

修士論文

平成 24 年度 (2012)

S字型構造の発達・消滅過程の動特性に基づいた  
オーロラ動画像の自動生成

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

小島 啓史

修士論文

平成 24 年度 (2012)

S字型構造の発達・消滅過程の動特性に基づいた  
オーロラ動画像の自動生成

指導教員 渡辺 大地

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

小島 啓史

## 論文の要旨

論文題目	S字型構造の発達・消滅過程の動特性に基づいた オーロラ動画像の自動生成
執筆者氏名	小島 啓史
指導教員	渡辺 大地
キーワード	3DCG, 自然景観, オーロラ, ビジュアルシミュレーション

### [要旨]

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再現することで、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。

オーロラのビジュアルシミュレーションの先行研究として、オーロラがカーテンのように揺れる様子を再現した研究や、渦を巻くような様子を再現した研究がある。このような局所的な運動ではなく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もある。しかしながら、オーロラが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まだない。

本研究では、3DCGを用いてオーロラを再現したアニメーションの生成を目的とし、オーロラの基本的な動きであるスプリッティング、シアア、といったひだが生じる運動や、ひだが回転する運動や、オーロラの特徴的な動きである分断(ディスコネクション)や、再接続(リコネクション)を表現する手法を提案する。

提案手法は、オーロラの2次元の初期分布と運動を再現する段階と、物理的な発光過程をシミュレーションすることでオーロラの2次元分布から3次元の分布を生成する段階に分かれる。オーロラの2次元の初期分布と運動を再現する段階では2つのアプローチを行った。1つ目のアプローチではカーテン状のオーロラが揺らめく様子や、渦状のオーロラを表現するために、オーロラの初期分布を荷電粒子群として扱い、オーロラの運動を荷電粒子の運動として扱った。電磁場からかかる力を計算し時間経過により変化するオーロラの分布に合わせて計算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。2つ目のアプローチではディスコネクションや、リコネクションにより多重なオーロラや、ひとつながりのオーロラが出現する様子を表現するために、オーロラの初期分布を点列として扱い、オーロラの運動を点列の運動として扱った。電流から点列にかかる力を計算しS字型構造に発達する運動を再現し、点列の繋ぎ変えによってS字型構造の消滅を再現することでオーロラのS字型構造の発達・消滅過程に基づいた運動を再現した。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方の再現具合とレンダリング品質について結果の検証を行い、本研究の有効性を確認した。

# A b s t r a c t

Title	Analysis of S-shaped structure toward visual simulation of aurora based on dynamic characteristics of the growth and extinction processes
Author	Takafumi Kojima
Advisor	Taichi Watanabe
Key Words	3DCG, natural phenomena, aurora, Visual simulation

**[summary]**

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. 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. We propose a new approach for simulating and rendering aurora. The proposed method can reproduce aurora motion and render the various aurora emission colors.

In the first approach, our proposed method reproduces aurora motion by simulating the movements of charged particles. The proposed method creates a square grid for simulating the electromagnetic field and 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. In the second approach, our goal is to generate motion pictures reproducing these unique phenomena of aurora. We analyze some fundamental motions of aurora such as splitting, shear and fold rotation, and propose a method to mimic such complicated deformations as disconnection and reconnection. By simulating the motions based on the growth and extinction processes of S-shaped structure, we address the problem to generate image of the appearance of the aurora's dynamic motion. 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.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景と目的	2
1.2	論文構成	7
<b>第2章</b>	<b>オーロラ現象</b>	<b>8</b>
2.1	オーロラ現象	9
<b>第3章</b>	<b>3DCGを用いたオーロラの表現手法</b>	<b>16</b>
3.1	手法の概要	17
3.2	荷電粒子群と電場を用いた運動表現手法	17
3.2.1	荷電粒子の初期分布	18
3.2.2	荷電粒子の運動	20
3.3	ひだ構造と電流を用いた運動表現手法	23
3.3.1	オーロラの分布表現	23
3.3.2	スプリッティング, シアーの表現	24
3.3.3	ひだの回転運動の表現	25
3.3.4	ディスクoneksiョン, リkoneksiョンの表現	25
3.4	物理的な発光過程のレンダリング手法	26
3.4.1	荷電粒子の落下・衝突	26
3.4.2	大気粒子の発光	27
3.4.3	レンダリング	27
<b>第4章</b>	<b>検証</b>	<b>30</b>
4.1	オーロラの運動表現の検証	31
<b>第5章</b>	<b>おわりに</b>	<b>42</b>
	<b>謝辞</b>	<b>45</b>
	<b>参考文献</b>	<b>47</b>

# 目 次

1.1	オーロラの写真 . . . . .	3
2.1	DMSP 衛星が南極上空を通過する際に撮影したオーロラの写真 . . . . .	9
2.2	相対位置によるオーロラの見え方 . . . . .	10
2.3	S字を形成したオーロラの模式図 . . . . .	11
2.4	スプリッティングの過程 . . . . .	12
2.5	シアアの過程 . . . . .	12
2.6	ひだの回転運動 . . . . .	13
2.7	ディスコネクション, リコネクションが発生する過程 . . . . .	14
3.1	荷電粒子の配置手順 . . . . .	18
4.1	カーテン型オーロラの生成結果 . . . . .	31
4.2	観測位置の異なるオーロラの生成結果 . . . . .	32
4.3	多重なオーロラの生成結果 . . . . .	33
4.4	渦状オーロラの生成結果 . . . . .	34
4.5	全体が緑色のオーロラの生成結果 . . . . .	35
4.6	上部が赤色で下部が緑色のオーロラの生成結果 . . . . .	35
4.7	緑色と青色のオーロラの生成結果 . . . . .	36
4.8	星空の写真と合成した結果 . . . . .	37
4.9	カーテン状のオーロラにひだが揺らめく様子の生成結果 . . . . .	38
4.10	ひだが分断し多重なオーロラを形成する様子 . . . . .	39
4.11	ひとつながりのオーロラを形成する様子 . . . . .	40

# 表 目 次

2.1	S-fractal manifold オーロラの構造と特性長と特性時間 . . . . .	12
4.1	実行環境 . . . . .	31
4.2	図 4.1, 図 4.2, 図 4.3 の波長ごとのパラメータ値 . . . . .	33
4.3	図 4.4 の波長ごとのパラメータ値 . . . . .	34
4.4	図 4.5 の波長ごとのパラメータ値 . . . . .	36
4.5	図 4.6 の波長ごとのパラメータ値 . . . . .	37
4.6	図 4.7 の波長ごとのパラメータ値 . . . . .	37
4.7	図 4.8 の波長ごとのパラメータ値 . . . . .	38
4.8	図 4.9, 図 4.10, 図 4.11 の波長ごとのパラメータ値 . . . . .	41

# 第 1 章

## はじめに



## 1.1 研究背景と目的

近年、オーロラ [1], 稲妻 [2], 雲 [3], 虹 [4], 蜃気楼 [5] といった気象現象をモデル化し, 3次元コンピュータグラフィクス (以下, 3DCG) 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盛んに行われている. その中でも, 自然現象を表現する 3DCG 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, 自然現象と 3DCG との視覚的印象が類似する 3DCG アニメーションを生成可能である.

また, 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, エンターテインメント分野にて活用されている. 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利用する用途や, 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や, 興業に利用する用途や, エンターテインメント分野では映画や, 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 3DCG 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. オーロラとは, 太陽から飛来する電気を帯びた粒子 (または, 荷電粒子や, プラズマ) が地上の超高層大気と衝突することによって発生する大気の発光現象である. オーロラは, 太陽活動の影響による地球環境の変化を知る宇宙観測として重要であるとともに, 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. オーロラの写真を図 1.1 に示す [6].



図 1.1: オーロラの写真

オーロラの運動はオーロラの発生状態によって種々様々で、緩やかな遅い動きを表すときもあれば、瞬く間に激しい変化を起こすときもある。オーロラの形態は、ねじれるように動き、ひだ構造を持つオーロラに発達したり、回転して渦状のオーロラを形成したりする。また、カーテン状のオーロラのひだが分断し千切れたオーロラを形成したり、分断したひだが統合し再びカーテン状のオーロラを形成したりする。また、ほとんど動かないオーロラもあれば、10分程の時間の中に波がうねるように長距離に拡がり大規模な波状構造に発達するオーロラもある。

このような様々なオーロラの運動は、次々に地球の大気に落下する荷電粒子の分布変化の結果である。太陽から地球大気までの荷電粒子流入過程において、荷電粒子は太陽と地球の磁気相互作用により形成する複雑な磁場や、荷電粒子の流入により変化する複雑な電場の影響を受ける。このように複数の要因が相互に関わることで、地球の大気に落下する荷電粒子の分布は変化する。

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 [7] [8] [9] [10]。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。しかしながら、オーロラ運動は複数要因が相互に関わる複雑系の一種であるとともに、オーロラは未だに解明できていない点の多い現象であるため、オーロラ運動を決定するためのメカニズムは解明できていない。

オーロラの発生に関わる磁気圏や、電離層における科学的な解析の場合には、物理的な厳密さが重要となるが、3DCG アニメーション生成を目的とした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る。そこで、オーロラ運動の 3DCG アニメーション生成のためには、メカニズムが科学的にまだ解明できていない部分についてオーロラの動態を考慮し、その動特性に対応する疑似的なモデルを構築することが重要となる。

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。

オーロラがカーテンのように揺れる様子を再現した研究としては、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、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 [11] 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 [12] 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。また、伊藤ら [13] 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  $\frac{1}{f}$  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 [14] 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、 $\frac{1}{f}$ 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。伊藤ら、伏見らの $\frac{1}{f}$ ゆらぎを用いる手法は計算コスト軽減には有効である。

次に、渦を巻くような様子を再現した研究として、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、オーロラの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。

地球規模のオーロラのレンダリングの研究として、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レンダリング手法を提案した。ここで、オーロラの色に関しては観測データから近似している。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として、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。

従来手法では、オーロラの疑似分布関数や、荷電粒子群の運動シミュレーション、観測データを用いることで、カーテン型のオーロラが揺らめく様子や、渦状に巻く様子、地球規模でのオーロラの分布変化を再現できる。しかしながら、実際のオーロラではそれらの動態だけではなく、スプリッティングや、シアー、ひだの回転運動という基本的な運動に合わせて、ディスコネクションや、リコネクションといった運動が起きることで多重なオーロラや、ひとつながりのオーロラが出現する。このようなオーロラが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まだない。

本研究では、オーロラの3DCGアニメーション生成のためにオーロラの物理的な特性を加味し、オーロラの動特性を考慮した擬似的なモデルを構築し、オーロラの特徴的な運動を示す様子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。本研究では、オーロラ特有のS字型構造の発達・消滅過程における動特性に着目し、その動特性によって表れる次の4項目のオーロラ動態を再現対象として設定した。

- カーテン状のオーロラにひだが揺らめく様子
- ひだが回転して渦状のオーロラを形成する様子
- カーテン状のオーロラのひだが分断し千切れたオーロラを形成する様子
- 分断したひだが統合し再びカーテン状のオーロラを形成する様子

本研究では、設定した4項目のオーロラ動態を再現するために、2次元上でオーロラ分布を疑似的に生成し、その分布に変化を与える力を計算することでオーロラの運動表現を行った。また、オーロラの物理的な発光過程をシミュレーションすることでオーロラの2次元分布をオーロラの3次元分布に拡張し、3次元上のオーロラのレンダリングを行った。

提案手法では、オーロラの2次元の初期分布と運動を再現する段階では2つのアプローチを行った。1つ目のアプローチではカーテン状のオーロラのひだが揺らめく様子や、渦状のオーロラが形成する様子を再現するために、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い、電磁場からかかる力を計算する手法を提案する。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。そこで、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。

2つ目のアプローチではディスコネクションや、リコネクションにより多重なオーロラや、ひとつながりのオーロラが出現する様子を表現するために、オーロラの初期分布を点列として扱い、オーロラの運動を点列の運動として扱った。電流から点列にかかる力を計算しS字型構造に発達する運動を再現し、点列の繋ぎ変えによってS字型構造の消滅を再現することで、カーテン状のオーロラのひだが分断し千切れたオーロラを形成する様子や、分断したひだが統合し再びカーテン状のオーロラを形成する様子を再現した。

そして、オーロラの発光色を再現するために、米山らの手法を用いて、オーロラの発光過程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うことで、オーロラの3DCGアニメーション生成を実現した。

提案手法を実装し、オーロラの特徴である分布や、動き方、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を検証することで本手法の有効性を確認した。

## 1.2 論文構成

本論文の構成は、以下の通りである。第2章では、オーロラ現象について述べる。第3章では、3DCGを用いたオーロラの運動表現手法について述べる。第4章では、本研究の提案手法をプログラムにて実装し、レンダリング結果の検証を行う。第5章では、本研究における成果と意義をまとめ、今後の展望を述べる。

## 第 2 章

# オーロラ現象

## 2.1 オーロラ現象

オーロラとは、荷電粒子が大気粒子に衝突し発生する大気の発光現象 [7] である。この荷電粒子とは太陽から放射している電気を帯びた粒子のことで、地球の南極や北極の極域周辺の高層大気に降り込む。

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 衛星が南極上空を通過する際に撮影したオーロラの写真を図 2.1 に示す [20]。

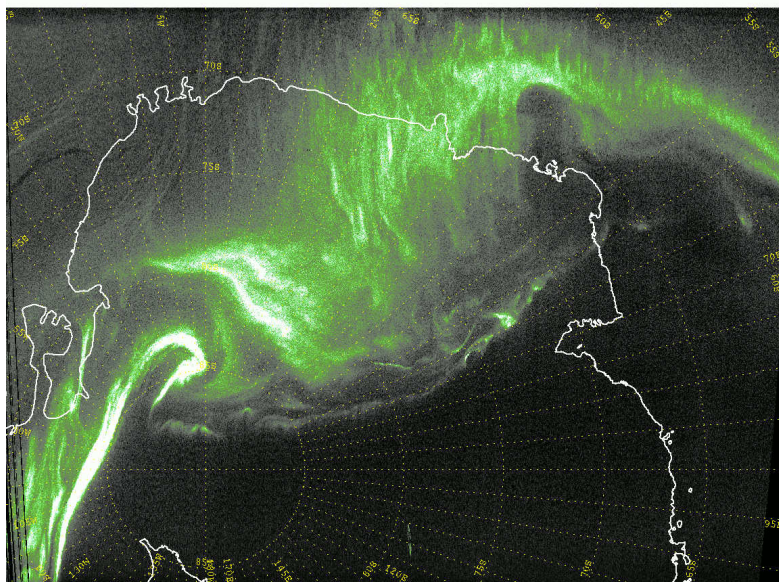


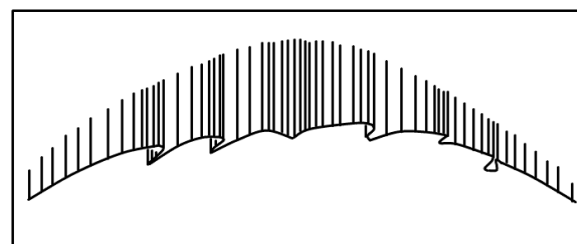
図 2.1: DMSP 衛星が南極上空を通過する際に撮影したオーロラの写真

オーロラが発生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。また、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 [8]。

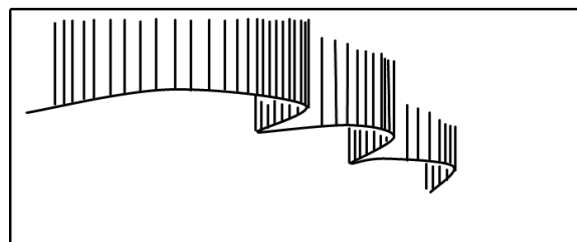


次に、オーロラの形や見え方、動き、発光色について説明する。オーロラの代表的なものとしてカーテン型のオーロラがある。オーロラは高い高度に出現するため、観測者から離れた場所に現れたオーロラは弧状に見えるが、同じオーロラをもっと近くから見ると帯状に見えて、オーロラの真下から見上げると空の一点に光の筋が集中する冠状のオーロラに見える。

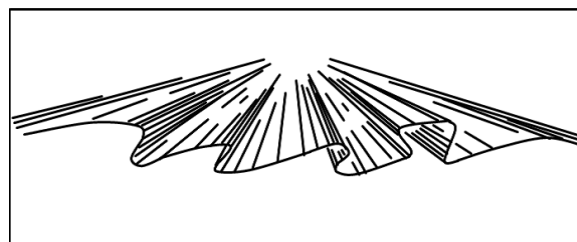
次の図 2.2 にオーロラと観測者の相対位置により見え方が変化する例を示す。



弧状のオーロラ(離れた場所)



帯状のオーロラ(近くの場所)



冠状のオーロラ(真下)

図 2.2: 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。

本研究では小口 [10] によるオーロラの構造や動特性による分類に従う。本節では、S-fractal manifold オーロラの構造や動特性について説明する。S-fractal manifold オーロラの大部分は、いわゆるカーテン型オーロラ (または、オーロラアーク、オーロラバンド) のことである。S-fractal manifold オーロラは基本的に一連のシート状の構造を持ち、明るさを増した活動部分の変形の際に磁場の向きに対して垂直な平面上でS字の形をとる。ここで、簡易のため磁場は単一のベクトルとして扱う。

磁場の向きに対して垂直な平面上でS字を形成したオーロラを図 2.3 を示す。



図 2.3: S字を形成したオーロラの模式図

ここで、図 2.3 に示すオーロラの模式図は北半球に限定したものである。上部を高緯度側、下部を低緯度側、左側を西側、右側を東側とする。また、磁場の向きは奥方向である。これは図 2.3 以降のオーロラの模式図に関しても同様とする。

また、S-fractal manifold オーロラは空間中における大きな構造から、小さな構造まで相似的な形となり、全体でフラクタルカーブを形成している。それぞれの構造は大きな構造から順番にバルジ、サージ、フォールド、レイと言う。S-fractal manifold オーロラの動特性としては、局所的な明るい部分は常にS字型構造の発達部分であり、S字型構造の発達・消滅を繰り返すのが特徴である。2つ目の特徴として、S字型構造の発達・消滅にかかる時間がS字型構造の空間的サイズに比例する点である。また、オーロラの明るさが安定して確認できる場合、変形にかかる速さはS字型構造の大きさによらずほぼ一定で、平均すると7-8km/sec程度になる。S字型構造の種類と、その特性長、変形にかかる特性時間を表 2.1 に示す。

表 2.1: S-fractal manifold オーロラの構造と特性長と特性時間

S 字型構造	特性長	特性時間
レイ	数 km	0.1-1 秒
フォールド	数十 km	1-10 秒
サージ	数百 km	1-2 分
バルジ	1000-2000km	数分

ここで、オーロラの明るさが安定していない場合には、変形にかかる時間はオーロラの明るさとも関係があるため、明るい程、あるいは急激に明るくなるほど S 字型構造の発達・消滅にかかる速さが増す。ただし、オーロラの明るさと特性時間の相関の詳細に関して、測定の難しさから観測によってこの関係を確認されていない。

S-fractal manifold オーロラの基本的な運動として、スプリットティング、シアー、ひだの回転といった運動がある。スプリットティングは、1つのシート状構造のオーロラの中に周辺より明るい部分が生じ、その明るい部分が東西に割れて、それまで折りたたんでいたプリーツが横から引っ張られるように現れてひだが生まれる運動のことである。シアーは、スプリットティングと違いオーロラに沿った向きに成長する。スプリットティングの過程を図 2.4 に、シアーの過程を図 2.5 に示す。

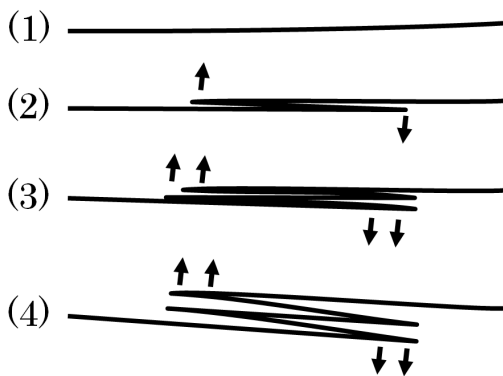


図 2.4: スプリットティングの過程

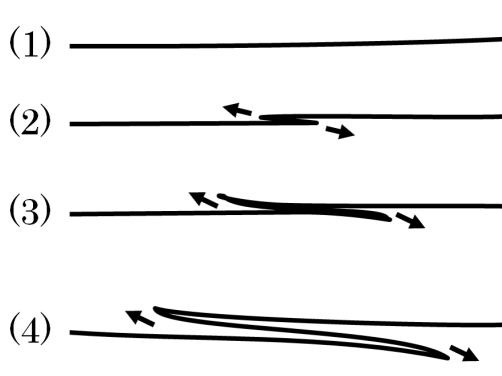


図 2.5: シアーの過程

シアーによって生じたひだが回転することによって、単純な S 字型構造が発達する過程を図 2.6 に示す。

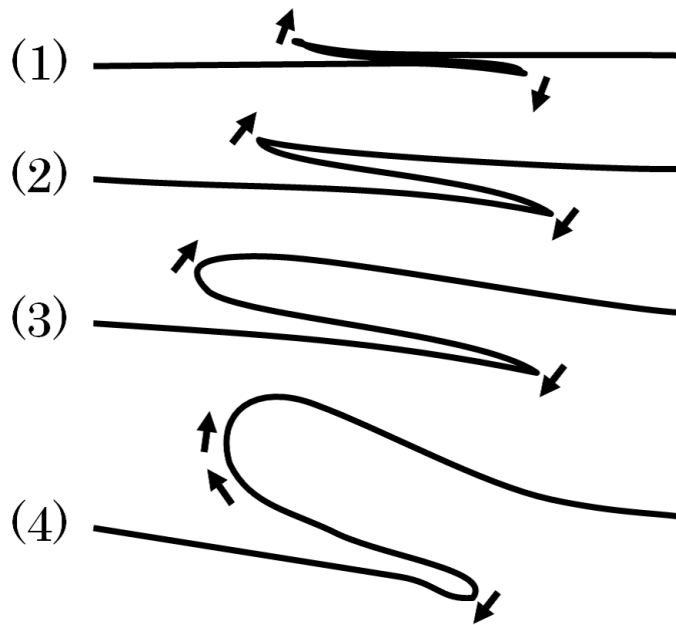


図 2.6: ひだの回転運動

次に，S-fractal manifold オーロラの基本的な運動によって起こる，ディスコネクション，リコネクションといった運動について説明する．まず，1つのシート状構造から生まれた折りたたみ構造のうち高緯度・西側に突き出した部分が，磁場の向きに見て右回りにめくれ上がる変形を起こす．次に，めくれ上がった部分の先端と，右隣からめくれ上がって突き出した部分の先端とが接続する．かつ，もともと接続していた部分がばらばらに分断することで，S字型に変形した新しいひとつなぎのオーロラと多重なオーロラに変化する．ディスコネクション，リコネクションが発生し，多重なオーロラや，ひとつなぎのオーロラに変化する過程を図 2.7 に示す．

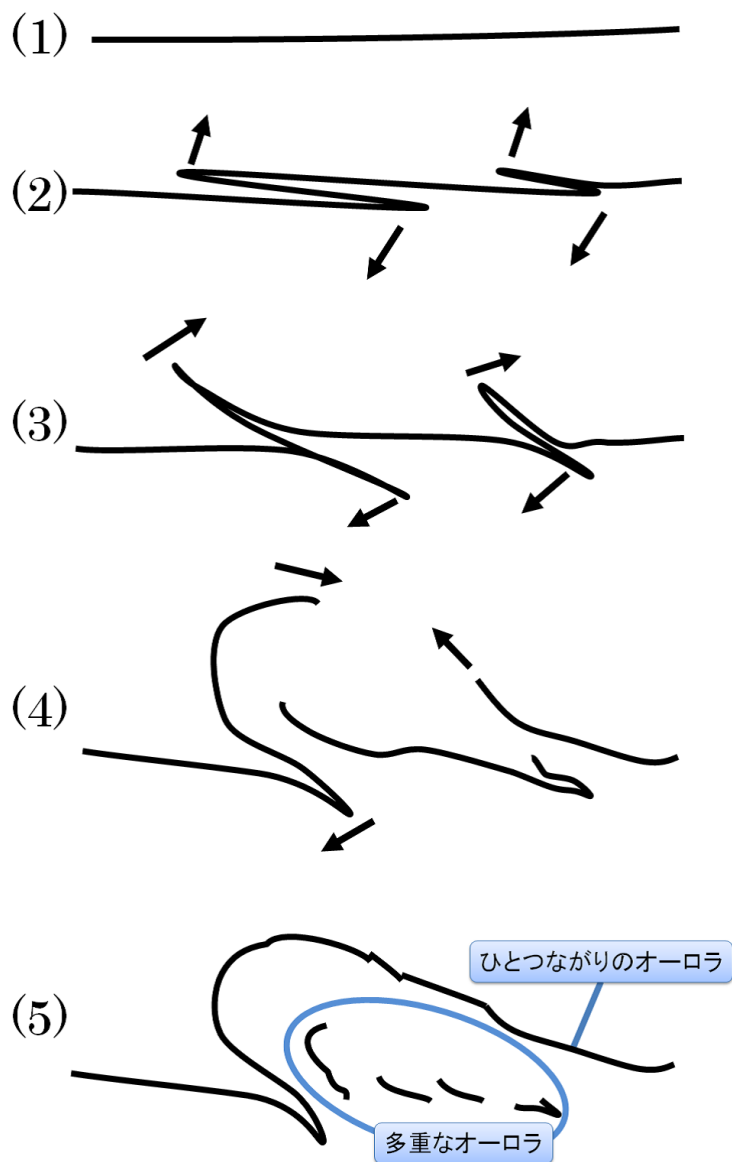


図 2.7: ディスコネクション，リコネクションが発生する過程

スプリッティング，シアー，ひだの回転，ディスコネクション，リコネクションによるオーロラの発達過程では，オーロラ全体は段階的に高緯度側，および西側に広がってゆく。

次に，オーロラと電流の関係について説明する．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言える。オーロラと電流は常に密接に関わっており、オーロラ活動に伴ってオーロラ中に電流が流れる。

オーロラ活動域の西側高緯度寄りの境界域に強い上向き電流が存在し、東側低緯度より下向き電流が卓越する。東側から流入し、西側から流出する電流は磁気圏起源であり、低緯度側から流入して高緯度側へ流出するのは電離層起源の電流である。また、西側から流出する磁気圏起源の電流は負の電位に対応しており、低緯度側から流入する電流は電離層起源の負の電位に対応している。

サージや、バルジなどの大きなサイズでは発生する電流も大きいため特徴的な電流系として測定できるが、小さいサイズのオーロラの場合には、小さな電流系となるため電流分布を推定することは難しい。しかし、S-fractal manifold オーロラの活動がサイズによらず相似的に共通の振る舞いを示すことから、レイや、フォールドといった小さいサイズのオーロラにも大きいサイズと相似の構造、および電流が存在する可能性がある。大きなサイズの電流系とは小さなサイズの電流系の総和として考えることができる [10]。

オーロラは大気の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。

## 第 3 章

### 3DCG を用いたオーロラの表現手法

### 3.1 手法の概要

本手法の流れは、大きく2つの段階に分かれている。第1段階では、オーロラの分布や動き方に関する表現を行い、第2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。また、第1段階では2つのアプローチを行った。

本章では、第3.2節で第1段階の1つ目のアプローチである荷電粒子群と電場を用いたオーロラの運動を表現する手法を述べ、第3.3節で第1段階の2つ目のアプローチであるひだ構造と電流を用いたオーロラの運動を表現する手法を述べ、第3.4節で第2段階の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述べる。

### 3.2 荷電粒子群と電場を用いた運動表現手法

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。荷電粒子を2次元平面上に配置し、その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 [7] [10]。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、本手法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擬似的な分布から求めた。

第3.2.1項では、荷電粒子の初期分布を決定する手法を述べ、第3.2.2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。

### 3.2.1 荷電粒子の初期分布

まず、第1段階にてオーロラの形状を表すための曲線(以下、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 3.1 は荷電粒子を配置するための手順を表している。

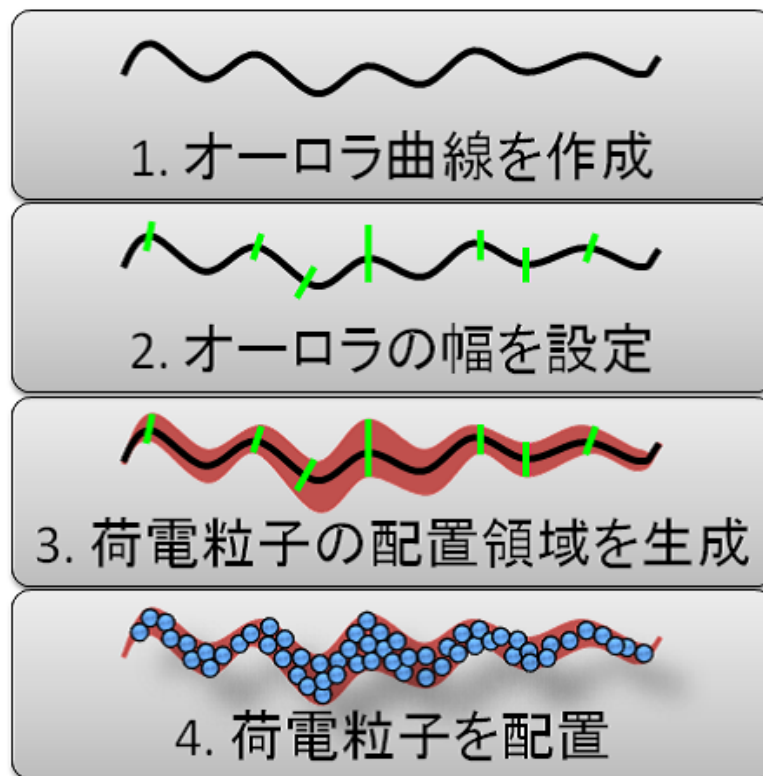


図 3.1: 荷電粒子の配置手順

荷電粒子の初期分布を生成するために、自由変形が可能な Bézier 曲線 [21] 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 (3.1) で表すことができる。

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

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 [21],  $\mathbf{Q}_i$  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で求めた。

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 (3.2) で表した。

$$W(t) = \begin{cases} L_0 & k = 1 \\ (1-p)L_q + pL_{q+1} & k \neq 1, 0 \leq t < 1 \\ L_{k-1} & k \neq 1, t = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

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,  $q = [tk]$ ,  $p = tk - q$  とし,  $[tk]$  とは  $tk$  の整数部分である。

式 (3.1) と式 (3.2) から求まる領域内の位置ベクトル  $\mathbf{A}(t, w)$  を次の式 (3.3) で

示す.

$$\mathbf{A}(t, w) = \mathbf{R}(t) + wW(t)\mathbf{N}_b(t) \quad (3.3)$$

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 (3.3) 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.

### 3.2.2 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 [22] から微小時間  $\Delta t$  秒後の荷電粒子の位置  $\mathbf{P}$  を次の式 (3.4) で示す.

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{v}_0\Delta t + \frac{1}{2} \frac{\mathbf{F}}{m_e} \Delta t^2 \quad (3.4)$$

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 (3.5) で示すことができる.

$$\mathbf{F} = q_0(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3.5)$$

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  $\phi$  の勾配  $\nabla$  を計算することにより求まるので、電場  $\mathbf{E}$  を次の式 (3.12) で示す。

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (3.6)$$

真空の誘電率  $\varepsilon_0$ 、電位  $\phi$ 、電荷密度  $\rho$  から、楕円型の偏微分方程式である 2次元の Poisson 方程式 [23] [24] は次の式 (3.7) で表すことができる。また、 $\nabla^2$  はラプラシアンである。

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

微小面積  $\Delta S$  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  $\rho$  を次の式 (3.8) で示す。

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

次に、Poisson 方程式を解き電位  $\phi$  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  $\phi$  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 [24] とし、端の格子の電位  $\phi = 0$  と設定する。Gauss-Seidel 法 [25] を用いて電位  $\phi$  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  $\Delta d$  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 [24] 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 (3.9)、式 (3.10) に示す。

$$\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\right) \approx \frac{\phi(i+1, j) - 2\phi(i, j) + \phi(i-1, j)}{(\Delta d)^2} \quad (3.9)$$

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

式 (3.7)、式 (3.9)、式 (3.10) から格子点  $(i, j)$  における電位  $\phi(i, j)$  を次の式 (3.11) で示す。ここで、周囲の格子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.

$$\phi(i, j) = \frac{1}{4} \left\{ \frac{(\Delta d)^2 \rho}{\varepsilon_0} + p(i, j) \right\} \quad (3.11)$$

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 [24] をとり、格子点  $(i, j)$  における電場  $\mathbf{E}(i, j)$  を求めた. 電場  $\mathbf{E}(i, j)$  を式 (3.12) に示す.

$$\mathbf{E}(i, j) = \left( -\frac{\phi(i+1, j) - \phi(i-1, j)}{2\Delta d}, 0, -\frac{\phi(i, j+1) - \phi(i, j-1)}{2\Delta d} \right) \quad (3.12)$$

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  $\phi$  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  $\phi$  を求める領域である正方形の 1 辺の長さ  $h$  を次の式 (3.13) で示す.

$$h = \begin{cases} u(x_1 - x_0) & x_1 - x_0 \geq z_1 - z_0 \\ u(z_1 - z_0) & x_1 - x_0 < z_1 - z_0 \end{cases} \quad (3.13)$$

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  $\phi$  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  $\Delta d$  を次の式 (3.14) によって求めた.

$$\Delta d = \frac{h}{a} \quad (3.14)$$

また、本手法では、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。

### 3.3 ひだ構造と電流を用いた運動表現手法

本手法では、電離層上部の2次元平面において磁気圏起源の電流と、電離層起源の電流からひだの一部にかかる斥力を計算しオーロラのスプリッティング、シアーという運動を再現する。さらに、電場からオーロラのひだの回転運動を再現し、そのうえで、磁気圏起源の電流と電離層起源の電流からひだの一部にかかる引力を計算し、ディスコネクション、リコネクションという運動を再現する。

第3.3.1項でオーロラ分布や、運動を計算する領域について述べ、第3.3.2項でオーロラの発生初期段階から起こるスプリッティングや、シアーを再現する手法を述べ、第3.3.3項でひだの回転運動を再現する手法を述べ、第3.3.4項でオーロラに複数のS字構造が発達することで発生するディスコネクション、リコネクションを再現する手法に述べる。

#### 3.3.1 オーロラの分布表現

本手法では、オーロラの分布や、その変化を電離層の高さ方向を無視した2次元平面上にて考える。オーロラの分布に関して複数の点列で構成する折れ線として近似することで、各点列にかかる力を計算しスプリッティングや、シアーや、ひだの回転運動を再現する。また、点列の接続状態を条件によって変更することで、ディスコネクション、リコネクションを再現する。オーロラの分布を表す点列中の点には、オーロラのひだ構造を表現するために2つの種類を設けた。1つ目は、オーロラのひだを構成する端点として電流からかかる力で運動する点であり、2つ目は、ひだの周囲で運動する点にかかる力の補間によって運動する点である。一

定間隔ごとに電流によりかかる力で運動する点を生成し、その各点の間に補間で運動する点を生成した。また、オーロラの運動を電離層上部の電流の働きと想定して表現するために、上向き電流の流れる点と下向き電流が流れる点を1つのペアとして考え、電流からかかる力によって運動する各点には、磁気圏起源の電子が電離層に入射することで発生する上向き電流と、電離層起源の電子が磁気圏に入射することで発生する下向き電流を交互に設定した。このようにひだの構造をモデル化した。

### 3.3.2 スプリットティング、シアアの表現

スプリットティング、シアアの運動を表現するために、その運動が発生する主因を電流により生じる磁場と想定し、ひだ構造の各点に流れる電流からアンペール力を求める。

ひだの構造モデルに設定する電流は、地球の磁場に沿って平行に流れる電流で、電流の向きは逆であるため、2点間の電流によって各点には互いにアンペール力による斥力が働く。アンペール力が働くことで、ひだが引っ張られるようにして広がっていく動きを再現する。

現れる運動がシアアか、スプリットティングかどうかは、ひだの各点間をオーロラにそった方向の成分と、垂直な成分に分離し距離を比較することで分かる。オーロラにそった方向の成分が卓越していると運動もオーロラにそったものとなり、オーロラの運動としてはシアアと対応する。オーロラに垂直な成分が卓越していると運動もオーロラに垂直なものとなり、オーロラの運動としてはスプリットティングと対応する。

真空の透磁率を  $\mu_0$  1点目の電流を  $I_1$ 、2点目の電流を  $I_2$ 、2点間の距離を  $r$ 、電流が流れる長さ  $l$  にかかるアンペール力の大きさを、次の式 (3.15) で示す。

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r} \quad (3.15)$$

ここで、本手法では電離層の高さ方向を無視したので、電流が通る長さ  $l$  は、実際

の電離層が存在する高度 80km から 500km に対して十分小さな値として 1m とした。また、アンペール力の向きは、アンペール力の発生元である点からアンペール力が働く相手の点の方向である。

### 3.3.3 ひだの回転運動の表現

ひだの回転運動を、地球の磁場に垂直な電場と、現在の速度、地球の磁場から求めたローレンツ力により再現する。ここで、アンペール力とローレンツ力は互いに根本的には同じ力ではあるが、スプリットティング、シアアの表現法と、ひだの回転運動の手法において求まる運動は異なる。それは、スプリットティング、シアアの表現法では各点に流れる磁場に沿った電流と、各点の平行電流によって発生する磁場の作用によって生じる力であるのに対して、ひだの回転運動の手法では地球の磁場に垂直な電場と、現在の速度、地球の磁場の作用によって生じるからである。

電荷素量を  $q_0$ 、地球の磁場を  $\mathbf{B}$ 、ひだの構造モデルの各点における現在の速度を  $\mathbf{v}$ 、地球の磁場に垂直な電場を  $\mathbf{E}$  としたとき、ひだの各点にかかるローレンツ力を式 (3.16) で示す。

$$\mathbf{F} = q_0(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3.16)$$

### 3.3.4 ディスコネクション、リコネクションの表現

本手法では、高緯度側に存在するひだの端を構成する点同士には同じ向きの平行電流が流れているため、アンペール力によって互いに引き合う引力が発生する。本研究では、高緯度側に存在する同じ向きの平行電流による引力の大きさと、高緯度側の点と低緯度側で接続している点における逆向きの平行電流による斥力の大きさを比べ、高緯度側の点同士の引力が強くなった場合、点列の接続関係を変更する。高緯度側と低緯度側で接続していたひだの接続関係がなくなることがディ



スコネクションに相当し、高緯度側の点同士で新しい接続関係を持つことがリコネクションに相当する。

### 3.4 物理的な発光過程のレンダリング手法

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 [7] 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、本手法ではオーロラの物理的な発光過程を考慮した米山ら [12] 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。

第 3.4.1 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、第 3.4.2 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。第 3.4.3 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。

#### 3.4.1 荷電粒子の落下・衝突

第 3.2 節や、第 3.3 節で求めた平面上の荷電粒子が降り込む位置に対し、 $y$  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そ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、高層大気の密度分布 [26] 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。

ここで、本研究の荷電粒子の落下表現手法では、オーロラの持つシート状の分布を表現する上で視覚的によく合致するため、磁場に沿った落下運動によって荷電粒子の軌跡は完全に直線となる近似を用いた。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  $\tilde{\mathbf{P}}_0$  としたとき、衝突判定位置  $\tilde{\mathbf{P}}$  を次の式 (3.17) に示す。

$$\tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{P}}_0 + v \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} \Delta \tilde{t} \quad (3.17)$$

荷電粒子の落下による大気粒子との衝突は、オーロラの分布変化よりも短い時間間隔で起きる現象であるため、 $\Delta \tilde{t}$  はローレンツ力を求める際の  $\Delta t$  と比較すると  $\Delta \tilde{t} \ll \Delta t$  とする。

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  $\Delta l$ 、高層大気の密度分布 [26] 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、 $\Delta l$  法 [27] から衝突確率  $P_1$  は次の式 (3.18) で示すことができる。

$$P_1 = n\pi r^2 \Delta l \quad (3.18)$$

### 3.4.2 大気粒子の発光

大気粒子の衝突位置と、高層大気の分布 [28] 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 [7] 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 [29] 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、 $\Delta t$  法 [27] から消光する確率  $P_2$  は次の式 (3.19) で表すことができる。

$$P_2 = 1 - \exp\left(-\sqrt{2}n\pi r^2 v_m t\right) \quad (3.19)$$

ここで、大気粒子の速度  $v_m$  はマクスウェル分布 [29] に従う。

### 3.4.3 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 [30] [31]。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 (3.20) で示す。

$$c = \exp(-(dg)^2) \quad (3.20)$$

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 [32] 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  $\sigma$  としたとき、ガウシアンフィルタを次の式 (3.21) で示す。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.21)$$

今回、フィルタのサイズ、標準偏差  $\sigma$  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 [33]。波長  $\lambda$ 、分光エネルギー分布  $L(\lambda)$  から、三刺激値  $X, Y, Z$  を次の式 (3.22) で示す。

$$\begin{aligned} X &= k \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda)L(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda)L(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda)L(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3.22)$$

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、本手法では分光エネルギー分布  $L(\lambda)$  に光の強さを利用した。

式 (3.22) で求めた  $X, Y, Z$  から変換した  $R, G, B$  値を, 次の式 (3.23) で示す [34].

$$\begin{aligned} R &= 255 \left( \frac{3.5060X - 1.7398Y - 0.5441Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \\ G &= 255 \left( \frac{-1.0690X + 1.9778Y + 0.0352Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \\ B &= 255 \left( \frac{0.0563X - 0.1970Y + 1.0500Z}{100} \right)^{\frac{1}{2.2}} \end{aligned} \quad (3.23)$$

# 第 4 章

## 検証

## 4.1 オーロラの運動表現の検証

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 [31] 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 4.1 の通りである。

表 4.1: 実行環境

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

まず、荷電粒子群と電場を用いたオーロラ運動表現の検証を行う。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、 $\Delta t$  を 0.0333、 $\Delta \tilde{t}$  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 4.1 に示す。

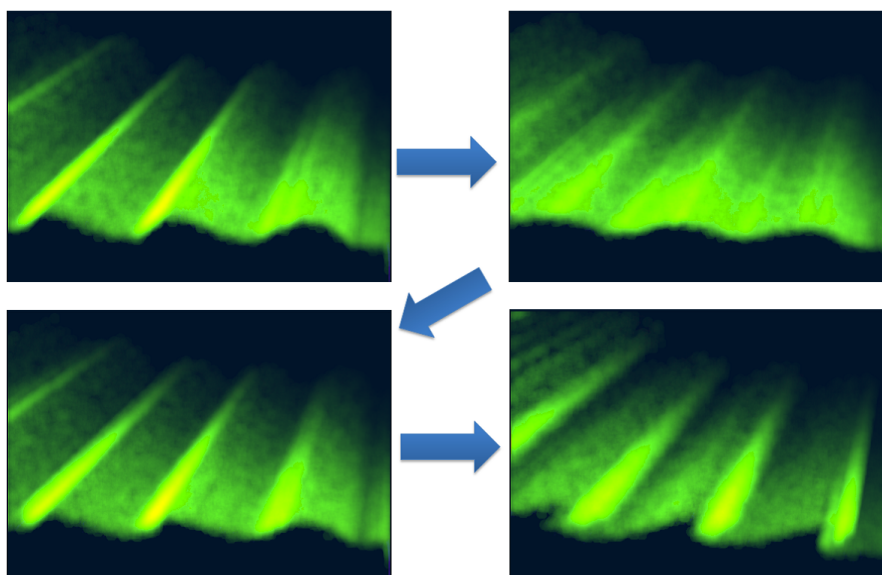


図 4.1: カーテン型オーロラの生成結果

図 4.1 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 4.2 に示す。

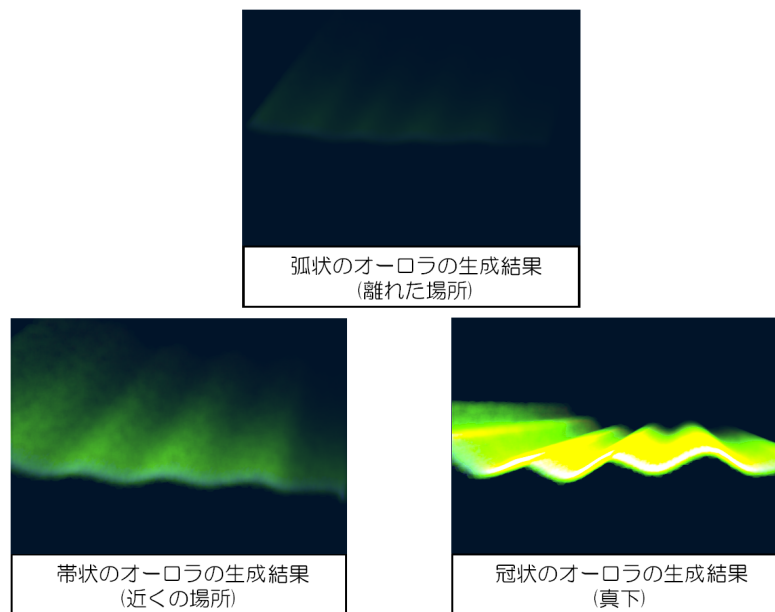


図 4.2: 観測位置の異なるオーロラの生成結果

多重に出現しているオーロラの生成結果を図 4.3 に示す。

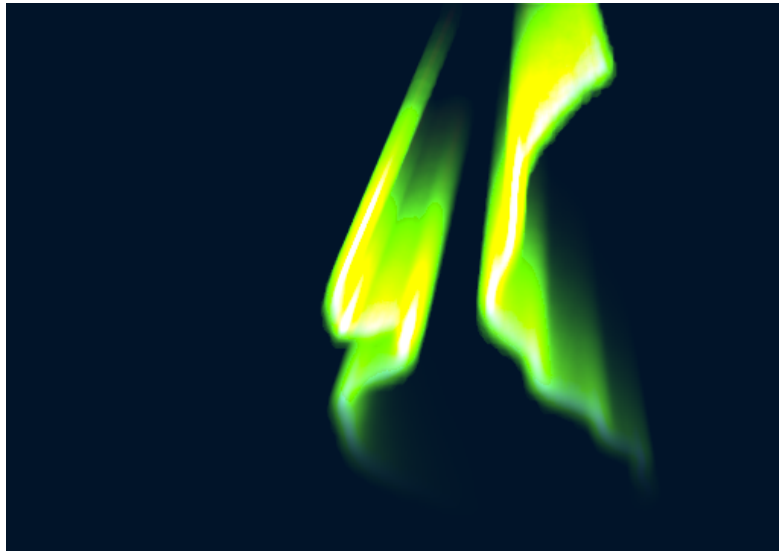


図 4.3: 多重なオーロラの生成結果

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。1フレーム毎の平均生成時間は約5分であった。なお、図 4.1, 図 4.2, 図 4.3 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。

また、図 4.1, 図 4.2, 図 4.3 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 4.2 に示す。

表 4.2: 図 4.1, 図 4.2, 図 4.3 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	$\sigma$	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、渦状オーロラの生成結果を図 4.4 に示す。



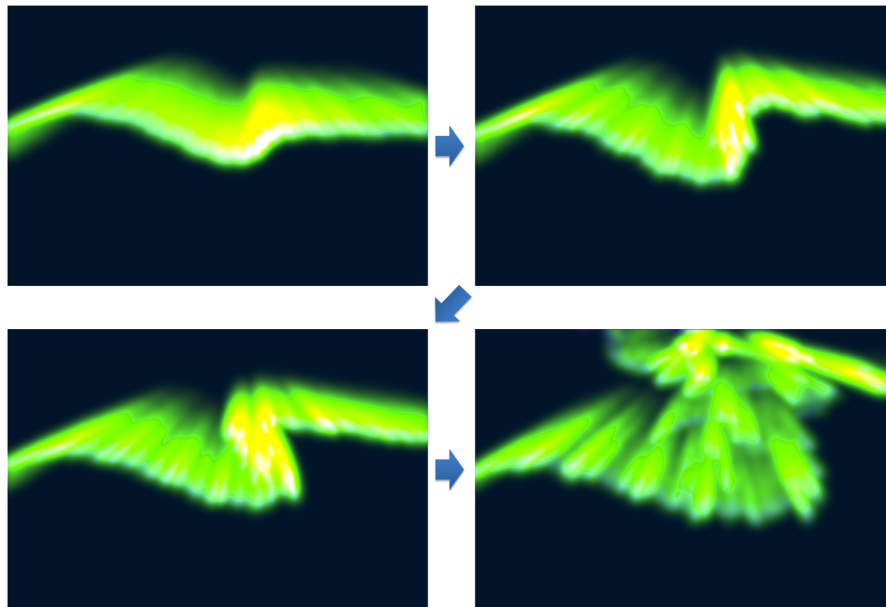


図 4.4: 渦状オーロラの生成結果

1 フレーム毎の平均生成時間は約 15 分であった。ひだが回転して渦状のオーロラを形成する様子が確認できる。図 4.4 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。

また、図 4.4 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 4.3 に示す。

表 4.3: 図 4.4 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	$\sigma$	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 4.5, 図 4.6, 図 4.7 に示す。

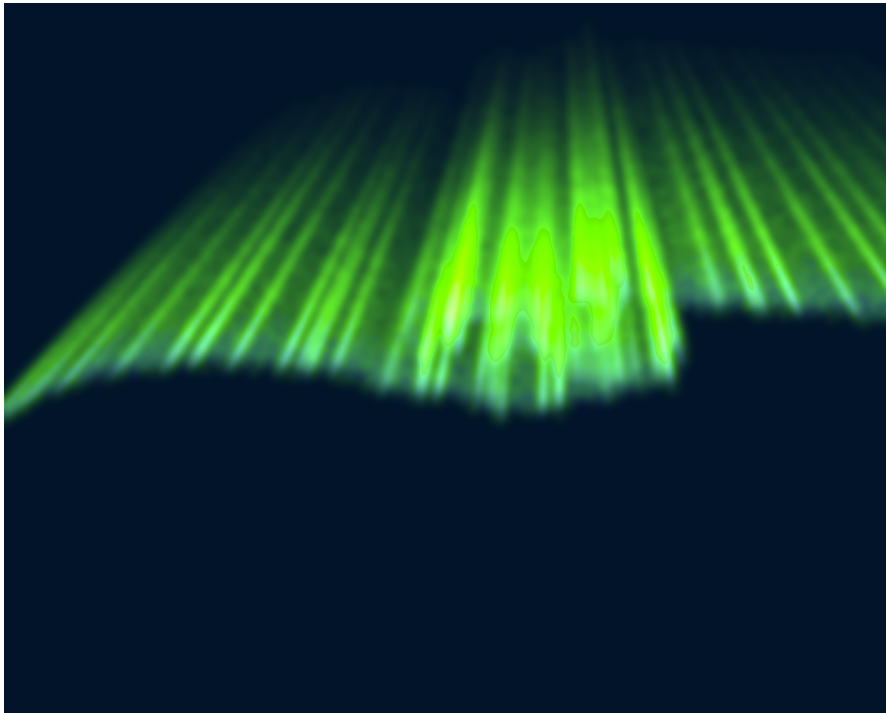


図 4.5: 全体が緑色のオーロラの生成結果

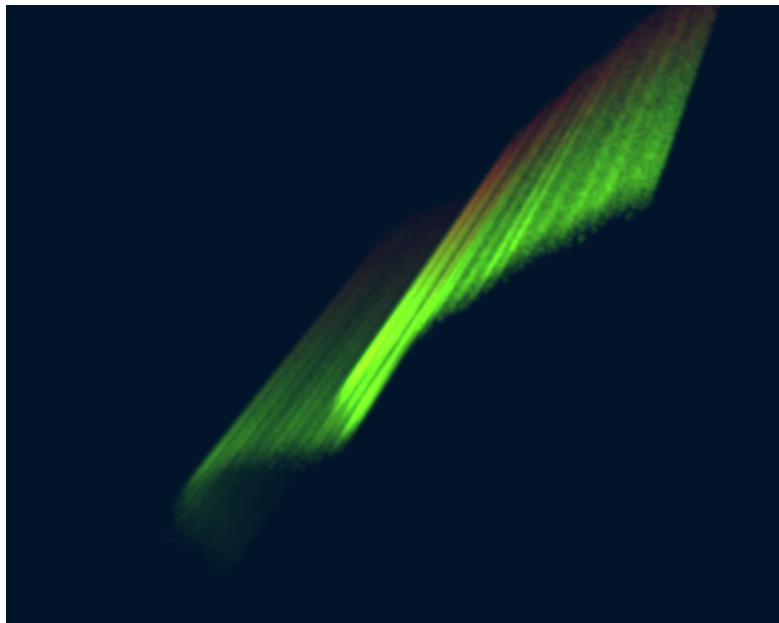


図 4.6: 上部が赤色で下部が緑色のオーロラの生成結果

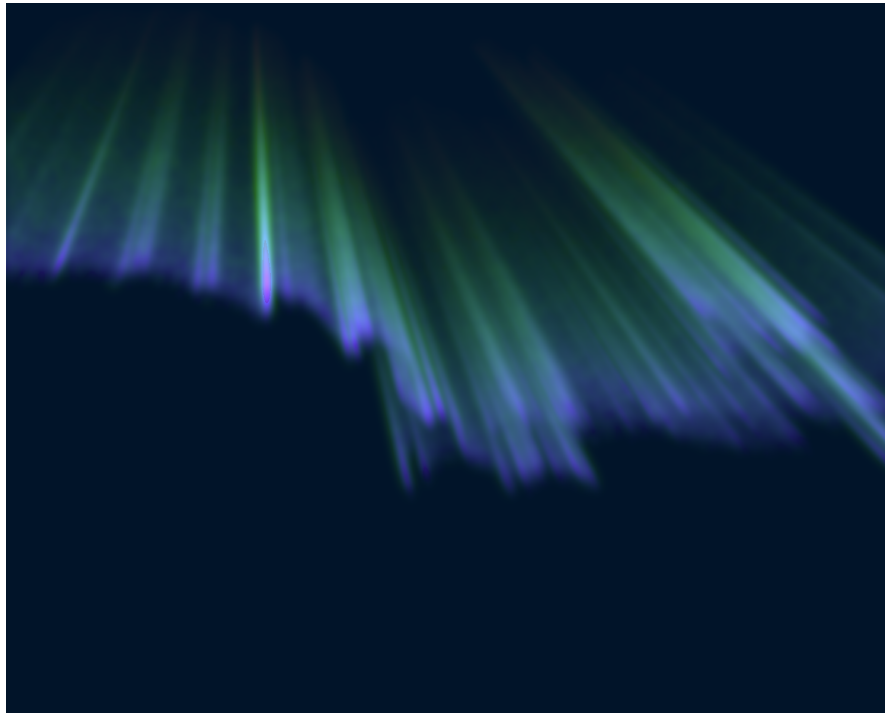


図 4.7: 緑色と青色のオーロラの生成結果

1 フレーム毎の平均生成時間は約 30 分であった。図 4.5, 図 4.6, 図 4.7 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。

また, 図 4.5 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 4.4 に示す。

表 4.4: 図 4.5 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	$\sigma$	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 4.6 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 4.5 に示す。

表 4.5: 図 4.6 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	$\sigma$	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 4.7 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 4.6 に示す.

表 4.6: 図 4.7 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	$\sigma$	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 [35] と合成した結果を図 4.8 に示す.



図 4.8: 星空の写真と合成した結果

1 フレーム毎の平均生成時間は約5分であった。図 4.8 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 60,000 個とした。

また、図 4.8 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 4.7 に示す。

表 4.7: 図 4.8 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	$\sigma$	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

次に、ひだ構造と電流を用いたオーロラ運動表現の検証を行う。ビジュアルシミュレーションを行った際のスクリーンサイズは横幅 720px, 縦幅 480px, ひだ構造の点列の最大個数は 1,000 個とした。

カーテン状のオーロラにひだが揺らめく様子の生成結果を図 4.9 に示す。

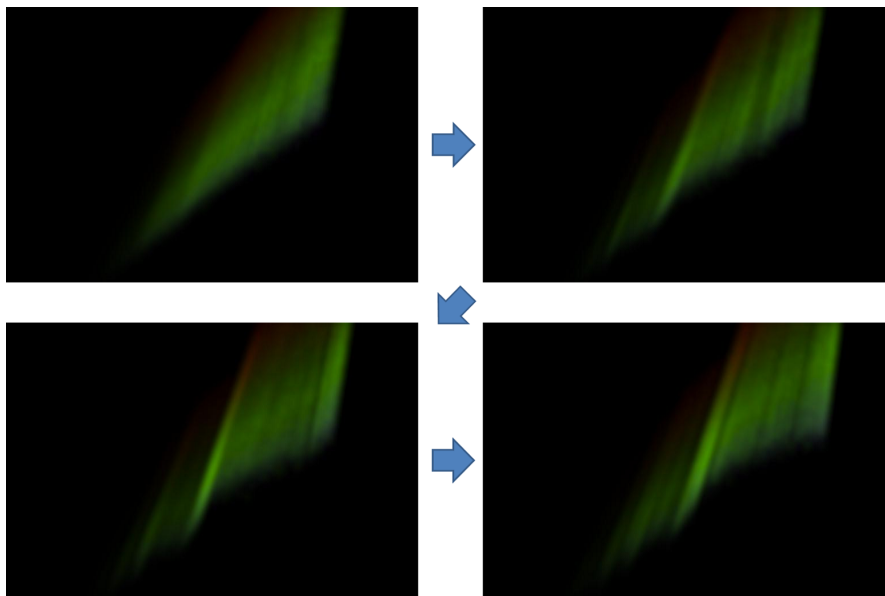


図 4.9: カーテン状のオーロラにひだが揺らめく様子の生成結果

図 4.9 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いる。

カーテン状のオーロラのひだが分断によって千切れ、多重なオーロラを形成する様子を図 4.10 に示す。

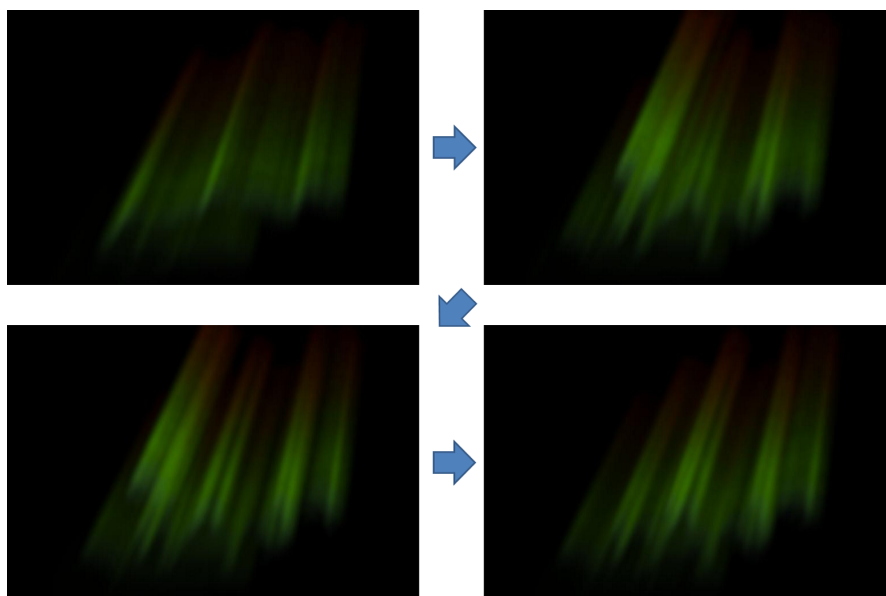


図 4.10: ひだが分断し多重なオーロラを形成する様子

オーロラのひだの1部分が分断により消滅し、再接続によりひとつながりのオーロラを形成する様子を図 4.11 に示す。

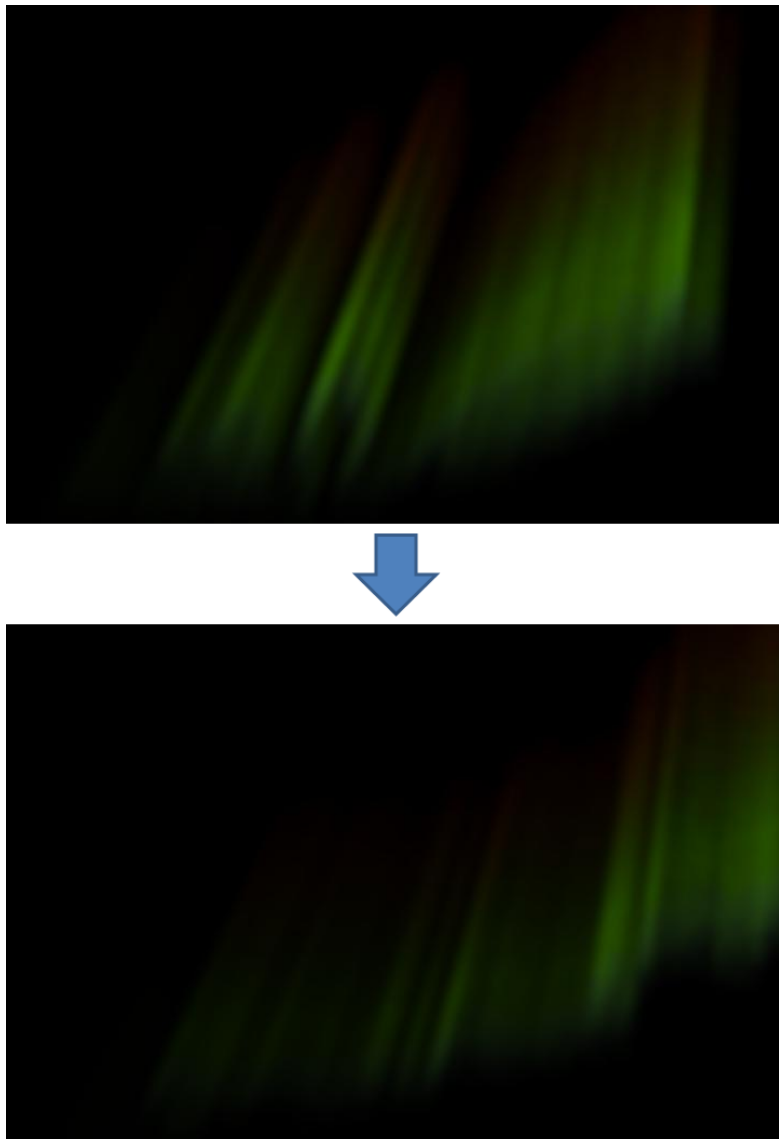


図 4.11: ひとつながりのオーロラを形成する様子

1 フレーム毎の平均生成時間は約 15 分であった。また、図 4.9, 図 4.10, 図 4.11 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以下の表 4.8 に示す。

表 4.8: 図 4.9, 図 4.10, 図 4.11 の波長ごとのパラメータ値

波長	発光の強度	$\sigma$	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



# 第 5 章

## 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、S字型構造の発達・消滅過程の動特性に基づいたオーロラ動画の自動生成を行った。第 3.2 節の手法では、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、スプリッティングや、シアー、ひだの回転運動という基本的な運動を再現し、本研究ではカーテン状のオーロラが揺らめく様子や、渦状のオーロラを表現できた。また、第 3.3 節の手法では、シアー、スプリッティングやひだの回転運動といった基本運動に合わせ、オーロラに複数の S 字構造が発達することで発生するディスコネクション、リコネクションを再現し、多重なオーロラや、ひとつながりのオーロラが出現する様子を表現できた。第 3.4 節の手法では、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。第 3.2 節の手法で、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、第 3.4 節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。また、オーロラの動画を生成する際に画像 1 枚を生成する処理には時間がかかり結果画像をすぐに確認できない。物理的な発光過程のレンダリング手法において、実際のオーロラに近い発光具合を得るためには、荷電粒子の落下シミュレーションに用いる微小時間  $\Delta \tilde{t}$  に小さい値を設定する必要がある。しかし、微小時間  $\Delta \tilde{t}$  を小さい値にすることで衝突判定回数が増加し、全処理の中でも荷電粒子の落下シミュレーションがもっとも処理時間がかかる要因となった。また、荷電粒子の個数に比例して処理時間が増加することも分かった。それは、本研究の手法では、荷電粒子の運動計算や、荷電粒子の落下計算、荷電粒子と大気粒子の衝突計算といった荷電粒

子に関わる処理が多いためである。

今後の展望に関して、第 3.2 節の手法で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。しかしながら、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、シミュレーションの前ステップ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、第 3.4 節のレンダリング手法では、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ことが期待できる。また、本手法ではグラフィ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、オーロラのビジュアルシミュレーションとして発展するだろう。

なお、本研究は、第 10 回 NICOGRAPH 春季大会において“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 [36]”として発表した内容、第 27 回 NICOGRAPH 秋季大会において“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 [37]”として講演した内容、SIGGRAPH ASIA 2011 において“Visual simulation of aurora movement [38]”として発表した内容、情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会 第 148 回研究発表会において“S 字型構造の発達・消滅家庭の動特性に基づいたオーロラ動画像の自動生成の検討 [39]”として発表した内容を含む。

# 謝辭

本研究を締めくくるにあたり，研究生活を見守って下さり，日常生活から研究方針，論文執筆，学会発表の準備等，多大なご指導とご協力を頂きました多くの方への感謝の意を表します。

## 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] 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.
- [3] 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/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム*, No. 15, pp. 106–111, 2011.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] henriluoma. Aurora Borealis in Lapland, Finland pt. 2. <http://www.flickr.com/photos/henriluoma/6999562865/in/pool-northernlight/>.
- [7] 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.
- [8] ニール・デイビス. 「オーロラ THE AURORA WATCHER'S HANDBOOK」. 地人書館, 1995.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] G. V. G. Baranoski, Jon Rokne, Peter Shirley, Trond Trondsen, Rui Bastos. “Simulating the Aurora”. *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 14, No. 1, pp. 43–59, 2003.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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. “Interactive Volume Rendering Aurora on the GPU”. *Journal of WSCG*, Vol. 19, p. H41, 2011.
- [18] “*Modeling of Aurora Borealis using the Observed 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] Hiroshi Miyaoka. SYOWA DMSP Satellite Downlink Data. <http://polaris.nipr.ac.jp/~dmsp/>.
- [21] 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.
- [22] 戸田 盛和. 「力学 (物理入門コース1)」. 岩波書店, 1982.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] NASA, Robert McGuire. MSIS-E-90 Atmosphere Model. [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis\\_vitmo.html/](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html/).
- [29] 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.
- [30] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines. 「リアルタイムレンダリング第2版 REAL-TIME RENDERING Second Edition」. ボーンデジタル, 1991.
- [31] Fine Kernel Project. Fine kernel tool kit system. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.
- [32] Gabriele Lohmann. 「3次元画像処理 Volumetric Image Analysis」. ボーンデジタル, 2009.

- [33] 千々岩 英彰. 「色彩学概説」. 東京大学出版会, 2001.
- [34] 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.
- [35] 日光 可可. 星空 — Flickr - Photo Sharing! <http://www.flickr.com/photos/38600185@N07/3632817904/in/photostream/>.
- [36] 小島 啓史, 竹内 亮太, 渡辺 大地. “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”. 第10回 NICOGRAPH 春季大会 ポスターセッション, pp. 150–151, 2011.
- [37] 小島 啓史, 竹内 亮太, 渡辺 大地, 三上 浩司. “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”. 第27回 NICOGRAPH 論文コンテスト 論文集, pp. 89–96, 2011.
- [38] Takafumi Kojima, Ryota Takeuchi, Soji Yamakawa, Taichi Watanabe, Koji Mikami. “Visual Simulation of Aurora Movement”. In *SIGGRAPH Asia 2011 Posters*, SA '11, pp. 44:1–44:1, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [39] 小島啓史, 柿本正憲, 渡辺大地, 石川知一, 竹内亮太, 三上浩司,. “S字型構造の発達・消滅家庭の動特性に基づいたオーロラ動画像の自動生成の検討”. 情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会 No.148, 2012.