

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：32692

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25730074

研究課題名(和文) 磁力線ベースの電磁流体のビジュアルシミュレーション

研究課題名(英文) Visual Simulation of Magnetohydrodynamics Based on Magnetic Field Lines

研究代表者

石川 知一 (ISHIKAWA, Tomokazu)

東京工科大学・メディア学部・助教

研究者番号：30635545

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：オーロラのCGアニメーションを制作するための新しいモデルの提案を行った。3DCGでオーロラを表現する手法はいくつも存在するが、オーロラの動特性である分離・再結合を表現できる方法は無かった。そこで本提案法では、オーロラ分布を点群で表現し、オーロラの3DCGアニメーションを制作した。次に、太陽表面などの熱伝導が顕著に現れる現象の再現のために、熱伝導計算を効率的に計算するための方法を提案した。自然界の中では雨氷も熱伝導が重要な現象であり、そのアニメーションを制作する方法を提案した。提案する熱伝導の計算方法は、流体計算法の1つであるFLIP法と親和性が高い方法である。

研究成果の概要(英文)：We proposed a new modeling method to simulate complicated deformations of aurora for CG animations. Although much research work has been done in order to reproduce the aurora phenomenon using 3D computer graphics, no one has recreated disconnection and reconnection of aurora, which are dynamic behaviors unique to aurora. In our method, the aurora distributions are represented as sampling points. The proposed method renders the CG animations of the aurora by projecting 3D aurora distribution to the screen and calculating the intensities of emissions.

Next, we propose a method for simulating glazed frost by computing heat transfers between water droplets and the surrounding air. We propose a method to create an animation of glazed frost formation by taking into account the heat transfer between particles and the outside grids. We propose a technique which is highly compatible for a FLIP method to solve the heat conduction equation and we reproduce the formation of glazed frost.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：3DCG オーロラ 電磁流体 熱伝導 自然現象

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまでに磁場との相互作用を考慮した3次元の流体シミュレーションの研究を行ってきた。天体現象と関連する電磁流体は、流体計算だけでなく、磁場からの外力の影響や、流体が移動することで誘起される磁場の影響を考慮しなければならないため、計算が複雑になり、通常は計算コストが高いとされる。コンピュータグラフィックス(以下CG)のような商用利用において、計算コストを削減するためのモデルの提案は重要で、研究代表者はこれまで電磁流体によって起こる現象について、そのモデルの提案に取り組んできた。本研究では、磁場変化を磁力線ベースで計算することによって電磁流体をシミュレーションする方法を提案する。

2. 研究の目的

本研究は、CG分野の研究であり、その目的は、主に3つの天体現象を再現するビジュアルシミュレーション手法を開発することである。ここで対象とする3つの天体現象は、オーロラのゆらぎ、太陽の表面活動、ブラックホールである。近年、スーパーコンピュータを利用することによって、これらの現象を解析・再現するための方法が提案されているが、CGへの応用はなされていない。CGへ応用するためには、商用利用を考えると視覚的效果を損なわずに計算量を抑える必要がある。本研究では、これらの天体現象について、共通して計算すべき電磁流体と磁場の相互作用についての手法を提案し、これら3つの天体現象に適用することで再現可能であることを実証する。

3. 研究の方法

ビジュアルシミュレーション手法の開発

(1)オーロラのビジュアルシミュレーション
オーロラのビジュアルシミュレーションについてはCGの分野でいくつか関連研究があるが、電磁流体ベースの方法や物理ベースの方法は確立されていない。科学的に解明されていない部分があることが原因と考えられるが、本研究では既知の事実に基づいてモデリングを行い、ゆらぎを表現するための時間発展についても検討した。

オーロラのゆらぎの原因は2つ考えられ、1つは「発生源の移動」、もう1つは「地球磁場のゆがみ」である。発生源の移動は入射される荷電粒子に摂動を加えることによって再現し、シミュレーションでは「地球磁場のゆがみ」を計算する。この地球磁場のゆがみはオーロラ内部の電流に起因することが知られている。

オーロラ内部の電流について説明する。オーロラは電離圏に流入・流出する荷電粒子によって発生する。磁力線に沿って磁気圏から地球の電離圏に流入する電流と、磁気圏に流出する電流の分布ができ、流入箇所から流出箇所へ水平方向に電気が流れる。この一連の電

気の流れがオーロラの形状を決めている。オーロラにはしばしばカーテンのひだが見ることがあるが、このひだは磁力線の形状を表しているものだとされている。

提案法では、この磁力線に沿った電流をシミュレートし、その電流による磁場の影響を考慮してオーロラのゆらぎを再現した。オーロラを水平方向にスライスした平面で電気の流れを計算し、オーロラの形状を決定した。また、各磁力線において電流から受ける力を計算した。スライスした二次元平面における電位や流れる電流量については天文学の分野で実績のあるモデルを利用した。この二次元平面をつなぐための情報として磁力線を利用した。

(2)太陽表面活動のビジュアルシミュレーション

研究代表者は既に太陽表面から磁力線の浮上にもなって吹き出すプロミネンスのビジュアルシミュレーション方法について提案した。しかし、次のような問題点が残っていた。

流体の速度場・密度・温度の更新に格子法を利用している

太陽表面の活動はプロミネンスに限定されている

磁気リコネクションを再現できていない

問題点 については、磁力線を用いて磁場をサンプリングする手法を提案しているが、流体との相互作用を格子で行っているため、磁力線から格子へのデータの変換が必要になり、計算誤差が累積されたり、格子を切ることによって磁力線まわりだけ計算すればよいプラズマのメリットを損なったりする問題があった。そこで、磁力線ベースの方法を採用して、流体は粒子法を採用することを検討した。また、温度についても格子法だけでなく、粒子法とのハイブリッドな計算方法を考案し、実装と検証を行った。この計算方法は太陽表面の現象以外にも活用できるため、別の現象に対しても適用できる有用な方法であることを示した。

フレア、黒点など太陽表面の活動はプロミネンス以外にも存在するが、これらの現象は考慮されていないことが問題点である。フレアの構造は、磁気リコネクションによって磁気エネルギーが解放されることが成因と考えられている。このため、問題点のように磁気リコネクションが再現できるモデルでないと、フレアも再現できないことになる。そこで、問題点をクリアするために、磁力線ベースの方法で磁気リコネクションを擬似的に再現することを提案する。「擬似的に」というのは、磁気リコネクションが科学的に解明されていないことから、物理的根拠を持たず、幾何的に処理することを意味する。このリコネクションモデルは流体の渦線モデルについて利用されており、モデルが実

現できればフレアの再現だけでなく、プロミ
ンスの再加速にも適用できる。

4. 研究成果

(1)オーロラのビジュアルシミュレーション
本研究では、分布特性を考慮してオーロラの
擬似的な分布を無数の点群で近似する。水平
方向に広がる2次元平面上に、ひとつながり
になるように複数の点を配置する。この点列
に対して、オーロラの分断と再統合の現象を
考慮した接続関係の変更処理を行う。点列を
切断し一部を分離する処理を行うことで、ひ
とつなりのオーロラが分断して複数のオー
ロラになるような様子を再現する。分離し
た複数の点列が再び接続する処理を行うこ
とで、分断したオーロラのひだが再統合す
ることでひとつなりのオーロラを形成する
様子を再現した。また、電磁場計算と流体計
算を用いた運動モデルを構築し、ひだの運
動を表現する。オーロラの2次元分布を変
化させることでオーロラ特有の複雑な運
動を再現した。さらに、オーロラの2次元
分布をもとに発光過程の計算を行いオー
ロラの3次元分布を計算する。1/fノイズ
を用いることで揺らぎのある自然な分布
を再現した。この3次元分布をスクリー
ンに射影し描画することでオーロラのCG
アニメーションを生成した(図1)。

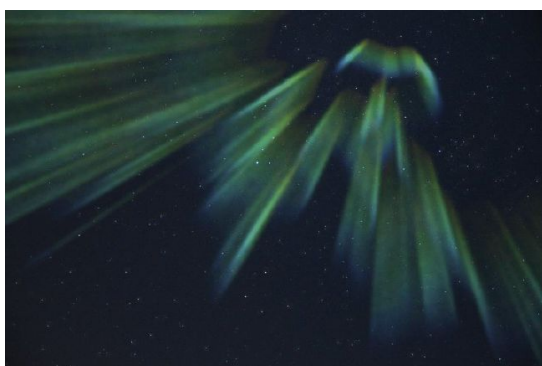


図1：オーロラのビジュアルシミュレーション
結果

(2)熱伝導を伴うビジュアルシミュレーション

太陽表面のビジュアルシミュレーションで
も温度は重要な因子である。ここで、温度計
算を効率的に行うために、流体計算で用いる
データ構造を利用することを考案した。また、
この手法が有効で、温度変化が顕著に現れる
現象として、雨氷があったため、まずは雨氷
のビジュアルシミュレーションが表現でき
るかを実験した。

雨氷とは、雨滴が不純物を含まないために、
過冷却状態でも凝結せず、地面や木などの物
体に衝突することで凍った後の透明な氷の
ことである。障害物に衝突して凍結または昇
華することで、氷層が形成される現象は着氷
現象と呼ばれ、雨氷の他に樹氷、霜がある。
着氷性の雨では過冷却状態を考慮する必要

があり、流れ落ちる効果を表現するためには
流体計算を必要とする。この計算を行って雨
氷を表現した研究は、我々が知る限りなかつ
た。流体計算はFLIP (Fluid Implicit Parti-
cle) 法によって計算し、粒子と外部の熱の授
受を計算することによって雨氷の生成ア
ニメーションを生成した(図2)。



図2：雨氷のビジュアルシミュレーション結
果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

小島啓史, 竹内亮太, 石川知一, 三上浩司,
渡辺大地, 柿本正憲, 近藤邦雄「分断と再統
合現象を考慮したオーロラのビジュアルシ
ミュレーション」情報処理学会論文誌, Vol.
55, No. 8, pp.1886-1898, 2014-8 (特選論文)
査読あり

〔学会発表〕(計 4件)

T. Ishikawa, Y. Yue, T. Watanabe, K.
Iwasaki, Y. Dobashi, M. Kakimoto, K.
Kondo, T. Nishita, "Visual Simulation of
Glazed Frost Taking into Account Super-
cooled State", Proc. of IEVC2014, 2014-10,
Samui (Thailand) (Best Paper Award) 査
読あり

T. Ishikawa, K. Okazaki, M. Kakimoto,
T. Nishita, "A Video Summarization Tech-
nique of Animation Products According to
Film Comic Format", SIGGRAPH 2014,
Poster, 2014-8, Vancouver (Canada) 査
読あり

R. Takeuchi, T. Ishikawa, M. Kakimoto,
T. Nishita, "A User-Controllable Defor-
mation Method for a Viscoelastic Body
Using Keyframes", Nicograph Interna-
tional'14, Short Paper, 2014-5, Visby
(Sweden) 査読あり

竹内亮太, 石川知一, 柿本正憲, 「キーフ
レームを用いた粘弾性体の自由変形アニメ
ーション生成」, 画像電子学会 Visual
Computing ワークショップ 2013, 2013-11,
玄海ロイヤルホテル, 福岡県宗像市 査読な
し

6 . 研究組織

(1)研究代表者

石川 知一 (ISHIKAWA, Tomokazu)

東京工科大学・メディア学部・助教

研究者番号：30635545