

流体解析に基づくセル状の雲のコントロール

楠元克敏[†] 土橋宜典[†] 山本 強[†]

CGの分野では、炎、煙、水などの流体现象をユーザが所望する形状となるようコントロールすることは興味深い研究課題の一つであり、いくつかの方法が提案されている。本稿では、セル状に現れる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。セル状の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、所望の大きさ・分布となるセル状の雲の生成が可能である。

A Control Method for Cell-like Clouds based on Computational Fluid Dynamics

KATSUTOSHI KUSUMOTO,[†] YOSHINORI DOBASHI[†]
and TSUYOSHI YAMAMOTO[†]

Controlling the simulation of natural phenomena such as fire, smoke, water so that it forms desired shape is challenging problem in computer graphics, and many methods have been proposed. In this paper we present a new method for controlling cell-like clouds. The shapes of cell-like clouds depend on many simulation parameters to simulate them. It is difficult to adjust those parameters so that the clouds form desired shape. Therefore, we control the cloud simulation in order to generate clouds of the distribution specified by user. Our method can generate cell-like clouds with desired shape without repeating simulations with various parameter values determined by trial and error.

1. はじめに

CGの分野では、炎、煙、水といった流体现象の表現を応用し、ユーザが所望する形状となるようそれらの物理シミュレーションをコントロールする研究が注目されている³⁾⁴⁾⁸⁾⁹⁾¹¹⁾。そのような研究は、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。本稿では、様々な流体现象として表現される自然現象の中でも雲に着目し、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や、セル状に現れる高積雲など様々な種類の雲が観察される。そのため、CG技術などを用いて屋外景観を表現する場合、雲の表示は極めて重要な要素と言える。写実的な雲をシミュレーションで生成する場合、流体解析に基づく方法が最も有効的だとされてい

る。しかし、流体シミュレーションに基づいた従来の手法では、生成される形状は様々な物理パラメータに依存し、ユーザが所望する形状の雲が生成されるようそ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、雲の形状をコントロールする方法が提案された¹⁾。しかし、この手法は積乱雲のコントロール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、層積雲・高積雲・巻積雲などのセル状に現れる雲に着目し、ユーザが意図した分布の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 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に利用する物理パラメータを制御することで所望の大きさ・分布となるセル状の雲の生成を行う。

以降、本稿の構成は以下の通りである。2章で関連研究について議論する。3章ではセル状の雲のシミュレーション方法について述べる。4章ではセル状の雲を所望の形状となるようコントロールする方法につい

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市

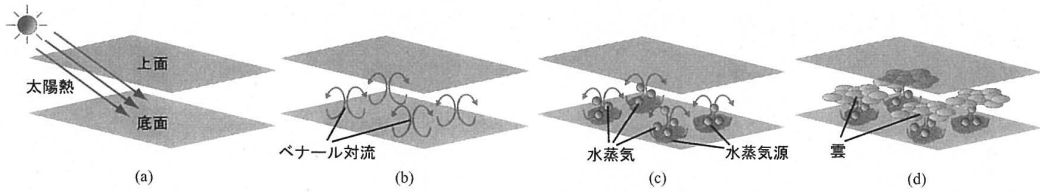


図 1 セル状の雲の生成過程

て説明する。5章で提案手法を用いて生成した適用例を示し、その有効性の考察を行う。最後に6章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 雲のモデリング

CG技術を用いて雲をモデリングする手法は数多く提案されている。雲の3次元形状を生成する擬似的な方法として、手続きのノイズ、またはフラクタルを用いた方法がいくつか提案されている²⁾。

また、物理現象に基づいた流体解析を利用した方法も提案されている⁵⁾⁶⁾。これらの方法は上述した方法に比べ計算コストは高くなるが、物理現象に基づいたシミュレーションを行うため、雲の動きや形状などを考慮したリアルな雲のアニメーションを生成するには有効である。しかし、シミュレーションに用いる熱源の配置、熱源の強さ、風の方向、水蒸気量などのパラメータが生成される雲の大きさや形状に影響を及ぼしてしまう。そのため、ユーザーが意図した雲が生成されるよう適切なパラメータを見つけ出すことは極めて困難である。

2.2 流体シミュレーションのコントロール

流体シミュレーションをコントロールする最初の研究としてTreuilleらの方法が挙げられる¹¹⁾。この方法では煙をキーフレームでコントロールする方法を提案している。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³⁾。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⁴⁾。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⁸⁾⁹⁾。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、土橋ら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指定した形状に一致するようコントロールする方法を提案した¹⁾。しかし、この手法ではコントロールされる雲の種類は積乱雲のみに制限されており、セル状の雲に適用することは不可能である。

提案手法では、雲の流体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、ユーザが指定した目標形状に合ったセル状の雲の生成を行う。

3. セル状の雲のシミュレーション

提案手法では、セル状の雲の生成は宮崎らが提案した方法⁶⁾に基づき、非圧縮性のNavier-Stokes方程式を文献¹⁰⁾の手法を用いて数値解析することで行う。セル状の雲の生成過程について図1に示す。セル状の雲を生成するには、ベナール対流をシミュレーションで実現しなければならない。ベナール対流とは、図1(a)に示すように太陽熱などにより定常的に下方が暖められ、上空の上方部分が冷やされるような不安定な状態を解消するために発生する対流である。この対流は図1(b)に示すように上方の流体が下降、下方の流体が上昇する循環運動として現れる。ベナール対流の発生に伴い、上昇気流とともに水蒸気が上昇し(図1(c))、相転移を起こすことで雲が発生する(図1(d))。ここで、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、セル状の雲もベナール胞の一種とされている。大気中にベナール対流が発生することによりセル状の雲は生成される。なお、水や油などの流体に対してもベナール対流を発生させた場合、セル状のパターンが形成されることが確認されている。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_w 、雲密度 q_c 、温度 T をそれぞれ割り付ける。そして、格子に割り付けたそれぞれの値の時間変化を計算する。以下に、セル状の雲のシミュレーションに用いる大気流体モデルと初期条件、境界条件について説明する。

3.1 大気流体モデル

セル状の雲のシミュレーションには以下に示す大気流体モデルを利用する。簡略化のため、大気を密度は一定で非圧縮性の流体であると仮定する。このとき、大気の流れ場の発展方程式は次式の非圧縮性Navier-Stokes方程式で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (1)$$

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

ここで、 t は時間、 ρ は大気密度、 \mathbf{B} は浮力、 \mathbf{f} は風や渦などを考慮した浮力以外の外力を表す。また、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ である。式(1)は大気速度場の時間変化を表す発展方程式であり、式(2)は質量保存則を表す連続の式である。浮力 \mathbf{B} については、次式で与えられる。

$$\mathbf{B} = -k_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \mathbf{z} \quad (3)$$

ここで、 T は空気塊の温度、 k_b 浮力の大きさを調節する係数、 \mathbf{z} は鉛直方向の単位ベクトルである。式(3)は水平方向の隣り合う格子の温度差に応じて浮力が発生することを表す。

雲密度 q_c と水蒸気密度 q_v の発展方程式はそれぞれ次式で表される。

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

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) q_v + k_v \nabla^2 q_v + C_c + S_v \quad (5)$$

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

ここで、 k_v は水蒸気の粘性係数、 C_c は相転移のための値であり式(6)のように表される。 S_v は水蒸気源からの供給量である。また、 α は相転移の割合を調節する相転移率である。 q_s は飽和水蒸気密度であり、次式で与えられる。

$$q_s = \max\left(s_a \exp\left(\frac{s_b}{T + s_c}\right), q_v + q_c\right) \quad (7)$$

ここで、 s_a 、 s_b 、 s_c は飽和水蒸気密度を決定するためのパラメータである。

温度 T の発展方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) T + \kappa \nabla^2 T + Q C_c \quad (8)$$

ここで、 κ は熱拡散係数、 Q は潜熱係数である。潜熱とは、雲の発生に伴い放出される熱量のことである。

3.2 初期条件・境界条件

初期条件として速度には微小乱数を与え、雲密度、水蒸気密度はすべての格子で0とし、温度には環境温度を与える。環境温度とは静力学的平衡状態にある大気温度のことである。環境温度は高度に対して線形に減少させ、水平方向に一定になるよう設定する。境界条件は上下境界では固定境界条件を用いシミュレ

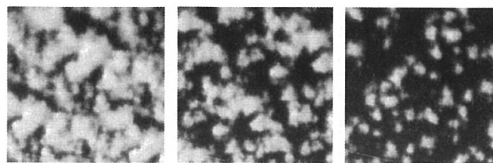


図2 熱拡散係数による比較例

シオン空間の下面部が上面部よりも高い温度となるよう固定値を指定する。これは、上述したようにベナール対流を発生させるため、シミュレーション空間に不安定な状態をつくりだす目的として行う。また、ベナール対流の発生に伴い、上昇気流が発生している部分を判定し、その位置の底面部を水蒸気源として指定することで水蒸気を付加する。水蒸気の付加は式(5)の S_v で行う。左右境界には周期境界条件を用いる。

4. 雲のコントロール

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、目標とする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、ユーザが所望する雲の形状の分布を表す target field をスクリーン上に直接描画することで形成する。次に、形成された target field を基にそ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のコントロールを行う。これには、シミュレーションパラメータのひとつである熱拡散係数 κ を target field の値に応じて決定することにより実現する。雲のシミュレーションには熱拡散係数の他に様々なパラメータが存在するが、それらのパラメータを変化させ雲への影響を比較した実験結果から、熱拡散係数が最も大きく影響することが確認できた。その結果について図2に示す。図2(a), (b), (c)を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セルの大きさが小さくなる傾向がわかる。しかし、熱拡散係数のコントロールのみでは、不要な領域に雲が発生するなど十分な結果は得られない。そのため、target field と発生した雲の分布を比較し、雲がより目標形状に近づくよう水蒸気量を調節することでこの問題点を改善する。以下、target field の指定方法とコントロール方法についてそれぞれ詳しく説明する。

4.1 target field

target field は、図3(b)に示すように滑らかに変化するスカラー場として定義する。target field の生成

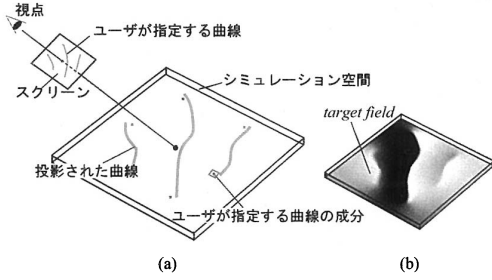


図3 target field の生成

には Orzan らが開発した diffusion curves⁷⁾ 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、グラデーションを伴った効果的な色づけを可能とする方法である。具体的な target field の生成手順について以下に示す。図 3(a) に示すように、まず、ユーザはスクリーン上に目標とする分布となるよう曲線を描画する。この曲線はシミュレーション空間中の底面に投影される。次に、曲線の成分として曲線の始点と終点の両側に所望の値を指定する。提案手法では曲線の成分として RGB 値の 3 要素を指定するのではなく、1 要素のみを 0.0~1.0 まで指定する。曲線の始点から終点までの任意の値は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されているため、曲線を $N_x \times N_y$ の平面上にラスタライズし、文献⁷⁾ の手法で提案された拡散方程式に適用する。この拡散方程式の効果により、左右に指定した曲線成分が各々の方向にのみ拡散することで図 3(b) のような target field λ を得ることができる。提案手法では、この target field λ を基に次に説明するコントロール方法を利用して所望するセル状の雲の生成を行う。

4.2 熱拡散係数のコントロール

熱拡散係数を大きくするほど生成される雲のセルの大きさが小さくなる傾向が実験から示された。そのため、提案手法では、target field の値 λ に熱拡散係数を比例させることにより、熱拡散係数を決定する。以下に、熱拡散係数のコントロールを考慮した温度の支配方程式を示す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)T + \lambda \kappa \nabla^2 T + Q C_c \quad (9)$$

ここで、target field の値 λ はシミュレーション空間の水平方向成分の格子点 (i, j) ごとに決まり、鉛直方向成分にはすべて同一の値を用いる。式 (9) を用いてシミュレーションを行うことで、target field の値が

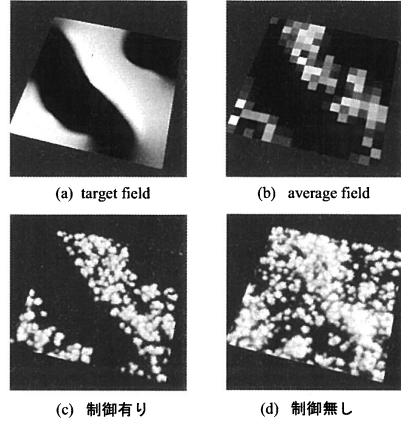


図4 水蒸気の制御

小さい部分にはセルの大きな雲が、値が大きい部分にはセルの小さな雲が生成される。

4.3 水蒸気量のコントロール

前述したように熱拡散係数のコントロールのみでは、不要なところに雲が発生するなど正確に target field 通りの雲が生成されるような結果は得られない。そのため、熱拡散係数のコントロールに加え、水蒸気量のコントロールも行う。これは発生した雲の量をフィードバックし、target field の値 λ と比較することで、その差分に応じた水蒸気量の調節を行う。具体的なコントロール方法の流れについて以下に示す。まずシミュレーションにより発生した雲の密度を取得し、鉛直方向の平均値 $A_c(i, j)$ をシミュレーション空間の最下層の格子点 $(i, j, 0)$ ごとに算出する。そして、 $A_c(i, j)$ の値が 0.0~1.0 の値となるよう規格化した $\bar{A}_c(i, j)$ を求める。すなわち、

$$A_c(i, j) = \left(\frac{1}{N_z} \sum_{k=0}^{N_z} q_c(i, j, k) \right) \quad (10)$$

$$\bar{A}_c(i, j) = A_c(i, j) / A_{c, \max} \quad (11)$$

ここで、 $A_{c, \max}$ は $A_c(i, j)$ の最大値である。 \bar{A}_c は $N_x \times N_y$ の二次元の分布として表される。提案手法では、この分布をさらにダウンサンプルした average field A'_c を求め、これを target field λ との比較に利用する。ダウンサンプルすることによって、シミュレーションにより生成された雲の分布のランダムさの影響を緩和する。なお、本稿では、1/4 または 1/8 のサイズにダウンサンプルして実験を行っている。図 4(b) は average field の一例を示したものである。最後に average field A'_c と target field λ を比較することで水蒸気量を調整

する。制御には以下の式を用いて算出した値 $S_{v,c}$ を水蒸気のコントロール量とし、式 (5) 中の S_v の代わりに境界条件として水蒸気量を付加する。

$$S_{v,c}(i, j) = \beta(1.0 - \lambda(i, j) - A'_c(i, j)) \quad (12)$$

ここで、 β は付加する水蒸気量を調節するための係数である。式 (12) から目標値 $1.0 - \lambda(i, j)$ と average field A'_c との差分に応じた付加する水蒸気量を決定する。雲の発生量が目標値に近いほど制御量は小さくなる。目標値が target field の値を反転させたものとなるのは、target field の値が小さいほどセルの大きな雲が発生し、雲の発生量も同時に多くなるためである。以上に示した処理を毎ステップ行うことで水蒸気量をコントロールする。図 4(c), (d) に水蒸気のコントロールを行った場合と行わなかった場合の比較結果について示す。図 4(c) は制御を行った場合の結果であり、図 4(d) は制御を行わなかった場合の結果である。比較結果から制御を行った場合、より正確に target field に近い結果が得られることがわかる。

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: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。図 5, 図 6 に提案手法を用いて生成したセル状の雲の適用例を示す。図 5 は、target field に比較的単純なものを指定してシミュレーションを行った結果である。シミュレーションで用いた格子数は $256 \times 256 \times 8$ 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。図 5(a) は、実際に描いて生成した target field を表し、それを基に図 5(b), (c) の結果が得られた。これらはおおよそ 350 ステップ目の結果を示したものである。セル状の雲はまず小さなセルとして現れ、時間ステップとともにセルの数は増加し、徐々に大きく成長する。図 5(b) は太陽の高度が高い場合の出力結果であり、5(c) は高度を低くした場合の出力結果である。太陽の位置を変更することにより、大気環境光が変化することでその色を雲に反映させたり、陰影を変化させることが可能である。また、雲は 3 次元シミュレーションを行っているため視点を変更した画像なども生成することができる。図 6 については複雑な target field を指定した場合の結果である。シミュレーションで用いた格子数は同様に $256 \times 256 \times 8$ であり、1 フレームあたりのシミュレーション時間はお

よそ 1 秒である。target field を変更した場合でも、シミュレーションにかかる時間の差異はそれほど生じない。図 6(a) は指定した複雑な target field を表し、図 6(b), (c) は太陽の位置をそれぞれ変化させて出力した結果である。これらはおおよそ 400 ステップ目の出力結果である。

以上より、提案手法を利用することで様々な target field を指定するだけでユーザが所望するセル状の雲を容易に生成することが可能である。提案手法を用いて生成したような雲を手動のパラメータ調整のみで生成することは極めて難しい。

6. まとめ

本稿では、ユーザが所望するセル状の雲が生成されるよう雲の物理シミュレーションをコントロールする手法を提案した。まず、ユーザが所望する雲の分布を表す target field の生成を行うインターフェースを作成することで容易に所望する形状を指定することを可能とした。そして、target field を基に物理パラメータのひとつである熱拡散係数と水蒸気の供給量をコントロールすることで、所望のセル状の雲を生成できる手法をそれぞれ提案した。熱拡散係数のコントロールでは、その特性を生かし target field の値にその値を依存させることでひとつひとつのセルの大きさをコントロールする。また、水蒸気の供給量のコントロールでは雲の密度を毎ステップごとにフィードバックし、target field と比較することで供給する水蒸気量を自動調整し target field により近い雲が生成されるよう精度の向上を可能にした。

今後の課題として、風などを考慮することで効果的な雲のアニメーションの生成を行うことが挙げられる。また、目標とする形状を単一に決めるのではなく、キーフレームで target field を変化させることで雲の形状変化アニメーションの生成を行うことも考えられる。さらに、より直感的な目標値の指定を行うインターフェースの改善も課題のひとつである。

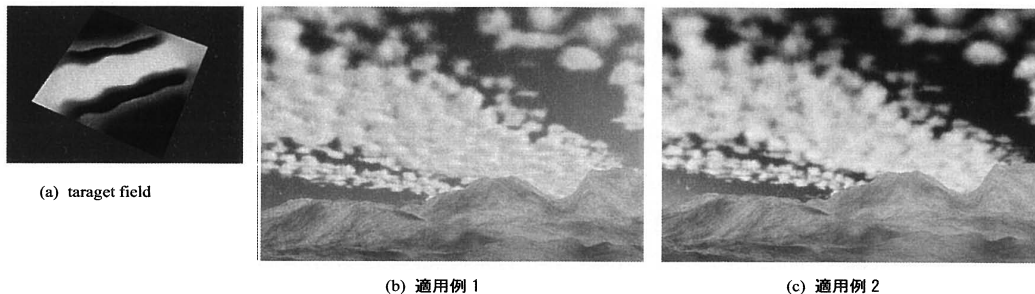


図 5 単純な形状を指定した実験例

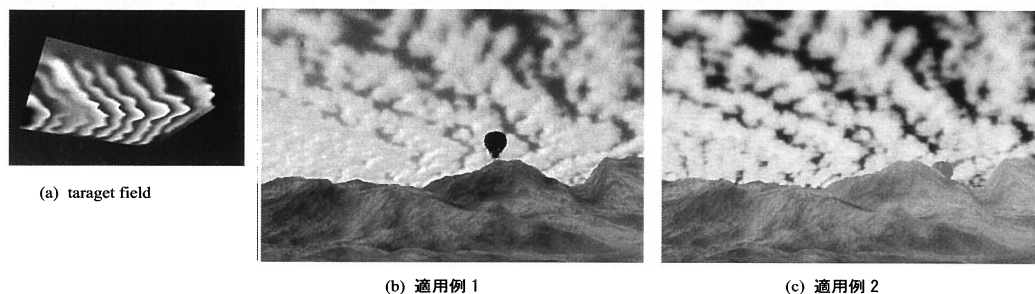


図 6 複雑な形状を指定した実験例

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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) A. Orzan, A. Bousseau, H. Winnemöller, P. Barla, J. Thollot, and D. Salesin. Diffusion curves: a vector representation for smoothshaded images. In *SIGGRAPH '08: ACM SIGGRAPH 2008 papers*. ACM, 2008.
- 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.