

自動車運転時における前頭連合野の高次脳機能計測

日大生産工(院) ○柳沼 健 日大生産工 綱島 均 日大生産工 丸茂 喜高
日大生産工(院) 小島 崇 筑波大(院) 伊藤 誠 筑波大(院) 稲垣 敏之

1. 緒言

近年、ドライバの運転における負担を軽減し、支援することでより安全な運転を確保するようなシステムの研究・開発が行われており、その一部はすでに実用化されている。しかし、運転者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。そのため、運転における注意を認知工学的、人体生理学的な立場から検討することが必要である。

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。情報を目や耳などの感覚器から受けとり、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。

脳活動を評価し得る方法としては、非侵襲画像診断法として最近注目されている機能的磁気共鳴画像 (fMRI: functional magnetic resonance imaging) が考えられる。fMRI検査は、磁気を用いて脳内の酸素化ヘモグロビン濃度変化の局在を観察するもので、言語や認知等、脳の高次機能の解明に大きな貢献をしてきている。しかし、fMRIは計測中に体動制限があり、運転操作時の評価を行うにあたっては難点が多い。

これに対して、近年、近赤外分光法 (NIRS: Near-Infrared Spectroscopy) と呼ばれる検査法が普及してきている。これは、近赤外光により組織の酸素化ヘモグロビンあるいは脱酸素化ヘモグロビンの増減を体表から評価するものであり、非侵襲的検査法である。

機能的近赤外線分光法 (fNIRS: functional NIRS)、光トポグラフィは、NIRSの技術を用いて大脳の機能局在を広範囲にマッピングして評価することが可能である¹⁾。NIRS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。今後このような評価を行う上で有望な検査機器であると言える。現在、fNIRS計測による暗算課題や列車シュミレータを用いた実験における脳活動が報告されている²⁾³⁾。

そこで本研究では、機能的近赤外線分光法 (fNIRS) を用いて、運転操作に対応する脳活動を捉えられるかどうかについて、ドライビングシュミレータを用いた実験により検討を行う。

2. 機能的近赤外分光法 (fNIRS) の原理

機能的近赤外分光法は、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の活動を捉える非侵襲的計測法である。神経活動が生じることにより局所脳血流が増加し、血中のヘモグロビン濃度が変化する。機能的近赤外分光法は、波長700~900nmの近赤外光を組織に照射することにより、透過光、散乱光から酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) および脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) の濃度変化を計測できる。

3. 自動車運転時の脳機能計測

3.1. ドライビングシュミレータ

図1に示すように、ドライビングシュミレータを使用し、ドライバの脳機能計測を行った。脳機能計測と合わせてドライバの運転操作を記録した。また、図2に示すように小型カメラを用いて、実験映像、被験者の挙動についても記録した。

Measurement of Drivers Higher Brain Function in Prefrontal Cortex

Takeru YANAGINUMA, Hitoshi TSUNASHIMA, Yoshitaka MARUMO,
Takashi KOJIMA, Makoto ITOH and Toshiyuki INAGAKI

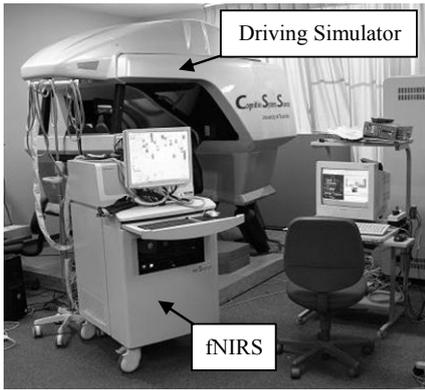


Fig. 1 fNIRS and Driving Simulator



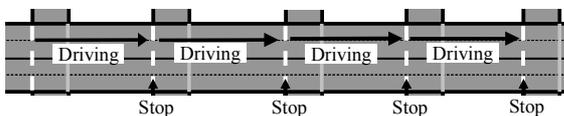
Fig. 2 Measurement of brain function of driver

3.2. 運転課題

運転操作に対応する脳活動を捉えられるかどうか検討するため、発進と停止を繰り返す課題を設定した。被験者は図3 (a) のような運転画面で実験を行った。図3 (b) に示す区間を、口頭による合図を受けて発進させ、市街地の直線道路を40km/hで走行し、次の交差点の停止線手前に停止させる。これを20秒間ずつで4回繰り返し、全体で200秒の運転課題とした。図4に実験デザインを示す。



(a) Images of Front of View in Driving



(b) Driving Section
Fig. 3 Driving-Stopping Task

3.3. 計測方法

fNIRSを用いて、運転中のドライバの前頭連合野の脳活動を計測した。計測装置は、島津製作所製、光脳機能イメージング装置 OMM-3000を用いた。図5に光ファイバの配置と計測位置を示す。数字は計測チャンネルを表し、42チャンネルを計測した。被験者は、普通自動車運転免許を保有する健全な男女6名とした。

3.4. 脳機能計測結果

一般に、脳が賦活してもとに戻る場合のoxy-Hbとdeoxy-Hbの変化は、図6に示されるような傾向をとることがわかっている⁴⁾。図7に、被験者Aの全チャンネルの計測結果を示す。両外側において、oxy-Hbが上昇し、deoxy-Hbが減少している。

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関係しない信号も含むため、詳細な評価を行うには、これらを分離する信号処理が必要になる。

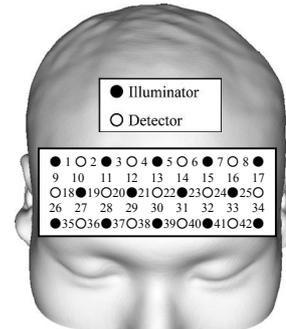


Fig. 5 Position of Optical Fibers and Channels

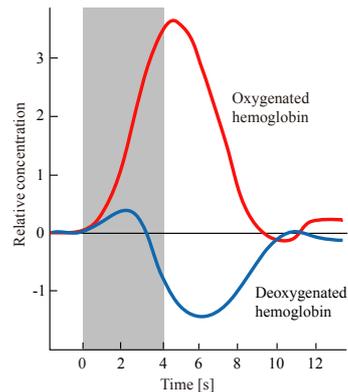


Fig. 6 Hb Concentration change due to neural activity⁴⁾

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⁵⁾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。

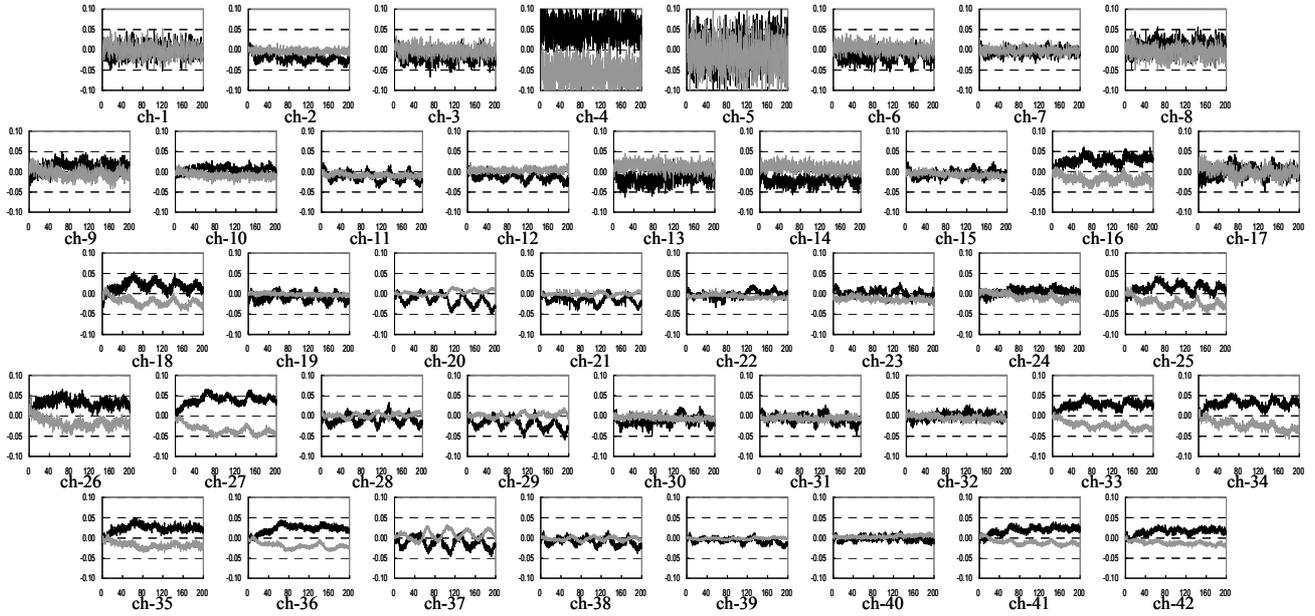


Fig. 7 Hb Concentration Changes in Frontal

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

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。マザーウェーブレット $\psi(t)$ は、コンパクトサポートであり正規直交基底となるDaubechiesのウェーブレットを用いる。このウェーブレットは、生成指数 M によって正則性が変化する特徴を持つ。今回は、比較的高次の生成指数を用いることとし、 $N=7$ とした。

4.2. fNIRS 信号の分解と再構成

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8に示す。

近似成分 (a_{10}) に実験全体のトレンドが抽出されていることがわかる。 d_1 , d_2 は比較的大きい振幅を持つ。これは心拍による血流変動、および計測ノイズであると考えられる。

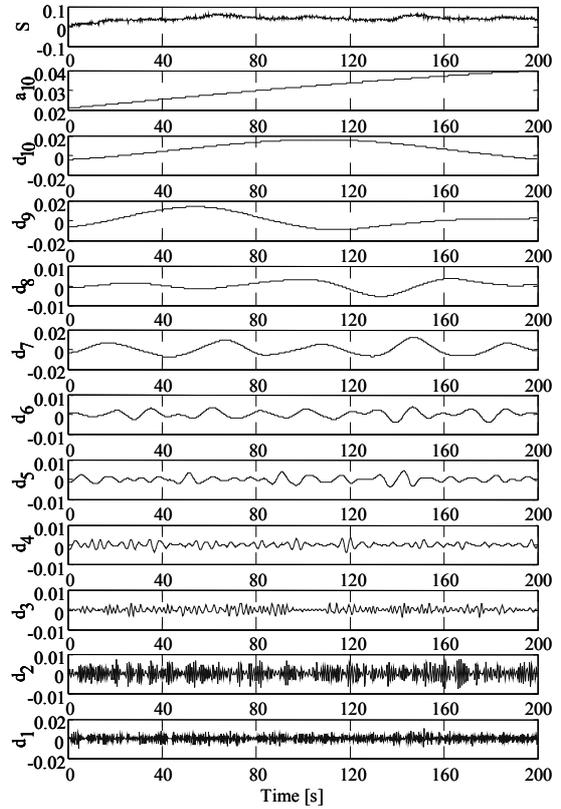


Fig. 8 Decomposition of oxy-Hb in channel 27

タスク、レストの反復が40秒であるので、 d_7 成分がタスクに関連する変動の中心成分となる。そこで、タスクに関連する d_6 , d_7 , d_8 を加算して信号を再構成した。

再構成した信号 (27チャンネル) と車両速度の関係を図9に示す。運転課題遂行時 (図中の網掛け部) に図6で示したような活動パターンが観察され、脳が賦活していることがわかる。

5. fNIRS 信号の加算平均と脳機能画像による解析

多重解像度解析の結果に加算平均を行い、各運転での脳活動のばらつきをなくした脳活動を解析した。図10 (a) に多重解像度解析を行った27チャンネルにおける、4回の走行を加算平均した結果と運転時のアクセル、ブレーキ操作量の関係、図10 (b) に再構成したoxy-Hb信号から作成した脳機能画像を示す。

図10 (a) の操作量は、正の値がアクセル操作量、負の値がブレーキ操作量を示す。口頭による合図を受けてブレーキを緩めて走行を開始してから、停止するまでoxy-Hbが上昇し、その後、停車中に減少している。このことから、運転作業中に脳が賦活していることがわかる。また、図10 (b) に示す脳機能画像から、①の運転開始時には低かった脳活動が、②の運転課題終了時には前頭前野両外側部で脳活動が上昇していることがわかる（図中の白色部分）。また③の停車中には左右両外側部でoxy-Hbが低下していることから、走行中に賦活した部位がもとの状態に戻るためoxy-Hbが低下していると考えられる。列車運転士を対象とした実験においても、ブレーキ操作後に同じ部分の活動が上昇されていることが報告されている⁶⁾。このことは、ブレーキ操作を行うための、小脳の内部モデルと前頭背外側部との関連を強く示すものと考えられる。

6. まとめ

機能的近赤外線分光法 (fNIRS) を用いて、前後方向の運転操作 (発進停止) に対応する脳活動を捉えられるか、ドライビングシミュレータを用いた実験により検討を行った。その結果、ブレーキ操作に関連する脳活動が計測された。

運転により得られたfNIRS信号を、ウェーブレット変換を用いた多重解像度解析により分解、再構成した結果、運転課題遂行時の脳活動を明瞭にとることが可能となった。さらに、再構成したfNIRS信号に加算平均を行い、脳機能画像を作成した。その結果、運転中に前頭前野背外側部の脳活動が上昇することがわかった。

今後は、市街地での運転や、危険を予測するような運転などの、より実際の運転に近い実験を行い、自動車運転時の脳活動を計測する必要がある。

なお本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究A (課題番号18201031 非拘束モニタリングにもとづく追突防止支援と過信抑制インタフェース: 研究代表者 筑波大学大学院 伊藤誠) の補助、および平成19年度日本大学学術助成金 (総合研究) の助成を受けた。

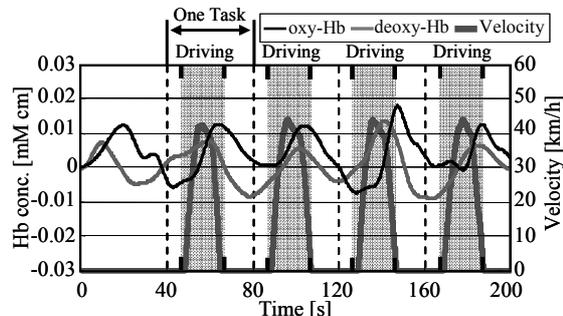
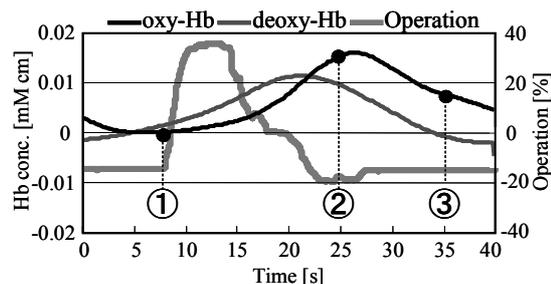
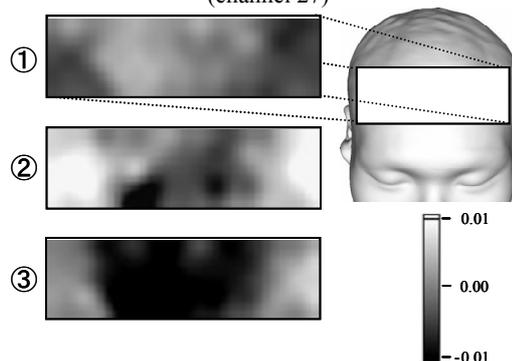


Fig. 9 Task-Related fNIRS Signal and Vehicle Speed (channel 27)



(a) Averaged fNIRS Signal and Car Operation (channel 27)



(b) Functional Brain Imaging

Fig. 10 Result of Driving-Stopping Task

参考文献

- 1) Y.Hoshi: Development of Functional Near Infrared Imaging System, NIRStation, INTERNATIONAL, REVIEW, OF NEUROBIOLOGY, Vol. 66, p.237-268 (2005)
- 2) 小島, 柳沼, 綱島, 広瀬, 清水, 塩沢, 泰羅, 土師: 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, 自動車技術会学術講演前刷集, No.60-07, p.19-22 (2007)
- 3) 綱島, 小島, 塩沢: 機能的近赤外分光法による列車運転時の脳機能計測, 自動車技術, Vol.60, No.5, p.81-86 (2006)
- 4) S. A. Huettel, A. W. Song and G. McCarthy: Functional Magnetic Resonance Imaging, Sinauer Associate, Inc., (2004)
- 5) I. Daubechies: Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF Regional Conference Series In Applied Mathematics: Society for Industrial and Applied Mathematics, No. 61 (1992)
- 6) 小島, 綱島, 伊藤, 塩沢: 機能的近赤外分光 (fNIRS) 装置を用いた列車運転時の高次脳機能計測, 人間工学, Vol.43, No.4, p.193-200 (2007)