

2006 年度 修士論文

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

指導教授 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
学籍番号 05R3234

テラニシ マサアキ
氏名 寺西 正晃

Abstract

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 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.

目次

第1章 序論	1
第2章 動画像の時間領域周波数解析	2
2.1 フーリエ変換	2
2.1.1 関数系の変換	2
2.1.2 関数の直交性と線形性	4
2.1.3 離散値系フーリエ変換	5
2.1.4 1次元フーリエ変換	6
2.2 例題 -自然界の動画像-	8
2.2.1 1/f ゆらぎ周波数	8
2.2.2 画像の構成要素	9
2.2.3 時間領域周波数特性	9
2.2.4 累乗近似	10
2.2.5 ゆらぎ周波数成分の可視化	10
2.2.6 自然界のゆらぎ画像解析	11
2.3 例題 -音楽-	13
2.3.1 音楽のゆらぎ	13
2.3.2 音楽データ	13
2.3.3 時間領域周波数特性	14
2.4 フーリエ余弦変換	15
2.4.1 偶関数と奇関数	15
2.4.2 フーリエ余弦変換	15
2.5 例題 -スポーツ動画像-	16
2.5.1 テニスショット動画像	16
2.5.2 時間領域周波数解析	16
2.5.3 時間領域周波数分布画像	16
第3章 動画像の時間領域周波数解析の応用	18
3.1 相転移現象時における時間領域周波数解析	18
3.1.1 物質の三態	18
3.1.2 実験器具	19
3.1.3 水の状態変化の撮影	19
3.1.4 水の状態変化における時間領域周波数特性	20
3.1.5 ハンダの状態変化の撮影	21
3.1.6 ハンダの状態変化における時間領域周波数特性	22
3.2 スポーツ動画像における時間領域周波数解析	23
3.2.1 ゴルフスウィングの力学的分析	23
3.2.2 ゴルフスウィング動画像の撮影	23
3.2.3 時間領域周波数解析	24
3.2.4 時間領域周波数分布画像	27
3.2.5 ゴルフクラブの軌跡	27
3.3 PIV データにおける時間領域周波数解析	28
3.3.1 円柱まわりの流れとカルマン渦	28
3.3.2 実験条件	29
3.3.3 時間領域周波数解析	29
3.3.4 時間領域周波数分布画像	30
3.4 心理学データにおける時間領域周波数解析	32
3.4.1 アートセラピー	32
3.4.2 描画療法	32
3.4.3 画像の色彩情報	33
3.4.4 対象者と描画	34
3.4.5 時間領域周波数解析	35
3.4.6 時間領域周波数特性	36
第4章 考察	37
第5章 結論	40
参考文献	41
研究業績	42
謝辞	43

第1章 序論

我々人類の文明的な生活は、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。

第2章 動画像の時間領域周波数解析

2.1 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对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对称かで偶関数か奇関数かそれぞれ仮定できる[4]．

2.1.1 関数系の変換

古典的な関数変換の目的は，解析的に扱いにくい関数系を解析的に扱いやすい関数系へ変換することである．例えば，ラプラス(Laplace)変換は微積分演算を単純な掛け算や割り算へ化す変換である．また関数系の変換とは，ある関数，例えば時間変化する関数を解析が容易な周期関数の和で表現することにも使われる．具体的な例としてフーリエ(Fourier)変換を取り上げる．フーリエ変換は解析的に扱えない関数を解析的に扱える角周波数の異なる正弦波と余弦波の和で表現する変換である．換言すれば，フーリエ変換は解析的に扱いにくい関数系を解析的に扱いやすい関数系へ分解する変換と考えてもよい．

今，ある任意の時間 t をパラメータとする関数 $f(t)$ を一定値 a_0 ，正弦波および余弦波の和で表現できるとする．すなわち， ω を角周波数として，

$$f(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(i\omega t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \cos(i\omega t) \quad (1)$$

と仮定する．

問題は式(1)の係数， a_0 ， a_i ， b_i を決める方法である．今，関数 $f(t)$ が $t=0$ から $t=T$ の区間で式(1)の係数を決めることを考えれば，式(1)は， $\omega = 2\pi/T$ であるから，

$$f(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin\left(i \frac{2\pi}{T} t\right) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \cos\left(i \frac{2\pi}{T} t\right) \quad (2)$$

とも書ける．

式(2)の両辺を時間 $t=0$ から $t=T$ の区間について積分すると，

$$\int_0^T f(t)dt = \int_0^T \left(a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(i \frac{2\pi}{T} t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \cos(i \frac{2\pi}{T} t) \right) dt$$

$$= a_0 T$$
(3)

が成り立つ.

したがって, 定数項 a_0 は

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)dt$$
(4)

となる.

次に, 式(2)の両辺に正弦波 $\sin[j(2\pi/T)t]$, $j=1,2,3,\dots$ を掛け算し, 時間 $t=0$ から $t=T$ の区間について積分する.

$$\int_0^T f(t) \sin(j \frac{2\pi}{T} t) dt = \int_0^T \left(a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(i \frac{2\pi}{T} t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \cos(i \frac{2\pi}{T} t) \right) \times \sin(j \frac{2\pi}{T} t) dt$$

$$= a_i \frac{T}{2}, \quad i=j \quad \text{or} \quad 0, \quad i \neq j$$
(5)

式(5)から係数 a_i は

$$a_i = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(i \frac{2\pi}{T} t) dt$$
(6)

として得られる.

同様に, 式(2)の両辺に余弦波 $\cos[j(2\pi/T)t]$, $j=1,2,3,\dots$ を掛け算し, 時間 $t=0$ から $t=T$ の区間について積分することで,

$$b_i = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(i \frac{2\pi}{T} t) dt$$
(7)

として係数 b_i が得られる.

したがって, 関数 $f(t)$ は, 区間 $t=0$ から $t=T$ で,

$$f(t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(i \frac{2\pi}{T} t) dt \right) \sin(i \frac{2\pi}{T} t) + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(i \frac{2\pi}{T} t) dt \right) \cos(i \frac{2\pi}{T} t) \quad (8)$$

と書ける。これがいわゆるフーリエ変換の原型となるフーリエ級数であり、左辺の関数 $f(t)$ を右辺の計算が簡単な定数項と三角関数の和に変換している。

2.1.2 関数の直交性と線形性

フーリエ級数の考え方の中に重要な関数間で成り立つ性質、すなわち、関数の直交性 (orthogonality) が使われている。

まず式(4)の係数が計算される過程を考える。式(3)は式(2)の両辺に定数値 1 を掛け算し積分する演算である。このとき、

$$\int_0^T 1 \cdot \sin(i \frac{2\pi}{T} t) dt = 0, \quad \int_0^T 1 \cdot \cos(i \frac{2\pi}{T} t) dt = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

の関係が成り立つために、式(4)の係数 a_0 が計算できた。この関係を、定数値 1 と正弦波 $\sin[j(2\pi/T)t]$ 、および余弦波 $\cos[j(2\pi/T)t]$ 間の直交性と呼ぶ。同様に、式(6)、(7)で計算される a_i 、 b_i は

$$\int_0^T \sin(i \frac{2\pi}{T} t) \sin(j \frac{2\pi}{T} t) dt = 0, \quad \int_0^T \cos(i \frac{2\pi}{T} t) \cos(j \frac{2\pi}{T} t) dt = 0, \quad i \neq j \quad (10)$$

なる直交性が成り立つことに基づいている。

また、式(9)、(10)から、直交性とは与えられた関数を他の関数の和で表現しようとする場合、和となる関数の大きさ (係数) を一意的に決める条件であることがわかる。言い換えれば、与えられた関数を他の関数の和で表現できる条件である。

さて、ある任意の時間 t をパラメータとする関数 $f(t)$ は、区間 $t=0$ から $t=T$ で、一定値、正弦波および余弦波の和で表現できることがわかった。この変換は、一定値、正弦波および余弦波間で直交性が成り立つことが条件であった。この結果に至る過程を考えてみると、まず、展開される関数の和でもとの関数が表現されるとする大前提がある。ある関数が他の関数の和で表現できる性質を線形性と呼ぶ。では、式(6)で計算される正弦波の係数 a_i が定数 c_i の n 個の和で表現されるとする。すなわち、

$$a_i = c_i + c_i + \dots = nc_i \quad (11)$$

である。式(11)から、和を前提とする系では比例関係が成り立つことを意味することがわかる。すなわち、線形性とは比例関係が成立する系である。

2.1.3 離散値系フーリエ変換

離散値なる用語が生まれたのは計数型計算機を用いて数値計算を行う場合、連続関数をサンプリングして得られる数値で代表したことに起因する。例えば、関数 $f(t)$ を時間 $t=0$ から $t=T$ の区間で、 Δt ごとに n 個サンプリングして離散値系で表すと、

$$F = [f(\Delta t), f(2\Delta t), f(3\Delta t), \dots, f(n\Delta t)]^T \quad (12)$$

なるベクトルとなる。

同様にして、式(1)を離散値系で書けば、

$$\begin{pmatrix} f(\Delta t) \\ f(2\Delta t) \\ f(3\Delta t) \\ \vdots \\ f(n\Delta t) \end{pmatrix} = a_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sin(\frac{2\pi}{T}\Delta t) & \sin(2\frac{2\pi}{T}\Delta t) & \sin(3\frac{2\pi}{T}\Delta t) & \dots & \sin(n\frac{2\pi}{T}\Delta t) \\ \sin(\frac{2\pi}{T}2\Delta t) & \sin(2\frac{2\pi}{T}2\Delta t) & \sin(3\frac{2\pi}{T}2\Delta t) & \dots & \sin(n\frac{2\pi}{T}2\Delta t) \\ \sin(\frac{2\pi}{T}3\Delta t) & \sin(2\frac{2\pi}{T}3\Delta t) & \sin(3\frac{2\pi}{T}3\Delta t) & \dots & \sin(n\frac{2\pi}{T}3\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\frac{2\pi}{T}n\Delta t) & \sin(2\frac{2\pi}{T}n\Delta t) & \sin(3\frac{2\pi}{T}n\Delta t) & \dots & \sin(n\frac{2\pi}{T}n\Delta t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} \cos(\frac{2\pi}{T}\Delta t) & \cos(2\frac{2\pi}{T}\Delta t) & \cos(3\frac{2\pi}{T}\Delta t) & \dots & \cos(n\frac{2\pi}{T}\Delta t) \\ \cos(\frac{2\pi}{T}2\Delta t) & \cos(2\frac{2\pi}{T}2\Delta t) & \cos(3\frac{2\pi}{T}2\Delta t) & \dots & \cos(n\frac{2\pi}{T}2\Delta t) \\ \cos(\frac{2\pi}{T}3\Delta t) & \cos(2\frac{2\pi}{T}3\Delta t) & \cos(3\frac{2\pi}{T}3\Delta t) & \dots & \cos(n\frac{2\pi}{T}3\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\frac{2\pi}{T}n\Delta t) & \cos(2\frac{2\pi}{T}n\Delta t) & \cos(n\frac{2\pi}{T}n\Delta t) & \dots & \cos(n\frac{2\pi}{T}n\Delta t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

or (13)

$$F = a_0 I + AS + BC$$

となる。ただし、 \mathbf{I} は n 次の単位列ベクトルである。

また、式(13)右辺の係数 a_0 、ベクトル \mathbf{S} と \mathbf{C} は、

$$a_0 = \frac{1}{n} \mathbf{I}^T \cdot \mathbf{F}, \quad \mathbf{S} = \frac{2}{n} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{F}, \quad \mathbf{C} = \frac{2}{n} \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{F} \quad (14)$$

で与えられる。

ここで、離散値系でフーリエ係数を計算する過程で、式(13)を

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= a_0 \frac{1}{\sqrt{n}} \mathbf{I} + \sqrt{\frac{2}{n}} \mathbf{A} \mathbf{S} + \sqrt{\frac{2}{n}} \mathbf{B} \mathbf{C} \\ &= a_0 \mathbf{I} + \mathbf{A}' \mathbf{S} + \mathbf{B}' \mathbf{C} \end{aligned} \quad (15)$$

と書き直すと、

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{n}} \mathbf{I}^T \cdot \mathbf{F}, \quad \mathbf{S} = \sqrt{\frac{2}{n}} \mathbf{A}'^T \cdot \mathbf{F}, \quad \mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{n}} \mathbf{B}'^T \cdot \mathbf{F}, \quad (16)$$

$$\mathbf{A}'^T \cdot \mathbf{A}' = \mathbf{I}, \quad \mathbf{B}'^T \cdot \mathbf{B}' = \mathbf{I}$$

の関係が成り立つ。 \mathbf{I} は n 次の単位行列である。この結果は、離散値系で正弦波や余弦波のフーリエ係数を求める場合、式(16)の係数行列 \mathbf{A}' 、 \mathbf{B}' の逆行列がそれぞれの転置行列で与えられることを意味する。言い換えれば、変換行列の逆行列が変換行列の転置行列で与えられることでフーリエ係数の直交性が満足される。

2.1.4 1次元フーリエ変換

画像データは、2次元配列で格納された数値の並びとしてデジタル計算機で表現される。この数値の並びを系統的に変更することを考える。すなわち、画像を構成する数値データを系統的に並べかえる演算を画像データの変換と呼ぶ。本項では画像データを複素数へ変換するフーリエ変換を導入する。フーリエ変換はフーリエ級数を複素数で行う演算と考える。

簡単のため、式(1)で n 次の1次元ベクトル \mathbf{F} をフーリエ変換することを試みる。

$$\mathbf{F} = [f(0), f(\Delta x), f(2\Delta x), \dots, f(\overline{n-1}\Delta x)] \quad (17)$$

変換行列は次式で与えられる.

$$\mathbf{C} = \frac{1}{\sqrt{n}} \begin{pmatrix} e^0 & e^0 & e^0 & \dots & e^0 \\ e^0 & e^{i\Delta x} & e^{i2\Delta x} & \dots & e^{i(n-1)\Delta x} \\ e^0 & e^{i2\Delta x} & e^{i4\Delta x} & \dots & e^{i2(n-1)\Delta x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^0 & e^{i(n-1)\Delta x} & e^{i(n-1)2\Delta x} & \dots & e^{i(n-1)(n-1)\Delta x} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$e^{i\alpha} = \cos(\alpha) + i\sin(\alpha), \quad i = \sqrt{-1}$$

式(17)のフーリエ変換は, 式(18)の変換行列を使って式(19)のように行われる.

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{C}\mathbf{F} \\ &= \frac{1}{\sqrt{n}} \begin{pmatrix} e^0 & e^0 & e^0 & \dots & e^0 \\ e^0 & e^{i\Delta x} & e^{i2\Delta x} & \dots & e^{i(n-1)\Delta x} \\ e^0 & e^{i2\Delta x} & e^{i4\Delta x} & \dots & e^{i2(n-1)\Delta x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^0 & e^{i(n-1)\Delta x} & e^{i(n-1)2\Delta x} & \dots & e^{i(n-1)(n-1)\Delta x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(0) \\ f(\Delta x) \\ f(2\Delta x) \\ \vdots \\ f((n-1)\Delta x) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

フーリエ逆変換は, 上添え字「*」が複素共役演算を示すこととして,

$$\mathbf{F} = (\mathbf{C}^T)^* \mathbf{F} \quad (20)$$

で行われる. 式(20)が成り立つためには,

$$\mathbf{C}^{-1} = (\mathbf{C}^T)^* \quad (21)$$

の条件が必要である.

このように, もとの行列の転置行列の複素共役が逆行列となる行列をエルミート (Hermite) 行列と呼ぶ.

2.2 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]。

2.2.1 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などが相当する。同様に、心地良い音楽を聴いたり、快い感じを抱いたり、安静にしているときの脳波にも「1/f ゆらぎ」が存在する。従来の「1/f ゆらぎ」解析法は、RGB成分強度値の1フレームに対する平均値を算出し、それを全フレームから求め、時系列に並べることでゆらぎを1次元配列へ格納し、その数値配列に対してフーリエ解析を用いてゆらぎの特徴を求める。より具体的には、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する。周波数の低下とともにパワースペクトラムが増加するような信号の中で、パワースペクトラムの振幅が周波数に対して反比例する信号を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。

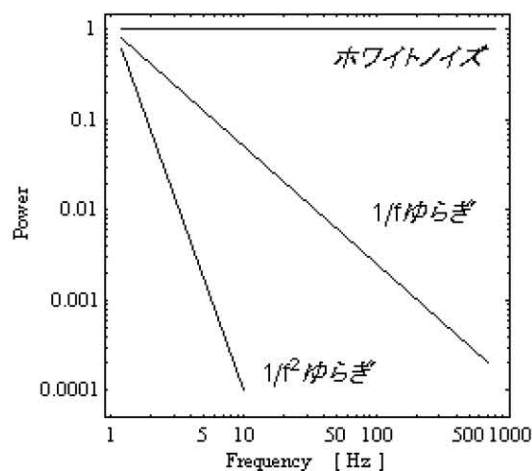


図1 フーリエ・パワースペクトラムの例

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別する方法である。図 1 にフーリエ・パワースペクトラムの一例を示す[8]。図 1 において、直線の傾きがゼロの場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急になる程単調な信号である。そしてホワイトノイズと単調な信号の中間的な信号で傾きが約-1 の場合を「1/f ゆらぎ」と呼び、人間が心地よいと感じる信号と言われる。

2.2.2 画像の構成要素

計算機のスクリーン上に描かれる画像は、色成分により赤、緑、青の濃淡で表現されている。また、 $m \times n$ 画素で構成される画像はスクリーン上で 2 次元平面上の画素の集合であり、

$$\begin{aligned}
 &image \in pixel_{i,j} \\
 &pixel_{i,j} \in R_k, G_k, B_k \\
 &i = 1, 2, 3, \dots, m \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 &k = 1, 2, 3, \dots, m \times n
 \end{aligned} \tag{22}$$

として表すことができる。

2.2.3 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。動画画像のゆらぎ成分の可視化方法としては最初に動画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

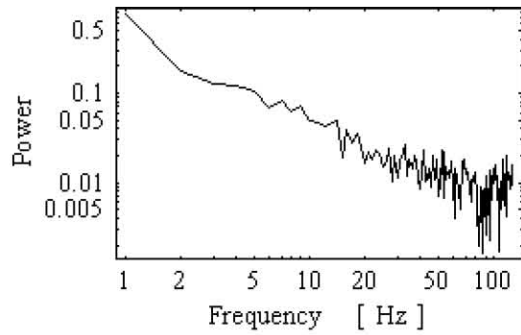


図3 フーリエ・パワースペクトラム

2.2.4 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(23)で表される。

$$f = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n] \quad (23)$$

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(24)により回帰直線の傾きを求める。

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

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i \cdot X_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i} \quad (24)$$

2.2.5 ゆらぎ周波数成分の可視化

図4はロウソク炎動画像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、ロウソク炎動画像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はロウソク炎動画像からロウソク炎の「 $1/f$ 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ろうソク炎動画像における「 $1/f$ 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。

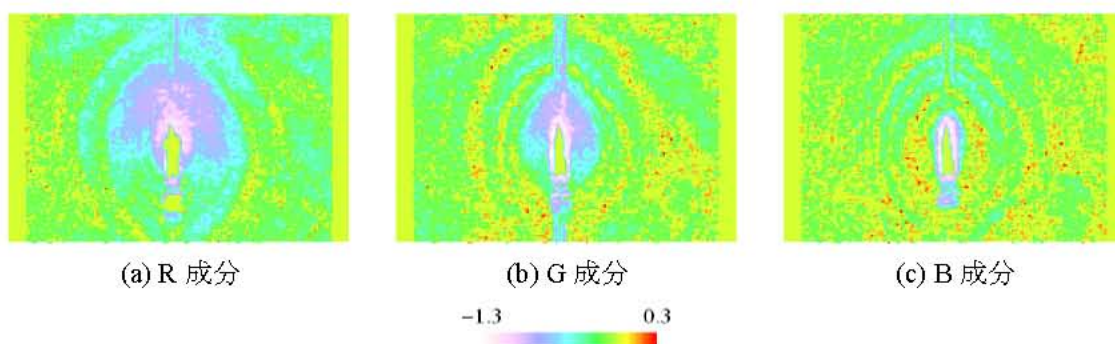


図4 ゆらぎ周波数分布

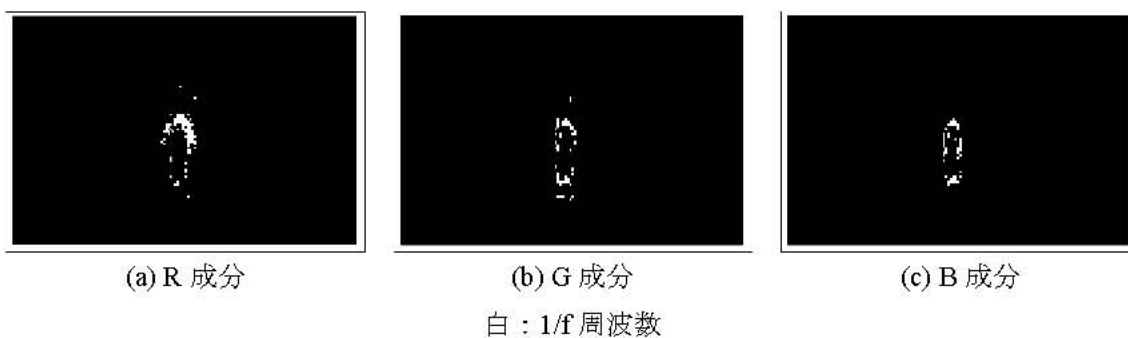


図5 $1/f$ ゆらぎ周波数成分の抽出

2.2.6 自然界のゆらぎ画像解析

動画像において各フレームの画素値を時系列(フレーム)方向にDFT解析し, 動画像の時間領域周波数特性解析の方法を述べた. ここでは, 時間領域周波数特性を用い自然界の風景などを解析した結果を述べる. 動画像の一例を図6に, 時間領域周波数特性を図7に示す.



図6 供試動画像

図7に示すように自然界の動画像の多くは「 $1/f$ ゆらぎ」周波数成分を持ち、雲、波のしぶきなどスクリーン上の大部分が「 $1/f$ ゆらぎ」周波数成分からなることが判明した。

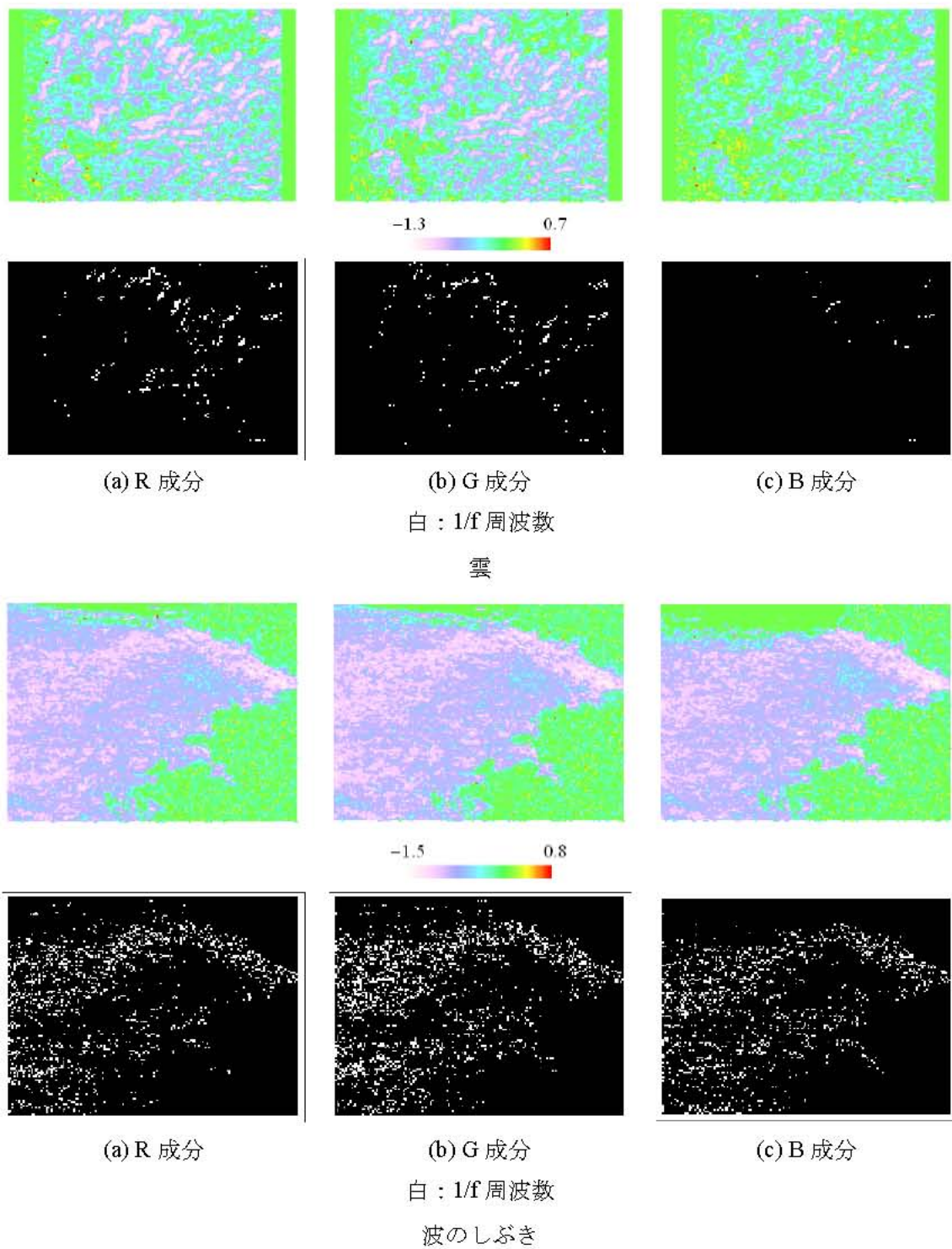


図7 $1/f$ ゆらぎ周波数分布

2.3 例題 -音楽-

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音楽データ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、音楽データを計算機に取り込み、時間領域周波数特性から音楽固有の特徴量を抽出することを試みる。

また、本研究では音楽データはモノラルの 8bit, 8000Hz で時間領域周波数解析を行う。

2.3.1 音楽のゆらぎ

言葉は通じなくとも、音楽はどの国の人にも同じような感動を与えていると言っても過言ではない。さらに、バッハやモーツァルトが生まれた時代と、我々が生きている現在とでは、文化的背景や価値基準はずいぶん変わっているが、バッハやモーツァルトの音楽は今でも愛されている。人種を超えて価値判断が一致し、文化的な背景がまったく違う人間同士で、どうして価値を共有することが出来るのだろうか。そして音楽が時代を超えて、愛されているということは、人間には生まれながらにして、音楽に快いと感じる共通の価値観を持ち、それが普遍的な性質であるからだと考えざるを得ない。これは、私たちの体の中のリズムが 1/f ゆらぎを示すからだと考えられる。この体のリズムのゆらぎと同じ性質を持った音楽のゆらぎを外部から刺激として受けると、「快適だ」と感じるのではないかと推測される。また、音楽を聴くと快適な気分になり、騒音を聞くと不快感を感じるのは、生体のリズムのゆらぎに合うか合わないかの違いではないかと推測される[9]。

2.3.2 音楽データ

解析対象の音楽データは次の 4 曲である。

- a) 世界に一つだけの花
- b) Wild Child
- c) 菩提樹
- d) アベマリア

まず(a)の曲は、国民的アイドルグループである SMAP が歌う楽曲で、売り上げ枚数が 200 万枚を突破した 2003 年の代表曲の一つである。次に(b)の曲は、アイルランド出身のエンヤが歌う楽曲で、世界的な人気を得ている女性歌手である。日本では CM や番組のエンディングなどに彼女の曲が多用され、ヒーリング（癒し）ミュージックとしていくつものナンバーが愛され絶大な人気を誇る。そして(c), (d)の曲は、音楽史上最も有名な作曲家のシューベルトの楽曲である[4]。(c)の曲はシューベルトの最高傑作であり、現代人にとっても最も愛されている歌曲集「冬の旅」第 5 曲である。また(d)の曲は、最晩年の歌曲の一つであり、伸びやかで息の長い旋律ゆえに、シューベルトの歌曲の中では最も人気の高い一つである。

2.3.3 時間領域周波数特性

ここでは、音楽固有の周波数特性について述べる。まず音楽データの時間軸方向へ 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。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 8 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、低周波領域から傾きを求める。その結果を表 1 に示す。

表 1 からいずれも名曲であると言われている(c) 菩提樹, (d) アベマリアには「 $1/f$ ゆらぎ」周波数成分が存在することが判明した。逆に、現代の代表曲である(a) 世界に一つだけの花, (b) Wild Child においてはゆらぎ成分が存在しない結果となった。

よって、古今東西を問わず、名曲だと言われる音楽には「 $1/f$ ゆらぎ」周波数成分が存在することが推測される。

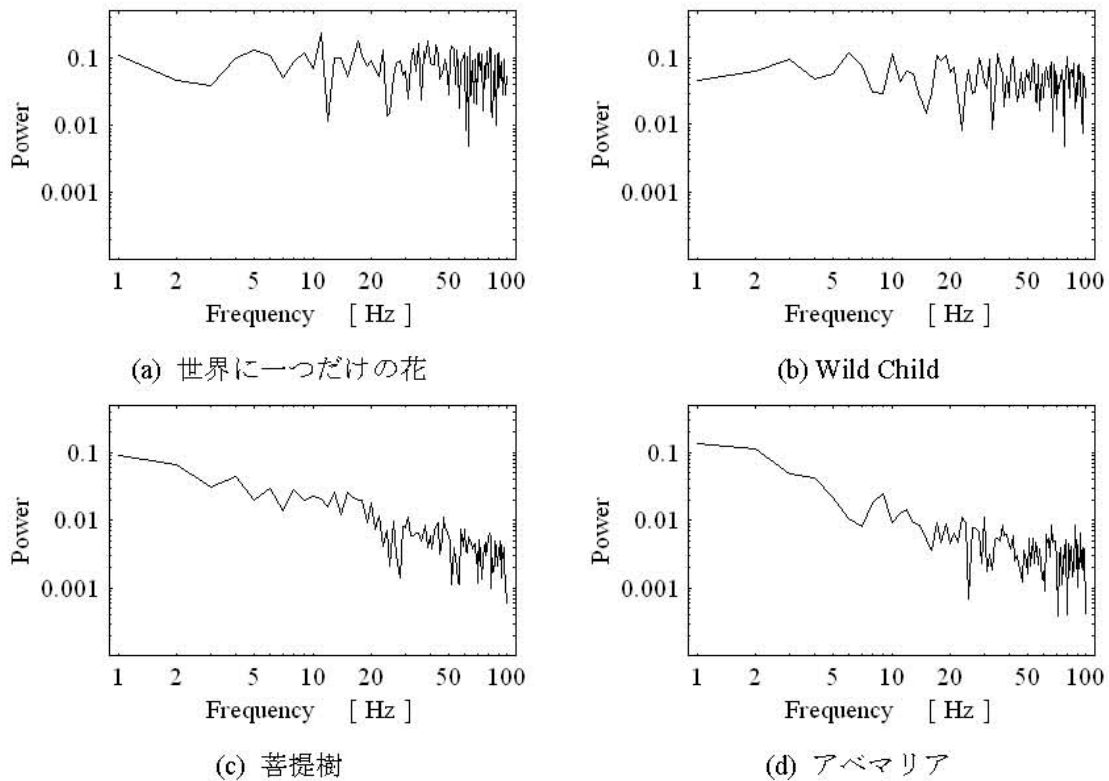


図 8 フーリエ・パワースペクトラム

表 1 傾きの値

音楽データ	世界に一つだけの花	Wild Child	菩提樹	アベマリア
傾きの値	-0.12	-0.13	-0.84	-0.70

2.4 フーリエ余弦変換

2.4.1 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]。

2.4.2 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 9 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 10 に図示する。

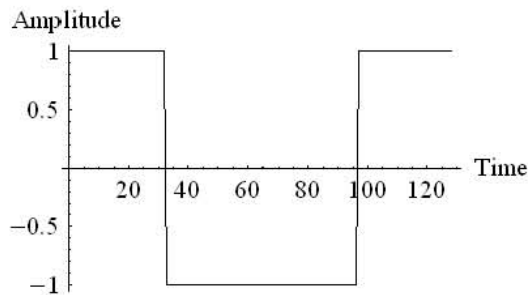


図 9 基本波

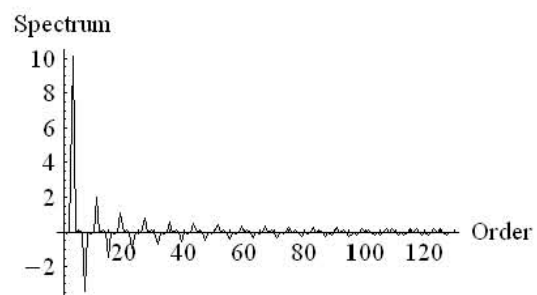


図 10 パワースペクトラム

フーリエ係数の最初の 10 項までを表 2 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 2 フーリエ係数

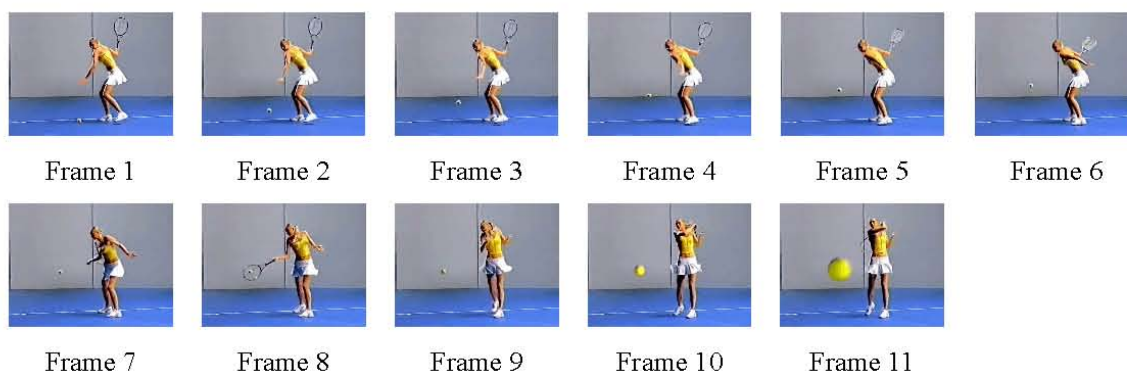
Order	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Spectrum	-0.1	0	10.1	0	0.1	0	-3.4	0	-0.1	0

2.5 例題 -スポーツ動画像-

本節ではフーリエ余弦変換を用いて動画像の時間領域周波数解析を試みる。フーリエ余弦変換は周波数領域の全データのスペクトラムを取り扱うことを可能とする[10]。例題としてスポーツ動作のテニスのショット動画像における時間領域周波数解析について述べる。

2.5.1 テニスショット動画像

解析対象動画像であるテニスのショット動画像は、PEPSIのTVCMから引用する。図11に示すテニスのショット動画像は、プロテニス選手であるマリア・シャラポアである。



<http://www.pepsi.co.jp/menu.html>

図11 供試動画像

2.5.2 時間領域周波数解析

ここでは、スポーツ動画像から個々のプレイヤー固有の特徴量を抽出する方法を述べる。その方法としては、フーリエ余弦変換を適用しスポーツ動画像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。すなわち、図11に示したテニスのショット動画像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。

2.5.3 時間領域周波数分布画像

図12はテニスのショット動画像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、テニスのショット動画像の時間領域周波数スペクトラム分布画像である。

図12よりフーリエスペクトラム分布が上半身から下半身までと体全体に観察され、特に腰から左足の部分において顕著に表れていることが判る。これは、ショット動作を行う際に軸となる部分を表すと考えられる。

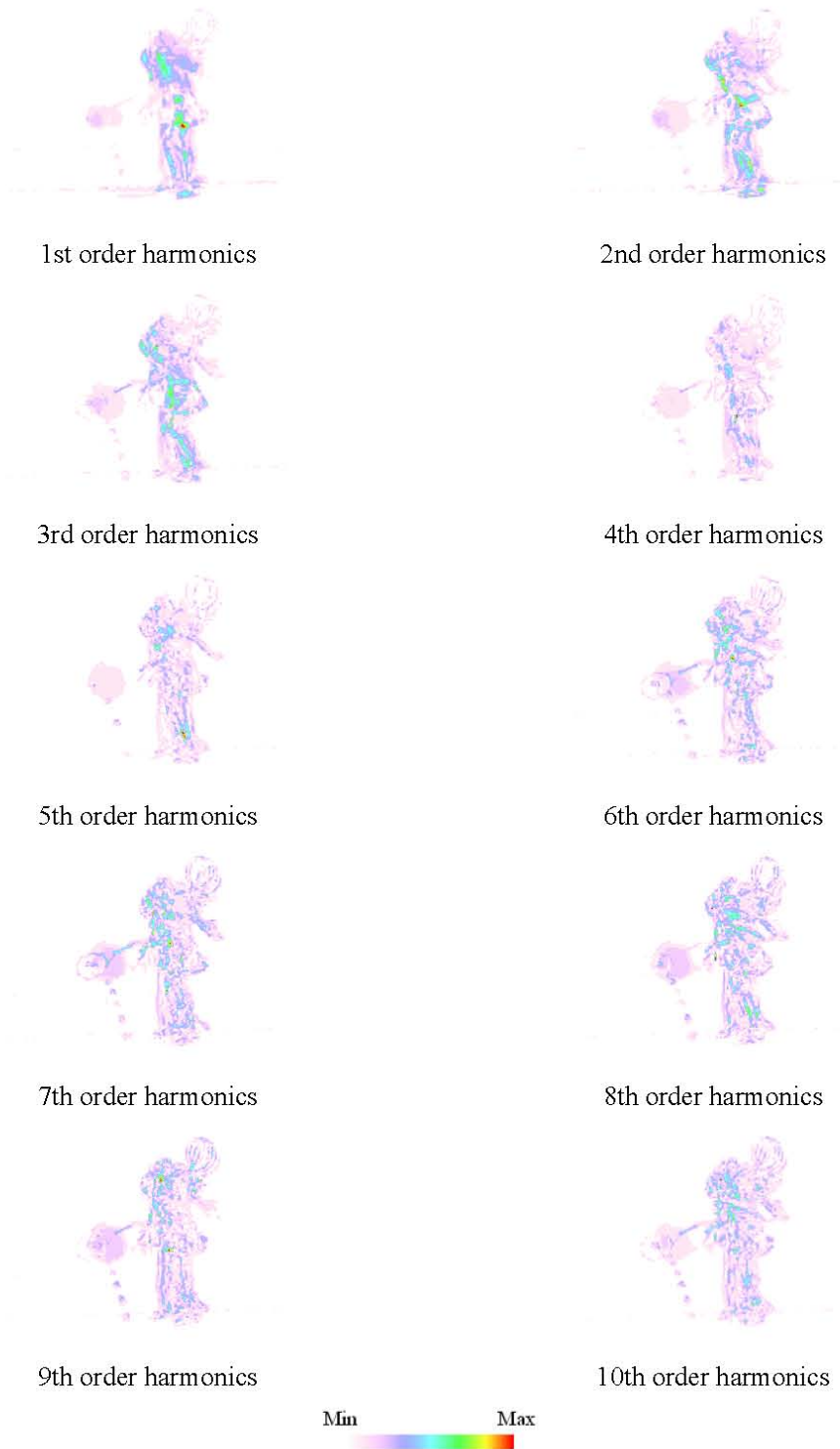


図 12 周波数スペクトラム分布

第3章 動画像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像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。

3.1 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[11]。

本節では融解、蒸発、凝固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が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。

3.1.1 物質の三態

図13に示すように物質は温度・圧力によって状態が変化する。例えば、1atmの下で液体の水は、 0°C 以下で固体であり、 100°C 以上で気体になる。物性として普遍的な三態（固体・液体・気体）すなわち、物質がまわりの温度や圧力によって平衡的相転移する物性変化は、特に状態変化（State Transition）とも呼ばれる。

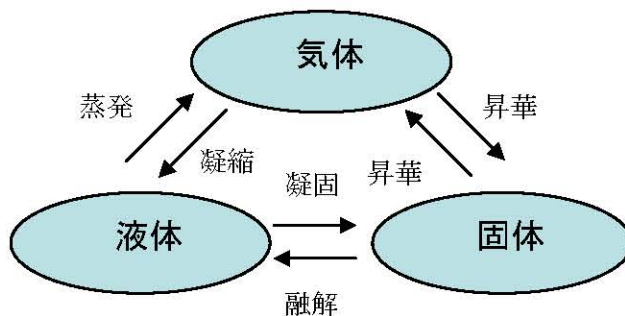


図13 物質の三態

3.1.2 実験器具

本実験では、画像の撮影に赤外線カメラを用いて熱画像を収録した。使用したカメラは三菱サーマルイメージャ（IR-SC1 三菱電機株式会社製）である。この赤外線カメラはキャリブレーションを行う CAL スイッチ、輪郭強調（EMPHASIS）を行うスイッチ、ゲイン（GAIN）切替スイッチが装着されている。今回の実験では赤外線カメラの設定を EMPHASIS は OFF、GAIN は LOW として撮影を行った。その理由は、EMPHASIS を ON とするとカメラ内部で輪郭強調のためになんらかの処理が行われていると考えられ撮影した画像データそのものを得ることが出来ないことが危惧されるためである。また、GAIN を LOW とすることにより時間が経つにつれて変化する熱が視覚的に分かりやすいからである。基準温度測定のため、デジタル温度計（TX1002 横河 M&C 株式会社製）を用いた。

3.1.3 水の状態変化の撮影

まず相転移現象である融解そして蒸発の実験を行う。

図 14, 15, 16 に示すように赤外線カメラを用いて、氷の融解時と水の蒸発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。

a) 融解

図 14(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 秒間撮影した模式図である。また、赤外線カメラのダイナミックレンジを固定するため、基準温度としてコップに入れた氷をビーカーの横に置いて撮影した。図 14(b)に撮影したフレーム画像を示す。黒い部分が氷である。

b) 蒸発

図 15(a)は鍋に 1500cc の水を入れ、IH 調理器で鍋を加熱し、水の蒸発時の動画像を 30 秒間撮影した模式図である。撮影時の水の温度は 70℃である。撮影したフレーム画像を図 15(b)に示す。

また、図 16(a)はビーカーに 400cc の水を入れ、アルコールランプでビーカーを熱し、水の蒸発時の動画像を 30 秒間撮影した模式図である。撮影時の水の温度は 70℃である。撮影したフレーム画像を図 16(b)に示す。



図 14 氷の融解

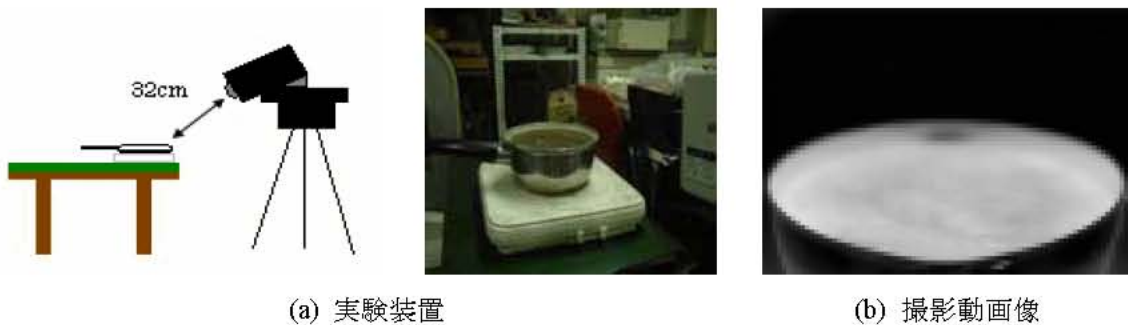


図 15 水の蒸発 (IH 調理器)

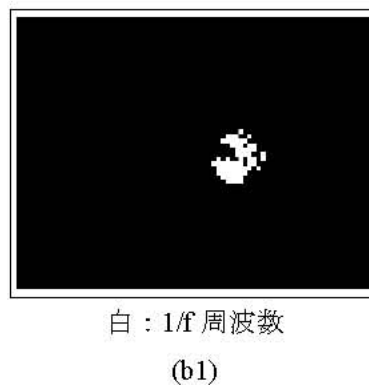
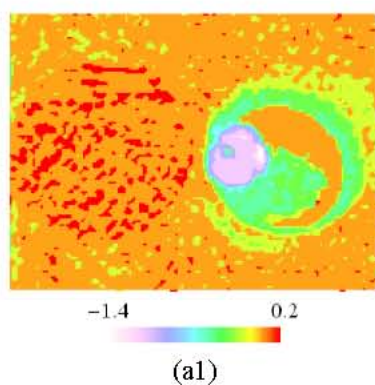


図 16 水の蒸発 (アルコールランプ)

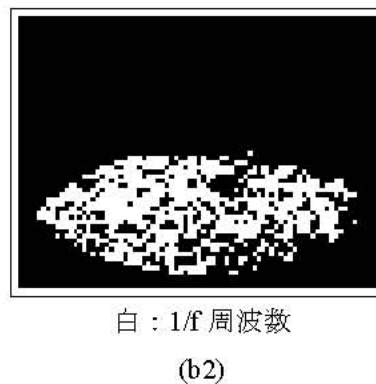
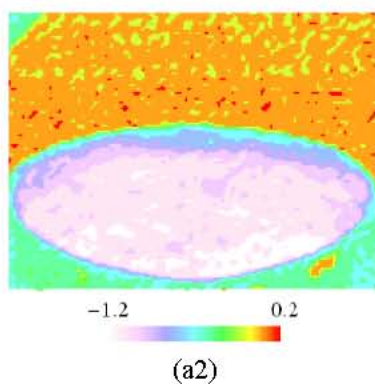
3.1.4 水の状態変化における時間領域周波数特性

図 17(a1)-(a3)はそれぞれ図 14(b), 15(b), 16(b)に示した氷の融解時と水の蒸発時の動画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.

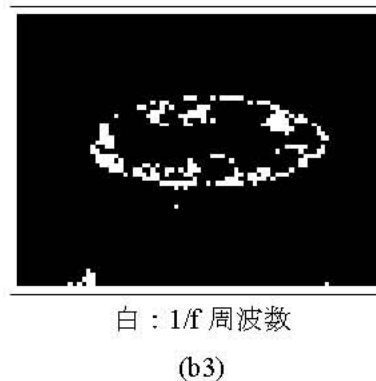
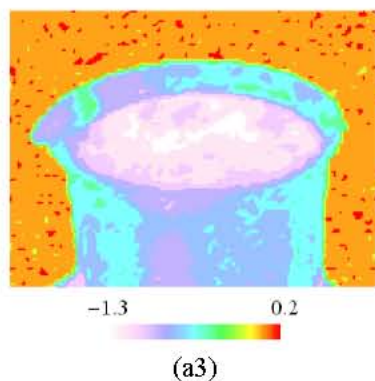
図 17(b1)-(b3)は図 17(a1)-(a3)で求めたフーリエ・パワースペクトラムの傾きが -1.05 から -0.95 の場合は画素値を 1 とし, その他の値は画素値をゼロとして得られた「 $1/f$ ゆらぎ」周波数の 2 値化画像である. すなわち, 図 17(b)は相転移状態における「 $1/f$ ゆらぎ」画像である.



氷の融解



水の蒸発 (IH 調理器)



水の蒸発 (アルコールランプ)

図 17 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

3.1.5 ハンダの状態変化の撮影

次に相転移現象である凝固の実験を行う。

まず本実験において表 3 に示すヤニなしハンダ (goot ステンレス用ハンダ SD-38) を用いた。撮影方法としては、ハンダを 10cm に切り、鍋の中に入れ電気コンロを用いてハンダを溶かす。そして、溶けたハンダが凝固する時の状態を赤外線カメラを用いて 60 秒間撮影

をした。画像は1秒間に30フレームレートで撮影した。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18(d)に撮影したフレーム画像を示す。黒い部分が氷である。

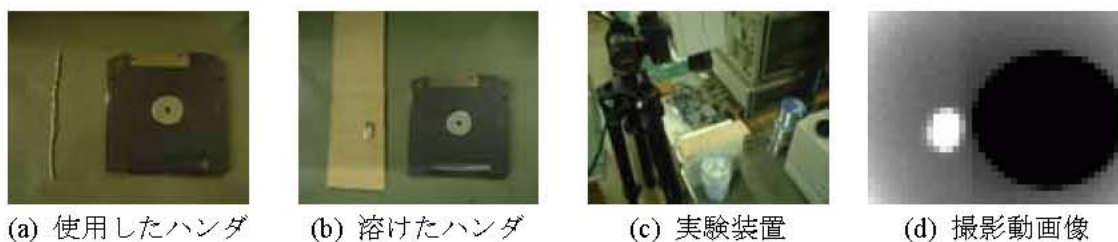


図18 ハンダの凝固

表3 goot ステンレス用ハンダ SD-38

型番	品名	融点/°C	線径/φ	スズ/%
SD-38	ステンレス用ハンダ	183	16	63

3.1.6 ハンダの状態変化における時間領域周波数特性

図19(a)はそれぞれ図18(d)に示したハンダの凝固時の動画像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19(b)は図19(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19(b)は相転移状態における「1/f ゆらぎ」画像である。

図17, 19から、融解, 蒸発, 凝固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。

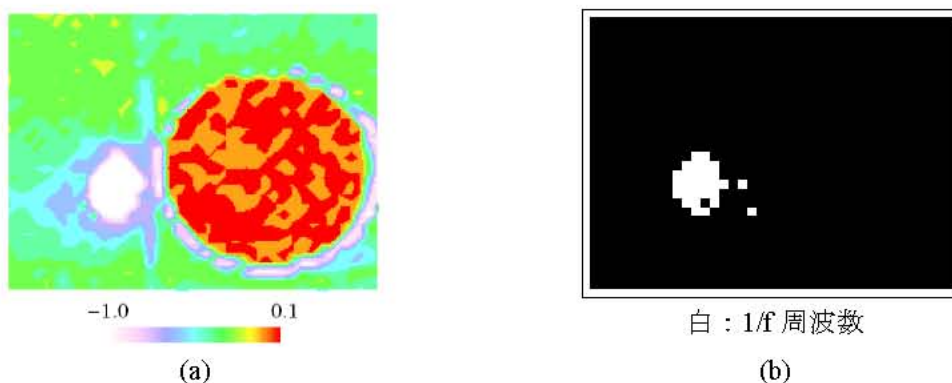


図19 1/f ゆらぎ周波数分布

左：ゆらぎ周波数分布，右：1/f ゆらぎ周波数

3.2 スポーツ動画像における時間領域周波数解析

本節では動画像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像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。

3.2.1 ゴルフスウィングの力学的分析

ドライバーショットの目的は正確に最大の距離を得ることである。環境条件が変われば、それに対応させる技巧が必要である[12]。

ゴルフのドライバーショットのスキルには次の諸点が含まれている。(1) 最大かつ正確な打撃力の発現、(2) スウィング時のバランスのコントロール、(3) 投射体の特性に含まれる諸要素。本質的には、望ましいスウィングの特性は、(1) インパクトにおけるクラブヘッドの最大運動量、(2) インパクトでのクラブヘッドの正しい位置と運動方向、(3) まっすぐにボールの重心を通るようなボールとのコンタクトであり、如何なる状況でも、これらの項目が充足されていることが望ましい[13]。

3.2.2 ゴルフスウィング動画像の撮影

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像を撮影した。画像は1秒間に30フレームレートで撮影した。

a) ドライバーショット正面

図 20 に示すように、ゴルフスウィング動画像を正面から撮影した。図 20(a)はゴルフ初心者であり図 20(b)はゴルフ経験者のスウィング動画像である。また動画像の全フレーム数であるが図 20(a)は 64 枚、図 20(b)は 75 枚である。

b) ドライバーショット斜め

図 21 に示すように、ゴルフスウィング動画像を斜めから撮影した。図 21(a)はゴルフ初心者であり図 21(b)はゴルフ経験者のスウィング動画像である。また動画像の全フレーム数であるが図 21(a)は 61 枚、図 21(b)は 76 枚である。



図 20 ドライバーショット正面

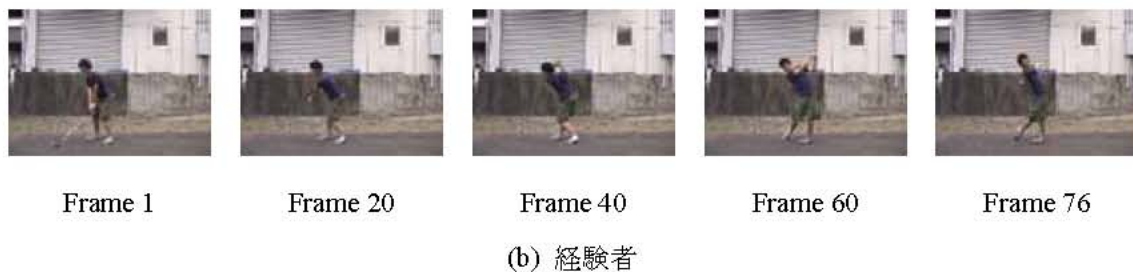


図 21 ドライバーショット斜め

3.2.3 時間領域周波数解析

スポーツ動画像から固有の特徴を可視化する方法としては動画像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 20, 21 に示したゴルフスウィング動画像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。

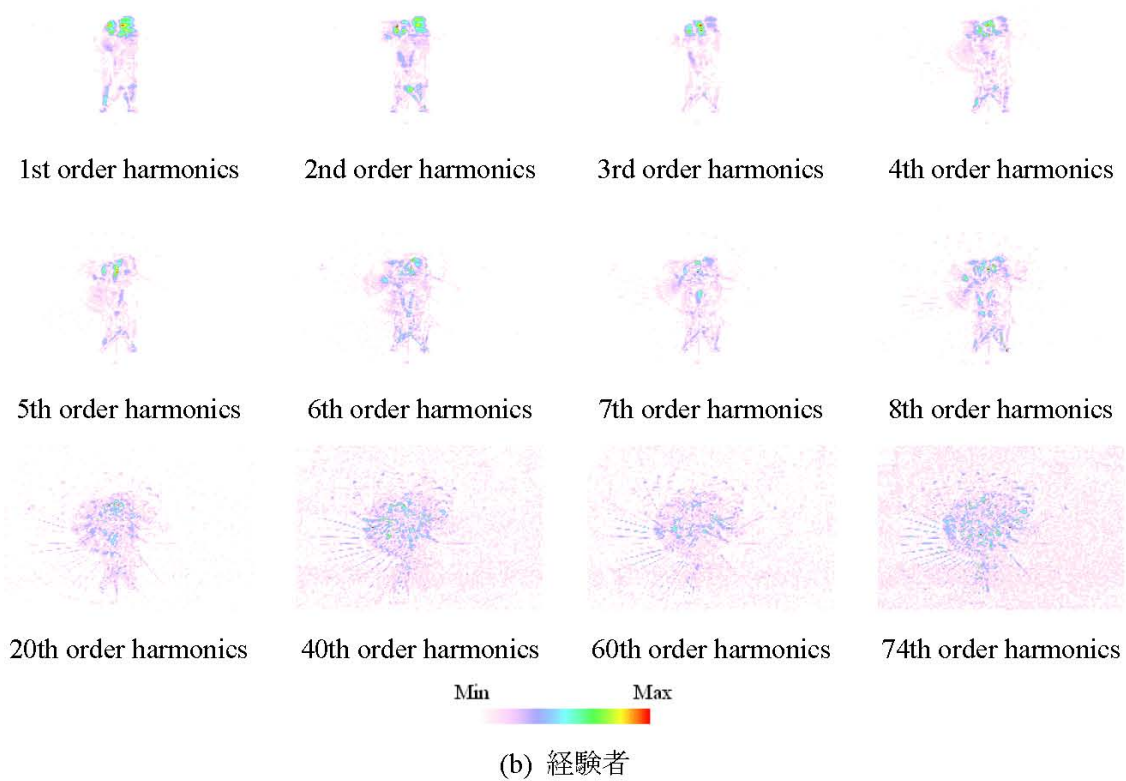
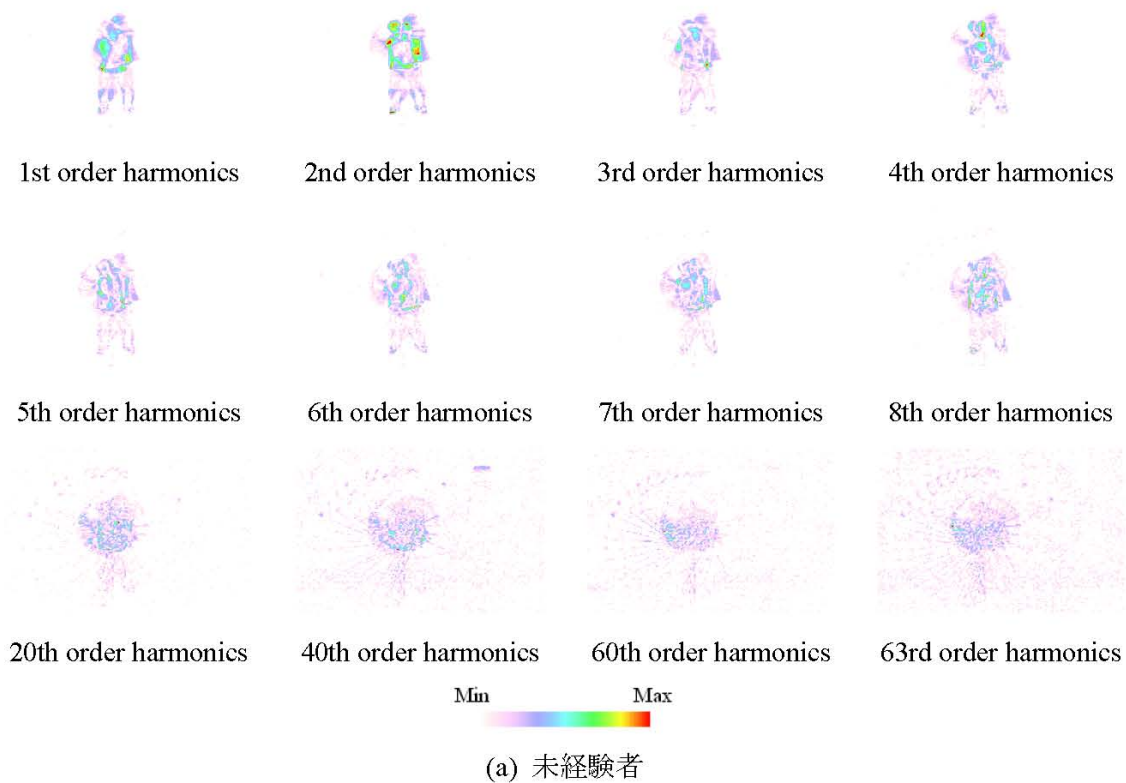


図 22 ドライバーショット正面の周波数スペクトラム分布

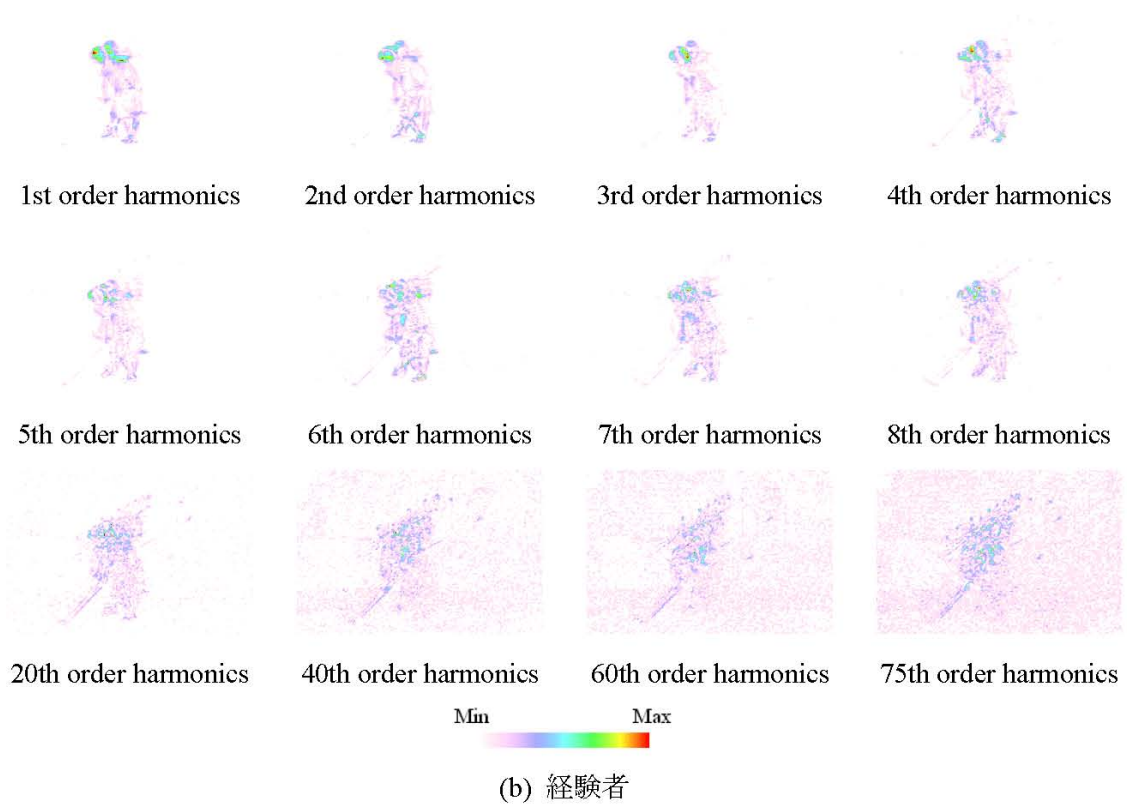
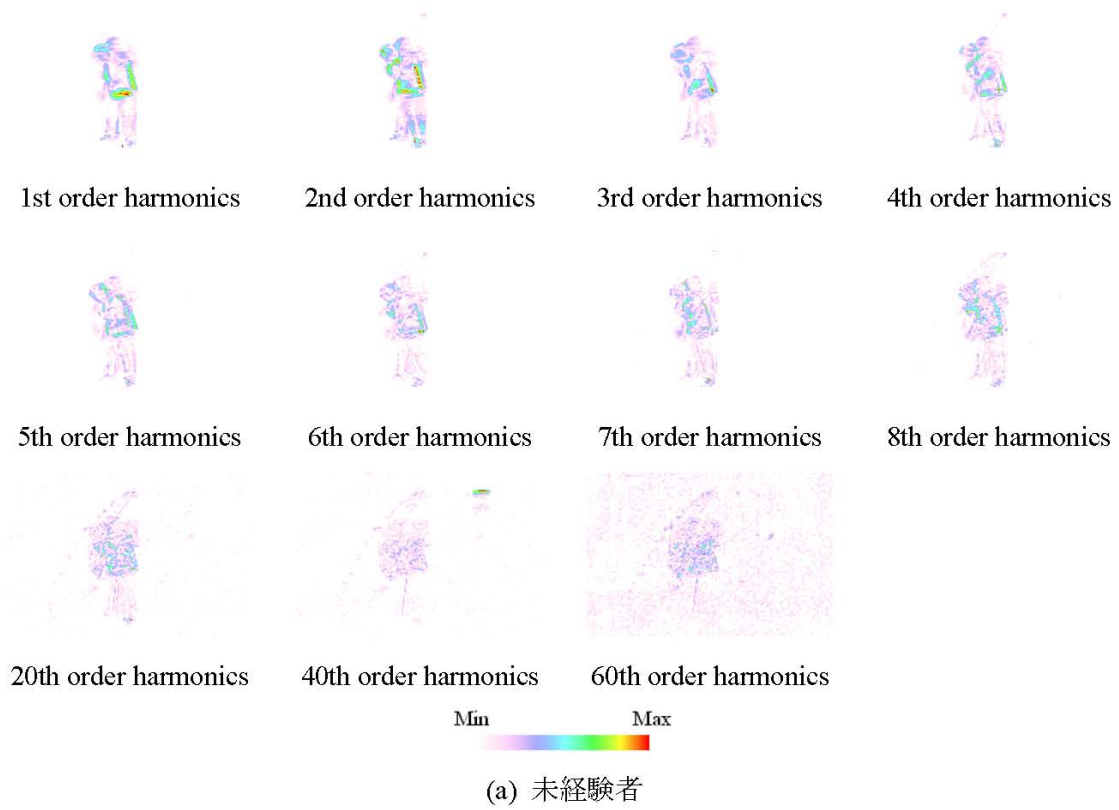


図 23 ドライバーショット斜めの周波数スペクトラム分布

3.2.4 時間領域周波数分布画像

図 22, 23 はゴルフスウィング動画像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像の時間領域周波数スペクトラム分布画像である。

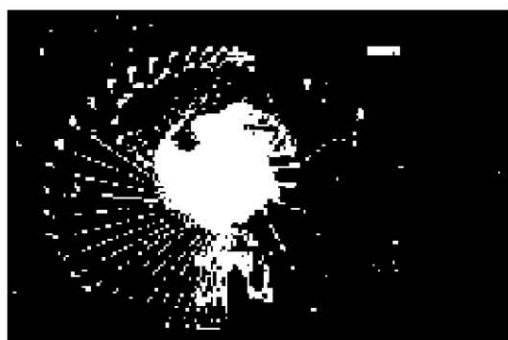
図 22(a), 23(a)よりフーリエスペクトラム分布が上半身に集中し、図 22(b), 23(b)よりフーリエスペクトラム分布が上半身から下半身までと体全体に観察され、高周波成分においてクラブの軌跡が顕著に表れていることが判る。

3.2.5 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 22 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 24 はゴルフクラブの軌跡を表す画像である。

図 24 で、経験者のスウィングはボールにヒットする直前で安定した軌道を描くことが判る。



(a) 未経験者



(b) 経験者

図 24 ゴルフクラブの軌跡

3.3 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。

本節では動画像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像からカルマン渦における特徴を抽出し可視化を試みる。

3.3.1 円柱まわりの流れとカルマン渦

本項では、物体まわりの流れの典型例として、一様流中に置かれた円柱まわりの流れについて述べる。

この流れでは、一様流速 U 、円柱直径 d 、流体の動粘度 ν で定義されるレイノルズ数

$$\text{Re} = \frac{Ud}{\nu} \quad (25)$$

が重要なパラメータとなる。

また、動粘度 ν は粘度 μ を密度 ρ で割った値をいい、単位は $[m^2/s]$ を用いる。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (26)$$

粘度は流体を特徴づける性質で、流体を変形させるときに変形速度に応じた力が必要とされるという性質である。例えば、粘りの強いグリースや水あめなどをかき混ぜると、水などに比べて大きな力を必要とし、より粘性が強いことが判る。空気などの気体にも粘性は存在し、空気抵抗などの原因となっている。

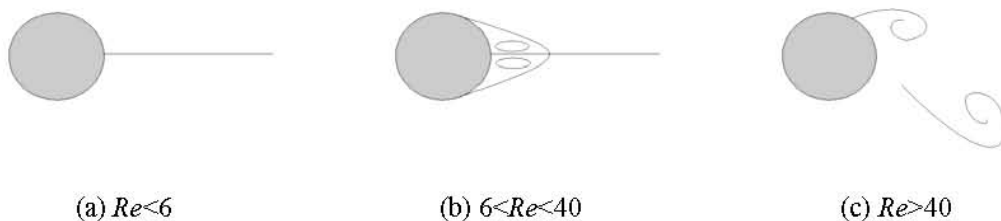


図 25 レイノルズ数による円柱まわりの流れのパターン変化
(流れの向き : →)

レイノルズ数が6以下の場合、流れは図25(a)のように円柱に付着して流れる。この流れのパターンは理想流体と同様である。しかし、理想流体では圧力分布が完全に対称であり摩擦力も存在しないため円柱に力が作用しないが、実在流体では主として円柱表面の摩擦力により抗力が作用する。この矛盾をダランベールのパラドックスと呼んでいる。

レイノルズ数が6以上40以下の場合には、図25(b)のように流れは円柱側面ではなく離し、円柱背後に一对の定常な渦を形成する。この渦を双子渦と呼ぶ。なお、レイノルズ数が大きくなるにしたがって、双子渦の長さは伸びていき、その下流側部分がゆらぎ始める。

レイノルズ数が40以上になると、図25(c)のように双子渦が安定に存在できず、交互に円柱から剥がれて振動流が発生する。円柱から剥がれた渦は、円柱下流で一定間隔を保った千鳥状の列を形成する。この渦の列をカルマン渦もしくはカルマン渦列と呼ぶ[14]。このカルマン渦は構造物の振動や疲労破壊の原因となっている[15]。

3.3.2 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 $0.16, 0.29\text{m/s}$ で、レイノルズ数は 4900 となっている。図26に実験図を示す。

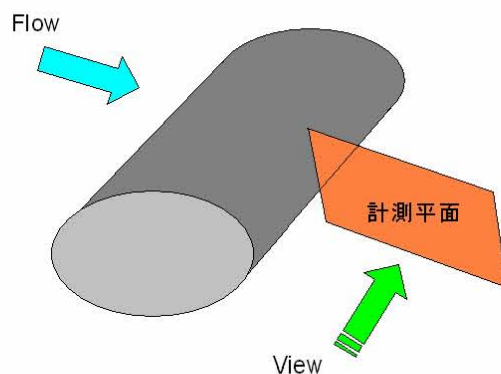


図26 実験図

3.3.3 時間領域周波数解析

円柱後流の動画像から固有の特徴を可視化する方法としては動画像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27に示した円柱後方流れの動画像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。

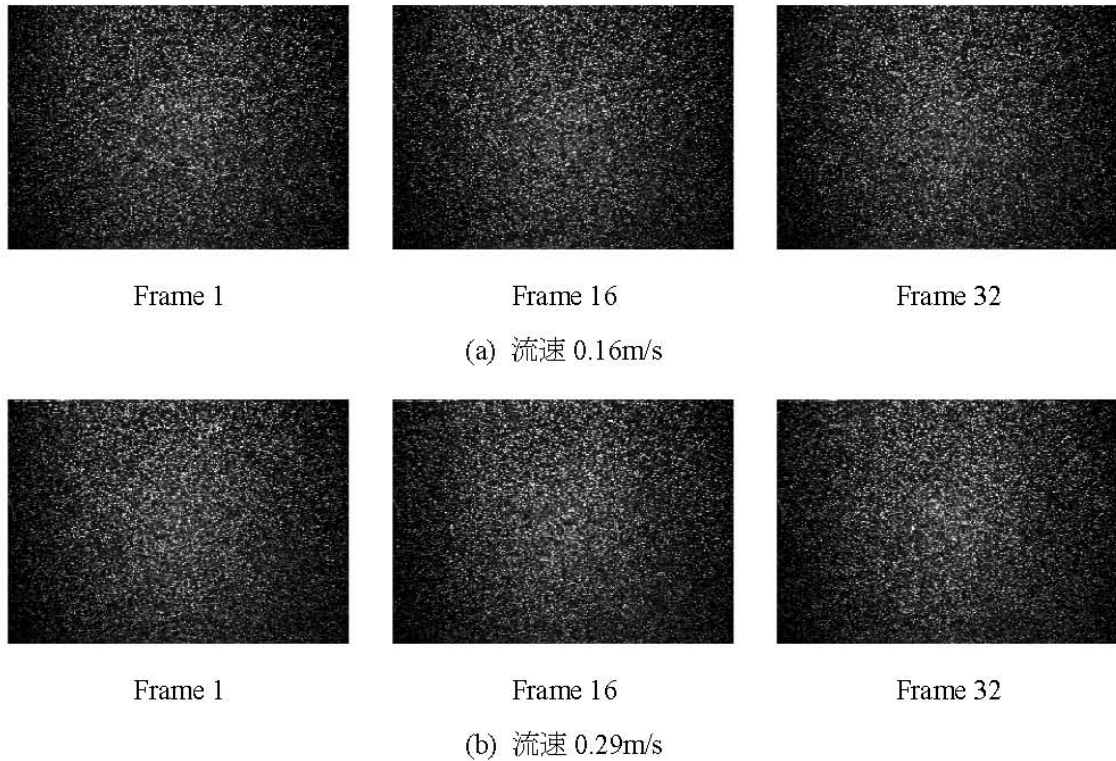


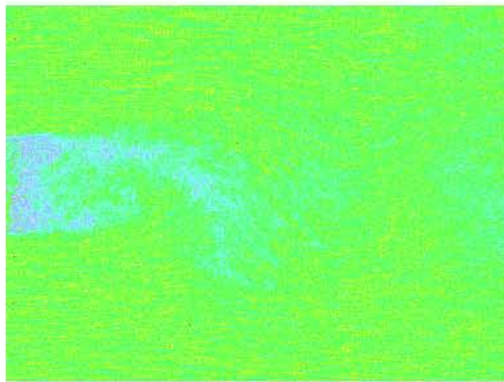
図 27 円柱後方流れの動画像

3.3.4 時間領域周波数分布画像

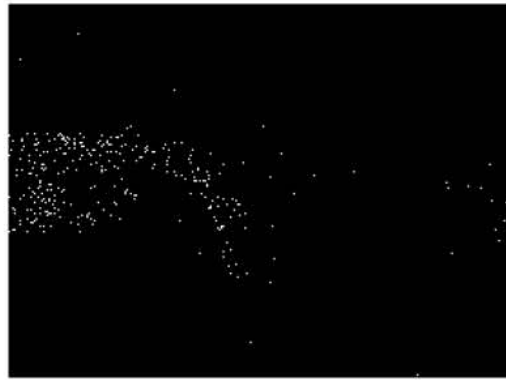
図 28(a1), (a2)は円柱後流の動画像の各フレームの各画素値へフレーム方向にフーリエ余弦変換を適用し、各周波数に対するフーリエスペクトラムを計算し、周波数振幅の傾きを求めて得られたカラー画像、すなわち、円柱後流の動画像におけるゆらぎ周波数分布画像である。

図 28(b1), (b2)は図 28(a1), (a2)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 28(b)は円柱後流における「1/fゆらぎ」画像である。

図 28 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。

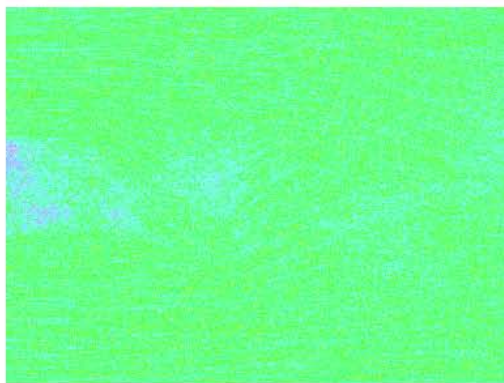


-3.4 1.4
(a1)



白 : 1/f 周波数
(b1)

流速 0.16m/s



-2.6 1.5
(a2)



白 : 1/f 周波数
(b2)

流速 0.29m/s

図 28 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

3.4 心理学データにおける時間領域周波数解析

これまで動画像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。

3.4.1 アートセラピー

アートセラピーでは、意識下に抑圧されていた様々な問題について言語を介さずに表現することができ、無意識の存在をあるがままに表出し、無意識と意識の橋渡しをする[16]。芸術的または創造的媒体を通じて人間のイメージや表象機能の持つ自己治癒力を導きだすセラピーである[17][18]。

アートセラピーの目的は下記のように示される。

- ① 作品をクライアントとの関係を強化する媒体として用い、相互の感情交流を促進させる。
- ② 言語では表現しにくい、患者の問題点を把握し、それを明確に表現する。
- ③ 表現行為それ自体がカタルシス効果を有する。
- ④ 心の中の葛藤や抑圧された感情を、イメージを通じて解放させ、カタルシスの効果（以前に抑圧された経験に付随していた情緒を発散する）を引き起こす。
- ⑤ 患者の心を自らの内界に向けさせ、洞察を得させる。
- ⑥ 自己実現、自己完成への道を開く。

対象とする分野は、描画療法・音楽療法・心理劇・ダンスセラピー・箱庭療法など実に広範な領域に渡っている。

適応可能な対象は、身体に障害を持つ人・知的障害を持つ人・高齢者・心の問題を持っている人・ストレスを感じている人など多種多様である。

3.4.2 描画療法

描画療法とは、描画を媒介として心身の問題を癒したり、治癒したりするものである[19]。描画は音楽などとは異なり記録に残りやすいため心の記録を追いやすく、また、人は幼少期より描画行為を経験しているため親和的な手法である。描画は、描くことそれ自体が記録的な意味を持っており、人間の心の内界を伝える記録としての役割が大きい。意識下に抑えられていた心の問題が、手を自由に動かすという一種の身体運動である描画により、知性化を経ずに表現されやすいと考えられている。

3.4.3 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]。

カラー画像の固有パターンは、画像中の R 成分の強度値、G 成分の強度値、B 成分の強度値で与えられ、1 画像に対して 3 組得られる。R 成分分布を I_R とすると、

$$I_R \in R_k \quad (27)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, m \times n$$

で与えられる。次に R 成分分布 I_R をダイナミックレンジ D の分布に正規化した正規化 R 成分分布 I_R^D を式(28)で定義する。Round[*] は括弧内の値を整数化する演算、Max[*] は括弧内の集合における最大値の要素を求める演算を示す。

$$I_R^D \in \text{Round} \left[D \times \frac{R_k}{\text{Max}[I_R]} \right] \quad (28)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, m \times n$$

次に、式(28)で求められたダイナミックレンジ D の正規化 R 成分分布 I_R^D において 1 から D までの数値の出現頻度を求めヒストグラム化する。Count[* , p] は括弧内の集合における数値 p の個数を数える演算である。

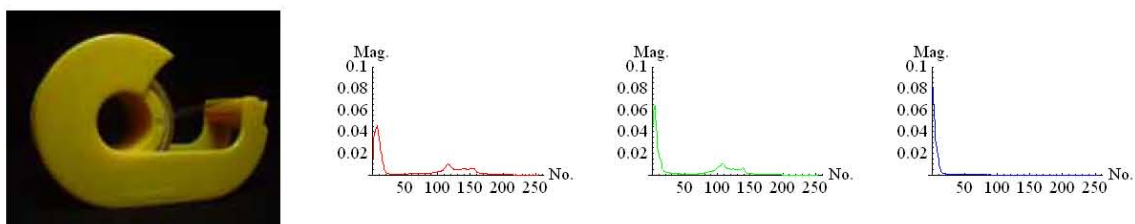
$$E_R \in \text{Count}[I_R^D, p] \quad p = 1, 2, 3, \dots, D \quad (29)$$

式(29)で求められた E_R を R 成分固有ベクトルと言う。G 成分、B 成分についても同様に固有ベクトルを算出する。固有パターンを E とすると固有パターン E は R 成分固有パターン、G 成分固有パターン、B 成分固有パターンの 3 個の固有パターンの集合からなり式

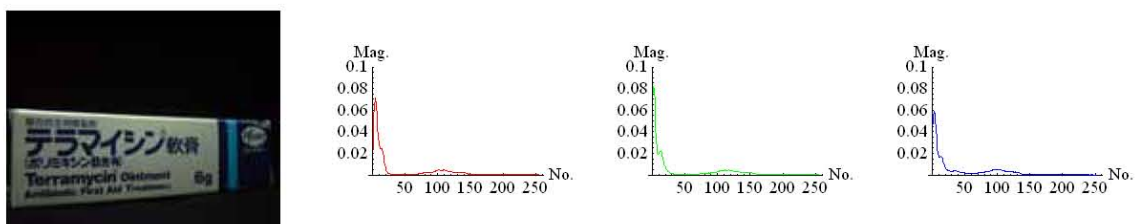
(30)で与えられる. モノクロ画像の場合, モノクロ画像の固有パターンは 255 次のベクトルとなる.

$$E = [E_R, E_G, E_B] \quad (30)$$

図 29 に静止画像の固有パターンの一例を示す. 図 29 に示すように画像はそれぞれ独自の固有パターンを持つことが判る.



(a) カラー供試画像 1



(b) カラー供試画像 2

図 29 静止画像の固有パターン
左：供試画像，右：固有パターン

3.4.4 対象者と描画



(a) クライエントの描画 No.1



(b) クライエントの描画 No.2

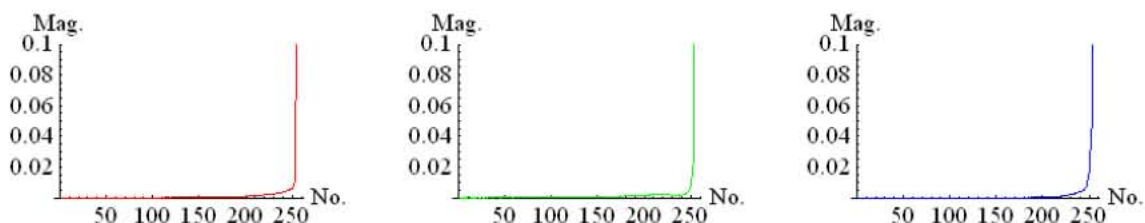
図 30 描画

対象者はいわゆるバーンアウト（燃え尽き症候群ともいわれ、クライアントは過剰適応の状態にあり、過度で持続的なストレスに対処できずに、張りつめていた緊張が緩み、意欲が急速に低下してしまったときに表出される極度の身体疲労と感情の枯渇に関する症状である）の症状を呈したクライアントの自由画（用紙や描画道具などについて特に指定はなく好きな絵を描く。自由画を描くという行為は、自分で題材を選んで自分の手で描くという主体的行為であるため、他の投影法よりも防衛的になりやすい傾向がある）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 30 に示す。

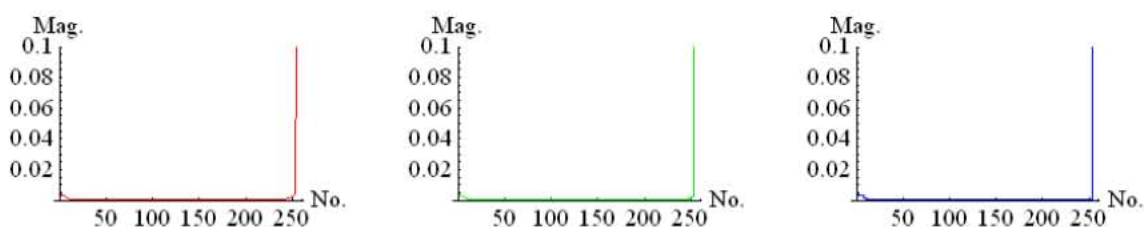
3.4.5 時間領域周波数解析

まず、図 30 の描画から得られた固有パターンを図 31 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式(30)に示すように時系列に並べ、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。



(a) クライエントの描画 No.1



(b) クライエントの描画 No.2

図 31 固有パターン

3.4.6 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・パワースペクトラムを計算する。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、ゼロに近いほどランダムノイズであることを意味する。

図 32 は、図 30 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。

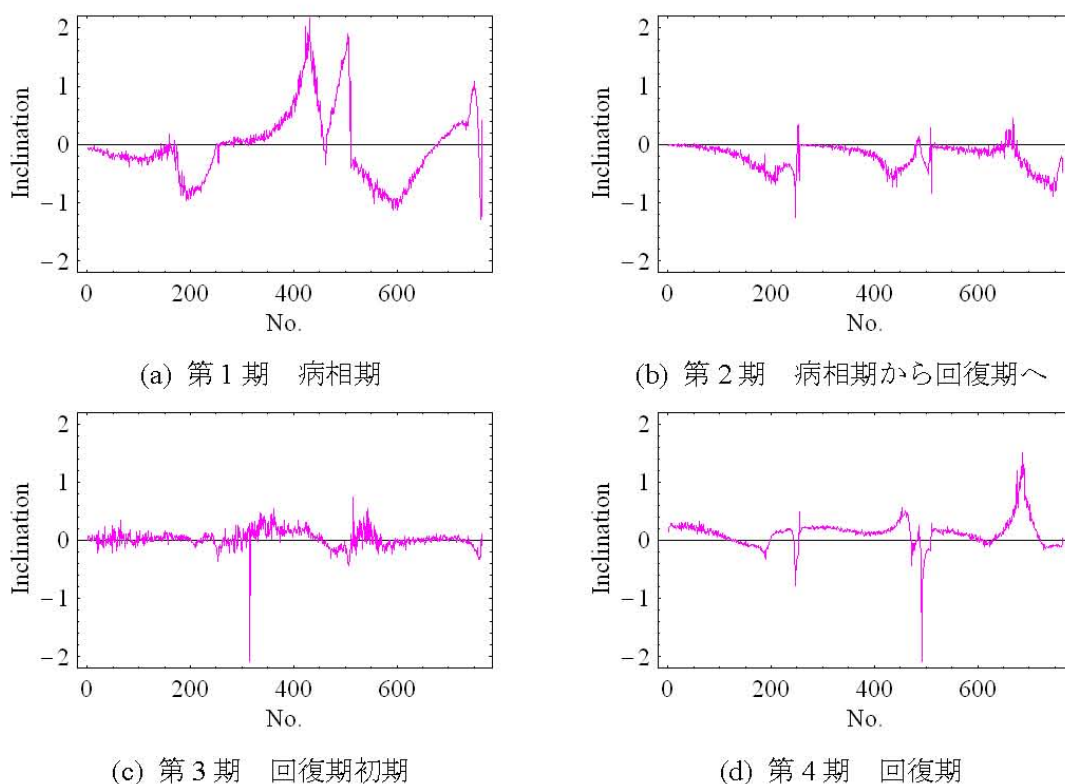


図 32 時間領域周波数特性

第4章 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 17(b2)より IH 調理器で鍋を熱することで、水の表面上に多くのゆらぎ成分が存在していることが判る。これは、IH 調理器で鍋を熱することにより、熱は周囲に逃げることなく鍋全体を熱するので、熱が直接水に伝わりこのように水の表面上にゆらぎ成分が観察されると考えられる。また、図 17(b3)よりアルコールランプでビーカーを熱することで、ビーカーと接している水の部分にゆらぎ成分が見られる。これは、先程の IH 調理器と比べ熱伝導率が低く多くの熱がビーカーの周囲に逃げてしまうので、熱が直接水に伝わらず、ビーカーの側面から間接的に熱が水に伝わるので、ビーカーと接している水の部分にゆらぎ成分が生成されると考えられる。

また、図 17, 19 から、融解、蒸発、凝固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次の三点を挙げる。

- ① 氷のうの中に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。
- ② 電気式の床暖房など電源自体にゆらぎ成分を持たせることにより、心地良い暖かさを得ることができるのではないか。
- ③ 炭火焼のようなゆらぎ成分を持つ燃焼を加熱調理器で模擬することによって、より美味しい料理ができるのではないか。

次にスポーツ動画像の時間領域周波数解析では、ゴルフスウィング動画像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 22, 23 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でき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微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。

また、図 22(a), 23(a), 24(a)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。これは、体全体ではなく上半身のみでドライバースウィングをしていると推定される。さらに図 22(b), 23(b)よりフーリエスペクトラム分布が上半身から下半身までと体全

体に観察され、高周波成分においてクラブの軌跡が顕著に表れていることが判る。これは、スウィング時のバランスのコントロールが良く、スウィング時においてクラブがコンスタントな加速に入り大きな運動量を作り出す動作を示しているためと考えられる。図 24(b)のゴルフクラブの軌跡より、ゴルフクラブの軌跡が円形を描き等間隔にゴルフクラブの軌跡が表れており、そしてボールを打つ瞬間にはゴルフクラブの軌跡の間隔が狭くなっていることが判る。これは、最大かつ正確な打撃の発現のためボールを打つ瞬間に狙いを定めていることが推定される。

PIV データにおける時間領域周波数解析では、図 28 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 32 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 32(a)に示す第 1 期は病相期（京都府精神保健福祉総合センター 心の健康のためのサービスガイド [<http://www.pref.kyoto.jp/health/index.html>] によると、うつ病の治療を始め、「不安・いらいら」「ゆううつ」が前景に出る時期、自責感、自己否定感、絶望感、不安感焦燥感などの感情に振り回されている時期）である。この時期クライアントは過剰適応であった自分の状態に気付き始め、不安や焦りを感じた時期である。また、青成分においては、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判る。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判る。

図 32(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。回復期には不安感などは減少するが、体調の不良ややる気が出ないなどの症状を示す。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判る。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 32(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。回復期は周囲からは良くなったと思われていており、焦燥感も減少しているが、楽しさが実感できなかったり、やる気のなかったり、集中力がなかったりという問題を抱えている時期でもあ

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。この時期には辞表を提出することを考えており、仕事自体にはやりがいを感じているクライアントにとって仕事を辞めることを受け入れることはかなり困難であることが判る。

最後の図 32(d)の第 4 期では、緑成分において 1/f ゆらぎが見られるが、緑成分は、心身の疲れを癒し、回復へと導いてくれる。また、安心感やバランス感覚と結びついている。さらに、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。さらに、新たに人生に対する希望が生まれていることが考察される。

第5章 結論

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はく離領域内に「 $1/f$ 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。その後の回復期に於けるが、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判る。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] 武者利光: ゆらぎの発想, NHK 出版, 1994.
- [10] 小杉山格, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 可視化画像の幾何学的複雑さ抽出の試み, 可視化情報学会誌, Vol.25, No.1, pp.67-70, 2005.
- [11] 西森秀稔: 相転移・臨界現象の統計物理学, 培風館, 2005.
- [12] 寺西正晃, 齋藤兆古: 動画像の時間領域周波数解析の応用, 第 15 回 MAGDA コンファレンス in 桐生 講演論文集, pp.71-76, 2006.
- [13] Clayne R.Jensen, Gordon W.Schultz 著, 波多野義郎, 小林義雄訳: スポーツ動作の科学的分析 -応用キネシオロジー-, 泰流社, 1977.
- [14] 日本機械学会: JSME テキストシリーズ 流体力学, 丸善, 2005.
- [15] 牛島央智, 李鹿輝, 齋藤兆古: 円柱後流における 1/f 周波数成分の可視化, 可視化情報学会誌, Vol.26, No.1, pp.263-264, 2006.
- [16] 徳田良仁, 村井靖児: 講座サイコセラピー 第 7 巻 アートセラピー, 日本文化科学社, 1988.
- [17] 河合隼雄: イメージの心理学, 青土社, 1991.
- [18] 徳田完二, 田中康裕, 渡辺雄三, 織田尚生, 河合隼雄, 多木浩二: 講座 心理療法<3> 心理療法とイメージ, 岩波書店, 2000.
- [19] 日本描画テスト・描画療法学会: 臨床描画研究 XI, 金剛出版, 1996.

研究業績

- [1] 2005 年度 可視化情報学会第 33 回可視化情報シンポジウム
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”
- [2] 2005 年度 法政大学計算科学研究センター研究報告
寺西正晃, 早野誠治, 齋藤兆古, “動画像の時系列周波数特性によるゆらぎ解析”
- [3] 2006 年度 可視化情報学会第 34 回可視化情報シンポジウム
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”
- [4] 2006 年度 第 15 回 MAGDA コンファレンス in 桐生
寺西正晃, 齋藤兆古, “動画像の時間領域周波数解析の応用”
- [5] 2006 年度 法政大学計算科学研究センター研究報告
寺西正晃, 齋藤兆古, “エネルギー変換現象時における $1/f$ ゆらぎ特性の可視化”

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には、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。