

# 心拍変動増大に最適な呼吸は圧反射感度を高めるか？ (第1報)

—シーケンス法を用いた圧反射感度評価システムによる検討—

榊原 雅人\*<sup>1)</sup> 金田 宗久\*<sup>2)</sup> 石田 光男\*<sup>1)</sup>

圧受容体反射感度評価システム (血圧が漸進的に上昇または下降する3~7拍のシーケンスを特定するために、コンピュータによって連続血圧と心電図 RR 間隔記録をスキャンするシステム) を構成した。圧受容体反射感度は特定されたすべてのシーケンスの回帰係数の平均値として算出した (Parlow et al., 1995)。実験では2名の健常男性において安静条件と緩徐なペース呼吸条件を実施し、心電図 (CM5誘導)、呼吸 (ストレンゲージを胸部に装着)、連続血圧を測定した。心電図 RR 間隔の標準偏差によって評価した心拍変動の大きさは安静に比べて緩徐なペース呼吸において増大した。さらに、本システムによって評価された圧受容体反射感度は安静に比較して緩徐なペース呼吸で増加した。本研究における圧受容体反射感度評価システムの有用性が考察された。

キーワード: 圧受容体反射感度, シーケンス法, 心拍変動, 自律神経活動, バイオフィードバック

## 1. はじめに

正常な心臓の拍動は洞結節から規則正しく発生した電気刺激が心室を興奮・収縮させることで起こり、拍動の頻度 (心拍数) は自律神経活動によって調節されている。心臓は常に一定のリズムで規則正しく拍動する印象があるが、子細に観察すると拍動間隔は一定でなくむしろ著しくゆらいでいるのがわかる。このようなゆらぎを心拍変動 (Heart rate variability) とよび、具体的に、心電図 R 波と次の心電図 R 波の間隔をミリ秒単位で順次測定することで把握することができる。これまでの研究から心拍変動は心臓自律神経活動を反映する指標となることが明らかにされているが<sup>1)</sup>、身体的負荷やストレスもしくは精神身体的な障害に関連して心拍変動は低下する (すなわち心拍のゆらぎがみられなくなる)<sup>2) 3) 4) 5) 6) 7)</sup>。一方、薬物や心理療法によって状態が軽快すると低下していた心拍変動が再び増大することも知られている<sup>8) 9) 10) 11)</sup>。また、若年者や有酸素能力の高い者<sup>12) 13) 14)</sup>、さらには情動刺激に対して適切に感情を制御できる者では安

静時心拍変動が大きいことから<sup>15) 16) 17)</sup>、心拍変動の増大は身体的・心理的な適応状態を反映しているのではないかと推測されている<sup>18)</sup>。

ところで、リラクセーションは基本的に心拍変動を増大させることが知られているが<sup>19)</sup>、特に、緩徐なペース呼吸とバイオフィードバックの手続きを用いて心拍変動を増大させる方法 (心拍変動バイオフィードバック: 以下、心拍変動 BF) はストレスに関わるさまざまな症状を緩和することが報告されている<sup>18)</sup>。心拍変動 BF の臨床的な効果については、不安の軽減<sup>20)</sup> や睡眠中の休息機能の改善<sup>21)</sup> などの基礎的な知見が積み重ねられているが、背景機序として、心拍変動 BF は圧受容体反射に関わる自律神経機能を高めるように働くのではないかと推測されている。圧受容体反射とは、大動脈弓や頸動脈洞にある圧受容体が血圧の変化を感知して循環中枢に情報を送り、自律神経を介して心拍数や血管運動を調節することで血圧をコントロールするホメオスタシス機能のひとつである。実際に、継続的な心拍変動 BF の練習は心拍変動を増大させ、同時に圧受容体反射感度を高めることが報告されている<sup>22)</sup>。

心拍変動 BF では心拍変動の増大を効率よく引き起

\* 1) 愛知学院大学心身科学部心理学科

\* 2) 心身科学研究科心理学専攻・研究員

(連絡先) 〒470-0195 愛知県日進市岩崎町阿良池12 愛知学院大学心身科学部心理学科 E-mail: msakaki@md.ccnw.ne.jp

こすのに最適なペースが重視されている。これを共鳴周波数 (resonance frequency) とよび、身長などの要因によって個人毎に異なるため<sup>18)</sup>、臨床的な心拍変動 BF 訓練では初期のセッションにおいて共鳴周波数を検索するための手続きが採られている<sup>23)</sup>。そこでは、はじめに1分あたり6回のペース呼吸を実施して心拍変動の出現度合いを判断し、順次、6.5回、5.5回、5回、4.5回のペースについても同様に評価してゆく。共鳴周波数をもとにペース呼吸が行われると顕著な心拍変動の増大が現れるとされている。しかしながら、この手続きにはいくつかの問題があり、個人の共鳴周波数は6.5cpmのように区切りのよいポイントでなく、本来は6.23cpmのように細かな値になり得ることが指摘されている<sup>23)</sup>。さらに、段階的なペース呼吸の試行には一定の時間を要するため、特に治療セッションではより短時間で正確に共鳴周波数を特定できるようにすることが課題となっている。

榑原・及川<sup>24)</sup>は、個人の共鳴周波数を効率的に同定するための手順を開発することを目的として、安静時心拍変動の低周波 (low frequency: LF) 成分のピーク周波数に着目し、これをもとにペース呼吸を実施すると従来の共鳴周波数検索法によって同定された周波数のペース呼吸よりも有意に大きな心拍変動が現れることを見出した。安静時心拍変動には0.1Hz近傍にLF成分のピークをみることができ、これは上述の圧受容体反射に関わる血圧変動が心拍変動に現れたものであると考えられている<sup>1)</sup>。彼らはこの点に着目し、LFピーク周波数をもとにしてペース呼吸を行うことで、呼吸によって生じる心拍変動と血圧調節に関わる心拍変動 (LF成分) が合致して共鳴が起こると仮定した。榑原・及川の知見ではこの仮説に沿うように心拍変動の増大がみられたが、圧受容体反射も実際に増加するかどうかについては明らかにされていない。そこで、本研究は安静時LF周波数をもとにペース呼吸を行ったとき、従来の共鳴周波数検索法によって導かれたペース呼吸に比して、心拍変動と圧受容体反射感度が同時に増加するかどうか検討することを目的とした。本論文ではこの検討目的のため、連続血圧、心拍変動、呼吸の各パラメータを測定し、圧受容体反射感度の評価システムを構築してペース呼吸に対する心拍変動の反応を試行的に分析したので報告する。

## II. 方 法

**実験参加者** 健康な成人男性2名を対象として生

理指標 (連続血圧, 心電図, 呼吸) を測定した。

**装置および測定** 動脈血圧波形は左手第2・3指に脈波測定センサを装着し非観血式連続血圧計 (CNAP500, Cnsystem) にて測定した。この際、校正血圧を得る目的で左上腕にカフを装着した。心電図はCM5誘導によって時定数0.1秒で増幅記録した (BA1008, デジテックス研究所)。呼吸は伸縮ベルトに付属したストレングージを上腹部に装着して測定した (ストレングージ呼吸センサ, G1 システム)。これらの生体信号はAD変換ボード (ATP-32F, Contec) を介して1kHzのサンプリング周期でパーソナルコンピュータ (Compaq nx6310, HP) に保存した。

**手続き** 防音シールド室にて各種センサを装着した後、座位で10分間の順応期間をおいた後、そのまま3分間の安静 (Baseline) データを記録した。続いて、15回/分 (cpm) の頻度で呼吸を統制しながら3分間の測定を行った。この測定の直後、15cpm条件下の心拍変動をスペクトル分析しLF成分のピーク周波数を同定した (後述)。最後に、この周波数を基準としたペース呼吸を3分間実施した (Paced-breathing)。

**心電図 R 波間隔の測定と心拍変動の評価** 記録された心電図データからR波を検出し、異常波の混入がないかどうかを確かめながらRR間隔を計測した。この際、RR間隔の時系列データは3次スプライン補間によって1秒毎の等間隔データに変換した。続いて、15cpm呼吸の下で得られたRR間隔データに対して高速フーリエ変換 (fast Fourier transform: FFT) によるスペクトル分析を施した。0.04-0.15Hzの範囲をLF帯域として分析し<sup>1)</sup>、そのピーク周波数を共鳴周波数として決定しペース呼吸に用いた。通常、LF帯域には複数のピークがみられることがあるが本報告では0.1Hz近傍で最も優勢なパワーを示すものとした。BaselineとPaced-breathingにおける心拍変動の大きさの比較にはRR間隔の標準偏差 (SDNN) を用いた。

圧受容体反射感度はParlow et al.<sup>25)</sup>の方法にしたがってspontaneous sequence法によって評価した。はじめに上記の測定手続きによって得られた血圧および心電図データから、収縮期血圧とRR間隔が共に連続して上昇あるいは下降する系列 (3~7拍) をコンピュータによって抽出した。今回、この操作のため、1) 血圧ピーク・心電図R波検出, 2) 血圧上昇 (または下降) シーケンス検出, 3) 各データテキスト出力、から成るプログラムを構成した (生体情報収録・解析ソフトウェア Analog recorder pro BR, G1 シス

テム).

この際、血圧値とRR間隔の関係は、Parlow et al.と同様に圧反射の時間的な特徴(圧受容体から情報が迷走神経と舌因神経を介して中枢へ送られRR間隔が調節される過程)を考慮して、ある時点の血圧の発生からその次に起こるRR間隔の組み合わせと定義した。図1はこのような血圧と心電図RR間隔の関係を示している。

本研究で用いた圧受容体反射感度評価システムで得られた血圧上昇シーケンス(図2)と血圧下降シーク

エンス(図3)の例を示した(Paced breathing, 参加者A)。それぞれの図の上段は呼吸曲線、中段は連続血圧波形、下段は心電図波形である。これらは、評価システムが収縮期血圧の上昇トレンド(図2)と同下降トレンド(図3)を捉えている(それぞれ5拍分のシーケンスの例)。Paced-breathingは約0.1Hz(呼吸長は約10秒)の緩徐な呼吸となるが、このような条件では吸気の終わりから呼気において血圧上昇トレンドがみられ、反対に呼気終わりから吸気にかけて血圧下降トレンドを伴っているのがわかる。

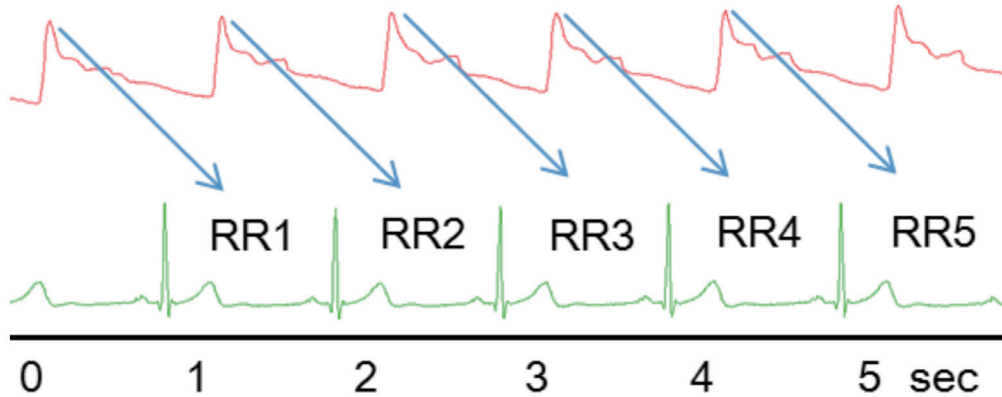


図1 血圧と心電図から得られた圧反射シーケンスの選択

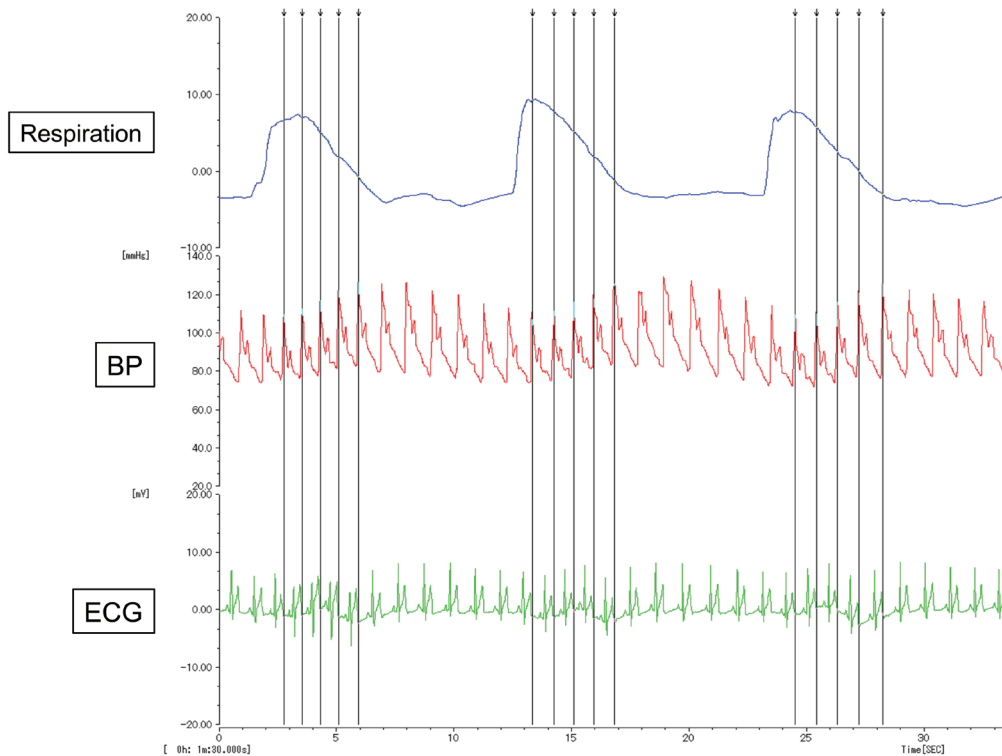


図2 圧受容反射感度評価システムにおける血圧上昇シーケンスの例

次に, 収縮期血圧の値と RR 間隔の値の関係をプロットしたものが図4である. このような関係を示すすべてのシーケンス (3~7 拍の上昇および下降) について回帰係数を求め, 平均したものを圧受容体反

射感度とした. この際, 少なくとも 1 mmHg 以上の変化を血圧の上昇 (または下降) とした. また, 連続的に上昇 (または下降) する血圧シーケンスに対して RR 間隔は常に延長 (または短縮) を呈するとは限

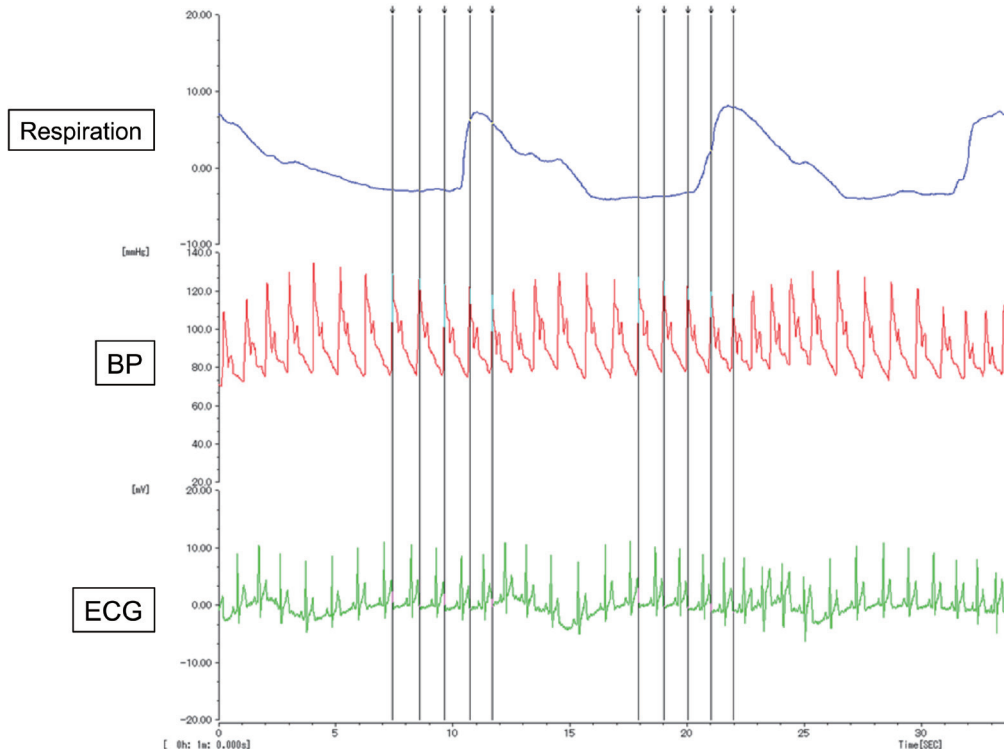


図3 圧受容反射感度評価システムにおける血圧下降シーケンスの例

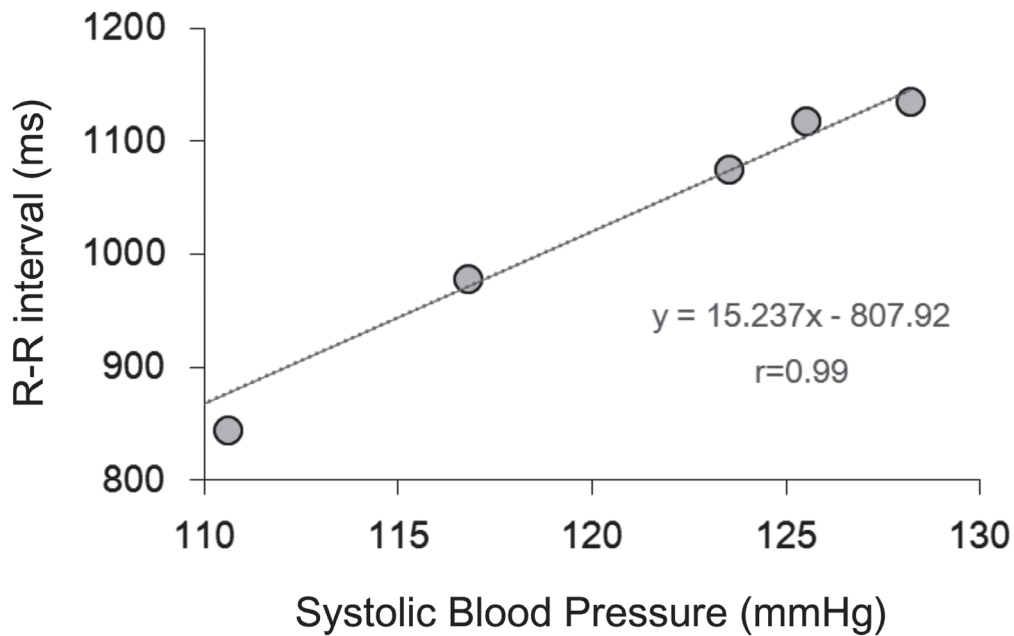


図4 収縮期血圧と RR 間隔の関係の例

らないため、収縮期血圧と RR 間隔の相関係数が0.95以上となるシーケンスを評価の対象とした。

### III. 結果

Baseline, Paced-breathing における呼吸頻度, 平均 RR 間隔, RR 間隔の標準偏差 (SDNN), 心拍変動の低周波成分パワー (LF power) および高周波成分パワー (HF power), 圧受容体反射感度 (baroreflex sensitivity: BRS) を表 1 に示した。

参加者 A は Baseline における呼吸頻度が約 9.1 回 / 分 (0.152 Hz) とやや低く, Paced-breathing の際の頻度は約 5.6 回 / 分 (0.093 Hz) であった。これに対し, 参加者 B の Baseline の呼吸頻度は約 17.3 回 / 分 (0.289 Hz) であり, Paced-breathing の頻度は約 4.9 回 / 分 (0.082 Hz) であった。

心拍変動の程度を反映する SDNN はいずれも Paced-breathing で明瞭に増大した。これについて心拍変動各成分の変化を反映するのがそれぞれ LF および HF である。それぞれのパワーを検討すると, いずれの参加者も LF 成分が Paced-breathing によって著しく増大しているのがわかる。HF 成分のパワーについてはそれぞれの参加者で一定した結果は見受けられなかった。心拍変動の変化に対して, 圧受容体反射感度 (BRS) はいずれの参加者も Paced-breathing で増加を示した。

### IV. 考察

心拍変動を効率よく増大させる共鳴周波数は, 従来の報告では 4.5~6.5 回 / 分とされており<sup>18)</sup>, 今回の参加者のペース呼吸頻度もその範囲にあった。緩徐な

表 1 参加者 A および B における各測定値

	参加者 A	参加者 B
Breathing frequency (Hz)		
Baseline	0.152	0.289
Paced-breathing	0.093	0.082
Mean R-R interval (ms)		
Baseline	1075.8	990.7
Paced-breathing	1019.8	998.4
SDNN		
Baseline	71.6	26.8
Paced-breathing	110.8	45.5
LF power (ms <sup>2</sup> )		
Baseline	4545.8	165.2
Paced-breathing	10048.0	1893.1
HF amplitude (ms <sup>2</sup> )		
Baseline	671.2	183.3
Paced-breathing	1000.2	137.53
BRS (ms/mmHg)		
Baseline	12.7	4.8
Paced-breathing	17.6	8.5



ペース呼吸によってリラクゼーション反応が誘発されると心拍数の低下が起こることが予想されるが、今回の試行は3分間の測定であったため十分な反応が生じるに至らなかったものと考えられた。

一方、心拍変動の大きさを反映するSDNN（標準偏差）は増大した。当該指標は心拍変動の成分を全体的に反映していると考えられるため、心拍変動増大の要因を細かくみるためには心拍変動スペクトル分析による検討が重要である。結果にみられたように、いずれの参加者ともPaced-breathingで著しいLFパワーの増大を示した。一方、HFパワーには一貫した変化はみられなかったことから、緩徐なペース呼吸によって心拍変動が主に低周波帯域へ移動したものと考えることができる。このような変化に伴ってBRS値も増大したことから、心拍変動を増大させる緩徐なペース呼吸によって圧受容体反射感度が高まることが示された。Lehrer et al.<sup>22)</sup>は、長期的な心拍変動バイオフィードバックの練習によって圧受容体反射感度が高まることを報告しているが、短時間の測定を実施した本研究の結果は緩徐なペース呼吸が基本的に当該感度を高める方向に働くことを示唆している。

さて、本報告では図1～4に示した手順で血圧の上昇（または下降）シーケンスを抽出し、それらに対するRR間隔の回帰を検討した。一般に、spontaneous sequence法による圧受容体反射感度の評価は、対象となるシーケンスが3～7拍程度とされている。しかしながら、各シーケンスにおける血圧とRR間隔の関係性（両者の相関係数、血圧の変化値の定義など）についてはあまり詳しく議論されていないように思われる。今回、血圧とRR間隔の相関係数を0.95以上のシーケンスとして検討したが、これより低い相関の場合には血圧の上昇（下降）に対して一貫したRR間隔の延長（短縮）がみられなくなり、相関係数の基準を高めると検出シーケンスは極端に減ってしまう。実際、参加者Aのbaselineにおける検出シーケンス数は上昇が2、下降が6であった。Paced-breathingにおいても同様であった。参加者Bのbaselineは上昇のみのシーケンスが1、Paced-breathingでは上昇シーケンス数3、下降シーケンス数3であった。そのため、少しでも評価対象シーケンスを確保できるよう、少なくとも3分以上の生理指標の測定が必要であろう。一方、血圧の変化（上昇または下降）についてはPCの測定精度によって1mmHg以下の変化も検出可能となるが、このように血圧の上昇（下降）が著しく小さいシーケンスに比較的变化の大きなRR間隔データ

を伴う場合には相対的に過大な回帰係数が算出されることになる。Spontaneous sequence法を用いた圧受容体反射感度の評価に際しては、これらのパラメータについて注意深く測定・評価することが重要であると考えられた。

以上、本報告では連続血圧、心拍変動、呼吸の各パラメータの測定・分析をもとにした圧受容体反射感度評価システムを構成した。圧受容体反射感度はspontaneous sequence法を用いたシステムの試行として2名の参加者のデータを分析した。緩徐なペース呼吸によって予想どおり心拍変動と圧受容体反射感度が増加することが示され、今後の検討において利用可能なシステムであると判断した。本研究は安静時LF周波数をもとにペース呼吸を行ったとき、従来の共鳴周波数検索法によって導かれたペース呼吸に比して、心拍変動と圧受容体反射感度が同時に増加するかどうか検討することを目的としている。今後、対象者を増やして引き続き検討を行う予定である。

## 付記

本報告に示したシーケンス法を用いた圧反射感度評価システムの構成は2017年度心身科学研究研究所研究助成の補助によるものである。また、システムに必要な連続血圧測定装置は科研費16K04395の補助を受けた。

## 引用文献

- 1) Berntson, G.G., Bigger, J.T. Jr., Eckberg, D.L., Grossman, P., Kaufmann, P.G., Malik, M., Nagaraja, H.N., Porges, S.W., Saul, J.P., Stone, P.H., & van der Molen, M.W. (1997). Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34, 623–648.
- 2) Arai, Y., Saul, J.P., Albrecht, P., Hartley, L.H., Lilly, L.S., Cohen, R.J., & Colucci, W.S. (1989). Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *American Journal of Physiology*, 256, H132–H141.
- 3) Grossman, P., Stemmler, G., & Meinhardt, E. (1990). Paced respiratory sinus arrhythmia as an index of cardiac parasympathetic tone during varying behavioral tasks. *Psychophysiology*, 27, 404–416.
- 4) Wang, Y., Zhao, X., O'Neil, A., Turner, A., Liu, X., & Berk, M. (2013). Altered cardiac autonomic nervous function in depression. *BMC Psychiatry*, 13, 187.
- 5) Routledge, F.S., Campbell, T.S., McPetridge-Durdle,

- J.A., & Bacon, S.L. (2010) . Improvements in heart rate variability with exercise therapy. *The Canadian Journal of Cardiology*, 26, 303–312.
- 6) Villareal, R.P., Liu, B.C., & Massumi, A. (2002) . Heart rate variability and cardiovascular mortality. *Current atherosclerosis reports*, 4, 120–127.
- 7) Hayano, J., Yamada, A., Mukai, S., Sakakibara, Y., Yamada, M., Ohte, N., Hashimoto, T., Fujinami, T., & Takata, K. (1991) . Severity of coronary atherosclerosis correlates with the respiratory component of heart rate variability. *American Heart Journal*, 121, 1070–1079.
- 8) Balogh, S., Fitzpatrick, D. F., Hendricks, S. E., & Paige, S.R. (1993) . Increases in heart rate variability with successful treatment in patients with major depressive disorder. *Psychopharmacology Bulletin*, 29, 201–206.
- 9) Carney, R. M., Freedland, K. E., Stein, P. K., Skala, J. A., Hoffman, P., Jaffe, A. S. (2000) . Change in heart rate and heart rate variability during treatment for depression in patients with coronary heart disease. *Psychosomatic Medicine*, 62, 639–647.
- 10) Chambers, A.S., & Allen, J.J. (2002) . Vagal tone as an indicator of treatment response in major depression. *Psychophysiology*, 39, 861–864.
- 11) Prasko, J., Latalova, K., Diveky, T., Grambal, A., Kamaradova, D., Velartova, H., Salinger, J., Opavsky, J., & Silhan P. (2011) . Panic disorder, autonomic nervous system and dissociation - changes during therapy. *Neuroendocrinology Letters*, 32, 641–651.
- 12) Shannon, D. C., Carley, D. W., & Benson, H. (1987) . Aging of modulation of heart rate. *American Journal of physiology*, 253, H874–H877.
- 13) Kuo, T. B. J., Lin, T., Yang, C. C. H., Li, C. L., Chen, C. F., & Chou, P. (1999) . Effect of aging on gender differences in neural control of heart rate. *American journal of physiology*, 277, H2233–H2239.
- 14) Boutcher, S.H., Nugent, F.W., McLaren, P.F., & Weltman, A.L. (1998) . Heart period variability of trained and untrained men at rest and during mental challenge. *Psychophysiology*, 35, 16–22.
- 15) Park, G., Vasey, M. W., Van Bavel, J. J., & Thayer, J.F. (2014) . When tonic cardiac vagal tone predicts changes in phasic vagal tone: the role of fear and perceptual load. *Psychophysiology*, 51, 419–426.
- 16) Pappens, M., Schroyen, M., Sutterlin, S., Smets, E., Van den Bergh, O., Thayer, J. F., & Van Diest, I. (2014) . Resting heart rate variability predicts safety learning and fear extinction in an interoceptive fear conditioning paradigm. *PLoS One*, 9, e105054.
- 17) Krygier, J.R., Heathers, J.A., Gross, J.J., Kemp, A.H. & Abbott, M.J. (2013) . Emotion Regulation and Heart Rate Variability: Effect of emotion reappraisal on subjective and cardiovascular responses to pleasant and unpleasant pictures. *Frontiers in Human Neuroscience Conference Abstract: ASP2013 - 23rd Annual meeting of the Australasian Society for Psychophysiology*.
- 18) Lehrer, P. (2007) . Biofeedback training to increase heart rate variability. In Lehrer, P.M., Woolfolk, R.L., & Sime, W.E. (Eds.) , *Principles and Practice of Stress Management* (pp. 227–248) . New York: Guilford Press.
- 19) Sakakibara, M. & Hayano, J. (2015) . Relaxation enhances respiratory sinus arrhythmia, a cardiorespiratory resting function. In S, Walters (Eds.) , *Heart Rate Variability (HRV) : Prognostic Significance, Risk Factors and Clinical Applications*. New York, USA: NOVA Science Publishers. pp. 149–163.
- 20) 榑原雅人 (2010) . 心拍変動バイオフィードバック法による不安軽減効果の可能性-特性不安の高い学生の訓練効果から-. 第39回日本バイオフィードバック学会学術総会.
- 21) Sakakibara, M., Hayano, J., Oikawa, L. O., Katsamanis, M., & Lehrer, P. (2013) . Heart rate variability biofeedback improves cardiorespiratory resting function during sleep. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 38, 265–271.
- 22) Lehrer, P.M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S.E., Eckberg, D.L., Edelberg, R., Shih, W.J., Lin, Y., Kuusela, T.A., Tahvanainen, K.U., & Hamer, R.M. Hamer, R.M. (2003) . Heart rate variability biofeedback increases baroreflex gain and peak expiratory flow. *Psychosomatic Medicine*, 65, 796–805.
- 23) Lehrer, P., Vaschillo, B., Zucker, T., Graves, J., Katsamanis, M., Aviles, M., & Wamboldt, F. (2013) . Protocol for Heart Rate Variability Biofeedback Training. *Biofeedback*, 41, 98–109.
- 24) 榑原雅人・及川 悠 (2017) . 心拍変動バイオフィードバックにおける共鳴周波数検索について—安静時 LF ピーク周波数を利用した手続きの検討—. *バイオフィードバック研究*, 44, 21–28.
- 25) Parlow, J., Viale, J.P., Annat, G., Hughson, R., & Quintin, L. (1995) . Spontaneous cardiac baroreflex in humans. Comparison with drug-induced responses. *Hypertension*, 25, 1058–1068.

(平成29年12月26日受理)

## Does suitable breathing for increasing heart rate variability enhance baroreflex sensitivity? (the 1st report) : examination of baroreflex sensitivity assessment system using spontaneous sequence method

Masahito SAKAKIBARA, Munehisa KANEDA, Mitsuo ISHIDA

### **Abstract**

Baroreflex sensitivity assessment system, a computer scanning of recordings consisting of continuous finger arterial pressure and R-R interval of ECG to locate sequences from three to seven beats where pressure progressively increased and decreased, was constructed in this study. The spontaneous baroreflex sensitivity was calculated as mean regression slope of all sequences (Parlow et al., 1995). CM5 lead ECG, a pneumogram with a strain gauge placed around the chest wall, and continuous finger arterial blood pressure were measured during baseline and slow paced breathing in 2 healthy adults. Results indicated that heart rate variability assessed by standard deviation of RR interval increased during the slow paced breathing compared to baseline. Moreover, the baroreflex sensitivity assessed by this system was greater during the slow paced breathing than during the baseline. Implications for usefulness of the assessment system in this study were discussed.

Key words : Baroreflex sensitivity, spontaneous sequence method, heart rate variability, autonomic nervous activity, biofeedback