

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岡野真裕

音楽演奏やダンスでは、アンサンブル演奏やデュエット演技などにみられるように、複数人でリズムカルな運動のテンポを維持することがしばしば求められる。これまで、ヒトにおけるテンポ維持のためのタイミング制御に関する先行研究では主に、一定テンポの指タッピングをメトロノームに同期させ、メトロノームを停止した後にもそのテンポを維持し続ける「同期-継続課題」が用いられ、この課題を単独（1人）で行った場合にはタップ間隔の時系列に長期相関が認められることが明らかになっている。一方で、この課題を共同行為として2人で実施する際のテンポ調整プロセスについては、相互相関関数を用いた解析が行われているものの、調整プロセスの詳細については不明である。そこで本研究では、同期-継続課題を2人組で実施する際のテンポ調整プロセスについて、時系列解析および結合振動子モデルを用いて検討した。

はじめに実験1では、26名の参加者が1人（ソロ条件）および2人組（ペア条件）での同期-継続課題を75、125、200拍/分の3種類のテンポで200秒間実施した。その結果、いずれのテンポ条件においても、ソロと比較してペアでは平均タップ間隔が短くなり、テンポが高速化した。さらに回帰分析を用いて、ペア条件でのテンポ増大は、ソロ条件で速くタップする傾向のある参加者が他方の参加者を一方的に引っ張るのではなく、両者が互いにタップのタイミングを調整することによってテンポが高速化していることが示された。

実験1から、同期-継続タッピング課題を2人組で、パートナー間の同期も維持しながら行うと、動作テンポが増大することが明らかになり、同期のためのタイミング調節が動作テンポを速める一因になる可能性が示唆された。一方先行研究では、リズム動作のテンポに影響を与える要因の一つとして心拍への引きこみが示唆されており、タッピングのタイミングのみを取得した実験1では、心拍の影響が否定しきれない。そこで実験2として、ソロおよびペアでの同期-継続タッピング課題中の参加者の心電図を計測し、心拍がタッピングのテンポに与える影響について検討した。その結果、ペア条件でのタッピングはソロ条件と比較して速くなる傾向があったが、心拍数はソロ・ペアの条件間で有意な差は認められなかった。また、各試行における動作テンポと心拍数にも有意な相関は認められなかった。これらの結果は、ペア条件におけるタッピングの加速は、少なくとも心拍数の増加によるものではないことを示唆している。

続いて、実験1における2人組のタッピングにおけるタップ間隔の時系列に着目し、トレンド除去相互相関解析を用いて、異なる時間スケールでの協調特性について検討した。

その結果、同じ参加者組のタップ間隔時系列間において、およそ 20 秒以上の比較的長い時間スケールの領域では時系列のスケーリング指数（フラクタル指数）間に有意な相関が認められた一方、それ以下の短い時間スケールでは相関が弱まるという構造が観察された。また、これらの関係は、タップ間隔のパワースペクトル密度関数の傾きにおいても同様に観察された。これらの結果から、2 人組での同期-継続課題の対人間相互作用の協調には、時間的に多層的な協調プロセスが関与していることが示唆された。

本研究ではさらに、これらの観察結果をふまえ、2 人組での同期-継続タッピング課題の遂行プロセスの数理モデル化を試みた。結合振動子モデルを用いて、パートナーに対して自身が遅れていれば位相および周期を上方修正し、進んでいればこれらを下方修正する、という仮定をおいた。また、観察されたテンポは、ある程度高速化するとプラトーに達する傾向が認められたことから、もとのテンポからの逸脱量が大きくなるほど、もとのテンポに戻そうとする力が強まることを再現するための項をモデルに追加した。数値シミュレーションの結果、この結合振動子モデルによってタッピングテンポの高速化を再現することができた。注目すべきは、先行研究のモデルにおいては、基準テンポからの逸脱はドリフト項によって強制的にもたらされていたのに対し、本モデルでは 2 者のタップタイミング調整という局所的な相互作用からもたらされていたという点である。加えて本モデルでは、早く聞こえてきた音に対して強く応答し、遅く聞こえてきた音に対して弱く応答するという応答関数の非対称性を仮定することなく、高速化がもたらされた。さらに数値シミュレーションの結果、本モデルにおける位相・周波数応答関数の利得およびテンポを初期値へ戻そうとする力の利得はそれぞれ、短時間スケール領域の協調構造（脱トレンドフラクタル解析によって算出される動揺量の傾き）および長時間スケール領域の協調構造に影響を与えることが明らかになり、これらのパラメータ操作によってトレンド除去相互相関解析の結果を再現することができた。

以上の実験およびモデル化によって、2 人組の同期-継続タッピングでは、テンポを維持しようという参加者の意図に反して、無意図的にテンポが増大してしまい、このテンポ増大は心拍数の増減とは無関係であることが示された。さらに、結合振動子モデルを新たに作成し、応答関数レベルでの時間的非対称性を仮定することなく、テンポの高速化を再現するとともに、局所的・大域的な時間構造を再現することができた。これらの結果は、テンポの高速化が、時間の矢、すなわち時間そのものの非対称性に由来する、万人に共通の制約要因によることを示すものであり、これが合奏におけるテンポ維持の難しさにつながっていることを示唆するものである。

審査会では、実験におけるテンポ設定やモデルで用いられた変数について、論文の完成度を高めるためのいくつかの指摘がなされ、それにもとづいて加筆修正が行われたものの、最終的には本論文が対人間の協調ダイナミクスを明らかにしたことが評価され、本審査委員会は全員一致で博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定した。