

NIRS を用いたニューロフィードバックトレーニングにおける 訓練効果の評価方法の提案

日大生産工 ○柳澤 一機 日大生産工 綱島 均

1 緒論

近年、非侵襲式の脳活動計測技術の発展に伴い、脳の活動情報を視覚刺激や聴覚刺激など知覚できるように提示することにより、訓練を通じて脳活動の随意制御を可能にする技術であるニューロフィードバック（Neurofeedback 以下NF と記す。）が注目されている。うつ病や自閉症などの精神疾患患者は、前頭葉機能が低下することが報告されており¹⁾、NFトレーニングによって、前頭葉の活動を随意制御することが可能になれば、うつ病などの精神疾患の予防や治療への応用につながる可能性がある。

先行研究としては、fMRI(functional magnetic resonance imaging)を用いたNFによって、画像を見たときの感情をコントロールすることが可能になったという報告がある²⁾。しかし、fMRIは測定装置が非常に大型であり、精神疾患の治療への応用を行うには、より簡易な脳活動計測・フィードバック方法が必要になる。

小型の測定装置で簡易に脳活動計測を行う方法としては、脳波や近赤外分光法（NIRS：Near-infrared spectroscopy）が挙げられる。加納ら³⁾は脳波とNIRSを用いて、NFトレーニング効果を比較しており、様々な周波数成分の変動が含まれる脳波よりも、脳血流の変動を計測するNIRSのほうがフィードバックする周波数帯域を選択しやすく、NFにおいて有効な脳活動計測方法であることが示されている。また、福長ら⁴⁾は、NIRSを用いたリアルタイムNFシステムを開発しており、NFにより脳活動を随意制御できる可能性を示している。

しかし、NIRSによる脳活動計測は、測定値が相対変化の値であり、トレーニング前後の脳活動を単純に比較することが難しく、NFトレーニングの効果を定量的に評価することが難しいという問題点がある。

本研究では、NFトレーニングによるNIRS信号の特徴の変化を定量的に評価する指標を提案し、その指標を用いた評価方法の有効性を検

証する。まず、NIRSを用いたニューロフィードバックシステムを開発し、7日間のNFトレーニングを行う。次にNFトレーニングの効果を定量的に評価するために、実験参加者をNFトレーニングを行う群、脳活動情報をフィードバックさせないでトレーニングを行う群、トレーニングを行わない群の3つの群に分け、実験を行う。この3つの群について、分離度という脳活動の特徴を評価する指標を提案し、NFトレーニングの効果を検証する。

2 NIRSを用いたNFシステム

本研究で用いたNIRS-NFシステムを図1に示す。脳活動測定装置は島津製作所製、近赤外光イメージング装置OMM-3000を用い、0.22秒毎にデータを記録した。このOMM-3000によって計測されたoxy-Hb信号をPCに転送し、リアルタイムに離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を行い、課題に関連した変動を抽出する。測定装置のノイズや心拍変動や呼吸による影響、Mayer waveなどを取り除くために、28～450s周期の変動を課題に関連する変動（0.0022～0.036Hz）として抽出した⁵⁾。

次に再構成後の信号から、脳の活動状態を色刺激として、ディスプレイに呈示する。測定開始時のoxy-Hbの値を緑色とし、oxy-Hbが上昇するほど濃い赤色、oxy-Hbが下降するほど濃い青色に変化するように設定し、呈示される色は65段階で変化するようにした。使用者はこの色の变化から自身の脳活動の状態を把握することができる。

計測した全チャンネルのoxy-Hb情報を提示すると、実験参加者が一度に受け取る情報量が非常に膨大なものになり、容易に自身の脳活動情報を知ることができなくなる可能性がある。そこで、すべてのチャンネルの中から、課題に関連した変動が顕著なチャンネルを1チャンネル選択し、そのチャンネルのoxy-Hb情報を提示する。

Proposal of Evaluation Method for Effects in Neurofeedback Training Using NIRS

Kazuki YANAGISAWA and Hitoshi TSUNASHIMA

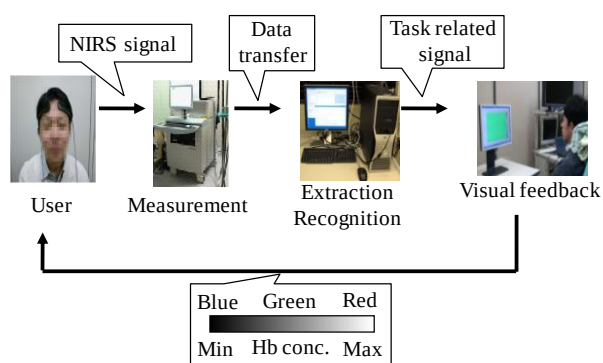
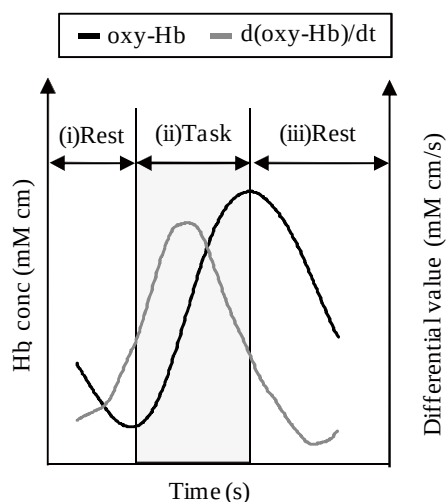
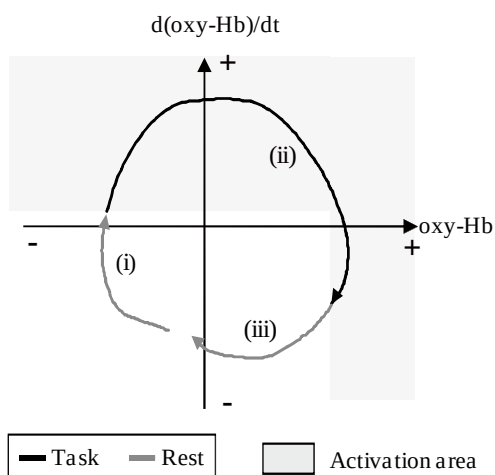


Fig.1 NIRS-NF system



(a) Change of oxy-Hb and differential value



(b) Trajectory of oxy-Hb and $d(\text{oxy-Hb})/dt$
Fig.2 Relations between oxy-Hb and differential value

3 実験内容

3.1 実験方法

NIRSを用いて前頭前野を計測部位としたNFトレーニングを行い、実験参加者の脳活動がどのように変化するか検討するため、7日間のNFトレーニングを行った。実験内容として、

実験参加者はタスク中に意識を集中させ、画面の色を赤にするイメージの想起を行った。

実験参加者に呈示する色の画面の色はoxy-Hbの増減に対応した色に変化させた。前レスト15秒、タスク30秒、後レスト15秒を1試行とし、6試行繰り返し行った。レスト中は閉眼し安静にするよう教示した。これを1日に2回行い、計7日間の実験を行った。なお、1回あたりの実験は、測定装置の取り付けも含め、50分程度とし、実験参加者の負担にならないよう配慮した。また、実験終了後に想起したイメージの内容や課題に対する達成度について、聞き取り調査を行った。

3.2 実験参加者

NFトレーニングの効果を検証するために、実験参加者を3つのグループに分けて実験を行った。

- ・ A 群：7日間NIRS-NFシステムを使用してトレーニングを行う。
- ・ B 群：NIRS-NFシステムを使用せず、脳活動をフィードバックしない条件（呈示される画面の色が緑のまま変化しない）で7日間トレーニングを行う。
- ・ C 群：1日目と7日目に計測のみ行い、NFトレーニングを行わない。

実験参加者は色の識別機能に障害のない20代男性23名、女性5名（21.6歳 $\pm$ 1.6）とし、ランダムに各群に振り分けた（A 群：男性13名、女性1名、B 群：男性11名、C 群：男性8名、女性4名）。インフォームドコンセントを得た後、実験参加者の安全と人権保護に十分配慮して実験を実施した。

4 NFトレーニング効果の評価

4.1 oxy-Hbとその微分値

NFトレーニングの効果を定量的に評価するために、本研究ではoxy-Hbとその微分値に注目する。先行研究より、oxy-Hbの微分値は課題のワークロードと相関があることが報告されている5）。

oxy-Hbとその微分値の課題時の一般的な変動を図2（a）に示す。課題に関連してoxy-Hbが上昇し、変化の割合である微分値はoxy-Hbより早く上昇する。この時のoxy-Hbを横軸、oxy-Hbの微分値を縦軸にとり作成した位相平面を図2（b）に示す。課題に関連してoxy-Hbが上昇するとき、脳が賦活していると考えられるが、それ以外にoxy-Hbは低い値だが、微分値が大きい時、つまりこれからoxy-Hbが上昇するような場合も脳が賦活していると考えられる。

4. 2 分離度による評価

oxy-Hb とその微分値から作成した特徴平面からニューロフィードバックトレーニングによる脳活動の特徴変化を分離度という指標を用いて定量的に評価する. 分離度とは特徴平面内の信号のまとまりを評価する指標であり, 機械学習などで特徴の評価に用いられる指標である⁶⁾.

分離度は, クラス内分散とクラス間分散の比で表される. まず, 計測されたoxy-Hb を p_{oxy} , oxy-Hb の微分値を $\dot{p}_{oxy}$ とする. これらを特徴平面内の軌跡 $\mathbf{p}$ として表すと

$$\mathbf{p} = (p_{oxy}, \dot{p}_{oxy}) \quad (1)$$

となる. タスクのグループに属する軌跡の集合を $\mathbf{X}_{task}$, $\mathbf{X}_{task}$ に含まれる軌跡の数を n_{task} , 軌跡の平均ベクトルを $\mathbf{m}_{task}$, レストのグループに属する軌跡の集合を $\mathbf{X}_{rest}$, $\mathbf{X}_{rest}$ に含まれる軌跡の数を n_{rest} , 軌跡の平均ベクトルを $\mathbf{m}_{rest}$ とする. また全軌跡の数を n , 全信号平均ベクトルを $\mathbf{m}$ とする. クラス内分散を σ_W^2 , クラス間分散 σ_B^2 をと表すと,

$$\sigma_W^2 = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{\mathbf{p} \in \mathbf{X}_{task}} (\mathbf{p} - \mathbf{m}_{task})^T (\mathbf{p} - \mathbf{m}_{task}) + \sum_{\mathbf{p} \in \mathbf{X}_{rest}} (\mathbf{p} - \mathbf{m}_{rest})^T (\mathbf{p} - \mathbf{m}_{rest}) \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{n} \left\{ n_{task} (\mathbf{m}_{task} - \mathbf{m})^T (\mathbf{m}_{task} - \mathbf{m}) + n_{rest} (\mathbf{m}_{rest} - \mathbf{m})^T (\mathbf{m}_{rest} - \mathbf{m}) \right\} \quad (3)$$

となる. 分離度は式 (2), 式 (3) を用いて

$$J = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2} \quad (4)$$

と定義できる. 式 (2) からクラス内分散は同じグループの軌跡の分散を表し, 式 (3) からクラス間分散はグループの重心の分散を表す. クラス内分散が小さく, クラス間分散が大きいほどタスク時とレスト時の特徴が大きく異なることを表している. つまり, 分離度は, タスクとレストの軌跡の分布が広く重なっている場合は低い値となり, 反対に, 同じグループの軌跡がより隣接して分散が小さく, タスクとレストの軌跡が分離して分布している場合は高い値を示す.

4. 3 評価結果

NFトレーニングの効果を定量的に評価するために, 各群の標準得点化したoxy-Hbとその微分値から作成した位相平面の軌跡の分布から, 分離度を用いて評価した. 良好な計測が行えなかった実験参加者を除き, A群11名, B群10名, C群10名を評価の対象とした.

NFトレーニングを7日間行ったA群のトレーニング初日の結果と7日目の結果を比較したものを図3に示す. トレーニングによるoxy-Hbの変化が顕著だった部位として前頭前野左外側部33chの位相平面の変化を図8(a)に示す. トレーニング前はタスク時とレスト時の軌跡が混在しており, 分離度は0.05であった. しかし, トレーニングを7日間行った結果, タスク時とレスト時の軌跡が混在せずに, トレーニング初日と比較してそれぞれの軌跡が分離して分布している. 分離度は1.65とトレーニング前と比べて上昇している.

図3(b)に分離度を画像化したものを示す. NFトレーニング初日では, 前頭前野全体で分離度が低い, トレーニング7日後では前頭前野両外側部にて, 分離度が上昇した. トレーニングによる変化が確認できることから, NFによってタスク時に脳が活動し, タスク時とレスト時の特徴がより異なる状態に変化したことがわかる.

次に, 7日間脳活動をフィードバックしないトレーニングを行ったB群の評価結果を図9に示す. 図4(a)にA群と同様に前頭前野左外側部33chの位相平面の変化を示す. トレーニング初日と比較して, トレーニング後は分離度が上昇しているが, A群と比較すると7日後の分離度の値は小さい. 図4(b)の前頭前野全体の分離度を画像化した結果からも, トレーニング後に前頭前野両外側部にて分離度の上昇が確認できるが, A群の分離度の結果(図3(b))と比較すると, その変化は小さい.

さらに, 7日間のトレーニングを行わないC群の結果を図5に示す. 図5(a)に示す位相平面上の変化については, 初日と7日目のどちらの結果も, 軌跡が混在したままであり, 分離度の上昇は確認できなかった. 図5(b)の分離度の結果からも, どの部位についても分離度がほとんど変化せず, NFトレーニングによる脳活動の変化は確認できない.

これらの結果は, 開発したNFシステムによるトレーニングを行うことで, 脳活動を随意制御できる可能性を示している. そして, 提案した分離度によって, NFトレーニングによるNIRS信号の特徴の変化を定量的に評価できる可能性を示している.

5 結論

本研究では, うつ病などの精神疾患の予防や治療を目的としたNFシステムの開発のために, NFトレーニングによるNIRS信号の特徴の変化を定量的に評価することが可能な指標と

して分離度を提案し、分離度によるNFトレーニング効果の検証を行った。

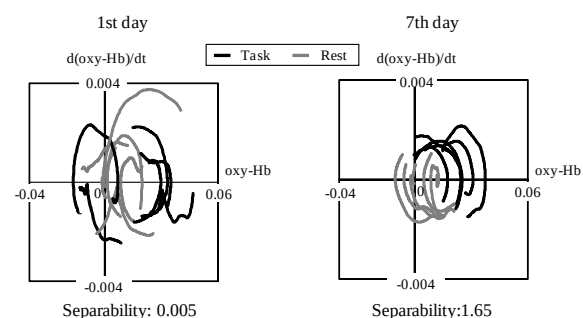
まず、NIRSを用いたNFシステムを開発し、健常者を対象に7日間のトレーニングを行った。実験参加者をNFトレーニングを行うA群、7日間脳活動をフィードバックしないトレーニングを行ったB群、トレーニングを行わないC群の3つの群に分けて実験を行った。さらに、oxy-Hbとその微分値に注目し、分離度という脳活動の特徴を評価する指標を提案した。

各群について分離度を算出した結果、NFトレーニングを行ったA群は、トレーニング後に前頭前野両外側部に分離度が上昇し、タスク時の脳活動とレスト時の脳活動の特徴が異なる状態に変化した。しかし、脳活動をフィードバックしないトレーニングを行ったB群、トレーニングを行わないC群については、そのような分離度の変化は確認できなかった。

これらの結果から、脳活動の特徴を評価する指標として提案した分離度によって、NFトレーニングによるNIRS信号の特徴の変化を定量的に評価できる可能性を示した。また、分離度によってNFにおける脳活動情報の提示方法を定量的に評価することも可能になる。

「参考文献」

- 1) 福田正人: 専門医のための精神科臨床リユミエール2 精神疾患と脳画像, 中山書店 (2008).
- 2) Johnston SJ, Boehm SG, Healy D, Goebel R, Linden DE: Neurofeedback : A promising tool for the self-regulation of emotion networks, NeuroImage, Vol.49, pp.1066-1072, (2010)
- 3) 加納慎一郎: Brain-Computer Interface(BCI)におけるバイオフィードバック, バイオフィードバック研究, Vol.36, No.2, pp.127-133, (2009)
- 4) 福長一義, 大貫雅也, 福井裕輝, 舟久保昭夫, 福井康裕, 中島章夫, 嶋津秀昭, 石山陽事, 大瀧純一: NIRS を用いたニューロフィードバックシステムの開発, 杏林医学会雑誌, Vol.42, No.1, pp.2-11, (2011)
- 5) 柳沢一機, 綱島均, 丸茂喜高, 広瀬悟, 清水俊行, 泰羅雅登, 土師知己: 機能的近赤外分光装置(fNIRS) を用いた高次脳機能計測とその評価, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.11, No.2, pp.183-191, (2009)
- 6) 石井健一郎, 上田修功, 前田栄作, 村瀬洋: わかりやすいパターン認知, オーム社 (1998)

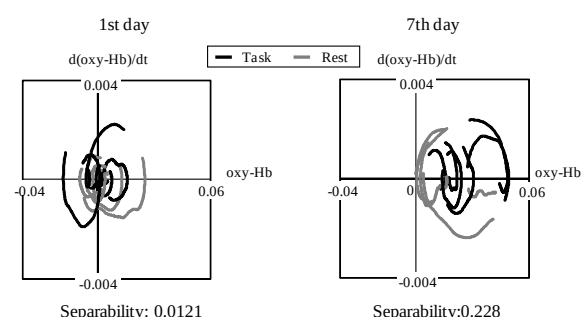


(a) Trajectory change in phase plane (34ch)



(b) Space distribution of separability

Fig.3 Evaluation result of group A

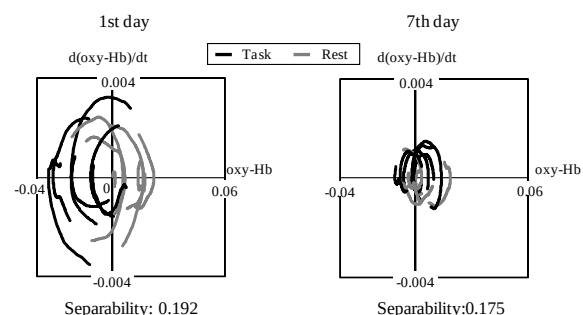


(a) Trajectory change in phase plane (34ch)



(b) Space distribution of separability

Fig.4 Evaluation result of group B



(a) Trajectory change in phase plane (34ch)



(b) Space distribution of separability

Fig.5 Evaluation result of group C