

音楽におけるリズムのゆらぎ

Rhythmical Fluctuations in Music

吉田友敬* 中西智子**

要 旨

音楽において、リズムのゆらぎは、音楽の流れに乗ることや、音楽的感動にとって大切な要素である。このゆらぎの本質的な要因は何であるか。特にゆらぎのスペクトル解析に関しては、武者等の研究がある。その中で、メトロノーム等に合わせることなく、自由に拍打ちをする、フリータッピングにおいて、 $1/f$ ゆらぎが見出されている。本研究では、この方向を発展させて、実際の楽曲に合わせて拍打ちをする実験を行った。その結果、新たに $1/f$ ゆらぎが見出され、人間的なリズムのゆらぎが私たちの感性に対して重要な意味を担っていることが推測される。また、いくつかの例において、リズムのゆらぎと引き込み同調の関連が示唆される。

Tomoyoshi Yoshida*, Satoko Nakanishi**

Abstract

Rhythmical fluctuations in music are important for running the music smoothly and moving our blood. Where do these fluctuations come from? Musha and his colleagues dealt with this problem especially by means of spectrum analysis. They revealed $1/f$ fluctuations in the case of "Free Tapping". In our research, we tried to improve the method by examining the case in which subjects were to tap with real musical works. As a result, we have found some $1/f$ fluctuations in the new conditions, which mean that rhythmical fluctuations in the function of humans are very important for sensitivity. Then, in some examples, the relation between rhythmical fluctuations and synchronizations in music is implied.

1. はじめに

情報という言葉聞いて普通に考えられるのは、コンピューターで扱うことの容易な、記号化され、符号化された情報のことが多い。しかし、情報という概念を広く捉えて考えたとき、上のように説明される意味の情報、自然や人間の活動に含まれる情報のうちのほんの一部分である。私たちは、

生活の中での判断や認識において、計算された論理的な根拠によるよりも、はるかに多くの部分を、直観的な感覚や感情の変化によっている。今後、より人間的な情報を扱う場合、このような点が重要になってくる事が予想されるが、こうした割り切れない情報を、どのように記述し、説明すれば良いのであろうか。本研究では、生命や人間に特有な情報の、本質的な一面に焦点を合わせる。

私たちの意識にとって、心の動きや感情の変化は行動の動機づけとして意味の大きい要素であるが、これらは時間とともに変化する一種の時系列と見ることができる。そこで、筆者らはこのような意識の変動を伴う現象の本質に関連するテーマとして、リズムの問題を考えた。その中でも、特にリズムのゆらぎには、示唆される事柄が多い。このゆらぎの意味を解明するために、拍打ちの実

*) 名古屋大学大学院人間情報学研究科
464-01 名古屋市千種区不老町
Graduate School of Human Informatics, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-01 Japan
TEL: (052) 789-4844
E-mail: tyosida@info.human.nagoya-u.ac.jp

**) 三重大学教育学部
〒514 三重県津市上浜町 1515
School of Education, Mie University
1515 Kamihama-cho, Tsu, Mie 514 Japan
TEL/FAX: (0592) 31-9337

験を行った。

実験は、従来メトロノームなどに合わせてタッピングをすることが多かったが、テンポを誘導するきっかけとして実際の楽曲を用いた。その結果、いくつかの興味深い特徴が見いだされたが、特にスペクトルの分析において、 $1/f$ ゆらぎが多く現われた。また、いくつかのデータにおいて、被験者同士、あるいは被験者と誘導リズムのタイミングがよく引き込みあって同調することが見いだされ、 $1/f$ ゆらぎとの関連が推測される。

実験に使った曲は、日本の文化と西洋の文化を代表するものを選んだが、楽曲自体のリズムの特徴にある程度の違いがある他、被験者の音楽的素養、特に西洋音楽に対する訓練の有無が拍打ちデータにいくらかの差異をもたらした。

2. 心の動き、感情の変化とゆらぎ・引き込み

私たちの感情は、ある種の昂揚と鎮静を繰り返すリズムが継続して成り立っていると言えるが、特に気分的に昂揚することは、人間の行動や判断、意志決定にとって、積極的で肯定的な結論を得るために必要な精神的環境であるように思われる。それは、新しい発見や発想の瞬間における意識の状態、また、芸術的な感動の気分、懸案の悩み事が解決して展望が開けてくる気持ちなどに典型的に現れる精神状態である。

この最後の例からも示唆されることであるが、このような人間の心の動きにおいては、何かの精神的な緊張状態が持続し、その頂点に達したところで心の緊張から解放されるという共通した変化が存在するように推測される。こうした精神作用は私たちの生活にとって普遍的に存在していると考えられるが、同様の考え方は音楽においてもやはり見い出される。

音楽においてもフレーズのリズムを構成する本質的な作用は何かということについて、これを緊張と弛緩、あるいは期待とその実現とする考え方が広く存在する。

例えば、グレゴリオ聖歌の研究者によれば、リズムの本質は緊張と弛緩の部分にあたるアルシスとテシスという基本的な要素から成ると考えられる。ここで、アルシスとは、精神的な緊張と共

に音楽的にはだんだん音量が増して行き、速さは次第に速くなる部分であり、反対に、テシスでは、心の弛緩と共に次第に静かになり、ゆっくりになって行く。^[2] また、緊張の高まっていく部分では、意識の集中やリズムの同調が起こるのではないかということも考えられる。^[5]

これらのリズム論は、もっぱら生き生きとした音楽演奏のためのイメージとして説明されることが多い。しかし、単なるイメージやメタファーとしてだけでなく、リズムの変化がもたらすこのゆらぎの秘密を解き明かせば、人間の心性の本質を理解する手がかりとなるのではないか。そうすれば、音楽の領域にとどまらず、人間の精神・意識に関わるさまざまな分野で、臨床的な応用が可能になるのではないかと思われる。

3. パワースペクトルと $1/f$ ゆらぎ

3.1 パワースペクトルによる分析

気温の変化、株価の変動など、不規則に変化するよう見える量の分析には、特に変動の全体的な性質を把握する目的で、スペクトル分析が用いられる。この方法は、フーリエ変換という数学的手段を利用することによって、不規則な変動を、無数の周期的な変動の総和に分解していくというものである。すなわち、変動の周期性を判定する場合などに、有効な手段が、このスペクトル分析というやり方である。

パワースペクトルとは、この各周期変動に分解されたそれぞれの周期変化の成分の強さ(パワー)を連続的なグラフにして表したものである。もし、変動が全く周期的なものであれば、このパワースペクトルが0でない値をとるのは、とびとびの箇所だけとなる(フーリエ級数)。しかし、変動に不規則な、周期的でない成分が含まれる場合には、パワースペクトルは連続的になる。本研究では、後者の場合に当てはまる現象を対象としている。また、パワースペクトルの分析を行うにあたり、後に述べるように、成分の強さの分布が周波数の何乗に比例しているかが、ポイントとなるので、グラフの目盛りを両対数にとることにより、その関係(乗数)を、グラフの傾きとして、明らかに読みとることができる。

なお、本研究におけるフーリエ変換は Mathematica の関数によるもので、その計算式は、数値列 a_n のフーリエ変換 b_s が、

$$b_s = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{r=1}^n a_r e^{2\pi i(r-1)(s-1)/n}$$

となっている。従って、パワースペクトル c_s は、 $c_s = |b_s|^2$ となり、横軸の s は、データの総拍数 (440 または 380) に対するゆらぎの周波数をしめす。ただし、 $s = 1$ での c_s の値は、データ全体の平均値に相当し、 $s = 2$ が、データ全体で、1 周期のゆらぎの強さを表す。

3.2 ゆらぎの分類

一般的に、周期の非常に短い部分では、周期変化の成分 (パワースペクトル) は小さな値をとることが多い。しかし、もし変動が完全にランダムであれば、パワースペクトルは全周期にわたって均一な値をとることがわかっている。^[4] このような変動の系列は、ホワイトノイズと呼ばれる。

これとは別に、周期変化の周期が短くなるにつれて、パワースペクトルの値が次第に小さくなっていくような変動のパターンが多く存在する。このうち、株価の変動、地平線の稜線などは、パワースペクトルの値が、周波数 f の 2 乗に反比例し、その逆数に比例するという意味で、 $1/f$ ゆらぎと呼ばれる。このような変動は、不規則な要因を含むものの、かなりよく予測をすることができる。

さらに、ホワイトノイズと $1/f$ ゆらぎの中間に、パワースペクトルの値が周波数 f に反比例するような変動も見つかっており、 $1/f$ に比例するという意味で、 $1/f$ ゆらぎと呼ばれている。 $1/f$ ゆらぎには、木目の模様での線と線の幅の変化、心臓の拍動のリズムのゆらぎ、高速道路を自動車が通過する台数のゆらぎなどがある。予測性とランダム性が中間的に含まれている変動と言え、生命現象や、音楽などの意識作用との関連が示唆されているが、 $1/f$ ゆらぎがもたらす快適性の要因など未解明の部分も多い。

3.3 フリータッピングとメトロノームタッピング

武者らは、被験者に均一に拍打ち (タッピング)

を行わせ、そのリズムのゆらぎについて分析を行った。^[3] それによれば、特にテンポを誘導する合図を用いず、被験者に自由にタッピングを行わせた場合 (フリータッピング)、0.1Hz 付近を境界にして、それよりも周波数の高い部分では、ホワイトノイズに近く、周波数の低い部分では、 $1/f$ に近い傾きを示した。

また、被験者のタッピングをメトロノームに合わせて行ったところ、周波数の低い部分でもホワイトノイズに近くなるか、あるいは逆に、周波数が低くなるに従って、パワースペクトルの値が小さくなる傾向を示した。最後のケースは、音楽的な経験を持つ被験者の場合であり、大局的には、メトロノームによる誘導テンポから大きくは、はずれないという音楽的トレーニングの結果と考えられる。音楽的トレーニングを受けていない被験者の場合は、全周波数域にわたってホワイトノイズに近い傾向となっている。

以上から、フリータッピングでは、ゆっくりとした周期でテンポがゆらぐよううねりを伴うが、メトロノームタッピングでは、その傾向は失われる。すなわち、メトロノームに合わせてタッピングを行った場合には、被験者独自のリズムのうねりは失われる代わりに、正確なテンポからの誤差と言えるようなずれが生じているのではないかと考えられる。

4. 拍打ちの実験

4.1 目的

リズム・フレーズの本質として、テンポの微妙な変化やずれを考えるが、今回の実験では、リズムの流れが、音楽的な意味を失わないように、実際の楽曲に合わせてタイミングをとった場合のリズムのずれを調べた。特に、そのゆらぎの特徴と、引き込み同調の様子を調べることを目的とする。

4.2 方法

テンポを誘導する音声をきっかけに、一度に 2 名の被験者が拍打ちを行なった。テンポを誘導する刺激としては、日本の音楽と西洋の音楽 (クラシック、ポピュラー) からそれぞれ選び、次の 3 曲を用いた。その中で、モーツァルトとアバはメ

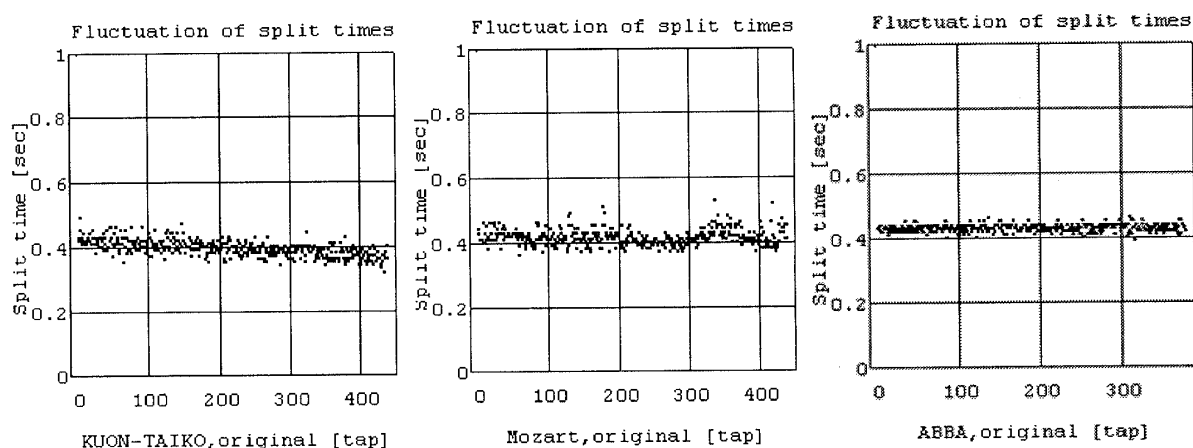


図1：テンポを誘導する楽曲のリズムのゆらぎ

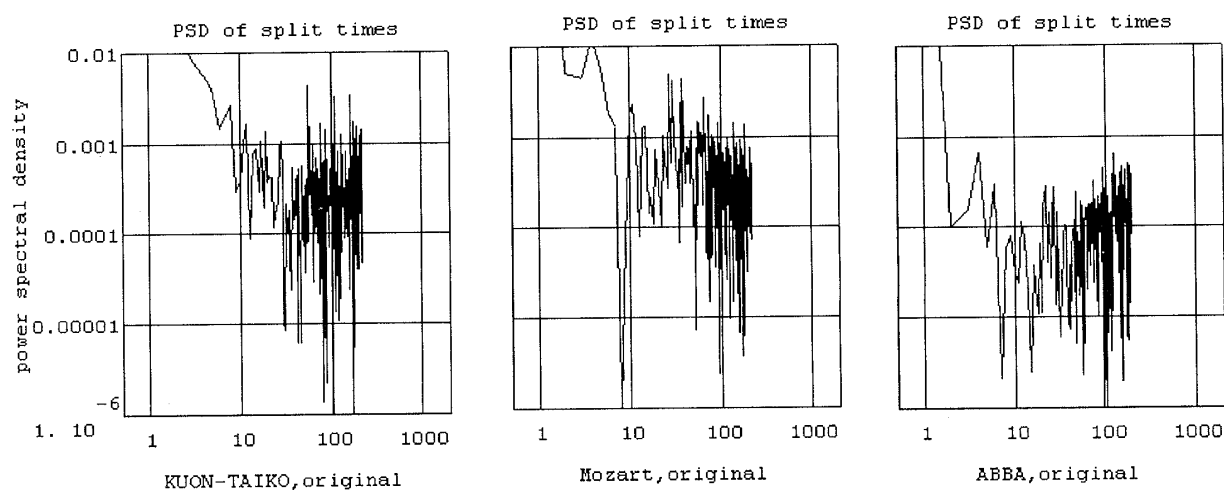


図2：テンポを誘導する楽曲のリズムのゆらぎのパワースペクトル

ロディーや和声を伴うが、久遠太鼓は純粹にリズムのみの音楽である。

1. 作曲者不詳，若松，津久遠太鼓演奏（本稿では久遠太鼓と記す。）
2. モーツァルト作曲，ピアノソナタ K.570 第3楽章，内田光子演奏（本稿ではモーツァルトと記す。）
3. Benny Andersson & Björn Ulvæus 作詞作曲，Does your mother know, ABBA 演奏（本稿ではアバと記す。）

楽曲における拍打ちのテンポは、あまりバラエティーに富ませるよりも、音楽のノリのよさを分析の対象とするため、できるだけ乗りやすいテンポの曲を選んだ。特にモーツァルトは、それに合わせてタイミングをとるのを困難にする rit. などが極力少ないものを選んである。また、いずれの曲も3分程度の長さで、1回の録音で400拍程度

のデータが得られた。

拍打ちは、小さいバチで叩いた音を、2名の被験者の別にステレオの左右のチャンネルに録音した。録音には、タイミングの正確を期して、MDデッキを用いた。その後、録音した音声信号を、音声解析ソフト「サウンド・マスター」に取り込み、その波形によって拍を叩いたタイミングを1/100秒単位まで測定して、データ列を出力した。テンポを誘導する音声のデータも、同様にサウンド・マスターに取り込んで、拍のタイミングを分析した。その後のデータの分析には Mathematica を主に用いている。

4.3 結果

結果の分析にあたっては、収録データのうち、初めの20拍と曲の最後の数拍を、乱れたデータを除外するために分析対象から除いた。その結果、

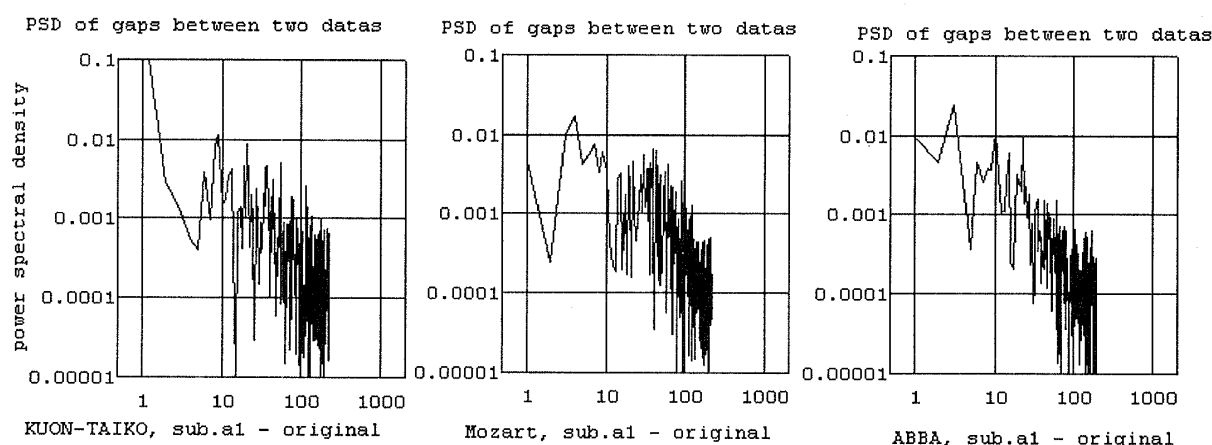


図3：被験者Aの誘導データからのずれのパワースペクトル

久遠太鼓とモーツァルトで440拍、アバで380拍となった。また、分析の対象となった被験者は、音楽・太鼓経験の有無を含む4名である。

テンポを誘導する楽曲データの分析

まず、被験者の拍打ちを誘導する元になる楽曲のデータ自体を分析しておく。1拍の長さを順にプロットしていくと図1のようになる。すぐにわかることは、久遠太鼓ではテンポが徐々に速くなっていくことである。これは、前述のリズム論から考えると、久遠太鼓では、全曲を通じて緊張感が盛り上がっていくところに特徴があるのではないかと考えられる。また、アバはもっともテンポのゆらぎが少なくなっている。

次に、このデータのパワースペクトルを図2に示してある。ゆらぎのスペクトル分析にあたっては、いくつかの方法があるが、1拍の幅を順に等間隔に並べたデータをフーリエ変換する方法で、他のより複雑なやり方とほぼ変わらない結果が得られることが、わかっている。^[4]

結果は、モーツァルトの場合がもっともよく $1/f$ ゆらぎを示した。久遠太鼓では、低周波域では $1/f$ となるものの、高周波域では逆に傾いた傾向を示している。また、アバにおいては、 $1/f$ の傾向はむしろ少ないと言える。

音楽的な系列に普遍的に見い出される現象として $1/f$ ゆらぎが挙げられるが、そのためにアバは自然な音楽から外れているとは一概に言えない。実際、被験者は、アバが3曲の中でもっともリズム

ムに乗りやすいと感じている。

ずれの分析

被験者のとったタイミングとテンポを誘導する音声データのタイミングとのずれを分析した。クラシックピアノの訓練を受けている被験者Aと音楽的には初心者である被験者Bとでは、全般に被験者Aの方が早いタイミングでリズムをとっている。

このうち、被験者Aについてテンポを誘導するデータからのずれのパワースペクトルを示したのが図3である。いずれもかなり良く $1/f$ を示している。特に注目されるのは、アバの場合に、元のデータは $1/f$ でないにもかかわらず、被験者のずれのデータはきれいな $1/f$ を示していることである。音楽的なノリと $1/f$ ゆらぎの関連が示唆されるデータと言える。この傾向は他の被験者にも一貫して見られた。

引き込み同調の分析

被験者とテンポを誘導する音声データ、および被験者同士でのタイミングの同調の様子について統計的手法で有意性を検定した。^[5]

複数のデータの系列は、互いに少しずつずれているが、そのずれは、拍の進行とともに大きくなったり、小さくなったりしている。このずれの大きさの変化が、全体的には一定の分散を示すのに比して、それぞれの箇所でのずれの程度の変化が偶然のばらつきの結果であるのか、意味のある変化

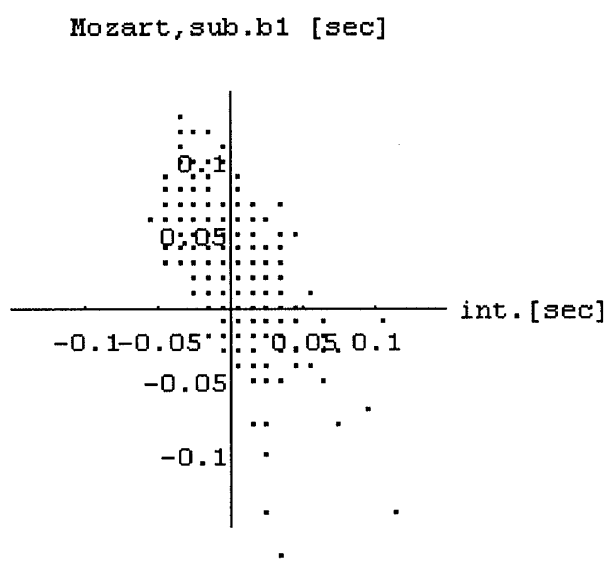


図4：被験者Bのずれと1拍の長さの相関

と言えるのかを、一定の信頼度で、判別することができる。特にずれの値が小さく、互いのデータが近づいている場合に、偶然の程度であるのか、引き込んでいると考えられるのかがポイントとなる。

その結果、いくつかのデータで有意に引き込み同調が起きていると考えられる結果が示された。被験者Aは、モーツァルトとよく同調し、被験者Bは、久遠太鼓とよく同調した。また、モーツァルトとアバでは、被験者AとBの間でも同調が見られた。これらの同調は、単に被験者のデータとテンポを誘導するデータが近いということではなく、リズムの流れの中で、引き込んだりばらついたりということを繰り返しているということが統計的な確率（この場合95%）で、証明されたということである。

また、どのようなところで引き込みが起こるかということを知る手がかりとして、ずれと1拍の長さ、および1拍の長さの変化量（拍の速さの変化）との関係を相関図として表したのが図4と図5である。前者では、相関係数 $r = -0.646$ と、中程度の負の相関があり、後者では、 $r = 0.345$ と、正の弱い相関が認められる。いずれも統計的に有意な相関であることが、95%の信頼度で確かめられる。これによると、1拍の長さの短いところ（速いところ）では、タイミングをとるのが遅くなるが、次第に速くなるところでは、逆にタイミ

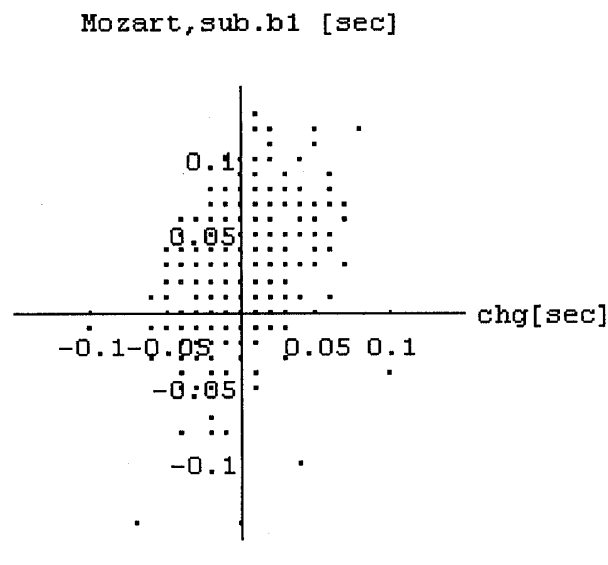


図5：被験者Bのずれと1拍の長さの変化の相関

ングをとるのが速くなっている。特に後者の場合、テンポの変化に対して、それを先取りしてタイミングをとっていると考えられる。

5. 考 察

今回の実験から、顕著に現れたこととして、テンポを誘導する音声刺激のデータからのずれが $1/f$ ゆらぎを示したことが、まず挙げられる。前述のように、武者等の研究において、メトロノームに合わせて拍打ちを行なった場合は、そのパワースペクトルはホワイトノイズになるか、あるいは、低周波域において $1/f$ とは逆の傾向を示した。^[3] この事実は、メトロノームに合わせた場合のタイミングのずれは、正規分布を持つということと同じ、すなわち、この場合のずれの本質は本来のタイミングからの誤差と考えることができる。このことを被験者の心理状態で考えるなら、メトロノームの音からのタイミングのずれを感じて、逐一それを修正しようという無意識の調整によるものではないかと言える。

これに対し、今回の実験では、メトロノームに合わせた場合とは異なった結果が生じた。これは、被験者が、単なる誤差とその修正を拍打ちで繰り返したのではなく、音楽の流れに乗って、拍打ちを行なったということの帰結である。このことから、アバの元のデータが $1/f$ ゆらぎになっていないにもかかわらず、すべてのデータで、 $1/f$ が示され

たことの意義は大きく、生理的な、あるいは人間的なリズムの特性が、音楽的なノリの中に常存在することが推測されるのである。

3曲の実験の中では、ジャンル・文化によるリズムの相違点も認められた。特に久遠太鼓のテンポが次第に速くなっていくことは、日本人に特有のリズム感の一部を示唆している。逆に、西洋の文化的伝統の中では、リズムとは時計のように一定の速さでテンポを刻んでいくものという合理的な発想が影響していることも考えられる。

このような3曲に対して、被験者の音楽的訓練の有無も一定の影響を示した。ピアノの訓練のある被験者Aは被験者Bに比べてモーツァルトでは、より良いタイミングの一致を示したのに対して、久遠太鼓では、元のデータのタイミングよりも先走ってしまう傾向があった。被験者Bの方は、逆に、モーツァルトで遅れる傾向を示した。

6. おわりに

これからの課題として、本研究の実験において、なぜ $1/f$ ゆらぎが生じたのか、その要因を明確化する事が、まず挙げられる。特に、テンポを誘導する指示音が $1/f$ にゆらいでいることが重要であるのかどうかという点がポイントになろう。本研究からは、アバの例から、音楽刺激自体は、必ずしもきれいな $1/f$ ゆらぎになっていなくても、被験者のタッピングは $1/f$ を示し、指示音のゆらぎの重要性には、否定的な傾向が示唆されている。しかし、本研究での実験のみから結論を出すのは不十分であり、性急と言えよう。

また、それでは、音楽刺激の持つ、音楽的な内容が何より重要ではないかということが推測されるが、この点について追究するためには、更なる慎重な分析が必要とされる。

スペクトル解析がデータの大局的な特徴を示すのに対して、引き込み同調は、局所的に見い出される現象であるので、この両者の連関を調べ、リズムのゆらぎと音楽の構造や内容との関係を研究する必要がある。この場合、引き込みを部分的な同調現象と見なしたとして、被験者相互のリズムのずれを評価する最小誤差と統計的検定、また、実験的意義との関係を見ておかなければならない。

本研究の実験ではタイミングのずれを $1/100$ 秒まで、測定している。しかし、2人の被験者のデータの同調を統計的に検定するには、その判別の境界が $1/100$ 秒よりも小さい値になるため、今回の検定結果を100%そのまま結論とすることはできない。この問題を克服するためには、測定の精度を高めて、 $1/1000$ 秒単位までとするか、同調の判定が行いやすいように、被験者の数を増やす必要がある。ところが、実験や、音楽アンサンブルの実際での物理的条件を考慮すると、音の速さが毎秒数百m程度であるため、 $1/100$ 秒程度のずれは、日常的に生じているはずである。このずれは、音楽におけるリズムのノリに障害となっているとは考えられず、本研究の進むべき方向としても、これ以上の誤差の圧縮は必ずしも意義のあることとは言えない。従って、実験における被験者の数を増やすことがまず求められ、2、3人での少人数における引き込み現象の分析は、別の視点からのアプローチや実験上の工夫が必要であらう。

参考文献

- [1] 小出昭一郎, 物理現象のフーリエ解析, 東京大学出版会, 1981。
- [2] 水嶋良雄, グレゴリオ聖歌, 音楽之友社, 1966。
- [3] T. Musha, K. Katsurai, and Y. Teramachi, Fluctuations of Human Tapping Intervals, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-32, No. 8, pp. 578-582 (1985)
- [4] T. Musha, $1/f$ Fluctuations of the Biological Rhythm, Computer Analysis of Cardiovascular Signals, M. Di Rienzo (Ed.) IOS Press Chapter 6, pp. 81-94 (1995)
- [5] 吉田友敬, 音楽における引き込みとゆらぎ, 信学技報 NLP94-96, pp. 9-16 (1995)

1996年5月31日受理
1996年7月8日採録



吉田友敬（よしだ ともよし）

1961年愛知県名古屋市生まれ。

1986年東京大学教養学部卒業（科学史・科学哲学）。楽器メーカー勤務を経て、1995年名古屋大学人間情報学研究科修士課程修了。同研究科博士後期課程在学中。日本聴能言語福祉学院非常勤講師。情報文化学会、情報処理学会、音楽知覚認知学会各会員。現在は、リズムのゆらぎについて、実験数理的アプローチのほか、心理的・哲学的等、学際的に研究している。



中西智子（なかにし さとこ）

1947年香川県生まれ。1972年国立音楽大学卒業。1974年三重大学助手から1980年助教授、現在に至る。専門は音楽教育学。著書に、「表現」

（共著、福村出版、1993）「音をつ

くろう」（共著、『かがくのとも』311号、福音館書店、1995）「歌の習得過程に関する研究」（三重大学教育学部研究紀要第42・43巻、1991・1992）「幼児の“おんがく”成立への足跡」（『季刊音楽教育研究』No 68、音楽の友社、1991）「教員養成大学における読譜能力の発達に関する研究」（文部省科学研究費補助金研究成果報告書課題研究04451145一般研究（B））、1994。1984年日本保育学会研究奨励賞、1994年三重県平成文化賞。