

2010年度 卒業論文

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に関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト

学籍番号 M0107189

小島 啓史

2010年度 卒業論文概要

論文題目

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に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0107189

氏名

小島 啓史

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

3DCG, オーロラ, ビジュアルシミュレーション, 大気光学現象,
荷電粒子, 電場, ポアソン方程式

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クス(3DCG)の活用分野が拡大し、3DCGによる自然景観のビジュアルシミュレーションは、様々な対象について多くの研究が行われるようになった。本研究では北極南極地方に現れるオーロラに着目した。オーロラと3DCGとの視覚的印象が類似するためには、オーロラの形や、色、運動、発生メカニズムなどオーロラの特徴を考慮する必要がある。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、レンダリング品質がよくないために、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、レンダリング品質とオーロラの動きの両立を目的として、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。実際のオーロラに視覚的印象を近づけるために、オーロラを荷電粒子群として扱い、広範囲の領域を解析できるよう解析領域の更新を行い、電磁場からかかる力を計算することで、オーロラの回転運動や、スプリッティングというS字状のひだを作りながらちぎれたように見える運動を表現する。また、先行研究が提案し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。

オーロラの特徴である形や、色、運動に合わせて、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、本手法の優位性を確認した。

目次

| | | |
|------------|------------------------|-----------|
| 第1章 | はじめに | 1 |
| 1.1 | 研究の背景と目的 | 1 |
| 1.2 | 本論文の構成 | 4 |
| 第2章 | オーロラ現象 | 5 |
| 2.1 | オーロラ現象とは | 5 |
| 2.2 | オーロラの運動 | 8 |
| 2.3 | オーロラの色 | 12 |
| 2.4 | オーロラの発生メカニズム | 13 |
| 第3章 | 提案手法 | 15 |
| 3.1 | 荷電粒子の初期配置 | 15 |
| 3.2 | 荷電粒子の運動 | 16 |
| 3.3 | 荷電粒子の落下・衝突 | 18 |
| 3.4 | 大気粒子の発光 | 19 |
| 3.5 | レンダリング | 20 |
| 第4章 | 動作検証と考察 | 22 |
| 4.1 | 考察 | 25 |
| 第5章 | まとめ | 27 |
| | 謝辞 | 28 |
| | 参考文献 | 29 |

目次

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | アラスカ上空のオーロラ (Wikipedia より引用) | 2 |
| 2.1 | オーロラと観測者の相対的な位置の違いによるオーロラの形の変化 | 6 |
| 2.2 | オーロラオーヴァルの領域 | 8 |
| 2.3 | スプリッティングの種類 | 10 |
| 2.4 | スパイラルを形成する様子 | 11 |
| 2.5 | フリッカリングの様子 | 11 |
| 2.6 | パルセイティングオーロラの運動の様子 | 11 |
| 2.7 | 磁気圏サブストームの発生過程 | 14 |
| 4.1 | 生成したバンド状オーロラ | 23 |
| 4.2 | スプリッティングの様子1 | 23 |
| 4.3 | スプリッティングの様子2 | 23 |
| 4.4 | スプリッティングの様子3 | 24 |
| 4.5 | スプリッティングの様子4 | 24 |
| 4.6 | スプリッティングの様子5 | 24 |
| 4.7 | スパイラルの様子1 | 24 |
| 4.8 | スパイラルの様子2 | 25 |
| 4.9 | スパイラルの様子3 | 25 |
| 4.10 | スパイラルの様子4 | 25 |
| 4.11 | スパイラルの様子5 | 25 |

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景と目的

コンピュータの高性能化と普及に伴い、教育、産業、エンターテインメントなどの幅広い分野において、3次元コンピュータグラフィックス(以下、3DCG)を活用する機会が増加してきた。特に、オーロラ、虹、稲妻、雪、蜃気楼といった現象が生む自然景観を3DCGによって表現するビジュアルシミュレーションの研究はこれまでも盛んに行われている [1][2][3][4]。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であり、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・南極地方の大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 [5][6][7]。

オーロラの特徴として、カーテン状や渦状といった様々な形や、緑色や赤色などの様々な発色を挙げることができる。また、オーロラは時間経過により形や色が変化しており、オーロラの動きは徐々に変化するだけでなく急激に変化する場合もある。オーロラのビジュアルシミュレーションを行うには、オーロラの形や、

色，動きといった特徴を考慮する必要がある．以下の図 1.1 はアラスカ上空に現れたオーロラの写真である．



図 1.1: アラスカ上空のオーロラ (Wikipedia より引用)

これまでに数多くの研究者が，オーロラのビジュアルシミュレーションに関する研究を行っており，オーロラの特徴を考慮するために様々な手法が提案している．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は静止画を生成することを目的としたものと，動画を生成することを目的としたものの 2 種類がある．

オーロラの静止画生成の研究として，井上ら [8] はオーロラの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，オーロラの形状を一葉双曲面によって表現し，色の変化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，2003 年に Baranoski ら [9] は色の変化について観測データを用いるとともに，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の落下を行い，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．ほかにも，米山ら [10] は曲線上に配置した荷電粒子の落下を計算するとともに，オーロラの物理的な発光原理に着目して，荷電粒子のエネルギーや，衝突する大気粒子の種類や，放射する波長 (または，輝線) の種類を考

慮した手法を提案した。これらのオーロラの静止画生成の研究はレンダリング品質の向上を目的としており、これらの手法でオーロラの特徴的な動きを再現した動画を生成するには、レンダリングするたびにパラメータ調整が必要となり、時間経過によってオーロラの特徴的な動きを生成することは実現できない。

オーロラの動画生成の研究として、2005年に Baranoski ら [11] は、地磁気と周囲の電場によって荷電粒子が運動している点に着目して、シート状の領域に荷電粒子を配置して、電磁場からかかる力によってシート状の領域を変形することで、オーロラの動きを表現する手法を提案した。しかし、Baranoski らの手法では、オーロラの動きにシート状の領域を用いたことで、オーロラの回転運動を表現することができたが、S字状のひだを作りながらちぎれたように見える運動(以下、スプリッティング)など他の運動は表現できていない。また、伊藤ら [12] は、地表から見た際の帯状のオーロラを対象にして、オーロラの形を平面として扱い、自然現象によく現れる $1/f$ ゆらぎを用いて、オーロラの色変化や、オーロラの動きを表現した。さらに、伏見ら [13] は、伊藤らの研究を発展し、厚みの情報を持ったカーテン状の3次元のデータをオーロラの形として扱い、 $1/f$ ゆらぎを用いて、オーロラの色変化や、オーロラの動きを表現した。伊藤ら、伏見らの $1/f$ ゆらぎを用いる手法は計算コスト軽減には有効だが、実際のオーロラとレンダリング結果を比較した際に $1/f$ ゆらぎだと動きのパターンに限りがある。ほかにも、津郷ら [14] は、オーロラの運動として回転運動だけでなくスプリッティングに着目して、オーロラの形状を荷電粒子群として扱い、電磁場からかかる力によって各荷電粒子を移動しオーロラの動きを表現する手法を提案した。津郷らの手法ではオーロラの動きに粒子群を用いて、オーロラの回転運動とスプリッティングを表現したが、レンダリング品質がよくないために、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、オーロラの動きのレンダリング品質の両立を目的として、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。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てオーロラの回転運動と

スプリットティングを表現したうえで、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。Baranosoki らの手法では、スプリットティングを表現できないため、本研究では、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。荷電粒子の初期配置を決定するために、まず、Bèzier 曲線 [15] によって出現位置の基準を定めて、オーロラのひだとひだの大きさを表現するために、基準となる位置に \sin 曲線による変化を加えて、さらに、オーロラの空間的広がりを表現するために、オーロラの幅に関する情報を与える。Baranosoki らと、津郷らはオーロラの運動を表現するために、電磁場シミュレーションを行ったが、津郷らの手法では限定した空間内の電磁場しか計算できない。本研究では、電磁場計算を行う際に必要な解析領域の範囲を更新することで広範囲の領域で電磁場計算を行った。米山らはオーロラの発光過程をシミュレーションすることでオーロラの発色と発光の強さを表現したが、本研究でも米山らの手法を採用する。オーロラの特徴である形や、色、運動に合わせて、レンダリング品質と、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し、本手法の優位性を確認した。

1.2 本論文の構成

本論文は全 5 章で構成する。第 2 章でオーロラ現象について述べ、第 3 章で提案手法について述べる。第 4 章で動作検証と考察を行う。最後に第 5 章でまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章

オーロラ現象

本章では、オーロラという自然現象の解説について、国立極地研究所編「南極の科学 2 オーロラと超高層大気」[5]を参考にした。まず、2.1節でオーロラという物理現象の概要や、オーロラの出現領域、出現領域別のオーロラの分類について説明する。次に、2.2節において、それぞれのオーロラの特徴と運動を解説したのち、2.3節において、オーロラの発光に関する概要や、発光する波長の種類、発光色によるオーロラの分類について述べる。そして、2.4節ではオーロラが発生する際の地磁気の変動や、時間経過による変化について述べる。

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(以下、荷電粒子)が、大気粒子に衝突し発生する大気発光現象である。また、オーロラが発光する高度は高層大気密度に依存しており、電離圏と呼ばれる約 80km から約 500km の高度に出現する。オーロラの科学的な研究は地表での目視観測に始まり、分光学的手法による発光機構の研究を経て、現在では人工衛星の出現によって、オーロラが発生する成因である荷電粒子の生成機構の研究を行うまでに発展してきた。

オーロラを観測した際に様々なオーロラの形状や、空間的広がり、時間変化の様子を確認できるが、オーロラの見え方は観測者とオーロラの相対位置により変

化してしまうため、オーロラの形状自体の変化と、見え方の変化を分けて考える必要がある。例えば、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。以下の図2.1にオーロラと観測者の相対位置により見え方が変化してしまう例を示す。

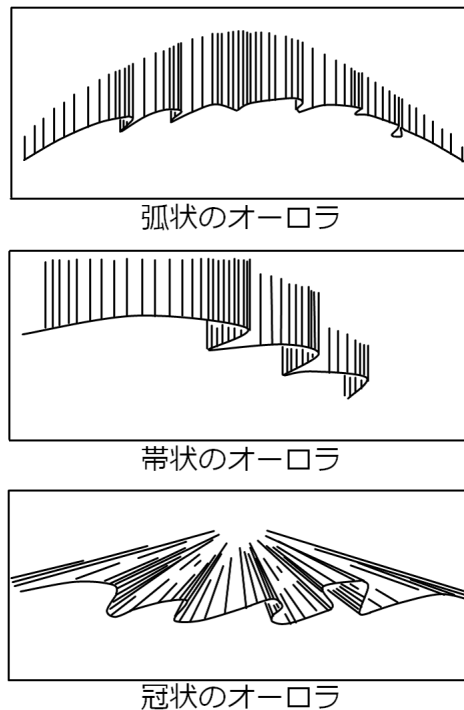


図2.1: オーロラと観測者の相対的な位置の違いによるオーロラの形の変化

オーロラの形状は、帯状、薄く広がった状態、線状の大きく3つに分類することができ、帯状オーロラはひだを持つ東西に弧状にのびたアーク状オーロラと、帯の一部がU字型やJ字型、渦巻状に折れ曲がっていることが多いバンド状オーロラの2つに細分化できる。また、薄く広がった状態のオーロラは、斑点状にぼんやりしているパッチ状オーロラと、空の大部分を一様に覆うベール状オーロラの2つに細分化できる。そして、線状オーロラは磁力線方向にのびる光の筋であり、一本の場合と複数の光の筋の束からなる場合がある。オーロラの空間的広がりには、多重な状態、破片状、冠状の3つに分類できる。多重な状態とは、アーク状や、バ

ンド状、パッチ状などのオーロラが2つ以上同時に出現する場合を表しており、破片状とはアークやバンドが切れ切れになった場合を表している。また、冠状とはオーロラが磁力線方向に位置した際に天の一点を中心に光の筋が集中する場合を表す。オーロラの時間変化の様子は、静穏な状態、活動的な状態、脈打つ状態の大きく3つに分類できる。静穏な状態とはオーロラの変形が非常にゆっくりと変化する場合を表しており、活動的な状態とはオーロラの変形が激しく変化する場合を表している。脈打つ状態は点滅するような状態、炎のような状態、ちらつくような状態、流れるような状態という4つに細分化できる。点滅するような状態とは明るさが数秒から数十秒の周期で変化する場合を表しており、炎のような状態とは明るい部分が炎のように磁力線の上方に向かって急速に広がる場合を表している。また、ちらつくような状態とは早い繰り返し周期で明るさがちかちか変化する場合を表しており、流れるような状態とはバンドまたはアークに沿って明るい部分が流れるように移動する場合を表している。

オーロラは地球上のどこであっても観測できる現象ではなく、観測できる領域は主に北極・南極といった極域である。オーロラが観測できる領域のことをオーロラオーヴァルと呼び、その定義は30分間に天頂から60度以内に出現したオーロラの出現頻度が75%を超える領域である。オーロラオーヴァルの位置は地理的な座標に固定したものではなく、磁気緯度と磁気地方時座標系から求まる高緯度にひずんだ環状の領域となっている。また、オーロラオーヴァルは地磁気の影響を受けており、地磁気の活動の度合いが大きくなるとオーロラオーヴァルは低緯度に広がる。オーロラオーヴァルはオーロラの明るさの情報を含まず全て同じ比重で統計しているが、実際のオーロラはオーロラオーヴァルに沿って一様な明るさで輝いているのではない。

ある瞬間の全極域に広がるオーロラの出現領域と形を観測できるようになったのは人工衛星が登場してからで、人工衛星によってオーロラオーヴァルの低緯度に出現するオーロラの全貌が明らかになった。オーロラオーヴァルの低緯度に出現するオーロラのことをまとめて、ディフューズオーロラ(または、拡散型オーロ

ラ)と総称する。破片状アークのオーロラや、パッチ状のオーロラや、ベール状のオーロラや、明るさが周期的に点滅するオーロラ(以下、パルセイティングオーロラ)がディフューズオーロラに分類できる。ディフューズオーロラに対して、オーロラオーヴァルの高緯度に出現するアーク状オーロラやバンド状オーロラをディスクリートオーロラ(または、個別型オーロラ)と総称する。

以下の図2.2の黄色の領域がオーロラオーヴァルを示している。

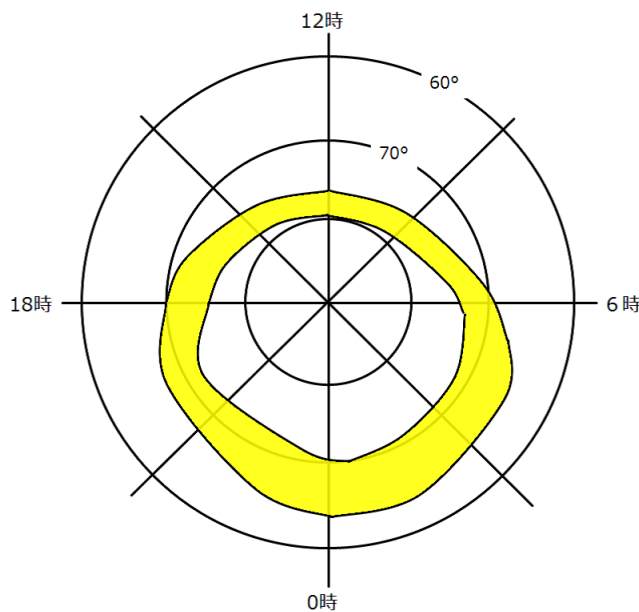


図 2.2: オーロラオーヴァルの領域

2.2 オーロラの運動

ディスクリートオーロラはシート状の形をしており、南北方向には通常1km以下と薄いのに対して東西方向の長さは数千kmに達することもある。オーロラオーヴァルの午後から真夜中までの領域では東西方向に長いオーロラが確認できるが、真夜中から午前までの領域では切れ切れになったオーロラが多い。ディスクリートオーロラでは複数のオーロラが多重に現れて、風に揺れるカーテンのようにオーロラのひだが絶えず動く。オーロラの発光が強くなると、このひだの動きも活発

になり、ひだがちぎれてS字型のオーロラに分かれたり、ひだが渦を巻いたりとおろら全体の形が変化する。ディスクリートオーロラのひだの大きさは、数kmの小さいものから数千kmまでの大規模なものまでである。2kmから10km程度の小規模なひだをカールと呼び、20kmから1500km程度の大規模なひだをスパイラルと呼ぶ。

南半球で地上からディスクリートオーロラを眺めたとき、まず、ぴったりと折り畳んだひだを開くようにオーロラの一部が裂けて、ひだを形成するスプリッティングという運動が起こる。次に、スプリッティングにより形成したひだの一つ一つが磁力線方向に対し時計回りの回転運動をして、S字型オーロラを形成する。ただし、地球の磁力線は南半球では上向きで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。ディスクリートオーロラの運動としてほかにもフリッカリングという運動がある。フリッカリングとはシート状のオーロラの中またはその近傍で数kmの大きさのかたまりが0.06秒から0.2秒程度の周期の速い点滅を繰り返しながら50km/s程度の速度で移動や回転をする運動である。

ディフューズオーロラはオーロラオーヴァルの真夜中から午前側の領域に幅広く存在しており、高緯度側では、低緯度側を根元と見立てたとき、高緯度側に突き出たたいまつのような形(以下、トーチ構造)をしている。ディスクリートオーロラは明るさが強く、肉眼でも容易に見つけることができるのに対して、ディフューズオーロラは明るさが弱く、肉眼で見つけるや、色を確認することが難しい。ディフューズオーロラの中でも特徴を確認できるパルセイティングオーロラは、パルセイションという周期的な明るさの変化を伴いながら、非伝搬型パルセイション、ストリーミング、極向き伝搬、赤道向き伝搬、拡大・縮小といった運動を繰り返す。しかし、パルセイティングオーロラの運動は、移動や拡大・縮小であるためディスクリートオーロラのようなオーロラ全体に影響を及ぼすような変化はほぼない。パルセイションとは明滅にかかる時間が0.1秒程度と短く10秒前後の周期で明るさがパルス的に変化である。非伝搬型パルセイションとは、トーチ構造の根元に

当たる領域に出現する直径 50km から 100km のパッチ状のオーロラが 10 秒前後の周期で点滅を繰り返し、ほぼ一定の形を保ちながら 300m/s 程度のゆっくりとした速度で、夕方側では西向きに午前側では東向きに移動する運動のことである。非伝搬型パルセイションの点滅は、ディスクリートオーロラのフリッカリングと比べると点滅の周期がかなり遅く不規則である。ストリーミングはトーチ構造の内部でよく観測することができる運動で、細い糸のようなフィラメント状のオーロラに沿って明るい部分が繰り返し流れるように 50km/s から 100km/s とはやい速度で移動する。極向き伝搬はパッチ状の明るい領域が高緯度側へ繰り返し伝搬する運動のことである。赤道向き伝搬は破片状になったアーク状のオーロラが低緯度側へ周期的に伝搬する運動のことである。拡大・縮小はパッチ状のオーロラの大きさが急激に広がり、また元の状態に戻る運動を繰り返す。

以下の図 2.3 は 10 種類のスプリットティングとその運動の様子を示しており、図 2.4 はスパイラルの形成する様子を示している。また、図 2.5 はフリッカリングの様子を示しており、図 2.6 はパルセイティングの運動の様子を示している。

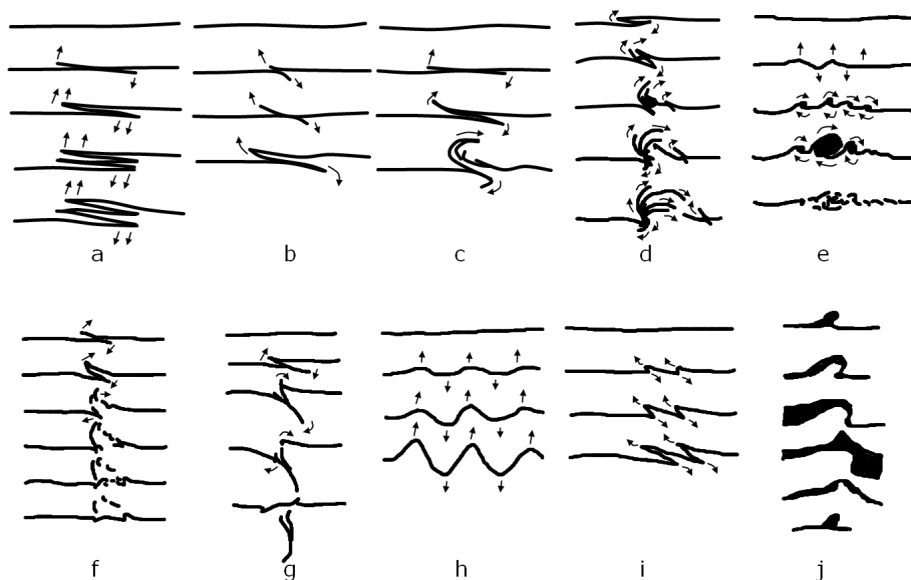


図 2.3: スプリットティングの種類

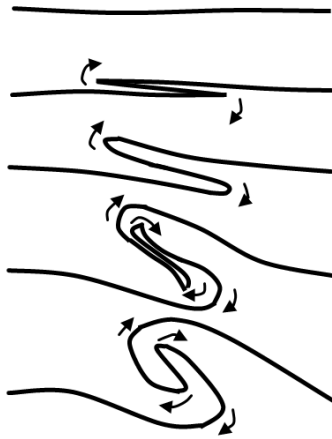


図 2.4: スパイラルを形成する様子

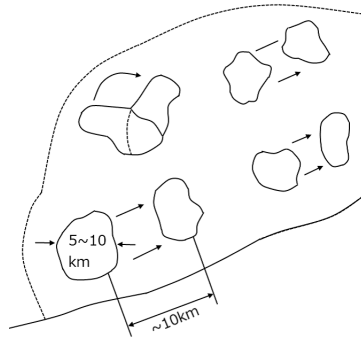


図 2.5: フリッカリングの様子

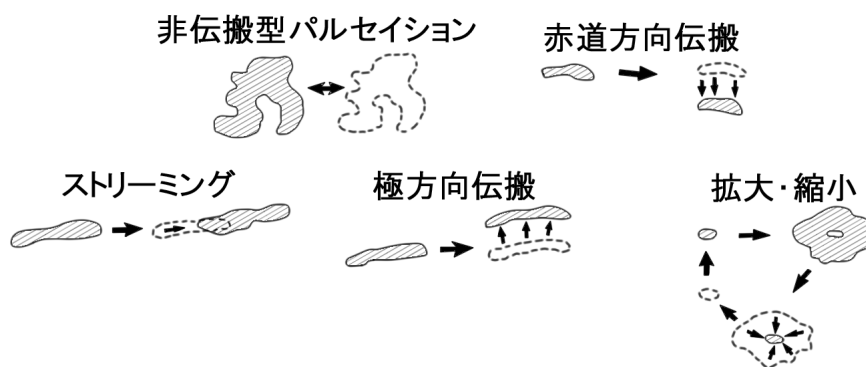


図 2.6: パルセイティングオーロラの運動の様子

2.3 オーロラの色

オーロラの色は多くの波長から成っており、オーロラが放射する波長は、荷電粒子が衝突した高層大気の大気粒子の種類によって決まる。高層大気的主要な成分は窒素分子、酸素分子、酸素原子、窒素原子、またはそれらのイオンであるが、一つの原子や分子が放射する波長の種類は1つではなく多くの波長を含む場合もある。原子が放射する波長には、許容線という放射する確率の高い波長と、放射する確率の低い禁制線という波長が存在する。禁制線が地上で放射することはほとんどない。それは、放射する確率の低さに合わせて、地上では他の大気粒子と衝突し放射するのに必要なエネルギーを失ってしまうからである。しかし、高層大気では、大気密度が小さく衝突が起きずエネルギーを失わないことで禁制線を発する可能性がある。また、分子から放射する波長は、分子は原子と違い振動や回転を行っているため、特定の波長ではなく少しずれた多数の波長を放射する。

オーロラの放射する主な波長は、高層大気の主成分である酸素原子と、窒素分子が放射する波長である。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。また、酸素原子が放射する630.0nmの波長は衝突によりエネルギーを得てから放射するまでにかかる時間が110秒と長い。そのため、高度が低くなると酸素原子が630.0nmの波長を放射する前に、他の原子や、分子と衝突しエネルギーを失い、波長を放射できなくなる消光という現象が発生する。

オーロラは発光色と高度の分布からa型, b型, c型, d型, e型, f型の6つの型のオーロラに分類できる。a型オーロラはオーロラの上部が赤色に発光し、高度120kmから140km周辺に出現しており、b型オーロラはオーロラの下部が赤色に発光し、高度80kmから100km周辺に出現している。c型オーロラはオーロラ全体が緑色に発光し、発光高度は100kmから200kmであり、d型オーロラはオーロラ全体が赤色に発光し、発光高度は220kmから250kmである。また、e型オーロラは赤色や緑色に発光し、b型オーロラの線構造がアーク状オーロラに沿って激しく

動くときに確認でき、f型オーロラは青色や紫色に見えて、オーロラの上部が太陽光に照らされたときに確認できる。

2.4 オーロラの発生メカニズム

極域の地磁気や、オーロラが時間とともに刻々と変化する擾乱現象の中でも、1時間から3時間の間に急激に発達したあとに元の状態に回復する現象を、それぞれ極磁気サブストームと、オーロラサブストームと呼ぶ。極磁気サブストームとオーロラサブストームは、プラズマ不安定現象という磁気圏と電離圏で起きる現象の一側面であり、磁気圏サブストームと総称できる。

磁気圏サブストームは、太陽風と地球磁気圏の相互作用によって得られたエネルギーがオーロラオーヴァルで急激に消費される過渡的過程であり、その開始は夜側のオーロラが爆発的に輝き出すことによって知ることができる。磁気圏サブストームの発達過程は第1段階である静穏時と、第2段階である成長期と、第3段階である拡大期と、第4段階である回復期に分かれる。磁気圏サブストームが起きる要因として、太陽磁場と地磁気の向きの変化が存在する。第1段階では、太陽磁場の向きが北向きとなり、太陽からのエネルギーが入りにくくなるため、磁気圏が定常的に保たれている静穏な状態である。第2段階では、太陽磁場の向きが北向きから南向きに変化し磁気圏の境界面が地球に近づき、太陽からのエネルギーが入りやすくなった不安定な状態である。第2段階からオーロラが出現するようになり、オーロラオーヴァルが低緯度側へ移動するのが観測できる。第3段階では、第2段階の不安定な状態に限界を迎えて蓄積されたエネルギーを一気に解放し、オーロラサブストームを発生する。夜側に出現していた帯状のオーロラの明るさが急激に増し、オーロラオーヴァルは高緯度側に拡大する。太陽磁場の向きが南向きであれば、エネルギーの解放時でも太陽のエネルギーの供給が行われる。磁気圏尾部において磁気エネルギーから荷電粒子の運動エネルギーへの変換が起きて荷電粒子が加速する。第3段階の継続時間は30分から60分ほどであり、終わりにはオーロラオーヴァルの高緯度側への拡大が停止する。第4段階では、太

陽磁場の向きが北向きとなり磁気圏にエネルギーが入りにくくなり、磁気圏の境界面が元に戻っていく。第4段階になりすぐにオーロラが消えるのではなく、第3段階で流入した大量の高エネルギー荷電粒子が徐々に電離圏に降下していくため、オーロラオーヴァルの高緯度側でカーテン状のオーロラが輝いている。オーロラオーヴァルの朝側の低緯度では、ぼんやりとしたパッチ状のオーロラが点滅を繰り返す。第4段階の継続時間は、30分から2時間ほどであるが、途中で太陽からのエネルギー供給が強まると新しい磁気圏サブストームが発生する。

磁気圏サブストームの発生過程の模式図を図2.7に示す。

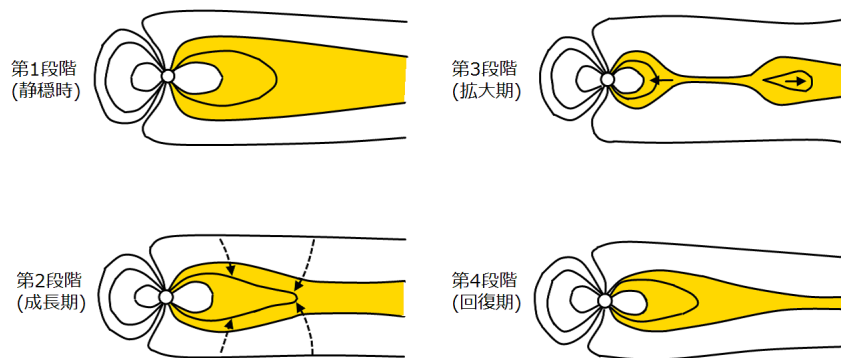


図 2.7: 磁気圏サブストームの発生過程

第 3 章

提案手法

本研究では、オーロラを荷電粒子の集合として扱い、オーロラの運動を荷電粒子群の運動によって表現する。まず、本章では、3.1 節で荷電粒子の初期配置に関する手法について述べ、3.2 節では、電磁場から荷電粒子にかかる力を計算して、荷電粒子の運動に適用する手法について述べる。さらに、3.3 節では、落下する荷電粒子と高層大気密度分布から衝突位置を算出する手法について述べる。そして、3.4 節では、衝突位置と高層大気粒子の分布から発光過程を考慮した手法について述べる。最後に、3.5 節では、3.4 節で求めた発光位置からスクリーン上にレンダリングする手法について述べる。また、本研究の座標系は右手座標系とした。

3.1 荷電粒子の初期配置

3DCG 上の空間において y 軸を高さ、 xz 平面を水平として、荷電粒子を配置するための領域を xz 平面上に生成する。本研究では Bèzier 曲線 [15] に sin 曲線を加えた曲線をオーロラ曲線と定義して、その曲線を使い領域を設定する。

n 次の Bèzier 曲線と m 種の sin 曲線からオーロラ曲線 $\mathbf{R}(t)$ は次の式 (3.1) で表すことができる。

$$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) \mathbf{Q}_i + \left\{ \sum_{j=0}^{m-1} A_j \sin(2\pi f_j t) \right\} \mathbf{N}_b(t) \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (3.1)$$

ただし、 $\mathbf{N}_b(t)$ は Bèzier 曲線のパラメータ t における単位法線ベクトル、 \mathbf{Q}_i は Bèzier 曲線の制御点 $\{\mathbf{Q}_0, \mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_n\}$ 、 $B_i^n(t)$ は Bernstein 基底関数、 A_j は sin 曲線の振幅、 f_j は sin 曲線の周波数である。

Bernstein 基底関数を次の式 (3.2) で示す。

$$B_i^n(t) = {}_n C_i t^i (1-t)^{n-i} \quad (3.2)$$

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。法線ベクトルとは線に垂直な方向ベクトルのことである。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 $\{W_0, W_1, W_2, \dots, W_{k-1}\}$ を用いて、次の式 (3.3) で表した。

$$W(t, w) = \begin{cases} w \frac{W_0}{2} & (k = 1) \\ w \frac{W_{\lfloor tk \rfloor} (1 - (tk - \lfloor tk \rfloor)) + W_{\lfloor tk \rfloor + 1} (tk - \lfloor tk \rfloor)}{2} & (k \neq 1, 0 \leq t < 1) \\ w \frac{W_k}{2} & (k \neq 1, t = 1) \end{cases} \quad (3.3)$$

ただし、 $-1 \leq w \leq 1$ であり、 $\lfloor tk \rfloor$ は tk の整数部分である。

式 (3.1) と、式 (3.3) から求まる領域内の位置ベクトル $\mathbf{A}(t, w)$ を、次の式 (3.4) で示す。

$$\mathbf{A}(t, w) = \mathbf{R}(t) + W(t, w) \mathbf{N}_a(t) \quad (0 \leq t \leq 1, -1 \leq w \leq 1) \quad (3.4)$$

ただし、 $\mathbf{N}_a(t)$ 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である。

3.2 荷電粒子の運動

本節では電磁場から荷電粒子にかかる力を計算して、荷電粒子の運動に適用する手法について述べる。電磁場から荷電粒子にかかる力をローレンツ力 [16] と呼ぶ。本研究では、ローレンツ力による荷電粒子群の移動によって、オーロラの運動を表現している。

ローレンツ力を \mathbf{F} 、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から微小時間 Δt 秒後の荷電粒子の位置 \mathbf{P} を、

次の式 (3.5) で示す.

$$\mathbf{P} = \left(\frac{\Delta t}{m} \mathbf{F} + \mathbf{v}_0 \right) \Delta t + \mathbf{P}_0 \quad (3.5)$$

次に, 電荷素量 q_0 , 地球の磁場を \mathbf{B} , 電場を \mathbf{E} としたとき, ローレンツ力 \mathbf{F} を, 次の式 (3.6) で示す. ただし, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ の \times はベクトルの外積を表している.

$$\mathbf{F} = q_0(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3.6)$$

地球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する. 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 (3.7) で示す.

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (3.7)$$

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 (3.8) で示す.

$$\rho = \frac{q_0 N}{\Delta S} \quad (3.8)$$

ただし, 真空の誘電率 ε_0 は真空内の電荷とその電荷が与える力の関係を示す物理定数である.

真空の誘電率 ε_0 , 電位 ϕ , 電荷密度 ρ から, 偏微分方程式であるポアソン方程式 [17][18] は次の式 (3.9) で表すことができる. また, ∇^2 はラプラシアンである.

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial^2x} + \frac{\partial^2\phi}{\partial^2z} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.9)$$

ポアソン方程式を解き, 電位 ϕ を求めるために xz 平面を直交格子に分割する. 境界条件を Dirichlet 条件 [18] として端の格子の電位 $\phi = 0$ と設定する. Gauss-Seidel 法 [19] を用いて電位 ϕ を求める. ある格子点での電位は周囲の格子点の電位から求めることができる. 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誤

差の少ない電位を求める。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、荷電粒子の位置と、荷電粒子を囲む4つの格子点の位置関係を考慮して、電荷密度、電場を求める。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を用いて求め、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る。

格子点間の距離を Δd として、格子点 (i, j) における電位の2階微分の近似式を表すために、対象の格子点と次の格子点との前方差分近似 [18] を取り、格子 (i, j) における電位の2階微分の近似式を、次の式 (3.10)、式 (3.11) で示す。

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right) \approx \frac{\phi(i+1, j) - 2\phi(i, j) + \phi(i-1, j)}{(\Delta d)^2} \quad (3.10)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}\right) \approx \frac{\phi(i, j+1) - 2\phi(i, j) + \phi(i, j-1)}{(\Delta d)^2} \quad (3.11)$$

式 (3.9)、式 (3.10)、式 (3.11) から格子点 (i, j) における電位 $\phi(i, j)$ を次の式 (3.12) で示す。

$$\phi(i, j) = \frac{1}{4} \left\{ \frac{(\Delta d)^2 \rho}{\epsilon_0} + \phi(i + \Delta d, j) + \phi(i - \Delta d, j) + \phi(i, j + \Delta d) + \phi(i, j - \Delta d) \right\} \quad (3.12)$$

対象の格子点とその前後の格子点との中心差分近似 [18] をとり、格子点 (i, j) における電場 $\mathbf{E}(i, j)$ を求める式を示す。

$$\mathbf{E}(i, j) = \left(-\frac{\phi(i+1, j) - \phi(i-1, j)}{2\Delta d}, -\frac{\phi(i, j+1) - \phi(i, j-1)}{2\Delta d} \right) \quad (3.13)$$

3.3 荷電粒子の落下・衝突

本節では、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る。まず、地球磁場に沿って荷電粒子の落下を行い衝突判定位置を割り出し、次に、高層大気の密度分布 [20] を使い衝突確率を求めて衝突位置を求める。

磁場 \mathbf{B} に沿って、速さ v で落下する荷電粒子の微小微小時間 $\Delta\tilde{t}$ 後の座標を衝突判定位置とする。 $\Delta\tilde{t}$ はローレンツ力を求める際の Δt と比べると、 $\Delta\tilde{t} \ll \Delta t$ である。衝突判定位置 $\tilde{\mathbf{P}}$ を次の式 (3.14) で示す。

$$\tilde{\mathbf{P}} = v \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} \Delta\tilde{t} \quad (3.14)$$

次に、衝突判定位置の高さと高層大気の数密度分布を用いて、荷電粒子と大気粒子との衝突確率を求める。ある領域を移動する粒子があったとき、その領域の体積と他の粒子の全体積の比率から、移動する粒子が他の粒子と衝突する衝突確率が求まる。大気粒子の半径を r 、微小時間に移動した距離を Δl 、単位体積当たりの数密度を n としたとき、 Δl 法 [21] から衝突確率 P_1 は、次の式 (3.15) で示す。

$$P_1 = n\pi r^2 \Delta l \quad (3.15)$$

ただし、 n は高層大気の数密度分布から求めた。

3.4 大気粒子の発光

本節では、大気粒子が放射する波長を決定する手法と、消光現象を考慮した手法について述べる。まず、発光位置の高さと大気粒子の分布 [22] から、衝突した大気粒子の種類を決定する。ここで、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 [5] から求める。次に、消光現象を考慮し、大気粒子が波長が発光するまでにかかる時間に他の大気粒子と衝突した場合には波長を放射しない。消光が起きなかった場合、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 [21] から消光する確率 P_2 は次の式 (3.16) で示す。

$$P_2 = 1 - \exp\left(-\sqrt{2}n\pi r^2 v_m t\right) \quad (3.16)$$

ただし、大気粒子の速さ v_m は、マクスウェル分布 [23] に従う。

3.5 レンダリング

本節では大気粒子の発光で求めた波長と、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。まず、発光位置をスクリーン上に射影して描画位置を求める。次に光の減衰を考慮して、光の強さを描画位置から発光位置までの距離の二乗に反比例するように求める。画像の輝度値を滑らかにするための手法などで用いられるガウシアンフィルタ [24] を使い、輝線と発光の強さを描画位置と周囲の描画位置に分配することで光の放射を表現している。標準偏差を σ としたとき、ガウシアンフィルタを次の式 (3.17) で示す。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.17)$$

今回、標準偏差 σ はオーロラとの視覚的類似性の面で、妥当だと考える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、スクリーンに表示できるように RGB 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 [25]。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 (3.18) で示す。

$$\begin{aligned} X &= k \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) L(\lambda) \delta\lambda \\ Y &= k \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) L(\lambda) \delta\lambda \\ Z &= k \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) L(\lambda) \delta\lambda \end{aligned} \quad (3.18)$$

ただし、 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 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 $L(\lambda)$ に光の強さを使っている。

求めた X, Y, Z から変換した R, G, B 値を次の式 (3.19) で示す.

$$\begin{aligned} R &= 255 \left(\frac{3.5064X - 1.7400Y - 0.5441Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \\ G &= 255 \left(\frac{-1.0690X + 1.9777Y + 0.0352Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \\ B &= 255 \left(\frac{0.0563X - 0.1970Y + 1.0511Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \end{aligned} \tag{3.19}$$

第 4 章

動作検証と考察

本章では，第3章で述べたビジュアルシミュレーション手法の実行例を示し，オーロラの視覚的印象の類似性を検証する。

オーロラのビジュアルシミュレーションを実装するために，3DグラフィックツールキットであるFK ToolKit System[26]を用いた。ビジュアルシミュレーションを行った際のパラメータは，スクリーンの横幅を512px，縦幅を360px，電場解析で用いる格子点の数を10000個，荷電粒子の数は60000個，発光の度合いを調整するガウシアンフィルタのフィルタサイズは9，標準偏差は100とした。このパラメータを設定したのち，シミュレーションを行うと時間経過によって自動的に動画を生成する。画像一枚を生成するのにかかる時間は平均約40秒である。また，ビジュアルシミュレーションを行った環境は表4.1の通りである。

表 4.1: 実行環境

| | |
|-----|--|
| OS | Windows 7 Enterprise |
| CPU | AMD Phenom(tm) IIX6 1090T Processor 3.20 GHz |
| GPU | GeForce GTX 470 |
| メモリ | 4.0 GB |

本研究のビジュアルシミュレーションによって，表現できたオーロラの視覚的特徴について述べる。バンド状オーロラを生成した結果を図4.1に示す。シート状の形とオーロラの発光に連続性があることが確認できる。

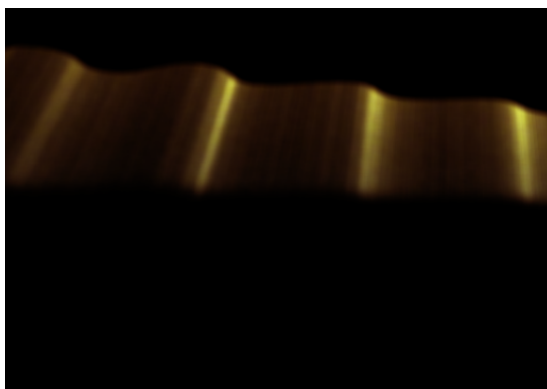


図 4.1: 生成したバンド状オーロラ

南半球の地上から見上げた場合を想定して，オーロラがスプリットティングと時計回りの回転運動をする様子を図 4.2, 図 4.3, 図 4.4, 図 4.5, 図 4.6 に示す. 時間経過とともに，スプリットティング運動と，アーク状オーロラのひだが回転する運動が確認できる.



図 4.2: スプリットティングの様子 1

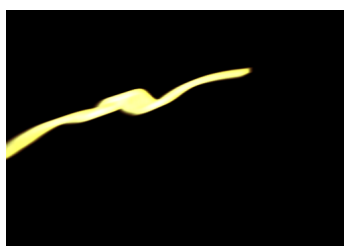


図 4.3: スプリットティングの様子 2

スプリットティングによってスパイラルを形成した様子を図 4.7, 図 4.8, 図 4.9, 図 4.10, 図 4.11 に示す. 時計回りに渦を巻いている様子が確認できる.



図 4.4: スプリットイングの様子 3



図 4.5: スプリットイングの様子 4

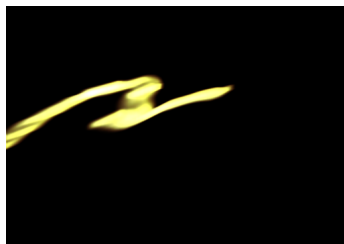


図 4.6: スプリットイングの様子 5

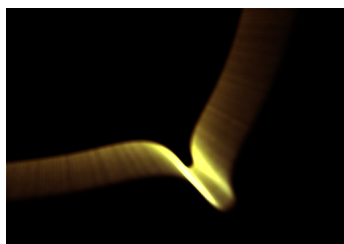


図 4.7: スパイラルの様子 1

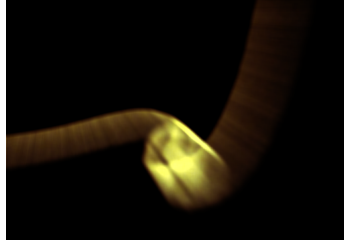


図 4.8: スパイラルの様子 2

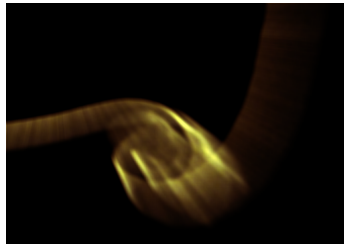


図 4.9: スパイラルの様子 3

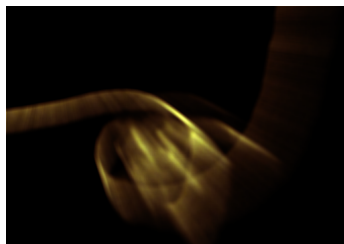


図 4.10: スパイラルの様子 4

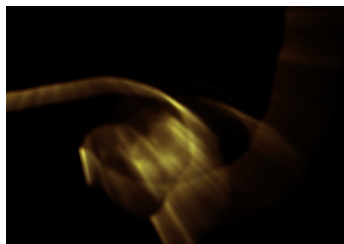


図 4.11: スパイラルの様子 5

4.1 考察

検証の結果、S字型のオーロラに分かれたり、ひだが渦を巻いたりとオーロラ全体の形が変化する様子を再現できた。また、実際のオーロラと比較して、シミュ

レーション結果はレンダリングの品質はよいものとなった。本研究の提案手法によって、レンダリング品質と、オーロラの動きの両立することができたといえる。しかし、現状の問題点としては、オーロラの運動としてフリッカリングや、ディフューズオーロラは表現できていない点と、磁気圏サブストームのように時間ごとの地球に落下する荷電粒子のエネルギー変化を扱っていないため、色と発光高度に変化がない点を挙げるができる。

第 5 章

まとめ

本研究ではオーロラのビジュアルシミュレーション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てオーロラの回転運動とスプリッティングを表現したうえで、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した。

電磁場からかかる力を計算することによって、オーロラのスプリッティングと回転運動を表現することが可能となった。物理的な発光過程を考慮したことでオーロラに適したレンダリング結果を得ることができた。本研究によってオーロラの動きとレンダリング品質を両立するシミュレーションを行うことができた。

今後の展望として、フリッカリングや、ディフューズオーロラの特徴を考慮することで、さらに、実際のオーロラとの視覚的印象を近づけるシミュレーションの実現を考えることができる。

謝辞

本研究を締めくくるにあたり、終始温かいご指導ならびに適切な助言をくださいました、本校メディア学部渡辺大地講師と三上浩司講師に心からの感謝の意を表します。また、研究方針の相談を引き受け、様々な助言をくださいました、同卒研室の竹内亮太様と、阿部雅樹様、さらには、研究室の院生の方々にも深く感謝致します。最後に、苦楽を共にし、歩んできた研究室のメンバーにも厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Yoshinobu Takahiro and 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, 2005-01-28.
- [2] Yoshinori Dobashi, Tsuyoshi Yamamoto, and 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–, 2001.
- [3] TOKOI KOHE and MORIKI HIRONORI. Real-time modeling of snow-covered shape(computer graphics). *Transactions of Information Processing Society of Japan*, Vol. 47, No. 5, pp. 1558–1565, 2006-05-15.
- [4] Ye Zhao, Yiping Han, Zhe Fan, Feng Qiu, Yu-Chuan Kuo, Arie E. Kaufman, and Klaus Mueller. Visual simulation of heat shimmering and mirage. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 13, pp. 179–189, 2007.
- [5] 国立極地研究所編. 南極の科学 2 オーロラと超高層大気. 古今書院, 1983.
- [6] ニール・デイビス. オーロラ THE AURORA WATCHER'S HANDBOOK. 株式会社地人書館, 1995.

- [7] 上出洋介. オーロラの科学. 誠文堂新光社, 2010.
- [8] 井上太郎, 牧野光則. CGによるオーロラのモデリング. NICOGRAPH 論文集 95, pp. 161–170, 1995.
- [9] G. V. G. Baranoski, Jon Rokne, Peter Shirley, Trond Trondsen, Rui Bastos. Simulating the aurora. *Visual. Comput. Animat*, pp. 43–59, 2003.
- [10] 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.
- [11] G. V. G. Baranoski, J. Wan. Simulating the dynamics of auroral phenomena. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, pp. 37–59, 2005.
- [12] 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, p. 137, 2008.
- [13] 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, p. 281, 2009.
- [14] 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, 2009.
- [15] 鳥谷浩志, 千代倉弘明. 「3 次元 CAD の基礎と応用」. 財団法人 東京大学出版会, 1991.
- [16] 小出昭一郎. 解析力学 [物理入門コース 2]. 株式会社岩波書店, 1983.
- [17] 富阪幸治, 花輪知幸, 牧野淳一郎. 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.
- [18] 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 株式会社, 1987.

- [19] 皆本晃弥. UNIX & Information Science-5 C 言語による数値計算入門. 株式会社サイエンス社, 2005.
- [20] 自然科学研究機構国立天文台. 理科年表 平成 23 年. 丸善株式会社, 2011.
- [21] 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.
- [22] NASA, Robert McGuire. MSIS-E-90 Atmosphere Model. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html.
- [23] 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.
- [24] Gabriele Lohmann. 3次元画像処理 Volumetric Image Analysis. 株式会社ボーンデジタル, 2009.
- [25] 千々岩英彰. 色彩学概説. 財団法人 東京大学出版会, 2001.
- [26] 渡辺 大地. Fine Kernel Tool Kit System. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.