

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 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21360044

研究課題名（和文） GPUを用いた粒子法シミュレーションの高速化に関する研究

研究課題名（英文） High Speed Computing of Simulation of Particle Methods Using GPU

研究代表者

越塚 誠一（KOSHIZUKA SEIICHI）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：80186668

研究成果の概要（和文）：粒子法シミュレーションにおいて、MPS法(Moving Particle Simulation Method)に基づく流体解析、固体解析、およびDEM(Discrete Element Method)に基づく粉体解析に関するGPU(Graphics Processing Unit)を用いた高速計算アルゴリズムを開発した。本アルゴリズムは一般的な並列計算にも有効である。実地形津波遡上の3次元流体解析を行い、その実用性を示した。

研究成果の概要（英文）：In particle methods, high speed computation algorithms on GPU (Graphics Processing Unit) have been developed for fluid and solid dynamics based on the MPS (Moving Particle Simulation) method and for powder dynamics based on DEM (Discrete Element Method). The present algorithms can also be applied to general parallel computers. Its utility is shown by a three-dimensional simulation of tsunami run-up on a real topography.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2011 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2012 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

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：計算力学・粒子法・MPS・GPU・流体力学・固体力学

1. 研究開始当初の背景

粒子法はメッシュを必要としないシミュレーション手法であり、連続体力学のためのSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法とMPS (Moving Particle Semi-implicit)法、粉体力学のための離散要素法(Discrete Element Method, DEM)などがある。メッシュが必要無いため、流体解析では自由表面流や混相流、固体力学では大変形や破壊に有利であると期待され、世界的に盛んに研究されている。

本研究代表者は1996年にMPS法を開発し、非圧縮性流れを世界に先駆けて粒子法で計算することに成功した。その後もMPS法を発展させ、混相流、相変化、表面張力、マイクロ流れ、船舶と波浪との相互作用、固体の弾塑性などの解析に取り組んできた。MPS法を用いた流体解析の商用ソフトウェアも開発されている。研究分担者はDEMにおいて、複数の粉体粒子を1個の計算粒子で模擬する粗視化モデルを開発した。DEMでは計算

機で扱える粒子数の上限が 100 万個程度であるのに対して、産業における問題では粒子数が 10 億個以上になる場合も多い。粗視化モデルによって DEM で扱える粒子数が飛躍的に増え、実用的な計算ができるようになる。

一方、GPU(Graphics Processing Unit)はこれまでコンピュータグラフィックス(CG)を高速化するための専用のプロセッサであったが、近年、プログラムによって動作させることが可能になり、科学技術計算への利用が試みられている。差分法による流体力学では Harris(2004)や小川ら(2008)の研究が、固体力学では大石ら(2006)の研究がある。また、粒子法に対しては Amada ら(2004)や岩崎ら(2004)の研究がある。

粒子法の並列計算および GPU を用いた高速計算の研究は本研究代表者、研究分担者および研究協力者によってこれまで実施された。特に研究協力者の原田隆宏氏は GPU 利用に関する代表的な書籍「GPU Gems 3」(2008)の中で 1 章 (Chapter 29) を執筆し、世界的に高い評価を得ている。

2. 研究の目的

以上の研究背景を踏まえて、本研究では GPU を用いた粒子法の高速度計算アルゴリズムを開発することを研究の目的とした。具体手には以下の研究を実施した。

- (1) GPU を用いた MPS 法の流体解析に関する高速計算アルゴリズムの開発
- (2) GPU を用いた MPS 法の固体解析に関する高速計算アルゴリズムの開発
- (3) GPU を用いた DEM の粉体解析に関する高速計算アルゴリズムの開発

3. 研究の方法

平成 21 年度は以下の 4 項目の研究を実施した。

- (1) GPU による DEM シミュレーションの研究
- (2) 流体解析や固体解析の粒子法 (MPS 法) に対する GPU による計算手法の研究
- (3) 実数の倍精度計算の研究
- (4) 複数の GPU を用いた並列計算の研究

平成 22 年度は以下の 4 項目の研究を実施した。

- (1) GPU による DEM シミュレーションの研究
- (2) 流体解析や固体解析の粒子法 (MPS 法) に対する GPU による計算手法の研究
- (3) 実数の倍精度計算の研究
- (4) 複数の GPU を用いた並列計算の研究

平成 23 年度は以下の 3 項目の研究を実施した。

- (1) 陽解法を用いた非圧縮性流れの計算精度に関する研究
- (2) GPU クラスタを用いた並列計算に関する

研究

- (3) GPU を用いたリアルタイム計算の研究

平成 24 年度は以下の 2 項目の研究を実施した。

- (1) 陽解法を用いた非圧縮性流れの計算精度および高速化に関する研究
- (2) 陽解法を用いた弾性解析の計算精度および高速化に関する研究

4. 研究成果

平成 21 年度は以下の研究成果を得た。

- (1) GPU による DEM シミュレーションの研究

平成 21 年度に整備した複数の GPU を備えた計算機を用いて、離散要素法 (DEM, Discrete Element Method) による粉体流動のシミュレーションの高速化の研究をおこなった。

- (2) 流体解析や固体解析の粒子法 (MPS 法) に対する GPU による計算手法の研究

平成 21 年度の研究により、流体解析においても固体解析においても陽的なアルゴリズムが高速であり、大規模計算に適しており、GPU においても性能を発揮しやすいことがわかった。そこで、陽的なアルゴリズムを研究対象とする。流体解析においてはマッハ数を変化させて非圧縮条件を満たすと同時に高速な計算を行うための条件を研究した。固体解析においては、ヤング率やポアソン比などの物性が時間刻み幅の制限値に与える影響を調べた。

- (3) 実数の倍精度計算の研究

平成 21 年度に購入した最新の GPU では、既に実数の倍精度計算が、専用のストリーミングプロセッサによって、単精度と大きくは変わらない性能が得られることがわかった。今後、GPU の開発は倍精度計算を重視することによって、倍精度計算による工学的なシミュレーションは高速に実行可能とした。

- (4) 複数の GPU を用いた並列計算の研究

現在の GPU では GPU 間のデータ転送に時間がかかり、複数の GPU を用いた計算ではデータ転送をできるだけ少なくしなければ、並列性能は得られない。粒子法においては、各 GPU が扱う領域のうち、境界付近の粒子のデータだけを別の GPU と通信することで、並列性能を高めることができる。こうした GPU の特性を踏まえた粒子法における高速並列計算に関して研究を進めた。

平成 22 年度は以下の研究成果を得た。

- (1) GPU による DEM シミュレーションの研究

平成 21 年度に整備した複数の GPU を備えた計算機を用いて、離散要素法 (DEM, Discrete Element Method) による粉体流動のシミュレーションの高速化の研究をおこない、CPU を用いた計算との比較をおこなった。

(2) 流体解析や固体解析の粒子法 (MPS 法) に対する GPU による計算手法の研究

陽的なアルゴリズムが高速であり、大規模計算に適していることから、流体解析において擬圧縮性を導入した陽解法の研究を実施した。数値安定性の研究から、マッハ数を 0.2 とすれば、陽解法でも半陰解法と同じ時間刻み幅を使用することができ、きわめて高速な流体解析が可能であることがわかった。

(3) 実数の倍精度計算の研究

最新の GPU では倍精度実数演算を実施するための演算器が備わっており、単精度の演算器を組み合わせるなどして倍精度計算を工夫する必要がなくなった。

(4) 複数の GPU を用いた並列計算の研究

陽解法では連立一次方程式を解く必要が無いので、GPU における並列化は比較的容易である。今のところ、CPU を用いた並列計算まで実施した。

平成 23 年度は以下の研究成果を得た。

(1) 陽解法を用いた非圧縮性流れの計算精度に関する研究

陽解法においては音速に仮想的な値を用いる。そこで、音速を流速で除した無次元数であるマッハ数を用いて計算精度を検討した。静水圧問題およびダム崩壊問題において、マッハ数と圧縮性の誤差の関係を定量的に示し、その誤差が許されるような問題では陽解法が有用であることが分かった。また、陽解法においても圧力の数値的な振動が生じ、半陰解法と同程度であった。

(2) GPU クラスタを用いた並列計算に関する研究

現状では CPU を用いた陽解法の並列計算を研究しており、近傍粒子テーブルの作成には空間バケット分割を用い、またこのバケットを利用して負荷が均等になるように空間分割を行うことで、高い並列化効率が得られた。また、CPU 数が増えてもこの並列化効率はほとんど低下しない。従って、流体解析における陽解法は大規模並列計算に適しており、今後、実地形における 3 次元津波解析に適用していくこととした。

(3) GPU を用いたリアルタイム計算の研究

流体解析における陽解法の計算時間を 1 千万粒子程度まで調べた。これまで通り、粒子数に対して計算時間は 1 乗で増加し、半陰解法の 1.5 乗と比較して高速であるとともに、大規模計算になればなるほどその差が広がっていく。また、半陰解法では圧力のポアソン方程式を解く部分に最も多くの計算時間が費やされるが、陽解法では近傍粒子テーブルの作成に最も計算時間がかかることが分かった。

平成 24 年度は以下の研究成果を得た。

(1) 陽解法を用いた非圧縮性流れの計算精度および高速化に関する研究

平成 21~23 年度の研究により、非圧縮性流れの計算では、マッハ数を仮想的に調節した疑似圧縮性流体に対する陽解法が高速であり、計算精度はあまり低下せず、大規模問題に対する並列計算に適していることが示された。

そこで平成 24 年度は、この陽解法に対して剛体-流体連成解析アルゴリズムを開発し、連成解析が適切に行われていることを検証した。本アルゴリズムを用いて漂流物 (港に係留されている船舶) を伴う津波の遡上解析を行い、その有用性を示した (図 1)。

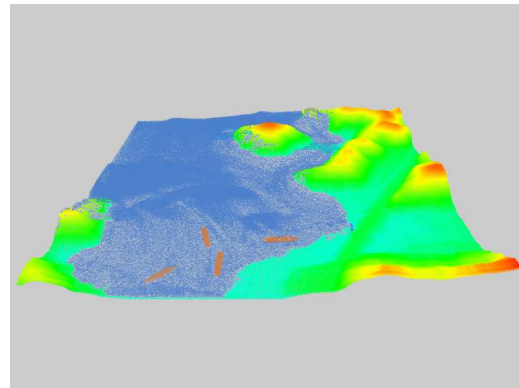


図 1 実地形を用いた浮遊物を伴う津波遡上の粒子法 3 次元シミュレーション

また、実地形 3 次元津波遡上解析を行うため、津波波源から沿岸までを 2 次元浅水方程式によって計算するコードの出力結果を波の入力の境界条件として設定できるようにした。これにより、東日本大震災における石巻市への津波遡上解析を行った。

さらに、陽解法を 2 段階で領域分割するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを用いれば、GPU クラスタによる大規模計算が可能になる。

(2) 陽解法を用いた弾性解析の計算精度および高速化に関する研究

大変形に適用可能な弾性解析を陽解法で行うアルゴリズムを平成 21~23 年度の研究により開発し、平成 24 年度はこれを生体に適用した。肺の呼吸による変形に関して、患者の医用画像と比較することで精度の検証をおこなった。また、肋骨を剛体と弾性体の組み合わせとしてモデル化し、胸骨による呼吸運動のシミュレーションを行った。本シミュレーションについても医用画像を用いることで精度の検証を行った。

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7件)

- ① 越塚誠一, "粒子法による固体解析" 冷凍 **87(8)**, 529-533 (2012)
- ② 邵阳, 伊藤広貴, 柴田和也, 越塚誠一, "Hamiltonian MPS粒子法によるReissner-Mindlinシェル解析モデル" 日本計算工学会論文集, Paper No.20120013 (2012)
- ③ 伊藤広貴, 越塚誠一, 芳賀昭弘, 中川恵一, "呼吸および吸気時CT画像に基づく胸郭運動モデルの構築" Medical Imaging Technology **29(4)**, 208-214 (2011)
- ④ 山田祥徳, 酒井幹夫, 水谷慎, 越塚誠一, 大地雅俊, 室園浩司, "Explicit-MPS法による三次元自由液面流れの数値解析" 日本原子力学会和文論文誌 **10(3)**, 185-193 (2011)
- ⑤ S. Koshizuka, "Current Achievements and Future Perspectives on Particle Simulation Technologies for Fluid Dynamics and Heat Transfer" J. Nucl. Sci. Technol., **48(2)**, 155-168 (2011)
- ⑥ 大地雅俊, 山田祥徳, 越塚誠一, 酒井幹夫, "MPS陽解法における圧力計算の検証" 日本計算工学会論文集, Paper No.20110002 (2011)
- ⑦ 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫, "自由表面流れ解析のためのMPS陽的アルゴリズムの開発" 日本計算工学会論文集, Paper No.20100013 (2010)

〔学会発表〕 (計12件)

- ① S. Koshizuka, "Moving Particle Simulation for Fluid Dynamics - Recent Developments and Applications -" 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012), Sao Paulo, July 8-13, 2012 [Semi-plenary]
- ② S. Koshizuka, "Moving Particle Simulation for Free Surface and Multi-phase Flows" Prof. 2nd Int. Conf. Particle-based Methods - Fundamentals and Applications - (PARTICLES 2011), Barcelona, October 26-28, 2011 [Plenary]
- ③ S. Koshizuka, "Technologies and Applications of Moving Particle Simulation" 6th International Smoothed Particle Hydrodynamics European Research Interest Community (SPHERIC) Workshop, Hamburg, June 8-10, 2011 [Keynote Lecture]
- ④ S. Koshizuka, "Particle Simulation for Fluid Dynamics with Free Surfaces" Proc. Joint Int. Conf. on

Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA+MC 2010), Tokyo, October 17-21, p.93 [Plenary]

- ⑤ S. Koshizuka, M. Ohchi, S. Mizutani and M. Sakai, "Acceleration of Particle Simulation Using Explicit Algorithms and GPU" Proc. 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), Sydney, July 19 - 23, 2010, a543 [Keynote Lecture]

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mps.q.t.u-tokyo.ac.jp/main.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越塚 誠一 (KOSHIZUKA SEIICHI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：80186668

(2) 研究分担者

酒井 幹夫 (SAKAI MIKIO)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：00391342

(3) 連携研究者

原田 隆宏 (HARADA TAKAHIRO)
HAVOK