

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246142

研究課題名(和文) 船体、プロペラ、舵、付加物の相互干渉流場数値計算に対する新しい体積力分布の導入

研究課題名(英文) New body force distribution method for computation of hull-propeller-rudder interaction

研究代表者

戸田 保幸 (Toda, Yasuyuki)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20172166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,200,000円

研究成果の概要(和文)：プロペラと船体・舵との相互干渉をCFD計算内で体積力分布を用いる方法に対して新しい手法を提案した。CFD計算のプロペラ面の速度を直接用い体積力分布を計算する方法でこれまでのものとは異なり、誘導速度を引き算して非粘性プロペラ性能で体積力分布を求める時に行うやり取りを必要としない。この手法を用いて平水中の推進性能、ダクトや舵につけられたフィンのような省エネルギーデバイスの付いた計算や波浪中における推力変動の計算を行い十分に使用可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：New body-force concept is proposed. In this method, the flow velocity components at propeller plane in CFD computation are used directly to predict the body force distribution. So, the subtraction of induced velocity and interpolation are not required. By using this method, propeller-rudder-hull interaction problem with energy saving devices in calm water is computed and compared with experiments. The present method can predict well in local and global quantities. The flow field around self-propelled ship model in waves is computed and the results show good agreement with measurement.

研究分野：船舶流体力学

キーワード：CFD プロペラ船体干渉 体積力モデル 操縦運動 波動中運動

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当時まで船舶に関する数値流体力学 (CFD) は非常に発展してきており、平水中の船体周りの流れや流体力は、十分吟味された CFD コードで数百万の格子数を用いればコードに関係なく十分な精度で求められるようになっていた。またプロペラ作動中についてもスライディング格子などを用いて実幾何形状のプロペラが船体の後ろで回転している状態でも計算が可能になってきていた。その当時までに行われた例では非常に期待の持てる結果が示されていた。また波の中で自航しながら操縦運動を行うような場合も計算され始めていた。商用コードもスライディング格子などが使用可能なものとなっており、波浪中での船舶の運動性能の計算が可能になってきていた。しかしプロペラ翼弦長を回転速度で除した無次元時間と船長を船体の前進速度で除した無次元時間の間には大きな差があり、回転するプロペラを完全に解くためには非常に短い時間間隔が必要となり、船体が 1 船長進むのに必要な計算時間は非常に大きくなる。このことから研究目的の計算には利用できても、数多くのパラメータに対して計算を行う必要のある設計への応用や船体が自分の長さの何倍も走行する間に操縦運動を行う場合の計算等への応用にはまだ長い時間がかかるあるいは不可能であると考えられていた。

一方、船体とプロペラの相互干渉を簡易的に取り扱うために、プロペラの影響を CFD 計算内では体積力で表現する方法が数多く用いられ船舶のさまざまな性能を推定するために用いられていた。その体積力分布の求め方としては、計測された推力、トルクを用いて解析的な分布で推定するもの、船速とプロペラ面での流速低下率に対応する有効伴流係数を用いたプロペラ流入速度と回転数による前進率とプロペラ単独特性から推力・トルクを求め解析的体積力分布を用いるものがよく知られていた。しかし船速が変化する操縦運動中などでは困難も多く、比較的高速の船に対して船速と回転数から推力、トルクを求める方法が行われている程度である。また解析的分布を用いるのではなく、非粘性プロペラ性能計算コードと CFD 計算を交互に行い体積力分布を求める方法も数多くおこなわれていた。申請代表者らも MIT の開発したプロペラ性能計算 PUF2 と粘性流コードを組み合わせた計算を最初の段階で手法を示し、その後多くの研究者によってこの手法は用いられていた。国内でも多くの計算が行われるようになり、その多くで無限翼数近似の九州大学法が用いられている。しかしプロペラ性能計算非粘性コードではプロペラ後流渦の形を仮定しており、船体が運動する場合や、舵や船体にさまざまな付加物がついた場合は問題がある。また粘性計算で得られた結果から誘導速度を引き算したものを非粘性コードの入力する必要がある、そ

の際どの場所の誘導速度を用いるべきなのかなど確立されていない部分も存在した。

### 2. 研究の目的

背景で示したように粘性流体計算コード内でプロペラの影響を体積力分布で準定常的に表現した場合、付加物や舵あるいは船体運動による影響を受けた後流渦が自動的に放出され流れにのって流される。したがって体積力位置の速度はプロペラ渦系の影響を含んだものであるため、非粘性のプロペラ計算プログラムと組み合わせる場合は、放出されている渦や周りの翼の束縛渦の影響を一度差し引き、有効流速分布を求め、それを入力して誘導速度を足し算して境界条件を満足するように束縛渦強さを決定し力の分布を求めるものである。本研究はこの枠組みを見直し、非粘性の理論で力の分布を求める部分を、誘導速度の影響も含んだ CFD 計算で求まっているプロペラ翼位置の流速分布を直接使って体積力分布を求めようとするものでこれまでの手法とは全くことなる新しい手法である。これによるプログラムを開発し CFD 計算プログラムに埋め込み、抵抗推進の問題だけではなく船体運動性能の問題にも適用することが目的とする。また様々な例について計算するために、詳細な実験データを取得し、提案した手法の適用性を調査することを目的とする。

### 3. 研究の方法

最初の段階としてこれまでの計算で数多く用いられている九州大学の方法と同じ近似レベルで体積力分布を求める方法から始めた。これは揚力線近似モデルで無限翼数近似をするもので、誘導速度の計算部分において 1 翼が次の翼位置に来るまでの間の時間平均的なものとなっているもので広く使われている。この時翼に働く力は翼素理論循環を有限翼数修正などの修正を施したもので求めるが、これまではそこで渦層を放出しその誘導速度を加えて循環分布を求めて力を求めていたが本方法では CFD 計算で求める速度そのものから循環がすぐに計算でき力の分布を求めることができる。この計算を用い力の分布を計算し、全流速を計算して全流速が収束するまで繰り返すことでプロペラと船体との相互干渉流場を求める手法を開発した。この方法では自由渦が放出され始めから計算を始めることも可能である。またこの手法は他のポテンシャルプロペラ性能計算プログラムへも拡張可能で今後は揚力面理論など様々な手法に応用していく予定である。まずこの手法を用い計算する手法をこれまでの方法と同じく軸対称な格子上で体積力を求め、CFD 格子状に補間する。また CFD で求められる全流速を軸対称格子状に補間する方法を開発した。しかし 1 点での圧力差の 1 翼回転時間の時間平均を考えればプロペラ面のプロペラ中心からの位置とその点で

の全流速3成分さえわかれば計算できることを明らかにし、体積力計算のための格子を必要としない方法を開発した。この手法をまず一様流中のプロペラに適用した後、平水中のプロペラの船体、プロペラ・船体・舵の相互干渉流場に適用した。さらに波浪中を航行する船体の推力変動や流れ場の変動などについて検討した。さらに操縦運動などについても適用した。このほかにも本研究で開発したモデルを他のコードで使ってもらうよう他研究機関に説明した。

#### 4. 研究成果

一様流中のプロペラに対し、初期の軸対称な格子とCFD格子の間で補間を両方向行う方法を適用した結果、簡単な方法でプロペラ影響をCFDに組み込むことが可能であることを示した。これを矩形格子だけを用いてCFD格子点上で直接体積力を求める方法を適用し同じ結果が得られることを示した。このことからこれまでのポテンシャルプロペラ性能計算法とCFD計算の間でやり取りする際に問題となることはなくプロペラと船体の干渉を計算することが可能であることを示した。

次に過去に著者らが、抵抗、自航試験とプロペラ作動の有無両状態の流れ場を計測していたシリーズ60, CB=0.6船型に適用した。この結果、積分量の力だけでなく、流れ場、圧力場のプロペラ作動による変化もよく推定できることが明らかになった。このときプロペラ後流の流れ場がより詳細に表現できるように回転するハブも導入し、その結果、後流の計算精度が改善されることを示した。これらの改良を経て、KVLCC2モデルを用いたプロペラの後ろに舵を装備した実験を行い、プロペラ、船体、舵の相互干渉流場を計算し、実験と比較した。また舵にフィンが付きの場合も計算と実験を行った。Fig.1に普通舵とフィン付き舵の後ろの流れを比較した結果を示す。図に示すように非常によく流れ場の変化を表現している。

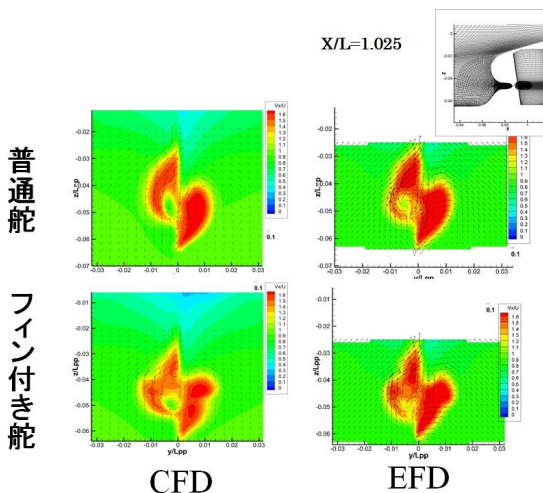


Fig.1 計算結果とPIV実験結果の比較

またハブ渦が舵によってどのように変形されているかが本研究の手法により表現可能かどうか調査するため、実幾何形状を用いて計算した結果と比較したものをFig.2に示している。この結果から時間平均を行っているため翼端渦は弱く表現されているが(これで時間平均流れは正しい)、ハブ渦は同じ程度の強さでほぼ同じ位置を通っていることを示した。これと力の計算が実験とよく一致していることにより本研究で提案したモデルはプロペラ・船体・舵の干渉流場を推定可能であることを示した。

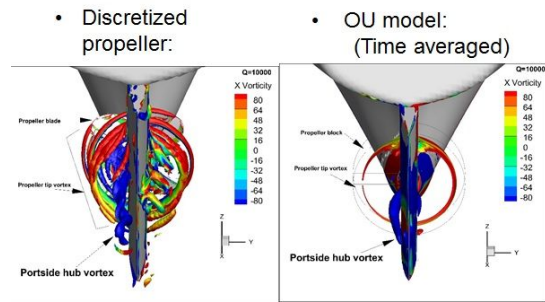


Fig.2 実形状計算と本研究の比較

この後、波浪中の問題にも適用し、自由表面に近いところで作動するプロペラの特長や波浪中での単独試験などの問題にも適用した。このとき展開面積比の小さいプロペラで空気吸い込みが起こりやすい条件では本研究のモデルだけでは実現象を表現できないことが明らかになったが、空気吸い込みが小さい場合には十分に性能を推定可能であることが示された。

また波浪中でKVLCC2モデル船がプロペラ作動状態でヒープ・ピッチ運動しながら前進する場合のPIV実験を行い、本研究の手法でCFD計算を行った計算と比較した。満載状態では推力変動の推定は非常によく実験結果を再現していた(Fig.3)。またFig.4, Fig.5に示すように流場についてもよく推定できており船体運動中についても本研究の体積力計算手法はうまく機能していることを示した。

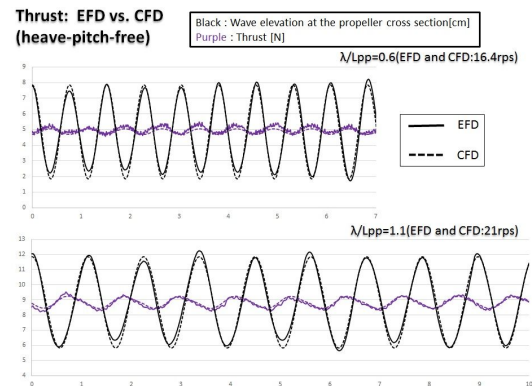


Fig.3 波浪中の推力変動(KVLCC2満載)

この他、操縦運動の計算にも使用して、これまでの実験結果や他の手法との比較において期待できる結果が得られているが、詳細な実験はこの研究では行っていない。

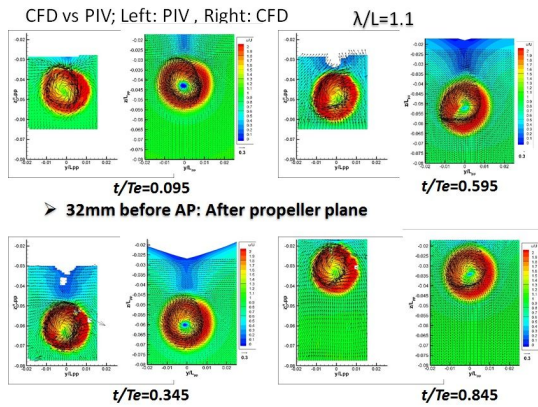


Fig.4 計算結果と実験結果の比較  
(  $\lambda/L=1.1$  位相平均流場 )

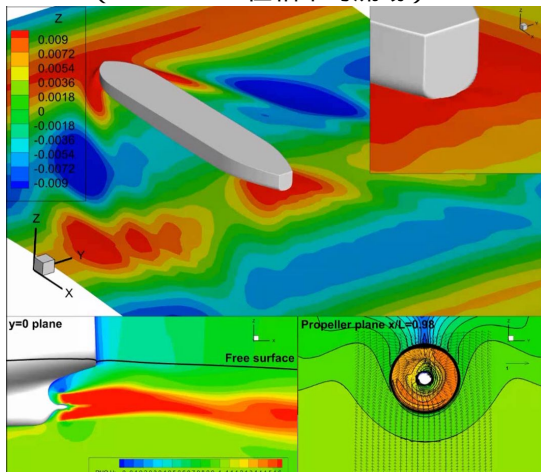


Fig.5 流場と波場のスナップショット  
(  $\lambda/L=1.1$  位相平均流場 )

### 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 18 件 )

2015

1. Computation of the Flow Field around Self-Propelled Ship in Ballast Condition in Waves Using Body-Force Model.  
Emel Tokgoz, Ping-Chen Wu, Yasuyuki Toda, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Violent Flows(VF-2016), 9-11 March, Osaka Japan
2. Computation of the Propeller-Hull Interaction Flow in Waves for Diffraction Problem Using Body-Force Distribution Model,  
Emel Tokgoz, Ping-Chen Wu, Yasuyuki Toda, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.20,pp251-254,2015
3. Computation and SPIV Measurement of the Flow Field around Self-Propelled Ship in Waves Using Body-Force Model  
Emel Tokgoz, Ping-ChenWu, Hiroshi Okawa, Kento Tamaki, Yasuyuki Toda,

日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.20,pp255-258,2015

4. SPIV Stern Flow Measurement around Operating Propeller for with and without Duct condition of Japan Bulk Carrier, Norihiro Jufuku, Masatoshi Hori, Syougo Itou, Munehiko Hinatsu, Yasuyuki Toda, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.21,Cpp309-312,2015
5. CFD Computation around Energy-Saving Device of Japan Bulk Carrier on Overset Grid, Saori Yokota, Emel Tokgoz, Wu Ping-Chen, Yasuyuki Toda, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.21,pp313-316,2015

2014

6. A New Method to Predict the Propeller Body-force Distribution for Modeling the Propeller in Viscous CFD Code without Potential Flow Code,  
Emel TOKGOZ、 Kazuhiro KURODA、 Yan Naing WIN, Yasuyuki Toda, 日本船舶海洋工学会論文集,Vol.19, pp1-7,2014
7. Phase-Averaged SPIV Flow Field Measurement for KVLCC2 Propeller in Waves, Kim H., Hayashi Y., Oshita S., Akamatsu K., and Toda Y., Proc. of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Busan, Korea,pp.796-801,2014
8. Phase-Averaged SPIV Flow Field Measurement for Ballast Condition of KVLCC2 in Waves, Akamatsu, K., Kim, H., Okawa, H., Toda, Y., Proc. of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Busan, Korea, pp.802-807,2014
9. Application of New Body-Force Concept to the Free Surface Effect on the Hydrodynamic Force and Flow around a Rotating Propeller, Tokgoz, E., Wu, P., Yokota, S., Toda, Y., Proc. of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Busan, Korea, pp. 607-612,2014
10. Added Resistance and Nominal Wake in Waves of KVLCC2 Model Ship in Ballast Condition, Ping-Chen Wu, H. Okawa, H. Kim, K. Akamatsu, H. Sadat-Hosseini, F. Stern, Y. Toda, Proc. of 30th Symp. on Naval Hydrodynamics, Tasmania, Australia ,2014

2013

11. CFD verification and validation of added resistance and motions of KVLCC2 with fixed and free surge in short and long head waves, Hamid Sadat-Hosseini, Ping-Chen Wu, Pablo M.Carrica, Ho Kim,

- Yasuyuki Toda, Frederick Sten, Ocean Engineering, Vol.59, pp240-273, 2013
12. CFD プログラム内におけるプロペラ影響の表現方法に関する研究, 横田早織, Tokgoz Emel, Yan Naing Win, 戸田保幸, 日本船舶海洋工学会講演論文集 Vol.17. CD-ROM 2013
  13. 肥大船の波浪中運動・抵抗増加と波による伴流分布の変動に関する研究, 大川博史, 赤松佳佑, Kim Ho, 戸田保幸, 日本船舶海洋工学会講演論文集 Vol.17. CD-ROM (2013)
  14. Computation of Propeller-Hull interaction using Simple Body-Force Distribution Model around Series 60 CB=0.6, Yan Naing Win, Tokgoz Emel, Ping-Chen Wu, Frederick Stern, Yasuyuki Toda, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.18, pp17-27, 2013
  15. A new method to predict the propeller body-force distribution for modeling the propeller in viscous CFD code without potential flow code, Tokgoz Emel, Kazuhiro Kuroda, Win Yan Naing, Yasuyuki Toda, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.16, CD-ROM 2013
  16. Nominal wake fluctuation due to waves-Volume mean and distribution based on CFD and PIV-, Ping-Chen Wu, Hamid Sadat-Hosseini, Stern Fred, Yasuyuki Toda, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.16, CD-ROM, 2013
- 2012
17. Viscous Flow Computation around the Wigley Hull with the Maneuvering Motion Using the Inertial Coordinate System on the Non-Inertia Grid, Yan Naing Win, Yasuyuki Toda, Proc. of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, pp70-275, 2012
  18. Phase-Averaged 3D-PIV Flow Field Measurement for KVLCC2 propeller plane in Waves, Kim Ho, Yoshiki Hayashi, Keisuke Akamatsu, Yasuyuki Toda, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, pp370-375, 2012

[学会発表](計 14 件)

2015

1. Emel Tokgoz, Ping-Chen Wu, Yasuyuki Toda, Computation of the Flow Field around Self-Computation Ship in Ballast Condition in Waves Using Body-Force Model, 3rd International Conference on Violent Flows (VF-2016), I-Site Namba, 2016.3.9-11
2. Emel Tokgoz, Ping-Chen Wu, Yasuyuki Toda, Computation of the

- Propeller-Hull Interaction Flow in Waves for Diffraction Problem Using Body-Force Distribution Model  
日本船舶海洋工学会 2015 年春季講演会  
神戸国際会議場, 2015.5.25-26
3. Emel Tokgoz, Ping-Chen Wu, Hiroshi Okawa, Kento Tamaki, Yasuyuki Toda, Computation and SPIV Measurement of the Flow Field around Self-Propelled Ship in Waves Using Body-Force Model, 日本船舶海洋工学会 2015 年春季講演会  
神戸国際会議場, 2015.5.25-26
  4. Norihiro Jufuku, Masatoshi Hori, Syougo Itou, Munehiko Hinatsu, Yasuyuki Toda, SPIV Stern Flow Measurement around Operating Propeller for with and without Duct condition of Japan Bulk Carrier, 日本船舶海洋工学会 2015 年秋季講演会  
東京大学生産技術研究所, 2015.11.16-17

2014

5. Kim H., Hayashi Y., Oshita S., Akamatsu K., and Toda Y., Phase-Averaged SPIV Flow Field Measurement for KVLCC2 Propeller in Waves, ISOPE2014, Busan, Korea, 2014. 6.15-20
6. Akamatsu, K., Kim, H., Okawa, H., Toda, Y., Phase-Averaged SPIV Flow Field Measurement for Ballast Condition of KVLCC2 in Waves, ISOPE2014, Busan, Korea, 2014.6-15-20
7. Tokgoz, E., Wu, P., Yokota, S., Toda, Y., Application of New Body-Force Concept to the Free Surface Effect on the Hydrodynamic Force and Flow around a Rotating Propeller, ISOPE2014, Busan, Korea, 2014.6.15-20
8. Yan Naing Win, Ping-Chen Wu, Tokgoz Emel Yasuyuki Toda, Computation of Propeller-Hull interaction using Simple Body-Force Distribution Model around Series 60 CB=0.6, ISOPE2014, Busan, Korea, 2014.6.15-20

2013

9. Tokgoz Emel, A new method to predict the propeller body-force distribution for modeling the propeller in viscous CFD code without potential flow code, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 広島国際会場, 2013.6.27-28
10. Ping-Chen Wu, Hamid Sadat-Hosseini, Stern Fred, Yasuyuki Toda, Nominal wake fluctuation due to waves-Volume mean and distribution based on CFD and PIV 日本船舶海洋工学会春季講演会, 広島国際会場, 2013.6.27-28
11. 横田早織, CFD プログラム内におけるプロペラ影響の表現方法に関する研究, 日

本船舶海洋工学会秋季講演会,2013  
11.21-22

12. 大川博史,肥大船の波浪中運動・抵抗増  
加と波による伴流分布の変動に関する  
研究,日本船舶海洋工学会秋季講演会,  
2013.11.21-22

2012

13. Yan Naing Win, Yasuyuki Toda,Viscous  
Flow Computation around the Wigley  
Hull with the Maneuvering Motion Using  
the Inertial Coordinate System on the  
Non-Inertia Grid, 6th Asia-Pacific  
Workshop on Marine Hydrodynamics,  
Unuversiti Tecnolgi Malaysia,  
2012.9.3-4

14. Kim Ho,Phase-Averaged 3D-PIV Flow  
Field Measurement for KVLCC2  
propeller plane in Waves,6th  
Asia-Pacific Workshop on Marine  
Hydrosynamics, Unuversiti Tecnolgi  
Malaysia,2012.9.3-4

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

戸田 保幸 (TODA, Yasuyuki)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：20172166

(2)研究分担者

松村 清重 (MATSUMURA, Kiyosige)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10135668

(3)連携研究者

( )

研究者番号：