3203 自動車運転時の脳活動計測 (前方衝突警報がドライバの脳活動に及ぼす影響)

Measurement of driver's brain activity
(Effect of Forward Collision Warning System on Driver's Brain Activity)

○学 若林 翔太 (日本大院) 学 柳沢 一機 (日本大院) 正 綱島 均 (日本大)

正 丸茂 喜高 (日本大) 伊藤 誠 (筑波大院) 稲垣 敏之 (筑波大院)

Shouta Wakabayashi, Graduate School of Nihon University, 1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba

Kazuki Yanagisawa, Graduate School of Nihon University

Hitoshi Tsunashima, Nihon University

Yoshitaka Marumo, Nihon University

Makoto Itoh, Graduate School of Tsukuba University

Toshiyuki Inagaki, Graduate School of Tsukuba University

This study examines the influence of driver's attention when using driving assistance system on Forward Collision Warning System (FCWS) by driving simulator experiments. Driver's brain activity is measured by near-infrared spectroscopy (NIRS). We conducted an experiment that subject followed a leading vehicle which suddenly decelerated. The brain activity of the driver without FCWS was higher than that of the driver with FCWS. Significant difference between following a leading vehicle with FCWS and without FCWS can be observed. This result is caused by the difference of the driver's attention to a leading vehicle.

Key Words: Near-Infrared Spectroscopy, Brain function, Forward Collision Warning System, Attention

1. 緒言

運転時のドライバの認知・判断を支援し、安全を確保する様々な運転支援システムが開発・導入されている。例えば、先行車への衝突を事前に検知して警報を作動させる前方衝突警報システム(FCWS)などが挙げられる。このような運転支援システムを含めた道路交通システムによる行動変化を行動適応という⁽¹⁾。しかし、運転支援システムの導入による負担の軽減やシステムへの過信によって、運転への注意力の低下する事や、危険な運轉行動をとるようになり予期せぬ事故の原因になることが考えられる。このようなネガティブな行動適応を負の適応といい、支援システム導入に伴うドライバの負の適応が報告されている⁽²⁾。そのため安全な運転支援システムの開発には、ドライバの運転時の注意を評価する必要がある。特に、運転中の知覚・認知・判断を行っている脳の活動とドライバの注意の関係について明らかにすることによって安全な運転支援システムの開発が期待できる。

脳活動を評価する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) があげられる。fMRI は、脳内の酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) が脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) に変化する際の磁気共鳴信号の増加を利用して、間接的に脳活動を測定する方法である。しかし、計測中に被験者は体を動かすことができず、運転時の測定には制限がある。一方の NIRS は近赤外光を用いて、oxy-Hb と deoxy-Hb の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、運転時の脳機能の評価を行う上で有望な方法である。

現在、NIRS 計測によるドライビングシミュレータ (以下、DS と記す) を用いた実験^(3,4)や、実車実験⁽⁵⁾が報告されている。しかし、これらの研究はドライバの運転への負担を評価しているもので、運転時の注意を脳機能から評価する研究は十分に行われていない。

そこで、本研究では、ドライバの注意について脳活動からの評価の可能性を検討した。DS を用いて先行車に追従する実験を行い、先行車急減速時における前方衝突警報の有無に

よる脳活動の違いを、NIRS を用いて計測された信号から検討した。

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 oxy-Hb, deoxy-Hb の濃度変化を計測することが可能である。検出された信号は、修正 Lambert-Beer 則により血中のヘモグロビンの濃度変化の相対値に返還される。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⁽⁶⁾。

しかし、NIRS 信号には脳活動以外のノイズ、すなわちアーチファクトが混在しているため、計測対象のタスクに関連した信号を抽出する必要がある。

3. 実験方法

3.1 実験方法

ドライバの注意について脳活動からの評価の可能性を検討するために、DS を用いて先行車追従中に先行車が急減速を行う実験を行った。実験に使用した DS を図 2 に示す。実験には、HONDA ドライビングシミュレータ (視野角 138°) を使用した。先行車の速度パターンを図 3 に示す。実験デザインは停止 15 秒、走行区間、停止 15 秒を 1 試行とした。走行区間は同じ速度パターンであると、被験者が減速のタイミングに気づく可能性が考えられる。そのため 30, 45, 60 秒の 3 種類のタスクをランダムに 2 度配置し、6 試行繰り返した。1 試行目の初めの停止のみ、エンジンの始動などの影響によって脳活動が大きくなることが考えられるため、走行前

の停止時間を 40 秒とした。

実験は前方衝突警報のある条件と、前方衝突警報のない条件を設定し、先行車追従走行を行い、そのときの脳活動を計測した。また、実験前に DS に慣れるために、数回練習走行を行った。その後、実験デザインの異なる 2 種類の先行車速度パターンを設定し、それぞれ、最初に前方衝突警報のある条件で実験を行い、その後警報なしの順で走行した。

走行コースは、カーブ地点や合流地点を有した高速道路を模擬した片側 2 車線の道路とした。その際に、被験者が車間距離を空けるなどによって車間時間に差が生じてしまうことが考えられる。そのため、先行車と車間時間を一定に保つように自車の速度制御を行い、実験条件を統一した。被験者には加速・一定速度区間では、ステアリング操作のみを行い、先行車が減速を行った場合のみ減速操作を行うように教示した。

警報は、先行車が急減速を行う 2 秒前に投影された DS 画面の中央上部に画像で呈示し、同時に音での呈示も行った。またブレーキランプ点灯による単純反応を防ぐため、先行車を減速させずにブレーキランプのみを点灯させるダミーブレーキを設定した。

3.2 測定方法

NIRS を用いて、被験者の運転中の前頭葉の脳活動を計測した。測定装置は島津製作所製、OMM-3000 を用いた。光ファイバの配置を図 4 に示す。送光ファイバと受光ファイバ間の数字が測定チャンネルを示し、全 42ch 計測を行った。

被験者は、普通自動車免許を持つ 20 代男性 8 名とした。実験の実施前には実験の趣旨説明とあわせてインフォームドコンセントを行った。また、脳活動の計測と合わせて、ペダル操作量や速度、加減速度等の運転操作を DS により記録した。

4. NIRS 信号解析

4.1 多重解像度解析と結果

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が含まれるため、詳細な脳活動の評価を行うために、これらの無関係な信号を取り除く必要がある。一般的な信号処理法としては、ERP（事象関連電位）と同様に複数回のデータを加算平均する方法が挙げられる。また、同一被験者が同じ課題を複数回繰り返す場合に脳活動の活発な状態が徐々に低下することが指摘されている。しかし、本研究のように走行時間の異なる課題を連続的に処理する場合には加算平均せずに元信号を離散ウェーブレット変換による多重解像度解析により関連した信号の身を抽出する方法が有効である。そこで本研究では、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 信号を分解し、実験課題に関連する成分について再構成を行った⁽⁷⁾。

実験中の先行車への衝突などにより実験をやり直す回数の多い、適切な注意を行なえていないと考えられる 2 名を除外した。計 6 名中の、ある被験者 1 名分の多重解像度解析を行った。前方衝突警報ありの結果を図 5 に、前方衝突警報なしの結果を図 6 に示す。図 5 (a) より、前方衝突警報を用いた場合には、走行区間において先行車追従に関連した oxy-Hb の値の変動はみられなかった。さらに、再構成した oxy-Hb 信号から脳機能画像を作成した。前方衝突警報を用いて実験を行った際の脳機能画像を図 5 (b) に示す。図中の白色部分が活動のある部位を示しており、減速操作を行っている際に、前頭葉において運転操作に関連して賦活が確認できなかった。

図 6(a)より、前方衝突警報のない場合には、走行区間にお

Fig.1 Schematic Hb concentration change due to neural activity

Fig.2 Driving Simulator

Fig.3 Speed pattern of leading car

Fig.4 Position of optical fibers and channels

Fig.5 Result of following a leading vehicle with FCWS

いて先行車追従に関連し oxy-Hb の値が上昇している。さらに警報のある場合と比較すると、警報のない場合に顕著に賦活していることが確認できる。また、deoxy-Hb の値も上昇しており、一般的変動とは異なっているが、前頭前野の認知課題においては deoxy-Hb が上昇する事も報告されている⁽⁸⁾。運転中のドライバーは状況を知り運転行動を起こしていることからこれらの変動はドライバーの運転操作に関連した変動で有と考えられる。次に図 6(b)に脳機能画像の結果を示す。この結果からも、運転操作に関連して前頭葉両外側部が賦活しており、減速行動を行う走行区間の終了時に顕著に賦活していることが確認できる。これらの結果は他の被験者から同様の傾向が見られた。

このことから、前方衝突警報のない場合において、運転行動に関連して前頭葉両外側部が賦活し、減速行動を行う走行区間の終了時に前頭葉両外側部の賦活が顕著になることが確認できた。この結果は、警報がないためにドライバーが先行車の減速に常に注意を払う必要があるため、脳が賦活したと考えられる。

4.2 標準得点化による加算平均

NIRS 信号はその原理上、開始時からの相対変化の値であり、このままでは、被験者間での測定値の比較や被験者全員の測定結果の加算などを行うことができないため、被験者全員の結果を評価することが難しい。そこで、多重解像度解析を行った後の oxy-Hb, deoxy-Hb それぞれのデータを各チャンネルで平均が 0, 標準偏差が 1 になるように標準得点 (Z-score) 化を行った。その結果から、前方衝突警報のない場合と、前方衝突警報を用いた場合の 2 条件の被験者 6 名分の加算平均を求めた^(4,7)。

図 7 に前方衝突警報ありの加算平均の結果、図 8 に前方衝突警報のなしの加算平均の結果を示す。図 7(a)より、運転操作に関連した oxy-Hb の値が上昇は確認する事が出来なかった。さらに、oxy-Hb 信号から作成した脳機能画像を図 7(b)に示す。図中の白色部分が活動のある部位を示しており、その結果からも運転操作に関連して、前頭葉の活動を認める事ができなかった。

Fig.6 Result of following a leading vehicle without FCWS

図 8(a)より、警報のない場合において、運転行動に関連して oxy-Hb の値が上昇していることが確認できる。さらに、脳機能画像を図 8(b)に示す。この結果についても、警報のない場合において、より前頭葉両外側部において賦活していることが確認できた。

この実験結果から、oxy-Hb の傾きに注目し、各実験条件における oxy-Hb の傾きの最大値を用いて NIRS 信号の評価を行った^(3,7)。右外側部 35ch の oxy-Hb の傾きの最大値を実験条件ごとにまとめた結果を図 9 に示す。警報なしの場合において傾きの最大値が大きくなっていることがわかる。また、t 検定を行った結果、警報の有無の条件の間に有意な差 ($p=0.05$)が確認できた。

以上のことから、前頭葉両外側部を計測する事により、ドライバーの注意について、前方衝突警報の有無における脳活動の違いから注意力評価の可能性を示した。

5. 結言

運転時のドライバーの注意について脳活動からの評価の可能性を検討するために、DS を用いて、先行車追従中に先行車が急減速する実験を行い、前方衝突警報を設定し、脳活動の計測・比較を行った。

多重解像度解析の結果、警報なしの条件において運転操作に関連して oxy-Hb の値が上昇する事が確認できた。また、警報のない場合において、前頭葉外側部の活動が減速行動を行う走行区間終了時に顕著であることが確認できた。

さらに、一般的な傾向を求めるために標準得点化によって、有効被験者 6 名分の加算平均を求めた。その結果、両条件において運転行動に関連し前頭葉両外側部の脳活動が確認できた。また、前方衝突警報なしの場合において前頭葉両外側部の賦活が顕著であることが確認できた。また、oxy-Hb の傾きの最大値に着目して t 検定を行った結果、有意な差を確認する事が出来た。

このような結果となった要因として、酒井らによって注意制御課題実施時の前頭前野の計測を行った結果、注意時に前頭葉外側部が注意制御の働きを担い、注意分配を行っている

(a) Averaged NIRS signal (channel 35)

(b) Functional brain imaging

Fig.7 Averaged result of following a leading vehicle with FCWS

Fig.9 Maximum gradient of NIRS signal

ことが報告されている⁽⁹⁾。そのことから、注意を必要とする警報なしの条件において両外側部が運転操作に関連して賦活したと考えられる。さらに警報のない場合は、常に先行車の減速に注意を払わなければならない。そのために警報のない場合において、先行車の減速に対しより多くの注意が分配され、前頭葉両外側部の賦活が顕著に現れたと考えられる。以上のことから、前頭葉両外側部を計測する事によって、前方衝突警報を用いた場合のドライバの注意を脳活動から評価する事の可能性を示した。

謝辞

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 21241041 自然な運転状況の中での人間-機械双心型多層的追突回避型マネジメント:研究代表者 筑波大学大学院伊藤誠) の補助を受けた。記して謝意を示す。

(a) Averaged NIRS signal (channel 35)

(b) Functional brain imaging

Fig.8 Averaged result of following a leading vehicle without FCWS

参考文献

- 1) OECD, Behavioural adaptations to changes in the road transport system, Paris, Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1990
- 2) 芳賀繁, 安全技術では事故を減らせない - リスク保証行動とホメオスタシス理論 -, 電子情報通信学会技術研究報告書, SSS, Vol.109, No.151, pp.9-11, 2009
- 3) 広瀬悟, 清水俊行, 南部起可, 柳沢一機, 丸茂喜高, 網島均, 土師知己, 泰羅雅登: 機能的近赤外分光装置 (fNIRS) によるドライバーの脳活動計測, 自動車技術会論文集, No.40, Vol.6, pp.681-686, 2009
- 4) Tsunashima, H, Yanagisawa, K.: Measurement of Brain Function of Car Driver Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS), Vol.2009, 2009
- 5) 清水俊行, 南部起可: 機能的近赤外分光法による実車運転時の脳活動の測定, 自動車技術会論文集, No. 41-6, pp. 1263-1268, 2010
- 6) 小川誠二, 上野照剛: 非侵襲・可視化技術ハンドブック - ナノ・バイオ・医療から情報システムまで -, 株式会社エヌ・ティー・エス, 第3章, 2007
- 7) 柳沢一機, 網島均, 丸茂喜高, 広瀬悟, 清水俊行, 泰羅雅登, 土師知己: 機能的近赤外分光装置 (fNIRS) を用いた高次脳機能計測とその評価, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.11, No.2, pp.183-192, 2009
- 8) Toichi M, Finding RL, Kubota Y, Calabrese JR, Wiznitzer M, McNAmara NK, Yamamoto K: Hemodynamic differences in the activation of the prefrontal cortex: attention vs. higher cognitive processing, Neuropsychologia, 42(5), pp.698-706, 2004
- 9) 酒井浩, 加藤寿宏: 注意制御課題実施時の前頭前野領域における血中ヘモグロビン濃度の変化 - 仮名拾いテストを用いた検討 -, 京都大学医学部保健学科紀要健康科学, 第3巻, pp.7-15, 2006