

CGによる大気散乱のシミュレーション Atmospheric Scattering Simulation using Computer Graphics

中井 真悟† 坂井 一雄†
Nakai Shingo Kazuo Sakai

1. はじめに

大気散乱シミュレーションに基づいた空の描画は、従来はCGの背景として用いるには計算コストの高いものだった。しかし、近年のハードウェアの進歩により、それが可能になってきている。しかし、先行研究では特にエアロゾル粒子による光散乱の考察が不十分であった。

本手法ではエアロゾルによる光散乱の波長依存性に注目し、今までは難しかった空色のシミュレーション、さらには地球以外の空色のシミュレーションも可能にすることを旨とする。

2. 物理背景

本手法を説明する前に、本手法で用いる物理量や関数について述べる。

・散乱断面積

物体と物体が接近したとき、その衝突確率は物体の進行方向に垂直な面での幾何断面積により見積もることができる。しかし、光(光子)と空気分子やエアロゾル粒子のような微小な粒子の場合、その断面積は単純な幾何断面積では表せなくなる。このような場合、空気分子やエアロゾル粒子の光散乱に関わる面積を散乱断面積といい、これらは Mie 散乱理論やその近似である Rayleigh 散乱を用いて求めることができる。散乱断面積は主に光の波長に依存する。

・散乱係数

散乱断面積は粒子同士一対一の相互作用についての量である。ある粒子が別の粒子媒質中を通過するときの散乱のおこりやすさを知るためには、散乱断面積に粒子媒質の個数密度をかけなければならない。これを散乱係数という。すなわち

$$\beta^{\lambda} = \rho(h) \cdot \sigma^{\lambda} \quad (1)$$

である。ただし $\rho(h)$ は高度 h における粒子個数密度、 σ^{λ} は波長 λ の光に対する粒子の散乱断面積である。

・位相関数

光がある程度の大きさを持つ物体に入射した場合、反射や屈折がおこる。これらについては、その後の光の進行方向を幾何学的に求めることができる。しかし、散乱がおこるほど小さな粒子に光が入射した場合、散乱後の光の進行方向を幾何学的に求めることはできない。そこで、光の全方向への散乱確率を与える関数が必要になる。これを位相関数という。

・空気分子による散乱

空気分子のような大きさのレベルの粒子による散乱は、Rayleigh 散乱で説明することができる。散乱断面積は波長 λ の 4 乗に反比例する。

散乱方向については、異方性は弱く、等方散乱に近い。

・エアロゾル粒子による散乱

空気中にはさまざまな微粒子が浮遊しているそれらのエアロゾル粒子による散乱は Mie 散乱理論で説明することができる。散乱断面積は波長に依存するが、粒子の半径に

も大きく影響される。散乱方向については、散乱後の光の方向は図 1 のような複雑な挙動を示すが、粒径が大きくなるほど前方散乱が顕著になることが知られている。

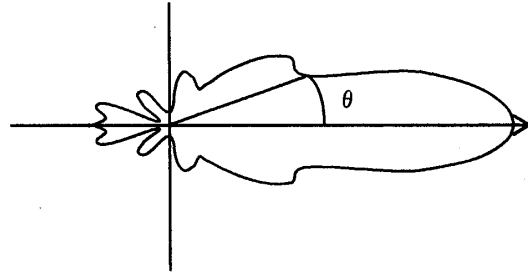


図 1. 半径 $0.42 \mu\text{m}$ 粒子の波長 532nm 光に対する位相関数

3. 粒径分布関数とエアロゾル粒子散乱断面積

次に、エアロゾル粒子の粒径分布関数と、その散乱断面積、位相関数について述べる。

・粒径分布関数と散乱断面積

空気中に分布する粒子の半径(粒径)には、ある程度の幅がある。

本手法では粒径分布関数としてよく用いられる対数正規分布を用いる。そして粒径分布関数より粒子粒径を決定し、散乱断面積を式 2 によって求める。

$$\frac{r^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2)$$

ただし、 r : 粒子半径 a_n, b_n : ミー級数 である。

・位相関数

本手法では、エアロゾル粒子の位相関数として、式 3 の Henyey-Greenstein 近似を用いる。Henyey-Greenstein 近似においては、前方散乱と後方散乱の比を異方性パラメータ g としてあらわす。

$$P_{mie}(\theta) = \frac{1-g^2}{4\pi(1+g^2-2g\cos\theta)^{1.5}} \quad (3)$$

Mie 散乱において異方性パラメータ g は $0.5 \sim 0.9$ の値を示す[1]。本手法では粒径 $0.01 \mu\text{m}$ のとき $g=0.5$ 、粒径 $5.0 \mu\text{m}$ のとき $g=0.9$ とし、その間では線形補間を行う。

4. レンダリング

本手法で行なうレンダリング処理について述べる。レンダリングにはレイマーチング法を用いる。多重散乱は計算しない。

視点 \mathbf{x} に、ある方向 ω から媒質中を通過して入射する光強度を求める。その際に、視線をいくつかの小区間に分割する i 番目の区間からの光強度を

$$I_i^{\lambda}(\mathbf{x}_i) = P(\theta_{fix}) L^{\lambda}(\mathbf{x}_i, \omega_{fix}) \beta^{\lambda}(\mathbf{x}_i) \times A^{\lambda}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i) \quad (4)$$

とする。ただし、

$P(\theta_{fix})$: 太陽方向での位相関数の値

$L^{\lambda}(\mathbf{x}_i, \omega_{fix})$: 太陽方向から位置 \mathbf{x}_i への光強度

$\beta^{\lambda}(\mathbf{x}_i)$: 位置 \mathbf{x}_i における散乱係数

である。これは実際には空気分子の散乱係数とエアロゾル

† 山梨大学大学院医学工学総合教育部 コンピュータ・メディア工学専攻

粒子の散乱係数の和である。エアロゾル粒子の散乱係数は粒径を粒径分布関数から決定し計算する。つまり

$$\beta^\lambda(\mathbf{x}_i) = \beta_{air}^\lambda(\mathbf{x}_i) + \beta_{aero}^\lambda(\mathbf{x}_i) \text{ である。}$$

また $A^\lambda(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i) = \exp(-\int_{x_0}^{x_i} \beta^\lambda(x') dx')$ であり、それは

区間 $[x_0, x_i]$ での光の減衰率である。よって、視点 \mathbf{x} に、ある方向 ω から媒質中を通して入射する光強度は

$$D_i = D_{i-1} + d_i, \\ L^i(\mathbf{x}, \omega) = \quad (5)$$

$$\sum_{j=1, D_j=0}^N \{A^\lambda(\mathbf{x}_0, D_j \omega + \mathbf{x}_0) \cdot P(\theta_{\omega, f_{j\lambda}}) \beta^\lambda(D_j \omega + \mathbf{x}_0) (L_{f_{j\lambda}}^\lambda \cdot A^\lambda(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_{100-f_{j\lambda}}))\} \times d_j$$

と表すことができる。ただし、

N : 区間分割数

d_i : i 番目の区間の区間幅である。

こうして求めた光のエネルギーを、以下のような手順で画像のピクセル値に変換する。

光強度(380nm~780nm, 20nm 間隔)※

↓
等色関数[3]を用いて CIE XYZ に変換

↓
式6により RGB (0~255) に変換[4]

$$R = k \times 255 (3.5064X - 1.7400Y - 0.5441Z)^{1/\gamma} \\ G = k \times 255 (-1.0690X + 1.9777Y + 0.0352Z)^{1/\gamma} \quad (6)$$

$$B = k \times 255 (0.0564X - 0.1970Y + 1.0511Z)^{1/\gamma}$$

k : 定数 γ : ガンマ補正値

※太陽が放射する光のエネルギーは、全周波数について同じ値を用いる。

5. 結果

本手法の物理的な正確さの検証のために、昼間の空の輝度の分光分布を測定し、正規化を行ない本手法の実行結果と比較した。そのとき用いたパラメータを表1に、その結果を図2に示す。

表1. 使用したパラメータ

地表大気密度 【 kg m^{-3} 】		地表エアロゾル密度 【 kg m^{-3} 】		粒径範囲	
2.55 × 10 ⁻²⁵		5.0 × 10 ⁻⁴		0.1 μm ~ 2.5 μm	
太陽仰角	太陽方位角	視線仰角	視線方位角		
36°	207°	17°	347°		

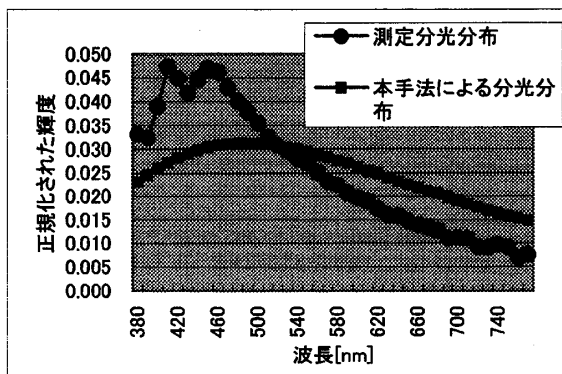


図2. 分光分布の比較

図2より、本手法による結果の傾向は測定結果に近いもの

の、短波長領域でのピークがなく、長波長領域の強度が相対的に強くなってしまっている。

次に、本手法によるレンダリング結果を示す。

文献より火星大気環境を推測し、火星の夕焼けを再現したレンダリング結果を図3に、またそのとき用いたパラメータを表2に示す。

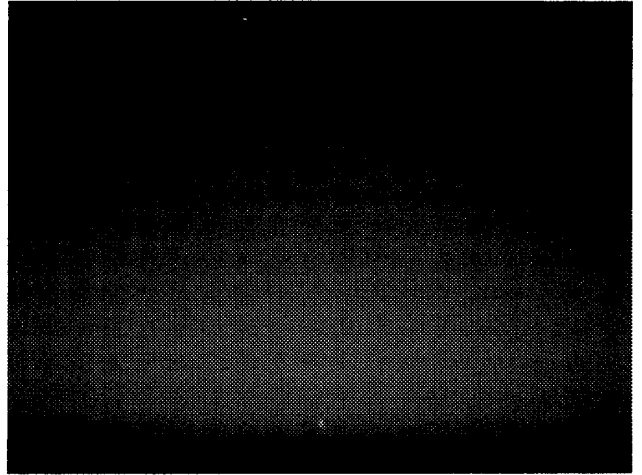


図3. 火星の夕焼けのシミュレーション結果

表2. パラメータ

地表大気密度 【 kg m^{-3} 】	地表エアロゾル密度 【 kg m^{-3} 】	粒径範囲
2.55 × 10 ⁻²³	2.0 × 10 ⁶	0.45 μm ~ 0.56 μm

また、この他にも地球の昼間、夕焼け空のシミュレーションも行った。

6. 結論

結果から、物理的な裏づけのある空のCG表現を得ることができた。特にエアロゾル粒子の粒径分布、散乱断面積の波長依存性なども考えることで、より豊かな夕焼けの表現や、地球以外の惑星の空も再現することができた。図3をNASAが撮影した実際の火星の夕焼け[5]と比較することで、本手法の有効性を確認することができた。本手法を用いることで、エアロゾルの分布の様子から空の色を再現したり、また逆に空の画像から大気の様子をある程度推測したり、といったことが可能になる。

しかし、問題もある。前述のように、実際の空の分光分布と比較すると、本手法の結果は、まだ物理的に精度が高いとは言いがたい。また今回はその比較を、一つの条件の下でしか行っておらず、今後はより詳細な測定実験との比較の下に、より詳しい物理的な有効性の検証が必要である。

参考文献

- [1] 竹内 延夫 編: 地球大気分光リモートセンシング, p206, 学会出版センター, 2001
- [2] 深尾 昌一郎, 浜津 享助: 気象と大気のレーダーリモートセンシング, p491, 京都大学学術出版会, 2005
- [3] JIS Z 8701 色の表示方法—XYZ表色系及びX10Y10Z10表色系, 財団法人 日本規格協会, 1999
- [4] CG-ARTS 協会: デジタル画像処理, p384, 2004
- [5] Mars Pathfinder Images: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/marspath_images.html> (2006-1-15)