



## 島崎藤村『破戒』における感情変化の可視化

- 離散値系ウェーブレット多重解像度解析 - \*

井波 真弓<sup>1)</sup>, 齋藤 兆古<sup>2)</sup>, 堀井 清之<sup>1)</sup>

Visualizing Change of Feelings in “Hakai” by Shimazaki Toson  
-Discrete Wavelets Multi-Resolution analysis -

Mayumi INAMI, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

### ABSTRACT

The movements of the feelings of people live in old society and modern society in “Hakai” were examined by the discrete wavelets multi-resolution analysis. The aspects for analysis has employed following three elements, which are three words of synonym that means the world where people are alive: “Seken” means the interpersonal relationship and innumerable others who surround, “Shakai” is a word of translation into Japanese from society and “Yononaka” is a vague space to be alive with the relation with innumerable people.

As a result, it is verified that there are reasonable meanings in the selection of the words in insisting on the standpoint of Characters in each society. Both societies of people have common recognition about “Seken”. “Shakai” is employed by the supporters of the new society when they insist on their right and realization of equal society.

**Keywords:** Seken, Shakai, Yononaka, Multi-resolution analysis, Wavelet transform

### 1. 緒 論

近年、自然言語処理手法に基づく文書の分析と可視化の研究は、増加している。しかし自然言語処理に基づく文書の分析と可視化の研究は、新聞記事・学術論文・ウェブサイトなどを対象としたものが多く、文学作品を対象にしたものは相対的に少ない。

一連の筆者らの研究<sup>1)</sup>では離散値系ウェーブレット変換の多重解像度解析を用いて文学作品を解析している。文学作品全体としての構成から、前半と後半の構成の差異など徐々に詳細な部分への差異を可視化することで、個々の文学作品の特徴を抽出している。

解析対象が文学作品という人間が構築した人工的なものであることから、文学分野に於ける先行研究と同様なキーワードを採用した筆者等の解析手法は、文学分野では主観的にならざるを得ない議論に数理的手法の導入による客観性を与えることを主眼とする研究である。すなわち、数理的な解析手法は著者等が提案した従来方法である。しかし、適用事例に応じたキーワードの選択により、個々の適用事例固有の情報が可視化され、

その結果として文学作品の数理的分析を行うことが筆者等の研究目的である。

本稿では文学作品として島崎藤村作『破戒』における類義語を取り上げ、登場人物の感情の揺れを検証する。

『破戒』は明治38年(1906年)3月、「緑蔭叢書」第一篇として自費出版された。島崎藤村(1879~1943年)は6年間に亘って信州の自然風土や風俗習慣を実地に調べ周到な準備の後、この『破戒』を書いた。明治34年ごろから小説の世界は自然主義的傾向にあったが『破戒』が世に出ることで自然主義小説が確立するにいたった。自然主義小説の代表的作品である所以は、現実の問題を深く追求し、封建的現実を解放するために差別待遇と戦い、不合理性と戦いそこに近代性を表現しようとした<sup>2)</sup>ところにある。高橋昌子<sup>3)</sup>は「高尚」な人間と無価値な人間を二極化して後者を黒倒するような「社会」の発想構造を、差別問題に絡ませることによって近代国家の問題に展開していると述べている。

『破戒』に対する評価は主人公に与えられた部落民という条件を重視して虚構によって成り立つ社会小説<sup>4),5)</sup>と丑松の苦悩を作者の自己投影と理解しながら告白にまで追い詰められていく自我内面のドラマ<sup>6),7)</sup>としての性格を重視する二つの立場がある。さらに、それらを統一的見地から論ずる立場<sup>8)</sup>もある。

渡辺廣士<sup>9)</sup>は小説とは複数のレベルで読まれ得るテキストであるとし、主要なコードの一つとして作品に敷き込まれた「不

\* 原稿受付 2009年10月1日

1) 正会員 白百合女子大学 文学部 (〒182-8525 東京都調布市緑ヶ丘 1-25, E-mail: minami@shirayuri.ac.jp)

2) 正会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科

調和な社会」という語に含まれる文化コードを挙げている。さらに明治の文学者のなかではもっとも熱烈に新しい言葉を探り求めた一人として評価している 藪貞子<sup>10)</sup>も語に焦点を当て『破戒』を「社会」の視点からを論じ、「世間」「社会」「世の中」の重層的な構図が描かれていると指摘している。さらに阿部謹也<sup>11)</sup>は『破戒』に使われる「世間」「社会」という語の使用頻度に注目し、日本が「世間」によって機能していると述べている。

このように人々が共同生活をしている「世間」「社会」「世の中」という類義語は作品の中で使い分けられている。類語辞典<sup>12),13)</sup>によると、「世間」は主観的な存在として、自分と交際・関係のある人々の集団である。「社会」は客観的な存在としてとらえた共同生活を営む人々の集団で、人々が相互に依存しながら生きる場を特定の経済的・政治的・文化的システム、特定の時代相のもとにあるものとしてとらえた語でもある。「社会」は近代西洋の「市民社会」の概念として入ったもので、日本で古くから使用されている語の「世間」とは見方を異にする。人間関係・交際範囲といったものを表した「世間」は「社会」とは置き換わらない。「社会」を「世間」と置き換え可能な場合は「世間」と置き換えると自分自身という個人の目から見た周囲の環境・生きるための基盤といって狭く限定されたものになる。「世の中」は無数の人々が互いにかかわりをもちながら生きている空間的な広がりをもつ、やや漠然と捕らえている。漠然という場合は「世の中」のほか「世間」も用いられる。また「社会」と同様に「世の中」は客観的表現にも使われる。

『破戒』は封建的で不合理な明治の社会と破戒によって自己解放された近代社会との対立が描かれているが、従来の既往研究では主に「社会」という語を軸に論じられ、日常的に用いられる「世間」「世の中」に言及するものはほとんどない。自由、平等、不合理などの概念が「世間」「世の中」といった語との併用を妨げているため、それらの語は社会をはじめとする別の書き言葉に置き換えられて論じられている。作品の内容から鑑みると、登場人物は「世間」「社会」を中心にし、「世の中」を含めた類義語の使用をめくり戦略的に使い分けており、語の選択は感情と深くかかわっている。作家の意図的な使用が認められる類義語「世間」「社会」「世の中」は、作品の構造と主題にも大きく関わっていると指摘されているが、それらの類義語に焦点をあて、作品全体でどのように揺れているかを可視化したものはない。そこで、本稿では感情表現を担う類義語「世間」「社会」「世の中」をキーワードとし、離散値系ウェブレット多重解像度解析を用い、旧社会の考えを持つ登場人物と新社会の考えを持つ登場人物とに分類し、対立する人々の感情の変化を可視化し考察する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析対象

『破戒』<sup>14)</sup>のあらすじを以下に述べる。

信州飯山の小学校教員である瀬川丑松は、被差別部落の出身だが、社会へ出て身を立てるには決して身分を明かしてはならないという父の戒めを守り、素性を隠して暮らしている。丑松の尊敬する猪子蓮太郎は、同じく部落出身であるにもかかわらず、その身分を公表し社会の偏見や迫害と戦っている。丑松は蓮太郎の著書を読み、その人間性や勇気ある行動に深く感動しているが、自己の素性は蓮太郎にも明かすことができない。現在の平穏な生活を維持したいという思いから、自分の正義に従って生きたいと思うものの部落民として社会から葬られてしまう現実の恐ろしさが丑松を引き止める。

父が死に際しても「忘れるな」と遺していった戒めに従いながら、部落民だけが負わされた苦しみの中で、社会の不合理や矛盾に引き裂かれながら、丑松は徐々に思い悩む人間になっていく。師範学校時代からの友人でかつ同僚である土屋銀之助は陽気であった丑松の変化を青春の哀傷と受け止める。

政治家高柳は、財産目当てに部落民の娘と結婚し、丑松にその事実を口外しないよう頼んだが、確約が得られないのを恨み、丑松の身分を学校に流した。丑松の教員としての能力を妬んでいる校長は、それを種に丑松を貶めようと画策する。

社会の目に見えぬ圧迫に追いつめられる中、折しも間近に迫った選挙の応援演説の席で、蓮太郎は政敵高柳のまわし者に襲われて死亡した。蓮太郎の姿を目の当たりにして、丑松はついに父の戒めを破る決心をする。

丑松は生徒たちに自らの素性を明かした。銀之助も、そして丑松が密かに慕っていた蓮華寺の養女お志保も、丑松の素性を知っても動じなかった。丑松は学校を去り大日向の経営するテキサスの農場に新しい生活を求めて町を去っていく。

### 2.2 キーワードの選択と方法

- 1) 作品の構成を継時的に見るために『破戒』に現れる三つの語、「世間」「社会」「世の中」をキーワードとして選び章ごとの使用頻度を新社会と旧社会とに分けて調べた。キーワードは著者が作品を読み、語を選択した。ルビの付いた「社会」は「社会」として選んだ。Table 1は旧社会におけるキーワードの選択結果であり、Table 2は新社会におけるキーワードの選択結果である。Table 3は人物を旧社会、新社会に分ける時の分類基準と代表的な人物を示した。Table 4には語「世間」「社会」「世の中」の意味するところを簡潔に説明したものである。Table 5は旧社会に現れる文章にキーワード「世間」「社会」「世の中」を含むものの例である。Table 6には作品の新社会に現れる文章

Table 1 Number of elements in old society.

章	世間	社会	世の中
1	0	1	2
2	1	0	0
3	0	1	0
4	0	0	0
5	0	0	1
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	1	0	1
11	0	0	0
12	0	0	1
13	1	1	1
14	1	2	0
15	1	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	10	2	0
19	0	0	0
20	0	1	0
21	2	1	1
22	0	0	0
23	0	0	0
合計	17	9	7

Table 2 Number of elements in new society.

章	世間	社会	世の中
1	0	5	0
2	1	0	0
3	0	0	0
4	0	1	1
5	0	0	1
6	0	0	0
7	0	1	0
8	0	1	0
9	2	3	0
10	1	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	2	0	0
14	0	0	0
15	0	1	0
16	1	1	2
17	1	0	0
18	2	3	2
19	1	2	1
20	0	3	0
21	0	1	1
22	0	1	1
23	1	0	0
合計	12	23	9

Table 3 Selected systems.

	分類基準
旧社会	前近代的, 封建的, 非合理的立場. 校長, 郡視学, 勝野文平.
新社会	近代的, 合理的立場. 瀬川丑松, 猪子蓮太郎.

Table 4 Selected elements.

要素	意味
第1要素 「世間」	自分と関係したり, 交際したりする人々を主観的な存在としてとらえた集団.
第2要素 「社会」	Society の翻訳語. 客観的な存在としてとらえた共同生活を営む人々の集団.
第3要素 「世の中」	無数の人々が互いに関わりを持ちつつ生きているやや漠然とした空間的な広がり.

Table 5 Examples of element in old society.

要素	事例
第1要素 「世間」	・ 「・・・幼稚なように見えて, 馬鹿にならないのは, 世間さ」
第2要素 「社会」	・ 学校にも居られなくなる, 社会からも放逐される, と言えば君, 非常なことだ. それではまるで死刑を宣告されるも同じだ.
第3要素 「世の中」	・ 今日とても矢張自分等の時代で有ると言いたい, 実は何時のか世の中が変遷して来た. 何が可畏いと言ったって, 新しい時代ほど可畏いものは無い.

Table 6 Examples of element in new society.

要素	事例
第1要素 「世間」	・ 『・・・世間の人の睨む通りに睨ませて置いて, 黙って狼のように男らしく死ぬ』
第2要素 「社会」	・ 自分だって社会の一員だ, 自分だって他と同じように生きている権利があるのだ.
第3要素 「世の中」	・ 未だ世の中をそれ程深く思い知らなかった頃は, 噴飯したくなるような, 気楽なことばかり考えて, この大祭日を祝っていた.

2)にキーワード「世間」「社会」「世の中」を含むものの例をあげた.

得られたデータに離散値系ウェブレット変換の多重解像度解析を適用する.

### 2.3 分析

「世間」, 「社会」, 「世の中」の要素にベクトルの概念を用いる. 「世間」を基準ベクトルとして, ベクトルをグラムシユミットの方法によって全て直交化し, 重複要素を除く. 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. 正規化さ

れたデータにウェーブレット多重解像度解析を適用する。本研究では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次を採用する。

離散値系ウェーブレット変換で取り扱われるデータの個数は2のべき乗である。このため、 $n=32$ 個の要素からなるデータベクトルを考える。このベクトルの最初から23番目の要素まではTable 1またはTable 2の値で構成されており、残り9要素の値はゼロである。この様にして得られた行ベクトルを $Y$ とする。さらに、 $W$ はウェーブレット変換行列であり、詳細は参考文献(15)および(16)を参照して頂きたい。

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。

$$S = WY \quad (1)$$

離散値系ウェーブレット変換で、特にドビッシーの2次を採用した場合、ウェーブレットスペクトラムの第1レベル(ウェーブレットスペクトラムベクトル $S$ の最初の1要素を除き、他を全てゼロとする)は全要素の平均値に対応し、第2レベル(ウェーブレットスペクトラムベクトル $S$ の第2要素のみ残り、残りの要素をゼロする)は全データを前半と後半に分けた場合の変化率、さらに第3レベル(ウェーブレットスペクトラムベクトル $S$ の第3,4要素のみ残り、残りの要素をゼロする)は全データを4分割してグループしたデータ間の変化率を意味する。従って、データの個数が $n=2^X$ であるならば、第 $(X+1)$ レベルは、隣接要素間の差を意味する。わかりやすくするため、具体的な例として、式(1)のベクトルが

$$Y = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

で与えられた場合を考える、このデータに対するドビッシーの2次基底によるウェーブレット変換行列は

$$W = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられるから、式(1)からこの例でのウェーブレットスペクトラム $S$ は

$$S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ (a+b)-(c+d) \\ \sqrt{2}(a-b) \\ \sqrt{2}(c-d) \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。

したがって、この例でのウェーブレット多重解像度解析のレベル1は

$$\begin{aligned} D^{(0)} &= W^T S^{(1)} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

同様に、レベル2,3は、それぞれ式(6)と(7)で与えられる。

$$\begin{aligned} D^{(1)} &= W^T S^{(2)} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ a+b-(c+d) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b-(c+d) \\ a+b-(c+d) \\ -(a+b)+c+d \\ -(a+b)+c+d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{D}^{(2)} &= \mathbf{W}^T \mathbf{S}^{(3)} \\
&= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{2}(a-b) \\ \sqrt{2}(c-d) \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a-b \\ -a+b \\ c-d \\ -c+d \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{7}$$

また、式(5)から(7)式より

$$\begin{aligned}
\mathbf{Y} &= \mathbf{D}^{(0)} + \mathbf{D}^{(1)} + \mathbf{D}^{(2)} \\
&= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \end{bmatrix} + \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b-(c+d) \\ a+b-(c+d) \\ -(a+b)+c+d \\ -(a+b)+c+d \end{bmatrix} \\
&\quad + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a-b \\ -a+b \\ c-d \\ -c+d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{8}$$

が成り立つ<sup>(15),(16)</sup>。

以上の例と同様にしてウェブレット多重解像度解析はなされる、より詳細は参考文献(15)および(16)を参照して頂きたい。

### 3. 結果と考察

『破戒』の要素ベクトルに離散値系ウェブレット多重解像度解析を適用した結果を Figs.1-4 に示す。横軸は本作品の最初から最後まで章ごとに構成要素を時系列に並べた。縦軸はキーワードの章ごとの頻度の変化率を表す。グラフは左より実線は「世間, SEKEN」、鎖線は「社会, SHAKAI」、一点鎖線は「世の中, YONONAKA」を表す。

類義語は大まかな意味は同じであるが、ニュアンスによって使い分けられており、使用する人間の微妙な心理が働いている。本作品における社会を表す三つの類義語は登場人物、特に新社会(近代社会)で生きたいと思う主人公にとって生きるか死ぬかというレベルの問題である。一方新社会を恐れ、旧社会(封建的で不合理な明治の社会, 世間)に生きたいと考える校長は

類義語を自分が有利になるような意味に変化させて使用している。このように社会を表す類義語に注目して全体の流れを追うことで新社会と旧社会の構造とそれぞれの立場でどのような駆け引きが行われていたかが明らかとなる。本作品においては「世間」「社会」「世の中」の重層的な構図が描かれていると指摘されているが、重要な個所でのそれぞれの語を指摘するのみで、全体の構造も明らかにされていない。本稿では類義語には感情や戦略があると判断し、二つの対立を明確に分け、作品の始まりから終焉にかけ全ての語を取り上げて可視化することで、全体の構造や登場人物の感情、語の使い分けやニュアンスについて、作品全体の流れの中での客観的考察を可能にした。

『破戒』における解析結果を見ると、旧社会、新社会ともにキーワードの「世間」は増加しており、キーワードの「社会」は頻出度合いが変化していることから、作品内の二つの対立に「社会」が重要な役割を演じていることが示唆された。

実際のデータ数としては23章までであるが、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24から32段落をゼロデータとした<sup>15)</sup>。また、結果はゼロを追加した段落を削除してある。離散値系ウェブレット多重解像度解析は全体、半分、1/4、1/8、1/16...というように段階に分けて分析し、これをレベル1、レベル2、レベル3、レベル4、レベル5...と呼ぶ。レベル1では作品全体の平均を示す。レベル2では半分に分けた1段落から16段落の平均と17段落から32段落の平均の変化を示す。レベル3では4等分した1段落から8段落の平均と9段落から16段落の平均の変化、17段落から24段落の平均と25段落から32段落の平均の変化である。レベル4では8等分、レベル5では16等分である。

#### 3. 1 旧社会の解析結果

まず、旧社会の人々の感情の流れを見るために分析対象を4等分したレベル3の結果を Fig.1 に示す。本論文では1章から8章を前半部、9章から16章を中間部、17章から24章を後半部と呼ぶ。

キーワードの「世間」とキーワードの「社会」はともに前半部、中間部、後半部と次第に増加していく傾向が見られる。

キーワードの「世の中」は前半部が多く、中間部は減少し後半部は頻出度合いの変化が少なくなっている。従来の社会の存続を望む旧社会の人々は新社会に対する不安や恐れを感じている。旧社会の人々は新しい時代の流れを瀬川丑松に感じており、彼を学校から追放しようとする時に、「世間」を持ち出して旧社会側の人々の立場を主張している。しかし、新しい社会になりつつあることは理解しており、作品の進行にしたがって次第に「社会」も増加する。そこでの「社会」は「世間」と代替可能な表現や、批判材料として用いられており、「世間」との対抗に「社会」という言葉が使われていると考えられる。「世の中」は

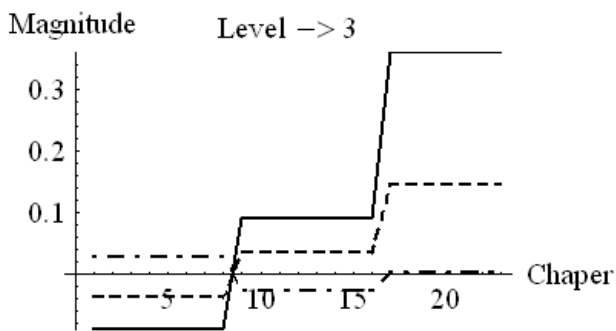


Fig. 1 Level 3 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: patterns of 3 synonyms of old society.  
Solid:SEKEN, Dotted:SHAKAI,  
Alternate long and short dash:YONONAKA

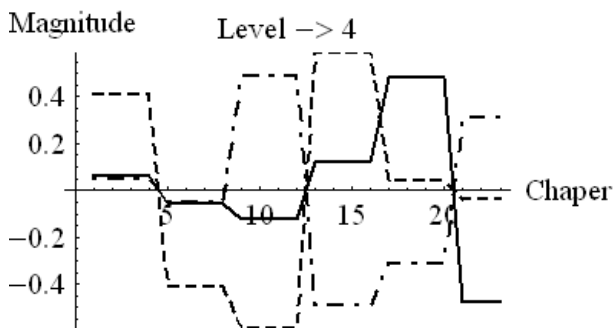


Fig. 2 Level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: patterns of 3 synonyms of old society.  
Solid:SEKEN, Dotted:SHAKAI,  
Alternate long and short dash:YONONAKA

「世間」と「社会」の使用頻度が高まるにつれて頻度割合の変化が少なくなっていく。

Fig. 2 は旧社会の人々の感情の流れをさらに詳細に見るために分析対象を 8 等分したレベル 4 を示すグラフである。本論文では 1 章から 4 章を前前半部、5 章から 8 章を後前半部、9 章から 12 章を前中間部、13 章から 16 章を後中間部、17 章から 20 章を前後半部 21 章から 24 章を後後半部と呼ぶ。

キーワードの「世間」の前前半部、後前半部、前中間部、後中間部では頻度割合の変化は緩やかであるが前後半部から後後半部にかけて頻度割合の変化が大きくなる。丑松の素性が明らかになると、旧社会側の人々が力を持ち始める。

キーワードの「社会」は前前半部、後前半部と前中間部、後中間部に頻度割合の大きな変化がある。前前半部と後半部では旧社会側の人々が新社会の側の人々の到来を拒否することで自己の立場を表明しており、後中間部では「社会」という語を使っているが、実は「世間」が語られているのである。

キーワードの「世の中」は前中間部と後中間部に大きな頻度割合の変化があり、後中間部では減少している。しかし後後半

部では再び増加している。前中間部は丑松の叔父が旧社会にひっそりと生きていくよう説得し、後後半部では旧社会側でも世の中の変化を受け入れざるを得ない状況が語られる。

### 3. 2 新社会の解析結果

新社会の人々の感情の流れを見るために分析対象を 4 等分したレベル 3 の結果を Fig. 3 に示す。キーワードの「世間」は前半部が少なく中間部、後半部は増加している。

キーワードの「社会」と「世の中」は共に前半部が多く、中間部が減少し、後半部になると再び増加している。師範学校を優秀な成績で卒業して社会に出た丑松は猪子蓮太郎の思想に引かれている。蓮太郎に関する記述にキーワードの「社会」は多く、キーワードの「世間」は少ない。丑松は旧社会の「世間」の中でなく、新社会の中に出て生きて行こうとするため前半部はキーワードの「世間」が少なくキーワードの「社会」が増加している。しかし中間部になると丑松は蓮太郎のように生きたいと思いつつも父親の戒めを思い出し、躊躇ってしまう。丑松の葛藤の部分では身分を明かして堂々と新社会で生きようとする考えを封じ込め、身分を隠したまま「世間」に生きたいと思う気持ちからキーワードの「世間」が多くキーワードの「社会」

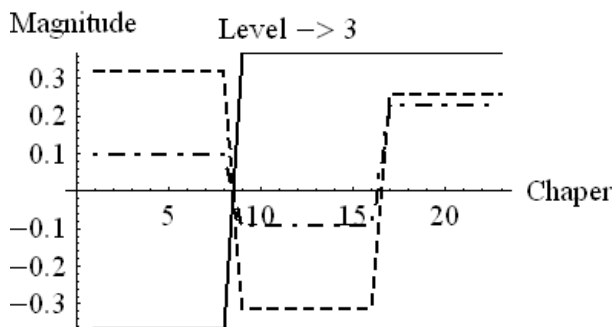


Fig. 3 Level 3 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: patterns of 3 synonyms of new society.  
Solid:SEKEN, Dotted:SHAKAI,  
Alternate long and short dash:YONONAKA

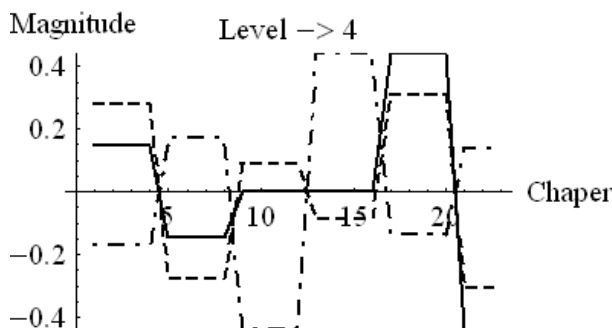


Fig. 4 Level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: patterns of 3 synonyms of new society.  
Solid:SEKEN, Dotted:SHAKAI,  
Alternate long and short dash:YONONAKA

は減少している。後半部はキーワードの「世間」、「社会」、「世の中」の全てが増加している。従来の旧社会に対して新社会を望む丑松が「社会」のあるべき姿を主張するも結局「世間」の勢力に圧倒され従来の「世の中」を受け入れる。

Fig.4 は新社会の人々の感情の流れをさらに詳細に見るために分析対象を8等分したレベル4の結果を示すグラフである。Fig.4 ではキーワードの「世間」は前前半部、後前半部、前中間部、後中間部での頻出度合いの変化は緩やかであるが前後半部から後後半部になると頻出度合いの変化が大きくなる。身分が明らかになりつつある時、丑松は「世間」で生きたいと強く望む。

キーワードの「社会」は前前半部、前中間部、後後半部にそれぞれ頻出度合いの変化があり、前中間部の頻出度合いの変化は前前半部と後後半部の頻出度合いの変化と比較して頻出度合いの変化が小さい。「社会」に出て生きて行こうと希望に燃えている前前半部は頻出度合いの変化が大きく、「世間」に行きするために素性を隠さなければならないと悩む前中間部は頻出度合いの変化は小さい。前後半部において再び頻出度合いの変化は大きくなるが、「社会」の語でありながら「世間」に近い意味で用いられ始める。

キーワードの「世の中」は後前半部、後中間部、後後半部にキーワードの「社会」と相反する頻出度合いの変化を示し、かつ前中間部と後中間部との頻出度合いの変化が大きい。丑松の求める理想の「社会」は現実の「世の中」とは相反する「社会」だったことが明らかとなった。

### 3.3 旧社会と新社会の比較

旧社会と新社会のグラフを比較するとキーワードの「世間」においてはレベル3、4共にほぼ同じ曲線を描いており、キーワードの「世間」には新旧社会に共通の認識があると考えられる。

キーワードの「社会」は新旧社会に違いが現れた。レベル3では旧社会において「社会」が次第に増加しているのに対し、新社会は中間部で減少している。レベル4では前前半部は新旧社会共にキーワードの「社会」が多く、前中間部と後中間部では相反する頻出度合いの変化が見られた。前後半部と後後半部では旧社会の頻出度合いの変化はほとんど見られないが新社会では前後半部と後後半部では大きな頻出度合いの変化がみられる。旧社会にとって「社会」は旧社会を脅かすものとして批判的に用いられているが、新社会にとっては可能性のある未知の世界として考えられている。

キーワードの「世の中」においてはレベル3では新旧社会で概ね同じような頻出度合いの変化が見られる。レベル4では前後半部と後後半部では同じような頻出度合いの変化が見られたが、前中間部と後中間部には相反する頻出度合いの変化が見ら

れた。

『破戒』という小説の進行を一つの時系列と考えたとき、どの位置にどのような要素が多く出現するかによって、類義語の重層的な構図が可視化された。さらに、二つの社会の言葉に込められた感情の変化が明らかとなった。

## 4. 結論

- (1) 旧社会と新社会の「世間」の頻出度合いの変化にはほぼ同様の傾向が見られ、双方ともに日本の古来から使用されている語「世間」に対する共通認識があることが確認された。「世の中」においても概ね共通の認識が認められた。
- (2) 新社会側の登場人物が自己の考えを主張する場合「社会」が多くなるが、自己を主張したいと考えながらも内面に大きな葛藤が見られる場合は少なくなっている。立場を主張する上で語の選択に大きな意味があることが明らかとなった。
- (3) 旧社会における「社会」の語は新社会に対抗したり、批判したりする時に多くなり、「世間」としての立場を主張するために「社会」を援用していることが示された。
- (4) 島崎藤村が「世間」、「社会」、「世の中」という従来の日本語と翻訳語を取り混ぜた類義語を使い分けることで、明治の文学者の中ではもっとも熱烈に新しい言葉を探り求めた一人であったことが検証された。
- (5) 離散値系ウェーブレット多重解像度解析を用いて「世間」、「社会」、「世の中」の頻出度合いの変化を可視化することで『破戒』の旧社会と新社会との対立する人々の感情の揺れと類義語「世間」、「社会」、「世の中」の重層的な構造が明らかとなった。
- (6) キーワードは先行研究で得られた「世間」、「社会」、「世の中」の分析と同様な観点から選んだが、それらに対して何らかの数学的方法を適用して客観的な解析が行われていなかった。本研究は、人手で選んだキーワードに対して離散値系ウェーブレット多重解像度解析を適用し、結果を可視化することで客観的な考察を与えている。

## 参考文献

- 1) 井波 真弓, 岩崎 晴美, 宮沢 賢治, 土屋 宏之, 齋藤 兆古, 堀井 清之, 『源氏物語』における源氏と空蝉の恋, 可視化情報学会論文集, Vol. 25, No. 5 (2005) pp.8-12.
- 2) 實方清: 藤村文芸辞典, 清水弘文堂 (1979) pp.48-50.
- 3) 平野謙: 島崎藤村, 現代作家論全集 第2巻, 五月書房 (1957).
- 4) 高橋昌子: 藤村の近代と国学, 双文社 (2007) pp.17-35.
- 5) 野間宏: 島崎藤村の『破戒』(1953), 島崎藤村, 文芸読本, 河出書房 (1979) pp. 33-39.
- 6) 吉田精一: 島崎藤村, 吉田精一著作集 第6巻, 桜楓社, (1981).

- 7) 佐々木雅彦:『破戒』試稿 - 自立への道 , 日本文学研究資料叢書 島崎藤村 II, 日本文学研究資料研究会, 有精堂 (1979) pp.92-106 .
- 8) 三好行雄: 島崎藤村論, 三好行雄著作集 第1巻, 筑摩書房 (1993) .
- 9) 渡辺廣士: 島崎藤村を読み直す, 創樹社 (1994) pp.24-31 .
- 10) 藪禎子: 『破戒』論- 「<sup>まのなか</sup>社会」の視点から, 平阿敏夫, 剣持武彦編, 島崎藤村 文明批評と詩と小説と, 双文社出版 (1996) pp.123-138.
- 11) 阿部隆也: 「世間」とは何か, 講談社 (1995) p.177-180.
- 12) 田志魁, 泉原昇二, 金相順編著: 日本語類似表現のニュアンスの違いを例証する類義語使い分け辞典, 研究社 (1998) p.396.
- 13) 松井 栄一編, ちかいかわかる類語使い分け辞典, 小学館 (2008) p.492.
- 14) 島崎藤村: 破戒, 新潮文庫 (1999) .
- 15) 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.
- 16) 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 JP10-102673A.
- 16) 齋藤兆古, 画像処理入門, 朝倉書店 (1998) pp.40-42.



## ウェーブレット変換を用いた非接触給電システム近傍の 磁界分布の可視化

高田 将吾 , 齊藤 兆古 (法政大学大学院) 堀井 清之(白百合女子大学)

### Wavelets Visualization of the magnetic field distributions around the contact-less power suppliers

Shogo TAKADA , Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

#### ABSTRACT

All of the modern electrical devices are composed of two major parts: one is the electrical signal processing part, and the other is the power supplier. Recent electrical devices are spreading in use not only the conventional consumer electronic products but also electrical vehicles. A reason why electrical vehicles should be developed is simply the antipollution of earth atmosphere, i.e., the electrical motors employed instead of combustion type engines. The electrical vehicles require a battery system which should be charged up by an external power source. This means that a contactless power supplier is extensively convenient to practical use for battery charging of the electrical vehicles.

Contactless power supplier is composed of a transformer having the distinct primal and secondary coils separated by air gap. Because of the electromagnetic compatibility problem, it is essential to keep the leakage magnetic fields around the contactless power supplier as low as possible.

This paper carries out the wavelets multi-resolution analysis to the magnetic field distributions around the transformer having the distinct primal and secondary coil separated by air gap.

As a result, it is found that the most reasonable core head shape of the transformers has the most dominant 1st order wavelet spectrum, i.e., the biggest 1st order wavelet spectrum and negligible higher order wavelets spectra. This means that there is no leakage magnetic field around the contact-less power supplier.

**Keywords** : Magnetic field visualization, Contactless power supplier, Wavelets analysis

#### 1. 緒 論

半導体技術の発展は、電気・電子機器の小型軽量化のみならず、インテリジェント化を可能とし、爆発的な電気・電子機器の普及をもたらした。その結果、高周波で駆動される電気・電子機器は生産設備のみならず家電機器まで普及し、家庭、事務所、工場、その他あらゆる場所でパソコン、ファックス、携帯電話、空調設備、照明機器等の多くの電気・電子機器が設置され、必要不可欠な文明の利器として活用されている。それらの電気・電子機器が空間を占める密度は、従来想定不可能な密度である。この意味で、現代の人工空間はあらゆる周波数の電磁界で満たされた空間と化している。この過酷な電磁環境中でも、電気・電子機器は誤作動をすることなく円滑にそれらの機能を発揮しなければ、人類の文明生活が維持できない状況に至っている。換言すれば、あらゆる周波数の電磁界で満たされ

た空間の中で人類は生活を強いられている状況である。電気・電子機器に対してだけでなく人類に対しても可能な限り、高周波の電磁界が分布しない自然な空間が望ましいことは言うまでもない。

近年、地球温暖化対策のために電気自動車の開発が急務となっている。電気自動車普及の大きなボトルネックとして電気自動車への給電システムとそのインフラがある。

本稿は電気自動車を前提とする非接触給電システム開発に関するものであり、具体的には非接触給電システムが与える周辺電磁界分布の可視化とそのウェーブレット解析である。

#### 2. 磁界分布の可視化

##### 2.1 1次・2次コア分離型単層変圧器

非接触給電システムでは1次・2次コイル分離型の変圧

器を採用することで非接触な電力電送を可能とする。変圧器のコア材は比較的重量があるため、コア材の量を削減する方途として高周波駆動が一般的である。高周波特性のよい磁性材料はフェライトである。我々の非接触給電システムでは、2個のU字型フェライトを用いた1次・2次コイル分離型単層変圧器と2枚の平面型フェライトを用いた1次・2次コイル分離型単層変圧器を試作した。

2.2 磁界ベクトル分布

Fig.1にU字型フェライトを用いた変圧器で、フェライトコアヘッド間が8mmの場合の磁界ベクトル分布図を示す。

1次・2次のフェライトコアヘッドに平行なx-y平面で、フェライトコアヘッド面に垂直な方向を高さz方向として、高さ(z方向)を10mm毎に4段階変更して、コアから漏れた磁界のxyzの3成分を測定した。

Fig.2に平面型フェライトを用いた変圧器で、コア間が30mm場合の磁界ベクトル図を示す。

1次・2次の平面型フェライトコアに平行なx-y平面で、平面型フェライトコア面に垂直な方向を高さz方向として、高さ(z方向)を10mm毎に4段階変更して、コア間の磁界のxyzの3成分を測定した。

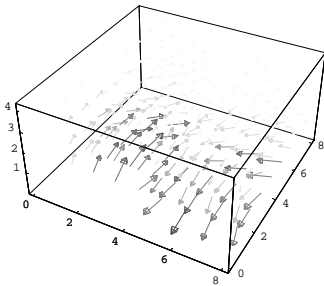


Fig.1 Magnetic Field Vectors Distribution around the U shape ferrite core transformer.

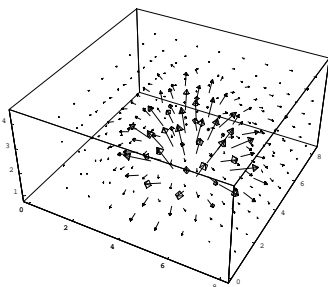


Fig.2 Magnetic Field Vectors Distribution around the flat shape ferrite core transformer.

3 . 磁界ベクトル分布のウェーブレット解析

3.1 理論

一般に、3次元のウェーブレット変換は、3次元マトリックスの転置行列を

$$[H_{lmn}]^T = H_{mnl} \tag{1}$$

で表すと、

$$S = [W_n \cdot [W_m \cdot [W_l \cdot H_{lmn}]^T]^T]^T \tag{2}$$

で与えられる。ここで、Sはウェーブレットスペクトラム、Hは1×m×nの直方マトリックス、W<sub>l</sub>、W<sub>m</sub>、およびW<sub>n</sub>はそれぞれl×l、m×m、n×nのウェーブレット変換マトリックスである。ここで、Hの各要素がx、y、z方向の3成分からなるベクトル

$$H = X + Y + Z \tag{3}$$

であるとき、式(1)、(2)より

$$S = [W_n \cdot [W_m \cdot [W_l \cdot (X + Y + Z)]^T]^T]^T \tag{4}$$

が得られる。ここでX、Y、Zはそれぞれ直交するベクトルであるから式(4)は

$$S = [W_n \cdot [W_m \cdot [W_l \cdot X]^T]^T]^T + [W_n \cdot [W_m \cdot [W_l \cdot Y]^T]^T]^T + [W_n \cdot [W_m \cdot [W_l \cdot Z]^T]^T]^T \tag{5}$$

となる。すなわちベクトルデータのウェーブレット変換スペクトラムは各成分のウェーブレット変換スペクトラムを成分とするベクトルである<sup>4)</sup>。

3.2 磁界ベクトル分布の解析

Figs.1、2で示した3次元磁界ベクトル分布へウェーブレット変換を適用する。

Figs.1、2に示したベクトルデータをx、y、z成分ごとにウェーブレット変換し、ウェーブレットスペクトラムを求める。Fig.1には基底関数にドビッシーの2次基底関数を使用し、Fig.2にはx,y成分にはドビッシーの8次基底関数、z成分には4次基底関数を使用する。

Fig.3にU字型フェライトコアを用いた場合のベクトルウェーブレットスペクトラム、Fig.5に平面型フェライトコアを用いた場合のベクトルウェーブレットスペクトラムを示す。

Figs.3、5は複数個のベクトルウェーブレットスペクトラムからなる。すなわち、Figs.3、5は空間周波数別に空間周波数の低い、最も支配的なウェーブレットスペクトラムと空間周波数が高いウェーブレットスペクトラムからなる。それぞれを独立にウェーブレット逆変換して再現された3次元磁界ベクトル分布をそれぞれ空間周波数の低いウェーブレットスペクトラムから、Level 1、Level 2、Level 3として、Figs.4、6に示す。

Figs4(a)は明らかに空間に漏れのない無い理想的な磁界分布を表している。しかし、Fig.6(a)は平面型フェライトコアを用いた変圧器の最低次レベルのスペクトラムで

あるにも拘らず必ずしも理想的な磁界ベクトル分布ではない、むしろレベル 2、3 の磁界ベクトル分布が平面型変圧器特有の磁界ベクトル分布を与える。

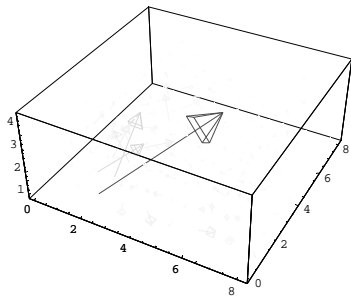
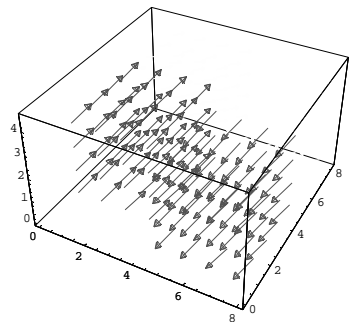
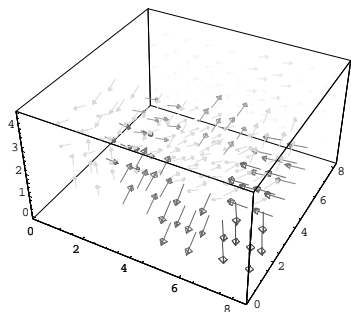


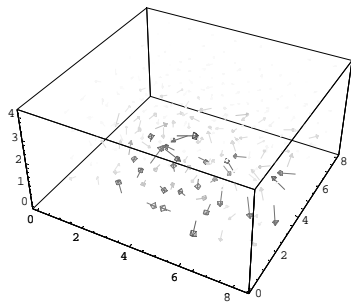
Fig.3 Wavelet spectra of the transformer with U shape cores



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

Fig.4 The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer with U shape cores

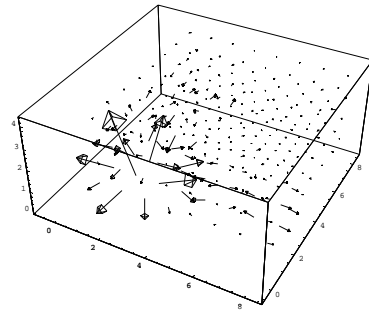
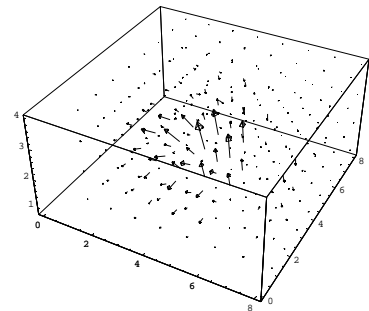
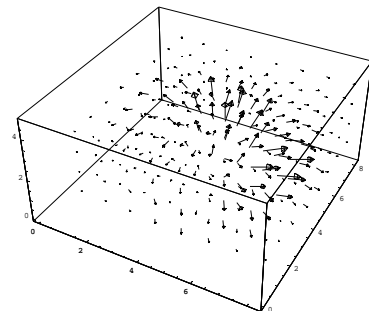


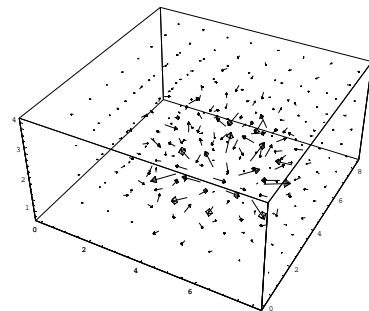
Fig.5 Wavelet spectra of the transformer with flat shape cores.



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

Fig.6 The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer with flat shape cores

これは、U字型フェライトコアを用いた変圧器と平面型フェライトコアを用いた変圧器はその磁気結合様式が相補的な形で異なるためである。すなわち、U字型フェライ

トコアを使った変圧器は磁気結合が U 字型に沿った直線的磁界ベクトルによってなされるため、一定方向へ磁界ベクトルが揃ったレベル 1 のスペクトラムが理想的な磁界ベクトルを再現する。しかし、平面型フェライトコアを持つ変圧器ではコアの中心から噴水状に広がる磁界ベクトルによって磁氣的結合がなされるため、高次のウェーブレットスペクトラムが平面型コア特有の噴水状磁界ベクトルを良く表現可能であることに拠る。

以上の結果から、変圧器の磁氣的結合様式で着目すべきウェーブレットスペクトラムが異なることが判明した。

#### 4. まとめ

本稿では、非接触給電システムの根幹要素である 1 次・2 次コイル分離型変圧器の周辺磁界分布の可視化を行い、ウェーブレット解析を行った。ウェーブレット解析は、コア形状の最適化指標を明確に与え、非接触給電システムに於ける漏洩磁界問題解決の一助となることが判明した。

#### 参考文献

- 1) 齊藤兆古 著：「ウェーブレット変換の基礎と応用」、朝倉書店、1998 年
- 2) 宮原晋一郎、早野誠治、齊藤兆古、増田則夫、遠矢弘和：「電気・電子機器の周辺電磁界可視化システム」、マグネティックス研究会資料、1998 年、MAG-98-112
- 3) Sekijima,D.,Hayano. and Saito,Y: Time-domain Visualization of Quasi-3D Current Vector Distributions PSFVIP-3 March 18-21,2001, U.S.A. F3303
- 4) 松山佐和、小口雄康、宮原晋一郎、齊藤兆古：「三次元ウェーブレット変換の応用」、日本氏シミュレーション学会、1998 年、2- -3

## 強磁性体の動的磁区画像と周波数ゆらぎ特性に関する幾つかの考察

石井 隆<sup>○</sup>, 齋藤 兆古(法政大学大学院), 堀井 清之(白百合女子大学)

### Study of Dynamic Magnetic Domain Movement and its Frequency Fluctuation Characteristics

Takashi ISHII, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

#### ABSTRACT

The Bitter method is most commonly observing way of the magnetic domains even though it is limited to the surface observation of specimen. To observe the magnetic domains by Bitter method, magnetic liquid is put on the target magnetic material surface after electrical field polishing processes. Applying magnetic field to this magnetic material covered by magnetic fluid makes it possible to observe the magnetic domain dynamics by a microscope. We have previously reported that local magnetization characteristics could be obtained from the visualized magnetic domain dynamics. Final purpose of our research on visualized magnetic domain dynamics is to work out a fully automatic quality control system for the thin magnetic material processing by our magnetic domain dynamics visualization method.

In this paper, we try to visualize the magnetic wall dynamics of ferromagnetic materials when impressing the vertical and horizontal alternating magnetic fields to the specimens. As the result, we try to extract  $1/f$  fluctuating frequency characteristics from each of the vertically and horizontally excited domain wall dynamics. Thus, we clarify the  $1/f$  fluctuation characteristics at the vertically as well as horizontally excited magnetic domains.

**Keywords:** Ferromagnetic materials, Magnetic wall dynamics, Visualization.

#### 1. 緒論

磁性鋼板は電気・電子機器を構成する主要な材料である。一般に、磁性材料は磁区と呼ばれる微小磁石の集合で構成され、外部磁界に応じて材料中の磁気エネルギーが最小となるように磁区が変化する。すなわち、磁性材料の磁化過程は外部磁界に対する磁区挙動である。所望の磁化特性を持つ材料開発・評価に、磁区挙動の可視化は磁化過程を掌握するために重要な役割を担う。磁区挙動の可視化は、磁性コロイド溶液を用いたビット法、電子顕微鏡に拠る方法、磁気光学効果を利用した方法等で行われる。ビット法は手軽な方法であるが、磁区間の磁壁しか観察できない。また、磁気光学的方法是磁性体表面の磁区挙動可視化に限定される。電子顕微鏡に拠る方法は磁性体内部の磁区挙動を観察可能とするが、高価な機器を必要とする。

従来、我々は磁区の電子顕微鏡画像から磁性体の磁化特性を抽出する全く新しい方法を提案した。現在、我々は安価な設備で磁性体の磁壁を可視化可能とするビット法を用いて磁性体の磁化特性を抽出する方法を開発している<sup>2)</sup>。

本稿では、方向性珪素鋼板および無方向性珪素鋼板、パーマロイ45%の強磁性体を用いて、E型フェライトコア上における強磁性体の磁壁移動をビット法で可視化し、磁区動画像の特徴を $1/f$ ゆらぎ周波数分布特性で評価する。

#### 2. 磁壁移動の可視化と磁化特性

##### 2.1 ビッター法による磁壁移動の可視化

試料台に試料を載せて、研磨した試料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。強磁性体微粒子(酸化鉄)のコロイド液を強磁

P01-001

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表面の漏れ磁束の傾斜に引き付けられて集まり、表面近傍の磁壁の観測ができる。この引き付けられた微粒子を光学顕微鏡で観察する。この原理は、マグネットビューワなどの商品に応用されており、比較的面倒な実験準備を必要とせず実行可能である<sup>2)</sup>。

2.2 E型フェライトコア上の磁区動画像

Fig.1 に示すように、E型の中央に励磁コイルを巻き、方向性珪素鋼板および無方向性珪素鋼板、パーマロイ45%に交流磁界を印加させた場合の各点における磁区動画像を Figs.2 -4 に示す。

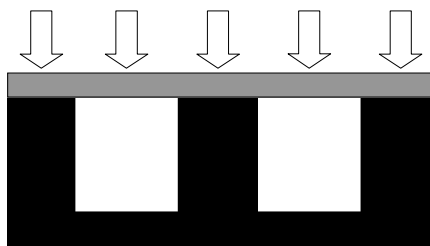


Fig.1 Experimental Devices.

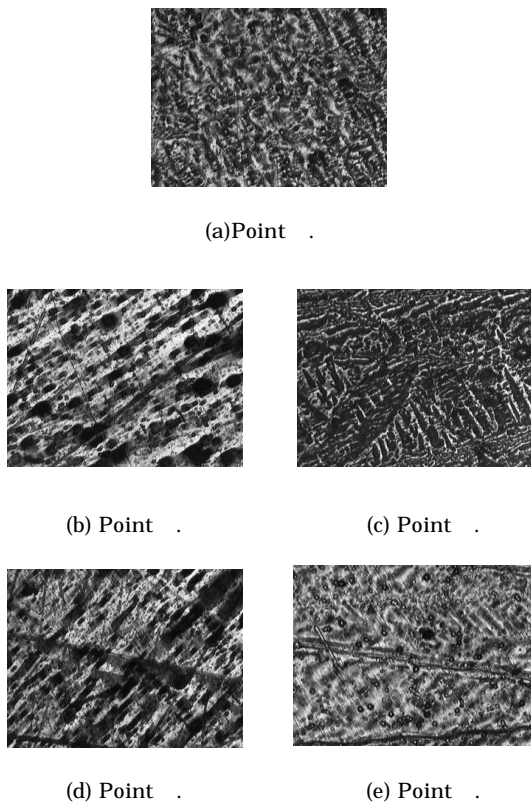


Fig.2 Flame Images of Magnetic Domain at each of the positions. , , , and in Fig.1 are corresponding to (a),(b),(c),(d) and (e), respectively. Sample: Grain Oriented Silicon Steel.

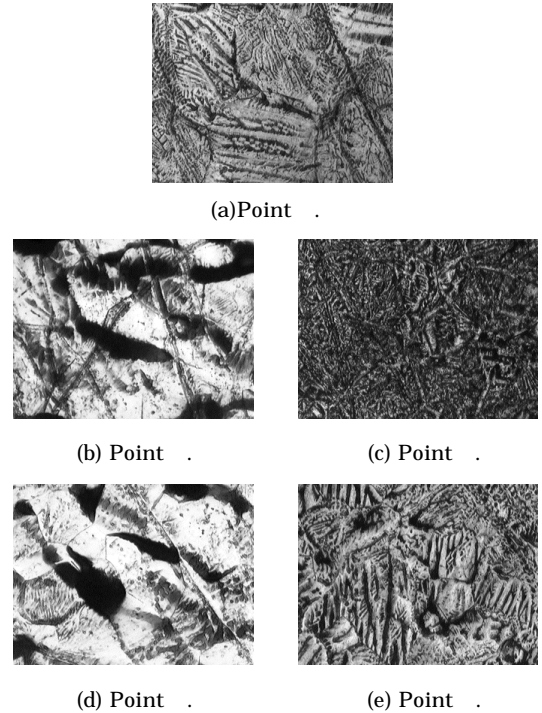


Fig.3 Flame Images of Magnetic Domain at each of the positions. , , , and in Fig.1 are corresponding to (a),(b),(c),(d) and (e), respectively. Sample: Non-Oriented Silicon Steel.

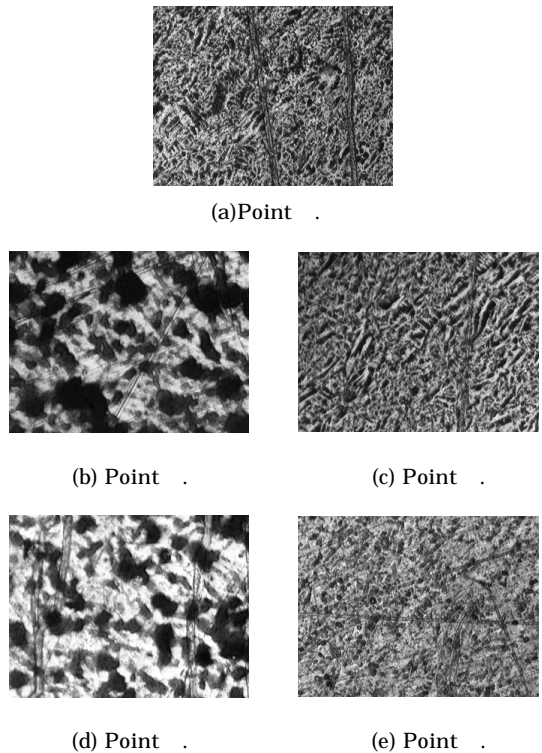


Fig.4 Flame Images of Magnetic Domain at each of the positions. , , , and in Fig.1 are corresponding to (a),(b),(c),(d) and (e), respectively. Sample: Permalloy45%.

3. 磁区画像の 1/f ゆらぎ周波数特性

3.1 1/f ゆらぎ周波数特性

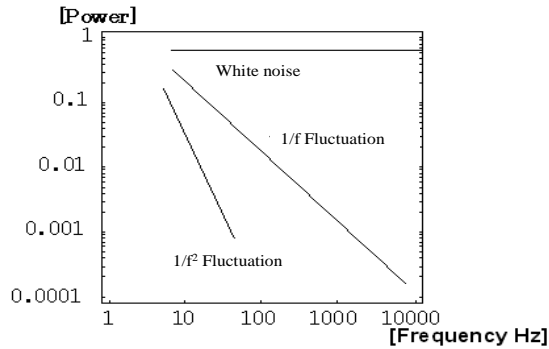
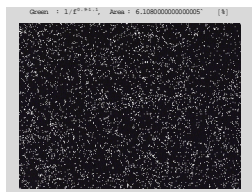


Fig.5 Typical Fourier Power Spectrum.

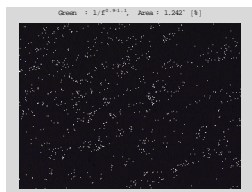
「1/f ゆらぎ」は小鳥の囀りなどの自然界に多く存在する。Fig.5 のように、直線の傾きが 0 の場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急になる程単調な信号である。そしてホワイトノイズと単調な信号の中間的な信号で傾きが約-1 の場合を「1/f ゆらぎ」と呼び、人間が心地よいと感じる信号と言われている。

磁区動画の 1/f ゆらぎは磁区画像のフレーム方向変化、すなわち、時間の変化によって生成される。

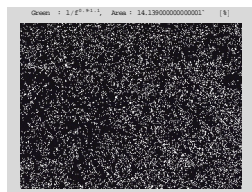
3.2 磁区画像の 1/f ゆらぎ



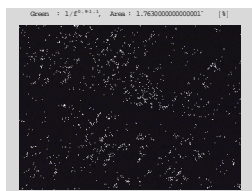
(a) Point .



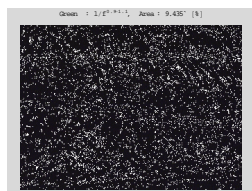
(b) Point .



(c) Point .

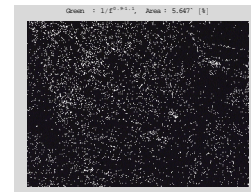


(d) Point .

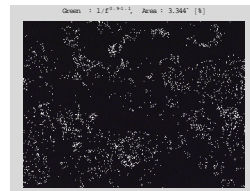


(e) Point .

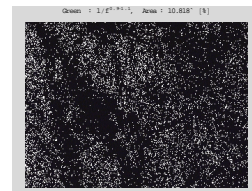
Fig.6 Extracted 1/f Frequency Fluctuation of Grain Oriented Silicon Steel. , , , and in Fig.1 are corresponding to (a),(b),(c),(d) and (e), respectively. White : 1/f frequency



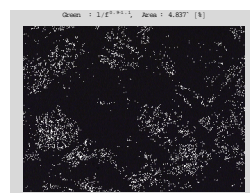
(a) Point .



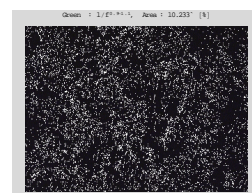
(b) Point .



(c) Point .



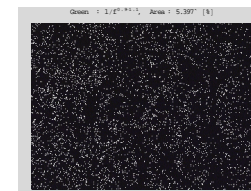
(d) Point .



(e) Point .

Fig.7 Extracted 1/f Frequency Fluctuation of Non-Oriented Silicon Steel. , , , and in Fig.1 are corresponding to (a),(b),(c),(d) and (e), respectively.

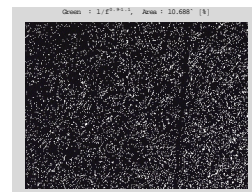
White : 1/f frequency



(a) Point .



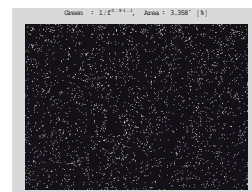
(b) Point .



(c) Point .



(d) Point .



(e) Point .

Fig.8 Extracted 1/f Frequency Fluctuation of Permalloy45%. , , , and in Fig.1 are corresponding to (a),(b),(c),(d) and (e), respectively. White : 1/f frequency

Table1 1/f Frequency Fluctuation Characteristic of Grain Oriented Silicon Steel.

The Point.	Extraction Rate.
	6.11%
	1.24%
	14.13%
	1.76%
	9.43%

Table2. 1/f Frequency Fluctuation Characteristic of Non-Oriented Silicon Steel.

The Point.	Extraction Rate.
	5.65%
	3.34%
	10.82%
	4.84%
	10.23%

Table3. 1/f Frequency Fluctuation Characteristic of Permalloy45%.

The Point.	Extraction Rate.
	5.40%
	0.08%
	10.69%
	0.05%
	3.36%

Figs.6-8 に Fig.1 で示した各点それぞれにおける方向性珪素鋼板、無方向性珪素鋼板、パーマロイ 45%の磁区画像の 1/f ゆらぎ周波数分布を白黒二値化させた画像を示す。白色の点は 1/f ゆらぎを表し、それ以外は黒色である。

また、方向性珪素鋼板、無方向性珪素鋼板、パーマロイ 45%の 1/f 周波数分布特性を式(1)で評価した結果を Table.1、Table.2、Table.3 に示す。

$$\frac{1/f \text{を呈する画素数}}{\text{全画素数}} \times 100[\%] \dots\dots\dots(1)$$

コアヘッド上の point 、 point 、 point とコアヘッド間の point 、 point の 1/f 周波数分布特性を比較すると、コアヘッド上の方が 1/f ゆらぎ数が多く表れていることが分かる。つまり、水平磁界を印加させた場合より、垂直磁界を印加させた場合の方が 1/f ゆらぎ数が顕著に表れる。

また、方向性珪素鋼板と無方向性珪素鋼板を比較した場合、無方向性珪素鋼板はコアヘッド間で方向性珪素鋼板より 1/f ゆらぎが多く抽出された。

#### 4. まとめ

本稿では、E 型フェライトコア上に強磁性体を乗せ、交流磁界を印加させた場合の磁区動画像を撮影し、1/f ゆらぎ周波数の抽出を行った。その結果、コアヘッド間の水平磁界が印加される部分より、コアヘッド上の垂直磁界が印加される部分の方が、1/f ゆらぎ数が顕著であることが判明した。従って、1/f ゆらぎ数と鉄損の関係性より、1/f ゆらぎ数が多い部分は鉄損が大きいと考えられる。すなわち、磁束の流れの方向が変化する部分の鉄損が大きくなることを示唆している。

また、無方向性珪素鋼板は、方向性珪素鋼板よりコアヘッド間における 1/f ゆらぎ数が多く表れた。これは、結晶中の原子配列方向がランダムであることに起因すると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Hisashi Endo, Seiji Hayano, Masahiro Fujikura, Hisashi Mogi, Chikara Kaido and Yoshifuru Saito; Magnetic domain dynamics visualization, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 15 (2001/2002) 409-416
- 2) 須永高志, 寺西正晃, 齋藤兆古, 堀井清之: ビッター法による可視化画像から 1/f ゆらぎの抽出、可視化情報学会シンポジウム、2006年7月、A311.
- 3) 石井隆, 齋藤兆古, 堀井清之: 動的磁壁画像の可視化による強磁性体の磁化特性、可視化情報学会シンポジウム、2009年7月、P01-004
- 4) 石井隆, 齋藤兆古: 動的磁壁画像の可視化による強磁性体の磁化特性と 1/f ゆらぎ周波数特性、可視化情報学会全国講演会、2009年10月、P01-004



## 時間領域信号の周波数揺らぎ解析による信号識別

野嶋 悟士<sup>○</sup>, 齊籐 兆古(法政大学大学院), 堀井 清之(白百合女子大学)

### Time Domain Signal Cognition by Frequency Fluctuation Analysis

Satoshi NOJIMA, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

#### ABSTRACT

Ferromagnetic materials, i.e., iron steel and its composites, are widely used as the frame parts of various artificial products and constructions such as a building, bridge and so on. Because of its mechanical property, iron steel is most popular in use for the frame materials to maintain their mechanical strength. On the other side, nondestructive testing of iron steel is an extremely important way in order to keep their mechanical reliability. One of the deterministic differences between the ferromagnetic and nonmagnetic materials is that all of the ferromagnetic materials when applying external magnetic field attracts major magnetic fields; and also magnetization process of ferromagnetic materials always accompanies with the Barkhausen effect. The Barkhausen effect is a phenomenon caused by movement of the magnetic domains accompanying with the discontinuous magnetizations. In order to carry out the nondestructive testing of iron steels with high reliability, this paper proposes one of the signal cognition methodologies based on the fluctuation frequency characteristics of the Barkhausen signals.

**Keywords:** Barkhausen phenomenon, 1/f Fluctuation, Signal cognition

#### 1. 緒 論

多くの時間領域一次元信号はオシロスコープで電気信号として可視化される。音声信号や計算機のクロック信号などが代表例である。これらの信号の中で、人間の可聴周波数である音声信号はキーボードを経由せずに計算機へコマンドを入力可能とするため、計算機と人間間の有力なインターフェイスと考えられ、これを実現するために音声認識・識別方法が鋭意研究開発されている。

本研究では、主として構造材として使われる鉄系磁性材料におけるバルクハウゼン信号の揺らぎ周波数特性を用いた非破壊検査法の確立を究極の目的として、バルクハウゼン信号測定時に必然的に伴う環境ノイズに対する1/f揺らぎ周波数特性法を解析した結果を報告する。

#### 2. 時間領域一次元信号の解析

##### 2.1 バルクハウゼン信号

多くの金属材料中で、鉄は最も広汎に使われる構造材である。鉄は機械的性質が制御可能であり、コスト的に

も安価である。これが構造材として広汎に使われる理由であろう。鉄は磁性体であり、磁性体の磁化過程は、可逆的磁壁移動、非可逆的磁壁移動、さらに可逆的回転磁化領域へ分類される。磁化曲線で考えれば、レイリーの法則が成り立つ範囲が可逆的磁壁移動による磁化過程範囲であり、非可逆的磁壁移動による磁化過程は不連続な磁壁移動で磁化されるために再現性は無く、周辺へ比較的高周波の磁界変化を与える。これがバルクハウゼン現象と呼ばれる磁性体特有の現象である<sup>2)</sup>。

Fig.1 に示すように磁性体の周辺へコイルを巻き、磁性体近傍で磁石を運動させるとバルクハウゼン現象に起因して磁界の時間変化がコイルに電圧が誘起する。この電圧を増幅してスピーカーへ入力すればスピーカーからバルクハウゼンノイズ(Barkhausen noise)が聞かれる。

本論文ではバルクハウゼン現象に起因する時間領域一次元信号を最終的な解析対象とし、信号収録過程において必然的に混入する環境ノイズの揺らぎ周波数特性解析する。

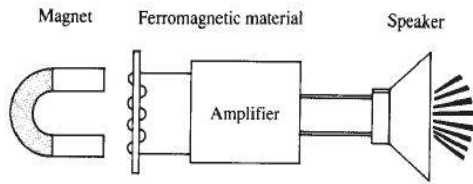


Fig.1 Barkhausen signal generation.

### 2.2 1/f ゆらぎ

1/f ゆらぎとは自然界の鳥のさえずりや小川のせせらぎなどに存在する特有の周波数特性である。信号のパワースペクトラムが周波数に反比例する場合、すなわち、フーリエパワースペクトラム対周波数の両対数グラフで傾きが -1 になるものを特に「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。本論文では、信号のゆらぎ周波数分布を信号の“固有の情報”として捉え、「固有の情報」と呼ぶ。

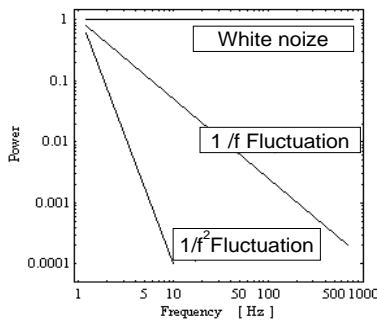


Fig.2 Typical Fourier power spectrum.

## 3. 実験

### 3.1 実験材料・装置

厚さ 0.3mm、長さ 145mm の鉄釘を供試材として取り上げた。供試材に太さ 0.2mm のホルマル線で 1000 回巻いたサーチコイルを装着し、誘起電圧およびパルクハウゼンノイズが測定可能な装置を作成した。

磁性体を磁化させる励磁コイルと継鉄を Fig.3 に示す。これは、太さ 0.6mm のホルマル線を 300 回巻いたフェライトの U 字型コアである。励磁コイル両端に位置する磁極間に供試材を乗せて固定したのち、励磁電流を流し、磁極間の供試材料を均一に磁化する。

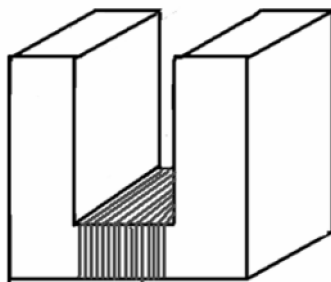


Fig.3 Exciting coils and U-shaped ferrite yoke core.

### 3.2 実験結果

実験結果を Fig.4 に示す。Fig.4 に見られるパルス上のパルクハウゼン信号に対して周辺の環境ノイズが無視できない大きさであることが分かる。

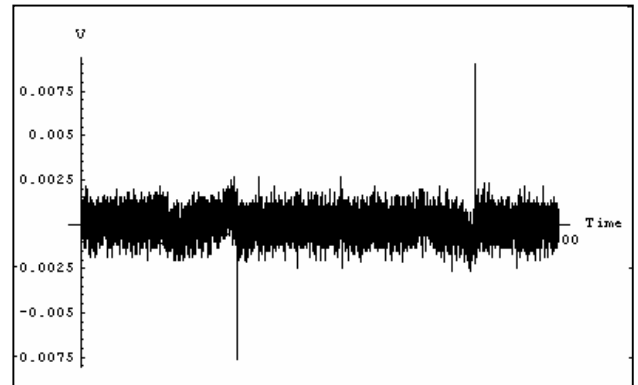
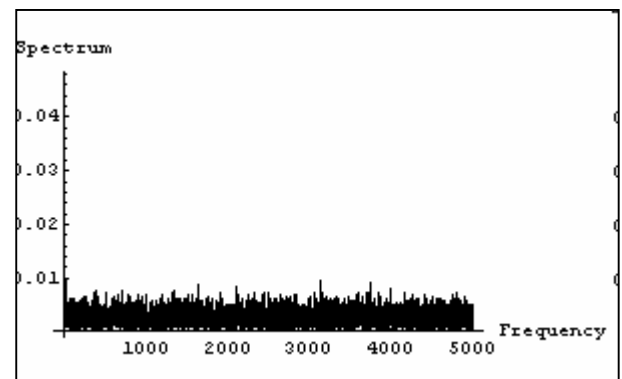


Fig.4 Barkhausen signal containing noise.

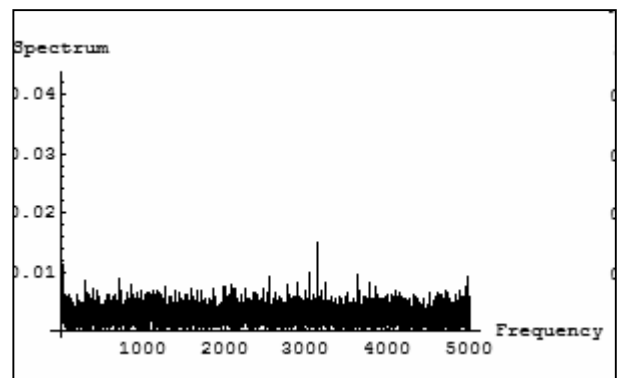
### 3.3 環境ノイズ

環境ノイズの位相は変化する。そこでサーチコイルに誘起する環境ノイズそのものを測定対象とし、揺らぎ周波数特性解析を行うことで、時々刻々変化する環境ノイズを「揺らぎ」の度合いによって分類することを試みる。

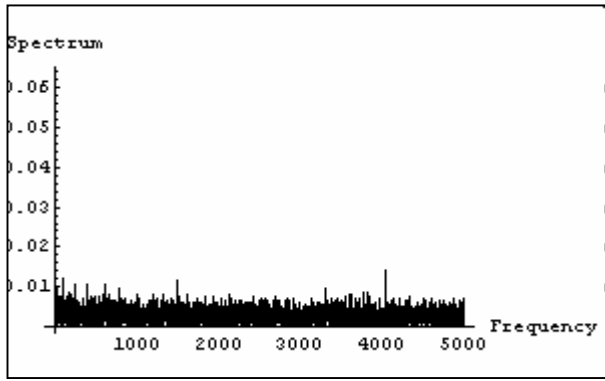
本論文では実験の再現性を確認するため 30 回ノイズを測定し、それぞれについて解析を行った。これらの中から、4 個のフーリエスペクトラム例を Fig.5 に示す。



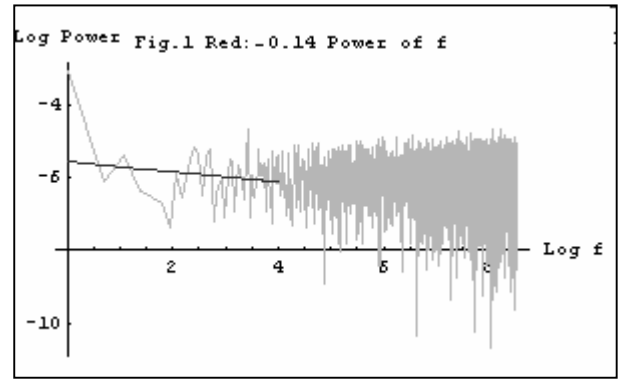
(a) Noise a



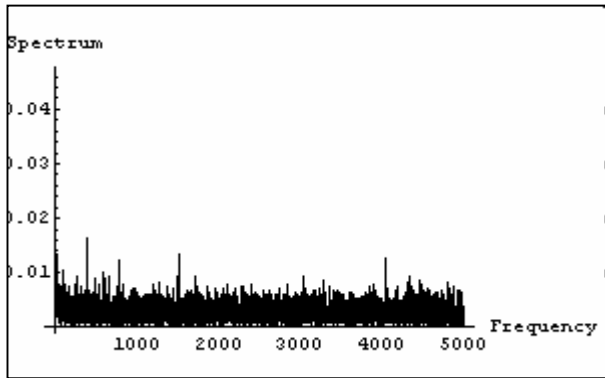
(b) Noise b



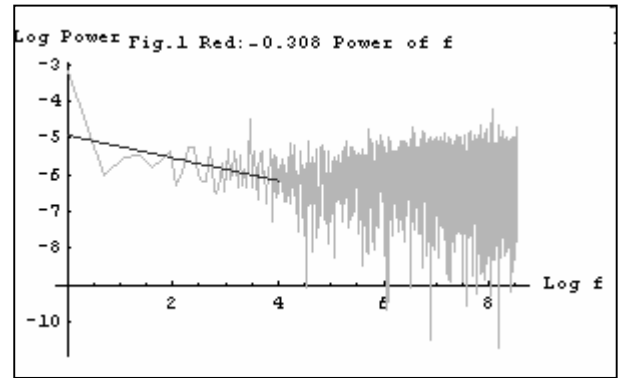
(c) Noise c



(a) Noise a Gradient:-0.14



(d) Noise d



(b) Noise b Gradient:-0.308

Fig.5 Fourier power spectrum vs. frequency characteristics of noise

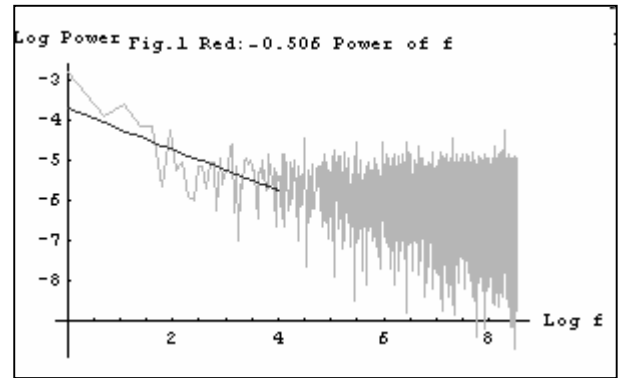
Fig.5 に示す環境ノイズのフーリエスペクトラム間の相関係数は、掲載していないデータも含め、30 信号全てに対して 0.3 以下の値に収束しており、全く同じ環境ノイズはひとつとして存在しないということを示唆した。

低周波領域の揺らぎ周波数特性解析結果を Fig.6 に、高周波領域の揺らぎ周波数特性解析結果を Fig.7 にそれぞれ示す。Fig.6 の結果から、環境ノイズは低周波領域の揺らぎの多寡によって、大きく以下の 4 ケースに大別出来ることが判明した。

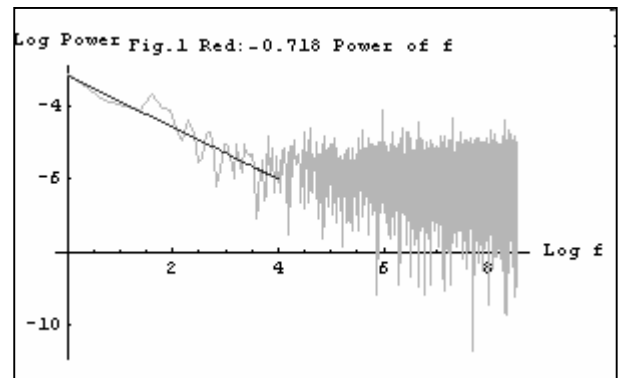
- 揺らぎ周波数特性 「0~0.2」
- 揺らぎ周波数特性 「0.2~0.4」
- 揺らぎ周波数特性 「0.4~0.6」
- 揺らぎ周波数特性 「0.6~」

掲載していないデータを含め、ノイズデータ 30 個は全て上記の 4 分類の何れかに属することが判明した。

Fig.7 に示すように、逆に高周波領域においては環境ノイズの揺らぎ周波数特性に大きな差異は見られなかった。

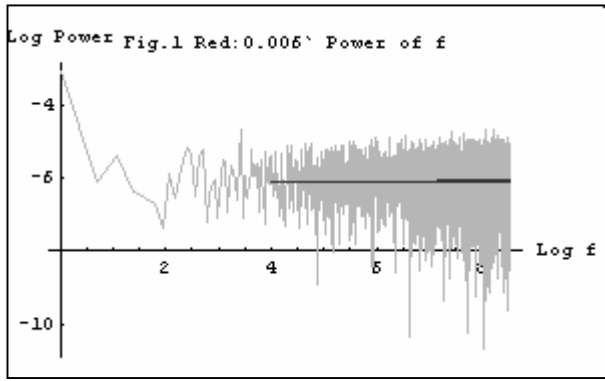


(c) Noise c Gradient:-0.506

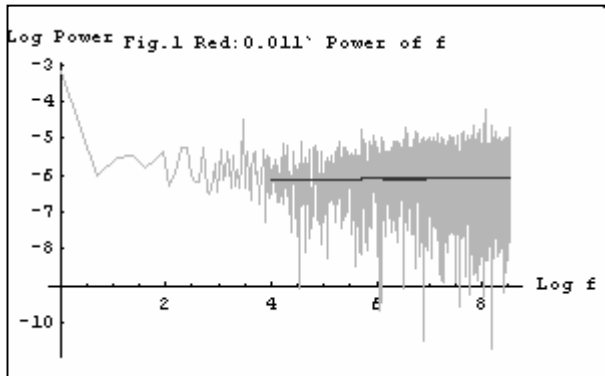


(d) Noise d Gradient:-0.718

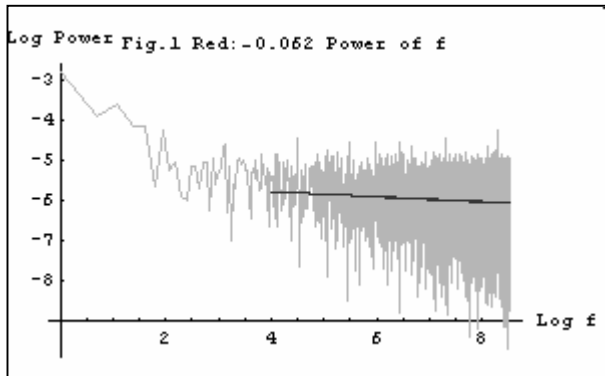
Fig.6 Frequency fluctuations calculated by 1<sup>st</sup> order least squares.



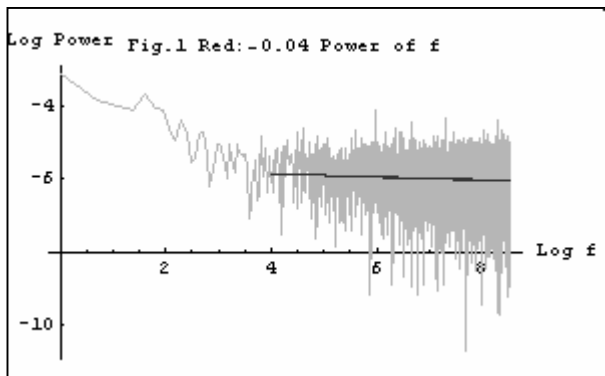
(a) Noise a Gradient:-0.006



(b) Noise b Gradient:-0.011



(c) Noise c Gradient:-0.062



(d) Noise d Gradient:-0.04

Fig.7 Frequency fluctuations calculated by 1<sup>st</sup> order least squares.

#### 4.まとめ

筆者らは強磁性体特有のバルクハウゼン信号の特徴を可視化し、識別・認証する一方法としてゆらぎ周波数解析法を提案している。

本稿では、実際の実務で必然的に伴う環境ノイズ対策を行うため、環境ノイズそのものの揺らぎ周波数特性を解析した。その結果、通常のフーリエスペクトラムの比較のみでは区別出来ない環境ノイズも、揺らぎ周波数解析を用いることによって、大まかに4種類の揺らぎ周波数特性へ分類可能であることを明らかにした。特に、環境ノイズが低周波領域で呈する揺らぎ周波数特性に顕著な差異が存在し、本来全くランダムであるノイズがある程度分類可能である。これは、バルクハウゼン信号を用いた非破壊検査の実現可能性を強く示唆していると考ええる。

#### 参考文献

- 1) 寺西正晃、丸山和夫、早野誠治、齊藤兆古：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、2005年7月、B108
- 2) 勝又理毅、早野誠治、齊藤兆古：バルクハウゼン現象の可視化法に関する一考察、可視化情報シンポジウム、2003年7月、B203
- 3) 野嶋悟士、堀井清之、齊藤兆古：時間領域一次元信号の揺らぎ周波数特性抽出とその一応用、可視化情報シンポジウム、2009年10月、P01-009

# 東京都目黒区回遊路の 1/f ゆらぎ周波数分布による環境評価

Environmental Evaluation of Meguro Relaxation Park in Tokyo by means of the 1/f Frequency Fluctuations

●齊藤兆古/法政大学, 菅井桂子/法政大学

SAITO Yoshifuru/ Hosei University, SUGAI Keiko / Hosei University

●Key words: 1/f fluctuations, image processing, environment evaluation

## 要約

目黒区では、目黒区基本構想・基本計画に定める「ともに つくる みどり豊かな 人間のまち」の実現に向けて、平成 27 (2015) 年度までを目標に「目黒区みどりの基本計画」を打ち立てている。この計画では以下の5つの基本的な考えをもとに、みどりの将来像をイメージしている。すなわち、1) みどりの拠点をつくる(まとまりのあるみどりを保全・創出・育成する)、2) みどりをつなぐ(区内のみどりのネットワーク化推進)、3) みどりをひろげる(地域の特性にあわせた緑化の推進)、4) みどりをつくる活動を後押しする(区民によるみどりの保全・創出・育成の支援)、5) みどりをつくる体制を整える(施策を推進する体制の充実や財源確保を図る)、の5方針である。

これらの基本方針の中でも特に「2. みどりをつなぐ」について、将来像実現のために挙げられた具体的な計画の1つが、みどりの散歩道の整備である。

目黒区のみどりの将来像は、みどりが多く現存する8箇所の「目黒の森」のみどりの拠点とし、それをつなぐ「みどりの軸」を5つの緑化軸としてみどりのネットワーク化を図るものである。現在、区内に残されている自然水面面積約7haのうち、約8割が目黒川である。そのため、前述の緑化軸の中でも特に目黒川緑化軸は、目黒区みどりの基本計画を担う主要な区間と言える。

本報告は9コースあるみどりの散歩道のうち、目黒川緑化軸に含まれる目黒川コースと、西郷山・目黒川コースの2コースに観られる自然の風物が構成する環境の中で、自然界の持つ「いわゆる癒し効果 (healing effect) 」があることで知られる 1/f ゆらぎ周波数分布の調査に関して述べる。

## 1. 緒言

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を備えなければならない。この意味で、これから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

もわかる。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 1)。視覚もまた人間の感性を刺激する重要な感覚のひとつである。プラトンが視覚を聴覚とともに他の感覚より優れたものと位置づけてから、西洋ではこの見解が継承され、伝統的に聴覚と視覚に関わるもののみが芸術とみなされてきた。このような背景から、音楽療法と心理学を結びつけ、様々なアートセラピーの手法なども提唱されている。これは、音や視覚情報が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ことを意味する 2)。

我々は、これまで人間の心理的・精神的な影響の中でも特に癒し効果に焦点を絞り、その評価法として 1/f ゆらぎ周波数を用いた研究をおこなってきた 2-5)。具体的には、音や動きに伴う 1/f ゆらぎ周波数の抽出と可視化である。

## 2. ゆらぎ周波数解析法

「1/f ゆらぎ」は自然界に多く存在し 3)、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。さらに、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 (Discrete Fourier Transform) 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。両対数で図1のように高調波次数と高調波の振幅の関係を描く。図1において、直線の傾きがゼロの場合は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 4)。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 6)。

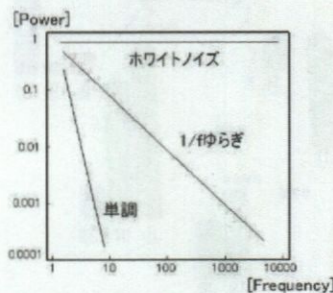


図1) 周波数ゆらぎ

具体的な音データや動画データからの  $1/f$  ゆらぎ周波数抽出法は文献 [3-5] へ詳細に述べられているので、ここでは割愛する。

### 3. 目黒川緑化軸コースの $1/f$ ゆらぎ周波数分布

現在、目黒区では、目黒区基本構想・基本計画に定める「ともにつくる みどり豊かな 人間のまち」の実現に向けて、平成 27(2015) 年度までを目標に「目黒区みどりの基本計画」を打ち立てている 6)。

この計画では、1. みどりの拠点をつくる、2. みどりをつなぐ、3. みどりをひろげる、4. みどりをつくる活動を後押しする、5. みどりをつくる体制を整える、の 5 方針のもとに、みどりの将来像をイメージしている。これらの基本方針の中でも特に「2. みどりをつなぐ」(区内のみどりのネットワーク化推進) について、将来像実現のために挙げられた具体的な計画の 1 つが、みどりの散歩道の整備である。目黒区のみどりの将来像は、みどりが多く現存する 8 箇所の「目黒の森」をみどりの拠点とし、それをつなぐ「みどりの軸」を 5 つの緑化軸としてみどりのネットワーク化を図るものである。

現在区内に残されている自然水面面積約 7 ha のうち、約 8 割が目黒川である。そのため、前述の緑化軸の中でも特に目黒川緑化軸は、目黒区みどりの基本計画を担う主要な区間と言える。

本研究では  $1/f$  ゆらぎ周波数解析を用いた環境評価の 1 方法を提案した。すなわち、9 コースあるみどりの散歩道のうち、目黒川緑化軸に含まれる目黒川コースと、西郷山・目黒川コースの 2 コースを対象として、視聴覚情報の  $1/f$  ゆらぎ周波数分布を調査し、結果として図 2 に示すような  $1/f$  ゆらぎ周波数に拠る癒し効果マップを作成した。図 2 は動画像による解析結果をまとめたものの一部であり、 $1/f$  ゆらぎの含有率をマップ上に示してある。

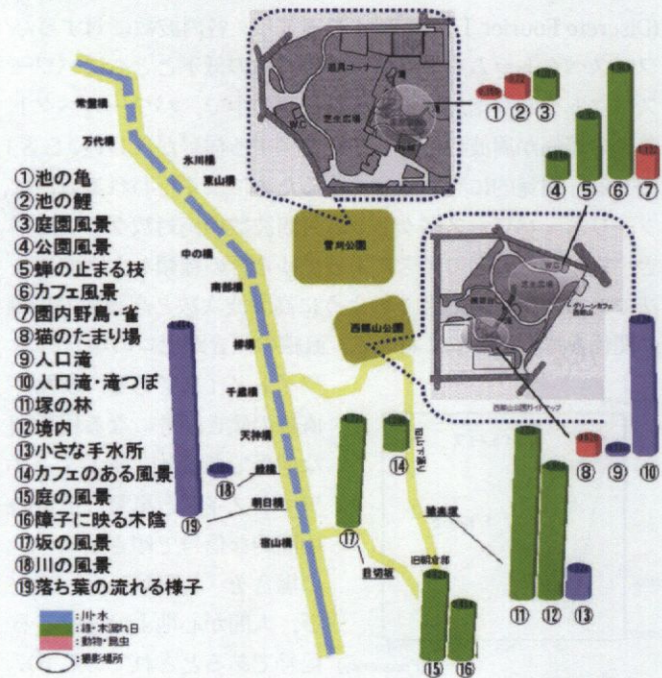


図 2 西郷山・目黒川コースの  $f$  周波数マップ

### 3.1 音データからの $1/f$ ゆらぎ周波数解析結果

野外で録音したデータの解析結果は大きく二分することができた。図 3 にその例を示す。図 3a のように、低周波領域から高周波領域まで傾きがほとんど無くホワイトノイズ状になるものと、図 3b のように中間周波数領域付近で急な傾きを示すものに分かれた。

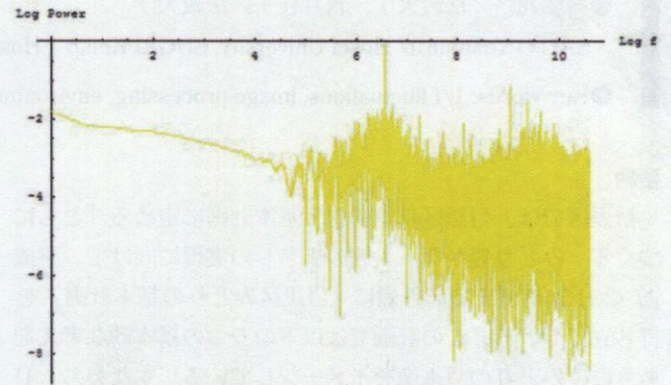


図 3a 野外音の周波数特性例 1

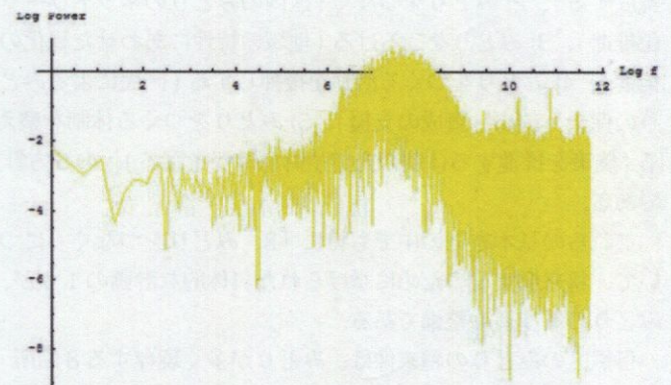


図 3b 野外音の周波数特性例 2

図 3a と 3b はほぼ同一の場所で録音した音源である。両者の音データの違いを実際に聞き比べてみると、大きく違ったのは主に風の音であった。風の音が大きく入ると図 3b のように中間の周波数領域で  $-1.5$  に近い急な傾きを示すことが判明した。試みに急な傾きを示した部分のみの音を抽出し試聴すると、風がマイクに当たるような低い音であった。

また、小川や滝近くの音も図 3b に示すような結果となった。音を試聴すると風や水の音は入っていないようであったが、再び急な傾きを示した部分のみを抽出した場合、風と水のくぐもったような音であった。

### 3.2 動画像からの $1/f$ ゆらぎ周波数解析結果

本報告では、2 種類のカメラを用いて撮影を行った。一般的に市場に出回っている 1 秒間に 30 フレームを撮影するビデオカメラと、1 秒間に 1200 フレームを撮影するハイスピードビデオカメラを使用した。通常スピードのカメラによる映像の解析結果と、人間の目の処理能力を超える動画を撮影した映像の  $1/f$  ゆらぎ周波数解析結果を一部示し、比較を行う。

なお、画像右上の Area は、全体の画素数に対する  $1/f$  ゆら

ぎ周波数を呈する画素数の割合を示す。

Yellow: 6518 [%]  $1/f^{0.93}$ , Area: 1.039 [%]



図 4a 通常スピードのカメラによる風景画像 (庭園)

Yellow: 1/f<sup>0.93</sup>, Area: 2.269 [%]



図 4b ハイスピードカメラによる風景画像 (木のゆれ)

図 4a は通常スピードのカメラによる風景画像で、図中の Area は 1.039% を示している。図 4b はハイスピードカメラによる風景画像で Area は 2.269% である。植物を撮影した画像では、風で揺れる枝葉の先に、木漏れ日を撮影した画像では、主に日光の当たる部分に  $1/f$  ゆらぎ周波数が現れるなど、分布の仕方や全体の画素数に対する  $1/f$  ゆらぎ周波数を呈する画素数の割合、共に通常スピードのカメラで撮影した映像の解析結果と顕著な差異はなかった。

Yellow: 6514 [%]  $1/f^{0.93}$ , Area: 0.048 [%]



図 5a 通常スピードのカメラによる画像 (蝶)

Yellow: 1/f<sup>0.93</sup>, Area: 11.198 [%]



図 5b ハイスピードカメラによる画像 (蝶)

図 5 はどちらも蝶を撮影した結果である。図 5a は通常スピードのカメラによる画像で、 $1/f$  ゆらぎの含有率は 0.048%

である。一方、ハイスピードカメラによる画像である図 5b では、11.2% の含有率を示している。通常スピードのカメラで撮影した場合の計算結果では、昆虫の部分に  $1/f$  ゆらぎ周波数が全く現れなかったが、ハイスピードカメラによる画像では植物に比べると割合は低いものの、昆虫の動きに  $1/f$  ゆらぎ周波数が現れた。

図 6a は通常スピードのビデオカメラで亀を撮影した画像で、水面上に浮かんだ頭部に僅かに  $1/f$  ゆらぎを呈していることがわかる。図 6b は水中の鯉を撮影した結果で、18.7% の  $1/f$  ゆらぎを含有している。通常スピードのビデオカメラでは水の中を泳ぐ鯉や亀、水面を漂うものに対して  $1/f$  ゆらぎ周波数が現れていたが、ハイスピードビデオカメラでは  $1/f$  ゆらぎ周波数が水面に多く現れていた。また水面では、太陽光をより強く反射している部分には  $1/f$  ゆらぎ周波数が顕著に現れないことも判明した。

Yellow: 6542 [%]  $1/f^{0.93}$ , Area: 0.155 [%]



図 6a 通常スピードカメラによる画像 (鯉)

Yellow: 1/f<sup>0.93</sup>, Area: 18.666 [%]



図 6b ハイスピードカメラによる画像 (鯉)

#### 4. まとめ

「目黒区みどりの基本計画」において、将来像実現のために挙げられた計画の 1 つであるみどりの散歩道整備の一環として、視聴覚情報における  $1/f$  ゆらぎ周波数の観点から、回遊路の癒し効果の判定を行い、視覚情報  $1/f$  ゆらぎ周波マップをまとめた。

人間の目の処理能力を超える速さの世界における  $1/f$  ゆらぎ周波数解析も行い、通常のビデオカメラで撮影した場合の解析結果と比較した。通常のビデオカメラとハイスピードビデオカメラに拠る  $1/f$  ゆらぎ周波数解析の比較から、植物や、植物の陰を対象物とした場合、両者に大きな差異はないことが判明した。一方、昆虫や水面といった、一画素におけるの移り変わりや動きが早い対象物については、 $1/f$  ゆらぎ周波数

抽出に大きく差異が現れた。昆虫を普通のビデオカメラで撮影した場合、ほとんど  $1/f$  ゆらぎ周波数を呈さない結果となったが、ハイスピードカメラで撮影した場合には  $1/f$  ゆらぎ周波数が現れた。また水面を撮影した場合も同様で、ハイスピードカメラによる撮影は顕著に水面から  $1/f$  ゆらぎ周波数を抽出した。水中を泳ぐものを対象とした場合に、水面のゆらぎ周波数が顕著なため、通常のビデオカメラによる撮影で十分であると考えられる。

以上の結果から、人間の目からの情報のみで  $1/f$  ゆらぎ周波数を感じようとした場合には、あまり感じ取れないゆらぎでも、人間の眼球に拠る視覚情報処理の限界を超える部分にしっかりと  $1/f$  ゆらぎ周波数を呈していることが判明した。音環境における回遊路調査では、風や水の音が中間周波数領域に特徴を与えることが判明した。

#### 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) 加藤千恵子, 齋藤兆古, "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", 芸術工学会誌 No.46, Mar.2008, pp.81-89.
- 3) 齋藤兆古, 宮坂総, 加藤千恵子, "1/f ゆらぎの可視化", 可視化情報 Vol.28, Suppl.No.1, July. 2008, No.P01-06
- 4) 菅井桂子, 齋藤兆古, "サウンドデータにおける  $1/f$  ゆらぎ周波数の抽出", 第 51 回自動制御連合講演会, No.215, Nov. 2008. pp.70-71.
- 5) 菅井桂子, 齋藤兆古, 堀井清之, "人間の動作に伴う  $1/f$  ゆらぎ周波数の抽出", 可視化情報 Vol.28, Suppl.No.1, July. 2008, No.P01-05
- 6) 佐々木松栄, 山本和夫, 宮崎敏子, 長澤英男, 立川弘: みどりの散歩道目黒川コース、緑の散歩道コースガイド、1993年



# ECT センサに関する準解析的方法によるインピーダンス対 周波数特性の可視化 — 導体間のキャパシタンスについて —

細原 隆史 , 齊藤 兆古(法政大学大学院) , 堀井 清之(白百合女子大学)

## Impedance vs. frequency characteristics Visualization of ECT sensor by semi-analytical simulation method

—Consideration of capacitive effects among the conductors—

Takafumi HOSOHARA, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

### ABSTRACT

For electromagnetic field analysis, we have previously proposed a semi-analytical method, which has made it possible to simulate the complex high frequency electromagnetic field distributions not obtainable by the conventional numerical schemes, such as finite elements and boundary elements means. An idea of this method is that target conductive region can be subdivided into small cylindrical conductors having simple geometrical shape. Resistance, inductance and capacitance of each subdivided conductor are analytically calculated to derive an equivalent circuit. Solving this circuit makes it possible to compute electromagnetic field distribution.

In this paper, we have tried to visualize the impedance vs. frequency characteristic of circular shaped coil which constitutes an eddy current sensor (ECT). This analysis fully takes the capacitive effects among the conductors into account. Thereby, it is possible to visualize the impedance vs. frequency characteristics of the ECT.

**Keywords** : semi-analysis, capacitive effect, impedance vs. frequency characteristic

### 1. 緒 論

小型・軽量・高性能な個人用計算機( Personal Computer, 以下、PC と略記) は、その多機能化と低価格化により広汎な普及を遂げている。従来、電磁界の数値解析は極めて大規模の計算となるため、大型計算機で行われていた。しかし、近年の高性能 PC の普及は電磁界解析を個人レベルで可能とし、商用電磁界解析パッケージも販売されるに至っている。また、電気電子機器の高性能化に伴い、高周波動作を前提とする磁気素子が増加している。これは、電磁界解析において、磁気素子の抵抗やインダクタンスを集中定数として考えることが困難なことを意味している。一方、電磁界解析は、電磁界を支配する方程式が偏微分方程式であることから、微分を有限差分で直接置き換える有限差分法(Finite Difference Method)、変分原理に基づく有限要素法(Finite Element Method)などの数値解析法で行われる。また、電磁界が無遠点まで広がる開領域問題に対しては、偏微分方程式の基本解を仮定した境界要素法(Boundary Element Method)などの積分方程式形解法が

採用される。何れの数値解析法も空間・時間領域を細分化し、細分化された個々の領域で解析的な関数を仮定して解くのが共通の特徴である。

本論文で述べる準解析的方法とは、古典的な解法による解析解と、現代の問題対象領域を細分化して解く方法を組み合わせたものである。問題対象領域を細分化する作業は、従来の数値解析法と同じである。しかし、細分化する過程は大幅に異なる。従来の数値解析法は、細分化された個々の領域で比較的簡単に解析的な解を仮定するため、細分化の方法に比較的自由度が高い。しかし、準解析的方法は、細分化された個々の領域で解析解を仮定するため、細分化の方法は限定され、自由度は少ない。

しかしながら、従来の方法は、細分化した領域で、解の形を仮定するのみであるから、高精度な解を得るためには大規模計算が必要となる。他方、準解析的方法は、細分化する時点で解析解を前提とするため、比較的小規模な計算で高精度な結果が得られる。また、解析解の組み合わせで定式化を行うため、閉領域・開領域に無関係に両者を含んだ解を与える。すなわち、有限要素法と境界要素法、ま

たは、微分方程式法と積分方程式法を包含した解析法が準解析的方法である。

このような観点から筆者らは準解析的方法を提唱し、その有効性を従来の数値解析では不可能であった変位電流を考慮した問題を解析可能とすることで報告してきた<sup>(1)(2)</sup>。

本論文では、従来の ECT センサでは無視されてきた、導体間のキャパシタンスを考慮した場合のコイルの共振現象の解析を行い、ECT センサのインピーダンス対周波数特性を可視化した。

2. 準解析的方法

2.1 原理

ここでは、本論文で採用する準解析的方法の原理を説明するため、Fig.1(a)に示す有限長ソレノイドコイルのインピーダンスの周波数特性について考える。

まず、このコイルを Fig.1(b)のように平行に並んだ円形コイルの集合に置き換える。そのため、元のコイルの巻数が円形コイルの個数になる。次に、Fig.1(c)のように円形コイルをそれぞれに内接するような正多角形に置き換える。そして、得られた正多角形で、各辺に自己インダクタンスと抵抗、さらに辺間の相互インダクタンスとキャパシタンスを解析的に計算し、これらを組み合わせて Fig.1(d)に示す回路を仮定し、全体のインピーダンス対周波数特性を求める。

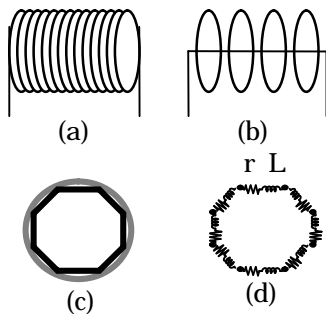


Fig.1 model of coil

2.2 システム方程式

Fig.2(a),(b)に示す巻数 2、半径 a の円に内接する角型有限長ソレノイドコイルを考える。

まず、この円形コイルを簡単のため Fig.2(c),(d)に示す 4 角形の等価回路へ変形する。Fig.2(c)はコイルの上部のみの等価回路を表し、Fig.2(d)はコイルの上部の一边とコイルの下部の等価回路を表している。4 角形各辺の導体の電気抵抗 r と自己インダクタンス L を解析的に計算する。それらは次式で与えられる。

$$r = \rho \frac{l}{\pi b^2} \tag{1}$$

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} l + \frac{\mu_0}{2\pi} l \left[ \ln\left(\frac{2l}{a}\right) - 1 \right] \tag{2}$$

ここで、 $\rho$ 、 $b$ 、 $l$ 、 $\mu_0$  はそれぞれ導体の抵抗率、巻線径、一辺の長さ、真空中の透磁率である。

また、Fig.2(c),(d)のモデルの導体間に磁束による相互結合が存在する。この磁氣的結合は以下の相互インダクタンス  $M_{ij}$  で表わされる。

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{1 + \sqrt{1 + d_{ij}^2}}{d_{ij}}\right) - \sqrt{1 + \left(\frac{d_{ij}}{l}\right)^2} + \frac{d_{ij}}{l} \right] \tag{3}$$

さらにそれぞれの導体間に電界系の結合も存在し、その結合は導体間のキャパシタンス  $C_{ij}$  で表わされる。

$$C_{ij} = \frac{\epsilon_0 S}{d_{ij}} \tag{4}$$

ここで、下添え字  $i,j$  は  $i$  番目と  $j$  番目の導体を示し、 $d_{ij}$  は  $i$  番目と  $j$  番目の導体間の距離である。面積  $S$  は導体間の平行部分の長さ（導体間の角度）に依存する。

また、Fig.2(c),(d)において、 $V$  は入力電圧を示し、 $r'$  と  $L'$  は個々の導体の電気抵抗  $r$  と自己インダクタンス  $L$  の半分値へ按分してある。

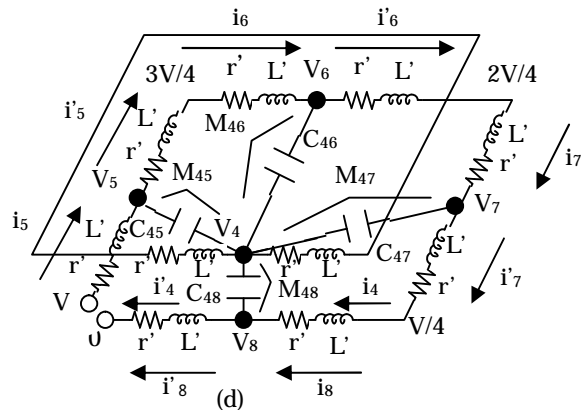
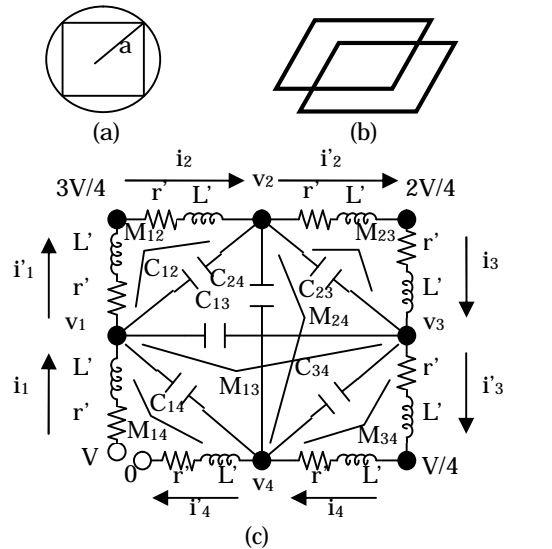


Fig.2 Equivalent circuit

ここで、印加電圧を  $V$  とし、 $X$ 、 $Y$  を式(5b)(5c)のようにそれぞれ状態変数ベクトルと入力ベクトルとすれば、この等価回路の定常状態におけるシステム方程式は次式で与えられる。

$$Y = DX \tag{5a}$$

$$X = \begin{bmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_{K \cdot m} & i'_1 & i'_2 & \cdots & i'_{K \cdot m} \\ & & & & v_1 & v_2 & \cdots & v_{K \cdot m} \end{bmatrix}^T \tag{5b}$$

$$Y = \begin{bmatrix} V & \frac{K-1}{K}V & \cdots & \frac{1}{K}V & & & & \\ & \underbrace{-\frac{K-1}{K}V}_{K \cdot m \text{ 個}} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \\ & & & & & & & \underbrace{0}_{K \cdot m \text{ 個}} \end{bmatrix}^T \tag{5c}$$

ここで、 $K$  はコイルの角数であり、 $m$  はコイルの巻数である。また、 $K \cdot m$  行  $K \cdot m$  列の零行列を  $0_{K \cdot m \times K \cdot m}$ 、単位行列を  $E_{K \cdot m \times K \cdot m}$  とすると、行列  $D$  は次式で与えられる。

$$D = \begin{bmatrix} R+L & 0_{K \cdot m \times K \cdot m} & E_{K \cdot m \times K \cdot m} \\ 0_{K \cdot m \times K \cdot m} & R+L & -E_{K \cdot m \times K \cdot m} \\ E_{K \cdot m \times K \cdot m} & -E_{K \cdot m \times K \cdot m} & 0_{K \cdot m \times K \cdot m} \end{bmatrix} \tag{6a}$$

$$R = \begin{bmatrix} r & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & r & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r \end{bmatrix} \tag{6b}$$

$$L = \begin{bmatrix} j\omega L & j\omega M_{12} & \cdots & j\omega M_{1K \cdot m} \\ j\omega M_{21} & j\omega L & \cdots & j\omega M_{2K \cdot m} \\ \vdots & \vdots & j\omega L & \vdots \\ j\omega M_{K \cdot m 1} & j\omega M_{K \cdot m 2} & \cdots & j\omega L \end{bmatrix} \tag{6c}$$

$$C = \begin{bmatrix} -j\omega \sum_{j=1}^{K \cdot m} C_{1j} & jaC_{12} & \cdots & jaC_{1K \cdot m} \\ jaC_{21} & -j\omega \sum_{j=1}^{K \cdot m} C_{2j} & \cdots & jaC_{2K \cdot m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ jaC_{K \cdot m 1} & jaC_{K \cdot m 2} & \cdots & -j\omega \sum_{j=1}^{K \cdot m} C_{K \cdot m j} \end{bmatrix} \tag{6d}$$

式(6a)に示されるように、行列  $D$  は正方行列であるから、 $D$  の逆行列を式(5a)のシステム方程式の両辺にかけることにより、式(7)を得ることが出来る。

$$X = D^{-1}Y \tag{7}$$

従って、式(7)より得られた  $X$  から、 $i$  番目の導体に流れる電流を  $I_i$  とすると、電流ベクトル  $I$ 、総電流  $i$ 、及びイ

ンピーダンスの大きさ  $|Z|$  は次式によって求められる。

$$I = [I_1 \quad I_2 \quad \cdots \quad I_{K \cdot m}] \tag{8}$$

$$i = \sum_{j=1}^m |I_{1+K(j-1)}| \tag{9}$$

$$|Z| = \frac{V}{\sum_{j=1}^m |I_{1+K(j-1)}|} \tag{10}$$

### 3. 例題

準解析的方法による計算例として、Table 1 に示す条件の場合のコイルのインピーダンス対周波数特性についての計算を行った。

Table 1 Parameter of coil

コイルの巻線の材料	銅
銅の抵抗率 $\rho$	$1.69 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$
半径 $a$	5[cm]
角数 $K$	4[角]
巻数 $m$	50[回]
巻線径 $b$	0.4[mm]
印加電圧	1[V]

Fig.3 にインピーダンス対周波数特性を示す。この結果より、この場合のコイルの共振周波数は 90MHz 周辺の高周波領域に存在することがわかる。

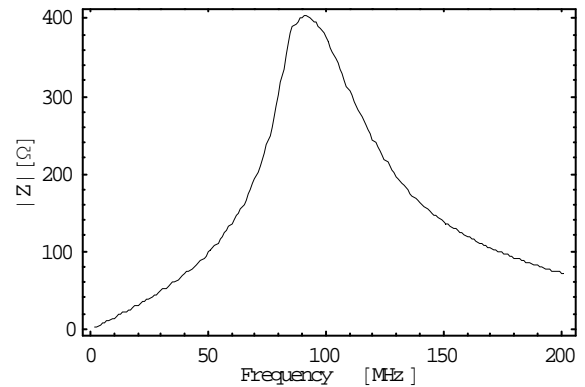


Fig.3 Impedance vs. frequency characteristics

次に、Table 1 において角数を 4、5、6 と変えた場合のインピーダンス対周波数特性についての計算結果を Fig.4 に示し、Table 1 と同じパラメータで作成したコイルの実験結果を Fig.5 に示す。この結果より、コイルの角数を増やし円形に近づけるとコイルの共振周波数は下がり、共振時のインピーダンスは上がる。また、この傾向は実際の共振型 ECT の周波数特性と定性的に一致する。しかし、

Fig.4 と Fig.5 を比較すると、計算値の共振周波数は実験値よりも高く、共振時のインピーダンスは小さくなる。これは、導体間の角度や導体の分割個数の増加等のことを考慮することにより、解決するのではないかと考えられる。

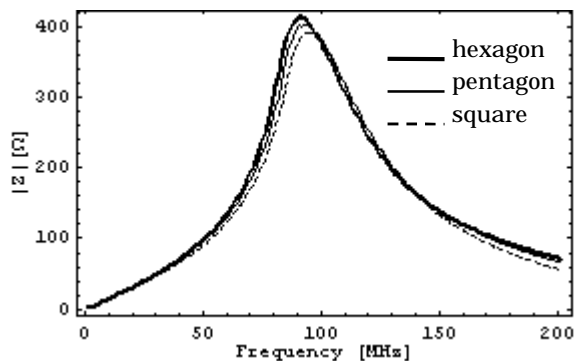


Fig.4 The relationship between numbers of n-angle and resonance frequency

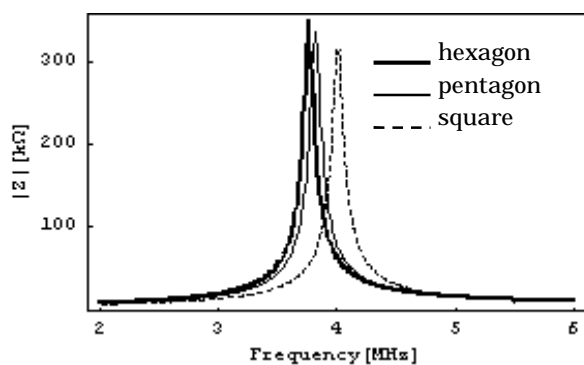


Fig.5 Experiment results

#### 4. まとめ

本論文では、コイルの導体間のキャパシタンスを考慮することで共振型 ECT のシミュレーションモデルを構築した。

その結果、従来の有限要素法や有限差分法などで変位電流を勘案した解析が不可能であったが、本論文で提案する準解析的方法は一次コイルが共振を呈するインピーダンスの周波数特性を定性的に可視化可能とした。

#### 参考文献

- 1) T.Takano, S.Hayano, and Y.Saito, "Coil impedance computation having arbitrary geometrical shape," IEEE PESC'98, Vol.2, May (1998).
- 2) 渡澤泰之、早野誠治、斎藤兆古、"準解析的方法による電磁界解析手法の提案、" マグネティックス研究会資料、MAG-00-117、(2000)
- 3) 高野貴正、早野誠治、斎藤兆古、"任意形状コイルのインピーダンス対周波数特性解析に関する研究"、日本シミュレーション学会、第19回計算電気・電子工学シンポジウム、1-II-14、(1998.)1
- 4) 黒田洪平、斎藤兆古、"準解析的手法による渦電流分布の可視化"、法政大学情報メディア教育研究センター研究報告 Vol.21、(2008)

## 『銀河鉄道の夜』における「青」について

—離散値系ウェーブレット多重解像度解析—

井波 真弓<sup>○</sup>(白百合女子大学), 齋藤 兆古(法政大学), 堀井 清之(白百合女子大学)

About "Blue" in "Gingatsudo no Yoru"

-Discrete Wavelets Multi-Resolution analysis -

Mayumi INAMI, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

### ABSTRACT

The Color vocabulary in "Gingatsudo no Yoru (Night of Galaxy Railway)" was examined by the discrete wavelets multi-resolution analysis. The aspects for analysis has employed following three elements of colors: "Ginga", the galaxy which represents a white color, "Black" a color to be opposed to the galaxy and "Blue" which is well known as the main color of Miyazawa Kenji. He uses more than hundred colors, in which "Blue" is a numerous.

As a result, it is verified that "Blue" is divided with "Black" and become a peculiarity color in this work. However, the luminosity is low comparing with "Black", "Blue" do not stand out so much in the visual or phenomenal world. This means that a different phenomenon is realized from the visual or phenomenal world through literature work by letters.

**Keywords:** Ginga, Black, Blue, Multi-resolution analysis, Wavelet transform

### 1. 緒 論

本稿の目的は離散値系ウェーブレット多重解像度解析を用いて『銀河鉄道の夜』における「銀河」と「黒」がどのように対立するか、また「青」がどのように関連性を持つのかを検証することで作品に表現される感情の揺れを考察することである。

宮沢賢治(1896~1933)は岩手県に生まれ、盛岡高等農林学校(現、岩手大学)農芸化学科を卒業、同研究生を終了した。家業の質・古着商に就くが、信仰をめぐり父と対立して上京する。その後、妹トシの病気を機に帰郷し、稗田農学校(後の県立花巻農学校)の教諭となる。この間活発な創作活動を展開するが、社会的矛盾に目覚め、農学校を退職し、羅須地人協会を設立して農村文化の交流を目指したが、肺を病み病床にふした。

『銀河鉄道の夜』<sup>1)</sup>は大正末に書き始められ、大規模な改稿を経て、最晩年まで推敲が続けられたが、作者の死によって未定稿のまま残された。作品は後に初期形と最終形の本文にまとめられることとなった。最初の稿では、銀河鉄道を旅するジョバンニに「セロのやうな声」が何度も聞こえ、その声に導かれるようにジョバンニには固い決意をするというものであったが、大規模な改稿後、「セロのやうな声」は削除され、様々な旅人との出会いの中からジョバンニは自発的に決意を固める形に変更さ

れた。妹トシの死を契機とし、宇宙空間に対する感心、信仰と科学の合一という課題から最初の構想が得られ、ジョバンニの孤独にはトシの死や友人との離別を体験した宮沢賢治の孤独が色濃く重ねられていた。宮沢賢治の代名詞<sup>2)</sup>と言えるほどの賢治作品のシンボルが『銀河鉄道の夜』あり、銀河系や天の川に代表される賢治の天体空間のシンボルが「銀河」である。車窓に展開する壮大な異界・異空間の幻想的イメージと、車内での人間のドラマ、天上世界と地上世界の内外呼応している。村瀬学<sup>3)</sup>は賢治がある種の特徴的な銀河のイメージかもしれないため、「銀河」の描写、特に銀河の「物語としての銀河」と「事実としての銀河」の二重性を描き出すことに力を注いだとする。それは前半の「透明な、光の、明るい銀河」から後半に「黒い銀河」へと作品構成上の絶妙なコントラストにみられると指摘する。上村くには<sup>4)</sup>作品の闇の描写に注目し、暗黒が光をさらに際立たせ、闇の重要性が光の重要性と正比例すると述べ、黒と光との密接な関係性を主張し、黒、光、白の語に注目している。田中雅史<sup>5)</sup>はジョバンニの状況と色彩などのイメージにおいて「黒」そして「白」という色彩のイメージが多くの場合交互に現れるのは『銀河鉄道の夜』の全体を通しての特徴であるとする。銀河や天の川などの白というイメージの関連性が冒頭からはっきり形成されており、それが話しの展開とともによ

り密接になっていく。この色彩のイメージは連鎖的に増殖し、ほかのイメージやモチーフと絡み合うことで、作品の中で重要な位置を占めていると指摘する。

賢治の使用する色彩語彙は100以上に及び、そのうちもっとも使用頻度の高いのは青系であることが既往研究<sup>6)</sup>で得られている。小沢俊郎<sup>7)</sup>は賢治の場合の色彩の主調は青であるが、単なる青でなく、青の感じ方や光線とのかかわりがあるとす。宮沢賢治<sup>8)</sup>は賢治作品全体から青の使い方を天体用語、光や煙を包含する抽象語、精神的にはマイナスの表出の三つに分けている。童話についていえば、マイナスの青系は少なく、心が充実している時の色彩として使用されているようだ<sup>9)</sup>と述べている。更に、黒と白の色彩使用については心の不満蓄積の色である可能性が強く、青や赤がそれらを爆発させ、精神の発散への向かわせる色彩ではないかと考察している。

『銀河鉄道の夜』における「銀河」は銀河系や天の川に代表される賢治の天体空間のシンボルであり、色彩としての白や光として関連付けられている。白と黒は交互に現れ、白や光とともに表現される「銀河」は黒とのコントラストをみせるだけでなく、ほかのイメージやモチーフと絡み合うことで、作品の中で重要な位置を占めている。「青」は賢治の主調色であり、その費用頻度と種類は多様で、天体や光との関連性や賢治の精神との関わりが指摘されている。しかし、それらの語に焦点をあて、作品全体でどのように変化しているかを可視化したものはない。そこで、本稿では語「銀河」「黒」「青」をキーワードとし、離散値系ウェブレット多重解像度解析を用い、「銀河」と「黒」の対立に「青」がどのように関連性を持つのかを検証することで作品に表現される感情の揺れを考察する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析対象

『銀河鉄道の夜』の最終形のあらすじを以下に記す。本稿では現在最も整理されているとされる『新校本宮沢賢治全集』<sup>10)</sup>収録のテキストを用いることとする。

#### 1. 午後の授業

ジョバンニは朝は新聞配達、午後は活版所で活字拾いのアルバイトをしていて疲れている。眠くて勉強に集中できず、先生の銀河についての質問にも答えられない。ザネリは笑い、カンパネルラは答えられるはずなのにジョバンニに同情して答えない。そこで先生は銀河は星の集まりだと教え、今日は銀河のお祭りだから外に出て空を見るように言って授業を終える。

#### 2. 活版所

放課後、カンパネルラやザネリたちは、星祭りに使う明かりを作る烏瓜を取りに行く相談をするが、ジョバンニは町の活版所へ活字拾いのアルバイトに行く。夕方、仕事終え、銀貨を一

枚もらい、パンと角砂糖を買って家に帰る。

#### 3. 家

裏町の小さな家に帰り夕食をとる。病弱な母と、北方に漁に行っているはずの父の帰りを待っている。ザネリはジョバンニの父が牢屋に入っていると噂したり、ラッコの上着を土産に返って来ると言って冷やかしたりする。パンパネルラとは父親同士も友人で仲が良かった。以前はパンパネルラとよく遊び、パンパネルラの家のアルコールで走る自動車でも遊んだ。配達されなかった牛乳をもらいがてら町に出て、一時間半ほど銀河のお祭りを見てくとジョバンニは家を出る。

#### 4. ケンタウル祭りの夜

ジョバンニが機関車みたいに坂を下りて行くとザネリに会った。ザネリは再びラッコの上着が来るとジョバンニを馬鹿にして去った。時計屋の前に来ると、円くて黒い星座早見があった。ジョバンニはお祭りでにぎわう町を抜け、町外れの牛乳屋に行ったが後で来るようにと言われ、町に戻る。クラスメイトに出会うと、また、ラッコの上着が来ると冷やかされる。ジョバンニは寂しくなって一人黒い丘に登った。

#### 5. 天気輪の柱

ジョバンニは一人丘の頂の天気輪の柱に身を投げ出す。空には天の川が南北に流れて遠い原野を夜汽車が走っていた。町の灯が星のように見え、ジョバンニは夢の中に入る。

#### 6. 銀河ステーション

銀河ステーションという声に気がつくと、ジョバンニは星がきらめく中を走る列車に乗っていて、前の座席にはパンパネルラが座っていた。列車は秋の天の川のほとりの白鳥座の手前を南に向かって走っていた。

7. 北十字とプリオシン海岸 やがて白鳥駐車場の停車時間に二人は列車を降りて、銀河の畔のプリオシン海岸に行き、くろみの化石を拾い、獣化石発掘現場を見学する。

#### 8. 鳥を捕る人

再び走り出すと鷺や雁を捕まえてお菓子にする人のよい鳥を捕る人が乗ってくる。鳥を捕る人は二人や隣の席の灯台守にお菓子をあげたり、銀河の中で鳥を捕まえて菓子にしたりする。押し花にされたお菓子の味は格別だった。

#### 9. ジョバンニの切符

車掌が切符を調べに来た時、ジョバンニはポケットから緑色の紙を渡す。それは天上にさへ行ける切符だった。先の停車場の手前で取り鳥が消え、りんごの匂いととともに小さい姉弟を連れた青年が乗ってくる。船が難破してここへ来たという。青年や姉と一番の幸いや、本当の神の話をする。カンパネルラがその姉の方とばかり話している時、ジョバンニは疎外感を感じる。列車はコロラド高原らしい所を過ぎ、インディアン出合い、架橋演習と発破、双子の星、蠍の火の近くを通過し、サザンク

ロスに着くと、青年たちは下車する。カンパネラと二人だけになって、本当の幸いを探し、どこまでも一緒に行こうと約束したが、石炭袋のところで、カンパネラの姿が突然消えてしまう。と同時にジョバンニは目を覚まし激しく泣く。ジョバンニは町へ戻り、カンパネラの、友人を救おうとした自己犠牲的死を知る。カンパネラの父は、ジョバンニに父の帰宅を告げる。

## 2. 2 キーワードの選択と方法

Table 1 Number of elements.

場面	銀河	黒	青
1, 午後の授業	27	3	1
2, 活版所	1	0	2
3, 家	1	0	1
4, ケンタウル祭りの夜	6	6	4
5, 天気輪の柱	6	3	3
6, 銀河ステーション	7	3	9
7, 北十字とプリオンシ海岸	4	3	6
8, 鳥を捕る人	4	3	2
9, ジョバンニの切符	30	22	21
合計	86	43	49

Table 2 Selected elements.

要素	事例
第1要素 「銀河」	白系の色彩や光を表すものとしての星, 銀河, 天の川など.
第2要素 「黒」	光が欠如する真っ暗, 薄暗いや色彩としての黒, 黒系の色彩など.
第3要素 「青」	色彩としての青, 青系の色彩, 青ざめた, 青白いなど.

Table 3 Examples of element.

要素	事例
第1要素 「銀河」	<ul style="list-style-type: none"> <li>このぼんやりと白い銀河を大きないゝ望遠鏡で見ますと、もうたくさん<small>の小さな星</small>に見えるのです。</li> </ul>
第2要素 「黒」	<ul style="list-style-type: none"> <li>すぐ前の席に、ぬれたやうにまっ黒な上着を着た、せいの高い子供が、窓から頭を出して外を見てゐるのに気がつきました。</li> <li>…黒い川の水はちらちら小さな波をたてゝ流れてゐるのが見えるのでした。</li> </ul>
第3要素 「青」	<ul style="list-style-type: none"> <li>草の中には、びかびか青びかりを出す小さな虫もゐて、…</li> <li>信号標のあかりは汽車が通るときだけ青くなるやうになってゐたんだ。</li> </ul>

1) 作品の構成を継時的に見るために『銀河鉄道の夜』に現れる三つの語、「銀河」、「黒」、「青」をキーワードとして選び章ごとの使用頻度を調べた。キーワードは著者が作品を読み、語を選択した。Table 1は『銀河鉄道の夜』におけるキーワードの選択結果であり、Table 2は作品における

キーワードの選択事例である。Table 3は作品に現れる文章にキーワード「銀河」「黒」「青」を含むものの例をあげた。

2) 得られたデータに離散値系ウェーブレット変換の多重解像度解析を適用する。

## 2.3 分析

「銀河」、「黒」、「青」の要素にベクトルの概念を用いる。

「銀河」を基準ベクトルとして、ベクトルをグラムシュミットの方法によって全て直交化し、重複要素を除く。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。正規化されたデータにウェーブレット多重解像度解析を適用する。本研究では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次を採用する。

離散値系ウェーブレット変換で取り扱われるデータの個数は2のべき乗である。このため、 $n=16$ 個の要素からなるデータベクトルを考える。このベクトルの最初から9番目の要素まではTable 1の値で構成されており、残り7要素の値はゼロである。この様にして得られた行ベクトルを  $\mathbf{Y}$  とする。さらに、 $\mathbf{W}$  はウェーブレット変換行列である。

ウェーブレット変換行列を  $\mathbf{W}$  とすればウェーブレットスペクトラム  $\mathbf{S}$  は次式で与えられる。

$$\mathbf{S} = \mathbf{WY} \quad (1)$$

離散値系ウェーブレット変換で、特にドビッシーの2次を採用した場合、ウェーブレットスペクトラムの第1レベル(ウェーブレットスペクトラムベクトル  $\mathbf{S}$  の最初の1要素を除き、他を全てゼロとする)は全要素の平均値に対応し、第2レベル(ウェーブレットスペクトラムベクトル  $\mathbf{S}$  の第2要素のみ残り、残りの要素をゼロする)は全データを前半と後半に分けた場合の変化率、さらに第3レベル(ウェーブレットスペクトラムベクトル  $\mathbf{S}$  の第3,4要素のみ残り、残りの要素をゼロする)は全データを4分割してグループしたデータ間の変化率を意味する。従って、データの個数が  $n=2^X$  であるならば、第  $(X+1)$  レベルは、隣接要素間の差を意味する。わかりやすくするため、具体的な例として、式(1)のベクトルが

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

で与えられた場合を考える、このデータに対するドビッシーの

2次基底によるウェーブレット変換行列は

$$W = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられるから、式(1)からこの例でのウェーブレットスペクトラム  $\mathbf{S}$  は

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ (a+b)-(c+d) \\ \sqrt{2}(a-b) \\ \sqrt{2}(c-d) \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる.

したがって、この例でのウェーブレット多重解像度解析のレベル1は、

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{(0)} &= W^T \mathbf{S}^{(1)} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

同様に、レベル2,3は、それぞれ式(6)と(7)で与えられる.

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{(1)} &= W^T \mathbf{S}^{(2)} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ a+b-(c+d) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b-(c+d) \\ a+b-(c+d) \\ -(a+b)+c+d \\ -(a+b)+c+d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{(2)} &= W^T \mathbf{S}^{(3)} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{2}(a-b) \\ \sqrt{2}(c-d) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a-b \\ -a+b \\ c-d \\ -c+d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

また、式(5)から(7)式より

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{D}^{(0)} + \mathbf{D}^{(1)} + \mathbf{D}^{(2)} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \\ a+b+c+d \end{bmatrix} + \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a+b-(c+d) \\ a+b-(c+d) \\ -(a+b)+c+d \\ -(a+b)+c+d \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a-b \\ -a+b \\ c-d \\ -c+d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

が成り立つ<sup>9),10),11)</sup>.

以上の例と同様にしてウェーブレット多重解像度解析はなされる.



### 3. 結果と考察

『銀河鉄道の夜』の要素ベクトルに離散値系ウェーブレット多重解像度解析を適用した結果を Fig. 1 に示す。横軸は本作品の最初から最後まで章ごとに構成要素を時系列に並べた。縦軸はキーワードの章ごとの頻度の変化率を表す。グラフは左より実線は「銀河, Ginga」, 鎖線は「黒, Black」, 一点鎖線は「青, Blue」を表す。

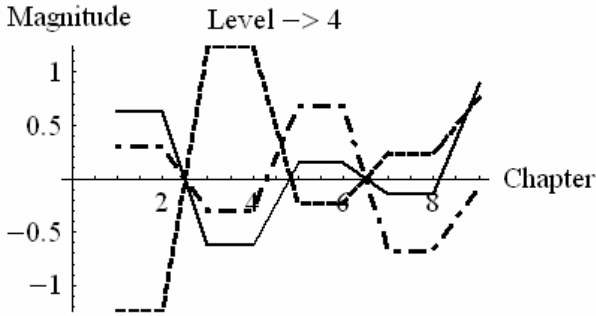


Fig. 1 Level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis: patterns of 3 keywords.  
Solid: Ginga, Dotted: Black,  
Alternate long and short dash: Bleu.

色彩語は作者によって固有に使われ、想像力を生み出す大きな要素となっていると考えられる。また、色彩によって読み手に与える印象は大きく変化する。本作品においては全体の構成に関わる「銀河」のイメージの変化や銀河との色彩のコントラストが指摘されているが、全体の構造や「青」との相互関係は明らかにされていない。本稿では作品の始まりから終焉にかけてキーワードを取り上げて可視化することで、作品全体の流れの中での客観的考察を可能にした。

本作品の解析結果から「銀河」と「青」は関連性があり、「銀河」と「黒」、「黒」と「青」のコントラストが認められるが、夢が進行するにつれて、「黒」とのコントラストが解消されていくことが示唆された。

実際のデータ数としては9章までであるが、解析には2のべき乗のデータが必要であるため最後の章に10から16章をゼロデータとした<sup>9)</sup>。また、結果はゼロを追加した章を削除してある。離散値系ウェーブレット多重解像度解析は、全体、半分、1/4、1/8...というように段階に分けて分析し、これをレベル1、レベル2、レベル3、レベル4...と呼ぶ。レベル1では作品全体の平均を示す。レベル2では半分に分けた1段落から8段落の平均と9段落から16段落の平均の変化を示す。レベル3では4等分、レベル4では8等分、レベル5では16等分である。

#### 3. 1 解析結果

全体の流れを見るために分析対象を8等分したレベル4の結果を Fig. 1 に示す。本論文では1章と2章を第1パート、3章

と4章を第2パート、5章と6章を第3パート、7章と8章を第4パート、9章を第5パートと呼ぶ。

第1パートにおいてはキーワードの「銀河」が多く次はキーワードの「青」である。そしてキーワードの「黒」は少なくなっている。第2パートにおいては第1パートとは逆にキーワードの「黒」が多く、キーワードの「銀河」とキーワードの「青」が少なくなっている。第3パートにおいては第1パートと同様にキーワードの「銀河」とキーワードの「青」が多いが、第1パートと異なり、キーワードの「青」のほうが多い。キーワードの「黒」は少なくなっている。第4パートで「銀河」と「青」は減少し、「黒」は多くなっている。物語の終焉である第5パートにおいては全てのキーワードが増加し、頻出度合いの変化が大きくなっている。

#### 3. 2 「銀河」と「黒」の解析結果

キーワードの「銀河」とキーワードの「黒」との関係においては第1パートから第4パートまで相反する変化を示しているが第5パートにおいては共に増加傾向にある。

キーワードの「銀河」とキーワードの「黒」との関係を見ると、第1パートと第2パートの頻出度合いの変化が大きく、相反する傾向が見られる。第3パートと第4パートにおいても相反する傾向が見られるが、ここでは頻出度合いの変化が小さくなっている。第5パートになると双方に増加が見られ、キーワードの「銀河」がキーワードの「黒」より一層の増加が見られる。キーワードの「銀河」とキーワードの「黒」との関係においては第1パートから第2パートはジョバンニが夢に入るまで、父親の不在、母親の病気、経済上の問題、さらにはザネリとの関係など困難な現実が描かれている。第3パートから夢の世界に入るが、第3パートから第4パートにおいて夢の中ではキーワードのコントラストが小さくなり、第5パートで本格的な列車旅行が始まると、コントラストが消滅してしまう。「銀河」と「黒」のコントラストはジョバンニの感情の動きが現実の苦しみから理想とする世界を描こうとするにつれて解消されていき、登場人物の心情が描かれていることが示された。

#### 3. 2 「銀河」と「青」の解析結果

キーワードの「銀河」とキーワードの「青」との関係においては第1パートから第4パートまでほぼ連動しているが、第5パートにおいては共に増加傾向にある。

キーワードの「銀河」とキーワードの「青」との関係を見ると、第1パートでは共に多く、第2パートでは共に減少しているが、頻出度合いの変化はキーワードの「銀河」のほうが大きい。第3パートでは共に多く、第4パートでは共に減少しているが、頻出度合いの変化はキーワードの「青」のほうが大きい。第5パートになると双方に増加が見られ、キーワードの「銀河」がキーワードの「青」より幾分増加傾向が高い。キーワードの

「銀河」とキーワードの「青」との関係においては第1パートから第2パートは午後の授業で先生が銀河の話しをし、質問をする。ジョバンニは銀河については知識があるものの答えを躊躇ってしまう。クラスメートは星祭には青いあかりをこしらえ、カンパネルラとの思い出の汽車はレールに信号標のあかりがついていて列車が通るときだけ青くなるのだった。第3パートから夢の世界に入るが、第3パートから第4パートにおいて夜の天の川を走る汽車から見える星や光っているものは青系の色で表現されている。銀河は青光を放っている。夢の中では銀河が青く輝いているのである。キーワードの「銀河」とキーワードの「青」の連動する関係は現実よりも夢の中で、より大きく変化し、強く結び付いていく。第5パートで本格的な列車旅行が始まると、「銀河」と「青」は共に増加するが、「銀河」のほうが「青」より多く、より深い銀河の世界に入っていくことが示された。

### 3.3 「黒」と「青」の解析結果

キーワードの「黒」とキーワードの「青」との関係においては第1パートから第4パートまで相反する変化を示しているが第5パートにおいては共に増加傾向にある。

キーワードの「黒」とキーワードの「青」との関係においては第1パートから第2パートの現実の世界では星座は黒板につるされた黒い図に示されており、時計屋の星座早見表も黒である。また、夕方に見る牛乳やの門は黒く、ザネリに馬鹿にされたジョバンニは黒い丘へ急ぐ。第3パートではジョバンニの目に映る木や野原などの自然は黒で表現されている。銀河ステーションではアナウンスと同時に目の前が明るくなる。汽車の車室は青い天蚕絨が張られ、まっ黒な上着を着たカンパネルラを目の前の席に発見する。実際の銀河は青く輝き、第5パートで本格的な列車旅行が始まると、コントラストが消滅してしまう。

「青」と「黒」のコントラストはジョバンニの感情の動きが現実の苦しみから理想とする世界を描こうとするにつれて解消されていき、登場人物の心情が描かれていることが示された。

## 4. 結論

- (1) 「銀河」と「黒」の頻出度合いの変化にはほぼ相反する傾向が見られ、絶妙なコントラストが可視化された。
- (2) 「銀河」と「青」の頻出度合いの変化にはほぼ同様の傾向が見られた。夢に入ると「青」の変化が大きくなったが、更に夢が進行するにつれて共に変化が大きくなった。
- (3) 「黒」には「青」に反する傾向が見られた。視覚・現象界では「青」は明度が低く「黒」と対比してもさほど際立つことがない。しかし、本作品では基調色としての「青」が「黒」とは分離され、本作品固有の色となっている。これは視覚・現象界とは異なる現象が文字を通して実現化され

たことを意味する。

- (4) 離散値系ウェーブレット多重解像度解析を用いて「銀河」「黒」「青」の頻出度合いの変化を可視化することで『銀河鉄道の夜』における主人公の心の変化と「銀河」「黒」「白」の重層的な構造が明らかとなった。
- (5) キーワードは先行研究で得られた「銀河」「黒」「青」の分析と同様な観点からが選んだが、それらに対して何らかの数学的方法を適用して客観的な解析が行われていなかった。本研究は、人手で選んだキーワードに対して離散値系ウェーブレット多重解像度解析を適用し、結果を可視化することで客観的考察を与えている。

## 参考文献

- 1) 三好行雄編：日本近代文学大辞典 作品編、勉誠出版（1994）p.238.
- 2) 渡部芳紀編：宮沢賢治大事典、勉誠出版（2007）p.199.
- 3) 村瀬学：『銀河鉄道の夜』とは何か、大和書房（1989）pp.66-172.
- 4) 上村 くにこ：『銀河鉄道の夜』における星のシンボリズム（人間科学特集）、甲南大学紀要 文学編、157、（2009）pp.1-42.
- 5) 田中 雅史：流動する「物語」、『銀河鉄道の夜』のイメージについて（日本語日本文学特集）、甲南大学紀要 文学編、133、（2003）pp.1-18.
- 6) 小沢俊郎：「青びとのながれ」考 - 「銀河鉄道の夜」の陰影として -、編者 日本文学研究資料刊行会、日本文学研究資料叢書 宮沢賢治 II、有精堂（1983）pp.1-42.
- 7) 宮沢賢治：宮沢賢治 近代と半近代、洋々社（1983）pp.109-110. p.113
- 8) 宮沢賢治：銀河鉄道の夜、【新】校本宮沢賢治全集 第11巻：童話(4) 本文篇、筑摩書房（1996）pp.123-171.
- 9) 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.
- 10) 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JP10-102673A.
- 11) 齋藤兆古、画像処理入門、朝倉書店（1998）pp.40-42.

# 時間領域信号のゆらぎ周波数解析とその応用

野嶋 悟士<sup>o</sup>, 齊籐 兆古(法政大学大学院)

## Application of the Frequency Fluctuation on Time Domain Signals

Satoshi NOJIMA and Yoshifuru SAITO

### ABSTRACT

Ferromagnetic materials, i.e., iron steel and its composites, are widely used as the frame parts of various artificial products and constructions such as a building, bridge and so on. Because of its mechanical property, iron steel is most popular in use for the frame materials to maintain their mechanical strength. On the other side, nondestructive testing of iron steel is an extremely important way in order to maintain their mechanical reliability. One of the deterministic differences between the ferromagnetic and nonmagnetic materials is that all of the ferromagnetic materials when applying external magnetic field attracts major magnetic fields; and also magnetization process of ferromagnetic materials always accompanies with the Barkhausen effect. The Barkhausen effect is a phenomenon caused by the movements of magnetic domains accompanying with the discontinuous magnetizations. In order to carry out the nondestructive testing of iron steels with high reliability, this paper proposes one of the signal cognition methodologies based on the fluctuation frequency characteristics of the Barkhausen signals.

**Keywords:** Barkhausen phenomenon, 1/f Fluctuation, Signal cognition

## 1. 緒 論

多くの時間領域一次元信号はオシロスコープで電気信号として可視化される。音声信号や計算機のクロック信号などが代表例である。これらの信号の中で、人間の可聴周波数である音声信号はキーボードを経由せずに計算機へコマンドを入力可能とするため、計算機と人間間の有力なインターフェイスと考えられ、これを実現するために音声認識・識別方法が鋭意研究開発され、一部実用化されている。

本研究では、バルクハウゼン信号測定時に必然的に伴う環境ノイズに対するゆらぎ周波数特性を解析し、その結果を用いて環境ノイズを削減した。その結果、主として構造材として使われる鉄系磁性材料におけるバルクハウゼン信号が応力の有無により異なるゆらぎ周波数特性を持つことを報告する。

## 2. 時間領域一次元信号の解析

### 2.1 バルクハウゼン信号

多くの金属材料中で、鉄は最も広汎に使われる構造材である。鉄は機械的性質が制御可能であり、コスト的にも安価である。これが構造材として広汎に使われる理由であろう。鉄は磁性体であり、磁性体の磁化過程は、可逆的磁壁移動、非可逆的磁壁移動、さらに可逆的回転磁化領域へ分類される。磁化曲線で考えれば、レイリーの法則が成り立つ範囲が可逆的磁壁移動による磁化過程範囲であり、非可逆的磁壁移動による磁化過程は不連続な磁壁移動で磁化されるために再現性は無く、周辺へ比較的高周波の磁界変化を与える。これがバルクハウゼン現象と呼ばれる磁性体特有の現象である<sup>2)</sup>。

Fig.1 に示すように磁性体の周囲へコイルを巻き、磁性体近傍で磁石を運動させるとバルクハウゼン現象に起因して磁界の時間変化がコイルに電圧を誘起する。この電圧を増幅してスピーカーへ入力すればスピーカーからバルクハウゼンノイズ(Barkhausen noise)が聞かれる。

本論文ではバルクハウゼン現象に起因する時間領域一次元信号を最終的な解析対象とし、信号収録過程において必然的に混入する環境ノイズのゆらぎ周波数特性解析を行う。

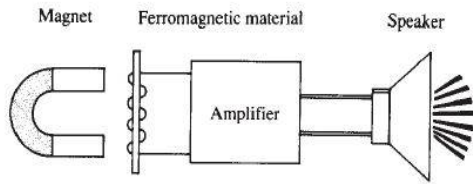


Fig.1 Barkhausen signal generation.

### 2.2 1/f ゆらぎ

1/f ゆらぎとは自然界の鳥のさえずりや小川のせせらぎなどに存在する特有の周波数特性である。信号のパワースペクトラムの大きさが周波数に反比例する場合、すなわち、フーリエパワースペクトラム対周波数の両対数グラフで傾きが - 1 になるものを特に「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。本論文では、信号のゆらぎ周波数分布を信号の“固有の情報”として捉え、「固有の情報」と呼ぶ。

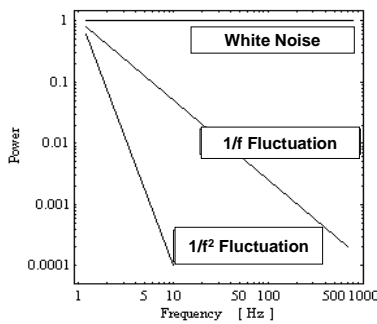


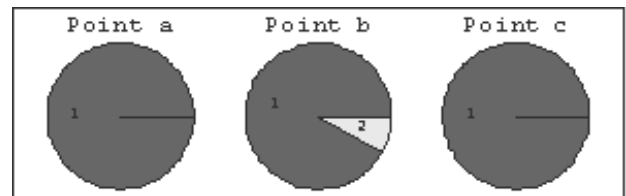
Fig.2 Typical Fourier power spectra.

### 3 . 実験

本実験では、厚さ 0.15mm、長さ 30mm の珪素鋼板を供試材として取り上げた。供試材に太さ 0.2mm のホルマル線で作成した 150 回巻きの空芯サーチコイルを着脱することにより、誘起電圧およびバルクハウゼンノイズを測定できる装置を用いた。

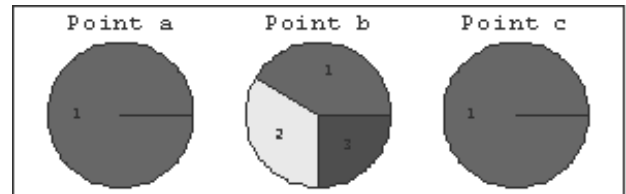
また、供試材は応力が加わっていない状態である珪素鋼板 A、中央点（便宜上 b 点と名付ける）に応力を加えた状態である珪素鋼板 B に 2 分類した。実際に応力が加わっている箇所は珪素鋼板 B の中央点のみである。

バルクハウゼン信号のパワースペクトラムから 4 ケースに大別した環境ノイズのパワースペクトラムを削除し、その結果得られたパワースペクトラムと周波数それぞれの対数を計算し、低周波領域におけるゆらぎ周波数解析を行う。全体の実験結果を Fig.3 にまとめて示す。Fig.3 より応力を加えた点は応力が存在しない点とは明らかに異なるゆらぎ周波数特性を呈することがわかる。



■ gradient > 1.9    2 1.7 < gradient < 1.9    3 gradient < 1.7

(a) Silicon steel sheet A.



■ gradient > 1.9    2 1.7 < gradient < 1.9    3 gradient < 1.7

(b) Silicon steel sheet B.

Fig.3 Dependency of stress impression of the frequency fluctuations at a low frequency range.

### 4 . まとめ

本論文では強磁性体のバルクハウゼンノイズの特徴を可視化する一方法としてゆらぎ周波数解析を用いる方法を提案し、応力の有無識別へ応用した。

バルクハウゼンノイズ測定時には測定時に必然的に伴う環境ノイズ対策が必要である。このため、環境ノイズそのもののゆらぎ周波数特性を解析し、その結果を用いて環境ノイズの影響を削減し、応力の有無に拠る珪素鋼板のゆらぎ周波数特性の相違を吟味した。

その結果、応力の有無はバルクハウゼンノイズの低周波領域のゆらぎ周波数特性を吟味することで識別可能であることが判明した。

### 参 考 文 献

- 1) 寺西正晃、丸山和夫、早野誠治、齊藤兆古：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、2005 年 7 月、B108
- 2) 勝又理毅、早野誠治、齊藤兆古：バルクハウゼン現象の可視化法に関する一考察、可視化情報シンポジウム、2003 年 7 月、B203
- 3) 野嶋悟士、堀井清之、齊藤兆古：時間領域一次元信号の特徴抽出と可視化、可視化情報シンポジウム、2009 年 7 月、P01-002
- 4) 野嶋悟士、堀井清之、齊藤兆古：時間領域一次元信号の揺らぎ周波数特性抽出とその一応用、可視化情報シンポジウム、2009 年 10 月、P01-009
- 5) 野嶋悟士、堀井清之、齊藤兆古：時間領域信号の周波数揺らぎ解析による信号識別、可視化情報シンポジウム、2010 年 7 月、P01-002

## 新方式共振型 ECT の提案とその特性

細原 隆史 ， 齊藤 兆古(法政大学大学院)

### A Proposal of the New Resonance Type Eddy Current Sensor and Its Characteristics

Takafumi HOSOHARA and Yoshifuru SAITO

#### ABSTRACT

ECT (eddy current testing) is extensively used to inspect such as elevator escalator, airplane, nuclear electric and power plant without any destructions. This paper proposes a resonance type ECT sensor system which makes it possible to detect the defect of metallic plate with higher reliability. Operating principle of this system is based on the essential nature of parallel resonant electrical circuit. When the primary coil is working as a sensing part and the secondary coil, i.e. a target metallic material, is magnetically coupled with the primary coil, the resonant frequency and impedance of the ECT sensor system greatly depend on the secondary impedance change caused by a defect such as cracks.

Particularly, in the present paper, we propose a new ECT sensor coil which is composed of the windings maximizing the line to line capacitance. By means of this new resonance type ECT sensor system, we have visualized the defects of plane metallic materials as a demonstration, and also compared its sensibility with those of the conventional one.

**Keywords** :New resonance type , Eddy Current Sensor, defect visualization

#### 1. 緒 論

金属の非破壊検査として、渦電流(ECT)による方法は検査対象と直接接触の必要がなく、比較的簡単な装置で高速な作業が行える反面、渦電流の流れる方向によって金属中の欠損を探知できない問題もある。しかしながらその汎用性は高く、非接触で探査が可能であるため、他の非破壊検査法に比較して有利な特性を有する<sup>1)</sup>。

本論文で取り上げる共振型 ECT センサ系は励磁コイルの並列共振周波数とインピーダンスが磁気的に結合する検査対象金属の状態に依存して変化することを利用して、すなわち、励磁コイルの入力端から見た共振条件が励磁コイルと磁気的に結合する検査対象中のクラックなどの欠損を反映することを利用したセンサである。

本論文では、従来の巻き方とは異なる、共振型インダクターの巻き方を用いた共振型結線 ECT センサによる金属中欠損の可視化を行い、従来型のそれと比較し明らかに感度が向上することを示す。

#### 2. 共振型結線 ECT

共振型結線 ECT の原理を述べる。Fig.1(a)に示す平行に並んだ二本の導体を考え、Fig.1(b)のように結線する。

Fig.1(b)において、2本の導体間を接続するコイルの抵抗やインダクタンスが無視できるとするならば、2本の導体に加わる電圧は等しく、大きさは電源電圧の半分となる。さらに、2本の導体間の電位差は導体の端から端まで等しく、流れる電流の方向は同じ方向である。従って、二本の導体間のFig.1(c)に示すキャパシタンスCが効果的に作用し、各導体の抵抗、自己インダクタンス、導体間の相互インダクタンスをそれぞれ R、L、M とすれば、Fig.1(c)の等価回路は Fig.1(d)のようにまとめられる。

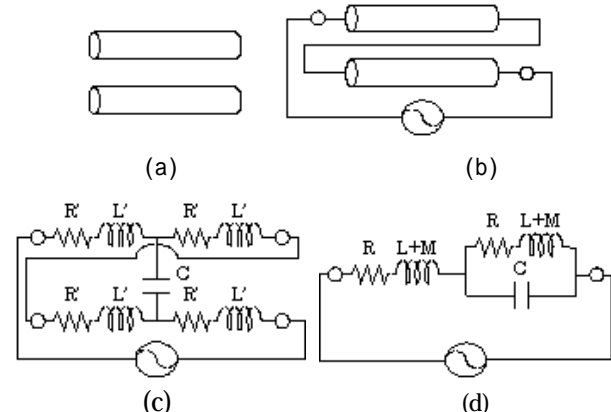


Fig.1 Principle of resonance type coil winding

### 3. 欠損探査

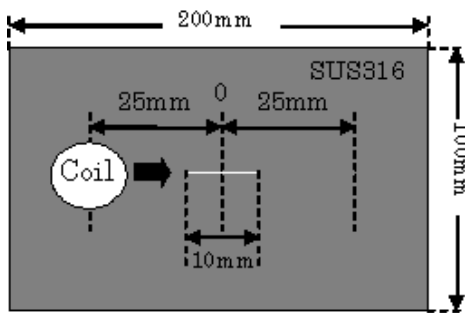
Table.1 に示す有限長ソレノイド型の励磁コイルを用いて Fig.2 に示す SUS316 の欠損を共振時のインピーダンス  $|Z|$  と共振周波数  $f$  を用いて可視化する .

Figs.3、4 は、各センサを用いて、寸法が 100mm × 200mm × 10mm の SUS316 の中央部に放電加工により作成した深さ 1mm、長さ 10mm の矩形スリットを可視化した結果であり、共振型結線の結果は(a)、通常の巻き方の結果は(b)である .この結果を見ると、従来型の共振型 ECT では、S/N 比が悪いのに対し、共振型結線 ECT では、従来型の共振型 ECT と比較して共振周波数、共振時のインピーダンス共に感度が約 2 倍上昇するため、S/N 比が向上することが分かる .ここで、Figs.3、4 のグラフの  $f$ 、 $z$  に対応するパラメータである共振周波数と共振時のインピーダンスの変化率は式(2)で計算した .さらに、測定点数は 2.5mm 間隔で 21 点とした .

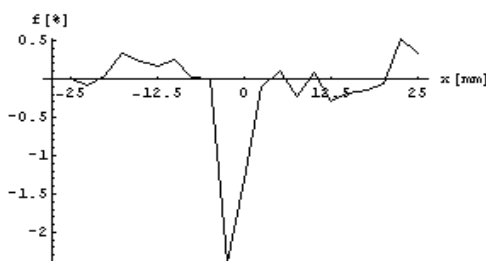
$$\text{変化率} = \frac{\text{測定値} - \text{基準値}}{\text{基準値}} \times 100[\%] \quad (2)$$

**Table 1** Various constants of a tested sensor coil .

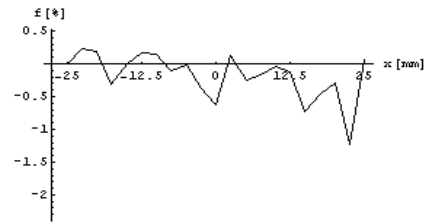
巻数	20[回]
内径	20[mm]
外径	21[mm]
長さ	5[mm]
層数	2[層]
巻線径	0.4[mm]



**Fig.2** Tested Target Metallic materials Sheet With Rectangular Defect

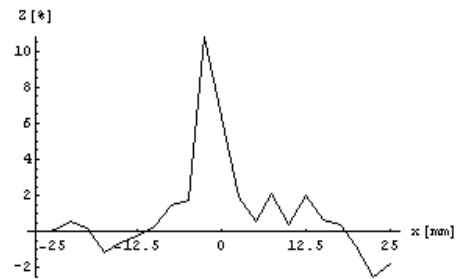


(a) New resonance type

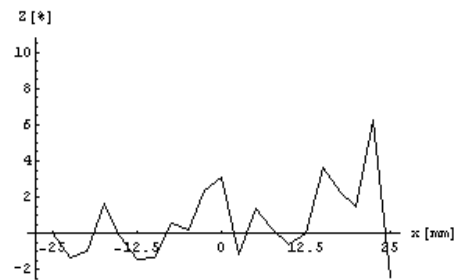


(b)Normal

**Fig.3** Defect Visualized by Resonance Frequency



(a) New resonance type



(b)Normal

**Fig.4** Defect Visualized by Resonance Impedance

### 4. まとめ

本論文では、共振型結線 ECT センサの原理を述べ、従来の共振型 ECT センサとの比較を行った .

その結果、共振型結線 ECT センサの感度は従来型に比べ、共振周波数、共振時のインピーダンスが共に増加し、従来の共振型 ECT では欠損の有無が把握出来なかった問題を解決し、欠損を明快に可視化可能であることを示した .

#### 参考文献

- 1) 佐藤庸平、早野誠治、齋藤兆古、堀井清之、"三相交流磁気センサの高度化と薄板状金属の欠損可視化"、可視化情報学会誌、Vol . 25、No . 1、pp . 185-188、(2005) .
- 2) 細原隆史、齋藤兆古、堀井清之、"共振型 ECT センサによる金属欠損の可視化"、2009年7月、P01-006 .
- 3) 緑川 洋一、早野 誠治、齋藤 兆古、"導体間の分布容量を用いた共振回路の実験的検討"、1994年2月、MAG-94-10
- 4) 緑川 洋一、佐藤 貞弘、早野 誠治、齋藤 兆古、"共振型インダクタのフィルタへの応用"、1995年2月、MAG-95-32

## 1/f ゆらぎ周波数マップによる公園の環境評価

菅井 桂子 , 齊藤兆古 (法政大学 大学院)

### Environmental Evaluation of Meguro Relaxation Park in Tokyo by means of the 1/f Frequency Fluctuations

Keiko Sugai and Yoshifuru SAITO

#### ABSTRACT

In addition to the highest functional performance, a series of various modern machines should be equipped the more sophisticated human interface in order to use, handle or drive them. In such meaning, modern human engineering has to provide the easiness of machine handling in addition to take the user mental impression into account.

Sound and visual information are the most impressive emotional signals to the human sensing ability. Hence, these two elements accompanying of the machine operation is of paramount importance in machine designing.

In this paper, we apply the healing effect of sound and visual information exhibiting 1/f fluctuation frequency to the environmental evaluation of Meguro relaxation park in Tokyo.

**Keywords:** 1/f fluctuations, image processing, environment evaluation

#### 1. 緒 論

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<sup>1)</sup>。視覚もまた人間の感性を刺激する重要な感覚のひとつである。プラトンが視覚を聴覚とともに他の感覚より優れたものと位置づけてから、西洋ではこの見解が継承され、伝統的に聴覚と視覚に関わるもののみが芸術とみなされてきた。このような背景から、音楽療法と心理学を結びつけ、様々なアートセラピーの手法なども提唱されている。これは音や視覚情報が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ことを意味する<sup>2)</sup>。

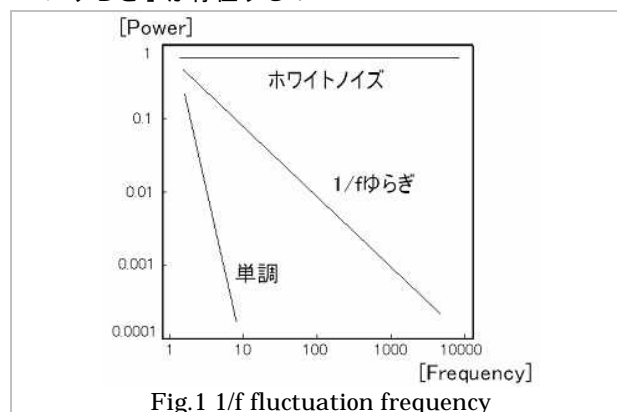
我々は、これまで人間の心理的・精神的な影響の中でも特に癒し効果に焦点を絞り、その評価法として 1/f ゆらぎ周波数を用いた研究をおこなってきた<sup>2-5)</sup>。具体的には、音や動きに伴う 1/f ゆらぎ周波数の抽出と可視化である。

本稿では東京都目黒区の目黒川を基幹とする回遊路の環境評価を音と景観の呈する 1/f ゆらぎ情報可視化を用いて行った結果の一部を報告する。

#### 2. ゆらぎ周波数解析法

「1/f ゆらぎ」は自然界に多く存在し<sup>3)</sup>、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くリズムが相当する。さらに、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 (Discrete Fourier Transform) 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。両対数で Fig.1 のように高調波次数と高調波の振幅の関係を描く。Fig.1

において、直線の傾きがゼロの場合は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<sup>4)</sup>。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。

具体的な音データや動画データからの1/f ゆらぎ周波数抽出法は文献[3-5]へ詳細に述べられているので、ここでは割愛する。

### 3. 目黒川緑化軸コースの1/f ゆらぎ周波数分布

現在、目黒区では、目黒区基本構想・基本計画に定める「ともにつくる みどり豊かな 人間のまち」の実現に向けて、平成27(2015)年度までを目標に「目黒区みどりの基本計画」を打ち立てている。

この中で将来像実現のために挙げられた具体的な計画の1つが、みどりの散歩道の整備である。目黒区のみどりの将来像は、みどりが多く現存する8箇所の「目黒の森」を拠点とし、それをつなぐ「みどりの軸」を5つの緑化軸としてみどりのネットワーク化を図るものである。

本研究では、区内の約8割の水面面積を占める目黒川流域の区間を基本計画を担う主要な区間と考え、目黒川緑化軸を調査の対象として、視聴覚情報の1/f ゆらぎ周波数分布を調査した。結果として1/f ゆらぎ周波数に拠る癒し効果マップを作成し、1/f ゆらぎ周波数解析を用いた環境評価の1方法を提案した。

#### 3.1 音データからの1/f ゆらぎ周波数解析結果

野外で録音したデータの解析結果は大きく二分することができた。低周波領域から高周波領域まで傾きがほとんど無くホワイトノイズ状になるものと、中間周波数領域付近で急な傾きを示すものに分かれた。

両者の音データの違いを実際に聞き比べてみるため、試みに急な傾きを示した部分のみの音を抽出し試聴すると、風がマイクに当たるような低い音や、水のくぐもったような音であった。

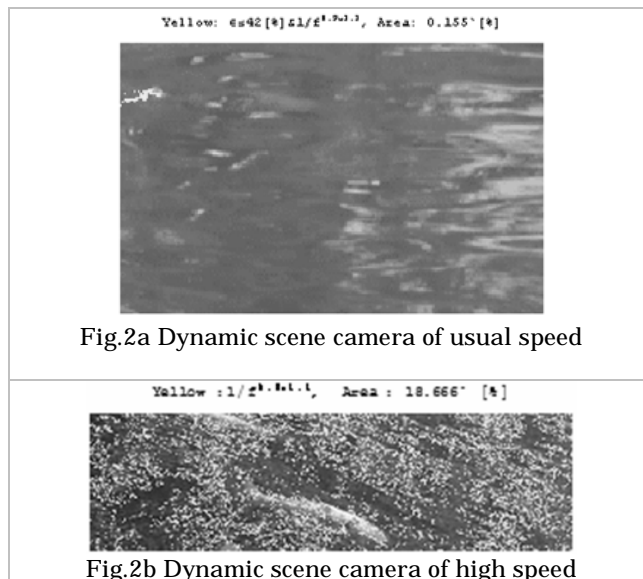
#### 3.2 動画からの1/f ゆらぎ周波数解析結果

本報告では、2種類のカメラを用いて撮影を行った。一般的に市場に出回っている1秒間に30フレームを撮影するビデオカメラと、1秒間に1200フレームを撮影するハイスピードビデオカメラを使用した。通常スピードのカメラによる映像の解析結果と、人間の目の処理能力を超える動画を撮影した映像の1/f ゆらぎ周波数解析結果を一部示し、比較を行う。

なお、Fig.2に示す画像右上のAreaは、全体の画素数に対する1/f ゆらぎ周波数を呈する画素数の割合を示し、1/f ゆらぎ周波数を有する画素を白抜きで示す。

植物や、植物の陰を対象物とした場合、通常スピードのビデオカメラとハイスピードカメラで撮影した結果に大きな差異はないことが判明した。一方、昆虫や水面といった、一画素における移り変わりや動きが早い対象物については、1/f ゆらぎ周波数抽出に大きく差異が現れ

た。昆虫を普通のビデオカメラで撮影した場合、ほとんど1/f ゆらぎ周波数を呈さない結果となったが、ハイスピードカメラで撮影した場合には1/f ゆらぎ周波数が現れた。



また水面を撮影した場合も同様で、ハイスピードカメラによる撮影は顕著に水面から1/f ゆらぎ周波数を抽出した。結果をFig.2に示す。水中を泳ぐものを対象とした場合に、水面のゆらぎ周波数が顕著なため、通常のビデオカメラによる撮影で十分であると考えられる。

### 4. まとめ

以上の結果から、人間の目からの情報のみで1/f ゆらぎ周波数を感じようとした場合には、あまり感じ取れないゆらぎでも、人間の眼球に抛る視覚情報処理の限界を超える部分にしっかりと1/f ゆらぎ周波数を呈していることが判明した。

また音環境における回遊路調査では、風や水の音が中間周波数領域に特徴を与えることが判明した。

### 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) 加藤千恵子, 齋藤兆古, “職場不適合者の芸術療法における描画の「1/f ゆらぎ」解析”, 芸術工学会誌 No.46, Mar.2008, pp.81-89.
- 3) 齋藤兆古, 宮坂総, 加藤千恵子, “1/f ゆらぎの可視化”, 可視化情報 Vol.28, Suppl.No.1, July.2008, No.P01-06
- 4) 菅井桂子, 齋藤兆古, “サウンドデータにおける1/f ゆらぎ周波数の抽出”, 第51回自動制御連合講演会, No.215, Nov.2008. pp.70-71.
- 5) 菅井桂子, 齋藤兆古, 堀井清之, “人間の動作に伴う1/f ゆらぎ周波数の抽出”, 可視化情報 Vol.28, Suppl.No.1, July.2008, No.P01-05



# ビッター法による磁区画像の可視化とその応用

石井 隆<sup>o</sup>, 齋藤 兆古(法政大学大学院)

## Visualization of Magnetic Domain Walls by Bitter Method and Its Application

Takashi ISHII and Yoshifuru SAITO

### ABSTRACT

The Bitter method is most commonly observing way of the magnetic domains even though it is limited to the surface observation of specimen. To observe the magnetic domains by Bitter method, magnetic liquid is put on the target magnetic material surface after electrical field polishing processes. Applying magnetic field to this magnetic material covered by magnetic fluid makes it possible to observe the magnetic domain dynamics by a microscope. We have previously reported that local magnetization characteristics could be obtained from the visualized magnetic domain dynamics. Final purpose of our research on visualized magnetic domain dynamics is to work out a fully automatic quality control system for the thin magnetic material processing by our magnetic domain dynamics visualization methodology.

In this paper, we try to visualize the magnetic wall dynamics of ferromagnetic materials when impressing the vertical and horizontal alternating magnetic fields to the specimens. As the result, we try to extract a difference between the vertical and horizontally directed magnetization characteristics of the soft iron sheets.

**Keywords:** Ferromagnetic materials, Magnetic wall dynamics, Visualization.

### 1. 緒論

磁性鋼板は電気・電子機器を構成する主要な材料である。一般に、磁性材料は磁区と呼ばれる微小磁石の集合で構成され、外部磁界に応じて材料中の磁気エネルギーが最小となるように磁区が変化する。すなわち、磁性材料の磁化過程は外部磁界に対する磁区挙動である。所望の磁化特性を持つ材料開発・評価に、磁区挙動の可視化は磁化過程を掌握するために重要な役割を担う。磁区挙動の可視化は、磁性コロイド溶液を用いたビッター法、電子顕微鏡に拠る方法、磁気光学効果を利用した方法等で行われる。ビッター法は手軽な方法であるが、磁区間の磁壁しか観察できない。また、磁気光学的方法は磁性体表面の磁区挙動可視化に限定される。電子顕微鏡に拠る方法は磁性体内部の磁区挙動を観察可能とするが、高価な機器を必要とする。

従来、我々は磁区の電子顕微鏡画像から磁性体の磁化特性を抽出する全く新しい方法を提案した。現在、我々は安価な設備で磁性体の磁壁を可視化するビッター法を用いて磁性体の磁化特性を抽出する方法を開発している<sup>2)</sup>。

本稿では、軟鉄板をサンプル資料として用い、強磁性体の磁壁移動をビッター法で可視化し、磁区動画像の画素値より得た長手方向と面方向の磁化特性に関して幾つかの考察を与える。

### 2. 磁壁移動の可視化と磁化特性

#### 2.1 ビッター法による磁壁移動の可視化

試料台に試料を載せて、研磨した試料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。強磁性体微粒子（酸化鉄）のコロイド液を強磁

P00-003

性体表面に垂らすと、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表面の漏れ磁束の傾斜に引き付けられて集まり、表面近傍の磁壁の観測ができる。この引き付けられた微粒子を光学顕微鏡で観察する。この原理は、マグネットビューワなどの商品に应用されており、比較的面倒な実験準備を必要とせず磁壁を観察可能とする<sup>2)</sup>。

2.2 磁区動画像と磁化特性

Fig.1 に示すように、継鉄を構成するフェライトコアの中央に励磁コイルを巻き、軟鉄板に交流磁界を印加させた場合の各点における磁区動画像を Figs.2 に示す。Fig.3 は磁化特性である。

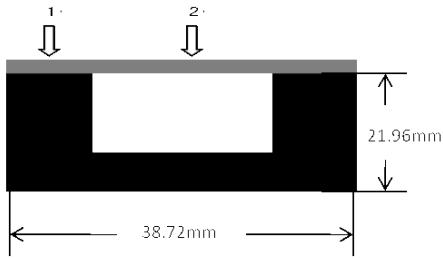
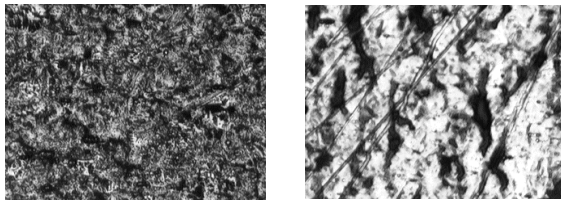


Fig.1 Experimental Devices.



(a) Point . (b) Point .

Fig.2 Flame Images of Magnetic Domain Dynamics of Soft Iron.

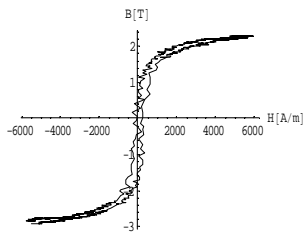
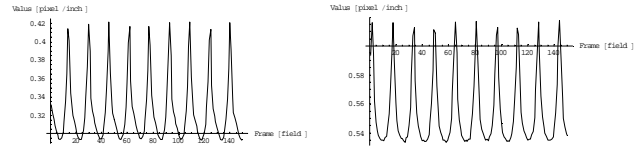


Fig.3 Magnetization Characteristic of Soft Iron.

3. 動画像から局所磁化特性の可視化

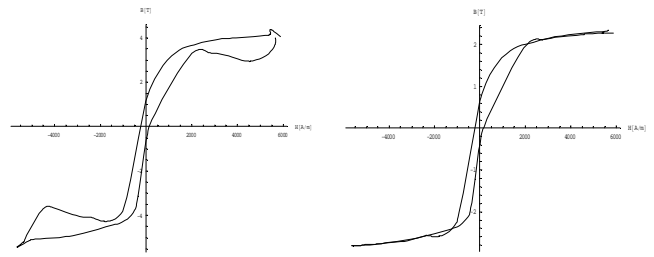
3.1 モノクロ動画像の平均画素値と磁化特性

Fig.4 は Fig.2 に示す各モノクロフレーム画像の画素値の平均値を時間方向へプロットした波形である。Fig.3 の磁化特性を基準として Fig.1 の point の平均画素値の磁束密度を決定した。Fig.5 は point と point の画素値より求めたそれぞれの磁化特性を示す。



(a) Point . (b) Point .

Fig.4 Time Series of the Average Pixel Values in each of the Flame Images of Magnetic Domain Dynamics



(a) Point . (b) Point .

Fig.5 Magnetization Characteristics of Soft Iron from pixel value.

4. まとめ

本稿では、U字型フェライトコアを継鉄として薄板状強磁性体の動的磁区画像を可視化した。画素値による磁化特性の抽出を行い、その結果、コアヘッド上の垂直磁界が支配的な部分はコアヘッド間の水平磁界が支配的な部分比べて B-H ループ幅が大きくなり、鉄損が大きくなる事を示唆した。すなわち、磁束の流れる方向が変化する部分の鉄損が大きくなることを明らかにした。

参考文献

- 1) Hisashi Endo, Seiji Hayano, Masahiro Fujikura, Hisashi Mogi, Chikara Kaido and Yoshifuru Saito; Magnetic domain dynamics visualization, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 15 (2001/2002) 409-416
- 2) 須永高志、寺西正晃、齋藤兆古、堀井清之：ピッター法による可視化画像から 1/f ゆらぎの抽出、可視化情報学会シンポジウム、2006年7月、A311.
- 3) 石井隆、齋藤兆古、堀井清之：動的磁壁画像の可視化による強磁性体の磁化特性、可視化情報学会シンポジウム、2009年7月、P01-004
- 4) 石井隆、齋藤兆古：動的磁壁画像の可視化による強磁性体の磁化特性と 1/f ゆらぎ周波数特性、可視化情報学会全国講演会、2009年10月、P01-004
- 5) 石井隆、齋藤兆古、堀井清之：強磁性体の動的磁区画像と周波数ゆらぎ特性に関する幾つかの考察、可視化情報学会シンポジウム、2010年7月、P01-001

# 非接触給電システム周辺電磁界分布の可視化と設計への応用

高田 将吾 , 齊藤 兆古 (法政大学大学院)

## Visualization of Electromagnetic Vector Fields near Contactless Power Supplier and Its Application to the Core Shape Design

Shogo TAKADA and Yoshifuru SAITO

### ABSTRACT

All of the modern electrical devices are composed of two major parts: one is the electrical signal processing part, and the other is the power supplier. Recent electrical devices are spreading in use not only the conventional consumer electronic products but also electrical vehicles. A reason why electrical vehicles should be developed is simply the antipollution of earth atmosphere, i.e., the electrical motors employed instead of combustion type engines. The electrical vehicles require a battery system which should be charged up by an external power source. This means that a contactless power supplier is extensively convenient to practical use for battery charging of the electrical vehicles.

Contactless power supplier is composed of a transformer having the distinct primal and secondary coils separated by air gap. Because of the electromagnetic compatibility problem, it is essential to keep the leakage magnetic fields around the contactless power supplier as low as possible.

This paper carries out the wavelets multi-resolution analysis to the magnetic field distributions around the transformer having the distinct primal and secondary coils separated by air gap.

**Keywords** : Magnetic field visualization, Contactless power supplier, Wavelets analysis

### 1. 緒 論

半導体技術の発展は、電気・電子機器の小型軽量化のみならず、インテリジェント化を可能とし、爆発的な電気・電子機器の普及をもたらした。その結果、高周波で駆動される電気・電子機器は生産設備のみならず家電機器まで普及し、家庭、事務所、工場、その他あらゆる場所でパソコン、ファックス、携帯電話、空調設備、照明機器等の多くの電気・電子機器が設置され、必要不可欠な文明の利器として活用されている。それらの電気・電子機器が空間を占める密度は、従来想定不可能な密度である。この意味で、現代の人工空間はあらゆる周波数の電磁界で満たされた空間と化している。この過酷な電磁環境中でも、電気・電子機器は誤作動をすることなく円滑にそれらの機能を発揮しなければ、人類の文明生活が維持できない状況に至っている。換言すれば、あらゆる周波数の電磁界で満たされた空間の中で人類は生活を強いられている状況である。電気・電子機器に対してだけでなく人類に対しても可能な限り、高周波の電磁界が分布しない自然な空間が望ましいこととは言うまでもない。

近年、地球温暖化対策のために電気自動車の開発が急務となっている。電気自動車普及の大きなボトルネックとし

て電気自動車への給電システムとそのインフラがある。

本稿は電気自動車を前提とする非接触給電システム開発に関するものであり、具体的には非接触給電システムが与える周辺電磁界分布の可視化とそのウェーブレット解析である。

### 2. 磁界分布の可視化

#### 2.1 1次・2次コア分離型単相変圧器

非接触給電システムでは1次・2次コイル分離型の変圧器を採用することで非接触に電力電送を可能とする。変圧器のコア材は比較的重量があるため、コア材の量を削減する方途として高周波駆動が一般的である。高周波特性のよい磁性材料はフェライトである。我々の非接触給電システムでは、2枚の平面型フェライトを用いた1次・2次コイル分離型単相変圧器を試作した。

#### 2.2 磁界ベクトル分布

Fig.1に平面型フェライトを用いた変圧器で、コア間が40mm 場合の磁界ベクトル図を示す。

1次・2次の平面型フェライトコアに平行なx-y平面で、平面型フェライトコア面に垂直な方向を高さz方向とし

て、高さ(z方向)を10mm毎に4段階変更して、コア間の磁界のxyzの3成分を測定した。

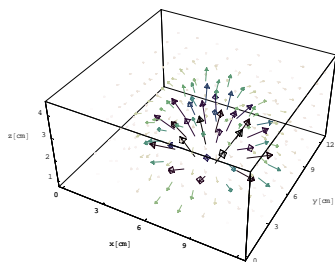


Fig.1 Magnetic Field Vector Distribution around the flat shape ferrite core transformer

### 3. 磁界ベクトル分布のウェーブレット解析

Fig.1で示した3次元磁界ベクトル分布へウェーブレット変換を適用する。すなわち、Fig.1に示したベクトルデータをx、y、z成分ごとにウェーブレット変換し、ウェーブレットスペクトラムを求める。基底関数にドビッシーの2次基底関数を使用する。

Fig.2に平面型フェライトコアを用いた場合のベクトルウェーブレットスペクトラムを示す。Fig.2は複数個のベクトルウェーブレットスペクトラムからなる。すなわち、Fig.2は空間周波数別に空間周波数の低い最も支配的なウェーブレットスペクトラムおよび空間周波数が高いウェーブレットスペクトラムからなる。それぞれを独立にウェーブレット逆変換して再現された3次元磁界ベクトル分布をそれぞれ空間周波数の低いウェーブレットスペクトラムから、Level 1、Level 2、Level 3としてFig.3に示す。

Figs.3(a), (b)は一次側コアと二次側コア間で磁氣的結合がなされている磁界分布を表しており、Fig.3(c)は磁氣的結合に直接寄与しない磁界分布を表している。

平面型フェライトコアを用いた変圧器では最低レベルの磁界ベクトル分布の他にも高次レベルの磁界ベクトル分布が平面型変圧器特有の磁界ベクトル分布を与える。

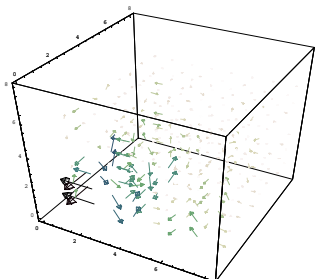
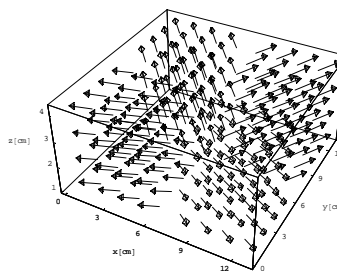
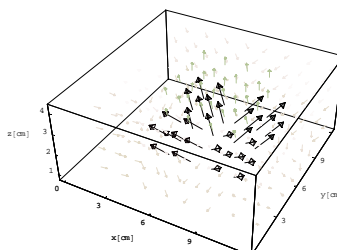


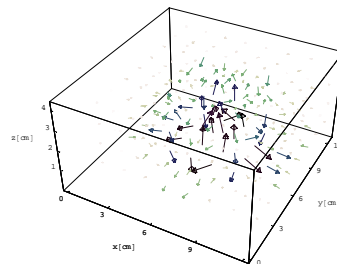
Fig.2 Wavelet spectra of the transformer employing flat shape cores



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

Fig.3 The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer employing flat shape cores

### 4. まとめ

本稿では、非接触給電システムの根幹要素である1次・2次コイル分離型変圧器の周辺磁界分布の可視化を行い、ウェーブレット解析を行った。ウェーブレット解析は、コア形状の最適化指標を明確に与え、非接触給電システムに於ける漏洩磁界問題解決の一助となることが判明した。

#### 参考文献

- 1) 齊藤兆古 著:「ウェーブレット変換の基礎と応用」、朝倉書店、1998年
- 2) 宮原晋一郎、早野誠治、齊藤兆古、増田則夫、遠矢弘和:「電気・電子機器の周辺電磁界可視化システム」、マグネティックス研究会資料、1998年、MAG-98-112
- 3) Sekijima,D.,Hayano, and Saito,Y: Time-domain Visualization of Quasi-3D Current Vector Distributions PSFVIP-3 March 18-21,2001, U.S.A. F3303
- 4) 松山佐和、小口雄康、宮原晋一郎、齊藤兆古:「三次元ウェーブレット変換の応用」、日本氏シミュレーション学会、1998年、2- -3

# ウェーブレット変換に拠る非接触給電システム周辺電磁界分布解析

高田 将吾 齊藤兆古\* (法政大学大学院)

Wavelets Analysis of the magnetic field distributions around the contact-less power suppliers  
Shogo Takada, Yoshifuru Saito\*, (Graduate School of Hosei University)

Contactless power supplier is composed of a transformer having the distinct primal and secondary coils separated by air gap. Because of the electromagnetic compatibility problem, it is essential to keep the leakage magnetic fields around the contactless power supplier as low as possible.

This paper carries out the wavelets multi-resolution analysis to the magnetic field distributions around contact less power supplier. As a result, we have succeeded in obtaining one of the core shape designing policies by observing the magnetic field vectors distribution's wavelets spectra.

キーワード：非接触給電，電磁界分布の可視化，ウェーブレット解析

(Keywords, Contact-less power supplier, Magnetic field visualization, Wavelets multi-resolution analysis)

## 1. 緒 論

半導体技術の発展は、電気・電子機器の小型軽量化のみならず、インテリジェント化を可能とし、爆発的な電気・電子機器の普及をもたらした。その結果、高周波で駆動される電気・電子機器は生産設備のみならず家電機器まで普及し、家庭、事務所、工場、その他あらゆる場所でパソコン、ファックス、携帯電話、空調設備、照明機器等の多くの電気・電子機器が設置され、必要不可欠な文明の利器として活用されている。それらの電気・電子機器が空間を占める密度は、従来想定不可能な密度である。この意味で、現代の人工空間はあらゆる周波数の電磁界で満たされた空間と化している。この過酷な電磁環境中でも、電気・電子機器は誤作動をすることなく円滑にそれらの機能を発揮しなければ、人類の文明生活が維持できない状況に至っている。換言すれば、あらゆる周波数の電磁界で満たされた空間の中で人類は生活を強いられている状況である。電気・電子機器に対してだけでなく人類に対しても可能な限り、高周波の電磁界が分布しない自然な空間が望ましいことは言うまでもない。

近年、地球温暖化対策のために電気自動車の開発が急務となっている。電気自動車普及の大きなボトルネックとして電気自動車への給電システムとそのインフラがある。

本稿は電気自動車を前提とする非接触給電システム開発に関するものであり、具体的には非接触給電システムが与える周辺電磁界分布の可視化とそのウェーブレット解析である。

## 2. 磁界分布の可視化

### 2.1 1次・2次コア分離型単層変圧器

非接触給電システムでは1次・2次コイル分離型の変圧器を採用することで非接触な電力電送を可能とする。変圧器のコア材は比較的重量があるため、コア材の量を削減する方途として高周波駆動が一般的である。高周波特性のよい磁性材料はフェライトである。我々の非接触給電システムでは、2個のU字型フェライトを用いた1次・2次コイル分離型単相変圧器と2枚の平面型フェライトを用いた1次・2次コイル分離型単相変圧器を試作した。

### 2.2 磁界ベクトル分布

図1にU字型フェライトを用いた変圧器で、フェライトコアヘッド間が10mmの場合の磁界ベクトル分布図を示す。

1次・2次のフェライトコアヘッドに平行なx-y平面で、フェライトコアヘッド面に垂直な方向を高さz方向として、高さ(z方向)を10mm毎に4段階変更して、磁界のxyzの3成分を測定した。

図2に平面型フェライトを用いた変圧器で、コア間が40mm場合の磁界ベクトル図を示す。

1次・2次の平面型フェライトコアに平行なx-y平面で、平面型フェライトコア面に垂直な方向を高さz方向として、高さ(z方向)を10mm毎に4段階変更して、コア間の磁界のxyzの3成分を測定した。

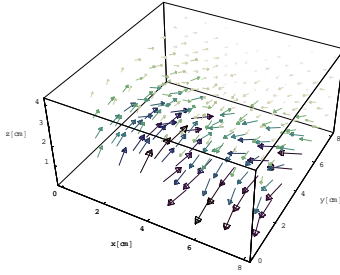


図1 U字型コア周辺磁界分布

Fig.1. Magnetic field vector distribution around the U shape ferrite core transformer

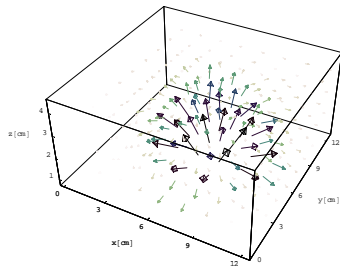


図2 平面型コア周辺磁界分布

Fig.2. Magnetic field vector distribution around the flat shape ferrite core transformer

### 3. 磁界ベクトル分布のウェーブレット解析

#### 3.1 理論

一般に、3次元のウェーブレット変換は、3次元マトリックスの転置行列を

$$\left[ H_{lmn} \right]^T = H_{mnl} \quad (1)$$

で表すと、

$$\mathbf{S} = \left[ W_n \cdot \left[ W_m \cdot \left[ W_l \cdot \mathbf{H}_{lmn} \right]^T \right]^T \right]^T \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\mathbf{S}$ はウェーブレットスペクトラム、 $\mathbf{H}$ は $l \times m \times n$ の直方マトリックス、 $W_l$ 、 $W_m$ 、および $W_n$ はそれぞれ $l \times l$ 、 $m \times m$ 、 $n \times n$ のウェーブレット変換マトリックスである。ここで、 $\mathbf{H}$ の各要素が $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の3成分からなるベクトル

$$\mathbf{H} = \mathbf{X} + \mathbf{Y} + \mathbf{Z} \quad (3)$$

であるとき、式(1)、(2)より

$$\mathbf{S} = \left[ W_n \cdot \left[ W_m \cdot \left[ W_l \cdot (\mathbf{X} + \mathbf{Y} + \mathbf{Z}) \right]^T \right]^T \right]^T \quad (4)$$

が得られる。ここで $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ 、 $\mathbf{Z}$ はそれぞれ直交するベクトルであるから式(4)は

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \left[ W_n \cdot \left[ W_m \cdot \left[ W_l \cdot \mathbf{X} \right]^T \right]^T \right]^T \\ &+ \left[ W_n \cdot \left[ W_m \cdot \left[ W_l \cdot \mathbf{Y} \right]^T \right]^T \right]^T \\ &+ \left[ W_n \cdot \left[ W_m \cdot \left[ W_l \cdot \mathbf{Z} \right]^T \right]^T \right]^T \end{aligned} \quad (5)$$

となる。すなわちベクトルデータのウェーブレット変換スペクトラムは各成分のウェーブレット変換スペクトラムを成分とするベクトルである<sup>(4)</sup>。

#### 3.2 磁界ベクトル分布の解析

図1、2で示した3次元磁界ベクトル分布へウェーブレット変換を適用する。

図1、2に示したベクトルデータを $x$ 、 $y$ 、 $z$ 成分ごとにウェーブレット変換し、ウェーブレットスペクトラムを求める。図1、2ともに基底関数にドビッシーの2次基底関数を使用する。

図3にU字型フェライトコアを用いた場合のベクトルウェーブレットスペクトラム、図5に平面型フェライトコアを用いた場合のベクトルウェーブレットスペクトラムを示す。

図3、5は複数個のベクトルウェーブレットスペクトラムからなる。すなわち、図3、5は空間周波数別に空間周波数の低い、最も支配的なウェーブレットスペクトラムと空間周波数が高いウェーブレットスペクトラムからなる。図3、5に於けるベクトルウェーブレットスペクトラムを、それぞれを独立にウェーブレット逆変換して再現された3次元磁界ベクトル分布をそれぞれ空間周波数の低いウェーブレットスペクトラムから、Level 1、Level 2、Level 3として、図4、6に示す。

図4(a)は明らかに空間に漏れのない、一次側コアと二次側コア間で磁気結合がなされている理想的な磁界分布を表しており、図4(b)、(c)は磁氣的結合に直接寄与しない漏れ磁界分布を表している。

図6(a)、(b)は一次側コアと二次側コア間で磁氣的結合がなされている磁界分布を表しており、図6(c)は磁氣的結合に直接寄与しない漏れ磁界分布を表している。

平面型フェライトコアを用いた変圧器では最低レベルの磁界ベクトル分布の他にも高次レベルの磁界ベクトル分布が平面型変圧器特有の磁界ベクトル分布を与える。

これは、U字型フェライトコアを用いた変圧器と平面型フェライトコアを用いた変圧器はその磁氣的結合様式が相補的な形で異なるためである。すなわち、U字型フェライトコアを使った変圧器は磁氣的結合がU字型に沿った直線的磁界ベクトルによってなされるため、一定方向へ磁界ベクトルが揃ったレベル1のスペクトラムが理想的な磁界ベクトルを再現する。しかし、平面型フェライトコアを持

つ変圧器ではコアの中心から噴水状に広がる磁界ベクトルによって磁氣的結合がなされるため、低次のウェーブレットスペクトラムに加え高次のウェーブレットスペクトラムが平面型コア特有の噴水状磁界ベクトルを良く表現可能であることに拠る。

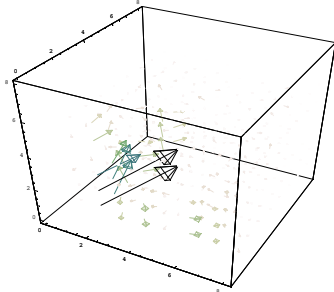
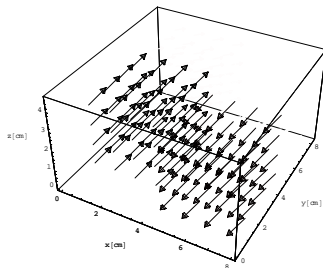
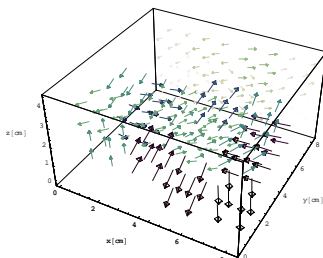


図3 U字型コアによるウェーブレットスペクトラム

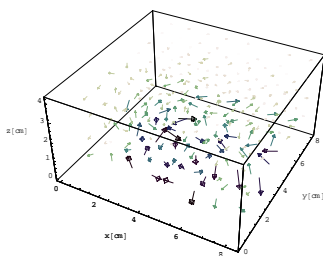
Fig.3. Wavelet spectra of the transformer employing U shape cores



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

図4 多重解像度解析の結果

Fig.4. The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer employing U shape cores

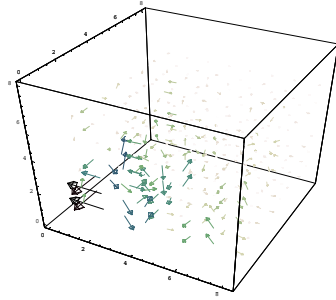
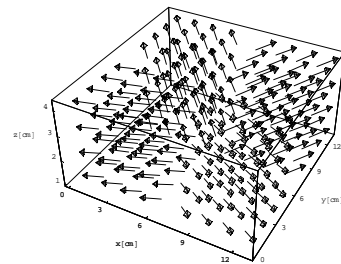
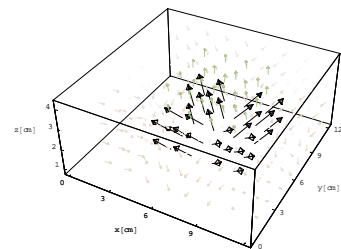


図5 平面型コアによるウェーブレットスペクトラム

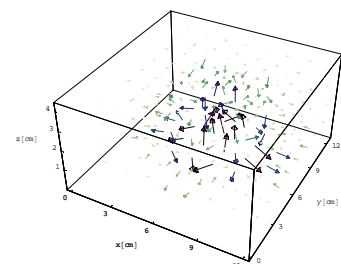
Fig.5. Wavelet spectra of the transformer employing flat shape cores



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

図6 多重解像度解析の結果

Fig.6. The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer employing flat shape cores

このことを吟味するため、平面型フェライトコアを用いた変圧器に対して有限要素法を適用して、理論上の磁界ベクトル分布を求める。採用した電磁界解析用有限要素法パッケージはAnsoft社の学生用フリーソフト MaxwellSVである<sup>(6)</sup>。

平面型フェライトコアを用いた変圧器は明らかに円盤状磁性体コアを中心とする軸対象モデルで表現可能である。このため、有限要素法解析モデルとして平面型フェライトコアを用いた変圧器モデルを採用した。

有限要素法解析モデルから計算される図2に対応する磁界ベクトル分布を図7に示す。但し、円盤状磁性体コアの中心を通過する一断面に沿って表示してある。

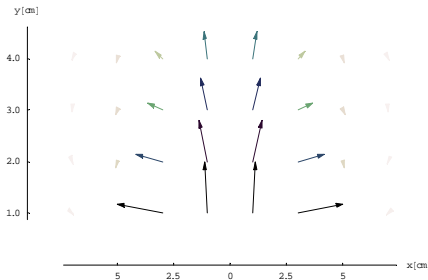


図7 有限要素法による平面型コア磁界分布

Fig.7. Computed magnetic field vectors distribution around the flat shape ferrite core transformer

図7の平面型フェライトコアを用いた変圧器の磁界ベクトル分布へ離散値系ウェーブレット変換を適用し、ウェーブレット多重解像度解析を適用する。図8は図7の平面型フェライトコアを用いた変圧器の磁界ベクトル分布へ離散値系ウェーブレット変換を適用して得られたウェーブレットスペクトラムである。

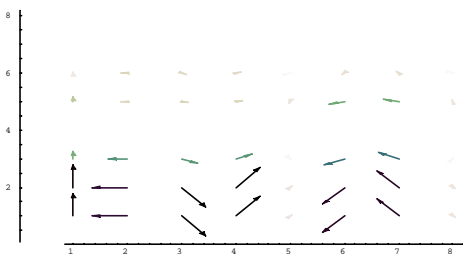


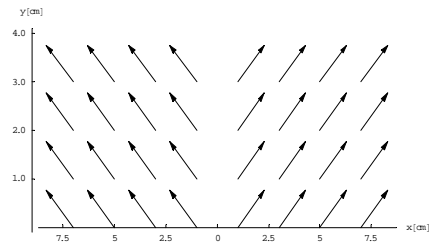
図8 有限要素法より再現された磁界によるウェーブレットスペクトラム

Fig.8. Ideal Wavelet spectra of the transformer employing flat shape cores

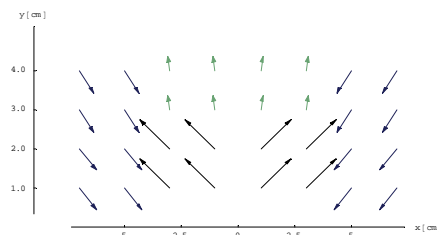
図8の平面型変圧器の磁界ベクトル分布のウェーブレットスペクトラムへウェーブレット多重解像度解析を適用し、各解像度(レベル)の磁界ベクトル分布を吟味する。図9は図8のウェーブレット多重解像度解析結果である。

図9の結果で、明らかに図9(c)に示されているレベル3の磁界ベクトル分布は励磁コイルのみに鎖交する漏れ磁束分布を表している。すなわち、平面型変圧器で1次・2次コイルに鎖交する有効磁束はウェーブレット多重解像度解析のレベル2までと考えられる。

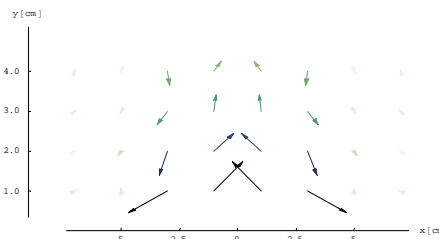
以上の結果から、変圧器の磁氣的結合様式で着目すべきウェーブレットスペクトラムが異なることが判明した。



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

図9 多重解像度解析の結果

Fig.9. The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer employing flat shape cores

#### 4. 結合係数

変圧器の基礎的で最も重要な性能指標である結合係数を調べて置く。変圧器の1次・2次コイルを図10に示す回路モデルで考えると、図11に示す結線を施しインピーダンスを測定することで式(6)から結合係数が求まる。

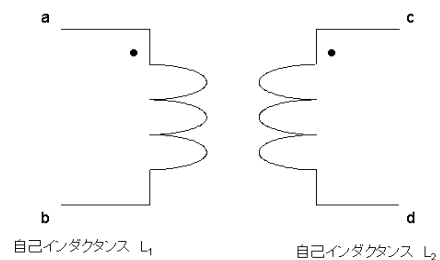


図10 変圧器回路

Fig.10. Circuit model of transformer



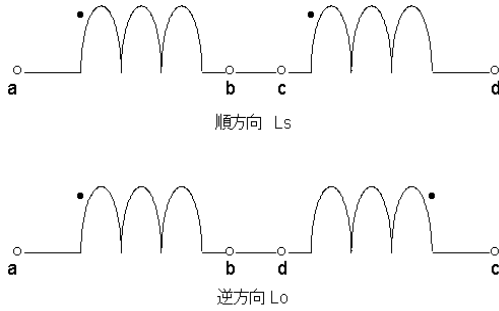


図 11 インダクタンスの直列接続

Fig.11. Series connection of inductance

$$\begin{aligned}
 L_s &= L_1 + L_2 + 2M, \\
 L_o &= L_1 + L_2 - 2M, \\
 M &= \frac{L_s - L_o}{4} \\
 \therefore k &= \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

表 1 および表 2 にそれぞれ U 字型フェライトコア型と平面型フェライトコア型の結合係数を示す。表 2 の結果から、平面型フェライトコア型を用いた単相変圧器は 5mm 程度のアギャップが存在しても十分なエネルギー伝送を可能とすることがわかる。

表 1 U 字型コアの結合係数 (周波数 : 30[kHz])

Table 1. Coupling factor of the transformer employing U shape cores (frequency: 30[kHz])

Gap[mm]	0	1	3	5	7	10
L <sub>1</sub> [μH]	1180.6	108.6	90.9	87.0	84.5	82.1
L <sub>2</sub> [μH]	1187.1	108.8	92.1	87.0	84.4	82.1
L <sub>s</sub> [μH]	4012.1	332.4	234.3	211.8	195.7	186.6
L <sub>o</sub> [μH]	129.9	132.2	135.8	138.3	140.8	144.5
k	0.82	0.46	0.27	0.21	0.16	0.13

結合係数、エアギャップ、周波数をそれぞれ高さ、縦、横軸に取りエアギャップ、周波数を変化させた場合の結合係数を図 12 および図 13 に示す。図 12,13 はそれぞれ U 字型コアおよび平面型コアを用いた変圧器であり、結合係数の減衰はそのエアギャップの拡がりに起因するものであり、周波数に対してはほとんど関係しないことがわかる。

表 2 平面型コアの結合係数 (周波数 : 30[kHz])

Table 2. Coupling factor of the transformer employing flat shape cores (frequency: 30[kHz])

Gap[mm]	0	1	3	5	7	10
L <sub>1</sub> [μH]	578.6	348.2	231.1	181.6	169.9	133.9
L <sub>2</sub> [μH]	572.7	348.1	229.4	181.0	168.3	133.3
L <sub>s</sub> [μH]	2297.4	1358.2	881.8	669.4	617.6	450.8
L <sub>o</sub> [μH]	16.9	26.1	41.4	56.0	61.1	84.3
k	0.99	0.96	0.91	0.84	0.82	0.69

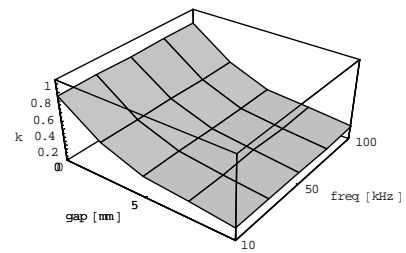


図 12 U 字型コア結合係数

Fig.12. Coupling factor of the transformer employing U shape cores

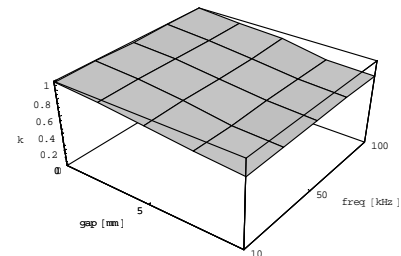


図 13 平面型コア結合係数

Fig.13. Coupling factor of the transformer employing flat shape cores

## 5. 並列共振時の電力変換効率

本稿では図 14 に示すように二次側の抵抗負荷に対して並列に共振用コンデンサを接続した基本的な並列共振回路を考える。図 15 にその等価回路を示す。平面型フェライトコアを使用し、コア間のギャップを 10[mm]とした。二次側抵抗負荷、共振用コンデンサの値を変化させ電力変換効率の変化を調べた。

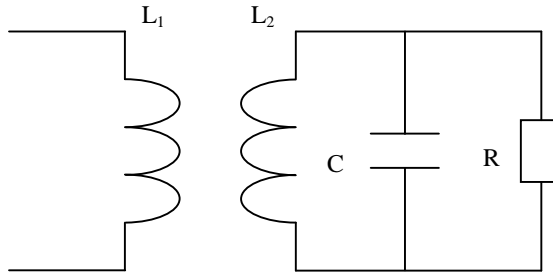


図 14 二次側並列共振回路

Fig.14. Parallel capacitor at secondary winding

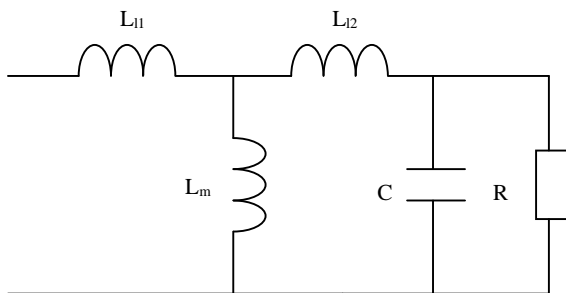


図 15 等価回路

Fig.15. Equivalent circuit

表 3 および表 4 に電力変換効率を示す。表 3 より抵抗負荷 1[Ω]では共振用コンデンサの値が 39.98[μF]の場合に電力変換効率が 79.88[%]と最大となり、表 4 より抵抗負荷が 10[Ω]では共振用コンデンサの値が 39.98[μF]の場合に電力変換効率は 33.74[%]と最大となることがわかる。また最大効率をとる共振用コンデンサの値を境に電力変換効率は徐々に低下していることがわかる。この結果から使用する負荷抵抗により共振用コンデンサの値を選定することが必要となる。さらに、抵抗負荷の大きさによって電力変換効率が変わり、低抵抗負荷時に電力変換効率は大となる。これは、抵抗負荷の値が大きいと、2 次電流の低下に起因すると考えられる。すなわち、2 次負荷消費電力の絶対的減少が結果として電力変換効率を低下させる。

表 3 電力変換効率 (抵抗負荷 : 1[Ω])

Table 3. Efficiency of power conversion (R: 1[Ω])

C[μF]	入力 [W]	出力 [W]	効率 [%]
20.00	1.97	1.48	75.00
39.98	2.20	1.76	79.88
59.87	2.29	1.61	70.20
79.45	3.28	1.82	55.41
99.03	2.93	1.71	58.36

表 4 電力変換効率 (抵抗負荷 : 10[Ω])

Table 4. Efficiency of power conversion (R: 10[Ω])

C[μF]	入力 [W]	出力 [W]	効率 [%]
20.00	3.88	1.16	29.97
39.98	2.86	0.97	33.74
59.87	3.29	0.81	24.46
79.45	3.75	0.68	18.09
99.03	4.07	0.47	11.61

## 6. まとめ

本稿では、非接触給電システムの根幹要素である 1 次・2 次コイル分離型変圧器の周辺磁界分布の可視化を行い、ウェーブレット変換に拠る解析、並列共振による電力変換効率の測定を行った。

ウェーブレット変換に拠る解析は、コア形状の最適化指標を明確に与え、非接触給電システムに於ける漏洩磁界問題解決の一助となることが判明した。また共振用コンデンサを用いることで電力変換効率が向上するが、共振用コンデンサの値の選定が必要となり、さらに大電流負荷に対して高電力変換効率が期待できることを示した。

## 文 献

- (1) 齊藤兆古 著:「ウェーブレット変換の基礎と応用」、朝倉書店、1998 年
- (2) 宮原晋一郎、早野誠治、齊藤兆古、増田則夫、遠矢弘和:「電気・電子機器の周辺電磁界可視化システム」、マグネティックス研究会資料、1998 年、MAG-98-112
- (3) Sekijima,D.,Hayano. and Saito,Y: Time-domain Visualization of Quasi-3D Current Vector Distributions PSFVIP-3 March 18-21,2001, U.S.A. F3303
- (4) 松山佐和、小口雄康、宮原晋一郎、齊藤兆古:「三次元ウェーブレット変換の応用」、日本氏シミュレーション学会、1998 年、2- -3
- (5) 金子聡、緑川洋一、早野誠治、齊藤兆古:「パネル型電力用変圧器に関する基礎的検討」、電気学会マグネティックス研究会資料、1996 年、MAG96-191.
- (6) <http://www.theengineer.co.uk/news/ansoft-maxtwell%C2%AE-sv/299659.article>
- (7) 高田将吾、齊藤兆古:「非接触給電システム周辺電磁界分布の可視化と設計への応用」、可視化情報学会、2010 年、P00-01

# 新方式共振型 ECT の提案とその特性

細原 隆史 齊藤 兆古\* (法政大学大学院)

A Proposal of the New Resonance Type Eddy Current Sensor  
and Its Characteristics  
Takafumi HOSOHARA and Yoshifuru SAITO

## Abstract

ECT (eddy current testing) is extensively used to inspect such as elevator, airplane, nuclear electric and power plant without any destructions.

This paper proposes a resonance type ECT sensor system which makes it possible to detect the defect of metallic plate with higher reliability. Operating principle of this system is based on essential nature of parallel resonant electrical circuit. In particular, this paper proposes new ECT sensor coil which is composed of the sensing coils maximizing the line to line capacitance.

As a result, we have succeeded in detecting the defects of plane metallic materials practically used in the nuclear plants.

キーワード：渦電流探査、共振型結線  
(ECT sensor, Resonance Connection)

## 1. 緒論

エレベータやエスカレータ、さらに航空機や各種発電所などの構造を支える金属材料の非破壊検査は安全性確保のために極めて重要な技術である。他方、金属そのものの品質評価要素として、材料の均一性、ゆがみ、たわみなどがあり、これらの要素を計測する手段としての非破壊検査技術もある。金属の非破壊検査法として、超音波、放射線、電気抵抗、渦電流などを利用した方法が用いられている。この中で、超音波による金属の非破壊検査は精度が良く信頼性も高い反面、振動子を検査対象に接触させる必要がある。この意味では電気抵抗測定による非破壊検査も直接接合の必要性がある。放射線による方法は、安全性の観点から放射線の取り扱いに一定の基準が課されているため、使用上に制約がともなう。

金属の非破壊検査として、渦電流(ECT)による方法は検査対象と直接接触の必要がなく、比較的簡単な装置で高速な作業が行える反面、渦電流の流れる方向によって金属中の欠損を探知できない問題もある。しかしながらその汎用性は高く、非接触で探査が可能であるため、他の非破壊検査法に比較して有利な特性を有する<sup>1)</sup>。

本論文で提案する共振型 ECT センサ系は励磁コイルの並列共振周波数とインピーダンスが磁気的に結合する検査対象金属の状態に依存して変化することを利用している<sup>2)</sup>。す

なわち、励磁コイルの入力端から見た共振条件が励磁コイルと磁気的に結合した検査対象中のクラックなどの欠損を反映することを利用したセンサである。

本論文では、有限長ソレノイド型のセンサコイルのコイル間キャパシタンス効果を最大とする共振型結線 ECT センサを提案する<sup>3,4)</sup>。提案する共振型結線 ECT センサによる金属中欠損の探査結果と従来型のそれと比較し、提案する共振型結線 ECT センサは感度が大きく向上することを報告する。

## 2. 共振型 ECT

### 2.1 原理

共振型 ECT センサの動作原理を具体的な実験例を通して述べる。図 1 に示すセンサーコイルで、(a)コイル単体のインピーダンス  $|Z|$  と位相 の周波数特性を測定する。次に、(b)コイル下に被検査対象と同じ材質を持つ欠損のない金属板を設置して、コイルのインピーダンス  $|Z|$  と位相 の周波数特性を測定する。さらに、(c)コイル下に欠損と見なす 1mm のスリットがある被検査対象金属板を設置して、コイルのインピーダンス  $|Z|$  と位相 の周波数特性を測定する。

図 2 はインピーダンス  $|Z|$  および位相 の周波数特性を示す。最も共振時のインピーダンスが大きく共振周波数が低い場合がコイル単体時(1)であり、最も共振時のインピーダンスが小さく共振周波数が高い場合はコイルが欠損のな

い被検査対象の金属板に面している場合(2)である。金属板にスリットがある場合(3)の共振時のインピーダンスと共振周波数は両者間に位置する値となる<sup>2)</sup>。

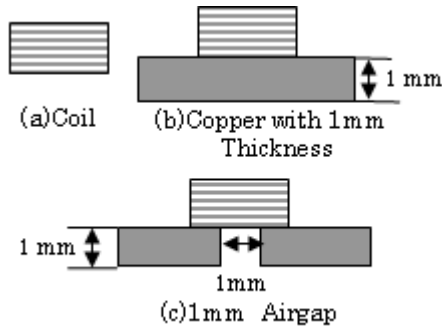


図1 試作コイルと測定条件  
Fig.1 Tested coil and measurement conditions

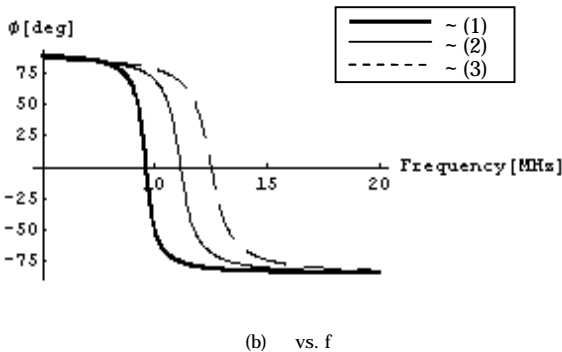
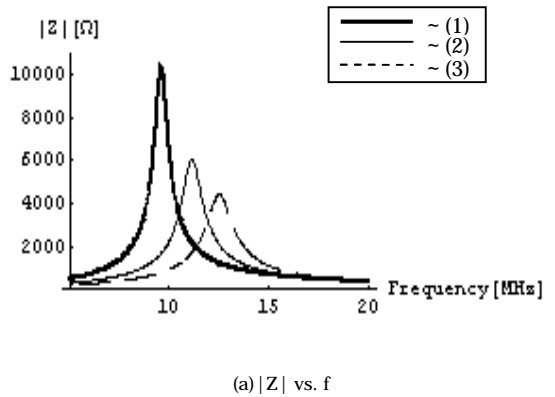


図2 インピーダンスと位相の周波数特性  
(1),(2),(3)はそれぞれコイル単独の場合、金属板に欠損がある場合および金属板に欠損がない場合を示す

Fig.2 Frequency characteristics of the impedance and phase. (1),(2) and (3) refer to the coil only, metallic plane with crack and metallic plane with no crack, respectively.

2.2 共振型結線 ECT

共振型結線 ECT の原理を述べる。図 3(a)に示す平行に並んだ 2 本の導体を考え、図 3(b)のように結線する。図 3(b)において、2 本の導体間を接続するコイルの抵抗やインダクタンスが無視できるとするならば、2 本の導体に加わる電位差は等しく、大きさは電源電圧の半分となる。さらに、こ

の 2 本の導体に流れる電流の方向は同方向であるため、コイル間キャパシタンスの効果が最大に発揮される。従って、図 3(c)に示すように、2 本の導体間のキャパシタンス C が想定可能となり、各導体の抵抗、自己インダクタンス、導体間の相互インダクタンスをそれぞれ R、L、M とすれば、図 3(c)の等価回路が導かれる。また、図 3(c)の等価回路は図 3(d)のように変形される<sup>3,4)</sup>。

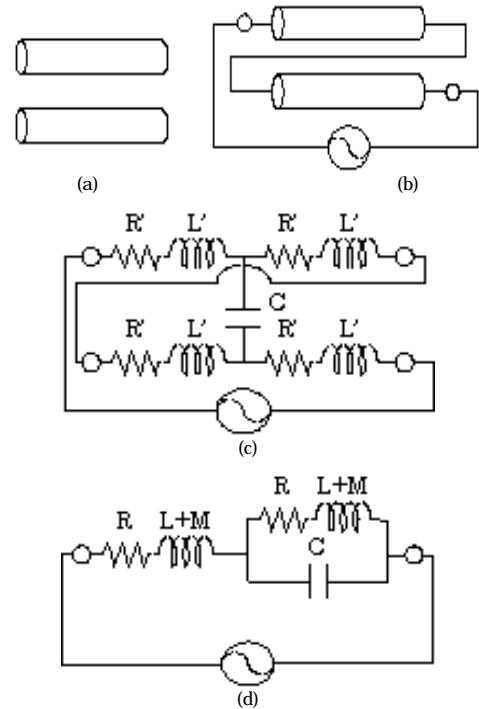


図3 共振型結線の原理  
Fig.3 Principle of a resonance type coil winding

また、図 4 はセンサコイルの(a)通常の巻線法および(b)共振型結線の巻線法の相違を示す。

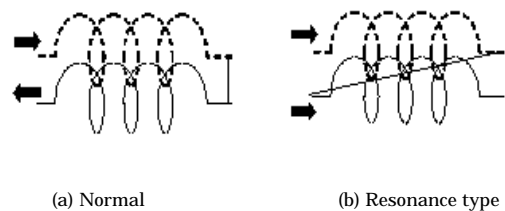


図4 通常の巻線法と共振型結線巻線法の比較  
Fig.4 Comparison of the normal with resonant type inductor windings

2.3 共振型結線 ECT の周波数特性

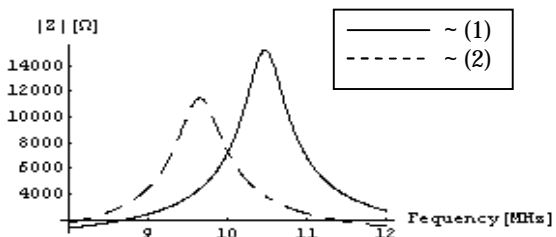
表 1 に測定に用いた有限長ソレノイド型試作センサの諸定数を示す。実験は通常の巻線法によるコイルと共振型結線の巻線法によるコイルをそれぞれ試作し、それぞれのコイル単体のインピーダンス対周波数特性の測定を行い、さらに回路の尖鋭度 Q 値は式(1)で計算した。

$$Q = \frac{R}{|X|} = \frac{|Z| \cos \phi}{|Z| \sin \phi} \tag{1}$$

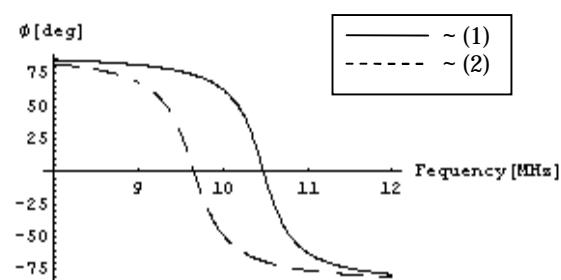
表 1 試作コイルの諸定数

Table 1 Various constants of a tested sensor coil .

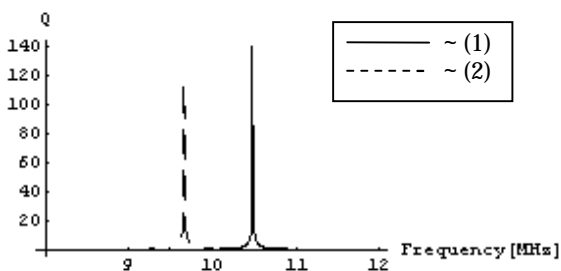
巻数	20[回]
内径	20[mm]
外径	21[mm]
長さ	5[mm]
層数	2[層]
巻線径	0.4[mm]



(a) |Z| vs. f



(b) vs. f



(c) Q

図 5 測定結果

(1)共振型結線、(2)従来型結線

Fig.5 Tested Results

(1) and (2) refer to the resonance type and conventional connections, respectively

図 5 にそれぞれのコイルのインピーダンス |Z|、位相 及び Q 値の周波数特性を示す。図 5 の(1)は共振型結線の巻線法によるコイルの結果であり、(2)は従来型の巻線法によるコイルの結果である。この結果は、いずれのコイルにおいても周波数特性は並列共振であり、共振型結線のコイルは共振周波数、共振時のインピーダンス及び Q が増加することがわかる。この理由は、従来型の巻線法によるコイルで

は巻線間に加わる電圧が場所によって異なり、且つ、小さい。しかしながら、共振型結線の巻線法によるコイルは巻線間にコイル全体に加わる全電圧の半分が導体間キャパシタンスへ加わり導体間のキャパシタンスが効果的に生かされたことに拠る。注意すべきは、キャパシタンスは幾何学的形状と媒質のパラメータで決まる量であり、その効果が生かされるか否かはキャパシタンスへ加わる電位差に拠る点である。

### 3. 欠損探査

#### 3.1 SUS316

表 1 に示す有限長ソレノイド型の ECT センサを用いて、図 6 に示す SUS316 の欠損を共振時のインピーダンス |Z| と共振周波数 f を測定する。

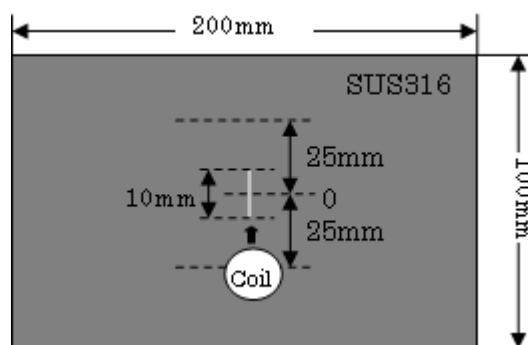
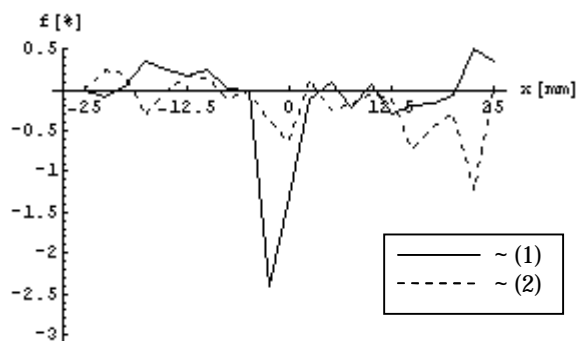
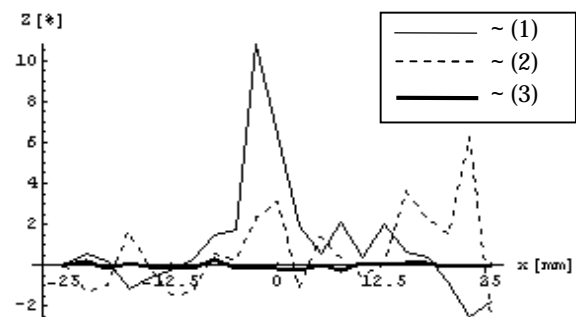


図 6 矩形スリットを有する探査対象の金属板  
Fig.6 Tested target metallic materials sheet with rectangular defect



(a) 共振周波数の変化



(b) インピーダンスの変化

図 7 欠損探査結果

Fig.7 Defect searching results. (1),(2) and (3) denote to the proposed resonance, normal resonance and conventional ECT sensors, respectively.

図7は、共振型、従来型、および通常のECT、各センサを用いて、寸法が100mm×200mm×10mmのSUS316の中央部に放電加工により作成した深さ0.5mm、長さ10mmの矩形スリットを探索した結果である。図7(1)は共振型結線ECTの結果、同図(2)は従来の共振型ECTの結果、同図(3)は通常のECTの測定周波数を10kHzに固定して得られた結果である。この結果から、通常のECT法では、ほとんど欠損が検出困難であることが分かる。また、従来型の共振型ECTではS/N比が悪く明確に欠損部が区別できていないことが分かる。他方、共振型結線ECTでは、従来型の共振型ECTと比較して共振周波数、共振時のインピーダンスの感度が共に約5倍以上に向上することが分かる。ここで、図7の縦軸 $f$ 、 $z$ は共振周波数と共振時のインピーダンスの変化率を式(2)でパーセント表示としたものである。さらに、測定点数は2.5mm間隔で21点とした。

$$\text{変化率} = \frac{\text{測定値} - \text{基準値}}{\text{基準値}} \times 100[\%] \quad (2)$$

### 3.2 SUS304

表1に示す有限長ソレノイド型のECTセンサを用いて、図8に示すSCC(stress corrosion crack、応力腐食割れ)の探索を行う。図9はSUS304に生じたSCCの模式図である。

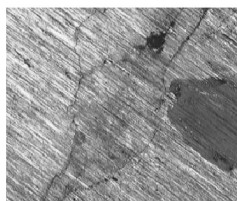


図8 SCCの金属顕微鏡写真  
Fig.8 Microscope picture of SCC

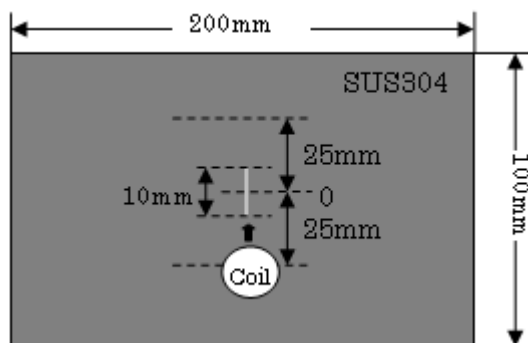
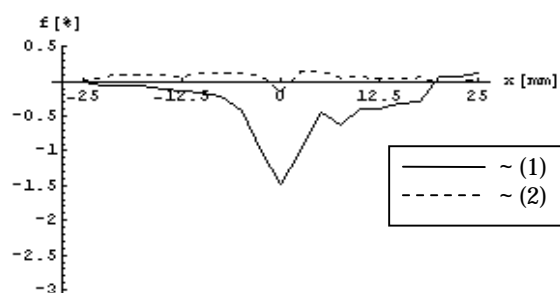


図9 矩形スリットを有する探索対象の金属板

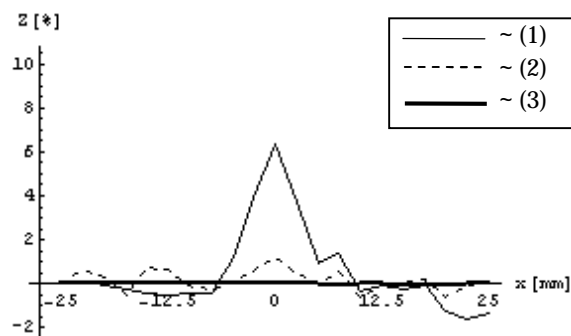
Fig.9 Modeling of the tested target metallic materials sheet with SCC Defect

図10は、共振型、従来型、および通常のECT、各センサを用いて、寸法が100mm×200mm×10mmのSUS304の中央部にある長さ10mmのSCC(stress corrosion crack、応力腐食割れ)を探索した結果を示す。図10(1)は共振型結線ECTの結果、同図(2)は従来の共振型ECTの結果、同図(3)は通常のECTの測定周波数を10kHzに固定して得られた結果である。この結果から、各センサによる探索結果は、SUS316の場合と同様な傾向となるが、変化率はSUS316

の場合に比較して小さいことがわかる。図10の縦軸 $f$ 、 $z$ は共振周波数と共振時のインピーダンスの変化率を式(2)でパーセント表示としたものである。さらに、測定点数は2.5mm間隔で21点とした。



(a) 共振周波数の変化



(b) インピーダンスの変化

図10 SCC欠損測定結果

Fig.10 Defect searching results of SCC. (1),(2) and (3) denote to the proposed resonance, normal resonance and conventional ECT sensors, respectively.

### 4. まとめ

本論文では、線間キャパシタンスの効果を利用した新方式共振型結線ECTセンサを提唱し、従来の共振型ECTセンサおよび従来型ECTとの欠損探索結果の比較を行った。その結果、共振型結線ECTセンサの感度は従来型に比べ、共振周波数、共振時のインピーダンスが共に増加し、従来通常の共振型ECTではS/N比が悪く、明快地把握出来ない欠損を明快地検出可能であることを示した。

### 文 献

- (1) 佐藤庸平、早野誠治、齋藤兆古、堀井清之、"三相交流磁気センサの高度化と薄板状金属の欠損可視化"、可視化情報学会誌、Vol. 25、No. 1、pp. 185-188、(2005)
- (2) 細原隆史、齋藤兆古、堀井清之、"共振型ECTセンサによる金属欠損の可視化"、2009年7月、P01-006。
- (3) 緑川 洋一、早野 誠治、齋藤 兆古、"導体間の分布容量を用いた共振回路の実験的検討"、1994年2月、MAG-94-10
- (4) 緑川 洋一、佐藤 貞弘、早野 誠治、齋藤 兆古、"共振型インダクタのフィルタへの応用"、1995年2月、MAG-95-32

# ビッター法による動的磁区挙動に関する研究

石井 隆 齋藤 兆古\* (法政大学大学院)

Research on Dynamic Magnetic Domain Movement by Bitter Method  
Takashi Ishii, Yoshifuru Saito\*, (Hosei University)

We visualize the magnetic wall dynamics of ferromagnetic materials when impressing the vertical and horizontal alternating magnetic fields to the specimens and extract 1/f fluctuating frequency characteristics. As the result, we try to extract a difference between the vertical and horizontally directed magnetization characteristics.

キーワード：強磁性体，磁区挙動，可視化，1/fゆらぎ，鉄損，ビッター法  
(Ferromagnetic materials, Magnetic wall dynamics, Visualization, 1/f fluctuating frequency, Iron loss, Bitter method)

## 1. 緒論

磁性鋼板は電気・電子機器を構成する主要な材料である。一般に、磁性材料は磁区と呼ばれる微小磁石の集合で構成され、外部磁界に応じて材料中の磁気エネルギーが最小となるように磁区が変化する。すなわち、磁性材料の磁化過程は外部磁界に対する磁区挙動である。所望の磁化特性を持つ材料開発・評価に、磁区挙動の可視化は磁化過程を掌握するために重要な役割を担う。磁区挙動の可視化は、磁性コロイド溶液を用いたビッター法、電子顕微鏡に拠る方法、磁気光学効果を利用した方法等で行われる。ビッター法は手軽な方法であるが、磁区間の磁壁しか観察できない。また、磁気光学的方法は磁性体表面の磁区挙動可視化に限定される。電子顕微鏡に拠る方法は磁性体内部の磁区挙動を観察可能とするが、高価な機器を必要とする。

従来、我々は磁区の電子顕微鏡画像から磁性体の磁化特性を抽出する全く新しい方法を提案した<sup>1)</sup>。現在、我々は安価な設備で磁性体の磁壁を可視化可能とするビッター法を用いて磁性体の磁化特性を抽出する方法を開発している<sup>2)</sup>。

本稿では、強磁性体の磁壁移動をビッター法で可視化し、磁区動画像の特徴を1/fゆらぎ周波数分布特性で評価する。また、磁区画像の画素値より求めた磁化特性と赤外線カメラによる熱分布より鉄損について幾つかの考察を行う。

## 2. 磁壁移動の可視化と磁化特性

### 2.1 ビッター法による磁壁移動の可視化

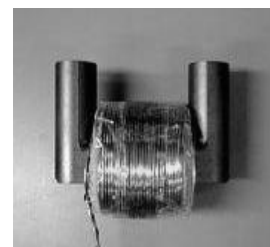
試料台に試料を載せ、研磨した試料面にスポットで磁性コロイド溶液をたらし、カバーガラスを載せて観察する。強磁性体微粒子（酸化鉄）のコロイド液を強磁性体表面につけると、コロイド液内に分散していた酸化鉄の微粒子が、磁壁付近の急峻な磁化変化に起因する表面の漏れ磁束の傾斜に引き付けられて集まり、表面近傍の磁壁の観測ができる。この引き付けられた微粒子を光学顕微鏡で観察する。この原理は、マグネットビューワなどの商品に応用されており、比較的面倒な実験準備を必要とせず実行可能である<sup>2)</sup>

### 2.2 交流磁界中の磁壁移動と磁化特性

図1に本研究で使用した実験装置と励磁コイルを示す。図2に周波数1[Hz]の交流磁界を印加した場合の磁区のフレイム画像例を示す。図3は供試材料のB-H磁化特性である。



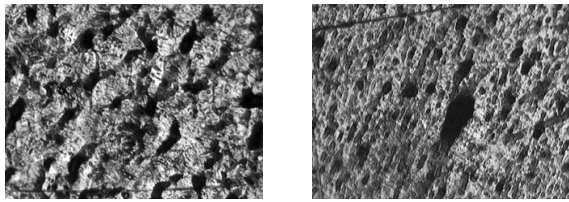
(a) Entire measurement system



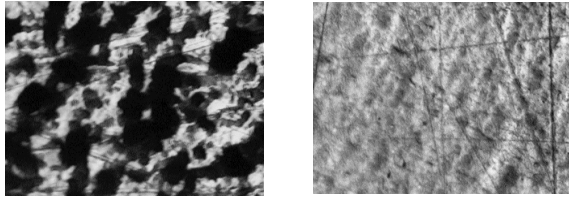
(b) Exciting coil and yoke

図1 実験装置

Fig.1 Experimental devices

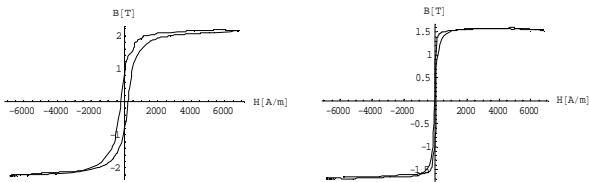


(a)Soft iron. (b)Silicon steel.

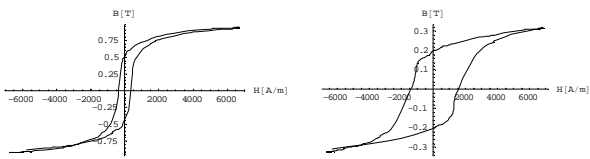


(c)Permalloy45%. (d)Nickel.

図2 サンプルの磁区フレーム画像.  
Fig.2 Sample flame images of dynamic magnetic domain walls



(a)Soft iron. (b)Silicon steel.



(c)Permalloy45%. (d)Nickel.

図3 各サンプルの磁化特性.  
Fig.3 B-H Loops of the tested magnetic materials.

### 2.3 E型フェライトコア上の磁区動画像

図4に示すように、E型の中央に励磁コイルを巻き、方向性珪素鋼板および無方向性珪素鋼板、パーマロイ45%に交流磁界を印加させた場合の各点における磁区動画を図5-7に示す。

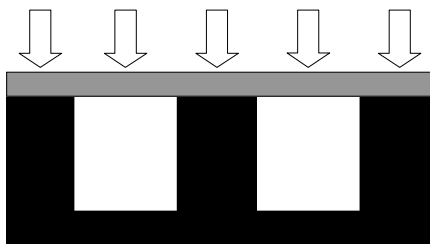
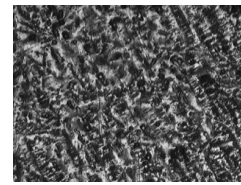
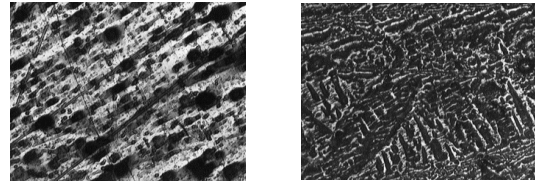


図4 実験装置

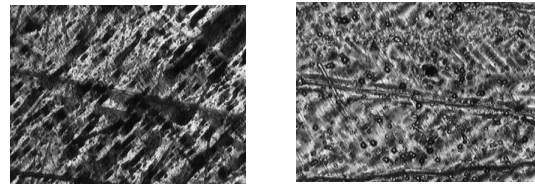
Fig.4 Experimental Devices.



(a)Point 1



(b) Point 2 (c) Point 3



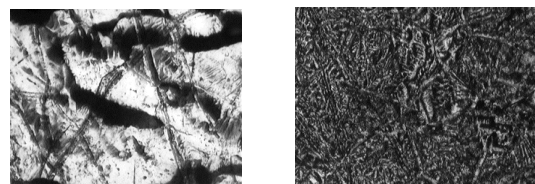
(d) Point 4 (e) Point 5

図5 各点における磁区画像  
サンプル：方向性珪素鋼板

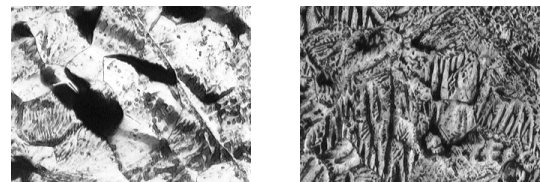
Fig.5 Flame images of magnetic domain at each of the positions. 1, 2, 3, 4, and 5  
Sample: Grain Oriented Silicon Steel.



(a)Point 1



(b) Point 2 (c) Point 3

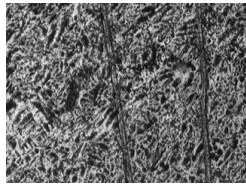


(d) Point 4 (e) Point 5

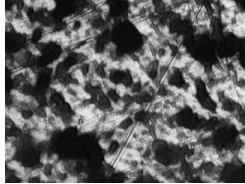
図6 各点における磁区画像.サンプル  
無方向性珪素鋼板

Fig.6 Flame images of magnetic domain at each of the positions. 1, 2, 3, 4, and 5.  
Sample: Non-Oriented Silicon Steel.

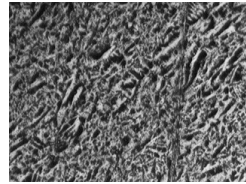




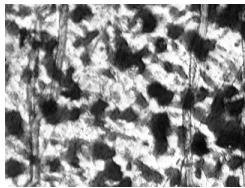
(a) Point .



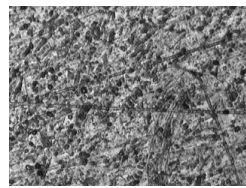
(b) Point .



(c) Point .



(d) Point .



(e) Point .

図7 各点における磁区画像  
サンプル：パーマロイ 45%

Fig.7 Flame images of magnetic domain at each of the positions . , . , . and .  
Sample: Permalloy45%.

### 3. 磁区画像の 1/f ゆらぎ周波数特性

#### 3.1 1/f ゆらぎ周波数特性

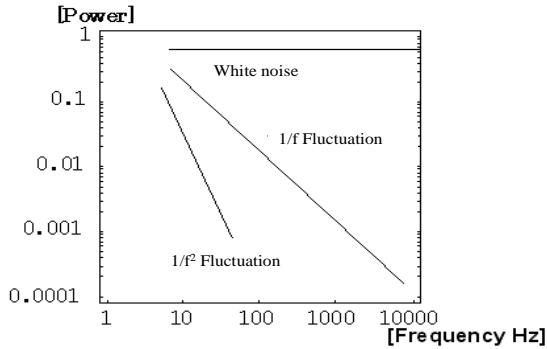


図8 フーリエパワースペクトラム

Fig.8 Typical Fourier power spectrum.

「1/f ゆらぎ」は小鳥の囀りなどの自然界に多く存在する。図8に示すように、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と言われている。

磁区動画の 1/f ゆらぎは磁区画像のフレーム方向変化、すなわち、時間の変化によって生成される。

### 3.2 磁区画像の 1/f ゆらぎ

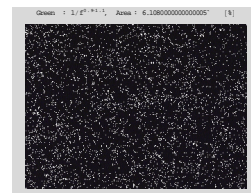
図9-11に図4で示した各点それぞれにおける方向性珪素鋼板、無方向性珪素鋼板、パーマロイ45%の磁区画像の1/f ゆらぎ周波数分布を白黒二値化させた画像を示す。白色の点は1/f ゆらぎを表し、それ以外は黒色である。

また、方向性珪素鋼板、無方向性珪素鋼板、パーマロイ45%の1/f周波数分布特性を式(1)で評価した結果を表1、表2、表3に示す。

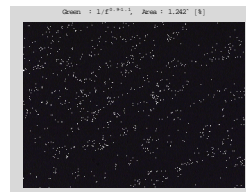
$$\frac{1/f \text{を呈する画素数}}{\text{全画素数}} \times 100[\%] \dots \dots \dots (1)$$

コアヘッド上の point .、point .、point . とコアヘッド間の point .、point . の1/f周波数分布特性を比較すると、コアヘッド上の方が1/f ゆらぎ数が多く表れていることがわかる。すなわち、水平磁界を印加させた場合より、垂直磁界を印加させた場合の方が1/f ゆらぎ数が顕著に表れる。

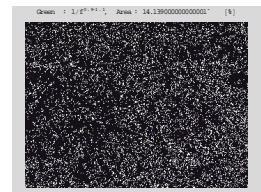
また、方向性珪素鋼板と無方向性珪素鋼板を比較した場合、無方向性珪素鋼板はコアヘッド間で方向性珪素鋼板より1/f ゆらぎが多く抽出された。



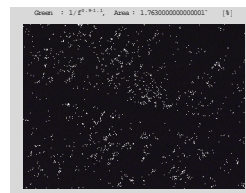
(a) Point .



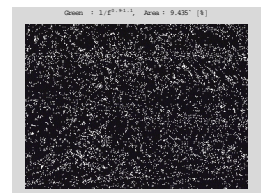
(b) Point .



(c) Point .



(d) Point .



(e) Point .

図9 各点における 1/f ゆらぎ

サンプル：方向性珪素鋼板

Fig.9 Extracted 1/f frequency fluctuation of non-oriented silicon steel

. , . , . and . refer to the sampled points

White point denotes 1/f frequency pixel

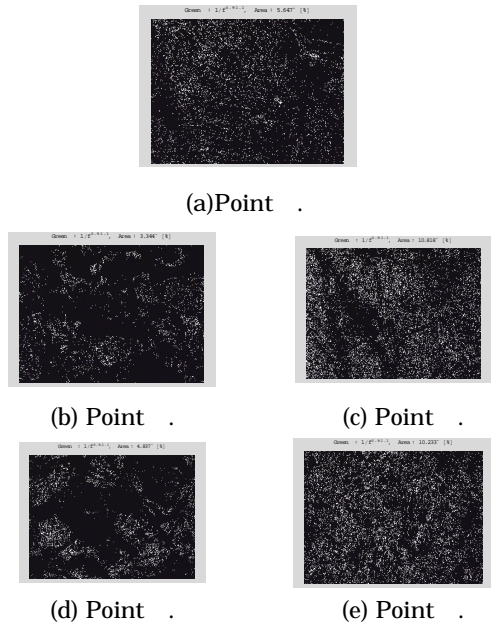


図 10 各点における 1/f ゆらぎ  
 サンプル：無方向性珪素鋼板  
 Fig.10 Extracted 1/f frequency fluctuation  
 of non-oriented silicon steel.  
 , , , and refer to the sampled  
 points  
 White point denotes 1/f frequency pixel

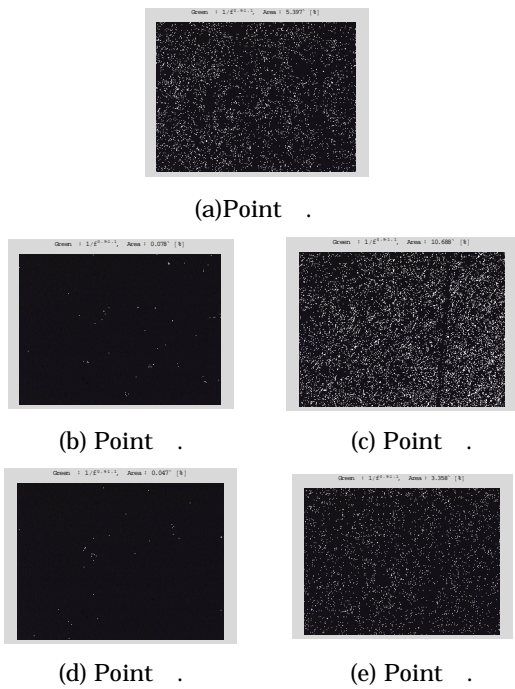


図 11 各点における 1/f ゆらぎ  
 サンプル：パーマロイ 45%  
 Fig.11 Extracted 1/f frequency fluctuation  
 of permalloy45%  
 , , , and refer to the sampled  
 points  
 White point denotes 1/f frequency pixel

表 1 方向性珪素鋼板における 1/f ゆらぎ周波数特性  
 Table1 1/f frequency fluctuation characteristic of  
 grain oriented silicon steel

The Point.	Extraction Rate.
	6.11%
	1.24%
	14.13%
	1.76%
	9.43%

表 2 無方向性珪素鋼板における 1/f ゆらぎ周波数特性  
 Table2. 1/f frequency fluctuation characteristic of  
 non-oriented silicon steel.

The Point.	Extraction Rate.
	5.65%
	3.34%
	10.82%
	4.84%
	10.23%

表 3 パーマロイ 45%における 1/f ゆらぎ周波数特性  
 Table3. 1/f Frequency fluctuation characteristic  
 of permalloy45%.

The Point.	Extraction Rate.
	5.40%
	0.08%
	10.69%
	0.05%
	3.36%

#### 4 磁化特性と鉄損

##### 4.1 磁区動画像と磁化特性

図 12 に示すように、継鉄を構成するフェライトコアの中央に励磁コイルを巻き、軟鉄板に交流磁界を印加させた場合の各点における磁区動画像を図 13 に示す。図 14 は磁化特性である。

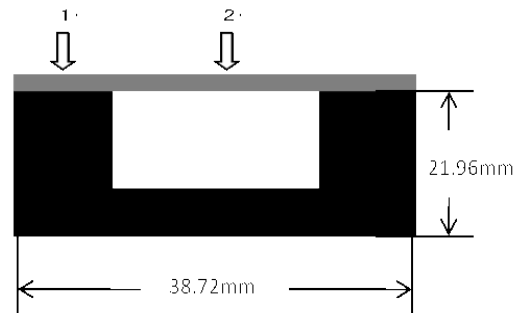
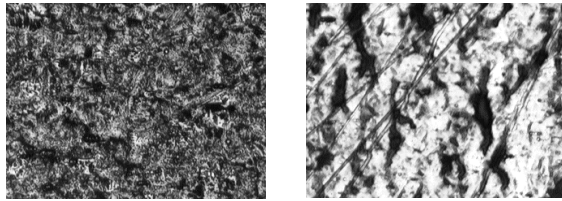


図 12 実験装置  
 Fig.12 Experimental device



(a) Point . (b) Point .

図 13 2点における磁区画像.サンプル:軟鉄.

Fig.13 Flame images of magnetic domain dynamics of soft iron.

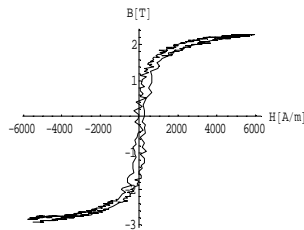
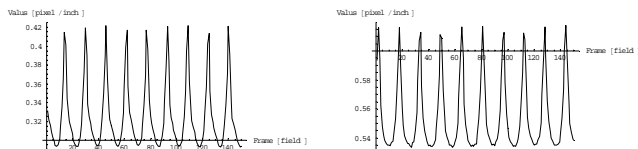


図 14 磁化特性.サンプル:軟鉄

Fig.14 Magnetization characteristic of soft iron.

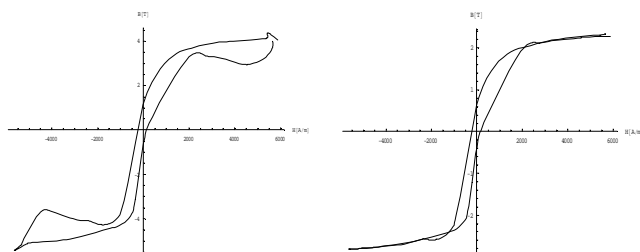
#### 4.2 モノクロ動画の平均画素値と磁化特性

図 15 は図 13 に示す各モノクロフレーム画像の画素値の平均値を時間方向へプロットした波形である。図 14 の磁化特性を基準として図 12 の point の平均画素値の磁束密度を決定した。図 16 は point と point の画素値より求めたそれぞれの磁化特性を示す<sup>3-5)</sup>。



(a) Point . (b) Point .

図 15 モノクロフレーム画像の画素値の平均値  
Fig.15 Average pixel values in each of the flame images in time t axis



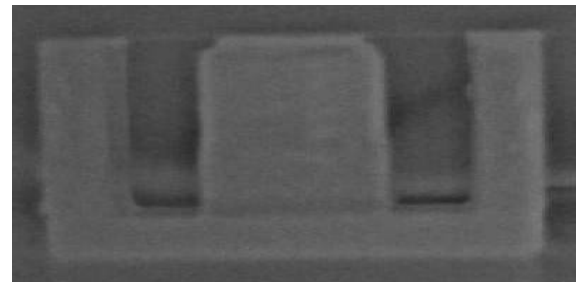
(a) Point . (b) Point .

図 16 画素値より求めた磁化特性.  
サンプル:軟鉄

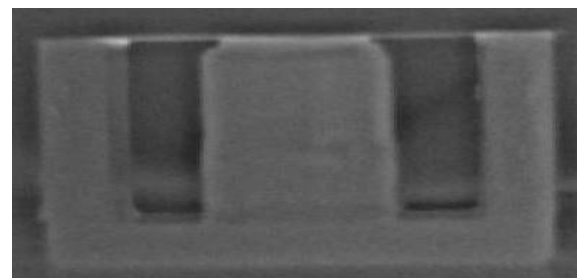
Fig.16 Magnetization characteristics of soft iron evaluated from the pixel values

#### 4.3 赤外線カメラによる熱分布

図 17 と図 18 に図 12 の実験装置に 1[kHz]の交流磁界を印加した場合の側面と垂直方向から見た赤外線画像をそれぞれ示す。



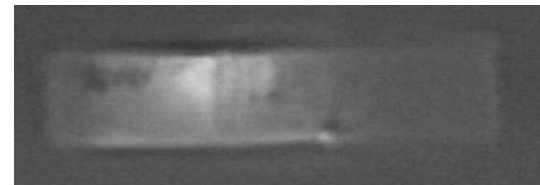
(a)0 秒



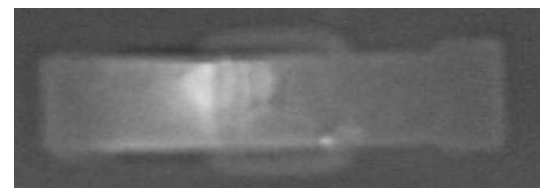
(b)60 秒

図 17 側面から見た赤外線画像

Fig.17 Side view of the infrared images



(a)0 秒



(b)60 秒

図 18 垂直方向から見た赤外線画像

Fig.18 Vertical view of the infrared images

#### 5. まとめ

本稿では、E型フェライトコアを継鉄として強磁性体板を交流磁化した場合の磁区動画を撮影し、1/f ゆらぎ周波数の抽出を行った。その結果、コアヘッド間の長手方向磁界が支配的な部分より、コアヘッド上の垂直磁界が支配的な部分の方が 1/f ゆらぎ周波数の数が顕著であることが判明した。従って、1/f ゆらぎ数と鉄損の関係性より、1/f ゆらぎ数が多い部分は鉄損が大きいと考えられる<sup>2)</sup>。すなわ

ち、磁束の流れの方向が変化する部分の鉄損が大きくなる可能性を示唆している。

また、無方向性珪素鋼板は、方向性珪素鋼板よりコアヘッド間、すなわち、長手方向における  $1/f$  ゆらぎ周波数の数が多く観測された。これは、結晶中の原子配列方向がランダムであることに起因すると考えられる。但し、 $1/f$  ゆらぎ周波数の数は個々のサンプル中での相対値であり、サンプルが異なれば単純に  $1/f$  ゆらぎ周波数の数で鉄損の大きさを比較できない点に注意すべきである。

次に、U字型フェライトコアを継鉄として薄板状強磁性体の動的磁区画像を可視化した。画素値による磁化特性の抽出を行い、その結果、コアヘッド上の垂直磁界が支配的な部分はコアヘッド間の長手方向磁界が支配的な部分に比較してB-Hループ幅が大きくなり、鉄損が大きくなる可能性が示唆された。すなわち、磁束の流れる方向が変化する部分の鉄損が大きく可能性を明らかにした。

また、赤外線カメラによる鉄損分布の検証実験を行った。明確な鉄損の実験結果を得ることは出来なかったが、長手方向の赤外線画像より継鉄のエッジ部分から熱が広がることがわかった。サンプル磁性体の上方、すなわち、垂直方向の赤外線画像から明確な温度分布の差異が観察されなかった。これは、面方向の熱拡散が良いためと考えられる。

## 参考文献

- 1) Hisashi Endo, Seiji Hayano, Masahiro Fujikura, Hisashi Mogi, Chikara Kaido and Yoshifuru Saito; Magnetic domain dynamics visualization, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 15 (2001/2002) 409-416
- 2) 須永高志、寺西正晃、齋藤兆古、堀井清之：ビッター法による可視化画像から  $1/f$  ゆらぎの抽出、可視化情報学会シンポジウム、2006年7月、A311.
- 3) 石井隆、齋藤兆古、堀井清之：動的磁壁画像の可視化による強磁性体の磁化特性、可視化情報学会シンポジウム、2009年7月、P01-004
- 4) 石井隆、齋藤兆古：動的磁壁画像の可視化による強磁性体の磁化特性と  $1/f$  ゆらぎ周波数特性、可視化情報学会全国講演会、2009年10月、P01-004
- 5) 石井隆、齋藤兆古、堀井清之：強磁性体の動的磁区画像と周波数ゆらぎ特性に関する幾つかの考察、可視化情報学会シンポジウム、2010年7月、P01-001
- 6) 石井隆、齋藤兆古：ビッター法による磁区画像の可視化とその応用、可視化情報学会全国講演会、2010年10月、P01-001

# 時間領域信号の周波数ゆらぎ解析とその応用

野嶋 悟士 齊藤 兆古\* (法政大学大学院)

Application of the Frequency Fluctuation Analysis to the Time Domain Signals  
Satoshi Nojima, Yoshifuru Saito\* (Hosei University)

Ferromagnetic materials are widely used as the frame parts of various artificial products and constructions. Because of its mechanical property, iron steel is most popular in use for the frame materials. Nondestructive testing of iron steel is an extremely important way to maintain their mechanical reliability.

As is well known fact that Barkhausen signal emitted from only the ferromagnetic materials having magnetic domain structures changes its property depending upon their past mechanical as well as radioactive stress.

In the present paper, it is clarified that apply the frequency fluctuation analysis to the Barkhausen signal makes it possible to detect the past stress experiences.

キーワード：バルクハウゼン現象、 $1/f$ ゆらぎ、信号認識  
(Barkhausen phenomenon,  $1/f$  Fluctuation, Signal cognition)

## 1. 緒 論

多くの時間領域一次元信号はオシロスコープで電気信号として可視化される。音声信号や計算機のクロック信号などが代表例である。これらの信号の中で、人間の可聴周波数である音声信号はキーボードを經由せずに計算機へコマンドを直接に入力可能とするため、計算機と人間間の有力なインターフェイスと考えられ、これを実現するために音声認識・識別方法が鋭意研究開発され、一部実用化されている。

本研究の目的は原子炉容器のような大型構造物から画鋲のような小型のものまで極めて広汎に主要材料として使われている主として鉄を主成分とする強磁性材料の機械的ストレスや放射線欠損などの履歴を強磁性材料が発する固有の信号であるバルクハウゼン信号処理によって識別する方法の提案である。

従来から強磁性材料のバルクハウゼン信号は過去の応力履歴や残留応力によって変化することは極めて良く知られている。しかしながら、従来の信号処理技術の何れを適用してもバルクハウゼン信号の変化から強磁性材料の応力履歴などの確実な識別が困難であった。この理由は簡単であり、いわゆるバルクハウゼン信号はバルクハウゼンノイズとも呼ばれるように再現性に乏しく、規則性や周波数特性が簡単に掌握できない点にある。

近年の巨大な半導体素子の超集積化技術がもたらした IT

技術の一分野に音声信号認識・識別技術がある。本研究はこれらの IT 関連信号処理技術を背景とする信号のゆらぎ周波数特性に着目し、強磁性材料特有のバルクハウゼン信号の応力履歴に起因するゆらぎ周波数特性を解析し、従来、不可能であった強磁性材料の応力履歴などを識別できる可能性を明らかにする。

本稿では、まず最初にバルクハウゼン信号測定時に必然的に伴う環境ノイズに対するゆらぎ周波数特性を解析し、環境ノイズのゆらぎ周波数特性を掌握することで環境ノイズの影響を可能な限りの削減を試みた。その結果、主として構造材として使われる鉄系強磁性材料におけるバルクハウゼン信号が応力の有無により異なるゆらぎ周波数特性を持つことを明らかにする。

## 2. 時間領域信号の解析

### (2-1) 強磁性体の磁化

消磁状態の強磁性体に磁界  $H$  を徐々に加えていくと、磁束密度  $B$  は図 1 に示すように、最初は緩やかに増加し、次に急激に増加し、また緩やかな増加となり、最終的には一定値に近づく。この曲線が初期磁化曲線 (initial magnetization curve) と呼ばれるものである。この曲線において、領域を

- (a) 初透磁率領域
- (b) 非可逆的磁化領域
- (c) 飽和領域

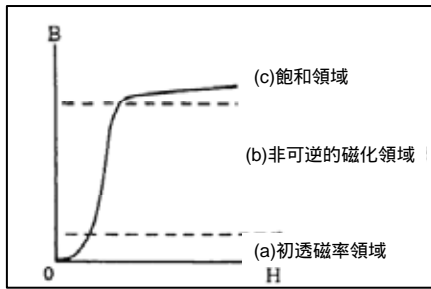


図 1 初期磁化曲線

Fig. 1. Initial magnetization curve.

の 3 領域へ分類することが出来る。(a)初透磁率領域では

$$B = \mu_i H + \frac{1}{2} \nu H^2 \dots\dots\dots (1)$$

磁化特性が表される式が成り立つ。ここで  $\mu_i$  は初透磁率 (initial permeability)、 $\nu$  を Rayleigh の定数といい、式(1)が成り立つ領域を Rayleigh 範囲という。(c)飽和領域では、磁気ヒステリシスの影響は小さく、磁気飽和によって B-H 関係が支配される。したがって、磁束密度 B が磁界 H の一価関数で表現でき

$$B = \frac{H}{a + bH} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{H}{B} = a + bH$$

なる式が成り立つ。式(2)は Frolich の関係式と呼ばれる。

2.2 バルクハウゼン信号

多くの金属材料中で、鉄は最も広汎に使われる構造材である。鉄は機械的性質が制御可能であり、コスト的にも安価である。これが構造材として広汎に使われる理由であろう。鉄は強磁性体であり、強磁性体の磁化過程は、(a)可逆的磁壁移動、(b)非可逆的磁壁移動、さらに(c)可逆的回転磁化領域へ分類される。図 1 に示す磁化曲線で考えれば、レイリーの法則が成り立つ範囲が可逆的磁壁移動による磁化過程範囲であり、非可逆的磁壁移動による磁化過程は不連続な磁壁移動で磁化されるために再現性は無く、初透磁率領域、飽和領域とは違い特定の関係式で表す方法は見出されていない。この非可逆的磁壁移動領域(b)の磁化過程で生ずる信号がバルクハウゼン現象と呼ばれる強磁性体特有の現象である<sup>2)</sup>。

図 2 に示すように磁性体の周囲へコイルを巻き、磁性体近傍で磁石を運動させるとバルクハウゼン現象に起因する電圧がコイルに誘起する。この電圧を増幅してスピーカーへ入力すればスピーカーからバルクハウゼンノイズ (Barkhausen noise) 音が聞かれる。

本稿ではバルクハウゼン現象に起因する時間領域 1 次元信号を最終的な解析対象とし、信号収録において必然的に混入する環境ノイズのゆらぎ周波数特性を最初に解析し、環境ノイズを掌握し削減した後に得られるバルクハウゼン信号のゆらぎ周波数解析を行う。

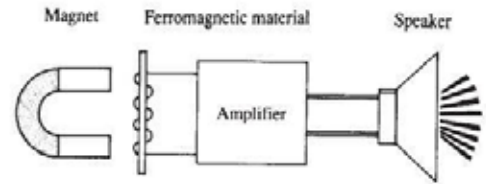


図 2 バルクハウゼン信号生成例

Fig. 2. Barkhausen signal generation.

2.3 1/fゆらぎ

1/f ゆらぎとは自然界の鳥のさえずりや小川のせせらぎなどに存在する特有の周波数特性である。信号のパワースペクトラムが周波数に反比例する場合、すなわち、フーリエパワースペクトラム対周波数の両対数グラフで傾きが - 1 になるものを特に「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。本稿では、信号の「1/f ゆらぎ」のみならずゆらぎ周波数特性を信号の“固有の情報”として捉え、「固有の情報」と呼ぶ。

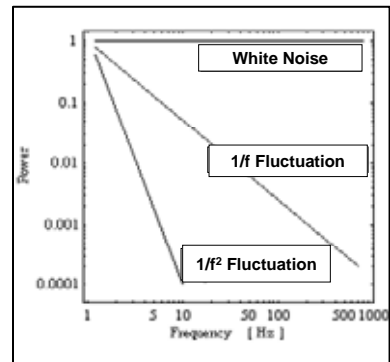


図 3 サンプルフーリエパワースペクトラム

Fig. 3. Typical Fourier power spectra.

3. 実験

3.1 実験材料・装置

厚さ 0.15mm、長さ 30mm の珪素鋼板を供試材として取り上げた。供試材に太さ 0.2mm のホルマル線で作成した 300 回巻きの空芯サーチコイルを着脱することにより、誘起電圧およびバルクハウゼンノイズを測定できる装置を作成した。

実験に用いた材料を図 4 に示す。これらの材料を応力が加わっていない状態である珪素鋼板 A、供試材料の中央 b 点に 3kg の重しを糸に吊るし、応力を加えた珪素鋼板 B の 2 つに分類した。実際に応力が加わっている箇所は珪素鋼板 B の b 点のみである。

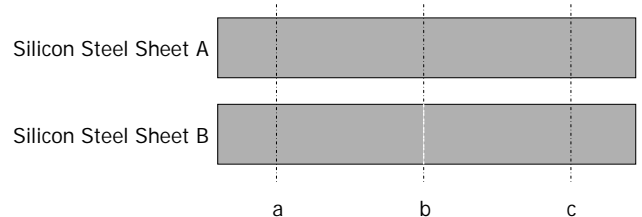


図 4 供試材料

Fig. 4. Experimental materials.

強磁性体を磁化する励磁コイルと継鉄を図 5 に示す。励磁コイルと継鉄は、それぞれ太さ 0.6mm のホルマル線を 300 回巻いたコイルと U 字型フェライトコアである。励磁コイル両脚に位置する磁極間に供試材を乗せて固定したのち、励磁コイルに電流を流し、磁極間の供試材料を均一に磁化する。

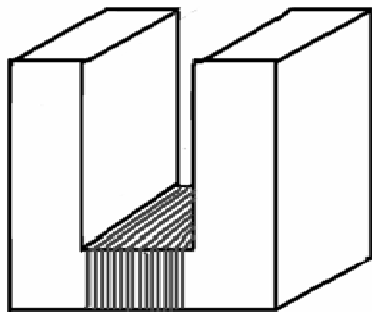


図 5 U字型フェライトコア及び励磁コイル

Fig. 5. Exciting coils and U-shaped ferrite yoke core.

### 3.2 環境ノイズ

環境ノイズは広汎な周波数に跨るのみならずその位相も変化する。そこでサーチコイルに誘起する環境ノイズそのものを測定対象とし、ゆらぎ周波数特性解析を行うことで、時々刻々変化する環境ノイズを「周波数ゆらぎ」の度合いによって分類することを試みる。

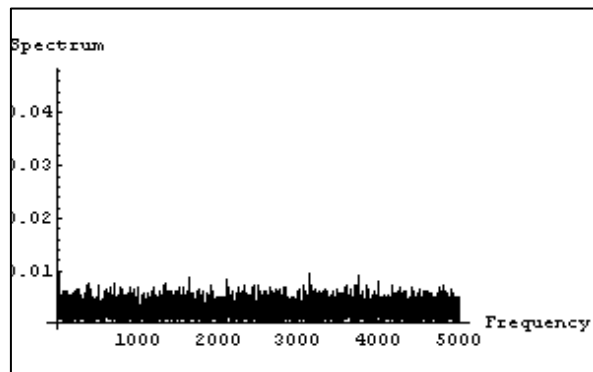
本稿では実験の再現性を確認するため 30 回ノイズを測定し、それぞれについて解析を行った。これらの中から、4 個のフーリエスペクトラム例を図 6 に示す。

図 6 に示す環境ノイズのフーリエスペクトラム間の相関係数は、掲載していないデータも含め、30 信号全てに対して 0.3 以下であり、全く同じ環境ノイズはひとつとして存在しないランダム信号であることが判明した。

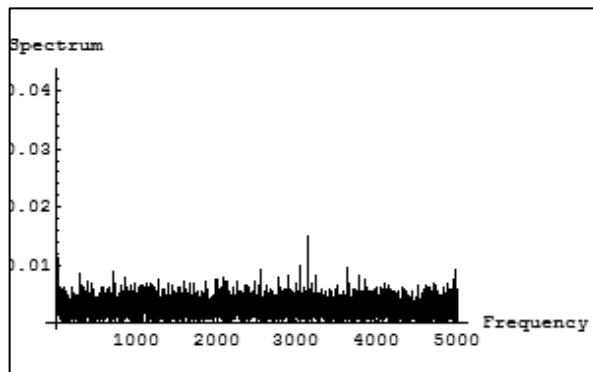
環境ノイズの高周波領域におけるゆらぎ周波数特性は大部分同じであり、周波数に無関係な一定値を取る。環境ノイズの低周波領域のゆらぎ周波数特性解析結果を図 7 に示す。図 7 の結果から、環境ノイズは低周波領域のゆらぎの多寡によって、大きく以下の 4 ケースに大別出来る。

- ゆらぎ周波数特性 「0~0.2」
- ゆらぎ周波数特性 「0.2~0.4」
- ゆらぎ周波数特性 「0.4~0.6」
- ゆらぎ周波数特性 「0.6~」

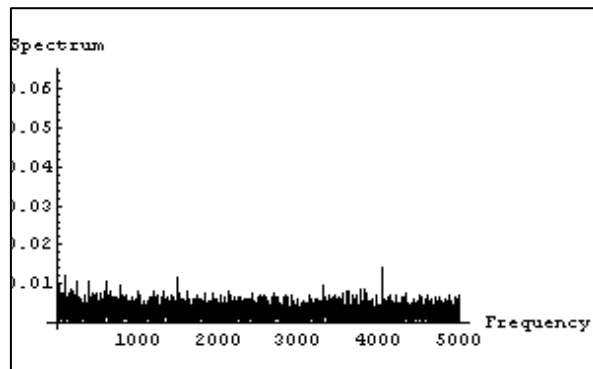
掲載していないデータを含め、ノイズデータ 30 個は全て上記の 4 分類の何れかに属することが判明した。この 4 分類は特定の実験室内の環境で可能な分類であり、全ての環境ノイズがゆらぎ周波数特性によって 4 分類可能であるわけでは無い点に注意が必要である。



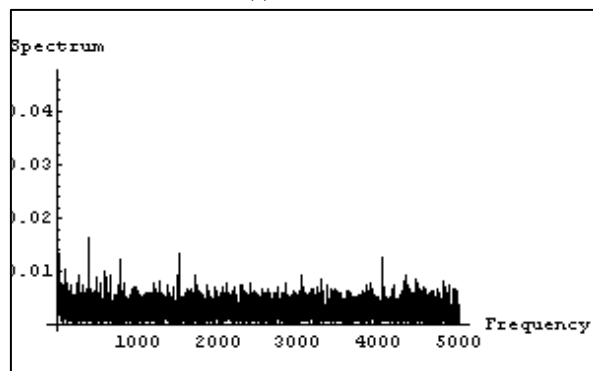
(a) Noise a.



(b) Noise b.



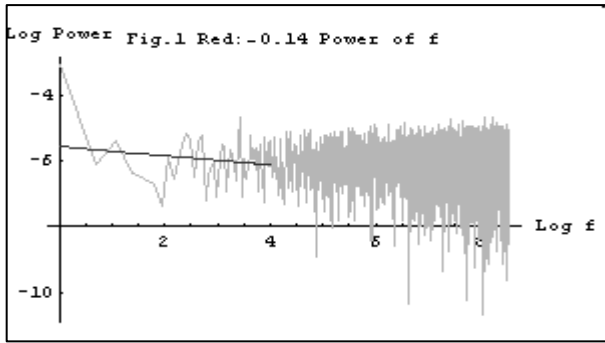
(c) Noise c.



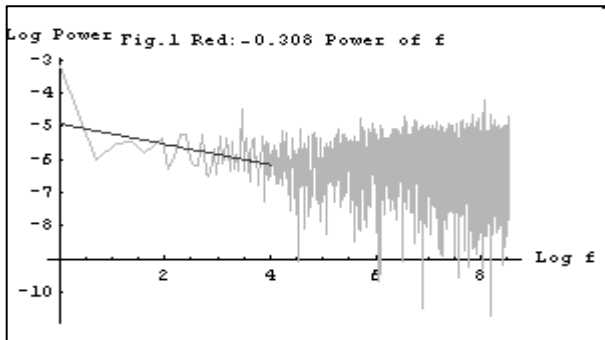
(d) Noise d.

図 6 サンプル環境ノイズのフーリエパワースペクトラム

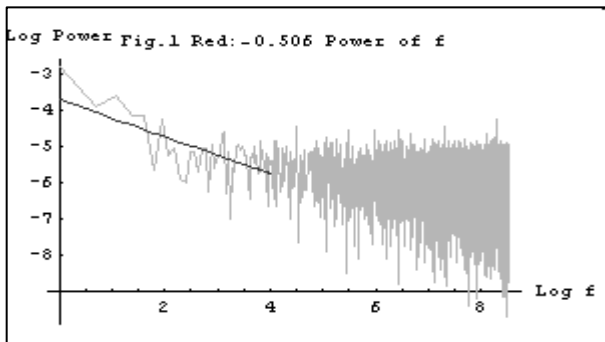
Fig. 6. Fourier power spectrum vs. frequency characteristics of environmental noise.



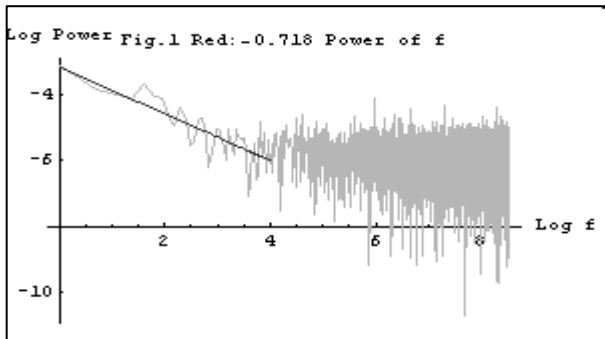
(a) Noise a Gradient:-0.14



(b) Noise b Gradient:-0.308



(c) Noise c Gradient:-0.506



(d) Noise d Gradient:-0.718

図7 サンプル環境ノイズの低周波領域における  
ゆらぎ周波数特性

Fig. 7. Frequency fluctuations of the noise calculated  
by 1<sup>st</sup> order least squares.

尚、高周波領域においては環境ノイズのゆらぎ周波数特性は殆ど同じであり、周波数に無関係に一定値となり、環境ノイズ間で大きな差異は見られなかった。

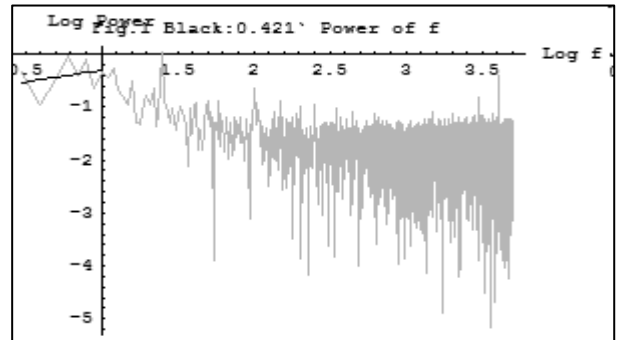
### 3-3 実験結果

バルクハウゼン信号のパワースペクトラムから 4 ケースに大別した環境ノイズのパワースペクトラムを削減し、その結果得られるデータの縦軸と横軸それぞれの対数を取り、低周波領域におけるゆらぎ周波数解析を行う。直線近似する領域を 3 領域へ細分化するが、それぞれの内訳は以下の通りである。

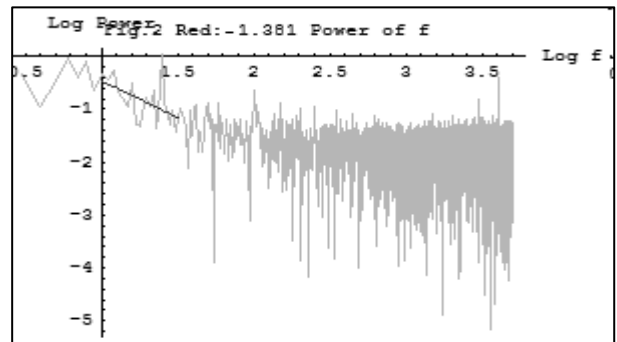
領域 Log 0.477121(最小値) ~ Log 1 (図 8(a)参照)

領域 Log 1 ~ Log 1.5 (図 8(b)参照)

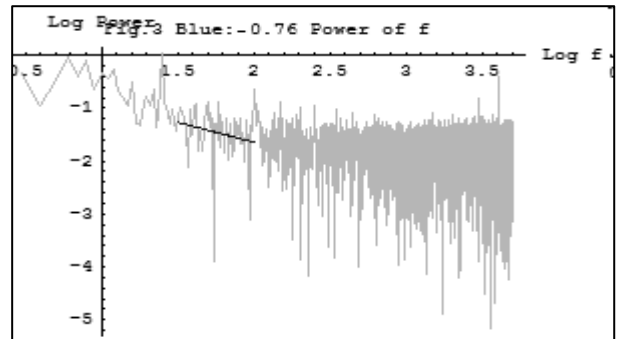
領域 Log 1.5 ~ Log 2 (図 8(c)参照)



(a) Range minimum to Log 1.



(b) Range 1 to Log 1.5.



(c) Range 1.5 to Log 2

図8 バルクハウゼン信号の低周波領域における  
ゆらぎ周波数解析例

Fig. 8. Gradient calculation at low frequency range of a  
typical Barkhausen signal by 1<sup>st</sup> order least squares.



解析結果の例を図 8 に示す。さらに、最も顕著に差異が観察された領域 について纏めた結果を図 9、10 に示す。図 9、10 で縦軸はゆらぎ周波数の傾き、横軸は同一材料のサンプル数である。

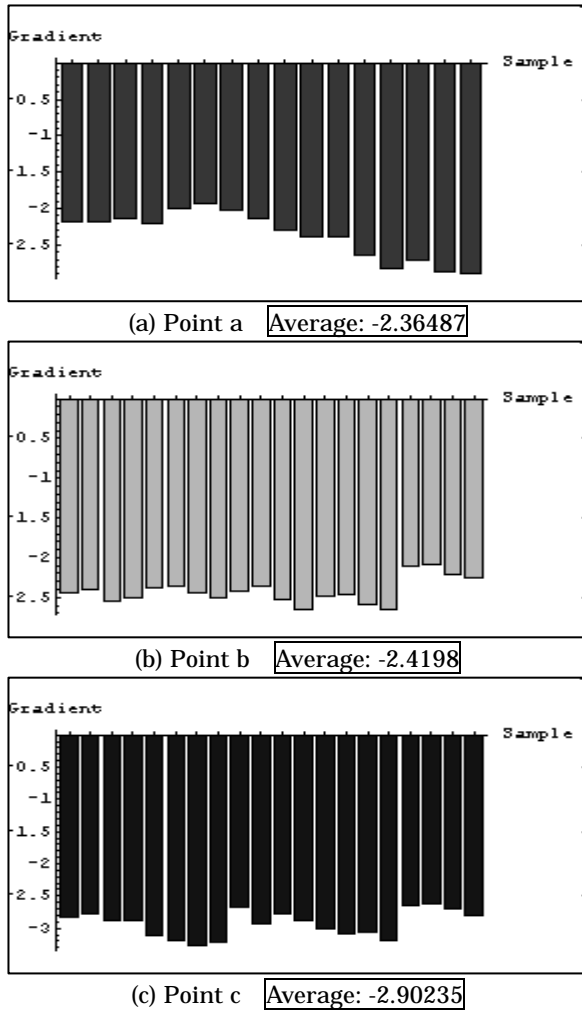


図 9 珪素鋼板 A の各点における低周波領域ゆらぎ周波数解析結果

Fig. 9. Results of gradient calculation at low frequency range of a silicon steel sheet A by 1<sup>st</sup> order least squares.

図 9、10 から、応力を加えた点においては他の点とは明らかに異なるゆらぎ周波数特性が観測されることがわかる。すなわち、図 9 に示す応力が加えられてない珪素鋼板 A では、サンプルやサンプル上の位置によらずゆらぎ周波数の傾きは -2 以上の傾きを呈するが、図 10 に示す応力が加えられている珪素鋼板 B の Point b では、サンプルによらずゆらぎ周波数の傾きは -2 以下で -1 に近い傾きを呈することが明らかである。

#### 4. まとめ

本論文では強磁性体のバルクハウゼンノイズの特徴を抽出する一方法としてゆらぎ周波数解析を用いる方法を提案し、応力の有無識別へ応用した。バルクハウゼン信号は本質的にランダム性の強いノイズに近い性質を呈するため、

バルクハウゼンノイズ測定時に必然的に伴う環境ノイズ対策が必要である。

本稿では、まず最初に環境ノイズそのもののゆらぎ周波数特性を解析し、その結果を用いて環境ノイズの影響を削減し、応力の有無に抛る珪素鋼板のゆらぎ周波数特性の相違を吟味した。その結果、応力の有無それぞれが呈するバルクハウゼンノイズの差異を、低周波領域のある特定範囲のゆらぎ周波数特性から識別可能であることが判明した。

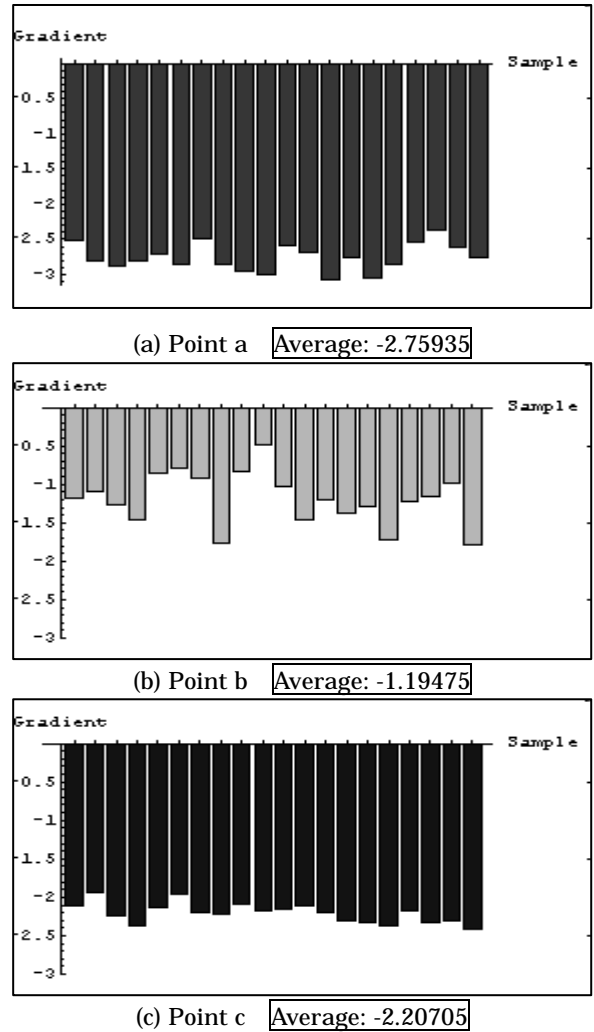


図 10 珪素鋼板 B の各点における低周波領域ゆらぎ周波数解析結果

Fig. 10. Results of gradient calculation at low frequency range of a silicon steel sheet B by 1<sup>st</sup> order least squares.

#### 文 献

- (1) 寺西正晃、丸山和夫、早野誠治、齊藤兆古：「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、2005 年 7 月、B108
- (2) 勝又理毅、早野誠治、齊藤兆古：「バルクハウゼン現象の可視化法に関する一考察」、可視化情報シンポジウム、2003 年 7 月、B203
- (3) 野嶋悟士、齊藤兆古：「時間領域信号のゆらぎ周波数解析とその応用」、可視化シンポジウム、2010 年 10 月、P00-04