

機能的近赤外分光装置(fNIRS)を用いた 作業負荷時の高次脳機能計測

日大生産工(院) ○柳沼 健 日大生産工(院) 小島 崇 日大生産工 綱島 均
日大生産工 丸茂 喜高 日大・医学 塩沢 友規

1. 緒言

現在多くの人々が、自動車・航空機・鉄道などの交通手段を利用している。これらの交通手段は人間により運転が行われるため、ヒューマンエラーによる事故が発生してしまう。そのため運転者の運転作業による負荷を、軽減し支援することで安全を確保する様々な技術の開発・実用化が進められてきた。例を挙げると、自動車における、前車と自車の車間距離を一定に保つACC(Adaptive Cruise Control)、航空機におけるAFCS(Automatic Flight Control Systems)、鉄道におけるATS(自動列車停止装置)などがある。

これらの支援システムによって、運転者へのワークロードは軽減される。しかし、運転者の運転への集中力の低下などにより、予期せぬ事故が引き起こされる可能性も考えられる。よって運転者を支援し、なおかつ集中力を低下させないための適切な負荷を与える必要がある。現在、様々な生体反応からワークロードの評価が行われ、運転支援システムが研究・開発されている。

運転を行う際運転者は、知覚・認知・判断を連続して行い運転をしている⁽¹⁾。情報を目や耳などの感覚器から受け取り、集めた情報から判断を行ったうえで脳から操作の指令を出している。つまりは、運転のプロセスである知覚・認知・判断は脳活動によるものと考えられる。このような知覚・認知・判断の情報に基づいて行動を計画し実行する脳の論理的な思考を、高次脳機能と呼ぶ⁽²⁾。そこで脳血流から脳機能の計測を行うことができる、機能的近赤外分光装置(fNIRS)を用いて実験を行う。その際、ワークロードを評価するために、負荷に対する脳活動が計測しやすい課題として、暗算による負荷を用いる。

そこで本研究では脳機能計測による客観的評価と、被験者自身の主観的評価によりワークロードを評価し、その内容と結果について述べる。

2. 機能的近赤外分光法

脳機能を脳血流から計測する技術として、機能的磁気共鳴画像(fMRI)と機能的近赤外分光法(fNIRS)がある。fMRIは計測中に体動制限があり、また時間分解能も低い。一方でfNIRSは体動制限が少なく、被験者に自然な状態で実験が行える。また時間分解能が高いため、ワークロードの違いによる脳血流の、時間による変化を計測することが可能である。

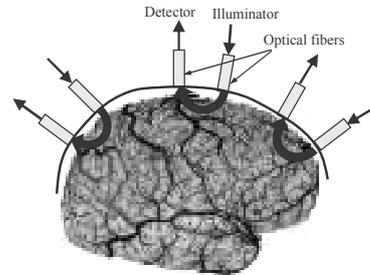


Fig.1 Diagram of Near-Infrared Spectroscopic Measurement

図1に示すように近赤外光を照射することで脳内の血流動態変化から脳活動を検出する装置である。血流動態の変化は、近赤外線を吸収しやすいoxy-Hbとdeoxy-Hbの量の変化によって計測する。本研究ではこのfNIRSを用いて脳活動を検討する。

3. 暗算課題時の脳機能計測

3.1 ワークロードの設定

作業負荷時の高次脳機能計測として暗算課題を用いた。暗算課題は先行研究⁽³⁾をもとに、論理的思考を必要とする複雑な計算(難易度高)と、そうでない計算(難易度低)で以下のように設定した。

難易度低タスク:1桁の繰り上りの無い足し算

難易度高タスク:小数点の引き算と割り算

(例) $234 \div (0.61 - 0.35)$

Measurement of Higher Brain Function with Workload by using functional Near-Infrared Spectroscopy(fNIRS)

Takeru YANAGINUMA, Takashi KOJIMA, Hitoshi TSUNASHIMA,
Yoshitaka MARUMO and Tomoki Youke SHIOZAWA

3.2 実験方法

暗算課題を作業負荷として、脳機能計測を行った。実験のデザインを図2に示す。実験はタスクレートの順番で、1セットをタスク60秒とレスト30秒で難易度低-難易度高の順番(180秒)で三回繰り返し、合計540秒行った。

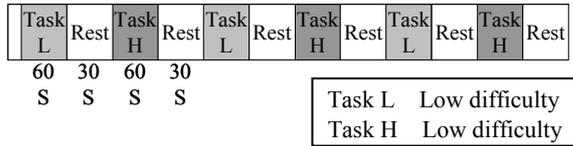


Fig.2 The block design of the experiment

図3に実験風景を示す。タスク時は紙面に印刷した問題を記入によって解答してもらい、レスト時には紙面に印刷した十字を見てもらい、開眼安静として、できるだけリラックスしてもらった。



Fig.3 Situation of Experiment Mental Arithmetic

被験者は健康な20代女性と男性、各1名とした。図4のように、7×3の32チャンネルの光ファイバを配置して前頭部の脳血流変動を計測した。

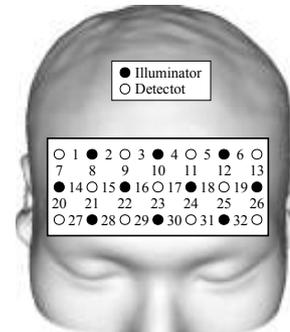


Fig.4 Position of Optical Fibers and Channels

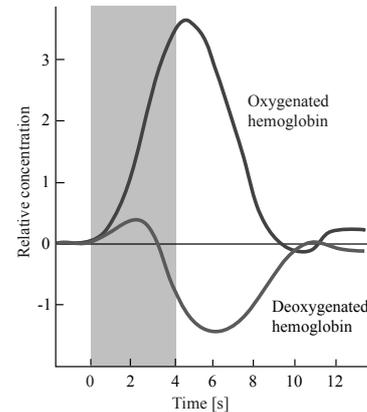


Fig.5 Hb Concentration Change due to Neural Activity⁽⁴⁾

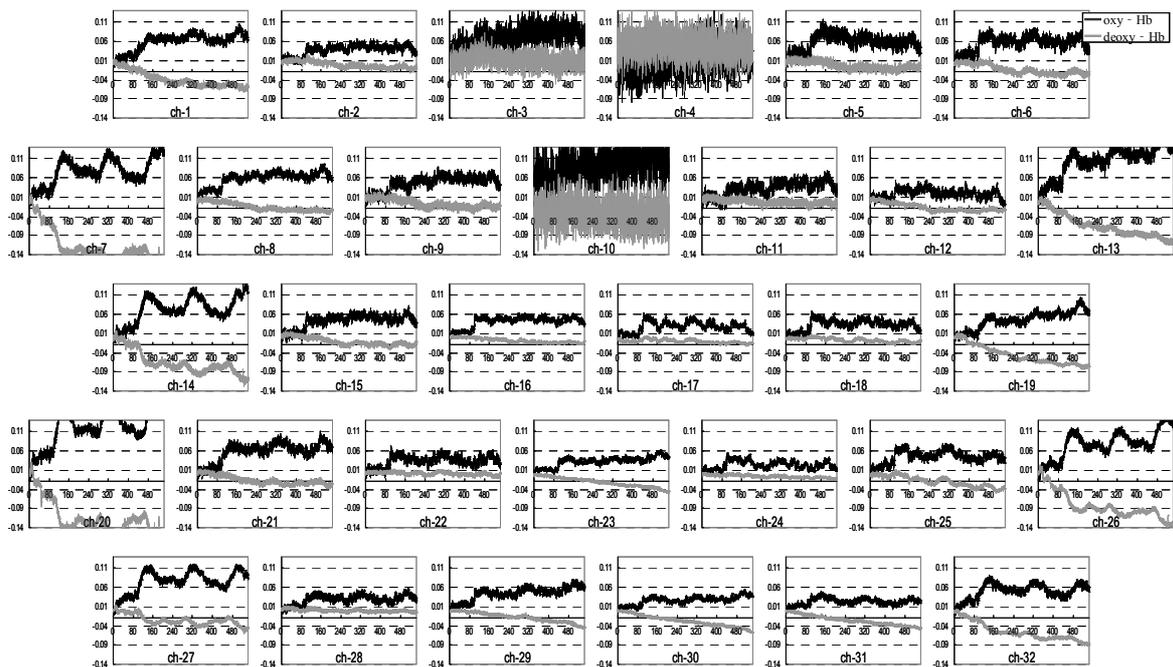


Fig.6 Hb Concentration Changes in Frontal during Operation

3.3 NASA - TLXによる作業負荷の評価

本実験では、暗算によるワークロードをfNIRSによる客観的評価との相関を図るために日本版NASA-TLX⁽⁵⁾により、被験者のメンタルワークロードの測定を試みた。NASA-TLXは精神的要求、身体的要求、時間的要求、作業成績、努力、フラストレーションの6つの尺度から構成されている。被験者はワークロードを評価する前に、自分がその作業を遂行する際のワークロードの要因として、どちらがより重要と思われるか、という基準で尺度の重要度を一対比較する。

15回の一対比較の判断の中で何回選択されたかが各尺度の重みとなる。作業のワークロードを評価する際には、被験者は6つの尺度ごとに両極端の間に引かれた線分の中の適当な位置に印をつける。

印の位置を0~100の評価として読み取り、これに一対比較によって定められた尺度ごとの重みをかけて平均したものがWWL得点である。

3.4 計測結果

一般に、脳が賦活する際のoxy-Hbとdeoxy-Hbは図5のような傾向をとる。図6に前頭部の全チャンネルの計測結果を示す。傾向として左右外側部で暗算課題とともに、oxy-Hbが上昇しdeoxy-Hbが減少しており、この結果から暗算課題に関して脳が賦活していることがわかる。しかしfNIRSの信号は、血圧変動・心拍・体動変化の影響や、測定装置のノイズなど脳活動に由来しない信号も含むため、これらを分離する信号処理が必要になる。

4. 多重解像度解析による

脳血流変動の分解と再構成

4.1 離散ウェーブレット変換による

多重解像度解析

ウェーブレット変換⁽⁶⁾は、マザーウェーブレットと呼ばれる小さな波 $\psi(t)$ を平行移動、伸縮させて解析したい波形 $S(t)$ の局所的な様子を表し、これを元に波形を解析していくものである。離散ウェーブレット変換は次式で与えられる。

$$D_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)\psi_{m,n}(t)dt \quad (1)$$

通常、離散ウェーブレット解析の2進格子配置は、正規直行となるように選ばれる。これにより、原信号の完全な再生が冗長なしに可能になる。多重解像度解析(MRA: multi-resolution analysis)は、離散ウェーブレット変換を用いて信号を階層構造に分解するものである。対象の波形 $S(t)$ をいくつかの近似成分(低周波数成分)と詳細成分(高周波数成分)に分解する。レベル j における信号の詳細成分は

$$d_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{m,n}\psi_{m,n}(t) \quad (2)$$

となるので、原信号 $S(t)$ は、次のように表現できる。

$$S(t) = a_j(t) + \sum_{m=1}^j d_m(t) \quad (3)$$

ここで、 d_m は詳細成分、 a_j 近似成分である。

4.2 暗算課題に関する信号の抽出

暗算課題に関する信号を抽出するために、図6に示した生のデータに多重解像度解析にかけて再構成した。タスク関連の変化が顕著であった27チャンネルのoxy-Hbの多重解像度解析の結果を図7に示す。暗算時、非暗算時の反復が90秒であるので、d9成分がタスクに関連する変動となる。ここではタスクに関連するd8・d9・d10を加算して信号を再構成した。

再構成した信号(32チャンネル)を図8に示す。タスクに非常に関連した結果であることがわかる。また、難易度低と難易度高の暗算課題遂行時の脳血流では、難易度高の暗算のほうが賦活の度合いが大きいことが見られる。

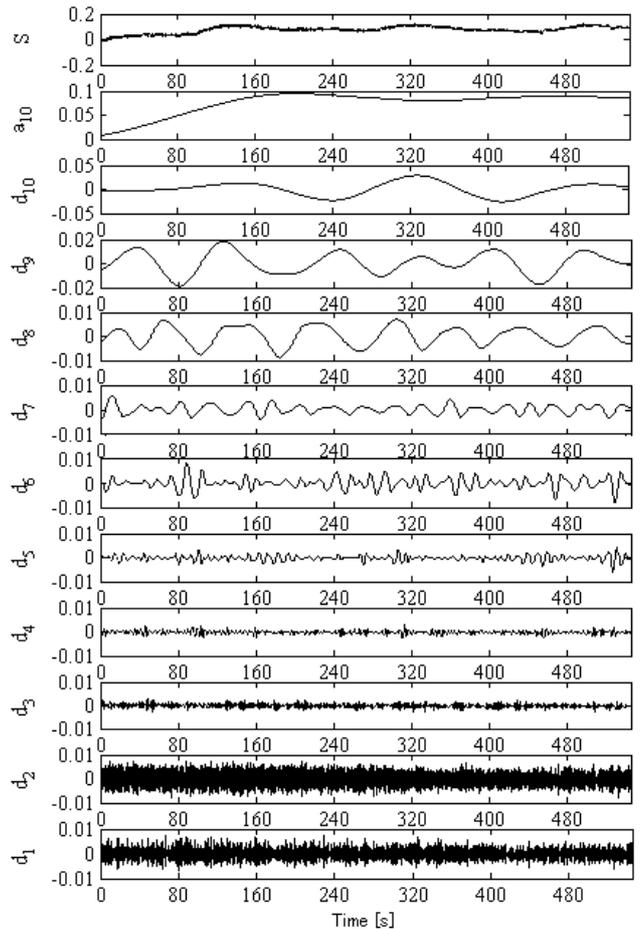


Fig. 7 Decomposition of oxy-Hb in Channel 27

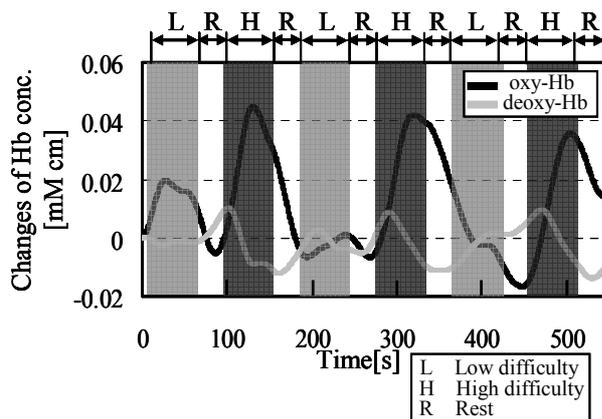


Fig.8 Reconstructed fNIRS Signal

4.2 NASA - TLXとfNIRS信号

今回の実験で得られたWWL得点を図9に示す. この結果から難易度の低い暗算よりも, 難易度の高い暗算に対するワークロードのほうが高いことがわかる. 図8に示したfNIRSから得られた信号を再構成した解析結果と, 図9に示したNASA - TLXにより得られたワークロード得点を比較すると, fNIRSにより得られた信号では, 難易度低と難易度高の暗算課題遂行時では, 難易度高の暗算のほうが賦活の度合いが大きいたことが見られた. また, NASA - TLXにより得られたワークロード得点は難易度の低い暗算課題よりも, 難易度の高い暗算課題のほうがワークロード得点が高かった. そしてfNIRSにより得られた脳血流とNASA - TLXにより得られたワークロードの間に, 相関が見られた.

5. まとめ

作業負荷時の高次脳機能を計測するために, fNIRSを用いて暗算課題中の脳機能計測を行った. 暗算の難易度によって脳の活動が違いたことが確認でき, 難易度低よりも難易度高の問題のほうが賦活の度合いが大きかった. これにより, 知覚・認知・判断の情報に基づいて行動を計画し実行する脳の論理的な思考である, 高次脳機能計測が可能であることが示唆された. また主観的評価法であるNASA-TLXを用いて作業負荷を計測を行った. その結果, fNIRSを用いて計測できた脳活動の結果との相関を得ることができた. この結果から, fNIRSより得られた脳血流から, ワークロードを評価することができる可能性があることが示唆された.

今後, 暗算課題や, それ以外の高次脳機能を必要とする実験と作業負荷の関係について, 被験者数を増やすことや, fMRIや血圧, 心拍, 脳波との同時計測を行い, 脳血流変動の生理学的意味について検討する必要がある.

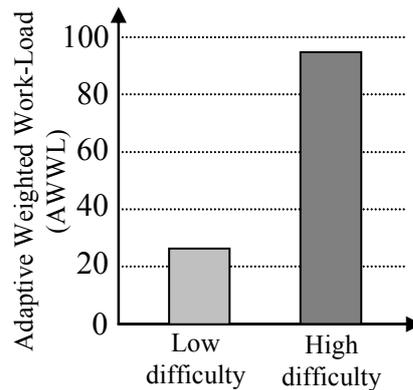


Fig.9 Workload evaluation by NASA-TLX

参考文献

- (1) 江部和俊, 大桑雅幸, 稲垣大: ドライバの視聴覚認知に伴う負担度評価, 豊田中央研究所R&Dレビュー, Vol.34, No.3, (1999)
- (2) 鈴木, 酒田: 高次脳機能の生理学, 医学書院, (1988)
- (3) 川島隆太: 高次脳機能のブレインイメージング, 医学書院, (2002)
- (4) S. A. Huettel, A. W. Song and G. McCarthy: Functional Magnetic Resonance Imaging, Sinauer Associate, Inc. (2004)
- (5) 芳賀繁, 水上直樹: 日本語版NASA-TLXによるワークロード測定, 各種室内実験課題に対するワークロード得点の感度, 人間工学, 32巻2号, 71-79(1996).
- (6) I. Daubechies: Orthonormal bases of compactly supported wavelets, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 41, No. 7, p. 909-996 (1988)