼帆列を対象にRANS解析を行い、その空力特性を基に翼帆列の発生する空気力を算出して、EPP による帆走性能評価を行った。翼帆形状と迎角条件は同一迎角のNACA0021翼型翼帆列、非同一迎角の同翼型翼帆列、および同一迎角の三日月型翼帆列の3種とし、風速条件は真風速 15, 20, 25knot の3条件、設定船速は 15knot とした。

図 16 に RANS 解析により得られた各翼帆列の空力特性を示す。また、EPP による帆走性能評価から得られた釣合船速における、各翼帆列の燃費削減率を図 17 に示す。

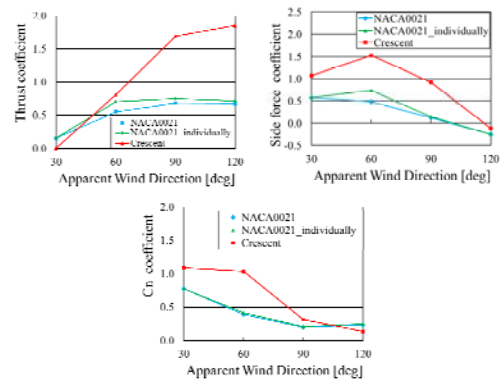


図 16 9枚翼帆列の空力特性 (上段左: 推力, 同右: 横力, 下段: ヨーモーメントの各係数)

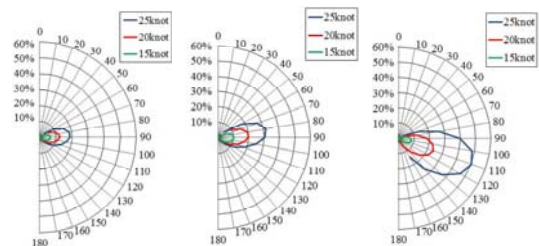


図 17 翼帆列の帆装による推定燃費削減率 (左から順に、NACA 翼型同一迎角, 同非同一迎角, 三日月翼型同一迎角)

同一迎角の NACA0021 翼型翼帆列, 非同一迎角の同翼型翼帆列, および同一迎角の三日月型翼帆列による燃費削減率は, それぞれ最大で 19%, 31%, 51%であった. この結果は, 翼帆の迎角設定ならびに翼型改良を施すことで, 燃費削減効果が 2~3 倍に増加しうること示している. また, 図 18 には, 真風速 25knot の際に生じる斜航抵抗および当て舵抵抗と, 翼帆列による風推力との比を示す. 図より, 三日月型翼帆列では, 真風向角 90° 付近において, 斜航抵抗と当て舵抵抗の影響を大きく受けていることが分かる. 従って, 翼帆迎角の設定条件を推力最大ではなく, 横力やヨーモーメント力の抑制も考慮する必要があるといえ, 推力低下分を上回る斜航抵抗や当て舵抵抗の低減が可能となれば, 燃費削減率のさらなる向上が期待できる.

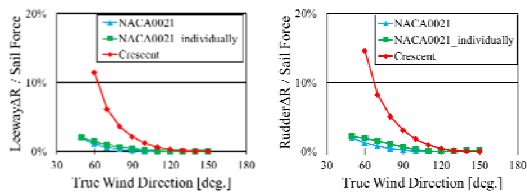


図 18 斜航抵抗 (左) および当て舵抵抗 (右)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 9 件)

1. Takahiro Miyasaka, Prediction and Improvement of Propulsive Performance of Wing Sails Considering Their Aerodynamic Interaction, The 23rd International Ocean and Polar Engineering Conference, 1 Jul. 2013, Anchorage Convention Center (Alaska, U. S. A.).
2. 宮坂 飛大, 次世代型風力推進船における翼型硬帆列の推進性能予測とその向上, 日本船舶海洋工学学会平成 25 年春季講演会, 2013 年 5 月 28 日, 広島市国際会議場 (広島市).
3. 中島 卓司, 干渉影響を考慮した帆主機従船の風力推進性能向上に関する研究, 日本船舶海洋工学学会平成 24 年春季講演会, 2012 年 5 月 17 日, 神戸市産業振興センター (神戸市).
4. 中島 卓司, 次世代型帆船用翼型硬帆の空力解析, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011 年 12 月 19 日, 大阪大学 (吹田市).
5. Takuji NAKASHIMA, "A Basic Study on Aerodynamic Interaction of Rigid Wing-Sails for a Next Generation Wind Driven Vessel," First World NAOE Forum, 25 Nov. 2011, Senri Hankyu Hotel (豊中市,

日本)

6. Yoshihiro Yamashita, A Basic Study for Propulsive Performance Prediction of a Cascade of Wing Sails Considering Their Aerodynamic Interaction, 21th (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, 21 Jun. 2011, Hyatt Regency Maui Hotel (Hawaii, U. S. A.).
7. 山下 芳弘, "帆主機従船の翼帆群を想定した翼間空力干渉の実験的検討," 日本船舶海洋工学学会平成 23 年春季講演会, 2011 年 5 月 19 日, 福岡県中小企業振興センター (福岡市).
8. 中島 卓司, 帆主機従船のための複数翼帆の性能予測, 日本機械学会 第 23 回計算力学講演会, 2010 年 9 月 23 日, 北見工業大学 (北見市).
9. 中島 卓司, 干渉影響を考慮した帆主機従船のための翼帆性能に関する基礎研究, 日本船舶海洋工学学会平成 22 年春季講演会, 2010 年 6 月 8 日, タワーホール船堀 (江戸川区).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 卓司 (NAKASHIMA TAKUJI)
 広島大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号: 40444707

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

二瓶 泰範 (NIHEI YASUNORI)
 大阪府立大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 00470055

山下 芳弘 (YAMASHITA YOSHIHIRO)
 広島大学・大学院工学研究科・博士課程前期学生 (研究当時)
 研究者番号: なし

宮坂 飛大 (MIYASAKA TAKAHIRO)
 広島大学・大学院工学研究科・博士課程前期学生
 研究者番号: なし