

# 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の検討

小島 啓史<sup>1,a)</sup> 柿本 正憲<sup>2</sup> 渡辺 大地<sup>2</sup> 石川 知一<sup>2</sup> 竹内 亮太<sup>2</sup> 三上 浩司<sup>2</sup>

概要：3次元CGによりオーロラ現象を再現する研究は多く行われている。しかしながら、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）を表現することはできていない。本研究では、CGを用いてオーロラを再現した動画像の生成を目的とし、オーロラのスプリッティング、シアー、ひだの回転運動といった基本的な運動を分析し、ディスコネクション、リコネクションという複雑な運動を擬似的に再現する手法を提案する。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することで、ひとつながりの状態から多重に分離し、一部が消滅してまたひとつながりになる様子の動画像生成手法を検討する。

キーワード：オーロラ，磁気圏，電離層，電磁場

## Analysis of S-shaped structure toward automatic motion picture generation of aurora based on dynamic characteristics of the growth and extinction processes

KOJIMA TAKAFUMI<sup>1,a)</sup> KAKIMOTO MASANORI<sup>2</sup> WATANABE TAICHI<sup>2</sup> ISHIKAWA TOMOKAZU<sup>2</sup>  
TAKEUCHI RYOTA<sup>2</sup> MIKAMI KOJI<sup>2</sup>

**Abstract:** 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. 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.

**Keywords:** Aurora, Magnetosphere, Ionosphere, Electromagnetic Field

### 1. はじめに

3次元コンピュータグラフィクス（以下、3DCG）による自然景観の可視化は、稲妻 [1]、虹 [2]、屋気楼 [3]、雲 [4] と

いった様々な現象を対象とする重要な研究分野の1つである。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。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。

また、メカニズムが科学的にいままで解明できていない

<sup>1</sup> 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  
Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences,  
Tokyo University of Technology  
<sup>2</sup> 東京工科大学メディア学部  
School of Media Science, Tokyo University of Technology  
a) kojima.takafumi0@gmail.com

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たりするような動きにより、またひとつ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解明できていないものの1つである。この場合、オーロラの動特性を考慮した疑似的なモデルを構築することで視覚的印象が類似した動画像を生成できる。

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、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、実際のオーロラに視覚的印象を近づけるために、オーロラが分断したり接続したりするような複雑な様子を再現することを目的として、オーロラの物理的な特性を加味し、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う。

本研究では、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手法を提案する。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模擬することにより、オーロラがひとつつながりになっている様子や多重に分かれる様子の動画像を生成し検討する。

## 2. オーロラ現象と関連研究

本節では、2.1でオーロラ現象について説明し、2.2で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で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である。

本研究では小口 [8] によるオーロラの構造や動特性による分類に従い、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 オーロラは構造として基本的に一連のシートであり、明るさを増した活動部分の変形のときに磁場の向きに見てS字の形を

とる。

磁場の向きに見てS字を形成したオーロラを図1を示す。ここで、図1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1以降のオーロラの模式図に関しても同様とする。



図1 S字を形成したオーロラの模式図

また、S-fractal manifold オーロラはサージと言う大きな構造から、レイと言う小さな構造まで全て相似的な形となり、全体でフラクタルカーブを形成している。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1に示す。

表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	1-several km	0.1-1 sec
フォールド	several tens km	1-10 sec
サージ	several hundred km	1-2 min
バルジ	1000-2000km	several min

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、測定の高さから観測によってこの関係を確かめられてはいない。

S-fractal manifold オーロラの基本的な運動として、スプリッティング、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、その明るい部分が縦にわけ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。スプリッティングの過程を図2に、シアーの過程を図3に示す。

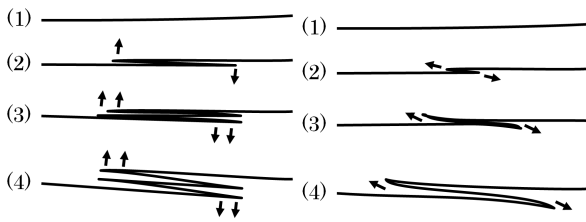


図 2 スプリットングの過程

図 3 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 4 に示す。

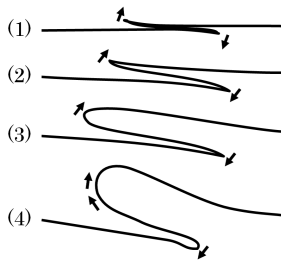


図 4 ひだの回転運動

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。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し、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し、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 5 に示す。

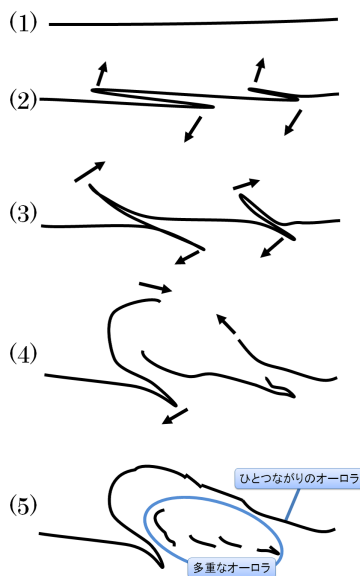


図 5 ディスコネクション、リコネクションが発生する過程

スプリットング、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、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 [8]。

## 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、オーロラの静止画生成の研究として、井上ら [9] 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 [10] 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 [11] 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、ディスコネクション、リコネクションは再現できない。

次に、オーロラの動画生成の研究として、Baranoskiら [12] 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 [13] 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。

ほかにも、Lawlorら [14] 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。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、ディスコネクション、リコネクションは再現できない。

石川ら [15][16] 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、ディスコネクション、リコネクションは再現できない。

### 2.3 本研究の位置付け

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、電離層上部における磁気圏起源の電流と、電離層起源の電流から、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する手法を提案する。

既存研究では、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形状を再現できる。しかし、実際のオーロラではそれらの運動だけではなく、スプリッティングや、シアー、ひだの回転運動といった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。

本研究ではS字型構造の元となる折りたたんだひだについて磁場にそった電流を踏まえうえで、電流にかかる力によってS字型構造に発展する構造モデルを構築した。この構造モデルを用いて、シアー、スプリッティング、ひだ

の回転運動といった基本運動に合わせ、ディスコネクション、リコネクションという複雑な運動の再現を行う。このようなオーロラのS字型構造の発達・消滅過程に基づいた運動を再現することで、オーロラがひとつながりの状態や多重に分かれる様子の動画像の生成を検討する。

### 3. オーロラ動特性に基づいたオーロラの運動再現手法

本章では、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の運動を再現する手法を述べる。

#### 3.1 オーロラの形状の表現方法

まず、オーロラの形状や運動を計算する領域について述べる。本研究では、電離層の高さ方向を無視した2次元平面上にて、2次元のオーロラの断面形状や、オーロラの変形を計算する、オーロラの3次元形状が必要な場合には、2次元のオーロラの形状を地球の磁場にそって鉛直に引き延ばすことで求める。

オーロラの形状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、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。この点を設定する段階では、2つで1つのペアとして生成するが、各点列にかかる力は全ての点列を踏まえうえで計算する。また、1つのペアはS字型構造の元となる折りたたまれたひだの両端として、地球の磁場にそった電流Iが流れる位置と対応している。

2次元平面におけるx軸方向を東、y軸方向を高緯度とした際に、東西に延びるオーロラに折りたたまれたひだが生じた場合のペアの設定は、ペアの1点目は、ひだの中心から西側高緯度側に配置し、ペアの2点目はひだの中心から東側低緯度側に配置する。1点目に流れる電流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し、2点目には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とした。また、2点目の電流の強さは1点目より弱いものとして設定する。このように折りたたまれたひだの構造をモデル化した。

S字型構造を生む折りたたまれたひだと、電流が流れる点のペアの1点目、2点目について図6に示す。

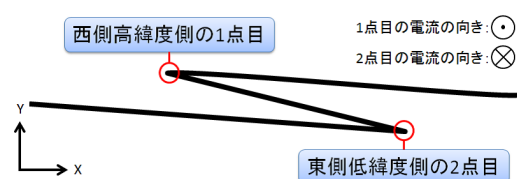


図6 折りたたまれたひだ、電流が流れる点のペア

### 3.2 スプリットング, シアーの表現

次に, オーロラの発生初期段階から起こるスプリットングや, シアーを再現手法を述べる. 電離層上部における荷電粒子の入射位置の変形を考える場合, 磁気圏における電場の遮蔽効果は磁場の遮蔽効果より大きいので, 電場は局部的に閉じ込められやすく, 磁場はより広い範囲に広がる. 荷電粒子の入射が少なく電場が発達していない初期段階からスプリットングや, シアーは発生するため, 本研究では, 電場ではなく電流により生じる磁場が主因の現象だと想定する.

ひだの構造モデルが1つだけ設定してある場合を想定すると, ペアの1点目, 2点目ともに地球の磁場に沿って平行な電流で, 電流の向きは逆であるため, 2点間の電流には互いにアンペール力による斥力が働く. ペアの2点にもアンペール力が働くことで, それまで折りたんでいた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.

現れる運動がシアーか, スプリットングかどうかは, ひだの両端の2点間距離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ーと対応する. 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を次の式 (1) で示す.

$$\mathbf{F} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}_1 \mathbf{I}_2}{2\pi r} l \quad (1)$$

ここで, 本研究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.

### 3.3 ひだの回転運動の表現

次に, ひだの回転運動を再現する手法について説明する. オーロラにひだの回転運動は磁場と電場の影響によるローレンツ力と解釈できる.

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 (2) で示す.

$$\mathbf{F} = q_0(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

ここで, スプリットング, シアーの手法では, 電流によって発生する磁場であるのに対して, ひだの回転運動の手法では, 地球磁場となっているので, 求まる運動は別と

なります.

### 3.4 ディスコネクション, リコネクションの表現

次に, ディスコネクション, リコネクションを再現する手法について説明する. 次に, 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ついて説明する.

本研究では, 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.

### 3.5 レンダリング

最後に, レンダリング手法について説明する. レンダリング手法に関しては, [17] の手法を参考にした. 本研究では, オーロラの形状に関して 2次元上の複数の点列で構成する折れ線として近似した. レンダリングする際には, 元の点列が空間的に離れていることも考慮し, 点列の間に隙間がないように点列を増やした分布を用いる. この電離層上部に存在するオーロラの 2次元上の分布から電離層内部に荷電粒子が振り込むものとして, 荷電粒子と大気粒子の衝突により発生する大気の発光過程のシミュレーションを行い, 大気粒子の発光をディスプレイに射影することで, スクリーン上にオーロラをレンダリングする.

## 4. おわりに

本研究の提案手法によってオーロラの S 字型構造の発達・消滅過程に基づいた運動を模擬することにより, オーロラがひとつつながりになっている様子や多重に分かれる様子の動画像の生成手法を検討した.

今後の予定として, 検討だけでなく提案手法の検証するプログラムを実装し, オーロラがひとつつながりになっている様子や多重に分かれる様子を再現した動画像の生成を行う.

### 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, *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 (2005-01-28).
- [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/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム*, No. 15, pp. 106-111 (2011-6).
- [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] 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編 (2010).
- [9] 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).
- [10] G. V. G. Baranoski, Jon Rokne, Peter Shirley, Trond Trondsen, Rui Bastos: Simulating the aurora, *Visual. Comput. Animat*, pp. 43-59 (2003).
- [11] 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).
- [12] G. V. G. Baranoski, J. Wan: Simulating the Dynamics of Auroral Phenomena, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, pp. 37-59 (2005).
- [13] 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(12), pp. 31-36 (2009).
- [14] Orion Sky Lawlor, Jon Genetti: Interactive Volume Rendering Aurora on the GPU, *Journal of WSCG*, p. H41 (2011).
- [15] Tomokazu Ishikawa, Yonghao Yue, Kei Iwasaki, Yoshinori Dobashi, Tomoyuki Nishita: Modeling of Aurora Borealis Using the Observed Data, *Proc. of SCCG*, pp. 35-38 (2011).
- [16] 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 (2011-6).
- [17] 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).