

## 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24年5月25日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360439

研究課題名（和文）船舶性能予測シミュレーションにおける実海域再現技術

研究課題名（英文）Reproduction of Actual-Sea Environment for Simulation-based Performance Evaluation of Ships

研究代表者

日野 孝則（HINO TAKANORI）

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：60373429

研究成果の概要（和文）：実海域における船舶の性能予測シミュレーションのために、与えられた海象条件に相当する不規則波を数値的に発生させる手法を開発した。さらに、船体まわりに生成した計算格子と波浪場の計算格子をオーバーラップさせて扱う重合格子法を用いて船舶の不規則波中航行シミュレーションを可能にした。

研究成果の概要（英文）：For the evaluation of ship's performance in actual-sea environment, a numerical method to reproduce irregular wave fields with given sea conditions has been developed. The use of an overlapping mesh technique which employs overlapped multiple mesh blocks makes it possible to simulate ship flows in irregular waves.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	7,400,000	2,220,000	9,620,000

研究分野：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：船舶工学、流体力学、計算物理、CFD

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策は全世界的な課題であり、各産業分野で温室効果ガスの削減が求められている。造船海運分野も例外ではなく、省エネルギー性能に優れた船舶の開発や効率的な運航方法の研究が活発化している。

船舶の燃費性能は、これまで平水中の性能で規定されることが通例であった。船型や推進システムの性能の基本特性は平水中の性能に最も強く現れるからである。しかし、実際の船舶は平水中のみを航行するわけではなく、様々な海象に遭遇している。したがって船舶の生涯燃費を推定して性能を評価す

るためには、船舶が遭遇すると予想される実海域海象における性能を評価する必要がある。

実海域性能の評価の重要性は国内外でも認識されており、我が国は実海域における船舶の燃費指標として「海の10モード指標」を開発し、IMO(国際海事機関)に提案している。設計段階での実海域性能評価にはいくつかの技術課題がある。実海域海象の中で最も性能に影響すると考えられる波浪中性能について言えば、平水中では定常状態として解析できる流体现象を、船体運動を伴う非定常なものとして扱う必要がある。また、実海域

海象を再現するためには、海洋波浪を精度良くモデル化する必要もある。これらの性能を水槽実験で計測することは多大な労力を必要とする。

CFD（計算流体力学）技術は、近年大きく進展し、計算機ハードウェアの高性能化と低価格化によって数十個から数百個の CPU による並列大規模計算も一般的になりつつある。船舶性能推定における CFD 応用の範囲も複雑化、大規模化の傾向にあり、抵抗・推進という平水中定常状態のシミュレーションだけではなく、操縦運動や波浪中のような非定常流れのシミュレーションも実用レベルに向かいつつある。CFD シミュレーションによって実海域性能を評価する場合に必要な要素技術としては、非定常流れ計算、船体運動計算などの他に海象を再現するための波浪シミュレーション技術がある。

船舶の波浪中性能の最も簡便な推定法は一方の規則波中の性能評価であり、正面向かい波中の性能試験は曳航水槽で行われている。しかし、実海域の海洋波は不規則波であり、水槽試験における造波では、周波数スペクトルと方向スペクトルのモデルを用いて種々の周期を持つ規則波の重ね合わせで表現することが一般的である。CFD においても同様に規則波の重ね合わせで実海域海象に相当する波浪を発生させ、その中で船舶を航走させるシミュレーションを行うことで実海域における船舶性能を推定することが可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究においては、実海域における船舶の性能予測シミュレーションのために、与えられた海象条件に相当する不規則波を数値的に発生させる手法を開発する。不規則波は、与えられた周波数スペクトルと方向スペクトルを元にして異なる周波数の規則波を重ね合わせることで発生させる。CFD 手法においては計算領域における境界条件として波高および速度、圧力を与えることになる。

さらに、不規則波中における船舶性能評価のために、船体まわりに生成した計算格子と波浪場の計算格子をオーバーラップさせて扱う重合格子法を用いて船舶の不規則波中航行シミュレーションを行う。

本研究で開発される、重合格子法を用いた、波浪中を運動しながら航行する船舶まわりの流れのシミュレーションによって、船舶の実海域性能の高精度評価が可能となれば、低燃費の船舶設計を通じて地球温暖化対策に貢献することができる。

## 3. 研究の方法

まず CFD シミュレーションにおける波浪生成のための要素技術の研究を行う。

### (1) 線形規則波理論と非線形自由表面条件の整合

不規則波生成は規則波の重ね合わせによって行うが、その基礎となる規則波理論は線形理論であり、水面の波高が微小であるという仮定のもとに構成されている。一方、CFD 解析ではナビエ・ストークス方程式を基礎式とし、非線形自由表面条件を満たすようにアルゴリズムが構成されている。両者の間の整合をとる境界条件設定法を開発する。

### (2) 造波境界条件と減衰境界条件の定式化

CFD 解析における計算領域は有限であり、波が変形するので、周期境界を用いることができない。そのため、流出境界を設定し、ここでは波の反射を避けるため、波のエネルギーを減衰させる減衰境界条件を用いることが多い。有効に波エネルギーを減衰させるため境界条件として、減衰領域の大きさや減衰方法を検討する。

### (3) 移動する計算領域における境界条件の設定

静止している海洋構造物まわりの流れ解析などでは、計算領域が固定されており、実際の波浪水槽と同様に造波位置も空間に固定されている。しかし、航行する船のまわりの流れ解析の場合は、船とともに移動する計算領域を用いなければ、非常に大きな計算領域を設定することになり、現実的ではない。そのため、シミュレーションにおいては、造波境界が時間とともに移動することになる。その場合の造波境界条件は、空間固定の場合とは異なったものになる。適切な定式化を行い、移動境界における造波を可能にする。

次に不規則波生成のための要素技術を開発する。

### (4) 線形規則波の重ね合わせによる不規則波生成

与えられた周波数スペクトルと方向スペクトルから求められる素成規則波を重ね合わせて不規則波を生成する。規則波の場合は波の伝搬方向が一方であるため、流出境界を一意に定めることができ、その境界において減衰境界条件を課すことができた。しかし多方向波の場合は個々の波については流出方向はランダムであり、単純に減衰境界条件を課すことができない。そこで、実験水槽における側壁反射型方向スペクトル造波機の考え方などを参考にして、新しい流出境界条件を開発する。

### (5) 移動する計算領域における不規則波生成

(4)で開発した生成手法を移動する計算境

界に適用するための拡張を行う。造波境界と流出境界がともに移動するので、それぞれについて境界移動の影響を定式化し組み込む。

(6) 自由表面流れにおける重合格子法の組み込み

船体まわりの自由表面粘性流れ計算プログラムに複数格子を重ね合わせて複雑形状を扱うため重合格子法を組み込む。

最後にこれまでに開発した技術を統合して不規則波中の船舶航行シミュレーション手法を完成させる。

(7) 船体運動モデルの組み込み

船体まわりの自由表面粘性流れ計算プログラムに船体運動モデルを組み込む。各時間ステップにおける船体表面の流体力を計算し、それをもとに船体の運動方程式を解いて船体運動を求める。その結果から船体の位置と姿勢を求め、計算格子を移動させる。

(8) 不規則波中の船舶航行シミュレーション

すべての要素を統合した手法により不規則波中の船舶航行シミュレーションを実行する。

4. 研究成果

まず、要素技術として、非定常流れにおける非線形自由表面条件、造波境界条件と減衰境界条件の定式化および移動する計算領域における境界条件の設定について検討を行った。界面捕獲法を用いたナビエ・ストークス・ソルバーに造波境界条件を組み込むため、波高および圧力、速度の取り扱いを検討し、非定常かつ非線形の自由表面条件を扱うための数値スキームを構築した。

図-1 はナビエ・ストークス・ソルバーによる規則波生成の1例である。手前側の減衰境界条件が有効に働いている。

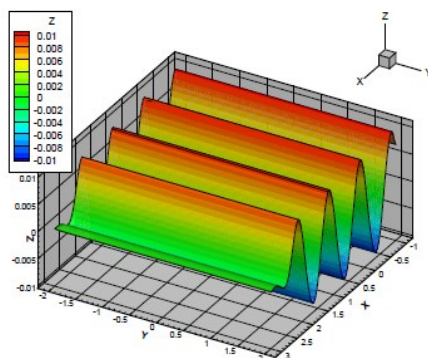


図-1 規則波の生成

また、造波境界条件に関する要素技術を基にして、与えられたエネルギースペクトルに対応した周波数と波高を持つ複数の規則波

の重ね合わせによる不規則波生成法の開発を行った。さらに、計算領域が移動する場合における境界条件の扱いを検討した。これらの検討により、界面捕獲法を組み込んだ、非定常粘性自由表面流れを計算するナビエ・ストークス・ソルバーにおける不規則波生成法に関して基礎技術を確立した。

波浪場における船体まわりの流れを計算するための準備として、同じナビエ・ストークス・ソルバーをベースとして、船体近傍に生成した格子ブロックと計算領域全体をカバーする背景格子ブロックを重ね合わせて流場を計算する重合格子法を開発した。これにより、背景格子ブロックにおいて生成した任意の波浪場の中を航行する船体まわりの流れを計算することが可能となった。図-2 は数値的に生成した不規則波の計算例である。また、図-3 は重合格子による船体周りの流れ計算例である。

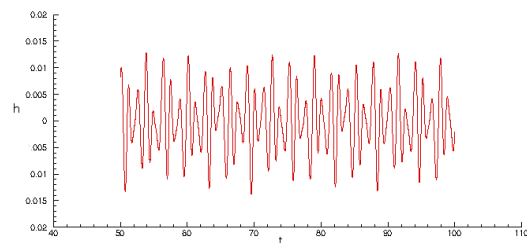


図-2 不規則波の計算例

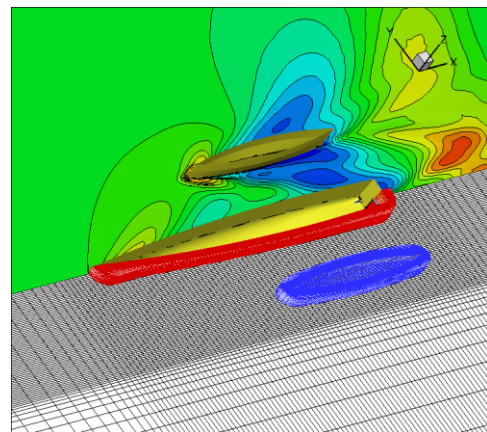


図-3 重合格子による計算例

最後にこれまでに開発した波浪モデリング技術、および船体まわりの流れを重合格子法で解析する技術を統合することで、不規則波中の船舶航行シミュレーション手法の開発を行った。

まず、船体まわりの自由表面粘性流れ計算プログラムに船体運動モデルを組み込んだ。各時間ステップにおいて船体に働く流体力を外力として船体の運動方程式を解き、船体の位置と姿勢の変化を求める。その変化に対応するように船体まわりの計算格子を移動

させる。船体から離れた領域は、船体まわりの格子とは別の格子ブロックによって分割されており、この格子における境界条件として波浪の発生条件を与える。これら二つの格子ブロックが重合格子法によって相互に情報を交換することで、不規則波浪中を運動しながら航行する船舶まわりの流れのシミュレーション法として機能する。

図-4 は重合格子法による不規則波中を航行する船体まわりの流れの計算例である。

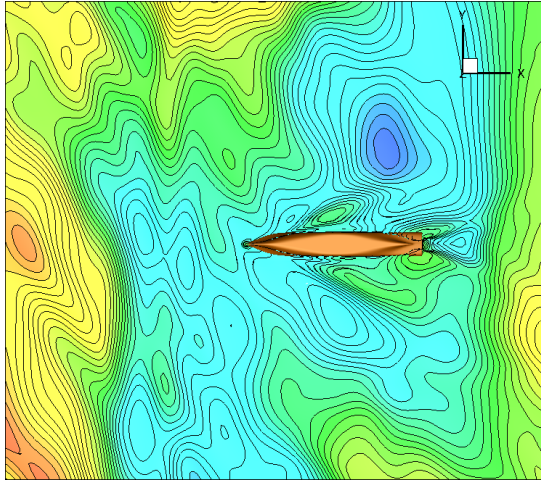


図-4 不規則波中の船体まわりの流れの計算例（波紋図）

本手法を用いた船舶の実海域性能の高精度評価により、低燃費の船舶設計が効率化し、海上輸送における地球温暖化対策に貢献することが期待される。

## 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)

[学会発表] (計 3 件)

① Nobuaki Sakamoto, Kunihide Ohashi, Hiroshi Kobayashi and Nobuyuki Hirata, Analysis of Non-Linear/Large-Amplitude Motions of Submerged and Floating Bodies by URANS Simulation with Moving Grid Technique、第 25 回数値流体力学シンポジウム 2011 年 12 月 21 日、大阪

② Hiroshi Kobayashi, Takanori Hino, and Kunihide Ohashi、Boundary Conditions in Numerical Wave Tank、第 24 回数値流体力学シンポジウム、2010 年 12 月 20 日、東京

③ Takanori Hino, Kunihide Ohashi and Hiroshi Kobayashi, Flow Simulations Using Navier-Stokes Solver SURF, Gothenburg 2010 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics 2010 年 12 月 8-10 日, Gothenburg, Sweden

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

日野 孝則 (HINO TAKANORI)  
横浜国立大学・工学研究院・教授  
研究者番号：60373429

### (2) 研究分担者

小林 寛 (KOBAYASHI HIROSHI)  
海上技術安全研究所・流体性能評価系・主任研究員

研究者番号：20361503

(H21-22)

大橋 訓英 (OHASHI KUNIHIDE)

海上技術安全研究所・流体性能評価系・主任研究員

研究者番号：10462871

(H23)