

2011年度 卒業論文

環境を考慮した着氷現象の  
シミュレーションに関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師  
三上 浩司 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト  
学籍番号 M0108413  
松浦 章人

**2011年度 卒業論文概要**

**論文題目**

環境を考慮した着氷現象の  
シミュレーションに関する研究

**メディア学部**

**学籍番号：M0108413**

**氏名**

松浦 章人

**指導  
教員**

渡辺 大地 講師  
三上 浩司 講師

**キーワード**

3DCG、ビジュアルシミュレーション、  
着氷現象、過冷却、霧、気象学

近年、3次元コンピュータグラフィクス(3DCG)では、様々な自然現象の研究が盛んである。本研究では、特殊な形状を持つ氷である着氷現象に着目した。実際の着氷現象と、3DCGの着氷現象の視覚的印象が類似するためには、着氷形状や、色などの特徴を考慮する必要がある。着氷現象に関する研究は、航空機の翼やエンジンへの着氷シミュレーションが盛んであり、形状の生成は実現している。しかし、飛行時の影響のシミュレーションのため、色に関しては考慮していない。また、厳密な結果が必要となるため、考慮しなければならないパラメータが多い。

本研究では着氷現象の形状と色を両立したレンダリングを目的として、着氷現象のビジュアルシミュレーションを行った。本手法では、ユーザが気温、風速の環境条件を入力することで、着氷現象の再現を行った。実際の着氷現象に近づけるために、過冷却の水 droplet を粒子として扱い、樹木などの地物への衝突を行った。衝突後凍結するまで移動する処理を行うことで、水粒子の広がりを表現した。凍結した水粒子の位置から MarchingCubes 法を用いて形状生成を行った。3次元空間を格子状に区切り、格子の各頂点に氷粒子が及ぼす濃度を算出し面を生成した。水粒子の凍結時の風速、各格子に含む水粒子の最大個数と、格子に含んでいる氷粒子の充填率から、色と透過度を求めてレンダリングを行った。

着氷現象の特徴である形状、色についてレンダリング結果の検証を行い、本手法の有用性を確認した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景と目的 . . . . .	1
1.2	本論文の構成 . . . . .	3
<b>第2章</b>	<b>着氷現象について</b>	<b>4</b>
2.1	着氷現象とは . . . . .	4
2.2	着氷現象の形状 . . . . .	5
2.3	着氷現象の色 . . . . .	7
<b>第3章</b>	<b>提案手法</b>	<b>10</b>
3.1	風速の設定 . . . . .	11
3.2	水粒子の移動 . . . . .	12
3.3	形状生成 . . . . .	12
3.4	マテリアルの設定 . . . . .	15
<b>第4章</b>	<b>検証と考察</b>	<b>17</b>
4.1	考察 . . . . .	20
<b>第5章</b>	<b>まとめ</b>	<b>21</b>
	<b>謝辞</b>	<b>22</b>
	<b>画像について</b>	<b>23</b>
	<b>参考文献</b>	<b>24</b>

# 目 次

1.1	樹氷	2
1.2	粗氷	2
1.3	スノーモンスター	2
2.1	着氷現象の模式図	5
2.2	着氷形態	6
2.3	樹氷の形状	7
2.4	粗氷の形状	7
2.5	樹氷の色	8
2.6	粗氷の色	8
2.7	着氷途中で比重が変わった時の色	9
3.1	処理手順	11
3.2	MarchingCubes法の生成パターン	13
3.3	濃度値による氷と空気の境界面生成	13
3.4	風速による形状の変化の模式図	14
3.5	対象となる格子検出の例	15
4.1	生成した粗氷	18
4.2	生成した樹氷	18
4.3	粗氷から樹氷に変化した様子	19
4.4	樹氷から粗氷に変化した様子	20

# 表 目 次

2.1 着氷現象の生成条件 . . . . .	5
4.1 実行環境 . . . . .	17

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

近年、3次元コンピュータグラフィクス（以下、3DCG）による自然景観の映像は、映画、ゲーム等のコンテンツに用いる機会が増加してきた。特に、雪、氷、水、雲といった自然景観を3DCGによって表現するビジュアルシミュレーションの研究 [1][2][3][4] は、これまでも盛んに行われている。自然現象は、物理的に様々な要因から発生しており、科学的な解析には厳密な結果が必要である。しかし、ビジュアルシミュレーションでは視覚的印象の類似が重要なため、対象の特徴を考慮した手法が必要である。その中でも氷は、寒さを表すために多く用いる表現である。そのため氷の研究は、形状生成、光の反射や屈折表現、氷解など研究が行われている [5][6][7]。本研究では、特殊な形状を持つ氷である、着氷現象に着目した。着氷現象には、樹氷、粗氷というものがある。着氷現象は、気温が0度以下の時に起こる現象で、着氷性の霧が風によって移動し、樹木などの地物に衝突することで形成する。次の図 1.1 に樹氷、図 1.2 に粗氷の例を示す。



図 1.1: 樹氷



図 1.2: 粗氷

また、樹氷の中にはスノーモンスターと呼ぶ現象がある。スノーモンスターとは、樹氷を生成する際に、雪が混ざることによって起きる現象である。スノーモンスターは、山形県蔵王町にできるものが有名である。次の図 1.3 にスノーモンスターの例を示す。



図 1.3: スノーモンスター

着氷現象の特徴として、針状やなめらかな形状といった形や、白色や半透明の色がある。また、着氷現象は生成中に環境が変化することによって、形状や色が変わる場合もある。着氷現象のビジュアルシミュレーションを行う場合には、着氷の形状や、色といった特徴を考慮する必要がある。本研究では、羽毛状で白色の着氷を樹氷、なめらかな形状で半透明の着氷を粗氷と定義した。

着氷現象に関する研究として、航空機の翼やエンジンへの着氷シミュレーション

がある。坂井ら [8] は、ジェットエンジンへの着氷による翼空力性能への影響を明らかにすることを目的とし、着氷現象のシミュレーションを実現した。しかし坂井らの手法は形状のみを考慮しており、レンダリング品質を目的としていないため、色の違いは出ない。また、氷のビジュアルシミュレーションでは、Kim ら [9] のものがあり、氷柱の形状生成とレンダリングを実現した。しかし Kim らの手法と着氷現象とは形状の生成過程が違うため着氷現象のような形状や色の変化は出ない。樹氷と見た目が似ている積雪のビジュアルシミュレーションでは、森谷ら [10] のものがあり積雪のビジュアルシミュレーションを実現した。しかし積雪は氷が積もるため、水滴が衝突することで凍結する着氷現象とは異なる現象である。

以上を踏まえて、本研究では、環境の変化とともに変わる着氷現象の形状とレンダリングの両立を目的として、3DCG のビジュアルシミュレーションを行った。

本研究では、ユーザが初期風速、最終風速を入力することで、パラメータから着表処理を行い、環境に適した着氷現象を行った。本手法では、水粒子を扱うのに粒子法を用いた。水粒子を樹木などの地物に向かって移動することによって水粒子が衝突する。水粒子は衝突後一定時間移動してから凍結する。そのため衝突した水粒子を、風速から求めた回数移動する処理を行うことで水粒子の分散を表現した。凍結した水粒子の位置から MarchingCubes 法 [11] を用いて形状生成を行った。また本手法では、着氷現象の形状を表すため、水粒子を楕円体形状として扱った。水粒子凍結時の平均の風速と水粒子数の充填率からマテリアルの設定を行った。着氷現象の特徴である形状、色を実際の着氷現象との類似性を検証して、本手法の有用性を確認した。

## 1.2 本論文の構成

本論文は全 5 章で構成する。第 2 章で着氷現象について述べ、第 3 章で提案手法について述べる。第 4 章で動作検証と考察を行う。最後に第 5 章でまとめと今後の展望について述べる。

# 第 2 章

## 着氷現象について

本章では、本研究において扱う着氷現象について述べる。着氷という自然現象の解説について、「着氷の物理的研究」[12][13][14][15][16]、「蔵王のアイスモンスター（樹氷）と積雪」[17]を参考にした。まず、2.1 節で着氷という自然現象の概要や、着氷の分類について説明する。次に、2.2 節において、それぞれの着氷の特徴的な形状について解説したのち、2.3 節で、着氷の色による分類について述べる。

### 2.1 着氷現象とは

着氷現象とは、凝固点を過ぎて冷却されても固体化せず、液体の状態を保持している水滴（以下、過冷却水滴）もしくは水蒸気が、樹木などの地物に衝突することで凍結もしくは昇華し、氷層を形成する現象、またそれによって生成された氷のことである。

着氷現象は、樹氷、粗氷、樹霜に分類できる。樹氷、粗氷は、過冷却水滴によってできる着氷性の霧が樹木などに衝突し、その衝撃によって凍結、付着した氷層である。氷層の成長方向は、風向きによって決まる。風により過冷却水滴が移動し物体に衝突していくため、成長方向は風上方向になる。次の図 2.1 に、着氷現象の模式図を示す。

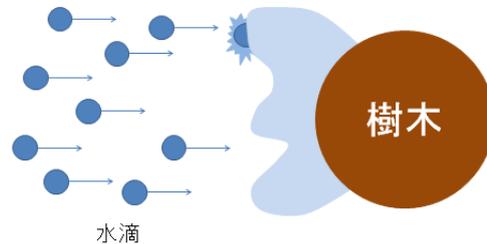


図 2.1: 着氷現象の模式図

樹霜は、空気中の水蒸気が昇華し、樹木に付着することによって生成される。樹氷、粗氷は、水滴が衝突して氷を形成していくが、樹霜は氷が付着し積み重なっていく。

このように着氷現象は、樹氷、粗氷、樹霜に分類できるが、樹霜は発生メカニズムが異なるため、本研究では樹氷、粗氷を対象とする。次の表 2.1 に、着氷現象の生成条件を示す。

表 2.1: 着氷現象の生成条件

分類	気温 (°C)	風速 (m/s)	水滴の大きさ ( $\mu\text{m}$ )	水との比重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
樹氷	-4 以下	5 以下	4~16	0.2~0.6
粗氷	-2~-10	5~20	4~22	0.6~0.8

## 2.2 着氷現象の形状

過冷却水滴は物体に衝突すると、物体に触れた面から凍結し、液体の部分は周囲に広がりながら凍結していく。そのため、風速や過冷却水滴の大きさによって、凍結時間が変化する。風速が早いと、過冷却水滴の広がる速度が早くなる。そのため、氷はなめらかな形状になる。風速が遅いと、過冷却水滴は粒状のまま凍結し、氷は針状となる。また、過冷却水滴が大きいと、凍結にかかる時間が増す。そ

のため水滴の広がりも大きくなる。過冷却水滴が小さいと、凍結にかかる時間は短くなる。次の図 2.2 に、着氷形態を示す。

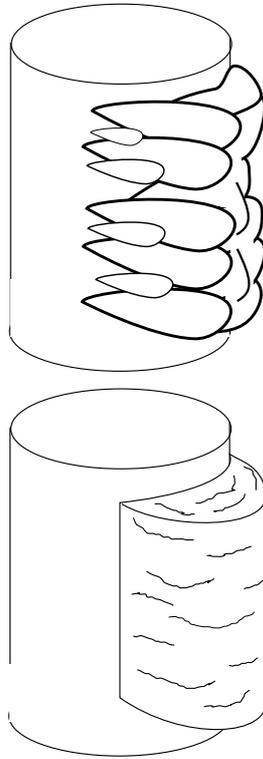


図 2.2: 着氷形態

樹氷は、羽毛状に成長する。代表的な形状として、えびのしっぽと呼ばれる形状がある。気温が低いため、凍結時間は短く、粒状の氷が積み重なっていく。次の図 2.3 に、樹氷の形状の模式図を示す。

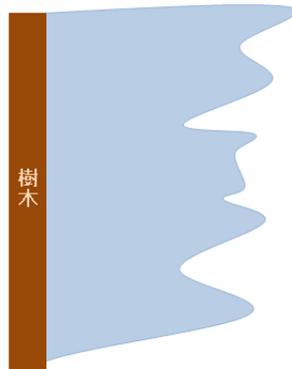


図 2.3: 樹氷の形状

粗氷は、丸みを帯びた形状なる。水滴の大きさが大きく、凍結時間が長いため、表面がなめらかな氷となる。透明な氷の層と、気泡を含んだ氷の層が重なりあってできている。次の図 2.4 に、粗氷の形状の模式図を示す。

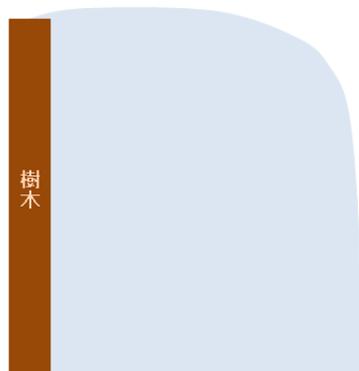


図 2.4: 粗氷の形状

## 2.3 着氷現象の色

着氷の色は、付着した氷の比重によって決まる。なお、基準となる物体は水とする。また、風が弱い時は、氷粒の結合は弱く脆いものとなり、風が強い時は、過冷却水滴が強く衝突するため、密度が高く硬い氷となる。樹氷の比重は 0.2～0.6 で

あり、空気の含有量が多い。そのため、氷内部に入った光が反射、屈折し、白い氷となる。次の図 2.5 は、樹氷の図である。



図 2.5: 樹氷の色

粗氷の比重は 0.6~0.8 であり、空気の含有量が少ない。そのため、光はあまり屈折せず、半透明の氷となる。次の図 2.6 は、粗氷の図である。



図 2.6: 粗氷の色

また、着氷途中で環境が変化することにより、比重も変化し色が変わることもある。次の図 2.7 は、着氷途中に粗氷から樹氷へ変化した着氷である。



図 2.7: 着氷途中で比重が変わった時の色

# 第 3 章

## 提案手法

本研究では、着氷現象の特徴を再現するために、その発生の仕組みを考慮した上で、ユーザが任意の着氷現象を生成できるようにする。ユーザが入力する要素として、樹木といった着氷する地物の 3D モデル、気温、風速を定めた。また、風速はシミュレーション過程において動的に変更可能である。着氷現象の形状、色は入力したパラメータから求め、着氷処理を行った。次の図 3.1 は処理の流れを示したものである。

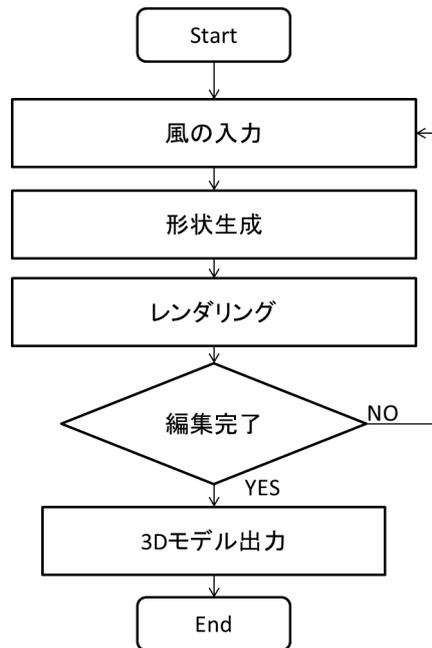


図 3.1: 処理手順

本章では以降、3.1 節で風速の設定について述べる。3.2 節で水粒子の移動について述べ、3.3 節で、3.2 節で求めた水粒子の位置から、形状を生成する手法について述べる。最後に 3.4 節で、3.3 節で生成した形状の色の設定についての手法を述べる。

### 3.1 風速の設定

本節では、風速の設定について述べる。

着氷現象は、風によって成長方向や凍結時間に変化が生じる。風速度を  $\mathbf{W}$ 、風速を  $|\mathbf{W}|$  とする。設定できる風速の範囲は、ビューフォート風力階級 [18] において、平穏状態である階級 1 である  $0.1(m/s)$  から、疾強風状態である階級 8 までの  $20.7(m/s)$  とした。この  $|\mathbf{W}|$  はシミュレート過程において任意に変更できる値である。

## 3.2 水粒子の移動

本節では、水粒子の移動について述べる。物体に衝突した水粒子は、一定時間経過後に凍結する [19]。そのため、水粒子が地物に衝突してから、一定時間は粒子の移動を行う。水粒子には一定の移動速度  $b$  を与え、物体に衝突してから凍結するまでの移動量を  $c$  および風速によって求めた。凍結後は、水と氷の体積比である 1 : 1.09 から、水粒子を拡大し氷粒子とする。

水粒子の初期位置は、ランダムで配置する。初期位置から、水粒子を風向方向に  $b$  ずつ移動する。半径  $l$  である水粒子と氷粒子が衝突した場合、衝突時の水粒子の位置  $\mathbf{I}$  と氷粒子の位置  $\mathbf{J}$  から、水粒子と氷粒子の距離干渉している長さ  $h$  を次の式 (3.1) で求めた。

$$h = l(1 + 1.09) - |\mathbf{I} - \mathbf{J}| \quad (3.1)$$

氷粒子から水粒子までのベクトルを正規化したベクトルを  $h$  倍することで水粒子が破裂して分散し凍結するまでを表現する。氷粒子に衝突したら  $t$  回水粒子の分散処理を行った。水粒子の凍結が始まる時の風速を  $|\mathbf{W}|$  とすると、凍結するまでの処理回数は  $\lceil |\mathbf{W}| \rceil$  となる。

## 3.3 形状生成

本節では、3.2 節で求めた氷粒子から形状を生成する手法について述べる。本研究では、着氷現象の形状を表現するのに、MarchingCubes 法 [11] を用いる。MarchingCubes 法は空間中に分布している濃度値等を可視化する手法である。可視化したい空間を立方格子状に区切り、格子の各頂点における濃度値等を算出する。頂点はその値により物体の内部に存在する点、外部に存在する点に分類できる。内部の点と外部の点が隣接する辺に物体表面を生成することで、空間中の濃度値等を可視化する。MarchingCubes 法では、頂点が内側か外側かの 2 通りを立方体の各頂点に対して判定するので、256 通りの組み合わせがある。しかし、回転対象や

内外の反転を除くと、基本となる面の生成パターンは15通りとなる。次の図3.2は基本となる面の生成パターンである。

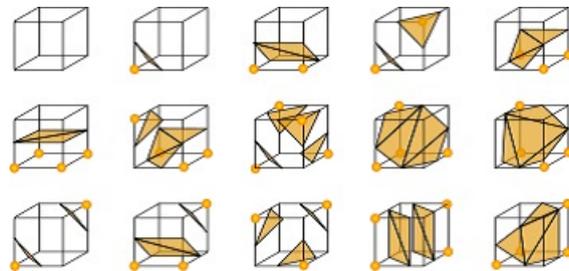


図 3.2: MarchingCubes 法の生成パターン

本手法では、氷粒子が格子の頂点に与える値を濃度値とする。濃度値が任意の閾値  $q$  より高い頂点は氷となり、 $q$  より低い頂点は空気となる。頂点を結ぶ線分上で、濃度値が  $q$  となる点を結ぶことで面を生成した。次の図3.3は濃度値による氷と空気の境界面生成の例である。

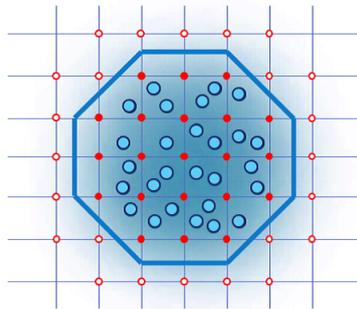


図 3.3: 濃度値による氷と空気の境界面生成

本手法では、風速による形状の変化を出すため凍結した際の氷粒子を楕円体形状とし、格子の各頂点から見た氷粒子の距離と楕円体形状を考慮して濃度値を算出する。風が強い時は、水粒子が地物に衝突した時に広がりが大きくなるので球体形状に近くなる。しかし風が弱い時は、水粒子は地物に衝突した時にあまり広

がらないため、風向方向に長い楕円体形状となる。次の図 3.4 は風速による形状の変化の模式図である。

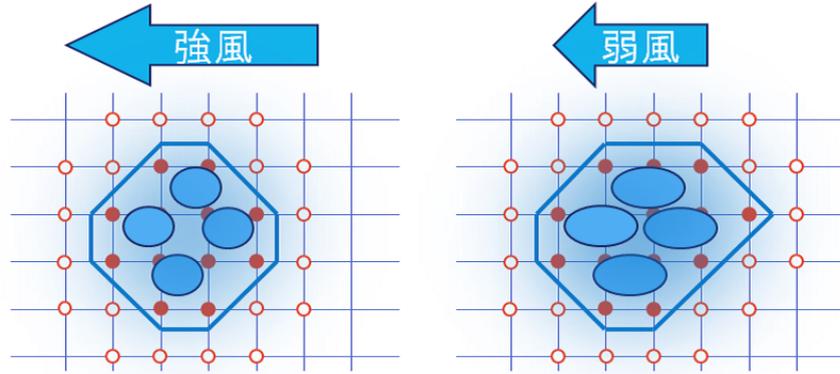


図 3.4: 風速による形状の変化の模式図

氷粒子の位置座標から格子の頂点座標までのベクトル  $\mathbf{D}$  を、3.1 節で求めた風速度  $\mathbf{W}$  に射影したベクトルを  $\mathbf{D}_j$  とする。本論文では、内積は  $\cdot$  を用いて表す。

$$\mathbf{D}_j = \frac{\mathbf{D} \cdot \mathbf{W}}{|\mathbf{W}|^2} \mathbf{W} \quad (3.2)$$

ベクトル  $\mathbf{D}$  を  $\mathbf{W}$  に射影した際の垂直成分を  $\mathbf{D}_p$  とし、 $\mathbf{D}_p$  を次の式 (3.3) から求める。

$$\mathbf{D}_p = \mathbf{D} - \mathbf{D}_j \quad (3.3)$$

次に、楕円の長径  $\alpha$  と短径  $\beta$  を求める。なお、 $\alpha$  は 1.0 程度の任意の値とし、式中 20.7 は想定 of 風速の最大値であり、 $\beta$  は式 (3.4) で算出する。

$$\beta = \frac{20.7}{|\mathbf{W}|} + \alpha \quad (3.4)$$

格子の頂点座標から粒子までの距離を算出し、次の式 (3.5) から 1 つの粒子が頂点に与える濃度  $N_i$  を出す。

$$N_i = \frac{(\alpha |\mathbf{D}_j|^2 + \beta |\mathbf{D}_p|^2)}{k} \quad (3.5)$$

なお、 $k$  は任意の正の値とし、本手法では 100 前後を想定している。

頂点から一定の距離  $x$  の範囲内の粒子の総数を  $u$  とした時、各頂点の濃度  $N$  を次の式 (3.6) で求める。

$$N = \sum_{i=1}^u N_i \quad (3.6)$$

各頂点の濃度が任意の閾値を超えたら頂点の内外判定を行い面を生成する。

### 3.4 マテリアルの設定

本節では、マテリアルの設定手法について述べる。本手法では、3.1 節で設定した凍結時の風速と、水粒子と氷粒子の充填率を用いて面の色を求めた。ただし本手法では水粒子および氷粒子の重さは考慮していない為、3.3 節で用いた各格子内の水粒子及び氷粒子の個数の充填率を利用した。表 2.1 で示した着氷現象の実測値と比較し、マテリアルを設定した。

まず、生成した面の重心  $G$  を求める。面の頂点座標  $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  とすると重心を次の式 (3.7) で求める。

$$G = \frac{(P_0 + P_1 + P_2)}{3} \quad (3.7)$$

次に、重心から最近傍にある氷粒子を求め、最近傍の氷粒子を含む格子を求める。求めた格子と、周囲 26 近傍に含む氷粒子を対象として、面のマテリアルを設定する。次の図 3.5 は対象となる格子の検出の例である。

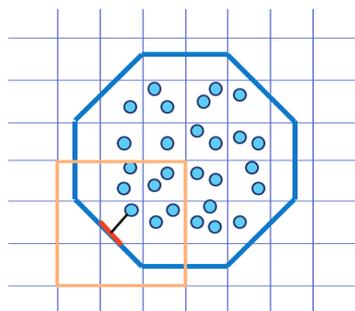


図 3.5: 対象となる格子検出の例

対象となる格子が含む氷粒子の総数  $K$  を求める。格子に含むことのできる水粒子の最大数を  $L$  を次の式 (3.8) とし、次の式 (3.9) で充填率  $Z$  を求める。

$$L = \frac{\sqrt{2}a^3}{8r^3} \quad (3.8)$$

$$Z = \frac{K}{L} \quad (3.9)$$

求めた格子と、周囲 26 近傍が含む氷粒子の凍結時の風速  $|\mathbf{W}|$  から風速の平均  $A$  を求める。

充填率  $Z$  と風速の平均  $A$  を実際のデータと比較して色を求める。本手法ではマテリアル値 (R,G,B) はすべての要素を同じ値  $c$  とする。粗氷のマテリアル値を (0,0,0)、樹氷のマテリアル値を (1.0,1.0,1.0) とする。まず風速の平均  $A$  と実際のデータを比較し、樹氷か粗氷かを求める。次に、充填率  $Z$  からマテリアル値の要素  $c$  を求める。

風速の平均が  $5(m/s)$  より大きく、 $20.7(m/s)$  以下の時、次の式 (3.10) で求める。

$$c = \begin{cases} 1.0 - Z & (0.2 \leq Z \leq 0.6) \\ 1.0 \times Z & (0.6 < Z \leq 0.8) \end{cases} \quad (3.10)$$

風速の平均が  $5(m/s)$  以下の時、次の式 (3.11) で求める。

$$c = \begin{cases} Z & (0.2 \leq Z \leq 0.6) \\ \frac{1.0}{Z} & (0.6 < Z \leq 0.8) \end{cases} \quad (3.11)$$

求めた  $c$  から透明度 ( $c$ )、環境光 ( $c,c,c$ )、拡散反射光 ( $c,c,c$ ) とする。なお、本手法では放射光、鏡面反射光は考慮しない。

# 第 4 章

## 検証と考察

本章では、3章で述べたシミュレーション手法の実行例を示し、実際の樹氷、粗氷との視覚的類似性を検証する。着氷のビジュアルシミュレーションを実装するために、3D グラフィックツールキットである Fine Kernel ToolKit System[20] を用いた。

本研究によって表現できた樹氷、粗氷の視覚的特徴について述べる。ビジュアルシミュレーションを行った際のパラメータは、スクリーンの横幅 512px、縦幅 512px、水粒子の数を 5000 個、MarchingCubes 法で用いる格子の数を 110592 個とした。このパラメータとユーザによる入力を設定しシミュレーションを行うことで、着氷の 3D モデルを作成する。作成までにかかった時間は約 32 分である。また、実行環境は表 4.1 の通りである。

表 4.1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-2557M CPU @ 1.70GHz
GPU	Intel HD Graphics 3000
メモリ	4.0GB

本研究のビジュアルシミュレーションによって、表現できた着氷現象の視覚的特徴について述べる。粗氷を生成した結果を次の図 4.1 に示す。なめらかな形状と

なり、半透明の色をしていることが確認できる。この時のユーザによるパラメータの設定は、初期風速  $20(m/s)$ 、最終風速  $10(m/s)$  である。

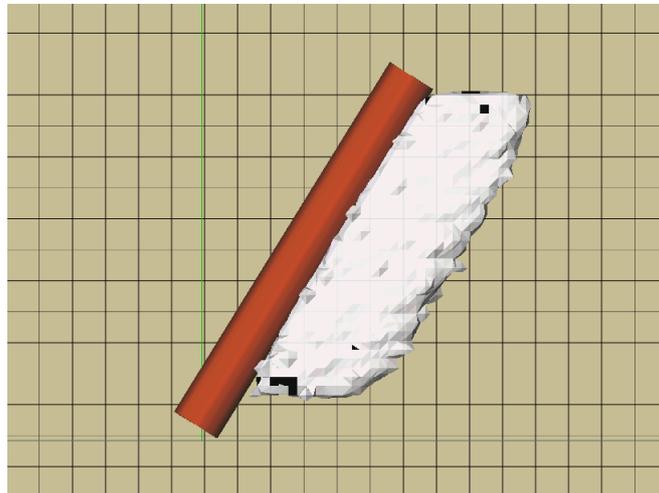


図 4.1: 生成した粗氷

樹氷を生成した結果を次の図 4.2 に示す。針状の形状となり、白色をしていることが確認できる。この時のユーザによるパラメータの設定は、初期風速  $5(m/s)$ 、最終風速  $3(m/s)$  である。

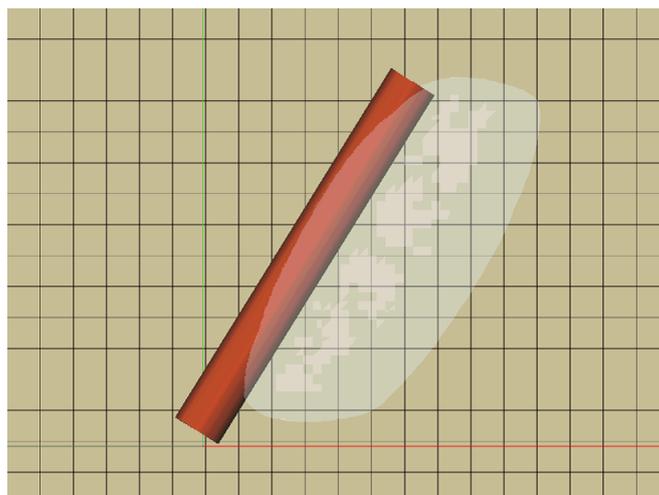


図 4.2: 生成した樹氷

環境が変化したことによって、粗氷から樹氷に変化した様子を生成した結果を次の図 4.3 に示す。着氷が始まったときはなめらかな形状で半透明の色をし、途中から針状で白色に変化しているのが確認できる。この時のユーザによるパラメータの設定は、初期風速  $10(m/s)$ 、最終風速  $1(m/s)$  である。

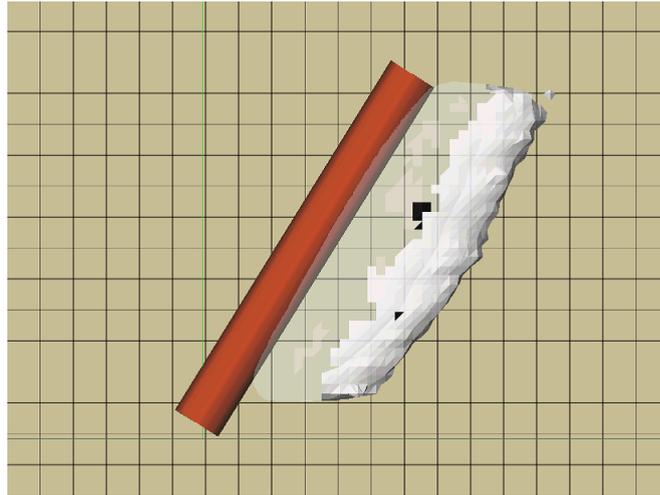


図 4.3: 粗氷から樹氷に変化した様子

また、樹氷から粗氷に変化した様子を生成した結果を次の図 4.4 に示す。着氷が始まった時は針状で白色となり、途中からなめらかな形状で半透明の色となっているのが確認できる。この時のユーザによるパラメータの設定は、初期風速  $1(m/s)$ 、最終風速  $10(m/s)$  である。

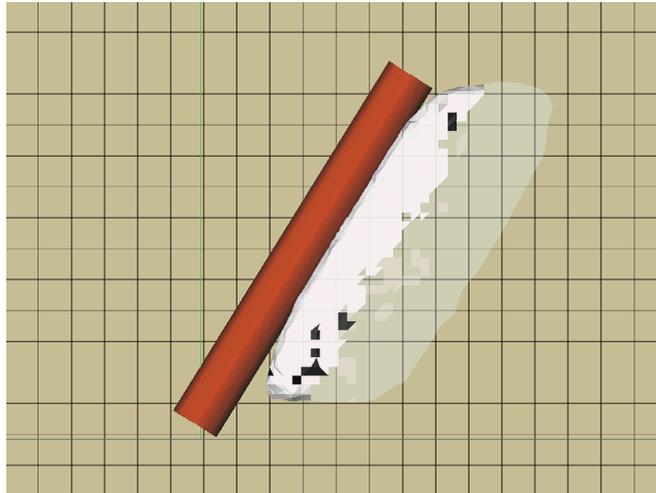


図 4.4: 樹氷から粗氷に変化した様子

## 4.1 考察

検証の結果、着氷形状、色を再現することができた。また、実際の着氷と比較して、それぞれの特徴を捉えた表現をすることができた。本手法によって、環境が変化とともに変わる着氷現象の形状とレンダリング品質が両立できたと言える。しかし現状の問題点として、外力による着氷形状の変化が無い点や、ポリゴンにマテリアルの値を与えているため、光の反射や屈折などの変化が無い点をあげることができる。

## 第 5 章

### まとめ

本研究では、ユーザが初期風速と最終風速を入力することで着氷現象のシミュレーションを行った。過冷却水滴を水粒子として扱い衝突時の水滴の分散表現を行った。水粒子を楕円体形状として扱い濃度値を算出した。水粒子の位置座標から、MarchingCubes法を用いて形状生成を行った。水粒子の平均の風速と充填率から面のマテリアル設定を行った。

本研究では着氷現象のビジュアルシミュレーションを、実際の着氷現象との視覚的印象が類似するために、環境を考慮し形状と色に変化する着氷現象のシミュレーションを行った。生成途中で環境が変化することで形状と色に変化していく様子も再現することができた。

今後の展望として、着氷することで枝が垂れ下がるなどの地物の変形や、光の反射や屈折を表現することで、さらに実際の着氷現象と視覚的印象を近づけるビジュアルシミュレーションの実現を考えることができる。

## 謝辞

終始全力全開でご指導してくださった渡辺先生と三上先生に感謝します。

悩んでいる時にアドバイスをくれた竹内先生と阿部先生ならびに先輩方に感謝します。

苦楽を共にした研究室のメンバーに感謝します。

常に心の支えとなり、研究テーマのきっかけとなった声優で歌手の水樹奈々さんに感謝します。研究を始める前、自叙伝発売記念の握手会にて「これから始まる研究と就活について一言もらえませんか」というお願いに対して、「頑張っ！絶対に大丈夫！」とコメントを頂きとても励まされました。夏の LIVE は中間発表りハーサルの中の休日に、無敵の笑顔で元気をもらいました。ベストアルバムでは、インターンの帰りにアドボードを見て「明日もがんばろう」と思いました。冬の LIVE では、これからの研究に不安がありましたが、強く漕ぎ出していくことができました。年末の新アニメ先行上映会は論文第 1 稿を提出翌日に、気力を回復することができました。年が開けてからも、新曲を聞くことで論文、最終発表を乗り切るパワーを得ることができました。これら以外でも、水樹奈々さんから元気をもらうことは多々ありました。本当にありがとうございます。

## 画像について

図 1.1、図 1.2、図 2.7 は「アキ爺の山歩き・沢歩き」より引用しました。

<http://blogs.yahoo.co.jp/akijiji>

図 1.3 は「成増農園」より引用しました。

<http://narimasu-nouen.com/>

図 2.5 は「一日の王」より引用しました。

<http://blog.goo.ne.jp/taku6100>

図 2.6 は「山の散歩道」より引用しました。

<http://www.geocities.jp/yamanosanpomichi/index.html>

図 3.2 は「Wikipedia」より引用しました。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/>

以上の画像の使用は承諾済みです。

## 参考文献

- [1] 後藤 智英, 小杉 信, and 向井 信彦, “降雪のリアルタイムシミュレーション (映像表現&コンピュータグラフィックス),” **映像情報メディア学会技術報告 32(34)**, 13–16 (2008-07-31).
- [2] Seipel, S. and Nivfors, A., “Efficient rendering of multiple refractions and reflections in natural objects,” *SIGRAD 2006* **19(1)** (2006).
- [3] 安部拓也, “粒子ベース液体シミュレーションによる水滴のアニメーション,” **奈良先端科学技術大学院大学修士論文** (2008).
- [4] 菊池 司, 岡崎 章, 藤本 忠博, 村岡 一信, and 千葉 則茂, “屋外景観映像制作のための雲のビジュアルシミュレーション,” **拓殖大学理工学研究報告 9(2)**, 77–84 (2004-10-20).
- [5] 上之和人, “つららの表面上にできる波模様,” **ながれ: 日本流体力学会誌 25(4)**, 381–389 (2006).
- [6] Seipel, S. and Nivfors, A., “Efficient rendering of multiple refractions and reflections in natural objects,” *SIGRAD 2006* **19(1)** (2006).
- [7] 青木 悦子 and 藤代 一成, “モルフォロジーに基づく氷解現象のモデリング,” **情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告 99(70)**, 85–90 (1999-08-23).

- [8] 坂井俊彦, 山本誠, and 水田郁久, “Fegv における着氷現象の数値予測: 運転条件による影響,” **日本ガスタービン学会誌** **38**(3), 187–193 (2010).
- [9] Kim, T., Adalsteinsson, D., and Lin, M., “Modeling ice dynamics as a thin-film stefan problem,” in [*Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*], 167–176, Eurographics Association (2006).
- [10] Moriya, T. and Takahashi, T., “A real time computer model for wind-driven fallen snow,” in [*ACM SIGGRAPH ASIA 2010 Sketches*], 26, ACM (2010).
- [11] Lorensen, W. and Cline, H., “Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm,” in [*ACM Siggraph Computer Graphics*], **21**(4), 163–169, ACM (1987).
- [12] 小口 八郎, “着氷の物理的研究 I. :顕微鏡的構造による着氷の分類,” **低温科学** (1951).
- [13] 小口 八郎, “着氷の物理的研究 II. :着氷の気象条件に就いて,” **低温科学** (1951).
- [14] 小口 八郎, “着氷の物理的研究 III. :着氷の密度に就いて,” **低温科学** (1951).
- [15] 小口 八郎, “着氷の物理的研究 IV. :着氷の寸法効果,” **低温科学** (1951).
- [16] 小口 八郎, “着氷の物理的研究 V. :着氷の顕微鏡的構造と凍結の機巧,” **低温科学** (1951).
- [17] 勝俊, 矢., “蔵王のアイスモンスター (樹氷) と積雪,” **雪氷防災研究発表会講演予稿集** **9**, 13–23 (1993-12-08).
- [18] 気象庁, “風向風速計／簡単な動作点検方法.”  
[http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku\\_guide/c4.htm](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/c4.htm).

[19] 菊池勝弘, [気象ボックス 021 雲と霧と雨の世界 雨冠の気象の科学-I], 成山堂書店 (2008).

[20] Fine Kernel Project, “Fine Kernel Tool Kit System.”  
<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.