

原著論文

## 複数演奏者による音楽リズムタイミングの一致度の測定と 脳波への影響の考察

吉田 友敬\*, 中西 智子\*\*, 山本 佐代子\*\*\*, 武田 昌一\*\*\*\*

\*名古屋文理大学情報文化学部, \*\*三重大学教育学部,  
\*\*\*帝京平成大学メディア・ラボⅢ, \*\*\*\*近畿大学生物理工学部,

### MEASUREMENTS OF SYNCHRONIZATION IN MUSICAL RHYTHMS AND STUDY OF EFFECTS OF RHYTHMS ON THE EEG

Tomoyoshi YOSHIDA\*, Satoko NAKANISHI\*\*, Sayoko YAMAMOTO\*\*\*,  
And Shoichi TAKEDA\*\*\*\*

\*School of Information Culture, Nagoya Bunri University, 365, Maeda, Inazawa-cho, Inazawa-shi, Aichi, 492-8520, Japan

\*\*Faculty of Education, Mie University, 1515, Kamihama-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507, Japan

\*\*\*Media Lab. III, Teikyo Heisei University, 2289-23, Uruido, Ichihara-shi, Chiba, 290-0193, Japan

\*\*\*\*School of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, 930 Nishi-Mitani, Kinokawa-shi, Wakayama, 649-6493, Japan

**Abstract:** Several types of tap rhythms by plural number of subjects were measured and analyzed, in terms of synchronization to determine at what timing multiple subjects were synchronized or not during an ensemble. Furthermore, EEG data was also measured and analyzed in order to investigate what phenomena were evoked from rhythmic tapping. As a result, it was found from the former that there were transient synchronizations in the rhythm patterns which were easy to play. And from the latter, (1) EEG peak at low frequency, which was roughly equal to the frequency of the tapping, was found; (2) the peak frequency of alpha waves was shifted according to the difficulty of the tapping. Consequently, these results suggested that the asynchronization of timing among subjects was caused not by simple random errors, but by some biological mechanism.

**Keywords:** Tapping, Synchronization, EEG, Alpha wave

## 1. はじめに

音楽アンサンブルは、特殊な例を除けば、基本的には最初から最後までリズムタイミングが一致しており、ずれはかぎりなくゼロに近いものという前提に立っている。しかし、実際にはこのずれをなくすることが不可能であるのは言うまでもなく、むしろ幾ばくかのずれが存在することがアンサンブル演奏の魅力となっていることは否めない。単独の演奏者のテンポの変動と共に、このようなずれもまた、Seashoreの言う「芸術的逸脱」の範疇に含まれるであろう [1]。

音楽における演奏解析や演奏システムの研究は多く存在する。従来は、単一の演奏者を対象としてきたが、近年複数の演奏者あるいは人間と機械の競演を扱った、伴奏システムやセッションシステムの開発も見られるようになって来た [2]。演奏者側だけでなく、機械の方が音楽をゆらがせることにより、より実際のアンサンブルに近い状況設定が可能となって来ている。

このように、次々に新しいシステムは作られるが、演奏者間のリズムタイミングのずれに関する法則性の解明や自然科学的モデル化の問題は未だ途上にあると思われる。その理由としては、

- (1) 複数演奏者のデータは高度に複雑であり、法則性を見出してモデル化することが困難である。

- (2) 複数の適切な被験者の協力の下、同時測定をおこなう事自体が容易ではない。

- (3) 小アンサンブルで、主旋律が明確である場合を除いて、タイミングの一致とずれを意識的にコントロールすることが困難である。

などが挙げられる。

本論文では、プロの演奏者の高度な演奏におけるタイミングの一致やずれについて詳細に調べる前段階として、どのような状況のときにタイミングが一致するか、あるいはずれるかについての基礎データを得ることを目的として、音楽の専門的教育を受けていない被験者について、簡単なリズム打ち課題（以下同じ意味でタッピングという表現を用いる）を課し、そのタイミングのデータを解析した結果について述べる。

更に、リズムタイミングの脳における情報処理を解明する第一段階として、タッピングと脳波の同調、およびタッピングの難易が脳波にどのように反映されるかについて調べることを目的として、脳波データを収集し解析した結果についても述べる。

## 2. アンサンブルにおけるタイミングの一致とずれ

さて、このようなずれの特質を解析するにあたり、少なくともつぎの2つの要因を考えなくてはならない。

- (1) アンサンブルの編成の大小
- (2) 主旋律（独奏者）が明確かどうか

一般的に、編成が小さい室内アンサンブルでは独奏者が比較的是っきりしているが、大編成のアンサンブルでは、協奏曲などを除くと、独奏者は一貫しておらず、その関係は複雑である。結果として、編成の大小を論ずる以前に、独奏者の有無による違いを先ず、検討することになる。

小編成で独奏者が比較的是っきりしている場合について、Rasch の研究を挙げる事が出来る [3]。Rasch は、3 人の演奏者による室内楽のデータを計測し、演奏のタイミングのずれを分析した。それによると、ソロパートではソロ演奏者のタイミングが、他の演奏者より早くなる傾向が示されている。また、Goodman も、同様の傾向を指摘している [4]。

これに対して、堀内は2人の演奏者の相互のずれを分析しているが、これによると、伴奏者の方が独奏者よりも早いタイミングで演奏するケースが報告されている [5]。この中で、独奏者と伴奏者のタイミングの傾向には必ずしも一貫性がみとめられておらず、堀内は、演奏者の個性や状況によって結果が大きく異なってしまうことを指摘している。堀内の結果は、実験に使用した曲や設定が Rasch などとは異っており、必ずしも Rasch らの結果を否定するものではないと考えられる。しかし、同様の実験を実施するに当たって、選曲や被験者の組み合わせなどに相当配慮なくしてはいけないことが示されている。

上述のような場合に比べ、演奏者同士が対等なアンサンブルのタイミングは複雑なものとなる。そこで、本論文では、演奏者同士の全体的なタイミングを解析するのではなく、リズムタイミングの一致度が常に変動している点に注目する。すなわち、大雑把には全体的に一致していても、詳細に見ると一致度の高い音と相対的にずれの大きくなっている音が存在するのである。

それでは、どのようなときに一致度が高まり、どのような時にずれが大きくなるのか。音楽フレーズの中には局所的なタイミングの一致と逸脱が交互に生じているが、この点に関して、著者らは、一致度がなんらかの意識の集中度と相関があるのではないかという仮説を持っている [6]。実際、Jones によって、拍子ごとに意識の集中度が高まるというモデルも提唱されており [7]、同様の傾向が一致度についても当てはまる可能性を検証する意義が存在するであろう。

### 3. アンサンブルにおけるタイミングの一致と生体情報

生体情報には様々なものがあるが、とりわけ脳波、心拍、呼吸などが基本的な情報を与えるものとして、また、被験者の意識と密接に関わるものとして有意義と考えられる。著者らは、そのための端緒として、脳波 (EEG) の測定と解析をおこなった。

アンサンブルのタイミングの一致とは、第一義的には被験者間相互のタイミングの一致を意味するが、このとき、各々の被験者の中では、被験者が感じるリズムと視覚・聴覚・触覚情報として外部から与えられるリズムのタイミングを一致させる必要がある。このとき、演奏されているリズムに対し

Pattern 1	♪ ♪ ♪ ♪ ♪   ♪ ♪ ♪ ♪ ♪   ♪ ♪ ♪ ♪ ♪
Note No.	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Pattern 2	♪ ♪ ♪ ♪ ♪   ♪ ♪ ♪ ♪ ♪   ♪ ♪ ♪ ♪ ♪   ♪ ♪ ♪ ♪ ♪
Note No.	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Pattern 3	♪ ♪ ♪ ♪ ♪   ♪ ♪ ♪ ♪ ♪   ...
Note No.	1 2 3 4 5 6 7 8

図1 実験1のリズム課題

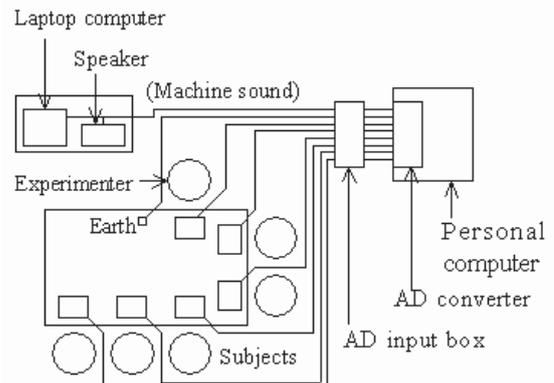


図2 実験1の装置の概念図

て生体がどう反応するか、あるいは、外的リズムと生体情報とのタイミングの一致ということが問題となる。

外的な刺激に対する生体、とくに EEG のタイミングの一致は従来からいくつか報告されている。武田らも聴覚刺激に対するタイミングの一致を引き込み同調現象という視点で報告しているが [8]、これらのタイミングの一致は、主に  $\alpha$  波帯域、あるいは  $\theta$  波帯域のものである。リズム打ちの速さは、速いものでもこれらの帯域よりはゆっくりとなるため、生体がどういう反応を示すかはまだ十分に調べられていない。本研究では、このようにゆっくりした時間帯域でのタイミングの同期に焦点を当てて実験をおこなう。

## 4. 実験1：タッピングの一致度の測定

### 4.1 実験の目的と概要

リズムフレーズ中で、一致度がどのように変化するかを調べるため、5人の被験者による簡単なリズムパターンの同時打ち実験をおこなった。

### 4.2 実験の方法

1回の実験で5人の被験者が同時にリズム打ちをおこない、そのタイミングを測定した。被験者のリズムの誘導は、実験者 (リーダー) の指示による。固定した刺激音でなく、被験者との相互作用が存在する実際の演奏に近い状況の設定とした。参照のため、コンピュータによる機械音での誘導のケースも測定した。

1回の測定で、被験者が刺激音 (リーダーの教示) に合わせて叩く部分と被験者のみで叩く部分を設定した。用いたリズム課題は、図1のとおりである。課題1はいわゆる三本

表 1 ずれの分布について正規性を検定した結果

Group	Normal distribution	Other pattern (p < 5%)	Other pattern (p < 1%)
G-1	51.1%	48.9%	24.4%
G-2	53.3%	46.7%	31.1%
G-4	66.7%	33.3%	22.2%
G-5	66.7%	33.3%	15.6%
Total	59.4%	40.6%	23.3%

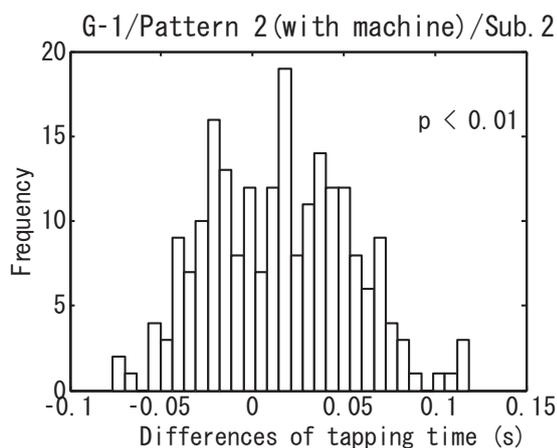


図 3 ずれの分布の例・非正規的な場合

締め、課題 2 はシンコペーションのリズム（被験者にはそのようなリズムの特性についての教示は与えていない）、課題 3 は単純な拍打ちである。

リズムの提示方法は、

- (a) リーダーが言葉を当てはめて提示
- (b) リーダーがタンタンなどの擬態語で提示
- (c) コンピュータによる機械音で提示

の 3通りである。(a)の場合に用いた言葉は各課題に応じて、

- (1)「りんご、みかん、ばなな、だ」
- (2)「よかった、よかった、よかった、よかった」
- (3)「きがくそうほう」、「かみはまいちごいちご」、「みえだいがくきょういくがくぶ」

である。1セットの実験の進行は、刺激音→被験者と交互にリズム打ちを6回くり返し、続けて刺激音+被験者→被験者のみのパターンを6回くり返す。なお、課題3は、7、8、13拍のパターンを順不同で各2回計6回、刺激音→被験者の順におこなう。

被験者は三重大学教育学部の学生 20 名である。いずれの被験者も音楽の専門的教育課程を経ていない。1回の実験は 5 名ずつで実施し、計 4 グループのデータを得た。3種類の課題で3通りの提示方法であるため、実験の実施方法は9通りである。各グループについて9通りの実験を1回ずつランダムな順序で実施した。

リズム打ちをするばちは、マイナスドライバー（小）に、アルミホイルを巻き、導線を接続した。叩く台は、アルミホイルを貼った紙箱を使用し、導線に接続した。この組み合わせを6セット作製し、リーダー（実験者）と被験者5名が対面できるようにレイアウトした。計6チャンネルについ

て、導線を AD 入力ボックスに接続した。更に、1チャンネルを機械音収録用に、1チャンネルをアース用とした(図2)。

### 4.3 結果と分析

#### 4.3.1 ずれの分布の正規性

まず、5人の被験者の叩いた時刻の平均値に対するずれを計算し、各セット・被験者ごとに分布を調べた。その結果、全体としては中央部にピークを持つ分布となったが、ピークの位置は平均の時刻よりずれているケースも少なくない。もし、この分布がランダムな誤差の性格を持っていれば正規分布に近くなるはずであるので、各々について正規性を検定した。グループによって 30～50% が、5% 水準で有意に正規分布から逸脱していた(表1)。

演奏者同士のずれが正規分布とは異なる場合があることは、必ずしも自明の事実ではない。実際、堀内は前述の研究の中で、二人の演奏者のずれの分布が正規的になる例を示している[5]。しかし、今回は、ずれは単なる誤差ではないことを示唆する結果も得られた。

ずれが正規分布から外れている事例の特徴として、正規的な中央部分へのデータの集中が多くなく、代わりにいくつかの分布のピークがみられる。つまり、刺激音とずれの少ない部分でのタッピングが多くなる代わりに、より早いあるいは遅いタイミングでのタッピングが多く、複数のタイミングに分散している傾向がみられる。

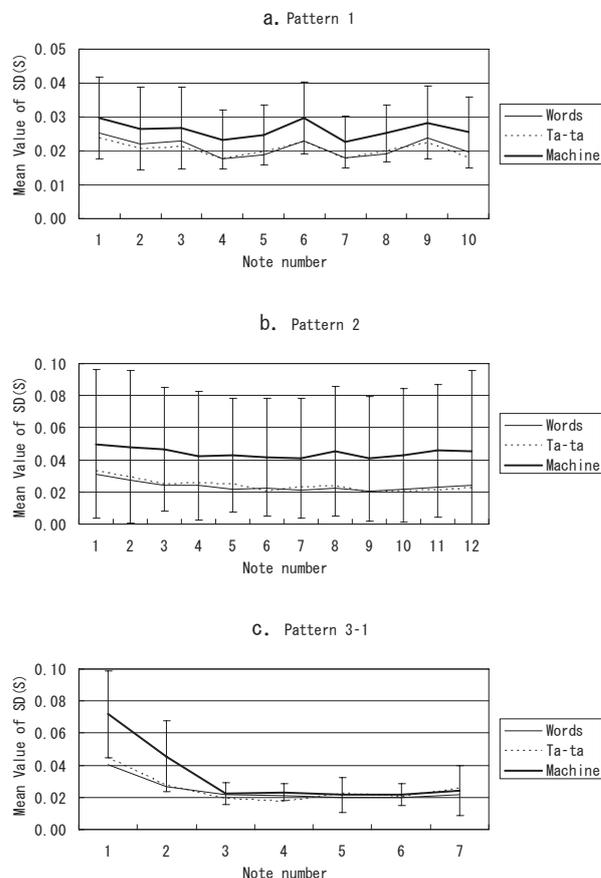


図 4 リズムの提示方法による一致度の比較

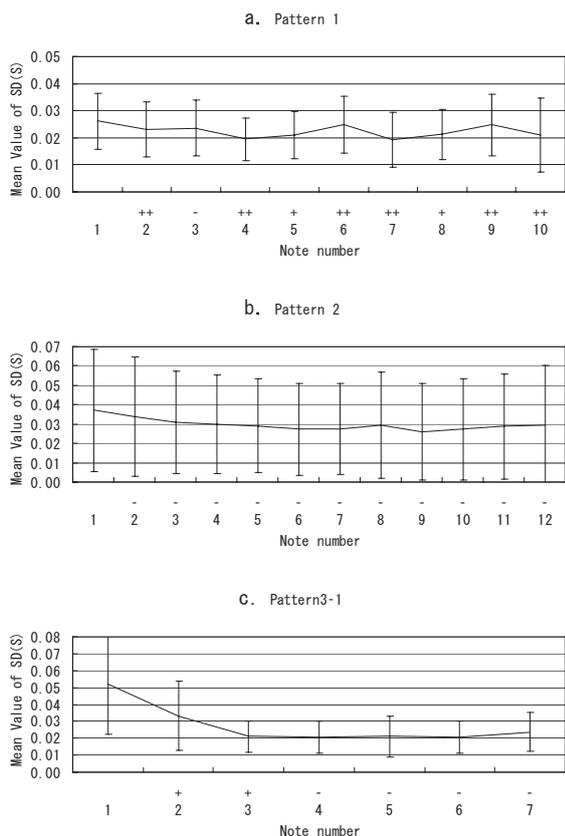


図5 フレーズ内での一致度の変動

4.3.2 リズムの提示方法と一致度

次に、一致度を測る指標として、5人の被験者データの標準偏差を用いた。その結果、課題1・2において、提示方法a・bともに一致度が高く、機械音による提示cでは、明らかに一致度がわるくなった(図4-a, b)。多重比較の結果、課題1の1カ所を除き課題1・2では提示方法cと提示方法a・bの間ですべて有意差が認められた(5%水準)。なお、図4-aで、提示方法aは84個、提示方法bは76個、提示方法cは72個のデータを用いている。また、図4-bでは、提示方

法a・b・cの順に82個、83個、66個のデータ数である。標準偏差は、課題1の提示方法a・b・cの順に0.011, 0.008, 0.010, 課題2は同順で0.011, 0.017, 0.041, 課題3(7拍)は同順で0.015, 0.014, 0.013(いずれも単位は秒)である。SDバーは、図の見やすさのために提示方法cのみに付加した。図中、タイミングのデータがばらついている程標準偏差は大きくなるので、値が大きく、グラフが上にあるほど一致度は低いことを示す。なお、課題3では、このような明らかな差は生じなかった(図4-c)。課題3は7拍、8拍、13拍の3パターンに分かれるが、いずれも同じ傾向であったので、7拍のパターンのみを示す。課題3では、提示方法間に有意差は見いだされなかった。最初の部分で標準偏差が大きくなっているのは、出だしでタイミングが合わないためと推測される。その後、標準偏差は0.02秒程度の値に収束する傾向が見られる。図4-cでは、各提示方法に8個ずつのデータを用いている。

4.3.3 一致度の変動

各々のパターン内での一致度の変動を調べた結果、課題1では、明らかな差違が認められた(図5-a)。図5のグラフは、多数のセッションでの標準偏差の平均値を示す。t検定の結果、直前の音に対して5%水準で有意に差が認められる場合を+で、1%水準で有意な場合を++で表示している。課題1で一致度が高かったのは音符番号4・7・10番である。

課題1のパターンは、音符番号で、1~3, 4~6, 7~9, および10(単独)とグルーピングされ、各々のグループの最初の音で一致度が高まっていると解釈される。1番の一致度が低いのは、叩き始めて被験者がタイミングをつかめていないためと考えられる。この結果は、2あるいは4拍子に当てはめれば、各拍子の最初の音で集中が高まるとする、前述のJonesの主張[7]を支持している。

これに対して、課題2では、出だしの一致度が悪い点以外は、平均値では大きな変化は見られなかった(図5-b)。課題3も同様である(図5-c)。最初の部分で一致度の変動

表2 個々のセッションにおけるタイミングの一致パターンの分類と割合(課題2)

Rhythm pattern 2 ○○×○○×○○×○○×○

		Synchronizing point						Sum
		First note	Second note	Third note	Other pattern	No significant change	Error	
Rhythm leader	Words	3 3.66%	10 12.20%	16 19.51%	19 23.17%	33 40.24%	1 1.22%	82 100%
	Ta-ta	2 2.41%	10 12.05%	15 18.07%	27 32.53%	28 33.73%	1 1.20%	83 100%
	Machine sound	3 4.55%	1 1.52%	13 19.70%	18 27.27%	22 33.33%	9 13.64%	66 100%
Situation	Subjects only	5 3.25%	9 5.84%	29 18.83%	42 27.27%	64 41.56%	5 3.25%	154 100%
	With leader	3 5.45%	12 21.82%	10 18.18%	15 27.27%	15 27.27%	0.00%	55 100%
	With machine	0.00%	0.00%	5 22.73%	7 31.82%	4 18.18%	6 27.27%	22 100%
Sum		8 3.46%	21 9.09%	44 19.05%	64 27.71%	83 35.93%	11 4.76%	231 100%

に有意差が認められるのは、出だしでタイミングが合わないのが、2拍目以降で慣れてきたからと推測される。なお、図4と同様、課題3は7拍の場合を示す。以下、この理由について課題2を対象として詳細に分析する。

#### 4.3.4 課題2の詳細な分析

全てのセッションの平均では有意な差の出なかった課題2について、個々のセッションの標準偏差値の変化を分析した。分布が正規的でない場合を含むため、F検定の際に用いられるF分布の代わりに、1実験ごとに実際のずれのデータから得られる分布を用いて有意性を検定した(分布形をなめらかにするために、ランダムシミュレーションによって、データ数を追加している)。全体的な傾向を調べるため、10%水準で、各セッションをいくつかの類型に分類した(表2)。

その結果、第1, 4, 7, 10音で、標準偏差値が極小となるのが約3%、第2, 5, 8, 11音で極小となるのが約9%、第3, 6, 9, 12音で極小となるのが約19%、異なるパターンが混在するものが約28%、有意な変化が認められない場合が約36%であった。

このような結果となった理由として、課題1ではグルーピングのパターンが一意的に決まりやすいのに対して、課題2では特定のグルーピングで解釈される割合が低かったと推測される。しかし、詳細に見たとき、なんらかのパターンで一致度が有意に変動する割合は、約60%であるが、これは課題1と同程度であった。

### 5. 実験2：リズム形と脳波反応の関係の測定

#### 5.1 実験の目的と概要

これまでに述べたように、タッピングのずれが単なるランダムな誤差ではなく、何らかの生理的なメカニズムに起因している可能性がある。そこで、タッピングの影響が脳波にどのように反映されているかを調べる目的で、脳波測定実験をおこなった。実験は、複数の被験者によるタッピング中のEEGを測定することにより、タッピングリズムに対してEEGがどのように反応するのか、EEGのタイミングとの一致およびタッピングの難易とEEGとの関係という観点から実施した。

#### 5.2 実験の方法

同時に4人の被験者が与えられたリズム形のタッピングをくり返しおこない、打拍中のEEGを測定した。被験者は成人女性4名で、音楽の専門的経験はない。

約40のリズム形の中から、予備実験により音楽演奏の熟練者でなくても容易に演奏できると考えられる10課題を選定した。本論文で扱う4課題を図6に示す。

各リズム形の開始に当たって、パソコンのスピーカーよりリズム形ごとに設定したテンポの信号音を8拍提示し、それに続いて被験者がリズム打ちを開始した。開始後のテンポは被験者にまかせ指揮等による誘導はおこなっていない。実

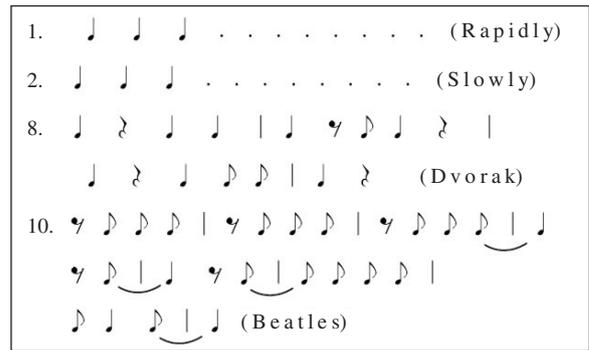


図6 実験2で使用したリズムパターン(抜粋)

表3 信号音で提示したテンポと実際のリズム打ちのテンポ

Pattern No.	1	2	8	10
BPM of signals	140	64	100	100
BPM of tapping	155	86	131	130

験の実施前に各リズム形について数回ずつ約20分間のリハーサルをおこなった。各リズム形のテンポは表3の通りである。

脳波の測定には(株)脳機能研究所のESAを用いた。測定点は10極である。リズム打ちには、カシオ製キーボードを用い、被験者ごとに指定した特定の鍵盤のみを打鍵させた。タッピング音を1本のマイクによってパソコンにwavファイルとして収録した。

### 5.3 結果と分析

#### 5.3.1 タイミングと一致する脳波成分の誘発

前頭部Fp1, Fp2電極で、眼球運動等によるアーチファクト(雑音)のない区間を選んで、4秒間の区間を切りだし、パワースペクトルを求めた。これを1秒ずつずらして連続した10区間を解析した。DFTにはHanning窓を用いている。第1被験者は、アーチファクトが多いため、この解析から除外した。

この結果、多くのデータで、1-3Hzの領域にスペクトルのピークが見られた(図7)。また、一部に、ピーク周波数が、

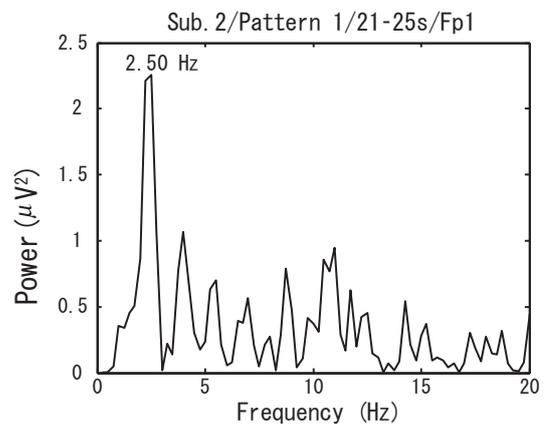


図7 誘発された脳波の例(スペクトル)

表4 ピーク周波数の平均値と標準偏差 (Fp2, Hz)

Pattern No.	1	2	8	10
Sub.2	2.33 ± 0.57	2.03 ± 0.58	1.68 ± 0.41	2.08 ± 0.64
Sub.3	1.95 ± 0.66	2.08 ± 0.33	1.58 ± 0.17	1.65 ± 0.54
Sub.4	2.48 ± 0.65	1.73 ± 0.08	1.65 ± 0.49	1.98 ± 0.51

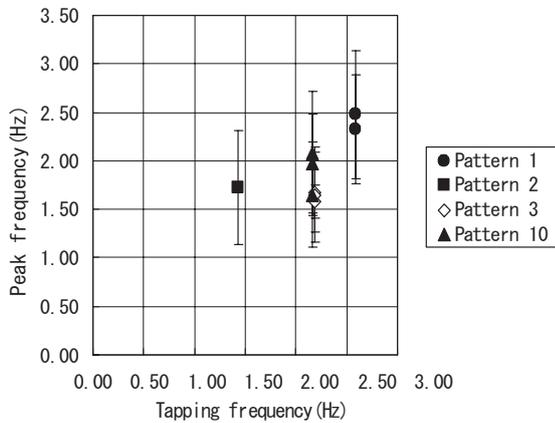


図8 タッピング周波数とピーク周波数の相関

倍化・半減する現象が見られた。これは、タッピングリズムに対して、2拍をまとめて感じたり、1拍を2つに分割して感じたりしていることを反映しているためと推測される。一種の分岐現象として興味深い。Fp2のピーク周波数の平均値を表4に示す。なお、このピークは、従来の観察から、タッピングを行っていないときには生じないことから、タッピングにより誘発されたものと認められる。また、Fp1、Fp2近傍は運動野の領域ではないので、直接タッピングの指の動きには関係ないと考えられる。何らかのより高次の機能が関与している可能性が高い [9]。

スペクトルピークの周波数は、実際のタッピング周波数と概略一致している。しかしながら、1.6-1.7Hz程度の周波数が多く見られ厳密には一致していない。タッピングの周波数とピーク周波数の相関を図8に示す。プロットしたデータ数は全データ12個のうち、ピーク周波数の時間経過の分析とスペクトル波形の視察から、ピーク周波数が分岐していると推測されるもの(たとえば、タッピング周波数が2.5Hzの時、誘発周波数が1.25Hz程度になるよう場合)3例を除く9個である。相関係数は0.61で、中程度の相関が認められる。いずれの課題でも、信号音のテンポよりも実際のタッピングのテンポの方が速くなった。どのような要因でこの値に落ち着くのかを解明するのは、今後の課題である。

### 5.3.2 α波ピーク周波数

電極O1について、前項と同様の解析をおこない、α波ピーク周波数を比較するため、連続した10区間のスペクトルを求めた(図9)。これらの平均的な値を求めるためには、各々を加算するのが通例である。しかし、図のように、10Hz付近で、時系列にしたがって、2つの異なったピークが生じている場合、単純に加算してから最高値の周波数を求めると、

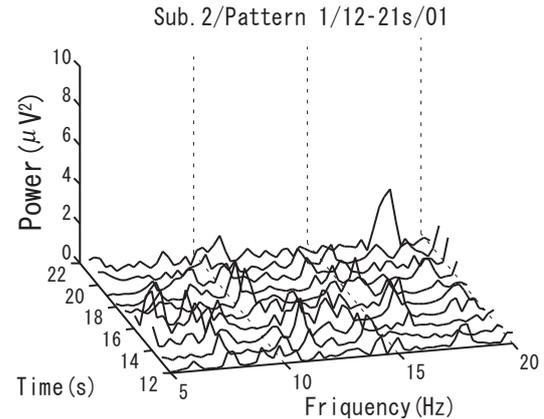


図9 パワースペクトルの時系列の例 (5.20Hz)

表5 α波ピーク周波数の平均値 (電極 O1, Hz)

Pattern	Section	Sub.1	Sub.2	Sub.3	Sub.4
1	1st	9.15	10.43	10.43	8.33
	2nd	10.08	11.33	9.66	9.48
2	1st	9.58	10.25	11.03	10.55
	2nd	9.58	11.13	10.10	10.43
3	1st	10.40	11.20	10.75	11.33
	2nd	11.45	10.85	11.48	10.50
4	1st	10.73	11.50	10.25	10.15
	2nd	10.58	10.83	10.80	10.35

一方のピークが全く加味されなくなる。そこで、各々の区間でのピーク周波数を先に求め、それらを10区間について平均した。4つの課題について、各々、前半と後半に10区間の解析対象を抜きだして表にした(表5)。前半と後半の比較においては、課題1などで、後半の方がピーク周波数上がる傾向が見られたが、その他に顕著な傾向は見られなかった。

苧坂は、ワーキングメモリへの負荷が高いほど、α波周波数が高くなること、および、音楽聴取時にはテンポの速い曲ほどα波周波数が高くなることを見出している [10]。そこで、この知見に従い、上述のデータを基に4人の被験者で各2回の合わせて8例を用いて比較をおこなった。

まず、同じリズム形でテンポのみ異なる課題1と課題2で前半部分と後半部分(タッピング開始10秒からの10区間と35秒からの10区間)のα波平均ピーク周波数を比較した結果を示す。(図10)。苧坂の音楽聴取時の解釈によれば、テンポの遅い課題2の方がα波周波数は低くなるはずである。ところが、この被験者の例では、逆の傾向となっている例も少なくない。音楽を聴くのと演奏するのではワーキングメモリへの負荷のかかり方が異なる可能性を示唆しているが、8例の検定の結果、課題1と課題2の間に有意差は見いだされなかった(5%水準)。この点に関して、より明確な検証のためには、タッピング周波数を大きく変えた場合などについて、被験者がタッピング周波数を一定に維持するような実験デザイン、あるいはタッピング周波数を一定に維持できる被験者による測定が必要と考える。

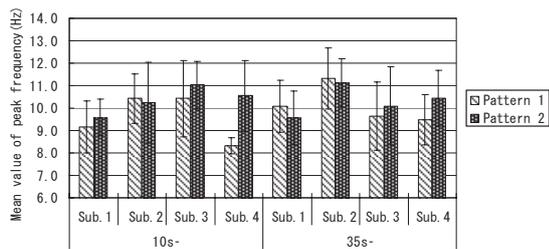


図 10  $\alpha$ 波平均ピーク周波数の比較 (課題 1, 2, 電極 01)

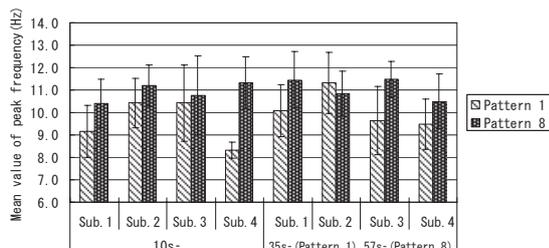


図 11  $\alpha$ 波平均ピーク周波数の比較 (課題 1, 8, 電極 01)

また、課題の難易度は、課題 1, 2 に比べて、課題 8, 10 の方が高く、とりわけ課題 10 は裏拍を多く含む、被験者にとってむずかしく感じたパターンである。ここで、課題 1 と 8 についても、前半と後半の  $\alpha$  波平均ピーク周波数を比較した (図 11)。課題 8 で周波数の高い傾向が見られる。8 例での検定により、課題 1 と課題 8 の間で平均ピーク周波数に有意差が見いだされた (5% 水準)。しかし、もっとも難易度の高い課題 10 では、かえって周波数の低下が見られた。難しすぎる課題では被験者があきらめてワーキングメモリへの負荷が低くなるという苧坂らの結果を支持しているように思われる。

なお、ここでの結果は 3 課題のみの比較であるため、更に難易度の異なる課題を加えデータを補強する必要があると考えている。

## 6. 考察

以上実験 1 より、種々のリズムパターンにおけるタッピングの難易度がリズムタイミングの一致度に反映され、ずれの分布が単にランダムではなく、生理的なメカニズムに起因していることを示唆する結果が得られた。この結果に関して、Jones はリズム変動中に注意を向けるタイミングについて言及している [7]。それによれば、小節中の特定の箇所 (1 拍目など) に特に注意が向けられているという Attending dynamics のモデルを提唱している。実験 1 の課題 1 における同調度の高くなる箇所では、注意力が高まっていることが推測され、Jones のモデルとの関連が予想される。さらに、Jones は非線形引き込み現象によるモデル化も試みており、本研究の方向性に対して示唆を与えるものである。

また実験 2 の結果は、必ずしも複数演奏の特徴を表しているかは明確ではないが、この実験からタッピング特有の次

の知見が得られた。すなわち、(1) タッピング時には、EEG にタッピング周波数にほぼ対応する 1.3Hz の領域にスペクトルのピークが現れるという結果が得られた。ただし、その相関はそれほど強いわけではなく、攪乱要因の存在が推測されるので、テンポの大きく異なる場合などをていねいに検証する必要がある。(2) タッピングの難易度がワーキングメモリの負荷の大小に対応して  $\alpha$  波周波数が変化するという、従来の知見 [10] と符合する結果が一部に得られた。このうち、 $\alpha$  波平均ピーク周波数とタッピング周波数 (テンポの速さ) との関係は、全体としては有意差が見られなかったが、音楽を聴く場合と演奏する場合のワーキングメモリへの負担が異なるというのは、経験的にも予測されることなので、今後、より正確な測定をすることによって要因を検証する必要がある。 $\alpha$  波平均ピーク周波数の課題の難易度による変化については、ほぼ予想通りに有意差が見られたが、まだ事例が少なく、実験パターンの工夫、音楽の専門的教育を受けたことのある被験者の場合などを調べる必要がある。

## 7. おわりに

本論文では、複数被験者の同時タッピング時のタイミングについて、一致度の計測と解析、および、生体情報のひとつとして EEG 計測と解析をおこなった。その結果、前者では、タイミングを取るのが易しいリズムパターンにおいて局所的なタイミングの一致傾向が見られること、後者では、(1) EEG の低周波域にタッピングのタイミングとほぼ一致する脳波成分が現れること、および、(2) タイミングの取り方の難易度により  $\alpha$  波ピーク周波数が変動することを確認した。

以上より、リズムタイミングのずれは単なるランダムな誤差ではなく、何らかの生理的なメカニズムによる揺らぎであることを示唆しているという結論を得た。今後は、更に脳波解析を進め、複数演奏者のリズムタイミングが一致する現象を「引込同調現象」という立場から解明していく。

## 謝辞

本研究は、一部を文部科学省ハイテク・リサーチ・センター補助金ならびに帝京平成大学学内特別研究費によるものである。一橋大院の廣瀬百合子氏、三重大院の町井紀善氏 (現オムロン)、帝京平成大の中村貴展氏を始め、実験・解析に協力頂いた方々、被験者の方々に深く感謝する。

## 参考文献

- [1] Seashore, C. E.: Psychology of Music, McGrawHill, 1938
- [2] 浜中雅俊, 後藤真孝, 大津展之: 学習するセッションシステム, 情処学研報, 2000-MUS-34, pp.27-34, 2000
- [3] Rasch, R. A.: Synchronization in performed ensemble music, Acustica, 43, 121-131, 1979
- [4] Goodman, E.: Ensemble performance, in Rink, J., ed.: Musical Performance, 153-167, Cambridge University Press, 2002

- [5] 堀内靖雄, 坂本圭司, 市川熹: 合奏時の人間の演奏制御の分析・推定, 情報学論, 45, 3, pp.690-697, 2004
- [6] 吉田友敬, 山本佐代子, 武田昌一: 文理融合モデルへの新しい発想の提案-生体情報への音楽リズムモデルの適用可能性-, 情報文化学研究, 3, pp.81-86, 2005
- [7] Jones, M. R. and Bolz, M.: Dynamic attending and responses to time, Psychological Review, 96, pp.459-491, 1989
- [8] 武田昌一, 加藤修一, 久保田和秀, 阿久津道広: 聴覚刺激により誘発される脳波の引き込み現象の検討, 日本音響学会講演論文集, 2-7-9, pp.677-678, 1996
- [9] 山本佐代子, 中西里果, 佐川泰広, 武田昌一: ビートトラッキング時と音楽聴取時の脳波 $\alpha$ 波帯域パワー変動の比較検討, 感性工学, 5, 3, pp.61-70, 2005
- [10] 苧坂満里子: ワーキングメモリの認知心理学的研究, 風間書房, 1994



**吉田 友敬** (正会員)

1986年東京大学教養学部教養学科卒。同年(株)河合楽器製作所入社。2001年名古屋大学大学院人間情報学研究科博士課程満了。2003年名古屋文理大学講師を経て現准教授。音楽、とくにリズムの研究に従事。日本

感性工学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 情報文化学会, 日本音楽知覚認知学会等の各会員。



**中西 智子** (非会員)

1972年国立音楽大学教育音楽学科卒, 三重大学助手を経て教授。著書に「おとをつくろう」(共著)「幼児の成長・発達と幼稚園の教育課程に関する基礎的研究」(共著)など。

1984年日本保育学会研究奨励賞。2001年情報文化学会賞。



**山本 佐代子** (正会員)

1982年お茶の水女子大学理学部物理学科卒。(株)日立製作所機械研究所入所。プリンターの開発に従事。1991年退職。お茶の水女子大学人間文化研究科入学。脳波解析等に従事。学術博士(お茶の水女子大学)。

日本物理学会, 電子情報通信学会, 生体医工学会, 日本感性工学会, ライフサポート学会等会員。2006年本会論文賞受賞。



**武田 昌一** (正会員)

1974年東京大学大学院工学系研究科修士課程了。工学博士(東京大学)。1974-75年米国スタンフォード大学人工知能研究所に留学。1975-2006年日立中研, 帝京平成大を経て, 2006年近畿大学生物理工学部教授。音声

情報処理, 感性情報, 脳波解析等の研究に従事。日本音響学会, 電子情報通信学会等各会員。2006年本会論文賞受賞。