

2022年度 卒業論文

チューリングパターンを利用した  
充填表現に関する研究

指導教員：渡辺 大地 教授

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト  
学籍番号 M0119325  
渡辺 充

2023年2月

2022年度 卒業論文概要

論文題目

チューリングパターンを利用した  
充填表現に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0119325

氏名

渡辺 充

指導  
教員

渡辺 大地 教授

キーワード

充填、チューリングパターン、Gray-Scott モデル、  
パラメータ、マーキング

映画やゲームなどの創作物において、ストーリーやシステムなどにおける重要な要素の演出にて物体や模様  
の充填表現を活用した事例が存在する。攻撃や移動を封じるとい  
う演出意図の強調や重要ステータスの提示など、充填表現は視覚  
を通じて、ユーザーに対するより明確な情報伝達が可能である。

充填表現の代表格としては、ターミネーター2のT-1000が行った液体金属の充填による銃創の自己修復が存在する。この表現に使用されたモーフィング手法は、穴が開いた様子の画像を変形することで表現を行っている。しかし、穴単体を基準とした処理では、複数の穴が重なったまま充填で塞がる表現に対して、基本処理とは別に干渉への対応処理が必要となる。この問題の解決策としては、穴そのものではなく穴の存在する座標を基準とする処理機構が有効である。

本研究では、互いに干渉する複数の穴への処理を含めた多様な創作表現への適用を目的として、より精密な充填表現を可能とする手法を提案する。

提案手法では、チューリングパターンの一種であるGray-Scottモデルを基準とした模様生成システムに幾つかの追加処理を実装している。モデルの特徴と追加処理による細部調整を活用することで、同時に存在する複数の穴に対して異なる充填表現を実施することに成功した。また、座標単位で計算処理を実行することで、パラメータ値の変更とマーキング実施座標の設定という単純な操作のみで細部の変遷を指定することも可能になった。

# 目次

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 第1章   | はじめに               | 1  |
| 1.1   | 研究背景               | 1  |
| 1.2   | 論文構成               | 3  |
| 第2章   | チューリングパターンについて     | 4  |
| 第3章   | 提案手法               | 7  |
| 3.1   | マーキングについて          | 8  |
| 3.2   | 使用するシステムについて       | 9  |
| 3.2.1 | 模様操作処理             | 10 |
| 3.2.2 | 障壁設置処理             | 10 |
| 3.2.3 | マーキング処理            | 11 |
| 3.2.4 | パラメータ値変更処理         | 12 |
| 3.3   | 提案手法に基づいたシステムの操作手順 | 14 |
| 3.3.1 | 無地模様の生成            | 14 |
| 3.3.2 | 穴の作成とマーキングナンバーの変更  | 15 |
| 第4章   | 手法の実証と考察           | 16 |
| 4.1   | マーキング無しの穴          | 17 |
| 4.2   | 消滅寄りパラメータ値の穴       | 17 |
| 4.3   | 比較的緩やかな拡散パラメータ値の穴  | 19 |
| 4.4   | 粒模様パラメータ値の穴        | 20 |
| 4.5   | 線模様パラメータ値の穴        | 21 |
| 4.6   | 結果総括と考察            | 23 |
| 第5章   | まとめ                | 25 |
|       | 謝辞                 | 27 |
|       | 参考文献               | 28 |

# 目次

|      |                                     |    |
|------|-------------------------------------|----|
| 2.1  | 粒形状の模様                              | 6  |
| 2.2  | 線形状の模様                              | 6  |
| 2.3  | 塊形状の模様                              | 6  |
| 3.1  | Gray-Scott モデルを用いた研究用プログラムのインターフェース | 9  |
| 3.2  | 拡散した線模様                             | 10 |
| 3.3  | 中央部分を削除した後の線模様                      | 10 |
| 3.4  | 左下にもみ模様が存在する様子                      | 11 |
| 3.5  | 障壁を迂回して拡散する模様の様子                    | 11 |
| 3.6  | 粒模様の拡散経路を可視化した様子                    | 12 |
| 3.7  | 線模様のみが拡散する様子                        | 13 |
| 3.8  | 線模様と粒模様が並存する様子                      | 13 |
| 3.9  | 拡散前の無地模様                            | 14 |
| 3.10 | 拡散中の無地模様                            | 14 |
| 3.11 | 拡散後の無地模様                            | 14 |
| 4.1  | 模様を一部消去した様子                         | 17 |
| 4.2  | 無地模様が拡散する様子                         | 17 |
| 4.3  | 充填完了直前の様子                           | 17 |
| 4.4  | 2種類の穴を2つずつ作成した様子                    | 18 |
| 4.5  | マーキングの無い穴2つのみ縮小する様子                 | 18 |
| 4.6  | イエローマーキングを施した大きな穴の様子                | 19 |
| 4.7  | イエローマーキングの一部を消去した後の様子               | 19 |
| 4.8  | シアンマーキングを施した2つの穴の様子                 | 20 |
| 4.9  | 無地模様の生成から時間が経過した様子                  | 20 |
| 4.10 | ブルーマーキングを施した穴の様子                    | 21 |
| 4.11 | ブルーマーキングの一部を拡張した後の様子                | 21 |
| 4.12 | マゼンタマーキングを施した穴の様子                   | 22 |
| 4.13 | マゼンタマーキングの一部を拡張した後の様子               | 22 |
| 4.14 | マゼンタマーキングの一部を拡張した後の様子               | 23 |

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景

映画やゲームなどの創作物において、物体や模様を充填による表現手法を用いた事例は多数存在する。該当する事例としては、均一な質感の素材を以て何かしらの穴を塞ぐ表現が多い。ターミネーター 2[1] では、構成物質が液体金属である敵アンドロイド T-1000 が、ストーリー序盤の時点で液体金属を充填する自己修復によって銃創を塞いだ。この演出は観客に対して、未知の存在への不気味な印象や無敵な敵役への絶望感を与える働きを果たした。進撃の巨人 [2] では主人公が岩石で壁の穴を塞ぐことで、壁外の巨人による人間の生活区域への侵攻を断ち切った。この窮地を切り返す演出は、それまで絶望的であったストーリーの転換点として読者がこれ以降の展開を期待する働きを果たした。また、数種類の模様を充填する表現も存在する。鋼の錬金術師 FULLMETAL ALCHEMIST[3] では、影に依存する性質を持つキャラクター「プライド」の表現として、各場面の影になっている場所に模様を高速で充填する表現が存在する。鋭い目と口を想起させる模様が影を一瞬で埋め尽くす様子は、視聴者の恐怖心と警戒を強める働きを果たした。汎用的な表現としては、様々なゲームにおけるステータスの提示手法としてゲージやメーター内部を対象とした充填表現が普及している。GUILTY GEAR -STRIVE-[4] のバーストゲージや東方緋想天 [5] の霊力ゲージなど、特殊アクションを実行するための蓄積値を可視化する手段として長方形や数珠状のゲージをゲーム展開に応じて充填する事例は多数存在する。充填とは真逆の手法にはなるが、最初から充填済みのゲージを用意してゲーム展開に応じて充填箇所の面積を減らす表現は、ジャンルを問わず数多くのゲーム [6][7] にて体力制や時間制ルールの可視化手段として

台頭している。これらの事例のように充填箇所のビジュアルが大幅に変化することから、創作における充填表現には創作表現の意図が視覚を以て明確に伝わる利点が存在する。そのため、表現意図がより明確に伝わる繊細な充填表現が可能となる手法の提案は、創作物の制作へさらなる発展を引き起こすと考えた。

穴を塞ぐ表現の中で有名な手法として、ターミネーター 2 の T-1000 に関する表現手段にモーフィングを用いた手法 [8] が存在する。ターミネーター 2 で使用されたモーフィング手法は Industrial Light & Magic 社が担当しており、同社が視覚効果制作を担当した映画 Willow[9] は世界で初めてモーフィングを使用した映画 [10] となった。

また、一定範囲内を充填する過程を持つ手法として、バブルメッシュ法 [11][12] が存在する。この手法は本来、不特定形状の二次元領域を大量の三角形や四角形で分割するために使用するものである。その過程においてより適切な分割を行うため、分割の基準点が範囲内にて均等な分布となるように調整する必要がある。バブルメッシュ法では、基準点が任意の半径を持つ円の中心であると考えられる。基準点同士の距離が半径 2 つの合計値より長い場合は引力を、短い場合は斥力を基準点に与える。この処理を繰り返すことで、各基準点は最終的に近隣の基準点と一定間隔の距離を保つ。これにより、大量の円形、そしてその中心に存在する基準点が指定範囲内を均等に充填する。

本研究の目的は、多様な創作表現への適用を可能とする充填表現の実現である。創作物の制作過程で検討する表現の中には、直前に開いた穴を充填している最中に新たな穴が開く場合など、穴を基準として充填処理を行うには不都合な表現が存在する。穴を基準とした処理であるモーフィング手法では使用する穴の画像を事前に用意するため、複数の穴が干渉するような表現へ適用する際には基本処理とは別に干渉に対応する処理を必要とする。また、バブルメッシュ法では基準点同士の距離のみを基準に充填処理を遂行するため、複雑な充填過程の表現では細部の調整に向きである。そこで、穴そのものや充填に用いる物ではなく、穴の存在する座標を基準として処理を行う方針で検討を行った。その結果、穴を含む模様を生成することが可能かつ各座標の変化に

対する適応が可能という理由から、チューリングパターン [13] に着目した。その結果、チューリングパターン自体が保有する特徴と人為的な編集操作を合わせることで、既存の穴の位置や状態からの影響を考慮する必要が無い安定した充填表現の手法を実現した。この手法では、パラメータ値の設定と座標の指定という 2 種類の操作を行うことで、充填の過程と結果を細かく編集することが可能である。

## 1.2 論文構成

本論文は、全 5 章にて構成する。2 章にてチューリングパターンについて述べ、3 章では提案手法について述べる。また 4 章では評価と分析について述べ、5 章にてまとめを述べる。

## 第 2 章

# チューリングパターンについて

チューリングパターン [14] とは、反応拡散方程式において式内の反応項や拡散係数等が一定の条件を満たす際、自発的に発生する模様である。その特徴として、山内ら [15] はパラメータや反応項次第で最終的な模様に変化が発生することを指摘している。この特徴により、1 つの連立方程式から構造の異なる模様を多数生成することが可能となる。

チューリングパターンの由来や特徴に関連する重要な研究として、近藤ら [16] はタテジマキンチャクダイの体表模様をチューリングパターン 1 つで個体差含めて再現し、予測が可能だと提示している。

本論文で提案する手法では、チューリングパターンの一種である Gray-Scott モデル [17][18] を 2 次元空間上で使用する。Gray-Scott モデルは、2 種類の一般的な化学種  $U$ ,  $V$  による反応である式 (2.1) と式 (2.2) を前提としている。 $P$  は、 $U$  や  $V$  と反応を起こすことの無い生成物である。



この一連の反応を数理モデル化すると、式 (2.3) と式 (2.4) によって成り立つ反応拡散型の連立方程式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D_u \nabla^2 u - uv^2 + F(1 - u), \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = D_v \nabla^2 v + uv^2 - (F + k)v. \quad (2.4)$$

$u$  と  $v$  は、2 次元空間上の任意の座標  $(x, y)$  における時刻  $t$  時点での  $U$  と  $V$  の濃度を示している。よって、 $u = u(t, x, y)$  かつ  $v = v(t, x, y)$  である。 $\frac{\partial u}{\partial t}$  と  $\frac{\partial v}{\partial t}$  は、 $u$  と  $v$  それぞれの  $t$  にお

る増減を表す。 $D_u$  と  $D_v$  は拡散係数であり、 $U$  と  $V$  が拡散する速度を示す。 $\nabla^2 u$  と  $\nabla^2 v$  は  $u$  と  $v$  それぞれのラプラシアンであり、 $U$  と  $V$  が隣接座標へと拡散する現象を表す。 $F$  と  $k$  はパラメータである。式 (2.3) と式 (2.4) の第 2 項にある  $uv^2$  は、式 (2.1) を示す。また、式 (2.4) の第 3 項にある  $-(F+k)v$  は、式 (2.2) を示す。式 (2.4) の第 3 項にある  $F(1-u)$  は、反応において減少する一方である  $U$  を補充することを示す。

2次元空間上の全ての座標で個別に濃度  $u, v$  が存在し、隣接する座標への  $u, v$  それぞれの拡散や各座標での  $u$  と  $v$  の反応が発生する。これらの作用によって範囲毎に濃度の偏りが発生して、各座標の  $u, v$  を可視化した際にその偏りが模様として見えるようになる。

このモデルで生成可能な模様には、時間経過に伴い模様の構造が変遷するという特徴が存在する。一定時間が経過する度に反応拡散方程式を用いて再計算するため、時間が経過する際に濃度の拡散と反応が何度も発生するのである。小規模な変遷では、模様の各所にて細部の構造変化が発生する。しかし、大規模な変遷においては元の模様とはかけ離れた様相への変化が発生する。これらの変遷が発生する条件として、以下の要素が存在する。

- 反応拡散方程式のパラメータ値
- 模様の密集度

反応拡散方程式のパラメータ値は、模様の拡散と消滅に影響を及ぼす。Gray-Scott モデルを適用したチューリングパターンは時間経過に伴い、縞模様や水玉模様を始めとした多種多様な模様に変遷する。パラメータ値には、模様が備える構造上の特徴を確定する作用が存在する。これにより、模様の変遷中におけるパラメータ値を固定すると、構造が不自然に乱れた場合でもそれ以前と同様の構造特徴を満たす模様への変遷が再び発生する。このパラメータ値を任意の値に設定することで、想定通りの構造かつ細部が異なる模様を無数に生成することが可能となる。

模様の密集度は、任意の地点における一定範囲内の面積に対する模様面積の割合を指す。この密集度が極端に高いと、過剰な密集状態を解消する作用として模様の一部が消失する。これと真

逆の作用として、模様密集度が極端に低い場合は近隣の模様が分裂し、拡散する。模様の拡散や消失を司る密集度の許容範囲は、パラメータ値によって変化する。

図 2.1 と図 2.2、図 2.3 は、Gray-Scott モデルを適用してそれぞれパラメータ値を変更した 3 種類のチューリングパターンである。図 2.1 では粒模様、図 2.2 では線模様、図 2.3 では模様の塊の集合体が全体に拡散している。

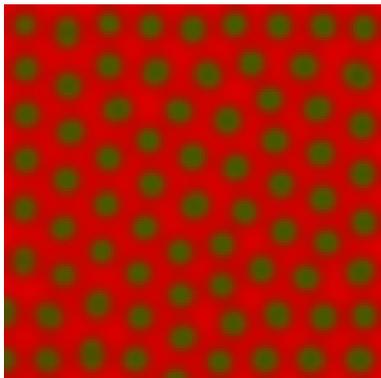


図 2.1 粒形状の模様

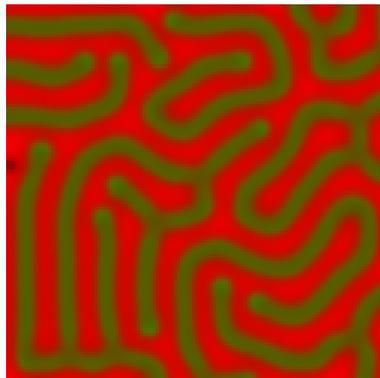


図 2.2 線形状の模様

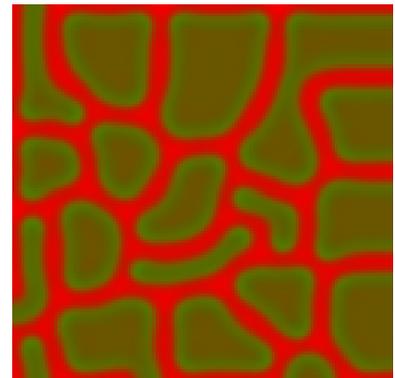


図 2.3 塊形状の模様

パラメータ値の違いが密集度の許容範囲に直結するため、模様の変遷にて以下の構造特徴が存在する。

- 許容範囲が狭く、一定以上の面積維持が不可能な図 2.1
- 模様同士に隙間が存在することにより、細長い線模様の拡散のみ可能な図 2.2
- 許容範囲が広く、一定の面積以下であれば塊の維持が可能な図 2.3

なお、模様の構成が可能なパラメータ値という条件下では、大規模な変遷を経て模様全体の密集度が許容範囲内に収まる事例が存在する。このような事例では、拡散や消失の発生条件を満たさないことから、安定状態に移行して小規模な変遷のみ発生する。また、パラメータ値自体を極端な値で固定すると、模様の拡散か消失の片方が際限なく発生する。

# 第 3 章

## 提案手法

当手法では、模様の変遷過程を編集することで各種創作物に必要な充填表現を実現する。Gray-Scott モデルを用いたチューリングパターンを充填する場合は、チューリングパターンの変遷が模様の変遷過程そのものとなる。編集前の操作も含めた手順は、以下の通りである。

1. 充填表現を適用したい動画や静止画にて、適用範囲を指定する
2. 充填に用いるチューリングパターンを、指定範囲内に生成する
3. チューリングパターンの変遷を、本来の動作から変更する

変遷を変更する具体的な手段として、反応拡散方程式のパラメータ値を変更することで新たな変遷を誘発する。シマウマ柄やキリン柄などといった模様構造の変化は、パラメータの値次第で拡散や反応の傾向が変容することに伴って発生する。そのため、模様の変遷の最中にある時点でパラメータ値を変更すると、それまでの物とは違う構造へ変化するような新たな変遷を発現するようになる。

しかし、全体のパラメータ値を変更するだけでは、複数種類の模様生成を使い分けるような複雑な充填表現は不可能である。そこで、濃度  $u, v$  と同じように、2次元空間上の全ての座標にて個別にパラメータ  $F, k$  を設定する。Gray-Scott モデルの反応拡散方程式で  $F$  と  $k$  が影響するのは、隣接する座標に影響を与えない反応項の延長線上のみである。そのため、座標毎にパラメータ値が異なる場合でも、隣接する座標同士で処理を行う拡散項への直接的な影響は存在しない。これにより、座標毎に異なるパラメータ値を設定することで、模様の変遷を維持しながら複数種類の模様構造を同時に誘発することが可能となる。

### 3.1 マーキングについて

模様の変換中に一部座標のパラメータ値を変更することで、複雑な模様変換の実現が可能となる。しかし、通常は全ての座標で共通なパラメータ値 2 つを管理すれば良いが、座標毎に異なるパラメータ値を設定する場合は管理するパラメータ値の数が膨大となる。同じ模様構造を発現するために複数の座標で同じパラメータ値を設定することを考慮すると、実際に管理するパラメータ値の種類は一気に少なくなる。それでも、人間が各座標のパラメータ値を確認、変更することも考慮すると、パラメータ値の管理を容易にする何らかの手段が必要である。そこで、濃度  $u, v$  やパラメータ  $F, k$  とは別物であるマーキング用のナンバーを各座標に設定した上で、このナンバーと 2 種類のパラメータ値などを紐付けするという手段を採用する。マーキングという呼称は、座標毎に設定した紐付け用ナンバーを可視化した様子から命名した。

事前準備として、充填表現に必要な模様構造を誘発するパラメータ  $F, k$  値の組み合わせをあらかじめ把握した上で、マーキングナンバーと紐付ける。これにより、座標のマーキングナンバーのみ手動で変更した際に、そのナンバーに紐付けた 2 種類のパラメータ値がナンバーと連動するように自動で変化する。表 3.1 は、マーキングナンバーによる紐付けの一例を示した表である。表 3.1 を基準として紐付けすると、マーキングナンバーが 0 の場合はパラメータ  $F$  の値を 0.072、 $k$  の値を 0.059 で設定する。また、ナンバー 1 の場合は  $F$  の値を 0.067、 $k$  の値を 0.062 で更新する。

表 3.1 マーキングナンバーによる紐付けの一例

| ナンバー | パラメータ $F$ の値 | パラメータ $k$ の値 |
|------|--------------|--------------|
| 0    | 0.072        | 0.059        |
| 1    | 0.067        | 0.062        |
| 2    | 0.025        | 0.055        |
| 3    | 0.0265       | 0.0605       |
| ...  | ...          | ...          |

このマーキングという手段を用いる場合、各座標には濃度  $u, v$  とパラメータ  $F, k$ 、そしてマーキングナンバーで計 5 種類の変数が存在する。当手法における各変数の扱いは、以下の通りとなる。

1. 手法運用者が、マーキングナンバーを手動で変更する
2. パラメータ  $F, k$  の値は、マーキングと紐付けた値に自動で変化する
3. 濃度  $u, v$  の値は、変化後のパラメータ値を用いた計算で新しく算出する

マーキングに紐付ける形式でパラメータ値を設定して、新たなマーキングナンバーを設定する座標を指定する。この手順を踏むことで、創作物の制作に使用する充填表現を細部まで編集することが可能となる。

## 3.2 使用するシステムについて

本研究で使用するシステムとして、2次元直交座標にて Gray-Scott モデルを用いたチューリングパターン生成プログラム (以降 TP 充填システムと呼称する) を制作した。図 3.1 は、TP 充填システムのインターフェースの画像である。



図 3.1 Gray-Scott モデルを用いた研究用プログラムのインターフェース

このプログラムの実装には Processing[19] を使用した。なお、TP 充填システムには充填処理の拡充を目的とした追加処理を実装している。

### 3.2.1 模様操作処理

TP 充填システムには、模様の構成を手動で編集する事が可能な機能を実装している。図 3.2 と図 3.3 は、チューリングパターンの一例である。図 3.2 では全体に線模様が拡散しているが、模様操作を施した後の図 3.3 では中央部分に赤い空洞が存在する。

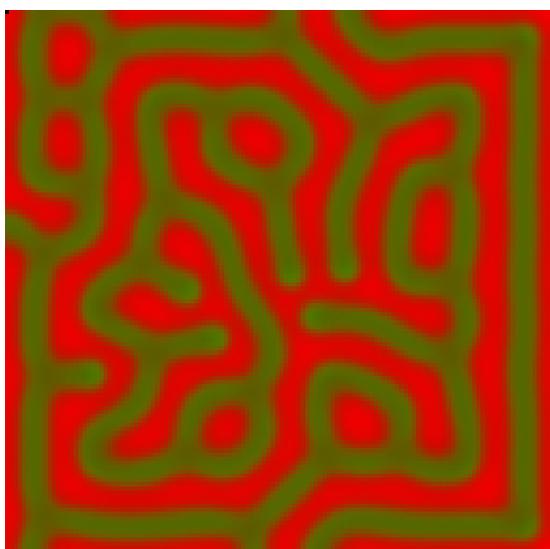


図 3.2 拡散した線模様

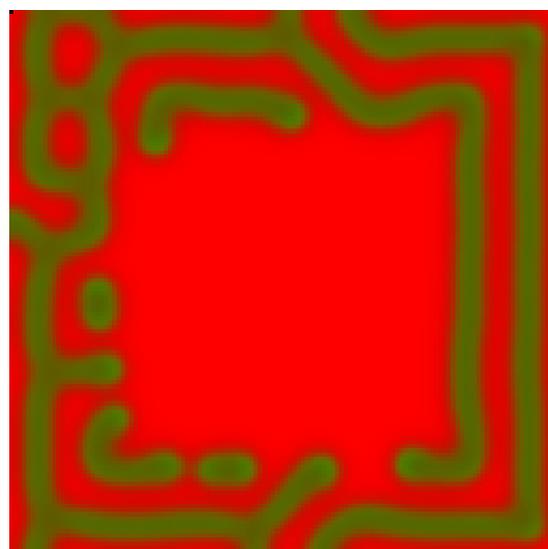


図 3.3 中央部分を削除した後の線模様

このような模様を削除する操作処理を用いることで、生成したチューリングパターンに穴を作成する。この操作により、銃創や破壊痕など創作表現における穴が開いた状態を用意することが可能となる。

### 3.2.2 障壁設置処理

TP 充填システムには、チューリングパターンが拡散不可能な障壁を設置する機能を実装している。図 3.4 と図 3.5 は、チューリングパターンの一例である。図 3.4 には拡散前の模様が左下に存在するが、それと同時に中央の左端から右側にかけて障壁が存在する。この障壁により、画像

上半分と下半分は中央右端を除いて隔離状態である。図 3.5 は図 3.4 の時間経過後の様子である。元は左下にのみ存在した模様が、障壁を迂回する形で中央右端まで辿り着き画像上半分に拡散しつつある様子が確認できる。



図 3.4 左下にのみ模様が存在する様子



図 3.5 障壁を迂回して拡散する模様の様子

TP 充填システムを適用しない箇所にこの障壁を設置することで、長方形よりも複雑な形状を持つ範囲内での TP 充填システムの適用が可能となる。また、模様の拡散中に後から障壁を設置することで、創作表現によって新たに拡散不可能となった範囲における模様拡散を強引に停止することが可能になる。

### 3.2.3 マーキング処理

TP 充填システムには、座標を基準としたマーキング機能を実装している。この機能は、各座標にマーキングナンバーを整数として保存する処理で構成した。チューリングパターンが存在する位置に自動でマーキングを実行すれば、模様の拡散経路を可視化することが可能となる。図 3.6 は、拡散経路を可視化したチューリングパターンの一例である。画像の左半分では模様の現状を、右半分ではマーキングの現状を可視化している。画像右半分の半透明なマーキングによって、粒模様が分裂を以て拡散することを可視化した。

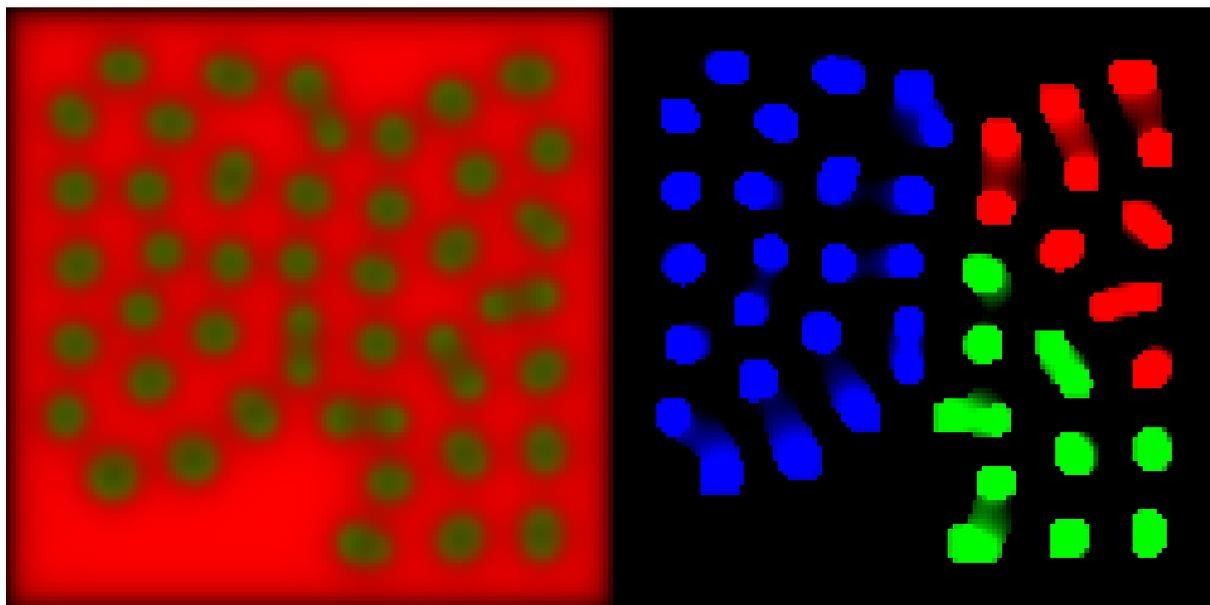


図 3.6 粒模様の拡散経路を可視化した様子

TP 充填システムでは、マーキングの手動変更と模様変遷に連動した自動変更の双方に対応している。

### 3.2.4 パラメータ値変更処理

TP 充填システムには、複数のパラメータ値を設定した上で任意のタイミングで適用する値を切り替える機能を実装している。図 3.7 と図 3.8 は、当機能を適用したチューリングパターンの一例である。これらの模様を生成した TP 充填システムでは、計算処理で使用するパラメータ値を各座標のマーキングナンバーに応じて変更している。図 3.7 の時点ではマーキングナンバーがデフォルトの 0 となっている。その結果、全ての座標のパラメータ値が同じ数値となっており、画像全体で線模様が発生している。図 3.8 は一部座標にマーキングを施した後、時間が経過した状態である。ブルーカラーのマーキングには、粒模様を誘発するパラメータ値を紐付けている。そんなマーキングを一部の座標に施した結果、該当する座標では線模様ではなく粒模様が発生している。

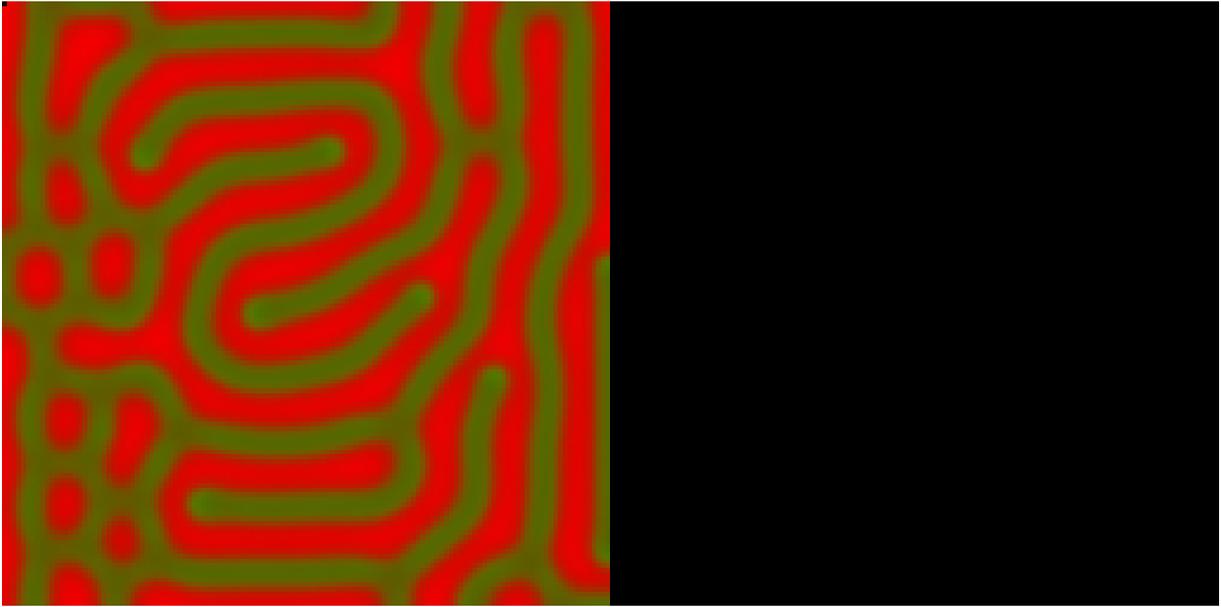


図 3.7 線模様のみが拡散する様子

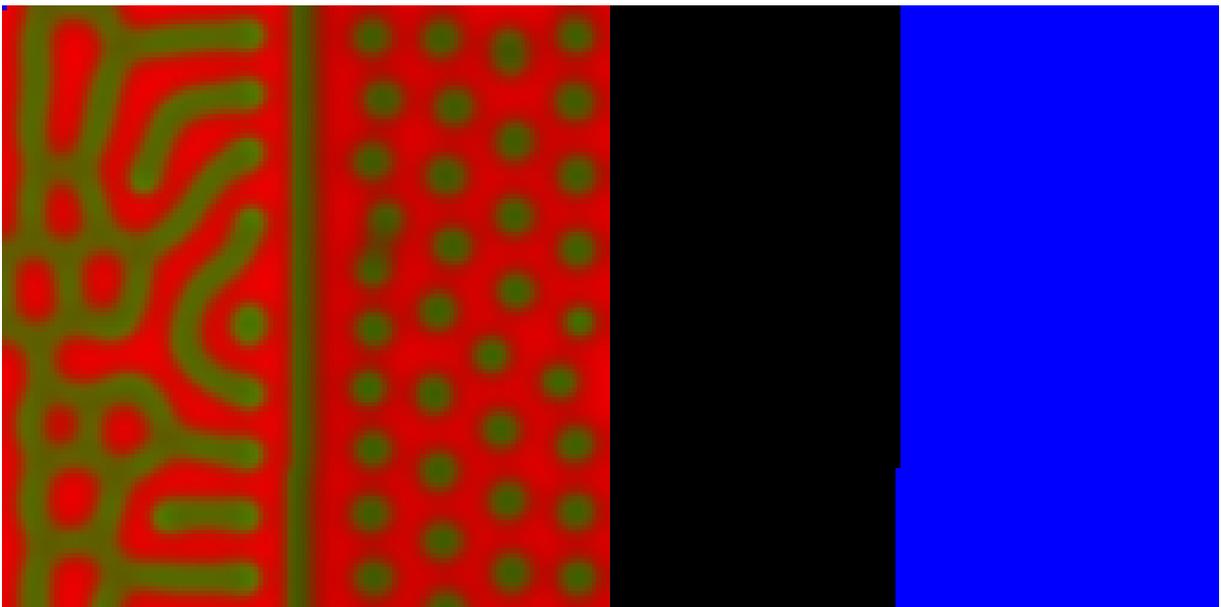


図 3.8 線模様と粒模様が並存する様子

このように、パラメータ値変更処理をマーキングと連動して適用することで、創作表現上で状態が変化した座標に新たなマーキングナンバーを設定して、設定前とは別種類の変遷を誘発することが可能となる。

### 3.3 提案手法に基づいたシステムの操作手順

最初は充填処理を行う範囲の準備段階として、無地のチューリングパターンを範囲全域に広げる。次に無地の模様を手動で穴を作成して、必要に応じて穴の存在する座標のマーキングナンバーを変更する。その後は充填表現に必要な編集を行いつつ、時間経過に伴う模様の変遷を確認する。

#### 3.3.1 無地模様の生成

TP 充填システムを実行開始する際に、初期パラメータ値を拡散寄りの極端な値で設定する。この状態でチューリングパターンが拡散することで、模様は障壁の影響を受けながら範囲全域に拡散する。拡散した模様が全域に到達して空白が存在しない状態を、無地の模様として扱う。図 3.9 と図 3.10、図 3.11 は、無地模様が拡散するチューリングパターンの一例である。図 3.9 を撮影した時点で TP 充填システムの実行を開始して、画面中央に小さな無地模様を配置した。そこから時間が経過した図 3.10 の時点では、障壁の存在しない方向へ模様の外周が広がっている。さらに時間が経過した図 3.11 の時点では、障壁で遮断した上部以外の全域に模様が拡散した。

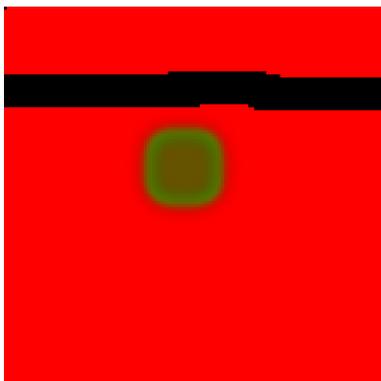


図 3.9 拡散前の無地模様



図 3.10 拡散中の無地模様



図 3.11 拡散後の無地模様

### 3.3.2 穴の作成とマーキングナンバーの変更

TP 充填システムの模様操作処理を用いて、前項にて用意した無地模様に穴を作成する。この穴の内部に模様が拡散する際の模様変遷を、充填表現として活用する。

また、無地模様の生成とは違う模様変遷を利用する場合は、目的の充填表現を再現するために必要なマーキングを随時設定する。システムの実行開始時に設定するだけでなく、指定した座標のマーキングナンバーを模様変遷の最中に変更することも可能となっている。

## 第 4 章

# 手法の実証と考察

表 4.1 は、マーキングナンバーとマーキング可視化時の色、パラメータ  $F, k$  それぞれの値の紐付けを示す表である。当手法が成立することを証明するために、表 4.1 に基づく紐付けによるマーキングを用意した。

表 4.1 システム実証用のマーキングナンバー紐付け表

| ナンバー | マーキングの色 | パラメータ $F$ の値 | パラメータ $k$ の値 |
|------|---------|--------------|--------------|
| 0    | ブラック    | 0.072        | 0.059        |
| 1    | イエロー    | 0.052        | 0.079        |
| 2    | シアン     | 0.072        | 0.060        |
| 3    | ブルー     | 0.0265       | 0.0605       |
| 4    | マゼンタ    | 0.067        | 0.062        |

これらのマーキングを使用して、システム実行開始時における各座標の初期設定を用意する。この実証では、以下のような初期設定を行った。これらの初期設定を行った TP 充填システムを、それぞれ実行する。

- 新たなマーキングナンバーを一切設定しない状態 (マーキングナンバー 0)
- 消滅寄りの極端なパラメータ値を紐付けたマーキング (ナンバー 1) を一部座標に設定
- ナンバー 0 より控え目に拡散するパラメータ値を紐付けたマーキング (ナンバー 2) を設定
- 粒模様を生成するパラメータ値を紐付けたマーキング (ナンバー 3) を設定
- 線模様を生成するパラメータ値を紐付けたマーキング (ナンバー 4) を設定

この実証では、システム上の模様変遷がパラメータ値による模様構造の傾向に沿うことを確認

する。これにより、当手法を適用することで、各種編集操作の意図に則った充填表現を誘発することが可能だと実証する。

## 4.1 マーキング無しの穴

図 4.1 と図 4.2、図 4.3 は、マーキング情報を追加していないパターンの実行結果である。マーキングナンバーは 0 のみを使用した。結果として、無地模様を作成した際の拡散とまったく同じ挙動で穴を充填した。図 4.1 を撮影した時点で、画面中央の大きな穴とその周囲の複数の小さな穴を作成した。そこから時間が経過した図 4.2 の時点では、大小を問わず穴が縮小している。大きな穴はこの時点でも半分程度の大きさを保っているが、小さな穴はその大半が周囲の無地模様の拡散により消失している。さらに時間が経過した図 4.3 の時点では、大きな穴と数個の小さな穴のみ消失直前の状態で存在している。この後、全ての穴が消失したため、操作範囲内の無地模様が穴作成前の状態に戻った。

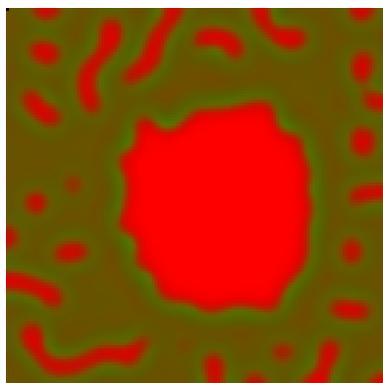


図 4.1 模様を一部消去した様子

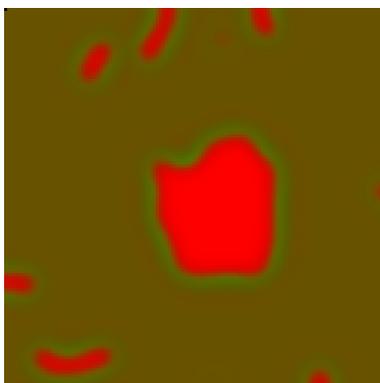


図 4.2 無地模様が拡散する様子



図 4.3 充填完了直前の様子

## 4.2 消滅寄りパラメータ値の穴

イエローマーキングを施した座標では、消滅寄りの極端なパラメータ値で計算処理を行う。マーキングナンバーは 0 と 1 を使用した。結果として、イエローマーキングを施した穴は、時間経過に伴い変化することは無かった。図 4.4 と図 4.5 は、イエローマーキングを使用したシステムの

実行結果である。図 4.4 を撮影した時点で、イエローマーキングの穴 2 つとマーキング無しの穴 2 つを作成した。そこから時間が経過した図 4.5 の時点では、マーキング無しの穴のみ縮小している。

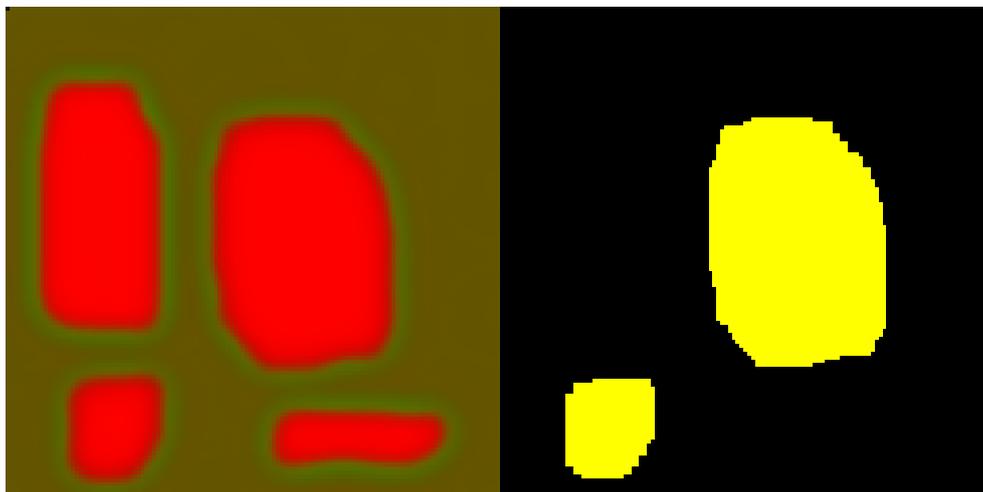


図 4.4 2種類の穴を2つずつ作成した様子

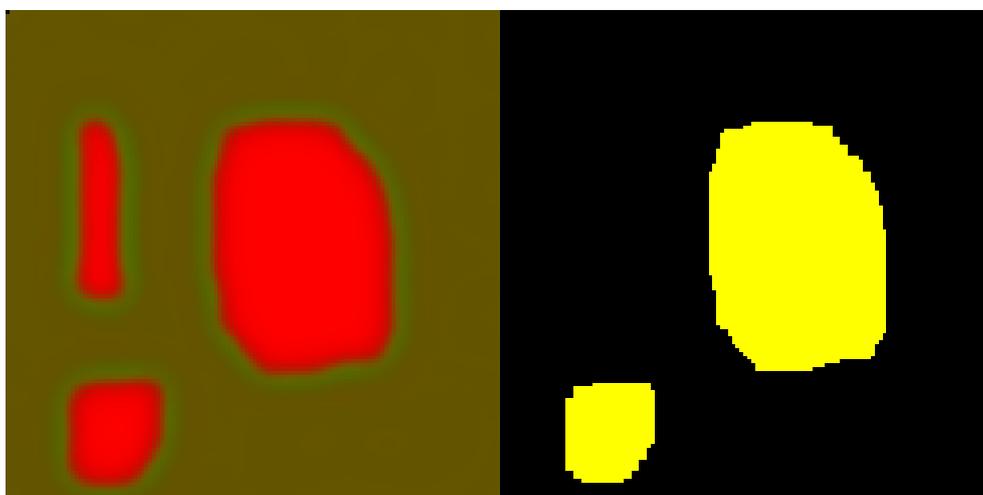


図 4.5 マーキングの無い穴2つのみ縮小する様子

また、図 4.6 と図 4.7 は、システム実行中にマーキングを消去する試みの実行結果である。図 4.6 を撮影した時点で、イエローマーキングの大きな穴を 1 つ作成した。その上で、イエローマーキングの一部を 3 箇所に分けて削除した。そこから時間が経過した図 4.7 の時点では、削除した箇所の特徴に応じて変遷の様子が変化した。削除範囲にイエローマーキングの外周が含まれた箇所

所では、マーキングが無くなった範囲の外周に無地模様が触れている為、該当範囲に無地模様が拡散して穴全体の一部を充填した。一方、削除範囲にイエローマーキングの外周が含まれなかった箇所では、無地模様の拡散経路が存在しない為、該当範囲の穴を充填することができなかった。

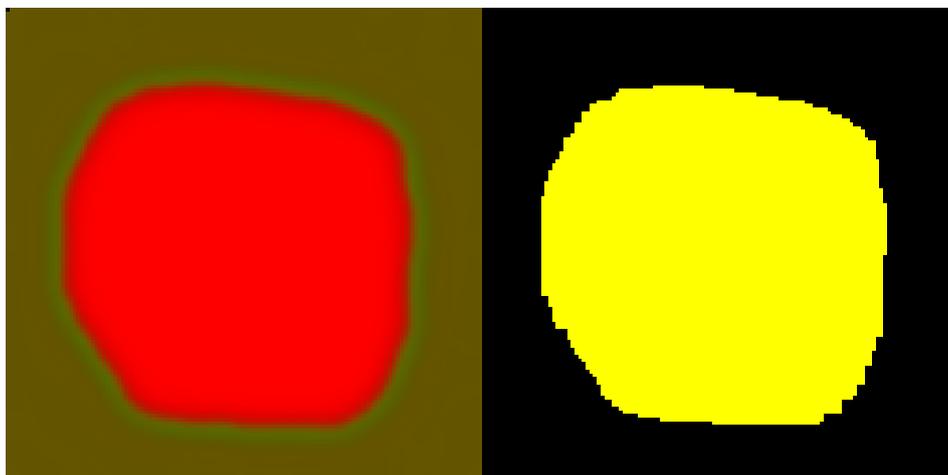


図 4.6 イエローマーキングを施した大きな穴の様子

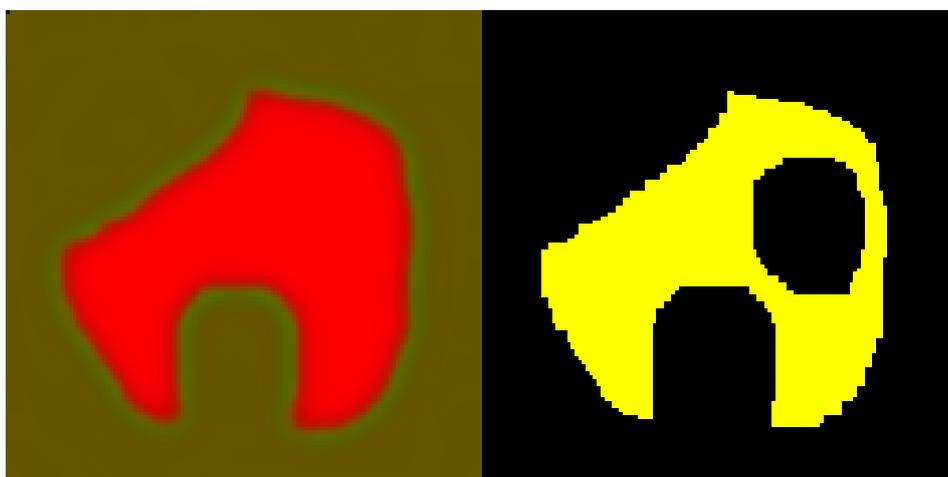


図 4.7 イエローマーキングの一部を消去した後の様子

### 4.3 比較的緩やかな拡散パラメータ値の穴

シアンマーキングを施した座標では、元の値より安定状態に近い極端なパラメータ値で計算処理を行う。マーキングナンバーは 0 と 2 を使用した。結果として、シアンマーキングを施した穴は、マーキングの無い穴と比べて充填速度が遅かった。図 4.8 と図 4.9 は、シアンマーキングを

使用したシステムの実行結果である。事前操作として、正方形の範囲を縦の障壁で分割した上で、分割した範囲の片側だけにシアンマーキングを施している。その後、図 4.8 を撮影した時点で、分割した 2 つの範囲両方に対して、上部に無地模様を生成した。そこから時間が経過した図 4.9 の時点では、マーキングの無い範囲の無地模様がシアンマーキングの範囲より速く拡散していた。

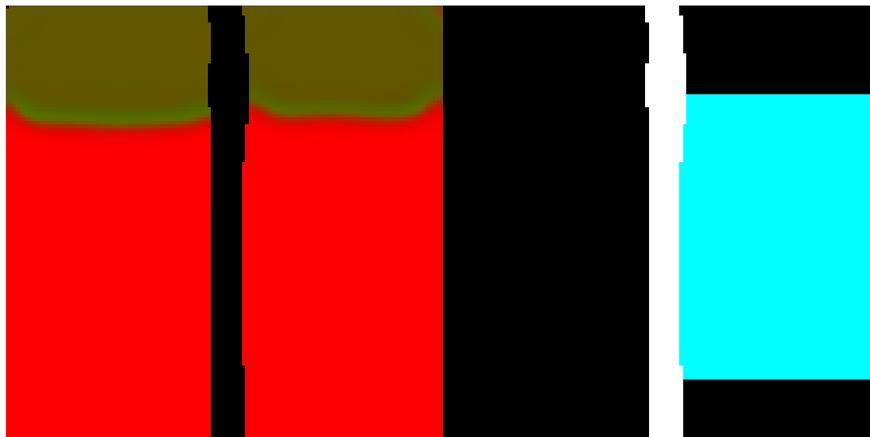


図 4.8 シアンマーキングを施した 2 つの穴の様子

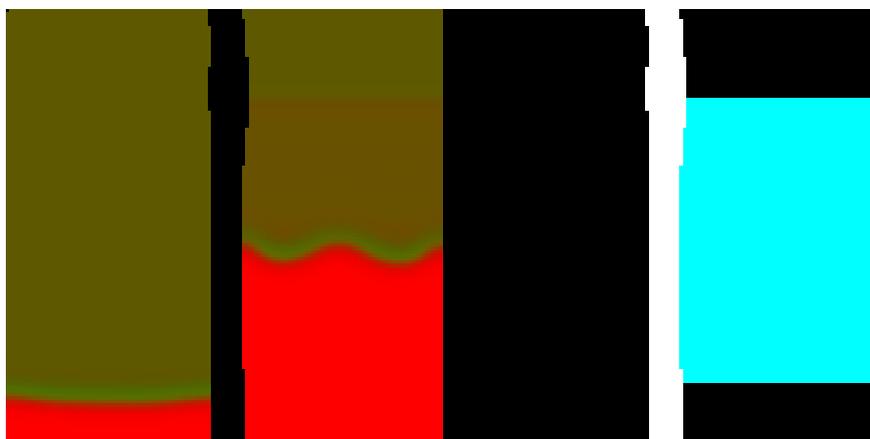


図 4.9 無地模様の生成から時間が経過した様子

#### 4.4 粒模様パラメータ値の穴

ブルーマーキングを施した座標では、粒模様を生成するパラメータ値で計算処理を行う。マーキングナンバーは 0 と 3 を使用した。図 4.10 と図 4.11 は、ブルーマーキングを使用したシステムの実行結果である。事前操作として、上部の大きな穴と下部の小さな穴 3 つを、ブルーマーキ

ングを施して生成した。図 4.10 を撮影した時点で、大きな穴の内部では粒模様が発生した。しかし、小さな穴の内部には粒模様が 1 つも発生しなかった。そこで、小さな穴 3 つの間に新たなブルーマーキングを施し、下部の小さな穴が大きな穴となる操作を行った。そこから時間が経過した図 4.11 の時点では、下部の穴でも内部で粒模様が発生した。

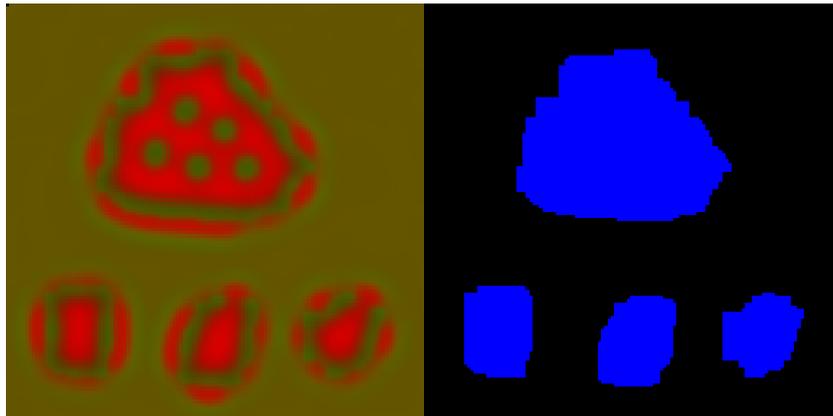


図 4.10 ブルーマーキングを施した穴の様子

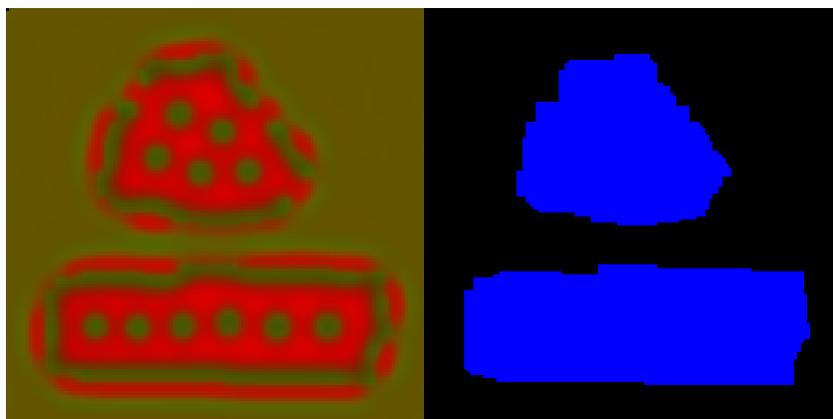


図 4.11 ブルーマーキングの一部を拡張した後の様子

## 4.5 線模様パラメータ値の穴

マゼンタマーキングを施した座標では、粒模様を生成するパラメータ値で計算処理を行う。マーキングナンバーは 0 と 4 を使用した。図 4.12 と図 4.13、図 4.14 は、マゼンタマーキングを使用したシステムの実行結果である。図 4.12 を撮影した時点で、中央にマゼンタマーキングを施した

大きな穴を生成した。そこから時間が経過した図 4.13 の時点では、無地模様と穴の境界線から線模様が発芽した。なお、穴を生成してから線模様が拡散を始めるまでには、かなりの時間を要した。さらに時間が経過した図 4.14 の時点では、穴の内部全体で線模様が拡散した。

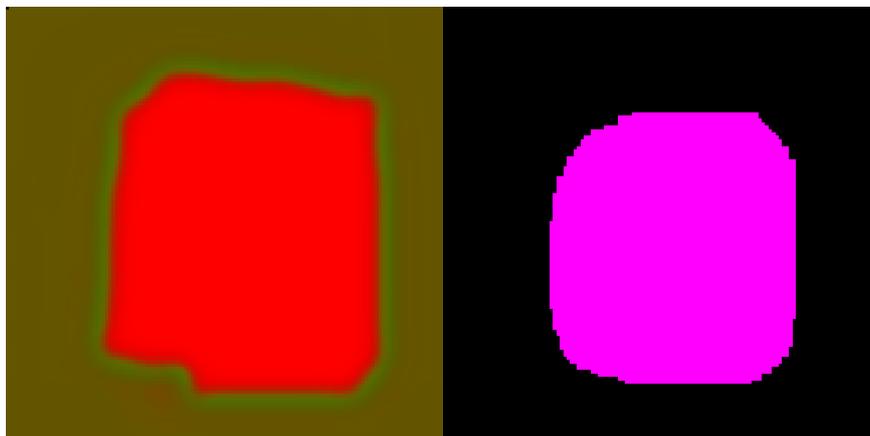


図 4.12 マゼンタマーキングを施した穴の様子

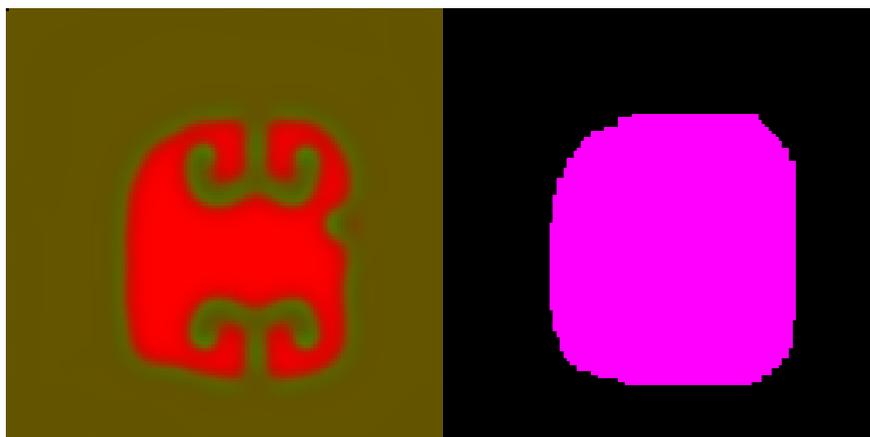


図 4.13 マゼンタマーキングの一部を拡張した後の様子

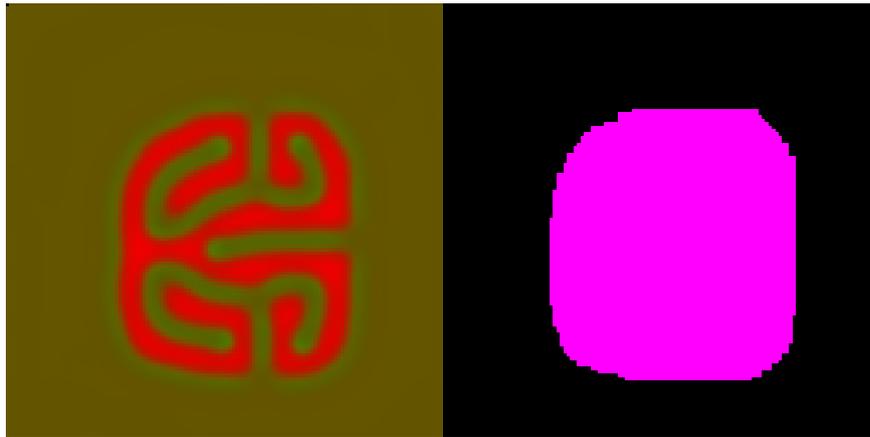


図 4.14 マゼンタマーキングの一部を拡張した後の様子

## 4.6 結果総括と考察

全体を通して、マーキングに関連付けたパラメータ値の特徴と実行結果の変遷が一致した。それと同時に、Gray-Scott モデルの密集度に関する特徴によって、一部の条件下ではパラメータ値に沿った変遷が発生しないという想定外の実行結果が存在した。その場合はマーキングの操作で模様を密集度を変更することで、想定通りの変遷を誘発することが可能であると判明した。

無地模様の充填処理では、穴を塞ぐ単純な模様変遷が発生した。この模様変遷は、損傷箇所の修復過程や沸騰中の熱湯の水面などの表現に活用可能である。修復中に新たな損傷が発生する場合や気泡が水面に絶え間無く穴を開ける場合など、既に穴が存在する箇所に新たな穴が発生する状況でも、不都合無く充填処理が可能である。

粒模様や線模様の充填処理では、チューリングパターンの特徴を活かした模様の充填に成功した。穴を塞ぐような充填表現と比べると使用用途が限定的だが、チューリングパターンの多様性を以て複雑な表現への局所的な活用が期待できる。

しかし、TP 充填システムの問題点として、チューリングパターンの変遷速度が遅いという事実が発覚した。この原因を確認したところ、各座標にて複数の計算処理を実行していることにより、システム全体の処理速度自体が遅いという事実が判明した。生成した模様変遷の録画映像を加速

するという手段により、変遷速度の遅さが創作表現への適用において問題となることは無い。しかし、本研究においてもシステムテスト単体に時間を長く確保する必要があったことから、創作表現の制作過程においてこの問題により悪影響が発生する可能性が存在する。

## 第 5 章

# まとめ

本研究では、チューリングパターンを用いた充填表現を実現する手法を提案した。チューリングパターンの模様生成作用に幾つかの追加機能を付与することで、TP 充填システムを制作した。そこで、システム本体と各種追加機能が想定通りの変遷を誘発することを確認するために、各機能をそれぞれ単体で適用する形式でシステムを実行した。その結果、設定したパラメータ値の特徴に沿った想定通りの変遷が、全ての機能において実現可能であることを確認した。

TP 充填システムをアニメーション生成システムとして使用することで、当手法で実現可能な充填の様子を創作表現にそのまま採用することが可能となる。現状のシステム単体では各種マーキングの単色表示しか対応していないが、模様変遷の録画映像にクロマキー合成 [20] を行うことで、数種類のマーキングに異なる映像や画像を適用するといった活用が可能だと考える。一例として銃創を自己修復する表現を考えると、穴の存在する箇所のマーキングに銃創越しに見える景色の映像を適用することが可能である。この際、化学種の濃度  $u, v$  を基準として無地模様と穴の境界部分をマーキングすることで、該当マーキングに銃創の側面画像を適用することも可能となる。

また、目的とする表現に合わせてパラメータ値やマーキングを設定することで、実在する景色における穴が塞がる様子を再現することも可能である。この用途で TP 充填システムを使用する理由として、経過時間や座標を基準とした細かい修正が容易という利点が存在する。

しかし、現状のシステムでは変遷処理の遅さに課題が存在する。制作期限が定まった創作活動が多数存在する以上、システムの処理速度改善は必須である。

システムの利便性を向上するためには、模様の特徴を基準としたパラメータ値のプリセットも必要となる。チューリングパターンや Gray-Scott モデルを知らないユーザーがシステムを使用

することを考慮すると、生成可能な模様と必要なパラメータ値をセットで表示する機能や二次元グラフ上でパラメータを操作する機能が望ましい。

# 謝辞

本研究では、渡辺大地先生と阿部雅樹先生から長きにわたりご指導をいただきました。この場で改めて、厚く感謝を申し上げます。進捗の傾向がプログラムなどの実装物に偏りがちな自分に対し、研究の何たるかを語りつつ目的の見据え方を伝授してくださりました。本論文の執筆にて数多の迷いを乗り越えた際、お二方からの指摘と薦めが自分の知らぬ道を照らしてくれたと憶えています。

また、頻繁にお世話になった大学院生の方々にも御礼を申し上げます。忙しい中でも自分の研究に興味を向けていただいたおかげで、自分本位な挑戦を広く役立つ試行へと昇華させることができました。特に、失敗が積み重なった論文初稿を的確に添削してくれた早期組の柊元君には頭が上がりません。本当に助かりました。

最後に、人生の支えとなりつつ研究や創作活動に理解を示してくださる両親に感謝の意を表します。これまでに受けた薫陶と我が身に刻んだ知見を以て、これからの大学院、そして社会へと挑んでいきます。

# 参考文献

- [1] STUDIOCANAL. Terminator 2: Judgment day. <https://www.studiocanal.com/title/terminator-2-judgment-day-1991/>. 参照: 2022.12.24.
- [2] 諫山創. 進撃の巨人 (4). 講談社, 2011.
- [3] 荒川弘, 鋼の錬金術師製作委員会, MBS. 鋼の錬金術師 fullmetal alchemist. <https://www.hagaren.jp/fa/>. 参照: 2023.01.16.
- [4] ARC SYSTEM WORKS. Guilty gear -strive-. <https://www.guiltygear.com/ggst/>. 参照: 2023.01.14.
- [5] 黄昏フロンティア. 東方緋想天. <http://tasofro.net/touhou105/story.html>. 参照: 2023.01.14.
- [6] Inc. HAL Laboratory and Nintendo. 星のカービィ ディスカバリー. <https://www.nintendo.co.jp/switch/arzga/index.html>. 参照: 2023.01.14.
- [7] SQUARE ENIX. よすみん。 <https://www.jp.square-enix.com/game/detail/yosumin/>. 参照: 2023.01.14.
- [8] G. Wolberg. Recent advances in image morphing. *Proceedings of CG International '96*, pp. 64–71, 1996.
- [9] Lucasfilm. Willow — lucasfilm.com. <https://www.lucasfilm.com/productions/willow/>. 参照: 2022.12.24.
- [10] Guinness World Records. First use of morphing. <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/first-use-of-morphing>. 参照: 2022.12.24.
- [11] K. SHIMADA. Physically-based mesh generation : automated triangulation of surfaces and volumes. *Ph.D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology USA*, 1993.

- [12] 山田敦, 嶋田憲司, 伊藤貴之. バブル・メッシュ分割法のための要素サイズの制御方法. *テレビジョン学会技術報告*, Vol. 20, No. 27, pp. 1–6, 1996.
- [13] J BARD. How well does turing's theory of morphogenesis work? *J Theor Biol*, Vol. 45, pp. 501–531, 1974.
- [14] Alan Mathison Turing. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 237, No. 641, pp. 37–72, 1952.
- [15] 山内憲一, 梶原毅. チューリングモデルにおける2次の反応項のパターンに与える影響. *岡山大学環境理工学部研究報告*, Vol. 8, No. 1, pp. 19–22, 2003.
- [16] 近藤滋, 浅井理人. A reaction-diffusion wave on the skin of the marine angelfish pomacanthus. *Nature*, Vol. 376, No. 6543, pp. 765–768, 1995.
- [17] Peter Gray and Stephen K. Scott. Autocatalytic reactions in the isothermal, continuous stirred tank reactor: Isolates and other forms of multistability. *Chemical Engineering Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 29–43, 1983.
- [18] Peter Gray and Stephen K. Scott. Autocatalytic reactions in the isothermal, continuous stirred tank reactor: Oscillations and instabilities in the system  $a + 2b \rightarrow 3b; b \rightarrow c$ . *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, No. 6, pp. 1087–1097, 1984.
- [19] Processing Foundation. processing. <https://processing.org/>. 参照: 2022.12.24.
- [20] 池田辰雄. 映像合成の諸法とクロマキー. *テレビジョン*, Vol. 14, No. 3, pp. 125–130, 1960.