

# 心拍変動バイオフィードバックの臨床効果と心理生理学的機序

榎 原 雅 人\*

心拍のゆらぎ（心拍変動）を増大させる目的で行われる心拍変動バイオフィードバック（heart rate variability biofeedback: HRVB）は自律神経障害を含む精神的・身体的障害に対して臨床的な有用性のあることが多くの研究によって報告されている。本研究はこの技法の基本的なプロトコルを示した後、これを踏まえて実施された臨床的研究の知見を紹介した。HRVBは約0.1Hz付近に存在する心臓血管系の共鳴周波数でペース呼吸を行い、呼吸性洞性不整脈と圧受容体反射に関わる自律神経機能を刺激する。HRVBの臨床的な効果は呼吸性洞性不整脈によるガス交換効率の向上や心肺系休息機能の促進の要因に支えられている。さらには圧受容体反射を介した上位中枢の刺激が感情制御に影響を及ぼしている可能性がある。心理生理学的な介入法であるHRVBは心身医学や臨床心理学領域において有用な方法になると考えられる。そのため、この技法に関する治療的有用性についてのさらなる実験的検討が必要である。

キーワード：HRVB, 呼吸性洞性不整脈, 圧受容体反射, ペース呼吸, 心臓血管系の共鳴周波数

## I. はじめに

通常は知り得ない生体の状態を知覚可能な情報として提供し、その制御を可能にする技術をバイオフィードバックと呼ぶ（稲森, 1997）。具体的に、心拍数、皮膚温、筋電図などを音や光などのわかりやすい信号に変換して“見える化”すると、わたしたちは意識的にそれらの内部状態を変化させることができようになる。このような技術は慢性のストレス刺激によって影響を受けた自律神経の反応を適切な方向へ修正する可能性をもっており、実際に医療分野（たとえば、心身医学領域）では気管支喘息、高血圧、不整脈、頭痛（片頭痛、筋収縮性頭痛）、レイノー病、頸性斜頸、疼痛など種々の病態の治療や予防の助けとして用いられている（佐々木, 1997）。また、競技を前にした運動選手の心身の管理、脳血管障害後のリハビリテーションや失禁予防にも役立てられている（西村, 2022）。

バイオフィードバックによってコントロールしようとするターゲットは一般に生体信号の“水準（レベル）”であるが、“ゆらぎ”という様態もまたコントロールの対象となり得る。たとえば、心臓の拍動間隔は1拍

ごとにゆらぎを呈する生体情報である。このような心拍のゆらぎを心拍変動（heart rate variability）と呼び、バイオフィードバックに利用されている。心拍のペースメーカーの役割を果たす洞結節には交感神経と迷走神経の入力があり、心拍変動はこれらの自律神経活動に影響を受けた生理現象である（早野, 2001）。心拍変動をフィードバックしてこれを増大させるように導く技法を心拍変動バイオフィードバック（heart rate variability biofeedback: HRVB）と呼ぶ。一定期間、HRVBを練習することによって自律神経機能の障害を伴う心理生理学的症状（たとえば、抑うつや不安など）が改善することが報告されている（Lehrer, 2021）。従来、行動療法の1つとして用いられてきたリラクゼーション技法（自律訓練法、漸進的筋弛緩法など）においても自律神経活動に変化が起り、ストレス症状が緩和することが知られている（Sakakibara et al., 1994; 近藤・小板橋, 2014）。しかし、HRVBにおいては心理生理学的な基礎検討を経た理論的な効果機序（心臓血管系の共鳴効果）が明らかになっている。この点は従来型のリラクゼーション技法と比べて大きく異なる特徴である。

\*愛知学院大学心理学部心理学科

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

本稿は HRVB の臨床効果を示し、近年明らかになっている心理生理学的機序にもとづいて解説することを目的とした。はじめに、心拍変動と HRVB の基本的な特徴を整理するために、心拍変動の分析指標の概要を解説し HRVB の訓練プロトコル (Lehrer et al., 2013) を示した。次に、HRVB プロトコルに則って実施された代表的な介入研究の結果を記した。HRVB の臨床効果についてはすでに榊原 (2012; HRVB 法の臨床応用—治療的效果と理論的基礎について—) の報告があるが、主にここに記載されなかった臨床報告を取りあげた (ただし、榊原 [2012] において一部記載が十分でなかったものについては適宜修正し再び記載したものもある)。最後に、HRVB の心理生理学的な作用機序を解説した。榊原 (印刷中) では HRVB における“心臓血管系の共鳴”効果が取り上げられているが、本稿はこれに加え、“呼吸性洞性不整脈によるガス交換効率の改善”、“休息機能の促進”、“圧受容体反射の活性化による血圧調節ホメオスタシスの向上”、“圧受容体反射を介した皮質活動への影響”についても指摘した。これらにより、HRVB の臨床効果に関わる心理生理学的メカニズムをできるだけ総合的に解説することとした。

## II. 心拍変動の分析指標

HRVB の特徴を理解するにあたり、心拍変動の分析によって得られる指標と自律神経機能の関係を把握しておくことが重要となる。ここでは、代表的な心拍変動指標を取り上げて自律神経との関連について概説した。要点として、心拍変動の分析指標は基本的に心臓

迷走神経 (副交感神経) 活動を評価する上で有用である。なお、心拍変動の分析と解釈については榊原 (印刷中) に詳しく解説されているが、ここでは各指標の標準的な数値範囲を加え、圧受容体反射感度の計測手順を記載した。

### 心拍変動の測定

心拍変動の分析は心拍間隔の情報を適切に把握することで可能となる。そのため、心電図 QRS 波が明瞭になるように測定し R-R 間隔を精度よく計測する (榊原, 印刷中)。Figure 1 は心電図 R-R 間隔を計測し時間軸上にそれらの値をプロットしたものである。心拍変動は自律神経活動に影響を受けるため、測定の際は激しい運動、喫煙、アルコールやカフェインの摂取を前夜から制限し、測定前約 3 時間は絶飲食とする。測定を開始するにあたり十分な安静 (座位または仰臥位) を保ち、心拍数がほぼ定常的なレベルに達した 5 分間の連続記録を標準とする (早野, 2001; Berntson et al., 1997)。

### 呼吸性洞性不整脈

Figure 2 は心拍変動と呼吸曲線を表したものである。吸気では R-R 間隔が短縮 (心拍数が増加) し、呼気で R-R 間隔が延長 (心拍数が低下) している様子がわかる。このように呼吸に同期して心拍数が変化する生理現象を呼吸性洞性不整脈 (respiratory sinus arrhythmia) と呼ぶ。

呼吸性洞性不整脈の振幅は心臓迷走神経 (副交感神経) 活動の指標である。薬理的な手法などで心臓迷走神経の活動を阻害すると、R-R 間隔は短縮しやがてそ

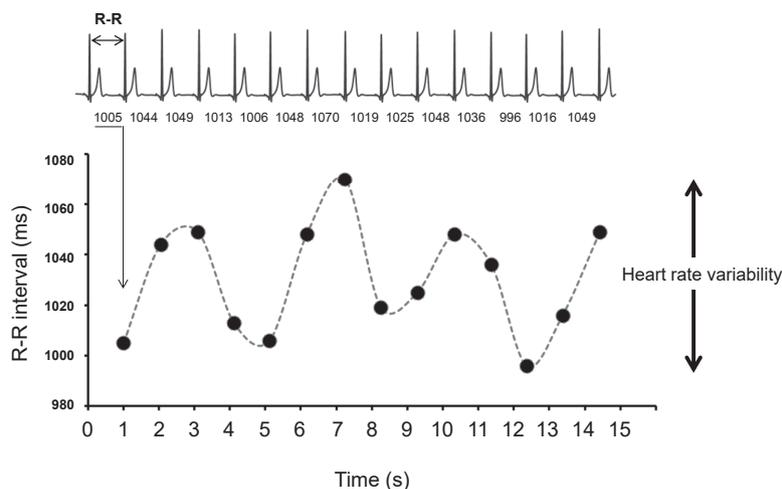


Figure 1 心拍変動 (R-R 間隔) 時系列データの測定

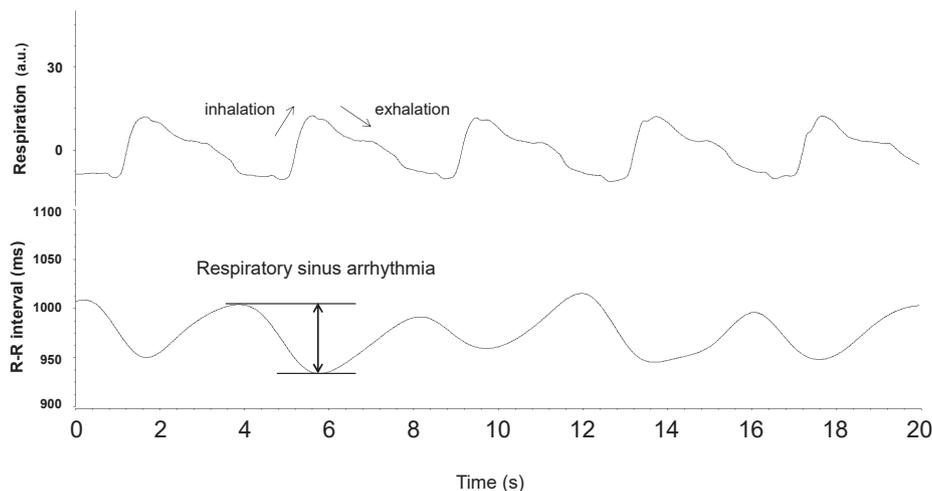


Figure 2 呼吸と心拍変動（呼吸性洞性不整脈）

れ以上変化しない点に達する。このときの R-R 間隔の変化量は迷走神経の活動量を反映するが、安静時の呼吸性洞性不整脈の振幅はこれと高い相関を示す (Hayano et al., 1991; Katona & Jih, 1975)。

### 心拍変動の高周波 (HF) 成分

短時間の心拍変動データには主に呼吸性洞性不整脈に起因する成分とさらに緩やかな変動成分が観察される。このような心拍変動成分をそれぞれの周波数の特徴から捉える方法をスペクトル分析と呼ぶ。Figure 3

は心拍変動データ（図上段）をスペクトル分析した結果である（図下段）。ここで0.15-0.4 Hzの周波数帯域にピークを形成するものは心拍変動の高周波 (high frequency: HF) 成分である。図の中段右側にみられる心拍変動が下段の HF 周波数帯域に現れる。通常（呼吸数がこの周波数帯域にあるとき）、HF 成分は呼吸性洞性不整脈を反映する。このデータは15回/分の速さ (0.25 Hz) で呼吸を統制しているため、0.25 Hz にピークが現れている。心拍変動 HF 成分の大きさは心臓迷走神経活動を反映する (Akselrod et al., 1981;

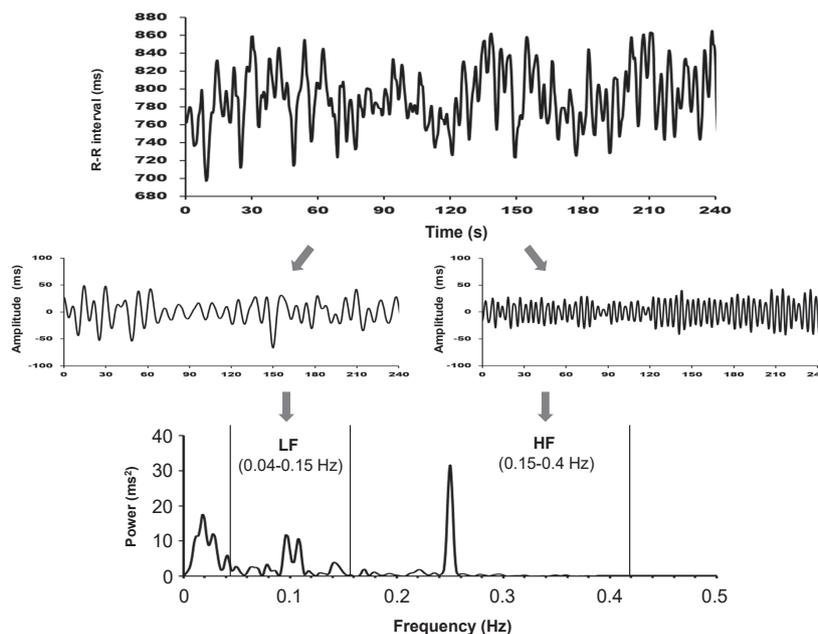


Figure 3 心拍変動のスペクトル分析の過程

Fouad et al., 1984; Grossman et al., 1990; Katona & Jih, 1975; Hayano et al., 1991; Pagani et al., 1986; Pomeranz et al., 1985). 心拍変動のスペクトル分析において交感神経活動は0.15 Hz よりも早い (高い) 周波数帯域に現れることはないので, HF 帯域内に現れる変動成分はもっぱら迷走神経性に伝達されたものである (Berger et al., 1989; Berntson et al., 1993).

### 心拍変動の低周波 (LF) 成分

一方, Figure 3 において0.04–0.15 Hz の帯域にピークを構成するものが心拍変動の低周波 (low frequency: LF) 成分である. 図の中段左側にみられる心拍変動が下段の LF 周波数帯域に現れる. LF 成分は血压 Mayer 波 (Guyton & Harris, 1951; Julien, 2006) が圧受容体反射を介して心拍変動に現れたものであり (Madwed et al., 1989; Vaschillo et al., 2002), 迷走神経と交感神経の両者の影響を受けている (Berntson et al., 1997; 早野, 2001; Pomeranz et al., 1985). 心拍変動にはこれらの他, very low frequency (VLF, 0.003–0.04 Hz), ultra low frequency (ULF,  $\leq 0.003$  Hz) などの区分がある (Task force, 1996).

### 時間領域の指標

心拍変動スペクトル分析によって得られる上記の指標が周波数領域の分析と呼ばれるのに対し, 心拍変動データの統計的性質を自律神経活動の指標とする手順を時間領域の分析と呼ぶ (Berntson et al., 1997; 早野, 2001; Task force, 1996). たとえば, mean RR は R-R 間隔の平均値であり, SDNN は N-N 間隔の標準偏差 (ms) を算出した指標である. N-N 間隔とは正常な洞調律によって得られた R-R 間隔のことである (N は normal を示す; 早野, 2001). RMSSD は隣り合った N-N 間隔の差の自乗の平均値の平方根 (ms) を表す. この他にも時間領域の分析にはいくつかの指標がある (Task force, 1996).

これらの指標は臨床研究で用いられる長時間データ (たとえば, 24時間) から導かれることが多いが, 短時間の心拍変動データにおいても算出され利用されている. SDNN は心拍の全体的な変動を反映する指標である. RMSSD は変化の早い変動を反映していると考えられ, 周波数領域では HF に対応する (すなわち, 迷走神経活動を反映する) (早野, 2001). Table 1 は Nunan et al. (2010) に示されている周波数および時間領域指標の標準的な数値範囲 (短時間計測から導かれたもの) を示している.

Table 1 周波数・時間領域の指標の例と数値範囲 (Nunan et al., 2010)

心拍変動指標	中央値	範囲
LF (ms <sup>2</sup> )	458	193–1009
HF (ms <sup>2</sup> )	385	82–3630
Mean RR (ms)	933	785–1160
SDNN (ms)	51	32–93
RMSSD (ms)	42	19–75

### 圧受容体反射感度

圧受容体反射 (baroreflex) とは血压を一定に保つため心拍数と血管緊張を調節するホメオスタシス機能である. たとえば, 血压が上昇すると大動脈弓・頸動脈洞にある圧受容体 (baroreceptor) から延髄の孤束核 (nucleus tractus solitarius) に情報が送られ, 交感神経と迷走神経を介して血管抵抗や心拍数の低下が引き起こされる. 血压が下降した場合は反対に血管抵抗の増加・心拍数の上昇が起こる.

このような圧受容体反射の感度を評価するため, 収縮期血压上昇 (または下降) に対する R-R 間隔の延長 (または短縮) の程度 (ms/mmHg) が算出される. たとえば, spontaneous sequence 法 (Parlow et al., 1995) では, 収縮期血压と R-R 間隔が共に連続して上昇または下降する系列 (3~7拍) を抽出し, これらの系列についての回帰係数を求め平均したものを圧受容体反射感度 (msec/mmHg) とする. この際, 血压は1 mmHg 以上, 心拍は2 msec 以上の変化をもって上昇/下降と定義し, 一般的に収縮期血压と R-R 間隔の相関係数が0.85以上の場合の系列が評価の対象となる (奥田ら, 2008). 圧受容体反射感度は, この他にも R-R 間隔時系列と連続血压のクロススペクトルを算出して, LF 帯域におけるそれらの power 比 (Lehrer et al., 2003), または LF・HF 両帯域 (Lucini et al., 1994) における R-R 間隔変動と血压変動の power 比をもって評価する場合もある (スペクトル power は開平値に変換される). 圧受容体反射感度 (ms/mmHg) は迷走神経活動を反映する指標となる (澤田, 1996). Figure 4 は spontaneous sequence 法による圧受容体反射感度の分析の例を示している. ここではある実験協力者 (大学生) が1分間に6回のペース呼吸を実施している. 図の上段は R-R 間隔と収縮期血压の変化を示し, 血压の変化に応じて R-R 間隔が変化したシーケンスを1組ずつ検出して回帰を求めている (下段右側の図は最初の1組のシーケンスにおける回帰である). Figure 4 下段左側の図は検出されたすべてのシーケンスの回

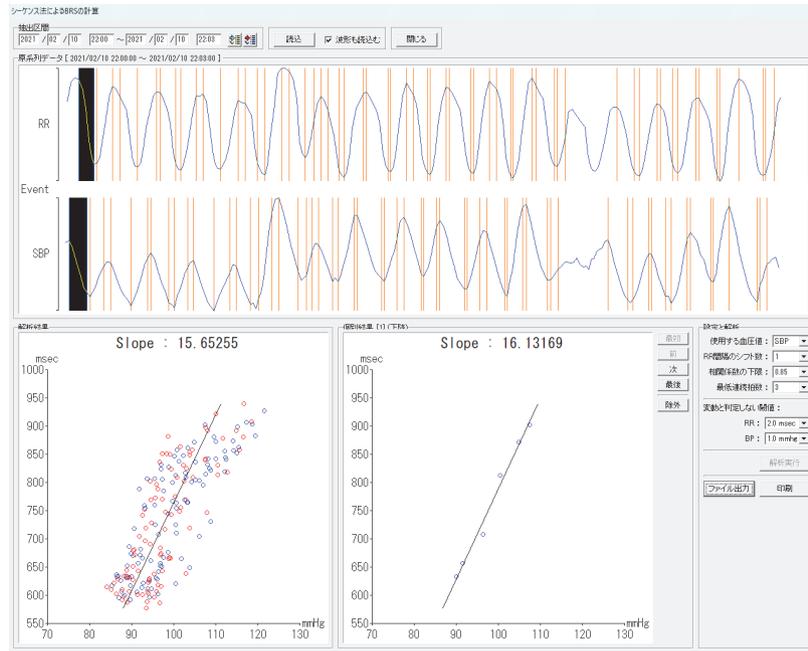


Figure 4 圧受容体反射感度の分析

帰係数を平均した結果である。この例では圧受容体反射15.65 msec/mmHgということになる。ちなみに、18-35歳（健常者）の安静期の圧受容体反射感度は平均で約11 msec/mmHg程度なので（Sakakibara et al., 2020），6回／分のペース呼吸によって圧受容体反射感度が増加することがわかる。

### III. HRVB の手続き

HRVB の手続きは臨床および研究に向けたプロトコルとして Lehrer et al. (2013) によって整えられている。HRVB はもともと10週間の訓練プロトコルとして提案されていたが（Lehrer et al., 2000），現在では4-5週のセッションで学習可能であるとされている。手続きの要点をまとめると、a) 共鳴周波数の検索、b) 自宅練習、c) 継続的な訓練セッションとなる。なお、HRVB プロトコルについてはすでに榊原（印刷中）に詳しく紹介されているので概要を紹介することとし、ここでは共鳴周波数検索の過程についてスペクトル分析を用いた解説を加えた。また、HRVB 訓練の副作用と禁忌について記載した。

#### HRVB 訓練のプロトコル

**共鳴周波数の検索** HRVB セッションでははじめにペース呼吸を無理なくできるように丁寧な説明がなさ

れる。この際、重要なこととして心拍変動を増大させる呼吸ペース、すなわち共鳴周波数（resonance frequency）を特定しこれをもとにHRVBを実施する。プロトコル（Lehrer et al., 2013）では共鳴周波数を特定する手順が次のように示されている。はじめに、6回／分のペース呼吸を2-3分程度実施し心拍変動を記録する（この際、呼吸波形も記録できるのが望ましい）。ペース呼吸はbreath pacer（たとえば、Biofeedback Federation of Europe, 2022）を利用する。次に、6.5回／分、5.5回／分、5回／分、4.5回／分のペース呼吸についても同様に実施し最も大きな心拍変動（すなわち、呼吸性洞性不整脈の振幅またはLF power）がみられたペースを共鳴周波数とする。HRVBのペース呼吸は通常よりもゆっくりとしているため、参加者によっては深く呼吸をして過呼吸症状を引き起こすリスクがある。共鳴周波数のペース呼吸に際して深い呼吸は必要なくふだんの呼吸のように浅く気楽に行う。

Figure 5は共鳴周波数を検索する際の心拍変動データ（3分間）をスペクトル分析したものである（ある実験協力者の例）。図Aから順に6.5、6、5.5、5、4.5 cpmのスピードでペース呼吸を実施したときのスペクトルpowerを表している。この参加者では4.5 cpmにおいて最も大きな心拍変動の振幅が現れ（Figure 5E）、これが共鳴周波数とされる。共鳴周波数でペース呼吸を行うと、心拍変動スペクトル分析のLF powerが顕

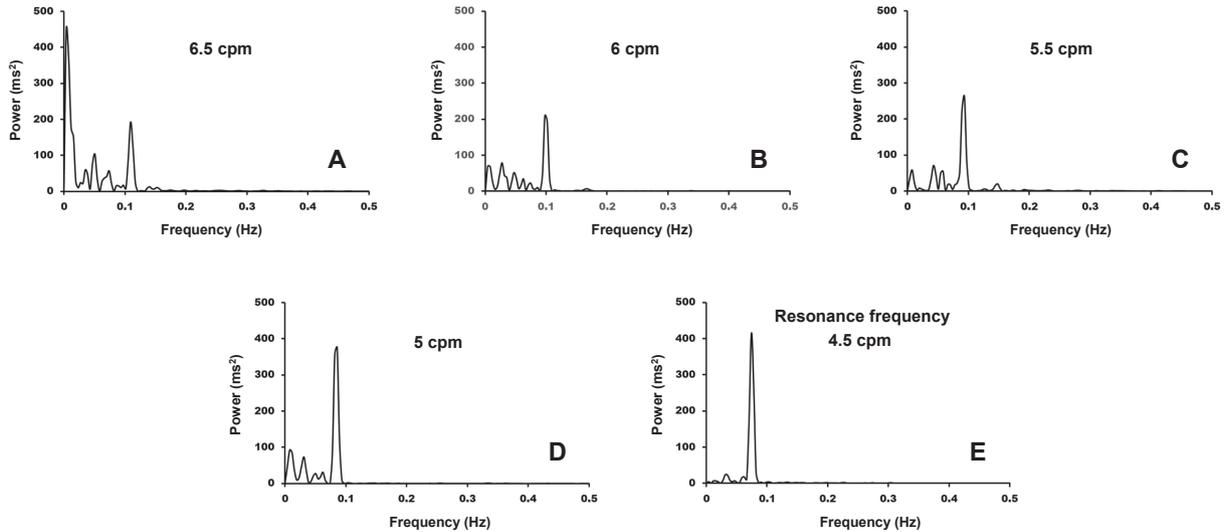


Figure 5 スペクトル分析による共鳴周波数の評価 (共鳴周波数：4.5 cpm [0.075 Hz])

著となり鋭いかたちのピークが現れるのが特徴である。この際、共鳴周波数以外のパワーが相対的に少なくなるが多い。

**自宅練習** 個人の共鳴周波数が明らかになると、自宅でペース呼吸を練習する。訓練参加者は前述の breath pacer をダウンロードするなどして、20分間の共鳴周波数のペース呼吸を1日に2回実施することになっている。この際、過換気症状（たとえば、立ちくらみ、しびれ、動悸、めまい、不安感）に気をつけるよう促し、練習の際はなるべく浅く自然な呼吸を心がけるよう指示する。また、参加者は記録（練習時間や練習上の疑問や感想など）を残すよう勧められる。

**継続的な訓練セッション** 初回セッションで共鳴周波数の検索と自宅練習の説明が行われる。第2回（第2週）セッションでは自宅練習におけるクライアントの体験や疑問を聴取し、もし、過喚起症状が現れるようであれば浅い呼吸を心がけるよう説明する。このセッションではリラックスしたペース呼吸が維持できるように、a) 腹式呼吸、b) 口すぼめ呼吸（鼻で息を吸い口から吐く。この際、口をすぼめる）、c) 呼気を長めにするなどの点が説明される。しばらく練習した後、共鳴周波数に設定された breath pacer を用いてペース呼吸を実施する。セッション後は自宅練習を継続する。

第3回（第3週）セッションは腹式呼吸、口すぼめ呼吸、共鳴周波数によるペース呼吸を確認し HRVB を総合的に実施する。ここでは画面に表示された心拍変動と呼吸曲線を参照しながら、両者が同期しかつ心

拍変動が大きく振れることを目標とする。はじめは breath pacer を利用し、その後、心拍変動と呼吸の動きのみで HRVB を実施する。この段階では参加者は心拍変動の動きを十分に理解できるようになり、心拍がゆらぐ様子をみながら適切に吸気と呼気が行えるようになる。第4回（第4週）以降のセッションはこれと同じ内容である。指導者は参加者の疑問に答え、動機づけを高めるようにコミュニケーションする。

**副作用と禁忌**

HRVB を実施するにあたり、留意しておかなければならない副作用と禁忌がある (Lehrer, 2021)。1つは過呼吸である。一般に、呼吸を自らコントロールしようとするとき過呼吸が起こりやすくなり、HRVB 初期のセッションでは特にそのリスクが高い。そのため、訓練プロトコルは浅く呼吸をするように教えている。過呼吸はめまいあるいはふらつき (lightheadedness)、チクチクする感覚 (tingling)、不安感 (increased anxiety)、動悸 (pounding heart) などの症状を誘発する。このような場合、可能であればカプノメータを使って呼気終末二酸化炭素分圧 (end-tidal CO<sub>2</sub>) をモニタしながら HRVB を実施することも有用である。

もう1つは HRVB の練習中、患者によっては呼気の終わりに期外収縮イベントが増えることが指摘されている (Lehrer, 2021)。この種の脆弱性をもつ患者では二酸化炭素分圧が比較的高いときに心室性期外収縮が誘発されやすいようである。不規則な心拍や抜けなどの異常はポアンカレプロットの表示を備えたソフト

ウェアがあれば確認しやすい。ポアンカレプロットとは、ある時点の R-R 間隔とその次の時点の R-R 間隔の組を x-y 軸上に順にプロットする手法である (R-R 間隔の変化の様相を 2 次元的に表現する)。ポアンカレプロットでなくても、刻々と変化する R-R 間隔をタコグラム表示することで、不整脈イベントを観察することもできる。

不整なパタンの心拍をもつ参加者が HRVB を実施する場合は、訓練中にその種のイベントが発生していないか特に注意する必要がある。このような特徴をもつ人 (たとえば患者) に対する HRVB の長期的な影響やリスクについてはまだよくわかっていない (Lehrer, 2021)。緩徐な呼吸によって期外収縮が誘発されることがそのまま循環器におけるリスクとなるのかどうかについてもまだよくわかっていない。期外収縮はしばしば疲労、ストレス、アルコール多飲で発生するとされているが、持続的に発生するようであれば医師の指示を仰ぐ等の対応が必要であろう (Lehrer, 2021)。

#### IV. HRVB の臨床的効果

HRVB による介入によってさまざまな疾患における臨床的改善が報告されている。それらは呼吸機能、情動的な側面 (抑うつや不安など)、疼痛などの問題に関連している。ここでは HRVB 訓練プロトコル (Lehrer et al., 2000; 2013) のエッセンスを踏まえて実施された介入研究の知見を紹介する。HRVB の臨床的応用についてはすでに榊原 (2012) において紹介されたものもあるが記載が十分でなかったものについてはあらためて示すこととした。ここでの要点は、心拍変動の増大が引き起こされる HRVB を継続的に練習することで症状の緩和やパフォーマンスの改善がもたらされることである。これにより、(すべてではないが) 安静ベースラインの心拍変動が増加する例も報告されている。

##### 喘息および慢性閉塞性肺疾患

**喘息** Lehrer et al. (2004) は HRVB 訓練によって喘息患者の呼吸機能が改善することを報告している。彼らは、先行研究 (HRVB による呼吸機能の改善) を踏まえ、18~65 歳までの 94 名の喘息患者において当該技法の効果を詳しく検討した。参加者は、1) 完全プロトコル群 (HRVB に呼吸を長くする口すぼめ呼吸の手順を加えたもの) に 23 名、2) HRVB 群 (HRVB

のみ) に 22 名、3) プラセボ群 (脳波  $\alpha$  波を増加または減少させるバイオフィードバック) に 24 名、4) 待機群 (通常治療のみ) に 25 名が配置された。患者を各群に配置する際、できるだけ少ない薬服状態となるように専門機関の服薬プロトコルに従って徐々に投薬量を減らし、最終的な服薬レベルを基準服薬レベルとした。次に、年齢、性別、喘息重症度 (軽症間欠型・軽症持続型・中等症持続型・重症持続型) の得点が均等になるように患者を配置した。1) ~ 3) 群は 10 セッション (おおむね週に 1 度実施) の介入を受け、自宅では 20 分の練習を 2 回実施するよう教示された。自宅練習に際し、HRVB (1 および 2) 群は練習用の小型機器を用いて練習するよう説明され、プラセボ群はリラックスして覚醒状態を保ちながら実験者から手渡されたクラシック音楽を聞くよう求められた。この録音テープには喘息が良くなるというメッセージが閣下で録音されていると告げられた。

実験データは喘息症状、自宅で計測したピークフロー値 (スパイロメトリを使って力いっぱい息をはき出したときの息の速さを計測する。通常 3 回実施した際の最大値を記録)、実験室来訪時に行われる呼吸機能テスト、月 1 回の診察である。なお、投薬量は喘息を専門とする医師が 2 週間に 1 度の頻度で調整した。呼吸機能テストは強制オシレーション法による呼吸抵抗が測定され、第 1、4、7、10 週のデータが比較された。呼吸抵抗 (Zrs) は 6Hz の抵抗値 (cm H<sub>2</sub>O/L/s)、周波数依存抵抗値 (6Hz 抵抗値と 8-32Hz の最小抵抗値との差, cm H<sub>2</sub>O/L/s)、共鳴周波数 (リアクタンスが負から正になるときの最小周波数, Hz) が評価された。また、圧受容体反射感度も同じタイミングで評価された。圧受容体反射感度は心拍数と血圧のクロススペクトルが計算され、二つの測度のコヒーレンスが 0.8 以上のときのデータから求められた (ms/mmHg)。

介入の結果、得点化された喘息服薬量は HRVB の二つの群で有意に減少し (両群に差はみられなかった)、プラセボ群でも有意な低下がみられた。待機群では変化はみられなかった。また、HRVB 両群のセッション終了時の服薬レベルは中等症持続型から軽症持続型となった。一方で待機群とプラセボ群の患者の服薬レベルは中等症持続型レベルのままであった。待機群に変化がなかったことから、一定時間経過することによる自然治癒的な変化はなかったと判断された。

強制オシレーション法における 6Hz 気道抵抗値、周波数依存抵抗、共鳴周波数は、HRVB 両群ではプラセボ・待機群に比してセッションの進行とともに有意に

減少した。HRVB 中は両群とも一回換気量が有意に増加し呼吸数は有意に減少した。呼吸周波数はおおむね 0.1Hz となった。スパイロメトリによるピークフロー値に変化はみられなかった。HRVB 実施中は HRVB 両群の心拍変動 total power (ただし, 0.005–0.4 Hz) と LF power (ただし, 0.05–0.15 Hz) が有意に増加した。また, HRVB 実施中は圧受容体反射感度もこれらの群で有意に増加した。セッションを通じて, 心拍変動の指標は変化せず, 服薬量, 喘息症状, 強制オシレーション法の各指標との相関もみられなかった。

一方, HRVB 両群ではステロイド吸入剤が減らされたにもかかわらず喘息症状の悪化はみられなかった。研究期間を通じて, HRVB 両群において 2 名の患者が緊急のステロイドの吸入治療を必要としたのに対し, プラセボ群 4 名の患者と待機群 5 名の患者がステロイド治療を必要とした。なお, 介入についての信頼度を問う質問を 9 ポイントスケールで患者に尋ねたところ, 4 群に差はみられず, 平均 6.5~7.5 点となった。以上のような結果から, HRVB による介入は喘息症状を緩和して投薬量を減少させることが示唆された。

この研究では HRVB の完全プロトコルと HRVB のみでは両者に差はみられないことが示されたが, 呼吸抵抗を示すデータは完全プロトコルによる介入 (口すぼめ呼吸で呼気を長く吐くタイプの HRVB) において改善の程度が大きくなっており, 呼吸コントロールをより意識した手順を採用することによって明確な反応が期待できるのかもしれない。

**慢性閉塞性肺疾患** Giardino et al. (2004) はゆっくりとした呼吸が一回換気量を増加させ, 呼吸筋を鍛えることなどの効果を期待して, 慢性閉塞性肺疾患 (chronic obstructive pulmonary disease: COPD) の患者に対し HRVB 訓練を実施した。20 名 (男女各 10 名) の患者において 5 週間の HRVB 訓練を実施し, 6 週~9 週は酸素飽和度をモニタしながら歩行訓練を行った。第 1 週は 10 回/分の呼吸を実施してペース呼吸に慣れることから始め徐々にペースを落としていった。ここでは呼吸性洞性不整脈の振幅が最大になるペース呼吸を練習した。第 2 週は HRVB の練習プロトコルに沿った口すぼめ呼吸や腹式呼吸を練習し, 20 分の自宅練習を指示した。第 3~5 週では口すぼめ呼吸や腹式呼吸を通じて呼吸性洞性不整脈が最大となる状態を維持する練習を行った。セッションでは呼吸 pacer を使わず, 緊張なくペース呼吸が維持できることをめざして練習した。また, 自宅では 1 日に 20 分の練習をするよう指示した。

第 6~9 週は小型のパルスオキシメータを装着しながら廊下を歩行する訓練を行った。ここでは息苦しくなるところまで歩行を続け, HRVB で修得した呼吸, 特に長く吐く呼吸を続けるよう励まされた。歩行中, 患者が立ち止まったときは酸素飽和度を確認するよう指示した。もし, 飽和度が 90% 以上で, かつ足の筋肉の疲労がなければ歩き続けるよう励まされた。また, 酸素飽和度が 90% 以下のとき, 患者は休憩し HRVB の際の呼吸を行った。患者は適切な呼吸 (HRVB 中のゆっくりしたペース呼吸) ができていることについて言語的なフィードバックを受けた。

第 1~9 セッションの介入前後で評価した 6 分間歩行試験の歩行距離は 249m から 432m へと有意に延び, 歩行前後の呼吸困難感も有意に改善した。また, 主観的な尺度として, 呼吸器疾患に関わる生活の質尺度, COPD セルフエフィカシー尺度, 呼吸困難質問尺度による評価はいずれも有意な改善を示した。介入前後の呼吸性洞性不整脈 (安静時の自発呼吸下で得られた HF power) は平均 241ms<sup>2</sup>/Hz から 1503ms<sup>2</sup>/Hz へと有意に増大した。

慢性閉塞性肺疾患に対する Giardino et al. (2004) の試みはコントロール条件のない予備的な研究であるが, HRVB の長期的な介入の効果が慢性肺疾患に関わる主観的評価を改善する可能性を示している。呼吸性洞性不整脈の増加は (自宅練習を含めた) HRVB 訓練によって安静時の自律神経機能が変化することを示唆している。

## 抑うつ症状

**大うつ病性障害** Karavidas et al. (2007) は大うつ病性障害 (major depressive disorder: MDD) に対する HRVB の有用性を示している。この内容についてはすでに榎原 (2012) に報告されているため, ここでは概要を簡単に紹介する。Karavidas et al. は, 抑うつ症状に心拍変動の低下 (もしくは圧受容体反射の低下) が関連していること, うつ病の治療 (薬物治療や認知行動療法) が奏功した際には低下していた心拍変動が回復することなどの知見から, HRVB が大うつ病性障害に適応があるのではないかと仮説を立てた。

25~58 歳までの大うつ病性障害の基準を満たす 11 名の患者が HRVB 訓練に参加した。HRVB は上述のプロトコルにあるように, 共鳴周波数の特定と共鳴周波数によるペース呼吸の自宅練習 (第 1 週), 腹式呼吸・口すぼめ呼吸・自宅練習 (第 2 週), 呼吸 pacer を利用した HRVB セッション・自宅練習 (第 3 週)

が実施された。第1, 4, 7, 10週のセッションにて心拍変動と呼吸データが収集された。また、各セッションでは安静(5分)―HRVB開始(5分)―HRVB終了直前(5分)―事後(5分)のデータが測定された(HRVBそのものはおおむね30分間行われている)。

介入の結果、抑うつ尺度(ハミルトンうつ病評価尺度、ベックうつ病調査表)の得点はセッションを通じて有意に低下した。SDNNとLF powerは第4週までに最も大きくなりその後は元のレベルに戻った。Karavidas et al. (2007)の研究はコントロール群のない予備的なものであるが、このような結果は大うつ病性障害に対するHRVBの適応の可能性を示唆している。

**心臓手術後の抑うつ症状** 心臓手術は生活上の重大な出来事となるだけでなく、患者の感情状態に大きな影響を与える。Patron et al. (2013)は心臓手術後リハビリテーションにおいてみられた抑うつや不安症状をもつ症例に対するHRVBの適応を検討した。

実験参加者は心臓手術後のリハビリテーションを続けている26名の患者で、標準的治療にHRVBを受ける群と標準的治療のみを受ける群にそれぞれ13名ずつランダムに配置された。HRVB訓練は2週間の間、毎日実施された(1セッションあたり約45分)。このグループに配置された参加者はコンピュータディスプレイに映し出された呼吸と瞬時心拍数の情報をもとに、呼吸と心拍変動が同期してかつ心拍変動が大きくなるように促された。HRVBを行うにあたり、呼吸数を抑えること、お腹を使って呼吸することが伝えられた。この際、過呼吸を起さないように過剰に深い呼吸をしないように教示された。HRVBの練習は6分間を2回実施した。また、このような訓練セッション以外にも、15分間のペース呼吸を1日に2回練習するよう励まされた。専門学会ガイドラインに沿って参加者全員にはダイエット、禁煙、体重コントロール、ストレスマネジメントについてのカウンセリングが実施された。

介入後、呼吸性洞性不整脈の大きさはHRVBを受けた参加者において有意に増加した。ここでは各個人が示した呼吸周波数の範囲が特定され、心拍変動スペクトル分析を施して当該周波数のpowerが算出された(したがって、HF powerに相当すると考えられる)。Patron et al. (2013)に表記された図からは、訓練前は両群の呼吸性洞性不整脈はおおむね20 ms<sup>2</sup>のレベルであるが、訓練後、HRVBを受けた群のレベルはおおむね120~140 ms<sup>2</sup>程度まで増大している。この際、標準

治療のみの群に変化はみられていない。また、抑うつ尺度(Center for Epidemiological Study of Depression scale: CES-D)はHRVB群において有意に低下し標準的治療群では変化はみられなかった。さらに、抑うつ尺度の変化値は呼吸性洞性不整脈の変化と有意な回帰を示した( $\beta=-.50, p=.03$ )。これらの結果から、Patron et al.は心臓手術を受けた患者のリハビリテーションプログラムにおいてHRVBが有用な行動的介入法の1つになることを示唆している。

### 線維筋痛症および慢性疼痛

**線維筋痛症** Hassett et al. (2007)は広範な筋骨格系の痛みや複数の圧痛点を特徴とする線維筋痛症(fibromyalgia)に対するHRVBの効果を報告している。この介入報告は比較対照群が設けられていない予備的なレベルの検討であるが、HRVBの実施によってうつ尺度と痛み尺度に改善がみられている(この結果はすでに榊原[2012]に記載されているが一部で表記に誤りがみられたため修正し研究の概要を記載した)。

Hassett et al. (2007)は18~60歳の12名の女性患者を対象に第1~10週の訓練セッションを実施し、その3ヶ月後に事後評価を行った。患者には20分の自宅練習が指示された。セッションは実験室で行われ、Lehrer et al. (2004)やKatsamanis et al. (2007)と同様、HRVBの前後5分間、およびHRVB開始直後と終了直前のそれぞれ5分間の心拍変動データが測定・分析された。第1週、第10週、事後における評価の際、線維筋痛症インパクト尺度(Fibromyalgia Impact Questionnaire)、ベックうつ病調査表(BDI-II)、マッギル痛み尺度(McGill Pain Questionnaire)、ピッツバーグ睡眠尺度(Pittsburgh Sleep Quality Index)が実施された。

HRVB介入の結果、第1週~10週にかけてベックうつ病調査表の得点は有意に低下した。また、3ヶ月後の事後評価の際には、第1週に比して線維筋痛症インパクト尺度、ベックうつ病調査表尺度、マッギル痛み尺度の得点が有意に低下した。HRVB訓練中の心拍変動LF powerは顕著に増加した。安静時の心拍変動total powerは1839.4 ms<sup>2</sup>(第1週)から2190ms<sup>2</sup>(第10週)へと有意に増加した。同じく安静時のHF powerは296.6 ms<sup>2</sup>(第1週)から613.4 ms<sup>2</sup>(第10週)へと有意に増加した。このような結果は線維筋痛症に対するHRVBの有用性を示唆している。また、安静時の心拍変動が増加したことから、継続的なHRVBによって自律神経機能が調整されること(副交感神経活

動の増加)の可能性を示している。

**慢性疼痛** HRVBが慢性疼痛を緩和する可能性のあることがBerry et al. (2014)によって示されている。Berry et al.は、慢性疼痛が身体のストレス反応を活性化し同時に心拍変動の低下をもたらすことを指摘し、このことが回復力の低下や自己調節能力の低下に関連するのではないかと仮定した。そこで、コヒーレンスHRVBを用いて慢性疼痛を持つ退役軍人への介入を試みた。コヒーレンスとはあるポジティブな感情(たとえば、感謝など)と心拍リズムが連動した状態のことを指し、この際、心拍変動はノイズの少ないサイン波様のパタンになることが指摘されている(Tiller et al., 1996; McCraty & Zayas, 2014)。HRVBはこのようなコヒーレンスの状態を誘発していると考えられる。具体的に、HRVBにおける共鳴周波数のペース呼吸はLF周波数帯域に集中的にpowerを形成するが、相対的に他の帯域のpowerは低下することになる(Figure 5Eを参照)。コヒーレンスの評価値は心拍変動total powerに対するLF powerの割合として表されるため(Mateos-Salgado et al., 2022)、LF以外のpowerが少なければ少ないほどコヒーレンス値は高くなる。Berry et al.はストレスマネジメントとしての有効性を判断する目的でコヒーレンスHRVBを実施し、この手順が副交感神経を増加させるという仮説を立てた(コヒーレンスHRVBではペース呼吸によってLF帯域に明瞭なピークが形成されると考えられる)。

実験では慢性疼痛の治療を受けている14名の退役軍人が治療群8名と対照群6名に無作為に割り当てられた。治療群はコヒーレンスHRVBと標準的治療を受け、対照群は標準的治療のみを受けた。治療群は週に1度ずつ4回にわたってコヒーレンスHRVBの介入を受け、対照群はこの期間の前後のみ実験室を訪れて評価を受けた。

介入前、全参加者の平均の疼痛重症度はBrief Pain Inventory (BPI)のスコアで26.71 (SD=4.46; 範囲=21-35)と評価され、中程度から重度の疼痛レベルを示していた。心拍変動のコヒーレンス値、BPI、Perceived Stress Scale (PSS)のレベルは治療群と対照群の間に有意差はみられなかった。介入の後、治療群は対照群よりもコヒーレンス値が有意に上昇し、主観的な疼痛評価が有意に低下した。たとえば、介入前から介入後にかけて、治療群のコヒーレンス値は0.22から0.42になったのに対し、対照群のそれは0.12から0.15であった。また、治療群のBPI値は27.1から17.3へ低下し、対照群では26.2から24.3であった。PSSの

値は治療群で24.4から20.4へ減少したのに対して対照群では24.8から26.0であった。この他、治療群ではBPI尺度の下位項目であるネガティブ感情や行動の制限の低下も顕著であった。以上の結果はコヒーレンスHRVBが慢性的な痛み(これに関わるネガティブな感情、行動の制限など)を緩和し、慢性疼痛の標準的治療をサポートする非薬理的な介入として有用であることが示唆されている。

### 心的外傷後ストレス障害

Zucker et al. (2009)は心的外傷後ストレス障害(post-traumatic stress disorder: PTSD)に対する効果を検討するため、HRVBを実施する実験群19名と漸進的筋弛緩法を行う統制群19名を比較した。この研究内容の詳細は榎原(2012)に記載されているため概要のみを示すと、4週にわたる介入の結果、HRVBを受けた群は抑うつ症状が低下し、安静時の心拍変動SDNNが増加したことが報告されている。Zucker et al.に示されている介入前後のSDNNの値(安静時)は、実験群では0.037から0.054へ増加し、統制群では0.038から0.036の変化であった(SDNNのデータ処理については不明)。

**戦闘に関わるPTSD** PTSDに対するHRVBの効果はさらにTan et al. (2011)によっても示されている。従来、PTSDに対する心理療法として暴露療法や認知行動療法が有用であることが示されているが、Tan et al.は治療が終結してもなお心拍数上昇やストレス刺激に対する過剰な心拍数反応などの自律神経機能に関わる障害が残存することを指摘した。彼らの研究目的は戦闘に関わるPTSD症状を呈する復員兵患者とPTSD症状のない者(ボランティア参加者)における心拍変動を比較すること、PTSD患者に対するHRVBの適応を検討することである。

20名のPTSD症状を呈する復員兵患者がHRVBと標準的治療を受ける実験群10名(24-67歳)と標準的治療のみを受ける統制群10名(24-62歳)に配置された。さらに、心拍変動を比較する目的でPTSD症状または精神疾患のない実験参加協力者10名が募集された。実験群は週に1度ずつ8週にわたってHRVB訓練を受けた。1回のセッションはLehrer et al. (2000)のプロトコルに則って約30分間実施された。初回セッションでは安静時の心拍変動が測定された後、参加者の共鳴周波数が特定された。その後、参加者は自然でゆっくりとした呼吸をすること(この際、呼吸は長めにする)が教示された。練習セッションが終了する

と、参加者は彼らの共鳴周波数によるペース呼吸を日常的に練習するよう教示され、共鳴周波数で変化する音刺激が記録されたCDが手渡され、それを聞きながら20分の練習を1日に2回行うよう求められた。

安静時の心拍変動はSDNNによって評価され、PTSD患者（実験群および統制群）とPTSDのない実験協力者の間で比較したところ、有意な差が認められた（PTSD患者の平均SDNN=48.10、実験協力者の平均SDNN=138.70）。次に、介入前後で測定したPTSD尺度（Clinician-Administered PTSD scale: CAPS および PTSD Checklist-Specific: PCL-S）の得点はいずれも実験群において有意に低下し、統制群では変化がみられなかった。具体的な介入前後の数値は、実験群のCAPS得点が平均86.41から71.24へ変化し、PCL-Sは平均64.82から54.43となった。一方、統制群のCAPS得点は平均89.13から80.80となり、PCL-Sは平均62.74から61.74であった。

さらに、CAPS尺度の下位項目（再経験、回避／無感覚、過覚醒）については実験群の回避／無感覚得点が統制群に比べて有意に低下していた。以上の結果から、戦闘に関わるPTSD患者に対するHRVBの有用性が示唆された。なお、Tan et al. (2011)の報告では介入前後の心拍変動の変化は示されていない。

### 特性不安

Lee et al. (2015)は継続的なHRVB訓練が参加者の特性不安レベルを有意に低下させることを報告している。彼らは韓国の理工系大学に所属する15名の学生をHRVB群、リラクゼーション群、統制群にそれぞれ5名ずつランダムに配置し、2週ごとに4回のセッションを実施した（統制群は介入期間前後の特性不安の評価にのみ参加した）。実験参加者の特性不安得点は平均53.67（SD = 4.45）で韓国の大学生の平均レベル（44.53, SD = 9.50）より有意に高かった。すべての参加者は介入前に実験説明を受けた後、特性不安尺度を実施した。HRVB群は2週間ごとに45分間のHRVBセッションを4回受けた。セッションははじめに心拍変動、身体的健康、心理的健康の間の関連性についての説明を受けた後、HRVB機器（emWave PC, HeartMath）のフィードバック情報を見ながら、横隔膜呼吸法（腹式呼吸）などを行うよう教示された。HRVBの小型機器は参加者の耳朶にセンサーを取り付けて脈拍を測定し、この脈拍データをもとにHRVコヒーレンス値が算出されるようになっている。訓練セッションではデスクトップコンピューターにコヒーレ

ンスが表示された。また、参加者には自宅練習用の小型HRVB機器が与えられ、これを通して5～10分の練習を少なくとも1日に3回練習するよう教示された。自宅練習の進捗状況（各回のコヒーレンス値）は小型機器に保存された。各セッションではこのデータが確認され、練習の難しさや障害となる要因を克服する方法について実験者との間で話し合いがなされた。

一方、リラクゼーショントレーニングはそれぞれのセッションで異なる技法が教示された。HRVBと同様に介入のためのセッションが2週間ごとに45分間ずつ設けられた。はじめに、参加者はリラクゼーションがストレス反応をどのように変化させ、不安を軽減するかについて説明を受けた。各セッションでは毎回異なるリラクゼーション技法が教示された（1回目：横隔膜呼吸、2回目：漸進的筋弛緩法、3回目：自律訓練法、4回目：誘導イメージ法）。各参加者は少なくとも1日3回、5～10分間これらのテクニックを練習し、練習記録を毎日作成するよう求められた。各セッションでは練習記録が確認され、実験者との間で練習の妨害要因とそれを克服する方法が話し合われた。

介入前後×各群の分析の結果、特性不安スコアに有意な交互作用がみられ、HRVB群の特性不安は統制群に比べて有意に低下した。リラクゼーション群と統制群に有意差はみられず、またHRVBとリラクゼーション群の間にも有意な差はなかった。このような結果から、HRVBがストレスマネジメントプログラムへの利用や不安の軽減を目的とした治療に有用であることが示唆された。なお、Lee et al. (2015)の報告では介入前後の心拍変動の変化は示されていない。

### その他の臨床的問題

以上の報告の他にも、ストレスが影響すると考えられるいくつかの臨床的問題についてHRVBの有用性の検討がなされている（Lehrer, 2021）。

### パフォーマンスの向上

**ダンスパフォーマンス** Raymond et al. (2005)は脳波のバイオフィードバック（ニューロフィードバック）とともにHRVBによる介入がダンスパフォーマンスを向上させることを示している。Raymond et al.はニューロフィードバックによる訓練が不安を低減して音楽パフォーマンスを向上させることから、この知見を拡張してダンスパフォーマンスに対しても影響を及ぼすのではないかと考えた。

実験では大学ダンススポーツチームに所属する者24名(平均年齢21.6歳)がニューロフィードバック群(アルファシータ訓練)、HRVB群、統制群に年齢と性別が均等になるように配置された。ニューロフィードバック群は脳波アルファ波とシータ波が増加するように1セッションあたり20分間のフィードバック訓練を受けた。また、HRVB群は共鳴周波数のペース呼吸を行い、コンピュータディスプレイに表示される心拍変動のフィードバックが20分間実施された。統制群は特別な処置を受けなかった。

ニューロフィードバックとHRVB訓練を受けた参加者は平均で9回のセッションに参加した(SD=1.26)。ダンスパフォーマンスはこの介入の前後で実施され、2名の評価者が技術(technicality)、音楽性(musicality)、タイミング(timing)、パートナー技術(partnering skill)、演技力(performing flair)、総合(overall execution)を評価した(2名の評価は平均化された)。介入の結果、ニューロフィードバック群とHRVB群の平均評価得点はいずれも統制群に比較して有意に高かった。ニューロフィードバック群とともにHRVB群では特に技術、演技力、総合評価の面で向上がみられた。なお、Raymond et al. (2005)では具体的な心拍変動の変化は報告されていない。

**運動パフォーマンス(バスケットボール)** さまざまなチームや個人のスポーツでは運動能力と精神運動プロセスの調整と改善が成功の要件とされ、アスリートが優れた運動パフォーマンスを達成するために高度な集中力と認知処理が重要な役割を果たしていると考えられている(Paul et al., 2012)。たとえば、バスケットボール競技ではシュートのような個人的スキルがゲームの結果に直結するため、高い緊張の中で集中の維持と適切な認知処理が求められる。また、意思決定の遅れ(反応の遅さ)は、攻撃や守備においてスキルの達成を妨げる要素となることから、たとえば反応時間の改善はパフォーマンスの調整において優先的事項となっている。スポーツにおける最適なパフォーマンスの向上の目的で脳波や筋電図を用いたバイオフィードバックの試みはあるものの、それまでHRVBについての検討例はなく、Paul et al. (2012)はバスケットボール選手の精神運動反応(psychomotor response)に対するHRVBの効果を検討した。

彼らは18-28歳の男女バスケットボール選手30名を実験群10名、プラセボ群10名、対照群10名に無作為に配置した。実験群ははじめに個人の共鳴周波数を特定し、この周波数によるペース呼吸を行うHRVB

を20分間実施した。また、これを10日間連続して行った。HRVB中、参加者は口すぼめ呼吸と腹式呼吸を行い、この際、自らのシュートをイメージするよう求められた。プラセボ群はバスケットボールの動機づけが高められるような内容のビデオクリップを10分間視聴し、これを10日間連続で実施した。対照群は特別な手続きを行わなかった。これらの介入の後、1ヶ月後に事後測定が行われた。

心理学的な測度としてConcentration Grid課題によって集中の程度が測定された。ここでは0から99までランダムに置かれた数字の中から、60秒の間に0から昇順に数字をできるだけ早く見つけ出すことが求められた。得点が高いほど、数字をスキャンする効率と課題を完了するための適切な集中力が示される。集中力の程度として60秒間で20~30コ(点)を記録できる能力が評価される。この課題にはバリエーションがあり、特定の数字から始めて降順で検出したり、奇数または偶数を探索させることもある。一方、パフォーマンスの指標として選択反応時間課題とシュート課題が実施された。前者は視覚刺激に対する選択的反応時間を計測し、後者は3分間の間にできるだけ正確にシュートを打つよう求められた(1シュートが1点となる)。また、生理的指標として心拍変動と呼吸数が記録された。

介入の結果、集中の程度、反応時間、シュート得点、心拍変動においてグループと時間(介入前・介入後)の交互作用が示された。下位検定の結果、集中の程度(得点)は実験群が他の2群に比べて有意に高かったが選択反応時間には有意な群差はみられなかった。シュート得点は実験群では介入後とフォローアップにかけて漸増したのに対し、他の2群では変化しなかった。実験群の心拍変動はLF powerが255ms<sup>2</sup>(pre)から1221.9 ms<sup>2</sup>(post)へ増加し、HF powerについても386.73 ms<sup>2</sup>(pre)から670.19 ms<sup>2</sup>(pre)へ増加した。一方、プラセボ群の心拍変動はLF powerが278.58ms<sup>2</sup>(pre)から278.47 ms<sup>2</sup>(post)となり、HF powerは223.14 ms<sup>2</sup>(pre)と222.89 ms<sup>2</sup>(post)であった。

これらの結果から、Paul et al. (2012)はHRVBの訓練がアスリートの心理生理学的プロセスをコントロールできるように助け、パフォーマンスを向上させる可能性のあることを示唆している。

### 介入効果のメタ分析

HRVBの効果についてはLehrer et al. (2020)が系統的レビューによるメタ分析を実施している。彼らは

HRVB に関わる介入研究をある基準に沿って選定し、ランダム化比較試験であるかどうかや参加者の特徴に関係なく、それらの測定値を分析した。HRVB の適応にはさまざまな生物学的および心理的問題の他、運動、認知、および芸術的パフォーマンスに関する問題が含まれていた。当初、1868 件の論文が得られ、そのうち基準を満たした 58 件について検討された。

分析の結果、HRVB には小～中等度範囲の効果量が認められた (平均  $g=0.37$ )。効果量は、不安、抑うつ、怒り、運動／芸術パフォーマンスにおいて最大となり、相対的に PTSD、睡眠、生活の質においては小さかった。集団の特徴や出版年にかかわらず、事前・事後テストの間の治療セッション回数に有意な差は見られなかった。HRVB は正常から臨床的な範囲の多くの領域で症状や機能を改善することから、Lehrer et al. (2020) は HRVB が補完的治療として有用であると結論づけている。特定の臨床的問題についての有効性を確認するには今後さらなる研究が必要であるとされている。

## V. HRVB の心理生理学的な作用機序

HRVB に関する系統的な実験は 1980 年代に Evgeny Vaschillo によって行われた。ここでは Vaschillo et al. (1984) の実験を紹介し、HRVB の作用機序に関わる心臓血管系の共鳴について解説する。要点としては、共鳴の背景で HRVB の効果発現に関わる生理学的要因、すなわち呼吸性洞性不整脈と圧受容体反射が効率的に引き起こされることである。心臓血管系には約 0.1 Hz の共鳴周波数があり、これと同じ周波数で呼吸をコントロールすると心拍変動が著しく増大する。この過程で呼吸性洞性不整脈が活性化されて肺のガス交換効率が向上するように働くと考えられる。また、呼吸性洞性不整脈がもたらす心肺系休息機能が高められる可能性がある。一方、共鳴過程で起こる圧受容体反射の活性化はホメオスタシス調節機能を高め、同時に皮質活動（たとえば、感情の制御）に影響を与えている。HRVB の心理生理学的な作用機序はすでに榊原 (印刷中) などにおいて記載されているが、ここでは呼吸性洞性不整脈と圧受容体反射の役割を明確にしてなるべく総合的に解説するようにした。

### 心臓血管系の共鳴

**Vaschillo らのバイオフィードバック実験**  
Vaschillo et al. (1984) はさまざまな周期で変化する正弦波刺激を準備しこれに合わせて実験参加者が自らの

瞬時心拍数を変化させるバイオフィードバック実験を行った。この実験の結果から“心臓血管系の共鳴”を指摘した (実験内容の詳細については榊原 [印刷中] を参照されたい)。実験には 24–27 歳までの 5 名の健康者が参加し、はじめにベースラインとして心電図、呼吸、連続血圧が 5 分間記録された。その後、バイオフィードバック課題が 5 分間実施された。ここで参加者はモニタに映される正弦波の動きに合わせて自らの瞬時心拍数を変化させるよう求められた。正弦波の周期は 100 s (0.010 Hz), 47 s (0.021 Hz), 34 s (0.029 Hz), 18 s (0.055 Hz), 13 s (0.077 Hz), 9 s (0.111 Hz), 7 s (0.143 Hz) である。各条件は 20 回測定され心拍変動の振幅と連続血圧値がそれらを通して平均化された。また、各条件における心拍変動と連続血圧波形の位相関係が分析された。

実験の結果、心拍変動の振幅は正弦波 18 s (0.055 Hz)~9 s (0.111 Hz) のいずれかで最も大きくなった (ただし、個人によって異なる)。また、心拍変動と血圧の位相関係は 13 s (0.077 Hz) もしくは 9 s (0.111 Hz) のときにおおむね 180 度となった。これは心拍数が上昇する相で血圧が下降 (あるいは心拍数が減少する相で血圧が上昇) したことを示している。実験後、参加者は正弦波の動きに合わせてどのように自分の心拍数を調節することができたのか尋ねられ、多くが“呼吸”を積極的に調整したことが明らかになった。

Vaschillo はその後アメリカでこの研究内容をまとめ直し、心臓血管系における共鳴特性 (resonance characteristic) を指摘した (Vaschillo et al., 2002)。ちなみに、共鳴とはある振動システム A に対して他のシステム B から同じ振動で刺激を与えるとシステム A の振動幅が増大する現象である。具体的に、Vaschillo et al. は、心臓血管系には約 0.1 Hz の共鳴周波数が存在しこれと同じ周波数で何らかの刺激 (すなわち、呼吸のコントロールなど) を与えることによって心臓血管系に共鳴が引き起こされると説明した (心拍変動の著しい増大は心臓血管系の共鳴の結果である)。また、この背景では圧受容体反射が心拍数を効率よく調整していると主張した。

**共鳴過程における呼吸—心拍—血圧の連動** 上述したように、共鳴周波数のペース呼吸の際に心拍変動 LF power は最も大きくなる (Figure 5E)。この過程において呼吸、心拍変動 (R-R 間隔の時系列データ)、収縮期血圧の関係を示したものが Figure 6 である。まず、呼吸 (A) と心拍変動 (B) に注目すると、呼吸性洞性不整脈の働きによって吸気 (inhalation) で R-R

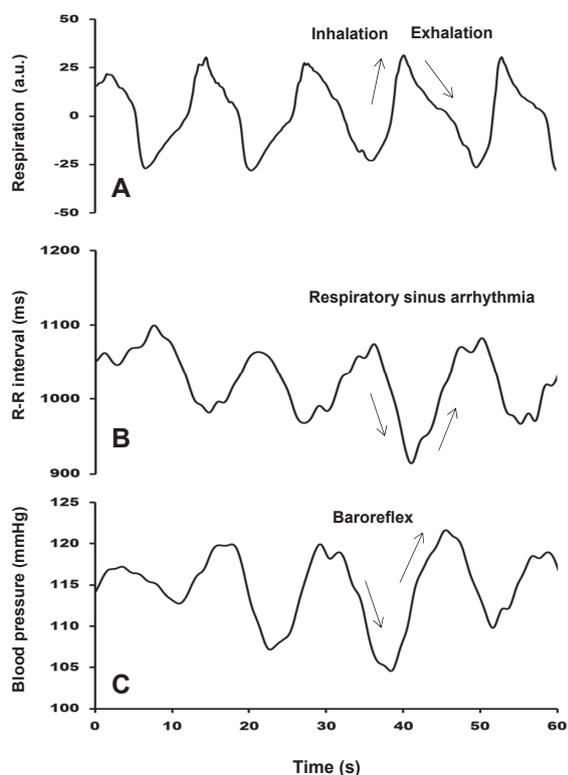


Figure 6 心臓血管系の共鳴過程における呼吸—心拍—血圧の関係

間隔が短縮し呼気 (exhalation) で延長しているのがわかる。次に、心拍変動 (B) と収縮期血圧 (C) の変化をみても、血圧の低下に続いて R-R 間隔の短縮が生じているのがわかる。圧受容体反射が働いて R-R 間隔の変化が引き起こされていると考えることができる。次に血圧の上昇に続いて R-R 間隔の延長が起こっている。このように、呼吸性洞性不整脈と圧受容体反射がおおむね同じタイミングで働くことで心拍変動の振れ幅が著しくなると考えられる。このことはペース呼吸を通して心臓血管系の共鳴を引き起こしたとき、圧受容体反射にかかわるホメオスタシス機能が効率よく刺激されていることを意味する。

### 呼吸性洞性不整脈の効果

**肺のガス交換効率の改善** 呼吸性洞性不整脈はガス交換効率を高める上で重要な役割を担っていることが Hayano et al. (1996) によって示されている。彼らはイヌの頸部迷走神経を刺激して人工的に RSA を引き起こすモデルを作成した。ここでは吸気で心拍数が増加する「RSA モデル」、反対に吸気で心拍が減少する「逆-RSA モデル」、呼吸によって心拍数変化が起こら

ない「対照モデル」が設定され、ガス交換に関わる指標が比較された。実験の結果、「対照モデル」に比べて「RSA モデル」の生理的死腔率 (一回換気量の中でガス交換に利用されない部分の割合) が 10% 低下し、肺内シャント率 (肺において酸素化されずに体循環に入る血液の割合) は 51% 低下した。一方、「逆-RSA モデル」では前者が 14%、後者が 64% 増加した。

呼吸性洞性不整脈は吸気の際に心拍数を増加させることによって酸素を効率よく体内に取り込むことを助けている。Lehrer (2021) は、呼吸性洞性不整脈 (心拍変動の振幅) が顕著となる HRVB では肺のガス交換効率が高まり、これが臨床的效果に寄与している可能性のあることを示唆している。

**心肺系休息機能の向上** 呼吸性洞性不整脈はさらに心肺系の休息機能を担っているのではないかとする仮説が Hayano and Yasuma (2003) によって提起されている。彼らは、(a) 呼吸性洞性不整脈がガス交換を効率化させること (上述)、(b) 呼吸性洞性不整脈の呼気相では心拍が減少するため心肺のエネルギー消費が抑えられること、(c) 呼吸性洞性不整脈 (心拍変動の振幅) は睡眠中に著しく増大すること、(d) 重症心不全や冠動脈疾患では呼吸性洞性不整脈がほぼ消失しており、このような予備能が低下した状態の心肺系は安静時においても休息モードをとれないことなどの例をあげ、呼吸性洞性不整脈の発現が能動的な心肺系の“休息”をもたらしていると解釈した。

呼吸性洞性不整脈の発現が身体の休息や回復に寄与するならば、リラクゼーションや睡眠において呼吸性洞性不整脈の振幅が増加する事実はこれに合致している。Sakakibara et al. (1994) は自律訓練法を繰り返し実施してリラクゼーション反応を引き起こしたとき、心拍変動 HF 成分の振幅 (呼吸性洞性不整脈) が徐々に増加することを示した。また、Bonnet and Arand (1997) によれば、呼吸性洞性不整脈は睡眠中、特に non REM 期において著しく増大することが報告されている。興味深いことに、就寝前に HRVB を実施すると、それに続く睡眠中の心拍変動 HF 成分の振幅が有意に増加する (Sakakibara et al., 2013; 榎原・早野, 2015)。したがって、HRVB は呼吸性洞性不整脈の発現を促して休息・回復機能を高めている可能性がある。継続的な HRVB の練習によって安静時の呼吸性洞性不整脈が増加した例 (HRVB の臨床的效果を参照) は、このような休息・回復的機能が高められた結果かもしれない。

## 圧受容体反射の効果

**圧受容体反射感度の増加** HRVB を継続的に訓練することで圧受容体反射感度 (baroreflex sensitivity) が増加することが Lehrer et al., (2003) によって報告されている。彼らは54名の健常成人 (実験群23名, 統制群31名) において10週にわたる継続的な HRVB の効果を検討した。実験群は5分間の安静測定の後, HRVB を30分間実施して直後に5分間の安静測定を行った。統制群はすべての測定において安静を保つよう指示された。圧受容体反射感度は第1週, 4週, 7週, 10週のタイミングで評価された。HRVB 実験群の参加者は個人の共鳴周波数をもとにしたペース呼吸を自宅でも練習するよう教示された。

HRVB セッション内の変化として, 圧受容体反射感度は訓練後半と訓練直後において増加した。また, 10週の訓練期間を通しての変化として, 各回の安静測定における圧受容体反射感度のレベルは漸増した。統制群ではいずれの測定期においても変化はみられなかった。

個人の共鳴周波数は継続的な HRVB 訓練においてほとんど変化しないため (Vaschillo et al., 2006), 訓練初期に共鳴周波数を適切に検索した後は, 当該周波数のペース呼吸を継続することで血圧調節に関わるホメオスタシスが徐々に高められる可能性がある。

**中枢への影響** HRVB によって引き起こされる圧受容体反射の刺激は皮質活動にも影響を及ぼしている。先に述べたように, 圧受容体反射は延髄の孤束核によって調整されている。当該部位は大脳辺縁系および前頭前皮質などの上位中枢と連絡しているため (Duschek et al., 2013; Mini et al., 1995), HRVB によって十分に刺激されていることが予想できる (McCarty & Zayas, 2014; Lehrer et al., 1999)。実際, HRVB は情動の生成や調節に関わる部位 (大脳辺縁系, 帯状回, 前頭前皮質) の血流を変化させ, 大脳辺縁系と前頭前野の結合性にも影響を与えることが報告されている (Mather, 2019)。このことは圧受容体反射を介した皮質への影響が抑うつや不安の調整に重要な役割を果たしていることを示唆している (Mather & Thayer, 2018)。HRVB を通した圧受容体反射の活性化は上位中枢を刺激し, 感情制御に関わる生物学的な基盤に影響を与えている可能性がある。

## VI. まとめ

心拍変動を増大させる目的で行われる HRVB は自

律神経の障害を含む精神的障害に対して臨床的な有用性のある手続きである。また, パフォーマンスを向上させる可能性がある。本稿は HRVB の基本的な実施手順を示した後, 訓練プロトコルの要点を踏まえて実施された臨床的研究の知見を紹介した。HRVB における共鳴周波数 (ただし個人によって異なる周波数) のペース呼吸は, 呼吸性洞性不整脈と圧受容体反射に関わる自律系機能を刺激している。

HRVB の臨床的な効果は呼吸性洞性不整脈によるガス交換効率の改善や休息機能の向上の要因に支えられていると考えられる。一方, HRVB は圧受容体反射を活性化させ血圧調節に関わるホメオスタシスを高めるように働いている。さらに, 圧受容体反射を介した上位中枢の刺激がおそらく感情制御に重要な役割を果たしている。心理生理学的な基盤に支えられた HRVB は今後, 心身医学や臨床心理学領域において有用な方法になると考えられる。そのために, HRVB に関わる臨床的有用性についてさらなる基礎的検討が必要である。

## 引用文献

- Akselrod, S., Gordon, D., Ubel, F. A., Shannon, D. C., Berger, A. C., & Cohen, R. J. (1981). Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science*, *213*, 220–222. DOI: 10.1126/science.6166045
- Alabdulgader, A. A. (2012). Coherence: a novel nonpharmacological modality for lowering blood pressure in hypertensive patients. *Global advances in health and medicine*, *1*(2), 56–64. DOI: 10.7453/gahmj.2012.1.2.011.
- Berger, R. D., Saul, J. P., & Cohen, R. J. (1989). Transfer function analysis of autonomic regulation. I. Canine atrial rate response. *American Journal of Physiology*, *256*, H142–H152. DOI: 10.1152/ajpheart.1989.256.1.H142
- Berntson, G. G., Bigger, J. T. Jr., Eckberg, D. L., Grossman, P., Kaufmann, P. G., Malik, M., ... van der Molen, M. W. (1997). Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, *34*, 623–648. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1997.tb02140.x
- Berntson, G. G., Cacioppo, J. T., & Quigley, K. S. (1993). Respiratory sinus arrhythmia: Autonomic origins, physiological mechanisms, and psychophysiological implications. *Psychophysiology*, *30*, 183–196. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1993.tb01731.x
- Berry, M. E., Chapple, I. T., Ginsberg, J. P., Gleichauf, K. J., Meyer, J. A., & Nagpal, M. L. (2014). Non-pharmacological Intervention for Chronic Pain in Veterans: A Pilot Study of Heart Rate Variability Biofeedback. *Global advances in*

- health and medicine*, 3(2), 28–33. DOI: 10.7453/gahmj.2013.075.
- Biofeedback Federation of Europe (2022). Try our Breath Pacer EZ-AIR PLUS! Biofeedback Federation of Europe. Retrieved from <http://bfe.org/try-our-breath-pacer-ez-air-plus/> (January 2, 2023)
- Bonnet, M. H., & Arand, D. L. (1997). Heart rate variability: Sleep stage, time of night, and arousal influences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 102, 390–396.
- Duschek, S., Wörsching, J., & Reyes del Paso, G. A. (2013). Interactions between autonomic cardiovascular regulation and cortical activity: A CNV study. *Psychophysiology*, 50, 388–397. DOI: 10.1111/psyp.12026
- Fouad, F. M., Tarazi, R. C., Ferrario, C. M., Fighaly, S., & Alicandri, C. (1984). Assessment of parasympathetic control of heart rate by a noninvasive method. *The American Journal of Physiology*, 246, H838–842. DOI: 10.1152/ajpheart.1984.246.6.H838
- Giardino, N. D., Chan, L. & Borson, S. (2004). Combined Heart Rate Variability and Pulse Oximetry Biofeedback for Chronic Obstructive Pulmonary Disease: Preliminary Findings. *Applied Psychophysiology & Biofeedback*, 29, 121–133. DOI: 10.1023/b:apbi.0000026638.64386.89
- 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. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1990.tb02335.x
- Guyton, A. C., & Harris, J. W. (1951). Pressoreceptor-autonomic oscillation: A probable cause of vasomotor waves. *American Journal of Physiology*, 165, 158–166. DOI: 10.1152/ajplegacy.1951.165.1.158
- Hassett, A. L., Radvanski, D. C., Vaschillo, E. G., Vaschillo, B. Sigal, L. H., Karavidas, M. K., ... Lehrer, M. (2007). A Pilot Study of the Efficacy of Heart Rate Variability (HRV) Biofeedback in Patients with Fibromyalgia. *Applied Psychophysiology & Biofeedback*, 32, 1–10. DOI: 10.1007/s10484-006-9028-0
- 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 第2版 (pp. 71–109) 医学書院
- Hayano, J., Sakakibara, Y., Yamada, A., Yamada, M., Mukai, S., & Fujinami, T. (1991). Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. *American Journal of Cardiology*, 67, 199–204. DOI: 10.1016/0002-9149(91)90445-q
- Hayano, J., & Yasuma, F. (2003). Hypothesis: Respiratory sinus arrhythmia is an intrinsic resting function of cardiopulmonary system. *Cardiovascular Research*, 58, 1–9. DOI: 10.1016/s0008-6363(02)00851-9
- Hayano, J., Yasuma, F., Okada, A., Mukai, S., & Fujinami, T. (1996). Respiratory sinus arrhythmia. A phenomenon improving pulmonary gas exchange and circulatory efficiency. *Circulation*, 94, 842–847. DOI: 10.1161/01.cir.94.4.842
- 稲森義雄 (1997). バイオフィードバック療法の基礎 柿木昇治・山崎勝男・藤澤 清(編) 新生理心理学2巻 生理心理学の応用分野 (pp. 156–167) 北大路書房
- Julien, C. (2006). The enigma of Mayer waves: Facts and models. *Cardiovascular Research*, 70, 12–21. DOI: 10.1016/j.cardiores.2005.11.008
- Katona, P. G., & Jih, R. (1975). Respiratory sinus arrhythmia: A noninvasive measure of parasympathetic cardiac control. *Journal of Applied Physiology*, 39, 801–805. DOI: 10.1152/jappl.1975.39.5.801
- Karavidas, M. K., Lehrer, P. M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Marin, H., Buyske, S., ... Hassett, A. (2007). Preliminary results of an open label study of heart rate variability biofeedback for the treatment of major depression. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 32, 19–30. DOI: 10.1007/s10484-006-9029-z
- 近藤由香・小坂橋喜久代 (2014). 1987～2013年における国内の漸進的筋弛緩法に関する看護文献レビュー. 日本看護研究学会雑誌, 37, 65–72.
- Lee, J., Kim, J. K., & Wachholtz, A. (2015). The benefit of heart rate variability biofeedback and relaxation training in reducing trait anxiety. *Hanguk Simni Hakhoe Chi Kongang*, 20(2), 391–408. DOI: 10.17315/kjhp.2015.20.2.002.
- Lehrer, P., Kaur, K., Sharma, A., Shah, K., Huseby, R., Bhavsar, J., ... Zhang, Y. (2020). Heart rate variability biofeedback improves emotional and physical health and performance: A systematic review and meta analysis. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 45, 109–129. DOI: 10.1007/s10484-020-09466-z
- Lehrer, P. M. (2021). Biofeedback training to increase heart rate variability. In P. M. Lehrer & R. L. Woolfork (Eds.), *Principles and practice of stress management* (4th ed., pp. 264–302). New York: Guilford Press.
- Lehrer, P. M., Vaschillo, E., & Vaschillo, B. (2000). Resonant frequency biofeedback training to increase cardiac variability: rationale and manual for training. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 25, 177–191. DOI: 10.1023/a:1009554825745.
- Lehrer, P. M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S. E., Eckberg, D. L., Edelberg, R., ... Hamer, R. M. (2003). Heart rate variability biofeedback increases baroreflex gain and peak expiratory flow. *Psychosomatic Medicine*, 65, 796–805. DOI: 10.1097/01.psy.0000089200.81962.19
- Lehrer, P., Sasaki, Y., & Saito, Y. (1999). Zazen and cardiac variability. *Psychosomatic Medicine*, 61, 812–821. DOI: 10.1097/00006842-199911000-00014
- Lehrer, P., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S. E., Scardella, A., Siddique, M., & Habib, R. (2004). Biofeedback treatment for

- asthma. *Chest*, 126, 352–361. DOI: 10.1378/chest.126.2.352
- 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. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-41.3.08>
- Lucini, D., Pagani, M., Mela, G. S., & Malliani, A. (1994). Sympathetic restraint of baroreflex control of heart period in normotensive and hypertensive subjects. *Clinical Science*, 86, 547–556. DOI: 10.1042/cs0860547
- Madwed, J. B., Albrecht, P., Mark, R. G., & Cohen, R. J. (1989). Low-frequency oscillations in arterial pressure and heart rate, a simple computer model. *American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology*, 256, H1573–H1579. DOI: 10.1152/ajpheart.1989.256.6.H1573
- Mateos-Salgado, E. L., Ayala-Guerrero, F., & Gutiérrez-Chávez, C. A. (2022). Evaluation of the Heart Rhythm Coherence Ratio During Sleep: A Pilot Study With Polysomnography. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 47(3), 193–198. DOI: 10.1007/s10484-022-09542-6.
- Mather, M. (2019). Can we improve brain mechanisms of emotion regulation by increasing heart rate variability? Paper presented at the annual meeting of the Society for Psychophysiological Research, Washington, D.C., September, 27–29.
- Mather, M., & Thayer, J. F. (2018). How heart rate variability affects emotion regulation brain networks. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 19, 98–104. DOI: 10.1016/j.cobeha.2017.12.017
- McCraty, R., & Zayas, M. A. (2014). Cardiac coherence, self-regulation, autonomic stability, and psychosocial well-being. *Frontiers in psychology*, 5, 1090. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.01090.
- Mini, A., Rau, H., Montoya, P., Palomba, D., & Birbaumer, N. (1995). Baroreceptor cortical effects, emotions and pain. *International Journal of Psychophysiology*, 19, 67–77. DOI: 10.1016/0167-8760(94)00084-r
- 西村千秋 (2022). バイオフィードバックとは？ 日本バイオフィードバック学会 Retrieved December 29, 2022 from <http://www.jsbr.jp/jsbr/about.html>
- Nunan, D., Sandercock, G. R., & Brodie, D. A. (2010). A quantitative systematic review of normal values for short-term heart rate variability in healthy adults. *Pacing Clinical Electrophysiology*, 33(11), 1407–1417. DOI: 10.1111/j.1540-8159.2010.02841.x.
- 奥田泰子・大槻 毅・長尾光城・松嶋紀子 (2008). 心臓副交感神経系の動脈圧受容器反射による上昇性および下降性の血圧調整機能は入浴時に増大する. 川崎医療福祉学会誌, 18, 129–136. <http://doi.org/10.15112/00012986>
- Pagani, M., Lombardi, F., Guzzetti, S., Rimoldi, O., Furlan, R., Pizzinelli, P., ... Malliani, A. (1986). Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circulation Research*, 59, 178–193. DOI: 10.1161/01.res.59.2.178
- Parlow, J., Viale, J. P., Annat, G., Hughson, R., & Quintin, L. (1995). Spontaneous cardiac baroreflex in humans: Comparison with drug-induced responses. *Hypertension*, 25(5), 1058–1068. DOI: 10.1161/01.hyp.25.5.1058
- Patron, E., Benvenuti, S., M., Favrettom G., Valfrè, C., Bonfà, C., Gasparotto, R., & Palomba, D. (2013). Biofeedback assisted control of respiratory sinus arrhythmia as a biobehavioral intervention for depressive symptoms in patients after cardiac surgery: a preliminary study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 38(1), 1–9. DOI: 10.1007/s10484-012-9202-5.
- Paul, M., Garg, K., & Sandhu, J. S. (2012). Role of biofeedback in optimizing psychomotor performance in sports. *Asian Journal of Sports Medicine*, 3(1), 29–40. DOI: 10.5812/asjasm.34722.
- Pomeranz, B., Macaulay, R. J. B., Caudill, M. A., Kutz, I., Adam, D., & Gordon, D. (1985). Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology*, 248, H151–153. DOI: 10.1152/ajpheart.1985.248.1.H151
- Raymond, J., Sajid, I., Parkinson, L. A., & Gruzelier, J. H. (2005). Biofeedback and dance performance: a preliminary investigation. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 30(1), 64–73. DOI: 10.1007/s10484-005-2175-x.
- 榊原雅人 (2012). HRVB 法の臨床応用—治療的効果と理論的基礎について—. 愛知学院大学論叢心身科学部紀要, 8, 59–72.
- 榊原雅人 (印刷中). 自律系心理生理学の応用—心拍変動とそのバイオフィードバック—. 生理心理学と精神生理学.
- Sakakibara, M., Kaneda, M., & Oikawa, L. O. (2020). Efficacy of paced breathing at the low-frequency peak on heart rate variability and baroreflex sensitivity. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 45(1), 31–37. DOI: 10.1007/s10484-019-09453-z.
- 榊原雅人・早野順一郎 (2015). 就寝前の HRVB 訓練が睡眠中の心肺系休息機能に及ぼす影響. バイオフィードバック研究, 42, 47–56.
- 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. DOI: 10.1007/s10484-013-9232-7
- Sakakibara, M., Takeuchi, S., & Hayano, J. (1994). Effect of relaxation training on cardiac parasympathetic tone. *Psychophysiology*, 31, 223–228. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1994.tb02210.x
- 澤田幸展 (1996). 心臓迷走神経活動. 生理心理学と精神生理学, 14, 77–88.
- 佐々木高信 (1997). バイオフィードバック療法の実際

- 柿木昇治・山崎勝男・藤澤 清（編）新生理心理学  
2巻 生理心理学の応用分野（pp. 168-181）北大路  
書房
- Tan, G., Dao, T. K., Farmer, L., Sutherland, R. J., & Gevirtz, R. (2011). Heart rate variability (HRV) and posttraumatic stress disorder (PTSD): a pilot study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 36(1), 27-35. DOI: 10.1007/s10484-010-9141-y.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability, standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17, 354-381.
- Tiller, W. A., McCraty, R., and Atkinson, M. (1996). Cardiac coherence: a new, noninvasive measure of autonomic nervous system order. *Alternative therapies in health and medicine*, 2, 52-65.
- Vaschillo, E. G., Konstantinov, M. A., & Menitskii, D. N. (1984). Individual typologic features in ability to control the cardiovascular system. *Human Physiology*, 10, 402-408. (translated from *Fiziologiya Cheloveka*, 10, 929-936.)
- Vaschillo, E., Lehrer, P., Rische, N., & Konstantinov, M. (2002). Heart rate variability biofeedback as a method for assessing baroreflex function: A preliminary study of resonance in the cardiovascular system. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 27, 1-27. DOI: 10.1023/a:1014587304314
- Vaschillo, E. G., Vaschillo, B. & Lehrer, P. M. (2006). Characteristics of resonance in heart rate variability stimulated by biofeedback. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 31, 129-142. DOI: 10.1007/s10484-006-9009-3
- Zucker, T. L., Samuelson, K. W., Muench, F., Greenberg, M. A., & Gevirtz, R. N. (2009). The effects of respiratory sinus arrhythmia biofeedback on heart rate variability and posttraumatic stress disorder symptoms, a pilot study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 34, 135-143. DOI: 10.1007/s10484-009-9085-2

（最終版2023年1月9日受理）

## Clinical Efficacy and Psychophysiological Mechanism of Heart Rate Variability Biofeedback

Masahito SAKAKIBARA

### Abstract

Previous studies have reported that heart rate variability biofeedback (HRVB) to increase heart rate oscillation is a clinically useful treatment for mental and physical disorders, including autonomic dysfunction. This study introduces a conventional HRVB protocol and reviews findings of previous clinical studies that used elements of this protocol. During HRVB training, paced breathing at the cardiovascular resonance frequency of approximately 0.1 Hz stimulates autonomic nervous functions related to respiratory sinus arrhythmia and baroreflex. The clinical efficacy of HRVB is supported by findings, including improved gas exchange efficiency and cardiopulmonary resting function related to respiratory sinus arrhythmia. Moreover, HRVB is related to enhancing emotional regulation by stimulating the central nervous system through baroreflex. HRVB, a psychophysiological intervention, is helpful in psychosomatic medicine and clinical psychology. Further laboratory study of this technique's clinical efficacy is warranted.

Keywords: heart rate variability biofeedback, respiratory sinus arrhythmia, baroreflex, paced breathing, resonance frequency of cardiovascular system