

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月12日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00148

研究課題名(和文) 複雑な境界形状に対応できる流体シミュレーション技術の確立

研究課題名(英文) Study of Fluid Simulation Technique to Handle Complex Boundaries

研究代表者

藤澤 誠 (Fujisawa, Makoto)

筑波大学・図書館情報メディア系・助教

研究者番号：90508409

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)：数値シミュレーションとは現実世界の現象を数値計算によりコンピュータ内で再現する技術であり、特に近年ではCG分野では欠かせない技術になっている。本研究では、粒子法と呼ばれる数値シミュレーション技術を拡張することで、実験室レベルの単純なシーンだけではなく、より複雑な形状・現象を伴う現実世界の自然現象のコンピュータシミュレーションを可能とした。ポロノイ領域を用いて粒子法における固体境界処理の問題を解決し、熱移動と化学反応を考慮することでよりリアルな炎のシミュレーションを可能とした。また、粒子法による大規模な波のシミュレータとそれに基づく海岸地形生成、複数流体の正確なシミュレーション手法も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子法は主に水や空気などの流体をコンピュータ内でシミュレーションし、その運動を再現するために用いられている技術である。この研究ではその粒子法を拡張し、現実世界の複雑な形状・現象に対応させ、結果として正確な境界形状表現を可能とし、更に燃え広がる炎や海の波のような大規模なシーンを高速にかつリアルに計算可能にした。このように粒子法をより広い範囲の現象に適用可能にした点に研究の意義がある。

研究成果の概要(英文)：A numerical simulation is an important technique for CG field to make behaviors of real phenomenon in a computer. In this research, we have extended one of the simulation technique called "particle method" in order to perform a computer simulation of natural phenomena in the real world, which have more complex shapes and phenomena than simple simulations performed in the laboratory. We have solved the problem of solid boundary processing for the particle method using Voronoi region, and realized more realistic flame simulation by considering heat transfer and chemical reaction. In addition, based on the large-scale wave simulator by particle method we developed, we could reproduce complex dynamics of solid terrain. Moreover, we have developed an accurate density calculation method at the liquid boundary to create a complex scene including multiple fluids.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：コンピュータグラフィックス 数値シミュレーション 粒子法 流体力学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では物理法則に基づく数値シミュレーションを物理シミュレーションと呼ぶ。物理シミュレーションは現実世界において物理法則に支配された現象をコンピュータによる数値計算で解析し、その挙動を再現することに用いられる。その中でも流体现象を対象とした流体シミュレーションは、工業製品の設計はもちろん、医療現場における手術シミュレータ、映画やゲームなどでのコンピュータグラフィックス(CG)アニメーションなど様々なシーンにおいて利用されており、今後の日本における様々な技術の発展に大きく寄与するであろうことが予想される。そのため、これまで様々なシミュレーション手法が開発・研究されてきている。

しかし、これらの方法を実際の現実世界で起こっている現象に当てはめるのは難しく、実験室内で再現できるような簡単な現象での検証にとどまっているのが現実である。なぜ、再現が難しいのかというと、水や空気などの流体はそれ自身の挙動のみを考えればよいのではなく、周囲の固体境界に大きな影響を受け、そして、現実世界の固体境界は非常に複雑な形状をしており、これまでの流体シミュレーションで扱われている単純な形状(平面や球、円柱など)では再現が難しいためである。これが実験室レベルの研究から実践的な解析に移ることを難しくしている。

### 2. 研究の目的

本研究では、流体シミュレーション、特に近年その計算速度の速さから注目されている粒子法において複雑な境界形状に対応でき、かつ、様々な複雑な現象に対応できる手法を研究していく。粒子法では計算点である粒子の集合により液体などの物体を表現し、粒子間相互作用によりその挙動を計算する。粒子は球形状の影響領域を持つため、固体境界との相互作用も球体を用いて計算される。例えば、平面境界と流体を表す粒子との相互作用を実現するために、平面境界を動かさない粒子の集合として近似する。この方法はシミュレーション上の変更も少なく非常に有用である一方で、粒子で近似することによる形状の制限、シミュレーションの誤差が問題となる。特に布のような薄い物体の扱いや粒子スケール以下の細かな特徴を反映することはとても難しい。もちろん、粒子スケールを十分小さくすることで対応は可能であるが、必要となる計算リソースが膨大となり、一般的に使える物ではない。そこで本研究ではこれまでの粒子法と異なり、計算点を中心とした球の集合で流体を近似するのではなく、計算点を中止とした任意形状の領域の集合により流体を近似することで、境界形状に合わせた計算点領域の集合を生成し、境界を別の離散化手法で近似すること無しに高精度なシミュレーションを可能とする。また、熱などの他の現象についても考慮することで様々な複雑な現象にも対応できるように粒子法を拡張する。

### 3. 研究の方法

粒子法を対象として、流体の流れに合わせて移動する計算点に対して、境界形状を考慮した領域分割を行い、その領域を用いて流れを計算する手法を開発する。また、熱や表面張力など流体運動に関わる様々な現象にも対応できるように粒子法を拡張していく。まずは申請者がこれまで開発してきたシミュレータをベースとして、基本となる粒子法シミュレータの開発を進め、境界形状に合わせた粒子法の改良を行う。そして、開発した手法を拡張して他の境界表現や他の現象を伴う複雑な現象にも対応させる。最終的には実験により確立した方法有効性も検証する。

### 4. 研究成果

本研究では粒子法を現実世界の複雑な形状・現象に対応させる技術として、(1)ポロノイ領域を用いた粒子法境界条件の改良、(2)熱移動、周囲の空気の流れ、物質の化学変化まで考慮した粒子法による炎のシミュレーション手法の開発、(3)粒子法を大規模なシーンに対応させる手法をベースとした海岸地形のシミュレーション手法の開発、(4)複数の流体が混在するシーンでの正確な密度計算手法の開発、の4つの研究成果をあげた。以下でそれぞれの成果について述べる。

#### (1) ポロノイ領域を用いた粒子法境界条件の改良

流体を粒子の集合で離散化し、支配方程式に基づいて流体の挙動をシミュレーションする方法を粒子法という。本研究では、粒子法の一つであるSPHに基づきこれを拡張することで様々な形状・現象に対応する技術を開発した。

流体運動をシミュレーションするとき必ず問題となるのが境界処理である。水のような流体はその内部にかかる力のみで運動が決定されるだけでなく、重力などの外力を受けることでその挙動が変化する。そのような外力を受ける要因として一番一般的なのが固体境界である。川や海を流れる水は固体である水底や橋桁、海岸など形状によってその動きが大きく変わる。現実世界の現象を再現する上で、これらの固体境界の考慮は欠かせないものである。

粒子法によって子のような固体境界を考慮する際に一般的な方法(固体境界形状を粒子で近似して(このときに使われる粒子を境界粒子と呼ぶ)、その粒子を固定された流体として扱う方法)である。この方法は固体との相互作用を計算する上では優れているが、球形の境界粒子で形状を近似することから、例えば、完全にフラットな境界形状の場合でも球体の大きさに依存した

凸凹した形状として近似されてしまう。本研究では粒子形状に球体ではなく、粒子中心を領域中心としたポロノイ領域の形状(2次元では凸多角形 3次元では凸多面体)を用いる既存手法を用いることでこの問題を解決した。ポロノイ領域を用いる既存手法では境界粒子の中心位置を固定すると多角形を使った場合でも境界形状の近似が正確でなく、平面の場合でも凸凹になってしまう(図1右)が、我々は境界粒子中心を動的に変化させる方法を提案し、図1左に示すように粒子法で滑らかな境界を実現した。

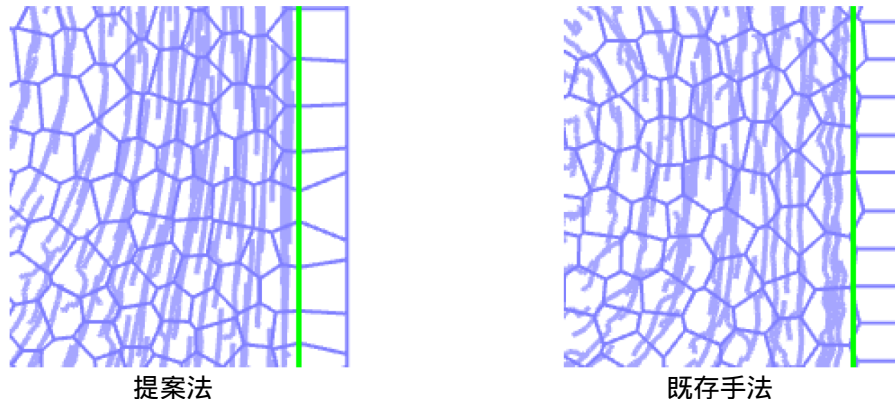


図1 境界付近の流れの実験結果

### (2) 粒子法による炎のシミュレーション手法の開発

粒子法の一つである SPH を用いると水のような流体の挙動を計算できるが、それ以外にも多くの流体现象が現実世界では発生している。その中でも炎は図2に示すように燃えることの元になっている化学反応、それによって生み出された熱の伝達、熱による浮力による空気の流れの発生と黒体放射による炎の色の变化などが含まれる複雑な現象である。本研究では、既存の粒子法を用いて炎そのものと燃料である固体を近似し、それに熱移動、化学反応による熱の発生と燃料・酸素の消費、周囲の空気からの影響と逆に炎が周囲の空気へもたらす影響まで考慮したシミュレータを開発した。結果として、炎単独のシミュレーションではなく、図3の結果に示したような酸素を含む風による燃え方の変化や固体燃料を消費しながらの燃え広がりを表現することを可能とした。

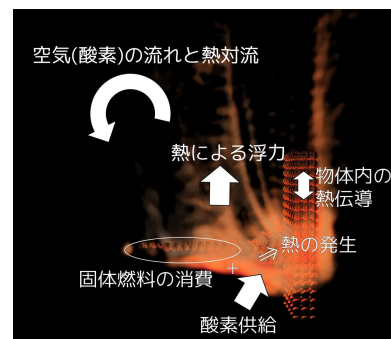


図2 炎の再現に必要な要素

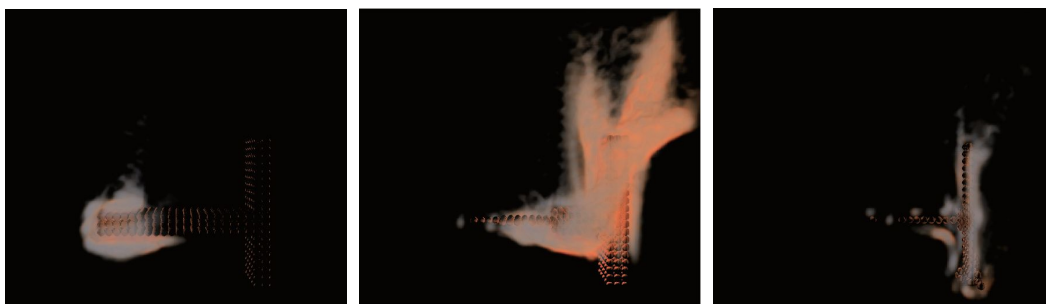


図3 風を伴う炎の燃え広がりシミュレーション結果

### (3) 粒子法を大規模なシーンに対応させる手法をベースとした海岸地形のシミュレーション手法の開発

粒子法は流体を粒子の集合で近似するが、海のような大規模なシーンでこの方法を用いようとする必要となる粒子数が爆発的に増大し、それに伴い計算コストも非常に高くなってしまふ。この問題を解決するために、我々は水表面の動きを波としてとらえる手法に注目し、海の場合なら海面の波を2次元運動する粒子で近似し、そこからしぶきなどの3次元運動する粒子を部分的に発生させることで大規模なシーンでもリアルタイム(30fps以上)で計算可能な方法を開発した。そして、それと数値地形学を組み合わせることで、図4に示すように波で削れてできる岩石海岸や波で砂が移動してできる砂浜海岸などの現実の複雑な海岸地形を再現することを可能とした。

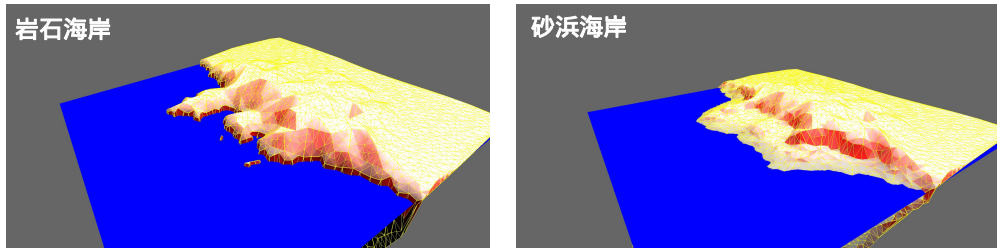


図4 粒子法による海岸地形の再現結果

(4) 複数の流体が混在するシーンでの正確な密度計算手法の開発

現実世界で見られる複雑な流体現象のひとつに気泡のような複数種類の流体によって引き起こされるものがある。気泡の場合は空気と水という混ざり合わない流体がその境界において互いに作用することで気泡特有の形状を作り出し、さらに表面張力によって水面まで上昇した気泡が泡として残る。その他にも水と油のように混じり合わない流体が複雑な現象を引き起こしている。このような現象を再現する際に問題となるのが、異なる流体の境界において密度が不連続に変化することである。これにより正確な相互作用の計算が難しくなる。本研究では粒子法において境界付近での密度計算を正確に行いつつ、水のような流体の特性である非圧縮性を満たすことができる MultiISPH という手法を開発した。この手法を用いることで図5に示したような複数種類の流体や気泡を安定して計算できる。更に正確な表面張力計算も行うことで従来の粒子法ではできていない、水による薄膜を含めた水面上に浮かぶ泡の再現も可能とした。

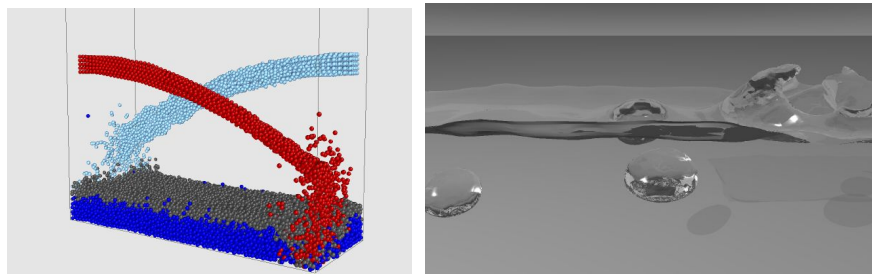


図5 複数流体の相互作用を考慮したシミュレーション結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

藤澤 誠, 加藤 悠平, 三河 正彦, "粒子法と数値地形学に基づく海岸地形生成", 画像電子学会誌, 査読有, Vol.47, No.4, pp.363-371, 2018.

Makoto Fujisawa, Takuya Nakada, Masahiko Mikawa, "Particle-based Shallow Water Simulation with Splashes and Breaking Waves", Journal of Information Processing, 査読有, Vol.25, pp.486-493, 2017.

〔学会発表〕(計2件)

Hiroki Watanabe, Makoto Fujisawa, Masahiko Mikawa, "Simulation of Bubbles with Floating and Rupturing Effect for SPH", In Proceedings of SIGGRAPH Asia 2018 Posters, Article No.10, Tokyo, Japan, December 4-7, 2018.

佐々木 浩幸, 藤澤 誠, 三河 正彦, "燃焼過程を考慮した炎のシミュレーション", 情報処理学会 コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学研究会 第169回研究発表会, 2018年3月3日

〔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://slis.tsukuba.ac.jp/pbcglab/> (研究成果の動画等を公開)

<http://slis.tsukuba.ac.jp/~fujis/cgi-bin/wiki/index.php> (研究で作成したコードの一部を公開)

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。