

研磨効果を考慮した錆のレンダリング

小澤 奈緒 藤代 一成[†]

お茶の水女子大学 理学部 情報科学科

〒112 東京都文京区大塚 2-1-1

ozawa@imv.is.ocha.ac.jp, †fuji@is.ocha.ac.jp

近年、CG 画像に頻繁に接するようことができるようになったが、その非現実感は未だ拭えない。これは、現実世界のオブジェクトがすべて受けているエイジング効果が、CG オブジェクトには欠落しているためと考えられる。CG モンタージュや augmented reality 等で、現実世界から獲得した画像と CG 画像との違和感の少ない画像合成を行なうためにも、エイジング効果の創出は、重要な要素として注目されている。

本論文では、エイジングの重要な例である銅の錆を扱う。その CG モデリングにあたって、逼真性、可制御性の 2 指標の満たすよう留意する。特に逼真性を高めるために、現実世界に即し人為的に錆を除去すること、すなわち、研磨効果を考慮したレンダリング法を提案し、簡易形状のオブジェクトを用いてその効果を検証する。

キーワード：エイジング、錆、多層構造モデル、テクスチャマッピング、研磨

Rendering of Metallic Patinas with Cleaning Effect

Nao Ozawa and Issei Fujishiro[†]

Department of Information Sciences, Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112, Japan

ozawa@imv.is.ocha.ac.jp, †fuji@is.ocha.ac.jp

Lack of considering aging factors in the real world has been giving rise to *unreal* objects even when making recent CG pictures. Aging effects are viewed to play an important role in establishing natural composition of synthesized objects upon acquired natural scenes, for instance, in CG montage methods and augmented reality environments.

This paper proposes a new volume-based method for rendering geometric objects covered with copper patinas. The main feature of the method is that it can produce more *realistic* aged images by accounting for cleaning effects; artificial post-processing for partial removal of metallic patinas. The photoreality and controllability of the present method are illustrated with a simply-shaped object.

keywords: Aging, metallic patinas, multi-layered structure, texture mapping, cleaning.

1 背景と目的

近年、コンピュータグラフィクス (CG) 画像は、テレビ番組や CM 等を通して頻繁に接することができるようになり、日常的なものとして人々に受け入れられるようになってきた。しかし、「CG 画像 = 非現実的な画像」という感はずいぶん拭えず、その違和感が原因となって、見ていて疲れすら感じることもある。こうした違和感を感じさせない画像生成の手段の一つとして、エイジング (aging) 効果の創出が有用であると考えられる。その理由として、現実世界ではエイジング効果を受けないオブジェクトが存在し得ないため、エイジング効果を考慮しない画像の現実感の欠如は避けられないこと、またエイジングによってオブジェクト同士が調和するため、画像に統一感をもたせることが可能となること等が挙げられる。特に、景観シミュレーションにおける CG モンタージュや現実世界と仮想世界の融合である Augmented Reality (AR) において、現実世界から獲得した画像と CG 画像との自然な合成を行なうためにエイジングは重要な役割を果たすと考えられる。

一般に、エイジングを物理的シミュレーションにより実現することは、時間的コストが膨大になってしまい、実用的でない。そこで、現象学的モデル (phenomenological model) を構築する必要がある。さらに、CG モデリングの立場から見た場合、迫真性 (reality) に加え、エイジング現象を幅広いオブジェクトに適用させるために可制御性 (controllability) という 2 つの指標を満たすようなエイジング技法が望まれている。

本論文では、先行研究 [1] に引続き、エイジング効果の重要な事例として銅の錆を扱う。可制御性のある錆の現象学的モデリングは、文献 [5] を参考にする。錆は老化の象徴として一般的に嫌われ、錆びた状態では放置されず、削り磨かれ、取り除かれる。銅の錆の場合も状況は異なるが、錆で覆われた出土遺産物には露出処理が必要とされる。そこで本論文では、迫真性をより高めるために、現実世界に即し人為的に錆を除去すること、すなわち、研磨効果を考慮したレンダリング法を提案し、簡易形状のオブジェクトを用いてその効果を検証する。

2 錆形成の物理的基礎

銅と銅の合金の錆 (以下断わりがない限り、銅は銅の合金も含む) の物理的な基礎概念を簡単に説明する。その特徴は以下の 3 点にまとめられる:

1. 層状に生成する
2. 環境・オブジェクトの形状・オブジェクト表面の湿度に大きく依存して成長する
3. 人為的作用により除去される

銅は、空気に腐食され、層状に錆が発達する。層を描写するには、錆表面の正確な化学的性質、

化学反応を起こす要素を考慮することが重要になるが、厳密なシミュレーションを行なうための実験データは一般に入手不可能である。計算時間削減の意味も含めて、本論文では、物理的な反応を基本とする現象学的なモデルを考慮する。

2.1 銅の錆の構造と形成

銅の錆は、典型的な多層構造の例である。きれいな銅は空気に触れると、まず鈍い茶色の薄い層をつくり、徐々に赤褐色に変色する。鈍い茶色は酸化銅 (copper oxide) が主成分であり、赤褐色は鉱物赤銅鉱 (mineral cuprite) が主成分となっている。この 2 層が適度に堆積すると、以降の層は環境によって成分・成長速度が異なる。本点について、次項で詳述する。

2.2 物理的環境への依存

2.2.1 3 環境下での錆の相違

水と酸素は錆反応に直接関係するのに対し、二酸化硫黄と塩化物イオンは、微量ながら存在すれば錆を促進する物質として挙げられる。環境によってこれらの物質の含有量は大きく異なるので、錆の生成法も異なる。マツソンの最近の研究によって明らかになった、環境による二酸化硫黄と塩化物イオンの含有量の違い [3] を簡潔にまとめる。ただし、() 内は表面への沈積量 [mg/m^2] を表す。

- ◇ 海岸
塩化物イオンの濃度が高い (5~500)
- ◇ 田園
空気は清浄である (ともに 10 以下)
- ◇ 都会
二酸化硫黄 (10~80) や黒い煤が多い

以上のような環境の大気の沈積量の違いが、錆の生成方法に影響を与える。それぞれの環境下での現象学的モデルの作成は、同様に 3 環境下で錆の層形成仕様を分類しモデル化している文献 [5] を参考にする。

【海岸】

第 3 段階 : アタカマ石と塩素系物質が優位である。有機質がほとんどない

第 4 段階 : 第 3 段階と同じ鉱物とつなぎの鉱物で錆が増大する

成長速度 : 1 [$\mu\text{m}/\text{year}$]

【田園】

第 3 段階 : 硫化物、アタカマ石が形成する。最初にできる硫黄化合物のポスニャク石が生成し、つなぎの有機物も生成する

第 4 段階 : 硫化塩がゆっくり形成する。アタカマ石とプロシヤン銅鉱の混合錆が典型的
成長速度 : 0.5 [$\mu\text{m}/\text{year}$]

【都会】

第3段階：適度な高さの硫黄の濃度である（「田園」と同じ）

第4段階：「田園」より硫黄の濃度が高い。
基本的な硫酸塩、アンテライトとプロシヤン銅鉱が形成する

成長速度：1~2 [$\mu\text{m}/\text{year}$]

錆の成長割合は、空気にさらされ始めた2~3年は高く、年を追うごとに減少する。約20年後は無視できるくらいの比になる。

2.2.2 研磨効果の必要性

錆の表面に影響を及ぼす要因として、研磨は避けて通れない。錆は見苦しいものであり、通常、磨く、削る、ペンキを塗る等の趣向を凝らして、錆が見えないように手を加える。銅の錆は、元来その緑青色が好まれ、芸術品に採り入れられることもあるが、出土遺産物において、錆で覆われたため表面の文様や象徴が判然としないときには、露出処理が必要となってくる。錆落しの際、削る磨くなどの機械的方法や、酸洗いなどの化学処理などが施されたり、文化財を傷つけず錆を落とす方法として、エアブラッシュ装置による除去がなされる[4]。この研磨効果を、錆成長に欠くことのできない要素として、本論文では特に注目する。

その他にも、錆の成長に影響を及ぼす重要な要素がある。中でも、湿度・水分は不可欠である。特に、流れていない水は急速に錆を成長させたため、垂直な面より、水平な面の方が錆の成長が速い。さらに、オブジェクトの上側よりも下側の方が、錆が発生しやすい条件といえる。また、日光にあたると表面の水分が蒸発し、錆の成長比は減少する。これらの要素も、5,6節で採り上げる。

3 銅の錆生成プロセス

我々が開発している錆生成レンダリング法は、前節冒頭で述べた錆成長の3つの特徴を網羅し、図1のような3つの主要ステップを踏む。

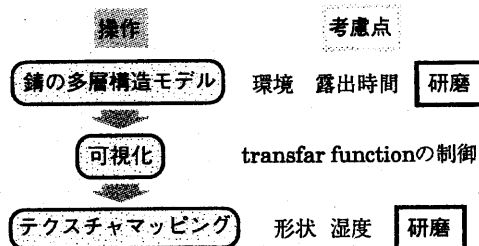


図1: 錆のレンダリングプロセス

まず、環境に依存し多層構造に成長、研磨した錆の3次元配列データを形成する(4節)。次に、作成した錆モデルをボリウム光線追跡し、可視化

する。このとき、光源を無限遠方に設定し、銅板面に垂直方向から透視投影することで、環境光だけを考慮した画像とみなし、これをテクスチャとして以下のプロセスに利用する(5節)。最後に、作成した錆の時系列のテクスチャを銅のオブジェクトに適切にマッピングし、銅オブジェクトのエイジングを表現する(6節)。

研磨は錆の成長に欠くことのできない要素であるにもかかわらず、研磨した錆表面の表現はなされていなかった。本論文では、新たな試みとして、錆の研磨表面の微細構造をモデル化し、作成された研磨表面のテクスチャを銅のオブジェクト表面の研磨領域に適切にマッピングすることでその効果を創出する(図1太枠の項目)。

4 モデリング

多層を成す錆の3次元配列データは、下記の3つのオペレータで形成する：

- coat(素材, *thickness-map*)
thickness-map が定義する厚さだけ新しい層として、素材を堆積する
- erode(*thickness-map*)
thickness-map が定義する深さまで侵食する
- brush(α , *radius*) (図2参照)
擾乱係数 α に依存した基準面から、平均半径 *radius* の球状プローブの到達可能面を求め、その面までブラッシングする

これらのオペレータの組合せで、幅広い錆に準ずる多層形成が可能である。オペレータを繰り返して適用することで、時間経過に伴った錆の変化を表現できる。最下層は銅であるとし、単一層は同質の物質からなるものとする。

4.1 Thickness - Map

上述の coat, erode オペレータを用いて、実際のエイジングの過程で起こる現象を尤もらしく表現する上で、引数 *thickness-map* の作成が重要な鍵を握っている。そのために、本論文では、文献[3]と同様に、Barabasi と Stanley[9]のフラクタルサーフェス成長モデルを参考にし、

- ◇ 堆積モデル：素材の堆積を扱う
- ◇ 浸透モデル：面上パッチの横への成長に及ぶ

の2タイプのモデルを採用する。これらは、錆のプロセスに現れるパターンのモデル化に適している。なぜなら、錆は、大気からオブジェクト表面に水と粒子が堆積することから始まり、錆の微粒子のパッチは、面の含水量をもとに発達し広がるためである。

堆積モデルとして実装するのは、以下の3つのモデルである。(1) **Steady thickening**. 時間の経過に伴い表面全体の層が増すモデル。(2) **Random deposition**. 面上のランダムな位置に粒子を落下

させるモデル。このモデルの応用で、さらに低い位置まで粒子が落下し、面の高さを緩和させつつランダムに堆積させるモデルもある。(3)Ballistic deposition. 面上のランダムな位置の上側から粒子を落下させて、面の側面に接した段階で停止するモデル。

浸透モデルとしては、Directed percolation depinning を実装する。3次元空間の任意方向に、成長し、厚さを増やす浸透過程を組み込んだモデルである。浸透速度や方向性は、seed-patch で容易に制御できる。

4.2 brush オペレータ

brush オペレータは、エアブラッシュ装置で錆びた表面を研磨することを想定して作成した、新たなオペレータである。エアブラッシュ装置の原理は、高圧の空気やガスに微粒末パウダーを混入して、それを細いノズルから超音速で噴射し、目的物の表面をその噴出流によってクリーニングするものである[4]。空気調節、パウダーの選択が可能のため、人間の意図する操作を柔軟に実現できる装置といえる。

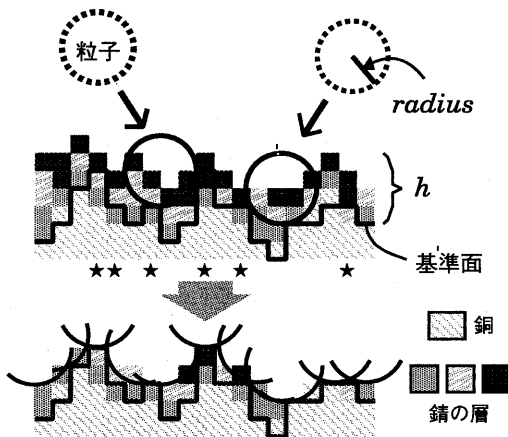


図2: brush オペレータの原理と効果 (鉛直断面図)

brush オペレータでは、その事実を反映させて、銅の表面にランダムに選択した面積比 α の領域(図2の★印の箇所)を銅より高く設定した基準面に沿って、半径 $radius$ に摂動をもたせた球状の粒子を這わせて、その粒子が届く領域は錆を除去するものとした。クリーニングは、銅の表面が見え始めたときに停止するため、銅の表面が見えるかどうかの基準面まで錆を除去するが、ここで微粒末パウダーが届かない範囲は研磨しないよう、Offset distance accessibility[6]の考え方を基に、粒子の到達可能面を示すボクセル位置を決定する必要がある。

5 可視化

前節のオペレータに基づき形成された3次元配列モデルを、3次元スキャン変換によってボリュームデータに変換する。それを可視化ソフトウェア VolVis ver2.0[7][†] を用いて可視化した。VolVis は各ボクセルにおける光の貢献・減衰の効果を創出できるボリュームレイトレーシング機能を搭載しているため、多層構造物質を通過した下層の影響も考慮した光の効果が表現できる。ただし、層と層の屈折率の違いにより生ずる層間での反射・屈折の効果を、本来はサブサーフェス散乱[8]のようなレンダリング法により実現する必要がある。

実験には、SGI社製O2システム(CPU:R5000, clock:180MHz, RAM:64MB)を使用した。2節で述べた物理的基礎に基づきモデリングした、6年ごとの都会での銅板の錆を可視化した結果の一部を図3に示す。3次元配列データの大きさは $256 \times 256 \times 64$ で、レンダリング時間はおおよそ9分であった。

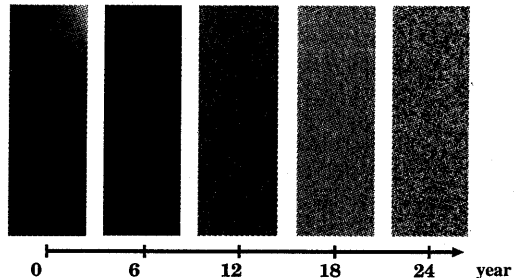


図3: 銅片の時系列(都会編)

18年経過した銅板のモデルに、 $radius = 3$ [voxels], $\alpha = 0.2$ で、brush オペレータを施したモデルを可視化し、テクスチャを生成した(図4)。レンダリング時間はおおよそ5分30秒であった。研磨され、粒子の到達可能領域の錆が除去され、銅が現れたようすが再現されている。

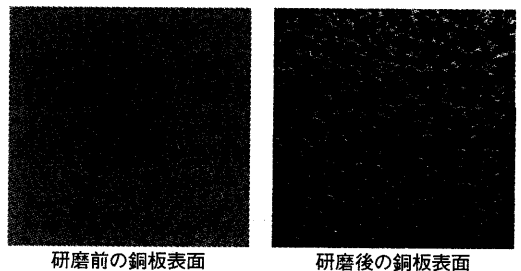


図4: 研磨された表面の可視化

[†] 米国 New York 州立大学 Stony Brook 校 Visual Computing センターにおいて、設計・開発されている PDS.

6 テクスチャマッピング

6.1 オブジェクト形状・表面湿度の取り込み

錆が進行しやすいところほど、時間が経ったテクスチャをマッピングする必要がある。錆びやすさを決める主要因として、(1) オブジェクト表面の湿度、(2) オブジェクトの形状(凹凸)に留意する。湿度が高いところほど錆びやすいことは2節で述べた。オブジェクトの形状が及ぼす影響としては、露出度の高いところほど錆が附着しにくく、くぼみの部分の錆の成長は速いことが挙げられる。

まず、2要因を以下のように定義する(図5)。(1) オブジェクト表面の湿度(l_M)は、オブジェクトの相対的な位置と法線の関数で、(2) 形状(l_E)は、Tangent Sphere Accessibility(TSA)[6]の関数として定義する。TSAは、幾何オブジェクト表面の点に到達可能な球の半径を表す。 l_M 、 l_E ともに、値が大きい程錆びやすいようにするため、 l_M は、鉛直な面ほど小さく、水平な面でもオブジェクトの上側よりも下側の方で大きく定義し、また l_E は、凹部から凸部と移行するに従い小さく定義する。

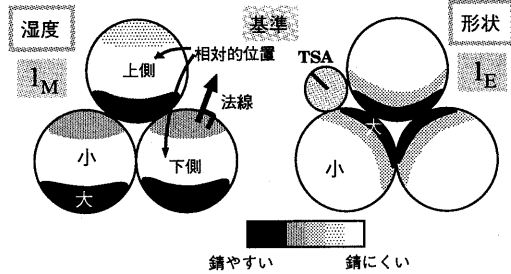


図5: 簡易形状における湿度と形状の定義例

次に、この2支軸でオブジェクト表面の領域を分割し、錆びやすさを統合する。数値化するにあたり、シェーディングに利用できるように、正規化されたパラメータ l_C を導入する。ここで、 l_C とは、色の混合を行なう際に用いられる錆に関する項の係数、換言すると、そのピクセルでの錆の割合を表す。 l_C の算出は以下の通りに行なう。 l_M 、 l_E に与えた銅の上限(* max)と錆の下限(* min)を基に、領域を3分割する。領域の条件は、以下のとおりである。

$$\text{領域 A: } l_{M_{\max}} \times l_E + l_{E_{\max}} \times l_M \geq l_{M_{\max}} \times l_{E_{\max}}$$

$$\text{領域 C: } l_{M_{\min}} \times l_E + l_{E_{\min}} \times l_M \leq l_{M_{\min}} \times l_{E_{\min}}$$

図6に分割した領域と l_C との対応を示す。 l_C は、領域に応じて以下のように定義される:

$$l_C = \frac{l_{M_{\min}} \times l_E + l_{E_{\min}} \times l_M - l_{M_{\min}} \times l_{E_{\min}}}{l_{M_{\max}} \times l_{E_{\max}} - l_{E_{\min}} \times l_{M_{\min}}}$$

このとき、* max、* minは操作可能で、領域分割を変えて、要因の貢献度を容易に制御できる。

オブジェクト表面の湿度: l_M

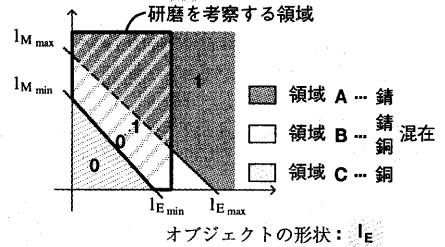


図6: オブジェクト表面の l_C への変換

研磨については、オブジェクトの形状だけに依存するため、 l_E の軸に沿って表面を分割し、上記の方法を拡張し表現する。

6.2 実行例

オブジェクトは、20個の球から構成された銅のピラミッドである。図3の新しい銅(0年)と第4段階(18年後)の錆の2つのテクスチャをマッピングし、都会に置かれたピラミッドのエイジング効果を表現した。実験は、SGI社製O2システム(CPU: R5000, clock: 180MHz, RAM: 64MB)上でOpenGL†により行なった。

くぼみの部分に錆が発生しているようすや、オブジェクトの下側の方が、より錆が進んでいる様が表現できた(図7)。

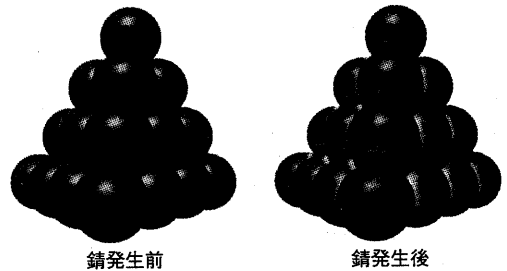


図7: ピラミッドの錆発生表現

研磨効果の表現には2つのアプローチがある(図8)。マッピングの際、銅と錆のテクスチャを斑にマッピングすることで、研磨したようにみせるアプローチ[2]と、より迫真性をもたせるため

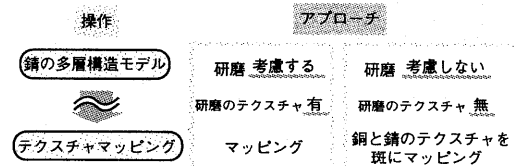


図8: 研磨表現のアプローチ

† Silicon graphics, Inc. の商標である。

に、研磨した表面細部をモデリングし、研磨した表面のテクスチャを作成し、それを含めてマッピング研磨効果を表現する、本論文で提案するアプローチである。図9は、両アプローチによる研磨効果表現を比較したものである。研磨テクスチャを含まない画像でも、研磨したような表現ができたが、研磨画像を含んだ画像は、さらに的確に研磨効果が再現できていることが分かる。

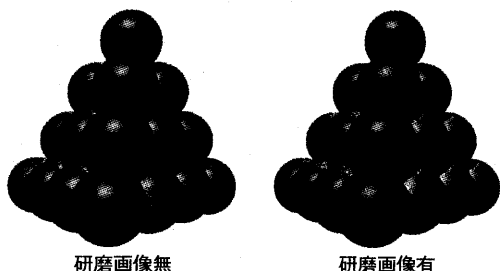


図9: 2つのアプローチによる研磨表現

7 まとめと今後の課題

7.1 まとめ

本論文では、見る者に違和感を感じさせない画像生成にエイジング効果の導入が有用であると考え、その一例として、銅の錆の表現を試みた。可制御性、迫真性の2指標を満たすような錆の現象学的レンダリング手法の開発を目指した。この2点から本手法を評価する。

【可制御性】フラクタルサーフェス成長モデルを活用したオペレータを組合せることで、異なる環境下での錆の表現が制御できる。VolVisのtransfer functionを制御し、層の透明度とRGB値が制御可能である。また、オブジェクトの形状・湿度に依存しテクスチャマッピングを施す際、オブジェクト表面の分割を可制御にし、どの要因に重点をおくか、自由に操作できる。

【迫真性】従来の、研磨表面のテクスチャを含まないマッピングで研磨表現するのではなく、研磨表面のテクスチャを生成し、それを含むマッピングによって、より現実に即した迫真性のある錆を表現できる。特に、錆の表面がクローズアップされるときは有用であると考察される。

7.2 今後の課題

今後の課題としては以下の6点が挙げられる。

- 各フェーズごとの迫真性の追究
層の素材のパラメータの設定が曖昧であるため、その調査を続行し定義する必要がある。また、VolVisの拡張点として、層間の反射・屈折の効果や、材質による反射係数を変化させるtransfer functionの定義し、研磨された銅の均一な面は光沢を増すといった効果の表

現も考慮している。しかし、計算時間とのトレードオフを考慮する必要がある。

- 研磨する道具の選択
たわしのように、ひっかき傷のような研磨跡が残る道具のモデリングも検討すべきである。
- 銅オブジェクトの形状操作
 - ◇ 錆による腐食のモデリング
錆は長期にわたると元の銅の組織を壊していく。オブジェクトの形状変化に及んだ、腐食モデリングも必要となってくる。
 - ◇ 錆の凹凸感の表現
バンプマッピングで、錆の凹凸感を表現することが考えられる。
- より複雑な形状のオブジェクト上への適用
現段階では、幾何オブジェクトに限定されてしまっているが、ARへの応用のためにも、任意のオブジェクトに対応するエイジングを検討していく。
- 他のエイジング
違和感の少ない画像生成のためには、錆以外のエイジング効果も統括して、画像全体のエイジングを表現することが必要である。

謝辞

発掘した多大な青銅器のデータを御提供下さり、銅錆に纏わる貴重な意見をいただいた、東京国立文化財研究所の平尾良光氏に深謝する。

参考文献

- [1] 江浦 由佳, 藤代 一成: Tangent Sphere Accessibility に基づくエイジング効果のレンダリング, 情報処理学会研究報告, 96-CG-81, pp. 79-84, 1996.8
- [2] 小澤 奈緒: 研磨効果を考慮した錆のレンダリング, お茶の水女子大学理学部情報科学卒業研究論文, 1997.2
- [3] 井上 勝也: 錆をめぐる話題, 裳華房, 1994
- [4] 樋口 清治, 青木 繁男: 金属製品のクリーニングにおけるエアブラッシュの応用, 保存科学, No.13, pp. 41-47, 1974
- [5] Dorsey, J. and Hanrahan, P.: "Modeling and Rendering of Metallic Patinas," in *Proc. SIGGRAPH '96*, pp. 387-396, August 1996.
- [6] Miller, G.: "Efficient Algorithm for Local and Global Accessibility Shading," in *Proc. SIGGRAPH '94*, pp. 319-326, August 1994.
- [7] Sobierajski, L. M. and Kaufman, A. E.: "Volumetric Ray Tracing," in *Proc. 1994 Symposium on Volume Visualization*, pp. 11-18, 1994.
- [8] Hanrahan, P. and Krueger, W.: "Reflection from Layered Surface due to Subsurface Scattering," in *Proc. SIGGRAPH '93*, pp. 165-174, August 1993.
- [9] Barabasi, A. L. and Stanley, H. E.: *Fractal Concepts in Surface Growth*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.