

生体情報等への音楽リズムモデルの適用可能性

吉田友敬^{*1}, 山本佐代子^{*2}, 武田昌一^{*3}

音楽における同調現象と、生体情報（特に脳波）のリズム構造を、引き込み同調の概念を通じて、並列的に議論し、新しいモデル提案の可能性を示唆する。

アンサンブルにおける演奏者同士のタイミングには、微妙なずれが存在する。そのずれの法則性とフレーズ構造には一定の関係が存在し、典型的な同調パターンに集約される。また、外的リズムと脳波の間にもある種の同調がみられる。さらに、脳内のダイナミクスには、 θ 波を基軸とした、同調 - 共鳴構造が存在する。本論文では、これらの事実の関係性を示し、生体リズムへの音楽的モデルの適用可能性を論ずる。

The Applicability of the Musical Rhythm Models to Biological Parameters

Yoshida T.^{*1}, Yamamoto S.^{*2}, and Takeda S.^{*3}

The synchrony in music and the rhythms in biological parameters, especially EEG, are discussed connectedly, proposing the ability of the new model of such phenomena.

There are small asynchronizations among the onset times of performers in an ensemble. We could consider a specific relation between the asynchronizations and the structure of the phrases: that is, the formula of "Soft Entrainment." In addition, a kind of synchronization is observed between EEG and outside rhythms. There are also the synchronous dynamics in brain, in the basis of theta wave. The relationship between each couples of such facts and the applicability of the musical model to the rhythms of biological parameters are implied.

1. はじめに

演奏におけるタイミングのゆらぎは、多くの研究者によって分析されてきた。さらに、近年には、複数の演奏者の演奏タイミングの研究も次第にみられるようになり、伴奏システムや、セッションシステムの開発研究に進展がみられる[1]。一方、演奏タイミングの同調とずれの持つ特有の法則性の解析と、構造のモデル化自体は未解明の点が多い。この理由として、(1)複数演

奏者のデータが複雑すぎて、普遍的な法則が見だしにくいこと(2)適切な複数被験者による同時演奏データをとることが容易でないこと(3)ごく小編成のアンサンブルをのぞいて、同調とずれのコントロールを意識的に行うのが困難であること、などがあげられる。

本稿は、この無意識性や複雑性を持つ現象の本質を明らかにすることが音楽演奏・聴取における表現・感動のメカニズムを解明することによって有効であることを認

*1 名古屋文理大学情報文化学部

School of Information Culture, Nagoya Bunri University

*2 お茶の水大学大学院

Graduate School of Ochanomizu University

*3 帝京平成大学情報学部

School of Informatics, Teikyo Heisei University

め、そのモデル化の可能性を示す。

筆者らはアンサンブルにおけるリズムの同調という現象に対して、それを当然の事実としてではなく、根本的な考察を行えば、容易にプロセスを説明できない複雑な現象としてとらえている[2]。このメカニズムを説明するため、これまでの研究で「引き込み同調」という概念を提唱してきた。「引き込み」という考え方には、長嶋のものがあるが、詳細には別の概念であるので区別が必要である[3]。しかし、その一方で、両者は全く無関係というわけでもなく、アプローチは異なるものの、究極的には同一の現象を扱っているものと考えられる。

2. 音楽におけるリズムの同調

Rasch は室内楽における、演奏者のタイミングの同調とずれの分析を行った[4]。2～3人程度のアンサンブルでは、ソロパートを弾く演奏者のタイミングが早くなる傾向が示されている。同様の傾向は、Goodman も指摘している[5]。さらに、2人の演奏のずれについて、堀内は様々の解析を行っている[6]。

また、リズムの同調を扱うときには、(主に聴覚を通じての)同時性の認知特性を考慮すべきである。Rasch も指摘しているように、聴取者が同時と感じる時間幅は、演奏の条件によって大きく変動し、場合によっては、数百ミリ秒におよぶずれがあっても同時と認知される。それらのずれは、複数楽器を識別して知覚するキーとなることが指摘される[7]。一方で、聴覚の時間分解能は、測定条件によっては、数マイクロ秒まで識別できることが知られている[8]。

上記のような小規模なアンサンブルに対して、より規模の大きい場合、また、ソロと伴奏の関係が判然としない演奏形態における同調とずれの特徴は、著しく複雑となり、このようなずれの生成過程はほとんど不明である。著者らは、このような、演奏者間に非対称性の少ない場合の同調とずれに関して、簡単なリズムパターンを用いてその特性を解析した。その結果を図1に示す[2]。この図は、以下に示す三本締め

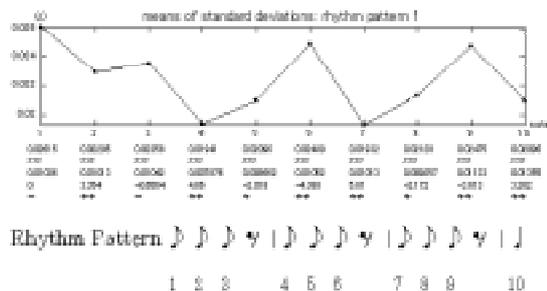


図1:三本締めにおけるずれの標準偏差の変動

リズム

× | × | × |

を棒でパットをたたくタッピングを5人の被験者で行い、タイミングのずれを標準偏差で評価したものである。グラフは、多くのセッションの平均値であり、変動は有意である ($p < 0.01$)。このパターンは3つのリズム小グループと最後の拍に分けて解釈されるが、各グループのはじめでよく同調し、その後分散していく傾向が認められる。Jones らは、このような拍子ごとのリズムの認知を、意識の集中の変化として捉えている[9]。また、同様のグルーピングによるパラメータの変化は、音声言語にもみられ、梅田の話し言葉の日英両言語の分析では、文節ごとに音声強度が変化していることを見いだしている[10]。

著者らは、同調のこうした傾向を一般化し、フレーズにおける同調の基本パターンを提唱している[11]。これは、フレーズの基本構造には、Narmour らの主張する、暗意 - 実現[12]、グレゴリオ聖歌のソレム派の主張するアルシス - テーシス[13]、あるいはより一般的に、期待 - 確信というような2項図式がみられるので、それに対応して、フレーズの発端から頂点に達する部分では次第に同調度が高まり、その後は同調が緩やかに解除されるパターンを仮定した(図2)。さらに、フレーズの開始時点での同調とフレーズの頂点が一般的に最後部付近に多いことを考慮して改善したパターンが図3である。

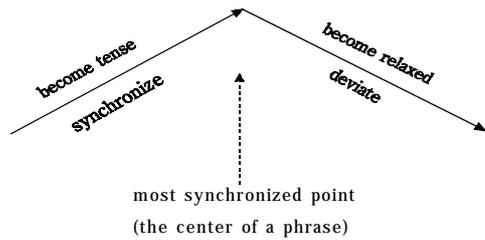


図2：フレーズにおける同調の基本パターン

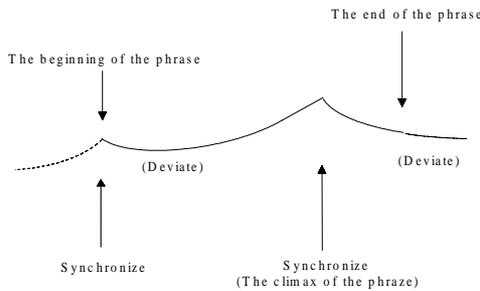


図3：改善した同調パターン

3．同調のモデル化

音楽のフレーズ構造のモデル化は、多くの自然科学分野で行われてきた。Vossらは、 $1/f$ ゆらぎの概念で音楽の時間構造を捉えようとした[14]。日本においても武者らが、 $1/f$ ゆらぎの適用を試みている。しかし、それが統計的な性質である上、 $1/f$ ゆらぎ自体のメカニズムがほとんど解明されていないために、このアプローチは音楽認知的な意義をみないまま現状に至っている。井上らは、音符間に独自のエントロピー量を定義することによって、バッハの作品がカオスとしての特性を持っていることを示した[15]。

このほかにも、フレーズ同調をモデル化する可能性のあるアプローチとして、金子や津田らの提唱する高次元カオスにおける「カオスの遍歴」[16]、山本らが $1/f$ ノイズを適用して脳波同調を見いだした「確率共鳴」[17]、立川らが生体現象への適用に着目している「結合したヘテロクリニックサイクル」[18]などが挙げられる。いずれも解明途上の方法と言えるが、基本的には、規則正しい同調と確率的な振る舞いを混合した現象の記述を念頭に置いていると解釈される。これらは、一部の生体パラメータや社会の集団現象の記述には成功するかもしれないが、音楽演奏のような個

人の意識が強く関わる現象に対して、定められた音楽構造を内部に含む形でモデル化することは困難ではないと思われる。

4．引き込み同調モデルの適用可能性

上記のような各種のモデル手法に代わるものとして、著者らは「引き込み同調」による現象記述の可能性を検討している。引き込み同調とは、相互に強く作用している振動子系が自発的に同調状態を実現する現象のことである。この現象は、物理・化学系のほか、生体内あるいは行動レベルなど様々な階層に広く見いだされている。吉川らは、塩水振動子の自発的な同調現象を見だしこれを定式化している[19]。また、清水らは、生体内の様々なリズム現象に引き込み同調を見いだしている[20]。

前述のように、音楽リズム同調には、一定でないずれが存在し、演奏の上で重要な役割を果たしている。このような対象に対して、単純な非線形モデルを当てはめることはあまり意味がないと思われる。そのため、著者らは、引き込み同調のより新しいモデルを提案すべきと考えている。

このような高次の脳活動に対する引き込みの適用を提案する例として、清水の関係子における引き込みがある[21]。また、それを剣術の場合に当てはめて、より詳細な議論をしている[22]。この中で、関係子とは即興劇を演ずる役者のようなものであり、互いに共通の「場」を共有することによって、「場」の中で演じあうように相互作用をする。この「場」の共有に欠かせないのが引き込みである。それは、分散した状態から徐々に同調に至るといった典型的な引き込み同調のイメージと異なり、特定の瞬間に向かって意識の集中とともに一時的な同調を実現するものである。その後、いったん生じた同調は、意識を継続することによって、同調度を変化させながら持続していくと考えられている。

また、Jonesは、引き込み同調の位相空間を、リズムに伴う集中度の変動に適用するユニークな提案をしている[23]。Jonesは、音楽リズムの認知に生体内リズムのモデルを援用して、自律的なリミットサイク

ルに一時的な集中のエネルギーパルスを組み合わせた非線形振動のモデルを仮定している。さらに、それを用いて、外部のリズム刺激と意識の感じる内的なリズムが同調する過程を、結合振動子系を使って詳細に議論している。

著者らの立場は、これらの試みの意義を大きく評価しているが、音楽リズムの本質を捉えるには、さらに踏み込んだアプローチが必要であると考えている。

5. 外的リズムと生体情報の同調

次に、音楽リズムとして外的に観察される演奏情報に対して生体内において認知されるリズムがどのようなメカニズムになっているかを解明するために、行動や視聴覚で知覚される外的リズムと生体情報の時間変動がどういう関係になっているかを検討する。

まず、邦楽を鑑賞するときの演者と鑑賞者の呼吸を調べた研究が中村によって行われている[24]。それによると、「間」の直後の呼吸が両者で同調していることが観察された。このような「間」の重要性は、音楽演奏の場合にも同様に当てはまると考えられる。

また、渡辺らは、入眠時における親子の呼吸の同調を見いだした[25]。母親が乳児を抱いて寝かせる際、双方の心拍を測定し、その変動リズムから、両者の呼吸が同調しているときに、子供が入眠する傾向があることを示した。この中で、親しい友人同士の会話における、動作や呼吸の同調も観測している。

前述の梅田も、会話において「ニュー波」と呼ばれる音声の強さの長時間変動を測定し、それが、親しい関係の被験者の間で共振することを見いだした[26]。このような現象は、あらかじめ決められたものを読み上げるような場合にはみられず、個人的な話題をその場の気分で話す場合に生じた。これを梅田は、「自発表現」と名付けて、コミュニケーションにおける重要性を強調している。

著者らも、グループでのタッピング時の EEG を測定したところ、脳波に低周波の

誘発がみられ、一種の同調現象であると考えられる[27]。その様子を図4に示す。

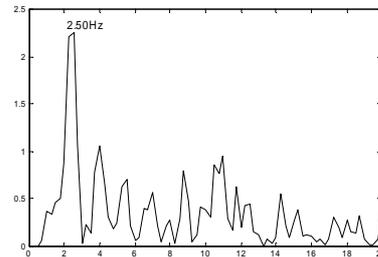


図4:タッピング時の脳波のスペクトルの例

4人の被験者が、指定された単純なリズム型を繰り返し音楽キーボードの指定した鍵盤を押すときの脳波を4人同時に測定した。この脳波の同調では、テンポが速いと、同調脳波の周期が倍加されたり、タッピング周波数とずれた周波数で安定するなどの興味深い傾向が見いだされている。

また、武田らは、聴覚刺激によって同調脳波が誘発される例を報告している[28]。もとより、前述の心拍と呼吸、あるいは血圧との関係を調べた Akselrod らの議論[29]も同様な同調関係に含まれるであろう。

6. 脳内のリズム構造

脳内には、 α 、 β 、 γ などの律動がみられるが、それらの本質的なメカニズムの解明はあまり進んでいない。このうち α 波は、浅い睡眠時に観測されることの多いものであるが、それ以外に覚醒時においても観測されることがある。最近この覚醒時の α 波に関する研究が、脳磁計などの発達によって急速に進んでいる。

このうち、前頭部中央付近に見いだされる α 波は、精神活動時や睡眠時の一部に見いだされ、日本人によって、Fm 波と名付けられた。名付け親でもある山口によって意識の注意集中との関係が示唆され、それが感覚として自覚可能であることが示された[30]。石原はこのことを検証した結果、被験者の感覚として、「精神集中」「熱中」「没頭」などの言語報告があることを示した[31]。

これらのことから、Fm 波はワーキングメモリによる高次の脳機能と関係があることが浅田らによって論じられている

[32]。さらに，ワーキングメモリの活性度と前部帯状回との関係は，芋阪らによっても示され[33]，この波が脳中枢の律動と関係がある可能性を強く示唆している。

実際，脳表面皮質に現れる波と中枢が同調しているとする共鳴説は Miller によって論じられているが[34]，Basarらは視聴覚刺激に対して前頭部に誘発される波を観測し[35]，TescheらはMEGによって，海馬の律動との同調を見いだしている[36]。

また，ワーキングメモリと関連するものとして，波のピーク周波数の変動が挙げられ，Pfurtschellerらは，刺激にあわせたボタン押しの課題遂行時にピーク周波数が大きくなることを見いだした[37]。この傾向は別の課題を用いた芋阪によっても追認されている[38]。波自体の生成メカニズムはそれほどはっきりと解明されたわけではないが，猫の脳波を測定した研究によって，多数のニューロンの発火のタイミングが波の周期でそろったりばらついたりした結果であることが明らかにされている[39]。

7. 考察とまとめ

以上の事柄から，脳波をはじめとした生体情報の間には，幾種かの同調関係が存在することが示され始めている。特に脳中枢におけるループは生体リズムの同調に対して重要な働きを持っていることが推測される。波はそれほど速い律動ではないため，場合によっては，リズム運動などの外的リズムと直接的な同調関係を持っている可能性も予想される。ただ，現段階では，個々の幅広い実験事実が存在するだけで，その全体がどのようなメカニズムによってリズム的に統合されているかは未解明である。

また，Jasperらによって示された波の生成機構は，音楽アンサンブルでのリズムの同調と酷似しており，音楽アンサンブルにおける演奏者の積極的な同調の特性が生体内にも存在するのではないかと予想される。従来の「引き込み同調」は基本的に振動子が自発的に（かつ受動的に）同調するものであるが，音楽アンサンブルにおける

同調の積極性を考慮すれば，これらはむしろ「引き込ませ同調」とでも呼んだ方がいいかもしれない。

本稿の論述は，予備的な段階にあるが，さらに生体計測等によるデータを集めるとともに，この「引き込ませ同調」を適切に記述できるようなモデルの提案を今後の目標としたい。

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。実験研究に多大の支援をいただいた，三重大大学の中西智子先生，一橋大学の廣瀬百合子氏，帝京平成大学の中村貴展氏をはじめ，協力いただいた方々，被験者の方々に深く感謝する。また，解析の協力を始め，様々に支えてくれた妻のあゆみ，本稿を執筆中に誕生し心の支えとなった息子に感謝する。

参考文献

- [1] 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，情処研報，Vol.2000，No.19 (2000-MUS-34)，pp.27-34，1999
- [2] 吉田友敬他：音楽リズムの同調と引き込み現象(1)，日本音楽知覚認知学会平成14年度秋季研究発表会予稿集，pp.79-86，2002
- [3] 長嶋洋一：音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす引き込み効果(2)，情処研報，Vol.2003，No.82 (2003-MUS-51)，pp.83-90，2003
- [4] Rasch, R.A.: Synchronization in Performed Ensemble Music, *Acustica*, Vol. 43, pp.121-131, 1979
- [5] Goodman, E.: Ensemble Performance, in *Musical Performance* (Ed. Rink, J.), Cambridge University Press, pp.153-167, 2002
- [6] 堀内靖雄他：二人の人間による演奏の協調動作について，情処研報，Vol.98，No.74 (98-MUS-26)，pp.103-108，1998
- [7] Rasch, R.A.: The Perception of Simultaneous Notes such as in Polyphonic Music, *Acustica*, Vol.40, pp.21-33, 1978
- [8] ムーア，B.C.J.(大串健吾監訳)：聴覚心理学概論，誠信書房，1994
- [9] Jones, M.R. & Bolz, M.: Dynamic Attending and

- Responses to Time, *Psychological Review*, Vol.96, pp.459-491, 1989
- [10]梅田規子:おしゃべりはリズムにのって, オーム社, 1997
- [11]Yoshida, T. et. al.: The Application of Entrainment to Musical Ensembles, *Proceedings(electrical) of ICMAI*, Edinburgh, UK, 2002
- [12]Narmour, E.: *The Analysis and Cognition of Basic Melodic Structures*, University of Chicago Press, 1990
- [13]水島良雄:グレゴリオ聖歌, 音楽之友社, 1966
- [14]Voss, R.F. & Clarke, J.: '1/f Noise' in Music, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.63, pp.258-263, 1978
- [15]井上政義, 入科孝一:エントロピー時系列による音楽の解析とその編曲・作曲への応用, *情処研報*, Vol.96, No.53(96-MUS-15), pp39-44, 1996
- [16]Kaneko, K.: Clustering, Coding, Switching, Hierarchical Ordering, and Control in Network Chaotic Elements, *Physica*, Vol.D(41), pp.137-172, 1990
- [17]Nozaki, S.R.D., Kwak, S. & Yamamoto, Y.: 1/f Noise Outperforms White Noise in Sensitizing Baroreflex Function in the Human Brain, *Physical Review Letters*, Vol.91, No.7, pp.078101-1-4, 2003
- [18]Tachikawa, M.: Multiplicity of Limit Cycle Attractors in Coupled Heteroclinic Cycles, *Prog. Theor. Phys.*, Vol.109, pp.133-138, 2003
- [19]Yoshikawa, K. & Murofushi, Y.: Evolution of Spatio-Temporal Structure in Interacting Salt-Water Oscillators, *Forma* Vol.5, pp.83-92, 1990
- [20]清水博:生命を捉えなおす 増補版, 中公新書, 1993
- [21]清水博:生命と場所, NTT 出版, 1992
- [22]清水博:生命知としての場の論理, 中公新書, 1996
- [23]Large, E.W. & Jones, M.R.: The Dynamics of Attending: How People Track Time-Varying Events, *Psychological Review*, Vol.106, No.1, pp.119-159, 1999
- [24]中村敏枝:"間"の解明, 辻三郎(編), 感性の科学, サイエンス社, pp.83-87, 1997
- [25]渡辺富雄, 大久保雅史:コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価, *情報処理学会論文誌*, Vol.39, No.5, pp.1225-1231, 1998
- [26]梅田規子:心の動きとしゃべりの波動, 「しゃべり音声のリズム構造とその心理的影響に関する研究」最終報告書, 原子力安全システム研究所, 1997
- [27]吉田友敬他:アンサンブルにおけるリズムの同調の分析, *日本音響学会講演論文集*, pp.863-864, 2003
- [28]武田昌一他:聴覚刺激により誘発される脳波の引込現象の検討, *日本音響学会講演論文集*, pp.677-678, 1996
- [29]Akselrod, S. et. al.: Power Spectrum Analysis of Heart Rate Fluctuation, *Science*, Vol.213, No.10, pp.220-222, 1981
- [30]山口雄三:F m ()・(), *臨床脳波*, Vol.36, No.8, pp.538-543, No.9, pp.601-606, 1994
- [31]石原務:バイオフィードバック法による F m 脳波感覚の検討, *臨床脳波*, Vol.23, No.3, pp.191-197, 1981
- [32]浅田博, 福田淳:前頭正中部 律動と能動的注意の持続機能, *日本神経回路学会誌*, Vol.8, No.4, pp.147-152, 2001
- [33]Osaka, M. et. al.: The Neural Basis of Individual Differences in Working Memory Capacity: An fMRI Study, *NeuroImage*, Vol.18, pp.789-797, 2003
- [34]Miller, R.: *Cortico-Hippocampal Interplay and Representation of Contexts in the Brain*, Springer-Verlag, 1990
- [35]Basar, E. et. al.: The Selectively Distributed Theta System: Functions, *International Journal of Psychophysiology*, Vol.39, pp.197-212, 2001
- [36]Tesche, C.D. & Karhu, J.: Theta Oscillations Index Human Hippocampal Activation during a Working Memory Task, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.97, No.2, pp.919-924, 2000
- [37]Pfurtscheller, G. et. al.: Inter- and Intrahemispheric Differences in the Peak Frequency of Rhythmic Activity within the Alpha Band, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol.42, pp.77-83, 1977
- [38]芋阪満里子:ワーキングメモリの認知神経心理学的研究, 風間書房, 1994
- [39]Jasper, H. & Stefanis, C.: Intracellular Oscillatory Rhythms in Pyramidal Tract Neurones in the Cat, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol.18, pp.541-553, 1965