

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

寺西 正晃 齋藤 兆古
法政大学大学院工学研究科

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、それぞれ、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、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。

1. はじめに

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と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。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。

自然界の動きは、天体の自転・公転や振り子の周期などに代表されるように、それぞれ固有の周波数特性を持っている。この周波数特性はロウソク炎、人間の動き、風景（波や雲など）にも存在し、「 $1/f$ ゆらぎ」や「 $1/f^2$ ゆらぎ」などと大まかに分類されている。

私たちの身のまわりには、たくさん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、物質の性質が異なる状態を相という。例えば水、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。

筆者等は動光源画像の RGB (Red, Green, Blue) ヒストグラムを用いた「 $1/f$ ゆらぎ」周波数成分の抽出法を提案し、動光源画像より得られた RGB 固有パターンからの「 $1/f$ ゆらぎ」周波数分布の可視化を提案した。

本論文では気化、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。

2. 「 $1/f$ ゆらぎ」とは

「 $1/f$ 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。

視覚的に判りやすくするために、よく行われる方法は、フーリエ・パワースペクトラム対周波数の両対数グラフを描き、描かれる線図の傾きによってゆらぎの種類を大別する方法である。Fig.1 にフーリエ・パワースペクトラムの一例を示す。

Fig.1 において、直線の傾きが 0 の場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急になる程単調な信号である。そしてホワイトノイズと単調な信号の中間的な信号で傾きが約 -1 の場合を「 $1/f$ ゆらぎ」と呼び、人間が心地よいと感じる信号と言われる。

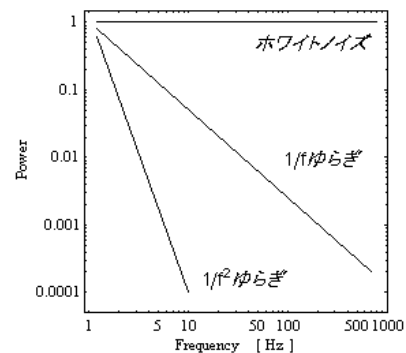


Fig.1 Typical Sample Power Spectra

3. 光源のゆらぎ成分の可視化

デジタルビデオカメラにより撮影した発光現象を計算機に取り込み、発光現象に伴って発生する RGB 成分のゆらぎを抽出する。計算機に取り込まれた動画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。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。本章ではこれらの光源からゆらぎを抽出し可視化する。

3.1 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 (R)、緑 (G)、青 (B) の濃淡で表現されている。また、画像はスクリーン上で 2 次元平面状の画素の集合であり、

$$\begin{aligned} \text{image} &\in \text{pixel}_{i,j} \\ \text{pixel}_{i,j} &\in R_k, G_k, B_k \\ i &= 1, 2, 3, \dots, m \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad k = 1, 2, 3, \dots, m \times n \end{aligned} \quad (1)$$

として表すことができる。

3.2 ゆらぎ成分の可視化

3.2.1 時間領域周波数特性

ここでは、動画の光源部分からゆらぎ成分を可視化する方法を例題を用いて述べる。動画のゆらぎ成分の可視化方法としては最初に動画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、Fig.2 に示したろうそく炎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。Fig.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。Fig.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。



Fig.2 Original Image

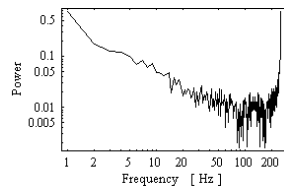


Fig.3 Power Spectrum of Fluctuation (R Component)

3.2.2 累乗近似

Fig.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 Fig.3 に示したグラフは式(2)で表される。

$$f = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n] \quad (2)$$

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研究では累乗近似を採用し、直線に回帰させる。すなわち、式(3)により回帰直線の傾きを求める。

$$\begin{aligned} X_i &= \log i & Y_i &= \log y_i \\ a &= \frac{n \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n Y_i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^n Y_i \sum_{i=1}^n Y_i} \end{aligned} \quad (3)$$

3.2.3 ゆらぎ周波数成分の可視化

次に Fig.2 に示したろうそく炎の動画を構成するフレーム画像の 1 画素単位で時系列方向に解析し、「1/f ゆらぎ」周波数分布を可視化する。

Fig.4 はろうそく炎の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モノクロ画像、すなわち、ろうそく炎の動画のゆらぎ周波数分布の可視化画像である。Fig.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。Fig.5 はろうそく炎の動画からろうそく炎の「1/f ゆらぎ」部分を抽出したフレーム画像の例である。

Fig.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そく炎の動画における「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。

4. 相転移現象時におけるゆらぎ成分の可視化

本章では相転移現象として、氷の融解と水の蒸発の動画から 1/f ゆらぎ周波数空間分布特性の可視化を試みる。

4.1 物質の三態

Fig.6 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。

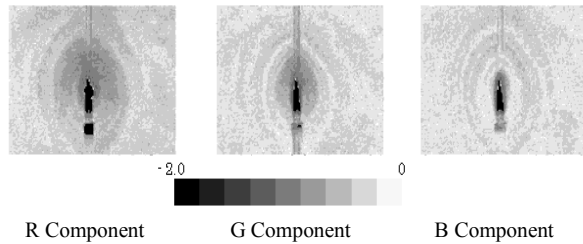


Fig.4 Fluctuation Frequency of Candle Fire

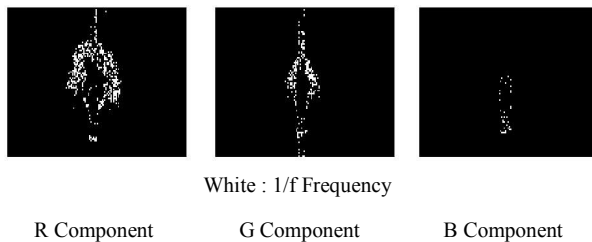


Fig.5 1/f-fluctuation parts of Candle Fire

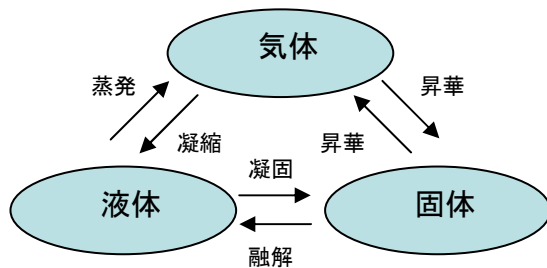


Fig.6 Three states of a material

4.2 実験

4.2.1 実験器具

本実験では、画像の撮影に赤外線カメラを用いた。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 : OFF、GAIN : LOW として撮影を行った。また、温度を測るためにデジタル温度計 (TX1002 横河 M&C 株式会社製) を用いた。

4.2.2 撮影

Figs.7、8、9 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

Fig.7(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。Fig.7(b)に撮影したフレーム画像を示す。黒い部分が氷である。

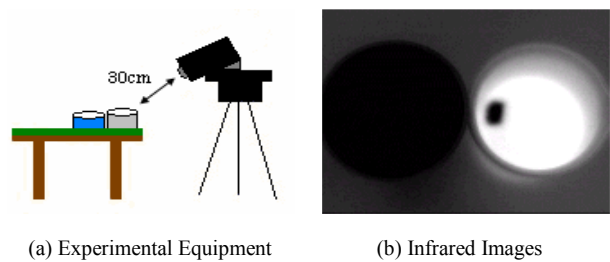


Fig.7 Ice Melting by Boiled Water

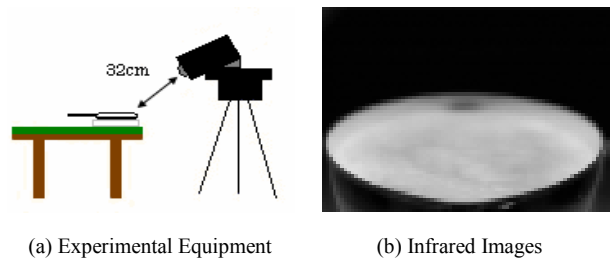


Fig.8 Water Vaporization Heated by IH

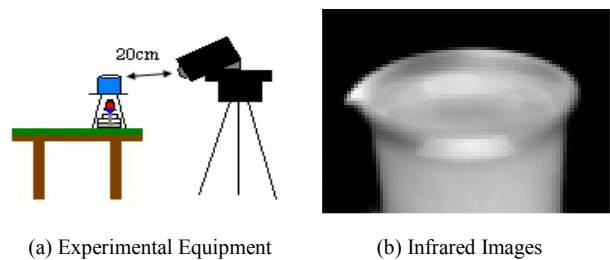


Fig.9 Water Vaporization Heated by Alcohol Banner

b) 蒸発

Fig.8(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°C である。撮影したフレーム画像を Fig.8(b)に示す。

また、Fig.9(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°C である。撮影したフレーム画像を Fig.9(b)に示す。

4.2.3 時系列周波数解析

Figs.10(a1)-(a3)はそれぞれ Figs. 7(b)、8(b)、9(b)に示した氷の融解時と水の蒸発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モノクロ画像である。これらが「1/f ゆらぎ」周波数分布の可視化画像である。Figs.10(b1)-(b3)は Figs.10(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、Fig.10(b)は相転移状態における「1/f ゆらぎ」画像である。

Fig.10 から、融解、蒸発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。

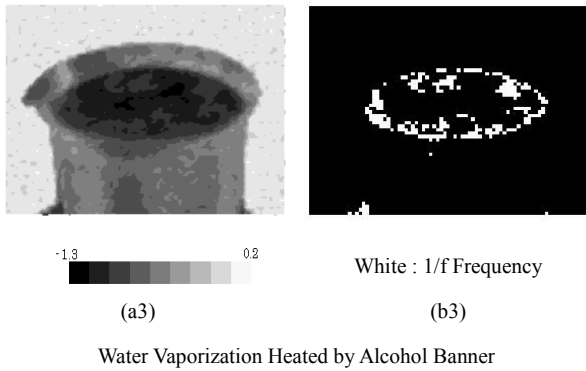
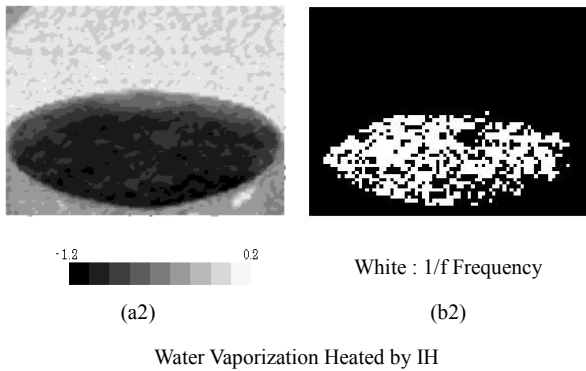
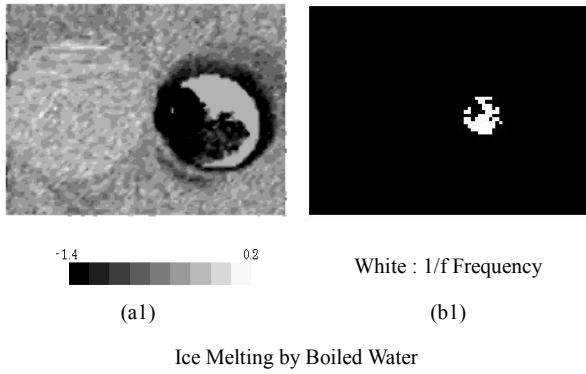


Fig.10 1/f-fluctuation Frequency Distributions

Left: 1/f-fluctuation Frequency,
Right: Frequency Fluctuation Distribution

5. まとめ

本論文では気化、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、物質の融解や蒸発時には「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。

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年
- [2]西森秀稔,"相転移・臨界現象の統計物理学",2005年
- [3]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 (2005) pp.75-78.
- [4]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 (2003) pp.95-98.
- [5]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 (2004) pp.223-226.

キーワード.

「1/f」ゆらぎの可視化、エネルギー変換過程、相転移

Summary.

Visualization of 1/f Fluctuation Characteristic in Energy Exchanging Processes

Masaaki Teranishi Yoshifuru Saito
Graduate School of Engineering, Hosei University

Frequency analysis of the natural phenomena more or less exhibits a time fluctuation. Precise analysis of this fluctuation leads to the famous “1/f fluctuation” characteristic that gives mental as well as psychological relaxation effects to human.

In the present paper, we focus on this “1/f fluctuation” characteristic observed in natural phenomena, in particular irreversible energy exchanging processes. As a result, it is found that a phase transition phenomenon such as a state changing to liquid from a solid accompanying irreversible energy exchanging process may exhibit “1/f fluctuation” characteristic.

Thus it is revealed that any of the nonlinear phenomena accompanying irreversible energy exchanging processes may exhibit the 1/f fluctuation characteristic.

Keywords.

Visualization of 1/f fluctuation, Energy Exchanging Processes, Phase Transition