

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289315

研究課題名(和文) 船舶流体力学におけるマルチスケールシミュレーションの研究

研究課題名(英文) Study on Multi-Scale Simulations in Ship Hydrodynamics

研究代表者

日野 孝則 (Hino, Takanori)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60373429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,200,000円

研究成果の概要(和文)：船舶流体力学におけるマルチスケールシミュレーションにおいて、複数の長さスケールと時間スケールを扱うための領域分割方法を開発した。領域分割法では、複数の格子ブロックを生成する、マルチブロック格子法を適用し、ブロック間のインターフェースでは、互いに変数を補間することにより、格子ブロック間の情報交換を行う。空間領域については内挿を、時間領域においては、領域全体の時間精度を維持するために、内挿と外挿の組み合わせを用いる。以上の開発により、空間マルチスケールシミュレーション法と時間マルチスケールシミュレーションを統合して、時空間マルチスケールシミュレーション法を構成することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：A multi-scale simulation method for ship hydrodynamics has been developed based on the domain decomposition approach using multiple grid blocks. The different length scales and time scales are assigned in each block. In order to achieve the connections between blocks, the interpolation is used for the space domain, whereas the combination of interpolation and extrapolation must be adopted in the time domain to maintain time accuracy. By integrating the multi-scale simulation method for the space domain and the time domain, a generic multi-scale simulation method for ship hydrodynamics can be established.

研究分野：船舶流体力学

キーワード：船舶流体力学 計算流体力学 マルチスケール

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化は地球環境問題の中でも極めて重要な課題であり、あらゆる分野においてその対策が求められている。船舶についても温室効果ガス(GHG)の排出削減が求められており、IMO(国際海事機関)は、「エネルギー効率設計指標(EEDI)」などを用いた船舶からのCO₂排出規制を2013年から発効させることを決定している。

このような規制に対応するためには、これまで以上に省エネルギー性能に優れた船舶を開発し、船型やプロペラの最適設計を進めるとともに、各種の省エネルギー技術を複合的に利用して性能目標の達成を図る必要がある。船舶の流体力学的性能は、極めて複雑な流体現象に支配されている。船体まわりの流れはレイノルズ数が高いため、基本的に3次元の乱流境界層である。さらに、船体は各種の設計条件を満たすように設計された自由曲面であり、かつ、船尾付近には推進器や舵、各種の省エネルギーデバイスなどが装備されるので、境界層の変形や剥離が発生し、非線形の強い粘性流れとなっている。また、推進器であるプロペラは流体を回転させて加速することで推力を得るので、流れはさらに大きく変形し、様々なスケールの渦運動が発生する。自由表面である水面を航走する船舶は造波現象を伴う。自由表面現象は本質的に非線形であり、造波現象は造波抵抗の源であると同時に、波崩れに伴う運動量損失や水面の乱れによるエネルギーの散逸などをもたらす。また、粘性影響と自由表面影響はお互いに干渉するので、流場構造はさらに複雑化する。

設計段階における船舶の性能推定には、縮尺モデルによる水槽試験が用いられている。しかし、長さが数百mの実船と数mの模型船では、レイノルズ数で2桁から3桁の相違があり、水槽試験による性能評価には尺度影響が不可避である。従来は、実船馬力と模型の性能の間の相関データベースを構築し、それを用いることで実船の性能推定を行ってきた。この相関データベースはあくまでも流体力学的性能評価の最終結果である推進馬力についての模型と実船の相関であり、より本質的な、実船のまわりの流場と模型船のまわりの流場との間の尺度影響を厳密に考慮しているわけではない。

一方で、計算機の発達に伴って、開発されたナビエ・ストークス方程式の数値解法である計算流体力学(CFD)手法は、CPUの高速化、メモリの大規模化とともにその適用範囲が拡大している。海事流体力学においても船舶の性能評価にCFDによる数値シミュレーションが広く用いられるようになってきた。当初は、模型試験を計算でシミュレートする、いわゆる「数値水槽」アプリケーションが主体であったが、大規模計算が一般化するにつれて、実船スケールにおける性能評価も視野に入ってきた。CFDによるシミュレーション

では流場全体の情報が得られることから、実船スケールの解析は流場に関する尺度影響を解明する手段としても有効である。設計段階での性能評価は模型試験に依存するが、模型と実船の間の性能相関は試験水槽毎に異なることから、実船性能推定の客観性を担保する上でもCFDベースの実船性能推定が一役を担えると考えられる。

実船スケールの流場のCFDシミュレーションは、上に述べたような極めて複雑な流体現象を正確に扱う必要がある。この複雑性の大きな理由は、流体現象に関わる空間スケールと時間スケールが広いレンジに分布していることである。そのため、CFDシミュレーションにおいて、すべてのスケールを解像しようとする膨大な計算資源が必要となり、実際的ではない。実用上は、乱流モデルなどの数理モデルを導入して、解像しきれないスケールの現象をモデルで表現することになる。しかし、スケールの異なる流体現象の間に強い干渉がある場合には、そのような干渉を想定していない数理モデルでは現象を正確に表現できない可能性がある。したがって、船体まわり流場のような、スケールの異なる現象が互いに干渉する流場を正確に解析するためには、それぞれの現象が支配的な領域を特定し、それぞれの領域で、そこでの代表スケールに対応した格子サイズや時間刻み幅を設定し、数理モデルを再構成して、流場全体を統合的に扱う、マルチスケールシミュレーション技術が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、船舶流体力学におけるマルチスケールシミュレーション技術の開発である。種々のスケールの流体現象が混在する複雑な流場を、流体現象の特性とそのスケールを考慮して、適切な数理モデルと最適な格子サイズと時間刻みを組み合わせる統合的に解析することを目標とする。

そのために、流場を流場の特性によって領域に分割し、領域毎に支配的な流体現象とその空間時間スケールを勘案して適切な格子解像度と時間刻みを設定し、それらに対応した数理モデルを導入することで領域相互の干渉を考慮して流場全体を同時に解いて、統合的に流場を解析する手法を開発する。

3. 研究の方法

船舶流体力学におけるマルチスケールシミュレーションの概念を確立するために、船体まわりの流れについて、関連する流体現象とその現象の長さスケールと時間スケールを整理する。また、乱流モデルなどの数理モデルを用いる場合には、モデルのベースとなっているスケールも合わせて整理する。これらの検討によってシミュレーションに必要なスケールのレンジの設定が可能となる。

次に上記のレンジをカバーするための、マルチスケールシミュレーション基盤技術を

開発する。マルチスケールの現象を単一の格子や単一の時間刻みで離散化することは効率的ではなく、実際的でもない。したがって、最も基本的な基盤技術は領域分割である。関わるスケールが長さや時間の2つなので、領域分割も空間領域と時間領域のそれぞれについて考える。

空間領域分割の考え方を示す。例えば、船体に省エネルギー付加物としてフィンが装着された状態の格子を考える。関連する流体現象として、圧力のポテンシャル成分と境界層を考えた場合、境界層の粘性底層の厚さは圧力分布の長さスケールよりもはるかに小さい。そのため、境界層方向の格子サイズは物体近傍では非常に小さくとる必要があり、そのサイズは数値モデル（この場合は乱流モデル）の特性によって規定される。船体表面の格子は船体から離れる方向（境界層方向）に非常に細かい格子となるが、船体に添う方向には圧力分布の長さスケールを解像すればよいので、それほど細かい格子を用いる必要がない。したがって、アスペクト比の非常に大きい、扁平な格子セルを用いることになる。対象が船体単独であれば、長さスケールとその方向性が一意に決まるので、上記のような格子で精度良く計算が行われる。しかし、省エネルギーフィンのような別のスケールの物体が加わると、格子の配置に問題が生じる。フィンにとっての境界層方向は、船体表面では表面に添う方向であり、両者に関連する長さスケールが大きく異なることから、格子サイズに対する要請が衝突することになる。フィンの境界層に合わせた格子を生成すると、船体表面の表面に添う方向の格子数が膨大となり、船体表面に添う方向の解像度に合わせた格子ではフィンの境界層を解像できない。このような場合、領域分割法を用いて、計算領域を船体まわりの領域と省エネルギーフィンのまわりの領域に分割し、それぞれの領域で、長さスケールの特性に合わせた格子を生成することで、格子解像度の要求の衝突を避けることができる。

領域毎に格子ブロックを生成するので、マルチブロック格子法を適用することになる。格子の大きさが領域毎に異なることを想定するので、ブロック間のインターフェースでは、格子点の共有を仮定せず、格子ブロック間の情報交換を互いに変数を補間することで行う。

上記のような、領域分割法による空間マルチスケールの取扱いでは、

- (1) 計算領域で生じる流体現象とそれを扱う数値モデルに基づく長さスケールの決定
- (2) 長さスケールの衝突の検出
- (3) 長さスケールの衝突を回避する領域分割
- (4) 領域毎に長さスケールに対応した格子生成
- (5) 空間補間に基づく領域間インターフェースの設定

というプロセスを経る。各プロセスにおいて要素技術の開発を行う。

また、空間マルチスケールシミュレーションの機能強化が必要である。微小スケールに対応する領域では、必然的に格子数が多くなるので計算時間が増大する。そこで、並列処理などの高性能計算 (HPC; High-Performance Computing) 技術を導入して、計算時間の短縮を図る。

さらに時間マルチスケールへの対応を行う。非定常流れ計算において、複数の流体現象が関係する場合に、時間スケールの差が問題になることがある。船体まわりの流れの例では、推進器の回転周期が 0.3 から 1 秒程度であるのに対し、波浪の周期は数秒から数十秒程度であり、波浪中を船運動しながら航走する船体まわりの流れの時間スケールは 10 倍から 100 倍の相違がある。シミュレーションにおいて、推進器の時間スケールに合わせた時間刻みを採用すると、波浪中運動の時間スケールに対しては過少となり、全体の計算時間が膨大になって、空間マルチスケールの場合と同様の問題が発生する。

そこで、時間マルチスケールシミュレーションについても、空間の場合と同様に領域分割法を適用する。解析プロセスを以下に示す。

- (1) 計算領域で生じる流体現象とそれを扱う数値モデルに基づく時間スケールの決定
- (2) 時間スケールの衝突の検出
- (3) 時間スケールの衝突を回避する領域分割
- (4) 領域毎に時間スケールに対応した時間刻みの設定
- (5) 領域間インターフェースの設定

上記(1)から(3)の要素技術は、空間マルチスケールの場合とほぼ同様であり、空間マルチスケールのための技術が適用できると考えられる。しかし、(5)は、領域毎に異なる時間刻みで時間進行する場合の領域間のインターフェースであり、新たな技術開発が必要である。

空間の領域分割の場合は、変数は全ての格子点で与えられているので、領域間インターフェースは空間補間で達成できる。しかし、領域毎に時間刻み幅が異なっている場合には、全ての時間ステップで変数が与えられないので、時間積分の前に時間方向の補間によって同一の時間ステップの解を全ての格子点に配置する必要がある。さらに、数値安定性に優れた陰的時間進行 (Implicit time marching) 法を用いる場合は、新しい時間ステップの値を全格子点で同時に求める必要があるため、時間方向の外挿も必要となる。これらの機能を備えた新しい時間進行スキームを開発する。

最終段階では、空間マルチスケールシミュレーション法と時間マルチスケールシミュ

レーションを統合して、時空間マルチスケールシミュレーション法として完成させる。空間方向のマルチスケールと時間方向のマルチスケールを独立して扱えるような手法として統合し、自由度の高いシミュレーション法を構成する。

4. 研究成果

船舶流体力学におけるマルチスケールシミュレーションの概念を確立するために、船体まわりの流れについて、関連する流体现象とその現象の長さスケールと時間スケールを整理した。これによってシミュレーションにおけるスケールレンジの設定が可能となった。

さらに、これらのスケールレンジをカバーするための、マルチスケールシミュレーション基盤技術として、まず、長さスケールに対応した空間領域の分割方法を開発した。長さスケールの異なる領域毎に格子ブロックを生成するので、マルチブロック格子法を適用することになる。また、格子の大きさが領域毎に異なることを想定するので、ブロック間のインターフェースでは、格子点の共有を仮定せず、格子を重ね合わせて、互いに変数を補間することにより、格子ブロック間の情報交換を行う。

この補間において、格子ブロック間で格子サイズの著しい不均衡があると、計算精度が損なわれることが判明したので、格子ブロックの重なり合う場所では、大きな長さスケールに対応する粗い格子のブロックでは、ブロック境界付近で、格子を局所的に細かくする、局所細密化を行うことにした。この細密化によって、格子間の補間を精度良く行うことができることを確認した。さらにこの細密化を自動的に行うアルゴリズムを開発し、マルチブロック格子生成の労力を大きく低減することができた。

いくつかの計算例によって、領域分割法を用いた空間マルチスケールの取扱いにおける要素技術の確立を確認した。また、局所細密化法の改良として、物体表面のような自由曲面上に配置された格子の細密化の際に、新たに追加する格子点を自由曲面上に配置する技法を開発した。実際の計算例により、自由曲面を有する領域における格子細密化の精度が向上することを確認し、空間におけるマルチスケールシミュレーション法を確立した。

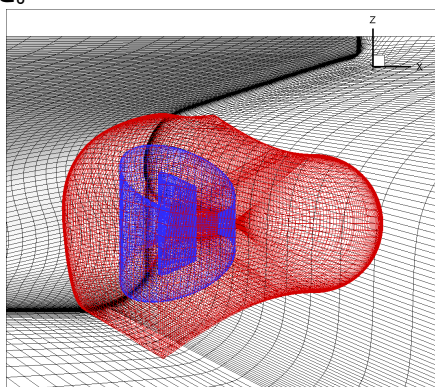


図1 船体に付加物がある場合の領域分割

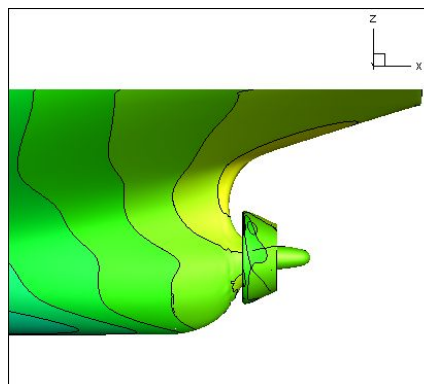


図2 船体に付加物がある場合の圧力の計算値

図1は船体に付加物として省エネルギーデバイスであるダクトを装着した例における領域分割を示す。船体まわりの領域(黒色)と同一のスケールで船尾端の領域(赤色)、異なるスケールでダクトの領域(青色)を配置している。このような領域分割に対してナビエ・ストークス方程式を適用して得られた圧力分布を図2に示す。

さらに、時間領域におけるマルチスケールシミュレーション手法の基礎的検討を行った。空間スケールの場合と同様に空間をいくつかの領域に分割し、各領域の時間スケールに対応して異なる時間刻み幅を設定する。各領域に設定した時間刻みを用いて時間積分を行うが、領域全体の時間精度を維持するには領域間で同期をとる必要がある。そのため、空間方向の領域間の情報交換の場合と同様に、時間方向にも変数補間を行う。CFD計算における計算効率を考慮すると、時間積分には陰的方法を用いることが必須であるため、領域間の変数補間においては、内挿と外挿の組み合わせを用いる。以上のような時間スキームの定式化を行い、簡単な問題について適用可能性を検討した。

図3はKdV方程式の時間発展解の数値解法に時間方向の領域分割を適用した例である。KdV方程式は、図3(a)のように、sin関数を初期値として時間進行すると複数の孤立波に分離することが知られている。

計算領域 $0 \leq x \leq 1$ を3分割し、 $0 \leq x \leq 0.35$ と $0.65 \leq x \leq 1$ は、時間刻みを $dt=0.1$ とし、 $0.35 \leq x \leq 0.65$ は $dt=0.01$ とした。時刻 $t=0.29$ から 0.30 までの解の挙動を図3(b)に示す。また、 $0.42 \leq x \leq 0.45$ の拡大図を図3(c)に示す。領域毎に時間スケールが異なるが、連続した数値解が得られている。

時間マルチスケール解析についても空間と同様に領域分割によって扱えることが確

認されたので、空間マルチスケールシミュレーション法と時間マルチスケールシミュレーションを統合して、時空間マルチスケールシミュレーション法を構成することが可能となった。

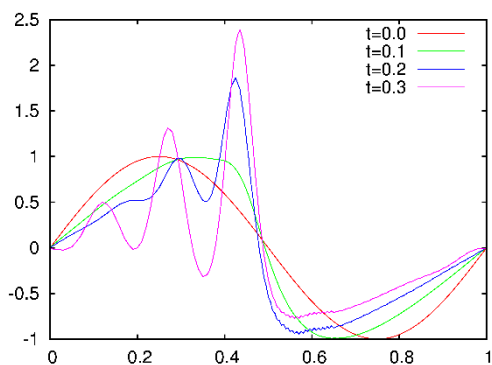


図 3(a) KdV 方程式の時間発展解

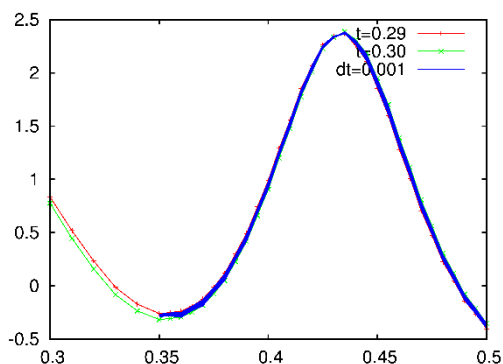


図 3(b) 時間スケール領域分割の場合の数値解

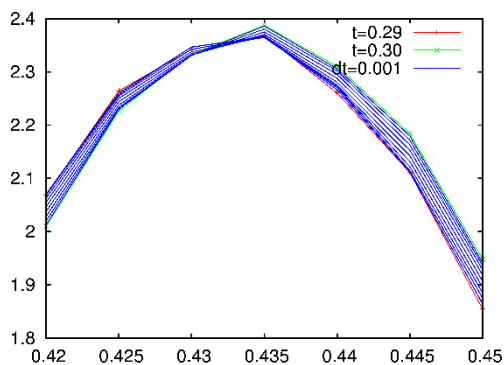


図 3(c) 時間スケール領域分割の場合の数値解(拡大図)

5 . 主な発表論文等

[学会発表](計 4 件)

T. Hino, An adaptive Overset Grid Method for Ship Flow Simulations, 日本船舶海洋工学会平成 25 年秋季講演会, 2013, 大阪.

T. Hino, Simulations of Ship Flows Using An Adaptive Overset Grid Method, 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2013, Hobart (Australia).

T. Hino, Curved Surface Reconstruction for Local Refinement of CFD Grids, 日本船舶海洋工学会平成 26 年秋季講演会 2014, 長崎.

T. Hino et al., Comparison of Unstructured Grid and Overset Grid Approaches for Flow Computations around a Ship with an Energy-Saving Duct, VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, 2015, Rome (Italy).

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

日野 孝則 (HINO, Takanori)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号 : 60373429