

アダプティブグリッド法を用いた効率的な雲のビジュアルシミュレーション

宮崎 玲[†] 土橋 宜典^{††} 西田 友是[†]

An Efficient Cloud Visual Simulation Using Adaptive Grid Method

Ryo MIYAZAKI[†], Yoshinori DOBASHI^{††}, and Tomoyuki NISHITA[†]

あらまし 雲, 煙, 炎, 水などの自然現象のシミュレーションは CG において重要な研究分野の一つであり, 特に雲の表示は景観画像の作成に重要な役割を果たす. リアルな雲を表現するためには, 計算コストはかかるが流体シミュレーションに基づく手法が有効である. 論文では大気流体のモデルの差分法による数値解法を用い, 積雲のリアルなアニメーションを作成することを目的とする. また障害物として山を考慮することにより, 従来法では取り扱われていなかった気流と山との衝突により生成される雲のシミュレーションも行う. しかし差分法は通常, 空間をグリッドに分割して行うが, リアルな雲を作成するためには空間を細かいグリッドに分割することが必要になり, それに伴い計算コストは増大してしまう. そこでグリッドをアダプティブに分割・統合していくアダプティブグリッド法を導入する. 用いる総グリッド数を大幅に抑えることができ, 効率的なシミュレーションを行うことができる. そしてシミュレーションで得られた雲の密度分布をレンダリングしてリアルなアニメーションを作成する.

キーワード 雲, 自然物, シミュレーション, アダプティブグリッド

1. まえがき

自然現象のシミュレーションは CG において重要な研究分野の一つであり, とりわけ雲の表示は, 景観画像, コンピュータゲーム, フライトシミュレータなどに幅広く応用される. 論文では, 生成・消滅していく積雲や, 鉛直方向にたかだかと成長していく積乱雲等の積雲型の雲を山の地形も考慮してシミュレーションを行い, リアルなアニメーションを作成することを目的とする. 以下ではこれらの雲を単に積雲と呼ぶ. 積雲は乱流による渦運動が特徴的であり, そのダイナミックスが見た目にも美しいことから, 積雲の画像やダイナミックスが見て取れる早送りの実写映像は多くの場面で利用されている. リアルなアニメーションをシミュレーションで作成するためには, 空間を細かいグリッドに分割することが必要となるが, それに伴い計算コストが大幅に増加してしまう. そこで論文では, 効率的に計算を行うためにアダプティブグリッド法を

用いて, 山の地形も考慮した大気流体モデルのシミュレーションによりリアルな雲のアニメーションを作成する手法を提案する.

論文の構成は, 2. では雲のモデリングの関連研究を説明する. 3. ではシミュレーションを行う対象の積雲について, 4. では大気流体の偏微分方程式のモデルを説明する. 5. でアダプティブグリッド法の説明と分割条件の考察を行い, 6. で 2 種類の雲の生成シミュレーションについて説明し, 7. でシミュレーションの検証と結果画像を示し, 8. でまとめる.

2. 関連研究

CG の分野において, 従来より雲のモデリングのために様々な手法が提案されている. 雲の形状を作成するために 3 次元での様々な雲の密度分布を出力する手続きのノイズ, またはフラクタルを用いる手法が提案されている [7], [9], [21]. しかし, これらの手法は静的な雲は作成できても, 物理則を考慮していないために, 雲のダイナミックス, 特に積雲に特徴的な渦運動を含むアニメーション作成は困難である.

雲のアニメーション作成のためにパーティクルベ

[†] 東京大学大学院新領域創成科学研究科, 東京都 Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongou, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

スのシミュレーションによる手法がいくつか提案されている．菊池らはパーティクルと3次元テクスチャを組み合わせ積雲のモデリングを行った [1], [2]．しかしこのモデルは計算コストが大きくパーティクルシステムでは流体のダイナミクス、特に渦運動を十分に表現することは難しい．Neyret もまたパーティクルによる定性的な積雲のシミュレーションを行った [14]．だがこの手法はパブル型の形状に特化しており、雲の多様な形状を表現しきれていない．

Stam は確率的なノイズによる速度場を用いて雲、煙、炎等の自然物を表現した [18], [19]．しかしこのモデルは統計的な2次のモーメントは考慮しておらず、リアルな流体の渦をシミュレートすることはできていない．

セルオートマトンによるシミュレーション [6] は、少ない計算コストで雲の生成・消滅を表現するが、このモデルは等方拡散のダイナミクスしかシミュレートできず、また流体の渦も作り出せない．よって横方向に流れる積雲のアニメーションしか表現できず、横方向と鉛直方向の性質が大きく異なる積乱雲の作成は困難である．

イメージベースの手法 [5] は衛星からのひまわり画像を用いて地球の外から見た雲のアニメーションを作成するものであったが、アニメーションを作成するためには衛星画像を用意する必要があり、また地表から眺めるスケールの雲は作成できていない．

CG の分野において流体方程式の数値解法を用いて、煙等の気体のシミュレーションが行われている [8], [20]．これらは雲のモデリング手法ではないが、高速で安定な流体方程式の近似解法を提案しているので、論文でのシミュレーションにおいても微分方程式の解法にこれらの手法を用いている．雲のシミュレーションはKajiya らが最初に行ったが空間の解像度が低く十分にリアルな結果を得ることができなかった [11]．また宮崎らは柳田らによるセルオートマトンの拡張版であるCML(Coupled Map Lattice) を用いた定性的な雲のシミュレーション [22], [23] を改良し高速に様々な雲を作成できる手法 [13] を開発したが、近似手法であるので計算コストの面では優れているが、雲のダイナミクスを十分にシミュレートできてはいない．

本手法は従来手法よりもリアルな積雲、積乱雲、そしていずれの従来手法でも扱っていない山の地形を考慮した雲の生成シミュレーションを、アダプティブグリッド法を用いることで、差分法を用いる手法として

は高速に計算することが可能である．

3. 積雲の形成過程

本章では積雲の形成過程 [4], [10], [12] を説明する．積雲は強い上昇気流によって生成され、乱流の渦によりパブル状のモクモクとした形態をしている．乱流の特性により、大きな渦のエネルギーが散逸し、より小さな渦が生成され、積雲の形態に特徴的なフラクタル構造が形成されることになる．上昇気流は暖められた地面付近の空気が浮力を得て上昇するか、または、地表に対し水平方向の気流が山に衝突し、斜面に沿って上昇することにより生じる．他の原因の一つとして、寒冷前線が温暖前線の下に潜り込むことにより、上昇気流は生じるが、論文ではこのような大域的な上昇気流は取り扱わないものとする．上昇する空気塊は断熱冷却の効果により温度が低下する．そして空気塊に含まれる水蒸気が相転移を起こし凝結し、雲（水滴）が生成される．その際潜熱が開放され、生成される雲量が多いと潜熱の浮力により雲は更に鉛直方向に成長を続ける．高々と発達した積雲は積乱雲（いわゆる入道雲）と呼ばれる（図1参照）．論文では、積雲のこれらの生成過程をシミュレートするための大気流体のモデルを用いる．



図1 積雲の写真 (左: 積雲, 右: 積乱雲)
Fig. 1 Photographs of cumulus.
(left: cumulus, right: cumulonimbus)

4. 大気流体のモデル

シミュレーション空間は3次元立方グリッドに分割される．各グリッドは速度ベクトル $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ 、水蒸気密度 q_v 、雲（水滴）密度 q_c 、温度 T を状態量として保持する．タイムステップごとに各状態量が更新され、グリッドもアダプティブに分割・統合される（5. 参照）．大気流体を以下の偏微分方程式でモデル化する．ここで、簡略化のため大気密度は一定で非圧縮流体と仮定する．速度場は非圧縮性 Navier-Stokes 方程式で表される．

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nu\Delta\mathbf{v} + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (1)$$

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

式 (1) は速度場更新のための式で、式 (2) は質量の保存則を表す連続の式である。\$p\$ は圧力、\$\mathbf{B}\$ は浮力、\$\mathbf{f}\$ は浮力以外の外力、\$\nu\$ は粘性係数である。\$D/Dt = \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla\$ はラグランジュ微分と呼ばれ流れに沿った微分を表している。浮力 \$\mathbf{B}\$ は温度 \$T\$ と環境温度 \$T_o\$ との差によって与えられる。ここで環境温度とは大気の静力学的平衡となるとききの温度で、すなわち浮力は平衡温度からの偏差で与えられる。また雲（水滴）にかかる重力も考慮すると浮力 \$\mathbf{B}\$ は次式で表される [10]。

$$\mathbf{B} = k_b \frac{T - T_o}{T_o} \mathbf{z} - k_g q_c \mathbf{z} \quad (3)$$

ここで、\$k_b\$ は浮力の係数、\$k_g\$ は重力の係数、\$\mathbf{z}\$ は鉛直方向の単位ベクトルである。環境温度 \$T_o\$ は空間の高さの関数で線形に減少していく。

雲と水蒸気の式は以下で与えられる [10]。

$$\frac{Dq_c}{Dt} = C_c \quad (4)$$

$$\frac{Dq_v}{Dt} = -C_c + S_v \quad (5)$$

ここで、\$C_c\$ は \$C_c > 0\$ のときは水蒸気の凝結を、\$C_c < 0\$ のときは雲の気化を表す。\$S_v\$ は水蒸気源からの供給量である。シミュレーションでは水蒸気は境界条件として補充される。\$C_c\$ は飽和水蒸気密度 \$q_s\$ を用いて以下のように表す。

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

ここで、\$\alpha\$ は相転移率である。相転移率は相転移による水蒸気密度と雲密度間の急激な遷移を防ぎ、数値計算を安定に行うために導入している。飽和水蒸気密度 \$q_s\$ は温度の関数であり [4]、以下で与える。

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

ここで、\$s_a, s_b, s_c\$ は飽和水蒸気密度を決定するパラメータである。

温度の式は以下で与えられる [10]。空気塊の鉛直方向の移動による断熱変化と、雲の生成による潜熱の開放に伴う温度上昇、日中地面が太陽に暖められること

に相当する熱源を考える。

$$\frac{DT}{Dt} = -\Gamma_d v_z + Q C_c + S_T \quad (8)$$

ここで、\$\Gamma_d\$ は乾燥断熱減率、\$Q\$ は潜熱の係数、\$S_T\$ は熱源の熱量である。熱源はシミュレーション空間の底面付近に配置する。

これらの微分方程式は差分法による高速な近似解法 [20] を用いて計算を行う。また [8] の手法により、数値計算の誤差で失われてしまう小さいスケールの渦を、外力として付け足す。

計算の結果得られた雲密度分布をレンダリングすることによりアニメーションを作成する。

5. アダプティブグリッド法

効率的なシミュレーションのためにグリッド領域のアダプティブ分割 [3] を行う。ここでは 8 点のグリッド（格子点）で囲まれた立方領域をグリッド領域と呼ぶ。最も粗な分割レベルを 0 とし必要に応じてグリッド領域を 8 分割するようグリッドを追加する。分割ごとに分割レベルが 1 ずつ増加する。グリッド幅は分割レベルが増加するごとに 1/2 に細分される（図 2 参照）。シミュレーションに用いるすべての状態量を分割時に補間する。また、隣り合うグリッド領域の分割レベルの差が 1 以下となるよう分割する。

5.1 グリッド分割条件の検討

通常、アダプティブグリッドのシミュレーションにおいて、グリッド間の状態量の差を分割の判定に用いるのが一般的である [3]。アダプティブグリッド法を導入する目的は、少ない計算コストで雲の小さなスケールのダイナミクスまで表現することである。そのために分割は、雲の小さなスケールのダイナミクスが損なわれない程度に、雲内部および雲の境界周辺にとどめるものとする。目的に合う分割を行うために、本シミュレーションで用いる状態量、すなわち速度、温度、雲密度、水蒸気密度、のいずれか、または組合せを用いることを考える。分割条件を決定するため、これらの状態量を単独で用いた場合の実験を行った。以下、この実験に基づく考察を述べる。

[雲密度] 直接可視化される状態量である雲密度は重要な状態量である。しかしこの状態量のみを分割条件に用いた場合、雲が生成または他のグリッドから輸送されて初めてグリッド領域が分割されることになり、小さいスケールの渦が生成されにくい。

[速度] リアルな雲を作成する上で、雲を輸送する速



図2 グリッド領域の分割
Fig.2 Refinement of grid region.

度場の小さいスケールのダイナミクスまで表現することが非常に重要である。しかし速度差を分割の判定に用いてアダプティブグリッドによるシミュレーションを行うと、熱源を配置する雲の生成シミュレーション(6.1参照)において空間の大部分、特に熱源を配置した付近は浮力により上昇気流が生じるために速度の変化が大きい。それゆえ雲の存在しない多くのグリッドが分割されてしまうため、グリッド数が大幅に増加し効率的ではない。

[温度] 速度の場合と同様に、温度を判定に用いると熱源を配置する雲の生成シミュレーションにおいて、熱源を配置したシミュレーション空間の底面付近の温度の変化が大きく、雲密度の存在しない多くのグリッドが分割されてしまう。

[水蒸気密度] 水蒸気密度は初期状態で鉛直方向に対して指数関数的なこう配を持っているので(6.1参照)、鉛直方向の変化の判定には、初期水蒸気密度からの変位を用いる。一般的に水蒸気が飽和している領域は雲も存在し、また速度場に乱れがある個所はその乱れによる水蒸気密度差も見られる。しかし、速度場による輸送によって一時的に雲が存在しても水蒸気密度が飽和水蒸気密度に満たない場合も起こり得るので、水蒸気密度のみを分割判定に用いるのは不十分である。

以上の個別の各状態量を用いた分割実験の考察を以下にまとめる。

- 雲密度では分割のタイミングが遅れ、小さい渦が生成されにくい。水蒸気密度では、上記の雲密度のみを用いた分割条件の欠点はないが、雲が存在する領域でも分割されないケースがある。速度場、及び温度では、空間の大部分、特にシミュレーション空間の底面付近が分割されすぎてしまい効率的ではない。

よって、分割の判定には直接可視化に結びつく雲密度のほかに水蒸気密度を用いることで、速度の変化のある個所のうち雲が存在するグリッド、及びその周辺に分割する領域を絞り込む。計算コストの削減のため

に、雲、または飽和に近い水蒸気が周辺に存在しないグリッドの分割は行わない。分割は各タイムステップごとに行う。シミュレーション中に以下のどちらかの条件を満たせばグリッド領域を分割する。

- 領域を囲んでいる八つのグリッドのうち、ある隣接するグリッド間の水蒸気密度の差がしきい値以上であり、かつ、その飽和水蒸気密度に対する水蒸気密度の割合がしきい値以上である。

- 領域を囲んでいる八つのグリッドのうち、ある隣接するグリッド間の雲密度の差がしきい値以上である。

雲が存在しているグリッドは水蒸気が飽和しており、上記の水蒸気の条件のみで分割を行うことができるが、雲の移動によっては水蒸気が飽和に達していても雲が存在する場合があるので、雲密度の判定条件も必要である。上記の条件を用いることにより、妥当な計算コストで雲の細かい形状も表現した雲の生成シミュレーションを行うことができる。

5.2 グリッド統合条件

前節の分割条件を用いて、シミュレーション中にグリッド領域がアダプティブに分割されていくが、雲が消滅、または移動により雲密度がなくなった領域は再統合することにより、総グリッド数を減らし更に効率的なシミュレーションを行うことができる。以下の統合条件を二つとも満たせば領域の再統合を行う。

- 領域を囲むすべてのグリッドの雲密度がしきい値以下

- 領域を囲むすべてのグリッドの飽和水蒸気密度に対する水蒸気密度の割合がしきい値以下

シミュレーション中のグリッドの分割・統合の流れを以下にまとめる。

- 上昇気流によりシミュレーション空間底面付近の水蒸気が上空に運ばれる。そして飽和水蒸気密度に近づき、グリッド間の水蒸気密度の差が生じグリッドが分割される。

- 雲の移動により水蒸気密度が飽和に満たない領域でも、グリッド間の雲密度差があれば分割は維持される。

- 雲も消滅し水蒸気も飽和に達しなくなった領域は、再びグリッドが統合される。

6. シミュレーション

論文では、積雲が発生するための上昇気流に次の二つのケースのシミュレーションを行うことが可能で

ある。

6.1 熱源配置による雲の生成

初期条件として環境温度を鉛直方向に線形に減少させる。初期温度は環境温度と一致させておく。水蒸気密度は地面からの高さに指数関数的に減少するように配置する。温度、水蒸気密度は地表に対し水平方向には一定としておく。水平方向の境界条件として周期的境界条件、上下境界にはともに固定境界を設定する。

シミュレーションを開始すると、シミュレーション空間の底面境界付近に雲ができる源となる熱源を配置する。これは日中太陽によって地面が暖められたことに相当する。熱源はユーザによる指定や、ノイズ関数を用いて与えられる。熱源の温度と環境温度との温度差による浮力により上昇気流が発生する。生じた上昇気流により底面付近の水蒸気が上空に運ばれ、相転移が起こり雲が生成される。雲は風に流されながら生成・消滅していく(図3(a))。

熱源を配置する雲の生成シミュレーションにおいて、熱源の分布を調節することにより、生成される雲の分布をコントロールすることができる。熱源の温度を高くすれば強い浮力が発生し、雲も大きく発達する(式(3))。シミュレーション空間の底面付近の水蒸気密度を大きくすると、それだけ生成される雲密度が大きくなり、それに比例して開放される潜熱量も多くなるのでより雲の発達を促す(式(8))。

6.2 気流と山との衝突による雲の生成

初期条件は熱源を配置する雲の生成シミュレーションの場合と同様である。山は境界部分を精度良く計算するために、前述の分割条件にかかわらず初期段階で山の境界部分のグリッド分割を行っておく。またこの分割で山の細かい起伏も表現する。境界条件として、山の境界と地表に対し水平方向の境界も固定境界に設定する。シミュレーション空間内で山の内部に相当するグリッドは状態量の更新は行わない。

シミュレーションを開始し、横風による気流と山が衝突すると、山の境界部分で斜面に沿って上昇気流が生じる。そのとき、熱源を配置する雲の生成シミュレーションと同様に、風に運ばれている底面付近の水蒸気が上昇していく。そして相転移が起こり、山の斜面または上部に雲が生成される(図3(b))。斜面で生成された雲は成長し、山を越えて下っていくときに温度が上昇し消滅する[10],[12]。

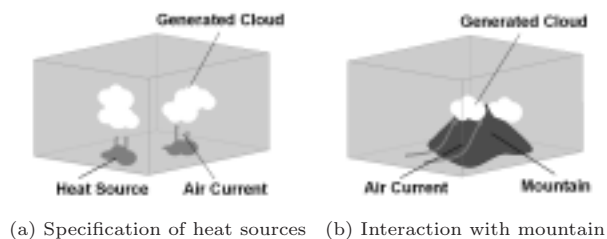


図3 2種類の雲の生成過程

Fig.3 Two kinds of cloud generation processes.

7. 計算結果と考察

7.1 シミュレーション空間のアダプティブ分割

積雲のシミュレーションにおけるグリッドがアダプティブに分割される様子を図4に示す。シミュレーションのグリッド数は初期状態で72,000(60×30×40)、最大分割レベルは2である。空間全体に風として地表に対し水平方向に速度が与えられている。シミュレーションを開始すると空間の底面付近のいくつかの個所に熱源を配置する。シミュレーションが進むにつれ熱源による浮力で生じた上昇気流により、底面付近の水蒸気が上空に運ばれ飽和状態に近づき、グリッド領域が分割され始める(図4(a))。水蒸気が飽和水蒸気密度を超え雲が生成されて、その周りの多くのグリッドが分割される(図4(b))。雲が消滅、あるいは移動して雲がなくなった領域は再統合されグリッドの総数は減少する(図4(c))。また、図4(a)から(c)までのグリッド数はそれぞれ145,000, 314,000, 242,000である。

7.2 分割レベルの違いによる比較

図6に最大分割レベルを変化させたときの最終的なレンダリング画像の違いを示す。それぞれ初期グリッド数が25,000(25×25×40)で200タイムステップ計算を行ったものである。分割レベルを増加させていけば、流体の細かい渦までシミュレーションを行うことができ、リアルな画像が生成できることが分かる。細分化レベルを細かくするほど、更に微細な形状の雲が生成されることになるが、グリッドが細かくなればなるほど、精度良く計算を行うためにシミュレーションのタイムステップを小さくする必要はある。

7.3 同じ空間解像度での比較

図5にグリッド数が100×100×160で最大分割レベル0、すなわち、均一な直交格子で、メモリ上のデータが連続している構造のアダプティブグリッドを

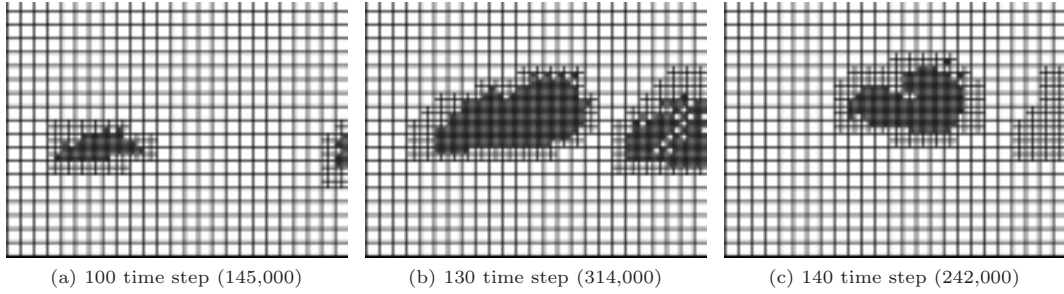
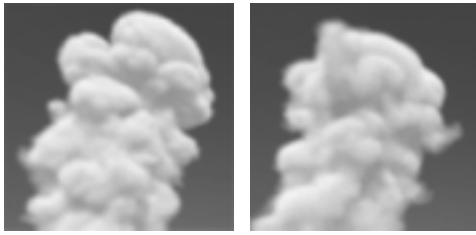


図 4 積雲のシミュレーションの断面図．括弧内はグリッド数を表す．水平方向は x 軸，鉛直方向は z 軸を表す．

Fig. 4 Cross sections of the simulation space for cumulus generation. The number of grids is shown in the parentheses. Horizontal direction is the x axis, and vertical direction is the z axis.



(a) no refinement (b) refinement level 2

図 5 結果画像の比較

Fig. 5 Comparison of result images

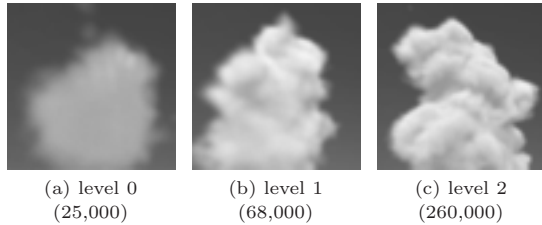


図 6 最大分割レベルの違いによるレンダリング結果の比較．括弧内は総グリッド数を表す．

Fig. 6 Comparison of the results with different levels of maximum refinement. The number of total grids is shown in the parentheses.

用いないものと、 $25 \times 25 \times 40$ で最大分割レベル 2 のツリー構造で実装されているアダプティブグリッドシミュレーションの結果画像を示す．ともに空間の解像度は同じとなり、180 タイムステップ目のものである．表 1 にグリッド数と計算時間を示す．計算時間にはレンダリングの時間は含まれていない．計算には Pentium 4 (2.7GHz) の PC を用いた．アダプティブグリッドを用いることにより、同じ空間解像度の結果を得るのに大幅な計算コストの削減をすることができ

る．この例では、180 タイムステップ目までの総計算時間は 25 % に短縮されている．なお、通常の直交格子とアダプティブグリッドのツリー構造において、同じグリッド数ならば、ツリー構造の方が約 2~4 倍以上の計算時間を要する．分割がほとんどされていない状態ではメモリ上のデータも連続しておりオーバーヘッドの割合は小さいが、分割が進みデータの不連続性が大きくなるにつれ、割合は大きくなる．

なお図 5 の二つの画像を比較すると差異が見られる．これは乱流がカオス状態であるために、ほんのわずかの状態の違いでも時間が経つにつれその違いが拡大し、振舞いがかなり異なったものになってしまうためである．アダプティブグリッド法を用いないシミュレーションと、用いるシミュレーションでの得られた雲をできるだけ一致させるためには、シミュレーション空間の底面付近から雲の下までの領域も分割することが必要であるが、その場合空間の大部分が分割されてしまう．論文では、効率性を重視して低コストで、積雲らしいダイナミクスほを作り出すことを目的とするため、分割は雲の周辺のみにとどめることとする．

表 1 アダプティブグリッド法によるグリッド数、および計算時間の減少．ts はタイムステップを表す．

Table 1 Decreasing of number of grids and computational time due to the adaptive grid method. "ts" indicates time step.

maximum refinement levels	0 (non refine)	2
initial number of grids	1,600,000	25,000
number of grids at 180ts	1,600,000	230,000
computational time at 180ts	3.3sec	2.0sec
total computational time to 180ts	600sec	150sec

7.4 結果画像

図 7 は積雲及び積乱雲の発達過程の結果画像であ

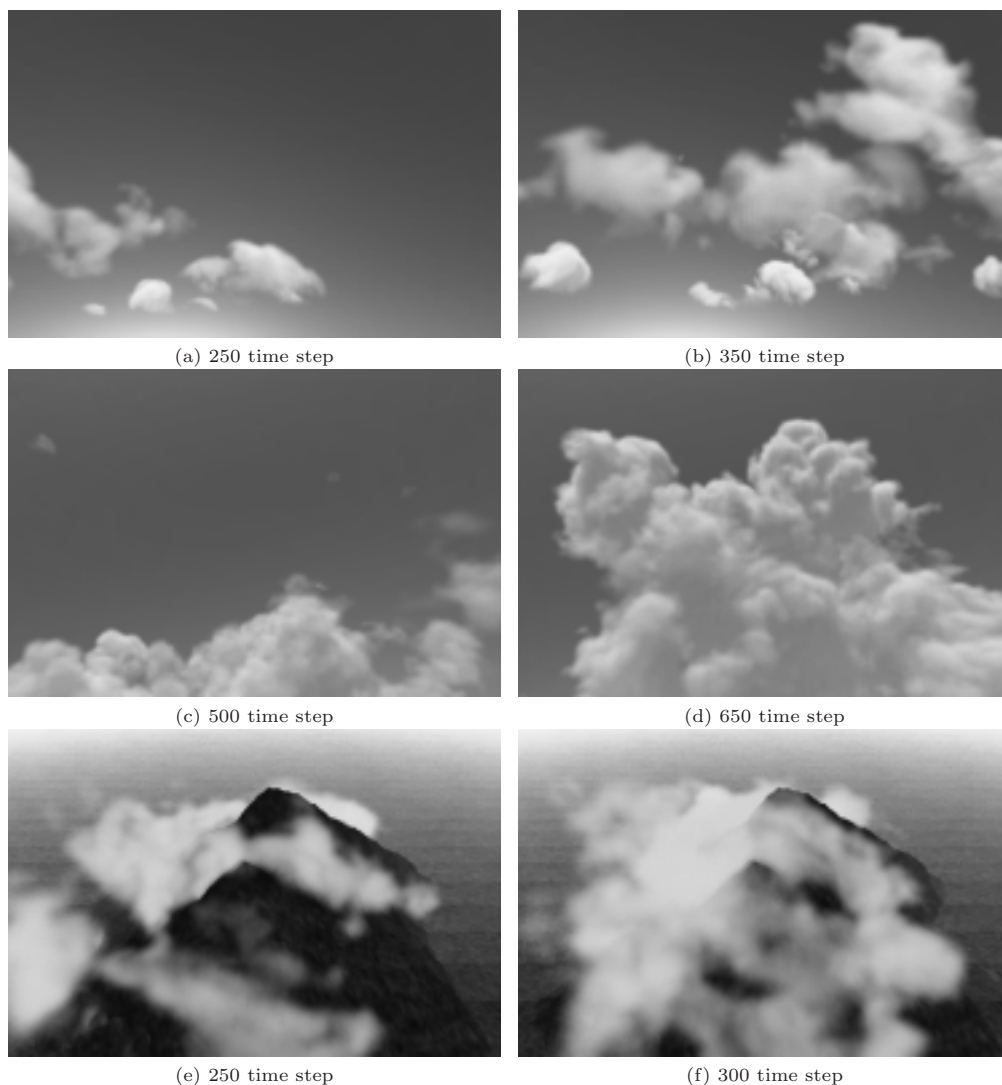


図 7 レンダリング結果：(a)(b) は積雲，(c)(d) は積乱雲，(e)(f) は気流と山との衝突によって生成された雲である．

Fig. 7 Rendering results: (a)(b) show cumulus, (c)(d) show cumulonimbus, (e)(f) show clouds generated by interaction of air current and mountain.

る．(a)(b) は図の左方向から右方向に風に流されながら発達していく積雲である．(c)(d) は積乱雲である．積雲のシミュレーションよりも，配置する熱源の個所が多く熱源の温度が高く，初期水蒸気密度も大きい．(e)(f) は気流と山との衝突によって生成された雲である．図左方向からの気流が図中央の山と衝突し，図右方向に通り過ぎていく．気流と山との衝突部分と気流が通り過ぎた上空に雲が生成されている．初期グリッド数はそれぞれ， $60 \times 40 \times 40$ ， $50 \times 50 \times 40$ ， 60

$\times 30 \times 40$ である．また (e) の状態でのシミュレーション空間の断面図を図 8 に示す．雲密度分布と速度ベクトル分布を同時に表示している．図の左方向から右方向に気流が流れ，中央の山に衝突している．気流が衝突する登りの斜面で雲が生成され，山を越えて気流が下る反対側の斜面で雲は消滅している．図 7 に示したすべての例について，最大分割レベル 2 としてシミュレーションを行った．分割レベル 0 での 1 グリッド幅は 40m，山の高さは 1000m，1 タイムステップ

は各々のシミュレーションで10秒としている。またこの場合、山はシミュレーション空間の約10%を占める。山と空間の境界は計算資源の許す限り、境界の影響が生成される雲に及ばないよう距離をとる。シミュレーションで空間の雲の密度分布を得て、文献[6]の手法によりレンダリングを行った。1画像のレンダリングはグラフィックスハードウェアを用いて約10数秒と高速に行うことができる。計算にはPentium 4 (2.7GHz)のPC, GPUはNVIDIA Quadro NVSを用いた。

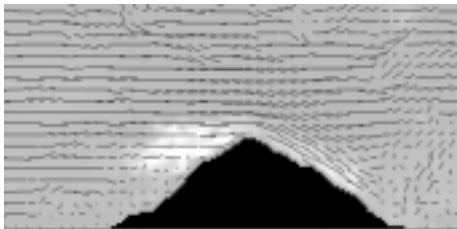


図8 気流と山との衝突によるシミュレーション空間の断面図。雲と速度ベクトルを表示している。

Fig. 8 A cross section of the simulation space for generating clouds interacting with the mountain. Clouds and velocity vectors are shown.

8. むすび

論文では、大気流体の偏微分方程式の数値解法により境界条件や初期条件を変えるだけで、生成・消滅を繰り返す積雲、鉛直方向へたかだかと発達する積乱雲のシミュレーションを行った。また従来手法では考慮されていなかった山の地形も考慮してシミュレーションを行うことにより、山の斜面上での雲の生成・消滅などのシミュレーションも行った。計算コストが膨大になる差分法による数値シミュレーションを、アダプティブグリッド法を用いて大幅な計算時間の削減を実現した。その際各状態量についてアダプティブ分割の実験を行い、雲密度と水蒸気密度を分割の判定に用いることよって、計算コストと雲の形態とのバランスが取れた妥当な分割条件を示した。

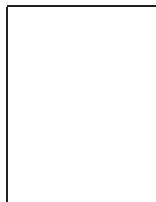
これらのシミュレーションで得られた雲の密度分布を、高速なレンダリング手法を用いてレンダリングすることによりリアルなアニメーションを作成した。

文 献

- [1] 菊池 司, 村岡 一信, 千葉 則茂, “積乱雲のビジュアルシミュレーション,” 画像電子学会誌, vol.28, no.2, pp.140–151, 1999.
- [2] 菊池 司, 村岡 一信, 千葉 則茂, “積雲型の雲のビジュアルシミュレーション,” 画像電子学会誌, vol.27, no.4, pp.317–326, 1998.
- [3] 数値流体力学編集委員会 (編), 格子形成法とコンピュータグラフィックス, 東京大学出版会, 1995.
- [4] 水野 量, 雲と雨の気象学, 朝倉書店, 2000.
- [5] Y. Dobashi, T. Nishita, H. Yamashita, and T. Okita, “Using metaballs to modeling and animate clouds from satellite images,” *The Visual Computer*, vol. 15, no. 9, pp. 471–482, 1998.
- [6] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, and T. Nishita, “A simple, efficient method for realistic animation of clouds,” *Proc. SIGGRAPH2000*, pp. 19–28, 2000.
- [7] D. S. Ebert, “Volumetric modeling with implicit functions: A cloud is born,” *Proc. SIGGRAPH'97*, p. 147, 1997.
- [8] R. Fedkiw, J. Stam, and H. W. Jensen. “Visual simulation of smoke,” *Proc. SIGGRAPH2001*, pp. 15–22, 2001.
- [9] G. Y. Gardner, “Visual simulation of clouds,” *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'85)*, vol.19, no. 3, pp. 279–303, 1985.
- [10] R. A. Houze, *Cloud Dynamics*, International Geophysics Series vol.53, Academic Press, New York, 1993.
- [11] J. T. Kajiya, and B. P. V. Herzen, “Ray tracing volume densities,” *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'84)*, vol. 18, no. 3, pp. 165–174, 1984.
- [12] D. M. Ludlum, *Field Guide to Weather*, National Audubon Society Field Guide Series, Chanticlear Press, New York, 2000.
- [13] R. Miyazaki, S. Yoshida, Y. Dobashi, and T. Nishita. “A method for modeling clouds based on atmospheric fluid dynamics,” *Proc. PACIFIC GRAPHICS 2001*, pp 363–372, 2001.
- [14] F. Neyret, “Qualitative simulation of convective clouds formation and evolution,” *Proc. EGCAS'97*, pp. 113–124, 1997.
- [15] T. Nishita, T. Sirai, K. Tadamura, and E. Nakamae, “Display of the earth taking into account atmospheric scattering,” *Proc. SIGGRAPH'93*, pp. 175–182, 1993.
- [16] T. Nishita, Y. Dobashi, and E. Nakamae, “Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light,” *Proc. SIGGRAPH'96*, pp.379–386, 1996.
- [17] J. Stam, and E. Fiume, “Turbulent wind fields for gaseous phenomena,” *Proc. SIGGRAPH'93*, pp. 369–376, 1993.
- [18] J. Stam, “Stochastic rendering of density fields,” *Proc. Graphics Interface'94*, pp. 51–58, 1994.
- [19] J. Stam, and E. Fiume, “Dipicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes,” *Proc. SIGGRAPH'95*, pp. 129–136, 1995.
- [20] J. Stam, “Stable fluids,” *Proc. SIGGRAPH'99*, pp. 121–128, 1999.

- [21] R. Voss, "Fourier synthesis of gaussian fractals: 1/f noises, landscapes, and flakes," SIGGRAPH'83: Tutorial on state of the art image synthesis, vol.10, 1983.
- [22] T. Yanagita and K. Kaneko, "Rayleigh-benard convection; Patters, chaos, spatiotemporal chaos and turbulent," Physica D, vol. 82, pp. 288-313, 1995.
- [23] T. Yanagita and K. Kaneko, "Modeling and characterization of clouds dynamics," Phys. Rev. Lett. vol. 78, no. 22, pp. 4297-4300, 1997.

(平成 x 年 xx 月 xx 日受付)



宮崎 玲

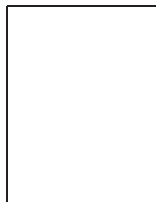
平 12 東大・工卒。平 14 同大学院新領域創成科学研究科修士課程了。平 14 同大学院新領域創成科学研究科博士課程に在学中。主として、コンピュータグラフィックス、特に雲のシミュレーション、及びレンダリングに関する研究に従事。情報処理

学会会員。



土橋 宜典

平 4 広島大・工卒。平 9 同大学院工学研究科了。同年、広島市立大学情報科学部助手。平 12 北海道大学大学院工学研究科助教授。工博。主として、コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。情報処理学会、映像情報メディア学会各会員。



西田 友是 (正員)

昭 46 広島大・工卒。昭 48 同大学院工学研究科了。同年、マツダ(株)入社。昭 54 福山大学工学部講師。昭 59 同助教授。平 2 同教授。平 10 東京大学理学部教授。平 11 同大学院新領域創成科学研究科教授。工博。主として、コンピュータ

グラフィックスに関する研究に従事。情報処理学会、画像電子学会、ACM、IEEE 各会員。