

発達障害者を対象とした NIRS-NFB システムの開発とその評価

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 文教大・教育 成田 奈緒子

1 はじめに

近年、発達障害についての研究が盛んに行われている。発達障害とは先天的な要因により生まれつき脳の発達が通常と異なっているため、特に幼少期に症状が現れる発達遅延の総称である。現在の発達障害の治療法は薬物投与などが主であるが、副作用による不眠などの身体的負担が大きな問題とされている。先行研究として成田らは非侵襲的脳機能計測器である近赤外分光法(NIRS: Near-infrared spectroscopy)を用いて、発達障害の1つにあたる自閉症スペクトラム(ASD: Autistic Spectrum Disorder)者の前頭前野背外側部における活動を計測した結果、健常者と異なる活動を確認した¹⁾。

また、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トレーニング(NFB: Neurofeedback)が発達障害者の支援方法として注目されている。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。このNFBトレーニングを用いることでASD者の脳活動を健常者のような活動パターンに変化させることができれば、症状の改善が行える可能性がある。

発達障害の支援を目的としたNFBトレーニング法として脳波を用いた方法²⁾が挙げられるが、成田らの報告により特定の脳部位での活動の違いを計測するため、脳波より空間分解能の高いNIRSを用いることでより効率的なNFBトレーニングシステムを実現できる可能性がある。

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³⁾。その結果、トレーニングによる脳活動の変化が確認された。しかし、脳活動情報の提示方法が単純な視覚刺激であるため、一部の使用者においてはトレーニングに対する意欲を持続できないことが問題点として挙げられる。

特に、発達障害者を対象とする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向上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4名を対象にNFBトレーニングを行う。

2 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。

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。

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

Evaluation and Development of NIRS-NFB system for developmental disorder

Nozomi NAKAMURA, Kazuki YANAGISAWA, Hitoshi TSUNASHIMA
and Naoko NARITA

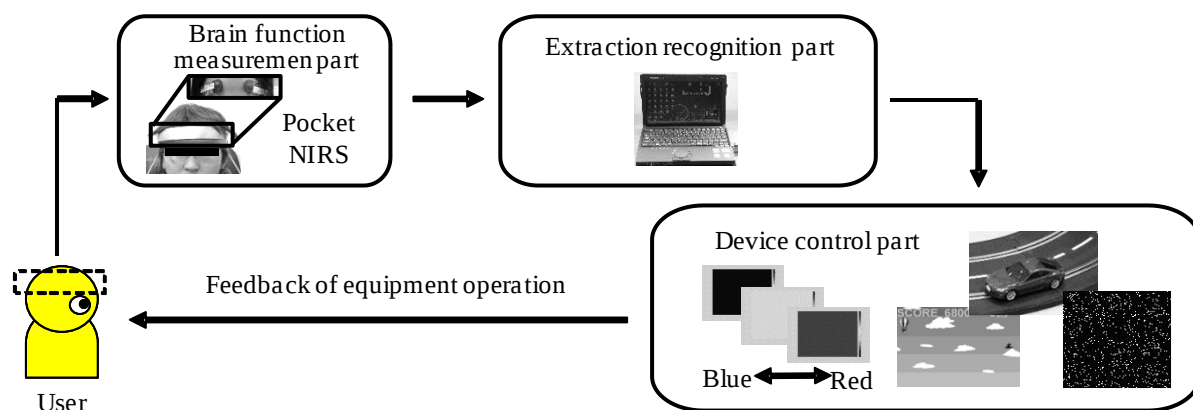


Fig.1 Portable NIRS-NFB system

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、仮想ポートにて、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るため、本研究では計測したNIRS信号に移動平均をかけることでこれらの影響を取り除いた。

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

機器制御部では、解析アプリケーションから送信されてきた脳活動レベルの判定結果に応じて機器の制御を行う。制御機器の1つとして、脳活動レベルを色に変換し視覚刺激として表示するものがある。これは脳活動レベルが高いほど濃い赤色、脳活動レベルが低いほど濃い青色に変化し、使用者はディスプレイを通じてこの色の変化を認識し、自身の脳活動を把握することができる。

本システムは使用者のモチベーションの維持を行うために、視覚刺激のみでなく脳活動レベルが高いほど早く走るスロットカー(KYOSHO製 Dslot43)や脳活動状態に応じて気球を上下させることで、障害物を回避するゲームなどの様々な機器の制御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¹⁾。この研究では認知記憶課題であるワーキングメモリ (WM: Working Memory) 課題とノンワーキングメモリ (NWM: Non Working Memory)の2種類の課題を設定し、脳活動の計測を行った。その結果、健常者と比べASD者において前頭前野左背外側部の脳

活動が異なっていることが確認された。これらの結果から開発したシステムを用いて、前頭前野左背外側部の脳活動をフィードバック情報としてNFBトレーニングを行った。さらにNFBトレーニングの効果を検証するためトレーニング前後にて効果検証実験を行い、その結果を比較検討した。

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4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制御機器部へと転送する。制御機器は基本的に色を用いた視覚刺激とし、モチベーション維持が難しい実験参加者には参加者自身が興味を示した課題を用いて実験を行った。

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試行を行った。タスク中は画面上に表示された色を濃い赤色に変えるように意識を集中し、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)、ASD者の特性傾向の計測を行える質問紙であるASD特性テストの計測をそれぞれ行った。実験参加者はASD者4名とし、文教大学の倫理委員会(承認番号: 25-001)の承認を得て、実験を行った。

4.3 効果検証実験

効果検証実験として用いたWM課題とNWM課題を図2に示す。WM課題では、色や形の異なる図形を4個呈示し記憶してもらい、その後呈示された図形を指で示し、NWM課題では、8個の図形を画面上に呈示し、画面上部枠内の図形を配置順に指で示すように教示した。

WM課題の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、NWM課題は15秒とした。WM課題とNWM課題を1セットとして、6回繰り返した。

5 実験結果

5.1 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く、測定値が相対変化の値であるため、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る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³⁾。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³⁾。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。

本実験においてもっとも脳活動に変化が見られた実験参加者1名(実験参加者C)のNFBトレーニング前後のWM課題時のNIRS信号位相平面の結果を図3に示す。

図3(a)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3(b)より、NFBトレーニング後では、トレーニング前に比べNIRS信号はWM・NWM課題時ともに再現性が高く信号の特徴が明確である。また位相平面上では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確認できる。位相平面の第1象限はoxy-Hbと微分値が共に高い領域であり、WM課題で脳が賦活していることを示している。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。これは健常者の一般的な脳活動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。他の実験参加者1名においては実験参加者Cと同様の結果が得られた。他の2名においては健常者の一般的な脳活動のような信号の変化は確認できなかったが、脳活動がトレーニングを行うことで変化していることは確認することができた。これらのことから、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た。

5.2 気分尺度の評価

図4に実験参加者4名の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

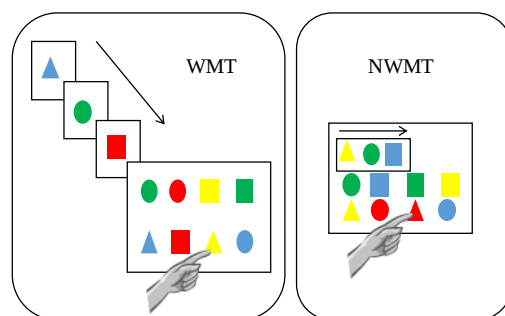


Fig.2 Working Memory and Non Working Memory Task

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4より、前実験参加者4名においてトレーニングの前後でTMD得点が低下している。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。

次に、図5に実験参加者4名のNFBトレーニング前後におけるASD特性テストの結果を示す。ASD特性テストではASD者の特徴傾向を示すPARSと注意多動性傾向を示すAD/HDを計測することができる。PARS・AD/HD両方の値が高いほどその傾向が高いことを示す。ASD特性テストとは本来ASD者本人を最もよく知る人物に回答してもらうことで客観的にASD者の特性を確認する質問紙だが、ASD者などの発達障害者は自身の症状に対する自覚傾向が希薄であることが知られているため、本研究では自身の症状の自覚を目的として実験参加者本人に回答をもらい、PARS値からNFBトレーニング後のASDの特性傾向の変化を確認する。

図5より、トレーニング前後でPARS値は実験参加者によって異なっていることが確認できる。特に脳活動に変化を確認できた実験参加者Cにおいてはトレーニング後において値が減少しているが、他の実験参加者3名においては増加していることが確認できる。これは自身の症によって各々自身の症状を自覚したことによってこのような結果が得られたと考えられる。

このことから全実験参加者において、NFBトレーニングによって自身の症状に対する自覚傾向が確認できたと考えられる。

5 まとめ

本研究では使用者のトレーニングに対する意欲を向上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4名を対象に

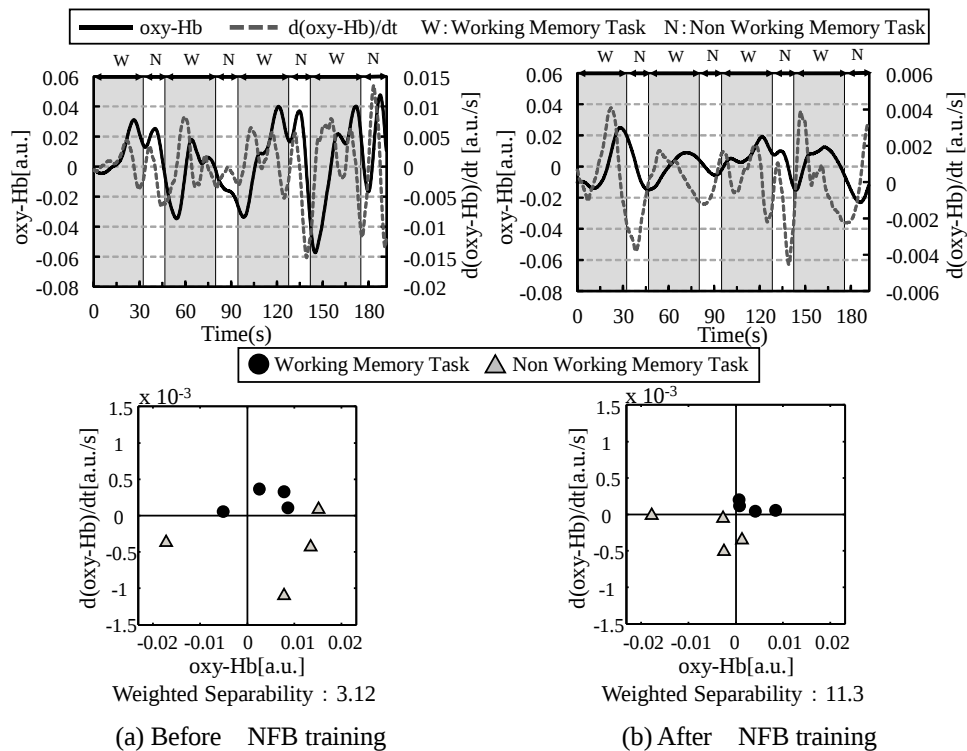


Fig.3 Change in the phase plane

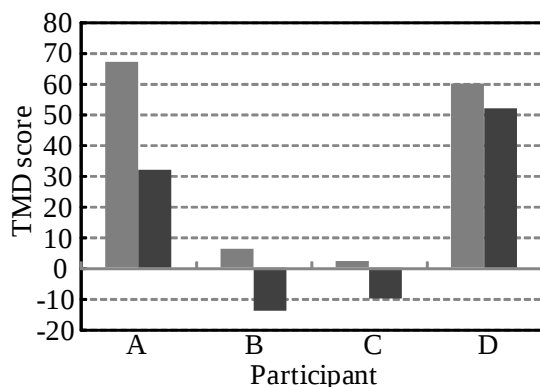


Fig.4 Result of POMS

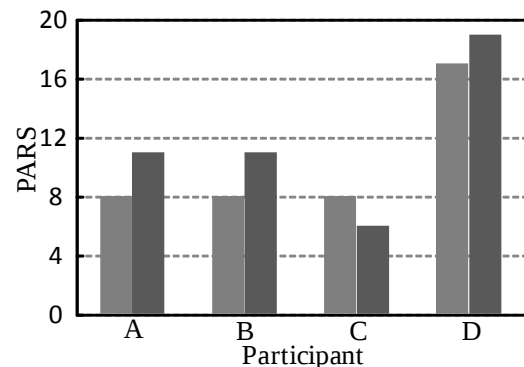


Fig.5 Result of ASD characteristic test(RARS)

NFBトレーニングを行い、トレーニング前後でWM課題・NWM課題時の脳活動とPOMSおよびASD特性テストの結果を比較した。

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およびASD特性テストの結果よりトレーニング前後で気分の改善や自身の症状に対する自覚傾向が確認できた。これらの結果から開発したNIRS-NFBシステムがASD者の症状改善へとつながる可能性を示した。

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。

「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) Mirjam E.j. Louijer , Jan M.N de Moor, et.al , Neurofeedback improves executive functioning in children with autism spectrum disorders , Research in Autism Spectrum Disorders , Vol.3 , Issue 1 , (2009) , pp.145-162
- 3) 柳澤一機 他, 前頭前野を対象としたニューロフィードバックトレーニングにおけるNIRS信号の評価手法の提案, 日本人間工学会, Vol.51, No.1, (2015), pp.42-52