

「息が合った演奏」の定量的評価のための基礎確立

—— 非線形時系列解析による試み ——

Constructing Foundation for Quantitative Measurement of a Sense of “Being in Sync” :
an Approach Using Nonlinear Time-series Analyses

2157003



研究代表者 (助成金受領者)	東京大学大学院 総合文化研究科 博士後期課程	岡 野 真 裕
共同研究者	東京大学大学院 総合文化研究科 助 教	進 矢 正 宏
共同研究者	東京大学大学院 総合文化研究科 准 教 授	工 藤 和 俊

〔研究の目的〕

音楽のアンサンブルがよく整っていることは、しばしば「息が合っている」と表現される。しかし、演奏のどのような性質がこの「息が合っている」という感覚につながっているかは明らかでなく、定量的な測定も現在のところ不可能である。そのため、現状ではアンサンブル演奏の質の評価は、主観に頼るしかない。本研究の究極的な目標は『「息が合っている」状態を説明しうる変数を特定し、この状態を定量的に記述すること』である。この目標に向けた基礎的研究として、音楽演奏の時間的な協調という側面に着目し、2人組テンポ維持同期課題（後述）の実験の実施および解析を行った。

音楽演奏で要求される最も基礎的なスキルの一つとして、意図したテンポを維持することが挙げられる。この能力を評価する方法として、同期－継続課題がある。典型的な同期－継続課題では、最初にメトロノームで提示された目標テンポに合わせたタッピングを始め、途中でメトロノームが停止した後も、そのままのペースでタッピングを数分間続けることを求められる。この課題で目標テンポを維持し続けることは難

しく、タップ間隔（Inter Tap Interval: ITI）は通常 50～100 秒程度の長い周期で、目標テンポ（目標 ITI）の周りを動揺する。この課題を複数人で行った結果はこれまで報告されていなかったが、近年、様々な認知課題・運動課題で、単独で行う場合と2人組で行った場合でパフォーマンスに差が見られることが報告されていることから、テンポ維持のパフォーマンスも人数により変化する可能性が考えられた。そこで〈研究1〉では、この目標テンポ維持課題のパフォーマンスを、課題を単独で行った場合と、2人組で行った場合（2人組テンポ維持同期課題）とで比較した。

また、音楽の生演奏のテンポはランダムな揺らぎを伴うが、それでも演奏者は、タイミングを互いに同期することができる。〈研究2〉では、ITIがランダムに揺らぎながらも同期してタッピングを続ける2人のITIが、どのような相関構造を持っているかについて検討するため、〈研究1〉で得られた2人組テンポ維持同期課題のITI時系列に、非線形時系列解析の方法である Detrended Fluctuation Analysis（トレンド除去動揺解析：DFA）や、Detrended Cross-Correlation Analysis（トレンド除去相互相関解析：DCCA）を適用した。これらの方

法は、時系列の持つ $1/f$ ゆらぎや、長期相互相関といったダイナミクス構造を定量することができる。Rankin ら (2008) は、自然な抑揚の付いた演奏で、テンポのゆらぎが $1/f$ ゆらぎの構造を持つことを示した。また、Stephen ら (2008) は、ランダムな間隔のビートに対する同期タッピングで、ITI とビート間隔の揺らぎの複雑性が強く相関することを示した。さらに Hennig (2014) は、2 人の参加者による共同タッピング課題のビート間隔において、両参加者のビート間隔の時系列に長期相互相関が観察されたと報告した。これらの研究でも DFA や DCCA が用いられており、これらの手法から「息が合う」という感覚の定量という目的にとって示唆が得られると考えた。

[研究の内容・成果]

〈研究 1〉

参加者：26 名 (13 組) の一般大学生が実験に参加した。

装置：参加者は電子ドラム (WAVEDRUM mini, KORG) のセンサークリップを指でタップし、音声フィードバックを受けた。センサーの出力電圧を AD コンバーター (USB-6218BNC, National Instruments) を通し、PC で記録した。

実験課題：参加者は単独での同期-継続課題 (以下、ソロ条件) と、2 人組テンポ維持同期課題 (以下、ペア条件) を遂行した。ソロ条件では、実験参加者はメトロノームと同期して指タッピングを 10 秒間行い、メトロノーム停止後もそのままの ITI でタッピングを続けることを求められた (1 試行 200 秒間)。ペア条件ではこれを 2 人同時に行い、音楽の合奏で同じパートを演奏するように、目標 ITI に加えてパートナーとの同期も維持するよう求めた (図 1)。目標 ITI によって結果が異なる可能性を考慮し、目標 ITI には 800, 500, 300 ms の 3 条件 (それぞれ 75, 120, 200 beats per minute に

相当) を設定した。

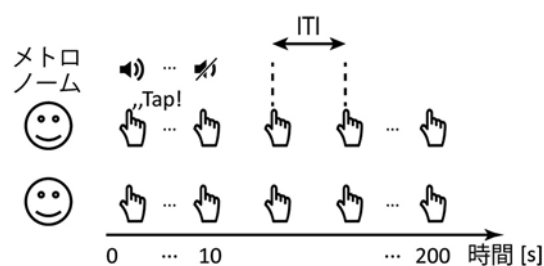


図1 2人組テンポ維持同期課題

結果：ソロ条件ではおよそ目標 ITI の近傍で長周期の変動が観察されたのに対し、ペア条件では ITI が徐々に短くなっていった (図 2 A)。800 ms 条件では、ソロ条件では全体として目標 ITI の近傍で ITI が変動したのに対し、ペア条件では ITI がほぼ単調に減少した。500, 300 ms 条件では、ソロ条件の ITI も単調に減少したが、ペア条件ではソロ条件以上に顕著に減少した (図 2B)。

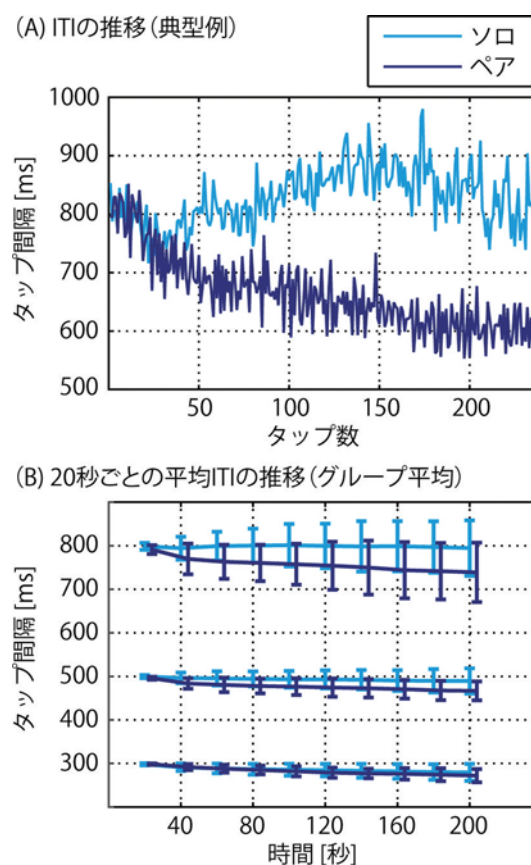


図2 ITIの推移

以上から、テンポ維持のパフォーマンスは、単独で課題を遂行する場合と比べて、2人組という環境ではテンポが速くなりやすいことが示唆された。実際の音楽演奏でもテンポが意図せず速くなることがしばしば起こり（「走る」と呼ばれる）、減速に遅くはならない。この現象の原因として、高揚や緊張といった演奏者の心理状態との関連が演奏現場では指摘されるが、本研究の結果は、2人組という環境自体もその原因となりうる可能性を示唆している。

〈研究2〉

DCCA・DFAの概要：DCCAは等しい長さを持つ2つの時系列間の様々な時間スケールにおける相関を評価するための解析手法で、2つの時系列を $x(t)$ 、 $y(t)$ とし、その長さが N であるとする、次のようなアルゴリズムで実行される。まず $x(t)$ と $y(t)$ から、その偏差の累積和の時系列 $X(t)$ 、 $Y(t)$ を求める（式(2)）。

$$\begin{aligned} X(t) &= \sum_{i=1}^t [x(i) - \bar{x}] \\ Y(t) &= \sum_{i=1}^t [y(i) - \bar{y}] \end{aligned} \quad \dots(1)$$

続いて $X(t)$ と $Y(t)$ を、オーバーラップしない長さ n のセグメント k 個に分割し、セグメントごとにローカルトレンドを除去した時系列を作成し、その共分散 $F_{DCCA}^2(n)$ を求める（式(2)： $X_n(t)$ および $Y_n(t)$ はローカルトレンドの時系列、すなわち $X(t)$ 、 $Y(t)$ の各セグメントにおける回帰直線をつなげた線上の値を表す）。

$$F_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [X(t) - X_n(t)][Y(t) - Y_n(t)] \quad \dots(2)$$

式(2)の手続きを、可能な全てのセグメント長 n について繰り返す。典型的には n が大きいほど $F_{DCCA}^2(n)$ も大きくなり、べき乗則が観察される。

$$F_{DCCA}^2(n) \propto n^{2\lambda} \quad \dots(3)$$

λ はスケーリング指数と呼ばれ、横軸に n 、縦軸に $F_{DCCA}^2(n)$ をとり両対数プロットした際、その近似直線の傾きになる。

式(1)の $y(i)$ に $x(i)$ を代入すると、DFAのアルゴリズムが得られる。すなわち、

$$F_{DFA}(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [X(t) - X_n(t)]^2} \quad \dots(4)$$

$$F_{DFA}(n) \propto n^\alpha \quad \dots(5)$$

さらに、異なる時間スケール（セグメント長 n に対応）における相互相関の指標として、DCCA相互相関係数 $\rho_{DCCA}(n)$ が、次のように定義される。

$$\rho_{DCCA}(n) = \frac{F_{DCCA}^2(n)}{F_{DFA_x}(n)F_{DFA_y}(n)} \quad \dots(6)$$

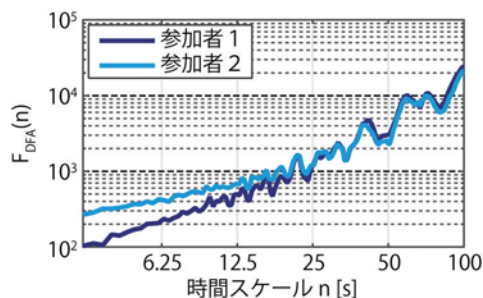
$F_{DFA_x}(n)$ および $F_{DFA_y}(n)$ は、 $x(t)$ および $y(t)$ に対する $F_{DFA}(n)$ をそれぞれ表す。 $\rho_{DCCA}(n)$ は時間スケール n における相互相関の強さを表し、 -1 （完全な負の相関）から 1 （完全な正の相関）の間の値をとる。 $\rho_{DCCA}(n)=0$ は、その時間スケール n では $x(t)$ と $y(t)$ の間に相互相関が全く存在しないことを表す。

DFAの α は時系列の自己相関に対応し、 $\alpha=0.5$ は時系列が自己相関を持たないホワイトノイズであることを示す。 $\alpha>0.5$ は、その時系列の変動が「持続的」（大きな値には大きな値、小さな値には小さな値が続きやすいという性質）であったことを示す。特に $\alpha=1.0$ を示す波形はピンクノイズあるいは $1/f$ ゆらぎと呼ばれる。 $\alpha=1.0$ は、時系列の定常性（どの区間について見ても、平均値や分散などの統計的性質が同一であること）が保持される最大の α 値である。 $\alpha<0.5$ は「反持続的」（大きな値には小さな値、小さな値には大きな値が続きやすいという性質）な変動を表す。なおサンプル点数が数百点程度の短い時系列に対するDFAは、スペクトル解析など、他の方法との併用が推奨されている。ホワイトノイズやピンクノイ

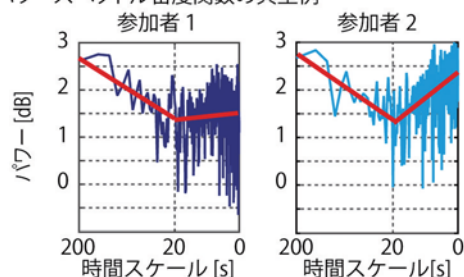
ズなどの複雑な時系列は、パワースペクトル密度関数（PSD）が周波数の対数に比例するため、 $1/f^\beta$ ノイズと総称される。PSD の回帰直線の傾き $-\beta$ と α との関係は、 $\alpha = (\beta + 1)/2$ となる。この α や β は、しばしば時系列の複雑性の指標として用いられている。ドリフトを伴う時系列で DCCA、DFA および PSD の算出を行うと長い時間スケール領域の値が不当に高まるため、これらの解析は線形トレンドを除去してから行った。

結果： $F_{DFA}(n)$ の値は長い時間スケールほど参加者間で一致する傾向が見られた（図 3 A）。

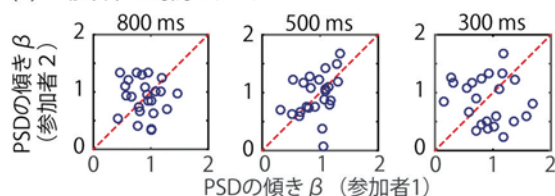
(A) DFAの結果の典型例



(B) パワースペクトル密度関数の典型例



(C) 20秒以下の時間スケール



(D) 20秒以上の時間スケール

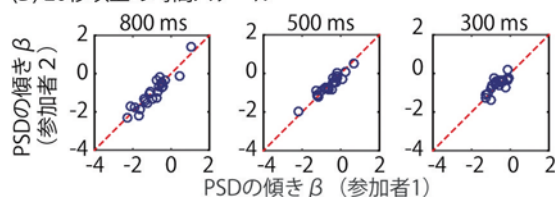


図3 DFA および PSD の結果

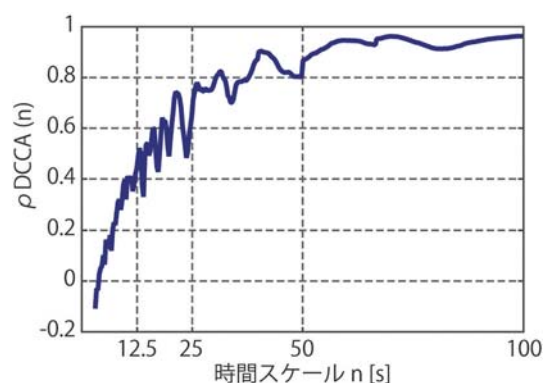


図4 DCCA の結果（典型例）

20 秒を境に時間スケールを分けて PSD の傾き β を算出したところ、20 秒以下の時間スケールでは参加者間でほとんど一致しない一方、20 秒以上では強く一致した（図 3 B～D）。

$\rho_{DCCA}(n)$ の値も、最小に近い時間スケールではほとんど相関が見られない一方で、長い時間スケールになるほど相関が強くなっていった（図 4）。これらの結果は、2 人組テンポ維持同期課題の参加者組の ITI は、局所的にはあまり協調が見られないにもかかわらず、複雑性のような大域的な構造において強く協調していたことを示唆している。

[今後の研究の方向、課題]

助成期間内にはこれらの結果と実際の音楽演奏の性質との関連までは明らかにできなかった。今後、実際の音楽演奏から得られた演奏テンポのゆらぎの時系列にこれらの手法を適用し、得られたパラメータと演奏者や聴衆の主観評価との関連について検討していく必要がある。

[成果の発表、論文等]

〈研究 1〉

岡野真裕, 進矢正宏, 工藤和俊. 『走る』アンサンブル：2 人組リズム維持タッピング課題におけるテンポ高速化』, 情報処理学会研究報告, Vol.2016-MUS111 No.58, 2016. (音学シンポジウム 2016 優秀発表賞受賞) 他

〈研究 2〉

Masahiro Okano, Masahiro Shinya, and Kazutoshi Kudo.

“Detrended Cross-correlation Analysis Reveals Long-range Synchronization in Paired Tempo Keeping Task.” *Proceedings of the 14 th Inter-*

tional Conference on Music Perception and Cognition, 2016 (p.794-797).