

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23日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560062

研究課題名（和文） 仮想物理空間の基礎となる連成解析手法の開発

研究課題名（英文） Development of Numerical Procedure for Coupled Problems Based on Virtual Physical Space

研究代表者

山田 貴博（TAKAHIRO YAMADA）

横浜国立大学・環境情報研究院・教授

研究者番号：40240022

研究成果の概要（和文）：高度なマルチフィジックスシミュレーションを行う汎用的なシステムを、各現象に対して開発された高性能なシミュレータの統合により実現することが望まれている。本研究課題は、このようなシミュレータの統合するために仮想物理空間と呼ぶ空間・時間に広がる物理量を各シミュレータが共有、操作するプラットフォームを構築することを目指し、そのための理論的な基礎として、領域分割型重合メッシュ法を開発した。

研究成果の概要（英文）：It is important to develop efficient numerical procedures for multi-physics problems by integrating individual simulators for single physics with high resolution. In this work, we introduce virtual physical space, which is a platform to integrate individual simulators and handle physical quantities defined on multiple simulators. In this project, we investigate theoretical foundation of the virtual physical space and develop a finite element procedure for overlapping meshes based on a domain decomposition approach.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 工学基礎

キーワード：シミュレーション工学, 計算物理, マルチフィジックス, 統合プラットフォーム, 仮想物理空間

1. 研究開始当初の背景

コンピュータの高性能化にともない、大規模な数値計算が可能になることで、従来は計算資源の制約から機器、構造物の構成要素毎に行われてきたシミュレーションが機器、構造物の全体に対して実行することが可能となってきた。このようなシミュレーシ

ョンを近年は「まるごとシミュレーション」と呼ばれている。まるごとシミュレーションによって、構成要素単位でのシミュレーションでは評価することのできなかつた全体としての挙動や局所的な挙動が全体に与える影響などを評価することが可能となる。

まるごとシミュレーションの真価が発揮さ

れるのは、流体と構造の連成など複数の物理現象の相互作用を考慮したいいわゆるマルチフィジックスシミュレーションであると考えられる。すなわち、機器・構造物に作用する環境、使用状態を物理現象毎に切り離して検討するのではなく、考慮すべき物理現象すべてを機器・構造物の全体において評価することで、試作・実験に完全に置き換わりうるシミュレーションが実現される。さらに、物理系以外のシミュレーションとして、制御システムを含めた運転状態、操作する人間の特性・反応、マネージメントプランなどの統合も考えられる。その結果として、使用特性や寿命予測、保守計画などが非常に高い精度で予測できる稼働環境下の状態に対するシミュレーションも可能となる。

まるとシミュレーションとして種々のシミュレータを統合し、マルチフィジックスシミュレーションやシステムレベルのシミュレーションを実施するためには、各種シミュレータの統合化技術が必要となる。現在行われているマルチフィジックスシミュレーションでは、予め複数の物理現象を組み込んだ専用のプログラムが用いられることが多いが、各現象に対する高性能で高機能なシミュレータを統合することで実現すれば、汎用的かつ精度の高いシミュレーションが可能となると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、上述のように各現象に対する高性能で高機能なシミュレータを統合することを考える。すなわち、それぞれの現象に対して開発された高度なシミュレータを独立に並列実行し、相互作用を考慮し統合することでマルチフィジックスのシステムに対する汎用的かつ精度の高いシミュレーションを実施することを目指す。そのために本研究課題では、各シミュレータが互いに共有される物理空間上の物理情報を交換するプラットフォームを導入することを考える。このようなプラットフォームとして、現在ヒューマンインターフェースやコミュニケーションなどのために用いられている仮想空間と類似なシステムとして、シミュレータが物理量などを操作、共有する仮想物理空間を提唱する。

仮想物理空間は、単なるシミュレータ相互の情報の交換する情報プラットフォームとしては成立せず、連成問題の数値計算を構成する計算環境となる。そこに必要な機能としては、物理量の定義方法の変換や相互作用を一致させるための連成解析手法も含まれる。

本研究課題は、仮想物理空間を実現するための数値計算技術を開発するものである。

3. 研究の方法

本研究は、各現象に対して開発された高性

能なシミュレータの統合化を行うプラットフォームである仮想物理空間を実現するための数値計算技術の理論的な基礎を確立するものである。

上述の研究目的に対して、以下のように問題設定を行い、研究を進めた。

(1) 領域分割型重合メッシュ法の開発

マルチフィジックスシミュレーションにおいては数値解の解像度に対して柔軟な制御を行うことが必要となる。本研究課題ではそのための手法として、複数の計算格子（メッシュ）を自由に重ね合わせるいわゆる重合メッシュ法に注目し、検討を行う。

差分法における従来の重合メッシュ法では、異なるメッシュは独立な領域として定義され、それぞれの領域における解の求解を基本としている。メッシュ間の接続は、領域間境界における変数を補間し、それぞれのメッシュの境界条件として用いるものとなっている。一方、有限要素法のような Galerkin 法に基づく近似手法においては、解の重ね合わせに基づく重合メッシュ法が一般的である。

本研究では、Nitsche の方法により拡張された Lagrange 未定乗数法を用いた重合メッシュ法を適用する。この方法では、先に述べた差分法の場合と同様に、各領域において独立に求解を行う可能性が指摘されている。この方法に対して、仮想物理空間に対応する背景格子を直交格子として導入し、Lagrange 未定乗数の定義と領域積分を背景直交格子により行う重合メッシュ法を開発する。

(2) スプライン関数を用いた流体計算法

代表的なマルチフィジックスシミュレーションである流体-構造連成問題を考え、仮想物理環境を適用するとき、Galerkin 法に基づく高精度な計算手法が必要となる。しかしながら、Galerkin 法に基づく一般的計算手法である有限要素法では、数値安定性を確保するためには、大きな数値粘性が含まれる安定化有限要素法のような上流化手法が必要となっている。したがって、有限要素法は高精度なマルチフィジックスシミュレーションを実現するための流体計算法としては不十分であり、有限要素法に替わる高精度な流体計算手法が必要となる。そこで、本研究課題では、このような計算手法としてスプライン関数を基底とし、上流化に特性法を用いた手法を開発する。このとき、単に新しい数値計算手法を開発するのではなく、数値特性を評価し、従来の手法と比べて望ましいものとなっているかを確認しながら、計算手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 領域分割型重合メッシュ法

領域分割型の重合メッシュ法に対して、図1のように2つのメッシュ（ここでは、グローバルメッシュとローカルメッシュ）における解の接続と積分の評価に背景直交格子を用いた有限要素解析手法を2次元ポアソン方程式の境界値問題に対して提案した。

提案した手法はNitscheの方法により拡張されたLagrange未定乗数法に基づく方法である。領域分割された各メッシュの有限要素解析は、領域間境界のフラックスに対応するLagrange未定乗数と領域間境界における剛性を考慮した方程式として、独立に計算が可能であり、Lagrange未定乗数に関しては共役勾配法に基づく反復法で解を求めるアルゴリズムを構築することができた。この手法は、重合メッシュ法を分割された問題の連成として取り扱うアルゴリズムであり、マルチフィジックスシミュレーションのための仮想物理空間の実現に向けた技術基盤のひとつとなる。

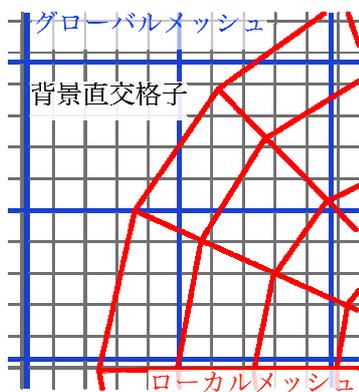


図1 重合メッシュ法

(2) 移流拡散方程式に対するスプライン関数を用いたGalerkin法の特性評価

高精度な流体計算法を目指し、スプライン関数を基底とした特性Galerkin法に基づく計算手法の数値特性を1次元移流拡散方程式によって検討した。

まず、スプライン関数を基底とした特性Galerkin法の数値特性の評価を行った。このとき、従来の数値特性の評価法はスプライン関数を用いた手法に直接は適用することはできなかったため、離散化によって得られる行列の固有値解析を用いた新しい汎用的数値特性評価法を開発した。その結果、2次スプラインを基底とした特性Galerkin法は、高精度な手法として多く用いられている3次精度上流差分の差分法と同等の数値特性を有することを明らかとした。

(3) スプライン関数を用いた手法における境界条件

スプライン近似では、基本的に基底の係数が節点のような特定の点の値の近似関数値を表さないため、ディリクレ境界条件を課す手法に工夫が必要である。Bスプライン関数を用いた手法におけるディリクレ境界条件を考慮する一つの方法は、ノットを重ねることによって得られる非一様Bスプライン(non-uniform B-spline)を用い、ノットを重ねた点で係数の値が関数値を表すようにするものである。他方、一様Bスプライン(uniform B-spline)に対して、ディリクレ境界条件を付帯条件としてペナルティ法等を用いて課す方法も用いられる。このようなスプライン基底を用いた手法のディリクレ境界条件の取り扱いについて、基底の近似能力の立場から明らかにされていないことから、基礎的検討として、1次元問題における非一様Bスプラインと一様Bスプラインについてディリクレ境界条件を課す手法と近似能力の関係を検討した。その結果、2次Bスプラインにおいては、非一様Bスプラインは本質的に一様Bスプラインにおいて拘束条件としてディリクレ境界条件を課したものと同値であることが分かった。

(4) スプライン関数を用いた流体計算手法の開発

前述の特性評価結果を踏まえ、非圧縮Navier-Stokes方程式に対するスプライン関数を基底とした特性Galerkin法に基づく手法を開発した。開発された手法は高精度なものであることが確認されたが、スプライン関数が基底であり、直交格子系の計算手法となっているため、任意形状物体周りの計算や構造との連成解析のためには重合メッシュ法などが特別な技術の導入が必須となる。本研究課題の研究期間においては、重合メッシュ法を導入した手法の開発には到らなかった。

(5) スプライン関数を用いた手法における境界条件

Nitscheの方法に基づく領域分割型の重合メッシュ法は、分割された領域毎に問題を解き、反復法によって領域間境界の変数の整合を図るものとなっている。本研究課題では、このような特徴を整合する1つのメッシュに対する通常の領域分割法にも適用し、大規模計算も仮想物理環境の枠組みで取り扱う可能性を検討した。その結果、Nitscheの方法に基づく領域分割法は、従来の手法と同等の収束性を有することが分かったが、分割された領域毎の問題を解く際に剛体変位成分の拘束に工夫が必要であることも明らかとなった。

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9件)

- (1) 丸岡 晃, 山田貴博, 移流拡散問題におけるBスプライン基底関数を用いた特性ガラーキン法, 日本計算工学会論文集, 査読有, Vol.2012, 20120001, 2012.
- (2) 山田貴博, 落合 亮, 松井和己, 背景直交格子を用いた領域分割型重合メッシュ有限要素法, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol. 67, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 14), 2011, I_117-I_125.
- (3) 落合亮, 山田貴博, 松井和己, バックグラウンドメッシュを用いた領域分割型重合メッシュ有限要素法, 第60回理論応用力学講演会講演論文集, 査読無, 2011.
- (4) 山田貴博, 解の仮定に基づかない移流拡散方程式に対する数値計算法の特性評価法, 第23回計算力学講演会CD-ROM講演論文集, 査読無, 2010.
- (5) 落合亮, 山田貴博, 松井和己, 領域分割型重合メッシュ有限要素法の検討, 第23回計算力学講演会CD-ROM講演論文集, 査読無, 2010.
- (6) 山田貴博, 清水則雄, スプライン基底を用いた計算法の移流拡散方程式における数値特性, 計算工学講演会論文集, 査読無, 15, 2010, pp.521-524.
- (7) 清水則雄, 山田貴博, スプライン基底を用いた特性 Galerkin 法による非圧縮粘性流体の数値計算, 計算工学講演会論文集, 査読無, 15, 2010, pp.745-748.
- (8) 山田貴博, 移流拡散方程式に対する高次基底を用いた近似手法の数値特性評価, 第22回計算力学講演会CD-ROM講演論文集, 査読無, 2009.
- (9) 山田貴博, 松井和己, Block Newton 法を用いた弾塑性体のミクロ-マクロ解析, 第58回理論応用力学講演会講演予稿集, 査読無, 2009, pp.203-204.

[学会発表] (計6件)

- (1) Takahiro Yamada, Finite Element Procedure for Overlapping Meshes Based on Domain Decomposition Approach using Background Voxel Mesh, 11th U.S. National Congress of Computational Mechanics, 2011年7月25日, 米国ミネアポリス.

- (2) Takahiro Yamada, Numerical Properties of High Order Galerkin Type Methods for Advection-Diffusion Equations, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, 2010年7月21日, オーストラリア, シドニー.
- (3) Takahiro Yamada, Multiscale Analysis of Elastoplastic Composite by the Block Newton Procedure, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, 2010年7月19日, オーストラリア, シドニー.
- (4) Takahiro Yamada, Numerical simulation of interaction of viscous fluid and largely deformed membrane by a B-spline Galerkin structural solver, 2nd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, 2010年4月2日, 横浜.
- (5) Takahiro Yamada, Numerical Simulation of Interaction of Largely Deformed Membrane and Fluid, Japan-Korea CFD Workshop, 2009年12月20日, 仙台.
- (6) Takahiro Yamada, On Performance of the Block Newton Procedure for Multiscale Analysis of Elastoplastic Composite, 10th U.S. National Congress of Computational Mechanics, 2009年7月18日, 米国, コロンバス.

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田 貴博(TAKAHIRO YAMADA)
横浜国立大学・環境情報研究院・教授
研究者番号: 40240022

(2)研究分担者

松井 和己(KAZUMI MATSUI)
横浜国立大学・環境情報研究院・准教授
研究者番号: 00377110

(3)連携研究者