

論文の内容の要旨

Coordination dynamics of whole-body rhythmic sensorimotor
synchronization: A study of skilled street dancers and non-dancers

(全身リズム動作による感覚運動同期の協調ダイナミクス：
熟練ストリートダンサーと非ダンサーの比較研究)

三浦 哲都

第1章：緒言

リズムカルな運動は人間にとって普遍的な運動のひとつである。リズムカルな運動の特性は音に運動を同期させる感覚運動同期によって明らかにされてきた。近年人間の感覚運動同期を非線形力学系理論により分析することで、従来の指標では評価し得ない複雑な運動の特性を記述することが可能となってきた。非線形力学系理論の身体運動への適用は、両手の指のリズムカルな協調運動から始まった (Kelso 1984)。その運動の特性は数理モデルで表現され (Haken et al. 1985)、近年ではその数理モデルを基に学習過程をモデル化し、両手のリズムカルな協調運動のパフォーマンスを予測することが可能となった (Fujii et al. 2010)。このように非線形力学系理論を用いたリズムカルな協調運動の研究は、指や手の運動を対象としたものが大部分を占める。しかしながら、非線形力学系理論はより広範な人間の運動特性の解明への適用可能性を秘めており、実際のパフォーマンスと関わるような全身リズム動作に適用することで、熟練者と初心者を分ける神経系の制約や、その克服方法の開発などにつながる可能性がある。そこで本研究は非線形力学系の方法論により、これまで調べられていなかったスポーツパフォーマンス、ダンスなどの実際的なパフォーマンスと関わる全身リズム動作を調べ、熟達度に関わる変数を特定することを目的とした。全身リズム動作の熟練者としてストリートダンサーを対象とし、全身動作の知覚-運動協調課題を行わせ、その運動の特性を定量化した。

第2章（実験1）：全身リズム動作における協調モード

ストリートダンスでは基本練習として、2種類の膝屈伸動作（ダウン：膝屈曲とビート音を同期、アップ：膝伸展とビート音を同期）を行う。経験的にアップはダウンより難しいとされているが、これらの動作が体肢協調の力学系法則に支配されているとすれば、知覚—運動協調において速度依存的なパターン形成が生じる可能性がある。ストリートダンサー8名（ダンサー）とダンス未経験者9名（非ダンサー）に立位での2種類の膝の屈伸運動を、を8種類の周波数（40～180拍/分を20拍/分刻み）で行わせた。1試行につき1周波数で動作を行わせ、その動作パターンを維持するように指示した。また各試行後に課題動作の難易度を1（易しい）から5（難しい）で評価させた。ビート音と膝関節角度の相対位相を算出した。その結果、非ダンサーは180拍/分ではアップを行おうとしても、ダウンの位相角へと引き込み現象が生じたが、ダンサーは180拍/分でもアップを行うことができた。位相角のばらつきはダウンよりもアップのほうが、ダンサーよりも非ダンサーの方が有意に大きかった（ $p < .05$ ）。課題動作の難易度評価では、両群ともに高周波において、ダウンよりアップの主観的難易度の方が有意に高かった（ $p < .05$ ）。これらの結果は、全身動作においてもダウン（安定）、アップ（準安定）という2種類の協調モードが存在し、その組織化には関節の動き（屈曲・伸展）や重力が影響していることを示唆する。速度依存的なパターン形成が観察されたことは、全身の知覚—運動協調が自己組織化というリズムミカルな運動に共通の力学系法則に従うことを示す1つの証拠である。また、ダンサーだけが引き込みに抵抗できたことは、リズムミカルな運動の学習が生得的に内在する安定な協調パターンへの引き込みを克服する過程であることが示唆される。

第3章（実験2）：全身リズム動作における自己組織化的なパターン形成

第2章（実験1）では、全身リズム動作における知覚—運動協調がリズムミカルな運動に共通の力学系法則に従うことが示唆された。しかしながら、実験1ではビート音の周波数が連続的に変化しておらず、また参加者が教示された協調パターンを維持するように指示された。そのためリズム運動が力学系法則に従うことを示す他の証拠（相転移、ヒステリシスなど）を直接的に観察していない。そこで実験2では、ビート音の周波数が連続的に変化し、参加者が知覚—運動協調における自発的なパターン形成に逆らわないように指示する実験設定により、相転移やヒステリシスを観察することを目的とした。ストリートダンサー9名と非ダンサー9名に立位での2種類の膝の屈伸運動（ダウン、アップ）を、60拍/分から220拍/分までの20拍/分ごとに上昇/下降するビート音に合わせて行わせ、ビート音と膝関節角度の相対位相を算出した。その結果、ダンサーでは平均166拍/分、非ダンサーでは平均125拍/分でアップからダウンへの相転移現象が観察され、その相転移周波数はダンサーの方が有意に高かった（ $p < .05$ ）。またアップでは上昇条件と下降条件の位相角のプロファイルが異なるヒステリシスが観察された。相転移やヒステリシスは、全身リズム動作における知覚—運動協調が自己組織化というリズムミカルな運動に共通の力学系法則に従うことを示す証拠である。相転移周波数がダンサーの方が高いという結果は、自発的なパターンを生成するダイナミクス（intrinsic dynamics）が運動学習によって変化したことを示唆し、相転移周波数が熟達度と関わる変数であることを示す。

第4章（実験3）：全身リズム動作の習熟度が関節間協調に与える影響

第2、3章（実験1、2）では全身リズム動作の熟達度を知覚—運動協調の観点から調べた。第4章（実験3）では、全身リズム動作の熟達度を関節間協調の観点から調べることを目的とした。参加者（実験1と同じ）に、ダウンのリズム動作を行なわせ、下肢関節角度（股関節、膝関節、足関節）間の相互相関を算出した。相互相関のピーク時刻の結果から、ダンサーは股関節と、膝関節および足関節の間に、非ダンサーよりも大きな位相差があることが明らかとなった ($p < .05$)。また相互相関のピーク値はダンサーの方が有意 ($p < .05$) に大きかった。これらの結果はストリートダンスの運動学習における関節間協調の自由度の再組織化は、関節間の位相差の増大を伴う新しい協調パターンの安定化として特徴付けることが可能であり、ダンサーが関節間協調に存在する生得的に安定した協調パターンを変調したことを示唆する。すなわち関節間の位相差が全身リズム動作の熟達度と関わる変数であることが示唆される。

第5章（実験4）：全身リズム動作の習熟度と筋の共収縮との関係

第5章（実験4）では、全身リズム動作の神経生理学的特徴を明らかにするために、その習熟度が下肢の拮抗筋間の共収縮に及ぼす影響について検討した。参加者（実験1と同じ）に、ダウンのリズム動作を行なわせ、下肢筋群の筋活動、および各関節の角度、角速度を計測した。膝関節ピーク時刻からリズム音までの時間変動はダンサーの方が有意 ($p < .05$) に小さく、屈筋と伸筋の筋電位の相対差分信号から算出した共収縮レベルはダンサーの方が有意 ($p < .05$) に小さかった。また重回帰分析では、共収縮の説明変数としてグループが有意 ($p < .01$) となり、その他の独立変数（角度や角速度）に関わらず、習熟度が共収縮と関連していることが明らかとなった。これらの結果は共収縮レベルの低下が、これまで主に調べられてきた上肢の運動 (Osu et al., 2002) に特異的ではなく、運動学習における一般原則であることを示唆する。

第6章：総括論議

本研究は全身動作の知覚—運動協調や関節間の協調には、生得的に安定または準安定の協調パターンが存在することを明らかにした。安定、準安定の協調パターン間の相転移や、動作周波数の上昇条件と下降条件で位相角のプロファイルが異なるヒステリシス現象は全身リズム動作がリズムカルな運動に共通の力学系法則に支配されていることを示す証拠である。またダンサーの相転移周波数の方が高かったことや、ダンサーだけが無意図的な引き込みに抵抗できたことは、人間のリズムカルな運動の学習が安定な協調パターンへの相転移や引き込み（神経系に内在する制約）を克服する過程である (Swinnen, 2002) ことを示す。また全身リズム動作熟達の神経生理学的背景には、筋の共収縮低下が存在することを明らかにした。熟達度を分ける相転移周波数や、共収縮指数を非線形力学系の数理モデル (Haken et al. 1986) に組み込むことで、全身リズム動作の熟達度を表現することが理論的には可能である。本研究で用いた課題動作は実際のパフォーマンスと関わるスキル動作であるために、パフォーマンスと関わる運動の学習プロセスの記述や、トレーニング方法の開発などへ応用が可能であると考えられる。また本研究は、ストリートダン

スの運動制御研究として、ストリートダンサーやダンスの教育者に対して示唆を与える。熟練ストリートダンサーの特徴として、生得的に不安定な協調パターンの安定化があげられる。全身リズム動作の協調パターンの形成には動作周波数（速度）が関わっているため、速度に着目した練習が効果的であると考えられる。また熟練ダンサーは筋の共収縮レベルが低いことが観察されたことから、脱力、リラックスを含めた練習が効果的であると考えられる。