

5Y-7

## 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

米山 孝史<sup>†</sup> 近藤 邦雄<sup>†</sup>  
 埼玉大学工学部情報システム工学科<sup>†</sup>

### 1 はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) による自然景観のシミュレーションは、様々な対象について多くの研究がされている重要なテーマである。本研究の目的は、極地方の空で見られる発光現象であるオーロラの CG によるビジュアルシミュレーションである。

これまで、CG によるオーロラの可視化の手法は Baranoski ら [1] や井上ら [2] により提案されている。これらの手法では、オーロラの現れる高度やその色の決定の方法に観測データに基づく参照テーブルを用いている。そこで本研究では、それらを高層大気組成や大気上層に入射するオーロラ粒子のもつ初期エネルギーから決定し可視化を行う手法を提案する。

### 2 オーロラ現象

ここでは物理現象としてのオーロラの発生原理であるオーロラ粒子とそれに起因する発光機構、またオーロラの色のパターンについて述べる。

#### 2.1 オーロラ粒子

オーロラは、太陽から飛来する電子や陽子といった荷電粒子 (オーロラ粒子) が地球大気中の原子や分子と衝突することにより発光する現象である [3]。オーロラ粒子は地球の磁気圏に入ると加速され磁力線に沿って地球大気に侵入する。そして大気中の原子や分子と衝突すると、エネルギーを得た原子や分子は励起状態となりエネルギーを光子として放射して安定な状態に戻る。この時、オーロラ粒子が衝突した原子や分子の種類によって異なる様々なオーロラの色が作り出される。

#### 2.2 発光機構

オーロラ光の輝線は、上層大気を形成する主要な成分である窒素分子 ( $N_2$ )、酸素原子 ( $O$ )、酸素分子 ( $O_2$ ) やそれらのイオンの輝線である。表 1 にオーロラ光で観測される酸素原子の主な禁制線、表 2 に分子のバンドを示す [4]。これら原子や分子、イオンを励起させる過程として、電子との直接衝突による励起のほか、解離再結合やエネルギー交換といった化学反応による励起のモデルがある。

#### 2.3 オーロラの色のパターン

オーロラの色を決める要因としては、(1) オーロラ粒子の持つ初期エネルギー、(2) 大気中の原子や分子の分布、(3) 大気の密度、がある。オーロラの出現する高度は初期エネルギーに依存しており、初期エネルギーが高いほど低い高度にオーロラが現れる。また、大気の分布や密度は地表からの高度により変化するため、オーロラの色はオーロラの現れる高度に最も多く存在する大気粒子による放射からの影響を強く

表 1: 酸素原子のおもな禁制線

遷移	波長 (nm)	平均寿命
$2p^4 \ ^1D - 2p^4 \ ^1S$	557.7	0.74s
$2p^4 \ ^3P - 2p^4 \ ^1D$	630.0-636.4	110s

表 2: おもな分子のバンド

分子	バンド名	波長域	平均寿命
$N_2$	First Positive	赤-赤外	$6\mu s$
$N_2^+$	First Negative	青-紫外	70ms
$O_2$	Atmospheric	赤-赤外	12s

受ける。図 1 に高度の違いによって異なるオーロラの色のパターンを示す [3]。高度 200km 以上では酸素原子による 630.0nm の赤色、高度 100km から 200km では 557.7nm の緑色が強く見られる。



図 1: オーロラの色のおもなパターン

### 3 発光過程のモデル化

本研究では、オーロラの発光をオーロラ粒子 (電子) と中性大気との直接衝突による大気粒子の励起としてモデル化を行った。提案手法におけるオーロラの発光過程を以下に述べる。

#### (1) オーロラ粒子の降下

任意の初期エネルギーを持ったオーロラ粒子を、大気の上層部からオーロラの形であるオーロラ・アークを表す曲線上の点より磁力線ベクトルに沿って降下させる。

#### (2) オーロラ粒子と大気粒子との衝突

オーロラ粒子は大気中を降下する際に大気中に含まれる原子や分子と衝突をする。オーロラ粒子と大気粒子との衝突確率  $P$  は次式で表される。

$$P = 1 - \exp(-n\pi d^2 \Delta l) \quad (1)$$

ここで、 $n$  はオーロラ粒子のある高度の大気の数密度、 $d$  は大気粒子の半径、 $\Delta l$  はオーロラ粒子の進む距

離である。

### (3) 衝突する粒子・放射する輝線の決定

衝突確率に従いオーロラ粒子と大気粒子が衝突する場合、その高度での大気の組成の割合から衝突する原子、分子を決定する。また、その原子、分子が放射する輝線を観測データに基づく励起の生成率の割合から決定する。このようにして様々な波長の輝線が集まったスペクトルがオーロラ光として観測される。

### (4) 消光の考慮

オーロラ光の輝線のうち酸素原子から放射される630nmの輝線は、放射されるまでの平均寿命が110秒と長いので高度が低くなると630nmの光を出す前に他の原子や分子と衝突しエネルギーを失ってしまう。これを消光といい、オーロラの色を決定する要因として重要であるため、本手法ではこれについて考慮する。平均寿命 $\tau$ 内に他の大気粒子と衝突する確率 $P$ を次式のようにする。

$$P = 1 - \exp(-\sqrt{2}n\pi D^2 v\tau) \quad (2)$$

ここで $n$ は大気密度、 $D$ は大気粒子の直径、 $v$ は大気粒子の速さである。

オーロラ粒子はこのように大気粒子と衝突して約100eVのエネルギーを失いながら最終的に静止する。これらの一連の流れをオーロラ粒子のビームとして複数回繰り返すことによりオーロラの形を生成する。

## 4 画像生成手法

ここでは、生成したオーロラ光のデータをボクセルに記憶し、それをボリュームレンダリングにより可視化する方法について述べる。

### 4.1 ボリュームデータの生成

前節の方法によりオーロラ粒子と大気粒子との衝突点を決定したら、その点を含むボクセルにオーロラ光の輝線の波長のデータを記憶させる。また、Baranoskiらの手法では、励起状態の大気粒子は輝線を放射する平均寿命内に移動をするため、移動距離は正規分布に従うものとしてオーロラ発光点を中心として2次元のガウシアンフィルタリングを行っている。本手法ではそれを3次元に拡張して、各輝線の発光強度について隣接ボクセルに対し任意の大きさの3次元のガウシアンフィルタリングを行う。

### 4.2 ボリュームレンダリング

オーロラ光のボリュームデータを生成したら、ボリューム内を視線に沿ってサンプリングしていくことにより画素の輝度を求めるレイキャスティング法を用いて可視化を行う。現在のサンプル位置での輝度を $i$ 、不透明度を $\alpha$ 、この点に入射した積算輝度値を $I_{in}$ とすれば、このサンプル点を抜けたときの積算輝度値 $I_{out}$ は次式で表される。

$$I_{out} = I_{in}(1 - \alpha) + i\alpha \quad (3)$$

ただし、ボクセルに記録されているデータは波長とその強度であるため、それらからRGB値への変換を行う。

## 5 実験結果

図2はO、N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub><sup>+</sup>からの代表的な輝線をデータとして取り入れ、それぞれ初期エネルギーを変えて生成したシミュレーション結果である。(a)の画像はオーロラ粒子の初期エネルギーが低い(500eV)高高度に現れる赤色のオーロラで、オーロラ粒子のビームの数は150000、発光点ひとつあたりの強さを20としている。(b)の画像は初期エネルギーが高い(30keV)低高度に現れる緑色のオーロラで、オーロラ粒子のビームの数は100000、発光点ひとつあたりの強さは10である。

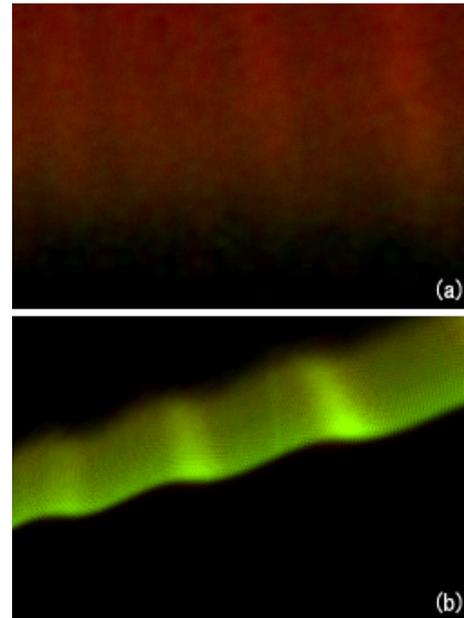


図 2: 生成画像

## 6 まとめ

本研究では、オーロラが発光する過程を考慮に入れたオーロラのビジュアルシミュレーションの手法の提案をした。これにより、オーロラ粒子の初期エネルギーにより変化するオーロラの色シミュレーションができた。今後の課題は、まだシミュレーションに取り入れていない励起機構による発光の追加である。

### 参考文献

- [1] Gladimir Baranoski, Jon Rokne, Peter Shirley, Trond Trondsen, Rui Bastos, "Simulating the aurora", J. Visual. Comput. Animat. 03; 14, pp.43-59, 2003
- [2] 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
- [3] Neil Davis 著, 山田卓訳, "オーロラ", 地人書館, 1995
- [4] 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