S7-2-3 生理計測による列車運転士の状態評価に関する研究

○小島 崇(日大院)[機]綱島 均(日大)塩沢友規(日大)[機]丸茂喜高(日大)

A Study on State Evaluation of Train Driver by Biological Measurement

Takashi Kojima (Graduate School of Nihon University) Hitoshi Tsunashima (College of Industrial Technology, Nihon University) Youke Tomoki Shiozawa (School of Medicine, Nihon University) Yoshitaka Marumo (College of Industrial Technology, Nihon University)

This paper describes a feature of a train driver focusing on the brain activity measured by using the newly developed train simulator and a functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). The developed train simulator can simulate the real train operations with a designed task condition for measuring the biological signals of the train driver. The cerebral blood flows of the driver operating the simulator are measured by using the fNIRS system. With the driver's operation, oxy hemoglobin gradually increases and deoxy hemoglobin decreases, and it indicate the activation of the brain. The multi-resolution analysis (MRA) using the wavelet transform is applied to the cerebral blood flows to extract the task related variations. The reconstructed signal signifies the variations of the cerebral blood flows caused by the driving tasks.

キーワード:列車運転シミュレータ、NIRS、ヒューマンエラー、ウェーブレット、多重解像度解析 Keywords: Train simulator, NIRS, Human error, Wavelet, Multi-resolution analysis

1. はじめに

鉄道のヒューマンエラーによる事故は、その数は少ない ものの、大量輸送という性質上、一度の事故が非常に大き な規模となり得る。最近では、JR 福知山線の重大事故によ り鉄道におけるヒューマンファクタが注目されている。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 (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 (ATO)を導入し、運転を自 動化させている事例もある。しかし、高度な信号保安装置 を導入するためには多くの費用を要することや、運転の自 動化によって、運転士のシステムへの依存や覚醒度低下な どが懸念される。

自動車分野では、ドライバの生体情報や運転挙動を評価 し、それに従って警報や情報提示を行う運転支援システム が研究されている¹⁾。鉄道においては、事例分析やエラー 実験など、エラーの発生過程に注目した研究が報告されて いるが²⁾、運転支援に向けた研究はまだ積極的に行われて いない。列車運転におけるヒューマンエラーを事前に防止 する方法の一つとして、人間の特性を考慮した運転支援シ ステムを開発することが考えられる。そのためには、運転 操作との認知工学的、人体生理学的な関係を明らかにする 必要がある。

本研究では、列車運転中の脳活動を把握するために、機 能的近赤外分光法(NIRS)およびヒューマンファクタ評 価用列車運転シミュレータを用いて、運転時の脳血流変動 を計測する。また、ウェーブレット変換を用いた多重解像 度解析による脳活動の評価方法について提案する。

2. ヒューマンファクタ評価用列車運転シミュレータ

本研究に用いた列車運転シミュレータ³⁾⁴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。

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。



図1 列車運転シミュレータのシステム構成



図2 fNIRSによる脳機能計測の模式図

3. 機能的近赤外分光法 (fNIRS) による脳機能計測

3.1 脳機能検査の最近の動向と必要性

ヒューマンエラーを起こすメカニズムを人間工学的に考 えるとき、生体的状況としてまず考慮することは、エラー を起こす際の脳の活動である。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)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、検査時に被験 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、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)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⁵⁾。また、機能的近赤外線分光法 (fNIRS)⁶⁾、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。図2は、NIRSの原理を示す模式図であ る。NIRS は、体動中の脳循環動態をリアルタイムに捉え ることができるところが特徴であり、今後この様な評価を 行う上で有望な検査機器であると言える。

3.2 列車運転シミュレータを用いた脳機能計測実験

(1) 実験の方法

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3に実験風景を示す。運転路線は、実路線の3駅間 2.3km を模擬したものを用い、停車時の血流変動を計測す るために50秒の長い停車時間を設定し、1走行6分を3走 行とした。被験者は男性2名で、実車の運転経験はないが、 シミュレータの運転には十分慣熟している。被験者には、



図3 運転シミュレータを用いた脳機能計測実験の風景



図4 近赤外光イメージング装置



図5 光ファイバの配置と計測チャンネル

信号、標識に従い、時刻表通りに運転するよう指示した。 計測装置は、近赤外光イメージング装置(OMM-3000、島 津製作所製、図 4)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、前頭部と 後頭部それぞれ 22ch ずつ、計 44ch を計測した。



図6 計測した前頭部の脳血流変動

(2) 計測結果

図6に、開始3駅間における前頭部の全チャンネルの計 測結果を示す。全体の傾向として、運転の経過とともに oxy-Hbが上昇し、deoxy-Hbの減少がしており、脳の賦活化 が確認できる。後頭部においても同様に賦活化が見られた。 さらに前頭部では、駅の走行・停車の反復に対する脳血流 の変動が見られた。しかし、運転課題全体に対する変動が 大きいため、個々の運転作業と脳血流の変化の関係を評価 するには、全体のトレンドとタスク関連の変動を分離する 必要がある。

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 ウェーブレット変換

ウェーブレット変換^りは、小さな波 $\psi(t)$ を平行移動、伸縮させて波形 f(t)を解析していくもので、式(1)で与えられる。

 $\psi((1-b)/a)$ は、b だけ時間(位相)をずらし周波数を 1/a にしている。これらの演算を施したのが連続ウェーブ レット変換と呼ばれる。連続ウェーブレット変換は、情報 が重複し、多くの計算量を必要とする。そこで、a と b を 離散化して式(2)のように与えられる。これを離散ウェーブ レット変換という。

 $(W_{\Psi}f)(2^{-j}k,2^{-j})=2^{j/2}\int_{-\infty}^{\infty}\psi(2^{j}t-k)f(t)dt$ …(2) 離散ウェーブレット解析は、連続ウェーブレット変換より も情報が少ないが、信号をより効率的に変換できる特徴が ある。

4.2 多重解像度解析

多重解像度解析は、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 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。

$$S = \sum_{j=1}^{n} d_j + a_n$$
 (3)

ここで、d,は詳細成分、a,近似成分である。

ウェーブレット変換では、マザーウェーブレットψ(1)の 選択が重要となる。本検討では、コンパクトサポートであ り、正規直交基底となる Daubechies⁸⁾を用いる。直交基底を 用いることにより、信号の効率的な分解・再構成が可能で あり、また、生成指数 N を高くするほど、より高次の異常 信号を検出可能になる。今回は、未知の信号を検出するた めに、まず比較的高次の生成指数を用いることとし、N=7 とした(図7)。



図7 Daubechiesのウェーブレット (N=7)

多重解像度解析の分解レベルについては、サンプリング 間隔 0.1 秒の信号から 120 秒周期のタスク関連の変動を抽 出するため、分解するレベルを 10 段階とした。すなわち、 原信号 S は、 $S=d_1+d_2+d_3+...+d_{10}+a_{10}$ に分解されるこ とになる。

4.3 脳血流変動の分解と再構成

タスク関連の変化が顕著であった ch.5の oxy-Hb の多重 解像度解析の結果を図8に示す。サンプリング間隔が0.1 秒であるので、各成分の対応する周期は、d₁は 0.2~0.5 秒 で、解像度が 1 つ下がるごとに 2 倍となるので、d₁₀ は 102 ~205 秒、a₁₀ は 205 秒以上となる。近似成分(a₁₀) に運 転課題全体のトレンドが抽出され、それ以外の変動が詳細 成分に分解されていることがわかる。d₁~d₃ 成分は比較的 大きい振幅を持つが、これは心拍による血流変動、および ノイズであると考えられる。また、d₉~d₁₀ 成分に大きな 変動が見られる。これは、走行・停車のタスクの反復が 120 秒であるので、タスクに関連する変動と考えられる。 そこで、deoxy-Hb についても同様に多重解像度解析を行い、 d₉~d₁₀ 成分を再構成(d₉+d₁₀)した。

図 9 に ch. 5 の再構成した脳血流変動と列車速度を示す。 oxy-Hb は、駅を発車する際に最も高くなり、deoxy-Hb はそ の逆の傾向が見られる。すなわち、停車中に脳が賦活化し ていることが確認できる。このことから、脳血流変動に対 してウェーブレット変換を用いた多重解像度解析を行うこ とにより、個々の運転作業に対する脳活動が評価し得るこ とが示された。

5. まとめ

機能的近赤外線分光法(fNIRS)を用いてシミュレータ 運転中の脳機能計測を行った。その結果、運転とともに oxy-Hbが上昇、deoxy-Hbが減少し、列車の運転によって脳 が賦活化することがわかった。また、ウェーブレット変換 を用いた多重解像度解析が、個々の運転作業に対する脳活 動の評価に有用であることを示した。

今後は、脳波や心拍との同時計測を行い対比させること によって、脳血流変動の生理学的評価について検討してい く予定である。

参考文献

- 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
- 2) 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、pp. 15-18、2003
- 3) 日刊工業新聞 2003 年 10 月 31 日付、事故の人的要因を究明
- 4) 綱島、小島、鉄道用運転シミュレータ、特願 2003-172450
- 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
- 6)小西、竹内、老川、和田、坂内、伊藤、小田、綱沢、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

- I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF Regional Conference Series In Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics, No. 61, 1992
- I. Daubechies, Orthonormal bases of compactly supported wavelets, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 41, No. 7, pp. 909-996, 1988





