

モルフォロジーに基づく氷解現象のモデリング

青木 悦子 藤代 一成[†]

お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科

[†] お茶の水女子大学 理学部 情報科学科

〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

etsu@imv.is.ocha.ac.jp, [†]fuji@is.ocha.ac.jp

自然物象の質感をCG表現する研究がさかんに行なわれている。しかし、一般的に自然物象を物理シミュレーションによって再現するには膨大な時間的コストが必要となるため、対話性の確保が難しい。そこで、なるべく複雑な計算をせずに視覚的に物理シミュレーションとほぼ同等な結果が得られるような現象学的モデル (phenomenological model) に基づくビジュアルシミュレーションが重要視されてきている。氷は日常よく目にする自然物の一つであり、氷解現象は映画やCMなど多くの分野で利用されている。本研究では、この氷解現象をとりあげ、Mathematical Morphology(モルフォロジー) に基づく専用の形状変形オペレータを設計し、そのビジュアルシミュレーションの実現を試みる。

Morphological Modeling of Ice Thawing

Etsuko Aoki Issei Fujishiro[†]

Graduate School of Humanities and Sciences

[†] Department of Information Sciences

Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan

etsu@imv.is.ocha.ac.jp, [†]fuji@is.ocha.ac.jp

Image synthesis of natural phenomena is one of the active research areas in computer graphics. Since the pursuit of photoreality requires physically-based computation at the cost of interactivity, much more attention has been paid to phenomenological models which strive to produce the same visual effect as physically-based models, without highly-complex computations. This paper focuses on ice thawing, which is one of the most common phenomena in our daily life, and attempts to design a specific morphological operator for the visual simulation.

1 背景と目的

自然物象の質感を CG によって表現する研究が古くから行われてきている。そのためには、対象の構造がもつ不規則性や複雑さを理解する必要がある。そこで、物理法則に基づくモデリング (physically-based modeling) がさかんに研究されている (例えば [2])。一般に自然物象の物理的な原理に沿ったシミュレーションでは、膨大な計算コストが必要となるため、問題点として対話性の確保の難しさがあげられる。このような問題点を解決するために、なるべく複雑な計算をせずに視覚的に物理シミュレーションとほぼ同等な効果が得られるような現象学的モデル (phenomenological model) に基づくビジュアルシミュレーションが重要視されてきている。

氷は日常よく目にする自然物の一つであり、氷解現象は映画や CM など多くの分野で利用されている。

氷解現象には以下のような特徴がある [3]:

- (i) 表面が熱エネルギーを吸収して解け始める。
- (ii) 凹凸があるとその部分だけ表面積が大きくなるため、熱エネルギーを多く吸収して速く解ける。
- (iii) 太陽光や、他の物体が接触することで生ずる摩擦熱などの熱源が存在すると、熱源方向を向いている面は熱エネルギーを多く吸収して速く解ける。
- (iv) 重力により解けた水が落下すると、その水が熱源となり、その部分が速く解ける。
- (v) 結晶境界が解けると単結晶の粒が離れ、氷の内部に縦横の網目のようなものが見える。

氷解現象を物理シミュレーションによって再現する際にも、複雑な熱力学的計算が必要となり、実用的ではない。そこで本研究では、この氷解現象をとりあげ、Mathematical Morphology(以下、モルフォロジーと記述) [5] に基づく専用の形状変形オペレータを設計し、そのビジュアルシミュレーションの実現を試みる。著者の一部によって、すでに石の風化の画像合成にモルフォロジーを適用す

る研究が行われている [7]。本研究の目的は、氷解という異なる原理に基づく現象に対しても、モルフォロジーが適用可能かどうかを探ることにある。

本論文は以下のように構成されている。まず次節で形状変形オペレータを提供するモルフォロジーの特徴と、氷解現象の表現に適用可能であると考えられる *opening* オペレータについて説明する。そして第 3 節で *opening* を拡張し、氷解現象専用の形状変形オペレータである *thawing* を設計する。続く第 4 節で *thawing* オペレータの妥当性を検証する実験を行い、その結果に考察を加える。最後に第 5 節でまとめと今後の課題を述べ、本論文を締めくくる。

2 モルフォロジー

本研究では、前節であげた (i) から (iii) の特徴に留意して氷解現象のビジュアルシミュレーションの実現を目指す。そこでまず、既存のモルフォロジーオペレータ *opening* が特徴 (i), (ii) を満たすことを示す。

2.1 モルフォロジーの特徴

1975 年に Matheron によって提案されたモルフォロジーは、以下のような特徴をもつ:

- モルフォロジーで定義される任意のオペレータは、数個の基底オペレータで表現可能であり、効率の良い実装方法がすでに知られている。
- 複雑なオペレータでも、より基本的なオペレータを組み合わせて、ブロックダイアグラム上で設計が可能である。
- 制御成分である structuring element(SE) の形状や大きさを調節することで、容易にさまざまな変形効果を得ることができる。

モルフォロジーは、ローパスフィルタに代表される信号処理や、エッジ検出、ノイズ除去などの画像処理における主要な手法として既に確立している。同様の効果は、3次元画像であるボリュームの解析

にも利用され始めているが [9], 本研究では, モデル化されたボリュームから画像合成を行うボリュームグラフィックス [6] の一手法として利用しているところが, 他の研究から差別化できる主要な点である.

2.2 opening オペレータ

本研究で用いるデータは, 要素の値として 1 (氷内部) か未定義を示す * の 2 つだけを許す 2 値ボリュームデータである. その表記には, 要素の値が 1 であるボクセルの集合を用いることにする. 1 の要素が 7 個の 2 値ボリュームデータの例とその表記法を図 1 に示す.

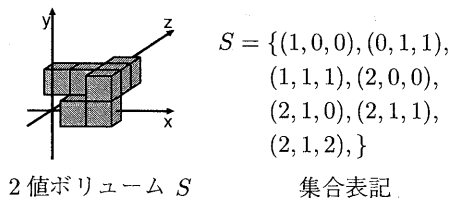


図 1: 2 値ボリュームデータの表記法

本研究では, モルフォロジーの中でも特に opening オペレータに注目する. opening は以下のように定義される.

$$\text{opening}(S, T) = \text{dilation}[\text{erosion}(S, T), T]$$

(S:元データ, T:SE)

ここで S と T は先に述べた 2 値ボリュームデータで与えられる. また erosion, dilation オペレータは以下のように定義される:

$$\text{erosion}(S, T) = \bigcap_{(i_n, j_n, k_n) \in T} \text{trans}(S; -i_n, -j_n, -k_n)$$

$$\text{dilation}(S, T) = \bigcup_{(i_n, j_n, k_n) \in T} \text{trans}(S; i_n, j_n, k_n)$$

ここで trans オペレータは平行移動オペレータであり, 次のように定義される:

$$\text{trans}(S; i, j, k) = \{(l_t, m_t, n_t) | l_t = l + i, m_t = j + n_t + k, \text{ただし } (l, m, n) \in S\}.$$

erosion は S の各要素を T の各要素で負の方向に平行移動したボリュームの積集合として,

dilation は S の各要素を T の各要素で平行移動したボリュームの和集合としてそれぞれ定義される.

opening オペレータは, 次に示す基本的な代数学的特性をもっている:

- 反拡張性: $\text{opening}(A, E) \subset A$
- 単調増加性: $A_1 \subset A_2 \Rightarrow \text{opening}(A_1, E) \subset \text{opening}(A_2, E)$
- 巾等性: $\text{opening}[\text{opening}(A, E), E] = \text{opening}(A, E)$

C, = などの比較オペレータは, 2 値ボリュームデータの集合表記法に対して定義される.

図 2 に 2 次元での opening オペレータの実行例を示す.

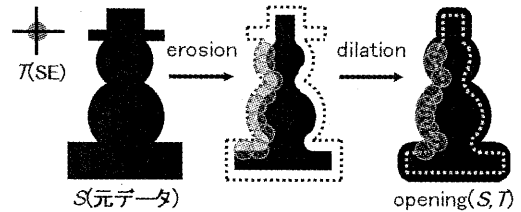


図 2: 2 次元 opening の実行例

この例からも, opening オペレータには, 以下のような特徴があることがわかる.

- (1) 角を丸めて滑らかにする
- (2) 細かな凹凸を侵食する
- (3) 曲率の大きい箇所を削除する

以上から opening オペレータは前節の (i) と (ii) であげたような氷解現象の特徴を表現するための基質を備えていることがわかる. しかし opening オペレータでは前節の (iii) 以降にあげた特徴を再現することはできない. 次節では, 前節で述べた氷解現象の特徴 (iii) も併せて表現するために, 仮定された面熱源に対し氷解の形状変形を行う 2 種類の thawing オペレータを示す.

3 Thawing オペレータ

3.1 涙型 SE を用いる従来法

opening を実行する際、熱源方向を考慮するように SE の形状を工夫すれば、第 1 節で述べた (iii) のような特徴も同時に表現できる *thawing* オペレータの第一近似が得られると考えられる。先の報告 [1] では、熱源と反対方向にある氷は相対的に融解しないという点に注目し、SE の形状に図 3 に示すような半径 r の球と底面の半径 r 、高さ h の円錐を組み合わせた涙型を採用した。熱源と反対方向に円錐の先が向くようにすることで、熱源方向の面はより丸みを帯び、反対方向の面は角張ったまま残すことがこの *thawing* オペレータのねらいであった。

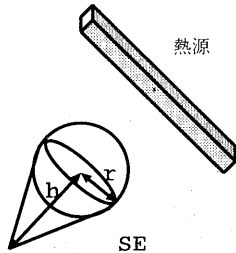


図 3: *thawing* 用 SE

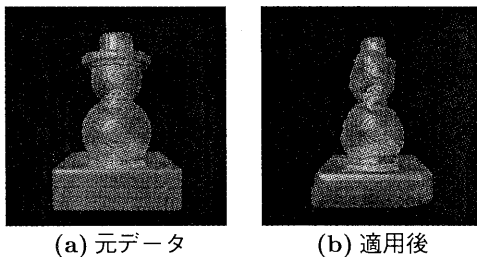


図 4: 涙型 SE 適用例

図 4 に涙型 SE を用いた *thawing* オペレータの適用例を示す。右上方向に面熱源を仮定したにもかかわらず、この方法では図 4(b) のように入力されるボリュームデータに対して仮定した面熱源からの熱の伝わり方にそぐわない解け方が見られることがわかった。これは面熱源からの熱伝達の大

域的な不均等分布を考慮していなかったためであり、また SE は対称な形状であるべきであるというモルフォロジーの基本概念 [5] を無視してしまったためでもあると考えられる。

3.2 疑似フォームファクタを用いた改良法

そこで本論文では、上記の問題点を解決するために熱源からの熱の伝達率を考慮したモデリングを指向し、ラジオシティ法 [4] で用いられるフォームファクタの概念を利用することを考える。フォームファクタはエネルギーの授受率を表すもので、物体の幾何学的形状と空間内の位置関係だけに依存する。以下で用いるフォームファクタはラジオシティ法で用いられるものに比べ厳密性に欠けるので、以降このフォームファクタを疑似フォームファクタとよぶことにする。

改良法は、入力ボリュームの表面の各ボクセルに対して面熱源からの疑似フォームファクタを求め、*erosion* を実行する際に疑似フォームファクタの大きさに比例して球状 SE の半径を変化させ、その後、*dilation* を実行する際の球状 SE の半径には *erosion* で用いられた最小の半径を適用する方式をとる。結果として、面熱源に向かう部分は多く侵食され、そうでない部分は元の形状に近い形で残るといことが期待できる。

なお、この方法では面熱源もボリュームデータとして扱う。こうすることで疑似フォームファクタ計算もボリュームグラフィックス [6] の範囲で行える。

疑似フォームファクタ計算の手順は以下の通りである：

1. 入力データの表面に存在するボクセルを判定する
2. 入力データ表面の各ボクセルから面熱源表面の各ボクセルに対してレイキャスティングを行う。
3. レイキャスティングの結果、入力データ表面のボクセルとの間に障害物がなかった面熱源の表面ボクセル数と面熱源表面の総ボクセル数の比を求める。

4.3の結果を面熱源とボクセルとの距離で割ったものを疑似フォームファクタとする。

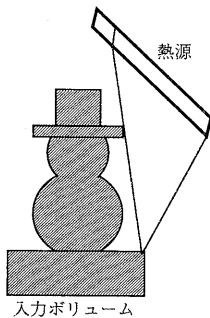


図 5: 疑似フォームファクタの計算

本来ならば疑似フォームファクタはボリューム内のすべてのボクセルに対して計算すべきである[10]。しかし本法では、表面のボクセルに対してだけ疑似フォームファクタを計算している。これは、*opening*, *thawing* オペレータにおける形状変形の効果がボリュームの境界付近にだけ見られるため、疑似フォームファクタの値によってSEの大きさを変化させる本方法では、表面の疑似フォームファクタによる侵食の結果、残ったボリューム内部の疑似フォームファクタは相対的に微小であると考えたためである。このことによって、結果としては *thawing* オペレータ全体の計算時間を削減することができる点に注目してほしい。

さらに、本法では *erosion* と *dilation* を実行する際のSEの大きさが異なる領域ができるので、*opening* における中等性(2.1項参照)は成立しなくなる。すなわち、本方法を繰り返し適用することによって、熱源に面しているボリュームがより多く侵食されていくような経時的变化のモデリングが可能である。

4 実験と考察

疑似フォームファクタを採用した *thawing* オペレータをC言語で実装し、それを簡単な形状のボリュームデータ(100×100×100ボクセル)に適用した。使用したハードウェアはSGI社製O2システム(CPU: R10000, Clock: 195MHz, RAM: 256MB),

可視化ソフトウェアには VolVis Ver.2.1[†]を用い、ボリュームレイトレーシングによってレンダリングを行った。

右上方向に面積 $30 \times 40 \times 1$ ボクセルの面熱源を仮定し、SEの形状には半径が2ボクセルから6ボクセルの5種類の球を用いた。この例ではモデリングに約6時間、レンダリングに約5分を要した。図6に結果を示す。

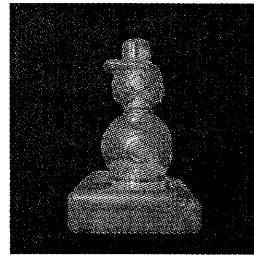


図 6: 図4(a)に改良法を適用した結果

元のデータ(図4(a))と比較すると、熱源方向に多く解けた効果を確認することができる。従来法(図4(b))との比較から明らかなように、熱伝達の仮定に合致した氷解速度が今回の方法では実装され、従来法の問題点が解消できたといえる。

また図7に *thawing* オペレータを反復的に適用した例を示す。入力ボリュームデータ、面熱源、SEの形状には前述の実験と同様のデータを用いた。熱源に向かって徐々に融解していく経時的变化の様子が確認できる。

5 まとめと今後の課題

日常的に目にする自然物象の一つである氷解現象をとりあげ、それをCGで再現するようなモルフォロジーオペレータ *thawing* を開発した。先行研究で設計した *thawing* オペレータでは、熱源の影響による解け方の偏りは再現できたが、熱源からの大域的な熱伝達の考慮が不足していた。本論文では、それをラジオシティ法で用いられるエネルギーの授受率を表すフォームファクタに近いコンセプトを

[†]米国 New York 州立大学 Stony Brook 校 Center for Visual Computing において開発されているフリーウェア。

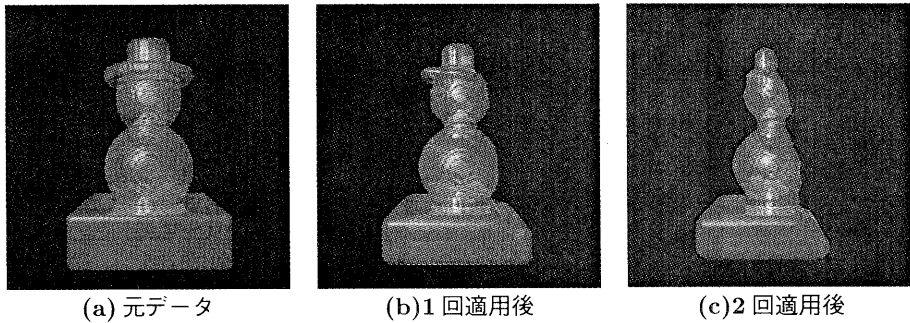


図 7: *thawing* オペレータの反復適用実験の結果

利用する方法を考案することにより改良した。そして基本実験により改良法の有効性が検証できた。

今後の主要な課題としては以下の4点があげられる。

- *thawing* オペレータを高速化する。モデリングに関しては計算コストをより抑えたオペレータの計算法の工夫が必要である。ボリュームレンダリングの高速化に関しては、リアルタイムボリュームグラフィックスボード VolumePro[8]の利用が考えられる。
- 現行の *thawing* オペレータでは面熱源を仮定しているが、任意の形状の熱源にも対応可能なようにオペレータを改良する。
- 現状では第1節の(iv)で述べた重力を考慮した氷解現象の特徴は表現されていない。今後はその特徴を解析し、近似度をより高めたオペレータを開発し、より現実に近い画像を生成したい。
- 氷の滑らかさを表現するために、アンチエイリアシング処理を施す必要がある。これにはボリュームサンプリング [11] が効果的であると考えられる。

参考文献

- [1] 青木 悦子, 藤代 一成: Mathematical Morphology に基づく氷解現象のビジュアルシミュレーション, 第 58 回情報処理学会全国大会, 1K-02, 1999 年 3 月
- [2] 長田 典子, 土橋 外志正, 真鍋 佳嗣, 井口 征士: 真珠のビジュアライゼーションにおける Physics-Based Modeling, Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム'98 予稿集, 1998 年 6 月, pp.103-108.
- [3] 前野 紀一: 氷の科学, 北海道大学図書刊行会, 1981 年
- [4] Cohen, M. F. and Wallace, J. R.: *Radiosity and Realistic Image Synthesis*, Academic Press, 1993.
- [5] Giardina, C. R. and Dougherty, E. R.: *Morphological Methods in Image and Signal Processing*, Prentice Hall, 1987.
- [6] Kaufman, A. E., Cohen, D. and Yagel, R.: "Volume graphics," *IEEE Computer*, vol. 26, no. 7, pp. 51-64, July 1993.
- [7] Ozawa, N. and Fujishiro, I.: "A Morphological approach to volume synthesis of weathered stones," In *Proc. Volume Graphics Workshop'99*, Swansea, March 1999, vol.II, pp. 207-220.
- [8] Pfister, H., Hardenbergh, J., Knittel, J., Lauer, H. and Seiler, L.: "The VolumePro real-time ray-casting system," To Appear in *Proceedings of SIGGRAPH99*, August 1999.
- [9] Sakas, G. and Walter, S.: "Extracting surfaces from fuzzy 3D-ultrasound data," In *Proc. SIGGRAPH95*, August 1995, pp. 465-474.
- [10] Sobierajski, L. M.: *Global Illumination Models for Volume Rendering*, Doctoral Dissertation, Department of Computer Science, State University New York at Stony Brook, July 1994.
- [11] Wang, S. W. and Kaufman, A. E.: "Volume-sampled 3D modeling," *IEEE CG & A*, vol. 14, no. 5, pp. 15-20, September 1994.