

周波数領域における $1/f$ フィルタを用いた癒し効果のある音の生成

Healing Sound Modification using $1/f$ Filtering in Frequency Domain

関口真澄

Sekiguchi Masumi

法政大学情報科学部デジタルメディア学科

masumi.sekiguchi.8p @ cis.hosei.ac.jp

Abstract

A $1/f$ fluctuation is a fluctuation that power (spectrum density) is in inverse proportion to frequency f . A noise having a $1/f$ fluctuation is a pink noise. A method to check having $1/f$ fluctuation or not is to judge it by a degree of regression line of a frequency characteristic of the object sound. Then, this experiment adds a $1/f$ fluctuation characteristic to the sound that does not have a $1/f$ fluctuation, and evaluates generated sound. It was performed with technique to operate the value of the frequency domain. As a result, it could add a $1/f$ fluctuation characteristic, but, it can be hardly said that the sound have a healing effect. So, it is necessary to study more in this research.

1 まえがき

2007年に行われたアンケート [1]によると、日常でストレスを感じる人の割合は8割にも及ぶ。ストレスの解消法の上位には「音楽を聴く」があげられ、ストレス軽減効果を期待した $1/f$ ゆらぎを用いたヒーリングミュージックCDも発売されている。ヒーリングミュージックCDのような $1/f$ ゆらぎに注目して作成された音楽以外にも、例えばクラシックにも $1/f$ ゆらぎ特性は存在する。先行研究では、音楽には部分的にはあるが、どんな楽曲にも $1/f$ ゆらぎが存在するといった結果が出ている [2]。また、別のストレス解消法としては「自然にふれる」といった方法があり、これも自然界の音に含まれる $1/f$ ゆらぎを利用した方法である。このように、癒し効果を与えてくれる音として注目されているのが、「 $1/f$ ゆらぎ」である。このゆらぎには脳波の波を発現させる「癒し」効果があるとされ [2]、医療現場への応用も研究されている。しかし、 $1/f$ ゆらぎは世間の理解度が高いとは言えない。 $1/f$ ゆらぎを用いたヒーリングミュージックCDにおいても $1/f$ ゆらぎそのものや $1/f$ ゆらぎをどのように音楽に用いたかなどの解説がなく、科学的な裏づけがされていないものが大半であり、「 $1/f$ ゆらぎ」という名前だけは知っているが、それがどういうものかを理解している人は多くない。

そこで本研究では、 $1/f$ ゆらぎについて調査し、その応用として、 $1/f$ ゆらぎのモデルを作成し、人の声や、身近な音楽にモデルを適用した効果を検証し、評価する。そして $1/f$ ゆらぎの効果を通常の生活で感じられるようにし、ストレス解消に役立て

ることを目標とする。

2 $1/f$ ゆらぎ特性の生成

2.1 ゆらぎ

「ゆらぎ」とは、温度、音量、密度、周波数、速度、濃淡、力など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る。ある物理的な量や質の時間的、もしくは空間的な変化において、その量や質は平均的には一定の周期（間隔）を示しているように見えるが、正確に測定を行うとわずかなずれが出ていることがあり、その変化は不規則であるため完全に予測することはできない。この予測できないような「ずれ」を「ゆらぎ」と呼ぶ。ゆらぎは「何が」「どのように」「ゆらいでいるか」という2つの観点から分類できる。

2.2 ゆらぎの対象

「何がゆらいでいるか」とは、観測対象のどの成分に注目するか、ということである。ゆらいでいる対象については先行研究においてははっきりと定義されていない。すなわち研究によってゆらぎの定義は様々であるが、周波数ゆらぎ、あるいは振幅ゆらぎ、あるいはそれら両方を含むものを $1/f$ ゆらぎとする研究が多く見られる。「何がゆらぐか」という点で、ゆらぎを分類すると、ゆらぎは大きく3つに分けることができる。

2.2.1 周波数ゆらぎ

観測量の周波数が不規則に変動する高低のゆらぎである。観測量のパワースペクトルがゆらぐ場合と、周波数の変調波がゆらいでいる場合があり、本研究では前者のゆらぎに着目する。小川のせせらぎ、鳥の声、波の音など自然の音や、人が弾くパイオリンの音色などが知られている。クラシック音楽は、多くの楽器の音が周波数変調波のゆらぎを持つことや、楽器奏者がピブラート（演奏・歌唱において音を伸ばすとき、その音の見かけの音高を保ちながら、その音の特に高さを揺らすこと。弦楽器・管楽器・打楽器・声楽などで使われる）をかけることにより周波数ゆらぎを持つことが知られている。

2.2.2 振幅ゆらぎ

観測量の振幅が不規則に変動する強弱のゆらぎである。例としては、波音がある。音楽では、音量の変化や、楽曲演奏時における奏者の技術などが振幅ゆらぎとなっている。お寺の鐘や江戸鈴などはこのゆらぎを持つ。

2.2.3 リズムゆらぎ

音リズムが時間軸に対しゆらぐものである。これは、平均リズムに対してゆらぐものである。音の発生タイミングのずれであり、テンポのずれである。例としては風があげられる。風は、突然吹いたりやんだりする。これが不規則なゆらぎである。心臓の鼓動や、楽曲演奏時における奏者の動作もその一つの例である。

2.3 スペクトルによるゆらぎの分類

「どのようにゆらいでいるか」という見方からもゆらぎを分類することができる。自然界に存在するゆらぎ現象をスペクトルによって分類すると大体は「 $1/f^0$ ゆらぎ」「 $1/f$ ゆらぎ」「 $1/f^2$ ゆらぎ」の3種のゆらぎに分類される [2]。これらのゆらぎは数あるゆらぎの中で、周波数とパワースペクトル密度とが両対数線形関係にあり、信号のゆらぎ方の指標となるため、よく検証に用いられる。パワースペクトル密度が周波数の何乗に反比例しているかによって、ゆらぎの種類を判断する。

2.3.1 $1/f^0$ ゆらぎ

完全にランダムな変動をするゆらぎである。ホワイトノイズはこのゆらぎを含んでいる。すべての周波数を含んだ光が白色であることから「ホワイトノイズ」と名付けられた。TVの砂嵐などやかましく耳障りな音などが相当する。パワースペクトルはすべての周波数成分にわたり、均一な値をとる。ゆえに、回帰直線の傾きは $f^0 = 1$ となる。ホワイトノイズの生成には正規乱数を利用する。

2.3.2 $1/f$ ゆらぎ

$1/f^0$ ゆらぎと $1/f^2$ ゆらぎのちょうど中間にあたるゆらぎである。パワースペクトルは低周波数部分のパワーが高く、高周波数部分では低い反比例のグラフとなる。周波数 f に対してパワーレベルが反比例するので $1/f$ と表現され「 $1/f$ ゆらぎ」と呼ばれている。ピンクノイズは $1/f$ ゆらぎを含むノイズである。ホワイトノイズに対し、 -3dB/oct で変化する特性をもつフィルターを用いることで生成することができる。波音、小川のせせらぎ、そよぐ風、かげろうなど主に自然界でよく観測される。自然界以外では、高速道路の交通流やインターネットの情報流など社会的なシステムや、脳波などの生体ゆらぎにもみられる [2]。

2.3.3 $1/f^2$ ゆらぎ

高周波数域ほどパワースペクトルの値が減衰するゆらぎである。このゆらぎを含むノイズはブラウンノイズ（レッドノイズとも呼ばれる）である。他のノイズとは異なり、「ブラウン」は色を指しているのではなく、ブラウン運動を発見したロバート・ブラウンの名前に由来している。パワースペクトルが周波数 f^2 に反比例することから「 $1/f$ 二乗ゆらぎ」と呼ばれる。グラフ上では $1/f$ よりも鋭い角度で減衰する数値が生じる。ゆったりとし、リズム感が乏しく眠気を誘うような「ゆらぎ」であり、砂丘の風紋、株価の変動、地平線の稜線などにみられる。ブラウンノイズの生成にはオクターブごとに 6dB 減少する特性をもつフィルターを用いる。

2.4 $1/f$ ゆらぎによる癒し効果

$1/f$ ゆらぎには癒し効果があると言われる。その理由は、人間の持つ生体リズム（心拍の鼓動のリズムや血圧、脳波の波の

ゆらぎ、歩行リズムなど）に $1/f$ ゆらぎが見られるためである。人間が $1/f$ ゆらぎを感知すると、それは生体リズムと共鳴し、共振する。このとき、人間は心地よさを感じる [4]。

2.5 ゆらぎの生成方法

周波数領域で値を操作することで $1/f$ ゆらぎ特性を付加させる方法には、フィルタにより特定の周波数を遮断（もしくは通過）させたり、パワースペクトルの式を変形させたりする方法がある。周波数領域で $1/f$ ゆらぎ特性を生成する方法にはセルラーオートマトンや間欠カオスを用いた方法等がある。

2.6 $1/f$ ゆらぎの生成実験

本研究では、2.5章で挙げた生成法のうち、周波数領域で値を操作する方法を採用し、実験を行う。ゆらぎには周波数のゆらぎや、振幅のゆらぎがあげられることを先述した。本研究では振幅ゆらぎよりも多く観察される周波数ゆらぎに着目し、操作する実験を行う [9]。この方法を採用した理由は、他の2方法がゆらぎそのものを生成する方法であるのに対し、採用した方法はすでにゆらぎを持つ音を操作する方法であり、ゆらぎを持たない人工的な音ではなく、すでにゆらぎを持つ音声に $1/f$ ゆらぎ特性を付加するという本研究の目的に適しているためである。この実験は、観測音全体のパワースペクトルを $1/f$ ゆらぎ特性にしたときに、 $1/f$ ゆらぎのもつ癒し効果が付加されていることを期待して行う。その結果、癒し効果が得られるか、癒し効果の他にどのような効果が得られるかを検証し、評価する。そのために以下に述べる客観・主観評価実験を行った。

2.7 客観評価実験

周波数領域で値を操作することで $1/f$ ゆらぎを付加した音声の評価する客観評価実験を行う。本実験の目的は、「 $1/f$ ゆらぎの有無を数値を用いて表現すること」と「 $1/f$ ゆらぎを含まない音声に $1/f$ ゆらぎ特性を付加させること」である。自然界の多くの音には $1/f$ ゆらぎが含まれている。しかし、 $1/f$ ゆらぎは、規則的なゆらぎと完全に不規則的なゆらぎのちょうど中間にあたるゆらぎである。2.4節で述べたように、人間は $1/f$ ゆらぎを体内リズムを使って感じ取っているため、その有無を人間の耳で判断することは非常に難しい。そこで、 $1/f$ ゆらぎの有無を数値を用いて表現することで、ゆらぎを付加させる対象かどうかを判断できるようにする。また、 $1/f$ ゆらぎは自然界に多く見られる。しかし、自然の少ない都会では自然界の音に接する機会が少ないので、街中で聞く音や人の声などの周波数を操作し、 $1/f$ ゆらぎ特性を付加した信号を生成させる。本実験のプログラムを書くにあたり、MATLAB(米 MathWorks 社開発の数値計算用ソフトウェア)を用いた。

入力・分割・前処理 信号を入力する。時間の長い信号を扱う場合、全体を一括して処理すると時間がかかる上、コンピュータの負担も大きい。そこで、信号を適当な長さに分割し、各々の信号に対して前処理として窓掛けを行う。今回はハン窓を使用した。

パワースペクトルの分析 DCT(離散コサイン変換)を行い、観察信号のパワースペクトル P を求める。パワースペクトルを表示したグラフの両軸を対数変換して描画する。このグラ

フには、パワーを含んでいない部分（グラフの谷になっている部分）が多々見られる。これらの部分は回帰直線を求める際に影響を及ぼしてしまうため、パワースペクトルをより正確に分析するために、グラフのピークを抽出し、パワーを含む部分のグラフの概形を求めておく。回帰直線の導出には、最小二乗法を用いる。回帰直線 $y = ax + b$ の傾き a が -1 であれば、その音には $1/f$ ゆらぎが含まれていると言える。注意すべき点は両対数変換を行うと、密度の高い高周波領域の成分が回帰直線の傾きに大きく影響してしまうことである。そこで信号を分割し、各フレームごとに回帰直線の傾きを求め、それらの平均全体の傾きとする。本実験では、回帰直線の傾きが約 -1 ($-0.9 \sim -1.1$) であった場合に、その音声は $1/f$ ゆらぎを含むと判定する。

信号処理 新しいパワースペクトルを P' とし、 P' の回帰直線を $y = a'x + b'$ とする。 $a' = -1$ となるように導出した $P' = P^{-\frac{1}{a}}$ によってゆらぎ特性を付加した信号を生成することができる [7]。

IDCT・結合処理・出力 位相を付加した後、IDCT（逆離散コサイン変換）して信号を時間領域に戻す。各フレームを結合させる。必要があれば正規化し、信号を出力させる。実際に音声を聞き、 $1/f$ ゆらぎ特性を付加した結果を考察する。

2.8 実験の条件と結果

実験対象 実験対象には、一般に不快音や快適音、人の声を用いた。不快音を用いる理由は、この研究がストレス軽減に役立てることを目的とするものであり、不快音に $1/f$ ゆらぎ特性を加えることで、不快感を取り除くことを期待しているためである。快適音（快適音とは、本研究では $1/f$ ゆらぎを含むと期待される音と定義する）を用いる理由は、この実験によって $1/f$ ゆらぎの有無を確認し、なければゆらぎ特性を付加してどのような効果を得ることができるか調べるためである。人の声も同様にゆらぎ特性を付加した効果を調べるために用いている。また、この実験方法は観測音を持つパワースペクトルを操作して $1/f$ ゆらぎのパワースペクトルにするものであり、音そのもののゆらぎそのものを付加しているわけではない。よって元々ゆらぎを持たない音（電子音）などは実験対象として適していない。これらの理由により、本実験の観測音には車のヘリコプターのプロペラ音、エンジン音、せせらぎの音、波音、母音「あ」を約5秒間発声したものを、一文を朗読したものをを用いた。

実験条件 すべての実験対象において標準化周波数 44.1kHz、量子化ビット数 16bit、フレームシフト率 50%で行った。各フレームの分析時間は適した秒数が決められていないが、約 30 ~ 200ms 程度の時間分解能を得られるようにため、1024 点（約 23ms）、2048 点（約 46ms）、4096 点（約 92ms）、8192 点（184ms）の 4 種類の点数で実験を行い比較した。窓長、DCT 長は、フレーム長と等しい幅である。データ時間および、23.2ms(1024 点)で分析したときの回帰直線の傾き a を導出させた結果を下記の表に示す。

表 1. エンジン音の実験結果

実験対象	データ長 (s)	フレーム長	a	a'
エンジン音	4.68(s)	23.2(ms)	-2.61	-1.00
せせらぎの音	13.50(s)	23.2(ms)	-1.16	-1.00

以下に各音声の実験結果を示す。左図は処理前、右図は処理後のパワースペクトルを対数表示させたものである。本実験は数フレームに分割して処理を行っているため、パワースペクトルは全フレームのパワースペクトルの合計をフレーム数で割り、平均をとっている。すべてフレーム長 23.2ms(1024 点)で分析したものである。

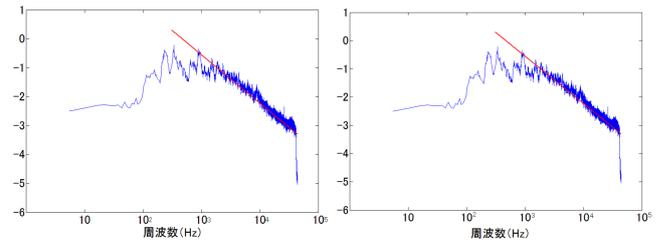


図 1. エンジン (処理前)

図 2. エンジン (処理後)

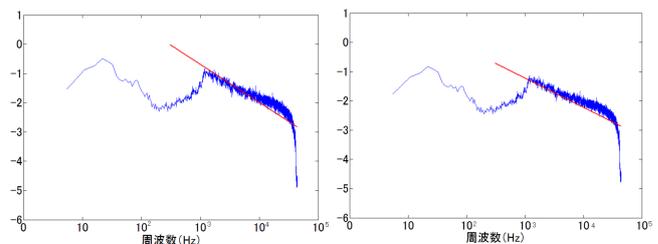


図 3. せせらぎの音 (処理前)

図 4. せせらぎの音 (処理後)

考察 すべての音声においてパワースペクトルを $1/f$ ゆらぎ特性にすることができた。エンジンの音や、ヘリコプターのプロペラ音は処理前の傾きが共に -2 近くあり、 $1/f^2$ ゆらぎのパワースペクトルを持つことがわかった。このような結果が出たのは、二つの不快音が低音が強く響く音であったためだと考えられる。小川のせせらぎの音と波音の分析結果はいずれも -1 に近い値を示しており、 $1/f$ ゆらぎ特性を持っていたことが確認できた。

この実験では、パワースペクトル全体を分析し、操作するという手法をとった。しかしこの方法では、図 3 のようにグラフの概形が山なりである場合には無理やり直線に回帰させることになってしまう。よって、パワースペクトルのどの範囲を $1/f$ ゆらぎ特性にするかを考慮し、部分的に分析を行う必要がある。例えば、人間の可聴域や聴覚特性を考慮するならば、20 ~ 20kHz の範囲内で実験を行う。

2.9 主観評価実験

$1/f$ ゆらぎ特性を付加した音声がどのような効果を持つかを調べるために、主観による評価実験を行った。 $1/f$ ゆらぎ特性の付加によって、快適音には快適度が上がることを不快音には不快度が下がることを期待する。評価方法にはアンケートを用いた。被験者は学生の男女 7 名である。アンケート方法は、信号処理前の信号と処理後の信号をランダムに被験者に聞かせ、各信号を快適度、不快度の二項目において 5 段階で評価してもらう。

さらに、処理前と処理後で音の変化を感じるかという設問も用意し、回答を得た。

本実験によって期待される結果は快適度が高く、不快度が低い音声である。設問の選択肢を快適度、不快度それぞれに合わせ重み付けし、集計結果の平均値を算出する。数値が高いほどそれぞれ「快適であり」「不快である」ことを表す。処理前と処理後の比較を表2に示す。快適度は「快適でも不快でもない」状態を0としたとき、どれくらい心地よさを与えるか、というプラスの状態を表す指数であると定義し、不快度は快適度と対になるマイナスの状態を指す指数と定義する。

表 2. 生成音の快適度と不快度の評価

音声	快適度		不快度	
	処理前	処理後	処理前	処理後
エンジン音	2.29	2.43	4.00	2.71
せせらぎ	3.57	3.86	1.57	1.43

考察 主観評価実験では、処理後の快適度評価・不快度評価ともに快適度を上げ、不快度を下げることができた。しかし、これらの音には若干ではあるが雑音の影響が見られた。考えられる原因の一つは録音方法である。別の原因として、実験プログラムによって雑音が発生している可能性もある。

エンジン音等の不快音に関しては、快適度が若干上がっているがその変化は1以下であり、小さいと言える。これは不快音が元々持っている12~20kHzでスペクトルの傾きがほぼ0になる特徴(図5)が実験により1/f ゆらぎ特性を付加しても変化しないことが一つの理由であると考えられる。せせらぎ音などの快適音においては、快適度・不快度ともに高評価を得ているが、処理前と処理後の値の変化は少ない。これは、処理前の音声の回帰直線の傾きが約-1.2であり、1/f ゆらぎ特性に近かったため、信号処理の影響をあまり受けていないためである。また不快音と同様に、快適音が持つ10kHz以上で急峻な傾きで減少する特徴(図6)が変化しなかったためである。

各音声において「違いを感じるか」という問いに対しては全員が「感じる」と答えた。このように、本実験によって実験音声の評価を少しではあるが上げることができた。しかし、処理後の音声に大きな違いを感じることはなく、癒し効果を得られたとは言えない結果となった。つまりこれらの実験結果から1/f ゆらぎと癒し効果には必ずしも相関があるわけではないことがわかった。

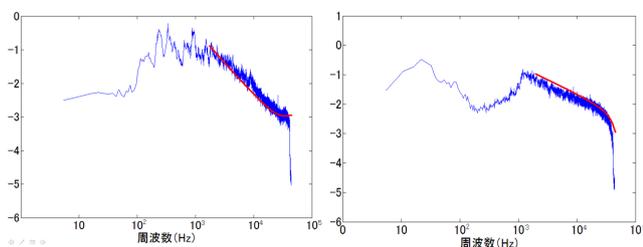


図 5. 不快音の特徴

図 6. 快適音の特徴

3 あとがき

本研究では、観測音の周波数全体を分析し、その音の持つパワースペクトルが1/f ゆらぎ特性であるかを客観的に評価し、さらに周波数領域において値を操作することでパワースペクトルを1/f ゆらぎ特性にする実験を行った。結果、ゆらぎ特性を

付加することが可能であるとわかった。主観評価実験では、不快音・快適音それぞれにおいて処理後の音声の評価を上げることができた。本実験の課題は、まず生成された音の品質を向上させることである。今回の実験で問題となった雑音には、マイクの性能上げたり、録音環境を変えろといった対処が必要である。また、プログラムの処理中に雑音が発生した可能性も考慮し、実験プログラムの見直し・修正をする必要がある。また、今回の実験ではゆらぎ特性の効果を十分に得られなかった。なぜなら本実験では、パワースペクトルを操作してゆらぎ特性にしたが、実際に音声にゆらぎを付加しているわけではないためである。そのため、今後は周波数変調の変調波に着目して1/f ゆらぎ特性を持つ変調波を生成し、音を1/f 特性でゆらぎさせる方法を考えていく。また、今回用いたクラクション等の不快音は音量の点からも不快さを感じる音である。よって、今後は、先述した振幅のゆらぎといった要素も考慮する。振幅ゆらぎも周波数ゆらぎと同様に、1/f ゆらぎ特性をもつ変調波を生成し、観測音を振幅変調させる実験を行っていく。

最後に、本研究の最終目標は、身近な音を収集し、1/f ゆらぎ特性を付加させて癒し効果のある音声を生成することである。今回の実験では、1/f ゆらぎの持つ癒し効果の実証には五段法による主観評価のみしか行っておらず、数値化して客観的に効果を示していない。よって、音声に1/f ゆらぎ特性を付加するだけでなく、脳波計測を用いた効果の評価方法も取り入れ研究を進めていかなければならない。

参考文献

- [1] NetMile リサーチ”ストレスについてのアンケート (2007年2月6日)”
- [2] 武者利光:”ゆらぎの世界 自然界の1/f ゆらぎの不思議”, 講談社,1980.
- [3] 武者利光:1/f ゆらぎ 応用物理
- [4] 武者利光編著:”ゆらぎの科学4”, 森北出版,1993.
- [5] ”統計学入門”,pp257-277, 東京大学出版会 1991.
- [6] 斎藤兆古:”1/f ゆらぎと複雑系に関する考察”第51回自動制御連合講演会, 山形大学工学部
- [7] 石川洋:”1/f ゆらぎ特性による音質改善システムの開発”九州共立大学大学院工学研究科 電子情報工学専攻
- [8] 上之園裕二 都築佳生 犬塚信博 世木博久 伊藤英則”自然界のゆらぎに基づいたメロディ生成の一手法”第54回平成9年前期(2) pp.267-268 19970312
- [9] 中山彰”音の1/f ゆらぎに関する研究”Research memoirs of the Kobe Technical College 34 pp.43-48 19960229
- [10] 瀧沢智和 中尾光之 五十嵐庸介 片山統裕 山本光璋”心拍1/f ゆらぎとそのモデル化”IEICE technical report. ME and bio cybernetics 97(371) pp.97-104 19971107
- [11] 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”法政大学大学院工学研究科
- [12] 野村 俊昭 石井 六哉:”スペクトル解析による快音・不快音の特徴抽出”電子情報通信学会技術研究報告. DSP, デジタル信号処理 pp.39-46 19950526