



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	心拍変動バイオフィードバック訓練が不安低減効果と脳活動に与える影響 : 脳波 (EEG) と内受容感覚の観点から [全文の要約]
Author(s)	齋藤, 隆司
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(保健科学)
Dissertation Number	甲第16194号
Issue Date	2024-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93966
Type	doctoral thesis
File Information	Ryuji_Saito_summary.pdf



博士論文の要約

博士の専攻分野の名称：博士（保健科学）

氏名：齋藤 隆司

学位論文題名

心拍変動バイオフィードバック訓練が不安低減効果と脳活動に与える影響：
脳波（EEG）と内受容感覚の観点から

第1章. 緒言

周期的な心拍間隔の変動である心拍変動（Heart rate variability: HRV）は自律神経活動を反映している。自律神経活動は孤束核、扁桃体、前部帯状回、島皮質などから構成される中枢自律神経線維網（Central autonomic network: CAN）によって制御されているが、CANは不安・ストレスなどの情動制御や注意、抑制などの認知制御にも関与している。そのため、HRVの高さは自律神経活動の活性化だけではなく、良好な情動・認知制御を反映している一方、HRVの低下は不安障害やうつ病、認知機能障害と関連している。HRVを増加させる方法として、緩徐な呼吸周期でのペース呼吸とHRVの波形情報のフィードバックを組み合わせた心拍変動バイオフィードバック（Heart rate variability biofeedback: HRVBF）がある。自律神経系と情動・認知機能との関連性から、HRVBF訓練では不安・ストレスの低減やうつ病症状の改善といった情動制御に対する臨床的効果が確認されており、注意や抑制、ワーキングメモリなどの認知機能の向上に有用である可能性も示唆されている。また、近年の先行研究では脳波（Electroencephalography: EEG）や磁気共鳴機能画像法（Functional magnetic resonance imaging: fMRI）による脳機能イメージングを用いてHRVBF訓練が脳活動を変化させることが報告されている。その一方で、HRVBFの訓練効果に関して否定的な先行研究も散見されており、対照群の設定や訓練プロトコルにおいて一貫性を欠く状況である。情動・認知機能に対するHRVBFの訓練効果のメカニズムとして、圧受容器や肺伸展受容器への刺激が迷走神経を介して孤束核に伝達され、孤束核から扁桃体、前部帯状回、島皮質、眼窩前頭皮質、内側前頭前野などの脳領域に投射されることで訓練効果が生じる可能性が推察されている。しかし、HRVの変化によって情動・認知機能の変化が生じ、その背景に脳活動変化が直接的に関連しているのか明らかではない。さらに、心拍や血圧、呼吸などの感知や、胃や腸などの内臓感覚などといった身体内部の生理状態に関する感覚は内受容感覚と呼ばれており、内受容感覚の信号は迷走神経を介して孤束核や視床下部などの皮質下構造に伝達され、前部帯状回、島皮質などの高次脳領域で統合・解釈される。そのため、HRVBFの訓練効果に関する神経基盤と内受容感覚の統合・解釈に関する神経基盤は共通しており、内受容感覚がHRVBFの訓練効果や習熟に関与している可能性が考えられる。そこで本研究では、能動的対照群の設定や適切な訓練プロトコルでHRVBFの不安低減効果と脳活動変化を検証し、HRVBFの訓練効果には脳活動変化が関連しているのかを検討すること及び内受容感覚の個人差がHRVBFのパフォーマンスに与える影響について検討することを目的として2つの研究を実施した。

第2章. 研究1：HRVBF 訓練による不安低減効果と脳活動変化との関連性

【目的】HRVBF 訓練による不安低減効果を注意バイアス, EEG, 質問紙を用いて多角的に検討し, 不安低減効果と脳活動変化との関連性を検討することを目的とした.

【方法】不安が高い健常な大学生・大学院生 52 名 (男性 22 名, 女性 30 名; 年齢: 22.0 ± 2.2 歳) を対象とした. 応募者は 150 名であり, 包含条件を満たし, 除外条件を満たさなかった 55 名が研究に参加し, 52 名が最終測定まで参加した. 参加者のランダム割り付けと能動的対照群の設定を行った研究デザインで一回あたり 20 分間の HRVBF 訓練または対照訓練を 10 回実施した. 訓練は emWave Pro (HeartMath LLC, Boulder Creek, CA, USA) を使用して実施した. HRVBF 訓練では, 訓練プロトコルに基づき, まず毎分 4.5-6.5 回の中から HRV の増加が最大となる呼吸周期を決定した. 次に視覚的に呈示される呼吸ガイドに合わせながら決定した呼吸周期でペース呼吸を継続し, HRV 波形の振幅が大きく且つ形状が滑らかな状態を保持するよう教示した. 対照訓練では, HRV への影響が少ないとされる毎分 10-14 回の中から HRV の変化が最小となる呼吸周期を決定し, 呼吸ガイドに合わせながら決定した呼吸周期でペース呼吸を継続するよう教示した. 訓練による HRV 波形の変化を評価したコヒーレンススコアが訓練終了毎に算出され, 全訓練を通した平均コヒーレンススコアを訓練の習熟度と定義した. 訓練前後で情動ストループ課題により測定される不安関連の注意バイアス, EEG, 新版 STAI 状態-特性不安検査 (State-Trait Anxiety Inventory-Form JYZ: STAI-JYZ), HRV を測定した. 注意バイアスは不安が高い人ほどネガティブな情報に注意を向ける傾向であり, 不安の客観的指標であると考えられている. 情動ストループ課題はネガティブおよびニュートラルな顔表情刺激がランダムに呈示され, 顔表情刺激の色名をキー押して反応する課題である. 注意バイアスはネガティブな顔表情刺激の反応時間 (Reaction time: RT; ms) からニュートラルな顔表情刺激の RT を差分して算出した. EEG は 32ch の脳波計 actiCHamp Plus (BrainProducts GmbH, Munich, Germany) を使用し, 情動ストループ課題時における頭頂部の後期陽性電位 (Late positive potential: LPP; μV) と中央部の頭頂陽性電位 (Vertex positive potential: VPP; μV), 安静時における前頭部の θ/β 比 (Theta/beta ratio: TBR) を測定した. LPP は情動刺激に対する注意配分, VPP は顔表情処理, TBR は注意バイアスの制御を反映する. HRV は携帯型心電計 Check My Heart (Daily Care Biomedical Inc., Taiwan) を使用し, 心臓迷走神経 (副交感神経) 活動を反映する隣接する R-R 間隔の差の二乗平均平方根 (Root mean square of successive differences: RMSSD; ms) と高周波成分 (High frequency: HF; ms^2) を測定した. 統計解析では, 2 群 (HRVBF 群, 対照群) $\times$ 2 時期 (訓練前, 訓練後) による 2 要因混合計画の分散分析により訓練効果を検証した. また, EEG 指標, 注意バイアス, STAI-JYZ 状態不安尺度及び特性不安尺度得点, HRV 指標における訓練後から訓練前を差分した各変化量間の相関係数を Pearson の積率相関係数を用いて各群で算出することにより不安低減効果と脳活動変化との関連性を検討した. 全ての統計解析は SPSS version 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) を使用し, 有意水準は 5%未満とした.

【結果】HRVBF 群 21 名 (男性 8 名, 女性 13 名; 年齢: 21.7 ± 2.4 歳), 対照群 19 名 (男性 7 名, 女性 12 名; 年齢: 21.9 ± 2.3 歳) を最終的な解析対象とした. HRVBF 群では対照群と比べて訓練前後で RMSSD 及び HF が有意に増加したが, 不安低減を示唆する注意バイアス, EEG, STAI-JYZ の各尺度得点は有意に変化しなかった. また, 訓練前後での EEG の変化量は注意バイアス及び HRV の変化量と有意な相関を示さなかった. どのような特性を持つ参加者が HRVBF 訓練による不安低減効果の恩恵を受けたのかを調べるため, 追加解析として Pearson の積率相関係数を用いて訓練前の HRV 指標と訓練前後での注意バイア

スの変化量間及び訓練前の HRV 指標と平均コヒーレンススコア間の相関係数を各群で算出した。その結果、HRVBF 群では訓練前の RMSSD と平均コヒーレンススコアとの有意な正の相関、訓練前後での注意バイアスの変化量との有意な負の相関が認められ、訓練前の RMSSD が高いほど平均コヒーレンススコアが高く、注意バイアスが減少したことが示された。

【考察】HRVBF 訓練によって HRV は増加したが、不安低減効果や脳活動変化は認められなかった。この要因として参加者の不安レベルが関連している可能性が考えられた。本研究の参加者の不安レベルは HRVBF の訓練効果を報告したこれまでの先行研究と同程度であり適切ではあったものの、注意バイアスや EEG の変化を示す先行研究と比較した場合には低いことが推察された。そのため、比較的不安が高い人の方が HRVBF 訓練による不安低減効果や脳活動変化が生じやすい可能性が考えられた。また、訓練前の心臓迷走神経（副交感神経）活動に由来する HRV の高さは HRVBF 訓練による不安低減効果や訓練の習熟に影響する参加者特性の一つであることが示唆された。

第 3 章. 研究 2 : 内受容感覚が HRVBF のコヒーレンススコアに与える影響

【目的】質問紙と行動学的課題を用いて内受容感覚を包括的に測定し、内受容感覚が HRVBF のコヒーレンススコアに寄与しているのかを重回帰分析を用いて明らかにすることを目的とした。

【方法】健常な大学生・大学院生 54 名（男性 25 名、女性 29 名；年齢：21.8±1.9 歳）を対象とした。研究デザインは単群による横断的研究デザインであった。内受容感覚は、質問紙などの主観的指標を用いて測定される内受容感覚の感受性（Interoceptive sensibility: IS）、行動学的課題による客観的指標を用いて測定される内受容感覚の正確性（Interoceptive accuracy: IAc）、課題遂行の正確さに対する確信度評価により測定される内受容感覚の気づき（Interoceptive awareness: IAw）の 3 つに区分されている。日本語版内受容感覚への気づきの多次元的評価（Japanese version of Multidimensional Assessment of Interoceptive Awareness: MAIA-J）と日本語版 Body Perception Questionnaire-Body Awareness 超短縮版（Japanese version of the Body Perception Questionnaire-Body Awareness Very Short Form: BPQ-BAVSF-J）を用いて IS、心拍カウント課題（Heartbeat counting task: HCT）を用いて IAc と IAw、持続処理課題（Continuous performance test: CPT）を用いて視覚刺激に対する外受容感覚、ベースライン時及び HRVBF 時の HRV、HRVBF のコヒーレンススコアを測定した。MAIA-J は内受容感覚を多次元的に測定する 25 項目 6 下位尺度（「気づき（Noticing）」、「気が散らない（Not-Distracting）」、「注意制御（Attention Regulation）」、「感情への気づき（Emotional Awareness）」、「身体を聴く（Body Listening）」、「信頼する（Trusting）」）で構成され、6 件法（「0. 全くない」から「5. いつもある」）で回答する。BPQ-BAVSF-J は内受容感覚の気づきを測定する 12 項目 1 因子の尺度で構成され、5 件法（「1. 全くない」から「5. いつも」）で回答する。HCT は手で脈を取るなどの外的な手がかりを利用することなく、身体に注意を向けて一定時間心拍数をカウントする課題である。25、30、35、40、45 秒の時間間隔でそれぞれ 2 回ずつランダムに心拍数をカウントし、実際の心拍数とカウントした心拍数から IAc を評価した。また、各時間間隔で心拍数をカウントした後にカウントした心拍数の正確さに対する確信度を視覚的アナログ尺度（Visual analog scale: VAS）を用いて評価し、IAc と VAS の評定値との相関係数の平均値を IAw とした。外受容感覚は視覚や聴覚など内受容感覚と対をなす感覚と解釈され、バイオフィードバック全般に影響を与えると考えられている。CPT はランダムに呈示されるターゲット刺激と非ターゲット刺

激に対してターゲット刺激呈示時のみキー押しする課題である。外受容感覚の指標として、ターゲット刺激に対する正答時の平均 RT、非ターゲット刺激に対する誤反応であるお手つきエラー率、ターゲット刺激に対する無反応である見逃しエラー率を算出した。HRV は emWave Pro に付属されている脈波センサを使用し、RMSSD (ms) と低周波成分 (Low frequency: LF) を自然対数変換した $\ln LF$ (ms^2) を測定した。LF は HRVBF 訓練による圧受容器反射機能の変化を反映する。HRVBF 終了時に算出されるコヒーレンススコアを測定した。統計解析は IS, IAc, IAw の各指標、ベースライン時の RMSSD 及び $\ln LF$, CPT の各指標を説明変数、コヒーレンススコアを目的変数として強制投入法及び変数減少法による重回帰分析を行った。全ての統計解析は SPSS version 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) を使用し、有意水準は 5%未満とした。

【結果】49 名 (男性 24 名, 女性 25 名; 年齢: 21.8 ± 2.0 歳) を最終的な解析対象とした。強制投入法による重回帰分析の結果、有意な回帰式は得られなかったが、MAIA-J「気づき」が負方向にコヒーレンススコアを有意に予測した。変数減少法による重回帰分析の結果、最終的に選択された説明変数は MAIA-J「気づき」、MAIA-J「感情への気づき」、CPT における見逃しエラー率、RMSSD, $\ln LF$ であり、有意な回帰式が得られた。これらの説明変数のうち、MAIA-J「感情への気づき」と RMSSD が正方向にコヒーレンススコアを有意に予測し、MAIA-J「気づき」と $\ln LF$ が負方向にコヒーレンススコアを有意に予測した。

【考察】ベースライン時の心臓迷走神経 (副交感神経) 活動がコヒーレンススコアを予測し、研究 1 の結果が支持された。また、ベースライン時の圧受容器反射機能が低いほどコヒーレンススコアが高くなりやすいという自律神経系の恒常性が示唆された。限定的ではあったが、身体感覚や感情状態に関する主観的な内受容感覚の一部がコヒーレンススコアを予測した。肯定的な身体感覚と感情状態との関連性への気づきに鋭敏であるほど HRVBF のコヒーレンススコアが高くなる一方で、否定的な身体感覚への気づきに鋭敏である場合には低くなる可能性が示唆された。

第 4 章. 総合的考察

HRVBF 訓練の方法論に関する近年の先行研究では、シャム (偽) 訓練を行う対照条件を採用した能動的対照群を設定することが HRVBF の訓練効果を適切に評価する上で重要であることが指摘されている。HRVBF の訓練効果を検証したこれまでの先行研究では訓練効果を過大評価している可能性があり、研究 1 で不安低減効果や脳活動変化が認められなかったように、真の HRVBF の訓練効果は限定的であるかもしれない。また、研究 1 及び研究 2 から、心臓迷走神経 (副交感神経) 活動に由来する HRV や主観的な内受容感覚が HRVBF の訓練効果や習熟に寄与することが示唆された。HRVBF 訓練ではどの対象者においても訓練効果の恩恵が受けられるのではなく、特定の対象者において訓練効果の恩恵が受けられる可能性があると考えられる。

第 5 章. 結論

本研究では HRVBF 訓練による不安低減効果と脳活動変化との関連性及び内受容感覚が HRVBF のコヒーレンススコアに与える影響について検討した。本研究の結果は HRVBF 訓練において対象者の選定が重要であることを HRV や主観的な内受容感覚の観点から示唆するものである。今後の研究では HRVBF 訓練効果を規定する要因を探索し、そのメカニズムを解明することがリハビリテーションをはじめとした領域で HRVBF を臨床応用する上で重要であると考えられる。