

2004年度 卒業論文

リアルタイム3DCGコンテンツにおける
雪の付着表現に関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 3DCG コンポーネントプロジェクト

学籍番号 M0101031

伊勢 健太郎

2004年度 卒業論文概要

論文題目

リアルタイム3DCGコンテンツにおける
雪の付着表現に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0101031

氏名

伊勢 健太郎

指導
教員

渡辺 大地 講師

キーワード

表面張力, 焼結作用, バウンディングボックス
パーティクル, テクスチャ, 画像処理

ハードウェア能力の向上と共に、3DCG(3次元コンピュータグラフィック)で表現できる能力も向上し、今ではリアルタイム3DCGにおいても、自然現象などの複雑な計算を要する表現も可能になってきている。その自然現象の表現の中でも、雪の表現というのは冬の季節感や寒さを表す表現として重要な表現である。本研究では、リアルタイム3DCGコンテンツにおいて、雪粒子一つ一つをキャラクターに綺麗に付着させていく雪の付着表現手法を提案し、雪が降るような場面での臨場感の向上を図る。

本研究の手法として、まず雪の付着の起こり方をモデル化し、それに基づき付着が起こるかどうかを判定した。そして付着が起こったと判断された雪は、テクスチャにて表現した。付着地点を特定、2次元画像処理にてテクスチャ画像を生成し、雪を表現することにより、高速な動作を実現した。また、付着する対象となる物体の素材を考慮することにより汎用性のある付着表現手法を実現した。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	雪について	3
2.1	降雪時の雪	3
2.2	物体への雪の付着	4
2.2.1	物体表面にひっかかることによる付着	5
2.2.2	表面張力による付着	5
2.2.3	焼結作用による付着	6
2.3	付着後の雪	8
第3章	モデル化	9
3.1	降雪時の雪のモデル化	9
3.2	物体に対する雪の付着のモデル化	9
3.2.1	物体と雪の接触	10
3.2.2	雪の付着	13
3.3	付着後の雪の表現	14
3.3.1	付着した雪のテクスチャ変換	14
3.3.2	物体モデルへのテクスチャ貼り付け	16
第4章	動作検証	19
4.1	実装	19
4.1.1	気温	19
4.1.2	表面張力での付着と焼結作用での付着の境界	19
4.1.3	含水率の決定	20
4.1.4	雪の付着確率の決定	20
4.1.5	焼結作用での雪の付着確率の決定	20
4.1.6	ひっかかりによる雪の付着確率の決定	20
4.1.7	雪がにじむ条件の決定	21
4.1.8	にじみ係数の決定	21
4.1.9	雪粒子	21
4.1.10	空間	21
4.1.11	物体モデル	21

4.2	実行	24
4.2.1	雪の付着の様子	25
4.2.2	温度による雪の付着の差	27
4.3	考察	28
第5章	まとめ	29
	謝辞	30
	参考文献	31

第 1 章

はじめに

ハードウェア能力の向上と共に、3次元コンピュータグラフィック (3DCG) で表現できる能力も向上し、今ではリアルタイム 3DCG においても自然現象などの複雑な計算を要する表現も可能になってきている。その中でも、雪の表現は冬の季節感や寒さを表す表現として重要な表現である。

今までのリアルタイム 3DCG における雪の表現に関する研究は、大場 [1] や森木 [2]、Hakan Haglund ら [3] の積雪表現に関する研究、北海道大学 高井研究室 [4] の都市空間での積雪や雪崩表現に関する研究、安藤 [5] の降雪表現に関する研究など、積雪や雪崩、降雪に関する研究は存在していた。しかし、降り落ちてくる雪一つ一つが物体に対して付着していくような、雪の付着表現手法は今まで着目されていなかった。もし、短時間で雪が付着していく様子を表現する手法があれば、雪が降る場面における臨場感の向上が期待できる。

本研究の主な目的は、高速でリアルな雪の付着表現手法を提案し、リアルタイム 3DCG コンテンツでの雪が降る場面での臨場感を向上することである。その際、実際に付着対象となる物体は布質のものから金属質のもの、その他様々な物体があることを考慮し、様々な付着対象モデルに対して汎用性のある付着表現手法を提案する。

本研究の手法は、付着後の雪の表現にはテクスチャーを用いる。付着する対象となる物体に雪が付着した地点を特定、その位置情報を基にテクスチャを描き換

えて雪の付着表現を行う。付着の判定には、物体の素材などを考慮し、汎用性のある付着表現が可能となった。

本論文の構成は以下の通りである。第2章ではまず雪とはどういうものなのかを述べる。第3章では第2章で示した雪の性質などを踏まえ、どのように雪をモデル化するかを述べる。第4章では実際にプログラムをどのように実装しているかを述べ、それを実行した結果とその考察について述べる。第5章では本研究のまとめを示す。

第 2 章

雪について

本研究では、実際の雪の性質を用いてモデル化を行う。本章では実際の雪についての説明を述べる。

2.1 降雪時の雪

雪はその周囲の環境により性質が変化する。主に温度に依存し、 0 付近の場合と、 0 を大きく下回る場合でその性質を大きく二つに分けることができる [6][7]。

周囲の気温が 0 付近の場合は、水の融点である 0 に近いため、雪は固体状態と液体状態の混ざり合った不安定な状態、つまり水分を含む割合の大きい湿った雪になる。このときの雪をしめり雪という。降雪時に他の雪粒子と衝突した場合はその雪粒子と合体する性質を持ち、地上にたどり着くまでの間に数個の雪粒子と合体し、一つの大きな雪片となる。このときの雪はぼたん雪と呼ばれ、しめり雪の中の代表的な雪の一つである。複数個絡まりあった雪片を示した写真が図 2.1 である [8]。

周囲の気温が 0 を大きく下回る場合は、水の融点を大きく下回るため、雪は完全に凍りきった状態、つまり乾いた状態の雪となる。この雪はかわき雪と呼ばれる。代表的なかわき雪としては粉雪があり、他の雪粒子と併合せずに、一つ一つの雪粒子がそれぞれ単体で降り落ちてくる。

雪は結晶の形で降り落ちてくる。雪の結晶は、降り落ちてくる以前に雲の中で



図 2.1: 雪粒子が複数個絡まりあったもの

生成され、様々な形状の雪に成長する。どの形状へと成長するかは、成長する時点での周囲の気温と水蒸気量に関する [9]。様々な形状の雪の結晶を示した写真を図 2.2 に示す [10]。基本的な雪の形状は、正六角形を基本形とした構造である。このような形状となる理由は、雪を構成する水分子の構造配列が正六角形の配列で構成されているために、その配列が反映され、最終的に六角形の形状の結晶になると考えられているが、詳しいことはまだ判明していない [11]。

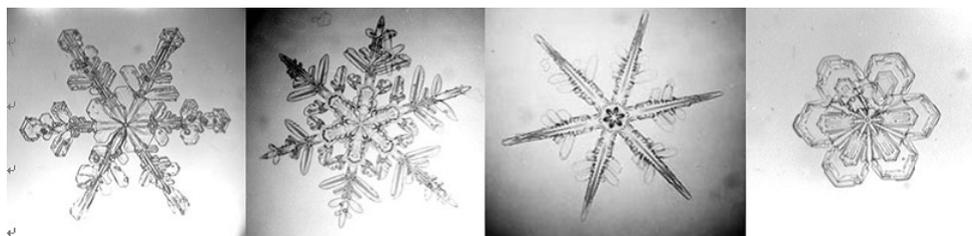


図 2.2: 様々な形の雪の結晶

2.2 物体への雪の付着

降り落ちてきた雪は、地面に落ちる前に接触した物体に対して付着することがある。この付着という現象は 3 種類に分類でき、物体にひっかかることによる付着、雪が含んでいる水分の表面張力による付着、焼結作用による付着がある

[6][7][11][12][13][14]。実際の雪の付着では、これら単独の原因での付着でなく、ひっかかってから焼結作用が働き、物体に対して堅く付着する、というように複数の付着が併合することもある。

本節では、3種類の付着をそれぞれ分けて説明する。

2.2.1 物体表面にひっかかることによる付着

物体の表面にひっかかることによって付着する場合がある [14]。第 2.1 節で述べたように雪は結晶の形で降雪してくる。単体での雪の結晶、もしくは複数個絡まりあった雪片、どちらの場合にしても、細かい凹凸が多く存在する。そのため毛羽立ったような細かい凹凸のある素材に対して、お互いの突起が絡まりあうため、非常にひっかかりやすい。細かい凹凸のある素材に雪が絡まる様子を図示したものを図 2.3 に示す。それら細かい凹凸にひっかかることにより、雪は物体に付着する。

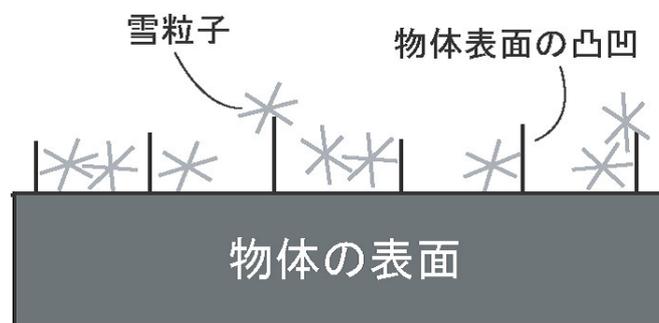


図 2.3: 物体の表面の細かい突起にひっかかる雪

2.2.2 表面張力による付着

雪が内包する水分によって表面張力が働き付着する場合がある [6][7][12]。第 2.1 節にて述べたように、降雪時の周囲の温度が 0 付近の温度であると湿った状態の雪になる。雪が物体に接触したとき、この湿った状態の雪であるか、もしくは接

触した物体の温度が高いとき、雪が内部に内包する水分が物体への接触時に周りに溶け出す。この水分の表面張力によって雪は物体に付着する。それを図示したものが図 2.4 である。付着のしやすさは雪粒子内部に所有する水分量に依存する。一つの雪粒子に対して内包する水分量を表したものを含水率という。表面張力による付着は、含水率の一定量までの増加に対しては付着しやすくなる。含水率が 10 ~ 15 % のときに付着一番付着しやすくなる。それを越えてしまうと逆に付着しにくくなる。

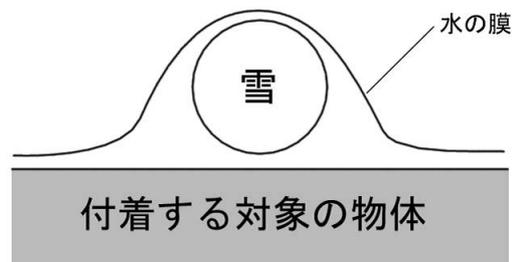


図 2.4: 表面張力で付着する雪

2.2.3 焼結作用による付着

焼結作用と呼ばれる分子間力の作用によって付着するがある [6][7][11][12][13]。第 2.1 節にて述べたように、 0 を大きく下回る場合、雪は乾いた状態の雪となる。この乾いた状態では、雪内部には水分は存在しないため、水分の表面張力による付着は起こらない。しかしこの場合焼結作用と呼ばれる分子間力が働き、物体への付着が起こることがある。 0 以下でも氷(雪)の表面には、疑似液体層と呼ばれる非常に薄い液体状の膜が存在する。この層は、固体である氷分子の配列に収まらなかった余分な分子部分が、氷の表面で流動的な状態になった液体状の層である。この液体状の層が他の雪や物体との接触時にその接触点の隙間に侵入し、そ

の間で再凝結することにより付着が起こる。それを示したものが図 2.5 である。純粋な水でできた氷の場合であれば、周囲の温度が -6 以上で出現し、融点に近づくほどその層は厚くなり、付着しやすくなる。不純物を含む水でできた氷の場合はこの液体の層の出現する温度はより低温でも出現するようになる。実際の自然界では、純粋な水はほとんど存在せず、雪は不純物を含んだ氷である。そのため -6 未満の場合でも、雪の焼結作用は起こる。表面張力による付着に比べると焼結作用による付着は起こりにくく、付着する雪の量が少なくなる。焼結作用で付着した雪を示した写真が図 2.6 である [15]。

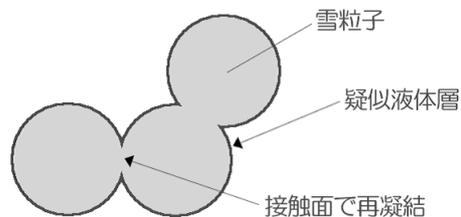


図 2.5: 焼結作用を示した図



図 2.6: 焼結作用で窓に付着する雪

2.3 付着後の雪

付着後の雪は、降雪時に雪は周囲の温度状況や付着した物体の温度により、その見た目が変わる [6][11]。付着した物体の温度が高い場合、もしくは降雪時の温度が0 付近で雪が湿っている状態のときは、雪付着地点の周辺に溶け出す。そのため、付着が連続すると、溶けてにじんだような見た目になる。実際に湿った雪が連続して付着したものを示したものが図 2.7である。降雪時の温度が0 を大きく下回り、かつ付着した物体の温度が十分に冷えている場合は、雪の融解が起きず、降り落ちてきた雪そのままの形で物体に付着する。



図 2.7: 湿った雪が連続して付着したもの

第 3 章

モデル化

第 2 章で示した雪の性質を考慮してモデル化を行う。

3.1 降雪時の雪のモデル化

本研究では、降雪時の雪をパーティクルで表現し、降り落ちてくる雪粒子一つ一つの動きを視覚化する。降り落ちてくるパーティクルの動きに揺らぎを与えることにより、ゆらゆらと落ちてくるより自然な降雪の動きを表現した。また、パーティクル全体に一方向に流れる動きを与えることにより、全体的な風が雪の動きに影響を与える様子を表現した。

3.2 物体に対する雪の付着のモデル化

本研究での付着の流れは次の通りである。雪粒子であるパーティクルが付着の対象となるモデルに対して接触判定を行う。次に、接触したと判定した雪について付着するかどうかを判定する。最後に、この時点で雪が付着したと判定したならばテクスチャ画像を描き換える。もし付着しなかったと判定したならば、接触判定でパーティクルを反射し、物体にくっつかないようにする。

3.2.1 物体と雪の接触

本研究では、雪が付着する対象となる物体モデルと雪との接触判定にバウンディングボックスを使用する。バウンディングボックスとは、物体モデルをすっぽりと包み込むことができる最小の直方体の空間のことである。この空間内に何か他の物体が入ったときに、接触したと判定する。物体モデルとバウンディングボックスの例を図 3.1 に示す。図中の青線がバウンディングボックスを示す。本来のバウンディングボックスを用いた接触判定は、接触の有無のみを判断するが、本研究では雪が物体のどの位置に付着するかを検出するためにバウンディングボックスのどの位置に接触したのかを検出する。

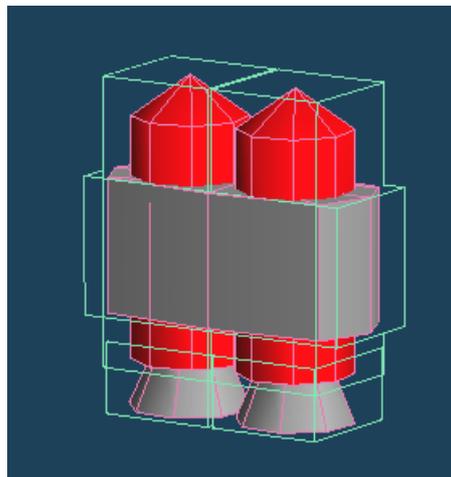


図 3.1: 物体モデルとバウンディングボックス

接触位置の検出方法を解説する。バウンディングボックスは自身のローカル座標系の xy 平面, yz 平面, zx 平面にそれぞれ平行な面を持ち、原点はバウンディングボックスの中心に位置するものと定義する。

まず、どの面に接触したかを検出する。雪粒子であるパーティクルが、バウンディングボックス内に入った時点の座標を P 、その時点でのパーティクルの速度を v とし、パーティクルは時間 Δt 毎に移動するものとする。バウンディングボックスに入る直前のパーティクルの座標を Q とすると、 Q は式 (3.1) で求めること

ができる。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P} - \mathbf{v}\Delta t \quad (3.1)$$

こうして得た \mathbf{P} と \mathbf{Q} の座標をバウンディングボックスのローカル座標に対応付ける。ローカル座標系における \mathbf{P}, \mathbf{Q} を \mathbf{P}', \mathbf{Q}' とする。このとき \mathbf{P}', \mathbf{Q}' に挟まれた面がバウンディングボックスを構成する面の中に存在する。その面を雪が接触した面と判定する。

次に、その面のどの位置に接触したかを検出する。 \mathbf{P}' と \mathbf{Q}' を結ぶ直線と接触した平面との交点を \mathbf{R} とすると、 \mathbf{R} は媒介変数 s を用いることにより式 (3.2) によって算出することができる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}' - s(\mathbf{P}' - \mathbf{Q}') \quad (3.2)$$

s は次に述べる手順で求める。接触した面の法線ベクトルを \mathbf{N} とし、 $\mathbf{P}', \mathbf{Q}', \mathbf{R}$ それぞれと \mathbf{N} の内積を D_1, D_2, D とする。 D_1, D_2, D はそれぞれ、式 (3.3), (3.4), (3.5) のようになる。

$$D_1 = \mathbf{P}' \cdot \mathbf{N} \quad (3.3)$$

$$D_2 = \mathbf{Q}' \cdot \mathbf{N} \quad (3.4)$$

$$D = \mathbf{R} \cdot \mathbf{N} \quad (3.5)$$

ここで、式 (3.5) に式 (3.2) を代入すると式 (3.6) のようになる。

$$D = \mathbf{P}' \cdot \mathbf{N} + s(\mathbf{Q}' - \mathbf{P}') \cdot \mathbf{N} \quad (3.6)$$

この式を展開したものが式 (3.7) である。

$$D = \mathbf{P}' \cdot \mathbf{N} - s(\mathbf{Q}' \cdot \mathbf{N} - \mathbf{P}' \cdot \mathbf{N}) \quad (3.7)$$

すると、ここで式 (3.3), (3.4) を式 (3.7) に代入すると式 (3.8) を得る。

$$D = D_1 + s(D_2 - D_1) \quad (3.8)$$

この式を変形すると s を求めることができる。式 (3.8) を変形したものが式 (3.9) である。

$$s = \frac{D - D_1}{D_2 - D_1} \quad (3.9)$$

このとき、内積 D は求める点 R と N の内積であるが、平面上の点の位置ベクトルとその平面の法線ベクトル N の内積は、平面上どこの点であっても一定の値を取ることが一般的に知られている。これを利用して内積 D を導く。こうして求めた s を式 (3.2) に代入することで平面との交点 R の座標を求めることができる。

平面上の座標を検出できたら、次にそれを 2 次元テクスチャ画像で扱える座標へと変換する。まず、2 次元座標として扱うために 2 つの座標値を取得する。接触した平面はバウンディングボックスのローカル座標系の xy 平面, yz 平面, zx 平面のどれかに平行な面であるので、その面に平行な座標要素だけ抜き出すことで 2 次元平面の座標情報を取り出すことができる。例えば、接触した点を P 、接触した平面を面 $ABCD$ 、それぞれの座標要素を $P(P_x, P_y, P_z)$, $A(A_x, A_y, A_z)$, $B(B_x, B_y, B_z)$, $C(C_x, C_y, C_z)$, $D(D_x, D_y, D_z)$ とし、 xy 平面に平行な面である場合は、それぞれの座標要素から x, y 座標要素を抽出することで 2 次元座標として扱える座標を取り出すことができる。それを示したものが図 3.2 である。

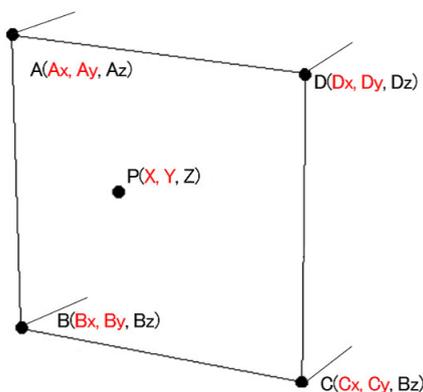


図 3.2: 2 次元座標の抽出 (赤文字が抽出する座標を示す)

次に、テクスチャ画像の左上の位置と平面上の一頂点を対応付ける。テクスチャの左上と対応する頂点は平面の法線ベクトル方向から垂直に見て左上に位置である。この頂点を2次元座標における原点に対応することで、全ての頂点をテクスチャ画像で扱える座標に変換ができる。

3.2.2 雪の付着

本研究では、第2.2節で述べた付着のプロセスを次のようにモデル化した。

まず、物体表面へのひっかかりによる付着のモデルについて述べる。この付着では、雪が付着する対象となる物体モデルの表面の素材を考慮する。表面の凹凸が少なく、滑らかな表面に近いほど引っかかりにくく、表面の凹凸が多く、より毛羽立った素材であればひっかかりやすいとまず仮定した。この、凹凸の多さ、つまり雪がひっかかりやすいかどうかの度合いを数値化し、その値を基に付着するかどうかを判断した。

次に、表面張力による付着のモデルについて述べる。実際の雪では第2.2節で示したように、雪の付着のしやすさは含水率に依存した。そのため、このモデル化においては、雪の含水率を考慮する。雪にはあらかじめ温度に応じて、含水率を決めるようにし、それに応じた雪の付着のしやすさを設定する。温度が高いほど含水率が高くなるように設定する。含水率が0%から増加していくに従って物体に付着する確率を高くし、雪が付着しやすくする。含水率が15%のときに最高にする。含水率が15%を超えた場合は、含水率が高くなるに従って雪は付着しにくくなり、含水率が25%を越えてしまった場合は、ほとんど雪の付着は起こらないようにする。

最後に、焼結作用による付着のモデルについて述べる。焼結作用での付着は、単純に温度で判断し、それに応じた確率で、付着する量を制御する。第2.2節で示したように、焼結作用での付着では、温度が高いほど付着しやすいという性質があった。本研究ではそれを考慮し、温度が高いときに付着する確率を高くし、温度が低いほど付着する確率を低くする。

3.3 付着後の雪の表現

付着した雪をテクスチャ画像へ変換し、物体モデルへ貼り付ける。

3.3.1 付着した雪のテクスチャ変換

付着した雪はテクスチャ画像にて表現する。テクスチャ画像はバウンディングボックス一つに対して面数分、つまり6枚用意する。雪が物体モデルへ付着したと判定したとき、第3.2.1節にて検出した、接触位置の情報を基に各面に対応するテクスチャ画像へ雪を描画する。テクスチャ画像を物体モデルの表面へ貼り付け、そのテクスチャ画像を雪の付着が起こるたびに描画し直すことにより、雪の付着を表現する。

完全透明な画像へ白い色を描画していくことで付着した雪を表現する。また描画する際は、透明度を示す α 値を与える。透明度を考慮し、物体が透けて見えることにより、雪の厚みが表現でき、立体感を表現した。本研究では、 α 値は256階調のものを使用する。 α 値が小さければ透明に近づき、大きくなると不透明に近づく。一度雪を描画した部分の上に再度雪が付着した場合は、前回描画した α 値へ、更に α 値を加算することにより、描画が重なった部分の雪の厚みが大きくなっていくように表現する。

テクスチャへの雪の描画には雪が付着した位置を中心にした周囲8ピクセルを含む全9ピクセルへ描画を行う。それを示したものが図3.3である。

描画を行う際は、湿ってにじんだような見た目になるか、降ってきた雪粒子そのままの形で付着するかを判定し、見た目の違いを表現する。

にじんだ見た目になる場合、雪の描画を行う際に各ピクセルに設定する α の計算には式(3.10)を用いた。

$$\alpha = u + vR + wD \quad (3.10)$$

R は0~1までの値を取る乱数である。付着する雪片の大きさを乱数を用いてにじみの量を変化させ、同じ見た目にさせないようするためのものである。 D は

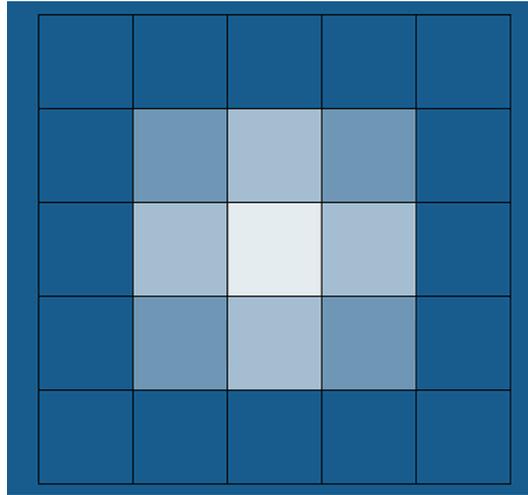


図 3.3: 雪の描画の例 (中心が雪の付着位置)

含水率に応じて 0.1 ~ 1 までの値を取る変数で、本研究では「にじみ係数」と呼ぶ。にじみ係数は含水率が高いほど数値は大きくなる。含水率が低ければ周囲へのにじみは少なく、含水率が高ければ周囲へのにじみが大きくなることを考慮した。 u, v, w には描画を行うピクセル毎に違う値を設定し、これにより最終的に各ピクセルに設定する α 値を決定した。中心のピクセル、中心の上下左右のピクセル、中心から斜めに位置するピクセルには試行錯誤した結果、以下の値が適当であると判断しそれらの値を設定した。

$$\text{中心のピクセル } (u, v, w) = (110, 25, -48) \quad (3.11)$$

$$\text{中心の上下左右のピクセル } (u, v, w) = (25, 10, 12) \quad (3.12)$$

$$\text{中心から斜めに位置するピクセル } (u, v, w) = (10, 5, 9) \quad (3.13)$$

にじまない見た目になる場合は、各ピクセルに設定する α の計算には式 (3.14) を用いた。

$$\alpha = m + nR \quad (3.14)$$

式中の R は、0 ~ 1 までの値を取る乱数である。 m, n には各ピクセル毎に違う値を設定する。にじまないため、付着地点の座標が目立つように描画することを考

慮し、試行錯誤した結果、各ピクセルにはそれぞれ、以下の値が適当であると判断し、それらの値を設定した。

$$\text{中心のピクセル } (m, n) = (90, 90) \quad (3.15)$$

$$\text{中心の上下左右のピクセル } (m, n) = (10, 15) \quad (3.16)$$

$$\text{中心から斜めに位置するピクセル } (m, n) = (5, 10) \quad (3.17)$$

3.3.2 物体モデルへのテクスチャ貼り付け

バウンディングボックスのそれぞれの面から作成したテクスチャデータを付着対象の物体モデルの上に貼り付ける。バウンディングボックスの面から、その中にある物体モデルに向かって、垂直にテクスチャ画像を投影させて貼り付ける。投影のイメージ図を図 3.4 に示す。作成されたテクスチャー画像をバウンディングボックスの持つ全ての面、全 6 面から投影し、貼り付ける。

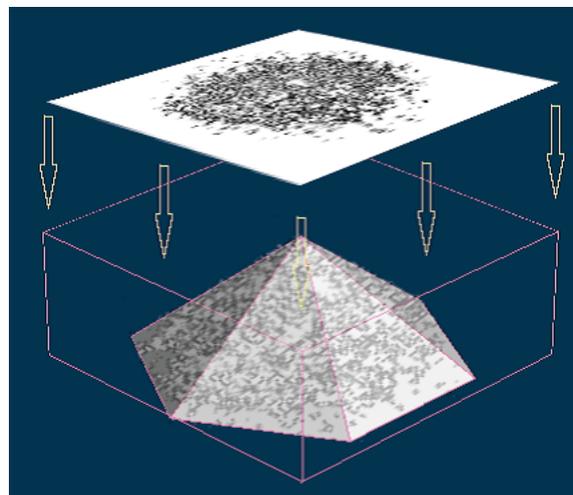


図 3.4: テクスチャを投影で貼り付けるイメージ図

手法の解説を以下に述べる。まず、バウンディングボックスの面にテクスチャ画像を貼り付けたと仮定する。それを示したものが図 3.5 である。図中の黄線はバウンディングボックスの辺を示す。

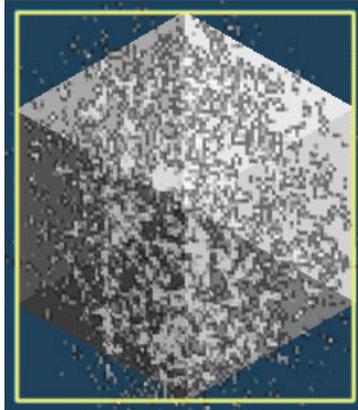


図 3.5: バウンディングボックスへのテクスチャの仮貼り付け

テクスチャ画像を貼り付けたと仮定した面から垂直に物体モデルを見て、モデルの存在する部分と、テクスチャ画像が重なって見える部分の画像を切り取る。図 3.6は切り取った後の図である。図中の赤線がモデルが存在する境界を示す。

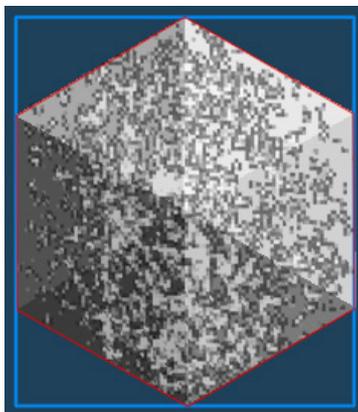


図 3.6: モデルと重なった部分のテクスチャの切り抜き

次に、物体モデルの見えている頂点座標全ての位置と、重なっているテクスチャ画像の全ての座標の位置を取得し、取得した座標の位置を基に、物体モデルの面に対応するように三角形で画像を切り出す。それを示したものが図 3.7である。図

中の緑線が三角形に切り出す線を示す。

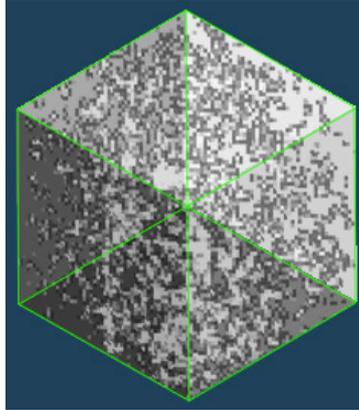


図 3.7: モデルの面に合わせたテクスチャの三角形での切り出し

そして最後に、切り出した画像を三角形テクスチャとして、物体モデルの頂点と対応させるように貼り付けていく。図 3.8に貼り付けた後のモデルの図を示す。

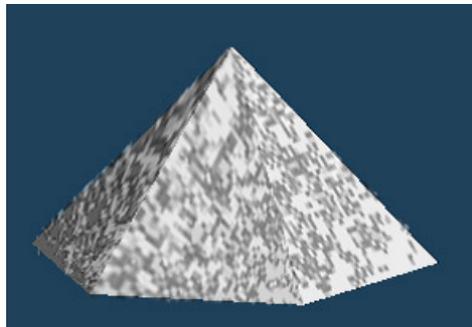


図 3.8: 三角形テクスチャを貼り付けた後のモデル

以上の行程を一つのバウンディングボックスにつき全6面分行い、テクスチャを貼り付ける。

第 4 章

動作検証

4.1 実装

本研究では、3次元グラフィックツールキットである「FK Toolkit System」[16]を使用し、実装を行った。各要素については次のように設定した。

4.1.1 気温

空間には任意調節可能な気温を設定した。この気温により雪の付着判定や付着後の雪の描画方法を決定する。本研究では、降雪可能でかつ雪の付着が起こる気温を考慮し、 $-10 \sim 3$ の範囲で気温を設定した。

4.1.2 表面張力での付着と焼結作用での付着の境界

空間に設定した気温により、どちらの付着になるかを決定する。本研究では、 -2 以上であれば表面張力での付着が起こり、 -2 を下回れば焼結作用による付着が起こるように設定した。

4.1.3 含水率の決定

表面張力での付着では含水率を考慮して雪の付着を判定を行う。含水率は空間に設定した気温により決定した。表面張力での付着が起こる温度範囲は - 2 ~ 3 である。 - 2 のときを含水率 5 % であるとし、 3 のときの含水率を 25 % とした。その間は気温の増加に比例して含水率は高くなるものとする。

4.1.4 雪の付着確率の決定

含水率に対応して雪が付着する確率を決定する。含水率が 15 % のときの雪が付着する確率を 25 % とし、含水率が 5 %、もしくは 25 % のときの雪が付着する確率を 7 % とした。含水率が 5 % から 15 % の間では含水率の増加に比例して雪が付着する確率は高くなり、含水率が 15 % から 25 % の間では含水率が増加に比例して雪が付着する確率は低くなるものとする。

4.1.5 焼結作用での雪の付着確率の決定

焼結作用での付着では気温により雪が付着する確率を決定する。焼結作用での付着が起こる温度範囲は - 10 ~ - 2 である。焼結作用での付着は、気温が高いほど雪は付着しやすくなる性質を考慮し、 - 2 のときに雪が付着する確率を 10 % とし、 - 10 のときに雪が付着する確率を 2 % と設定する。その間は、気温の減少に比例して雪が付着する確率は低くなるものとする。

4.1.6 ひっかかりによる雪の付着確率の決定

ひっかかりによる付着では、物体モデル表面のひっかかりやすさの度合いを数値化して、それを物体モデルに持たせた。数値化する際には直接、付着の確率として数値化した。完全に凹凸が無いような表面のときには付着の確率を 0 % とし、非常にひっかかりやすい毛羽立ったような表面に近づくとつれ、付着の確率を最大 50 % になるように設定した。

4.1.7 雪がにじむ条件の決定

空間に設定した気温により、にじんだような見た目になるか、にじまない見た目になるかを決定する。本研究では、表面張力での付着と焼結作用での付着の境界と同じ温度である -2 を雪の描画方法決定の境界とした。 -2 以上であれば湿ってにじんだような見た目になり、 -2 を下回れば雪粒子そのままの形で付着した見た目になるようにした。

4.1.8 にじみ係数の決定

付着後の雪の描画が、湿ってにじんだような見た目になった場合は含水率に対応してにじみ係数を決定する。含水率が5%のとき、にじみ係数を最小値の0.1とし、含水率が25%のとき、にじみ係数を最大値の1とした。その間は含水率の増加に比例してにじみ係数は高くなるものとする。

4.1.9 雪粒子

雪粒子は最大1500個までの任意の個数用意できるようにし、空間の最上部から空間全体にランダムに降らせた。空間の最下部、もしくは雪が付着したと判定されたものは消去し、空間最上部に再度生成するようにした。

4.1.10 空間

空間は、四方向かい合う面を結んだ無限空間を用意した。また、対象となる物体モデルは画面中央に常に表示した。

4.1.11 物体モデル

物体モデルには「車」のモデルと「人間」のモデルを用意した。車のモデルでは、表面の大部分は金属質のものであり、凹凸がほとんどないためひっかかりによる付着は起きないが、表面張力による付着や焼結作用による付着が起こる。逆

に、人間のモデルでは、着ている服などの凹凸に雪がひっかかるため、ひっかかりによる付着が起こる。これらの二つの違う性質の物体モデルを使用し、本手法がいろいろな材質を考慮した汎用性ある手法であるかを検証する。

車のモデルの各パーツには次のような設定をした。パーツをそれぞれ、車体部、タイヤ部に分けた。車体部のひっかかりやすさに関する付着の確立を0%とした。タイヤ部は高速に回転しているため、落下雪の付着は起こらないと考え、タイヤ部に設定したバウンディングボックスにパーティクルが接触した場合は、その場でパーティクルを消去し、付着は起こらないように設定した。図4.1に、採用した車のモデルを設定したバウンディングボックスとともに示す。図中の青線がバウンディングボックスを示す。

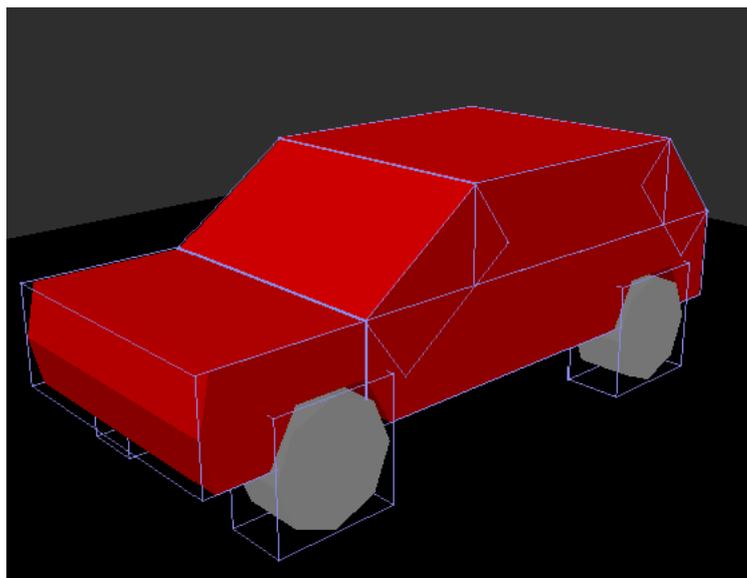


図 4.1: 車モデル

人間のモデルの各パーツには次のような設定をした。パーツをそれぞれ、肌部、上着部、ズボン部、靴部に分けた。ひっかかりやすさに関する付着の確率はそれぞれ、上着部には40%、ズボン部には25%、靴部には10%を設定した。肌部は常に温度が高い部分であり、雪が付着してもすぐに溶けて見えなくなってしまうと

考え、肌部に設定されたバウンディングボックスにパーティクルが接触した場合は、その場でパーティクルを消去し、付着は起こらないように設定した。図 4.2に、採用した人間のモデルを、設定したバウンディングボックスとともに示す。図中の青線がバウンディングボックスを示す。

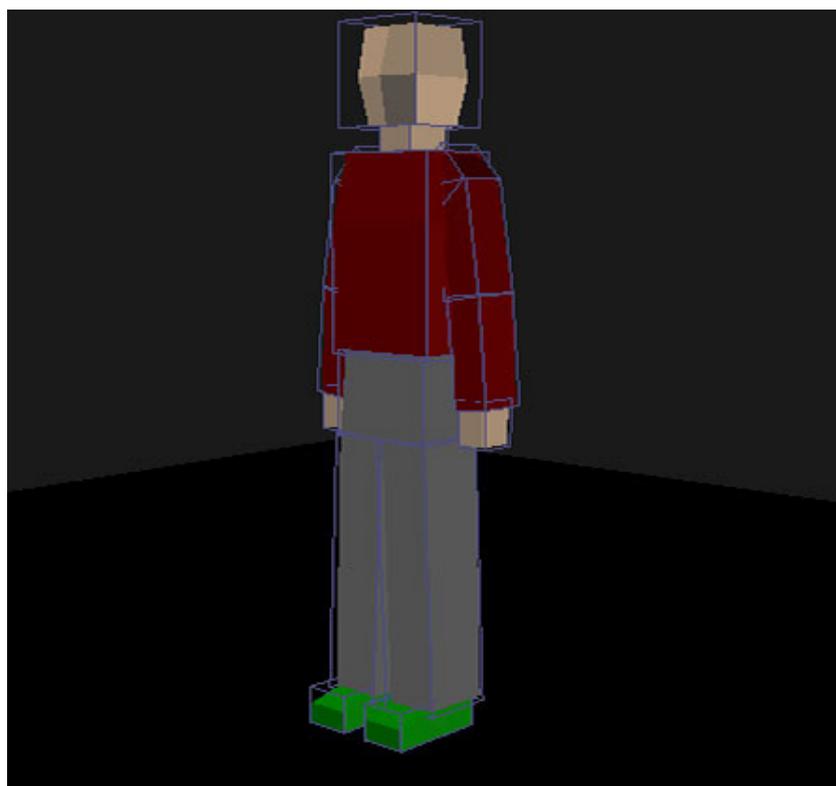


図 4.2: 人間モデル

4.2 実行

実行したマシンの動作環境は以下の通りである。

- CPU : Pentium4 2.4BGHz
- メモリー : 512MB
- ビデオカード : NVIDIA GeForce4 Ti 4200 128MB
- OS : WindowsXP

以上の環境で実行したところ、表示されるパーティクル数が1300個あたりまでは60fpsを保ったまま動作し、最大1500個のパーティクルを表示したときには50fps前後で動作した。実行する際は、風を画面の手前側から画面の奥に向かって吹くように設定した状態で実行した。以下に実行結果を示す。

4.2.1 雪の付着の様子

まず、車モデルを用いて雪が物体に対して付着していく様子が表現できるかどうかを検証した。図 4.3はそれを示した結果である。車モデルに接触した雪がその場に付着、もしくは付着せずに風に流れて飛んでいく様子が確認できた。



図 4.3: 雪が物体に対して付着していく様子

次に、車モデルと人間モデルそれぞれを同じ温度、同じ時間で実行し、雪が付着する様子の差を検証した。図 4.4はそれを示した結果である。人間モデルの方が車モデルよりも若干多くの雪が付着していく様子が確認できた。

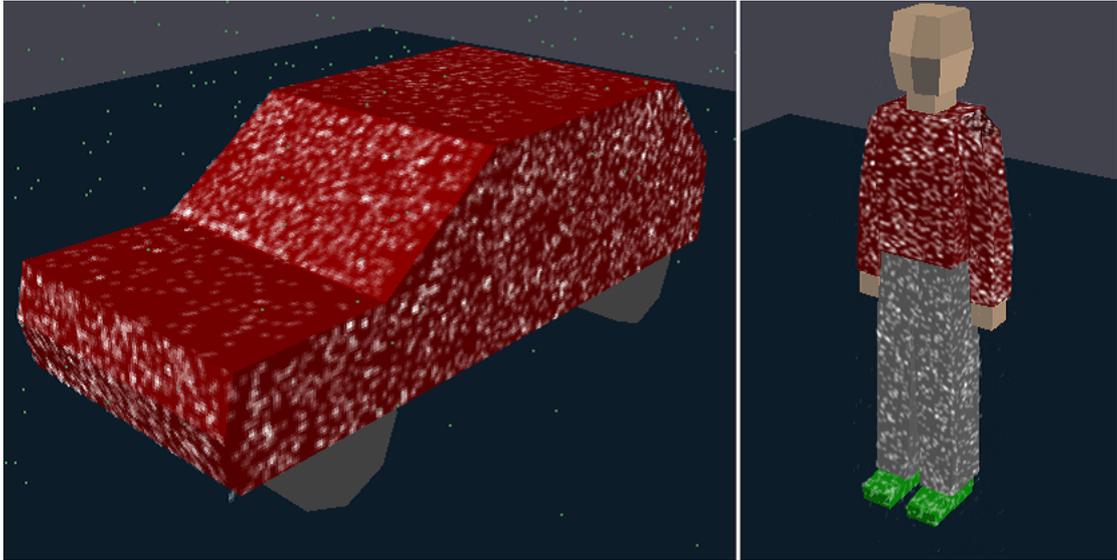


図 4.4: 車モデルと人間モデルの実行結果の違い

4.2.2 温度による雪の付着の差

温度による見た目の差を検証した。車モデルに対し、 -10 、 -1 、 3 の場合で実行した。図 4.5はそれぞれの場合での結果を示したものである。図中の左上の画像が -10 、右上の画像が -1 、下の画像が 3 の場合を示したものである。 -10 の場合は乾いたような雪の印象を得られた。 -1 の場合は湿ったような雪の印象を得られ、 3 の場合は -1 のときよりもさらに湿ったような雪の印象を得られた。またこのとき、それぞれを同じ時間で実行したところ付着した雪の量に若干の違いが見られた。 -1 、 3 、 -10 の順に多く雪が付着することが確認できた。

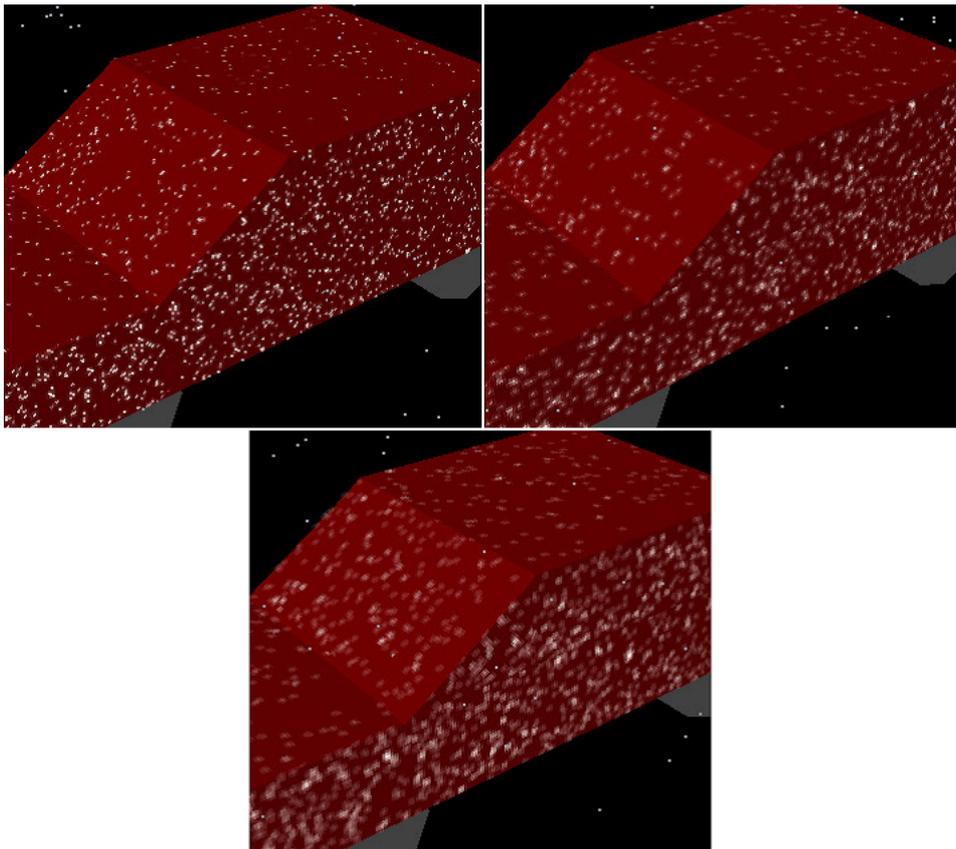


図 4.5: 温度による雪の見た目の違い

4.3 考察

雪が物体モデルに対し付着していく様子が表現でき、素材や温度を考慮することにより雪が物体モデルに対し付着しやすいかどうかを考慮できる手法であることが分かった。また、付着後の雪の見た目に関しては、周囲の温度を感じ取れるようなリアリティのある印象を得ることができる効果的な表現手法であることが分かった。

しかし、本手法には次のような問題点も見られた。まず、空気の流れが考慮されていないことにより不自然な付着が起こることである。空気の流れを完全にシミュレートしていないために、物体モデルの動きによる物体モデル周りの空気の流れが表現できず、物体モデルの周りへ雪が回り込むような動きができないため、面に向かって垂直に風が吹いた場合など、雪が面に押し付けられてしまい、強制的にその場に付着してしまうということが起こった。空気の流れを考慮することができれば、より自然な雪の付着が可能になると思われる。もう一つの問題点として、本手法を長時間実行し続け、付着が連続し続けると、最終的に物体モデルが真っ白になってしまうということがある。本手法ではテクスチャに α 値を加算し続けるだけで雪の厚みを表現しているため、 α 値が最大値である 255 に到達した場合は、それ以上描画に変化が起こらなくなってしまう。そのため、透明度を用いた雪の表現以外にも、雪の表現を行う手法を併せて使用することにより、この問題を回避する必要がある。

以上のように、本手法は効果的な表現ができる反面、課題が残っているのが現状である。

第 5 章

まとめ

本手法を用いることにより、物体モデルの素材や温度変化を考慮した判定を利用したリアルな雪の付着の様子が表現でき、テクスチャ表現によりリアルな付着後の雪の表現できるようになった。本手法をリアルタイム 3DCG コンテンツにおけるキャラクターモデルや背景モデルに対して実装することにより、雪の場面の臨場感を向上させることができると期待できる。また、今後の展望として、物体モデルの動きや、雪自身の重みにより剥がれ落ちる雪を表現できれば、よりリアルな雪の表現手法としての効果が期待できる。現状では課題も残っているが、これらの問題を解決することにより、雪を表現する非常に有効な手法となるだろう。

謝辞

本研究を締めくくるにあたり、暖かいご指導と適切な助言をくださいました、本校メディア学部の渡辺大地講師および和田篤氏（電気通信大学）に心より感謝いたします。また、いつも気軽に相談にのってくれた全ての友人たちに感謝します。そして、温かく見守ってくれた家族に感謝します。

最後に、本研究にご協力いただきました全ての方々に、厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 大場喜文, ”ボリュームデータを用いた積雪形状形成に関する研究”, 東京工科大学, 2003.
- [2] 森木大樹, ”雪の不規則な動きを考慮した積雪のリアルタイムモデリング”, 和歌山大学大学院, 2003.
- [3] Hakan Haglund, Mattias Andersson, and Anders Hast, ”Snow Accumulation in Real-Time”, University of Gavle, 2002.
- [4] 北海道大学 高井研究室, ”時間経過を考慮した都市空間の雪景色 CG 表現に関する研究”, 北海道大学.
- [5] 安藤大志, ”リアルタイム 3DCG における風を考慮した降雪表現に関する研究”, 東京工科大学, 2004.
- [6] 日本雪氷学会, 「雪氷辞典」, 古今書院, 1990.
- [7] 木下誠一編, 「雪と氷のはなし」, 技報堂出版, 1988.
- [8] 武田温友, 「パンプキンランドサロマ」, 雪の結晶のページ,
< <http://www.muratasystem.or.jp/~takeda/> >.
- [9] 小林禎作著, 「雪の結晶 - 冬のエフェメラル」, 北海道大学図書刊行会, 1983.

- [10] 村井昭夫, 「不思議の国のアキノコ 空と雪の結晶とオーロラのページ」, 雪の結晶紹介ページ, < <http://www1.linkclub.or.jp/~kinoko/> >.
- [11] 前野紀一著, 「氷の科学」, 北海道大学図書刊行会, 1981.
- [12] ”道路吹雪対策マニュアル”, 独立行政法人 北海道開発土木研究所, 2003.
- [13] 布施浩司, 岳本秀人, 安倍隆二, 久保裕一, ”上弦材のある橋梁の着雪・冠雪対策について”, 北海道開発土木研究所月報, 2004.
- [14] 「株式会社モンベルホームページ」, アンチグリース・パリスティックナイロン素材紹介, < <https://www2.montbell.com/> >.
- [15] 穴戸昌広, 「なでら山散策日記」, 2003年1月日記, < <http://chemeng.yz.yamagata-u.ac.jp/bike/diary.html> >.
- [16] 渡辺大地, ”FK Toolkit System”, < <http://www.teu.ac.jp/aqua/~earth/FK/> >.