

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：44519

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K21563

研究課題名(和文) 流体構造連成計算に対する超効率計算システムの構築

研究課題名(英文) Development of High Performance Efficient Computation System for Fluid-structure Interaction

研究代表者

浅尾 慎一 (Asao, Shinichi)

産業技術短期大学・その他部局等・講師

研究者番号：90462019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：流体構造連成計算に対して研究室レベルのワークステーションで超高効率計算が可能なシミュレーション技術の構築を目指した。本システムのベースとなる3つの手法のうち、「移動埋め込み格子法」、「移動計算領域法」については3次元計算が可能となった。しかしながら「スライディングメッシュ法」に関しては2次元計算にとどまった。これらの計算手法を合わせて並列計算を行った。その結果、研究室PCレベルのCPUを用いて最大3.64倍の計算スピードを得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We aimed to develop a high performance efficient computation system for fluid-structure interaction on a multi-core and/or parallel environment of the small laboratory. In three basic techniques of this system, a three-dimensional calculation was enabled about "Moving Embedded-grid method" and "Moving Computational Domain method". However, a two-dimensional calculation was only possible about "the sliding mesh method". Parallel calculations were performed by combining these methods. As a result, we obtained a calculation speed of 3.64 times at maximum in this system.

研究分野：数値流体力学

キーワード：数値流体力学 先進アルゴリズム 流体構造連成計算 有限体積法 並列計算

1. 研究開始当初の背景

流体構造連成問題は計算流体力学の観点で興味深い流れ場の一つであり、これは物体の移動によって流れが変化し、その流れ場の変化によって物体の移動が変化する現象である。例えば、浮遊血栓や赤血球を含む血管内の流れや弁を含む心臓の血液流れ、ボールの変化球の軌跡の解析、津波によるダム決壊時における瓦礫の漂流位置の予測など多種多様であり、これらの流れの解明は工学上・医学上の知見からも重要である。このような流体構造連成問題は条件が細くなるほど、計算負荷が大きくなるため、スーパーコンピュータを用いた高効率で大規模な計算が必要となる。しかしながら、スーパーコンピュータを使える環境は誰もが持っているわけではない。そのため、研究室レベルの規模の大きさのワークステーションで高効率に計算することが一般的な方法となる。そこで本申請では流体構造連成計算に対してワークステーションでもスーパーコンピュータに匹敵する超高効率計算が可能なシミュレーション技術の構築を目指す。

2. 研究の目的

物体が流体の流れによって変形し、同時に物体の移動・変形により流れが変化する「流体構造連成問題」に対して、研究室レベルのコンピュータでスーパーコンピュータ並みの結果を出す超効率計算システムの構築を目指す。本課題の目的は申請者が研究を進めている下記の3つを統合させ、実用化のための高効率計算システムを提案することにある。

- [1]超効率計算システムのベースとなる3つのアルゴリズム「移動埋め込み格子法」、「移動計算領域法」及び「スライディングメッシュ法」の検討
- [2] 正確な物体変形の構造計算
- [3] 研究室レベルでの大規模計算システム

3. 研究の方法

研究目的を達成するための具体的な項目は以下の3つである。

- [1]超効率計算システムのための3つのアルゴリズム「移動埋め込み格子法」、「移動計算領域法」、「スライディングメッシュ法」の作成、及び、統合
- [2]正確な物体変形の構造計算の手法の調査とアルゴリズムの開発
- [3]研究室レベルでの大規模計算システムの検討

上記の項目を4期に分けて基礎検討、実用化検討と進めた。

H28年度前期

項目[1]の(A)「スライディングメッシュ法」の3次元計算プログラム作成と項目[2]の「正確な物体変形の構造計算」の調査が中心となる。

H28年度後期

項目[1]の(B)「超効率計算システムのための3つのアルゴリズムの統合」と項目[2]の「正確な物体変形の構造計算」のプログラム作成が中心となる。

H29年度前期

項目[1]と項目[2]の統合における検討を行う。また項目[1]と項目[2]の統合ができ次第、[3]の検討を行う。

H29年度後期

項目[1]、[2]、[3]をすべて統合させた超効率計算システムを用いて、大規模な流体構造連成問題を取り組み、現象の解明を行う。

4. 研究成果

・研究の主な成果

項目[1] 超効率計算システムのための3つのアルゴリズムの作成、及び、統合について

当初の計画では3次元計算を目指しており、「移動埋め込み格子法」、「移動計算領域法」の2つについては3次元計算が可能となった。しかしながら「スライディングメッシュ法」に関しては2次元計算にとどまった。ゆえに計算結果についてはすべて、2次元計算を提示する。

移動する回転楕円物体の周りの流れ

「移動計算領域法」と「スライディングメッシュ法」の統合を示すため、図1のような無限に大きい空間を移動する回転楕円周りの流れの数値シミュレーションを行った。

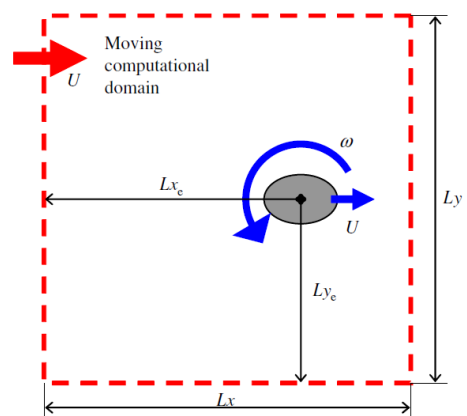


図1 無限に大きい空間を移動する回転楕円周り

物体を回転させながら移動する場合、計算領域(破線領域)ごと移動させた。また楕円の縦横比は1:1, 1:0.75, 1:0.5, 1:0.25とし、それぞれの場合を、Case0, Case1, Case2, Case3とする。計算格子の様子を図2に示す。図2 赤色部分がスライディングメッシュである。計算結果として図3に各Caseの渦の様子を示す。

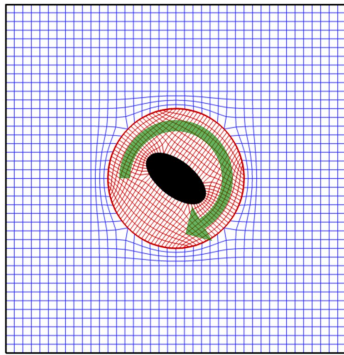


図2 計算格子

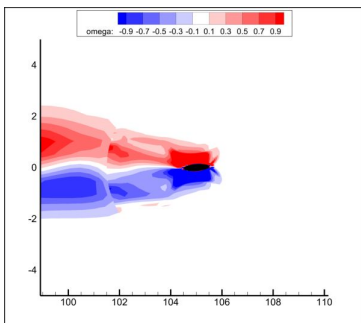
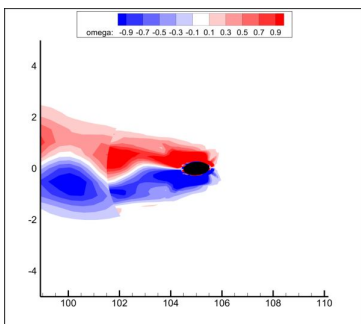
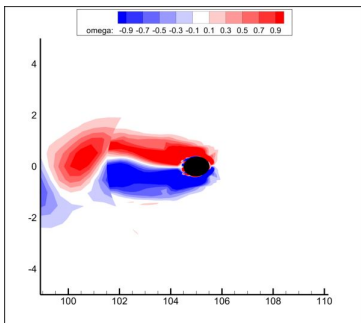
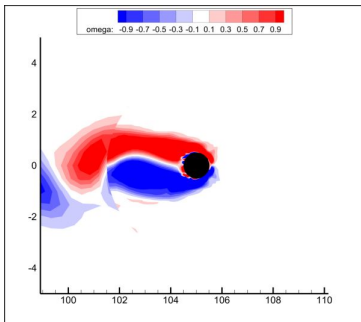


図3 物体周りの渦度の様子  
(赤：正の渦度，青：負の渦度  
上から Case0, Case1, Case2, Case3)

図3より楕円の縦横比により流れの様子の違いがわかる。また，図4は揚力(上下方向の力)係数の時間履歴を示している。これより，物体が真円に近い場合，揚力はカルマン渦の放出の影響によるもの，物体が楕円に近い場合，揚力は物体の回転の影響によるものであることがわかった。

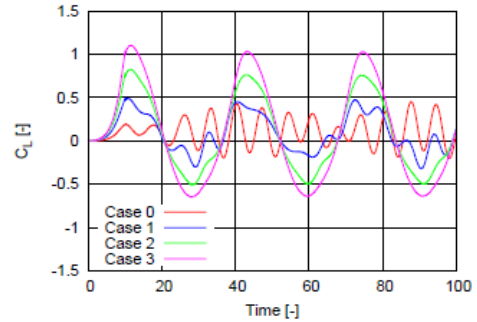


図4 揚力係数の時間履歴

次に、「移動埋め込み格子法」と「スライディングメッシュ法」の統合を示すため，図5のような容器内を移動する複数回転楕円周りの流れの数値シミュレーションを行った。図5における四角形の緑色破線部分が「移動埋め込み格子」であり，円形の青色破線部分が「スライディングメッシュ」である。図中の  $d$  は楕円の長径を表している。

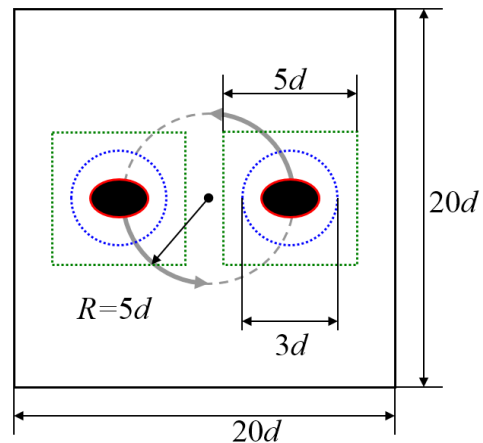


図5 移動する複数回転楕円周りの流れ

計算結果として，図6に各時間における渦度を示す。時間とともに物体が回転し，それとともに渦が生成されているのがわかる。さらに，時間が経過することによって，流れ場は複雑になっていることがわかる。

以上の結果より，項目[1]の超効率計算システムのための3つのアルゴリズム「移動埋め込み格子法」，「移動計算領域法」，「スライディングメッシュ法」，の作成，及び，統合は2次元コードにおいて完了した。

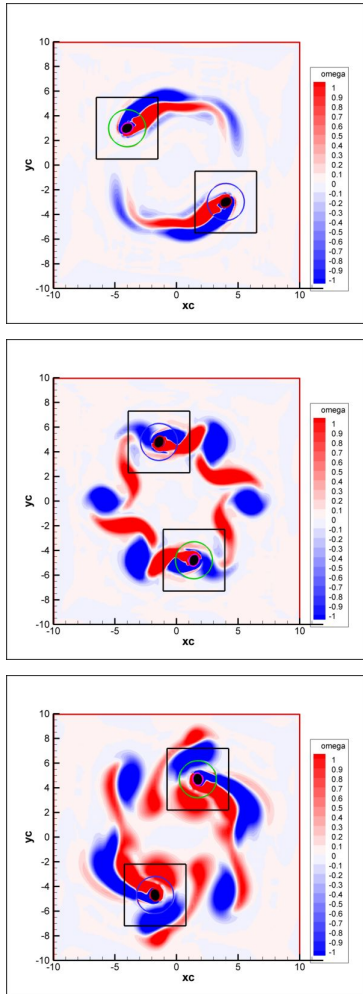


図6 各時間における物体周りの渦度の様子 (赤：正の渦度，青：負の渦度)

項目[2] 正確な物体変形の構造計算の手法の調査とアルゴリズムの開発について

項目[1]の「スライディングメッシュ法」の3次元化の検討に多くの時間を費やしたため構造計算については開発ができず、文献調査のみにとどまった。

項目[3] 研究室レベルでの大規模計算システムの検討について

申請者は非圧縮性流体の並列計算手法の一つであるドミノ法を開発している。本研究期間中に、項目[1]にドミノ法を組み込んだ。その結果、研究室 PC レベルの CPU を用いて最大 3.64 倍の計算スピードを得ることができた。

・得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

流体物体連成問題は、流体力学的な観点において興味深い現象である。この現象に対して高効率で計算することは数多く存在する連成問題を計算する上で喫緊の課題であるとい

える。本研究はその問題に対してのアプローチである。項目1の「スライディングメッシュ法」の3次元化に関しては達成しなかったが、これができるれば計算効率の面で大きなインパクトがあると考えている。また、複数物体が回転しながら移動する流れ場を解析できたことは物理現象の解析手法として学術的な価値がある。

・今後の展望

項目[1]については「スライディングメッシュ法」の3次元化を目指す。これができるようになれば、現実の物体周り流れを効率よく計算できると考えている。

項目[2]については項目[1]が出来次第行う予定であるが、場合によっては項目[1]と同時進行で行っていきたい。

項目[3]については CPU による並列化の他に GPU による並列化がより効率の良い手法であることがわかってきているので、GPU による並列化を目指す。

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4件)

[1] M. Yamakawa, N. Mitsunari, and S. Asao: Numerical Simulation of Rotation of Intermeshing Rotors using Added and Eliminated Mesh Method, *Procedia Computer Science*, 108, pp. 1883-1892, (2017), DOI: 10.1016/j.procs.2017.05.061 査読有

[2] S. ASAO, M. YAMAKAWA, K. MATSUNO and S. ISHIHARA: PROGRESSIVE DEVELOPMENT OF SLIDING MESH APPROACH FOR SIMULATIONS OF A FLOW AROUND MOVING BODY, *The 27th International Symposium on Transport Phenomena Proceedings*, (2016), 査読有

[3] M. YAMAKAWA, S. CHIKAGUCHI and S. ASAO: NUMERICAL SIMULATION OF TILT-ROTOR PLANE USING MULTI AXES SLIDING MESH APPROACH, *The 27th International Symposium on Transport Phenomena Proceedings*, (2016), 査読有

[4] M. NISHIMURA, R. SAKASHITA, M.YAMAKAWA, K.MATSUNO and S. ASAO: NUMERICAL SIMULATION OF AIRCRAFT MODEL TOWARDS DIGITAL FLIGHT BASED ON UNSTRUCTURED MOVING COMPUTATIONAL DOMAIN METHOD, *The 27th International Symposium on Transport Phenomena Proceedings*, (2016), 査読有

〔学会発表〕(計9件)

[1]浅尾 慎一, 山川 勝史: スライディングメッシュ法を用いた移動する回転楕円物体の周りの流れに関する一考察, 第 31 回数値流体力学シンポジウム (2017)

[2]宮岡 伸行, 山川 勝史, 浅尾 慎一: 高速で旋回走行するフォーミュラカー周りの空力解析, 第 31 回数値流体力学シンポジウム (2017)

[3]棚橋 昭夫, 山川 勝史, 浅尾 慎一: 自由表面流れ中に移動物体を有する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)

[4] T. UKAI, M. YAMAKAWA, S. ASAO: Acceleration of Euler/Navier-Stokes Solver with Parallel Computation, Parallel CFD 2017 (2017)

[5] M. Nishimura, R. Sakashita, M. Yamakawa, K. Matsuno, S. Asao: Simulation of Aerobatic Maneuver with Unstructured Moving Computational Domain Method Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology 2016 (2016)

[6] S. Asao, K. Matsuno, M. Yamakawa, S. Ishihara: A parallelization of a Moving Mesh Method with Sliding Mesh Approach for Incompressible Flow, Parallel CFD 2016 (2016)

[7] M. Nishimura, R. Sakashita, M. Yamakawa, K. Matsuno, S. Asao: Parallel Computing for Propeller Aircraft Model Based on Aerodynamics and Flight Dynamics, Parallel CFD 2016 (2016)

[8] M. Yamakawa, Y. Ikuno, K. Matsuno, S. Asao: Unstructured Computing Using Euler and Navier Stokes Equations in an OpenMP Parallel Environment, Parallel CFD 2016 (2016)

[9] S. Ishihara, K. Matsuno, M. Yamakawa, S. Asao: Parallel Numerical Simulation of Free Surface Flow with Moving Submerged Object, Parallel CFD 2016 (2016)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sangitan.ac.jp/sankan/pursuit/machine.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

浅尾慎一 (ASAO SHINICH)

産業技術短期大学 機械工学科 講師

研究者番号 : 90462019