

降雪・積雪景観の  
ビジュアルシミュレーションに関する研究

1999年3月

岩手大学大学院工学研究科

電子情報工学専攻

村岡 一 信

①

博士學位論文  
降雪・積雪景観の  
ビジュアルシミュレーションに関する研究

1999年1月14日

岩手大学大学院工学研究科  
電子情報工学専攻  
村岡一信

## 目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3
第2章 降雪シミュレーション法	5
2.1 まえがき	5
2.2 渦場の生成法	5
2.3 降雪雪片の移動シミュレーション	8
2.4 むすび	13
第3章 積雪シミュレーション法	14
3.1 まえがき	14
3.2 自然の積雪現象	14
3.3 仮定の“気温”を形状制御パラメタとした仮定の“雪粒子”に基づくモデル	15
3.4 積雪形状生成アルゴリズム	20
3.5 積雪シミュレーション結果	23
3.6 むすび	26
第4章 融雪シミュレーション法	27
4.1 まえがき	27

4. 2	融雪現象	27
4. 3	融雪シミュレーションのための要素	30
4. 4	インプリメントのための簡略化	30
4. 5	積雪形状定義のための融雪シミュレーション法	31
4. 6	融雪シミュレーションの実行結果	40
4. 7	むすび	44
第5章	降雪雪片のレンダリング法	45
5. 1	まえがき	45
5. 2	従来の3次元テクスチャ法	45
5.2.1	テクセルの要素	46
5.2.2	テクセルのレンダリング	48
5. 3	降雪雪片専用3次元テクスチャ法	50
5. 4	3次元テクスチャの異方性に関するこれまでの研究	57
5. 5	異方性を考慮した3次元テクスチャ法	58
5.5.1	基本型異方性3次元テクスチャ法	58
5.5.1.1	異方性のための仮想球体	59
5.5.1.2	密度球・陰影球の実現方法	59
5.5.1.3	仮想球体への登録アルゴリズム	62
5.5.1.4	異方性3次元テクスチャのレンダリング法	65
5.5.1.5	密度の補間法	68

5.5.2	改良型異方性3次元テクスチャ法	70
5.5.2.1	改良型の仮想球体	70
5.5.2.2	仮想球体への登録法	70
5.5.2.3	密度と輝度の計算	71
5.5.2.4	データ量の削減方法	72
5.5.3	異方性3次元テクスチャの生成例	75
5.6	むすび	93
第6章	積雪のレンダリング法	94
6.1	まえがき	94
6.2	積雪レンダリングの概要	94
6.3	積雪のレンダリングアルゴリズム	98
6.4	積雪レンダリングの実行結果	101
6.5	むすび	105
第7章	結論	106
	謝辞	109
	参考文献	110
	発表論文	113

## 第1章

### 序論

#### 1. 1 本研究の背景と目的

近年、映画作品などでコンピュータグラフィックスによる自然物や自然景観の表現が多用され、実写と区別することが困難な作品もいくつか発表されている。しかしながら残されている課題も多く、特に、季節の自然景観映像、すなわち春の新緑や花吹雪、夏の深緑や積乱雲、秋の紅葉や絹雲、冬の枯れ木や積雪など、四季を感じさせるさまざまな現象の映像生成は困難な問題を数多く含む魅力的なテーマである。本論文では、雪景観映像生成のための降雪・積雪・融雪のビジュアルシミュレーション法を提案する。

降雪中の雪は地表付近の気流の影響を受け複雑な動きを見せる。物体上に堆積する雪の形状は、降雪初期にはそれを丸くしたような形になるが、降雪の進行とともに「冠雪」に代表される雪独特の形状に変化していく。また、降雪後も融雪により形状が刻々と変化する複雑なものである。さらに、雪の質感は、結晶や不定形な氷の粒からなる複雑な構造を反映したものといえる。

これまでの雪景観映像生成に関する研究には、

- (1) 遠景の冬季の山岳景観の表現を目的としたもの[1][2]
- (2) 降雪の表現を目的としたもの[3]
- (3) 近接景観の積雪の形状表現に関するもの[4][5][6]
- (4) 季節景観の積雪のレンダリング法に関するもの[5][6]

などがある。

本論文の手法は(2)(3)(4)に属するものである。(2)の降雪の表現では、Sims[3]は渦とスパイラルの組み合わせによる意図的な気流により降雪を表現し、雪はパーティクルで表現した。本論文では、渦場の手法により、障害物の影響を受け時間とともに自動的に変化する気流の場により降雪を表現する手法を示し、さらに、3次元テクスチャ法に基づく降雪雪片のレンダリング法を示す。

(3)の積雪形状表現については Nishita ら[5]は対話的にメタボールを配置し積雪形状を定義する手法を提案している。本論文では“雪粒子”の行動モデルにより降雪直後の積雪形状を自動生成する手法[4]を拡張し仮想の“気温”を積雪形状パラメタとした手法を示す。さらに、“雪粒子”の行動モデルにより生成した積雪形状を初期値として、日射や地熱、物体からの放射熱を考慮した熱伝搬シミュレーションに基づき、融雪した形状へ変形する手法[6]を示す。

(4)の積雪のレンダリングでは、Nishita ら[5]は雲の多重散乱によるボリュームレンダリング法を拡張し、物理モデルに基づく積雪レンダリング法を提案している。本論文で示す手法[6]は、1次散乱のみの簡略化したボリュームレンダリング法であるが、積雪内の密度のゆらぎなどを考慮することで、従来手法では表現が十分ではないと思われる、積雪表面の微細な陰影を表現することができる。

なお、本手法は景観映像生成のためのものであり、厳密な物理量を求めようとする物理シミュレーションとは異なるものである。

## 1. 2 本論文の構成

第2章では、渦場の手法による気流の場の生成法を説明し、気流の場と重力、ランダムな力を受けて雪片を移動させる降雪シミュレーション法を示す。また、本手法により生成した降雪の動画像の一部の画像により、その効果を示す。

第3章では、自然の積雪現象を文献よりまとめ、積雪形状の特徴について述べる。次に、積雪の特徴を表す積雪形状の生成法として、仮想の“気温”を形状制御パラメタとした、降雪直後の積雪形状を自動生成する積雪シミュレーション法を示す。さらに、シミュレーション例により、その効果を示す。

第4章では、自然の融雪現象を文献よりまとめ、積雪シミュレーション法で生成した積雪形状を初期形状として、積雪表面の雪が受ける直達日射光や散乱日射光、物体からの放射熱の計算法、および積雪内部の熱伝搬シミュレーション法を示し、これによる融雪した積雪形状の自動生成法を示す。さらに、融雪シミュレーション例により、その効果を示す。

第5章では、3次元テクスチャ法に基づく降雪雪片のレンダリング法を示す。次に、従来の3次元テクスチャ法の異方性に関する問題点を指摘し、それを解決する異方性3次元テクスチャ法を示す。さらに、これらの手法の効果をレンダリング例により示す。

第6章では、積雪シミュレーション法および融雪シミュレーション法により得られた積雪のボリュームデータから、リアルな積雪の質感を表現するための積雪レンダリング法を示す。まず、積雪表面の特徴を述べ、次に、積雪のボリュームデータからレンダリングのための形状データの生成法について述べる。さらに、ボリュームレンダリング法をベース



とした、積雪のレンダリング法について述べ、最後に、レンダリング例によりその効果を示す。

第7章では、結論と今後の課題について述べる。

## 2. 1 雪の表現

雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。

雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。

雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。

## 2. 2 雪の表現法

雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。

### 雪の表現法

雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。雪は、雪が降り積もる状態に表現する必要がある。

## 第2章

# 降雪シミュレーション法

### 2.1 まえがき

降雪は、雪片が地表まで溶けずに落下する現象であり、雪片とは雪結晶あるいは複数の雪結晶が空中で結合したものである。降雪のシミュレーションは渦場の手法により気流の場を生成し、それから受ける力と重力、ランダムな力を受けて雪片を移動させることにより行う。

本章ではまず、渦場の生成法について述べ、次に降雪雪片の移動方法について述べる。さらに、本手法の効果を降雪の動画像の一部により示す。

### 2.2 渦場の生成法

流れには、層流と呼ばれる時間的にあまり変動しない比較的単純な流れと、乱流と呼ばれる時間的にも空間的にも極めて不規則に変動する複雑な流れがある。渦場の手法[7][8]では、この気流の場を大小さまざまな渦の速度場の合成として生成する。渦場を構成する個々の渦は固定した状態ではなく、絶えず発生・成長・消滅・移動を繰り返している。渦の形としては図1に示すような3次元ランキン渦を用いている。渦場の更新は以下のように行う。

#### 渦場の更新：

ステップ0：|渦の発生| 渦の発生は、その中心位置、半径、回転の速さ、回転の方向をランダムに与えることにより行う。

ステップ1：{渦の成長} 計算クロックごとに渦の回転の速さを減衰させ、半径を大きくする。

ステップ2：{渦の消滅} 渦の回転の速さと半径の関係が、ある値以下となった渦は消滅させる。

ステップ3：{渦の移動} 渦は、その中心での渦場の速度に応じて移動させる

ステップ4：{渦の障害物回避} 渦は、障害物に対しては弾性衝突するものとする。ただし、簡単のため、渦の中心で弾性衝突するものとする。

なお、上昇気流や下降気流、一定方向の風などを作る目的のために、減衰や移動しない固定した渦や、層流成分も使用する。

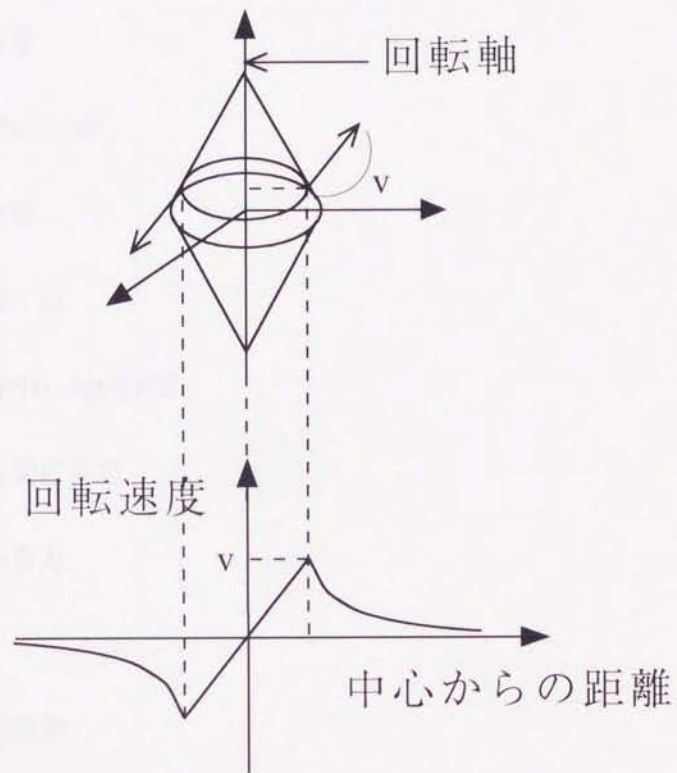


図1 3次元ランキン渦

## 2. 3 降雪雪片の移動シミュレーション

1つの雪片は図2に示す力を受け、物体に接触するまで次の運動方程式により移動する.

$$M a(t) = f(t) \quad (1)$$

$M$  : 雪片の質量

$a(t)$  : 加速度  $d^2x(t)/dt^2$

$x(t)$  : 雪片の位置

$f(t)$  : 雪片に働く力

$$= f_v(t) + f_r(t) + Mg - Cv(t)$$

$f_v(t)$  : 渦場から受ける力

$f_r(t)$  : ランダムな力

$Mg$  : 重力

$C$  : 空気抵抗係数

$v(t)$  : 速度  $dx(t)/dt$

(1)式の微分方程式に対する最も単純な数値解法であるオイラー法による差分方程式は

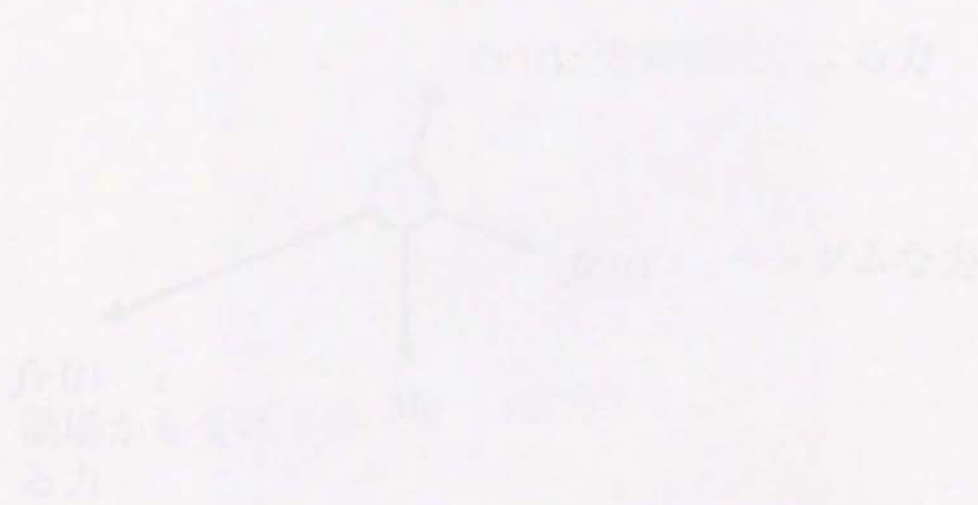
(2)式で表され、これにより雪片の移動シミュレーションを行う.

$$v(t+\Delta t) = v(t) + \Delta t \cdot f(t)/M$$

$$x(t+\Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot v(t) \quad (2)$$

本手法による効果を図3, 図4に示す. これらは、本手法により生成した降雪動画像の

一部の画像であり、図3が渦場による気流の場の影響を押さえた風のない状態の降雪。図4  
が渦場により乱れた気流を発生させた、激しく舞う雪を表現したものである。



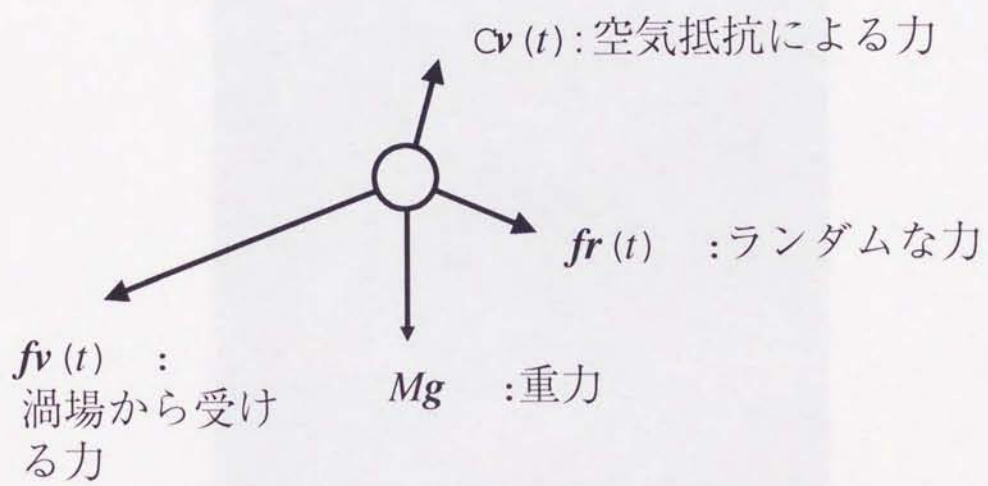


図2 雪片が受ける力

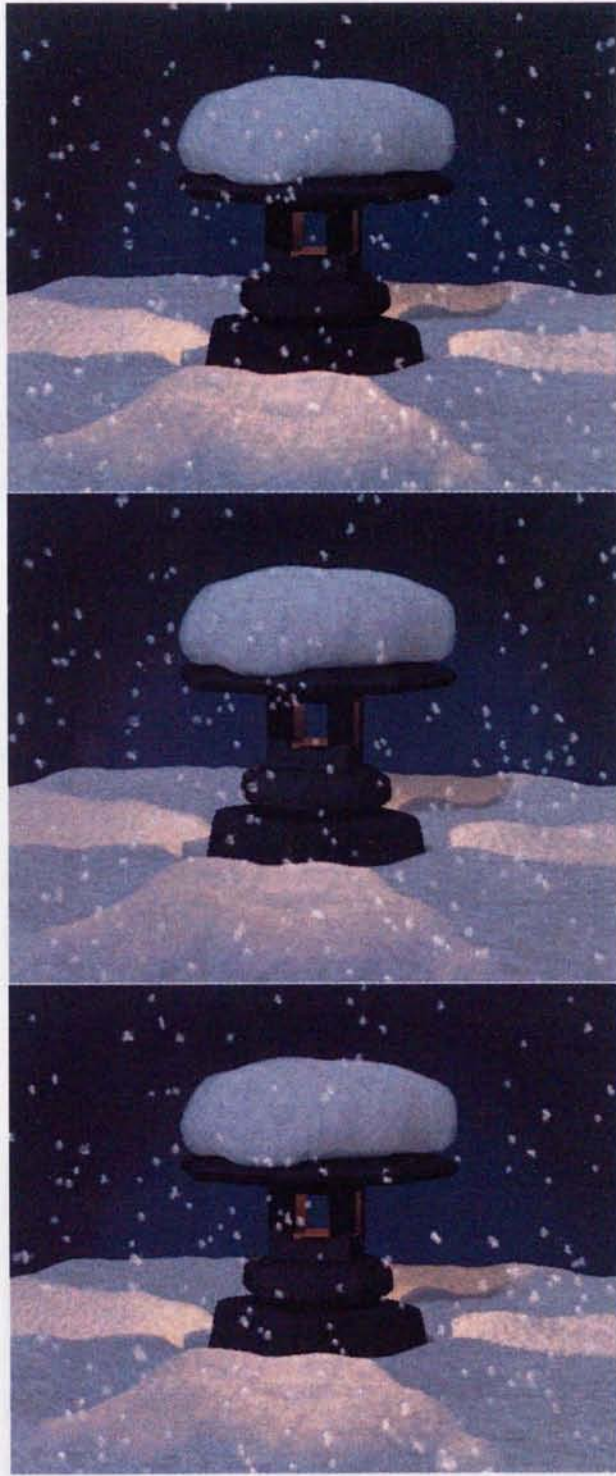


図3 風のない状態の降雪動画像の一部画像





図4 気流の影響を受ける降雪動画像の一部画像

## 2. 4 むすび

本章では、渦場の手法により気流の場を生成し、それから受ける力と重力、ランダムな力および空気抵抗を考慮した降雪シミュレーション法を示した。渦場による気流の場を制御することで、静かに降り積もる降雪から激しく舞う降雪まで表現できることを降雪動画の一部の画像により示した。

## 3. 2 自らの検証実験

### 3.2.1 検証実験

## 第3章

# 積雪シミュレーション法

### 3.1 まえがき

本章では、まず、自然の積雪現象についてまとめる。次に、文献[4]の降雪直後の積雪形状を生成する仮定の“雪粒子”による手法に、仮定の“気温”による形状制御パラメタを導入した改良型の積雪形状生成法を示す。さらに、積雪シミュレーション結果の画像生成例により、その効果を示す。

なお、本シミュレーション法における雪粒子は、降雪直後の積雪形状を生成するための単純化した仮想的なものであり、第2章の降雪雪片とは異なるものである。

### 3.2 自然の積雪現象

本節では、積雪シミュレーションのためのモデル構築の基礎となる積雪現象について文献[9][10][11][12]に基づきまとめる。

#### 3.2.1 積雪現象

積雪現象は雪片が地表や物体の上に堆積したものである。

気温が0℃に近いところでは雪片には湿り気があり、「しめり雪」と呼ばれる。しめり雪ではたくさんの雪結晶が併合して大きな雪片となることがあり、このような雪は「ぼたん雪」と呼ばれる。

気温が0℃より充分低いところでは雪片は乾いており、「かわき雪」と呼ばれ、雪結晶もあまり多く併合しない。このような雪が積雪した場合は「こな雪」と呼ばれる。

しめり雪は物体に付着しやすく、かわき雪は付着しにくい。含水率10%以下のしめり雪では、含水率の増加とともに付着強度も増し、10~15%で最大、20~30%では減少傾向がみられる。かわき雪は焼結現象により物体に付着するが、付着強度はしめり雪に比べて弱く、-10℃以下では付着はほとんど起こらない。

### 3.2.2 代表的な積雪形状

降雪が始まってさほど時間が経過していないときの積雪は、雪の下に埋もれている物体を丸くしたような形をつくるが、時間が経過し降雪量が多くなると次第に雪自体が作り出す形状へと変化していく。このような形状にはさまざまなものがあるが、降雪中に形成される代表的な形状として冠雪がある。これは、樹木、電柱、杭、石塔などの頂部に帽子状に積もった雪のことである。冠雪の断面積は、頂部の何倍にもなることがある。頂部の面積が小さくても、次々に降り積もる雪どうしが結合して、高く広く積み重なっていく。しめり雪では特に大きくなる。なお、冠雪と呼べるほど極端ではなくとも、低木や垣根などの上に積もった雪を観察すると、このような傾向の積雪形状は普通に見られる。

## 3.3 仮想の“気温”を形状制御パラメタとした仮想の“雪粒子”に基づくモデル

降雪により形成される積雪形状について、冬季の積雪景観で最も印象的な次の特徴に注目する。

- (1) 雪に埋もれた物体を丸くしたような形状
- (2) 降雪中に形成される冠雪形状

ここでは、これらの形状を実現するため、雪片の集まりを表す“雪粒子”と呼ぶ仮想の粒子の行動の仮定に基づく単純な行動の規則を持つモデルにより積雪形状を定義する。

“雪粒子”の行動の仮定を次のように定める。

仮定 1：雪粒子は一定の速度で落下する。

仮定 2：雪粒子は風により流される。

仮定 3：雪粒子は物体もしくは積雪表面に接触したとき、落下を停止する。

仮定 4：落下を停止した雪粒子は、積雪の表面を“移動力”に従い移動し、“着雪条件”を満たすと着雪する。

仮定 5：着雪した雪粒子は一定の時間経過（“付着時間”）すると、“付着力”を持つ。

仮定 1, 2 は降雪中の雪粒子の振る舞いを、仮定 3, 4 は着雪について規定している。

また、仮定 5 は着雪後の雪質の変化について規定している。

以下に仮定についての補足説明を示す。

“移動力”について：仮定 4 の移動力は積雪表面上や物体表面上にある雪粒子に加わる力で、重力と風による力の和で表される。これにより雪粒子は積雪や物体表面を移動する。

着雪条件が満たされるとは、次の条件のうち 1 つ以上を満足することをいう。

条件 1：雪粒子に隣接して“付着力”を持つ積雪した雪粒子が存在する。

条件 2：雪粒子が（移動力が閾値以下で）移動できない。

条件 3：雪粒子が距離  $D$ （“移動距離限界”）を越えた。

条件 3 の距離  $D$  は雪片が移動できる距離を表す。実際の雪片では形状が単純なこな雪などではよく移動し、形状が複雑なぼたん雪などではほとんど移動しない。このため  $D$  は雪

片の複雑さに関係しているといえる。実際の雪片の形状は、雪片が生成される雲の気温に関係することが知られている。雲内の気温および水蒸気加飽和度と雪結晶の関係を表した中谷ダイアグラム[9]を図5に示す。これより、雲の中の水蒸気の過飽和度が120%以上の場合、気温が $-10^{\circ}\text{C}$ で針状、 $-15^{\circ}\text{C}$ で六花状の複雑な形状となり、 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下では突起のない単純な六角柱状となることがわかる。

ここで、積雪シミュレーションのためのパラメタとして雲内の仮定の気温  $T_c$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) を導入し、次式のように  $D$  を  $T_c$  の関数として定められると仮定する。

$$D = f(T_c) \quad (3)$$

ここでは、関数  $f$  を積雪形状生成シミュレーションの実験結果から経験的に次式のように定める。

$$f(T_c) = (0.133 Ka)^{\alpha(T_s - T_c)} \quad (4)$$

$T_s$  : 雲内で雪結晶が生成される仮定の最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha$  : 気温と雪結晶の複雑さの関係を表す定数

$Ka$  : 積雪する物体の特徴的長さ(頂部の長さ等)をボクセル数で表した値

“付着力”について：仮定5の“付着力”を持つとは、すでに積雪している雪粒子が、降雪・移動中の雪粒子を付着させることができることをいい、着雪した後、一定時間  $A$  (これを付着時間と呼ぶことにする) が経過すると付着力を持つようになるものとする。  $A$  が小では積雪した雪は短時間で付着力を持つようになるため雪粒子を付着しやすく、  $A$  が大では付着しにくくなる。3.2.1で述べたように実際の降雪では水分を多く含んだ雪片は

物体に容易に付着し、水分が少ない雪片はほとんど付着しない。したがって、 $A$ は雪片の水分量に関係しているとみなせる。さらに、雪片に水分が含まれるとは、雪片を構成する氷が部分的に溶けている状態であり、地表付近の気温が $0^{\circ}\text{C}$ よりわずかに高いことを意味し、反対に水分が少ない場合はあまり溶けておらず、気温は $0^{\circ}\text{C}$ 付近かそれより低いことを意味する。

ここで、積雪シミュレーションのためのパラメタとして地表付近の仮想の気温  $T_g$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) を導入し、次式のように  $A$  を  $T_g$  の関数として定められると仮定する。

$$A = g(T_g) \quad (5)$$

ここでは、関数  $g$  を積雪形状生成シミュレーションの実験結果から経験的に次式のように定める。

$$g(T_g) = Kb^2 \cdot 3^{\beta(T_d - T_g)} \quad (6)$$

$T_d$  : 雪片が地表まで溶けずに落下できる仮想の最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\beta$  : 気温に対する雪の水分量を表す定数

$Kb$  : ボクセル空間の底辺の1辺の長さをボクセル数で表した値

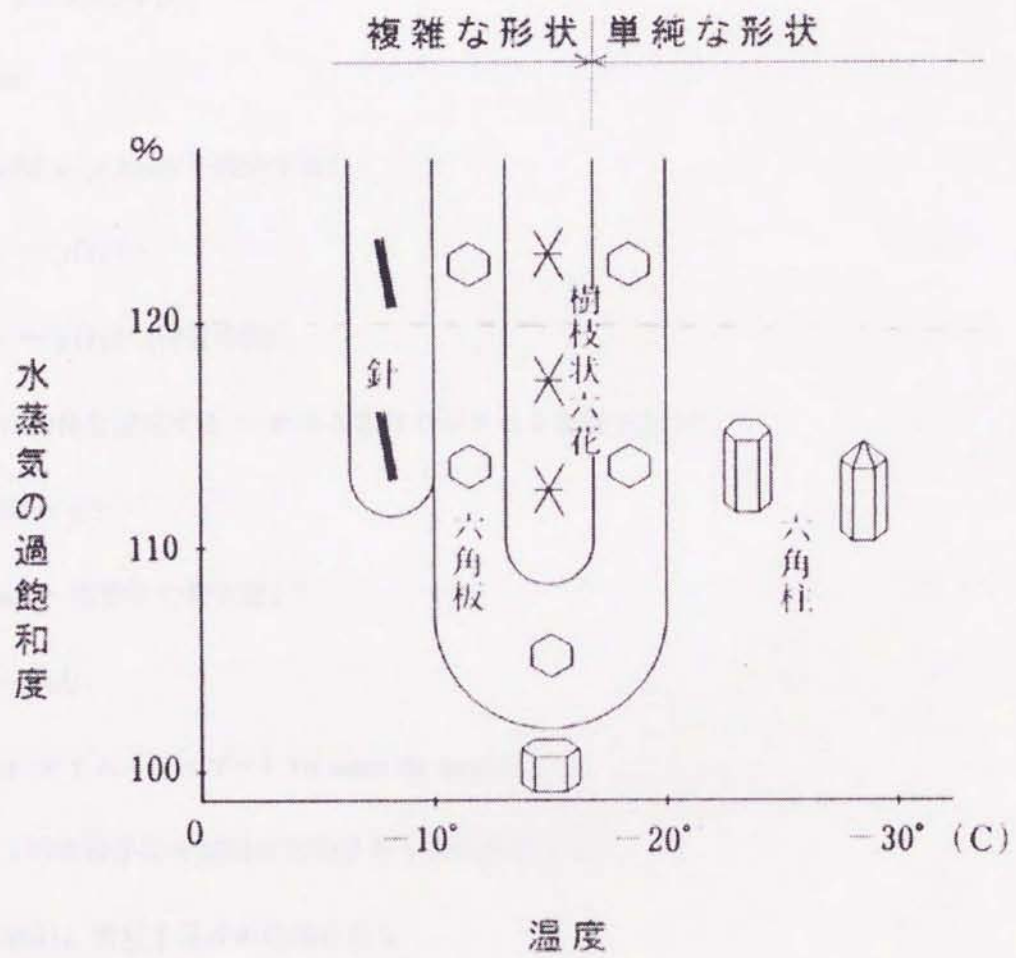


図5 中谷ダイアグラム[9]



### 3. 4 積雪形状生成アルゴリズム

3. 3節に基づく積雪形状生成アルゴリズムを以下に示す.

---

procedure 積雪形状生成;

var 3次元配列  $S$ ;

begin

$T_s, T_d, \alpha, \beta, k_a, k_b$  を設定する;

$D \leftarrow f(T_c)$ ;

$A \leftarrow g(T_g)$  |付着時間|;

$S$  に物体を設定する |いわゆる物体のボクセル表現を行う|;

積雪  $\leftarrow \phi$ ;

$smax \leftarrow$  雪粒子の最大量;

$v \leftarrow$  風力;

for タイムステップ  $\leftarrow 1$  to  $smax$  do begin

$S$  の雪粒子発生領域に雪粒子を 1 つ発生させる;

while 雪粒子は  $S$  の内部にある

and 雪粒子は物体あるいは積雪に接触していない

do begin

重力と  $v$  に従い雪粒子を隣接ボクセルへ移動させる;

```

end;

if 雪粒子は物体あるいは積雪に接触している

then begin

     $L \leftarrow 0$ ;

    while 雪粒子は  $S$  の内部にある

        and 雪粒子は付着力を持つ積雪した雪粒子に接触していない

        and 移動力は閾値より大きい

        and  $L \leq D$ 

    do begin

         $L \leftarrow L+1$ ;

        移動力を計算する;

        物体あるいは積雪表面上を移動力に従い雪粒子を隣接ボクセルへ移動させる;

    end;

if 雪粒子は  $S$  の内部にある

then 積雪  $\leftarrow$  積雪  $\cup$  雪粒子;

end;

for 付着力を持たない雪粒子  $\in$  積雪 do begin

if 付着力を持たない雪粒子の着雪後の経過時間  $> A$  then 雪粒子に付着力を持たせ

る;

end

```

end |タイムステップ|

end |積雪形状生成|

---

以上の積雪形状生成アルゴリズムについての補足とインプリメント上の注意を次に示す。

**雪粒子発生領域について：**3次元配列の上面と、風が吹いている場合にはさらに風上側の側面を発生領域としている。発生領域からボクセルをランダムに1つ選び、そのボクセルから雪粒子を発生させ降雪させている。

**雪粒子の接触の検出について：**本インプリメントでは雪粒子をボクセルで表現している。雪粒子のボクセルの26近傍のボクセルを調べ、1つ以上のボクセルが物体か積雪であれば接触したものと判定している。

**移動力について：**移動力は風力と重力によって物体あるいは積雪表面を移動するための力であるが、重力に相当する力は *Sobel* の微分オペレータによって表面の傾きを検出することにより求めている。ただし、先の尖った形状の先端の部分に雪粒子が落ちた場合は傾きを検出できないため、そこに不自然に雪粒子が重なってしまう場合がある。このため、雪粒子が先端にあり、移動距離限界に達していない場合は乱数により方向を定め、強制的に移動させている。

**付着力について：**積雪した雪粒子が付着力を持つかどうかの判定は、雪粒子に経過時間を示す連続番号を付加し、降雪中の雪粒子と積雪している雪粒子の番号の差が付着時間以上であるかどうかを調べることによって行っている。

### 3. 5 積雪シミュレーション結果

仮定の気温のパラメタを変化させシミュレーションした例を図6に示す。シミュレーションに使用した  $S$  のサイズは  $100 \times 100 \times 100$  であり,  $T_s = -5$ ,  $T_d = 5$ ,  $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = 0.2$ ,  $Ka = 30$ ,  $Kb = 100$  である。地表気温  $5^\circ\text{C}$  では雲内気温に関わらず, また, 地表気温  $0^\circ\text{C}$  では雲内気温が  $-15^\circ\text{C}$  以上で冠雪状の形状が得られている。地表気温, 雲内気温とも低下すると冠雪状とはならず, こな雪状の粘りけのない雪が積もった形状が得られることが確認できる。

図7に灯籠に積雪する過程をシミュレーションした動画像の一部を示す。



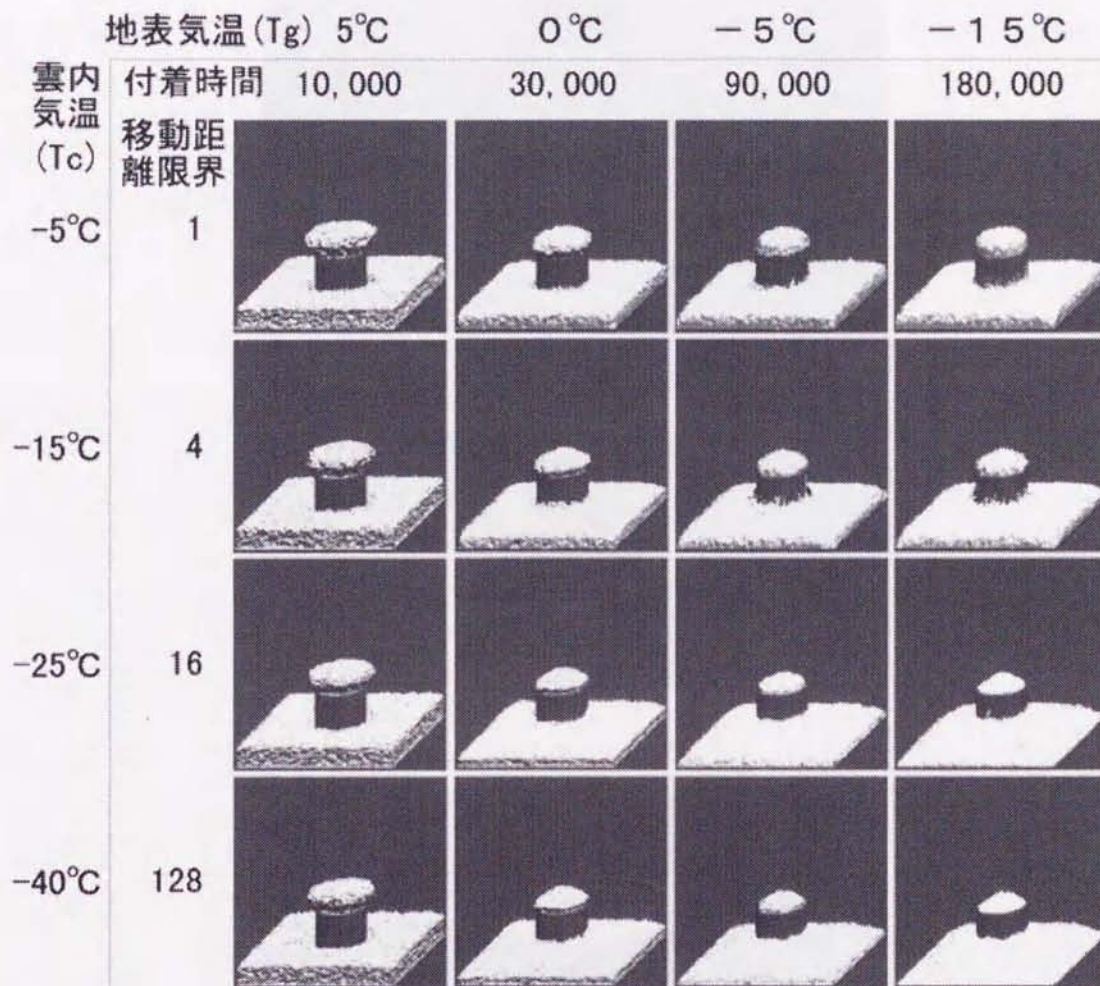


図6 積雪シミュレーション結果



図7 灯笼の積雪動画像の一部

### 3. 6 むすび

本章では、自然の積雪現象についてまとめ、文献[4]の降雪直後の積雪形状を生成する仮想の雪粒子による手法に、仮想の気温（雲の気温と地表面の気温）による形状制御パラメタを導入し、より形状制御しやすい改良型の積雪形状生成法を示した。また、積雪シミュレーション結果の画像生成例により、雪の特徴的な形状（冠雪状やこな雪により形成される形状）と仮想の気温パラメタとの関係を明確にした。

## 第4章

### 融雪シミュレーション法

#### 4.1 まえがき

本章では、融雪のビジュアルシミュレーションのためのモデル構築の基礎となる融雪現象について、文献[10][11][12]よりまとめ、次にシミュレーションの要素を明確にし、それらに基づく融雪のシミュレーション法[6]を示す。さらに、融雪のシミュレーション結果の画像生成例により、その効果を示す。

#### 4.2 融雪現象

積雪は、雪結晶あるいは雪結晶がいくつか合わさった雪片が地表や物体に堆積したものである。積雪は固体の氷と空気の混合物であり、融雪は積雪の温度が0℃以上になり氷が融解し水となる現象である。

積雪内部の温度は次式で表される熱収支を考慮することで得られる。

$$\text{熱I} \text{ 補} \text{ の入力} - \text{熱I} \text{ 補} \text{ の出力} = \text{熱I} \text{ 補} \text{ 貯留} \quad (7)$$

積雪に対する熱エネルギーの入出力は図8のように考えることができる。図中の矢印の方向は積雪に対する入力と出力を表している。



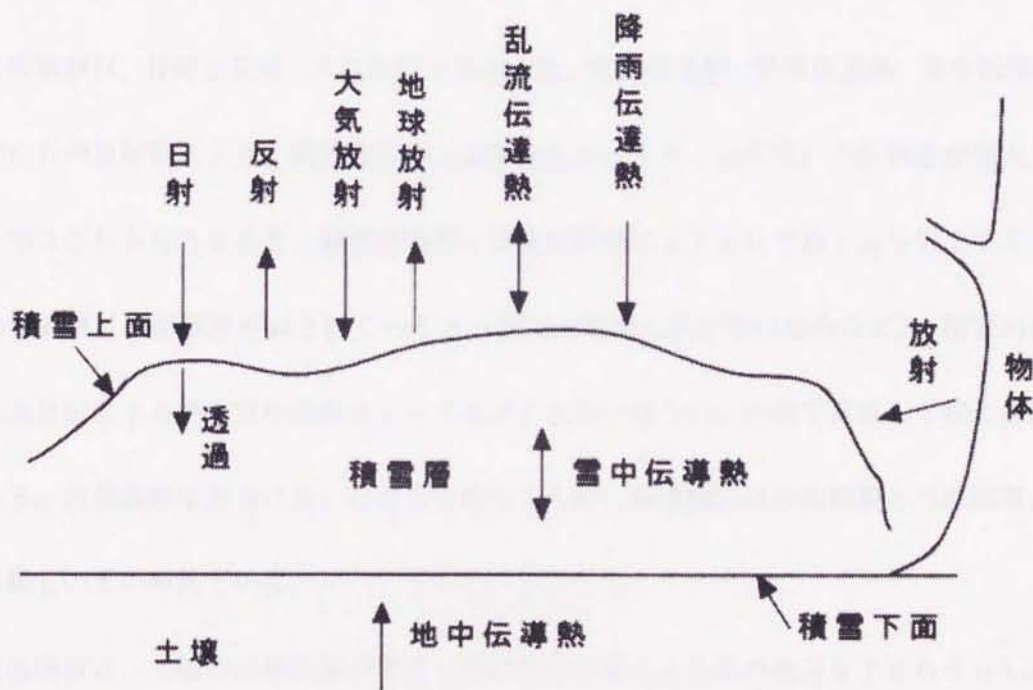


図8 積雪の熱収支

積雪は、その上面が接する大気、下面が接する土壌とでそれぞれ熱交換を行っている。

大気-積雪上面間では、日射、雪面からの反射、大気放射、雪面からの地球放射、乱流による熱の伝達、雨による熱の伝達、物体からの放射熱などがある。

積雪内部では、透過日射や雪中伝導熱、土壌-積雪下面間では、地中伝導熱がある。

融雪現象には、積雪上面から融解する表面融解、内部から融解する内部融解、積雪底面から融解する底面融解とがある。

表面融解は、日射と反射、大気放射と地球放射、乱流伝達熱、降雨伝達熱、雪中伝導熱、物体からの放射熱により、積雪表面層（表面から5~15cm程度）の貯熱量が増大して引き起こされるものであり、融雪最盛期には表面融解により1日で数cmも低下する。

内部融解は表面融解がおきにくいとき（空気が乾燥し風が強い場合など）、積雪内部への透過日射による熱を雪中伝導によって運びきれない場合に、内部で昇温して起こる融解である。内部融解は表面に近いところで起こるため、融雪期には表面融解と内部融解の区別は難しいといわれている。

底面融解は、土壌の伝導熱量が積雪下面の雪中伝導による熱の輸送を上まわり0℃以上になったときに起こる。積雪は熱を伝えにくい物質のため、外気温が低い厳冬期でも積雪量が増加すると、積雪底面付近での伝導熱量は小さくなり底面融解は進行する。冬季の気温が-30℃以下になる積雪地方でも0.3~0.5mm/日の底面融解があり、冬季の気温があまり低くない地方の暖冬年では1.25mm/日の融雪量となる場合もある。なお、融雪期では融雪水の浸透により地中熱量の供給が減少し、底面融解は少なくなる。

### 4. 3 融雪シミュレーションのための要素

4. 2 節から、厳冬期には底面融解、融雪期には表面融解と内部融解が融雪の主な原因であることがわかる。表面融解と内部融解はそれぞれ積雪表面層の上部と下部で発生するものであり、特殊な条件がそろわない限り表面融解の方が融雪量は多い。また融雪期では両者は区別がつかないことが多いため、融雪のシミュレーションモデルでは、表面融解と底面融解の2つを考慮し、次の5つの要因をモデル化する。

(1)日射, (2)反射, (3)物体からの放射,

(4)雪中伝導熱, (5)地中伝導熱

なお、大気、地球放射は積雪全体にはほぼ一様に作用すると考えられ、形状変形への貢献は小さいと思われるため除外した。また、降雨のない降雪期を仮定して降雨熱伝達を除外し、無風状態を仮定して乱流伝達熱も除外した。ただし、無風状態であっても積雪表面とそれに接する空気との間の熱の交換は存在するため、これは考慮する。

### 4. 4 インプリメントのための簡略化

融雪シミュレーションのアルゴリズムは、4. 3 節の融雪の要因に基づくが、インプリメントの容易のため、次の簡略化を行う。

(1)日射や物体からの放射熱の影響は、積雪の表面を構成する雪のみが受けるものとする。

(2)積雪の密度は変化しない。

(3)融雪で生じる水は積雪から失われる。

本モデルでは内部融解は考慮しないため、(1)は妥当な簡略化であろう。(2)では、積雪

深が実際よりやや高くなるが、縮小変換などの後処理で対応可能である。(3)では、融雪水の作用による形状変形、例えば、つららを伴う融雪や、積雪下面に水が溜まり氷に変質するような融雪は表現できないが、徐々に融雪が進行し、発生する水量が少ない融雪では、この簡略化でも十分表現可能であると思われる。

#### 4. 5 積雪形状定義のための融雪シミュレーション法

本手法は、第3章章の手法により生成された積雪形状を表すボリュームデータを初期形状とし、これに対して、天空や地面、物体からの放射熱と、積雪中の熱の伝搬をシミュレーションして、 $0^{\circ}\text{C}$ 以上になった雪を除去することで融雪形状を生成するというものである。

まず、融雪シミュレーションを行う空間を包含するボクセル領域  $V$  を用意する。ここでは、ボクセルの集まりからなる直方体の領域をボクセル領域と呼ぶことにする。各ボクセルには、雪、物体、地面、空気を区別する属性と、温度と熱量を保存することができる。また、ボクセルの形状はここでは立方体とみなしている。

このボクセル領域  $V$  は天球面によって覆われているものとする。天球面は、天空からの直達日射、散乱日射を計算するためのもので、このための仮想の“温度”を記憶する。この温度はユーザによって自由に設定することができる。

次に、ポリゴンで表現された積雪のまわりの物体、すなわち地面や建築物、その他の物体をボクセル表現に変換し、ボクセル領域  $V$  に書き込む。

初期積雪形状のボリュームデータは、ボクセル領域  $V$  と同じサイズの3次元配列によっ

て表現され、配列の各要素には雪の存在、非存在が書き込まれている。雪が存在する要素と同じインデックスを持つボクセル領域Vのボクセルの属性を雪にすることで、初期積雪形状を設定する。

ボクセルには、その属性に応じた初期温度を設定する。

以上の設定の後、融雪のシミュレーションを開始する。

まず、天球面に、散乱日射に相当する温度を書き込み、太陽が存在する位置に直達日射に相当する温度を書き込む。なお、これは時間の経過とともに天球面上を移動するようにしている。

次に、積雪表面を表すボクセルすべてについて、天球面Sや近くの物体からの放射によって受ける熱量と、空気へ逃げる熱量を求め、これらから、そのボクセルが受ける熱量を決定する。

その後、雪のボクセルすべてについて、そのボクセルの6近傍（面で接している6個のボクセル）の雪のボクセルとの間で熱量の交換を行う。

熱量の交換の後、各ボクセルの温度を求め、 $0^{\circ}\text{C}$ 以上になっているボクセルの属性を雪から空気に変更する。この変更の操作で、雪の固まり（雪のボクセルが6近傍で連結しているものを1つの固まりと考えることにする）が空中に浮いてしまう場合は、それを落下させる。

以上の操作を太陽の位置を変えながら繰り返し、融雪形状を雪の属性を持つボクセルの集まり（ボリュームデータ表現）として求める。

なお、天球面や物体からの放射が積雪面に達するかどうかは、ボクセルから天球面や物

体へ向かってレイを飛ばすことにより調べている。

以下に融雪のアルゴリズムを示す。

ステップ0：融雪シミュレーションを行う空間を包含するボクセル領域  $V$  を用意し、直達日射、散乱日射を表す天球面  $S$  を用意する。

ステップ1：ボクセル表現された地表、物体（建築物、樹木など）、を  $V$  に読み込み、積雪形状を  $V$  に読み込む。各ボクセルにはボクセルの属性に応じた温度を書き込む。

ステップ2：時刻を  $t$  とし、時間幅  $\Delta t$  で最大シミュレーション時間に達するまでステップ2-1から2-6を繰り返す。

ステップ2-1：天球面  $S$  に、時刻  $t$  における散乱日射の温度を設定し、太陽が位置する場所に直達日射の温度を設定する。

ステップ2-2： $V$  の積雪表面のボクセル  $v$  すべてについて、以下のステップ2-2-1～2-2-4を繰り返す。

ステップ2-2-1：ボクセル  $v$  から太陽の方向へレイを飛ばして直達日射の温度を取得し、天球面  $S$  に向かって  $n$  本のレイをランダムに飛ばし、 $S$  との交点を求め、次式で天球面からの温度  $T_s$  を求める（図3参照）。

$$T_s = (1/(n+1))B \left( T_s \cos \theta + \sum_{i=1}^n T_i \cos \theta_i \right) \quad (8)$$

$T_s$  ：直達日射の温度

$T_i$  ：レイ  $i$  が交差した天球面の温度

$B$  : ボクセルの露出度に関する係数(1~5)

$\theta_s$  : 太陽へのレイと積雪表面の法線との成す角

$\theta_i$  : レイ  $i$  と積雪表面の法線との成す角

ステップ 2-2-2 : ボクセル  $v$  から空いている空間へ向かってランダムに  $m$  本のレ

イを飛ばし物体(地表を含む)との交点を求め、次式で物体から

の温度  $T_b$  を求める.

$$T_b = (1/m)B \sum_{i=1}^m \{c/(c+l_i^2)\} U_i \cos \theta_i \quad (9)$$

$U_i$  : レイ  $i$  が交差した物体の温度

$l_i$  : ボクセル  $v$  からレイ  $i$  が交差した物体までの距離

$c$  : 距離定数

ステップ 2-2-3 天球面や物体からボクセル  $v$  が受ける熱量  $Q_a$  を次式で求める.

$$Q_a = \nu (T_s - T(t - \Delta t)) + \xi (T_b - T(t - \Delta t)) \Delta t \quad (10)$$

$\nu$  : 日射に対する熱放射係数

$\xi$  : 放射熱に対する熱放射係数

$T(t)$  : 時刻  $t$  のボクセル  $v$  の温度

ステップ 2-2-4 : ボクセル  $v$  に接する空気との熱伝導の熱量  $Q_c$  を次式で求める.

$$Q_c = \sum_k h(A/d) (T(t - \Delta t) - T_k) \Delta t \quad (11)$$

$k$  : ボクセル  $v$  に 6 近傍で接する空気のボクセルのインデックス

$A$  : ボクセルの断面積

$h$  : 空気の熱伝導率

$d$  : ボクセル間の距離

$T_i$  : 空気の温度

ステップ2-3: 積雪を表す全てのボクセル  $v$  について, 次式で熱伝導の熱量  $Q_c$  を求める.

$$Q_c = \sum_k \lambda (A/d) (T_k(t-\Delta t) - T(t-\Delta t)) \Delta t \quad (12)$$

$k$ : ボクセル  $v$  の6近傍のボクセルのインデックス

$T_k(t)$ : 時刻  $t$  のボクセル  $v$  に接するボクセル  $k$  の温度

$\lambda$ : ボクセル間の熱伝導率

$$= (\lambda_v + \lambda_k) / 2$$

$\lambda_v$ : ボクセル  $v$  の熱伝導率

$\lambda_k$ : ボクセル  $k$  の熱伝導率

ステップ2-4: 積雪を表すボクセル  $v$  について次式で各ボクセルの温度  $T(t)$  を求める

(図10参照).

$$T(t) = T(t-\Delta t) + (Q_a + Q_c - Q_e) / (Cm) \quad (13)$$

$C$ : ボクセル  $v$  の比熱

$m$ : ボクセル  $v$  の質量

ステップ2-5: 氷の融解温度 ( $0^\circ\text{C}$ ) 以上になっている積雪を表すボクセルの属性を空



気に変更する。

ステップ2-6：ステップ2-5によって発生する，空中に浮かぶ雪のボクセルの固まり

(6近傍で連結している雪のボクセルの集合；グループと呼ぶことにする)を，ステップ2-6-1～2-6-3を繰り返して解消する(図11参照)。

ステップ2-6-1：グループごとにラベル付けする。

ステップ2-6-2：ラベル付けられたグループすべてについて，それぞれのグループが落下できる最大距離(落下距離)を求める。

ステップ2-6-3：すべてのグループの落下距離が0ならば繰り返しを終える。そうでなければステップ2-6-2で求めた各グループの落下距離に応じてそれぞれ落下させる。

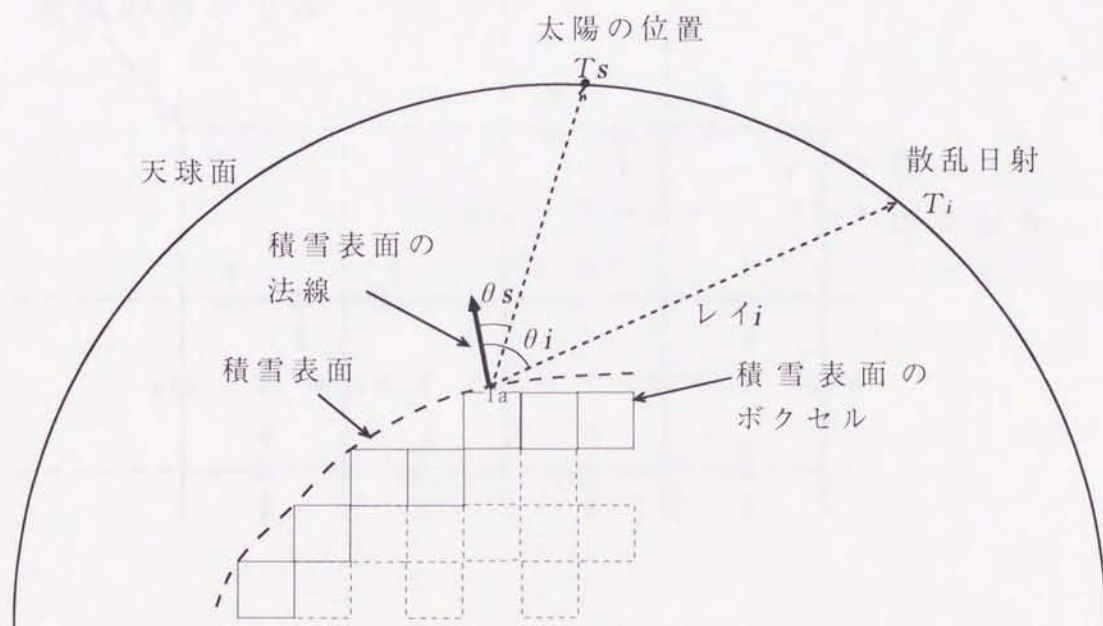


図9  $T_a$ の計算

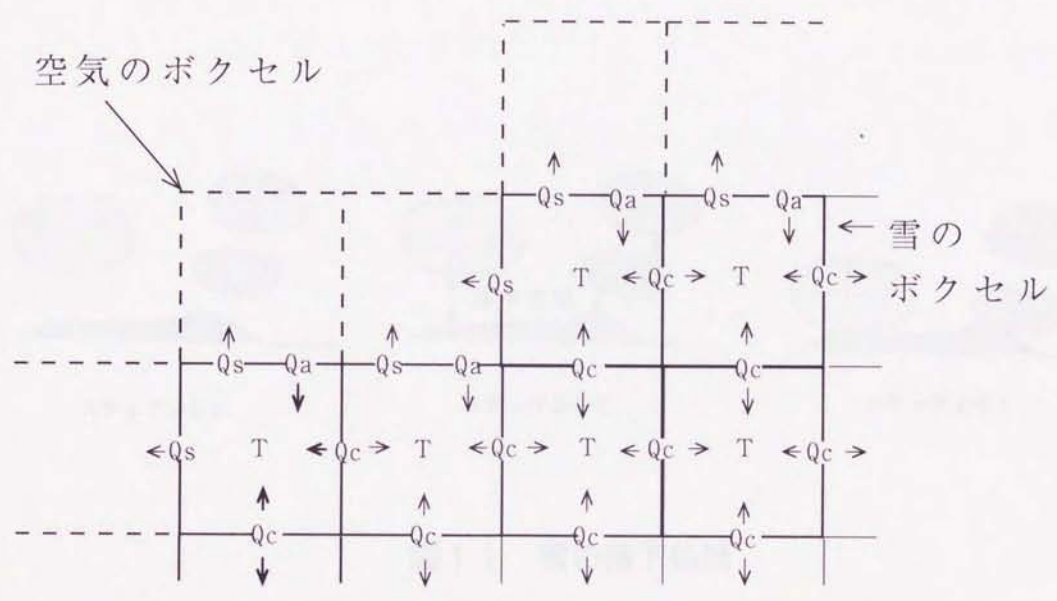


図10  $T(t)$ の計算



#### 4. 6 融雪シミュレーションの実行結果

図12に日射による融雪のシミュレーション結果を示す。シミュレーションの進行に伴い日射量の多い灯笼の屋根の部分から先に融け、影の部分に積雪が残ることが確認できる。

図13に放射熱による融雪のシミュレーション結果を示す。熱源である円柱の周りから雪が融けていることが確認できる。実際の積雪でも樹木の周りから先に融けていくことが知られており、これは「根びらき」と呼ばれている。なお、シミュレーションは図12では0から80までの81回、図13では0から40まで41回実行した。これらのパラメータを表1に示す。



1



35



50

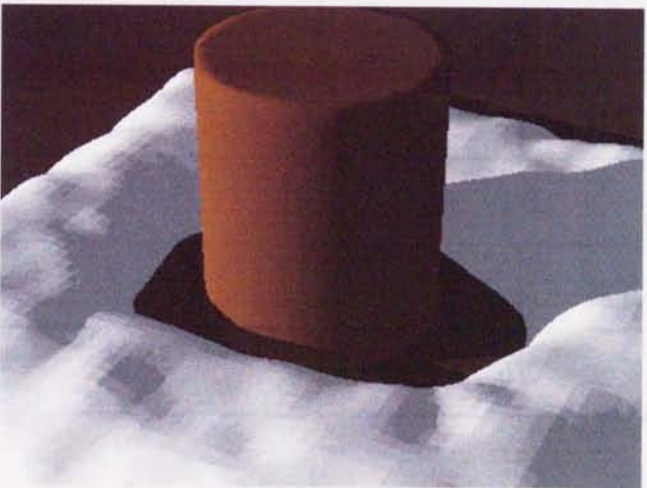
図12 日射による融雪のシミュレーション結果



1



20



40

図13 放射熱による融雪のシミュレーション結果

表1 融雪シミュレーションパラメタ

シミュレーション パラメタ	日射 (図12)	放射 (図13)
積雪ボリュームデータサイズ	128×128×128	64×64×64
シミュレーション開始時刻	午前9時	
シミュレーションのΔt	6分	10分
散乱日射の探索レイ	5本	
熱放射の探索レイ	5本	10本
積雪の初期温度	-20℃	-20℃
散乱日射の温度	1℃	
直達日射の温度	18℃	10℃
地面の温度	1℃	
物体の温度	2℃	50℃
空気の温度	0℃	



## 4. 7 むすび

本章では、融雪のビジュアルシミュレーションのためのモデル構築の基礎となる融雪現象について、雪に関する文献よりまとめシミュレーションの要素を明確にした。それに基づき日射や放射熱、地熱の影響を考慮した積雪内部の熱伝搬シミュレーションによる融雪積雪形状を生成する手法を示し、融雪のシミュレーション結果の画像生成例により、日射や放射熱による融雪の効果を示した。