

## 大気の効果を検討した 雲のレンダリングパラメータの推定手法

岩崎 航<sup>†1</sup> 土橋 宜典<sup>†1</sup> 山本 強<sup>†1</sup>

コンピュータグラフィックスを用いて屋外景観画像を作成する際、雲はその重要な構成要素となる。雲を表現する手法は数多く存在するが、よりリアルな画像が必要となる場合はボリュームデータが用いられる。しかし、レンダリング結果は多くのレンダリングパラメータに依存し、写実的な画像を得るためのパラメータを設定することは容易ではない。そこで、本稿では、一枚の実写画像から雲のボリュームレンダリングにおけるレンダリングパラメータを推定する手法を提案する。提案法により、ユーザは雲のボリュームデータと所望の実写画像を入力するだけで、入力した実写画像のような写実的なレンダリング結果を生成することが可能である。

### A Method of Estimating Rendering Parameters for Clouds Taking into Account Atmospheric Effects

WATARU IWASAKI,<sup>†1</sup> YOSHINORI DOBASHI<sup>†1</sup>  
and TSUYOSHI YAMAMOTO<sup>†1</sup>

In creating synthetic images of outdoor scenes using computer graphics, clouds play an important role in enhancing the realism of the synthetic images. Many methods have therefore been proposed for displaying clouds and a volumetric representation is often employed to render realistic clouds. However, the realism of the resulting images depends on many rendering parameters and it is often difficult to adjust those parameters manually to achieve sufficient realism. In order to address this problem, this paper proposes a method for estimating the rendering parameters for clouds from a single photograph. Our method can render realistic clouds whose colors are similar to those of real clouds in the photograph specified by the user.

#### 1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) を用いて屋外景観画像を作成する際、雲は重要な構成要素となる。コンピューターゲームやバーチャルリアリティなどの高速表示が要求されるアプリケーションでは、2次元テクスチャを用いて雲を表示する方法が多く利用されている。しかし、より写実的かつ3次元的な雲の表示を行う場合は、雲をボリュームデータとして表現する方法が用いられる。すなわち、雲の3次元密度分布を3次元格子を用いて定義する。これにより、視点位置や太陽位置に応じた雲の輝度を物理則に基づいて計算することが可能になり、リアルな画像を得ることができる。そこで、本稿では、ボリュームデータとして表現された雲のレンダリングについて着目する。

一般に、雲のボリュームデータはボリュームレンダリングを行うことで可視化することができる。しかし、その結果は多くのレンダリングパラメータに依存して変化するため、所望の結果を得るためには、その調整作業が必要となる。雲の場合、直射光成分、環境光成分、アルベド、減衰率などのパラメータによって結果が大きく左右される。したがって、リアルな画像を得るためには、これらのパラメータを適切な値に設定しなければならない。しかし、これらのパラメータは直感的ではないばかりか、各パラメータがレンダリング結果に及ぼす影響などの専門的な知識を必要とするため、その調整作業は容易ではない。本研究では、この問題を解決するため、実写を利用してレンダリングパラメータを自動的に決定する手法を提案する。提案手法では、雲の実写画像と類似した色となるようレンダリングパラメータを推定する。提案法を用いれば、ユーザは雲のボリュームデータと所望の実写画像を一枚入力するだけで、容易に写実的なレンダリング結果を生成することが可能である。

以降、本稿の構成は、2節で関連研究について簡単な紹介を行い、3節で提案手法の概要について述べる。そして、4節で本稿で用いている雲の輝度計算式について説明を行い、5節で提案手法の詳細について述べる。その後、6節で提案手法を用いた実験結果とその考察について述べる。最後に7節でまとめとする。

#### 2. 関連研究

雲のレンダリングに関して、これまで多くの研究が行われてきた 1)2)3)4)5)。これらの

<sup>†1</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

手法を用いることによって、非常に写実的な雲の画像を生成することが可能となってきた。しかし、そのレンダリング結果は多くのレンダリングパラメータに依存し、パラメータに対する専門的な知識を持たないユーザにとっては、適切なパラメータを設定して所望のレンダリング結果を生成することは容易ではない。そこで、この問題に対し、著者らの先行研究 6) では直感的な編集操作を通してパラメータを設定することが出来るシステムを提案している。このシステムでは、ユーザは簡単な編集操作を行うだけでインタラクティブに雲のボリュームレンダリングにおけるレンダリングパラメータを決定することができる。しかし、直感的なパラメータの指定は可能となったものの、実写のような写実的な結果を得るためには、依然、試行錯誤的なパラメータ調整作業は必要となる。また、現実世界においては、雲と視点との間に大気が存在しており、その影響によって見え方も大きく変わる。しかし、上述のシステムでは、大気の効果までは考慮されていない。そこで、本稿では実写画像を利用し、大気の効果まで考慮して雲のレンダリングパラメータを推定する。

実写を利用してレンダリングパラメータを推定する研究としては、髪 7) や半透明物体 8)、霧 9) などを対象とした手法が挙げられる。髪を対象とした手法 7) では、事前に髪型やレンダリングパラメータの異なる大量の画像を作成しておき、実写画像と最も類似した画像をデータベース内から探索することでパラメータを推定する。そのため、推定結果はデータベースに依存し、必ずしも最適な推定結果が得られるとは限らない。また、雲の場合、形状や陰影などの組み合わせを有限な数で表現することは難しいため、データベースを作成することは困難である。半透明物体を対象とした手法 8) では、物体の密度分布は一様と仮定して表面下散乱関数のパラメータを推定する。しかし、雲の密度分布は一様ではないため、この手法を適用することはできない。霧を対象とした研究 9) においても、霧の密度を一様としており、雲への適用は難しい。

### 3. 提案法の概要

提案法では、雲の密度分布はボリュームデータとして表現する。すなわち、3次元空間を格子状に分割し、各格子(ボクセル)に雲の密度を割り付ける。本稿では、雲の輝度計算では、太陽光の一次散乱成分は数値積分により計算し、雲内部の多重散乱成分は、環境光として与える定数値として近似する。雲粒子による光の散乱については、等方散乱を仮定する。また、大気による光の散乱・減衰についても考慮する。すなわち、視点に到達する光の輝度は雲の輝度が大気により減衰したものと大気の散乱光の輝度を足しあわせたものとなる。ただし、大気については、その密度は一様であり、散乱光強度も至るところ一定という最も単

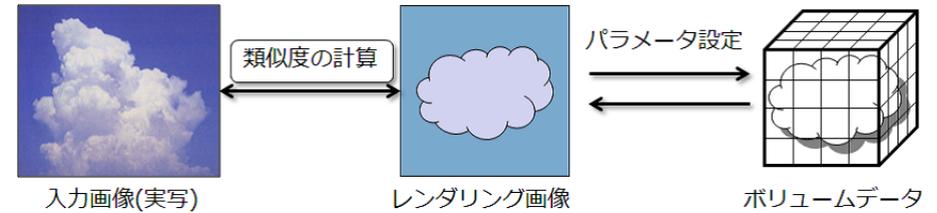


図1 提案法の概要

Fig. 1 Outline of proposed method

純なモデルを用いる。

提案法では、以上の方法により計算される雲の画像と実写画像を比較することで、レンダリングパラメータを決定する(図1参照)。ただし、本稿では、実写における太陽光の色と方向は既知とし、ユーザにより指定する。これらのパラメータの推定は今後の課題である。残るレンダリングパラメータは、雲に関するものは、減衰率、アルベド係数、環境光強度の3つであり、大気に関するものは大気の減衰率のみとなる。ただし、大気の減衰率は波長に依存する。波長に関しては、RGBの3成分でサンプルする。したがって、レンダリングパラメータは6つとなる。提案法では、これら6つのパラメータを遺伝的アルゴリズム 10) を用いて推定する。ただし、6つのパラメータに対して単純に遺伝的アルゴリズムを適用してランダム探索を行うことは効率が悪い。そこで、提案法では、大気を考慮した雲の輝度計算の性質を利用し、雲に関する3つパラメータと大気に関するパラメータを分離して扱うことで効率化を図る。具体的には、遺伝的アルゴリズムにより雲に関する3つのパラメータの候補を生成し、まず、これらを用いて雲の輝度を計算する。その後、計算された雲の輝度を用いて、実写と最も類似する大気の減衰率の最適値を算出する。大気の減衰率に関しては、波長ごとに1次元探索を行うことで、高速に最適値を求めることが可能である。このようにして決定した6つのパラメータで生成したCG画像と実写との類似度を計算し、その結果を遺伝的アルゴリズムにフィードバックすることでより良い雲のパラメータ候補を新たに生成する。このような処理を繰り返すことで、最適解を効率的に探索する。

以降、第4節で大気を考慮した雲の輝度計算について述べた後、第5節で提案法の各処理について詳しく述べる。

#### 4. 大気を考慮した雲の輝度計算式

いま、図2に示すように、視線と雲の交点をそれぞれ  $P_a$  および  $P_b$  とし、 $P_a$  から距離  $t$  にある点を  $P$ 、 $P$  と太陽とを結ぶ直線と雲の交点を  $Q$  と定義する。このとき、一次散乱のみを考慮した場合、画素  $p$  に対応する雲の輝度  $I_c(p, \lambda)$  は次式により計算できる。ただし、 $\lambda$  は波長を表し、RGB によりサンプルする。

$$I_c(p, \lambda) = I_l(\lambda) \int_0^{T(p)} \rho(t) \exp(-\kappa\tau(t)) (\beta \exp(-\kappa\tau_s(t)) + I_m) dt + I_{sky}(\lambda) \exp(-\kappa\tau(T(p))) \quad (1)$$

$$\tau(t) = \int_0^t \rho(l) dl \quad (2)$$

$$\tau_l(t) = \int_0^{S(t)} \rho(s) ds \quad (3)$$

ここで、 $I_l(\lambda)$  は太陽光の輝度、 $I_{sky}(\lambda)$  は空の輝度、 $T(p)$  は雲の厚み、 $\rho$  は雲の密度、 $\kappa$  は雲粒子による光の減衰係数、 $\tau(t)$ 、 $\tau_l(t)$  は雲の光学的距離、 $\beta$  はアルベド、 $I_m$  は環境光成分、 $S(t)$  は  $P$  と  $Q$  の距離を表す。

次に、大気の効果について考慮する。雲と視点との間には、大気が存在するため、大気粒子によって雲の輝度は減衰し、大気粒子による太陽光の散乱光も視点に到達する。本研究では、最も単純なモデルを用いて大気の効果を検討する。すなわち、大気の密度は一様であり、大気による太陽光の散乱光強度は一定であると仮定する。このとき、視点に到達する光の輝度は次式により表される。

$$I(p, \lambda) = I_c(p, \lambda) \exp(-\kappa_s(\lambda)d_c) + (1.0 - \exp(-\kappa_s(\lambda)d_c))I_{sky}(p, \lambda) \quad (4)$$

式4の右辺第一項は、大気により減衰した雲の輝度を表し、第二項は大気による太陽光の散乱光を表す。

式1から4において、雲の密度分布  $\rho$  を除くと、雲の輝度値を決定するパラメータは  $I_l(\lambda)$ 、 $\kappa_s(\lambda)$ 、 $\kappa$ 、 $\beta$ 、 $I_m$ 、 $I_{sky}(\lambda)$  である。これらのうち、前述したように、 $I_l(\lambda)$  はユーザ指定により既知であるとする。また、 $I_{sky}(\lambda)$  については、文献11)の方法を用いて算出する。したがって、提案法では、残る6つのパラメータ  $\kappa_s(\lambda)$  ( $\lambda = R, G, B$ )、 $\kappa$ 、 $\beta$ 、 $I_m$  を実写を利用して決定する。

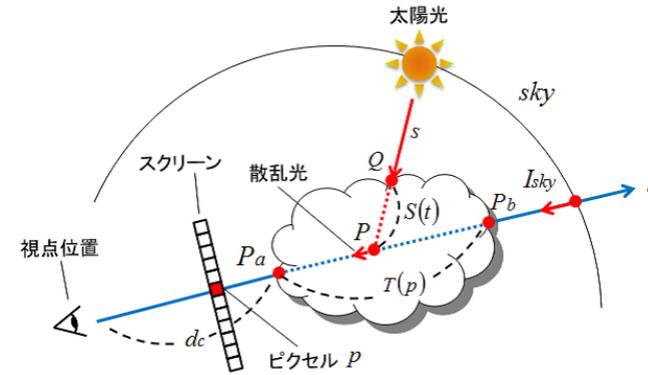


図2 雲の輝度  
Fig.2 Intensity calculation of clouds

#### 5. 提案手法

前節で述べた6つの未知パラメータに対し、 $\kappa$ 、 $\beta$ 、 $I_m$ の3つには遺伝的アルゴリズムを適用し、 $\kappa_s(\lambda)$  ( $\lambda = R, G, B$ ) は波長ごとに1次元探索を用いて決定する、これらのパラメータを様々な値に設定し、ユーザが入力したボリュームデータに対してレンダリングを行う。提案法の処理の流れを図3に示す。以下、提案法について詳しく説明する。ただし、遺伝的アルゴリズムの詳細についてはここでは省略する。遺伝的アルゴリズムについては、文献10)を参照いただきたい。

前述したように、 $\kappa$ 、 $\beta$ 、 $I_m$ の3つのパラメータは遺伝的アルゴリズムにより探索するため、2進数を用いた遺伝子表現に置き換える。各パラメータの最小値と最大値をユーザにより指定し、その間の値を指定したビット数で量子化し、その2進数表現を得る。そして、図4に示すように、3つのパラメータの2進数表現を並べたものを一つの個体の遺伝子とする。まず、初期状態として、 $n$ 個の個体を乱数により生成する。ただし、 $n$ はユーザにより指定する。その後、以下の処理を繰り返す。

まず、各個体の遺伝子表現から対応するパラメータ値を算出し、雲の輝度  $I_c(\lambda)$  を式1により計算する。このとき、太陽光の方向は一定であるため式1における雲の光学的距離  $\tau(t)$  および  $\tau_l(t)$  は変化しない。そこで、前処理としてこれらの値を計算して記憶しておく

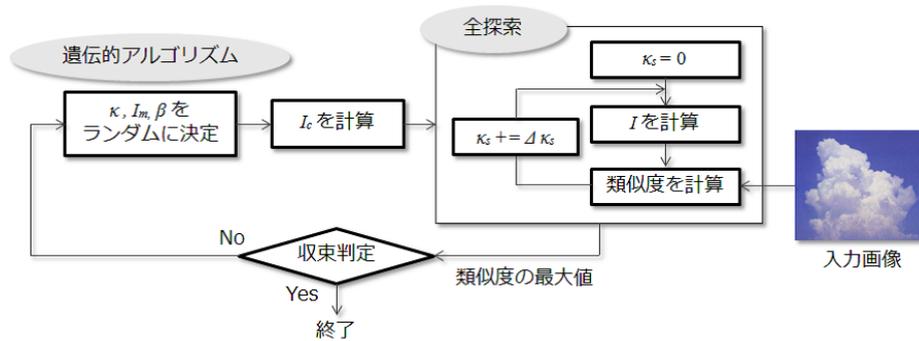


図3 処理の流れ  
Fig. 3 Flow of processing

ことで効率化を図る。次に、各個体ごとに、実写との類似度を最大にする  $\kappa_s(\lambda)$  を全探索により計算する。すなわち、 $\kappa_s(\lambda)$  の値を様々に変化させ、式 4 を用いて各画素の輝度値  $I(p, \lambda)$  を計算する (図 3 参照)。そして、 $I(p, \lambda)$  と実写画像との類似度を計算し、類似度が最大となる  $\kappa_s(\lambda)$  を算出する。なお、類似度の計算については後述する。類似度が十分大きいあるいは指定した繰り返し回数に達していれば処理を終了する。そうでなければ、各個体の類似度を用いて、交叉および突然変異により新たな個体を生成する。遺伝的アルゴリズムでは、交叉処理により類似度の高い個体の遺伝子の特性を保持しつつ新たな個体を生成することで、より最適解に近いパラメータを探索する。また、突然変異では、ランダムに選択したビットを反転する。これにより、局所解に陥ることを回避することができる。そして、新たに生成された個体を用いて、以上の処理を繰り返す。

類似度については、以下の式で表されるヒストグラム差分を用いて計算する。

$$d = avg_{\lambda} \left( \frac{1}{(\sum_{i=0}^{L-1} |h_p(i, \lambda) - h_c(i, \lambda)| + 1)} \right) \quad (5)$$

ここで、 $L$  は画像の輝度の階調数、 $h_p(i, \lambda)$ 、 $h_c(i, \lambda)$  はそれぞれ実写画像、レンダリング画像における輝度値が  $i$  である画素の全画素に占める割合である。また、 $avg_{\lambda}(\dots)$  は波長に関する平均を表す。これにより、実写画像と類似したヒストグラムとなるレンダリング画像のパラメータを割り付けられた個体ほど、類似度が高くなる。



図4 遺伝的アルゴリズム  
Fig. 4 Genetic algorithm

## 6. 実験結果

提案手法を適用した結果を図 5 ~ 図 7 に示す。実験環境は、CPU が Intel Core i5 760、GPU が NVIDIA GeForce GTX 460、グラフィックス API が OpenGL である。実験条件は以下の通りである。図 6 (c)、(f) は、ボリュームデータの格子数が  $280 \times 100 \times 186$  で、 $\kappa, I_m, \beta$  の範囲が  $0.0 \sim 1.0$ 、 $\kappa, I_m, \beta$  の量子化ビット数が 8bit、 $\kappa_s$  の範囲が  $0.0 \sim 2.0$ 、 $\kappa_s$  の刻み幅が 0.1 である。また、図 7 (c) は、ボリュームデータの格子数が  $252 \times 100 \times 194$  で、その他の実験条件は図 6 (c)、(f) と同様である。

図 6 (a)、図 6 (b) がそれぞれユーザが入力した実写画像とボリュームデータである。また、図 6 (c) が提案法により推定したレンダリングパラメータを用いてレンダリングした結果である。入力した実写画像と類似した写実的なレンダリング結果を生成できていることが確認できる。さらに、図 6 (c) を図 6 (a) に合成した結果が図 6 (d) である。自然な合成が行われており、この結果からも類似したレンダリング結果を生成できていることが確認できる。図 6 (e)、図 6 (f) はそれぞれ夕焼け雲の実写画像とその推定結果である。

図 5 は図 6 (c) を生成する際の類似度の推移を表すグラフである。計算時間の増加に伴い、類似度が収束に向かっていくことが確認できる。本実験では約 15 分の時点で類似度が十分大きいと判断し、推定処理を終了した。

さらに、応用として、文献 11) の手法で実写画像から雲のボリュームデータを作成し、作成した雲に対して提案法を用いてレンダリングパラメータを推定するという実験を行った。図 7 (a) がユーザが入力した実写画像であり、それをもとに作成したボリュームデータが図 7 (b) である。また、図 7 (a) に対して提案法により推定したレンダリングパラメータでレンダリングした結果が図 7 (c) である。青みがかった影を表現できていることが確認

できる．図 7 (d) は図 7 (c) に対して太陽光の方向を変更した結果である．

提案法の妥当性を確認するために，CG で作成した画像を入力としてレンダリングパラメータを推定するという実験を行った．図 7 (e) が入力画像で，それをもとに推定を行った結果が図 7 (f) である．また，推定したパラメータの値はいずれも相対誤差が 2% 以下であった．このことから，真値に極めて近い値を推定できていることが確認できる．

## 7. ま と め

本稿では，一枚の実写画像から大気の影響を考慮した雲のボリュームレンダリングにおけるレンダリングパラメータを推定する手法を提案した．提案法を用いることで，パラメータに対する専門的な知識を持たないユーザであっても実写画像のような写実的なレンダリング結果を得ることが可能となった．今後の課題としては，太陽方向の推定を行うことが挙げられる．

## 参 考 文 献

- 1) Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, and T. Nishita : A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds, *In Proceeding of ACM SIGGRAPH*, pp.19-28 (2000).
- 2) T. Nishita, Y. Dobashi, and E. Nakamae : Display of Clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light, *In Proceeding of ACM SIGGRAPH*, pp.379-386 (1996).
- 3) Henrik Wann Jensen, and Per H. Christensen : Efficient Simulation of Light Transport in Scenes with Participating Media using Photon Maps, *In Proceeding of ACM SIGGRAPH*, pp.311-320 (1998).
- 4) Antoine Bouthors, Fabrice Neyret, Nelson Max, Eric Bruneton, and Cyril Crassin : Interactive multiple anisotropic scattering in clouds, *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D)*, (2008).
- 5) Y. Yue, K. Iwasaki, B.-Y. Chen, Y. Dobashi, and T. Nishita : Unbiased, Adaptive Stochastic Sampling for Rendering Inhomogeneous Participating Media, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia 2010)*, Vol.29, No.6, pp.177:1-7 (2010).
- 6) 岩崎 航, 土橋 宜典, 山本 強 : 雲のボリュームレンダリングの編集システム, 情報処理学会研究報告, Vol. 2010-CG-141, No. 5, pp. 1-5, 2010
- 7) N. Bonneel, S. Paris, M. Van De Panne, F. Durand, and G. Drettakis : Single Photo Estimation of Hair Appearance, *Computer Graphics Forum (Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering)*, Volume 28, Issue 4, pp.1171-1180

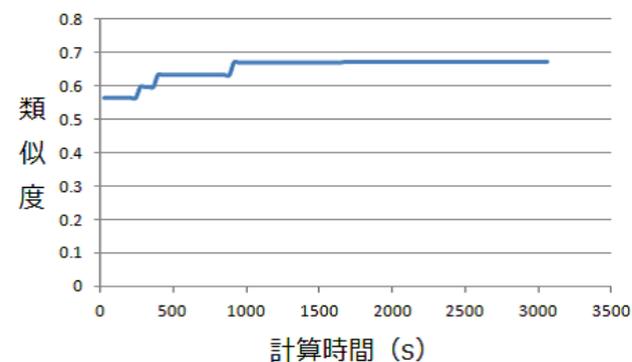


図 5 類似度の推移  
Fig. 5 A transition of similarity

- (2009).
- 8) Adolfo Munoz, Jose I. Echevarria, Jorge Lopez-Moreno, Francisco Seron, Mashuda Glencross, and Diego Gutierrez : BSSRDF Estimation from Single Images, *Computer Graphics Forum (Eurographics 2011)*, Volume 30, Issue 2, pp.455-464 (2011).
- 9) Raanan Fattal : Single Image Dehazing, *In Proceeding of ACM SIGGRAPH*, Volume 27, Issue 3, Article No.72 (2008).
- 10) 北野 宏明 : 遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1993).
- 11) Y. Dobashi, Y. Shinzo, T. Yamamoto : Modeling of Clouds from a Single Photograph, *Computer Graphics Forum (Pacific Graphics 2010)*, Volume 29, Issue 7, pp.2083-2090 (2010).

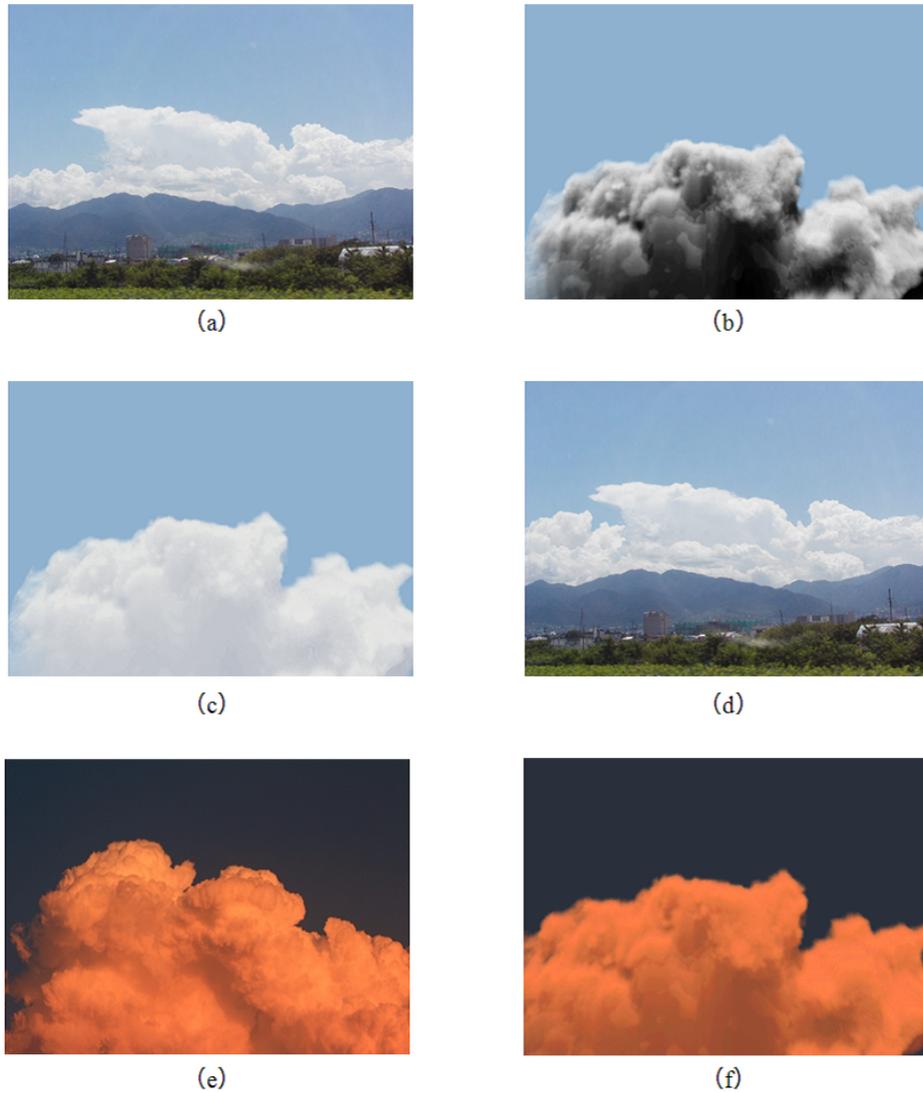


図 6 実験結果  
Fig.6 Results

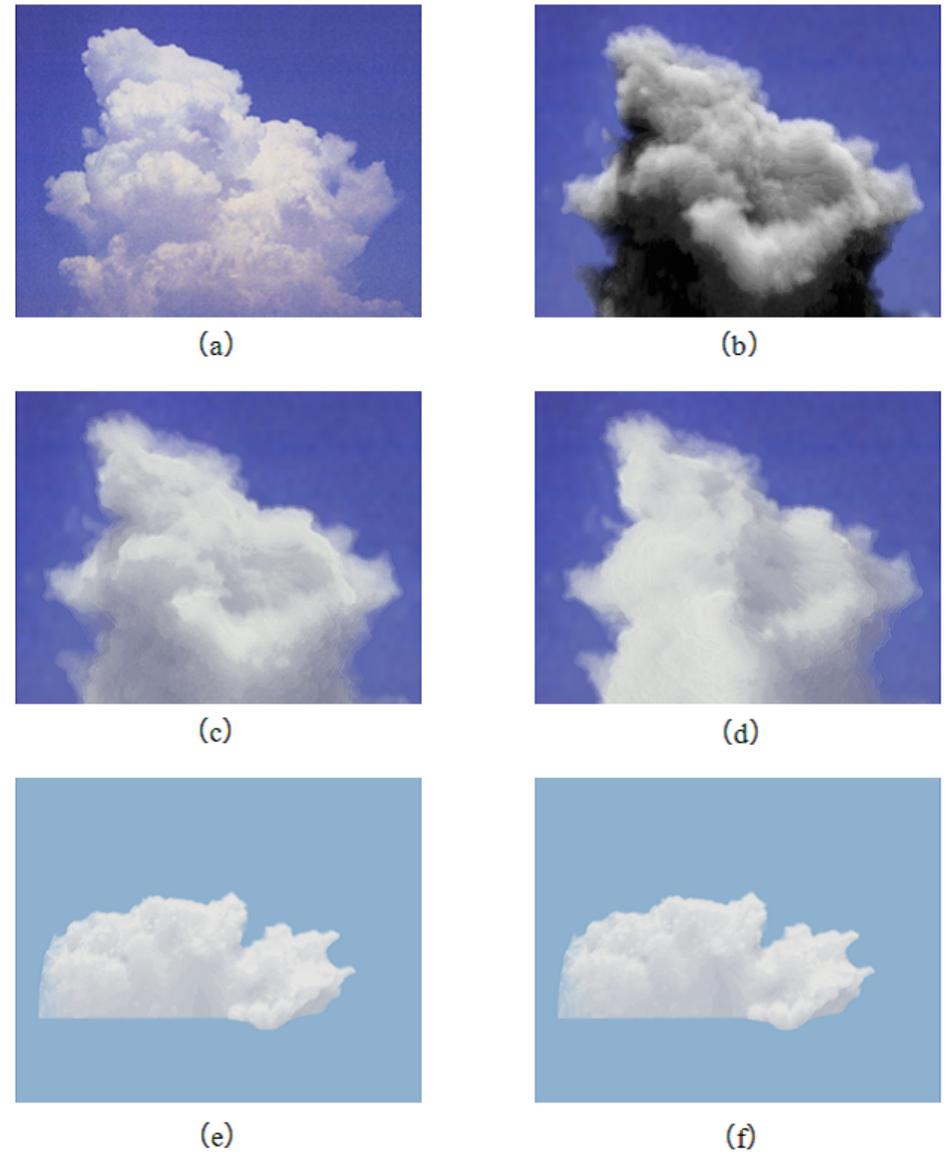


図 7 その他の実験結果  
Fig.7 Another example