

# 降雪の $1/f$ ゆらぎ現象

山形大学 工学部 / 李鹿輝  
東洋大学 工学部 / 加藤 千恵子  
法政大学 大学院 システムデザイン研究科 / 齋藤 兆古

本稿では、降雪の動画のRGB固有パターン(動画を構成する各フレームの赤、緑および青色成分の強度分布)を抽出することによって、空間的に広がりを持つ画像の時系列方向にそのゆらぎの周波数分布を解析する。人と自然と技術の融合という観点から、降雪の観賞の癒し効果と「 $1/f$  ゆらぎ」周波数成分との関係を明らかにする。

## 1 はじめに

「ゆらぎ」とは物理学では「力、速度、密度、温度、音量、濃淡などの物理量を測定して得る観測値に対して、その統計的に見た平均値の近くで変動する現象」と定義されている。その物理量が空間的、時間的に変化するとき、平均的には一定の周期を示しているように見えるが、正確に測定すると完全に予測できないような「ズレ」が出ている。このズレがゆらぎであり、自然界をはじめ、様々な場でゆらぎ現象が観測できる。たとえばそよ風、風速の変化を分析してみると、「ゆっくりした変化ほど変動の度合が大きく、速い変化ほど変動の度合が小さい」という性質をもっている。その風速の変動の大きさが周波数(一定期間内の同じ振動状態の繰り返し)に反比例すれば、このような変化を「 $1/f$  ゆらぎ」と呼んでいる。心地よさを感じる風は、風速だけではなく、風向も時々刻々変化していて、やはり $f$ 分の $1/f$  ゆらぎのリズムを持っている。

$1/f$  ゆらぎ現象は自然界に多く存在し、たとえば小川のせせらぎや小鳥の囀りなどの心安らくリズムが相当する。また、 $1/f$  ゆらぎは潮騒の音の強弱の他、音楽の強弱やテンポ、絵画の濃淡の変化など、身の回りに広くみられる現象である。このように地球のみならず宇宙全体の自然界においても $1/f$  ゆらぎに合致すると思われる現象が種々存在

し、人間の感性、特に癒し効果を与える心地よさと密接な関係があることが解明されている。これは、たとえば人に $1/f$  ゆらぎのリズム(心地よい音楽)を聴かせると、心地よさを感じ脳波に波が多く分布することで検証されている。

$1/f$  ゆらぎはナノからマクロまで、生命体、非生命体に関係なく、広く自然界に存在する現象である<sup>1)</sup>。近年、人と自然と技術の融合が目ざされ、ストレスに拠る心身症や鬱病患者などに $1/f$  ゆらぎを有する絵画、音楽、風景、風がある環境を与えることで癒し効果、すなわち、ストレスの解放へ繋がる「ゆらぎ理論の人間環境への応用」が研究され、工業製品の、いわゆる、Well-being Designの実現が期待されている<sup>2)</sup>。最近、自然界の動画の多くは $1/f$  ゆらぎ周波数成分を持ち、雲、波のしぶきなどの大部分が $1/f$  ゆらぎ周波数成分からなることが明らかにされている<sup>3)</sup>。

人間が心地良いと感じることができる自然界現象は多く存在し、冬の降雪の景色が挙げられる。古くから、降雪の風景を観賞することは人間に安らぎを与えることが知られている。このことから、降雪の風景を利用して人間の心理的・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考えられる。このため、降雪のゆらぎの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一環と考えられる。

しかし、従来のゆらぎの解析方法は一次元的な時間軸

情報のみに着目するため、動画の空間情報を考慮していない。したがって、動画のゆらぎ解析は未だ明快な説明がなされていない分野である。本稿では、降雪の動画のRGB固有パターン(動画を構成する各フレームの赤、緑および青色成分の強度分布)を抽出することによって、空間的に広がりを持つ画像の時系列方向にそのゆらぎの周波数分布を解析し、降雪観賞の癒し効果と $1/f$ ゆらぎ周波数成分との関係を明らかにする。

## 2 $1/f$ ゆらぎの定義

従来のゆらぎ解析は、一次元離散フーリエ変換を用いて、ある時系列信号の各周波数に対するパワースペクトルを計算し、パワースペクトル - 周波数の分布からゆらぎを判別する。図1に示すように、パワースペクトル対周波数の両対数グラフを描き、グラフの傾きによってゆらぎの種類を大別する。直線の傾きが0の場合は主にホワイトノイズとなり、傾きが急になる程単調な信号になる。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ことができる信号といわれる。すなわち、周波数の低下とともにパワースペクトルが増加するような信号の中で、パワースペクトルの振幅が周波数に対して反比例する信号が $1/f$ ゆらぎである。

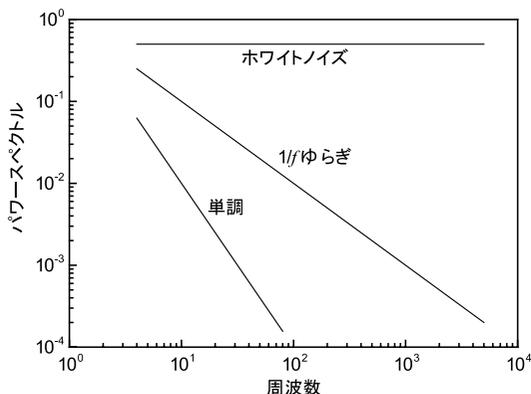


図1 ゆらぎの種類

## 3 動画のゆらぎの理論

動画は空間情報と時間軸情報を持つため、本研究では、デジタル動画の各画素単位でフレーム方向、すなわち、時間軸方向の $1/f$ 周波数成分抽出をRGB固有パターンから行い、ゆらぎの現象を解析する。

### 3.1 カラー画像のRGB固有パターン解析

デジタル画像は画素RGBの集合であり、各画素は可視光の波長によってR(赤)、G(緑)、B(青)色成分で構成される。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。RGB成分分布はそれぞれ $I_R$ 、 $I_G$ 、 $I_B$ とすると、ダイナミックレンジ $D$ の分布に正規化した正規化成分分布 $I_i^D$ は、

$$I_i^D = \text{Round} \left[ D \times \frac{I_i}{\text{Max}[I_i]} \right] \quad \dots (1)$$

$$i = R, G, B$$

で定義できる。ここで、 $\text{Round}[\ast]$ は括弧内の値を整数化する演算、 $\text{Max}[\ast]$ 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。静止画像のRGB成分の固有パターンは、各正規化成分分布 $I_i^D$ において1から $D$ までの数値の出現頻度をヒストグラム化したもので、下記の式で計算される。

$$E_i = \text{Count}[I_i^D, n] \quad \dots (2)$$

$$i = R, G, B$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, 255$$

ここで $\text{Count}[\ast, n]$ は括弧内の集合における数値 $n$ の個数をカウントする演算である。

カラー静止画像の固有パターン $E$ は、R成分固有パターン $E_R$ 、G成分固有パターン $E_G$ 、B成分固有パターン $E_B$ で構成され、式(3)で定義される。

$$E = [E_R, E_G, E_B] \quad \dots (3)$$

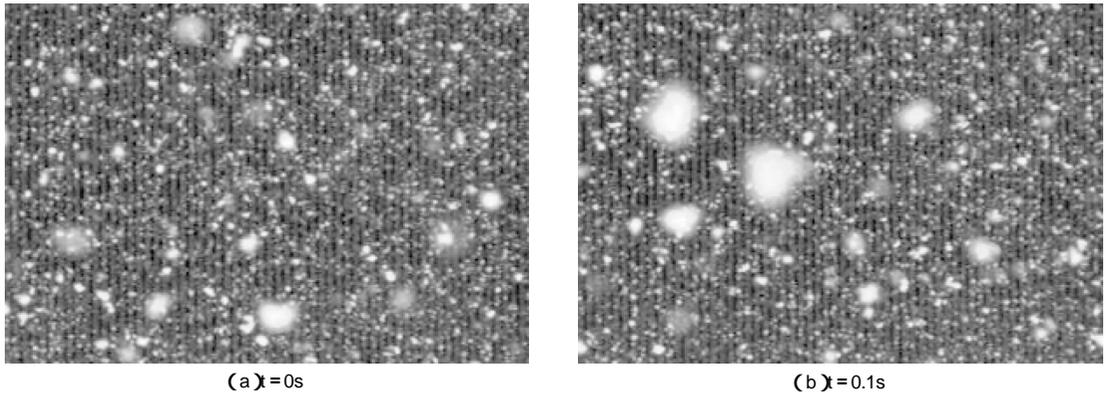
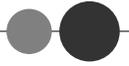


図2 降雪のフレーム画像

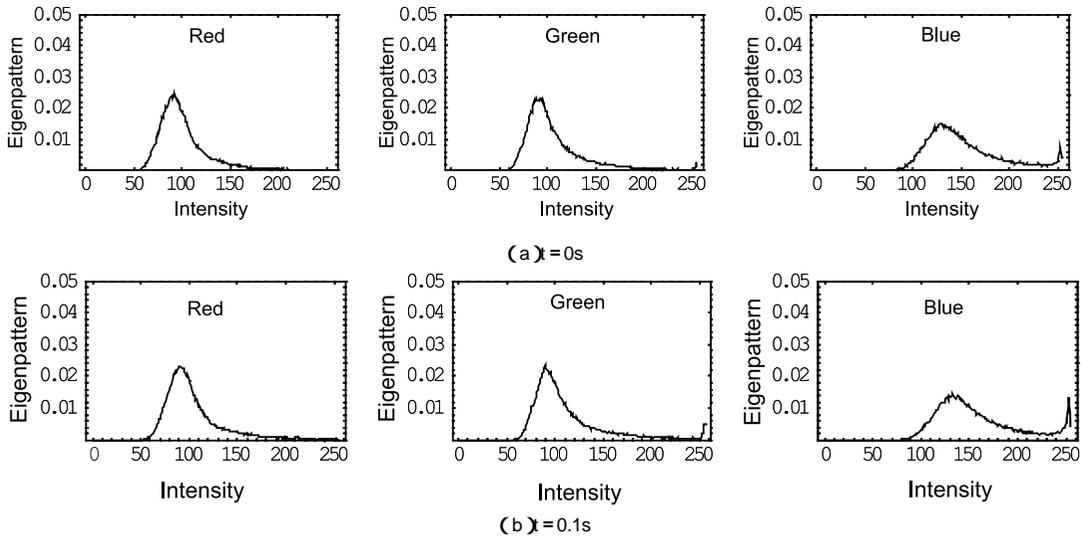


図3 降雪のフレーム画像のRGB固有パターン

図2は時間間隔0.1秒で撮影した雪の静止画像である。式(1)と(2)を用いてRGB固有パターンを計算し、その結果を図3に示す。ここで、縦軸は最大値が1へ正規化された頻度、横軸は画素値の強度を示す。図2に示す2画像、それぞれのRGB固有パターンを比較すると、それぞれ独自の固有パターン(特に、G成分とB成分)を持っていることがわかる。

### 3.2 動画のゆらぎ抽出

各フレーム画像の固有パターンを時系列に並べることで動画の固有パターンが定義される。すなわち、下式に示すように各フレーム画像の固有パターンを時系列に並べ、動画のRGB固有パターンベクトルを構成する。

$$F = [E_1, E_2, \dots, E_N] \quad \dots (4)$$

$N$ : フレーム数

本研究では、得られた固有パターンのゆらぎを時系列方向に離散的フーリエ変換し、各周波数に対するパワースペクトルを計算する。視覚的に分かりやすくするために、フーリエスペクトルパワーと周波数をそれぞれ、縦軸と横軸に対応させ両対数グラフを描く。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。-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する。

### 3.3 累乗近似

離散的フーリエ変換で求められた周波数*i*に対するパワースペクトル*p*が下記の*N*個の数値配列

$$(f, p) = \{(f_1, p_1), (f_2, p_2), \dots, (f_N, p_N)\} \quad \dots (5)$$

で構成される。この周波数とパワースペクトルの数値配列を両対数グラフで表したときの傾きを求める方法として累乗近似を採用し、直線に回帰させる。すなわち、次式により周波数に対する回帰パワースペクトルの傾き *a* を求める。

$$x_i = \log f_i \quad y_i = \log p_i$$

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad \dots (6)$$

したがって、周波数とパワースペクトルとの関係式は

$$p = 10^b \cdot f^a \quad \dots (7)$$

となる。回帰直線の傾き *a* が0のとき、その信号はホワイトノイズで構成されている。傾きが急になるほど単調な信号になる。そして、ホワイトノイズと単調な信号のちょうど中間的な信号(傾き *a* = -1)が1/f ゆらぎとなる。

## 4 降雪のゆらぎ

本研究では、高速デジタルビデオカメラを用いて、以下の条件で降雪の撮影を行った。

- ・場所 : 山形県米沢市山形大学工学部キャンパス内
- ・撮影日 : 2007年1月9日昼
- ・高速ビデオカメラ : フォトリオン製「RGB Rabbit」
- ・画像解像度 : 640 × 480pixel
- ・撮影速度 : 1秒間250フレーム
- ・シャッタ速度 : 1/250s

動画のゆらぎを解析するため、まず、連続の64枚の降雪の動画像に対して、式(1)~(3)によって固有パターンを抽出し、式(4)によって動画のRGB固有パターンベクトルを生成する。図4はその動画のRGB固有パターンの分布を示す。次に、時系列方向に固有パターンに対して離散フーリエ変換を行い、各周波数のパワースペクトルを計算する。図5はRGBの各成分におけるパワースペクトルの分布である。最後に、累乗近似式(6)を用いて両対数グラフで表したときのパワースペクトルの傾きを求める。

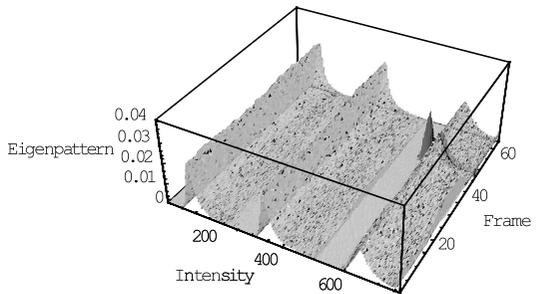


図4 降雪の動画のRGB固有パターン分布

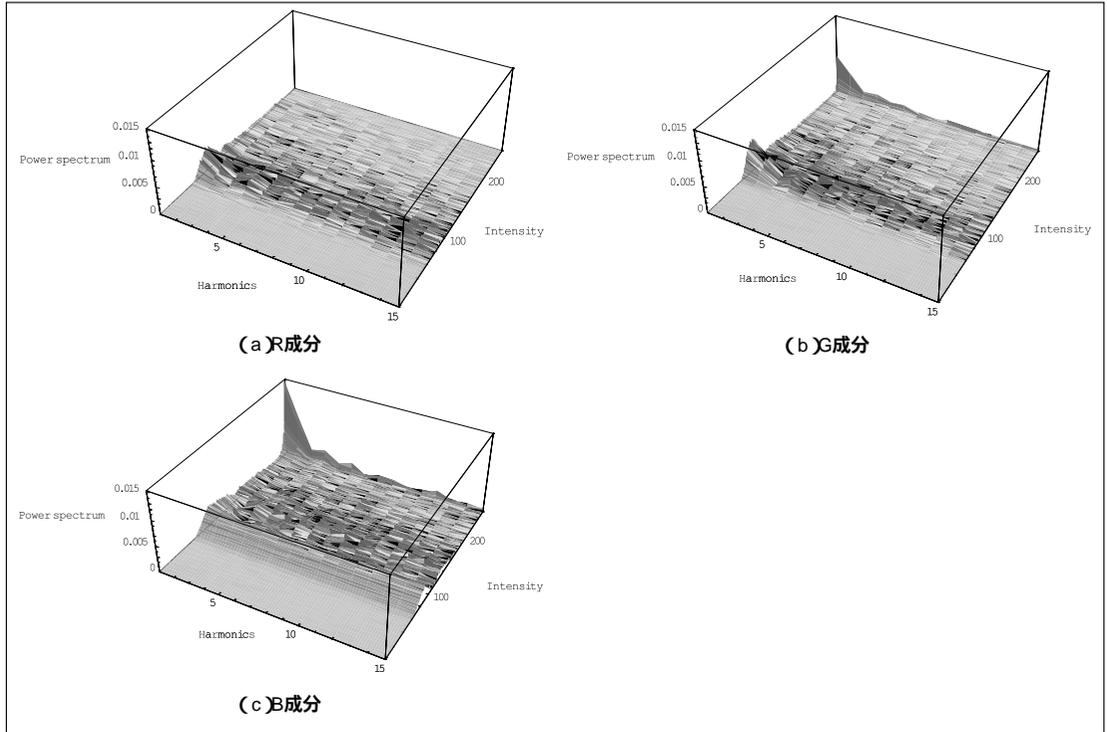
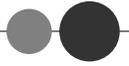


図5 降雪の動画のRGB固有パターンのパワースペクトル分布

図6はRGB固有パターンのパワースペクトルに回帰直線を適用して得られた傾きの分布を示す。その結果から、RGB成分の0～255までの強度分布の $1/f$  ゆらぎの存在を表した数値配列を得ることができた。横軸にはRGB成分強度値、縦軸にはパワースペクトルの傾きをとった。グラフの縦軸の値が-1に近いほど $1/f$  ゆらぎに近い信号が存在することを意味する。

図6からは、降雪の動画はRGBの各成分において $1/f$  ゆらぎ成分を持っていることがわかった。降雪は不規則な雪運動と見えるが、その観賞は人間が心地良いと感ずることができる。その理由は降雪が $1/f$  ゆらぎ成分から構成されていることに起因するといえる。この解析の具体的な応用を考えれば、人に快適感を与える空間の一部として、降雪が窓から見える形式やテレビ映像などの環境を構築し、自然と同じリズムの環境を人工的に生成し、精神的ストレスから解放できると考えられる。これは人と自然と技術の融合といえる。

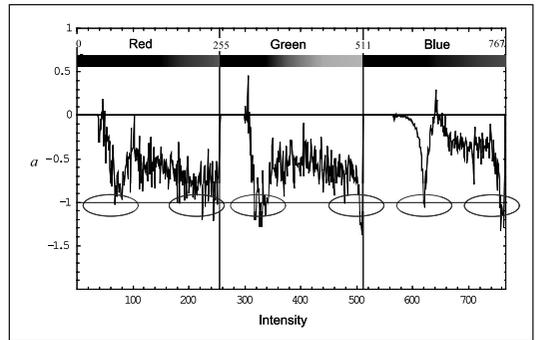


図6 降雪の動画のパワースペクトルの傾き分布

## 5 おわりに

本稿では、動画RGB固有パターンの抽出によりゆらぎ解析の新技术を紹介した。その応用として、降雪の動画のゆらぎを解析することによって、降雪の観賞の癒し効

果と $1/f$  ゆらぎとの関係を明らかにした。人と自然と技術の融合という観点から、降雪が窓から見える形式やテレビ映像などの自然と同じリズムの環境を人工的に生成し、人類の文明的な生活へ自然界の癒し効果が導入できると考えられる。

### 参考文献

- 1) ゆらぎ研究会編：“ゆらぎの科学10”，森北出版社（1999）
- 2) 佐治 晴夫：“快適空間の物理”，応用物理, Vo.60, No.3, pp.247-253( 1991 )
- 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, Suppl. No.1, pp.167-170( 2006 )

山形大学工学部 機械システム工学科

TEL & FAX.0238-26-3225

rinosika@yz.yamagata-u.ac.jp

<http://vweb.yz.yamagata-u.ac.jp/fluids/>