

## 発達障害の改善を目的とした NIRS-NFB システムの開発

日大生産工(院) ○中村 のぞみ 日大生産工 柳澤 一機  
日大生産工 綱島 均

### 1 はじめに

近年、近赤外分光法(NIRS: Near-infrared spectroscopy)などの非侵襲的脳機能計測技術の発展に伴い、脳活動計測による発達障害・精神疾患の診断補助に関する研究が注目されている。

NIRSは近赤外光を用いて、脳血流の変化を計測する装置であり、自然な状態での脳活動計測が可能である。NIRSを用いた先行研究として、成田らは発達障害の1つにあたる自閉症スペクトラム(ASD: Autistic Spectrum Disorder)者の課題遂行時の前頭前野背外側部の活動に注目し、その活動が健常者の活動パターンとは異なっていることを報告している<sup>1)</sup>。

また、NIRSを用いたブレイン・コンピュータ・インターフェース(BCI: Brain Computer Interface)技術の1つであるニューロフィードバック(NFB: Neurofeedback)トレーニングが治療への応用の可能性がある。NFBとは、BCIシステム使用者自身の現在の脳活動状態を視覚・聴覚刺激などを用いてフィードバックすることで、トレーニングを通じて脳活動を随意制御する技法である。ASD者の脳活動をNFBトレーニングによって健常者のような活動パターンに変化させることが可能になれば、症状を治療できる可能性がある。

NFBトレーニングに関する先行研究として、柳澤らはNIRS-NFBシステムの開発を行い、このシステムを用いて健常者を対象にNFBトレーニングを行った<sup>2)</sup>。その結果、トレーニングによる脳活動の変化を報告している。しかし、多くのNFBトレーニングシステムと同様に、脳活動情報の呈示方法が単純な視覚刺激であるため、システム使用者のトレーニングに対する意欲を持続できない場合があるという問題がある。

特に、発達障害者を対象にするNFBトレーニングでは、使用者のトレーニングに対する意欲を持続させることは非常に重要な要素である。

そこで、本研究では使用者のトレーニングに対する意欲を維持させることが可能なNIRS-NFBトレーニングシステムの開発を行う。開発したシステムの有効性を検証するためにASD者1名を対象にNFBトレーニングを行う。

### 2 NIRSを用いたNFBシステム

#### 2. 1 NIRSの原理

NIRSは、近赤外光を用いて脳血流量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が増加する。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・拡散光から酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)の濃度変化を計測することが可能である。しかし、その計測値は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。

#### 2. 2 従来のNFBシステムとその問題点

NFBにおける脳活動情報の呈示方法は、視覚を用いたものがほとんどであるが、その呈示方法にはさまざまな方法がある。先行研究として脳活動の変化をバーの変化<sup>3)</sup>や、車速度計のようなメータに変化<sup>4)</sup>させるフィードバックシステムがあげられる。しかし、これらのNFBシステムは呈示方法である視覚刺激が単調であるため、使用者がトレーニングに対して怠倦感を覚えてしまい、トレーニング意欲の維持に問題があることが指摘されている。また、ほとんどのNFBシステムは、マルチチャンネルNIRSを使用している。マルチチャンネルのNIRSは、fMRIなどと比較すると簡易に脳活動計測を行うことができるが、装置の装着が煩雑で長時間にわたる計測は、使用者の負担になるという問題点がある。

### 3 NIRSによる脳活動計測

#### 3. 1 機器制御システムの概要

本研究で開発したNIRS-NFBシステムを図1に示す。本システムは(i)脳活動計測部、(ii)特徴抽出・認識部、(iii)機器制御部の3つから構成される。(i)脳活動計測部にて、NIRSを用いて計測した信号をリアルタイムに(ii)特徴抽出認識部へと転送し、ノイズ除去などの解析を行う。その後、(iii)機器制御部にて脳活動レベルの判定を行い、その判定に応じて機器を制御することが可能となる。

Development of NIRS-NFB system for improvement of developmental disorder

Nozomi NAKAMURA, Kazuki YANAGISAWA and Hitoshi TSUNASHIMA

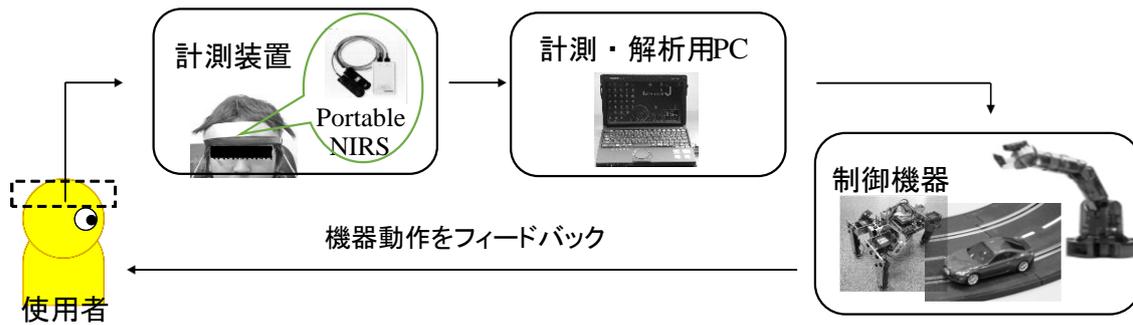


図1 NIRS-NFBシステム

### 3. 2 脳機能計測部

脳機能計測部では、使用者の脳活動をNIRS装置により計測する。計測に用いたNIRS装置は、株式会社ダイナセンス製、携帯型近赤外組織酸素モニタ装置Pocket NIRSである。Pocket NIRSは、計測チャンネルが2chのみと少ない。しかし、測定装置が非常に小型(W100×H61×D18.5mm 100g)で軽量であり、また他の脳機能計測装置やマルチチャンネルのNIRSと比べ、装着が容易である。そのため、長時間の計測に適しており、使用者への負担も少ない。

PocketNIRSにより計測したNIRS信号(サンプリング周波数4Hz)は、Bluetoothにてデータ計測・解析用PCの専用計測ソフトに転送され、仮想ポートを利用して作成した特徴抽出・認識部に送られる。

### 3. 3 特徴抽出・認識部

NIRS信号は計測装置のノイズ、呼吸による影響、血圧変動などの脳活動に無関係な変動が含まれている。

本研究では、これらのノイズの影響を取り除くために、計測したNIRS信号に移動平均を行った。さらに、計測データの平均値から閾値を求め、現在の計測値が閾値を超えているか判定し、その結果を機器制御部に送信する。移動平均点数と閾値のための平均値を求める区間は任意に設定できるようにした。

### 3. 4 機器制御部

従来のNFシステムの脳活動情報の呈示方法は、呈示する視覚刺激が単調であるという問題があった。そこで本研究では、脳活動状態に応じて様々な機器を制御することで、トレーニングに対するモチベーションを持続することが可能になるのではないかと考えた。

機器制御部では、解析アプリケーションからArduinoへ判定結果が送信され、判定結果に応じて、様々な機器を制御することができる。

1例として、BCIによりスロットカーを制御する場合を説明する。まず、使用したスロットカー(KYOSHO製、Dslot43)は、付属のコースのレール上に電流を流すことによりスロットカーのモータコード部に通電し、モータが駆動する仕組みと

なっている。本研究では、脳活動レベルをこのスロットカーの走行速度としてフィードバックした。使用者のoxy-Hbが高い値を示すほど脳活動レベルが高いと判定し、走行速度が上昇するように設定した。脳活動レベルの判定は、過去の計測値から求めた閾値と現在のoxy-Hbの値の差分を求め、この差分が大きいほどスロットカーの走行速度が上昇するように設定した。

Arduinoを使うことで、簡単に様々な機器(おもちゃ・ロボット)を制御することが可能であり、スロットカー以外にも4足歩行ロボットやロボットアームを操作することが可能である。

## 4 NIRS-NFB検証実験

### 4. 1 ASDの前頭葉機能

成田らは、ASD者における課題間切り替えの苦手さに注目し、NIRSを用いてタスク切り替えに伴う前頭葉血流変化を測定した。WM課題とノンワーキングメモリ(NWM)課題の2種類の課題を設定し、脳活動計測を行った結果、健常者とASD者の課題の正答率は差異がなかった。しかし、健常者は課題に関連して脳が賦活したが、ASD者はそのような反応が見られなかったことを報告している。また、健常者とASD者の脳活動の違いは前頭前野左背外側部に表れることも報告している。これらの結果から、開発したシステムを用いたNFトレーニングの前後で、WM課題とNWM課題の2種類の課題を行っているときの脳活動を計測し、その結果を比較した。

### 4. 2 NFBトレーニング実験

本研究では、開発したNIRS-NFBシステムを用いてASD者1名を対象に実験を行った。計測装置であるPocket-NIRSを前頭前野両外側部の2箇所に取り付け、左外側部にて計測されたoxy-Hb信号をフィードバック情報としてスロットカーに転送し、動作させる。実験デザインは前レスト15秒、タスク30秒、後レスト15秒を1試行とし、1回の実験で6試行繰り返した。タスク中は意識を集中させスロットカーを動かし、レスト中は安静にするように教示を行った。また、NFBトレーニング前後で一時的な気分や感情を計測できる特徴を持つ質問紙であるPOMS(Profile of Mood

States)の計測を行った。実験参加者はASD者1名とし、文教大学の倫理委員会(承認番号:教25-001)の承認を得て、実験を行った。

#### 4. 3 WM課題とNWM課題

本実験で用いたWM課題とNWM課題を図2に示す。WM課題では、4種類の色と3種類の形の図形を3秒ごとに連続してコンピュータ画面に刺激呈示として記憶させ、その後8個の図形を表示した画面上から、先に呈示された図形を探索し順番どおりに指で示すよう教示した。NWM課題では8個の図形を表示した画面上から同じ画面の上部枠内に示した図形を配置の順番どおりに探索し、指で示すように教示した。

WM課題は記憶する図形の数を4個、記憶する図形を呈示する時間が18秒、画面から記憶した図形を探索し指で示す時間を15秒とした。NWM課題は15秒とした。WM課題とNWM課題を1セットとし、これを6回繰り返した。

#### 4. 4 実験結果

##### 4. 4. 1 重み付き分離度による評価

NIRSは他の非侵襲的脳機能計測器と比べ歴史が浅いため、課題に対する脳活動の有無を判定するためにどのような特徴量に注目すべきかの検討が不十分である。そこで柳澤らは局所脳血流の変化と相関の高いoxy-Hbと、課題時における負荷の大きさを示すワークロードとの相関があるoxy-Hbの微分値に注目し、このoxy-Hbとその微分値から作成した位相平面上の信号の特徴を定量的に評価する重み付き分離度 (WS: Weighted Separability)の開発を行った<sup>9)</sup>。本研究では、このWSを用いて、作成した位相平面上のWM課題とNWM課題それぞれの平均点の分布から課題ごとの脳活動の特徴の違いを評価する。すでに、ASD者は、このWSが健常者と比較して有意に低いことが報告されている<sup>9)</sup>。NFBトレーニングによってASD者の脳活動が変化すれば、このWSも変化すると考えられる。

図3にNFBトレーニング前、図4にNFBトレーニング後のWM・NWM課題時のNIRS信号と位相平面の結果をそれぞれ示す。

図3(a)(b)より、NFBトレーニング前では、NIRS信号において特にNWM課題時での変動に再現性がなく、位相平面においても各平均点が広い領域に分布している。

しかし、図4(a)(b)より、NFBトレーニング後では、NIRS信号において再現性が高く信号の特徴が明確である。また、位相平面上においてはWM課題時の平均点が第1象限、NWM課題時の平均点が第3象限を中心にそれぞれ分布していることがわかる。位相平面の第1象限はoxy-Hbと微分値がともに高い領域であり、WM課題で脳が賦活していることを示している。

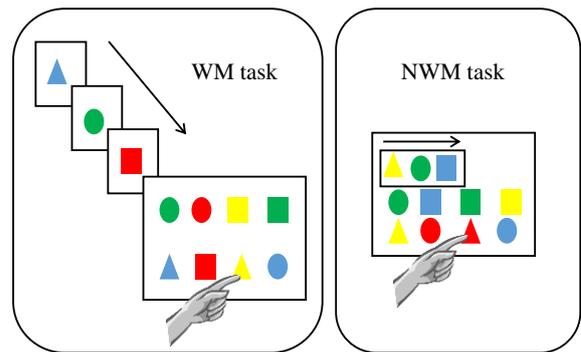


図2 WM課題とNWM課題

反対に第3象限はどちらの値も低い領域であり、NWM課題時はWM課題時より脳が活動していないことを示している。これは健常者と同様の反応であり、WSについてもNFBトレーニング前が3.12であったのに対して、11.3と大きく上昇している。この結果は、NFBトレーニングによって脳活動が変化した可能性を示している。

##### 4. 4. 2 気分尺度の評価

図5にNFBトレーニング前後におけるPOMSの結果を示す。POMSでは「緊張-不安」「抑うつ」「怒り」「活気」「疲労」「混乱」の6つの気分尺度を計測できる。今回は総合的な気分状態の指標となるTMD(Total-Mood-Disturbance)得点を用いて評価を行った。TMD得点は値が高いほど不安定な気分状態であるといえる。

図5より、トレーニングの前後でTMD得点が若干であるが低下していることがわかる。これは、NFBトレーニングによって気分・感情状態が望ましい状態に変化したことを示している。

#### 5 まとめ

本研究では使用者のトレーニングに対するモチベーションを維持させることが可能なNIRS-NFBトレーニングシステムの開発を行った。開発したシステムの有効性を検証するために、ASD者1名を対象にNFBトレーニングを行い、トレーニングの前後でWM課題・NWM課題時の脳活動とPOMSの結果を比較した。

その結果、NFBトレーニングによってWM課題時の脳活動が健常者と同様の活動パターンに変化することを確認した。また、POMSの結果についてもトレーニングの前後で変化があり、TMD得点は減少した。これらの結果から開発した発達障害治療のためのNIRS-NFBシステムがASD者の治療に利用できる可能性を示した。

今後は、実験参加者数を増やし、システムの有効性の検証を行う予定である。

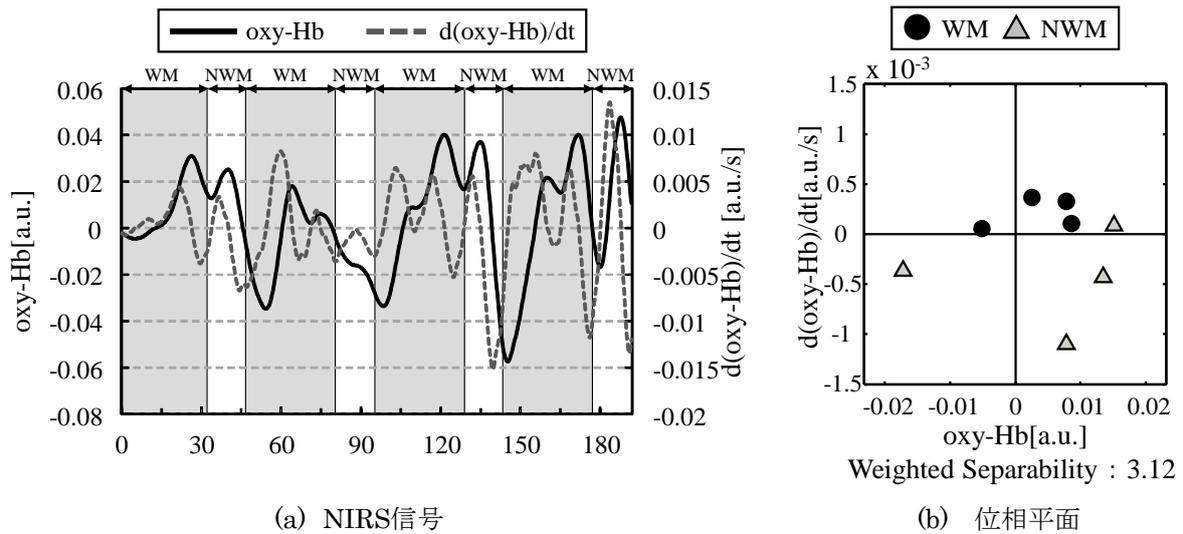


図3 NFBトレーニング前の脳活動

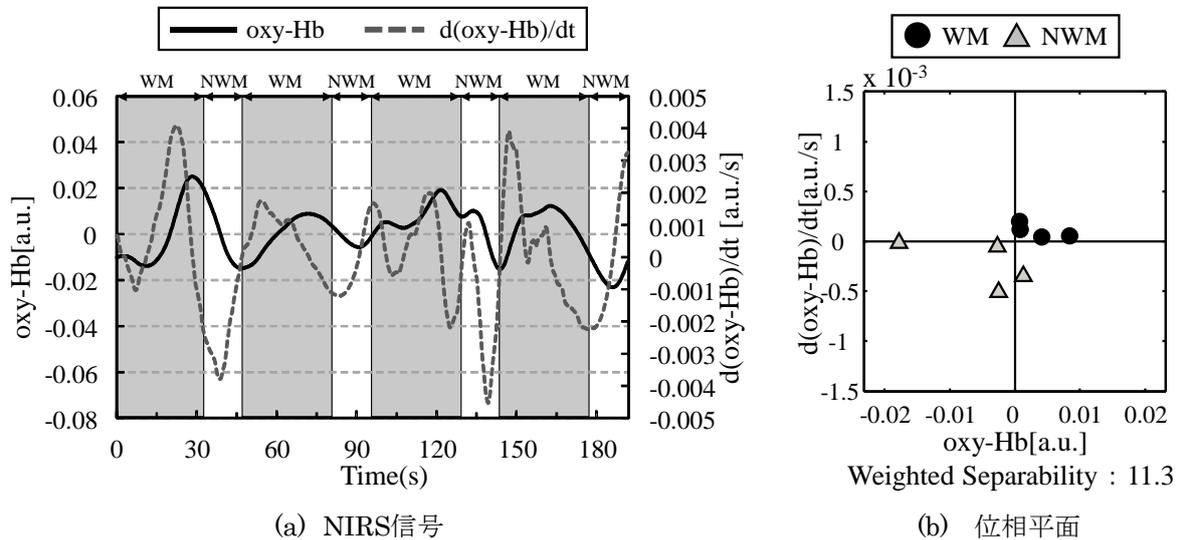


図4 NFBトレーニング後の脳活動

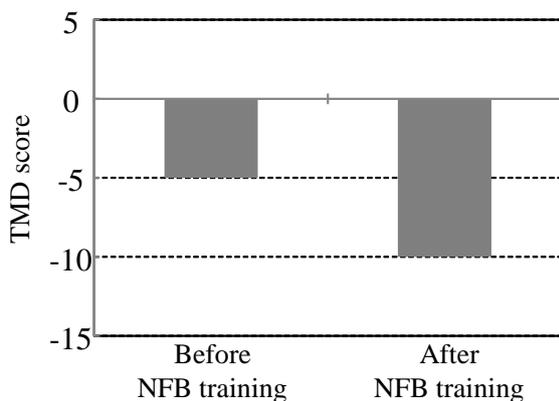


図5 POMSの結果

「参考文献」

1) Naoko Narita, Akiyuki Saotome et al., "Impaired prefrontal cortical response by

switching stimuli in autism spectrum disorders", Journal of Pediatric Neurology, Vol.10, No.2, (2012) p.87-94.

2) 柳澤一機, 綱島均, NIRS信号の特徴平面による評価手法の提案, 第4回NU-Brainシンポジウム, (2014) p.3.

3) 加納慎一郎, 非侵襲計測によるBCI: ユーザに働きかけるBCIを目指して, 第2回NU-Brainシンポジウム, (2011) p.25-39.

4) 福長一義, 大貫雅也 他, 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, (2011) p.2-11.

5) 柳澤一機, 綱島均, 中村のぞみ, 成田奈緒子, 酒谷薫, NIRS信号による発達障害の診断補助指標の開発, 第16回光脳機能イメージング学会, (2014).