

# アーティスト制御可能なオーロラシミュレーション -Artist Control for Simulation of Aurora-

関口智大†

藤澤誠†

三河正彦†

Tomohiro SEKIGUCHI†,

Makoto FUJISAWA†

and Masahiko MIKAWA†

†筑波大学 †University of Tsukuba

E-mail: †{sekiguchi, fujis, mikawa}@slis.tsukuba.ac.jp

## 1 はじめに

近年、物理シミュレーションによって生成された自然現象のコンピュータグラフィックス (CG) は、主にゲームや映画といったエンターテインメントコンテンツ等で幅広く利用されている。物理シミュレーションを用いた CG の生成では、クリエイターが望んだ色や形状を得るために、パラメータを細かく調整する必要がある、これが物理シミュレーションの使用を難しくしている。このような細かな調整を自動化するために、ペンなどを用いた直感的な入力に基づき、シミュレーションをインタラクティブに制御する手法の研究が、炎や煙など様々な自然現象に対して行われている [1, 2]。

CG で表現される自然現象の一つとして、極地周辺で観測されるオーロラ現象がある [3]。オーロラ現象は、太陽から放射された荷電粒子が、地球上の大気粒子と衝突することで起こる発光現象が原因であり、電磁場から受けるローレンツ力によって、カーテンが揺らめくような動きをしたり、S 字状や渦状といった形状を形成することが判明している。しかし、このような挙動のメカニズムは未だ完全に解明されていないため、物理的な特性を加味しつつも実際のオーロラとの視覚的な妥当性を追求するビジュアルシミュレーションに関する研究 [4, 5] が多く行われている。これらの手法を用いることで、実際のオーロラのような CG を作成することが可能となるが、クリエイターが望む形状のオーロラアニメーションを作成するためには、複雑なパラメータ設定が必要となる。

本研究では小島らの手法 [4] をベースに、オーロラの形状を制御可能なシミュレーション手法を提案する。オーロラが形状を変化させる原因は、電磁場から受けるローレンツ力であると考えられている。そのため、クリエイターによって指定された形状に近づくような力を発生させる電場分布を生成することで、オーロラアニメーションの形状制御を実現する。またオーロラ現象では、図 1 に示すようにシート状の構造が分断して多重のオーロラになったり、複数のオーロラが結合して一つながりのオーロラを形成するといった、分断と結合現象が発生することがある。電場分布を生成す

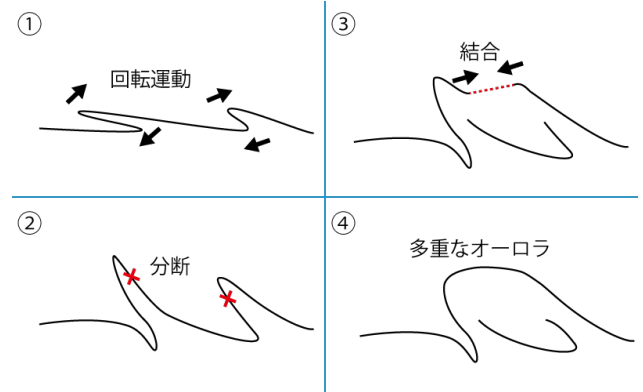


図 1 分断・結合によって多重なオーロラが生成される様子

る際に、オーロラの接続情報も考慮することでこれらの現象を表現する手法も提案する。

## 2 提案手法

### 2.1 全体の流れ

提案手法は、形状を制御するための電場分布を生成する処理と、その電場分布を用いて実際に荷電粒子の運動を計算する処理、位置を更新した荷電粒子を疑似的に落下させ発光シミュレーションを行うレンダリング処理の、3つの処理から構成される。提案手法の全体的な流れを図 2 に示す。なお、本手法では図 3 のように高さとして  $y$  軸を磁場方向にとり、それに垂直な水平面を  $xz$  平面とする。形状制御や運動計算は図 3 赤枠で示された  $xz$  平面上で行う。

最初の電場分布生成処理では、まずクリエイターのマウスドラッグ操作によって、生成したいオーロラの変形前の元形状と変形後の目標形状を指定する。この際、分断・結合現象を考慮するため、オーロラの接続情報も設定する。次に、設定した元形状と目標形状の間の中間目標形状を 3 次のスプライン補間によって生成し、その近傍に荷電粒子を配置する。その後、平面をグリッドセルで分割し、配置された荷電粒子を基に各セルにおける電荷密度を求め、電位・電場分布を反復法によって計算する。ここで、反復法の初期値として中間目標形状の電荷密度の反数を与えることで、中間目標形

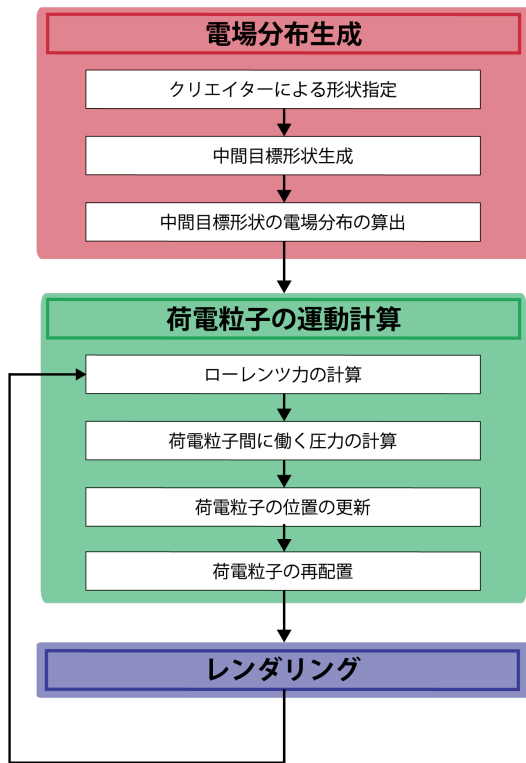


図2 提案手法の流れ

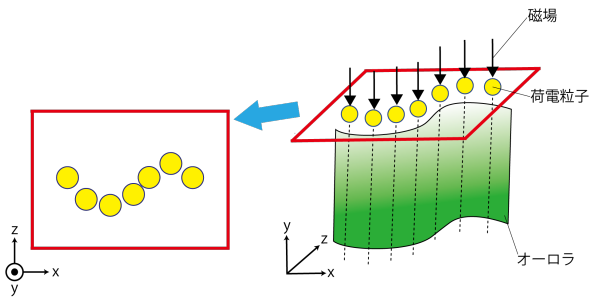


図3 荷電粒子を配置する2次元平面

状近傍の電位が低くなり、中間目標形状に近づくような力を働かせる電場分布を生成することが可能となる。

次に、生成した電場分布を用いて実際に荷電粒子の運動を計算する。提案手法では荷電粒子に働く力として、電磁場から受けるローレンツ力と、荷電粒子の間で働く疑似的な圧力の2つを扱う。計算した2つの力を用いて荷電粒子の位置の更新を行い、その後荷電粒子の過度な密集や目標形状からの離反を防ぐための削除・再配置処理を行う。

最後に、位置を更新させた荷電粒子を疑似的に落下させ、荷電粒子と大気粒子との衝突位置を計算する発光シミュレーションを行う事で、最終的なレンダリング結果を生成する。

## 2.2 クリエイターによる形状指定

初めに、クリエイターが生成したいオーロラの形状をマウスドラッグ操作によって与える。マウスをクリックしてから離すまでに描いた曲線を一本のシート状構造として扱い、得られた曲線を線分で離散化する。この際、図4に示すように、離散化に使用する各線分の端点を制御点と呼称する。 $i$ 番目の制御点の位置は、クリエイターが予め設定した制御点の総数を  $n$  個、ドラッグ操作によって得られたマウス位置の総数を  $m$  個とすると、 $i \times \frac{m}{n}$  個目のマウス位置と  $(i \times \frac{m}{n}) + 1$  個目のマウス位置の間を線形補間することで求める。また、一度のドラッグ操作で描いた曲線を一本のシート状構造として扱うため、その離散化に用いた各制御点には、前後の制御点との接続情報を格納しておく。これらの処理を、変形前の元形状と変形後の目標形状についてそれぞれ行う。複雑な変形アニメーションを作成する場合には、途中過程での形状を含めた、複数個の目標形状を入力として与える。

- ①ドラッグ操作による形状指定 ②制御点を結ぶ線分で離散化



図4 オーロラの形状指定

元形状と目標形状の間での分断現象と結合現象は、各制御点が保持している前後の制御点との接続情報を更新することで表現する。その際、元形状の接続関係を単純に変更してしまうと、元々接続していた線分が不連続に消失したり、逆に元々分離していた部分が不連続に接続する現象が生じてしまう。これを防ぐため、元形状の分断・結合が発生する線分上に新しく制御点を配置し、線分が急に発生・消滅しないようにする。一方目標形状では、分断・結合が発生した後の位置に新しく制御点を配置し、同様にその制御点との接続関係を追加する。分断・結合が発生する場合の制御点の接続関係の更新を図5,6に示す。

分断が発生する場合には、元形状内で分断現象が発生する線分を選択する(図5(a)の①)。その後、元形状で選択された線分の端点にあたる制御点の接続情報を削除し(図5(a)の②)、新たに線分の midpoint に生成した制御点との接続情報を追加する(図5(a)の③)。目標形状では、元形状で選択された線分に対応する制御点の接続情報を同様に削除し、新たにその線分の端点に生成した制御点との接続情報を追加する(図5(b))。

結合が発生する場合には、元形状内で結合したい2つの制御点を選択する(図6(a)の①)。その後、元形状では選択

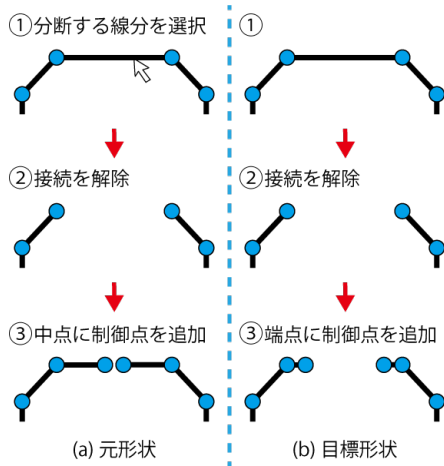


図5 分断が発生する際の接続情報の更新

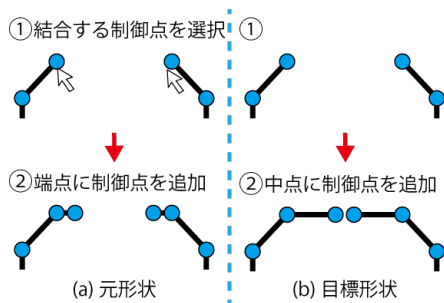


図6 結合が発生する際の接続情報の更新

された制御点の位置に新たに制御点を追加し、その制御点との接続情報をそれぞれ追加する (図 6(a) の②)。目標形状では、選択された制御点の midpoint に新たに制御点を追加し、同様にその制御点との接続情報を追加する (図 6(b))。

### 2.3 中間目標形状生成

クリエイターが指定した目標形状から直接電場分布を生成すると、元形状と目標形状が大きく異なっていた場合に、生成した電場分布が荷電粒子に対して及ぼす影響が小さくなってしまい、元形状から目標形状への形状変化が上手く実行されない。そのため、変形前の元形状と変形後の目標形状の間の形状にあたる、中間目標形状を生成する。中間目標形状は、元形状と目標形状と同様に制御点とそれを結ぶ線分によって表現される。各フレームにおける中間目標形状の制御点位置は、元形状と目標形状の対応する各制御点の位置を 3 次スプライン補間を用いて補間することで求める。元形状と目標形状の制御点を、クリエイターがドラッグ操作を行った順番に一つ一つ対応させ、対応する制御点間で補間を行う。また、分断・結合を指定した際に元形状と目標形状に追加した制御点も、それぞれ対応させる。

### 2.4 中間目標形状の電場分布の算出

生成した中間目標形状の電場分布を生成するために、図 3 赤枠で示された 2 次元平面を直交グリッドで分割し、各セルにおける電荷密度、電位、電場を順に算出していく。

初めに、各セルの電荷密度を求める。電荷密度とは、単位面積量当たりの電荷の分布量のことを指す。まず、中間目標形状の近傍に荷電粒子を配置することで、各セル  $(i, j)$  に属する荷電粒子数  $N(i, j)$  を得る。ここで、中間目標形状との近傍判定は、各制御点を接続情報に従って結んだ線分と荷電粒子との距離が閾値以下であることを条件として行う。求めた荷電粒子数  $N(i, j)$  から式 (1) を用いて各セルの電荷密度  $\rho(i, j)$  を計算する。

$$\rho(i, j) = \frac{q_0 N(i, j)}{\Delta S} \quad (1)$$

$q_0$  は電気素量、 $\Delta S$  は単位面積を表す。電気素量とは、陽子あるいは電子がもつ電荷の大きさを表す定数のことを指す。

次に、求めた電荷密度  $\rho(i, j)$  から、各セルの電位  $\phi(i, j)$  を求める。真空の誘電率を  $\epsilon_0$  とすると、2 次元平面上のポアソン方程式は次の式 (2) で表される [6]。

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

反復法としてガウス・ザイデル法を用いてこのポアソン方程式を解くことで、各セルの電位  $\phi(i, j)$  を求める。境界条件はディリクレ境界条件として  $\phi = 0$  を与えた。電位の 2 階微分を中心差分近似を用いて表し、セル  $(i, j)$  における電位  $\phi(i, j)$  を次の式 (3) で求める。

$$\phi(i, j) = \frac{1}{4} \left\{ -\rho(i, j) \frac{\Delta S}{\epsilon_0} + \gamma(i, j) \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\gamma(i, j)$  はセル  $(i, j)$  の 4 近傍の電位和を表し、 $\gamma(i, j) = \phi(i+1, j) + \phi(i-1, j) + \phi(i, j+1) + \phi(i, j-1)$  と表される。反復時に電荷密度の反数である  $-\rho(i, j)$  を用いていることで、中間目標形状の近傍セルほど電位が低くなるような電位分布が生成される。また、オーロラの高周波な動きを表現するために、算出した電位分布にパーリンノイズ [7] を加える。最後にセル  $(i, j)$  における電場  $E(i, j)$  を、周囲の電位から中心差分近似で求める。中間目標形状の近傍セルほど電位が低い分布となっているため、生成される電場は中間目標形状の近傍に近づくような分布となる。

図??は実際に生成した中間目標形状であり、黒色の点が制御点、制御点を結んだ緑色の線分が中間目標形状の概形を表す。図??の中間目標形状から生成した電位・電場分布を図 8 に示す。各画素の色は対応するセルの電位値を表し、

青色に近いほど電位が低く、赤色に近いほど電位が高いことを表す。また、白色の矢印は電場を表し、 $xz$  方向それぞれ 10 セルおきに表示している。中間目標形状近傍の電位値が他の部分に比べて低くなっており、中間目標形状に向かって力が働く電場分布を生成できていることが観測された。

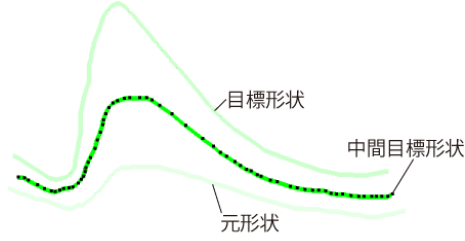


図7 生成した中間目標形状

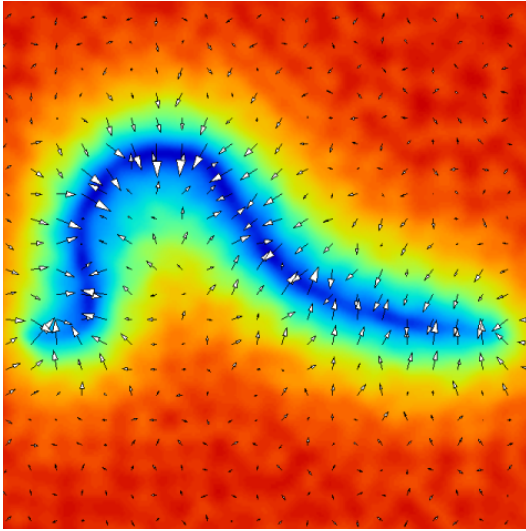


図8 生成した電位・電場分布

## 2.5 ローレンツ力の計算

クリエイターの指定した形状に近づくような電場分布を生成した後は、それを使って荷電粒子の位置を更新する処理を行う。まず、荷電粒子に働くローレンツ力を計算する。ローレンツ力とは、電磁場の中を運動する荷電粒子にかかる力のことである。荷電粒子にかかる電場  $\mathbf{E}$  と、 $y$  軸方向に働く地球の磁場  $\mathbf{B}$  から、ローレンツ力  $\mathbf{F}_L$  は次の式 (4) で求めることができる。

$$\mathbf{F}_L = q_0(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{v}$  は荷電粒子の  $xz$  平面上での速度を表す。各荷電粒子にかかる電場  $\mathbf{E}$  は、セルに格納された値の線形補間により算出する。

## 2.6 荷電粒子間に働く圧力の計算

提案手法では、オーロラの高周波な揺らめくような動きを再現するために、中間目標形状近傍に荷電粒子を毎フレームランダムにサンプリングする手法ではなく、中間目標形状の電場分布から求めたローレンツ力を用いて荷電粒子を移流させる。しかし、ローレンツ力のみを考慮して荷電粒子の運動計算を行った場合、荷電粒子は中間目標形状の近傍付近に分布するような動きをするが、オーロラ形状が大きく折れ曲がる部分や、元形状と目標形状の位置の差が大きい制御点付近では、荷電粒子が過度に密集してしまう。この問題に対処するため、提案手法では荷電粒子間の疑似的な圧力を導入する。

圧力の計算には、Müller らの手法 [8] に代表される SPH 法の圧力項の計算に基づいた方法を利用する。まず、各荷電粒子周辺の密度  $\delta_i$  を、近傍荷電粒子の重み付き和から求める。荷電粒子  $i$  の位置を  $\mathbf{x}_i$ 、質量を  $m_i$ 、近傍に存在する荷電粒子の集合を  $N$  とすると、密度  $\delta_i$  を表す式は次の式 (5) で表される。

$$\delta_i = \sum_{j \in N} m_j W_{poly6}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, h) \quad (5)$$

ここで、 $W_{poly6}(\mathbf{r}, h)$  は有効半径を  $h$  とした Poly6 カーネル関数である。

その後、Desbrun ら [9] の圧力と密度の状態方程式 (6) から圧力値  $p_i$  を求める。

$$p_i = k(\delta_i - \delta_0) \quad (6)$$

ここで、流体のシミュレーションであれば  $\delta_0$  は対象の流体の密度を表すが、今回の手法では中間目標形状の平均密度を用いた。 $k$  はガス定数を表す。

最後に各荷電粒子に働く圧力  $\mathbf{F}_P$  を次の式 (7) で求める。

$$\mathbf{F}_P = \sum_{j \in N} m_j \frac{p_i + p_j}{2\delta_j} \nabla W_{spiky}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, h) \quad (7)$$

ここで、 $W_{spiky}(\mathbf{r}, h)$  は有効半径を  $h$  とした Spiky カーネル関数である。

## 2.7 荷電粒子の位置の更新・再配置

荷電粒子に働くローレンツ力と圧力を用いて、位置の更新と再配置を行う。荷電粒子  $i$  の位置  $\mathbf{x}_i$  の更新は、ニュートンの運動方程式を用いて以下の式 (8) のように求める。

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^t \frac{w_L \mathbf{F}_L + w_P \mathbf{F}_P}{m_i} \Delta t \quad (8)$$



ここで、 $w_L, w_P$  はそれぞれローレンツ力と圧力にかかる重み係数であり、本論文では実験により求めた  $w_L = 0.6$ ,  $w_P = 0.4$  を用いた。

位置の更新を行った後は、荷電粒子の過度な密集や目標形状からの離反を防ぐために、荷電粒子を追加・削除することで再配置処理を行う。まず、中間目標形状の近傍セルにおいて、セルに属している荷電粒子数をカウントする。各セルが中間目標形状の近傍であるかどうかは、中間目標形状近傍に配置した荷電粒子数と、電位分布を用いて判定する。その後、荷電粒子の数が少なすぎた場合は荷電粒子を追加し、逆に多過ぎた場合には削除する。加えて、荷電粒子が中間目標形状の近傍から大きく離れてしまった場合も、その荷電粒子を削除する。荷電粒子を追加する際には、周囲の荷電粒子の速度の平均値を初速度として与える。また、荷電粒子を削除する時は、なるべく中間目標形状に近い荷電粒子を残すために、セル内の荷電粒子を中間目標形状との距離順にソートし、遠いものから順番に削除していく。

## 2.8 レンダリング

最後に、更新した荷電粒子の位置から  $y$  軸方向への落下シミュレーションを行い、最終的なレンダリング結果を得る。レンダリングにはスクリーン空間を用いて落下処理を行う手法 [10] を用いる。

処理の模式図を図 9 に示す。まず前計算として 3 次元空間上での落下処理を行い、荷電粒子の落下が終了する位置を相対置として算出しておく。その後、3 次元空間上での落下開始位置と終了位置を発光点とみなし、光の届く範囲を半径としたパーティクルを生成する。このパーティクルをスクリーン空間上に投影することで、スクリーン空間上での落下開始位置と終了位置が求められる。これを基に、スクリーン空間上での荷電粒子の落下方向と、微小タイムステップ幅  $\Delta \tilde{t}$  ごとに落下する距離を求める。落下方向は、投影後の落下開始位置から落下終了位置へのベクトルを正規化することで算出する。落下距離は、シミュレーション空間とスクリーン空間での、微小タイムステップ幅ごとの落下距離と最終的な落下距離の比から求める。スクリーン空間上での落下開始位置を  $P_s$ 、落下終了位置を  $P_e$ 、シミュレーション空間上での落下する速さを  $v_f$ 、最終的な落下距離を  $D$  とすると、スクリーン空間上での微小タイムステップ幅  $\Delta \tilde{t}$  ごとに落下する距離  $\tilde{v}_f$  は次式となる。

$$\tilde{v}_f = v_f \Delta \tilde{t} \frac{\|P_e - P_s\|}{D} \quad (9)$$

落下開始位置から、微小タイムステップ幅  $\Delta \tilde{t}$  ごとにスクリーン空間上での荷電粒子の位置を更新していき、大気粒子

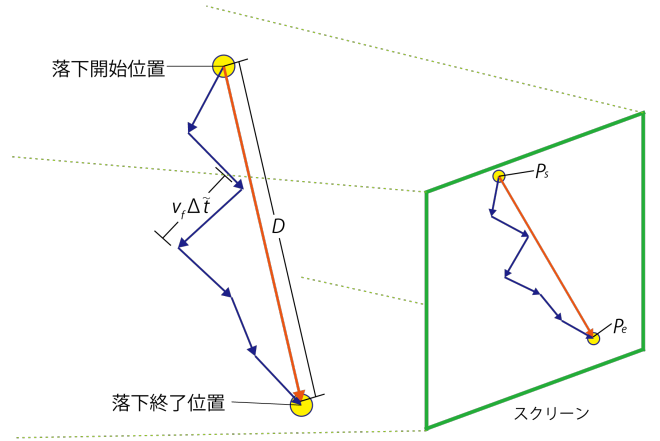


図 9 スクリーン空間上での落下シミュレーションの模式図

と衝突するか否かを判定する。大気粒子との衝突判定には、高層大気の数密度分布から求めた大気粒子数密度と、大気粒子の半径から求める衝突確率を用いる。衝突が発生した場合、荷電粒子の落下方向を乱数によって変更し、再び微小タイムステップ幅  $\Delta \tilde{t}$  ごとに位置の更新と衝突判定を繰り返す。上記の処理を、衝突回数が一定値以上になるまで繰り返し、全ての発光地点を算出する。

算出した発光地点から、最終的なレンダリング結果を生成する手法は米山らの手法 [5] を用いた。衝突地点において、衝突する大気粒子の種類とそれにより放出される光の波長を決定し、全ての衝突地点で生じる輝度値を積算することで最終的なカラーマップを生成する。

## 3 実行結果と考察

本手法を実装し、クリエイターの指定したオーロラ形状が再現できているかを検証するための描画実験を行った。実験には CPU に Intel Core i7-6700K, GPU に NVIDIA GeForce GTX 1080 を搭載した PC を用いた。荷電粒子に働く圧力の計算、荷電粒子の再配置、レンダリング処理は NVIDIA CUDA により GPU で並列処理を行った [10]。

実験の際にマウス操作によって設定した元形状と目標形状を図 10 に示す。黒色の点が制御点、制御点を結んだ緑色の線分がオーロラ概形を表す。実験では、図 1 に示されるように 1 本のシート状オーロラから 2 本のひだが発生し (図 10 ②), そのひだで回転・分断・結合 (図 10 ③, ④, ⑥) が生じ、2 層のオーロラを形成するアニメーションを生成した。

図 10 の目標形状に従って、実際にシミュレーションを行い、オーロラアニメーションを真下方向からレンダリングした結果を図 11 に示す。シミュレーション開始時に配置した荷電粒子の個数を 10 万個、荷電粒子が一度の落下で大気粒子と衝突する回数を 100 回、元形状から目標形状への遷移

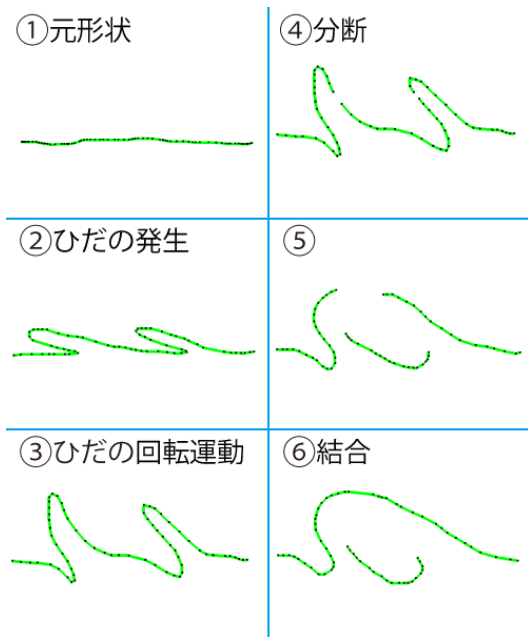


図 10 指定した元形状と目標形状

にかかるフレーム数を 420 とした。1 フレームあたりのシミュレーションにかかる時間は、2 次元平面上での運動計算が約 2-3 秒、落下シミュレーションによるレンダリングが約 1-2 秒であった。レンダリング結果から、クリエイターが指定した形状を満たすようなシミュレーションが行えていることがわかる。また、一本のシート状構造からひだが発生し回転する様子(図 11 ①-④)や、伸びたひだが分断し 3 つのシート状構造を構成する様子(図 11 ⑤-⑦)、分断した両端のひだが再び結合する様子(図 11 ⑦-⑧)を観測することができる。

#### 4 まとめと今後の課題

本論文では、クリエイターの指定した形状から電場分布を生成することで、オーロラの高周波な揺らめくような動きを保持したまま、分断や結合を含めた形状制御を行う手法を提案し、実験によってその有用性を確認した。

今後の課題として、分断や結合が発生する場合の目標形状生成の自動化が挙げられる。提案手法では、分断や結合が発生する場合に、分断・結合する直前の形状を目標形状として設定し、その目標形状に対して分断・結合が発生する線分を選択する必要がある。そのため、より複雑なオーロラの動きを再現する場合には、多くの目標形状の設定が必要となり、アニメーション生成までに時間がかかってしまう。この問題に対処するため、分割や結合が発生する際のオーロラの動きを観測的な特徴からパターン化し、元形状と目標形状を設定するだけで分断・結合直前の形状を自動生成できるようにする必要があると考えている。

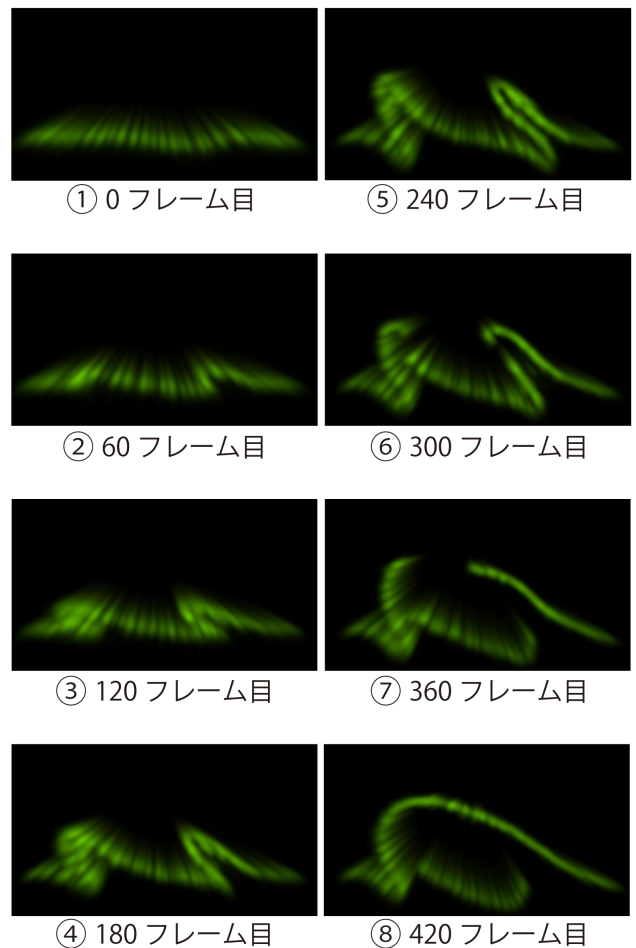


図 11 生成したオーロラアニメーション

加えて、現在は制御点の対応関係がクリエイターのマウスドラッグ操作に依存してしまっているため、オーロラ構造の特徴から、元形状と目標形状間での制御点の対応を自動で設定する手法の実装が必要である。

また、ユーザーが形状制御を行った結果と実際のオーロラとの比較実験や、使用感に関するアンケート調査等を基にしたインターフェースの改善を行っていき、より使いやすい制御システムを実現したい。

#### 参考文献

- [1] 渋川雄平, 土橋宜典, 山本強, “ガス状物体のボリュームレンダリングのための特徴量に基づく伝達関数設計手法”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, No. 2, pp. J66-J71, 2014.
- [2] G. Kawada and T. Kanai. ”Procedural Fluid Modeling of Explosion Phenomena Based on Physical Properties”, *Proc. Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, pp. 167-176, 2011.

- [3] G. Baranoski, J. Rokne, P. Shirley, T. Trondsen and R. Bastos. "Simulating the Aurora", *J. Visual. Comput. Animat.*, Vol. 14, No. 1, pp. 43-59, 2003.
- [4] 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", 芸術科学会論文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 24-35, 2012.
- [5] 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.
- [6] 遠藤雅守, "電磁気学-初めて学ぶ電磁場理論-", 森北出版, 2013.
- [7] K. Perlin, "An image synthesizer", *ACM SIG-GRAPH Computer Graphics*, Vol. 19, Issue 3, pp.287-296, 1985.
- [8] M. Müller, D. Charypar and M. Gross, "Particle-based Fluid Simulation for Interactive Applications", *In Proc. Symposium on Computer Animation 2003*, pp.154-159, 2003.
- [9] M. Desbrun and M. P. Cani, "Smoothed Particles: A New Paradigm for Animating Highly Deformable Bodies", *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation*, pp.61-76,1996.
- [10] 関口智大, 藤澤誠, 三河正彦, "スクリーン空間を用いたオーロラの高速度なシミュレーション", *Visual Computing /グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2016 予稿集*, pp. 23:1-4, 2016.