

バルクハウゼン信号の高次周波数ゆらぎ解析法とその応用

Application of The Frequency Fluctuation Analysis Method to The Barkhausen Signal and Its Application

河副 隼¹⁾ 齊藤 兆古¹⁾

Jun KAWAZOE, Yoshifuru SAITO

¹⁾ 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻

Ferromagnetic materials are widely used for various manufactured products such as cars, trains, and ships. Iron and steel are the most popular materials for frame structures because of their mechanical properties. Nondestructive testing of iron and steel is an extremely practical way of maintaining their mechanical reliability. It is well known that Barkhausen signals are only emitted from ferromagnetic materials while they are magnetizing. These signals also vary depending on their past mechanical as well as radioactive stress histories.

In the present paper, we have applied a generalized analysis of frequency fluctuations to Barkhausen signals in order to detect the various mechanical stresses. Surprisingly, we have succeeded in clarifying that application of our frequency fluctuation analysis to the Barkhausen signals made it possible to detect several kinds of different pressure mechanical stresses.

Keywords : Barkhausen signals, Frequency fluctuations, Signal processing, Least squares method

1. 緒言

バルクハウゼン信号は、磁区構造を持つ強磁性体、例えば、鉄、ニッケル、コバルト、ガーネット等の磁化過程で観測される。また、バルクハウゼン信号は機械的応力や中性子による損傷等へ敏感に反応することが知られている。

鉄に代表される強磁性体は、多くの人工的プロダクト、すなわち、建造物や製造物中に必須とされる機械的強度を支えるメインフレームの材料として広汎に使われている。機械的構造はその本質的な役割のため、常に機械的応力が加わり、残留応力も存在する。機械的強度維持のため、機械的応力や残留応力に対する非破壊検査技術は安全性確保のために極めて重要であり、予め残留応力などが非破壊的に探査可能となれば、大部分の人工的プロダクトに

於ける機械的安全性や耐久性が計数化可能となり、プロダクトの安全性が確保できる。

従来から、バルクハウゼン信号は機械的応力に対して敏感に反応することが知られている。しかしながら、バルクハウゼン信号はバルクハウゼンノイズと呼ばれるようにランダム性が強く、バルクハウゼン信号から機械的応力や中性子による損傷などが感知可能な信号処理技術は存在しなかった^[1,2]。先行研究として、バルクハウゼン信号へゆらぎ周波数解析を適用することで印加応力に対する巨視的な規則性抽出に成功した例が報告されている^[3]。

本論文の主要な目的は、バルクハウゼン信号から巨視的な規則性抽出を行う場合の周波数範囲設定に関する課題を克服し、さらに従来の周波数ゆらぎ解析法を周波数の1次関数からn次関数へ一般化し、その有効性を吟味することである。

本論文では、周波数の n 次関数へ一般化された周波数ゆらぎ解析法を珪素鋼板の応力探査へ適用し、応力の有無が明確にバルクハウゼン信号へ反映する可視化技術を報告する。具体的には、本論文で採用された供試試験体である珪素鋼板へ周波数の n 次関数へ一般化された周波数ゆらぎ解析法を適用した場合、関数の絶対値が大きい有意義な係数はせいぜい 4 次関数程度であることから、これら 4 個の係数を 3 次元空間上の情報として可視化する方法の提案である。

周波数ゆらぎとしてよく知られているのは $1/f$ ゆらぎである。これは、風の音やさざなみ、川のせせらぎなどの自然現象の音に含まれ、人間に癒し効果を与えることが知られている^[4]。

従来の $1/f$ ゆらぎ周波数解析は、周波数とフーリエ・パワースペクトラム両者の対数値を前提として、周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率を周波数に対する 1 次関数で最小自乗近似する方法に基づいている。すなわち、周波数とフーリエ・パワースペクトラム両者の対数値に対して、周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率を $a_0 + a_1 f$ なる周波数に対する 1 次関数で近似する。 a_0 と a_1 はそれぞれ 0 次と 1 次の周波数ゆらぎの係数であり、 a_1 は 1 次の周波数ゆらぎ特性を与え、特に、 $a_1 = -1$ の場合を $1/f$ ゆらぎと呼ぶ。

本論文では、従来の周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率を 1 次関数で近似する手法を周波数に対する 4 次関数近似へ拡張した高次周波数ゆらぎ解析法を提案する。さらに、バルクハウゼン信号のパワースペクトラムの有効周波数領域を抽出するため、ユークリッド距離を最小化する最適化手法である k -means 法を適用する。 k -means 法で抽出されたパワースペクトラムの有効周波数領域を周波数の 4 次関数近似曲線で表し、4 個の係数を 3 次元空間上に可視化する。磁性体に外部応力を加えた場合、4 個の係数が 3 次元空間上で明確に変化し、大雑把であるが外部印加応力の大きさも掌握可能であることを報告する。

2. 一般化された周波数ゆらぎ解析

2.1 基本式

任意の信号 $g(t)$ およびそのフーリエ・パワースペクトラム $G(f)$ を考え、フーリエ・パワースペクトル $G(f)$ および周波数 f それぞれの対数を求める。縦軸に $\log G(f)$ 、横軸に $\log f$ として信号 $g(t)$ の周波数特性を描く。すなわち、信号の周波数特性を x - y 平

面座標系で、横軸 x を周波数 f の対数、縦軸 y をフーリエ・パワースペクトラムの対数として表す。全周波数領域に対する周波数ゆらぎ特性を表すために、式(1)のべき級数関数近似を適用する。

$$h(f) = e^{(a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + \dots + a_n f^n)} \quad (1)$$

式(1)の係数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ は最小自乗法で決定される。すなわち、式(1)の係数を要素とするベクトル \mathbf{A} は式(2)で与えられる。

$$\mathbf{A} = [\mathbf{C}^T \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{Y} \quad (2)$$

ここで、上添え字 "T" は行列の転置を示し、ベクトル \mathbf{A} 、 \mathbf{Y} および行列 \mathbf{C} はそれぞれ式(3),(4),(5)で与えられる

$$\mathbf{A} = [a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_n]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = [h(f_0) \quad h(f_1) \quad \dots \quad h(f_m)]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & f_0 & f_0^2 & \dots & f_0^n \\ 1 & f_1 & f_1^2 & \dots & f_1^n \\ 1 & f_2 & f_2^2 & \dots & f_2^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & f_m & f_m^2 & \dots & f_m^n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$m > n.$$

式(4),(5)において、 m は式の数であり、1Hz, 10Hz, 100Hz, 1000Hz, \dots などサンプル周波数の数と一致する。サンプル周波数の数 m は、常に供試材料の数 n より多い。このため、式(3)-(5)の条件は常に満たされる。

2.2 1次周波数ゆらぎ

Fig.1 は本論文で採用したバルクハウゼン信号測定装置である。Fig.1 で、継鉄として U 字型マンガンジंक系フェライトコアを採用した。供試材料は厚さ 0.35mm 幅 30mm 長さ 100mm の方向性珪素鋼板である。

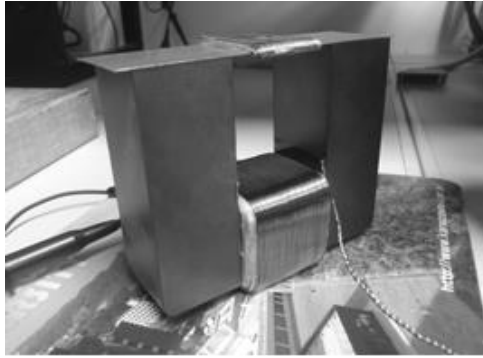


図.1 バルクハウゼン信号測定装置

Fig.1 Device for measuring Barkhausen signals.

U字型フェライトコアの底部に巻かれた励磁コイルは 300 回巻きであり、この励磁コイルへ振幅 1A、周波数 1Hz の正弦波交流電流を通電した。また、鋼板の圧延方向は長手方向で、サーチコイルは長手方向に対して直角に巻いてある。

Fig.2 に示すように 3kg の錘をサンプルの中心部へ吊り下げてない場合、すなわち、何の応力も加えない場合のバルクハウゼン信号の周波数特性を Fig.3 に示す。

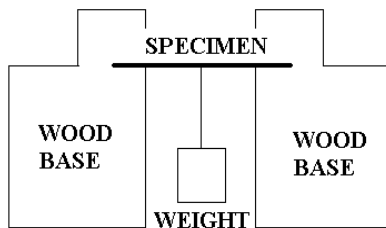


図.2 応力印加方法

Fig.2 Stresses are applied by hanging weights.

Fig.3 から、バルクハウゼン信号の周波数特性は明らかに異なる 2 つの周波数帯域からなることがわかる。一方は低周波数領域であり、式(1)の 1 次関数近似を採用した場合、周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率が $f^{-2.26}$ となる。他方は、周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率がほぼ f^0 となるホワイトノイズの高周波数領域である。

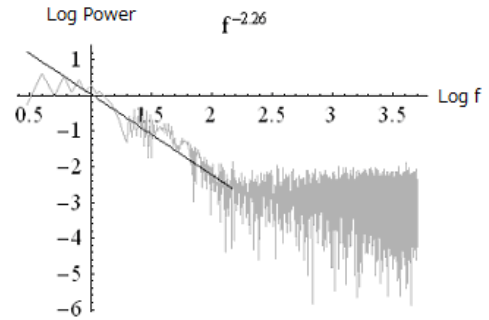


図.3 無応力時におけるバルクハウゼン信号の周波数特性

Fig.3 Example of typical frequency characteristics of Barkhausen signal under no stress.

Fig.4 は、Fig.2 に示すように 3kg の錘をサンプルの中心部へ吊り下げた場合のバルクハウゼン信号の周波数特性である。

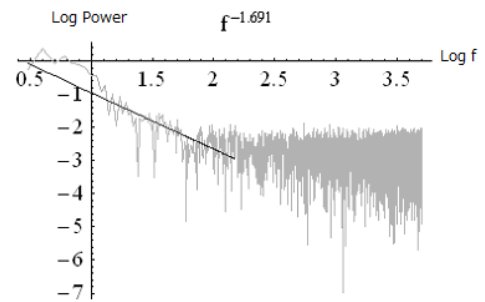


図.4 応力 3kg 時におけるバルクハウゼン信号の周波数特性

Fig.4 Example of typical frequency characteristics of Barkhausen signal under 3 kg of stress.

Fig.4 に於いても、Fig.3 と同様に周波数特性を 2 周波数領域に分けることが可能である。一方は、式(1)で 1 次関数近似した場合、周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率が $f^{-1.69}$ となる低周波数領域である。他方は、周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率がほぼ f^0 となる高周波数領域である。

Figs.3,4 に於ける周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムの変化率 $f^{-2.26}$ と $f^{-1.69}$ の違いは珪素鋼板に加えられた 3kg の錘をつるした場合に拠る。

この結果は、30 個の同一仕様の供試材料に対して同様な傾向が確認されている^[3]。

しかしながら、式(1)の 1 次関数近似を採用した場合、直線近似であるため、重要な問題点がある。すなわち、周波数範囲の選択が周波数ゆらぎ特性へ直

接関係する 1 次関数近似を適用する周波数範囲の決定にあり、これが経験に依存する点である。

2.3 1 次周波数ゆらぎ

横軸を周波数 f の対数、縦軸を Fig.1 の実験装置から得られたバルクハウゼン信号のフーリエ・パワースペクトラムの対数とし、式(1)を用いて高次近似関数の係数を計算した。その結果得られた関数の絶対値が大きい有意義な係数はせいぜい 4 次関数程度であることが判明した。このため、本論文では 4 次関数近似を採用した。

Fig.5 は、錘を吊るさない場合のバルクハウゼン信号に対して、式(1)の 4 次関数近似を適用して得られる 4 次周波数ゆらぎ曲線（濃い実線）とバルクハウゼン信号の周波数特性（薄い実線）を重ねた図である。

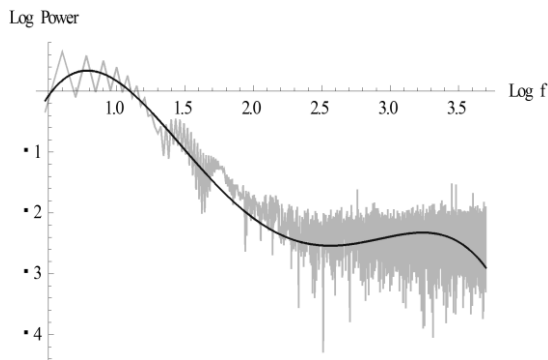
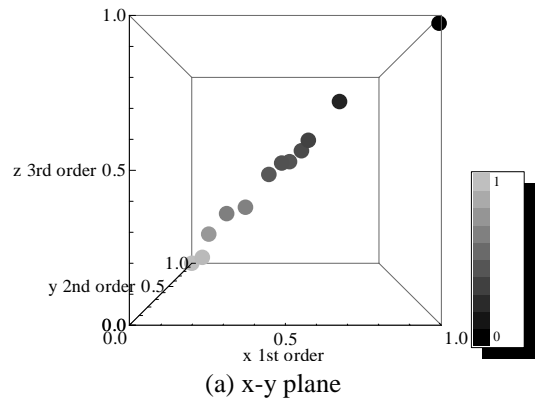


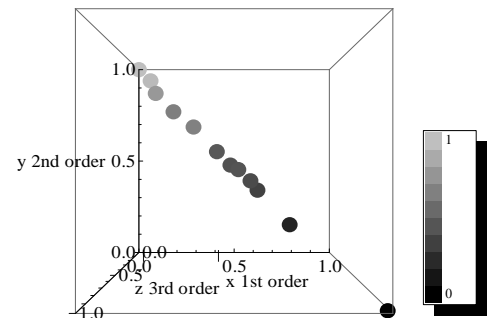
図.5 無応力時における信号の周波数特性と 4 次関数による近似曲線

Fig.5 Example of typical frequency characteristics of the Barkhausen signal under no stress along with an up to the 4th order power series curve in (1).

係数 a_1, a_2, a_3, a_4 の再現性を調べるため、同一仕様の供試材料 10~12 個に対する係数 a_1, a_2, a_3, a_4 を求めた。得られた係数 a_1, a_2, a_3, a_4 をすべて 0 から 1 の値に正規化し、正規化された係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の値をそれぞれ x 軸、y 軸、z 軸と座標点の濃淡度へ対応させ、x,y,z の 3 次元空間上にプロットすると Fig.6 が得られる。



(a) x-y plane



(b) x-z plane

図.6 周波数ゆらぎ係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の分布

Fig.6 Dispersion of frequency fluctuation coefficients.

Fig.6 は同一仕様の供試材料それぞれに対する係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の分布を示している。Fig.6(a)と Fig.6(b)から、座標点が分布しているのは、Fig.7 の斜線で示されている平面近傍領域となることがわかる。

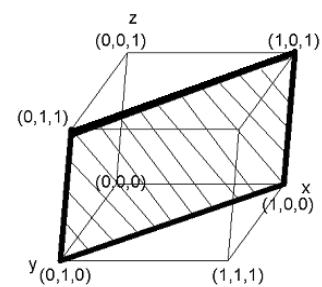


図.7 正規化された周波数ゆらぎ係数 a_1', a_2', a_3', a_4' が分散する面

Fig.7 Area over which normalized frequency fluctuation coefficients a_1', a_2', a_3', a_4' are dispersed (hatched surface).

Fig.6 の結果と Fig.7 の斜線部分について考えると、錘を吊るさない場合の同一仕様とする珪素鋼板にバルクハウゼン信号のバラツキが存在し、このバラツキは Fig.7 の斜線部分近傍に座標点が分布する周

波数ゆらぎ特性となることを意味する。

2.4 印加応力の可視化

2.3 節で行った実験と同様にして、1kg 以下の錘をいくつか用意して、その中から無作為に選択した錘を吊るし周波数ゆらぎ特性を測定した。

Fig.8 は、錘を吊るした場合のバルクハウゼン信号に対して、式(1)の4次関数近似を適用して得られる4次周波数ゆらぎ曲線（濃い実線）とバルクハウゼン信号の周波数特性（薄い実線）を重ねた図である。

Fig.9 に 1kg 以内の錘に対して得られた、正規化した係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の分布を示す。1kg 以内の重さから無作為に選択した錘を吊るした場合と錘を吊るしていない場合でそれぞれ 5 個のデータ、計 10 個のデータを抽出した。それらのデータを用いて得られた係数 a_1', a_2', a_3', a_4' を、最大値を 1 としてゼロから 1 へ正規化して描いた結果が Fig. 9 である。

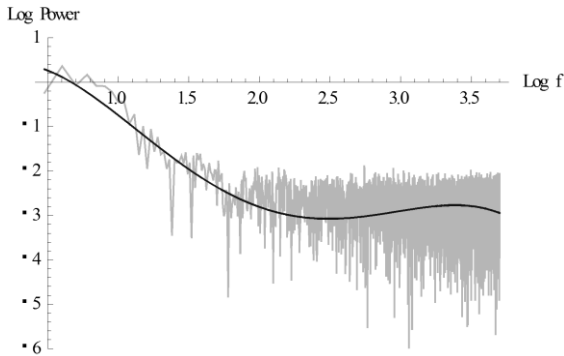
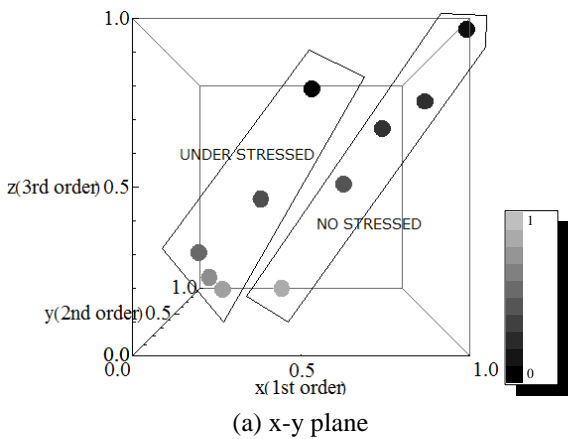
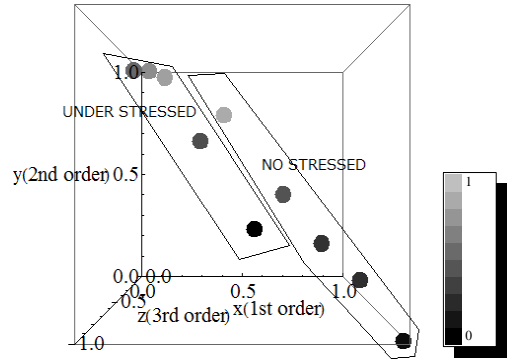


図.8 応力印加時における信号の周波数特性と4次関数による近似曲線

Fig.8 One frequency characteristic of the Barkhausen signals under stress along with the 4th order power series.



(a) x-y plane



(b) x-z plane

図.9 応力有無による係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の分布の違い

Fig.9 Difference in normalized frequency fluctuation coefficients a_1', a_2', a_3', a_4' between stressed and non-stressed groups.

Fig.9 のいずれにおいても錘を吊るした場合は直線状に分布する係数 a_1', a_2', a_3', a_4' が平行移動し、(0,1,0)座標近傍へ集中することがわかる。

2.5 印加応力の可視化と k-means 法

2.4 節で行った実験と同様にして、1kg 以下の錘をいくつか用意して、その中から無作為に選択した錘を吊るした場合と錘を吊るしていない場合で、周波数ゆらぎ特性を測定した。周波数ゆらぎ特性はホワイトノイズである高周波部分とバルクハウゼン信号を含む低周波部分にクラスタリングした。クラスタリングは k-means 法を採用した。

k-means 法は、最初に各データに対してランダムにグループを割り振り、各グループの中心をもとめる。次に各データを最も近い中心のグループに割り当て直す。これらを繰り返す、グループに変化がなかった場合にグループが確定し、クラスタリングが終了する。

Fig.10 は錘を吊るした場合のバルクハウゼン信号の周波数特性を高周波部分と低周波部分に分割した波形と、バルクハウゼン信号を含む低周波部分に対して式(1)の4次関数近似を適用して得られる4次周波数ゆらぎ曲線を重ねた図である。

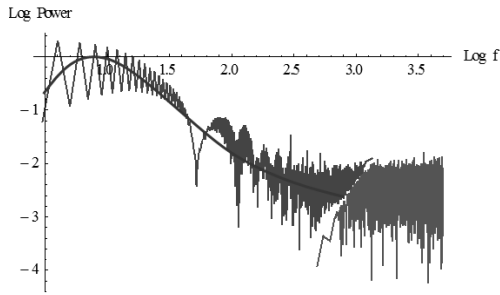


図.10 k-means 法適用後の低周波部分に対して 4 次関数近似を適用した例

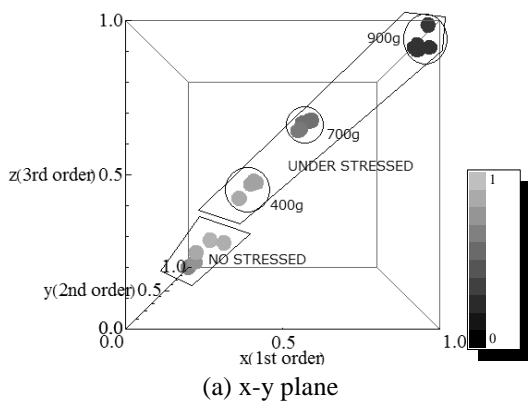
Fig.10 Classified into 2 groups frequency characteristics of Barkhausen signals by the k-means method and a 4th order power series approximation curve to the lower frequency range.

1kg 以下である 900g, 700g, 400g の 3 種類の錘を用意し, 同じ重さの錘あたり 5 回の周波数ゆらぎ特性の測定を行った. 錘を吊るしてない場合を含めて 4 種類の応力を珪素鋼板へ印加して実験した. 周波数のクラスタリングは k-means 法を採用し, 4 次の近似関数を採用した.

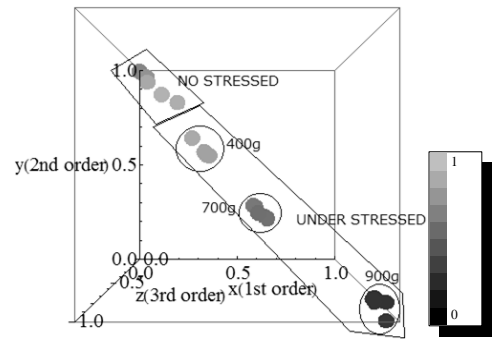
Fig.11 は 1kg 以内の重りをいくつか用意し, その中から無作為に選択した錘を吊るした場合と錘を吊るしていない場合のデータ, 計 4 種類で 20 個のデータに対する正規化した係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の分布を示す.

Fig.11 のいずれにおいても錘を吊るした場合は直線状に分布する係数 a_1', a_2', a_3', a_4' が, (1,0,1)座標側へ集中することがわかる.

また, 錘を吊るした場合は, (0,1,0)座標から (1,0,1)座標側にかけて, 吊るした錘の重さ, すなわち, 圧力に準じて分布していることがわかる.



(a) x-y plane



(b) x-z plane

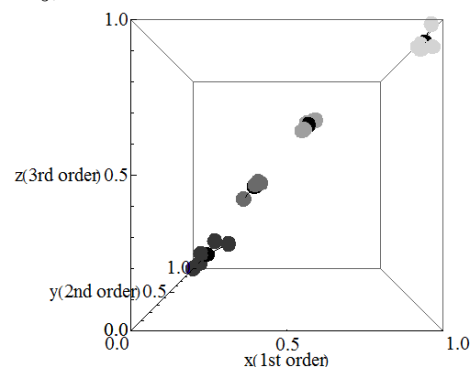
図.11 応力有無による係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の分布の違い

Fig.11 Difference in normalized frequency fluctuation coefficients a_1', a_2', a_3', a_4' between stressed and non-stressed groups.

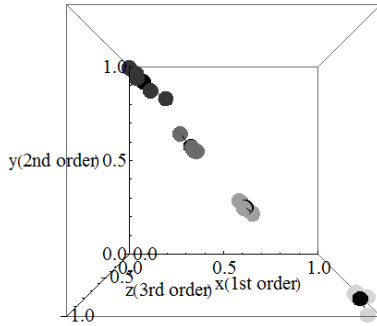
Fig.12 に k-means 法を Fig.11 に適用し, Fig.11 の結果をクラスタリングした結果である. 3 種類の錘を吊るした場合と錘を吊るしていない場合の計 4 種類に対するデータを k-means 法でクラスタリングすれば, 錘の重さに対してもクラスタリングが可能であることがわかる.

Fig.12 で, それぞれのグループ中心にある黒点は, k-means 法を行った際におけるグループの重心に相当する. k-means 法は性質上, 初期値がランダムに振り当てられる.

そのため, 初期値の振り当てによりグルーピングの結果が多少異なるが, サンプル数が充分多ければ一意的なクラスタリング可能である. このことから, Fig.12 では, 多少のクラスタリングのばらつきは考慮していない.



(a) x-y plane



(b) x-z plane

図.12 応力有無による係数 a_1', a_2', a_3', a_4' の分布のクラスタリング

Fig.12 Classified into 4 groups of the normalized frequency fluctuation coefficients by means of the k-means method.

3. 結言

本論文は、バルクハウゼン信号から巨視的な規則性抽出を行う場合に技術的課題として残っていた周波数範囲設定に関する問題を克服するため、周波数ゆらぎ解析法を周波数の1次関数からn次関数へ一般化した。

周波数のn次関数へ一般化された周波数ゆらぎ解析法を珪素鋼板の応力探査問題へ適用し、応力の有無がバルクハウゼン信号へ反映する可視化法も併せて提案した。

その結果、珪素鋼板の錘の有無や錘の重さの相違を3次元空間上で可視化可能であることが判明した。

また、バルクハウゼン信号の低周波領域のみへ4次関数を用いた周波数ゆらぎ解析法を適用することで、印加応力の有無が明確となることを述べた。バルクハウゼン信号の低周波領域を客観的にクラスタリングする方法としてk-means法を採用した。その結果、より明確で客観的のある応力分布情報が3次元空間上に可視化された。

さらに、3次元空間上に可視化された応力印加情報へk-means法を適用することで応力の大きな相違が判定可能なグルーピングが可能であることが判明した。

参考文献

- [1] R M. Bozorth: Ferromagnetism, p. 462 (IEEE PRESS).
 [2] M. Katsumata, S. Hayano, and Y. Saito: A Study of

- Barkhausen Phenomenon Visualization, The Visualization Society of Japan, B203, July (2003).
 [3] S. Nojima and Y. Saito: Application of Frequency Fluctuation to Barkhausen Signals and its Application, J. Magn. Soc. Jpn., 35, 380-385 (2011).
 [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).