

## 経時変化するオブジェクトのボリュームモルフォロジー†

2E-4-2

藤代 一成 青木 悦子‡ 小澤 奈緒‡

お茶の水女子大学 理学部情報科学科 † 大学院人間文化研究科

## 1 はじめに

時間の進行につれて、オブジェクトの表面属性や形状の微細構造にきたす変化を画像合成する技術は、拡張現実感をはじめ、実画像とのシームレスな融合を実現する上で必要不可欠である。ところが、そのような経時変化する物理的原理に基づいてシミュレートする物理法則ベースモデリングは、概して時間的コストが膨大になり、対話性の観点からみて実用的とはいえない。そこで、必ずしも物理則に従わなくても、少数の制御パラメータの操作により、視覚的に近いオブジェクトの経時変化する効果を表出できるような、可制御性に富む現象学的モデル (*phenomenological model*) を構築しなければならない。

そこで本稿では、石の風化等の経時変化するビジュアルシミュレーションのための現象学的モデルとして、3次元離散モルフォロジー [9] に基づく統一したアプローチを提案する [13, 8]。モルフォロジーは、75年に Matheron によって提案されて以来、信号解析や2/3次元画像解析に多用されてきた方法論であり、以下のような特長をもつ：

- モルフォロジー特有の各基底オペレータに対して、効率の良い実装方法が知られている。
- 任意のモルフォロジーオペレータは、基底オペレータを組み合わせ、ブロックダイアグラムを用いて設計可能である。
- 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、さまざまな変形効果を容易に得ることができる。

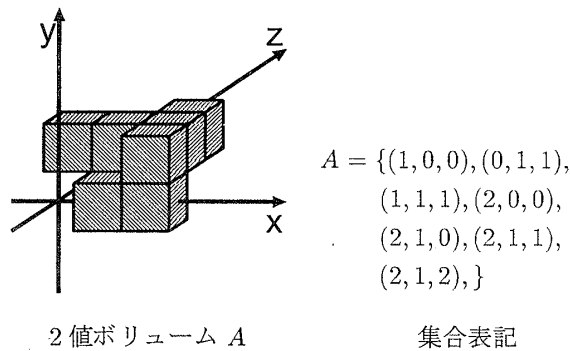
本研究では、上記の特長を現象学的モデルとしての基質にとらえ、モルフォロジーをボリュームグラフィックス [11] の一手法として利用する。従来の画像解析手法としてでなく、画像合成手法としてモルフォロジーに注目したところは、本研究を他から差別化できる重要なポイントである。

本稿は以下のように構成されている。次節では、本稿で一貫して利用する対象のボリュームデータ構造を示したのち、オブジェクトの経時変化するシミュレートする上で基盤となるモルフォロジーオペレータである *opening* を簡単に説明する。そして続く3節で、その *opening* を拡張し、日常的に目にする「石の風化」という特定の経時的形状変化に対応する専用オペレータを開発し、その妥当性を実験により検証する。最後に4節で、現在取り組んでいる「氷解現象」オペレータの中間結果を用いて、モルフォロジーアプローチの適用可能性の広範さを示して本稿をまとめる。

2 *opening* オペレータ

本稿で用いるデータは、要素の値として1 (オブジェクト内部) か、あるいは未定義を示す \* の2つだけを許すような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。要素が7個の2値ボリュームデータ *A* とその表記の例を図1に示す。

† Volume Morphology for Time-Changable Objects  
Issei Fujishiro, Etsuko Aoki and Nao Ozawa  
Ochanomizu University, 2-1-1 Otsuka, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan  
E-mail: fuji@is.ocha.ac.jp, etsu@imv.is.ocha.ac.jp



2 値ボリューム A 集合表記

図 1: 2 値ボリュームデータの表記法

本研究では、既存のモルフォロジーオペレータの中でも、*opening* に注目する。*opening* は以下のように定義される:

$$opening(A, E) = dilation[erosion(A, E), E] \quad (A: \text{元データ}, E: SE)$$

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

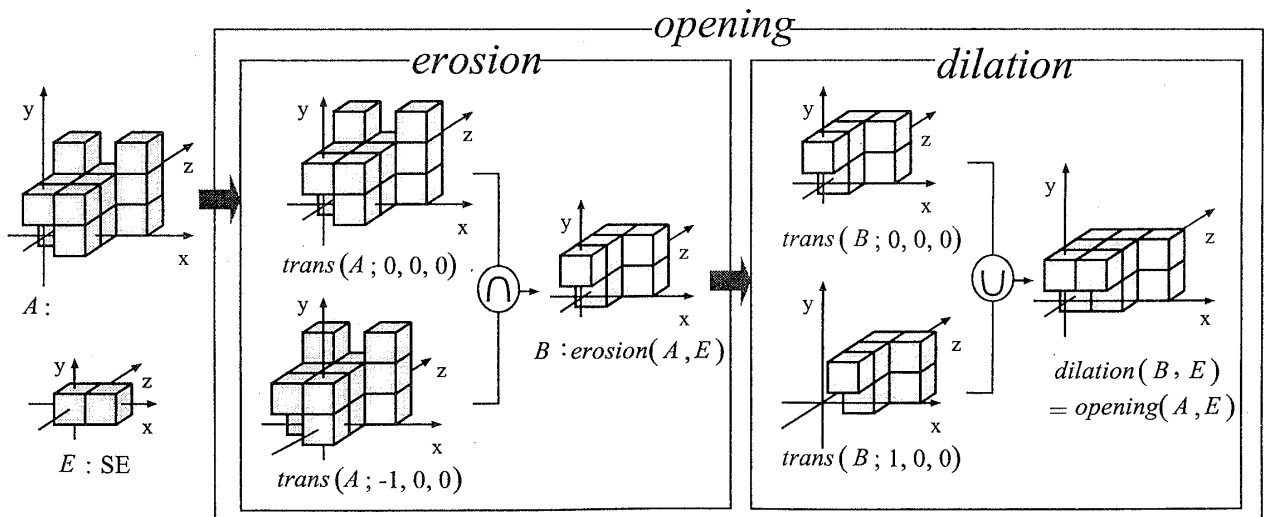
$$erosion(A, E) = \bigcap_{(i_n, j_n, k_n) \in E} trans(A; -i_n, -j_n, -k_n)$$

$$dilation(A, E) = \bigcup_{(i_n, j_n, k_n) \in E} trans(A; i_n, j_n, k_n)$$

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:

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

すなわち、*erosion* は、 $A$  の各要素を  $E$  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、また *dilation* は、 $A$  の各要素を  $E$  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。図 2 に *opening* オペレータの実行例を示す。



よりマクロな視点からみた *opening* オペレータの変形効果を確認するために、2次元の例を図3に示す。この例は、*opening* オペレータを用いれば、ソリッドオブジェクト *A* が別のソリッドオブジェクト *E* の接触作用によって削りとられる効果を表出できる可能性を示している。その変形効果には以下のような特徴がある：

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

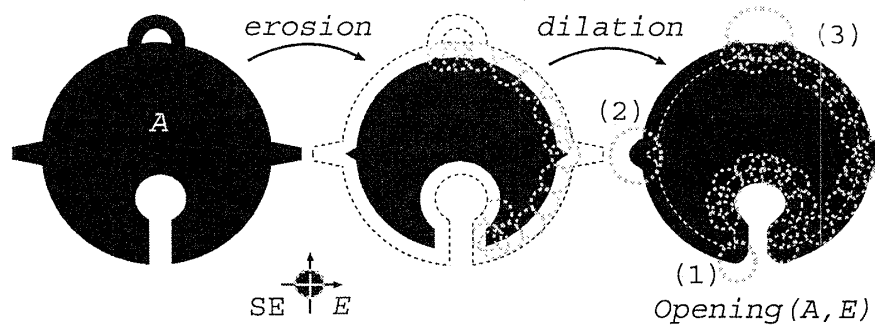


図 3: 2次元 *opening* の変形効果

より一般的にいえば、*opening* オペレータには、次に示すような基本的な代数的特性が知られている [9]:

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

ここで、 $\subset$ ,  $=$  などの比較オペレータは、図1に示した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。反拡張性と単調増加性は、上記の *opening* の変形効果の妥当性を保証するものである。ただしその効果は、巾等性により、十分長い時間が経過した後の結果であることに注意しなければならない。自然界のオブジェクトに対する経時的変形オペレータは、1回の適用が一定の有限時間内の変形効果に対応し、かつ外界の要因を反映して、確率的に微妙な変形効果の差を与えられる必要がある。そこで次節では、この分析をベースに *opening* を発展させて、「石の風化」という具体的な物象に対する経時的変化をシミュレートする高次モルフォロジーオペレータを設計する。

### 3 石の風化

オブジェクト表面の汚れや朽ちなどのエイジング (*aging*) の表現は、実在感のある画像合成に不可欠な方法論である。これまでに、金属の腐食 [14]、埃の堆積 [12, 10]、金属の錆 [5, 2]、汚水の流れの跡 [6] など、個々の物象ごとに興味深い成果が報告されつつある。

ところで石は、石造建築物、石段、道、石橋、石畳、石碑、お地蔵さまなど、身近な建造素材としてさまざまな局面で利用されており [17]、その風化作用を、スケールの大きな経時的変化をビジュアルシミュレーションする素材としてとりあげる意義は、その適用範囲の広さからも大きいと考えられる。石の風化に関しては、最近 Dorsey らによる関連研究 [7] が報告されたばかりであるが、ここではそれとは独立に、モルフォロジーに基づくより抽象的な計算方式を示すことにする [13, 8]。

### 3.1 Weathering オペレータ

石は数種の鉱物から構成され、外気に接しかつ脆い鉱物から侵食される。その結果、局所的にはごつごつした表面を呈し、全体的には角が丸みを帯びてくる。また、曲率が大きく脆い部分が欠損することもある。後者2点は、前節で述べた *opening* オペレータの直接的適用によっても近似可能であるが、含有鉱物の結晶構造や風雨の影響のランダムさに起因する、ごつごつした表面生成を再現するには、確率的処理の付加が必要になってくる。ここでは、図4に示すようなブロックダイアグラムで定義される専用オペレータ *weathering* を考えることにする。

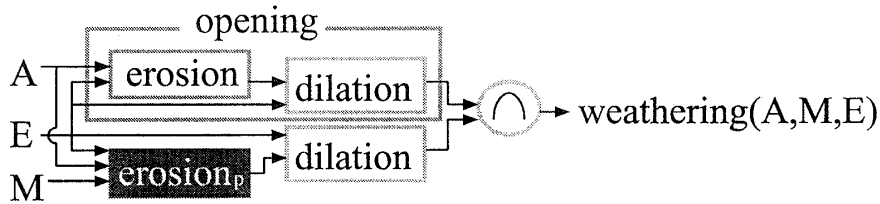


図4: *weathering* オペレータのブロックダイアグラム

*weathering* オペレータには、確率的な *erosion<sub>p</sub>* を用いる。これは、SE の中心に位置するボクセルに対応した鉱物の種類に依存して、SE のサイズに摂動を加える点でオリジナルの *erosion* とは異なる。すなわち、石のシェイプボリューム (SV) とサイズが等しい、石の鉱物 ID を格納するマテリアルボリューム (MV) を与えて、SV の各ボクセルに対応する MV のボクセルを参照し、特別な **transfer function (TF)** により、鉱物から SE のサイズへとマッピングする。例えば、ボクセルが脆い鉱物であるほど、そのボクセルを中心とする SE のサイズを大きく設定する。より具体的には、図5のように、横軸に鉱物 ID をとり、球状の SE に対して、それぞれ半径の絶対比、摂動幅を表す  $W(m), s(m)$  の TF を定義し、後述する *erosion<sub>p</sub>* の式へ  $W(m), s(m)$  を組み込むという方法をとる。ここでは鉱物を3種類に大別している。またこの TF の設定を変えることにより、さまざまな変形効果を生み出すことができる。

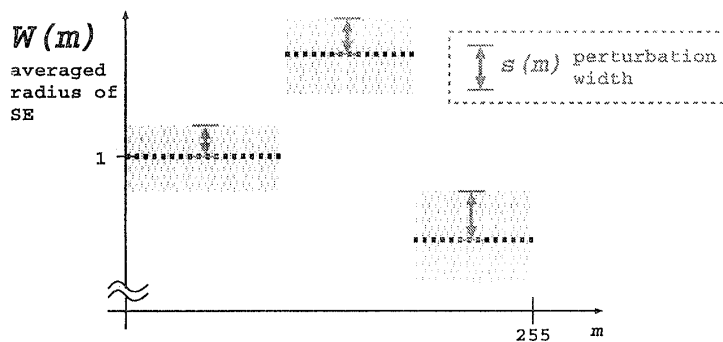


図5: transfer function の設定例

*erosion<sub>p</sub>* において、 $S$  の各ボクセルに対応する SE の半径のサイズは、 $W(m) + \epsilon$  で重み付けられる。より詳しく書けば：

$$erosion_p(A, E) = \bigcap_{(i_n, j_n, k_n) \in E} TRAN(A; ((W(m) + \epsilon) \cdot (-i_n, -j_n, -k_n)) \quad |e| < s(m)$$

上式で定義した *erosion<sub>p</sub>* をそのまま用いると、 $dilation [erosion_p(A, E), E] \not\subset A$  となってしまう、*opening* オペレータが有する反拡張性が失われてしまう。そこで、*erosion<sub>p</sub>-dilation* パスと *opening* された  $A$  との積集合を

とることにより, *weathering* オペレータが *opening* された  $A$  より膨張しないように工夫している点に注目してほしい(図 4). 以下の特性を, *weathering* オペレータ特有のものとして明記しておく:

- 包含性:  $weathering(A, E) \subset opening(A, E)$
- 反巾等性:  $weathering[weathering(A, E), E] \subset whetherring(A, E)$

特に反巾等性は, *weathering* の適用回数によって論理的な時間経過の度合いを表現できることを保証する点で重要である. *weathering* は, 初期に亀裂に入り込んだ水が熱によって膨張・凝縮を繰り返すことで進行する, 現実の石の風化の原理をより忠実にシミュレートできることになる.

### 3.2 実験と作品

図 6 に, *opening* と *weathering* が生み出す経時的変形効果の違いを確認する実験結果を示す. ハードウェア環境は, SGI O2 システム (CPU: R10000, Clock: 195MHz, RAM: 256MB) であり, ボリュームモデリング部分のコードは C 言語を用いて自主開発した. またレンダリングには, ボリュームレイトレーシング [16] を搭載する可視化ソフトウェア VolVis 2.1 (New York 州立大学 Stony Brook 校 Visual Computing センターから入手可能なフリーウェア) を用いた.

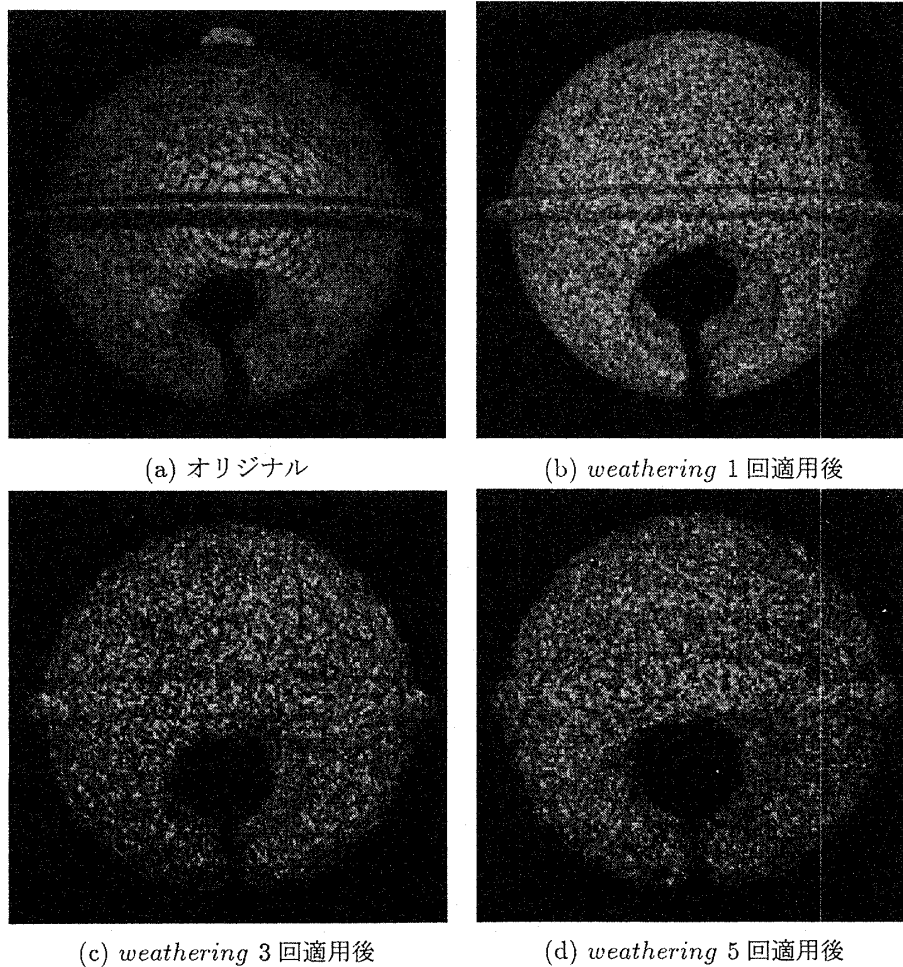


図 6: *weathering* オペレータの変形効果

図 6(a) に示すオリジナルの鈴形オブジェクトのボリューム (サイズ:  $230 \times 230 \times 230$  ボクセル) は, 断面写真を積層することにより生成した石の MV に対して, CSG オペレーションにより生成した鈴形の SV を用いてソリッドテキストチャリングを実行することにより生成したものである。

図 6(b) は, そのボリュームに *weathering* オペレータを 1 回適用した結果である。MV は, 3 つの異なる仮想的鉱物を含み, 各々に適切な球形 SE の半径 (6 と 4, 8 ボクセル) を与えた。さらに鉱物に依存して確率的な摂動 ( $\pm 1$ ) も加えた。変形にはおよそ 60 分, レンダリングはマイクロな凹凸における多重反射を反映し, 8 分要した。同図 (a) と比較し, 角が丸みを帯びているだけでなく, 水平に突起した帯は若干痕跡を残す一方で, 頂点の小さな取っ手は完全に除去された様子が観察できる。また, 数箇所にはボコボコしたくぼみや, 帯や淵が部分的に欠けた様子が観察でき, 自然な石の風化した形態を生成できたことが分かる。

次に図 6(c)(d) は, 同図 (b) と同じ条件の *weathering* オペレータをそれぞれ 3 回, 5 回適用した後の結果である。丸めの効果が徐々に進み, 軟らかくそしてくすんだ石の表面の質感が, 埋蔵品の鈴が掘り出されたような印象を与えている。両者ともレンダリング時間のオーダはほとんど増加しなかった。これは, オブジェクトの複雑さにレンダリング時間が依存しないボリュームグラフィックスの利点 [11] を表明している。

次に図 7 に, *weathering* オペレータを用いて制作した作品を例を紹介する。これは, ヨーロッパの古城をイメージして作成した画像である。ボリュームデータは,  $255 \times 230 \times 230$  である。ここではレンガ部分とセメント部分から構成されるレンガ調の MV を生成した。上部の淵や, 窓枠が欠けている様子が表現できており, 築後長年経過している雰囲気を漂わせている。

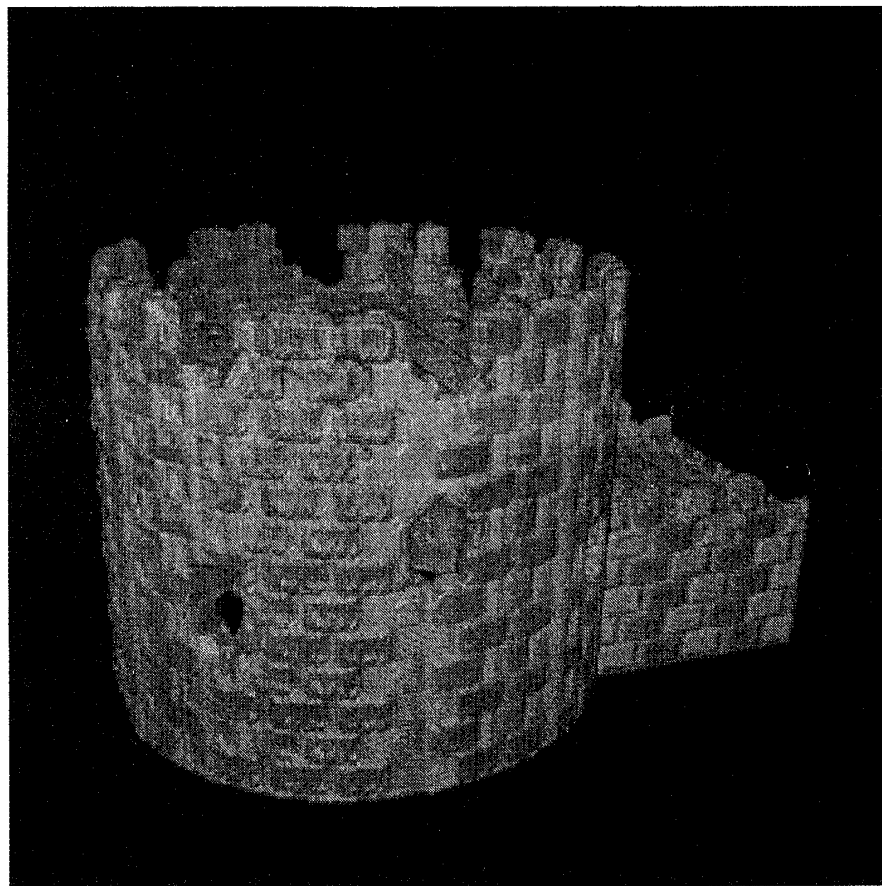


図 7: *weathering* オペレータを用いた作品例: ヨーロッパの古城

## 4 おわりに

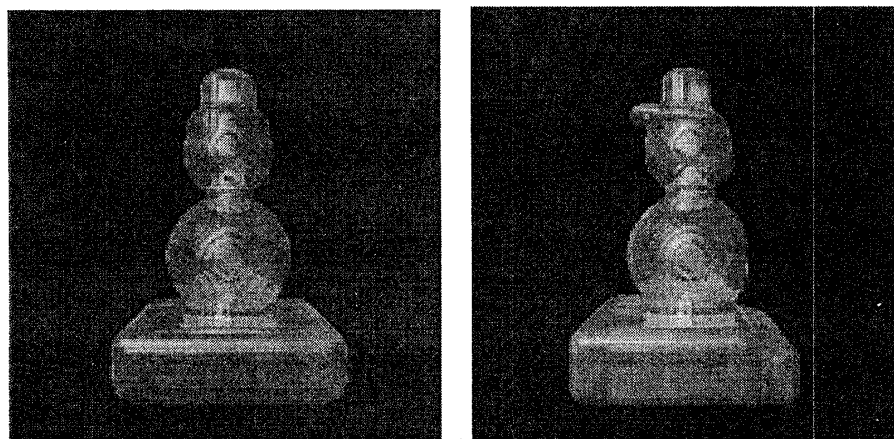
本稿では、代表的なエイジング現象の一つである石の風化を採り上げ、経時的変化のビジュアルシミュレーションのためのボリュームモルフォロジーアプローチを提案した。既知のオペレータ *opening* を出発点として開発した風化オペレータ *weathering* は、含有鉱物から SE サイズを確率的に決定する TF の制御だけで、石造物の表面特性や形状の経年変化の視覚効果を表出できることを実証した。この可制御性に反して、ボリューム処理の時間計算量は対話性を損なうものであるが、この点も、リアルタイムボリュームレンダリングエンジンの開発 [15] を含め、ボリューム処理ハードウェアの利用可能性の向上に伴って、著しく改善されると期待される。

現在、*opening* オペレータの拡張性を示すもう一つの事例として、風化と同程度に日常よく目にする「氷解現象」の再現を試みている [1]。氷解現象に対しても *opening* をベースに設定できることを裏付ける特徴として以下の 2 点がある [3]:

- 表面が熱エネルギーを吸収して解け始める;
- 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。

しかし、「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」という事実 [3] は、SE サイズの不均衡分布を決定する際に大域的な熱伝達の効果を考慮しなければならないことを意味している。そこで、ラジオシティ法のフォームファクター計算 [4] と同様に、与えられた熱源に対して、氷オブジェクト内部の各ボクセルごとに熱授受率を求め、そこから局所的な SE サイズを決定する方針を採用して、専用オペレータ *thawing* を開発している [1]。

図 8 にその実験結果を示す。開発・実験環境は前節と同じである。同図 (a) のオリジナルの雪だるまボリュームに対し、右斜め上から平行熱源が与えられたときに *thawing* オペレータを 1 回適用した後の結果が同図 (b) に示されている。オブジェクトと熱源との相対的位置関係がもたらす氷解速度の差の効果が一次的に実現できていることがわかる。重力の影響や結晶境界の効果を *thawing* オペレータに加えることは今後の課題である。



(a) オリジナルの雪だるま

(b) *thawing*1 回適用後

図 8: 氷解オペレータ *thawing* の変形効果

モルフォロジーを、経時的変化の標準的なビジュアルシミュレーション手法として位置付けるには、この他にも効果的な適用対象を調査し、専用オペレータの開発を継続していく必要がある。風化や氷解のような侵食方向だけではなく、膨張方向にも好例が隠されているのではないかと考えている。

## 参考文献

- [1] 青木 悦子, 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」, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会, 定山溪, 1999 年 8 月 (発表予定)
- [2] 小澤 奈緒, 藤代 一成: 「研磨効果を考慮した錆のレンダリング」, 情報処理学会研究報告, 97-CG-87, pp.13-18, 1997 年 10 月
- [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] Dorsey, J. and Hanrahan, P.: "Modeling and rendering of metallic patinas," In *Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series, 1996, ACM SIGGRAPH, pp.387-396.
- [6] Dorsey, J., Pedersen, H. K. and Hanrahan, P.: "Flow and changes in appearance," In *Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series, 1996, ACM SIGGRAPH, pp.411-420.
- [7] Dorsey, J., et al.: "Modeling and rendering of weathered stones," In *Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series, 1999, ACM SIGGRAPH, pp.225-234.
- [8] Fujishiro, I. and Ozawa, N.: "Synthesizing weathered objects for seamless super-imposition on natural scenes," In *Conference Abstracts, International Symposium on Mixed Reality '99*, Yokohama, Mar. 1999.
- [9] Giardina, C. R. and Dougherty, E. R.: *Morphological Methods in Image and Signal Processing*, Prentice Hall, 1987.
- [10] Hsu, S. and Wong, T.: "Simulating dust accumulation," *IEEE CG & A*, 15(1):18-22, Jan. 1995.
- [11] Kaufman, A. E., Cohen, D. and Yagel, R.: "Volume graphics," *IEEE Computer*, 26(7):51-64, July 1993.
- [12] Miller, G.: "Efficient algorithm for local and global accessibility shading," In *Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series, 1994, ACM SIGGRAPH, pp. 319-326.
- [13] 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.
- [14] Perlin, K. and Hoffert, E. M.: "Hypertexture," *Computer Graphics*, 23(3):253-262, July 1989.
- [15] Pfister, H., et al.: "The VolumePro real-time ray-casting system," In *Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series, 1999, ACM SIGGRAPH, pp.251-260.
- [16] Sobierajski, L. M. and Kaufman, A. E.: "Volumetric ray tracing," In *Proc. 1994 Symposium on Volume Visualization*, Washington, D. C., Oct. 1994, pp.11-18.
- [17] Winkler, E. M.: *Stone in Architecture - Properties, Durability*, Third, Completely Revised and Extended Edition, 1994.