

取扱注意

# “ゆらぎ”の不思議な世界を考える

自然界のゆらぎは私達の心にやすらぎを与えてくれています

1/fゆらぎを含めその本質とはなんだろう!!

IHIQB

小嶋一郎

2021年1月5日改

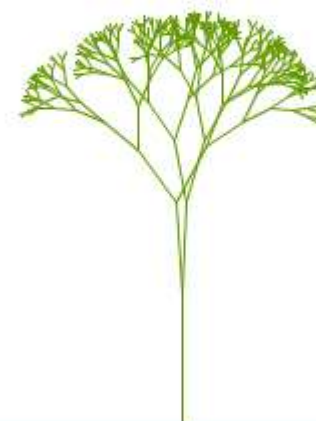
注:この資料は2015年11月14日の講演資料として作成したものをもとに追記しました。



をクリック、“スライドショー”“から”現在のスライド“  
をクリックするとBGMが流れます。



木の枝のフラクタル



## ストレス、不安がいっぱい現代社会を考える

私達が生活するこの世はストレス、不安がいっぱい。新型コロナウイルスの感染が広がる中、自分自身や大切な家族、友人への感染や社会、経済への大きな不安を抱えながらの毎日を過ごしているのではと考えます。

現代社会ならではの精神的重圧や現在の新型コロナウイルスの感染拡大など様々な原因で年齢、性別問わず多くの方々は「ストレス」や「不安」を感じながら毎日の生活を送られていると思います。

★ ここに“1/fゆらぎの世界”が生きます ★

# 私がゆらぎに関心を持ったわけ

- 日本国土の自然は”ゆらぎ”に満ちています。古来からそれを受入れて、利用しているという事です。
- 私は宇宙の起源に興味を持ち勉強して来ました。宇宙の始まりは約138億年前、インフレーションのわずかな前の小さな“ゆらぎ”が、大きな爆発(ビッグバン)となって宇宙が誕生し、それが成長して、原始銀河を生み、星を創造し、人間が創られたと言う事です。
- 私は病気治療に漢方に頼っています。その漢方医療も”ゆらぎ”と密接に関係していると言う事です。
- 我々人類は、この”ゆらぎ”を無視出来ません。
- 上記のわけで“不思議な”ゆらぎ”現象”を調べました。今日は調査の一端を以下に述べ、紹介したいと考えます。

# “ゆらぎ”とは

- 自然界(含宇宙)の一切は波であり、存在するものに静止しているものは無く時間の経過とともに微妙に変化しています。
- 身近なもので星の瞬き、打ち寄せる波、小川のせせらぎの音、風、木漏れ日の光、水墨画や浮世絵、切り絵、音楽等これらは皆“ゆらい”でいます。
- 体温の変化や心拍の間隔も“ゆらぎ”です。
- “ゆらぎ”とは、ある一定のリズムが微妙にズれている様で、温度、音量、密度、周波数、速度、濃淡、力なども“ゆらぎ”ます。
- 驚く事に、私たちの宇宙は、時間も空間もまた物質もない、無の状態の“ゆらぎ”から生まれたと考えられていると言う事です。

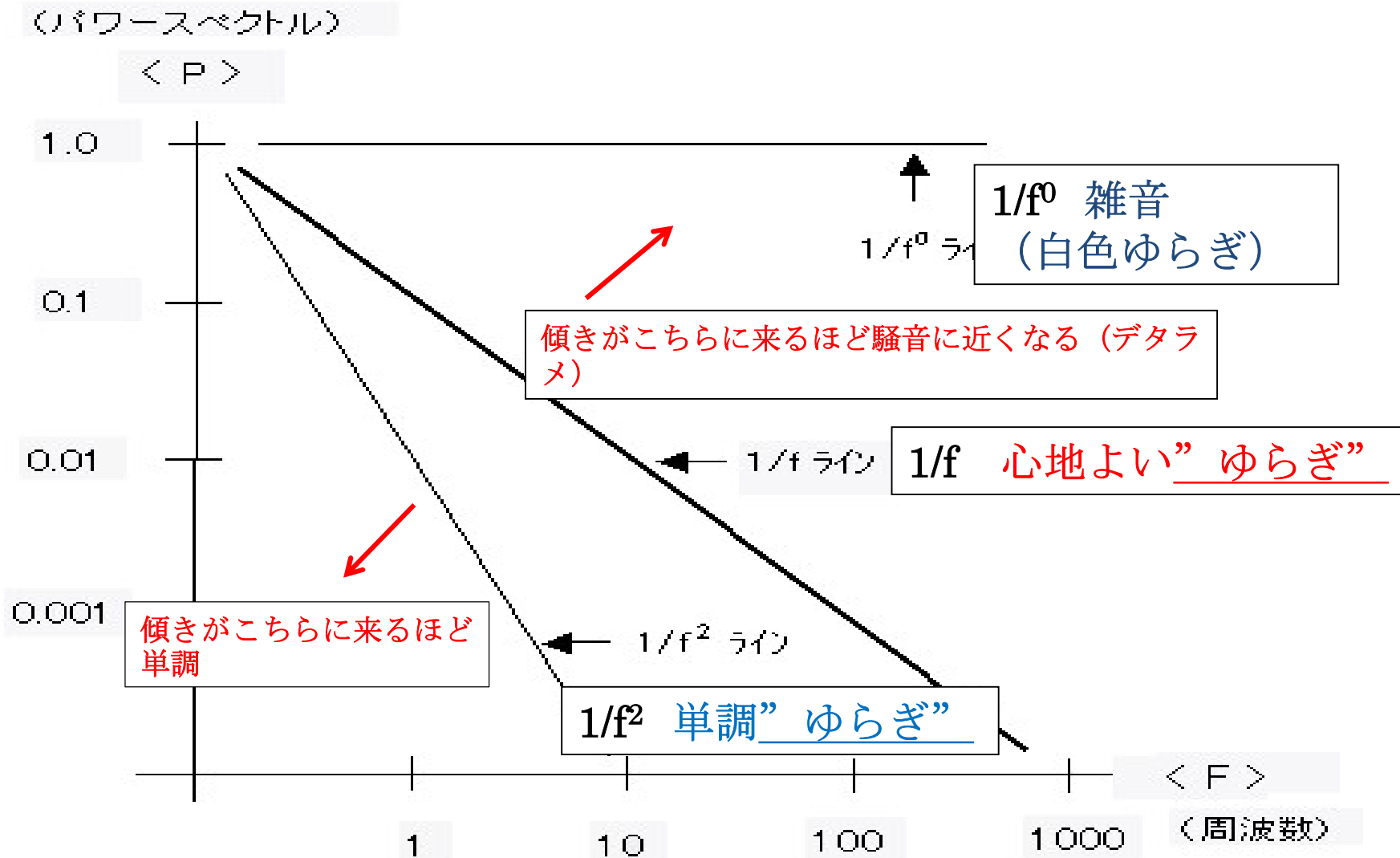
# ”1/f ゆらぎ” とは

- 数学的に表現されたもので、自然界に普遍的に見られる現象、規則正しくはないが、ある法則性を持ち、あらゆる自然現象の変化を表したものです。
- 予測は、規則性があるから出来るので、言い換えると“**ゆらぎ**”とは、ものの空間的、時間的変化や動きが、部分的に不規則な様子とも言える。メトロノームなどが刻む規則的なリズムと、街の喧騒のように全く不規則なリズム、それらの中間にある。「規則正しさと不規則さが、ちょうど良いバランスで調和したパターン」が「**1/f ゆらぎ**」です。
- “**1/f ゆらぎ**”は、いくつかある“**ゆらぎ**”の種類の一つで、私たちが心地良いと感じるリズムとしても紹介されています。

# ”1/f ゆらぎ”人と共鳴し合う時

- 人間は自然界の一部です。環境としての自然のリズムと、人間の体の中のリズムが共鳴し合う時に最も理想的な美を見つけたような、あるいは心地良く感ずるような気持になる事がポイントとなります。
- 1/f ゆらぎは人間の体内にある基本リズムのゆらぎと密接に関係します。
- 自然の中のさまざまなところに1/f ゆらぎがあります。1/f ゆらぎのリズムが一致した時に、私達は美しさや心地良さが味わえるのです。
- 瓦屋根、たたみの目、江戸小紋、日本庭園の池、毛筆の仮名文字が描く曲線の曲がりやをスペクトルで調べると1/f のゆらぎになります。  
これらは幾何学では表わされない文様、ここに1/f ゆらぎがあります。

# ・1/f とは



“ゆらぎ” のスペクトル (パワーレベル (P) を縦軸に、周波数 (F) を横軸)

# ・1/f とは

- “1/f ゆらぎ”: 傾き -1 の“ゆらぎ”で、適度な予測性と適度な意外性とが共存し調和している状態、つまり、規則正しくはないがある法則性をもったリズムといえます。
- “1/f<sup>2</sup> ゆらぎ”: ラインの傾きがきつくなれば、突発的な変化が少なく、次を予測しやすい規則正しい波形になります。  
変化の少ない規則的で単調な“ゆらぎ”で、時計の秒針や機械的な電子音、砂丘の風紋は、ほぼこの形をしています。
- “1/f<sup>0</sup> ゆらぎ”: 傾きが緩やかになれば、突発的な変化が頻発しますから、次を予測しにくい波形になります。  
傾きが0になると、 $P = 1/f^0 = 1$  となり、周波数に関係なくパワーレベルが1に集約されるので、高い周波数成分も低い周波数成分も均一に含まれた値はF (周波数) に平行になります、一般的に「雑音」といわれ、やかましく耳障りな音や不快感を覚える色彩、苛立ちを感じる配列などがこれに相当します。



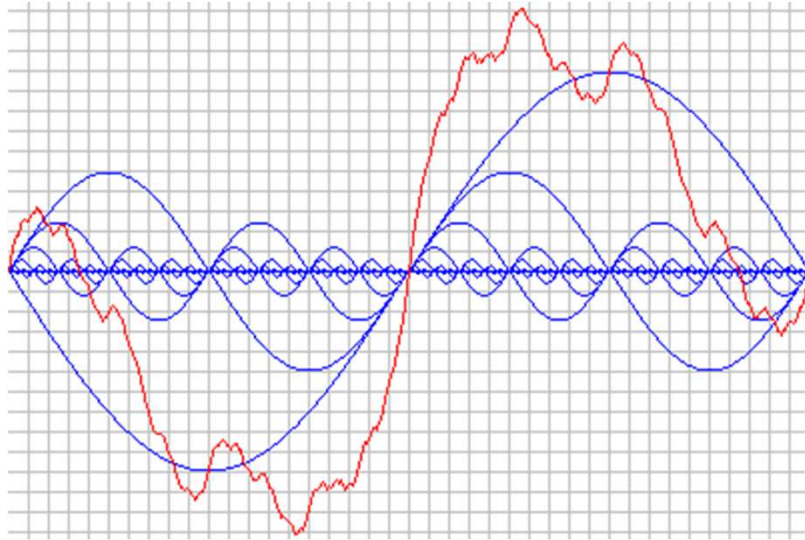
## 数学的表現としての $1/f$ (パワースペクトル) **1/2**

- 自然界(含宇宙)の一切は波であり時間の経過とともに微妙に変化して複雑な合成波の形になっている。
- 複雑な合成波を周波数(振動数)の異なる正弦波に分離すれば、それぞれの正弦波の周波数と振幅という値で表現できる。この複雑な波を周波数の異なる単純な波(正弦波)に分離する数学的手法をフーリエ変換と呼びます。
- フーリエ変換という手法をつかって、どんな周波数の正弦波がどのくらいの大きさで含まれているのかを調べれば、複雑な波でもその性質を調べる事が可能です。
- このようにどんな周波数の正弦波がどれくらい含まれているかを調べることをスペクトル分析といいます。

## 数学的表現としての $1/f$ (パワースペクトル) **2/2**

- ゆらぎをスペクトル分析すると、その周波数と振幅の関係が $1/f$ の関係にあることを示しています。すなわち、 **$1/f$ ゆらぎ**とは、高い周波数の波ほど振幅が小さく、低い周波数ほど振幅が大きくなっている正弦波の合成波であるといえます。
- この様に **$1/f$ ゆらぎ**は自然界に多く見られます。
- 星の瞬きや $\alpha$ 波の波形、そして波の音や風の強さなども **$1/f$ ゆらぎ**である。とくに、人の耳に心地よく聞こえる潮騒の音やそよ風などは、 **$1/f$ ゆらぎ**の傾向が強く見られます。
- 音楽でもクラシック音楽や心の鎮静効果を伴う宗教音楽などに **$1/f$ ゆらぎ**が多く見られこのように、 **$1/f$ ゆらぎ**という性質は、“美”や心地よさという人の感情と深く関わっています。

## 参考 1/f ゆらぎの解析(フーリエ変換) 1/4



このグラフの**赤色の線**に注目します。複雑な**波形**です。でも、自然界にはもっと複雑で変な**波形**もいっぱい存在します。波形って？音、光、空間のパターンでも何でもいいのですが、周期的な変動をするものことです。グラフの横軸に時系列なり、位置系列なりをとり、そのときの値（強さ、高さ、ずれなど）を縦軸にとると**波形**ができあがるのです。この**波形**、沢山ある**青色の線**を足し算したものです。逆に言えば、すべての**波形**は複数の**サイン曲線**に分解することが出来ます。その分解の方法を提供するのが『**フーリエ変換**』です。ここでの目的は**1/f ゆらぎ**について述べることで、その詳しい方法については割愛します。

## 参考 1/f ゆらぎの解析(フーリエ変換) 2/4

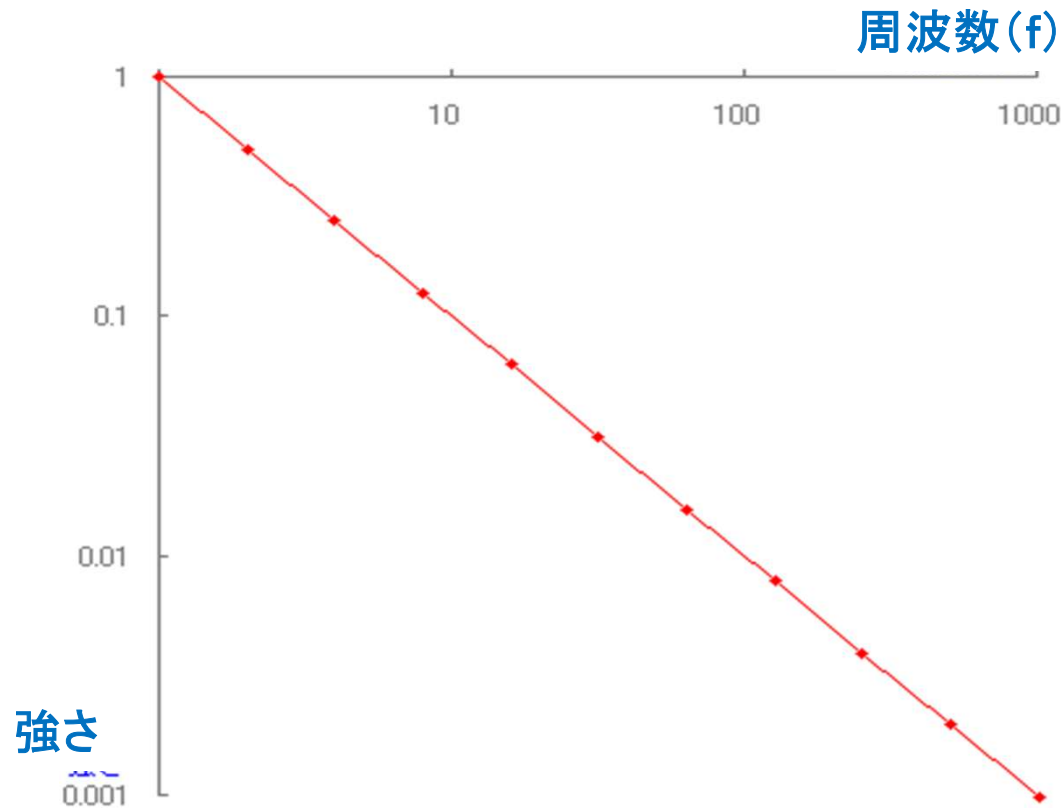
$$f(x) = \sum_{i=0}^{10} 2^{-i} \sin 2^i x$$

これは、前頁のグラフを描くときに用いた数式です。赤色の文字は赤色のグラフを、青色の文字は青色のグラフをそれぞれ表しています。要は、周波数の違うサイン曲線に適切な係数をかけて足し合わせているだけです。難しくはありません。

「sin」というキーワードの後ろにある部分が周波数です。例えば、「i=0」のとき、「1x」で、グラフでは「 $-\pi \leq x \leq \pi$ 」の範囲を描いてあるのですが、この変化が一秒間に起こったとすると、「1Hz」となるわけです。同様に、「i=5」のときは「32Hz」、「i=10」のときは「1024Hz」となります。

「sin」というキーワードの前にある部分(係数)がその周波数成分の強さです。ここでは、1/f ゆらぎにするために、意図的に係数を調整してありますが、普通の分解ではこのようなきれいな値にはなりません。

## 参考 1/f ゆらぎの解析(フーリエ変換) 3/4



さて、では周波数を横軸に、その時の成分の強さを縦軸にとってグラフを描いてみます。但し、軸は対数(LOG)で表しています。

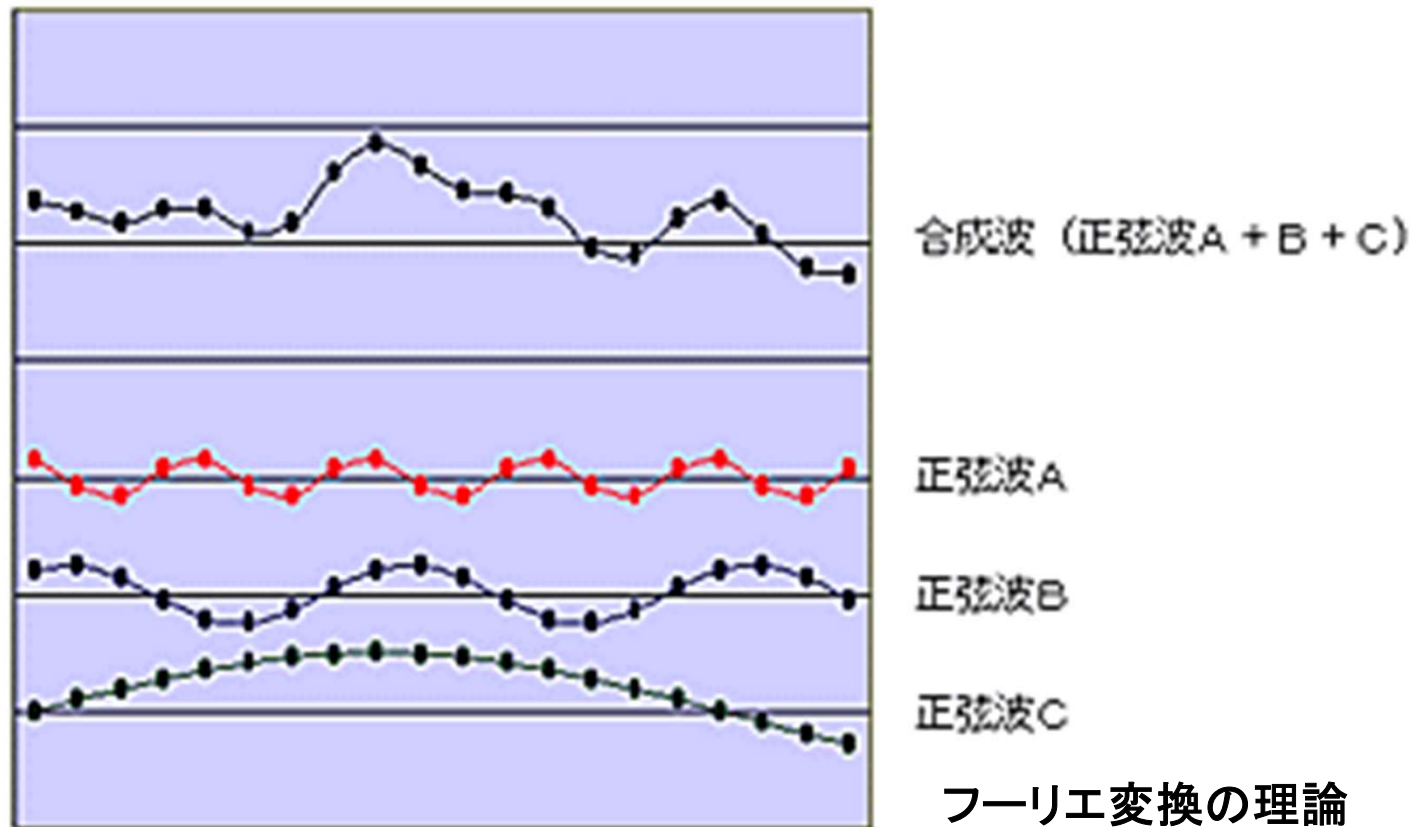
赤色の点を結んだ線の傾きは？そう  $-1$  です。グラフは対数で描いています、 $-1 \times \log(f)$  という式を元に戻すと  $1/f$  。 $1/f$  というキーワードが出ました。

つまり、波形を分解して各周波数成分を対数軸にプロットした時にその傾きが  $-1$  で近似できる波形のことを  $1/f$  ゆらぎと言います。

## 1/f ゆらぎの解析(フーリエ変換)【考察】 4/4

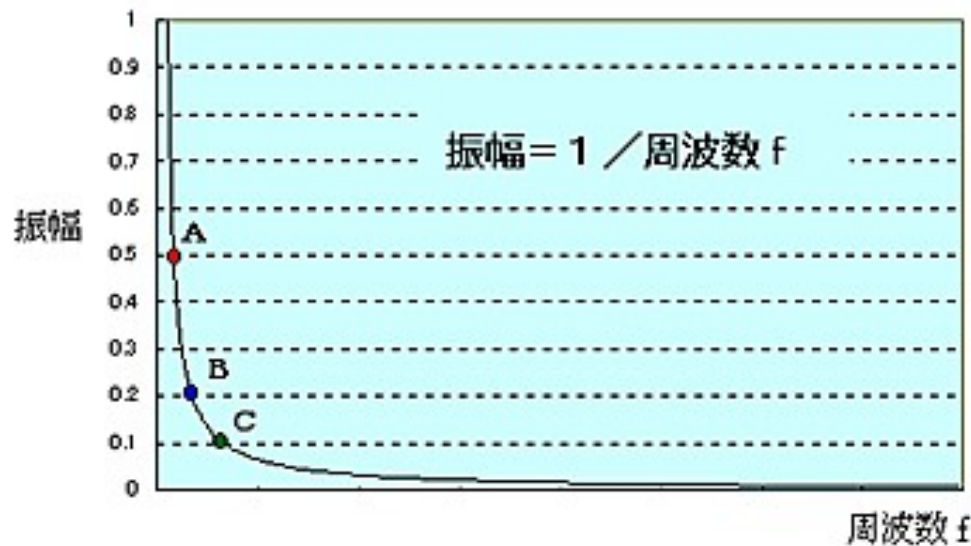
- 分析した結果は、傾きが -1.76 や -2 のように傾斜がきつくなる場合や、-0.25 や -0.001 のように傾斜がゆるくなる場合もある。
- 一般に、傾斜がきつくなればなるほど、突発的な変化が抑制されて大きな変化が支配するようになるので、次を予測しやすい波形になる。それに対して、傾斜が緩やかになればなるほど、突発的な変化が頻発するので、次を予測しにくい波形になる。
- そして、傾きが0になると、ホワイトノイズと言われるものになります。
- 傾き -1、即ち **1/f ゆらぎ** の状態では、適度な予測性と適度な逸脱性が共存していると考えられることができます。自然界には**この 1/f ゆらぎ** になるような波形があふれています。我々人間も自然の一部として、この波形に親しんでいるせいか、海や山で小波や木々の葉がそよぐ音を聞くと、不思議と落ち着きますね。
- **注意:** 人が心地よいと感じる音を分析すると 1/f になっていることが多いのですが、すべての 1/f が人にとって心地よいと感じるわけではないので、その他にも人を「気持ちいい」と感じさせる要因はまだまだ沢山あると思われます。

# 1/fゆらぎフーリエ解析とは

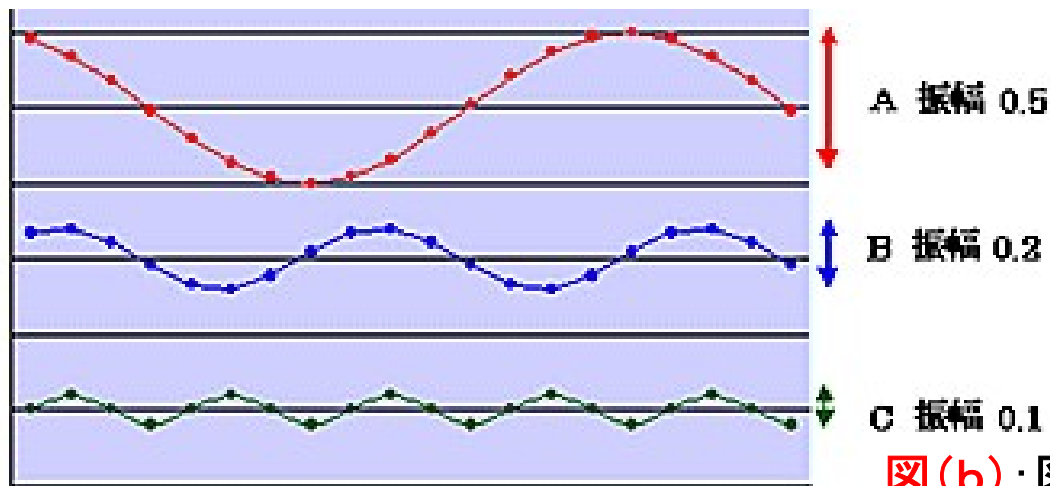


自然界(含宇宙)の一切は波であり時間の経過とともに微妙に変化して複雑な合成波の形になっている。

複雑な合成波もこのような周波数(振動数)の異なる正弦波に分離すれば、それぞれの正弦波の周波数と振幅という値で表現することができる。この複雑な波を周波数の異なる単純な波(正弦波)に分離する数学的手法をフーリエ変換と呼びます。



図(a) :  $1/f$ ゆらぎの周波数特性、  
スペクトル分析結果



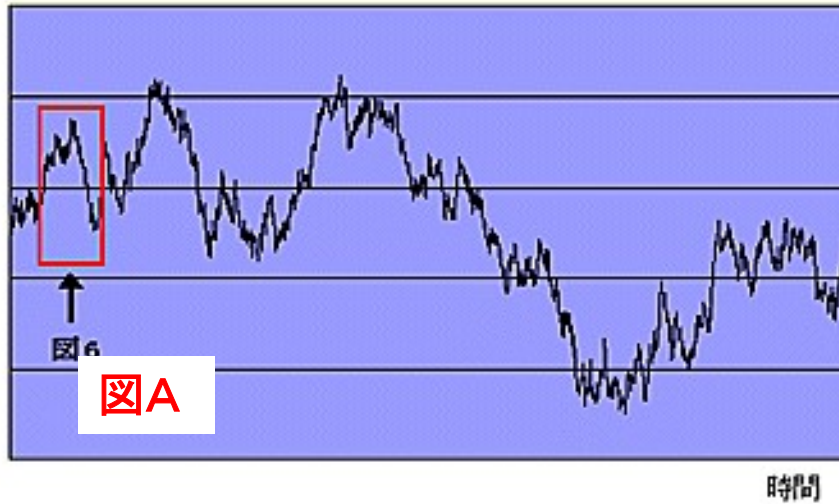
図(b) : 図(a)の関係にある正弦波の例

$1/f$ ゆらぎの $f$ は、frequency(周波数)のことです。そして、 $1/f$ でゆらぐと言うことは、ゆらぎをスペクトル分析すると、その周波数と振幅の関係が $1/f$ の関係にあることを示しています。すなわち、 $1/f$ ゆらぎとは、高い周波数の波ほど振幅が小さく、低い周波数ほど振幅が大きくなっている正弦波の合成波であるといえます。

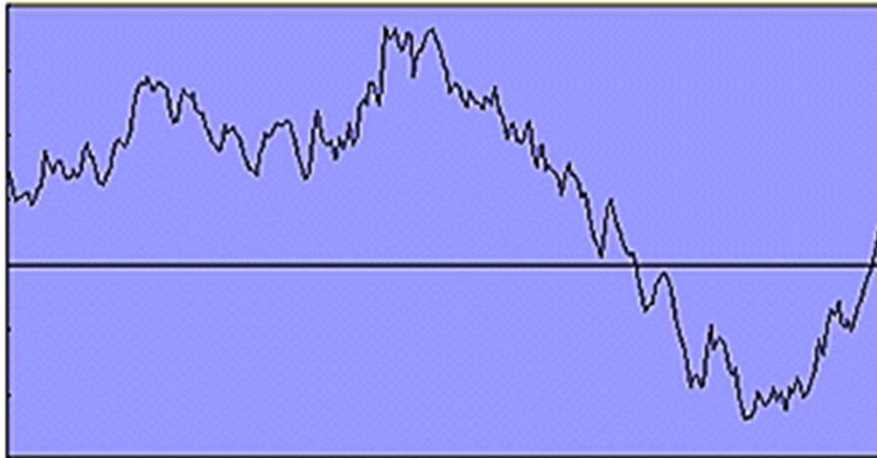
この関係を、グラフに示すと 上図 (a)(b) のようになります。



振幅



前頁 図(a)(b)の周波数特性を持つ波を左図に示す。  
これが $1/f$ ゆらぎの波形の一例です



左図は、図Aの矢印の部分拡大したものです。

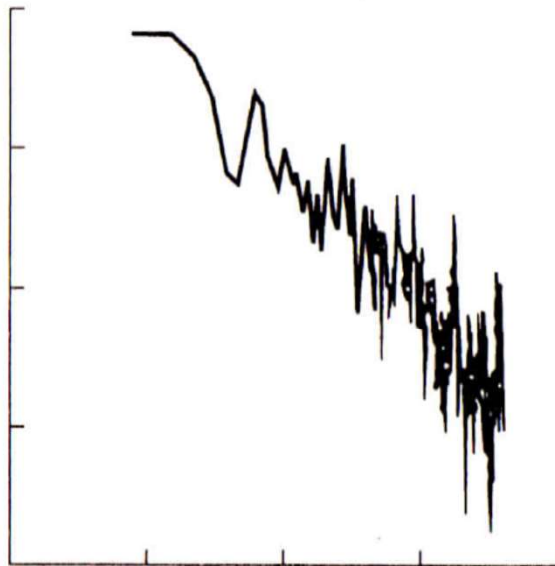
上図のふたつの波形を比べてみると、とても似かよっていることが分かる。このように、一部分に全体の形が畳み込まれているような性質は、“フラクタル(fractal)”と呼ばれています。これは、 $1/f$ ゆらぎの重要な特徴の一つです。

# 1/f ゆらぎという性質

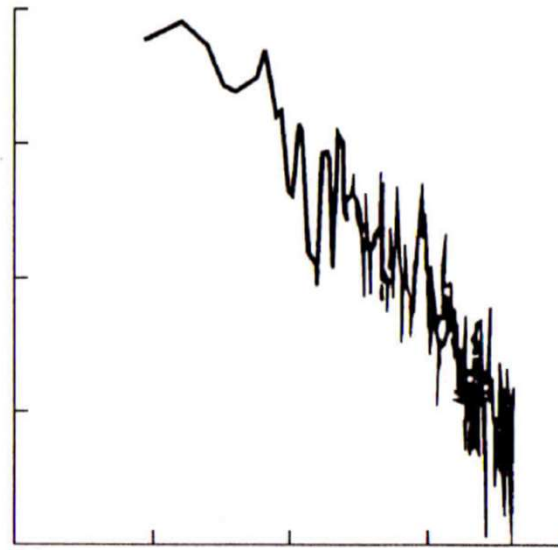
- このフラクタルという特徴は、自然界に非常に多く見られます。例えば一本の樹木や草木を注意深く見ると、幹から枝への分かれ方や、枝から葉への分かれ方など同じようなパターンのくりかえしが見られます。また、山の形や雲の形などもフラクタル性を持っています。
- そしてまた、**1/f ゆらぎ**も自然界に多く見られます。星の瞬きやα波の波形、そして波の音や風の強さなども**1/f ゆらぎ**であると言われていています。とくに、人の耳に心地よく聞こえる潮騒の音やそよ風などは、**1/f ゆらぎ**の傾向が強く見られるといえます。
- 音楽でもクラシック音楽や心の鎮静効果を伴う宗教音楽などに**1/f ゆらぎ**が多く見られる。
- 以降に、**1/f ゆらぎ**の性質、“美”や“心地よさ”という人の感情と深く関わっている例を示します。

# 自然界の営みには“ $1/f$ ゆらぎ” 音楽の心地よさ

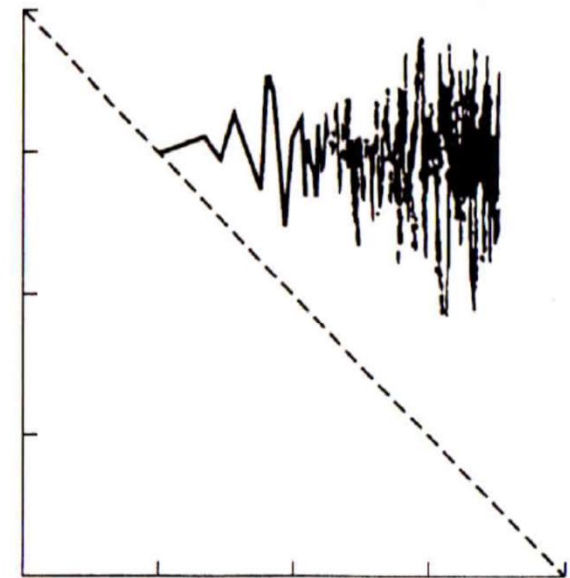
いろいろな音楽を調べると、私たちが快いと感じる音楽は、周波数の時間的変動が“ $1/f$ ゆらぎ”になっている事がわかりました。



モーツァルト  
トルコ行進曲

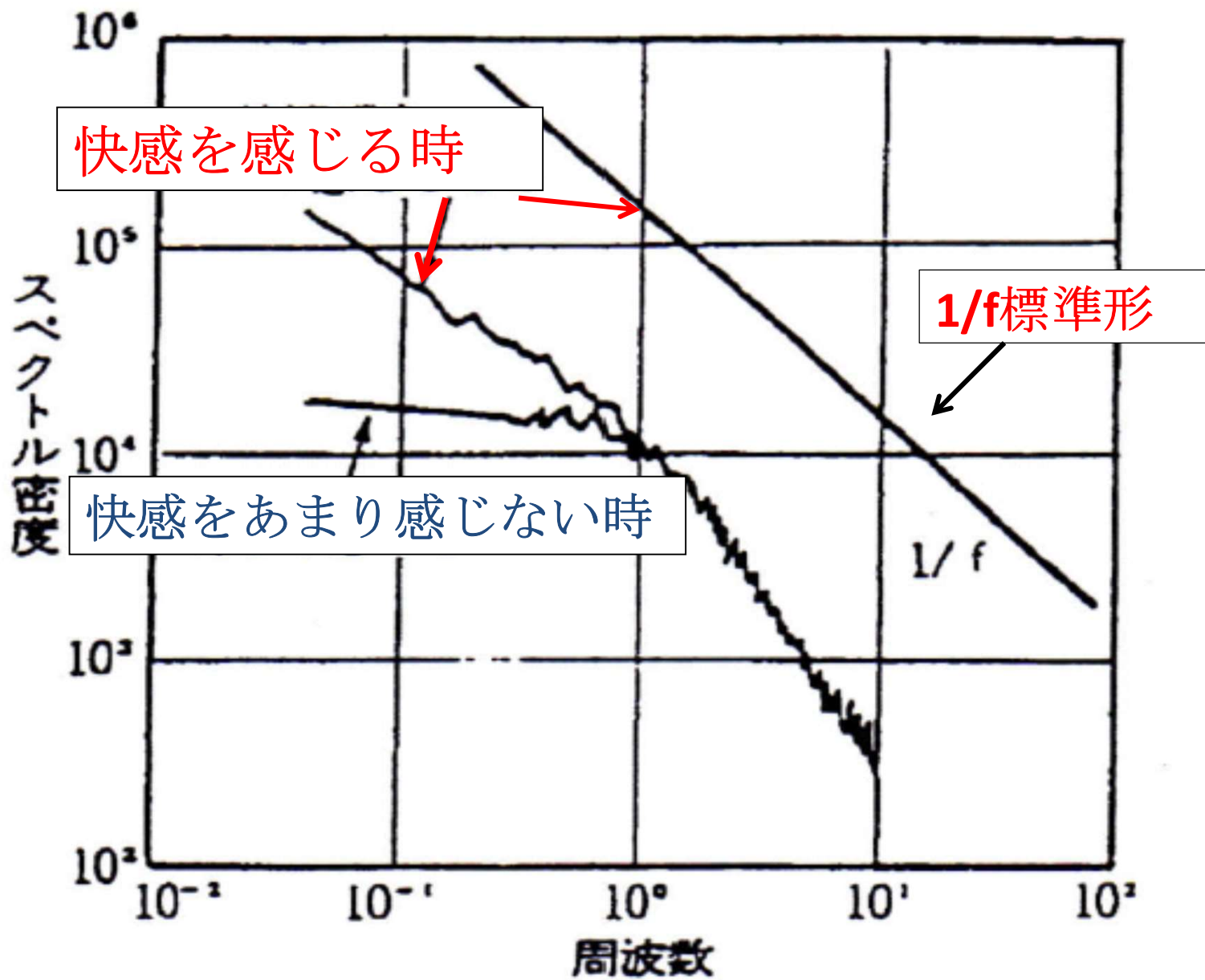


バッハ  
主よ人の望みの喜びよ



地下鉄の騒音

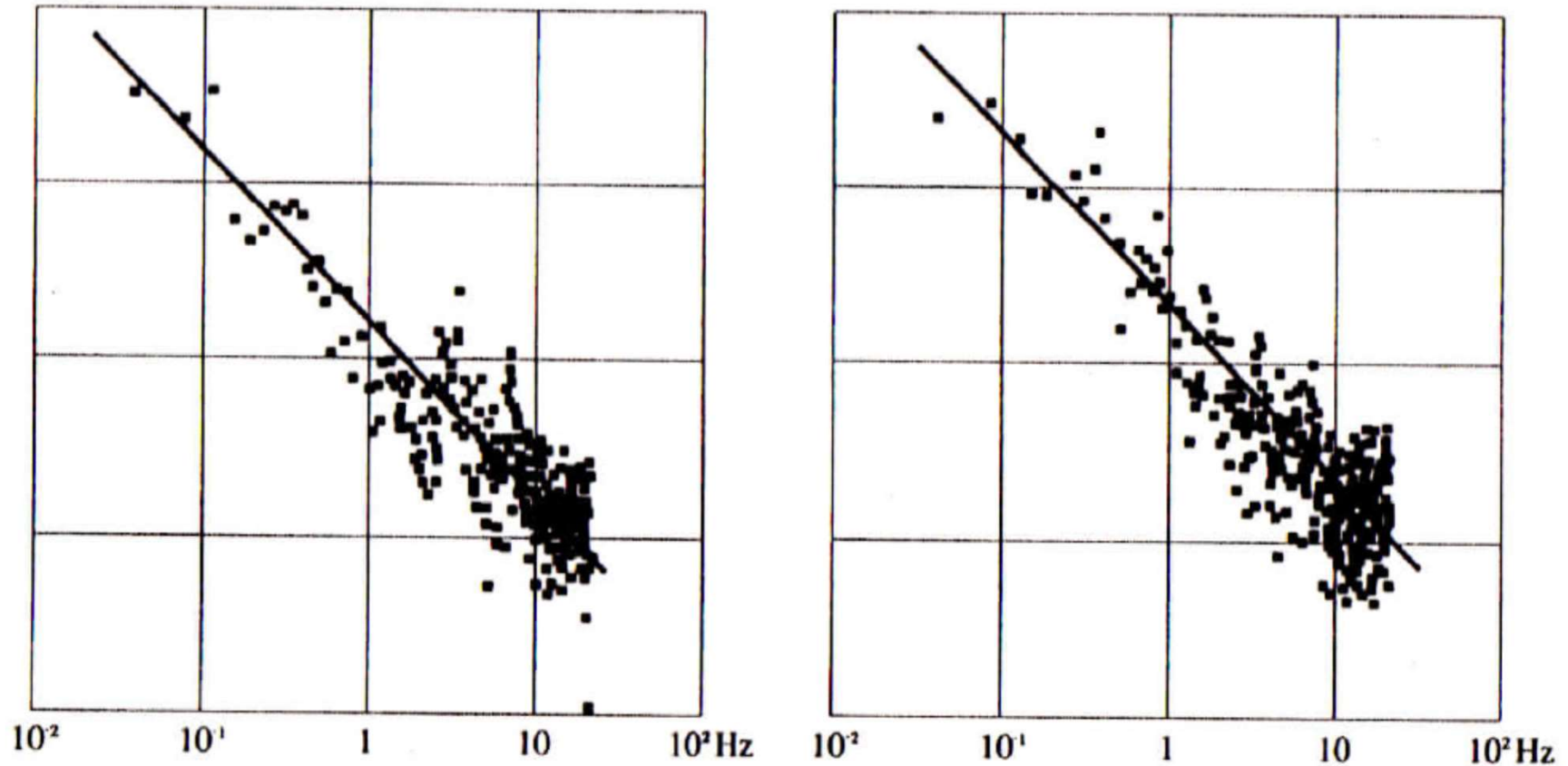
音楽のパワー・スペクトルは、斜め右下がりの $1/f$ ゆらぎを示します。これに対して地下鉄の騒音は、スペクトルが右下がりにならず、ほぼ水平の白色ゆらぎを示します。



快い・不快の心の状態

# 演奏時のパワー・スペクトラム

音楽演奏時のパワー・スペクトル図



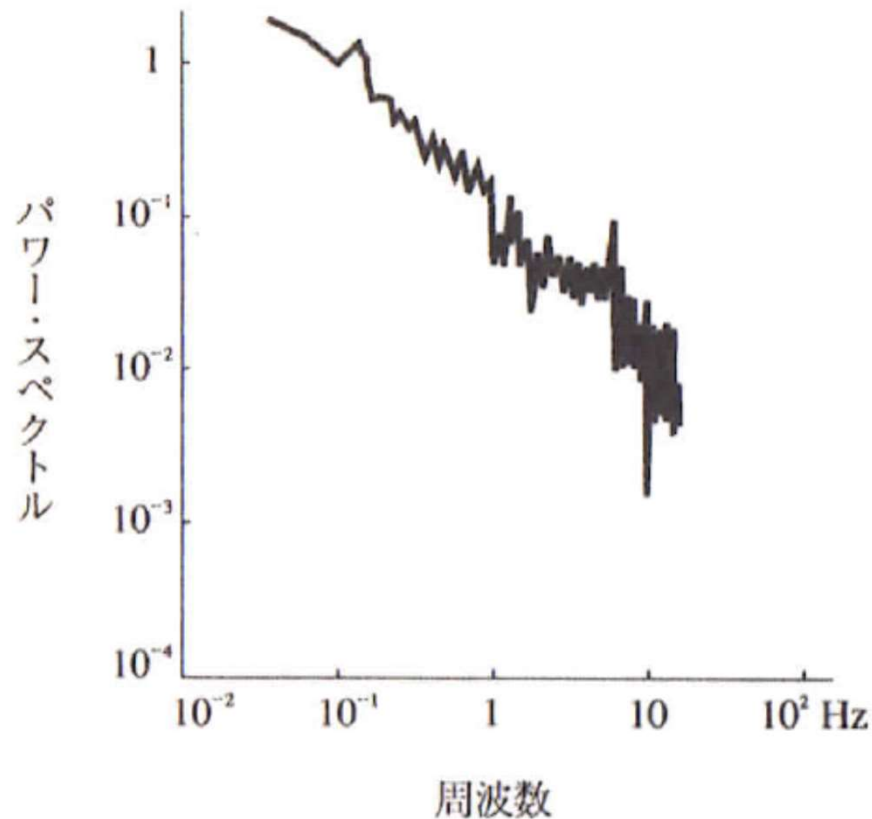
J.Sバツハ  
ブランデンブルグ協奏曲 第1番第1楽章

モーツァルト  
交響曲 第40番第1楽章

いずれも  $1/f$  ゆらぎを示す右下がりに近いゆらぎが見られる

# せせらぎのパワー・スペクトラム

5-5 せせらぎのパワースペクトル図



せせらぎのパワー・スペクトラムは音楽と同じように $1/f$ ゆらぎを示しています。せせらぎの音は自然が奏でる音楽と言える

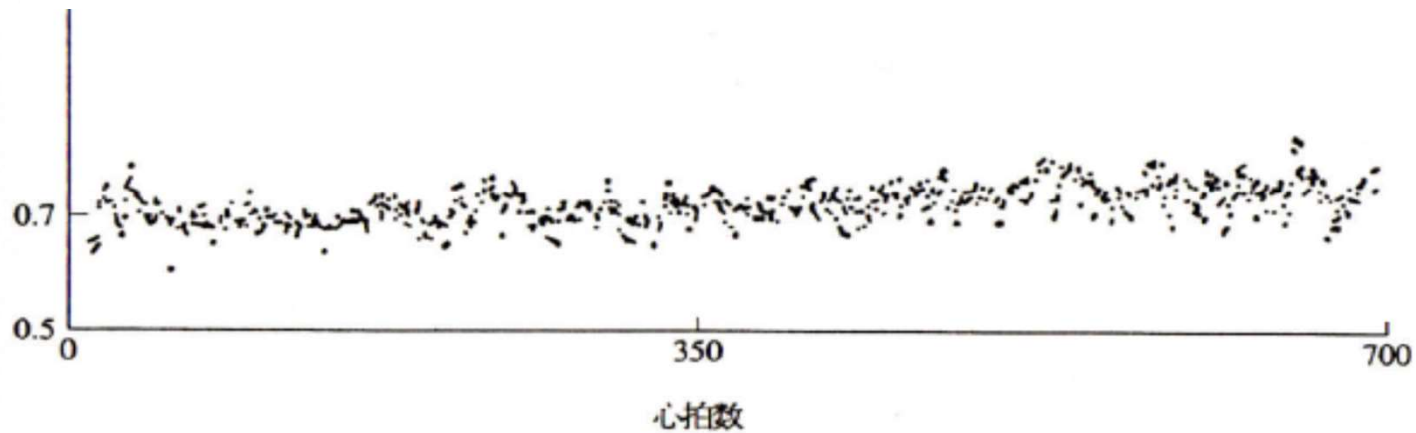
# 心拍の”ゆらぎ“



## 4.1心電図

健康な人の心電図、心拍が規則正しく続いている事がみえる

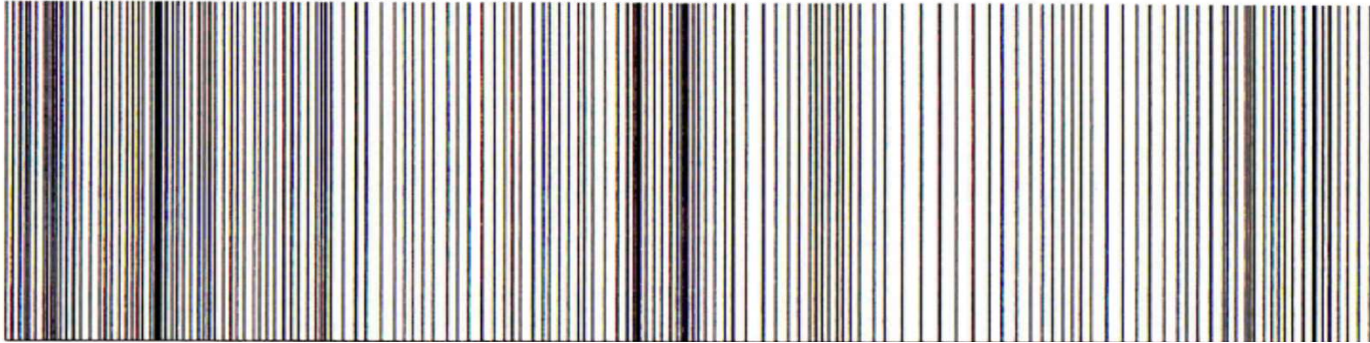
## 4.2心拍周期のゆらぎ



ベッドでの安静状態の心拍周期は規則正しく続いている、心拍周期は図のようにゆれ動いている。

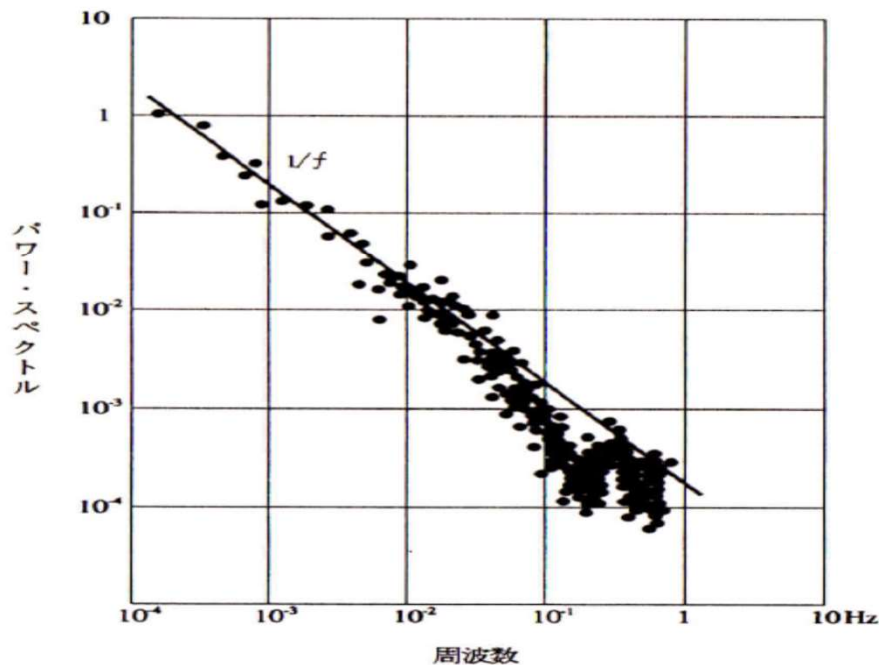
# 心拍の”ゆらぎ“

## 4.3 心拍周期を拡大した平行線



心拍周期の揺れ動く様子は $1/f$ ゆらぎを示す木目に良く似た模様である

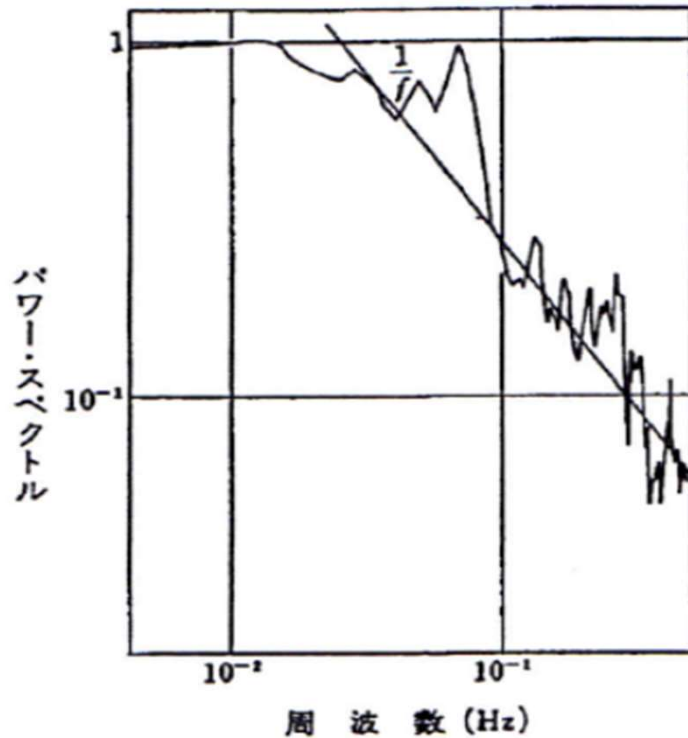
## 4.4 心拍周期のパワー・スペクトル図



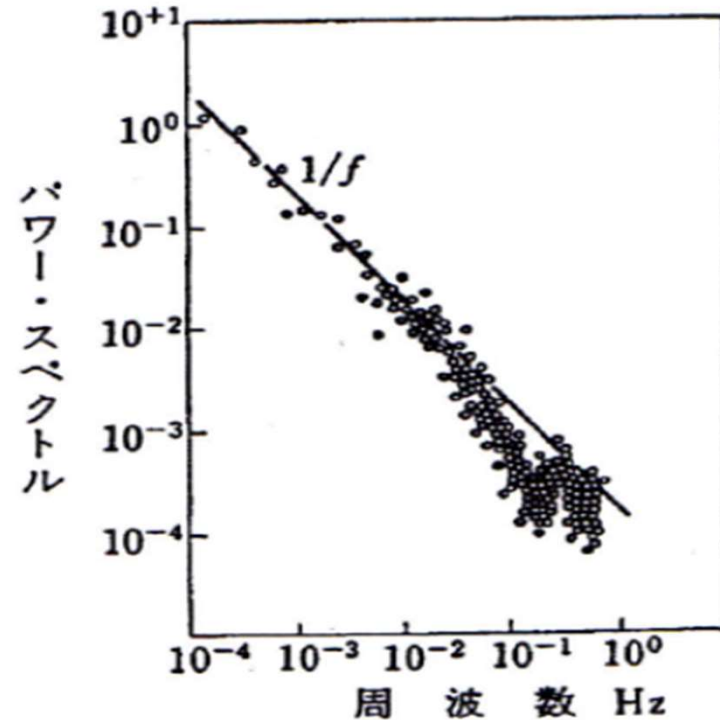
心拍周期をパワー・スペクトラムで表すと、**1/fゆらぎ**であることが良くわかる



# α波と1/fゆらぎ



気分の良い時の脳のα波



心拍周期のパワー・スペクトル

自然界、人間の行為、動物の生体情報などに見られる1/fゆらぎは、人体から発生する生体信号にも存在することがわかってきた。

# 都市や自然景観、夜景および風景絵画の2次元フーリエ変換

・様々な都市や自然景観、夜景および風景絵画の画像を対象に、2次元フーリエ変換を利用してパワースペクトル曲線を導き出し、その傾き変化から被写体となる景観の性質とゆらぎ特徴の関係として調べると、白色ノイズ、 $1/f$ ゆらぎ、 $1/f^2$ ゆらぎが見える

・デジタル画像の濃淡を2次元波と捉え、これを周波数領域へ変換して様々な画像処理を施す手法によるゆらぎ解析

・絵画を分析すると精神・心理的転移に於ける作者の心境がゆらぎとして表れる

画像からもとめた空間周波数とパワースペクトルを両対数グラフに整理し、パワースペクトル曲線（図2）。基本空間周波数を $1/512(\text{pixel})$ として、横軸に対数值、縦軸にパワースペクトルの対数值をプロットする

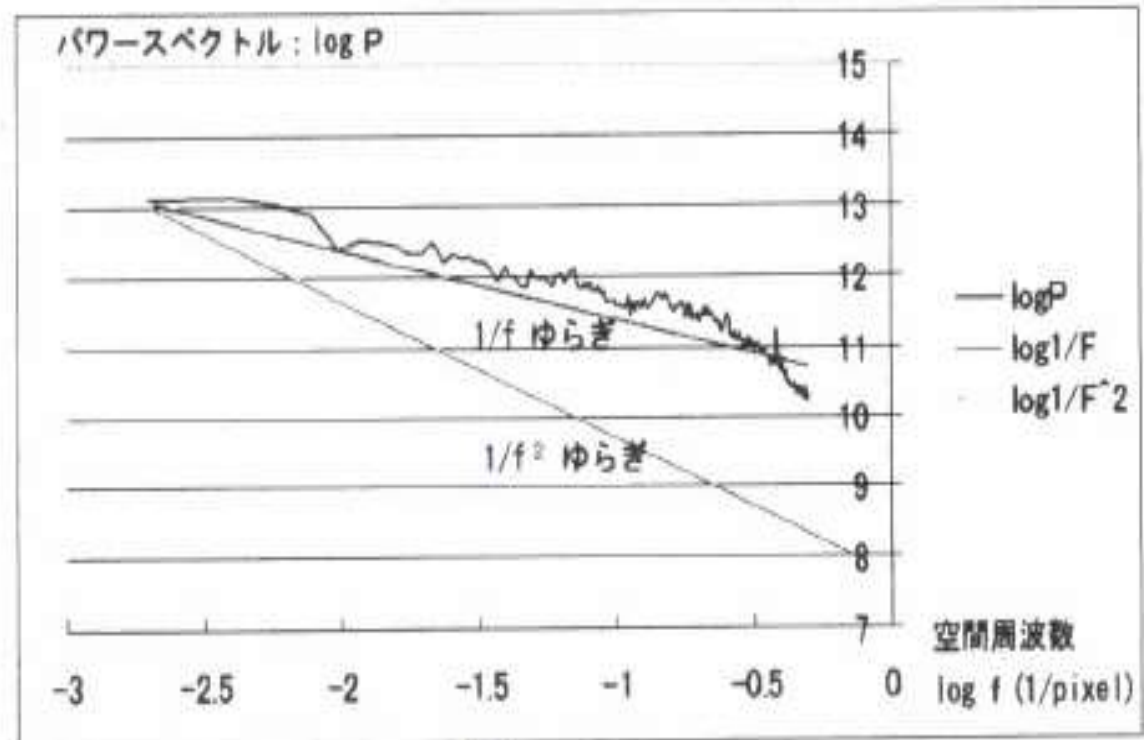


図2 パワースペクトル曲線

# 白色ノイズ・ $1/f$ ゆらぎ・ $1/f^2$ ゆらぎ景観

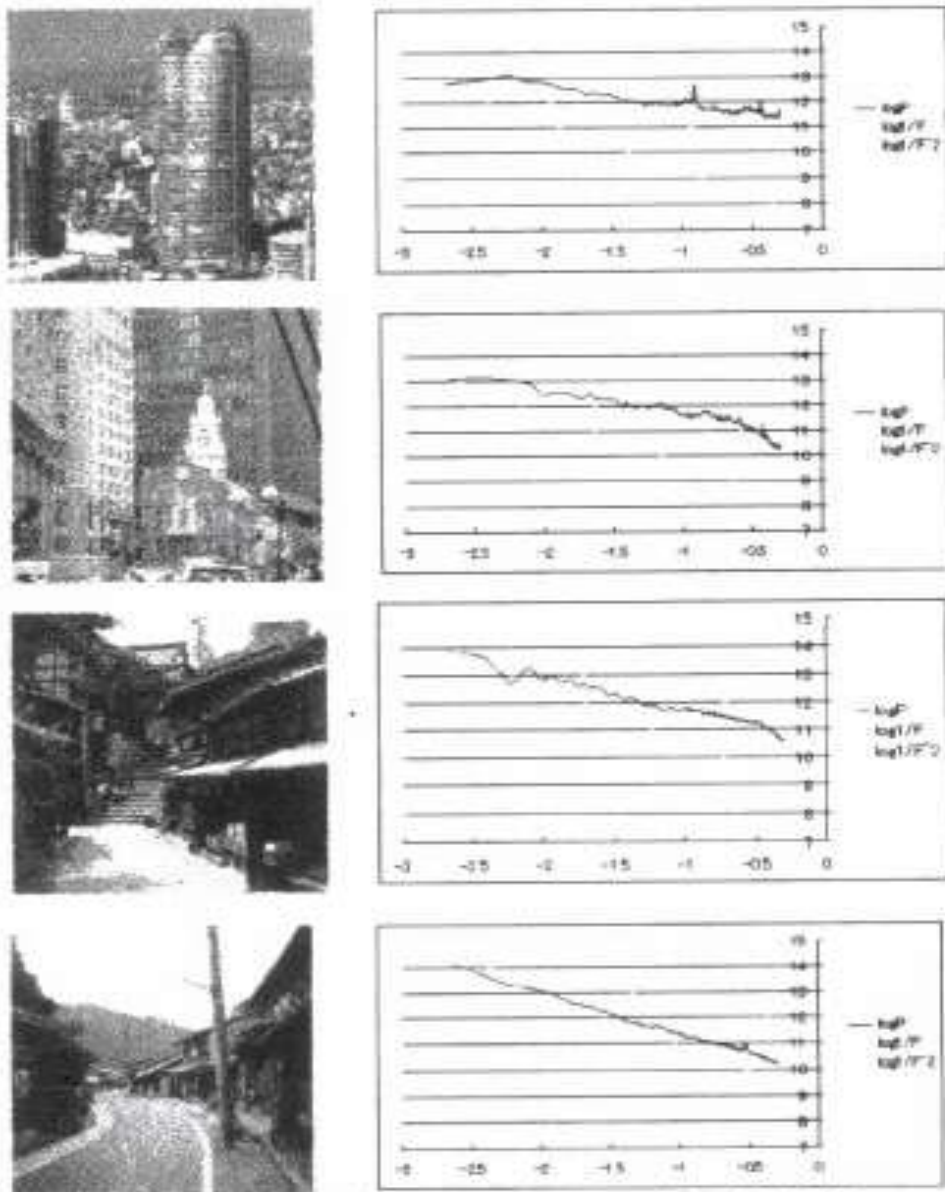


図3 白色ノイズ・ $1/f$ ・ $1/f^2$  ゆらぎ景観

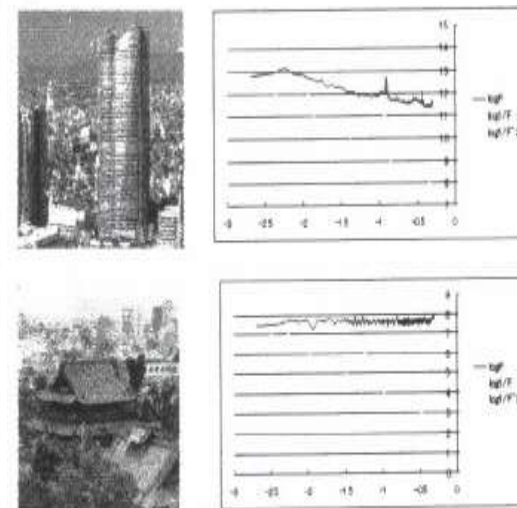
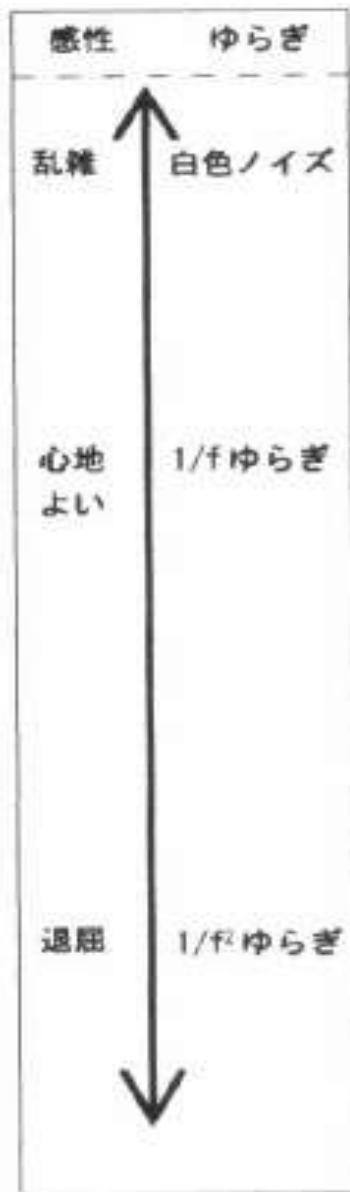
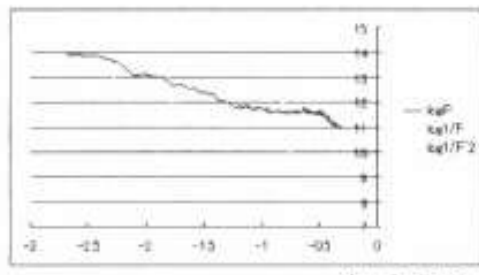
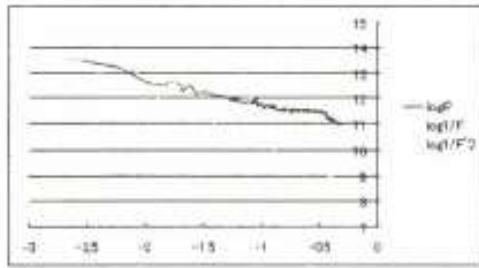
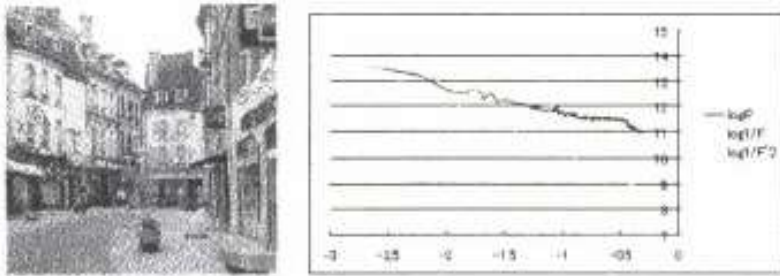
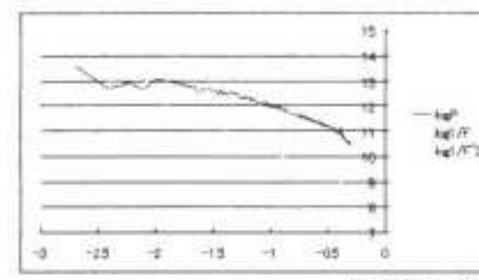
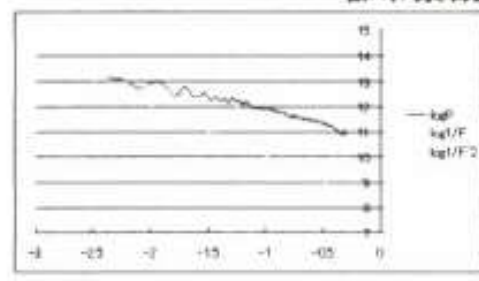


図4 白色ノイズ景観

# 白色ノイズ・ $1/f$ ゆらぎ・ $1/f^2$ ゆらぎ景観

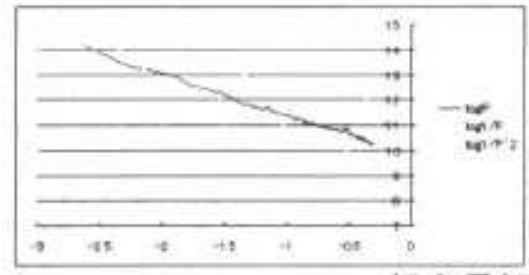
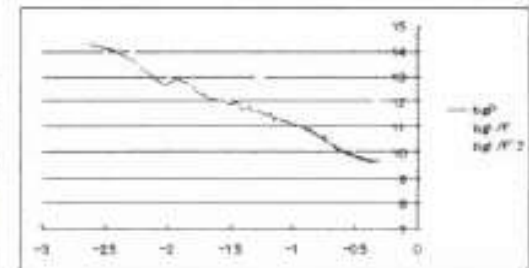


都市景観

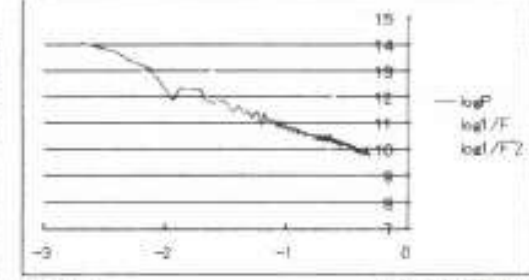
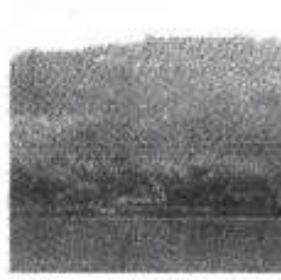
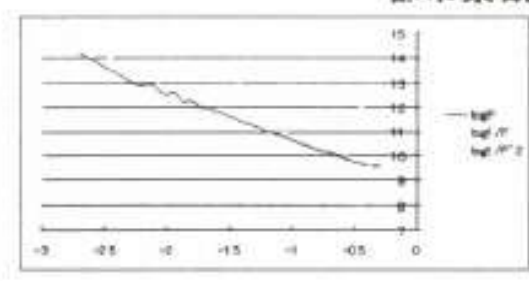


自然景観

図5  $1/f$  ゆらぎ景観



都市景観

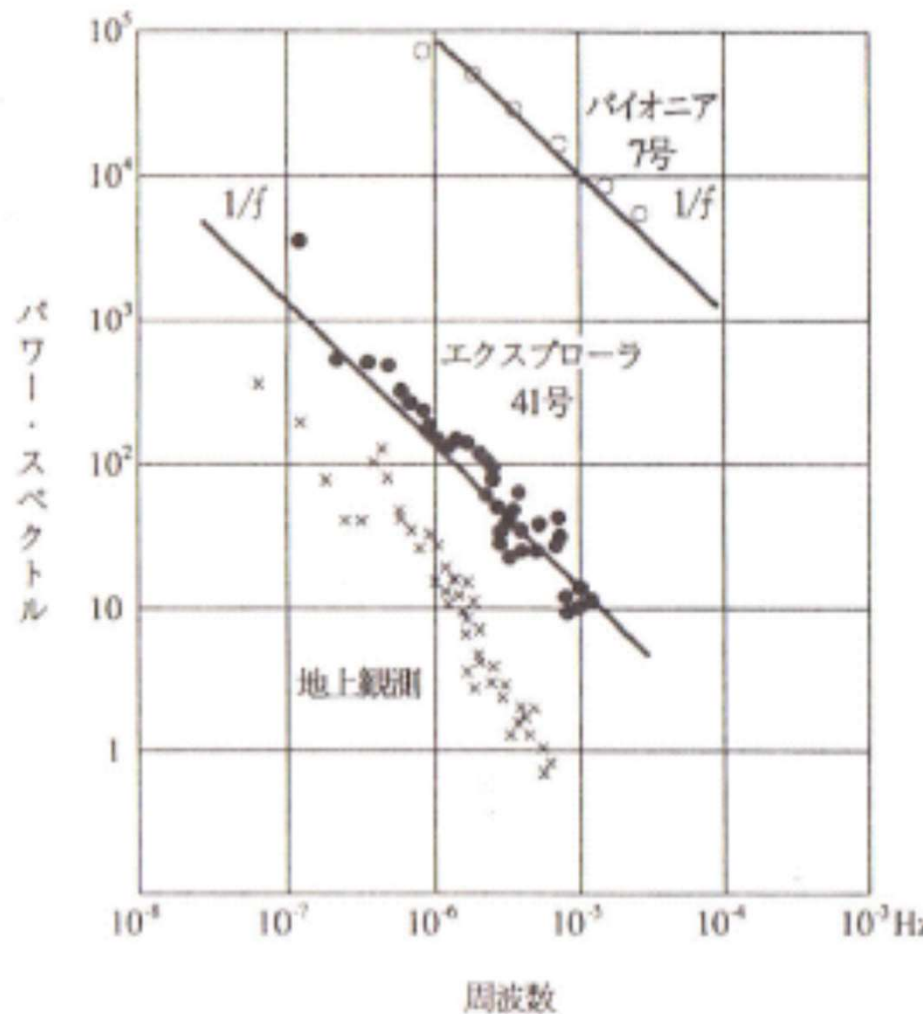


自然景観

図6  $1/f^2$  ゆらぎ景観

# 宇宙線の数の $1/f$ ゆらぎ

2-5 宇宙線の数のゆらぎのパワー・スペクトル図



地球に到達する前の宇宙線を観察した人工衛星エクスペローラ41号によるデータと、人工衛星パイオニア7号によるデータを調べた結果、**宇宙線の数は $1/f$ ゆらぎ**になっている事が分かった。

# 銀河系宇宙線のゆらぎ

銀河系

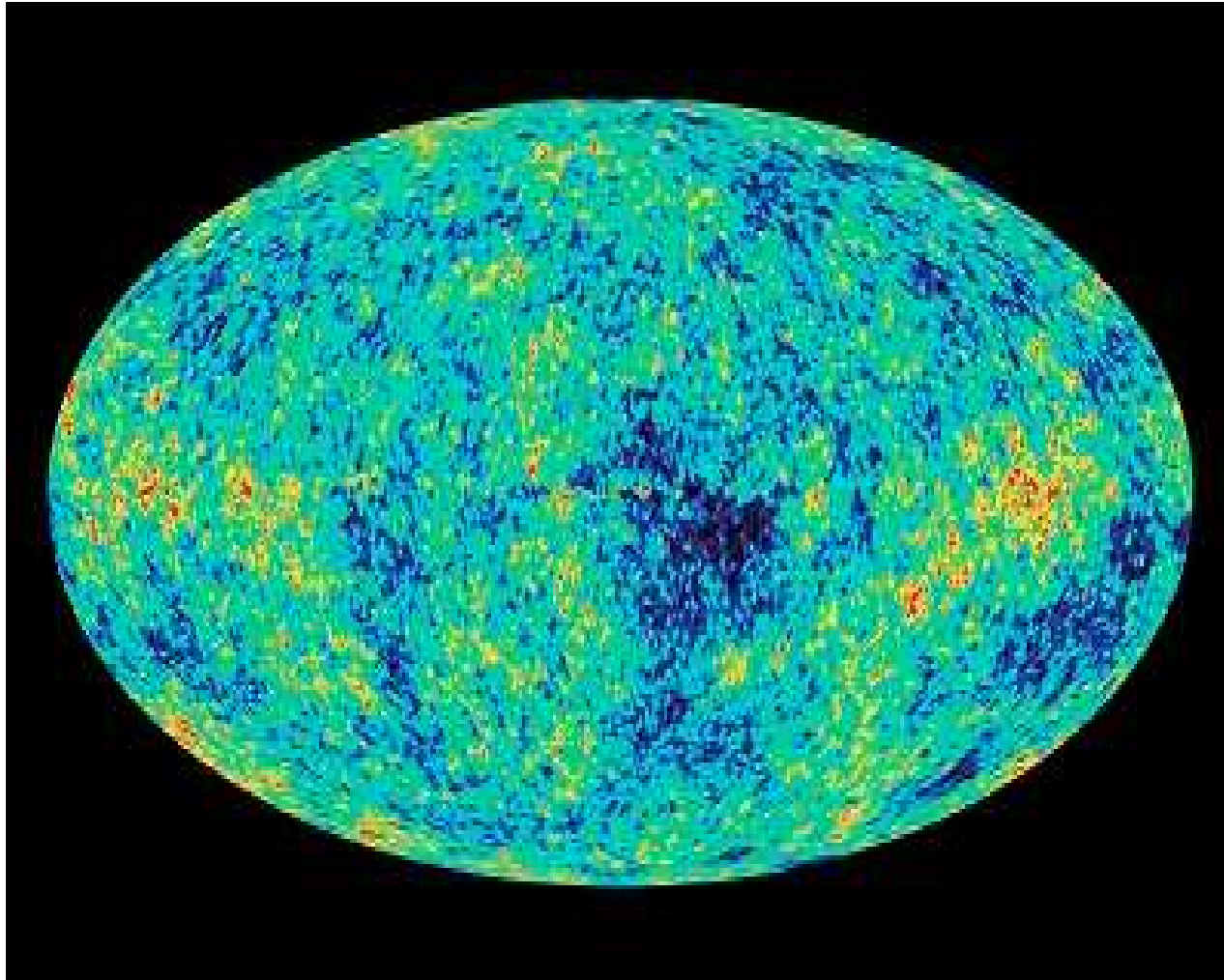
宇宙線のゆらぎは、  
銀河系の磁場のゆらぎの影響を受けている事が分かります。  
宇宙線のゆらぎを見てきたと思うと楽しくなります



# 宇宙の始まり(量子的“ゆらぎ”)

- 宇宙の始まりは約138億年前、インフレーションのほんの少し前の小さな“ゆらぎ”が、大きな爆発(ビッグバン)となって誕生し、それが成長して、原始銀河を生み、星を創造し、人間を創ったと考えられています。
- 量子論に起因する“ゆらぎ”を種として、物理法則の数学的構造は、自ずと秩序が生じ構造をつくり上げていく性質をもっていて、新たな構造や情報が次々と生まれていき、宇宙の多様性を織りなしています。
- その事実を裏づけるのが、NASAのWMAP衛星が観測したビッグバンの名残の熱放射である宇宙マイクロ波背景放射の微小な“ゆらぎ”です。

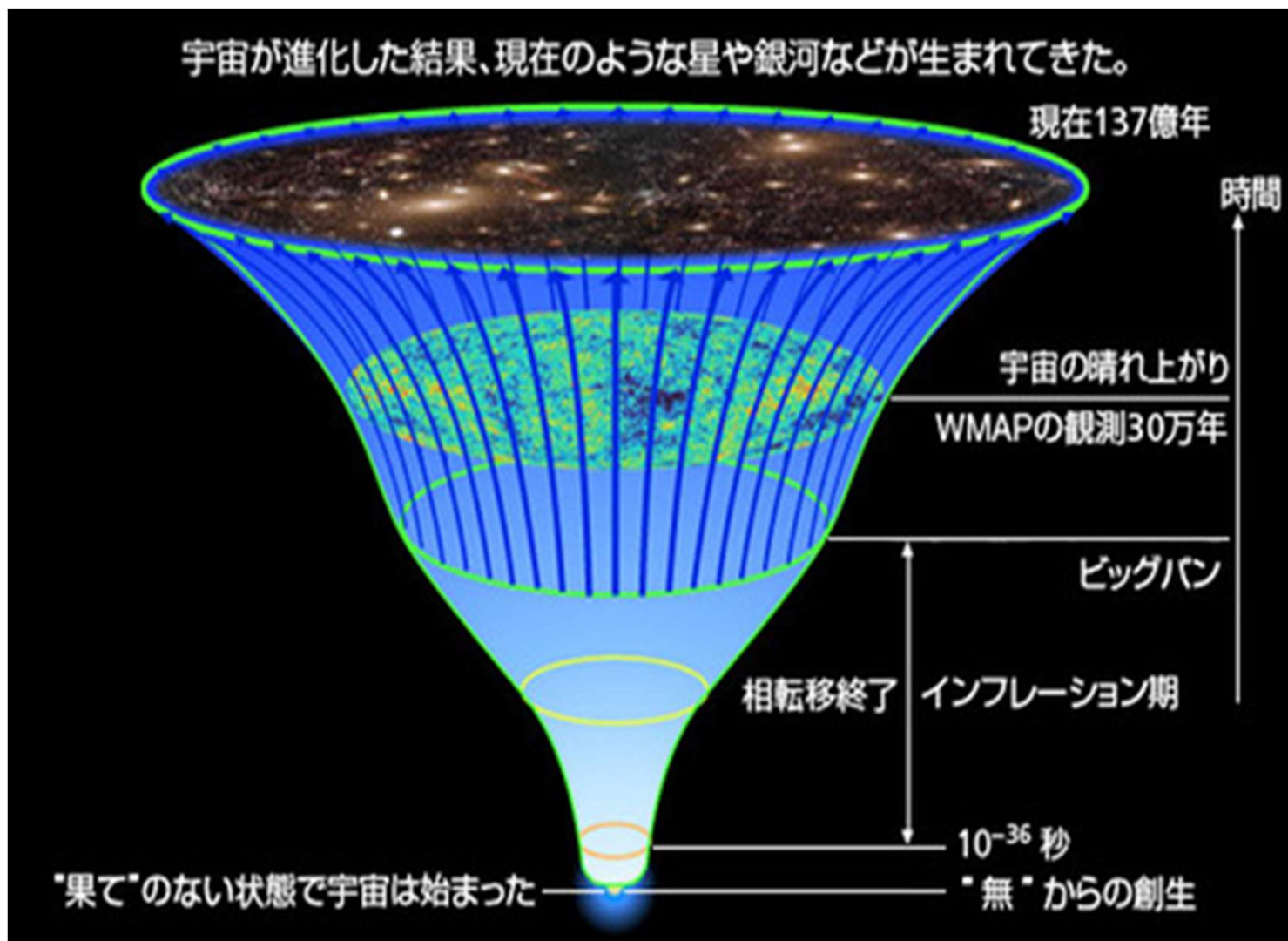
# 量子論に起因する”ゆらぎ”



宇宙マイクロ波背景放射の密度”ゆらぎ”



# 宇宙誕生



約138億年後（図の137億年は現在では138億年後と修正された）の現在、宇宙誕生の鍵となる原始重力波の痕跡が見られるというわけです。

・※1 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background(radiation))  
宇宙のあらゆる方向から一様に降り注ぐ電磁波のこと。

ビッグバンから38万年後、宇宙が冷えるに従い原子が形成され光が真っ直ぐ進むようになった状態(宇宙の晴れ上がり)の時に生じた宇宙最古の光であり、ビッグバンが起きたという有力な証拠である。

・※2 ビッグバン

宇宙誕生初期に起こった、超高温・超高密度の火の玉状態からの大爆発のこと。

・※3 インフレーション

宇宙誕生後、ビッグバンが起きる以前のごく短時間に生じた急激な加速膨張のこと。その時に蓄えられたエネルギーによってビッグバンが起きたと考えられている。しかし、インフレーションが実際に起きたという証拠はまだ得られていない。

・※4 原始重力波

インフレーションが起きた際、時空が振動することで生じたと考えられる波のこと。原始重力波が発見されれば、インフレーションが起きたという直接的な証拠となる。

注： 岐阜県飛騨市に建設中の地下望遠鏡「KAGRA(かぐら)」で17年度に観測を開始。国際協力で複数の衛星を打ち上げ、原始重力波を観測する構想がある。

# お礼

“ご参加ありがとうございます”

1/f ゆらぎには不思議な事が一杯あります  
理解しづらい点があったかと思いますが、私は  
今後もいろいろ調査したいと思っております。

〈主なる参考文献〉

本文は下記を参考に筆者の考えに基づき編集した。

- ・ゆらぎの発想 “1/fゆらぎの謎に迫る”  
武者利光著 NHK出版
- ・ゆらぎの不思議な物語 佐治晴夫著 PHP出版
- ・景観画像・風景画のゆらぎ特徴 川崎寧史
- ・インターネットによる“1/fゆらぎ関連項目”検索利用