

I-012

流体解析に基づくユーザの意図を反映したセル状の雲の生成法 A Method for Modeling Cell-Like Clouds based on Computational Fluid Dynamics

楠元 克敏† 土橋 宜典† 山本 強†
Katsutoshi Kusumoto Yoshinori Dobashi Tsuyoshi Yamamoto

1. まえがき

3次元コンピュータグラフィックス(CG)を用いて生成される映像の中でも、雲の表示は屋外景観などの表現において重要な要素の一つである。CG技術を用いて雲のリアルな動きや形状を表現する効果的な方法として、流体シミュレーションに基づく手法が挙げられる。

映像制作を行う上で、制作者の意図した雲の形状や分布などが求められることがある。しかし、雲の形状・大きさなど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調節することは極めて困難である。

本稿では、層積雲・高積雲・巻積雲などのセル状に現われる雲に着目し、ユーザの意図を反映した雲の分布が自動生成される方法を提案する。提案手法では、ユーザは所望とする雲の分布を表す **target field** を指定する。そして、指定された **target field** に基づきシミュレーションを行うことで所望の大きさ・分布となるセル状の雲を生成する。

2. 関連研究

CG技術を利用して雲を表現する方法はいくつか存在するが、流体シミュレーションによる方法はリアリティを追求するには効果的である。宮崎らは数値流体解析を用いて、大気流体モデルをシミュレーションすることで、写実的なセル状の高積雲、層積雲などの雲を生成する方法を提案した[2]。しかし、生成される雲の大きさ・分布などは熱源の配置、熱源の強さ、水蒸気の量などの様々なパラメータに依存してしまう。そのため、ユーザが意図した雲を生成するためには、それらのパラメータを細かく設定しなければならない。しかし、ユーザの意図に一致する雲が生成されるようなパラメータを細かく設定するには膨大な手間と労力を必要としてしまう。

本研究では、上述の問題点を解決するため、ユーザが直感的かつ容易に所望とする雲の生成を可能とする方法を提案する。

3. 提案手法

提案手法では、ユーザは所望とする雲の大きさ・分布の雲が生成されるようコントロールする **target field** を直接画面上で描画することにより形成する。これには Orzan らが提案した **diffusion curves** とよばれる手法[3]を利用する。これは、曲線と曲線の右側・左側の RGB 成分をそれぞれ指定するだけで、陰影を伴った効果的な色づけを可能とする方法である。具体的には、描いた曲線を **color source** とし、拡散方程式に適用することで指定した色成分を拡散させ、空間中にその色成分を滲ませることで滑らかな

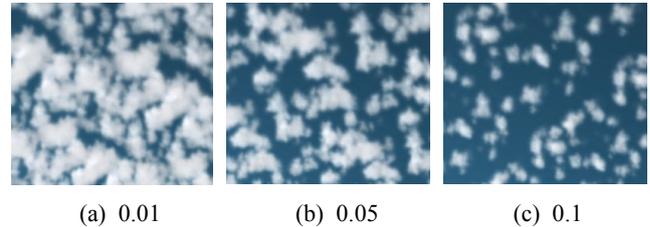


図1 熱拡散係数による比較例

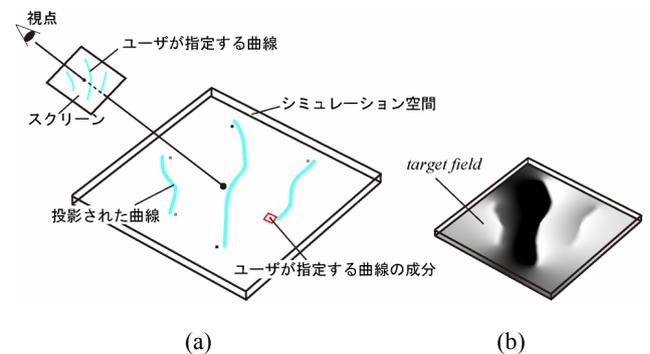


図2 提案手法の概要

スカラー場を定義できる。本研究では、**diffusion curves** を用いてユーザにより形成された **target field** を基に、雲のシミュレーションに使用されるパラメータのコントロールを行う。これにより、**target field** に応じた大きさと分布の雲が生成される。雲のシミュレーションには宮崎らの手法[2]を利用する。

シミュレーションのコントロールは以下のように行う。基本的な考え方は、形成された **target field** の値が大きい部分にはセルの大きな雲が、値が小さい部分にはセルの小さな雲が生成されるようシミュレーション制御を行う。これは、熱拡散係数を **target field** の値に依存させることで実現する。熱拡散係数とは、大気流体シミュレーションに使用する熱の支配方程式の熱拡散項を調節するためのパラメータである。図1に、熱拡散係数によるセル状の雲の比較実験例を示す。図1(a), (b), (c)はそれぞれ熱拡散係数を 0.01, 0.05, 0.1 としたときの出力結果である。実験例から熱拡散係数を大きくするほど雲のセルの大きさが小さくなる傾向がわかる。そのため、熱拡散係数を **target field** の値に比例させることにより、ユーザの所望とする分布の雲を生成する。以下、提案手法について詳しく説明する。

3.1 熱拡散係数の制御

まず、所望の雲の分布を表す **target field** の指定方法について述べる。図2(a)に示すように、ユーザはスクリーンに所望の雲が生成されるよう、曲線と曲線の始点と終

†北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市

点の両側の値を指定する。指定する値には 0-255 までの値を用いる。曲線の任意の点の値は始点と終点の値から線形補間により決定する。シミュレーション空間は、格子状に分割しておき、diffusion curves の手法[3]を用いることで、図 2(b)のような滑らかに値が変化するスカラー場である target field を生成する。提案手法では、target field から得られる値に比例するよう、熱拡散係数をコントロールする。熱拡散係数の制御を考慮した温度場の支配方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial T(i, j, k)}{\partial t} = -(\mathbf{u}(i, j, k) \cdot \nabla)T(i, j, k) + \lambda(i, j)\kappa_T \Delta T(i, j, k) + QC(i, j) \quad (1)$$

ここで、 κ_T は拡散係数、 Q は潜熱係数、 $C(i, j, k)$ は雲の発生量、 $\mathbf{u}(i, j, k)$ は速度、 $T(i, j, k)$ は温度、 $\lambda(i, j)$ は target field の値である。target field の値 $\lambda(i, j)$ が大きい部分ほどセルの小さな雲が発生し、target field の値が小さい部分ほどセルの大きな雲が生成される。上式の右辺第一項は温度場の移流を、第二項は温度場の拡散を、第三項は潜熱の発生を表す。

以上に説明した熱拡散係数の制御を用いて雲のシミュレーションを行うことで、ユーザが所望とする位置に所望とする大きさのセル状の雲を生成させる。

4. セル状の雲のシミュレーション

セル状の雲のシミュレーションには宮崎らの手法[2]を利用する。セル状の雲をシミュレーションするためにはベナール対流というものを考慮しなければならない。ベナール対流は流体の中で、上方が冷たく、下方が暖かいという不安定な状況を解消しようと、上方の流体が下降、下方の流体が上昇する循環運動により発生する。ベナール対流により形成されるセル状のパターンをベナール胞と呼び、セル状の雲は大気中にベナール対流が発生することにより生成される。シミュレーションでは、境界条件としてシミュレーション空間の下面部に上面部よりも高い温度となるよう固定値をそれぞれ指定することでベナール対流を生み出す。シミュレーション空間は格子状に分割し、各格子点には、速度 \mathbf{u} 、水蒸気密度 q_w 、雲密度 q_c 、温度 T を割り付ける。各格子点に割り当てられた状態量の時間変化を数値シミュレーションする。ベナール対流が形成され、底面の速度が鉛直方向に上昇している部分のみを水蒸気源とみなし、その場にある一定量の水蒸気を加えることで、水蒸気を上昇させる。上昇する水蒸気が相転移を起こすことで雲が形成される。

5. 実験結果

提案手法を用いてセル状の雲のシミュレーションをコントロールした結果を図 3 に示す。図 3(a)(c)はユーザが描いた曲線を基に生成した target field を表し、図 3(b)(d)はそれぞれ、図 3(a)(c)の target field を用いて雲のシミュレーションをコントロールした結果である。実装環境は、CPU:Core2Extreme X9650、グラフィックスハードウェア:Geforce8800GT を搭載した PC である。グラフィックス API には OpenGL を用いた。シミュレーションで用いた格子数は $256 \times 256 \times 10$ であり、1 フレームあたりのシミュレーション時間はおおよそ 1 秒である。提案手法により、ユ

ーザが所望とする雲となるよう描いた曲線を基に target field に応じた様々な大きさ・分布のセル状の雲を生成することが可能である。本節で示した雲を生成するようシミュレーションパラメータを設定することは極めて困難である。

6. まとめ

本稿では、より直感的にユーザが所望とするセル状の雲を自動生成する方法を提案した。提案手法により、ユーザは曲線と曲線の成分を指定するだけで、細かいパラメータをシミュレーション中にコントロールすることなく、ユーザの意図を反映した所望とする大きさ・分布のセル状の雲を生成することが可能になった。

セル状の雲の大きさには水蒸気の拡散係数や浮力の大きさも影響されると言われている。そのため、今後の課題として、それらのパラメータのコントロールも考慮に入れることでより効果的な雲の制御を可能とする手法の開発などが挙げられる。

参考文献

- [1] DOBASHI, Y., KANEDA, K., YAMASHITA, H., OKITA, T., AND NISHITA, T. 2000. A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds, In *Proceeding of ACM SIGGRAPH 2000*, Annual Conference Series, 19-28
- [2] MIYAZAKI, R., YOSHIDA, S., DOBASHI, Y., AND NISHITA, T. 2001. A Method for Modeling Clouds based on Atmospheric Fluid Dynamics. *Proc. PACIFIC GRAPHICS 2001*, pp 363-372, 2001
- [3] ORZAN, A., BOUSSEAU A., WINNEMOLLER, H., BARLA P., THOLLOT, J., AND SALESIN D. 2008. Diffusion Curves: A Vector Representation for Smooth-Shaded Images. *ACM Transactions on Graphics 27 (Proceedings of SIGGRAPH 2008)*

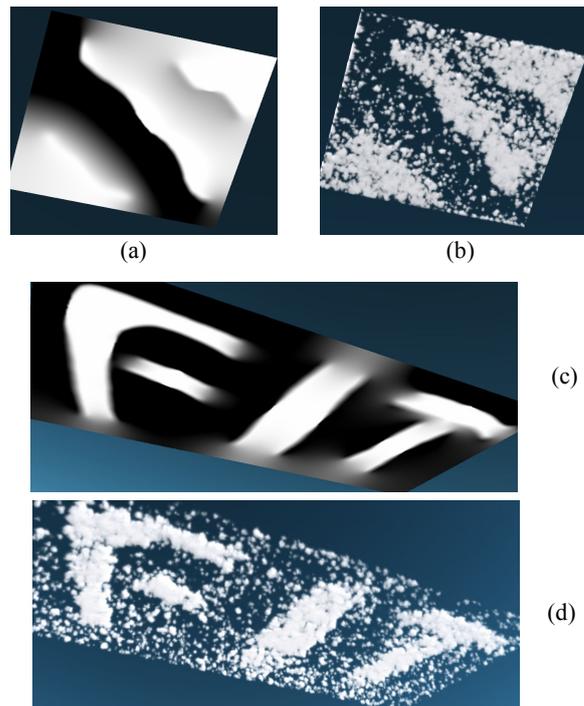


図 3 適用例