

## 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—

前田 優輔<sup>1)</sup>・鈴木 平<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 桜美林大学大学院 国際学研究科 国際人文社会科学専攻 博士後期課程

<sup>2)</sup> 桜美林大学 心理・教育学系

### Changes of thinking rhythm during solving a problem

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

<sup>1)</sup> Graduate school of J. F. Oberin University

<sup>2)</sup> J. F. Oberin University

キーワード：思考 リズム ゆらぎ

**抄録：**「生きているシステム」のリズムは常にゆらいでいる。そのようなシステムの振舞いの一つである思考もまた、ダイナミカルシステム・アプローチの観点からリズムとして捉えられる。

実験は大学生の男女 12 名を対象に行った。実験課題は加算課題と創造課題を使用し、それぞれ収束的課題群と拡散的課題群と表した。本研究では問題解決中の思考リズムが変化の様子を指尖脈波を用いてリアルタイムに観測した。そのリズムが時間とともにどのような変化をしていたのか明らかにするために、まず、時系列データに対してカオス解析を行い最大リアプノフ指数と KS エントロピーの算出、アトラクターの再構成を行った。次に、算出されたデータを微視的発生研究デザインに基づいて分析を行うことで、異なる自由度を持つ学習課題を遂行している際の思考リズムがどのような特徴を持っているのか検討した。

その結果、①収束的課題を行っている時には最大リアプノフ指数は減少し、拡散的な課題を行っている時には収束的な課題を行っている時よりも安静時から有意に増加していたこと、②課題の特徴や問題解決にあたって求められる思考内容の特徴が最大リアプノフ指数の時間推移の仕方に影響を与えること、③拡散的課題を行っている時に KS エントロピーが減少すること、④拡散的な課題を行っている時、アトラクターの空間的幾何学構造は安静時よりも小さくなる傾向にあることが明らかとなった。

本実験を通して、学習課題の自由度によって思考リズムの変化の仕方が異なることが示唆され、指尖脈波が思考情報を反映する生理指標として使用できる可能性が示唆された。

## 1. 問題提起

これまで心理学の分野では発達や認知など変化の記述を静的に捉え、変化が起こる理由を複数の要素に分解し、再構成することで還元主義的にアプローチしてきた。しかし、「生きているシステム」においては構成要素に分解することで本質が抜け落ちてしまうおそれがあると指摘されている（岡林，2008）。従って、変化そのものを観察し、変化全体の文脈の中で物事を捉えていくことが求められる。近年、私たち人間を「生きているシステム」として捉える試みが行われている（井庭・福原，1998；岡林，2008；清水，1990）。そして、人間を含めた生物は呼吸や心拍、概日リズムといった様々な生物リズムを持っている（郡・森田，2011；蔵本，2007，2014）。つまり、リズムとはシステムの時間経過にともなう変化の流れであり、システムの周期性あるいは非周期性を含んだ振舞いであると言えよう。このようなアプローチ方法は総称してダイナミカルシステム・アプローチ（Dynamical Systems Approach）と呼ばれる（岡林，2008）。

まず、システムとは「そのシステムを構成している要素は各自のルールに従って機能しており、局所的な相互作用によって全体の状態・振舞いが決定される。そしてそれらの全体的な振舞いをもとに個々の構成要素のルール・機能・関係性が変化していく（井庭・福原，1998）」ものである。そしてそのようなシステムが時間とともに変化する場合、動的システムと呼ばれる。なおかつ、私たち人間のような「生きているシステム」は散逸構造をなしており（田中，2002）、動的非平衡システムとみなされる。このようなシステムにおいてゆらぎとはエントロピー増加に逆行して秩序を形成するシステムの可能性を意味する。このゆらぎがポジティブフィードバックを引き起こすことで、システムが自己組織化し、新たな構造や特徴を持った秩序が創発する。そして、システムが非平衡状態、すなわち不安定な状態にあるほどゆらぎによる秩序形成の可能性が高くなる。システムが質的に切り替わる直前で観察されるゆらぎは臨界ゆらぎとも呼ばれる。基本的にシステムは時間と共に連続的に変化しているのだが、ある時点を境に非連続的な変化が現れたように観察されるのはこのためである。システムが質的に切り替わるという現象は創発とも呼ばれ、例えば、赤ちゃんの歩行運動がハイハイから二足歩行に完全に切り替わる様子が挙げられる。完全に切り替わるまでの間はハイハイと二足歩行の間を行ったり来たりという様子が見られるように、質的な変化はある日突然生じるのではなく、不安定な移行期をささむことが伺える（河合，2008）。このような歩行運動や発達といった目に見える身体的な変化に限らず、パーソナリティなど目に見えない心の質的な変化も動的非平衡システムに見られる自己組織化現象として捉えられている（Thelen & Smith, 1994; Kawai, 1987; 河合，2008, 多賀，2002; 岡林，2008）。そこで、本研究では目に見えない心の変化の一つとして問題解決中の思考もまた、動的非平衡システムとして捉えられるのではないかと考えた。

一般的に問題解決に際する思考は主に収束的思考と拡散的思考の2種類に分類される (Guilford, 1950)。収束的思考は与えられた情報から一定の結論を導き出すもので、探索的な課題や蓄積してきた知識を活用する場合に機能する。一方で拡散的思考は与えられた情報から多種多様かつ独創的な結論を導き出すものであり、創造性と結びついているとされている。アイデアや解放といった所産が導き出される際、身体情報レベルではどのようなことが起こっているのだろうか。例えば、Sakamoto, Katori, Yoshida, Aihara, & Mushiake (2013) は迷路課題の解決方法のひらめきと前頭前野の神経細胞活動における発火現象について研究を行い、ひらめきの直前にゆらぎが増加し臨界ゆらぎが認められることを報告している。このことから私たちが直接意識できない局所的なレベルでの変化と所産のように意識可能な大局的なレベルでの変化には関係があることが伺える。これは先に述べたシステムの定義に従うものである。局所的な変化を生理指標を用いた局所的リズムとして捉えるならば、Sakamoto et al. (2013) の示唆を踏まえると、思考が収束的である場合、思考リズムのゆらぎは小さく、拡散的である場合にはゆらぎが大きくなると表現できるかもしれない。

このように、思考に関する生理指標を用いた研究の主なアプローチ方法は、主に抹消神経系ではなく中枢神経系からであった。理由としては認知的側面に注目して研究がなされてきたことが挙げられるだろう。しかし、思考には認知的側面だけでなく、感情的側面や身体的側面からの影響も大きく反映されている。例えば何かをひらめいたときには驚きや嬉しさのような感情が伴うし、問題が解けない時にイライラしたりする。また、前者には手を叩いたり、後者には貧乏ゆすりをしたりといった身体的な側面も付随して起こる。かつて Zajonc (1980) と Lazarus (1982) によって認知が先か、感情が先かという論争が展開されたが、今日では両方の側面から総合的に追究しようという試みが行われており、例えば Ciompi (1997) は思考や行動に対して感情と認知の相互作用という点からアプローチを行っている。彼は感情を「内的または外的な刺激によって引き起こされる、さまざまな質や持続時間や意識されやすさをもった、全体的な心身の状態のこと」と定義している。一方で認知については、感覚上の差異と共通点を捉え、続いてこれを神経系において情報処理を行うことであると述べている。その上で、感情が基盤となって認知と行動に対して長期的に組織化と統合の作用を及ぼしていると述べている。また、このような相互作用は辺縁系・前頭葉間の神経路を通じて行われ、内分泌系や行動特性の制御が認められることから交感神経優位あるいは副交感神経優位という2つの状態を感情状態のプロトタイプとして捉えることができるのではないかと考えている。仮に、思考を認知と感情の両側面から形成され、これらの相互作用によって変化するものだと考えるならば、末梢神経系から思考に対してアプローチすることも可能なのではないだろうか。それでも、日常生活の思考も含め、認知的側面の変化について末梢神経系からアプローチし言及した研究報告は決して多くない。その中、抹消神経系の生理指標である指尖脈波に脳の中樞系の情報が含まれていることを、Miao, Shimoyama, & Oyama-Higa (2006) が指尖脈波の数理モデルを作成し報告している。指尖脈波とは指先の毛細血管を流れるヘモグロビンの増減を測定したものである。そして、岡林 (2014, 2015) や雄山 (2012) によって数理モデルだけでなく現

象レベルでも中枢神経系の情報が含まれていることが示唆されていることから、指尖脈波を使用した抹消からのアプローチによって思考の振る舞い、つまり思考のリズムについて追究できるのではないかと考える。そこで、本研究では中枢神経系と抹消神経系の両方の情報を内包する指尖脈波を使用し、その時系列データを思考情報を含むリズムとして再構成し、これを思考リズムとして定義する。

以上のことから、ダイナミカルシステム・アプローチの観点から、本研究では思考を動的非平衡システムとして捉える。そして、指尖脈波を使用して問題解決中に思考リズムがどのように変化しているのかりアルタイムで観測し自由度の異なる課題を遂行している最中の思考リズムの特徴を明らかにする。

ダイナミカルシステム・アプローチで使用される分析手法は、従来の心理学で使用されてきたものと同じように量的な手法と質的な手法に分けられる。前者の例としてカオス解析やニューラルネットワークモデルといった非線形性に着目した解析を用いた研究が近年行われている（清水・苗・下山，2004；地村・松岡・駒崎・中川・楠見，1999）。後者の例としては微視的発生研究デザイン（Microgenetic Research Designs）（Fogel, 2008）や状態空間の中にシステム全体としての動きをマッピングしたり、地勢図として図式化する方法が挙げられる。本研究では分析手法としてカオス解析と微視的発生研究デザインを使用する。ある時点でのシステムの状態は状態空間内の一つの点として記述することができる。そして時間発展と共にシステムの状態は空間内を動き、時間が経つとある特定の領域の中に落ち着く。この領域はアトラクターと呼ばれ安定状態を指す。アトラクターの形状は固定点やリミットサイクルなどいくつかの種類に分けられるが、生きているシステムではストレンジアトラクターあるいはカオスアトラクターと呼ばれるアトラクターを描くことがある。そして、空間内の軌道の不安定さを数量化したのとしてリアプノフ指数がある。中でも最大リアプノフ指数は心理状態を反映するゆらぎ量としても扱われ（雄山，2012）、最大リアプノフ指数の時間推移を見ることでリズムのゆらぎが増減する様子を観測することができる。岡林（2015）は安静中と加算作業中、図形問題を解いている最中の指尖脈波をそれぞれ測定した結果、指尖脈波から算出された加算作業中の最大リアプノフ指数は安静状態よりも低くなり、図形問題を解いている時の最大リアプノフ指数は安静状態よりも高くなっていたことを報告している。また、Miao, Shimizu, Makabe, & Oyama-Higa（2008）や Mia, Oyama-Higa, & Sato（2008）は振舞いが周期的なもの、カオス的なもの、完全にランダムなものという異なる特徴を持つトラッキング課題3つを用意し、課題中の耳朶容積脈波を測定している。この実験を通して、振舞いがカオス的である課題の最中の最大リアプノフ指数が他と比べて高かったことを述べている。同時に、カオス的な振舞いをするトラッキング課題をしている最中のアトラクターは他の課題をしているときと比べて、強いカオスアトラクターを描いていた。さらに雄山（2012）は暗算課題や鏡映描写課題のような外部環境に適応する必要の少ない内部集中型の作業と、夜間のトラックの運転や道路状況に応じた運転、モニター監視作業といった外部環境の変化に適応することが求められる外部適応型の作業における最大リアプノフ指数を比較している。その結果、安静時よりも内部環境型の作業

を行っている際の最大リアプノフ指数が小さかったのに対し、外部環境型の作業中では安静時よりも最大リアプノフ指数が大きくなっていくことを報告している。これらの報告から最大リアプノフ指数やアトラクターを指標として使用することで、課題の持つ自由度の差異を通して問題解決中の思考リズムの特徴を明らかにすることができるのではないかと考えた。一方で、微視的発生研究デザインは、単に変化の事前と事後に注目するのではなく変化の起きている期間を通じて観察し、量的、質的側面から分析することで変化を引き起こしている一連の時間的な過程を明らかにすることを目的としている (Fogel, 2008)。そして、個々人の変化の様子をトレースし、重ね合わせることで個人内変化に見られる共通の特徴や差異を明らかにするとともに、個人間を含んだ全体の変化を検討することができる。最後に、本研究では収束的思考が主に機能する学習課題として一桁の足し算課題 (収束的課題群) と、拡散的思考の機能が含まれる学習課題として答えが予め決まっていない創造課題を使用した (拡散的課題群)。これら問題を解くにあたって求められる思考の違いを課題の自由度の違いと表現する。

## 2. 方法

### (1) 実験協力者

2015 年 11 月～2016 年 8 月にかけて、機縁法によって依頼した都内の大学に所属する大学生 12 名 (男：2 名，女：10 名，平均年齢 21.25 歳) を対象に実験を行った。実験は実験協力者の時間的負担を考慮し、2 度に分けて実施した。

### (2) 使用する実験課題及び生理指標について

#### <実験課題>

##### a. 収束的課題群

収束的な学習課題として一桁の加算課題を行った。課題には内田クレペリン作業検査に用いられるものを使用した。なお、作業中の思考リズムの変化、また事前に測定する安静時のリズムとの変化率について分析を行うため、誤答の有無は考慮せず収束な加算作業課題として使用し、精神検査としての分析は行わないこととした。実験手順等はマニュアル (外岡, 1998) に従い、練習、本番の順で行った。分析対象は本番 5 分間の試行のみとした。

##### b. 拡散的課題群


拡散的な学習課題として新しいアイデアを創り出す創造課題を行った。創造課題として PISA2015 ドラフト (OECD, 2013) に記載されている協働型問題解決課題「クラスロゴの作成」を日本語に翻訳し使用した (図 1)。この課題は PISA2015 ドラフトの中でコンピュータを用いて実施することが想定されているが、本研究では紙媒体の文章問題として使用した。問題を解く時間は 5 分間とし、実験協力者の進行具合を見ながら残り時間を口頭で提示した。

問 あなたの学校でスポーツ大会が開かれることになりました。開催情報の日時については下記の通りです。

日時：夏  
 場所：公園  
 競技種目：マラソン、サッカー、テニス

そこで、次に示す 3つの条件に従って、あなたのクラスのロゴを作ってください。

条件 1：カラフルであること  
 条件 2：シンプルであること  
 条件 3：近年使用された次に示すロゴは使用できない



回答には隣の記入欄を使用してください。記入欄が足りない場合は裏面を使用してください。なお、ロゴを作るにあたって、考えたことやスケッチは消さないでください。

図 1 クラスロゴの作成

<生理指標>

c. 指尖脈波

Lyspect3.6.1 ((株) カオテック研究所製) を使用し、課題作業中の 5 分間測定を行った。収集した指尖脈波の時系列データは 200Hz, 300sec であった。指尖脈波測定用のカフは利き手と逆の手の第三指に装着してもらった。

(3) 実施手順

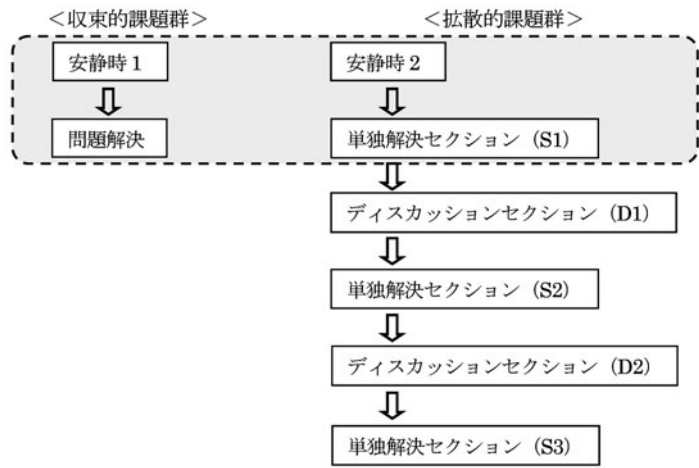


図 2 実験デザインの全貌と実験手順

研究の全体実験デザインは図2の通りである。収束的課題群で使用した加算課題は一人ずつ実施した。一方で、拡散的課題群は二人で協働して取り組む課題であったことから二人で実施した。単独解決セッション中は会話等をせず一人で問題に取り組んでもらい、ディスカッションセッションでは単独セッション中に考えたことを前提として意見交換してもらうものであった。これらを交互に行った。本論文では課題の自由度の違いが思考リズムに与える影響を明らかにすることを目的としているため、収束的課題群の安静時1と加算課題、拡散的課題群の安静時2と単独解決セッションを分析対象とした。その際、拡散課題群からは、条件を揃えるため、相手とのやりとりによる影響が含まれない単独解決セッション(S1)を対象とした。

#### (4) 分析方法

本研究では、2つの作業課題が指尖脈波に与える影響に焦点を当てた。まず、指尖脈波の時系列データに対してカオス解析を行うことで、最大リアプノフ指数(Largest Lyapunov Exponent: LLE)の算出と、位相空間内へのアトラクターの再構成を行った。アトラクターの再構成時にはTakens(1981)の埋め込み定理を使用した。その際、遅延時間 $\tau$ と埋め込み次元 $d$ のパラメーター設定を行う必要があることから、今回は先行研究に基づいて、各パラメーターは遅延時間 $\tau=50.0\text{msec.}$ 、埋め込み次元 $d=4$ に設定した(Sano & Sawada, 1985; 岡林, 2015)。解析ソフトにはLyspect3.6.1((株)カオテック研究所製)とカオス検証・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)を使用した。次に、算出された最大リアプノフ指数の安静状態と課題作業中の変化量に対して、課題の自由度を独立変数、最大リアプノフ指数の変化率を従属変数として被験者内の対応のあるt検定を行った。アトラクターについては、課題作業中に見られた特徴を形状と位相空間内を占める大きさの2つの視点から抽出し、課題間で比較を行った。最後に、微視的研究デザインを用いて、実験協力者全員の最大リアプノフ指数の時間推移をトレースすることで、作業中の自身の思考の変化がどのような特徴として表れているのか観察を行った。また、システムの状態を示す指標としてKSエントロピー(Kolmogorov-Sinai entropy)を算出し、対応のあるt検定を行った。一般にエントロピーとは乱雑さの程度として用いられるが、KSエントロピーとは時系列データの特徴を数量化したもので、リアプノフ指数と並んで予測不可能性を示す指標として用いられる(池口・合原, 1993)。心理学におけるカオス解析を用いた研究では主に最大リアプノフ指数とアトラクターの2つの指標がカオス判別のために用いられるが、本研究ではカオス性に関連するKSエントロピーも加えることで、多面的に捉えることができるのではないかと考えた。

### 3. 結果と考察

#### (1) 最大リアプノフ指数

##### 1-a. 課題群内

まず、収束的課題群において安静時1 ( $4.64 \pm 1.54$ ) と加算課題遂行時 ( $3.68 \pm 1.36$ ) の比較を行ったところ、加算課題時に最大リアプノフ指数が5%水準で有意に減少した ( $t(10) = 3.07$ ,

$p = .012$ ,  $cohen's d = .67$ )。一方で、拡散的課題群における安静時 2 ( $4.48 \pm 1.18$ ) と創造課題遂行時 ( $4.93 \pm 1.65$ ) の間には有意差は見られなかった ( $t(11) = 1.67$ ,  $n.s.$ ,  $cohen's d = .32$ )。

### 1-b. 課題群間

次に、群間で最大リアプノフ指数の変化量を比較したところ、創造課題を行った場合 ( $0.46 \pm 0.99$ ) は加算作業を行った場合 ( $-0.96 \pm 1.04$ ) よりも、最大リアプノフ指数が安静時と比べて 1%水準で有意に増加した ( $t(10) = 3.92$ ,  $p = .003$ ,  $cohen's d = 1.41$ )。このことから、課題の持つ自由度が小さく収束的思考が強く機能する加算課題のような収束的な課題においては思考リズムの変化は小さく、課題の自由度が高く拡散的思考が強く機能する創造課題のような拡散的な課題においては思考リズムが大きく変化することが示唆された。本実験によって示唆された結果は岡林 (2015) や Miao et al. (2008, 2010) らの報告と一致するものである。

### 1-c. 実験協力者間における最大リアプノフ指数の時間推移のトレース

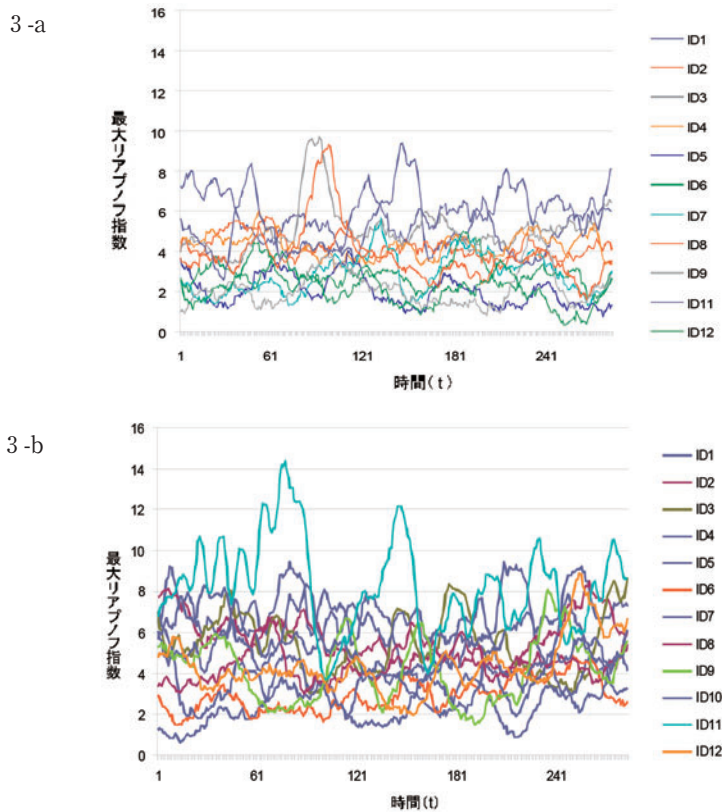


図3 課題遂行中における最大リアプノフ指数の時間変動：  
3-a (左)：加算課題遂行時， 3-b (右)：創造課題遂行時



微視的研究デザイン研究法に基づいて、各実験協力者の最大リアプノフ指数の時間推移のトレースを行った。まず、図 3-a と図 3-b を比較すると、拡散的な課題を行っている最中の方が全体的に最大リアプノフ指数の変動範囲が大きいことが分かる。すなわち、創造課題遂行時の方がリズムのゆらぎが開始から終了までの間、全体的に大きいと言える。次に、図 3-a を見ると、1 分前後で最大リアプノフ指数が増加し、次の合図があるまでは最大リアプノフ指数が減少している。これは、内田クレペリン精神検査で使用する加算課題では 1 分ごとに合図があり行替えが行われるため、課題の特徴が反映されていると考えられる。一方で、図 3-b のように創造課題を解いている場合には、同じ課題であっても人によって異なるリズムを示している。本来、リズムはそれぞれ固有な周期を持っている（蔵本，2007）。例えば、思考はその人の持つスキーマ (schema) を通して行われるものであり、同じ情報であっても人によって受け取り方が異なる。本実験で使用した創造課題は加算課題よりも自由度が大きく、外界から入ってくる情報の解釈が、個々人のスキーマに基づいて行われるため、収束的課題群における最大リアプノフ指数の時間推移（図 3-a）と比べて、個人間で異なる変化の様子が見られたのではないだろうか。このことから、問題解決中の思考リズムの変化の仕方はその人のスキーマに基づいた固有リズムに依存していると考えられる。

## (2) KS エントロピー

次に KS エントロピーについて、両群内で安静時と課題遂行時で比較を行ったところ、収束的課題群において安静時 1 ( $3.99 \pm 0.26$ ) と加算課題遂行時 ( $3.85 \pm 0.51$ ) では有意な差は見られなかった ( $t(10) = 1.09, n.s., cohen's d = .30$ )。一方で、拡散課題群における安静時 2 ( $3.97 \pm 0.23$ ) と課題遂行時 ( $3.76 \pm 0.27$ ) では、安静時から課題遂行時の間で KS エントロピーが 1% 水準で有意に減少した ( $t(11) = 3.81, p = .003, cohen's d = .83$ )。このことから、拡散的課題を行っている時、KS エントロピーの減少よりシステムの状態が不安定になっていることが示唆された。また、収束的課題群での KS エントロピーの変化量 ( $-0.14 \pm 0.43$ ) と拡散的課題群での変化量 ( $-0.21 \pm 0.19$ ) の比較を行ったところ、有意な差は見られなかった ( $t(10) = 0.53, n.s., cohen's d = .22$ )。

## (3) アトラクターの空間的幾何学構造

図 4 はアトラクターが描かれた位相空間のスケールを揃えてトレースしたもので、安静時のアトラクターは黒色、加算課題を行っている時のアトラクターは青色、創造課題を行っている時のアトラクターは赤色で表している。加算課題を行っている場合のアトラクターは安静時と比べて、同程度あるいはそれ以上の大きさになるが、創造課題を行っている場合には、同程度もしくはそれ以下の大きさになることが伺える。各アトラクターの最大リアプノフ指数と KS エントロピーに注目すると、最大リアプノフ指数の増減に関わらず、KS エントロピーが減少するとアトラクターは小さくなり、KS エントロピーが増加とアトラクターが大きくなる傾向があることが推察される。

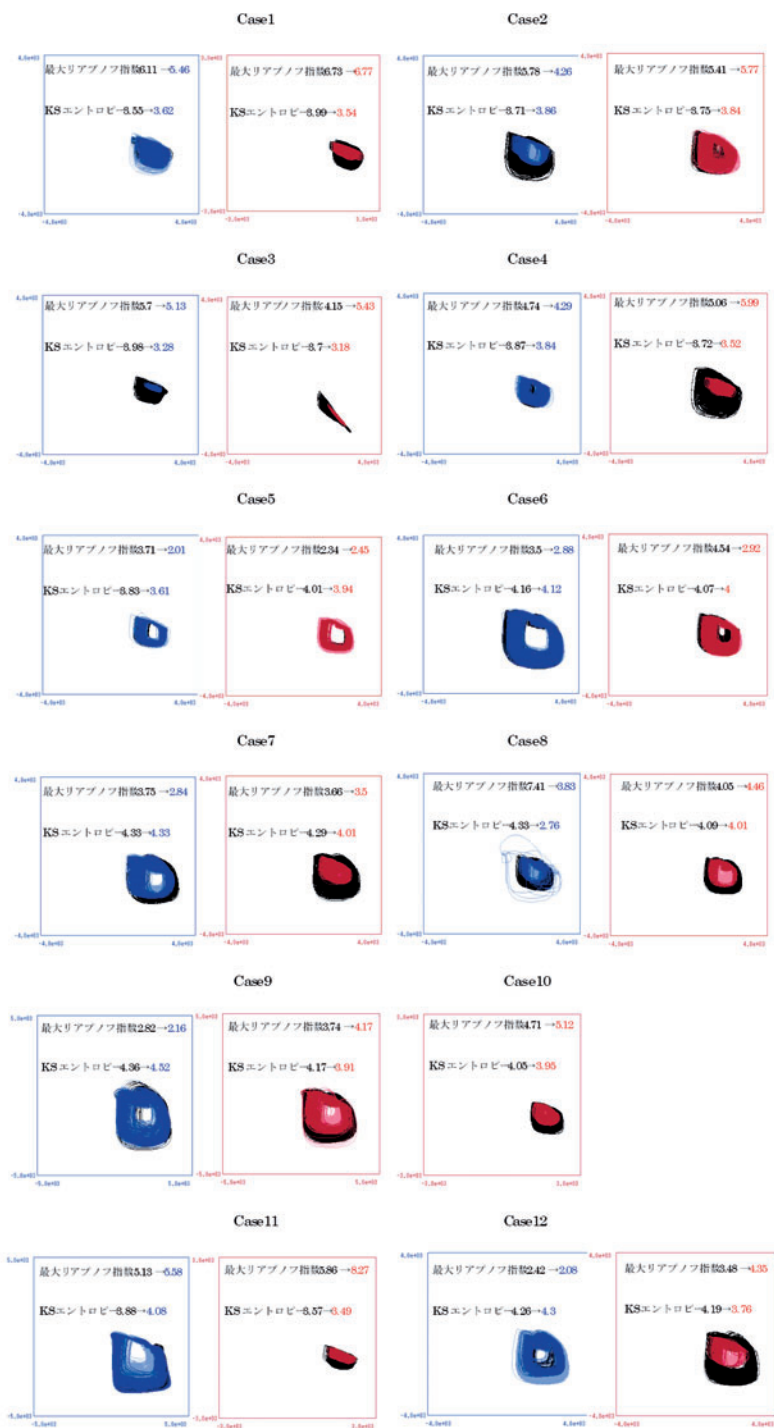


図4 アトラクターの空間的幾何学構造の変化  
(縦軸, 横軸ともアトラクター相空間のパラメーター値を示している。)

#### 4. 全体的考察

本実験結果を通して、課題の自由度の違いによって指尖脈波から得られたリズムの変化が異なることが示唆された。具体的には、①収束的課題を行っている時には最大リアプノフ指数は減少し、拡散的課題を行っている時には増加すること、②課題の特徴や問題解決にあたって求められる思考内容の特徴が最大リアプノフ指数の時間推移に影響を与えること、③拡散的課題を行っている時に KS エントロピーが減少すること、④拡散的な課題を行っている時、アトラクターの空間的幾何学構造は安静時よりも小さくなる傾向にあることが明らかとなった。このことから、これまで思考に対する主なアプローチは脳科学や質的研究が中心であったが、抹消神経系からアプローチし定量化でき得る可能性を示している。そして思考リズムの変化がカオスであるということが示唆された。

一般的に時系列データの振舞いがカオスである場合、最大リアプノフ指数は正の値をとる。カオスとは決してランダムという意味ではなく、決定論的な法則に従いながらも、システムの非線形性によって長期の予測が不可能な複雑な振舞いを示す現象のことを指す(合原, 2000)。時系列データがカオスであった場合、一見異なるように見える変化をしていても、その背景には何らかの法則が隠れていることが示唆される。問題解決においては、与えられた情報はスキーマに従って処理されるというある種決定論的な法則に従いながらも、様々な解法やアイデアが生み出される。この点では加算課題も創造課題も共通していると言えるだろう。しかし、これまでに身につけてきた知識や技術の活用と、それらからさらに連想しイメージを発展させる応用という点で両課題の間に差異がある。また、前者は収束的思考のプロセスが主であるのに対して、後者は収束的思考と拡散的思考の両方のプロセスが含まれているのである。このことから、問題解決中においては、この拡散的思考の有無が最大リアプノフ指数の増加や減少といった変化の傾向に関わっていると思われる。

次に、一般的にエントロピーは無秩序さを意味しており、物理現象においてはエントロピーの増大法則に従い無秩序に向かうとされている。しかし、Schrodinger (1944) が生命は負のエントロピーを食べるという言葉でこの現象を表現したように、人間をはじめとする「生きているシステム」はエントロピーを外部にはき出し、減少させることで常に秩序を形成し続ける。本研究において、加算課題では外部からの情報を内部で処理することが中心なため、安静時と作業中の間に KS エントロピーの有意な変化は見られなかったが、創造課題では外部に考えを表現することが求められるため安静時よりも KS エントロピーが減少していたのではないかと考えられる。このことから、「生きているシステム」のリズムの一つである思考リズムにおいても、外部から入ってきた情報に対して内部からそれに対する考えをはき出すことで、エントロピーの減少が起きていたのではないかと考えられる。佐藤 (2012) はシステムを自然に放置したときエントロピーが大きくなりその構造は均一な状態になるが、生命のように外部との相互作用のあるシステムではエントロピーが小さくなり不均一な状態になると述べている。同時に、エントロピーの減少はシステムの多様性と関係していることを示唆している。すなわち、構造が均一な状態を安定している状態とするならば、「生きているシステム」は常に不安定な

状態にあることを示しており、非平衡状態を維持していると言える。このようにシステムが不安定にあるということは新たな状態が出現する可能性を秘めているということでもある（多賀，2002；河合，2008）。従って、問題解決中の思考リズムのエントロピーが減少し、より不安定になっている場合、その思考システムはこれまでになかった新しいアイデアや解法などの多様な所産を導くひらめきを誘引するような状態にあると推察される。仮に、生きているシステム内部におけるエントロピーの最大量が固定されているとして、エントロピーがはき出せない場合、外部からの情報で満たされ、均一な状態に近づいていこう。それに従って、窮屈になったシステム内部で起こるゆらぎは小さくなることは想像できる。つまり、外部から流入してくる情報に対してうまく考えをはきだせる場合、エントロピーの減少とゆらぎの増大が起こると推察される。

以上を踏まえて、思考リズムにおけるゆらぎの役割について討論したい。一般的に「生きているシステム」のリズムは常にゆらいでいる。これまでゆらぎは不規則さを表す邪魔なものとして捉えられてきたが、リズムのゆらぎが減少した状態はむしろ不健康な状態にあり（雄山，2012）、ゆらぎがなくなるときは生命が終わった時であると考えられている（武者，1998）。思考においてはと言うと、雄山（2012）は外部適応型の作業中に最大リアプノフ指数が低い場合、つまり外部適応が低い状態だと体調不良やミスを引き起こしたことを報告している。また、岡林（2015）は繰り返し作業では徐々にリズムが単調になってくることをアトラクターの分析を通して報告しており、思考が単調になるとゆらぎが減少していくことが推察される。言い換えれば、ゆらぎの存在は非平衡状態であることの表れであり、環境に対して柔軟に対応するための力とも言えるだろう。もしそれを前提とするならば、思考リズムにおけるゆらぎの減少は学習者にとっての課題に対する柔軟さの低下であり、思考の単純化や行き詰まり状態に陥っている、あるいは陥りそうな状態にある可能性が考えられる。本実験から加算作業中に減少していたゆらぎが外界からの合図によって増加したことが推察されたが、他者を含めた外界からの働きかけによって、自己の思考システムに情報の流入が起こり、思考リズムが活性化していたのではないかと考えられる。

最後に、本研究を通して指尖脈波が思考情報を反映しており、課題の持つ特徴や求められる思考内容によってリズムの変化の仕方が異なることがカオス解析と微視的研究デザイン研究法を通して示唆された。今後の課題として、課題の自由度の設定や、最大リアプノフ指数とKSエントロピー、アトラクターの関係性を検討する必要がある。また、これらのパラメーターと思考状態との関連性についても実証的なさらなる検討が望まれる。

## 付記

本研究の一部はICP2016（The 31st International Congress of Psychology）でポスター発表された。

## 文献

- 合原一幸 編 (2000). *カオス時系列解析の基礎と応用* 産業図書
- Ciampi, L. (1997). *Die emotionalen Grundlagen des Denkens: Entwurf einer fraktalen Affektlogik*. Vandenhoeck & Reprecht, Göttingen. (山岸洋・野間俊一・菅原圭悟・松本雅彦 (訳) 2005 基盤としての情動—フラクタル感情論理の構想— 学樹書院)
- 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
- Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, **5**, 444-454.
- 井庭崇・福原義久 (1998). 複雑系入門：知のフロンティアへの冒険 NTT 出版
- 地村弘二・松岡隆史・駒崎久明・中川正宣・楠見孝 (1999). カオスニューラルネットワークによる漢字記憶検索プロセスのダイナミカルなモデル化 認知科学, **6**, 1, 44-54.
- 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
- Kawai, M. (1987). Development of reaching behavior from 9 to 36 months. *Japanese Psychological Research*, **29**, 184-190.
- 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. 66-81) 金子書房
- 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
- Lazarus, R. S. (1982). Thoughts on the relations between emotion and cognition. *American Psychologist*, **46**, 819-834.
- 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., Shimizu, T., Makabe, H., & Oyama-Higa, M. (2008). Chaos in ear plethysmograms: Tracking experiment and a model. *IEEE Conferences on Systems, Man, and Cybernetics Proceedings*. 2982-2987.
- 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>
- 岡林春雄 (1995). 認知心理学入門：その基礎理論と応用 金子書房
- 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
- 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)

清水博 (1990). 生命を捉えなおす 増補版 中央公論新社

外岡豊彦 監 (1998). 内田クレペリン精神検査・基礎テキスト 増補改訂版第 17 刷 日本・精神技術研究所

多賀厳太郎 (2002). 脳と身体の動的デザイン：運動・知覚の非線形力学と発達 金子書房

Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Mathematics*. **898**, 366-381.

田中博 (2002). 生命と複雑系 培風館

Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge, MA: MIT Press.

Zajonc, R. (1980). Feelings and thinking. *American Psychologist*, **35**, 151-175.