

芸術工学会誌

Design Research No.46, Mar. 08

2007 年度秋期大会（名古屋）記録号

● 2007 年度春期大会 基調講演記録

● 2007 年度秋期大会（記録）

● 研究論文

● 学会より

2008 年度春期大会（富山）

秋期大会（熊本）のご案内 他



職場不適應者の芸術療法における描画の「1/f ゆらぎ」解析

1/f Fluctuations Analysis of Paintings in Art Therapy for a Maladjusted Person

- 加藤千恵子／東洋大学、斎藤兆古／法政大学
KATO Chieko / Toyo University, SAITO Yoshifuru / Hosei University
- Keywords: 1/f fluctuations, image processing, art therapy

要約

本研究では、「ゆらぎ」理論を用いて、うつ病を呈した職場不適應者に対する芸術療法における描画の解析を行い「1/f ゆらぎ」を抽出し、その「ゆらぎ」と職場不適應者の病状との関連について探求した。具体的には、一次元離散フーリエ変換を用いて職場不適應者が描いた色彩画のR（赤）G（緑）B（青）成分ごとにパワースペクトルを計算し、「ゆらぎ」を抽出する手法を考案し試行した。その結果、うつ病のクライアントの病相期から回復期への症状と描画の「1/f ゆらぎ」との関連を捉えることができた。

病相期には、クライアントAは葛藤を抱えながらも治療への姿勢を示すように、R成分に「1/f ゆらぎ」が見られた。赤は、エネルギー・怒り・激情を示すと考えられる。つまり、クライアントAは現在の仕事に対して過剰適応している自分に描画を通して気付くというエネルギーを持ち始めながらも、それを受け入れる葛藤を感じていた。その後、回復期初期においては、周囲から治癒されてきたと見えていたが、クライアントAはまだ自分の現状を受容しきれておらず、その様子が「1/f ゆらぎ」が現れていないことにより示されている。その後、回復期中期では、安らぎや癒しを示すと考えられるG成分において「1/f ゆらぎ」が見られ、回復過程をたどっている様子が示された。回復期後期では、B成分において「1/f ゆらぎ」が見られ、沈静を求めている様子が示されていた。

本研究より、クライアントの描画を客観的かつ定量的に捉えることが可能となることが期待でき、正確なクライアントの症状把握に貢献できる可能性が示唆された。

1. 緒言

「ゆらぎ」とは物理学では「力・速度・密度・温度・音量・濃淡等の物理量を測定して得る観測値に対して、その統計的に見た平均値の近くで変動する現象」と定義されている¹⁾。その物理量が空間的・時間的に変化するとき、平均的には一定の周期を示しているように見えるが、正確に測定すると完全に予測できないような「ズレ」が出ている。この「ズレ」が「ゆらぎ」であり、自然界をはじめ、様々な場で「ゆらぎ」現象が観測できる。例えば、そよ風の風速の変動を分析してみると、その変動の大きさが周波数（一定期間内の同じ振動状態の繰り返し）に反比例すれば、このような変化を「1/f ゆらぎ」と呼んでいる¹⁾。「1/f ゆらぎ」現象は自然界に多く存在し、例えば、小川のせせらぎや小鳥の囀り等の心安らぐリズムが相当する²⁾。

近年、ストレスによる心身症やうつ病患者等に「1/f ゆらぎ」を有する絵画や音楽を与えることで癒し効果が得られ、ストレスの解放に繋がることの実証されてきている²⁾。

ところで、芸術療法、特に描画療法の描画の診断においては経験に基づく主観的評価による診断が多く、客観的な測定はなされていない。そのため、客観的指標を確立し、わずかなクライアントの変化を見逃さない、より適切なカウンセリングを行う手助けが必要であると考えられる。

そこで本研究では、描画からクライアントの病状を客観的に把握するための第一歩として、描画における「1/f ゆらぎ」と病状との関連について検討していく。

2. 「1/f ゆらぎ」理論

(1) 「1/f ゆらぎ」の定義

「ゆらぎ」解析は、一次元離散フーリエ変換（以下、離散フーリエ）を用いて、ある時系列信号の各周波数に対するパ

ワースペクトルを計算し、パワースペクトル-周波数の分布から「ゆらぎ」を判別する。図1に示すように、パワースペクトル-周波数の両対数グラフを描き、グラフの傾きによって「ゆらぎ」の種類を大別する。直線の傾きが0の場合は主にホワイトノイズとなり、傾きが急になる程単調な信号になる。そしてホワイトノイズと単調な信号の中間的な信号で傾きが約-1の場合を「1/fゆらぎ」と呼び、人間が心地良いと感じることができる信号といわれる。すなわち、周波数の低下とともにパワースペクトルが増加するような信号の中で、パワースペクトルの振幅が周波数に対して反比例する信号が「1/fゆらぎ」である。

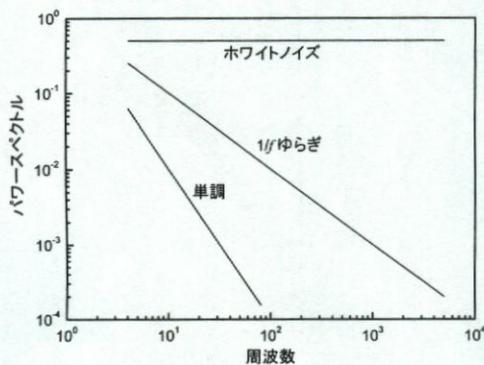


図1 「ゆらぎ」の種類

(2) カラー画像における濃淡値のヒストグラム

連続画像は空間情報と時間軸情報を持つため、本研究では、デジタル連続画像の各画素単位でフレーム方向、すなわち、RGB濃淡値のヒストグラムから時間軸方向の周波数成分抽出を行い、「ゆらぎ」の現象を解析する。

ここでRGB濃淡値を用いる理由は、カラーが生物学的・心理学的に人に影響を与えるからである^{3*,4*,5*}。

デジタル画像は画素RGBの集合であり、各画素は可視光の波長によってRGBで構成される。通常、各波長の分解能は8ビットであるから、RGB濃淡値はそれぞれ0から255までの256階調の画素値(画像の濃淡値)を取る。RGB濃淡値分布をそれぞれ I_R 、 I_G 、 I_B とすると、正規化成分分布 I_i^D は

$$I_i^D = \text{Round} \left[\frac{I_i}{\text{Max}[I_i]} \right] \quad i=R, G, B \quad (1)$$

で定義できる。ここで、 $\text{Round}[*]$ は括弧内の値を整数化する演算、 $\text{Max}[*]$ は括弧内の集合における最大値の要素を求める演算を示す。静止画像のRGB濃淡値のヒストグラム E_i は、各正規化成分分布 I_i^D において0から1までの数値の出現頻度をヒストグラム化したもので、下記の式で計算される。

$$E_i = \text{Count}[I_i^D, n] \quad i=R, G, B; \quad n=0, 1, 2, \dots, 255 \quad (2)$$

ここで $\text{Count}[* , n]$ は括弧内の集合における数値 n (画像の濃淡値)の個数をカウントする演算である。

カラー静止画像の濃淡値のヒストグラム E は、R濃淡値のヒストグラム E_R 、G濃淡値のヒストグラム E_G 、B濃淡値のヒストグラム E_B で構成され、

$$E = [E_R, E_G, E_B] \quad (3)$$

で定義される。

図2から図5はクライアントAの描画である。これらは解析に用いた16枚のうち、クライアントAの掲載許可が得られた代表的なものである。式(1)と式(2)を用いてRGB濃淡値のヒストグラムを計算し、その結果を図6に示す。ここで、縦軸は最大値が1に正規化された頻度、横軸は画素値の強度を示す。画像のRGB濃淡値のヒストグラムを比較すると、それぞれ独自の分布を持っていることがわかる。

(3) 連続画像の「ゆらぎ」抽出

各画像の濃淡値のヒストグラムを時系列に並べることで連続画像のヒストグラムが定義される。すなわち、下式に示すように各画像の濃淡値のヒストグラムを時系列に並べ、連続画像のRGB濃淡値のヒストグラム F を構成する。

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_N] \quad N: \text{画像枚数} \quad (4)$$

本研究では、クライアントAの描画より得られた濃淡値のヒストグラムの「ゆらぎ」を求めるために、時系列方向に離散フーリエ変換を行い、各周波数に対するパワースペクトルを計算する。

図7は16枚の日付順に描かれたクライアントAの描画(本研究では16枚ごとに4期に分類し解析を実施している)に対して、式(1)~(3)によって濃淡値のヒストグラムを抽出し、式(4)によって連続画像のRGB濃淡値のヒストグラムを生成したものである。そして、時系列方向に濃淡値のヒストグラムに対して離散フーリエ変換を行い、各周波数のパワースペクトルを計算する。図8はRGB濃淡値におけるパワースペクトルの分布である。

視覚的に分かりやすくするために、パワースペクトルと周波数をそれぞれ、縦軸と横軸に対応させ両対数グラフを描く(図1)。そして、累乗近似を用いて両対数グラフで表したときの傾きを求める。-1に近い程「1/fゆらぎ」に近い信号が存在することを意味する。

(4) 累乗近似

離散フーリエ変換で求められた周波数 f に対するパワース

ベクトル p が下記の N 個の数値配列

$$(f, p) = \{(f_1, p_1), (f_2, p_2), \dots, (f_N, p_N)\} \quad (5)$$

で構成される。この周波数とパワースペクトルの数値配列を両対数グラフで表したときの傾きを求める方法として累乗近似を採用し、直線に回帰させる。すなわち、次式により周波数に対する回帰パワースペクトルの傾き a を求める。

$$x_i = \log f_i \quad y_i = \log p_i$$
$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (6)$$

したがって、周波数とパワースペクトルとの関係式は

$$p = b f^a \quad (7)$$

となる。ここで、 b は係数である。回帰直線の傾き a が 0 のとき、その信号はホワイトノイズで構成されている。傾きが急になるほど単調な信号になる。そして、ホワイトノイズと単調な信号の中間的な信号 (傾き $a = -1$) が「 $1/f$ ゆらぎ」となる。

(5) 「ゆらぎ」抽出方法

本論文では、下記の手順で連続画像の RGB 濃淡値の「ゆらぎ」の抽出を行う。

- (a) 連続画像に対して、式(1)~(3)によって各画像の濃淡値のヒストグラムを計算する。
- (b) 式(4)に示すように各画像の濃淡値のヒストグラムを時系列に並べる。
- (c) 時系列方向に濃淡値のヒストグラムに対して離散フーリエ変換を行い、各周波数のパワースペクトルを計算する。
- (d) 累乗近似式(6)を用いて両対数グラフで表したときのパワースペクトルの傾きを求める。

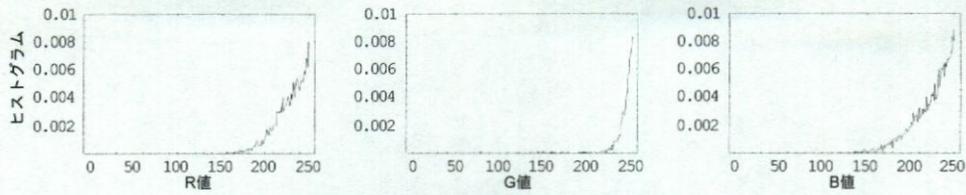
3. 事例

本事例は、職場不適應の状態になり、会社の産業医の勧めのもと、クリニックに来院したクライアント A の描画療法を用いたカウンセリングの過程である^{6*}。クライアント A は 30 代前半の男性であり、大学院修了と学歴が高い。公務員として 3 年間働き、その後、外資系の経営コンサルタントに転職した。独身で両親と同居している。幼少時には落ちつきがなく多動なところはあったが、反抗期もほとんどなく手のかからない子であり勉強もできた。主訴は、「仕事上のケアレスミスが多い。上司・同僚を問わず頼まれた仕事は全てこなさな

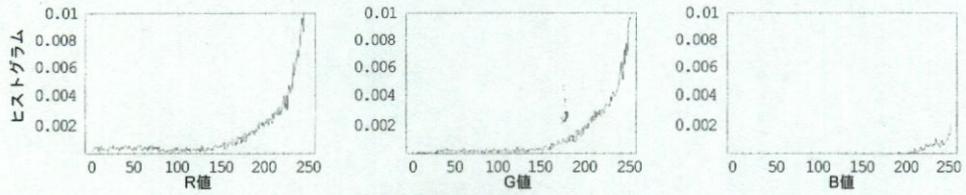
くはならないと思ってしまう。労働時間が 1 日あたり 12 時間から 14 時間であり少し長すぎる気がする。かぜでもないのに微熱が出る」とのことであった。また、「現在のコンサルタント業務を継続できるように、体調を整えたい」と強く要望していた。インテーク時のカウンセラー (筆者) のクライアント A に対する印象としては、中肉中背であり、ものあたりは柔らかく、優しそうな印象であった。

カウンセリング導入までの経緯としては、Y クリニックの産業医により来院後半年間薬物療法が実施されていたが、クライアント A が「薬を飲むと仕事に眠くなってしまっているので、薬を止めるか減らしてもらいたいです」と訴えたため、産業医は薬の量を減らし、並行してカウンセリングを導入することとした。カウンセリングは 1 回 30 分とし月に 2 回行い、病状の改善がみられていくに従い月に 1 回とした。

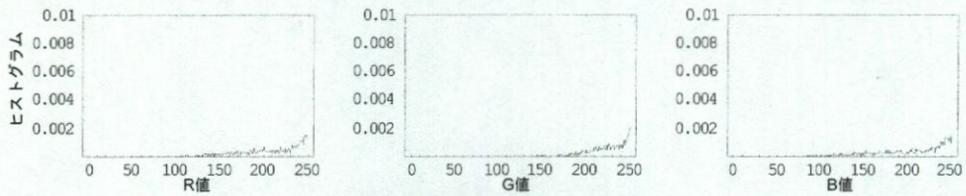
クライアント A は仕事に対して過剰適應の状態 (外的適應と内的適應との不均等状態であり、周囲には外の環境に対して非常に適應的であるように映っても、本人が著しい不満や不安を抱えている状態) にあり、軽症うつ状態であった。言語によるカウンセリングを実施した結果、クライアント A が自らの状態に気付いていないことがわかった。カウンセラーが仕事について尋ねると、「今の仕事はちょっと大変けれども充実しているから、何とかもつと頑張って続けられるようにしたいのです」と述べていた。カウンセリングを実施することに対しては「あまり必要があるとは思えないです」と述べていたが、カウンセリング実施後は「いろいろ話せてすっきりします」と産業医に述べていた。しかし、言語によるカウンセリングでは、自らの現状に気付くことが難しいとカウンセラーは考えた。職場不適應者は過重労働状況下におかれているということに気付いていない場合が多いため、自らのストレスへの気付きを促す治療が必要であるとされている^{7*}。自らも気付かない状態において気付きを促すには、無意識を表出し、気付きを促すことが可能な芸術療法を用いることが好ましいと考えられた。芸術療法は意識下に抑圧されていた様々な問題について言語を介さずに表現することができ、無意識の存在をあるがままに表出し、無意識と意識の橋渡しをするものであるとされている^{8*}。また、芸術療法は心の中の葛藤や抑圧された感情を、イメージを通じて解放させ、カタルシス効果 (以前に抑圧された経験に付随していた情緒を発散する) を引き起こす^{9*, 10*}とされるため、気持ちを表現することができないクライアント A の心を解き放ち、本当の自分



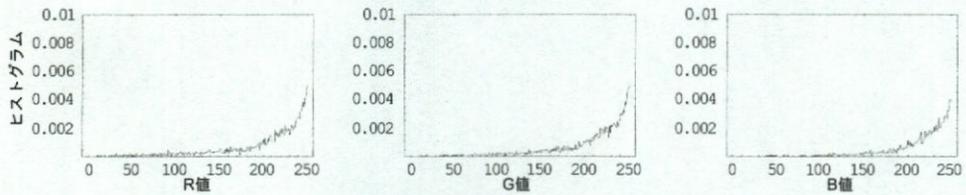
(1) 図2の濃淡値のヒストグラム



(2) 図3の濃淡値のヒストグラム



(3) 図4の濃淡値のヒストグラム



(4) 図5の濃淡値のヒストグラム

図6 クライアントAの描画のRGB濃淡値のヒストグラム

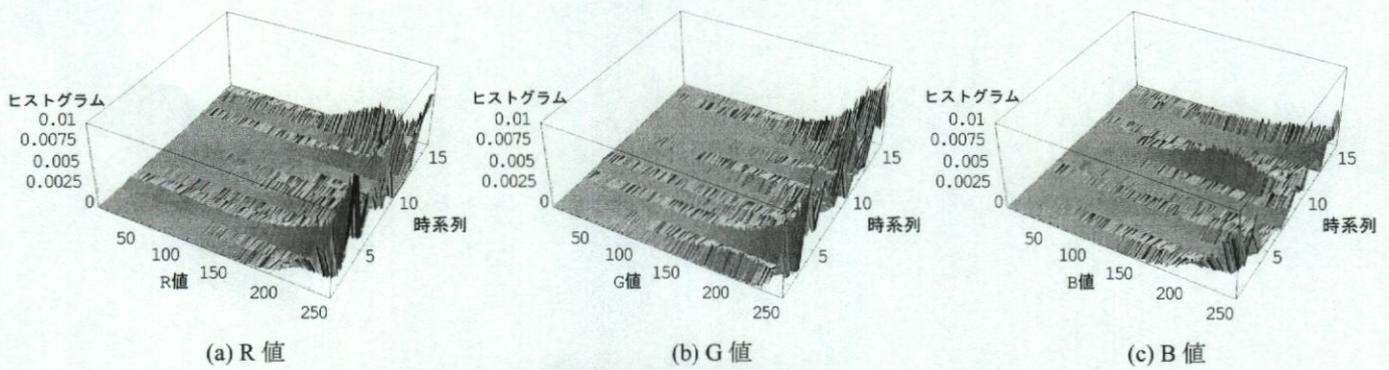


図7 16枚の連続描画のRGB濃淡値のヒストグラム分布

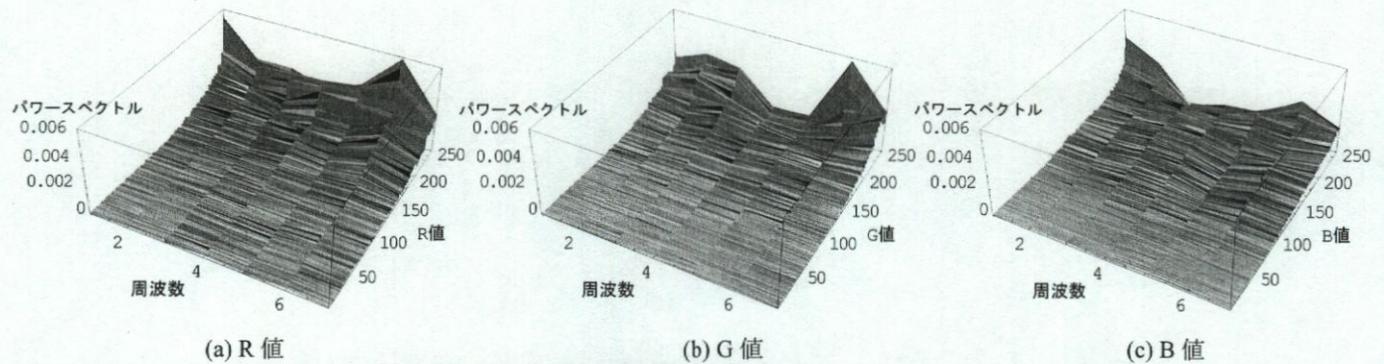


図8 16枚の連続描画のRGB濃淡値のヒストグラムのパワースペクトル分布

に気付くことが可能となると考えられた。芸術療法の中でもクライアントAは絵を描くことを望んでいたため、描画療法を用いることとした。

クライアントAの症状に合わせて病状を4期に分けた。通常、うつ病は病相期と回復期に分けられ(京都府精神保健福祉総合センター)、クライアントAも同様の回復過程をたどった。第1期は病相期であり、心身のエネルギーが衰え、疲労感等の身体症状が目立ち、不安・いらいら・ゆううつが前景に表れ、自責感・自己否定感・絶望感・不安感・焦燥感等の感情に振り回されている時期でもある。第2期の回復期への移行期、つまり回復期初期は、周囲からは良くなったと思われ、クライアントAの焦燥感も減少しているが、楽しさが実感できない・やる気がない・集中力が低いという問題を抱えている時期でもある。病相期に逆戻りする可能性もあり、自殺年慮が高まる時期でもある。第3期の回復期中期には症状も安定し、気分変動が減るが、疲労を感じやすい。第4期の回復期後期では、回復を遂げたように見えるが、完全には回復を遂げたわけではないので、注意をして見守る必要がある。

4. 結果

ここでX0年5月からX1年の4月までのうつ病のクライアントAが描いた絵を解析する。ここでは、時系列変化の特性に対して「1/fゆらぎ」を検出しており、「1/fゆらぎ」を示すRGB濃淡値について代表的な描画を取り上げ、その特徴について解説していく。

図9と図10はX0年5月から8月までの中でクライアントAからの掲載許可が得られた代表的な描画を示す。この時期、クライアントAは仕事に過剰適応であった自分の状態に気が始め、不安や焦りを感じ始めており、第1期の病相期であると診断される。この時期の描画についてそれぞれRGB濃淡値のヒストグラムを求め、描画の日付順に時系列で離散フーリエ変換を行う。そのパワースペクトル-周波数の分布の傾きを図11に示す。この結果からR成分に「1/fゆらぎ」が12%見られる。赤は生命力・エネルギー・熱情・自己主張等という激しさや強い生命力等の高揚した心理と結びつきやすいと同時に、怒りや葛藤とも結びつくと考えられるが、病相期におけるR系統の色に「1/fゆらぎ」が見られたことは、クライアントAが無意識下にあった自分、つまり現在の仕事を続けることが辛い、仕事に対して過剰適応している自分に対して、

描画を通して気付くというエネルギーを持ち始めながらも、それを受け入れることに葛藤を感じていたものと理解することができる。

具体的にはクライアントAの描画よりR成分の「1/fゆらぎ」について考察を行う。図9は「1/fゆらぎ」が見られるR成分を含んでいる。この時期のクライアントAは微熱や疲労感を訴えており、今の仕事を続けられるかどうかという不安や焦りから不眠症状も訴えていた。カウンセリング時にも通常より多弁であり焦燥感が表れていた。黄色い太陽が左下の人らしきもの(クライアントAいわく蟻)を照り付けている。これが自分であるとする、自分が白日の下にさらされている。太陽は脱中心性、万能感、転換期を示す¹¹⁾。そして、その人は過去を示す左を向いている¹²⁾。つまり、いわゆるエリートであったクライアントAには過去の栄光を取り戻せるという万能感はあるが、一方で這い蹲ってどうしようもないとも感じており、クライアントAの中に2つの自己が内在している状態であるとカウンセラーは考えた。過去の栄光にすがろうとするが、そこまでたどり着かない。しかし、クライアントAは現在の仕事についていけない自己を受け入れようとしており、もがいている様子が太陽の示す転換期に現れている。このときカウンセラーは、現実を受容しようともがいているクライアントAを受容したいと思い、図9について、「こんなに暑い中で小さな蟻が頑張っているんですね。きっとこれからも汗をかきながら休みながら進むのでしょうか。ちょっとくらい休んでも、こんな暑い中で過ごしているだけで凄いですね」と述べた。するとクライアントAは「休んでは進歩がありません。挫折しないように進まないといけません」と述べたので、カウンセラーはさらに「暑い中にいるだけですごいですから。それが進歩です」と述べた。クライアントAは「そんなものですかね」と苦笑いをしていた。

図10は太陽に見える赤い丸が新芽を照らしている描画である。この時も図9が描かれたときと同様の症状であったとクライアントAは述べている。ここでもR成分が用いられていることがわかる。この描画に対してクライアントAは「この赤い丸は月です。新芽が成長するには太陽が必要ですけどね」と語った。新芽はクライアントAを示していると考えられる。この発言を聞いたカウンセラーは「そうですけど、月でもいいかもしれませんね」と応えた。カウンセラーはクライアントA自身に成長しようとする気持ちがあることに気付いてもらいたいと思い、太陽よりエネルギーがない月でも新

芽は成長できることを伝えようとした。クライアントAは赤い丸を最初に描き、その周辺を黒く塗りつぶし月とした。赤い太陽に照らされて成長するほどのエネルギーはまだクライアントAの中にはないが、新芽としての新たな自分が少しずつ芽生えてきていることがわかる。

その他、G成分やB成分においてもそれぞれ8%、10%の「1/fゆらぎ」が見られる。図10に見られるように、G成分の示す癒しに伴う回復の兆候が表れている様子が窺える。また、B成分が沈静化を示すと考えられることから、病相期ではあるが、焦燥感や不安を鎮めようと懸命にもがいている様子が窺える。

図12と図13はX0年9月からX1年1月前半に描かれた代表的な絵である。この時期、クライアントAは職場の人からは良くなってきたと思われてきている。しかし、まだ不眠や発熱といった身体症状が残っており、「まあまあだが、いまいちやる気が沸かない」「ちょっと疲れる」「どうするのが一番良いのか迷っている」と述べている。クライアントAは、ありのままの自分を受け入れ、現在の仕事は過剰適応であり、続けることができないということを認めてはいるが、それを認めることに対する抵抗を示していると考えられる。この時期には辞表を提出することを考えているが、仕事自体にはやりがいを感じているクライアントAにとって仕事を辞めることを受け入れることはかなり困難であった。カウンセラーはクライアントAには転職するだけのエネルギーはまだないと考えたため、辞めるのではなく事務職に配置転換してもらうことを勧めた。以上より、この時期は第2期の回復期への移行期、回復期初期であると診断される。ここで、この時期の描画の「ゆらぎ」を時系列解析したものを図14に示す。その結果、どこにも「1/fゆらぎ」が現れていないことがわかる。

図12についてであるが、この時期にはクライアントAは「まだ微熱が出ることもたまにあります」と述べていた。カウンセリング時には少し疲れた様子を示していた。この図は多義的な意味を含んでいる。この描画はさいころのように見える。ころころ変わる気分を描いているようである。このときのクライアントAの発言には現在の仕事を辞めるかどうか迷っていることが含まれていることが多く、カウンセラーは「迷うのも当然である」ということを伝えるように心がけていた。

図13が描かれたときには「周りの人に自分の様子がわかってもらえないことがあります」と述べている。症状は図12

が描かれたときとほとんど変わっていない様子であった。図13はとげとげしい岩が連なっている海岸のように見える。岩場はとがっていたら危ない。とげとげしい感じがし、落ちたら怪我をしそうである。次のステップに進むにはかなりの困難が伴うことをクライアントAは示しているのであろう。この描画は周りの状況が悪くて動けないクライアントAを表しているとも考えられる。中にまぎれて自分をわからなくしているようである。黒は自分の中の暗い部分を表している。黒は宇宙の無意識を示すとも考えられる。他の色にも覆われ、囲まれている。空のイメージと水のイメージである。透き通った部分と石の影の部分がある。塗り方としては黒く描いた後に青を塗ってさらに黒で抑えている。黒い無意識の衝動を抑えているようである。頂が見えている所と見えない所がある。右側は未来を示す^{12*}が、右側の頂には見えない部分があり、上がっていくかもしれないが、下がっていくかもしれない。クライアントAが自分の未来について不安に思っている様子が示されている。

図2から図5はX1年1月後半から2月に描かれた絵であり、クライアントAは不眠症状もほとんどなくなり、落ち着いてきており、第3期の回復期中期であると診断できる。この時期の各描画のRGB濃淡値のヒストグラムを時系列的に離散フーリエ変換したものを図15に示す。その結果、G成分に12%の「1/fゆらぎ」が見られる。G成分は、心身の疲れを癒し、回復へと導いてくれると考えられ、また、安心感やバランス感覚とも結びついていると考えられる。このことより、クライアントAは、自己を受け入れ、自分の理想と現実のバランスを取ろうとしており、徐々に癒されてきている状態であると理解できよう。この時期の最後に「また困ったら来ますから」とクライアントAは述べ、しばらくして一旦カウンセリングは終了となる。

この時期の特徴的な描画を挙げ、症状の変化を述べていく。図2が描かれた時期には微熱や不眠の症状は無くなりつつあり、焦燥感や不安感も減少してきていた。図2は丸い馬車に小さい車輪が2つあり太陽にも見える。太陽が手前の方に来ている。のどかでホッとさせる描画である。初期の描画と比較すると空が広がってきている。ただし、馬車は宙に浮いており、空を飛んでいる感じがある。着地しようとしているができないのではないかと。つまり、クライアントAは現実と理想のバランスを取ろうとし、現実認識を持ち出しているが、まだ叶わない理想を追求しており、地に足が着かないでいる

と考えられる。

図3が描かれたときも症状は図2が描かれたときとの症状とほとんど差異がなかった。図3は空間の裂け目や割れ目、境界線を描いている。クライアントAの中で何かの区切り、また区切りたいという願望を示しているのではないかと推察される。心的な体験が実生活からはわからないが、何らかの変化があったと考えられる。同じ色であっても同じ濃淡ではない。つまり、境界を際立たせるために異なった濃淡で描いていた。区切りたい気持ちを際立たせていると思われる。「1/f ゆらぎ」が検出された緑という色を考えると、そよ風に吹かれた草の葉をイメージしているとも考えられる。稲の穂や草の葉という感じで生命性を表している。柔らかい印象を見た者に与える描画である。クライアントAは青や緑の洋服を好んで着ていることから2色が好ましい色として捉えられる。

図4が描かれた時期には友人と外出に出る等、症状が回復してきている様子が示されていた。図4は布の扇子のようであり、スカートのようにも、柔らかいイメージである。容器の中に入っている別の世界ともとれる。自分の心の中を容器の中に入れ込んでいるようである。それがガラスから透けて見える。クライアントAは閉じていた自分の心を見ても良いと思ったのかもしれない。緑を中心に描いており、この描画は意味のある転換点を示しているといえる。この時期クライアントAは「夜も眠れるようになった」と述べた。そして「何となく焦らなくなりました」と小さい声で話し始めた。クライアントAが気にしていた熱について話すときも、あまり深刻ではないという印象をカウンセラーは受けた。頑張り過ぎていたことについても自ら話すことができるようになり不眠の症状も和らいできた。以上のことから、クライアントAは無意識の気づきが意識のレベルに昇り、それを受け入れられるようになってきたとカウンセラーは解釈した。

図5が描かれたときは図4が描かれたときと同様、自ら周囲の人と交流を図る等、社交的な面が見られた。図5は草むらや草原・芽・種・水というイメージである。布が揺らいでいる感じがする。クライアントAの心を優しく覆うような感じがする。緑に青が近づいている。緑の癒しと青の沈静化が一体となり、静かな穏やかな癒しを求めている様子が窺える。

図16から図18はX1年3月から4月であり回復期後期にあたる。クライアントAはNPOで働いていることを伝えるに訪れ、スケッチブックをカウンセラーに渡した。クライアントAは、「症状も安定しており、まだ完全ではないが、前の

ように元気になってきています」と述べた。回復期後期では、B成分に最も多く14%の「1/f ゆらぎ」が見られた(図19)。これは沈静を求める色であると考えられるが、この色に「ゆらぎ」が見られるということから、クライアントAは今までの頑張り過ぎていた自分を認め、穏やかな気持ちになろうとしている、またはなりつつあることが示されている。

図16は「1/f ゆらぎ」が検出された青で描かれている。図16が描かれた時期には身体症状はほぼ消えていたが、不安を感じるものがたまにあるようであった。図16が冷えた水であるとする、生命の源であると考えられる。丸いガラスの水晶であるとも捉えることができる。透き通っている感じがする。自分の心が丸い感じになって落ち着いてきており、無意識の自分を見ることができるようになっていることを示しているようである。微妙に陰りをつけており、上から光がさしている。未来からの光である¹²⁾。

図17が描かれたときには、不安感よりも頑張っていきたいという前向きな姿勢が見られた。図17は緑の葉が一面に広がり、枝が画用紙の隅々まで伸びており、生命力を感じさせるものである。徐々にクライアントAにエネルギーがみなぎってきていることがわかる。

図18が描かれた時期は図17が描かれた時期の症状とほぼ同じであった。火山が噴火しているように見える。自分の中の受け入れがたい無意識の部分を外に出し、本来の自己を取り戻したと考えられる。経験を描画により示すことを通して、無意識の出し入れができるようになり、無意識の受容が可能になったといえよう。つまり、クライアントAは認めたくない自分を受け入れたのであろう。

5. まとめ

本研究では、芸術療法における描画を「1/f ゆらぎ」理論を用いて解析した結果、描画における「1/f ゆらぎ」と病状との関連を示すことができた。

本事例では、うつ病のクライアントAの病相期から回復期への状態を描画の解析により捉えた。病相期には、クライアントAは葛藤を抱えながらも治療への姿勢を見せていく。病相期は、治療を始めた頃に不安感・自責感・焦燥感等の感情を持ち、情緒が不安定になる時期であるため、R成分に「1/f ゆらぎ」が見られた。赤は生命力・エネルギー・熱情・自己主張等を示すと考えられる。つまり、クライアントAは現在の仕事に対して過剰適応している自分に描画を通して気付く

というエネルギーを持ち始めながらも、それを受け入れることに対する葛藤を感じていた。

その後、回復期初期では、周囲から治癒されてきたと見られていてもクライアントAはまだ問題を抱えているため、その様子が「1/f ゆらぎ」が現れていないことで示されていた。その後、回復期中期では、安らぎや癒しを示すと考えられるG成分において「1/f ゆらぎ」が見られ、回復過程をたどっていった。さらに、回復期の最後の時期ではB成分に「1/f ゆらぎ」が多く見られ、沈静を求めている様子がわかる。

本研究で「1/f ゆらぎ」が見られた色とクライアントAの状態が一致したことから、本手法がうつ病のクライアントの描画の解析に応用可能であることが示唆された。この手法を多くのクライアントに適用し、妥当性を検証することで今後描画解析を客観的かつ定量的に行うことが可能となり、カウンセリング場面に適用する手段となることが期待される。その結果、言語のみならず非言語的情報も的確に判断することができるようになり、クライアントの無意識下の情報を含めて捉えることが可能となり、クライアントのわずかな変化も見逃さないケアができる可能性を示唆した。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、事例に関しましてご指導いただきました多摩美術大学 伊集院清一教授に深く感謝申し上げます。

げます。

参考文献

- *1 佐治晴夫、「快適空間の物理」、応用物理、Vol.60, No.3, pp.247-253, 1991
- *2 ゆらぎ研究会編、『ゆらぎの科学10』、森北出版社、1999
- *3 J. Dee and L. Taylor (著)、鈴木宏子(訳)、『カラーセラピー』、産調出版、2003
- *4 L. V. Bonds (著)、今井由美子(訳)、『実用カラーの癒し』、産調出版、2006
- *5 山脇恵子、『図解雑学、よくわかる色彩心理』、ナツメ社、2006
- *6 加藤千恵子、「職場不適合者の描画表現を通じた自己受容」、日本芸術療法学会誌、Vol.35, No.1,2, pp.77-88, 2005
- *7 中村純・徳永雄一郎、「心の病気について—シリーズこころの健康を考える—」、上里一郎・西村良治・山中康祐、「ストレス専門医の処方せん—うつ状態・うつ病の実際と治療」、pp.169-207, 2002
- *8 岩井寛、『絵画療法の理論と実践 1 絵画療法とは何か』、徳田良仁・村井靖児(編著)、講座サイコセラピー、第7巻、アートセラピー、日本文化科学社、pp.14-18, 1988
- *9 河合隼雄、『イメージの心理学』、青土社、1991
- *10 河合隼雄、『イメージと心理療法』、河合隼雄(編著)、講座心理療法 3、心理療法とイメージ、岩波書店、pp.1-24, 2000
- *11 宮本忠雄、「太陽と分裂病—ムンクの太陽壁画によせて—」 pp.233-263, (編)木村敏、『分裂病の精神病理3』、東京大学出版会、1974
- *12 高橋雅春・高橋依子、『樹木画テスト』、文教書院、1986

病相期 (X0年5月-8月)

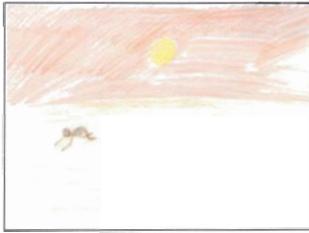


図9 X0年5月6日

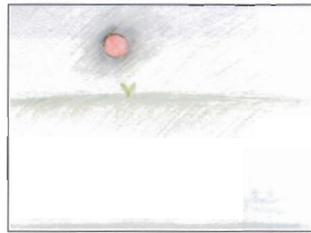


図10 X0年5月9日

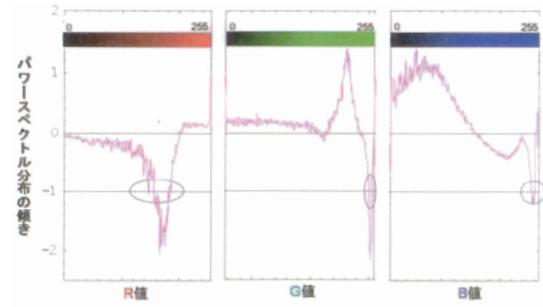


図11 第1期 病相期における「ゆらぎ」解析

回復期初期 (X0年9月-X1年1月前半)



図12 X0年10月9日

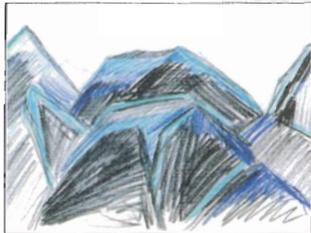


図13 X0年10月31日

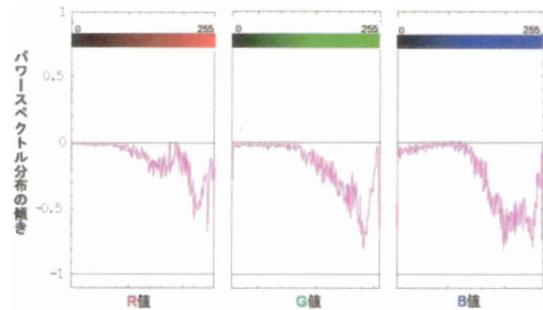


図14 第2期 回復期初期における「ゆらぎ」解析

回復期中期 (X1年1月-2月)

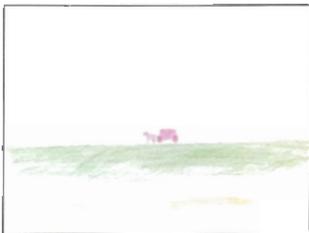


図2 X1年1月17日

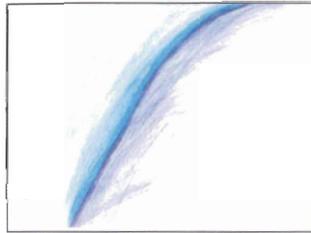


図3 X1年1月20日

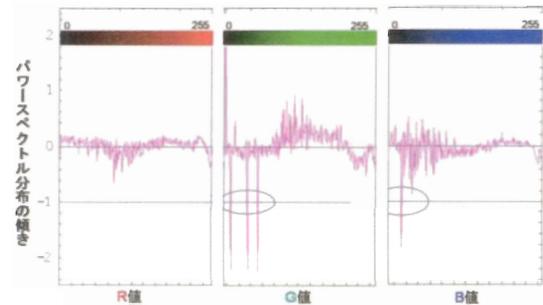


図15 第3期 回復期中期における「ゆらぎ」解析



図4 X1年1月25日

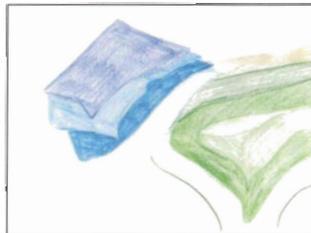


図5 X1年2月1日

回復期後期 (X1年3月-4月)



図16 X1年3月8日



図17 X1年3月15日

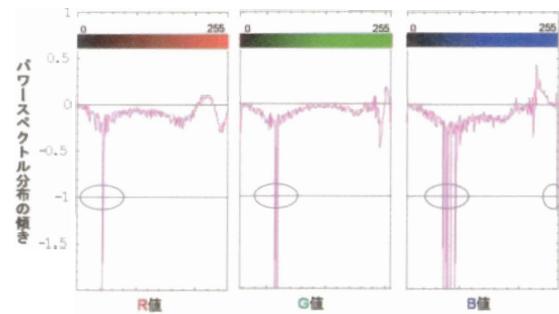


図19 第4期 回復期後期における「ゆらぎ」解析



図18 X1年3月18日

ISSN 1342-3061 芸術工学会誌



芸術工学会
Design Research Association

本部事務局：九州大学大学院 芸術工学研究院/〒815-8540 福岡市南区塩原4丁目9-1 Tel/Fax092-553-4504
Office: Kyushu University, Faculty Design/9-1, 4 Chome, Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka, 815-8540 Japan



Parallel Ferroresonance Circuit Analysis by Chua-type Magnetization Model

Yoshifuru Saito Member (Hosei University, ysaito@hosei.ac.jp)

Iliana Marinova Non-member (Technical University of Sofia, iliana@tu-sofia.bg)

Hisashi Endo Member (Hitachi Ltd, hisashi.endo.fa@hitachi.com)

Keywords : Chua-type magnetization model, parallel ferroresonant circuit, chaotic phenomena, characteristic values

Various types of electrical apparatus using magnetic materials have been developed. Due to nonlinear properties of magnetic material, e.g., magnetic saturation, hysteresis, eddy current, etc.; the electrical apparatus occasionally exhibits complex responses that can not be anticipated and calculated easily. In the design of modern magnetic devices, prediction of various responses to the complex input signals is of paramount importance to prevent the troubles of devices. Nevertheless, any of the deterministic methodologies has not been yet proposed to do this mainly caused by the complex magnetization behaviors of inductors.

To clarify the regularity of chaotic behaviors in the up-to-date power magnetic devices, this paper carries out transient analysis in a parallel ferroresonant circuit exactly taking into account the magnetic hysteresis, saturation, aftereffects, and frequency dependence of ferromagnetic material properties. To extract the system regularity, the characteristic values of the state variable equations for the ferroresonant circuit are calculated in each step in the calculation period. It is revealed that the changes of characteristic values have no hysteretic properties, even though chaotic phenomenon is exhibiting.

To carry out transient analysis of ferroresonant circuit, we employ a Chua-type magnetization model representing dynamic constitutive relation between magnetic field H (A/m) and flux density B (T) as

$$H = \frac{1}{\mu}B + \frac{1}{s} \left(\frac{dB}{dt} - \mu_r \frac{dH}{dt} \right) \dots\dots\dots (1)$$

where μ , μ_r , and s denote permeability (H/m), reversible permeability (H/m), and hysteresis parameter (Ω/m), respectively.

A significant feature of these parameters is that they are determined independently to the past magnetization histories because of the ideal magnetization curve approach, as pointed out by Bozorth. The permeability μ and the reversible permeability μ_r are obtained from the ideal magnetization curve and minor loops respectively when measuring the ideal magnetization curves.

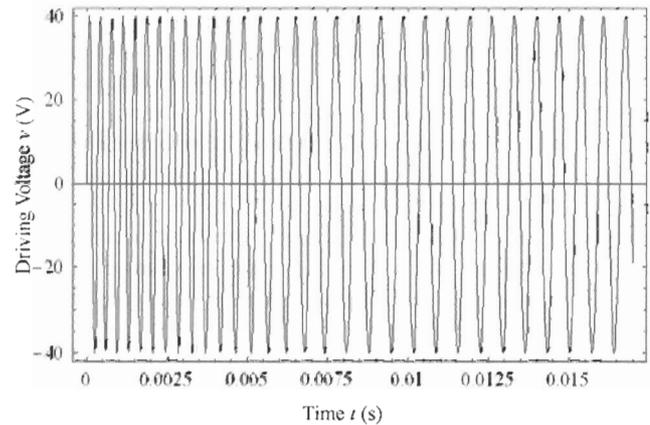
When $B=0$, s is determined by.

$$s = \frac{1}{H_c} \left(\frac{dB}{dt} - \mu_r \frac{dH}{dt} \right) \dots\dots\dots (2)$$

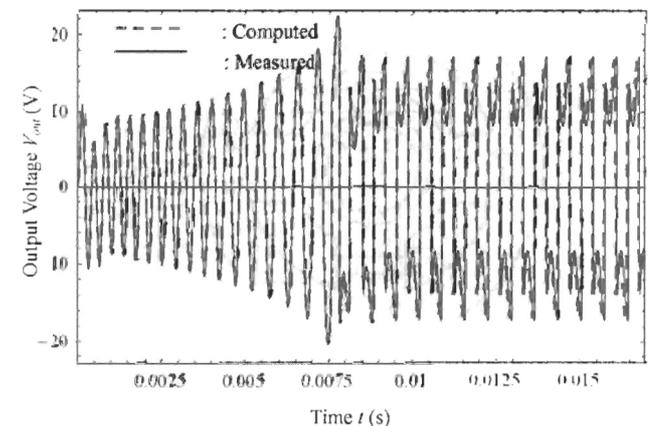
where μ_r takes maximum value and the applied field H corresponds to coercive force H_c . Thus, determination of parameter s in Eq. (2) requires the measurements of the dB/dt and dH/dt . The validity of this model has been verified by the precise experiments of magnetization characteristics excepting for anisotropic materials and permanent magnets of typical materials.

Figure 1 illustrates dV_{out}/dt versus V_{out} , exhibiting chaos-like

behavior not tracing the same locus while the frequency of the driving voltage v is fixed at $t=7.8$ ms. Let us compare the series and parallel ferroresonant phenomena. At the beginning of resonance, either output response drastically increases. If the driving voltage is fixed when the ferroresonant mode is reached, we have nonlinear oscillation continuously. On Poincare diagrams, the parallel ferroresonance shakes dV_{out}/dt although the frequency of driving voltage is fixed. Further, the series ferroresonance has the same nature of small shaking in the current applied to the inductor. Since dV_{out}/dt in parallel ferroresonant circuit is associated with current, then these phenomena suggest that the chaos-like flicking is closely related to a condition of input term.



(a) Driving voltage v



(b) Measured and computed output voltage V_{out}

Fig. 1. Transient analysis of the ferroresonant circuit

Parallel Ferroresonance Circuit Analysis by Chua-type Magnetization Model

Yoshifuru Saito* Member
 Iliana Marinova** Non-member
 Hisashi Endo*** Member

This paper studies the nonlinear response of a parallel ferroresonant circuit. To carry out a transient analysis in parallel ferroresonant circuit, we apply Chua-type magnetization model to an inductance exhibiting saturation and hysteretic nonlinear properties of ferromagnetic materials, deriving a state variable equation and solutions by the backward Euler method with automatic modification. The characteristic values of the state transition matrix are calculated in each calculation step of Euler method in order to extract the chaotic characteristics. As a result, it is clarified that the chaotic behavior in the ferroresonant circuit is greatly concerned with the magnetic aftereffect of ferromagnetic materials.

Keywords : Chua-type magnetization model, parallel ferroresonant circuit, chaotic phenomena, characteristic values

1. Introduction

Various types of electrical apparatus using magnetic materials have been developed. Due to nonlinear properties of magnetic material, e.g., magnetic saturation, hysteresis, eddy current, etc.; the electrical apparatus occasionally exhibits complex responses that can not be anticipated and calculated easily. In the design of modern magnetic devices, prediction of various responses to the complex input signals is of paramount importance to prevent the troubles of devices. Nevertheless, any of the deterministic methodologies has not been yet proposed to do this mainly caused by the complicated magnetization behaviors of inductors.

To clarify the regularity of chaotic behaviors in the up-to-date power magnetic devices, this paper carries out transient analysis in a parallel ferroresonant circuit exactly taking into account the magnetic hysteresis, saturation, aftereffects, and frequency dependence of ferromagnetic material properties⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾. To extract the system regularity, the characteristic values of the state variable equations for the ferroresonant circuit are calculated in each step in the calculation period. It is revealed that the changes of characteristic values have no hysteretic properties, even though chaotic phenomenon is exhibiting.

2. Parallel Ferroresonant Circuit

2.1 Chua-type Magnetization Model

To carry out transient analysis of ferroresonant circuit, we employ a Chua-type magnetization model representing dynamic constitutive relation between magnetic field H (A/m) and flux density B (T) as

$$H = \frac{1}{\mu} B + \frac{1}{s} \left(\frac{dB}{dt} - \mu_r \frac{dH}{dt} \right) \dots\dots\dots (1)$$

where μ , μ_r , and s denote permeability (H/m), reversible permeability (H/m), and hysteresis parameter (Ω/m), respectively⁽³⁾⁽⁵⁾. Figure 1 shows the measured curves giving these parameters for ferrite (TDK H5A). A significant feature of these parameters is that they are determined independently to the past magnetization histories because of the ideal magnetization curve approach, as pointed out by Bozorth⁽⁶⁾. The permeability μ and the reversible permeability μ_r are obtained from the ideal magnetization curve and minor loops respectively when measuring the ideal magnetization curves. When $B=0$, s is determined by

$$s = \frac{1}{H_c} \left(\frac{dB}{dt} - \mu_r \frac{dH}{dt} \right) \dots\dots\dots (2)$$

where μ_r takes maximum value and the applied field H corresponds to coercive force H_c . Thus, determination of parameter s in Eq. (2) requires the measurements of the dB/dt and dH/dt . The validity of this model has been verified by the precise experiments of magnetization characteristics excepting for anisotropic materials and permanent magnets of typical materials⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾.

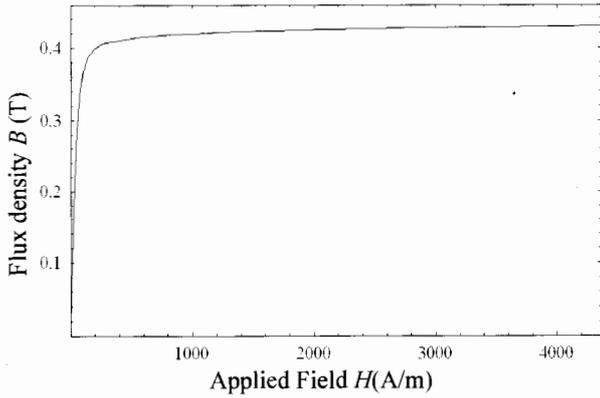
2.2 Formulation

Consider a parallel ferroresonant circuit shown in Fig. 2. At first, the line integral of Eq. (1) along with flux path l yields magnetomotive force. Thus, the relation between the current i_1 and linkage flux λ of the inductor is given by

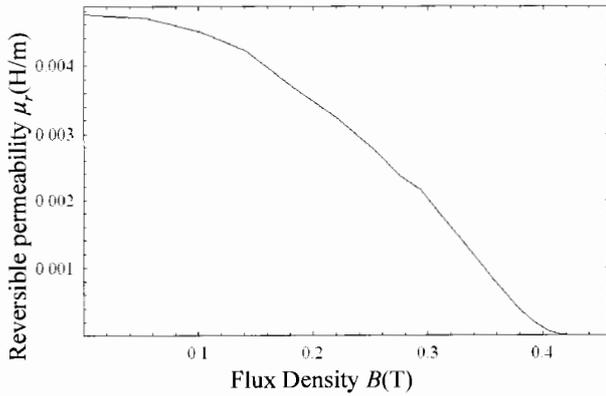
$$N i_1 + \frac{\mu_r}{s} N \frac{d i_1}{dt} = \frac{l}{\mu A N} \lambda + \frac{l}{s A N} \frac{d \lambda}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

Moreover, a relation between the driving voltage source v and current i_1 is derived from the consideration of circuit connection and electromotive force $d\lambda/dt$

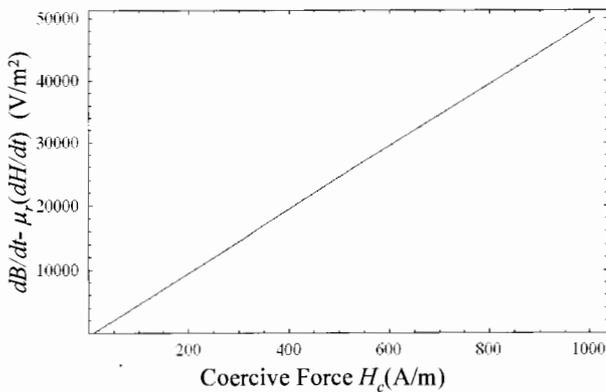
* Graduate School of Hosei University
 3-7-2, Kajimo-cho, Koganei 184-8584
 ** Department of Electrical Apparatus, Technical University of Sofia
 Kliment Ohridski 8, Sofia 1756 Bulgaria
 *** Institute of Fluid Science, Tohoku University / Currently, Power &
 Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi Ltd.
 7-2-1, Ohmika, Hitachi 319-1221



(a) Magnetization curve giving permeability μ



(b) Reversible permeability μ_r



(c) The curve giving hysteresis parameter s

Fig. 1. Parameters of Chua-type magnetization model (Measured: TDK H5A)

$$i_1 = \frac{1}{r} \left(V_{out} - \frac{d\lambda}{dt} \right) \dots \dots \dots (4)$$

Second, substituting Eq. (3) into Eq. (4) yields the state equations

$$\frac{\mu_r N}{sr} \frac{d^2 \lambda}{dt^2} = \left\{ -\frac{N}{r} + \frac{\mu_r N}{sR^2 C} - \frac{l}{sAN} \right\} \frac{d\lambda}{dt} - \frac{l}{\mu AN} \lambda + \left\{ \frac{N}{r} - \frac{\mu_r N}{sr} - \left(\frac{1}{RC} + \frac{1}{rC} \right) \right\} V_{out} + \frac{\mu_r N}{srRC} v \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{1}{rc} \frac{d\lambda}{dt} - \left(\frac{1}{RC} + \frac{1}{rC} \right) V_{out} + \frac{1}{RC} v \dots \dots \dots (6)$$

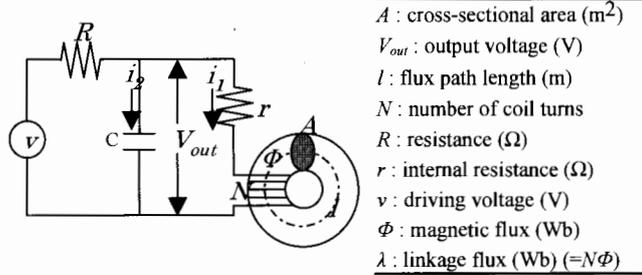


Fig. 2. Parallel ferroresonant circuit

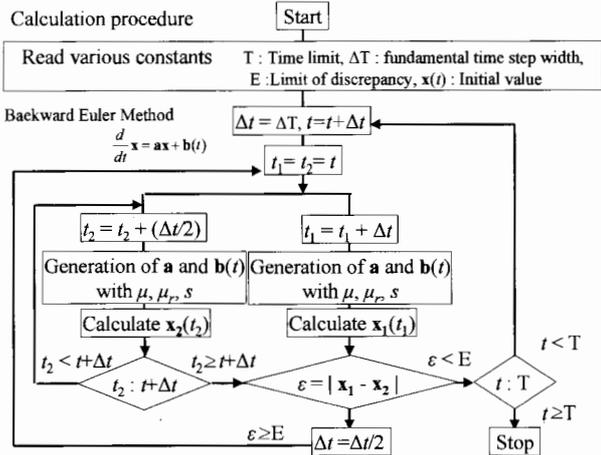


Fig. 3. Flowchart of the calculation with the adaptive step size control

Finally, the state Eqs. (5) and (6) yield a system of state variable equations having 3×3 square state transition matrix a

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda \\ \frac{d\lambda}{dt} \\ V_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \frac{d\lambda}{dt} \\ V_{out} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

or

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}(t) \dots \dots \dots (8)$$

where the elements $a_{21}, a_{22}, \dots, u_2$ and u_3 in Eq. (7) are determined by Eqs. (5) and (6).

2.3 Backward Euler Method

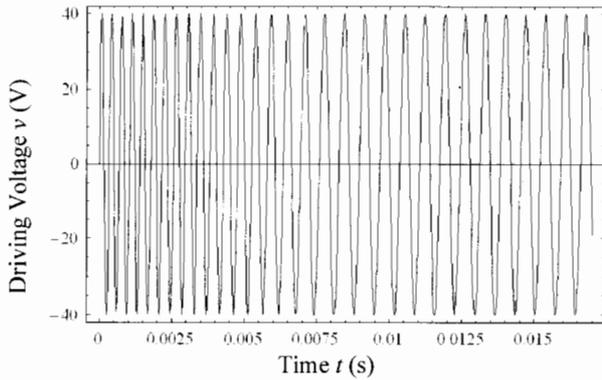
The backward Euler strategy to numerical solution of Eq. (7) makes it possible to carry out a transient analysis of ferroresonant circuit. As shown in Fig. 3, the calculation compares two solutions in each calculation step. The first one is one step solution with time step-width Δt (s), and another is two steps solution with $\Delta t/2$. Evaluating the difference between them reveals a relevant step-width for each of the calculations. Namely, if the difference is greater than a criterion listed in Table 1, then the same period is recalculated with the modified time step width $\Delta t = \Delta t/2$. The iteration with this modification is carried out until the criterion is satisfied.

In the iterative calculation, the nonlinear parameters, shown in Fig. 1, μ and μ_r are treated as functions of flux density B and s as a function of dB/dt ⁽⁷⁾.

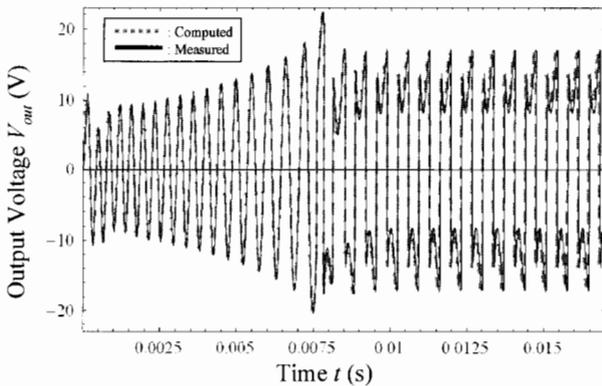
3. Results and Discussion

3.1 Ferroresonant Phenomenon

Figure 4 shows the



(a) Frequency of the driving voltage v is decreased from 3.0 to 1.441 kHz until time $t=7.8$ ms



(b) Measured and computed output voltage V_{out}

Fig. 4. Transient analysis of the ferroresonant circuit

Table 1. Parameters for calculation of ferroresonant circuit

μ : permeability (H/m)	Fig. 1(a)
μ_r : reversible permeability (H/m)	Fig. 1(b)
s : hysteresis parameter (Ω/m)	Fig. 1(c)
A : cross-sectional area (m^2)	48.0×10^{-6}
C : capacitance (F)	1.0×10^{-6}
l : flux path length (m)	75.4×10^{-3}
N : number of coil turns	100
R : resistance (Ω)	272.0
r : internal resistance (Ω)	0.4
ε : limit of discrepancy	1.0×10^{-5}

calculated result of Eq. (7) employing the parameters in listed Table 1. As demonstrated in Fig. 4 (b), the experimentally obtained output voltage well agrees with calculated one. As shown in Fig. 5, the frequency of the driving voltage v in Fig. 4 (a) is decreased from 3.0 to 1.441 kHz until time $t = 7.8$ ms in order to observe its ferroresonant process. Around this moment, the output voltage V_{out} drastically increases, exhibiting the typical ferroresonant phenomena.

3.2 Chaotic Behavior Figure 6 illustrates dV_{out}/dt versus V_{out} obtained from Fig. 4 (b), exhibiting chaos-like behavior not tracing the same locus while the frequency of the driving voltage v is fixed at $t = 7.8$ ms. Let us compare the series and parallel ferroresonant phenomena⁽¹¹⁾. At the beginning of resonance, either output response drastically increases. If the driving voltage is fixed when the ferroresonant mode is reached, we have nonlinear oscillation continuously. On Poincare diagrams,

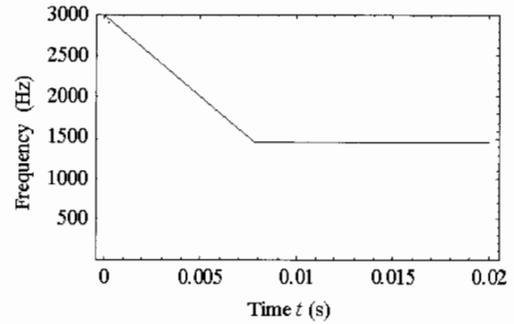


Fig. 5. Frequency variation of source voltage v

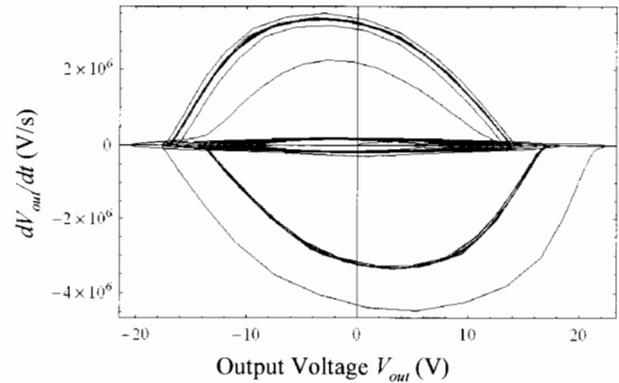


Fig. 6. Poincare diagram during ferroresonant mode

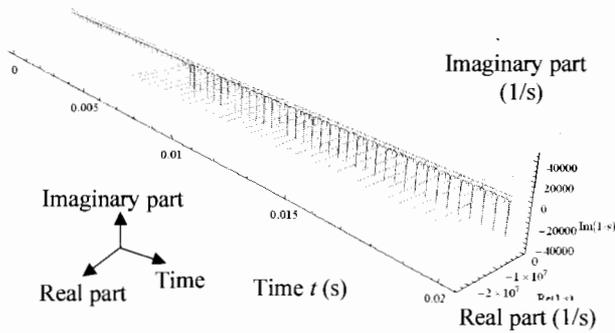
the parallel ferroresonance shakes dV_{out}/dt although the frequency of driving voltage is fixed. Further, the series ferroresonance reported in Ref. (11) has the same nature of small shaking in the current applied to the inductor. Since dV_{out}/dt in parallel ferroresonant circuit is associated with current, then these phenomena suggest that the chaos-like flicking is closely related to a condition of input term of Eq. (7) or Eq. (8).

3.3 System Regularity To consider the state of ferroresonant system in detail, we calculate the characteristic values of the state transition matrix \mathbf{a} in Eq. (7) in each of the calculation steps. The characteristic value analysis could be applied to only the linear system. So that we essentially assume this nonlinear system to be a piecewise linear system in each of the calculation steps for solving Eq. (7).

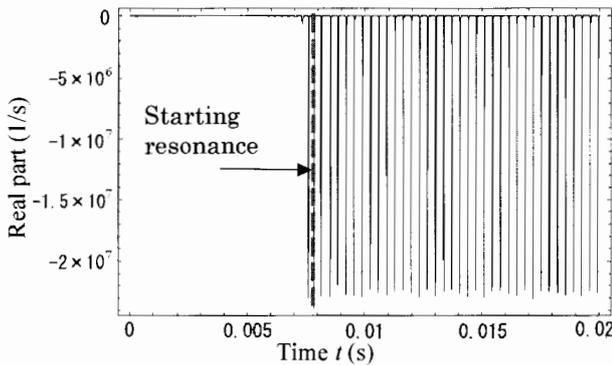
Figure 6 shows the loci of characteristic values derived from the state transition matrix \mathbf{a} in Eq. (7) assuming \mathbf{a} to be linear in each calculation step. Since \mathbf{a} is 3×3 square matrix, we have three characteristic values. Fig.7 shows time versus characteristic values, presenting that these are tracing on the regular loci. Meanwhile, the output voltage locus exhibits a chaotic flicking. One of the causes of this chaotic flicking is an equivalent coercive force $H_{c,eq} = (\mu_r/s)dH/dt$ in the Chua type magnetization model (1). This instantaneously leads to the positive real part of the characteristic values as shown in Fig.7 (b).

Thus, this is the cause of the instable chaos-like flicking. The characteristic values at the other timing are all on the left half plane on a complex coordinate system.

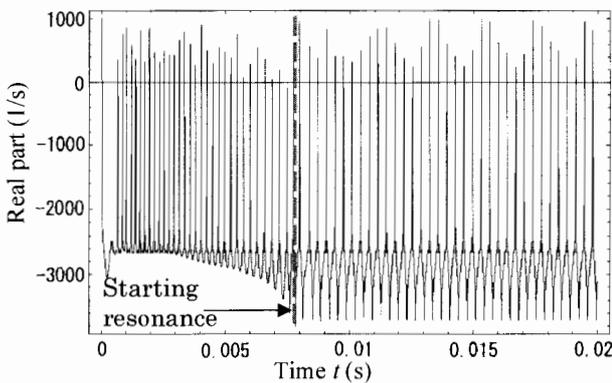
Let us consider the characteristic values by decomposed into the real and imaginary parts. Figs. 7 (b)-(d) express the characteristic values given as pure real number, complex number in real part, and complex number in imaginary part, respectively. Since the complex number characteristic values are always given as



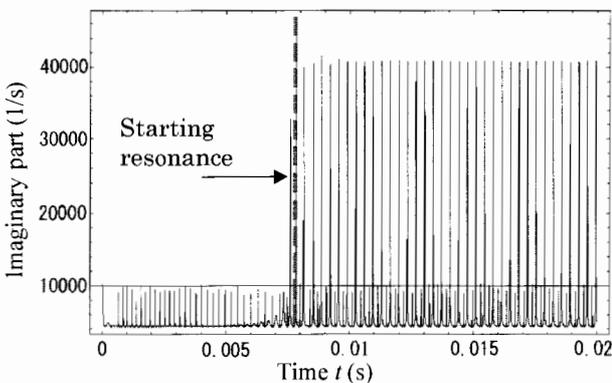
(a) Time varying of the characteristic values



(b) Pure real number part



(c) Real part of complex number



(d) Imaginary part of complex number

Fig. 7. Characteristic values derived from the state transition matrix

complex conjugate pairs, then we omit one of them. The real parts in Figs. 7 (b) and (c) regularly oscillate with changes of amplitude after the resonance starts, affecting nonlinear output response in V_{out} when resonance occurring. The imaginary part in Fig. 7 (d) oscillates in nearly constant amplitude and drastically increases after the rouse of resonance. This gives that the state of resonance depends on the imaginary parts. Observing the characteristic values makes it possible to predict the ferroresonant phenomena.

4. Conclusions

In this paper, we have derived the state variable equations of the parallel ferroresonance circuit employing the Chua-type magnetization model, and carried out the transient analysis of the parallel ferroresonant circuit. The characteristic value analysis of the state transition matrices obtained in every calculation step of Euler method has elucidated that the cause of chaotic flicking is an equivalent coercive force $H_c = (\mu_r/s)dH/dt$.

As described above, it is revealed that our approach employing the Chua-type magnetization model clarifies the precise processes of the parallel ferroresonance phenomenon.

Acknowledgments

The authors are acknowledged to Mr. Y. Tanaka, Hosei University (currently Nihondensan Co. LTD) for his effort to obtain the experimental as well as calculated results on this paper.

(Manuscript received Nov. 22, 2007, revised Jan. 31, 2008)

References

- (1) F. Liorzou, B. Phelps, and D. L. Atherton : "Macroscopic models of magnetization", *IEEE Trans. Magnetics.*, Vol.36, pp.418-427 (2000-3)
- (2) E. Della Torre : *Magnetic Hysteresis*, IEEE Press Piscataway, NJ (1999)
- (3) A. Ivanyi : *Hysteresis Models in Electromagnetic Computation*. Akademiai Kiado, Budapest, Hungary (1997)
- (4) L. O. Chua and K. A. Stromsmoe : "Lumped circuit models for nonlinear inductor exhibiting hysteresis loops", *IEEE Trans. Circuit Theory*, Vol.CT-17, pp.564-574 (1970-4)
- (5) Y. Saito, M. Namiki, and S. Hayano : "A magnetization model for computational magnetodynamics", *J. Appl. Phys.*, Vol.69, No.8, pp.4614-4616 (1991)
- (6) Y. Saito, M. Namiki, and S. Hayano : "A representation of magnetization characteristics and its application to the ferroresonance circuits", *J. Appl. Phys.*, Vol.67, No.9, pp.4738-4740 (1990)
- (7) R. M. Bozorth : *Ferromagnetism*, Princeton NJ (1951)
- (8) Y. Saito, S. Hayano, and N. Tsuya : "Experimental verification of a Chua type magnetization model", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.MAG-25, pp.2968-2970 (1989-7)
- (9) Y. Saito, K. Fukushima, S. Hayano, and N. Tsuya : "Application of a Chua-type model to the loss and skin effect calculations", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.MAG-23, pp.3569-3571 (1987-9)
- (10) Y. Saito, S. Hayano, Y. Kishino, K. Fukushima, H. Nakamura, and N. Tsuya : "A representation of magnetic aftereffect", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.MAG-22, pp.647-649 (1986-9)
- (11) H. Endo, I. Marinova, T. Takagi, S. Hayano, and Y. Saito : "Dynamics on ferroresonant circuit exhibiting chaotic phenomenon", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.40, No.2, pp.868-871 (2004-3)

Yoshifuru Saito



(Member) was born in Fukuoka, Japan on July 24, 1946. Professor Saito attended Hosei University (B.E. 1969, M.E. 1971, Ph.D. 1975). Dr. Saito was an assistant research fellow (1975-76), lecturer (1976-78) and was appointed Associate Professor (1978-87) and Professor (1987-) in the Electrical Engineering Department at Hosei University. Currently, he is a Professor of the graduate school of system designing.

Iliana Marinova



(Non-member) was born in Pleven, Bulgaria on June 10, 1959. She received a Ph.D. degree in electrical engineering from Technical University of Sofia, Bulgaria in 1989, and is presently an associate professor at Technical University of Sofia. She has worked on inverse problems in electromagnetism and biomagnetism, modelling and visualization of electromagnetic fields, optimal design and investigation of electromagnetic devices. IEEE Magnetics society, International Compumag society member.

Hisashi Endo



(Member) was born in Kanagawa on July 7, 1976. He received his BE, ME, and Ph.D. from Hosei University in 1999, 2001, and 2004, respectively. He worked at Institute of Fluid Science, Tohoku University from 2002 to 2006. Currently, he is working at Power & Industrial Systems Laboratory, Hitachi Ltd. from 2007. His research interests include nondestructive evaluation, image analysis and electromagnetic computation.

Cognition of the Metallic Material Properties and Physical Dimensions by Magnetic Sensor Signal Visualization

Yoshifuru Saito (Hosei Univ., ysaito@hosei.ac.jp)

Iliana Marinova (Technical University of Sofia, iliana@tu-sofia.bg)

Hisashi Endo (Hitachi Ltd., hisashi.endo.fa@hitachi.com)

Keywords : magnetic sensor, signal processing, 3D Lissajous diagram, least squares method

Innovative idea underlying modern active magnetic sensors, such as magnetic resistance (MR), flux gate (FG), magneto-impedance (MI), etc., have been changing scenes of industry, as well as medical services. Satisfactory sensitivity and resolution for low field have been realized at room temperature. It is possible to get fine information on magnetic fields under the cheap measurement environment while elaborate methods of signal processing are essentially required because of active sensing. On the other hand, personal computers in recent years with high-speed data acquisition interfaces bring real time observation and calculation, taking advantage of image and signal cognition technologies. Therefore, a database system approach may give one of the effective solutions to treat complicated signals due to magnetization and to reflect skillful experts' experiences. This inspires us to develop a smart magnetic sensing system.

The present paper reports our developed magnetic sensing system in order to provide a smart magnetic sensing function. Our method is composed of three major steps; the first is an active magnetic sensor detecting metallic objects (Fig. 1); the second is proposed as a method of visualization converting from sensor input and output (I/O) signals to image data; the last one is an image cognition methodology using the imaged sensor signals. We apply our system to identify metallic cans commonly utilized for canned drinks. As a result, it is found that our magnetic sensor signals processing ascertain the metallic material properties as well as their physical dimensions.

Concrete example is as follows. Figure 2 illustrates the 3-D Lissajous diagrams proposed in this paper for the 2 cans when locating at one of the pickup coils. The period to draw the diagrams is 0.1 s. In Fig. 2, the image size is 64×64 pixels and the dynamic ranges in x- (output) and y- (input) axes are about ±4.0 and ±23.0 V, respectively.

We prepared several aluminum and steel cans with different shapes for experiments. It is obvious that the diameter of cans relates to the width of diagrams since it turns out interaction, i.e.,

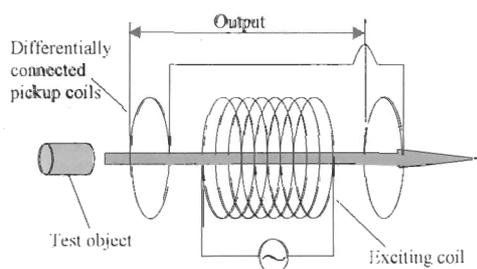


Fig. 1. Schematic diagram of the differential coil sensor system employed in this paper

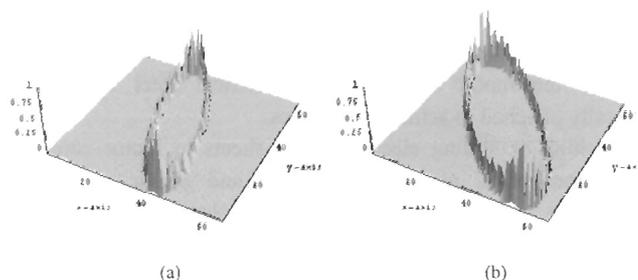


Fig. 2. 3-D Lissajous diagrams of the cans in Fig. 4 (400Hz, 64×64 pixels)

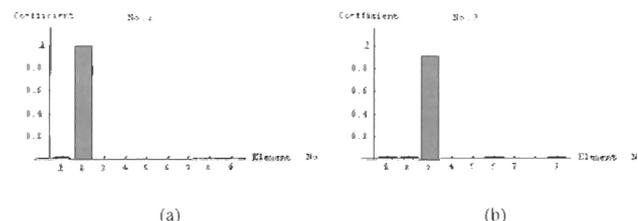


Fig. 3. Elements in solution vector **U** as the identified results

mutual inductance and eddy currents, between the test object and coils. In cases of the steel cans, the distorted diagrams due to magnetization characteristics are obtained. The histograms of steel cans are somewhat averaged because the high frequency components in output signal reduce the low frequency information in output voltage waveforms.

Let us identify the cans by means of the 3-D Lissajous diagrams shown in Fig. 2. We have 4 aluminum and 5 steel cans for constructing the database matrix **C**. In this case, the dimension of matrix $m \times n$ becomes $(64 \times 64) \times 9$. We apply the least squares to solve a system of equations $\mathbf{V} = \mathbf{C}\mathbf{U}$ having the column-wise system matrix **C**. In this system of equations, **V**, **U** and **C** are the input vector with order 9, solution vector with order 64×64 and system matrix with order (64×64) by 9, respectively. The 3-D Lissajous diagram data of Figs. 2 (a) and (b) corresponds to one of the column matrices composing database matrix **C**, and also an input vector **V**, respectively.

Figure 3 shows the solution vectors **U** when the diagrams in Fig. 2 are used as the input vectors **V** of the system of equations. The elements taking the maximum value in the solution vectors reveal the cognized cans.

Thus, we have succeeded in identifying the prepared 9 cans by our smart magnetic sensor system.

Cognition of the Metallic Material Properties and Physical Dimensions by Magnetic Sensor Signal Visualization

Yoshifuru Saito* Member
 Iliana Marinova** Non-member
 Hisashi Endo*** Member

This paper proposes a method of 3-D Lissajous diagram for signal processing of a differential coil type magnetic sensor. Overlapping several Lissajous diagrams between the sensor input and output signals yields a three-dimension or grayscale image whose height or tone reveals a number of overlapped points. This conversion from the time-domain sensor signals to an image provides the differences in frequency, amplitude, phase, distortion, etc. Employing image cognition methodology to this three-dimension image makes it possible to identify each of the signals stored in a database. We demonstrate the remarkable cognition results by our magnetic sensor signals processing strategy.

Keywords : magnetic sensor, signal processing, 3D Lissajous diagram, least squares method

1. Introduction

Innovative idea underlying modern active magnetic sensors, such as magnetic resistance (MR), flux gate (FG), magneto-impedance (MI), etc., have been changing scenes of industry, as well as medical services⁽¹⁾⁽²⁾. Satisfactory sensitivity and resolution for low field have been realized at room temperature. It is possible to get fine information on magnetic fields under the cheap measurement environment while elaborate methods of signal processing are essentially required because of active sensing. On the other hand, personal computers in recent years with high-speed data acquisition interfaces bring real time observation and calculation⁽³⁾, taking advantage of image and signal cognition technologies. Therefore, a database system approach may give one of the effective solutions to treat complicated signals due to magnetization and to reflect skillful experts' experiences. This inspires us to develop a smart magnetic sensing system⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

The present paper reports our developed magnetic sensing system in order to provide a smart magnetic sensor function. Our method is composed of three major steps; the first is sensing the metallic materials with a magnetic sensor (Fig. 1); the second is visualization converting from sensor input and output (I/O) signals to image data; the last one is an image cognition using the visualized sensor signals⁽⁶⁾. We apply our system to identify metallic cans commonly utilized for canned drinks. As a result, it is found that our magnetic sensor signals processing ascertain the metallic material properties as well as their physical dimensions.

2. 3-D Lissajous Method and Cognition System

2.1 Differential Coil Sensor

Figure 1 shows a

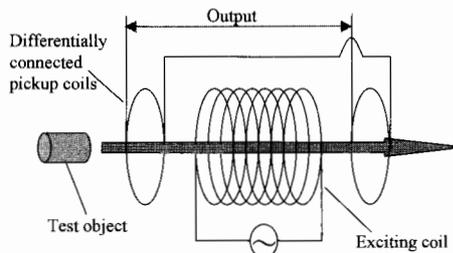


Fig. 1. Schematic diagram of the differential coil sensor system employed in this paper

schematic diagram of the active magnetic sensor employed in this paper. It consists of an exciting coil and a couple of pickup coils differentially connected. The coils are all arranged along with the common axis and a test metallic object passes their inside. When alternating current is applied to the exciting coil and the metallic object locates at any position except the center of exciting coil on the axial line, the difference in linkage flux between the left- and right-sided pickup coils yields a sensor signal. It must be noted that observing both input and output signals, i.e. input voltage of the exciting coil and output voltage of differentially connected pickup coils in Fig.1, is of paramount importance to evaluate the test objects precisely.

2.2 3-D Lissajous Diagram The conventional Lissajous diagram simultaneously displays I/O signals on a 2-D plane, representing differences in frequency, amplitude, and phase. In case of contactless magnetic sensor systems, we confront to the serious problems, e.g. signal deflection and distortion due to the targets moving, magnetic hysteresis, and so on. To address this difficulty, we propose a method of 3-D Lissajous diagram. It is a histogram of Lissajous diagrams observed within a regular period. Figure 2, for instance, shows a 3-D Lissajous diagram constructed by input voltage impressed at the exciting coil terminals and output voltage measured at the terminal of differentially connected pickup coils shown in Fig.1. More concretely, let us consider a metallic can identification problem. When some of a metallic can

* Graduate School of Hosei University
 3-7-2 Kajino-cho, Koganei 184-8584
 ** Department of Electrical Apparatus, Technical University of Sofia
 Kliment Ohridski 8, Sofia 1756 Bulgaria
 *** Institute of Fluid Science, Tohoku University / Currently, Power &
 Industrial Systems R&D Lab., Hitachi Ltd.
 7-2-1, Ohmika, Hitachi 319-1221

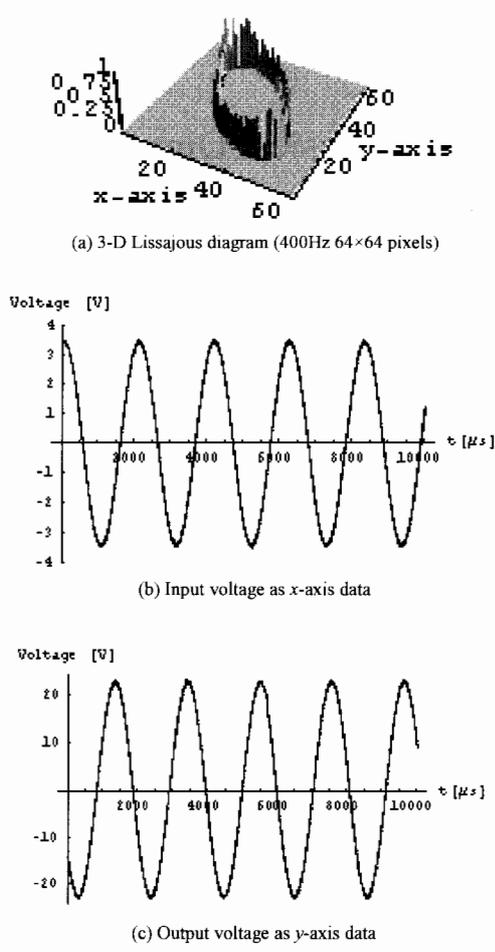


Fig. 2. 3-D Lissajous diagram of the sensor system in Fig. 1

is inserted as a test object shown in Fig.1, it is possible to obtain an output voltage signal from the differentially connected pickup coils while an input voltage is impressed to at an exciting coil. Typical examples of input and output voltages are shown in Figs. 2 (b) and (c), respectively. Therefore, the metallic can identification problem is reduced into one of the magnetic sensor signal cognition problems.

Thus, the data x- and y- axes composing a 3-D Lissajous diagram respectively correspond to the values of input (Fig.2 (b)) and output (Fig.2 (c)) signals so that the time is the intervening parameter. Overlapping loci of conventional Lissajous diagram are taken into account as histograms, i.e. counting the rate of overlapping, in the direction of z-axis. This means that the values in x-, y- and z-axes of 3D Lissajous are corresponding to the input voltage at the exciting coil terminals, output voltage obtained at the terminals of differentially connected pickup coils, and the rate of x-y position overlapping. Since this idea contains the information of the time, then it is possible to treat both steady and transient states as grayscale tone image data. Although a linear I/O condition like demonstrated in Fig. 2 is a simple case, the I/O data changing rates can be reflected in the histograms.

2.3 Least Squares To realize the smart magnetic sensing system, we have studied an image cognition methodology using image pixel distribution for the 3-D Lissajous diagrams⁽⁷⁾⁽⁸⁾ Solving a system of equations in Eq. (1) identifies and evaluates the test objects from magnetic sensor responses.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{C}\mathbf{U}, \\ \mathbf{U} &= [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T, \\ \mathbf{C} &= [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n]. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

For the vector expression of the 3-D Lissajous diagram shown in Fig.2 (a), i.e., \mathbf{V} and $C_i, i=1,2,\dots, n$ in Eq. (1), assume the 3-D Lissajous diagram as a 2-D digital image G consisting of $k \times l$ pixels,

$$G = g(i, j), \quad i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, l, \dots\dots\dots (2)$$

where $g(i, j)$ refers to the pixel value at the position (i, j) . After that the data set of image is rearranged to a 1-D data set as expressed by,

$$\mathbf{V} = [g_v(1,1), \dots, g_v(1,l), g_v(2,1), \dots, g_v(2,l), \dots, g_v(k,1), \dots, g_v(k,l)]^T, \dots\dots\dots (3)$$

$$\mathbf{V} = [g_i(1,1), \dots, g_i(1,l), g_i(2,1), \dots, g_i(2,l), \dots, g_i(k,1), \dots, g_i(k,l)]^T, \dots\dots\dots (4)$$

where the superscript T refers to transpose of matrix/vector.

The image size $k \times l$ in Eqs. (2),(4) is associated with the voltage resolution and the number of unknowns m . As a matter of reality, the number of pixels is much greater than that of the stored 3-D Lissajous diagrams. The solution, therefore, is obtained by means of least squares⁽⁹⁾

$$\mathbf{U} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{V}, \dots\dots\dots (5)$$

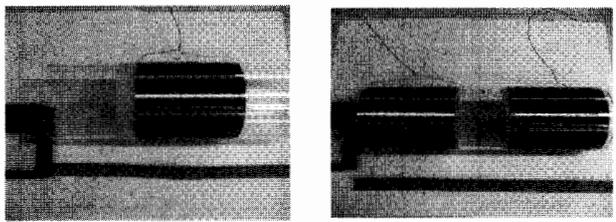
Thus in Eq. (1), \mathbf{V} represents the 3-D Lissajous diagram corresponding to the information on test object as an input vector with order m ; \mathbf{U} expresses an identified result as a solution vector with order n ; moreover \mathbf{C} is a $m \times n$ rectangular coefficient matrix storing n 3-D Lissajous diagrams as database. When \mathbf{V} is identical to the i -th column vector C_i in the matrix \mathbf{C} , the i -th element u_i in the solution vector \mathbf{U} accordingly takes maximum value. Even though the database does not have the identical data, the linear combination the column vector $C_i, i=1,2,\dots,n$, is capable of extracting similarities between the inputted data and stored database.

3. Identification of Metallic Cans by Means of 3-D Lissajous Diagrams

3.1 Experimental Setup Let us consider a metallic can identification problem to demonstrate the smartness of our magnetic sensor system. Figure 3 shows a differential coil sensor described in Section 2.1. Both exciting and differentially connected pickup coils are assembled in a coaxial way as shown in Fig.1. Table 1 lists the specification of the tested sensor. The metallic cans to be identified are shown in Fig. 4.

3.2 3-D Lissajous Diagram Figure 5 illustrates the 3-D Lissajous diagrams for the 9 cans shown in Fig. 4 when locating at one of the pickup coils. The input voltage of exciting coil is the same as Fig. 2 (c). We measured the input and output signals with 0.1s duration to draw the diagrams. The frequency of the exciting coil is determined by the several previous experimental studied to obtain the reasonable sensibility⁽⁴⁾⁽⁸⁾.

In Fig. 5, the image size is 64×64 pixels and the dynamic ranges in x- (output) and y- (input) axes are about ± 4.0 and ± 23.0 V, respectively. The resolution of diagram depends on the originally



(a) Exciting coil (b) Differentially connected pickup coils
Both coils are assembled in a coaxial way as shown in Fig.1

Fig. 3. Coil elements of the magnetic sensor system illustrated in Fig.1

Table 1. Specification of a tested sensor shown in Fig.3

Coil	Number of turns	Diameter (mm)	Length (mm)
Exciting	200	90	115
Pickup	200	80	110

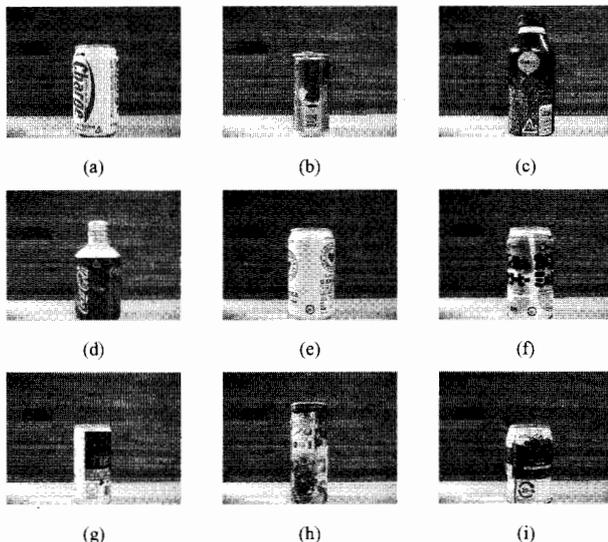


Fig. 4. Empty cans to be identified; (a)- (d) are aluminum cans : (e) - (i) are steel cans. (a)- (i) are referred to as Nas. 1-9, respectively

measured signal precision, i.e. the maximum image resolution is the maximum resolution of the sensor signals, but reflects on the size of system matrix C in Eq. (1). Thereby, consideration of the AD converter resolution (11bit) of the used digital oscilloscope and computing time has lead to the 64×64 pixels resolution.

As shown in Fig.4, We prepared 4 aluminum cans and 5 steel cans with different shape for experiments. In cases of the steel cans, the diagrams shown in Figs. 5 (e)-(i) take the somewhat different in shape compared with that of aluminum cans shown in Figs. 5 (a)-(d) due to time domain phase difference caused by magnetization characteristics.

3.3 Cognition Let us identify the cans by means of the 3-D Lissajous diagrams shown in Fig. 5 and the image cognition methodology described in Section 2-C. We have 4 aluminum and 5 steel cans for constructing the database matrix C in Eq. (1). In this case, the dimension of matrix $m \times n$ becomes $(64 \times 64) \times 9$. Therefore, we apply the least squares in (5) to solve (1) having the

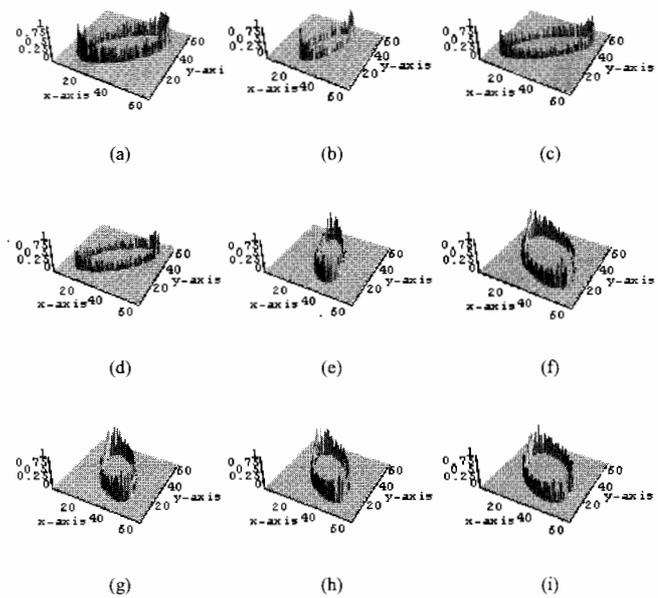


Fig. 5. 3-D Lissajous diagrams of the cans in Fig. 4 (400Hz, 64×64 pixels) : (a)- (i) correspond to the diagrams when the cans shown in Figs. 4(a)-(i) are inserted into the sensor, respectively

column-wise system matrix C . The 3-D Lissajous diagram data of Figs. 4 (a)-(i) corresponds to each of the database matrix C as its column vectors C_1, \dots, C_9 , respectively.

Figure 6 shows the solution vectors when each of the input vectors V in Eq. (1) is derived from the 3-D Lissajous diagrams independently measured to the column vectors C_1, \dots, C_9 in system matrix C . As a result, this has lead that any of the solution vectors U are composed of the non-zero elements shown in Fig.6. Hence, it has been assumed that the elements taking the maximum value in the solution vectors reveals the cognized cans. Thus, we have succeeded in identifying the prepared 9 cans by our smart magnetic sensor system.

4. Conclusion

We have proposed one of the smart magnetic sensor systems, composed of the magnetic sensor, 3-D Lissajous diagram visualization, and image cognition engine. The 3-D Lissajous diagram converts from the sensor I/O signals to image data and implicitly contains the time information by histograms as the overlapped points on the conventional Lissajous diagram. This makes it possible to utilize image cognition to realize the smart function enabling us to cognize the distinct metallic materials. One of the practical applications for identifying metallic cans has successfully been accomplished by our smart magnetic sensor system. Many kinds of magnetic sensors, with magnetic materials, can be treated by our approach for variety of purposes.

Acknowledgment

The authors are greatly acknowledged to Mr.K.Kawamura (currently Yokokawa Electric Co. LTD), who was a master course student of graduate school of engineering Hosei university, for his effort to obtain the experimental as well as calculated results on this paper.

(Manuscript received Nov. 22, 2007, revised Feb. 7, 2008)

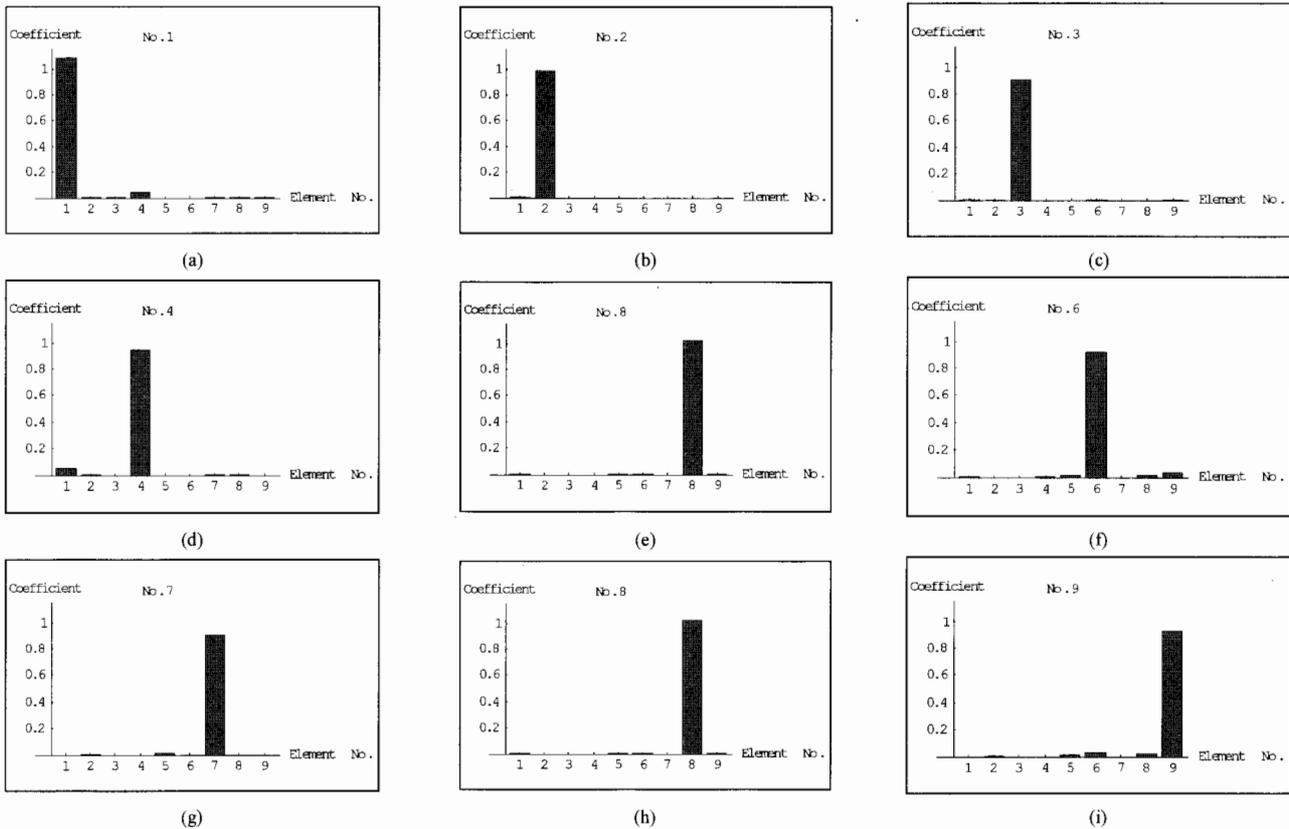


Fig. 6. Elements in solution vector U as the identified results : (a)-(i) correspond to the identification when the cans shown in Figs. 4(a)-(i) are inserted to the sensor, respectively. Vertical and horizontal axes are the magnitude and position number in the solution vector U , respectively

References

- (1) C. Dolabdjian, S. Saez, A. Reyes Toledo, and D. Robbes : "Signal-to-noise improvement of bio-magnetic signals using a flux-gate probe and real time signal processing", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.69, No.10, pp.3678-3680 (1998-10)
- (2) C. M. Cai, K. Usami, M. Hayashi, and K. Mohri : "Frequency-modulation-type MI sensor using amorphous wire and CMOS inverter multivibrator", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.40, No.1, pt.1, pp.161-163 (2004-1)
- (3) T. Hayase, K. Nisugi, and A. Shirai : "Numerical realization for analysis of real flows by integrating computation and measurement", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol.47, Nos.6-7, pp.543-559 (2005-12)
- (4) K. Kawamura, S. Hayano, K. Horii, and Y. Saito : "Time domain signals analysis by equivalent characteristic value", *J. Visualization Soc. Jpn* (Proc. of VSJ Niigata 2005), Vol.25, suppl.2, pp.137-138 (2005) (in Japanese)
- (5) Y. Shigeta, S. Hayano, and Y. Saito : "Magnetic sensor signal analysis", *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, Vol.15, pp.349-352 (2001/2002)
- (6) I. Senoo, Y. Saito, and S. Hayano : "Magnetic sensor signal analysis by means of the image processing technique", *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, Vol.15, pp.343-347 (2001/2002)
- (7) K. Wakabayashi, S. Hayano, and Y. Saito : "The eigen pattern of image and its application to magnetic field identification", *T. IEE Japan*, Vol.120-A, No.10, pp.902-906 (2001-10) (in Japanese)
- (8) H. Takahashi, S. Hayano, and Y. Saito : "Estimation of two-dimensional current distribution by least squares method", *T. IEE Japan*, Vol.120-A, No.10, pp.919-923 (2001-10)
- (9) G. Strang : *Linear Algebra and Its Applications*, 2nd ed., Academic Press, Inc. (1980)

Yoshifuru Saito



(Member) was born in Fukuoka, Japan on July 24, 1946. Professor Saito attended Hosei University (B.E. 1969, M.E. 1971, Ph. D. 1975). Dr. Saito was an assistant research fellow (1975-76), lecturer (1976-78) and was appointed Associate Professor (1978-87) and Professor (1987-) in the Electrical Engineering Department at Hosei University. Currently, he is a Professor of the graduate school of system designing.

Iliana Marinova



(Non-member) was born in Pleven, Bulgaria on June 10, 1959. She received a Ph.D. degree in electrical engineering from Technical University of Sofia, Bulgaria in 1989, and is presently an associate professor at Technical University of Sofia. She has worked on inverse problems in electromagnetism and biomagnetism, modelling and visualization of electromagnetic fields, optimal design and investigation of electromagnetic devices. IEEE Magnetics society, International Compumag society member.

Hisashi Endo



(Member) was born in Kanagawa on July 7, 1976. He received his BE, ME, and Ph.D. from Hosei University in 1999, 2001, and 2004, respectively. We worked at Institute of Fluid Science, Tohoku University from 2002 to 2006. Currently, he is working at Power & Industrial Systems Laboratory, Hitachi Ltd. from 2007. His research interests include nondestructive evaluation, image analysis and electromagnetic computation.

講演論文集

第20回

「電磁力関連のダイナミクス」

シンポジウム

The 20th Symposium on Electromagnetics and Dynamics
(SEAD20)

会期：2008年5月21日(水)～23日(金)

会場：別府ビーコンプラザ

主催：日本 AEM 学会，大分県，大分大学

共催：電気学会(産業応用部門)，日本機械学会

協賛：日本鉄鋼協会，計測自動制御学会，磁性流体研究連絡会

日本磁気学会，低温工学協会，静電気学会，日本液晶学会，精密工学会，

日本原子力学会，高速処理応用学会，日本工業技術振興協会，

日本シミュレーション学会

電気インピーダンス法トモグラフィに関する一考察

A Study of Electrical Impedance Tomography

齊藤 兆古^{*1}(正員), 音川 英一^{*2} (非会員)

Yoshifuru SAITO (Mem.), Eiichi OTOGAWA (Non-Mem.)

With the developments of modern high-speed computer, X-ray and MRI tomography systems are widely used as a deterministic tool of medical diagnosis. On the other side, EIT (Electrical Impedance Tomography) is now developing mainly for industrial use. Fundamental difference between them is that MRI or X-ray tomography needs not to handle the functional measured data, but EIT is based on the functional nature of the measurable data. Namely, EIT requires a solution of ill-posed system equations but MRI or X-ray tomography does not require the solution of such the ill-posed system of equations. Because of the reliability, EIT is not applied to the medical use. Even though EIT does not give the reliable tomography, United State of America, England and the other countries are still developing the EIT. In particular, EIT is intensively developed as one of the national projects in China. EIT has several merits compared with that of MRI and X-ray tomography from a viewpoint of the cost and simple electromechanical structures. If it is possible to obtain the reliable solution of ill-posed system equations accompanying with EIT, then EIT may be used not only the industrial use but also medical use. In the present paper, we propose one of the most reliable solution methodologies accompanying with EIT development.

Keywords: EIT, Inverse Problem, Generalized Sampled Pattern Matching Method

1 緒言

現在, 実用化されている断層撮影技術として, X線CT(Computerized Tomography)やMRI(Magnetic Resonance Imaging)などが挙げられる。これらは医療分野などにおいて非常に重要な診断情報を提供する。X線CTを行うためには, X線照射装置が必要であり, MRIを行うためには, 強力な磁界生成のために超伝導磁石が必要となる。これらの装置は比較的大型, 比較的高価であるという欠点を持つ。これらの点を解消すべく, より小型の装置で安価に断層撮影を行うための研究が各国で行われている。特に, 多くの人口を抱える中国では, 国家計画として研究・開発が行われている[1]。これらの研究の一例として, 電気インピーダンス・トモグラフィ(Electrical Impedance Tomography, EIT)が挙げられる。X線CTやMRIなどでは, 断層撮影対象への働きかけに, 断層撮影対象内を直進する性質を持っているX線やマイクロ波を用いるので, その応答は一次元関数で表現することができる。EITでは, 断層撮影対象物への働きかけに対する応答が二次

元以上の関数で表現されるため, これらの断層撮影技術を関数型トモグラフィ(Functional Tomography)と言われる。二次元以上の関数の応答を元にする点が関数型トモグラフィの断層撮影画像生成理論の確立を困難にしている。関数型トモグラフィの研究で最も一般的な理論の一つとして, Sensitivity行列法が挙げられる[2]。Sensitivity行列法は, 一種の条件付パターンマッチング法と考えることができる。考えられる全てのパターンを用意する事が困難であるというパターンマッチング法の限界がSensitivity行列法の最大の欠点である。

本論文では, 電磁気学における電気双極子を関数型トモグラフィに導入した電気双極子法という新たな定式化法を提唱する。電気双極子法の利点は, Sensitivity行列法のようなパターンマッチング法の限界が存在しない点にある。本論文は, 関数型トモグラフィの一つであるEITの新たな定式化法として電気双極子法を提唱し, 従来のSensitivity行列法の問題点と, 電気双極子法の有効性に関して考察を行うものである。

2 理論的背景

2.1 Sensitivity 行列法

Sensitivityとは, 断層撮影対象内を離散化した最小領域内の一点で媒質パラメータが変化した場合の領域

連絡先: 齊藤 兆古, 〒184-8584 小金井市梶野町3-7-2 法政大学理工学部電気電子工学科
e-mail: ysaito@hosei.ac.jp

^{*1}法政大学 ^{*2}法政大学大学院 (現在, 富士通株式会社)

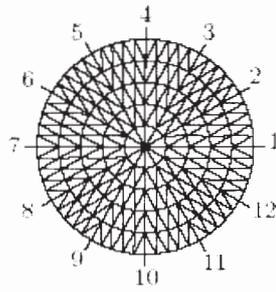


Fig.1 Discreted Area and Electrodes

全体のインピーダンス変化量を表す。断層撮影対象外周部に設置された測定電極対が i,j であるときの任意の離散化領域 r_n のSensitivity値 S_{ij}^n は式(1)のように表される。

$$S_{ij}^n = \frac{1}{\beta} \frac{Z_{i,j}^{r_n} - Z_{i,j}^a}{Z_{i,j}^b - Z_{i,j}^a} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D_n}{D_{all}} \quad (2)$$

Sensitivity 値 S_{ij}^n は、任意の離散化領域 r_n のみに導電率 b [S/m]が存在する場合のインピーダンス Z_{ij}^n [Ω] と、領域内が基準導電率 a [S/m] で満たされた基準状態でのインピーダンス Z_{ij}^a との差分を取ること、基準インピーダンスからのインピーダンス変化量を算出し、それを最大の変化量 Z_{ij}^b / Z_{ij}^a で正規化する。 Z_{ij}^a [Ω] は対象領域が全て基準導電率 a で満たされている場合の基準インピーダンス、 Z_{ij}^b [Ω] は検出対象導電率 b [S/m] で満たされている場合の最大インピーダンスである。更に対象領域全体の面積 D_{all} [m²] に対する離散化領域 r_n の面積 D_n [m²] の占める割合 β で除することで、各離散化領域の面積の違いの影響を無くす。このようなSensitivity 値を測定電極 i, j の全ての組み合わせと、全ての離散化領域 r_k について並べたものをSensitivity 行列と定義する。

Fig.1 の場合、測定電極は12 極存在するので、 i, j の全ての組み合わせは $(12 \times (12-1)) / 2 = 66$ 組となる。また、断層撮影対象領域は312 個の領域に離散化されているので、 $k = 312$ となる。任意の導電率分布状態における測定インピーダンス Z_{ij} [Ω] と基準インピーダンス Z_{ij}^a [Ω] の差であるインピーダンス変化量 Z'_{ij} [Ω] は、Sensitivity 行列 S と導電率分布 κ の積の形で表すことができると考えると、式(5) が成り立つ。

式(5) を用いて導電率分布 κ を求めるためには、 S の逆行列を Z' の左側からかけることになる。しかし、 S

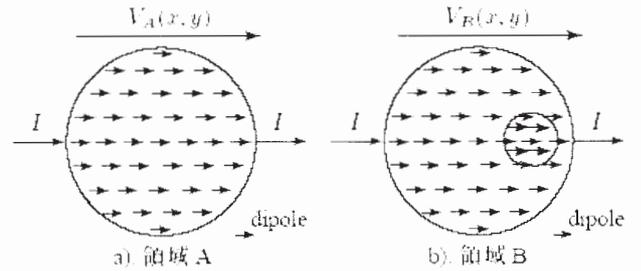


Fig.2 Counter Electromotive Force by Different Resistance

$$Z'_{i,j} = Z_{i,j} - Z_{i,j}^a \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} Z'_{1,1} \\ Z'_{1,2} \\ \vdots \\ Z'_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{11}^2 & \dots & S_{11}^k \\ S_{12}^1 & S_{12}^2 & \dots & S_{12}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{ij}^1 & S_{ij}^2 & \dots & S_{ij}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \vdots \\ \kappa_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Z' = S \kappa \quad (5)$$

$$V_B(x, y) - V_A(x, y) = V_C(x, y) \quad (6)$$

は一般に正則ではないため、逆行列を求めることができない。したがって、この問題は不適切な線形システム方程式を解く逆問題に帰する。

近年、Sensitivity 行列法へ筆者等が提唱したGVSPM (Generalized Sampled Pattern Matching) 法を適用した結果、Newton 法や特異値分解法等よりも良好な結果が武居等やDong 等によって報告されている[2, 3, 4, 5]。本論文では、このGVSPM 法を不適切な線形システム方程式の解法としてを採用する。

2.2 電気双極子法

電気回路において、抵抗素子で生じる電圧降下は電圧源に対して逆方向にかかる起電力と考える事ができる。この起電力は逆起電力と呼ばれる。抵抗素子を微小な抵抗素子の集合と考えれば、抵抗素子における逆起電力は微小な逆起電力の集合と考えられる。微小な逆起電力は陽・陰電極の組み合わせであるから、電気双極子と考えられる。電気双極子は陽・陰電荷の極対である。よって、抵抗素子における逆起電力とは、電気双極子の集合であると考えることが可能である。

Fig.2 a) に示す領域A に対して電流 I [A] を注入した場合、領域内部には逆起電力分布 $V_A(x, y)$ [V] が生じる。同様にFig.2 b) に示す領域B に先ほどと等しい電流 I [A] を注入した場合、領域内部には逆起電力分布 $V_B(x, y)$ [V] が生じる。領域B は領域A 内に異なる導電率の部分を追加した状態である。領域A の状態から領域B の状態への導電率分布変化に起因する両者の逆起電力分布の相違 $V_C(x, y)$ は式(6) で与えられる。この

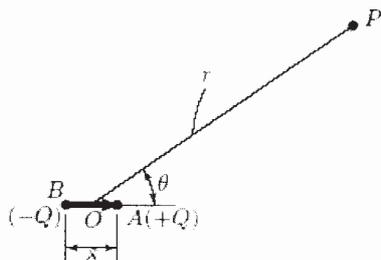


Fig.3 Electric Dipole

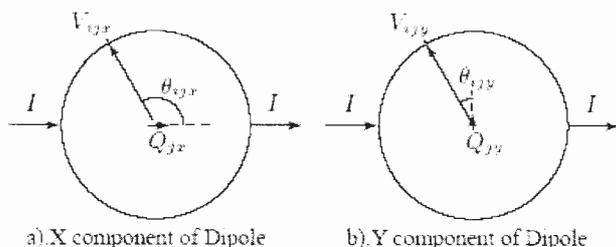


Fig.4 Measurable Voltage and Voltage Dipole

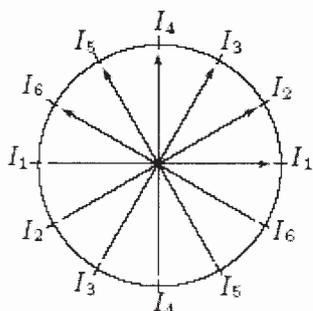


Fig.5 Pairs of Electrodes for Current Injection

差分逆起電力分布 $V_c(x; y)$ は電気双極子の集合からなると考えられる。

EIT の目的は、断層撮影対象領域外周部で測定される電圧分布から断層撮影対象領域内部の導電率分布を推定することにある。導電率分布の推定は、導電率の変化によって生じる逆起電力分布 $V_c(x; y)$ が与える対象周辺電圧分布から電気双極子の位置と大きさを推定することと等価であると考えられる。このように、EIT の導電率パラメータ推定問題は、電気双極子の与える対象周辺電圧分布から電圧源である電気双極子の位置を推定する問題に置き換えることが可能である[6, 7, 8, 9]。

Fig.3 に示す電気双極子が作る電圧は式(7) で与えられる。ここで、 V_P [V] は電荷 Q [C] を有する電気双極子が距離 r [m] 離れた任意の点 P に作る電圧である。また、 ϵ [F/m] は空間の誘電率であり、 δ [m] は電気双極子の有する陽極、陰極間の距離である。

$$V_P = \frac{Q\delta \cos \theta}{4\pi\epsilon r^2} \quad (7)$$

Fig.4 に示すように、任意の離散化領域に存在する電気双極子は X 成分、 Y 成分で構成されるものとする。断層撮影対象領域外周部の周辺電圧分布は対象領域内を離散化した複数点の電気双極子の X 成分、 Y 成分が作る電圧分布の線形和であると考えられる。よって、対象領域外周部の周辺電圧分布は式(7) を用いて、式(9) で与えられる。ただし、 $\delta = 4\pi\epsilon$ とする。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11x} & G_{11y} & \dots & G_{1mx} & G_{1my} \\ G_{21x} & G_{21y} & \dots & G_{2mx} & G_{2my} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{n1x} & G_{n1y} & \dots & G_{nmx} & G_{nmy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1x} \\ Q_{1y} \\ \vdots \\ Q_{mx} \\ Q_{my} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{GQ} \quad (9)$$

$$G_{ijx} = \frac{\cos \theta_{ijx}}{r_{ij}^2} \quad (10)$$

$$G_{iyy} = \frac{\cos \theta_{iyy}}{r_{ij}^2} = \frac{\sin \theta_{ijx}}{r_{ij}^2} \quad (11)$$

式(9) のシステム方程式から求めるべきは任意の位置の電気双極子の大きさ Q [C] であるから、 G の逆行列を周辺電圧値 \mathbf{V} [V] の左側に掛けることになる。ところが、対象領域外周に設置できる測定電極数は有限個に限定されるため、一般に行列 G は正方行列にならない。したがって、この問題は不適切な線形システム方程式を解く逆問題に帰する。電気双極子法においても、Sensitivity 行列法の場合と同様に逆問題解法として GVSPM 法を採用する。

このような線形システム方程式は、電流注入パターンそれぞれに与えられ、その線形システム方程式をそれぞれ独立に解き、得られた複数の結果を用いて式(12) であらわされる畳み込み演算 (convolution) を行う。畳み込み演算は解の共通部分を抽出するフィルタ演算であり、電流注入パターンを変えても、常に異なる導電率部分のみが共通部分として抽出されるため、逆問題による解の信頼性向上が期待できる。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 \circledast \mathbf{Z}_2 \dots \circledast \mathbf{Z}_{n/2} \quad (12)$$

対象領域内の電流分布を勘案すると、この畳み込みによる方法は、電極組み合わせ数を増やすことが、必ずしも解の精度を向上させることを意味しない。よって、可能な限りの電極組み合わせ数を取ることなく、測定電極 n 個に対して、対象領域の中心を電流が通過可能な電流注入パターン数は $n/2$ とする。Fig.5 に示す

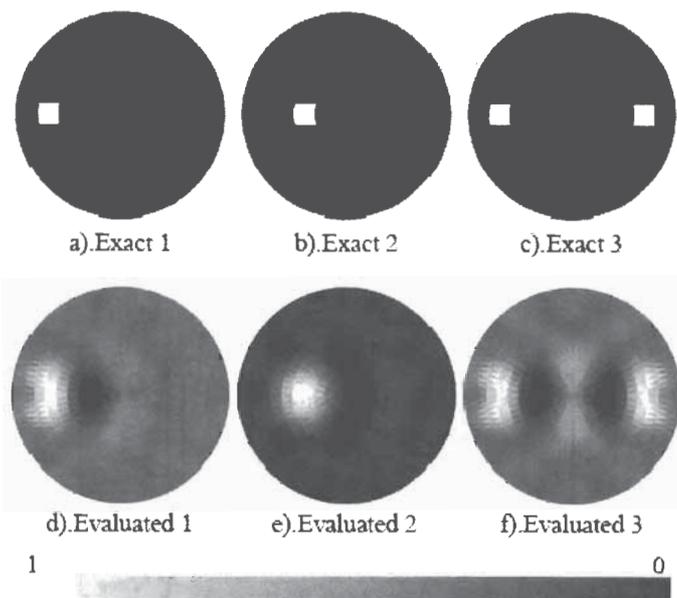


Fig.6 Exact and Evaluated Conductance Distributions

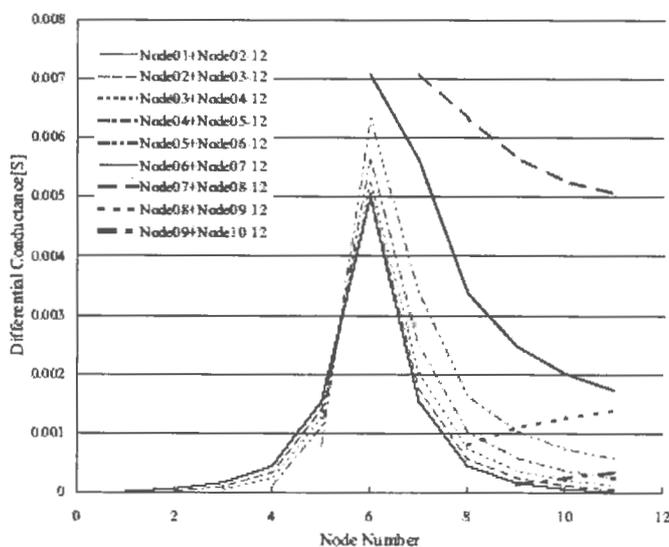


Fig.7 Differential Impedance

ように、対象領域外周部に電極が12個存在する場合、対象領域への電流注入パターンは6方向とする。

3. シミュレーションによる検証

3.1 Sensitivity 行列法

2.1で述べた理論的背景を前提としてSensitivity 行列法の数値シミュレーションを行う。Sensitivity 行列法のシステム方程式は式(13)のようにLaplaceの方程式で表される。ここで、 κ [S] は導電率、 ϕ [V] は電気スカラーポテンシャルをあらわす。

$$\nabla \cdot \kappa (\nabla \phi) = 0 \quad (13)$$

対象領域内の離散化には三角形一次有限要素法 (Finite Element Method, FEM) を用いる。断層撮影対

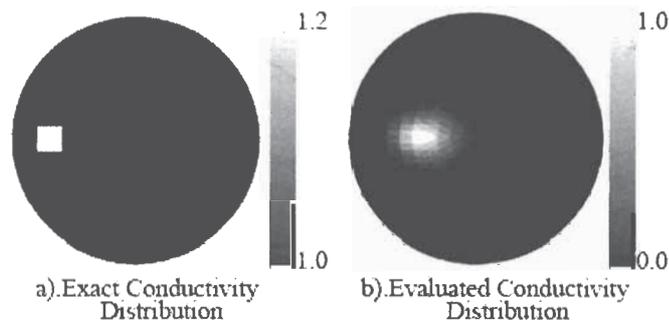


Fig.8 Exact and Evaluated Conductivity Distributions

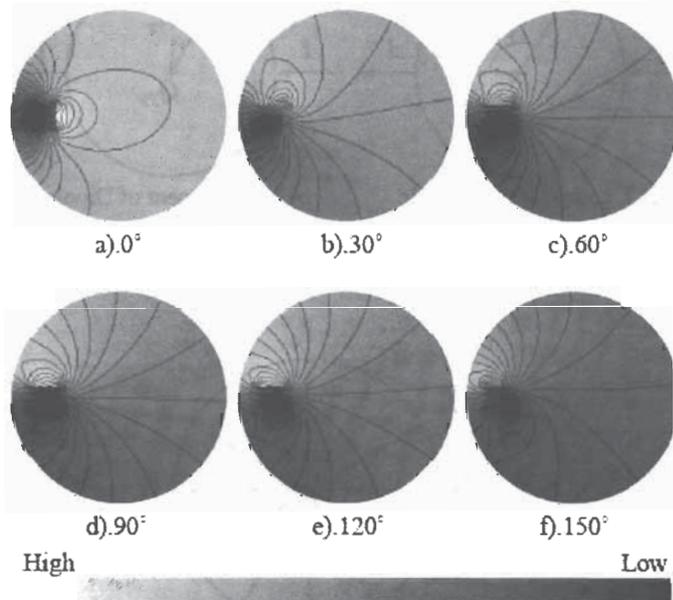


Fig.9 Voltage Distributions obtained by solving Eq. (6)

象領域外周部に設置する測定電極数は12極とし、電極番号はFig.1の様に設定する。

Fig.6 a), b), c) は、シミュレーションに用いた導電率分布を表し、Fig.6 d), e), f) は式(5)から得られたシミュレーション結果を表す。Fig.6における黒色部は基準導電率部、白色部は検出対象導電率部をあらわしている。

Fig.6 d), e), f) の結果は、それぞれ、算出結果の白色部が検出対象導電率部付近に現れていることから、検出対象を算出することに成功していると考えられるが、白色部に隣接して黒色部が存在する事が解の信頼性を低くしている。

Fig.7はFig.6 a)における各測定電極組み合わせとインピーダンス変化量の関係をあらわす。Fig.7のデータ列Node 01+Node 02-12はインピーダンスを計測するために接続する二極の電極のうち、一極をNode 01へ接続し、二極をNode 02からNode 12へとつなぎ変えたときに得られるインピーダンスを表す。測定電極と対象導電率部が近接しているときにインピーダンス変化量が高いことが分かる。これらのデータ列を式(5)

の Z' として、 κ を求めた結果がFig.6 d) である。逆問題の解法としてはGVSPM 法を用いた。

3.2 電気双極子法

2.2で述べた理論的背景を前提として有限要素法による電気双極子法の数値シミュレーションを行う。EITのシステム方程式は式(14)のようにPoisson の方程式で表される。ここで、 κ [S] は導電率、 ϕ [V] は電圧、 j [A/m²]は印加電流密度をあらわす。

$$\nabla \cdot \kappa (\nabla \phi) = j \tag{14}$$

断層撮影対象領域への電流注入により領域内に生じる電圧分布の導出には三角形一次有限要素法を用いた。式(9) のシステム方程式に用いる電気双極子は、断層撮影対象領域を離散化した微小領域の重心に存在するものとする。測定電極数は24 極であることを仮定した。これは、正しい解を得るためには最低でも24 極の測定電極を用意しなければならないことが経験的に分かっているためである。

Fig.8 a) はシミュレーションに用いた導電率分布を示し、Fig.8 b) は、式(9), (12) から得られた導電率分布を示す。Fig.8 b) の結果はFig.8 a) に示される検出対象導電率部の位置よりも内側に検出対象導電率部が検出される傾向があるが、比較的良好な結果と考えられる。

Fig.9 は検出対象導電率部の有無による電圧変化をあらわした電圧分布と等電圧線である。Fig.9 は式(6)によって得られる。Fig.9 に示される角度は電流注入角度を表し、Fig.5 における I_1 の角度を基準角度0°としている。Fig.10 はFig.9 の電圧分布から、対象領域外周部に設置された測定電極部の値のみを抽出したものである。Fig.10 に示される外周部電圧データの総和をゼロとして正規化した結果を式(9) の V とする。本研究においては領域内に存在する電荷は全て電気双極子であることを前提としているから外周部電圧データの総和もゼロである。Fig.11 は各電流注入パターンに対して得られる式(9)をそれぞれ独立に解いて得られた電気双極子分布をあらわす。逆問題の解法としてはGVSPM 法を用いた。Fig.11 a)-f) に示される電気双極子分布から、電流の通電パターンを変えても共通に電気双極子が存在する位置は変わらず、それらを抽出した結果がFig.8 b) である。Fig.11 に示される電気双極子が有する電荷の絶対値を0 から最大値1 に正規化して、式(12) の畳み込み演算を行うことで共通位置の抽出を行った。Fig.12 は検出対象導電率分布と式(9), (12) によって得られた導電率分布を示す。Fig.8, Fig.12 の

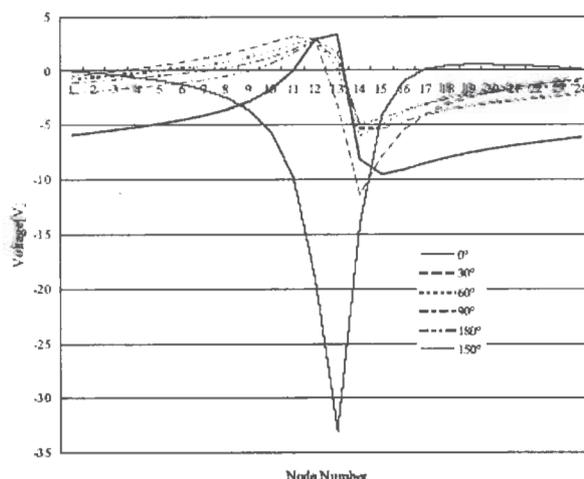


Fig.10 Differential Surface Voltage

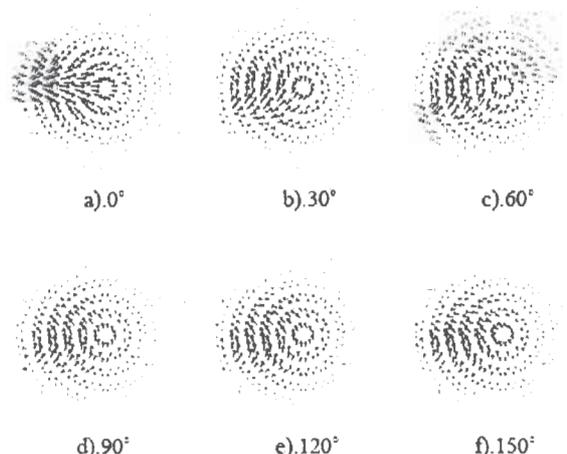


Fig.11 Voltage Dipole Distributions obtained by solving Eq. (9), independently

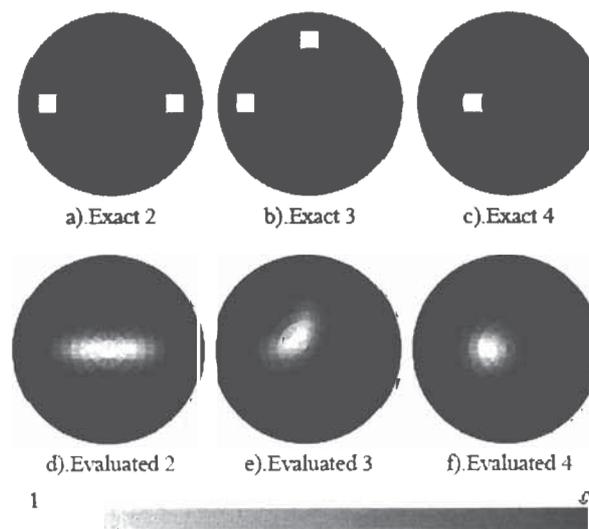


Fig.12 Exact and Evaluated Conductance Distributions

Table 1 Parameters of tested System(Sensitivity Matrix Method)

測定対象トレイ	アクリル樹脂製, 直径 20cm, 銅板電極 24 極 (H=2cm W=1cm D=0.3mm), 水深 1cm
検出対象物	銅ブロック (H=2cm W=2cm D=2cm), 発泡スチロールブロック (H=2cm W=2cm D=2cm)
Impedance Analyzer	HewlettPackard 4194A

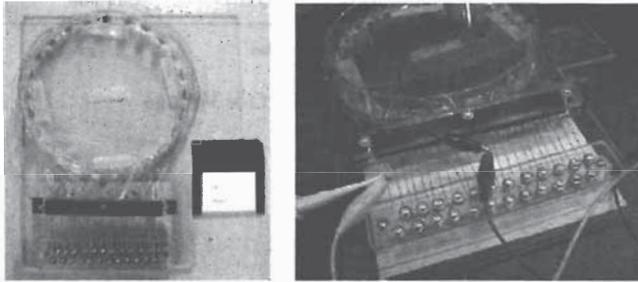


Fig.13 Device for Experiments

結果は, それぞれ正確な導電率分布とほぼ一致した導電率分布が電気双極子法によって推定可能であることを示している。

以上, 本論文で提唱する電気双極子による導電率パラメータ推定問題の定式化の妥当性がシミュレーションによって検証された。

4. 実験

4.1 Sensitivity 行列法

断層撮影対象として, Fig.13 のようなトレイを用意し, インピーダンス・アナライザを用いて各電極組み合わせにおけるインピーダンスの測定を行った。装置の各パラメータはTable.1 に示すとおりである。測定対象とするインピーダンスは抵抗成分とし, リアクタンス成分は考慮しない。測定対象周波数には測定対象トレイの共振周波数を用いることでリアクタンスの影響を最小限にする。共振周波数とはリアクタンスが最小, すなわち, ゼロとなる周波数である。Fig.14 に示す測定対象トレイの電極間インピーダンス周波数特性の測定結果から測定対象周波数を3[kHz] と決定した。

Figs.15, 16 に実験結果を示す。Fig.15 a), Fig.16 a) は測定対象である銅ブロック, 発泡スチロール・ブロックの有無による測定対象トレイのインピーダンス変化を示す。Fig.15 a) は, 基準媒質である水に対して導電率の高い銅ブロックが挿入されたことで領域全体の

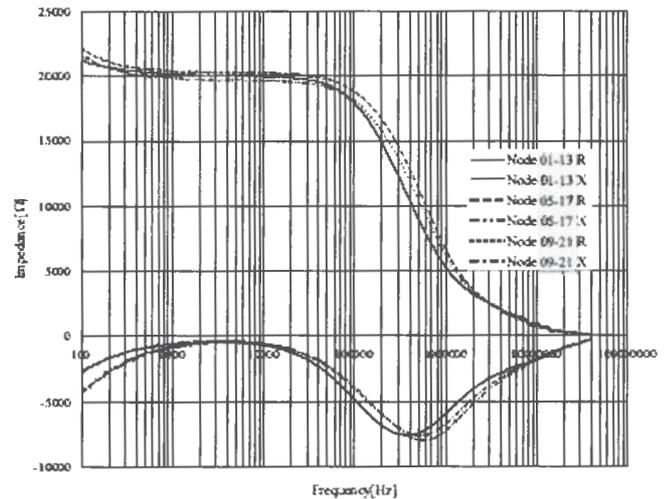


Fig.14 Frequency characteristics of the tested Tray

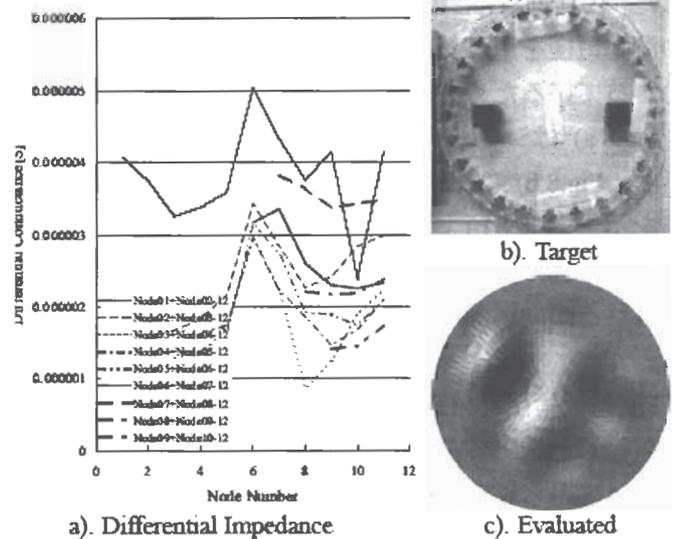


Fig.15 Result of Experiment (Copper Block)

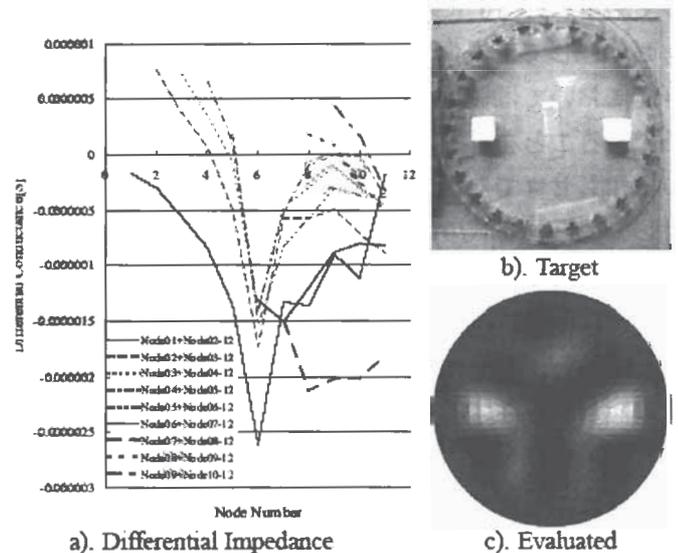


Fig.16 Result of Experiment (Polystyrene Block)

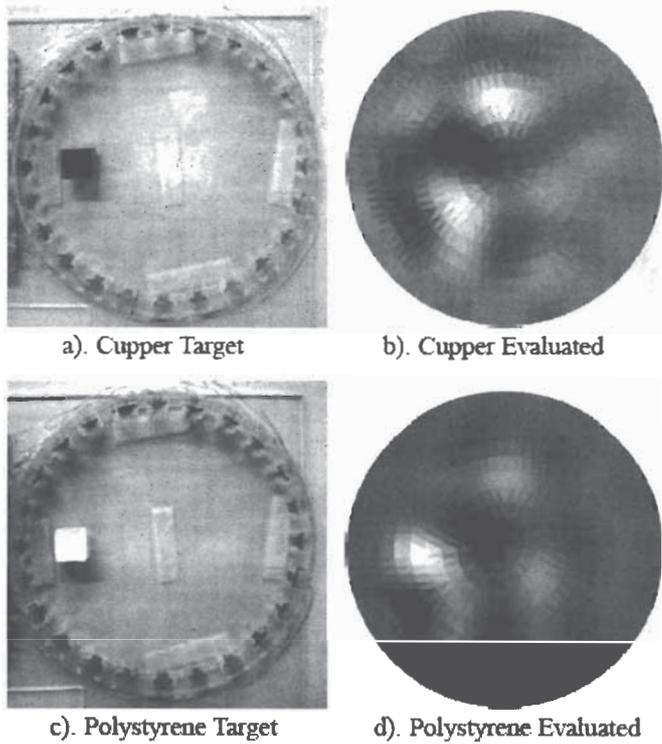


Fig.17 Exact and Evaluated Conductance Distributions

コンダクタンスが増加していることが分かる。Fig.16 a) は、基準媒質である水に対して導電率の低い発泡スチロール・ブロックが挿入されたことでコンダクタンスが減少していることが分かる。

これらの測定値を用いて式(5) を解いた結果がFig.15c)とFig.16 c) である。Fig.15 c) の結果は検出対象である銅ブロックを検出しているとは言いがたい。Fig.16 c) の結果は比較的良好である。その他に、Fig.17 の結果も得られている。Fig.17 d) は比較的良好に発泡スチロール・ブロックの位置を検出しているが、Fig.17 b) は銅ブロックを検出しているとは評価しがたい。

4.2 電気双極子法

電気双極子法に於いても、測定対象としてFig.13 のトレイを用い、Fig.18 の実験システムを使用した。装置の各パラメータはTable.2 に示すとおりである。電気双極子法は直流を前提としたものであるが、実験は交流で行った。これは、直流電流を用いた実験は水の電気分解が生じるなどのノイズ要因が懸念されるためである。Sensitivity 行列法の実験と同様に、リアクタンス分の影響を削減するため、電源の駆動周波数を測定トレイの共振周波数である3[kHz] とした。

Figs.19,20 に実験結果を示す。Fig.19 a)、Fig.20 a)から、銅ブロック、発泡スチロール・ブロックの有無による断層撮影対象外周部の電圧変化は検出対象の存在

Table 2 Parameters of tested System (Electric Dipole Method)

測定対象トレイ	アクリル樹脂製, 直径 20cm, 銅板電極 24 極 (H=2cm W=1cm D=0.3mm), 水深 1cm
検出対象物	銅 ブロック (H=2cm W=2cm D=2cm), 発泡スチロール ブロック (H=2cm W=2cm D=2cm)
標準抵抗	1k Ω
Function Generator	KIKUSUI MODEL 4502
アンプ	NF Electronic Instruments 4025 HIGH SPEED POWER AMPLI-FIR
オシロスコープ	YOKOGAWA DL7100

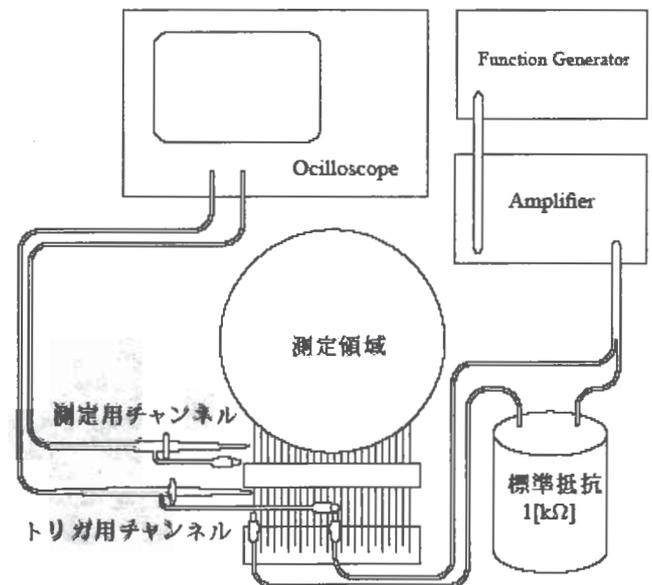


Fig.18 Schematic diagram of the tested EIT

する場所に近い電極に強く現れることがわかる。また、水に対して導電率が高い銅ブロックを挿入した場合と導電率が低い発泡スチロールを挿入した場合とでは外周部の電圧変化の傾向が相反していることが分かる。この結果は、検出対象の導電体近傍に配置された電気双極子が、銅ブロックを挿入した場合と発泡スチロール・ブロックを挿入した場合とでは逆方向を向いていることを意味している。

Fig.19 a) の測定値を用いて式(9) のシステム方程式を解いた結果がFig.21 である。式(9) はFig.19 a) における各電流通電パターン、それぞれに対して式(9) のシステム方程式を独立に解いた。Figs.21 a)-f) の結果から、電気双極子が共通に存在する部分を式(12) を用いて抽出した結果がFig.19 c) である。Fig.21 はシミュレ

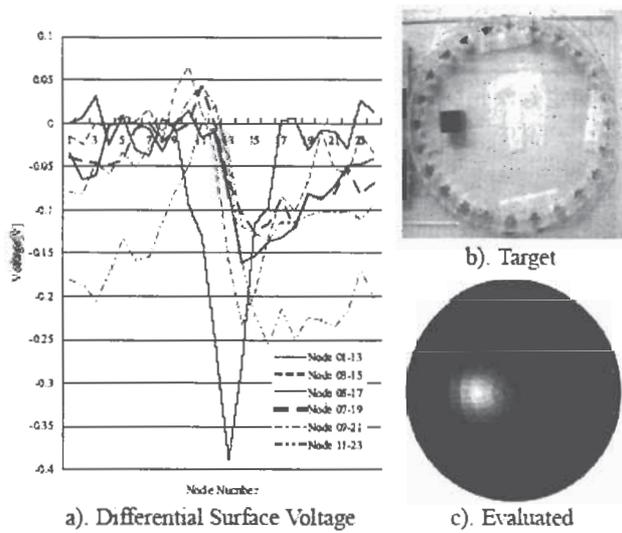


Fig.19 Result of Experiment (Copper Block)

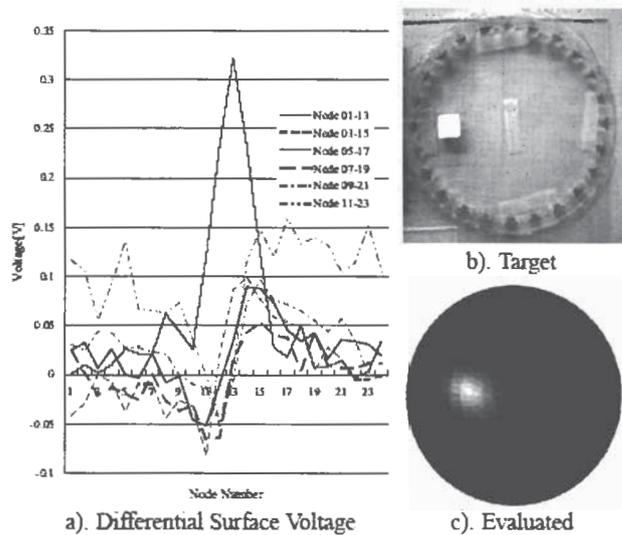


Fig.20 Result of Experiment (Polystyrene Block)

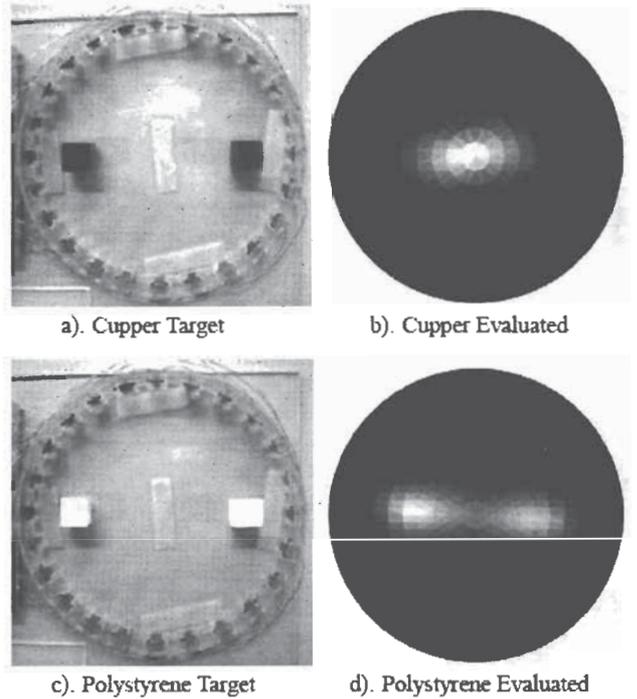


Fig.22 Exact and Evaluated Conductance Distributions

ーション結果であるFig.11 とほぼ一致しノイズの影響が少ないことがわかる。さらに、式(12)を用いた畳み込み演算後の結果にはノイズの影響が削減され、畳み込み演算はノイズ低減効果を持つことが確認された。

Fig.20 a) の測定値について同様の処理を行った結果がFig.20 c) である。Figs.19 c)と20 c) は共に銅ブロック、発泡スチロール・ブロックの位置を比較的良好に検出することに成功している。その他に、Fig.22 の結果も得られている。Fig.22d) の発泡スチロール・ブロック二個を対象とした場合、Fig.12 d) のシミュレーション結果に比較的近い結果が得られたが、Fig.22 b) の銅ブロック二個を対象とした場合では良い結果が得られなかった。

以上のように、全てについて完全な結果が得られなかったものの、全体としては比較的良好な結果が得られた。

以上の結果から、本論文で提唱する電気双極子による導電率パラメータ推定問題の解析方法に関して一定の妥当性が実験的に検証された。

5. まとめ

本論文では、関数型トモグラフィの研究として一般的なSensitivity 行列法と筆者等が提唱する電気双極子法についてシミュレーションと実験によってそれらの妥当性を検討した。

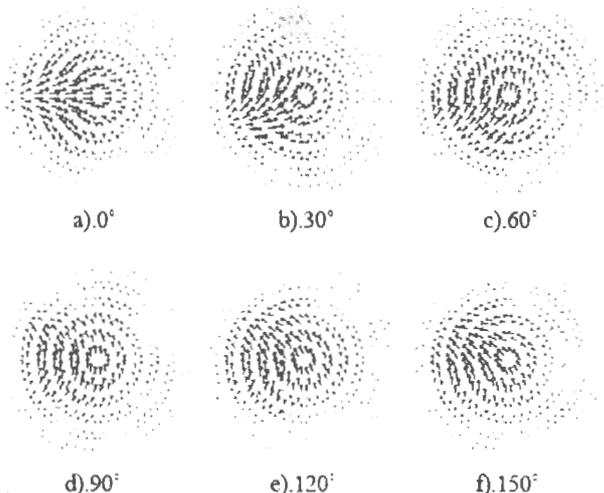


Fig.21 Voltage Dipole Distributions obtained by solving Eq. (9), independently

電気双極子法は、抵抗素子に電流を流した際に生じる電圧降下が逆起電力で表すことができる点に注目し、その逆起電力を電気双極子として扱うことで、導電率パラメータ推定問題であるEITに電気双極子を用いた新たな定式化法である。

Sensitivity 行列法はシミュレーション、実験共に良好な結果が得られるとは言えない。これらの結果は、Sensitivity 行列法の理論的限界に起因するものと言えるであろう。一方、電気双極子法は全てに妥当な解を与えるとは限らないが、シミュレーション、実験共に Sensitivity 行列法を改善した結果を与えることが確認された。

参考文献

- [1] H. Tian, W. He, and Y. Saito, A Study of Reconstruction Algorithm for Electrical Impedance Tomography, *The 2nd Japan, Australia and New Zealand Joint Seminar*, pp.24-25, Kanazawa Japan, January 2002.
- [2] T. Murai, and Y. Kagawa, Electrical impedance computed tomography based on a finite element model, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* Vol.32, pp.177-84, 1985.
- [3] H. Endo, S. Hayano, Y. Saito, and K. Miya, Generalized vector sampled pattern matching method-theory and applications Electromagnetic Nondestructive Evaluation, *Studies Appl. Electromagn. Mech.*, pp.285-92, 2002.
- [4] 武居昌宏, 李輝, 越智光昭, 齋藤兆古, 堀井清之, "サンプルドパターン・マッチング法による固気二相流CT画像の再構成," 可視化情報学会論文集, Vol.22, No.9, pp.71-78, 2002.
- [5] G. Dong, R. Bayford, S. Gao, Y. Saito, R. Yerworth, D. Holder, W. Yan, The application of the generalized vector sample pattern matching method for EIT image reconstruction, *Physiol. Meas.*, pp.449-466, 2003
- [6] H. Saotome, T. Doi, S. Hayano, Y. Saito, Crack identification in metallic materials, *IEEE Transaction on Magnetics* Vol. MAG-29, No.2, March, pp.1861-1864, 1993
- [7] 音川英一, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, "パラメータ推定に関する逆問題とその関数型トモグラフィへの応用", 可視化情報学会論文集, Vol.23, No.1, pp.103-106, 2003.
- [8] 音川英一, 早野誠治, 齋藤兆古, "電気インピーダンス法に関する一考察", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103 No.564, pp.91-98, 2004.
- [9] 音川英一, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, "電気インピーダンス法による導電率分布可視化とその実験的検証", 可視化情報学会論文集, Vol.24, No.1, pp.255-258, 2004.

P47

電流分布の赤外線による可視化とその応用 Visualization of Current Distributions by Infrared Imaging and Its Application

-赤外線による過渡熱分布測定-
-Transient Temperature Distribution Measurement by Infrared Imaging-

鈴木 剛^{*1}(学生員), 齋藤 兆古^{*2} (正員)

Goh SUZUKI (Stu.), Yoshifuru SAITO (Mem.)

In order to realize the reliable nondestructive inspection systems, many infrared image sensor systems are developed and utilized because of their high visual capability. Recently, nuclear electric power plant is increasing its usefulness not warm up earth atmosphere accompanying with human life activities. We are now developing to enhance an infrared inspecting system to carry out the condition based maintenance methodology mainly for nuclear electric power plant use. At first, this paper clarifies a relationship between the pixel value constructing infrared image and absolute temperature even though automatic gain control function equipped in infrared CCD camera is activating to get the highest contrast image. Second we demonstrate the absolute temperature visualization when heating the targets by magnetic induction. This makes it possible to clarify the versatile capability of our scheme for various condition based maintenance applications.

Keywords: Infrared image, Nondestructive testing, induction heating

1 緒論

映像情報による診断は、医学の世界などでも用いられているように極めて具体的な状態把握を可能にする。たとえ言語の異なる民族間でも、映像情報を用いることで意思疎通が可能となる。このように人間の視覚情報処理は全地球人類共通の強力な知的機能である。人間は外部から得る情報のなかで 80 パーセント以上を視覚から取り入れている[1]。

近年、商品の品質検査・管理のために、赤外線カメラを用いた非破壊検査技術が広範に用いられている[2-4]。この背景として、赤外線カメラの広汎な普及と監視技術の高度化が挙げられる。

本研究は、第 2 世代赤外線非破壊検査として、コンピュータを前提とする画像処理技術、すなわち、画像認識・識別・監視技術を含めた、赤外線画像情報による知的非破壊検査・監視技術の開発を目指すものである。

本論文では、従来から我々が提唱する“基準温度同時撮影法”を用いて検査対象である金属の過渡温度上昇分布動画を赤外線ビデオカメラの熱画像から抽出し、金属中の欠損やシステム欠陥箇所、また非金属体へ混入した金属片可視化法を提案する。

2 基準温度同時撮影法

本実験において使用した赤外線カメラは「三菱サーマルイメージャ（形式 IR-SC 1 三菱電機株式会社）」である。

赤外線画像は対象物の温度分布をモノクロ濃淡情報として表示するものであり、温度の高い部分を白色、温度が低い部分を黒色で可視化する。温度の高低に伴う白黒濃淡情報の範囲（ダイナミックレンジ）は有限であるため、対象の温度情報を高コントラストで取得する方途として、AGC (Automatic Gain Control, 対象の温度分布で最も支配的な温度を中心としたダイナミックレンジへ自動制御する機能) が組み込まれている。これは相対的な温度分布可視化に有効であるが、絶対的な温度分布可視化を不可能にする。可動部分や動力源を含むシステムにおいては、相対的な温度分布よりも遙かに絶対的な温度分布が有意義である場合もある。これは、多くの機器が特定の許容絶対温度内で正常に機能すべく設計されていることから自明である。

以上の事から、単純な赤外線可視化画像から各種機器の適正動作温度を前提とする高精度連続監視システム構築は困難である。しかし、AGC は広範囲な温度幅の撮影を可能とし、赤外線カメラの適用範囲をより広汎なものとする。換言すれば AGC が備わっていない場合、温度感知範囲が限定されるため、不測の温度に対する熱画像が得られない。

連絡先： 鈴木 剛，〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2，法政大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 齋藤兆古研究室

e-mail: suzuki@ysaitoh.k.hosei.ac.jp

^{*1}法政大学大学院 ^{*2}法政大学大学院



Fig.1 Infrared cup images containing different temperature water.

赤外線 CCD に拠る熱画像は対象の赤外線反射率に依存する。すなわち、対象の赤外線反射率が厳密に既知で無い限り厳密な熱画像・温度画像は得られない。

AGC と赤外線反射率問題を解決する一方法として、本論文では、赤外線画像中に既知の異なる温度を持つ複数の温度基準画像を被温度測定対象と同時に撮影し、既知温度を有する複数の画像を構成するそれぞれの画素値とそれらの温度間の関係を用いて被温度測定対象の絶対温度を測定する“基準温度同時撮影法”を提唱する[2, 3, 4]。さらに、この基準温度同時撮影法と誘導加熱を併用した赤外線非破壊検査の幾つかの例を示す。

Fig. 1 は異なる温度の湯を満したコップの赤外線画像である。それぞれのお湯の温度は、上段の左から 46. 4℃, 29. 0℃, 25. 2℃, 下段の左から 15. 7℃, 12. 8℃である。赤外線カメラの AGC 機能が有効に機能し、高温から低温へ至るカップのお湯を最大コントラストで可視化している。お湯の表面画像を構成する画素値は、高温から順に、180, 101, 87, 52, 43 となり、絶対温度と画素値は比例しないことが判る。従って、赤外線画像から対象物の相対的な温度分布は可視化可能であるが、高精度な絶対温度分布の可視化は困難である。通常のデジタルカメラ用 CCD であっても、赤外線波長領域に於ける光エネルギーの入射によって電荷移動が励起されることから、赤外線 CCD と同じ機能を有する。このため、仮に通常の CCD を用いて正確な絶対温度画像が取得可能であれば、遙かに低コストで温度センシングシステムの構築が可能となる。

“基準温度同時撮影法”の基本的な着想は、長さなど幾何学的情報が既知の対象を画像中に同時に写し込み、全体の画像中で、幾何学的情報が既知の対象画像を基準として幾何学的情報が未知である対象物の幾何学

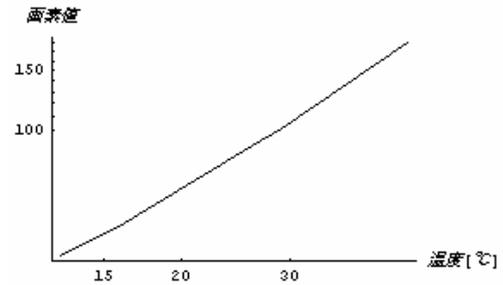


Fig. 2 Temperature versus pixel value

的情報を求める航空写真に拠る地図作成法と同様である。このため、“基準温度同時撮影法”では、温度が既知である対象の赤外線画像を構成する画素値と温度の関係把握しなければならない。

多くの自然科学の問題では、温度上昇などの拡散現象は時間・空間に対しては指数関数的に変化する。このため、ここでは赤外線画像を構成する画素値と絶対温度の関係も指数関数的に關係すると仮定し、Fig.2 に示すように両者を両対数グラフへプロットする。Fig.2 から画素値と温度が比例するため、明らかに両者の関係は指数関数的であり、Fig.2 を用いて画素値を温度へ換算すれば絶対温度分布の可視化画像を得ることが可能となる。

3 誘導加熱に拠る非破壊検査



Fig. 3 Two Iron plates to simulate a straight crack.

Fig. 4 Thermal Image of two iron plates when heating by alternating magnetic fields.

3.1 鉄板中の亀裂探査

鉄板中のクラックを模擬するため 2 枚の鉄板を接合した実験モデルを Fig.3 に示す。平面状スパイラル励磁コイルへ通電し Fig.3 のモデルを誘導加熱した。定常的な加熱状態を表す赤外線画像を Fig.4 に示す。Fig.5

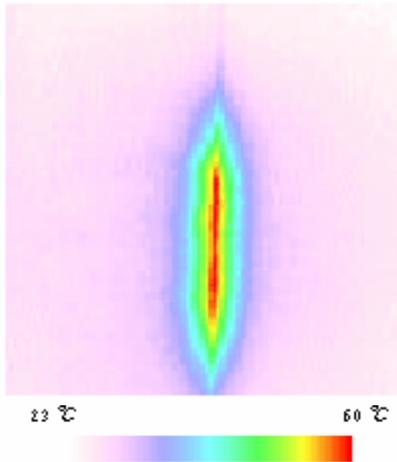


Fig.5 Absolute temperature distribution of two iron plates when heating by alternating magnetic fields.

は基準温度同時撮影法によって得られた絶対温度分布である。赤部分が最も高温部を示し、白色に近づくにつれ低温部を示す。この結果から鉄板接合部分は周囲に比べて摂氏 30~40 度高温であることがわかる。すなわち、加熱電流である渦電流密度は鉄板の接合部で最大となる。

3.2 非金属材料中の金属探査



Fig. 6 A cloth folding in a $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ iron plate

衣料品中の縫製針や魚介類中の金属網破片探査は直接人体の内外へ障害を与えるため、極めて精密で正確な検査を必要とする。

Fig.6 に示すように非金属中に混入した金属片を模擬し、二つ折りにした布間に $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ の鋼板を挟んだ。Fig.7 に示す励磁コイルへ通電して生成される交流磁界中へ Fig.6 の金属片を挟んだ布を配置する。誘導加熱開始 2 分後に赤外線画像を撮影した。得られた赤外線画像へ基準温度同時撮影法を適用して絶対温度上昇分布を可視化した。Fig.8 は温度上昇画像を示す。

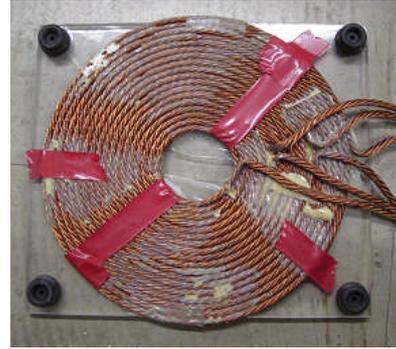


Fig. 7 Exciting coil used for induction heating

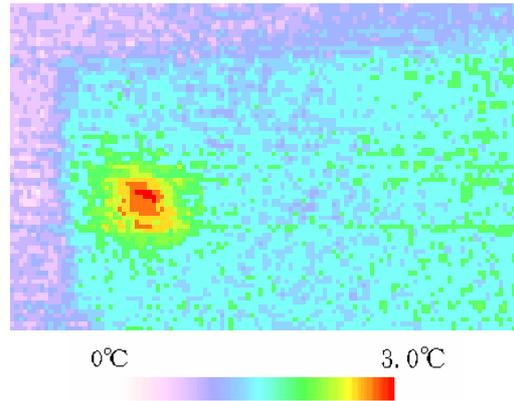


Fig. 8 Absolute temperature rise distribution of the cloth folding in an iron plate

Fig.9 はノイズの状況を把握するために Fig.8 の温度上昇を縦軸に取った Fig.8 の 3 次元表示である。

Fig.8, 9 より金属片が位置する部分の温度は、誘導加熱前と比較して約 3°C 温度上昇することが確認できる。すなわち、金属片は布の間に挟まれているため目視が不可能であるが、誘導加熱によって金属片が加熱され、結果として、非金属中に混入した金属が可視化される。

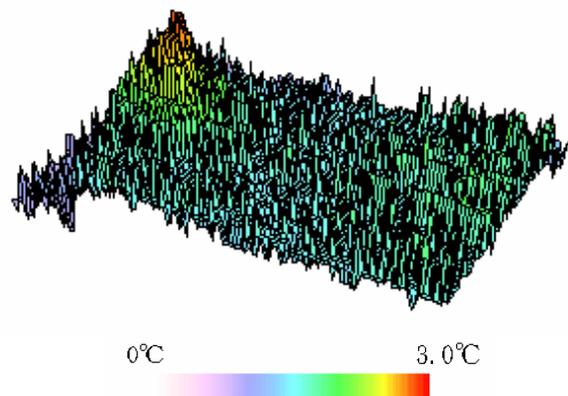


Fig. 9 3D representation of the absolute temperature rise distribution

次に、加熱対象となる金属と、温度上昇の関係について吟味する。Fig. 10 はそれぞれ 0.5×0.5 , 1.0×1.0 , 1.5

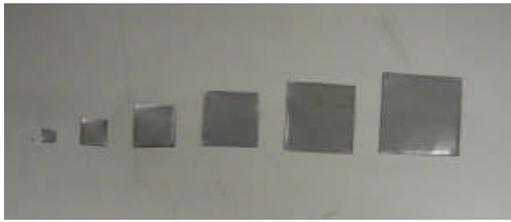


Fig. 10 Six tested metallic plates having different surface area.

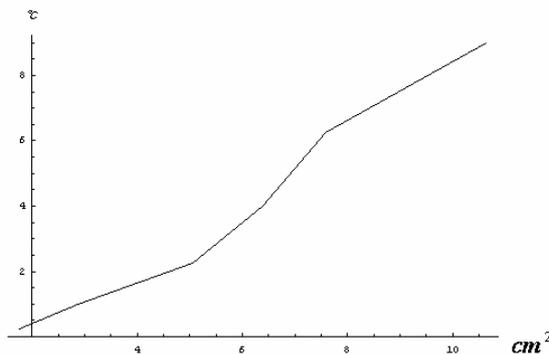


Fig. 11 Temperature rise versus surface area of the tested metallic plates

×1.5, 2.0×2.0, 2.5×2.5, 3.0×3.0cm²の6種類の金属片を示す。これらの金属片を3.1や3.2節と同様にそれぞれを布に挟んだ状態で誘導加熱を行い、絶対温度上昇分布画像を基準温度同時撮影法によって得た。

6種類の金属片で、それぞれの最高温度上昇は1.76°C, 2.95°C, 5.66°C, 6.39°C, 7.59°C, 10.63°Cであった。金属片の表面積と、温度上昇の関係をFig. 11に示す。Fig. 11の結果から以下のことがわかる。

- 1) 同じ条件下で誘導加熱を行った場合、励磁コイル面と平行な加熱対象金属の表面積が大きいほど発熱量が大きい、
- 2) 最大温度上昇値から金属片の励磁コイルに平行な面の相対的な寸法の概略が把握できる。

4 結言

本論文では、赤外線 CCD カメラを用いて絶対温度測定を可能とする一方法として“基準温度同時撮影法”を提唱し、その有効性を検証した。その結果、赤外線カメラを用いた絶対温度状態監視システム構築の一端が開けた。

参考文献

- [1] 中島 龍興, 近田 玲子, 面出 薫; “照明デザイン入門”, 彰国社(1955)
- [2] 鈴木剛, 齋藤兆古, 堀井清之, “過渡熱伝達分布測定による金属欠損の可視化”, 第35回可視化情報シンポジウム, 可視化情報 C211, Vol.27, Suppl. No.1 (2007年7月)
- [3] 鈴木 剛, 齋藤 兆古, 堀井 清之, “電気抵抗の赤外線画像による可視化”, 第36回可視化情報シンポジウム, 可視化情報 P01-001, Vol. 28, Suppl. No.1 (2008年7月)
- [4] 鈴木 剛, 齋藤 兆古, “過渡熱伝達分布測定による金属欠損の可視化”, 第16回MAGDA コンフェレンス in 京都, (2007.11.22-23)

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

宮坂 総 , 齋藤 兆古(法政大学大学院), 堀井 清之(白百合女子大学)

Visualization of Magnetization Characteristics by Cellular Automaton - Physics of complex systems and Preisach model - Sou MIYASAKA, Yoshifuru SAITO, Kiyoshi HORII

ABSTRACT

The cellular automaton is being widely used for analyzing complex physical systems as a deterministic methodology. Although theory of cellular automaton innovated in 1940 by Neumann, German scientist Preisach had worked out the same to the cellular automaton model to represent the nonlinear magnetization characteristics of ferromagnetic materials in 1935. In 1984, S. Wolfram pointed out that method of cellular automaton was a reasonable methodology to represent the complex physical systems but Preisach had derived as is called Preisach model by cellular automaton for typical nonlinear complex ferromagnetic physical system.

In this paper, we try to derive the Preisach type, i.e. cellular automaton, model by visualizing magnetic domain movements by Bitter method.

Keywords: Cellular Automaton, Preisach model, Hysteresis

1. 緒 論

セルオートマトンは、1940年代にノイマンによって提唱された。その後、1984年にウルフラム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、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、雪崩、さらに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が無く、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われている。

本稿は、セル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オートマトン理論が提唱される以前に既に提案され実用化されたセル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からセルオートマトンモデル導き、このセルオートマトンモデルから強磁性体の磁化特性を導く。¹⁾

2. セルオートマトン

2.1 セルオートマトンとは

セルオートマトンとは、格子サイトがいろいろな初期

値を持つ不連続な系からなり、これらのサイトはそれぞれのサイトがいくつかの局所的な隣接サイトの値に基づいた新しい値と有限な数の過去の時間ステップを仮定すると、離散的な時間ステップで状態が変化するものである。²⁾

また、セルオートマトンには、空間の広がりに応じて1次元、2次元、さらに3次元のセルオートマトンがある。

2.2 セルオートマトンの例

ある一定のルールを決め、実行した1次元のセルオートマトン例を示す。Fig.1は初期値(0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 0)でセルオートマトンのルール30((左近傍 t の値 右近傍) t+1の値: (1 1 1) 0, (1 1 0) 0, (1 0 1) 0, (1 0 0) 1, (0 1 1) 1, (0 1 0) 1, (0 0 1) 1, (0 0 0) 0)を適用した場合をFig.1に示す。

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

Fig.1 Example of Cellular Automaton based on Rule 30.

3. 磁化特性のセルオートマトンモデル

3.1 プライザッハモデル

セルオートマトンを用いたプライザッハモデルのシミュレーションを行った結果をFig.2に示す。

P01-004

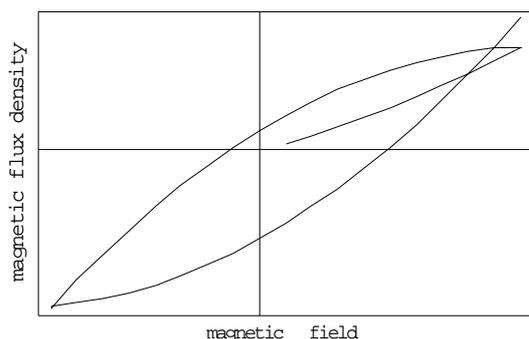


Fig.2 Magnetization Curve computed by Cellular Automaton, i.e. Preisach Model.

Fig.2 のシミュレーションに使ったセルオートマトンを Fig.3 に示す . Fig.3 の図の黒色部分は 1 の値を、灰色部分は - 1 の値を持つ . Fig.2 はそれぞれの画像の値の総和を各フレームの値とし黒に転移する場合はプラスに磁化され灰色に転移する場合はマイナスに磁化されると考える . Fig.3 はプライザッハが提案したプライザッハ線図そのものに他ならない .

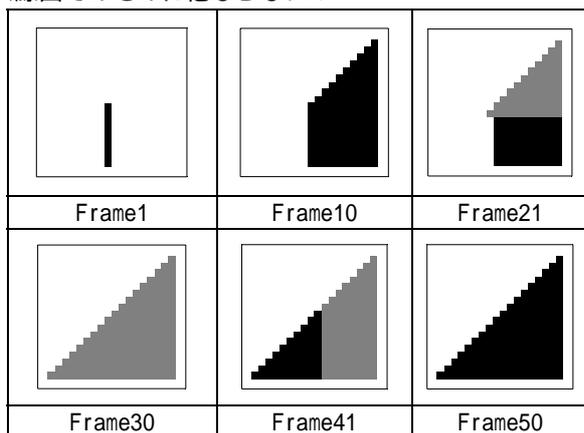


Fig.3 Cellular Automaton Images representing the Magnetization Processes.

3.2 磁区挙動からの解析

磁性体表面磁区挙動をピッター法によって可視化した . 得られた磁区挙動画像を、磁化過程によって 3 過程に分類した . 磁性体の磁化過程は、可逆的磁壁移動範囲、非可逆的磁壁移動範囲さらに可逆的回転磁化領域分けられる . 簡単のため、ここでは可逆的磁壁移動範囲について考える . 可逆的磁壁移動範囲で、正に単位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 (数値ゼロ) として 2 値化した磁区画像 Fig.4 は、Fig.3 の白色部がランダムに存在する、セルオートマトン画像に対応する . Fig.4 から Fig.3 と同様にして Fig.5 の磁化特性に対応する線図が得られる .

4. まとめ

本稿では、1)簡単なセルオートマトンの例を述べ、2) 2次元セルオートマトンとしてプライザッハ線図を示し、

3)プライザッハ線図からレイリーループを描き、4)ピッター法によって可視化された磁区画像を、磁化過程の相違で 3 領域へ分類し、5)分類された領域の中で可逆的磁壁移動範囲に対する磁区画像を画素値に応じて 1 かゼロへ 2 値化してセルオートマトンモデルを作成した . 6)磁区画像から得られたセルオートマトンモデルから磁化特性へ対応する線図を得ることに成功した .

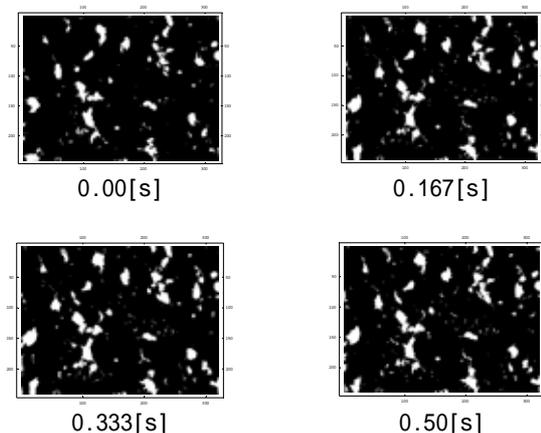


Fig.4 Binary Images of Magnetic Domains.

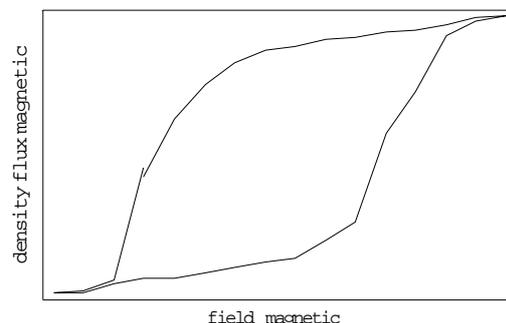


Fig.5 Diagram corresponding to the Magnetization Characteristics.

参考文献

- 1) 須永高志、齋藤兆古、堀井清之 : ピ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、荒井隆 = 訳 : Mathematica 複雑系のシミュレーション物理学と生物学の探求
- 3) R.J.ゲイロード/西舘数芽 = 著、西舘数芽/西川清 = 訳 : Mathematica 自然現象の計算モデル化セルオートマトン・シミュレーション
- 4) 西成活裕 : セル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://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/mypapers/rikouJ.pdf>

1/f ゆらぎの可視化

齊藤 兆古 (法政大学), 宮坂 総(法政大学), 加藤 千恵子(東洋大学)

Visualization of 1/f Fluctuation Yoshifuru SAITO, Soh MIYASAKA and Chieko KATO

ABSTRACT

1/f fluctuation analysis of the non-life-bearing, life-bearing and self driven particle targets is carried out. As a result, it is clarified the followings. State transition, e.g., melting an ice to water, of all the non-life-bearing targets exhibits 1/f fluctuation frequency characteristics. Namely, all the non-life-bearing materials exhibit 1/f fluctuations when changing their state aspect such as solid, liquid and gas. On the other side, 1/f fluctuations can be observed the creative works, e.g., artistic paints when transitioning mental situation from depression to mania of life-bearing target, i.e., his or her. In the other words, a life-bearing target typically human exhibits 1/f fluctuation characteristics via his own creative work when changing his mental situation.

Keywords: Visualization, 1/f Fluctuation, Healing, Artistic Paint Works

1. 緒 論

約 30 年近く前になるであろうか、毎日々計算機で非線形磁化特性問題を解析していた。この問題は依然として計算電磁気学で解決できていない問題であり、汎用電磁界解析パッケージが持つ最大のウイークポイントである。1981 年 9 月に米国シカゴで開催された最初の IEEE 主催 COMPUMAG (計算電磁気学に関する国際会議) で自分なりの非線形磁化特性モデルの提唱と準 3 次元非線形磁界解析結果を発表して以来、非線形問題は「力仕事」と言う先入観が筆者(齋藤)のトラウマであった。

非線形問題のイメージが変わったのは 2007 年の夏休みであった。某工務店からの依頼で居住空間に於ける直火使用に拠る環境効果の調査をきっかけとして始めた「1/f ゆらぎ」抽出に関する研究から「1/f ゆらぎ」生成の研究へ移行するために、チューリング・パターンに関する状態反応拡散系、「箱玉理論」によるソリトン波、「超離散化」、セルラー・オートマトン (Cellular Automaton)、「渋滞学」を少しかじり始めてから非線形系解析のイメージが変わった^{1,2)}。

非線形系の解析は計算機支援の力仕事または超幾何級数で代表される複雑な関数を用いた解析解から有限差分を基礎とする「超離散化」などの離散数学と 1984 年に S.Wolfram によって提唱された「セルラー・オートマトン」による複雑系の物理へ繋がったと考える。異方性を含めた非線形磁化特性問題などは案外「渋滞学」的なセルラー・オートマトンモデルが解決の決め手となると予

想される。これは「渋滞学」で使われる「自己駆動粒子 (Self-driven particle)」モデルが磁性体を構成する磁区モデルに対応し、Cellar Automaton モデルそのものが異方性を前提としているためである³⁾。

非線形系解析の理論的背景は 21 世紀に入ってからかなり体系的に系統化され、その結果、非線形系に特有な「1/f ゆらぎ」は化学反応系の相転移 (Phase Transition) 時に生ずることが解明された⁴⁾。本稿では、非生物 (物質) に於ける相転移 (Phase transition、例えば氷が溶けて水へ変化やガスが燃焼によって酸化化合物へ変化) 時に「1/f ゆらぎ」現象が伴う実験的検証例を述べる。

次に、生物系に於ける「1/f ゆらぎ」現象は精神・心理的な側面が投影された行動や行為の結果に表れることを示す。具体的な例として、精神・心理的变化 (Mental / Psychological transition : 例えば鬱状態から回復へ精神・心理的状态が変化) 時の人間が描いた絵画などに「1/f ゆらぎ」現象が生ずることを述べる。

非生物と生物の中間的な物として自己駆動粒子の「1/f ゆらぎ」について述べる。自己駆動粒子とは、例えば高速道路を走行中の自動車などが具体的な例であり、自己駆動機能を持つがその行動・動作が制限されるものを言う。自己駆動粒子モデルを磁性体の磁区挙動に適用し、磁性体が磁気飽和へ至る状態遷移 (State transition) 時に「1/f ゆらぎ」現象が生ずることを示す。同様に自己駆動粒子モデルの例として、一様な層流からカルマン渦へ変化する状態遷移時に「1/f ゆらぎ」現象が生ずることを示す。

P01-006

纏めれば、非生物では相転移時、生物では精神・心理的变化時の行為や行動の結果、そして、非生物と生物の間である自己駆動粒子モデルでは状態遷移時にそれぞれ「1/f ゆらぎ」現象を生ずることを述べる。

最後に、「1/f ゆらぎ」は何故に「癒し (Healing)」効果を与えるのかを考える。癒し効果の実験的検証は脳波のアルファ波が増加することで検証されるが、アルファ波が増加する理由は、「1/f ゆらぎ」を含有する自然現象、例えば灯された蝋燭などを観察することで人間の「1/f ゆらぎ」状態が促され(共振し)結果として「癒し」へ繋がる精神・心理的变化を喚起する点にあると考えられる。

2. 1/f ゆらぎ解析

2.1 1/f ゆらぎ

任意の周期関数 $f(t)$ をフーリエ級数で表現すると、

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

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、正弦波の項が虚部へそれぞれ対応する。スペクトラムの振幅は実部と虚部のノルムとなる。

(1) 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。Fig.1 にフーリエ・パワースペクトル対周波数のグラフの一例を示す。

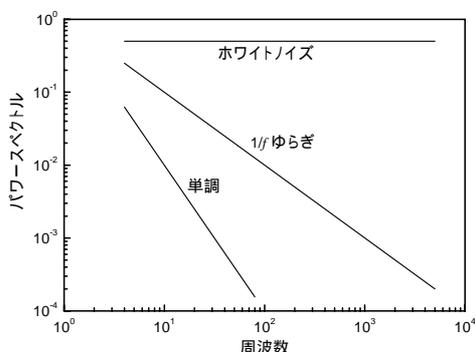


Fig.1 Definition of 1/f Fluctuation

Fig.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となる。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 -1 となる場合を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ⁵⁾。

2.2 相転移時における 1/f ゆらぎ

(a)融解 Fig.2 に示すように赤外線カメラを用いて、氷の融解状態を撮影した。フレームレートは 1 秒間に 30 フレームである。

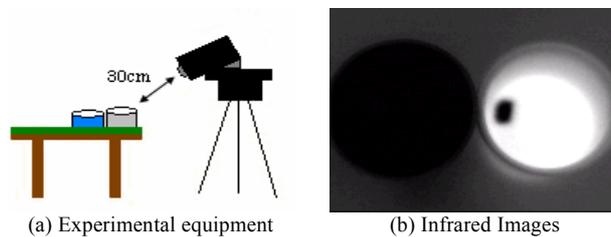


Fig.2 Ice Melting by Boiled Water

Fig.2(a)は沸騰した熱湯をビーカーに 150cc 入れ、その熱湯中に氷を入れて、氷の融解状況を 30 秒間撮影した実験の模式図である。また、赤外線カメラのダイナミックレンジを固定するため、基準温度としてコップに入れた氷をビーカーの横に置いて撮影した。

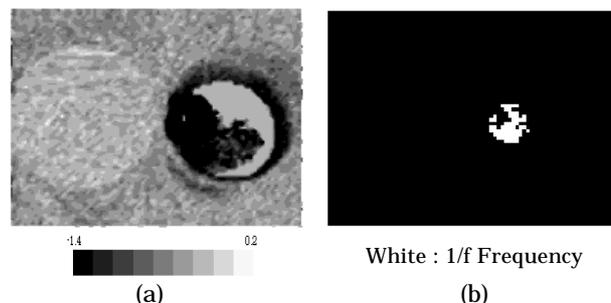


Fig.3 1/f-fluctuation accompanying ice melting

Fig.2(b)は撮影したフレーム画像例を示す。黒い部分が氷である。Fig.3(a) は Fig. 2(b)に示した氷の融解時の動画を構成する各フレームの画素値を時系列(フレーム)方向に離散値系フーリエ変換し、各周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムから求めた周波数対振幅の傾きを濃淡画素値とする可視化画像である。Fig.3(b)は Fig.3(a)で求めたフーリエ・パワースペクトラムの傾きが -1.05 から -0.95 の画素値を 1 とし、その他の画素値をゼロとして得られた「1/f ゆらぎ」周波数の 2 値化画像である。すなわち、Fig.3(b)は相転移状態における「1/f ゆらぎ」可視化画像であり、融解時の相転移時において、「1/f ゆらぎ」成分が存在することを示している⁴⁾。



Fig.4 1/f fluctuation accompanying gas burning

P01-006

(b)燃焼 Fig.4 はガスバーナの燃焼時において空気とガスが化し酸化化合物へ相転移する黄色部分に「1/f ゆらぎ」が生じていることを示している⁴⁾。

2.3 精神・心理的転移における 1/f ゆらぎ

(a)失恋 Fig.5 はゴッホが失恋した時期に描いた絵画の1例を示す。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ビットのレンジを持つ画素値で描かれている。それぞれのRGB成分画像のRGB強度(画素値)のヒストグラムを作成する。RGB成分画像それぞれの強度分布ヒストグラムをRGB固有パターンと定義する。このRGB固有パターンはそれぞれの絵画によって幾何学的形状が変化するにも拘わらず、色彩情報で絵画の特徴変化を吟味可能とする。



Fig.5 Example of Vincent van Gogh's paint work when losing sweetheart.

2.3 精神・心理的転移における 1/f ゆらぎ

(a)失恋 Fig.5 はゴッホが失恋した時期に描いた絵画の1例を示す。

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、同一強度(画素値)に対して時系列方向に離散値系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からゆらぎ成分を抽出する。その結果 RGB 成分の0から255までの画素値の時系列の変化率に「1/f ゆらぎ」が存在することを示す。横軸に R,G,B 成分の画素値、縦軸にフーリエ・パワースペクトラムの傾きを取り、赤、緑、青成分画に対するゆらぎを描いた Fig.6 は縦軸の値が最も-1に近い値を取る B(青)成分のゆらぎを示す。

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。また、青の中でも画素値が50程度の(淡い)部分に最も「1/f ゆらぎ」に近い揺らぎが見られる。淡い青の花として勿忘草が上げられる。この花の花言葉は「私を忘れないでください」。

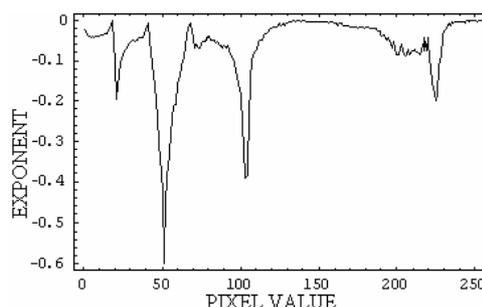


Fig.6 Blue color component 1/f fluctuation derived from time sequentially arranged Blue color histograms of the Paint Works by Vincent van Gogh

「真実の愛」である。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。

ゴッホはこの作品を描いた時期に失恋している。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、ゴッホは左手を蝨燭の炎にかざすという自傷行為を行っている[5]。このため、この時期に描いたゴッホの作品に失恋時の心理状態が反映されていると考えられる。また、弟と画家としての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。すなわち、画家としての原点に帰り、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り、当に精神・心理的な側面が変化状態にあると言えよう⁵⁾。

Fig.7 はゴッホが精神的に深く病んでいる時期に描いた絵画の1例である。この時期、彼は友人のゴーギャンヘコップを投げつけたり、耳を切って売春宿へ送りつけたりなど奇矯な振る舞いをした Fig.8 は Fig.6 と同様に RGB 色情報の中で 1/f ゆらぎが観測された B(青)成分を示す。

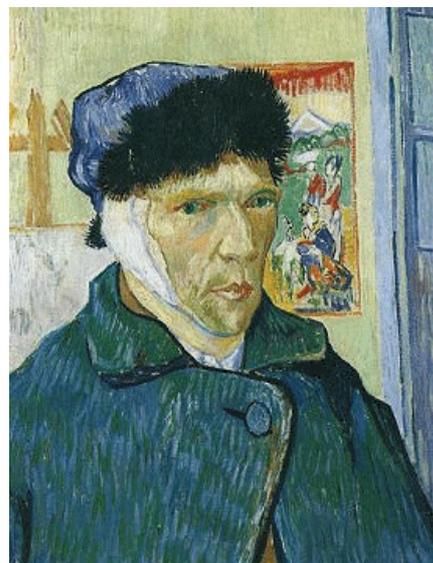


Fig.7 Example of Vincent van Gogh's paint work when diseasing mental situation.

P01-006

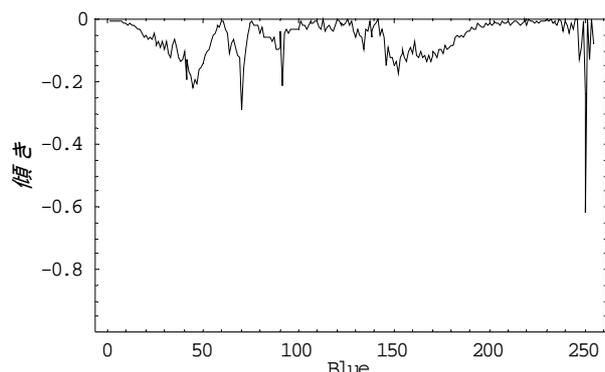


Fig.8 Blue color component 1/f fluctuation derived from time sequentially arranged Blue color histograms of the Paint Works by Vincent van Gogh

なお、ゴッホの絵画の RGB 色情報を作品が描かれた時代順に単純に時系列で並べた可視化情報から周波数特性を計算しても 1/f ゆらぎ特性は可視化できなかった。ゴッホの精神的葛藤が奇矯な振る舞いとして判明している時期の絵画を時系列データとして解析してはじめて 1/f ゆらぎが可視化できた。

(b)鬱病 Fig.9 は鬱病患者が回復期に描いた絵である。この患者は極めて真面目で仕事熱心な地方公務員から外資系の企業へ転職した方である。しかし、転職後、彼は仕事に真面目すぎるために鬱病に侵された。Fig.9 は彼が鬱病から回復期において描いた一連の絵を纏めて示している。

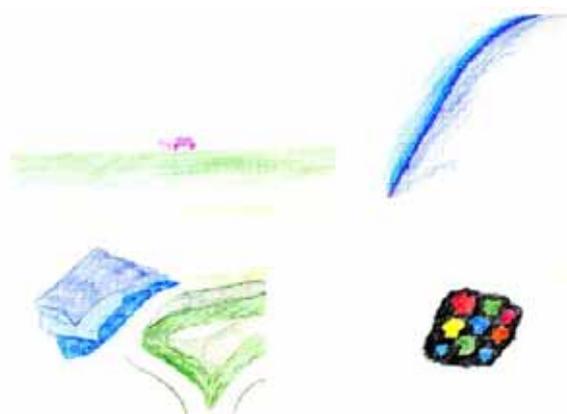
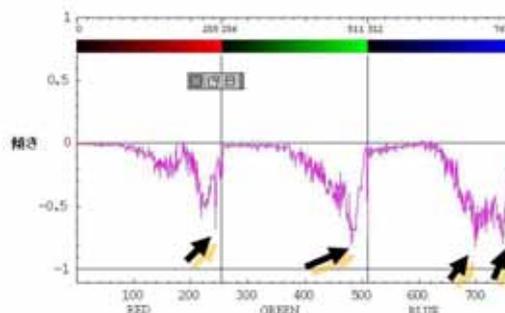


Fig.9 Paint works by a psychotic depression patient.

Fig.9 の絵が描かれた順番(時系列)に並べて Figs.6,8 と同様に RGB 固有パターンを抽出して R(赤),G(緑),B(青)色成分強度(画素値)ヒストグラムから 1/f ゆらぎ求めた結果を Fig.10 に示す。

明らかに精神・心理的变化時(回復初期)に描いた絵は 1/f ゆらぎを赤、緑、青成分全てに呈していることが判る。すなわち、回復期に入ると何れの色成分でも「1/f」ゆらぎが観察される。特に安らぎや癒しを示す緑において「1/f ゆらぎ」が見られ、青成分においても「1/f ゆら



Arrows show the 1/f fluctuation points

Fig.10 RGB 1/f fluctuation parts derived from paint works of a patient when recovering psychotic depression disease.

ぎ」が存在し、沈静を求めている様子が判る。

鬱病患者の描いた絵画に於いても単純に描かれた時期順に並べて時系列データとして周波数解析を行っても 1/f ゆらぎは可視化できなかった。患者の症状の変化時に描かれた一連の絵画から 1/f ゆらぎが可視化できた。

2.4 状態転移における 1/f ゆらぎ

(a)磁性体の磁気飽和 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。試料台に薄板状強磁性体を載せ、強磁性体の表面歪みを電界研磨によって取り除いた研磨面にスポットで磁性コロイド溶液をたらし、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。



Fig.11 Experimental device for magnetic wall observation.

Fig.11 は磁壁移動の可視化に使用した実験装置を示す。励磁コイルを使って周波数 1[Hz]の交流磁界を観測対象に印加する。顕微鏡は KEYENCE 社の HD 中倍率ズームレンズ VH-Z75 に高精細クイックマイクロスコープ VH-5000 を接続したものである。軟鉄の動的磁壁移動を動画像として記録した。Fig.12 は観測したフレーム画像の例を示す。

P01-006

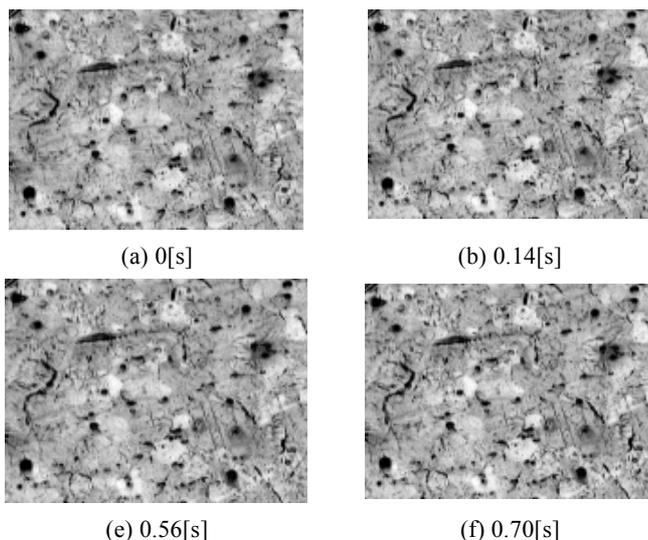
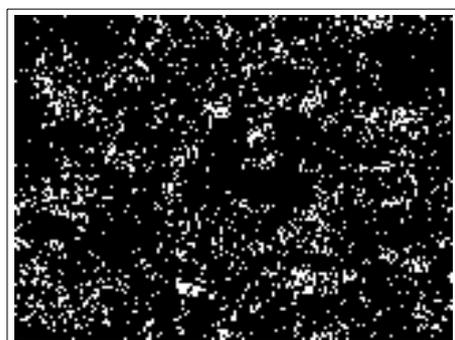


Fig.12 Frame images of magnetic wall. Sample: soft iron.

飽和磁束密度は最も高いが鉄損も大きい軟鉄における 1/f ゆらぎ周波数成分（厳密には周波数 f に対して-0.95 乗から-1.05 乗）分布を調べた結果を Fig.13 に示す。Fig.13 は周波数 f に対して-0.95 乗から-1.05 乗を 1, その他を 0 と二値化して示している。白色の点が 1/f ゆらぎ周波数で運動する磁壁部分を示す。尚、1/f ゆらぎ部分の抽出は Figs.3,4 と同様な方法で行った。

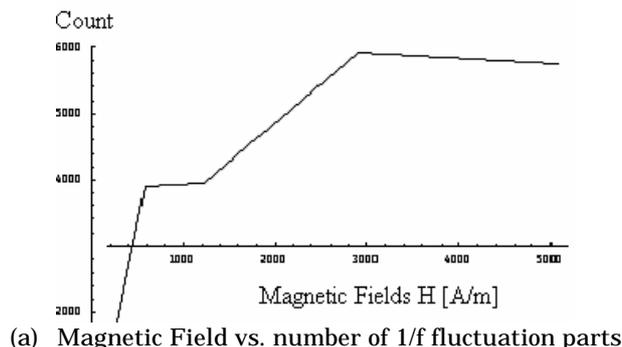


White : 1/f frequency

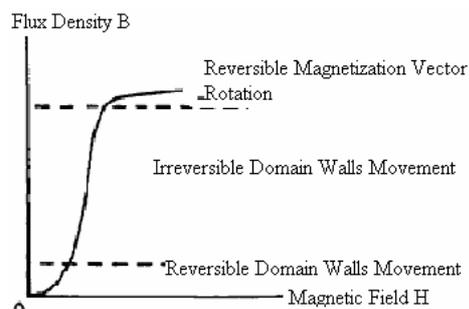
Fig.13 Extracted 1/f frequency fluctuation parts in soft iron.

Fig.13 で、励磁電流の振幅を変更して白色部で示されている 1/f ゆらぎ部分の画素数をカウントした。この結果を励磁磁界 H 対個数として図 15(a)に示す。図 15(b) は典型的な磁気飽和曲線である。図 15(a)と(b)を比較することで以下のことが判明した。可逆的磁壁移動範囲では、1/f ゆらぎ部分は少ないが非可逆的磁壁移動範囲で 1/f ゆらぎ部分が劇的に増加する。しかし、可逆的回転磁化範囲へ入ると 1/f ゆらぎの個数は飽和し、逆に磁界 H の増加にも拘わらず減り始めることが判る⁸⁾。これは磁性体の磁化過程が磁壁移動から各磁区内の磁化ベクトルの回転へ状態遷移時に「1/f ゆらぎ」が最大となることを意味している。この関係は「渋滞学」に於ける自由走行対密度の関係に類似している³⁾。

(b)流体 Fig.15 は層流とカルマン渦間の境界に生成さ

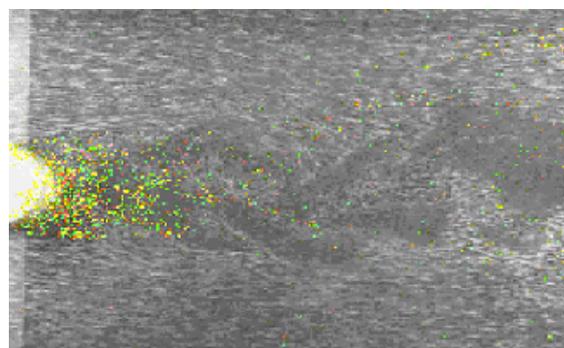


(a) Magnetic Field vs. number of 1/f fluctuation parts



(b) Typical magnetization curve of ferromagnetic materials.

Fig. 14 Magnetic Field vs. number of 1/f fluctuation parts and typical magnetization curve of ferromagnetic materials.



Yellow shows 1/f fluctuation points

Fig.15 1/f fluctuations occur at the boundaries between layer and eddy flows.

れる 1/f ゆらぎを示す⁹⁾。

レイノルズ数 Re が 0~約 3000 の状態では、流れは層流となるが、レイノルズ数が約 3000 を越えると、流れの状態は急激に変化し、大小の渦が入り乱れながら流れる乱流となる。この層流と乱流の境は明らかに状態遷移であり、その結果、層流と乱流の境界で 1/f ゆらぎが観察される。

3.まとめ

非線形系解析の理論的背景は 21 世紀に入ってかなり体系的に系統化され、その結果、多くの非線形特有な事象が明らかにされた。

本稿では、物質の相転移 (Phase transition) 時に「1/f ゆらぎ」現象が伴う実験例としてガスが酸素と化合して

P01-006

酸化物へ変わる相転移時に生成される「 $1/f$ ゆらぎ」と氷が融解する相転移時に生ずる「 $1/f$ ゆらぎ」を示した。

次に、失恋時のゴッホの作品や鬱病患者が回復時に描いた絵の色情報から「 $1/f$ ゆらぎ」を抽出し、生物(人間)における「 $1/f$ ゆらぎ」現象は精神・心理的变化(Mental/Psychological transition)時に人間の行動や行為の結果に表れることを示した。

磁性体の磁気飽和特性へ至る状態遷移時と流れが一般的な層流と渦が生ずる状態遷移境界に「 $1/f$ ゆらぎ」が生成された具体例を用いて、非生物と生物の中間的な物を意味する自己駆動粒子モデルにおいては状態遷移(State transition)時に「 $1/f$ ゆらぎ」が生ずることを示した。

参考文献

- 1) 東京大学ホームページ、<http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/mypapers/rikouJ.pdf>.
- 2) 高橋大輔、超離散化された波、特集/<波の世界>の魅力と数理、早稲田大学ホームページ、<http://takahashi.math.sci.waseda.ac.jp/works/public/03-Surikagaku-478-35-preprint.pdf>.
- 3) 西成活裕、渋滞学の新しい世界、東京大学ホームページ、<http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/>.
- 4) 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, 可視化情報シンポジウム, B108, 2005.
- 5) 丸山和夫, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 色情報を利用した知的動画像認識, 可視化情報学会誌, vol.23, No.1, pp.95-98, 2003
- 6) 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
- 7) 加藤千恵子、法政大学学位論文、2007年3月
- 8) 須永高志, 寺西正晃, 齋藤兆古, "ピッター法による可視化磁区画像から周波数特性の抽出," 日本AEM学会誌 Vol. 15, No. 2(2007) pp. 195-200
- 9) 古川裕之、カルマン渦の実験画像、名城大学ホームページ、<http://mech.meijo-u.ac.jp/prof/furukawa/zemi/mj/gazoupage1.htm>

1/f ゆらぎと複雑系に関する考察

○齊藤兆古 宮坂総 菅井桂子 (法政大学)

Study of 1/f Fluctuation Frequency and Complex System

* Y.Saito, S.Miyasaka and K.Sugai (Hosei University)

Abstract— Based the Newton mechanics and continuous mathematics, recent engineering sciences have developed various tools for modern human society such as high speed traffic/transport, high quality consumer electronics, intelligent housing and enormous information network systems. One of the most effective methodologies for next generation of the engineering sciences may be a nonlinear complex system methodology, because the human is one of the complex systems. This paper describes an extracting method of the 1/f fluctuation frequencies intrinsically accompanying non-linear physical system operation such as non-life being, life-being and self-driven particle systems.

Key Words: 1/f fluctuation frequency, Complex system

1 まえがき

21世紀の今日まで、人類の科学技術は、主としてニュートン力学と古典解析学を武器として、極めて多岐に渡る多くの文明の利器を提供した。特に、20世紀末に開発され爆発的な普及を遂げたコンピュータは、IT関連産業を喚起し、その結果、あらゆる業種の在り方へ広汎な影響を与えた。コンピュータは従来型プロダクトのインテリジェント化や多機能化を可能としただけでなく、新しい科学技術の方法論を与えんとしている。すなわち、人間の物理的機能の強化のみならず脳機能の補完や情緒・精神面を勘案したプロダクト開発のキーとなる非線形な複雑系の解析を可能とする。

筆者等は、家庭電化に伴う直火を使わない生活空間が人間に与える影響を調べるため、燃焼現象に伴う炎の1/f揺らぎ周波数解析を行い、これを基点として、化学反応などの非生物系における1/fゆらぎ¹⁾、人間の情緒・精神活動に伴う1/fゆらぎ²⁾、さらに磁性体の磁区挙動の1/fゆらぎ³⁾などを解明した。1/fゆらぎは非線形な複雑系で観察される周波数特性であり、非線形現象の代表的な特徴である。非線形系は従来の線形系と比べて現実の物理系を忠実に表現可能とするのみならず、人間の感性、例えば癒し(healing)効果などがあるとされている。すなわち、非線形な複雑系は、従来の単純なヒューマン・インターフェイスと一線を画する人間の感性を前提とした機械と人間のインターフェイス構築の基幹となる一方法を提供する。

複雑系をシミュレーションするには系のマクロ的振る舞いを現す支配方程式を解くことによるトップダウン型と系を構成する局所部分の振る舞いを積み上げて系全体の振る舞いを表現するボトムアップ型がある。前者は古典的な解析手法の拡張であり、後者はコンピュータを前提とする離散値系の手法であり、その代表としてセルラー・オートマトン(cellar automaton)がある⁴⁾。多くの非線形な複雑系はこのセルラー・オートマトンで記述される⁵⁾。

以上のことを鑑み、本稿では筆者等が提案する1/fゆらぎ解析法と複雑系に関するいくつかの考察を行う。

2 1/fゆらぎ周波数の抽出

2.1 1/fゆらぎ周波数とは

一般に任意の周期波形 $f(t)$ は平均値 a_0 、余弦波 $a_i \cos(i\omega t)$ および正弦波 $b_i \sin(i\omega t)$ の和で表され

る。ここで、 $i = 1, 2, \dots, \infty, \omega = 2\pi/T = 2\pi f$ (角周波数)とする。

すなわち、

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

が成り立つ。

(1) 式の高調波次数 i と高調波の振幅 c_i の関係を両対数で Fig. 1 に示すように描く。

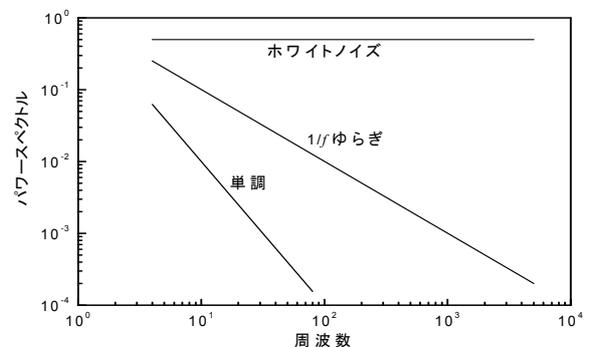


Fig.1 Definition of 1/f fluctuation frequency

Fig. 1で、周波数に無関係に振幅 (パワースペクトル) が一定値をとる周波数特性はパルスやホワイトノイズに見られ、人間の感性ではランダム性が大きく不快感を与える。他方、高周波数になると急激に振幅が減衰する波形は単調な信号、例えば単純な正弦波などであり、人間の感性に対して単調すぎて飽きられる感覚を与える。周波数に反比例して振幅が減衰する特性、すなわち、振幅が1/fに比例して減衰する周波数特性を1/fゆらぎ周波数特性と言ひ、人間の感性に対して心地よい感覚を与える。心地よさの測定は脳波で α 波の発生度合いを測定することで検証される。

2.2 1/fゆらぎ周波数を持つ波形の性質

乱数を用いて生成した1/fゆらぎ周波数の波形を Fig.

2に示す。Fig. 2のフーリエスペクトラム対高調波次数の関係をそれぞれの対数で描くとFig. 3となる。Fig. 3で、直線は最小自乗法で得られた直線近似であり、その勾配は-1.002であり、1/fゆらぎ周波数特性が抽出された。

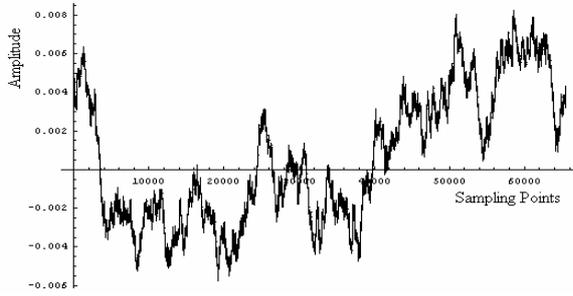


Fig. 2 An example of waveform having 1/f frequency characteristic.

Fig. 4はFig. 2に示す波形のサンプリング個数を半分、すなわち、全データが65536点からなる波形の前半部分32768個からなる波形のフーリエ・パワースペクトラム対高調波次数の関係である。Fig. 4で、直線は最小自乗法で得られた近似であり、その勾配は-0.978であり、1/fゆらぎ周波数特性は、やや大きな誤差であるが、近似的に抽出された。同様にFig. 2の波形で、第16384から第57344点まで40960個の波形から得られた周波数特性を直線近似して得られる勾配は-0.998となった。

拠って、1/fゆらぎ周波数特性を呈する波形はサンプリング個数に拠らず、1/fゆらぎ周波数特性を近似的に与える。その近似精度はサンプリング個数に比例することが判明した。

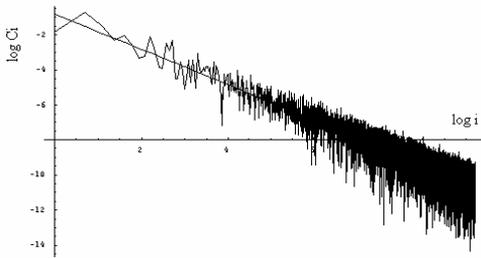


Fig.3 $\log c_i$ versus $\log i$ characteristic
Straight line denotes the least squares approximation having -1.002 gradients.

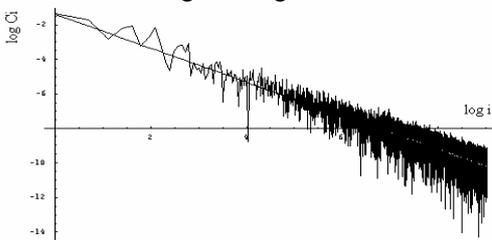


Fig.4 $\log c_i$ versus $\log i$ characteristic
Straight line denotes the least squares approximation having -0.978 gradients

2.3 動画画像から 1/fゆらぎ周波数特性の抽出

カラー動画画像の任意の1フレームは赤、緑および青成分からなる。赤、緑、青画像はそれぞれ独立なモノクロ画像として表現できる。

Fig. 5は時間 t_1, t_2, t_3 におけるそれぞれのモノクロフレーム画像を示す。Fig. 5で、全体のフレーム画像に共通なx,yスクリーン座標上の任意の画素位置における画素値を式(1)の周期関数 $f(t)$ に対応させて時間(フレーム)軸方向の1/fゆらぎ周波数特性を求める。すなわち、画素(pixel)毎にフレーム方向に生ずる1/fゆらぎ周波数特性を求める。このため、動画画像の1/fゆらぎ周波数特性は1枚の静止画として抽出される。

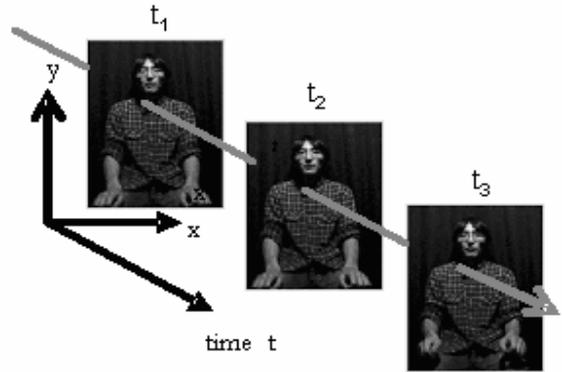


Fig.5 Sequential 3 frame monochrome images

2.4 フィルター

いま、横軸の画素位置 j 、縦軸の画素位置 k における第 i 次高調波のフーリエ・パワースペクトラムを

$$|F_{j,k}(i\omega)| = |c_i|_{j,k}, \quad i = 0, 1, \dots, l-1 \quad (2)$$

とすれば、

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{j,k} &= [\log |F_{j,k}(\omega)| \quad \log |F_{j,k}(2\omega)| \quad \dots \quad \log |F_{j,k}(l\omega)|]^T, \\ \mathbf{x}_{j,k} &= [\log \omega \quad \log 2\omega \quad \dots \quad \log l\omega]^T, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

に対して、直線近似

$$y = a + bx \quad (4)$$

を適用するとすれば、以下の線形システム方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{j,k} &= \mathbf{C} \mathbf{X}_{j,k}, \\ \mathbf{Y}_{j,k} &= [\log |F_{j,k}(\omega)| \quad \log |F_{j,k}(2\omega)| \quad \dots \quad \log |F_{j,k}(l\omega)|]^T, \\ \mathbf{X}_{j,k} &= [a \quad b]^T, \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & \log \omega \\ 1 & \log 2\omega \\ \cdot & \cdot \\ 1 & \log l\omega \end{bmatrix}, \quad j = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式の線形システム方程式の係数行列 C は l (フレーム数) 行 2 列であるから不適切(ill posed)である。こ

のため、(5)式の近似解ベクトル $\mathbf{X}_{ij,k}^*$ は誤差ノルム

$$|\mathbf{r}_{j,k}| = |\mathbf{Y}_{j,k} - \mathbf{C}\mathbf{X}_{j,k}^*| \quad (6)$$

を最小にする最小自乗法による解

$$\mathbf{X}_{k,j}^* = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{Y}_{j,k} \quad (7)$$

を採用する。

尚、実際の計算ではフーリエ係数の精度を勘案して全フレーム数の 1/4 項までに対応するフーリエ・パワースペクトラムから(4)式の直線近似の係数 a, b を決定した。Figs. 3,4 が得られた直線近似の例である。Fig. 6 の直線近似は比較的好く成り立っている。実際は、近似がどの程度正しいかは(6)式の残差ノルム $|\mathbf{r}_{j,k}|$ から評価できる。換言すれば、直線近似の精度を勘案して有意な $1/f$ ゆらぎ周波数部分のみを抽出することが可能である。例えば、(6)式から全体の平均誤差を

$$\mathcal{E}_{mean} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n |r_{j,k}|}{m \times n} \quad (8)$$

で計算し、Fig. 6 に示すようにこの平均誤差を閾値とするフィルターを作成し最小自乗法が一定の精度以上で成り立つ部分のみを抽出することが可能である。



Fig. 6 An example of space filter

3 例題

3.1 音楽

音楽データはいわゆる音であり一次元データであるため、比較的容易に解析可能である。音楽データの周波数特性は、1)音楽全体として $1/f$ ゆらぎを呈するもの、2)一定の周波数帯域で $1/f$ ゆらぎを呈するもの、さらに 3)全体としても周波数帯域別にも $1/f$ ゆらぎを呈さないものに大別できる。

Fig. 7 はいわゆる癒し効果を与える音楽として市販されている曲のゆらぎ解析結果である。Fig. 7 で、直線は最小自乗近似に拠る周波数特性の傾きを表し、緩やかな傾きはほぼ -1 であり、急峻な傾きは -1 よりも小さい値である。直線の傾きを観察すれば、この音楽は周波数帯域毎に単調な旋律と $1/f$ ゆらぎを呈する旋律

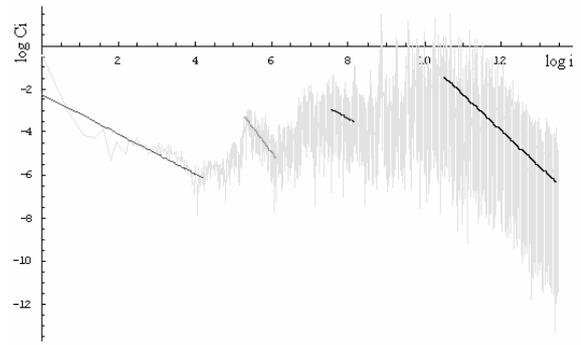


Fig. 7 An Example of Music Frequency Characteristic

が交互に配置されていることが判る。

3.2 動画像

大部分の自然界の $1/f$ ゆらぎ周波数特性は動画像から抽出される。化学反応などの非生物系における $1/f$ ゆらぎ¹⁾、人間の情緒活動に伴う $1/f$ ゆらぎ²⁾、さらに磁性体の磁区挙動の $1/f$ ゆらぎ³⁾などが報告されている。

Fig. 8 は楽器（三味線）演奏に伴う $1/f$ ゆらぎ周波数の抽出例である。白のドットが $1/f$ ゆらぎを呈する画素を示す。尚、この結果は最小自乗法の誤差ノルムを使った空間フィルター(2.4節を参照)を使っている。



Fig. 8 $1/f$ Fluctuation Frequency Extraction from a Music Instrument (Shyamisen) playing
White dots denote the $1/f$ fluctuating pixel position.

4 セルラー・オートマトン

4.1 歴史的背景

セルラー・オートマトンは1950年代にノイマンとウラムが考え出したものである。1970年代から生物の形体生成のモデルに利用され、1986年には格子ガスオートマトン法へと進化した。その後、格子ボルツマン法に発展し、複雑な流れの解析などに適用されてきた。今日では物理・科学現象、材料・交通・電子回路特性、社会・経済現象などに幅広く適用されている⁴⁾。

他方、スティーブン・ウルフラム (Stephen Wolfram, 1959年8月29日 -) はアメリカの Wolfram Research 社の創業者で最高経営責任者であり、また、理論物理学者でもある。彼は15歳にして素粒子論の学術論文を執筆し、オックスフォード大学を17歳で卒業。その後

カリフォルニア工科大学に進み、高エネルギー物理学、場の理論、宇宙論の研究を行った。20歳で理論物理学の研究によりカリフォルニア工科大学において Ph. D. の学位を取得した。1982年より現在では『複雑系』に分類される自然界の複雑さについて研究し、セル・オートマトンに関する革新的研究を行った。さらに彼はそれらの成果を Review of Modern Physics 誌に掲載した⁵⁾。

4.2 磁性体における複雑系

a)磁区 磁性体は一般に原子レベルの大きさで電子スピンの起因する磁石を持っている。これらの微小磁石は外部磁界に応じて系に蓄えられる磁気エネルギーを最小にするように運動する。原子レベルの磁石を個々に観察するのは不可能であるが、通常、磁性体中では微小磁石が複数個の凝集した塊の集合を形成する。これらの塊の集合（これを磁区と言う）、すなわち、磁区は電子顕微鏡や金属顕微鏡で観察される。



Fig. 9 A Magnetic Domain Image by Bitter Method
Sample: soft iron

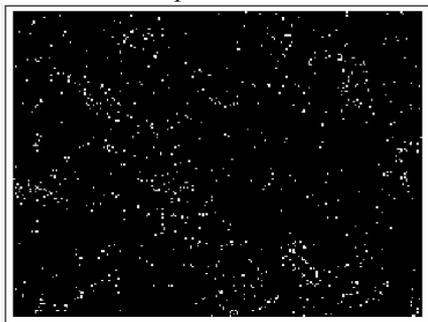
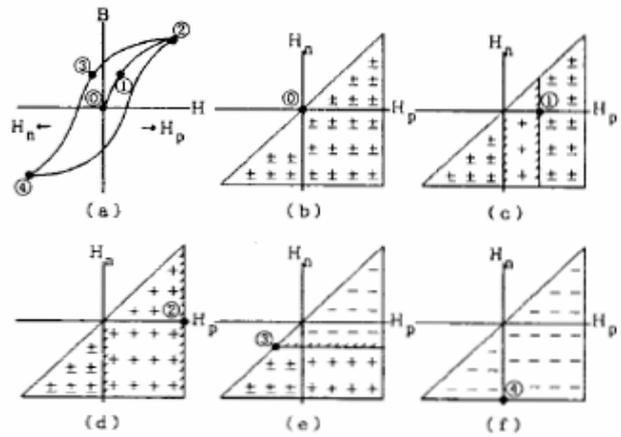


Fig. 10 1/f Fluctuating parts accompanying with magnetic domain movements.
White dots denote the 1/f fluctuating pixel position

Fig. 9 は表面磁区のみであるがビッター法で得られた磁区画像の一例である³⁾。これらの磁区状態は外部磁界の強度と極性に対して運動し、Fig. 10 に示すように 1/f ゆらぎ周波数特性を呈する。

b)Preisach Model F.Preisach は磁性体の磁化特性を表現するため磁化方向を軸とする 2次元平面上で、外部磁界強度に応じて単位磁化の極性が反転するモデル、すなわち、Fig. 11 に示す Preisach モデルを考えた⁶⁾。Fig. 11 で、 \mp がゼロ、+1 が正方向の単位磁化、-1 が負方向の単位磁化であるから、明らかに Preisach の磁化モデルは外部磁界に応じて 3 値を取る一種のセルラ



Preisach Diagram

(a) 図中の点①～④は (b)～(f) の各状態に対応する。

Fig. 11 Preisach Model

ー・オートマトンモデルである。これは、コンピュータが出現する以前の 1930 年代に於いても複雑な物理現象を表現する方法はセルラー・オートマトン型にならざるを得ないことを意味し、興味深い。

自己駆動粒子モデルで表現される道路の渋滞推移は 1/f ゆらぎ周波数特性を呈する。そしてそれらのシミュレーションモデルはセルラー・オートマトンで構築される⁷⁾。さらに非線形波動の代表であるソリトン波も箱玉モデルと呼ばれるセルラー・オートマトンで表される⁸⁾。

抛って、セルラー・オートマトンは複雑系解析の有力な一方法である。

5. まとめ

本稿では信号から 1/f ゆらぎ周波数特性を抽出する方法とそれらの具体的例、および、セルラー・オートマトンモデルに関して概述した。

参考文献

- 1) 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, 可視化情報シンポジウム, B108, 2005.
- 2) 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
- 3) 須永高志, 寺西正晃, 齋藤兆古, “ビッター法による可視化磁区画像から周波数特性の抽出,” 日本 AEM 学会誌 Vol. 15, No. 2 (2007) pp. 195-200
- 4) フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』セル・オートマトン, ja.wikipedia.org/wiki/セル・オートマトン
- 5) フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』スティーブン・ウルフラム, ja.wikipedia.org/wiki/スティーブン・ウルフラム
- 6) F.Preisach, Zeitschrift für Physik, 94, No.5 (1935)
- 7) <http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/>
- 8) <http://takahashi.math.sci.waseda.ac.jp/works/public/03-Surikagaku-478-35-preprint.pdf>

セルラー・オートマトンによる磁化特性の表現

○宮坂 総 齋藤 兆古 (法政大学)

Representation of Magnetization Characteristics by Cellular Automaton

* S.Miyasaka and Y.Saito (Hosei University)

Abstract— After we classified the magnetization curve of a ferromagnetic material into three magnetization regions, we applied the Preisach type cellular automaton model to each of three magnetizing regions. As a result, it is shown that the magnetization curves can be represented by the cellular automaton model.

Keywords : 1/f Fluctuation, Preisach Model, Cellular Automaton

1 まえがき

セルラー・オートマトンは、1940年代にノイマンによって提唱された。その後、1984年にウルフラム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、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、雪崩、さらに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¹⁻³⁾。

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ツハによって提唱された。このプライザツハモデルは極めて具体的な磁区理論に基づくため、他に代替となるモデルが無く、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われている⁴⁾。

我々は既に磁化特性を表現するプライザツハモデルが、未だセルラー・オートマトンの概念が提唱されて無いにも拘わらず、一種のセルラー・オートマトンモデルであることを示した。

本論文では、まず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、非可逆的磁壁移動、さらに磁化ベクトルの回転磁化領域へ分割した後、これらの3領域へプライザツハ型セルラー・オートマトンモデルを適用した。その結果、磁性体の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ることを報告する。

2 セルラー・オートマトン

2.1 セルラー・オートマトンとは

セルラー・オートマトンとは、格子サイトがいろいろな初期値を持つ不連続な系からなり、これらのサイトはそれぞれのサイトがいくつかの局所的な隣接サイトの値に基づいた新しい値と有限な数の過去の時間ステップを仮定すると、離散的な時間ステップで状態変化する系を与える¹⁻³⁾。また、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、2次元、さらに3次元のセルラー・オートマトンがある。

2.2 セルラー・オートマトンの例

Fig. 1は初期値(0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 0)でセルラー・オートマトンのルール30((左近傍 tの値 右近傍)→t+1の値 : (1 1 1)→0, (1 1 0)→0, (1 0 1)→

0, (1 0 0)→1, (0 1 1)→1, (0 1 0)→1, (0 0 1)→1, (0 0 0)→0)を適用した場合をFig.1に示す。

t=0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0
t=1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1
t=2	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
t=3	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1
t=4	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0

Fig.1 Example of Cellular Automaton based on Rule 30.

3 磁化特性のセルラー・オートマトンモデル

3.1 プライザツハモデル

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行った結果をFig.2に示す。

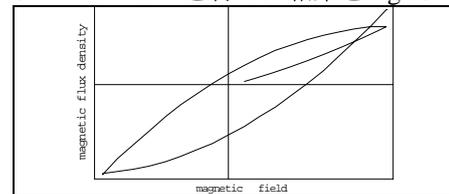


Fig.2 Magnetization Curve computed by Cellular Automaton, Corresponding to the Preisach Model.

Fig.2のシミュレーションに使ったセルラー・オートマトンを Fig.3 に示す。Fig.3 で、黒色部分は+1の値、灰色部分は-1の値を持つ。Fig.3 で、黒に転移する場合はプラスに磁化、灰色に転移する場合はマイナスに磁化されると考える。Fig.2は、Fig.3の個々の画像の総和を縦軸の値、横軸は磁界とする。Fig.3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。

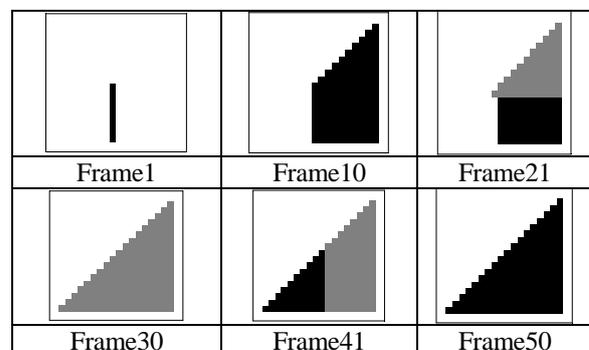


Fig.3 Cellular Automaton Images representing the Magnetization Processes

3.2 磁区挙動に基づく解析

磁性体表面磁区挙動をビット法によって可視化した。得られた磁区挙動画像を、磁化過程によって3過程に分類した。磁性体の磁化過程は、可逆的磁壁移動範囲、非可逆的磁壁移動範囲さらに回転磁化領域分けられる。本論文では、非可逆的磁壁移動範囲について考える。非可逆的磁壁移動範囲で、正に単位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(数値ゼロ)として2値化した。その結果、得られた磁区画像 Fig.4 は Fig.3 の白色部が空間的にランダムに位置するセルラー・オートマトン画像に対応する。Fig.4 から Fig.3 と同様にして Fig.5 の磁化特性が得られる。

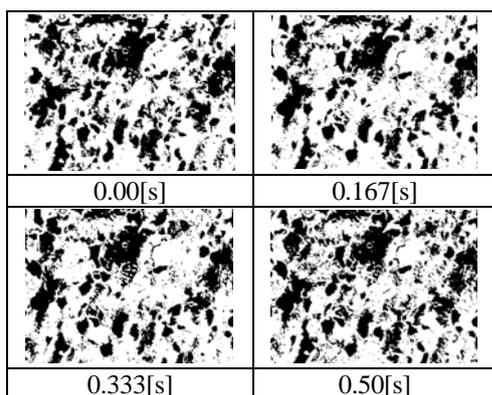


Fig.4 Binary Images of Magnetic Domains.

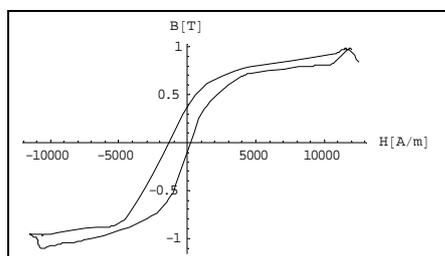


Fig.5 Magnetization Curve by obtained Binary Images of Magnetic Domains

しかし、Fig.4 の磁区挙動画像から得られた Fig.5 の磁化特性と 3.1 節で述べたシミュレーション結果には多少の相違がある。これは、Fig.4 に示す磁区画像は本来、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、磁化曲線の反転部で顕著に誤差が反映することに拠る。Fig.4 の2値化した磁区画像から、Fig.3 のプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルの状態遷移ルールを抽出する。Fig.4 から以下の状態遷移ルールが導かれる。徐々に磁界を増加すると、しばらくはゆっくりと磁化され、その後、磁界が閾値を越えると、急激に磁化される。さらに、磁界の方向が反転する直前では、磁界が弱くなるためゆっくりと磁化される。これらのセルラー・オートマトンの状態遷移ルールをプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルへ適用し、Fig.4 の磁

区挙動画像の画素値からプライザッハ型セルラー・オートマトンの磁化値を決定する。その結果得られたプライザッハ(型セルラー・オートマトン)線図を Fig.6 に示す。Fig.7 は Fig.6 から再現された磁化曲線である。

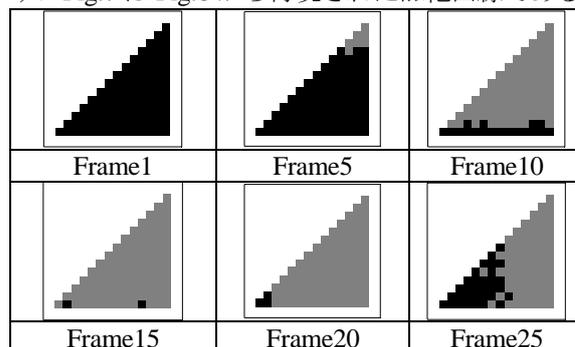


Fig.6 Cellular Automaton Images representing the Magnetization Processes taking into account the practical magnetization

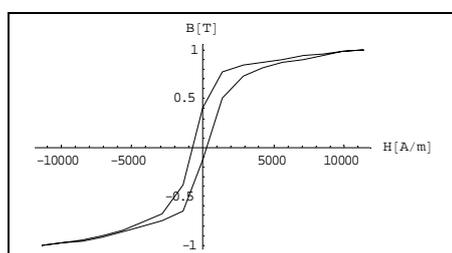


Fig.7 Magnetization Curve by Cellular Automaton Images obtained from the Preisach type cellular automaton model

4 まとめ

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。次に、ビット法によって可視化された磁区画像を、磁化過程の相違で3領域へ分類し、分類された領域の中で可逆的磁壁移動範囲に対する磁区画像を画素値に応じて1かゼロへ2値化してセルオートマトンモデルを作成した。最後に、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遷移ルール、および画素値からプライザッハ型モデルのルールと磁化値を採用し、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。

参考文献

- 1) R.J.ゲイロード/P.R.ウェリン、荒井隆(訳) : Mathematica 複雑系のシミュレーション物理学と生物学の探求
- 2) R.J.ゲイロード/西館数芽(著)、西館数芽/西川清(訳) : 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
- 3) 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://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/mypapers/rikouJ.pdf>
- 4) 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

サウンドデータにおける $1/f$ ゆらぎ周波数の抽出

○菅井桂子 齊籐兆古 (法政大学大学院)

1/f fluctuation frequency extraction from sound data

* K. Sugai and Y. Saito (Graduate School of Hosei University)

Abstract—Most of the modern conveniences are designed to operate in a highly efficient manner with sophisticated human interface. According to the spreading use of micro-computers, modern conveniences are able to equip the human intelligent functions. Further, modern ergonomics have to take the mental environmental impression into account. Sound is one of the most effective signals appealing to human sensitivity. Therefore, it is possible to say that sound is an extremely important factor when we design the intelligent human interface of modern conveniences as well as ergonomics considering the human mental impressive effects into account.

Since $1/f$ fluctuation frequency characteristic may give a healing effect to the human, this article makes a study of the $1/f$ fluctuation frequency characteristics extracted from various types of music.

Key Words: $1/f$ Fluctuation, human interface, sound

1. 緒論

現代の多くの機械は、単に高性能が要求されるだけで無く、より洗練されたヒューマンインターフェイスを備えなければならない。この意味で、現代の人間工学は取り扱い易さに加えて人間へ与える心理的・精神的な影響も考慮しなければならない。

音響は人間の感性へ訴える最も効果的な信号である。このことは近年、音楽療法が多くの医療施設で取り入れられるなど、音楽の効果的な作用が医学的に認められていることからわかる。音楽には様々な病気の改善効果や癒し効果があるとされている。

音楽療法とは病気の改善や治療を目的に実施されるセラピーである。慢性分裂病や自閉症などの改善、高血圧や脳血管障害の克服、老人性痴呆症の予防や治療、がん患者の延命効果、心身の緊張や痛みの緩和効果など、種々の医学的作用を持つことが証明され、すでに多くの医療分野で導入されている。この音楽療法には、効果的な音楽を聴覚情報として耳から聞き入れる受動的音楽療法と、楽器演奏や歌を唄うといった能動的音楽療法がある。

人間が耳で感じ取れる周波数は、医学的にみて15ヘルツから20,000ヘルツといわれている。耳から入力される音の周波数は人間の脳から脊椎にある各骨格部位と対応しており、例えば延髄より上の脳神経系は4,000ヘルツ以上の高周波音に対応し、頸椎は2,000から3,000ヘルツ、また胸椎は800から2,000ヘルツ、腰椎から仙椎は125から800ヘルツという周波数に呼応している。そのため音楽に含まれる高周波音は、副交感神経の分布する延髄から脳にかけての神経系を刺激し、その結果、脳神経系、ホルモン系、循環系、免疫系といった人間の健康を支えている生体機能に効果的に働く¹⁾。

抛って、音はものづくりにおけるヒューマンインターフェイスを考える上で極めて重要な因子であるといえる。本論文では音楽中に含まれる $1/f$ ゆらぎ周波数に関して幾つかの考察を述べている。

2. $1/f$ ゆらぎとは

「 $1/f$ ゆらぎ」は自然界に多く存在し²⁾、例えば小川のせせらぎ、小鳥の囀り、爽やかなそよ風などの心安らぐリズムが相当する。同様に、心地良い音楽を聴いたり、快い感じを抱いたり、安静にしているときの脳波にも「 $1/f$ ゆらぎ」が存在する。

「 $1/f$ ゆらぎ」解析法として、信号へ離散フーリエ変換を適用し、各周波数に対するパワースペクトラムを計算する。周波数の低下とともにパワースペクトラムが増加するような信号の中で、パワースペクトラムの振幅が周波数に対して反比例する信号が「 $1/f$ ゆらぎ」である。

視覚的に判りやすくするために、よく行われる方法は、フーリエ・パワースペクトラム対周波数の両対数グラフを描き、描かれる線図の傾きによってゆらぎの種類を大別する方法である。Fig.1 にフーリエ・パワースペクトラムの例を示す。

Fig.1において、直線の傾きがゼロの場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急になる程単調な信号である。そしてホワイトノイズと単調な信号の中間的な信号で傾きが約-1の場合を「 $1/f$ ゆらぎ」と呼び、人間が心地よいと感じる信号であるとされている。

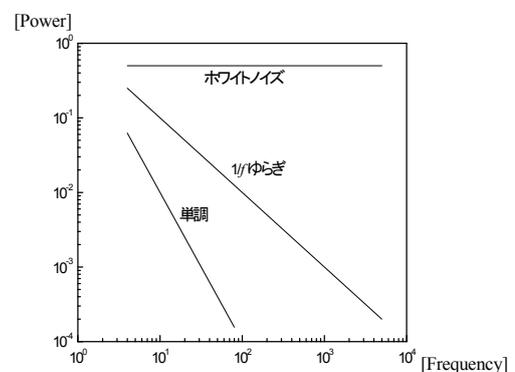


Fig.1 $1/f$ fluctuation frequency

3. 音楽の $1/f$ ゆらぎ周波数特性

3.1 実験方法

まず、音楽データの信号を時間領域にフーリエ変換し、フーリエ係数の絶対値を計算してフーリエ・パワースペクトラムを得る。得られたフーリエ・パワースペクトラムから、フーリエ・パワースペクトラム対周波数の両対数グラフを描く。

フーリエ変換は全サンプル数に等しい実部と虚部を与えるので、独立なパワースペクトラムは全サンプル数の半分までであり、さらにフーリエ変換の精度を勘案し全サンプル数の $1/4$ 項までで高調波解析を行う。フーリエ・パワースペクトラム対周波数の両対数図から周波数特性を直線近似する一次関数を最小自乗法によって求め、その比例項（傾き）から揺らぎの種類を大別し特徴を吟味する。本稿では全体の傾きに加え、部分的な周波数帯域における傾きも求めた。

3.2 実験結果

和楽やクラシック音楽、民族音楽、現代音楽など、幅広いジャンルで実験を行った。計算機のメモリ制約から、曲中で主題の展開部にあたる部分の約1分から1分30秒を抜粋して計算した。

その結果、全体を通してのフーリエ・パワースペクトラムの傾きが -1 で $1/f$ ゆらぎを呈する音楽、全体で見ると傾きが急で一見単調だが、部分的に見ると $1/f$ ゆらぎが存在する音楽、逆に全体で見ると傾きはゼロであるが部分的に $1/f$ ゆらぎが現れている音楽など、ほとんどの曲で $1/f$ ゆらぎ周波数特性の存在が確認できた。しかし、一方で、 $1/f$ ゆらぎが現れても微細であり、ほとんど確認できない曲も存在した。

$1/f$ ゆらぎが確認できた例を Fig.2 と Fig.3 に示す。

Fig.2 は三味線であり、全体で見ても部分で見ても $1/f$ ゆらぎが現れていた。Fig.3 はクラシックの管弦楽で、全体の傾きは -1.4 と多少急であったが、部分的に見ると2箇所 $1/f$ ゆらぎが現れていた。

次に、ほとんど $1/f$ ゆらぎが存在しなかった例を Fig.4 と Fig.5 に示す。Fig.4 は南米の民族音楽で、今回抜粋した部分ではほとんど傾きが無かった。Fig.5 はピアノ協奏曲の一部だが、傾きが -2 の部分の他にわずかな範囲で $1/f$ ゆらぎが確認できた。

4. まとめ

フーリエ変換と最小自乗法を用いて音楽データから $1/f$ ゆらぎ周波数成分を抽出した。その結果、様々なジャンルの音楽で $1/f$ ゆらぎ周波数成分の存在が確認され、さらに、それらは個々の音楽で固有の様式で周波数帯域に組み込まれていることが判明した。

5. 参考文献

1) 和合晴久, 新・健康モーツァルト音楽療法 PART2: 血液循環系疾患の予防, P1/P13 (2004年)

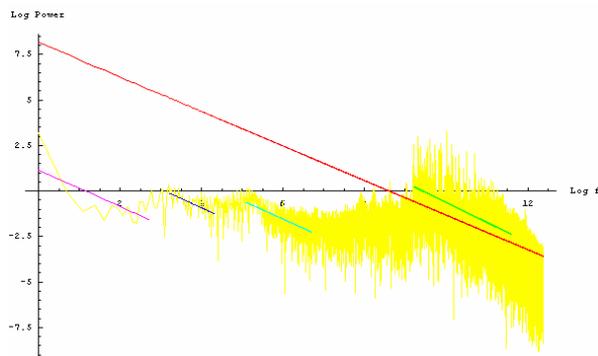


Fig.2 Japanese music(Syamisen)

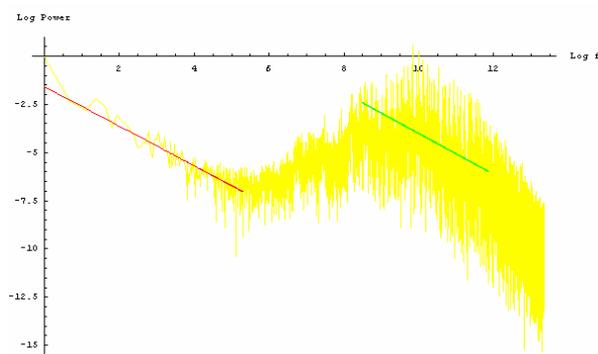


Fig.3 Classic music

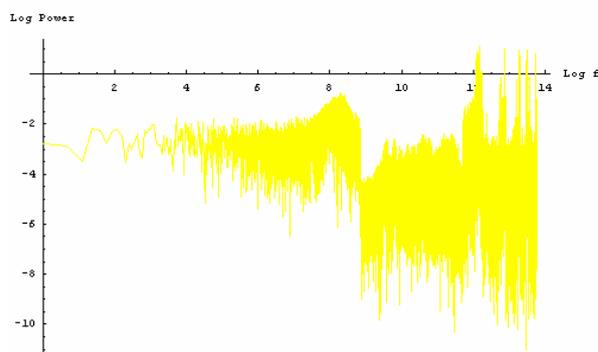


Fig.4 Folk music of South America

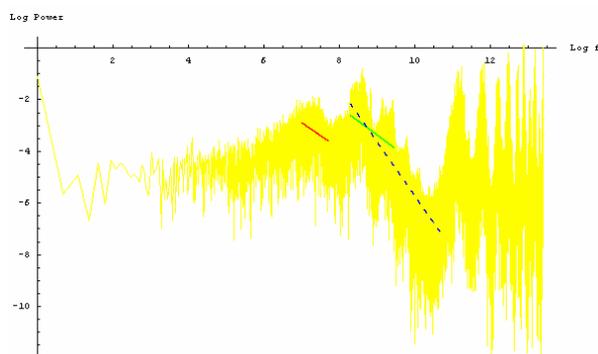
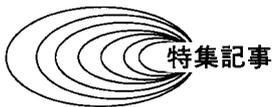


Fig.5 Piano Concerto

2) 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, 可視化情報シンポジウム, B108, 2005.



ウェーブレット変換を利用した文学作品の解析*

井波 真弓**, 齋藤 兆古***, 堀井 清之****

Analysis for Literary Works Using Wavelets Transform

Mayumi INAMI, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

1. 緒 論

本稿では、文学作品解析に線形空間論の正規直交系と離散値系ウェーブレット変換を導入した研究成果について紹介する。文学作品解析に線形空間論を導入することで、より精緻な分析が可能になり、従来、文学者しかできなかった文学作品分析結果に客観的な評価を与えると同時に、ワードプロセッサ等に採用されている要約の範囲を超えて、文学作品の文体、文法構造、さらに作品の暗黙知解析などに対して合理的で普遍性のある結果を導くことが可能^{1,2)}となった。

暗黙知とは哲学においては言葉で言い表せない知の領域^{3,4)}とされるが、堀井清之⁵⁾は明確に表記されないが、自明に文章に含まれているものを文学作品における暗黙知と定義している。

近年、インターネットで情報通信が可能な時代となり、大容量メディアであるCDやDVD等を中心として本の電子メディア化が促進されている。このような背景を前提に文学作品を特定の文学者が読み、作品中からキーワードとなるものを抽出して分析する方法が可能となった。

言語学、文学分野においては、作家のテキストや発話資料を大規模に集め、統計学や確立論を駆使して、表やグラフを作成し考察を行う研究・分析が行なわれているが、そこでは主に言語についての具体的な問題の解決を目指している。大曾美恵子⁶⁾は確率論的なアプローチとして談話における終助詞の出現頻度を調査し、世代間の使用頻度を明らかにした。村上征勝⁷⁾は『源氏物語』の助動詞を調べることで源氏の巻の成立順、真贋を問題とした。この相関論的なアプローチのほかに、近藤泰弘⁸⁾の単語・文字列単位の分析による『源氏物語』の表現における『古今集』の引用関係を探る先行作品との比較論的なアプローチが行われている。

本稿では文学者の観点から見た分析と機械的な要約との間にある大きな空白部分を埋めることを目的とした一方法を提案し、その妥当性を従来の文学者による分析と比較することで検証する。

2. 従来型文学作品の研究・評論と問題点

文学とは文字によって表現された芸術である。Literatureの訳語としての文学は西周の『百学連環』⁹⁾の中にみられ、『大言海』¹⁰⁾では文学の意味を「人ノ思想、感情ヲ、文章ニヨリテ表現シ、人ノ感情ニ訴フルヲ主トセル美的作品。即チ、詩歌、小説、戯曲、又、文学批評、歴史ナドノ類ナリ。」としている。

文学分析の方法としては研究と評論がある。研究は真理の追求を目的とし、客観的、実証的、論理的であって、普遍妥当性を持つ必要がある。一方、評論は個性と主観に際立った特徴を必要とする。評論家の個性や独自性が求められ、現代の問題とも関係づけられることがある。また、直観や鑑賞力がもともになることが多い。

文学作品には生まれた風土、時代、作者の個性、問題意識などが含まれているため、読み手が作品を読む時にそれらの影響を免れることはできない。また、文学作品はことばに含まれる多義性によって読み手の想像力に働きかけるため、読み手の感性、視点、問題意識、知識、経験、感性、環境などに左右される。このように文学研究は作品の持つ問題性、社会的意義に対し、従来にない新たな価値や意義を発見する必要があり、必然的に独自性が求められる。その結果として、ある程度の個性的、主観的に因子が選択され独自性の主張となる。批評に比べ、より客観性が求められる研究においても、文学というものが人工的な世界であるため、完全な客観性維持は不可能である。

文学研究における文体研究を例に挙げると、本研究は文学と言語学の両面から行われている。しかしながら、客観的な視点から論じられておらず、また、文体の全体性も未だ示されていない。

文学研究者である原子朗¹¹⁾は文体論を科学として体系づけ、確立させることを望むも、それは困難なことではないかと述べている。また、自説の文体論が第三者から見ると見当ちがいであったり、理解されないものだった

* 原稿受付 2007年10月30日

** 正会員 白百合女子大学 文学部 (〒181-8525 東京都調布市緑が丘1-25, E-mail: minami@shirayuri.ac.jp)

*** 正会員 法政大学 工学部

**** 正会員 白百合女子大学 文学部

りする場合が少なくなく、文体論研究が個人の主観に左右されることを認めている。

一方、言語学者の小林英夫¹²⁾は文体研究は真の文学的感性を備えた者に許されると述べている。これは文学的文体論で、主観性の強いものと評価されている。

時枝誠記¹³⁾は小林英夫の文体論をとりあげ、作品の全体性というものが問題にされていないと、全体性の欠如を批判している。

3. 本論文で提案する解析方法とその目的

従来の研究、評論は読み手の文学的感性、直感、経験に依存することから必然的に個性的、主観的となる。また、文体の特徴を抽出する場合、あるいは文学作品の思考のプロセスを追う場合、その変化過程はその時その時で表されても作品全体の経時変化を連続する情報として表示することはほとんどない。そこで本研究では個々の研究者や評論家の個人的経験に依存しない方法論として、分析対象データへ線形空間論の「正規直交化」の概念を導入する。まず、分析データ中の重複情報の削除によって客観化し、次に各データの作品に対する重みを平等化し、基礎的な部分で共通するアイデンティティーを持たせる。作品全体は連続する情報として可視化され、その結果から思考プロセスや思考の揺れ等の暗黙知が明らかとなる。

3.1 文学における線形空間解析概要

最初に導入する概念はベクトルである。これは大きさと方向を持つ量を意味するが、たとえば、作品各章の特定語彙の数を要素とするベクトルを考える。すなわち、各語彙が構成するベクトルをいわゆる線形空間のベクトルと対応させる。次に内積の概念を導入する。この概念はデータの積和、すなわち、線形空間における内積である。各語彙が構成するベクトル間の内積が非ゼロである場合、ベクトル間に角度の概念が成り立つ。ベクトル間の角度の概念は文学作品において語彙ベクトル間の重複度評価に対応する。たとえば、語彙ベクトル間の角度がゼロに近い場合は両ベクトルが重複して作品を構成していることを意味する。語彙ベクトル間の角度が90度に近い場合は両ベクトルが独立して作品を構成していることを意味する。本稿においては語彙ベクトルをグラムシュミットの方法によってすべて直交化する。さらに直交化されたベクトルを単位ノルムに正規化することで作品を構成するベクトルの重みを平等化する。このようにして構成された正規直交系に Haar (ハール) 基底を用いたウェーブレット変換を適用する。Haar 基底は数多く提案されている離散値系ウェーブレット変換基底中で最も簡明で数学的、物理的意味が解釈しやすい。このため、本論文では Haar 基底を分析に採用する。以下、文学では通常用いられる「分析」を理工系で使われる「解析」と書く。正規直交化された文学作品を構成するベクトルへ離散値系ウェーブレット変換を適用する。得られ

たウェーブレット変換スペクトラムに多重解像度解析を適用し、全体の平均値としての低周波情報から隣接する要素間の変化率を表す高周波情報まで、それぞれ直交化してソーティングされた結果のベクトルに対する考察を行う。

3.2 理工学と文学における基本的相違

理工学は平均値が重要な世界であるが故に、頻回におよぶもの、一般的なもの、普遍的なもの法則を見出すことが求められる。このため低周波の部分に意味がある。一方、文学においては、言語によって人間の心のゆらぎが表現されることから、一回的なもの、特殊なもの、個性的なもの本質と法則を把握することが求められる。したがって高周波の部分が無視できない。

4. 文学作品の暗黙知の可視化モデルと解析方法

正規直交化された文学作品の構成ベクトルへ離散値系ウェーブレット解析の多重解像度解析手法^{2,14)}を適用した文学作品の解析例を述べる。まず、言語解析・形式に主眼をおいた解析を三島由紀夫作『近代能楽集』¹⁵⁾へ適用する。要素の選択方法は読み手の理解、解釈、鑑賞に依存するが、表現されている形式に注目して選択するため、解析者へ依存せず一意的な可視化結果を与える。しかし、結果の解釈は読み手に依存する。次に、解釈・内容に主眼をおいた解析をゲーテ作『ファウスト』^{16,17)}へ適用する。ここでのキーワードの選択方法は読み手の理解、解釈、鑑賞に対する依存性が避けがたい。

4.1 言語解析・形式に主眼をおいた解析

— 『近代能楽集』における終助詞 —

4.1.1 要素の選択と方法

三島由紀夫作『近代能楽集』における終助詞「よ」、「ね」、「よね」の頻出数を初巻から終巻までの計8巻を要素として暗黙知の一解析を行う。「よ」は自己主張、「ね」は一致志向、「よね」は聞き手に配慮しながらの自己主張⁹⁾が見られる。8編から成る本作品は「主張する立場」を暗黙的に取る傾向があり、また出現頻度が極めて少ない「よね」が最後の1巻のみにも拘わらず、暗黙の内に出現頻度が比較的多い「よ」と同等に使われていることが洞察された。

三島由紀夫の『近代能楽集』の各巻で使われている終助詞「よ」、「ね」、「よね」の頻出度数を Fig. 1 に示す。「よ」と「ね」は同じ傾向であるが、「よね」は極めて少ない。

4.1.2 解析方法

「よ」(Yo) と「ね」(Ne) は極めて類似した使われ方をしているので、両者のベクトルの一致度合いを8次元空間(要素数が8個からなるベクトルの構成する空間)の角度で調べる。

$$\text{Cos}^{-1} \left[\frac{\text{YO}^T \cdot \text{NE}}{\|\text{YO}\| \|\text{NE}\|} \right] \times \frac{180}{\pi} = 7.27 [\text{Deg.}] \quad (1)$$

であるから、両者はほぼ同じ傾向を持つベクトルと言え

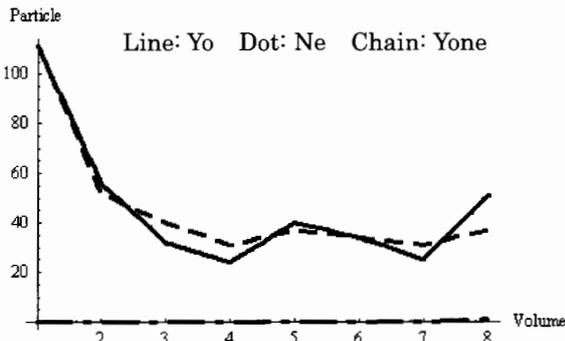


Fig. 1 Frequency of Particles “Yo”, “Ne”, “Yone” in “Kindai Nogaku Shu”

る。

「よ」と「ね」のウェーブレット多重解像度解析を行う。基底関数は演算処理の意味が把握できるドビッシーの2次である。

Fig. 2 と Fig. 3 から、隣接する要素間の変化率では「よ」と「ね」の使われ方がかなり異なることがわかる。

Fig. 4 は「よ」と「ね」のウェーブレット多重解像度解析でレベル4のベクトルを比較したものである。「よ」と「ね」は全く同じ傾向のベクトルと原データからは想定される。しかし、各巻での頻出度の変化率（レベル4）で見ると、第6巻から両者は異なる傾向を取り始め、大きさは異なるが最終巻では全く相反する使われ方であることが判る。

Fig. 5 は「よ」と「ね」のウェーブレット多重解像度解析でレベル4のベクトルを除いてベクトルを再構成したものである。その結果、両者のベクトル間の角度は7.27 [度] から16.09 [度] と増加し、ベクトル間の角度は開いた。換言すれば隣接する巻間の変化率レベル4のベクトルの一致が両者のベクトルを同じ傾向としている。これは文学解析を正規直交化せず原データから解析する場合、各巻毎に変化する「語彙」、ここでは「よ」と「ね」の変化率が重要な役割を担う事を意味する。

Fig. 6 は「よ」を基準とした直交化ベクトルをそれぞれのノルムが1となるように正規化した結果を示す。これはそれぞれのベクトルの大きさを揃えることを意味する。

データベクトルを Y, ウェーブレット変換行列を W とすればウェーブレットスペクトラム S は次式で与えられる。

$$S = WY \tag{2}$$

ウェーブレット多重解像度解析で、レベル1はスペクトラム行列 S の第1要素のみを残し他の要素をゼロとしてウェーブレット逆変換式(3)で得られる。

$$S' = \begin{bmatrix} S_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ S_n \end{bmatrix}, D_0 = W^T \cdot S' \tag{3}$$

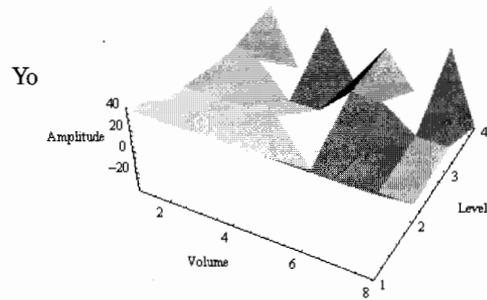


Fig. 2 The discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Yo” in “Kindai Nogaku Shu”.

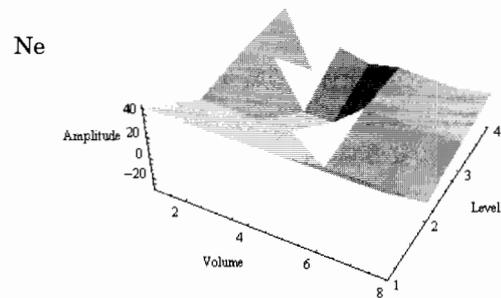


Fig. 3 The discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Ne” in “Kindai Nogaku Shu”.

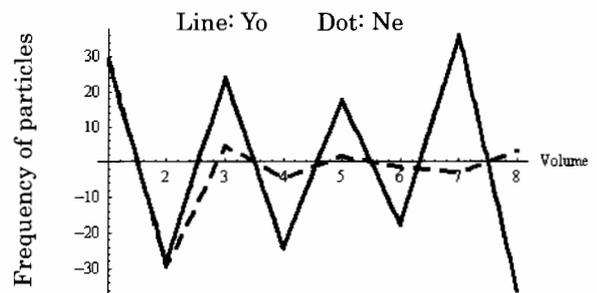


Fig. 4 Level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Yo”, “Ne”, of “Kindai Nogaku Shu”

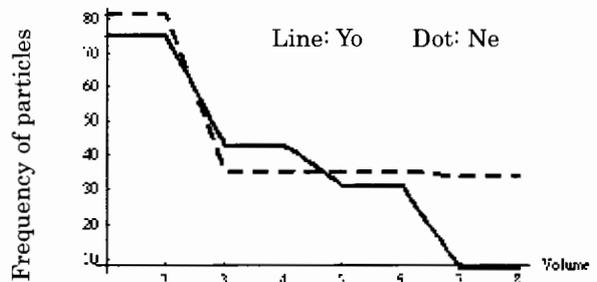


Fig. 5 Except of level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Yo”, “Ne”, of “Kindai Nogaku Shu”.

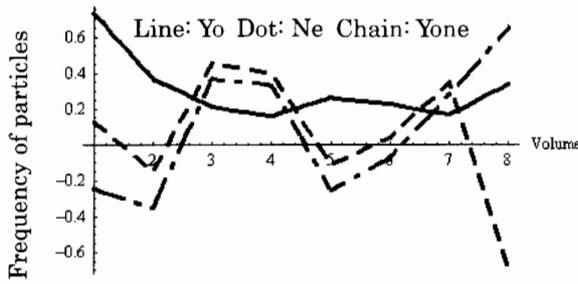


Fig. 6 “Yo” basic and norm 1 of the orthonormalization Analysis: “Kindai Nogaku Shu”.

4.1.3 結果と考察

以下, Fig. 7 から Fig. 10 にレベル 1 から 4 までの結果を示す。

Fig. 7 のレベル 1 は作品全体としての平均的ベクトルを与えるから, 全作品を通して「よ」が多く使われ, この作品が主張する立場から書かれている事を意味する。

Fig. 8 のレベル 2 は全作品を前半と後半に分けた場合の終助詞の頻出度合いを表す。「ね」が支配的であり, 前半は積極的に「ね」が使われ, 後半は「ね」を使わない傾向が伺える。

Fig. 9 のレベル 3 は全作品を 4 分割した場合, 「よね

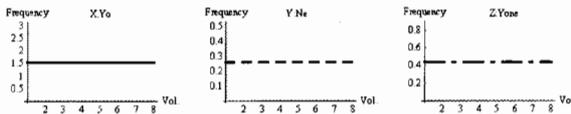


Fig. 7 Level 1 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Yo”, “Ne”, “Yone” in “Kindai Nogaku Shu”.

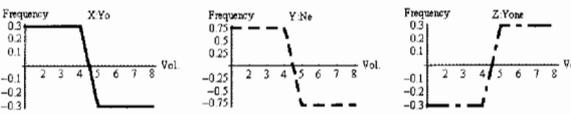


Fig. 8 Level 2 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Yo”, “Ne”, “Yone” in “Kindai Nogaku Shu”.

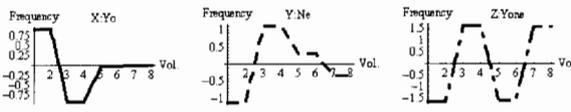


Fig. 9 Level 3 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Yo”, “Ne”, “Yone” in “Kindai Nogaku Shu”.

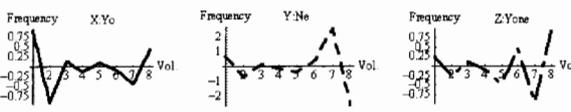


Fig. 10 Level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: Particles “Yo”, “Ne”, “Yone” in “Kindai Nogaku Shu”.

が支配であり, 最初は「よね」の使用を避けているが交互に「よね」を積極的, 非積極的に使われている事を意味する。

Fig. 10 は最も高次のレベル 4 は各巻ごとの終助詞の個々の巻を時系列で見た場合, 最も大きな変化を示すのが「ね」であり, 特に第 7 巻と 8 巻で極端な変化をすることがわかる。

レベル 4 はデータの平均化がなされていないため, 隣接するデータ間のバラツキを強調した結果を含んでいることに注意しなければならない。

『近代能楽集』における終助詞「よ」, 「ね」, 「よね」の解析結果から, 「よ」, 「ね」, 「よね」の変化率を評価する場合, レベルによって, それぞれの最大振幅が異なり最大値を取る助詞が傾向を判断する指標となることが明らかとなった。最初のレベルから, 平均的にとると三島由紀夫の作品は「主張する立場」を暗黙的に取る傾向が抽出されたと考えられる。本作品に使われている助詞「よ」, 「ね」, 「よね」の頻出度解析を行った結果, 文学解析を正規直交化せず原データから解析する場合, 各巻毎に変化する要素「よ」と「ね」の変化率が重要な役割を担う事が判明した。さらに, 正規直交化解析から, 出現頻度が極めて少ない「よね」が最後の 1 巻のみにも拘わらず, 暗黙の内に出現頻度が比較的多い「よ」と同等に使われていることが洞察された。

4.2 解釈・内容に主眼をおいた解析

— 『ファウスト』における宗教の多様性 —

ゲーテ作『ファウスト』を対象として本手法を適用した。その結果, ゲーテが多様な宗教観を持っていたこと, また自然探求者としての立場が揺るがなかったことが考察された。

ドイツの作家ゲーテ (Johann Wolfgang von Goethe, 1749-1832) は人生の諸段階において宗教的信条を述べているが, 時と状況に応じて変化する発言はさまざまな疑惑を生むこととなった。

『ファウスト』(1774-1831) はゲーテの青春時代から 60 年の歳月をかけて, 完成させたライフワークというべき作品で, 生涯の全思想と体験が織り込まれている。特に自然研究の成果はいろいろな形で取り入れられている。また, ゲーテの宗教的思想が最もまとめて述べられている作品の一つ¹⁸⁾であると指摘されている。

『ファウスト』には 3 つのプロローグおよび第一部と第二部からなる 12111 行の作品であり, その全体を解析対象とした。プロローグは 3 場面, 第一部は 25 場面, 第二部は 26 場面で, 全 54 場面に分けられる。この作品は知識と行動の限りない意欲を持つファウストが世界を遍歴する物語である。閉鎖的で重い第一部と開放的で軽快な第二部からなり, 第一部の主要部分は学者ファウストの悲劇とグレートヘン悲劇の二つからなり, 第二部は人物や事件も複雑であるが, 作品全体の構想のもとに成り立っており, ヘレナ悲劇がグレートヘン悲劇と対

をなしている。ゲーテ自身は第一部を酷評し、第二部には満足していた。

ゲーテは才能に恵まれ、文学作品を書く一方、若い時から自然研究を続けた。また、ワイマール公国では政治の実務に携わった。宗教に関する発言も多く、ゲーテのキリスト教に対する関係についての研究も神学思想の歴史との関連¹⁹⁾のうちに生まれている。宗教に対してゲーテは自由な立場をとっていた。そのため一神論者としての篤信のキリスト教徒から異端視された。ゲーテに対する宗教的非難は、彼が「神を自然のうちに、自然を神のうちに見る」汎神論的立場を固持したことによる。ゲーテは無神論者ではなく、汎神論的な有神論というべき立場をとるが、これは自然探求者としてのゲーテにとっては捨てることのできない、自然との感応から獲得された根源的な立場²⁰⁾であった。一方、詩と信仰がゲーテの内面生活のなかで両立しえず、詩人としての使命にしたがうために決定的な信仰をもちえなかったことはゲーテの宗教性と文学性を理解するためにきわめて重要なこと²¹⁾である。

ゲーテの宗教に対する考え方は『箴言と省察』(*Maximen und Reflexionen*)²²⁾の「宗教とキリスト教」において知ることができる。「わたしたちは、自然探求者としては汎神論者、詩人としては多神論者、道德家としては一神論者である」との考え方に對しティリーケ¹⁹⁾は視点の差異に基づいて相補的な関係にとらえその限りにおいて寛容が得られると述べている。

『ファウスト』の特徴の一つに多様な登場人物が挙げられる。伝説、神話、聖書に登場する人物のほか、あらゆる階層の人物が登場し、宗教を異にしている。そこで、ゲーテが『箴言と省察』で述べている宗教に対する考え方をもとに文学的要素も考慮し、登場人物を要素として選んだ。要素は「自然探求者・汎神論者」「詩人・多神論者」「道德家・一神論者」の3つに分類して、場面ごとの登場頻度を調べ、ウェーブレット多重解像度解析を適用した。

『ファウスト』における解析結果から、作品の主要な要素は「道德家・一神論者」であり、第1部と第2部の間に大きなゆれがあることが示された。以下、離散値系ウェーブレット多重解像度解析による詳細な分析結果を述べる。横軸は場面の数を示し、縦軸はキーワードの頻度の変化率を表す。

実際のデータ数としての段落は54場面までであるが、解析には2のべき乗のデータが必要であるため最後の段落に55から64段落をゼロデータとした¹⁴⁾。また、結果はゼロを追加した段落を削除してある。

作品の主要な要素を把握するために、Fig. 11のウェーブレット多重解像度解析のレベル1を参照すると、「道德家・一神論者」が作品の半分弱を占め、最も高い割合を示している。次いで「自然探求者・汎神論者」となり、「詩人・多神論者」は最も低い割合を占めている。

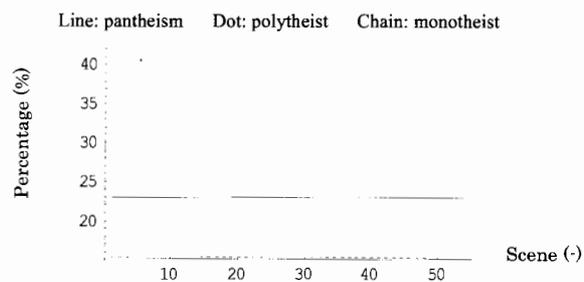


Fig. 11 Level 1 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: religious pattern of "Faust".

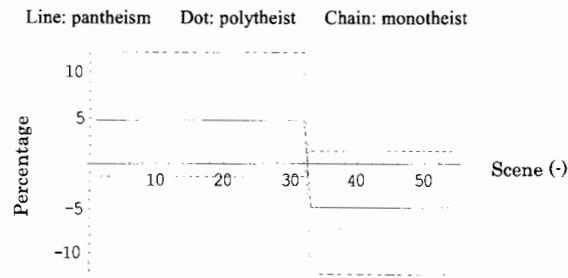


Fig. 12 Level 2 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: religious pattern of "Faust".

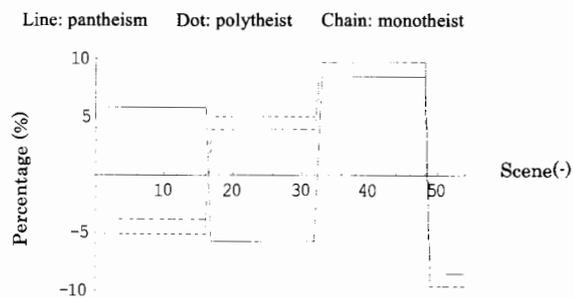


Fig. 13 Level 3 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: religious pattern of "Faust".

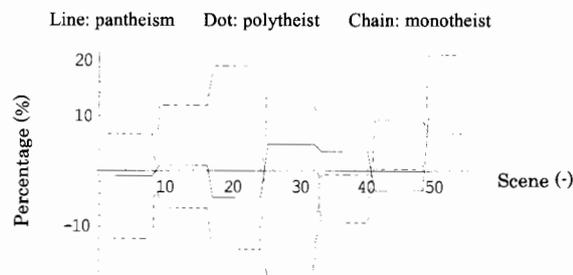


Fig. 14 Level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: religious pattern of "Faust".

Fig. 12 は分析対象を 2 等分したレベル 2 の結果を示す。前半部と後半部の「道徳家・一神論者」には大きなゆれが見られる。しかし、「自然探求者・汎神論者」と「詩人・多神論者」はゆれが少ない。

Fig. 13 は分析対象を 4 等分したレベル 3 の結果である。前半部、前後半部は 3 要素のゆれが大きく、「詩人・多神論者」と「道徳家・一神論者」はゆれが一致し、「自然研究者・汎神論者」はそれに相反する傾向でゆれている。一方後前半部、後後半部では 3 つの要素のゆれが一致している。

Fig. 14 は分析対象を 8 等分したレベル 4 の結果を示す。前半部から中間部の始めにかけて「詩人・多神論者」と「道徳家・一神論者」が相反する傾向で大きくゆれている。中間部の終わりから後半部にかけては「自然研究者・汎神論者」と「詩人・多神論者」のゆれが大きくなり、「道徳家・一神論者」ゆれは少ない。しかし、後半部の終わりになると「道徳家・一神論者」には再度大きなゆれがある。全体として一番ゆれが少ないのは「自然研究者・汎神論者」である。ゲーテ自身が第一部に満足できなかったのは芸術と信仰がゲーテの内面生活のなかで両立しえない状態であり、第二部に満足したのは、自然研究者としての立場を貫きつつ信仰と芸術が作品の中で手を結ぶことができたためであると考えられる。第二部の最終部分で、「道徳家・一神論者」が再び大きくゆれるのは、ゲーテが「道徳家・一神論者」であり、信仰の中に救済を求めていたと推察される。

本解析結果から、『ファウスト』はキリスト教文化圏の作品としての特徴を維持しつつゲーテの多様な宗教観が描かれている。また、第一部と第二部が異なる傾向を持ちながらも「自然探求者・汎神論者」によって作品全体の構想に統一感が保たれていることが考察された。

5. 結 語

以上、文学作品解析に線形空間論の正規直交系と離散値系ウェーブレット変換を導入することで、文学作品評価に対する高い客観性が構築された。言語、文学研究、評論の分野において、特に文章や文体の表現形式に注目してキーワードを選択した場合、解析者に依存せず一意的な結果が得られる処理を可能とした。また、解釈・内容に主眼をおいた解析においてもレベルによって従来の説との整合性が認められた。

『近代能楽集』では、現在心理学分野でキーワードとして注目されている終助詞に着目した解析から作品の暗黙知の可視化を可能とした。これは頻出度数の多い語彙が必ずしも作品において支配的になっているとは言えず、むしろ言葉の裏に秘められた言葉が抽出可能であることが判明し、統計学では不可能であった暗黙知の可視化を

可能にした。

さらに、離散値系ウェーブレット変換の多重解像度解析は各レベルの解析結果に着目することでより精緻な解析と解釈を可能にした。可視化された結果から全体の整合性を精査し、作品の読みを再考させる手掛かり、すなわち新しい読みの可能性を提起した。

参 考 文 献

- 堀井清之・宮沢賢治・角山茂章編著：「文系知」と「理系知」の融合 コンピュータによる文体構造の可視化，近代文芸社，(2001)。
- 堀井清之，齋藤兆古：特許「文学作品解析方法および解析装置」，特願 JP 10-102673 A。
- マイケル・ポランニー，佐藤敬三訳：暗黙知の次元：言語から非言語へ，紀伊国屋書店，(1990)。
- 井筒俊彦：意味の深みへ，岩波書店，(1985)。
- 堀井清之：線形空間論を用いた文学作品における暗黙知の可視化，可視化情報，Vol.21, Supple., No.1 (2001) pp.774-782。
- 大曾美恵子：「よ」「ね」「よね」再考—雑談コーパスに基づく考察—，言語教育の新展開 牧野成一教授古希記念論集，シリーズ言語学と言語教育 第 4 巻，ひつじ書房，(2005) pp. 3-15。
- 村上征勝，今西祐一郎：源氏物語の助動詞の計量分析 (特集：人文科学とコンピュータ)，情報処理学会論文誌，情報処理学会 40(3) (1993) pp.774-782。
- 近藤泰弘，近藤みゆき：平安時代古典語古典文学研究のための N-gram を用いた解析手法，言語情報処理学会，第 7 回年次大会発表論文集 (2001) <http://lkabri.aoyama.ac.jp/public/paper/20010328.pdf> (入手 2002)。
- 西岡ほか，大久保利謙編：百学連環，明治啓蒙思想集，筑摩書房 (1967) p.50。
- 大槻文彦：大言海新編版，富山房 (1982) p.1837。
- 原子朗：〈個人の神話〉から〈文体へ〉—言語分析から文体論へ—，日本文学研究の方法 近代編，日本文学研究資料叢書，有精堂 (1984) p.136。
- 小林英夫：文体，文体論の美学的基礎づけ，文体論の建設，小林英夫著作 7，みすず書房 (1975) pp.309-314。
- 時枝誠記：文体論と文章研究，文章研究序説，山田書院 (1960) p.34。
- 齋藤兆古：ウェーブレット変換の基礎と応用—Mathematica で学ぶ，朝倉書店 (1998) p.39, pp.93-95。
- 三島山紀夫：近代能楽集，新潮社 (1956)。
- ゲーテ，訳者 相良守峰：ファウスト 第一部 岩波文庫 (1993)。
- ゲーテ，訳者 相良守峰：ファウスト 第二部 岩波文庫 (1994)。
- 高橋恒：ゲーテの宗教性，カトリック研究，上智大学神学会 48，(1985) pp.221-222。
- ヘルムート・ティーリケ，訳者 田中義充：ゲーテとキリスト教，柳文芸社 (2003) p.7, p.31。
- 友田孝典：ゲーテの宗教的世界，大谷学報，大谷学会 75(4) (1963) p.30。
- 木村直司：ゲーテ研究，南窓社 (1994) p.109。
- ゲーテ，訳者 岩崎英二郎・関橋生：箴言と省察，ゲーテ全集 13，潮出版社 (1992) p.211。