

東京電機大学

博士論文

自然現象の写実的表現モデルの研究

Visual Simulation Models for Natural Phenomena

2018年3月

金澤 功尚

# 目次

目次	1
あらまし	5
<b>第1章 序論</b>	<b>7</b>
1.1 本研究の背景	7
1.2 本研究の目的	8
1.2.1 大気光学現象の再現	9
1.2.2 ウェザリング現象の再現	9
1.3 論文の構成	10
<b>第2章 関連研究</b>	<b>11</b>
2.1 大気光学現象の再現に関する先行研究	11
2.2 ウェザリング現象の再現に関する先行研究	12
<b>第3章 大気光学現象の再現手法</b>	<b>16</b>
3.1 はじめに	16
3.2 蜃気楼のメカニズム	17
3.2.1 大気の静的な温度勾配による蜃気楼	17
3.2.2 大気の動的な温度勾配による蜃気楼	18
3.3 背景	18
3.3.1 蜃気楼ボックス	18
3.3.2 ペンシルトレーシング法	21
3.4 提案手法	26

3.4.1	論理的根拠	26
3.4.2	蜃気楼のためのオブジェクト	27
3.5	結果	30
3.5.1	実験環境	30
3.5.2	四角い太陽蜃気楼	30
3.5.3	処理効率	33
3.5.4	制約と問題点	34
3.6	むすび	37
3.7	章末付録：シーン設定の詳細	38
3.7.1	四角い太陽蜃気楼	38
3.7.2	レンダリング結果に欠落が生じる例	38
<b>第4章</b>	<b>ウェザリング現象の再現手法</b>	<b>41</b>
4.1	はじめに	41
4.2	提案手法	43
4.2.1	確率的セルオートマトンモデル	43
4.2.2	セルの状態と属性	44
4.2.3	ターゲットジオメトリの要件	46
4.2.4	セルの初期化	46
4.2.5	更新ルール	47
4.2.6	可視化	55
4.3	結果	56
4.3.1	実験環境及びパラメータ	56
4.3.2	レンダリング	57
4.3.3	さまざまなジオメトリ表面での錆の成長過程	60
4.3.4	実践的な作例	60
4.4	むすび	62
4.5	章末付録：重心座標を用いたベクトルのマッピング	67

第 5 章 結論	69
5.1 本研究のまとめ	69
5.2 今後の展開	70
5.2.1 大気光学現象の再現手法	70
5.2.2 ウェザリング現象の再現手法	71
謝辞	72
参考文献	73
付 録 A 四角い太陽蜃気楼 (拡大画像)	78
付 録 B さまざまなジオメトリでの錆の成長過程 (拡大画像)	84
付 録 C 人間の知覚特性の考慮に関する検討	100
C.1 Introduction	100
C.2 Related Works	101
C.2.1 Optical System Approach	101
C.2.2 Neural System Approach	102
C.3 Visual Simulation Method	102
C.3.1 Optical Simulation Step	103
C.3.2 Neural Simulation Step	107
C.4 Experimental Results	111
C.4.1 Snellen Chart	111
C.4.2 Hermann Grid Illusion	113
C.4.3 Direction Boards	113
C.5 Concluding Remarks	114
付 録 D 研究業績一覧	118
D.1 査読付き論文 ( Journal Papers )	118
D.2 国際会議 ( International Conferences )	118



D.3 国内会議 ( Domestic Conferences ) . . . . . 120

# あらまし

自然現象を写實的に表現することはコンピュータグラフィックスコミュニティではもっとも挑戦的な分野の一つであり、3D コンピュータグラフィックスにおいてはシーンを印象的に描写するための重要な要素である。多くの自然現象は、微視的な作用の集積が結果として巨視的な大域構造を作り出す構造をとる。本論文ではそのような現象として、大気光学現象とウェザリング (風化) 現象という2種類の自然現象に着目した。特に大気光学現象として蜃気楼を再現する手法と、ウェザリング現象として金属腐食を再現する手法を提案する。

蜃気楼は、大気の温度勾配や熱による摂動によって生じる現象である。これを再現するためにペンシルトレーシング法を応用したシミュレーション手法を提案する。ペンシルトレーシング法は近軸近似理論を用いてレイトレーシング法を高速化する手法の一つである。ペンシルトレーシング法では光線追跡の際にレイ (半直線) を4次元ベクトルとして表現し、シーン内での光の伝播 (直進), 屈折, 反射によるレイへの影響を  $4 \times 4$  行列として表現する。この表現方法は摂動によるレイへの影響を記述するのに適している。本手法ではペンシルトレーシング法を拡張し、摂動によるレイへの影響を表現できるようにした。これにより効率的に蜃気楼の写實的表現を生成することが可能となる。

金属腐食は金属と酸素の電気化学的反応の結果として起こる腐食生成物の形成, その移動と拡散, 沈着などの現象からなる複雑な反応拡散系である。この様相をシミュレーションするため, 金属の腐食過程を一種の2次元セルオートマトンとしてモデル化した。このモデルのセルオートマトンの各セルは, 互いに影響し合う二つの属性, すなわち腐食レベルと染みレベルを持つ。各セルは独自の更新ルールに従って自身の状態をその近傍のセルに伝播させる。また, 本手法は生成結果をマッピング

グする対象の 3D モデルの形状を考慮したシミュレーションが可能である。本手法によるシミュレーションでは、腐食レベルや染みレベルを伝播させる際にモデル空間とシミュレーション空間における面の接続性を調べ、伝播する対象のセルを適切に選択することで、3D モデルの形状に沿って成長する金属の腐食過程を再現している。シミュレーションの各ステップにおいて、セル全体の腐食レベルと染みレベルの濃淡を可視化(画像化)することで、金属腐食の経時的な成長過程を表現した一連のテクスチャセットを得ることができる。

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

1970年代に始まった3Dコンピュータグラフィックス分野は、ここ半世紀ほどでめざましい発展を遂げた。現在では実写と見紛うまでの写実的なシーンの生成が可能となっている。その応用分野は、映画やコンピュータゲームといったエンターテインメント分野をはじめとして、アートやデザイン、物理学や生物学などの科学シミュレーション、教育、医療など枚挙に暇がない。

3Dコンピュータグラフィックス分野において、自然現象の表現はシーンをより写実的あるいは印象的にするために必要不可欠なものである。写実的な表現が求められる分野では、現実に存在する物質や現象を3DCG上で再現するための様々な研究がなされているが、とくに自然現象を写実的に表現することはコンピュータグラフィックスコミュニティではもっとも挑戦的な分野の一つである。現実の自然現象は非常に複雑な構造や振る舞いをもっているため、それらを再現するためには適切なあるいは巧妙なモデル化が必要であり、また用途や目的によっては大量の計算機資源を必要とするものも多い。現在でも計算機能力は上昇と低価格化を続けているが、あるいはそれゆえにこれらを3DCGとして表現しうる手段は多様になっており、いまだ発展の余地を残す分野であるといえる。

自然現象の中には、微視的な作用の集積が結果として巨視的な構造を作り出しているものがしばしば見られる。本研究ではそのような自然現象として、大気光学現象とウェザリング現象に着目した。大気光学現象とは、虹やオーロラ、日暈や薄明光線といった大気中で発生する現象の総称である。これらの現象は、微視的には大気の温度勾配や大気に含まれる水滴や氷晶が光の経路へ微細な影響を与えているに

過ぎないが、それらが折り重なることで巨大で複雑な一種の光学系として作用し、様々な形の現象として表出している。

ウェザリング (weathering) とは英語で「風化」を意味する語であるが、3D コンピュータグラフィックス分野ではエイジングとも呼ばれ、物体表面などに汚れや劣化を生じさせる現象やそれを再現するための技術のことを指す。ウェザリング現象に含まれる現象には様々なものがあるが、身近なもので言えば物体表面の微細な傷や埃、苔や錆といった現象が該当する。これらの現象は、微視的には物体表面の細かな凹凸や堆積した粉塵、または苔のコロニーや金属腐食に伴う孔食といった要素の集合であるが、巨視的にはその発生原理や環境に応じて興味深い様々な紋様を作り出す。

いずれの自然現象の再現も3D コンピュータグラフィックス分野ではしばしば話題に上がるものではあるが、3D オブジェクトの形状の記述や生成、オブジェクト表面 (マテリアル) の詳細の合成や再現、モーションといった分野に比べれば先行研究の数は多くなく、また、広く定着している手法もほとんど存在しない。そこで本研究では、これらの自然現象のように微視的作用が巨視的な振る舞いをつくる構造に着目し、そのような構造を3DCG上で再現するための実装アプローチについて検討する。その一環として、大気光学現象の一つである蜃気楼の再現手法とウェザリング現象の一つである金属腐食の再現手法を提案する。

## 1.2 本研究の目的

前節で述べたように、本研究の目的は微視的作用が巨視的構造をつくる自然現象を3DCGとして再現する実装アプローチを検討することである。本研究では特に大気光学現象として蜃気楼と、ウェザリング現象として金属腐食を取り上げる。

### 1.2.1 大気光学現象の再現

本研究では大気光学現象として蜃気楼に着目する。蜃気楼のなかには特殊な条件下でなければ観測できないものもあるが、かげろうや逃げ水など身の回りでもしばしば目にすることがある大気光学現象の一つである。蜃気楼を3DCGとして再現する手法としては、2.1節で述べるようにレイトレーシング法を応用した現象学的、あるいは擬似物理ベースのモデル化や、厳密な物理シミュレーションといったいくつかのアプローチが提案されている。本研究ではレイトレーシング法的高速化手法の一つであるペンシルトレーシング法を応用するアプローチを検討した。ペンシルトレーシング法はあくまでもレイトレーシング法の光線追跡を高速化する手法であるが、そのなかで用いられているレイや光学系の表現は蜃気楼、とくに大気の摂動によって生じる現象の再現に応用が可能である。この手法を拡張することによって、少ない計算量で蜃気楼を再現することが可能となる。

### 1.2.2 ウェザリング現象の再現

本研究ではウェザリング現象として金属腐食に着目する。金属腐食は身の回りでもしばしば観察される現象であるが、その発生機序は、電気化学分野において主に防止や予見を目的として詳しく調べられている。ウェザリング技術の中でも金属腐食に着目したものは極めて少ない。金属腐食の伝播・拡散過程の再現や予測を目的とする手法としては、反応拡散系のシミュレーションを行うアプローチや、2次元ランダムウォーク、2次元セルオートマトンといったアプローチなどが提案されている。本研究では電気化学分野でも応用例のある2次元セルオートマトンベースの手法を検討した。錆の成長を、腐食スポットの成長とそこから拡散する染みという二つのレベルで捉えたモデル化をすることで、写実的な金属腐食の様相を再現することが可能となる。

### 1.3 論文の構成

本章では本研究の背景と目的について述べた。本章以降は以下のように構成されている。第2章では自然現象をコンピュータグラフィックスとして再現するための様々な先行研究について説明し、各々の利点と欠点について議論する。第3章では、大気光学現象の一つである蜃気楼を再現するための手法を提案する。第4章ではウェザリング現象として金属腐食の成長過程を再現する手法を提案する。第5章では本研究の成果と今後の課題について議論する。

## 第2章 関連研究

### 2.1 大気光学現象の再現に関する先行研究

3D コンピュータグラフィックスの初期から、蜃気楼のような大気光学現象をシミュレートすることを目的としたいくつかの研究がある。コンピュータグラフィックス上で蜃気楼に取り組んだもっとも初期の研究は Berger と Trout によって顕された [1]。Berger と Trout は大気の温度勾配に起因する屈折率の変動を再現するために、“蜃気楼ボックス”を提案した。蜃気楼ボックスは、異なる屈折率を持った複数の平行な平面を内包する特殊な種類のシーンオブジェクトである。この手法では、蜃気楼ボックスを通った光は多角形的な光路をたどる。多角形的な光路は平面的な光学的歪みを引き起こしうるため、写実性の面ではとって不利となる場合がある。大気が小さな標高範囲で急激な温度勾配を持つとき、光線の軌跡は直線にはならずより大きな屈折率を持った側へ曲がる。Musgrave は、光線の経路は、臨界角における全反射のために非線形な軌跡をたどると指摘している [2]。

このため、非線形レイトレーシング法 [3] を用いたアプローチが提案されている。非線形レイトレーシング法とはパラメトリック曲線のような複雑な形状のレイを使用するレイトレーシング法の派生手法である。Stam と Languenou は、非均一な媒質での光線追跡を可能にするため、空間の屈折率の分布のモデル化した擬似的物理モデル (physically-motivated; 厳密な物理シミュレーションではないが、それに近い結果をもたらすモデル) を提案している [4]。このアプローチでは、空間の屈折率の分布は、ブロブの重ね合わせと確率論的関数から導かれる。また、その環境でレイがたどるパスを摂動論を用いて導いた。この手法の欠点は、レイの軌跡の計算が高コストであることである。Seron ら [5] は、文献 [1] と文献 [4] を組み合わせることに



よってこの計算量を減らす手法を提案している。この手法の主眼は、レイの初期方向に基づいてレイのパスを計算する方法を使い分けることである。これらの現象学的、あるいは物理ベースのアプローチとは対照的に、Zhao は物理的に厳密なシミュレーションもちいた手法を提案している [6]。この手法では、大気の屈折率の分布をシミュレートする熱転送モデルと熱フローモデルを用いている。この手法は視覚的にかなり妥当な結果を生成することが可能であるが、複雑な処理と多くの計算量を要し、また熱によるゆらぎなどの見た目を任意に制御することが極めて難しい。

## 2.2 ウェザリング現象の再現に関する先行研究

自然なテクスチャを生成するための手法は、コンピュータグラフィックスの分野においては過去 20 年以上にわたって綿密に調査されている。自然なテクスチャ生成に関する初期の研究は Perlin によって示された [7]。Perlin はいくつかのプリミティブ関数を合成することによって様々なパターンを生成する画像合成システムを提案した。Turk らは反応拡散系のシミュレーションすることによって自然なパターンを合成する手法を提案した [8]。反応拡散系とは二つ以上の化学物質で構成される系におけるそれらの濃度の経時的变化を記述する数理モデルの一つである。

ウェザリングは 4.1 節で述べるように自然な画像合成における重要な要素の一つである。ウェザリングに関する研究は数そのものは多くないものの、今日までにいくつかの卓越した手法が提案されている。ウェザリングという語は、粉塵による汚れ、腐食や浸食、傷、染み、苔の繁茂などを含む多様な現象を意味する。そのため再現する対象の現象やその実装アプローチ、ターゲットジオメトリの形状の考慮や、ジオメトリそのものの変更の有無など様々な手法のバリエーションが存在する。

実際の世界の汚れは埃や砂塵、水滴など何らかの粒子によってもたらされるものが多い。そのような粒子をモデル化したウェザリング技術が提案されている。Dorsey らは 3D モデルの表面上での水滴の流れ方をモデル化したパーティクルベースの手法を提案している [9]。この手法では、水滴やその動きは与えられたジオメトリの表面と相互作用するパーティクルとしてシミュレートされる。このパーティクル

は最終的に、壁や扉などの表面上にしばしば見られる染みのようなパターンを形成する。これはシミュレーション中にこれらのパーティクルによって生成された様々な状態を格納したいくつかのテクスチャマップを可視化することによって得られる。Chenらは別のタイプのパーティクルベースのアプローチを提案している [10]。彼らは  $\gamma$ -ton と呼ばれる特別なパーティクルを導入している。これは実際のウェザリング現象における様々な粒子に対応づけることができるパーティクルである。彼らの手法では、放射された  $\gamma$ -ton はフォントレーシング [11] と同様の方法でシーンに拡散する。この  $\gamma$ -ton は、直進、反射、屈折といった光子と同様の挙動をするだけでなく、表面上でのバウンドや表面に沿った流れといった挙動も行う。シミュレーションの結果として  $\gamma$ -ton はジオメトリ表面に堆積し、汚れや染み、浸食などの様々な「劣化」を擬似的に引き起こす。

これらパーティクルベースの手法は、ウェザリングの初期的な配置や伝播にターゲットジオメトリの形状を考慮しているものの、ウェザリングの影響を受けた領域が新たなパーティクルを生じるような伝播は考慮されておらず、ウェザリングの様相はパーティクルの散布源やターゲットジオメトリの形状に依存して局所的となりうる。また、これらの手法はパーティクルの散布と伝播をシミュレーションするために3次元空間における幾何計算や物理計算といった時間的に高コストな処理を必要とする。

ウェザリング現象として、特に金属腐食を対象とした手法も提案されている。Dorsey と Hanrahan は緑青の成長をシミュレーションする手法を提案した [12]。この手法は腐食した金属材質の表面の多層構造を考慮している。彼らの手法では、シミュレーションはレイヤー化したテクスチャ上で行われる。シミュレーションを通して、このテクスチャに対してレイヤーの「厚さ」に影響を与える独自のオペレータを連続的に適用することで緑青の成長過程を再現する。このオペレータによる変化の量と拡散はユーザが選択するいくつかの確率論的モデルによって決定される。彼らは環境からの放射照度を腐食領域の分布として利用する例を示した。この手法では、シミュレーション初期において緑青が発生する3Dモデル表面上の領域を決定する

ためにターゲットジオメトリの形状を利用しているものの、緑青の成長方向にはそれを利用しておらず腐食はおおむね均一に成長する。Merillouらはジオメトリ変化を伴う、より一般的な金属腐食の成長をシミュレーションする手法を提案した [13]。彼らは材質表面上の腐食の伝播モデルとしてテクスチャ空間でのランダムウォークを用いている。この手法も文献 [12] と同様に腐食の伝播にターゲットジオメトリの形状を利用しておらず、腐食の様相は初期的な腐食領域の分布に大きく依存する。Ishikawaらは金属腐食の化学反応プロセスを考慮したDorseyらのモデルのバリエーションを提案している [14]。この手法はパーティクルベースの手法であり、パーティクルとモデル表面との相互作用に化学的な正確さを考慮しているが文献 [9][10] と同様の問題を持つ。これらのアプローチと異なり、シミュレーションを二次元のテクスチャ空間ではなく離散化したモデル空間、いわゆるボクセルで行う手法も提案されている。Jainらはボクセル空間で実行する孔食を伴う腐食のシミュレーション手法を提案している [15]。この手法では腐食は確率的モデルにしたがって近傍のボクセルに伝播する。この確率的モデルにはターゲットジオメトリの形状を考慮しており、重力方向に従った腐食の成長の再現が可能である。しかしこの手法はターゲットジオメトリの面ごとにボクセル空間でのシミュレーションを行うため、多くの記憶容量を必要とする。

また金属腐食に関連して、材質表面の劣化の様相を再現する手法も提案されている。GobronとChibaはセルオートマトンを用いて材質表面に生じる塗装物のひびや剥離に起因する粗い表面の外観を合成した [16]。Wongらは腐食や汚れに沿って発生する剥離を模したテクスチャを合成するシステムを提案している [17]。

ここまで見てきたように、コンピュータグラフィックス分野では腐食の再現のために様々なシミュレーションアプローチや拡散モデルが提案されている。一方、電気化学の分野では、主に腐食現象の理解、予見、防止のための様々なシミュレーション技術が提案されている。その多くは腐食現象を一種の拡散反応系としてシミュレートする手法である [18][19]。これらの手法の難しい点は、数値シミュレーション、つまり非線形な連立偏微分方程式の求解を必要とすることである。そのような手法は

解の安定性の点で極めて慎重な注意を要するため，セルオートマトンベースの離散的なシミュレーションもよく利用されている [20][21]．特に Taleb らは金属腐食のシミュレーションのための，ランダムウォークを組み合わせたセルオートマトンモデルについて記述しており，これには多くの派生手法がある．

## 第3章 大気光学現象の再現手法

本章では大気光学現象，その中でも特に蜃気楼を再現するために検討した手法について詳述する。

### 3.1 はじめに

レイトレーシング法 [22] はコンピュータグラフィックス上で写実的なシーンを合成するもっともよく知られた，そして最も基礎的なテクニックである。レイトレーシング法とその派生手法は今日までに多くの研究者によって調査され，また改良され続けている。レイトレーシング法は光の反射と屈折をシミュレートするのに適した手法であるため，レイトレーシング法やその派生手法を応用し，大気の状態を大域的な光学系と見なして大気光学現象を表現する研究が少なからず存在する。逃げ水，浮島現象，ファータモルガナ (上位蜃気楼の一種)，四角い太陽，かげろうといったいわゆる大気光学現象は様々な大気の状態に起因して発生する。たとえば，熱された道路上の空気のような，垂直方向に急激な温度勾配をもつ大気の場合，冷たい層から暖かい層へ突入した光線は，フェルマー則に基づいて冷たい層への曲がったパスを描く。結果として，温度の境界面は鏡のように働き，私たちは曲がった光路の接線方向に虚像を知覚する。この現象が蜃気楼である。

蜃気楼のための代表的な手法では，光線追跡の処理の際に上述のような光路に影響を与える大気屈折率の変動を考慮しているものが多い。初期には，大気温度境界として働く特殊なシーンオブジェクトを使った現象学的手法が提案されている [1]。また，熱伝導モデルと熱フローモデルを用いて大気熱力学系を正確にシミュレートすることを狙った現代的な手法も提案されている [6]。この手法によって生成さ

れた画像は実際の光学現象の外観に極めて近くなるが、アルゴリズムは極端に複雑になり、シミュレーションには多くの計算量を必要とする。

本研究では近軸近似理論に基づいたレイトレーシング法の拡張であるペンシルトレーシング法 [23] に着目した。本節では、屈折率の動揺を考慮したシンプルな大気モデルを用いた、蜃気楼のシミュレーション手法を示す。またペンシルトレーシング法で用いられるレイ表現を応用した本手法のモデルが、大気の摂動に起因する光学的な歪みをシミュレートするのに有用であることを示す。

本手法は、文献 [1] や文献 [4] のような擬似的物理ベースのシンプルなモデルを採用しているため、シミュレーションのために多大な計算量を必要とすることなく、後述する大気温度勾配や摂動に起因する大気光学現象を再現することが可能である。

## 3.2 蜃気楼のメカニズム

本節では蜃気楼を生じる基礎的なメカニズムについて解説する。蜃気楼は、大気の屈折率の変動に起因する大気光学現象である。大気の屈折率は大気の組成、温度、湿度、気圧など様々な要因により変化する。地表では大気の組成や気圧はおおむね一定であるため、大気の屈折率の分布に影響を与えるのは主に温度と湿度である。ただし湿度が与える影響は非常に小さく無視することができるため、大気の屈折率は温度と反比例する関数であるとみなすことができる。このため多くの大気光学現象—逃げ水、蜃気楼、かげろうなどは、観察者周辺の大気温度勾配が主要因となって発生する。大気光学現象は大きくふたつに分類することができる。すなわち、静的な温度勾配によって引き起こされるものと、動的な温度勾配によって引き起こされるものである。

### 3.2.1 大気の静的な温度勾配による蜃気楼

下方蜃気楼は、地面近くに暖かい空気の層があり、上方に冷たい空気の層がある場合に観測される。逃げ水や浮島現象などが代表的な例である (図 3.1(a), 図 3.1(b)).

一方、上方蜃気楼は、下方蜃気楼とは逆で、上方に暖かい空気の層があり、下方に冷たい空気の層がある場合に観測される。ファータモルガナ、四角い太陽、などがその例である (図 3.2(a), 図 3.2(b)). 図 3.4(a)(b) はこれらの現象における光の振る舞いを表している..

### 3.2.2 大気の動的な温度勾配による蜃気楼

熱対流や移流が起きると、空気の温度勾配は動的に変化する。このような現象に起因する摂動した空気は、光線のパスを位置的に、そして方向的に変更する。かげろうは、このグループの現象の代表例である (図 3.3). 図 3.4(c) はこの現象における光の振る舞いを表している.

## 3.3 背景

本手法は、ペンシルトレーシング法を応用した、Berger と Trout によって提案された蜃気楼を表現するための従来手法の直接的な拡張である。そのため、本手法のアプローチについて説明する前に、本節ではふたつの背景研究—蜃気楼ボックス [1] とペンシルトレーシング法 [23] について述べる。

### 3.3.1 蜃気楼ボックス

はじめに、蜃気楼ボックスについて述べる。2.1節で述べたように、蜃気楼ボックスはコンピュータグラフィックス上で蜃気楼を扱った初期的な研究である。Berger と Trout は、垂直方向に温度勾配をもつ大気を蜃気楼ボックスによってモデル化した。蜃気楼ボックスは、異なる屈折率を持つ複数の平行な平面を内包した特別な種類のシーンオブジェクトである。名前が示すとおり、Berger と Trout は、彼らの実装のなかでボックスクリップされた平面の束を用いている。このオブジェクトと交差したレイはオブジェクトの内部で繰り返し曲げられ、蜃気楼を形成する条件下の



(a) 逃げ水



(b) 浮島現象

図 3.1: 下方蜃気楼の例





(a) ファータモルガナ



(b) 四角い太陽

図 3.2: 上方蜃気楼の例

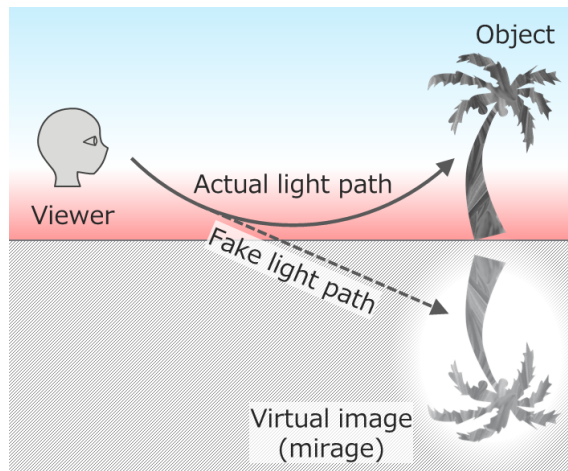


図 3.3: 大気の摂動による蜃気楼の例

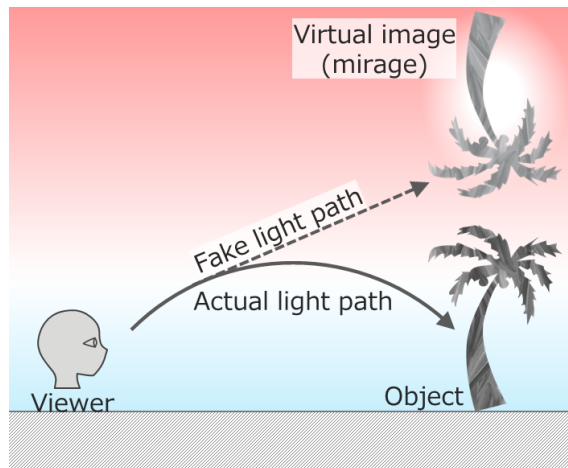
大気中のように曲がったパスを近似的にたどる。このモデル化は単純でその適用可能な現象は限定されるが、上位/下位蜃気楼をシミュレートするのに十分なモデル化である。

### 3.3.2 ペンシルトレーシング法

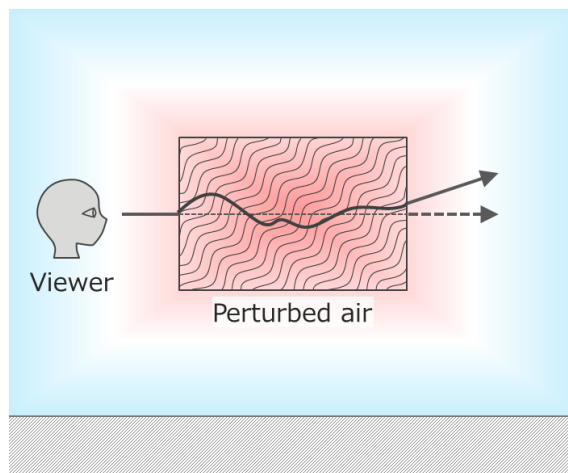
次に、ペンシルトレーシング法について述べる。ペンシルトレーシング法は新谷らによって提案された、レイトレーシング法を高速化するために提案された手法である [23]。この手法は、あるレイと同様の方向を持つレイは類似したパスをたどる、という仮定を使って光線追跡の処理の高速化を実現している。典型的なレイトレーシング法では、各ピクセルあるいはサブピクセルの色は個々のレイを追跡することによって算出する (図 3.5(a))。一方、ペンシルトレーシング法では、個々のレイを追跡するのではなく、特定の領域のピクセルあるいはサブピクセルの色を計算するためにペンシルと呼ばれる複数のレイのセットを追跡する (図 3.5(b))。ペンシル (pencil) とは光束や光線束を意味する語であるが、ここではスクリーン中の特定の



(a) 下方蜃気楼

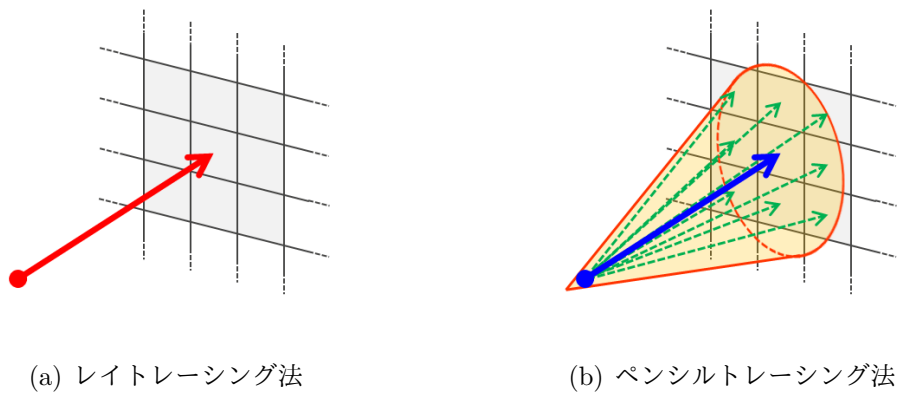


(b) 上方蜃気楼



(c) 大気の摂動

図 3.4: 温度勾配や摂動によって引き起こされる現象



(a) レイトレーシング法

(b) ペンシルトレーシング法

図 3.5: レイとペンシル

領域に広がるレイの束を意味し、軸レイと呼ばれる中央のレイと、近軸レイと呼ばれるそれを取り巻くレイからなる。領域の中心点の色は典型的なレイトレーシング法と同様に計算するが、その周囲のピクセルの色は近軸レイを追跡した結果を使って近似する。軸レイを光線追跡した結果を使い、近軸レイの光線追跡を省略することがこの手法の主眼である。

### 近軸近似理論

これを実現するために、新谷らは近軸近似理論を利用している。近軸近似は幾何光学において、光学系を通過した光の振る舞いをシミュレートするために用いられる近似理論である。この理論では、レイはレイベクトルと呼ばれる4次元ベクトルとして、光学系はシステム行列と呼ばれる $4 \times 4$ 行列として表現される。ここで「光学系」とは、光線の経路に影響を与えるすべてのオブジェクトを意味する。具体的に言えば、光路上にある光を反射/屈折する全てのオブジェクトである。この光学系によってもたらされるレイへの影響は、そのレイのレイベクトル表現をシステム行列で変換することによって近似される。

**レイベクトル表現** レイベクトルは、近軸レイを軸レイからの位置と方向のずれという観点で記述した4次元ベクトルである。このために、レイ座標系という座標系を用いる。レイ座標系は、レイの始点 $O$ を原点とし、方向ベクトル $\hat{\mathbf{e}}$ とそれと直交

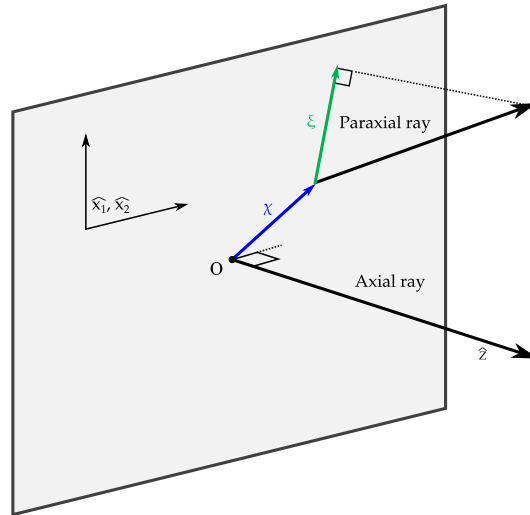


図 3.6: レイ座標系

する二つのベクトル  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$  で構成される直交座標系である。

レイベクトル  $\psi$  は、近軸レイの始点のずれ、すなわち近軸レイと  $\hat{x}_1$ - $\hat{x}_2$  平面の交点をあらわす 2次元座標  $\mathbf{x}$  と、方向のずれ、すなわち近軸レイの方向ベクトルを  $\hat{x}_1$ - $\hat{x}_2$  平面に投影した 2次元ベクトル  $\xi$  で構成される。

$$\psi = \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \xi \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

図 3.6 は、これらの幾何学的関係を示している。

システム行列 軸レイは光学系を通して、伝播、屈折、反射といった影響を受ける。これらの光学的影響は、レイベクトルに対する  $4 \times 4$  行列による線形変換で表現できる。この行列をシステム行列という。システム行列は光学系の一部である要素システム行列のシステム行列の行列積である。ある光学系がシステム行列  $T$  で表されるとき、レイベクトル  $\psi$  はこの光学系を通して以下のように変換される。

$$\psi' = T\psi \quad (3.2)$$

変換されたレイベクトル  $\psi'$  は、光学系を通して変更された軸レイのレイ座標系から見た近軸レイを表している。

伝播，屈折，反射のそれぞれに対応する要素システム行列は以下のように定義される。

### 伝播行列

近軸レイが媒質中でまっすぐに伝播するとき軸レイからの方向的ずれが，伝播後の近軸レイの始点位置に大きく影響を及ぼす。近軸レイが軸レイにそって距離  $z_0$  を進むとき，伝播のためのシステム行列  $T_t$  は以下ようになる。

$$T_t = \begin{pmatrix} e & z_0 e \\ 0 & e \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

上記の行列の各成分は  $2 \times 2$  行列である。ここで， $e$  は  $2 \times 2$  行列の単位行列， $0$  は  $2 \times 2$  のゼロ行列である，

### 屈折行列

媒質の境界にレイが接触するとき，屈折方向は，二つの媒質の絶対屈折率と，レイと物体の交点における法線ベクトルに依存して決まる。同様に，屈折のシステム行列もまたそれらに依存する。屈折のシステム行列  $T_i$  は以下ようになる。

$$T_i = \begin{pmatrix} \theta' \theta^{-1} & e \\ (\theta')^{-1} h Q \theta^{-1} & (\eta/\eta') (\theta')^{-1} \theta \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

ここで，

$$\theta = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}_1 & \hat{\mathbf{x}}_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}_2 \\ \hat{\mathbf{x}}_2 \cdot \hat{\mathbf{u}}_1 & \hat{\mathbf{x}}_2 \cdot \hat{\mathbf{u}}_1 \end{pmatrix}, \theta' = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}'_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}_1 & \hat{\mathbf{x}}'_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}_2 \\ \hat{\mathbf{x}}'_2 \cdot \hat{\mathbf{u}}_1 & \hat{\mathbf{x}}'_2 \cdot \hat{\mathbf{u}}_1 \end{pmatrix}, \quad (3.5)$$

$$h = \cos \theta' - (\eta/\eta') \cos \theta \quad (3.6)$$

$\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2, \hat{\mathbf{x}}'_1, \hat{\mathbf{x}}'_2, \hat{\mathbf{u}}_1, \hat{\mathbf{u}}_2$  はそれぞれ入射レイ，屈折レイ，法線レイの，おのこの方向ベクトルに垂直なレイ座標系の1組の基底ベクトル， $Q$  は接触面の曲率行列， $\theta, \theta'$  はそれぞれ入射角，屈折角， $\eta, \eta'$  はそれぞれ入媒質，出媒質の絶対屈折率である。

### 反射行列

反射は屈折の特別な場合として扱うことができる。したがって，反射の場合は式(3.4)の  $\theta'$  を  $(\pi - \theta)$  に置き換えるだけでよい。

## 3.4 提案手法

本節では、提案手法について詳述する。本手法は3.2.2項で述べたような、蜃気楼による揺らぎを扱うことができるペンシルトレーシング法の拡張である。3.2節で述べたような蜃気楼は、特定の条件下にある大気によって引き起こされる。そのような状態の大気もまた一種の光学系と見なすことができるため、ペンシルトレーシング法の枠組みで扱うことが可能である。

これを実現するため、BergerとTroutの手法のように3DCG上で蜃気楼を再現するための特殊なシーンオブジェクトを導入する。層状の温度勾配を持った大気をシミュレートするアプローチはBergerとTroutの方法と同様だが、本手法ではさらに動的な温度勾配をもった大気をシミュレートするための別の種類のシーンオブジェクトを導入する。本手法では、これらの種類のオブジェクトを扱うことができるようにペンシルトレーシング法を拡張している。

### 3.4.1 論理的根拠

本節では、蜃気楼のシミュレーションにペンシルトレーシング法を使用することの利点と論理的根拠について議論する。

大気光学現象をシミュレートすることを目的とした、非線形レイトレーシング法から派生したさまざまな従来手法[4][5][6]は、物理的に正確な結果を生成することが可能だが、それらは共通して高い計算コストを要求する。一方、本手法はあくまでも擬似的物理ベースの手法であるため、先に挙げた従来手法のような正確な結果を生成するのは困難である。本手法は物理的な正確性が求められるシーンには適さないが、しかしながらその計算コストは従来法に比べて顕著に軽量である。正確なシミュレーションよりも、物理的正確性を必要としないレンダリングプレビューといった用途に本手法は適している。

また、ペンシルトレーシング法(近軸近似理論)のレイベクトル表現は、光学的振動をシミュレートするのに極めて有用である。3.2.2項節で述べたように、揺らぎ

を持った大気は光線レイに位置的・方向的ノイズを与える。それゆえ、そのような光線レイのパスは完全にランダムなパスとはならず、オリジナルの方向をおおよそ保ちながら伝搬する。レイベクトル表現を使って位置的・方向的ノイズをレイに加えることは、単純にレイの始点と方向ベクトルに次元ごとのホワイトノイズを加えることよりも妥当な方法であると考えられる。

### 3.4.2 蜃気楼のためのオブジェクト

本手法では、2種類の特特殊なオブジェクトを配置することによって蜃気楼を再現する。この特特殊なオブジェクトとはすなわち、温度境界オブジェクトと摂動オブジェクトである。

温度境界オブジェクトは、端的に言えば温度勾配に対応する定数の屈折率を持ったオブジェクトである。これは Berger の Trout の蜃気楼ボックスと本質的に同じものである [1]。蜃気楼ボックスは何枚かの平行な面を含む直方体だが、本手法の温度境界オブジェクトは単なる無限平面でもよい。本手法では屈折面を持つオブジェクトを包括的に「温度境界」と呼んでいるに過ぎない。これを使って、安定した温度勾配をもつ大気の状態を再現する。

摂動オブジェクトは、レイに位置的小よび方向的ゆらぎを与えるオブジェクトである。これにより、変動する温度勾配によって引き起こされる大気光学現象を再現する。このノイズベースの方法は、Stam と Languenou がレイを摂動させるために用いた統計学的手法と概念的には同様のものである [4]。

#### 温度境界オブジェクト

狭い範囲で急激な温度勾配をもつ大気のは、異なる屈折率を持った媒質同士の境界面と見なすことができる。そのため、このような安定的な温度勾配は、特定の屈折率を持つオブジェクトをシーンに配置することで単純に再現することが可能である。このような面をもつオブジェクトを本論では温度境界オブジェクトと呼ぶことにする。



現実の大気の屈折率の変化は実際には高度に沿って連続的に変化する。これを再現するためには平行な平面上の温度境界オブジェクトを層状に多数配置すればよい。

温度境界オブジェクトによる光線の変化は、屈折および反射(全反射)である。これに対応するシステム行列は文献 [23] で議論されている屈折・反射行列をそのまま適用することができる。

### 摂動オブジェクト

熱対流などによって、大気の温度勾配がかき乱されることによって、大気に複雑な摂動が生じる。光線がこのような摂動を持った領域に入ると、光路は微少な屈折の影響を受けながらおおむね直進する(図 3.4(c))。このような領域は、微視的に正確な観点からは極めて複雑な光学系であるが、巨視的にはレイの方向的、位置的なノイズを与えるものとして考えることができる。

本手法では、このような大気の摂動をシミュレートするために、レイに方向的、位置的なノイズを与える特別な種類のシーンオブジェクト、摂動オブジェクトを導入した。このタイプのオブジェクトに交差したレイの始点と方向はノイズによって変更される。この摂動したレイは、オリジナルのレイベクトルとノイズレイベクトルとの加算として表現することができる(式 (3.7))。

$$\psi' = \psi + \psi_\epsilon \quad (3.7)$$

ここで  $\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi_\epsilon$  は入射レイ, 摂動したレイ, ノイズレイのレイベクトル表現である。

摂動オブジェクトの形状はどんなものでもよい。多くの場合は無限平面で十分であるが、シーン中の摂動領域が局所的であるならば何らかの閉包的な形状が必要となるだろう。

**摂動ベクトル場** レイと摂動オブジェクトの交点におけるノイズレイベクトル  $\psi_\epsilon$  を決定する方法はいくつか考えられる。今のところ本手法ではテクスチャマッピングに似たアプローチをとっている。

本手法では、摂動オブジェクトの表面には、摂動に対応するベクトル場をマッピングしている。摂動レイベクトル場は2次元的な広がりを持つベクトル場である。これを構成するレイベクトルは、光線が摂動した空気に入射した際に受ける摂動の影響の大きさを示している。摂動オブジェクトの表面のすべての点において摂動レイベクトルは定義される。

本手法の実験的な実装では、摂動レイベクトル場は乱数生成された2次元の格子状に並んだレイベクトルを用いている。一般的なテクスチャマッピングのように、摂動レイベクトルはレイと摂動オブジェクトの交点におけるテクスチャ座標の関数である。格子間の摂動レイベクトルは周囲のレイベクトルをバイリニア補間することによって求めている。

**レイベクトル表現とシステム行列の拡張** 本手法の大元であるペンシルトレーシング法におけるシステム行列は、伝播、屈折、反射の3種類である。摂動の影響の計算は式(3.7)で示すようにレイベクトルの加算として定義されているため、摂動を従来の $4 \times 4$ システム行列の計算に直接組み込むことはできない。レイベクトルの加算を行列積として扱うためには、システム行列を $5 \times 5$ 行列として、レイベクトルを5次元ベクトルとして表現する必要がある。この拡張された行列の第5列ベクトルはレイベクトルの加算要素として働く。

これは以下のように定式化される。

$$T^E = \left( \begin{array}{c|c} T & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0}^t & 1 \end{array} \right) \quad (3.8)$$

ここで、 $T$ は従来の $4 \times 4$ システム行列であり、 $T^E$ は $T$ と等価な拡張 $5 \times 5$ システム行列である。そして、レイベクトル表現は以下のように拡張される。

$$\psi^E = \begin{pmatrix} \psi \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

ここで、 $\psi$ は従来の4次元レイベクトルであり、 $\psi^E$ は $\psi$ と等価な拡張5次元レイベクトルである。

この方法に従うと，摂動のためのシステム行列  $T_P$  は以下のように表現される．

$$T_P^E = \left( \begin{array}{c|c} \mathbf{e} & \psi_\epsilon \\ \hline \mathbf{0}^t & 1 \end{array} \right) \quad (3.10)$$

ここで  $\mathbf{e}$  は  $4 \times 4$  の単位行列， $\mathbf{0}$  は 4次元の列ゼロベクトル， $\psi_\epsilon$  は 3.4.2 項で議論したノイズレイベクトルである．

## 3.5 結果

この節では，提案手法による生成した画像と，その処理効率について考察する．

### 3.5.1 実験環境

最初に，この節全体で使用する実験環境について述べる．実験に使用した計算機の仕様を表 3.1 に示す．

表 3.1: 実験環境

CPU	Intel Core i7-920 (2.66GHz)
メモリ	16GB(PC3-12800)
利用可能なスレッド数	8
ストレージ	512GB SSD

### 3.5.2 四角い太陽蜃気楼

本項では，大気光学現象として四角い太陽蜃気楼を再現した例を示す．四角い太陽蜃気楼は上方蜃気楼の一種である．上方蜃気楼は，3.2.1 項節で述べたように地面近くの大気が上方の大気よりも暖かい場合に発生する現象である．

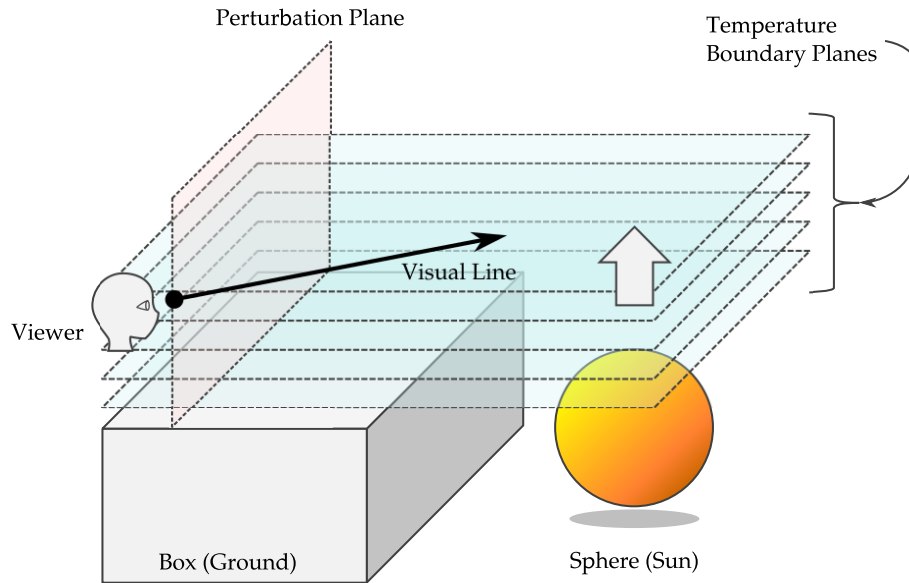


図 3.7: シーン設定の概要

この現象を再現するために、ボックス (地面)、球体 (太陽)、そしていくつかの特殊オブジェクトからなるシーンを使用した。太陽役の球体はシーン全体を通して上方へ移動する。垂直な大気温度勾配を再現するため、いくつかの異なる屈折率をもつ平面を地面の上に配置した。そして、黎明に伴って発生する大気の摂動を再現するため、視点の前方に摂動平面を配置した。図 3.7 はこれらシーンオブジェクトの位置関係の概要を示している。このシーン設定やレンダリングパラメータの詳細については 3.7.1 項を参照せよ。

生成結果を図 3.9 に示す。摂動の効果を観察しやすくするため、この作例は 15 秒 (450 フレーム) の動画として生成している。図 3.9 は提案手法を用いて生成した四角い太陽の画像である。参考として、同じシーンに格子状のテクスチャを適用してレンダリングした結果を図 3.10 に示す。また、図 3.8 は、北海道別海町にて撮影された実際の蜃気楼の写真である。なお図 3.8 と図 3.9 の拡大画像を付録 A として添付する。これらの画像から分かるように、本手法は写実的な結果を生成することができる。

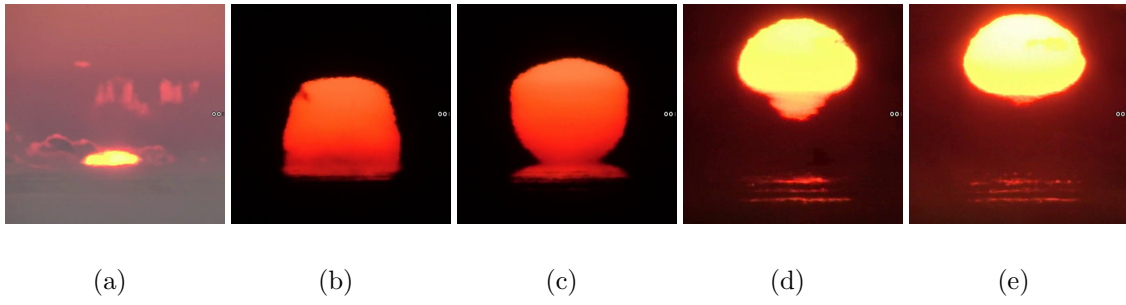


図 3.8: 四角い太陽蜃気楼 (実際の写真)

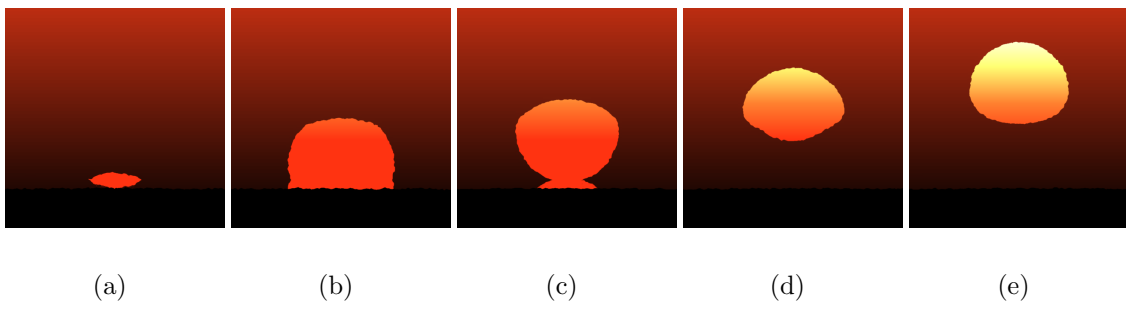


図 3.9: 四角い太陽蜃気楼 (提案手法による生成結果)

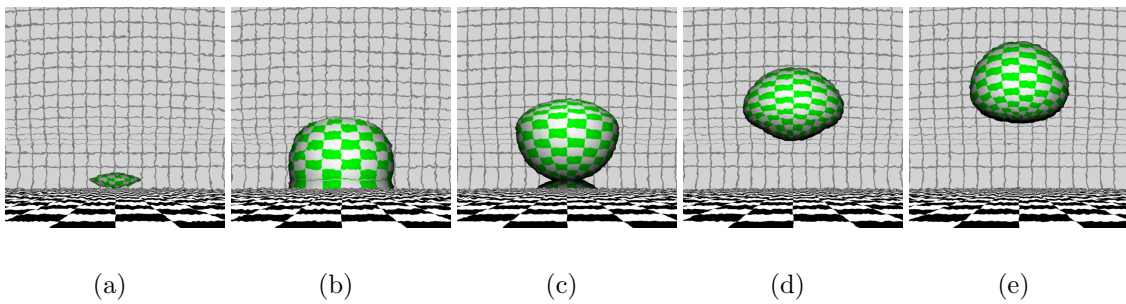


図 3.10: 四角い太陽蜃気楼 (提案手法による生成結果 (テクスチャなし))

### 3.5.3 処理効率

次に本手法の処理効率について述べる。本手法はペンシルトレーシング法を基づいているため、その処理効率に関する特性も継承している。テストに用いたシーンは前節と同様である。画像生成時間は、画像サイズとドメインサイズを変えながら測定した。画像サイズは64ピクセル四方から512ピクセル四方まで64ピクセル刻みで変化させ、ドメインサイズは8ピクセル四方から64ピクセル四方まで指数的に変化させた。計測結果を図3.11に示す。前述したように、生成結果は15秒(450フレーム)の短い動画であるため、図3.11に示す処理時間はすべてのフレームを生成するのにかかった合計時間である。比較対象として、典型的なレイトレーシング法によって同じシーンをレンダリングするのにかかった時間も計測し、緑の線で示してある。この結果は、本手法が典型的なレイトレーシング法よりもおよそ1.5倍から5倍ていど高速に画像を生成できることを示している。

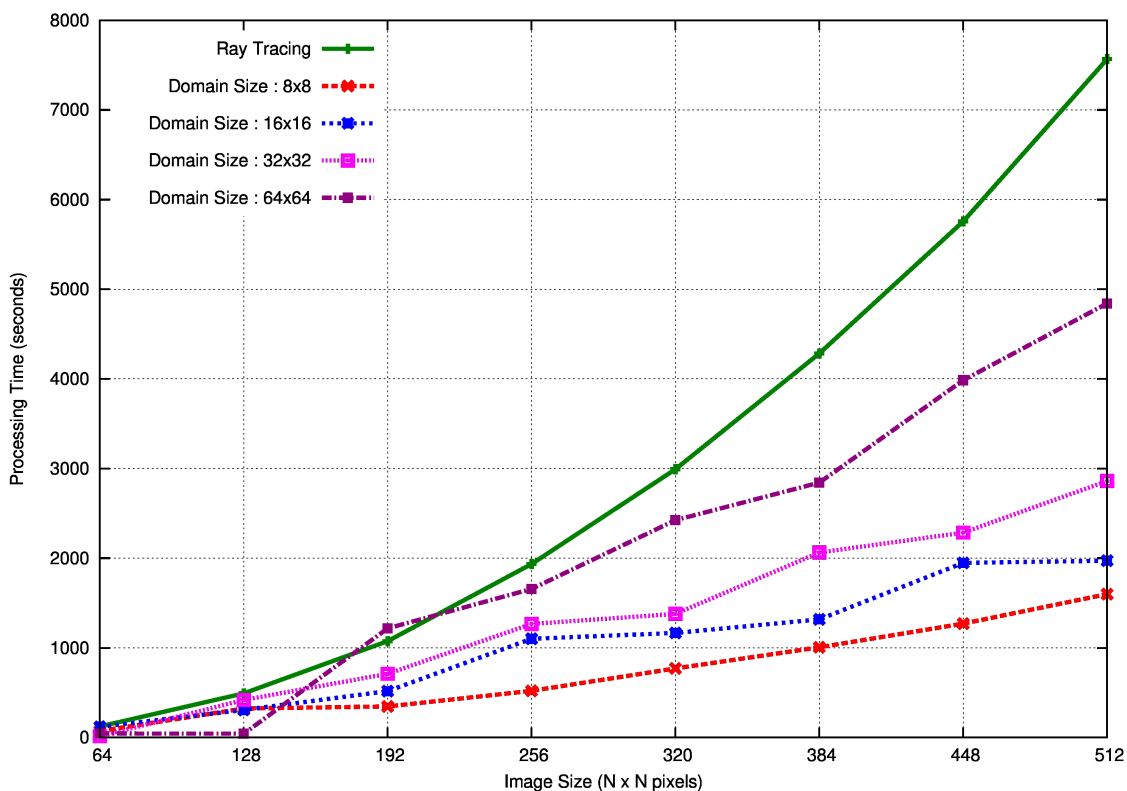


図 3.11: 処理効率

### 3.5.4 制約と問題点

本項では提案手法の制約と問題点について議論する。提案手法の現在の実装には画像正確性に関する制約と、隣接ドメイン間での不連続性に関する問題がある。

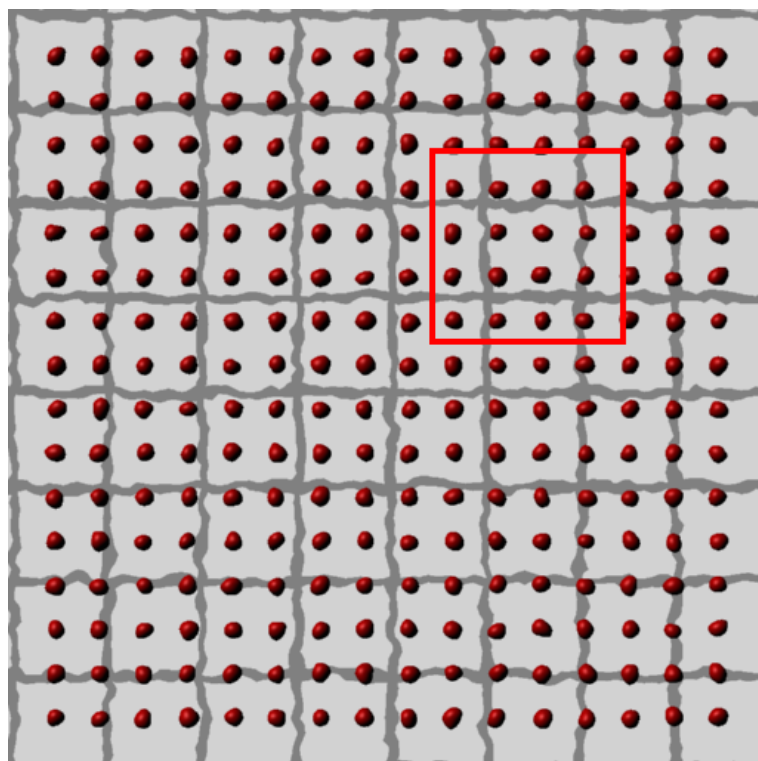
#### 正確性の制御

本手法の現在の実装における光束追跡処理は、シーンオブジェクトの性質やドメインサイズによっては不正確な結果を生成しうる。

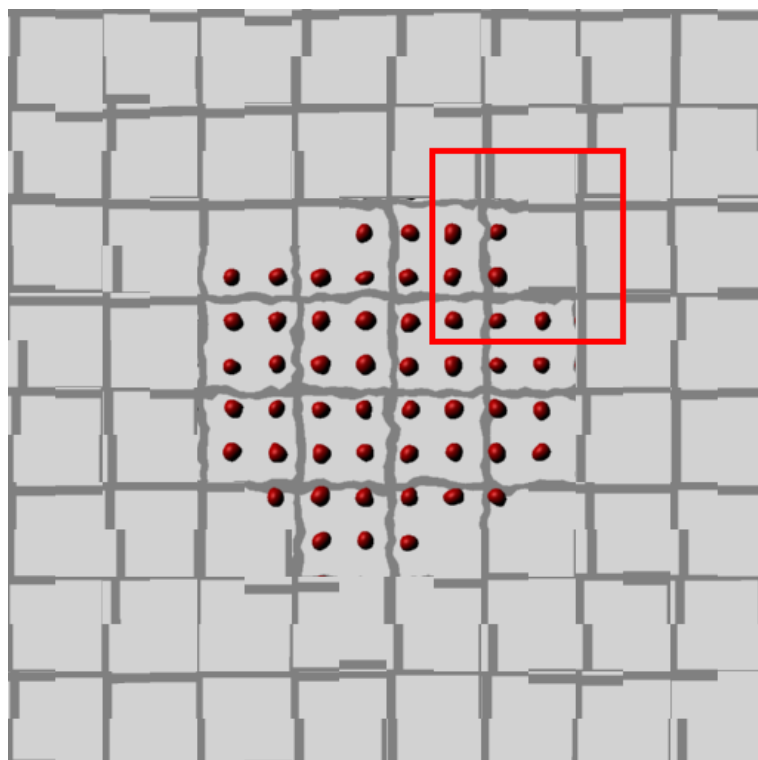
新谷らのオリジナルのペンシルトレーシング法[23]と異なり、現在の実装では、レンダリングのためのドメインサイズを固定している。オリジナルの手法では、ドメインサイズは結果画像の任意の正確性要求に基づいて解析的に決定している。つまり、画像を初期的なドメインサイズに分割し、光束追跡処理中にドメインの光束広がり角が、事前定義された画像正確性を満たさないほどに増加することを検出した場合に、ドメインをより小さなドメインに分割する、という方法を採用している。そのような解析には物体表面の性質に起因する、真の光路からの誤差の推定が必要だが、本手法で導入した摂動オブジェクトに対してそのような誤差推定を行うことは困難である。なぜなら本手法のノイズ因子の挙動は乱数的に生成されたものであり、その挙動を解析的に推定することはできないためである。

このことは、現在の実装における光束追跡処理ではドメインのサイズよりも小さな物体を見失いうることを意味している。これは文献[23]の節4.1(1)で言及されているのと同じ問題である。図3.12はこの問題に起因するうまくいかない結果の例である。このシーンでは、球がおおよそ各ドメインの軸レイの隙間に位置するように格子状に配置されている。このシーン設定とレンダリングパラメータの詳細については3.7.2項を参照せよ。図3.13は、図3.12の赤枠で囲った部分を拡大したものである。

図3.12(a)-図3.13(a)は、通常のレイトレーシング法で生成したものであり、図3.12(b)-図3.13(b)は提案手法で生成したものである。この例が示すように、いくつかの球が本手法による結果画像では隠れてしまっている。



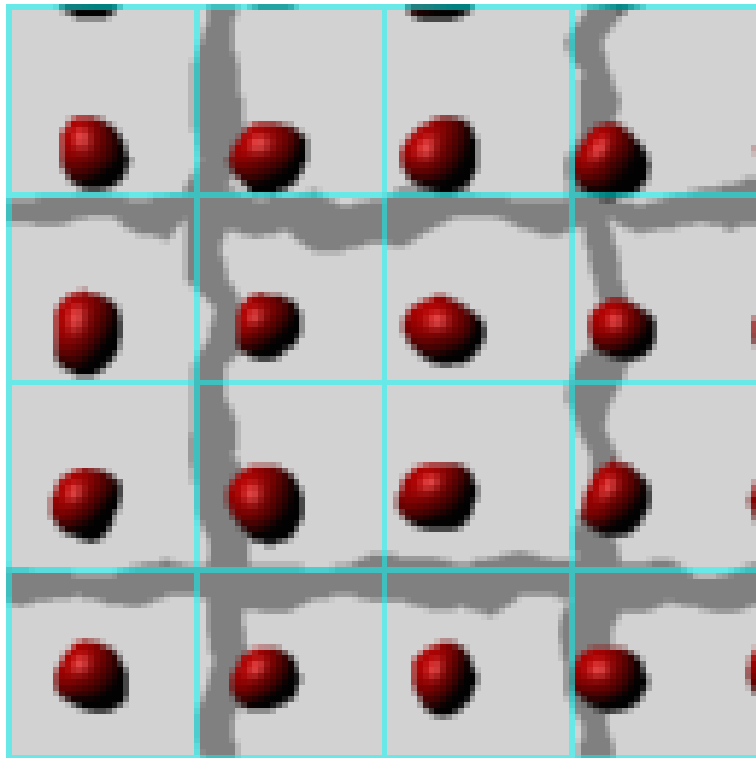
(a)



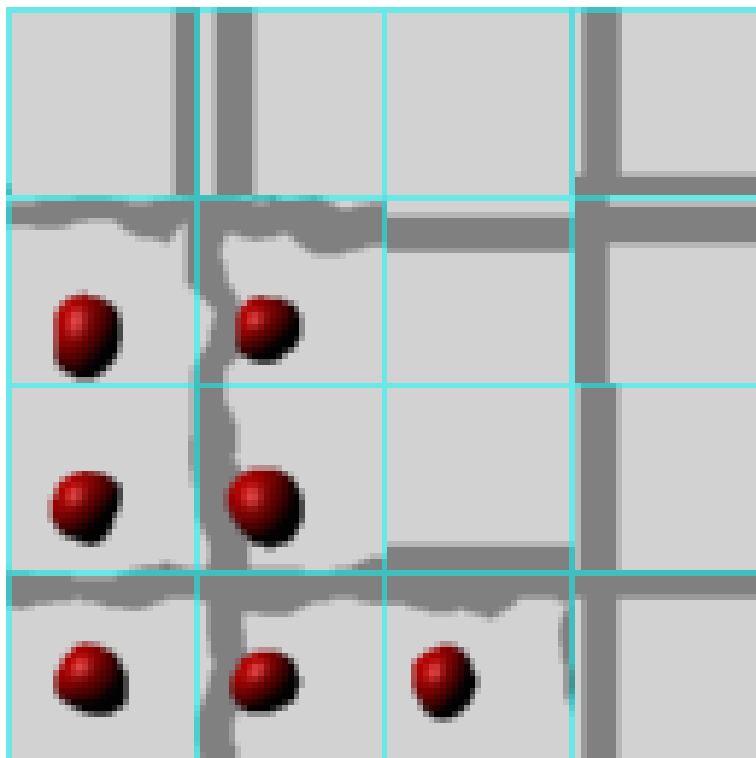
(b)

図 3.12: レンダリング結果に欠落が生じる例





(a)



(b)

図 3.13: レンダリング結果に欠落が生じる例 (拡大)

これら問題を解決するには、シーンの幾何特性にもとづいて適切なドメインサイズを決定したり、摂動オブジェクトに対して誤差推定を行う何らかの方法が必要であると考えられる。

### 隣接ドメインとの接続性

提案手法には隣接するドメイン間で不連続性が現れうる問題がある。

ペンシルトレーシングでは、画像中の領域はレイの束を追跡することによって描画するため、軸レイを変化させた摂動オブジェクトによる影響は、すべての周辺の近軸レイへ伝搬される。そのため摂動効果は領域ごとに異なる。結果として、この挙動は不連続な外観を生じる。図 3.13(b) はこの問題に起因するうまくいかない結果の例である。この画像の水色のグリッドは、ドメイン境界を示している。この例が示すとおり、ドメイン内部では連続性が保たれているが隣接ドメイン間ではそうっていない。大きなドメインサイズを用いると、この欠陥は顕著になる。四角い太陽曇気楼のような、物体表面の様子が重要ではないシーンでは、この欠陥は問題にならないと考えられる。しかしそのようなシーンはむしろ一般的ではなく、それゆえこれは解決すべき重要な課題である。

この問題を解決するためには、隣接領域間での何らかの補間が必要となると考えられる。

## 3.6 むすび

本章では大気光学現象を再現するための、ペンシルトレーシング法を拡張したサンプルな手法を提案した。提案方法では、レイのパスに影響を与える特別なオブジェクトをシーンに挿入することで、大気の屈折率の分布に起因する様々な光学的影響を効率的にシミュレートすることができる。提案手法には 3.5.4 項で言及したような制約と問題点があるため、これらの解決が今後の課題である。

## 3.7 章末付録：シーン設定の詳細

本節では 3.5 節で用いた各シーンの詳細について掲載する。

### 3.7.1 四角い太陽蜃気楼

表 3.2 は、3.5.2 項で使用したシーン設定の詳細である。

このシーンでは一つの摂動オブジェクトを設置している。この摂動オブジェクトは、ノイズレイベクトル場をマップした平面である。このノイズレイベクトル場は  $128 \times 128$  のレイベクトルを含んでおり、平面上の 3 単位四方の領域にマッピングしている。このベクトル場内のレイベクトルは乱数生成したものであり、 $3 \times 3$  のガウシアンフィルターで平滑化している。

なお、これらのシーンオブジェクトの配置や屈折率などは、四角い太陽蜃気楼を引き起こしうる大気の状態に基づいて推定したものであり、この蜃気楼を生じる大気状態を観測して得た実測値ではない。

表 3.3 は図 3.9 を生成するのに用いたレンダリングパラメータである。

### 3.7.2 レンダリング結果に欠落が生じる例

表 3.4 は 3.5.4 項で使用したシーン設定の詳細である。このシーンでは、球がおおよそ各ドメインの軸レイの隙間に位置するように格子状に配置されている。摂動オブジェクトに関しては 3.7.1 項と同様である。

表 3.5 は図 3.12 を生成するのに用いたレンダリングパラメータである。

表 3.2: 四角い太陽蜃気楼のシーン設定

オブジェクト	プロパティ	値
カメラ	位置	$(0, 1.8, 0)$
	注視点	$(0, 25, 0)$
	FOV	$45^\circ$
球 (太陽)	位置	$(0, -155, 0) \rightarrow (0, 620, 0)$
	半径	120
ボックス (地面)	中心	$(0, -250, 0)$
	x 幅	1000
	y 幅	500
	z 幅	1000
摂動オブジェクト		
平面	位置	$(0, 0, 4)$
	法線	$(0, 0, -1)$
温度境界面 ( $i = 0, 1, 2, 4$ )		
平面 <sub>0-4</sub>	位置	$(0, h_1, 0), h_1 = 120 + 1.25i$
	法線	$(0, -1, 0)$
	屈折率	1.02
平面 <sub>5-9</sub>	位置	$(0, h_2, 0), h_2 = 0.1 + 0.125i$
	法線	$(0, 1, 0)$
	屈折率	0.9999

表 3.3: 四角い太陽蜃気楼のためのレンダリングパラメータ

生成画像のサイズ	512 × 512 ピクセル
ドメインサイズ	8 × 8 ピクセル
ピクセルごとのレイ数	9 本
フレーム数	450 フレーム

表 3.4: レンダリング結果に欠落が生じる例のシーン設定

オブジェクト	プロパティ	値
カメラ	位置	(0, 0, -5)
	注視点	(0, 0, 0)
	FOV	22.62°
球 ( $c = 0-15$ , $r = 0-15$ )	位置	$(c_x, c_y, 0)$ $c_x = -0.875 + 0.125c$ $c_y = -0.875 + 0.125r$
	半径	0.024
	摂動オブジェクト	
平面	位置	(0, 0, 1)
	法線	(0, 0, -1)

表 3.5: レンダリング結果に欠落が生じる例でのレンダリングパラメータ

生成画像のサイズ	512 × 512 ピクセル
ドメインサイズ	16 × 16 ピクセル
ピクセルごとのレイ数	9 本
フレーム数	1 フレーム

## 第4章 ウェザリング現象の再現手法

本章ではウェザリング現象，その中でも特に金属腐食の外観を再現するために検討した手法について詳述する。

### 4.1 はじめに

3Dグラフィックスにおいて生成されるシーンは，シーンに含まれるオブジェクトの視覚的詳細の欠如から人工的な印象を与えることがしばしばある．現実の世界のオブジェクトはたいていの場合，汚れや傷といった非常に多くの視覚的な詳細をもつため，シーンをより写実的にするにはそれらを再現する必要がある．

3DCGにおけるウェザリング(風化，エイジングとも呼ばれる)とはそのような視覚的詳細を形成する要素の一つである．朽ち木，苔むした石像，緑青をふいた銅像，埃を被った家具，染みのできた壁などが風化した物体の例である．3Dオブジェクトの表面を構成するテクスチャマップやバンプマップを工夫したり特別なシェーダを用いることで，これらのウェザリング効果を再現することは可能ではあるが，視覚的にそれらしいパターンを形成するのは容易なことではない．現状としては，アーティストの人手の描画によるパターンの生成や，現実の写真などを加工することでこれらのパターンを作り出す場合が多いが，写実的な結果を得るにはいまだ大量の労力が必要である．

このため2.2節に示すように，これまでに自動または半自動のものを含む様々なウェザリング技術が提案されている．しかし特に金属腐食を指向する技術はウェザリング技術全体から見れば事例は少なく，未だ発展の余地を残す分野であると言える．

金属腐食は興味深いウェザリング現象の一つである。金属腐食は金属の酸化をきっかけとして起こる複合的な劣化現象であり、工業的観点からは抑止あるいは制御すべき現象である。しかし意図的に金属腐食の外観を作り出すことは美術分野、たとえばインテリアやスケールモデルなどの分野でしばしば行われる。こういった分野では「エイジング塗装」や「ウェザリング塗装」などとよばれる一種の塗装技術があり、ものの見た目を古く見せかけるために用いられている。また腐食したオブジェクトは、3DCG 技術と関わりが深い映画やゲームといったエンターテインメント分野においてもシーンを印象的にするためにしばしば使用される。廃虚や廃工場、古びた宇宙船といった環境はそうした作中でよく見かけるものである。一口に腐食といっても、それは意外なほど複雑な現象である。腐食現象は金属の酸化をはじめとして、腐食生成物による染みの拡散、表面塗装物のひび割れや剥離といった様々な構成要素的現象を含んでいる。その複雑さのため手作業での再現がとりわけ難しいものでもある。しかし現在のところ腐食したオブジェクトの外観を生成する広く使われているツールはほとんどない。

Tanabe らはこのような金属腐食の再現を自動化することを目的として、電気化学分野のアプローチにヒントを得た 2次元セルオートマトンベースの手法を提案している [24]。この手法は視覚的に妥当性のある金属腐食の外観を再現することが可能ではあるものの、腐食の成長方向に関して以下の制限を持っている。

- 腐食の成長方向がセルオートマトンモデルの 2次元格子の下方方向に限定されていること
- 腐食する面の傾きに関する考慮が離散的 (面の方向が鉛直上向き、45°、垂直の 3通り) であること

このため Tanabe らの手法では任意の形状のジオメトリ表面における錆の成長をシミュレートすることが困難であった。

以降、4.2 節ではこの手法の制限を解除し可制御性を強化した新たな手法について述べる。4.3 節では、本手法の効果を検証するため平面、半円筒、バニー、フランジ

付きパイプなどいくつかのジオメトリにおける経時的な腐食過程をシミュレートした例を示す。章末では、4.4節にて本手法の制約と今後の課題について議論する。

## 4.2 提案手法

金属の腐食現象は、電気化学的反応の結果として起こる腐食生成物の形成、その移動と拡散、沈着などの現象からなる複雑な反応拡散系である。Tanabeらはこれを一種のセルオートマトンとしてモデル化し、金属表面における腐食の成長過程を再現できることを示した [24]。その結果は一定の視覚的妥当性を達成していると考えられるが、2.2節で言及したように腐食の成長方向に関して強い制約を持っている。本節では、任意のジオメトリの表面にわたって成長する金属腐食の成長過程をシミュレートするシンプルな手法を導入する。本手法は拡張ランダムウォーク法を組み合わせた確率的セルオートマトンに基づいた手法である。このモデルではターゲットジオメトリの形状を考慮しており、シミュレーションを通して腐食や染みはジオメトリの表面に沿って伝播する。

### 4.2.1 確率的セルオートマトンモデル

本研究の目的は、任意の3Dモデルの金属表面に沿った腐食の成長プロセスを再現することである。本研究では金属腐食のメカニズムを確率的セルオートマトンとしてモデル化した。2.2節で言及したように、腐食現象の電気化学的なシミュレーションにおいてセルオートマトンモデルはしばしば用いられる。セルオートマトンモデルは、空間格子上に整列したセルに割り当てられた状態を、その状態と近傍の状態をもとに何らかの更新ルールにしたがって反復的に更新する技術である。確率的オートマトンは、その更新ルールに偶発性を導入したセルオートマトンモデルの一種であり、この種の現象のシミュレーションに適している。本手法は文献 [20][24] のように一つのセルがテクスチャ画像の画素に対応する2次元格子状で実行される。ただしテクスチャ空間におけるターゲットジオメトリの面(≒三角形)で覆われ



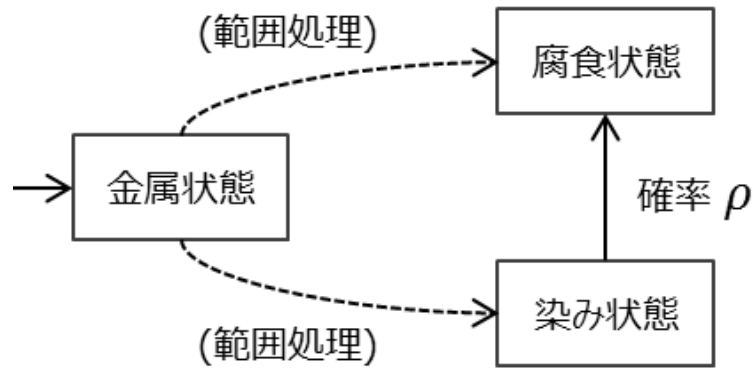


図 4.1: セルの状態遷移の概略

た一部の領域のみを使用する。次節以降では、本セルオートマトンモデルのセルが持つ状態と属性，更新ルールなどについて記述する。

#### 4.2.2 セルの状態と属性

実際の材料表面上の腐食した領域は微視的には大変複雑な構造を持ち，その詳細は表面の材質や防食処理，物理的損耗などに依存する。またその周辺の領域は腐食生成物の沈着や腐食の中間といった様々な状態をとりうる。それら全てを包括的にモデル化することは困難であるため，本手法ではセルの状態を三つの状態に単純化した。

本手法における一つのセルは，想定する材質表面の微小な2次元領域であり，つぎの三つの状態を取る。すなわち金属状態，腐食状態，染み状態である。各状態は，おのおの腐食していない材質素地のままの領域，腐食した領域，染みで汚れた領域を表すセルの状態である。腐食状態のセルは電気化学的に活性な領域であり，腐食生成物の供給源の役割を果たす。染み状態のセルは，腐食セルからの腐食生成物や剥離物によって汚れた領域であり，潜在的に腐食状態に変わりうる領域である。シミュレーションのあいだ，セルの状態は後述する一定の条件の下でそれらのうちの一つに変更される。図 4.1 はこれらの状態の間の遷移関係を示したものである。詳細については 4.2.5 項で述べる。

これらの状態はセルの属性に基づいて定義される。本手法のセルは，腐食レベル，

染みレベル, 成長方向, フェイス ID, 活性の5つの属性を持つ. これらの属性とその表記に用いる記号, 値域を表 4.1 に示す.

表 4.1: セルの属性

属性名	記号	値域
腐食レベル	$\chi$	$\chi \geq 0, \chi \in \mathbb{Z}$
染みレベル	$\psi$	$\psi \geq 0, \psi \in \mathbb{Z}$
成長方向	$\vec{\mathbf{d}}$	$ \vec{\mathbf{d}}  \leq 1, \vec{\mathbf{d}} \in \mathbb{R}^2$
フェイス ID	-	(本文参照)
活性	-	真理値

最初の二つの属性, 腐食レベル  $\chi$  及び染みレベル  $\psi$  はそのセルがどれだけ腐食あるいは染みによって浸食されているかを示すゼロ以上の整数値である. これらはシミュレーションの前に初期腐食としてのセルを除いてゼロに初期化され, 一定の条件下で増加する. 成長方向  $\vec{\mathbf{d}}$  は, そのセルから発生する腐食や染みの拡散方向を決定するノルムが1以内の2次元ベクトルである. これは具体的には, ターゲットジオメトリの表面における重力の分力を用いる. フェイス ID はそのセルが割り当てられているターゲットジオメトリの面 (= 三角形) を識別するための情報である. その用途は 4.2.5 項で説明する. セルの活性は, そのセルがシミュレーションのために利用されているかどうかを区別するために使用される真理値である. テクスチャ空間においてターゲットジオメトリの面に覆われていないセルは本手法では使用されず, 非アクティブ値をもつ. 表 4.2 にセルの腐食/染みレベルとその状態の関係についてまとめる.

表 4.2: 腐食/染みレベルと状態

$\psi \setminus \chi$	= 0	> 0
= 0	金属	腐食
> 0	染み	腐食

### 4.2.3 ターゲットジオメトリの要件

本手法では、ターゲットジオメトリ (3D モデル) は最も主要な入力である。シミュレーションに用いるターゲットジオメトリにはいくつかの制約がある。まずターゲットジオメトリはテクスチャ座標を持つ三角化されたメッシュである必要がある。その形状自体には特に制限はなく、本手法は凸面体でも凹面体でも扱うことができる。テクスチャ座標はいかなる方法で割り当ててもよい。また、テクスチャ空間上の面は複数の島に分かれていてもよい。

本手法のシミュレーションはテクスチャ空間において実行されるため、テクスチャ空間における空間密度はモデル空間のそれとできるだけ等しくなければならない。そのため、モデル空間とテクスチャ空間のマッピングは全単射かつ等尺であることが望ましい。そうではない場合、文献 [8] の方法などによってリメッシュすればよい。

### 4.2.4 セルの初期化

シミュレーションの前に、すべてのセルは適切に初期化される必要がある。

セルの腐食レベル  $\chi$ 、染みレベル  $\psi$  は、そのセルが初期腐食でない限りはゼロにセットされる。セルが初期腐食として選択された場合、腐食レベルは 1 に、染みレベルはゼロにセットされる。初期腐食を分布させる方法はいくつか考えられる。ターゲットジオメトリを曝露する環境が安定していれば、初期腐食を均一に分布させれば十分である。環境の変化に偏りがある場合 (例えば水滴が一定の角度からモデルの表面に落ちる傾向があるような場合)、より巧妙な方法が必要になる。そのようなケースでは、粒子ベースの手法 [9][10][14] が適している。4.3 節では、一定数の初期腐食を格子上の有効なセルにランダムに配置する単純な方法と、シーン中の点から全方向にランダムに初期腐食を散布する方法の両方の結果を例として示している。

腐食の成長方向はセルごとに個別に設定可能である。この成長方向は 4.2.2 項に示したように任意の方向を向いたノルムが 1 以内の 2 次元ベクトルである。それを決

定する適用可能な方法はいくつかありうる。ここではターゲットジオメトリの表面における重力の分力を成長方向としてしている。このためにはモデル空間における力の方向と大きさをテクスチャ空間にマッピングする必要がある。本手法では、このために重心座標を用いた。重心座標は三角形の頂点の位置関係を使って位置を記述するため、テクスチャ座標がどのような方法でマッピングされていたとしてもモデル空間における位置やベクトルをテクスチャ空間にマップすることができるという利点がある。その方法の詳細については4.5節に掲載する。

#### 4.2.5 更新ルール

全てのセルが初期化されたあと、それら状態と属性は本節で説明する更新ルールにしたがって反復的に更新される。リスト 1はこの更新ルールの概要を示している。

現実の金属素地の腐食過程では、それが暴露されている環境にも依存するが、まず傷や表面処理の劣化により金属素地が直接的に酸化するスポットが形成され、そのスポットの成長(拡大)と、スポットからの腐食生成物の拡散の両方の過程が並進する [25]。これを考慮して、本手法では各シミュレーションステップで腐食状態のセルの拡散と染み状態のセルの拡散の両方の処理を行う。具体的な更新ルールは以下である。

セルの状態が金属状態である場合、セルは基本的にその状態を維持する。金属状態のセルは自発的に他の状態になることはない。後述のように周辺のセルの影響によってほかの状態に遷移する。

腐食状態のセルは電気化学的に活性な領域を表しており、腐食を周囲のセルに伝播させる。このため、セルが腐食状態である場合、腐食状態のセルはその周囲のセルの腐食レベル  $\chi$  を1増加させる。周囲のセルの具体的な選択方法については4.2.5項で詳しく述べる。腐食状態はセルの状態遷移の終状態でありここから別の状態に遷移することはない。

セルが染み状態である場合、腐食確率  $\rho$  で腐食状態に遷移する。 $\rho$  は本手法のパラメータの一つであり、通常は低い確率にセットされる。4.3節で示す例では  $\rho = 0.0001$

---

**リスト 1** 更新ルールの概要

---

```
1: while  $N$  回 do
2:   for all セル do
3:     (以下, 着目しているセルを  $C$  と表記する).
4:     if  $C$  が金属状態である then
5:       なにもしない.
6:     else if  $C$  が腐食状態 ( $\chi > 0$ ) である then
7:        $C$  の近傍から起点セル  $C'$  を選択する.
8:        $C'$  の  $\chi$  を増加させる.
9:        $C'$  を起点として  $C$  の成長方向  $\vec{d}$  へ広がる領域のセルの
10:         $\chi$  を 1 増加させる.
11:     else if  $C$  が染み状態である then
12:       確率  $\rho$  で  $C$  の  $\psi$  を増加させる.
13:        $C$  の近傍から起点セル  $C''$  を選択する.
14:        $C''$  を起点として  $C$  の成長方向  $\vec{d}$  へ広がる領域のセルの
15:         $\psi$  を 1 増加させる.
16:     end if
17:   end for
18: end while
```

---

を用いている。これは  $\rho$  は新たな腐食スポットの形成のしやすさであり、主に最終的な外観の粗さに影響を与える。また染み状態セルはその成長方向に沿って更なる染みを生じる。具体的にはそのセルの周囲のセルの染みレベル  $\psi$  を 1 増加させる。染み状態は、その大きさを除いて腐食状態と同じ方法で伝播する。これらのセルの状態遷移を図 4.1 に示す。

シミュレーションは、事前定義した一定の回数  $N$  だけ更新ルールを適用することによって終了する。特別な収束条件などは設けない。4.3 節の例では  $N = 100$  を用いている。

### 空間的拡散処理

本手法では腐食や染みは文献 [20] のように 2 次元ランダムウォークを拡張した方法で伝播する。

この方法は 2 段階からなる。すなわち、拡散領域の起点の選択と領域内のセルの更新処理である。各シミュレーションステップにおいて、処理するセルが腐食状態や染み状態である場合、隣接するセルのうち一つを拡散領域の起点として選択する。それから選択した起点から広がる領域内のセルの状態を一斉に更新する。図 4.2 は処理中のセルと拡散領域とその起点の位置関係の一例である。

Tanabe らの手法では、拡散領域の起点は処理するセルを中心とした半径 2 の円近傍から一様な確率で選択し、そこから 2 次元格子の下方方向を向いた細長い領域内のセルの腐食/染みレベルを増加させている。これを任意方向の成長に対応させるため、以下のように変更する。

本手法ではセルの成長方向ベクトルに依存して変化する空間的確率密度関数 (SPDF: Spatial Probability Density Functions) をもつ確率変数を用いて、拡散領域の起点を選択する。これは、固定的な形状の領域、たとえばノイマン近傍、ムーア近傍、円近傍など典型的な形状の近傍から起点を選択すると、腐食や染みを特定の方向に成長させるのが困難であるためである。これらの形状の近傍におけるセルの選択確率に偏りを持たせる方法も考えられるが、選択されうる範囲を限定せずに確率密度関

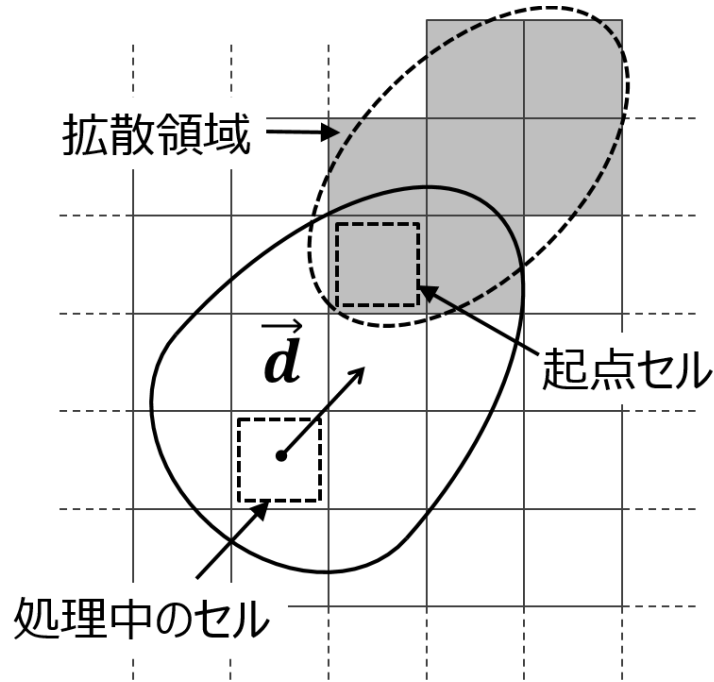


図 4.2: 空間的拡散処理

数を用いた方が制御が容易である。また固定的な形状の近傍を用いた場合、最終的な画像に不自然なパターンが生じることもある。そのため、本手法では処理中のセルの位置を中心として成長方向ベクトルに沿ってある程度の空間的な広がりを持つ SPDF を用いる。これは成長方向とそれに直交する方向とで異なる確率密度関数を組み合わせることで実現される。起点となるセルは式 (4.1), 4.2 に基づいて選択される。

$$\vec{p}' = \vec{p} + \frac{1}{|\vec{d}|}(\xi\vec{d} + \mu\vec{d}_\perp) \quad (4.1)$$

$$\xi = (1 - |\vec{d}|)\mu + |\vec{d}|\nu \quad (4.2)$$

ここで  $\vec{p}$  と  $\vec{p}'$  はそれぞれ処理中のセルと起点となるセルのテクスチャ空間における位置ベクトルである。  $\vec{d}$  はセルの成長方向ベクトルであり、  $\vec{d}_\perp$  はその直交ベクトルである。  $\nu$  と  $\mu$  は成長方向とその直交方向のための確率変数である。 鏝の成長・拡散の様相はこれらの変数の確率分布に強く影響をうける。 各変数のための妥当な確率分布は複数あり得る。 これらの変数の分布についての要件は、  $\mu$  がゼロを

中心とする対称分布をとり， $\nu$ が右に（正方向に）歪んだ非対称分布をもつことである．このような分布の例を図4.3に示す．これは4.3節の例で用いた分布である．

起点を選択したあと，その起点から広がる一定範囲のセルの状態を一斉に更新する．本手法ではこの範囲の形状として楕円を用いた．この楕円はセルの成長方向に基づいてその長径・短径・中心点を変化させる．大きな成長方向ベクトルをもつ腐食/染みセルほど，細長い楕円となり遠くまで腐食の影響が伝播する．このように変形する楕円の短径，長径，中心位置は式(4.3),4.4,4.5で求められる．

$$s = r_1 \tag{4.3}$$

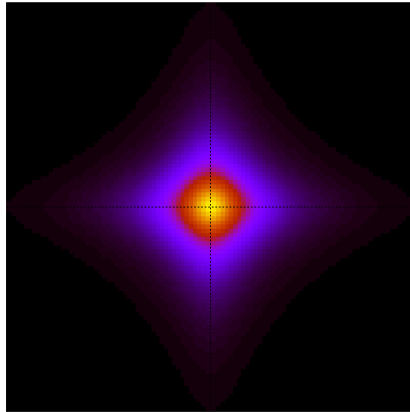
$$r = (1 - |\vec{d}|)r_1 + |\vec{d}|r_2 \tag{4.4}$$

$$\vec{c} = \vec{p} + r\vec{d} \tag{4.5}$$

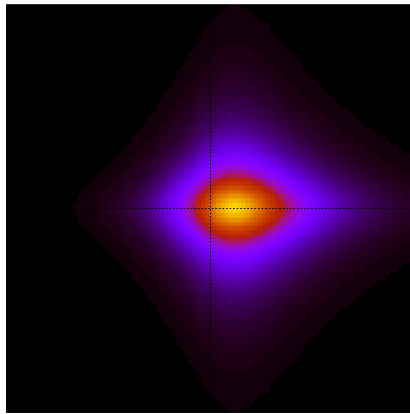
$r_1$ と $r_2$ は事前定義された最小/最大の半径， $s$ ， $r$ ， $\vec{c}$ は楕円の実際の短径と長径，中心位置である．この楕円は成長方向に向かって傾いており，その傾斜角は成長方向から計算される．図4.4はこのモーフィングの過程を示している．

上記の更新ルールは，着目しているセルの次の状態をそのセルの現在の状態とその近傍を使って決定する通常のセルオートマトンモデルの更新処理とは異なり，着目しているセルの状態が近傍のセルの状態を決めるという逆の手順をとっていることには注意が必要である．このため，セルを更新する順序に注意する必要がある．リニアスキャンのような特定の順序での更新は偏った結果を引き起こしうるため，今回の実装では更新のたびに異なるランダムな順序でセルを更新している．また，1度のシミュレーションステップにおいて一つのセルに対して複数回の更新処理を許すか否かにも注意する必要がある．たいていの場合，あるセルとその近傍のセルは同様の成長方向を持つ．それらは拡散処理においても同様の領域へ影響を拡散するため，それらの影響が重畳することによって腐食/染みレベルの増加が急峻なものとなる．

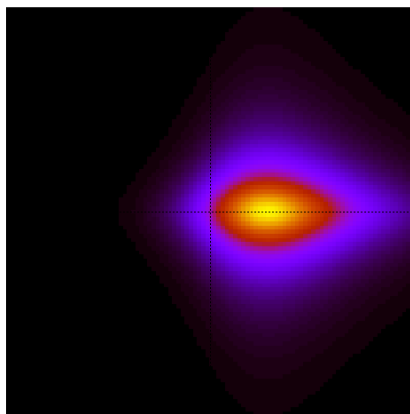




(a)  $|\vec{d}| = 0.0$

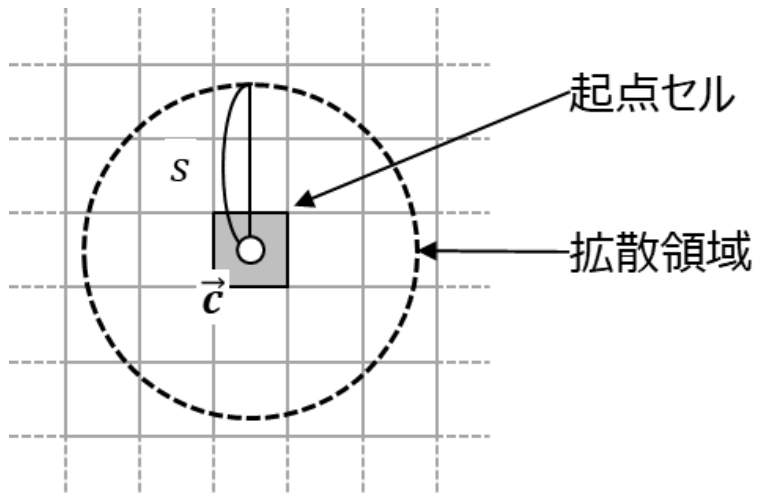


(b)  $|\vec{d}| = 0.5$

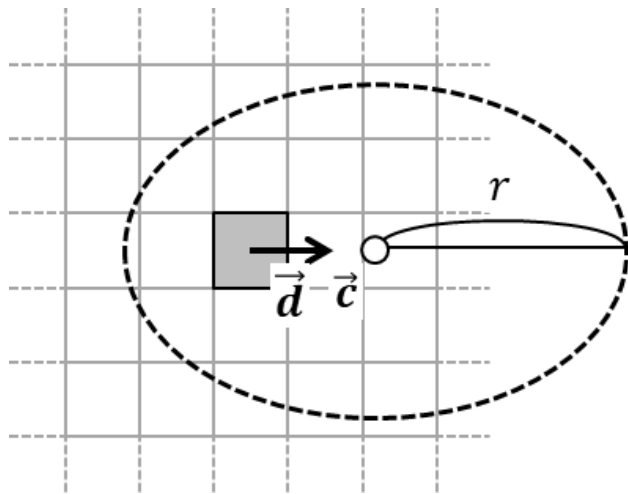


(c)  $|\vec{d}| = 1.0$

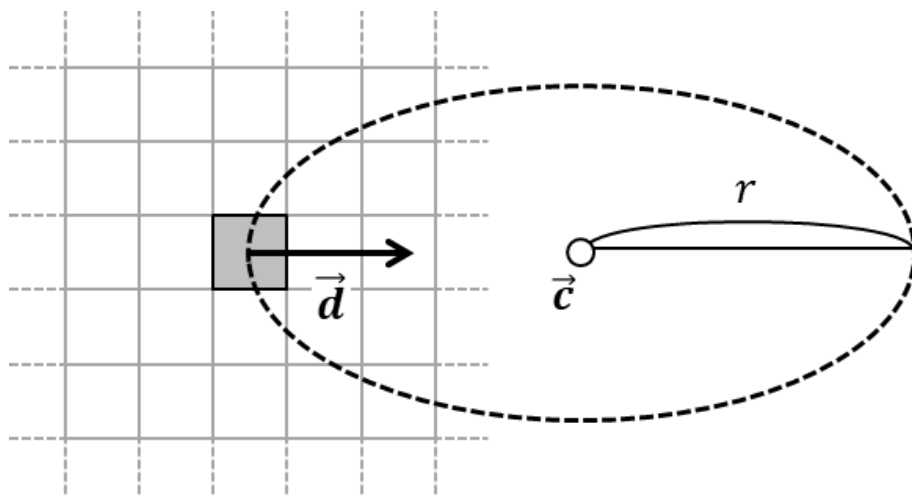
図 4.3: 空間的確率密度関数の例



(a)  $|\vec{d}| = 0.0$



(b)  $|\vec{d}| = 0.5$



(c)  $|\vec{d}| = 1.0$

図 4.4: 拡散領域の変形

なる。これを避けるため、今回の実装では一つのセルに対する更新は1度のステップにおいて1回までに制限している。

## 面の接続性の考慮

前節で説明した空間的拡散処理において、ターゲットジオメトリの面の間接続性は注意深く処理する必要がある。モデル/テクスチャ空間における面の接続性、およびセルオートマトンの格子上の隣接性は、互いに無関係である。なぜなら、テクスチャ空間における面は複数の島に分かれうるため、モデル空間において隣接している面(つまり辺を共有する面)同士であっても、テクスチャ空間では互いに隣接していない可能性があるためである。また2次元格子上隣接しているセル同士でも、テクスチャ空間におけるテクスチャ面の島の境界を越えて位置している可能性もある。これは4.2.5項で述べられている空間的拡散処理で、モデル空間における面の接続性を考慮することが必要であることを意味する。

この問題に対処するため、本手法ではターゲットジオメトリの面のあいだの隣接性を解析し、その情報をシミュレーションに利用する。シミュレーションのあいだ、拡散領域の起点を選択する際や領域内のセルを処理する際に、4.2.2項で説明したフェイスID及び活性を用いて、モデル空間において分離セルがその原初セルと同じ面に属しているかどうかをチェックする。ここで「原初セル」「分離セル」とは、処理中のセルとその近傍から選択された起点を、または起点となるセルと拡散領域内の各セルを意味する。分離セルがその原初セルとは異なるフェイスIDを持っている場合あるいは分離セルが無効な(不活性の)セルである場合、それはそのセルがテクスチャ空間におけるテクスチャ面の境界を越えて選択されていることを意味する。その場合、隣接情報に基づいて分離セルの位置を『転送』することで分離セルを選び直す。4.2.3項で議論したように、ターゲットジオメトリに含まれる三角形はおおよそ等尺であると仮定したため、この転送処理は非常にシンプルにすることができる。その方法は以下である。

分離セルがその原初セルが属している面  $f_1$  の外側で選択され、その面はテクス

チャ空間において離れた島に位置する他の面  $f_2$  と、モデル空間上で共通の辺を共有すると仮定する。また、それらの共通辺は、それぞれ  $f_1$  の  $f_2$  の一部であるエッジ  $e_1$ ,  $e_2$  である。転送後の点は、その点と  $e_2$  の二つの端点を作る三角形が、分離セルの中心点と  $e_1$  の二つの端点を作る三角形と相似になるように選択される。転送後の点の最近傍のセルを新しい分離セルとみなす。図 4.5 はこの関係を示している。

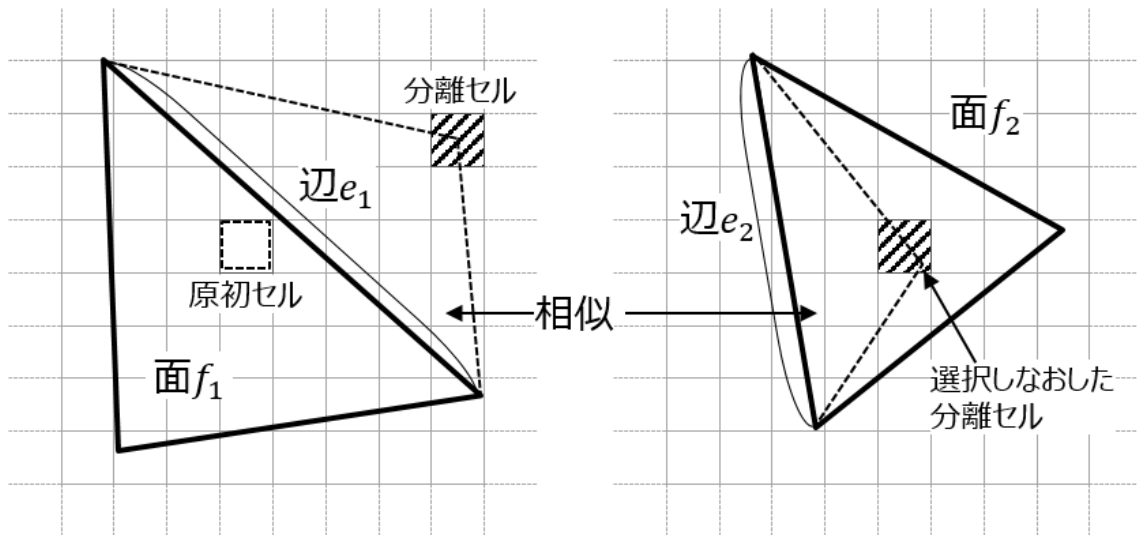
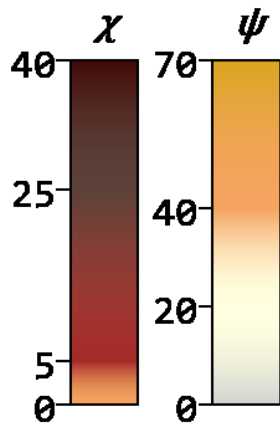


図 4.5: 分離セルの再選択

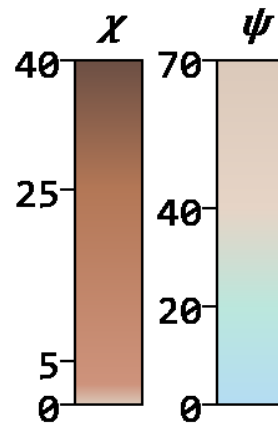
#### 4.2.6 可視化

シミュレーションを通じて、2次元格子上のセルの腐食レベル  $\chi$ 、染みレベル  $\psi$  の濃淡に自然なパターンが形成される。各シミュレーションステップにおいてこれら腐食/染みレベルの濃淡をテクスチャ画像として取り出すことで、経時的な腐食過程を再現した一連のテクスチャ画像のセットを得ることができる。このためには、腐食/染みレベルに対してある種の可視化処理を実行する必要がある。このための直接的な方法は腐食/染みレベルを適当なカラースケールを使って色に変換することである。図 4.6 は 4.3 節で説明する例で使用したカラースケールである。

腐食/染みレベルの値の大きさは概ね更新ルールの適用回数  $N$  に比例するが実質的には予測不可能なため、このようなカラースケールを準備するにはユーザーの介



(a) 図 8,9,10 で用いたカラー  
スケール



(b) 図 11 で用いたカラー  
スケール

図 4.6: カラースケールの一例

入が必要である。本手法の実験的な実装ではセルの属性を 32 ビットカラーイメージに直接エンコード・格納し、専用の対話的ツールを使って適切なカラースケールを作成し可視化に用いている。

テクスチャ空間上の島の境界付近にあるセルを可視化するには注意が必要である。このような境界付近の色はターゲットジオメトリにマッピングした際に、いわゆるシーム (縫い目) として現れる場合があるためである。これを避けるため本手法では無効なセルを可視化するのに、本手法では活性化近傍セルの平均色を用いている。

## 4.3 結果

本節では、本手法を用いて生成したいくつかの作例を示す。

### 4.3.1 実験環境及びパラメータ

以下に本節における実験環境を示す。本手法の実装には C++ を用いた。表 4.3 は本節で提示する作例の生成に用いた計算機の仕様である。また、本手法にはいくつかのパラメータがある。表 4.4 は本節の作例で用いたパラメータである。これらの

表 4.3: 実験環境

CPU	Intel Core i7-7700HQ
メモリ	16GB(DDR4-2400)
利用可能なスレッド数	8
ストレージ	512GB SSD

パラメータは実験的に定めた。

補足として、4.2.5 項で説明した確率変数  $\mu$ ,  $\nu$  の確率密度関数として、本節の作例ではジョンソン  $S_U$  分布を用いている。ジョンソン  $S_U$  分布は歪度と尖度を容易に制御できる正規分布のバリエーションの一つである [26]。この確率密度関数は四つのパラメータ  $\gamma, \delta, \lambda, \xi$  をもつ (これらのパラメータは歪度や尖度そのものではない)。4.2.5 項で述べた SPDF の枠組みでこの分布を用いたときの確率密度の分布の例を図 4.3 に示す。

また、おのこの作例を生成するのに要した時間を表 4.5 にまとめる。これらの生成時間は、各々の作例のパラメータで腐食過程のシミュレーション処理と可視化処理 (テクスチャ化) を 10 回実行した際の平均時間である。この生成時間にはレンダリング時間は含まれていないことに注意せよ。レンダリングそのものにかかる時間は、レンダリングに用いるソフトウェア (後述) に大きく依存し本手法の時間的効率性とは独立であると考えられるため、表 4.5 の生成時間にはレンダリング時間を含めていない。

### 4.3.2 レンダリング

本節の作例はすべて本手法で生成した腐食/染みテクスチャを、シミュレーション時に用いた 3D モデルにテクスチャマッピングしてレンダリングしている。レンダリングには Blender 2.78b を用いた。

孔食の視覚的外観を疑似的に再現するため、本節の作例にはすべてバンプマッピングを適用している。孔食とは、金属材質の表面に腐食反応などによって運び去ら

表 4.4: 使用したパラメータ

パラメータ\作例	図 4.8	図 4.9	図 4.10	図 4.11
3D モデルの面数	2	32	69451	3192
更新回数 $N$	100			
セル数 (行 x 列)	512 × 512	2048 × 2048	4096 × 4096	
初期腐食の分布	ランダム		点から散布	
成長方向	重力の分力			
腐食確率 $\rho$	0.0001			
SPDF	ジヨンソン $S_U$ 分布			
腐食 $\mu$	$\gamma = 0.0, \delta = 0.0, \lambda = 2.0, \xi = 1.0$			
$\nu$	$\gamma = -2.0, \delta = 0.0, \lambda = 3.0, \xi = 1.0$			
染み $\mu$	$\gamma = 0.0, \delta = 0.0, \lambda = 1.0, \xi = 0.8$			
$\nu$	$\gamma = -1, \delta = 0.5, \lambda = 1.8, \xi = 2.0$			
拡散領域の形状	楕円			
腐食	$(r_1 = 1.5, r_2 = 2.0)$			
染み	$(r_1 = 2.0, r_2 = 4.0)$			
カラースケール	図 4.6(a)		図 4.6(b)	

れる質量分の局所的な窪み (孔) ができる現象である。

バンプマッピングを行うためには高低差を表す情報、いわゆるハイトフィールド (ハイトマップ) が必要である。このハイトフィールドとして使用する濃淡画像は、高い腐食レベルを持つセルほど深い孔食となるという仮定のもと、各セルの腐食レベルを式 (4.6) に示す方法で変換することで生成した。

$$h_{ij} = 1 - \frac{\min(\chi_{ij}, C_\chi)}{C_\chi} \quad (4.6)$$

$\chi_{ij}$ ,  $h_{ij}$  はそれぞれ2次元格子上的位置  $(i, j)$  のセルの腐食レベルとそのセルにおけるハイトフィールドの高さ ( $h_{ij} \in [0.0, 1.0]$ ) である。この変換は出力値が1チャンネルの値でありグラデーションの始点と終点の色のみをもつ、4.2.6 項に説明したカラースケールを用いた変換の特別な (あるいは単純な) 場合である。 $C_\chi$  は腐食レベルの上限である。ここでは  $C_\chi = 50$  を用いている。腐食レベルに上限を用いて変換を行っているのは以下の理由による。この変換は腐食レベルの値を高さの値域、つまり閉区間  $[0.0, 1.0]$  の値に変換する処理である。腐食レベルを単純にこの値域に押し込むならば上限値  $C_\chi$  を用いずとも、シミュレーション上の空間的・時間的に最も大きな腐食レベルを調べてその値を用いて正規化することでも実現可能である。しかし、本手法では腐食レベルは局所的に極めて大きな値を取る傾向があるためそのような最大値を用いた正規化を行うと、高低差の特徴が潰れてしまう。そのため腐食レベルに決め打ちの上限を設けている。図 4.7 はこの方法で生成したハイトフィールドの例である。これはシミュレーションステップ 60 において平面をレンダリング

表 4.5: 生成時間 (レンダリング時間を除く)

作例	生成時間
図 4.8	49.47 秒
図 4.9	54.28 秒
図 4.10	785.43 秒
図 4.11	2541.07 秒



するのに使用したものである。

### 4.3.3 さまざまなジオメトリ表面での錆の成長過程

図 4.8, 4.9, 4.10 はそれぞれ本手法を使って生成した平面, 半円柱, バニ어의腐食過程である。これらの画像は左からシミュレーションステップ 0,20,40,60,80 の様子である。上段はこれらのシミュレーションステップにおける 2次元格子を可視化した画像であり, 下段はレンダリング結果である。なお図 4.8, 4.9, 4.10 の拡大画像を付録 B として添付する。

図 4.8 では, 平面が鉛直方向を向いているため腐食は均一に広がっている。図 4.9 では, 半円柱の上部から側面にかけてその形状に起因して腐食具合が変化している。上部の腐食は平面の場合の状態と同様になっているが, 側部では末広がり形状をした腐食スポットが多数形成されている。これは錆の成長方向に関する考慮がうまく機能していることを示している。図 4.10 は本手法が複雑なバニ어의ような複雑な形状でもうまく動作することを示している。くわえて, このモデルのテクスチャ空間上の面は歪みを避けるために複数の島に分割されているが, モデルの表面には一貫性のないパターンは現れていない。このことは 4.2.5 項で議論した面の接続性についての処理, また 4.2.6 項で説明した境界処理がうまく動作することも示している。

### 4.3.4 実践的な作例

図 4.11 はより実践的な作例である。図 4.11 の (a) の画像は実際の写真, (b) の画像はそれを模した生成結果である。金属腐食のシミュレーションはフランジ付きパイプに対して行っている。このパイプはその形状に起因して不均一な腐食の様相を呈している。フランジ(接合部)より奥は激しく腐食しているが, 手前のフランジの影となる部分ではあまり腐食が進んでいない。これは雨滴などがフランジに遮られているためと考えられる。この状況を再現するため, この例では初期腐食はシーン

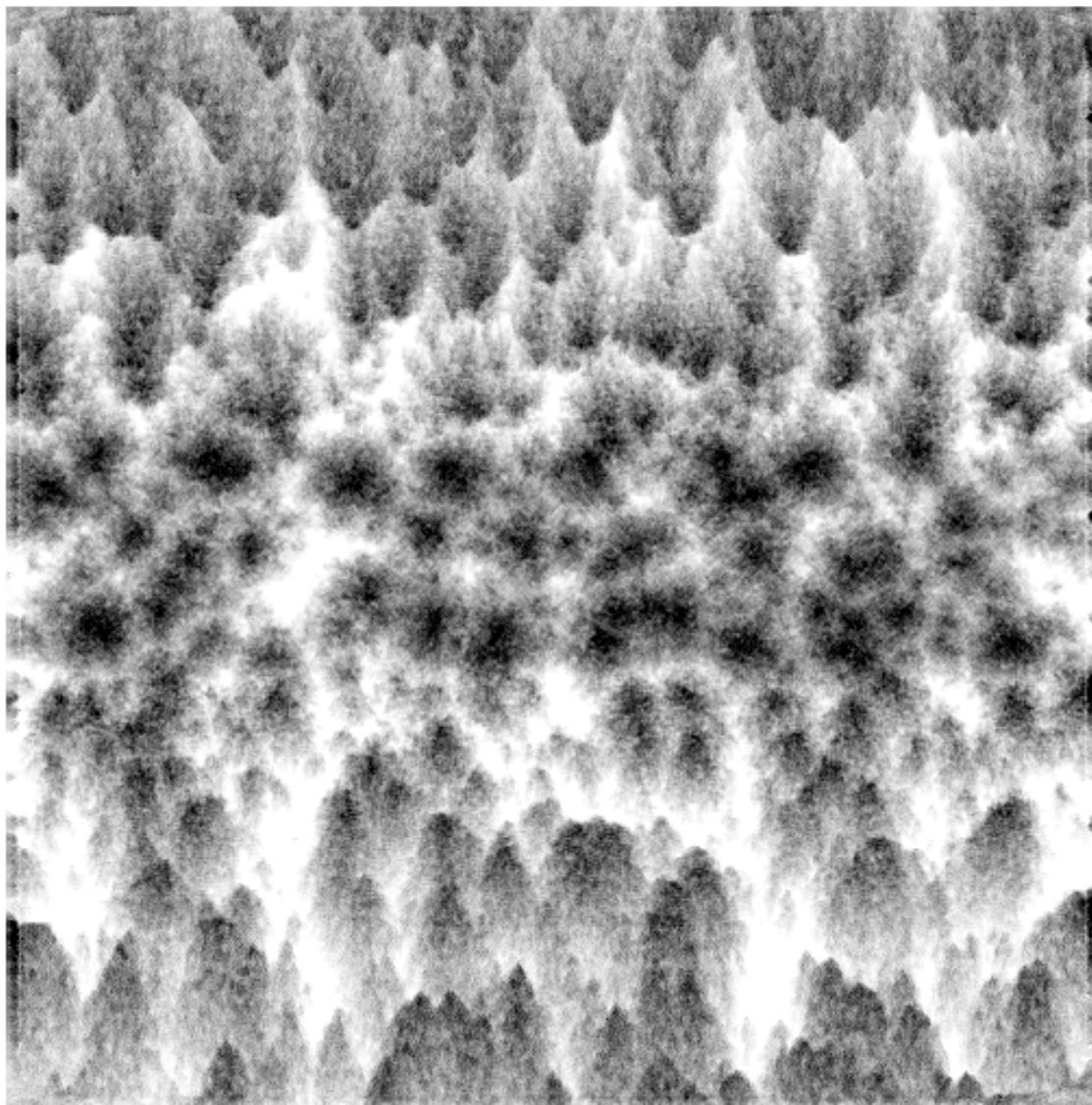


図 4.7: 生成したハイトフィールドの例

中の点からランダムに散布している。この初期腐食の発生源は奥側のパイプの上側に配置されている。このため初期腐食はフランジで遮られた手前側のパイプよりも奥側のパイプに降着しやすくなり、奥側のパイプの表面は手前側に比べて激しく腐食する結果となっている。

## 4.4 むすび

本章では金属腐食の視覚的外観を再現する手続き的テクスチャ生成手法を提案した。本手法は、任意のジオメトリ表面での経時的な腐食過程をシミュレートすることによって、一連のテクスチャ画像のセットを生成することが可能である。この手法には初期腐食の分布方法、腐食/染みの拡散範囲、可視化に用いるカラースケールといったカスタマイズ可能な部分があり、これらを調整することで様々なタイプの金属の腐食現象を再現することができる。

多くの既存手法と異なり、本手法では腐食の初期配置と伝播の双方にターゲットジオメトリの形状を考慮しており、また実際の腐食現象のように腐食スポットが周辺に新たな腐食を発生させるような拡散過程を考慮している。さらにこの手法のシミュレーションは2次元のセルオートマトンベースの手法であり、シミュレーションは基本的にテクスチャ空間で行われるため比較的少ない計算量と記憶容量で実行可能である。

最後に、本手法の問題点と今後の課題について述べる。現状では本手法には、シミュレーションに関する制約と、孔食の再現に関する問題がある。本手法のシミュレーションに関する制約とは、物理的正確性、錆の成長方向の柔軟性、そして複数のオブジェクトに対する協調的なシミュレーションの可否の3点である。一つ目はセルオートマトンベースのアプローチには共通の問題ではあるが、本手法におけるタイムステップは物理的な単位時間に対応していないことである。本手法はあくまでも現象論的モデルに基づいた手法であり物理的に正確なモデルに基づいているわけではない。そのため、物理的な正確性を要求される分野、たとえば材質が将来どのように風化するかを予測するというような目的には適していない。二つ目は本

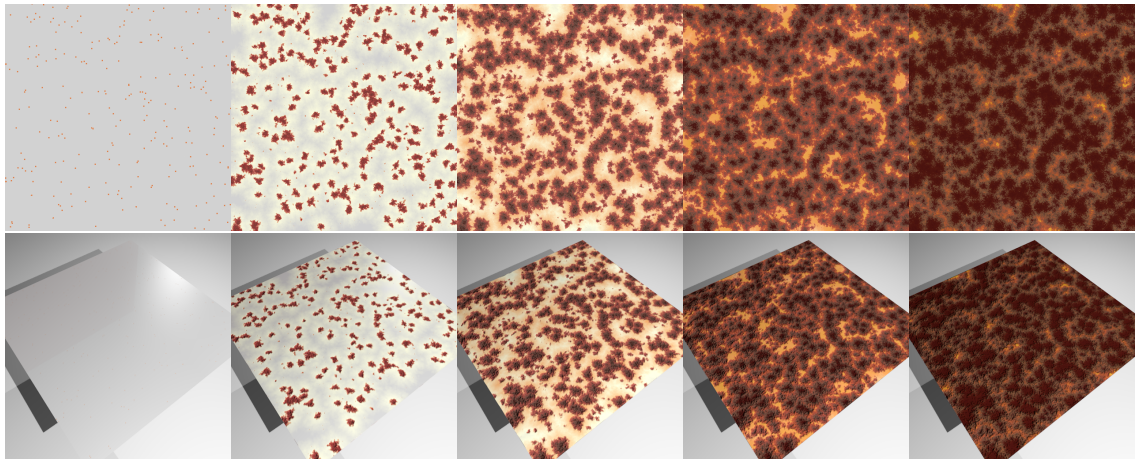


図 4.8: 生成された腐食過程 (形状: 平面)

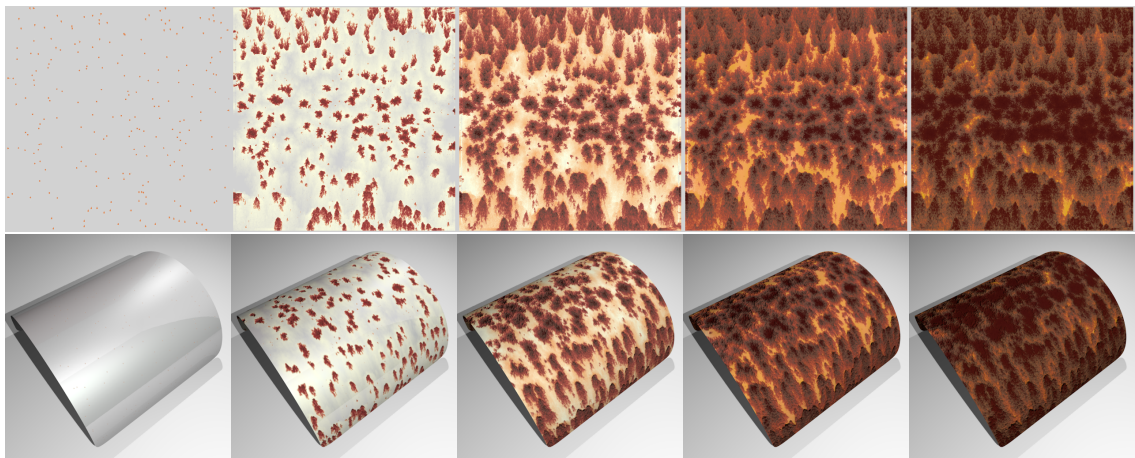


図 4.9: 生成された腐食過程 (形状: 半円柱)

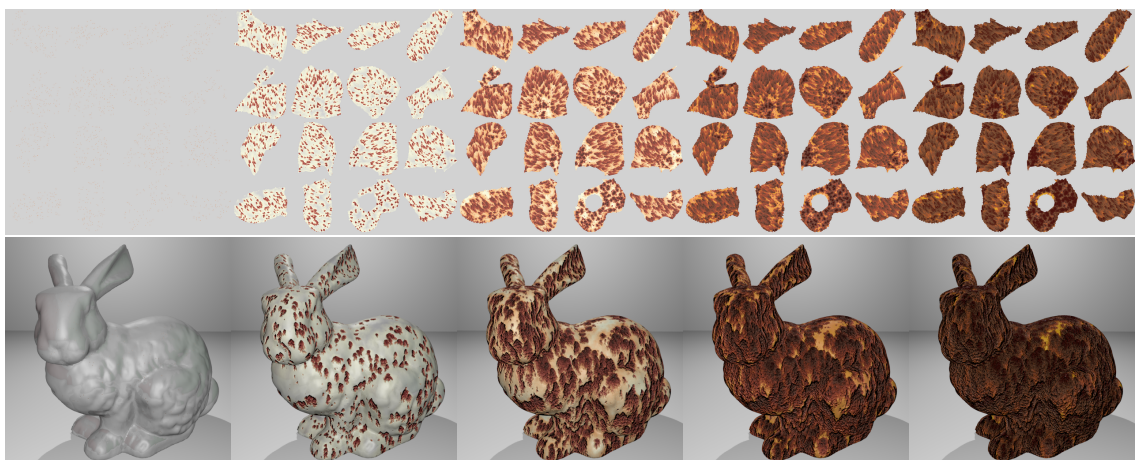
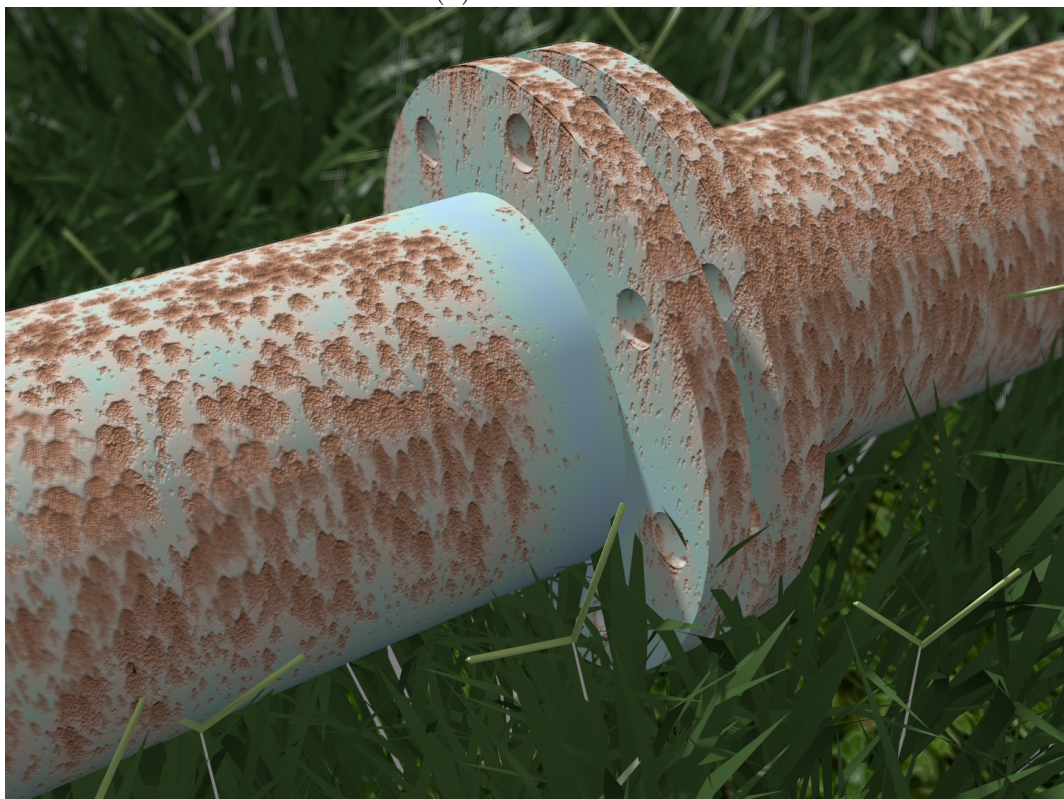


図 4.10: 生成された腐食過程 (形状: バニー)





(a) 実際の写真



(b) 本手法を用いた再現結果

図 4.11: フランジ付きパイプの例

手法ではシミュレーションの間、対象のモデルがその姿勢を維持することを前提としているため、シーン中を動きうるオブジェクトの腐食過程をシミュレートするのに適していないことである。腐食の成長方向は主に各セルの成長方向ベクトルに支配されるため、シミュレーションステップごとにそれらを更新すればそのようなシミュレーションは可能ではある。ただし、そのためにはシミュレーションにおけるタイムステップを何らかの方法でモデルが運動する空間のタイムステップに対応づける必要がある。三つ目は、本手法では面で接触する複数の閉じたオブジェクト同士で、相互作用しながら進展する腐食過程をシミュレーションするのが困難なことである。これは本手法が、腐食がターゲットジオメトリの連続な表面上を伝播することを前提としており、トポロジ的に不連続ではあるが接触し合う面での腐食の伝播を考慮していないためである。これは、自己接触する部分を有する単一のジオメトリも同様である。図4.11の例において実際の写真にある接合部のボルトを扱っていないのはこのためである。実際の腐食現象においては、このような面同士が接触する箇所ではすきま腐食とよばれる激しい損傷が発生するため、生成結果をより写実的にするにはこのような面同士の接触を考慮する必要がある。これを解決するためにはシーン内のオブジェクトの位置関係から面同士の近接の度合いを調べ、4.2.5項で言及した腐食確率 $\rho$ にマッピングするなどの処理が必要となると考えられる。

孔食の再現に関する問題とは、一定以上大きな腐食レベルをもつ領域がレンダリングの上では平坦になってしまう問題である。これはバンプマッピングに用いるハイトフィールドの生成において、式(4.6)のような決め打ちの上限値を用いた変換を用いているためである。図4.12は、図4.10のバニーの腐食過程のシミュレーションをさらに進めて、レンダリング結果の一部を拡大したものである。最大値 $C_x$ を超える腐食レベルを持つ領域では、図4.12に示すように平坦な領域として描画されてしまう。これを解決するためには式(4.6)のような単純な線形変換ではなく、広いレンジを持つ腐食レベルを特徴量を残しながら高さの値域に押し込む、より巧妙な変換が必要となると考えられる。

今後の課題としては、金属腐食以外のウェザリング現象の考慮が挙げられる。本



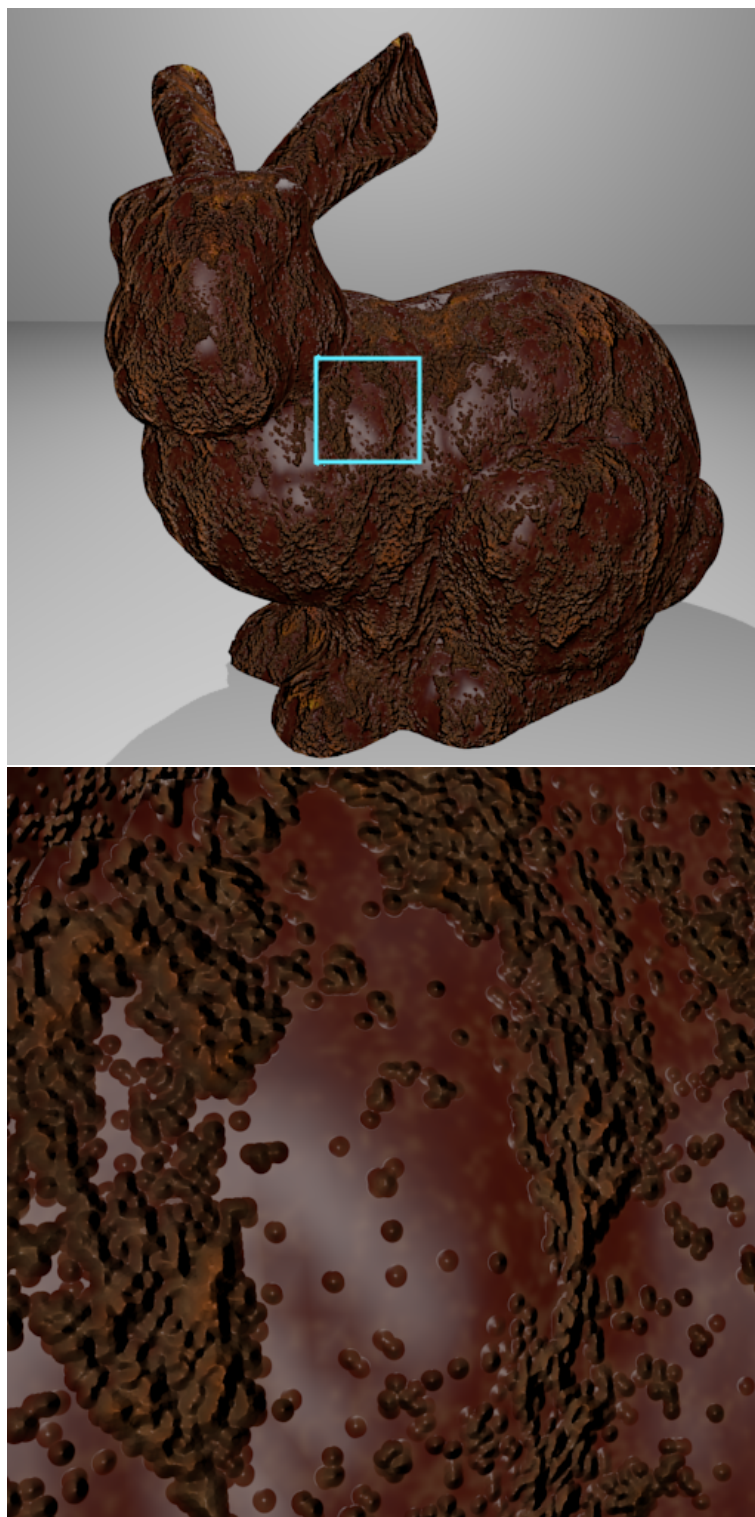


図 4.12: 孔食が平坦となる例

手法はウェザリング現象として金属腐食のみを指向した手法であり、いまのところ表面塗装のひびや剥離といった金属腐食としばしば併発する現象を同じ枠組みで再現するのは困難である。ひびや剥離に関しては先行研究があるため、たとえばテクスチャ空間の領域ごとに異なるシミュレーション手法を用いるといった協調的な方法で、より複雑で写実的な腐食の様相を再現することができると考えられる。このような統合的な手法の開発が今後の課題である。

## 4.5 章末付録：重心座標を用いたベクトルのマッピング

1. 重力ベクトルをターゲットジオメトリの表面上に投影し、面の接空間をつかってその2次元ベクトル表現  $\vec{G}_p$  を得る。

$$\vec{G}_p = \begin{pmatrix} \vec{G} \cdot \vec{t} \\ \vec{G} \cdot \vec{b} \end{pmatrix}$$

ここで  $\vec{t}$  と  $\vec{b}$  はそれぞれ面の接ベクトル、従法線ベクトルである。

2.  $\vec{G}_p$  を面を構成する三角形の頂点によって構成される重心座標系で表現する。重心座標系が表現できるのは位置のみであることに注意が必要である。このため、実際には三角形の重心  $\vec{m}_1$  から  $\vec{G}_p$  だけ離れた位置を変換する。  $\lambda$  は以下を満たす行ベクトルである。

$$\vec{G}_p + \vec{m}_1 = \lambda \cdot \begin{pmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{v}_3 \end{pmatrix}$$

ここで  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$  はステップ1と同じ方法で変換した三角形の頂点位置の2次元ベクトル表現である。

3.  $\lambda$  をテクスチャ空間上の面の三角形で構成される重心座標と解釈することで、



2次元ベクトル  $\vec{G}_t$  を得る.

$$\vec{G}_t = \lambda \cdot \begin{pmatrix} \vec{t}_1 \\ \vec{t}_2 \\ \vec{t}_3 \end{pmatrix} - \vec{m}_2$$

ここで  $\vec{t}_1, \vec{t}_2, \vec{t}_3$  はテクスチャ空間上の三角形の頂点位置,  $\vec{m}_2$  はその重心である.

## 第5章 結論

### 5.1 本研究のまとめ

本研究では、微視的作用が巨視的構造をつくる自然現象を3DCGとして再現するための実装アプローチを検討した。その一環として蜃気楼と金属腐食を3DCG上で再現する手法を提案した。

蜃気楼の再現手法ではペンシルトレーシング法を拡張して、レイに大気の変動による光線の位置的・方向的ノイズを与えるシステム行列を導入した。また、蜃気楼ボックスの手法を応用した大気の変動の再現することにより大気の変動を伴う蜃気楼現象を再現できることを示した。

金属腐食の再現手法では、2次元セルオートマトンをベースとして3Dオブジェクトの形状を考慮した腐食の伝播・拡散過程をモデル化した。腐食レベルと染みレベルという互いに作用し合う属性を導入しシミュレーションの各ステップにおいて、これらを可視化することで経時的な金属腐食の成長過程を模した経時的なテクスチャセットを生成できることを示した。

これらの手法はそれぞれペンシルトレーシング法の応用と、2次元セルオートマトンによるシミュレーションと全く異なるアプローチとなったが、蜃気楼や金属腐食を再現したこれらの手法の骨子はほかの類似した現象への応用が可能であると考えられる。蜃気楼の再現手法は、変動を伴う他の現象への応用が見込まれる。たとえば、真水に砂糖水や食塩水を混合したときに見られるゆらぎ—シュリーレン現象の再現に応用することが可能であろう。金属腐食の再現手法は、現象の伝播・拡散を伴う他のウェザリング現象—苔や黴の繁茂や、液体の浸食による染みといった現象の再現への応用が見込まれる。

## 5.2 今後の展開

3章, 4章の各章の章末で触れたように, どちらの手法ともいくつかの制約と問題を持っている. 本章はそれらについて簡潔に触れ, またそれぞれの手法の今後の展開について述べてむすびとする.

### 5.2.1 大気光学現象の再現手法

蜃気楼の再現手法には, いまのところ画像の正確性に関する制約と, 出力画像に不連続なパターンを生じる問題がある.

前者は潜在的にペンシルトレーシング法から継承した問題で, 近軸レイのパスを軸レイのパスを使って近似しているため, 本来ならば近軸レイが交差する物体でも, ドメインサイズによっては交差がとれなくなってしまうことがあるものである. このため, 視角上ドメインサイズよりも小さなオブジェクトがシーンに含まれていると, オブジェクトの位置や姿勢によってはそれらのオブジェクトが描画から完全に失われてしまう. これはオリジナルのペンシルトレーシングにはない摂動という乱数性を持った挙動を導入したため, 解決のためには摂動オブジェクトによって生じる誤差を推定し, ドメインを動的に分割する何らかの手法が必要である.

後者もまた摂動という振る舞いによって生じる問題で, 隣接するドメイン間で摂動の影響の大きさに一貫性がないため, ドメインの境界において不連続なパターンが発生するものである. この問題の解決のためには, 近軸レイのパスを近似する際に隣接するドメイン間で摂動の影響を適切に補間する方法が必要となる.

今後の展開として, 摂動ベクトル場を乱数によって生成するのではなく, 何らかの実データに基づいて生成する手法を検討している. 陽炎などの現象を実際に観測してその「ゆらぎ」を生成結果に適用することでより写実的な表現が可能になると考えられる.

## 5.2.2 ウェザリング現象の再現手法

金属腐食の再現手法には、シミュレーションに関する制約と孔食の再現に関する問題がある。

前者に類する問題は何点かあるが、その中でももっとも根本的で深刻なのは複数の3Dモデルが近接あるいは接触しているようなシーンにおいて、3Dモデル間での金属腐食の伝播を再現することができない問題である。これは、本手法のシミュレーションはあくまでもテクスチャ空間上において行われるため、それを共有しない3Dモデル同士では面同士が接触しているとしても、その影響を伝達することができないためである。この問題の解決のためには、接触を持つ3Dモデル同士でシミュレーションのみテクスチャ空間を共有するような変更を加えるといった方法が考えられるが、3Dモデルの面の接続性はともかく面の接触は現段階では考慮していないためそれを適切に処理する方法が必要となる。

後者の問題は、本手法のシミュレーションによる腐食レベルや染みレベルの濃淡が条件によっては局所的に非常に極端な値をとることに起因する。そのような分布を持つ値を、正規化したりあるいは値に上限を設けてしまうと、シミュレーションによって得られた腐食レベルや染みレベルの濃淡の特徴が失われてしまう。これを解決するためには、腐食レベルや染みレベルの可視化(画像化)の方法を工夫することであるといど解決が可能であると考えられる。

今後の展開として金属の表面塗装物の考慮を検討している。表面塗装物のひびや剥離はいくつかの先行研究があるためこれらを協調的にもちいた手法を用いれば、より写実的に金属腐食を再現することが可能になると考えられる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心にご指導を頂きました東京電機大学 工学部 情報通信工学科 長谷川 誠 教授，東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科 齊藤 剛 教授，鉄谷 信二 教授，高橋 時市郎 教授に深く感謝致します。

日頃からご支援賜る アストロデザイン株式会社 様，ドワンゴCG リサーチ 様に感謝いたします。

また，本研究に対して数多くのご助言を頂きました，ビジュアルコンピューティング研究室の皆様，中でも東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科 森谷 友昭 助教，同研究室の出身で現在の同僚である東京医療保健大学 医療保健学部 医療情報学科 杉田 純一 助教 に深く感謝いたします。

研究活動に際してご理解とご支援を頂いた東京医療保健大学 医療保健学部 医療情報学科 石原 照夫 教授，津村 宏 教授ならびに医療情報学科の先生方に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] M. Berger, T. Trout, and N. Levit. Ray tracing mirages. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 10(3):36–41, May 1990.
- [2] F.K. Musgrave and M. Berger. A note on ray tracing mirages (comments and author’s reply). *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 10(6):10–12, November 1990.
- [3] Eduard Gröller. Nonlinear ray tracing: Visualizing strange worlds. *The Visual Computer*, 11:263–274, 1995.
- [4] Jos Stam, Eric Languenou, and Projet Syntim. Ray tracing in non-constant media. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 225–234, 1996.
- [5] F.J. Seron, D. Gutierrez, G. Gutierrez, and E. Cerezo. Visualizing sunsets through inhomogeneous atmospheres. In *Computer Graphics International*, pages 349–356, June 2004.
- [6] Y. Zhao, Y. Han, Z. Fan, F. Qiu, Y.-C. Kuo, A.E. Kaufman, and K. Mueller. Visual simulation of heat shimmering and mirage. *Visualization and Computer Graphics, IEEE*, 13(1):179–189, January 2007.
- [7] Ken Perlin. An image synthesizer. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 19(3):287–296, July 1985.
- [8] Greg Turk. Generating textures on arbitrary surfaces using reaction-diffusion. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 25(4):289–298, July 1991.

- [9] Julie Dorsey, Hans K ohling Pedersen, and Pat Hanrahan. Flow and changes in appearance. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '96, pages 411–420, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [10] Yanyun Chen, Lin Xia, Tien-Tsin Wong, Xin Tong, Hujun Bao, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Visual simulation of weathering by  $\gamma$ -ton tracing. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, SIGGRAPH '05, pages 1127–1133, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [11] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, pages 21–30, London, UK, UK, 1996. Springer-Verlag.
- [12] Julie Dorsey and Pat Hanrahan. Modeling and rendering of metallic patinas. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '96, pages 387–396, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [13] Stephane Merillou, Jean-Michel Dischler, and Djamchid Ghazanfarpour. Corrosion: Simulating and rendering. In *Proceedings of the Graphics Interface 2001 Conference*, pages 167–174, June 2001.
- [14] Tomokazu Ishikawa, Kousaku Kamata, Yuriko Takeshima, and Masanori Kakimoto. Rusting and corroding simulation taking into account chemical reaction processes. In *ACM SIGGRAPH 2016 Posters*, SIGGRAPH '16, pages 65:1–65:1, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [15] Nisha Jain, Prem Kalra, and Subodh Kumar. Simulation and rendering of pitting corrosion. In *Proceedings of the 2014 Indian Conference on Computer Vi-*

- sion Graphics and Image Processing*, ICVGIP '14, pages 38:1–38:8, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [16] Stéphane Gobron and Norishige Chiba. Crack pattern simulation based on 3d surface cellular automaton. In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics*, CGI '00, pages 153–, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [17] Tien-Tsin Wong, Wai-Yin Ng, and Pheng-Ann Heng. A geometry dependent texture generation framework for simulating surface imperfections. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '97*, pages 139–150, London, UK, UK, 1997. Springer-Verlag.
- [18] Murray Eden. A two-dimensional growth process. In *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 4: Contributions to Biology and Problems of Medicine*, pages 223–239, Berkeley, Calif., 1961. University of California Press.
- [19] E. Somfai, L. M. Sander, and R. C. Ball. Scaling and crossovers in diffusion limited aggregation. *Phys. Rev. Lett.*, 83:5523–5526, Dec 1999.
- [20] A. Taleb, A. Chauss, M. Dymitrowska, J. Stafiej, and J. P. Badiali. Simulations of corrosion and passivation phenomena: diffusion feedback on the corrosion rate. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(3):952–958, 2004.
- [21] Haitao Wang and En-Hou Han. Cellular automata modeling on corrosion of metal with line defects. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(1):815–822, January 2015.
- [22] Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 13(2):14–, August 1979.



- [23] Mikio Shinya, T. Takahashi, and Seiichiro Naito. Principles and applications of pencil tracing. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4):45–54, August 1987.
- [24] Ryoma Tanabe, Tomoaki Moriya, and Tokiichiro Takahashi. A generation method of rust aging texture considering rust spreading. In *Proceedings of 2015 Joint Conferenct of IWAIT and IFMIA*, 2015.
- [25] Herbert H Uhlig and R Winston Revie. *Corrosion and Corrosion Control, 3rd edition*. Wiley Interscience, 1989.
- [26] Johnson. N.L. Systems of frequency curves generated by methods of translation. *Biometrika*, 36(1/2):149–176, January 1949.
- [27] S. Mostafawy, O. Kermani, and H. Lubatschowski. Virtual eye: retinal image visualization of the human eye. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(1):8–12, Jan 1997.
- [28] M. Yoshida, H. Kaneko, and K. Onuma. The simulation eyesight using psf analyzer. In *Meeting abstract of 13th annual meeting Japanese Academy of Optometry and Ophthalmic Science*, 2009.
- [29] Brian A. Barsky. Vision-realistic rendering: Simulation of the scanned foveal image from wavefront data of human subjects. *Applied Perception in Graphics and Visualization*, 2004.
- [30] Kunihiko Fukushima. A feature extractor for curvilinear patterns: a design suggested by the mammalian visual system. *Kybernetik*, 7(4):153–160, Sep 1970.
- [31] James A. Ferwerda, Sumanta N. Pattanaik, Peter Shirley, and Donald P. Greenberg. A model of visual adaptation for realistic image synthesis. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '96, pages 249–258, New York, NY, USA, 1996. ACM.

- [32] Y. Kobayashi and T. Kato. A high fidelity contrast improving model based on human vision mechanisms. In *Proceedings IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, volume 2, pages 578–584 vol.2, Jul 1999.
- [33] De Monasterio F. M. and P. Gouras. Functional properties of ganglion cells of the rhesus monkey retina. *The Journal of Physiology*, 251(1):167–195, Sep 1975.
- [34] Ophthalmic optics – visual acuity testing – standard optotype and its presentation. Standard, International Organization for Standardization, Jul 2009.
- [35] Optics and optical instruments – visual acuity testing – method of correlating optotypes. Standard, International Organization for Standardization, Sep 1994.
- [36] Visual acuity testing equipment. Standard, Japanese Industrial Standards Committee, Oct 2002.

## 付 録 A 四角い太陽蜚気楼 (拡大画像)

本章では表 A.1 の結果画像の拡大版を掲載する．それぞれの対応は表 A.1 の通りである．

表 A.1: の拡大画像の対応

初出	元画像	番号	拡大画像
表 A.1	図 3.8	(a)	図 A.1 上
	図 3.9	(a)	図 A.1 下
	図 3.8	(b)	図 A.2 上
	図 3.9	(b)	図 A.2 下
	図 3.8	(c)	図 A.3 上
	図 3.9	(c)	図 A.3 下
	図 3.8	(d)	図 A.4 上
	図 3.9	(d)	図 A.4 下
	図 3.8	(e)	図 A.5 上
	図 3.9	(e)	図 A.5 下

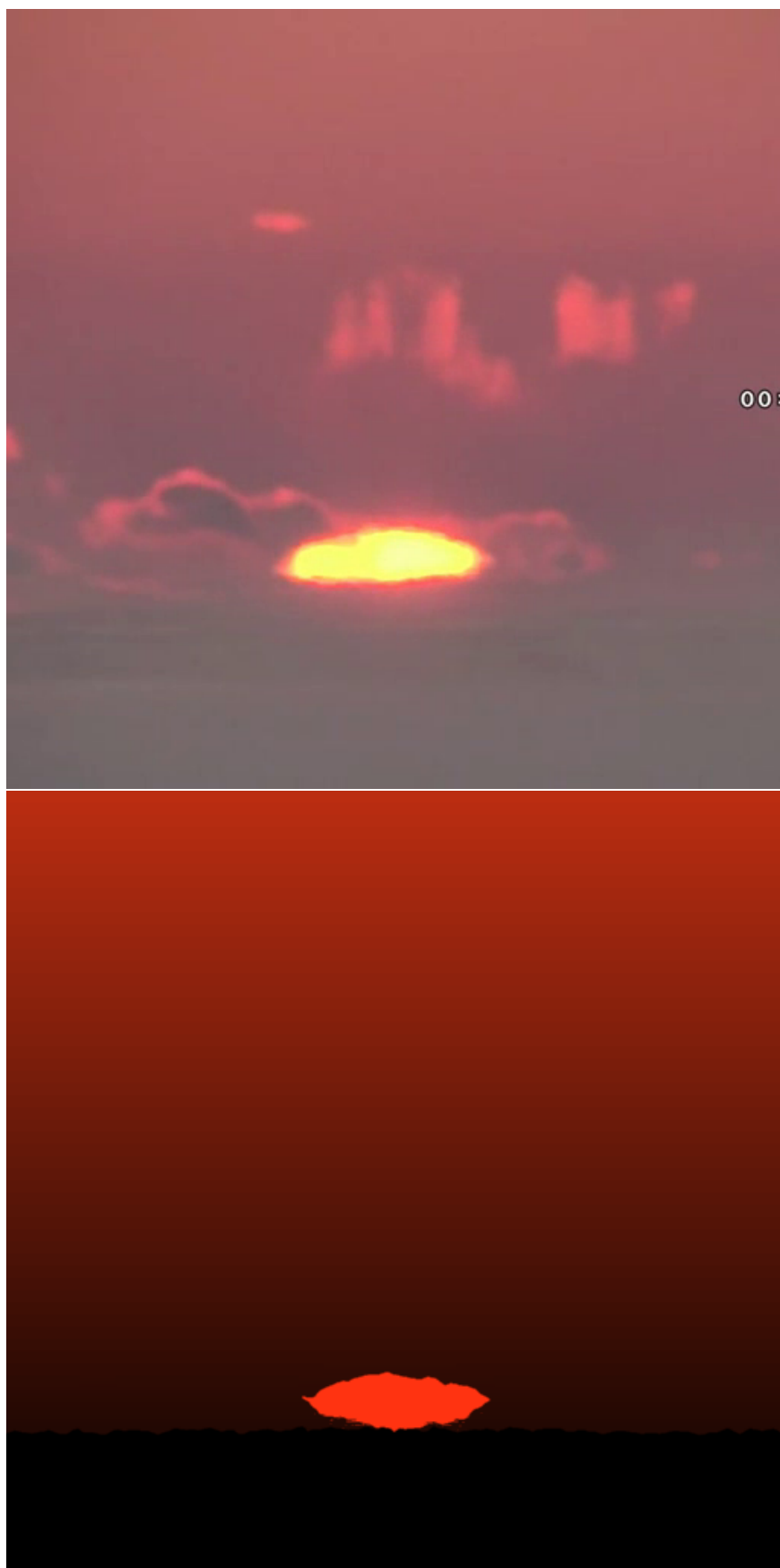


図 A.1: 図 3.8-3.9 の拡大画像 (a)

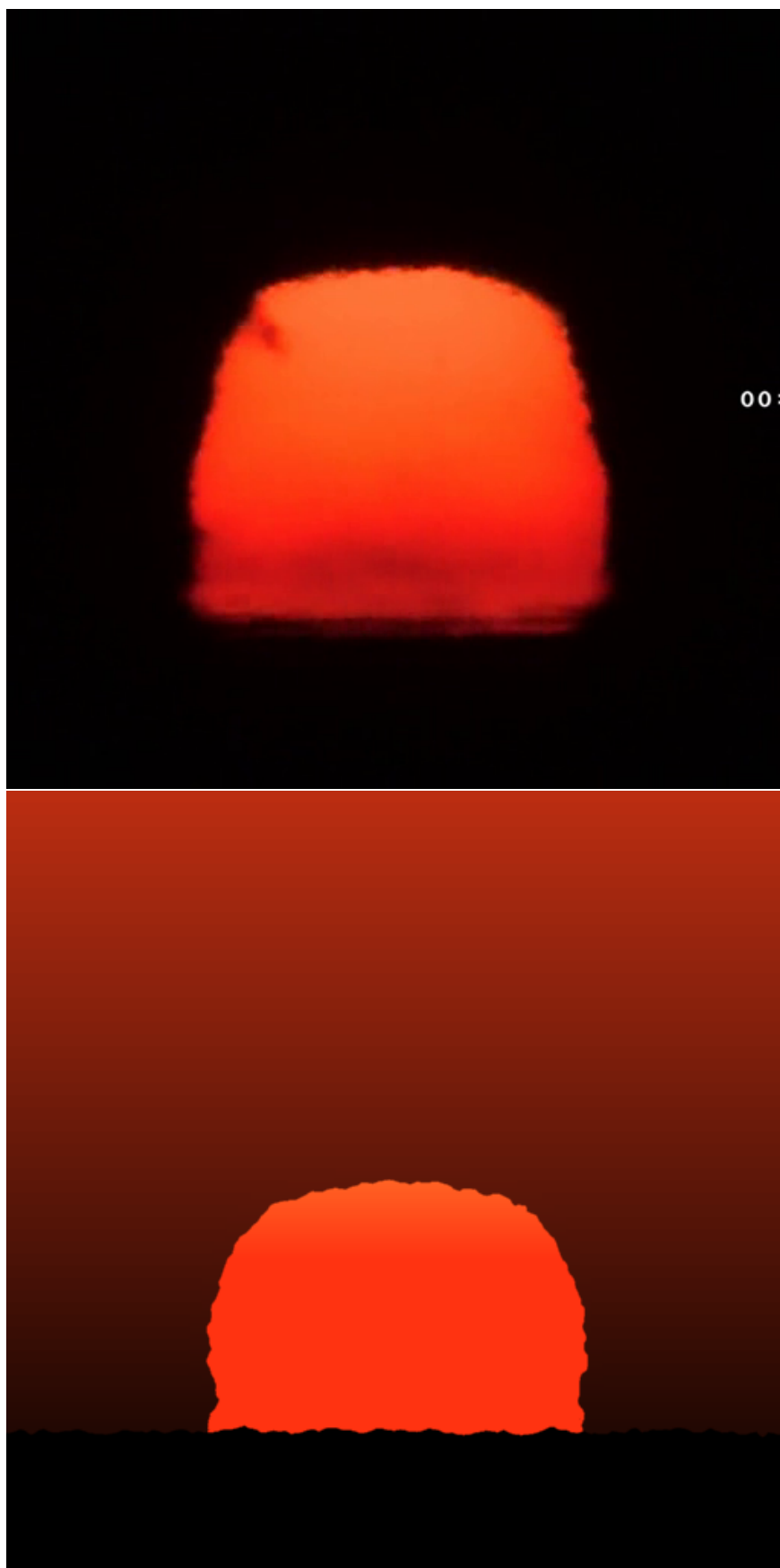


図 A.2: 図 3.8-3.9 の拡大画像 (b)

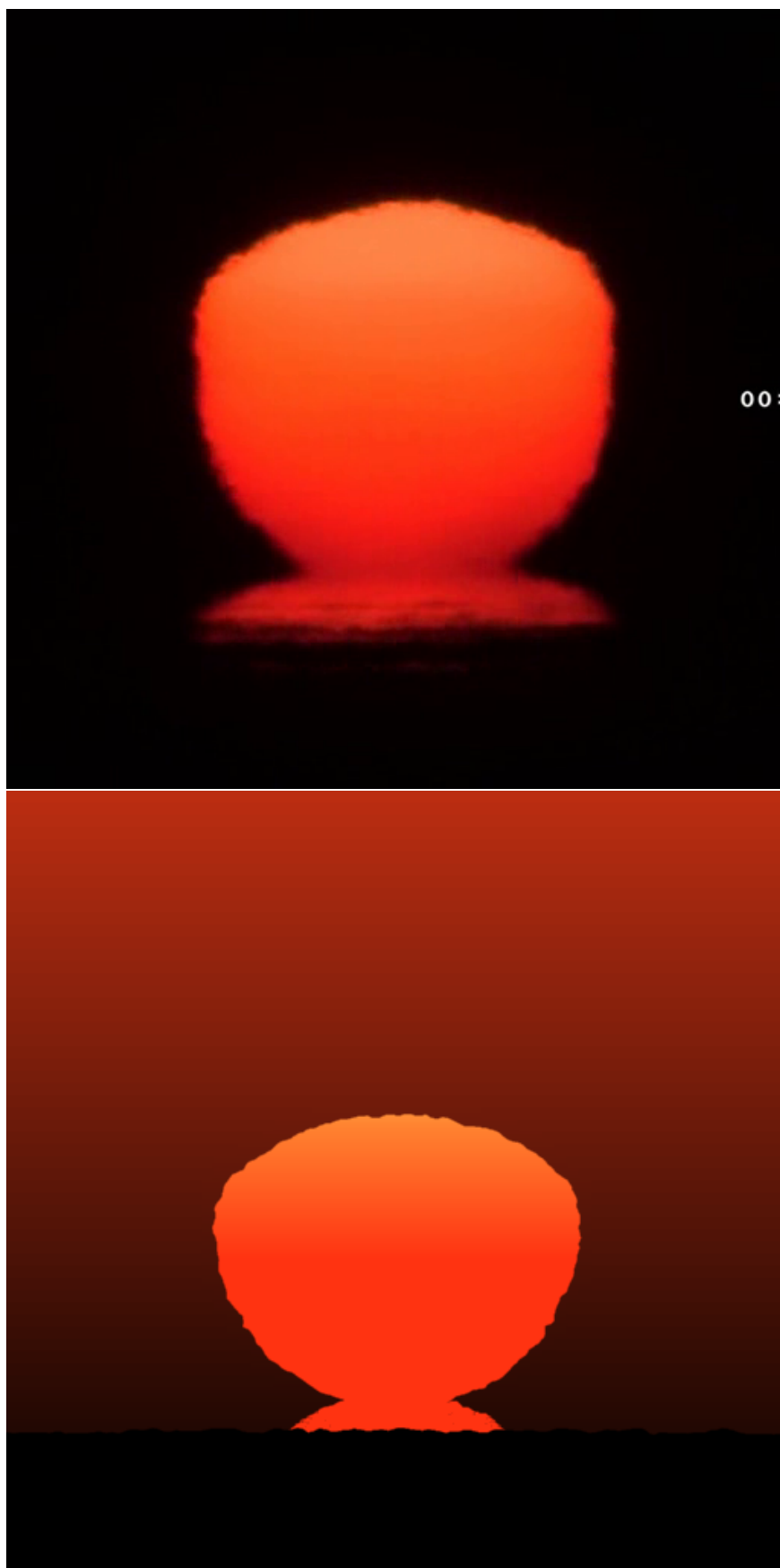


図 A.3: 図 3.8-3.9 の拡大画像 (c)



図 A.4: 図 3.8-3.9 の拡大画像 (d)



図 A.5: 図 3.8-3.9 の拡大画像 (e)



## 付録B さまざまなジオメトリでの鑄 の成長過程 (拡大画像)

本章では 4.3.3 項の結果画像の拡大版を掲載する。それぞれの対応は表 B.1 の通りである。

表 B.1: 4.3.3 項の拡大画像の対応

初出	元画像	シミュレーションステップ	拡大画像
4.3.3 項	図 4.8	0	図 B.1
		20	図 B.2
		40	図 B.3
		60	図 B.4
		80	図 B.5
	図 4.9	0	図 B.6
		20	図 B.7
		40	図 B.8
		60	図 B.9
		80	図 B.10
	図 4.9	0	図 B.11
		20	図 B.12
		40	図 B.13
		60	図 B.14
		80	図 B.15

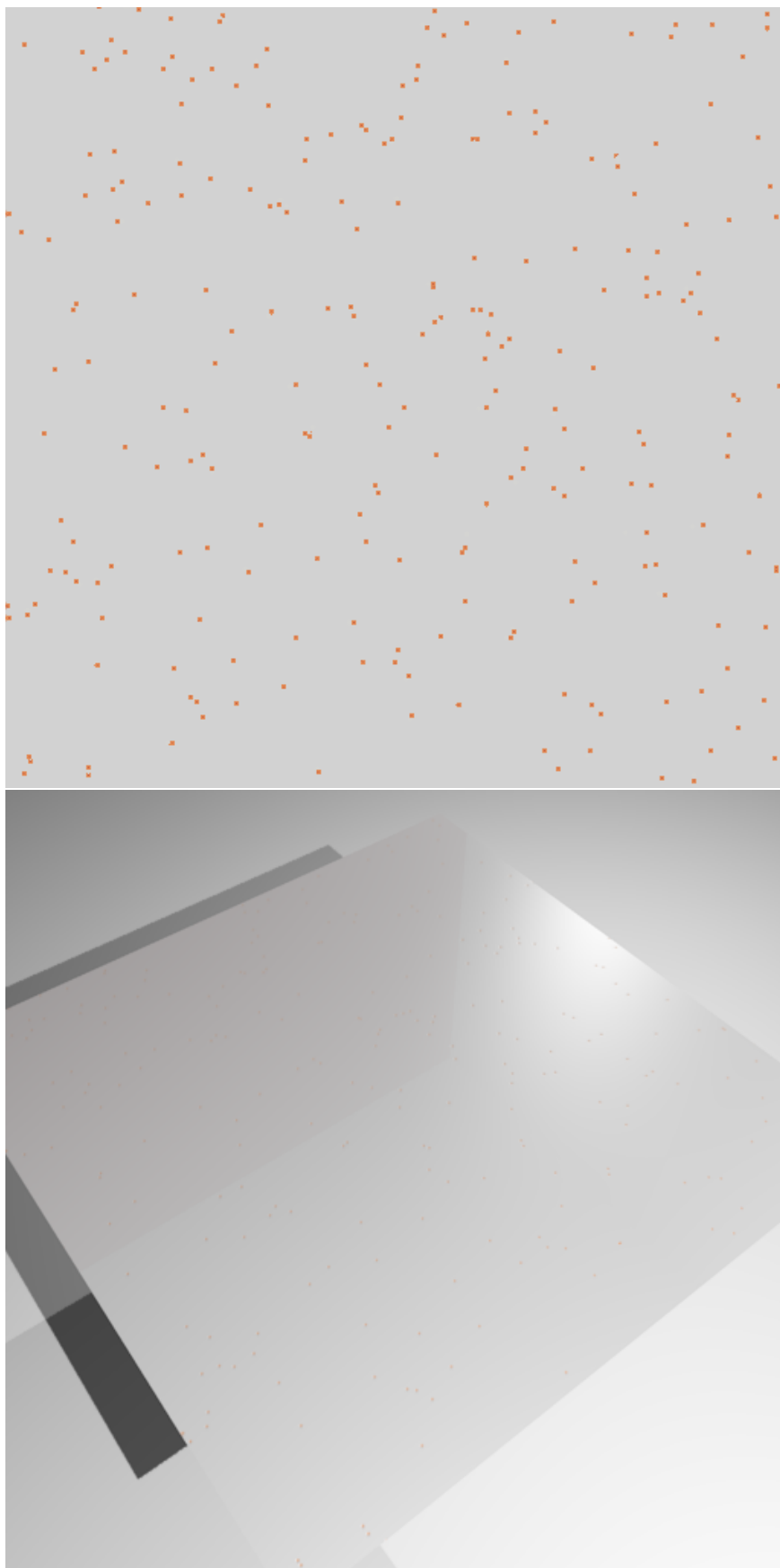


図 B.1: 図 4.8 の拡大画像 (シミュレーションステップ:0)

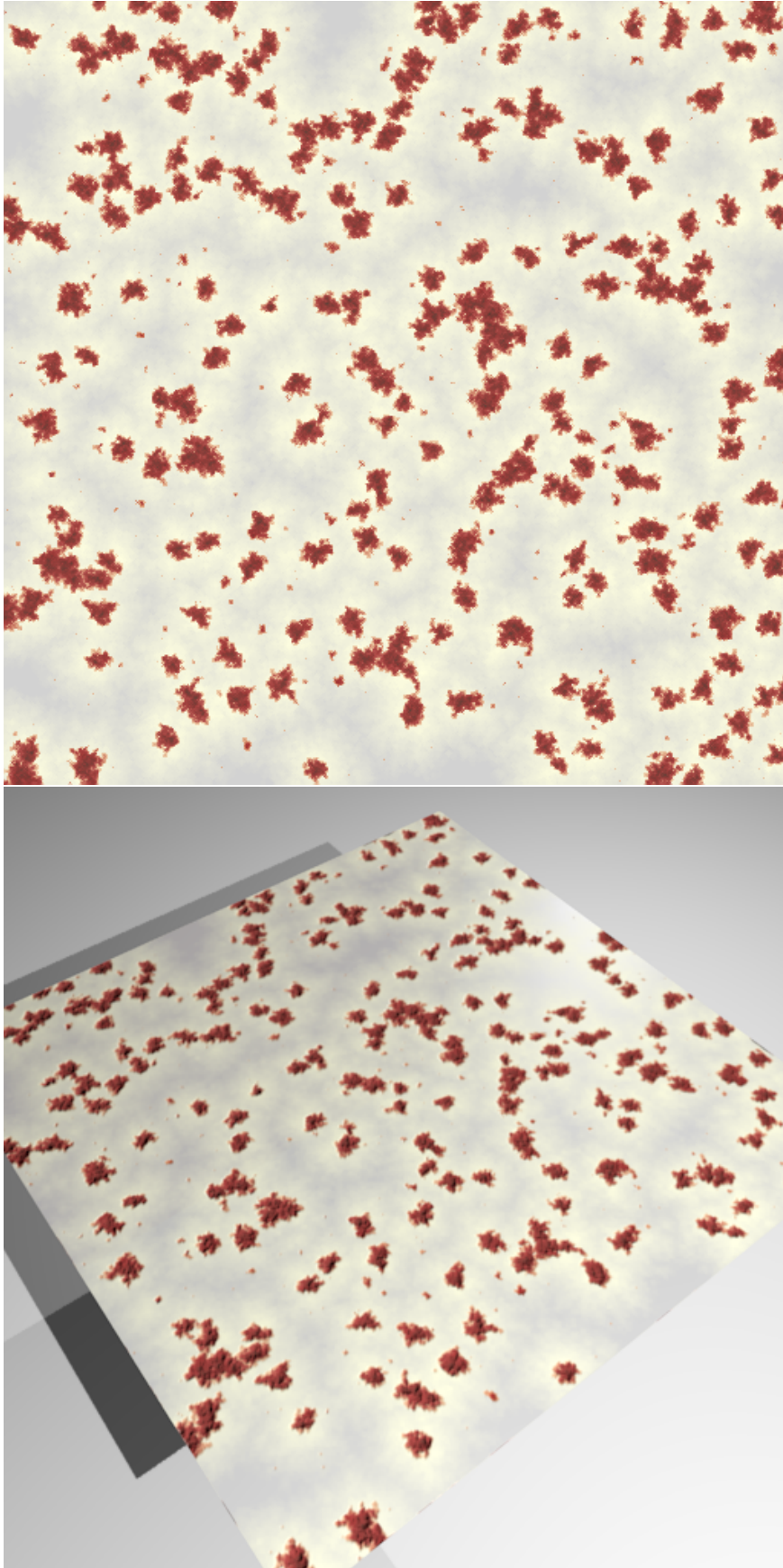


図 B.2: 図 4.8 の拡大画像 (シミュレーションステップ:20)

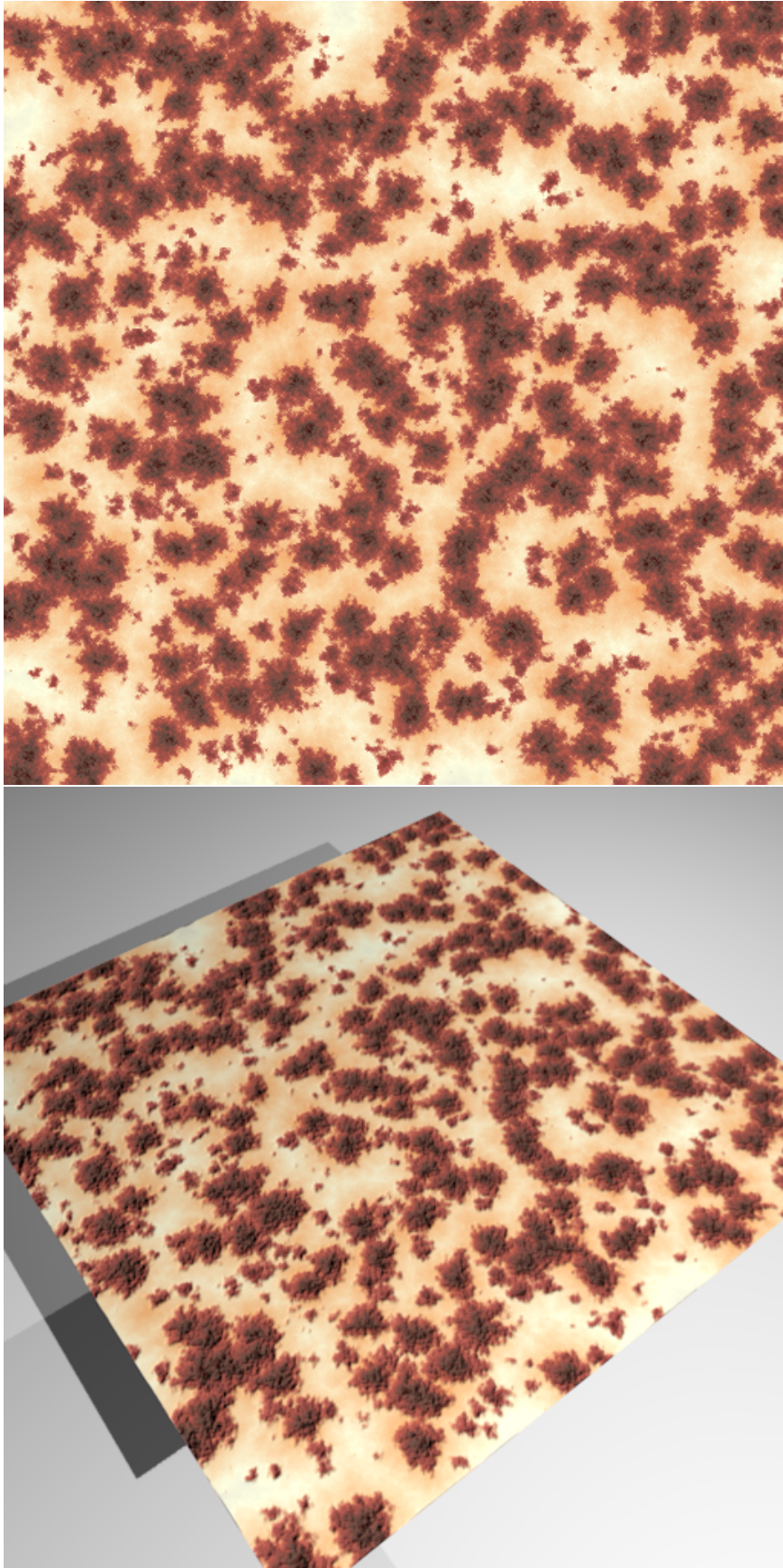


図 B.3: 図 4.8 の拡大画像 (シミュレーションステップ:40)  
87



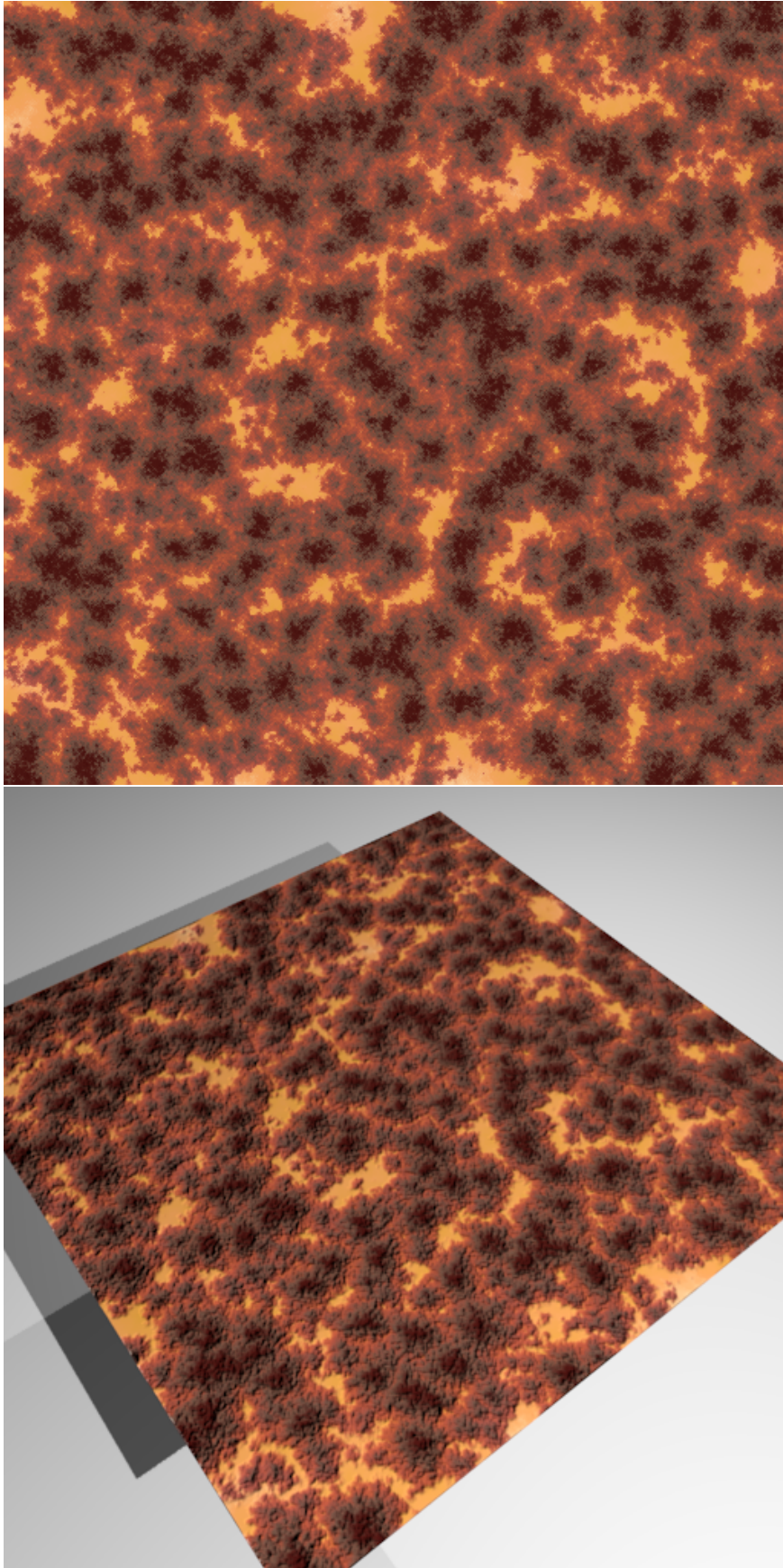


図 B.4: 図 4.8 の拡大画像 (シミュレーションステップ:60)

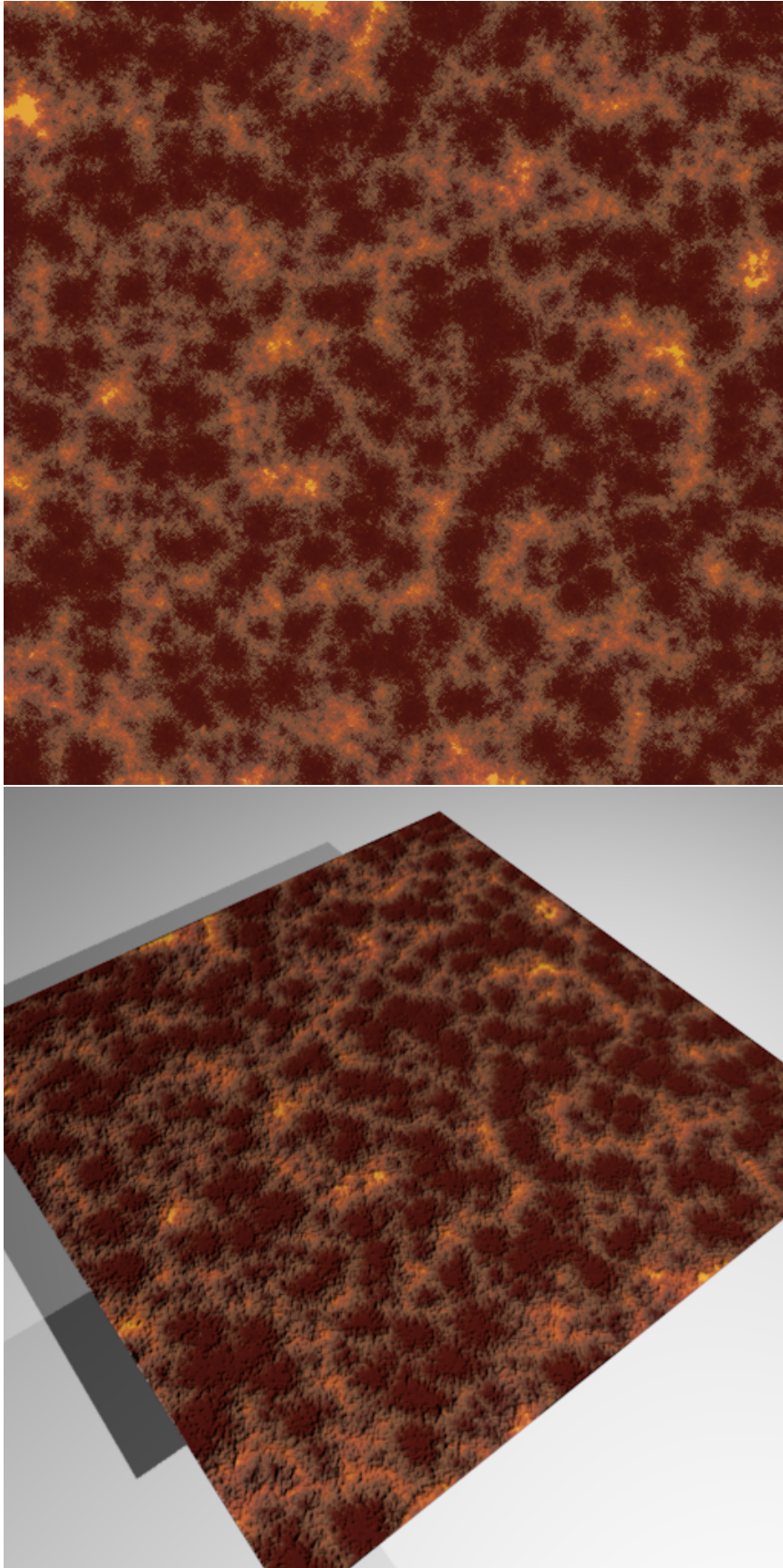


図 B.5: 図 4.8 の拡大画像 (シミュレーションステップ:80)  
89

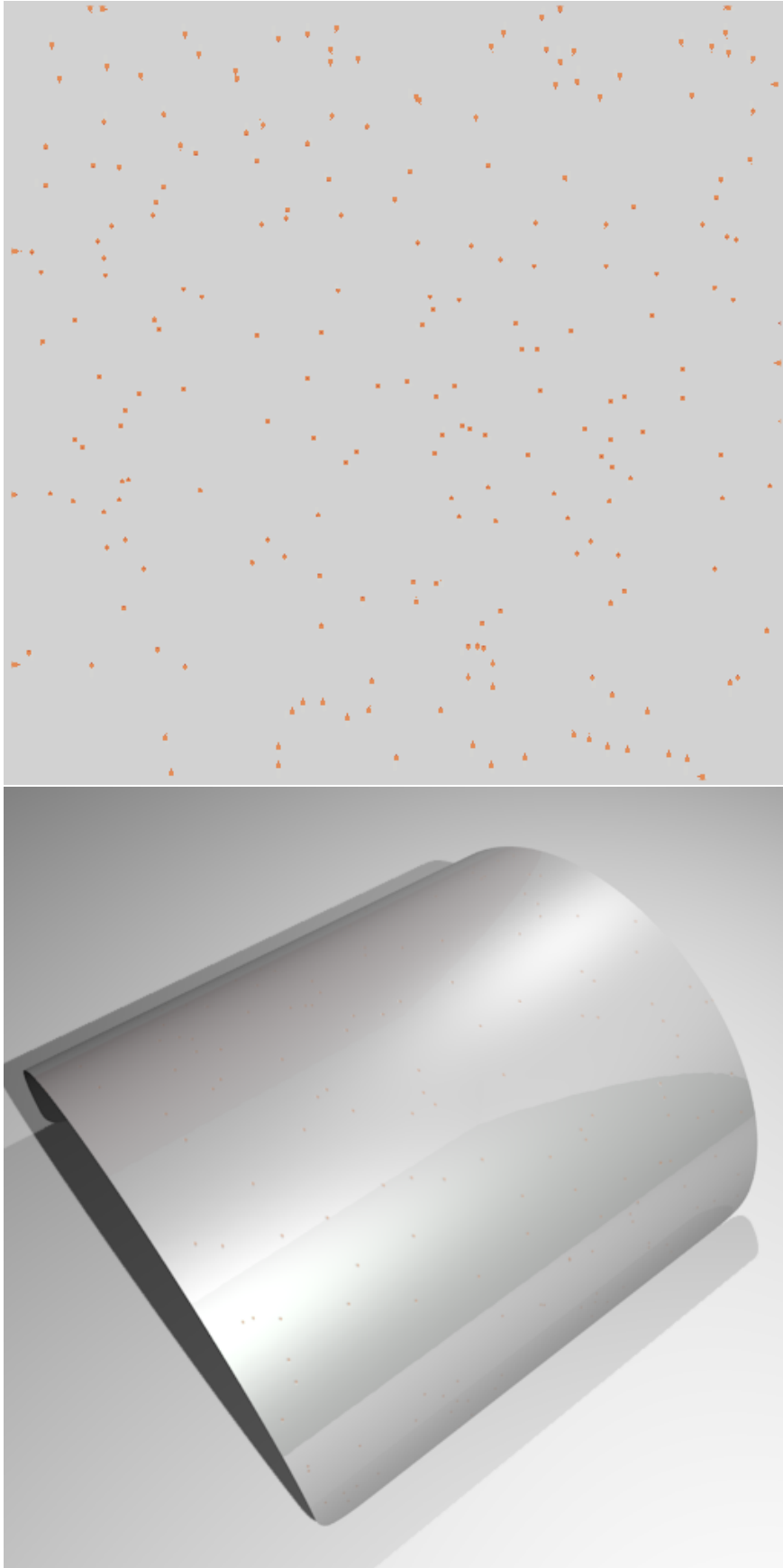


図 B.6: 図 4.9 の拡大画像 (シミュレーションステップ:0)



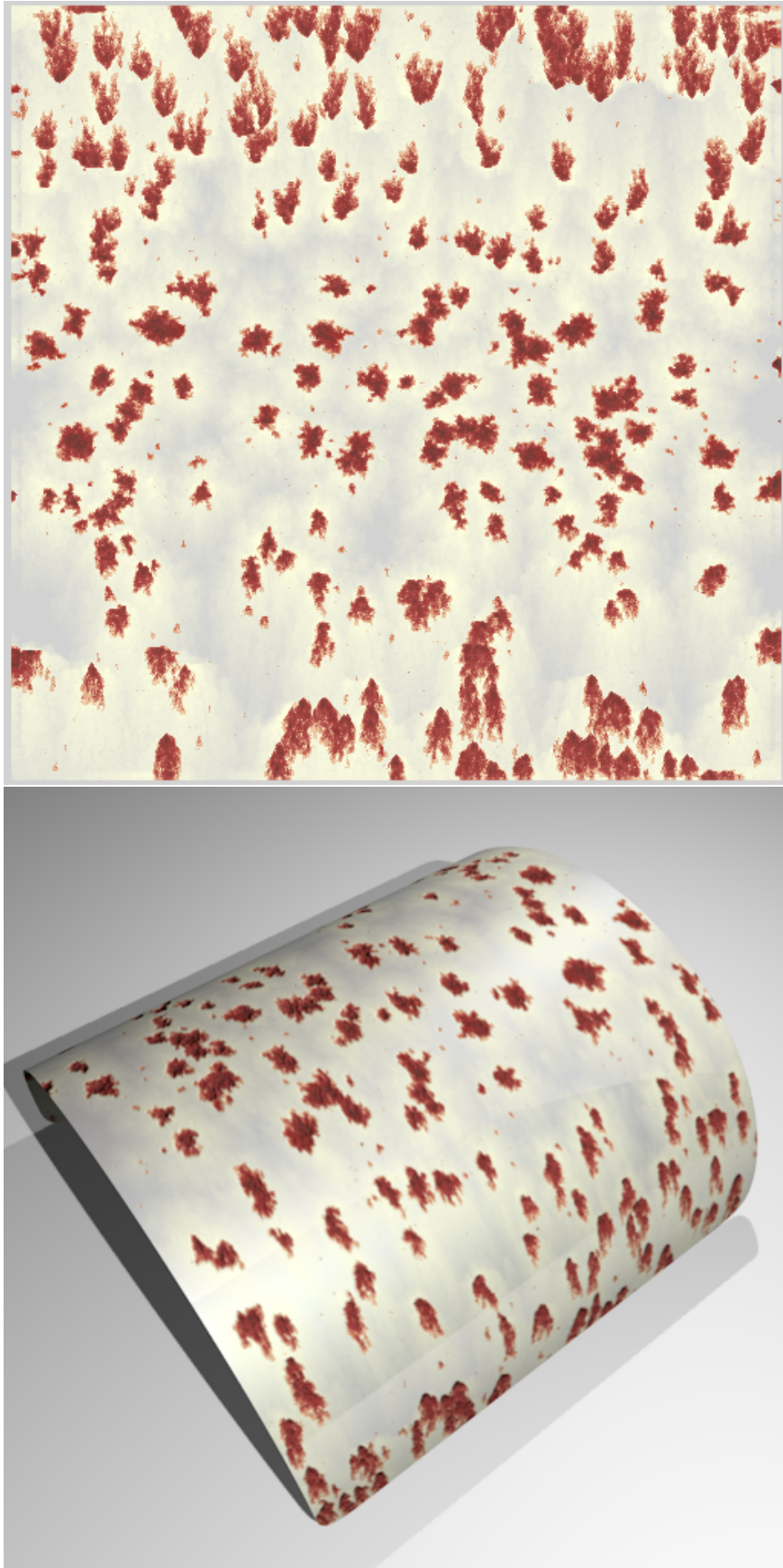


図 B.7: 図 4.9 の拡大画像 (シミュレーションステップ:20)





図 B.8: 図 4.9 の拡大画像 (シミュレーションステップ:40)  
92

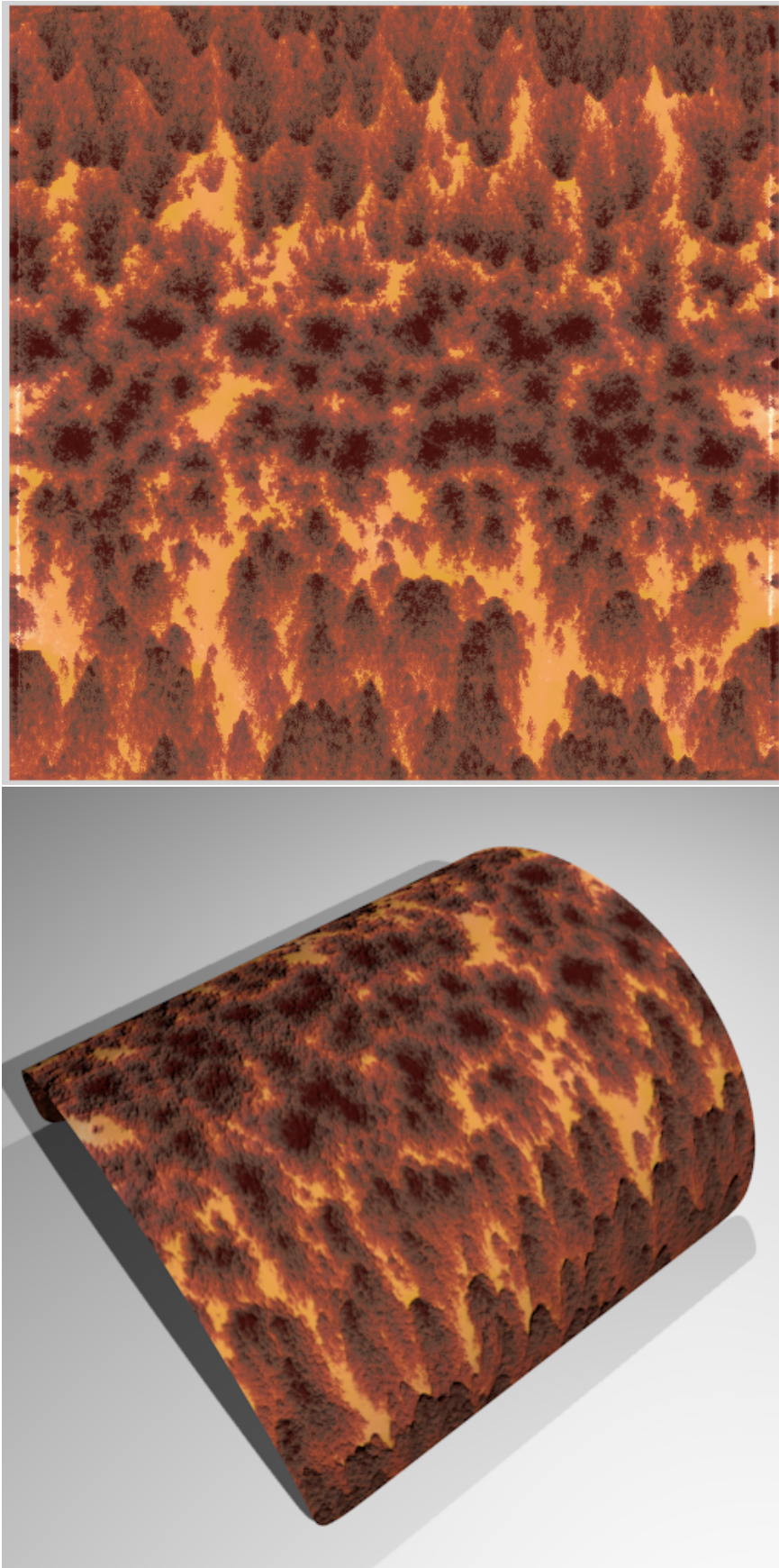


図 B.9: 図 4.9 の拡大画像 (シミュレーションステップ:60)  
93



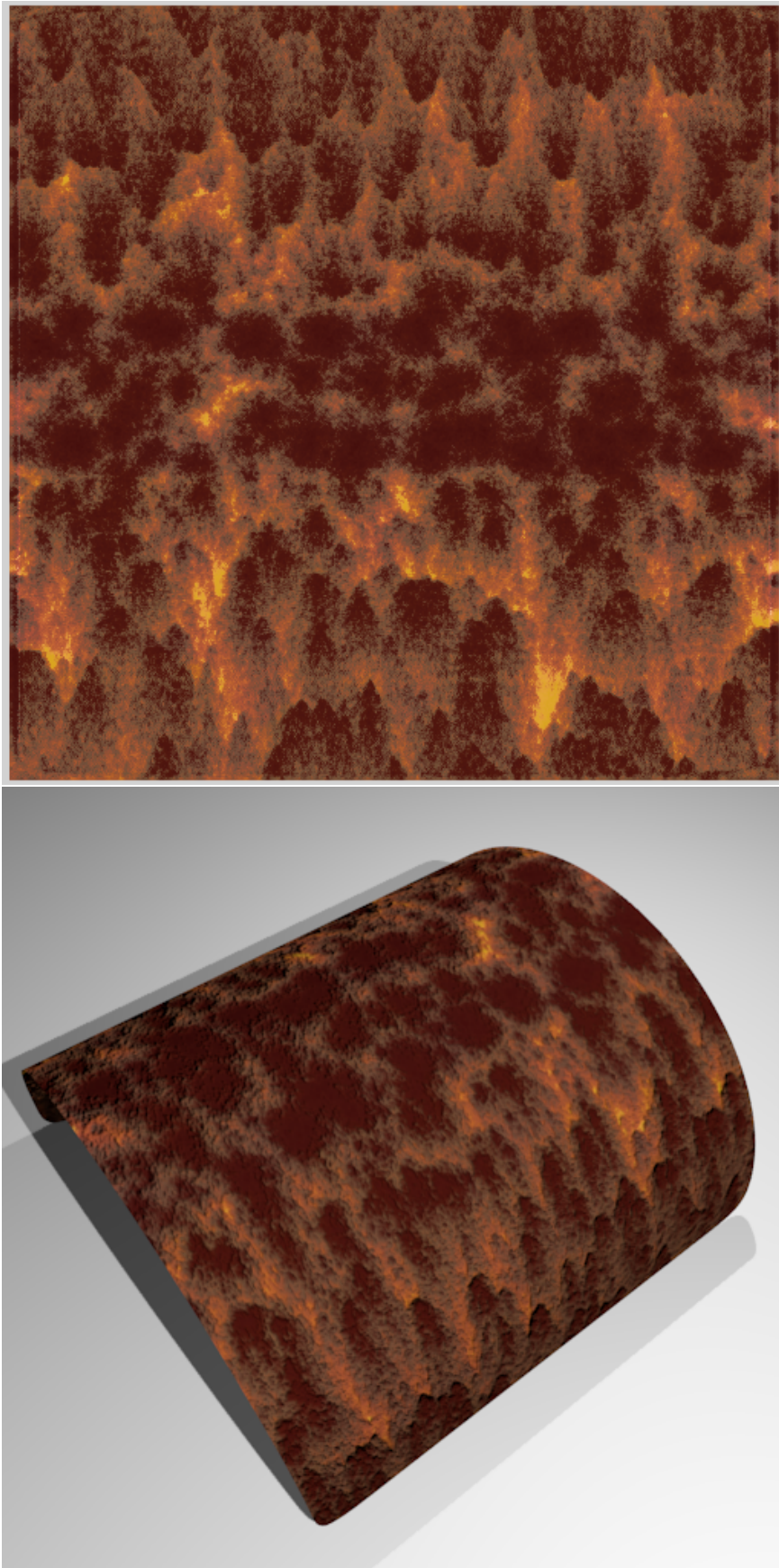


図 B.10: 図 4.9 の拡大画像 (シミュレーションステップ:80)



図 B.11: 図 4.10 の拡大画像 (シミュレーションステップ:0)

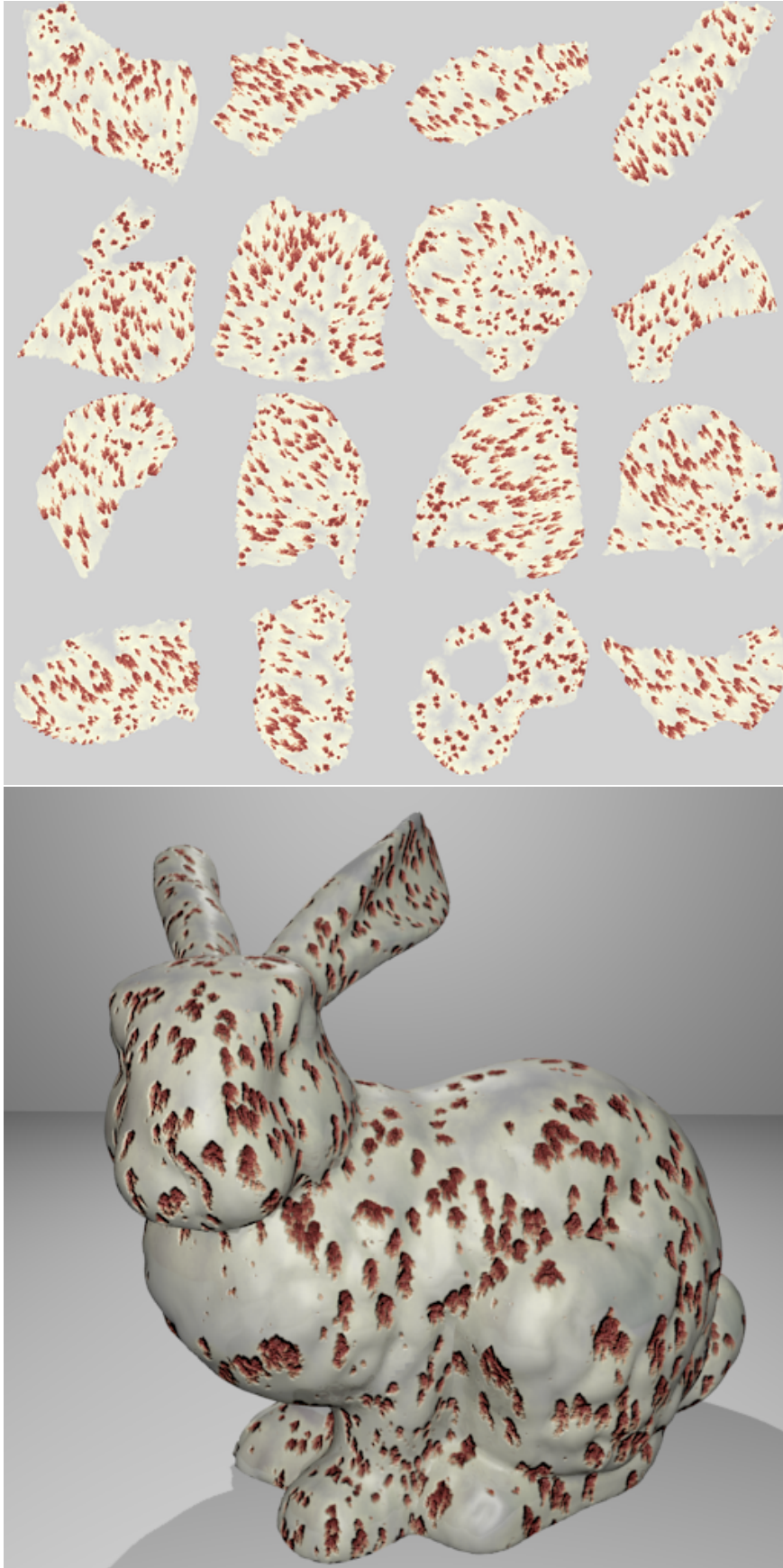


図 B.12: 図 4.10 の拡大画像 (シミュレーションステップ:20)





図 B.13: 図 4.10 の拡大画像 (シミュレーションステップ:40)  
97



図 B.14: 図 4.10 の拡大画像 (シミュレーションステップ:60)





図 B.15: 図 4.10 の拡大画像 (シミュレーションステップ:80)



# 付録C 人間の知覚特性の考慮に関する検討

本章では、本論文で提示したようなビジュアルイメージを人間の視覚特性を考慮して提示する手法について詳述する。

## C.1 Introduction

This is because the designer's viewpoint and visual angle to the computer monitor are different from viewer's viewpoints and visual angle to the exhibited object. Since the distance between the designer and the computer monitors is very close, the designer do not notice this problem on visual appearance. On the other, the distance between the viewer and huge exhibited objects is very far. Therefore, the viewer cannot read very small characters because their viewpoints are far from the objects. If the viewers' eyesight is weak, this problem becomes serious. Unfortunately, there are few design tools to simulate visual appearance considering both viewers' viewpoint and eyesight.

Many methods have been proposed to simulate such visual appearance. They are classified into two approaches. One is the optical simulation approach which simulates imaging processes on the retina by tracing optical behaviors of rays through human eyes. Several methods measure the point spread function images on the retina, so that they can simulate visual appearance of very weak eyesight exactly. However, they require complicated and large-scale equipment, and are expensive. The other approach is the neural approach based on physiological studies, and mainly intends

to generate perceptual images. This approach can simulate various effects such as visual adaptation and eyesight caused by physiological structure of human eye.

In this paper, we propose a visual appearance simulation method of exhibited objects based on image filtering approach by combining conventional two approaches. Our method can simulate visual appearance of various exhibited objects which is viewed by the viewers with arbitrary eyesight from arbitrary distant places.

## **C.2 Related Works**

There have been proposed many methods for visual appearance simulation.

These visual simulation methods are classified into two approaches: optical system approach and neural system approach.

### **C.2.1 Optical System Approach**

In optical system, a ray from an object reaches to retina through pupil, lens and vitreous humour with complicated reflections and refractions, and finally images are formed on the retina.

There have been several simulation studies based on anatomic properties of eye. Mostafawy[27] et al proposed a method to simulate retinal image for corneal surgery. They simulated retinal image by using ray tracing technique. Their method requires various simulation parameters measured by the wavefront analyzer. Yoshida et al[28] developed a Point Spread Function (PSF) analyzer to simulate a retinal image according to optical properties of viewers' eye. Barsky[29] proposed a similar method to generate 3D CG images.

These methods are applied for medical applications because medical fields require strictly correct simulation results. However, they require dedicated devices to measure simulation parameters of a specific viewer. Because they simulate eyesight for

the specific viewer based on the measured optical properties.

These conventional methods are very complicated and long-scale to simulate eyesight, however, a simple but general method is required. Moreover, we should consider neural system after retinal images are simulated.

### **C.2.2 Neural System Approach**

Neural system approach simulates visual appearance based on neural structures of human visual system. Light fallen on retina is converted to physiological stimuli, and they are propagated to brains. Stimuli fired in a retina is aggregated, enhanced and reduced through intermediate neurons. We perceive these stimuli as an image.

There have been several studies based on neural system. Lateral inhibition is a phenomena caused by neural system, which neighboring neuron inhibit their reaction. Fukushima[30] proposed a neural network model which consisted of six-layered I/O system. Each layer behaves like a convolution filter, however, and the entire model is able to detect line segments. Ferwerda et al[31] proposed a method based on physiological studies for generating realistic images. Their methods can simulate effects such as visual adaptation and eyesight caused by physiological structure of human eye. Kobayashi and Kato[32] proposed mathematical model for simulating lateral inhibition, and applied it to natural image enhancement.

These neural system approaches are mainly intended to simulate perceptual images of eyesight, but they do not consider optical system, i.e., viewers' eyesight and visual angles.

## **C.3 Visual Simulation Method**

Problems on visual appearance of exhibited objects are caused by difference between visual distances when they were designed and exhibited. For example, when

we create a slide on a computer display monitor, we often zoom a figure in the slide to edit and draw its details more precisely. Such a figure is hard to read, especially, for weak eyesight viewers. We should consider visual apparent sizes of exhibited objects and viewers' eyesight. In addition, we have to consider perceptual effects of human neural system. One of the most important properties is lateral inhibition. The lateral inhibition is a phenomena caused by the neural system. We perceive enhanced contrast of images caused by this phenomena.

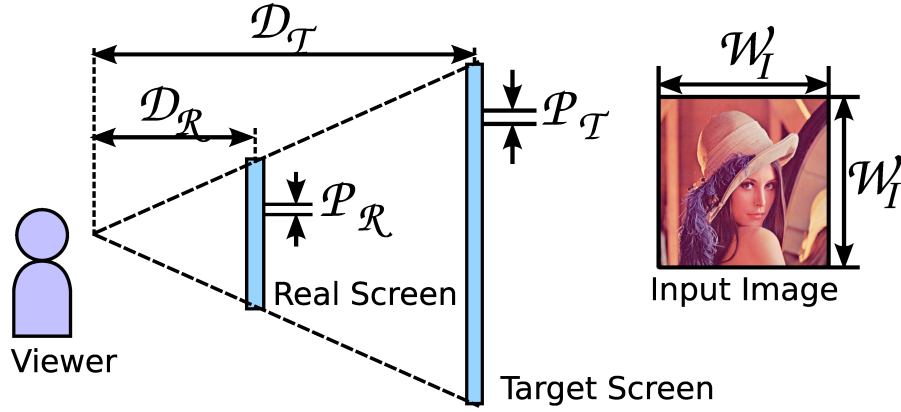
We propose a visual simulation method considering both optical and neural systems of human visual system. Our method consists of two steps. Each step is corresponding to one of the two systems respectively. We simulate these systems by using two convolution filters: Gaussian filter and DOG filter. These filters are applied sequentially to an input image to generate a resultant simulation image.

### C.3.1 Optical Simulation Step

First step is *optical simulation step*, corresponds to optical system of human visual system. This step consists of two processes. First process is visual angle adjustment which fits the size of an input image to the apparent size from the viewer. Second process is an optical defocus simulation that generates blurred image. The blurred image is aimed to simulate poor eyesight. We use Gaussian smoothing filter to simulate optical blur. Parameters of Gaussian filter are measured.

#### Visual Angle Adjustment

First, we adjust the size of an input image to the apparent size in sight of the viewer. We can calculate apparent size based on a proportion of distance to real and target screen. Apparent size  $W_R$  is given by Eq.(C.1).



⊠ C.1: Simulation Parameters

$$W_R = \frac{D_R P_T W_I}{D_T P_R} \quad (\text{C.1})$$

Here,  $W_I$  is the size of input image in pixels,  $D_R$  and  $D_T$  are the distance from the viewer to real screen where simulated images are displayed and target screen(exhibited object), respectively as illustrated in Fig.C.1.  $P_R$  and  $P_T$  are width and height of one pixel on the real and target screens, respectively.

## Defocus Simulation

Second process is to generate blurred images to simulate viewers' eyesight.

We perceive a blurred image when we watch a fairly far target. This phenomena is caused by relation of the viewers' eyesight and the distance between the eye and the target(the exhibited object). If viewers' eyesight is not enough, rays through lens focus in front of / behind a retina and form a blurred image on a retina. This defocus mechanism can be approximated by Gaussian filter, however, we have to measure the relation between the appropriate kernel sizes and eyesight.

表 C.1: Experiment Environment

Illuminance	610 <i>lx</i>
Real screen	19 <i>inch</i> LCD Resolution: 1280x1024 <i>pixels</i> Luminance: 6.8-145.5 <i>cd/m<sup>2</sup></i>
Viewer's eyesight	Over 20/20 <i>vision</i>
Viewer's viewpoint	In front of the screen Distance to real screen: 1.0 <i>meters</i>

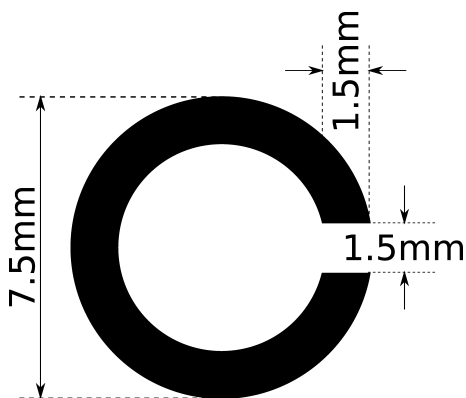
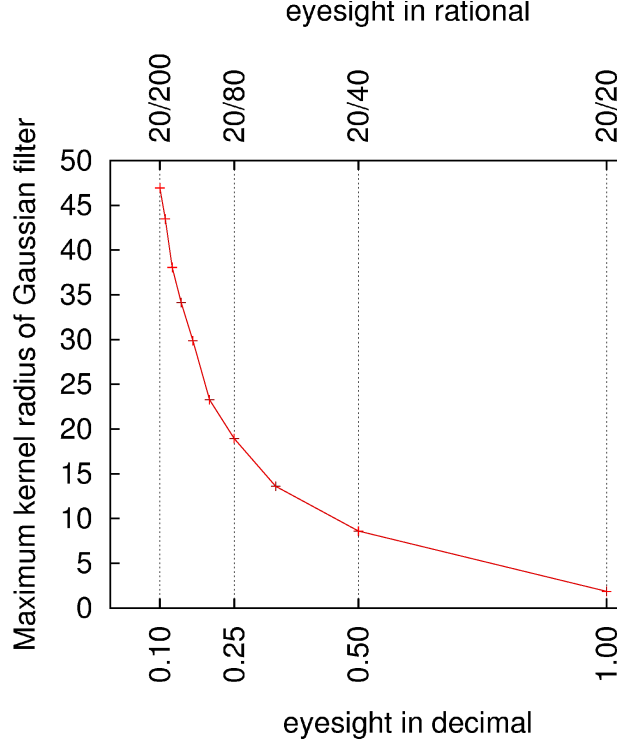


图 C.2: An example of Landolt rings

### Kernel Size Measurement

In order to measure appropriate kernel sizes, the following experiment has been done in the environment described in Tab.C.1. In this experiment, we use the Landolt ring as figures shown to examinees. Landolt ring is a figure like C that is generally used at the static vision test as shown in Fig.C.2. The width of its stroke and aperture is same, and its diameter is quintuple of that width. Examinees answer the direction of aperture of letter C.

We provide various of blurred Landolt ring images, and show them at random to examinees. Examinees have to discern these figures correctly as possible as they can.



⊠ C.3: Measurement Result

The blurred Landolt ring images are generated by applying both Gaussian filter by varying its kernel size from 3 to 47 pixels and Lateral inhibition filter discussed in §C.3.2.

We define that figures are discernible if examinees discerned over 60% of figures correct. We measure the maximum kernel size which examinees discerned correctly. We use this size as appropriate kernel size for simulating particular eyesight.

We have 12 examinees (10 males and 2 females). All of them have over 20/20 vision, and are 21-25 years old. The measurement result is shown in Fig.C.3. The horizontal axis indicates assumed eyesight, and the vertical axis indicates the appropriate kernel size to simulate certain eyesight. Based on this result, we define the appropriate kernel size  $K_E$  to simulate eyesight  $E$  (in decimal) by Eq.(C.2).

$$K_E = \frac{5.1}{E} - 3.4 \quad (\text{C.2})$$

### C.3.2 Neural Simulation Step

Second step is *neural simulation step*. Neural system simulates another significant visual effect, lateral inhibition. First we explain the lateral inhibition. Next, we describe our model to simulate the lateral inhibition. Our model is based on Fukushima's model[30].

#### Lateral Inhibition Phenomenon

An image on the retina is propagated to the brain as electrical signal from photoreceptor cells through retinal ganglion cells. Retinal ganglion cells are a kind of neurons, which are primary components and enhance visual contrast. They aggregate stimuli from many excited photoreceptor cells, then propagates them to brains. Retinal ganglion cells are distributed on entire retina. They are excited when center of their receptive fields are exposed by light, but they do not excited when surrounding of their receptive fields are exposed by light. We perceive enhanced contrast caused by this behavior of neural system, called *lateral inhibition*.

#### Computing Model for Lateral Inhibition

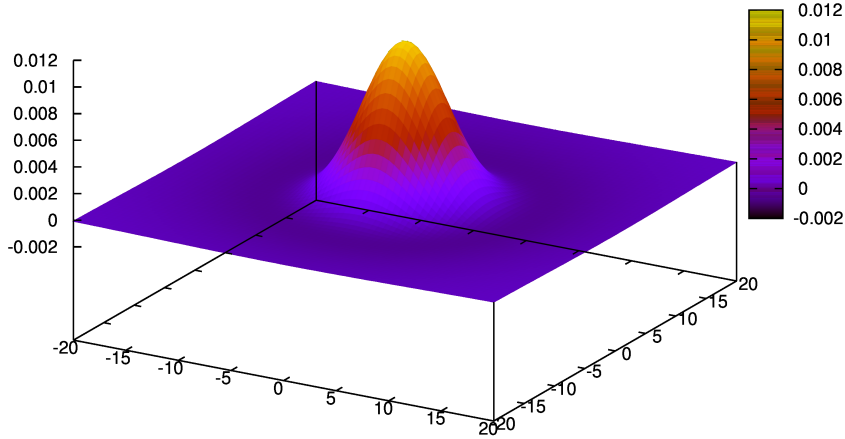
In order to realize lateral inhibition filter, we adopt Fukushima's model. According to Fukushima's model, the reaction strength  $U'_{x,y}$  transmitted from a retinal ganglion cell is given by Eq.(C.3).

$$U'_{x,y} = \phi \left[ \int_{A_1} C_{1\xi,\eta} U_{x+\xi,y+\eta} d\xi, d\eta \right] \quad (C.3)$$

$$\phi[x] = \begin{cases} x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (C.4)$$

Here,  $A_1$  is peripheral region at central point  $(x, y)$ , and represents a receptive field of a retinal ganglion cell.  $\xi$  and  $\eta$  are offset from the center of  $A_1$ .  $U$  is the





⊠ C.4: Interconnection function  $C_{1,\xi,\eta}$

reaction strength transmitted from photoreceptor cells,  $C_1$  is the interconnection function that represents influence of stimuli from a photoreceptor cell.  $C_1$  has a gradient that has positive value around the center and has negative value around the circumference(Fig.C.4).

In our method, we approximate this gradient by using DOG (Difference of Gaussian) distribution.

### DOG Distribution

We set parameters of the lateral inhibition filter based on the size of receptive fields of a retinal ganglion cell. The lateral inhibition filter is basically a convolution filter with DOG distribution. DOG distribution have a gradient composed by two Gaussian distributions which have opposite signs and different standard deviations. Usually, one of their distribution is sharp, other is wide. Two dimensional DOG

distribution is given by Eq.(C.5).

$$DOG_{\sigma_1\sigma_2}(x, y) = G_{\sigma_1}(x, y) - G_{\sigma_2}(x, y) \quad (C.5)$$

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-(x^2 + y^2)/2\sigma^2) \quad (C.6)$$

This distribution forms a gradient like  $C_1$  described in §C.3.2. Thus, DOG distribution has three parameters: (1) a standard deviation  $\sigma_1$  of sharper positive Gaussian distribution, (2) a standard deviation  $\sigma_2$  of wider negative Gaussian distribution and (3) the kernel size of convolution.  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  are corresponding to the sizes of center and surrounding receptive fields respectively. These parameters have to set based on physiological experiments. We approximate these parameters based on the size of receptive fields of rhesus monkeys[33]. We take 3.6' as  $\sigma_1$ , and 12.0' as  $\sigma_2$  in visual angles. Since kernel has to cover entire kernel gradient, we define the kernel size three-times as wider as  $\sigma_2$ .

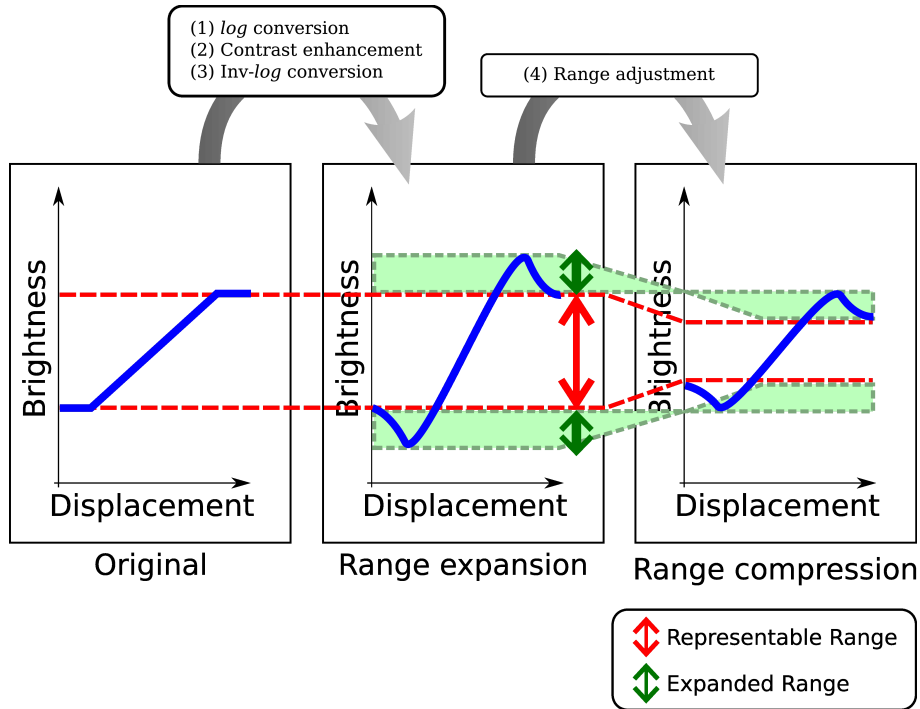
### Range Adjustment of Brightness

The lateral inhibition filter as described above increases brightness of images and generates perceptual contrast. That is, the dynamic range of image brightness is widen, and may exceed the range of the digital image. Therefore the range of brightness has to be compressed.

We first apply our lateral inhibition filter to an input images. The dynamic ranges of the filtered images are widen to range of  $[-\delta, 1 + \delta]$  ( $\delta \geq 0$ ). Then, we compress the dynamic ranges of the filtered images to the range of  $[0, 1]$ .

We measured the dynamic ranges as follows. We show filtered and compressed images to examinees. Several images are shown to an examinee simultaneously. Each examinee is required to answer which images he/she can sense difference of brightness.

We have above practice with 10 examinees (6 males and 4 females). All of them



☒ C.5: Lateral inhibition filtering process

have over 20/20 vision, and are 21-25 years old. As the result of measurement, the minimum value of  $\delta$  is estimated as 0.02.

### Lateral Inhibition Filtering Process

In order to approximate the human eyesight as consequence of lateral inhibition, we propose a lateral inhibition filter, consists of the following four steps as illustrated in Fig.C.5.

1. The brightness of an input image is converted to the reaction strength of the photoreceptor cell. The reaction strength means electrical potential transmitted from the photoreceptor cell. Because the reaction strength of the photoreceptor cell has logarithmic characteristic, the brightness is applied logarithmic conversion in the range of  $[0, 1]$ .
2. According to the reaction strength and Fukushima's model, we calculate the

contrast enhanced by lateral inhibition of neural circuit at each pixel and add it to the reaction strength.

3. In order to convert reaction strength added contrast to brightness, inverted logarithmic conversion is applied. Consequently, brightness in the range of  $[0, 1]$  of the original image is expanded to the range of  $[-\delta, 1 + \delta]$  ( $\delta \leq 0$ ).
4. The expanded range of the brightness is compressed to the range of  $[0, 1]$  to represent as the digital image.

## C.4 Experimental Results

First, we simulate visual appearances of static vision test of Snellen chart and famous Hermann grid illusion by applying our filters as mentioned above. Second, we simulate visual appearance of a direction board.

### C.4.1 Snellen Chart

We apply our filters to Snellen chart which is often used in static vision test. Snellen chart contains several alphabetical characters(Fig.C.6(a)). The width of each stroke and aperture of characters is same, and the width and height of each character is same.

By varying parameters of our filters, that is, by varying simulated eyesight of viewers, we generate several blurred Snellen charts as shown in Fig.C.6(b).

Then, we show blurred Snellen charts to examinees. We measure how correct examinees can recognize characters in the charts. We have 6 examinees (4 males and 2 females), and all of them have over 20/20 vision, and are 21-25 years old.

The experimental result is shown in Tab.C.2.

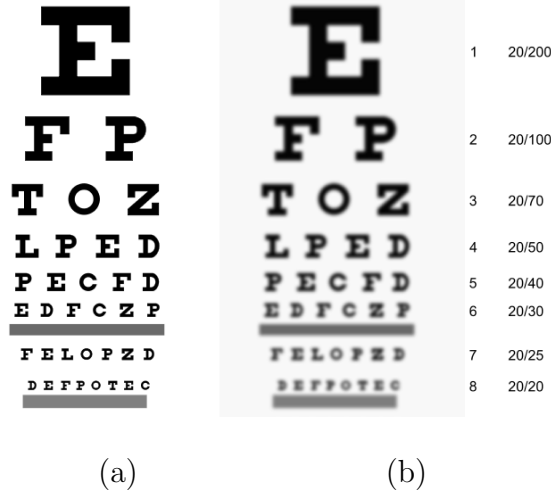


图 C.6: Snellen chart applied lateral inhibition filtering. (a) Normal Snellen chart; (b) Filtered Snellen chart

Each row of Tab.C.2 indicates character recognition rate of a certain character of Snellen chart to test viewers' eyesight, not examinees' eyesight, when simulated viewers' eyesight vary.

For example, a recognition rate at 3rd column of 2nd row indicated 36%. In this case, characters of Snellen chart which are shown to viewers are to test their eyesight(character eyesight, in short here-in-after) is 20/30, but the simulated eyesight is 20/40. Therefore, it is difficult for examinees to recognize characters in Snellen

表 C.2: Character recognition rate(%) of filtered Snellen charts

		simulated eyesight					
		20/20	20/30	20/40	20/70	20/100	20/200
eyesight	20/20	89	53	0	0	0	0
	20/30	83	69	36	0	0	0
	20/40	97	92	90	3	0	0
	20/70	100	100	100	96	8	0
	20/100	100	100	100	76	78	0
	20/200	100	100	100	100	100	33

chart, because simulated viewers' eyesight(20/40) is worse than the character eyesight(20/30). On the other hand, a recognition rate at 3rd column of 3rd row is 90%. This is because simulated viewers' eyesight and the character eyesight are equal to 20/40.

If simulated viewers' eyesight is better than or equals to the character eyesight, recognition rates are better than or equal to 60 %, as shown in Tab.C.2. This result follows the international standard for the visual testing [34][35][36]. The standard defines that "a certain eyesight" as the ability to correctly recognize the direction of the series of characters in the chart corresponding to the certain eyesight with the rate at or above 60%. Thus, this result means that our filters can simulate arbitrary eyesight almost as same as the eyesight to recognize characters of Snellen charts.

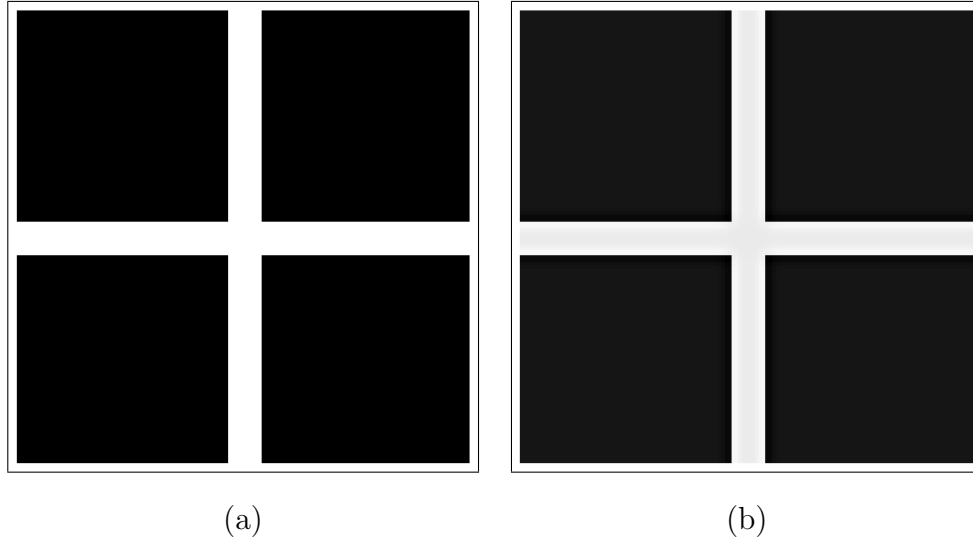
### **C.4.2 Hermann Grid Illusion**

Hermann grid illusion is a very famous optic illusion, which consists of several black rectangles laid on a white background like city blocks as shown in Fig.C.7(a). We can observe a gray spot appears at crossroads. It's said that this illusion is caused by lateral inhibition.

We choose a kernel size larger than that described in §C.3.2, because this optic illusion occurs on where retinal eccentricity ratio is large. The filtered image is shown in Fig.C.7(b). Fig.C.8 shows three dimensional views of the gradients of Fig.C.7(a) and (b). A basin of the brightness appears at the crossroad. This means that our filters can approximate the sensory properties of human visual system.

### **C.4.3 Direction Boards**

One of the most accessible exhibited objects is direction boards or traffic signs. We simulate visual appearances of a direction board. We assumed that (1) a direction



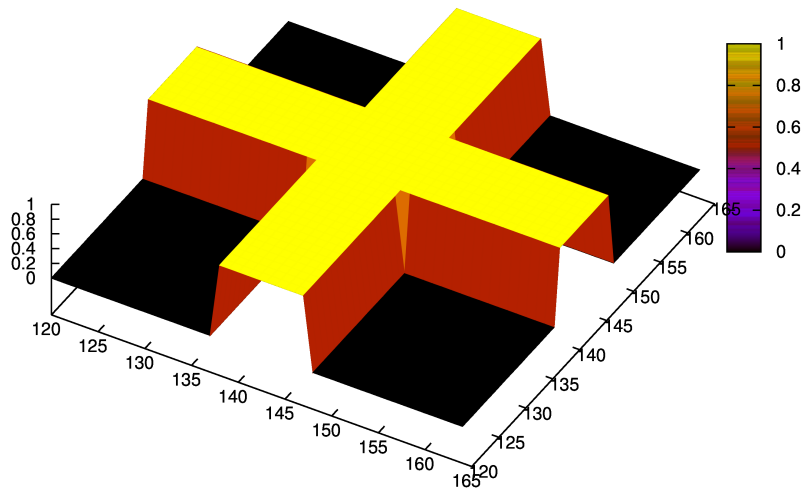
☒ C.7: An approximation result of Hermann grid. (a) An original image, (b) Lateral inhibition filtering applied image

board is 2.2 *meters* height and 2.8 *meters* width, (2) distance of sight is 30 *meters* and 100 *meters* away from the board, and (3) eyesight of viewers is 20/20, 20/30, 20/60. We apply our filters to the board image, and generate the images as shown in Fig.C.9. These simulation results verify that our filters can generate appropriate blurred images corresponding to eyesight, and visual angle adjustment including visual contrast due to lateral inhibition phenomena.

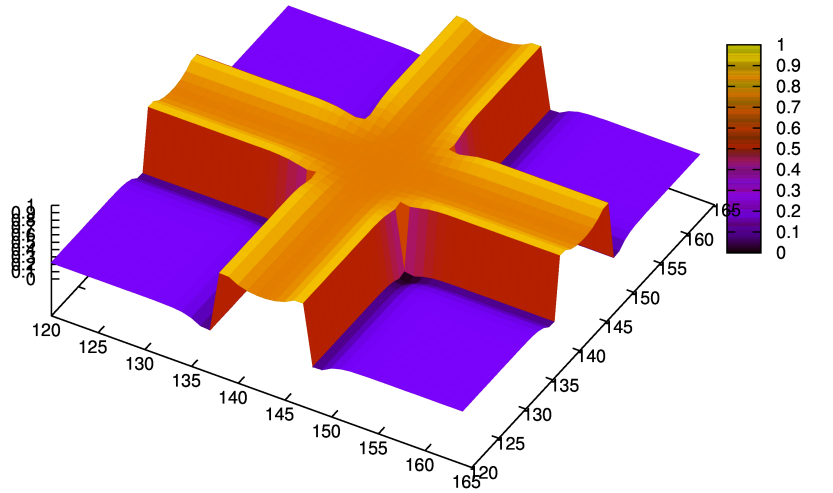
## C.5 Concluding Remarks

In this paper, we proposed a visual simulation method of viewers' eyesight based on image filtering approach. Considering the properties of human visual system, we measured and found several appropriate parameters for our filters experimentally, and confirmed their validity.

- We verified our filters can simulate arbitrary eyesight by the experiments on Snellen charts which commonly utilize for static vision test. Our experimental result showed that the simulated eyesight by our filters and the eyesight of the



(a)



(b)

☒ C.8: Three-dimensional views of gradient. (a) Original gradient; (b) Filtered gradient



characters of Snellen chart which test viewers' eyesight are almost equal from the point of view of characters recognition capability.

- Our method succeeded in simulating one of the most famous optic illusions, Hermann grid illusion, by applying our filters considering the lateral inhibition phenomenon.
- We simulated visual appearance of direction boards were at 30 *meters* and 100 *meters* away from the board, and viewers' eyesight varied from 20/20, 20/30 to 20/60. Simulated appearance of the direction board also satisfied that visual angle adjustment as well as blurred images corresponding to eyesight.

In this paper, we use only grayscale image to measure several parameters. However, sensitivities of human visual system are depending on wavelength of light. For more exact simulation, we should consider such sensitivities. This is the future issue.

simulated eyesight	Distance of sight	
	30 meters	100 meters
20/20		
20/30		
20/60		

図 C.9: Simulation Results

## 付録D 研究業績一覧

### D.1 査読付き論文 ( Journal Papers )

- [JP-1] 金澤功尚, 田邊竜馬, 森谷友昭, 高橋時市郎: “オブジェクトの形状を考慮した錆によるエイジング画像シミュレーション”, 画像電子学会誌, Vol.46, No.4, pp.547-558, (2017)
- [JP-2] Katsuhisa Kanazawa, Yuma Sakato, Tokiichiro Takahashi: “Pencil Tracing Mirage Fast Generation Method of Mirage based on Paraxial Approximation Theory”, ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.1, No.4, pp.307-316, (2013)
- [JP-3] Katsuhisa Kanazawa, Yasuko Nakano, Tomoaki Moriya, Tokiichiro Takahashi: “Visual Appearance Simulation Method for Exhibited Objects Considering Viewer’s Eyesight and Lateral Inhibition”, 画像電子学会誌, Vol.40, No.1, pp.151-158 (2011)

### D.2 国際会議 ( International Conferences )

いずれも査読有り

- [IC-1] Katsuhisa Kanazawa, Ryoma Tanabe, Tomoaki Moriya, Tokiichiro Takahashi: “Rust Aging Simulation Considering Object’s Geometries”, ACM SIGGRAPH 2015 Posters, Los Angeles, USA (2015)

- [IC-2] Katsuhisa Kanazawa, Tomoaki Moriya, Tokiitiro Takahashi: “Video-based Mirage for Extended Pencil Tracing”, 2015 Joint Conference of IFMIA and IWAIT, Tainan, Taiwan (2015)
- [IC-3] Katsuhisa Kanazawa, Yuma Sakato, Tokiichiro Takahashi: “Pencil Tracing Mirage: Principle and its Evaluation”, ACM SIGGRAPH 2013 Technical Talks, Anaheim, USA (2013)
- [IC-4] Katsuhisa Kanazawa, Yuma Sakato, Tokiichiro Takahashi: “Pencil Tracing Mirage: Principle and its Evaluation”, ACM SIGGRAPH 2013 Technical Posters, Anaheim, USA (2013)
- [IC-5] Katsuhisa Kanazawa, Yuma Sakato, Tokiichiro Takahashi: “Pencil Tracing Mirage Fast Generation Method of Mirage based on Paraxial Approximation Theory “, International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2013), Nagoya, Japan (2013)
- [IC-6] Katsuhisa Kanazawa, Takafumi Arai, Tomoaki Moriya, Tokiikichiro Takahashi: “A Walking Motion Morphing Method Based on Statistical Data of the Elderly”, ACM SIGGRAPH 2011 Technical Posters, Vancouver, Canada (2011)
- [IC-7] Katsuhisa Kanazawa, Kazushi Urabe, Tokiichiro Takahashi: “An Image Query-based Approach for Urban Modeling”, ACM SIGGRAPH ASIA 2010 Technical Sketches, Seoul, Korea (2010)
- [IC-8] Katsuhisa Kanazawa, Yasuko Nakano, Tomoaki Moriya, Tokiichiro Takahashi: “A Visual Model for Display Boards Considering Eyesight and Lateral Inhibition”, IEEEJ Image Electronics and Visual Computing Workshop (IEVC 2010), Nice, France (2010)

## D.3 国内会議 ( Domestic Conferences )

### 研究会

- [DC-1] 金澤功尚, 高橋時市郎, 田中明通, 森田哲之, 内山 匡: “PC 操作情報を用いたウェブ行動履歴表示 UI の開発”, 電子情報通信学会第 11 回ウェブインテリジェンスとインタラクション研究会 (2008)
- [DC-2] 金澤功尚, 森田哲之, 田中明通, 加藤泰久, 高橋時市郎: “テキストと操作情報を利用した Web 閲覧履歴のクラスタ解析の検討,” 電子情報通信学会第 8 回ウェブインテリジェンスとインタラクション研究会 (2007)

### 筆頭著者

- [DC-3] 金澤功尚, 森田哲之, 田中明通, 加藤泰久, 高橋時市郎: “操作情報を利用したウェブ閲覧履歴表示 UI の提案”, FIT2007 (第 6 回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, J-011 (2007)
- [DC-4] 金澤功尚, 森田哲之, 田中明通, 加藤泰久, 高橋時市郎: “PC 内の操作履歴を用いた Web 閲覧行動の分析”, FIT2006 (第 5 回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, D-018 (2006)

### 共著

- [DC-5] 細井雄介, 金澤功尚, 森谷友昭, 高橋時市郎: “都市景観再現のための効率的なテクスチャ検索法”, 映像情報メディア学会&画像電子学会 映像表現フォーラム 2011, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.35, No.14, pp.41-44 (2011)
- [DC-6] 金谷潤一, 金澤功尚, 細井雄介, 森谷友昭, 高橋時市郎: “仮想都市景観構築のための 3 次元マップ作製ツールの開発”, FIT2010 (第 9 回情報科学

技術フォーラム) 講演論文集, I-045 (2010)

- [DC-7] 浦辺一志, 金澤功尚, 森谷友昭, 高橋時市郎: “ビル群画像からの類似した街並みのモデリング法”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2010 (2010)
- [DC-8] 中野泰子, 金澤功尚, 高橋時市郎: “視力と側抑制効果を考慮した展示物の見え方のモデル化”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2009 (2009)
- [DC-9] 浦辺一志, 森谷友昭, 金澤功尚, 高橋時市郎: “スケッチ入力によりカメラ制御できる絵コンテ作成システム”, FIT2008 (第7回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, I-083 (2008)
- [DC-10] 大坂章, 金澤功尚, 高橋時市郎: “照明環境変化にロバストな講義自動撮影システムの構築”, 2008年電子情報通信学会総合大会 (2008)
- [DC-11] 浦辺一志, 金澤功尚, 高橋時市郎: “簡易3DCGアニメーション制作システムの開発”, 平成19年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会 講演論文集, D-12-236(2008)
- [DC-12] 中野泰子, 金澤功尚, 高橋時市郎: “視力と視角に基づく展示物の見え方のシミュレーション”, 2008年映像情報メディア学会冬季大会 (2007)
- [DC-13] 勝村大, 阿部祥子, 金澤功尚, 谷村知洋, 田口博之, 高橋時市郎: “ペリフェラル特徴とフレーム間差分を併用した布地ビデオテクスチャ生成の高速化,” 2007年電子情報通信学会総合大会 (2007)
- [DC-14] 阿部祥子, 勝村大, 金澤功尚, 谷村知洋, 田口博之, 高橋時市郎: “フレーム間差分距離を用いた布地ビデオテクスチャ生成,” 2007年電子情報通信学会総合大会 (2007)