周期運動と離散運動の違いが単発的な筋出力調節に及ぼす影響

野村国彦
江藤幹
楠本秀忠
中尾美喜夫

要旨

日常生活では，目標物に手を伸ばすという一回の動作で完了する運動（離散運動）や歩行のように同じ動作を繰り返す運動（周期運動）を織り交ぜることで身体活動を行っている。一方，スポーツにおける練習には，バッティング動作のような一回限りの離散運動に対して，素振り練習という繰り返し動作，あたかも周期運動かのような練習もある。周期運動による練習が離散運動の上達にどれだけ関係するかは不明である。本研究では，示指の屈曲動作による単発的な力発揮時の筋出力量調節に注目した。指示された目標値になるよう筋出力量を調節する機構に関して，事前に繰り返し行う練習を離散的に行うのか，周期的に行うのかの違いによって運動学習がどのように影響を受けるのかを検討した。その結果，練習後の初回の筋出力は離散運動で練習する方が目標値からの誤差が有意に少なかった（$P<0.05$）。練習の違いを定量化するために，筋出力量系列のゆらぎに対してフラクタル解析した。その結果，離散運動での練習時の筋出力量系列は反持続性相関を持つ一方，周期運動練習時のそれは持続性相関を持つことが示された。これらのことから，離散運動では筋出力のための神経回路が試行毎に修正される一方，周期運動ではプリセットされた神経回路が修正されにくいことが示唆された。

キーワード：ダイナミクス，detrended fluctuation analysis，長期相関，運動制御

はじめに

ヒトが行う運動は，1）リーチングのような一回限りの動作（離散運動），2）歩行のような同じ動作の繰り返し（連続運動），3）対戦型スポーツで見られるような動作，すなわち複数の離散運動や連続運動を状況に応じて組み合わせて行う動作（複合運動）の三つに分類できる［1］。ヒトは，意識するしないにかかわらず，生後さまざまな運動を習得する。ヒト特有の運動形態である二足歩行，歯磨き動作など日常生活で何気なく行う運動は成長段階で繰り返し練習することにより習得している。この日常生活動作の例は，連続運動の中でも単純な動作が周期的に繰り返される運動であり，このような運動は周期運動に分類

できる。上述のような周期運動では，中枢神経系内のパターン・ジェネレータ（CPG: central pattern generator）により動作パターンが生成されると考えられている［2－6］。一方，特に手先を用いた運動は，一次運動皮質から脊髄α運動ニューロンへの単シナプス投射により生成されている，すなわち脊髄神経回路内の反射やパターン生成機構により間接的に筋出力が調節されるのではないと考えられている。

運動学習とは，動作誤差をもとに運動指令を繰り返し修正することを継続することと考えられている［7］。スポーツの場面では特に繰り返し練習行うことが技術習得および更なる技術向上にとって重要である。ここで，素振り練習を例に考えると，例えば，野球［8］におけるバッティング技術やバドミントン［9］におけるストローク技術の向上を目的として，実際の競技場面とは異なる状況下で繰り返し行われている。各素振りの間隔は，どのようにすべきだろうか。ほぼ等間隔であたかも一連の動作とした連続動作のように行う場合と，実際の競技場面を想定して一回一回の素振りの間隔を十分に空けて離散的に行う場合とでは効果は同じなのだろうか。素振り練習における注意点などについては指導者の経験知が活用されている。

運動学習は生後成長過程でたくさん行われているが，成人すると意識されるような新たな運動学習は少なくなる。そのため，成人を対象とした運動学習の研究においては，日頃経験しないような運動課題を課す必要がある。例えば，鏡の手前に置いた星型の図形をはみ出さないようになぞる運動課題がある［10］。この場合，自分の手が見えないように手元が隠された状態で，鏡に映る手元と星型図形を見ながらなぞらなければならない。鏡越しに見る手の動きは反転して見えるため，獲得済みの視覚による運動誤差を修正する神経回路は役に立たない。しかし，繰り返し練習することではみ出す回数が減り徐々に上達する。このように日頃経験しない運動課題を用いた研究として，最近では主にリーチング課題の研究に用いられるマニピュランダムとよばれる装置を用いて，視覚情報と実際の手の動きが異なるようにした視覚運動変換課題を調べたものがある［11，12］。実験参加者は装置のハンドルを握り，画面上のカーソルを操作するように，ハンドルを動かす。例えば，スタート地点とゴール地点が画面上で垂直に並んでいる課題に対して，ハンドルを操作することでスタート地点にあるカーソルをゴール地点まで動かす。運動結果と画面上のカーソルの動きに何も細工をしなければ，獲得済みの視覚による運動誤差修正に関する神経回路が役に立つ。しかし，ここでカーソルを動かそうとしたとき，ハンドルの動きから右向きに30度ずれてカーソルが動くよう視覚回転変換が加えられると，実験参加者は最初戸惑う。しかし，試行を繰り返すことでカーソルをターゲットまで到達させることを学習する。このように，実際の手の動きとフィードバックされる視覚情報が不一致な課題でも繰り返し練習することで，視覚回転変換の程度が変わることなく一定であれば，新たな運動として学習することができる。

マニュプランダムを用いて視覚運動変換課題を練習する際，各試行の間隔を空けずにハンドルの前後操作を繰り返す周期運動の場合と，試行間隔を空けて繰り返す離散運動の場合とでは学習効果に違いが出ることが示されている［13］。この研究によると周期運動，

離散運動ともに練習回数が増えるごとに誤差は小さくなる。その誤差については周期運動よりも離散運動の方がより小さくなる。さらに，周期運動を先に行いその数秒後に離散運動を行った場合，学習効果はあまり保持されず，離散運動の最初には大きな誤差が現れ，逆に，離散運動を先に行いその後に周期運動を行った場合，周期運動の最初から誤差が少なかったことが報告されている。このことから，周期運動での練習では試行間隔が短いため誤差情報を基にした神経回路内での修正が追いつかないと考えられている。さらに，周期運動でも毎回カーソルの動きを画面上に提示するのではなく，数回に 1 回画面上に提示した場合，4 回に 1 回あるいは 5 回に 1 回提示すると学習効果が上がる，すなわち誤差がより小さくなることが示されている［14］。これらの先行研究は，運動学習には試行と試行の間の時間を十分にとることが重要と指摘する Huang と Shadmehr［15］の考えを支持し，周期運動では誤差を確認し修正するための時間が不十分だったと考えている。しかし，周期運動と離散運動の違いは誤差情報の多寡の違いだけではないだろう。例えば，周期運動では手先の運動とはいえ周期的なパターンを生成する CPG が関係し，離散運動では CPG に依存しないかもしれない。

CPG が周期的な動作を生み出すと考えられている歩行［5，16］のような周期運動を対象とした研究には，ステップ毎のステップ間隔（歩行周期）のゆらぎを解析するものがある［17－21］。歩行周期はステップ毎にゆらぐ。このゆらぎは自己相似性をもつことが示されており，いわゆる $1/f$ ノイズの性質を有する。Hausdorff ら［17］は，detrended fluctuation analysis（DFA）を用いてフラクタル解析し，健常者の歩行周期ゆらぎから持続性相関があることを初めて明らかにした。さらには，従来の歩行モデルでは実現できなかった歩行周期ゆらぎのフラクタル性を説明できる CPG モデルを提唱した［21］。彼らは，従来ノイズとして無視していたゆらぎ成分をシステムの特性としてとらえ，そのゆらぎを定量化するために DFA を用いた。DFA では，時系列データから求めた累積和系列が示す局所トレンドの周りの変動成分を様々な時間スケールで調べ，各時間スケールの関数として変動成分の二乗平均平方根を両対数グラフにしたときに得られる近似直線の傾きをスケーリング指数として求める（詳細は方法のセクションを参照）。求めた α が以下の場合，$0<\alpha<0.5$ では反持続性相関があり，$\alpha=0.5$ ではホワイトノイズ，$0.5<\alpha<1.0$ では持続性相関があり，$\alpha=1.0$ では $1/f$ ノイズという性質を時系列が有することを示している［22］。また，高齢者の通常時の歩行周期ゆらぎから求めたスケーリング指数は低下することが示された［20］。これは持続性相関が弱まることを意味し，歩行周期がよりランダムに近づいたことを示している。メカニズムはいまだ不明だが，CPG が関係した周期運動の場合，フラクタル性を有するゆらぎが生じるものと考えられる。

運動学習に関する研究において，誤差の修正を神経回路に反映させるためには試行と試行の間に十分な時間が必要であるという先行研究はある。しかしこれら先行研究ではリーチング課題などを用いており，単発的な筋出力量調節という運動課題に関しては不明である。また，周期運動のゆらぎの研究では，動作の周期系列に着目しており，動作時の筋出力量に注目した研究はない。本研究では，単発的な筋出力量の調節に関しても，先行研究

で示されているリーチング課題に対する周期運動および離散運動練習の効果の違いを支持できるのかを明らかにする。さらに，練習としてもちいる離散運動と周期運動の違いについて，練習時の力発揮により得られる筋出力量系列のゆらぎ特性を明らかにする。

方　　法

周期運動による練習と離散運動による練習の二種類の練習内容の違いが示指による筋出力量調節に及ぼす影響を評価するために，19－24歳の健康な大学生16名（男性９名，女性７名）を対象として実験を行った。実験参加者には本研究の趣旨と実験概要を書面と口頭にて説明した上で承諾を得た。また，実験９時間前からは，激しい運動および喫煙，カフェインの摂取を控えるよう実験参加者にお願いした。本研究を遂行するに当たりヘルシンキ宣言および個人情報の適切な取扱いのための本学ガイドラインを遵守した。

プロトコール

示指の屈曲による筋出力量を測るためにキープス社製ハンドグリップメータ（MCZ-5041，以下 HG と略す）を使用した。実験参加者には背筋を伸ばした状態で椅子に座り，手掌が真上を向くよう回外位の状態で肘から先の両腕を机上に置いてもらった。このとき肘関節角度が90°になるように椅子の高さを調整した。利き手の示指のみを HG のレバーにかけ，残りの指で握り部を把持してもらった。

筋出力量調節を評価するために，周期運動あるいは離散運動での練習後に10回の力発揮を運動課題として行ってもらった。このとき，筋出力量の目標値を 3 kg とした。本研究では，力発揮を離散運動として行うことを課題とした。そのため10回の試行それぞれの間隔をおよそ10秒以上空けて行った。このとき実験参加者に毎回の筋出力量の結果を HG の液晶画面で確認させた。また練習と運動課題との間には少なくとも３分間の休憩をとった。本研究では練習と運動課題を一つのセッションとした。練習の影響が残らないようにするために，二つのセッションは一週間空けて行った。

周期運動による練習では，１秒間隔で120回の力発揮を行った。このとき二拍子で鳴る120 bpm のメトロノーム音に合わせながら行った。離散運動による練習では，実験者がストップウォッチで10秒経過するのを確認してから力発揮するように指示を出し，計30回の力発揮を行った。なお，練習および運動課題を行う際，レバーを握りしめず単発的に力発揮（短時間の短縮性収縮後すぐにリラックス）するよう指示した。また，それぞれの練習においても筋出力量を目標値に近づけるため，実験参加者には，各力発揮時の値を液晶画面にて確認してもらった。

筋出力量調節に関する評価

本研究の運動課題は，示指による単発的な力発揮で筋出力量を目標値の「3 kg」になるようにすることであった。10回の試行を離散運動として行った単発的力発揮の筋出力量調節能力を評価するために，1）目標値からの誤差と 2）各回の変動量から安定性を検討した。目標値からの誤差（F_{error}）は，$F_{error}=\frac{100}{F_{Target}}[N^{-1}\sum_{i=1}^{N}\{F(i)-F_{Target}\}^2]^{1/2}$，に従い，目標

値（F_{Target}）からの偏差から二乗平均平方根（root mean square, RMS）を求め，その値を F_{Target} で正規化した。ここで $F(i)$ は，i 番目の力発揮の値である。安定性（$F_{stability}$）は，$F_{stability}=\frac{100}{F_{Target}}(N-1)^{-1}\sum_{i=1}^{N-1}|F(i)-F(i+1)|$，に従い，$i$ 番目と $i+1$ 番目の差の絶対値の平均を求めた。上記二式で用いられている N については，本研究では10とした。

Detrended fluctuation analysis を用いた力発揮系列ゆらぎの定量化

二種類の練習を定量的に特徴づけるために，筋出力量系列のゆらぎから DFA を用いてスケーリング指数 α を求めた。この手法は，対象とする系列がホワイトノイズあるいはブラウンノイズ，反持続性相関，持続性相関のいずれの性質を有するかを判別できる。

DFA の標準的な導出方法は以下のステップからなる［22－24］。1）データ個数 N の対象となる系列 $\{x_j\}_{j=1}^{N}$ について，平均値で減算してから積算する。

$$y_k=\sum_{j=1}^{k}(x_j-\langle x\rangle),$$

ここで，$\langle x\rangle$ は $\{x_j\}$ のサンプル平均である。2）積算された系列 $\{y_k\}_{k=1}^{N}$ を重複が無いように長さ n 個からなるボックスで $\lfloor N/s\rfloor$ 個のセグメントに分割する（図１参照）。ここで，$\lfloor\cdot\rfloor$ は床関数，$4\leq s\leq N/2$ である。3）それぞれのセグメント内で最小二乗法を用いて回帰直線を求め，これを局所トレンドとする。4）y_k の局所トレンドからの平均二乗偏差を求め，その平方根を以下の式に従い計算し，各 s に対して F_s を求める。

$$F_s=\left[\frac{1}{\lfloor N/s\rfloor}\sum_{l=1}^{\lfloor N/s\rfloor}\left\{\frac{1}{s}\sum_{k=(l-1)s+1}^{ls}[y_k-p_k^{(l)}]^2\right\}\right]^{1/2},$$

ここで $p_k^{(l)}$ は l 番目のセグメント内で最小二乗法により求めた局所トレンドの近似式である。またステップ 2）および 3）を全ての時間スケール（ボックスサイズ）で繰り返し計算し，F_s と s の関係を特徴づける。これら F_s を s の関数として両対数表示したとき直線関係を示せばパワー則の存在を意味する。ここで得られた比例関係 $F_s\propto s^{\alpha}$ から一次近似式の傾きを表す係数がスケーリング指数 α となる。なお，本研究では，s の取りうる値の範囲が $N/s\in\mathbb{Z}$ をみたすときに限定した。また，$p_k^{(l)}$ を一次近似とした。

DFA により求められたスケーリング指数 α は次のように解釈されている。対象となる系列は，1）$0<\alpha<0.5$ のとき反持続性相関，2）$\alpha=0.5$ のときホワイトノイズ（無相関），3）$0.5<\alpha<1$ のとき持続性相関，4）$\alpha=1.0$ のときピンクノイズ（$1/f$ ノイズ），5）$\alpha>1$ のときパワー則は消失するが持続性相関，6）$\alpha=1.5$ のときブラウンノイズである［22］。

統計的分析

本研究は，二種類の練習方法の違いが筋出力量調節に及ぼす影響を検討するために設計された。本研究のデータ分析により，各実験参加者から周期運動および離散運動に関係する評価変数が対の値として得られる。そのため，各変数についての統計的検討には対の t 検定を用いた。また，スケーリング指数 α と筋出力量調節に関する変数との関係については相関係数 r を求めて検討した。

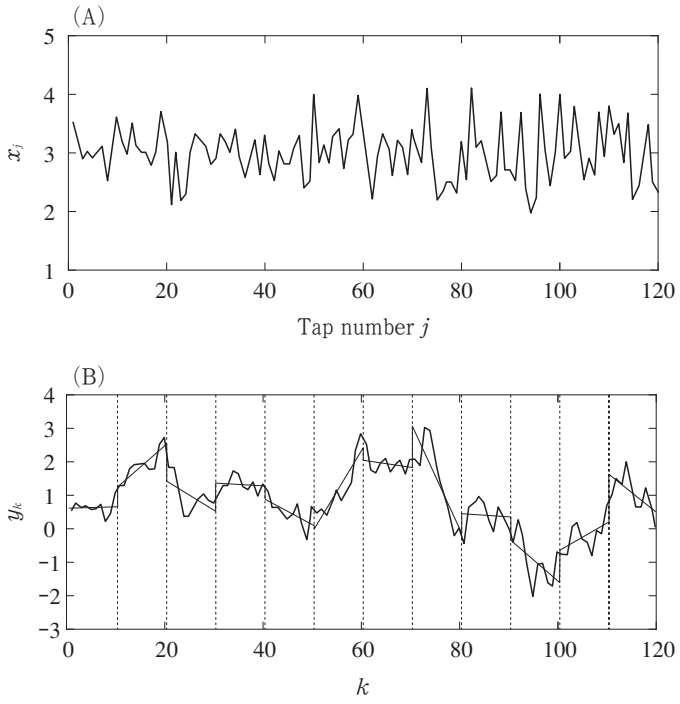

図1　計測値系列（x_j）と積算系列（y_k）

（A）は計測系列 $\{x_j\}$ を，（B）は（A）の系列から求めた積算系列 y_k（実線）に，一例としてボックスサイズ $s=10$ で，$N/s=12$個のセグメントに分割した場合の局所トレンド（細実線）を重ねて表示している。縦の点線は各セグメントの区切りを示している。各セグメントでの局所トレンド周りの分散を求め，セグメント数で平均したものの平方根を計算することで，F_s が求まる。

結　　果

練習内容の違いを定量化するために，本研究では各練習時の筋出力量系列からスケーリング指数 α を DFA 法により求めた。その結果，図2に示すように，周期運動による練習時の筋出力量系列の α は 0.66±0.14 で，離散運動練習時のそれ（0.48±0.27）に比べ，有意に高い結果となった（$P<0.05$）。

練習後に行った運動課題から筋出力量の誤差を評価した結果，F_{error} は，16名中12名において周期運動後に比べ離散運動後に低い値を示した。全体の平均は，周期運動後に17.1±5.9%で，離散運動後に14.5±6.6%となり，周期運動後の誤差が大きかった（$P=0.08$，図3左）。また，筋出力量の安定性 $F_{stability}$ は，F_{error} に比べ個人差が大きく，16名中9名において離散運動後の課題で変動が小さかった。全体の平均は，周期運動後に16.2±7.4%で，離散運動後に14.3±6.0%となり，これも周期運動後の方が大きかった（$P=0.198$，図3右）。

練習直後の運動課題1回目の筋出力量（F_{1st}）に関して検討した結果，周期運動後に3.79±0.73 kg，離散運動後に3.26±0.62 kg と有意に周期運動後の F_{1st} が大きくなった（$P<0.05$，図4上）。また，スケーリング指数 α と F_{1st} の関係に注目すると，図4下に示すよ

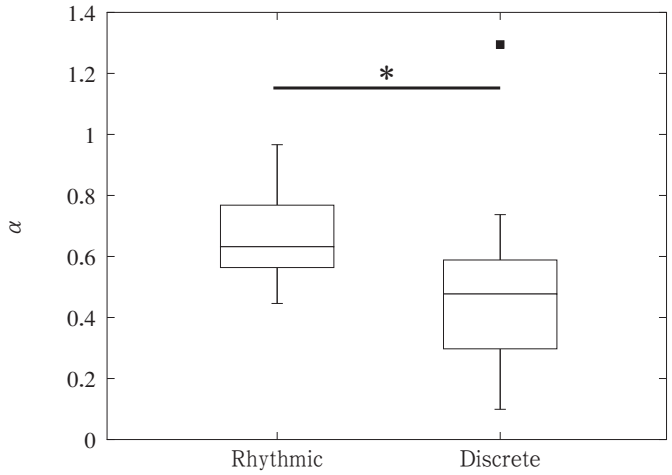

図２　周期運動および離散運動練習時の筋出力量系列のスケーリング指数

二種類の練習時における力発揮系列から求めたスケーリング指数 α を全実験参加者から求めた結果を箱ひげ図として示している。また，■印の点は外れ値（四分位範囲の1.5倍を超えた値）を示している。ボックスの中の水平線が中央値に相当する。＊，$P<0.05$ を意味する。

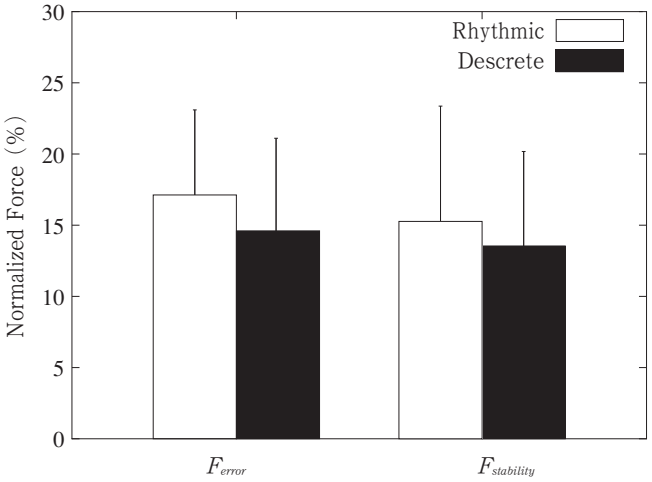

図３　周期運動および離散運動練習後の筋出力量の誤差（$\boldsymbol{F_{error}}$）および安定性（$\boldsymbol{F_{stability}}$）

左２列の棒グラフは運動課題時（力発揮10回）の筋出力量と目標値「3 kg」との差から求めた RMS 値を，右２列の棒グラフは10回の力発揮の各試行とその前の回の試行の差の絶対値を平均した値を示している。両方とも目標値で正規化したものである。F_{error} は，筋出力量が目標値から外れれば外れるほど大きな値になる。この図から離散運動による練習後の方が誤差は小さいことが示されている（$P=0.08$）。同様に，$F_{stability}$ も離散運動後の方が各試行の変動は小さいことが示されているが（$P=0.20$），F_{error} に比べ個人差が大きかった。

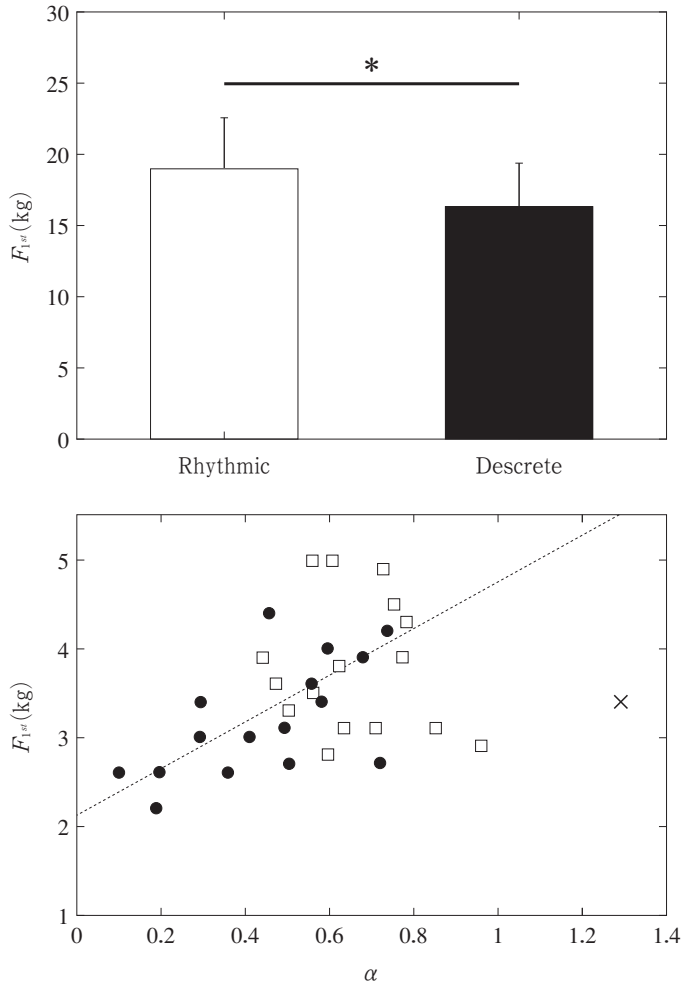

図4　周期運動および離散運動練習後の運動課題第1回目の筋出力量とαの関係

上の棒グラフは各練習後の運動課題第1回目の力筋出力量（F_{1st}）の平均値と標準偏差を示している。周期運動練習後の方が有意に大きかった。下の散布図は，F_{1st}と練習時の筋出力量系列から求めたスケーリング指数αとの関係を示している。□が周期運動，●が離散運動の結果を表している。周期運動に関しては，αとF_{1st}の間に明確な相関関係は見られなかったが，離散運動に関しては，正の相関関係が示された（破線；$r=0.75$，$P<0.01$，×の外れ値を除外して求めた）。

うに，周期運動では相関関係（$r=-0.128$，$P=0.64$）が不明確だが，離散運動では正の相関（$r=0.75$，$P<0.01$）がみられた。図中の破線は離散運動に関するデータのみに関する回帰直線である。また，このとき，離散運動時の筋出力量系列から求めたαが四分位範囲の1.5倍を超えたため外れ値として扱った。

考　　察

本研究では，単発的な力発揮時の筋出力量調節に関して，事前に行う練習が周期運動なのかあるいは離散運動なのかによって運動学習の効果が異なるという仮説を立てた。従来の研究の枠組みでは，離散運動と周期運動を同じ枠組みで評価されてこなかった。本研究では，練習時の筋出力量系列のゆらぎを解析することで異なる運動を同じ枠組みで特徴づけた。第一の発見は，練習時の筋出力量系列から DFA を用いて求めたスケーリング指数が離散運動時は $\alpha<0.5$，周期運動時は $\alpha>0.5$ であった。スケーリング指数は，$0<\alpha<0.5$ なら反持続性相関，すなわち過去におきた変動がマイナス方向なら未来にはプラス方向に変動する可能性が高いことを示し，$\alpha>0.5$ なら持続性相関，すなわち過去におきた変動がマイナス方向なら未来にもマイナス方向に変動する可能性が高いことを示すという性質を持っている［22］。本研究の筋出力量系列は，離散運動による練習時には毎回の誤差を修正しようとしている，すなわち目標値との誤差がマイナスならプラス方向に修正しようとしていることが生じていることを意味している。一方，周期運動の場合は，その傾向が弱まり，誤差がマイナスでもマイナスのまま，プラスでもプラスのままという傾向が生じていることを示している。この結果は，一つに，離散運動では各力発揮において誤差を修正しようとする機構が働いていたことを示唆している。一方，周期運動ではプリセットされた神経回路に修正が加わらず，小さな誤差をもったまま筋出力されていたことを示唆している。

第二の発見は，練習後に行った運動課題の第 1 回目の筋出力量と目標値との誤差が，周期運動練習後の方で有意に大きかったことである。Nozaki らのグループ［13］は，視覚運動変換課題のリーチング動作に対して，事前に周期運動あるいは離散運動によって練習を行った場合，課題の初回に現れる誤差が周期運動での練習後では離散運動での練習後よりも大きいことを報告した。リーチング動作ではなく力発揮の筋出力調節に注目した本研究においても，練習後の運動課題第 1 回目は，周期運動の練習では学習効果が保存されにくいことを示し，上記先行研究の結果を支持した。Nozaki らのグループは，この練習内容の違いとし，周期運動を行っている間，実験参加者へ誤差情報を毎回提供することが情報過多になり情報の重みが低下すると考え，誤差の提示を毎回ではなく数回に 1 回に間引くことの効果を検討した［14］。その結果，4，5 回に 1 回誤差情報を提示すると学習効果が上がることが示された。このことは毎回誤差提示されると難しいが数回に 1 回の誤差提示ならプリセットされている神経回路を修正することが出来ることを示唆している。本研究では誤差情報を毎回提示した。そのため実験参加者は情報過多により誤差修正が間に合わなかったかもしれない。情報過多で誤差修正が出来ない場合，ヒトはプリセットされた神経回路を用いて出力を繰り返すのかもしれない。この神経回路に CPG が関与するかもしれない。

本研究では練習後の運動課題10回について筋出力量調節の評価として分散などの変動量を検討した。平均としては周期運動練習後よりも離散運動練習後の方が精度は良い，具体

的には目標値からの誤差が少なく，各試行間の変動量も小さかった。しかし，統計的には有意と判定されなかった。この理由の一つに，本研究では運動課題中も HG 液晶画面の数値を実験参加者に確認させたため，運動課題の10回の試行中に誤差修正の学習が生じ，事前の練習効果の差が埋まってしまったと考えられる。前段落で議論したように，運動課題の力発揮10回の第1回目の筋出力量のみに注目すると，練習内容の違いが明確に出ていたことからもこの考え方を支持できる。

筋出力量系列のゆらぎを検討した過去の研究はない。ヒトの身体活動において周期運動の代表である歩行に対しては，歩行周期系列のゆらぎが検討されている［17－21］。歩行の周期運動は中枢神経系内の CPG により作り出されていると考えられている［4，5，16］。CPG による周期運動の場合，DFA により求めたスケーリング指数は $\alpha>0.5$ となる。通常，ヒトの身体活動だけでなく身体内部でおこるような周期活動，例えば心臓の拍動周期などもスケーリング指数が $\alpha>0.5$ となり，健康な場合は $\alpha\approx1.0$ となる［25］。また加齢などにより機能低下した場合，心臓の拍動周期ゆらぎの α は増加する［25，26］。一方，自分のペースで歩く歩行周期ゆらぎの場合，若年健常者の場合 α は1.0に近づき，加齢などにより0.5に近づく。すなわち身体活動によるゆらぎは調節能力が低下すると，より持続性相関を失いランダムな周期ゆらぎになることを示している。同様に指タッピングを行った場合もタッピング間隔のゆらぎは持続性相関を示す［27］。これらのことから，健常なヒトから自然に発生する周期運動の周期系列ゆらぎは $1/f$ ノイズに近づくように制御されていることがわかる。

一定リズムのメトロノームに合わせてタッピングした場合，タッピング周期のゆらぎは持続性相関を失うが，刺激とタッピングしたタイミングとの誤差系列は持続性相関を示す［28］。このことは，誤差を修正した結果のタッピング周期系列はランダムウォークに近づくが，誤差系列にはフラクタル性が現れていることを意味している。本研究でもメトロノームを用いて一定間隔で力発揮してもらった。未計測のため不明ではあるが，力発揮の周期系列はランダムウォーク様に振る舞っていたかもしれない。その一方，上記先行研究が示す誤差系列のフラクタル性と同様に，本研究における周期運動練習時の筋出力量系列のゆらぎは持続性相関がありフラクタル性を示した。音に合わせようとすることで力発揮のリズムはランダムに近づいていたかもしれないが，筋出力量系列のゆらぎがフラクタル性を有していたのは，運動制御の神経回路にフラクタル性を示す機構を有することを示唆している。

本研究では，周期運動練習と離散運動練習では，その後の筋出力量調節に違いが出るのかを検討した。周期運動練習時には筋出力量系列のゆらぎが持続性相関を持つ一方，離散運動練習時のそれは反持続性相関を持つことが示された。このように練習内容の違いが確率論の視点から定量的に示された。また，練習の効果として，特に練習後の1回目の試行において離散運動練習後の方で有意に誤差が小さかった。これらのことから，単発的な力発揮が必要な運動課題においては，繰り返し練習する際に試行間の時間を十分にとることが重要であると言える。

謝辞

本論文作成にあたり清野健博士（大阪大学大学院基礎工学研究科）には価値ある助言を賜りました。また，本研究の実験に際し，大阪経済大学情報社会学部第二期生にお手伝いいただいた。ここに記して感謝の意を表するとともに，厚く御礼申し上げます。

参考文献

［1］ 山本裕二，“連続および複合打球動作が打球成績に及ぼす影響：ダイナミカルシステムアプローチからの検討，”*体育學研究*，第 巻47，第3，pp. 243-251，2002.

［2］ 笹本一茂，“咀嚼と中枢神経系，”*口腔・咽頭科*，第 巻12，第2，pp. 175-183，2000.

［3］ 吉田教明，“成長期における咀嚼機能の発達と学習のメカニズム解明に向けた実験的アプローチについて，”*日本顎口腔機能学会雑誌*，第 巻13，第1，pp. 2-10，2006.

［4］ 中澤公孝，“神経の可塑性と脊髄損傷のリハビリテーション（＜特集＞ 神経・筋の可塑性とリハビリテーション・スポーツ（69回大会シンポジウムの紹介）），”*日本生理人類学会誌*，第 巻19，第3，pp. 191-193，2014.

［5］ T. Nakajima, R. A. Mezzarane, T. Komiyama and Z. E. Paul, “Reflex control of human locomotion: Existence, features and functions of common interneuronal system induced by multiple sensory inputs in humans,” *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine,* 4(2): 197-211, 2015.

［6］ 小林誠，野村泰伸，佐藤俊輔，“ヒトの二足歩行運動のインパルス状外乱に対する応答とその中枢神経機構に基づく解釈，”*医用電子と生体工学*，38(1)：30-32，2000.

［7］ R. Shadmehr, M. A. Smith and J. W. Krakauer, “Error correction, sensory prediction, and adaptation in motor control,” *Annual review of neuroscience,* 33: 88-108, 2010.

［8］ 太田洋一，中本浩揮，石井泰光，幾留沙智，“バ-2A-P 22 重いバットで素振りを行った後の重さ錯覚が野球打撃動作の上肢筋活動に与える影響（05. バイオメカニクス，一般研究発表抄録），”*日本体育学会大会予稿集*，61：156，2010.

［9］ 阿部一佳，須田和裕，鵜木秀夫，加藤幸司，“バドミントンの素振り練習による身体トレーニングについての検討，”*大学体育研究*，9：49-58，1987.

［10］ B. Milner, L. R. Squire and E. R. Kandel, “Cognitive neuroscience and the study of memory.” *Neuron,* 20(3): 445-468, 1998.

［11］ 野崎大地，“身体運動の制御と学習：無意識のうちに実行される私たちの行動（2）運動学習の潜在性，”体育の科学，64(4)：275-279，2014.

［12］ 野崎大地，“身体運動の制御と学習：無意識のうちに実行される私たちの行動（3）感覚予測誤差にもとづく運動学習，”*体育の科学*，64(5)：349-352，2014.

［13］ T. Ikegami, M. Hirashima, G. Taga and D. Nozaki, “Asymmetric transfer of visuomotor learning between discrete and rhythmic movements,” *The Journal of Neuroscience,* 30(12): 4515-4521, 2010.

［14］ T. Ikegami, M. Hirashima, R. Osu and D. Nozaki, “Ikegami, Tsuyoshi, et al. “Intermittent visual feedback can boost motor learning of rhythmic movements: evidence for error feedback beyond cycles,” *The Journal of Neuroscience,* 32(2): 653-657, 2012.

［15］ V. S. Huang and R. Shadmehr, “Evolution of motor memory during the seconds after observation of motor error,” *Journal of Neurophysiology,* 97(6): 3976-3985, 2007.

[16] S. Grillner, "Biological pattern generation: the cellular and computational logic of networks in motion," *Neuron,* 52(5): 751-766, 2006.

[17] J. M. Hausdorff, C. -K. Peng, Z. Ladin, J. Y. Wei and A. L. Goldberger, "Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait," *Journal of Applied Physiology,* 78(1): 349-358, 1995.

[18] J. M. Hausdorff, P. L. Purdon, C. -K. Peng, Z. V. I. Ladin, J. Y. Wei and A. L. Goldberger, "Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuations," *Journal of Applied Physiology,* 80(5): 1448-1457, 1996.

[19] J. M. Hausdorff, Y. Ashkenazy, C. -K. Peng, P. C. Ivanov, H. E. Stanley and A. L. Goldberger, "When human walking becomes random walking: fractal analysis and modeling of gait rhythm fluctuations," *Physica A: Statistical mechanics and its applications,* 302(1): 138-147, 2001.

[20] J. M. Hausdorff, "Gait dynamics, fractals and falls: finding meaning in the stride-to-stride fluctuations of human walking," *Human movement science,* 26(4): 555-589, 2007.

[21] Y. Ashkenazy, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov and H. E. Stanley, "A stochastic model of human gait dynamics," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,* 316(1): 662-670, 2002.

[22] C. -K. Peng, S. Havlin, H. E. Stanley and A. L. Goldberger, "Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science,* 5(1): 82-87, 1995.

[23] C. -K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley and A. L. Goldberger, "Mosaic organization of DNA nucleotides," *Physical Review E,* 49(2): 1685-1689, 1994.

[24] K. Kiyono, "Establishing the direct connection between detrended fluctuation analysis and Fourier analysis," p. arXiv: 1508.02204, 2015.

[25] S. M. Pikkujämsä, T. H. Mäkikallio, L. B. Sourander, I. J. Räihä, P. Puukka, J. Skyttä, C. K. Peng, A. L. Goldberger and H. V. Huikuri, "Cardiac interbeat interval dynamics from childhood to senescence: comparison of conventional and new measures based on fractals and chaos theory.," *Circulation,* 100(4): 393-399, 1999.

[26] Z. R. Struzik, J. Hayano, S. Sakata, S. Kwak and Y. Yamamoto, "$1/f$ scaling in heart rate requires antagonistic autonomic control," *Physical Review E,* 70(5): 050901, 2004.

[27] G. Madison, "Fractal modeling of human isochronous serial interval production," *Biological Cybernetics,* 90(2): 105-112, 2004.

[28] Y. Chen, M. Ding, J. S. & Kelso, "Long memory processes ($1/f^{\alpha}$ type) in human coordination," *Physical Review Letters,* 79(22): 4501-4504, 1997.

[29] R. Hardstone, S. S. Poil, G. Schiavone, R. Jansen, V. V. Nikulin, H. D. Mansvelder and K. Linkenkaer-Hansen, "Detrended fluctuation analysis: a scale-free view on neuronal oscillations," *Frontiers in physiology,* 3: 1-8, 2012.