

NIRS を用いた Brain Computer Interface に関する研究

- ニューロフィードバックトレーニングの検討 -

日大生産工 (院) ○浅賀 恭平

日大生産工 (院) 柳沢 一機

日大生産工 綱島 均

1. 緒論

現在, 体を動かせない身体障害者の生活支援¹⁾やリハビリテーション²⁾, アミューズメント³⁾応用のため, 脳と機械やコンピュータを直接つなぐインターフェース技術として, ブレインコンピュータインターフェース BCI (Brain-Computer Interface) の研究が注目されている. 脳機能の非侵襲的計測法には, 主に機能的磁気共鳴画像 (fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging) や近赤外分光法 (NIRS: Near-Infrared Spectroscopy), EEG (Electro Encephalo Gram) などがあげられる. fMRI は空間分解能に優れているが, 装置が大型であることや, 体動の制限があるため体動を伴う BCI への応用は難しい.

これに対して, NIRS は近赤外光を用いて, 酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) と脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) の相対的な変化量を測定する装置であり, 体動の制限が少なく, 被験者に対して自然な状態で実験が行えるため非侵襲式の計測器として優れている. また, EEG と比較し, 空間分解能が高く, 電氣的ノイズに強いという長所があるため, 本研究では, NIRS を用いる.

BCI システムは, 使用する被験者に大きく依存している. そのため, 被験者自身のトレーニングも必要不可欠となる⁴⁾. トレーニング方法の一つとしてとしてニューロフィードバック (以下 NF) がある. NF とは現在の脳の活動状態を, 使用者自身に提示することで課題に反映させ, トレーニング効果を促す方法である.

飯塚らは NIRS を用いて, BCI において NF トレーニング効果を検討している. 運動野を計測し, 運動イメージを行い 5 日間の NF トレーニングを行った. その結果 5 名中 2 名の被験者で訓練の効果が認められた⁵⁾.

しかし, 運動野の情報をもとにした BCI はある程度検討がされているが, 運動野は NIRS 信号の S/N が悪く, 被験者によっては測定が困難な場合もある. 一方, 注意や, 認識や意図など高度な機能を司っている前頭葉連合野に注目することで, 新しい応用も期待できる. また, 前頭葉は NIRS での計測もしやすいという利点もある. しかし, 前頭葉に注目した BCI は少なく, 特に, トレーニング効果を検討した研究は行われていない.

そこで本研究では, NIRS を用いて前頭葉の脳活動

を計測し, NF によるトレーニングを行って, 被験者の脳活動がどのように変化するか検討する.

2. 近赤外分光法 (NIRS) の原理

NIRS は, 近赤外光を用いて脳血流の変化を計測することによって, 間接的に脳活動を捉える非侵襲的計測法である. 神経活動が生じる部位では, 局所的に血流が増加し, 血中のヘモグロビンの濃度に変化する. 近赤外分光法は, 生体への透過性が良好な 700~900nm の波長の近赤外光を照射し, その透過光・拡散光から oxy-Hb, deoxy-Hb の濃度変化を計測することが可能である.

しかし, 計測された値は, 絶対量ではなく, 相対量であることから, その扱いには注意しなければならない. 脳が活動するときの oxy-Hb, deoxy-Hb の変動の様子を模式的に図 1 に示す. 一般的には, 課題が始まると oxy-Hb が上昇し, 少し遅れて deoxy-Hb が減少することが知られている.

3. 実験方法

3.1. NF システム

研究で用いた NF システムを図 2 に示す. NIRS で計測した使用者の oxy-Hb 信号を PC に転送し, リアルタイムに解析を行い, ディスプレイに脳活動の状態を色と

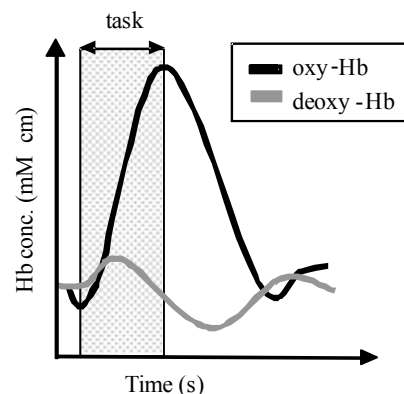


Fig. 1 Schematic Hb concentration change due to neural activity

して表示し, 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た. 解析後の oxy-Hb 信号の情報は 0.5s 毎に更新されディスプレイに表示される. また, 色は 65 段階で変化するようにした. この画像の変化を使用者に視覚的に提示することで, 自身の脳活動の状態を把握させることができる. 本研究では, 上記の脳活動に関連して提示する色が変わる場合を NF あり, 提示する画像が緑色のままで変化しない場合を NF なし (コントロール条件) として実験を行う.

3.2. 実験内容

NF を用いたトレーニングを行うことで意図的に脳活動を制御することができるか検討するために, 前途の NF システムを用いた 7 日間のトレーニング実験を行った.

被験者に対して, NF ありと NF なしの 2 条件の画面をそれぞれ提示し, その画面の色を赤色に近づくように変化させるようにイメージの想起を行うように教示し, その時の脳活動, および 7 日間での脳活動の変化を比較した.

7 日間のうちの 1 日目, 4 日目, 7 日目を計測日とし, その間の日を訓練日とした.

1 日目は, NF に用いる測定チャンネルを決定するために, 図 3 に示すブロックデザインで NF なしのタスクを行った. その結果から oxy-Hb の活動が顕著な測定チャンネルを決定した. 2 日目以降はこの決定したチャンネルを使用して実験を行った. 決定したチャンネルを用いて図 4 に示すブロックデザインで実験を行った. ここでは, NF ありとコントロール課題として, NF なしのタスクを行った. NF ありと NF なしのタスクのどちらも同様に画面の色を赤色に近づけるように画面の色が変化していくイメージの想起を行うよう教示した.

訓練日のブロックデザインを図 5 に示す. NF ありの条件のみで画面に表示された色を赤色に近づけるイメージの想起を行った. 1 日にこの課題を 2 回繰り返した. 4 日目と 7 日目は, 図 5 のブロックデザインの NF ありの条件のみでの実験を 1 回行い, その後, 図 4 のブロックデザインの NF なしと NF ありを交互に繰り返すタスクの実験を行った. レスト中は閉眼し, 安静にしているよう教示した.

3.3. 離散ウェーブレット変換による多重解像度解析

NIRS は oxy-Hb と deoxy-Hb の濃度変化とその 2 つの値の合計値である total-Hb の信号を計測できる. 本研究では, oxy-Hb の濃度変化は局所脳血流 rCBF (regional Cerebral Blood Flow) の変化と相関が高いこと⁶⁾, rCBF の増加は神経活動の増加を反映していること⁷⁾から, oxy-Hb 信号に注目する.

NIRS 信号には, 測定装置のノイズ, 呼吸による影響, 血圧変動など脳活動には無関係な信号も含まれるため, 詳細な脳活動の評価を行うためには, これらの無関係な

信号を取り除く必要がある. そこで, 離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を用いて, 測定した NIRS 信号を異なる周波数帯域に分解し, 課題に関連する成分を再構成する方法が提案されている⁸⁾.

3.4. 測定条件

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 を用いた. 光ファイバの配置を図 6 に示す. 送光ファイバと受光ファイバの間にある図中の数字の部分に測定チャンネルを示し, 全 42ch 計測した.

被験者は健康者の 20 代男性 3 名とした. 被験者には事前にインフォームドコンセントを実施し, 被験者の安全と人権保護に十分配慮した.

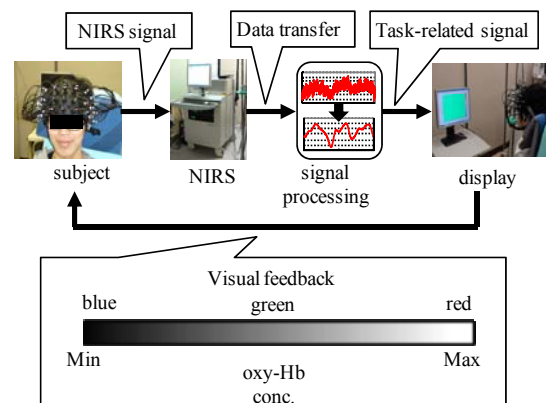


Fig. 2 Neuro-feedback system

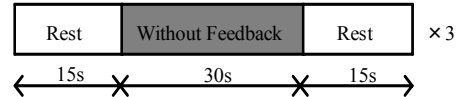


Fig.3 The block design for selecting measurement channel



Fig. 4 The block design for evaluation

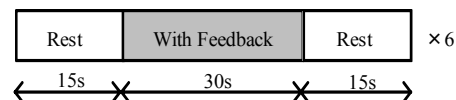


Fig. 5 The block design for training

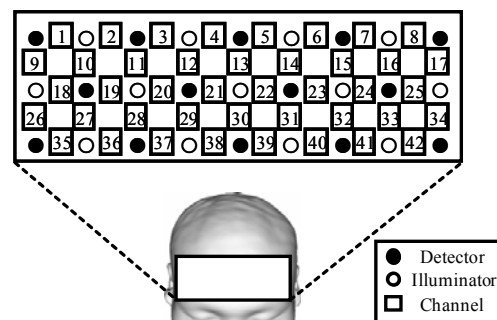


Fig. 6 Position of optical fibers and channels

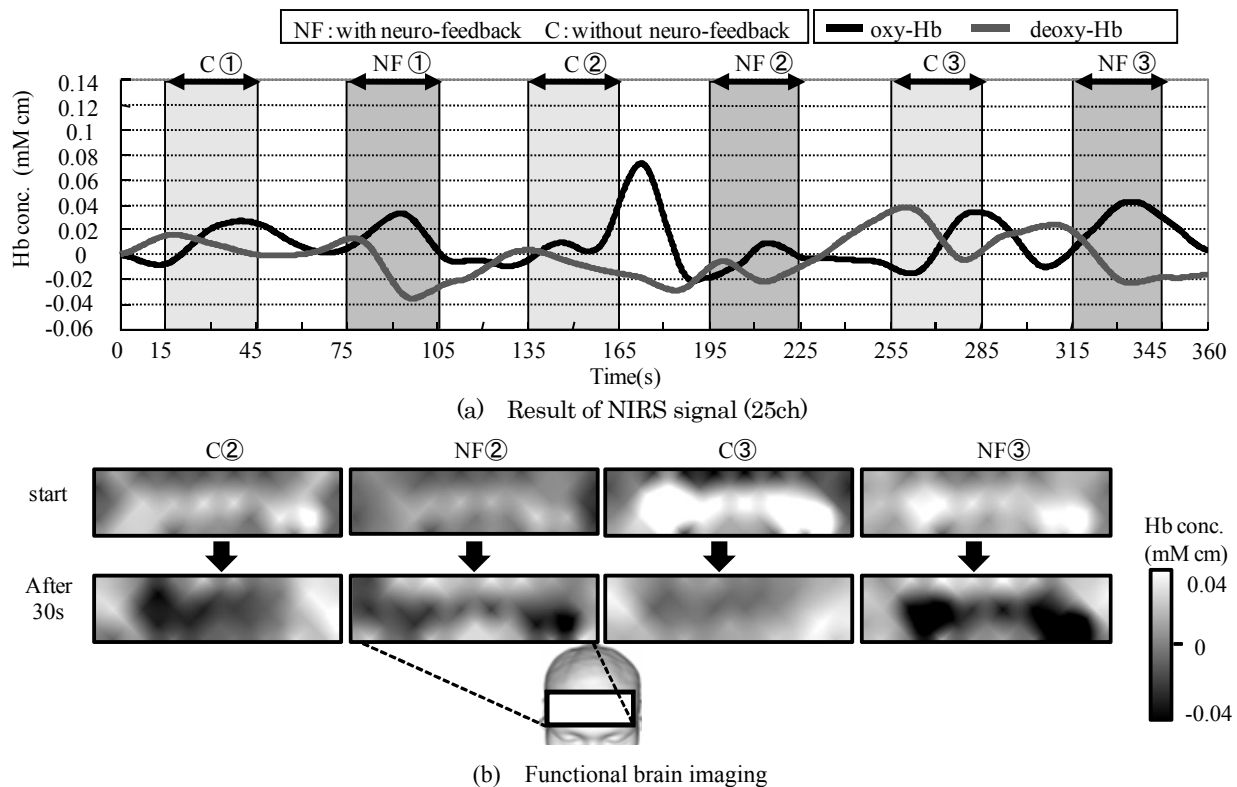


Fig. 7 Result of neuro-feedback training (first day)

3.5. 実験結果

被験者 A の 1 日目の結果を図 7 に示す。1 日目に決定した左外側部 25ch の結果を図 7 (a) に示す。全てのタスクで oxy-Hb が上昇し、deoxy-Hb が低下する一般的な脳の活動時の Hb の変動が確認できたが、3 回目のタスク (C②) 後にもしばらく oxy-Hb の変動が観測された。

図 7 (b) に被験者 A の 1 日目の脳機能画像を示す。NF なしの 2 回目と 3 回目のタスク (C②と C③) と NF ありの 2 回目と 3 回目のタスク (NF②と NF③) の開始時と終了時の脳機能画像を示す。脳機能画像から、タスクごとの賦活している部位の再現性が低いことが確認できた。

7 日間のトレーニングを行った後の 7 日目の計測の結果を図 8 に示す。左外側部 25ch の結果を図 8 (a) に示す。タスク開始後に oxy-Hb が上昇し、しばらくして deoxy-Hb が低下する傾向が全てのタスクで確認できた。1 日目の結果と比較し、タスク開始後に oxy-Hb が上昇し、タスクが終了すると oxy-Hb が低下することが確認できた。また、1 日目に見られたレスト中の oxy-Hb の上昇は 7 日目には確認されなかった。

図 8 (b) に被験者 A の 7 日目の脳機能画像を示す。1 日目は賦活した部位の再現性は低かったが、7 日目には賦活する部位の再現性が向上し、すべてのタスクで両外側部での顕著な賦活が確認できるようになった。

他の 2 名について、1 名は、被験者 A と同様に、1 日

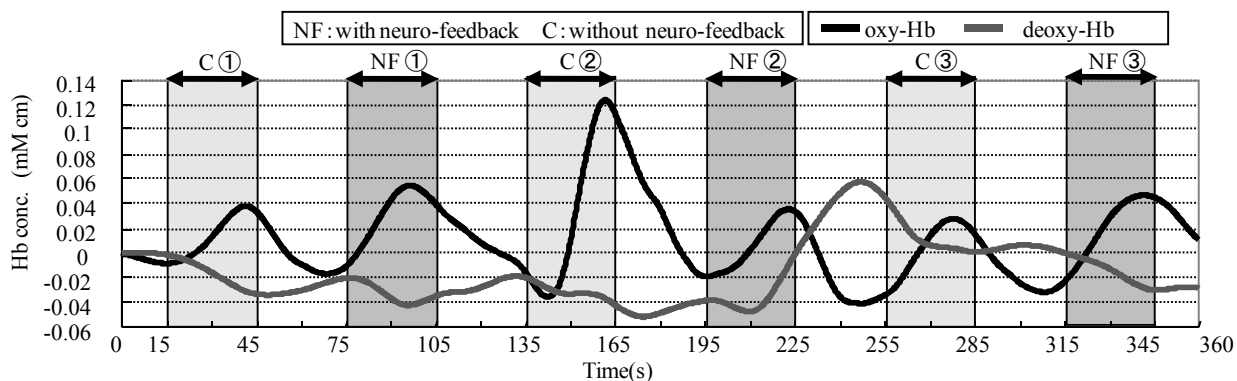
目では広範囲での賦活が確認されたが、7 日目には賦活する部位の再現性が上がり、両外側部での顕著な賦活が確認できた。

もう 1 名は、1 日目にはタスクと関連のある oxy-Hb の上昇はあまり確認できなかったが、7 日間のトレーニングの結果、NF ありのみで、oxy-Hb の上昇が確認できた。NF なしにおいては関連する脳活動は確認できなかった。賦活した部位については、1 日目と比較し、7 日目に賦活した部位の再現性が上がった。

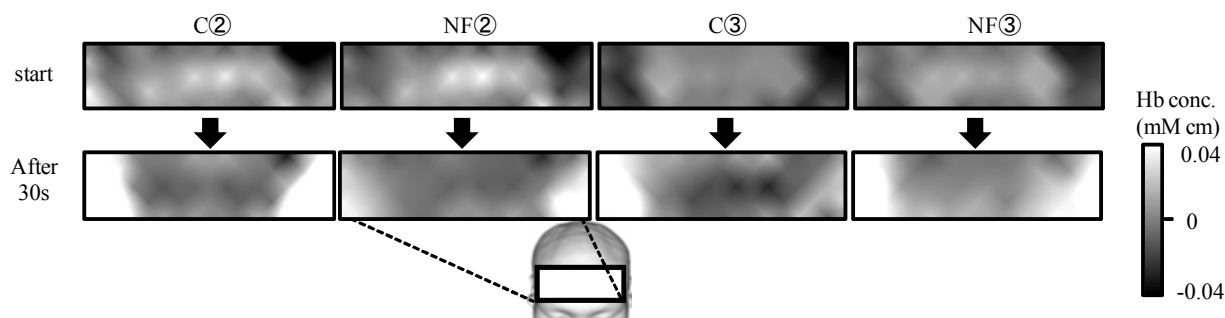
4. 結言

本論文では、NF によるトレーニングを行うことで被験者が、意図的に脳活動を制御することができるか検討するため、画像提示による視覚刺激を用いた NF システムで 7 日間の訓練を行った。

その結果、3 名中 2 名が NF なしと NF ありのどちらのタスクにおいても oxy-Hb の上昇が確認できた。1 名は NF ありのみでの oxy-Hb の上昇が確認できた。このことから、7 日間の訓練を行うことで、脳活動を制御できる可能性を示した。また、7 日間のトレーニングを行うことで、賦活する部位を前頭連合野背外側部に局在化できることが確認できた。今後は、被験者を増して実験を行い、トレーニングの成果の統計的評価が必要である。また、今回得られた結果が、NF ありで行ったトレーニングによるものなのか、トレーニング



(a) Result of NIRS signal (25ch)



(b) Functional brain imaging

Fig. 8 Result of neuro-feedback training (seventh day)

グを行うこと自体に効果があるのかを検証するため、被験者を NF あり群、NF なし群、計測のみ群の群に振り分け、計測を行う。

「参考文献」

- 1) Leigh R.Hochberg, Mijail D. Serruya, Gerehard M.Friebs, Jon A. Mukand, Maryam Saleh, Abraham H. Caplan, Almut Branner, David Chen, Richard D. penn, Jhon P. Donoghue, Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia, Nature, Vol.442, 2006, pp.164-171
- 2) T. Nagaoka, K. Sakatani, T. Awano, N.Yokose, T. Hoshino, Y. Murata, Y. Katayama, A. Ishikawa, H Eda, Development of a new rehabilitation system based on brain-computer interface using near infrared spectroscopy. Advances in Experimental Medicine and Biology, Vol.662, 2010, pp.497-503
- 3) Benjamin Blankertz, Guido Dornhege, Matthias Krauledat, Klaus-Robert Muller, Grabriel Curio, The non-invasive Berlin Brain-Computer Interface, Fast acquisition of effective performance in untrained subjects, NeuroImage, 2007, Vol.37, pp.539-550
- 4) 川人光男：脳情報とブレイン・マシン・インタフェース、バイオフィードバック研究、36 巻、第 2 号、2009、pp.101-106
- 5) 飯塚慶、加納慎一郎、宮本浩一郎、吉信達夫、川島隆太：運動イメージ時の脳活動における NIRS 信号を用いたニューロフィードバックの効果：NIRS による評価、電子情報通信学会信学技報、NC2009-61, 2009, pp.59-64
- 6) K. Sakatani, Y. Murata, N. Fujiwara, T. Hoshino, S. nakamura, T. kano, Y. katayama, Comparison of blood-oxygen-level-dependent functional magnetic resonance imaging and near-infrared spectroscopy recording during functional brain activation in patients with stroke and brain tumors, Journal of Biomedical Optics, Vol.12(6), 2007 p. 062110
- 7) Jueptner, M., Willer, C., Dose measurement of regional cerebral blood flow reflects synaptic activity?~ implications for PET and fMRI; neuroimage, Vol.2, 1995, pp.148-156
- 8) H. Tsunashima, K. Yanagisawa, Measurement of Brain Function of Car Driver Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS), Computational Intelligence and Neuroscience, 2009, Vol.2009