

磁化特性のモデリング

MODELING OF MAGNETIZATION CHARACTERISTICS AND ITS APPLICATION

田中祐司

Yuji TANAKA

指導教員 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程

This paper studies nonlinear phenomena caused by ferromagnetic materials. To represent nonlinear properties of ferromagnetic materials in series, parallel ferroresonant circuits as well as electrical transformer, we employ a Chua-type magnetization model composed of the nonlinear parameters: permeability μ , reversible permeability μ_r and hysteresis parameter s independently measured from the past magnetization history. By the backward Euler method with automatic modification, the transient analysis of this initial value problem is carried out. The characteristic values of the state transition matrix are calculated in each calculation step of Euler method in order to visualize the chaotic properties. As a result, it is clarified that the chaotic behavior in the ferroresonant circuit is greatly concerned with the magnetic aftereffect of ferromagnetic materials.

Key Words : Chua-type magnetization model, ferroresonant circuit, characteristic values

1. はじめに

磁気的結合など磁性材料の特性を積極的に利用し多彩な機能を有する電気機器が数多く開発され、実用化されている。しかし、磁性材料の持つ磁気飽和、ヒステリシス、渦電流等の特性は、時として磁性材料を用いる電気機器において、予測困難で複雑なシステム応答を示す場合がある。したがって、磁性材料を含む電磁界解析の高信頼化は、高度化する電気機器の設計に不可欠であり、予測し難いシステム応答の解明に重要な役割を果たす。このような現状と共に、近年のパーソナルコンピュータの演算速度の高速化は目覚しく、比較的大規模な有限要素解、非線形解析をも遂行可能としつつある。

磁気ヒステリシスを表現するためにさまざまな磁化特性モデルが提案されているが、その大半は過去の磁気履歴や物理的要因、例えば、残留磁気、残留応力等によって影響を受けるパラメータを用いている。このため、履歴特性を表現するパラメータそのものが履歴を含むことに起因して、再現される履歴現象は限定されることとなる。磁性材料を含む電磁界解析のキーは、材料の特性を表現する磁化特性モデル、すなわち構成方程式を導出し、Maxwell の方程式を解くことに帰する。従来から早野・齋藤らが提案する Chua 型磁化特性モデルに関し、強磁性体特有の現象であるヒステリシス、磁気余効、鉄共振現象などのシミュレーションおよびその実験的検証に成功し、電気機器設計に有用な鉄損、周波数特性、表皮深

さに関する報告がなされている[1,2]。さらに他の代表的磁化特性モデルとの関係も明らかにされている[1,2,3]。

本論文では、Chua 型磁化特性モデルを用いて磁性材料を含む電気回路、特に定電流源として用いられる直列鉄共振回路、定電圧源として用いられる並列鉄共振回路の非線形過渡特性に関して報告する。Chua 型磁化特性モデルの構成方程式より導出される回路方程式を状態変数法で表現し、後方オイラー法を用いて過渡解析を行う。同時に状態遷移行列の固有値を時間刻み幅ごとに計算し、固有値の時間推移を可視化する。その結果、回路応答がヒステリシスやカオス的な鉄共振現象を提示しているにもかかわらず、状態遷移行列の固有値は規則的に変化し履歴に依存しないことを示す。

以上の結果から、履歴現象を呈する系、すなわち、ヒステリシス現象を呈する非線形現象の解析において、過去の履歴に依存しないパラメータ測定とそれらを用いた解析が最初に解決されるべき最重要課題であることを述べる。

2. Chua 型磁化特性モデル

鉄共振回路の過渡解析を行うために、式(1)で表現される Chua 型磁化特性モデルの構成方程式を用いる。

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

式(1)の右辺第1項は静的な磁区状態を表し、第2項は動的な磁区状態を表す。ここで、 H 、 B はそれぞれの磁界の強さ $H(\text{A/m})$ と磁束密度 $B(\text{T})$ を表し、 μ 、 μ_r 、 s は Chua 型磁化特性モデルのパラメータであり、それぞれ透磁率 (H/m) 、可逆透磁率 (H/m) 、ヒステリシス係数 (Ω/m) である。この3パラメータは、過去の履歴や駆動周波数に依存しない方法で導出、測定されることが磁化特性モデル構成に関する最大のキーポイントである。

磁化特性モデルは、磁気履歴を表現しようとするものであり、モデルを構成するパラメータが過去の履歴に依存するようなものであってはならない。図1-3は本論文で用いるパラメータ μ 、 μ_r 、 s を与える曲線である。

透磁率 μ は各点において交流消磁して得られる理想磁化曲線から決定する。飽和値に達する周期的磁化状態のヒステリシスループにおいて、同一磁束密度における上昇曲線と下降曲線それぞれの磁界の平均値をトレースすると近似理想磁化曲線が得られることが知られている。この理想磁化曲線は過去の履歴を交流消磁して得られるから過去の履歴に無関係である。

可逆透磁率 μ_r もまた、過去の履歴に依存しないパラメータでなければならない。よって、過去の履歴に無関係である理想磁化曲線測定時におけるマイナーループ、すなわち理想磁化曲線測定時に得られる増分透磁率を用いる。この増分透磁率を測定する場合、渦電流や表皮効果の影響を削減するため、極めて低周波の励磁電圧を用いて測定する必要がある。

ヒステリシス係数 s は、磁束密度 $B=0$ 時のサーチコイル誘起電圧より dB/dt と電流波形より dH/dt を求めることで決定できる。磁束密度 $B=0$ 時の磁界 H は、保磁力 H_c に対応するから式(1)よりヒステリシス係数 s は、

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

となる。結果として、励磁電圧を変化させ、磁束密度 $B=0$ 時の dB/dt と dH/dt より、ヒステリシス係数 s が求まる。また、可逆透磁率 μ_r は $B=0$ のとき最大となるため、ヒステリシス係数を求める式(2)で使用する値は最大可逆透磁率である。

3. 電気機器への応用

(1) 直列鉄共振回路

a) 直列鉄共振回路の定式化

直列鉄共振回路は、図4に示すヒステリシスを呈する磁性材料を含む $R-L-C$ 直列回路である。電源電圧一定で周波数を徐々に変化させていくとある周波数で急激に出力電流が増加し共振が始まる。共振の状態から周波数を変化させても直ちに共振は終了しない。また、電源電圧の振幅を徐々に変化させた場合でも同様の現象が起こる。

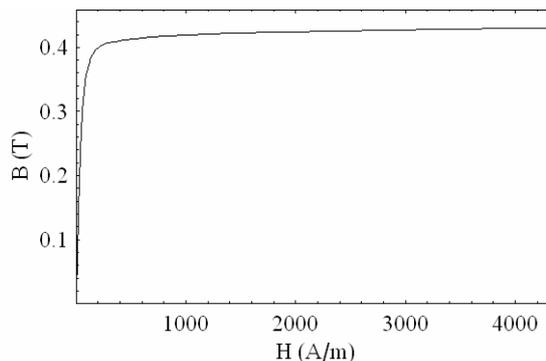


図1 透磁率 μ を与える曲線 (TDK H5A)

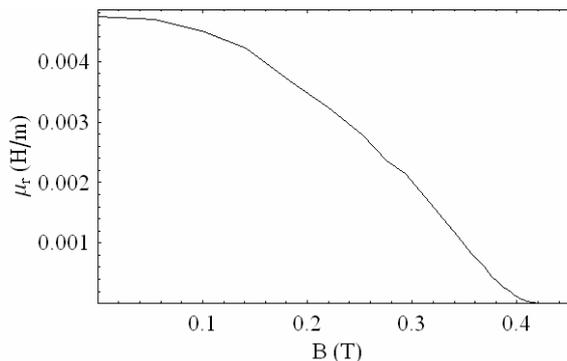


図2 可逆透磁率 μ_r (TDK H5A)

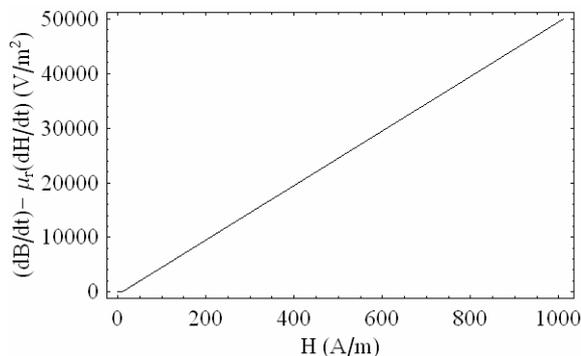


図3 ヒステリシス係数 s を与える曲線 (TDK H5A)

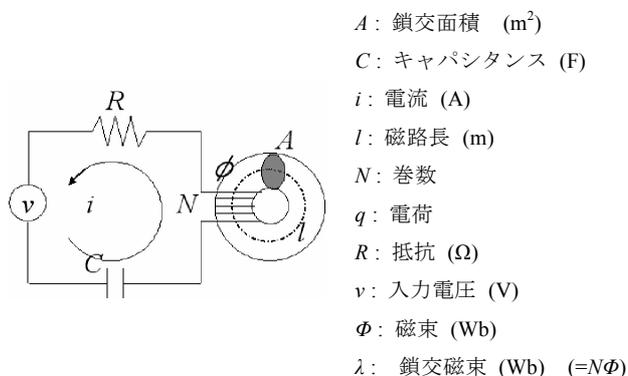


図4 直列鉄共振回路

Chua 型構成方程式(1)式を、図4におけるトロイダルコアの磁路 l に関して周回積分を行うと、

- A : 鎖交面積 (m^2)
- C : キャパシタンス (F)
- i : 電流 (A)
- l : 磁路長 (m)
- N : 巻数
- q : 電荷
- R : 抵抗 (Ω)
- v : 入力電圧 (V)
- Φ : 磁束 (Wb)
- λ : 鎖交磁束 (Wb) ($=N\Phi$)

$$\int_0^l H + \frac{\mu_r}{s} \frac{dH}{dt} dl = \int_0^l \frac{1}{\mu} B + \frac{1}{s} \frac{dB}{dt} dl \quad (3)$$

$$Ni + \frac{\mu_r}{s} N \frac{di}{dt} = \frac{l}{\mu A} \phi + \frac{l}{sA} \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

を得る. また, 図4における電流 i とその時間微分 di/dt は,

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{1}{R} \left(v - \frac{q}{C} - N \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (5)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{R} \left(\frac{dv}{dt} - \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} - N \frac{d^2\phi}{dt^2} \right) \quad (6)$$

で与えられる. (4)式に(5),(6)式を代入すると,

$$\begin{aligned} \frac{\mu_r}{s} \frac{d^2\lambda}{dt^2} + \left(1 + \frac{lR}{sAN^2} - \frac{\mu_r}{sRC} \right) \frac{d\lambda}{dt} \\ + \frac{lR}{\mu AN^2} \lambda = \frac{\mu_r}{s} \frac{dv}{dt} + \left(1 - \frac{\mu_r}{sRC} \right) v \end{aligned} \quad (7)$$

を得られる. (5),(7)式を状態遷移行列で記述すれば, 1階連立微分方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda \\ \dot{\lambda} \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \dot{\lambda} \\ q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

あるいは,

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}(t) \quad (9)$$

を得る. (9)式を後方オイラー法で離散化し, 直列鉄共振回路の過渡現象を計算する.

b) 実験的検証と数値シミュレーション

表1に示す定数を用いて直列鉄共振回路の過渡解析を行う.

図5,6はそれぞれ入力となる駆動電圧 v , 計算結果と実験結果の電流 i の時間波形である. 図5の駆動電源は, 周波数 3000Hz で駆動を開始し, 周波数を徐々に低下させる. その後, 鉄共振現象が始まる $t=0.00845s$ で 1311Hz 固定とする. 図6では $t=0.00845s$ 付近で急激に電流が増

加し, 持続する典型的な鉄共振現象が観察される. また, 図6において計算値と実験値とを比較すると, よく一致しておりこのモデルの妥当性を示している.

表1 直列鉄共振回路パラメータ

μ : 透磁率 (H/m)	図1
μ_r : 可逆透磁率(H/m)	図2
s : ヒステリシス係数 (Ω/m)	図3
A : 鎖交面積 (m^2)	48.0×10^{-6}
C : キャパシタンス (F)	1.0×10^{-6}
l : 磁路長 (m)	75.4×10^{-3}
N : 巻数	100
R : 抵抗 (Ω)	1.0
r : 内部抵抗 (Ω)	0.4
ε : limit of discrepancy	1.0×10^{-5}

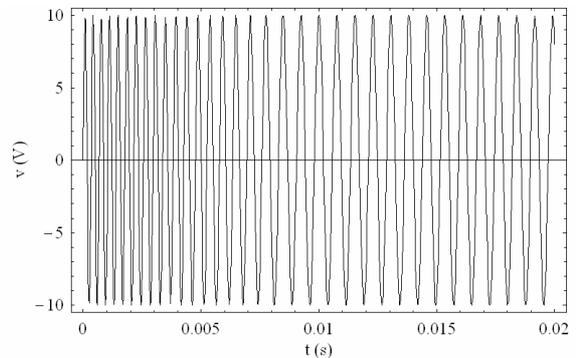
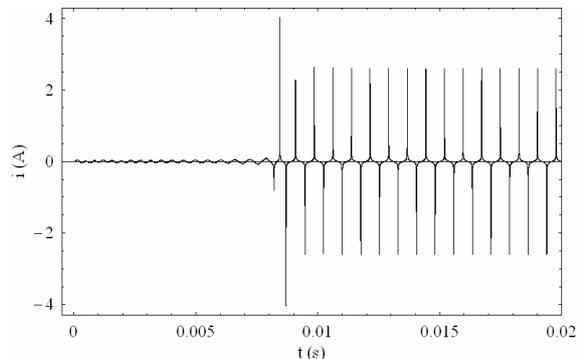
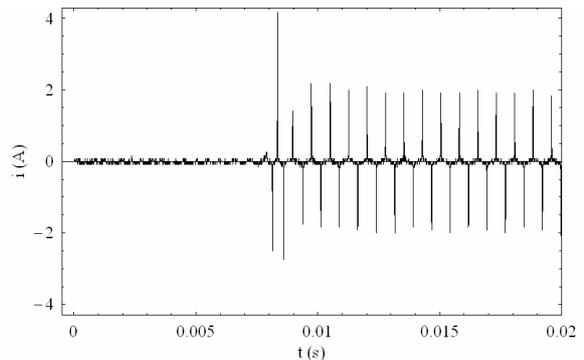


図5 入力電圧 v



(a) 計算値

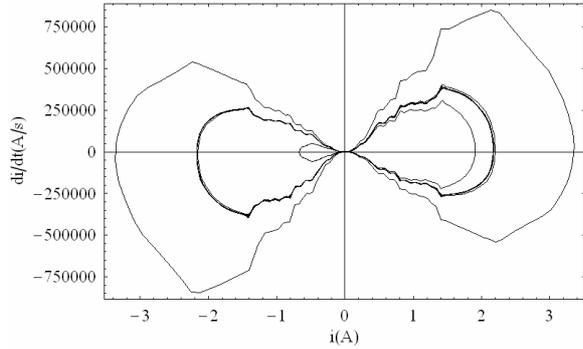


(b) 実験値

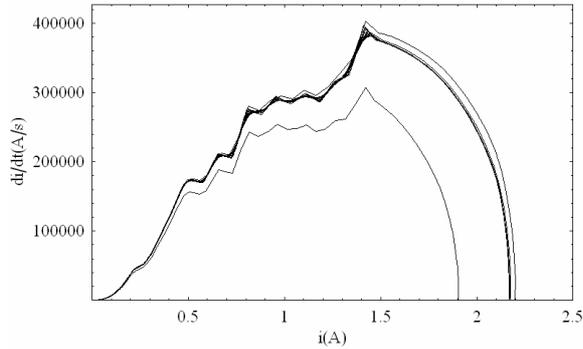
図6 電流 i の計算値と実験値

c) ポアンカレ図

図7は、図6に示す共振を持続させたときの過渡解析結果を用いて、縦軸に電流の時間微分値 di/dt 、横軸に電流 i をプロットしたポアンカレ図である。図7(b)より、周波数一定で駆動している $t=0.00845s$ 以降においても、 di/dt 対 i の関係は一定の軌跡を通らない。これは、鉄共振現象がカオス的振る舞いを呈することを可視化したのみならず、Chua型磁化特性モデルから導かれた微分方程式を用いて、カオス現象が可視化されることを意味する。



(a) $t=0.0s \sim 0.02s$



(b) $t=0.00845s \sim 0.02s$

図7 ポアンカレ図

d) 固有値

状態変数方程式における状態遷移行列の固有値は、本来線形な系にのみ適用できる概念であるが、本論文では、固有値解析法を非線形な系に対して区間線形化近似を適用し、系の状態推移を考察する。

鉄共振回路システムの状態推移特性を考察するため、式(9)に置ける状態遷移行列 a の固有値を時間刻み幅ごとに計算し、時間軸を共通軸とし、縦・横軸に固有値の実部と虚部を取り3次元的に固有値の時間変化を可視化する。図8は状態遷移行列 a の固有値の時間変化である。式(9)の行列 a は3行3列の正方行列であるから3個の固有値を持つ。いずれの固有値も共振持続時にカオス的出力信号に揺らぎが生じているにもかかわらず一定の軌跡を通っている。これはカオス現象を喚起するのは、式(9)右辺の入力電圧に関する項であることを意味している。式(8)の右辺のパラメータは、 μ_r/s であるが、 μ_r/s は保磁力 H_c に関係する[1,3]。よって、保磁力の相違がカオス的

な状態を喚起すると考えられる。

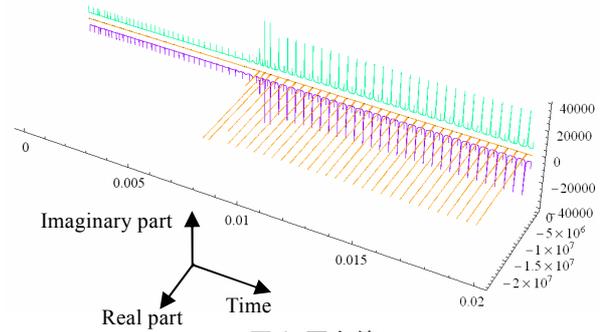


図8 固有値

(2) 並列鉄共振回路

a) 並列鉄共振回路の定式化

並列鉄共振回路は、図9に示すヒステリシスを呈する磁性材料を含む $R-L-C$ 並列回路である。直列鉄共振回路と同様に鉄共振現象を呈する。

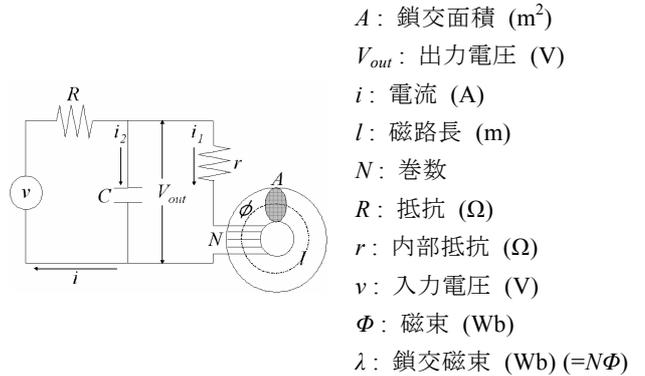


図9 並列鉄共振回路

Chua型構成方程式(1)式を、図9におけるトロイダルコアの磁路 l に関して周回積分を行うと、

$$\int_0^l H + \frac{\mu_r}{s} \frac{dH}{dt} dl = \int_0^l \frac{1}{\mu} B + \frac{1}{s} \frac{dB}{dt} dl \quad (10)$$

$$Ni + \frac{\mu_r}{s} N \frac{di}{dt} = \frac{l}{\mu A} \phi + \frac{l}{sA} \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

を得る。また、図9における電流 i_1 とその時間微分 di_1/dt 及び V_{out} は、

$$i_1 = \frac{1}{r} (V_{out} - N \frac{d\phi}{dt}) \quad (12)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{r} \left(\frac{dV_{out}}{dt} - N \frac{d^2\phi}{dt^2} \right) \quad (13)$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{N}{rc} \frac{d\phi}{dt} - \left(\frac{1}{RC} + \frac{1}{rC} \right) V_{out} + \frac{1}{RC} v \quad (14)$$

で与えられる．次に，(11)式に(12),(13),(14)式を代入すると，

$$\begin{aligned} \frac{\mu_r N}{sr} \frac{d^2 \lambda}{dt^2} = & \left\{ -\frac{N}{r} + \frac{\mu_r N}{sR^2 C} - \frac{l}{sAN} \right\} \frac{d\lambda}{dt} - \frac{l}{\mu AN} \lambda \\ & + \left\{ \frac{N}{r} - \frac{\mu_r N}{sr} - \left(\frac{1}{RC} + \frac{1}{rC} \right) \right\} V_{out} + \frac{\mu_r N}{srRC} v \end{aligned} \quad (15)$$

を得られる．(14),(15)式を状態遷移行列で記述すれば，1階連立微分方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda \\ \dot{\lambda} \\ V_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \dot{\lambda} \\ V_{out} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (16)$$

あるいは，

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}(t) \quad (17)$$

を得る．直列鉄共振回路と同様に，(17)式を後方オイラー法で離散化し，過渡現象を計算する．

b) 実験的検証と数値シミュレーション

表2に示す定数を用いて直列鉄共振回路の過渡解析を行う．

図10,11それぞれ入力となる駆動電圧 v ，計算結果と実験結果の電圧 V_{out} の時間波形である．図10の駆動電源は，周波数 3000Hz で駆動を開始し，周波数を徐々に低下させる．その後，鉄共振現象が始まる $t=0.00845s$ で 1441Hz 固定とする．図11では $t=0.0078s$ 付近で急激に電圧が増加し，持続する典型的な鉄共振現象が同様に観察される．また，図11において計算値と実験値とを比較すると，並列回路でも両者はよく一致している．

表2 並列鉄共振回路パラメータ

μ : 透磁率 (H/m)	図1
μ_r : 可逆透磁率(H/m)	図2
s : ヒステリシス係数 (Ω/m)	図3
A : 鎖交面積 (m^2)	48.0×10^{-6}
C : キャパシタンス (F)	1.0×10^{-6}
l : 磁路長 (m)	75.4×10^{-3}
N : 巻数	100
R : 抵抗 (Ω)	272.0
r : 内部抵抗 (Ω)	0.4
ε : limit of discrepancy	1.0×10^{-5}

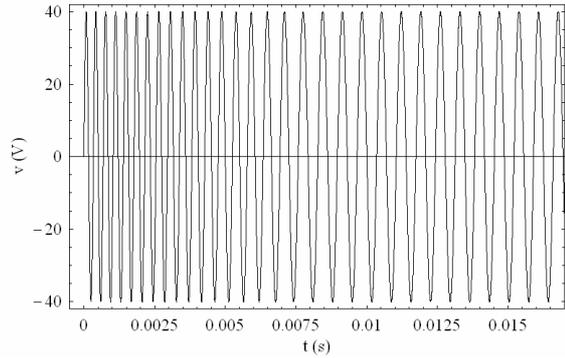
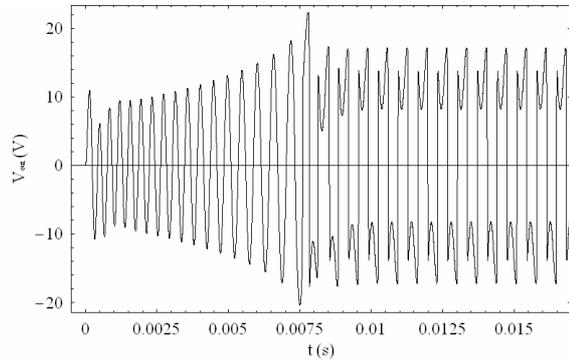
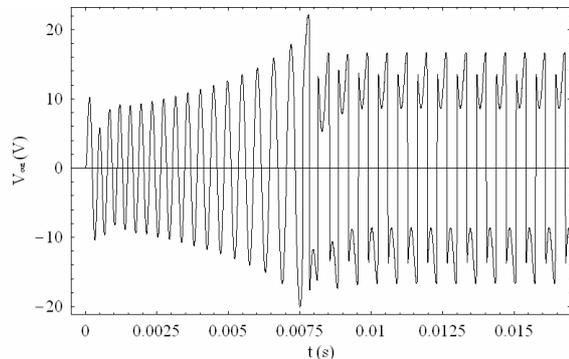


図10 入力電圧



(a) 計算値



(b) 実験値

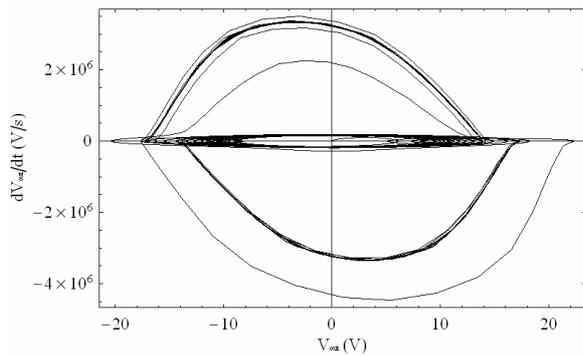
図11 電圧 V_{out} の計算値と実験値

c) ポアンカレ図

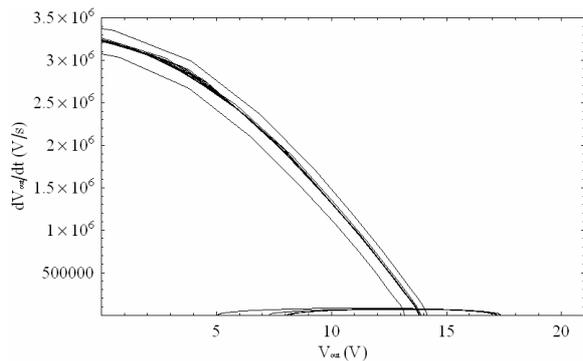
直列鉄共振回路と同様に，図 11 で示す出力電圧 V_{out} よりポアンカレ図を描いた．その結果，並列鉄共振回路でもまた， $t=0.0078s$ 以降一定の入力を与えているにもかかわらず，鉄共振現象がカオス的な振る舞いを呈していることが判明した．また図 7(b)に示す直列鉄共振回路のポアンカレ図と図 12(b)に示す並列鉄共振回路のポアンカレ図を比較すると，両者ともカオス的な振る舞いを呈しているが，前者のほうがより不安定な動きをしているのが見て取れる．これは，定電圧源として用いられる並列鉄共振回路のほうがより安定な電源になりえることを示している．

d) 固有値

図 13 は式(17)に置ける状態遷移行列 a より同様に固有値を計算した結果である．いずれの固有値も共振持続時に出力信号がカオス的な揺らぎを生じているにもかかわらず，一定の軌跡を通っている．3 個の固有値の実数部は常に負の値であり，直列鉄共振回路と同様に並列鉄共振回路もまた，非常に安定なシステムであることが見て取れる．



(a) $t=0.0s \sim 0.017s$



(b) $t=0.0078s \sim 0.017s$

図 12 ポアンカレ図

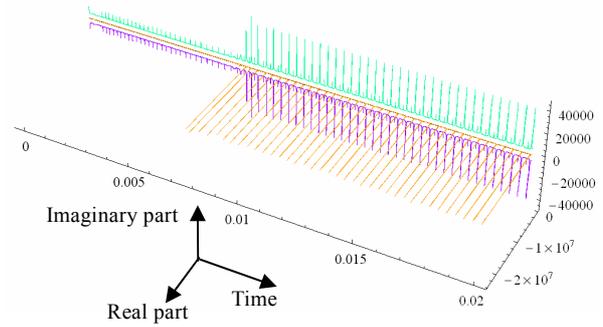


図 13 固有値

4. まとめ

本論文では，Chua 型磁化特性モデルを用いて直列鉄共振回路および並列鉄共振回路の過渡解析を行い，鉄共振現象で観察されるカオス現象に関して述べた．非線形計算の時間刻み幅ごとに計算される状態遷移行列の固有値の時間推移を 3 次元的に可視化した．その結果，回路はヒステリシスやカオス現象を呈している間も状態遷移行列の固有値は履歴依存性が無いことが判明した．これは，Chua 型磁化特性モデルが過去の履歴に依存しないパラメータを用いることに起因している．すなわち，予測が困難な履歴現象を呈する磁性材料を含む系の解析にはこのように過去の履歴に依存しないパラメータを用いなければならないことを示唆している．

カオス的な現象を呈する系の固有値は状態に応じて変化するが，その変化は規則的でありカオスへ直接寄与しない．このため，鉄共振系のカオス的な振る舞いは保磁力，すなわち，磁束密度ゼロ時の非可逆的磁区状態が鉄共振回路のカオス的な振る舞いを喚起することが，系の固有値を可視化することで判明した．

謝辞：本研究を進めるに当たり，齋藤兆古教授，早野誠治教授には数多くのご指導，ご支援を賜りました．深く感謝致します．

また，齋藤兆古研究室の皆様，公私にわたりご助言，ご支援を賜りました．ありがとうございました．

参考文献

- 1)早野誠治:磁性材料の構成方程式に関する研究, 法政大学学位論文, 1995-1
- 2)Y. Saito, M. Namiki, and S. Hayano : A Magnetization Model for Computational Magnetodynamics, J. Appl. Phys., Vol.69, No.8, pp4614-4616, 1991-4
- 3)Y. Saito, S. Hayano, and Y. Sakaki ; A Parameter Representing Eddy Current Loss of Soft Magnetic Materials and Its Constitutive Equation, J. Appl. Phys., Vol.64, No.10, pp5684-5686 1988-11
- 4)R. S. Vargher : Matrix Iterative Analysis, Prentice-Hall, NJ, 1962

- 5) 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古 : 可飽和インダクタンスを含む回路解析に関する考察, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-139, 2002-10
- 6) H. Endo, I. Marinova, T. Takagi, S. Hayano, and Y. Saito : Dynamics on Ferroresonant Circuit Exhibiting Chaotic Phenomenon, IEEE Trans. Magn, vol.40, no. 2, pp 868-871 2004-3
- 7) 田中祐司, 早野誠治, 齋藤兆古, 遠藤久, 堀井清之 : 電気回路における非線形現象の可視化, 可視化情報学会誌, 2005, Vol.25, Suppl. no.1, pp177-180, 2005-7
- 8) 田中祐司, 早野誠治, 齋藤兆古 : 鉄共振現象とカオスの振る舞いに関する解析, 電気学会研究会資料 マグネティックス研究会, MAG-06-1~3・5~10, pp43-47, 2006-3
- 9) 田中祐司, 齋藤兆古, 堀井清之 : 磁性体に起因する非線形現象の可視化, 可視化情報学会誌, 2006, Vol.26, Suppl. no.1, pp279-282, 2006-7
- 10) 田中祐司, 齋藤兆古 : 磁化特性のモデリングと電気機器可視化解析への応用, 第 15 回 MAGDA コンファレンス in 桐生 講演論文集, pp104-109, 2006-11

動画像の時間領域周波数解析とその応用に関する研究

TIME DOMAIN FREQUENCY ANALYSIS OF DYNAMIC IMAGE AND ITS APPLICATION

寺西正晃

Masaaki TERANISHI

指導教員 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程

This paper deals with a method of frequency characteristic extraction from dynamic image. We have previously proposed the method of frequency characteristic extraction from dynamic image of natural phenomena. Most of the natural phenomena include a time fluctuating component. Frequency analysis of this time fluctuation component leads to the famous “1/f fluctuation” characteristic that gives mental as well as psychological relaxation effects to human. Because of wide spreading electrical power supply, modern residence removes the combustion utilities and installs much various kinds of electricities. This means that modern human life essentially removes natural phenomena. In this environmental change surrounding human life, this paper tries to extract the characteristics from natural phenomena. Principal purpose of this paper is to propose the method of two dimensional frequency characteristics, e.g. significant feature extraction from dynamic image of particular irreversible energy conversion exchanging processes and the other various movements such as the golf swing, PIV data, and psychology data. As a result, it is revealed that the method proposed in this paper is one of effective methods of extracting major frequency characteristics of dynamic image.

Key Words : Time domain frequency characteristic, 1/f fluctuation, Fourier power spectra

1. はじめに

我々人類の文明的生活は、自然光下よりも、コントロールが容易な人工的照明下でなされることが多くなっている。歴史的には、古典的で最も原始的なロウソクや暖炉などの燃焼炎が与える照明は人間に安らぎを与え、燃焼炎は古くから家庭や仲間の潤いや団欒の象徴として取り入れられてきた。また、近年では、燃焼炎や燃焼炎の与える照明効果は人間の心理的・精神的ストレスを低減させるといった癒し効果もあると報告されている。人間は外部から得る情報の中で80%以上を視覚から取り入れている[1]。その視覚情報の中で、人間の生理や心理に働きかけているものが照明光のゆらぎではないかと予想される。このため、照明光のゆらぎ特性の解析は人類の文明的な生活へ自然界の癒し効果の導入に繋がる基幹技術と考えられる[2][3]。

自然界の現象は、天体の自転や公転などに代表されるように、境界条件や初期条件に応じて再現性の無いそれぞれの現象固有の周波数特性をもっている。この周波数特性はロウソク炎などの化学反応現象、人間などの生物の動き、気象現象である波や雲などの風景にも存在し「1/f ゆらぎ」などと呼ばれている。この「1/f ゆらぎ」周

波数は人間のメンタル部分へ作用し、いわゆる「癒し」効果が有り、名画の空間周波数や名曲にも必ず存在することが知られている。

本論文ではこのゆらぎ特性を吟味するため、動画像の時間領域周波数解析を試みる。具体的には、デジタル動画像を構成する各画素の時間領域（フレーム方向）周波数特性を計算し、各画素の時間領域周波数特性分布画像から動画像固有の特徴量を可視化する方法について述べる。

本論文の構成は以下の通りである。最初に動画像の時間領域周波数解析について述べる。解析手法で用いたフーリエ変換とフーリエ余弦変換について述べ、各例題として自然界の動画像、音楽データ、そしてテニスのショット動画像の時間領域周波数解析を試みる。次に動画像の時間領域周波数解析の応用として相転移現象時の動画像、スポーツ動作のゴルフスウィング動画像、PIVデータ、そして心理学データにおける時間領域周波数解析の結果を報告する。また、それぞれの時間領域周波数解析の結果から動画像固有の特徴量を考察する。最後に、本論文をまとめる。

2. 動画の時間領域周波数解析

(1) フーリエ変換

データを直交するデータ（線形独立、すなわち、互いに重複する情報を持たないデータ）の線形和へ並べ直す演算の代表にフーリエ級数がある。計算機で扱えるのは連続関数を離散化(Discretize)して得られた一連の数値である。このため、解析的な関数のように無限の概念が使えない。また、フーリエ変換やフーリエ級数は関数が連続関数であるため、基準座標の選び方で原点に対して線対称か点対称かで偶関数か奇関数がそれぞれ決まる。このため、離散化された数値の並びで与えられる計算機中の一連の離散値データも原点に対して線対称か点対称かで偶関数か奇関数かそれぞれ仮定できる[4]。

(2) 例題 -自然界の動画像-

本節では離散フーリエ変換を用いた時間領域周波数特性の例題として自然界の動画像における時間領域周波数解析について述べる。具体的には、デジタルビデオカメラにより撮影した動画像を計算機に取り込み、動画像固有の周波数特性の抽出を試みる。計算機に取り込まれた動画像は静止画像を時系列に並べた一連のフレーム画像であり、現在一般に使われているデジタルビデオカメラは1秒間に約30コマのフレーム画像を撮影可能である。各フレーム画像は画素の集合であり、各画素は可視光の波長によってそれぞれ R (赤), G (緑), B (青) 成分の色情報を持つ[5][6]。通常、各波長の分解能は8ビットであるから、RGB成分はそれぞれ0から255までの256階調の画素値を取る[7][8]。

a) 1/f ゆらぎ周波数

「1/f ゆらぎ」は自然界に多く存在し、例えば小川のせせらぎ、小鳥の囀り、爽やかなそよ風などの心安らぐリズムが相当する。

従来のゆらぎ解析は、ある信号へ離散フーリエ変換(DFT, Discrete Fourier Transform)を適用し、各周波数に対するパワースペクトラムを計算し、フーリエ・パワースペクトラムの概形からゆらぎの解析を行なう。すなわち、周波数の低下とともにフーリエ・パワースペクトラムが増加するような信号の中で、フーリエ・パワースペクトラムの振幅が周波数に対して反比例する信号を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。

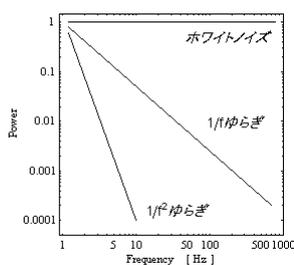


図1 フーリエ・パワースペクトラムの例

ゆらぎ画像解析で視覚的に判りやすくするために、よく行われる方法はフーリエ・パワースペクトラム対周波数の両対数図を描き、フーリエ・パワースペクトラムの周波数に対する傾きを直線近似し、直線の傾きからゆらぎの種類を大まかに分類する。直線の傾きが0の場合は主にホワイトノイズ、傾きが-1のときを「1/f ゆらぎ」、傾きが急になる程単調な信号と言われる。図1にフーリエ・パワースペクトラムの一例を示す。

b) 時間領域周波数特性

ここでは、蠟燭の燃焼炎画像の光源部分からゆらぎ成分を可視化する方法を例題として述べる。動画像のゆらぎ成分の可視化方法としては最初に動画像の画素値に時間軸方向へDFTを適用し、各周波数に対するパワースペクトラムを計算する。すなわち、図2に示したロウソク炎動画像の各フレーム画像の画素値にDFTを適用し、各周波数に対するパワースペクトラムを計算する。フーリエ・パワースペクトラムと周波数をそれぞれ、縦軸と横軸に対応させ、両対数図を描く。図3に示すような両対数軸上に描かれる曲線へ累乗近似を適用し、回帰直線の傾きを求める。ただし、DFTスペクトラムは、全サンプル数に等しい実部と虚部を与えるから、独立なパワースペクトラムは全サンプル数の半分までで有り、さらにDFTの精度を勘案して、全サンプル数の1/4項までの低周波領域から傾きを求める[8]。図3は典型的なパワースペクトラム対周波数特性である。周波数が高いほどDFTの精度が悪く、振動的にパワースペクトラムが変化することが判る。



図2 供試動画像

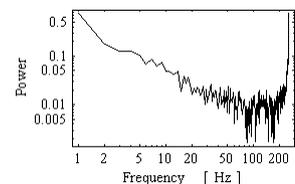


図3 フーリエ・パワースペクトラム

c) 累乗近似

図3に示したパワースペクトラムから傾きを求める方法を述べる。パワースペクトラムがn次の数値配列で構成されているとすると図3に示したグラフは式(1)で表される。

$$f = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n] \quad (1)$$

この数値配列で、要素値と要素の順番をそれぞれ両対数グラフで表したときの傾きを求める方法として本論文では累乗近似を採用し、直線に回帰させる。すなわち、式(2)により回帰直線の傾きを求める。

$$X_i = \log i \quad Y_i = \log y_i$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i \cdot X_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i} \quad (2)$$

d) ゆらぎ周波数成分の可視化

図4はロウソク炎動画の各フレームの画素値を時系列(フレーム)方向にDFT解析し、各周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムを計算し、周波数振幅の傾きを求めて得られたカラー画像、すなわち、ロウソク炎動画の時間領域周波数分布画像である。図4で求めたフーリエ・パワースペクトラムの傾きが-1.05から-0.95の場合は画素値を1とし、その他の値は画素値をゼロとして得られる1/fゆらぎ周波数の2値化画像を作成し1/fゆらぎ周波数部分のみを抽出する。図5はロウソク炎動画からロウソク炎の「1/fゆらぎ」部分を抽出したフレーム画像の例である。

図4, 5より「1/fゆらぎ」周波数分布を可視化することによってロウソク炎動画における「1/fゆらぎ」の分布が比較的光りの低周波成分のR成分画像に顕著であり、また空気とパラフィンが混合し燃焼でガス化する相転移部分で観察されることが判る。

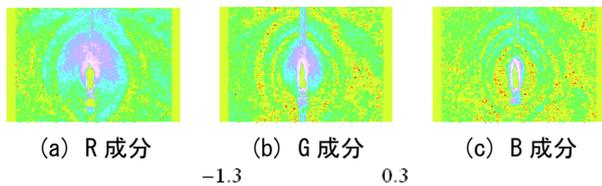


図4 ゆらぎ周波数分布



図5 1/f ゆらぎ周波数成分の抽出

(3) フーリエ余弦変換

a) 偶関数と奇関数

フーリエ変換では奇関数に対して正弦波の奇数次高調波(Harmonics)の和から成り、偶関数に対して余弦波の偶数次高調波の和からなる。このため、計算機で行う離散値フーリエ変換は、正弦波高調波のみを仮定するフーリエ正弦波(Fourier Sin)と余弦波高調波のみを仮定するフーリエ余弦波(Fourier Cos)がそれぞれデータの周期境界を奇関数、偶関数に仮定することで利用できる[4]。

b) フーリエ余弦変換

フーリエ余弦変換の例題を以下に示す。図6に示す基本波に対してフーリエ余弦変換を行い、その結果を図7に図示する。

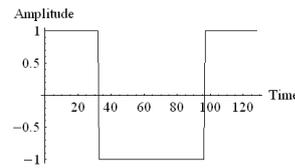


図6 基本波

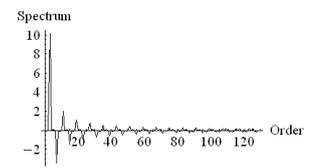


図7 パワースペクトラム

フーリエ係数の最初の5項までを表1に示す。第ゼロ次を勘案すれば、偶関数であるから偶数次高調波のみが値を持つ。

表1 フーリエ係数

Order	0	1	2	3	4	5
Spectrum	-0.1	0	10.1	0	0.1	0

3. 動画の時間領域周波数解析の応用

第2章で述べた時間領域周波数解析法を用いて動画の時間領域周波数解析の応用を行う。最初に、非可逆的エネルギー変換が行われる相転移現象の動画像に関して時間領域周波数解析を行い非可逆的エネルギー変換過程が非線形現象特有の1/f特性を有することを明らかにする。次にスポーツ動作のゴルフスウィング動画像に関して時間領域周波数解析を述べ、ゴルフスウィング動画像から固有の特徴量を抽出する方法を述べる。そしてPIVデータの動画像に関して時間領域周波数解析を行い、エネルギー損失の著しいカルマン渦近傍に1/f特性が存在することを示す。最後に心理学データに時間領域周波数解析を応用し、RGB色成分のゆらぎ特性から描画の特徴量抽出に関して述べる。

(1) 相転移現象時における時間領域周波数解析

我々の身のまわりには、多くの物質が様々な状態で存在している。日常的な長さのスケールで、物質の性質が一様な状態を相という。例えば氷、液体の水、水蒸気はそれぞれ水の相である。液体が気体に変化して相が急激に変化することを相転移と呼ぶ[9]。

本節では融解などの自然界に於ける相転移現象時の動画像に関して時間領域周波数特性を考察する。画素単位の時間軸フーリエ・パワースペクトラムから1/fゆらぎ周波数特性の空間分布を可視化し、1/fゆらぎ周波数発生源が非可逆的エネルギー変換の行われる相転移現象発生時に生成される可能性を明らかにする。

a) 水の状態変化の撮影

まず相転移現象である融解の実験を行う。

図8に示すように赤外線カメラを用いて、氷の融解時の状態を撮影した。画像は1秒間に30フレームレートで

撮影した。

図 8(a)は沸騰した熱湯をビーカーに 150cc 入れ、その熱湯中に氷を入れて、氷の融解時を 30 秒間撮影したモード図である。また、赤外線カメラのダイナミックレンジを固定するため、基準温度としてコップに入れた氷をビーカーの横に置いて撮影した。図 8(b)に撮影したフレーム画像を示す。黒い部分が氷である。



(a) 実験装置 (b) 撮影動画像
図 8 氷の融解

b) 氷の状態変化における時間領域周波数特性

図 9(a)は図 8(b)に示した氷の融解時を構成するフレームの画素値を時系列（フレーム）方向に DFT 解析し、各周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムを計算し、周波数振幅の傾きを求めて得られたカラー画像である。これらが「1/f ゆらぎ」周波数分布の可視化画像である。

図 9(b)は図 9(a)で求めたフーリエ・パワースペクトラムの傾きが-1.05 から-0.95 の場合は画素値を 1 とし、その他の値は画素値をゼロとして得られた「1/f ゆらぎ」周波数の 2 値化画像である。すなわち、図 9(b)は相転移状態における「1/f ゆらぎ」画像である。

図 9 から、融解時等の相転移時に於いては「1/f ゆらぎ」成分が存在することが判明した。

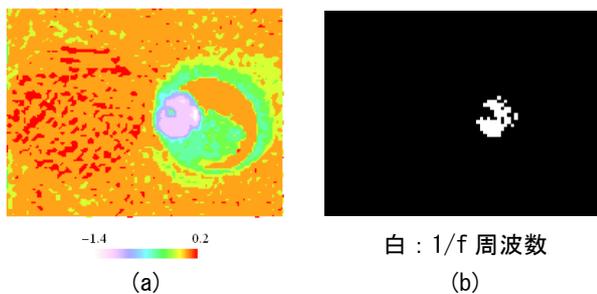


図 9 1/f ゆらぎ周波数分布
左：ゆらぎ周波数分布，右：1/f ゆらぎ周波数

(2) スポーツ動画における時間領域周波数解析

本節では動画の時間領域周波数解析の応用例として、スポーツ動作のゴルフスウィング動画からゴルフスウィング時における個々のプレイヤー固有の特徴を抽出し可視化を試みる。

a) ゴルフスウィング動画の撮影

本実験では、デジタルビデオカメラ（Panasonic 製 NV-GS300）を用いてゴルフスウィング時の動画を撮影した。画像是 1 秒間に 30 フレームレートで撮影した。

図 10 に示すように、ゴルフスウィング動画を正面から撮影した。図 10 はゴルフ初心者のスウィング動画で

あり、動画の全フレーム数は 64 枚である。



図 10 ドライバショット正面

b) 時間領域周波数解析

スポーツ動画から固有の特徴を可視化する方法としては動画の各画素の時間領域（フレーム方向）周波数特性を計算する。本研究では、フーリエ余弦変換を適用しフーリエスペクトラムの値を計算する。すなわち、図 10 に示したゴルフスウィング動画の各フレーム画像を構成する各画素値へフレーム方向にフーリエ余弦変換を適用し、各画素のフーリエスペクトラムを計算する。

c) 時間領域周波数分布画像

図 11 はゴルフスウィング動画の各フレームの各画素値へフレーム方向にフーリエ余弦変換を適用し、各周波数に対するフーリエスペクトラムを計算して得られたカラー画像、すなわち、ゴルフスウィング動画の時間領域周波数スペクトラム分布画像である。

図 11 よりフーリエスペクトラム分布が上半身に集中していることが判る。

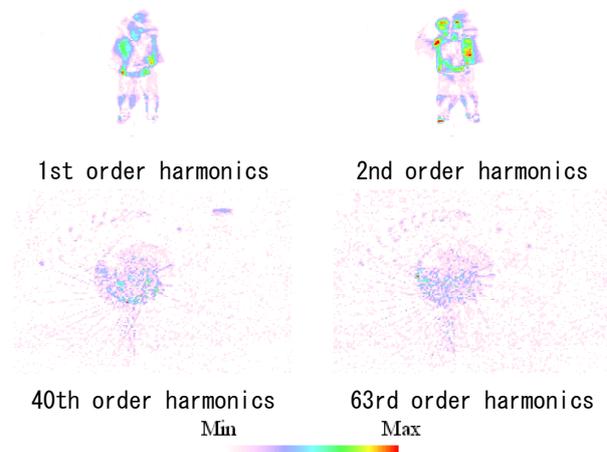


図 11 ドライバショット正面の周波数スペクトラム分布

d) ゴルフクラブの軌跡

次にゴルフクラブの軌跡のコントラストを上げることを試みる。図 11 で求めた周波数スペクトラム分布の各高調波成分を足し合わせ、スペクトラムの値がある場合は画素値を 1 とし、その他の値は画素値をゼロとして得られた周波数スペクトラム分布の 2 値化合成静止画像を作成する。すなわち、図 12 はゴルフクラブの軌跡を表す画像である。

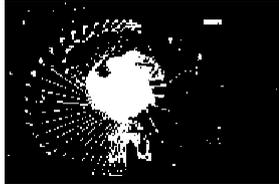


図 12 ゴルフクラブの軌跡

(3) PIV データにおける時間領域周波数解析

流れの可視化技術とデジタル画像処理技術を駆使した粒子画像流速測定法 (PIV : Particle Imaging Velocimetry) は、流速の同時多点計測を効率的に行う最新の流体計測手法として多方面で活用されている。

本節では動画の時間領域周波数解析の応用例として、円柱後方流れの動画からカルマン渦における特徴を抽出し可視化を試みる。

a) 実験条件

円柱後流の可視化実験の実験条件は以下の通りである。円柱の直径 $d=35\text{mm}$ 、前方の流速は 0.16m/s で、レイノルズ数は 4900 となっている。図 13 に実験図を示す。

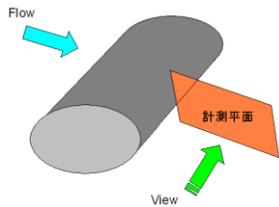


図 13 実験図

b) 時間領域周波数解析

円柱後流の動画から固有の特徴を可視化する方法としては動画の各画素の時間領域 (フレーム方向) 周波数特性を計算する。本研究では、フーリエ余弦変換を適用しフーリエスペクトラムの値を計算する。すなわち、図 14 に示した円柱後方流れの動画の各フレーム画像を構成する各画素値へフレーム方向にフーリエ余弦変換を適用し、各画素のフーリエスペクトラムを計算する。



Frame 1 Frame 16 Frame 32

図 14 円柱後方流れの動画

c) 時間領域周波数分布画像

図 15(a)は円柱後流の動画の各フレームの各画素値へフレーム方向にフーリエ余弦変換を適用し、各周波数に対するフーリエスペクトラムを計算し、周波数振幅の傾きを求めて得られたカラー画像、すなわち、円柱後流

の動画におけるゆらぎ周波数分布画像である。

図 15(b)は図 15(a)で求めたフーリエ・パワースペクトラムの傾きが -1.05 から -0.95 の場合は画素値を 1 とし、その他の値は画素値をゼロとして得られた「 $1/f$ ゆらぎ」周波数の 2 値化画像である。すなわち、図 15(b)は円柱後流における「 $1/f$ ゆらぎ」画像である。

図 15 の結果から、本論文の方法は明らかにカルマン渦が必ず $1/f$ ゆらぎを呈することが判り、PIV データからカルマン渦の存在を抽出した。

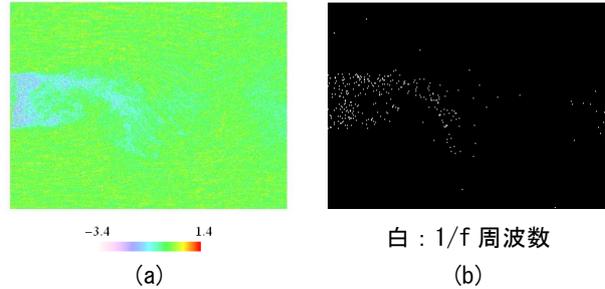


図 15 $1/f$ ゆらぎ周波数分布
左 : ゆらぎ周波数分布, 右 : $1/f$ ゆらぎ周波数

(4) 心理学データにおける時間領域周波数解析

これまで動画の各フレームの各画素値へフレーム方向にフーリエ余弦変換を適用し、各周波数に対するフーリエスペクトラムを計算し時間領域周波数解析を行ってきた。

本節では画像の色情報の概念を導入し、画像の色彩情報を時系列方向に並べることにより RGB (赤, 緑, 青) 成分の時系列変化をゆらぎとして捕らえ、そのゆらぎ特性から描画の特徴量を抽出することを試みる。

a) 画像の色彩情報

本研究では、時系列の描画から固有パターンを抽出し、固有パターンを時系列に並べ、時間領域周波数解析を試みる。

計算機のスクリーン上へ可視化された画像は 2 次元平面上の画素 (Pixel) で構成されており、画素の幾何学的配置によって表現される。カラー画像の場合、各画素は可視光の波長によってそれぞれ赤, 緑, 青 (以下それぞれ R, G, B と略記) 成分の情報をもつ。モノクロ画像の場合、各画素は白黒の濃淡情報をもつ。そのため、計算機のスクリーン上の可視化画像は、スクリーンの解像度や基準座標 (視点) に依存する性質をもつ。このようなハードウェアに依存する性質を削減した可視化画像の不変量を、本論文では固有パターン (Eigen Pattern) と呼ぶ [6][7]。

b) 対象者と描画

対象者はいわゆるバーンアウトの症状を呈したクライアントの自由画であるが、詳細に関してはプライバシーの問題があるため、ここでは述べられない。また、自由画に関しても許可が得られたもののみ、図 16 に示す。



図 16 描画

c) 時間領域周波数解析

まず、図 16 の描画から得られた固有パターンを図 17 に示す。

これらを含む描画を期間ごとに分けて得られた固有パターンを時系列に並べ、各 RGB 成分の時間領域周波数特性を計算する。本研究では DFT を適用し、各周波数に対するパワースペクトラムを計算する。ただし、DFT スペクトラムは、全サンプル数に等しい実部と虚部を与えるから、独立なパワースペクトラムは全サンプル数の半分までで有るので、全サンプル数の 1/2 項までの高調波領域を計算に採用した。そして、累乗近似を用いて両対数グラフで表したときの傾きを求める。

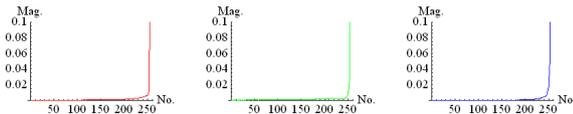


図 17 固有パターン

d) 時間領域周波数特性

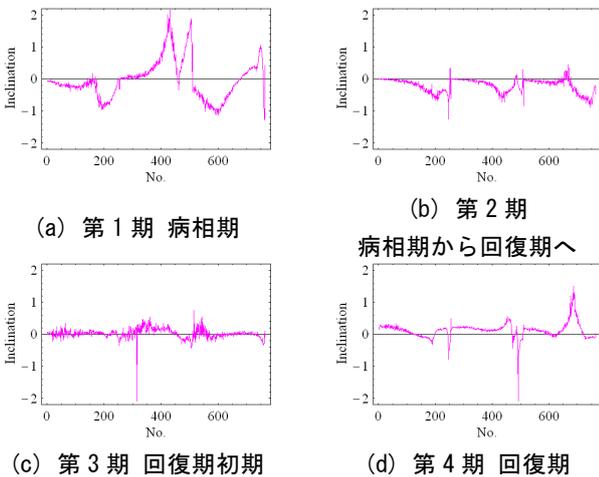


図 18 時間領域周波数特性

時系列方向に並べた描画より得られた固有パターンを時系列方向に DFT 解析し、各周波数に対するフーリエ・パワースペクトルを計算する。そして、累乗近似を用いて両対数図で表した場合の傾きを求める。ただし、全サンプル数の 1/2 項までの高調波領域を計算に採用した。その結果、RGB 成分の 1 から 255 までの強度分布のゆらぎの特性を表した数値配列を得ることができ、横軸に

RGB 成分強度値、縦軸にフーリエ・パワースペクトラムの傾きをとりグラフ化した。-1 に近い程「1/f ゆらぎ」に近い信号が存在することを意味し、0 に近いほどランダムノイズであることを意味する。

図 18 は、図 16 を含む描画の RGB 固有パターンのゆらぎにおけるフーリエ・パワースペクトラムに累乗近似を適用して得られた傾き分布である。すなわち、描画における時間領域周波数特性である。

4. 考察

まず相転移現象時における時間領域周波数特性では、図 9 から、融解時等の相転移時に於いては「1/f ゆらぎ」成分が存在することが判明した。これより非可逆的エネルギー変換過程において 1/f ゆらぎ周波数が発生することを示唆している。

この特性の応用例としては、氷のうち氷を入れて冷やすことで得られる冷却効果は、コールドスプレーなどに比べより心地良い冷却効果が得られるのではないかと考えられる。

次にスポーツ動画の時間領域周波数解析では、ゴルフスウィング動画の各フレームを構成する各画素値のフレーム方向にフーリエ余弦変換を適用し、各周波数に対するフーリエスペクトラムを計算した。

フーリエ余弦変換は与えられた関数を偶関数と見なすので、本来、偶数次高調波のスペクトラムが有意な値を持ち、奇数次高調波スペクトラムの振幅は無視できるほど小さいはずである。しかし、実際のゴルフスウィング画像のフーリエ余弦スペクトラム図 11 は偶数次のみならず奇数次の振幅も有意な値を持つ。これは、ゴルフスウィングを構成する各画素の時間方向波形が単純な周期関数で表現出来ないことを意味する。換言すれば、各画素の時間方向波形が単純な周期関数でなく、加速度などのバイアスが重畳された波形と考えられる。ゴルフスウィングを構成する各画素は空間的に無関係であるにも拘わらず、フーリエ変換で空間的な回転運動が特徴量として抽出された点が、今回の解析で有意な点と考えられる。

PIV データにおける時間領域周波数解析では、図 15 より円柱の直後の領域に「1/f ゆらぎ」成分が観察されることが判る。この領域は緩やかな変動が生じるはく離流れである。これより、はく離流領域内の流れに於いては「1/f ゆらぎ」成分が存在することが判明した。

一般に、はく離領域内に於ける流れの運動エネルギー損失は最も大きいと言われている。これより PIV データにおけるエネルギー損失部分において 1/f ゆらぎ周波数が発生することが考えられる。

最後に心理学データにおける時間領域周波数解析の考察である。図 18 は 4 期に分けたクライアントの描画の時間領域周波数特性を示す。

図 18(a) に示す第 1 期では、青成分において藍色に近い

青のあたりで 1/f のゆらぎが見られたが、この色は沈静を求める色である。つまり、クライアントは葛藤の中にいるが、沈静を求めていることがわかる。そして、赤成分にも 1/f ゆらぎが見られる。赤は命・エネルギー・自己主張などという激しさや強い生命力など高揚した心理と結びつきやすいと同時に、辛さや痛みを示す。つまり、クライアントは無意識化にあった自分に行き詰まり現在の仕事を続けることが辛い、無理をしている自分に描画を通して気付くというエネルギーを持ち始めながらも、それを受け入れる痛みや辛さを感じていることがわかる。

図 18(b)に示す第 2 期以降は回復期に移りつつある時期である。徐々にクライアントはこれまでと比べ焦燥感が感じられなくなり、不眠・発熱といった身体症状も少しずつ治まってきていた。さらに自分が周囲に対して過剰適応していたことについてクライアント自身による言語化が促されてきた。つまり、無意識の意識化が促されていったことがわかる。画像を構成する色情報 RGB 全てにおいて 1/f のゆらぎが表れていた。

しかし、図 18(c)の第 3 期においては、ホワイトノイズが多く出現している。クライアントは、ありのままの自分を受け入れ、現在の仕事は過剰適応であり、続けることができないということを認めてはいるが、それを受け入れることに対する抵抗を示していると考えられる。

最後の図 18(d)の第 4 期では、明るい緑色において 1/f ゆらぎが見られることから、希望・平穏・平和などを表わす。つまりクライアントは、自己を受け入れ、癒されてきている状態であり、現実と理想のバランスを保つことができるようになってきていることが示されている。

5. まとめ

本論文では、動画像の時間領域周波数特性を解析する方法を述べ、動画像固有の特徴量を抽出することを試みた。

第 2 章では、動画像の時間領域周波数解析について述べた。解析手法であるフーリエ変換とフーリエ余弦変換について述べ、時間領域周波数特性からそれぞれ固有の特徴量を抽出した。

第 3 章では、気化、昇華、融解、燃焼などの自然界に於ける相転移現象の動画像に関して時間領域周波数特性を解析する方法を述べ、それぞれに対する「1/f ゆらぎ」周波数成分分布の可視化を行なった。その結果、物質の融解、蒸発そして凝固時には「1/f ゆらぎ」周波数成分が存在し、「1/f ゆらぎ」周波数成分が相転移現象発生時、すなわち、エネルギー変換現象に密接に関係することが判明した。

次に、スポーツ動作であるゴルフスウィング動画像に関して時間領域周波数特性を解析する方法を述べ、時間領域周波数スペクトラム分布の可視化を行なった。その結果、ゴルフ初心者と経験者のゴルフスウィング動画像からそれぞれ固有の特徴を時間領域周波数スペクトラム

分布画像から抽出可能であることが判明した。

また、PIV データに関して時間領域周波数特性を解析する方法を述べ、「1/f ゆらぎ」周波数成分分布の可視化を行った。その結果、流れの運動エネルギー損失は最も大きいと言われているが離領域内に「1/f ゆらぎ」周波数成分が存在することを示した。これは、「1/f ゆらぎ」周波数成分が相転移現象発生時と同様に、エネルギー変換現象に密接に関係することを示すことに他ならない。

そして心理学データにおける時間領域周波数解析では、臨床心理データに対して本手法が有効である可能性が示唆された。具体的には、うつ病のクライアントの病相期から回復期への状態を捉えることができた。病相期には、クライアントは葛藤を抱えながらも治療への姿勢を見せていく。そのため、赤成分に 1/f ゆらぎが見られた。その後の回復期に関してであるが、回復期の初期には周囲から治癒されてきたと見られていてもクライアントはまだ問題を抱えているため、その様子がホワイトノイズで示されている。その後、回復期中期以降では、安らぎや癒しを示す緑に対して 1/f ゆらぎが見られ、回復過程をたどっていることがわかる。このように、うつ病のクライアントは回復の経過に波をもちながら、治癒していく様子が本研究で明らかにされた。

よって、本論文で述べた動画像の時間領域周波数解析は、自然界の物理現象である相転移現象時、また人間の化学反応や神経反応における動作時そして描画から、それぞれ動画像固有の周波数特性が抽出可能であることを示した。その結果、「1/f ゆらぎ」周波数成分は、自然界そして人間におけるエネルギー変換現象時に密接に関係することを明らかにした。

参考文献

- 1) 中島龍興, 近田玲子, 面出薫: 照明デザイン入門, 彰国社, 1995
- 2) 寺西正晃, 丸山和夫, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 自然界の画像が持つ 1/f 周波数成分の可視化, 可視化情報学会誌, Vol.25, No.1, pp.75-78, 2005
- 3) 寺西正晃, 齋藤兆古, 堀井清之: 自然現象における時間領域周波数特性の可視化, 可視化情報学会誌, Vol.26, No.1, pp.167-170, 2006
- 4) 齋藤兆古: 場の理論と可視化, 研究室内部資料, 2006
- 5) 若林健一, 早野誠治, 齋藤兆古: ウェーブレット変換を用いた画像の固有パターン認識, 可視化情報学会誌, Vol.20, No.1, pp.133-136, 2000
- 6) 佐藤隆紀, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 知的可視化情報処理による動画像認識, 可視化情報学会誌, Vol.22, No.1, pp.243-246, 2002
- 7) 丸山和夫, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 色情報を利用した知的動画像認識, 可視化情報学会誌, Vol.23, No.1, pp.95-98, 2003
- 8) 丸山和夫, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 色情報による光源特徴の一解析, 可視化情報学会誌, Vol.24, No.1, pp.223-226, 2004
- 9) 西森秀稔: 相転移・臨界現象の統計物理学, 2005