Osaka University Knowledge Archive

Title	脈波測定における最大リアプノフ指数(LLE)の意味に関する再検討
Author(s)	胡, 毓瑜; 三好, 恵真子
Citation	大阪大学大学院人間科学研究科紀要. 2024, 50, p. 131-148
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/94729
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

脈波測定における最大リアプノフ指数（LLE）の意味に関する再検討

胡　毓瑜・三好　恵真子

目　次

１．はじめに
２．LLE と関連する諸概念
３．脈波の LLE の意味
４．LLE と具体的な課題
５．脈波の LLE の意味に関する再討論
６．まとめと今後の課題

脈波測定における最大リアプノフ指数（LLE）の意味に関する再検討

胡　毓瑜・三好　恵真子

1．はじめに

生理心理学は、人間の生体信号と心理の特徴や心理活動との関係性を解明する学問である。これまで、我々研究チームは、主に生理心理学の知見に基づいて、脈波、脳波、心電図といった生体信号を測定しながら、カオス解析、周波数解析を中心とする分析方法から、アトラクター、最大リアプノフ指数（Largest Lyapunov Exponent : LLE）、自律神経バランス、サンプルエントロピーなどの指標を算出し、種々の課題に対する人間の心理特徴と心理状態の挙動を評価してきた。以下、本稿の 2.2 にて詳述していくように、生体信号の中で、特に注目されるのは「脈波」である。そして脈波から算出される様々な指標のうち、最大リアプノフ指数 (LLE) は、カオス情報が読み取れることと、挙動が明確かつ安定という特徴を持ち、様々な刺激･活動との関係性が明確になるがゆえに、とりわけ重要な指標として応用展開されている（雄山 2012 : Hu・Miyoshi 2021）。

しかし、LLE はカオス理論からの概念であり、数理的な定義・意味を持つ一方で、理解しやすい一般的なイメージが確立されていない。つまり、脈波の LLE は、「心拍数」、「体温」、「瞳孔の大きさ」などの他の指標と比較すると、明らかに抽象度が高いと言える。したがって、脈波の LLE を指標として利用する場合、「脈波」及び「LLE」の数理的な定義による説明だけでは不十分であり、生理心理学に即した、より理解し得る意味を構築しなければならないと考えられる。

そこで、脈波の LLE の分かりやすい「意味」を構築するにあたり、基礎となる LLE の数理的定義・意味との関係性を考慮するのみならず、この意味から様々な実験結果・現象についても、より適切に説明できるかどうかが重要な判断基準となる。言い換えれば、構築された意味は、「正解」というよりも、新たな研究結果によって再検討・修正されうるものでもある。これまで既存研究では、脈波の LLE の意味について、「外的な刺激への対応能力」、「心の柔軟性」のような表現が多く用いられているが、これらは、脈波のカオス分析の第一人者である雄山真弓がいくつの実験結果に基づいて提起したものである (雄山 2012：Oyama-Higa・Ou 2018)。筆者らも、これまで雄山の提起した「意味」に基づいて脈波を検討してきた。しかし、第 2 章において、より詳細を述べていくように、最近実施した新たな研究結果の中には、こうした「意味」から解釈できない現象が現れ

てきたのである。同様に、LLE は刺激に対する変化が激しいために、特性的な指標として適切かどうかという疑問を提起している論考 (柴山・鈴木 2021) も見られるようになった。よって、脈波における LLE の「意味」を再検討する余地が残されており、むしろこれまでの研究の蓄積から、積極的に再検討すべきであると考えるに至った。

そこで、本稿では、まず根幹にある LLE の数理的な意味及び脈波における LLE の意味の由来を具体的に説明した上で、これまで筆者らが実施してきた様々な課題の結果に基づき、それらを説明しうる指標の新たな意味について再検討を試みていく。なお、先の柴山らの指摘 (2021) も参照しつつ、従来の解釈のように本質的な素質として捉えるよりも、新しい LLE の「意味」は、測定時点での心理の「状態」を表しており、またその経時的な動態性も捉えることができるものであるという点を予め強調してきたい。

2．LLE と関連する諸概念

2.1 カオス現象と LLE

カオス (chaos) とは、システムの状態遷移規則が決定論的であるにも関わらず、システム自体の非線形性によって確率系と等価な複雑さを生み出す現象のことを指し示す。カオスの概念は、1961 年に気象学者により最初に提起されたことを契機として、その理論が迅速に普及・発展することにより、極めて多くのシステムにおいて、カオス現象の存在が発見されるようになった。

このカオス現象を分析する際に、重要な方法の一つが、先にも触れたように、最大リアプノフ指数 (LLE) の算出である。まず、リアプノフ指数 (LE) とは、近接した 2 点から出発した二つの軌道が、どのくらい離れていくかを測る尺度である。つまり、この軌道幅の時間的な変動を数値にしたものがリアプノフ指数であり、その最大値を LLE と呼ぶ。そして、リアプノフ指数は次のように定義される（Abarbanel et al. 1991）。

$$\mathrm{LE} = \lim_{\varepsilon \to 0} \lim_{\mathrm{n} \to \infty} \frac{1}{t} \log \frac{|\delta X_{\epsilon}(t)|}{|\epsilon|} \tag{1}$$

$$\delta X_{\epsilon}(t) = X(t) - X_{\epsilon}(t) \tag{2}$$

$$\epsilon = \mathrm{X}(0) - X_{\epsilon}(0) \tag{3}$$

既存研究では、LLE の値は、「システムの変化の強さ」と見なされ、同時に「LLE がプラスの場合、システムにはカオス現象が存在する」という判断が確立されている [1)]。

2.2 LLE と脈波

規則に従っているシステムが無秩序に見えるのは、そのシステムを構成する要素の一

つ一つの動きが単純であっても、集合体として振る舞うと複雑になるからであり、こうした対象のことを「複雑系」と呼ぶ。人間も複雑系であり、そこから産出される生体信号にカオス情報が存在する可能性が高いと判断された。近年、生体信号におけるカオス情報の存在が明らかとなり、それらの分析によって、人の生理・心理状態を推定する方法の有効性が様々な実験により証明されつつある（Oyama-Higa・Ou 2018）。

そこで、我々研究チームが注目するのは、上述したように「脈波」であり、これは「指先の毛細血管を流れるヘモグロビンの増減」である (Oyama-Higa・Miao 2006)。すなわち、心臓からの血流と同期であることから、指尖脈波の測定部位が指先となり（図 1）、これは、脳磁図 (MEG)、脳波 (EEG)、心電図などの多チャンネルの測定と比較すると、明らかに利便性が高く、かつ測定時間が短いので、様々な活動をしながら測定することも可能になる。

図 1　脈波の測定装置（筆者撮影）

また脈波は、心臓、肺、脳など複数の部位から発信される様々な信号の合成であり、身体および心的状態を鋭敏に反映する生体信号であることも明らかになってきた（雄山 2012）。ちなみに中国は、数千年前から「脈診」という診断方法があり、これも脈波によって人の生理状態を判断する手法と考えられる。

さらに、脈波のデータから埋め込み法（次元数 4、遅延時間 0.05 秒）によりアトラクターを描くと（Lyspect を活用）、図 2 の中の下部に示したような奇異な形状になり、また、LLE がプラスの値であるので、脈波にはカオス情報の存在が判明された（雄山 2012）としている。

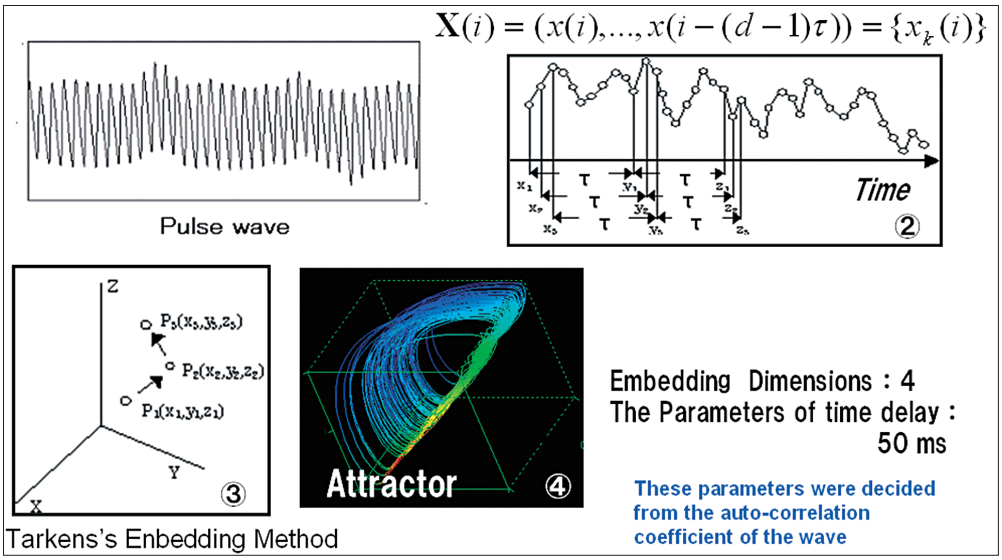


図 2　Lyspect による脈波のアトラクターの計算法と形

3．脈波の LLE の意味

上述のように脈波には、カオス情報が存在しているため、カオス解析により脈波データを分析することができる。また、算出された LLE の値と種々の外的な刺激、あるいは多様な自発的な活動との関係性が存在することも発見された。ただし、このカオス解析により、脈波の LLE から心理状態を説明する際に生じる主な疑問として挙げられるのは、「脈波の LLE の意味」と「脈波の LLE の値（例えば、LLE ＝ 5 はどんな状態であるか）」であり、さらに「脈波の LLE の上昇 / 低下はどのような意味を示すのか」である。このうち、「脈波の LLE の意味」は、すべての問いに答えるための基礎であるために、まず説明しなければならないと思われる。同時に、この意味の説明は、新しい分析手法の創成の上でも不可欠な部分であり、応用展開の起点とも言えるであろう。一方、意味を説明する場合には、当然ながら根拠も必要になる。さらに、その根拠は、二つの側面があり、一つは数理的な意味と関係があること、もう一つはこの意味から様々な現象（研究結果）が説明できることである。

ここで、既存研究で提示されている「システムの変化の強さ」という脈波の LLE の意味は、筆者と共同研究者が実施した、以下のいくつの研究結果と関係が深い。一つは麻酔測定の結果であり（Oyama-Higa et al. 2009）、測定対象者は 71 歳の男性であった。彼は癌治療の手術のため、深く麻酔をかける必要があった。2008 年 12 月に、対象者の同意と医者の協力が得られた上で、手術の麻酔中の LLE の挙動が記録された（図 3）。そのなかで、t11 から t19 までは開腹術であり、時間スケールにおいて、t20 は麻酔から意識が回復する時点である。

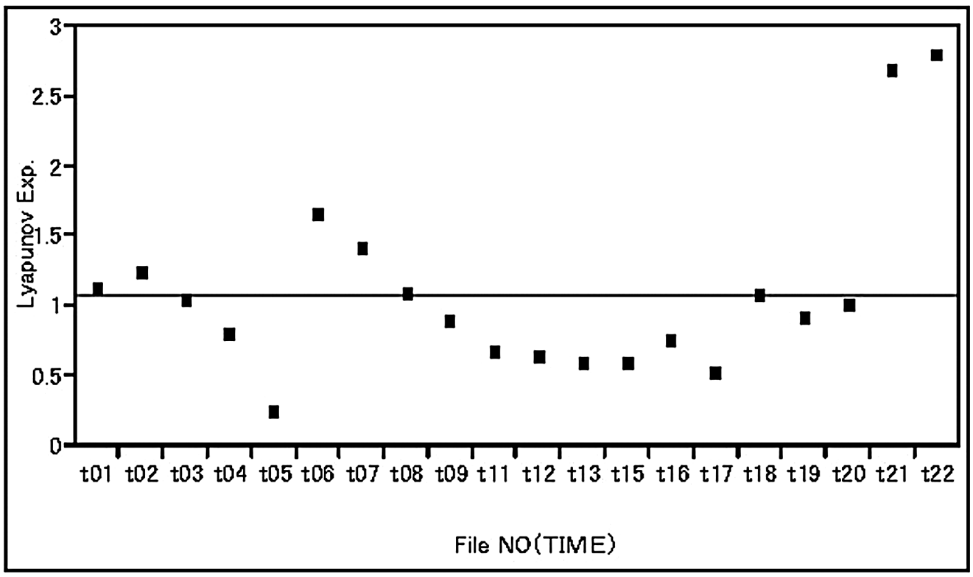
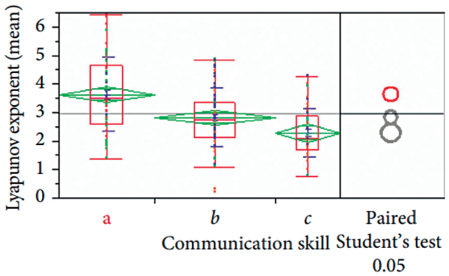


図 3　麻酔状態の LLE の挙動（Oyama-Higa 2009）

麻酔状態に入ると、呼吸系と循環性の動きは続けることができるが、神経系の動きはほぼ止まっていると考えられるために、脈波の LLE は生理状態より神経系の動きと関係が深いと判断された。また、「システムの変化の強さ」という数理的な意味に合わせるならば、脈波の LLE は、心理状態（心理システム）の変化の強さとも関係が深いと考えられる。

二つ目は、認知症と LLE の関係性を分析した研究結果である（Oyama-Higa・Miao 2006）。測定対象者の老人ホームとその家族の双方からの同意が得られ、2003 年 8 月から 11 月にかけて、老人ホームの 179 名の高齢者を対象に脈波測定を行った。また、同じ対象者について医療専門家によって記録された認知症データと日常生活活動度 (ADL) インデックスも取得された。その結果、脈波の LLE は、認知症の重症度や高齢者のコミュニケーション能力と明確な関係性があることが明らかとなった（図 4 と図 5）。



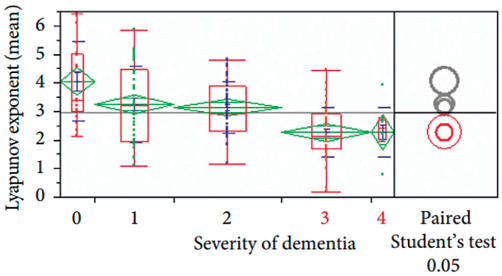


図 4　LLE と高齢者のコミュニケーション能力の関係（左）
図 5　LLE と認知症の重症度の関係（右）(Oyama-Higa・Miao 2006)

三つ目は、うつ状態と LLE の関係性を分析した研究結果である（Hu et al. 2011）。2009 年 8 月から 9 月に、専門のカウンセラーおよび精神科医の支援を受けて、うつ病患者の脈波を測定した。測定件数は全部で 195 回である。また患者と比較するために関西学院大学に所属する健康な学生 113 名（男性 42 名、女性 71 名）を対象に同じく脈波を測定した。学生の LLE は相対的に高い位置でゆらいでいる一方、患者の LLE は低い状態が長時間続いている（図 6 左）。また、T 検定の結果から、患者群の LLE の値は有意に低いことが明らかとなった（図 6 右）。

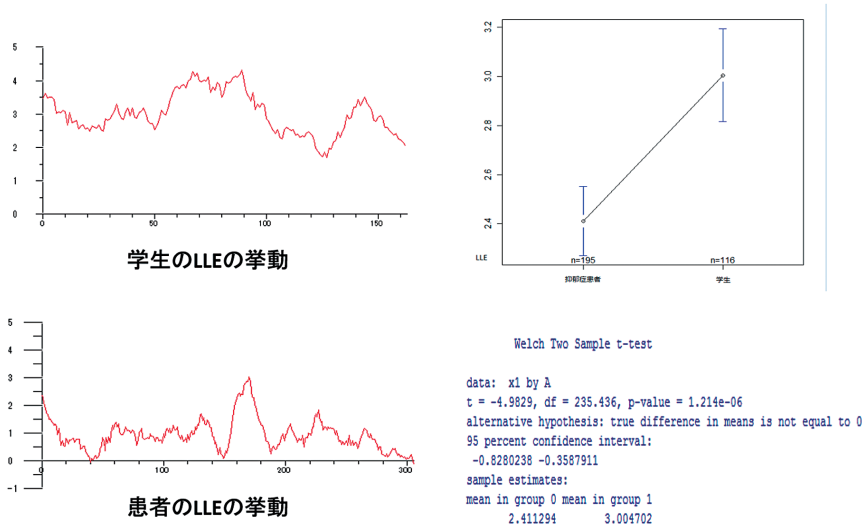


図 6　うつ病患者と健常者と LLE の挙動（(Hu et al. 2011）の分析結果より筆者作成）

以上のようなこれまで得られた結果に基づき、さらには実験中における様々な現象[2)]を併せながら考察すると、脈波における LLE について、その値が大きい状態とは、肯定的に捉えるならば、行動的で積極的な状態であり、逆に否定的に捉えるならば、不安定で心許ない状態となる。他方、LLE の値が小さい状態とは、変化を好まない頑なな状態であり、外部適応が困難な状態であるともいえる (Oyama-Higa・Ou 2018:Hu et al. 2011)。さらに、雄山は、「(脈波の）LLE が適当に揺らいでいる状態であれば、精神的に健康」、「LLE の急激な上昇が危険（暴力行動と関係)」と示唆している (Hu et al. 2011)。

従って、この考察が広く引用されるとともに、さらに一般に活用される場合には、よりイメージしやすく、かつ簡潔な表現が望まれるために、最終的に脈波の LLE は「外的な刺激への対応能力」、「心の柔軟性」の指標として応用展開されている。

4． LLE と具体的な課題

これまで、筆者らは、以下の課題に対して脈波測定を実施し、LLE を計算しながら対象者の心理状態の分析を試みてきた[3)]。

①麻酔状態と生体情報の関係（Oyama-Higa et al. 2009））
②うつ状態と生体情報の関係（Oyama-Higa･Miao 2006））
③老人の認知症と生体情報の関係（Hu et al. 2011）
④子供の発達と生体情報の関係（Oyama-Higa･Miao 2006）
⑤長時間の運転と生体情報の関係（雄山 2012）
⑥音楽鑑賞と生体情報の関係（胡・三好 2015）
⑦学習効率と生体情報の関係（Hu et al. 2017）
⑧歌唱活動と生体情報の関係（Hu･Miyoshi 2019）
⑨地下鉄における高濃度 PM2.5 と生体情報の関係（Hu･Miyoshi 2021）

課題①から課題③までは、上記に結果を触れているので、課題④から課題⑨の研究内容と結果を簡単にまとめてみる。課題④は 0 歳から 5 歳まで総計 242 名の子供に対して脈波測定を行い（表 1）、結果として、大人より子供の LLE が高いことと年齢が若ければ若いほど、LLE は高くなることが分かった（図 7）(Oyama-Higa･Miao 2006)。課題⑥は 14 名の対象者に対して、音楽鑑賞前、音楽鑑賞中と音楽鑑賞後の 3 回測定を 1 組として総計 22 組の測定を行い、結果として、音楽鑑賞前より音楽鑑賞中に LLE が低下すること、音楽鑑賞前より音楽鑑賞後に LLE が高くなることが分かった（図 8）（胡・三好 2015）。課題⑤は 36 名の対象者に対して休憩､暗算と鏡映描写の時に､脈波測定を行い、また課題⑦は 3 名の対象者に対して長時間（4 時間から 6 時間）の勉強の間に総計 25 回の脈波測定を行った。結果として、仕事・勉強に集中すると、LLE が低下することと長時間仕事もしくは勉強をすると、LLE が徐々に低下することが分かった (雄山 2012:Hu et al. 2017)。課題⑧は一人の対象者について、歌唱前と歌唱後の 2 回測定を 1 組として総計 53 組の測定を行い、結果として、歌唱活動によって LLE が向上することが分かった (Hu･Miyoshi 2019)。課題⑨は一人の対象者について、東京における PM2.5 濃度を測定しながら、地下鉄駅のホーム（マスク着用）、外（マスク着用）と外（マスクなし）での測定を 1 組として総計 10 組の脈波測定を行い、結果として、空気質（PM2.5 濃度、マスク着用）の影響を受け､LLE の低下が見られることなどの結果が明らかとなった（図 9）(Hu･Miyoshi 2021)。

表 1　年令別・性別の人数

	Boy	Girl	Total
0 years old	2	5	7
1 years old	13	10	23
2 years old	19	13	32
3 years old	27	27	54
4 years old	44	25	69
5 years old	34	23	57
Total	139	103	242

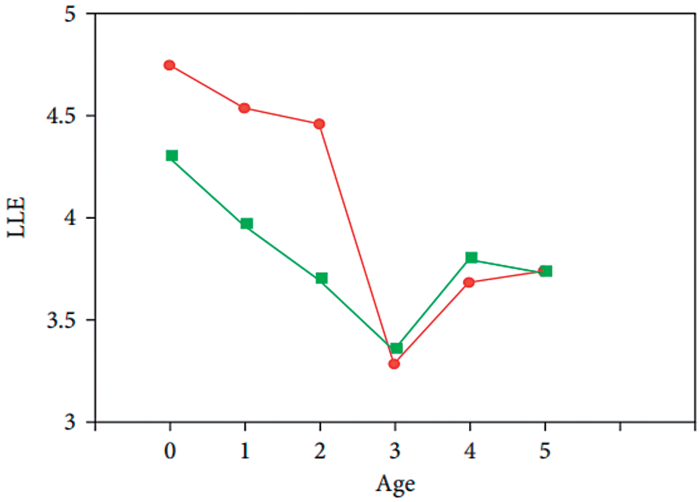


図 7　子供の LLE の挙動 (Oyama-Higa･Miao 2006)

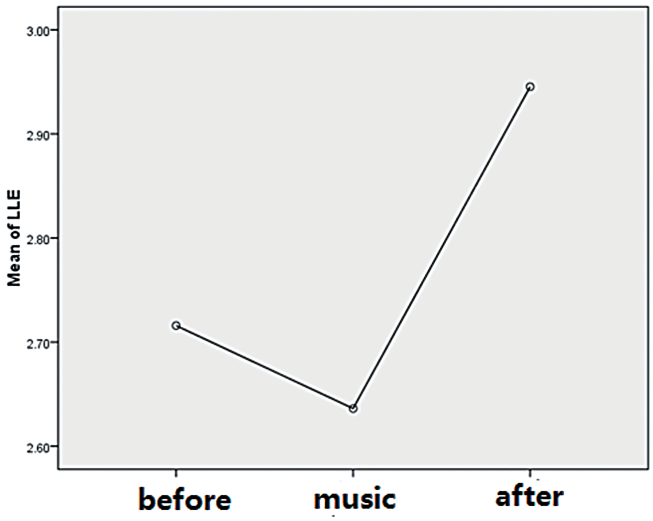


図 8　音楽鑑賞前後の LLE の挙動（胡・三好 2015）

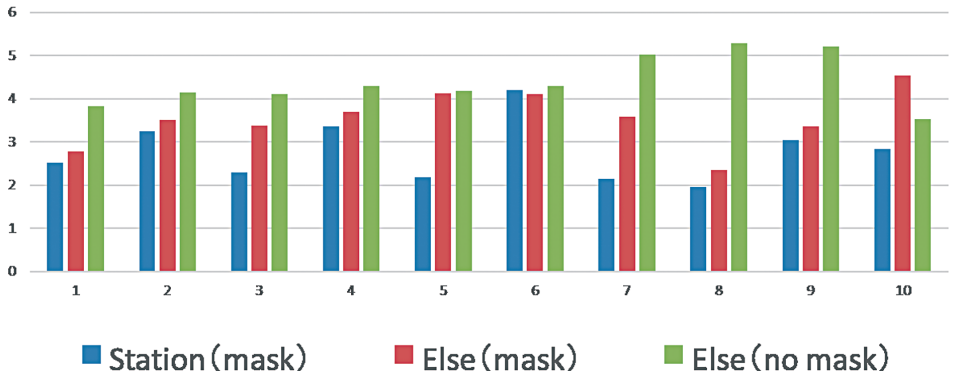


図 9　地下鉄駅内と外の LLE の挙動　(Hu･Miyoshi 2021)

5．脈波の LLE の意味に関する再討論

以上述べてきたように、脈波における LLE について、「外的な刺激への対応能力」、「心の柔軟性」の指標という表現はわかりやすく、また上記の一部の結果、特に課題①から課題③を的確に説明できると考えられる。

ただし、一部の結果については、上手く説明できない問題点も生じており、例えば、子供の LLE が非常に高い現象が存在しているが、子供が外的な刺激に対応能力が高い、あるいは子供のココロの柔軟性が高いとは言い難いのではないだろうか。また、課題⑤から⑨までは、課題①②③と異なり、主に対象者がある刺激を受ける前後、あるいはある活動の前後に LLE の挙動を確認しながら心理状態を分析しているものである。結果として、ある刺激を受けたり、あるいはある活動したりしてから LLE が変化する結果が、通常見られた。「能力」、「柔軟性」のような要因は瞬時に変化することはまずあり得ないという一般的な認識があるので、「能力」からこれらの LLE の挙動を解釈する場合、どうしても違和感が生じてしまう。また、「能力」や「柔軟性」などの表現は、ポジティブなイメージが強く、「その表裏として否定的に捉えると不安定で心許ない状態である」という説明があるにもかかわらず、こちらは無視されがちであり、一方的にこの指標を向上させることになる懸念がある。つまり、「能力」や「柔軟性」に基づいて研究結果を説明する場合、誤解を招く可能性があるのである。例えば、既存研究に以下のような説明がある。加えて、これは個別事例ではない。

「この数値（LLE）が正の値であれば 現象がカオスであることを示す一つの指標となり，数値が大きくなるほどカオス性が高くなることを意味している。多くの先行研究から，LLEmean の値が高いほど心身の健康状態が良好であり，適応的であることを意味していると考えられている。」（長澤・鈴木 2021:94）。

一方、「適応しすぎ、柔軟すぎ」について注意を促す，以下のようなケースも見られる。

「LLE の値が常に Up/Down している状態が健康であり「揺らぎがある」と示され，環境や社会への外部適応力，心の柔軟性，自発性，協調性などが関係すると報告する。LLE は，0 から 10 で示され 4.0 ～ 6.0 がバランスのよい状態であり，この範囲内での変動が理想である。6.1 ～ 7.9 をややストレス状態，8.0 以上はストレス状態で自制心の低下がある（外部や内部に対し攻撃的）とする。また，2.0 ～ 3.9 を環境への適応力がやや低下した状態，2.0 未満は環境への適応力低下の状態とする。」（荻野・篠崎 2022:451）

しかし、このような表現にも課題が残されていると考えられる。これまでの実験結果から、子供、特に赤ちゃんの LLE が 8 を超えることは例外ではなく、また、音楽を聴くと LLE は 6 を超えることが一般的である。しかし、どちらも疲労・ストレスと関係がない[4)]。また、LLE が高すぎると正常ではないことと、LLE が瞬時に上昇すると危険であるという現象も「外的な刺激に対応能力」や「ココロの柔軟性」から解釈しづらい。

従って、上記の現象をより適切に説明するために、一つの改善案は「外的な刺激への対応能力」に対して、更なる説明を加えることである。例えば、次のようなことが考えられる。「外的な刺激への対応能力」とは、人の能力や人格など素質からの影響ではなく、測定時点の心理状態から影響を受けている対応性のことである。一方、「ココロの柔軟性」についても、本来の素質というよりも、測定時点での心理状態を指し示すと考えられる。ただし、そもそも LLE の意味とは、理解しやすくするために作られた「内容説明」であるため、加えてこのような補足説明が必要になる場合には、直接的に意味の表現を変更したほうが適切であると思われる。そこで、本稿では、脈波の LLE について、「ココロの柔軟性」を「心の余裕のあるスペース」に変更し、また「外的な刺激への対応能力」を「外的な刺激に対応するために、使うことのできる精神力（精神的エネルギー）」に変更することを提案したい。

その理由は、まず精神力は体力のように、活動あるいは刺激に対して、短時間でも変化し得るものと考えられる。また、感受性の空間の仮説と合わせて内的な関係性・メカニズムを説明することにより、上記に挙げたすべての課題の結果を適切に説明できる。以下、具体的に述べていく。

①精神力に関する仮説：

感受性の空間（容量がある）存在している[5)]。また、感受性の空間には、様々な感覚が存在している。既存の感覚以外の空間は、「心の余裕のあるスペース」と見なすことができ、つまり、心の余裕のあるスペースが多いほど、使うことのできる精神力が多く、その状態の時の LLE の値は高いと考えられる。また、これは、図 10 に示したように、LLE の値と二つの意味の傾向との関係である。

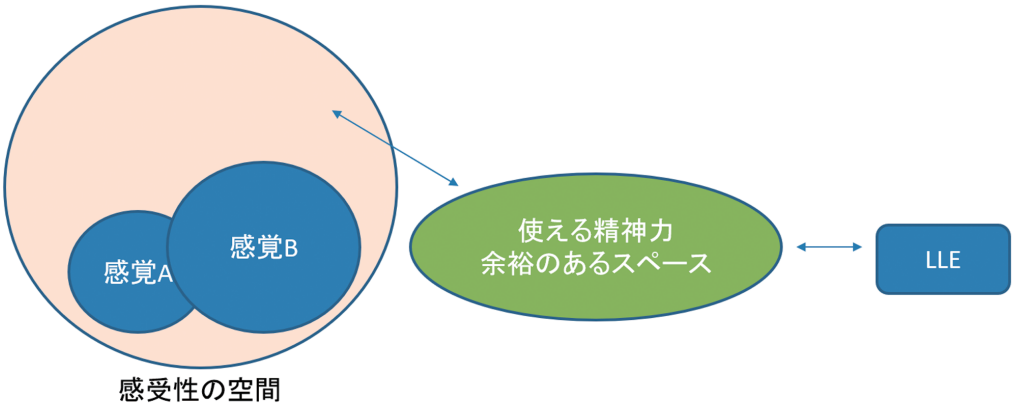


図 10　感受性の空間、精神力と LLE との関係（筆者作成）

一方、人は活動によって感覚が生じ、感覚は時間が経てば消えるが、感覚の種類により消えるまでにかかる時間が異なる[6]。また、他の感覚の影響を受けて、急速に消失する可能性がある。さらに、生理状態の変化によって、感受性の空間の大きさが変化する可能性がある。このような状況は、図 11 のような概念図としてまとめられる。

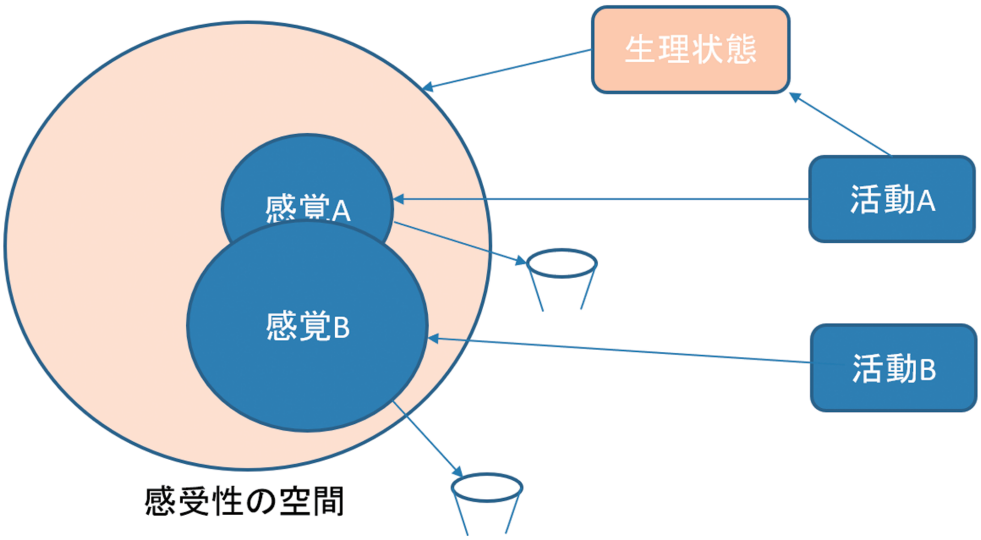


図 11　生理状態と感受性の空間（筆者作成）

心の余裕のあるスペースがある場合、心理状態は変化しやすいが（一方、インパルスの可能性も高くなる）、心の余裕のあるスペースがない場合は、心理状態はあまり変化しないことも統計力学のエントロピーの概念やシステムの内部運動の複雑さにもつながる。感覚が生じたり消えたりする、つまり LLE が常に Up/Down している精神状態が健康で

あり、またこの揺らぎの状態は単なる「不安定」な状態ではなく、システム論の視点からみると「散逸構造」[7] の状態であり、複雑系にとってごく一般的な状態である（貝塔朗菲 1987）。一方、心が完全に空いている方が良いとも言いがたい。感覚遮断実験によって視覚、聴覚などの感覚を遮断すると、対象者が覚醒の状態、感情の反応、態度、思考など多くには阻害的な反応が見られ、また予期しなかった現象として、幻覚が生じることが明らかとなっている (Bexton et al. 1954)。この結果は、いわゆる人間は、感覚を望んでいることを示している。感覚がないままの状態が続くと、心理状態が不安定となり、プラスの感覚ではなくとも、刺激感、さらにマイナスな感覚を追求するケースも見られる。この考えから「LLE が高すぎると正常ではない」並びに「LLE の激上昇が危険（暴力行動と関係）」について、説明できる。

以上述べてきたように、本稿で提示した脈波の LLE の新たな「意味」は、LLE の数理的な意味・雄山の考えに一致することに加え、上記の課題④から⑨までの研究結果においても、一般的な認識から指標の変化と各現象との関係について説明できると考える。上記に懸念点として挙げた子供の LLE の挙動については、子供はいつも好奇心が強く、物事に興味津々な状態である。その原因をさらに探求すると、恐らく子供の感覚はより単一な感覚であり、マイナスな感覚であっても消えやすいので、いつも外的な刺激を追求する状態にあると考えられる。それゆえに、子供の LLE が相対的に高いと考えられる。また、音楽鑑賞の結果の場合、音楽鑑賞中の LLE の低下の原因は、音楽に夢中になり、他の刺激に対応するため使うことのできる精神力が逆に少ないものの、完了後に回復すると考えられる。また、音楽鑑賞が終わってから、LLE が上昇してそれ以前よりもさらに高くなることは心の中に残っている感覚が音楽鑑賞により少なくなっており、こうしたことこそが、音楽など一部の活動が持っている調整機能ではないかと推察される。

一方、長時間の勉強・作業の時に LLE が徐々に低下することによって、身体の疲れという生理的な原因がある反面、様々な感覚が生じて使うことのできる精神力が少なくなる可能性も考えられる。身体の疲れは飲食、休憩などによって回復できるが、ゲームなど様々な活動によって心理状態が調整できると考えられる。さらに PM2.5 濃度が高い場所において、長時間にわたりマスクを着用する場合、LLE の低下する原因については、空気質などの環境要因の変化が敏感に感じられなくとも、生理状態に影響を与え、また生理状態の変化によって感受性の空間が変化し、使うことのできる精神力も変化し、その結果、LLE の値として反応することになる。

一方、課題①から課題③については、従来の解釈と多少異なるものの、説明が可能になると考えられる。まず、うつ状態の場合、LLE の挙動について、「安定な心理状態ではないが、外的な刺激に対応するのは困難 (Hu et al. 2011)」という従来の解釈に対して、本稿で提起する新しい意味から解釈すると、基本的になんらかの原因で心にマイナスの感覚や気持ちに占有され、他の刺激に対応する、あるいは活動する意欲が低くなり、また活動により心理状態を調整する精神力がほぼない状態であると言えるのではないだろ

うか。また、麻酔状態と認知症の場合、基本的に生理状態が原因で、感受性の空間が閉鎖状態、あるいは小さくなり、使うことのできる精神力の総量が少ないと考えられる。

6．まとめと今後の課題

本稿では、脈波のLLEの意味を修正し、「心の柔軟性」、「外的な刺激への対応能力」を「心の余裕のあるスペース」あるいは「外的な刺激に対応するために、使うことのできる精神力（精神的エネルギー）」へと変更した。つまり、総じて、能力・性質的な指標から状態の指標に変更したということである。従来の意味から解釈できない現象や観点を説明できることに加え、従来の意味から解釈できる現象や観点であっても、一般的な認識とより適合する角度から説明できるになると考えられる。さらに、具体的な応用展開については、良い／悪いという二項対立的な評価から脱却し、多様な角度から活動の諸要因（活動主体・活動対象・活動条件・活動環境など）の関係性及び活動過程を分析できるようになる。

ただし、ここで留意すべきは、新しい意味も同じく構築されたものであり、今後さらなる具体的な課題に応用展開を期待される一方、新たな現象に基づいて再修正すべきことも重要な課題であると心している。また、本稿には「感受性の空間」及び関連する説明はいまの段階では、あくまでも仮説であり、今後、心理学の知識・理論及び実証研究から検証を加えていくことも重要になると考えられる。

注

1) カオス性の判断方法はいくつか存在するものの、その代表的な手法がアトラクターの形状（奇妙なアトラクター、ストレンジアトラクター）、LLEの値（LLEがプラス）によるものである。
2) 脈波のLLEの意味を説明するために、この三つの研究結果が重要であるが、この三つの研究結果だけで上記の「意味」を描き出すことが出来るとは言い難い。雄山先生は実験中における様々な現象を含みながら脈波のLLEの意味を説明している。
3) LLEを利用して心理特徴・心理状態を分析した課題は沢山あるものの、筆者がこの9課題を選んだ理由は、いずれの課題も結果が明確であり、直接、論点と繋がるからである。
4) 恐らくLLEが高すぎるとなぜよくないのかを説明するために、次のように推定した。「柔軟性が高い⇒いろいろな気遣い⇒疲労・ストレス」。しかし、たとえこの推定のような事実が存在しているとしても、これはLLEが高い人の一つの表現でしかなく、LLEの意味とは言えない。
5) 認知心理学の記憶のモデリング及び情報処理のモデリング（様々な心理活動には活動空間が存在し、空間の限度を超えると情報処理ができなくなること）を参考にしてこ

の仮説を立てた (王 2006)。

6) 一般的には、マイナスな感覚が消えるまでに時間がかかる。

7) 耗散構造は、平衡から遠ざかったオープンシステムが、外部と物質やエネルギーを交換し続け、外部の条件が一定の閾値に達すると（十分な負のエントロピーの流れが形成される）、内部の相互作用（フラクチュエーション、突然変異など）によって自己組織化現象が発生し、システムは無秩序な状態から時間と機能の面での大規模な秩序のある状態に自発的に変化し、新しい安定した秩序構造が形成されるというものである。また、エントロピーの入力と出力の格差の常に発生するので、静的状態が保たれるのでなく、動的なプロセスが保たれるのは特徴である。

引用文献

日本語

荻野朋子，篠崎恵美子 (2022),「軽度から中等度のアルツハイマー型認知症高齢者に対する写真療法の効果」『日本農村医学会雑誌』第 70 巻 5 ，448-459 頁

雄山真弓 (2012),『心の免疫力を高める「ゆらぎ」の心理学』, 祥伝社

柴山笑凜，鈴木平 (2021),「個人の客観的健康指標としての指尖脈波の Largest Lyapunov Exponent の有効性についての検討」『桜美林大学研究紀要』第 1 巻，55-64 頁

胡毓瑜 , 三好恵真子 (2015),「脈波と脳波の非線性解析並びに音楽刺激による両者の挙動の比較検討」『大阪大学大学院人間科学研究科紀要』第 41 巻，61-77 頁

辻野順子・堀井桂子 (2019),「子どもの愛着障害と生体情報」『姫路日ノ本短期大学紀要』第 42 巻 , 99-109 頁

長澤七海，鈴木平 (2021),「指尖脈波のカオス解析による虚偽検出の可能性」『桜美林大学研究紀要』第 1 巻，90-103 頁

英語

Abarbanel H.D.I., Brown R., Sidorowich J.J., Tsimring L.S. (1993). The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems. *Rev. Mod. Phys*., 65, 1331-1392.

Bexton, W. H., Heron, W., & Scott, T. H. (1954). Effects of decreased variation in the sensory environment. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 8(2), 70–76.

Hu Y., Li Z., Oyama-Higa M. and Miyoshi E. (2017). Exploring the use of pulse waves as psychological indicators in learning. *Collected Papers on The Sixth International Conference on Educational Innovation through Technology*, 307-310.

Hu Y. and Miyoshi E. (2019). An Empirical Study on the Analysis of Singing Effects Based on Pulse Waves. *International Joint Conference on Information, Media and Engineering (IJCIME2019)*, pp.364-367.

Hu Y. and Miyoshi E. (2021). The Impact of High Concentration PM2.5 in Subway Station on Psychological State. *International Joint Conference on Information, Media and Engineering2021*

Hu Y., Oyama-Higa M.,and Miyoshi E. (2018). Using Pulse Waves for Self-Cognition. *International Joint Conference on Information, Media and Engineering (ICIME2018)*, pp.201-204.

Hu Y., Wang W., Suzuki T., Oyama-Higa M. (2011). Characteristic Extraction of Mental Disease Patients by Nonlinear Analysis of Plethysmograms. *2011CMLS*, 92-101.

Oyama-Higa M. and Miao T. (2006), Discovery and Application of New Index for Cognitive Psychology. *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2006*, Taipei, Taiwan, 2040-2044

Oyama-Higa M, Miao T, Imanishi A, Kojima J. (2009) Effect of Anesthesia on Chaotic Dynamics in Finger Plethysmograms. *ISPA2009 Proceedings of the 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, pp.321-326.

Oyama-Higa M, Miao T, Mizuno-Matsumoto Y.(2006). Analysis of dementia in aged subjects through chaos analysis of fingertip pulse waves. *IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern*. 2863-2867

Oyama-Higa M. and Ou F. (2018) Indication of Mental Health from Fingertip Pulse Waves and Its Application. *Journal of Healthcare Engineering Volume 2018 Article* ID 7696458

Oyama-Higa M., Tsujino J., Tanabiki M. (2006). Does a Mother’s Attachment to Her Child Affect Biological Information provided by the Child? -Chaos analysis of fingertip pulse waves of children. *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2006*, 2030-2034

中国語

王甦，汪安圣 (2006),《认知心理学》北京大学出版社

贝塔朗菲 (1987),《一般系统论基础发展和应用》清华大学出版社

A Reexamination of the Meaning of the Largest Lyapunov Exponent in Pulse Wave Measurements

Yuyu Hu and Emako Miyoshi

This study revises the interpretation of the Largest Lyapunov Exponent (LLE) in pulse waves, which serves as a crucial metric for analyzing psychological traits and mental states. However, because the LLE originates from chaos theory and measures the intensity of system alterations, it lacks a simple, comprehensible representation in the context of pulse waves. When applied in fields such as psychology, behavioral studies, or everyday life, it necessitates a clear explanation of its significance. Currently, pulse waves are widely understood to signify "inner flexibility" or "responsiveness to external stimuli." This interpretation has been widely accepted and applied in numerous studies. However, our subsequent research has found that this definition struggles to explain many observed phenomena. Specifically, we have noticed significant changes in the LLE of pulse waves when subjects are exposed to certain stimuli or engage in specific activities. This is puzzling, because "inner flexibility" or "responsiveness to external stimuli" should not exhibit significant short-term changes. Moreover, the original definition is often perceived as a desirable trait, implying that higher values are preferable. This contradicts the notion that excessively high or unstable LLE values of pulse waves may indicate psychological unhealthiness. Therefore, we have redefined the meaning of the LLE of pulse waves based on various research findings. We now consider the LLE of pulse waves to represent "internal reserves" or "mental energy available to respond to external stimuli." This revised interpretation aligns more closely with the mathematical significance of LLE and, in conjunction with prior research, clarifies why excessively high values are undesirable. Additionally, this new interpretation can account for phenomena that were challenging to explain under the previous definition. When we apply this new meaning to phenomena that could be explained by both the old and the new definitions, we find that the new interpretation aligns more closely with common sense or general perceptions. 310 words.