

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560075

研究課題名(和文) 指数関数型ペトロフ・ガラーキン有限要素法による乱流解析及び統合ソフトウェアの開発

研究課題名(英文) Turbulence Analysis Using Petrov-Galerkin Finite Element Method with Exponential Weighting Functions and Its Integrated Software Development

研究代表者

角田 和彦 (KAKUDA, Kazuhiko)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：80177336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで流れのモデルを対象に指数関数型ペトロフ・ガラーキン有限要素法を開発してきた。また、自由表面等を含むより複雑な流れの問題への適用を図るために、粒子法による数値解析も示してきた。その粒子法による圧力計算をする際に、有限要素法の定式化で用いられた重み関数のアイデアを粒子法シミュレーションに拡張し、圧力場に関する数値解の安定化を図った。その流れの可視化システム構築として、マーチングキューブ法を用いポリゴンデータに変換し、POV-Rayでレンダリングすることで流体をリアルに表現することを示した。また、GPUによる大規模な3次元複雑流れのシミュレーションの可能性を提示してきた。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a finite element scheme based on the Petrov-Galerkin weak formulation using exponential weighting functions. We have also presented the particle approach for solving numerically complicated fluid flow problems. To overcome spurious oscillations in the standard MPS method, we have proposed to utilize the logarithmic-type weighting function and also take into the influence radius reduction for solving an auxiliary Poisson equation for the pressure field. The polygonization of numerical data has been constructed by using the marching cubes algorithm, and also the rendering has been illustrated in using the generated polygons and POV-Ray as the physics-based computer graphics. We have also presented the application of the GPU-based particle method to three-dimensional complicated fluid flow problems, namely the dam-breaking flow problem, and flow in a liquid ring pump with rotating impeller.

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：計算流体力学 複雑流れ 有限要素法 粒子法 GPU ソフトウェア マーチングキューブ法 POV-Ray

1. 研究開始当初の背景

1980年代前後、指数関数を重み関数として選ぶ場合のペトロフ・ガラーキン型有限要素法が提出されていた。特に、Hughesらは、1次元移流拡散方程式に対し、変分原理を構成する際に指数関数型の重み関数を提案した。このことは、移流項に起因した非対称性を有する移流拡散方程式が対称化できることを意味する。その他、幾つかの指数関数型重み関数が提案されている。しかしながら、これらの研究の何れもナビエ・ストークス方程式への拡張がなされていない。これまで2次元及び3次元の非圧縮粘性流れの層流モデルを対象とした有限要素法の開発を目指し、指数関数型重み関数による新しい近似スキームの提案を行い、立方体内の自然対流問題や円柱まわり流れの問題等に関する解析を通して手法の適用性及び有効性を示してきた。また、高レイノルズ数域での円柱後方でのwake幅の減少、平均抗力係数の激減、及びストローハル数の挙動が実験値や他の解析結果と比較して定性的に良い一致を示した。

また当時、自由表面、移動境界やマルチフィジックス等を含むより複雑な流れの問題への適用を図るために、格子や要素メッシュを利用しない立場の粒子法による数値解析も提示されていた。特に、その粒子法による圧力計算をする際に擬似的な数値解が発生することが知られ、その疑似解の発生を抑制することが急務となっていた。

2. 研究の目的

理工学の諸分野において現れるナビエ・ストークス方程式によって支配されている粘性流体の複雑な非定常流れの現象を明らかにすることは重要な課題の一つである。その現象の解明に当たり、差分法、有限体積法及び有限要素法に基づく数多くの近似解析スキームが提案されてきた。これまで、2次元/3次元非圧縮粘性流れ及び熱流体の問題を対象に、指数関数を重み関数としているペトロフ・ガラーキン有限要素法の開発を行い、幾つかの代表的な問題に対し、解析手法の適用性及び有効性を示してきた。

本研究では、これまで開発してきた指数関数型ペトロフ・ガラーキン有限要素法をもとにLES乱流モデルの構築を行い、種々の3次元非圧縮性の複雑流れ問題に適用することを考え、さらに流れの可視化システムを統合したソフトウェアの構築も図る。また、より複雑な流れの問題への適用を図るために、圧力安定化粒子法の開発を行い、解析手法の適用性及び有効性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、研究の目的を達成するために、指数関数型ペトロフ・ガラーキン有限要素法に基づくLES乱流モデルの開発及びチャネ

ル内流れ、立方体キャビティ内流れ、及び基本形状まわり流れの乱流解析を行い、実験値や他解法の結果との比較を通して提案手法の妥当性及び適用性を明らかにする。また、実際の乱流現象への適用性を検討するために、より複雑な形状を有する物体まわりの流れの挙動をシミュレートし、数値結果のポスト処理としての統合ソフトウェアの構築を図る。また、市販のソフトウェア(例えば、ANSYS CFX/Fluent等)による解析結果との比較検討もを行い、本解析手法の妥当性の拡充を検討する。

また、これまで流れのモデルを対象に指数関数型ペトロフ・ガラーキン有限要素法を開発してきた。そのアイデアは、有限要素法の定式化において指数関数型の重み関数を利用することにより圧力等の数値解の安定化を図っている点である。特に、粒子法による圧力計算をする際に擬似的な数値解が得られることが知られているが、前述の指数関数型ペトロフ・ガラーキン有限要素法の定式化で用いられた重み関数のアイデアを粒子法シミュレーションに拡張し、圧力場に関する数値解の安定化を図られることを明らかにする。また、流れの可視化システムの構築として、得られた数値データをコンピュータ・グラフィックスのアルゴリズムの一つであるマーチングキューブ法によってポリゴンデータに変換し、流体の表面を作成した後、POV-Rayを用いてレンダリングすることで流体をよりリアルに表現することを提示する。さらに、大規模な3次元複雑流れの数値シミュレーションを実行するには、多大な計算時間を必要とする。そのため、より高速で高機能なコンピュータ資源が必要であり、高性能なGPU(Graphics Processing Units)コンピュータを利用した大規模シミュレーションの可能性を提示する。

4. 研究成果

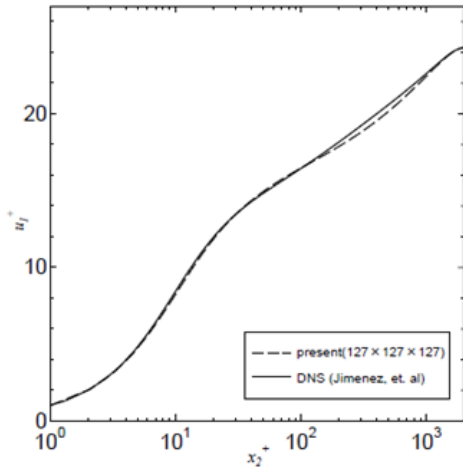
本研究課題を通して得られた研究の主な成果等の幾つかを以下に記述する。

(1) GPUを利用した有限要素乱流解析

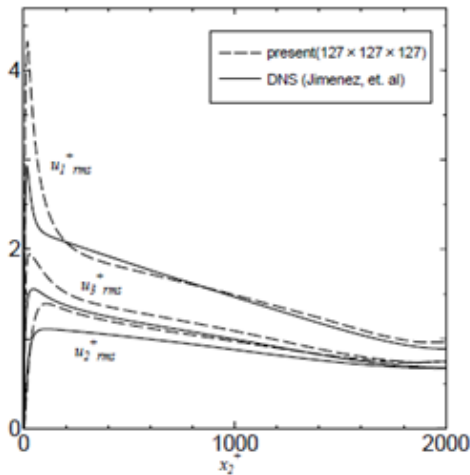
有限要素法によるGPU計算は、配列の間接インデックスに伴うランダムアクセスにより性能がでないとされており、有限要素法による計算でGPUを適用した例は非常に少なく、さらに流体計算への適用はほとんど見られていない。そこで本手法では、このような配列のランダムアクセスを低減させる手法の適用といくつかの高速化法を提案し、GPUによる高速化を検証した。数値計算例として、Large Eddy Simulation(LES)を用いた有限要素法によるチャネル内流れ問題に適用し、高レイノルズ数域($Re=2000$)における乱流計算結果をDNSデータと比較し、良好な結果が得られた(図1参照)。

今後、本計算における高レイノルズ数域での乱れ強度等も定量的に一致させるには、更

なるメモリーと高速化が必要であるため、マルチ GPU の導入等を検討する必要がある。



(a) 主流方向流速成分



(b) 流速の乱流成分

図1 チャンネル内乱流問題

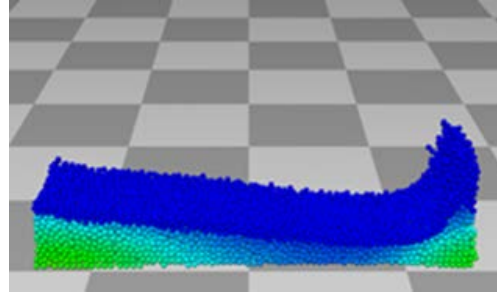
(2) 粒子法による複雑流れ問題の解析

粒子法はラグランジュ法であるため、従来の差分法や有限要素法のようなオイラー法とは異なり、解析領域が大変形を伴っても問題なく解析が可能な手法である。そのために、回転翼による強制力、及び遠心力や重力等の相互作用によって生じる現象を解明するために適した手法である。しかしながら、標準的な MPS 粒子法シミュレーションでは、圧力に関するポアソン方程式を解くと擬似的な圧力振動解が得られることが知られており、その改善等をするために以下の点を工夫してきた。実際の流動現象は3次元空間内での挙動であるため、提案手法を3次元流動解析に拡張し、さらに計算の高速化を図るために GPU を利用してきた。また、粒子法で利用される重み関数として対数関数を適用することにより、2粒子間の近接に関する重み関数の特異性の緩和を図った。さらに、圧力の擬似的な振動解を改善するために、圧力場を計算する際の影響半径を流速ベクトル場計算

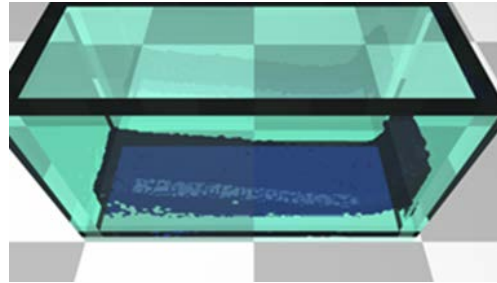
の影響半径よりも縮減させた。

① 水柱崩壊流れの問題

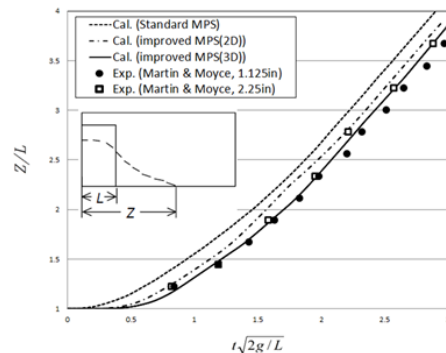
上述のアイデアを検証するために、重力と自由表面を有する水柱崩壊流れの問題（ダム崩壊問題）に適用し、圧力場を含む粒子挙動、POV-Ray による流れの可視化、及び実験データとの比較を通して良好な結果が得られた（図2参照）。



(a) 瞬時の粒子挙動と圧力場



(b) POV-Ray による流れの可視化



(c) 実験データとの比較

図2 水柱崩壊流れの問題

② 液封式真空ポンプ内流れの問題

液封式真空ポンプは一作動、側気口構造の一段式真空ポンプである。主要部品は円筒形のケーシング、左右各一個ずつのカバーと制御板、ケーシングに偏心して取り付けられるインペラシャフト、及び軸受と軸シール部品で構成されている。この流れは、ポンプ内のブレードが反時計回りに 2,400rpm で回転し、流体粒子を攪拌するという複雑な問題である。その特徴的な挙動として、液封式ポンプシミュレーションでは、ウォーターリングと呼ばれる層の発生が実験を通して知られている。

この液封式真空ポンプを設計する際に影響を及ぼすウォータリングの形成に関し提案手法を適用し、ポンプ内の羽根車の高速回転による遠心力からウォータリング形成の様子が得られた(図3参照)。また、ウォータリング形成に伴う気液界面及び圧力分布の比較検討として、得られた計算結果と実験データとの定性的な一致が示された。

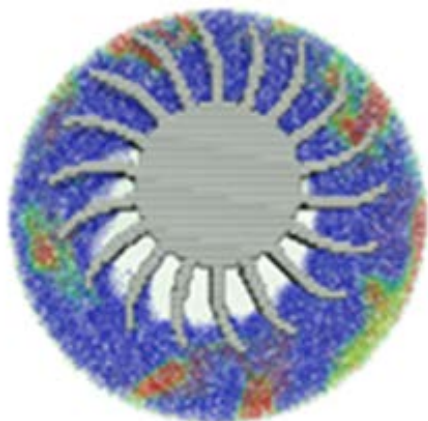


図3 液封式真空ポンプ内流れの問題

以上により、圧力安定化粒子法を用い複雑流れの3次元シミュレーション及び物理ベースCGに関する解析結果の妥当性を検証することができ、今後、シミュレーション工学分野における大規模マルチスケール/マルチフィジックス解析の可能性が与えられたものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① K. Kakuda, K. Tochikubo and J. Toyotani, Dam-breaking Flow Simulations by Particle-based Scheme Using Logarithmic Weighting Function, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences, vol.95, no.5, 2013, pp.351-367, (査読有) DOI: 10.3970/cmcs.2013.095.351
- ② K. Kakuda, T. Nagashima, Y. Hayashi, S. Obara, J. Toyotani, S. Miura, N. Kasturada, S. Higuchi and S. Matsuda, Three-dimensional Fluid Flow Simulations Using GPU-based Particle Method, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences, vol.93, no.5, 2013, pp.363-376, (査読有) DOI: 10.3970/cmcs.2013.093.363
- ③ K. Kakuda, T. Nagashima, Y. Hayashi, S. Obara, J. Toyotani, N. Kasturada, S. Higuchi and S. Matsuda, Particle-based Fluid Flow Simulations on GPGPU Using CUDA, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences, vol.88, no.1, 2012, pp.17-28,

(査読有) DOI: 10.3970/cmcs.2012.088.017

- ④ K. Kakuda, S. Obara, J. Toyotani, M. Meguro and M. Furuichi, Fluid Flow Simulation Using Particle Method and Its Physics-based Computer Graphics, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences, vol.83, no.1, 2012, pp.57-72, (査読有) DOI: 10.3970/cmcs.2012.083.057
- ⑤ K. Kakuda, J. Toyotani, S. Matsuda, H. Tanaka and K. Katagiri, Flow Simulations by a Particle Method Using Logarithmic Weighting Function, e-journal ICCES, vol.17, no.4, 2011, (査読有) DOI: 10.3970/icces.2011.017.105

〔学会発表〕(計5件)

- ① 三浦慎一郎, 市川周一, 角田和彦, GPUを用いた有限要素法による乱流解析, 数理科学会第32回数値科学講演会講演論文集, CD-ROM, 2013.8.17, 大阪府立大学
- ② 林侑希, 豊谷純, 角田和彦, 表面張力を考慮した液滴落下の粒子法シミュレーション, 数理科学会第32回数値科学講演会講演論文集, CD-ROM, 2013.8.17, 大阪府立大学
- ③ 永島侃, 小原俊介, 三浦慎一郎, 豊谷純, 角田和彦, CUDA/GPUによる粒子法シミュレーションの高速化, 数理科学会第31回数値科学講演会講演論文集, pp.65-66, 2012.8.25, 都立産業技術高専
- ④ 林侑希, 小原俊介, 豊谷純, 角田和彦, MPS法による3次元流体シミュレーション, 数理科学会第31回数値科学講演会講演論文集, pp.63-64, 2012.8.25, 都立産業技術高専
- ⑤ 小原俊介, 角田和彦, 豊谷純, MPS法による圧力安定化手法及び液封式ポンプへの適用, 日本流体力学会第25回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.1-4, USBメモリー, 2011.11.19, 大阪大学

〔その他〕

研究者情報

<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profilefiles/44/0004389/profile.html>

受賞

計算&実験理工学国際会議(ICCES2014)にて Distinguished Achievement Medal (2014.6) http://www.icces.org/achievement_medal.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

角田 和彦 (KAKUDA, Kazuhiko)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号: 80177336