

# 熱力学に基づく氷解現象のアニメーション

藤澤 誠<sup>†</sup> 三浦 憲二郎<sup>††</sup>

この論文では、熱力学に基づいた氷解現象のアニメーションを高速に生成する方法を提案する。提案手法は、熱放射の計算にフォトンマッピング法を導入、従来、照明計算に用いられているフォトンマッピング法において、各フォトンに熱エネルギーを格納することによって、シーン中の熱放射現象を高速に解く。また、ボクセル表現を用いて、物体内部の熱伝導、空気との熱伝達についても考慮することで、現実的な氷解現象のアニメーションを生成する。

## Animation of Ice Melting Phenomenon based on Thermodynamics

MAKOTO FUJISAWA<sup>†</sup> and KENJIRO T. MIURA<sup>††</sup>

This paper proposes a fast and efficient method for producing animations of ice melting phenomena. The method presented here introduces the photon mapping method for calculating the thermal radiation. By the photon mapping method usually used for lighting calculation, the thermal radiation phenomenon in a scene is solved efficiently by storing thermal energy in each photon. We show the animation of a realistic ice melting phenomenon can be generated using voxel representation by taking into account the heat conduction inside an object and the heat transfer with air as well.

### 1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) によるアニメーションは、映画、ゲーム、TV などエンターテインメントの分野においては今や欠かせないものとなっており、我々の日常生活に深く浸透している。特に、自然現象、例えば川の流れや風などの流体现象、ロウソクや松明の炎などの燃焼現象、火山の噴火などの爆発、人の運動に伴う布などを CG アニメーションで再現することが非常に重要となる。しかしながら、それらのアニメーション制作は、試行錯誤的にモデル形状を変形したり、エフェクトを追加するなど、非常に複雑で困難な作業となるとともに、多くのノウハウが不可欠であり、クリエイタの熟練した技術と経験が必要であった。そのため、近年、CG の分野において、自然現象を物理法則に基づいてシミュレートする研究が盛んに行われるようになり、リアリティの高いアニメーションを生成するための別のアプローチとして発展してきてい

る。このアプローチでは、例えば液体が流れていくなどの現象を法則として組み込むことができるため、より直感的にアニメーションを生成できる。

氷解現象は、われわれの身近に存在する自然現象のひとつであり、映画や CM など多くの分野で利用されている。氷解現象を物理法則に基づいてシミュレートする場合、伝熱工学に基づき熱移動を解析する必要がある。しかし、これは流体分野における流体解析が複雑であると同様に、コンピュータアニメーションに適用するには複雑であり、かつ計算時間がかかる。その中でも特に問題となるのが、熱放射現象である。

本研究では、氷解現象における熱放射を、グローバルイルミネーション手法であるフォトンマッピング法を用いることで効率的に計算する。また、氷解させるオブジェクトをボクセル化することによって、熱伝導、熱伝達を計算する微分方程式を離散化する。これらを統合して、現実的な氷解現象のアニメーションを生成する。

### 2. 関連研究

青木等<sup>5),11)</sup> はモルフォロジーを用いてモデルを変形することによって、熱力学計算を必要とせずに氷解現象のビジュアルシミュレーションを行った。しかし、この方法では熱源からの熱放射の計算に、ラジオシティ

<sup>†</sup> 静岡大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University

<sup>††</sup> 静岡大学創造科学技術大学院  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

法で用いられているフォームファクタを利用しているため、計算に時間がかかるとともに、鏡面反射などの相互反射も考えられていなかった。Jones<sup>8)</sup>は熱力学に基づいてシミュレーションすることで、物体が溶ける過程をコンピュータグラフィックスとして再現した。物体が溶けている状態(液体と固体の混相状態)を考慮し、レンダリング時にその情報を用い、ボリュームレンダリングと組み合わせた。しかし、熱伝導の計算に陽解法を用いたため、シミュレーションの時間ステップ幅に制限があり、また熱放射に関しても、単に熱源に対する方向のみしか考慮されていなかった。

熱放射を効率的に解くために Howell 等<sup>6)</sup>はモンテカルロ法を放射伝熱の計算に適用した。熱放射は、波動理論により説明されるが、光のエネルギーの最小単位粒子である光子(フォトン)の概念によっても説明でき、フォトンによって熱エネルギーが運ばれるとすることで、熱放射現象を解析することができる。

### 3. 伝熱理論

物質が溶ける現象を物理的に正しくシミュレートするためには、熱の伝わり方、熱の移動する速さなどを計算するために、伝熱工学に関する知識が必要となる。

一般に伝熱工学では、伝熱の形式を、熱伝導、熱伝達、および熱放射の3つに分ける。本章では、熱伝導、熱伝達について述べ、第5章において、熱放射をフォトンマッピング法と関連して述べる。

#### 3.1 熱伝導

熱伝導は固体(あるいは静止している流体)内部における伝熱である。熱は温度の高い分子から、それに接する温度の低い分子へと分子間で直接伝わる。この伝熱の法則は、熱力学第二法則によって必ず高温側から低温側に向かう。

本研究では、熱伝導のシミュレーションを行うために、次のフーリエの微分方程式を用いる。

$$\frac{dT}{dt} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 $T$ は温度、 $a = \lambda/c_p\rho$ は熱拡散率であり、物体の非定常熱伝導における温度分布の時間変化速度の大きさを表している。 $\lambda$ は熱伝導率、 $c_p$ は定圧比熱、 $\rho$ は密度である。式(1)は、物体内の熱特性が均一で、内部から熱を発生しないと仮定したものである。本研究のターゲットである氷解現象を考えると、氷は通常の場合、均質で内部からは熱は発生しない。そのため、この式を離散化して解くことで、氷解現象の熱伝導をシミュレートする。

シミュレーション空間をセル分割し、各セル内の温

度をセル中心で定義し、空間微分を中心差分法によって、時間微分を前進差分によって離散化する。

$\partial T/\partial t$ の時間微分は、風上差分を用いて離散化する。タイムステップ幅を $\Delta t$ とすると、離散化式は以下となる。

$$\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} = a \frac{T_{i+1}^n + T_{i-1}^n + T_{j+1}^n + T_{j-1}^n + T_{k+1}^n + T_{k-1}^n - 6T^n}{h^2} \quad (2)$$

ここで、 $T^n, T^{n+1}$ はあるセルにおける $n, n+1$ ステップの温度値、 $T_{i\pm 1}, T_{j\pm 1}, T_{k\pm 1}$ はその周りのセルの温度値であり、離散化グリッド幅は、全ての軸方向で同じ( $h = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ )とした。式(2)を $T^{n+1}$ について解くことで、簡単に $n+1$ ステップにおける温度を計算することができる。これは、陽解法と呼ばれる方法である。しかし、陽解法で安定に解くためには、CFL条件(Courant-Friedrichs-Lewyの条件)などによりタイムステップ幅に厳しい制限を課す必要がある<sup>8)</sup>より、式(2)を陽解法で解く場合の安定条件は、 $a\Delta t/h^2 \leq 1/6$ である。本研究では、陰解法を用いて式(2)を解く。陰解法では、式(2)を線形連立方程式の形式にすることで、大きなタイムステップに対しても安定に解くことができるため、ユーザが任意のタイムステップを選ぶことができる。陰解法で用いる方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^{n+1} + T_{j+1}^{n+1} + T_{j-1}^{n+1} + \\ T_{k+1}^{n+1} + T_{k-1}^{n+1} + \frac{1-6r}{r} T^{n+1} = -\frac{1}{r} T^n \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $r = a\Delta t/h^2$ である。式(3)は、連立方程式 $Ax = b$ の形式であり、行列ソルバを用いることで解くことができる。このときの行列 $A$ は、正値対称行列となるので、共役勾配法を用いることができる。そこで、本研究では、共役勾配法を用いて高速に式(3)を解く。

#### 3.2 熱伝達

熱伝達は、運動している気体または液体から固体へ、あるいは固体から気体または液体に熱が伝わる伝熱形式である。表面積 $A$ 、固体の温度 $T_w$ 、流体の温度 $T_f$ であるとき、流体から固体への熱伝達は以下の式で表される。

$$Q = hA(T_f - T_w) \quad (4)$$

ここで、 $h$ は熱伝達率であり、熱の伝わりやすさを表す。熱伝達では、熱による流体の対流などを考慮する必要があるが、計算が複雑になってしまうため、本研究では流体の対流は考慮しない。また、シミュレーションでは、空気から固体への熱伝達は考慮するが、固体

から空気への熱伝達は考慮しない。これは、本研究では空気の対流を実際に計算しないが、自然対流や強制対流によって氷の周りの空気は常に一定温度を保っている環境を仮定しているためである。この環境では氷による空気温度への影響が氷の温度変化に影響しない。

図1に物体内部の伝熱をシミュレートした結果を示す。周囲の空気から熱が伝わり(熱伝達)、物体内部を伝わっていく(熱伝導)様子が分かる。

### 3.3 熱放射

熱放射は、炎から熱放射線によって熱エネルギーが移動する場合のように、熱エネルギーが中間の物質には無関係に、赤外線や可視光線を含む電磁波である熱線として伝達される伝熱形式である。

全ての物質は、放射エネルギーを射出しており、物体に入射した放射エネルギーは、吸収、反射、透過される。入射エネルギーを完全に吸収する物体を完全黒体、完全に反射する物体を完全白体、完全に透過する物体を完全透明体という。

ある一定の温度において、ある物体の放射エネルギーが最大となるのは完全黒体のときである。従って、任意の物体のある温度における放射エネルギー量  $E$  は  $E_b$  に対する割合  $\varepsilon$  で表すことができる。

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (5)$$

ここで、 $E_b$  は完全黒体表面から単位面積、単位時間あたりに放射される全エネルギー量である。この  $\varepsilon$  を放射率(emissivity)という。

$E_b$  はステファン-ボルツマンの法則で与えられる。

$$E_b = \sigma T^4 \quad (6)$$

ここで、 $\sigma$  はステファン-ボルツマン定数といい、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$  である。式(6)が示すように、黒体から単位面積、単位時間あたりに放射されるエネルギー量は、絶対温度の4乗に比例する。

実在の物体のほとんどは  $\varepsilon =$  一定である灰色体と呼ばれる物質である。灰色体からの放射エネルギー量  $dQ$  は以下となる。

$$dQ = E dA = \varepsilon \sigma T^4 dA \quad (7)$$

ここで、 $dA$  は放射面積である。熱伝導や熱伝達に比べると、放射で伝わる熱量は、その物体が高温になるほど増大する。また、放射率  $\varepsilon$  は材質のほかに、物体の表面荒さなどによっても変化する。

### 4. 相転移

物質は、固体、液体、気体などのように、ミクロで見ると同じ分子であっても、マクロ的には異なる集合形態を示す。これらのことを「相」と呼ぶ。一般的に、

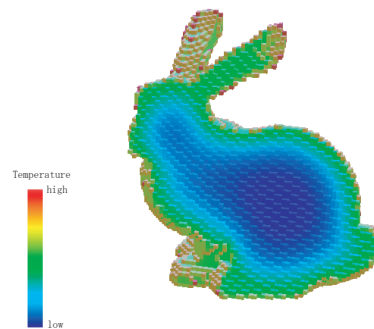


図1 物体内部の伝熱 (Bunny)  
Fig. 1 Conduction in the solid object

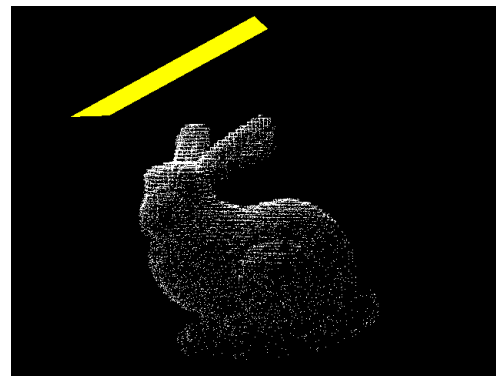


図2 フォトンマップ  
Fig. 2 Photon mapping

物質は固相、液相、気相の3態に分かれる。各相は均一で境界を持ち、密度などの違いによって区別される。

1つの相から別の相への状態変化を相転移といい、本研究で扱う氷解現象のように固相 → 液相の変化も相転移のひとつである(このときの温度を融点と呼ぶ)。固相から液相への相転移では、固相の分子結合を破壊するためにエネルギーが用いられる。このエネルギーを融解熱(あるいは潜熱)という。摂氏0度の氷1kgが完全に液相になるためには、約333kJの熱が必要となる。本研究では、液相になってからのシミュレーションは行わないため、潜熱については考慮しない。しかし、融解後のシミュレーションも行う場合は、潜熱を考慮する必要がある。

### 5. フォトンマッピング法による熱放射計算

Howell等による放射伝熱計算へのモンテカルロ法の適用<sup>6)</sup>は、個別の問題に対応した基礎式や境界条件が必要なく、その手法はCG分野におけるフォトンマッピング法<sup>7)</sup>と非常に良く似ている。よって、本研究では、Howell等の方法をフォトンマッピング法に

導入することで熱放射を効率的に計算する。

従来の放射伝熱解析では、放射エネルギーを連続量として取り扱っていた。しかし、放射伝熱解析にモンテカルロ法を適用する場合、放射エネルギーを連続可変量としてではなく、ひとつひとつが一定のエネルギー量を有する粒子（フォトン）として考える。ここでは、この粒子（フォトン）の取扱いについてフォトンマッピング法と関連づけて述べる。

### 5.1 熱源からの放射エネルギーの射出

熱源からの放射エネルギーを連続量としてではなく、一定のエネルギー量を有するフォトンが射出されると考える。式 (6) より、熱源から射出される単位面積、単位時間あたりのエネルギー量は  $\sigma T^4$  なので、表面積  $A$  の熱源から放出されるフォトン数を  $N$  とすると、フォトン 1 つあたりの熱エネルギーは以下となる。

$$E_p = \frac{\varepsilon \sigma T^4 A \Delta t}{N} \quad (8)$$

ここで、 $\Delta t$  はフォトン放射時間である。本研究では、フォトン「毎時間ステップごと放射」するので、 $\Delta t$  は時間ステップ幅と等しい。また、コンピュータグラフィックスにこれらの法則を導入するため、物体表面の拡散反射率と鏡面反射率のパラメータに放射率  $\varepsilon$  を格納する。これにより、従来のフォトンマッピングプログラムに新たにパラメータを追加することなく計算が可能となる。

### 5.2 射出方向

熱源を散乱面と仮定した場合、フォトンの射出方向分布  $(\theta, \phi)$  は、ランバートの法則に従う。図 3 のような球面座標系を考えた場合、熱源要素からのフォトン射出方向  $(\theta, \phi)$  は、 $[0, 1]$  の一様乱数  $\xi_\theta, \xi_\phi$  を用いることで次式となる。

$$\begin{aligned} \theta &= 2\phi\xi_\theta \\ \phi &= \cos^{-1} \sqrt{1 - \xi_\phi} \end{aligned} \quad (9)$$

### 5.3 放射エネルギーの反射および吸収

熱エネルギーを持つフォトンが物体に到達した場合、物体表面での反射または吸収を考える必要がある。物体表面に入射した放射エネルギーは、表面の吸収率  $\alpha$  に相当する量が吸収され、 $(1 - \alpha)$  に相当する量が反射される。本研究では、フォトンマッピング法と同様に、各フォトンの熱エネルギーを修正するのではなく、一様乱数  $\xi \in [0, 1]$  を用いて、式 (10) で反射・吸収を決定する。

$$\begin{aligned} \xi \leq \alpha & \text{ 吸収} \\ \xi > \alpha & \text{ 反射} \end{aligned} \quad (10)$$

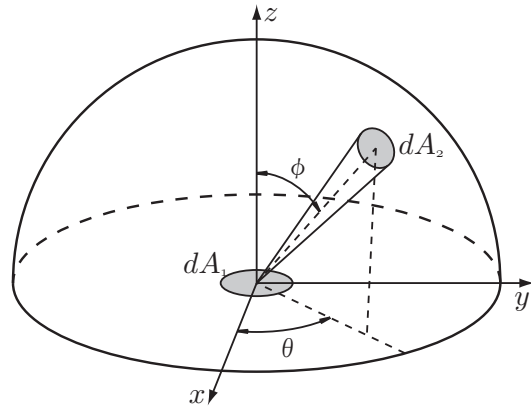


図 3 物体表面からの放射

Fig. 3 Radiation from the surface of the solid object

ロシアンルーレットを用いることで、少なくとも同一の熱源から放出したフォンは、同じ熱エネルギーを持つ。そのため、入射熱エネルギー量を計算するときには、計算セル内に存在するフォトン数を数えるだけでよい。

熱力学より、物体の放射率  $\varepsilon$  と吸収率  $\alpha$  は等しいので、 $\varepsilon$  の場合と同様に  $\alpha$  の値は、物体表面の拡散反射率と鏡面反射率を用いる。図 2 にボクセル化したオブジェクト表面に到達したフォンの分布を示す。図中に黄色で示した多角形が熱源であり、フォトンが吸収された座標が白点で描画されている。それぞれのボクセル表面に吸収されたフォトン数をカウントし、式 (8) より熱放射による熱量を計算する。

### 5.4 熱放射によるボクセル温度の上昇

6.2 節で述べるように、各ボクセルは属性値としてフォトン数を持つ。各時間ステップにおいて、放出されたフォンは、各ボクセルでカウントされる。その情報から熱放射による温度上昇を計算する。フォトンひとつあたりの温度上昇は以下となる。

$$\Delta T_p = \frac{E_p}{c\rho h^3} \quad (11)$$

ここで、 $E_p$  はフォトンひとつあたりのエネルギーであり、式 (8) より算出する。 $h$  はボクセルのグリッド幅である。

## 6. 実 装

### 6.1 処理の流れ

本研究における処理の流れを図 4 に示す。まず、ポリゴンモデルを読み込み、ボクセル化する。その後、熱源、床などボクセルモデル以外の物体を定義する。そして、フォトンマッピング法により熱放射をシミュレーションし、それより伝熱計算を行う。

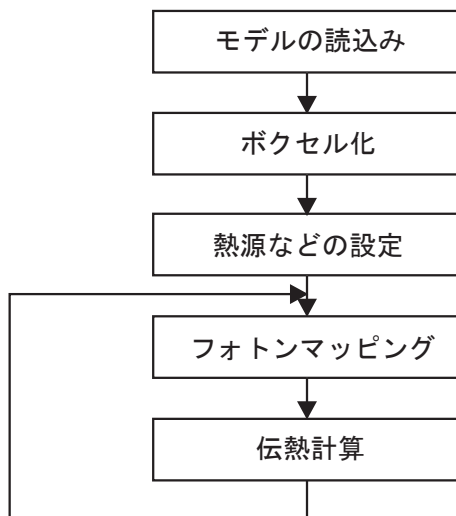


図 4 処理の流れ  
Fig. 4 Flowchart

## 6.2 ボクセル

本研究では、伝熱計算における物体内部の熱伝導計算にボクセルを用いる。ボクセルには属性値として以下の情報を格納する。

- (1) 温度
- (2) フォトン数

(2) は熱放射の計算に用いるパラメータである。本研究では、計算結果をレンダリングするために、ボクセルの表面を覆うポリゴンモデルを描画する。しかし、そのままレンダリングしたのでは、表面の凹凸が目立ち、あまり滑らかではないため、Fairing<sup>10)</sup> という処理を実行することで表面を滑らかにする。

## 7. 結果と議論

シミュレーションを行った結果を以下に示す。使用した計算機の CPU は Pentium4 2.6GHz で 512MB のメモリを搭載している。

図 5(a)~(f) は、 $64^3$  のボクセルで構成された立方体の例である。図 5(a) は初期状態であり、図中に黄色で示した位置に平面熱源を設定した。図 5(b)~(f) から熱源からの熱放射によって、立方体上部が溶けているのが確認できる。熱源の方向性のみを考慮した場合<sup>8)</sup> と異なり、熱源の形状が溶け方に反映されているため、立方体上部が凹形状になるように溶けているのが分かる。また、周りの空気からの熱伝達によって立方体の各エッジが滑らかになっている。この例では、ボクセル数は約 26 万個、熱放射に用いるフォトン数は 30,000 個であり、計算には 1 ステップあたりフォトン射出に最大 5.6[s]、伝熱計算に 0.2[s] かかった。また、ボクセル

化によって複雑な形状にも対応できる。その例として、図 6(a)~(f) に Stanford bunny, 図 7(a)~(f) にペンギンのモデルの例を示す。ボクセル分割数は  $128^3$  とした。図 6(a), 図 7(a) がそれぞれの初期状態であり、図中に黄色で示した場所に斜め向きの平面熱源を設定し、熱放射の計算に用いるフォトン数は両方とも 30,000 個とした。Stanford bunny の例では、ボクセル数は約 42 万個、計算には 1 ステップあたりフォトン射出に最大 7.7[s]、伝熱計算に 0.4[s] かかった。また、ペンギンの例では、ボクセル数は約 18 万個、計算には 1 ステップあたりフォトン射出に最大 7.9[s]、伝熱計算に 0.2[s] かかった。重力の影響を考慮していないため、ペンギンの手が本体から離れても宙に浮いている。

図 8 に屈折球による熱の集中の例を示す。ここでは太陽光のように熱が光とほぼ同じ性質を示している場合の例である。計算時間と立方体のパラメータ等は、図 5 とほぼ等しく、図 8(a) は初期状態であり、図中に黄色で示した位置に平面熱源を設定し、水色で描画された球はガラス球を示している。図 8(b) は図 2 と同様にオブジェクト表面に到達したフォトンの分布を示している。フォトンが屈折球によりその軌道が曲げられ、立方体上部真ん中付近に集中していることが分かる。図 5(b),(c) にシミュレーション結果を示す。フォトンが集中した箇所から溶けているのが分かる。

このシミュレーションでは、オブジェクトを離散化するために、ボクセルを用いた。そのため、特に熱伝導、熱伝達の計算時間はボクセル数に依存している。しかし、熱放射の計算では、ボクセルの表面に対応するポリゴンモデルを生成して、それをフォトンマップ生成に用いているため、ボクセル数にあまり依存しない結果となった。また、熱伝導の計算に陰解法を用いたことで、比較的大きな時間ステップ幅をとることができ、必要な総計算ステップ数を少なくとも 500 ステップ以下にすることができた。これは、1 つのアニメーションに 8000 ステップかかった Jones による陽解法による手法<sup>8)</sup> と比べて非常に少なく、陰解法を用いたことによる計算量の増大を十分カバーできると思われる。

## 8. 結 言

この論文で、伝熱計算において計算負荷の大きい熱放射の計算にフォトンマッピング法を用いることで、高速に現実的な氷解現象アニメーションを生成する方法を提案し、その有効性を確認できた。

今後の課題として、以下があげられる。

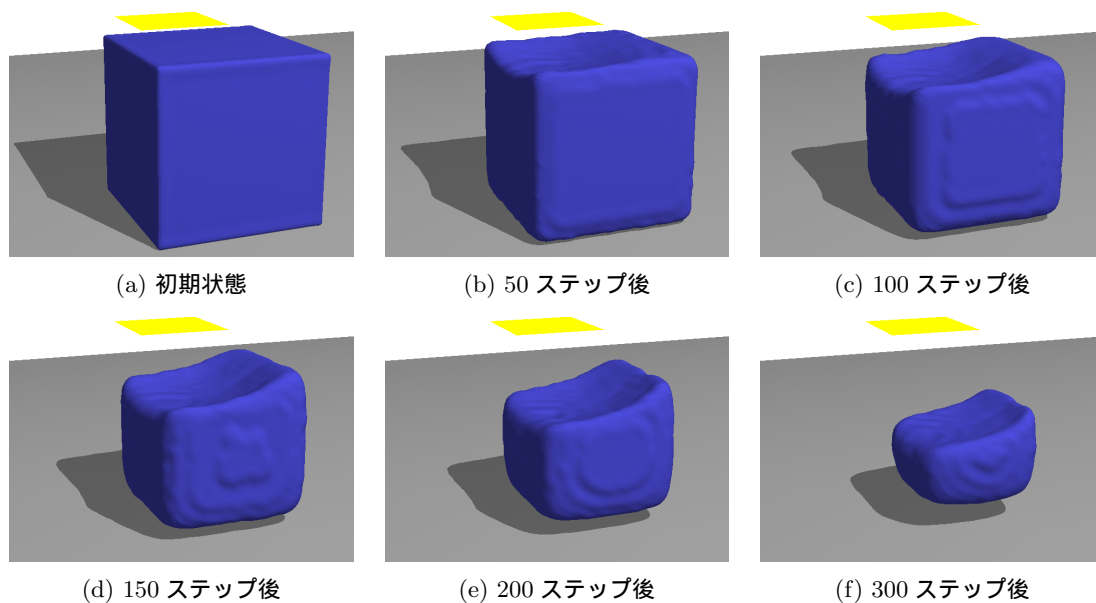


図 5 立方体  
Fig.5 Cube

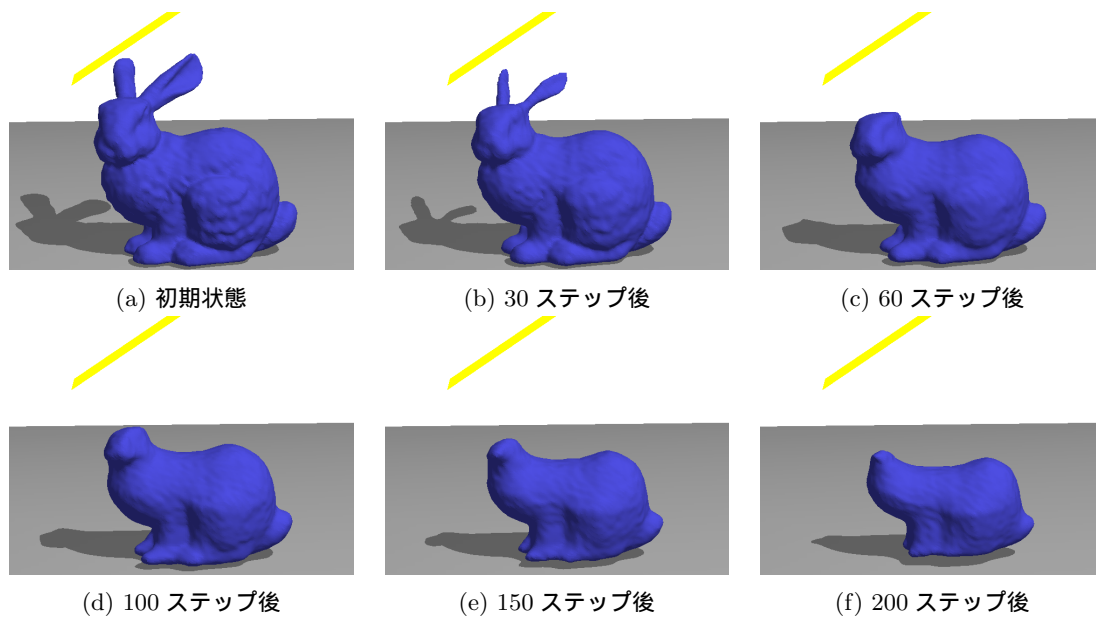


図 6 Stanford bunny  
Fig.6 Stanford bunny

(1) オブジェクト周囲にできる熱による空気の対流の考慮：本研究では、空気から氷への熱伝達しか考慮していないが、実際の現象では、氷によって周りの空気が冷やされる．それにより生じる

温度差によって起こる自然対流が氷解に及ぼす影響を考慮する必要がある．また、外部から強制的に風を送るなどの強制対流は、自然対流と比べてもより大きな影響を持つと思われる．こ



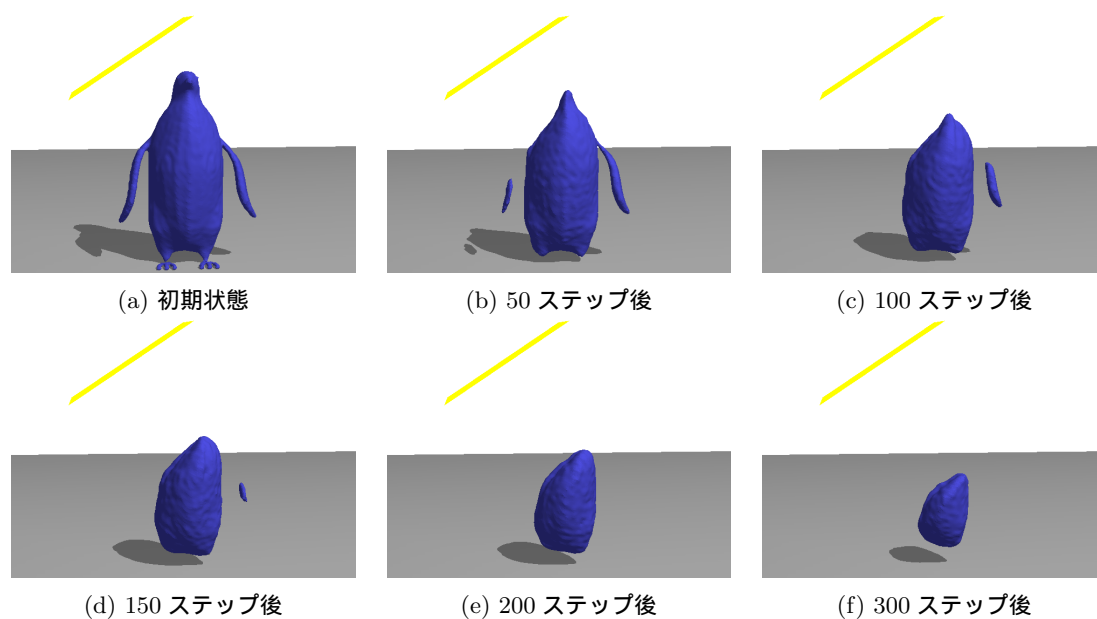


図 7 ペンギン  
Fig. 7 Penguin

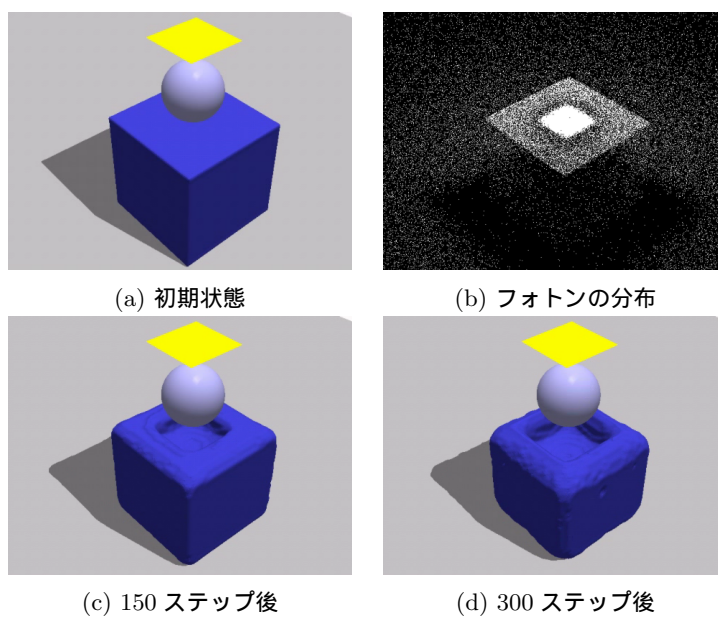


図 8 屈折球  
Fig. 8 Refraction Ball

これらの空気対流には, semi-Lagrangian 法<sup>9)</sup>などを用いることが考えられる。そして, 空気が対流することで背景が揺らいで見える現象を再現することで, より現実性は高くなるであろう。

- (2) 相転移における混相状態の考慮した描画 : Jones<sup>8)</sup> が提案したように, 氷と水が混在している混相状態を考慮し, 各ボクセルについてそ

- の内部で氷の占める割合を用いてレンダリングすることで、より自然なアニメーションが可能となる。
- (3) 氷解後に溶けた水が物体表面を流れ落ちる様子のシミュレーションおよびレンダリング：固体が液体になった後のシミュレーションとレンダリングは、流体力学の問題となる。氷解現象では特に、固体と液体の相互作用が重要となる。これには、レベルセット法<sup>3),4)</sup>やMAC法<sup>2)</sup>などが考えられる。
- (4) 流れ落ちる水がオブジェクトに及ぼす影響の考慮：(3)で液体をシミュレートすることで、(1)と同様に熱伝達問題として解決できるものと考えられる。このとき、氷から水への熱伝達を考慮することで、再氷化<sup>5)</sup>の問題についても再現できると思われる。
- (5) 重力の考慮：地球上の物体は常に重力の影響を受けており、固体が溶けていくことによる形状変化によって、物体の倒壊、倒壊による分離などが起こる。これは、剛体シミュレーション<sup>1)</sup>の分野に近いが、物体を形状の変化しない剛体として扱っているため、分離や形状変化に対するモデリング上の工夫が必要である。

謝辞 図6の初期形状はStanford bunnyであり、Stanford 3D scanning repositoryに帰属します。また、貴重なご意見をいただきました査読者の方々に感謝致します。

### 参 考 文 献

- 1) Bourg, D.M.: *Physics for Game Developers*, O'REILLY (2002).
- 2) Carlson, M., Mucha, P.J., III, R. B. V. H. and Turk, G.: Melting and Flowing, *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (2002).
- 3) Enright, D., Marschner, S. and Fedkiw, R.: Animation and Rendering of Complex Water Surface, *Proceedings of SIGGRAPH 2002*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, pp.744–736 (2002).
- 4) Foster, N. and Fedkiw, R.: Practical animation of liquids, *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, pp.23–30 (2001).
- 5) Fujishiro, I. and Aoki, E.: Volume graph-

ics modeling of ice thawing, *Volume Graphics 2001*, pp.69–80 (2001).

- 6) Howell, J.R. and Perlmutter, M.: Monte Carlo solution of thermal transfer through radiant media between gray walls, *J. Heat Transfer*, Vol.86, pp.116–122 (1964).
- 7) Jensen, H.W.: Global Illumination using Photon Maps, *Rendering Techniques '96 (Proceedings of the Seventh Eurographics Workshop on Rendering)*, pp.21–30 (1996).
- 8) Jones, M.W.: Melting Objects, *The Journal of WSCG*, Vol.11, No.2, pp.247–254 (2003).
- 9) Stam, J.: Animation and Rendering of Complex Water Surface, *Proceedings of SIGGRAPH 99*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, pp.121–128 (1999).
- 10) Taubin, G.: A Signal Processing Approach to Fair Surface Design, *Proceedings of Siggraph'95*, pp.351–358 (1995).
- 11) 青木悦子, 藤代一成: モルフォロジーに基づく氷解現象のビジュアルシミュレーション, *Visual Computing グラフィクスとCAD 合同シンポジウム 2000 予稿集*, pp.41–46 (2000).

(平成 17 年 6 月 3 日受付)

(平成 18 年 5 月 10 日採録)



藤澤 誠 (正会員)

昭和 55 年生・平成 15 年静岡大学工学部機械工学科卒業・平成 17 年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了・静岡大学大学院理工学研究科博士課程在学中・日本学術振興会特別研究員 DC・物理シミュレーション等の研究に従事。



三浦憲二郎 (正会員)

昭和 34 年生・昭和 57 年東京大学工学部精密機械工学科卒業・昭和 59 年同大学院修士課程修了・同年、 كانون (株) 入社・機械系 CAD/CAM システムの開発に従事・平成 3 年コーネル大学機械工学科博士課程修了 (Ph.D.)・平成 5 年会津大学コンピュータ理工学部コンピュータソフトウェア学科助教授・平成 9 年静岡大学工学部機械工学科助教授・平成 16 年同教授・平成 18 年同大学創造科学技術大学院教授形状処理工学, CAD/CAM, 物理シミュレーション等に興味を持つ・ACM, IEEE 各会員。