

様 式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：62615

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07410

研究課題名（和文）高精度・高速な大規模CG流体シミュレーション

研究課題名（英文）Fast and Accurate Fluid Simulation for Computer Graphics

研究代表者

安東 遼一 (Ando, Ryoichi)

国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・助教

研究者番号：50784881

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000 円

研究成果の概要（和文）：2年間の研究成果として、変形格子法のための節点ベースの圧力ソルバ、変形格子法での FLIP 法による移流アルゴリズムの開発、自由境界の2次精度の境界条件の埋め込み、変形格子のマルチ解像度法による高速な変形を達成した。特に2次精度の境界条件の埋め込みは、形成されるポアソン方程式の線形一次方程式が、正値対象行列となるような制約を埋め込むことができた。結果は、既存のアダプティブ格子法と比べても、高速であることが分かった。また、解析解が知られている Taylor-Green Vortex の実験で、正しい解に収束していく様子が確認できた。これら本研究結果は、国際雑誌へ投稿予定である。

研究成果の概要（英文）：Through the two-years-long research, we were able to implement nodal pressure solver, FLIP solver on deforming grids, the embedded boundary conditions and the multi-resolution fast grid deformation. Particularly, our second-order accurate boundary embedding was achieved while enforcing the resulting matrix symmetric positive definite. Our results were verified though the Taylor-Green-Vortex experiments, of which the analytical solution is known. We plan to submit our result to an international journal.

研究分野：コンピューターグラフィックス

キーワード：コンピューターグラフィックス

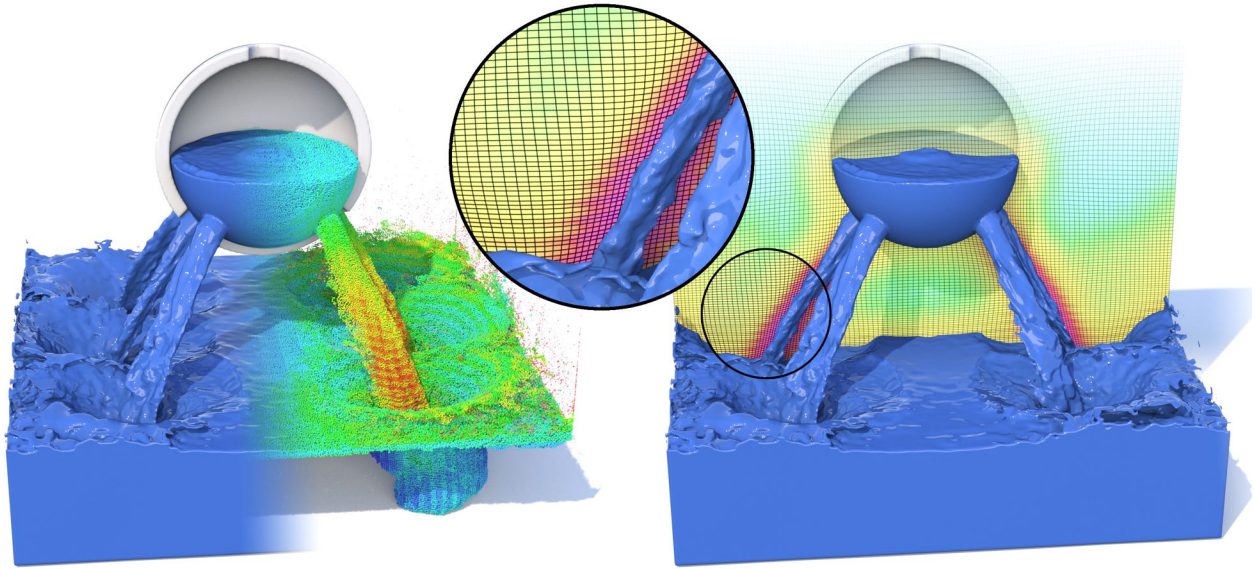


図1. 本研究のシミュレーションの例。粒子の色は変形の強度を可視化している。赤い粒子ほど、精度が高く計算されている。

1. 研究開始当初の背景

背景流体の支配方程式は非線形を含むため、解析解を求めるのが難しい。そこで、流体现象を含む自然現象の予測は、数値計算を使って、近似解を求める手法が用いられてきた。しかし、大規模流体計算は現在でも計算コストが高く、現代も未解決問題として研究が盛んに行われている。こういった背景の中、本研究課題の申請時における動機は、変形格子による高速で効率の良い流体計算の開発である。図4にその例を示す。計算格子を歪めるという操作は、直感的に空間を歪めると捉えられる。図4のように、水しぶきがたくさん発生している場所で、虫眼鏡で拡大するように、空間を拡大する。本研究の目的は、このように空間を縮小して、より視覚的に重要な液体の運動を少ない計算コストで表現可能とする事である。本研究では、変形をスカラー値のポアソン方程式の解として、そのスカラーの勾配と変形として高速な変形ソルバ開発に成功した。結果として、変形格子による流体のアダプティブ計算が実現された (図1)

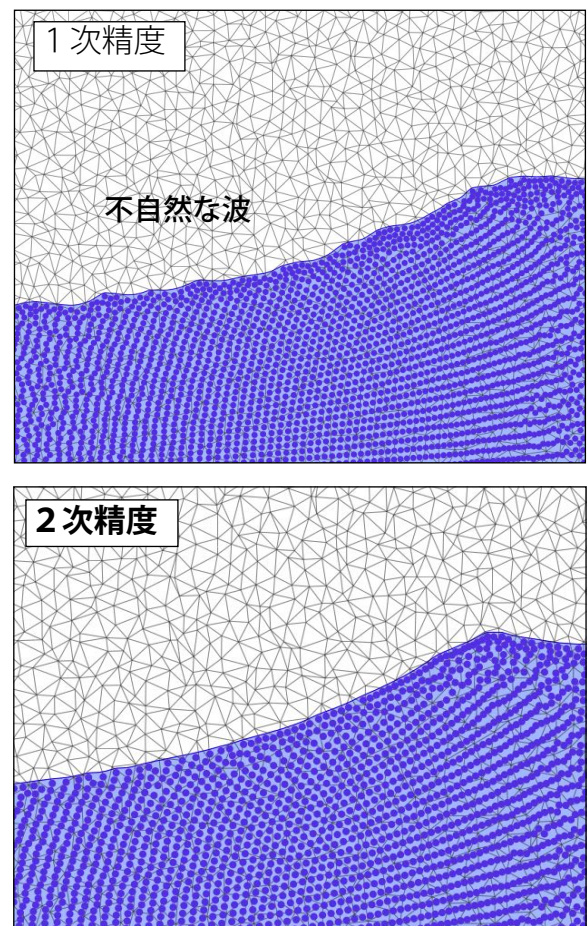


図2. 1次精度境界条件と2次精度境界条件による、滑らかな波の運動の計算の違い。

2. 研究の目的

本研究課題の申請時における当初の研究目的は、より大規模な流体計算を変形格子で可能にする点である。そのために重要となるのが、計算コストの高い圧力のポアソン方程式の計算である。圧力のポアソン方程式を解くには、実際に境界での圧力の値を定めなければならない。これを境界条件と呼ぶ。しかし、本研究では領域を四面体で分割するため、四面体を横切るような境界で、境界条件を正しく与えるには工夫(=2次精度)が必要となる。そのような工夫がないと(=1次精度)図2の左に見られるように、不自然な波が発生してしまう。2次精度は、有限体積法と呼ばれる従来の離散法では知られていたが、節点ベースの圧力ソルバでは私達の知る限り、存在しなかった。そこで、新たな2次精度を達成可能な節点ベースの圧力ソルバを開発した。その精度は、図3で見られるようなグリーン関数との比較を行い、実際格子幅を半分にすると、誤差が4分の1ほど小さくなる様子を確認した。これは、学術研究においては当初予想しなかったほどの理論に近い精度であった。

3. 研究の方法

本研究課題の研究方法として、動的に動く計算格子を高速に計算した。まず、その中間処理として、スカラー値のポアソン方程式の解の勾配とする線形一次方程式として数学的モデルを開発した。そして、そのスカラーの勾配を変形とすることで、高速な変形ソルバ開発に成功した。(図5左)

4. 研究成果

研究の主な成果は、図1で示されるようなCG向けの実用的流体シミュレーションを変形格子で可能とした点である。得られた成果の国内外における位置付けは、CGのためのアダプティブ液体計算が変形格子で初めて可能になった点でなる。図5は本研究の計算時間を分類分けして可視化したものである。既存の流体計算と比べ、本手法では変形処理(Deformation Solve)が加わる。しかし、変形処理は他の計算部分に比べ、負荷が比較的低いことが

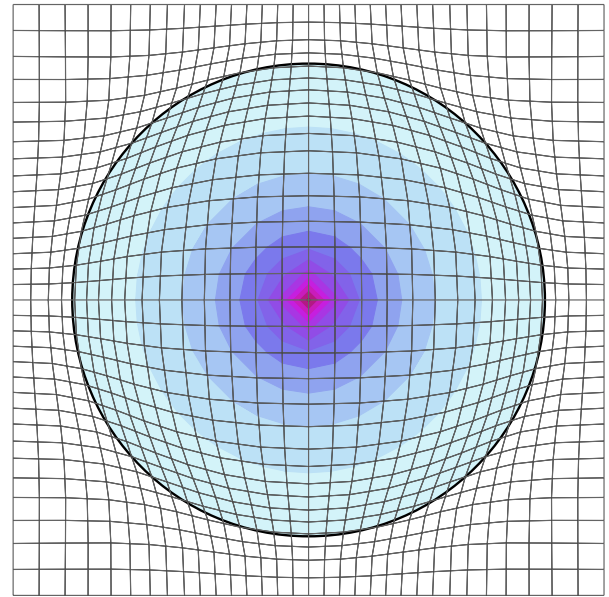


図3. 2次精度の実験例。解析解の分かっているグリーン関数との比較で誤差を図っている。



図4. 上図は物理座標系での流体計算の可視化。下図は計算座標系の可視化。

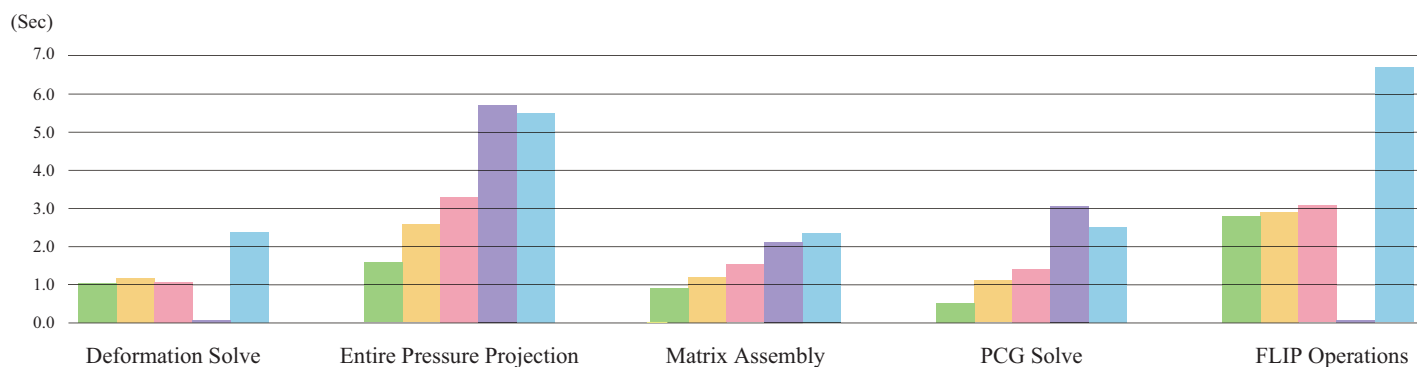


図5. シミュレーションの分類別の計算時間の可視化

分かる。図6では、本手法と既存手法で同じ水球落下実験をした時の視覚的な違いを図示したものである。本手法では、水球の衝突によって生成されるクラウンの形状をより正確に捉えている。一方、既存手法の一つである MAC法では、同解像度ではクラウンの形状が我々の手法に比べて、正確に表現出来ていない。解像度を2倍にすると、クラウン形状を良く表現できるが、計算時間は我々の手法より長くなる。既存のアダプティブ法を使っても、クラウン形状を生成可能だが、アルゴリズムが煩雑になってしまう欠点がある

結論として、本研究では、変形格子による新しいアダプティブ流体計算手法を開発した。これを実現するため、新しい節点ベースの圧力ソルバ、2次精度境界条件の埋め込み、高速な変形ソルバ、そして FLIP への適用を行った。結果として、従来手法より簡素なアルゴリズムで、より正確で高速な流体計算を可能とした。また、その精度はグリーン関数や Taylor-Green Vortex 実験を通して数値的に確認された。本結果は、国際雑誌へ投稿予定である。今後の展望として、本研究は液体シミュレーションだけでなく、弾性体シミュレーションにも応用が期待される。

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 0件)

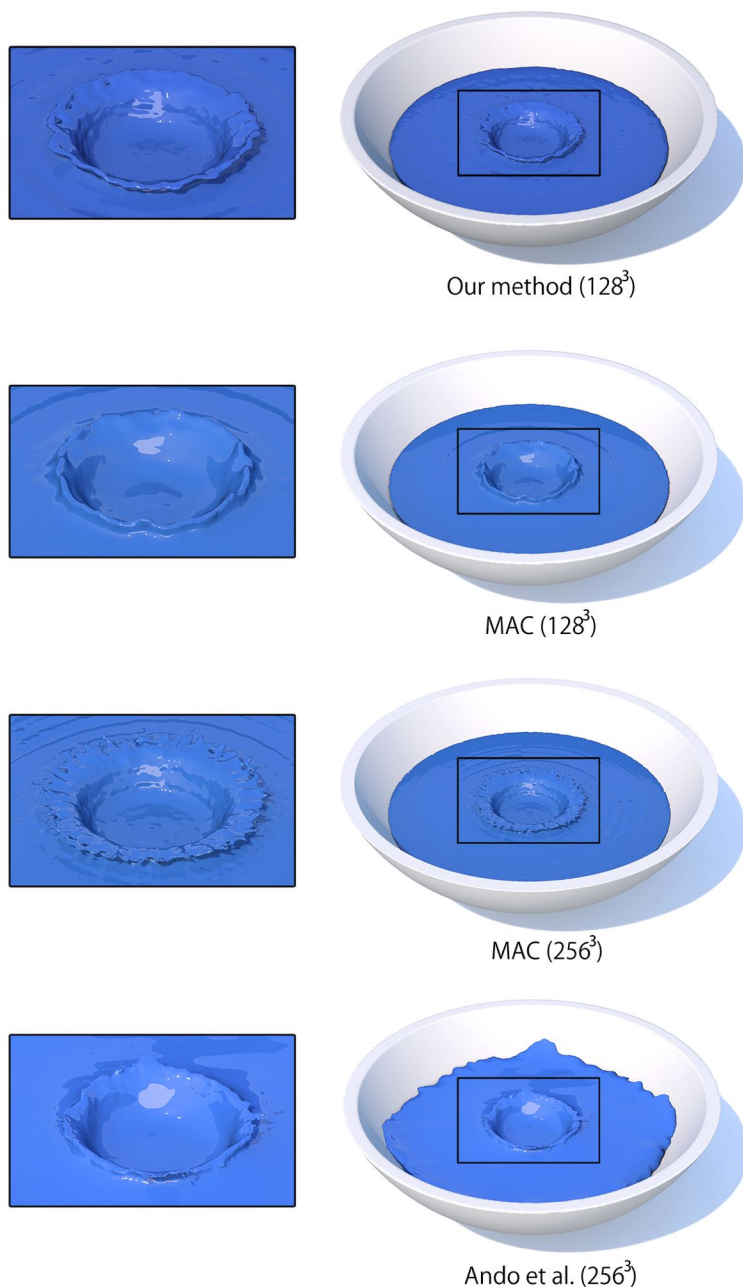


図6. 既存手法との比較

〔学会発表〕（計 0件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕なし

研究組織

(1) 研究代表者

安東遼一（ANDO, Ryoichi）

国立情報学研究所・コンテンツ科学系・助教

研究者番号：50784881

(2) 研究分担者: 無し

(3) 連携研究者: 無し

(4) 研究協力者

尉林 暉（IBAYASHI, Hikaru）

University of Southern California・Ph.D candidate

Chris Wojtan

IST Austria・教授

Nils Thuerey

Technical University of Munich・教授

五十嵐 健夫 (IGARASHI, Takeo)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授