

近赤外分光法（NIRS）を用いた列車運転士の脳機能計測

日大生産工(院) ○小島 崇

日大生産工

綱島 均

日大・医 塩澤友規

1 はじめに

列車の運転は、自動車と比較して運転が単調になりやすい特徴を有しており、ヒューマンエラーの原因の一つに運転士の覚醒度低下が挙げられる。ヒューマンエラー事故の防止方策として、鉄道会社では乗務員の教育・訓練が行われている。また、バックアップとして自動列車停止装置（Automatic Train Stop: ATS）などを採用してきた。一部の鉄道では、自動列車運転装置（Automatic Train Operation: ATO）を導入し、運転を自動化させている事例もある。

しかし、自動化を進めることにより運転士は監視作業が中心となり、覚醒度低下が懸念される。自動車分野では、ドライバの生体情報や運転挙動から居眠りを検知し、警告を与える居眠り運転警報装置が研究されている¹⁾²⁾。鉄道においては、ヒューマンファクタに関する基礎的研究が行われているが³⁾、積極的な運転支援にまで至っていないのが現状である。そこで、列車運転におけるヒューマンエラーを事前に防止するために、人間の特性を考慮した運転支援システムの開発が必要であると考えられる。

このようなシステムを開発するためには、運転士がどのような情報認知を行い、それにもとづいてど

のような判断を行い、行動をとるのかを把握することが重要となる。このような運転行動を解析するためには、運転士の生体計測などを様々な条件のもとで行える運転シミュレータが必要となる。

本稿では、人間-機械系評価用列車運転シミュレータを開発し⁴⁾⁵⁾、それを用いた列車運転中の脳活動の計測について述べる。

2 運転シミュレータの開発

開発した運転シミュレータのシステム構成を図2に示す。車両制御コンピュータ、運転台、計器盤表示モニタ、スピーカの模擬車両と、視界生成コンピュータ、プロジェクタ、スクリーンの視界模擬装置、指令コンピュータから構成される。運転士が操作する運転台のハンドル位置が車両制御コンピュータに入力され、車両特性にもとづいて車両運動計算や音響の生成、計器盤画像の生成等を行う。計算した車両位置を視界生成コンピュータに送り、コンピュータグラフィックスの視界画像を生成し、プロジェクタから前方のスクリーンに投影する。

計器盤は、2台の液晶ディスプレイ上に表示することで、多様な計器の模擬を可能にした。車両の振動は、軌道不整と車両運動モデルによって車両の振



図1 列車運転シミュレータ

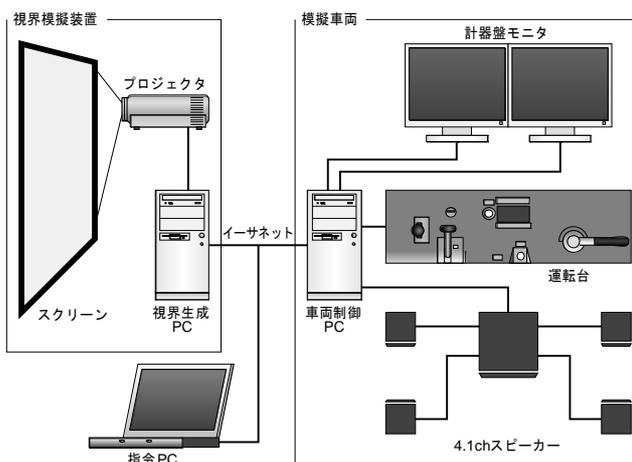


図2 システム構成図

Measurement of Train Driver's Brain Activity by Near-Infrared Spectroscopy (NIRS)

Takashi KOJIMA, Hitoshi TSUNASHIMA and Youke SHIOZAWA

動を計算し、スクリーンの視界画像を揺らすことにより、モーションベースなしに車両が揺れているような感覚を与えている。

指令コンピュータからは、運転の開始・停止や信号現示の変化、異常事態の発生をリアルタイムに制御できる。この機能により、異常事態発生時の生体情報の計測も可能としている。また、オフラインで運転行動の解析を可能とするために、被験者の操作するハンドル位置や車両の走行速度、前方の信号現示などの運転に関する状態を時系列に記録する機能を有している。

3 運転シミュレータを用いた脳機能計測

3.1 脳機能検査の最近の動向と必要性

ヒューマンエラー事故を起こすメカニズムを人間工学的に考えるとき、事故を起こす主体における生体的状況として先ず考慮することは、事故を起こす際の脳の活動である。この脳活動とは、一般に、認知科学的手法によって検討され得る。認知力を測る手法としては、臨床神経生理学的手法として、事象関連電位P300⁶⁾等が知られている。これは、刺激から約300ミリ秒後に誘発される陽性波(P300)が、脳の選択的注意(認知・識別)に関係があると考えられている。このため、運転等の作業時の脳機能評価に有用と考えられ、自動車において最近その応用が試みられている⁷⁾。しかし、事象関連電位の測定には、同様の刺激による反復測定が必要とされることから、被験者の意表をつくイベントに対するとっさの反応等の評価には適していない。

事故の際の脳機能を評価し得る他の方法としては、非侵襲的な画像診断的手法として、最近注目されている機能的磁気共鳴画像(Functional magnetic resonance imaging: fMRI)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

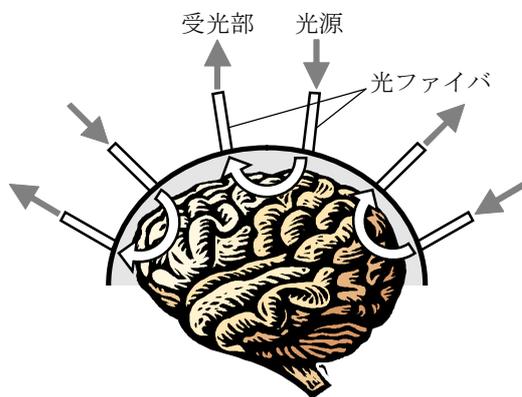


図3 近赤外分光法の模式図

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には、様々な制限があり、運転操作時の評価を行うにあたっては難点が多い。例えば、MRIは、機器本体を覆い尽くすだけの大がかりな磁気シールドルームを建造しなければならない。また、検査時には、被験者は狭い円筒の中で仰臥位になり、身体、特に頭部を動かすことが許されず、運転作業をしながらの測定は困難である。さらに、事象関連電位同様、同一刺激の反復が必要であり、この点でも評価内容が制限される。

これに対し、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。単チャンネルの比較的小型な機種では、実際の航空機操縦時にも応用されている⁸⁾。また、機能的近赤外線分光法(fNIRS: functional near-infrared spectroscopy, 図4)⁹⁾、いわゆる光トポグラフィは、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。

NIRSは、いずれの機種も、体動中の脳循環動態をリアルタイムに安定して捉えることができる場所が特徴であり、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。

次節以降に開発した列車運転シミュレータとfNIRSを用いた運転士の脳機能計測について述べる。

3.2 運転タスクとシミュレータのシナリオの作成

本シミュレータは、研究目的に応じてシステムの拡張や省略、シナリオの作成が可能になっている。実路線を模擬したシナリオは、時刻表に従って駅の発車・停車を行い、実車と同様の運転作業が再現で



図4 fNIRS装置

きる。一方、生体情報を定量的に評価するためには、複雑な運転作業を単純なタスクへ切り分ける必要がある。そこで、列車運転の基本動作になると思われる以下の2つのタスクを作成した。

① **速度維持タスク**：速度計を見ながらマスコン・ブレーキを操作し、指示された速度に一定に保つ。

② **信号認知タスク**：前方の信号機の信号現示が変化したとき、それに対応するボタンを押す。

これらのタスクを課すために、シミュレータには、下り勾配の単調な直線線路に一定間隔で信号機を設置して信号現示が走行中に変化するシナリオを作成した。

3.3 基礎実験

fNIRSを用いてシミュレータ運転中の脳活動の計測が有効に行えるかどうか検討するため、まず予備調査として、最小構成の簡易型シミュレータを構築し、本学医学部所有のfNIRS装置（OMM-2001、島津製作所製）により前頭部と後頭部の脳血流を計測した。被験者は、列車運転の資格を持たない一般の男性2名である。計測は、タスクと休憩を交互に反復する方法とし、以下の2つの実験を行った。

① 開眼 - 閉眼実験

タスク：停車中の視界画面を注視

休憩：閉眼安静

② 運転 - 停車実験

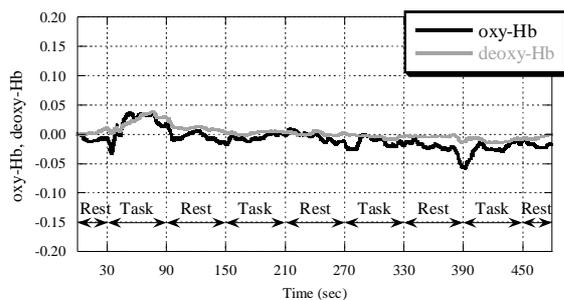
タスク：速度維持タスク+信号認知タスク

休憩：停車中の視界画面を注視

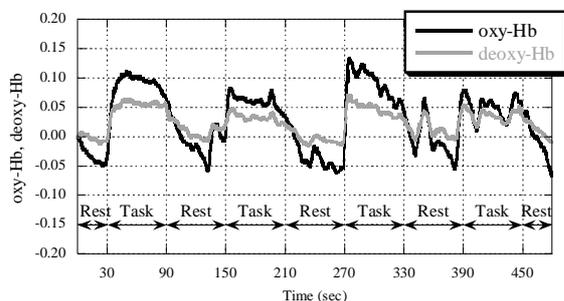
図5に閉眼-画面実験の結果を示す。図(b)後頭部は、画面注視の時に酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)が増加しており、視覚刺激に対する脳の活動が確認できる。図(a)前頭部では、タスクに関連した変化は見られなかった。図6に運転-停車実験の結果を示す。図(b)後頭部にはタスクに関連する変化は見られず、このことから列車運転中と停車中の視覚刺激に対して脳活動に大きな差がないと考えられた。一方、図(a)前頭部は、2回目以降のタスク開始時にoxy-Hbが変化していることがわかる。この結果、運転行動による脳活動の変化は前頭部に現れると考えられる。

3.4 列車運転シミュレータを用いた脳機能計測実験

基礎実験において、fNIRSを用いてシミュレータ運転時の脳機能計測が有効に行えることが確認できたので、フルスケールの列車運転シミュレータを用いて、脳活動計測実験を行った(図7)。路線は実路線の3駅間2.3kmを模擬したもので、停車時の血流変動を計測できるように50秒の長い停車時間を設定し、1走行6分とした。被験者は、シミュレータの運転には十分慣熟している。計測装置はfNIRS(OMM-3000、島津製作所製)を用い、前頭部と後頭部それぞれ22ch、計44chを計測した。タスクは、運転支援システム評価の例として以下の2つの実験

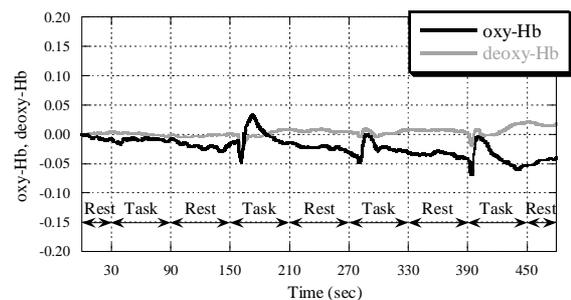


(a) 前頭部

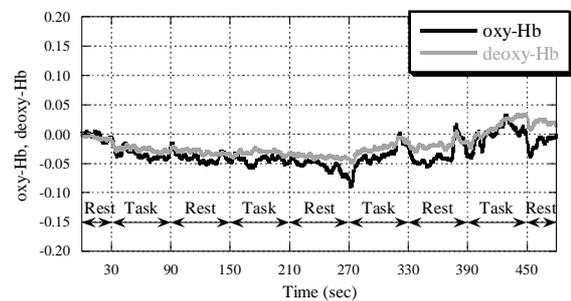


(b) 後頭部

図5 開眼-閉眼実験の結果



(a) 前頭部



(b) 後頭部

図6 運転-停車実験の結果

を行った。

① 手動運転タスク：マスコン・ブレーキを操作し、時刻表に従って運転する。

② 自動運転タスク：車掌からの発車合図を確認後、ATOの出発ボタンを押し、次駅まで自動走行させる。

計測結果を図8、図9に示す。チャンネルは、前頭部の1例を示したものである。図8の手動運転実験では、oxy-Hbが運転の経過とともに増加している。それに対し、図9の自動運転実験では変化が見られなかった。また、駅停車中であっても血流は下がらず、脳が活動していることがわかる。この結果から、シミュレータ、及びfNIRSを用いて運転方法や運転支援システムの評価が行える可能性が示唆された。

4 まとめ

人間-機械系評価用列車運転シミュレータを開発し、機能的近赤外線分光法（fNIRS）を用いて列車運転中の脳血流を計測した。その結果、手動運転と自動運転における運転士の脳活動に違いがあることが示唆された。これらの結果から、列車運転シミュレータ及びfNIRSが、運転支援システムなどの評価に有効であることを示した。

今後は、複数の列車運転士による計測を行い、計測結果の信頼性を向上させる必要がある。また、疲労状態や作業負荷による脳血流変化の違いを脳波や心拍変動と対応させて評価していく予定である。

参考文献

- 1) 北島, 沼田, 山本, 五井: 自動車運転時の眠気の予測手法についての研究(第1報), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 63, No. 613, pp.93-100, 1997
- 2) 沼田, 北島, 五井, 山本: 自動車運転時の眠気の予測手法についての研究(第2報), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 63, No. 61, pp.101-108, 1997
- 3) 深沢, 倉又, 佐藤, 澤, 水上, 赤塚: 列車運転シミュレータ上で発生するヒューマンエラー, 鉄道総研報告, Vol. 17, No. 1, 2003, pp. 15-18
- 4) 日刊工業新聞2003年10月31日付: 事故の人的要因を究明
- 5) 網島, 小島: 鉄道用運転シミュレータ, 特願2003-172450
- 6) 大澤: 臨床誘発電位ハンドブック(黒岩, 園生編), 東京, 中外医学社, pp. 200 (1997)



図7 脳機能計測実験

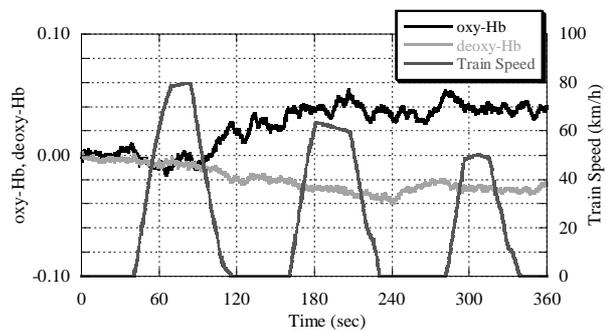


図8 手動運転実験の結果

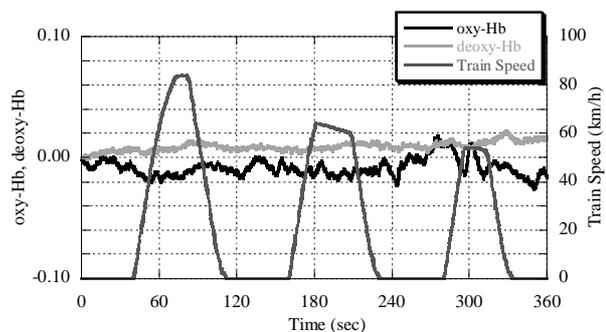


図9 自動運転実験の結果

- 7) 江部, 小里: 事象関連電位を用いた運転注意力計測技術, 自動車技術, Vol. 58(7), pp. 91-96 (2004)
- 8) Kobayashi A., Miyamoto Y.: In-flight cerebral oxygen status: continuous monitoring by near-infrared spectroscopy, Aviat Space Environment Med Vol. 71, pp. 177-183, 2000
- 9) 小西, 竹内, 老川, 和田, 坂内, 伊藤, 小田, 網沢: 近赤外光による無侵襲生体計測マルチチャンネル酸素モニタ OMM-2000 の開発, 島津評論別冊, Vol.57, pp. 141-151 (2000)