

# 動きの運動学的・力学的指標と非線形的分析から 推測される心的状態

— 2例に基づく準備的研究 —

野田 満\*

## 要 約

本研究は、力学的指標ならびに非線形的指標を用いて、ビーズ移し課題（研究1）とウクレレ演奏（研究2）の分析を行い、心的状態のあり方を検討することを目的とした。研究1では、垂直位置を除き、水平位置や速度、加速度で最大リアプノフ指数が正值をとり、カオス性が確認できた。ただ状態空間に再構成されたアトラクタが描く軌跡をみると、速度では収束、加速度では拡大するという違いとなって表れた。習熟するに従い慎重さと切り替えの早さが反映したと解釈された。研究2では最初の手ふりと演奏で粗大運動・微細運動の違いが特徴的に表れた。手ふりでは空間位置や速度でカオス性が認められたが、演奏では加速度でのみ確認された。力学的指標によりカオス的な振る舞いが異なって表れたが、演奏での指の制御が、手ふりの動きとは異なり速度の不連続な変化となり、加速度ではカオス性を表す最大リアプノフ指数が高い値になったと解釈された。注意資源と最大リアプノフ指数との関連性を指摘したが、運動指標の違いによりアトラクタの現れ方が異なることも確認された。

キーワード：軌跡, カオス, 最大リアプノフ指数, アトラクタ, 注意

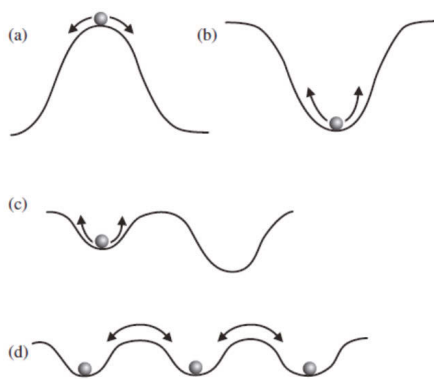
## 問題と目的

課題を解く際の身体の動きは、これまで統制すべき剰余変数として扱われてきた。しかし、イメージ操作の補助的役割として動きや行為に注目した研究が現れてきている（Chu & Kita, 2008; Göksum et al., 2013; 野田, 2015a, b）。動きは可視的行動レベルでのみ語られることが多く、微視的な視点は充分とは言えなかった。これまでの発達の視点からみると乳児期の身体動作のあり方は、その発現の仕方から発達診断に用いられてきた経緯がある（Gessell, Thompson, & Amatruda, 1934 清水訳 1982; Gessell & Amatruda, 1956 佐野・清水訳 1970）。日常的に観察可能な動きの変化が中

心であった。一方で、近年、多重の時間スケールで生じる幾つもの運動の変化が発達の方向を進めると考えたテーレン（Thelen & Smith, 1994 小島監訳 2018 及び Thelen & Smith, 2006）はダイナミックシステム理論（DST）を導いた。彼らは運動発達のみならず発達全般について、システム論的捉え方をしていて、(1) 発達とは、分子レベルから文化レベルまで、システムのすべてのレベルで継続的な相互作用が行われるとみなし、(2) 数ミリ秒から数年にわたる非常に長い時間スケールで展開される入れ子になったプロセスであると捉えている（Thelen & Smith, 2006）。テーレンの興味深い発想は、力学系で用いられるアトラクタ（attractor）の概念を行動変化に転用した点である。アトラクタのそもそもの意味は、軌道を描く物体の運動が、時間とともにひきつけられるように、相空間上に留まる領域を指している。テーレ

2022年11月30日受付

\* 江戸川大学 人間心理学科特任教授 空間認知発達



**Figure 1** Stable attractor and unstable attractor: A metaphorical diagram that considers the state of motor development in terms of the state of a ball, which is regarded as an attractor, in relation to a well or a hill. (Thelen & Smith, 2006)

ンたちは、発達における安定した段階への変化とその経過の不安定さを説明する上で援用している。彼らは力学的な概念を多用しているので、その例として、振り子の動きを速度と空間位置により定まる円環的の動きに置き換えて、ダイナミックシステムを説明している。外的な抵抗が無い場合は、振り子は安定していて周期的な運動を続け、リミットサイクルと呼ばれる円周運動を描く。しかし、なんらかの抵抗により振り子の運動に変化が生じ、描かれていた周期的円環運動から、渦巻状の点に引き込まれるような動きへと転じ、点アトラクタと呼ばれる状態空間の相へと変化していく様が説明されている。

また、このアトラクタという概念を用いて、丘と井戸のモデルにより安定性と不安定性の説明が試みられている。4通りの状態が示されているが (Figure 1), a は丘の上のボールはエネルギーを秘めていて、わずかに押されるだけで落ちていってしまう状態。b は底にあり、もとに戻るのに多くのエネルギーが必要な状態にある。ただし安定したアトラクタとされる。c は浅めの井戸にあり不安定な状態にあるとされる。わずかな摂動 (perturbations) でボールは外に押し出され、十分な時間があれば、それ自体がもつ確率的雑音 (ランダムな事象) のため、最後はより深い方の井戸へと移ることになる状態。d は行動システム

がもつだろう多重安定性を示している。

行為の生成と消失を含めた発達変化を説明する上で示唆に富むモデルといえる。「ダイナミックな観点からは、行動の発達は、時系列に沿って安定性を変化させつつ、システムのアトラクタが生成と崩壊を繰り返す連鎖として見ることができる。それと認識できる形態をもつどんな行動パターンも、その集合変数は状態空間のある限定的な部分にのみ存在しているということ (Thelen & Smith, 1994 小島 (監訳) 2018, p117)」と捉えており、発達の諸側面のあり方を、子どもの行動データから (たいていは力学系のデータに基づき) 非線形的な状態空間になぞらえていることがわかる。

テーレンらが言う集合変数をどう取るかで、見えてくる行動のパターンのあり方も異なってくると思われる。集合変数は、ハーケン (Haken, 1996 奈良・山口訳 2013) の秩序パラメータ (order parameter) の考えを適用したものである。それは、複数の部分が集団的に働くことから生まれる統括的な存在のことを指している。テーレンもハーケンと同じくシナジェティックの意味合いで用いている。ただし、ハーケンは脳の自己組織化を説明するために用いていたが、テーレンは運動における制御の発生機序を説明することに用いていて、リーチングやキックといった観察

されるひとかたまりの行動パターンとして用いている。パターンの変容は、例えば姿勢や運動速度等の制御パラメータ (control parameter) に基づくと考えられている。国内では岡林他 (2008) が、ダイナミックシステムを概観し現在の研究動向を展望しているが、その中で運動研究は協調を単位とすることの重要性を指摘している。ハーケンのシナジュエティックスの考えは指の共振に基づくが、河合 (2008) は乳児研究を通じて、下位の行動レベルの出来事が互いにシステムに位置づけられ組み込まれていくことで、新たな機能を生み出すことを、発達とみることの意義を唱えている。その意味で、行為や行動の下位の動きの自己組織化に注目していくことは、広い意味で発達を明らかにする重要な方向を示しているといえる。

生体反応に基づく非線形指標を用いた研究がある。ひとつは脈波等の生理指標も用いた研究である。指尖容積脈波の応用は本邦で盛んに検証されてきた。脈波から最大リアプノフ指数を求め、心の状態や不安との関連性が調べられている (Tsuda, Tahara, & Iwanaga, 1992; 雄山, 2006; Oyama-Higa, Miao, & Mizuno-Matsumoto, 2006; Imanishi & Oyama-Higa, 2006; Oyama-Higa, Tsujino, & Tanabiki, 2006; 今西・雄山, 2008)。またそれら医療への応用のレビューとして田原 (1995) や馬庭他 (2003) の研究がある。カオスの状態と従来ではつかめなかった健康感との関係に迫ろうとするものであった。最大リアプノフ指数はアトラクタの軌道の変動を捉えたもので、最大リアプノフ指数が大きな値を取ると、軌道位置が外れていくため、その後の軌道は不安定な要素が加わってくることを示している。こうした初期値敏感性がカオスのひとつの証拠として扱われてきている。一方で、最大リアプノフ指数がゼロに近似すると周期的なりミットサイクルに代表されるような、変化のない状態が繰り返されることを意味する。アトラクタの軌道の変動が身体の何に影響されて生じるかが問題となってきた。

Oyama-Higa 他グループは、コミュニケーションの上手く出来ない高齢者や、認知度が低い高齢者は、そうではない者に比べ、最大リアプノ

フ指数の平均や標準偏差が低下することを見出した (Oyama-Higa et al., 2006)。また、大学生に心電図パターンをモニターさせ、どのタイミングで周期が切り替わるかを判断させる課題を行ったところ、試行ごとの判断エラーと最大リアプノフ指数とは負の相関を取った。著者らは、課題遂行中の切迫感や失敗の感情が、最大リアプノフ指数に反映しているかどうかはこの時点ではわからないと述べている (Imanishi & Oyama-Higa, 2006)。しかし高齢者の場合では、環境にうまく対処できていない場合は最大リアプノフ指数が低く現れる傾向にあり、大学生の場合では与えられた課題に失敗すると最大リアプノフ指数は逆に上昇するという傾向を得ている。Oyama-Higa & Miao (2006) は、最大リアプノフ指数が心的免疫 (mental immunity) のあり方と関連すると想定し、心的免疫を外的環境への適応力やコミュニケーションスキル、心的柔軟性 (divergence) のレベルとして定義し、最大リアプノフ指数の変化から心的免疫が捉えられるのではないかと考えている。興味深い実験例のひとつとして、クレベリン後に頭がすっきりすると、リアプノフ指数も数値が上がるということが報告されている。

こうした最大リアプノフ指数はアトラクタでの軌道不安定性を示し、時系列のカオス性を示すものであるが (合原, 2000)、カオス解析に関しては他にも Imanishi & Oyama-Higa (2006) の脳波から得た最大リアプノフ指数とエラーとの関連性や、藤田他 (2004) による疲労の評価方法にも利用されている。

他方、母親と胎児 (11~36 週) の心音を超音波ドップラー法で測定し、最大リアプノフ指数を導き、母子の比較を行った研究がある (石山他, 2018)。サロゲートデータを用いて帰無仮説を検証するという仕方でもデータの準備が行われた。母親、胎児ともに最大リアプノフ指数が正の値を取るなどの解析結果から、ともにカオスであることが示された。胎児の自己組織化とも関連づけ、内外の環境との非線形相互作用として現れていると解釈されている。また、母子の心音データに基づき、3 期に渡る妊娠経過でのアトラクタの形状の

比較を試みた研究がある (Ishiyama et al., 2020)。母親は全期に渡りカオス的アトラクタを既に形成していたが、胎児の方は3期になるに従い、非構造的な状態からカオス的アトラクタへと変化していくことが捉えられた。母親と胎児とのアトラクタが類似してくるについて、両者間で生じる感情変化の表れであり、一種の母子間のエンタレインメントが表れているのではないかとしている。また、母親の声への胎児の反応ではカオス的アトラクタが形成されるが、知らない人の声の場合だとそうはならないことも報告している。

空間変換に関する検査での最大リアプノフ指数のあり方を検討した研究がある。積み木型図形 (Shepard & Metzler, 1971) を用いて、図形の回転後を再認させる課題を行った際の EEG を測定し、そこで得た最大リアプノフ指数との関係を検討している (Barone, et al., 2012; Maron et al., 2013)。対象は大学生で、事前に空間推論能力 (BPR5-SR) で高低群に分けられた。EEG が測定された8か所のいずれにおいても、空間推論能力が高い学生は低い学生に比べ、最大リアプノフ指数の平均が低い値となって現れた。このことから、著者らは、高い空間推論能力を持つ学生は、少ないエネルギーで再認課題を遂行できたからではないかと考えている。また、野田 (2023) は反応時間を指標とするメンタルローテーション課題を5歳の幼児に実施し、頭部の揺れを映像からトラッキングして非線形指標を導き出している。対象となった子どもは定められた基準からメンタルローテータと特定できた者であるので、イメージの順次変換が行われていると想定された幼児である。局所的力学的安定性を捉えるために、刺激の傾きごとのリアプノフスペクトラムを抽出したところ、提示刺激の勾配に従い、つまり困難度に従い、周期アトラクタからストレンジアトラクタへと変化することを見出している。

同様にして動作課題での姿勢の局所的力学的安定性についての研究が行われている。Longo et al. (2018) は、反復動作を伴う両手動作課題 (bimanual task) を行う際の姿勢の動きを、センシング可能なスーツからサンプリングすること

で捉えている。その際に3の倍数を逆算させる認知課題の有無で、最大リアプノフ指数がどう変化するかを検討した。参加者は25歳前後の男女であった。運動学的データの平均からの変動誤差を指標とし、リアプノフ指数が求められている。結果は、認知課題を併用して行っている時の最大リアプノフ指数が、反復動作だけの条件に比べて有意に高い値を示した。このことから、認知課題を併用した場合は局所力学的安定性が低下したとみなしており、逆算することで動作課題に必要な注意資源との間で干渉を起こしていたのではないかと考えている。

また、発達性協調運動障害 (DCD) の子どもには動きの不確かさが見られるが、Mercê et al. (2018) は、想起に基づく運動がどれほど不安定であるかを確かめるために、平均3.9歳のDCD児から、閉眼・開眼や行動の違い等により頭頂と頸部のマーカの映像から運動学的指標を取り出し、状況による不安定さのあり方を示している。実際には、i) 開眼での座位、ii) 閉眼で座位、iii) 検査者が粘土でボールをつくる行為の観察、iv) 子ども自身が開眼で粘土のボールを作る、v) 閉眼で粘土のボールを作る、という5条件が設けられた。結果は、頭頂及び頸部いずれにおいても、5番目の条件で最大リアプノフ指数が最も高い正の値を示した。正の最大リアプノフ指数はカオス性を示すひとつの証拠であるが (合原, 2000)、著者らは、最大リアプノフ指数が大きければ、それに比して座位での姿勢制御の不安定性 (Haboume & Stergiou, 2003) も高くなることを指摘している。そして、5番目の条件は、目標となる外的情報が無い状況で反応しなければならないので、多くの自由度が凍結してしまったのだろうとしている。

本研究では、一見安定した反復的行為や日常の行為であっても、心的緊張や必要以上の注意資源が強えられる場合に、局所的な運動の単位を切り出すと、周期的な様相に加えて不安定な側面が現れ、それが非線形的指標である最大リアプノフ指数に反映するのではないかと考えた。動画解析と同じく、特定の視点からみた2次元的なデータと

なるが、運動学的、力学的指標を取り出し、非線形解析を試み課題遂行中での心的状態を検討することを目的とした。

## 研究 1

連続的な作業をする中で、頭部の揺れの状態を把握することを目的とし、作業課題を実施した。課題では、手先に注意を集中し、反復的で連続的な運動による微細な指先の制御が求められた。時系列に従い変化する、前頭部の空間位置、速度、加速度を測定した。ここでは、身体の揺れをみるために、運動学的 (kinematic) 変化と、作業中の動きにおける非線形性を検討することにした。頭部の測定であるが、シナジー的視点からすると、課題中の揺れは連動していることが分かっているので (野田, 2015a)、手の動きが頭部に反映すると想定している。

## 方法

参加者：成人女性 1 名

ビーズ移し課題：実験を行う机の上に、ガラス製の容器と色の異なる円柱ビーズ ( $\phi$  2mm, 4.5×5.0mm, 重さ 1g 弱) 20 個、ビーズを移すために用いる側面全てが丸い箸、積み木に接着したゼムピンの突端を縦に直線に伸ばしビーズを挿入できる形状にした台座を用意した。ビーズの入った容器は参加者の左側、台座は右側に配した。課題自体は箸でビーズを取り出し台座のピンに挿入していく作業である。本課題では 20 個あるビーズの中から 5 個移すことが求められた。

### 手続き

参加者にはヘルメットを被ってもらったが、ヘルメット前額部にマーカーの役割を果たす赤いシールを付着した。撮影用ビデオカメラ (30fps) は参加者から 3m の距離を離して、参加者の正面に設置し、頭部から作業場面まで撮影出来るように設置した。最初に課題の説明を行い、練習の為にひとつずつ移す練習を 4 回行った。次に本検査

では号令に従い、参加者は座位のまま出来るだけ早く、右手で持った箸を使い、正確にビーズをピンからピンまで移すまでを 1 試行とし、5 試行行った。つまり、5 個移すように求めた。色の指定はない。5 個移し終わると課題は終了した。

## 分析

映像データが分析対象となる。動きの偏位を調べるために、Kinovea (動作解析ソフト ver. 0.8.23) を用いた。赤色のマーカーをトラッキングし、水平・垂直位置 (position; px), 速さ (speed, px/s), 水平・垂直方向の速度 (velocity, px/s) <sup>(1)</sup>, 加速度 (acceleration, px/s<sup>2</sup>), 水平・垂直方向の加速度を求めた。次に、非線形性での検討として、リカレントプロット、カオス性を最大リアプノフ指数 ( $\lambda$  1), リアプノフスペクトラム、アトラクタの形状と軌道の検討を行った。また、周期に関しては、スペクトル解析による周波数分析、自己相関の減衰を検討した。尚、水平・垂直位置での偏位を調べるために、取得データの初期値を座標上の原点に変換している。

## 倫理的配慮

参加者には直接実験内容およびデータの使用用途の説明をした上で、協力の同意を得た。

## 結果

### 1) 空間位置・速度・加速度の変化

第 1 試行から第 5 試行まで分析の対象とした時間は 27 秒であった。また、Kinovea によるサンプリングレートは 33.3 Hz であった。ビーズ課題の作業全体で水平と垂直位置での平均値に差がみられ ( $p < .01$ ), 垂直方向の下方に偏っていた。また分散では 3 指標とも分散比で有意差がみられ、水平方向が垂直方向に比べて高い値を示した (Table 1)。上下に比べて左右への動きが大きく変動していたことがわかる。位置や速度の平均値が水平垂直ともにマイナスの値を取っているが、これはサンプリング画面の左下側に多くの観測点が集合していたことを現わしている。この領域

Table 1 Comparison of horizontal and vertical direction of kinematics in the study 1.

	position		velocity		acceleration	
	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical
$\bar{X}$	-17.78	-28.20	-5.24	-0.21	-6.58	0.93
$SD$	109.11	9.14	146.00	5.10	169.31	114.14
$n$	821	821	820	820	819	819
$F$	142.59 $p < .01$		69.33 $p < .01$		16.90 $p < .01$	
$t$	2.68 $p < .01$		0.96 ns		0.44 ns	

Note. velocity is treated as a horizontal and vertical vector quantity.

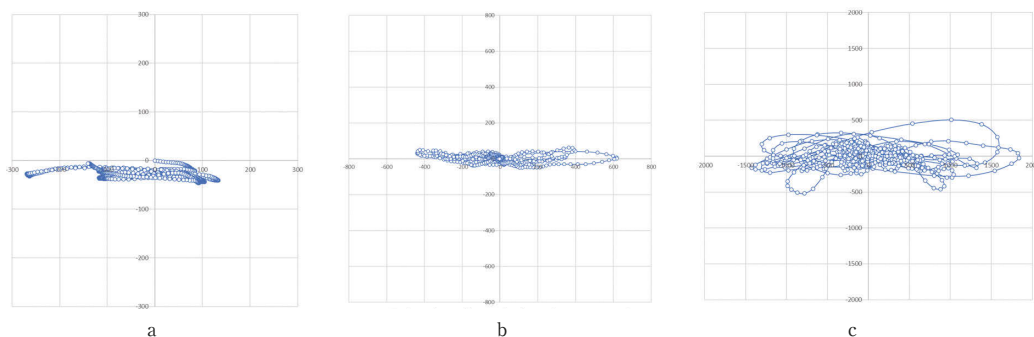


Figure 2 Fluctuation of (a) spatial position, (b) velocity, and (c) acceleration plotted over time. The horizontal axis is the horizontal component, and the vertical axis is the vertical component. The starting point of the spatial position was converted to the coordinates of the origin.

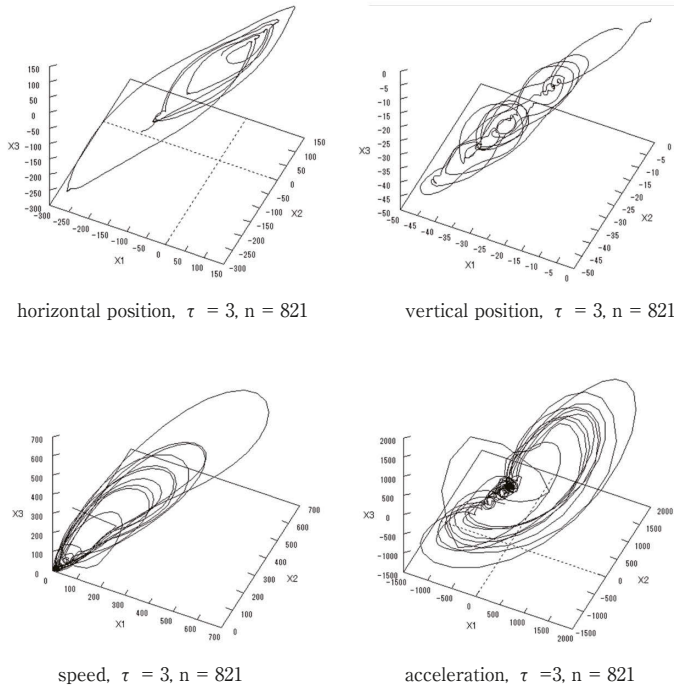
は、ビーズを挿入するピンが配置され、参加者の右下側になる。またトラッキングを示す Figure 2 から分かるように、集合した点群に左右の変動を確認できる。空間位置は左右の動きを表すが (Figure 2a)、速度や加速度は左右方向での動きの強弱を表している (Figure 2b,c)。ただ左右対称的に変動しているように見えるものの、加速度の図では、やや離れた領域を移動している点も認められる。これは、左右という決まった空間領域を行き交う中で、ある時点で同一ではない加速がかかったことが示される。

## 2) 非線形指標

水平、垂直位置と速さ、加速度のデータを用いた。Takens (1981) の埋め込み定理に基づき 3 次元の状態空間 (Figure 3) を再構成した。軌道の形成のされ方をフレームごとに時系列にみると、空間位置の内、水平位置のアトラクタは軌道

が中心へ収束していくが、垂直位置ではいくつかの渦が並列して構成されていくことが確認できた。また速さのアトラクタは原点へと収束する一方で、加速度では軌跡が多く集まっている中心領域から、周辺へと拡大していくことが認められた。

リカレンスプロットを描いたが、一様ではないが同型のパターンの繰り返しが認められた。リカレントプロットの定常性を仮定しているリアプノフスペクトラム推定を適用するには注意を要するが、アトラクタの特徴を抽出するために、最大リアプノフ指数を算出した。任意であるが  $\lambda$  が +0.08 以上をプラス、-0.08 以下をマイナスとして、それ以外の  $\pm 0.08$  の間の値をゼロとする基準を用いて、リアプノフスペクトラムを記号化した (Table 2)。最大リアプノフ指数が正であることが、カオス性を検討する上で重要とされるが、ここでは合原 (2000)、佐野 (1987) にならないリアプノフスペクトラムを用いて判断することにし



**Figure 3** Attractors and reconstructions. The upper left is based on the coordinates of the horizontal position, and the right is based on the vertical position. The lower left shows the speed attractor, and the right shows the acceleration attractor. If the lag is 1 ( $\tau = 1$ ), the trajectories slightly overlapped, so here we took  $\tau = 3$  and reconstructed the state space.

**Table 2** Lyapunov spectrum and coded patterns in the study 1.

	h-position		v-position		speed		acceleration	
$\lambda_1$	0.0908	+	0.0749	0	0.0969	+	0.1381	+
$\lambda_2$	-0.0128	0	-0.0418	0	-0.0569	0	-0.0794	0
$\lambda_3$	-0.1213	-	-0.1594	-	-0.3502	-	-0.5267	-

Note. h-position means horizontal position, and v-position means vertical one. Plus, minus and zero sign correspond to Lyapunov exponent.

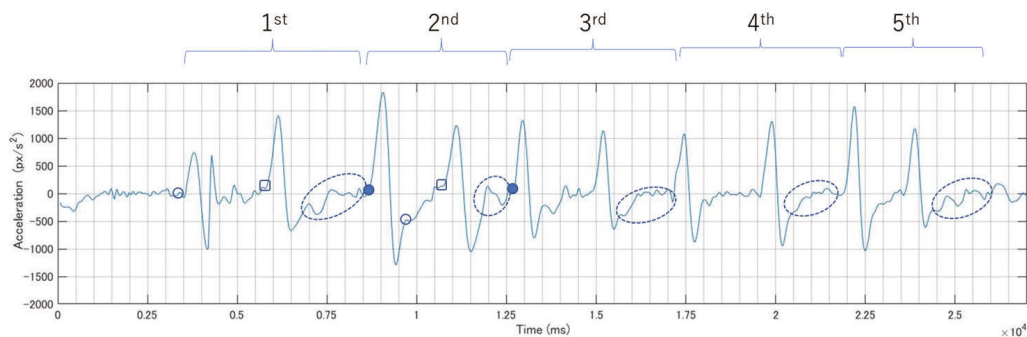
た。Table 2に見られるように、水平位置、速さ、加速度でカオス性が疑われるリアプノフスペクトラムのパターンが得られた。垂直位置はスペクトラムのパターンから準周期的アトラクタに区分した。

同じ空間位置、速さ、加速度のデータを用いて、スペクトル解析と自己相関関数の算出を行った。スペクトル解析の結果、空間位置ではピークは現れなかったが、速さ、加速度の時系列データとともに、12 Hzでピークが確認され、特定の周期の存在が示された。一方、自己相関関数はいず

れのデータも時間の増大とともにゼロに収束し、不規則な信号であることが分かった。

### 3) その他の特徴

動きの解析の中で、加速度の変化から動きに2種類あることが確認された。Figure 4に示すように連続的な加速の変化が見取れるが、波形をよく見ると、大きな振幅と小さな振幅とからなることがわかる。課題では5つのビーズを移し替えるものだったので、振幅のパターンから5つの周期に区分されることがわかる。更に詳細な部分に



**Figure 4** We captured the time-series changes in the acceleration of the head during the bead transfer task. Five trials were conducted. The depicted ○ is when the participant first places chopsticks into the bead container; □ is the moment participant grabbed the beads, the part enclosed by the dashed line is during the act of placing the beads into the pin; ● is the bead on the pin—it shows the time when the bead was inserted. In the first trial (1st), when the participant picks up the bead, it drops and the acceleration changes. Rapid acceleration and deceleration is observed when grabbing the bead (□) and moving it to the pin. This is followed by an elliptical area, where the bead must be carefully inserted into the pin; thus, the adjustment action appears as a subtle change in acceleration. Insertion into the pin is completed at the point indicated by ●. One cycle is shown from the chopsticks—from when they are placed into the bottle (○) to when bead is inserted into the pin (●). The dashed area of the ellipse and the process of extracting the pin (from the white circle to the white square) are delimited here as "stagnation."

目を向けると、ピンにビーズを入れるという微細な動きの振幅は小さく、ピンから箸を離して容器にビーズを取りに行く行為の際は大きな振幅で捉えられている。ビーズの移し替えの際に、容器内のビーズから別の場所の台座の上のピンに移し替えるという動作が、ビーズ掴みという微細な動きと、急いでガラス容器まで箸を持って移動する動きとが分離していた。ピンに入れようとする行為は小さいながら慎重さを要し、加速が調整されていることから、小さな「よどみ」のような動きとして捉えることができた。

### 考察

頭部での測定が手先の動きを反映していると推測できる結果を得たといえる。課題自体が移し替えであったので、自然に左の容器から右の台座の上のピンへの連続的かつ反復的な身体全体の動きが生じていた。頭部に付着したマーカーもそれに連動して左右の運動を描いたといえる。水平方向と垂直方向の相違は、上下より左右の動きの幅が大きく値に反映したといえる。ただし中には左右の定まった領域内の動きにとどまらず、別の動き

を示した軌道の存在は、おそらく作業中に行われた身体全体での微妙な調整的な動きを反映したものと考えられる。作業体制を整えるなどが主たる原因であろう。

非線形の指標であるリアプノフスペクトラムの結果からはカオス性が示唆された。任意に最大リアプノフ指数 ( $\lambda 1$ ) のカオス性の閾値をプラス 0.08 以上と定めたが、その妥当性についてはまだ議論が残るところではある。ただしこの基準で考えると、あまり動きの無かった空間位置における垂直だけ準周期アトラクタがみられ、他の水平位置、速さ、加速度においてストレンジアトラクタの特徴が見られた。スペクトル解析では位置、速さ、加速度のいずれでも、周期の存在が示されたことから、先にも触れた「よどみ」を含むリズミカルな運動の特徴も現れていたと捉えられる。また、アトラクタの構成の時系列的変化に特徴があり、速さの軌道は周辺から中心部の微小な値へと収束したが、加速度では中心から周辺へと拡散した。そして水平位置は中心部へ収束したが、垂直では収束でもなく拡散でもない並列的な螺旋の渦が形成された (Figure 3)。このことは、時間とともにより慎重に作業を進めるようになること



で、作業速度が抑えられた結果、再構成されたアトラクタの軌道は収束を描くが、逆に効率よく作業が進めれるようになってくると、ひとつの動きから別の動きへの変化（加速減速）の切り替えが早くなり、拡散がみられたものと推測される。水平位置での収束も、同様にして作業効率が水平方向に反映したため、垂直位置ではそうした効果はみられなかったと解される。

## 研究 2

先の実験では、頭部の揺れから手先の状態を検討したが、ここでは状況により異なる、手の動きを直接検討することを目的とし、演奏前の手ふりと演奏の際の手の動きとの違いを分析対象とした。同じく運動学的指標と非線形の指標を用いて空間内での動きの状態を捉えることにした。

## 方法

**参加者：**ウクレレの演奏の出来る 6 歳女児 1 名 (米国籍)

**材料：**Elvis Aron Presley の曲 'Can't Help Falling In Love' をウクレレ演奏する動画を分析対象とした。実際には、演奏前にカメラに向かって手

を振って挨拶をし (3 秒)、最初の部分の演奏 (8 秒) までの 11 秒間を対象とした。座位で正面からの映像であった。動画は Internet より入手した。

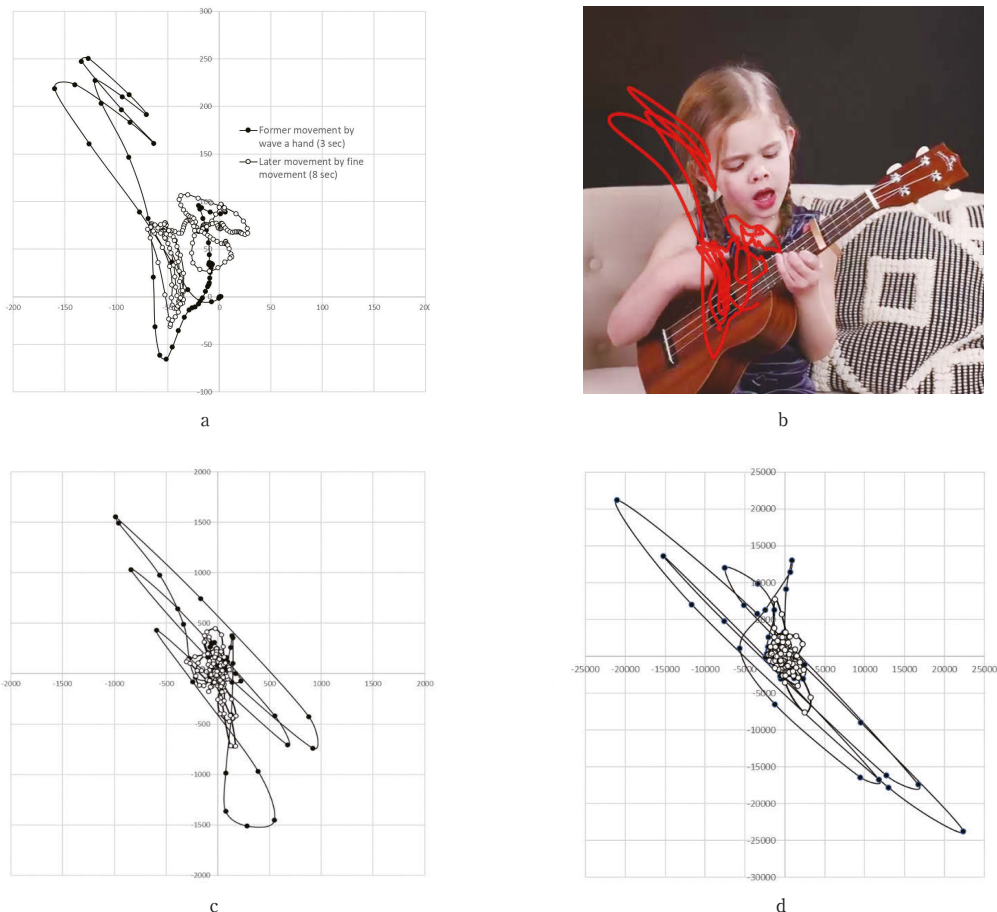
## 分析

分析には実験 1 と同じく Kinovea を用い、子どもの右手親指の爪の位置にマーカーを設定した。右手はウクレレの弦を弾く側となる。演奏中に親指が隠れた場合は位置を推定し 1 フレームずつトラッキングした。サンプリングレートは 24.4 Hz となった。指標として実験 1 と同じく、水平・垂直位置 (px)、速さ (speed, px/s)、水平・垂直の速度 (velocity) と加速度 (acceleration, px/s<sup>2</sup>) を求めた。ただし、映像には動きの性質の異なる手ふりと引き続き演奏とが含まれているため、それらを別のデータとして扱い、それぞれについての値を算出した。次に、非線形性での検討として、リカレントプロットで周期性・定常性を検討し、カオス性をリアプノフスペクトラム、アトラクタの形状と軌道において検討を行った。スペクトル解析では周期を調べ、自己相関関数の減衰の確認をとった。これも手ふりと演奏データ別に算出した。

Table 3 a Comparison of horizontal and vertical positions and former and later halves.

		h_position	v_position	between h and v
Whole	$\bar{X}$	-27.95	58.58	$t=24.46, p<.001$
	$s$	30.75	48.68	
	$s^2$	945.29	2369.93	$F=.40, p<.001$
	$n$	265	265	
Former	$\bar{X}$	-35.69	59.72	$t=9.02, p<.01$
	$s$	41.28	79.70	
	$s^2$	1704.04	6352.09	$F=.27, p<.01$
	$n$	72	72	
Later	$\bar{X}$	-25.07	58.16	$t=23.39, p<.01$
	$s$	25.27	30.15	
	$s^2$	638.57	909.02	$F=.70, p<.01$
	$n$	193	193	
between former and later	$t=2.05, p<.05$ $F=2.67, p<.001$	$t=.16, n.s.$ $F=6.99, p<.001$		

## 動きの運動学的・力学的指標と非線形的分析から推測される心的状態



**Figure 5** Figure (a) on the top left shows the changes in spatial position obtained by tracking markers. The picture (b) on the right is the actual situation. Before the performance (former) when the hand is waved, a prominent vertical movement can be seen. In the later part, the strings are plucked with the right hand, indicating that the movement was in a limited area. The index is  $px / s$ . The sampling rate was 23.8 Hz. Figure (c) of the bottom left shows the change in velocity. The former half spreads around the periphery, but the latter half converges in the center. The velocity in the former half fluctuates mainly in the vertical direction, but the velocity decreases in the later half and there is no directional deviation. The index is  $velocity / s$ . Figure (d) on the right side indicates changes in acceleration. Like the velocity, in the first half, there is a prominent change pattern in the vertical direction, but it is slightly left oblique, but in the second half, it is concentrated in the center. The index is  $acceleration / s^2$ .

### 倫理的配慮

参加児の保護者には連絡を取り、実験内容およびデータの使用用途の説明をし、動画及び写真の使用の同意を得た。

### 結果

#### 1) 空間位置・速度・加速度の変化

11秒の映像でのサンプリングレートは23.8 Hzであった。水平位置と垂直位置と比較したところ、Table 3aに示すように、全体では垂直位置の平均ならびに分散が水平位置より高い値となった ( $p < .001$ )。手を振る前半 (former) と演奏

Table 3 b Comparison of horizontal and vertical velocity and former and later halves.

		speed	h_velocity	v_velocity	between h and v
Whole	$\bar{X}$	188.59	-5.72	7.07	$t=.60, ns$
	$s^2$	84412.76	30595.20	89496.67	$F=2.93, p<.01$
	$n$	263	263	263	
Former	$\bar{X}$	364.36	1.66	30.32	$t=.55, ns$
	$s^2$	231317.72	99101.63	265933.94	$F=2.68, p<.01$
	$n$	71	71	71	
Later	$\bar{X}$	123.60	-8.44	-1.52	$t=.40, ns$
	$s^2$	15284.51	5620.60	25027.13	$F=4.45, p<.01$
	$n$	191	192	192	
between former and later		$t=4.16, p<.01$ $F=15.13, p<.01$	$t=.268, ns$ $F=17.63, p<.01$	$t=.512, ns$ $F=10.63, p<.01$	

Table 3 c Comparison of horizontal and vertical acceleration and former and later halves.

		acceleration	h_acceleration	v_acceleration	between h and v
Whole	$\bar{X}$	5.56	-7.51	-0.72	$t=.022, ns,$
	$s^2$	7539811.03	10004900.87	15957442.95	$F=1.59, p<.01$
	$n$	261	261	261	
Former	$\bar{X}$	9.23	4.23	15.01	$t=.009, ns,$
	$s^2$	22928509.57	36100083.02	53579182.15	$F=1.48, .05<p<.10$
	$n$	70	70	70	
Later	$\bar{X}$	4.22	-11.82	-6.49	$t=.043, ns,$
	$s^2$	1990960.12	580817.35	2378673.24	$F=4.10, p<.01$
	$n$	191	191	191	
between former and later		$t=.009, ns,$ $F=11.52, p<.01$	$t=.022, ns,$ $F=62.15, p<.01$	$t=.024, ns,$ $F=22.51, p<.01$	

している後半 (later) とともに、垂直位置の平均値が水平位置より高い値を示した ( $p < .001$ )。また、前半と後半の位置の平均を比較検討したところ、水平位置では前半と後半の間で差がみられたが、垂直位置ではみられなかった。分散では両位置とも後半より前半の方が高い値を示した ( $p < .01$ )。手ふりの動作が垂直的動きであったため、分散での差となっていた。

各運動学的指標について、軌跡の時系列的变化を、前半部を○、後半部を●のマーカーで示したのが Figure 5 である。空間位置についてみると、Figure 5a, b に示されるように、前半では右手をあげて手を振っていたので、その軌跡が大きく垂直方向 (やや左斜めから下) に描かれていること

がわかる。一方で後半では、右手はウクレレの弦を弾くことになるので、前半に比べて限定された領域での垂直方向の運動へと移っていることがわかる。

一方、速度でも、Table 3b に示したように、前半、後半ともに垂直方向の分散が水平方向に比べて高い値が得られ ( $p < .01$ )、前半後半を比較すると前半の分散の方が後半に比べ大きな値をとった ( $p < .01$ )。速度は時間に対する距離の比なので、手を振るという行為が弦を弾くよりも、単位時間当たりの運動範囲が大きくなることから当然の結果と言える (Figure 5c)。

また、加速度においては前半では平均値、分散ともに水平と垂直方向との間に有意差が無かった

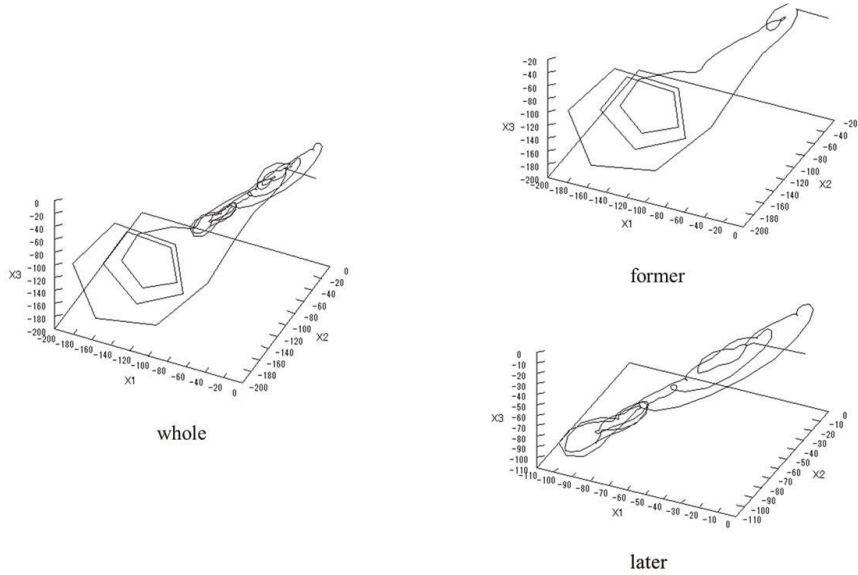


Figure 6 Attractor of horizontal position.

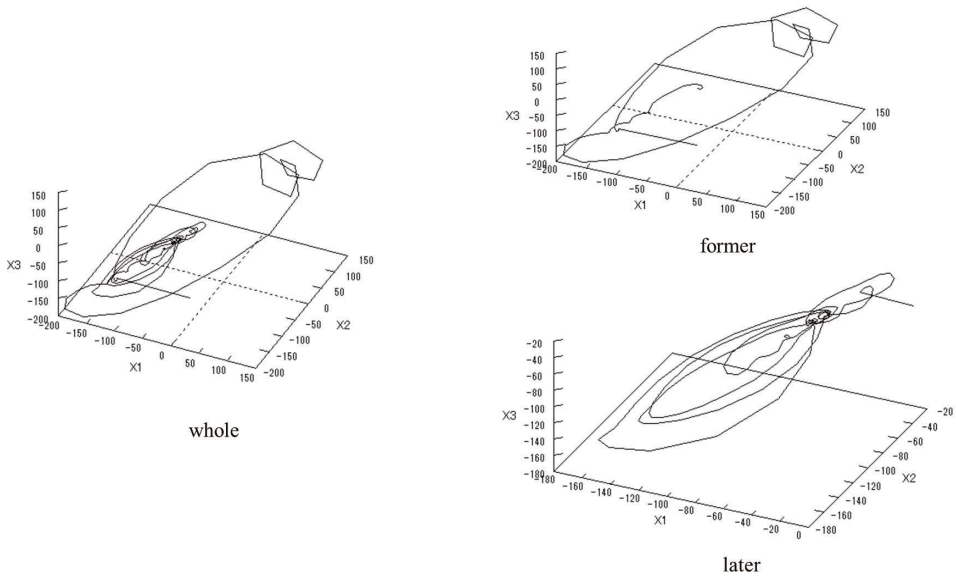


Figure 7 Attractor of vertical position.

が、Table 3c に示すように、後半では垂直方向の分散が水平方向より高い値を示した ( $p < .01$ )。前半では、手ふりでの加速度の変化は無かったが、後半になり垂直方向でのみ動きの緩急が生じて、加速度の違いとなって現れたといえる。加速度について前半後半の比較をしたところ、水平、

垂直方向ともに前半の方が後半より分散が大きかった ( $p < .01$ )。加速度の水平と垂直方向の時系列変化を Figure 5d にプロットした。前半後半の描き分けの仕方は空間位置の場合と同じである。手ふりという大きな運動の加速度の軌跡は、左上から右下の領域にかけて描かれている。加速

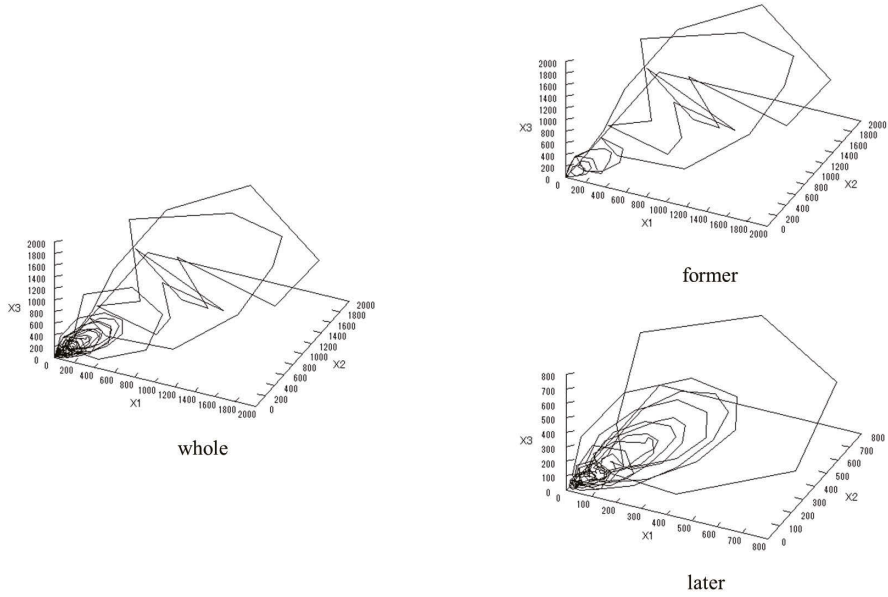


Figure 8 Attractor of speed.

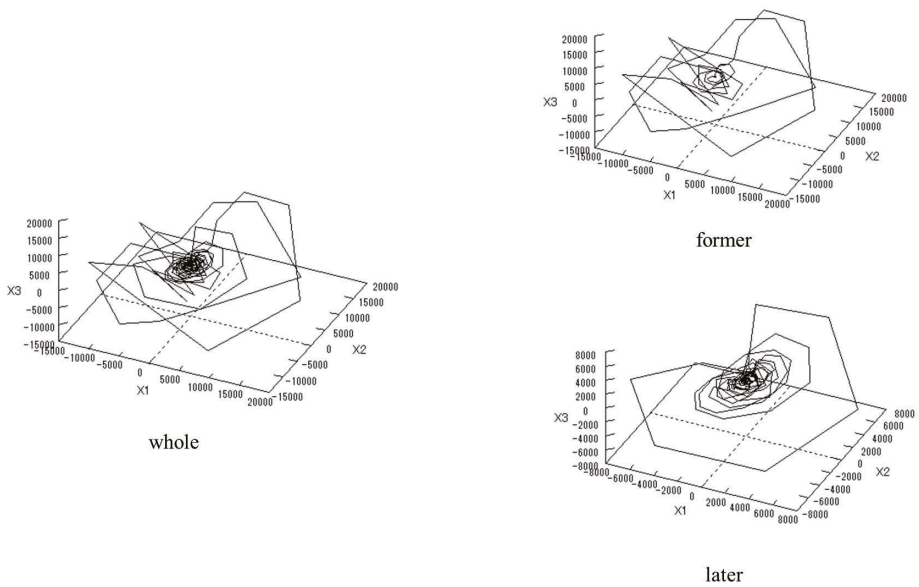


Figure 9 Attractor of acceleration

度であるので、加速と減速が水平垂直方向に交互に現れるパターンを示している。一方で、演奏での手のあり方は中心部に集中していて速度変化が限定されていることが分かるが、特定の空間位置内での細かな動きの状態となっていることがわかる。

## 2) 非線形指標

研究1と同じく  $\tau = 1$  で状態空間にアトラクタを再構成した。全体 (whole) と前半 (former)、後半 (later) に分け、それぞれの指標別に軌道を再構成したのが Figure 6~9 である。前半と後

半で縮尺が異なる。後半のアトラクタは、いずれも全体の中の限定された領域に集約されるように構成されていることが分かる。時系列に従って軌道の振る舞いを確認したところ、水平位置の前半ではアトラクタ左領域の6から5角形に収束し (Figure 6)、後半は研究1の垂直位置でもみられた、いくつもの渦が並列的に発生した。垂直位置の前半ではアトラクタの右上端の領域で収束がみられた後に左下へと拡大する軌跡がみられ、後半では中心部での渦巻が確認された (Figure 7)。速さの前半では、右上側の領域が収束するかたちで描かれたが、そのまま原点近傍に移り更に収束していった。後半は原点辺りから逆に拡大していく軌道が描かれた (Figure 8)。加速度では、前半は中心部への収束、後半は収束したところから逆に周辺へ拡大していく軌道が確認された。後半の水平位置を除くと、前半が収束、後半が拡大という軌道の違いがみられた (Figure 9)。

水平垂直及び前半後半でのそれぞれの成分について、リカレンスプロットを求めた。質感は一様ではなく同じパターンも全体としては現れなかった。非周期性、非定常性がうかがえた。研究1と同じ最大リアプノフ指数の基準を用いて、リアプノフスペクトラムのパターンを検討した。Table 4にそれぞれの力学的指標データのリアプノフ指数を整理した。煩雑を避けるために速さ、加速度は水平垂直方向に分けずに算出した。リアプノフスペクトラムの正負のパターンを見ると、前半部の垂直位置の変動でのみ、+0-の典型的なスト

レンジアトラクタであるカオス性が示された。基準を緩めて最大リアプノフ指数 ( $\lambda 1$ ) が正であるという性質だけに着目すると、+-のパターンが多く現れたことが分かる。全体でみると、水平位置、垂直位置、速さ (speed)、加速度 (acceleration) の全てで+-パターンが確認された。ただし前半部と後半部でみると、リアプノフスペクトラムの現れ方は異なっていた。前半部では水平、垂直位置、速さで最大リアプノフ指数 ( $\lambda 1$ ) が正の値を取ったが、加速度だけ0となった。後半部では加速度でのみ最大リアプノフ指数の正の値が認められ、他の水平、垂直位置、速さでのリアプノフスペクトラムは0--のパターンとなった。0--は、周期アトラクタと区別されるもので (合原, 2000; 佐野, 1987)、連続的に繰り返されるリミットサイクルの特徴が現れていた。加速度とそれ以外の指標とが前半・後半のリアプノフスペクトラムにおいて、対照的なパターンとなったことがわかる。

また、スペクトル解析をした後のピリオドグラムに基づき特徴を検討したところ、空間位置や速さでは明確なピークは確認されなかったが、加速度ではデータ全体で21 Hzと34 Hzの2つのピークが確認され、データの前半では5 Hzと10 Hzの2つのピーク、後半で16 Hzのピークが確認された。前半において2つの周波数成分が存在したが、後半では1つのより高い周波数へと変化したといえる。自己相関関数では全ての指標、条件で0に収束した。

Table 4 Lyapunov spectrum and coded patterns in the study 2.

		h_position	v_position	speed	acceleration
Whole	$\lambda 1$	.0916 +	.1286 +	.1383 +	.0838 +
	$\lambda 2$	-.1487 -	-.1423 -	-.2046 -	-.1075 -
	$\lambda 3$	-.5733 -	-.3976 -	-.7199 -	-.7912 -
Former	$\lambda 1$	.1205 +	.1572 +	.0909 +	.0223 0
	$\lambda 2$	-.0807 -	-.0108 0	-.4017 -	-.1416 -
	$\lambda 3$	-.4830 -	-.3144 -	-1.2432 -	-.6335 -
Later	$\lambda 1$	.0502 0	.0621 0	.0606 0	.1088 +
	$\lambda 2$	-.1568 -	-.1456 -	-.1356 -	-.2093 -
	$\lambda 3$	-.5731 -	-.5579 -	-.6974 -	-.8634 -

## 考察

楽器の演奏では、楽器の特性に身体の運動が左右される。手ふりの垂直方向での大きな動きと、ウクレレ演奏での垂直方向での細やかな動きを、空間位置の変化や速度、加速度のあり方から捉えることが出来た。典型的な粗大運動 (gross motor) と微細運動 (fine motor) の違いが運動指標に明確に現れたものといえる。

前半部での手ぶりという行為は、より広い空間内での行為であったが、弦を弾く方は、指の動きが限定された範囲内で、垂直方向に細かな遅速のある運動が生じていたことが推測される。パターンとしては明確な違いが得られている。ただ手ふりの前半部で、加速度の水平垂直の差が無かったことについては、両方向での相殺が推測される。Figure 5d を見ると、前半部はグラフの左上と右下との反復として描かれている。こうした結果を生じるのは、手を振る行為が日常よく行う動きの連続であったからかもしれない。一方で、音符に従った指運びは、定まったコードに従い、微細な運動を調整することが求められ、外的基準の無い自発的な運動とは異なる要因が働いていた可能性がある。

非線形の指標を用いると、加速度を除いて空間位置や速さでは、前半部でカオス性が認められ、後半になるとリミットサイクルになった。おそらく演奏時はトラッキングした側の右手の親指は、定型の動きを繰り返す運動であったために周期性が示されたのだろうが、演奏前に行ったカメラに向かって手を振る行為は、不安定な運動であったのかもしれない。また力学的指標の内、空間位置や速さと加速度とが手ふりと演奏とは異なる傾向を示した。このことから、2つの異なる行為を行っている際、心的な負荷の違いが指標に反映していた可能性も考えられる。

スペクトル解析からの示唆として、前半では繰り返された2種類の動きを捉えているようだ。手ぶり運動における、例えば手と腕のそれぞれの動きのように上肢の異なる部位が反映したのかもしれない。

れない。また後半では前半より周期の値が高くなっていることから、手を振るという大きく反復する運動から、指先での演奏という微細な反復的動きへと移ったことが原因しているのではないかとと思われる。

## 総合的考察

本研究は、遂行時において注意と手先の制御を要する反復課題 (研究1) と、楽器演奏に入る前の手ふりと演奏との比較 (研究2) について、頭部あるいは手が空間内をどのように動くか、運動学的、力学的な時系列的变化と非線形的指標を用いて分析し、行為者の心的状態を検討することを目的とした。

研究1において、力学的指標では左右の動きが顕著に現れた。そしてリアブノフスペクトラムあるいは最大リアブノフ指数から、水平位置、速さ、加速度でカオス性が認められた。また、状態空間に再構成されたアトラクタの軌道が収束あるいは拡散するという振る舞いがみられた。課題で行われた作業は左から右へのビーズの移し替えであるので、反復運動になるが、ビーズを箸で取る時や、ピンに挿入する時は、慎重に行わないと上手く進めることが出来ない。その意味で「よどみ」と呼んだ行為の調整が行われている間は、他の運動行為より、おそらく心的注意資源を消耗せざるを得なかったのではないかと考えられる。先行研究において見本合わせ課題を解く時、空間能力の高い学生は低い学生に比べて、最大リアブノフ指数が低いとする研究 (Barone et al., 2012; Maron et al., 2013) があった。Barone 達は EEG を使っているが、空間能力が低いと課題遂行でエネルギーをより多く消費すると考えている。認知的負荷がエネルギー消費に関連するという点からすると、本研究でのビーズの取り出しや挿入といった慎重さを要する作業が、最大リアブノフ指数の増大の要因になっていたのではないかと推測される。

また、Longo et al. (2018) は、両側的な反復運動の際、認知課題を行った群は行わなかった群

に比べて、最大リアプノフ指数が高くなることを見出し、認知課題と注意資源との間で干渉があったことを想定している。彼らは、認知課題として逆数唱するといった妨害的な状況が与えられていたので、認知的負荷が生じ最大リアプノフ指数へ影響するという結果が得られたといえる。つまり、先行研究 (Barone et al., 2012; Longo et al., 2018; Maron et al., 2013) でみられたように、認知的資源と最大リアプノフ指数とが関連する結果を得たものと考えられる。

一方で、容積脈波からの知見も同様の側面を指摘しているかもしれない。タイミングを判断させる課題でのエラーが多いと、最大リアプノフ指数が高くなる (Imanishi & Oyama-Higa, 2006) というのも、課題で失敗することに気を取られ、それが心的負荷となっていると考えるならば、本研究と同じ側面を見ていたのではないかと思われる。しかし、連続作業であるクレペリンを終えた後に、最大リアプノフ指数が上昇するという研究報告 (雄山, 2006; Oyama-Higa & Miao, 2006) については、単純に、注意資源の消費では説明がつかないように思われる。クレペリン自体は、それほど多くの注意を要せずに行える単純加算であるので、逆の結果になったのかもしれない。クレペリン課題の作業の性質は検討すべきであろう。

本研究で確認された、速度における「収束する軌道」と加速度での「拡大する軌道」についてだが (研究1と研究2の一部)、作業の進行とともに注意の集中や切り替えといった、いわば習熟度が上昇してきたことと関係するのではないかと推測される。本課題において、反復作業が進むにつれて習熟していくと同時に、失敗しないよう注意を払い続け慎重になっていくだろうことから、計測上は速さの低下がもたらされ、状態空間に表現されたアトラクタの軌道の収束として現れたのだろう。そしてまた、速さ自体は低下していくものの、作業の習熟が進むにつれ、より細かな作業のステップ間の切り替えに要する速さが増大し、その差分としての加速度の上昇が、軌道の拡大として現れたのではないかと推測される。空間位置は直接的に速さと連動しているため、変動の大き

かった水平位置の軌道においてのみ速さと同じく軌道の収束がみられたといえる。

研究2では、特に手を振るという行為と演奏との違いが線形、非線形指標に反映された。サンプリングデータには明確に異なる2種類のプロフィールが描かれた。粗大運動と微細運動という区分けの仕方がそのまま当てはまるものであった。分散に示されるように (Table 3a, b, c), 捉えられた動きは左右方向よりは上下方向での運動が顕著に現れ、前半の方が後半より大きな変動を示した。リアプノフスペクトラムでは、空間位置や速さと加速度との間で、対照的パターンが現れていた (Table 4)。空間位置と速さは、前半部でカオス性が認められ、後半でリミットサイクルとなったが、加速度は前半がリミットサイクルで、後半にカオス性が現れていた。

こうしたカオス性の対照的な現れ方であるが、前半の周波数分析から、手や腕をふる動きは2つの動きから成ることが予想された。前半に限って言うと、状態空間に構成されていくアトラクタの変化のあり方から、加速度を除く空間位置や速さで、状態空間の2領域において別々のまとまった構成が行われる様子が確認できた。つまり、時間とともにある領域でのまとまった軌跡から別の領域を構成する軌跡へのシフトが認められ、Figure 6, 7, 8に示されるように、前半内でのアトラクタの構成では軌跡の振る舞いが2分されていた。一方、加速度は前半でリミットサイクルを示し、アトラクタは中心へと収束する軌跡が構成された (Figure 9, Table 4)。

後半の演奏では微細な動きが求められる中、手の動きを状態空間に再構成すると、加速度では収束と拡大の両方の時系列変化を伴った軌道が現れていた。最大リアプノフ指数はカオス性を示していたが、ひとつの状態空間内に軌跡の収束・拡大といった反対方向の振る舞いが存在していたことが原因していたと推測される。空間位置や速さの状態空間では、水平位置での渦をのぞいて、加速度でみられたような相反する軌跡の動きは認められず、拡大する軌跡が構成された。

空間位置と速さは、加速度とは異なる心的負荷



の状態を捉えているのかもしれない。先行研究の多くが容積脈波や脳波等の生理指標から、心的状態を推測しているが、力学的指標で捉えた Longo et al. (2018) によると、生理的指標と同じく、認知的負荷がかかると最大リアプノフ指数が低下してくることが指摘されている。また野田 (2023) もメンタルローテーションで用いた刺激の勾配に従って、つまり課題の困難度が上昇するにつれ、アトラクタが周期的なものからストレンジアトラクタへと変化することを見出している。その結果は、言い換えると、課題の負荷が最大リアプノフ指数を正の値へと変化させたことを示している。

後半での演奏では、連続した的確な指の動きをしなくてはならない。手ふりに比べて速さは無いが、短時間で指のあり方を切り替えていかなければならないという点では、研究1における習熟した際の箸の動きの切り替えとも類似している。短い時間で指や手の動きを制御しなくてはならないという点で、研究1と同じく、注意の集中や注意の切り替えが、速度の変化である加速度に表れた可能性がある。

整理すると、本研究では、力学的な指標を用いて状態空間に軌道を再構成したところ、特徴的なアトラクタの振る舞いが確認された。ただし局所的力学的安定性は、Longo et al. (2018) が言うように、課題の試行ごとに切り分けられた中で確認されたものであった。局所性は、研究1では課題を通じての各試行であり、研究2では前半と後半であった。発達の変化をみたわけではないが、Thelen & Smith (1994 小島監訳 2018) や Thelen & Smith (2006) が言うような、生成と崩壊を繰り返す限定的な部分に存在する状態空間を、本研究では5試行の課題の中や、演奏の前半と後半に置き換えてみた。研究1では、試行が進むにつれ、おそらく習熟度が高まるにつれ、状態空間に再構成されたアトラクタは収束と拡大という異なる軌道を描いた。それは作業が早くなるだけでなく、移し替えるという一連の動きのひとつひとつの切り替えが早くなっていくという精緻化が、速さにおいては軌跡の収束、加速度においては軌跡の拡大につながったと解釈できた。おそらく、緊

張や多くの注意資源の動員が行われた結果、最大リアプノフ指数も高い値となって表れたと捉えられる (野田, 2023)。研究2では、前半と後半で手ふりと演奏という質的にも違う行動であったが、連続した行動を区切ることで、より操作的に局所的な状態空間の場を設定することが出来た。非線形分析では、前半はアトラクタの収束となり後半は拡大となった。興味深いのはカオス性に関して、加速度とそれ以外の指標では、前半と後半で反対のパターンを示したことだった。このことから、行動の質的な違いにより、カオス性を捉える上で、それぞれに適した指標がある可能性が示唆された。

本研究は、新しい挑戦的な試みであったが、今後、DCD研究の知見からも示されるように、不器用さとそれに関連する身体動揺 (野田, 2021, 2022) からの検討も有用になるのではないかと考えられる。また身体制御の前提にある注意の集中や切り替え (野田・落合, 2017) といった自己制御 (self-regulation) のあり方を非線形的手法で、明らかに出来ることが考えられる。

#### 謝辞

本研究は科学研究費 (課題番号: 19K11603) の助成を受けた。また、株式会社あいはらの高橋純氏から技術的なコメントいただいた。参加協力いただいた Claire Crosby 氏、Dave Crosby 氏に感謝します。We would also like to thanks to Claire Crosby and Dave Crosby for their participation and cooperation. We would like to thank Editage ([www.editage.com](http://www.editage.com)) for English language editing.

#### 《注》

- (1) スカラー量の速さ (speed) とベクトル量の速度 (velocity) とは漢字表記を変えている。

#### 引用文献

- 合原一幸・池口徹・山田泰司・小室元政 (2000). カオス時系列解析の基礎と応用 産業図書  
 馬庭芳朗・天田実志・内田一郎・太田祥一・布川寿恵 (2003). 医療におけるカオスと複雑系 (<特集> カオスと複雑系) 知能と情報, 15, 635-642.  
 Barone, D. A. C., Maron, G., & de Almeida Ramos, E. (2012). Measuring the Differences between Spatial Intelligence in Different Individuals using Lyapunov Exponents. Paper presented at

- 7th International Conference on Mass Data Analysis of Images and Signals (MDA 2012) (pp. 10-24).
- Chu, M., & Kita, S. (2008). Spontaneous gestures during mental rotation tasks: insights into the microdevelopment of the motor strategy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137, 706.
- Crosby, C. (2019, March 9). *Can't Help Falling In Love - Elvis Cover by 6-Year-Old Claire Crosby* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=VIPdfLr1FSo>
- 藤田悦則・小倉由美・落合直輝・安田栄一・土居俊一・村田幸治・亀井勉・上野義雪・金子成彦 (2004). 指尖容積脈波情報を用いた長時間差座疲労の簡易評価法の開発 人間工学, 40, 254-263.
- Gessell, A., Thompson, H., & Amatruda, C.S. (1934). *Infant behavior: Its genesis and growth*. New York; McGraw-Hill. (ゲゼル, A・トンプソン, H・アマトゥルーダ, C.S. 新井 清三郎 (訳) (1982). 小児の発達と行動 福村出版)
- Gesell, A., & Amatruda, C.S. (1956). *Developmental Diagnosis: Normal and Abnormal Child Development: Clinical Methods and Pediatric Applications*. New York; Paul B. Hoeber Inc. (ゲゼル, A・アマトゥルーダ, C.S. 佐野 保・新井清三郎 (訳) (1970). 発達診断学—小児の正常発達と異常発達— 日本小児医事出版社)
- Göksun, T., Goldin-Meadow, S., Newcombe, N., & Shipley, T. (2013). Individual differences in mental rotation: what does gesture tell us? *Cognitive processing*, 14, 153-162.
- Haken, H. (1996). *Principles of brain functioning: a synergetic approach to brain activity, behavior and cognition*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (ハーケン, H, 奈良重俊・山口陽子 (訳) (2013). 脳機能の原理を探る：非平衡協同現象としての脳神経活動・行動・認識 丸善出版)
- Harbourne, R. T., & Stergiou, N. (2003). Nonlinear analysis of the development of sitting postural control. *Developmental Psychobiology: The Journal of the International Society for Developmental Psychobiology*, 42, 368-377.
- Imanishi, A., & Oyama-Higa, M. (2006). The relation between observers' psychophysiological conditions and human errors during monitoring task. *Paper Presented at 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 3, pp. 2035-2039). IEEE.
- 今西明・雄山真弓 (2008). 生理心理学における新たな解析手法の提案：生体信号のカオス解析 人文論究, 58, 23-42.
- 石山さゆり・岩永浩明・田原孝・清岡佳子・大橋一友 (2018). 胎児と母は決定論のカオスである：サロゲート法による解析. 看護理工学会誌, 5, 74-79.
- Ishiyama, S., Tahara T., Iwanaga, H., Kiyooka, Y., & Ohashi, K. (2020). Emotional Changes in Fetuses and Mothers over the Course of Pregnancy: Chaos Analysis of Heart Sounds. *International Journal of Caring Sciences*, 13, 1545-1554.
- 河合優年 (2008). 発達心理学とダイナミカルシステム理論. 岡林春雄 (編) 心理学におけるダイナミカルシステム理論 (pp. 65-81) 金子書房
- Longo, A., Federolf, P., Haid, T., & Meulenbroek, R. (2018). Effects of a cognitive dual task on variability and local dynamic stability in sustained repetitive arm movements using principal component analysis: a pilot study. *Experimental Brain Research*, 236, 1611-1619.
- Maron, G., Barone, D. A., & Ramos, E. A. (2013). Spatial cognition degree of development classification Using artificial neural networks and largest Lyapunov exponents. *Paper Presented at 2013 BRICS Congress on Computational Intelligence and 11th Brazilian Congress on Computational Intelligence* (pp. 495-500). IEEE.
- Merce, C., Branco, M. A., Seabra, A. P., & Catela, D. (2018). Postural Control in Developmental Coordination Disorder and Typical Children: A Systematic Review. *Journal of Yoga, Physical Therapy and Rehabilitation*, 2018, 1-8.
- 野田満 (2015). 発達のみにイメージ変換におけるからだの動き 江戸川大学紀要, 25, 145-157.
- 野田満 (2015). 身体性とイメージ「ひきうつし」という手操作方略のイメージにおける役割— イメージ心理学研究, 13, 29-33.
- 野田満・落合洋子 (2017). 幼児期におけるメンタルローテーションと自己制御との関連性 江戸川大学紀要 27, 309-319.
- 野田満 (2021). 重心動揺における軌跡の幾何学的分析からみられる姿勢の非線形的特徴 - ASD 児, ID 児, 大学生の比較 - 31, 17-30.
- 野田満 (2022). 幼児期における対象イメージの操作と不器用さとの関連性 江戸川大学紀要, 32, 129-140.
- 野田満 (2023). 幼児におけるイメージ変換と非線形解析による準備的研究 日本発達心理学会第 34 回大会発表論文集
- 岡林春雄 (2008). ダイナミカルシステム・アプローチ (DSA) の概念と歴史的流れ 岡林春雄 (編) 心理学におけるダイナミカルシステム理論 (pp. 3-25) 金子書房
- 雄山真弓 (2006). 脈波の「ゆらぎ」を用いた精神健康度自己チェックの可能性 第 12 回公開シンポジウム「人文科学とデータベース」人文系データベース協議会, 12, 31-38.
- Oyama-Higa, M., & Miao, T. (2006). Discovery and

- application of new index for cognitive psychology. *Paper Presented at 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 3, pp. 2040-2044). IEEE.
- Oyama-Higa, M., Miao, T., & Mizuno-Matsumoto, Y. (2006). Analysis of dementia in aged subjects through chaos analysis of fingertip pulse waves. *Paper Presented at 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 4, pp. 2863-2867). IEEE.
- Oyama-Higa, M., Tsujino, J., & Tanabiki, M. (2006). Does a Mother's Attachment to Her Child Affect Biological Information provided by the Child? *Paper Presented at Chaos analysis of fingertip pulse waves of children-2006 IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*.
- 佐野雅己 (1987). カオスの構造とフラクタル 高橋秀樹 (編) フラクタル科学 (pp. 58-116) 朝倉書店
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In D.A. Rand & B.S. Young (Eds.), *Dynamical system and turbulence, Lecture Notes in Mathematics*, 898 (pp. 366-381). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 田原孝 (1995). 臨床におけるカオスの応用. *バイオメカニズム学会誌*, 19 (2), 105-116.
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT press. (テーレン, E・スミス, L.B. 小島康次 (監訳) 高橋義信・丸山慎・宮内洋・杉村伸一郎 (訳) (2018). 発達へのダイナミックシステム・アプローチ: 認知と行為の発生プロセスとメカニズム 新曜社)
- Thelen, E., & Smith, L. B. (2006). Dynamic Systems Theories. In R. M. Lerner & W. Damon (Eds.), *Handbook of child psychology: Theoretical models of human development* (pp. 258 - 312). John Wiley & Sons Inc.
- Tsuda, I., Tahara, T., & Iwanaga, H. (1992). Chaotic pulsation in human capillary vessels and its dependence on the mental and physical conditions. *Paper Presented at the Annual Meeting of Biomedical Fuzzy Systems Association: BMFSA 4* (pp. 1-40). Biomedical Fuzzy Systems Association.

## Mental States Inferred from Kinematic and Mechanical Indices of Movement and Nonlinear Analysis

–A preliminary study based on two cases–

Mitsuru Noda

This study aimed to analyze the bead transfer task (Study 1) and ukulele performance (Study 2) using mechanical and non-linear indexes, and to examine the state of mind. The largest Lyapunov exponent in Study 1 was positive for horizontal position, velocity, and acceleration, but negative for vertical position, confirming chaoticity. However, when the attractor's trajectory was reconstructed in state space, the difference appeared as convergence in velocity and expansion in acceleration. It reflected prudence and switching speed as it gained proficiency. In Study 2, the distinction between gross and fine movements was evident between the first gesture and performance. Chaos was observed in spatial position and velocity in gestures, but only during ukulele performance acceleration. Chaotic behavior appeared differently depending on the dynamic index, but unlike hand gestures, finger control during performance resulted in discontinuous changes in speed, and acceleration had a high largest Lyapunov exponent, expressing chaos. We discovered a relationship between attentional resources and the largest Lyapunov exponent and confirmed that the appearance of attractors varies with the motor index.

**Key words:** trajectory, chaos, largest Lyapunov exponent, attractor, attention