

## 指尖脈波に現れる思考リズム

前田 優輔<sup>1</sup>・鈴木 平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 桜美林大学 健康心理・福祉研究所・<sup>2</sup> 桜美林大学 心理・教育学系)

### An investigation of thinking rhythm monitored by finger plethysmogram

Yusuke Maeda<sup>1</sup>, Taira Suzuki<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Health Psychology and Welfare Laboratory, J. F. Oberlin University,

<sup>2</sup>Divisions of Psychology and Education, J. F. Oberlin University)

キーワード：思考、リズム、ゆらぎ、カオス

#### 抄録

これまでの研究で、心的活動である思考は身体的なリズムに影響を与えることが示唆されている。本研究ではダイナミカルシステム・アプローチの観点から指尖脈波を用いて思考中の生体リズムの変化の特徴を明らかにすることを目的とし、最大リアプノフ指数とKSエントロピーを中心に、思考中の生体リズムがどのように変化しているのかというメカニズムについて検討した。

実験は大学生7名を対象に行った。実験課題には長谷川式簡易スケールで使用される計算課題と、4種類のクイズ課題を使用し、単純思考課題と複雑思考課題と表した。各課題中には指尖脈波の測定を行い、思考中の変化をリアルタイムな時系列データとして捉えた。時系列データに対してはカオス解析を通して最大リアプノフ指数とKSエントロピーを算出した。また、リズムの特徴を観測するために、微視的発生研究デザインに基づいた最大リアプノフ指数の時系列データのトレースを行うと同時に、データの傾きを求めた。

本研究を通して、計算課題時には安静時と比べて最大リアプノフ指数とKSエントロピーに有意な変化は見られなかったが、クイズ課題時には最大リアプノフ指数が増加し、KSエントロピーが減少していたことが明らかとなった。また、最大リアプノフ指数の時間推移について、単純思考的な計算課題時には右肩下がりに減少していくという変化が対象者間で類似の特徴として見られたが、複雑思考的なクイズ課題時にはクイズの種類や内容によって変化が異なることに加え、同一課題であっても対象者によって異なる変化を示していたことが分かった。

## 1. 問題提起

「生きているシステム」とは、時間とともに絶えず変化するような系の自己内部と外部の間にやりとりの存在する開放系のことを指す。これまで私たち人間をはじめとする生命のような「生きているシステム」として、生きているというのは安定している状態が正しいと考えられてきた。例えば、ホメオスタシスという観点ではある一定の状態が健康とされ、その正常値から外れる変化が起きた場合に、それを負のフィードバックによって打ち消すことで一定の状態を維持しようとしていると考えられた。従って、正常値から外れれば不健康であり、良くないと見做されるのである。しかし、生命の振舞いにはゆらぎが常に含まれている。先の考えに則ればゆらぎは正常値から外れる変化であり、邪魔なものとして見做される。従来、ゆらぎは「決定論的な予測からのズレを含むような時間的または空間的な変化」(武者, 1998)として、不規則さや複雑さを生み出す要因になると考えられていたためである。その一方で、臨界ゆらぎというものが存在する。ある一定の閾値までゆらぎが大きくなるとシステムの質的な状態が切り替わる。このことから、ゆらぎが大きい状態というのは不安定な状態であると同時に質的な変化に繋がる可能性を内包していると考えられる。

このようなシステムの特徴を明らかにするために、ダイナミカルシステム・アプローチ(Dynamical Systems Approach)と呼ばれる変化の非線形性に着目した手法がある。ダイナミカルシステム・アプローチは変化の記述に関する分析手法や考え方の総称であり、還元的な手法とは異なる(岡林, 2008)。例えば、ダイナミカルシステム・アプローチではリアルタイムな変化を追うにあたって、非線形解析をはじめとする分析手法が用いられる。中でも非線形性の特徴の一つにカオス(Chaos)と呼ばれる現象がある。カオスとは決定論的な法則に従っているにも関わらず、予測できない振る舞いを示すような現象である。この現象を解析するために行われるカオス解析では対象となる時系列データに見られる軌道不安定性を捉えるために、まず遅延時間と埋め込み次元に基づいて位相空間内にアトラクターの再構成が行われる。一般的にある時刻におけるシステムの状態は位相空間内に一つの点として表現され、各点を結んだものを軌道として描くことができる。これによって時系列データの変化を視覚化することができ、その質的な特徴をアトラクターの形状から分類することが可能になる。次にリアプノフ指数(Largest Lyapunov Exponent)とKSエントロピー(Kolmogorov-Sinai entropy)の算出を行うことで、時系列データの振舞いに潜む決定論的なからくりを理解しようとする。リアプノフ指数とは初期値の鋭敏製によって起こる予測不可能に見える軌道の拡大率を定量化する指標であり、対象の時系列データがカオスであればリアプノフ指数は正の値になる。この正のリアプノフ指数は最大リアプノフ指数と呼ばれる。また、リアプノフ指数の逆数からKolmogorov-Sinaiエントロピーを求めることができる。KSエントロピーは予測の臨界時間を与えるという意味でその予測可能性の限界を定量化する指標となり、値が大きければ、その逆数で臨界時間は減少するため、カオス応答を示す場合には短時間でしか予測できないことを示している(池口・山田・小室, 2000)。そのため、KSエントロピーもまた最大リアプノフ指数と同様に予測不可能性を示唆する指標のひとつとなる。一般的に生きているシステムにはカオス性の振舞いが見られる。

例えば, Goldberger, Rigney, Mietus, Antman, & Greenwald (1988) や Goldberger, Rigney, & West (1990) は健康な時の心拍に見られるゆらぎはカオス的であるが, 突然死や心不全発症の前にゆらぎが周期的になったり大きく減少していたことを報告している。このようなゆらぎや複雑さを表す指標として前述した最大リアプノフ指数やKSエントロピー, アトラクターを用いることができる。最大リアプノフ指数とKSエントロピーは時系列データの複雑さを定量化する指標であると同時に, 生体におけるゆらぎや構造の状態を示す特徴量としても用いられる。アトラクターはデータを相空間上にプロットした時の変化の軌道の集合であり, 質的な側面からその特徴を捉える指標として用いられる。劉・鈴木 (1997) は幼児・成人・高齢者それぞれの安静時における心拍時系列データから最大リアプノフ指数とリアプノフ次元, KSエントロピーの算出を行ったところいずれも幼児の方が高く加齢に伴って減少することを報告している。また, 田原 (1995) は指尖脈波のアトラクターから, 疲労時, 被ストレス時, 不健康時, 老化によってアトラクターが単純化し, カオスの複雑さが低下していたことを明らかにしている。雄山 (2012) は最大リアプノフ指数の値が大きいほどアトラクターの変動は大きく, ゆらぎの幅が大きいと述べている。その上で, 健康者の方がうつ病患者と比べて指尖脈波から得られた最大リアプノフ指数の値が高く, アトラクターの変動幅も大きかったとしている。これらのことから, 一定値を刻み続けるのではなく, ゆらぎが含まれている変化の方が「生きているシステム」にとっては健康的で適応的な状態であると考えることができる。田原 (1995) は従来のホメオスタシスという概念にかわって, 生体はある状態を定常的に一定に維持するのではなく, 動的なゆらぎによって生命が維持し, コントロールされ, 健康状態が保たれているというホメオダイナミクス (Homeodynamics) を提唱している。このように生体信号が規則的な変化ではなく常にゆらぎを伴っており, カオス性の振舞いを示すことが明らかとなっている。

その中, 近年では生体リズムに着目し, リアルタイムな変化から質的な構造が組みあがるメカニズムを理解しようという試みが行われている。人間を含めた生物は様々なリズムを持っており (郡・森田, 2011; 蔵本, 2007, 2014), そのような生体リズムの例として概日リズムや歩行, また先にあげた生体信号の心拍や脈波などが挙げられる。一般的にリズムとは規則性をもった時間的な変化を指していると考えられているが, 私たち生命のような生きているシステムにおいては常にゆらぎをともなっているのもまた事実であった。リズムは自己内部と外部の間で起こるエネルギーの流入と流出という循環サイクルの中で発生する (図1)。生体信号も例に漏れず何らかのエネルギーの流入と流出によって起こり, リズムの生成をしていると考えられる。

また, エネルギーの流入と流出にともなってリズムが発生すると同時にシステム内部に貯蔵されるエントロピーにも変化が起こる。エントロピーは乱雑さを表す指標である。エントロピーが増大するということは無秩序になることを意味している。一般的に, 物質のような系の自己内部と外部の間にやりとりの存在しない閉鎖系では, エントロピーは増大すると考えられているが, 系の自己内部と外部の間にやりとりの存在する「生きているシステム」のような開放系においてはその限りではない。系とそれを取り巻く外部環境という全体としては大局的にエントロピーは増大しているが, 系の自己内部だけに目を向けたとき, やりとりによってエントロ

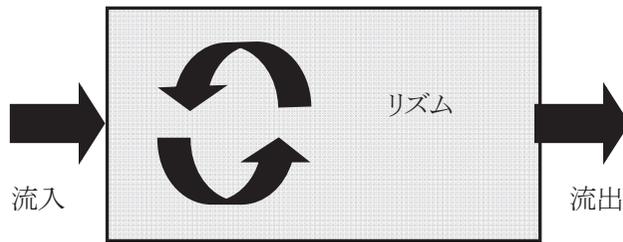


図1 エネルギー循環とリズム発生機構 (北畑・吉川 (2005) を参考に作成)

ピーを外部に放出することで局所的にエントロピーが減少しているのである。これによって開放系は閉鎖系と違って部分的な秩序化が生じ、同時に多様な変化が可能になっている。

本研究では心の活動である思考もまた生体リズムから捉えられると考える。思考を先のリズム発生機構から捉えようとした時、情報の流入と流出という同型のサイクルから生まれると仮定することができる。情報はエントロピーと置き換えて考えることができる。情報をため込むことはシステム内部のエントロピーが大きくなっていくことであり、思考が一様になっていくこととも言換えることができる。たくさんの知識や技術を情報としてインプットするまではよかったが、うまくアウトプットできずにためこんでしまい八方ふさがりになっている状態とも言えるかもしれない。逆に、システム内部のエントロピーが小さくなっていく状況というのは、インプットした知識・技術をうまくアウトプットできている状態と見做せる可能性がある。

思考をリズムとして捉えるにあたって生体信号を用いて観察することは有用である。例えば、Sakamoto, Katori, Yoshida, Aihara, & Mushiake (2013) は動物実験を通して、問題解決中の前頭前野の神経細胞活動における発火現象の研究から、ひらめきの直前に臨界ゆらぎが見られたことを報告している。このように思考に対して中枢神経系からのアプローチが主に行われている一方で、指尖脈波に中枢情報が含まれていることが示唆されている (Miao, Shimoyama, & Oyama-Higa, 2006)。実際に思考中の指尖脈波を測定すると、指尖脈波から得られる最大リアプノフ指数の値が課題の内容や特徴によって異なる変化をすることがこれまでの研究より報告されている。前述したように、最大リアプノフ指数はゆらぎの指標として用いられており (雄山, 2012), 岡林 (2015, 2016) は課題の違いが指尖脈波の振舞いに特徴が現れることを示唆している。Miao, Oyama-Higa, & Sato (2010) は指尖脈波を用いて周期的振る舞い、カオス的な振る舞い、ランダムな振る舞いという3種類の異なる振舞いをするトラッキング課題を行っている最中のリズムの変化が課題によって異なることを明らかにしている。また、前田・鈴木 (2017) は内田クレペリン作業検査で用いられる加算課題と OECD (2013) の提出したドラフトに含まれる創造課題を用いて、指尖脈波にあらわれる思考中のリズムの特徴について研究を行い、加算課題では最大リアプノフ指数が減少していた一方で、創造課題では増加傾向にあったことを報告している。このことから、解決に求められる思考が異なる課題では思考中の生体リズムの変化も異なることを示唆している。このように思考中のリズムの変化や特徴は中枢神経系からだけな

く指尖脈波や耳朶脈波のような末梢神経系からのアプローチでも追究できると考えられる。

これらのことから、ダイナミカルシステム・アプローチの観点から、単純な思考を要する課題と複雑な思考を要する課題を用いて、各問題解決中の生体リズムがどのように変化しているのか検討する。生体リズムの測定にあたっては末梢系生体信号の一つである指尖脈波を用いることとする。測定された時系列データについては、カオス解析を用いて最大リアプノフ指数だけでなくKSエントロピーも合わせて算出することで思考の違いに伴う変化の生体リズムの特徴について、多面的に評価していく必要がある。また、ダイナミカルシステム・アプローチにおける質的な分析手法として微視的発生研究デザインがある。微視的発生研究デザインは変化の様子を変化前と変化後の結果を比較するだけでなく、変化の起こる直前と直後の様子に注目しながら観察することで、変化を含んだ大きな流れの中からその特徴を捉えようとする分析手法である (Fogel, 2008)。本研究ではカオス解析によって得られた最大リアプノフ指数の時系列データの全体を見ることで最大リアプノフ指数の平均値だけでは見ることのできない特徴を明らかにしたり、時系列データを被対象者間で重ね合わせることでリズムの変化の仕方の共通点や相違点について検討する。それによって課題によってリズムに表れる特徴を追究したい。

以上より、本研究ではダイナミカルシステム・アプローチの観点から指尖脈波を用いて思考中の生体リズムの変化の特徴を明らかにすることを目的とした。そこで単純な思考を要する計算課題と複雑な思考を必要とするクイズ課題を用いてそれぞれの思考リズムの変化を検討することとした。前田・鈴木 (2017) や岡林 (2015) の報告のように計算課題時には指尖脈波の最大リアプノフ指数は減少し、クイズ時には増加することが推測される。しかし、最大リアプノフ指数の変化を通してゆらぎが増減したという研究報告はあっても、心理学研究においてなぜゆらぎが増減するのか言及したものは多くない。そこで、本研究では最大リアプノフ指数だけでなくKSエントロピーをあわせることで多面的に、リズムが変化するメカニズムについて検討した。

## 2. 方法

### 2.1. 実験協力者

首都圏の大学に所属する学士課程3年生7名(男性1名, 女性6名, 平均年齢21.00歳,  $SD = 0.93$ )であった。

### 2.2. 日時と場所

2016年10月12日, 都内A大学心理学実験室にて。室温はエアコンによって23度程度に調整されていた。

### 2.3. 使用する実験課題及び指標について

#### 2.3.1. 単純課題

単純な思考中の生体リズムを測定するために、改訂版長谷川式簡易知能評価スケール

(HDS-R) (加藤・下垣・小野寺・植田・老川・池田・小坂・今井&長谷川和夫, 1991) 内に用いられている, 100から7を順番に引いていく計算課題を単純課題として使用した。課題を行う時間は3分間とし, 暗算を繰り返してもらった。

### 2.3.2. 複雑課題

複雑な思考を行っている際の生体リズムを測定するために, 内容の異なる4種類のクイズを使用した。制限時間は3分間とした。各クイズの内容は次に示す通りである。<sup>(注1)</sup>

クイズ1: 大きいものから小さなものまで大量の荷物を積み込んだトラックがカーブを曲がる時に何かを落としてしまいました。それは何?

クイズ2: ショートケーキの日というのがあります。それは毎月22日です。なぜ, 22日がショートケーキの日なのでしょう?

クイズ3: 一郎さんと二郎くんは, 同じ生年月日であり同じお父さんとお母さんですが, 双子では無いという, どうしてでしょう。

クイズ4: ここに1時間で燃え尽きる蚊取り線香があります。この蚊取り線香を使って, 1時間45分を計るためにはどうしたらいいでしょう? (※蚊取り線香は何個使っても構いません。)

### 2.3.3. 生理指標

思考リズムの特徴を捉えるため, Lyspect3.6.1 ((株) カオテック研究所製) を用いて指尖脈波の測定を行った。測定にあたって安静時を含んだ各課題中は利き手と逆の手の第二指に測定用のカフを装着してもらった。収集した指尖脈波の時系列データは200Hz, 180secであった。

### 2.3.4. 最大リアプノフ指数

最大リアプノフ指数とは時系列データからカオス解析によって算出される値であり, 複雑さを示す指標として用いられる。最大リアプノフ指数が増加するとリズムが複雑になると考えられ, リズムのゆらぎが大きいことを表している。一方で, 最大リアプノフ指数が減少するとリズムが単純化していると読むことができる。本研究では先行研究 (Sano & Sawada, 1985) に従って, 遅延時間  $\tau = 10.0\text{msec.}$ , 埋め込み次元  $d=4$  に設定し, Takens (1981) の埋め込みを用いてカオス解析を行った。

### 2.3.5. KSエントロピー

KSエントロピーは最大リアプノフ指数と並んで時系列データの複雑さを示す指標として用いられる (池口・合原, 1993)。一般的にエントロピーが増加するとゆらぎは小さくなり変化は一つの可能性に収束するが, 私たち人間をはじめとする生命体においては絶えずエントロピーを内部に取り込むと同時にエントロピーを外部に放出することで絶えず変化している。そのような変化は自己内部と外部でエントロピー量に差があるときに起こり, エントロピー差によってリズムに変化が生まれると考えられている (佐藤, 2012)。本研究ではカオス検証・分析プロ

グラムCHORUS((株) コンピュータコンビニエンス社製：現(株) TAOS研究所製)を用いて算出した。

## 2.4. 実験の手順

実験の手順は次の図2の通りである。本実験は集団で実施した。まず、個々のリズムの基準を知るため、会話など行わず安静に待機してもらい、その間指尖脈波を3分間測定した。次に、改訂版長谷川式簡易知能評価スケールの計算課題を3分間行った。その後、複雑課題として前述したクイズ1～クイズ4までを順に、それぞれ3分間ずつ行った。各課題中は指尖脈波の測定も同時に行った。各課題の詳細については前述を参照。

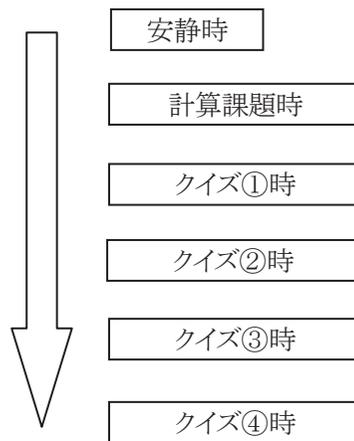


図2 実験手順

## 2.5. 倫理的配慮について

事前に体調がすぐれない場合や実験の途中で不快感を感じた場合には実験を中止できる旨を実験手順とともに説明した。また、実験で得られたデータの使用については、実験終了後に個別に連絡を行い承諾を得た。

## 3. 結果と考察

実験を通して得られた指尖脈波に対してカオス解析を行い、最大リアプノフ指数 (LLE)、最大リアプノフ指数の傾き、KSエントロピーの算出を行った。各指標の記述統計については表1を参照。

### 3.1. 最大リアプノフ指数

まず、繰り返しのある分散分析を行ったところ有意であった ( $F(5,30)=11.29, p=.000, \eta_p^2=.65$ )。さらにHolmによる多重比較を行ったところ、安静時とクイズ1 ( $t=4.08, p=.007, d=1.22$ )、安静時

表1 記述統計

	安静時		計算時		クイズ1		クイズ2		クイズ3		クイズ4	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
LLE	4.31	1.25	4.48	1.35	6.53	2.07	6.50	2.04	6.22	1.80	6.71	1.43
LLEの傾き	0.47	3.15,	0.51	3.24,	0.78	4.61,	0.77	4.62,	0.68	4.56,	0.54	5.38,
		5.46		5.73		8.45		8.39		7.88		8.03
	-0.08	0.46	-0.58	0.37	-0.14	0.20	0.12	0.48	-0.27	0.30	-0.15	0.27
	0.18	-0.51,	0.14	-0.92,	0.08	-0.32,	0.18	-0.33,	0.11	-0.55,	0.10	-0.39,
		0.35		-0.24		0.05		0.57		0.00		0.10
KS entropy	4.06	0.33	4.09	0.24	3.65	0.51	3.71	0.43	3.74	0.43	3.59	0.34
	0.12	3.76,	0.09	3.87,	0.19	3.17,	0.16	3.34,	0.16	3.34,	0.13	3.28,
		4.36		4.30		4.12		4.13		4.13		3.90

とクイズ2 ( $t=4.85, p=.003, d=0.12$ ), 安静時とクイズ3 ( $t=5.29, p=.002, d=1.16$ ), 安静時とクイズ4 ( $t=6.16, p=.001, d=1.67$ ) の間に有意差が見られた。また計算課題とクイズ1 ( $t=3.40, p=.014, d=1.10$ ), 計算課題とクイズ2 ( $t=4.49, p=.004, d=1.10$ ), 計算課題とクイズ3 ( $t=5.73, p=.001, d=1.03$ ), 計算課題とクイズ4 ( $t=5.59, p=.001, d=1.50$ ) の間に有意差が見られた (図3)。いずれもクイズ課題時の方が最大リアブノフ指数の値が高く、複雑な思考をしている時には指尖脈波のリズムのゆらぎが増加することが示唆された。一方で、安静時と計算時の間、各クイズ間では有意差は見られなかった。このことから、単純な思考をしている時には安静時と比べてゆらぎに有意な変化が起こらなかったことが伺える。また、今回使用したクイズの種類の違いによるゆらぎの増加には量的な差がなかったことも分かった。

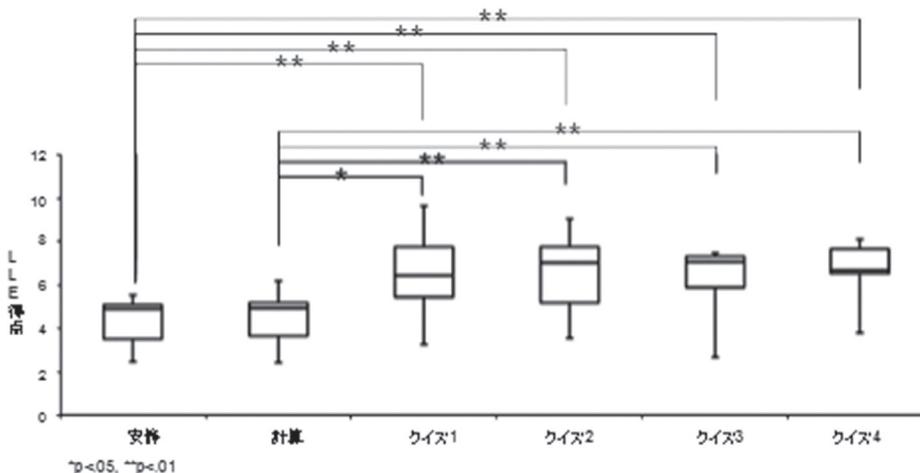


図3 LLEの箱ひげ図

次に各課題中の最大リアブノフ指数の時間変動をグラフ化した。安静時から各実験課題時の最大リアブノフ指数の時間変動を示すグラフは次の図4の通りである。安静時は個人によって

て異なる変化を示している。その後行った計算課題時においては、時間が経つにつれて緩やかに減少していることが対象者間の共通の特徴として伺える。計算課題は同じ条件で全員が行っており、人によって大きく計算方法が異なるなどが起こらない。そのため、同じような推移になる傾向になっていると考えられる。その一方で、クイズ間に最大リアブノフ指数の平均値に有意差はなかったものの、クイズを解いている際の時間変動の仕方は個人によって異なっていたことが観測でき、クイズの種類によっても異なる変化を示していたことが伺える。同一のクイズであっても対象者の反応が異なり、クイズの種類によっても反応の仕方が変わることから、このような変動を示していたものと思われる。

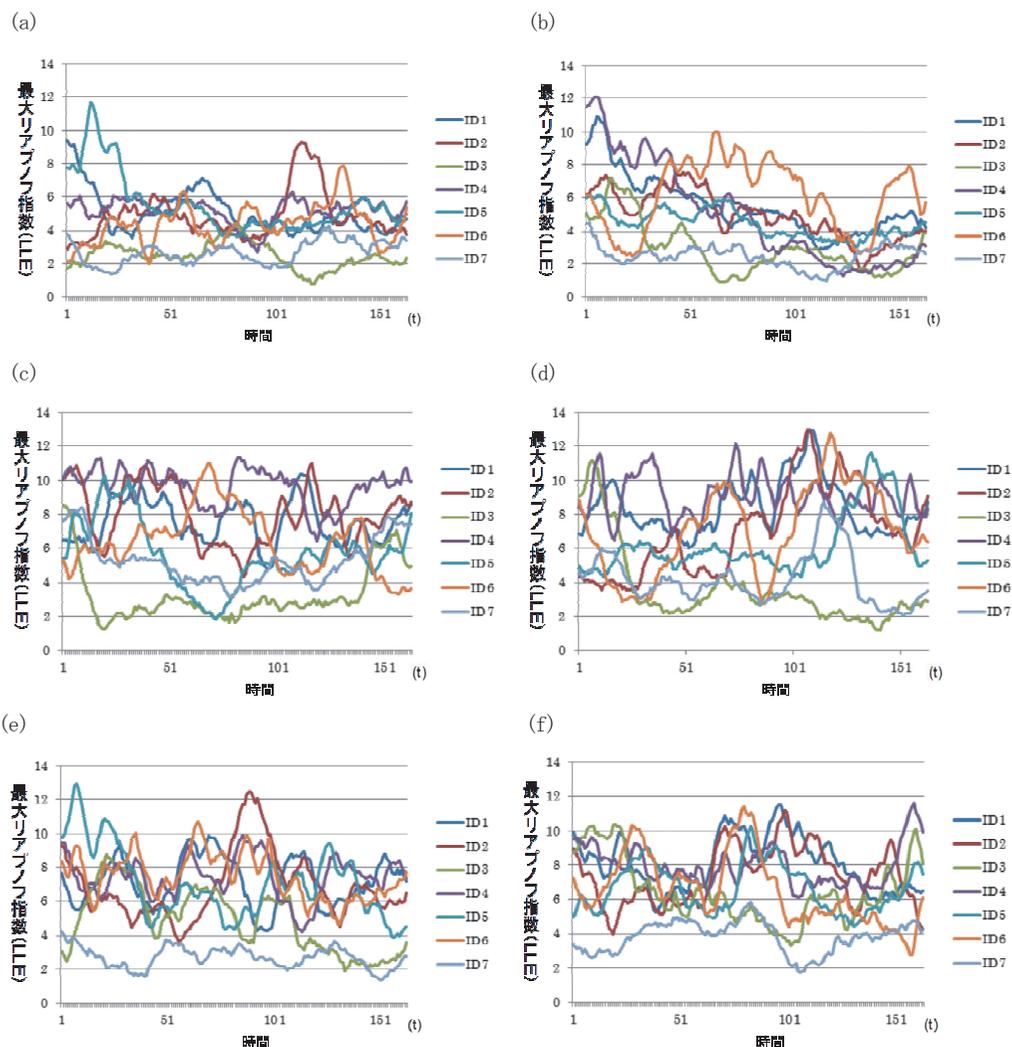


図4 各課題中の最大リアブノフ指数の時間変動 (a:安静時, b:計算時, c:クイズ1, d:クイズ2, e:クイズ3, f:クイズ4)

さらに最大リアプノフ指数の時間変動の傾向を量的に明らかにするため、回帰係数を求めることでグラフの傾きを算出した。それによって得られた標準化回帰係数 $\beta$ の値に対して各群間で反復測定による分散分析を行ったところ、有意であった ( $F(5,30) = 3.14, p = .021, \eta_p^2 = .34$ )。さらにHolmによる多重比較を行ったところ、安静時と計算課題時の間に有意差がみられた ( $t = 3.81, p = .009, d = 1.12$ )。また計算課題時とクイズ1 ( $t = 2.84, p = .029, d = 1.39$ )、計算課題時とクイズ2 ( $t = 3.21, p = .018, d = 1.53$ )、計算課題時とクイズ4 ( $t = 2.11, p = .079, d = 1.26$ )。クイズ2とクイズ3 ( $t = 2.18, p = .072, d = .92$ )の間に有意差が見られた(図5)。一方で、安静時とクイズ1, 2, 3, 4の間、クイズ1とクイズ2, 3, 4、クイズ2とクイズ4、クイズ3とクイズ4に有意差が認められなかったことについて、右肩下がりに減少するという大きな共通の変動傾向を示していた計算課題時と比べて、対象者間で共通の時間変動が観察できなかったことが理由として考えられる。これは同一の状態や同一の課題中であっても思考の仕方が個々に任されている場合には、共通の変動が現れづらいことが理由として挙げられるだろう。

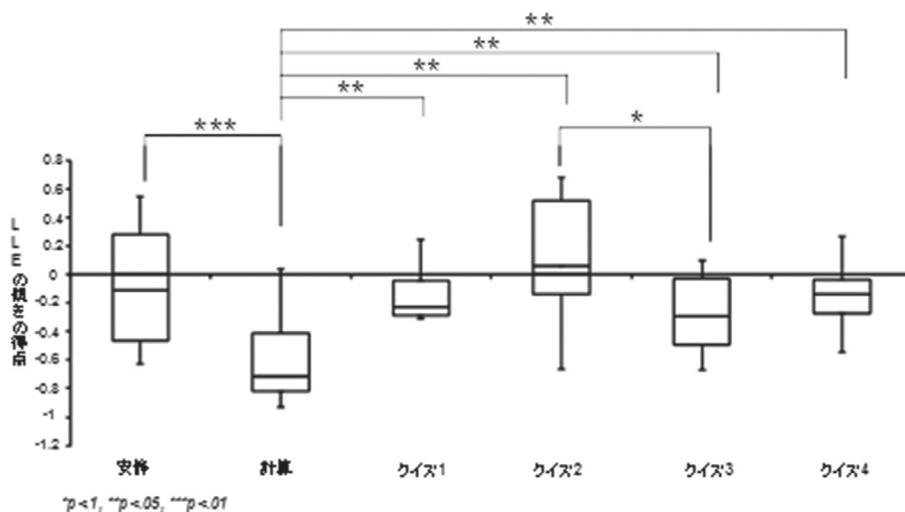


図5 LLEの傾きの箱ひげ図

### 3.2. KSエントロピー

KSエントロピーについて、安静時を含む各課題間で反復測定による分散分析を行ったところ有意であった ( $F(5,30) = 4.87, p = .002, \eta_p^2 = .45$ )。さらにHolmによる多重比較を行ったところ、安静時とクイズ1 ( $t = 2.38, p = .055, d = .91$ )、安静時とクイズ2 ( $t = 3.25, p = .017, d = .86$ )、安静時とクイズ3 ( $t = 1.98, p = .095, d = .80$ )、安静時とクイズ4 ( $t = 3.64, p = .011, d = 1.32$ )の間に見られた。計算時とクイズ1 ( $t = 2.51, p = .046, d = 1.04$ )、計算時とクイズ2 ( $t = 2.97, p = .025, d = 1.01$ )、計算時とクイズ3 ( $t = 2.37, p = .056, d = .95$ )、計算時とクイズ4 ( $t = 4.15, p = .006, d = 1.59$ )の間にそれぞれ有意差が見られた(図6)。このことから、安静時と計算時よりも各クイズを解いている時の方がエントロピーが小さくなっていたことが明らかとなった。その一方で、安静時と計算時の間にエント

ロピーの差は認められなかった。

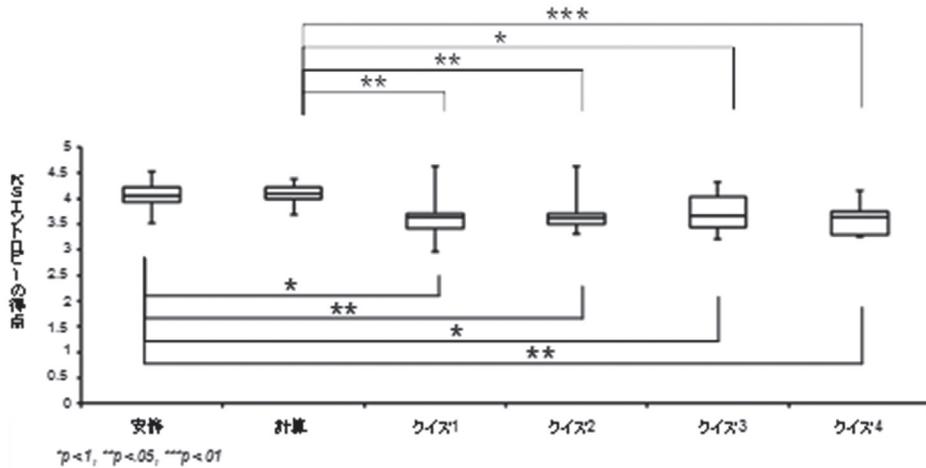


図6 KSエントロピーの箱ひげ図

#### 4. 全体的考察

本研究を通して、計算課題時には安静時と比べて最大リアプノフ指数とKSエントロピーに有意な変化は見られなかったが、クイズ課題時には最大リアプノフ指数が増加し、KSエントロピーが減少していたことが明らかとなった。また、最大リアプノフ指数の時間推移について、単純思考的な計算課題時には右肩下がりに減少していくという変化が対象者間で類似の特徴として見られたが、複雑思考的なクイズ課題時にはクイズの種類や内容によって変化が異なることに加え、同一課題であっても対象者によって異なる変化を示していたことが分かった。

雄山 (2012) は内部集中による自己完結型と外部適応にともなう環境依存型の2種類に分けられるという。前者に相当する暗算課題において最大リアプノフ指数の平均値が小さかったことについて、雄山 (2012) は外部適応する必要がないためと考えているが、自らの考えを問題と照らし合わせて正しいか否か判断するというよりも自身のスキーマとの照合に重点が置かれ、問題を解くために必要な新規の情報を外部から取り込む必要がなかったためだと考えられる。また、解き始めた当初は最大リアプノフ指数は高かったものの、時間とともに減少していったのは飽きや慣れによるものと考えられる。その一方で、クイズ課題においては自身のスキーマに外部から取り入れた情報を照らし合わせたあと、外部の情報と比較し、また自己内部に情報を取り込むという自己内部と外部におけるやりとりが存在する。そのため最大リアプノフ指数の値が大きくなったと考えられる。このことは雄山 (2012) のモニター監視作業や自動車走行といった環境依存型の作業と一致する。これらのことから一般的に考えている状態というのはゆらぎが大きくなると考えられる。その後、情報処理が行われ、自己内部・外部に関わらず完結してしまえばゆらぎは小さくなる。そのことはSakamoto et al. (2013) のひらめき後に見られた

ゆらぎの減少からも伺える。また、各課題中のリズムの変化を見たとき、大局的には類似した傾向が見られても局所的には異なる変化を示していたことが図4から示唆されたが、これは類似したスキーマで情報処理している一方でスキーマの構造や働き方が個々人によって少しずつ異なるためだと思われる。思考とは外部から入ってきた情報を自己内部でスキーマに基づいて処理し、外部へと放出する情報処理である。共通のメカニズムを持ちながらも、スキーマの違いによって局所的な相違が現れたのではないかと考える。

Schrödinger (1944) は、生命は負のエントロピーを食べて生きていると考えた。エントロピーは乱雑さの指標と言われ、閉じたシステムでは一般的にはエントロピー増大の法則にしたがって無秩序に向かうと考えられている。しかし、生命はこれに反したメカニズムを持っており、常に秩序を形成し続けている。負のエントロピーを食べて生きているというのはエネルギーを外部から自己内部に取り込んだとき、外部にエントロピーを吐き出すことで自己内部のエントロピーを減少させていることを表している。その振舞いは外部のエントロピーを増大させているとも言える。エントロピーを減少させるメカニズムの説明をするために、散逸構造が提唱されている (Nicolis & Prigogine, 1989)。秩序構造の形成にはなんらかのきっかけが必要となるが、その役割を果たしているのがゆらぎである。臨界ゆらぎとも呼ばれるような、ゆらぎがある一定の閾値まで増大することでシステムの対称性が破れて新たな秩序形成が起こる。本研究における最大リアプノフ指数とKSエントロピーはこれと同様の傾向を示していた。クイズのようにひらめきを必要とする課題時にゆらぎが増加するとエントロピーが減少するという本研究の実験結果は、思考における定常状態の対称性が破れ、新たな秩序構造が形成されるという状態が身体レベルでも起きていたことが伺える。言い換えれば、思考中に自己内部のエントロピーが満たされるということはゆらぎが減少し、思考結果が一方向に収束することである。計算課題時のように、情報を取り入れても自己内部のゆらぎとエントロピーに変化が見られない場合、既にある思考枠組みの中で解決できる課題であると言える。情報を消化して吐き出す必要がないのである。その一方で、クイズ課題時のようにエントロピーが減少した場合、取り入れた情報を消化し吐き出すことでゆらぎを発生させ、思考中のリズムを活性化させる必要があったと考えられる。このメカニズムが思考の情報処理課程の中で行われ、個々人の持つスキーマの違いがリズムのゆらぎ方やエントロピーの増減の仕方に表れていたと考えられよう。

最後に、最大リアプノフ指数とKSエントロピーはカオスの指標として用いられており、本研究では安静時ならびに単純な思考時に比べてクイズを解いている複雑な思考時の方がカオスが強まっていたことが示唆された。生体においてカオスは変化に対処するために適応性や柔軟性や学習の強化の役割を果たしている (田原, 1995)。このことより生体は強いカオスを生成することで難題な課題に対応しようとしていたことが伺える。

以上より、思考の違いによって指尖脈波にあらわれる反応が異なることが明らかとなった。このことから、思考中のリズムを反映する指標として指尖脈波を用いることで、末梢神経系からのアプローチも可能であると考えられる。その際、思考における指尖脈波から得られたリズムが他の生理指標を用いた生体リズムと同型 (Bertalanffy, 1968) のメカニズムで発生している

可能性もダイナミカルシステム・垂ブローチの観点より考えられる。しかし、末梢神経系からのアプローチに限らず中枢神経系からのアプローチも含めて研究領域全体の知見が不足しているのが現状であると思われる。そのため、Sakamoto et al. (2006) のひらめきの直前に前頭前野における神経細胞活動のゆらぎが増加し、臨界ゆらぎが見られたという研究報告と、本研究にけるクイズ中にゆらぎが増加したという結果が、直接的に同型のメカニズムを持つものとして結び付けられるとは限らない。そこで、本研究では思考の違いという点で課題時のリズムについて検討を行ったが、今後の課題としてクイズの正答を考慮した上で場合わけを行い、リズムの非線形性の特徴について更なる検討を行うことが求められる。それによって、中枢神経系と末梢神経系の表層的な特徴の関係性や目に見えないメカニズムについての知見を深めていくことが、本研究の発展に繋がると考える。

また、研究をさらに深めていくにあたって、本研究では検討を行わなかった順序効果についても検討する必要がある。そして、最大リアプノフ指数とアトラクターを用いた心理学研究は見られる一方で、KSエントロピーを含めた研究報告は決して多くない。そのため、これらの指標を用いて多面的な追究をしていく必要があると考えられる。

## 付記

本研究の一部は日本心理学会第81回大会でポスター及びシンポジウムで発表した。

## 注

注1: 実験で用いたクイズ課題のURLは以下の通りである。

<https://matome.naver.jp/odai/2135429535358113801>

(2016年10月12日)

## 文献

- Bertalanffy, L. Von. (1968) *General system theory: Foundations, development, applications*. New York: George Braziller. [長野 敬・太田邦昌 (共訳) (1973) 一般システム理論: その基礎・発展・応用, みすず書房]
- Fogel, A. (2008). *Dynamic Systems Research in Developmental Psychology*. 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. 202-213) 金子書房
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R., Mietus, J., Antman, E. M., & Greenwald, S. (1988). Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: Heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia*, 44, 983-987.
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R., & West, B. J. (1990). Chaos and fractals in human physiology. *Scientific American*, 262, 43-49.
- 池口徹・合原一幸 (1993). 脳波 (EEG) のカオス 合原一幸 (編) ニューラルシステムにおけるカオス (pp. 91-124) 東京電機大学出版局
- 池口徹・山田泰司・小室元政 (2000). カオス時系列解析の基礎理論 合原一幸 編カオス時系列解析の基礎と応用 産業図書 121-198.
- 加藤伸司・下垣光・小野寺敦志・植田宏樹・老川賢三・池田一彦・小坂敦二・今井幸充・長谷川和夫 1991 改定長谷川簡易知能評価スケール (HDS-R) の作成 老年精神医学雑誌 2 (11) 1339-1347.
- 北畑裕之・吉川研一 (2005). 化学・生物の世界のリズム 蔵本由紀 (編) リズム現象の世界 東京大学

出版会 1-37.

- 郡宏・森田善久 (2011). 生物リズムと力学系 共立出版
- 蔵本由紀 (2007). 非線形科学 集英社
- 蔵本由紀 (2014). 非線形科学 同期する世界 集英社
- 前田優輔・鈴木 平 (2017). 問題解決における思考リズムの変容—ダイナミカルシステム・アプローチの観点から— 桜美林大学心理学研究 7, 117-130.
- Miao, T., Shimoyama, O., & Oyama-Higa, M. (2006). Modelling Plethysmogram Dynamics based on Baroreflex under Higher Cerebral Influences. *IEEE Conferences on Systems, Man, and Cybernetics Proceedings*, 2868-2873.
- Miao, T., Oyama-Higa, M., & Sato, R. (2010). Chaos in plethysmograms during tracking chaos. *IEEE Conferences on Systems, Man, and Cybernetics Proceedings*, 3966-3970.
- 武者利光 (1998). ゆらぎの発想: 1/fゆらぎの謎にせまる NHK 出版
- OECD (2013). *PISA2015 Draft Collaborative problem solving framework*.  
<http://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/pisa2015draftframeworks.htm>
- Nicolis, G. & Prigogine, I. (1989). Exploring complexity [安孫氏聖也・北原和夫 (訳) 1993 複雑性の探求 みすず書房]
- 岡林春雄 (2008). 心理学におけるダイナミカルシステム理論 金子書房
- 岡林春雄 (2014) 指尖脈波は心の指標となりうるか: 生体信号のカオス探究 日本教育心理学会総会 発表論文集 56, 713.
- 岡林春雄 (2015). 人間心理をリズムと揺らぎから探究する: 指尖脈波によるリアルタイムアプローチ 日本教育心理学会総会発表論文集 57, 239.
- 雄山真弓 (2012). 心の免疫力を高める「ゆらぎ」の心理学 祥伝社
- 劉 僖根・鈴木秀明 1997 カオス性からみた心拍変動の加齢変化 研究紀要 Bulletin of Toyohashi Sozo Junior College 豊橋創造大学短期大学部 1 161-170
- Sakamoto, K., Katori, Y., Saito, N., Yoshida, S., Aihara, K., & Mushiake, H. (2013). Increased Firing Irregularity as an Emergent Property of Neural State Transition in Monkey Prefrontal Cortex. *PlosONE* 8(12): e80906. doi: 10.1371/journal.pone.0080906
- Sano, M., & Sawada, Y. (1985). Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series. *Physical Review Letters*, 55, 1082-1085.
- 佐藤直樹 (2012). エントロピーから読み解く生物学: めぐりめぐむ わきあがる生命 裳華房
- Schrödinger, E. (1944). *What is life?: The physical aspect of the living cell*. Cambridge University Press. (岡小天・鎮目恭夫 (訳) 2008 生命とは何か: 物理的にみた生細胞 岩波書店)
- 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
- Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Mathematics*, 898, 366-381.