

## 流体解析に基づく積雲のキーフレームコントロール

楠元克敏<sup>†</sup> 土橋宜典<sup>†</sup> 山本 強<sup>†</sup>

CGを用いて生成される映像の中でも、雲の表示は重要な要素の一つである。本稿では、綿のような形状として現れる積雲に着目し、積雲が所望の形状となるよう流体シミュレーションをコントロールする手法を提案する。積雲をシミュレーションする際、その形状や大きさはシミュレーションに使用する様々なパラメータに依存する。ユーザが意図した雲が生成されるようこれらのパラメータを手動で調節することは極めて難しい。そこで本研究では、ユーザが指定した分布の雲が自動生成されるよう流体シミュレーションをコントロールする。提案手法により、パラメータの調整に試行錯誤することなく、キーフレームで指定した所望の形状・分布に変化する積雲のアニメーション生成が可能である。

### Keyframe Control of Cumulus Clouds based on Computational Fluid Dynamics

KATSUTOSHI KUSUMOTO,<sup>†</sup> YOSHINORI DOBASHI<sup>†</sup>  
and TSUYOSHI YAMAMOTO<sup>†</sup>

Display of clouds is one of the important factors in creating images of outdoor scenes by using computer graphics. In this paper we present a new method for controlling cumulus clouds like cotton. When simulating cumulus clouds, their shapes depend on many simulation parameters. It is difficult to adjust those parameters so that the clouds form desired shapes. Therefore, we propose a method that can control the cloud simulation in order to generate clouds of the shape specified by user. The user specifies the multiple shapes of the clouds at several key frames. By using our method, cumulus clouds that change into specified shapes can be animated without repeating simulations with various parameter values determined by trial and error.

#### 1. はじめに

CGの分野では、煙、炎、水などの流体现象を扱ったシミュレーションに関する研究が注目されている。従来研究では、数値流体解析を利用することで、極めてリアルな映像を生成することに成功している<sup>4)</sup>。しかし、数値流体解析による手法では、ユーザが意図した結果となるようシミュレーションをコントロールすることは難しい。この問題点を解消するために、流体现象の形状や動きをコントロールする方法がいくつか提案されている<sup>3)5)8)9)11)</sup>。このような研究は、ゲームや映画など、制作者の意図を大きく反映するような映像制作への応用が期待される。本論文では、流体现象の中でも特に雲の表現に着目し、雲が所望する形状となるようコントロールすることを目的とする。

自然界では、バブル状に鉛直方向に高々と発達した積乱雲、綿のような積雲、セル形状をもつ巻積雲など

様々な種類の雲が観察される。CG技術を用いて屋外景観を表現する場合、自然界で観察されるような雲の表示は非常に重要な要素の一つである。写実的な雲をシミュレーションで表現する有効な方法の一つとして、数値流体解析手法を利用した手法が挙げられる。しかし、数値流体解析手法により生成される雲の形状・大きさなどは様々な物理パラメータに依存する。そのため、ユーザが所望する雲が生成されるようこれらのパラメータを調節することは極めて困難である。この問題点の改善を目的とする研究として文献<sup>1)</sup>では、積乱雲の形状コントロールを行う方法が、文献<sup>12)</sup>では、セル状の雲の形状コントロールを行う方法がそれぞれ提案された。しかし、これらの手法はそれぞれ積乱雲、セル状の雲に特化した方法であり、その他の種類の雲に適用することは不可能である。

そこで本研究では、雲の種類の中でも積雲に着目し、ユーザが意図した形状、分布の積雲が自動生成される方法を提案する。提案手法では、ユーザは所望する雲の分布を表す複数の target field をキーフレームとし

<sup>†</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市

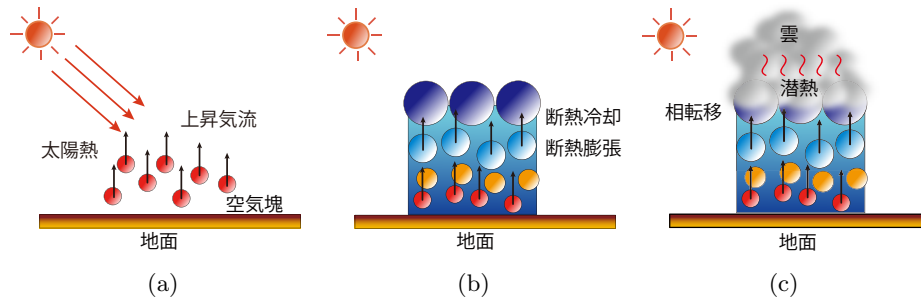


図 1 積雲の生成過程

て指定する. 指定された target field に基づきシミュレーションのパラメータを調整することで雲の発生量と雲の形状をコントロールする. 提案手法では, 雲の生成過程に影響を及ぼす物理パラメータを制御するため, リアルな形状を保ったまま所望する分布をもつ積雲の形状変化アニメーションの生成が可能である.

## 2. 関連研究

### 2.1 雲のモデリング

CG の分野において雲のモデリングに関する従来研究は多数行われている. 手続き的ノイズやフラクタルを利用すれば, 所望する 3次元形状を有する雲の密度分布を低コストで生成できる<sup>2)</sup>. しかし, これらの方法では, 雲が生成される物理現象を考慮していないため, 雲の成長過程を示すアニメーションや雲の複雑な動きを表現することは困難である. そこで, 雲の物理現象を考慮した手法が提案されている<sup>6)7)</sup>. これらの手法では, 大気流体モデルの数値シミュレーションを行っており, よりリアルな動き・形状の雲を表現できる. しかし, 生成される雲の形状などは入力として指定する様々な物理パラメータに依存するため, ユーザの意図した形状の雲を生成することは難しい.

### 2.2 流体シミュレーションのコントロール

流体現象のコントロールに関する研究は現在までにいくつか報告されている. Treuille らは流体解析のコントロールに関する最初の研究として, キーフレームで煙の形状をコントロールする方法を提案した<sup>11)</sup>. その後, より効率的な方法として, Fattal らは目標形状に応じた二つの新しい外力を適用することで煙の形状変化アニメーションを生成する方法の提案を行った<sup>3)</sup>. また, Hong らはポテンシャル場による煙のコントロール手法を示した<sup>5)</sup>. Shi らはフィードバック制御を用いることで煙, 水などの形状変化を行う手法を提案した<sup>8)9)</sup>. これらの従来研究では, 煙や水の形状を動物や

文字などの形状に変化させるもの想定している.

一方, 我々は現実世界で観察されるようなリアルな積乱雲をユーザが描いた雲の輪郭線に一致するようコントロールする方法を提案した<sup>1)</sup>. さらに, 文献<sup>12)</sup>では, ユーザが指定した分布を持ったセル状の雲が生成されるようコントロールする方法を提案した. しかし, これらの手法では, コントロールされる雲の種類はそれぞれ積乱雲, セル状の雲のみに制限されており, 積雲に適用することは不可能である.

提案手法では, 上述の問題に着目し, 積雲のシミュレーションをコントロールする新しい方法を提案する. 提案手法により, キーフレームとして複数の目的形状を指定することで, ある形状から別の形状に変化する積雲の形状変化アニメーションの生成が可能である.

## 3. 積雲の流体シミュレーション

積雲のシミュレーションには宮崎らの手法<sup>6)</sup>に基づき, 非圧縮性の Navier-Stokes 方程式を文献<sup>10)</sup>の手法を用いて数値解析することで行う. 積雲の生成される過程について図 1 に示す. 積雲は対流雲の一種に分類され, 上昇気流により生成される. 上昇気流は太陽熱などにより暖められた地面付近の空気が浮力を得ることによって発生する (図 1(a)). そして, 水蒸気を含む空気の塊が上昇気流と共に上空へ上昇する. このとき, 空気の塊は断熱冷却・断熱膨張により上空に行くほど温度が低下する (図 1(b)). その後, 空気の塊の水蒸気量が飽和水蒸気量に達することにより, 水蒸気が雲 (水滴) に状態変化 (相転移) する (図 1(c)). 相転移の際には潜熱と呼ばれる熱量が発生する. シミュレーション空間を  $N_x \times N_y \times N_z$  の格子に分割し, 各格子点に速度  $\mathbf{u} = (u, v, w)$ , 圧力  $p$ , 水蒸気密度  $q_v$ , 雲密度  $q_c$ , 温度  $T$  を割り付ける. そして, これらの値の時間変化を数値計算する. 以下に, 積雲のシミュレーションに利用する大気流体モデルについて説明する.

### 3.1 大気流体モデル

大気は密度が一定で非圧縮、非粘性の流体であると仮定する。このとき、大気の流れ場は次式の非圧縮、非粘性の Navier-Stokes 方程式で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  は大気密度、 $\mathbf{B}$  は浮力、 $\mathbf{f}$  は風などの外力を表す。浮力  $\mathbf{B}$  は以下の式で表される。

$$\mathbf{B} = k_b \frac{T - T_{amb}}{T_{amb}} \mathbf{z} - g q_c \mathbf{z} \quad (3)$$

ここで、 $T_{amb}$  は環境温度、 $\mathbf{z}$  は鉛直方向の単位ベクトル、 $k_b$  は浮力の係数、 $g$  は重力の係数である。環境温度  $T_{amb}$  は静力学的平衡状態にある大気温度のことであり、地面からの高度に対して、線形に減少する。式 (3) の右辺第 1 項は、空気塊の温度と環境温度との差に比例した浮力が発生することを表し、右辺第 2 項は水滴の落下にともなう周辺空気の引きずりを表す。

雲密度  $q_c$ 、水蒸気密度  $q_v$  は次式で表される。

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) q_c + C_c \quad (4)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) q_v - C_c + S_v \quad (5)$$

$$C_c = \alpha (q_v - q_s) \quad (6)$$

ここで、 $C_c$  は相転移によって発生する雲の量、 $S_v$  は水蒸気源からの水蒸気の供給量、 $\alpha$  は相転移率、 $q_s$  は飽和水蒸気密度である。

最後に、温度は以下のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) T - \Gamma_d v_z + Q C_c + S_T \quad (7)$$

ここで、 $\Gamma_d$  は乾燥断熱減率、 $Q$  は潜熱の係数、 $S_T$  は熱源からの熱量を表す。

シミュレーションにおける初期条件として、速度は微小乱数により設定し、雲密度はすべての格子で 0、水蒸気密度および温度は、それぞれ、環境水蒸気密度および環境温度に設定する。ここで、環境水蒸気密度は地面からの高度に対して、指数関数的に減少するように設定する。また、境界条件は上下境界では固定境界条件とし、水平境界では周期境界条件とする。

## 4. 積雲のコントロール方法

提案手法では、3 節で示した大気流体モデルのシミュ

レーションをコントロールすることで、目的とする積雲の形状を自動生成させる。コントロールの基本的な考え方について以下に示す。

まず、所望する雲の目的分布である target field を指定する。次に、指定した target field を基にその位置にのみ雲が発生するようシミュレーションを行う。これには熱源の強さをコントロールすることで実現する。前節で述べたように、積雲は上昇気流の影響により生成される。上昇気流は熱源からの熱により発生するため、熱源の位置を target field に応じて決定することで積雲が発生する位置を制御することができる。しかし、target field に応じて熱源の位置を設定だけでは生成される雲の量を調節することはできない。これは、シミュレーション中に熱源から毎ステップ一定量の熱が供給され続けるためである。そのため、雲が過剰に発生することにより、指定した目的形状を外れて雲が発達してしまうことがある。この問題を改善するため、target field と発生した雲の分布を比較し、供給する熱源からの熱量を調節することで雲の過剰な発生を抑制する。

提案手法では、target field をキーフレームで変更することで、積雲の形状変化アニメーションの生成を行う。ただし、 $t$  番目の目的形状と  $t+1$  番目の目的形状をユーザが指定した場合、target field はその 2 つの目的形状を補間させたものを指定することで徐々に変化させる。これは積雲の滑らかな形状変化を実現するためである。積雲は一般的に風などにより水平方向に移動しながら発達する。しかし風の効果を考慮した場合は、目的形状通りの雲の生成をコントロールすることは難しい。そこで提案手法ではシミュレーション空間の各格子に割り当てられた状態量を水平方向へ移流させることで、擬似的な風の効果を実現する。以下、提案手法について詳しく説明する。

### 4.1 target field

ユーザは目的とする雲の分布である target field をキーフレームで指定する。target field  $\lambda$  には、指定した目的分布に応じて雲が発生させる位置には 1 を、それ以外は 0 としたスカラー場として定義する。提案手法では、この target field  $\lambda$  の値を基に、値が 1 の部分に熱源を設置することで雲の発生を促す。そして、target field  $\lambda$  の値を基に、雲の目標値を決定することで、その目標値の雲が発生するよう制御を行う。

次に、キーフレームで指定した target field の補間方法について説明する。補間には文献<sup>3)</sup>の方法を利用し、初期分布から目的分布まで徐々に変化するスカラー場を生成する。図 2 は文献<sup>3)</sup>を用いて生成した

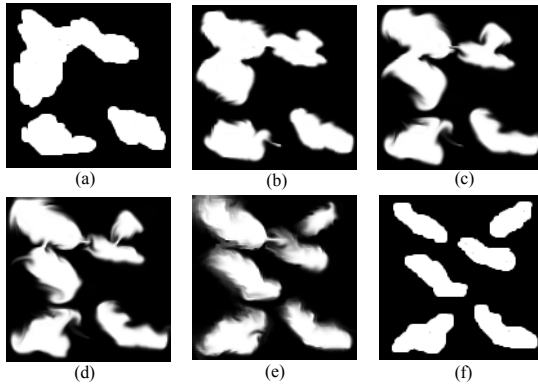


図 2 target field の補間

target field の一例である。図 2(a) を  $t$  番目の目的形状、図 2(f) を  $t+1$  番目の目的形状とした場合、図 2(b)～(e) は補間された中間のスカラー場である。補間に際して、0～1 の間の値が発生するため、あるしきい値を用いて二値化したスカラー場を target field  $\lambda$  として指定する。

以降で target field を利用した積雲のコントロール方法の詳細について説明する。

#### 4.2 熱源のコントロール

まず、指定した分布の位置にのみ雲が発生するよう target field  $\lambda$  の値が 1 の部分に熱源を設置する。また、熱源から供給される熱量の大きさについても制御を行う。これは、前述したように、雲が目的分布に一致した後も過剰に発生することで目的分布を外れて発達してしまうことを防ぐためである。熱量の大きさは発生した雲の量をフィードバックし、target field  $\lambda$  と比較することでその差分に応じた熱源の強さの調節を行う。具体的なコントロールの方法の流れについて以下に示す。シミュレーションにより発生した雲の密度を取得し、シミュレーション空間の最下層の格子点  $(i, j, 0)$  ごとに鉛直方向の雲の密度の平均値  $A_c$  を算出する。すなわち、

$$A_c(i, j) = \frac{1}{N_z} \sum_{k=0}^{N_z} q_c(i, j, k) \quad (8)$$

$A_c$  は  $N_x \times N_y$  の二次元の分布として表される。熱源からの熱量の調整にはフィードバック制御の一種である比例制御を利用する。次式を用いて算出した値  $S_{CT}$  を熱量のコントロール量として、式 (7) 中の  $S_T$  の代わりに境界条件として熱量を付加する。

$$q_{ct}(i, j) = q_g \lambda(i, j) \quad (9)$$

$$S_{CT}(i, j) = K_c(q_{ct}(i, j) - A_c(i, j)) \quad (10)$$

ここで、 $q_g$  は目標とする雲の密度を調節するための係数であり、target field  $\lambda$  を基に、雲の目標値  $q_{ct}$  を算出する。また、 $K_c$  は供給する熱量を調節するための比例ゲインである。式 (10) から目標値  $q_{ct}(i, j)$  と  $A_c(i, j)$  との差分に応じた熱量を決定する。雲の発生量が目標値に近いほど制御量は小さくなる。以上に示した処理を毎ステップ行うことで熱量をコントロールする。

#### 4.3 移流項のコントロール

提案手法ではシミュレーションで利用する状態量を水平方向へ移流させることで、擬似的な風の効果を表現する。具体的には、それぞれの状態量の支配方程式の移流項に対し、速度場成分  $\mathbf{u}$  に任意の速度場成分を付加する。この効果を考慮した場合の速度場の支配方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -((\mathbf{u} + \mathbf{u}_a) \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{u}_a$  は水平方向成分のみ値を持ち、方向や速度の大きさを任意に指定する。また雲、水蒸気、温度の状態量についても同様に移流させることにより、所望する方向に所望する速度で流れる雲のシミュレーション結果を得ることができる。

### 5. 実験結果

本節では、提案手法の実験例について示し、提案手法の有効性について検討する。実装環境は CPU:Core i5, グラフィックスハードウェア:NVIDIA GeForce GT 330M を搭載した PC である。グラフィックス API には OpenGL を用いた。雲の数値シミュレーションは CUDA を利用し、雲の表示にはシミュレーション空間の各格子の雲密度分布よりボリュームレンダリングを利用してレンダリングを行った。まず、単純な形状として、図 3(a), (b) をそれぞれ  $t$  番目、 $t+1$  番目の target field として指定して実験を行った結果を図 4 に示す。図 4(a), (b), (c), (d) はそれぞれ、80, 160, 240, 300step 目の結果を表示したものである。図 4(a) は  $t$  番目の target field を指定した場合の結果であり。図 4(f) は、 $t+1$  番目の target field を指定した結果である。中間の画像については、4.1 節で示した方法により、徐々に target field を変化させてシミュレーションを行って生成した。シミュレーションで用いた格子数は  $192 \times 128 \times 64$  であり、1 ステップあたりのシミュレーション時間は 1.1 秒であった。

次に複雑な形状として、赤外衛星画像から抽出した分布である、図 3(c), (d) をそれぞれ  $t$  番目、 $t+1$  番目の target field として指定して実験を行った結果を

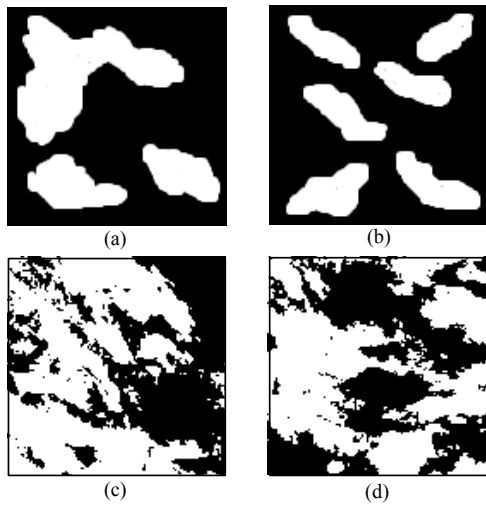


図3 target field

図5に示す。図5(a), (b), (c), (d)はそれぞれ、80, 120, 180, 220step目の結果を表示したものである。図5(a)はt番目のtarget fieldを指定した場合の結果であり。図5(f)は、t+1番目のtarget fieldを指定した結果である。シミュレーションで用いた格子数は $128 \times 128 \times 64$ であり、1ステップあたりのシミュレーション時間は1.5秒であった。実験結果から、提案手法を用いて生成した画像では、target fieldとしてキーフレームで指定した2つの目的形状に近似した雲の映像が生成されていることがわかる。また、図6、図7は図3のtarget fieldを利用して生成した雲を別の視点から見た場合の例である。実験では、target fieldを2つのみを指定しているが、2つ以上指定した場合でも提案手法を利用することでさらに形状が変化する雲のアニメーションを生成することが可能である。

以上から、提案手法により、target fieldとしてユーザが所望する形状、分布を描いて指定するだけで、様々な形状、分布を持った積雲の形状変化アニメーションの生成が可能である。本節で示した雲の形状や分布、雲の形状変化アニメーションをシミュレーションパラメータの調整で生成することは極めて難しい。

## 6. まとめ

本稿では、キーフレームとして指定した目的形状を持つtarget fieldに近似した積雲が生成されるよう、積雲のシミュレーションをコントロールする方法を提案した。提案手法では、スムーズな形状変化が実現するよう、文献<sup>3)</sup>の方法を用いて2つのtarget fieldを補間し、徐々に変化させる。そして、target fieldを基に物理パラメータのひとつである熱源の係数をコント

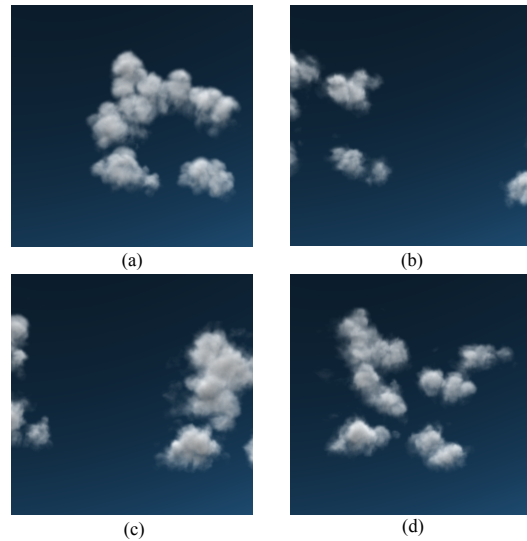


図4 実験例: 単純な形状

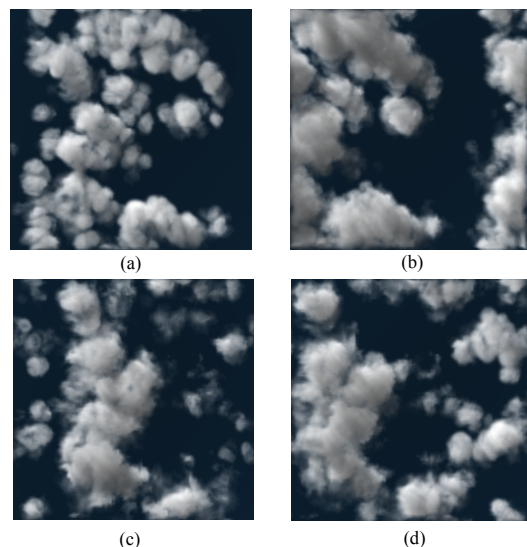


図5 実験例: 衛星画像から抽出した形状

ロールすることで、所望の形状の積雲を生成できる手法を提案した。熱源のコントロールでは、積雲の生成過程と熱源の関連性に着目し、target fieldに応じてまず熱源位置の設定を行い、さらに雲の過剰な発生を抑制するために、毎ステップ雲の密度をフィードバックし、target fieldを基に生成した目的分布の値と比較することで、供給する熱源の強さを自動調整する。

提案手法を利用することで、target fieldをキーフレームとして指定するだけで、target fieldに近似した積雲の形状変化アニメーションの生成が可能である。しかし、提案手法では、アニメーションの生成のために水平方向の移動に擬似的な移流項を利用しているが、そ

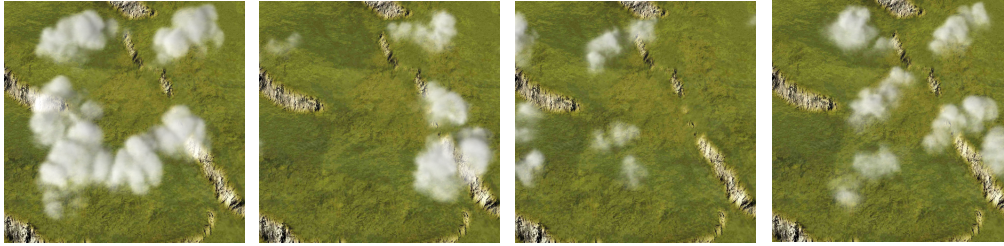


図 6 視点変更した実験例: 単純な形状

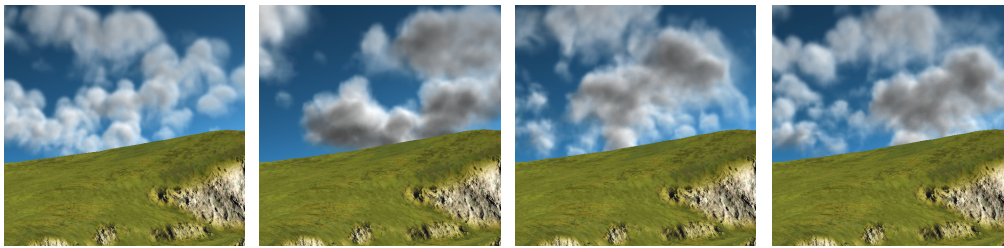


図 7 視点変更した実験例: 衛星画像から抽出した形状

の速度は提案手法では全空間で一様としている。そのため、今後の課題として、水平方向の移動にユーザの意図を反映できるようにコントロールする方法の提案が挙げられる。

#### 謝辞

この研究は独立行政法人科学技術振興機構、CRESTによりサポートされています。

#### 参考文献

- 1) Y. Dobashi, K. Kusumoto, T. Nishita, and T. Yamamoto. Feedback control of cumuliform cloud formation based on computational fluid dynamics. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 27, No. 3, 2008.
- 2) D. S Ebert, F. Kenton Musgrave, D. Peachey nad K. Perlin, and S. Worley. Texturing modeling: a procedural approach. In *Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling*.
- 3) R. Fattal and D. Lischinski. Target-driven smoke animation. In *SIGGRAPH '04: ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pp. 441–448. ACM, 2004.
- 4) N. Foster and R. Fedkiw. Practical animation of liquids. In *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 23–30. ACM, 2001.
- 5) J. Hong and C. Kim. Controlling fluid animation with geometric potential: Research articles. *Comput. Animat. Virtual Worlds*, Vol. 15, No. 3-4, pp. 147–157, 2004.
- 6) R. Miyazaki, Y. Dobashi, and T. Nishita. Simulation of cumuliform clouds based on computational fluid dynamics. In *EUROGRAPHICS 2002 Short Presentations*, pp. 405–410, 2002.
- 7) R. Miyazaki, S. Yoshida, T. Nishita, and Y. Dobashi. A method for modeling clouds based on atmospheric fluid dynamics. In *PG '01: Proceedings of the 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pp. 363–372. IEEE Computer Society, 2001.
- 8) L. Shi and Y. Yu. Controllable smoke animation with guiding objects. In *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, pp. 140–164, 2005.
- 9) L. Shi and Y. Yu. Taming liquids for rapidly changing targets. In *SCA '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 229–236. ACM, 2005.
- 10) J. Stam. Stable fluids. In *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 121–128. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999.
- 11) A. Treuille, A. McNamara, Z. Popović, and J. Stam. Keyframe control of smoke simulations. In *SIGGRAPH '03: ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pp. 716–723. ACM, 2003.
- 12) 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強. 流体解析に基づくセル状の雲のコントロールシミュレーション. 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J92-D(12), pp. 2270–2277. 電子情報通信学会, 2009.