

# 心拍変動解析から解釈する自律神経評価の難しさ

——複数の副交感神経活動指標に着目して——

三 島 利江子

## 問題

心理療法には、精神分析、認知行動療法、EMDR など、さまざまな手法があり、セラピーの効果を精神生理学的・神経学的に説明しようと探究する論文は増加傾向にある。クライアントないし実験協力者の主観評価だけでなく、生理指標を用いて客観的に臨床の効果を評価し、有効性を判断しようとする試みは、心理療法を提供する側がクライアントや社会に対してその意義や有効性の説明責任を果たしていくにあたって必要なことである。また、心理療法の精神生理学的・神経学的探究は、その介入がなぜ効果があるのかというメカニズムの解明につながる可能性も高く、関心が注がれている。

自律神経系の活動は、心臓の拍動データを取得することで調べることができる。まず心臓の拍動から R-R 間隔 (R-R interval: RRI) を取得する。心臓は収縮する時に電気信号が発生し、電圧の山や谷ができる。一般的に心臓の波形には P, Q, R, S, T といった名前が付けられている。電圧が最も高くなるピークが R と呼ばれる部分で、R は心臓の心室が急激に収縮して血液を心臓から全身へ送り出すときに発生する。この R 波と次の R 波の間のミリ秒単位の時間を計測したのが R-R 間隔である (Figure 1)。R-R 間隔の分析をしていくことで、交感神経と副交感神経の変動が見えてくる。心拍変動解析には複数の方法があり、大別すると時間領域 (time domain)、周波数領域 (frequency domain)、非線形 (nonlinear) の分析法がある (早野, 2001)。

時間領域の分析法は、比較的長時間のデータ (例えば 24 時間) を取得して、積率統計量や幾何学的指標を算出する、心疾患の予後予測に用いられることが多い解析方法である (早野, 2001)。例えば、隣り合った R-R 間隔の差の二乗の平均値を平方根で表した指標 RMSSD (単位は ms) は、副交感神経活動の指標として知られている。周波数領域の分析法は、時系列デー

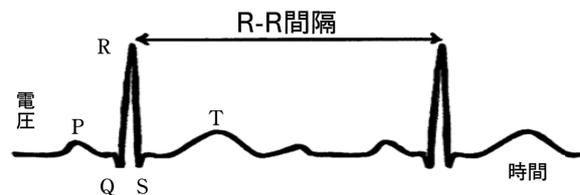


Figure 1 心臓の拍動と R-R 間隔

(注) この図は、広く知られている正常な心拍波形の形を参考に、筆者が描き直したものである。

タに含まれる周期的な変動成分の特徴を測定する解析方法である (早野, 2001)。心拍間隔波形がどのような周波数帯の波で構成されているかを分析することで、交感神経と心臓迷走神経 (副交感神経) の賦活量を把握することができる (井上, 2001; 日本自律神経学会, 2015; 駒沢, 2016)。LF (low frequency; 0.04~0.15 Hz の低周波), HF (high frequency; 0.15~0.40 Hz の高周波) といった指標があり、例えば LF/HF は交感神経活動の指標、HF (単位は  $ms^2$ ) は副交感神経活動の指標として知られている。HF/(LF+HF) は、自律神経機能の活動量のうち副交感神経活動の割合を示す指標として用いられる。非線形の分析法の中のローレンツプロット (ポアンカレプロットとも呼ぶ) 解析は、時系列信号を非線形のプロットで表し、分布の散らばり具合から自律神経の変化を捉えようとする解析方法である。連続した R-R 間隔は、 $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$  と表現することができ、それらを連続する 1 組 ( $I_k, I_{k+1}$ ) ( $k=1, 2, \dots, n-1$ ) として、プロットをとっていくと概ね楕円形の分布が現れる。Toichi, Sugiura, Murai, & Sengoku (1997) は、 $I_k=I_{k+1}$  の線に対し水平の長軸成分を L、 $I_k=I_{k+1}$  の線に対し垂直の短軸成分を T と名付けた。そして L と T の比率 (L/T) は交感神経活動の指標 CSI (cardiac sympathetic index)、L と T の面積 [ $\log_{10}(L \times T)$ ] は副交感神経の指標 CVI (cardiac vagal Index) とみなすことができた。

こうした分析法と指標が提唱されており、理想としてはどの心拍変動解析を行っても同じような結果になることが望ましいものと考えられる。しかしながら、生体信号の解釈は単純ではなく、指標によって感度が

異なる(アーチファクトに対する過敏性が異なる)こともあり、結果が一貫しないことがみられる(Allen, Chambers, & Towers, 2007; Guzik et al., 2007; 石橋, 2005)。元データが同じであるにもかかわらず、分析法によって結果が異なりうることは自律神経評価の信頼性に関わる問題である。また、ローレンツプロット解析においては指標の解釈が研究者によって異なるという問題も生じている。Toichi et al. (1997)は、LとTにプロットの4SDを採用したが、他の研究者の中にはLの1/4(つまり標準偏差:1SD)をSD2と呼び、Tの1/4をSD1と呼ぶ者もいる(Guzik et al., 2007; Brennan, Palaniswami, & Kamen, 2001; Tulppo, Makkilainen, Takala, Seppanen, & Huikuri, 1996)。さらにGuzik et al. (2007)は、SD1とSD2の積をS、SD2をSD1で割った商をSD2/SD1と呼んでいる。CSIとSD2/SD1、そしてCVIとSは数学的には似たようなパラメーターであるが、生理学的解釈は異なっている。例えばToichi et al. (1997)はLとTの面積を副交感神経活動の指標と見なしたが、Guzik et al. (2007)は、SD1を副交感神経が主に影響する短期変動の尺度と見なせるのではないかと提唱した。このようにローレンツプロットを用いた自律神経評価には混乱が生じており、課題が残されている。一部の研究者には、ローレンツプロットから得られる指標を自律神経系のマーカーとして用いるには、現時点ではエビデンスが十分ではないとの主張もみられる(Rahman, Habel, & Contrada, 2018)。

他方、現時点でローレンツプロット解析に関心を集めている理由には、以下のようなものがある。まず、心拍の間隔を表した全てのポイントをプロットにして視覚的に変化を確認できることは大きな利点である。一つ一つの点によって現れた楕円の形の変化は、数字の増減だけではわかりにくかった多くの情報を明瞭に伝えてくれる。また、ローレンツプロットは他の分析法よりもアーチファクト等で生じた外れ値を検出しやすいというメリットももたらす。周波数領域の分析法で得られる指標は、外れ値の影響を受けやすいことが知られており、分散も大きくなりがちである(Guzik et al., 2007; 原口・佐藤・木藤, 2010)。ローレンツプロットの指標は、周波数解析の指標と比べるとばらつきは概ね小さい(石橋, 2005)。加えて周波数解析は高速フーリエ変換などの複雑な計算を行わなければならない一方、ローレンツプロット解析の計算はシンプルで容易である。時間領域や周波数解析の分析法では、比較的長い時間の心拍データを取得することが必要と

なるが、ローレンツプロット解析は例えば2分以内の短い心拍データでも分析が可能とされている(Toichi et al., 1997)。

以上のように、自律神経評価の方法論についての議論が続いている中で自律神経評価の解釈を行うには、その方法について検討しておくことが欠かせない。そこで本研究では、心拍変動解析で用いられる複数の指標を比較することによって、各指標の解釈方法について検討することを試みる。自律神経の変動は個人差が大きく、複数のデータを平均してしまうと、各指標を比較する意味が薄れてしまうことから、本研究では個別のデータを用いて解釈を検討する。扱うデータは、サンプリングを行い、健康な成人において代表的な自律神経活動を示した対象者のものを用いることとする。具体的には、暗算課題を行い、暗算時に心拍数の増加と交感神経系の賦活が認められる者を対象とする。その理由は、個別の特性によって論が拡散することを防ぐためである。自閉症やうつ病群では、自律神経系の変動が非臨床群と異なる傾向にあることが指摘されている(十一・神尾, 1999; Toichi & Kamio, 2003; 久保・吉原・古川, 2010)。このような個別の特性を探究していくことは今後の課題であるが、本研究はそうした研究の前段階として位置づけられるものであり、したがって健康な成人の典型例を扱うこととする。また、課題を暗算としたこと理由は、暗算が古典的に精神ストレス課題として多くの研究で用いられてきており、先行研究から健康な人に見られる反応が明確になっているからである(浜田他, 2006; 河野・近喰, 2017)。前述のとおり、副交感神経活動を表す指標には、RMSSDやHFといった指標もあるが、CVIは他の指標と似たような結果が出にくいことは他の研究者から指摘されている(Allen et al., 2007)。そこで本研究では、複数の副交感神経活動指標に焦点をあてて比較を行い、自律神経評価について考えることとする。

## 目的

本研究では、種類の異なる心拍変動解析を行い、そこから得られる複数の副交感神経指標に焦点をあてて比較検討し、自律神経評価の解釈について考察することを目的とする。本研究では検討を行うにあたって、実験協力者に暗算課題を求め、健康な成人に見られる代表的な反応が得られたデータを基に検討を試みる。

## 方法

### 1. 研究対象

近畿地方の私立大学に在籍する大学生および大学院生に対し、講義中での募集および得られた協力者から紹介を頼り、実験協力者を募った。募集期間は2019年5月から8月までであった。実験協力者に暗算負荷課題を行い、その中から年齢層、前日の睡眠時間など条件がそろっていて、かつ暗算中に心拍数の増加（R-R間隔の短縮）と交感神経活動の亢進が認められた2名を本研究の対象とした。2名とした理由は、自律神経系の働きは一部の変動を統制しても個人差が大きく、単独のデータを基に解釈を考えるより、複数のデータから論ずる方が望ましいと考えられたからである。サンプル数は少ないものの、自律神経活動の多様な反応の一旦を示すことはできると判断した。事例1は20代前半男性、事例2は20代前半女性であった。

### 2. 実験場所

筆者の所属大学の一室にて、室温を26度に保ち、他者による実験室の出入りを遮断した上で実施した。

### 3. 実験手続き

実験協力者に心拍センサを取り付けるための電極ベルトを胸部に装着するよう求めた。心拍センサの装着後、リアルタイム計測のモニターで動作確認を行った。具体的には、心拍波形がモニターに正常に映し出されない場合は、心拍センサの位置や電極ベルトの締め具合が適切でないことが疑われることから、実験協力者に再装着を求めて調整を行い、Figure 1のような心拍波形がモニター上に現れて心臓の拍動データが正しく取得できていることを確認した。その後、約2分かけて年齢、性別、前日の睡眠時間、当日のカフェイン摂取量、服薬の有無等を生理情報として聴取した。心拍センサの計測数値が安定したことを確認後、自然（山）の写真を実験協力者に提示し、「こちらを見ながら楽に座ってください」と教示して安静時の心拍を2分間取得した。その後、暗算で1000から7を連続して引き算する課題を行うように求めた。検査は座位の開眼状態で行い、計算状態の1分間を測定した。暗算試行後、安静時と同様に自然（山）の写真を実験協力者に提示し、2分間の休憩を行って終了した。

### 4. 使用機器

心拍センサには、ユニオンツール株式会社製の「WHS-3」（41.6×38.1×10mm, 16g）を使用した。当該装置は、みぞおちの高さに巻いたベルト電極に小型のセンサをスナップで取り付けるだけのものである。装着が簡単かつ侵襲性が少ないが、心臓にある洞結節の興奮で起こる電気信号からの正確な心拍数を測定でき、幅広く研究で活用されている機器である。心拍数が50 (bpm) 以下200 (bpm) 以上の場合、ノイズとして除去する設定で計測を実施した。得られたデータは、ローレンツプロット解析が可能なニホンサンテック株式会社の自律神経解析プログラム「MaP1060」で読み込んだ。

### 5. 自律神経指標

本研究では、安静状態で2分、暗算状態で1分、暗算後の休憩状態で2分間計測を行ったが、暗算状態は教示を受けた直後は心拍データが安定しにくく、その影響を取り除くため最初の10秒を除いた50秒を用いた。同様のタイムスパンで比較するため、安静状態は2分のうち後半50秒を用い、暗算後の休憩状態は2分のうち前半50秒を用いて以下の指標を算出した。

#### (1) 交感神経

周波数領域の分析法で交感神経活動指標として用いられることの多いLF/HFと、非線形の分析法で交感神経活動指標として知られているCSIを用いた。LF/HF値、CSI値はともに値が大きくなると交感神経活動が活性化したことを示す。本研究では、両方の指標が概ね同じように変動した（安静時や暗算後よりも暗算中の値が大きくなった）ケースを選定した。

#### (2) 副交感神経

時間領域の分析法で副交感神経活動指標として知られているRMSSD、周波数領域の分析法のHF、そしてローレンツプロットの分析法のCVIを比較検討した。これらは、値が大きくなるほど副交感神経活動が活性化したことを示す。また、Guzik et al. (2007) によって、ローレンツプロット解析の解釈としてSD1 (Toichi et al. [1997] のTを1/4にしたもの) が、副交感神経が主に影響する短期変動の尺度と見なせるのではないかと提唱がなされていることから、参考にTも記載することとした。加えて、自律神経機能の活動量のうち副交感神経活動の割合を示す指標HF/(LF+HF)も参考として記した。

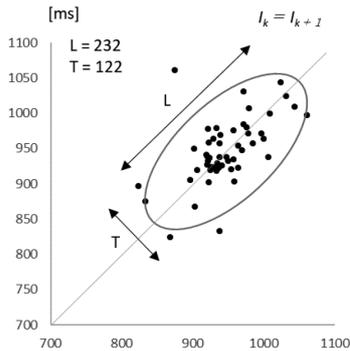


Figure 2 事例1の安静時

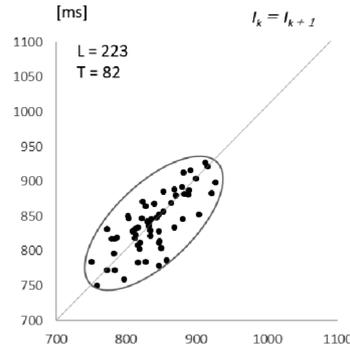


Figure 3 事例1の暗算中

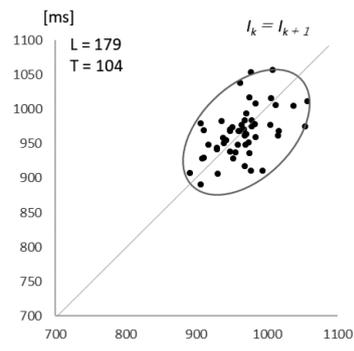


Figure 4 事例1の暗算後

Table 1 事例1の副交感神経活動にまつわる指標

	時間領域解析指標		周波数領域解析指標		ローレンツプロット指標	
	RRI	RMSSD (ms)	HF (msec <sup>2</sup> )	HF/(LF+HF)	CVI	T
安静時	944.51	42.45	314.44	0.39	4.45	122.20
暗算中	838.23	28.94	529.92	0.21	4.26	81.80
暗算後	965.04	36.09	282.64	0.37	4.27	103.91

Note. RRI=R-R 間隔; RMSSD=連続した R-R 間隔の差の二乗平均平方根; HF=0.15~0.4 Hz の高周波  
 LF=0.04~0.15 Hz の低周波; CVI=Toichi et al. (1997) の副交感神経活動指標 [Guzik et al. (2007) の S と類似]  
 T=ローレンツプロットの同一線に垂直な部分の長さ [値を 1/4 にすると Guzik et al. (2007) の SD1 となる]

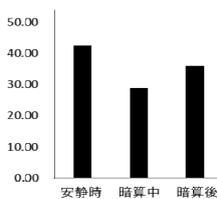


Figure 5 事例1のRMSSD

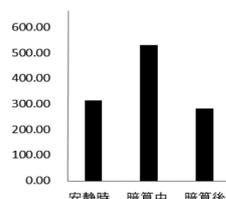


Figure 6 事例1のHF

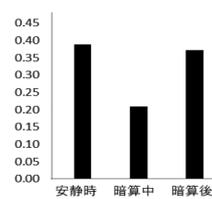


Figure 7 事例1のHF/(LF+HF)

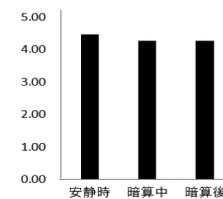


Figure 8 事例1のCVI

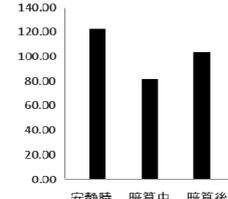


Figure 9 事例1のT

6. 倫理的配慮

本研究は、著者の所属大学の「ヒトを対象とした研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施された。実験協力は任意であること、非侵襲的な生理測定装置(心拍センサ)を用いた実験であること、途中で中断も可能であること等の説明を行い、同意書に署名を受けた上で実施された。

結果

事例1と2共に、対象者は服薬・喫煙がなく、実験前日の睡眠は約7時間、直近の食事は2-3時間前、実験当日のカフェイン摂取量は少ない状態であった。

1. 事例1

LF/HF 値は、安静時1.58, 暗算時3.78, 暗算後1.68と変動していた。CSI 値は、安静時1.90, 暗算時2.73, 暗算後1.72と変動していた。R-R 間隔のローレンツ

プロットを Figure 2-4 に示した。また RMSSD, HF, CVI 等の副交感神経活動指標は Table 1 にまとめた。指標によって単位や値の大きさが異なり、暗算前後の変動の度合いは異なっている。例えば CVI は、他の指標と比べて変動幅が小さい。それらが視覚的、相対的に比較できるようにグラフの縦軸をそろえたものを参考として Figure 5-9 に示した。

2. 事例2

LF/HF 値は、安静時0.62, 暗算時8.24, 暗算後2.52と変動していた。CSI 値は、安静時2.19, 暗算時3.65, 暗算後2.41と変動していた。R-R 間隔のローレンツプロットを Figure 10-12 に示した。また副交感神経活動指標は Table 2 にまとめた。指標によって単位や値の大きさが異なり、暗算前後の変動の度合いは異なっている。例えば HF/(LF+HF) は、他の指標と比べて変動幅が大きい。それらが視覚的、相対的に比較できるようにグラフの縦軸をそろえたものを参考として

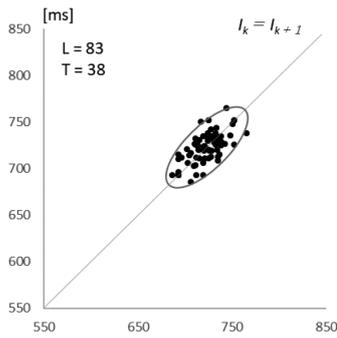


Figure 10 事例 2 の安静時

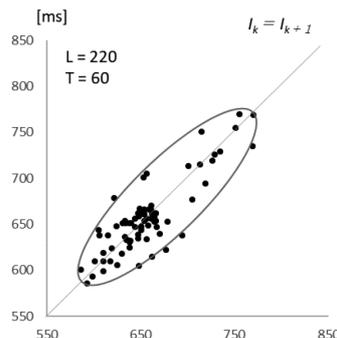


Figure 11 事例 2 の暗算中

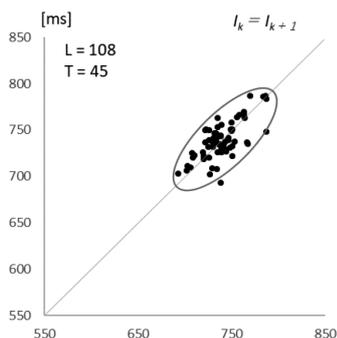


Figure 12 事例 2 の暗算後

Table 2 事例 2 の副交感神経活動にまつわる指標

	時間領域解析指標		周波数領域解析指標		ローレンツプロット指標	
	RRI	RMSSD (ms)	HF (msec <sup>2</sup> )	HF/(LF+HF)	CVI	T
安静時	721.59	13.62	70.33	0.62	3.50	38.03
暗算中	656.17	21.19	101.61	0.11	4.12	60.27
暗算後	735.89	15.53	109.13	0.28	3.68	44.64

Note. RRI=R-R 間隔; RMSSD=連続した R-R 間隔の差の二乗平均平方根; HF=0.15~0.4 Hz の高周波 LF=0.04~0.15 Hz の低周波; CVI=Toichi et al. (1997) の副交感神経活動指標 [Guzik et al. (2007) の S と類似] T=ローレンツプロットの同一線に垂直な部分の長さ [値を 1/4 にすると Guzik et al. (2007) の SD1 となる]

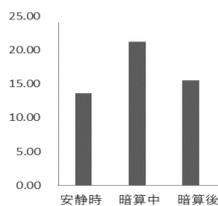


Figure 13 事例 2 の RMSSD

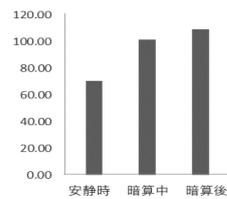


Figure 14 事例 2 の HF

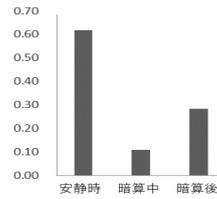


Figure 15 事例 2 の HF/(LF+HF)

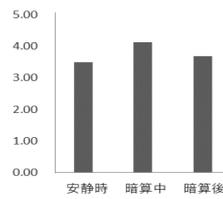


Figure 16 事例 2 の CVI

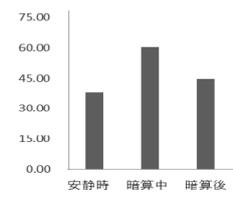


Figure 17 事例 2 の T

Figure 12-16 に示した。

### 考察

本研究の目的は、事例に対して分析法の異なる解析を行い、得られた副交感神経活動指標を比較して自律神経評価の解釈について考えることであった。事例 1 の場合は、RMSSD, T の値から、安静時と比べて暗算中に副交感神経活動が抑制されたことが示された。CVI の値も若干ではあるが暗算中に減少し、副交感神経活動は抑制されていた。ところが HF の値によれば、安静時と比べて暗算中に副交感神経活動が賦活していた。ただし HF/(LF+HF) の値から、自律神経活動全体のうち副交感神経活動が占める割合は、安静時と比べて暗算中に減少していたことが示唆された。暗算後は、CVI のみ暗算中とほぼ横ばいであったが、その他指標は安静時の値に戻るように変動していた。事例 2 の場合は、HF/(LF+HF) の値では、事例 1 と同様

に自律神経活動全体のうち副交感神経活動が占める割合は、安静時と比べて暗算中に減少したことが示された。ただし RMSSD, HF, CVI, T の値は、安静時と比べて暗算中に副交感神経活動が活性化していた。暗算後は、HF を除く他の指標が安静時の値に戻るよう減少する中、HF だけは暗算後に若干増加していた。

事例 1 と 2 のどちらにおいても、異なる解析手法の副交感神経活動指標を比較したが、一部一貫しない結果であった。同じデータを基に比較して、自律神経活動評価が必ずしも一致しないことはこれまで指摘されていたが (Allen et al., 2007; Guzik et al., 2007; 石橋, 2005)、本研究においても一貫した結果は得られなかった。特に周波数解析の HF 指標は、その他の副交感神経活動指標と比べると、一部異なる変動を示す傾向が見られた。周波数解析は、分析する信号の定常性 (stationarity) が必要で、アーチファクトに敏感である (Guzik et al., 2007)。周波数解析を行う場合は、呼吸数を 9 回/分以上 (0.15 Hz 以上) に保つことの望

ましいとされている(早野, 2001; Grossman, Karmaker, & Wieling, 1991)。しかしながら, 本実験では暗算の邪魔にならないように呼吸には介入せず, 実験協力者の自然な呼吸に任せた。このことが HF 値に影響した可能性がある。

ここで HF や RMSSD がなぜ副交感神経活動指標とみなすことができるのかを考えたい。まず各神経には周波数伝達特性がある。HF はその特性を利用している。交感神経は 0.15 Hz 以上の心拍変動を伝達し得ないが, 心臓迷走神経は 1 Hz 前後の変動まで伝達し得ることが知られている。交感神経と心臓迷走神経の反応にこのような発現速度の差があるため, 0.15 Hz 以上よりも速い心拍変動は, 交感神経の変動が媒介しない(早野, 2001)。そのために周波数解析では, スペクトル分析によって高周波(HF: 0.15~0.40 Hz)を取り出し, それを心臓迷走神経の変動によって生じたもの, つまり副交感神経の活動指標とみなしている。周波数解析を行う場合に, 呼吸数や心拍呼吸比を考慮することが望まれる理由は, 呼吸の周波数を, 交感神経の伝達可能周波数限界である 0.15 Hz 以上に保つ必要があるからである(Hayano et al., 1991)。

心拍のゆらぎはさまざまなメカニズムに起因する(早野, 2001), RMSSD はその中でも 1 拍ごと (beat-to-beat) の変動に着目している。1 拍ごとの調節は, 主に呼吸の周期と関連がある。ヒトの心拍数は吸気に増加して, 呼気に減少する。この現象により, 一般的に呼吸性洞性不整脈 (respiratory sinus arrhythmia; 以下 RSA) と呼ばれる心拍のゆらぎが発生する。1 拍ごとの動的で瞬時的 (instantaneous) な調節を行うことができる神経は心臓迷走神経であるため(井上, 2001), RSA の強さは, 心臓迷走神経系の興奮度に比例することが知られている(Paton & Pickering, 2012; McAllen & Spyer, 1978)。こうしたことから時間領域解析では, 連続した心拍間隔の差の二乗平均平方根 (RMSSD) を, 副交感神経活動の指標とみなしている。また, ローレンツプロットは, RSA の評価に役立つツールであるという指摘がある(Brennan et al., 2001)。ローレンツプロットは, 連続した心拍間隔を ( $I_k, I_{k+1}$ ) としてプロットしていく。プロットされた楕円形が厚みをもつ (T が大きくなる) ということは, 1 拍ごとのゆらぎが大きく, 連続した心拍間隔の差が小さくなったり大きくなったりと幅があることを示す。本研究において, 2 事例とも RMSSD と T の指標に類似性が認められたが, それは両者が RSA の評価に関連した短期的な心拍変動を反映する指標だ

からであろう。ローレンツプロット解析は周波数解析とは異なり, 呼吸の調整は不要とされている(Toichi et al., 1997)。自律神経評価の方法として, ローレンツプロット解析が近年注目されているのは, 呼吸回数や心拍呼吸比を考慮に入れる必要がないという利点も大きいと考えられる。

次にローレンツプロットの解釈について考えたい。Toichi et al. (1997) は L と T の積 (CVI) を副交感神経指標とみなしたが, 値は当然ながら T だけでなく L の長さの影響を受けてしまう。例えば事例 1 のローレンツプロット Figure 3 と 4 を見比べると, 暗算中から暗算後に移ると T は長くなったが, L は短くなったことがわかる。結果的に, 事例 1 の暗算中と暗算後で CVI 値はほぼ変わらなかったが, ローレンツプロットを眺めると質が変化していることが伺われる。暗算後は, 全体的に心拍がゆったりとして, かつ心周期のゆらぎが大きくなった。心拍数の低下 (R-R 間隔の延長) は, 副交感神経線維からアセチルコリンが放出されたことにより心室の収縮力が低下して起こるもの(Drew & Sinoway, 2012) であることも考慮すると, Figure 3 と 4 の CVI がほぼ同じ値で副交感神経活動が同水準であるという解釈には違和感が残る。Guzik et al. (2007) が SD1 という指標を副交感神経が主に影響する短期 HRV (short-term heart rate variability) の尺度とみなせるのではないかと提唱してから十数年経ったが, 現在では RMSSD と SD1 を同一のメトリックスとみなす研究者が増えているようである(Ciccione et al., 2017; Shaffer & Ginsberg, 2017)。ローレンツプロットで心拍変動を視覚的に確認するときは, 楕円形の厚みである T ないし SD1 に着目することは重要なポイントの一つと考えられる。

2 名のサンプルに基づいて結論を導くことは控えないけれども, 複雑な自律神経系の働きについて, 一部の変動を統制してもこのように多様性が見られたことは興味深い。今後はサンプル数を増やしたり, サンプリングに偏りを持たせずに検証したりすることが望まれる。一方で, 自律神経の評価(解釈)が難しいものであること自体は本研究で示すことができたと考えられる。交感神経と副交感神経の活動はこのように変化したといった研究報告を読むと, 結論ばかりに注意が向きがちであるが, 解析法を変えたり, どの指標で判断したりするかによって結果が異なりうることを常に念頭に置いておかなければならない。各指標が何を表すかだけでなく, その指標がなぜ自律神経系の指標となり得るのかという背景の知識を持っておくこと

は有用であろう。どの解析法にもメリット・デメリットがあり、複数の指標を補足的に用いながら、慎重に判断していく姿勢が求められる。

本研究では、呼吸の調整をしておらず、HF 指標が他の指標と比べて一部異なる変動を示す傾向が見られた。そのため、事例の検討は慎重にすべきであろう。ただし、呼吸性変動が反映される成分は HF であり、血圧変動が反映される LF 成分（早野, 2001; Eckberg, Kifle, & Roberts, 1980）等への影響は限定的であると考えられる。そこで本研究の事例から読み解くことができたことを記しておく。事例 2 では、HF/(LF+HF)（自律神経活動全体のうち副交感神経活動が占める割合）は、安静時と比べて暗算中に減少していた。精神ストレス負荷課題を行っている間に、副交感神経活動の割合が減少するのは自然なことである。ところが RMSSD, HF, CVI, T の値は全て暗算時に増加していた。暗算時に副交感神経活動が増加したが、同時にその増加を上回るだけの著しい交感神経活動の活性化があったことが、HF/(LF+HF) によって示された。事例 1 では、暗算中は交感神経系が活性化して、HF 以外の指標からは副交感神経系が抑制されたことが同われ、自律神経はシーソーのように拮抗的に働いていた。自律神経系が円満に作用しているときに見られる反応である。ところが事例 2 では交感神経系が著しく活性化して、同時に副交感神経系も賦活したことが示唆された。Berntson, Cacioppo, Quigley, & Fabro (1994) は、自律神経が非互斥的反応を起こす場合を指摘しており、交感神経系と副交感神経系の両方が活性化した状態を「相互活性 (co-activation)」と呼んだ。事例 2 はこの状態を捉えたものと考えられる。本研究の結果、評価したい区間の心拍変動の変化をローレンツプロットで視覚的に捉え、HF/(LF+HF) 値を参考にした上で、複数の指標を補足的に用いれば、自律神経系の全体像がつかみやすくなると考えられる。

一般的に生理指標の解釈は、長い年月をかけてコンセンサスが得られる傾向がある。研究の進展によって指標の解釈が変化していくことはまれではなく、本研究で取り上げた自律神経を評価する指標についても今後解釈や捉え方が修正されていく可能性がある。自律神経の調整不全はさまざまな心身不調とつながっている。特にトラウマ臨床において、自律神経系の調整不全を整えていくための介入が重要であると年々強調されるようになってきている (Kain & Terrell, 2018)。自律神経系の評価がより正確にできれば、研究においても臨床現場においても有益なものとなりうると考えられ

る。

【付記】本論文は、2名の文学部教員（研究指導教員を除く）による査読を経た後に人文科学研究科委員会で掲載を決定したものである。

【謝辞】ローレンツプロット解析に関して、神経発達症研究推進機構の天野玉記先生より情報提供を賜りました。心よりお礼申し上げます。

#### 引用文献

- Allen, J. J. B., Chambers, A. S., & Towers, D. N. (2007). The many metrics of cardiac chronotropy: A pragmatic primer and a brief comparison of metrics. *Biological Psychology*, 74, 243-262.
- Berntson, G. G., Cacioppo, J. T., Quigley, K. S., & Fabro, V. T. (1994). Autonomic Space and Psychophysiological Response. *Psychophysiology*, 31, 44-61.
- Brennan, M., Palaniswami, M., & Kamen, P. (2001). Do existing measures of Poincaré plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability? *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 48, 1342-1347.
- Ciccone, A. B., Siedlik, J. A., Wecht, J. M., Deckert, J. A., Nguyen, N. D., & Weir, J. P. (2017). Reminder: RMSSD and SD1 are identical heart rate variability metrics. *Muscle Nerve*, 56, 674-678.
- Drew, R. C., & Sinoway, L. I. (2012). Autonomic control of the heart. In Robertson, D., Biaggioni, I., Burnstock, G., Low, P. A., & Paton, J. F. R. *Primer on the Autonomic Nervous System. 3rd edition.* (pp. 139-142). New York: Elsevier.
- (ドリュエー, R. C., シノウエイ, L. I. 岩瀬敏 (訳) (2015). 心臓の自律神経性制御. ロバートソン, D. ビアギオニ, I. パーンストック, G. ロー, P. A. ペイトン, J. F. R. 高橋昭・間野忠明 (監訳) ロバートソン自律神経学, エルゼビア・ジャパン)
- Eckberg, D. L., Kifle, Y. T., & Roberts, V. L. (1980). Phase relationship between normal human respiration and baroreflex responsiveness. *Journal of Physiology*, 304, 489-502.
- Grossman, P., Karemaker, J., & Wieling, W. (1991). Prediction of tonic parasympathetic cardiac control using respiratory sinus arrhythmia: the need for respiratory control. *Psychophysiology*, 28, 201-216.
- Guzik, P., Piskorski, J., Krauze, T., Schneider, R., Wesseling, K. H., Wykretowicz, A., & Wysocki, H. (2007). Correlations between the Poincaré Plot and Conventional Heart Rate Variability Parameters Assessed during Paced Breathing. *The Journal of Physiological Sciences*, 57, 63-71.
- 浜田敏彦・村田哲人・高橋哲也・大竹由香・齊藤実・木村秀樹・和田有司・吉田治義 (2006). 暗算負荷によ

- る自律神経機能および脳波の変化と両者の関連性について. 臨床病理, 54, 329-334.
- 原口雅浩・佐藤鑑永・木藤恒夫 (2010). 心拍変動の周波数解析とローレンツプロットの比較. 日本心理学会大会発表論文集74, 2PM056-2PM056.
- 早野順一郎 (2001). 心拍変動による自律神経機能解析. 井上博 (編) 循環器疾患と自律神経機能, 医学書院, 71-102.
- Hayano, J., Sakakibara, Y., Yamada, A., Yamada, M., Mukai, S., Fujinami, T., Yokoyama, K., Watanabe, Y., & Takata, K. (1991). Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. *The American Journal of Cardiology*, 67, 199-204.
- 井上博 (2001). 自律神経の電気生理学的作用. 井上博 (編) 循環器疾患と自律神経機能, 医学書院, 44-70.
- 石橋圭太 (2005). 自律神経活動評価における心拍変動解析とローレンツプロット法の比較. 日本生理人類学会誌, 10, 40.
- Kain, K. L., & Terrell, S. J. (2018). *NURTURING RESILIENCE: Helping Clients Move Forward from Developmental Trauma- An Integrative Somatic Approach*. California: North Atlantic Books.
- (ケイン, テレル, 花丘ちぐさ・浅井咲子 (訳) (2019). レジリエンスを育む一ポリヴェーガル理論による発達性トラウマの治癒. 岩崎学術出版)
- 河野貴美子・近喰ふじ子 (2017). 発達障害児にみる自律神経系機能と脳波による検討. 国際生命情報科学会誌, 35, 23.
- 駒澤真人 (2016). 日常生活における自律神経機能の計測と評価に関する研究. 平成28年度博士論文. 神戸大学レポジトリ.
- 久保千春・吉原一文・古川智一 (2010). 心療内科を受診する慢性疲労を訴える患者の診療, 客観的なバイオマーカーを用いた疲労の解析, うつ状態, 種々の神経症状に関する研究. 平成21年度厚生労働科学研究報告書 (こころの科学研究事業) 自律神経機能異常を伴い慢性的な疲労を訴える患者に対する客観的な疲労診断法の確立と慢性疲労診断指針の作成に関する研究報告書.
- McAllen, R. M., & Spyer, K. M. (1978). The baroreceptor input to cardiac vagal motoneurons. *Journal of Physiology*, 282, 365-374.
- ニホンサンテック, 自律神経解析プログラム MaP1060. <https://wp.santeku-map.com/>
- 日本自律神経学会 (編) (2015). 自律神経機能検査. 文光堂.
- Paton, J. F. R., & Pickering, A. E. (2012). Cross-talk Between Body Systems: Respiratory-Cardiovascular Coupling in Health and Disease. In Robertson, D., Biaggioni, I., Burnstock, G., Low, P. A., & Paton, J. F. R. *Primer on the Autonomic Nervous System. 3rd edition.* (pp. 117-121). New York: Elsevier.
- (ペイトン, J. F. R., ピッカリング, A. E. 岩瀬敏 (訳) (2015). 身体の器官系間のクロストーク: 正常と疾患における呼吸系と心血管系間のカップリング. ロバートソン, D. ビアギオニ, I. バーンストック, G. ロー, P. A. ペイトン, J. F. R. 高橋昭・間野忠明 (監訳) ロバートソン自律神経学, エルゼビア・ジャパン)
- Rahman, S., Habel, M., & Contrada, R. J. (2018). Poincaré plot indices as measures of sympathetic cardiac regulation: Responses to psychological stress and associations with pre-ejection period. *International Journal of Psychophysiology*, 133, 79-90.
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*, 5, 258.
- 十一元三・神尾陽子 (1999). 自律神経反応からみた自閉症者の覚醒状態. 児童青年精神医学とその近接領域 40, 319-328.
- Toichi, M., & Kamio, Y. (2003). Paradoxical Autonomic Response to Mental Tasks in Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 33, 417-426.
- Toichi, M., Sugiura, T., Murai, T., & Sengoku, A. (1997). A new method of assessing cardiac autonomic function and its comparison with spectral analysis and coefficient of variation of R-R interval. *Journal of the Autonomic Nervous System*, 62, 79-84.
- Tulppo, M. P., Makikallio, T. H., Takala, T. E., Seppanen, T., & Huikuri, H. V. (1996). Quantitative beat-to-beat analysis of heart rate dynamics during exercise. *American Journal of Physiology*, 71, H244-252.
- ユニオンツール株式会社, 心拍センサ WHS-3. [http://www.uniontool.co.jp/product/sensor/index\\_020103.html](http://www.uniontool.co.jp/product/sensor/index_020103.html)