

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

小島 啓史[†] 竹内 亮太[†] 渡辺 大地[‡] 三上 浩司[‡]

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[†]

東京工科大学 メディア学部[‡]

Visual Simulation of Aurora based on Feature Motion

Takafumi Kojima[†] Ryota Takeuchi[†] Taichi Watanabe[‡] Koji Mikami[‡]

Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences, Tokyo University of Technology[†]

School of Media Science, Tokyo University of Technology[‡]

E-mail: kojima.takafumi0@gmail.com, s2rita@nifty.com, earth@media.teu.ac.jp,

mikami@media.teu.ac.jp

概要

自然景観のビジュアルシミュレーションは、3DCG の重要な研究分野の 1 つである。これまでに様々な自然景観を再現する手法の開発が行われており、教育、産業などの幅広い分野において活用する機会が増加している。本研究では、北極や南極付近の極地方に現れるオーロラに着目した。オーロラのビジュアルシミュレーションでは、オーロラの形、運動、色といった特徴や、その発生メカニズムを利用することで、オーロラと 3DCG の視覚的印象が類似した動画を自動生成できる。本研究ではオーロラの特徴的な動き方と、レンダリング品質の両立を目的とした。オーロラの特徴的な動きを荷電粒子の運動として扱うことで再現した。荷電粒子の運動を再現するために電磁場シミュレーションを行い、荷電粒子の分布の状態によって解析領域を更新することで、解析領域外に飛び出した荷電粒子に対応した。また、物理的な発光過程のシミュレーションに合わせて光の減衰を考慮することで、オーロラに適したレンダリング手法を提案する。オーロラの特徴的な動きに合わせてレンダリング品質についてレンダリング結果の検証を行い本手法の有効性を確認した。

Abstract

Visual simulation of natural phenomena is one of the most important research fields in 3DCG. Many methods were developed for representing natural phenomena. These methods are used in many fields such as education and industry. We focus on aurora which is light emission phenomena and appears the sky of Polar Regions. Visual simulation of aurora generates dynamic animations by using feature of aurora such as form and motion and colors and generating mechanism. We propose a new approach for simulating and rendering aurora. The proposed method can reproduce motion of aurora, which render the various aurora emission colors. Our method reproduces motion of aurora by simulating the movements of charged particles. In this paper, we use a square grid for simulating the electromagnetic field, which calculates forces acting on the charged particles by simulating the electromagnetic field. The particle positions are iteratively updated, and the grid size is also updated after every iteration so that all the particles are always within the region of the grid. The proposed method reproduces the various aurora emission colors by simulation of the emission process and the light attenuation. Our experimental results indicate the effectiveness of the proposed system.

1 はじめに

近年、コンピュータの高性能化と普及に伴い、3次元コンピュータグラフィックス (以下、3DCG) による自然景観のビジュアルシミュレーションは、稲妻、虹、蜃気楼、雲、水流といった様々な現象について研究が行われるようになった [1] [2] [3] [4] [5]. 自然現象は物理的に複雑な原理によって発生しており、科学的な解析の場合には物理的な厳密さが重要となる. しかし、ビジュアルシミュレーションの場合には自然景観と3DCGとの視覚的印象が類似していることが重要となり、対象とする自然景観の特徴を考慮した手法を構築する必要がある.

本研究では北極・南極地方の上空に広がる神秘的で美しい現象であるオーロラに着目した. オーロラという現象は未だ解明できていない点も多いが、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 [6] [7] [8] [9]. オーロラは時間経過によりカーテン状や渦状といった形や動き、緑色や赤色といった発色の変化を起こしている. オーロラは地球に落下する電気を帯びた粒子 (以下、荷電粒子) と大気粒子との衝突によって発生する大気の発光現象である. オーロラのビジュアルシミュレーションでは、その物理特性を考慮することで、視覚的印象が類似した静止画、動画を生成できる.

オーロラのビジュアルシミュレーションの既存研究にはレンダリング品質の向上を目的として静止画生成を行う研究があるが、時間経過によるオーロラの特徴的な動きは実現できない. また、オーロラの特徴的な運動を表現することを目的として動画生成を行う研究もあるが、レンダリング結果が実際のオーロラと比較した際に視覚的印象が類似していない.

本研究ではオーロラの特徴的な動きとレンダリング品質の両立を目的として、オーロラの物理的な特性を加味して3DCGを用いてオーロラのビジュアルシミュレーションを行った.

本研究では、カーテン状や渦状といったオーロラの動きを再現するために、地球の磁場と周囲の電場による荷電粒子群の運動をシミュレーションする. 荷電粒子の周囲の電場を求める際には、電場計算を行う領域を指定する必要がある. オーロラは時間経過によって分布が変化しているため、荷電粒子の分布状態によって領域を更新することで、オーロラを可視化できる領域を限定しないように対応した. また、レンダリング品質を向上するために、オーロラの物理的な発光過程のシミュレーションに合わせて光の減衰を考慮することで、オーロラに適したレンダリング手法を提案する. 提案手法を実装し、オーロラの特徴である形や運動、色に合わせてレンダリング結果を比較した際に視覚的印象の類似性について検証することで、本手法の有効性を確認した. なお、本稿は第27回 NICOGRAPH 論文コンテストにおいて講演した内容 [10] を含む.

本論文は全5章で構成する. 第2章でオーロラ現象と関連研究について述べ、第3章で提案手法について述べる. 第4章で動作検証を行う. 最後に第5章でまとめと今後の展望について述べる.

2 オーロラ現象と関連研究

本章では、2.1 節にてオーロラ現象について説明し、2.2 節にて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ついて述べ、2.3 節にて、本研究の位置づけを述べる.

2.1 オーロラ現象とは

オーロラとは、太陽から放射している電気を帯びた粒子である荷電粒子が地球の南極や北極の極域周辺の高層大気に降り込み、荷電粒子が大気粒子に衝突し発生する大気の発光現象 [6] である. 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.

荷電粒子は磁力線にそって移動し、地球の磁気圏において加速することで、1キロ電子ボルトから10キロ電子ボルトといった運動エネルギーを持った状態で高層大気に降り注ぎ、荷電粒子は大気粒子と衝突するごとに平均100電子ボルトの運動エネルギーを失っていく [7]. オーロラが発光する高度は荷電粒子の運動エネルギーと高層大気の密度に依存しているため、約80km から約500kmの高度である電離圏にオーロラは出現する.

次に、オーロラの形や見え方、動き、発光色について説明する. オーロラの代表的なものとしてカーテン型のオーロラがある. オーロラは高い高度に出現するため、観測者から離れた場所に現れたオーロラは弧状に見えるが、同じオーロラをもっと近くから見ると帯状に見えて、オーロラの真下から見上げると空の一点に光の筋が集中する冠状のオーロラに見える.

次の図1にオーロラと観測者の相対位置により見え方が変化する例を示す.

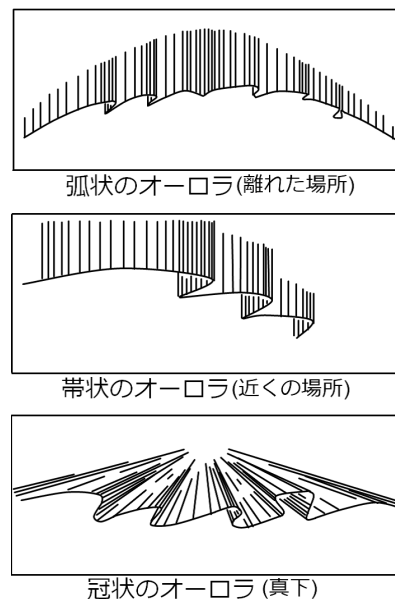


図 1: 相対位置によるオーロラの見え方

カーテン型のオーロラを観察した際には、風に揺れるカーテンのようにひだが絶えず動いている様子を確認できる。ひだの動きが活発になるとオーロラの発光が強くなり、ひだがちぎれてS字型のオーロラに分かれたり渦を巻いたりしてオーロラ全体の形が変化する。このようなオーロラの動きは、地球の磁場と周囲の電場から生じるローレンツ力 [11] による荷電粒子群の運動によって起きている。ひだの全長が 2km から 10km 程度の小規模なものをカールと呼び、20km から 1500km 程度の大規模なものをスパイラルと呼ぶ。

カールやスパイラルなどの様々な動き方は、オーロラの主な運動であるスプリッティングという運動と、ひだの回転運動によって起きる。

南半球の地上からオーロラを眺めたとき、まず、オーロラの一部がぴたりと折り畳んだひだを開くように裂けてひだを形成するスプリッティングが起こる。次に、スプリッティングにより形成したひだの1つ1つが磁力線方向に対し時計回りの回転運動を起こしS字型オーロラを形成する。スプリッティングやひだの回転運動により、S字型オーロラを形成する際の運動速度は5km/s から10km/s である [9]。なお、地球の磁力線は南半球では上向きであり北半球では逆に下向きとなっているため、北半球でオーロラを地上から眺めたときは回転方向が逆となる。

図2は、スプリッティングとひだの回転運動によりS字型オーロラを形成したのち、内部でさらにスプリッティングとひだの回転運動が起こりスパイラルを形成する様子を表している。

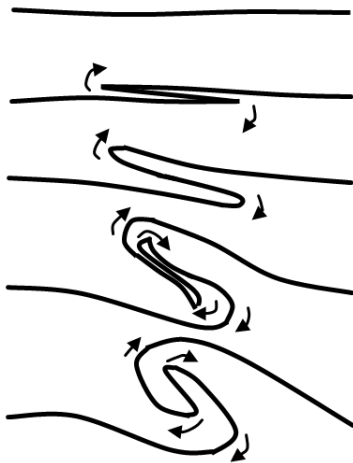


図 2: スパイラル形成

オーロラは大気発光現象であるため、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。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）から元の状態に戻る際に発光する。大気粒子が発光の際に放射する波長は励起状態によって異なり、酸素原子が放射する主な波長は 557.7nm, 630.0nm であり、窒素分子が放射する主な波長は 391.4nm, 427.8nm, 670.5nm である。

2.2 オーロラの可視化に関する研究

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では、オーロラの特徴を考慮し 3DCG により再現する様々な手法を提案している。大きく分けて、静止画を生成することを目的とした研究と、動画を生成することを目的とした研究の2種類がある。

まず、オーロラ静止画生成の研究として、井上ら [12] はオーロラの形状を一葉双曲面によって表現し、オーロラ発光色が高度が上昇するにつれて薄くなる点に着目して、オーロラの色を表現するために観測データから連続的な近似数式モデルを提案した。また、Baranoski ら [13] はオーロラについて観測データを用いるとともに、荷電粒子と大気粒子との衝突によってオーロラが発光することに着目して、シート状の領域に配置した荷電粒子を一定間隔で落下を行い、大気粒子と衝突した位置を発光点としてスクリーンに直接投影する手法を提案した。井上ら、Baranoski らの手法では生成できるオーロラの色は観測データに基づいたものだけとなり、状況に応じた様々なオーロラの色の変化を表現できない。

米山ら [14] はオーロラの形状を正弦曲線を重ね合わせにより表現し、オーロラの物理的な発光過程を考慮したレンダリング手法を提案することによりオーロラの様々な色を表現した。正弦曲線の振幅、周波数、位相の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るが、スプリッティングや、ひだの回転運動といったオーロラの特徴的な運動は再現できない。

次に、オーロラの動画生成の研究として、Baranoski ら [15] 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することで、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。しかし、オーロラ発光の強さが一定であるため実際のオーロラと比較した際に明るさの変化がない。

津郷ら [16] 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、オーロラが裂けるような動き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。荷電粒子の落下計算の際に大気粒子との衝突時の揺らぎを考慮したが、大気粒子との衝突判定に高度ごとの大気粒子数の比率を用いたため、高度が低くなるほど衝突回数が増えオーロラの形状が実際と比較した際に視覚的印象が類似していない。

Baranoski ら、津郷らの手法ではあらかじめ限定した領域を用意し、その領域内を格子状に区切り各格子点において電場を計算する。領域の境界付近では誤差が大きくなるため、荷電粒子の分布よりも大きな領域を用意する。また、領域を限定することで電場を計算する際の精度は安定する。しかし、荷電粒子の運動によって荷電粒子の分布は変化し、あらかじめ限定した領域内に収まるとは限らない。このため、限定した領域内で動くオーロラしか可視化できない。荷電粒子が運動することを考慮に入れた広い領域を用意し、格子点の個数を増やすといった対策を考えることができる。しかし、荷電粒子の周囲の電場計算に必要な格子点が増加することになり、必要な記憶容量の効率

が良くない。

Lawlor ら [17] は事前にオーロラの分布に関する計算を行い、保持しているボリュームデータを変更しないことにより、地球規模のオーロラに関してリアルタイムで視点を変更できる手法を提案した。オーロラの色に関しては観測データから近似している。オーロラの分布は事前に計算した状態から変更できないため、スプリットングや、ひだの回転運動は再現できない。

石川ら [18] [19] は高緯度帯における電場と沿磁力線電流の観測データを用いることで、地球規模におけるオーロラの出現や出現領域の変化を再現した。カーテン型オーロラが持つひだといった形状や、カーテン型オーロラに起きているスプリットングや、ひだの回転運動は再現できない。

2.3 本研究の位置付け

実際のオーロラに視覚的印象を近づけるために、電磁場からかかる力を計算しオーロラの特徴的な運動を表現したうえで、物理的な発光過程を考慮してオーロラに適したレンダリング手法を提案する。

まず、渦状のオーロラやオーロラが裂けるような動き方を表現するために、本研究では Baranoski ら、津郷らと同じようにオーロラを荷電粒子群として扱った。既存手法では電場計算を行う領域を限定していたが、実際のオーロラは限定した空間内での現象ではなく荷電粒子の分布は時間経過によって変化する。本研究では、荷電粒子の分布状態によって電磁場シミュレーションの際に必要な領域を更新することで、オーロラを可視化できる領域を限定しないように対応した。

次に、オーロラの色を再現するために、米山らの手法を用いて、オーロラの色をシミュレーションすることで発色と発光の強さを表現した。また、本研究では必要な記憶容量が膨大となってしまうため、ボリュームデータを用いずに、発光点を射影変換によってスクリーン上に投影し光の減衰を考慮したレンダリングを行った。

3 オーロラの可視化手法

本章では、オーロラの特徴的な動き方と発光の様子をビジュアルシミュレーションにおいて表現する手法を述べる。図 3 は、本手法の概略を図示したものである。

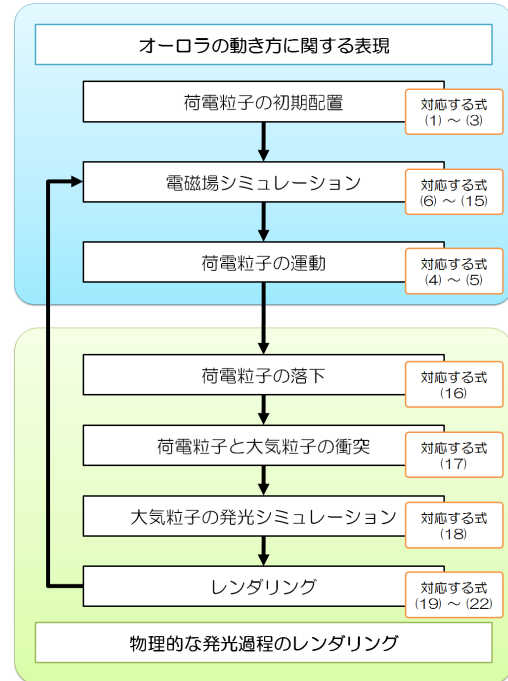


図 3: 提案手法の流れ

本手法の流れは、大きく 2 つの段階に分かれている。1 つ目の段階では、オーロラの動き方に関する表現を行い、2 つ目の段階では、物理的な発光過程を考慮したレンダリングを行う。まず、オーロラの動き方を表現する手法を 3.1 節で述べ、物理的な発光過程を考慮したレンダリング手法について 3.2 節で述べる。

3.1 オーロラの動き方に関する表現

オーロラの動きは地球へ降り込む荷電粒子群の落下方向に垂直な運動として理解できる。また、荷電粒子群は地球の磁場や周囲の電場によって生じたローレンツ力を受け運動している。このため、本手法ではオーロラの動きを荷電粒子群の運動によって表現する。本研究では、荷電粒子を平面上に配置し、2 次元平面上で電磁場シミュレーションを行うことでローレンツ力を求め、荷電粒子群の運動を再現する。

オーロラ特有の初期分布は太陽や地球の磁場変化、荷電粒子の流入過程といった様々な要因によって生じる。オーロラ特有の分布は人工衛星などを用いた研究解析が進んでいる分野であるが、未だ解明できていない部分が多い。荷電粒子がオーロラ形状特有の特徴的な分布になることに関しては、科学的に明らかにはなっていない [6] [9]。したがって、荷電粒子の初期分布については測定データを用いるか、擬似的な分布を用いる必要がある。

このため、本研究ではオーロラの視覚的印象から荷電粒子の初期分布を複数のひだを持った帯状の疑似的な分布から求めた。

3.1.1 項では、荷電粒子の初期配置を決定する手法を述べ、3.1.2 項では、電磁場から荷電粒子にかかる

ローレンツ力を計算し、荷電粒子の運動に適用する手法について述べる。

3.1.1 荷電粒子の初期配置

まず、第1段階にてオーロラの形状を表すための曲線 (オーロラ曲線) を作成し、第2段階ではオーロラ曲線の法線方向に対して幅を設定する。第3段階ではオーロラ曲線と幅から荷電粒子を配置する領域を生成し、第4段階にてその領域内に荷電粒子を配置する。

図4は荷電粒子を配置するための手順を表している。

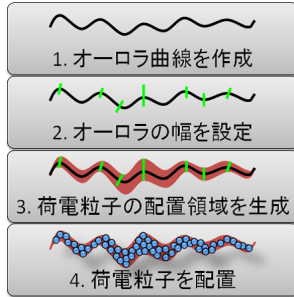


図4: 荷電粒子の配置手順

本研究では荷電粒子を初期配置するために、自由変形可能な Bézier 曲線 [20] にオーロラのひだを表現する正弦曲線を加えたオーロラ曲線を定義した。3DCG 上の空間において y 軸を高さ、 xz 平面を水平とし、荷電粒子を配置するための領域を xz 平面上に生成する。また、本研究では直交座標系を右手系とした。

n 次の Bézier 曲線、 m 種の正弦曲線、 $0 \leq t \leq 1$ の範囲を持つパラメータ t から、オーロラ曲線 $\mathbf{R}(t)$ は次の式 (1) で表すことができる。

$$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) \mathbf{Q}_i + \left\{ \sum_{j=0}^{m-1} A_j \sin(2\pi f_j t) \right\} \mathbf{N}_a(t) \quad (1)$$

ここで、 m 種の正弦曲線は任意の数 m だけ用意した正弦曲線であり、 $B_i^n(t)$ は Bernstein 基底関数 [20]、 $\mathbf{Q}_i$ は Bézier 曲線の制御点 $\{\mathbf{Q}_0, \mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_n\}$ 、 A_j は正弦曲線の振幅、 f_j は正弦曲線の周波数、 $\mathbf{N}_a(t)$ は Bézier 曲線のパラメータ t における単位法線ベクトルである。

次に、荷電粒子を配置する領域を生成するためにオーロラ曲線の法線ベクトル方向に対して幅を設定する。荷電粒子の疎密によって荷電粒子の運動の度合いが変化するため、オーロラ曲線全体で幅の変化をつけることで配置する荷電粒子が密になる部分や、疎になる部分を生み出す。オーロラ曲線全体で幅の変化をつけるために、オーロラ曲線の始点から終点までを等間隔に分割するような点を設け、その各点においてそれ

ぞれ幅の値を与える。オーロラ曲線上の各点の間における幅の値は、前後の点における幅の値を線形補間すること求めた。

オーロラ曲線のパラメータ t における幅は k 列の設定幅 $\{L_0, L_1, L_2, \dots, L_{k-1}\}$ を用いて次の式 (2) で表した。

$$W(t) = \begin{cases} L_0 & k = 1 \\ (1-p)L_q + pL_{q+1} & k \neq 1, 0 \leq t < 1 \\ L_{k-1} & k \neq 1, t = 1 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 k 列の設定幅は任意の数 k だけ設定した幅であり、 $q = \lfloor tk \rfloor$ 、 $p = tk - q$ とし、 $\lfloor tk \rfloor$ とは tk の整数部分である。

式 (1) と式 (2) から求まる領域内の位置ベクトル $\mathbf{A}(t, w)$ を次の式 (3) で示す。

$$\mathbf{A}(t, w) = \mathbf{R}(t) + wW(t)\mathbf{N}_b(t) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{N}_b(t)$ はオーロラ曲線のパラメータ t における単位法線ベクトルを表している。また、 t の範囲は $0 \leq t \leq 1$ 、 w の範囲は $-1 \leq w \leq 1$ とした。

荷電粒子を任意の個数だけ設定し、各荷電粒子ごとに式 (3) の t 、 w にそれぞれ一様乱数を与え、各荷電粒子の初期位置を決定する。

3.1.2 荷電粒子の運動

荷電粒子の運動を再現するためには、荷電粒子の分布から空間内の電場を計算し、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。求めたローレンツ力を荷電粒子の運動にあてはめることで、荷電粒子の新しい位置を決定する。また、この荷電粒子の新しい分布をもとにして同じ手順を繰り返すことで、時間経過ごとの荷電粒子の運動を再現する。

ローレンツ力を $\mathbf{F}$ 、荷電粒子の質量を m_e 、荷電粒子の現在位置を $\mathbf{P}_0$ 、荷電粒子の現在の速度を $\mathbf{v}_0$ としたとき、ニュートンの運動方程式 [21] から微小時間 Δt 秒後の荷電粒子の位置 $\mathbf{P}$ を次の式 (4) で示す。

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{v}_0 \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\mathbf{F}}{m_e} \Delta t^2 \quad (4)$$

次に、電荷素量 q_0 、地球の磁場を $\mathbf{B}$ 、電場を $\mathbf{E}$ 、荷電粒子の速度を $\mathbf{v}$ としたとき、ローレンツ力 $\mathbf{F}$ は次の式 (5) で示すことができる。

$$\mathbf{F} = q_0(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ の $\times$ はベクトルの外積を表している。地球の磁場は本来場所と時間によって変化しているが、本研究では磁場 $\mathbf{B}$ は偏りがなく一様なものとした。また、電荷素量 q_0 とは陽子または電子1個が持つ電荷の大きさを表す物理定数である。

電場 $\mathbf{E}$ は電位 ϕ の勾配 ∇ を計算することにより求まるので、電場 $\mathbf{E}$ を次の式 (6) で示す。

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (6)$$

真空の誘電率 ε_0 、電位 ϕ 、電荷密度 ρ から、楕円型の偏微分方程式である 2 次元の Poisson 方程式 [22] [23] は次の式 (7) で表すことができる。また、 ∇^2 はラプラシアンである。

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

微小面積 ΔS あたりに存在する荷電粒子の個数を N としたとき、電荷密度 ρ を次の式 (8) で示す。

$$\rho = \frac{q_0 N}{\Delta S} \quad (8)$$

次に、Poisson 方程式を解き電位 ϕ を求め、そこから電場 $\mathbf{E}$ を求める方法について述べる。Poisson 方程式を解くために、 xz 平面上の電位 ϕ を求める領域を直交格子に分割する。直交格子の境界条件を Dirichlet 条件 [23] とし、端の格子の電位 $\phi = 0$ と設定する。Gauss-Seidel 法 [24] を用いて電位 ϕ を求める。 xz 平面の各格子点において繰り返し計算することにより精度の高い電位を求める。

格子点間の距離を Δd としたとき、対象の格子点と前後の格子点との中心差分近似 [23] を用いて、格子点 (i, j) における電位の 2 階微分の近似式を次の式 (9)、式 (10) に示す。

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) \approx \frac{\phi(i+1, j) - 2\phi(i, j) + \phi(i-1, j)}{(\Delta d)^2} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \approx \frac{\phi(i, j+1) - 2\phi(i, j) + \phi(i, j-1)}{(\Delta d)^2} \quad (10)$$

式 (7)、式 (9)、式 (10) から格子点 (i, j) における電位 $\phi(i, j)$ を次の式 (11) で示す。ここで、周囲の格子点における電位の和を $p(i, j) = \phi(i+1, j) + \phi(i-1, j) + \phi(i, j+1) + \phi(i, j-1)$ とした。

$$\phi(i, j) = \frac{1}{4} \left\{ \frac{(\Delta d)^2 \rho}{\varepsilon_0} + p(i, j) \right\} \quad (11)$$

対象の格子点とその前後の格子点における電位との中心差分近似 [23] をとり、格子点 (i, j) における電場 $\mathbf{E}(i, j)$ を求めた。電場 $\mathbf{E}(i, j)$ の X 成分を式 (12) に、 Z 成分を式 (13) に示す。このとき、電場 $\mathbf{E}(i, j)$ の Y 成分は 0 である。

$$(\text{電場の } X \text{ 成分}) = -\frac{\phi(i+1, j) - \phi(i-1, j)}{2\Delta d} \quad (12)$$

$$(\text{電場の } Z \text{ 成分}) = -\frac{\phi(i, j+1) - \phi(i, j-1)}{2\Delta d} \quad (13)$$

本研究では、電磁場シミュレーションを行う毎に荷電粒子の分布状態によって、 xz 平面上の電位 ϕ を求める領域を更新する。

カーテン型オーロラのように軸にそって細長い分布の場合には、荷電粒子の運動による分布変化は軸にそった方向よりも軸に垂直な方向の方が大きく不安定である。本研究では、荷電粒子の運動によって変化する荷電粒子の分布に対して安定して電場の計算を行う

ために、軸にそって分布変化が少ない方向を基準とし、分布変化が大きい方向に対して予め領域を確保した正方形領域を電場解析の領域とする。

xz 平面上に分布する各荷電粒子の位置の X 成分、 Z 成分のうち、最小の値をそれぞれ x_0 、 z_0 、最大の値をそれぞれ x_1 、 z_1 、領域の拡大率を u としたとき、電位 ϕ を求める領域である正方形の 1 辺の長さ h を次の式 (14) で示す。

$$h = \begin{cases} u(x_1 - x_0) & x_1 - x_0 \geq z_1 - z_0 \\ u(z_1 - z_0) & x_1 - x_0 < z_1 - z_0 \end{cases} \quad (14)$$

ここで、領域の境界付近の格子点では誤差が大きくなるため、荷電粒子に近い格子点が境界付近から離れるように設定するために領域の拡大率 u を用いた。

電位 ϕ を求める正方領域を直行格子に分割した際の格子点 1 列分の個数を a としたとき、正方形領域の 1 辺の長さ h から格子点間の距離 Δd を次の式 (15) によって求めた。

$$\Delta d = \frac{h}{a} \quad (15)$$

また、本研究では、格子点上からずれた位置に存在する荷電粒子にかかる電場を求めるために、荷電粒子の位置から荷電粒子を囲む 4 つの格子点における電荷密度を線形補間によって求め、荷電粒子にかかる電場は周囲 4 つの格子点における電場を線形補間することで求めた。

3.2 物理的な発光過程のレンダリング

オーロラは荷電粒子が衝突した大気粒子の種類や放射する光の波長によって様々な色で発光する。大気粒子の種類や放射する光の波長ごとの励起の生成率 [6] によって、大気粒子の放射する光の波長を求めることができる。このため、本研究ではオーロラの物理的な発光過程を考慮した米山ら [14] と同様の手法を用いた上で、光の減衰による光の強さの変化を考慮したレンダリングを行う。

3.2.1 項では落下する荷電粒子と大気粒子との衝突位置を算出する手法を述べ、3.2.2 項では荷電粒子と衝突した大気粒子の発光過程を再現する手法について述べる。3.2.3 項では大気粒子が放射した波長と発光位置からオーロラをレンダリングする手法について述べる。

3.2.1 荷電粒子の落下・衝突

3.1 節で求めた xz 平面上の荷電粒子の位置に対し、 y 座標をオーロラが出現する最大高度である 500km とすることで荷電粒子の落下シミュレーションにおける初期位置とした。初期位置から地球の磁場によって落下する荷電粒子の運動をシミュレーションし微小時間進んだ落下位置を求める。次に、落下位置を衝突判定位置とし、高層大気密度分布 [25] を用いて衝突

確率を求める．その衝突確率と乱数を用いて衝突判定の試行をすることで衝突位置を求める．

磁場 $\mathbf{B}$ にそって速さ v で落下する荷電粒子の微小時間 $\Delta \tilde{t}$ 後の座標を衝突判定位置 $\tilde{\mathbf{P}}$ とする．現在の荷電粒子の位置を $\tilde{\mathbf{P}}_0$ ，衝突判定位置 $\tilde{\mathbf{P}}$ を次の式 (16) に示す．

$$\tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{P}}_0 + v \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} \Delta \tilde{t} \quad (16)$$

$\Delta \tilde{t}$ はローレンツ力を求める際の Δt と比較すると $\Delta \tilde{t} \ll \Delta t$ である．

大気粒子の半径を r ，荷電粒子が微小時間 $\Delta \tilde{t}$ の間に移動した距離を Δl ，高層大気の数密度分布 [25] から求めた単位体積当たりの大気粒子の数密度を n を用い， Δl 法 [26] から衝突確率 P_1 は次の式 (17) で示すことができる．

$$P_1 = n\pi r^2 \Delta l \quad (17)$$

3.2.2 大気粒子の発光

大気粒子の衝突位置と，高層大気の数密度分布 [27] から，まず，衝突した大気粒子の種類が酸素原子，窒素分子のどちらであるかを求める．衝突した大気粒子の種類から放射する波長の決定に関しては，波長ごとの励起の生成率 [6] から求める．また，大気粒子が波長を放射するまでの時間に他の大気粒子と衝突した場合には発光が起きない消光現象を考慮する．マクスウェル分布 [28] を用いて大気粒子同士の衝突確率を計算し，最終的な発光位置を決定する．

大気粒子の半径を r ，数密度を n ，大気粒子の速さを v_m ，大気粒子が発光するまでにかかる時間を t としたとき， Δt 法 [26] から消光する確率 P_2 は次の式 (18) で表すことができる．

$$P_2 = 1 - \exp\left(-\sqrt{2}n\pi r^2 v_m t\right) \quad (18)$$

ここで，大気粒子の速度 v_m はマクスウェル分布 [28] に従う．

3.2.3 レンダリング

まず，発光位置をスクリーン上に射影し描画位置を求める．次に，描画位置における光の強さを，各大気粒子の光の波長の発光強度と，光の減衰から求める．3DCG において減衰表現を実現する方法として，線形式，指数式，平方指数式を用いることがある [29] [30]．本研究では各方法を試し，オーロラの写真や，動画像におけるオーロラの分布と発光具合を踏まえ，オーロラの写実的な表現に適していた平方指数式を採用した．描画位置から発光位置までの距離を g ，減衰係数を d としたとき，光の減衰率 c を次の式 (19) で示す．

$$c = \exp(-(dg)^2) \quad (19)$$

本手法では，発光位置をスクリーン上に射影した描画位置だけでなく周囲の描画位置における発光を代表

するために，画像の輝度値を滑らかにするための手法などで用いるガウシアンフィルタ [31] を用いて，波長と発光の強さを描画位置と周囲の描画位置に分配する．

標準偏差を σ としたとき，ガウシアンフィルタを次の式 (20) で示す．

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (20)$$

今回，フィルタのサイズ，標準偏差 σ はスクリーンサイズによって描画位置に隙間が生じることを考え，波長ごとにオーロラとの視覚的類似性の面で妥当な値を試行錯誤して求めた．

また，光の強さと輝線の波長は物理的なデータであるため，ディスプレイに表示できるように R, G, B 値へ変換を行う．まず，波長を CIE-XYZ 表色系の三刺激値 X, Y, Z に変換する [32]．波長 λ ，分光エネルギー分布 $L(\lambda)$ から，三刺激値 X, Y, Z を次の式 (21) で示す．

$$\begin{aligned} X &= k \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) L(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) L(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) L(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (21)$$

ここで， $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ は等色関数から求まるスペクトル三刺激値， k は最大視感度であり，本研究では分光エネルギー分布 $L(\lambda)$ に光の強さを利用した．

式 (21) で求めた X, Y, Z から変換した R, G, B 値を次の式 (22) で示す [33]．

$$\begin{aligned} R &= 255 \left(\frac{3.5060X - 1.7398Y - 0.5441Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \\ G &= 255 \left(\frac{-1.0690X + 1.9778Y + 0.0352Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \\ B &= 255 \left(\frac{0.0563X - 0.1970Y + 1.0500Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \end{aligned} \quad (22)$$

4 検証

提案手法を実装したプログラムを用いてレンダリングの結果を示し，その有用性を検証する．提案手法の実装には，3D グラフィクス API の OpenGL を基にした 3DCG ツールキットである FK Toolkit System [30] を用いた．今回のシミュレーションでは北半球の地上から見上げた場合を想定し，磁場の向きと視点を設定した．ビジュアルシミュレーションを行った環境は表 1 の通りである．

表 1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise 64bit
CPU	Intel Core i7-2600 3.40GHz
メモリ	8.0 GB

ビジュアルシミュレーションを行った際のパラメータ値は, Δt を 0.0333, Δt を 0.0084, 拡大率 u を 2.0 とした. また, 正方領域を直行格子に分割した際の格子点の 1 列分の個数 a を 100 としたので, 格子全体での格子点の個数は 10,000 個となる.

カーテン型オーロラを生成した結果を図 5 に示す.

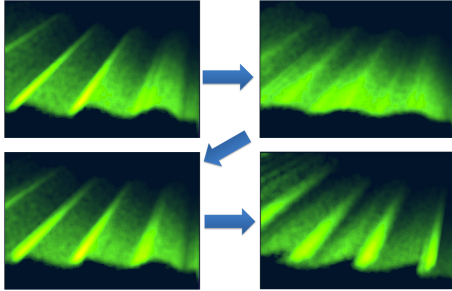


図 5: カーテン型オーロラの生成結果

図 5 はカーテンが揺らめくような動きをしたオーロラを表現できており, 発光に連続性があることが確認できる.

それぞれ異なる観測位置から見上げたオーロラの生成結果を図 6 に示す.

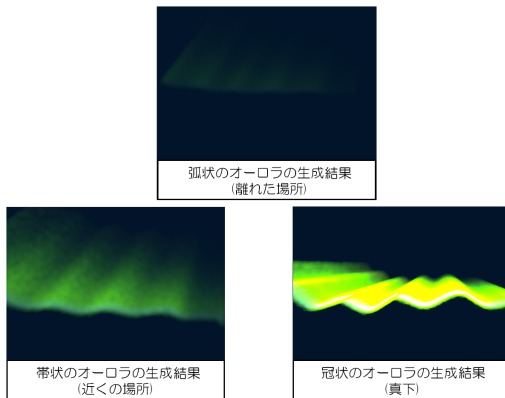


図 6: 観測位置の異なるオーロラの生成結果

多重に出現しているオーロラの生成結果を図 7 に示す.

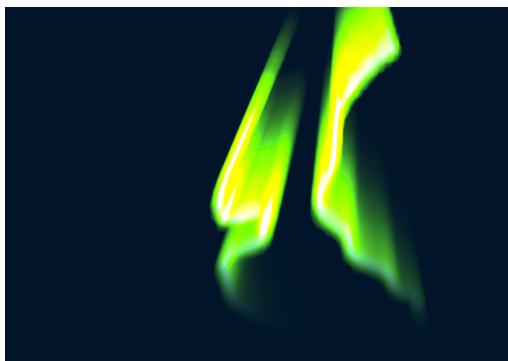


図 7: 多重なオーロラの生成結果

光の減衰により観測位置から見てオーロラの遠い部分ほど発光が弱くなるのが確認できる. なお, 図 5, 図 6, 図 7 のパラメータ値は, スクリーンサイズは横幅 512px, 縦幅 360px, 荷電粒子の個数は 60,000 個とした. このとき, 1 フレーム毎の平均生成時間は約 5 分であった.

また, 図 5, 図 6, 図 7 の放射する光の波長ごとの発光の強度, ガウシアンフィルタのパラメータ値を次の表 2 に示す.

表 2: 図 5, 図 6, 図 7 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	σ	サイズ
557.7nm	1.0	15.0	30
630.0nm	0.05	50.0	5
391.4nm	0.4	100.0	5
427.8nm	0.005	120.0	5
670.5nm	0.005	120.0	5

また, スプリットティングや, ひだの回転運動によってスパイラルを形成した様子の生成結果を図 8 に示す.

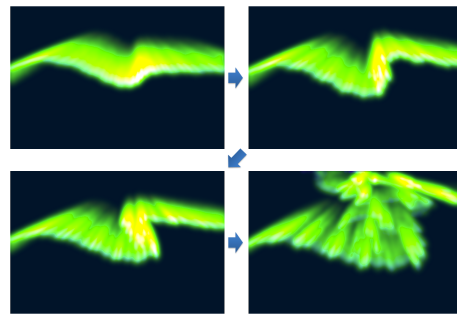


図 8: スパイラルの生成結果

オーロラの特徴的な運動であるスプリットティングや, ひだの回転運動, 反時計回りに渦を巻いている様子が確認できる. 図 8 のパラメータ値は, スクリーンサイズは横幅 720px, 縦幅 480px, 荷電粒子の個数は 160,000 個とした. このとき, 1 フレーム毎の平均生成時間は約 15 分であった. また, 図 8 の放射する光の波長ごとの発光の強度, ガウシアンフィルタのパラメータ値を次の表 3 に示す.

表 3: 図 8 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	σ	サイズ
557.7nm	1.0	7.0	100
630.0nm	0.05	4.0	20
391.4nm	0.4	4.0	30
427.8nm	0.005	0.9	20
670.5nm	0.005	0.9	20

様々な色のオーロラを生成した結果を図 9, 図 10, 図 11 に示す.

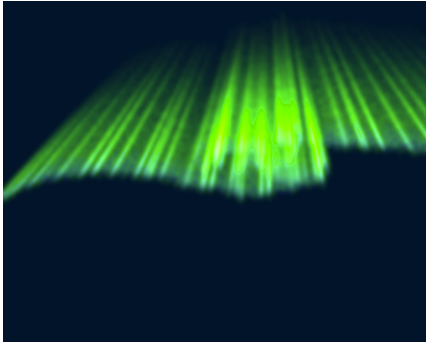


図 9: 全体が緑色のオーロラの生成結果

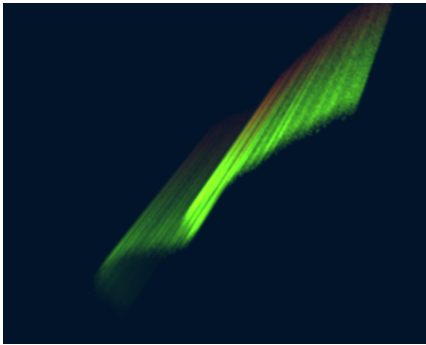


図 10: 上部が赤色で下部が緑色のオーロラの生成結果

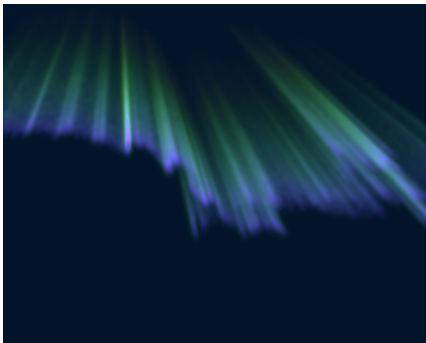


図 11: 緑色と青色のオーロラの生成結果

図 9, 図 10, 図 11 のパラメータ値は, スクリーンサイズは横幅 1500px, 縦幅 1200px, 荷電粒子の個数は 300,000 個とした. このとき, 1 フレーム毎の平均生成時間は約 30 分であった. また, 図 9 の放射する光の波長ごとの発光の強度, ガウシアンフィルタのパラメータ値を次の表 4 に示す.

表 4: 図 9 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	σ	サイズ
557.7nm	1.0	12.0	100
630.0nm	0.05	5.0	20
391.4nm	0.4	4.0	80
427.8nm	0.005	4.0	20
670.5nm	0.005	9.0	20

また, 図 10 の放射する光の波長ごとの発光の強度, ガウシアンフィルタのパラメータ値を次の表 5 に示す.

表 5: 図 10 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	σ	サイズ
557.7nm	1.0	3.5	50
630.0nm	0.05	3.0	50
391.4nm	0.4	2.0	14
427.8nm	0.005	0.9	10
670.5nm	0.005	0.9	10

また, 図 11 の放射する光の波長ごとの発光の強度, ガウシアンフィルタのパラメータ値を次の表 6 に示す.

表 6: 図 11 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	σ	サイズ
557.7nm	1.0	7.0	80
630.0nm	0.05	4.0	20
391.4nm	0.4	4.0	100
427.8nm	0.005	0.9	20
670.5nm	0.005	0.9	20

星空の写真 [34] と合成した結果を図 12 に示す.

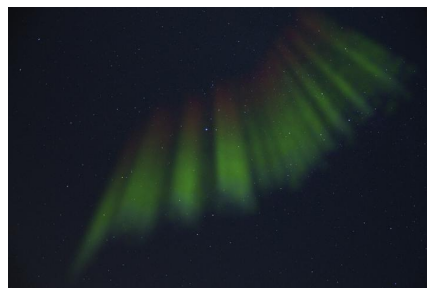


図 12: 星空の写真と合成した結果

図 12 のパラメータ値は, スクリーンサイズは横幅 720px, 縦幅 480px, 荷電粒子の個数は 60,000 個とし

た．このとき，1 フレーム毎の平均生成時間は約 5 分であった．

また，図 12 の放射する光の波長ごとの発光の強度，ガウシアンフィルタのパラメータ値を次の表 7 に示す．

表 7: 図 12 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	σ	サイズ
557.7nm	0.012	5.0	30
630.0nm	0.012	5.0	30
391.4nm	0.007	5.0	30
427.8nm	0.00001	3.0	20
670.5nm	0.0007	5.0	30

本研究のビジュアルシミュレーションによって，オーロラの形，動き方，色といったオーロラの視覚的特徴を表現できた．

5 おわりに

本研究では実際のオーロラに視覚的印象を近づけるために，オーロラの動きとレンダリング品質を両立するビジュアルシミュレーションを行った．この結果，電磁場シミュレーションにより荷電粒子にローレンツ力を求め，オーロラの特徴的な動きであるスピリッティングやひだの回転運動と，それらの組み合わせによるスパイラルの形成を表現できた．また，物理的な発光過程を考慮したことでオーロラの様々な発色を表現し，レンダリング結果を得ることができた．

本研究で提案した手法に関して課題を述べる．本手法において，S 字型オーロラの運動速度を実際と近似するには，荷電粒子の初期分布と荷電粒子の個数，磁場の強さを調整する必要がある．これらのパラメータ値の調整を人が行うには手間のかかる作業となる．また，シミュレーションをある程度続けると，オーロラの動きを平面上における荷電粒子の運動として扱うため，ローレンツ力による加速運動によって荷電粒子の分布が拡散しオーロラ特有の分布ではなくなってしまう．また，本研究のレンダリング手法では，スクリーンサイズに応じてレンダリングの際に用いるガウシアンフィルタを調整する必要がある．これらのパラメータ値の調整を，人が行うには手間のかかる作業となる．

今後の展望に関して，磁気圏での荷電粒子の分布を想定し，磁気圏内での立体的な荷電粒子の運動を再現することで，実際のオーロラの運動により近づけることが期待できる．また，本研究では磁場を一樣として扱ったが，より様々なオーロラの動きを表現するには磁場の変化を考慮することが望まれる．

電場解析を行う領域を更新する際に，軸方向に細長いオーロラを想定した荷電粒子の分布の場合，全ての荷電粒子の分布を含む正方形領域ではなく長方形領域とした方が解析効率を高めることができる．しかし，長方形領域の場合には荷電粒子の運動の度合いにより

領域の変形が激しいため，荷電粒子の分布と領域の拡大率だけでは，適切な長方形領域を得るための設定をすることはできない．電場解析を行う領域を更新する際に，荷電粒子の分布と領域の拡大率に合わせて，前回の電場分布を考慮することで適切な長方形領域を得ることが期待できる．

また，スクリーンサイズから適切なガウシアンフィルタのパラメータ値を導出する手法を検討することで，調整にかかる手間をなくすることが期待できる．

また，本手法ではグラフィックスハードウェアである GPU(Graphics Processing Unit) などを用いた処理の並列化を行っていない．本手法における逐次処理をなくすることで処理の並列化による高速化が期待できる．

これらの課題を解決することで，オーロラの視覚的印象により近づく表現を行いたい．今回は，オーロラの物理的な特性に基づいたビジュアルシミュレーションを行ったが，周囲の環境に与える光源としての効果や，カメラなどのオーロラを観測する機材の特性を考慮することで，実際のオーロラの写真や，動画像により近いレンダリング結果を生成するオーロラのビジュアルシミュレーションとして発展可能であると考えている．

参考文献

- [1] Yoshinori Dobashi, Tsuyoshi Yamamoto, Tomoyuki Nishita. “Efficient Rendering of Lightning Taking into Account Scattering Effects due to Cloud and Atmospheric Particles”. In *Proceedings of the 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, PG '01, pp. 390–399, 2001.
- [2] Yoshinobu Takahiro, Kaneda Kazufumi. “Rendering Rainbows based on Wave Optics and Compositing the Rainbow and Photographs”. 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol. 104, No. 647, pp. 65–70, 2005.
- [3] Zhao Ye, Han Yiping, Fan Zhe, Qiu Feng, Kuo Yu-Chuan, Kaufman Arie E., Mueller Klaus. “Visual Simulation of Heat Shimmering and Mirage”. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 13, pp. 179–189, 2007.
- [4] 西野 考則, 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/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム*, No. 15, pp. 106–111, 2011.
- [5] Chentanez Nuttapong, Müller Matthias. “Real-time Eulerian Water Simulation using a Restricted Tall Cell Grid”. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4, pp. 82:1–82:10, 2011.
- [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] ニール・デイビス. 「オーロラ THE AU-
RORA 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] 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.
- [10] 小島 啓史, 竹内 亮太, 渡辺 大地, 三上 浩司. “特
微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”. 第 27 回 NICOGRAPH 論
文コンテスト論文集, pp. 89–96, 2011.
- [11] 小出 昭一郎. 「解析力学 (物理入門コース 2)」.
岩波書店, 1983.
- [12] 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.
- [13] G. V. G. Baranoski, Jon Rokne, Peter Shirley,
Trond Trondsen, Rui Bastos. “Simulating the
Aurora”. *Journal of Visualization and Com-
puter Animation*, Vol. 14, No. 1, pp. 43–59,
2003.
- [14] 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.
- [15] G. V. G. Baranoski, J. Wan. “Simulating
the Dynamics of Auroral Phenomena”. *ACM
Transactions on Graphics*, Vol. 24, pp. 37–59,
2005.
- [16] 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.
- [17] Orion Sky Lawlor, Jon Genetti. “Interac-
tive Volume Rendering Aurora on the GPU”.
Journal of WSCG, Vol. 19, p. H41, 2011.
- [18] “Modeling of Aurora Borealis using the Ob-
served Data”, 2011.
- [19] Tomokazu Ishikawa, Yonghao Yue, Kei
Iwasaki, Yoshinori Dobashi, Tomoyuki
Nishita. “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.
- [20] 鳥谷 浩志, 千代倉 弘明. 「3 次元 CAD の基礎
と応用」. 東京大学出版会, 1991.
- [21] 戸田 盛和. 「力学 (物理入門コース 1)」. 岩波
書店, 1982.
- [22] 富阪 幸治, 花輪 知幸, 牧野 淳一郎 (編). 「シ
ミュレーション天文学 シリーズ現代の天文学 第
14 巻」. 日本評論社, 2007.
- [23] デュシャトウ, ザッハマン. 「マグロウヒル大学演
習シリーズ 偏微分方程式」. マグロウヒル ブッ
ク, 1987.
- [24] 皆本 晃弥. 「UNIX & Information Science-5 C
言語による数値計算入門」. サイエンス社, 2005.
- [25] 自然科学研究機構国立天文台 (編). 「理科年表
平成 23 年」. 丸善, 2011.
- [26] 菅原 広剛. “電子群シミュレーションに用いら
れる諸公式 2. 衝突・散乱”. 放電学会誌 “放電研
究”, Vol. 47, No. 1, pp. 2–6, 2004.
- [27] NASA, Robert McGuire. MSIS-E-90 Atmo-
sphere Model. [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/
vitmo/msis_vitmo.html/](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html/).
- [28] 菅原 広剛. “電子群シミュレーションに用いられ
る諸公式 1. マクスウェル分布”. 放電学会誌 “放
電研究”, Vol. 46, No. 4, pp. 31–34, 2003.
- [29] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines. 「リアル
タイムレンダリング第 2 版 REAL-TIME REN-
DERING Second Edition」. ボーンデジタル,
1991.
- [30] Fine Kernel Project. Fine kernel tool kit sys-
tem. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.
- [31] Gabriele Lohmann. 「3 次元画像処理 Volumet-
ric Image Analysis」. ボーンデジタル, 2009.
- [32] 千々岩 英彰. 「色彩学概説」. 東京大学出版会,
2001.
- [33] 日本色彩学会 (編). 「色彩科学講座 4 カラー
イメージング」. 朝倉書店, 2004.
- [34] 日光 可也. 星空 — Flickr - Photo Shar-
ing! [http://www.flickr.com/photos/
38600185@N07/3632817904/in/photostream/](http://www.flickr.com/photos/38600185@N07/3632817904/in/photostream/)

小島 啓史



2011 年東京工科大学メディア学部メディア学科卒業。
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修士前期課程在籍。ACM
SIGGRAPH, 芸術科学会会員。

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。2012 年同研究科博士後期課程満期退学。3DCG およびゲーム制作に関する研究・教育に従事。

渡辺 大地



1994 年慶応義塾大学環境情報学部卒業。1996 年慶応義塾大学大学政策・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。情報処理学会，芸術科学会会員。

三上浩司



1995 年慶応義塾大学環境情報学部卒業，博士(政策・メディア:2008 年慶応義塾大学)。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，情報処理学会，日本デジタルゲーム学会ほか所属。