

[研究助成 (A)]

ヒトの神経多様性を考慮したニューロフィードバック型 注意訓練システムの開発

Development of neurofeedback-based attention training system
considering individual differences in the human brain

2211014



研究代表者

成蹊大学 理工学部理工学科

准教授

櫻 田 武

[研究の目的]

本研究では、注意と呼ばれるヒトの神経系における認知機能の向上を目的とした訓練システムの開発、およびその訓練効果の実証を目的とした。

「注意」とは、神経系に入力される膨大な感覚情報を取捨選択し、その時々状況に応じて、感覚情報の一部を優先的に処理できるようにするフィルターの役割を持つ認知機能である。このような注意機能は、外部環境において適切に行動するための重要な機能であるだけでなく、運動学習やリハビリテーション効果を左右する要因でもあることが指摘されている。さらに、注意は脳卒中における半側空間無視や学習性不使用といった、日常生活に大きな影響をおよぼす後遺症にも関連する認知機能であることから、その訓練システム確立は臨床的にもニーズが高いといえる。したがって、加齢や脳機能障害に伴って注意機能が低下した場合には、その機能を再獲得するための訓練環境の提供が重要となる。

このような「注意」などの脳機能を向上させるためのアプローチはいくつか存在するが、その中でも「ニューロフィードバック」と呼ばれる技術が着目されている。本研究で提案する訓練システムの基盤でもあるニューロフィードバックとは、計測した脳活動を本人にフィード

バックすることにより、脳活動を人工的に望ましい状態へ誘導し、その結果として特定の脳機能を向上させる手法である。従来においても、ニューロフィードバックを健常者・脳卒中患者などへ適用することで効果が得られる報告はなされているが、個人間で得られる訓練効果には大きな差が生じる問題点も残されている。このような訓練効果差の問題が生じる原因の一つとして、訓練対象であるヒトの神経系における多様性が考慮されていないことが挙げられる。つまり、従来研究では、事前に獲得すべき脳活動パターンを画一的なゴールとして設定したうえでニューロフィードバック訓練を行うことが一般的であるため、そのゴールが適していない訓練者にとっては訓練効果が得にくくなってしまいうリスクがある。このようなニューロフィードバック訓練における問題を克服するためには、ヒトの神経多様性を考慮し、獲得すべき脳活動パターンを設定せずに脳機能向上を目指す手法が有効と考えられる。

以上のような仮説の下、本研究では、ヒトの持つ神経特性の多様性を前提とした新しい訓練手法を採用することにより、個々の神経特性に応じて最も獲得しやすい神経回路の賦活が自然と促されるテイラーメードなシステムの提案を目指した。

[研究の内容, 成果]

1. ニューロフィードバック型注意機能訓練システムの実装

本研究におけるニューロフィードバック訓練システムでは、「①脳波誘発のための感覚刺激呈示 ②脳波計測 ③注意状態推定のためのリアルタイム脳波解析 ④注意状態のフィードバック」に基づく閉ループで構成される（図1）。このようなリアルタイム脳情報解析により、訓練者は普段目に見えない自身の注意状態を認識することが可能となり、「注意を向けたつもり」ではなく「正しく注意が向けられている状態」の獲得が実現すると期待される。

上記提案システムにおいて、注意状態の推定には、定常状態体性感覚誘発電位（Steady-State Somatosensory Evoked Potentials: SSSEP）と定常状態視覚誘発電位（Steady-State Visual Evoked Potentials: SSVEP）と呼ばれる律動的脳波を利用した。これらの脳波は、一定の周波数で感覚刺激を呈示した際、その刺激周波数と同じ周波数を持つ波が低次感覚野において観察される脳波である。具体的には、機械振動刺激を皮膚に提示すれば SSSEP が体性感覚野から観察され、視覚点滅刺激を提示すれば SSVEP が視覚野から観察される。これらの律動的脳波は、呈示される感覚刺激に対して能動的に注意を向けると応答が強まる特性を持つことから、ヒトの注意状態を推定するのに有用なものであ

る。注意に応じた SSSEP あるいは SSVEP の変化は、フーリエ変換に基づく周波数解析によって定量化した。最終的に、推定された注意状態（指示された対象に向けられる注意の強さ）は、スピーカー音量に変換され訓練者にフィードバックされた。

ここで、本ニューロフィードバック訓練システムがヒトの神経多様性に対応しうる特徴について説明する。従来のニューロフィードバック訓練手法に基づけば、注意機能の向上を目指す場合、その注意制御を担う高次脳領域である前頭前野や後頭頂連合野における特定の活動パターンを獲得すべきゴールとして設定することとなる。一方、本ニューロフィードバック訓練システムでは、そのような直接注意機能を内在する領域の活動ではなく、“適切に注意が向けられているかどうかを反映する低次感覚野の活動”に着目しフィードバックした。つまり、このようなアウトカムに基づく訓練を行うことで、「適切な注意が向けられている状態を作ることさえできれば、脳内で獲得される神経活動パターンは問わない」というゴールフリーな学習則が成立する。これにより、訓練者の脳機能特性に左右されず、個々人が最も獲得しやすい神経回路がテイラーメイドに賦活されることが期待される。

2. 訓練システムの効果実証

前節で説明したニューロフィードバック訓練システム構築後、健常若年者を対象として、本システムの効果実証を試みた。本研究においては、SSSEP あるいは SSVEP を利用して訓練を行うこととしている。この際、どちらの律動的脳波を用いて訓練を行うかについては、訓練対象とする注意機能の種類に応じて切り替えるものとした。具体的には、自身の身体の一部へ注意を向ける“身体性注意”の訓練を目的とする際には、SSSEP を利用し、一方で外部空間へ注意を向ける“空間的注意”の訓練を目的とする際には SSVEP を利用した。

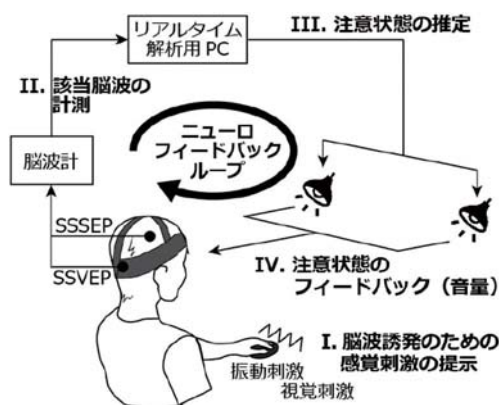


図1 訓練システム構成

〈SSSEPに基づく身体性注意訓練〉

ニューロフィードバック訓練は8日間行われた。訓練中、訓練者の左手および右手にそれぞれ 22 Hz・25 Hz の機械振動刺激を提示した上で、左手に注意を向ける指示を与えた。SSSEP に対するリアルタイム解析の結果、左手に注意が強く向けられていると推定された場合には、訓練者の左側に置かれたスピーカーからの音量が大きくなるものとした。逆に、指示されていない右側へ注意が向いてしまったと推定された場合には、右側に置かれたスピーカーからの音量が大きくなった。ただし、訓練参加者は、自身の脳活動に基づいて推定された注意状態がフィードバックされる Real 群と、事前に計測した他人の脳活動に基づいて推定された注意状態がダミーとしてフィードバックされる Sham 群にランダムに割り当てられた。

訓練中において計測された脳波に対して周波数解析を行った結果、多くの訓練者において体性感覚野 (S1) での SSSEP 応答の増幅が確認された。図 2 は訓練初日と最終日における SSSEP 応答変化の典型例である (上段: Real 群・下段: Sham 群)。提示された機械振動刺激は反対側体性感覚野での SSSEP を誘発する。Real 群においては、注意を向けることが指示された左手への機械振動刺激によって誘発される右体性感覚野 SSSEP 応答 (22 Hz) が、強く

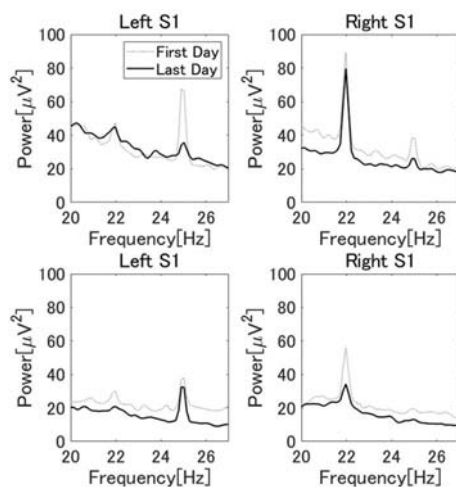
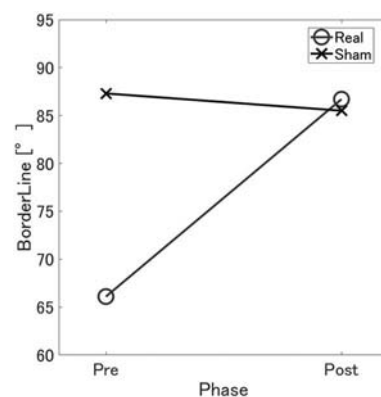


図2 ニューロフィードバック訓練中における SSSEP 応答の変化

維持された。その一方で、注意を向ける必要のない右手に呈示された機械振動刺激によって誘発される左体性感覚野での SSSEP (25 Hz) は、訓練最終日にかけて大きく減弱した。つまり、このような SSSEP 応答の変化から、Real 群に割り当てられた参加者は望ましい注意状態を反映する脳活動が獲得できたといえる。Sham 群においてはこのような望ましい脳活動変化は認められなかった。

つづいて、上記のような脳活動の変化に伴って、実際に身体性注意機能が向上したことを確認するため、Hand-choice 課題を実施した。本課題はニューロフィードバック訓練の前後において実施し、そのパフォーマンスを比較した。Hand-choice 課題では、訓練者を中心に様々な方向にターゲットを提示し、そのターゲットに対して左手または右手のどちらを使うか判断したうえでリーチングすることを要求した。ニューロフィードバック訓練により左手への注意が強くなっていた場合、左手を利用してリーチングするターゲット領域が広がることが期待された。結果、当初の期待通り、Real 群においてのみ左手でリーチングを遂行する判断をした領域が広がることが確認された (図 3)。

以上の結果より、SSSEP を用いたニューロフィードバック訓練は体性感覚野の応答を変調させ、それに伴って身体性注意機能の向上に寄与する可能性が示された。



(Pre: 訓練前, Post: 訓練後)

図3 Hand-choice 課題において左手を利用する領域の広さ

〈SSVEP に基づく空間的注意訓練〉

ニューロフィードバック訓練のプロトコルは SSSEP に基づくものと同一とした。訓練者の正面にはディスプレイが置かれ、左視野および右視野にそれぞれ 14.4 Hz・12 Hz の点滅刺激を呈示したうえで、左視野に注意を向ける指示を与えた。SSVEP 応答を周波数解析により定量化し、注意が強く向いていると推定された視野側のスピーカー音量が大きくなるものとした。

訓練の結果、視覚野 (V1) での望ましい SSVEP 変調が Real 群において確認された。具体的には、注意を向けることが指示された左視野での視覚刺激に誘発された 14.4 Hz の SSVEP 応答が増幅した。このような応答変化は Real 群においてのみ確認された (図 4)。

つづいて、上記のような SSVEP の変調に伴って、実際に空間的注意機能が向上したことを確認するため、線分二等分課題を実施した。本課題はニューロフィードバック訓練の前後において実施し、そのパフォーマンスを比較した。この課題では、訓練者の正面に一本の水平な線分を提示し、その線分の中点と認識される場所を回答してもらうものであり、外部空間における注意の偏りを評価するのに用いられることが多い。具体的には、注意が強く向けられている空間方向へ中点の位置がずれることとなる。図 5 は訓練前後で比較した中点回答位置の変化量を示している。負値は訓練前に対して訓練後に

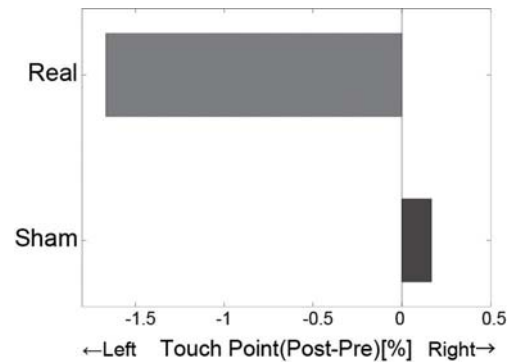


図 5 線分二等分課題において訓練者が回答した中点位置の変化量

左方向へ回答位置がずれたことを意味し、逆に正值は右方向へ回答位置がずれたことを意味している。この図に示す通り、Real 群においてのみ左方向へ中点回答位置がずれる傾向を示した。Sham 群においてはこのような訓練前後における大きな変化は認められなかった。

以上の結果より、SSVEP を用いたニューロフィードバック訓練においても視覚野の応答を変調させ、それに伴って空間的注意機能の向上に寄与する可能性があることが確認された。

〔今後の研究の方向、課題〕

本研究により、低次感覚野応答に着目したニューロフィードバック訓練系が構築され、SSSEP および SSVEP を用いてそれぞれ身体性注意・空間的注意の異なる注意機能向上が可能である結果を得た。今後はより効率的に訓練効果が得られるよう、訓練内容を最適化していく必要がある。例えば、訓練者の負担軽減のためには、訓練日数をできる限り少なくすることが望ましい。本研究においては 8 日間の訓練日数を設定したが、何日目において訓練効果が得られるのか、より細かい解析を実施していくことで必要最低限の訓練日数を見積もることができる。

また、本ニューロフィードバック訓練により、注意機能を直接担う前頭前野・後頭頂連合野の活動パターンがどのように最適化されたか、さ

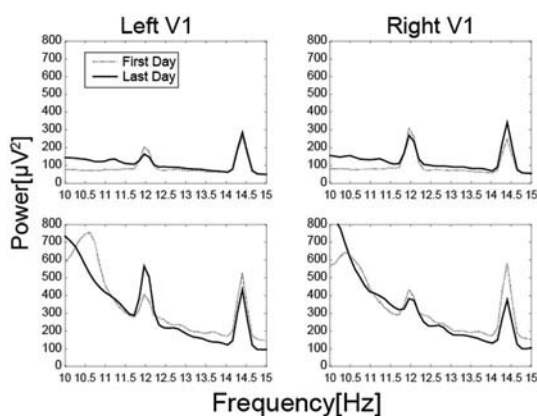


図 4 図 3 ニューロフィードバック訓練中における SSVEP 応答の変化

らにはその活動パターンの多様性を確かめていく必要がある。

最後に、本研究期間においては新型コロナウイルス感染拡大の影響により、ヒトを対象としたデータ計測が長期間に渡り難しい状況が続いた。以上を踏まえ、今後も継続して実験を進めていく予定である。

[成果の発表，論文等]

検討中