

Application of Frequency Fluctuation Analysis to Barkhausen Signals and its Application

S. Nojima and Y.Saito

Graduate School of Electrical Engineering, Hosei University, 3-7-2 Kajinotyo, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan

Ferromagnetic materials are widely used for cars, trains, and ships. Because of their mechanical properties, iron and steel are popularly used for the frame materials. Nondestructive testing of iron and steel is an extremely important way of maintaining their mechanical reliability. It is well known fact that Barkhausen signals are only emitted from ferromagnetic materials having magnetic domain structures. Also these signals change their properties depending on their past mechanical as well as radioactive stress histories.

We applied a method of analyzing frequency fluctuations to the Barkhausen signals to detect the mechanical stresses. We unexpectedly succeeded in finding that applying frequency fluctuation analysis to the Barkhausen signal made it possible to detect the mechanical stress. This was fact confirmed by applying our method to the 30 test ferromagnetic materials. Further, the environmental noise problem essentially accompanying measurement of the Barkhausen signals were taken into account by applying this frequency fluctuation analysis method to environmental noise.

Key words: Barkhausen phenomenon, 1/f frequency fluctuation, Signal cognition

バルクハウゼン信号の周波数ゆらぎ解析とその応用

野嶋悟士・齊藤兆古

法政大学大学院電気工学専攻, 東京都小金井市梶野町 3-7-2 (〒184-8584)

1. 結論

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入力を直接可能とする。この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。

主として鉄を主成分とする強磁性材料は原子炉容器のような大型構造物から画紙のような小型のものまで極めて広汎に使われている。本研究は、これらの強磁性材料が磁化に伴い発するバルクハウゼン信号に関するものである。すなわち、強磁性体の機械的ストレスや放射線欠損などをこのバルクハウゼン信号の周波数ゆらぎ解析によって識別する方法を提案する。

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良く知られている。しかし、従来の信号処理技術ではバルクハウゼン信号から強磁性材料の応力履歴などを高い信頼性で識別できなかった。この理由は単純で、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、単純なフーリエスペクトラム解析では規則性や周波数特性が簡単に掌握できないことに起因する。

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周波数ゆらぎ特性に着目した。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周波数ゆらぎ特性を解析し、従来、不可能であった強磁性材料の応力履歴などが識別可能であるかを検討する。

本稿では、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周波数ゆらぎ特性を解析し、環境ノイズの周波数ゆらぎ特性を掌握することで環境ノイズの影響を可能な限り削減することを試みる。その結果、主として構造物として使われる鉄系強磁性材料の呈するバルクハウゼン信号が応力の有無により明確に異なる周波数ゆらぎ特性を持つことを明らかにする。

すなわち、実務的には未だ多くの課題が存在するが、構造物の構造を支える主要材料である鉄へ加わる荷重が、強磁性体特有のバルクハウゼンノイズの信号処理で検出可能であり、構造物の安全性を保つ一非破壊検査法開発の一端に繋がることを報告する。

2. バルクハウゼン信号の解析

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 Fig.1 に示す初期磁化曲線が描かれる¹⁾。初期磁化曲線は、領域を

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

の 3 領域へ分類することが出来る。

- (a) 初透磁率領域では

$$B = \mu_i H + \nu H^2 / 2. \quad (1)$$

で磁化特性が良好に近似される。ここで μ_i は初透磁率、 ν を Rayleigh の定数である。

(b) 非可逆的磁化領域の特性は磁気履歴、磁化速度などに依存する。

(c) 飽和領域は各磁区内の磁化ベクトルの回転で磁化される領域であり、磁束密度 B が磁界 H の一価関数で近似でき

$$B = H / (a + bH).$$

$$1/\mu = H/B = a + bH. \quad (2)$$

なる関係式で良好に磁化特性が表される。

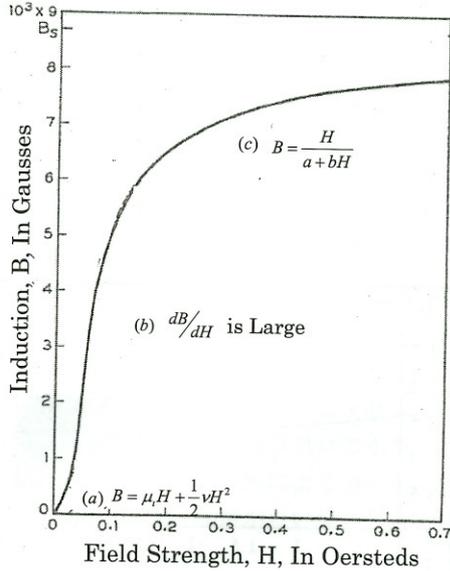


Fig. 1 Initial magnetization curve.

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る。鉄は強磁性体であり、強磁性体の磁化は 2.1 で示したような過程を辿る。この過程の中で、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。

Fig.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 次元信号であるバルクハウゼンノイズを最終的な解析対象とする。信号収録過程において必然的に混入する環境ノイズに対して、最初にゆらぎ周波数特性解析を適用する。これによって環境ノイズの周波数ゆらぎ特性を掌握する。最後に環境ノイズを削減したバルクハウゼン信号へ周波数ゆらぎ解析を適用する。

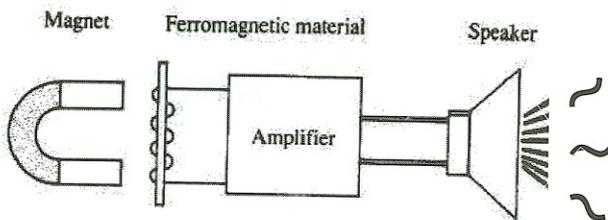


Fig. 2 Generation of Barkhausen signal.

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音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^{2,4)}。本稿では、信号の「1/f ゆらぎ」のみならず周波数ゆらぎ特性 f^α を信号の“固有の情報”として捉え、これを信号の固有特性と考える。

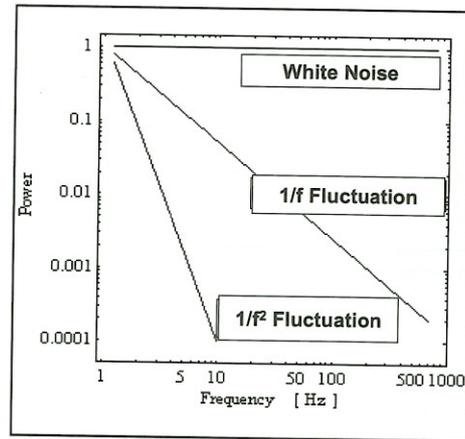


Fig. 3 Typical Fourier power spectra.

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。

実験に用いた試料を Fig.4 に示す。これらの試料を応力が加わっていない状態である珪素鋼板 A、供試材料の中央点 b に 3kg の重しを吊るして応力を加えた珪素鋼板 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 b 点のみである。

試料を木材で作られた台と台間に乗せ、糸で吊るした重しによるたわみを削減するために、試料の両端を木材で挟んで固定した。

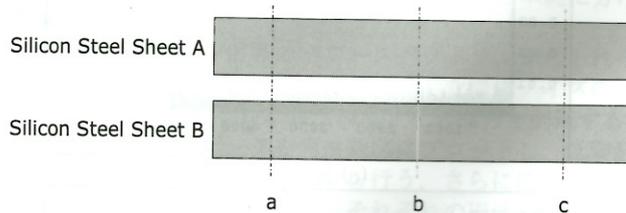


Fig. 4 Tested materials.

強磁性体を磁化する励磁コイルと継鉄を Fig.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磁化する。励磁電流は 1 Hz の正弦波である。本論文では、供試材料へ外部から応力(加重)が加わった場合のバルクハウゼン信号の変化を検出する信号処理手段を提案することが目的であるので、詳細は略す。

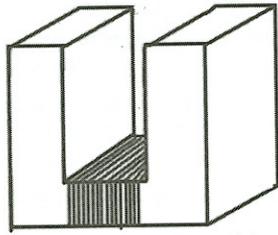
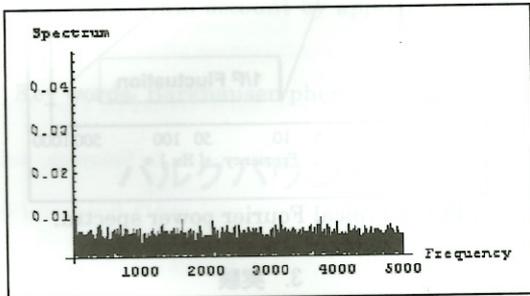


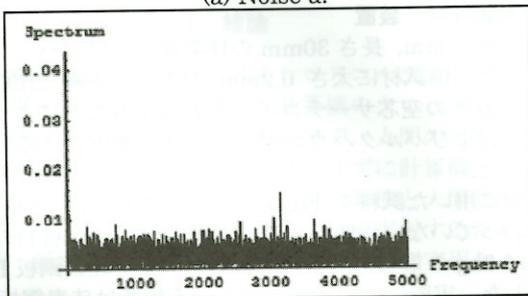
Fig. 5 Exciting coils and U-shaped ferrite yoke core.

3.2 環境ノイズ

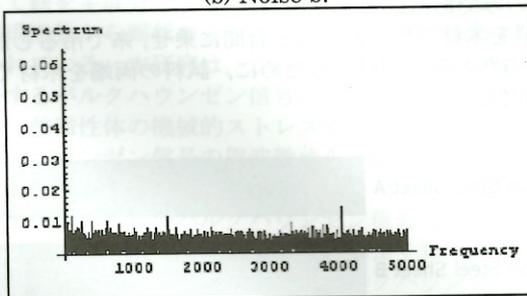
環境ノイズは広汎な周波数に跨るのみならずその位相も時々刻々と変化する。そこでサーチコイルに誘起する環境ノイズそのものを測定対象とし、周波数ゆらぎ特性解析を行う。これにより、時々刻々変化する環境ノイズを「周波数ゆらぎ」の度合いによって分類することを試みる。



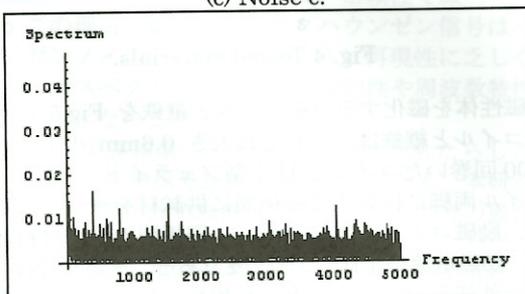
(a) Noise a.



(b) Noise b.



(c) Noise c.

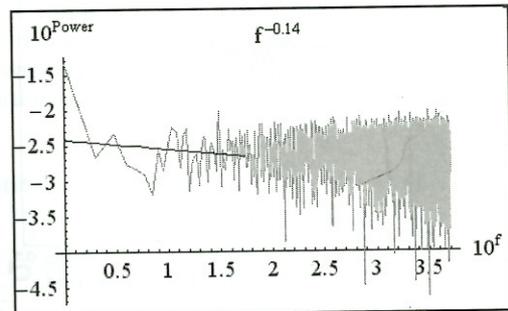


(d) Noise d.

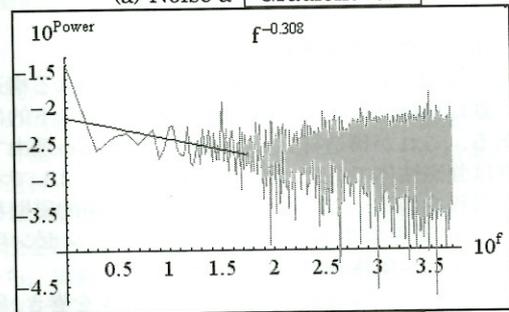
Fig. 6 Fourier power spectrum vs. frequency characteristics of environmental noise.

環境ノイズは文字通りノイズで測定毎に異なるパワースペクトラムを持ち、いずれの環境ノイズのパワースペクトラム間の相関係数は 0.3 以下である。実験室で午前 9 時から午後 6 時まで 30 回環境ノイズを測定し、環境ノイズのゆらぎ周波数特性を調べた。Fig.6 は環境ノイズの代表的なフーリエスペクトラムである。

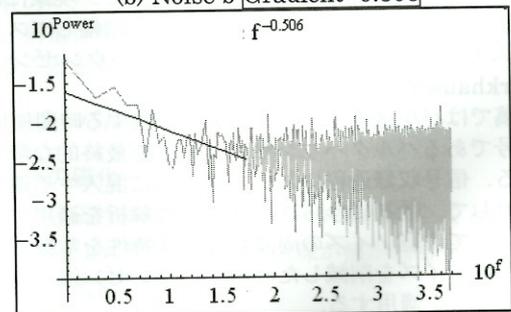
何れの環境ノイズのゆらぎ周波数特性も大きく分けて、周波数ゆらぎが傾きを持つ部分と傾きがゼロとなる部分へ 2 分できることが判明した。高周波部分はほぼ完全なホワイトノイズで、傾きはほぼゼロである。他方、低周波領域の周波数ゆらぎの傾きに差異が見られ、その差異を調べた結果、環境ノイズのゆらぎ周波数特性は傾きの値の範囲から 4 種類へ分類可能であることが判明した。



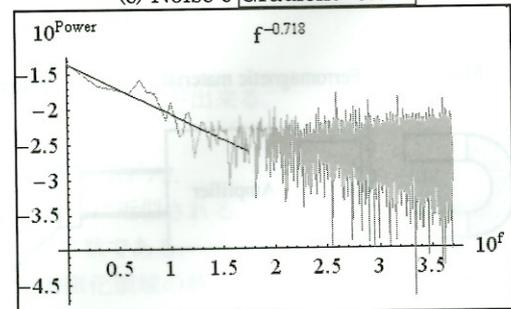
(a) Noise a Gradient:-0.14



(b) Noise b Gradient:-0.308



(c) Noise c Gradient:-0.506



(d) Noise d Gradient:-0.718

Fig. 7 Frequency fluctuations of noise calculated with 1st order least squares.

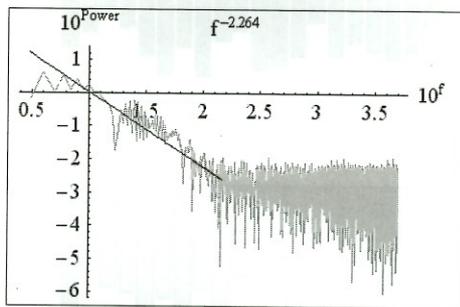
環境ノイズの低周波領域の周波数ゆらぎ特性解析結果を Fig.7 に示す. Fig.7 の結果から, 環境ノイズは低周波領域のゆらぎの多寡によって, 大きく 4 ケースに大別出来る.

- ①周波数ゆらぎの傾きの絶対値の範囲: 「 $0.0 \leq \alpha < 0.2$ 」
- ②周波数ゆらぎの傾きの絶対値の範囲: 「 $0.2 \leq \alpha < 0.4$ 」
- ③周波数ゆらぎの傾きの絶対値の範囲: 「 $0.4 \leq \alpha < 0.6$ 」
- ④周波数ゆらぎの傾きの絶対値の範囲: 「 $0.6 \leq \alpha$ 」

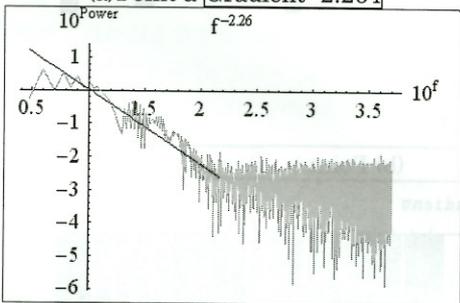
掲載していないデータを含め, ノイズデータ 30 個は全て上記の 4 分類の何れかに属することが判明した. この 4 分類は特定の実験室内の環境で可能な分類であり, 全ての環境ノイズがゆらぎ周波数特性によって 4 分類可能とは限らない点に注意を要する.

3.3 巨視的実験結果

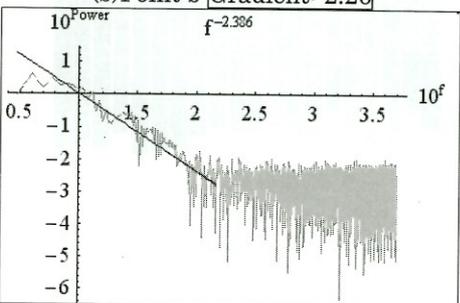
一般にゆらぎ周波数解析は非線形解析であり, 線形系の周波数応答などと本質的に異なり, 結果から判断する. すなわち, Figs.8,9 に示すように, バルクハウゼンノイズのゆらぎ周波数特性は結果として低周波と高周波帯域に分けられる, 高周波帯域は傾きがほぼゼロのホワイトノイズであり, 低周波帯域に加重の有無による違いが反映した. Fig.8 と Fig.9 はそれぞれ, 加重がない場合とある場合である.



(a)Point a Gradient:-2.264

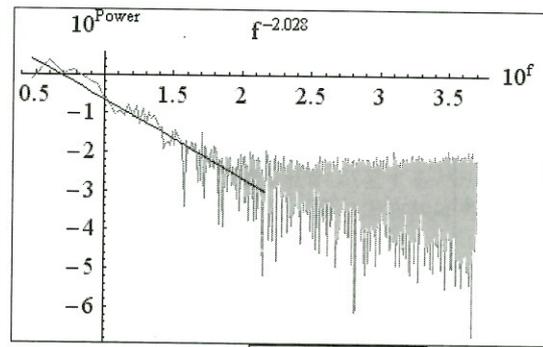


(b)Point b Gradient:-2.26

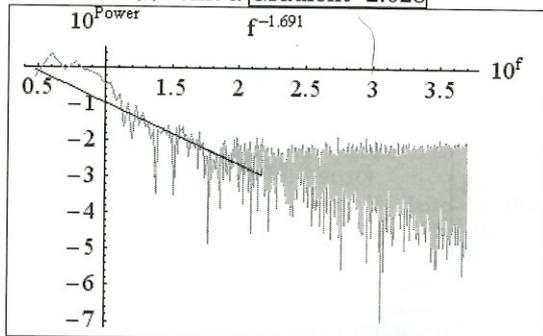


(c)Point c Gradient:-2.386

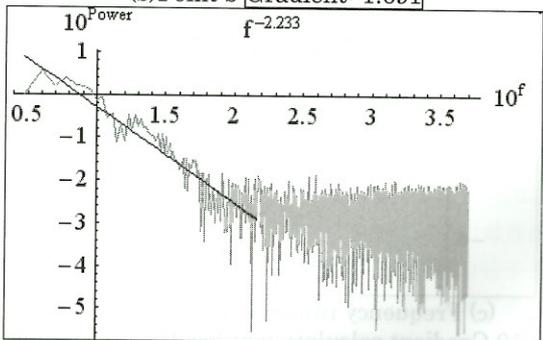
Fig.8 Gradient of low frequency ranges calculated by 1st order least squares applied to the silicon steel sheet .A.



(a)Point a Gradient:-2.028



(b)Point b Gradient:-1.691



(c)Point c Gradient:-2.233

Fig.9 Gradient of low frequency ranges calculated by 1st order least squares applied to silicon steel sheet B.

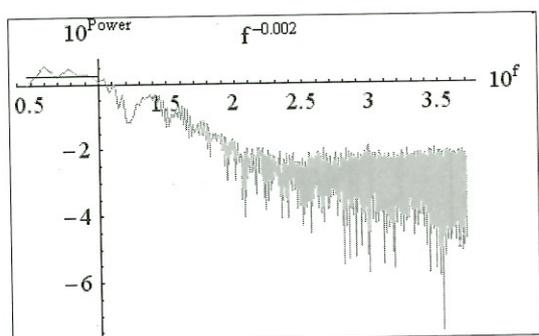
3.4 周波数領域の細分化

本論文では, 低周波帯域のどの辺りへ加重の相違が最も大きく反映するかを単純に低域, 中域, 高域と単純に分けて調べた.

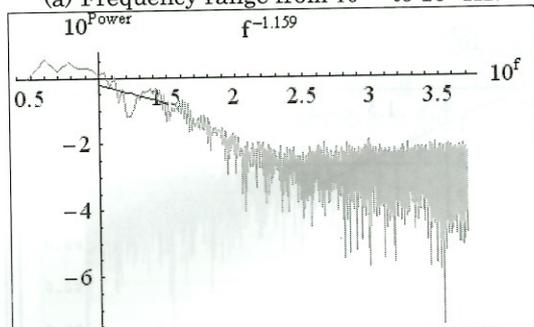
バルクハウゼン信号のパワースペクトラムからそれぞれの測定時に応じて, 4 ケースに大別した環境ノイズのパワースペクトラム中から, 該当環境ノイズ成分を削減する. その結果得られたデータを両対数図にプロットし, 低周波領域におけるゆらぎ周波数解析を行う. さらに直線近似する領域を 3 領域へ細分化する. それぞれの周波数領域は以下の通りである.

- ① 領域 $10^{0.48}$ (最小値) $\leq f < 10^1$ Hz (Fig.10(a)参照)
- ② 領域 $10^1 \leq f < 10^{1.5}$ Hz (Fig.10(b)参照)
- ③ 領域 $10^{1.5} \leq f < 10^2$ Hz (Fig.10(c)参照)

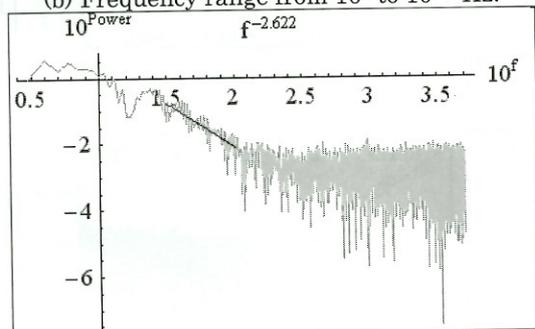
3 周波数領域, それぞれの周波数ゆらぎ特性を解析した結果の例を Fig.10 に示す. さらに, 最も顕著に差異が観察された周波数領域③について纏めた結果を Figs.11, 12 に示す. Figs.11, 12 で, 縦軸はゆらぎ周波数の傾き, 横軸はサンプル数である.



(a) Frequency range from $10^{0.48}$ to 10^1 Hz.

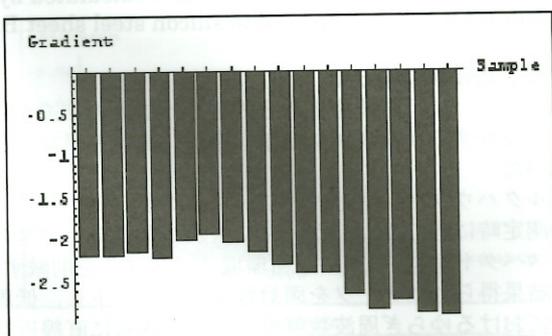


(b) Frequency range from 10^1 to $10^{1.5}$ Hz.

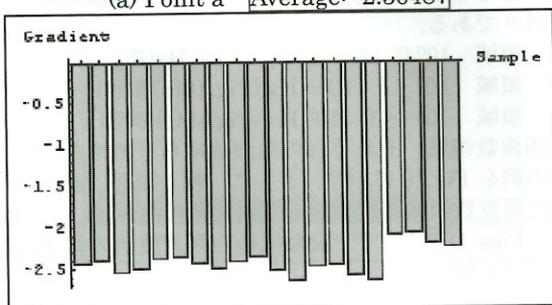


(c) Frequency range from $10^{1.5}$ to 10^2 Hz.

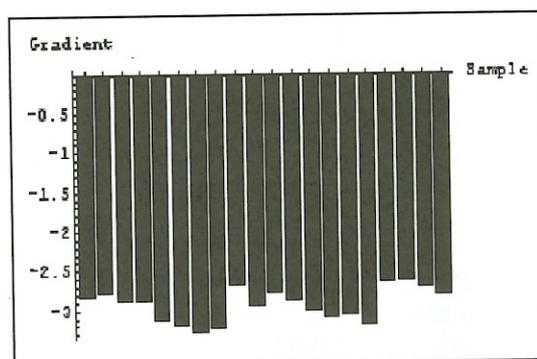
Fig. 10 Gradient calculation at low frequency range of typical Barkhausen signal by 1st order least squares.



(a) Point a Average: -2.36487

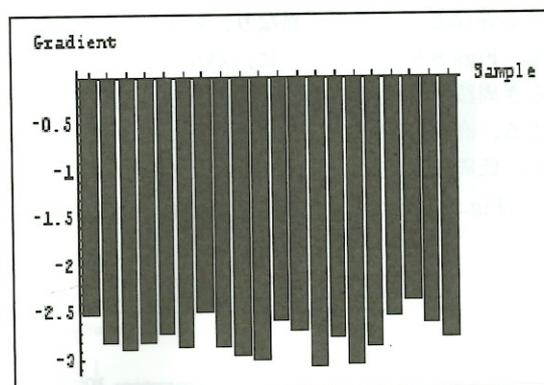


(b) Point b Average: -2.4198

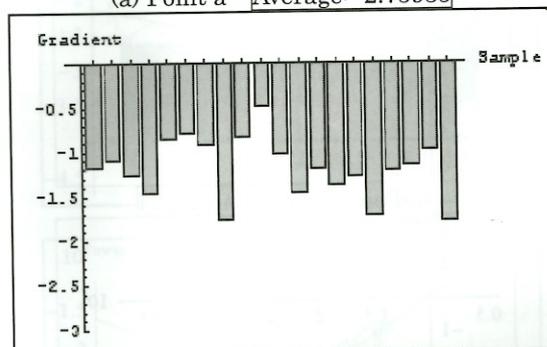


(c) Point c Average: -2.90235

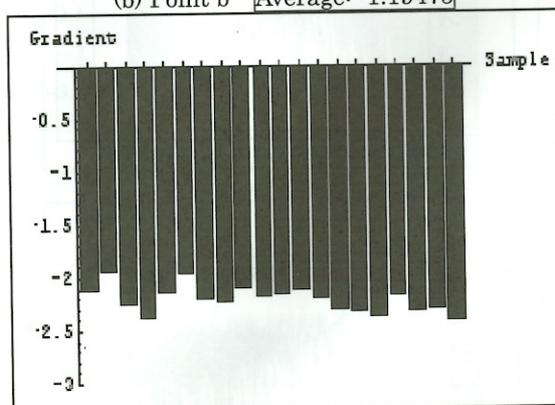
Fig. 11 Results of gradient calculation in low frequency range of silicon steel sheet A by 1st order least squares.



(a) Point a Average: -2.75935



(b) Point b Average: -1.19475



(c) Point c Average: -2.20705

Fig.12 Results of gradient calculation in low frequency range of silicon steel sheet B by 1st order least squares.

Figs.11, 12 から、応力を加えた珪素鋼板 B の b 点においては他の点とは明らかに異なる周波数ゆらぎ特性が観測

されることがわかる。すなわち、Fig.11 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。しかし、Fig.12 に示す応力が加えられている珪素鋼板 B の Point b では、サンプルによらず周波数ゆらぎの傾きは-2 以下で-1 に近い傾きを呈する。

以上の結果から、応力が加えられてない珪素鋼板は低周波数領域における周波数の増加に対して高調波の振幅が急速に減衰する単調なバルクハウゼンノイズを呈する。しかし、応力が加えられている珪素鋼板のバルクハウゼンノイズは低周波数領域における周波数の増加に対して高調波の振幅が緩やかな減衰となり、いわゆる $1/f$ ゆらぎ周波数特性へ近づく傾向を持つ。この結果に関する理論的な解釈を与えるべきであるが、現時点では確固たる実験的な検証が無く推論の域を出ない。このため、動的磁壁挙動とバルクハウゼンノイズの同時観測実験などの継続した実験結果を踏まえて議論すべきと考え、理論的解釈に関しては別の機会に譲る。

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周波数ゆらぎ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、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、応力の有無に拠る珪素鋼板の周波数ゆらぎ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特定周波数範囲の周波数ゆらぎ特性から識別可能であることが判明した。

これは多くの構造物の構造を支える主要材料である鉄系材料へ加わる荷重が、強磁性体特有のバルクハウゼンノイズの信号処理で検出可能であり、構造物の安全性を保つ一非破壊検査法開発の一端に繋がることを意味する。

References

- 1) R. M. Bozorth: *Ferromagnetism*, p. 462 (IEEE PRESS)
- 2) S. Nojima and Y. Saito: Application of Frequency Fluctuation on Time Domain Signal, *The Visualization Society of Japan*, P01-002, July (2010)
- 3) M. Katsumata, S. Hayano and Y. Saito: A Study of Barkhausen Phenomenon Visualization, *The Visualization Society of Japan*, B203, July (2003,)
- 4) M. Teranishi, K. Maruyama, S. Hayano, and Y. Saito: Visualization of $1/f$ Frequency Component in Dynamic Image of Natural Phenomena, *The Visualization Society of Japan*, B108, July (2005)

2011年2月7日受理, 2011年4月22日採録

About Color Vocabulary in *Gingatetsudo no Yoru* (*Night of Galaxy Railway*)

*M. Inami*¹, *Y. Saito*², *K. Horii*³

1. Department of Literature, Shirayuri College, 1-25 Midorigaoka, Chofu, Tokyo 182-8525, Japan.

2. Faculty of Science and Engineering, Hosei University, 3-7-2 Kajinocho, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan.

3. Department of Literature, Shirayuri College, 1-25 Midorigaoka, Chofu, Tokyo 182-8525, Japan.

Corresponding author *M. Inami*
minami@shirayuri.ac.jp

Abstract

The Color vocabulary in “Gingatetsudo no Yoru” 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.

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.

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

1. Introduction

The motivation behind this paper is to investigate the color vocabulary in the literary work. The discrete wavelets multi-resolution analysis has been applied to clarify the meaning and relation of “Ginga(galaxy)”, “Black” and “Blue” in “Gingatetsudo no Yoru (*Night of Galaxy Railway*)”.

Kenji Miyazawa (1896~1933) was born in Iwate Prefecture, graduated Morioka advanced agriculture and forestry school and its research course. The conflicts with father concerning the belief brought him to Tokyo. Afterwards, he returned home taking the opportunity of younger sister Toshi's sickness, and became a teacher at the agriculture school.

“Ginga” in “Gingatetsudo no Yoru” is a symbol [1] of Kenji's heaven or space and it is related to white color and light [2], [3]. White and the black appear alternately [4]. Also, “Ginga” expressed with white and light occupy an important position with the black, not only shows the contrast but also intertwines to other images as well as motif in the work [5]. “Blue” is Kenji's keynote color [6], and number of vocabularies concerning color used by Kenji is more than 100. In particular, “Blue” is the most frequently used color; also it is pointed out the tight relations with Kenji's spirits [7]. However, the style structure of each word has been neglected. The style analysis will be focused on more attention in this research, to which a mathematical method is employed to make the style structure of “Gingatetsudo no Yoru” more visible by increasing the objectivity of the otherwise subjective data. Thus, the discrete wavelets multi-resolution analysis has been applied to clarify the relation of “Ginga(galaxy)”, “Black” and “Blue” in the whole work.

2. Method of Analysis

2.1 Outline of text

In this paper, the elements, i.e. color terms, for analysis are selected from the book: “The complete works of “Shin kohon Miyazawa Kenji”[8].

The outline of the final type of “Gingatetsudo no Yoru” is as follows.

1. The Afternoon Class

Every day Giovanni delivers newspapers in the morning and goes to the printing works in the afternoon. So it is not possible to concentrate on study. He is sleepy and is difficult to answer the question of teacher about galaxy. Zanelli laughed to him and Campanella never answer sympathizing with Giovanni. Teacher explained about galaxy and said to his students to go outside because that night is for the Festival of the galaxy.

2. The Printing Works

After school, Campanella and Zanelli prepared for Festival but Giovanni goes to the printing works in the town. The work finished and Giovanni got one silver coin. After buying cube sugar and bread, he returned to the home in the evening.

3. At Home

He lived with sickly mother and was waiting his father who should have gone to the north to catch fish. Zanelli rumored that Giovanni's father was in the prison, and bantered that he will return with the souvenir of otter's jacket. Giovanni goes to the town to get milk that had not delivered and to see the Festival of the galaxy.

4. The Night of the Centaur Festival

Giovanni drove down an incline like the locomotive then he met Zanelli. He bantered Giovanni again. Arrived to the clock and watch shop, where there was a round black disk. In the town Giovanni met class mates, who bantered him. Giovanni feels lonely and climbed black hills.

5. The Weather Pole

Reaching the foot of the pole at the summit, Giovanni threw himself down panting on the cool grass. The galaxy flowed from the south to the north and the night train was running in a far uncultivated field in the sky. The light of the town looked like stars, and Giovanni entered the dream.

6. Galaxy Station

Suddenly a voice saying "Galaxy Station" came from somewhere, Giovanni noticed that he was in the train and Campanella was sitting directly in front of him. The train is running in the side of Cygnus near the Galaxy and going down toward the south.

7. The Northern Cross and the Pliocene Coast

At the Swan Halt, Giovanni and Campanella got off the train and went to "Pliocene Beach", picked up a walnut and saw a thick geological stratus.

8. The Bird-Catcher

The Bird-Catcher got into the train. He made candy with birds that hi had caught in the Galaxy. Giovanni ate the pressed herons. It tasted nicer than chocolate.

9. Giovanni's Ticket

When the conductor came to check the ticket, Giovanni showed green paper. It was the ticket with which he was able to go even to heavens. The Bird-Catcher had got off a previous station, and the young man with fragrant of the apple got into the train accompanying with boy and boy's elder sister. They said that as their ship had wrecked they came here. When Campanella was speaking only with the elder sister, Giovanni felt the sense of alienation. When the train passes by the place the land of Colorado, they met Indians. Further, they saw the bridge-building, blasting, and twin stars and scorpion fire. At Southern Cross, the young people get off the train. When tow boys were alone, Giovanni asked Campanella to go to search true happiness for everyone together. Suddenly Campanella disappeared in the coal sacks. At the same time Giovanni on the grass waked up and cried intensely. Giovanni returned to the town, and knew Campanella had dead by self-sacrificial for saving Zanelli who had in the river. At that moment Campanella's father informed Giovanni about his father's return from the sea.

2.2 Selection of the Element and Plan

The objective of this analysis was to visualize the element pattern in this work. The elements are selected by the author through reading. Table 1 is a result of selected elements, Table 2 is an explanation about selected elements and Table 3 is the examples of the sentences in which appeared each element. The element pattern was revealed through the analytical process; three elements

selections, Gram-Schmidt method and the multi-resolution analysis of wavelets. The wavelet analysis theory requires two steps:

- 1) The elements meaning “Ginga”, “Black” and “Blue” were selected and their frequencies in usage were counted from each chapter.
- 2) These data were analyzed by this method for visualizing the dominant elements.

Table 1 Number of Elements.

Chapter	Ginga	Black	Blue
1. The Afternoon Class	27	3	1
2. The Printing Works	1	0	2
3. At Home	1	0	1
4. The Night of the Centaur Festival	6	6	4
5. The Weather Pole	6	3	3
6. Galaxy Station	7	3	9
7. The Northern Cross and the Pliocene Coast	4	3	6
8. The Bird-Catcher	4	3	2
9. Giovanni's Ticket	30	22	21
Total	86	43	49

Table 2 Selected Elements.

Element	Example
No.1 Element “Ginga”	Galaxy, White collar, Light glistens etc.
No.2 Element “Black”	Black collar, darkness etc
No.3 Element “Blue”	Blue collar, blue light etc.

Table 3 Examples of elements

Element	Example
No.1 Element “Ginga”	Now, boys – what about this vague <u>white</u> blur that, as I just told you, ... ? What was it the twin <u>stars</u> did?
No.2 Element “Black”	The face of the young man in <u>black</u> was alight with joy as he answered the girl. “No, I wouldn’t be afraid to go down into that great <u>dark</u> hole, even, he said, “because I’m going in search of true happiness for everyone!
No.3 Element “Blue”	A man in a <u>blue</u> apron went past behind Giovanni. The yellow one would gradually retreat to the far side, while the smaller, <u>blue</u> one would come around to the front; ...

2.3 Wavelet Analysis

The concept of the vector is used for the elements of “Ginga”, “Black”, and “Blue”. “Ginga” is assumed to be a reference vector; all vectors are orthogonalized and excluded the overlapping elements by Gram Schmidt method. After that, the orthogonalized vectors are regularized in a unit norm.

The wavelet multi-resolution analysis is applied to the regularized data. In this study the Daubechies 2nd order base function is adopted as the base function to be able to understand the meaning of the operation processing.

The number of data handled by a discrete wavelets multi-resolution analysis should be composed of the power of 2. Therefore, the data vector consists of the n=16 piece of elements. This vector is composed by elements from the beginning till the 9 of the value of Table 1, and the value of seven remained elements is 0. The vector obtained by this way is assumed to Y. In addition, W is a wavelet transform matrix.

A wavelet spectrum vector S is given by

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{Y} \quad (1)$$

where \mathbf{W} is the wavelet transform matrix.

In case of applying the discrete wavelets multi-resolution analysis, especially Daubechies 2nd order base function is adopted, first level of wavelet spectrum (excluding the first one element of wavelet spectrum vector S; the rest of elements is assumed to be 0) corresponds the mean value of all elements. The second level (remaining only the second element of wavelet spectrum vector S; the rest of elements is assumed to be 0) shows the rate of change when all data is divided in the first half and the latter half. The third level (remaining the third and fourth elements of wavelet spectrum vector S; the rest of elements is assumed to be 0) means the rate of change divided all data into four. Therefore, when the number of data is $n=2^x$, the (X+1) level means the difference between adjacent elements.

For example, when the vector of (1) is given by

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

In this case, the wavelet transform matrix employing the Daubechies 2nd order base function is given by

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

From (1), wavelet spectrum vector S wave let Spectrum S is given by

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

Therefore, the level 1 of the wavelets multi-resolution analysis by this example as follows:

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

In the same way, level 2 and 3 are given respectively by (6) and (7).

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

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

Moreover, from the (5) to (7) consist as follows [9], [10], [11]:

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

The wavelets multi-resolution analysis is applies the same way as mentioned above.

3. Results and discussion

3.1 Elements of this story

Fig.1 shows the result of level 4 of the wavelet multi-resolution analysis. In Fig. 1, the horizontal and vertical axes correspond to the magnitude and the number of the chapters of three vectors, respectively.

In this figure, the level 4 by multi-resolution analysis of wavelets which is divided equally the story by 8, is chosen for discussions. In this paper we call 1 and 2 chapters the first part, 3 and 4 chapters the second part, 5 and 6 chapters the third part, 7 and 8 chapters the fourth part and 9 chapters the fifth part.

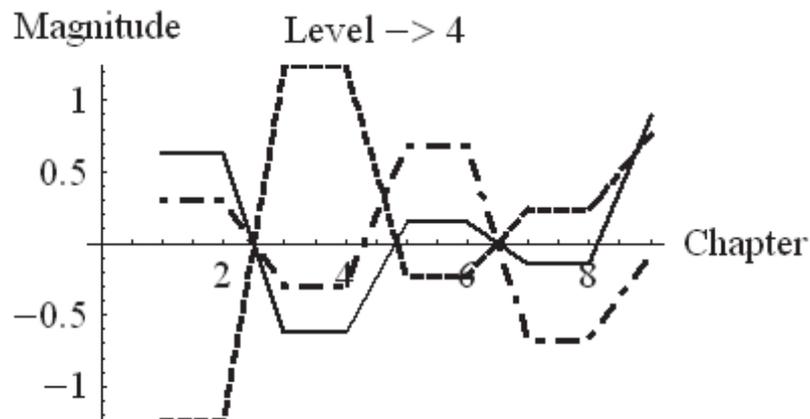


Fig.1 Level 4 of the discrete wavelets multi-resolution analysis:
patterns of 3 keywords.
Solid: Ginga, Dotted: Black,
Alternate long and short dash: Blue.

“Ginga” and “Blue” are high; on the contrary “Black” is low in the first part. “Black” is high and “Ginga” and “Blue” are low in the second part. In the third part, same tendency with the first part but “Blue” is higher than “Ginga” and “Black” is low. “Ginga” and “Blue” have decreased in the fourth part and “Black” has increased. In the fifth part, the end of the story, all elements increase, and the change in the frequency rises gradually.

3. 2 Results of “Ginga” and “Black”

From the first part to the fourth part “Ginga” and “Black” are different tendency but in the fifth part both are increasing.

The relation of “Ginga” and “Black” are contrary in the first and second part. The third and fourth parts, the change of frequency decreases. In the fifth part, both elements increase more than before, “Ginga” increases much more in case of “Ginga”.

In the first and second part indicates the absence of father, the sickness of mother, and problem in economy and human relations with his classmate. From the third part, Giovanni has entered the dream, and the contrast of elements becomes small from the third and fourth parts. When the train travels in the starts in the fifth part, contrast of elements disappears. The contrast of “Ginga” and “Black” has disappeared from suffering of the reality to ideal dream world.

3. 3 Results of “Ginga” and “Blue”

From the first part to the fifth part “Ginga” and “Blue” synchronize and in the fifth part both are increasing rapidly

In the first part, the teacher asked Giovanni about “Ginga”, but he hesitated to answer. He had the memories that Campanella had a toy train attached a signal on rail and the signal became blue when the train went passed in the second part. Ginga and the stars are shining in a blue corollary in the third and fourth part. The galaxy shines in blue in the world of dream more greatly than that of reality. Entering into deeper world of dream, “Ginga” increased more than “Blue”

3. 4 Results of “Black” and “Blue”

From the first part to the fourth part, the curve of “ Black “ and “Blue” move contrary and in the fifth part both are increasing rapidly.

In the real world, the big map of the constellation, the round disk shown the constellations, the gate of the milk shop are all black and bantered by Zanelli, Giovanni started running for the black hills in the first and second part. In the third and fourth part, at the galaxy station, with an announcement there was a flood of light. Inside the carriage, the seats were covered with blue-velvet and Giovanni met Campanella sitting in front of him in a black, wet-looking jacket. Stars were shining and flashing out of the train. The contrast of “Blue” and “Black” gradually disappears in the fifth part from suffering of the reality to the dream world.

4. Conclusions

- (1) “Ginga” and “Black” have almost opposite tendency and the exquisite contrast of both elements are visualized.
- (2) Almost similar tendency was seen in the “Ginga” and “Blue”. When the hero entered the dream world, “Blue” changes more greatly.
- (3) The tendency of “Black” and “Blue” are contradiction. In the sight and the phenomenal world, the difference of “Black” and “Blue” doesn't stand out because their luminosity is low. However, “Blue”, the base color of this work, is separated from “Black” and become a peculiar color. This means the writer created an original world which is different from the sight and the phenomenal world through the characters.
- (4) The movement of feeling of hero and many layers structure of three elements “Ginga”, “Black” and “Blue” are clarified from the beginning till the end by applying discrete wavelets multi-resolution analysis.
- (5) The key words of “Ginga”, “Black”, and “Blue” which had been obtained by the previous works were given objectivity by applying the discrete wavelets multi-resolution analysis and visualized the result.

References

- [1] Miyoshi Y., “Dictionary of modern Japanese literary, work edition”, Benseishuppan, (1994), p238.
- [2] Watanabe Y., “Dictionary of Kenji Miyazawa”, Benseishuppan, (2007), p199.
- [3] Murase M., “*What is Night of galaxy railway*”, Daiwashobo, (1989), pp 66-172.
- [4] Uemura K., “Symbolism of star in *Night of galaxy railway* (Special feature of human science)”, Bulletin of Konan university, Literary edition, 157, (2009), pp 1-42.
- [5] Tanaka M., “Image of flowing Story in *Night of galaxy railway* (Special feature of Japanese and Japanese literature)”, Bulletin of Konan university, Literary edition, 133, (2003), pp 1-18.
- [6] Ozawa T., “Study of flow with blue people, shadow in *Night of galaxy railway*”, Committee of nihon bungaku kenkyu shiryō kankokai, Yuseido, (2003), pp 1-42.
- [7] Miyazawa K., “Kenji Miyazawa, modern and half modern ages”, Yoyosha, (1983), pp 109-110, p 113.
- [8] Miyazawa K., “*Night of galaxy railway*”, The complete works of Shin kohon Miyazawa Kenji Vol. 11, Edition of story for children No. 4, Chikumashobo, (1996), pp 123-171.
- [9] Saito Y., “*Basics and application of wavelets transform with mathematica*”, Asakura Inc (1998), p39, pp 93-95.
- [10] Saito Y. and Kiyoshi Horii K., Patent: Analytical method and its system for the style of literary books, JP 10-102673A.
- [11] Saito Y., “*Introduction to image processing*”, Asakura Inc., (1998) pp.40-42.

講演論文集

第23回

「電磁力関連のダイナミクス」

シンポジウム

The 23rd Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD23)

会期:2011年5月18日(水)~20日(金)

会場:愛知県産業労働センター(ウインクあいち)

主催:日本AEM学会

共催:電気学会(産業応用部門), 日本機械学会

協賛:磁性流体研究連絡会, 日本液晶学会, 精密工学会, 日本鉄鋼協会, 日本磁気学会,

日本原子力学会, 計測自動制御学会, 日本シミュレーション学会, 低温工学・超電導学会

後援:財団法人大幸財団

信号伝送用非接触給電トランス

Transformers for Contactless Power Suppliers - Signal Transmitting Use -

大橋 竜也^{*1}(学生員)、齊藤兆古^{*1}(正員)

Tatsuya OHASHI (Stu. Mem.), Yoshifuru SAITO (Mem.)

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 contactless power supplier. As a result, we have succeeded in obtaining one of the core shape designing policies by observing the wavelets spectra of measured magnetic field vectors distributions. Furthermore, it is revealed that a tested trial transformer gives nearly 80 percent power transmission efficiency even though the primary and secondary coils are separated by 10mm air gap.

Keywords: contactless power suppliers, magnetic field visualization, wavelets multi-resolution analysis.

1 緒言

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広汎に普及し、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。

電気電子機器の広範な普及は単にそれらの機器を駆

動する電気エネルギーの給電のみならず、現代の電気電子機器は何らかの形でネットワークへ接続されて機能する。

本稿は電気自動車を前提とする非接触給電システムで、給電時に給電エネルギーに電気信号を重畳し、電気自動車の故障検知などの状態診断などを行うシステム開発に関するものである。本稿では、主として、非接触給電システムを構成する基幹要素としての一次二次コイル分離型トランス開発に係わる基礎研究成果を述べる。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 変圧器周辺磁界分布

2.1 一次・二次コア分離型単相変圧器

非接触給電システムでは一次・二次コイル分離型の変圧器を採用し、空隙を介して電力電送を行う。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、Fig.1 に示す 2 個の U 字型フェライトを用いた一次・二次コイル分離型単相変圧器と Fig.2 に示す 2 枚の平面型フェライトを用いた一次・二次コイル分離型単相変圧器を試作した[1,2]。

連絡先：大橋 竜也、〒184-8584 小金井市梶野町 3-7-2,
法政大学大学院工学研究科電気工学専攻齊藤兆古研究室,
e-mail: 07d3036@stu.hosei.ac.jp

^{*1} 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻

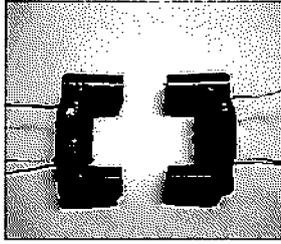


Fig.1 U shape ferrite core transformer.

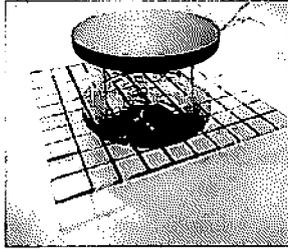


Fig.2 Flat shape ferrite core transformer.

2.2 周辺磁界ベクトル分布

Fig.3 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 である場合の磁界ベクトル分布図を示す。一次・二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。また、磁界分布測定には、二次側端子を開放している。

Fig.4 に平面型フェライトを用いた変圧器で、コア間が 40mm である場合の磁界ベクトル分布図を示す。一次・二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。この場合も U 字型コアと同様に、磁界分布測定時には、二次端子を開放している。

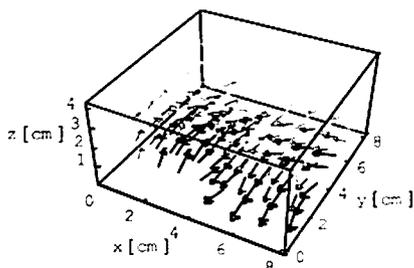


Fig.3 Magnetic field vector distribution around the U shape ferrite core transformer.

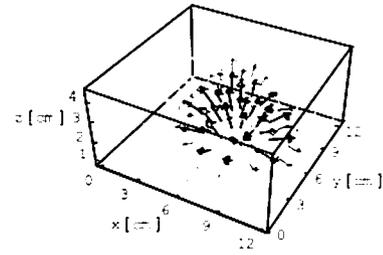


Fig.4 Magnetic field vector distribution around the flat shape ferrite core transformer.

3 磁界ベクトル分布のウェーブレット解析

3.1 離散値系ベクトルウェーブレット変換

一般に、三次元のウェーブレット変換は、三次元行列の転置行列を

$$[H_{lmn}]^T = H_{nml} \quad (1)$$

で表すと、

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

で与えられる[3,4]。ここで、 S はウェーブレットスペクトラム、 H は $l \times m \times n$ の立方マトリックス、 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行列である。さらに、 H の各要素が x、y、z 方向の 3 成分からなるベクトル

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

であるとき、式(1)、(2)より

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

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

$$S = \left[W_n \cdot \left[W_m \cdot \left[W_l \cdot X \right]^T \right]^T \right]^T + \left[W_n \cdot \left[W_m \cdot \left[W_l \cdot Y \right]^T \right]^T \right]^T + \left[W_n \cdot \left[W_m \cdot \left[W_l \cdot Z \right]^T \right]^T \right]^T \quad (5)$$

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[4]。

3.2 磁界ベクトルのウェーブレットスペクトラム

Figs.3、4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.3、4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。Figs.3、4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。

Fig.5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.6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。

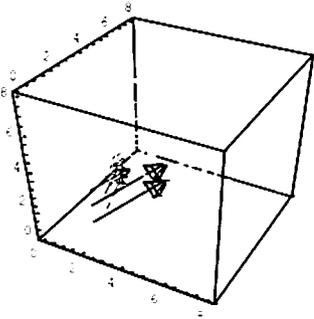


Fig.5 Wavelet spectra of the transformer employing U shape cores.

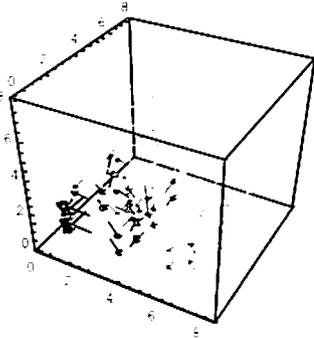
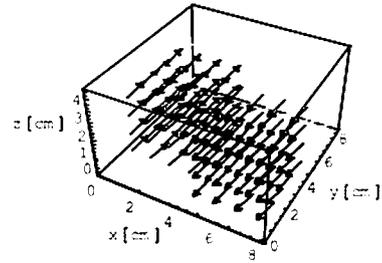


Fig.6 Wavelet spectra of the transformer employing flat shape cores.

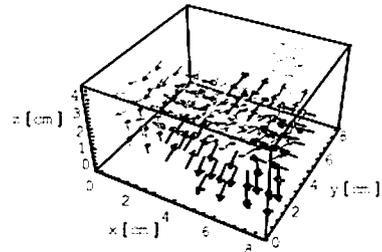
Figs.5、6は複数個のベクトルウェーブレットスペクトラムからなる。すなわち、Figs.5、6は空間周波数の低い、最も支配的なウェーブレットスペクトラムと空間周波数が高いウェーブレットスペクトラムからなる。Figs.5、6に於けるベクトルウェーブレットスペクトラムへ離散値系ウェーブレット変換の多重解像度解析を適用する。すなわち、Figs.5、6に於けるベクトルウェーブレットスペクトラムをそれぞれレベル毎にウェーブレット逆変換して再現された3次元磁界ベクトル分布を得る。それらを空間周波数の低い

いウェーブレットスペクトラムから順に、Level 1、Level 2、Level 3として、Figs.7、8に示す。

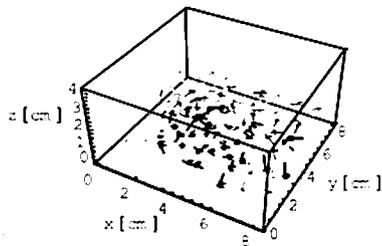
Fig.7(a)は明らかに空間に漏れのない無い、一次側コアと二次側コア間で磁気結合がなされている理想的な磁界分布を表しており、Figs.7(b)、(c)は磁氣的結合に直接寄与しない漏れ磁界分布を表している。



(a) LEVEL 1



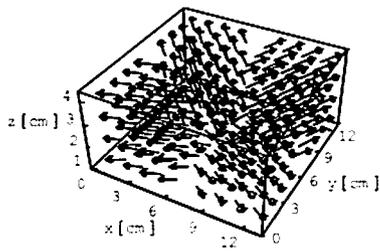
(b) LEVEL 2



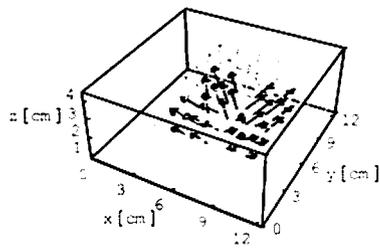
(c) LEVEL 3

Fig.7 The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer employing U shape cores.

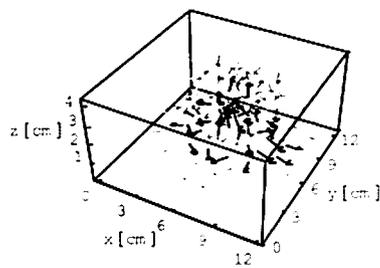
Figs.8(a)、(b)は一次側コアと二次側コア間で磁氣的結合がなされている磁界分布を表しており、Fig.8(c)は磁氣的結合に直接寄与しない漏れ磁界分布を表している。



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

Fig.8 The wavelet multi-resolution analysis results of the transformer employing flat shape cores.

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レベル2の磁界ベクトル分布が磁氣的結合に寄与する。これが平面型変圧器特有の磁界ベクトル分布であろう。すなわち、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。

他方、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好に表現可能とすることに拠る。

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、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[5]。

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。Fig.9 に対称軸から半分とした変圧器の断面モデルを示す。

有限要素法解析モデルから計算される Fig.4 に対応する磁界ベクトル分布を Fig.10 に示す。但し、周波数に対して表示してある。

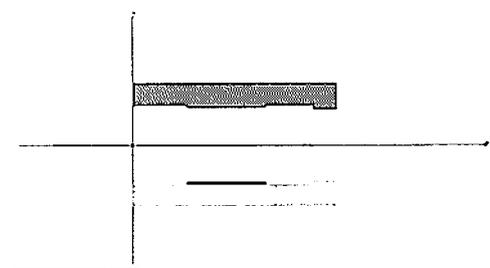


Fig.9 Axis-symmetrically FEM modeled transformer employing flat shape cores.

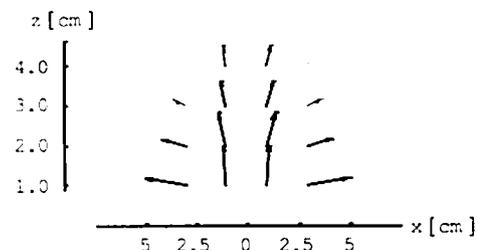


Fig.10 Computed magnetic field vectors distribution around the flat shape ferrite core transformer.

Fig.10 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。Fig.11 は Fig.10 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ベクトルウェーブレットスペクトラムである。

Fig.11 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。Fig.12 は Fig.10 のウェーブレット多重解像度解析結果である。

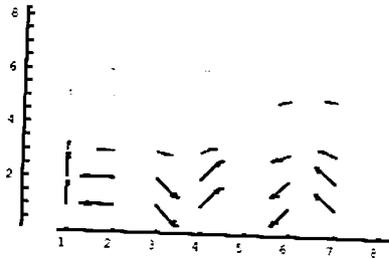
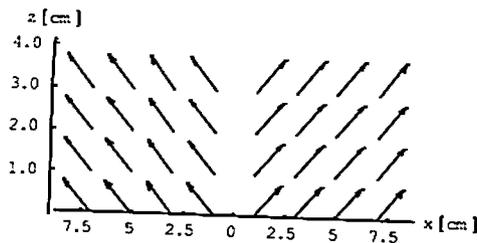
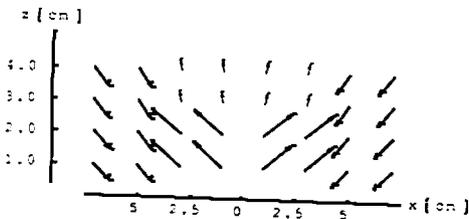


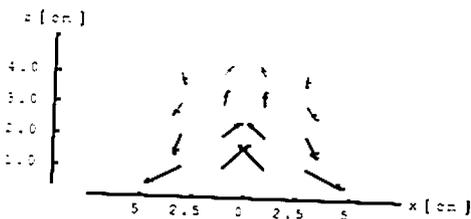
Fig.11 Wavelet spectra of the axis-symmetrically FEM modeled transformer employing flat shape cores.



(a) LEVEL 1



(b) LEVEL 2



(c) LEVEL 3

Fig.12 The wavelet multi-resolution analysis results of the axis-symmetrically FEM modeled transformer employing flat shape cores.

Fig.12 の結果で、明らかに Fig.8(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、平面型変圧器で一次・二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成分までと考えられる。

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。

4 変圧器の諸特性

4.1 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 κ を調べて置く。変圧器の一次・二次コイルを Fig.13 に示す回路モデルで考えると、Fig.14 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 κ が求まる。

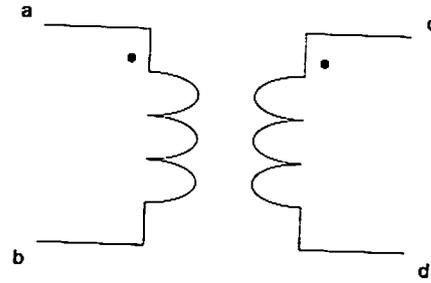


Fig.13 Circuit model of transformer.

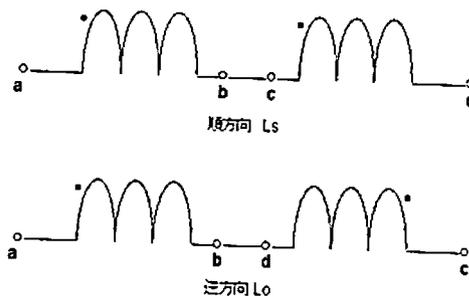


Fig.14 Series connection of the primary and secondary inductances.

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

Table 1 に平面型フェライトコア型の結合係数を示す。Table 1 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 程度のエアギャップが存在しても結合係数が 80%を越える十分な磁気結合を維持とすることがわかる。

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

Gap[mm]	0	1	3	5	7	10
L_1 [μ H]	578.6	348.2	231.1	181.6	169.9	133.9
L_2 [μ H]	572.7	348.1	229.4	181.0	168.3	133.3
L_s [μ H]	2297.4	1358.2	881.8	669.4	617.6	450.8
L_o [μ H]	16.9	26.1	41.4	56.0	61.1	84.3
κ	0.99	0.96	0.91	0.84	0.82	0.69

4.2 効率

本稿では Fig.15 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。Fig.16 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 10mm とした。二次側を純抵抗負荷とし、共振用コンデンサの値を変化させた場合の電力変換効率を調べた。駆動周波数は 30kHz である。

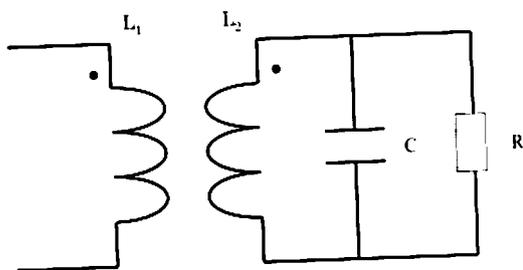


Fig.15 Parallel capacitor at secondary winding.

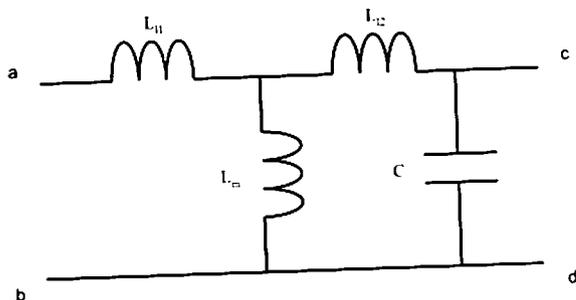


Fig.16 Equivalent circuit.

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

C[μ F]	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

Table 3 は平面型フェライトコア型の電力伝送効率を示す。Table 3 から、抵抗負荷 1 Ω 、共振用コンデンサ 39.98 μ F の場合、結合係数が $\kappa = 0.69$ であるにも拘わらず、電力変換効率が 79.88%と約 80%となることが興味深い。

5 結言

本稿は非接触給電システムを構成する基幹要素としての一次・二次コイル分離型トランスに関する基礎開発について述べた。

その結果、非接触給電システムを利用した信号伝送が十分可能であることが判明した。

謝辞

本研究は現在 (2011 年 2 月) 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程に在籍する高田 将吾君が精力的に研究開発を行った非接触給電システムの成果を纏めたものであり、紙面を借りて同君の精進と努力に謝意を記す。

参考文献

- [1] 高田将吾、齊藤兆古、堀井清之、非接触給電システム周辺電磁界分布の可視化、日本可視化情報学会、2009 年度可視化情報シンポジウム、P01-001、2009。
- [2] 高田将吾、齊藤兆古、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、電気学会マグネティクス研究会資料、MAG-10-154、2010
- [3] 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、日本シミュレーション学会、1998 年、2-II-3、1998。
- [4] 齊藤兆古、ウェーブレット変換の基礎と応用、朝倉書店、1998。
- [5] <http://www.theengineer.co.uk/news/ansoft-maxwell%C2%A>

E-sv/299659.article.

講演論文集

第23回

「電磁力関連のダイナミクス」

シンポジウム

The 23rd Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD23)

会期:2011年5月18日(水)~20日(金)

会場:愛知県産業労働センター(ウインクあいち)

主催:日本AEM学会

共催:電気学会(産業応用部門), 日本機械学会

協賛:磁性流体研究連絡会, 日本液晶学会, 精密工学会, 日本鉄鋼協会, 日本磁気学会,

日本原子力学会, 計測自動制御学会, 日本シミュレーション学会, 低温工学・超電導学会

後援:財団法人大幸財団

信号伝送用空心変圧器

Coreless Transformer for Signal Processing

石塚 拓実^{*1}(学生員), 齊藤 兆占^{*1}(正員)

Takumi ISHIZUKA (Stu. Mem.), Yoshifuru SAITO (Mem.)

Previously, we had succeeded in realizing the DC/DC converter employing coreless film transformer. Although this converter was a laboratory work, the maximum efficiency recorded over 72%. This means that the coreless transformer could be used for all of the lightest electronic devices.

This paper plans to work out a designing strategy of the coreless transformer and to demonstrate several experimental results concerning the tested coreless transformers.

Keywords: applied magnetics, coreless, transformer, skin effect, Nagaoka coefficient, inductance.

1 緒言

大容量電源機器から小型のDVDプレイヤーなどの電子機器で最も広範に使われる電気機器として変圧器がある。また、大規模な変電所などにも使用されており、現代文明を支える機器の重要な一要素と言っても過言ではない。磁性材料や絶縁材料の進歩に伴って変圧器も大きな改良が積み重ねられてきたが、依然としてより大きな改良の必要性がある。

最近の電力用半導体素子の高周波化に伴い、各種電源機器の小型化が実現されてきている。特に、パワートランジスタ、パワーMOS-FETなどの自己消弧形半導体デバイスは数百kHz以上での駆動が可能であり、小電力のスイッチングレギュレータから電子計算機用として主に使用される無停電電源装置(UPS)に至るまで幅広く用いられている。一方、これらの電源機器の中で平滑用および変圧用として用いられるインダクタおよびトランスは、フェライトまたはアモルファス磁性材料を磁心に用いることで高周波化に対応している。しかしながら、比較的高周波特性の良好な磁性材料であるフェライトにおいても、MHz帯以上の動作では透磁率が小さく実質的に空心と同じ動作となり、さらに材料のわずかな電流やヒステリシス損失が増加し、磁性材料を用いる本質的な利点が失われてしまう。

このため、如何なる高周波に於いても高効率が維持

できる変圧器が理想の変圧器として考えられる。駆動周波数の増加に対して高効率が期待でき、磁性材料を用いない空心で漏れ磁束が極小化され一次・二次間の磁気結合が極めて密な空心変圧器は理想的な変圧器の形態と言える[1-4]。

本稿では、空心変圧器を導線の径や形状を変えて試作し、それらの特性を測定し、実験値と理論値の比較を行い、空心変圧器の最適設計に関する考察を行う。

2 ツイストコイル型空心変圧器

2.1 動作原理と基礎特性

2.1.1 基礎原理

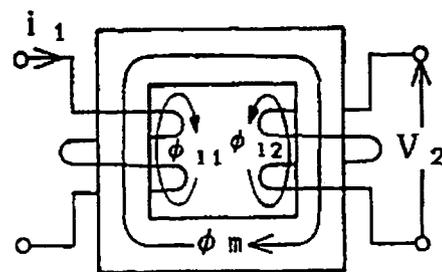


Fig.1 Conventional core type transformer

Fig. 1 に磁性材料を磁心に用いた従来型トランスの原理図を示す。主磁束 ϕ_m は一次および二次巻線に共通に鎖交し、一方、漏れ磁束 ϕ_{11} および ϕ_{12} は、各巻線の近傍でその磁束を生じさせる電流の流れている巻線と同じ巻線のみ鎖交している。

Fig. 1 に存在する漏れ磁束を削減する一方途として

連絡先: 石塚 拓実, 〒184-8584 小金井市梶野町 3-7-2, 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻齊藤兆占研究室,
e-mail: 07d3012@stu.hosei.ac.jp

^{*1}法政大学大学院工学研究科電気工学専攻

一次・二次巻線間の幾何学的な距離を接近させることが考えられる。この場合、Fig.2に示すような磁性体が構成する磁路の概念は無く、磁氣的結合は個々の導線周囲を取り囲む磁束が担うこととなる。

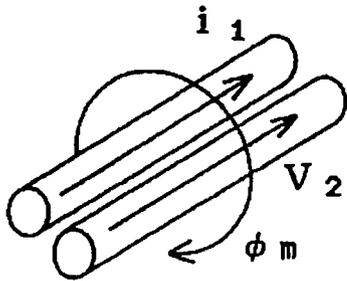


Fig.2 Adjacent primary and secondary coils.

2.1.2 円筒導体の表皮効果

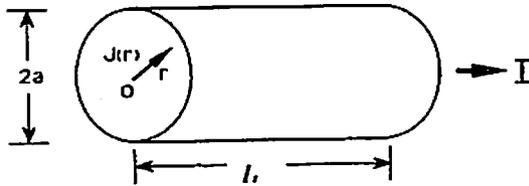


Fig.3 A conductor having circular cross-section.

Fig.3に示す様な半径 a 、長さ l_1 の導体に電流 I が流れている時、導体断面上の電流密度 J に関する支配方程式は、

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial J}{\partial r} \right) = \frac{\mu_0}{\rho} \frac{\partial J}{\partial t} \quad (1)$$

となる[5]。

ここで r 、 l および ρ はそれぞれ半径方向の座標時間および導体の抵抗率である。円形境界の場合のこの種の支配方程式の解はベッセル関数によって表され、

$$J(r) = \frac{k_1 I}{2\pi a} \frac{I_0(k_1 a)}{I_0'(k_1 a)} e^{j\omega t} \quad (2)$$

として与えられる。ただし $I_0(k_1 r)$ は0階第1種の変形ベッセル関数であり、 ω を電流の角周波数として、

$$k_1 = a \sqrt{\frac{\mu_0 \pi \omega}{2\rho}} \quad (3)$$

とした。また、 I_0' は I_0 の半径方向に対する微分関数を表し、式(1)右辺の時間微分 $\partial/\partial t$ は $j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$) とした。

2.1.3 円形断面導体の内部インピーダンス

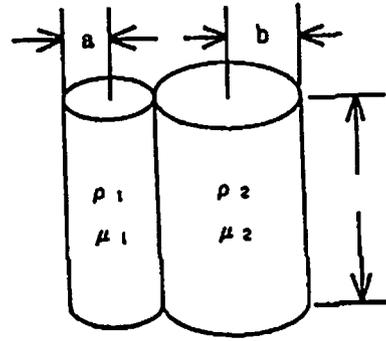


Fig. 4 Adjacent primary and secondary coils having different diameters in each other.

Fig. 4の左に位置する一次導体の内部磁束を考える。導体表面の両端電位差 V は、導体表面電流が内部磁束と鎖交しないことから、

$$k_a = a \sqrt{\frac{\mu_1 \pi \omega}{2\rho_1}} \quad (4)$$

として、

$$V = \rho_1 I J(a) = \rho_1 l \frac{k_1 I}{2\pi a} \frac{I_0(k_a a)}{I_0'(k_a a)} \quad (5)$$

として与えられる。

一方、Fig. 4の一次導体を集中定数としてみた交流抵抗と内部インダクタンスをそれぞれ R_{i1} 、 L_{i1} とすれば、

$$V = (R_{i1} + j\omega L_{i1}) I \quad (6)$$

が成り立つ。

ここで、電流 I は

$$I = \int_0^a J 2\pi r dr \quad (7)$$

である。

式(5)で直流抵抗 $R_{D1} = \rho_1 l / (\pi a^2)$ とすれば、式(5)および式(6)より、

$$\frac{1}{R_{D1}} (R_{i1} + j\omega L_{i1}) = \frac{k_a a}{2} \frac{I_0(k_a a)}{I_0'(k_a a)} \quad (8)$$

を得る。

(8)式の実部および虚部がそれぞれ等しいから、

1) 電源角周波数 ω が小さく、 $k_a < 1$ の場合

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{D1}}(R_{A1} + j\omega L_{11}) & \\ &= \frac{k_a a I_0(k_a a)}{2 I'_0(k_a a)} \\ &\doteq 1 + jk_a^2 + \frac{1}{3}k_a^4 - j\frac{1}{6}k_a^6 \end{aligned} \quad (9)$$

と近似できるため、

$$\begin{aligned} R_{A1} &= R_{D1} \left(1 + \frac{1}{3}k_a^4 \right) \\ L_{11} &= \frac{\mu_1 l}{2} \left(1 - \frac{1}{6}k_a^4 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

2) 電源角周波数 ω が大きく、 $k_a \geq 1$ の場合

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{D1}}(R_{A1} + j\omega L_{11}) & \\ &= \frac{k_a a I_0(k_a a)}{2 I'_0(k_a a)} \\ &\doteq (1+j) + \frac{1}{4} + \frac{1}{32(1+j)k_a} \end{aligned} \quad (11)$$

と近似できるため、

$$\begin{aligned} R_{A1} &= R_{D1} \left(\frac{1}{4} + k_a + \frac{1}{64} \frac{1}{k_a^3} \right) \\ L_{11} &= \frac{\mu_1 l}{2} \left(\frac{1}{k_a} - \frac{1}{64} \frac{1}{k_a^3} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

として交流抵抗 R_{A1} 、および内部自己インダクタンス L_{11} が与えられる。

Fig.4に示すように二次は半径 b 、長さ l のコイルからなるから、式(10)、式(12)と同様にして、

$$\begin{aligned} k_b &= b \sqrt{\frac{\mu_2 \pi \omega}{2 \rho_2}} \\ R_{D2} &= \frac{\rho_2 l}{\pi b^2} \end{aligned} \quad (13)$$

とすれば、

3) 電源角周波数 ω が小さく、 $k_b < 1$ の場合

$$\begin{aligned} R_{A2} &= R_{D2} \left(1 + \frac{1}{3}k_b^4 \right) \\ L_{12} &= \frac{\mu_2 l}{2} \left(1 - \frac{1}{6}k_b^4 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

4) 電源角周波数 ω が大きく、 $k_b \geq 1$ の場合

$$\begin{aligned} R_{A2} &= R_{D2} \left(\frac{1}{4} + k_b + \frac{1}{64} \frac{1}{k_b^3} \right) \\ L_{12} &= \frac{\mu_2 l}{2} \left(\frac{1}{k_b} - \frac{1}{64} \frac{1}{k_b^3} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

2.1.3 インダクタンス

電流が各コイル軸を中心として対称に分布すると仮定した場合、Fig. 4 の一次・二次コイル間の相互インダクタンス M は

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \log \left(\frac{2l}{a+b} \right) - 1 \right\} \quad (16)$$

で与えられる。

また、一次・二次コイル、それぞれの自己インダクタンスは

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{11} + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \log \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right\} \\ L_2 &= L_{12} + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \log \left(\frac{2l}{b} \right) - 1 \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

で与えられる。

式(17)に於ける L_{11} 、 L_{12} はそれぞれ一次二次コイルの内部インダクタンスであり、式(4)の κ_a と式(13)の κ_b の関数であるから、周波数の関数として変化することに注意を要する。

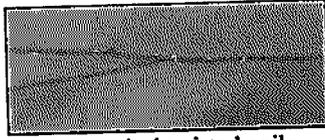
2.2 実際の空心変圧器

2.2.1 ツイストコイル

実際の空心変圧器では、Fig. 4に示すようにコイルを平行に並べ通電した場合、二次電流の負荷が誘導性が容量性かで位相が異なるが、仮に二次電流が一次電流と同方向である場合、両者の導体中の電流は導体間に集中する。逆に二次電流が一次電流と逆方向である場合、導体中の電流は互いの電流間の距離が最大になるように分布する。このため、空心変圧器の特性は負荷の力率、すなわち、二次電流の位相によって変化することとなる。この問題を緩和する方法としてFig. 5に示すように一次と二次コイルを互いにツイストさせることで両者の接する面を交互に入れ替えて平均化する[6,7]。



(a) Schematic diagram of twisting
Solid: Primal, Dotted: Secondary



(b) Practical twisted coils

Fig.5 Schematic and practical twisted coils.

2.2.2 実際の構造と長岡係数

実際に空心変圧器をツイストコイルで作成する場合、何らかの形でコイルを束ねて置かざるを得ない。最も簡単にコイルを束ねる方法はFig.6に示すように有限長ソレノイド形状とすることである。

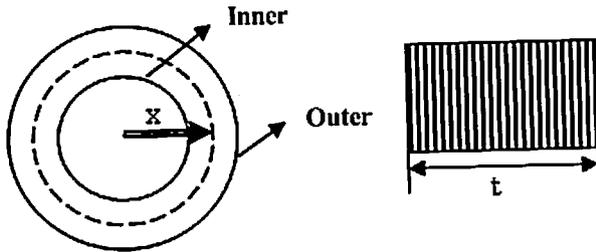


Fig.6 Finite length solenoid coil.

Fig.6の有限長ソレノイドでは、ソレノイド内を貫通する一次・二次に共通な磁束が存在するため、単純なツイストコイルに比較してより大きな一次・二次間の結合が期待できる。

一次・二次コイルをツイストしたコイルで有限長ソレノイドコイルを作成した場合、有限長ソレノイドコイルの平均半径を x 、長さを l 、ソレノイド中は真空もしくは空気として透磁率を $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 、一次、二次コイルの巻数をそれぞれ N_1 、 N_2 とすれば、有限長ソレノイド型の構造に起因する一次・二次コイルの自己インダクタンスは

$$\begin{aligned} L_{s1} &= C4\pi^2 x^2 \frac{N_1^2}{l} \times 10^{-7} \\ L_{s2} &= C4\pi^2 x^2 \frac{N_2^2}{l} \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (18)$$

となる。

ここで、

$$\text{長岡係数} : C = \frac{4}{3\pi\kappa'} \left\{ \frac{\kappa'^2}{\kappa^2} (K - E) + E - \kappa \right\}$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{4x^2}{4x^2 + l^2}} \quad (19)$$

$$\kappa' = \sqrt{1 - \kappa^2}$$

$$\text{第一種完全楕円積分} : K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$\text{第二種完全楕円積分} : E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

とする。

よって、有限長ソレノイド型空心変圧器のインダクタンスは

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{s1} + \frac{\mu_0}{2\pi} l \left\{ \log \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right\} + L_{s1} \\ &= L_{s1} + \frac{\mu_0}{2\pi} l \left\{ \log \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right\} \\ &\quad + C4\pi^2 x^2 \frac{N_1^2}{l} \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} L_2 &= L_{s2} + \frac{\mu_0}{2\pi} l \left\{ \log \left(\frac{2l}{b} \right) - 1 \right\} + L_{s2} \\ &= L_{s2} + \frac{\mu_0}{2\pi} l \left\{ \log \left(\frac{2l}{b} \right) - 1 \right\} \\ &\quad + C4\pi^2 x^2 \frac{N_2^2}{l} \times 10^{-7} \end{aligned}$$

となる。

2.2.3 結合係数

一次と二次巻線の有効長を l_{1e} と l_{2e} 、コイル間の透磁率を μ_0 とすれば、巻線間の相互インダクタンス

M_c は、

$$l_{1e} \leq l_{2e} \text{ のとき} : M = \frac{\mu_0}{2\pi} l_{2e} \left\{ \log \left(\frac{2l_{1e}}{a+b} \right) - 1 \right\} \quad (21)$$

$$l_{1e} > l_{2e} \text{ のとき} : M = \frac{\mu_0}{2\pi} l_{1e} \left\{ \log \left(\frac{2l_{2e}}{a+b} \right) - 1 \right\}$$

となる。

また、一次、二次コイルの有効長、および巻数が、とした一般的な場合の一次、二次コイルの自己インダクタンスは

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{s1} + \frac{\mu_0}{2\pi} l_{1e} \left\{ \log \left(\frac{2l_{1e}}{a} \right) - 1 \right\} \\ &\quad + C4\pi^2 x^2 \frac{N_1^2}{l} \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (22)$$

$$L_2 = L_{11} + \frac{\mu_0}{2\pi} I_{2c} \left\{ \log\left(\frac{2l_{2c}}{b}\right) - 1 \right\} + C4\pi^2 x^2 \frac{N_2^2}{l} \times 10^{-7} \quad (23)$$

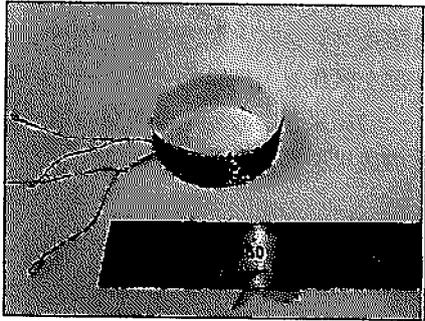
で与えられ、一次と二次間の結合係数 k は、次式によって与えられる。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (24)$$

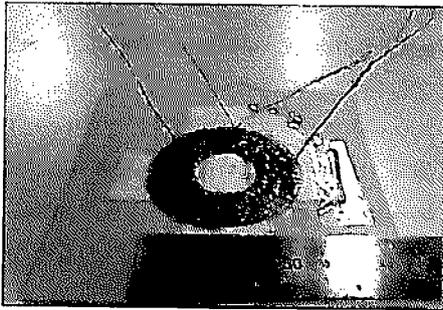
2.3 実験

2.3.1 試作空心変圧器

Fig.7 に示すように、本稿では試作変圧器を有限長ソレノイド型とコイルをスパイラル状に巻いた平面型を試作した。Table 1 は試作変圧器の諸定数を示す。



(a) Solenoid type



(b) Spiral type

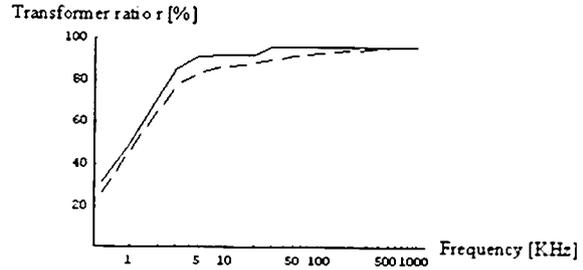
Fig.7 Tested coreless transformers.

Table 1 Various constants of the tested transformer

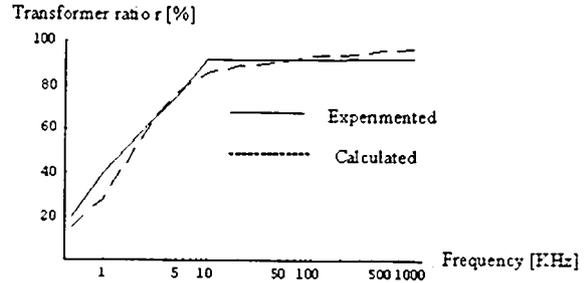
Type	Dimensions	Primal Coil	Secondary Coil
Solenoid	Lgth.:15mm	Dia.:0.4mm	Dia.:0.4mm
	Dia.:25mm	Lgth.:3m	Lgth.:3m
Spiral	Inner:22mm	Dia.:0.4mm	Dia.:0.4mm
	Outer:25mm	Lgth.:3mm	Lgth.:3mm

2.3.2 変圧比

Fig.8 に変圧比の周波数特性を示す。コイル長が 3m 程度であるにもかかわらず 100KHz 以上の周波数であれば所定の変圧比を有することがわかる。



(a) Solenoid type

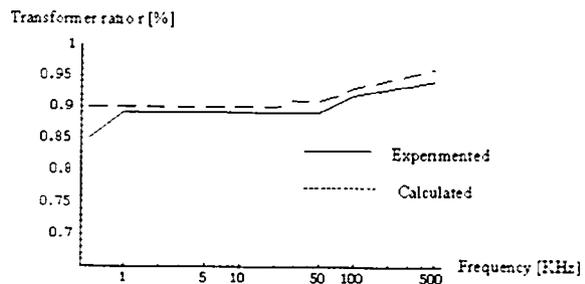


(b) Spiral type

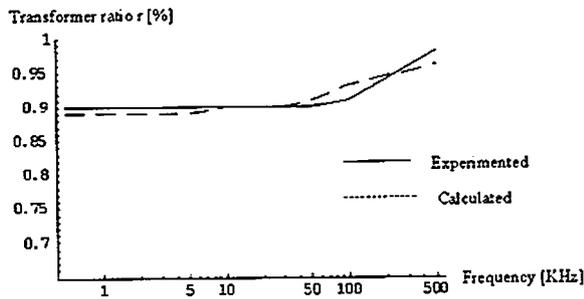
Fig.8 Transformer ratio.

2.3.3 結合係数

Fig.9 に結合係数の周波数特性を示す。コイル長が 3m 程度であるにもかかわらず 100KHz 以上の周波数であれば良好な結合を有することがわかる。



(a) Solenoid type

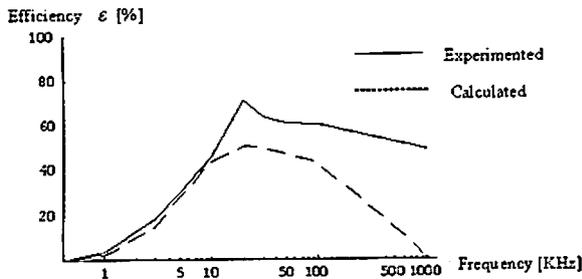


(b)Spiral type

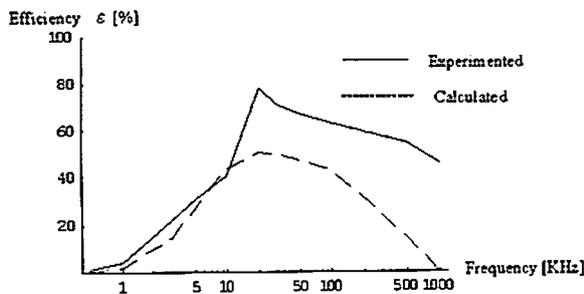
Fig.9 Coupling factor.

2.3.4 効率

二次コイル端子に純抵抗 1Ω を負荷として接続し、一次全入力に対する二次抵抗 1Ω に消費される電力の比として効率を求めた。



(a)Solenoid type



(b)Spiral type

Fig.10 Efficiency $\varepsilon = (\text{Input} / \text{Output}) \times 100[\%]$.

Fig.10 は効率の周波数特性を示す。変圧比や結合係数の周波数特性に比較して、周波数に対して最大値を持つ実験値と計算値の定性的な特性は一致するが、両

者の差が大きい。

通常、計算値は計算に考慮されていない条件やパラメータなどによって実験値よりも良い効率となる。しかし、空心変圧器は計算モデルに勘案されていない条件やパラメータが効率の向上に寄与している可能性が考えられる。しかしながら、効率に関して、単峰性のピークを持つ周波数特性を持ち、ソレノイド型、平面（スパイラル）型を問わず数十 KHz で 80% 程度の最大効率を持つことが判明した。

3 結言

本稿では、電気電子機器の高周波動作に伴い鉄損が増加する従来型の磁性体をコア材とする変圧器に対して、理論的には全く鉄損が無い空心変圧器を提案した。

空心変圧器の動作原理は高周波化に必然的に伴う表皮効果を利用している。このため、理論上、動作周波数が上がる程変圧器として良好に機能する。

実際に有限長ソレノイド型と平面（スパイラル）型の空心変圧器を試作し、理論的アプローチの妥当性を検証した。その結果、空心変圧器開発の第一歩としてはほぼ所定の成果を得た。

参考文献

- [1] T.Ogawa, H.Saotome, S.Hayano and Y.Saito, Realization of a coreless transformer and its application to a DC/DC converter, *Elektrotechn.CAS.*, 44, No.7, pp.238-241, 1993.
- [2] 早乙女英夫、小川達成、早野誠治、齊藤兆古、木脇久勝、高周波空心トランスの小型電源装置への適用、電気学会パワーエレクトロニクス研究会資料、PE91-63, 1991.
- [3] 早乙女英夫、小川達成、早野誠治、齊藤兆古、高周波軽量トランスの DC/DC コンバータへの適用、電気学会パワーエレクトロニクス研究会資料、PE91-54CPM91-113, 1991.
- [4] 小川達成、早野誠治、齊藤兆古、空心変圧器の一考察、電気学会マグネティクス研究会資料、MAG-93-132, 1993.
- [5] F.Bowman 著、平野鉄太郎訳、ベッセル関数入門、日新出版、昭和44年4月第3版、1969.
- [6] S.Hayano, H.Saotome, Y.Nakajima and Y.Saito, A new type high frequency transformer, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.MAG-27, No.6, Nov., pp.5205-5207, 1991.
- [7] 齊藤兆古、新方式高周波トランスの提案、電気学会マグネティクス研究会資料、MAG-91-86, 1991.

講演論文集

第23回

「電磁力関連のダイナミクス」

シンポジウム

The 23rd Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD23)

会期:2011年5月18日(水)~20日(金)

会場:愛知県産業労働センター(ウインクあいち)

主催:日本AEM学会

共催:電気学会(産業応用部門), 日本機械学会

協賛:磁性流体研究連絡会, 日本液晶学会, 精密工学会, 日本鉄鋼協会, 日本磁気学会,

日本原子力学会, 計測自動制御学会, 日本シミュレーション学会, 低温工学・超電導学会

後援:財団法人大幸財団

ゆらぎ周波数信号処理法の提案

A Proposal of Frequency Fluctuation Signal Processing

齊藤 兆古^{*1}(正員)

Yoshifuru SAITO (Mem.)

Most of the signal processing is based on the Fourier transform or its modified ones. Recently, wavelet transform has been focused on the new possibilities for signal processing, even though selection of the optimum wavelets base functions requires a lot of experiences.

As one of the signal processing methodologies, this paper proposes a frequency fluctuation signal processing method. In particular, $1/f$ frequency fluctuation is extensively well known and famous characteristic accompanying natural phenomena giving healing effect. Generalization of this $1/f$ frequency fluctuation to the $1/f^n$ leads to a new signal processing method.

To demonstrate the usefulness of frequency fluctuation signal processing method, one of the natures of Barkhausen signals associated with the magnetization of ferromagnetic materials is derived.

Keywords: frequency fluctuation, signal processing, Barkhausen signal, stress cognition.

1 緒言

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

筆者は、家庭電化に伴う直火を使わない生活空間が人間へ与える影響を調べるため、燃焼現象に伴う炎の $1/f$ ゆらぎ周波数解析を行い、これを基点として、化学反応などの非生物系における $1/f$ ゆらぎ[1]、人間の情緒・精神活動に伴う $1/f$ ゆらぎ[2]、さらに磁性体の磁区挙動の $1/f$ ゆらぎ[3]などを解明した。 $1/f$ ゆらぎは非線形な複雑系で観察される周波数特性であり、非線形現象の代表的な特徴である。非線形系は従来の線形系と比べて現実の物理系を忠実に表現可能とするのみならず人間の感性、例えば癒し(healing)効果などに関連があ

るとされている。すなわち、非線形な複雑系は、従来の単純なヒューマン・インターフェイスと一線を描く人間の感性を前提とした機械と人間のインターフェイス構築の基幹となる一方法を提供する。

複雑系をシミュレーションするには系のマクロ的振る舞いを現す支配方程式を解くことによるトップダウン型と系を構成する局所部分の振る舞いを積み上げて系全体の振る舞いを表現するボトムアップ型がある。

前者は古典的な解析手法の拡張であり、後者はコンピュータを前提とする離散値系の手法であり、その代表としてセルラー・オートマトン(cellar automaton)がある。多くの非線形な複雑系はこのセルラー・オートマトンで記述される[5]。

以上のことを鑑み、本稿では、最初に、 $1/f$ ゆらぎ周波数特性を $1/f^n$ ゆらぎ周波数特性へ拡張する。次に、強磁性体が磁化に伴って発生するバルクハウゼン信号へ $1/f^n$ ゆらぎ周波数特性解析法を適用し、バルクハウゼン信号の特長抽出を試みる。

2 ゆらぎ周波数信号処理

2.1 ゆらぎ周波数とは

一般に任意の周期波形 $f(t)$ は平均値 a_0 、余弦波 $a_i \cos(i\omega t)$ および正弦波 $b_i \sin(i\omega t)$ の和で表される。ここで、 $i = 1, 2, \dots, \infty$, $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ (角周波

連絡先： 齊藤 兆古，〒184-8584 小金井市梶野町 3-7-2,

法政大学理工学部電気電子工学科,

e-mail: ysaito@hosei.ac.jp

^{*1}法政大学

数)とする。

すなわち、

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

が成り立つ。

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

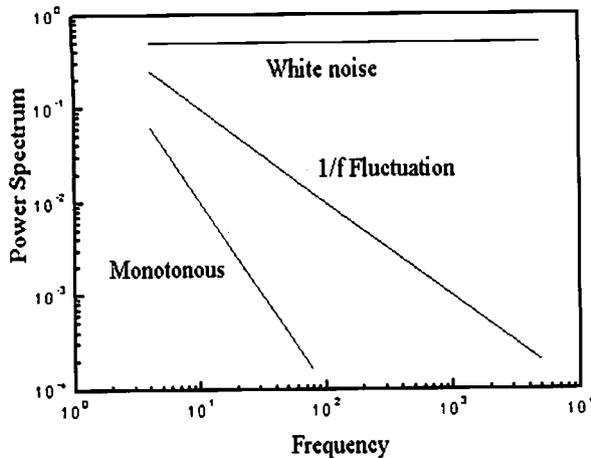


Fig.1 Definition of frequency fluctuation.

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

2.2 1/fゆらぎ周波数を呈する波形の性質

乱数を用いて生成した1/fゆらぎ周波数の波形をFig.2に示す。Fig.2のフーリエスペクトラム対高調波次数の関係をそれぞれの対数で描くとFig.3となる。

Fig.4は、Fig.2に示す波形のサンプリング個数を半

分、すなわち、全データが65536点からなる波形の前半部分32768個からなる波形のフーリエ・パワースペクトラム対高調波次数の関係である。

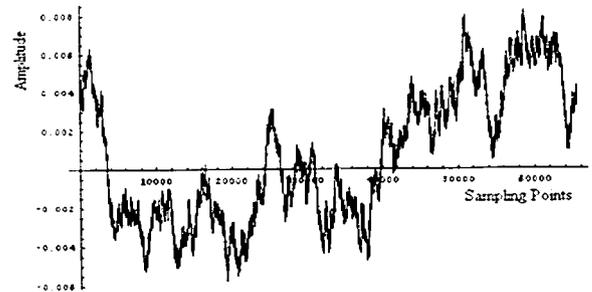


Fig.2 Example of waveform exhibiting 1/f frequency fluctuation generated by random numbers.

いま、Fig.2で、第*i*次高調波のフーリエ・パワースペクトラムを、

$$|F_i| = c_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

とすれば、 ω を角周波数として、

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y}_i &= [\log F_1 \quad \log F_2 \quad \dots \quad \log F_n]^T, \\
 \mathbf{x}_j &= [\log \omega \quad \log 2\omega \quad \dots \quad \log n\omega]^T, \\
 i &= 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{3}$$

に対して、直線近似でFig.3の傾きを近似する。すなわち、

$$y = ax + b \tag{4}$$

を適用するとすれば、以下の線形システム方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X}, \\
 \mathbf{Y} &= [\log |F_1| \quad \log |F_2| \quad \dots \quad \log |F_n|]^T, \\
 \mathbf{X} &= [a \quad b]^T, \\
 \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & \log \omega \\ 1 & \log 2\omega \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \log n\omega \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5}$$

式(5)の線形システム方程式の係数行列*C*は*n*(サンプリング個数)行2列であるから不適切(ill posed)である。このため、式(5)の近似解ベクトル*X**は誤差ノルム

$$|r_i| = |\mathbf{Y}_i - \mathbf{C}\mathbf{X}^*| \tag{6}$$

を最小にする最小自乗法による解ベクトル

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

を採用する。ゆらぎ周波数の傾きは式 (4) の係数 a で与えられる。

Fig.3 で、直線は、全データが 65536 点へ最小自乗法を適用して得られた近似であり、その勾配は-1.002 となり、 $1/f$ ゆらぎ周波数特性が抽出された。

Fig.4 で、直線は、全データが 65536 点からなる波形の前半部分 32768 個へ最小自乗法を適用して得られた近似であり、その勾配は-0.978 であり、全データに対してゆらぎ周波数の傾きが異なる。これはゆらぎ周波数の傾きを計算する周波数範囲によってゆらぎ周波数が異なることを意味する。

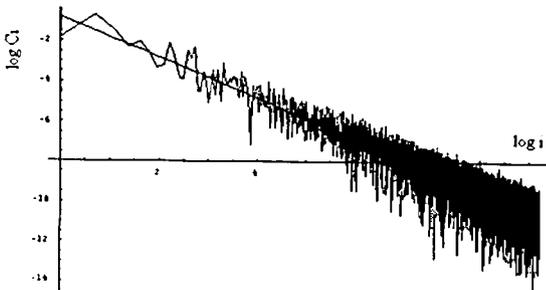


Fig.3 $\log c_i$ versus $\log i$ characteristic.
Straight line denotes the -1.002 gradient obtained by the least squares to the entire data in Fig.2.

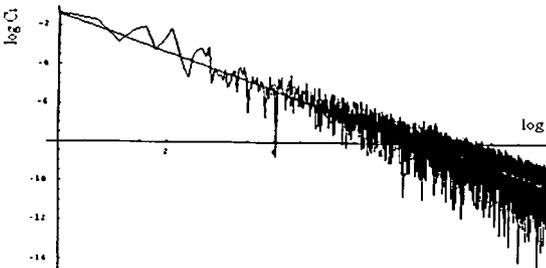


Fig.4 $\log c_i$ versus $\log i$ characteristic.
Straight line denotes the -0.978 gradient obtained by the least squares to the first half data in Fig.2.

2.3 音楽のゆらぎ周波数特性

音楽データはいわゆる音であり一次元時系列データであるため、2.2 節で述べた解析方法が直接に適用できる。音楽データの周波数特性は、1) 音楽全体として $1/f$ ゆらぎを呈するもの、2) 特定の周波数帯域で $1/f$ ゆらぎを呈するもの、さらに 3) 全体としても周波数帯域別にも $1/f$ ゆらぎを呈さないものに大別できる。

Fig.5 はいわゆる癒し効果を与える音楽として市販

されている曲のゆらぎ周波数解析結果である。Fig.5 で、直線は最小自乗近似に拠る周波数特性の傾きを表し、緩やかな傾きはほぼ-1 であり、急峻な傾きは-1 よりも小さい値である。直線の傾きを観察すれば、この音楽は周波数帯域毎に単調な旋律と $1/f$ ゆらぎを呈する旋律が交互に配置されていることが判る。

一般にモーツアルトの音楽は癒し効果を持つと言われているが、実際に α 波の測定を行い詳細に吟味すると、最高音部、すなわち、Fig.5 の右端部分の高周波領域で $1/f$ ゆらぎ周波数を呈する音楽のセラピー効果が大きい[6]。

いわゆる癒し効果を呈するとされる音楽に置いては、音楽が単純に $1/f$ ゆらぎ周波数を含むからとは言えず、むしろ周波数帯域毎にゆらぎ周波数の傾きを解析しなければならない。換言すれば、周波数帯域毎のゆらぎ周波数の傾きを音楽の固有情報と考え、本稿では、これを拡張して $1/f$ ゆらぎと呼び、 α の組み合わせが 1 次元時間軸情報のゆらぎ周波数固有特性とする。

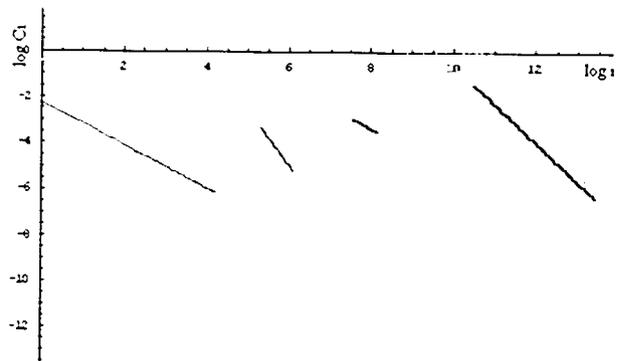


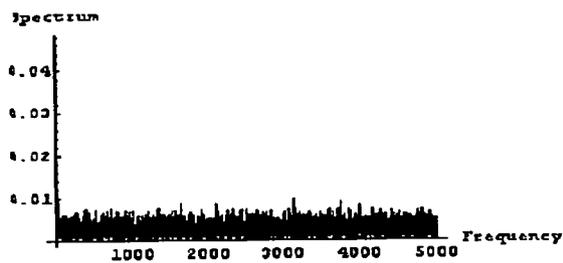
Fig.5 Typical frequency fluctuations extracted from a music giving healing effect (commercial base product).

3 信号のゆらぎ周波数固有特性の応用

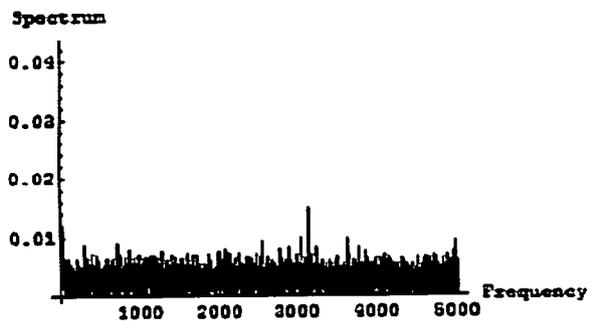
3.1 電磁環境ノイズの固有特性

電磁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時々刻々と変化する。実験室内で単純な有限長ソレノイドコイルに誘起する電圧を周辺環境、たとえば測定時間帯を変えて 30 回測定し、それらのパワースペクトラムを計算した。典型的な環境電磁ノイズのパワースペクトラムを Fig.6 に示す。30 個のパワースペクトラム間の相関係数は全て 0.3 以下であり、パワースペクトラムで評価する限り規則性は無いと考えられる。

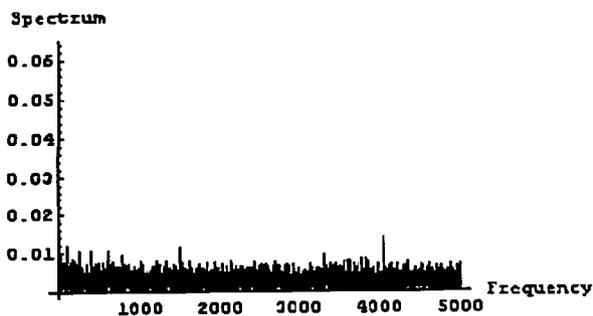
これらの電磁環境ノイズのゆらぎ周波数固有特性を抽出する。



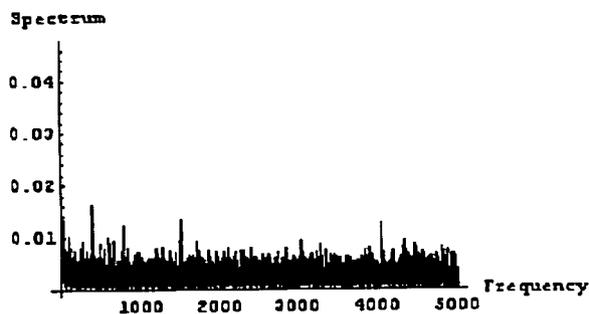
(a) Noise a



(b) Noise b



(c) Noise c

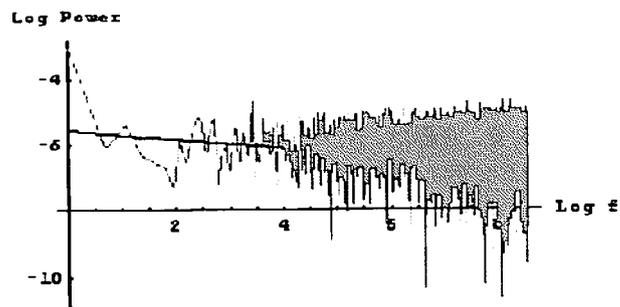


(d) Noise d

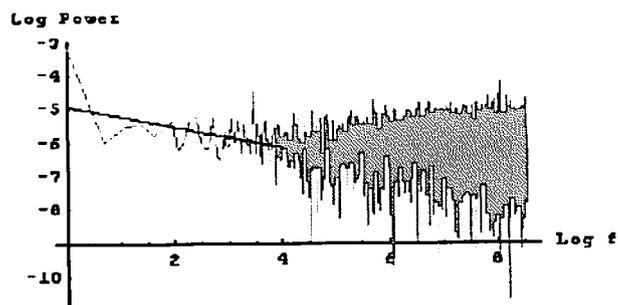
Fig. 6 Typical Fourier power spectrum vs. frequency characteristics of the electromagnetic environmental noise.

全体として 30 回測定した環境電磁ノイズに対して、周波数領域を低周波帯域と高周波帯域とに 2 分してゆらぎ周波数特性を計算した。Fig.6 に対するゆらぎ周

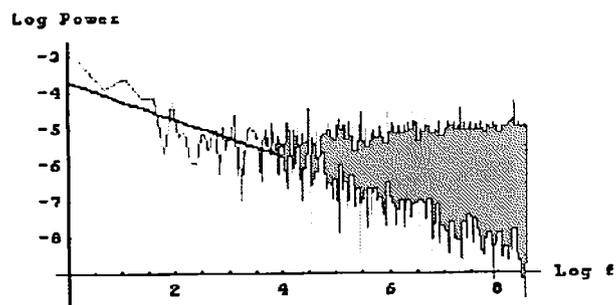
波数特性で低周波帯域の計算例を Fig.7 に示す。



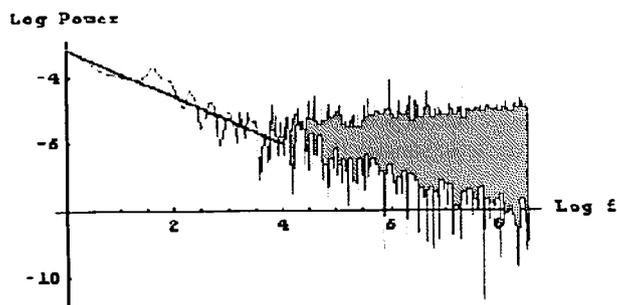
(a) Noise a, Fluctuation: $f^{-0.14}$



(b) Noise b, Fluctuation: $f^{-0.308}$



(c) Noise c, Fluctuation: $f^{-0.506}$



(d) Noise d, Fluctuation: $f^{-0.718}$

Fig. 7 Typical frequency fluctuations of the lower half Fourier power spectra in Fig.6.

高周波帯域におけるゆらぎ周波数の傾きは全ての測定した電磁ノイズに対してほぼゼロのゆらぎ周波数

であり、完全なホワイトノイズである。他方、低周波帯域に関して、Fig.7に示すように30回測定した環境ノイズは、少なくとも測定した実験室の環境下ではゆらぎ周波数の傾きが、 $0 \geq \alpha > -0.2$, $-0.2 \geq \alpha > -0.4$, $-0.4 \geq \alpha > -0.6$, $\alpha < -0.6$ のいずれかに分類可能であることが判明した。これは、従来、電磁環境ノイズに対する対策がもつばらノイズ発生源の特定と遮蔽技術で行われていたのに対し、測定された信号から電磁環境ノイズをある程度削減できる方法がゆらぎ周波数固有特性によってもたらされる可能性を示唆する[7]。

3.2 バルクハウゼン信号の固有ゆらぎ周波数特性

バルクハウゼン信号の測定は文献[7]に述べられているようにU字形のフェライトの脚間に跨がってサンプル磁性鋼板(厚さ0.15mm幅10mm長さ30mm)を配置し、サンプル磁性鋼板に巻いたサーチコイルに誘起する電圧から行った。得られたバルクハウゼン信号には環境電磁ノイズも含まれているから、サーチコイルのみに誘起する電圧から環境電磁ノイズを測定し、環境電磁ノイズのパワースペクトラムを原バルクハウゼン信号のパワースペクトラムから差し引いて削減した。環境電磁ノイズは測定毎に変わるため、この前処理によって完全に環境電磁ノイズが削除されない。しかし、前述の4ケースに分類された環境電磁ノイズのゆらぎ周波数特性の影響はある程度削減可能と考える。

バルクハウゼン信号も基本的には測定毎に変わる一種の磁気ノイズであるから、その特徴も通常の電磁ノイズと同様に低周波帯域に存在する。これは30個の同一仕様素材のサンプル磁性材料について確認した。Fig.8はサンプル磁性材料に何のストレスも加わって無い場合の代表的な低周波帯域のゆらぎ周波数特性を示す。

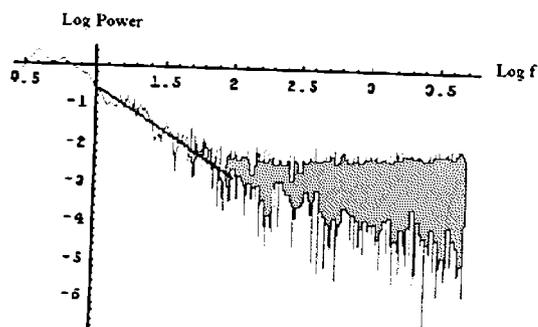
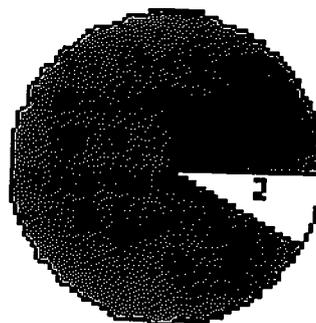


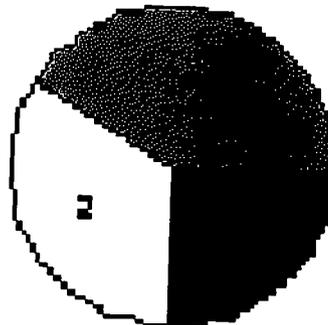
Fig.8 Representative fluctuation frequency characteristic of a tested soft-iron sheet exhibiting f^2 fluctuation frequency.

磁性体に加わる応力がバルクハウゼン信号のゆらぎ周波数特性から識別可能かを吟味するため、同一材料の中心部、すなわち、U字形フェライトの左右両脚間の中心に3kgの応力を加えた場合と加えない場合のゆらぎ周波数特性を30個の同一仕様で作られた供試軟鉄板に対して測定した。その結果、得られたゆらぎ周波数特性値“ α ”の平均値をFig.9に示す。



Dark part 1 : $\alpha \geq -1.9$
Light part 2 : $-1.9 \leq \alpha < -1.7$

(a) Under no stress



Medium part 1 : $\alpha \geq -1.7$
Light part 2 : $-1.9 \leq \alpha < -1.7$
Dark part 3 : $\alpha < -1.9$

(a) Under 3kg stress at the center of soft iron sheet

Fig. 9 Fluctuation frequency difference between the 3kg stress and no stress at the center of tested soft-iron sheet. 30 distinct results average.

Fig.9は明らかにゆらぎ周波数特性 f^α で、指数部が加重の有無で大きく異なることを示している。すなわち、加重を加えた場合に生ずる $\alpha \geq -1.7$ を持つゆらぎ周波数特性が存在する。Fig.9の結果は、30個の同一仕様である供試材料に対する平均値であるが、全ての供試材料が殆んど同一の傾向を示した。

4 まとめ

本稿では、従来、非線形系の呈する $1/f$ ゆらぎ周波数特性を f^α の形へ一般化し、さらに、周波数帯域毎のゆらぎ情報である α の組み合わせをゆらぎ周波数固有特性とする新しい信号処理方法を提案し、その具体的な応用例として、環境電磁ノイズの分類や応力ストレス下にある磁性材料の識別を取り上げた。その結果、定性的な信号処理方法としての有効性が確認された。

謝辞

本研究は現在（2011年1月）法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程に在籍する野嶋悟士君が学部の4年時から一貫して取り組んで来たバルクハウゼン信号評価に関する研究成果を纏めたものである。紙面を借りて、同君に謝意を記す。

参考文献

- [1] 寺西正晃, 丸山和夫, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, 自然界の画像が持つ $1/f$ 周波数成分の可視化, 第33回可視化情報シンポジウム, B108, 2005.
- [2] 宮坂総, 齋藤兆古, 加藤千恵子, 動画像の色彩情報可視化とその応用, 第35回可視化情報シンポジウム, C213, 2007.
- [4] 須永高志, 寺西正晃, 齋藤兆古, ビッター法による可視化磁区画像から周波数特性の抽出, 日本 AEM 学会誌 Vol. 15, No. 2, p. 195, 2007
- [5] フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』ステイーブン・ウルフラム, <http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- [6] 菅井桂子, 齋藤兆古, 堀井清之, 音楽に伴う $1/f$ ゆらぎ周波数成分の抽出とその人間生理への応用, 第37回可視化情報シンポジウム, C213, 2007.
- [7] 野嶋悟士, 齋藤兆古, 時間領域信号の周波数ゆらぎ解析とその応用, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-10-152, 2010

講演論文集

第23回

「電磁力関連のダイナミクス」

シンポジウム

The 23rd Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD23)

会期:2011年5月18日(水)~20日(金)

会場:愛知県産業労働センター(ウインクあいち)

主催:日本AEM学会

共催:電気学会(産業応用部門), 日本機械学会

協賛:磁性流体研究連絡会, 日本液晶学会, 精密工学会, 日本鉄鋼協会, 日本磁気学会,

日本原子力学会, 計測自動制御学会, 日本シミュレーション学会, 低温工学・超電導学会

後援:財団法人大幸財団

動画像信号処理による磁化特性の評価

Magnetization Characteristics Evaluation by Dynamic Image Signal Processing

齋藤 兆古^{*1}(正員)

Yoshifuru SAITO(Mem.)

Previously, we have succeeded in visualizing the magnetic domain dynamics by the scanning type electron microscope as well as Bitter methods. Further, we have extracted the local B-H loops from the visualized domain dynamic animations.

This paper visualizes the magnetic wall dynamics of ferromagnetic materials when impressing the perpendicular and longitudinal alternating magnetic fields to the thin flat shape specimens and extract 1/f fluctuating frequency characteristics in each of the magnetized directions. As the result, it is clarified that the perpendicular magnetization characteristics are carried out in a quite different manner comparing with those of longitudinal ones. And also, this suggests that the local iron loss distributions are greatly depending on the magnetized directions to the materials.

Keywords: ferromagnetic materials, magnetic wall dynamics, 1/f fluctuating frequency, iron loss, Bitter method.

1 緒言

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。

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[1]。従来から、筆者の研究室で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研究・開発している[2-7]。

本稿では、強磁性体の磁壁移動をビッター法で可視化し、動的磁壁移動画像の特徴を 1/f ゆらぎ周波数分布特性で評価する。また、磁壁画像の画素値より求め

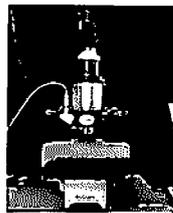
た鉄損分布と赤外線カメラによる熱分布測定から推定される鉄損分布を比較し、両者は定性的に一致した傾向を持つことを報告する。

2 動的磁壁画像の可視化

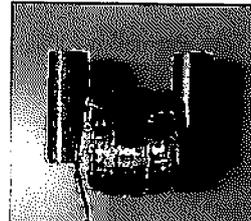
2.1 ビッター法

試料台に試料を載せ、研磨した試料面にスボイ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(γ酸化鉄)のコロイド液を強磁性体表面につけると、コロイド液内に分散していた酸化鉄の微粒子が、磁壁付近の急峻な磁化変化に起因する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と呼ばれる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磁壁の観測が可能とする[2]。

2.2 動的磁壁画像と磁化特性



(a) Entire measurement system



(b) Exciting coil and yoke

Fig.1 Experimental devices for the basic Bitter method.

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

^{*1}法政大学

Fig. 1 に本研究で使用した実験装置と励磁コイルを示す。

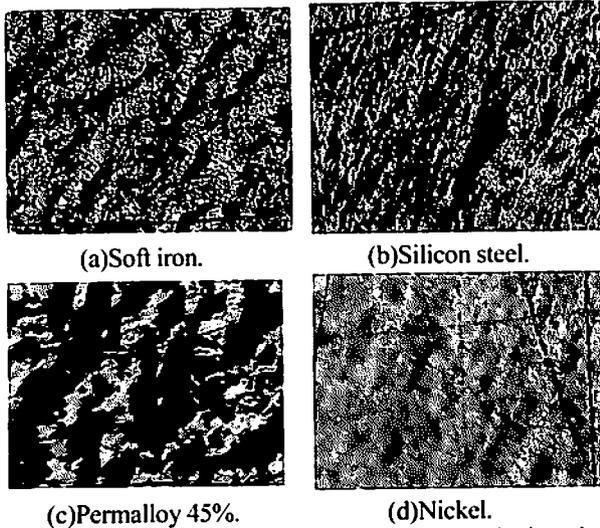


Fig.2 Sample flame images of dynamic magnetic domain walls

Fig. 2 は、周波数 1Hz の正弦波交流磁界を各種の強磁性材料に対して印加した場合に得られる動的磁壁画像のフレーム画像例を示す。

Fig. 3 はそれぞれの供試材料に巻かれたサーチコイルと励磁電流から得られる B-H ループ特性である。Fig.2 に示す動的磁壁画像の画素値の平均を Fig. 3 の B-H ループ上の各磁界強度に対する平均磁束密度に対応させることによって、動的磁壁画像の画素値から、Fig.3 の B-H ループを基準とする局所的 B-H ループが画素レベルで得られる[1,2]。

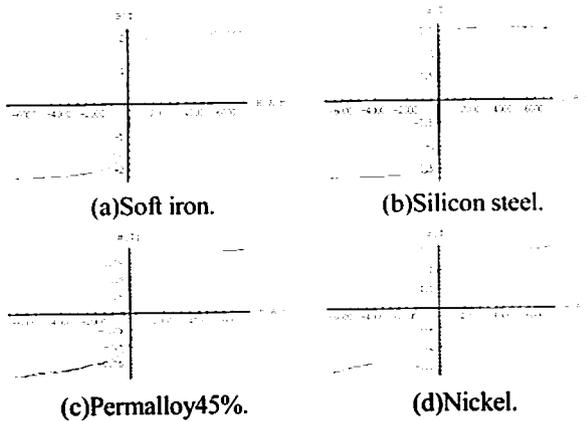


Fig.3 B-H loops of the tested magnetic materials.

2.3 磁化方向による動的磁壁画像の違い

供試材料が長手方向や垂直方向へ磁化された場合の動的磁壁移動画像を観察するため、Fig.4 に示す E 型

フェライトコアを継鉄として使った。Fig.4 に、E 型フェライトコアの中央脚に巻かれた励磁コイルによって磁化された場合の磁壁観察位置を①から⑤の番号で示す。中心脚の励磁磁界が理想的に分布し材料が完全に均一ならば、測定点①と⑤、②と④はそれぞれ同一磁壁画像となる。測定点②と④は継鉄の中央脚から両端の脚へ渡る長手方向の動的磁壁移動画像、そして、測定点①、③、⑤は縦方向磁化特性が反映する動的磁壁移動画像を与えると考えられる。

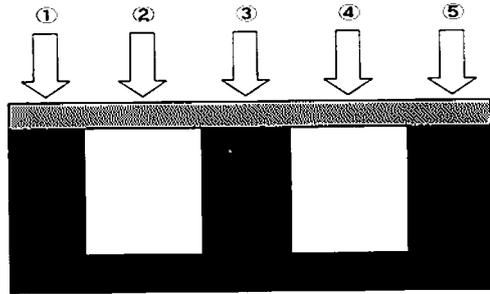


Fig.4 Observation points of the dynamic magnetic domain wall movements.

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 1Hz の交流磁界を印加した場合の各点における磁区動画像中のフレーム画像を Figs.5 -7 に示す。

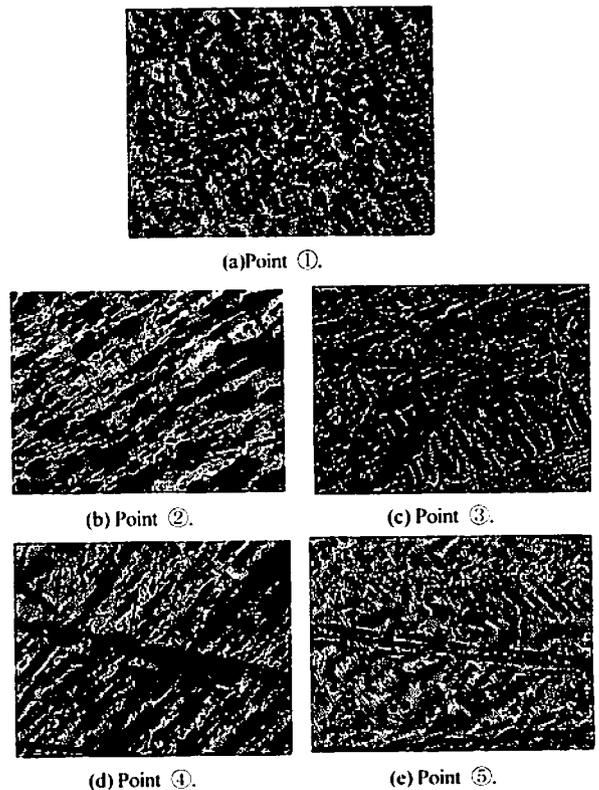


Fig.5 Flame images of magnetic domain walls at each of the positions: ①,②,③,④ and ⑤ in Fig.4. Sample: Grain Oriented Silicon Steel.

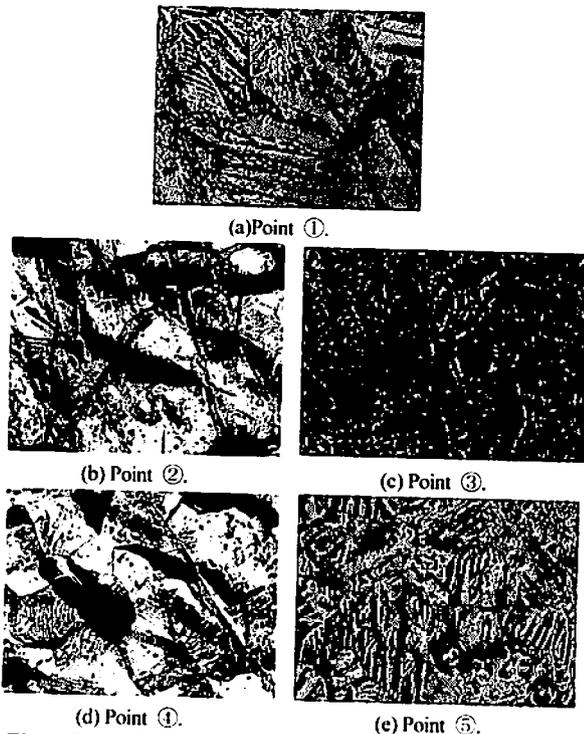


Fig.6 Flame images of magnetic domain walls at each of the positions: ①,②,③,④ and ⑤ in Fig.4.
Sample: Non-Oriented Silicon Steel.

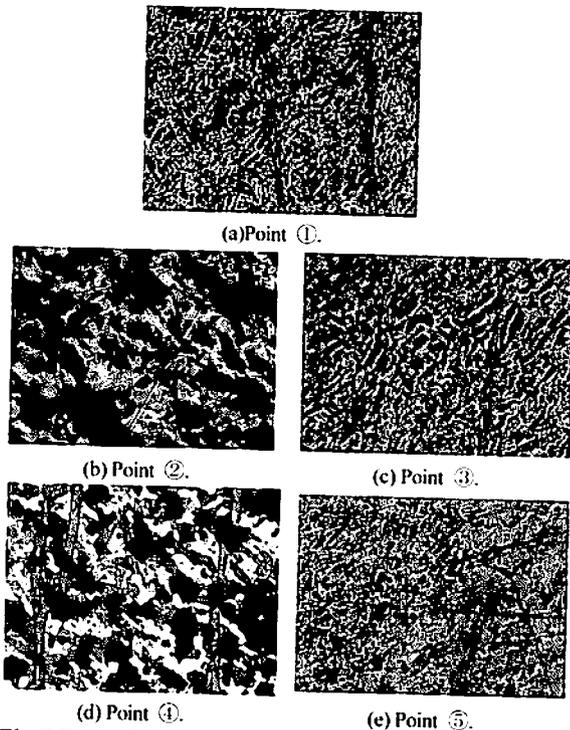


Fig.7 Flame images of magnetic domain walls at each of the positions: ①,②,③,④ and ⑤ in Fig.4.
Sample: Permalloy45%.

3.1 1/f ゆらぎ周波数特性

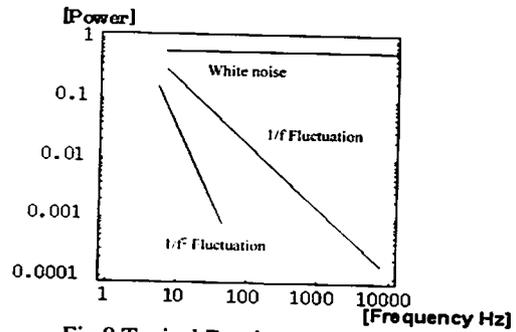


Fig.8 Typical Fourier power spectrum.

「1/f ゆらぎ」は小鳥の囀りなどの自然界に多く存在する。Fig.8に示すように、フーリエパワースペクトラムと周波数、両者の対数を取った図で、直線の傾きが0の場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急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周波数特性と言われている。

動的磁壁画像の1/f ゆらぎ特性は、各磁壁画像を構成する画素値のフレーム方向変化、すなわち、時間軸方向の画素値の変化から求められる[2]。

3.2 磁化方向による1/f ゆらぎ特性の違い

Fig.4で示した観測点①から⑤に於いて、それぞれの点における1/f ゆらぎ周波数分布を、方向性珪素鋼板、無方向性珪素鋼板、パーマロイ45%に対して抽出した。Figs.9-11は、それぞれの1/f ゆらぎ周波数分布画像で、1/f ゆらぎ周波数部分を「白」、他を「黒」としたモノクロ二値化画像である。

さらに、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Tables 1, 2, 3にそれぞれ示す。

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

Fig.4に示すフェライトコア脚上の測定点①、③、⑤とフェライトコア脚間の測定点②、④の1/f周波数分布特性を比較する。その結果、コアヘッド上の方が1/f ゆらぎ周波数分布が高密度であることがわかる。すなわち、長手方向よりも垂直方向へ磁界を印加した場合の方が顕著な1/f ゆらぎ周波数特性を呈する。

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フェライトコア脚間、すなわち、長手方向磁化で方向性珪素鋼板より1/f ゆら

3 動的磁壁画像のゆらぎ周波数特性

ぎ特性を顕著に呈することが判明した。

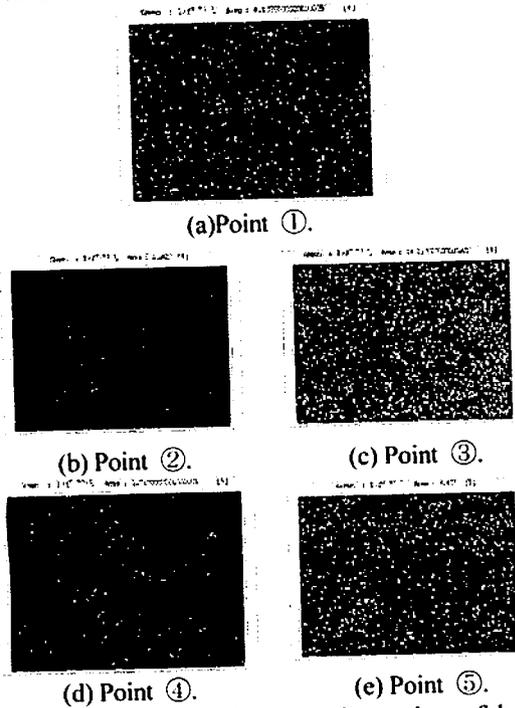


Fig.9 Extracted 1/f frequency fluctuations of the non-oriented silicon steel. ①,②,③,④ and ⑤ refer to the sampled points in Fig.4. White point denotes 1/f frequency pixel.

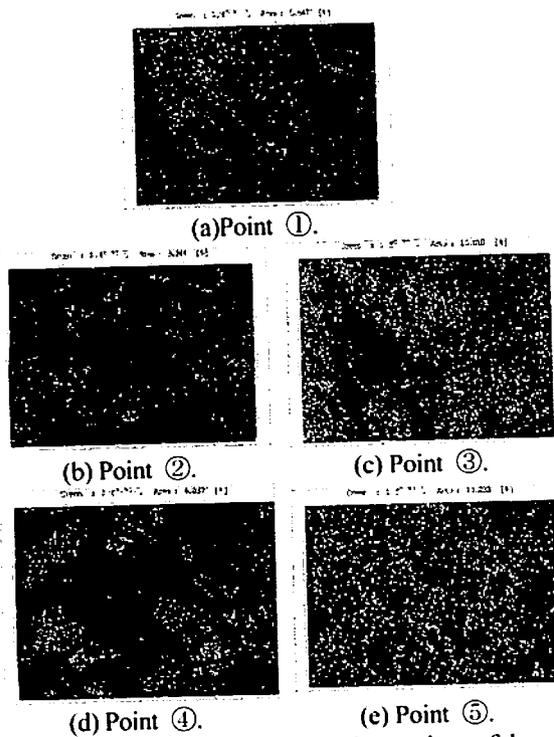


Fig.10 Extracted 1/f frequency fluctuations of the non-oriented silicon steel. ①,②,③,④ and ⑤ refer to the sampled points in Fig.4. White point denotes 1/f frequency pixel.

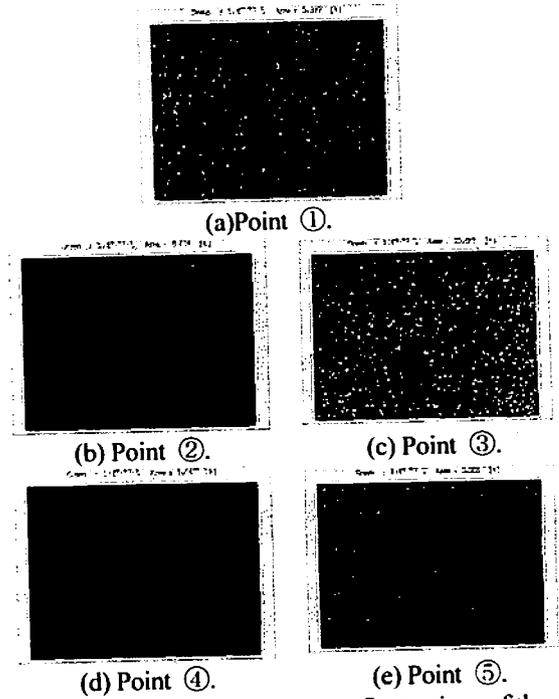


Fig.11 Extracted 1/f frequency fluctuations of the permalloy45%

①,②,③,④ and ⑤ refer to the sampled points in Fig.4. White point denotes 1/f frequency pixel

Table 1 1/f frequency fluctuation characteristic of the grain oriented silicon steel

Observed Points	1/f Fluctuation Rate.
①	6.11%
②	1.24%
③	14.13%
④	1.76%
⑤	9.43%

Table 2 1/f frequency fluctuation characteristic of the non-oriented silicon steel.

Observed Points	1/f Fluctuation Rate.
①	5.65%
②	3.34%
③	10.82%
④	4.84%
⑤	10.23%

Table 3 1/f Frequency fluctuation characteristic of the permalloy45%.

Observed Points	1/f Fluctuation Rate
①	5.40%
②	0.08%
③	10.69%
④	0.05%
⑤	3.36%

4 長手方向と垂直方向の磁化特性

4.1 動的磁壁画像と磁化特性

Fig. 12 に示すように、継鉄を構成するフェライトコアの底部に励磁コイルを巻き、サンプルである軟鉄板に交流磁界を印加させた場合の各点における動的磁壁画像のフレーム画像を Fig. 13 に示す。

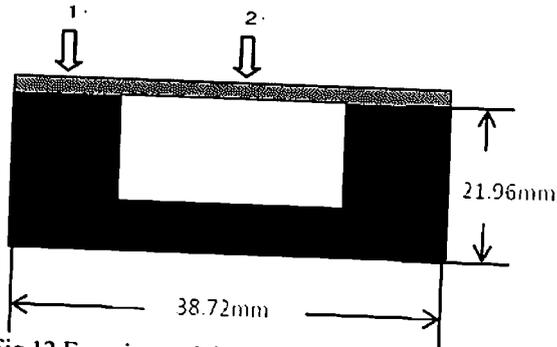
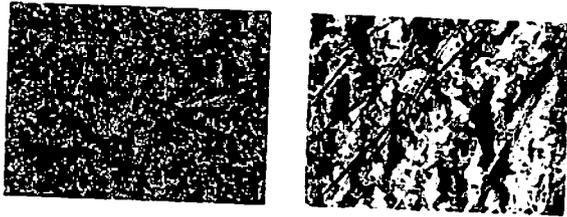


Fig. 12 Experimental device for the local magnetization characteristics measurements



(a) Point ①.

(b) Point ②.

Fig. 13 Flame images of dynamic magnetic domain walls at each of the positions: ① and ② in Fig. 12. Sample: Soft iron.

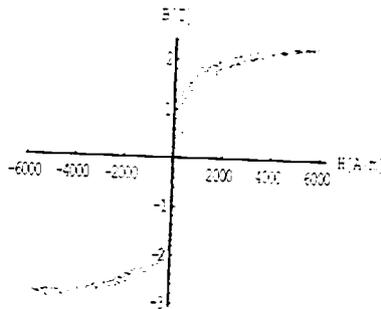


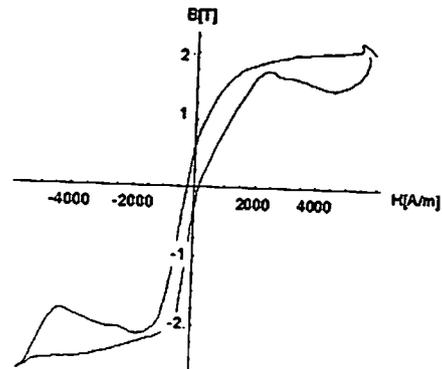
Fig. 14 B-H loop of the tested soft iron.

4.2 モノクロ動画画像の平均画素値と磁化特性

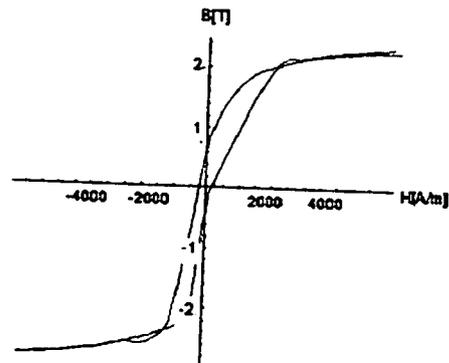
Fig. 14 はそれぞれの供試材料の磁壁観測点②を中心として巻かれたサーチコイルと励磁電流から得られた B-H ループである。サーチコイルは測定点②を中心として巻かれているから、Fig. 13(b)の平均画素値を Fig. 14

の各磁界強度に対する磁束密度に対応させることによって、動的磁壁画像の画素値から Fig. 15 に示す局所的な B-H ループ特性を得る。Fig. 15 は測定点①と②の全画素の平均値から求めたそれぞれの B-H ループである [2-6]。但し、Fig. 15 の両者の飽和磁束密度は同一であり、Fig. 14 のそれと一致させてある。これは、Fig. 13(a),(b)の平均画素値を飽和磁束密度で揃えたことを意味する。

Fig. 15(b)は Fig. 14 からノイズを加算平均化処理で削除した B-H ループを再現し、Fig. 15(a)の B-H ループは上下非対称で且つループで囲まれる面積も Fig. 16(b)のそれと比較して大きい。これは、軟鉄では長手方向から垂直方向へ磁化方向が変曲する部分で鉄損が大きいことを意味し、3.2 節で述べた 1/f ゆらぎ周波数特性から推定された結果と一致する。



(a) Point ①.



(b) Point ②.

Fig. 15 Magnetization characteristics of soft iron evaluated from the entire pixel values in each of the flame images.

4.3 熱分布画像の測定

軟鉄を供試材料とし、Fig. 12 の実験装置を用いて 1[kHz]の交流磁界を印加した場合の熱分布を赤外線カメラ（三菱サーマルメジャー）で撮影した。

Figs. 16 は Fig. 12 の実験装置を側面から撮影した赤

外線画像であり、60秒後に中央脚上にほぼ均一の白色で示される熱分布が存在し、さらに、左脚の右端部に熱分布の存在がわかる。すなわち、鉄損は最も磁束密度が高く、さらに垂直方向磁化が強い中央脚上に多く、磁束が長手方向から垂直方向へ変化する変曲部（左脚の右端部）に集中して存在することを意味する。

以上の傾向は、垂直方向の磁束が支配的な領域では鉄損が増加することを意味する Table 1 から Table 4 までの結果と一致する[7]。

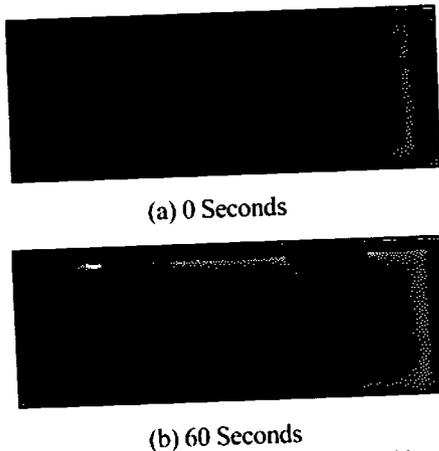


Fig.16 Infrared flame images when excited by 1kHz frequency magnetic fields, where tested sample is the soft-iron sheet.

White part denotes the high temperature parts.

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動的磁壁移動画像を撮影し、1/f ゆらぎ周波数の抽出を行った。その結果、コアヘッド間の長手方向磁界が支配的な部分よりも、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より、垂直磁界部分の鉄損が大きいと考えられる[2]。すなわち、磁束の流れの方向が長手方向から垂直方向へ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。

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壁移動画像を可視化した。画素値による磁化特性を算定し、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と比較して 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なる可能性が明らかになった。

赤外線カメラによる鉄損分布の検証実験を行った。

その結果、鉄損は、最も磁束密度が高く垂直方向磁化が強い中央脚上に多く、さらに、磁束が長手方向から垂直方向へ変化する変曲部（左脚の右端部）に集中して鉄損が存在することが判明した。この結果は動的磁壁画像から得られた傾向と一致した。

謝辞

本研究は現在（2010年11月）法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程に在籍する石井 隆君が学部4年生から一貫して続けて来た Bitter 法による強磁性体の動的磁区観察を通して得られて成果を纏めたものであり、紙面を借りて同君の精進と努力に謝意を記す。

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 Vol.15, pp. 409-416, 2001/2002.
- [2] 須永高志、寺西正晃、齋藤兆古、ビッター法による可視化磁区画像から周波数特性の抽出、日本 AEM 学会誌 Vol.15 No.2, pp.143-148, 2007.
- [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、P01-001.
- [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、P01-001.
- [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.
- [7] 石井隆、齋藤兆古、ビッター法による動的磁区挙動に関する研究、電気学会マグネティックス研究会資料(2010年11月26日、秋田大学)、MAG-10-153

講演論文集

第23回

「電磁力関連のダイナミクス」

シンポジウム

The 23rd Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD23)

会期:2011年5月18日(水)~20日(金)

会場:愛知県産業労働センター(ウインクあいち)

主催:日本AEM学会

共催:電気学会(産業応用部門), 日本機械学会

協賛:磁性流体研究連絡会, 日本液晶学会, 精密工学会, 日本鉄鋼協会, 日本磁気学会,

日本原子力学会, 計測自動制御学会, 日本シミュレーション学会, 低温工学・超電導学会

後援:財団法人大幸財団

新方式共振型 ECT 信号処理

New Resonance Type ECT Signal Processing

齊藤 兆古^{*1}(正員)

Yoshifuru SAITO(Mem.)

Eddy Current Testing (ECT) is extensively used to inspect such as nuclear power plants, airplanes, elevators, iron bridges, and escalators without any destruction.

This paper proposes a new resonance type ECT sensor system, which makes it possible to detect the defects of metallic plate with higher reliability compared with conventional resonance type ECT. Several examples demonstrate that this new resonance type ECT sensor has versatile sensibility compared with that of conventional ones.

Keywords: eddy current sensor, resonance wire connection.

1 緒言

エレベータやエスカレータ、さらに航空機、鉄橋、原子力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。金属の非破壊検査として、超音波、放射線、電気抵抗、渦電流などが用いられている。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触の必要性がある。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(以下、ECT と略記)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。一方、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など、他の非破壊検査法に比較して有利な特性を有する[1]。

本論文で提案する共振型 ECT センサは励磁コイルの並列共振周波数とインピーダンスが磁氣的に結合す

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[2]。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氣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センサコイルを構成するコイル間キャパシタンスを効果的に発揮させる共振型結線 ECT センサを提案する[3,4]。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 センサは圧倒的に感度が向上することを報告する。

2 共振型 ECT

2.1 原理

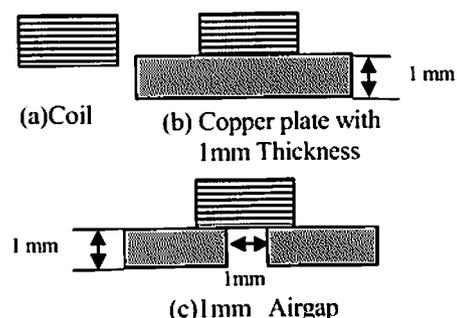


Fig.1 Tested ECT coil and measurement conditions

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。Fig.1 に示すセンサコイルで、(a)有限長ソレノイドコイル型 ECT センサ単体の入力インピー

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

^{*1}法政大学

ダンス $|Z|$ と位相 ϕ の周波数特性を測定する。次に、(b)ECT センサコイル下に被検査対象と同じ材質を持つ欠損のない銅板を設置して、コイルのインピーダンス $|Z|$ と位相 ϕ の周波数特性を測定する。さらに、(c)コイル下に貫通欠損と見なす 1mm 幅のスリットを持つ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 ϕ の周波数特性を測定する。

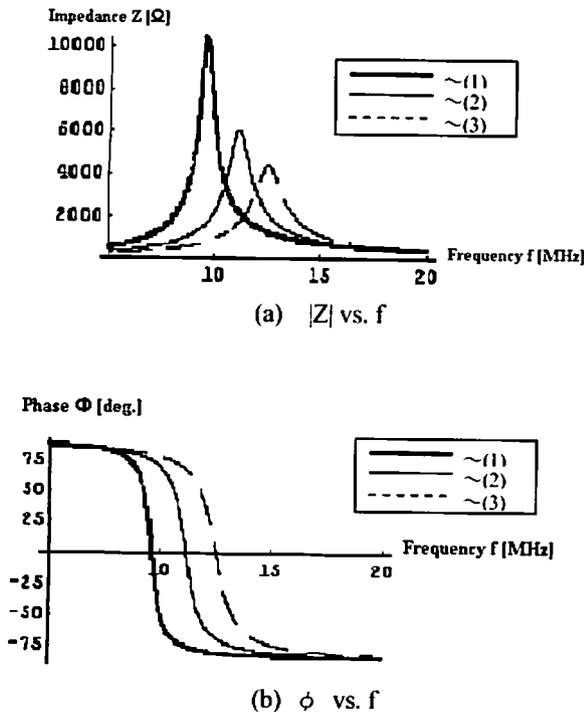


Fig.2 Frequency characteristics of the impedance and phase. (1),(2) and (3) denote the proposed resonance type located at no target, target with no defect and target with slit regarded penetrate type defect, respectively.

Fig.2 はインピーダンス $|Z|$ および位相 ϕ 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低い共振周波数の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高い共振周波数の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 1mm 幅のスリットを貫通欠損とみなす場合(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[2]。

2.2 共振型結線 ECT の原理

共振型結線 ECT の原理を述べる。Fig.3(a)に示す平行に並んだ二本の導体を考え、Fig.3(b)に示すように結線する。Fig.3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、この2本の導体間の電位差は導体の端から端まで等しいため、コイル間キャパシタンスを集中定数とみなすことができる。また、流れる電流の方向は同方向である。Fig.3(c)に示すように、二本の導体間のキャパシタンス C を集中定数で仮定可能であるから、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.3(c)の等価回路が導かれる。Fig.3(c)の等価回路は Fig.3(d)のように変形される[3,4]。

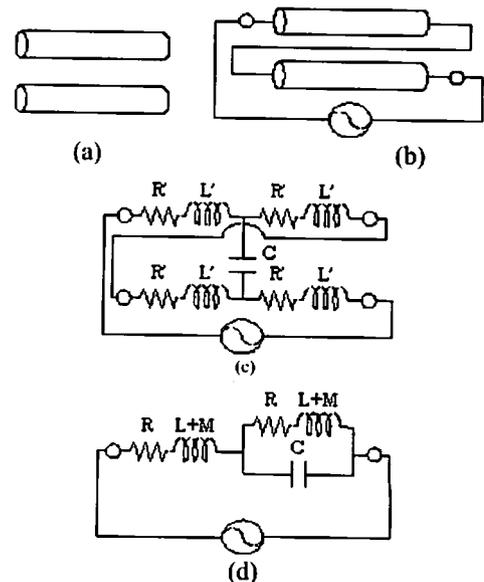
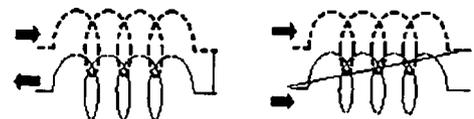


Fig.3 Principle of a resonance coil connection.

また、Fig.4 はセンサコイルの巻線法で、(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。



(a) Normal (b) Resonance type
Fig.4 Comparison of the normal with resonant coil connections.

2.3 共振型結線 ECT

Table 1 は試作し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 値を式(1)で計算

した。

$$Q = \frac{R}{|X|} \quad (1)$$

ここで、 R, X はそれぞれ、インピーダンス Z の実数部と虚数部である。

Table 1 Specification of a tested sensor coil.

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

Fig. 5 は試作した ECT センサーの周波数特性を従来の単純なソレノイドコイル型 ECT センサーのそれと比較して示す。

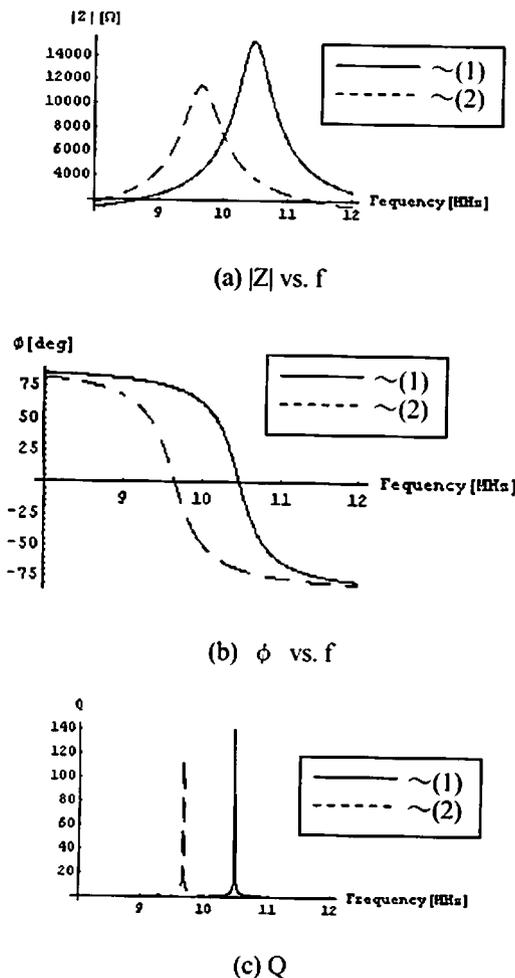
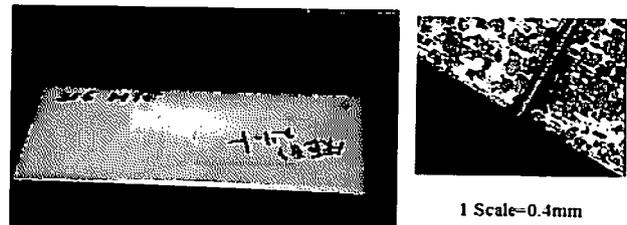


Fig.5 Resonant frequency characteristics of the tested resonance type ECT sensor together with conventional solenoidal one. (1) and (2) denote to the proposed resonance type and conventional one, respectively.

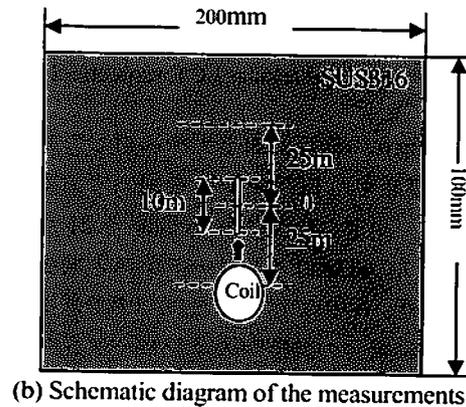
Fig.5 は、対象金属が存在しない条件下、すなわち、それぞれのコイル単体のインピーダンス $|Z|$ 、位相 ϕ 及び Q に関する実験結果である。同図中で、実線と破線は、それぞれ共振型と従来型の巻線法によるセンサコイルの結果を示す。この結果は、いずれのコイルにおいても周波数特性は並列共振であり、共振型結線のコイルは明らかに従来型である通常結線のコイルの周波数特性と異なることを示す。すなわち、Fig.5 で、実線は共振型結線のコイルの共振周波数、共振時のインピーダンス及び Q を示し、破線で示す従来型のそれらと比較して増加することを示す。従来型の巻線法によるコイルでは巻線間に加わる電圧が場所によって異なり、且つ、小さい。これは、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大きく依存する点である。

3. 欠損探査実験

3.1 加工スリット傷



(a) Tested sample: SUS316



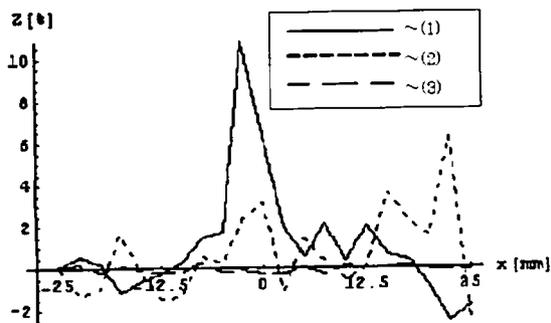
(b) Schematic diagram of the measurements

Fig.6 The tested target metallic sheet with a rectangular defect.

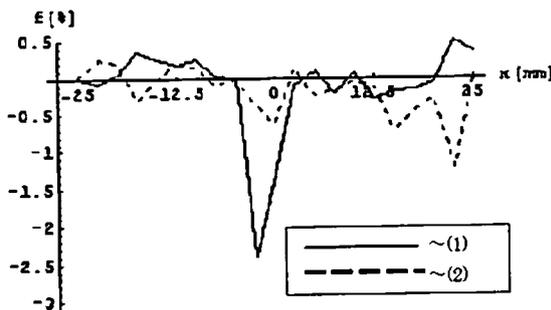
Table 1 に示す有限長ソレノイド型の ECT センサを用

いて、Fig.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 の変化から探査する。SUS316 は 18%の Cr と 12%の Ni を含み、それにモリブデン (Mo)を添加して耐食性、耐孔食性をさらに向上させたステンレス鋼である。海水をはじめ各種媒質に対して優れた耐食性を有する耐孔食材料である。

Fig.6 は、共振型、従来型、および通常の ECT、各センサに対する検査探査モデルを示し、このモデルは 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 の矩形スリットを欠損とみなしている。



(a) Resonance/Input impedance deflections



(b) Resonant frequency deflections

Fig.7 Defect searching results. (1), (2) and (3) refer to the proposed resonance type, conventional resonant type and regular ECT, respectively.

Fig.7 は Fig.6 の検査対象モデルに対して共振型、従来型、および通常の ECT センサを用いて欠損探査した結果を示す。測定点数は 2.5mm 間隔で 21 点である。ここで、Fig.7 の縦軸はインピーダンスと共振周波数の変化率であり、式(2)で定義した。式(2)で基準値は欠損が存在しない場合の共振時のインピーダンスと共振周波数である。

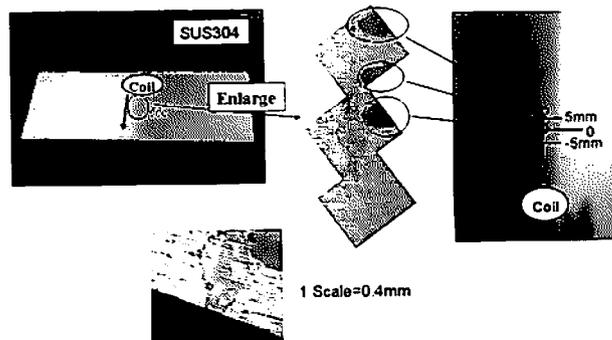
$$\text{変化率} = \frac{\text{測定値} - \text{基準値}}{\text{基準値}} \times 100[\%] \quad (2)$$

Fig.7 で、実線は共振型結線 ECT、点線は従来型の共振型 ECT さらに破線は駆動周波数 10kHz の通常型

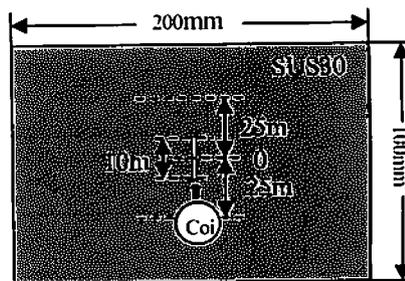
ECT、それぞれの探査結果である。この結果から、通常の ECT では、ほとんど欠損が検出困難であることがわかる。また、従来の共振型 ECT では、S/N 比が悪く明確に欠損部が区別できない。他方、提案する共振型結線型 ECT は、従来型の共振型 ECT と比較して共振周波数、共振時のインピーダンス共に感度が 5 倍以上に向上することがわかる。

3.2 応力腐食割れ

Table 1 に示す有限長ソレノイド型の ECT センサを用いて、Fig.8(a)に示す SCC(応力腐食割れ)の探査を行う。普通の鉄鋼材料では腐食環境下で赤錆のような表面全体にわたる腐食が発生し進行する。一方、一般に錆び難い材料、例えばステンレス鋼や、ある種の銅合金などは、表面に極めて薄い腐食膜ができ、腐食の進行を防いでいる。このような材料は、引張り応力と腐食環境の相互作用で、材料に亀裂が発生し、その亀裂が時間と共に進展する現象が起こることがある。この現象を応力腐食割れ(SCC : Stress Corrosion Cracking)と呼んでいる。Fig.8(b)は SUS304 に生じた SCC の検査対象モデルである。



(a) Tested sample: SUS304

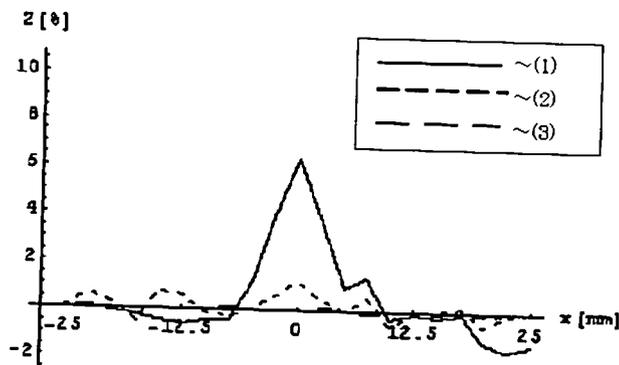


(b) Schematic diagram of the measurements

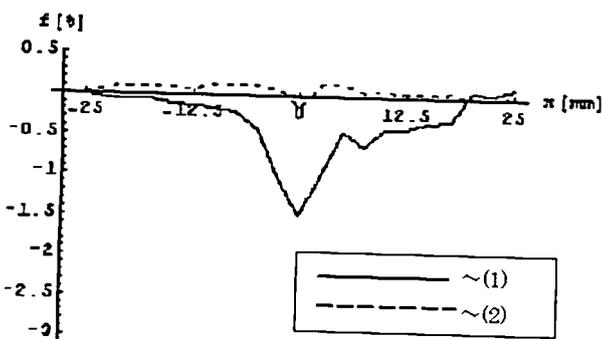
Fig.8 Modeling of the tested target metallic sheet with SCC Defect.

Fig.9 は、共振型、従来型、および通常の ECT セン

サを用いて Fig.8 の探査対象モデルの欠損探査を行った結果を示す。Fig.9 で、実線は共振型結線 ECT、点線は従来の共振型 ECT および破線は駆動周波数を 10kHz とした通常の ECT、それぞれの探査結果である。測定点数は 2.5mm 間隔で 21 点とした。この結果から、それぞれのセンサによる探査結果は、SUS316 と同様な傾向となるが、変化率は SUS316 に比較して小さいことがわかる。これは、SUS316 に比較して傷の深さと渦電流分布の相違によるものと考えられる。



(a) Resonance/Input impedance deflections



(b) Resonant frequency deflections

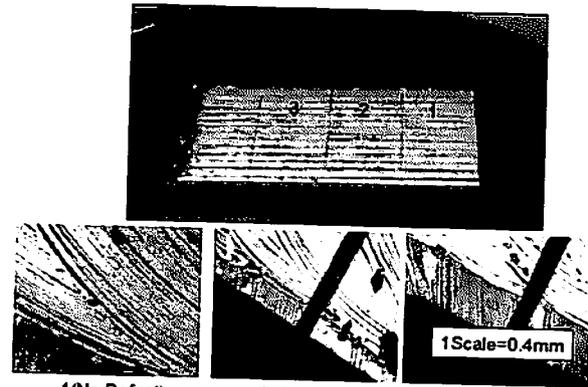
Fig.9 Defect searching results of SCC. (1),(2) and (3) refer to the proposed resonance type, conventional resonant type and regular ECT, respectively.

3.3 肉盛り板

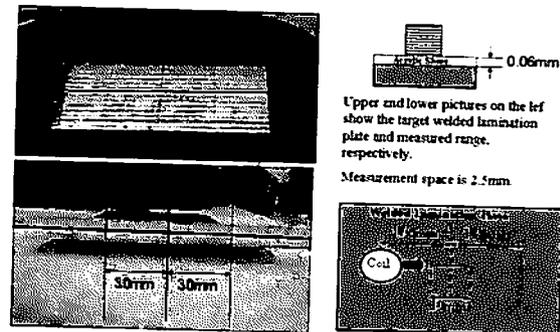
Table 1 に示す有限長ソレノイド型の ECT センサを用いて、図 10(a)に示す溶接によって作られた肉盛り板中における欠損探査を行う。肉盛りで構成された平面は必然的に凹凸を持つ面となるため、図 10(b)に示すように肉盛り板上に厚さ 0.06mm のアクリルプレートを重ね、センサが走査する面を肉盛りによる凹凸の影響で上下しない設定とした。

図 11(c)は、図 11(b)に示す検査対象モデルを共振結

線型、従来の共振型、および通常の ECT センサを用いて欠損探査した結果を示す。尚、測定区間は図 12(b)に示す 60mm であり、2.5mm 間隔で測定した。



(a) Tested sample: Welded Lamination Plate



(b) Schematic diagram of measurement

Fig.10 Modeling of the welded lamination plate and measurement conditions.

Fig.11 は、Fig.10(a)で、欠損の無い部分"1"を共振型結線 ECT (実線)、従来の共振型 ECT (点線)、さらに駆動周波数を 10kHz に設定した通常の ECT (破線)、それぞれの欠損探査結果である。何れも欠損が存在しない結果を与えている。

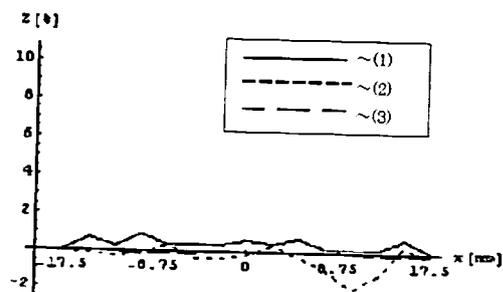


Fig.11 Impedance deflection at the point 1(No defect). (1),(2) and (3) refer to the proposed resonance type, conventional resonant type and regular ECT, respectively.

Fig.12 は、Fig.10(a)で、深さ 3mm の欠損がある部分

"2"に関する欠損探査結果である。明らかに提案する共振型結線方式は欠損の存在を示唆している。

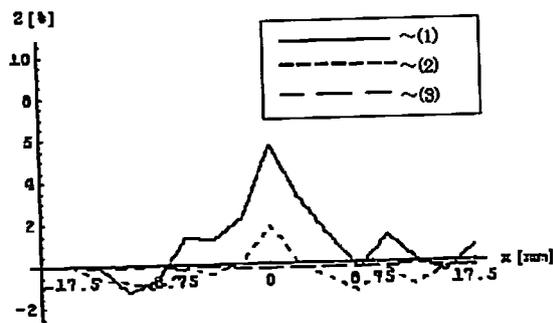


Fig.12 Impedance deflection at point 2 with 3mm depth defect. (1),(2) and (3) refer to the proposed resonance type, conventional resonant type and regular ECT, respectively.

Fig.13は、Fig.10(a)で、深さ5mmの欠損がある部分"3"に関する欠損探査結果である。何れの共振型ECTも欠損の存在を示唆しているが、提案する共振型結線方式は感度が従来型共振ECTセンサと比較して約2倍近く高感度である。

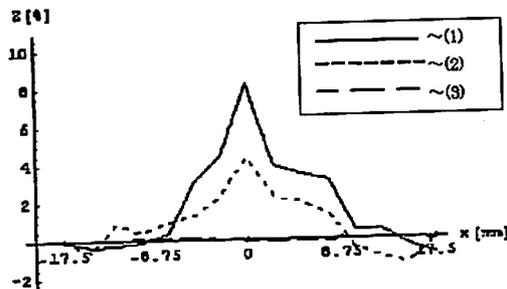


Fig.13 Impedance deflection at point 3 with 5mm depth defect. (1),(2) and (3) refer to the proposed resonance type, conventional resonant type and regular ECT, respectively.

Fig.14は、Fig.10(a)で、深さ5mmの欠損がある部分"3"に対して共振周波数の変化で探査した結果である。何れの共振型ECTも欠損の存在を示唆しているが、提案する共振型結線方式は感度が従来型共振ECTセンサと比較して約5倍高感度である。

以上の結果から、通常のECT法は図10(a)に示す溶接によって作られた肉盛り板の欠損に対して無力であることがわかる。また、従来型共振ECTも明確に欠損部が区別できない。他方、提案する共振型結線ECTは、通常のECTや従来型共振ECTと比較して共振周波数、共振時のインピーダンス共に圧倒的に高感度であるため、大部分の欠損を探査可能とすることがわかる。

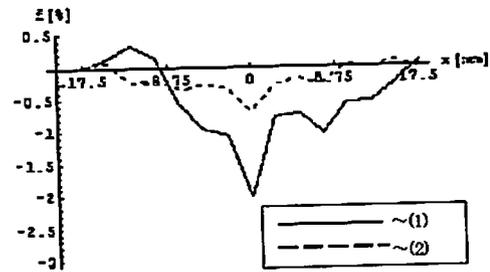


Fig.14 Frequency deflection at point 1 with 5mm depth defect. (1) and (2) refer to the proposed resonance type and conventional resonant type ECT, respectively.

4 結言

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、従来型共振ECTセンサおよび通常のECTセンサとの欠損探査結果の比較を行った。

その結果、提案する共振型結線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、従来型共振ECTではS/N比が悪く、明快に把握出来ない欠損をも検出可能であることを示した。

謝辞

本研究は現在(2011年1月)法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程に在籍する細原隆史君がECTの高感度化を試みて得た成果を纏めたものである。紙面を借りて、同君に謝意を記す。

参考文献

- [1] I.Marinova, S.Hayano and Y.Saito, Polyphase eddy current testing, Journal of Applied Physics, Vol. 75, No.10, pp. 5904-5906, 1994.
- [2] 細原隆史、齊藤兆古、堀井清之、共振型ECTセンサによる金属欠損の可視化、可視化情報シンポジウム、2009年7月、P01-006.
- [3] Y.Midorikawa, S.Hayano and Y.Saito, A resonant phenomenon between adjacent series connected coils and its application to a noise filter, Elsevier Studies in Applied Electromagnetics in Materials, Vol.6, pp. 633-639, 1995.
- [4] 緑川洋一、佐藤貞弘、早野誠治、齊藤兆古、"共振型インダクタのフィルタへの応用"、1995年2月、電気学会マグネティクス研究会資料、MAG-95-32、1995.
- [5] 細原隆史、齊藤兆古、新方式共振型ECTの提案とその特性、電気学会マグネティクス研究会資料MAG-10-151、2010.