

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

小島 啓史^{1,a)} 竹内 亮太² 石川 知一¹ 三上 浩司¹ 渡辺 大地¹
柿本 正憲¹ 近藤 邦雄¹

受付日 2014年1月28日, 採録日 2014年5月17日

概要: オーロラの CG アニメーションのために, オーロラ特有の複雑な運動を擬似的に再現する手法を提案する. これまで, オーロラを対象にしたビジュアルシミュレーションの研究が多く行われてきた. しかしながら, 実際のオーロラのように分断したり, 接続して再統合したりするような複雑な様子を再現できる研究は行われていない. 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, オーロラに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, ひとつつなが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つながりのオーロラを形成する様子を再現する. 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する. 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する.

キーワード: CG, オーロラ, 磁気圏, 電離層, 電磁場

Visual Simulation of Aurora Taking into Account Dynamic Phenomena of Disconnections and Reconnections

TAKAFUMI KOJIMA^{1,a)} RYOTA TAKEUCHI² TOMOKAZU ISHIKAWA¹ KOJI MIKAMI¹
TAICHI WATANABE¹ MASANORI KAKIMOTO¹ KUNIO KONDO¹

Received: January 28, 2014, Accepted: May 17, 2014

Abstract: This paper describes a new modeling method to simulate complicated deformations of aurora for CG animations. Our goal is to generate motion pictures reproducing these unique phenomena of aurora. Although much research work has been done in order to reproduce the aurora phenomenon using 3D computer graphics, no one has re-created disconnection and reconnection of aurora, which are dynamic behaviors unique to aurora. In our method, the aurora distributions are represented as sampling points. Sampling points are set on the 2D horizontally plane as an ordered list. Our method processes modifications of connection relationships among a sequence of sampling points taking into account dynamic phenomena of disconnections/reconnections. We represent the situation of aurora that formed multiple distributions by cutting a sequence of sampling points. We represent the situation of aurora that formed a singly connected distribution by reconnecting sequences of sampling points. The proposed method reproduces the aurora motion by simulating the movements of charged particles. The movements of charged particles are calculated by the fluid simulation adding the Ampere force and the Lorentz force as external force. Our method generates 3D aurora distributions by simulating emission of light process based on 2D aurora distributions. We reproduce the distribution of natural fluctuation using the $1/f$ noise. The proposed method renders the CG animations of the aurora by projecting 3D aurora distribution to the screen and calculating the intensities of emissions.

Keywords: CG, aurora, magnetosphere, ionosphere, electromagnetic field

¹ 東京工科大学
Tokyo University of Technology, Hachioji, Tokyo 192-0982,
Japan

² シリコンスタジオ株式会社

Silicon Studio Corporation, Shibuya, Tokyo 150-0013, Japan
a) kojima.takafumi0@gmail.com

1. はじめに

近年、オーロラ [1]、稲妻 [2]、雲 [3]、蜃気楼 [4] といった気象現象をモデル化し、コンピュータグラフィクス（以下、CG）を用いて視覚的に再現するビジュアルシミュレーションの研究がさかんに行われている。また、自然現象を表現する CG アニメーション生成のためにビジュアルシミュレーションを活用することがある。自然現象をモデル化しビジュアルシミュレーションを行うことで、現実の景観に類似した CG アニメーションを生成できる。

様々な自然現象の中でもオーロラは、太陽活動に起因する磁気圏の変化を知るための観測として重要であるだけでなく視覚的にも極地の大空を彩る神秘的で美しい現象である。ビジュアルシミュレーションによって生成した静止画や、動画は、教育、産業、エンタテインメント分野において活用されている。オーロラ動画の自動生成の応用先としては、教育分野ではオーロラの動態を理解するための教材としての利用や、産業分野ではプラネタリウムなどオーロラに興味を持つきっかけとして、広告およびエンタテインメント分野では映画、ゲームなどの映像作品の背景として利用することが考えられる。

本研究では、オーロラの CG アニメーション生成を目的としたビジュアルシミュレーションを行う上で、北極・南極地方の大空に発生するオーロラの運動に着目した。

これまでに数多くの科学者がオーロラの研究を行い、様々な特徴や発生メカニズムを解明してきた [5], [6], [7], [8]。オーロラ現象のメカニズムが判明している部分については、その物理特性を考慮することで視覚的印象が類似したシミュレーションを行うことができる。一方で、メカニズムがいまだ科学的に解明できていないオーロラの動態も多くある。シート状構造のオーロラが分断して多重なオーロラになったり、分断していたオーロラが接近し接続して再度ひとつながりのシート状のオーロラになったり、といった動態もメカニズムが解明できていない。そこで、我々は物理的な確証のない動態については、実際に観測される事実に基づいた擬似的なモデルを提案し、既存研究において再現できなかったオーロラのビジュアルシミュレーションを目標とする。本研究で対象とするオーロラの動態は、次にあげる分断と再統合の2つである。

- (1) オーロラのひだが分断し、複数のオーロラを形成する様子
- (2) 分断したひだが再統合し、ひとつながりのオーロラを形成する様子

2. オーロラの分断・再統合現象

オーロラは磁極を中心として極域周辺のひずんだ環状の領域（オーロラオーヴァル）によく出現する。DMSP 衛星 [9] が南極上空を通過する際に撮影したオーロラの写真

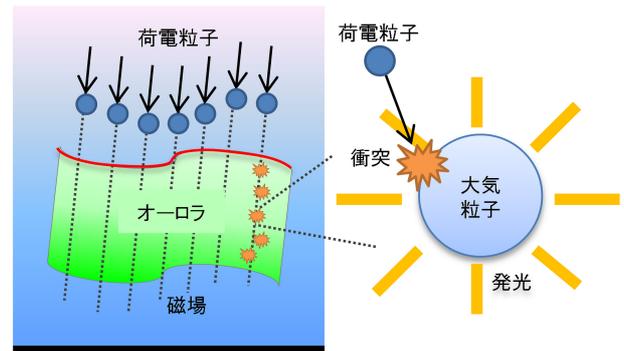


図 1 オーロラの発生過程

Fig. 1 The process of aurora development.

によって、曲線的な分布をしている箇所や、流体のような複雑な分布をしている箇所が確認できる。

オーロラのビジュアルシミュレーションの先行研究においてオーロラの運動や発光の様子を再現する様々な手法が提案されてきた。しかしながら、実際のオーロラのように分断したり、接続したりするような複雑な様子を再現できる研究は行われていない。本研究では、オーロラの動画生成のために、オーロラの物理特性の中でも、オーロラの動特性に着目した擬似的なモデルを構築する。

まず、オーロラの発生過程について説明する。太陽から放射される荷電粒子は、地球の磁場にとらえられて磁力線にそって降下する。地球の極地周辺の高層大気に降り込んだ荷電粒子は、高層大気に存在する酸素原子や、窒素分子といった大気粒子と衝突する。大気粒子は、荷電粒子との衝突によりエネルギーを得た状態（励起状態）になり、元の状態に戻る際に衝突によって得たエネルギーを光として放射する（図 1）。この光がオーロラとして観測される。

次々と降り込む荷電粒子は曲線的な分布となるが、そのオーロラ特有の分布が生じるメカニズムは科学的に明らかになっていない。

本研究で対象とするカーテン型オーロラは、薄いシート状であり、ひだのように折り畳まれることもある。また、オーロラの大局的な運動は、流体的な振舞いをする。そこで本研究では、オーロラの大局的な運動を流体計算によって再現する。この際に、局所的に発生するひだの動きは流体の外力項として考慮に入れるモデルを提案する。また、荷電粒子は磁力線にそってほぼ直線的に降下するといった性質がある。そのため、オーロラの 3 次元分布はその水平断面を鉛直下向きにスイープした形状と近似する。それに基づき、本研究ではオーロラの 3 次元分布を水平な 2 次元平面の断面と、高さ方向の 1 次元に分けて取り扱う。オーロラの形状を水平断面上の線分で表し、オーロラが動く様子を線分の変化で表現する。以降、オーロラの運動について説明する際には水平断面を見下ろす視点とする。

カーテン型オーロラの基本的な運動として、ひだの拡大運動と回転運動の2つがある。オーロラの揺らめきや、渦

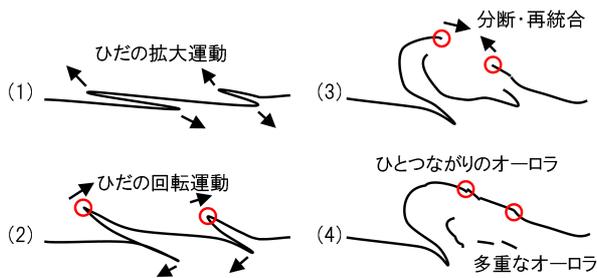


図 2 オーロラが分断・再統合する様子(見下ろし視点)
 Fig. 2 Processes of disconnections and reconnections (airscape).

状の動きは、ひだの拡大運動と回転運動によって起こる。オーロラの運動が活発になるとひだが密接する箇所が発生する。このような箇所では、オーロラの一部が分断したり、分離していた部分が再統合したりすることで、オーロラの結合の組合せが変わる。小口 [5] の解説によると、分布が途中で枝分かれする結合の組合せはない。本研究では、このような局所的な動きを考慮することで、オーロラ独特の運動を再現する。ひだの拡大や、回転運動、オーロラの方断・再統合によってひとつながりのオーロラ、多重なオーロラになる様子を図 2 に示す。図 2 は、小口 [5] の解説に基づくものである。ひだの運動方向を矢印で表し、分断・再統合が起きる箇所を丸印で表している。

オーロラの科学的な調査や分析の研究として、オーロラの発達過程の分析 [10] が行われたり、オーロラの 3 次元構造 [11] を解明したり、オーロラ発生時の電場や磁場のシミュレーション [12] や、磁気圏-電離圏におけるオーロラの電磁流体力学シミュレーション [13] が行われてきた。

オーロラの動態には、太陽から地球の磁気圏までの磁場や、電場、電流が関わっている。オーロラは太陽風と磁気圏磁場との相互作用によるプラズマ発電の結果から生じる電気を使って極域超高層大気中に起こる真空放電だといえる。オーロラと電流はつねに密接に関わっており、オーロラ活動にともなってオーロラ中に電流が流れる。オーロラ発生領域では磁力線に沿って上向きの電流や、下向きの電流が所々で発生している。しかしながら、オーロラの動態と原理については科学的に解明されていない。

我々は、オーロラの原理として物理的な妥当性を追及するよりも、実際に観測されるオーロラの動態に即する擬似的なモデルを構築することを重視した。そこで、本研究では、オーロラの分布に磁力線に沿って上向きの電流や、下向きの電流を設定し、その分布を動かす力としてアンペール力や、ローレンツ力を仮定した擬似的な運動モデルを提案する。

3. 関連研究

この節では、オーロラの CG 表現に関する研究について述べ、最後に本研究の位置づけを述べる。これまでのオー

ロラのビジュアルシミュレーションに関する研究において、オーロラの特徴を考慮した手法が提案されている。

まず、カーテンのように揺れる様子を再現した研究について述べる。井上ら [1] はオーロラの形状を一葉双曲面によって表現した。この研究の展望において一葉双曲面のパラメータ値を変化させることでアニメーション生成が可能であることを示した。Baranoski ら [14] は、オーロラの分布を荷電粒子を用いて表現した。荷電粒子の配置に正弦曲線を用いており、変移量を指定することでオーロラが揺れるような動きを実現できた。米山ら [15] は、荷電粒子の配置に複数の正弦曲線を合成した曲線を用いたことで、Baranoski ら [14] の手法では対応できなかった複雑なオーロラの揺らめきに対応できた。

また、伊藤ら [16] は、オーロラの形状を平面として扱い、正弦関数と自然現象によく現れる $1/f$ ゆらぎを用いて、オーロラの明るさの変化や、オーロラが揺れるような動きを表現した。さらに、伏見ら [17] は、オーロラの分布を厚みの情報を持ったカーテン状の 3 次元のボリュームデータとして扱い、 $1/f$ ゆらぎを用いて、オーロラの色変化や、オーロラが揺れるような動きを表現した。これらの $1/f$ ゆらぎを用いる手法は、自然なゆらぎの表現に適しており、計算コスト軽減に有効であるため本研究でも採用する。

次に、オーロラが渦を巻くような様子を再現した研究について説明する。Baranoski ら [18] はシート状の領域に荷電粒子を配置しローレンツ力による荷電粒子の運動を再現した。渦状のオーロラを表現するのに電磁場シミュレーションが有効であることを示した。津郷ら [19] はオーロラの形状を荷電粒子群として扱い電磁場シミュレーションを行うことで、オーロラが広がる動き (スプリッティング) や、ひだの回転運動を表現する際にもローレンツ力を用いることが有効であることを示した。小島ら [20] は渦状のオーロラ、スプリッティング、ひだの回転運動といったオーロラの特徴的な動き方と、様々なオーロラの発色といったレンダリング品質の両立を行った。荷電粒子の分布状態によってシミュレーション領域を更新することで、荷電粒子の分布が領域外に出てしまうことを防止した。

他にも、地球規模のオーロラのレンダリングの研究 [21] や、地球規模のオーロラにおける大域的な運動を再現した研究 [22], [23] もあり、オーロラの CG 表現に関する研究はさかんである。

従来手法は、オーロラの揺らめきや、渦状の動き、地球規模での分布変化を再現できる。しかしながら、実際のオーロラはそれらの動態だけではない。ひだの方断や、再統合といった運動が起きることでオーロラの結合の組合せが変わり、ひとつながりのオーロラや、多重のオーロラになる様子 (図 2) が発生する。従来手法はオーロラの方断・再統合過程を考慮していないため、このような複雑な様子を再現できない。本研究では、オーロラの CG アニメーシ

ン生成のために物理的な特性を加味し、特に動特性を考慮した擬似的なモデルを構築し、オーロラ特有の運動を再現するビジュアルシミュレーション手法を提案する。

4. オーロラのCG表現手法

本研究では、オーロラの分布に関して見下ろし視点による2次元水平面上の一連の発光部分をオーロラ分布と定義する。提案手法では、オーロラを見下ろした際の上空500 km付近に設定した水平面上の2次元分布を初期分布として生成する。2次元水平面上で運動のシミュレーションを行うことにより、オーロラ分布の時間変化を計算する。次に、オーロラの分断・再統合の処理を行い、オーロラ分布の再形成を行う。最後に、得られた2次元分布を基に鉛直下向きにカーテン状のオーロラを発生させレンダリングを行う。提案手法の流れを図3に示す。

4.1 オーロラ分布の表現

オーロラは曲線的で滑らかな独特の分布を持つが、そのメカニズムについては科学的には解明されていない。そこで、荷電粒子が流入する箇所においてオーロラの発光が発生することから、オーロラの発光部分（オーロラ分布）の無数の点群をサンプリングしたものを荷電粒子流入点とする。便宜上、荷電粒子流入点のことを荷電粒子と呼称する。

水平方向に広がる2次元水平面上に、複数の荷電粒子どうしを接続し、ひとつながりになるように配置する。複数の荷電粒子と、その接続関係によって、オーロラ分布を近似する。ここで、荷電粒子の列を双方向リストとして扱い、荷電粒子の接続関係を定義する。荷電粒子列の*i*番目の荷電粒子は、*i*−1番目の荷電粒子と、*i*+1番目の荷電粒子と接続する。また、カーテン型オーロラの特徴を考慮し、枝分かれするように荷電粒子が接続することは禁止した。初期状態は、マウス入力によって2次元平面に線を描き、その線上に荷電粒子を配置することで設定する。

1つの荷電粒子列は、カーテン型オーロラ1つの分布に相当する。複数の荷電粒子列を用いることで、オーロラの分断・再統合で生じる複数のオーロラ分布に対応する。基の荷電粒子列を切断し一部を新しい荷電粒子列として分離することで、ひとつながりのオーロラが分断して複数のオーロラになる様子を再現する。一部が分離した荷電粒子列をひとつながりになるように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がりのオーロラを形成する様子を再現する。また、オーロラの曲線的で滑らかな分布を再現するために、荷電粒子を再度サンプリングしオーロラ分布の再形成を行う。複数のオーロラ分布の例を図4に示す。

4.2 オーロラの運動表現

オーロラの運動シミュレーションでは、オーロラに関わ

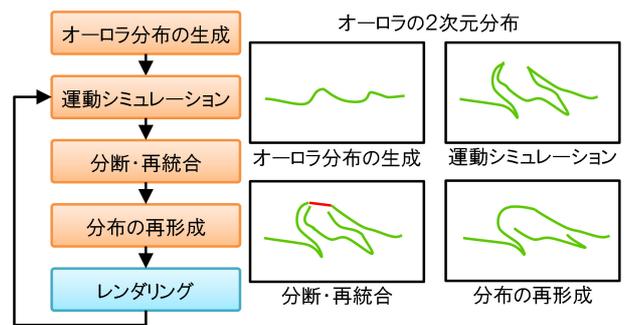


図3 処理の流れ

Fig. 3 A flowchart of the proposed method and the 2D distribution of aurora.

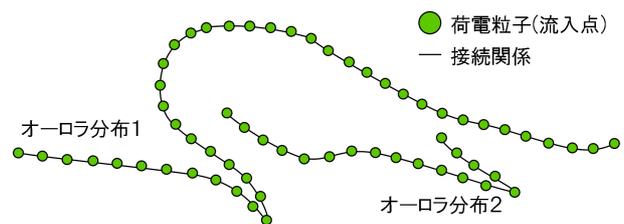


図4 複数のオーロラ分布。荷電粒子流入点とは、オーロラの発光部分（オーロラ分布）の無数の点群をサンプリングしたものである

Fig. 4 Aurora distributions. The charged particles (Inflow points), as the sampling points, are set on the aurora distributions.

る物理特性である電場や、磁場、電流から荷電粒子にかかる力を計算し、流体シミュレーションを行う。

本研究では、荷電粒子にかかる力を荷電粒子の運動に適用する際に、オーロラ分布を輸送する擬似的な連続体として非圧縮性流体を想定する。2次元の流体シミュレーションを行うことで、オーロラの流体的な動き方を擬似的に表現する。流体シミュレーションでは、格子法を用いて流体運動を記述するナビエ・ストークス方程式を解き、空間中の流速を計算する。流速を \mathbf{u} 、圧力を p 、密度を ρ 、外力項を \mathbf{f} としたとき、流体運動を記述するナビエ・ストークス方程式を式(1)、連続の式を式(2)に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、ナビエ・ストークス方程式の外力項 \mathbf{f} に電流から荷電粒子にかかるアンペール力と、電場や、磁場から荷電粒子にかかるローレンツ力の合力を与える。

次に、荷電粒子にかかるアンペール力とローレンツ力の計算方法について説明する。オーロラには、磁力線にそって電流が発生している。本研究では、荷電粒子の位置に電流量を設定し、他の電流から荷電粒子にかかるアンペール力を計算する。アンペール力を考慮することでひだの拡大や、分断・再統合が発生するきっかけになるひだの接近を表現する。電流の向きの違いによるアンペール力とそれに

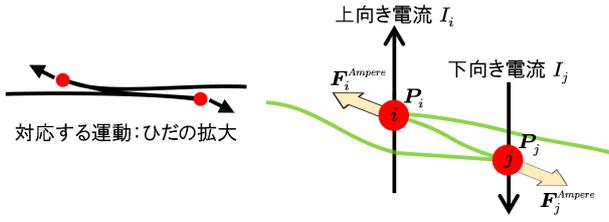


図 5 電流の向きが反対の場合のアンペール力

Fig. 5 The Ampere force between charged particles with the antiparallel electric currents.

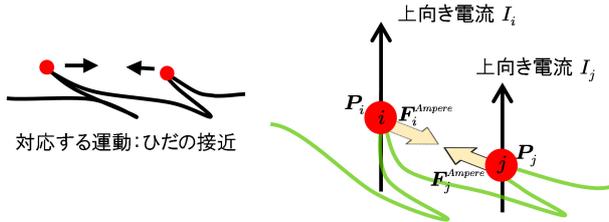


図 6 電流の向きが同じ場合のアンペール力

Fig. 6 The Ampere force between charged particles with the same electric currents.

対応する運動をそれぞれ図 5, 図 6 に示す.

まず, ユーザ入力によって電流量の最大値 I^{Max} と最小値 I^{Min} を設定する. 荷電粒子列の i 番目の荷電粒子の位置に流れる電流 I_i を次の式 (3) に示す.

$$I_i = I^{\text{Min}} + \xi(I^{\text{Max}} - I^{\text{Min}}) \quad (3)$$

ここで, ξ は $[0, 1]$ の一様乱数とする. 電流量が正の値の場合, 電流の向きは鉛直上向きである. また, 電流量が負の値の場合には電流の向きは鉛直下向きである.

荷電粒子列の i 番目の荷電粒子の位置 P_i に流れる電流を I_i , j 番目の荷電粒子の位置 P_j に流れる電流を I_j とし, 2 点間の距離を $r_{i,j}$, 電流が流れる長さを l , 真空の透磁率を μ_0 としたとき, i 番目の荷電粒子にかかるアンペール力 F_i^{Ampere} を次の式 (4) に示す.

$$F_i^{\text{Ampere}} = \sum_j \frac{\mu_0 I_i I_j}{2\pi r_{i,j}} l (P_j - P_i) \quad (4)$$

また, 荷電粒子の分布から電場を計算し, 電場と磁場から各荷電粒子にかかるローレンツ力を求める. クーロンの法則と電場の定義式に従い, 電荷量を q , 真空の誘電率を ϵ_0 としたとき, i 番目の荷電粒子に他の荷電粒子が与える電場の総和 E_i を次の式 (5) に示す.

$$E_i = \sum_j \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_{i,j}^3} (P_j - P_i) \quad (5)$$

ここで, 電荷量 q はすべての荷電粒子で同じ負の値を用いた.

ローレンツ力の計算は Baranoski ら [18], 津郷ら [19] の手法を参考にした. 荷電粒子の速度は磁場に水平な成分と垂直な成分があるが, 本研究では垂直な成分のみを用いる.

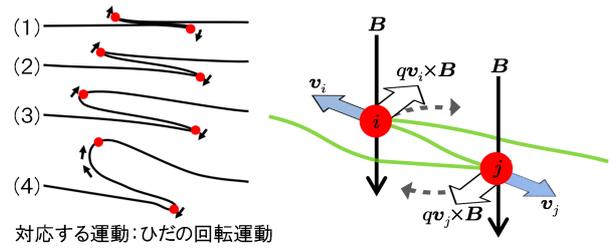


図 7 ひだの回転運動とローレンツ力の対応

Fig. 7 The correspondence of the Lorentz force to a rotation of the aurora folds.

磁場に垂直な荷電粒子の現在の速度を $v_{\perp i}$, 地球の磁場を B としたとき, ローレンツ力 F_i^{Lorentz} を次の式 (6) に示す.

$$F_i^{\text{Lorentz}} = q(E_i + v_{\perp i} \times B) \quad (6)$$

ここで, v_i は荷電粒子の位置 P_i を囲む格子点における流速 u からバイリニア補間によって求めた. また, B はシミュレーション空間に対して鉛直下向きである. $v_i \times B$ は速度ベクトルと磁場ベクトルの外積を表している. ひだの回転運動との対応を図 7 に示す.

次に, 各荷電粒子において計算したアンペール力とローレンツ力を流体計算の格子に分配する. 荷電粒子の位置で求めた力を格子に分配する際に, 分配前の力の大きさと, 分配後の力の大きさの総和が等しくなるように, 分配計算には荷電粒子を囲む 4 つの格子点からなる面積比を用いた. $M \times N$ の解像度の格子において, 格子を構成する格子点は縦方向, 横方向ともに等距離間隔 d ごとに配置するものとする. 格子点の位置を G , i 番目の荷電粒子の位置 P_i で求めたアンペール力とローレンツ力の合力を $F_i^{\text{Resultant}}$, 格子点の近傍にある荷電粒子の集合を Z としたとき, 外力 f を式 (7) に示す.

$$f = \sum_{i \in Z} W(P_i - G, d) F_i^{\text{Resultant}} \quad (7)$$

ここで, $W(P_i - G, d)$ は $[0, 1]$ のカーネル関数とする.

基底ベクトルとして $e_1 = (1, 0)$, $e_2 = (0, 1)$ としたとき, カーネル関数 $W(H, d)$ を式 (8) に示す.

$$W(H, d) = \frac{(d - |H \cdot e_1|)(d - |H \cdot e_2|)}{d^2} \quad (8)$$

荷電粒子全体の集合を C , 格子点の近傍にある荷電粒子の集合 Z を式 (9) に示す.

$$\begin{aligned} X &= \{i \in C \mid |(P_i - G) \cdot e_1| < d\} \\ Y &= \{i \in C \mid |(P_i - G) \cdot e_2| < d\} \\ Z &= X \cap Y \end{aligned} \quad (9)$$

最後に, 各荷電粒子の位置において, 格子法における流速をサンプリングし, ルンゲクッタ法により荷電粒子の位置を更新することで, オーロラ分布の流体的な振舞いを表現する.

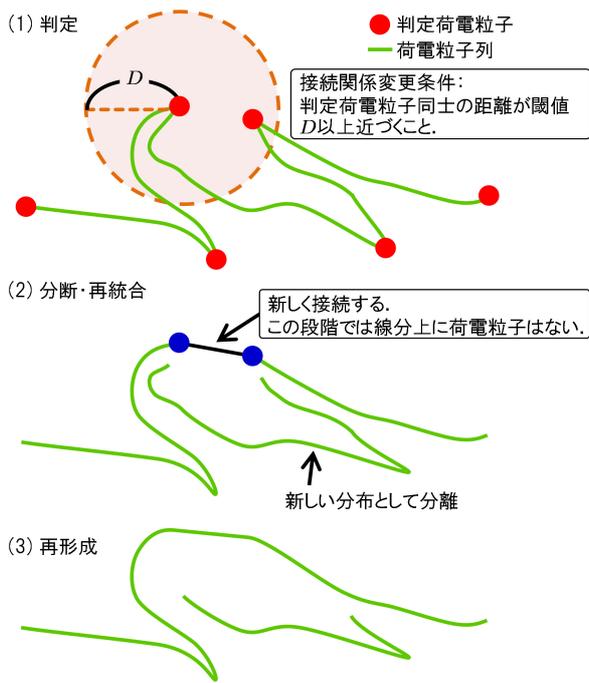


図 8 荷電粒子の接続関係が変わる過程

Fig. 8 A process of modifications of connection relationships among charged particles.

4.3 オーロラの分断・再統合および再形成表現

荷電粒子列の接続関係を変更することで、オーロラの方断・再統合を表現する方法について述べる。1つの荷電粒子列から一部分を別の荷電粒子列として分離することで、オーロラが分断し、ひとつながりのオーロラから別のオーロラとして分離する様子を表現する。また、オーロラの方断した箇所をつなぐことで、ひとつながりのオーロラを形成する様子を表現する。接続関係の変更を判定し、判定荷電粒子どうしの接続関係が変わる過程を図 8(1)、図 8(2)に示す。

オーロラ分布中で分断・再統合が発生する箇所を求めるために、荷電粒子列の中から一定個数間隔で荷電粒子を抽出する。抽出した荷電粒子は変更条件を判定するために用いるので、これ以降では判定荷電粒子と呼称する。

接続関係を変更する条件は、判定荷電粒子どうしの2点間距離が閾値 D よりも小さいことと設定した。抽出したすべての判定荷電粒子どうしで総当たりで判定処理を行う。

荷電粒子列の s 番目の荷電粒子と、 w 番目 ($s < w$) の荷電粒子が変更条件を満たした場合について説明する。まず、 s 番目と $s-1$ 番目の荷電粒子を切断し、 w 番目と $w+1$ 番目の荷電粒子を切断する。次に、 s 番目から w 番目までの荷電粒子列を新しいオーロラ分布として分離する。最後に、基の荷電粒子列の $s-1$ 番目と $w+1$ 番目を接続する。変更条件を満たしていない場合には何もしない。

オーロラ分布が変化すると、初期状態で生成した荷電粒子だけでは曲線的で滑らかなオーロラ独特の分布分布を表

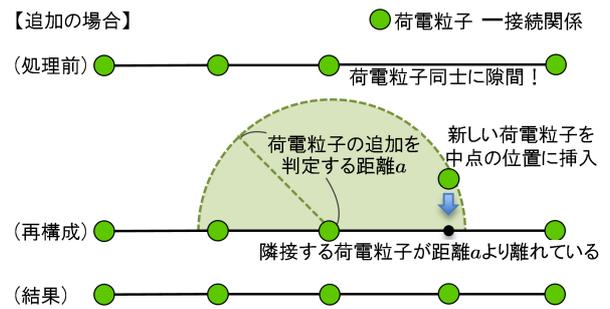


図 9 荷電粒子の追加によるオーロラ分布の再形成 (再サンプリング)
Fig. 9 A resampling of an aurora distribution by the addition of a charged particle.

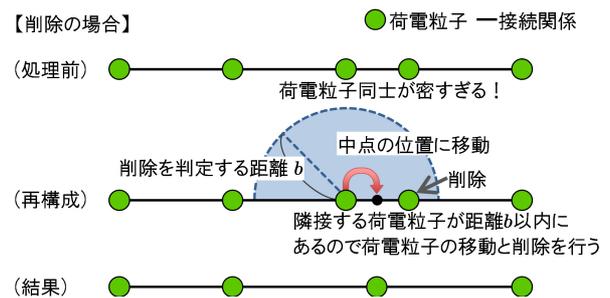


図 10 荷電粒子の削除によるオーロラ分布の再形成 (再サンプリング)
Fig. 10 A resampling of an aurora distribution by the deletion of a charged particle.

現できない。そこで、荷電粒子どうしの位置関係を条件としてオーロラ分布の再形成 (再サンプリング) を行う。

オーロラの滑らかな分布を保つために、必要に応じて荷電粒子の追加、削除を行う。荷電粒子の追加、削除によってオーロラ分布を再形成する過程を図 9、図 10 に示す。オーロラ分布の再形成を行い、滑らかな分布になった結果を図 8(3) に示す。

追加条件は、接続する荷電粒子どうしが一定距離 a 以上離れることと設定した。 i 番目の荷電粒子と $i+1$ 番目の荷電粒子が追加条件を満たした際には、2つの荷電粒子の中点の位置 $\frac{P_i + P_{i+1}}{2}$ に新しい荷電粒子を挿入する。削除条件は、接続する荷電粒子どうしが一定距離 b 以上近づくことと設定した。 i 番目の荷電粒子と $i+1$ 番目の荷電粒子が削除条件を満たした場合には、2つの荷電粒子のうち i 番目の荷電粒子を中点の位置 $\frac{P_i + P_{i+1}}{2}$ に移動し、 $i+1$ 番目の荷電粒子を取り除く。

オーロラ分布の再形成によって、接続する荷電粒子どうしの距離は b 以上 a 以下に収束し、荷電粒子の分布の粗さ (以下、詳細度) が決定する。荷電粒子の詳細度が変化することで電荷の総和が変化することになるが、実際のオーロラでも荷電粒子の降り込みによって電荷が変化しているので、電荷の総和が一定に保たれているわけではない。

4.4 レンダリング手法

レンダリング手法に関しては、小島ら [20] の手法を参考にした。既存研究と同様に、2次元上の荷電粒子の分布を3次元空間に配置し、オーロラの発光過程をシミュレーションする。発光過程の計算において、ユーザの入力により荷電粒子の初期エネルギーを設定し、荷電粒子が大気粒子との衝突計算によってエネルギーを失うまで荷電粒子の降下計算を行う。荷電粒子と大気粒子との衝突計算により、大気粒子が放射する光の波長、発光の強さを計算し発光分布を求める。オーロラの発色は、高層大気に存在する酸素原子や窒素分子といった大気粒子の種類によって異なる。酸素原子が放射する主な波長は 557.7 nm, 630.0 nm であり、窒素分子が放射する主な波長は 391.4 nm, 427.8 nm, 670.5 nm である。大気粒子が発光の際にどの波長を放射するかは、どのエネルギー準位から遷移するかによって異なる。生成した3次元上の発光分布をスクリーンに射影しオーロラを描画する。

次に、我々がオーロラ分布をレンダリングする際に改良した点を述べる。既存手法では、オーロラらしいレンダリング結果を得るために、静止画像の1画素あたりの発光量が十分になるような荷電粒子の個数を事前に設定する必要がある。本研究では、オーロラ分布の再構成を行っているため、荷電粒子の個数は一定ではない。そこで、降下計算の事前処理として、オーロラ分布の各荷電粒子をつなぐ線分上に荷電粒子を配置する。降下計算のために用いる基の荷電粒子と新しく追加した荷電粒子を降下粒子と呼称する。そして、基の荷電粒子と降下粒子の個数比を事前に設定することでオーロラらしいレンダリング結果を得る。

また、既存手法では荷電粒子の初期エネルギーは一定として扱った。しかしながら、実際には地球に降下する荷電粒子のエネルギーは一定ではなく、時間経過により出現するオーロラの鉛直方向の長さは変化する。本研究では、計算コストの低い簡易な $1/f$ ノイズを用い、荷電粒子の初期エネルギーに揺らぎを与えることで自然なオーロラに近づけた。

初期エネルギーに、時間経過による揺らぎと、荷電粒子ごとの揺らぎを与える方法を述べる。 k 番目のフレームにおける $1/f$ ノイズを n_k 、ノイズ係数を h 、エネルギーの最大値を g^{Max} 、最小値を g^{Min} としたとき、時間経過による揺らぎを考慮したエネルギー g_k を次の式 (10) に示す。

$$g_k = g^{\text{Min}} + hn_k(g^{\text{Max}} - g^{\text{Min}}) \quad (10)$$

同フレームでの荷電粒子のエネルギーの振幅最大値を c 、 i 番目の降下粒子における $1/f$ ノイズを m_i としたとき、 k 番目のフレームにおける、 i 番目の降下粒子の初期エネルギー $e_{k,i}$ を次の式 (11) に示す。

$$e_{k,i} = \frac{g_k + g_{k-1}}{2} + \frac{c(m_i + m_{i-1})}{2} \quad (11)$$

また、今回参考にした既存のレンダリング手法では、複数フレーム分の結果画像を生成するために、荷電粒子の降下計算、放射光の波長計算、発光強度の減衰計算をフレームごとに行っていた。本手法では、レンダリングの高速化のためにそれらの処理を事前計算してテーブル化し、描画計算時にそれらのテーブルを参照することで高速化を図った。事前計算のテーブル生成はマルチスレッド処理で並列化した。計算結果テーブルの種類は、放射光の波長と、発光強度の減衰係数である。本研究では、1フレーム分の静止画を得る際には荷電粒子の降下計算を行い、衝突位置の鉛直方向の成分をキーに各テーブルから必要な計算結果を参照する。同種テーブルの何番目の計算結果に参照するかは乱数を用いた。この計算上の工夫により、リアルタイムな結果ではないがレンダリング結果を損なわずにレンダリング時間を短縮した。今回参考にした既存手法では1フレームあたり数分から数十分かかるが、本手法では数秒から数十秒、長くても数分になった。

5. 描画実験と考察

提案手法を実装し描画実験を行い、分断・再統合表現の考察を行った。実験目的は、次にあげる点の実現できたかを判断するためである。

- (1) オーロラのひだが分断し、複数のオーロラを形成する様子
- (2) 分断したひだが再統合し、ひとつながりのオーロラを形成する様子
- (3) 分布の再形成による滑らかなオーロラの様子
- (4) $1/f$ による自然なオーロラの揺らぐ様子

5.1 実験方法

プログラムの実装には C++ と OpenGL を用いた。ビジュアルシミュレーションの実行環境は、表 1 に示す。

今回の検証において、オーロラを生成した条件を述べる。用いたパラメータと設定した数値の対応を表 2、表 3 に示す。

オーロラ分布の生成や、運動の計算を行うために、一様格子による2次元空間を設定し、この2次元空間に収まるような線分を用意する。次の手順によって、描いた線分の上に荷電粒子の列を配置する。まず、線分の始点、終点だけに荷電粒子を配置した。この2つの荷電粒子は、描いた線分の始点と終点に固定して配置する。次に、運動計算を始める前に1度だけオーロラ分布の再形成処理を計算す

表 1 実行環境

Table 1 Runtime environments.

OS	Windows 7 Enterprise 64 bit
CPU	Intel Core i7-3770 3.4 GHz
メモリ	16.0 GB

表 2 2次元のシミュレーションに関するパラメータ表

Table 2 Parameters for 2D simulation.

パラメータ	数値
格子点	64 × 42 個
l	1.0
I^{Max}	1000.0 A
I^{Min}	-1000.0 A
q	-1.6022×10^{-19}
d	0.0156
判定荷電粒子の抽出頻度	10 個ごと
D	0.0078
a	0.0036
b	0.0027

表 3 レンダリングに関するパラメータ表

Table 3 Parameters for rendering.

パラメータ	数値
事前計算のテーブル個数	10 個
基の荷電粒子と降下粒子の個数比	1:1000
g^{Max}	10,000 eV
g^{Min}	3,500 eV
c	1,250 eV
h	0.175

る。その結果, a , b の値と, 描いた線分の長さから, 荷電粒子の初期状態での個数は 257 個となった。

レンダリングにおいて, 実際にオーロラが出現する空間の広さに対応づけるために, 求めたオーロラ分布を拡大し 3次元空間に配置する。3次元空間の水平方向の広さは $500,000 \text{ km}^2$ とし, オーロラ分布を 1,000,000 倍に拡大し配置した。

5.2 分断・再統合するオーロラの生成実験

時間経過によるオーロラの 2次元分布のシミュレーション結果を図 11 に示す。この図は, 5.1 節で述べた運動のための 2次元空間の一部を切り出したものである。ひとつながりのオーロラ分布を赤い曲線で表し, 分断・再統合を判定する荷電粒子を緑色の点で表し, 分断したオーロラ分布を白い曲線で表した。

また, 同じフレーム数での各描画結果を図 12 に示す。描画結果上にオーロラ分布を表す赤い曲線を重ねて表示した。

5.3 オーロラのレンダリング実験

オーロラのみをレンダリングした結果を図 13 に示す。図 14 は, 図 13 よりも離れた位置に視点を設定したレンダリング結果である。オーロラのレンダリング結果と実写背景 [24] を合成した結果を図 15 に示す。

(1) 分断・再統合の有無による描画実験

本手法の分断・再統合の有無による違いを図 16, 図 17

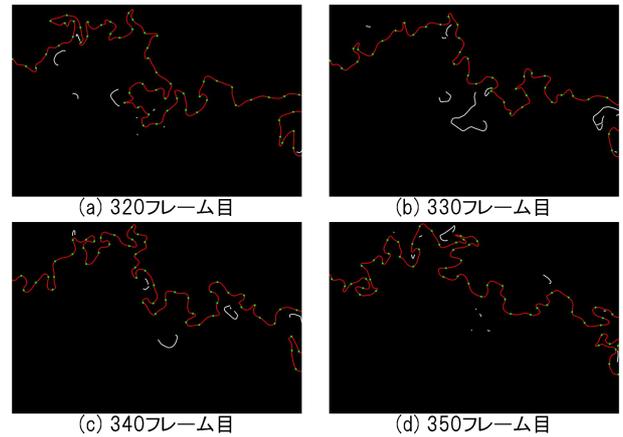


図 11 分断・再統合のシミュレーション結果。ひとつながりのオーロラ分布を赤い曲線で表し, 分断・再統合を判定する荷電粒子を緑色の点で表し, 分断したオーロラ分布を白い曲線で表した

Fig. 11 Simulation results of disconnections and reconnections. The red curve represents the distribution of the aurora. The green dots represent the charged particles used to determine disconnections and reconnections. The white curves represent isolated aurora distributions.

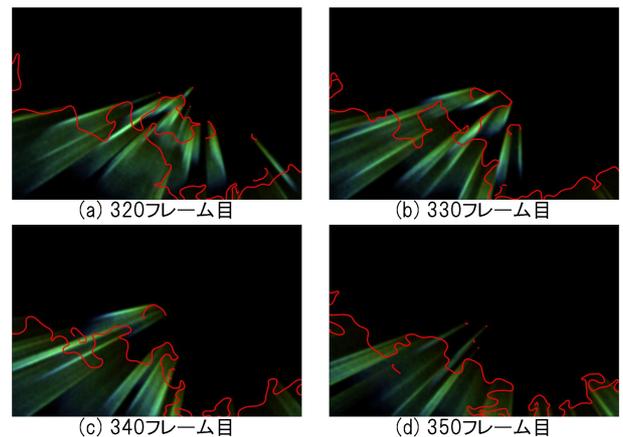


図 12 分断・再統合するオーロラの生成結果。描画結果上にオーロラ分布を表す赤い曲線を重ねて表示した

Fig. 12 Rendering results of aurora with disconnections and reconnections. Red curves represent the aurora distributions.

に示す。図 16 は分布のシミュレーション結果であり, 図 17 はレンダリング結果である。赤い線はオーロラ分布を表している。

図 16(a), 図 16(b), 図 17(a), 図 17(b) は分断・再統合処理を行った場合である。分断・再統合処理があることで, フレームが進むと 1つのオーロラ分布から複数のオーロラ分布が分離している。オーロラの分離により, 切断された基のオーロラ分布は切断部分がつながることでひとつながりのオーロラ分布を形成している。

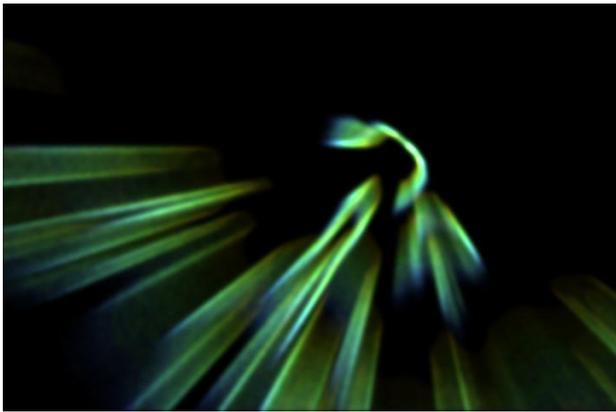


図 13 オーロラのレンダリング結果
Fig. 13 A rendering result of aurora.



図 14 離れた位置からレンダリングした結果
Fig. 14 A rendering result when viewed away from the aurora.



図 15 実写背景との合成結果
Fig. 15 A composition result of the simulated aurora and a photograph.

図 16 (c), 図 16 (d), 図 17 (c), 図 17 (d) は分断・再統合処理を行っていない。フレームが進んでも分断・再統合が起きないので、1つのオーロラ分布だけが広がっていく。分断・再統合処理を行わないと、オーロラが分離したり、ひとつつながりになるような様子を再現できない。また、オーロラ分布の再形成によって滑らかな曲線的な分布を維持しているが、折り重なるよ

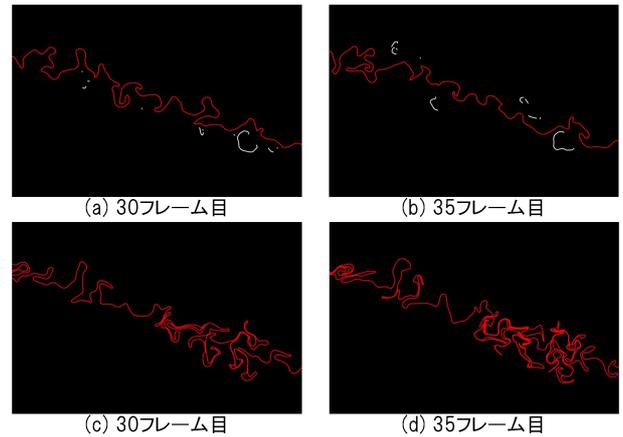


図 16 分断・再統合の有無による違い (2次元分布のシミュレーション結果). (a), (b) が分断・再統合のある場合. (c), (d) が分断・再統合のない場合

Fig. 16 Comparisons of 2D distribution simulation results with disconnections/reconnections (a), (b) and without it (c), (d).

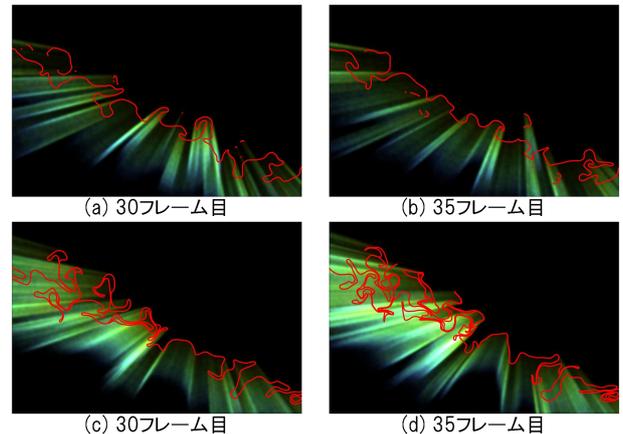


図 17 分断・再統合の有無による違い (レンダリング結果). (a), (b) が分断・再統合のある場合. (c), (d) が分断・再統合のない場合

Fig. 17 Comparisons of 3D rendering results with disconnections/reconnections (a), (b) and without it (c), (d).

うな分布になってしまっている。

(2) オーロラ分布の再形成の有無による描画実験

本手法の分布再形成の有無による違いを図 18 に示す。図 18 は分布のシミュレーション結果であり、緑の点は荷電粒子を表している。赤い線は荷電粒子の接続関係を表している。

図 18 (a), 図 18 (b) は分布の再形成を行っており、接続している荷電粒子どうしの距離間隔に制限がかかる。フレームが進むごとに荷電粒子の追加と削除を行うことで、滑らかな曲線的な分布を維持している。

図 18 (c), 図 18 (d) は分布の再形成を行っていない。フレームが進むごとに荷電粒子の分布が疎になり、滑らかな曲線的な分布を維持できていない。

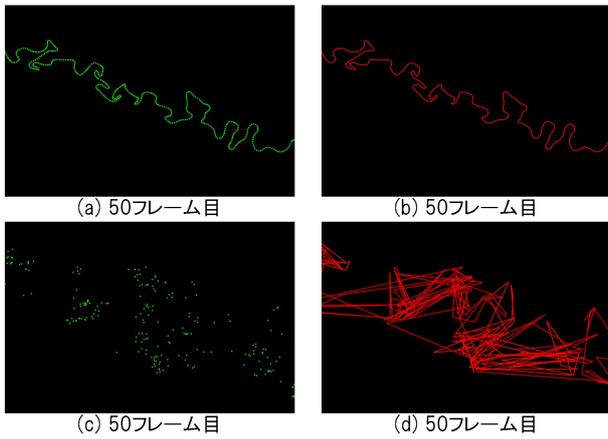


図 18 分布再形成の有無による違い (2次元分布のシミュレーション結果). (a), (b) が分布再形成のある場合. (c), (d) が分布再形成のない場合

Fig. 18 Comparisons of 2D distribution simulation results with a resampling of the aurora distribution (a), (b) and without it (c), (d).

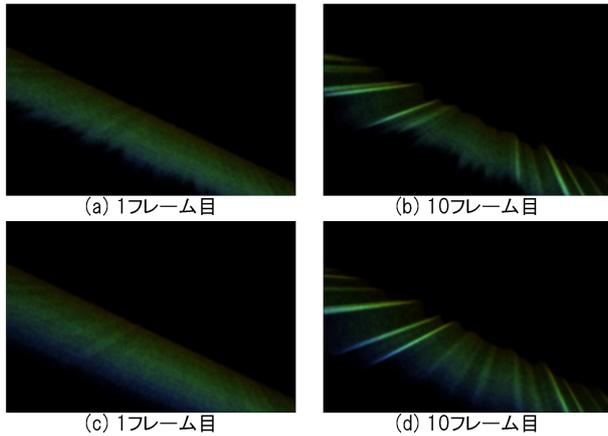


図 19 レンダリング結果. (a), (b) $1/f$ ノイズがある場合. (c), (d) $1/f$ ノイズがない場合

Fig. 19 Comparisons of 3D rendering results with $1/f$ noise (a), (b) and without it (c), (d).

(3) 初期エネルギー揺らぎの有無による描画実験

本手法の $1/f$ ノイズの有無による違いを図 19 に示す. 図 19(a), 図 19(b) は $1/f$ ノイズがある場合であり, 図 19(c), 図 19(d) は $1/f$ ノイズがない場合のレンダリング結果である. 初期エネルギーに $1/f$ ノイズで揺らぎを入れることで, 降下荷電粒子が侵入できる限界高度にばらつきが生じ, オーロラ下端の揺らぎが表現できる.

(4) 荷電粒子の詳細度の違いによる描画実験

荷電粒子の詳細度の違いを図 20, 図 21 に示す. 図 20 は分布のシミュレーション結果, 図 21 はレンダリング結果である. 緑の点は分断・再統合処理における判定荷電粒子を表している.

図 20(a), 図 20(b), 図 21(a), 図 21(b) は, 荷電粒子

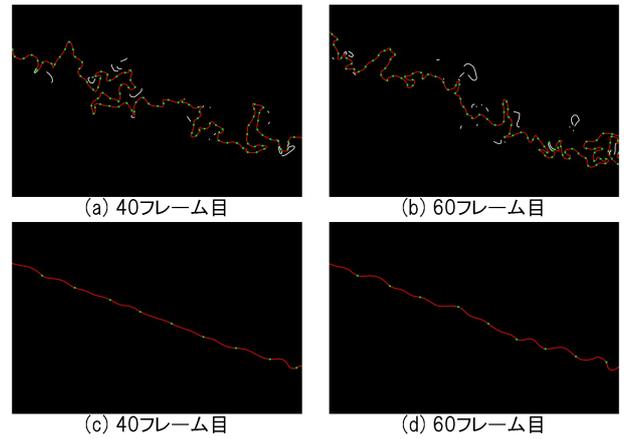


図 20 荷電粒子の詳細度の違い (2次元シミュレーション結果). (a), (b) が詳細度が高い場合. (c), (d) が詳細度が低い場合

Fig. 20 Comparisons of level of detail of charged particles (2D simulation results). A large number of charged particles (a), (b) and a small it (c), (d).

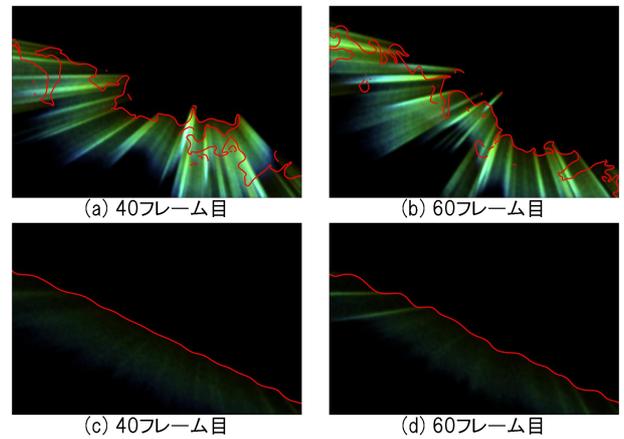


図 21 荷電粒子の詳細度の違い (レンダリング結果). (a), (b) が詳細度が高い場合. (c), (d) が詳細度が低い場合

Fig. 21 Comparisons of level of detail of charged particles (3D rendering results). A large number of charged particles (a), (b) and a small it (c), (d).

の詳細度を高く設定したときにおける結果を示している. 荷電粒子の詳細度を高く設定するために, 分布の再形成において荷電粒子の詳細度を決定するパラメータ a, b の値を, 表 2 の値よりも $1/2$ 倍の値にした. 荷電粒子の詳細度は高くなったが, 判定荷電粒子を抽出する個数間隔は変更していないので, 図 11, 図 12 と比べて分断・再統合を判定する箇所が増えている. また, この実験では, 分断・再統合の判定に用いる D も変更していない. そのため, 荷電粒子の詳細度が高くなったことですぐ近くの位置にある判定荷電粒子と分断・再統合処理が行われる頻度が高くなった. 分離するオーロラの長さを比べると, 荷電粒子の詳細度だけを高くしたことで, 元の結果より短いものが増えた. 図 20(c), 図 20(d), 図 21(c), 図 21(d) は, 荷電粒

子の詳細度を粗く設定した結果である。荷電粒子の詳細度を粗く設定するために、パラメータ a , b の値を表 2 の値よりも 2 倍の値にした。荷電粒子の詳細度は粗くなったが、判定荷電粒子を抽出する個数間隔は変更していない。図 11, 図 12 と比べて分断・再統合を判定する箇所が減っている。また、 D も変更していないため、荷電粒子の詳細度が粗くなったことで分断・再統合処理が行われる頻度が低くなった。

5.4 考察

本研究の描画実験から考察を行う。提案手法の描画実験の画像によって、多重なオーロラ、ひとつながりのオーロラを形成する様子が確認できた。

計算時間について述べる。2次元分布のシミュレーションにおける計算時間の平均は 379 FPS であった。シミュレーションからレンダリングまで 1 フレームごとの画像生成にかかる平均の時間は約 5 秒であった。

本研究と既存研究との比較を行う。既存研究の手法において複数の初期分布を配置することで、複数のカーテン型オーロラを表現することは可能である。しかしながら、既存研究の手法では複数のカーテン型オーロラが発生する過程を考慮していないため、その過程におけるオーロラの様子を自動生成することは難しい。本手法の分断・再統合のある場合を確認すると、ひとつながりのオーロラから複数のカーテン型オーロラが生成できている。カーテン型オーロラは、最も典型的で変化に富んだオーロラであり、その発生過程を再現する提案手法は映像コンテンツ制作における有効性が高い。

本手法のオーロラ分布の再形成をすることで、シミュレーションによって分布が大きく変化しても、オーロラ特有の滑らかな分布を保つことができた。

レンダリング手法において、既存研究では初期エネルギーは一定であったため、オーロラ下端の鉛直方向の変化はなかった。本研究では、初期エネルギーに $1/f$ ノイズを加えることでオーロラ下端の自然な揺らぎを表現した。

本研究において荷電粒子の詳細度を変更した場合について述べる。荷電粒子の個数を抑えて詳細度を粗くするとオーロラらしい分布を表現できない。オーロラらしい分布として見える荷電粒子列の最低個数は、荷電粒子列が分布する空間の大きさによって異なる。逆に、荷電粒子の個数を増やして詳細度を細かくすると、他のパラメータの数値を調整しないと分断・再統合の挙動が大きく変化する。それは、分断・再統合を判定する判定荷電粒子の抽出を一定個数間隔で行っているためである。

6. おわりに

本研究では、分断・再統合の動特性に基づいたオーロラのビジュアルシミュレーション手法を提案し描画実験と考

察を行った。目標としたオーロラの動態を再現し、本研究の有効性を確認した。

本研究の利点は以下のとおりである。

- (1) 分断・再統合に基づいた複数のカーテン型オーロラを自動生成できる
- (2) 分布シミュレーションによりダイナミックなオーロラの動きが表現できる
- (3) 分布の再サンプリングにより滑らかなオーロラの分布を保持できる
- (4) $1/f$ ノイズを付与したエネルギーによりオーロラの自然な揺らぎが表現できる

本手法では、分断するカーテン型オーロラの出現頻度と配置の制御は難しい。また、パラメータ値の選定に試行錯誤する必要がある。今後は、オーロラに関係する他の要因をふまえたうえで、課題を解決することでよりユーザ制御の容易なオーロラ表現を実現したい。

参考文献

- [1] 井上太郎, 牧野光則: CG によるオーロラのモデリング, 第 11 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.161–170 (1995).
- [2] Dobashi, Y., Yamamoto, T. and Nishita, T.: Efficient Rendering of Lightning Taking into Account Scattering Effects due to Cloud and Atmospheric Particles, *Proc. 9th PCCGA*, pp.390–399 (2001).
- [3] 西野孝則, 岩崎 慶, 土橋宣典: 雲のエンドレスアニメーションのリアルタイムレンダリング, *Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム*, No.15, pp.106–111 (2011).
- [4] Ye, Z., Yiping, H., Zhe, F., et al.: Visual Simulation of Heat Shimmering and Mirage, *IEEE Trans. VCG*, Vol.13, pp.179–189 (2007).
- [5] 小口 高: オーロラの物理学入門, 名古屋大学太陽地球環境研究所 (2010).
- [6] 国立極地研究所 (編): 南極の科学 2 オーロラと超高層大気, 社古今書院 (1983).
- [7] Davis, N., 山田 卓 (訳): オーロラ THE AURORA WATCHER'S HANDBOOK, 地人書館 (1995).
- [8] 上出洋介: オーロラの科学—人はなぜオーロラにひかれるのか, 誠文堂新光社 (2010).
- [9] Miyaoka, H.: SHOWA DMSP Satellite Downlink Data, available from <http://polaris.nipr.ac.jp/~dmisp/>.
- [10] Akasofu, S.: The development of the auroral substorm, *Planetary and Space Science*, Vol.12, pp.273–282 (1964).
- [11] Aso, T., Ejiri, M., Urashima, A., et al.: First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March, 1995, *Earth Planets Space*, Vol.50, pp.81–86 (1998).
- [12] Yamamoto, T.: A numerical simulation for the omega band formation, *Geophysical Research*, Vol.116, pp.81–86 (2011).
- [13] 長谷川裕記, 大野暢亮, 佐藤哲也: オーロラ形成の連結階層シミュレーション, 日本流体力学会誌「ながれ」特集—地球科学における流体現象 2—地球表層編~, Vol.30, No.5, pp.401–408 (2011).
- [14] Baranoski, G.V.G., Rokne, J., Shirley, P., et al.: Simulating the Aurora, *Journal of VCA*, Vol.14, No.1, pp.43–59 (2003).

- [15] 米山考史, 近藤邦雄: 発光原理を考慮したオーロラのビジュアルシミュレーション, 日本図学会 2005 年度大会学術講演論文集, pp.69–74 (2005).
- [16] 伊藤大輔, 降矢 佳, 村岡一信: オーロラの CG 表現のための基礎的検討, 平成 20 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.137 (2008).
- [17] 伏見侑恵, 村岡一信: CG のためのオーロラの表現法, 平成 21 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.281 (2009).
- [18] Baranoski, G.V.G. and Wan, J.: Simulating the Dynamics of Auroral Phenomena, *ACM Trans. Graphics*, Vol.24, pp.37–59 (2005).
- [19] 津郷晶也, 玉木 徹, 金田和文: 荷電粒子が電磁場から受ける力を考慮したオーロラのアニメーション, 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告, No.12, pp.31–36 (2009).
- [20] 小島啓史, 竹内亮太, 渡辺大地ほか: 特徴的な動き方を考慮したオーロラのビジュアルシミュレーション, 芸術科学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.24–35 (2012).
- [21] Lawlor, O.S. and Genetti, J.: Interactive Volume Rendering Aurora on the GPU, *Journal of WSCG*, Vol.19, H41 (2011).
- [22] 石川知一, Yue, Y., 岩崎 慶ほか: 電離圏モデルを利用したオーロラのシミュレーション, *Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム*, No.19, pp.133–138 (2011).
- [23] Ishikawa, T., Yue, Y., Iwasaki, K., et al.: Modeling of Aurora Borealis using the Observed Data, *Proc. SCCG*, pp.35–38 (2011).
- [24] 阿 慶鄭: 星空—Flickr - Photo Sharing!, 入手先 (<http://www.flickr.com/photos/38600185@N07/3632817904/in/photostream/>).



小島 啓史 (学生会員)

2011 年東京工科大学メディア学部メディア学科卒業。2013 年東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻博士前期課程修了。現在は、東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻博士後期課程に在籍。ACM SIGGRAPH, 芸術科学会各会員。



竹内 亮太

2004 年東京工科大学メディア学部メディア学科卒業。2006 年東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻博士前期課程修了。同年より 2013 年まで、東京工科大学メディア学部で演習講師として勤務。2012 年東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻博士後期課程満期退学。2013 年学位: 博士 (メディアサイエンス) 取得。同年より現在まで、シリコンスタジオ株式会社にエンジニアとして勤務。形状モデリング, リアルタイム 3DCG 基盤技術, およびゲームコンテンツへの応用に関する研究に従事。



石川 知一 (正会員)

2003 年東京理科大学理工学部情報科学科卒業。2005 年東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻修士課程修了。同年より 2007 年まで、日本アイ・ビー・エム株式会社でシステムエンジニアとして勤務。2012 年東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻博士課程修了。同年より現在まで、東京工科大学メディア学部助教。ビジュアルシミュレーションを含む CG 全般の研究に従事。



三上 浩司 (正会員)

1995 年慶應義塾大学環境情報学部卒業, 博士 (政策・メディア: 2008 年慶應義塾大学)。日商岩井, 株式会社エムケイ等でメディアコンテンツのプロデュースに従事。1999 年より東京工科大学片柳研究所クリエイティブ・ラボに従事し, 現在はメディア学部准教授。主に 3DCG を利用したアニメ, ゲームの制作技術と管理手法に関する研究開発に従事。ACM SIGGRAPH, 芸術科学会, 日本デジタルゲーム学会各会員。



渡辺 大地 (正会員)

1994年慶應義塾大学環境情報学部卒業。1996年慶應義塾大学大学政策・メディア研究科修士課程修了。修士(政策・メディア)。1999年より東京工科大学メディア学部講師。コンピュータグラフィックスやゲーム制作に関する

研究に従事。芸術科学会、画像電子学会各会員。



柿本 正憲 (正会員)

1982年、東京大学工学部電子工学科卒業。同年、(株)富士通研究所入社。以来、コンピュータグラフィックスの研究開発に従事。1989~1990年、米国ブリガムヤング大学訪問研究員。1993年、富士通研究所退職。CG機器メーカー、映像制作会社、1995年、日本シリコングラフィックス(株)(現、日本SGI)、2011年、シリコンスタジオ(株)を経て、2012年より東京工科大学教授。2005年、在職のまま東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。博士(情報理工学)。情報処理学会グラフィクスとCAD研究会主査。

1982年、東京大学工学部電子工学科卒業。同年、(株)富士通研究所入社。以来、コンピュータグラフィックスの研究開発に従事。1989~1990年、米国ブリガムヤング大学訪問研究員。1993年、富士通研究所退職。CG機器メーカー、映像制作会社、1995年、日本シリコングラフィックス(株)(現、日本SGI)、2011年、シリコンスタジオ(株)を経て、2012年より東京工科大学教授。2005年、在職のまま東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。博士(情報理工学)。情報処理学会グラフィクスとCAD研究会主査。



近藤 邦雄 (正会員)

1978年名古屋工業大学第II部卒業、名古屋大学教養学部図学教室、東京工芸大学講師、埼玉大学工学部情報システム工学科助教授を経て、2007年東京工科大学メディア学部教授。情報処理学会グラフィクスとCAD研究会主査、日本図学会副会長、芸術科学会会長、画像電子学会副会長、ビジュアルコンピューティング研究委員会委員長等を歴任、現在、画像電子学会会長。情報処理学会25周年記念論文賞、日本図学会賞、関東工学教育賞、NICOGRAPH奨励賞等を受賞。コンピュータグラフィックス、アニメやゲーム等の映像コンテンツ制作の研究等に関する研究に従事。

1978年名古屋工業大学第II部卒業、名古屋大学教養学部図学教室、東京工芸大学講師、埼玉大学工学部情報システム工学科助教授を経て、2007年東京工科大学メディア学部教授。情報処理学会グラフィクスとCAD研究会主査、日本図学会副会長、芸術科学会会長、画像電子学会副会長、ビジュアルコンピューティング研究委員会委員長等を歴任、現在、画像電子学会会長。情報処理学会25周年記念論文賞、日本図学会賞、関東工学教育賞、NICOGRAPH奨励賞等を受賞。コンピュータグラフィックス、アニメやゲーム等の映像コンテンツ制作の研究等に関する研究に従事。