

ストロークレートの差異によるハンドル牽引力の 揺らぎと安定性

Fluctuation and stability of handle-pull-force with a difference in stroke rate

平川 武仁

Takehito HIRAKAWA

Abstract

This study examined the change in the fluctuation and stability of the pull-force with an increase in stroke rate. Thirteen well-trained varsity rowers pulled the handle on a rowing ergometer over 30 times for approximately six stroke rates: 16, 20, 24, 28, 32, and 34 strokes per min. Analogue force data were recorded during pulling. The stroke interval was calculated and analyzed to confirm the validity of the rowing data. An embedding dimension and a delay time for each data were detected, from which an attractor for each data was reconstructed. Recurrence quantification analysis (RQA) was used for the attractor to calculate the recurrence rate (RR) and the rate of maximum line length (pLmax). The results showed that 1) the data obtained were appropriate as rowing data and 2) the RR (pLmax) had an upward (downward) trend with respect to an increase in the stroke rate. We discussed the stochastic trajectory of the attractor for a stroke rate below 20 rates per min; above 20 rates per min, the attractor would have weak to disturbance.

Keywords: time-series data, motor control, attractor dynamics

1 序論

1.1 漕艇競技

漕艇競技（以下、競漕とする）は、例えば全日本選手権大会や全日本大学選手権大会での競漕の距離は2000mであるように、非常に長い時間オールを漕ぎ、そして艇を速く進めることのできた漕手が勝利する種目である。それゆえ、競漕の距離が1000mであれば100回以上、2000mであれば200回以上、漕動作を反復しなければならない。その漕動作の特徴は、キャッチからフィニッシュまでのドライブと呼ばれる局面と、フィニッシュからキャッチに至るリカバリと呼ばれる局面で構成されており、これらの2つの局面を総じてストロークと呼ばれる（Janshen, Mattes, and

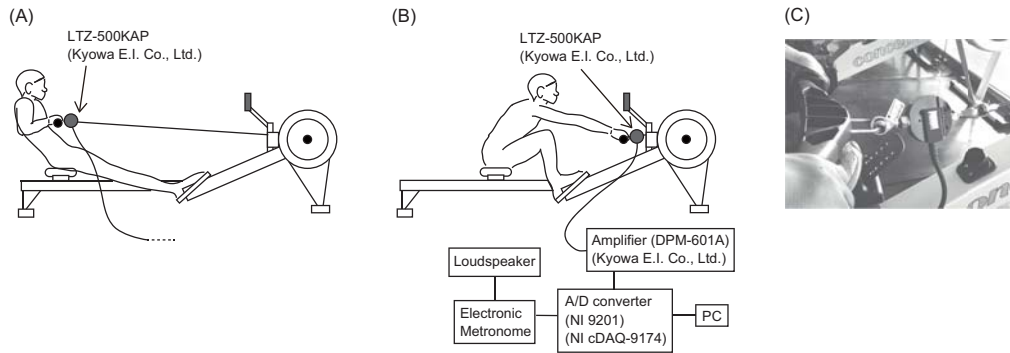


図1 フィニッシュ姿勢(A), キャッチ姿勢と測定機器設定(B), および牽引型センサ(LTZ-500KA-P, 共和電業)の接続(C)

Tidow, 2009)。キャッチは、脚を屈曲させながら身体を艇の船尾方向に移動させ、オールのパドル部分を水面に入れて水を掻き始める瞬間である(キャッチの姿勢は図1B)。フィニッシュは、キャッチ後に脚を伸展させながら船首方向にシートを移動させながら上体を後傾させ、上肢でオールを引き終わる瞬間であり、パドルは水上に上げられている(フィニッシュの姿勢は図1A)。

前述のように、競漕では100回あるいは200回ものストロークを反復するため、毎回のストロークでの一貫性、つまり風向き、風の強さ、波の状況などの環境の変化、あるいは疲労などの身体的な変化によって、毎回のストロークの状態が変化しないことが求められる。水上では、オールを牽引して艇を進めるため、オールを引くフォース(Force)やパワーの発揮に、研究の関心が向けられることが多い。先行研究では、競技水準によるパワー発揮の差異(Smith and Spinks, 1995)、ローイング・エルゴメータ(以下、エルゴとする)の漕動作のハンドルの速度とフォースの関係(Sprague, Martin, Davidson, and Farrar, 2007)、1000m漕とハンドル速度の関係(平川・山本, 2011)などの観点から検討されてきた。しかしながら、上述のように、毎回のストロークでの一貫性が重要であることを踏まえると、ハンドル速度の定時的安定性(平川, 2014b)やハンドル速度と体幹やシート速度の協応の安定的側面(平川, 2014a)など、パワー発揮あるいはフォースとハンドルの速度の解析に加え、一貫性あるいは安定性という観点から解析することも、指導現場への示唆を得るために必要である。ただし、先行研究において、オールやエルゴのハンドルの牽引で生じるフォースの検討では、各ストロークを分割して解析しているため、牽引で生じるフォースの時系列データ全体を解析対象として検討することも必要である。

これは、各漕手によるフォースの発揮の状態が各漕手が保有する、あるいは各漕手固有の運動制御に依拠し、産出されていると推測されるからである。それゆえ、牽引という動作における運動制御の安定性は、漕手固有のアトラクタ(Attractor; 次節で解説)から産出される事象であり、そのアトラクタを検討することが、漕艇競技の技能を評価していることといえる。しかしながら、実際の訓練の現場では、競漕時と同じストロークレート(毎分のストローク数、以下、本文ではレートとする)で漕動作を実施して訓練しているとは考えられず、様々なレートで漕いでいることが予想される。そのため、各レートによってアトラクタの状態が変化している可能性がある。例えば、レートに関心を向けた先行研究においては、様々なハンドル速度において発揮されたフォースとの関係(Sprague et al., 2007)、レートと艇速の関係(Martin and Bernfield, 1980)、レートと脊柱の動作の

関係 (McGregor, Bull, and Byng-Maddick, 2004) などがあるが、レートと牽引で生じたフォースの一貫性 (Consistency)・安定性 (Stability) の関係を検討した研究は見当たらないようである。そこで、本研究は、レートと牽引で生じたフォースの一貫性・安定性について、アトラクタを解析することで検討する。

1.2 系の安定性

運動心理学あるいはスポーツ心理学において、人間の運動制御を解明するための理論的枠組みの一つとして、1980年代になると力学系理論 (Dynamical system theory) が援用されるようになった (研究の発展に関する詳細は、平川, 2013を参照)。これは、熱力学における散逸構造 (Prigogine and Nicolis, 1971) と非平衡系における協働現象 (Synergetics) (Haken, 1983, 2000) を運動に援用し、人間の身体運動もエネルギーを散逸しながら秩序を維持する自己組織化 (Self-organization) する過程として捉えたこと (代表的な研究は、Kelso, 1984であり、その数理モデルの代表的な研究は、Haken, Kelso, and Bunz, 1985) でもある。つまり、人間の運動制御における運動パターンを形成することを自己組織化の概念から捉えたことを意味する (詳細は、Kelso, 1995)。その特徴は、散逸する力学系 (Dynamical system) の秩序状態の評価の一つとして、系 (System) の安定性を取り入れていることである。

例えば、人間の運動を一つの系として仮定し、その散逸的な性質をもつ系は、時間経過に伴って安定な定常状態に接近していくことが解っている (詳細は、Kelso, 1995)。これは、力学系理論において、ある系の安定性がアトラクタという概念で定量的に評価できることを示している。このアトラクタとは、ある系の状態を記述する状態空間において、ある系が時間発展しながら向かっていく集合のことであり、ある特定の軌道 (あるいは軌跡) や点に引き込まれる (あるいは落ち着く) 領域のことをいう。それゆえ、力学系から捉えた人間の運動制御の安定性とは、わずかな摂動でも質的には変化しない運動制御構造の安定を意味する。もし人間が運動を再生あるいは試行するならば、各個人が経験や訓練によって蓄積してきた記憶情報 (Memorized information) に基づいて産出することになり、その個人が産出した技能の根底にあるのがアトラクタといえるのである。つまり、アトラクタの安定性を評価することで、個人人の技能を評価できる。そして、このアトラクタの同定あるいは定量化は、非線形時系列解析で可能となる。

また、本研究での検討種目である漕運動は、律動性や周期性を自分で維持する運動であることも重要なことといえる。このような運動は振動子のような運動 (Bernstein, 1967; Kelso, 1995; Richardson, Schmidt, and Kay, 2007) とされる。これまでにも、このような運動は、秩序を維持する散逸力学系の振動子に模して、検討されてきた (Beek and Beek, 1988; Vereijken, Whiting, and Beek, 1992; Yokoyama and Yamamoto, 2011)。これは、人間の運動を理解するために、非線形振動子の動的変化を記述すること (Beek and Beek, 1988; Haken et al., 1985; Kay, Kelso, Saltzman, and Schöner, 1987; Kugler, Kelso, and Turvey, 1980) を意味する。さらに、各漕手のアトラクタを解析することで、牽引のフォースの決定論的構造 (Deterministic structure) の定量化も可能となる (Webber, 1991; Webber and Zbilut, 1994, 1996)。

1.3 非線形時系列解析

ある系のアトラクタの評価には、非線形時系列解析を援用することが有用である (Strogatz, 1994)。非線形時系列解析には、長期時系列データを解析する方法、あるいは短期時系列データ

を解析する方法など、種々の方法がある。しかしながら、人間の身体運動を解析対象にする場合は、長期時系列データを得ることは難しい、という問題がある。そのため、本研究では、短期時系列データ解析で有用な手法である再帰定量化解析 (Recurrence quantification analysis : RQA ; 平川, 2014ab) を適用する。再帰定量化解析の有用性としては、データの大きさ、分布、定常性を仮定しなくて良いこと、微細な時間相関を同定できることがある (Kinsella-Shaw, Harrison, Colon-Semenza, and Turvey, 2006)。ここでいう再帰とは、再構築された状態空間中のアトラクタの、ある時点に対し、一定の周期後の別の時点が近接した、という意味である。再帰の振る舞いは様々な自然の過程で観察されており、力学系理論における基本的な構想に基づく (Konvalinka, Xygalatas, Bulbulia, Schjødt, Jegindø, Wallot, Van Orden, and Roepstorff, 2011)。そして、後の時点と前の時点との近接の有無によって評価する再帰状態は、決定論的力学系 (Deterministic dynamical system) の基本的特性であり、非線形系の特徴を示す (Kinsella-Shaw et al., 2006; Marwan, Romano, Thiel, and Kurths, 2007)。

この再帰定量化解析において、解析データとして作成される再帰プロットは、最初に Eckmann, Kamphorst, and Ruelle (1987) によって提案されたものである。再帰した状態は決定論的力学系の基本的特性を明らかにするだけでなく、系の非線形的特徴を同定できる (Marwan et al., 2007)。いくつか算出される変数のうち、本研究ではアトラクタの揺らぎ (Fluctuation) あるいは確率的軌道 (Stochastic trajectory) として再帰率 (Recurrence Rate : RR), 安定性として最大線長率 (pL_{max}) を取り上げる。再帰率とは、再帰プロット中に再帰したデータ数の割合である。例えば、再帰率が小さいほど、系の摂動に伴う確率論的誤差 (Stochastic noise) あるいは揺らぎが大きくなっていくこと、そしてその系が決定論的構造を有するとはいえなくなっていくこと (Richardson et al., 2007) を示している。最大線長率とは、再帰プロットのデータ長を 1 とおいたときに、最も長く近接した (Kudo, Park, Kay, and Turvey, 2006) ことを意味する。先行研究 (例えば、Richardson et al., 2007; Richardson, Lopresti-Goodman, Mancini, Kay, and Schmidt, 2008 など) によると、この指標はアトラクタ強度 (Attractor strength) と呼ばれる。そして、最大線長率の逆数は、その系のダイナミクスで現れる最大リャプノフ指数の推定 (Trulla, Giuliani, Zbilut, and Weber, 1996) でもある。この指数は、当該の系の安定性と不安定性を同定するものであり (Zbilut, Zaldívar-Comenges, and Strozz, 2002), 指数が大きければ安定していることを示す。再帰定量化解析の解析手続き等については、方法で概説する。

1.4 目的

本研究の目的は、各レートの牽引で生じた牽引力の確率論的誤差・軌道あるいは揺らぎと安定性について検討する。そこでは、まず教示されたレートで各漕手が漕いでいたかどうかを確認する。次に、非線形時系列解析である再帰定量化解析を用いて、各漕手の各レートでのアトラクタの再構築、そしてそのアトラクタの揺らぎと安定性を定量化するために、再帰率と最大線長率を算出する。最後に、レートを独立変数に、再帰率と最大線長率を従属変数にして、レートと揺らぎ・安定性の関係を検討する。

2 方法

2.1 測定参加者および手続き

測定参加者（以下、参加者とする）は、競漕を専門とする 13 名の健康な大学生（以下、漕手とする。男 11 名、女 2 名。年齢： 20.2 ± 1.5 歳，身長： 168.1 ± 7.0 cm，体重： 63.1 ± 6.9 kg）であり，2014 年に測定が実施された。彼らは測定に参加する前に，測定者から測定内容について十分な説明を受け，同意してから測定に参加した。本研究は，南山大学研究審査委員会において承認された手続きに基づいて実施された。

2.2 データ収集

測定では，世界で最も共通して用いられているエルゴ（Mikulić, Smoljanović, Bojanić, Hannafin, and Pedišić, 2009）である Concept II（Concept 2 Inc., Morrisville, VT）を用いた。まず，各参加者は，エルゴを用いて，自由にウォーミングアップをすることができた。参加者自身が十分にウォーミングアップできたと判断した後，16, 20, 24, 28, 32, 34 レート（ストローク / 分）の計 6 種のレート（各試技）において，各 20 ストローク分を漕いだデータの収集を課題とした。各試技においては，各参加者が各レートになったと判断した後に，20 ストロークのデータ収集が開始された。そのため，いずれの参加者においても，データ収集は，10~15 ストロークを漕いだ後に開始されていた。収集するデータは，ハンドルの牽引力のアナログデータであり，ストレインゲージ式引張型センサ（LTZ-500KA-P，共和電業）によって採取された（図 1C）。その力は，ストレインアンプ（DPM-601A，共和電業）と A/D 変換器（NI9201, cDAQ-9174, National Instruments Corp.）を介してデジタル変換され，コンピュータに保存された（サンプリングレート 1000Hz）（図 1B）。漕運動中には，漕手が決められたレートで漕げるように，電子メトロノームによる聴覚教示と，PM3 モニタ（Concept 2 Inc., Morrisville, VT）によって参加者が実際に漕いでいるレートの視覚フィードバックが与えられていた。

2.3 解析データの準備

まず，採取されたアナログデータは，バターワース・ローパス・フィルタによって，遮断周波数 100Hz で平滑化された。次に，RQA で解析するには，膨大なデータ数を用いることができないため，平滑化されたアナログデータ（サンプリングレート 1000Hz）をダウンサンプリング（サンプリングレート 50Hz）した。

ただし，RQA は時系列データが再帰した近接（距離）に基づいて解析を行うため，図 2A に示されたように，34 レート（図中 a）と 16 レート（図中 b）を比較した場合，0V 付近のデータ数が多い 16 レートのほうが安定していることになる。つまり，本研究で解析を試みる牽引力の揺らぎや安定性を評価できないだけでなく，牽引していない時間の評価の影響を受けることになる。それゆえ，平滑化されたデータから，0.1V を超えた時点を開始，0.1V を下回った時点を終了として，計 10 周期のデータを抽出し，連結することによって時系列データを準備した。図 2B が，図 2A から再構成された時系列データの例である。

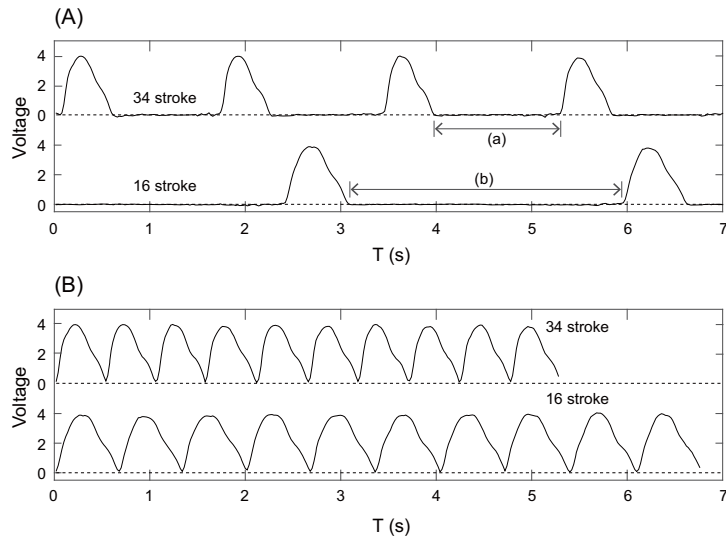


図2 測定参加者10から得られたハンドル牽引の(電圧変換後)時系列データ(A)と再帰定量化解析で用いられた解析データの例(B)。(A)と(B)は共に、毎分16回と34回のストロークレートで得られたデータを例示している。

2.4 再帰定量化解析

再帰定量化解析については平川(2014ab)に記載されているので、本節では本研究での主な手続きについて記述する(更なる詳細は、Marwan et al., 2007やWebber, 2012などを参照)。

まず、各参加者における各レートで準備された時系列データに対して、平均相互情報量(Average mutual information)によって遅延時間(Delay time) τ (Fraser and Swinney, 1986)を算出した。次に、誤り再隣接法(False nearest neighbors)によって埋め込み次元 m (Abarbanel, 1996; Kennel, Brown, and Abarbanel, 1992; Takens, 1981)を算出した。算出された値に基づいて、各時系列データのアトラクタを再構築した。図3に、参加者10における各レートのアトラクタの例を示した。

次に、各アトラクタを構成するデータの各時点間の距離 $D_{i,j}^m$ を計算した。そして、ある時点 x_i がある時点 x_j の近くに再帰したか否かの判定基準(閾値)となる半径パラメータ ε を決定した。半径パラメータ ε の決定においては、半径パラメータ ε の最大距離の1~30%まで0.1%刻みで変化させた際の半径と再帰率あるいは最大線長率を両対数に配置し、その傾きが直線的になる直前の半径パラメータ ε を採用した。採用された半径パラメータ ε は14.1%であり、図4に参加者10の再帰プロットの例を示した。最後に、各参加者の各レートにおける再帰プロットを用いて、各参加者における各レートの再帰率(RR)と最大線長率(pL_{max})を算出した。

2.5 統計的解析

まず、再帰定量化解析をする前に、各参加者における各レートの原データについて、スペクトル解析で周波数成分を求め、最もパワーの高い周波数の逆数を周期として、教示されたレートに対する母集団の分散を仮定しない平均値比較をした。次に、各レート間での周期が異なるか否かを一要因6水準の分散分析で平均値比較した。また、各参加者の平均周期を代表値として、相関係数の算

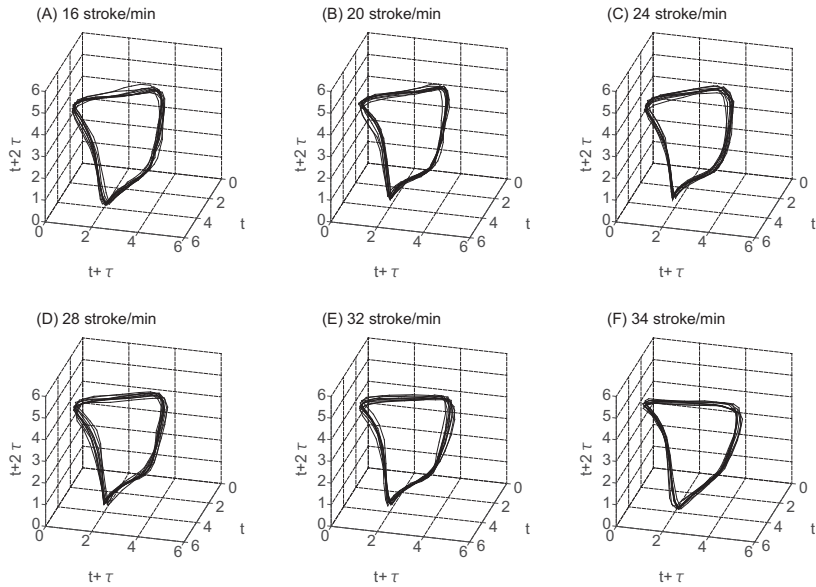


図3 各レートにおいて再構築された測定参加者10のアトラクタ。遅延時間を平均相互情報量、埋め込み次元を誤り最隣接法で算出した結果である。エルゴでの1000mタイムトライアルで最もタイムがよかった漕手の結果を例として示した。再帰プロットを作成する際には、算出された埋め込み次元は6次元であったが、この図では誌面に記載できる最大次元である3次元で例示した。

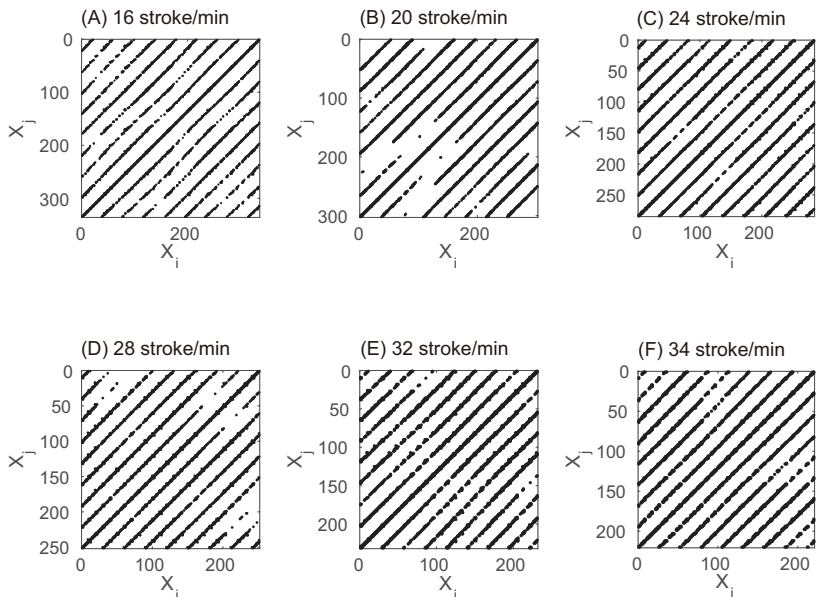


図4 各レートにおける測定参加者10の再帰プロット。採択された半径パラメータ（点間の最大距離に対する $\eta = 14.2\%$ ）での結果であり、エルゴでの1000mタイムトライアルで最もタイムがよかった測定参加者10の結果を例示した。

出とその有意性の検定をした。そして、ドライブ時間とリカバリ時間の比率とレートとの関係について、回帰分析をした。

再帰定量化解析における統計的検定では、レートを独立変数、再帰率、最大線長率の各指標を従属変数として、一要因6水準の分散分析で平均値比較した。有意差が認められた際には、Bonferroni法で多重比較し、レート間の平均値を比較した。有意水準は5%とした。

3 結果

3.1 ストロークレート

表1は、各レートで各参加者が漕いだときの牽引力のデータから、スペクトル解析で算出された周波数の平均とその標準偏差、その逆数で算出された周期に基づくレートの平均とその標準偏差を示している。聴覚教示されている各レートを母平均と仮定し、各参加者の各レートの平均値を代表値として、母集団からの標本とみなされるか否かを検定する平均値の検定をした。その結果、6つのレートのうち、4つのレートで有意な差は認められなかった。

次に、各レートにおける各参加者の平均レートを代表値として、分散分析をした結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 3586.7, p < .01, \eta_p^2 = 0.9966$)。多重比較の結果、全てのレート間で差が認められた ($MSe = 0.1739, p < .05$)。また、図5は、各レートにおける各参加者の平均レートの散布図である。相関係数は.9978であり、有意であった ($F(1, 72) = 17133.3, p < .01$)。説明率 (R^2) は99.56%であった。

これらの結果は総じて、各参加者が教示されていた各レートで漕ぐことができていたこと、そして各レートで漕がれた牽引データは、レートが異なれば、それぞれ全く異なるレートでのデータであったことを意味している。

3.2 ドライブ時間とリカバリ時間の平均、変動、その比率

表2Aと図6Aは、各レートにおける各参加者の平均ドライブ時間と平均リカバリ時間の結果とその平均値を示している。平均ドライブ時間に関して、分散分析の結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 90.1, p < .01, \eta_p^2 = 0.8824$)。多重比較の結果、レート28と32、レート32と34との間

表1 各ストロークレートにおける実際の周波数 (Hz) とそのレート (Cycle per min.: cpm)

		Stroke rate (cycle per min.)					
		16	20	24	28	32	34
Frequency (Hz)	M	0.270	0.330	0.401	0.462	0.535	0.564
	SD	0.005	0.008	0.007	0.004	0.007	0.007
Rate (cpm)	M	16.198	19.775	24.057	27.719	32.114	33.860
	SD	0.293	0.498	0.390	0.264	0.390	0.422
	t	* 2.340	-1.564	0.508	* -3.679	1.011	-1.147

*: $p < .05$

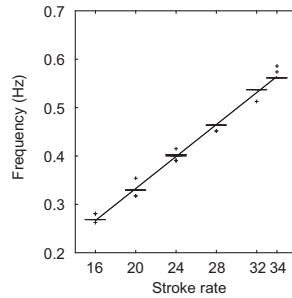


図5 各レートにおけるストローク周波数の平均とその標準偏差。+は外れ値である。斜めの実線はストロークレートを独立変数、周波数を従属変数としたときの線形近似させたときの直線である ($y = 0.0165x + 0.0025$, $R^2 = 0.996$)。

以外は、全てのレートで差が認められた ($MSe = 935.2923$, $p < .05$)。この結果は、ドライブ時間がレートの上昇に伴って、やや減少していくことを意味している。平均リカバリ時間に関して、分散分析の結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 1625.5$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.9927$)。多重比較の結果、全てのレート間で差が認められた ($MSe = 3584.3897$, $p < .05$)。この結果は、リカバリ時間がレートの上昇に伴って、大きく減少していくことを意味している。

表2Bと図6Bは、各レートにおける各参加者のドライブ時間とリカバリ時間の標準偏差の結果とその平均値を示している。ドライブ時間の標準偏差に関して、分散分析の結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 7.2$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.3752$)。多重比較の結果、レート16と、24から34の4つのレートで差が認められたが、他のレートでは差が認められなかった ($MSe = 29.7659$, $p < .05$)。標準偏差を変動性として捉えるならば、この結果は、ドライブ時間の変動性がレートの上昇に伴って、やや減少していくことを意味している。リカバリ時間の標準偏差に関して、分散分析の結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 30.1$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.7149$)。多重比較の結果、レート16は他の全てのレートと、レート20は28, 32, 34と、レート28は32, 34と、それぞれ差が認められた ($MSe = 244.5902$, $p < .05$)。標準偏差を変動性として捉えるならば、この結果は、リカバリ時間の変動性がレートの上昇に伴って、大きく減少していくことを意味している。

表2Cと図6Cは、各レートにおける各参加者のドライブ時間とリカバリ時間それぞれにおける標準偏差の比率(%)の結果(=B/A)とその平均値を示している。ドライブ時間の平均値に対する変動性の比率に関して、分散分析の結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 2.5$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.1745$)。多重比較の結果、レート16と24でのみ差が認められたが、他のレートでは差が認められなかった ($MSe = 53.4110$, $p < .05$)。この結果は、リカバリ時間の平均値に対する変動性の比率は、レートによる差異があまりないことを意味している。リカバリ時間の平均値に対する変動性の比率に関して、分散分析の結果、有意な差は認められなかった ($F(5, 60) = 2.3$, $p > .05$)。この結果は、ドライブ時間の平均値に対する変動性の比率は、レートによる差異がないことを意味している。

3.3 ドライブとリカバリの時間比 (相対的タイミング)

図7は、各レートにおける実際のレートと、リカバリ時間に対するドライブ時間の比率、の散布図であり、予測直線の結果を示している。図7Aが参加者1、Bが参加者13、そしてCが参加者9の結果であり、3名の例として示している。例として挙げた理由は、参加者1が最も決定率が低く、

表2 各ストロークレートにおけるドライブ時間とリカバリ時間の平均とその標準偏差 (A), 標準偏差の平均とその標準偏差 (B), 各時間における標準偏差の率 (C) (単位は msec.)

(A)

		Stroke rate (cycle per min.)					
		16	20	24	28	32	34
Drive	M	756.923	682.923	637.231	594.923	561.846	543.077
	SD	78.004	57.269	45.873	31.813	29.989	28.894
Recovery	M	2958.769	2346.769	1868.615	1559.231	1314.462	1219.231
	SD	104.170	97.332	64.633	48.836	29.822	27.147

(B)

		Stroke rate (cycle per min.)					
		16	20	24	28	32	34
Drive	M	22.144	15.943	12.725	12.959	11.696	11.563
	SD	11.090	5.833	2.764	2.968	2.974	3.918
Recovery	M	93.110	60.050	55.276	40.654	30.782	29.92
	SD	26.342	18.986	14.380	16.565	9.759	11.303

(C)

		Stroke rate (cycle per min.)					
		16	20	24	28	32	34
Drive	M	28.912	22.929	20.050	21.866	20.834	21.184
	SD	13.225	6.873	4.336	5.177	5.364	6.736
Recovery	M	31.518	25.660	29.585	25.997	23.395	24.507
	SD	9.363	8.277	7.724	10.233	7.224	9.088

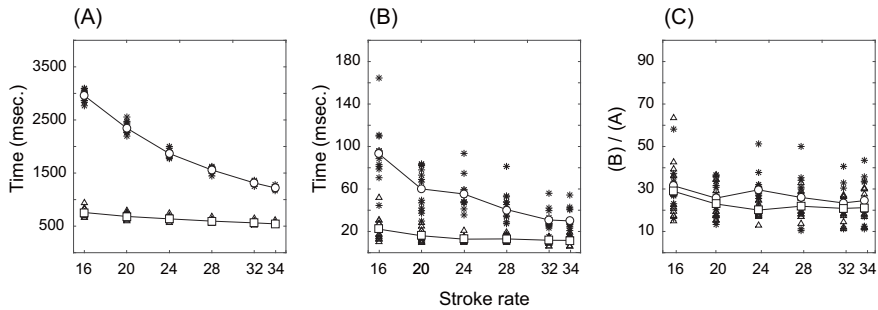


図6 ドライブとリカバリの時間 (A) の平均値, その標準偏差 (B), およびそれらの比率 (C)。□がドライブ, ○がリカバリの平均値の結果を示している。△は各測定参加者のドライブ, *はリカバリの代表値を示している。

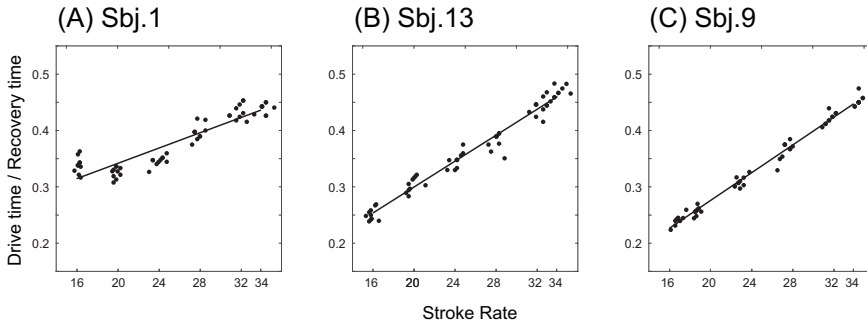


図7 ストロークレートと牽引・非牽引時間の比率。

表3 レートに対する相対的タイミング (= ドライブ時間 / リカバリ時間) の回帰分析の結果。1,000m Time はエルゴでの1,000mのタイムトライアルの順位, pe は相対的タイミング, re はレートである。

Sbj	Sex	1000m Time	Regression equation	R^2	$F(1, 58)$	SEe	p
1	Male	9	$pe = 0.007 \times re + 0.206$	0.839	301.80	0.008	**
2	Male	4	$pe = 0.013 \times re + 0.028$	0.979	2717.12	0.002	**
3	Male	11	$pe = 0.009 \times re + 0.097$	0.975	2262.00	0.002	**
4	Male	5	$pe = 0.011 \times re + 0.059$	0.963	1513.82	0.003	**
5	Male	10	$pe = 0.013 \times re + 0.020$	0.977	2420.63	0.002	**
6	Female	13	$pe = 0.010 \times re + 0.138$	0.923	698.19	0.005	**
7	Female	12	$pe = 0.009 \times re + 0.129$	0.949	1074.81	0.003	**
8	Male	7	$pe = 0.013 \times re + 0.090$	0.966	1632.96	0.003	**
9	Male	2	$pe = 0.012 \times re + 0.030$	0.990	5518.92	0.001	**
10	Male	1	$pe = 0.011 \times re + 0.033$	0.981	3010.78	0.001	**
11	Male	6	$pe = 0.008 \times re + 0.136$	0.892	476.56	0.006	**
12	Male	3	$pe = 0.012 \times re + 0.023$	0.984	3612.89	0.001	**
13	Male	8	$pe = 0.012 \times re + 0.070$	0.970	1868.91	0.002	**

** : $p < .01$

他方、参加者9が最も高く、参加者13がちょうど中位の7番目ということである。表3は、全参加者におけるレートに対する相対的タイミング (= ドライブ時間 / リカバリ時間) の予測式の結果を示している。目的変数を比率 (相対的タイミング)、説明変数を実際のレートとして、予測式を求めた結果、係数は0.007から0.013の範囲、定数項は0.020から0.136の範囲、予測の標準誤差は0.001から0.008の範囲であった。競漕の相対的タイミングを検討した Dawson, Lockwood, Wilson, and Freeman (1998) では、係数が0.010から0.013の範囲であり、定数項は0.100から0.170の範囲であったことを踏まえると、これらの結果は、彼らの研究結果と概ね一致しており、ローイングのデータとして妥当なデータが得られていたことを意味している。

3.4 再帰定量化解析

図3は、状態空間中に再構築されたアトラクタの例として、エルゴでの1,000mタイムトライア

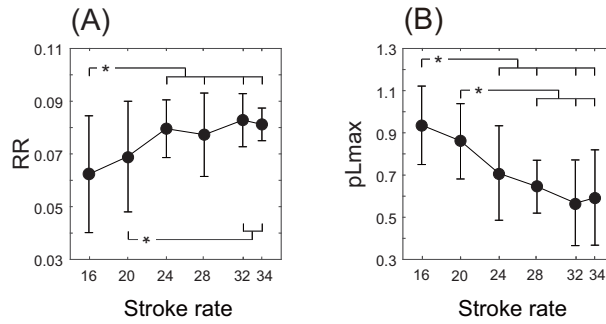


図8 各レートにおける再帰率 (A) と最大線長率 (B) の平均とその標準偏差, および多重比較の結果 (*: $p < .05$)

ルで最も良い記録をもつ参加者 10 の結果を示している。再帰定量化解析での埋め込み次元は 6 次元であったが、誌面に記載できる最大次元である 3 次元で結果を例示している。そして、図 4 は、再構築されたアトラクタから作成された参加者 10 の再帰プロットの結果である。

全参加者における全レートの再帰率に関して、分散分析の結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 8.9$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.4245$)。多重比較の結果、レート 16 と 24 から 34 の間に、レート 20 と 32 と 34 の間に差が認められた (図 8A, $MSe = 0.9386$, $p < .05$)。この結果は、20 以下のレートと 32 以上のレートで、再構築されたアトラクタの確率論的誤差・軌道あるいは揺らぎの程度が異なっていることを意味している。

最大線長率に関して、分散分析の結果、有意な差が認められた ($F(5, 60) = 9.5$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.4416$)。多重比較の結果、レート 16 と 24 から 34 の間に、レート 20 と 28 から 34 の間に差が認められた (図 8B, $MSe = 307.8472$, $p < .05$)。この結果は、20 以下のレートと 28 以上のレートで、アトラクタ強度が異なっていること、つまり安定性が異なっていることを意味している。

4 考察

本研究の目的は、16, 20, 24, 28, 32, そして 34 の計 6 レートで漕運動したときのハンドルの牽引力の揺らぎあるいは確率論的誤差・軌道と、安定性について、非線形時系列解析によって検討することであった。まず、教示されている各レートで各漕手(測定参加者)が漕いでいたかどうかを確認するため、レートと周波数のデータから得られた数値の統計的検定、ドライブ時間とリカバリ時間の平均、変動、そしてその比率の統計的検定をした。次に、非線形時系列解析の 1 つの手法である再帰定量化解析を援用し、各漕手の各レートでのアトラクタの再構築、そして再帰率によってアトラクタの確率論的誤差あるいは揺らぎ、最大線長率によってアトラクタの強度あるいは安定性、を定量化し、レートとの関係を検討した。

4.1 レート(漕周期レート)による漕運動データとしての妥当性

教示されたレートに対する各参加者のレートとの差異を検討した結果、6 つのレートのうち、4 つのレートで有意な差は認められなかった(表 1)。また、それぞれ教示されたレートにおいて、

実際に発揮されたレートに、有意な差が認められた（表1）。また、教示されたレートと発揮されたレートと各レートとの関係に、非常に強い関係（ $R^2=99.56\%$ ）が認められた（図5）。これらの結果は、本研究で収集されたデータは、各参加者が教示されていた各レートで漕いでいたデータ、しかも各レートで漕がれた牽引データは全く異なるレートでのデータであったことを示している。

平均ドライブ時間に関して、レート28と32、レート32と34との間以外は全てのレートで、平均リカバリ時間に関して、全てのレート間で差が認められた（表2A, 図6A）。これらの結果は、レートの上昇に伴ってドライブ時間がやや減少していくこと、リカバリ時間が大きく減少していくこと、を示している。また、ドライブ時間の標準偏差に関して、レート16と24から34の4つのレートで差が認められたが、他のレートでは差が認められなかったこと、リカバリ時間の標準偏差に関して、レート16は他の全てのレートと、レート20は28, 32, 34と、レート28は32, 34と、それぞれ差が認められた（表2B, 図6B）。これらの結果は、ドライブ時間の変動性がレートの上昇に伴って、やや減少していくこと、リカバリ時間の変動性がレートの上昇に伴って、大きく減少していくこと、を示している。そして、ドライブ時間の平均値に対する標準偏差の比率に関して、レート16と24でのみ差が認められたが、他のレートでは差が認められなかったこと、リカバリ時間の平均値に対する変動性の比率に関して、レートによる差異がない、という結果であった（表2C, 図6C）。これらの結果は、リカバリ時間の平均値に対する変動性の比率は、レートによる差異があまりないことを示している。

全参加者におけるレートに対する相対的タイミング（＝ドライブ時間／リカバリ時間）の予測式に関しては、目的変数を比率（相対的タイミング）、説明変数を実際のレートとしたとき、係数は0.007から0.013、定数項は0.020から0.136、予測の標準誤差は0.001から0.008の範囲であった（表3）。

Dawson et al. (1998) の検討では、本研究のレートと異なり、18, 23, 28, 33の4種のレートを用いているが、本研究の結果と同様に、レートの上昇に伴って、リカバリ時間は大きく減少するが、ドライブ時間はあまり減少しないこと、リカバリ時間の変動性は減少するが、ドライブ時間の変動性はあまり減少しないという結果が得られている。さらに、漕運動のリカバリ時間に対するドライブ時間の比率は、レート上昇に伴って上昇していく傾向であること、エルゴでの漕運動の予測式においても線形近似したとき、同程度の係数値、定数項値であるという結果であった。それゆえ、本研究で収集されたデータは、漕運動を検討するうえで妥当なデータであったと考えられる。

4.2 再帰定量化解析

本研究の再帰定量化解析では、20以下のレートと32以上のレートで、再帰率が異なっていること、つまり確率論的誤差あるいは揺らぎの程度が異なっており、レートが低いときには再帰率が低く、レートが大きいときには再帰率が高い、という結果であった。人間の、特に技能が必要な熟練者の運動は、常に変動しながらも、合目的な運動である（Bernstein, 1967）と言われている。このことは、非線形時系列解析によって、心拍（Kobayashi and Musha, 1982）などの生理学的指標、上肢（Miyazaki, Kadota, Kudo, Masani, and Ohtsuki, 2001）や自己ペースタッピング（Yamada, 1995; Yoshinaga, Miyazima, and Mitake, 2000）などの身体領域の運動の解析、さらには姿勢動揺（Duarte and Zatsiorsky, 2001）や歩行（Hausdorff, Peng, Ladin, Wei, and Goldberger, 1995）などの全身の運動など、人間の生理学的特徴や身体運動まで様々な水準において、変動の構造があることが実証されてきた。

さらに、漕運動においても、漕手が30分から60分もの間、快適に漕運動できるレートを基

準（100%）として、前後10%のレートの3種の時系列データについてトレンド除去揺らぎ解析（Detrended fluctuation analysis : DFA ; Peng, Buldyrev, Havlin, Simons, Stanley, and Goldberger, 1994）などで検討した結果、漕運動のレートには $1/f$ 型揺らぎがあること、そのレートはおおよそ20レートであることが確認されている（平川, 2015）。また、ランニングでの揺らぎへの走速度の影響に関して、至適速度でDFAの指数が最も低く、このを中心としてU字となること（Jordan, Challis, and Newell, 2006）と、一方で至適なランニング速度を中心として $\pm 20\%$ の速度で検討した研究（Nakayama, Kudo, and Ohtsuki, 2010）では、至適な速度を中心としてU字曲線とはならないことなど、いくつか異なる見解も得られている。そして、一定のペースの聴覚教示に対するタイミング同期の研究では、運動周波数の高低によって、揺らぎの構造が異なること（Kadota, Kudo, and Ohtsuki, 2004）なども確認されてきている。これらの結果を総括すると、運動周波数によって揺らぎの程度が異なるが、いずれの周波数においても、揺らぎが存在している、ということが共通した知見である。

本研究の結果に対して、これらの4つの研究の結果を踏まえると、漕運動における揺らぎの程度やその構造が変化し、さらに小さいレート数で漕いだときに、増大していく可能性が考えられる。そして、低いレートの場合、再構築されたアトラクタの軌道は確率的にしか定められないことを示していると考えられる。ただし、平川（2015）の解析方法はDFAであること、本研究では再帰定量化解析であることを踏まえると、本研究の結果をそのまま、レート上昇と揺らぎの低下という関係として結論づけることには慎重にならなければいけない。

次に、本研究では、各レートにおいて各漕手が発揮した牽引力は、各漕手に固有のアトラクタに基づいて発揮されているという前提に基づき、そのアトラクタの強度を牽引力を発揮するための一貫性・安定性として検討した。そして、アトラクタ強度の指数として、再帰定量化解析によって算出された最大線長率を指標として用いた。その結果、最大線長率は、レートの上昇に伴って低下していくこと、さらにレート16と24から34の間、レート20と28から34の間に差があることが認められた。これらの結果は、漕運動が短い周期になればなるほど、不安定になっていくこと、そして、20以下のレートと28以上のレートで、発揮においてはアトラクタの強度が異なっていたことを示していると考えられる。

これまで、人間の運動の制御に関して、非線形力学系理論に依拠して明らかにされてきた基本概念には、内在ダイナミクス（Intrinsic dynamics）と記憶情報がある（Schöner and Kelso, 1988）。前者は、アトラクタの形成に影響を及ぼすような、人間が生得的に固有に保持するダイナミクスである。また後者は、過去に経験した運動が、情報として蓄積され、アトラクタの形成に影響を及ぼす因子である。これらは生得的な内在ダイナミクスと漕運動の訓練などの経験の蓄積によりアトラクタを形成する要因と考えられている。さらに、これまで、人間の肢間の協応運動におけるアトラクタ強度に関しては、運動周波数の増大に伴って、最大線長が短くなっていく現象（Kudo et al., 2006; Richardson, et al., 2007）が確認されてきている。そしてこの知見に、漕手が30分から60分もの間、快適に漕運動できるレートが20レートであること（平川, 2015）を踏まえると、本研究における漕周期の上昇は、Kudoらの研究における運動周波数の上昇に該当するものであり、漕運動のような身体全体を使ったスポーツの運動制御においても、肢間などの身体領域の運動制御と同様に、周期上昇に伴うアトラクタ強度の低下現象を引き起こすものであったと考えられる。そのため、快適な漕運動のレートよりも高頻度のレートでは、外乱や摂動に対して弱いアトラクタによって牽引力が引き出されている、あるいは産出されていると考えられる。

5 結論

本研究は、各レートの牽引で生じた牽引力の揺らぎ、そして一貫性・安定性について検討した。まず教示されたレートで各漕手が漕いでいたかどうかを確認し、非線形時系列解析を用いて、各漕手の各レートでのアトラクタを再構築し、そのアトラクタの確率論的誤差に基づいた揺らぎの程度を、アトラクタの強度によって一貫性・安定性を定量化した。最後に、レートを独立変数に、アトラクタの安定性を従属変数にして、レートと安定性の関係を検討した。その結果、収集されたデータは、各参加者が教示されていた各レートで漕いでいたデータ、しかも各レートで漕がれた牽引データは異なるレートでのデータであることが確認された。また、平均ドライブ時間と平均リカバリ時間、これらの標準偏差、そしてそれぞれの平均時間に対する標準偏差の比率など、先行研究と同様なデータであることが確認された。そして、再帰率によってアトラクタの確率論的誤差に基づいた揺らぎを定量化した結果、低いレートではアトラクタの軌道生成において、揺らぎが大きいことが認められた。最後に、最大線長率によってアトラクタの強度による安定性を定量化した結果、高いレートではアトラクタ強度が弱いことが確認された。これらの結果は、快適に漕運動できるレート（20 ストローク / 分）を境に、揺らぎの程度やその構造が変化すること、特に低いレートでは揺らいだ軌道あるいは確率的に定まる軌道でのアトラクタであるが、高いレートでは摂動や外乱に対して強度の弱いアトラクタによって牽引力が産出されていると考えられる。

謝辞

本研究は、2012年度に堀科学芸術振興財団から助成を受け、実施された成果の一部である。謝辞に記して、財団への感謝の意を表したい。

文献

- Abarbanel, H. D. I. (1995) *Analysis of Observed Chaotic Data*. N.Y.: Springer-Verlag.
- Beek, P. J. and Beek, W. J. (1988) Tools for constructing dynamical models of rhythmic movement. *Human Movement Science*, 7: 301-342.
- Bernstein, N. A. (1967) *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Oxford: Pergamon Press.
- Dawson, R. G., Lockwood, R. J., Wilson, J. D., and Freeman, G. (1998) The rowing cycle: Source of variance and invariance in ergometer and on-the-water performance. *Journal of Motor Behavior*, 30: 33-43.
- Duarte, M. and Zatsiorsky, V. M. (2001) Long-range correlations in human standing. *Physics Letters A*, 283: 124-128.
- Eckmann, J. P., Kamphorst, S. O., and Ruelle, D. (1987) Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics Letters*, 5: 973-977.
- Fraser, A. M. and Swinney, H. L. (1986) Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical Review A*, 33: 1134-1140.
- Haken, H. (1983) *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-organizing Systems and Devices*. Berlin: Springer-Verlag.
- Haken, H. (2000) *Information and Self-organization (2nd ed.): A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Berlin: Springer.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., and Bunz, H. (1985) A theoretical model of phase transitions in human hand movements.

- Biological Cybernetics*, 51: 347–356.
- Hausdorff, J. M., Peng, C. K., Ladin, Z., Wei, J. Y., and Goldberger, A. L. (1995) Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. *Journal of Applied Physiology*, 78: 349–358.
- 平川武仁 (2013) 体育・スポーツにおける運動学習の理解：力学系理論に依拠した学習ダイナミクスによるアプローチ. *アカデミア人文・自然科学編*, 5: 161–173.
- 平川武仁 (2014a) 浮動ローイング・マシンにおける 1000m タイムトライアル中のレース経過に伴う協応パターンの変化. *アカデミア人文・自然科学編*, 8: 89–112.
- 平川武仁 (2014b) ローイング・マシンにおける 1000m タイムトライアル中のハンドル速度パターンと定時的安定性の関係. *アカデミア人文・自然科学編*, 7: 69–85.
- 平川武仁 (2015) 競漕選手による漕周期の長期相関と $1/f$ 型揺らぎ. *アカデミア人文・自然科学編*, 9, 99–114.
- 平川武仁・山本裕二 (2011) ローイング・エルゴメータ 2000m タイムトライアル中の序盤と終盤における技能水準による漕パターンの異同. *アカデミア人文・自然科学編*, 2: 83–96.
- Janshen, L., Mattes, K., and Tidow, G. (2009) Muscular coordination of the lower extremities of oarsman during ergometer rowing. *Journal of Applied Biomechanics*, 25: 156–164.
- Jordan, K., Challis, J. H., and Newell, K. M. (2006) Long-range correlations in the stride interval of running. *Gait and Posture*, 24: 120–125.
- Kadota, H., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2004) Time-series pattern changes related to movement rate in synchronized human tapping. *Neuroscience Letters*, 370: 97–101.
- Kay, B. A., Kelso, J. A. S., Saltzman, E. L., and Schöner, G. (1987) Space-time behavior of single and bimanual rhythmic movements: Data and limit cycle model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13: 178–192.
- Kelso, J. A. S. (1984) Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, 246: R1000–R1004.
- Kelso, J. A. S. (1995) *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge: The MIT Press.
- Kennel, M. B., Brown, B., and Abarbanel, H. D. I. (1992) Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Physical Review A*, 45: 3403–3411.
- Kinsella-Show, J. M., Harrison, S. J., Colon-Semenza, C., and Turvey, M. T. (2006) Effects of visual environment on quiet standing by young and old adults. *Journal of Motor Behavior*, 38: 251–264.
- Kobayashi, M. and Musha, T. (1982) $1/f$ fluctuation of heartbeat period. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 29: 456–457.
- Konvalinka, I., Xygalatas, D., Bulbulia, J., Schjødt, U., Jegindø, E-M., Wallot, S., Van Orden, G., and Roepstorff, A. (2011) Synchronized arousal between performers and related spectators in a fire-walking ritual. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108: 8514–8519.
- Kudo, K., Park, H., Kay, B. A., and Turvey, M. T. (2006) Environmental coupling modulates the attractors of rhythmic coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32: 599–609.
- Kugler, N. P., Kelso, J. A. S., and Turvey, M. T. (1980) On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. In G. E. Stelmach and J. Requin (Eds.) *Tutorials in Motor Behavior*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, pp. 3–47.
- Martin, T. P. and Bernfield, J. S. (1980) Effect of stroke rate on velocity of a rowing shell. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12: 250–256.
- Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., and Kurths, J. (2007) Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438: 237–329.
- McGregor, A. H., Bull, A. M., Byng-Maddick, R. (2004) A comparison of rowing technique at different stroke rates: A description of sequencing, force production and kinematics. *International Journal of Sports Medicine*, 25: 465–70.

- Mikulič, P., Smoljanović, T., Bojanić, I., Hannafin, J., and Pedišić, Ž. (2009) Does 2000-m rowing ergometer performance time correlate with final rankings at the World Junior Rowing Championship? A case study of 398 elite junior rowers. *Journal of Sports Sciences*, 27: 361–366.
- Miyazaki, M., Kadota, H., Kudo, K., Masani, K., and Ohtsuki, T. (2001) Fractal correlation of initial trajectory dynamics vanishes at the movement end point in human rapid goal-directed movements. *Neuroscience Letters*, 304: 173–176.
- Nakayama, Y., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2010) Variability and fluctuation in running gait cycle of trained runners and non-runners. *Gait and Posture*, 31: 331–335.
- Peng, C. K., Buldyrev, S. V., Havlin, S., Simons, M., Stanley, H. E., and Goldberger, A. L. (1994) Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, 49: 1685–1689.
- Prigogine, I. and Nicolis, G. (1971) Biological order, structure and stabilities. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 4: 107–148.
- Richardson, M. J., Lopresti-Goodman, S., Mancini, M., Kay, B. A., and Schmidt, R. C. (2008) Comparing the attractor strength of intra- and interpersonal interlimb coordination using cross-recurrence analysis. *Neuroscience Letters*, 438: 340–345.
- Richardson, M. J., Schmidt, R. C., and Kay, B. A. (2007) Distinguishing the noise and attractor strength of coordinated limb movements using recurrence analysis. *Biological Cybernetics*, 96: 59–78.
- Schöner, G. and Kelso, J. A. S. (1988) Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, 239: 1513–1520.
- Smith, R. M. and Spinks, W. L. (1995) Discriminant analysis of biomechanical differences between novice, good and elite rowers. *Journal of Sports Sciences*, 13: 377–385.
- Sprague, R. C., Martin, J. C., Davidson, C. J., and Farrar, R. P. (2007) Force-velocity and power-velocity relationships during maximal short-term rowing ergometry. *Medical Science and Sports Exercise*, 39: 358–64.
- Strogatz, S. (1994) *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Cambridge: Perseus Books.
- Takens, F. (1981) Detecting strange attractors in turbulence. In D. Rand and L. S. Young (Eds.) *Dynamical Systems and Turbulence*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 366–381.
- Trulla, L. L., Giuliani, A., Zbilut, J. P., and Webber, C. L. (1996) Recurrence quantification analysis of the logistic equation with transients. *Physics Letters A*, 223: 255–260.
- Vereijken, B., Whiting, H. T. A., and Beek, W. J. (1992) A dynamical systems approach to skill acquisition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 45A: 323–344.
- Webber, C. L., Jr. (1991) Rhythmogenesis of deterministic breathing patterns. In H. Haken and H. P. Koepchen (Eds.) *Rhythms in Physiological Systems*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 171–191.
- Webber, C. L., Jr. (2012) Recurrence quantification of fractal structures. *Frontiers in Physiology*, 3: 382.
- Webber, C. L., Jr. and Zbilut, J. P. (1994) Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies. *Journal of Applied Physiology*, 76: 965–973.
- Webber, C. L., Jr. and Zbilut, J. P. (1996) Assessing deterministic structures in physiological systems using recurrence plot strategies. In M. C. K. Khoo (Ed.) *Bioengineering Approaches to Pulmonary Physiology and Medicine*. N.Y.: Plenum Press, pp. 137–148.
- Yamada, N. (1995) Nature of variability in rhythmical movement. *Human Movement Science*, 14: 371–384.
- Yokoyama, K. and Yamamoto, Y. (2011) Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Computational Biology*, 7: e1002181.
- Yoshinaga, H., Miyazima, S., and Mitake, S. (2000) Fluctuation of biological rhythm in finger tapping. *Physica A*, 280: 582–586.
- Zbilut, J. P., Zaldívar-Comenges, J. M., and Strozzi, F. (2002) Recurrence quantification based Lyapunov exponents for monitoring divergence in experimental data. *Physics Letters A*, 297: 173–181.