

1/f ゆらぎの可視化

齊藤 兆古 (法政大学), 宮坂 総(法政大学), 加藤 千恵子(東洋大学)

Visualization of 1/f Fluctuation Yoshifuru SAITO, Soh MIYASAKA and Chieko KATO

ABSTRACT

1/f fluctuation analysis of the non-life-bearing, life-bearing and self driven particle targets is carried out. As a result, it is clarified the followings. State transition, e.g., melting an ice to water, of all the non-life-bearing targets exhibits 1/f fluctuation frequency characteristics. Namely, all the non-life-bearing materials exhibit 1/f fluctuations when changing their state aspect such as solid, liquid and gas. On the other side, 1/f fluctuations can be observed the creative works, e.g., artistic paints when transitioning mental situation from depression to mania of life-bearing target, i.e., his or her. In the other words, a life-bearing target typically human exhibits 1/f fluctuation characteristics via his own creative work when changing his mental situation.

Keywords: Visualization, 1/f Fluctuation, Healing, Artistic Paint Works

1. 緒 論

約 30 年近く前になるであろうか、毎日々計算機で非線形磁化特性問題を解析していた。この問題は依然として計算電磁気学で解決できていない問題であり、汎用電磁界解析パッケージが持つ最大のウイークポイントである。1981 年 9 月に米国シカゴで開催された最初の IEEE 主催 COMPUMAG (計算電磁気学に関する国際会議) で自分なりの非線形磁化特性モデルの提唱と準 3 次元非線形磁界解析結果を発表して以来、非線形問題は「力仕事」と言う先入観が筆者(齋藤)のトラウマであった。

非線形問題のイメージが変わったのは 2007 年の夏休みであった。某工務店からの依頼で居住空間に於ける直火使用に拠る環境効果の調査をきっかけとして始めた「1/f ゆらぎ」抽出に関する研究から「1/f ゆらぎ」生成の研究へ移行するために、チューリング・パターンに関する状態反応拡散系、「箱玉理論」によるソリトン波、「超離散化」、セルラー・オートマトン (Cellular Automaton)、「渋滞学」を少しかじり始めてから非線形系解析のイメージが変わった^{1,2)}。

非線形系の解析は計算機支援の力仕事または超幾何級数で代表される複雑な関数を用いた解析解から有限差分を基礎とする「超離散化」などの離散数学と 1984 年に S.Wolfram によって提唱された「セルラー・オートマトン」による複雑系の物理へ繋がったと考える。異方性を含めた非線形磁化特性問題などは案外「渋滞学」的なセルラー・オートマトンモデルが解決の決め手となると予

想される。これは「渋滞学」で使われる「自己駆動粒子 (Self-driven particle)」モデルが磁性体を構成する磁区モデルに対応し、Cellar Automaton モデルそのものが異方性を前提としているためである³⁾。

非線形系解析の理論的背景は 21 世紀に入ってからかなり体系的に系統化され、その結果、非線形系に特有な「1/f ゆらぎ」は化学反応系の相転移 (Phase Transition) 時に生ずることが解明された⁴⁾。本稿では、非生物 (物質) に於ける相転移 (Phase transition、例えば氷が溶けて水へ変化やガスが燃焼によって酸化化合物へ変化) 時に「1/f ゆらぎ」現象が伴う実験的検証例を述べる。

次に、生物系に於ける「1/f ゆらぎ」現象は精神・心理的な側面が投影された行動や行為の結果に表れることを示す。具体的な例として、精神・心理的变化 (Mental / Psychological transition : 例えば鬱状態から回復へ精神・心理的状态が変化) 時の人間が描いた絵画などに「1/f ゆらぎ」現象が生ずることを述べる。

非生物と生物の中間的な物として自己駆動粒子の「1/f ゆらぎ」について述べる。自己駆動粒子とは、例えば高速道路を走行中の自動車などが具体的な例であり、自己駆動機能を持つがその行動・動作が制限されるものを言う。自己駆動粒子モデルを磁性体の磁区挙動に適用し、磁性体が磁気飽和へ至る状態遷移 (State transition) 時に「1/f ゆらぎ」現象が生ずることを示す。同様に自己駆動粒子モデルの例として、一様な層流からカルマン渦へ変化する状態遷移時に「1/f ゆらぎ」現象が生ずることを示す。

P01-006

纏めれば、非生物では相転移時、生物では精神・心理的变化時の行為や行動の結果、そして、非生物と生物の間である自己駆動粒子モデルでは状態遷移時にそれぞれ「1/f ゆらぎ」現象を生ずることを述べる。

最後に、「1/f ゆらぎ」は何故に「癒し (Healing)」効果を与えるのかを考える。癒し効果の実験的検証は脳波のアルファ波が増加することで検証されるが、アルファ波が増加する理由は、「1/f ゆらぎ」を含有する自然現象、例えば灯された蝋燭などを観察することで人間の「1/f ゆらぎ」状態が促され(共振し)結果として「癒し」へ繋がる精神・心理的变化を喚起する点にあると考えられる。

2. 1/f ゆらぎ解析

2.1 1/f ゆらぎ

任意の周期関数 $f(t)$ をフーリエ級数で表現すると、

$$\begin{aligned}
 f(t) &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i \cos(i2\pi ft) + b_i \sin(i2\pi ft)] \\
 &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \cos \left[2\pi i f t - \tan^{-1} \left(\frac{b_i}{a_i} \right) \right] \\
 &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \cos \left[2\pi i f t - \tan^{-1} \left(\frac{b_i}{a_i} \right) \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

となる。離散値系フーリエ変換では、定数項と余弦波の項が実部、正弦波の項が虚部へそれぞれ対応する。スペクトラムの振幅は実部と虚部のノルムとなる。

(1) 式のパワースペクトラムの振幅 c_i が周波数 if に対して反比例する信号を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。フーリエ・パワースペクトラム対周波数の関係を両対数グラフに描き、描かれた線の傾きによってゆらぎの種類を大別する。Fig.1 にフーリエ・パワースペクトル対周波数のグラフの一例を示す。

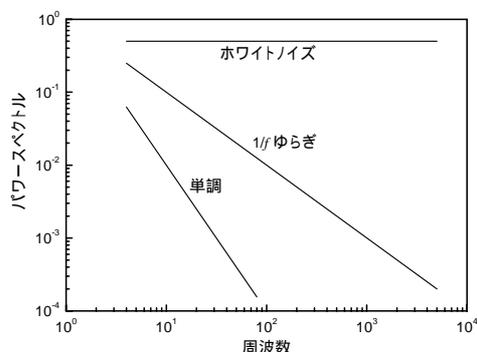


Fig.1 Definition of 1/f Fluctuation

Fig.1 で、直線の傾きが 0 の場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急なほど単調な信号となる。そして、ホワイトノイズと単調な信号の間で直線の傾きが -1 となる場合を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ⁵⁾。

2.2 相転移時における 1/f ゆらぎ

(a)融解 Fig.2 に示すように赤外線カメラを用いて、氷の融解状態を撮影した。フレームレートは 1 秒間に 30 フレームである。

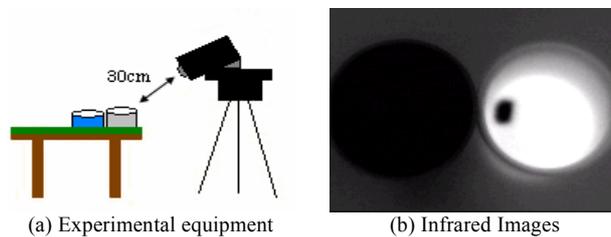


Fig.2 Ice Melting by Boiled Water

Fig.2(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、氷の融解状況を 30 秒間撮影した実験の模式図である。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。

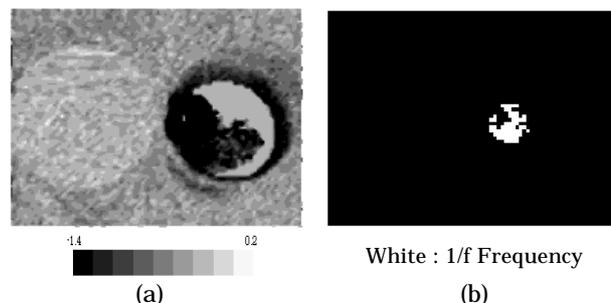


Fig.3 1/f-fluctuation accompanying ice melting

Fig.2(b)は撮影したフレーム画像例を示す。黒い部分が氷である。Fig.3(a) は Fig. 2(b)に示した氷の融解時の動画画像を構成する各フレームの画素値を時系列(フレーム)方向に離散値系フーリエ変換し、各周波数に対するフーリエ・パワースペクトラムから求めた周波数対振幅の傾きを濃淡画素値とする可視化画像である。Fig.3(b)は Fig.3(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 の画素値を 1 とし、その他の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.3(b)は相転移状態における「1/f ゆらぎ」可視化画像であり、融解時の相転移時において、「1/f ゆらぎ」成分が存在することを示している⁴⁾。



Fig.4 1/f fluctuation accompanying gas burning

P01-006

(b)燃焼 Fig.4 はガスバーナの燃焼時において空気とガスが化し酸化化合物へ相転移する黄色部分に「1/f ゆらぎ」が生じていることを示している⁴⁾。

2.3 精神・心理的転移における 1/f ゆらぎ

(a)失恋 Fig.5 はゴッホが失恋した時期に描いた絵画の1例を示す。デジタル画像は光の三原色(赤 R, 緑 G, 青 B)からなっている。1枚のカラー画像は R,G,B 成分が構成する3枚のモノクロ画像からなっている。RGB 各成分画像はそれぞれ各成分の強度分布が0から255の8ビットのレンジを持つ画素値で描かれている。それぞれのRGB成分画像のRGB強度(画素値)のヒストグラムを作成する。RGB成分画像それぞれの強度分布ヒストグラムをRGB固有パターンと定義する。このRGB固有パターンはそれぞれの絵画によって幾何学的形状が変化するにも拘わらず、色彩情報で絵画の特徴変化を吟味可能とする。



Fig.5 Example of Vincent van Gogh's paint work when losing sweetheart.

2.3 精神・心理的転移における 1/f ゆらぎ

(a)失恋 Fig.5 はゴッホが失恋した時期に描いた絵画の1例を示す。

ゴッホの個々の作品それぞれに対する RGB 固有パターンを時系列に並べ、同一強度(画素値)に対して時系列方向に離散値系フーリエ変換を適用し、フーリエ・パワースペクトラムを得る。フーリエ・パワースペクトラムの周波数に対する変化からゆらぎ成分を抽出する。その結果 RGB 成分の0から255までの画素値の時系列の変化率に「1/f ゆらぎ」が存在することを示す。横軸に R,G,B 成分の画素値、縦軸にフーリエ・パワースペクトラムの傾きを取り、赤、緑、青成分画に対するゆらぎを描いた Fig.6 は縦軸の値が最も-1に近い値を取る B(青)成分のゆらぎを示す。

青は「寒冷」「冷淡」「陰気」の象徴としてよく使われている。さらに、原点・原初の色であり、創造するクリエイティブなエネルギーであり、創造して物を互いにコミュニケーションするエネルギーである。また、青の中でも画素値が50程度の(淡い)部分に最も「1/f ゆらぎ」に近い揺らぎが見られる。淡い青の花として勿忘草が上げられる。この花の花言葉は「私を忘れないでください」。

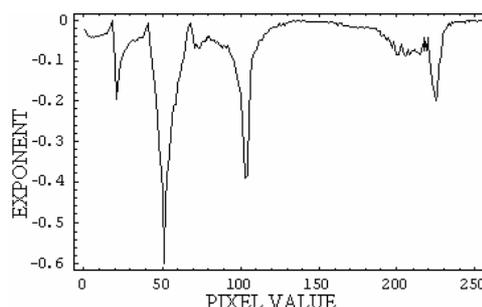


Fig.6 Blue color component 1/f fluctuation derived from time sequentially arranged Blue color histograms of the Paint Works by Vincent van Gogh

「真実の愛」である。このように青には、マイナスのイメージや失恋のイメージがある。

ゴッホはこの作品を描いた時期に失恋している。好きな人の両親に自分の気持ちが真剣であることを伝えるため、ゴッホは左手を蝨燭の炎にかざすという自傷行為を行っている[5]。このため、この時期に描いたゴッホの作品に失恋時の心理状態が反映されていると考えられる。また、弟と画家としての将来について話し合い、自分が画家として生計を立てられるか否かを悩んでいる様子が伺える時期であり、さらに、水彩画の道具一式を尊敬する画家から与えられ、絵画の方向性を変えようとしている時期である。すなわち、画家としての原点に帰り、創造するクリエイティブなエネルギーを生み出そうとしている時期であり、当に精神・心理的な側面が変化状態にあると言えよう⁵⁾。

Fig.7 はゴッホが精神的に深く病んでいる時期に描いた絵画の1例である。この時期、彼は友人のゴーギャンヘコップを投げつけたり、耳を切って売春宿へ送りつけたりなど奇矯な振る舞いをした Fig.8 は Fig.6 と同様に RGB 色情報の中で 1/f ゆらぎが観測された B(青)成分を示す。

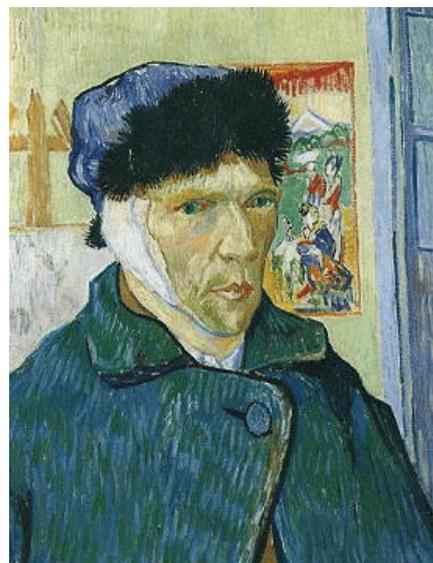


Fig.7 Example of Vincent van Gogh's paint work when diseasing mental situation.

P01-006

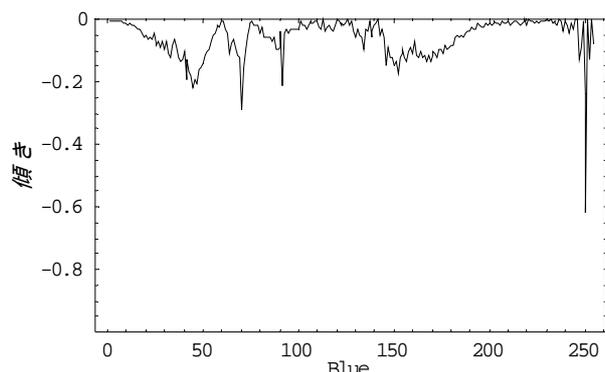


Fig.8 Blue color component 1/f fluctuation derived from time sequentially arranged Blue color histograms of the Paint Works by Vincent van Gogh

なお、ゴッホの絵画の RGB 色情報を作品が描かれた時代順に単純に時系列で並べた可視化情報から周波数特性を計算しても 1/f ゆらぎ特性は可視化できなかった。ゴッホの精神的葛藤が奇矯な振る舞いとして判明している時期の絵画を時系列データとして解析してはじめて 1/f ゆらぎが可視化できた。

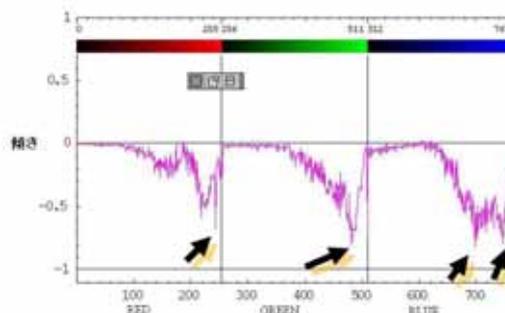
(b)鬱病 Fig.9 は鬱病患者が回復期に描いた絵である。この患者は極めて真面目で仕事熱心な地方公務員から外資系の企業へ転職した方である。しかし、転職後、彼は仕事に真面目すぎるために鬱病に侵された。Fig.9 は彼が鬱病から回復期において描いた一連の絵を纏めて示している。



Fig.9 Paint works by a psychotic depression patient.

Fig.9 の絵が描かれた順番(時系列)に並べて Figs.6,8 と同様に RGB 固有パターンを抽出して R(赤),G(緑),B(青)色成分強度(画素値)ヒストグラムから 1/f ゆらぎ求めた結果を Fig.10 に示す。

明らかに精神・心理的变化時(回復初期)に描いた絵は 1/f ゆらぎを赤、緑、青成分全てに呈していることが判る。すなわち、回復期に入ると何れの色成分でも「1/f」ゆらぎが観察される。特に安らぎや癒しを示す緑において「1/f ゆらぎ」が見られ、青成分においても「1/f ゆら



Arrows show the 1/f fluctuation points

Fig.10 RGB 1/f fluctuation parts derived from paint works of a patient when recovering psychotic depression disease.

ぎ」が存在し、沈静を求めている様子が判る。

鬱病患者の描いた絵画に於いても単純に描かれた時期順に並べて時系列データとして周波数解析を行っても 1/f ゆらぎは可視化できなかった。患者の症状の変化時に描かれた一連の絵画から 1/f ゆらぎが可視化できた。

2.4 状態転移における 1/f ゆらぎ

(a)磁性体の磁気飽和 ビッター法による磁壁可視化の原理について述べる。試料表面の磁壁を観察するために、反射型の金属光学顕微鏡を用いる。試料台に薄板状強磁性体を載せ、強磁性体の表面歪みを電界研磨によって取り除いた研磨面にスポットで磁性コロイド溶液をたらし、カバーガラスを載せて観察する。強磁性微粒子(γ 酸化鉄)のコロイド液を強磁性体表面につけるとコロイド液内に分散していた酸化鉄の微粒子が、磁壁付近の急峻な磁化変化に起因する漏れ磁束の急激な勾配に反応し、表面近くの磁壁の観測ができる。この引き付けられた微粒子を光学顕微鏡で観察する。



Fig.11 Experimental device for magnetic wall observation.

Fig.11 は磁壁移動の可視化に使用した実験装置を示す。励磁コイルを使って周波数 1[Hz]の交流磁界を観測対象に印加する。顕微鏡は KEYENCE 社の HD 中倍率ズームレンズ VH-Z75 に高精細クイックマイクロスコープ VH-5000 を接続したものである。軟鉄の動的磁壁移動を動画像として記録した。Fig.12 は観測したフレーム画像の例を示す。

P01-006

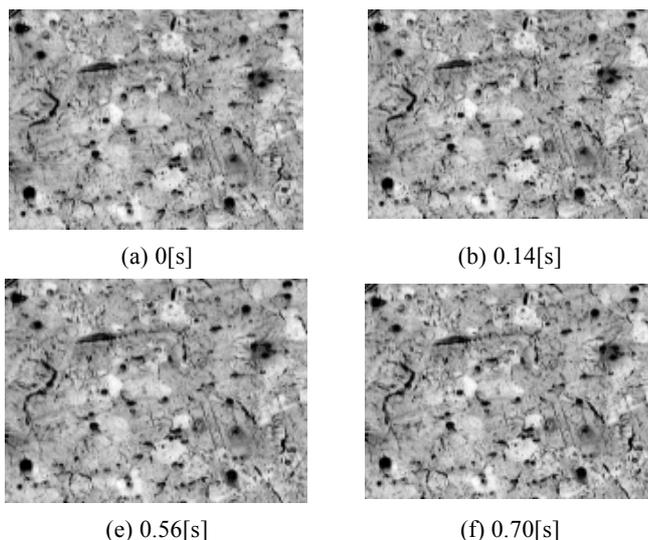
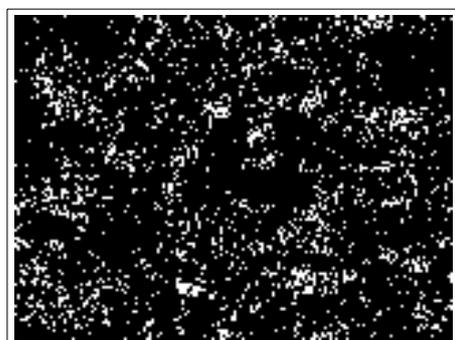


Fig.12 Frame images of magnetic wall. Sample: soft iron.

飽和磁束密度は最も高いが鉄損も大きい軟鉄における 1/f ゆらぎ周波数成分（厳密には周波数 f に対して-0.95 乗から-1.05 乗）分布を調べた結果を Fig.13 に示す。Fig.13 は周波数 f に対して-0.95 乗から-1.05 乗を 1, その他を 0 と二値化して示している。白色の点が 1/f ゆらぎ周波数で運動する磁壁部分を示す。尚、1/f ゆらぎ部分の抽出は Figs.3,4 と同様な方法で行った。

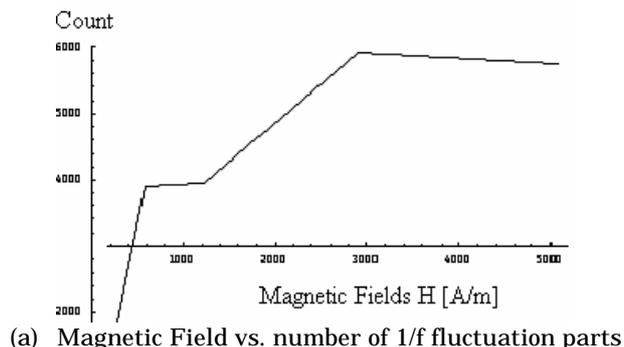


White : 1/f frequency

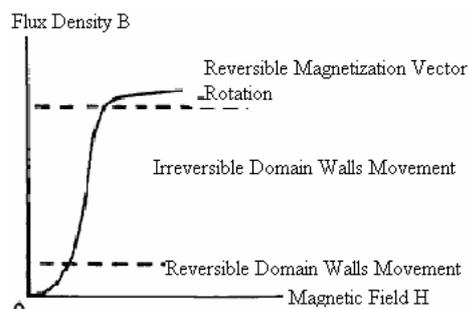
Fig.13 Extracted 1/f frequency fluctuation parts in soft iron.

Fig.13 で、励磁電流の振幅を変更して白色部で示されている 1/f ゆらぎ部分の画素数をカウントした。この結果を励磁磁界 H 対個数として図 15(a)に示す。図 15(b) は典型的な磁気飽和曲線である。図 15(a)と(b)を比較することで以下のことが判明した。可逆的磁壁移動範囲では、1/f ゆらぎ部分は少ないが非可逆的磁壁移動範囲で 1/f ゆらぎ部分が劇的に増加する。しかし、可逆的回転磁化範囲へ入ると 1/f ゆらぎの個数は飽和し、逆に磁界 H の増加にも拘わらず減り始めることが判る⁸⁾。これは磁性体の磁化過程が磁壁移動から各磁区内の磁化ベクトルの回転へ状態遷移時に「1/f ゆらぎ」が最大となることを意味している。この関係は「渋滞学」に於ける自由走行対密度の関係に類似している³⁾。

(b)流体 Fig.15 は層流とカルマン渦間の境界に生成さ

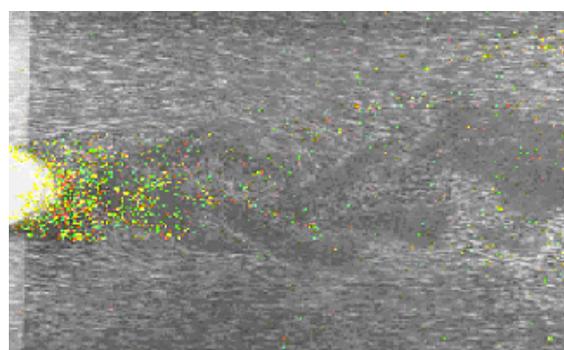


(a) Magnetic Field vs. number of 1/f fluctuation parts



(b) Typical magnetization curve of ferromagnetic materials.

Fig. 14 Magnetic Field vs. number of 1/f fluctuation parts and typical magnetization curve of ferromagnetic materials.



Yellow shows 1/f fluctuation points

Fig.15 1/f fluctuations occur at the boundaries between layer and eddy flows.

れる 1/f ゆらぎを示す⁹⁾。

レイノルズ数 Re が 0~約 3000 の状態では、流れは層流となるが、レイノルズ数が約 3000 を越えると、流れの状態は急激に変化し、大小の渦が入り乱れながら流れる乱流となる。この層流と乱流の境は明らかに状態遷移であり、その結果、層流と乱流の境界で 1/f ゆらぎが観察される。

3.まとめ

非線形系解析の理論的背景は 21 世紀に入ってかなり体系的に系統化され、その結果、多くの非線形特有な事象が明らかにされた。

本稿では、物質の相転移 (Phase transition) 時に「1/f ゆらぎ」現象が伴う実験例としてガスが酸素と化合して

P01-006

酸化物へ変わる相転移時に生成される「 $1/f$ ゆらぎ」と氷が融解する相転移時に生ずる「 $1/f$ ゆらぎ」を示した。

次に、失恋時のゴッホの作品や鬱病患者が回復時に描いた絵の色情報から「 $1/f$ ゆらぎ」を抽出し、生物(人間)における「 $1/f$ ゆらぎ」現象は精神・心理的变化(Mental/Psychological transition)時に人間の行動や行為の結果に表れることを示した。

磁性体の磁気飽和特性へ至る状態遷移時と流れが一樣な層流と渦が生ずる状態遷移境界に「 $1/f$ ゆらぎ」が生成された具体例を用いて、非生物と生物の中間的な物を意味する自己駆動粒子モデルにおいては状態遷移(State transition)時に「 $1/f$ ゆらぎ」が生ずることを示した。

参考文献

- 1) 東京大学ホームページ、<http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/mypapers/rikouJ.pdf>.
- 2) 高橋大輔、超離散化された波、特集/<波の世界>の魅力と数理、早稲田大学ホームページ、<http://takahashi.math.sci.waseda.ac.jp/works/public/03-Surikagaku-478-35-preprint.pdf>.
- 3) 西成活裕、渋滞学の新しい世界、東京大学ホームページ、[http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/](http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/http://soliton.t.u-tokyo.ac.jp/).
- 4) 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, 可視化情報シンポジウム, B108, 2005.
- 5) 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
- 6) 宮坂総, 齋藤兆古, 加藤千恵子, " 動画像の色彩情報可視化とその応用," 第35回可視化情報シンポジウム 工学院大学2007年7月25日, C213, Vol.27, Suppl. No.1 (2007年7月)pp. 227-228
- 7) 加藤千恵子、法政大学学位論文、2007年3月
- 8) 須永高志, 寺西正晃, 齋藤兆古, "ピッター法による可視化磁区画像から周波数特性の抽出," 日本AEM学会誌 Vol. 15, No. 2(2007) pp. 195-200
- 9) 古川裕之、カルマン渦の実験画像、名城大学ホームページ、<http://mech.meijo-u.ac.jp/prof/furukawa/zemi/mj/gazoupage1.htm>