

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02369

研究課題名(和文) 3次元耐航性理論による波浪中プロペラ近傍流場変動現象の解明とその簡易推定法の開発

研究課題名(英文) An application of the 3-D seakeeping theory for a study on fluctuation mechanism of flow fields around rotating propeller in waves and development of its simple estimation method

研究代表者

北川 泰士 (Kitagawa, Yasushi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50579852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、船舶の波浪中プロペラ近傍流場変動メカニズムを3次元耐航性理論に基づく数値計算手法と実験的検証によって解明して、従前の波浪中プロペラ有効流入速度モデルの高度化を行うことである。

この実験的検証においては、波浪中船体表面圧力の振幅にプロペラ回転流が与える影響は有意ではない、等の貴重な知見を得た。一方で、数値計算手法の開発において、研究分担者が途中で外れる事情も相まって当初目標通りの実証を行うことが出来なかったが、取得した実験機器の有効利用による代替的検討として、操縦運動中の船尾付近及び舵表面の圧力分布の解析をプロペラ回転流の観点から行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、一部の数値計算手法の開発は当初目標を達成出来なかったものの、波浪中模型試験による波浪中のプロペラ回転流影響の分析において、貴重な知見を多数得られた。これら知見は、速度ポテンシャルベースの耐航性計算手法の高度化において貴重な参考データとなり、ノンキャビ状態のプロペラ変動圧の評価については新しい知見を与えたものである。

また、操縦運動中の舵表面を含んだ非定常圧力の計測を行えたことも含め、特にCFDによる自由航走直接シミュレーション手法の開発等、数値計算手法の高度化に貢献できる貴重なデータが得られたことは意義深いと言える。

研究成果の概要(英文)：Aims of this study is elucidating fluctuation-mechanism of flow fields around rotating propeller of ship, by applications of a numerical calculation method basing on the 3-D seakeeping theory and experimental investigations. Furthermore, based on results of these investigations, sophisticating the conventional model of the propeller effective inflow velocity in waves is also aimed.

In the experimental investigations, some significant findings were obtained. For example, it was experimentally confirmed that effects of the propeller slipstream to fluctuation amplitude of hydrodynamic pressure on hull surface in waves are not significant. On the other hand, development and its validation of the numerical calculation method is not ended as initially planned, since co-researcher had to get out of this project. Therefore, as alternative investigations on the effects of the propeller slipstream, measurements of hull surface pressure in maneuvering motion were successfully done and analyzed.

研究分野：船舶耐航性能、船舶操縦性能

キーワード：船舶耐航性能 波浪中プロペラ推力・トルク プロペラ有効流入速度 船体表面圧力 船舶操縦性能 非定常圧力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国際海事機関 IMO により船舶就航時の性能要件として EEDI 規制が導入された。EEDI はエネルギー効率設計指標と呼ばれ、その規制値は 2025 年までに段階的に厳しくなることが IMO より示されている。ここで、この規制を満足するための現実的な対策として出力の小さい主機を搭載することが有力視されているが、このトレンドにより過度に主機出力の小さい船舶が増加することが予見される。これを受け、荒天下中の船舶の操船性を保証するための最低推進出力に関する暫定ガイドラインが IMO により 2013 年に策定されている。このガイドラインに関する協議は当時より深まっており、主機出力と関連した船舶の波浪中安全運航に関する議論及び研究開発は今後も重要課題として継続されると考えられる。

一方、これらの最低推進出力に関する議論は所定出力を有する船舶が荒天下で任意の方向に推進できるかどうかという船舶推進性能及び操縦性能(保針性能)に基づく検証がほとんどであり、荒天下において船舶の低出力主機がどのような負荷変動を受けるかというような主機安全性を評価するような検証例は少ない。このような背景の下、申請者は主機の負荷に対する応答特性を考慮した上で波浪中プロペラトルク変動を計算で推定するための研究開発を行ってきた。波浪中プロペラトルク変動の計算手法として主流なのは平水中で得られたプロペラ単独特性と(1)式の波浪中プロペラ有効流入速度(u_p)モデルを組み合わせたものである。

$$u_p = (1 - w_p)\{u - \omega_e \xi_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_\xi)\} + \alpha_w \omega \zeta_w e^{-kz_p} \cos \chi \cos(\omega_e t - kx_p \cos \chi) \quad \dots(1)$$

本モデルの前項は船体の前後動揺による流速変動成分、後項はプロペラ位置における波粒子運動による前後方向流速成分を表す。波粒子運動成分は線形過程の入射波速度ポテンシャルから解析的に得られる式に船尾における入射波振幅の減衰を考慮するために導入された有効波振幅係数 α_w を掛け合わせて表現される。

ここで、申請者らは模型試験を通じた実験的検討により波浪中プロペラ流入速度モデルの高度化に関する研究を行っていたが、その結果、本モデルは一部波条件では物理的な厳密さを欠くことが分かった。よって、波浪中主機負荷変動の推定精度向上のためにはプロペラ付近の波浪中流場変動に関する更なる現象解明を進めて波浪中プロペラトルク変動推定の高度化を行っていく必要がある。

2. 研究の目的

前項の研究背景の下、申請者が着目したのは波浪中プロペラ有効流入速度モデルの構成要素である。前述の通り、(1)式の後項は波粒子運動成分であり、入射波の速度ポテンシャルから解析的に求められる。一方、速度ポテンシャルベースで定式化される船舶耐航性理論では入射波ポテンシャルに基づくフルードクリロフカの他に、船体動揺に関するラディエーションポテンシャルや船体表面からの発散波によるスキヤタリングポテンシャルなど、それぞれのポテンシャルから流体力を求めて波浪中応答を算定している。以上を考慮すると、プロペラ面の波浪中流場変動の推定に際し、入射波ポテンシャルの他にラディエーションポテンシャルやスキヤタリングポテンシャルを考慮することで有効流入速度モデルの高度化が期待できよう。そして、船体表面以外の速度ポテンシャルを高精度に求めるためには、ストリップ法に代表される 2 次元理論でなく、水面下の全体的な船体形状を考慮できる 3 次元耐航性理論に基づく評価が必要である。

以上より本研究では、速度ポテンシャルベースでプロペラ面の波浪中流場変動を評価する数値計算手法を開発してプロペラ面の流速変動特性を明らかにすることを主な目的に据え、粘性影響も考慮しながら、得られた知見を落とし込んで従前のシンプルな波浪中プロペラ有効流入速度モデルの高度化することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では前項の研究目的を遂行するため、3 次元耐航性理論に基づいた定式化によるプロペラ面の波浪中速度ポテンシャルの計算手法の開発と、検証用データ取得及び波浪中プロペラ近傍流場の現象解明の一助のための波浪中模型試験を行った。

数値計算手法の開発としては、速度ポテンシャルの求解は 3 次元耐航性理論の実用計算法である 3 次元ランキンパネル法を基本線として、定式化中の境界条件は物体表面でなく物体の無い空間であることを考慮した。

波浪中模型試験に関しては、まず対象船型を 33000DWT のケミカルタンカー船型とし、模型船を製作した。対象船の実船及び模型尺度の主要目を表 1 に示す。本模型試験の目的はプロペラ近傍の波浪中流場変動の検証であるため、計測項目は従来の耐航性試験で計測する船体動揺や船体への流体力に加えてプロペラ側方及び真後ろの流速と船尾を中心とした船体表面圧力とした。流速の計測には小型翼車式流速計、船体表面圧力の計測には昨今の船舶海洋工学分野で適用が進んでいる FBG(Fiber Bragg Grating)圧力センサーを用いた。図 1 に模型船にセットした小型翼車流速計と FBG 圧力センサーを示す。小型翼車式流速計はロッドが細く没水部の断面は流線型であり、流場への攪乱は最小限となっている。

表 1 対象船の主要目

Item	Full	Model
Hull		
垂線間長 (L) [m]	170.5	3.90
幅 [m]	27.7	0.634
喫水 [m]	10.0	0.2289
肥大係数 (C_b)	0.799	
Propeller		
プロペラ直径 (D)[m]	6.60	0.151
ピッチ比 at 0.7R	0.650	
Wing section	NACA	
翼数	4	

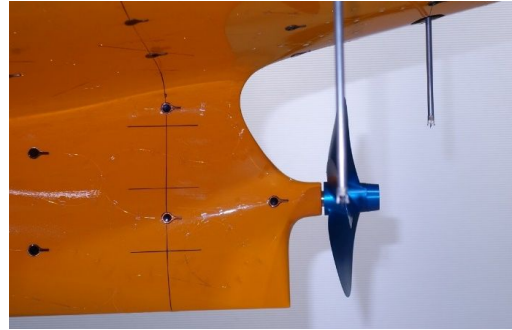


図 1 模型船船尾にセットした小型翼車式流速計と FBG 圧力センサー（黒の各点）

小型翼車式流速計は申請者所属機関で保有するものを使用し、FBG 圧力センサーは新たに製作した。製作したセンサー数は合計 95 点で、研究目的上、船尾に集中させて貼付した。また、後述の操縦性自由航試験による評価においては模型舵表面へのセンサー追加も行っている。

4. 研究成果

最初に模型試験による検証結果を説明する。模型試験は申請者の所属機関である海上技術安全研究所の実海域再現水槽で行った。本水槽は高い造波性能と波の吸収性能を有し、高効率な計測を進めることができる。本試験の波条件は規則波中かつ波振幅が実船尺度で 1.0m であることを基本として、様々な波向き及び波長条件にて計測を行った。計測時の曳航船速は計画速力の 80% 相当、プロペラ回転数は ship-point 相当の 11.2rps とした。

まず、プロペラ回転の有無による船体表面圧力の挙動を検証する。図 2 は平水中での計測圧力の平均値、図 3 は規則波左斜め追波中の出会い波周期成分の 1 次振幅を表す。これらのグラフの横軸 α_p はガー角と呼ばれるもので、 $\alpha_p = \tan^{-1}(Z_S/Y_S)$ の通りセンサーの船体表面上座標 (Y_S, Z_S) から算定され、値が 90 度より低いと船体右側、90 度より高いと左側を指す。系列は青丸がプロペラ回転無し（ダミーボス装着時）、赤十字がプロペラ回転時の結果を示す。

図 2 の平水中の結果より、計測断面が船尾であるにつれ、プロペラ回転がある方が圧力が低く計測される傾向にある。これは、ベルヌーイの定理からも説明しやすいように、プロペラ回転による増速流によって圧力の低下が発生したものと考えられる。次に図 3 の規則波左斜め追波中の結果を分析すると、プロペラ近傍に近くなる程の段階的な傾向の変化もなく、プロペラ回転の有無によって圧力振幅に有意な差が無いことが確認できる。そして、この傾向は凡そ全ての波条件で同様であった。過去の研究例より、船舶耐航性理論においては定常流れを考慮する 3 次元理論においてもプロペラによる回転流の影響を考慮しないことが従前の取り扱いであったが、一方でその是非が検討された例は無いと思われる。本試験結果はその従前の取り扱いで実用上の問題がないことを示した例である貴重なものと言える。

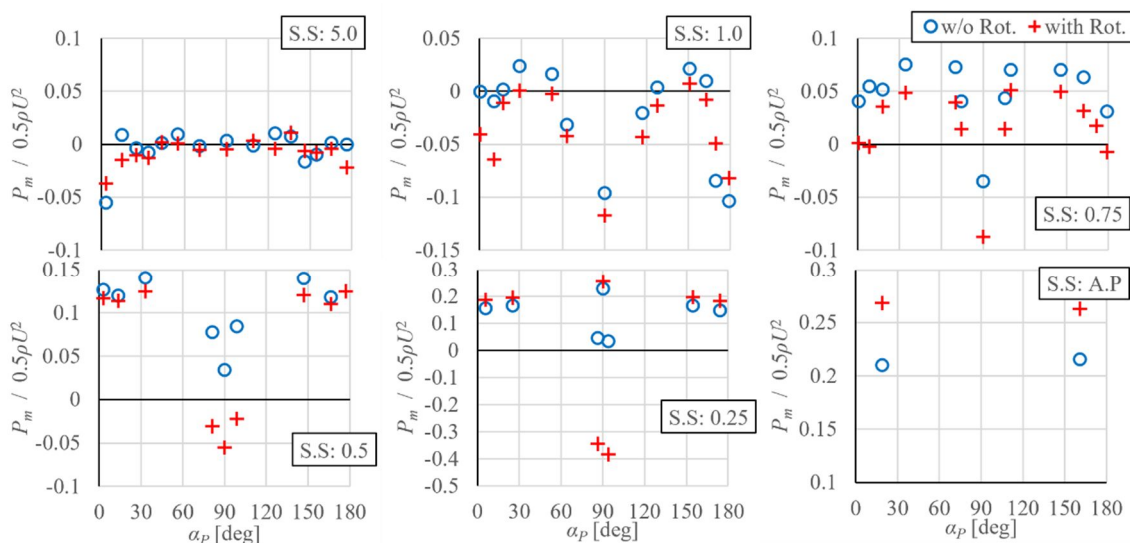


図 2 平水中曳航時の船尾付近計測圧力

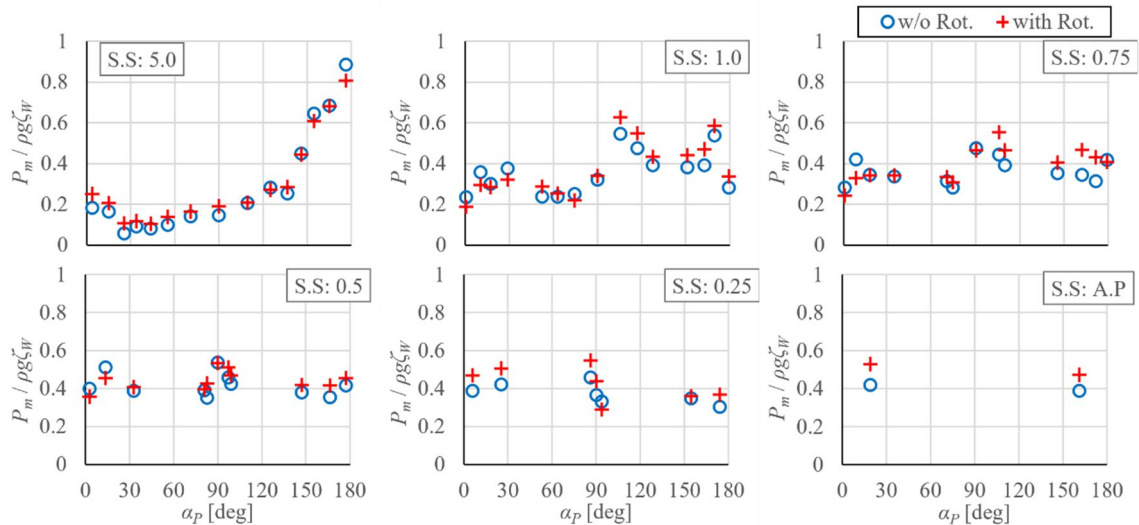


図3 規則波中左斜め追波中曳航時の計測圧力1次振幅（波長船長比：1.2）

次に、図4にプロペラ回転によるノンキャビテーション状態の船体表面変動圧を解析した結果を示す。これより、規則波中で計測されたプロペラ変動圧は平水中よりも全体的に値が低く計測されていることが確認できる。また、他の波出会い角条件においても、この傾向は同じであった。この要因は入射波による波粒子運動や船体動揺による流場の攪乱によるものと推察されるが、計測器の特性による影響の可能性も考慮しつつ、具体的なメカニズムは追って検証されるべきである。しかし、平水中と波浪中のプロペラ変動圧の差を実験的な検証できた貴重な一例であることは研究成果として強調しておきたい。

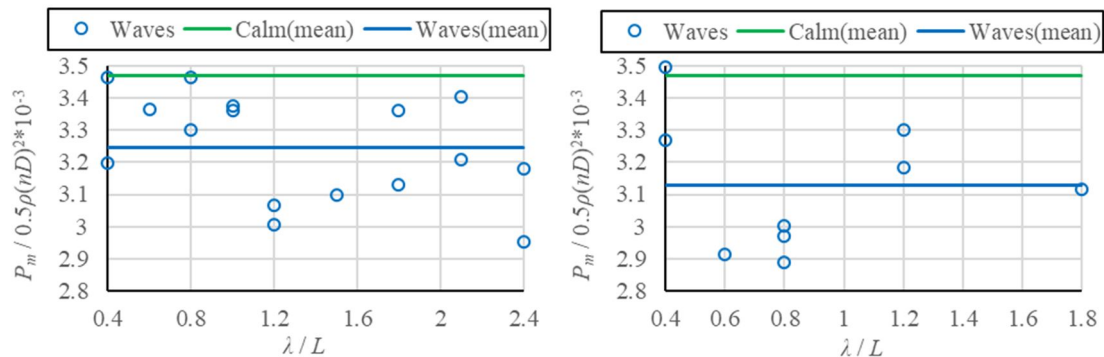


図4 ノンキャビ状態における平水中（緑実線）及び規則波中プロペラ変動圧（点：規則波中計測値、青実線：規則波中計測値の平均、波向き 左：向波 右：左斜め追波）

模型試験による成果をこれまで述べた。一方で数値計算手法の開発とこれによる体系的な検証については、前項に示した通り定式化の目的は立てたものの、研究分担者が所属機関を退職する都合もあり期間途中から外れたことも相まって、研究当初に目標にしていた所までプログラム開発を進めることが叶わなかった。そこで、本研究で取得した計測結果や実験機器の有効利用として、プロペラ付近の流場評価に関する検討を別途実施した。

まず、申請者の所属機関と横浜国立大学との共同研究の一環で、前述の計測結果を検証材料として、CFD(Computational Fluid Dynamics)による耐航性能計算手法の高度化に貢献した。著作権とページ数の都合で結果の図示は差し控えるが、“研究発表”項における横浜国立大学系の発表に成果が示されている。

次に、模型舵表面にFBG圧力センサーを追加し、操縦運動中の船体表面及び舵表面の圧力計測を行い、プロペラ回転による影響を分析した。その一例として、同じ対象船で自由航走模型試験の巡回試験を行い、巡回運動中の圧力を解析した結果を示す。図5は巡回試験中の“操舵開始前の直進時”、“右35度操舵をして定常巡回運動になった状態”、“左35度操舵をして定常巡回運動になった状態”の動圧を無次元表記した結果であり、設定プロペラ回転数は直進時に計測速度相当となるいわゆるModel-pointの回転数を与えている。まず、舵含めた船尾状態の動圧分布が取得されており、これらは国際的にも貴重なデータと言える。直進時の結果を見ると、船体表面の圧力は船尾に向かうにつれて高くなっていくことが分かり、舵表面では右面上と下及び左面下の圧力が低くなっていることが分かる。これは、プロペラが後方から見て時計回りで回転する場合の増速流発達が顕著な場所と対応しており、流速増に対応した圧力低下が発生したものと考

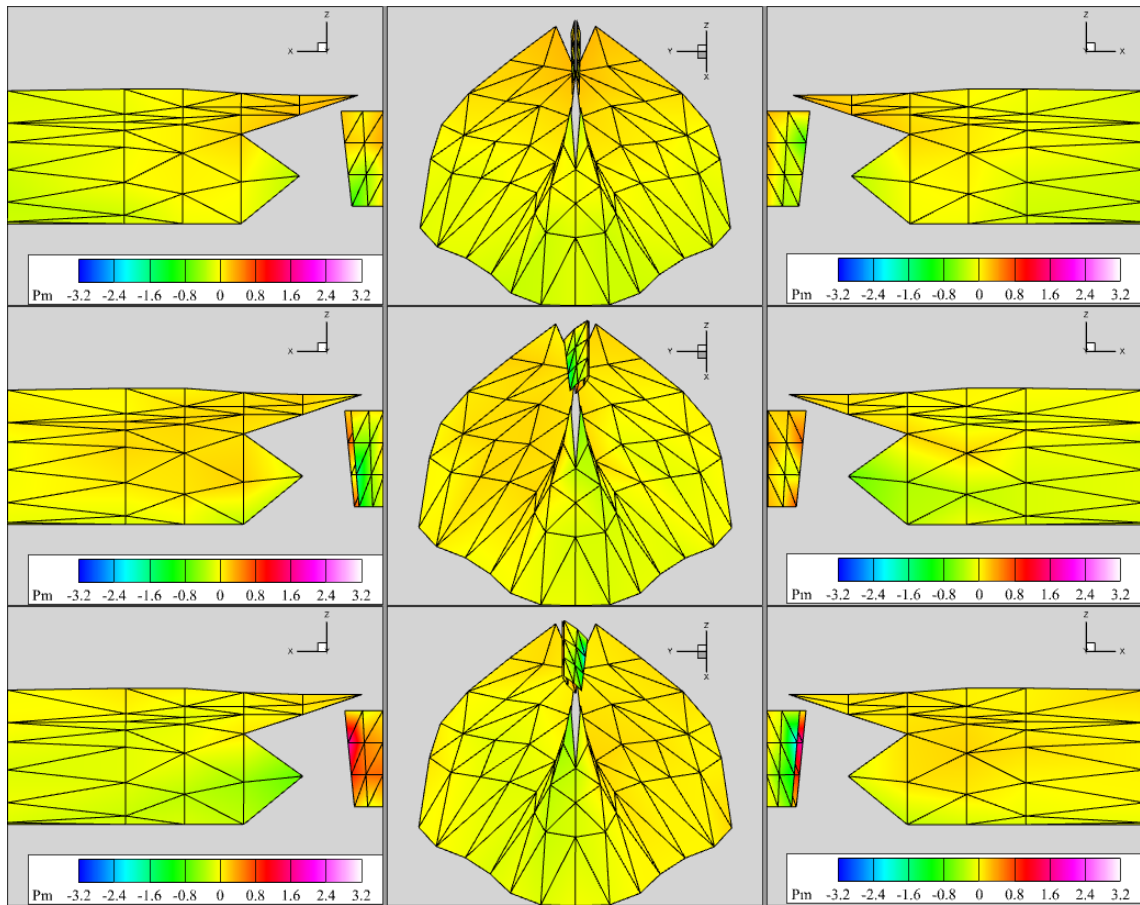


図5 自由航走中（旋回試験）の船体表面及び舵表面の計測圧力（上：直進航走時、中央：右旋回中定常状態、下：左旋回中定常状態）

えられる。また、右旋回及び左旋回の圧力について、まず船体の圧力分布は両者で凡そ左右対称になっているが、舵面の圧力は左右旋回で違いがあり、左旋回時の方が舵両面での圧力の発達大きい。この要因は、プロペラ増速流が舵右側でより発達するため、その場所により距離が近くなる左旋回時（左35度操舵時）に圧力発達が大きくなるものと推察される。以上により自由航走中の船体表面及び舵表面の圧力という貴重な計測が実施できた。紙面では示せないが、この計測の値は多点同時計測によって非定常な圧力の時間変化が計測できている点にもあり、例えば、CFDによる自由航走直接シミュレーション計算コードを開発するための貴重な検証データとなる。

以上より、プロペラ回転流が及ぼす諸影響を耐航性や操縦性能の視点から検証し、有意義な知見を得ることが出来た。これらの研究成果発表は進行中であり、これらの成果公表に努めることで学術研究の発展に貢献していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 北川泰士	4. 巻 なし
2. 論文標題 船舶の主機負荷変動推定のための波浪中プロペラ有効流入速度モデルに関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 大阪大学博士学位論文	6. 最初と最後の頁 1-61
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 北川泰士、塚田吉昭
2. 発表標題 プロペラ回転流が波浪中船尾圧力に及ぼす影響に関する実験的研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第33号（令和3年度日本船舶海洋工学会秋季講演会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柏倉昂太
2. 発表標題 向波中における船尾周りの流場解析
3. 学会等名 横浜国立大学理工系合同研究シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柏倉昂太
2. 発表標題 砕波・PMM 試験の CFD 解析と波浪中の船体流場解析
3. 学会等名 横浜国立大学海洋空間のシステムデザイン教室2021年度ポートフォリオ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北川泰士、塚田吉昭、柏倉昂太
2. 発表標題 FBG圧力センサーによる規則波中船尾圧力の計測とプロペラ回転影響の分析
3. 学会等名 第21回 推進・運動性能研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasushi Kitagawa, Yoshiaki Tsukada and Kunihide Ohashi
2. 発表標題 On Measurement of Hydrodynamic Pressures on Hull and Rudder Surface in Free-running Model Test
3. 学会等名 15th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果の一部はFBG圧力センサーを活用して得られている。これを受け、成果公表と学术交流の場を設ける趣旨の下、日本船舶海洋工学会令和3年度秋季講演会においてオーガナイズドセッション“FBGセンサーを活用した計測・実験技術”を企画し、本研究課題の発表を含めた計9件の発表が行われた。これによって、関連技術に関する学術的貢献を深めたのみならず、研究者間の人的ネットワーク構築の一助ともなった。

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	柏木 正 (Kashiwagi Masashi) (00161026)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	2021年度から研究分担者を外れた(本人承諾済)

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------