



Title	コンピュータグラフィックスにおける所望形状の雲の映像生成に関する研究
Author(s)	楠元, 克敏
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11763号
Issue Date	2015-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11763
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58916
Type	doctoral thesis
File Information	Katsutoshi_Kusumoto.pdf



博士論文

コンピュータグラフィックスにおける所望形状の雲の
映像生成に関する研究

北海道大学 大学院情報科学研究科
メディアネットワーク専攻

楠元 克敏

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	4
1.3	論文の構成	7
第 2 章	関連研究	8
2.1	数値流体解析手法	8
2.2	流体现象のコントロール	10
2.3	雲のビジュアルシミュレーション	12
第 3 章	積乱雲のコントロール	14
3.1	積乱雲の大気流体モデル	14
3.2	積乱雲のコントロール概要	17
3.3	target shape の指定方法	20
3.4	積乱雲のコントロール	21
3.5	適用例	25
3.6	考察	37
第 4 章	積乱雲のキーフレームコントロール	39
4.1	研究目的	39
4.2	積乱雲のキーフレームコントロール概要	40
4.3	積乱雲のキーフレームでのコントロール方法	41

4.4	実験結果	46
4.5	考察	50
第 5 章	積雲のコントロール	51
5.1	積雲の大気流体モデル	51
5.2	積雲のコントロール概要	52
5.3	target field	53
5.4	積雲のコントロール方法	54
5.5	実験結果	59
5.6	考察	64
第 6 章	セル状の雲のコントロール	66
6.1	セル状の雲の大気流体モデル	66
6.2	セル状の雲のコントロール概要	70
6.3	target field	75
6.4	浮力の係数のコントロール	76
6.5	水蒸気量のコントロール	77
6.6	実験結果	78
6.7	考察	84
第 7 章	結論	86
	参考文献	88
	参考文献	89
	研究業績	94
	学会誌	94
	研究業績 学会誌	94

査読付国際会議	94
査読付国際会議	95
学会技術研究会	95
学会技術研究会	96
全国大会等発表	96
全国大会等発表	97

目次

1.1	数値流体解析手法	2
1.2	雲の写真画像	3
2.1	流体现象のコントロールに関する従来研究の適用例	10
3.1	積乱雲の生成過程	15
3.2	コントロール方法の基本構造	18
3.3	提案手法によるコントロールの流れ	19
3.4	target shape の指定方法	20
3.5	ポテンシャルフィールド生成の流れ	22
3.6	ポテンシャルフィールドによる外力	23
3.7	P 制御と PI 制御の比較実験	25
3.8	従来手法と提案手法の比較結果	28
3.9	検定に利用した積乱雲の生成例	30
3.10	単純な輪郭線を指定した場合の適用例	33
3.11	複雑な輪郭線を指定した場合の適用例	34
3.12	ドクロのような形状の適用例	35
3.13	提案手法の失敗例	35
3.14	写真画像を基に生成した適用例	36
4.1	提案手法の概要	41
4.2	異なる制御方法での比較例	47

4.3	適用例	48
4.4	適用例 (曲線の描画無し)	49
5.1	積雲生成のコントロールの基本構造	52
5.2	target field の生成	54
5.3	熱量の制御	55
5.4	熱源の制御の有無の比較例	56
5.5	移流項のコントロールの効果	57
5.6	擬似的な風の作用	58
5.7	単純な target field	61
5.8	実験例 1: 単純な形状を指定した例	61
5.9	特殊な target field	62
5.10	実験例 2: 特殊な形状の指定した例	62
5.11	実写画像から抽出した target field	63
5.12	実験例 3: 実写画像との比較	63
6.1	セル状の雲の生成過程	66
6.2	ベナール胞の生成例	67
6.3	ベナール対流の境界条件と速度場	69
6.4	コントロールの基本概念	70
6.5	粘性係数による比較結果	71
6.6	浮力の係数による比較結果	72
6.7	熱拡散係数による比較結果	72
6.8	セル状の雲のコントロールの流れ	74
6.9	target field の指定方法	75
6.10	水蒸気供給量の制御	78
6.11	適用例 1	81

6.12	適用例 2	82
6.13	適用例 3	83

表目次

3.1	実験に用いた制御パラメータ数値	27
3.2	各実験例でのシミュレーション時間・格子数	27
3.3	検定のためのアンケートの結果	30
4.1	実験に用いた制御パラメータ数値	47
6.1	実験に用いた制御パラメータ数値	79
6.2	各実験例でのシミュレーション時間・格子数	79

第 1 章

序論

本章ではコンピュータグラフィックス (以下, CG) の分野における研究課題について考察し, 本研究の目的の位置づけを明確にした上で, その概要について説明する.

1.1 研究背景

近年, コンピュータの普及, 性能の向上などにより様々な分野で CG の技術が応用されている. 例を挙げると, 映画, コンピュータゲームなどにおける映像生成用途がまず第一に考えられるが, デザイン・モデリング支援システムやユーザエクスペリエンスを向上させるための GUI(グラフィカルユーザインターフェース), 医療分野での臓器・骨格の可視化システムなどにも CG 技術は利用されている. また, 映像の可視化だけにとどまらず, CG 技術を用いてシミュレーションした結果を現実の世界で実体化するファブリケーションという用途にも応用されている. このような CG 技術の利用用途拡大に伴い, CG の分野では多種多様な研究課題が設定され, 様々な研究が取り組まれている. 中でも自然現象のビジュアルシミュレーションに関する研究はひとつの重要な研究課題として位置づけられており, 映像制作の分野での映像のリアリティの向上や多様な演出の幅の広がりに大きく貢献している. 自然現象のビジュアルシミュレーションに関する研究の中には, 特に炎, 煙, 水などの流体現象に着目した研究も盛んに行われており, 現在までに様々な表現手法が提案されている. 流体現象の形状や動きなどのリアリティを重視する場合, それらの物理現象を再現する方法

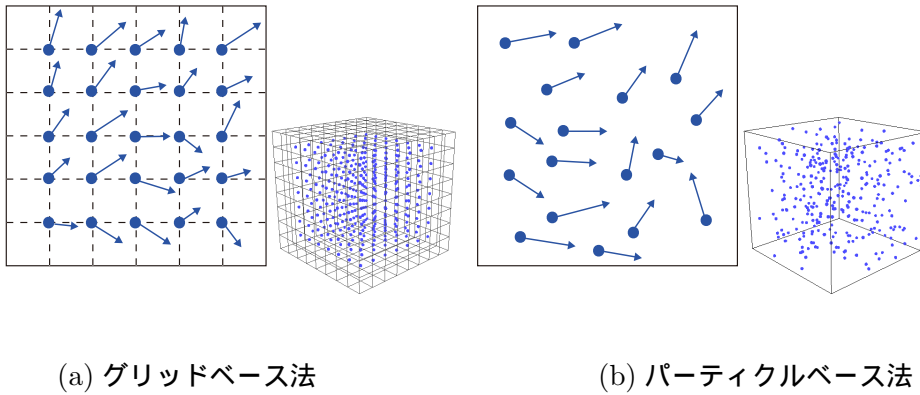


図 1.1 数値流体解析手法

が有効である．従来研究では数値流体解析を利用することで物理現象に忠実なシミュレーションを行い，極めてリアルな映像の生成に成功している [8][10][29][11]．流体現象を対象とした数多くの表現手法に関しては，[2] にまとめられている．

数値流体解析手法には大別してグリッドベースの方法とパーティクルベースの方法が存在する．グリッドベースの方法では，図 1.1(a) に示すようにシミュレーション空間を格子状に分割することで流体の動きを解析する．具体的には，格子点と任意のタイムステップを設定し，流体の支配方程式を空間的，時間的に離散化し，差分法を利用することで数値解析を行う．一方，パーティクルベースの手法では，流体を粒子群と近似することで流体の動きを解析する．具体的には，図 1.1(b) に示すように，シミュレーション空間に多数の速度・座標を持った粒子を発生させ，粒子間の相互作用を考慮することで流体の支配方程式の数値解析を行う．本研究では，流体のシミュレーションを行う際に，シミュレーションの容易性，計算の高速化，流体現象をシミュレーションする際に考慮する非圧縮性の法則の適用の容易性から，格子法による方法を利用する．

前述したように，数値流体解析による手法は，写実的な映像生成には大変有効である．しかし，ユーザが意図した動きや形状となるシミュレーション結果を得ようとする場合，試行錯誤でシミュレーションの物理パラメータを調節しなければならない．また，物理パラメータを調整したとしても，完全にユーザが意図



(a) 積乱雲

(b) 積雲

(c) 高積雲

図 1.2 雲の写真画像

した結果を得ることは極めて困難である．この問題点を解消するため，流体解析を利用して，炎，煙，水などの流体现象を表現する従来の研究を応用し，ユーザが所望する形状となるよう流体现象をコントロールする研究が注目されている [12][22][41][9][16][20][21][25][34][35][38][39]．流体现象のコントロールに関する従来研究では，煙や水が自然な形状や動きを保ったまま映像制作者の意図した通りに動くようコントロールすること，あるいは，文字や動物といった特徴的な形状へ変形するようコントロールすることなどを目的としている．こういった研究は，アニメーターなど映像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．本論文も流体现象のコントロールに着目し，流体现象の中でも特に雲の表現を研究テーマとして取り上げる．

自然界では，図 1.2(a) のようなバブル状に鉛直方向に高々と発達した積乱雲，図 1.2(b) のような綿状の雲が分布する積雲，図 1.2(c) のような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，より現実に近い屋外景観映像を CG 技術を用いて表現する場合，雲の表示はとりわけ重要な要素であり，映画やアニメーションなどの映像制作，景観シミュレーション，コンピュータゲーム，フライトシミュレータなど幅広く利用されている．雲の表示においても数値流体解析の利用は有効であり，文献 [26] の方法では，数値流体解析を用いて雲の物理現象をシミュレーションすることで，雲のリアルな動きや形状を表現することに成功している．しかし，数値流体解析を利用した方法だけでは，生成される雲の形状や動きはシミュレーションに

使用する様々な物理パラメータに依存する．例えば，雲の場合は，熱の量の大きさ，風による外力，シミュレーション空間中に分布する水蒸気量など複数のパラメータが複雑に作用し合う．そのため，ユーザが所望する形状の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困難である．

1.2 研究目的

本研究では，前述の問題を改善し，雲がユーザの所望する形状となるようコントロールする方法の提案を目的とする．雲は大別して，巻雲，巻積雲，巻層雲，高積雲，高層雲，乱層雲，層積雲，積雲，層雲，積乱雲の 10 種類に分類され，大気流体の様々な条件により現れる種類の雲が異なる．本研究では，10 種類の雲の中でも，特徴的な形状や分布をもつ積乱雲，積雲，セル状の雲 (高積雲・層積雲・巻積雲) に着目し，以下の 3 つのコントロール方法を提案する．

- 積乱雲のコントロール
- 積雲のコントロール
- セル状の雲 (高積雲・層積雲・巻積雲) のコントロール

それぞれの雲をシミュレーションする場合，各々の雲に適した大気流体モデルを利用する必要がある．以下では，3 つの雲のコントロール方法に関して，利用する大気流体モデルとコントロール方法の概要について説明する．

1.2.1 積乱雲のコントロール

積乱雲は強い上昇気流により鉛直方向に高々と成長する雲であり，様々な凹凸形状の積乱雲が現実の世界でも観察される．積乱雲のシミュレーションを行う場合，上昇気流により成長する雲の大気流体モデルを利用する．積乱雲は強い上昇気流による鉛直方向の発達が特徴的であるため，熱源から加える熱量を大きく設定することで，強い上昇気流を発生させる必要がある．

積乱雲のコントロール方法では、特徴的な凹凸形状に着目する。所望の積乱雲の形状を輪郭線で指定し、目的形状の通りに積乱雲が発達するよう積乱雲のシミュレーションをコントロールする。コントロールは積乱雲のシミュレーションで利用する潜熱と呼ばれる熱量と、水蒸気量を調整することで実現する。潜熱とは、水蒸気が雲(水滴)へ状態変化する時に発生する熱量である。積乱雲はこの潜熱の発生により、雲の発生とともに、さらなる鉛直方向への発達が促される。また、水蒸気量を調整することで、発生する雲の量を調整する。以上の潜熱と水蒸気量の調整により、所望の目的形状の積乱雲を生成することが可能である。しかし、指定できる目的形状は単一であるという制限がある。そのため、ある目的の形状の積乱雲が生成された後、別の形状に変化させることはできない。この点を改善するため、上記のコントロール方法を拡張し、ある目的形状の積乱雲が形成された後に、別の目的形状を指定することで、その形状へ変化が生じるようシミュレーションをコントロールする方法についても提案する。この方法により、ある形状の積乱雲が形成された後に、別の形状へ雲が消滅する様子や形状変化する様子を表現することが可能である。

1.2.2 積雲のコントロール

積雲は、太陽熱などにより地面が暖められることで、様々な場所で上昇気流が発生し、その上昇気流により上空へ上昇した水蒸気が冷やされることで発生する。発生する積雲の底面は平らであり、同じ高度に、大小様々な大きさの綿状の塊が疎らに分布して現れる。また、風などの影響により、発生した積雲がその形を変えながら、水平方向へ移動していく様子が特徴的である。発生する積雲の分布は、空気中に存在する水蒸気量や、上昇気流の発生場所、風などに影響される。積雲のシミュレーションを行う場合も、積乱雲と同様の大気流体モデルを利用する。積乱雲との違いは上昇気流の強さにある。上昇気流が強い場合は、発生した積雲が鉛直方向へ発達し、積乱雲となってしまう。そのため、比較的弱い上昇気流が発生するようシミュレーションを行うことで、積雲が鉛直方向に成長することを抑制する。

積雲のコントロール方法では、同じ高度に分布する雲が風の影響により、その形状を変化しながら水平方向へ移動する特徴に着目する。所望の積雲の分布を、2次元の0か1の値のいずれかを持つスカラー場で指定し、目的形状の通りの積雲が発生するよう積雲のシミュレーションをコントロールする。また、ある目的形状の積雲が生成された後に、別の目的形状を指定することで、積雲が風に流れるよう水平方向に移動しながら目的の形状へ変化していくアニメーションの生成を行う。コントロールは、上昇気流の発生元となる熱源の位置と、熱源から発生する熱量を調整することで実現する。水平方向への積雲の移動に関しては、風を積雲のシミュレーションにおいて外力として作用させた場合、目的形状通りの積雲を形成することが難しい点から明らかになった。提案手法では、目的形状を形成しながら、積雲の水平方向への移動を行う新たな方法を提案する。以上のコントロール方法により、所望する目的形状の積雲が形成され、さらに別に指定した目的形状の積雲へ風に流れるように徐々に変化していくアニメーションの生成が可能である。

1.2.3 セル状の雲 (高積雲・層積雲・巻積雲) のコントロール

高積雲・層積雲・巻積雲は様々な大きさ・分布のセルパターンを持って現れる。これは、大気中にベナール対流と呼ばれる循環運動による対流が発生し、そのベナール対流によりベナール胞と呼ばれるセルパターンが形成されるためである。高積雲・層積雲・巻積雲は現れる高度により分類される。巻積雲・層積雲・高積雲の順に上空に位置し、高度が高いほど雲の厚みやセルの大きさなどが小さくなる。セル状の雲のシミュレーションを行う場合は、ベナール対流を考慮した大気流体モデルを利用する。

セル状の雲のコントロール方法では、様々な大きさのセルパターンを持ち、多様な形状の分布として現れる特徴に着目する。所望のセル状の雲の分布を、2次元の0~1までのいずれかの値をもつスカラー場で指定し、そのスカラー場にに応じて、所望する位置に、所望する大きさのセルパターンを持ったセル状の雲が生成されるようコントロールを行う。コントロールは、ベナール対流により発生する上昇気流の強さを調整

することで、セルパターンの大きさを調整する。また、シミュレーション空間中の水蒸気量を調整することで、セル状の雲の発生場所や、雲の発生量を調整する。以上のコントロール方法により、所望の分布で且つ、所望の大きさのセルパターンを持ったセル状の雲の生成が可能である。

1.3 論文の構成

本節では、本論文の構成について説明する。本章は、CG 分野における研究課題や現在における CG 技術の応用範囲について述べ、本研究に関する研究背景、目的について考察した。第 2 章では、数値流体解析手法の具体的な解き方を説明した後に、流体現象のコントロールに関する関連研究、雲のビジュアルシミュレーションに関する関連研究について議論する。第 3 章では、積乱雲のコントロール方法について説明し、第 4 章では、第 3 章で提案した方法をさらに拡張し、複数の目的形状をキーフレームとして指定することで積乱雲の形状変化が生じるようシミュレーションをコントロールする方法を説明する。第 5 章では、積雲のコントロール方法、第 6 章では、セル状の雲 (高積雲・層積雲・巻積雲) のコントロール方法について述べる。最後に、第 7 章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。

第 2 章

関連研究

本章では，本研究の関連研究として，まず，流体現象を表現するための数値流体解析手法について説明する．次に，流体現象の動きや形状をコントロールする従来研究について議論する．最後に，本研究で焦点を当てる流体現象のひとつである雲に関する従来研究について議論する．

2.1 数値流体解析手法

流体の動きの計算には，Navier-Stokes 方程式と呼ばれる方程式を利用する．Navier-Stokes 方程式を数値流体解析により解くことで，時間経過に伴う流体の速度の変化を表現することができる．CG の分野では，流体のシミュレーションにおいて，物理学の分野で求められるような流体現象の計算精度よりも，実装の容易性が求められる．そのため，流体が非圧縮であると仮定して，数値流体解析を行う方法がよく利用される．非圧縮性の Navier-Stokes 方程式は以下のように示される．

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.2)$$

式 (2.1) は，流体の動きを算出するための運動方程式であり，運動量保存則を示す．式 (2.2) は，連続の式と呼ばれ，非圧縮性流体の条件を満たすために用いる．ここで， \mathbf{u} は速度， t は時間， p は圧力， ρ は流体の密度， ν は粘性係数である．式 (2.1) の左辺は，時間軸で離散化した場合の微小時間における速度の変化を表す．式 (2.1) の

右辺は、4つの項から成り、左から順に、移流項、圧力項、拡散項、外力項と呼ばれる。移流項は、流体の速度場が速度場自身により移動する効果を表す。圧力項は、圧力の高い位置から低い位置に速度が移動する効果を表す。拡散項は、速度場がまわりに拡散しながら減衰する効果を表す。外力項は、速度場に外力を加えた場合の効果を表す。式(2.2)の連続の式は、ある微小体積に対して流体の流入する量と流出する量が同じになることを表す。前述の通り、シミュレーションには大きく分類してグリッドベースの方法とパーティクルベースの方法が存在する。本研究では、グリッドベースの手法を採用するため、グリッドベースの手法に関して以下で詳しく説明する。グリッドベースの方法では、シミュレーション空間を格子状に分割し、任意のタイムステップを設定することで、上記の Navier-Stokes 方程式を空間的・時間的に離散化し、差分法を利用することで計算する。しかし、Navier-Stokes 方程式を差分法の陽解法のみを用いて計算する場合、安定して計算を行うにはシミュレーションの条件を適切に設定する必要がある。この点を改善し、無条件に Navier-Stokes 方程式を安定的に解く方法が 1999 年に Stam によって提案された [37]。Stam の提案した方法では、 n ステップ目の速度場 \mathbf{u}_n から $n+1$ ステップ目の速度場 \mathbf{u}_{n+1} を計算する場合、Navier-Stokes 方程式の右辺を分解し、4つのステップで計算する。各ステップは以下の通りである。

Step1: 速度場 \mathbf{u}_n を利用し、外力項による速度場への影響を計算し、 \mathbf{u}_n^1 とする。外力項の計算には差分法の陽解法を利用する。

Step2: 速度場 \mathbf{u}_n^1 を利用し、拡散項による速度場への影響を計算し、 \mathbf{u}_n^2 とする。拡散項の計算には、陰解法を利用する。拡散項を陽解法を利用して計算する場合、粘性係数 ν を小さく設定する必要がある。陰解法では、粘性係数 ν が大きく設定した場合でも、安定して拡散項の計算を行うことができる。

Step3: 速度場 \mathbf{u}_n^2 を利用し、移流項による速度場への影響を計算し、 \mathbf{u}_n^3 とする。移流項の計算には、セミ・ラグランジュ法を利用する。移流項を陽解法を利用して計算する場合、タイムステップの値を小さく設定する必要がある。セミ・ラグランジュ法

では、仮想粒子を配置し、速度場を逆にトレースして補間を行うことで、タイムステップを大きく設定した場合でも安定的に移流項を計算することができる。

Step4: 速度場 u_n^3 を利用し、圧力項による速度場への影響を計算し、 u_n^4 とする。圧力項の計算ではまず、未知変数である圧力の値を算出する。圧力は、連続の式を利用することで、反復計算により算出できる。算出した圧力の値を陽解法を利用し、その影響を速度場に反映させる。

最終的に得られた速度場 u_n^4 を $n+1$ ステップ目の速度場 u_{n+1} とすることで、流体の速度場を時間変化とともに、流体の速度場を更新していく、実際に、煙、炎、水、雲などの流体現象のシミュレーションを行う場合、得られた速度場を利用し、煙の密度や炎の温度など各流体現象で扱う物理量を移動させる。その物理量を可視化することで、流体現象の映像生成が可能である。

2.2 流体現象のコントロール

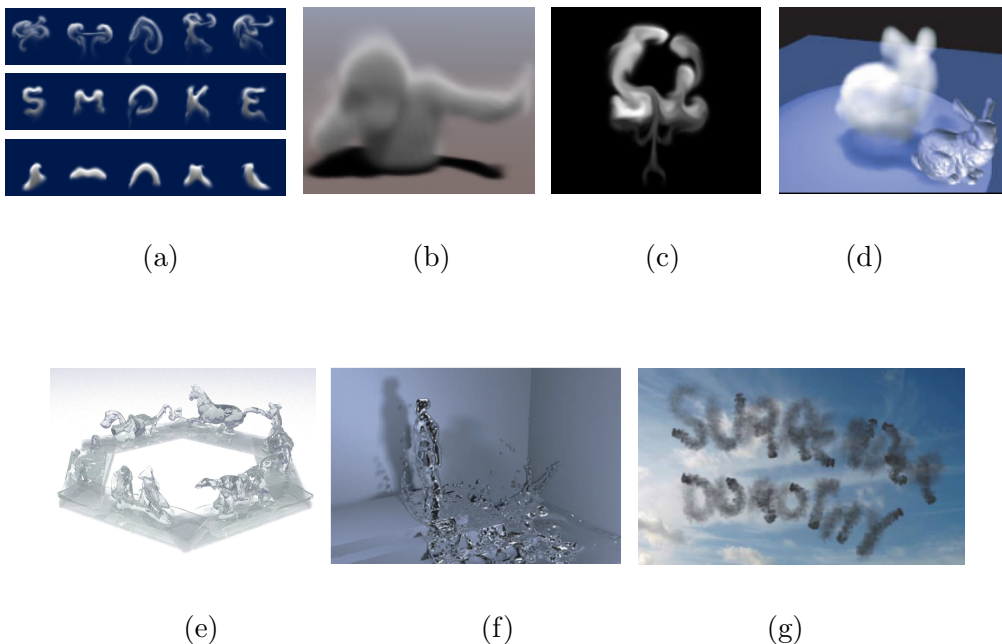


図 2.1 流体現象のコントロールに関する従来研究の適用例

前節で述べたように、煙、水などの自然現象の動きや形状をコントロールする研究

は多数行われている．図 2.1 は，それら従来研究の適用例の一部を示したものである．Foster と Mataxas は，流体现象をコントロールする最初の研究として，embedded controller という概念を利用することで，流体の圧力や速度場をコントロールする方法を提案した [12]．この方法では，アニメーターは流体の動きを表現する方程式の知識を知らなくても，流体の流れなどを操作することができる．Witting らは，アニメーターがインタラクティブに 2 次元での煙や水の流れをコントロールする方法を提案した [41]．この方法では，画像を入力値とし，初期温度場や，熱源，強制関数を設定するシステムを開発している，このシステムは映画 Prince of Egypt の映像生成に実際利用されている．また，Lamorlette らは，parametric space curve を利用して定義した曲線を骨格とし，ユーザからの入力値を基に物理ベースの風を作用させ，骨格を動かすことでユーザの意図した炎の映像を生成する方法を提案した．炎の映像生成は，骨格を筒状とみなし，その中にパーティクルを発生させることで行う．以上の 3 つの従来研究では，流体の自然な動きや形状を維持しながら，その動きや形状にユーザの意図を反映できるようなシステムを提供している．一方で，文字やキャラクターなどの自然には発生しない形状となるよう煙や水などをコントロールする研究も行われている．Treuille らは，流体を文字などの特殊な形状にコントロールする方法を初めて提案した [39](図 2.1(a))．この方法では，ユーザはキーフレームで目的の形状を指定し，目的形状に煙の形状が近づくよう風として外力が加えられる．外力の制御には，Continuous quasi-Newton optimization に基づき行い，目的形状に近づくに連れて外力が小さくなるよう調整される．しかし，この方法では，計算時間が膨大であるという問題点があった．その後，Treuille らの手法を随伴行列を用いて高速化を図った方法が McNamara らにより提案された [25](図 2.1(b))．この方法では，煙だけでなく，水についてもその形状を目的の形状にコントロールされるよう拡張されている．また，Fattal と Lischinski は，効率的に煙をある目的形状から別の目的形状へ形状変化しながらコントロールする方法を提案した [9](図 2.1(c))．この方法では，driving force term と呼ばれる外力により，煙の目的形状への移動を促し，gathering

term とよばれる作用により，目的形状により近似するよう煙の密度を調整することで煙のコントロールを可能にしている．Hong と Kim はポテンシャルフィールドを用いて煙の形状をコントロールする手法を開発した [16](図 2.1(d))．この方法では，初期の煙の密度分布と目的形状からポテンシャルフィールドを定義し，目的形状の中に煙を導くよう外力を発生させる．Shi と Yu はフィードバック制御を用いることで水・煙のアニメーションをコントロールする方法を提案した [34][35](図 2.1(e))．フィードバック制御では，煙や水の表面の形状をフィードバックし，目的形状との差分に応じて外力を発生させる．これらの研究では，煙や水を複雑な形状に変化させることは可能であるが，コントロールは直接的なものであり，流体の詳細な形状や，自然な動きの振る舞いまでは考慮できていない．最近の研究では，Thüerrey らはパーティクルを利用してしぶきなど水の詳細な形状までコントロールする方法を提案した [38](図 2.1(f))．また，Kim らはユーザが指定した経路に沿うような煙の動きを生成する方法を示している [21](図 2.1(g))．以上に挙げたように，煙や水を対象とした煙・水などの流体现象のコントロールに関する研究は多数行われているが，雲を対象とした研究は行われていない．また，雲の形成に関わる物理現象を従来研究では考慮していないため，雲のシミュレーションに従来研究の方法を直接適用することは難しい．直接外力などを発生させる従来法を適用した場合，雲のダイナミクスが失われてしまい，不自然な映像となってしまう．

2.3 雲のビジュアルシミュレーション

CG の分野において，雲のビジュアルシミュレーションに関する研究は盛んに行われており，様々な方法が提案されている．そのアプローチのひとつとして手続き的アプローチが挙げられる．手続き的アプローチは，実際の物理現象をシミュレーションすることなく，結果としてそれらしい映像生成を行う方法である．手続的アプローチを利用した方法として，フラクタルを利用した方法 [40][13][31][30]，ノイズを利用した方法 [23][7][6][4][5][24]，定性シミュレーションを利用した方法 [19][28]，確率的モ

デリングを利用した方法 [36] などが提案された。これらの手法では、低コストで雲の映像を生成することが可能である。しかし、所望の形状の雲や、様々な種類の雲を生成する場合、パラメータの選定や調整を試行錯誤で行うことが必要になる。また、生成される雲は物理現象を考慮していないため、雲の生成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難しい。一方で、雲のリアリティの向上や動きの表現を行うために、雲の物理現象を考慮した手法も多数提案されている。Kajiya らは CG の分野で初めて雲の物理現象を考慮して雲の映像生成を行う手法を提案した [18]。しかし、この方法は、極めて複雑であり、また計算コストも非常に高い。Dobashi らは、セルオートマトンの仕組みを利用することで、効率的に雲の形状と動きを表現する方法を提案した [3]。しかし、この方法では、単純な雲の形成過程を利用しているため、様々な雲を表現することは難しい。Miyazaki らは、CML の仕組みを利用して、雲のシミュレーションを行う方法を提案した [27]。この方法では、上昇気流やペナル対流などをシミュレーションすることで、様々な種類の雲の生成に成功している。CML は計算効率の点では優れているが、雲の物理シミュレーションを忠実にやっているわけではないため、大気中の渦などの作用により現れる雲の詳細な形状を表現することができない。Miyazaki らは [27] の手法を改良し、Stam が提案した無条件に安定して流体方程式を解く手法を応用することで、雲のシミュレーションを行う方法を提案した [27]。この方法では、雲の生成過程を示す大気流体モデルを忠実にシミュレーションするため、より写実的な動きや形状の雲を表現することが可能である。しかし、生成される雲の形状・大きさなどは熱源の位置、熱源の強さ、風の方向、水蒸気量など様々な物理パラメータに依存する。そのため、ユーザの意図した形状の雲を生成するにはそれらのパラメータをシミュレーション中に試行錯誤しながら調節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見つけ出すことは極めて困難であり、膨大な手間と労力を必要としてしまう。

第 3 章

積乱雲のコントロール

本章では、ユーザが指定した目的形状に沿った積乱雲が自動生成されるよう積乱雲のシミュレーションをコントロールする手法について述べる。

本章の構成は次の通りである。はじめに、3.1 節で積乱雲の数値シミュレーション方法について説明する。次に、3.2 節で提案手法の基本的な考え方と処理の流れについて説明し、3.3 節以降で提案手法の詳細について述べる。その後、3.5 節で提案手法を用いて生成した積乱雲の形状コントロール結果について示し、3.6 節で考察を述べる。

3.1 積乱雲の大気流体モデル

本節では、積乱雲の数値シミュレーション方法について説明する。提案手法では、積乱雲の生成に Miyazaki らが提案した大気流体モデル [26] を利用する。大気流体モデルの数値解析は文献 [37] の手法に基づいて行う。積乱雲の生成される過程について図 3.1 に示す。積乱雲は強い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で発生する (図 3.1(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 3.1(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) に状態変化する (図 3.1(c))。これを相転移と呼ぶ。相転移の際に発生する熱を潜熱と呼び、この潜熱の発

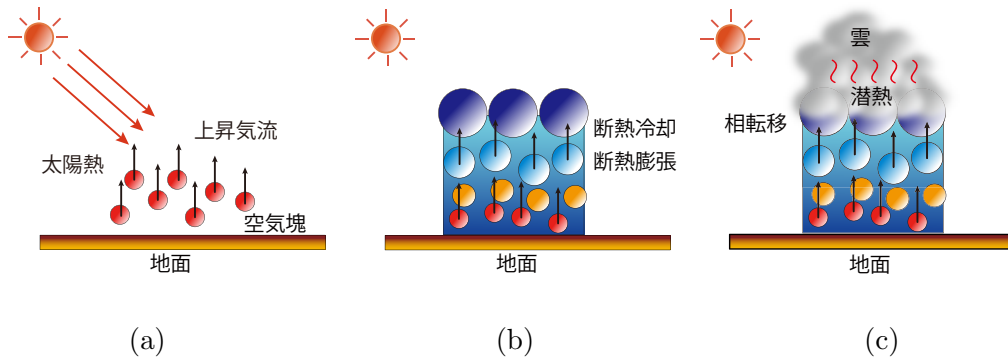


図 3.1 積乱雲の生成過程

生が新たなる浮力を生み出し、さらなる雲の鉛直方向への発達が促進される。

雲のシミュレーションは、1.1 節で述べたグリッドベースの方法に基づいて行う。シミュレーション空間は $N_x \times N_y \times N_z$ の格子に分割し、ボクセルと呼ばれる各格子点に速度 $\mathbf{u} = (u, v, w)$ 、圧力 p 、水蒸気密度 q_v 、雲密度 q_c 、温度 T をそれぞれ割り付ける。そして、大気流体モデルを離散的なタイムステップに分けて計算することで、各ボクセルに割り当てられた状態量を時間変化とともに更新させる。雲の表示には各ボクセルの雲密度をボリュームデータとして利用し、ボリュームレンダリングを利用することで、可視化を行う。ボリュームデータとは各ボクセルに与えられた密度値などのデータを指す。以降で、シミュレーションに利用する大気流体モデルとその初期条件・境界条件について示す。

3.1.1 積乱雲の大気流体モデル

積乱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以下に示す。簡略化のため、大気は密度が一定で非圧縮の流体であると仮定する。このとき、大気の流れは次式で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.2)$$

ここで、 t は時間、 ρ は大気の密度、 ν は流体の粘性係数、 \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 (3.1) は大気の流れの時間変化を表す発展方程式であり、右辺第一項の移流項、第二項の圧力項、第三項の拡散項、 \mathbf{B} 、 \mathbf{f} などの外力項で構成される。各項の効果については、2.1 節で説明した通りである。式 (3.2) は、非圧縮性の条件を満たすために使用する連続の式である。式 (3.1) と式 (3.2) を用いて数値シミュレーションを行うことで、時間変化する大気の流れを表現する。式 (3.1) 中の浮力 \mathbf{B} は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{B} = k_b \frac{T - T_{amb}}{T_{amb}} \mathbf{z} - g q_c \mathbf{z} \quad (3.3)$$

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の温度を指し、地面からの高度に対して線形に減少する。式 (3.3) の右辺第一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、右辺第二項は水滴の落下にともなう周辺空気の引きずりを表す。

数値シミュレーションを行うにあたり、その計算過程中の数値誤差により、大気流体内における小さなスケールの渦の表現が失われてしまう。そこで、失われた渦を補うため、次式で与えられる外力 \mathbf{f}_{conf} を加えることで小さなスケールの渦を表現することができる [10]。

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u}, \mathbf{N} = \frac{\nabla |\boldsymbol{\omega}|}{|\nabla |\boldsymbol{\omega}||} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{f}_{conf} = \varepsilon (\mathbf{N} \times \boldsymbol{\omega}) \quad (3.5)$$

ここで、 ε は渦の強度を調節するための係数である。

雲密度 q_c と水蒸気密度 q_v の発展方程式は、それぞれ次式で与えられる。

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) q_c + C_c \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) q_v - C_c + S_v \quad (3.7)$$

$$C_c = \alpha (q_v - q_s) \quad (3.8)$$

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、 α は相転移率である。相転移率 α は水蒸気と雲の間の急激な遷移を抑制するために用いる。また、 q_s は飽和水蒸気密度を表す。式 (3.6)、(3.7) の右辺第一項はそれぞれ大気の流れによる雲密度・水蒸気密度の移流を表す。飽和水蒸気密度 q_s は温度 T の関数として次式で与えられる。

$$q_s = \min(A \exp(-B/(T + C)), q_v + q_c) \quad (3.9)$$

ここで、 A 、 B 、 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。

最後に、温度の発展方程式は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)T - \Gamma_d v_z + QC_c + S_T \quad (3.10)$$

ここで、 Γ_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。式 (3.10) の右辺第一項は温度場の大気による移流を表す。また、第二項は断熱冷却の効果を表し、第三項は潜熱の発生を表す。

3.1.2 初期条件・境界条件

シミュレーションにおける初期条件と境界条件は以下のように与える。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を設定する。ここで、環境水蒸気密度は環境温度における飽和水蒸気量を算出し、任意の比率を乗じた値を設定する。すなわち、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。また、上昇気流の発生を促すために、シミュレーション空間の底面に熱源を配置する。熱源の位置はユーザにより任意の位置に指定するか、あるいはノイズ関数により与える。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。

3.2 積乱雲のコントロール概要

提案手法におけるコントロール方法の基本的な仕組みについて図 3.2 に示す。ユーザはスクリーン上で目的とする積乱雲の輪郭形状を直接描くことで指定する。本稿で

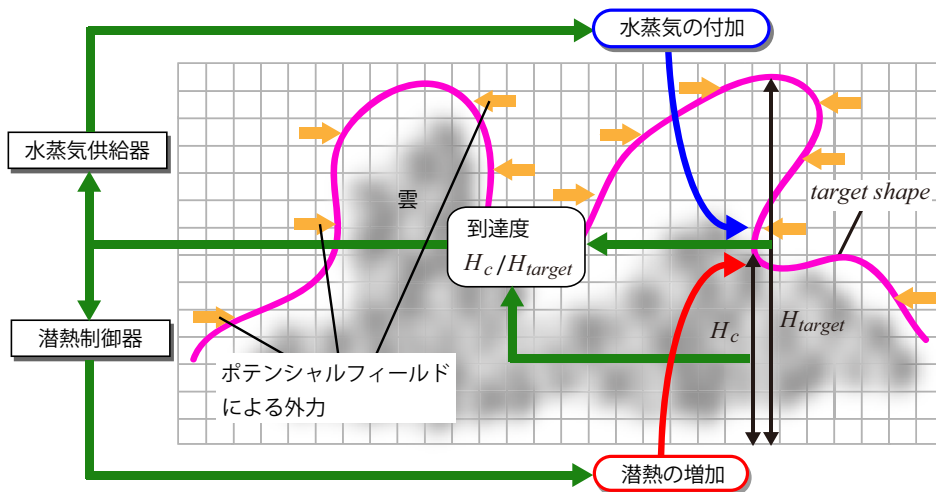


図 3.2 コントロール方法の基本構造

は、以降、ユーザが指定した目的形状を target shape と呼ぶ。提案手法では、target shape に沿った形状の積乱雲が自動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。提案手法による積乱雲のコントロールは以下の 2 つの方法により実現する。

- 第一の手法: フィードバック制御

target shape の高さまで雲が到達するよう雲の発達を促進させる制御を行う。フィードバック制御は潜熱制御器と水蒸気供給器に分かれる。潜熱制御器は target shape と雲の高さの差に応じて潜熱の制御を行い、雲の鉛直方向への発達を調整する。潜熱とは、前述したように雲の相転移により発生する熱である。この潜熱の発生により新たなる浮力が生じ、雲が鉛直方向へさらに発達する。水蒸気供給器は target shape の高さまで雲が発達していない位置に水蒸気の供給を行う。水蒸気量が増加することにより、水蒸気から雲への相転移が起こりやすくなる。水蒸気から雲への相転移は潜熱の発生につながるため、最終的に水蒸気の供給が雲の鉛直方向への発達を促進させる。

- 第二の手法: ポテンシャルフィールドによる外力

target shape の内部に雲が収まるよう水平方向に作用する外力を作用させる。

提案手法では、この外力を仮定のポテンシャルフィールドを利用することで生成し、target shape の境界付近でのみ作用させる．ポテンシャルフィールドは target shape を基に生成する．この外力の作用は、より正確に target shape に一致する積乱雲の形成を可能とする．

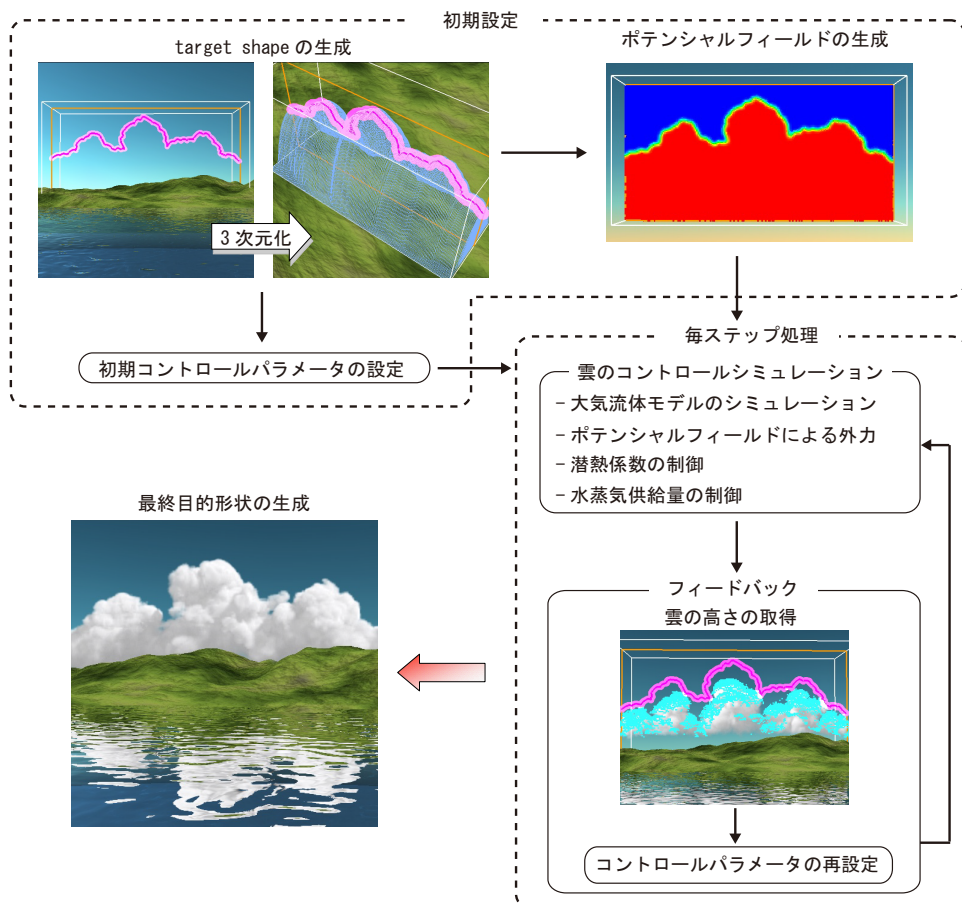


図 3.3 提案手法によるコントロールの流れ

提案手法の流れを図 3.3 に示す．まず、初期設定としてユーザは target shape を指定する．このとき、コントロールに利用する様々なパラメータを target shape の高さから算出する．さらに、target shape を基にポテンシャルフィールドの生成を行う．次に、毎ステップ処理として target shape ，ポテンシャルフィールドを用いることで雲のコントロールシミュレーションを行う．鉛直方向の雲のコントロールは

潜熱制御器・水蒸気供給器により行い、水平方向の雲のコントロールはポテンシャルフィールドによる外力により実現する．target shape と雲の高さの差に応じてステップごとにコントロールパラメータが再設定される．

3.3 target shape の指定方法

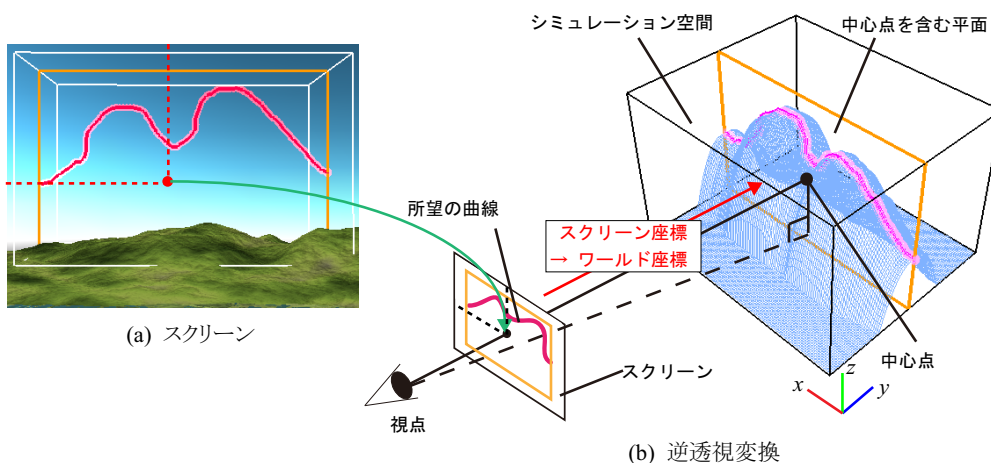


図 3.4 target shape の指定方法

図 3.4 は提案手法による target shape の入力システムについて示したものである．図 3.4 に示すように，ユーザは目標とする雲の 3 次元形状をマウスやタブレット操作などにより，直接描くことで指定する．具体的には，まず，ユーザは所望するカメラ位置からスクリーンに所望の雲の輪郭線を曲線として描く．図 3.4(a) は実際の入力システムのスクリーン画面を示したものである．次に，描いた曲線はシミュレーション空間の中心点と視点を結んだベクトルの水平成分に垂直な平面に投影される．この投影は図 3.4(b) に示すように，逆透視変換を利用し，スクリーン座標から仮想空間中のワールド座標を計算することにより行う．そして，投影された曲線を基にシミュレーション空間に目標とする 3 次元形状を自動生成する．これには Igarashi らの手法 [17] を利用する．Igarashi らの手法では，2 次元のスケッチ画像から 3 次元形状の自動生成を行うことが可能である．3 次元の目的形状は描いて投影された曲線がシ

ミュレーション空間の y 軸成分に厚みを持つよう生成する．ここで生成された 3 次元形状が target shape である．提案手法では，この target shape に近づくよう雲の生成過程のコントロールを行う．

3.4 積乱雲のコントロール

本節では積乱雲のシミュレーションをコントロールする方法について詳しく説明する．提案手法では，target shape から得られる高さとしミュレーションにより生成される雲の高さとの差が 0 となるよう制御を行う．具体的には，まず，target shape の高さとしミュレーションにより生成される積乱雲の高さとの比率を到達度 R として定義する．そして，到達度 R が 1，すなわち，雲の高さが target shape の高さまで到達するようシミュレーションをコントロールする．到達度 R はシミュレーション空間最下層の格子点 $(i, j, 0)$ ごとに算出する． R は次式により与えられる．

$$R(i, j) = H_c(i, j) / H_{target}(i, j), \quad (i = 1, \dots, N_x; j = 1, \dots, N_y) \quad (3.11)$$

ここで， $H_c(i, j)$ はシミュレーションにより生成される各タイムステップでの雲の高さを， $H_{target}(i, j)$ は target shape の高さを表す． $H_c(i, j)$ ， $H_{target}(i, j)$ はシミュレーション空間の最下層からの高さとする．

提案手法では，前述したようにフィードバック制御とポテンシャルフィールドによる外力の 2 つの方法を用いることで，積乱雲の形状コントロールを実現する．フィードバック制御は，target shape の高さまで雲が到達するよう雲の鉛直方向の発達を促す．フィードバック制御では，雲の相転移の際に発生する潜熱と，水蒸気の供給量を制御することで雲の発達をコントロールする．潜熱の制御は潜熱制御器により行う．潜熱制御器は各タイムステップにおける到達度 R をフィードバックし，潜熱係数 Q (式 3.10) をコントロールすることで潜熱量を調整する．従来手法の積乱雲のシミュレーションでは，潜熱係数 Q は全シミュレーション空間で同一の値で設定されていた．しかし，提案手法では，雲のコントロールを行うために，シミュレーション空間の最下層の格子点 $(i, j, 0)$ ごとに，潜熱係数 $Q_c(i, j)$ を設定する．そして，その

値をフィードバック制御によりタイムステップごとに変化させる．また，水蒸気の供給量の制御には水蒸気供給器により行う．水蒸気供給器は各タイムステップでフィードバックした到達度 R に応じて，target shape の高さまで達していない位置に水蒸気を供給する．水蒸気の供給は，水蒸気の供給量を $S_c(i, j)$ とし，各タイムステップにおける雲の高さの位置に供給する．これら 2 つのコントロールにはフィードバック制御の一種である PID 制御を利用する [15][32][1] ．

フィードバック制御は鉛直方向の制御には有効であるが，この制御だけでは target shape を水平方向に超えて雲が生成される．そのため，完全に目的形状に一致した雲を生成することは難しい．この問題を改善するため，シミュレーション空間に滑らかに値が変化するポテンシャルフィールドを設置し，外力を作用させる．鉛直方向への雲の制御はフィードバック制御で十分であるため，この外力は水平方向にのみ作用させる．以降で，ポテンシャルフィールドによる制御とフィードバック制御の方法について詳しく説明する．

3.4.1 ポテンシャルフィールドによる外力

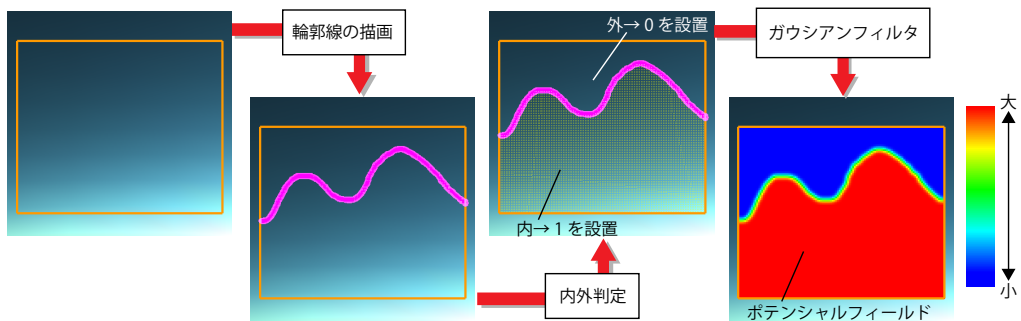


図 3.5 ポテンシャルフィールド生成の流れ

前述したように，水平方向成分における雲のコントロールを行うため，仮想のポテンシャルフィールドを配置し，そこから得られる外力を target shape の境界付近で作用させる．図 3.5 はポテンシャルフィールドの生成手順について示したものである．ポテンシャルフィールドの設定方法について以下に説明する．まず，ユーザは上述し

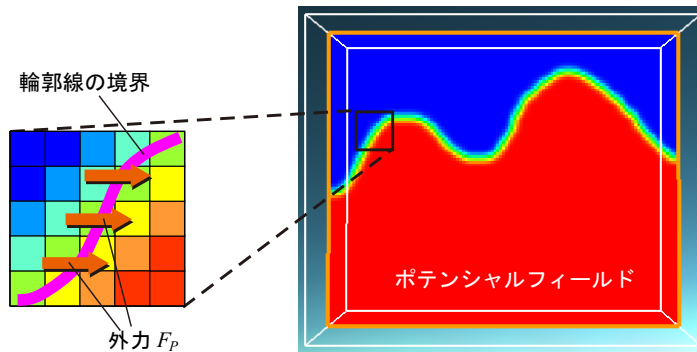


図 3.6 ポテンシャルフィールドによる外力

たようにスクリーン上に target shape を指定する．次に，target shape の内側と外側を判定し，シミュレーション空間の各格子点において内側には 1 を，外側には 0 を設定する．次に，0 あるいは 1 が設定されたシミュレーション空間にガウシアンフィルタを施す．以上の処理を行うことで，輪郭線付近で値が滑らかに変化するスカラー場を設置することができる．このスカラー場がポテンシャルフィールドである．図 3.6 の矢印の図で示すように，ポテンシャルフィールドによる外力 F_p は水平方向成分にのみ作用するため，次式により算出する．

$$F_p(q_c, \psi) = q_c \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \nabla \psi \quad (3.12)$$

ここで， q_c は雲の密度， ψ はポテンシャルフィールドを表す．この外力はポテンシャルフィールドの勾配に比例されることで，輪郭線付近ほど強く，遠ざかるほど弱いものとなる．また，雲の密度に比例させることで，雲の密度が存在する領域のみ作用する．この外力の作用により，雲が水平方向に target shape を超えて発達することを抑制することができる．

3.4.2 潜熱制御器

提案手法では，潜熱制御器に PID 制御を利用する．PID 制御とは，入力値を出力値と目標の偏差の一次関数として制御する比例制御 (P 制御)，出力値と目標の偏差の積分値に比例して制御する積分制御 (I 制御)，入力値の時間変化に応じて制御を行う

微分制御 (D 制御) の 3 つを組み合わせた制御方法である。しかし、本研究では、実験結果から、P 制御と I 制御のみを用いた PI 制御で十分であることが確認できたため、潜熱の制御には PI 制御を適用する。PI 制御を用いることで、時間変化とともに出力値を目標値まで近づけるような制御が可能である。P 制御は雲が target shape の高さよりも下方にあるほど潜熱量を大きくすることで雲の発達を促し、目標値に近づくほど潜熱量を小さくすることで雲の発達を抑制する。しかし、P 制御のみでは図 3.7 に示すように雲と target shape との間に残留偏差が残ってしまう。この問題点を改善するため、I 制御を作用させ、この残留偏差が 0 となるよう雲を目標値まで発達させる。潜熱係数 $Q_c(i, j)$ の値は、PI 制御を用いて以下の式により各タイムステップごとに決定する。

$$Q_c(i, j) = K_P(i, j)\Delta_H(i, j) + K_I(i, j) \int_0^T \Delta_H(i, j, \tau) d\tau \quad (3.13)$$

$$\Delta_H(i, j) = 1.0 - R(i, j) = \frac{H_{target}(i, j) - H_c(i, j)}{H_{target}(i, j)} \quad (3.14)$$

ここで、 $\Delta_H(i, j)$ は target shape の高さとしミュレーションにより生成される雲の高さとの差分を規格化したものである。 $\Delta_H(i, j)$ の値が大きいほど、出力値である潜熱係数の値も大きくなる。式 (3.13) の右辺第一項は比例制御 (P 制御) 部分を、第二項は積分制御 (I 制御) 部分を表す。 $K_P(i, j)$ 、 $K_I(i, j)$ はそれぞれ P 制御、I 制御を調節する値であり、それぞれ比例ゲイン、積分ゲインと呼ばれる。 $K_P(i, j)$ 、 $K_I(i, j)$ は以下に示す式により算出する。

$$\begin{aligned} K_P(i, j) &= \kappa_P H_{target}(i, j) \\ K_I(i, j) &= \kappa_I H_{target}(i, j) \end{aligned} \quad (3.15)$$

各格子点でのそれぞれのゲインの決定には、まず、限界感度法 [42] により、実験的に $H_{target}(i, j)$ の一番大きな値に対する理想的なゲイン κ_P 、 κ_I を求める。そして、その値と $H_{target}(i, j)$ との積をそれぞれのゲインとして利用する。これは、全シミュレーション空間で各々のゲインを求めるには膨大な時間がかかってしまうためである。 $Q_c(i, j)$ は鉛直方向 (z 軸成分) にすべて同一の値を用いる。

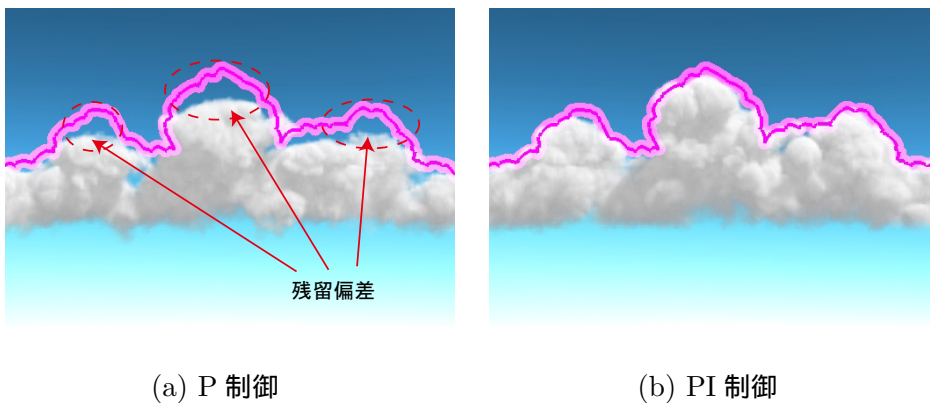


図 3.7 P 制御と PI 制御の比較実験

3.4.3 水蒸気供給器

水蒸気供給器は以下に示す条件を満たす時、水蒸気の付加を行う。

$$R(i, j) < \frac{1}{N_x N_y} \sum_{l=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} R(l, m) \quad (3.16)$$

式 (3.16) は到達度 $R(i, j)$ の総和の平均値よりも、到達度 $R(i, j)$ が低い位置に対して水蒸気を付加することを意味する。つまり、潜熱制御器は、すべての格子点で同じ割合で雲が成長するよう作用する。付加する水蒸気量 $S_c(i, j)$ は以下の式により決定する。

$$S_c(i, j) = c_v q_{amb}(i, j, k_{top}) \quad (3.17)$$

ここで、 c_v は水蒸気量を調節するための係数、 q_{amb} は環境水蒸気密度である。 (i, j, k_{top}) はシミュレーションにより生成される雲の一番高い格子点番号を示す。

3.5 適用例

本節では、提案手法を用いて、積乱雲のコントロールシミュレーションを行った結果を示す。実験に用いた環境は以下の通りである。

- CPU : Core2Extreme X9650
- グラフィックスハードウェア : Geforce8800GT

- グラフィックス API : OpenGL

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、Dobashi らの手法 [3] を利用してレンダリングを行った。以下に示す実験例では、表 3.1 に示す値をシミュレーションに利用するパラメータとして利用した。雲の生成に関するパラメータは、従来研究である Miyazaki らの方法 [26]、Harris らの方法 [14] を参考にすることで決定した。また、フィードバック制御に利用したパラメータについては、上述したように限界感度法を利用することにより算出した。限界感度法ではまず、P 制御のみの制御を行い、比例ゲインを徐々に増加させ、制御量の変化が持続振動の状態になったときの比例ゲインを求める。そして、得られた比例ゲインと持続振動の周期から最適な比例ゲイン、積分ゲインを算出する。各実験例におけるシミュレーション空間の分割数、シミュレーション時間、画像のサイズは表 3.2 に示した通りである。なお、雲以外の山などの物体については、3 角形ポリゴンの集合で表現した。物体の色の決定にはテクスチャマッピングの手法を用いた。テクスチャマッピングとは、3 次元 CG のマッピング技法の一つであり、ポリゴン表面にテクスチャと呼ばれる画像を貼り付ける機能である。ポリゴンの各頂点に対応するテクスチャ座標 (s, t) を指定することで、各ポリゴンにマッピングされる画像の範囲を指定できる。また、水面の表示については、波動方程式を用いて、水面の height field を算出し、環境マッピングの手法を利用することで、空など、水面から遠方の領域に存在する物体の映り込みを表現した。環境マッピングとは、映り込みを擬似的に表現する手法であり、反射物体を取り囲む外界の画像を含む特殊なテクスチャを反射物体にマッピングすることで、映り込みを効率的に表現できる。また、水面付近の物体の移りこみについては、シミュレーション空間に仮想平面を配置し、仮想平面に視点から 3 次元モデルを投影させることでテクスチャを作成し、そのテクスチャを水面にテクスチャマッピングすることで表現した。

	パラメータ名	数値
dt	タイムステップ	1.0
dh	格子幅	1.0
k_b	浮力の係数	1.0
g	重力の係数	0.2
T_{amb}	環境温度	2.5(上面) ~ 3.0(底面) (高度に比例)
S_v	水蒸気供給係数	0.0
α	相転移率	0.1
(A, B, C)	飽和水蒸気量の係数	(100, 3, -2.3)
Γ_d	乾燥断熱減率	0.02
S_T	熱源の強さ	0.23
κ_P	比例ゲイン	4.95
κ_I	積分ゲイン	0.6
c_v	水蒸気供給器の係数	0.5

表 3.1 実験に用いた制御パラメータ数値

	シミュレーション時間	格子数	画像サイズ
実験例 1(図 3.8)	4.3 秒/フレーム	200 × 100 × 80	480 × 240 pixel
実験例 2(図 3.10)	7.2 秒/フレーム	320 × 100 × 80	480 × 320 pixel
実験例 3(図 3.11)	7.2 秒/フレーム	320 × 100 × 80	480 × 320 pixel
実験例 4(図 3.12)	4.3 秒/フレーム	200 × 100 × 80	480 × 240 pixel
実験例 5(図 3.13)	3.5 秒/フレーム	160 × 100 × 80	480 × 240 pixel
実験例 6(図 3.14)	7.2 秒/フレーム	320 × 100 × 80	480 × 320 pixel

表 3.2 各実験例でのシミュレーション時間・格子数

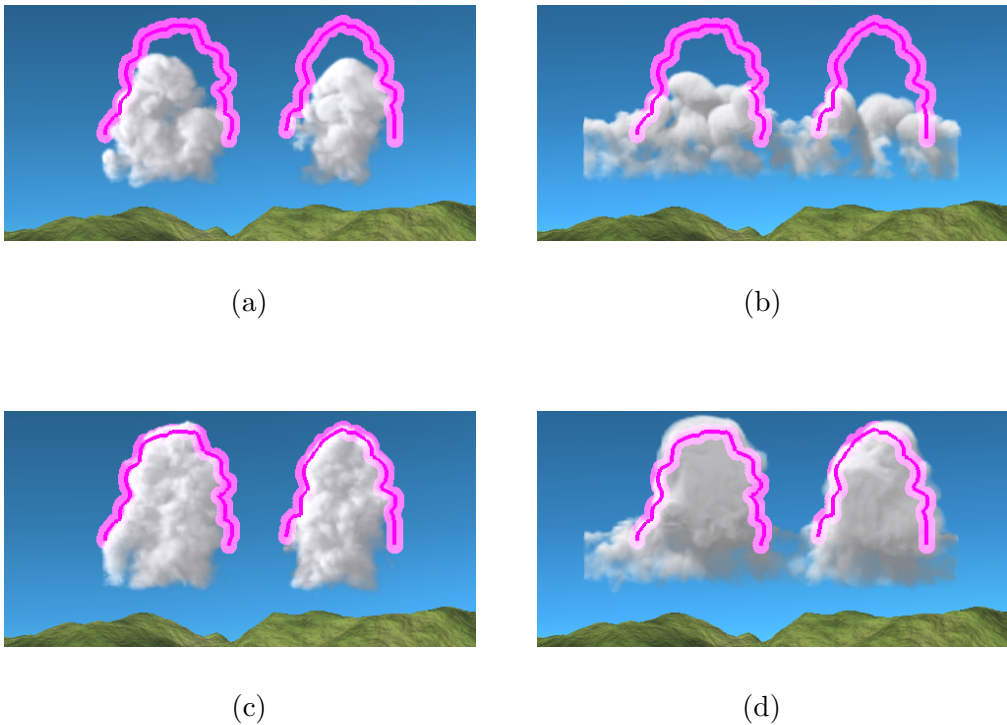


図 3.8 従来手法と提案手法の比較結果

まず，提案手法の有効性を示すために，提案手法と従来手法を比較した実験例について図 3.8 に示す．従来手法には Fattal らの手法 [9] を利用し，雲のシミュレーションと組み合わせた実験を行った．図 3.8(a)(b) は目的形状に達する前の結果であり，図 3.8(c)(d) は目的形状に達した結果である．図中のピンクの曲線がユーザが指定した輪郭線を表す．右側の画像が Fattal らの手法による結果であり，左側の画像が提案手法による結果である．比較結果から，Fattal らの手法ではシミュレーション空間から目的形状に雲が集まるような動きが現れ，不自然な映像となる．それに対して提案手法では，雲が目標とする高さまで積乱雲の特徴であるバブル状の形状を形成しながら発達する自然な雲の映像を生成することが可能である．これは，提案手法が雲の生成過程をコントロールしているためである．

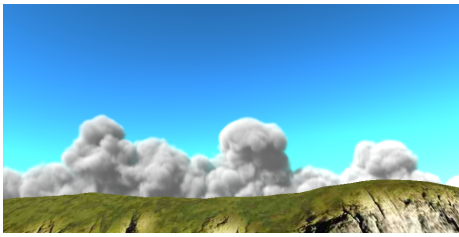
次に，提案手法により生成される雲と，雲のシミュレーションのみによる方法で生成される雲の映像の自然さに差があるかを比較するための検証を行った．検証で行った実験方法は以下の通りである．

- 実験対象者: 北海道大学大学院情報科学研究科の修士 1 年生の学生 22 名
- 実験の内容: 提案手法と物理シミュレーションのみによる方法をそれぞれ用いて生成した異なる雲の動画を 3 組を見せ、それぞれどちらの映像が自然か (違和感がないか) を選択するアンケートを実施

アンケートに利用した雲の動画の最終フレームの画像を図 3.9 に示す。アンケートでは、まず、1 組目の雲の映像を (a), (b) の順に見せ、(a), (b) の最終フレームの静止画像を並べて表示した状態で、どちらの雲の映像が自然か (違和感がないか) をアンケート用紙の選択肢の中から選択してもらった。2 組目、3 組目についても同様の手順でアンケートを実施した。提案手法を利用して生成した雲の結果は (a), (c), (f) であり、物理シミュレーションのみによる方法で生成した雲の結果は、(b), (d), (e) である。アンケートの結果を、表 3.3 に示す。アンケートで得られたデータを利用し、検定方法のひとつである符号検定により、検証を行った。今回のケースでは、帰無仮説を、提案手法と従来手法により生成された雲の映像の自然さ (違和感の無さ) には差がない、と定義し、対立仮説を、提案手法と従来手法により生成される雲の映像の自然さ (違和感の無さ) には差がある、と定義する。そして、有効水準を 5%(0.05) とし、選択数の多かった従来手法が有意であるか検証すると、

p 値: $0.6201 > 0.05$

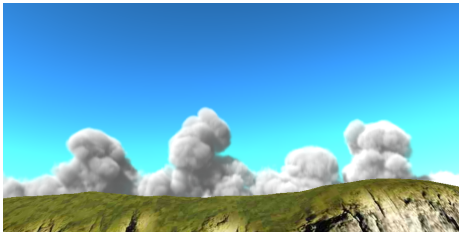
となり、帰無仮説は棄却できない。そのため、「提案手法と従来手法により生成された雲の映像の自然さ (違和感の無さ) には差がある」とは言えない。今回の実験で、帰無仮説が棄却される (従来手法が有意だと判定される) 領域の境界は、提案手法が 24 回、物理シミュレーションのみによる方法が 41 回選択される場合である。



(a)



(b)



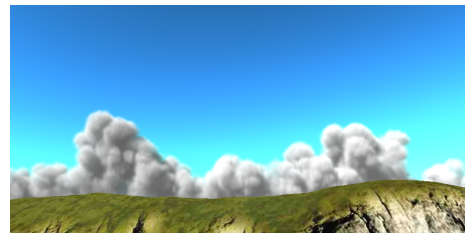
(c)



(d)



(e)



(f)

図 3.9 検定に利用した積乱雲の生成例

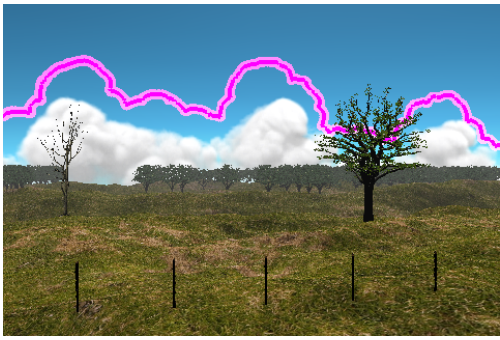
	1 組目	2 組目	3 組目	合計
提案手法の選択数	14	8	8	30
従来手法の選択数	7	14	14	35

表 3.3 アンケートの結果

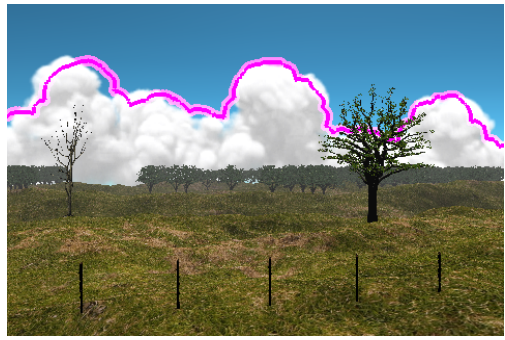
次に，提案手法を用いた適用例を図 3.10 と図 3.11 に示す．図 3.10 は比較的自然界で観察されるような単純な凹凸形状を指定した例である．これは，target shape が完全に height field となる．図 3.10(a)，(b) はそれぞれ 150step 目，190step 目の結果であり，図中のピンク色の曲線はユーザが指定した輪郭線である．図 3.10(c) は，輪郭線を表示しなかった場合の 190step 目の結果であり，図 3.10(d) は太陽の高度を下げた場合の結果である．太陽の位置を変更することにより，大気環境光が変化することでその色を雲に反映させたり，陰影を変化させることが可能である．また，図 3.10(e)，(f) は視点を変更させた場合の結果である．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可能である．提案手法により，ほぼ target shape に一致した雲が生成されている．図 3.11 は，より特徴的な凹凸形状を指定した場合の例である．図 3.11(a)，(b) はそれぞれ 150step 目，190step 目の結果であり，図 3.10(c) は輪郭線を表示しなかった場合の 190step 目の結果である．また，図 3.10(d) は太陽の位置を変更させた場合の結果であり，図 3.10(e)，(f) は視点を変更させた場合の結果である．この場合，target shape は完全な height field とならないが，提案手法を利用することで，target shape に近い形状の雲を生成することが可能である．

次に，target field が全く height field とならない部分を有する場合の適用例について図 3.12，図 3.13 に示す．図 3.12 は現実世界で観察されないドクロのような形状を指定した結果である．図 3.12(a) は輪郭線の描画のみを行った結果であり，図 3.12(b)，(c) はそれぞれ 160step 目，200step 目の結果である．また，図 3.12(d) は輪郭線の表示をしなかった場合の 200step 目の結果である．図 3.12(a) は輪郭線の表示のみを行った結果であり，生成された雲の結果と target shape との間には差異が存在する．しかし，生成される雲の形状は target shape に近い十分な結果である．次に，図 3.13 は，提案手法の失敗例について示したものである．この場合，雲の右側部分が target shape まで達していない．

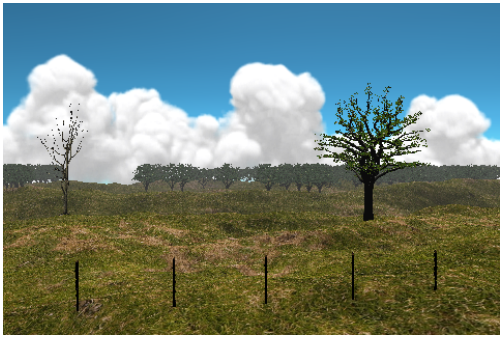
最後に、本物の写真画像に似た雲を提案手法により生成した結果について図 3.14 に示す。写真の雲から雲の輪郭線を抽出し、その輪郭線を提案手法に利用することで、target shape を生成し、シミュレーションのコントロールを行った。図 3.14(a) は、輪郭線の抽出に利用した写真画像である。図 3.14(b), (c) は抽出した輪郭線をもとに生成した 200step 目の結果であり、図 3.14(b) については輪郭線の表示も行っている。また、図 3.14(c), (d) はそれぞれ太陽の位置を変更させた場合の結果、視点変更を行った場合の結果である。提案手法を用いることで、写真中の雲に近い形状の雲を生成することが可能である。



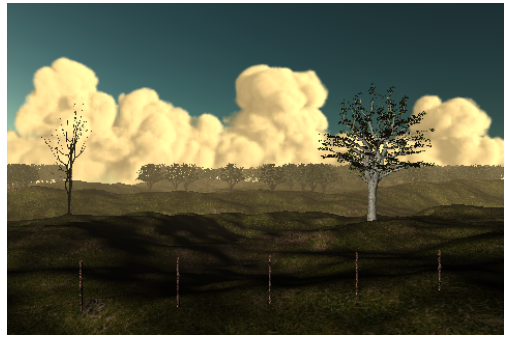
(a)



(b)



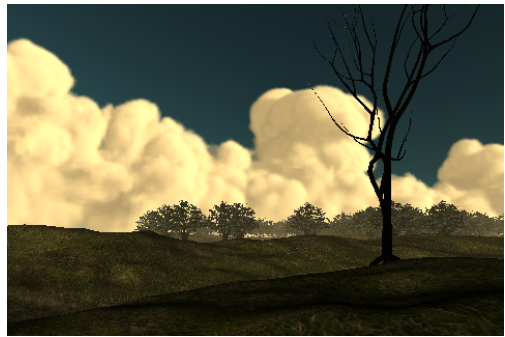
(c)



(d)

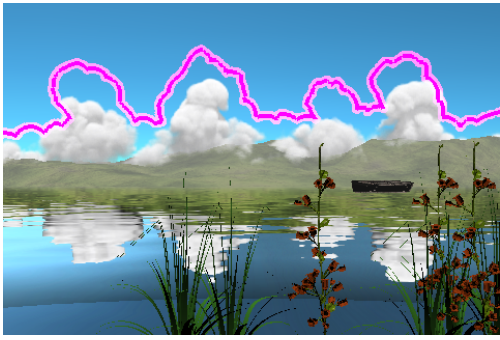


(e)



(f)

図 3.10 単純な輪郭線を指定した場合の適用例



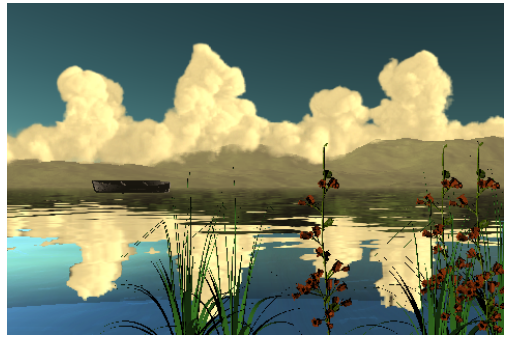
(a)



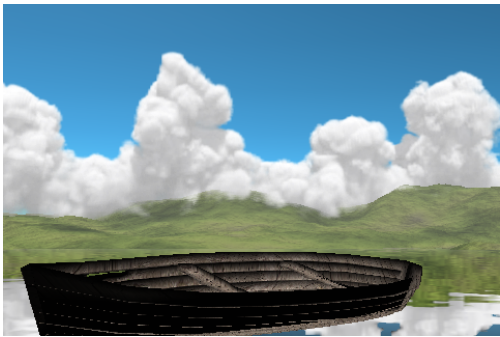
(b)



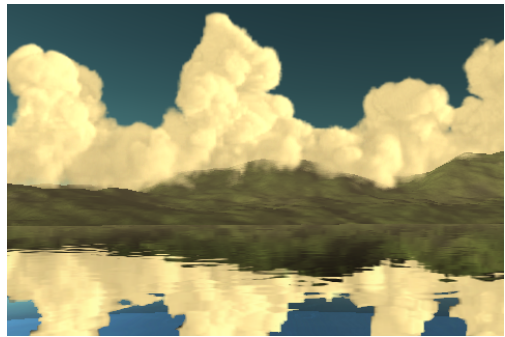
(a)



(b)

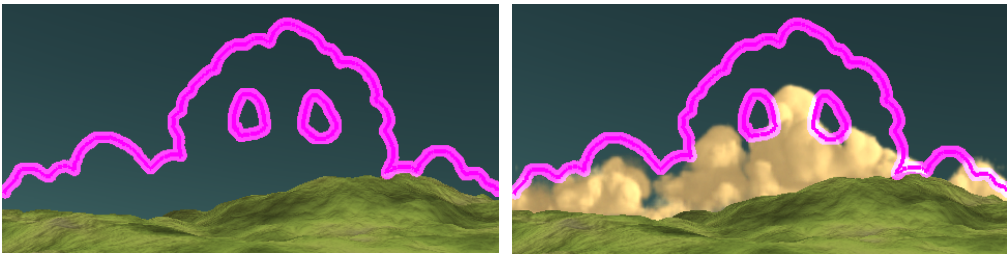


(a)



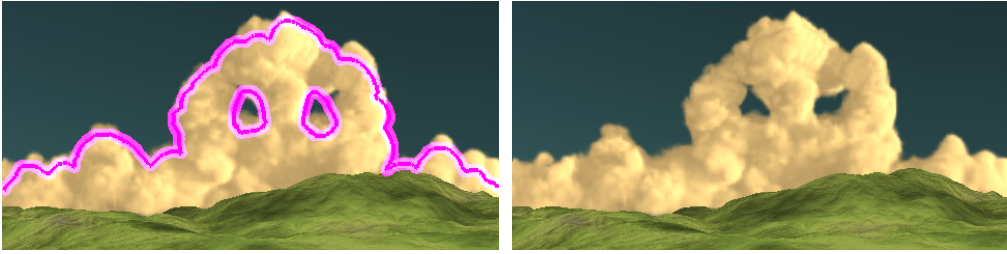
(b)

図 3.11 複雑な輪郭線を指定した場合の適用例



(a)

(b)



(c)

(d)

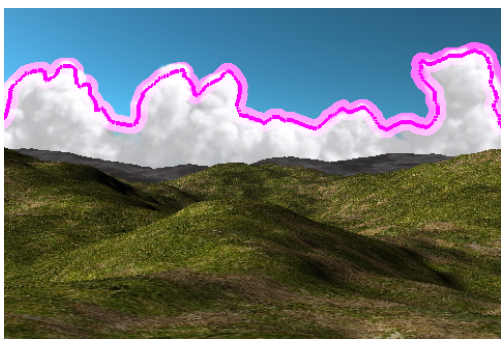
図 3.12 ドクロのような形状の適用例



図 3.13 提案手法の失敗例



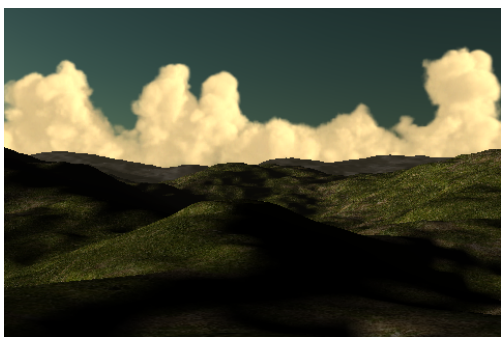
(a)



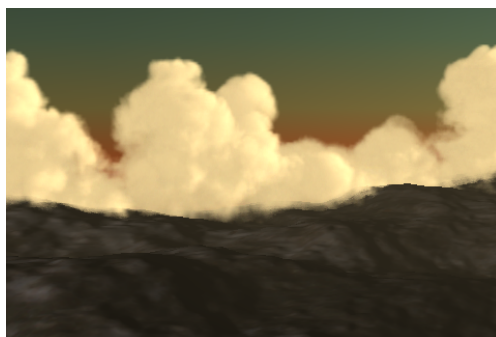
(b)



(c)



(d)



(e)

図 3.14 写真画像を基に生成した適用例

3.6 考察

本節では、3.5 節で示した実験例をもとに提案手法のコントロール方法の妥当性について検証する。

従来の流体解析のコントロール方法では、外力を加えるなど直接的なコントロールであったが、提案手法では、物理パラメータを調節するため、間接的なコントロールとなる。そのため、正確に目的形状に一致させることは難しい。しかし、コントロールには雲の生成過程を考慮しているため、シミュレーションをコントロールした場合でも、外力を直接加える方法と比較して、自然な雲の発達、動きを表現することが可能である。さらに、本研究の目的である、ユーザが所望する自然な形状の雲の生成という観点では、シミュレーションにより生成された雲が完全に目的形状に一致させるということは重要でない。もし、生成される雲を完全に目的形状に一致させるコントロールを行う場合、ユーザはリアルな雲の目的形状を指定する必要がある。提案手法では、ユーザがおおまかな雲の目的形状を指定するだけで、実際の物理シミュレーションで生成される雲のように鉛直方向に発達し、バブル形状をもつ雲を生成することが可能である。また、前節で述べた検定結果より、自然な雲の映像生成において、物理シミュレーションのみによる方法の方が有意性があるとは言えないという結果が得られた。そのため、提案手法により、著しく雲の自然さが失われることはないということが考えられる。しかし、この検定だけでは、帰無仮説として定義した、提案手法と従来手法により生成された雲の映像の自然さ（違和感の無さ）には差がない、とは言えない。すなわち、提案手法が従来手法と同等に自然な雲の映像の生成ができるとは言えない。以上から提案手法では、物理シミュレーションによる雲と同等の自然さの雲が生成できるとは必ずしも言えないが、雲の特徴を著しく損なうことなく、目的の形状の雲が自動生成することが可能であると言える。

本研究では、ユーザの所望する形状の積乱雲が自動生成されるよう積乱雲の生成過程をコントロールする方法を提案した。鉛直方向の雲の動きのコントロールには

フィードバック制御を利用し，水平方向のコントロールにポテンシャルフィールドによる外力を利用することで，自然な積乱雲の形状コントロールの実現が可能となった．しかし，現在の水平方向のコントロールでは，輪郭線の境界付近で外力を作用させている．そのため，視点変化などにより雲の側面を見ると，積乱雲の特徴であるバブル状の形状が失われてしまっている．また，外力は輪郭線の中に留まるように作用するのみであるため，実験例 3.13 で示したように，不完全な height field を target shape として指定した場合，目的形状に達しない部分が存在してしまう．これは，3.1.1 節で述べたように，積乱雲の形成過程に影響する外力である浮力 (式 3.3) は，鉛直方向にのみ作用するため，雲の形成は鉛直方向の動きが主になる．そのため，積乱雲の生成過程をコントロールすることにより，水平方向のコントロールを行うことは難しい．今後の課題として，水平方向のコントロール方法を拡張し，側面のバブル状の形状が失われてしまう点や，不完全な height field の target shape を指定した場合でも，target shape に類似した積乱雲を生成するコントロール手法の提案が考えられる．

第4章

積乱雲のキーフレームコントロール

本章では、3章で提案した積乱雲の形状コントロール方法をさらに拡張し、複数の目的形状をキーフレームで指定することで、積乱雲の形状変化アニメーションを生成する手法について述べる。はじめに、4.1節で3章で提案した積乱雲の形状コントロール方法の課題を明確にした上で、本研究の目的を述べる。次に、4.2節で提案手法の基本的な考え方について述べた後、4.3節以降で提案手法の各処理方法について詳細を説明する。4.4節で提案手法を用いて生成した積乱雲が形状変化する適用例を示し、4.5節で考察を述べる。

4.1 研究目的

第3章では、積乱雲の目的形状を輪郭線として指定し、輪郭線に沿った積乱雲が自動生成される方法を提案した。しかし、この方法では、単一の目的形状しか指定できないため、目的の形状の積乱雲が生成された後、別の形状に変化させることができない。アニメーション作成において、時間変化する屋外景観映像を作成する際、一旦形成された雲がその状態のまま留まっている様子は非常に不自然である。そのため、例えば、日中から夕暮れまでの時間変化を伴うアニメーションを作成する場合、形成された雲が消滅する様子や形状が変化する様子を表現したアニメーションを作成することが必要である。本章では、この問題を解決するため、第3章で提案した積乱雲の形状コントロール方法を拡張し、複数の目的形状をキーフレームとして指定すること

で積乱雲の形状変化が生じるようシミュレーションをコントロールする方法を提案する．提案手法を用いれば，上述の問題が解決できるだけでなく，特定のタイミングで雲が消え去ったり，特定の形状になるなどといった演出効果を表現することが可能となる．これを実現する単純なアプローチとして，目的の変化が生じるよう強制的な外力 [9] を付与する方法を用いることが考えられる．しかし，我々の実験によれば，この方法では積乱雲が水平方向に分裂して移動するなどの動きが生成されてしまう．積乱雲は，一般に，上下方向の変化が主であり，このような動きは極めて不自然である．そこで，提案手法では，一旦，目的の形状の積乱雲が生成された後，最初の形状の積乱雲が消滅しながら，別の形状の積乱雲が新たに生成されると考えることで，上下方向に変化する積乱雲の形状変化アニメーションを実現する．積乱雲の生成に関しては，第 3 章の方法を利用し，積乱雲の消滅に関しては，新たな手法を提案する．以降の節で，提案手法の詳細な手順について説明する．

4.2 積乱雲のキーフレームコントロール概要

積乱雲のシミュレーションには，3.1.1 節で説明した大気流体モデルを利用する．目的形状の指定方法は，3.3 節で述べた方法と同様に，複数の目的形状を *target shape* としてキーフレームで指定する．図 4.1 を用いて提案手法の基本的な考え方を説明する．図 4.1 中の二つの曲線をそれぞれ t 番目の目的形状， $t+1$ 番目の目的形状とし，今， t 番目の目的形状の積乱雲が形成されているとする．提案法は，以下の二つのコントロール部分からなる．

- 成長促進部． $t+1$ 番目の目的形状が形成されるよう積乱雲の成長を促進する．
図 4.1 に示すように， t 番目の目的形状の高さより $t+1$ 番目の目的形状の方が高い領域について成長を促す．具体的には，第 3 章の方法と同様に， $t+1$ 番目の目的形状との高さの差に応じて，潜熱係数を制御する．
- 消滅促進部． t 番目の形状の積乱雲の消滅を促す．図 4.1 に示すように， $t+1$ 番目の目的形状より高い位置に存在する雲の消滅を促す．具体的には， $t+1$

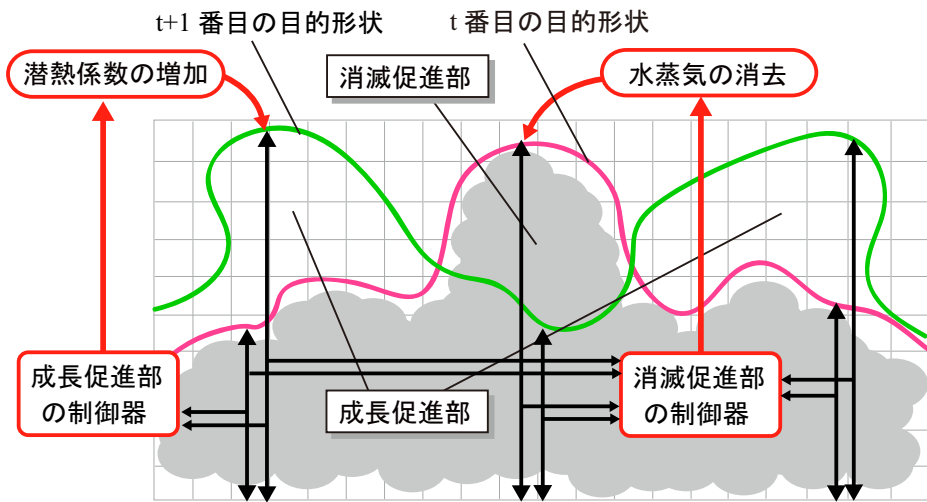


図 4.1 提案手法の概要

番目の目的形状との差に応じて、水蒸気を強制的に除去することで雲の消滅を促す。このとき、成長促進部での雲の成長度合いも監視し、 $t + 1$ 番目の目的形状が形成されるタイミングにあわせて t 番目の雲が消滅するよう水蒸気の除去量を制御する。

これらの二つの制御を組み合わせることによって、積乱雲の形状変化を実現する。

4.3 積乱雲のキーフレームでのコントロール方法

前節で述べたように、提案法は成長促進部と消滅促進部からなる。以下、それぞれについて説明する。

4.3.1 成長促進部

成長促進部は、第 3 章の手法を利用する。具体的には、積乱雲の鉛直方向への発達を促進を潜熱量と水蒸気量を制御することにより実現する。さらに、より正確に目的形状の積乱雲を形成するため、目的形状をもとにポテンシャルフィールドを生成し、目的形状の内部に雲が納まるような外力を加える。この外力は目的形状の輪郭線付近でのみ発生する。ポテンシャルフィールドおよび水蒸気量の制御については、3.4.1

節, 3.4.3 節と同様であるため, 本章では詳しい説明は省略する. 以下では, 潜熱量の制御方法についてのみ説明する.

まず, 第 3 章と同様に, 目的形状の高さとシミュレーションにより生成される積乱雲の高さとの比率を到達度 R として定義する. R はシミュレーション空間最下層の格子点 $(i, j, 0)$ ごとに算出する. R は次式により与えられる.

$$R(i, j) = H_c(i, j) / H_{target}(i, j), \quad (4.1)$$

ここで, $H_c(i, j)$ はシミュレーションにより生成される各タイムステップでの雲の高さ, $H_{target}(i, j)$ は目的形状の高さを表す. $H_c(i, j)$, $H_{target}(i, j)$ はシミュレーション空間の最下層からの高さとする. 到達度 R が 1 となるように潜熱係数 Q を調整し, シミュレーション空間の最下層の格子点 $(i, j, 0)$ ごとに潜熱係数 $Q_c(i, j)$ を定義し, それぞれ, 独立に制御する. 第 3 章では制御方法として PI 制御を用いているが, 本研究では PD 制御を用いる [15][32][1]. PI 制御には制御量と目標値との差分値を時間的に累積した積分値を制御に利用する I 制御が含まれる. しかし, この方法では, 目的形状が変化する場合, 変更前の制御に利用した積分値が変更後の制御に影響を及ぼしてしまう. そこで, 提案手法では, 制御値にあらかじめバイアス値を付加することで I 制御を利用することなく残留偏差がなくなるよう制御を行う. また, 目的形状が変化する場合, 制御量が急激に変化し, 不自然な映像となってしまう. これを抑制するために D 制御を導入する. PD 制御は, 入力値を出力値と目標の偏差の 1 次関数として制御する比例制御 (P 制御) と, 入力値の時間変化に応じて制御を行う微分制御 (D 制御) を組み合わせた制御方法である. P 制御により, シミュレーションにより生成された雲と目的形状との差に比例するよう潜熱量を制御する. また, D 制御により, 雲の急激な発達・下降を抑制し, 不自然な動きとなることを防ぐ. 潜熱係数 $Q_c(i, j)$ の値は, PD 制御を用いて以下の式により各タイムステップごとに決定

する .

$$Q_c(i, j) = K_P(i, j)\Delta_H(i, j) + K_D(i, j)\frac{d\Delta_H(i, j)}{dt} + Q_{c,0}(i, j) \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta_H(i, j) &= 1.0 - R(i, j) \\ &= \frac{H_{target}(i, j) - H_c(i, j)}{H_{target}(i, j)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここで、 $\Delta_H(i, j)$ は目的形状の高さとシミュレーションにより生成される雲の高さとの差分を規格化したものである。 $K_P(i, j)$ 、 $K_D(i, j)$ はそれぞれ P 制御および D 制御を調節する値であり、比例ゲインおよび微分ゲインと呼ばれる。また、 $Q_{c,0}$ は目標値に達したときにその状態を維持するための潜熱係数のバイアス値である。 $K_P(i, j)$ 、 $K_D(i, j)$ 、 $Q_{c,0}(i, j)$ は以下に示すように算出する。

$$\begin{aligned} K_P(i, j) &= \kappa_P H_{target}(i, j) \\ K_D(i, j) &= \kappa_D H_{target}(i, j) \\ Q_{c,0}(i, j) &= \kappa_{Q0} H_{target}(i, j) \end{aligned} \quad (4.4)$$

κ_P 、 κ_D 、 κ_{Q0} は、限界感度法 [42] により実験的に決定する。なお、 $Q_c(i, j)$ は鉛直方向 (z 軸成分) にすべて同一の値を用いる。また、PD 制御により算出した Q_c が 0 以下となる場合、雲が減少するときに潜熱が発生してしまうため、 $Q_c = 0$ とすることで不自然な映像となることを防ぐ。

4.3.2 消滅促進部

消滅促進部は水蒸気密度、重力、温度場を制御することにより実現する。これらの制御を行うことで、雲の消滅および鉛直下方向への下降を促す。以下、それぞれの具体的な制御方法と作用について説明する。

まず、水蒸気密度の制御については、目的形状の外部に存在する領域について、水蒸気量を強制的に徐々に減少させる。これにより、対象領域の空気が乾燥し、雲 (水滴) から水蒸気への相転移が生じ、雲が消滅する。このとき、水蒸気を全体で一様に減少させるのではなく、雲の一番高い位置から消去する。これらにより、雲が徐々に低くなりながら自然に消滅する映像を表現できる。水蒸気量の減少は以下の式で表現

する．

$$q_v(i, j, k_{top}) = D_{rate} \times q_v(i, j, k_{top}) \quad (4.5)$$

ここで、 (i, j, k_{top}) は、シミュレーションにより生成される雲の一番高い位置に相当する格子点であり、 D_{rate} は水蒸気量の減衰率である．前述したように、 $t + 1$ 番目の雲が形成されるとタイミングに合わせて t 番目の雲が消滅するよう D_{rate} を以下に示すように制御する．まず、 $t + 1$ 番目の目的形状と、雲の高さとの差分をとり、目標値まで達していない領域での差分の平均値を R_{up} および目標値を超えた領域での差分の平均値を R_{down} を、それぞれ、以下の式により算出する．

$$R_{up} = \frac{1}{N_u} \sum_{l=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} (H_{target}(l, m) - H_c(l, m)) \quad (4.6)$$

$$R_{down} = \frac{1}{N_d} \sum_{l=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} (H_c(l, m) - H_{target}(l, m)) \quad (4.7)$$

ここで、 N_u 、 N_d は、それぞれ、シミュレーション空間の最下層の格子点について、目標値まで達していない領域内に存在する格子点および目標値を超えた領域内に存在する格子点の総数である．これらの値を利用し、以下のように D_{rate} を決定する．

$$D_{rate} = 1.0 + C_r \times (R_{up} - R_{down}) \quad (4.8)$$

ここで、 C_r は制御の影響度を調節するための係数であり、水蒸気消去係数と呼ぶ．この制御を行うことで、雲の発達と雲の消滅を同じ割合で促進させることが可能である．水蒸気の制御のみを適用して生成した雲の形状変化の出力結果について図 4.2(b) に示す．図 4.2(a) は図中の曲線を t 番目の目的形状とし、提案手法を用いてシミュレーションした結果である．図 4.2(b) は、 t 番目の目的形状の雲を形成後、 $t + 1$ 番目の目的形状として図中の曲線を指定し、シミュレーションを行った結果である．出力結果からわかるように、水蒸気の消去のみでは $t + 1$ 番目の目的形状を超えた位置に雲が残存してしまっている．この問題点を改善するために、重力の制御を行う．重力の制御も考慮し、雲を鉛直方向に下降させながら水蒸気を消去することで、雲が上空に残るような映像となることを抑制することが可能である．具体的には、式 (3) の

右辺第二項を次式で表される G_c で置き換えることで、重力の制御を行う。

$$G_c = g_c q_c \mathbf{z} \quad (4.9)$$

$$g_c(i, j, k) = (k - H_{target}(i, j)) \times g_{ex} + g \quad (4.10)$$

ここで、式 (4.10) で表される g_c は、目標値に遠い位置ほどより多くの重力が作用するように制御する。 g_{ex} は重力の制御を調整するための係数であり、過剰重力制御係数と呼ぶ。また、 k は z 軸方向の格子点番号である。図 4.1(c) は水蒸気の制御に加え、重力の制御を適用して生成した雲の形状変化の出力結果である。図 4.2(a) に示す t 番目の目的形状の雲を形成後、 $t + 1$ 番目の目的形状の雲を生成するようシミュレーションを行った。水蒸気だけの制御である図 4.2(b) と比較すると改善が見られるものの、図 4.2(c) の真ん中付近に雲が目的形状まで下降していない部分が存在する。これは、重力の制御の効果により一度目的形状まで雲が下降するが、その後、不要な浮力が働き、雲が再度目的形状を超えて上昇したために起こる。この浮力は重力の制御による雲の落下に伴い、温度も同様に落下し、制御位置の底面付近に高い温度が集約するために発生する。そこで、重力の制御範囲における温度場を徐々に環境温度まで減少するように制御することで、底面付近に高い温度場が発生することを抑制する。温度場の制御に利用する式は以下のように与える。

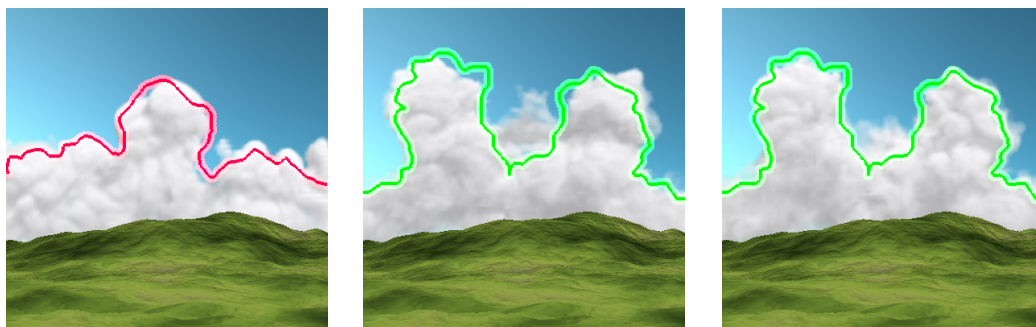
$$\frac{\partial T}{\partial t} = E_r(T_{amb} - T) \quad (4.11)$$

ここで、 E_r は温度場を環境温度に近づける割合を調節するための係数であり、温度減衰率とする。温度場の支配方程式 (3.10) に加えて、式 (4.11) を考慮したシミュレーションを行うことで、タイムステップごとに徐々に温度場が環境温度に近づくよう制御する。この制御により、重力の作用による高温の温度場が発生することを抑制し、不自然な浮力の発生が改善される。図 4.1(d) に温度の制御も考慮してシミュレーションを行った結果を示す。温度の制御により、浮力の問題が解消され、一度目的形状まで下降した雲は上昇することなく目的形状付近に留まる。

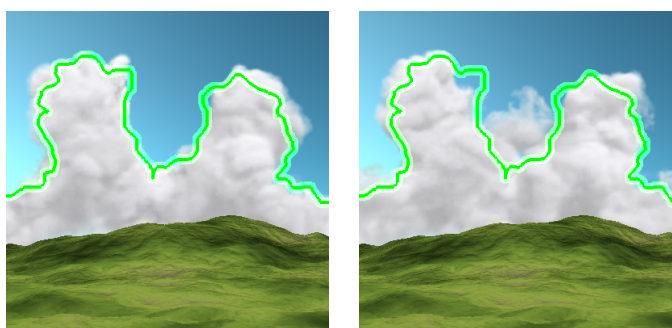
4.4 実験結果

本節では提案手法の適用例を示し、その有効性について検討する。実装環境は CPU として Intel Core2 Duo E6750、グラフィックスハードウェアとして NVIDIA Geforce7600GS 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文献 [3] の手法を利用してレンダリングを行った。まず、提案手法の有効性を示すため第 3 章で提案した手法を用いて生成した例を図 4.2(e) に示す。図 4.2(a) は前述したように、 t 番目の目的形状が形成されるよう提案手法を用いて生成した結果、(d)、(e) はそれぞれ $t+1$ 番目の目的形状を生成するために本章で提案した手法を適用した結果、第 3 章の手法を適用した結果である。図 4.2(e) の出力結果についても、図 4.2(a) 中の曲線を t 番目のターゲット、図 4.2(b) 中の曲線を $i+1$ 番目のターゲットとしてシミュレーションを行った。シミュレーションで用いた格子数は $120 \times 80 \times 100$ である。提案手法を用いて生成した画像では、 t 番目のターゲットから $t+1$ 番目のターゲットへ雲を鉛直方向に発達させる領域、下降させる領域ともに目的形状に到達している。制御に用いたパラメータには表 4.1 に示した値を用いた。一方、第 3 章で提案した方法を用いて生成した結果では、発達させる領域は目的形状付近まで到達しているが、下降させる領域については目的形状よりも上空に残存した結果となってしまう。以上から、本章で提案した手法を用いることにより、第 3 章で提案した方法では不可能であったキーフレームでの雲の形状変化コントロールが可能となったことがわかる。

次に、提案手法を用いてキーフレームとして三つの目的形状を指定して生成した雲の形状変化のアニメーション過程について図 4.3 に示す。図 4.3(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) はそれぞれ、140、160、180、200、230、260step 目の結果を表示したものである。図 4.3(a)、(c)、(e) 中の曲線がそれぞれ一番目、二番目、三番目の目的形状である。シミュレーションで用いた格子数は $200 \times 80 \times 100$ であり、1 ステップあたりのシミュレーション時間は 6.95 秒であり、そのうち、消滅促進部の処理に要する時間



(a) 提案法での t 番目の形状 (b) 水蒸気の制御 (c) 水蒸気 + 重力の制御



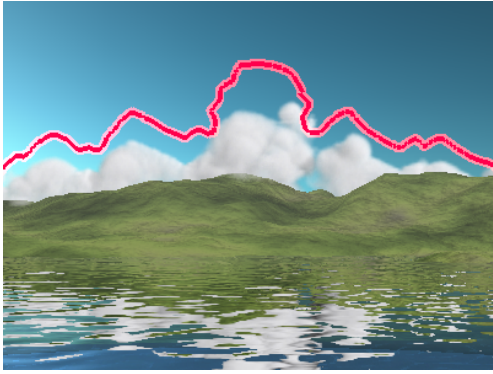
(d) 水蒸気 + 重力 + 温度の制御 (e) 第 3 章の方法

図 4.2 異なる制御方法での比較例

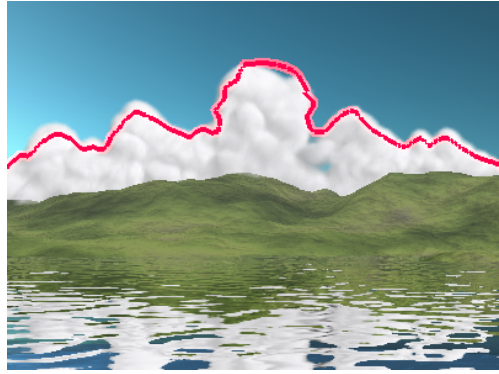
	パラメータ名	数値
C_r	水蒸気消去係数	2.0
g_{ex}	過剰重力制御係数	6.5
E_r	温度減衰率	0.97

表 4.1 実験に用いた制御パラメータ数値

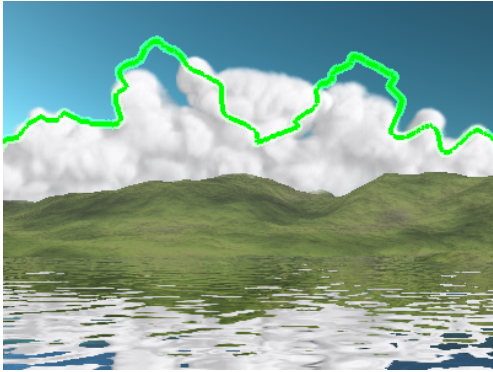
は 0.03 秒であった．消滅促進部による処理速度の低下はほとんどないことがわかる．
 図 4.4(a), (b), (c) はそれぞれ図 4.3(b), (d), (f) の曲線を表示しない場合の適用例
 である．また，図 4.4(d), (e), (f) は図 4.4(a), (b), (c) と同じ雲であるが，レンダ
 リング時に太陽の高度を低くした場合の出力結果である．太陽の位置を変更させるこ
 とにより，雲の色を変更させることが可能である．また，3次元シミュレーションを
 行っているため，視点を変更させた場合の出力結果も得ることができる．



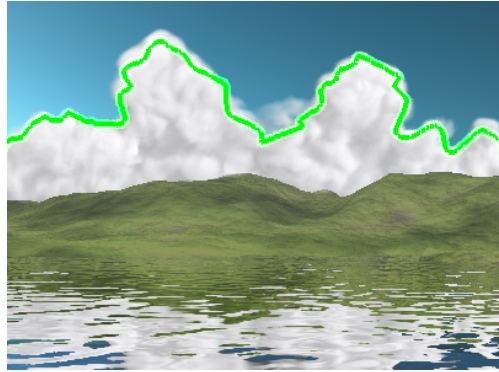
(a) 140 step



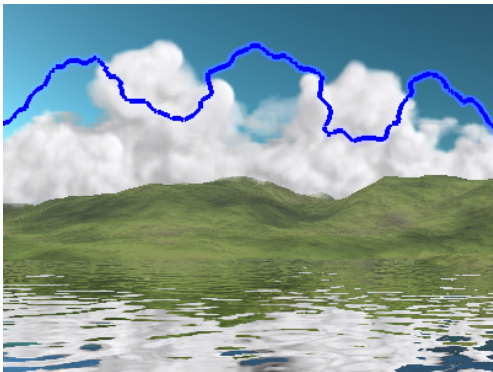
(b) 160 step



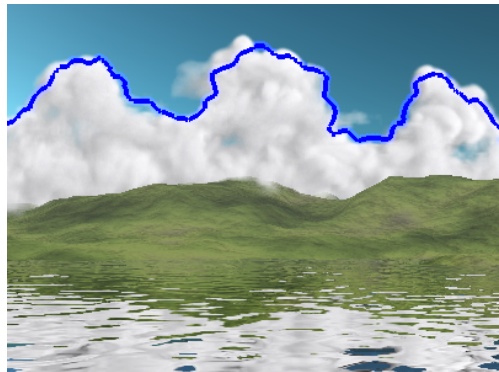
(c) 180 step



(d) 200 step

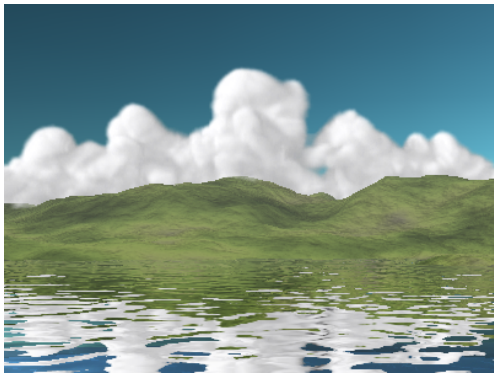


(e) 230 step

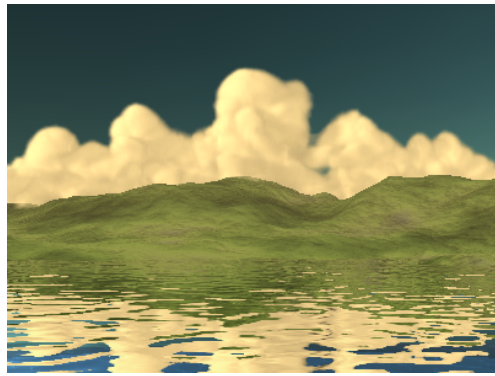


(f) 260 step

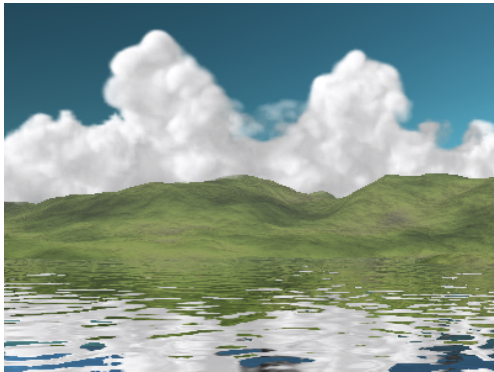
图 4.3 適用例



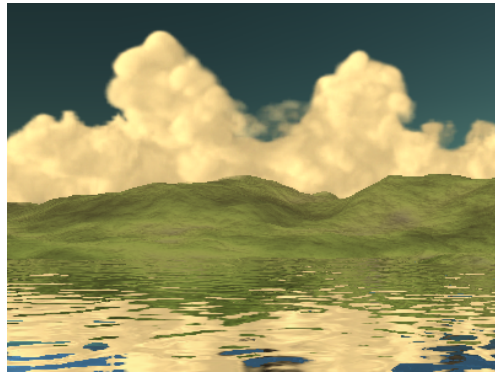
(a)



(b)



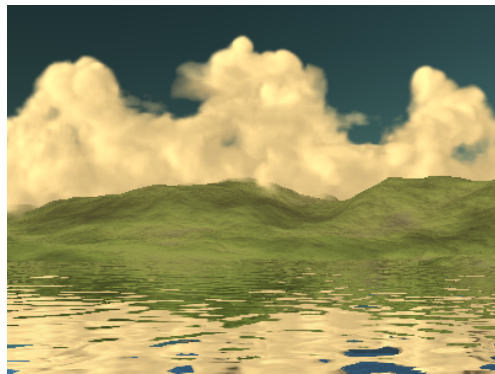
(c)



(d)



(e)



(f)

図 4.4 適用例 (曲線の描画無し)

4.5 考察

本節では、4.4 節で示した実験例をもとに提案手法のコントロール方法の有効性について検証する。

第 3 章で提案した積乱雲のコントロール方法では、指定できる目的形状は単一である。そのため、目的の形状の積乱雲が生成された後、別の形状に変化させることができないという課題があった。本章で提案した手法はこの点を改善し、キーフレームで目的の形状を変化させることで、次々と積乱雲が形状変化するアニメーションの生成が可能である。第 3 章の研究と同様に、提案手法では、雲の生成過程を考慮したコントロールを行っているため、雲の不自然な発達や動きを軽減することができる。

本章では、第 3 章で提案した積乱雲の形状コントロール方法を拡張し、ユーザが所望する形状に次々と形状変化する積乱雲のコントロール方法を提案した。提案手法では、目的形状をキーフレームで指定する。鉛直方向の積乱雲の動きのコントロールでは、成長促進部により積乱雲の鉛直方向の成長を促し、消滅促進部により積乱雲の消滅および鉛直下方向への下降を促す。水平方向のコントロールにポテンシャルフィールドによる外力を利用した。提案手法により、輪郭線を指定するだけで、様々な形状の積乱雲を生成することが可能であり、シミュレーション中に輪郭線を変更することにより、雲の形状変化アニメーションの生成も可能である。しかし、3.6 節でも述べたように、本手法でも水平方向のコントロールに関しては、目的形状の内側に留まるような外力を付加するだけであり、実験例 3.13 で示したような形状の雲を生成することが難しい。この点は、今後の課題として解決のための新たな水平方向のコントロール方法を開発する必要がある。

第5章

積雲のコントロール

本章では、ユーザがキーフレームで指定した目的分布の積雲が生成されるようシミュレーションをコントロールする手法について述べる。本章の構成は次の通りである。はじめに、5.1 節で積雲のシミュレーション方法について説明する。次に、5.2 節で提案手法の基本的な考え方と処理の流れについて説明し、5.3 節以降で、提案手法の詳細について述べる。その後、5.5 節で提案手法を用いて生成した積雲の形状コントロール結果について示し、5.6 節で考察を述べる。

5.1 積雲の大気流体モデル

本節では、積雲の数値シミュレーション方法について説明する。基本的には、3.1 節で説明した大気流体モデルと同様のモデルを利用して、シミュレーションを行う。積雲も積乱雲と同様に、図 3.1 に示すように、地面付近に発生した上昇気流により、水蒸気が上空へ押し上げられ、相転移が起こることで発生する。積乱雲と積雲の違いは、主に上昇気流の強さにある。積雲の場合、上昇気流は比較的強くはないため、ある程度の高度で雲の鉛直方向の発達ที่止まる。また、発生した雲が風などの影響で水平方向に移動しながら形状を変化させていくことが特徴的であり、風の効果を考慮することは積雲の映像表現では重要な要素となる。雲のシミュレーションは、1 節で述べたグリッドベースの方法に基づいて行い、各格子に割り当てた状態変数をタイムステップに分けて計算することで更新していく。

5.2 積雲のコントロール概要

提案手法では、5.1 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する。コントロール方法の基本的な考え方について以下に示す。図 5.1 は、提案手法における雲の生成のコントロールの基本的な構造を示したものである。図 5.1(a) のように、ユーザは所望する雲の目的分布を、0 か 1 の値のいずれかを持つスカラー場として定義する。本論文では、以降、ユーザが指定した目的分布を *target field* と呼ぶ。積雲のコントロールでは、*target field* に応じて、シミュレーション空間中に熱源を設置する。図 5.1(b) の緑色の部分は、*target field* に応じて設置した熱源を示す。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する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、上昇気流が発生し続け、雲が過剰に発生してしまうとともに、指定した *target field* を外れて水平方向に広がりながら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* をもとに決定した雲の目標密度と発生した雲の密度を比較し、供給する熱源からの熱量を制御し、

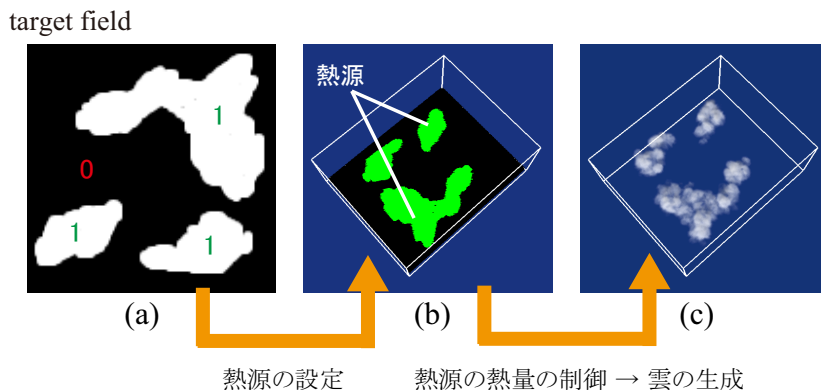


図 5.1 積雲生成のコントロールの基本構造

上昇気流の強さを調整することで雲の過剰な発生と水平方向への発達を抑制する (図 5.1(c)).

提案手法の流れを以下に示す．まず，初期設定としてシミュレーションで利用する target field を生成する．提案手法では，目的形状をキーフレームで指定することで，積雲の形状変化アニメーションの生成を行う．ただし， n 番目の目的形状と $n+1$ 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することで徐々に変化させる．補間を行わずに， n 番目の目的形状から $n+1$ 番目の目的形状に変更してシミュレーションを行った場合， $n+1$ 番目の形状の雲がいきなり発生してしまい不自然な映像となってしまう．そのため，積雲の滑らかな形状変化を実現するため，補間した target field を徐々に変化させる．次に，毎ステップ処理として，target field に応じて積雲のシミュレーションをコントロールする．ここでは，target field に応じて熱源を設定し，生成された雲の分布と target field の差に応じてステップごとに熱源からの熱量が再設定される．また，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．しかし風の影響を考慮した場合，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，擬似的な風の実現する．また，提案手法では，速度場と温度場を毎タイムステップ一定量だけ減衰させる．これにより安定に target field に類似した形状の雲の生成を促すことができる．以下，target field の生成方法と積雲のコントロール方法についてそれぞれ詳しく説明する．

5.3 target field

本節では，目的分布である target field の生成方法について説明する．target field λ は，指定した目的分布に応じて雲を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 (図 5.1(a))．提案手法では，この target field λ 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 (図 5.1(b))．そして，

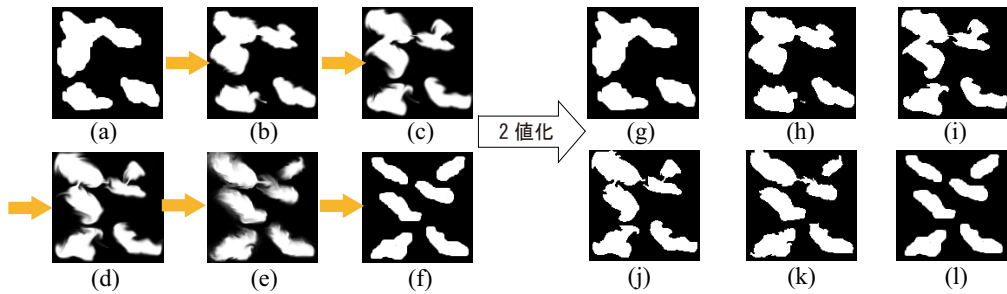


図 5.2 target field の生成

target field λ 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．前述の通り，提案手法では，ユーザが指定した複数の目的分布を補間したものの target field として指定することで，滑らかな雲の形状変化を実現する．target field の補間方法について具体的に説明する．補間には Fattal らの方法 [9] を利用する．この方法では，煙の流体シミュレーションに対して新しく driving force term , gathering term という 2 つの項を定義することで，キーフレームで指定した目的分布が滑らかに変化する形状変化アニメーションを作成することができる．提案手法では，Fatal らの方法を利用することで n 番目のキーフレームでの target field から $n+1$ 番目の target field へと徐々に変化するスカラー場を生成する．図 5.2(a) ~ (f) は，Fattal らの方法を利用して生成したスカラー場の一例である．図 5.2(a) を n 番目の目的形状，図 5.2(f) を $n+1$ 番目の目的形状とした場合，図 5.2(b) ~ (e) は補間された中間のスカラー場である．このとき， $0 \sim 1$ の間の連続値が発生するため，任意のしきい値を用いて二値化したスカラー場を target field λ として用いる (図 5.2(g) ~ (l)) ．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．

5.4 積雲のコントロール方法

本節では，積雲のシミュレーションをコントロールする方法について詳しく説明する．提案手法では，target field で指定した分布の積雲が生成されるよう制御を行う．

5.4.1 熱源のコントロール

前述したように，指定した分布の位置に雲が発生するよう target field λ の値が 1 の部分に熱源を設置する．また，図 5.3 に示す通り，熱源から供給される熱量の大きさについても制御する．これは，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．熱量の大きさの制御手順は以下の通りである．まず，発生した雲の量を計測してフィードバックする．次に，フィードバックした雲の量と target field λ を比較することで，その差分を算出する．そして，その差分に応じて，熱源から加える熱量の大きさを再設定することで，熱源の強さを調整する．具体的な制御方法について以下に説明する．

シミュレーションにより発生した雲の密度分布を取得し，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，

$$A_c(i, j) = \frac{1}{N_z} \sum_{k=0}^{N_z} q_c(i, j, k) \quad (5.1)$$

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 (3.10) 中の S_T の代わりに境界条件として熱量を付加

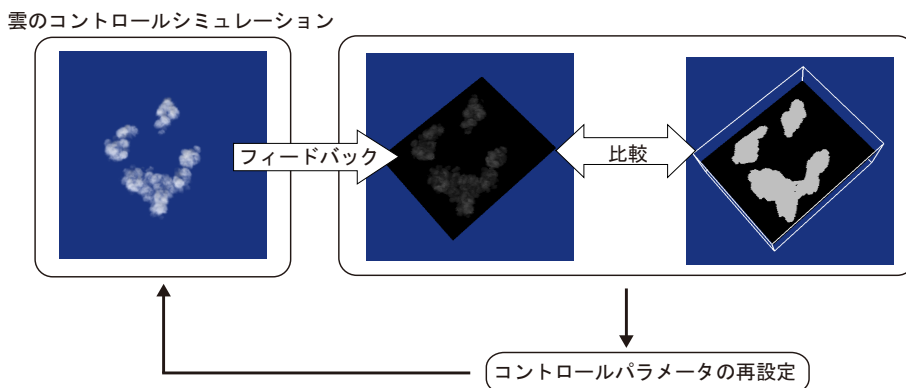
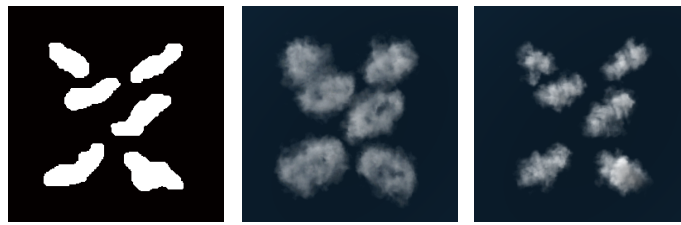


図 5.3 熱量の制御



(a) (b) 制御なし (c) 制御あり

図 5.4 熱源の制御の有無の比較例

する .

$$S_{CT}(i, j) = K_c(q_{ct}(i, j) - A_c(i, j)) \quad (5.2)$$

$$q_{ct}(i, j) = q_g \lambda(i, j) \quad (5.3)$$

ここで, q_{ct} は雲の発生量の目標値であり, target field λ に比例した値として与える . q_g はその係数であり, ユーザにより指定する . また, K_c は供給する熱量を調節するための比例ゲインと呼ばれる . 式 (5.2) 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発生する熱量は小さくなる . 以上を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 .

図 5.4 は, 熱源から供給される熱量の制御の有無によるシミュレーション結果を比較したものである . target field には, 図 5.5(a) を指定した . 図 5.4(b) は図 5.4(a) の通りに熱源を設置し, 供給される熱量の制御を行わなかった結果である . また, 図 5.4(c) は供給される熱量を発生する雲の量に応じてコントロールした場合の結果である . 図 5.4(b) より, 熱量の制御を行わなかった場合, 目的分布を超えて雲が発達してしまっている様子が見られる . これは, 常に熱源からの熱の供給されることにより上昇気流が発生し続け, 過剰に雲が発生してしまうためである . 比較結果から熱量の制御を行うことで, 雲の過剰な発生を抑えることができ, より target field に近いシミュレーション結果が得られることがわかる .

5.4.2 移流項のコントロール

前述の通り，外力項として風の影響を考慮した場合，目的形状通りの雲を生成することが難しい．図 5.5(b) に，風を外力項として考慮してシミュレーションを行った場合の結果を示す．target field には，図 5.5(a) を指定した．図 5.5(b) はそれぞれ 100step 目，150step 目のシミュレーション結果である．図 5.5(b) からともに目的形状とは異なる雲が生成されてしまう様子がわかる．これは熱源の位置は固定されており，熱源からの熱量供給により雲が発生するが，発生した雲は風の効果により水平方向に移動してしまうためである．また，風を考慮した場合，水平方向の速度場はシミュレーション空間で一様でないため，目的形状を保ったまま平行移動するような雲が生成され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．しかし，積雲が形状変化しながら発達するアニメーションを表現する場合，水平方向への積雲の移動は必要不可欠である．そのため，提案手法では図 5.6 に示す通り，シミュレーションで利用する状態量を水平方向へ一定の速度 u_a で移流させることで，擬似的な風の効果表現し，この課題への解決を図る．具体的には，それぞれの状態量の支配方程

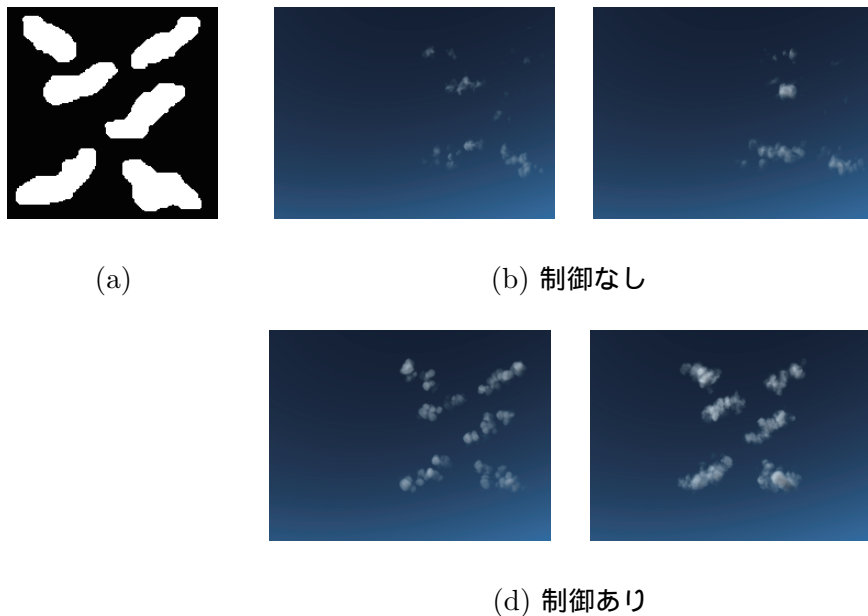


図 5.5 移流項のコントロールの効果

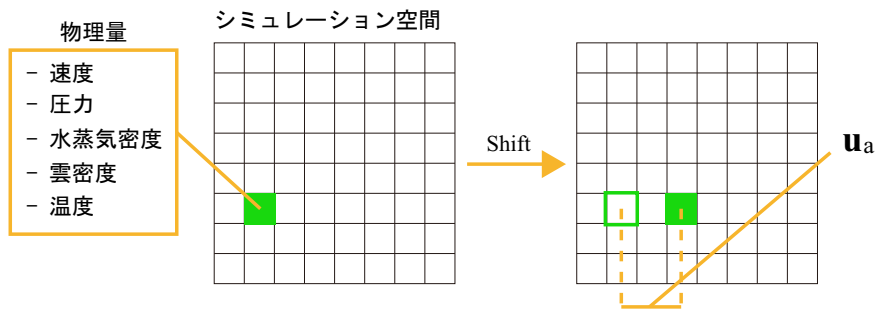


図 5.6 擬似的な風の作用

式の移流項に対し，速度 \mathbf{u} に任意の速度 \mathbf{u}_a 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．

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -((\mathbf{u} + \mathbf{u}_a) \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (5.4)$$

ここで， \mathbf{u}_a は水平方向成分のみの値を持ち，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，熱源の位置についても同様に移流させる．図 5.5(c) は図 5.5(a) を target field として利用し，移流項のコントロールを適用した場合の結果を示す．図 5.5(c) はそれぞれ 100step 目，150step 目のシミュレーション結果である．移流項のコントロールにより，まず目的形状に類似した雲が生成され，その形状を維持したまま水平方向に移動する様子がわかる．以上の通り，移流項のコントロールにより擬似的な風の効果を実現することで，目的形状を維持したまま水平方向に移動する積雲のアニメーションを生成することができる．

5.4.3 速度場と温度の減衰

提案手法により，熱源から熱の供給を続けた場合，target field の通りの雲が形成されにくい場合がある．これは，熱源からの熱の供給が続くことにより，シミュレーション空間内の熱量が過剰に増加したことや，大きな上昇気流の発生の影響により，大気の状態が乱雑となるためである．そのため，提案手法では速度場と温度場を毎タイムステップ一定量減衰させることで上述の問題の改善を図る．具体的には，速度場については，1.0 以下の係数を乗算することで減衰を行い，温度場については，環境

温度との差分を算出し、その差分の一定の割合を減衰することで環境温度に近づくよう減衰させる。速度場と温度場を徐々に減衰させることで、大気の状態が乱雑となることを抑制でき、より安定して目的形状に類似した積雲の生成が可能となる。

5.5 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 i7, グラフィックスハードウェア:NVIDIA Quadro 200M を搭載した PC である。雲の数値シミュレーションは GPU による並列計算を行うことで高速化を図った。雲の表示にはシミュレーションにより得られた雲密度分布よりボリュームレンダリングを利用して行った。

まず、実験例 1 では、図 5.7(a), (e) をキーフレームでの目的形状とし、5.3 節で示した方法を用いて、図 5.7(b)~(d) の補間画像を生成し、それぞれを target field として指定してシミュレーションを行った。シミュレーションで用いた格子数は $320 \times 224 \times 64$ であり、1 ステップあたりのシミュレーション時間はおよそ 0.48 秒である。図 5.8(a), (b), (c), (d), (e) はそれぞれ図 5.7(a), (b), (c), (d), (e) の target field に対応する雲が生成されたステップでの結果である。次に、実験例 2 では、図 5.9(a), (e) に示すように、現実の世界では観察されないようなドクロやウサギなどの複雑な形状をキーフレームでの目的形状とし、図 5.9(b)~(d) の補間画像を生成し、それぞれを target field として指定してシミュレーションを行った。シミュレーションで用いた $320 \times 224 \times 64$ であり、1 ステップあたりのシミュレーション時間は 0.48 秒である。図 5.10(a), (b), (c), (d), (e) はそれぞれ図 5.9(a), (b), (c), (d), (e) の target field に対応する雲が生成されたステップでの結果である。以上の実験結果から、提案手法により、雲が水平方向に移動しながら形状変形し、キーフレームにおいては指定した形状に類似した雲が形成されていることがわかる。また、実験例 2 で利用した同一の条件を用い、本稿で提案したコントロールを適用せずに通常の積雲のシミュレーションを行った場合、1 ステップあたりのシミュレーション時間は 0.46

秒であった．コントロールの有無によるシミュレーション時間の差は1ステップあたり0.02秒であり，コントロールの適用によるシミュレーション時間の影響はわずかであることがわかる．

次に，実写映像から目的形状を生成し，その目的形状をもとに生成した実験結果と実写映像との比較を行った．まず，実写映像から2つのタイムステップの画像を抽出し，キーフレームの目的形状の生成を行う．図5.11(a), (b)は実写映像から抽出した2つの画像である．実写映像では，図(a)の赤枠中の雲が，図(b)の赤枠中の雲に形状変化するため，本実験では，実写画像の赤枠部分の雲を目的形状として利用する．図5.11(c), (f)はそれぞれ図5.11(a), (b)の赤枠部分から雲の領域を抽出することで生成したキーフレームでの目的形状を示す．図5.11(d), (e)は図5.11(c), (f)から補間したtarget fieldである．図5.12に実写画像から生成したtarget fieldを利用して生成した結果と実写画像との比較結果を示す．図5.12(a), (d)は上述したtarget fieldを生成するために実写映像から抽出した2つのタイムタイムステップの画像であり，図5.12(b), (c)はそれら2つのタイムステップの中間画像である．図5.12(e)~(h)は，図5.11(c)~(f)をtarget fieldとして利用して生成した結果である．実写画像と比較すると，中間画像において類似する形状を示すところもある一方で，類似しない形状部分も存在する．これは補間により生成したtarget fieldの中間画像が雲の物理現象を考慮せずに生成されているためだと考えられる．

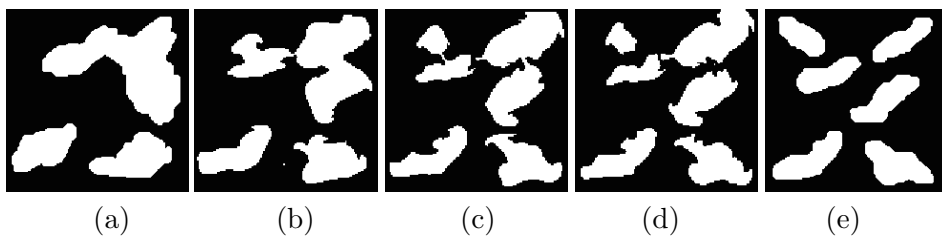


図 5.7 単純な target field

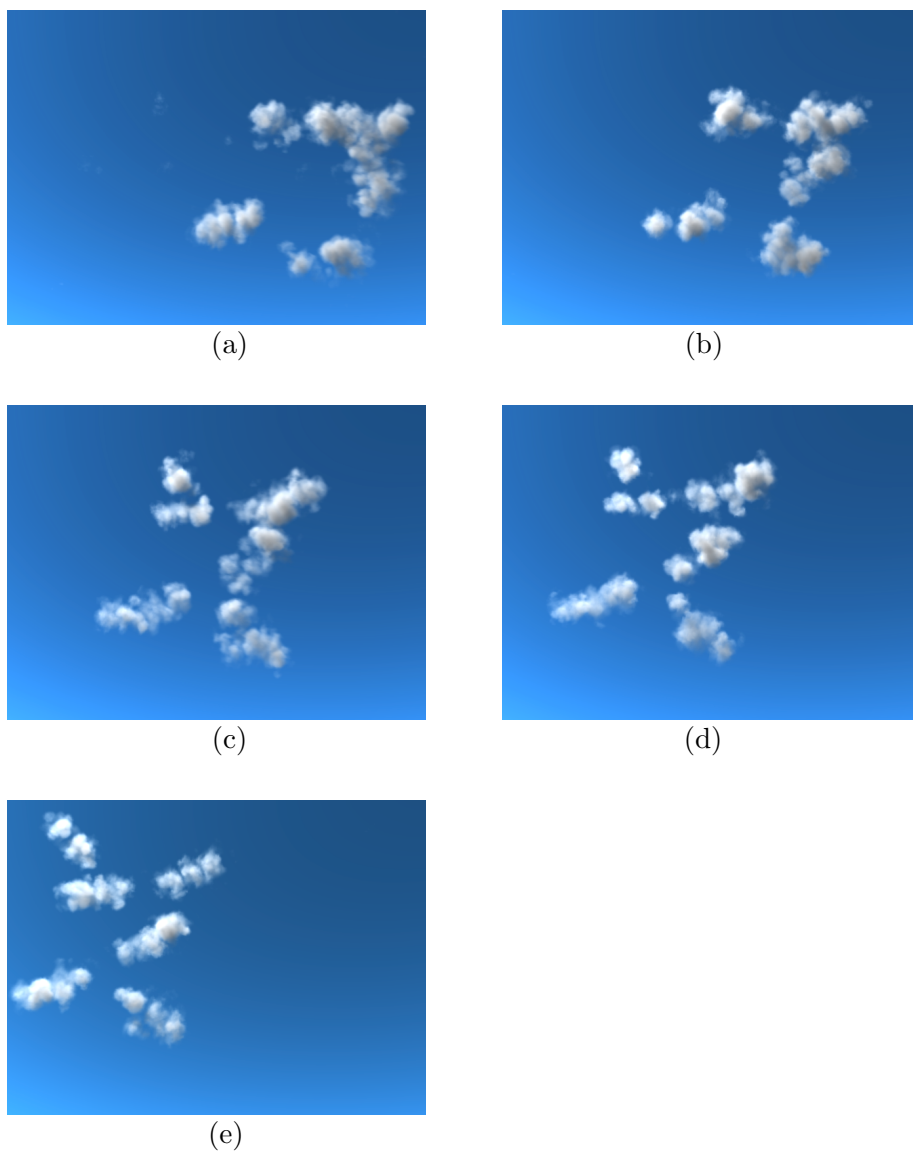


図 5.8 実験例 1: 単純な形状を指定した例

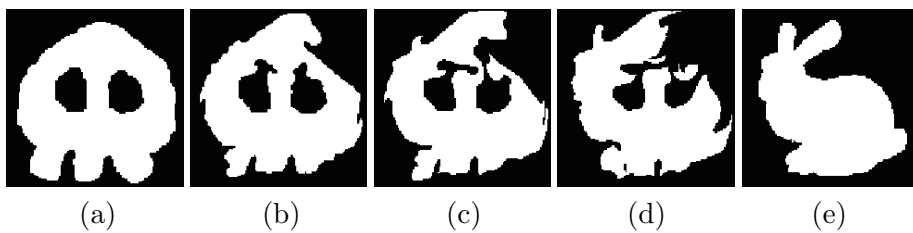


図 5.9 特殊な target field

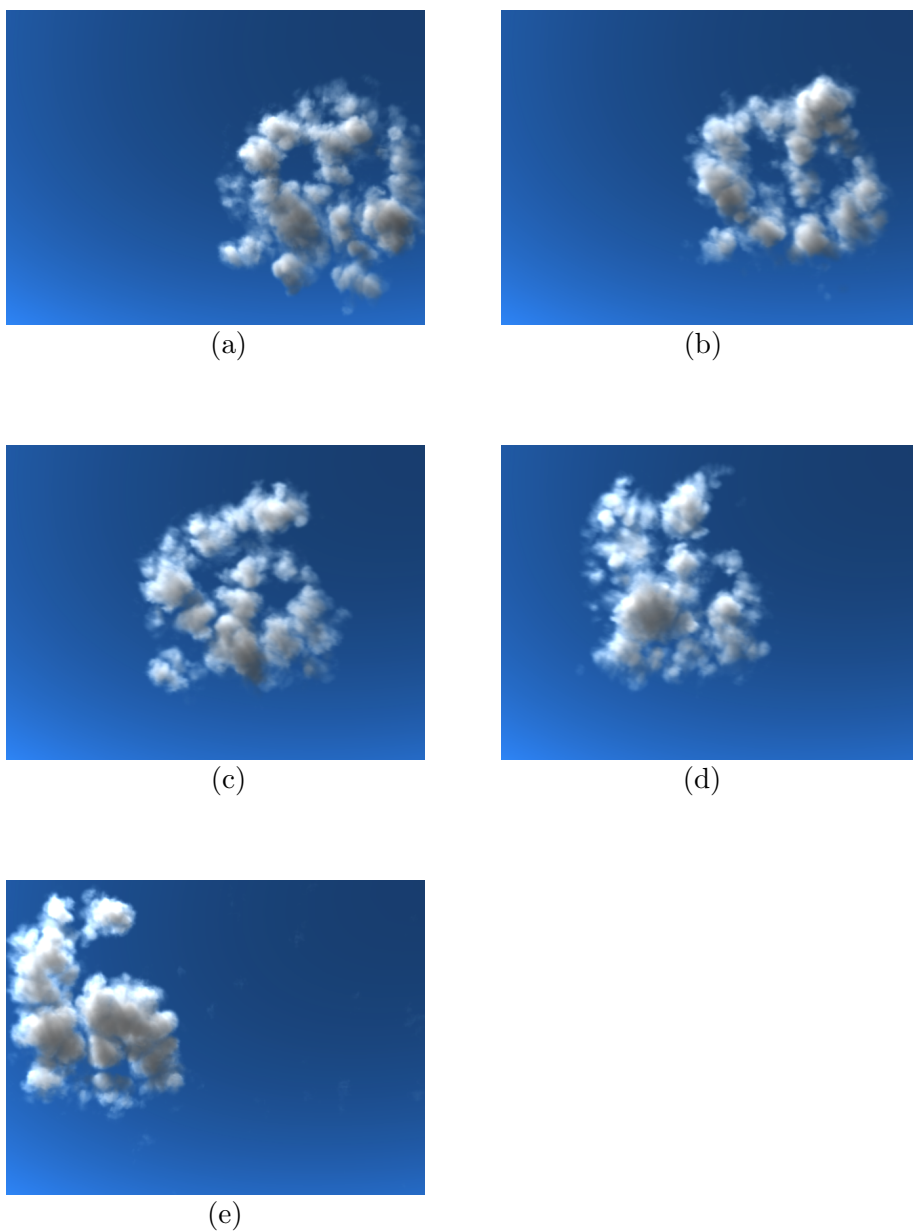


図 5.10 実験例 2: 特殊な形状の指定した例

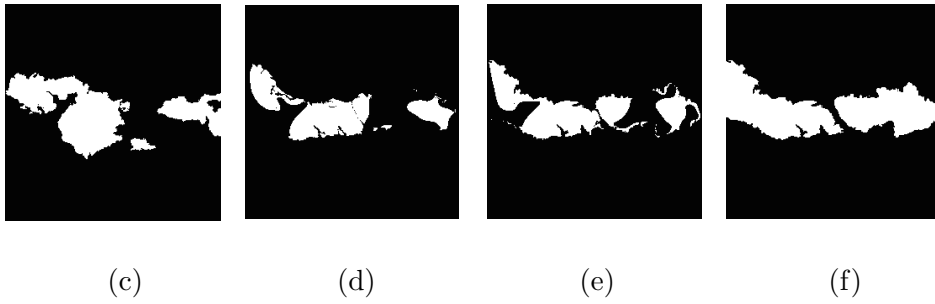


図 5.11 実写画像から抽出した target field

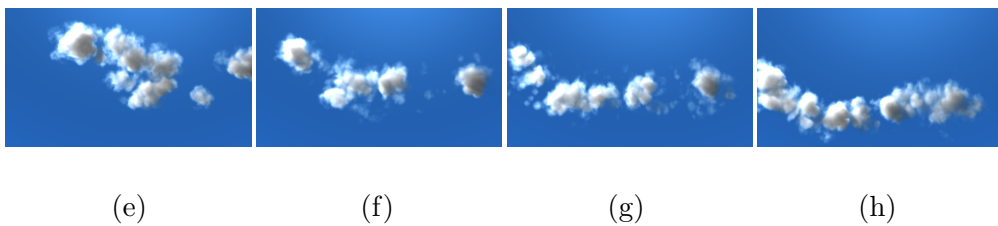


図 5.12 実験例 3: 実写画像との比較

5.6 考察

本節では、5.5 節で示した実験例をもとに提案手法のコントロール方法の妥当性について検証する。

提案手法では、従来研究で提案されている目的形状を形成するような外力を加えるのではなく、雲の物理シミュレーションに利用するパラメータを調整することで積雲の形状制御を行っている。そのため、綿状の現れるような積雲の特徴を維持したままの雲の表現が可能である。従来の雲のシミュレーションを利用する場合は、目的形状の雲を生成するために多くのパラメータを調整する必要があり、パラメータの調整だけでは目的形状の雲の結果が得られない場合もある。提案手法では、目的の分布を指定するだけで、複雑なパラメータの調整なしに意図した形状の雲の生成が可能である。しかし、提案手法のコントロール方法では、自然な風の流れを考慮することはできていない。通常、シミュレーションにおいて風の効果を出す場合、外力や、境界条件として風のパラメータを考慮する。上述したように、この方法では、指定した目的形状の雲を形成、維持することは難しい。提案手法では、積雲の動きの特徴として、水平方向におよそ一定の速度で流れる点に着目し、擬似的な風の効果を出す方法を開発した。本研究の目的は、積雲が風に流れながら目的の形状に変化するアニメーションの作成であるため、実験結果より、擬似的な風の効果で十分な目的の結果は得られている。

本研究では、キーフレームとして指定した目的形状を持つ target field に一致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、雲がキーフレームで指定した目的形状に徐々に変化するアニメーションを実現するために、文献 [9] 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 に類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．ただし，制御パラメータが熱源のみであること，target field の生成において雲の物理現象を考慮していないため，完全に自然界で観察されるような雲の動きや形状変化過程を完全に再現するのは難しい．そのため，今後の課題として，より自然な雲の形状変化過程を表現するために，熱源以外の制御や，物理現象に基づいた中間の target field の生成方法の提案が考えられる．

第 6 章

セル状の雲のコントロール

本章では、ユーザが指定した目的分布の層積雲・高積雲・巻積雲などのセル状の雲が自動生成されるようセル状の雲のシミュレーションをコントロールする手法について述べる。本章の構成は次の通りである。はじめに、6.1 節でセル状の雲の数値シミュレーション方法について説明する。次に 6.2 節で提案手法の基本的な考え方と処理の流れについて説明し、6.3 節以降で提案手法の詳細について述べる。その後、6.6 節で提案手法を用いて生成したセル状の雲のコントロール結果について示し、6.7 節で考察を述べる。

6.1 セル状の雲の大気流体モデル

本節では、層積雲・高積雲・巻積雲などのセル状に現れる雲の数値シミュレーション方法について説明する。提案手法では、セル状の雲の生成に Miyazaki らが提案した大気流体モデル [26] を利用する。大気流体モデルの数値解析には、文献 [37] の手法を利用する。セル状の雲の生成過程について図 6.1 に示す。セル状の雲を生成する

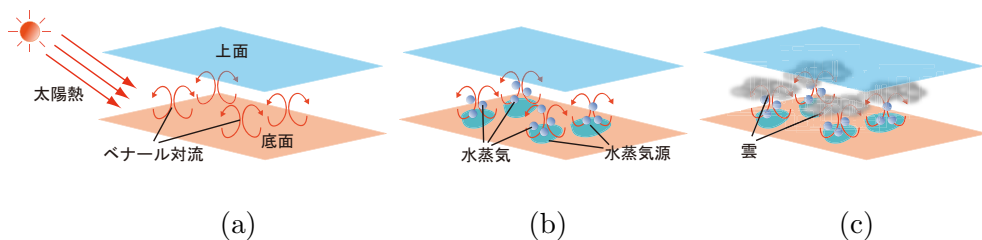


図 6.1 セル状の雲の生成過程

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、熱対流の一つであり、薄い流体層を下面は一様に温め、かつ上面は一様に冷やしたときに発生する対流である^{*1}。ベナール対流は、流体層の鉛直方向の温度勾配が一定の臨界値を超えたときに、上下層の循環する運動として現れる。これは、下層付近の温められた流体が膨張する（密度が小さくなる）ことで上昇し、その領域に周囲の低温度の流体が流れ込むという過程が繰り返され、流体が循環する流れの場が生じるためである。実際の大気におけるベナール対流と、それに伴う雲の生成過程について以下に説明する。まず、大気は流体層と考えられる。そのため、図 6.1(a) に示すように、太陽熱、もしくは気流の関係などが要因となり、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が現れる。このとき、その不安定な状態を解消しようとベナール対流が発生する。ベナール対流の発生に伴い、上昇気流とともに水蒸気を含む空気塊が上昇する（図 6.1(b)）。そして、空気塊中の水蒸気が飽和水蒸気量に達したとき、相転移が起こり、雲が発生する（図 6.1(c)）。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（図 6.2)(a)。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（図 6.2)(b)。シミュレーション空間は、積乱雲のシミュレーションと同様に、 $N_x \times N_y \times N_z$ の格子に

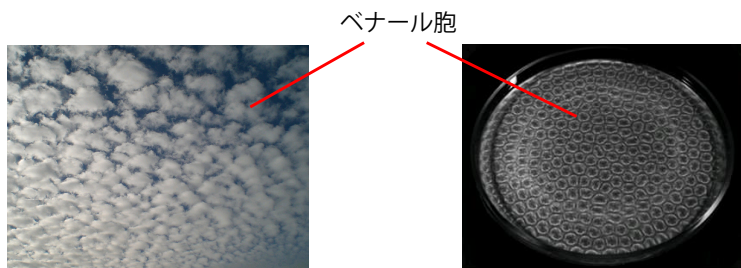


図 6.2 ベナール胞の生成例

^{*1} <http://homepage3.nifty.com/kuebiko/biology/jyosyo/benard.htm>
<http://kobam.hp.infoseek.co.jp/meteor/benard.html>

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．

6.1.1 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，大気は密度が一定で，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 of 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式で表される．

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (6.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6.2)$$

ここで， t は時間， ρ は大気の密度， ν は流体の粘性係数， \mathbf{B} は浮力， \mathbf{f} は浮力以外の外力を表す．式 (6.1) は，大気の流れ場の時間変化を表し，右辺第一項の移流項，第二項の圧力項，第三項の拡散項， \mathbf{B} ， \mathbf{f} などの外力項で構成される．各項の効果については，2.1 節で説明した通りである．式 (6.2) については，3.1 節で説明した連続の式である．セル状の雲に利用する浮力 \mathbf{B} については，次式で与えられる．

$$\mathbf{B} = -k_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} \right) \mathbf{z} \quad (6.3)$$

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 (6.3) 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．外力 \mathbf{f} については，積乱雲の場合と同様に，式 (3.4)，(3.5) で示した微小渦の効果も考慮している．

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与えられる．

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) q_c + C_c \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) q_v + k_v \nabla^2 q_v + C_c + S_v \quad (6.5)$$

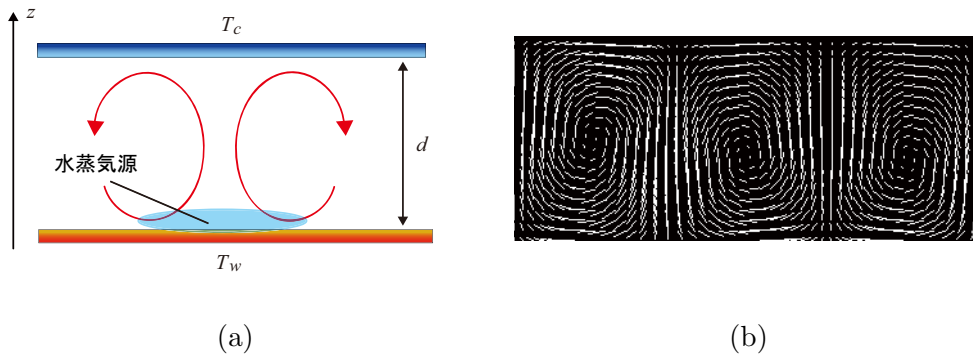


図 6.3 ベナール対流の境界条件と速度場

ここで、 k_v は水蒸気の拡散係数、 C_c は相転移のための値であり、式 (3.8) と同様である。 S_v は水蒸気源からの水蒸気供給量である。式 (6.4)、(6.5) の右辺第一項は、それぞれ雲密度、水蒸気密度の速度場による移動を表す移流項である。式 (6.5) の右辺第二項は水蒸気の拡散作用を表す。

温度 T の発展方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)T + \kappa \nabla^2 T + QC_c \quad (6.6)$$

ここで、 κ は熱拡散係数、 Q は潜熱係数である。式 (6.6) 右辺第一項は、速度場による温度場の移動を表す移流項を、第二項は温度場の拡散作用を表す。

6.1.2 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。上下方向の境界条件は固定境界条件として以下の式で与える。

$$\begin{cases} w = 0, & \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 & (z = 0, d) \\ T = T_w & (z = 0), & T = T_c & (z = d) \end{cases} \quad (6.7)$$

ここで、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の速度である。また、 d は z 軸方向に対するシミュレーション空間最上の格子点番号である。速度場については、上下境界で w は常に 0 となるようにし、 u, v については勾配が 0 となるようにする。温度場については、シミュレーション空間の下面部が上面部よりも高い温度となるようそれぞ

れ, T_w, T_c を指定する．これは, ベナール対流の発生要因である不安定な状態をシミュレーション空間につくり出す目的として行う (図 6.3(a))．さらに, 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, その位置の底面付近を水蒸気源として指定することで水蒸気を付加する (図 6.3(a))．水蒸気の付加は式 (6.5) の S_v で行う．左右境界には周期境界条件を用いる．以上に示した大気流体モデルを 2 次元でシミュレーションした場合, 図 6.3(b) に示すような速度場が発生する．図の結果からわかるように, 循環運動する対流 (ベナール対流) が発生している．

6.2 セル状の雲のコントロール概要

セル状の雲のコントロールでは, 6.1 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し, 目的とする雲の形状を自動生成させる．提案手法におけるコントロールの基本的な考え方について図 6.4 に示す．ユーザが所望する雲の目的分布は, スクリーン上に直接描画することで生成する．本稿では, 以降, ユーザが指定した目的分布を *target field* と呼ぶ．*target field* は 0.0~1.0 のいずれかの値をとるスカラー場として定義する．提案手法では, *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いくつかを *target field* の値に応じて制御することにより実現する．雲のシミュレーションパラメータは多数存在するが, 制御を行うパラメータの候補として, 粘性係数 ν , 浮

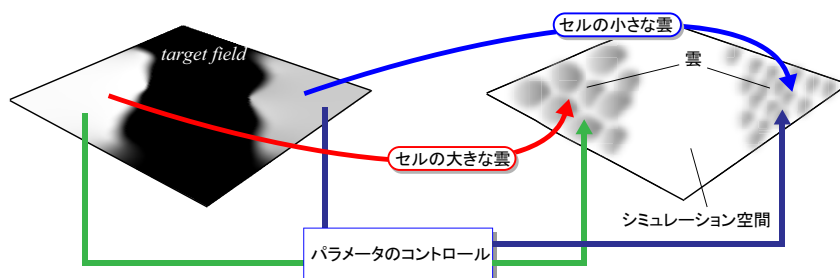
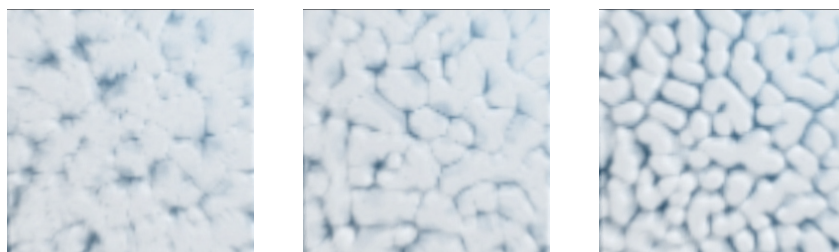


図 6.4 コントロールの基本概念

力の係数 k_b , 熱拡散係数 κ について着目する . それらのパラメータが生成されるセル状の雲の形状に影響する実験結果が得られたためである . 各パラメータの値を変化させ場合の雲の形状への影響を比較した実験結果について以下に示す .

- 粘性係数

図 6.5(a) , (b) , (c) はそれぞれ粘性係数を 0.01 , 0.05 , 0.1 としたときの出力結果である . 実験結果から , 粘性係数を大きくするほどセル形状がはっきりし , 各セルの間隔が大きくなる傾向がわかる .



(a) 0.02

(b) 0.06

(c) 0.1

図 6.5 粘性係数による比較結果

- 浮力の係数

図 6.6(a), (b), (c) はそれぞれ浮力の係数を 0.01, 0.05, 0.1 としたときの出力結果である。実験結果から、浮力の係数を大きくするほど各セルの大きさが大きくなる傾向がわかる。

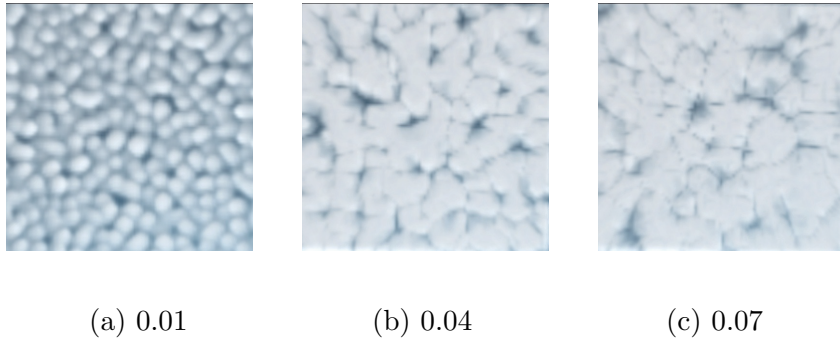


図 6.6 浮力の係数による比較結果

- 熱拡散係数

図 6.7(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。実験結果から、熱拡散係数を大きくするほど各セル間の間隔が大きくなる傾向がわかる。これは、熱拡散係数を大きくするほどベナール対流の発生源が減少するためである。

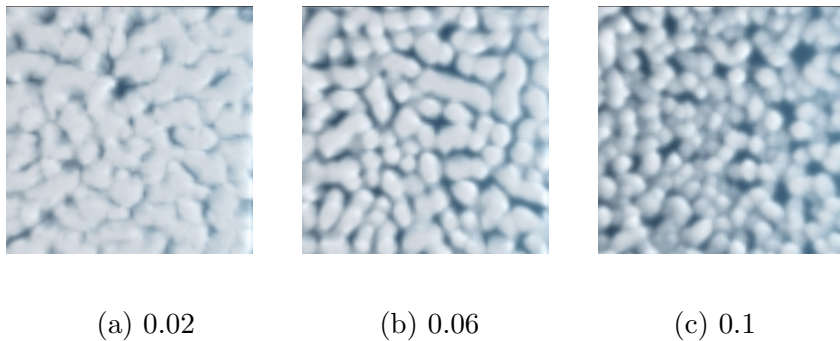


図 6.7 熱拡散係数による比較結果

以上の実験結果から、セルの大きさには浮力の係数が最も大きく影響することがわかる。そのため、提案手法では、浮力の係数を target field に応じて決定することで、セル状の雲のコントロールを実現する。しかし、浮力の係数をコントロールするだけでは、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、水蒸気は毎ステップ水蒸気源から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セル形状が維持できないことがある。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、供給する水蒸気量を調節することで雲の過剰な発生を抑制する。

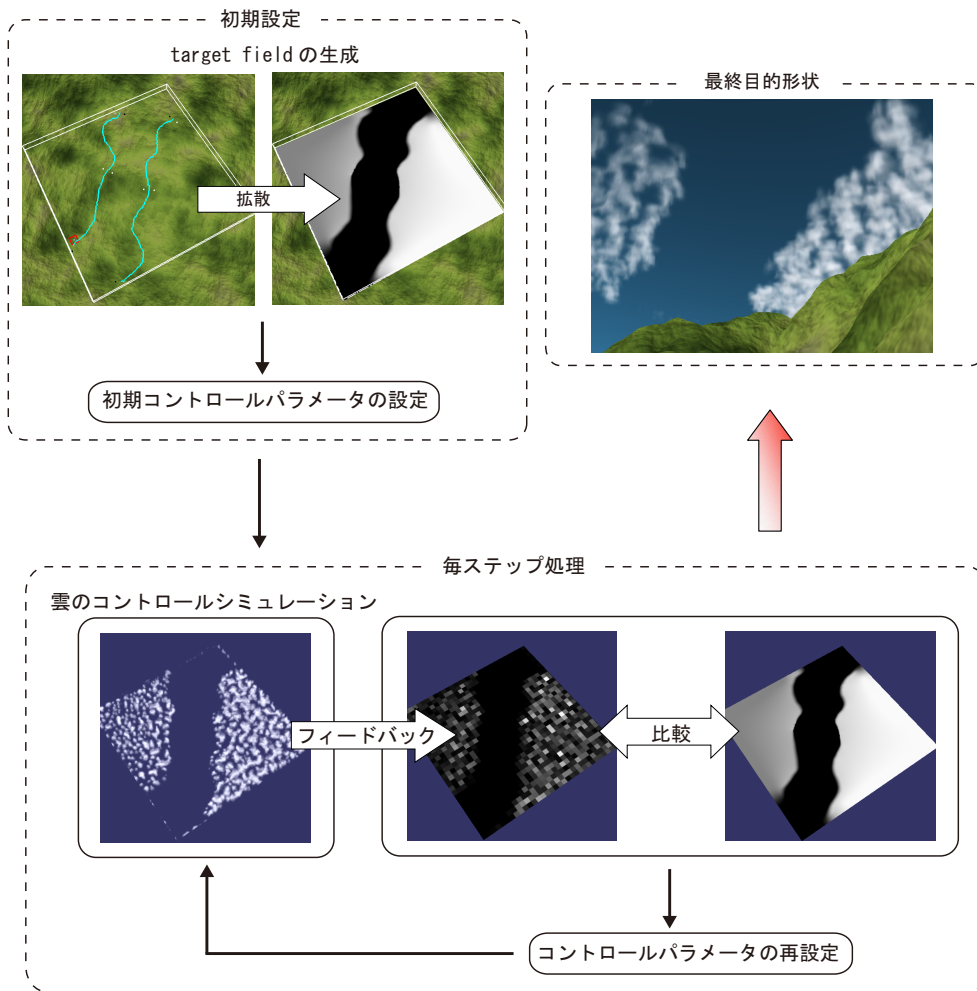


図 6.8 セル状の雲のコントロールの流れ

提案手法の流れを図 6.8 に示す．まず，初期設定としてユーザが target field を指定する．このとき，コントロールに利用する浮力の係数を target field により算出する．次に，毎ステップ処理として target field の値に応じて雲のコントロールシミュレーションを行う．ここでは，初期設定で決定した浮力の係数を用いて浮力の計算を行い，さらに，フィードバック制御により供給される水蒸気量のコントロールを行う．target field と生成された雲の分布との差に応じてステップごとに水蒸気の供給量が再設定される．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．

6.3 target field

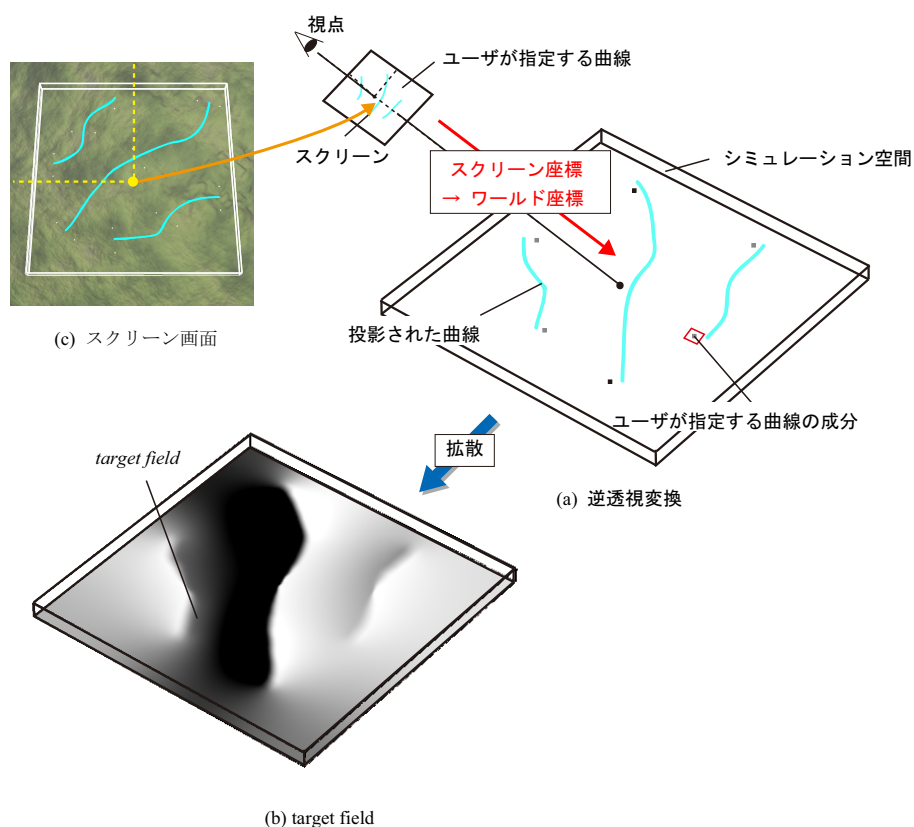


図 6.9 target field の指定方法

図 6.9 は提案手法による目的分布の入力システムについて表したものである。図 6.9 に示すように、ユーザは目的とする雲の分布である target field をマウス・タブレット操作などにより直接描くことで指定する。具体的には、まず、ユーザは所望するカメラ位置からスクリーンに所望の曲線を描く。図 6.9(c) は、実際の入力システムのスクリーン画面を示したものである。次に、描いた曲線は、シミュレーション空間の底面に投影される。この投影は図 6.9(a) に示すように、逆透視変換を利用し、スクリーン座標から仮想空間中のワールド座標を計算することにより行う。そして、投影された曲線を基にシミュレーション空間に図 6.9(b) に示すような滑らかに変化

するスカラー場を自動生成する．これには Orzan らが開発した diffusion curves[33] 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着色を可能とする方法である．具体的な処理は，以下の通りである．ユーザは，描いた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．Orzan らの手法では，着色を目的とするため，成分として RGB 値を指定する．しかし，提案手法では，滑らかなスカラー場の生成が目的であるため，成分には 1 要素のみを 0.0~1.0 のいずれかの値で指定する．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，Orzan らの手法 [33] 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し，図 6.9 のような target field を得ることができる．提案手法では，この target field の値 λ を基に，次節で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．

6.4 浮力の係数のコントロール

浮力の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 (図 6.6)．そのため提案手法では，target field の値 λ に浮力の係数を比例させることにより，浮力の係数をコントロールする．以下に，浮力の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．

$$\mathbf{B}(i, j, k) = -\lambda(i, j)k_b \left(\frac{\partial^2 T(i, j, k)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T(i, j, k)}{\partial^2 y} \right) \mathbf{z} \quad (6.8)$$

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 (6.8) を用いてシミュレーションを行うことで，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．

6.5 水蒸気量のコントロール

前述したように浮力の係数のコントロールのみでは、雲の発生量を調節することができない。そのため、雲が過剰に発生してセル形状が失われるなど、正確に target field を反映した雲が生成される結果は得られない。これを解消するため、浮力の係数のコントロールに加え、供給する水蒸気量についてもコントロールを行う。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、

$$A_c(i, j) = \left(\frac{1}{N_z} \sum_{k=0}^{N_z} q_c(i, j, k) \right) \quad (6.9)$$

$$\bar{A}_c(i, j) = A_c(i, j) / A_{c,max} \quad (6.10)$$

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。図 6.10(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 average field A'_c を比較することで水蒸気量を調整する。制御にはフィードバック制御の一種である P 制御を利用する。以下に与える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 (3.7) 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。

$$S_{v,c}(i, j) = K_v(\lambda(i, j) - A'_c(i, j)) \quad (6.11)$$

ここで、 K_v は供給する水蒸気量を調節するための比例ゲインである。式 (6.11) から目標値 $\lambda(i, j)$ と average field A'_c との差分に応じた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．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 6.10(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 6.10(c) は制御を行った場合の結果であり，図 6.10(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，雲の発生量を抑え，セル形状が失われていない点ができる．

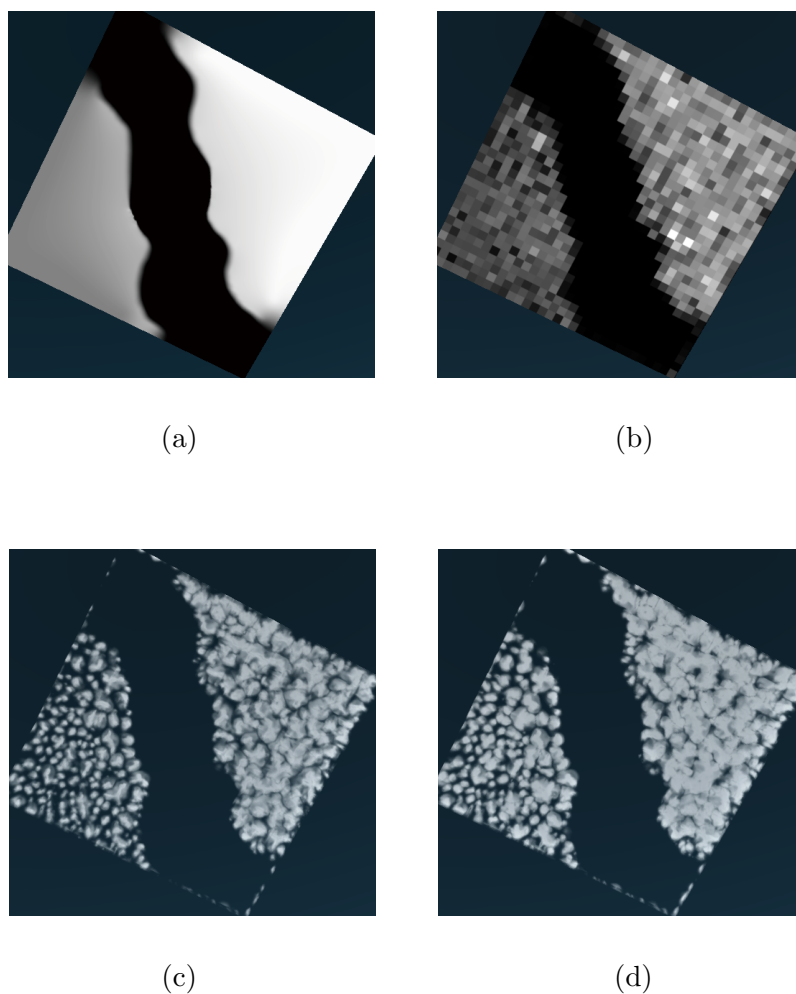


図 6.10 水蒸気供給量の制御

6.6 実験結果

本節では，提案手法を用いて，セル状の雲のコントロールシミュレーションを行った結果を示す．実験に用いた環境は以下の通りである．

- CPU : Core2Extreme X9650
- グラフィックスハードウェア : Geforce8800GT
- グラフィックス API : OpenGL

	パラメータ名	数値
dt	タイムステップ	1.0
dh	格子幅	1.0
ν	粘性係数	0.03
k_b	浮力の係数	0.1
k_v	水蒸気粘性係数	0.05
κ	熱拡散係数	0.03
Q	潜熱係数	0.02
T_{amb}	環境温度	2.5(上面) ~ 2.7(底面) (高度に比例)
α	相転移率	0.1
(A, B, C)	飽和水蒸気量の係数	(100, 3, -2.3)
κ_P	比例ゲイン	4.95

表 6.1 実験に用いた制御パラメータ数値

	シミュレーション時間	格子数	画像のサイズ
実験例 1(図 6.11)	1.1 秒/フレーム	256 × 256 × 10	512 × 512 pixel
実験例 2(図 6.12)	1.1 秒/フレーム	256 × 256 × 10	512 × 512 pixel
実験例 3(図 6.13)	1.1 秒/フレーム	256 × 256 × 10	512 × 512 pixel

表 6.2 各実験例でのシミュレーション時間・格子数

雲の表示には，3.5 節で示した方法と同様に，シミュレーション空間の各格子の雲密度分布より Dobashi らの手法 [3] を利用してレンダリングを行った．以下に示す実験例における雲のコントロールシミュレーションに利用したパラメータには表 6.2 に示す値を用いた．雲の生成に関するパラメータには従来研究である Miyazaki らの方法 [27] を参考にすることで決定した．また，コントロールに利用したパラメータについては試行錯誤により決定した．各実験例におけるシミュレーション空間の分割数，シミュレーション時間，画像のサイズは表 3.2 に示した通りである．なお，雲以外の物体の表示については，3.5 節で示した方法と同様の方法を利用した．

適用例 1 では，コントロールによるセルの大きさの変化がわかりやすいよう，円状にグラデーションさせた target field(図 6.11(a)) を指定した場合の結果を示した．図 6.11(b) の結果から，target field の値に応じてセルの大きさも段階的に変化している様子がわかる．

適用例 2 では，現実の世界で観察されるような一般的な分布をもつ target field(図 6.12(a)) を指定した場合の結果を示した．提案手法を利用して生成した雲の出力結果が図 6.12(b) であり，これは 360 ステップ目の結果である．表 6.2 に示したパラメータでシミュレーションを行った場合，およそ 250 ステップから 300 ステップほどでベナール対流が形成された．図 6.12(e) は，視点を変更した場合の出力結果であり，図 6.12(c)，(d) はそれぞれ，300 ステップ目，330 ステップ目の結果を表したものである．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．また，図 6.12(f) は，太陽の高度が低い場合の結果である．太陽の位置を変更することにより，大気的环境光の変化を雲の色に反映させたり，陰影を変化させたりすることが可能である．

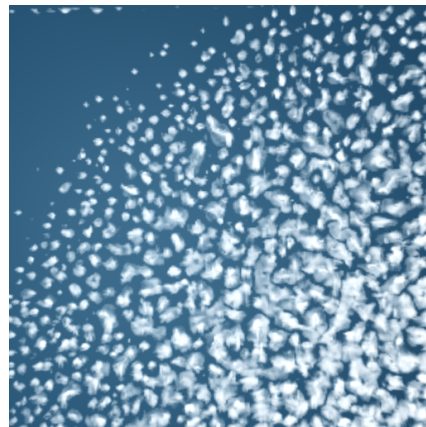
適用例 3 では，現実の世界で観察されないような特殊な分布をもつ target field(図 6.13(a)) を指定した場合の結果を示した．提案手法を利用して生成した雲の出力結果が図 6.13(b) であり，これは 360 ステップ目の結果である．図 6.13(e) は，視点を変更した場合の出力結果であり，図 6.13(c)，(d) はそれぞれ，300 ステップ目，330 ス

トップ目の結果を表したものである．図 6.13(f) は，太陽の高度が低い場合の結果である．

以上に示した適用例のように，提案手法を用いることで所望する位置に所望する大きさのセル状の雲を生成することが可能である．

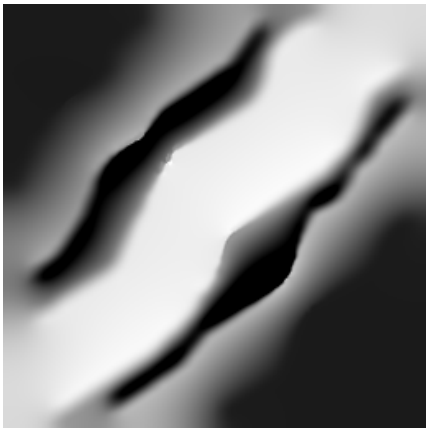


(a)

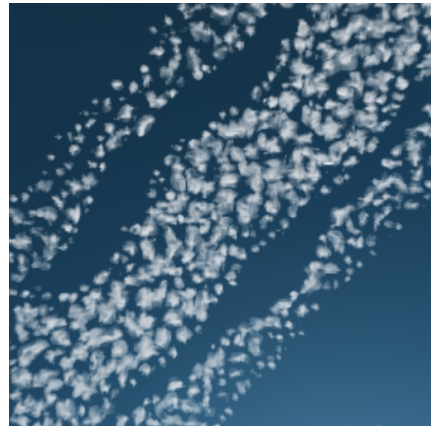


(b)

図 6.11 適用例 1



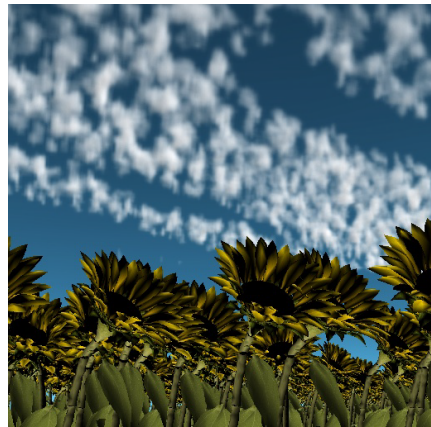
(a)



(b)



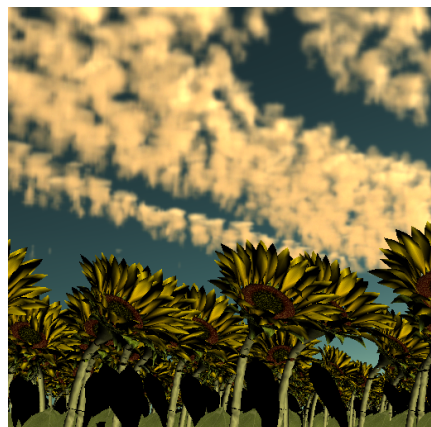
(c)



(d)

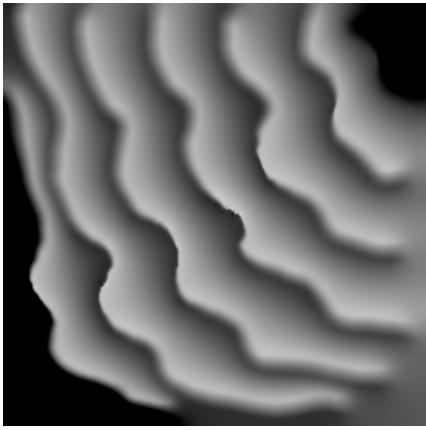


(e)

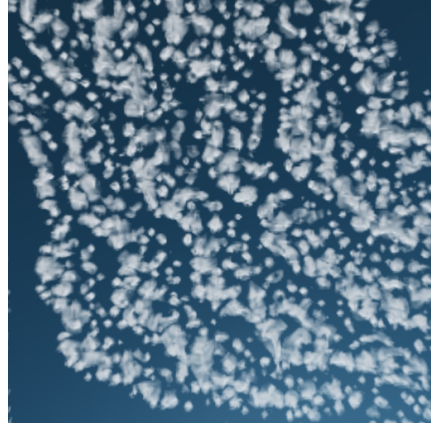


(f)

图 6.12 適用例 2



(a)



(b)



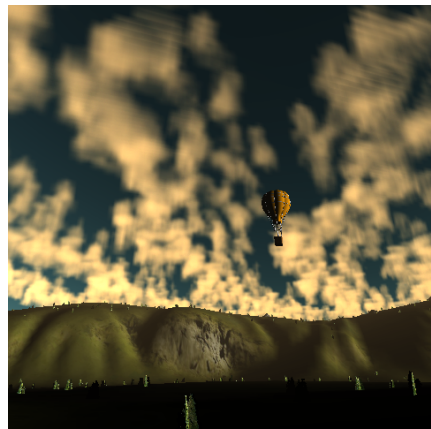
(c)



(d)



(e)



(f)

图 6.13 適用例 3

6.7 考察

本節では、6.6 節で示した実験例をもとに提案手法のコントロール方法の有効性について考察する。

提案手法では、直接的な外力を加えるのではなく、シミュレーションに利用する物理パラメータを調節することで雲のコントロールを行っている。そのため、セル状に現れるような巻積雲・高積雲・層積雲の特徴を維持したままの目的の分布で意図したセルの大きさをもった雲の表現が可能である。従来の雲のシミュレーションを利用する場合は、目的形状の雲を生成するために多くのパラメータを試行錯誤で調整する必要がある。提案手法では、今回開発した入力システムをもとに滑らかに変化するスカラー場を指定するのみで、複雑なパラメータ調整をすることなく、意図した分布の雲の生成が可能である。しかし、提案手法のコントロール方法では、各セルごとの詳細な形状まで制御することはできない。この点については、本研究の目的であるユーザが所望する分布を持った雲の生成という観点から、目的分布に応じておおまかにセルの大きさをコントロールするだけで十分であると考えられる。もし、各セルごとの詳細形状までコントロールする場合、ユーザは多数存在するセル形状のひとつひとつを全て指定しなければならず、大きな労力と手間を必要とする。さらに、セル形状をコントロールするための新たなコントロール方法を開発しなければならない。

本研究では、ユーザが所望する分布を持つセル状の雲が自動生成されるよう雲の生成過程をコントロールする方法を提案した。提案手法では、target field の値に応じて浮力の係数を決定することでセルの大きさをコントロールする。さらに、毎ステップ雲の密度をフィードバックし、target field と比較することで発生する雲の量をコントロールする。この二つの制御により、セル状の特徴を維持したままの雲のコントロールが可能となった。しかし、提案手法では、指定できる目的形状は単一であるという制限がある。また、提案手法を用いて生成する映像は、徐々に目的形状の分布を持つセル状の雲が現れるような映像となり、不自然である。実際、自然界観察される

セル状の雲は，風の影響により水平方向へ移動しながら，その分布を変化させていく．
今後の課題として，風などを考慮することで，現実の世界で観察されるセル状の生成
過程に近い，セル状の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，キーフレームで変化させることでセル状の
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．

第7章

結論

本章では、本論文で述べた流体解析を利用した雲のコントロール手法とその効果についてまとめ、今後の課題について考察し、本論文の結論とする。

本論文では、CG 技術を利用して屋外景観映像を作成する際に、映像制作者の意図した動きや形状を反映した様々な種類の雲の映像生成を行う方法を提案した。

近年のコンピュータの普及、性能の向上とともに、CG 技術で実現できる映像表現の幅も広がり、映像制作の現場では、多種多様な映像表現が可能となった。その一例として、炎、煙、水などと言った流体現象の表現が挙げられる。流体現象の写実的な映像の制作には、物理現象に基づいた方法が有効であるが、コンピュータの性能が向上した現在でも、高解像度の映像を表現する場合、その計算コストは高い。また、映像制作者の意図した動きや形状の流体現象を表現する場合、シミュレーションのパラメータを試行錯誤で調整する必要があり、膨大な時間がかかる。この問題点は、流体現象のひとつである雲を物理シミュレーションを用いて表現する場合も同様である。

本論文では、上述の問題点を改善するために、10 種類に分類される雲の中から、積乱雲、積雲、セル状として現れる高積雲・層積雲・巻積雲などに着目し、それぞれの雲をシミュレーションする大気流体モデルをコントロールする方法を提案した。まず、第3章では、ユーザが所望する形状となるよう積乱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、フィードバック制御により、積乱雲のシミュレーションパラメータの一つである潜熱の量を調整し、積乱雲の鉛直方向への

発達をコントロールする．さらに，ポテンシャルフィールドによる外力により，雲が指定した目的形状に一致するよう雲の形状コントロールする．第4章では，第3章の方法を拡張し，積乱雲の消滅を促す制御方法を新たに開発することで，ユーザが所望する形状に次々と形状変化する積乱雲のコントロール方法を提案した．さらに，第5章では，キーフレームとして指定した目的形状に一致した分布の積雲が徐々に形状変化しながら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，フィードバック制御により，熱源からの熱量を調整することで，発生する積雲の位置や量を調整する．最後に，第6章では，ユーザが所望する形状・分布を持つセル状の雲が生成されるようセル状の雲のシミュレーションをコントロールする手法を提案した．提案手法では，目的分布の値に応じて，シミュレーションパラメータの浮力の係数を決定することでセルの大きさをコントロールする．さらにフィードバック制御により，水蒸気量を調整することで発生する雲の量のコントロールする．以上の手法は，それぞれの雲のシミュレーションの物理パラメータを目的の形状に応じてコントロールするため，強制的な外力などを発生させて目的の形状を形成するコントロール手法と比較し，不自然な映像となることを抑制することが可能である．

今後の課題として，第3章，第4章で示した積乱雲のコントロールに関しては，様々な目的形状に対応できるよう，水平方向のコントロール方法を改善する手法の開発が挙げられる．第5章で示した積雲のコントロールに関しては，より自然な積雲の形状変化過程を表現するために，熱量以外のパラメータの制御や，雲の物理現象を考慮した中間の目的形状の生成方法の提案が挙げられる．第6章で示したセル状の雲のコントロールに関しては，風の作用を考慮することで，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．

謝辞

本研究および本論文の作成に関し、多大なる御指導、御討論を頂きました北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻、土橋宜典准教授に心より感謝いたします。また、貴重な御意見、御討論を頂きました北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻、山本強教授、青木直史助教に心より感謝いたします。

あわせて、本研究に対し、貴重な御意見、御討論を頂きました株式会社オー・エル・エム・デジタル研究開発部門安生健一氏に深く感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、御助言、御指導を頂いた北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻、長谷山美紀教授に心より感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、御助言、御指導を頂いた北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻、荒木健治教授に心より感謝いたします。

本研究に対して、御助言、御協力を頂いた北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻情報メディア学講座情報メディア環境学研究室諸氏に心より御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] K. J Astrom and T. Haqqlund. Pid controllers:theory, design, and tuning. In *International Society for Measurement and Con.*, 1995.
- [2] R. Bridson. *Fluid Simulation for Computer Graphics*. AK Peters, 2008.
- [3] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, and T. Nishita. A simple, efficient method for realistic animation of clouds. In *SIGGRAPH '00: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 19–28. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.
- [4] D. S. Ebert. Volumetric modeling with implicit functions: A cloud is born. In *ACM SIGGRAPH 97 Visual Proceedings: The Art and Interdisciplinary Programs of SIGGRAPH '97*, SIGGRAPH '97, pp. 147–, 1997.
- [5] D. S. Ebert. Simulating nature: From theory to application. In *Course Note 26 of SIGGRAPH'99*, pp. 5.1–5.52, 1999.
- [6] D. S. Ebert, W. E. Carlson, and R. E. Parent. Solid spaces and inverse particle systems for controlling the animation of gases and fluids. In *The Visual Computer*, Vol. 10, pp. 179–190, 1994.
- [7] D. S. Ebert and R. E. Parent. Rendering and animation of gaseous phenomena by combining fast volume and scanline a-buffer techniques. *Proceedings of the 17th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Vol. 24, No. 4, pp. 357–366, 1990.
- [8] D. Enright, S. Marschner, and R. Fedkiw. Animation and rendering of com-

- plex water surfaces. In *SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 736–744. ACM, 2002.
- [9] R. Fattal and D. Lischinski. Target-driven smoke animation. In *SIGGRAPH '04: ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pp. 441–448. ACM, 2004.
- [10] R. Fedkiw, J. Stam, and H. W. Jensen. Visual simulation of smoke. In *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 15–22, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [11] 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, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [12] N. Foster and D. Metaxas. Controlling fluid animation. In *Proceedings CGI'97*, pp. 178–188, 197.
- [13] G. Y. Gardner. Visual simulation of clouds. In *SIGGRAPH '85: Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 297–304. ACM, 1985.
- [14] M. J. Harris, W. V. Baxter, T. Scheuermann, and A. Lastra. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware. In *HWWS '03: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*, pp. 92–101. Eurographics Association, 2003.
- [15] F. Haugen. Pid control of dynamic systems. In *Tapir Forlag*.
- [16] 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.
- [17] T. Igarashi, S. Matsuoka, and H. Tanaka. Teddy: a sketching interface for

- 3d freeform design. In *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 409–416. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999.
- [18] J. T. Kajiya. and B. P Von Herzen. Ray tracing volume densities. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 18, No. 3, pp. 165–174, 1984.
- [19] T. Kikuchi, K. Muraoka, and N. Chiba. Visual simulation of cumulonimbus clouds. *The Journal of The Institute of Image Electronics and Electronics Engineers of Japan*, Vol. 27, No. 4, pp. 317–326, 1998.
- [20] B. Kim, Y. Liu, I. Llamas, X. Jiao, and J. Rossignac. Simulation of bubbles in foam with the volume control method. In *SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 papers*, p. 98. ACM, 2007.
- [21] Y. Kim, R. Machiraju, and D. Thompson. Path-based control of smoke simulations. SCA '06 : Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp. 33–42. Eurographics Association, 2006.
- [22] A. Lamorlette and N. Foster. Structural modeling of flames for a production environment. In *Proceedings of SIGGRAPH 2002*, pp. 729–735. ACM, 2004.
- [23] N. Max. Light diffusion through clouds and haze. *Comput. Vision Graph. Image Process.*, Vol. 33, No. 3, pp. 280–292, 1986.
- [24] N. Max, R. Crawfis, and D. Williams. Visualizing wind velocities by advecting cloud textures. In *Proceedings of the 3rd Conference on Visualization '92*, pp. 179–184, 1992.
- [25] A. McNamara, A. Treuille, Z. Popović, and J. Stam. Fluid control using the adjoint method. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, No. 3, pp. 449–456, 2004.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] F. Neyret. Qualitative simulation of convective cloud formation and evolution. In *Proc of Eurographics Computer Animation and Simulation Workshop'97*, pp. 113–124, 1997.
- [29] D. Quang Nguyen, R. Fedkiw, and H. Wann Jensen. Physically based modeling and animation of fire. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 21, No. 3, pp. 721–728, 2002.
- [30] T. Nishita, Y. Dobashi, and E. Nakamae. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '96*, pp. 379–386, 1996.
- [31] T. Nishita, T. Sirai, K. Tadamura, and E. Nakamae. Display of the earth taking into account atmospheric scattering. In *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '93*, pp. 175–182, 1993.
- [32] A. O'Dwyer. Handbook of pi and pid controller tuning rules. In *Imperial College Press*.
- [33] A. Orzan, A. Bousseau, H. Winnemöller, P. Barla, J. Thollot, and D. Salesin. Diffusion curves: a vector representation for smooth-shaded images. In *SIGGRAPH '08: ACM SIGGRAPH 2008 papers*. ACM, 2008.
- [34] L. Shi and Y. Yu. Controllable smoke animation with guiding objects. In *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, pp. 140–164, 2005.

- [35] 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.
- [36] J. Stam. Stochastic rendering of density fields. In *Proceedings of Graphics Interface '94*, pp. 51–58, 1994.
- [37] 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.
- [38] N. Thürey, R. Keiser, M. Pauly, and U. Rüdè. Detail-preserving fluid control. In *SCA '06: Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 7–12. Eurographics Association, 2006.
- [39] 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.
- [40] R. Voss. Fourier synthesis of gaussian fractals: 1/f noises, landscapes, and flakes. In *Proc. SIGGRAPH'83: Tutorial on State of the Art Image Synthesis*, Vol. 10, 1983.
- [41] P. Witting. Computational fluid dynamics in a traditional animation environment. In *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 129–136, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [42] By J.G. ZIEGLER and N. B. NICHOLS. Optimum settings for automatic controllers. In *Transactions of the A. S. M. E. 64*, pp. 759–768, 1942.

研究業績 学会誌

- [1] Yoshinori Dobashi , Katsutoshi Kusumoto , Tomoyuki Nishita , Tsuyoshi Yamamoto, “Feedback Control of Cumuliform Cloud Formation based on Computational Fluid Dynamics” , *In ACM Transactions on Graphics.* , Vol.23, No.3, Article94 (Aug. 2008) .
- [2] 楠元克敏 , 土橋宜典 , 山本強, “フィードバック制御による積乱雲のキーフレームコントロール” , 映像情報メディア学会誌 Vol.65 No.3 2009 (Mar. 2009) .
- [3] 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シミュレーションのコントロール” , 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J92-D(12), 2270-2277, 2009-12-01
- [4] 楠元克敏 , 土橋宜典 , 山本強, “流体解析に基づく積雲のシミュレーションのコントロール” , 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J96-D(8), 1944-1951, 2013-08-01

査読付国際会議

- [1] Yoshinori Dobashi , Katsutoshi Kusumoto , Tsuyoshi Yamamoto, "Keyframe control of cumulus cloud simulation", SIGGRAPH Asia 2012 Posters

学会技術研究会

- [1] 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強, “フィードバック制御による雲のアニメーション制御”, 情報処理学会 グラフィックスと CAD 第 129 回研究会, 研究報告, pp. 7-12(Nov. 2007) .
- [2] 土橋宜典, 楠元克敏, 西田友是, 山本強, “フィードバック制御を用いた雲のモデリングシステム”, Visual Computing/グラフィックスと CAD 研究会合同シンポジウム 2008(CD-ROM), (Jun. 2008) .
- [3] 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”, 情報処理学会 グラフィックスと CAD 第 133 回研究会, 研究報告, pp. 61-66(Nov. 2008) .
- [4] 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強, “流体解析に基づく積雲のキーフレームコントロール”, 情報処理学会 グラフィックスと CAD 第 147 回研究会, 研究報告, pp. 1-6(Nov. 2014) .
- [5] 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強, “流体解析を利用したインタラクティブな Smoke Art の生成法”, Visual Computing/グラフィックスと CAD 研究会合同シンポジウム 2014(CD-ROM), (Jun. 2014) .

全国大会等発表

- [1] 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強, “任意形状を形成するための雲のアニメーション制御”, 電子情報通信学会 2007 年総合大会講演論文集, D-12-50, (Mar. 2007) .
- [2] 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強, “フィードバック制御による雲のコントロール”, 電気・情報関係学会北海道支部 連合大会講演論文集 (CD-ROM), (Oct. 2007) .
- [3] 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強, “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”, 情報処理学会 FIT 2008 第 7 回情報科学技術フォーラム, I-012 . (Oct. 2008) .
- [4] 楠元克敏, 土橋宜典, 山本強, “ユーザの入力支援に基づく積雲の生成法”, 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集 5-1-1, 2011-12-21 (Dec. 2011) .