

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420834

研究課題名(和文) 動的重合格子法を用いたプロペラ周りのCFD計算によるハブボルテックス推定法の開発

研究課題名(英文) Development of hub vortex estimation method by CFD computation around a propeller with dynamic overset approach

研究代表者

小林 寛 (Kobayashi, Hiroshi)

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：20361503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：重合格子法は、互いに重合(オーバーラップ)する複数の格子ブロック間で計算領域をカバーし、計算時には物理量等を補間し合うことで流場を求める手法であり、部分的な物体形状の変更や、多体問題への適用性に優れている。各時刻ステップで重合情報(補間情報)を生成する動的重合格子法を開発し、移動格子法による非定常計算と組合せ、プロペラ周りの流れ場の計算を行うとともに、流場や積分値等計算結果の検証を行い、手法の妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Overset grid approach is one of ways to deal with complex geometries, simplifying grid generation and it provides flexibility to rearrange geometries. Overset grid approach is also useful for a moving body problem since it can cope with change of arrangement of computational grids by just recomputing Domain Connectivity Information(DCI) without regenerating grids. Dynamic overset grid approach was introduced to compute unsteady flow field such as a flow around a rotating propeller by recomputing DCI at each time steps. It is confirmed that the system has capability to simulate unsteady flow field around a rotating propeller by dynamic overset assembling approach practically.

研究分野：船舶流体力学

キーワード：動的重合格子 CFD プロペラ 構造格子 非定常計算

### 1. 研究開始当初の背景

国際海運においては、CO<sub>2</sub> 排出削減規制を導入するための MARPOL 条約の改正附属書 VI が、2013 年 1 月 1 日に発効し、新船に「エネルギー効率設計指標 (EEDI)」が導入されることとなっている。EEDI は、1 トンの荷物を 1 マイル運ぶ際の CO<sub>2</sub> 排出量で表される船舶の燃費指標である。このため、船舶設計において、一層の燃費性能の追及が求められている。

船舶の推進性能は、摩擦抵抗、圧力抵抗及び造波抵抗といった船体の推進抵抗や、プロペラの推進効率等の影響を受ける。特にプロペラの推進効率の改善は、近年注目されており、付加物 (省エネルギーデバイス) を配置することにより船尾流場を改善し、推進効率の向上を図る試みが多数行われている。その際、主として模型を使用した実験による手法と、数値計算によるシミュレーションの 2 つのアプローチが存在するが、多数のデザインパターンの調査やレイノルズ数影響の評価の観点からシミュレーションによる現象の再現が極めて有用である。流体现象が非線形かつ非定常であるため、計算流体力学による計算が有効である。

船体周り流れの CFD 計算におけるプロペラ影響の評価は、体積力をプロペラ面に与えることでプロペラ影響を考慮する体積力モデルから始まり、その後プロペラ周りに計算格子を生成し、船体周りの計算格子とはスライディングメッシュ法により接合する手法が一般化している。しかし、舵とプロペラの間隔が狭い場合等、物体間隔によってはスライディングメッシュ法が適用困難であり、格子同士を重合させ流場情報を互いに補完する動的重合格子法が注目されている。特にプロペラ後流において付加物等による推進効率改善 (エネルギーロスの回避) を図るためには、ハブボルテックス等プロペラ後方の流場が高精度に推定可能であることが必要であり、動的重合格子が最も適した手法であると考えられる。

船舶用 CFD は、抵抗・推進分野で実用されつつある。しかし、今後は運航性能の総合的な評価に向けて、省エネルギーデバイスやプロペラ等の複雑形状対応、あるいは波浪中運動シミュレーション等、適用領域をさらに広げる必要がある。中でも回転するプロペラ周りの船尾流場は船舶海洋流体力学分野で、ブレイクスルーが望まれる分野であり、かつ非線形・非定常問題への適用可能性、粘性流の取り扱い、自航あるいはフリーランへの発展性等の観点から CFD 計算以外の手法での解決は困難である。

### 2. 研究の目的

プロペラを作動させて航行している船舶の船尾周りの流れを高精度に計算可能な CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーション法を開発し、ハブボルテックス

等プロペラ後方の流れ場の解明を行う。非定常かつ複雑な渦場をとまなうため、乱流モデル等数値モデルの改良、高精度で安定した補間を実現するための重合格子法の改良を実施し、様々な省エネルギーデバイスが存在する場合でも、流場の情報をもとにした定量的な効果の検証を可能とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 重合格子法の改良

重合格子法は、互いに重合 (オーバーラップ) する複数の格子ブロック間で計算領域をカバーし、計算時には物理量等を補間し合うことで流場を求める。例えば、船体、船尾フィン、舵、舵フィン等の周りの流場を計算する場合、個々の物体周りの計算格子を個別に作成し、計算領域内に配置する。計算格子ブロック間で流速や圧力といった物理量を補間するための補間係数 (重合情報) を予め計算しておき、CFD 計算時には物理量を補間し合うことで対象物体周りの流場を求めることができる。本研究で開発・使用している重合格子生成法は、構造格子をベースとしている。インデクシングや格子の集中化が容易である反面、境界適合格子生成において特異点、特異線、特異面、周期境界の取扱いが複雑となる。より多くの複雑形状へ対応するため、トポロジーの追加や格子生成、補間手法の高精度化等の重合格子法の改良を行う。

#### (2) 動的重合格子法開発

物体の運動を伴う非定常計算では、移動格子等の手法で物体の移動を処理する必要があるが、重合格子法においては上述の重合情報の計算を各時間ステップで行う必要がある。非定常計算では複数の時刻ステップ間で計算を行うため、ステップ間での整合 (前時刻で計算領域外にあったセルが、計算領域内に移動した場合は、必ず値を補間されるセルとする等) を確保できる手法の開発を行う。

#### (3) 高速化対応

動的重合格子法では、各時刻ステップで重合情報の計算を行う必要があるため、計算時間が多大になる傾向がある。そのため、相対的な位置関係が変化しない計算格子間では重合関係の再計算を行わないといった重合情報計算の高速化や、粗い格子から計算を始める Full Multigrid の手法を動的重合格子法に適用可能とする等の高速化手法の開発を行う。

### 4. 研究成果

運輸省航海訓練所 (当時) 練習船「青雲丸」の通常プロペラを対象として、一様流中の単独プロペラ計算を行った。図 4.1 に計算格子の概要を示す。直方体で覆われる計算領域内で、プロペラブレード及びボスの計算格子をプロペラ軸周りに回転させて計算を行った。図 4.2 にスラスト及びトルク係数の計算結果

について、動的重合格子法の計算結果と実験結果及び体積力モデル (Body Force) との比較を示す。MAU プロペラに関しては、体積力モデルはチューニングされているため全般的に実験値に合う傾向にあるが、スラスト係数については本計算の方が、実験値に近い結果となった。トルク係数については粘性影響が大きく現象が複雑で、かつ格子依存性も強いいため、今後更なる検証が必要である。

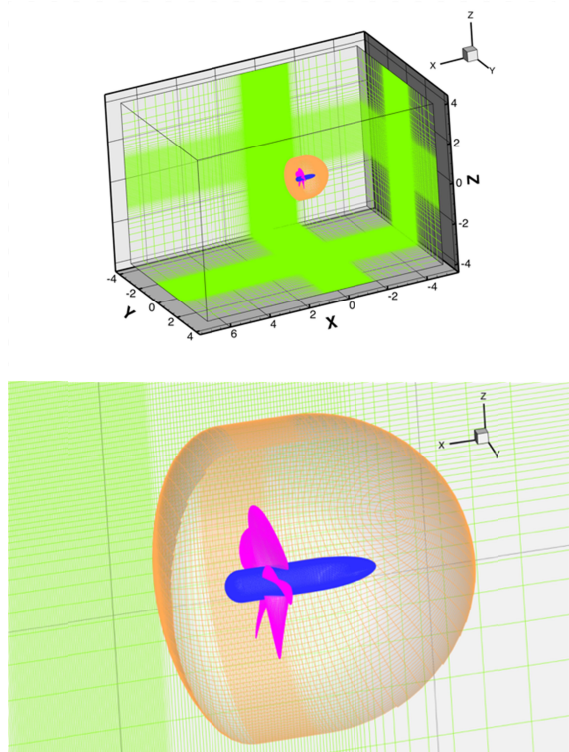


図 4.1 プロペラ周りの重合格子全体図(上), プロペラ部分の拡大図(下)

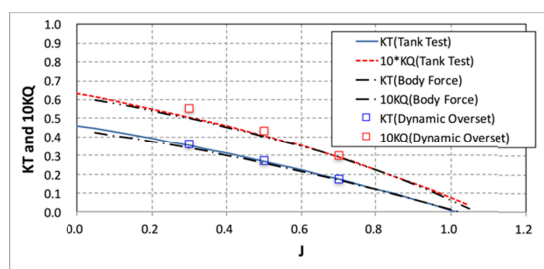


図 4.2 POT 計算結果

一方、船後でプロペラを回転させる自航シミュレーションに際しては、プロペラの回転運動をとらえるために時間刻みを細かくする必要があります。このため、効率的かつ高速に計算を行うことが、実用面で重要である。そのため、各ステップでの重合情報更新が必要な非定常計算においても、粗い格子で計算を開始し、細かい格子に移行する Full Multigrid 法を適用可能とする開発を行った。粗い格子 (Coarse grid) と、細かい格子 (Fine grid) での格子及び流線を図 4.3 に示す。計算対象はバルクキャリア船型 (JBC) の設計

速力での自由表面付自航計算である。詳細流場は細かい格子で計算を行う必要があるが、計算開始時は粗い格子で行うことで、計算を効率的に実施可能である。

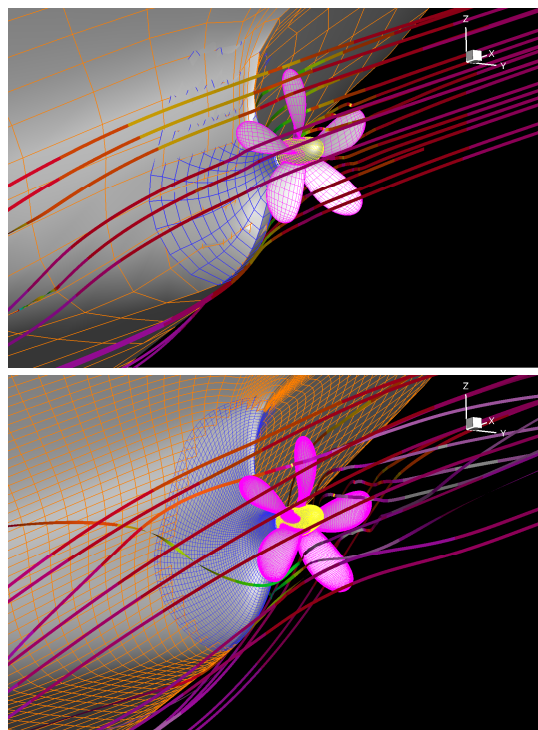


図 4.3 Full Multigrid による自航シミュレーション(上: Coarse grid, 下: Fine grid)

別の高速化手法として、定常抵抗計算の流場を元にプロペラ周りの計算格子の初期流場を補間により作成し、プロペラ周りの流場計算を行う手法も開発した。図 4.4 及び図 4.5 にある瞬間での、物体表面圧力分布と渦度の等値面を示す。計算対象は上と同様にバルクキャリア船型 (JBC) の設計速力での自由表面付自航計算である。

図 4.4 は、主流方向の渦度  $\omega_x \cdot L_{pp}/U = -400$  の等値面であり、図 4.5 は、 $\omega_x \cdot L_{pp}/U = 400$  のものである。ハブ後方の渦や、各ブレード後縁部の渦が確認できる。

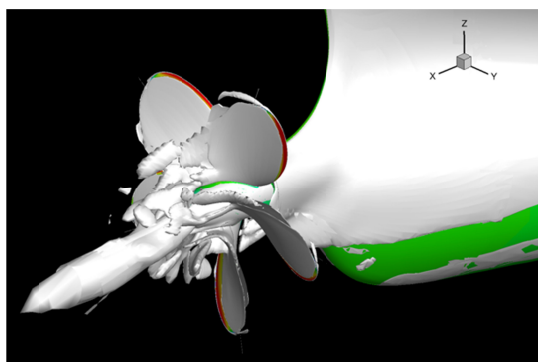


図 4.4 渦度  $\omega_x \cdot L_{pp}/U = -400$  の等値面 (x: 主流方向、 $L_{pp}$ : 垂線間長 (代表長さ)、U: 一様流速度 (代表速度))

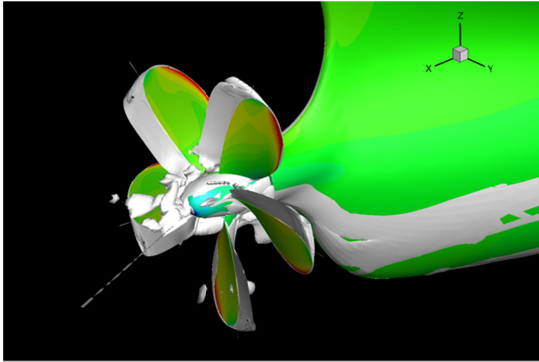


図 4.5 渦度  $\omega_x \cdot L_{PP}/U = 400$  の iso surface

## 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 1件)

Hiroshi KOBAYASHI and Yoshiaki KODAMA, DEVELOPING SPLINE BASED OVERSET GRID APPROACH AND APPLICATION TO UNSTEADY FLOW AROUND A MOVING BODY, Journal of Mathematics and System Science, 査読有, Vol. 6, 2016, pp.339-347  
DOI:10.17265/2159-5291

### [学会発表](計 5件)

Hiroshi KOBAYASHI and Yoshiaki KODAMA, DEVELOPING SPLINE BASED OVERSET GRID APPROACH AND APPLICATION TO UNSTEADY FLOW AROUND A MOVING BODY, VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering(MARINE 2015), 査読有, 2015

H. Kobayashi, K. Ohashi and N. Hirata, Flow Simulations Using Overset Grid Assembler UP GRID and Navier-Stokes Solver NAGISA, Proceeding of "Tokyo 2015 A workshop on CFD in Ship Hydrodynamics", 査読無, 2015

H. Kobayashi, K. Ohashi and N. Hirata, Overset grid approach for the flow behind a high block coefficient ship with an appendage, Proceedings of the 29th Computational Fluid Dynamics Symposium, D09-1, 査読無, 2015

H. Kobayashi and K. Ohashi, Flow simulation around a rotating propeller with dynamic overset grid approach, Proceedings of The 7th International Conference on Computational Methods(ICCM2016), 査読有, 2016

H. Kobayashi, J. Fujisawa and R. Fukasawa, Numerical Simulation With

Overset Approach For a Bulk Carrier(JBC) In Shallow Water, Proceedings of JASNAOE autumn meeting, 査読無, 2016

[その他]  
ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

小林 寛 (KOBAYASHI, Hiroshi)

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：20361503