

令和元年6月14日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06919

研究課題名(和文) 実海域における船舶の複雑挙動推定のための数値シミュレーション手法の開発

研究課題名(英文) Development of Numerical Simulation Method for Estimation of Complex Behavior about a Ship in Actual Sea

研究代表者

大橋 訓英 (Ohashi, Kunihide)

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：10462871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：実海域の船舶の複雑挙動を推定することを目的として、船体周りの粘性流場を計算できるCFD(Computational Fluid Dynamics)ソルバーと主機関特性モデル、船体の変形を表す構造応答モデルを連成させる数値計算手法を開発した。始めに主機関特性モデルとCFDソルバーを連成させ、実験結果との検証を行い、波浪中での燃料投入量の変動等を精度良く再現できることや、船体周りの流場との干渉について考察を加えた。次にモード法による主船体の変形と船体周り流場との干渉等を明らかにし、最後に全てのモデルを連成させ、主機関特性モデルが主船体の変形に与える影響や、波向きによる干渉影響等を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘性流場とともに主機関の変動を推定する手法を世界に先駆けて開発し、実験結果との検証からその有効性を確認した。さらに主船体の変形をモードにより表し、船体周りの流場に与える変形の影響や、水面へ突入する際の衝撃圧を船体変形とともに推定できる手法を構築した。さらに全ての手法やモデルを連成させ、主船体の変形に与える主機関の変動の影響有無や、波向きの変化による干渉影響について明らかにした。本手法により船舶性能、主機関応答と構造応答を一体とした新たな技術開発につながる事が予想される。

研究成果の概要(英文)：A numerical method to estimate the ship performance in an actual sea condition is developed. First, the dynamics of a ship propulsion plant is modeled by the function of the diesel engine control system. Present method can reproduce the time history of propeller rotational speed and torque in the condition with the regular waves. The amplitude of fluctuations shows agreement with the measured data. Next, the elastic deformation is obtained by solving the equations based on the Bernulli-Euler beam theory, and the deformations are accounted for by the grid deformation method with the strong coupling way. Present method reproduces the impact pressure due to the interaction between the ship motions and incoming waves. Finally, the ship propulsion plant model and elastic deformation are coupled with the solver. The effects of the wave direction to the ship propulsion plant and flow fields are revealed.

研究分野：船舶数値流体力学

キーワード：数値流体力学 モード法 流体構造連成 主機関特性

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2013年に国際環境規制が発効したことにより、建造時に限らず運航時を含めた実海域での船舶の性能推定への取り組みは活発化した一方で、性能向上を目的とした技術開発に関する国際競争は厳しさを増している。実海域では海象の影響を受け、船体運動、船体抵抗の増加、主機関の出力変動、構造強度からの制限等、多数の要素が存在し、また相互干渉も発生することから各要素の挙動推定の手法は非常に複雑なものになる。波浪中の推進性能の推定については、実験的アプローチにより、規則波・不規則波中の抵抗増加、自航要素の変化等が詳細に調査され、欧州におけるプロジェクト SHOPERA では、実海域で最低限必要な主機関出力の検討が行われている。主機関の挙動をモデル化することによる、実海域での主機関の応答に関する研究も進んでおり、主機関の応答モデルを使った水槽試験法が開発されている。実海域での構造応答については、非線形理論に基づく波浪中船体運動と縦強度に関する研究があげられる。また近年の船舶の大型化に伴い、スプリングやホイッピングといった、これまで実船では起こらないとされていた現象が確認されており、現象解明等に関する研究開発も始まっている。一方、数値流体力学(CFD)は計算機の演算性能の向上とともに大きな発展を遂げている。近年は非定常計算による成果が目覚ましく、船舶の分野でも、さらに複雑な問題をシミュレートする方向へ進んでいる。この傾向は船舶関係の数値流体力学の研究者が一堂に集う CFD ワークショップのテストケースによく現れており、2015年には大波高、斜波さらには波浪中の自由航走状態のケースが設定された。

### 2. 研究の目的

実海域の船舶の複雑挙動を推定することを目的として、海象を模擬した波浪場において、主機関をモデル化した手法による主機出力の変動と船体を梁とみなした船体構造応答を同時に計算できる、重合格子手法に基づく数値シミュレーション手法を開発する。実海域を航行する船舶周りの流れ、主機出力の変動、船体運動と構造応答について相互干渉を含めた複雑挙動を、時間精度を有しつつ同時に得る新たな計算手法を構築する。

### 3. 研究の方法

本研究内容は大きく分けて、Ⅰ. CFD ソルバー用の主機応答モデル開発とパラメータチューニングⅡ. 船体を梁とみなした構造応答モデル開発と格子変形+移動格子法へのカップリングⅢ. 全てを統合させたシミュレーション手法の構築である。Ⅰ. では主機の応答モデルを CFD ソルバー用に開発し、主機応答モデルのパラメータ調整等を行う。Ⅱ. では構造応答モデルと各時刻の流場の収束計算を双方向にカップリングし、格子変形と保存則を満たす移動格子法により船体の変形を考慮する。Ⅲ. では全てを統合させて、実海域における主機出力の変動と構造応答を同時に解きながら、相互干渉を含めた船舶の複雑挙動をシミュレーションできる手法を完成させ、干渉の要素抽出により主機・構造応答・船体運動から粘性流場の変化までに至る複雑挙動のメカニズム解明に取り組む。

### 4. 研究成果

ベースとなる CFD ソルバーは 5. の③にて発表したものである。重合格子に対応しており、支配方程式は 3次元非圧縮レイノルズ平均ナビエストークス方程式であり、擬似圧縮性を仮定し、圧力と流場のカップリングを行う。計算法の詳細は 5. の③にあるため、概略について述べる。空間離散化には構造格子を用い、セル中心に変数を配置した有限体積法を適用する。非粘性項には Flux-Difference-Splitting に基づく 3次風上差分(MUSCL type)、粘性項には中心差分を用いる。自由表面モデルとして一相の Level Set 法を適用する。実時間微分は 2次精度で近似し、局所時間刻みによる収束加速を行う。規則波は計算格子内の領域造波に基づく波浪モデルにより生成する。物体の運動は流体力学に基づく運動方程式を解くことで導出し、計算格子を運動にそって変形させ、格子移動速度により運動が考慮される。重合格子における重合情報の計算には文献[1]による方法を使用した。

推進器影響はポテンシャル理論に基づく翼数を無限大とした簡易プロペラモデルによる体積力で表す。流場と体積力のカップリングは、まず計算格子からプロペラ面上の流速を補間し、体積力を計算する。次に計算格子とプロペラ面が交差する領域を探索し、セルの交差面の面積とプロペラモデルによる体積力をかけあわせ、推進器影響として考慮する。

主機関特性モデルには北川ら[2]のモデルを適用する。同モデルはディーゼル機関の機械式ガバナの要素ごとの特性をモデル化したものであり、燃料投入指令量のセンサーモデルによる方程式、パワーピストンモデルによる燃料投入量の方程式、主機トルクとプロペラトルクに基づく主機回転数の方程式から構成される。流場計算とプロペラモデルより得られるプロペラトルクを介することでソルバーと主機関特性モデルを連成させる。

主機関特性モデルとソルバーのカップリングの検証として、北川ら[2]の計測で使用されたコンテナ船型を対象とし、模型長さ 4m 相当のレイノルズ数  $2.8 \times 10^6$ 、フルード数 0.128、推進に必要なプロペラの要目等は実験と同一の条件のもと、実験結果との比較を行った。入射波である規則波の条件は波長と船長比で 0.9、1.0、1.1 の 3種、波方向は向波、波高と船長の比は 0.025 とし、船体運動は上下運動(ヒーブ)と縦揺(ピッチ)の 2自由度である。図 1 に主船体近傍図を示す。規則波が生成される矩形格子(Rect.)の中に船体格子(Hull)と船尾付近の解像度を

高める矩形格子(Refined Rect.)を重合させた。

図2にプロペラ回転数の時刻歴、図3にプロペラトルクの時刻歴、図4に無次元燃料投入量の時刻歴の計算結果と計測結果の比較を示す。波長船長比1.1の条件であり、プロペラ回転数とプロペラトルクは有次元値により比較している。実験での補正と同様に位相の表示はプロペラ回転数と計測値を一致するようにした。これらの図から規則波と船体運動により諸量変動の様子を再現できていることが分かる。計測結果からの計算値の平均値のずれは主にプロペラへの平均流入速度の違いにより生じているものと考えられる。計測結果に基づく北川らの考察と同様にプロペラトルクが増加すると回転数が低下し、指令回転数に调速するために燃料投入量が増加するという主機特性を表すことができています。

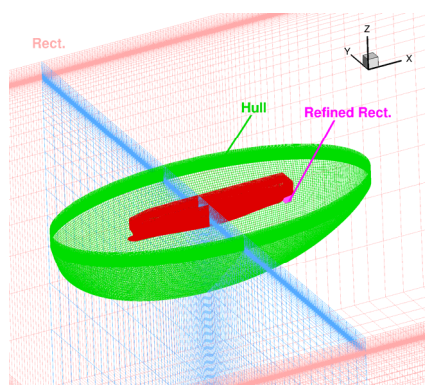


図1 計算格子

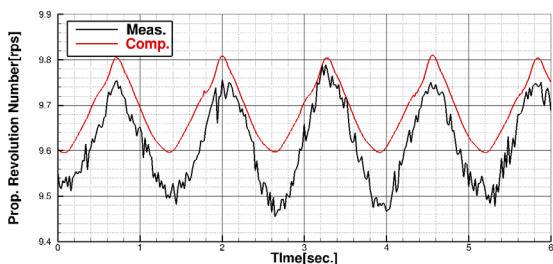


図2 プロペラ回転数の時刻歴

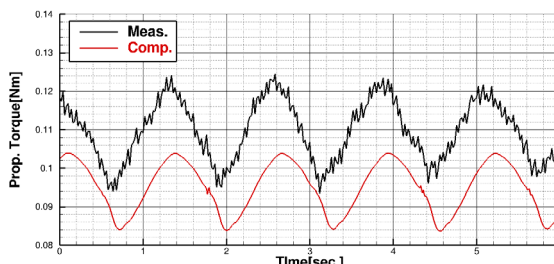


図3 プロペラトルクの時刻歴

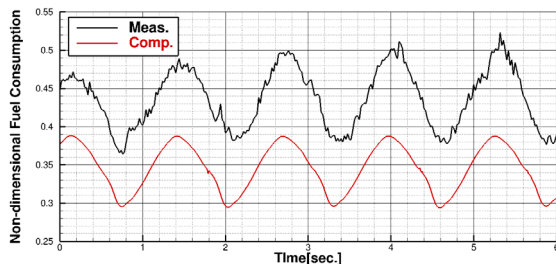


図4 無次元燃料投入量の時刻歴

図5から図7に波長船長比を変化させた時の両振幅の計測結果との比較を示す。計算結果は概ね計測結果と一致していることが分かる。プロペラトルクについては主機関特性モデルによる結果とあわせて平均回転数で固定した場合の結果も示している。主機関特性モデルにより振幅が小さくなる傾向を定量的に推定できていることが分かる。

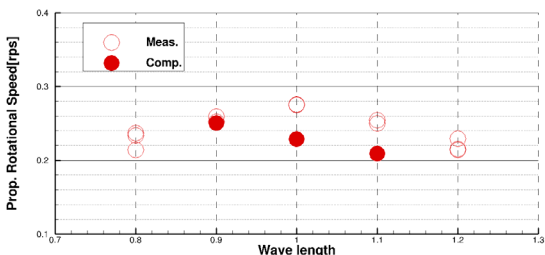


図5 プロペラ回転数の振幅

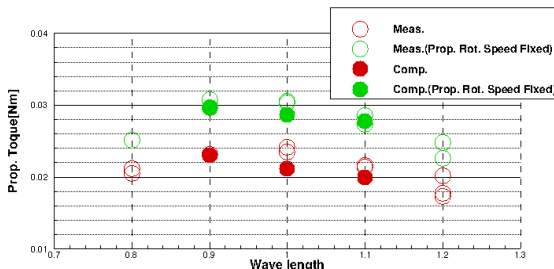


図6 プロペラトルクの振幅

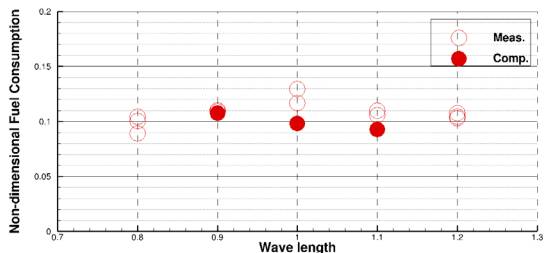


図7 無次元燃料投入量の振幅

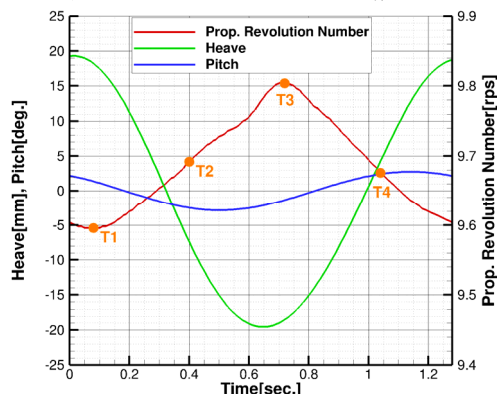


図8 プロペラ回転数と船体運動の時間変化

図8に出会い周期1周期におけるプロペラ回転数と船体運動の時間変化を示す。波長船長比



1.1の条件である。プロペラ回転数が主に船体のヒープ運動に伴い変化していることが分かる。図中に示したT1からT4における船体近傍の自由表面の可視化図を図9に、船体固定座標系に変換したプロペラ位置での速度分布を図10に示す。速度分布は規則波の円運動と船体運動により、大きく変動することが分かる。時刻T1ではヒープ運動は最大値付近でピッチ運動は船首上げの状態のため、船首が水面より突出しており、プロペラへはz方向に正の流入速度を生じている。プロペラの回転方向は船尾後方から見て時計回りであり、平水中では右半分の方が速くなるのが一般的であるが、時刻T1では左半分が高くなっていることが確認できる。時刻T2ではヒープ運動は負値に向かい、ピッチ運動は船首下げの状態であり、プロペラへはz方向に正の流入速度を生じているものの時刻T1より小さくなり、左右両方で加速される様子が見られる。時刻T3になるとヒープは最小値付近で、ピッチは船首下げであるが船首上げに向かう過程であり、プロペラへはz方向に負の流入速度を生じている。時刻T3ではプロペラによりおよそ右半分が加速される状態であることが分かる。最後に時刻T4ではヒープ運動がほぼゼロ付近で、ピッチ運動は再び船首上げとなり、船首が水面より出始める様子が見られる。プロペラへのz方向の流入速度は負であるが時刻T3より弱まり、平水中で一般的に見られる流速分布に近い状態となっている。以上のことから、規則波と船体運動によりプロペラへの流入速度が変わることに伴うプロペラ特性の変化と、主機特性モデルにおける燃料投入量等が変わることに伴うプロペラ回転数の変化が相互に干渉して、時間変動を起こしていると言える。

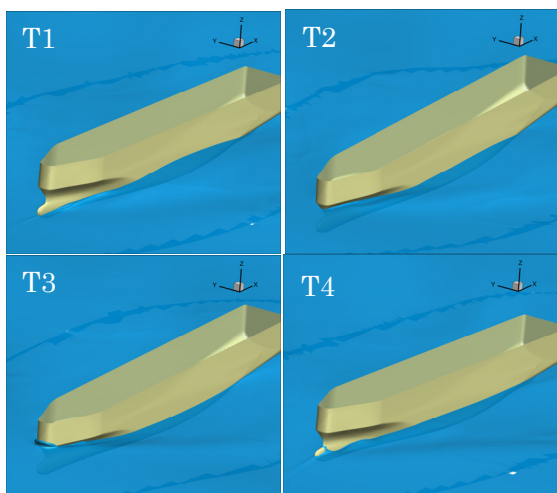


図9 船体近傍の自由表面の可視化

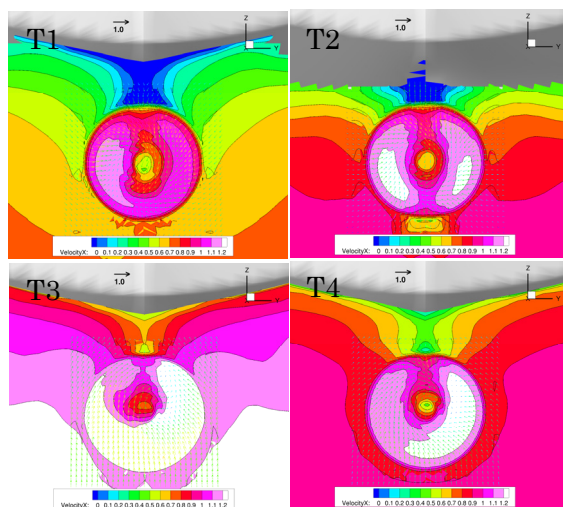


図10 プロペラ位置での速度分布

次に、ベースソルバーとモード法に基づく弾性変形をカップリングさせ、規則波中で運動する船舶において弾性変形による主船体の変形も考慮した数値シミュレーション手法を開発した。両端が自由端であるBernulli-Euler梁を仮定し、梁を長手方向に微小要素に分けて、微小要素に働く力とモーメントの釣り合い方程式を導出する。変位をモードの重ねあわせで表せると仮定すると、モード関数と各モードの時間振幅からさらにモード関数を重み関数としてかけて船長方向に積分した方程式が得られる。外力として流体力と自重を与え、3次のAdams-Bashforceスキームにより予測値を計算し、3次のAdams-Moultonスキームにより修正値を求める。弾性変形の変位の計算についてもソルバーにおいて連続の式を満たすための擬似時間ステップの始めに予測値を計算した後、擬似時間ステップ内で修正値を計算し、得られた変位に基づき格子を変形させることにより流場との強連成計算が可能になる。

モード法とソルバーの連成計算の検証として、文献[3]にて検討されているコンテナ船型を使用した。モデル長さ3m相当のレイノルズ数 $2.557 \times 10^6$ 、フルード数は0.179である。規則波の条件は波長船長比で0.8、1.0、1.25の3種で、波方向は向波、波高船長比は0.035とし、構造強度検討に応じた極限海象の条件となっている。船体の剛体運動は上下運動(ヒープ)と縦揺(ピッチ)の2自由度とし、モード法において必要な重量分布については静止時の浮力分布に等しいとし、剛性については台形分布を与えた。

図11に波長船長比1.0における入射波との出会い周期1周期分の船体運動と各モードの時間振幅及び船体中央位置での波高の時刻歴を示す。出会い波周期で船体が運動する一方で、弾性変形の各モードの時間振幅は固有の周期でも変動していることが分かる。2節と3節を比較すると、2節のモードの時間振幅が支配的なことが分かる。図11に示した時刻T3における各モードの変形量の船長方向分布の無次元値とその総和を図12に示す。船首位置が-0.5で、船体中央で0.0である。船体中央で規則波の波高がゼロで船首側に波の山、船尾側に波の谷がある状況で、3節の形状が規則波の形状に沿った分布となり、総和にもその影響が見られる。

図13に図11に示した時刻T2における弾性変形有無での船尾付近のx軸方向の流速分布を示す。船体近傍については弾性変形有無で大きな違いは見られないが、船体より離れた領域で差が見られる。図14に船首付近の2点における圧力の時刻歴を示す。時刻T1ではP1及びP2両位置が水面に突入することにより衝撃圧を生じ、計測結果と同様に瞬時に圧力が上昇する様子

を再現していることが分かる。時刻 T2 では船体運動と入射波が干渉しながら P1 及び P2 とも水面上に出る直前で圧力が上昇している。弾性変形により 2 回目の圧力上昇が特にやや後方の P2 位置で捉えられていることが分かる。

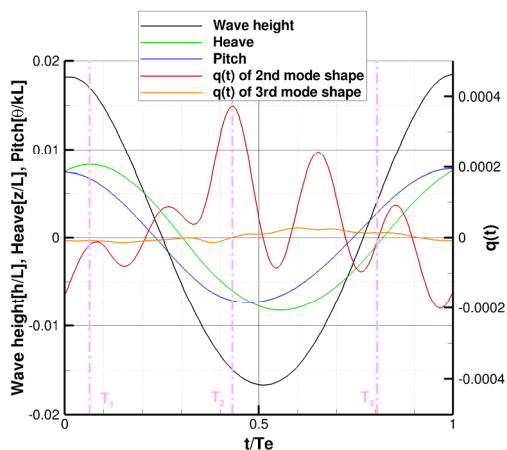


図 11 船体運動と各モードの時間振幅及び船体中央位置での波高の時刻歴

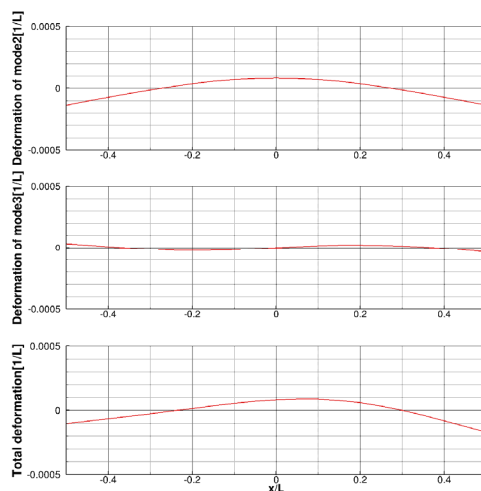


図 12 各モードの変形量の船長方向分布とその総和

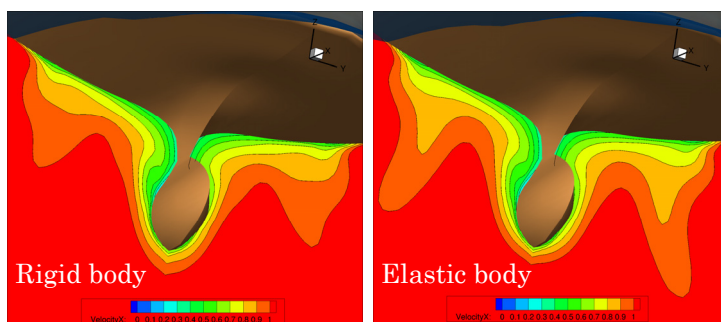


図 13 船尾付近の x 軸方向の流速分布

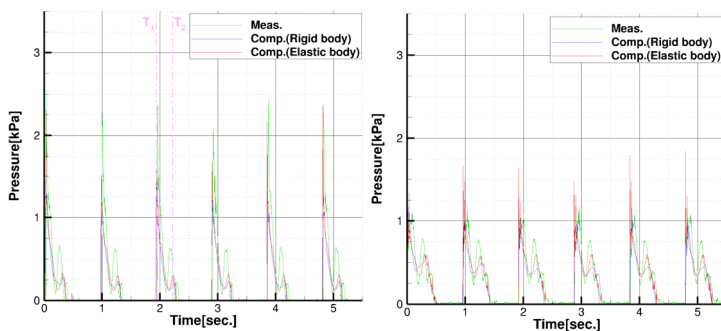


図 14 圧力の時刻歴

最後に主機応答モデルと構造応答モデルとソルバーを全て連成させた計算を行った。主船体の形状についてはデッキ形状を再現し、向波と斜め 45 度の向波の 2 種類の状態についても比較を行った。図 15 に船体付近の自由表面の可視化図を示す。いずれの波向きでも大波高と船体運動によりデッキが水面下になることで、デッキ上にも水塊が残る様子を確認できる。図 16 にプロペラ作動位置付近の伴流分布の可視化図を示す。向波の場合は左右対称の伴流分布形状で、プロペラモデルにより加速される領域を確認できる。斜め向波では左右非対称の伴流分布が見られ、プロペラにより加速される流れの様子も変化している。主機応答モデル有無による構造応答モデルの各モードの時間振幅には差は見られなかったため、構造応答に与える推

進器や主機応答の影響はないものと考えられる。図 17 に船体中央位置での波高、無次元燃料投入量及び各モードの時間振幅  $q(t)$  の時刻歴を示す。無次元燃料投入量は波高と同じ周期で変動し、 $q(t)$  は固有の周期で変動している様子が分かる。向波と斜め向波を比較すると無次元燃料投入量は斜め向波で変動が大きく、 $q(t)$  は向波で変動が大きいことが分かる。図 16 における斜め向波で左右非対称の流れがプロペラに流入すること等、波向きによる伴流と主機応答及び構造応答の相互干渉について明らかにすることができたと言える。

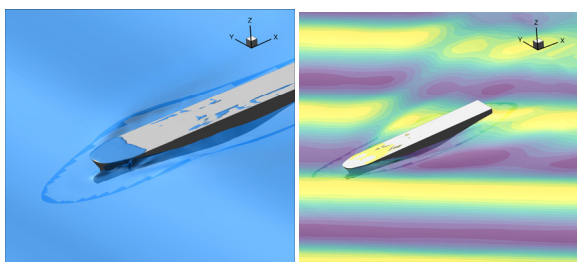


図 15 船体周り自由表面(左:向波、右:斜め向波)

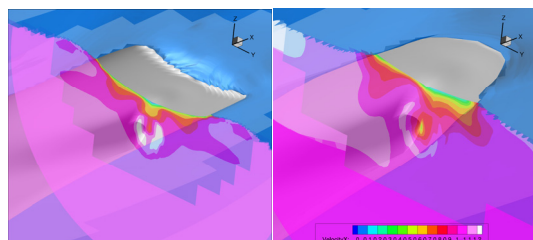


図 16 伴流分布(左:向波、右:斜め向波)

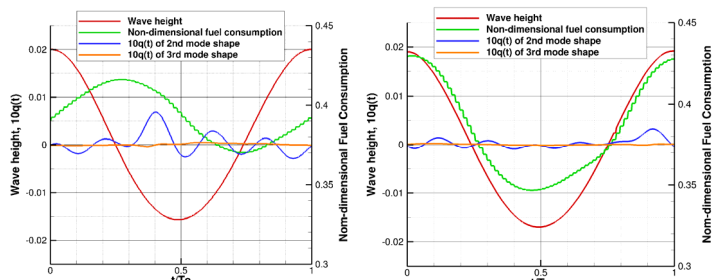


図 17 船体中央位置での波高及び各モードの時間振幅と無次元燃料投入量の時刻歴(左:向波、右:斜め向波)

集 第 22 号, 2015

[3]岡他, 斜波中におけるポストパナマックスコンテナ船の高精度荷重計測試験, 第 10 回海上技術安全研究所研究発表会講演集, 2010

[1]Kobayashi, H., and Kodama, Y., Developing Spline Based Overset Grid Assembling Approach and Application to Unsteady Flow around a Moving Body, Journal of Mathematics and System Science 6, pp. 339-347, 2016

[2]北川他, 実船の波浪中船速低下を直接計測する水槽試験法の開発, 日本船舶海洋工学会論文

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

①Kunihide Ohashi, Development of numerical method to simulate flows around a ship at propulsion conditions in regular waves coupling with the ship propulsion plant model, Applied Ocean Research, 査読有, Vol. 73, 2018, 141-148

<https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.02.006>

②Kunihide Ohashi, Hiroshi Kobayashi, Takanori Hino, Numerical simulation of the free-running of a ship using the propeller model and dynamic overset grid method, Ship Technology Research, 査読有, Vol. 65(3), 2018, 153-162

<https://doi.org/10.1080/09377255.2018.1482610>

③Kunihide Ohashi, Takanori Hino, Hiroshi Kobayashi, Naoyuki Onodera, Nobuaki Sakamoto, Development of a structured overset Navier-Stokes solver with a moving grid and full multigrid method, Journal of Marine Science and Technology, 査読有, 2018

<https://doi.org/10.1007/s00773-018-0594-7>

[学会発表] (計 6 件)

①Kunihide Ohashi, NUMERICAL STUDY OF FLOWS AROUND A SHIP HULL INCLUDING ELASTIC DEFORMATION EFFECT USING A MODE FUNCTION, 6th European Conference on Computational Mechanics and 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics, 2018

②大橋訓英, モード法による弾性変形を考慮した波浪中船体周り流れ数値シミュレーション, 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017

③Kunihide Ohashi, Numerical Simulation of Flows around Moving Bodies using an Overset Moving Grid Technique, 20th Numerical Towing Tank Symposium, 2017

④Kunihide Ohashi, Development of Numerical Method to Simulate Flows around a Ship in Regular Waves including the Effect of Ship Propulsion plant Model, The seventh International Conference on Computational methods in Marine Engineering, 2017

⑤大橋訓英, 動的重合格子による自走する船体の数値シミュレーション, 日本流体力学学会年会, 2016

⑥大橋訓英, 主機関特性モデルとリンクした船舶の波浪中推進状態の数値シミュレーション, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。