

2008 年度

修士論文

非線形磁化特性のセルラー・オートマトンモデル
Cellar Automaton Model of Nonlinear Magnetization
Characteristics

法政大学システムデザイン研究科

システムデザイン専攻修士課程

宮坂 総

学籍番号 : 07U0012

指導教員 : 齋藤 兆古

Abstract

Cellular automaton is being widely used for analyzing the complex physical systems as one of the deterministic tools. Although theory of cellular automaton innovated in 1940 by Neumann, German scientist Preisach had caught up a similar key idea to the cellular automaton in order to represent the nonlinear magnetization characteristics of ferromagnetic materials in 1935. Even though Preisach had derived the magnetizing model by a modified cellular automaton for the typical nonlinear complex ferromagnetic systems, Wolfram pointed out that the method of cellular automaton was a reasonable methodology to analyze/represent the complex physical systems in 1984. This means that any of the complex physical systems could be represented or modeled by means of the cellular automaton procedures.

Based on above, this paper tries to derive a magnetization model by means of a modern cellular automaton along with the visualized magnetic domain dynamics.

目次

Abstract	.....	i
第 1 章序論	.....	1
第 2 章 非線形磁化特性のセルラー・オートマトンモデル	.....	2
2.1 セルラー・オートマトン	.....	2
2.1.1 基礎理論		
2.2.2 セルラー・オートマトンの例		
I 1次元セルラー・オートマトン		
i. 1次元セルラー・オートマトンの定義		
ii. 1次元セルラー・オートマトンの例		
II 2次元セルラー・オートマトン		
i. 2次元セルラー・オートマトンの定義		
ii. 2次元セルラー・オートマトンの例		
2.2 磁性材料の非線形磁化特性	.....	9
2.3 プライザッハモデル	.....	11
2.3.1 基礎理論		
2.3.2 セルラー・オートマトンを用いたプライザッハモデル		
2.4 磁区挙動に基づく解析	.....	14
2.4.1 ビッター法		
2.4.2 磁区挙動画像		
2.4.3 磁区挙動画像の二値化		
2.4.4 磁化特性		
2.4.5 磁化曲線		
2.5 プライザッハ型セルラー・オートマトンモデル	.....	19
2.5.1 磁区挙動画像よりルールの抽出		
2.5.2 モデリング		
i セルラー・オートマトン型プライザッハモデル I		
ii セルラー・オートマトン型プライザッハモデル II		
2.6 バルクハウゼンノイズ	.....	23
2.6.1 基礎理論		
2.6.2 バルクハウゼンノイズの抽出		
第 3 章 考察	.....	26
第 4 章 結論	.....	27
参考文献	.....	28
研究業績	.....	29
謝辞	.....	30
付録	.....	31

第1章 序論

近年、様々な分野で複雑系のシミュレーションが行われている。例えば、気象現象・経済現象・生理現象などである。しかし、この様な複雑系のシミュレーションは古典的な数学的手法では十分なシミュレーションが困難である。この理由は、古典的な微積分方程式に基づくトップダウン型の定式化は平均的な結果、すなわち、グローバルな結果を得るには極めて有効であるが、局所的な連鎖が全体の結果へ大きく寄与するボトムアップ型問題に対しては弱い点にある。局所的な連鎖の積み重なりが全体の結果となるボトムアップ型の非線形問題には局所的な連鎖関係をベースとするセルラー・オートマトンの考え方が一般的であるのは自明と言える。

新たなシミュレーション手法として注目されてきているセルラー・オートマトンは、1940年代にジョン・フォン・ノイマンによって提唱された。その後、1984年にスティーブン・ウルフラムによって複雑系のシミュレーションを行う方法として紹介され、近年、多くの分野で新世代シミュレーション技術として研究・開発が行われている。特に、従来の方法ではモデル化が困難であった交通渋滞・経済問題・火事などの自然災害のシミュレーションにも用いられており、今後さらなる研究開発と実用化が期待されている。

一方、磁性体は極めて複雑な磁化特性を呈するが、1930年代にこの磁化特性を表現するモデルがプライザッハによって提唱された。このプライザッハモデルは極めて具体的な磁区理論に基づくため、他に代替えとなるモデルはなく、現代でも磁気記録理論や磁性体を含む磁界計算に広範に使用されている。

本論文は、セルラー・オートマトンを用いてプライザッハモデルを導き、プライザッハモデルはセルラー・オートマトン理論が提唱される以前に既に実用化されたセルラー・オートマトンによる磁化特性モデルであることを述べる。具体的には、ビッター法を用いた可視化磁区動画像を古典磁区理論に基づき磁性体の磁化過程を3領域、すなわち可逆的磁壁移動領域・非可逆的磁壁移動領域、さらに磁化ベクトルの回転磁化領域へ分割する。これらの3領域へプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルをそれぞれ適用する。その結果、磁性体の非線形磁化特性がセルラー・オートマトン型モデルで表現可能であり、このモデルは従来のプライザッハモデルでは表現不可能であった磁化過程も表現可能とすることを報告する。すなわち、本論文で導出されるセルラー・オートマトン型磁化特性モデルは拡張されたプライザッハモデルである。¹⁾²⁾³⁾⁸⁾

第2章 非線形磁化特性のセルラー・オートマトンモデル

2.1 セルラー・オートマトン

2.1.1 基礎理論

セルラー・オートマトンは、フォン・ノイマン(John von Neumann)の頭脳の申し子であるノイマン型計算機として現在の大勢を占める計算機の理論構造に名を残しているが、それだけではなくゲーム理論をはじめとするいくつかの豊かな数理科学分野を創出し、後世の多くの研究者に研究テーマを与えてきた。その一つにセルラー・オートマトンという論理機械がある。セルと呼ばれる単位がその近傍にあるセルと相互作用して状態が変化することにより、全体として理論計算を実行する論理機械である。

フォン・ノイマンは自己複製する機械の論理的構築を目指して、セルラー・オートマトンを導入した。しかし、近年、セルラー・オートマトンは単に自己複製機械の構築だけにとどまらず、いろいろなシステムのモデルとして使われている。特に最近では、カオス、フラクタル、システムの創発など、複雑適応系という一群のシステムのモデルの一つとして、その性質が広範かつ精力的に探求されている。

セルラー・オートマトンにはノイマン型計算機と大きく異なる点がある。ノイマン型計算機では、計算機に実行させたい論理演算の過程をプログラムとして書き出し、計算機に与え実行させて結果を得る。論理演算の過程はプログラムに明示されている。

これに対して、セルラー・オートマトンでは人が計算機に実行すべき論理演算の過程を与えるのではない。人がすることは、セルラー・オートマトンの構造、すなわち、セルラー・オートマトンの次元、大きさ、セルがとる状態の数、セルの間の相互作用の仕方および初期状態を定めることである。その意味で、セルラー・オートマトンは人工物である。しかし、作られたセルラー・オートマトンが行う理論演算の過程、すなわちセルラー・オートマトンの挙動は決して簡単なものではなく、また容易に理解できるものでもない。挙動の性質を明らかにするには、自然科学者が自然を理解しようとするのと同じ姿勢の探究が必要となる。

人がセルラー・オートマトンの構造を定めることは、自然でいえば宇宙を創生することに相当する。宇宙創成のときに定まった物理法則に従って、自然のいろいろな現象が起きるように、作られたセルラー・オートマトンの構造に従っていろいろな挙動が生まれる。そこには、基本的な法則とその下で喚起する複雑多様な現象という自然に見られるのと同じ関係が存在する。この意味でセルラー・オートマトンは一種の人工の自然であり、その構造の簡

単さに比べて極めて複雑多様な挙動を示すシステムである。

1940年代にフォン・ノイマンがこのセルラー・オートマトンを提唱した後に、1984年に理論物理学者のスティーブン・ウルフラム(Stephen Wolfram)によって複雑系のシミュレーションを行う決定的な方法として紹介された。このことより、近年では、多くの分野で新世代シミュレーション技術として研究・開発が行われている。特に、従来のシミュレーション技術ではモデル化が困難であった交通渋滞、経済変動、さらには火事などの自然災害のシミュレーションにも用いられており、今後さらなる研究開発と実用化が期待されている。²⁾³⁾⁴⁾⁸⁾

2.1.2 セルラー・オートマトンの例

セルラー・オートマトンの代表的なものの一つにライフゲームがある。ライフゲームは1970年にイギリスの数学者ジョン・ホートン・コンウェイ(John Horton Conway)によって考案された生命の誕生、進化、淘汰などのプロセスを簡易的なモデルで再現したシミュレーションゲームである。単純なルールでその模様の変化を楽しめるため、パズルの要素を持っている。生物集団においては、過疎でも過密でも個体の生存に適さないという個体群生態学的な側面を背景に持つ。⁸⁾

また、ここで述べたライフゲームは2次元セルラー・オートマトンの代表例だが、このライフゲーム以外にも、セルラー・オートマトンには空間の広がりに応じて1次元や2次元など様々な次元のセルラー・オートマトンが存在する。

以下に、1・2次元それぞれのセルラー・オートマトンの適用ルールを示しそのルールを用いたセルラー・オートマトンの例を示す。

I 1次元セルラー・オートマトン

i 1次元セルラー・オートマトンの定義

状態が1次元におけるパターンとして表現されるのでその時間的推移が2次元目の軸となり容易に観察することが可能であるため、1次元セルラー・オートマトンは、セルラー・オートマトンのマクロな挙動を観察するのに最も適したものである。

以下に、1次元セルラー・オートマトンの定義を示す。

- (1) N 個のセル $1, 2, \dots, N$ を1次元に並べる。末端のセル N を最初のセル 1 に隣接させて輪を作り、端がなくどこまでも同じ推移規則をもつセルラー・オートマトンとする。
- (2) 各セルは k 個の状態 $\{0, 1, 2, \dots, k-1\}$ のいずれかをとるものとする。な

お、セルの状態の N 個の並びをセルラー・オートマトンの状態という。

- (3) あるセル i の時刻 t における状態が $x(i,t)$ であるとき、次の時刻 $(t+1)$ においてとる状態 $x(i,t+1)$ は、セル i とそのセルの左右に隣接する r 個ずつ、合計 $2r+1$ 個のセルの状態の並び方、

$$n(i,t) = \{x(i-r,t), \dots, x(i,t), \dots, x(i+t)\}$$

により定まるものとする。ここで、セル i とそれに隣接する r 個ずつ合計 $2r+1$ 個のセルをセル i の「近傍」、近傍に含まれるセルの数 $(2r+1)$ を「近傍の大きさ」、そして近傍の中における状態の並びを「配列」という。近傍の例を図 2.1.1 に示す。

次の時刻におけるセルの状態は、 $n(i,t)$ と $x(i,t+1)$ の対応として

$$n(i,t) \rightarrow x(i,t+1)$$

の集まりとして与えられる。

ここに示した(1)から(3)が 1 次元セルラー・オートマトン推移規則である。⁸⁾

ii 1 次元セルラー・オートマトンの例

1 次元のセルラー・オートマトンは上でも述べたように、現在の値と横方向の近傍の値によって次の時間ステップにどのような値がくるのかが決定されるものである。ここでは、初期値(1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1)に 1 次元セルラー・オートマトンのルール 30 を適用し $t=0$ から $t=7$ まで変化させた結果を例としてあげ、以下の図 2.1.1 に示す。

今回の例で用いたルール 30 は、現在の値と左近傍の値、右近傍の値の 3 近傍の値によって次の時間 $t+1$ の値が決まるルールの一つであり、その詳細を以下に述べる。

(左近傍 t の値 右近傍) $\Rightarrow t+1$ の値 : $(1 1 1) \Rightarrow 0, (1 1 0) \Rightarrow 0, (1 0 1) \Rightarrow 0, (1 0 0) \Rightarrow 1,$
 $(0 1 1) \Rightarrow 1, (0 1 0) \Rightarrow 1, (0 0 1) \Rightarrow 1, (0 0 0) \Rightarrow 0$

t=0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1
t=1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1
t=2	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
t=3	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1
t=4	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0
t=5	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
t=6	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
t=7	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1

図 2.1.1 1 次元セルラー・オートマトンの例

例に挙げた 1 次元セルラー・オートマトンに用いたルールは 3 近傍の「1」と「0」の組み合わせ 8 パターンによって次の $t+1$ の値が決定するという簡単なルールだが、実際に行ってみるとセルの値が複雑に変化しており、一見ランダムな数字の変化に見える。しかし、実は規則に沿った変化であり複雑なシミュレーションに対して豊かな結果が得られることがわかる。

II 2次元セルラー・オートマトン

i 2次元セルラー・オートマトンの定義

2次元セルラー・オートマトンは、ライフゲームに代表されるように幅広い場面でシミュレーションに用いられている。1次元セルラー・オートマトンでは、横方向にセルの並びを、縦方向に時間的推移を示していたが、2次元セルラー・オートマトンは、セルの並びが横方向と縦方向に示され3次元方向に時間的推移が示される。このように、1次元に加えて次元が増えるため、より複雑なルール設定が可能となる。

以下に、2次元セルラー・オートマトンの定義を示す。

- (1) 「セル」と呼ばれる単位が 2 次元の柵が格子状に配列している。格子の一辺の数をセルラー・オートマトンのサイズという
- (2) 一つのセルは、そのセルとそれに隣接するセルの集まりからなる一種の「近傍」をもち、近傍にはそのセル自身も含まれる。近傍の取り方はいろいろ存在しているが、2次元のセルラー・オートマトンではノイマン近傍（線で繋がる近傍）とムーア近傍（点で繋がる近傍）のいずれかがよく用いられる。近傍の取り方はすべてのセルについて共通である。ここで用いたノイマン近傍とムーア近傍について以下に詳しく述べる。
- (3) 一つのセルは、 N 個の状態のいずれかをとる。状態を $\{0,1,2,\dots,N-1\}$ と表す。ここで状態を表す数字は、状態を区別するためであって数を表すためではない。取り得る状態はすべてのセルについて共通である。時刻 0 におけるセルの状態を初期状態という。
すべてのセルの状態の配置をセルラー・オートマトンの状態という。
- (4) あるセルの次の時刻における状態は、そのセルの近傍におけるセルの状態の配置により定まる。あるセルの近傍におけるセルの状態の配置から、そのセルの次の時刻での状態を定める規則を「推移規則」という。推移規則はすべてのセルについて共通である。

ここに示した(1)から(4)が 2次元セルラー・オートマトン推移規則である。⁸⁾

ii 2次元セルラー・オートマトンの例

2次元セルラー・オートマトンは上で述べた1次元セルラー・オートマトンに加えて縦方向の近傍の値によって次の時間ステップにどのような値が決まるかというものである。その中でも代表的なルールの決め方が存在する。それは、上の(2)でも述べたノイマン近傍とムーア近傍の2種類である。ノイマン近傍は現在の値 t に加えてその値の上下左右の4つの値、計5つの値によって次の $t+1$ の値が決まるというものである。一方、ムーア近傍はノイマン近傍に加えて現在の値の斜め方向の4方向を加えた計9つの値によって次の $t+1$ の値が決まるというものである。図に表わすとそれぞれ以下の図2.1.2のように表すことができる。⁸⁾

$\begin{pmatrix} & \text{北} & \\ \text{西} & t & \text{東} \\ & \text{南} & \end{pmatrix} \Rightarrow t+1$	$\begin{pmatrix} \text{北西} & \text{北} & \text{北東} \\ \text{西} & t & \text{東} \\ \text{南西} & \text{南} & \text{南東} \end{pmatrix} \Rightarrow t+1$
ノイマン近傍	ムーア近傍

図 2.1.2 代表的な2次元近傍

2次元セルラー・オートマトンでのルール例を図2.1.3に示す。さらに、これらの2次元セルラー・オートマトンモデルの初期値を図2.1.4とし、図2.1.3で示したルールを用いて時刻を $t=1$ から $t=4$ まで変化させた結果を図2.1.5に示す。

$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \Rightarrow 1$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow 1$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow 1$
$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow 1$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow 1$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow 0$

図 2.1.3 シミュレーションで用いた2次元セルラー・オートマトンルール



図 2.1.4 2次元セルラー・オートマトンの初期値

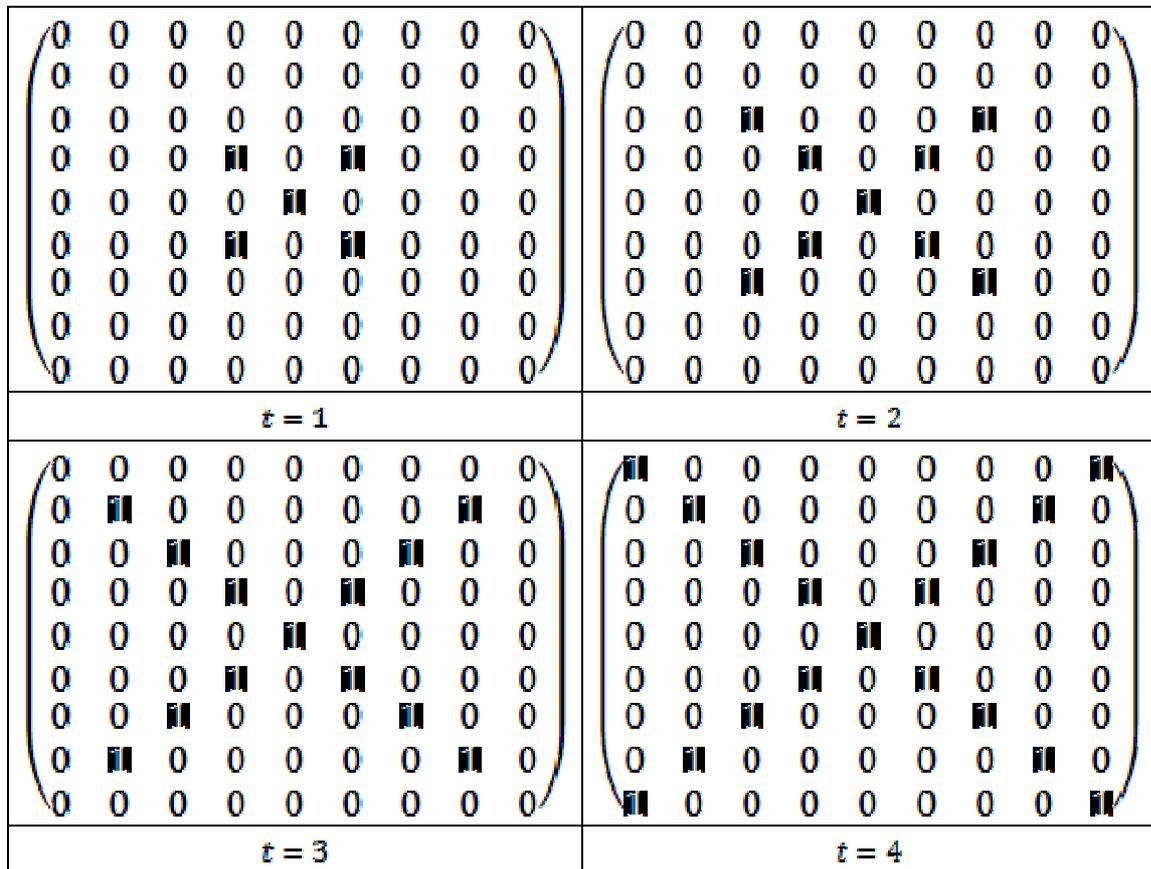


図 2.1.5 2次元セルラー・オートマトンの例

上記の 2次元セルラー・オートマトンの例題に用いたルールはムーア近傍の「1」と「0」の組み合わせ 512 パターン中の 5 パターンの場合のみに次の $t+1$ ステップの値が「1」に決定するという簡単なルールであるが、実際に行ってみるとセルの値「1」が斜めの 4 方向にまっすぐ増殖していることが判る。

このように簡単なルールを付加するだけで様々なセルの変化を観察することができる。さらに、ルールを複雑にするとより複雑なシミュレーション結果を得ることができる。

2.2 磁性材料の非線形磁化特性

物質は磁界中に置かれると多かれ少なかれ磁氣的に分極を起こす。これを磁化するという。特に強磁性体では、一旦かけた磁界をゼロにもどしても有限の自発磁化が残る(残留磁化)。これは磁性原子のもつ磁気モーメントが、量子力学的な力で一方向に揃おうとする性質による。実際の試料では図 2.2.1(a)のように多くの磁区に分かれており、異なった磁区の磁化方向は必ずしも揃っていない。図 2.2.1(a)のような消磁状態では、全体の磁化はゼロであるが、磁界を大きくしていくと図 2.2.1(b)、図 2.2.1(c)のように磁区の境界が移動し、最終的には図 2.2.1(d)のように試料全体が1つの磁区になる。このとき磁化(磁束密度)の変化を磁界 H の関数として描いた磁化曲線は図 2.2.2 の OBC を辿り C では1つの磁区となり、磁化(磁束密度)が飽和する。この状態から磁界 H を減少させると、磁化は CD に沿って減少し $H=0$ でも OD に相当する残留磁化が残る。さらに H を反対向きに増やしていくと、DEF に沿って変化し、ついには逆方向に磁化(磁束密度)が飽和する。 H を再びゼロに戻して正になると磁化(磁束密度)は FGC と変化する。このようにある磁界のもとでの磁化の値は、それまでにどのような磁化過程を経てその状態になっているかに依存するのでこれを履歴曲線(ヒステリシスカーブ)といい、一周の曲線 CDEFGC を履歴曲線(ヒステリシスループ)という。⁹⁾

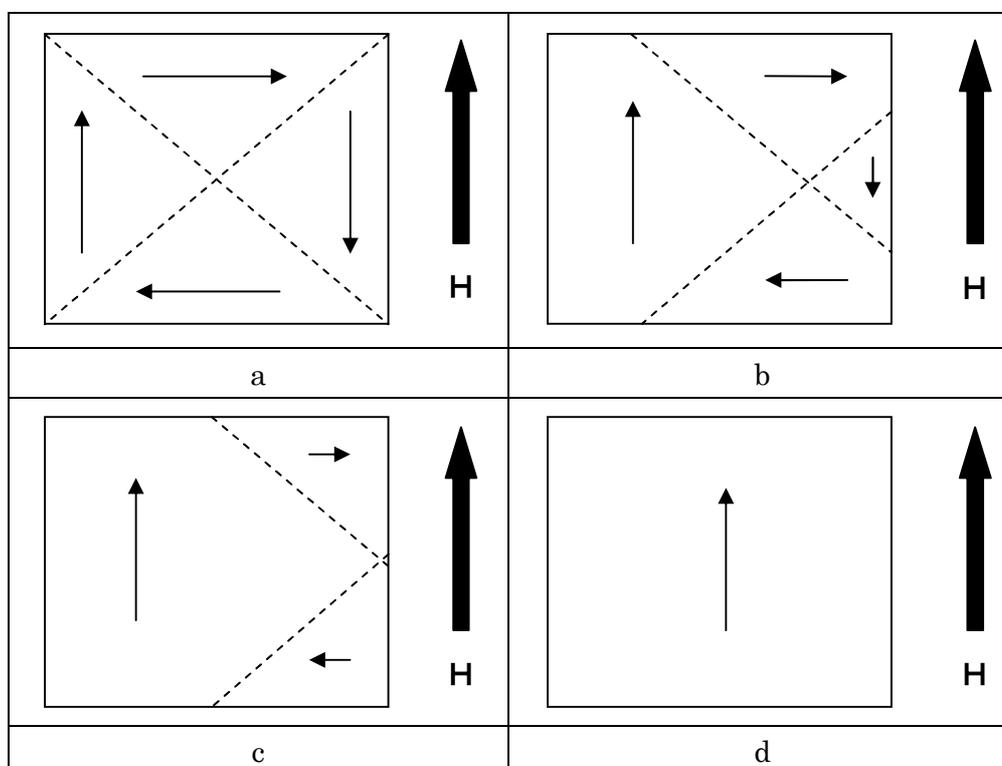


図 2.2.1 磁化過程

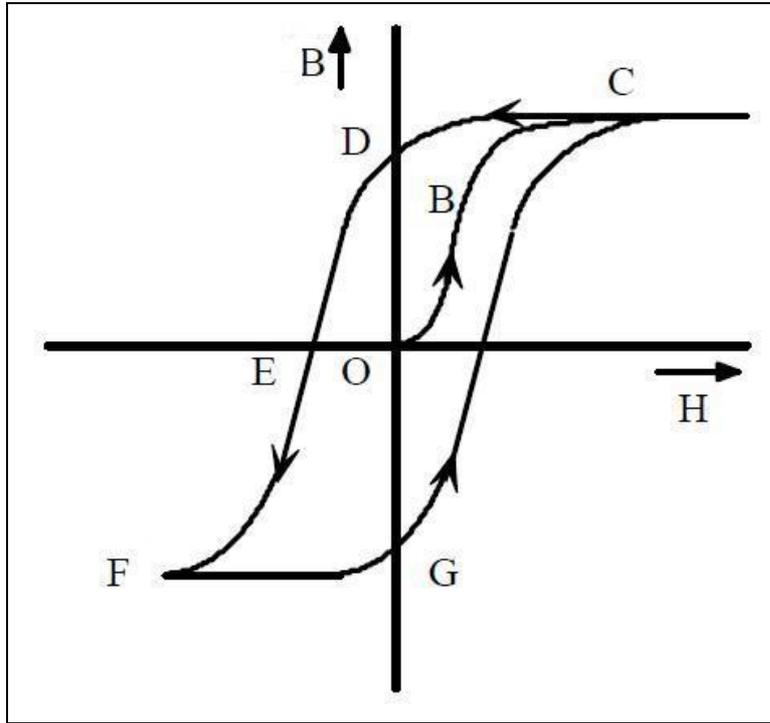


图 2.2.2 履歷曲線

2.3 プライザツハモデル

2.3.1 基礎理論

強磁性体は、自発磁化を持つ磁区から構成されていることは周知の事実である。いま、磁性体が単位磁化を持つ単位磁区から構成されているとした理想的な磁性体モデルを想定する。図 2.3.1(a)における各磁化状態をこの理想磁区モデルで表すことを考える。図 2.3.1(a)で図中に示されているように、磁界 H の正方向を H_p 、負方向を H_n とすれば原点 O の非磁化状態は、図 2.3.1 で $+$ を正の単位磁化、 $-$ を負の単位磁化として図 2.3.1(b)の状態 で表される。図 2.3.1(b)では $+$ の数と $-$ の数が等しく三角形全体としての磁化は零であり、非磁化状態を表すことになる。図 2.3.1(a)の点 \square の磁化状態は、三角形の一部の磁化が正の値となる図 2.3.1(c)によって表される。同様にして、図 2.3.1(a)中の $\textcircled{2} \sim \textcircled{4}$ の磁化状態は図 2.3.1(c) \sim (f)の三角形全体の磁化の総和で与えられる。以上のことから図 2.3.1(b) \sim (f)は磁性体の磁化状態を表す分布図となる。この分布図のことをプライザツハ線図という。⁶⁾

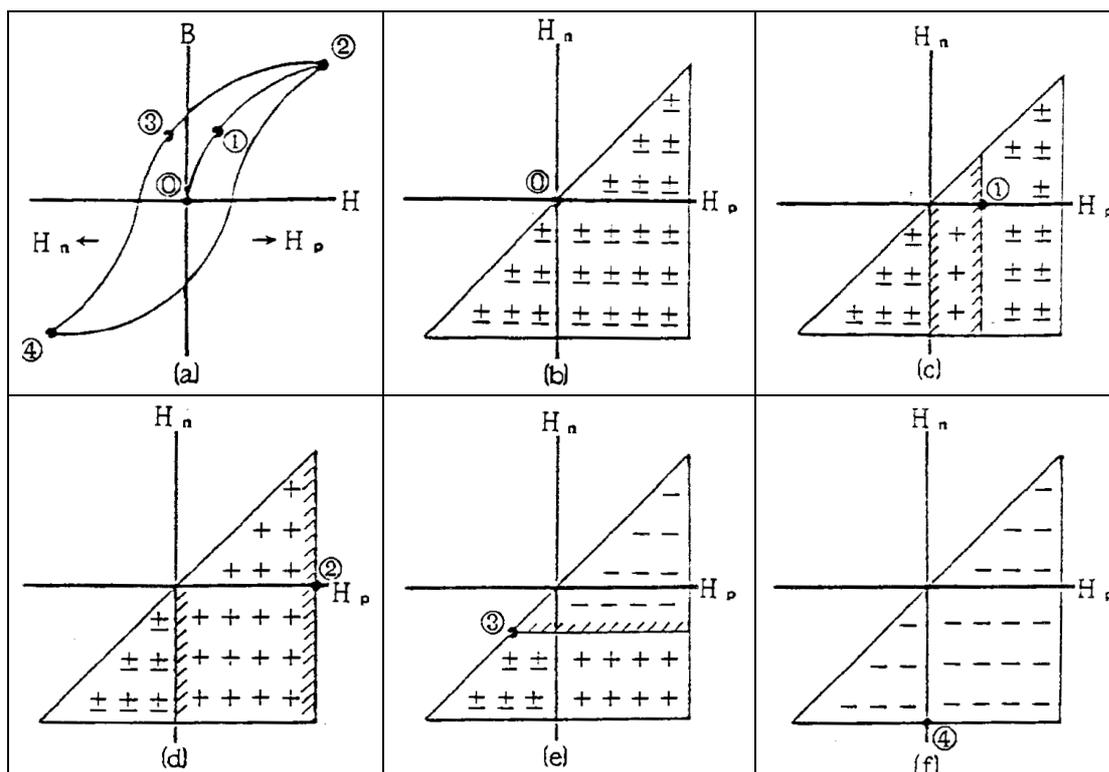


図 2.3.1 プライザツハ線図

2.3.2 セルラー・オートマトンを用いたプライザツハモデル

プライザツハモデルをシミュレーションするために用いたセルラー・オートマトンを図 2.3.2 に示す。図 2.3.2 の図には、以下のルールを適用する。

白色部分の値：0 黒色部分の値：1 灰色部分の値：-1

白色や灰色から黒色に転移：プラスに磁化

白色や黒色から灰色に転移：マイナスに磁化

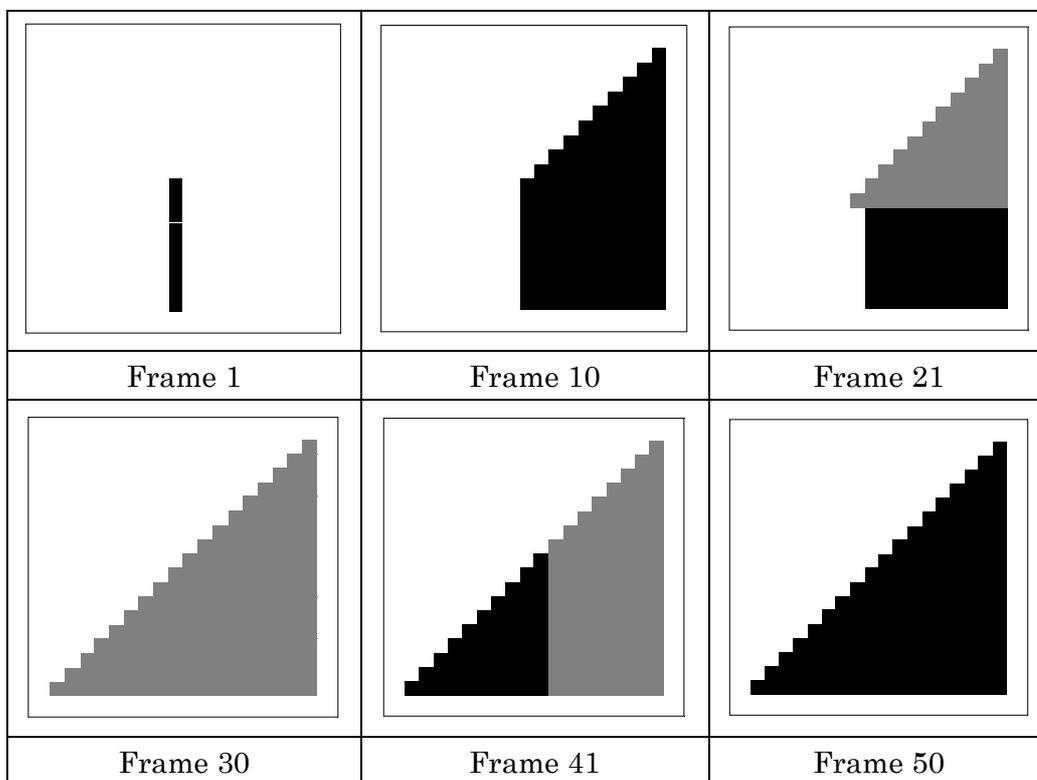


図 2.3.2 セルラー・オートマトンを用いたプライザツハモデル

図 2.3.2 のセルラー・オートマトンを用いたプライザツハモデルのシミュレーションを上記のルールを使って磁化特性を求めた結果を図 2.3.3 に示す。図 2.3.3 は図 2.3.2 の個々の画素値（黒：+1，灰：-1，白：0）の総和を縦軸の値、横軸は磁界として得られる磁化曲線である。

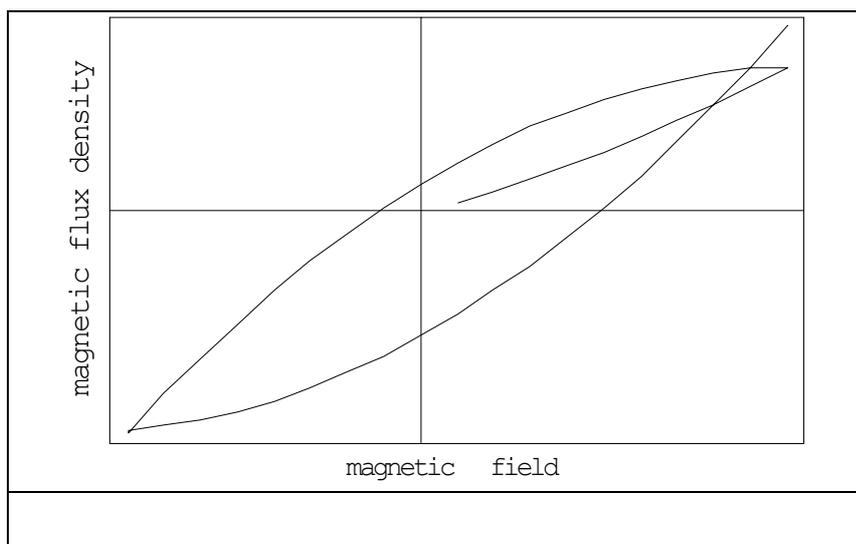


図 2.3.3 セルラー・オートマトンを用いたプライザツハモデルによって
得られた磁化曲線

図 2.3.3 からわかるように、これはプライザツハが提案したプライザツハ線
図そのものに他ならない。

2.4 磁区挙動に基づく解析

2.4.1 ビッター法

ビッター法による磁壁可視化の原理について述べる。試料表面の磁壁を観察するために、反射型の金属光学顕微鏡を用いる。顕微鏡の倍率は、通常、100~200 倍程度でもよいが、本稿では、機材の都合から全て 750 倍で行った。試料台に試料を載せて、表面歪みを取り除いた研磨面にスポイトで磁性コロイド溶液を垂らし、カバーガラスを載せて観察する。強磁性微粒子 (γ 酸化鉄) のコロイド液を強磁性体表面につけると、コロイド液内に分散していた酸化鉄の微粒子が、磁壁付近の急峻な磁化変化に起因する漏れ磁束の急激な勾配に反応し、表面近くの磁壁の観測ができる。この引き付けられた微粒子を光学顕微鏡で観察する。

この原理はマグネットビューワーと呼ばれる商品などに応用されており、比較的面倒な実験準備を必要とせずに磁壁を観察可能とする。¹⁾

2.4.2 磁区挙動画像

2.4.1 節で述べたビッター法によって抽出した鉄表面の磁区挙動画像を以下の図 2.4.1(a)に示す。さらにこの磁区挙動画像から磁化特性を求めると図 2.4.1(b)が得られる。¹⁾

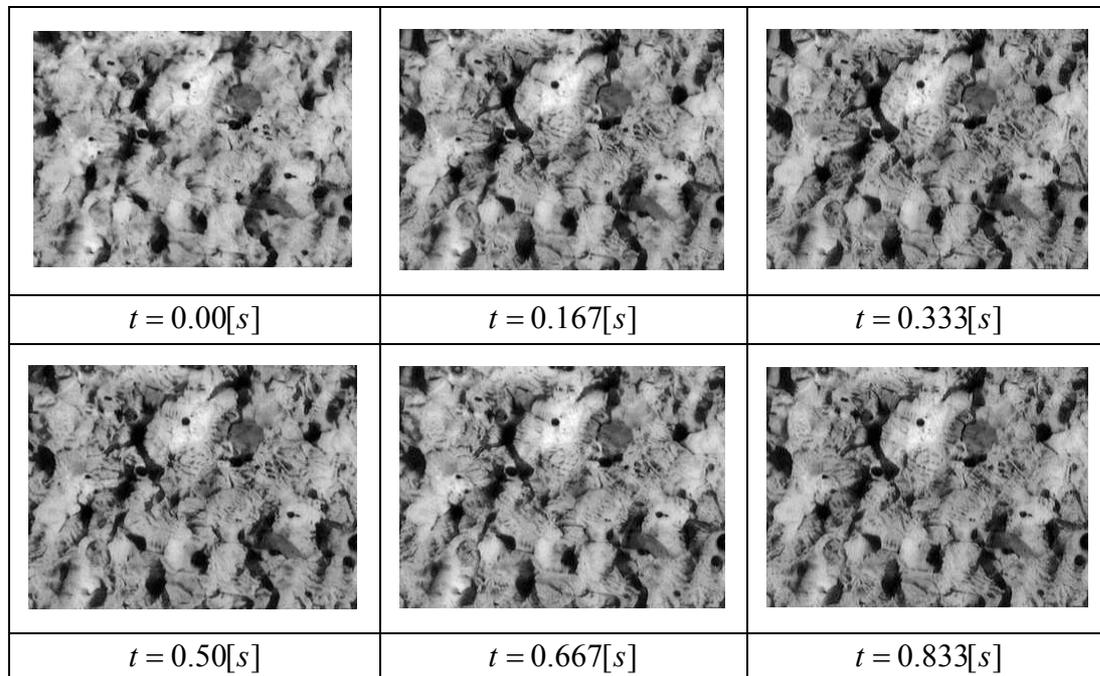


図 2.4.1(a) 鉄の磁区挙動画像

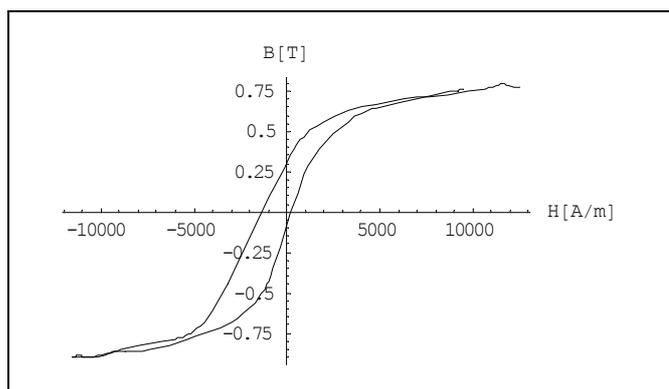


図 2.4.1(b) 画素値から求めた磁化特性 ¹⁾

2.4.3 磁区挙動画像の二値化

2.4.2 節では磁性体表面磁区挙動をビットアーク法によって可視化した。ここでは、得られた磁区挙動画像を磁化過程によって3過程に分類する。磁性体の磁化過程は磁壁状態によって、可逆的磁壁移動領域、非可逆的磁壁移動領域、さらには可逆的回転磁化領域に分けられる。

図 2.4.2(a)に可逆的磁壁移動領域を、図 2.4.3(a)に非可逆的磁壁移動領域を、さらに図 2.4.4(a)に可逆的回転磁化領域を、それぞれ正に磁化された部分を白色(数値 1)、磁化されていない部分を黒色(数値 0)へ二値化して示す。さらに、この二値化した画像データからそれぞれの磁化過程領域について磁化ループを描くと、それぞれ図 2.4.2(b)、図 2.4.3(b)、および図 2.4.4(b)となる。

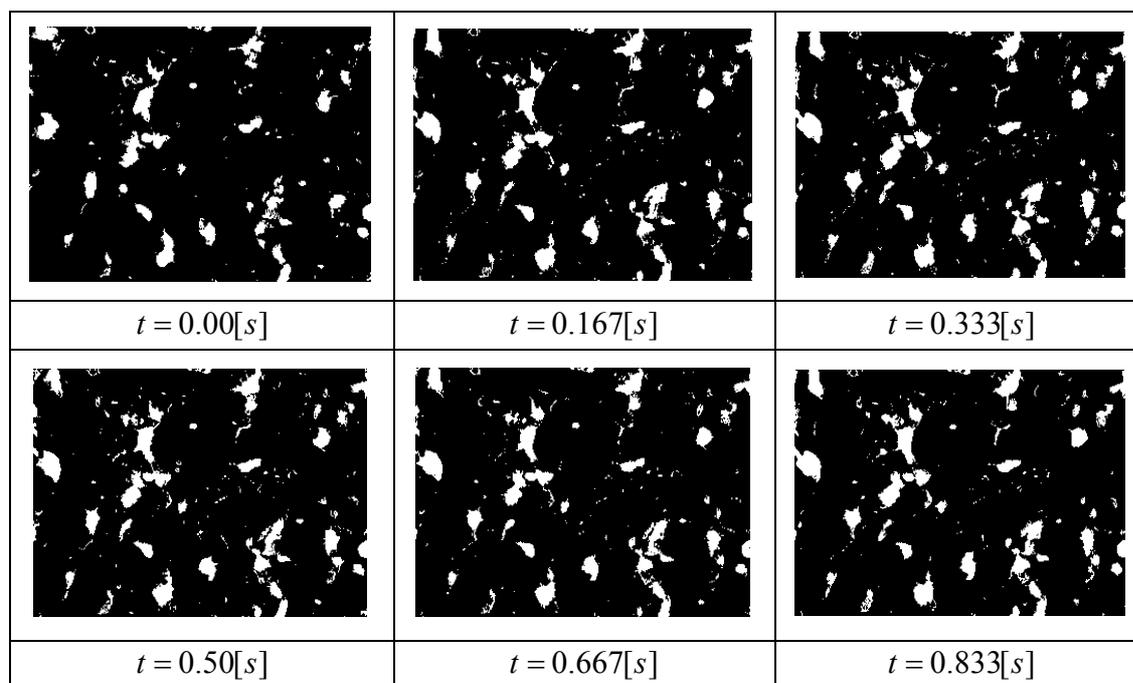


図 2.4.2(a) 可逆的磁壁移動領域を二値化した磁区挙動画像

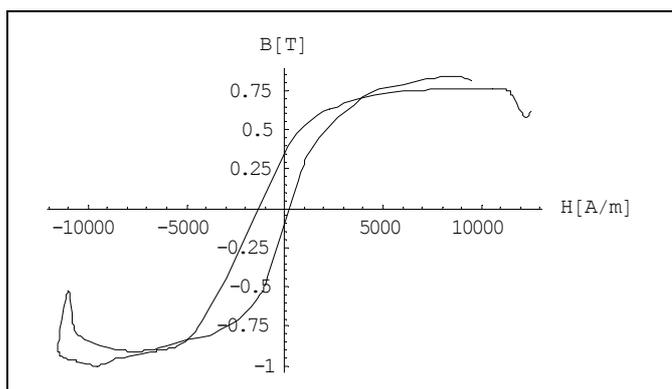


図 2.4.2(b) 可逆的磁壁移動領域の画素値から求めた磁化特性

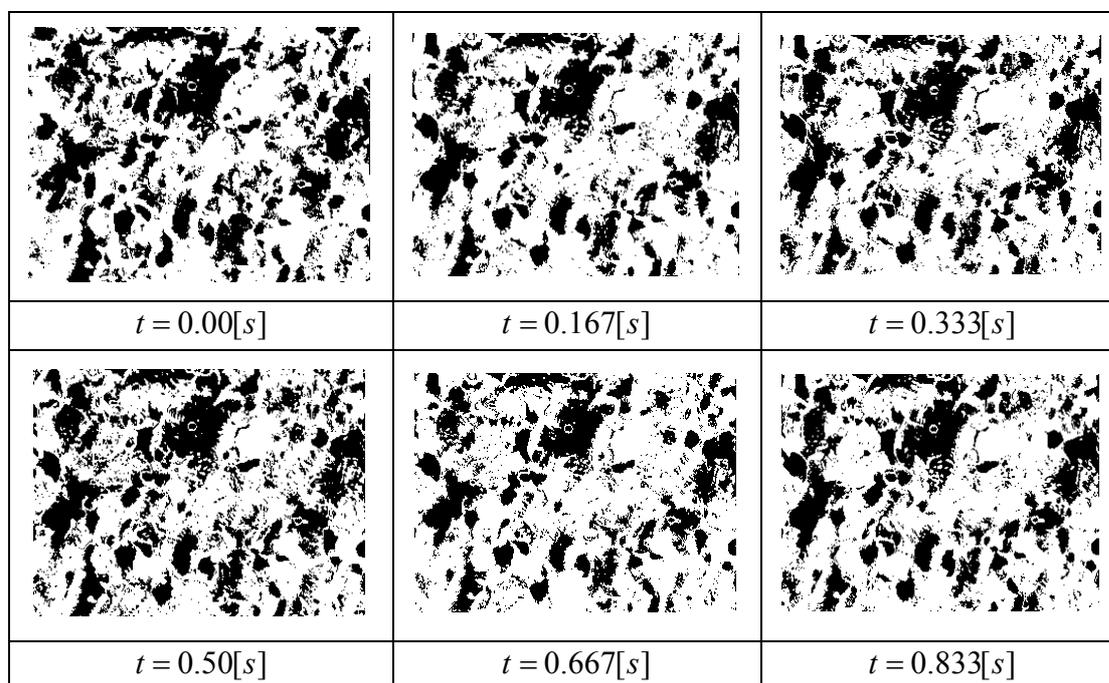


図 2.4.3(a) 非可逆的磁壁移動領域を二値化した磁区挙動画像

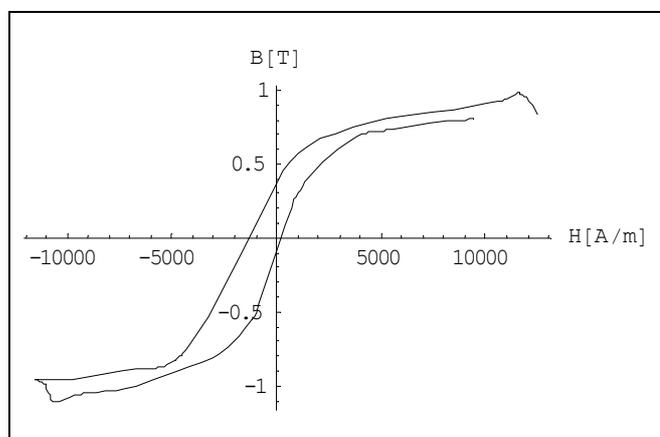


図 2.4.3(b) 非可逆的磁壁移動領域の画素値から求めた磁化特性

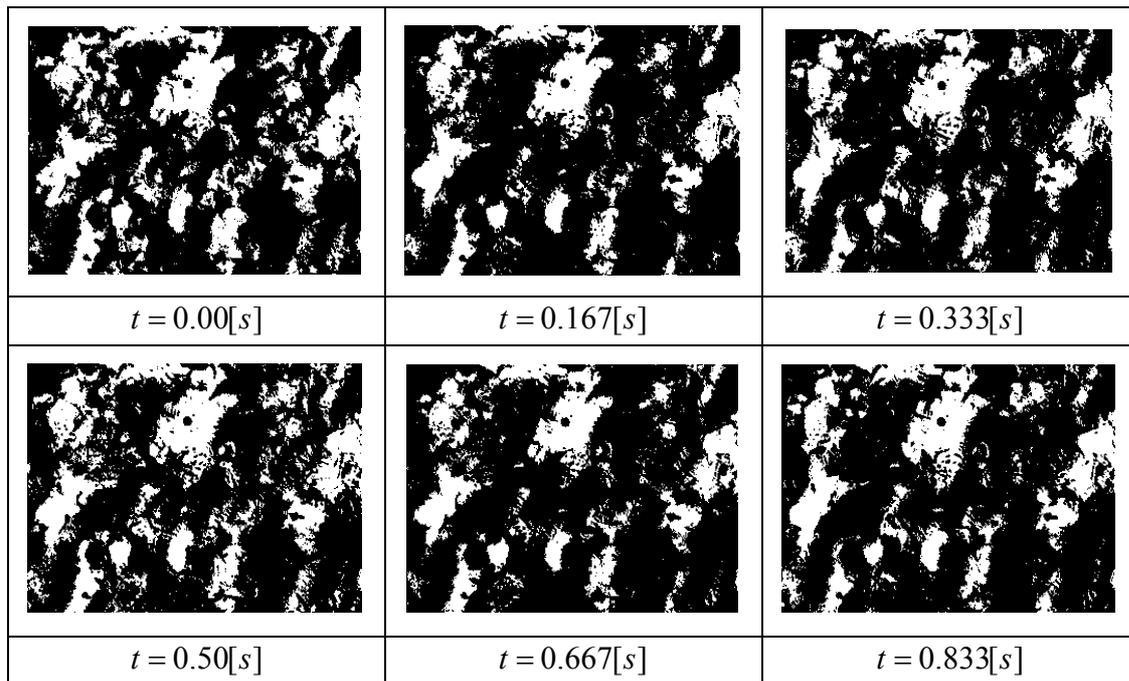


図 2.4.4(a) 回転磁化領域を二値化した磁区挙動画像

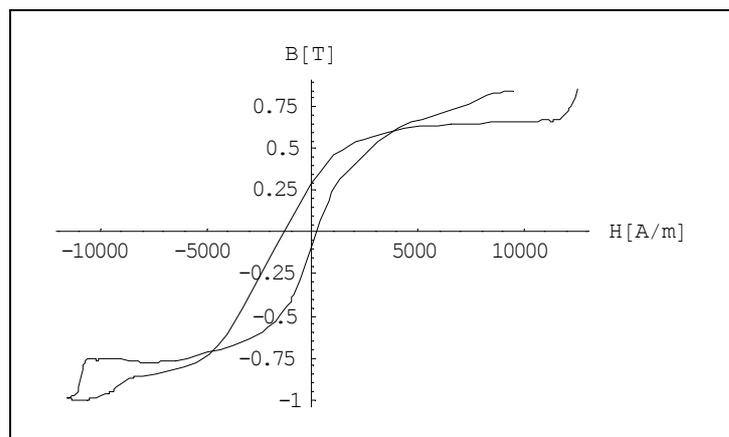


図 2.4.4(b) 回転磁化領域画素値から求めた磁化特性

2.4.4 磁化特性

試料を磁化させる外部磁界は式(2.1)で与えられる。

$$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{L} [A/m] \quad (2.1)$$

磁束密度 $B(t)$ の変化による試料に発生する誘起電圧 $V(t)$ をサーチコイルで測定する。ファラデーの法則である式(2.2)より、式(2.3)を求めることができる。

$$v(t) = -N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} [V] \quad (2.2)$$

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \int V(t) dt [T] \quad (2.3)$$

v : 誘起電圧、 N_1 : 励磁コイルの巻き数、 N_2 : 検出コイルの巻き数、
 I : 電流、 L : 磁路長、 φ : 磁束

式(2.3)で測定された誘起電圧波形 $V(t)$ を積分することで磁束密度 $B(t)$ の変化を算出することができる。⁷⁾

2.4.5 磁化曲線

2.2 で求めた磁化曲線と 2.3 の磁区挙動画像より導いた磁化曲線を比較すると、磁界の方向が反転する直前などにおいて多少の相違が観察される。これは、図 2.4.1(a) に示す磁区挙動画像は本来中間的なグレイレベルを持つにも拘わらず、単純な 2 値化を行ったことに起因する誤差であり、この誤差は磁化曲線の反転部で顕著になる。

次に磁区挙動画像よりセルラー・オートマトンルールを導き出しプライザッハモデルに適用することで実際に磁区挙動画像より導いた磁化特性をプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルによって再現することができることを示す。

2.5 プライザッハ型セルラー・オートマトンモデル

2.5.1 磁区挙動画像よりルールの抽出

2.4.1 節の磁区挙動画像から以下のような状態遷移ルールを導き出すことができる。

- (1) 磁界を徐々に増加させると、磁性体は磁化を開始してから緩慢に磁化される
- (2) (1)の後に、磁界がある閾値を超えると磁性体の磁化される速度が速くなり急激に磁化される
- (3) 最後に、磁界の方向が反転する直前では、磁化速度は再び緩慢となる。

2.5.2 モデリング

2.5.1 節で導いたルールを元に 2 種類のプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルのモデルを考える。第一は、プライザッハモデルのセルの移動に対してセルラー・オートマトンの状態遷移ルールを適用するモデルである。このルールを適用したモデルをプライザッハ型セルラー・オートマトンモデル I とする。第二は、1 セルに入る値を変数とする状態遷移ルールを適用するモデルである。このルールを適用したモデルをプライザッハ型セルラー・オートマトンモデル II とする。それぞれのモデルのルールの詳細とそれぞれのルールに基づいてモデリングし、シミュレーションした結果を以下に述べる。

i プライザッハ型セルラー・オートマトンモデル I

プライザッハ型セルラー・オートマトンモデル I はセルの移動方法に変化を加えたルールである。

2.4.1 節の磁区挙動画像より磁区の移動を観察し、磁区移動より観察された画素値の増減をプライザッハモデルに適用する。ルールは 2.5.1 節で求めたルールをベースとして以下のように設定した。

- (1) 磁化開始後、磁化は暫く緩慢に進行する。
- (2) ある程度磁化された後に磁化は急激に進行する。
- (3) 磁界の方向が反転する直前で、磁化は緩慢に進行する。

これらのルールを適用したプライザッハモデル I を図 2.5.1 に示す。

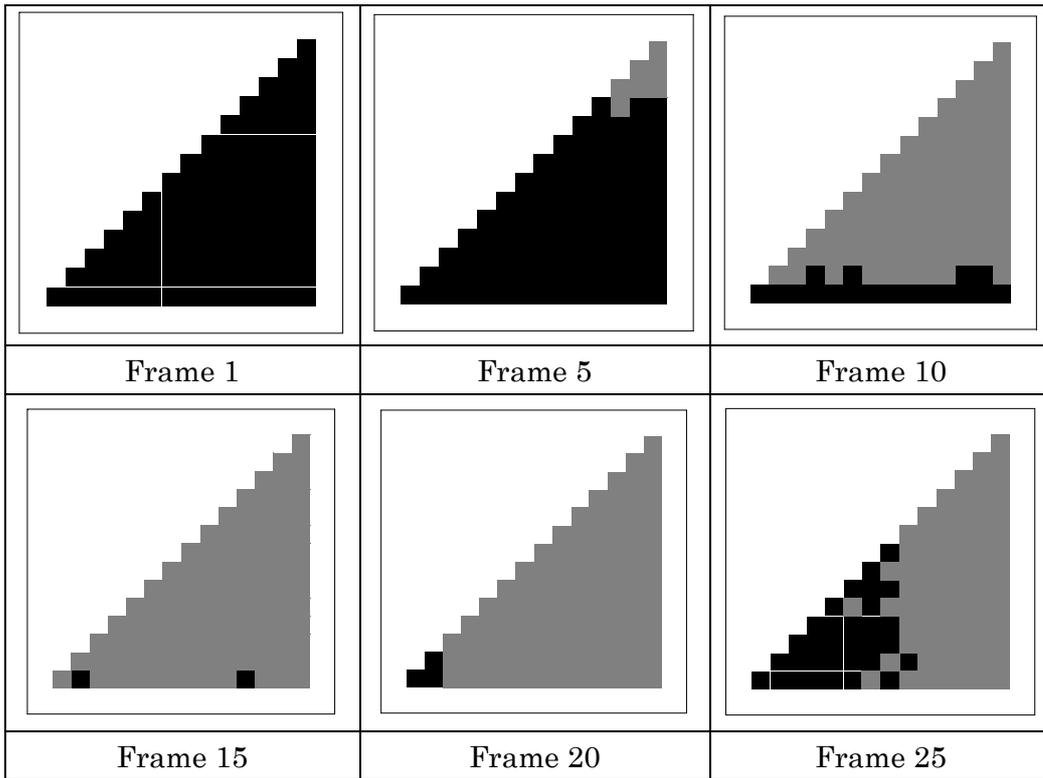


図 2.5.1 プライザッハ型セルラー・オートマトン I

図 2.5.1 に示す線図から、プライザッハ型セルラー・オートマトンモデル I から得られる磁化特性を図 2.5.2 に示す。

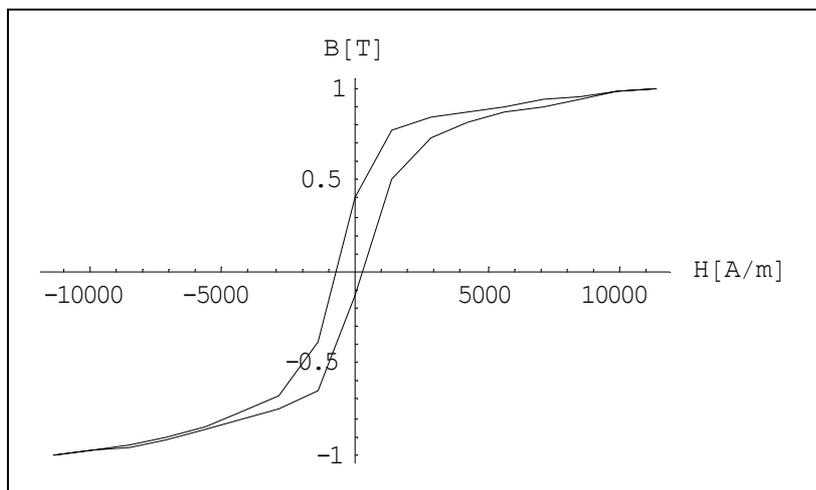


図 2.5.2 プライザッハ型セルラー・オートマトン I から求めた磁化特性

ii プライザッハ型セルラー・オートマトンモデルⅡ

プラスに磁化される場合とマイナスに磁化される場合、それぞれを3領域に分類する。さらに、それら3領域それぞれへ異なるセルラー・オートマトンルールを適用する。3領域へ分類する方法を図2.5.3に示す。それぞれの領域に対するセルラー・オートマトンルールを以下に述べる。

白色部分：プラスに磁化される場合、各セルに入る値は右方向へ単調増加。マイナスに磁化される場合も同様に下方向へ単調増加。

灰色部分：プラスに磁化される場合、各セルに入る値は中心軸まで右方向へ単調増加、中心軸を通過後は右方向へ単調減少。マイナスに磁化される場合も同様に、中心軸までは下方向へ単調増加、中心軸を通過後は下方向へ単調減少。

黒色部分：プラスに磁化される場合、各セルに入る値は右方向へ単調減少。マイナスに磁化される場合も同様に下方向へ単調減少。

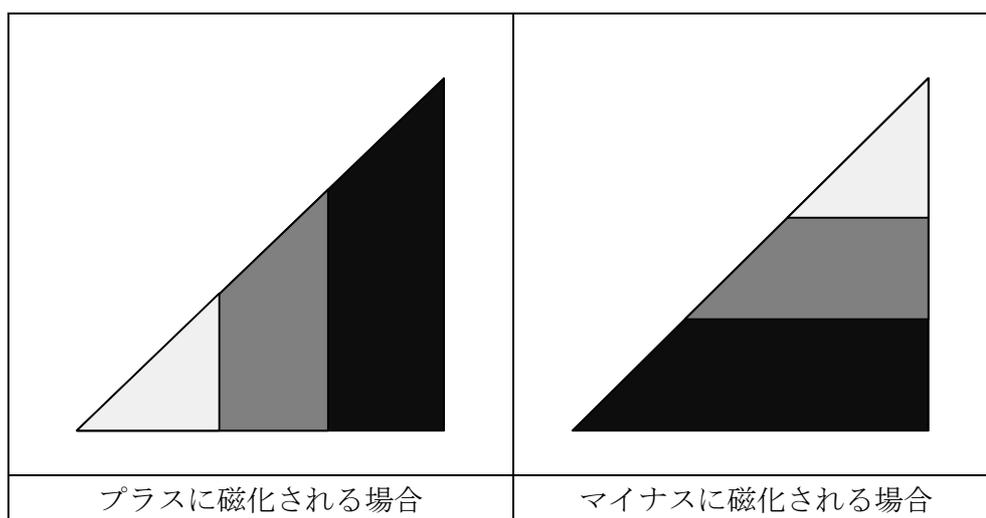


図.2.5.3 プライザッハ型セルラー・オートマトンⅡ

以上のプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルⅡより導いた磁化特性を図2.5.4に示す。

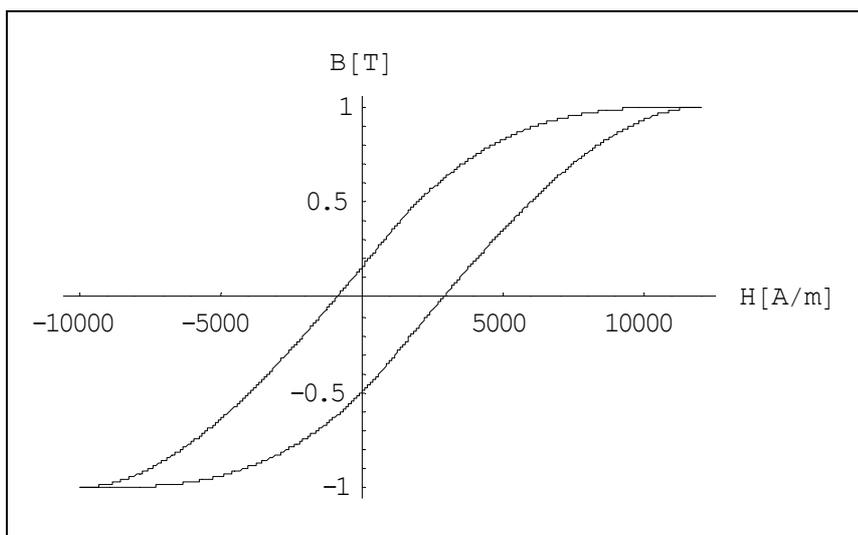


図 2.5.4 プライザツハ型セルラー・オートマトンⅡから求めた磁化特性

2.6 バルクハウゼンノイズ

2.6.1 基礎理論

強磁性体が磁化する場合、材料内の磁壁が不連続に移動することによってバルクハウゼンノイズと呼ばれる磁気ノイズが発生する。この磁気ノイズ、すなわち、バルクハウゼンノイズは1917年にバルクハウゼン(Barkhausen)によって発見された。その後このバルクハウゼンノイズは、金属材料の組織や応力状態に敏感であることが報告され、さらに材料の非破壊的評価法として利用した場合、他の非破壊的検出法にはない優れた特性も一部有していることが確認されている。⁵⁾

バルクハウゼンノイズの発生原理を模式的に示したのが図2.6.1である。これは強磁性体材料の磁区構造であり、図中の矢印は磁区内の磁化モーメントの方向を示しており、磁区と磁区の境界は2.4.1で述べた磁壁である。ここで、図中に示す H の方向に磁界を与えたとすると、磁界と同じ方向を向いた磁区面積が大きくなる方向に磁壁が移動し始める。その際、材料内に、不純物、析出物、異相、欠陥、残留ひずみなどのさまざまな材質的不均一があると磁壁は滑らかに移動せずに不連続に移動する。このため、磁気ノイズ(バルクハウゼンノイズ)が発生する。図2.6.1の図中の黒い丸の部分は材質的不均一部位を模式的に表している。

このバルクハウゼンノイズを含む強磁性体の磁化曲線(ヒステリシスループ)は階段状になり図2.6.2のようになる。⁵⁾

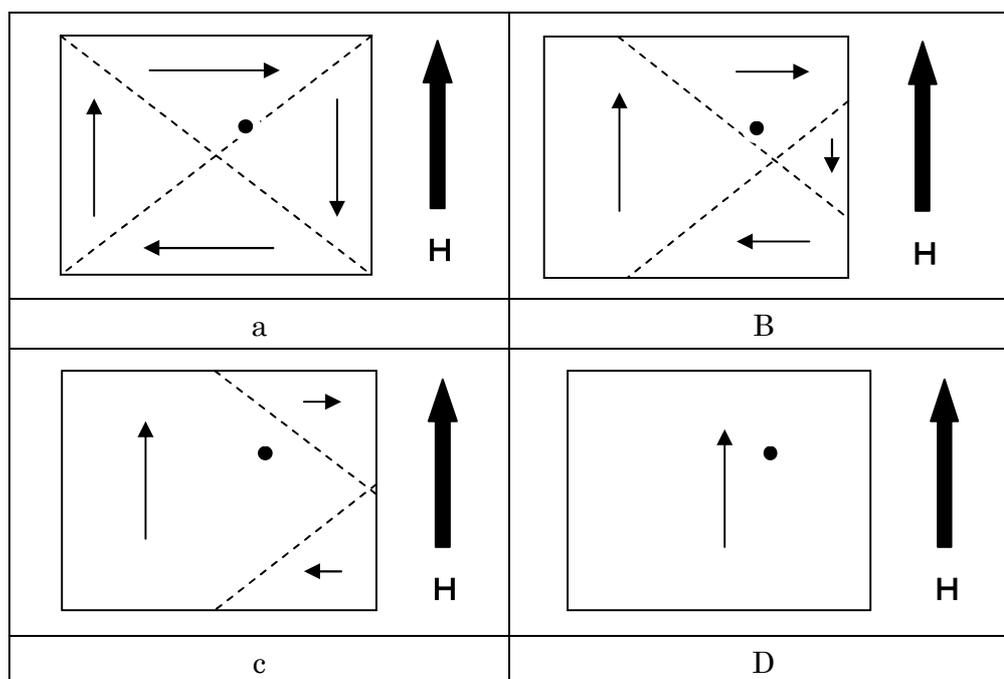


図 2.6.1 材質的不均一を含む磁化過程

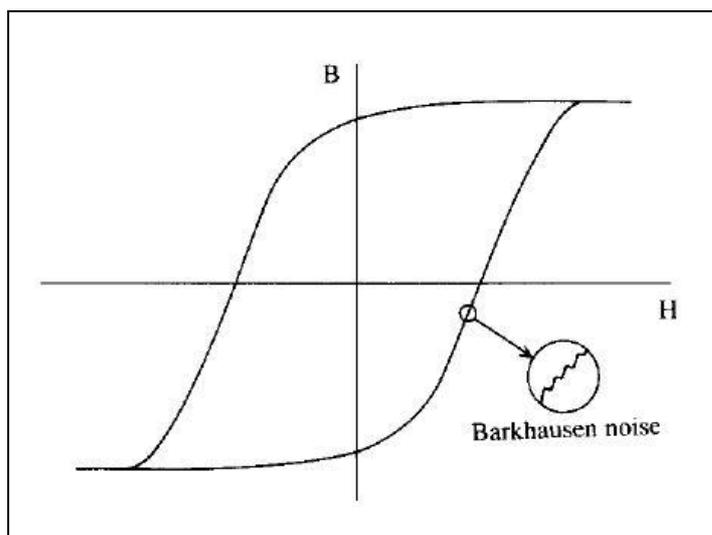


図 2.6.2 バルクハウゼンノイズ

2.6.2 バルクハウゼンノイズの抽出

2.5.2 節で導いたセルラー・オートマトン型プライザツハモデルⅡをベースとして、磁区挙動画像見られたノイズを乱数で模擬した結果を図 2.6.3 に示す。

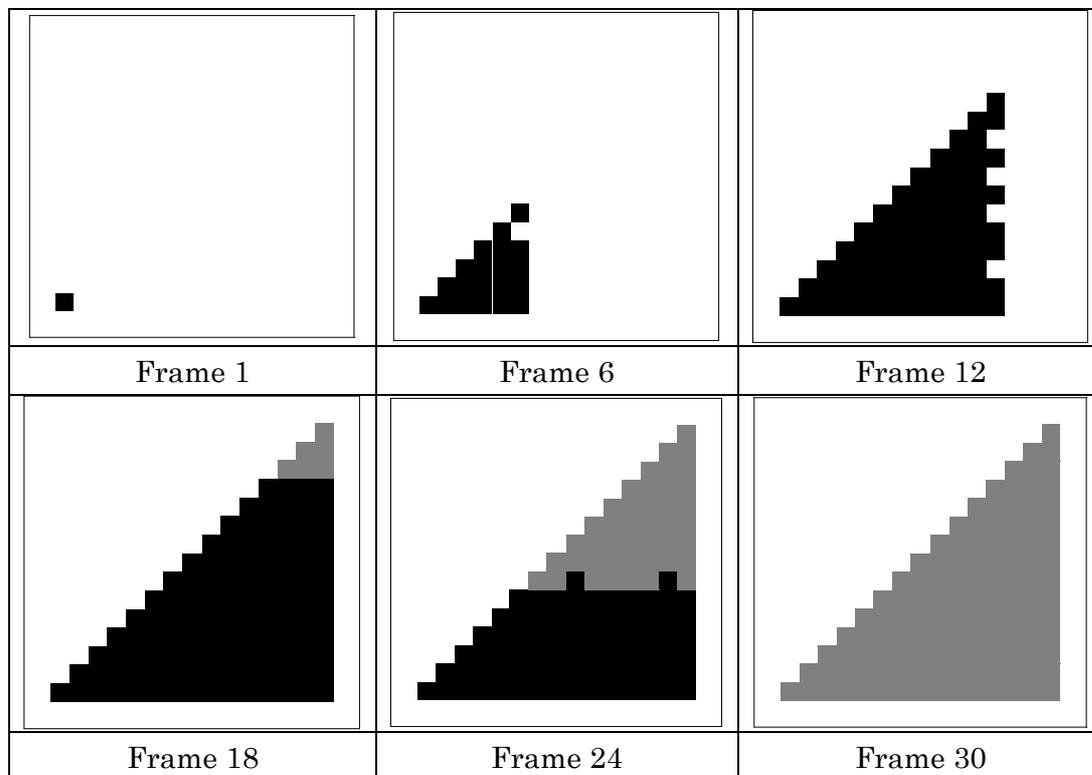


図.2.6.3 バルクハウゼンノイズを乱数で模擬したセルラー・オートマトン型プライザツハモデル

図 2.6.3 から磁化曲線を描くと図 2.6.4 となる。

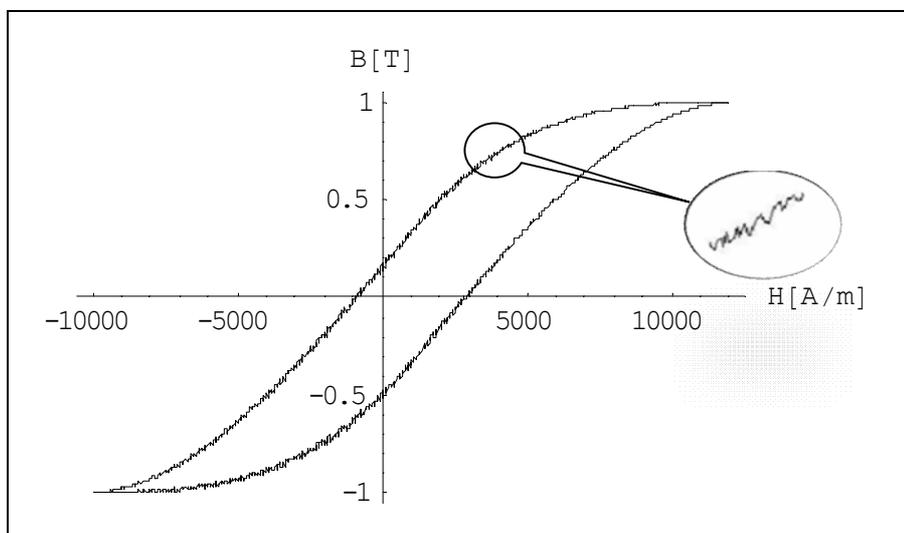


図.2.6.4 バルクハウゼンノイズを乱数で模擬した
セルラー・オートマトン型プライザッハモデルから求めた磁化特性

図 2.6.4 は、2.4 で用いたセルラー・オートマトン型プライザッハモデルでは表現することが出来なかったバルクハウゼンノイズが、乱数を用いて再現可能であることを示唆している。

第3章 考察

磁区挙動画像から得られた磁化曲線とセルラー・オートマトンを用いたプライザッハモデルによるシミュレーション結果から得られた磁化曲線を比較すると、定性的な傾向をよく再現しているが定量的には多少の相違が存在することが判る。これは、セルラー・オートマトンを用いたプライザッハモデル中に磁区画像が本来もっていた中間的なグレイレベルの画素値を持っていないからであると考えられる。シミュレーション結果との相違の原因はこれらを見捨てて単純な2値化を行ったことに起因する誤差であり、磁化曲線の反転部で顕著に誤差が反映することによる。

以上を踏まえて、セルラー・オートマトンを用いたプライザッハモデルに幾つかの新たなルールを付加したプライザッハ型プライザッハモデルⅠ・Ⅱを提案し、より現実に即応した精度の高い磁化特性表現モデルがセルラー・オートマトンを用いて導出可能であることを示した。

第 4 章 結論

本論文では、最初に 2 次元セルラー・オートマトンから古典プライザッハ型磁化特性モデルを導きレイリーループを描いた。第 2 番目に、ビット法によって可視化された磁区挙動画像を、磁化過程の相違で可逆的磁壁移動領域、非可逆的磁壁移動領域、可逆的回転磁化領域の 3 領域へ分類し、分類したそれぞれの領域を画素値に応じて 1 かゼロへ 2 値化してセルラー・オートマトンモデルを導いた。第三番目に、実際の磁区挙動画像から得られたセルラー・オートマトンモデルの状態転移ルールおよび画素値の変化率からプライザッハ型モデルの状態転移ルールとセル値の変化率を導入し、実際に観測した磁化特性に対応する磁化特性の再現に成功した。最後に、実際の磁区挙動画像において観察されるノイズを乱数で模擬した状態転移ルールを考えることでバルクハウゼンノイズを含む磁化特性の再現に成功した。

以上、本論文では従来から顕著な非線形性に起因して不可能であった強磁性体の高精度なシミュレーションを可能ならしめる新しい手法として、セルラー・オートマトンモデルを提案し、その基礎的性質を明らかにすることで非線形磁界解析問題の新境地の一端を開拓した。

参考文献

- 1) 須永高志、齋藤兆古、堀井清之：ビッター法による磁性材料の鉄損分布の可視化：可視化情報学会シンポジウム(2007) c207
- 2) R.J.ゲイロード/P.R.ウェリン、(訳)荒井隆：Mathematica 複雑系のシミュレーション物理学と生物学の探究
- 3) R.J.ゲイロード/西舘数芽、(訳)西舘数芽/西川清：Mathematica 自然現象の計算モデル化セルラーオートマタ・シミュレーション
- 4) 西成活裕：セルラー・オートマトンによる複雑現象のモデル化、東京大学ホームページ
<http://www.soloton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/mypapers/rikouJ.pdf>
- 5) バルクハウゼンノイズの材料評価への適用：豊田中央研究所 R&D レビューvol.27 No.4(1992.12)
- 6) 齋藤兆古、早野誠治、福島一弘、木住野泰光、津谷昇：磁化特性のモデリング(1986.MGA-86-109)
- 7) 須永高志：ビッター法による可視化磁区画像に関する考察～磁性体の $1/f$ ゆらぎと鉄損分布の可視化～、法政大学学術機関リポジトリ 022 修士論文
- 8) 市川惇信：複雑系の科学
- 9) 強磁性体の磁化特性：岡山理科大学ホームページ
<http://www.ous.ac.jp/DAS/phys/class/exp1/pdf/Ferromagnetism.pdf>
- 10) 宮坂総、齋藤兆古、堀井清之：セルオートマトンによる磁化特性の可視化 - 複雑系の物理とプライザッハモデル - (可視化情報 Vol.28 Suppl.No.1 2008年7月 P01-004)
- 11) 宮坂総、齋藤兆古：セルラー・オートマトンによる磁化特性の表現(第51回自動制御連合講演会 2008年11月22日、23日 214、山形大学工学部)

研究業績

- (1) 宮坂総、齋藤兆古、加藤千恵子：動画像の色彩情報可視化とその応用(第35回可視化情報シンポジウム 工学院大学2007年7月25日, C213,. Vol.27, Suppl. No.1 (2007年7月) pp. 227-228.)
- (2) 宮坂総、須永高志、齋藤兆古、加藤千恵子：1/f ゆらぎに関する一考察(第16回 MAGDA カンファレンス in 京都 2007.11.22-23 P50)
- (3) 宮坂総、須永高志、齋藤兆古、加藤千恵子：1/f ゆらぎに関する一考察(法政大学学術機関リポジトリ 030 紀要)
- (4) 宮坂総、齋藤兆古、堀井清之：セルオートマトンによる磁化特性の可視化 - 複雑系の物理とプライザッハモデル - (可視化情報 Vol.28 Suppl.No.1 2008年7月 P01-004)
- (5) 齋藤兆古、宮坂総、加藤千恵子：1/f ゆらぎの可視化(可視化情報 Vol.28 Suppl.No.1 2008年7月 P01-006)
- (6) 宮坂総、齋藤兆古：セルラー・オートマトンによる磁化特性の表現(第51回自動制御連合講演会 2008年11月22日、23日 214、山形大学工学部)

謝辞

本研究を進めるに当たり、齋藤兆古教授には多くのご指導、ご支援を賜りました。深く感謝いたします。

また、齋藤研究室の皆様には、公私にわたりご助言、ご支援を賜りました。ありがとうございました。

付録 絵画の1/f ゆらぎ抽出

1A. 序論

近年、うつ病などの精神疾患の患者が増加している。このような精神疾患の患者はカウンセリングによって診断されている。しかし、カウンセリングは言葉のみで診断を行うことは困難である。アートセラピーは、自分の気持ちや心を他人に伝えることができない人や、自分自身で自分の気持ちや心の中を理解できない人が言葉ではなくアート(絵画)で表現することによって、専門家(アートセラピスト)がその作品から心理状態を分析するものである。しかし、このアートセラピーには熟練した技術が必要である。

そこで、「1/f ゆらぎ」に注目した。「1/f ゆらぎ」は、ヒーリング効果のある音楽などに存在すると言われている。また、音楽だけでなく「1/f ゆらぎ」は、自然界の様々なところに存在している。小川のせせらぎ、爽やかなそよ風などの心が安らぐリズムが主な例である。^{1A)}

さらに、「1/f ゆらぎ」は、身体のリズムと関係していると言われており、心拍のリズムや目の動き、脳波のα波の周波数にも「1/f ゆらぎ」が存在している。^{2A)}このことより、身体のリズムのみではなく、人間が行う動作にも「1/f ゆらぎ」が存在するのではないかと考えることができる。

本研究では、ゴッホの絵画^{3A)}を取り上げて絵画の色使いの時系列的変化を可視化し解析することによってその時代の作者の心理的な状態を知る手がかりとなる可能性があることを示す。

2A. 「1/f ゆらぎ」とは

任意の周期関数 $f(t)$ をフーリエ級数で表現すると

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i \cos(i2\pi ft) + b_i \sin(i2\pi ft)] \\ &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \cos\left[i2\pi ft - \tan^{-1}\left(\frac{b_i}{a_i}\right)\right] \quad (1A) \\ &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \cos\left[i2\pi ft - \cot^{-1}\left(\frac{b_i}{a_i}\right)\right] \end{aligned}$$

となる。離散値系フーリエ変換では、定数項と余弦波の項が実部、正弦波の項が虚部のノルムとなる。

(1A)式のパワースペクトラムの振幅 c_i が周波数 if に対して反比例する信号を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。フーリエ・パワースペクトラム対周波数の関係

を両対数グラフに描き、描かれた線の傾きによってゆらぎの種類を大別する。図 A.2.1 にフーリエ・パワースペクトラム対周波数のグラフの一例を示す。図 A.2.1 で、直線の傾きが 0 の場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急なほど単調な信号を成る。そして、ホワイトノイズと単調な信号の間で直線の傾きが約 -1 となる場合を「 $1/f$ ゆらぎ」と呼ぶ。

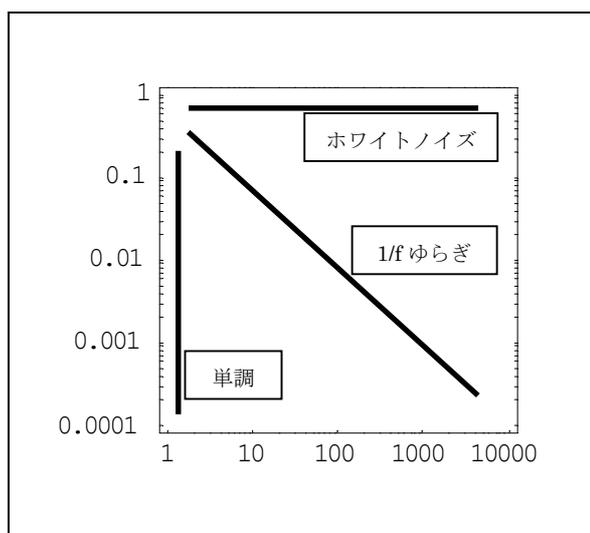


図 A.2.1 $1/f$ ゆらぎの種類

3A. 解析方法

3A.1 カラー画像の固有パターン

デジタル画像は光の三原色(赤 R、緑 G、青 B)からなっている。1 枚のカラー画像は R、G、B 成分が構成する 3 枚のモノクロ画像からなっている。RGB 各成分画像はそれぞれ各成分の強度分布が 0 から 255 の 8 ビットの解像度で描かれている。それぞれの RGB 成分画像の RGB 強度のヒストグラムを作成する。それぞれの RGB 成分画像の強度分布ヒストグラムを RGB 固有パターンと定義する。

ここでは、この RGB 固有パターンを抽出し「 $1/f$ ゆらぎ」解析を行う。まず、各画像から色成分画像を抽出する。次に、RGB 各色成分画像から RGB 固有パターンを抽出する。

3A.2 ゆらぎの解析

固有パターンのゆらぎ解析を行う。ゴッホの個々の作品それぞれに対する RGB 固有パターンを時系列に並べ、時系列方向に離散フーリエ変換を適用し、フーリエ・パワースペクトラムを得る。フーリエ・パワースペクトラムの周波数に対する変化へ累乗近似を適用してゆらぎ成分を抽出する。その結果

RGB 成分の 0 から 255 までの強度成分の「 $1/f$ ゆらぎ」の存在を表した数値配列を得ることができ、横軸に RGB 成分強度値、縦軸にパワースペクトラムの傾きをとりグラフ化した。このグラフの傾きが -1 に近いほど「 $1/f$ ゆらぎ」に近い信号であると言える。

4A. 結果と考察

4A.1 初期の頃

ゴッホが画家になり絵画を描き始めたころの絵画のいくつかを以下の図 A.4.1 に示す。^{3A)}また、これらの絵画の RGB 強度のヒストグラムを図 A.4.2 へ示す。さらに、以下の図 A.4.3 にゴッホが 1881 年頃に描いた複数枚の絵画から抽出したゆらぎを示す。



図 A.4.1 1881 年頃に描いた絵画

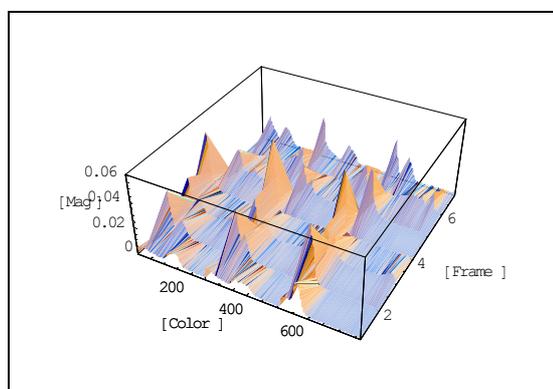


図 A.4.2 絵画の各色成分のパワースペクトラム

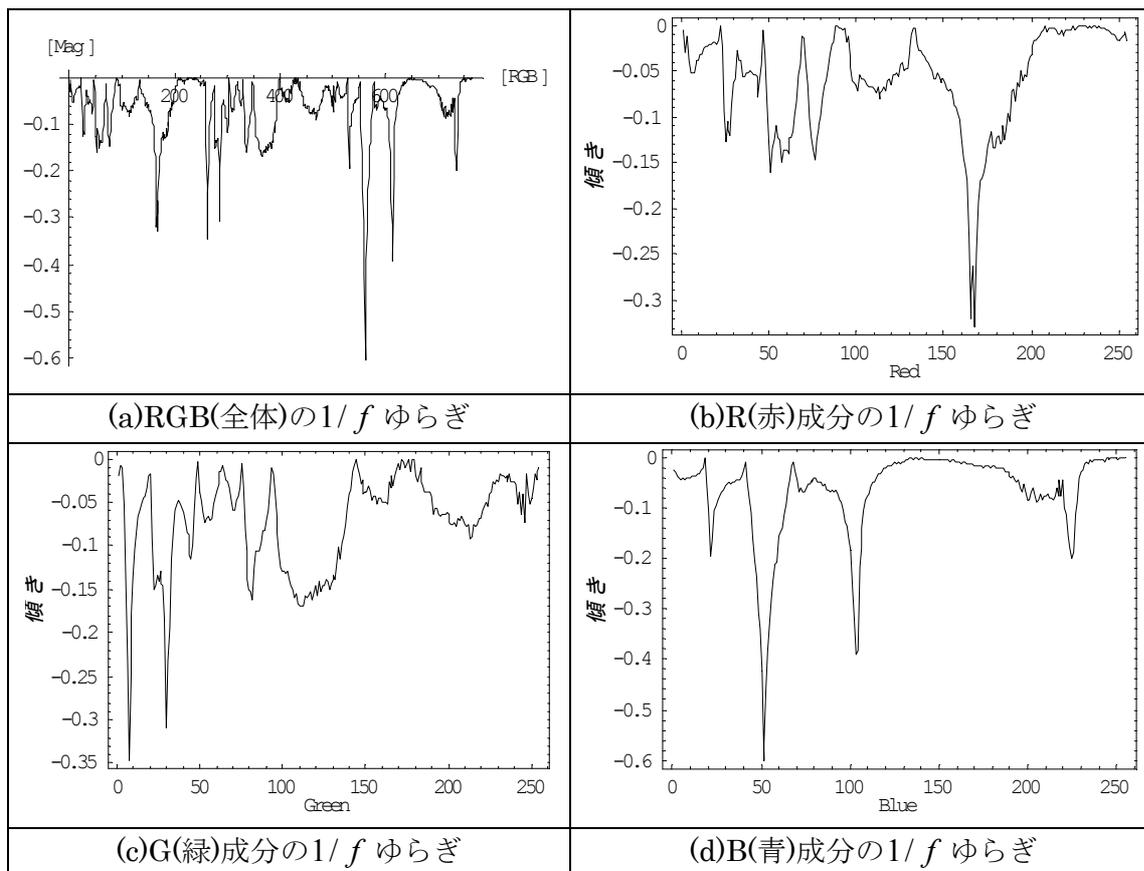


図 A.4.3 各色成分から抽出した $1/f$ ゆらぎ

抽出したゆらぎからわかるように R 成分(図 A.4.3(b))と G 成分(図 A.4.3 (c))には「 $1/f$ ゆらぎ」の存在が見られない。しかし、B 成分(図 A.4.3 (d))においては「 $1/f$ ゆらぎ」に近いゆらぎが存在する。

青は「寒冷」「冷淡」「陰気」の象徴としてよく使われている。さらに、原点・原初の色であり、創造するクリエイティブなエネルギーであり、創造して物を互いにコミュニケーションするエネルギーである。^{5A)}

また、青の中でも淡い青の部分に「 $1/f$ ゆらぎ」に近いゆらぎが見られる。淡い青の花として勿忘草が挙げられる。この花の花言葉は「私を忘れないでください・真実の愛」である。^{4A)}このように青には、マイナスのイメージや失恋のイメージがある。

ここで、実際に起こった歴史的背景と比較してみる。ゴッホはこの作品を描いた時期に失恋している。さらには、好きな人の両親に自分の気持ちが真剣であることを伝えるため、左手を蝋燭の炎にかざすという自傷行為をこの時にゴッホは行っている。^{6A)}このため、絵画にこの失恋した時の心理状態が反映されていると考えられる。また、弟と画家として将来について話し合い、自分が画家として生計を立てられるか否かを悩んでいる様子が伺える時期で

あり、さらに、水彩画の道具一式を尊敬する画家から与えられ絵画の方向性を変えようとしている時期である。つまり、画家として原点に戻り、創造するクリエイティブなエネルギーを生み出そうとしている時期であると言えよう。^{6A)}

4A.2 1888年12月後半～1889年2月頃

ゴッホが自分の耳を切り落とした1888年12月後半～1889年2月頃の絵画に注目してみた。この頃、ゴッホは自画像を含め複数の人物画を描いている。ここでは、その人物画について解析を試みた。この時代に描いた人物画の中のいくつかを図A.4.4に示す。^{3A)} また、これらの絵画のRGB強度のヒストグラムを図A.4.5示す。さらに、図A.4.6はこれらの複数枚の絵画から抽出したゆらぎを示す。



図 A.4.4 1888年12月後半～1889年2月頃までに描いた絵画

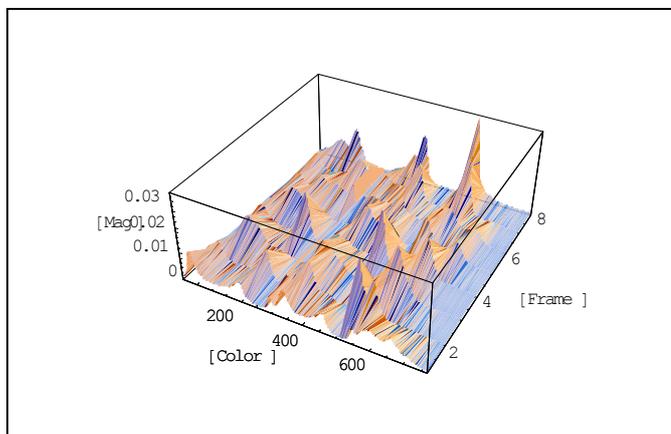


図 A.4.5 絵画の各色成分のパワースペクトラム

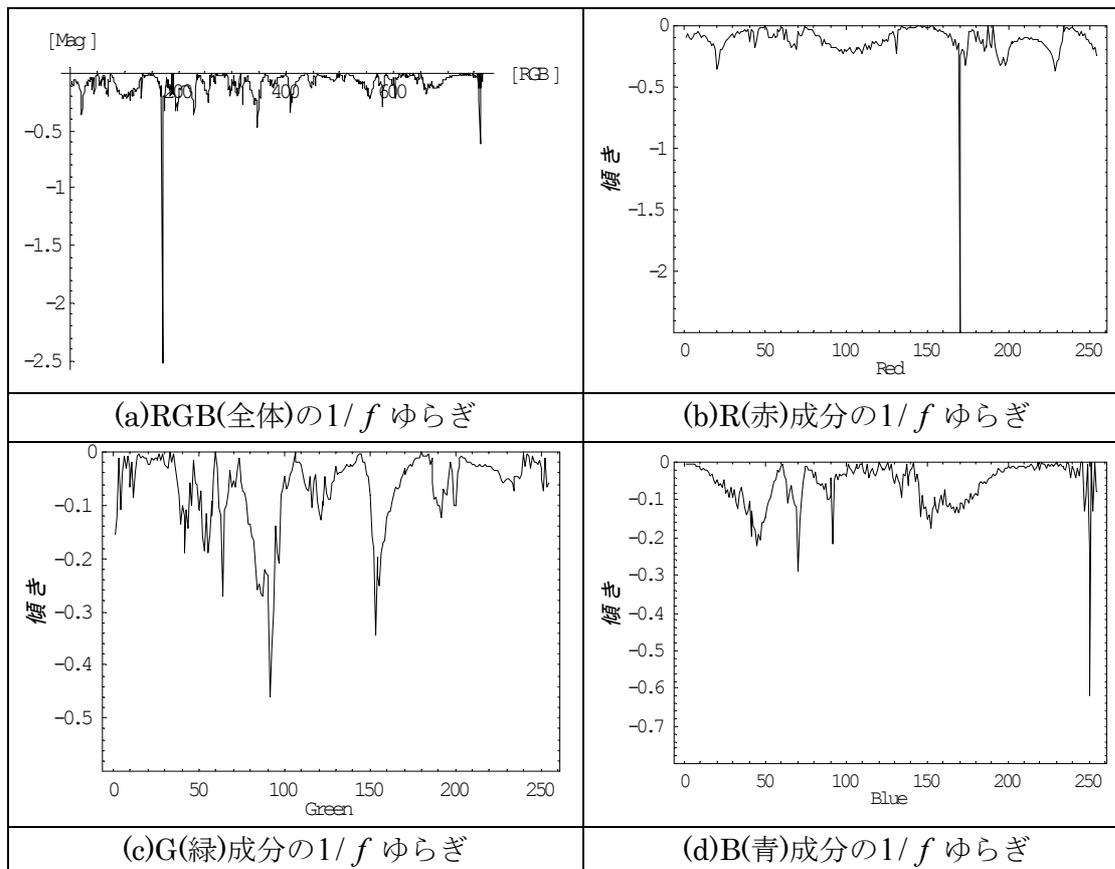


図 A.4.6 各色成分から抽出した $1/f$ ゆらぎ

図 A.4.6 から、抽出されたゆらぎからわかるように、4.1 節で解析した場合と同様に R 成分(図 A.4.6(b))と G 成分(図 A.4.6(c))には「 $1/f$ ゆらぎ」の存在が見られなかった。しかし、B 成分(図 A.4.6(d))においては、画素値が最も大きい部分（濃い青）に近似的な「 $1/f$ ゆらぎ」が存在する。青の濃い部分には、深い悩みなど精神的にマイナスの状態にあるイメージがある。

ここで、実際に起こった歴史的背景と比較してみる。この時期、ゴッホは知人のゴーギャンの頭にコップを投げつけたり、カミソリで脅したり、自分の耳を切り取り、紙で包み、売春宿に送り届けたりするなど異常な行動を行っていた。さらには、幻覚の病にかかるなどしており深い悩みの状態であったであろうことが絵画に反映されていると言える。^{3A)}

5A. まとめ

本研究では、絵画中の色成分の時系列変化における「 $1/f$ ゆらぎ」周波数成分分布の可視化を行った。

その結果、絵画の色成分から見て、使う色と絵画の作者の心理状態との相

関が示唆された。

参考文献

- 1A) 寺西正晃、丸山和夫、早野誠治、齋藤兆古、堀井清之：自然界の画像が持つ $1/f$ 周波数成分の可視化(第33回可視化情報シンポジウム B108 工学院大学 2005年7月25日)
- 2A) F 分の1ゆらぎの謎にせまる：
<http://www.athome.co.jp/academy/physics/phy03.html>
- 3A) ゴッホの障害
<http://www.geocities.jp/twentyfirstnet/gogh/>
- 4A) フリー百科事典『ウィキペディア(Wikipedia)』
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%89%B2>
- 5A) 加藤マイヤ：ホリスティック・カラーセラピー(現代書林.2006)
- 6A) Ingo,F,Walther,Rainer, Metzger：ゴッホ全油彩画(TASCHEN.2002)
- 7A) 宮坂総、齋藤兆古、加藤千恵子：動画像の色彩情報可視化とその応用(第35回可視化情報シンポジウム 工学院大学2007年7月25日, C213,. Vol.27, Suppl. No.1 (2007年7月)pp. 227-228.)
- 8A) 宮坂総、須永高志、齋藤兆古、加藤千恵子： $1/f$ ゆらぎに関する一考察(第16回 MAGDA カンファレンス in 京都 2007.11.22-23 P50)