

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

(習熟による脳活動の変化について)

日大生産工（院） ○長谷川 靖
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

1 はじめに

運転操作におけるヒューマンエラーは、大事故に至る場合があるため、その適切な防止策が求められる。鉄道のヒューマンによる事故エラーは、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。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: Automatic Train Stop）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: Automatic Train Operation）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注意力低下などが懸念される。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。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、非侵襲画像診断法であり、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機能的磁気共鳴画像（fMRI: functional magnetic resonance imaging）が考えられる。しかし、検査時に被験者は狭い円筒の中で身体が制限されるため、運転操作時の脳活動の評価を行うには難点が多い。

これに対し、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近赤外分光法（NIRS: Near-Infrared Spectroscopy）と呼ばれる、非侵襲的検査法が普及して

きている。このNIRSの技術を用いた機能的近赤外線分光法（fNIRS: functional NIRS）、いわゆる光トポグラフィは、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、体動中の脳循環動態をリアルタイムにとら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。

これまでの研究では、列車運転シミュレータを用いて列車運転中の脳機能計測を行い、運転操作に関連する脳活動について示した²⁾。本研究では、機能的近赤外線分光法（fNIRS）を用いて、列車運転シミュレータ運転中の脳機能計測を行った。それにより得られた運転操作の習熟による脳活動部位の変化について述べる。

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 列車運転中の脳機能計測

3.2 列車運転シミュレータ

生体信号は被験者に課したタスク以外のさまざまな影響を受けて変化するため、必要な信号を抽出するために、出来る限り同じ実験環境で計測を繰り返す必要がある。本研究では、実車に近い刺激を

Measurement of higher brain function of train driver
by using functional near-infrared imaging

Yasushi HASEGAWA, Hitoshi TSUNASHIMA, Yoshitaka MARUMO, Takashi KOJIMA



Fig.1 Experiment of measurement of brain function using train simulator

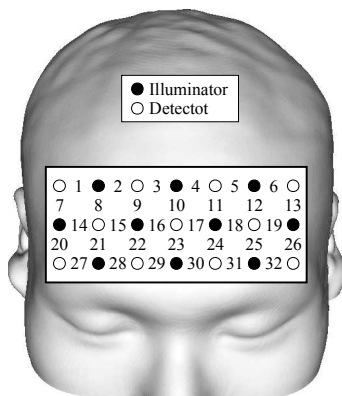


Fig.2 Position of Optical Fibers and Channels

与えられるよう、独自に開発したヒューマンファクタ研究用の列車運転シミュレータを用いて実験を行った。

3.3 機能的近赤外分光法による脳機能計測実験

fNIRS を用いて列車運転シミュレータを運転している時の脳活動を計測する実験を行った。

図 1 に実験風景を示す。計測装置は、島津製作所製、近赤外光イメージング装置 OMM-3000 を用いた。図 2 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 32 チャンネルを計測した。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 2 走行とした。

被験者は、健康な 20 代 3 名でシミュレータ運転経験が 5 回未満のシミュレータ初心者 2 名と運転暦が 4 年のシミュレータ運転熟練者 1 名とした。

3.4 脳血流変動の解析

3.4.1 離散ウェーブレット変換による多重解像度解析

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、詳細な評価を行うためには、これらを分離する信号処理が必要になる。そこで、離散ウェーブレット変換による多重解像度解析⁴⁾⁵⁾を用いてタスクに関連する信号の分解と再構成⁶⁾を行った。

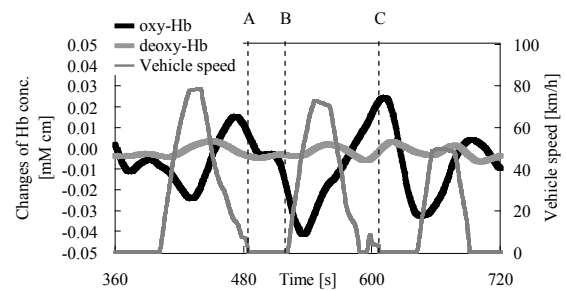


Fig.3 Reconstructed fNIRS signal and vehicle speed

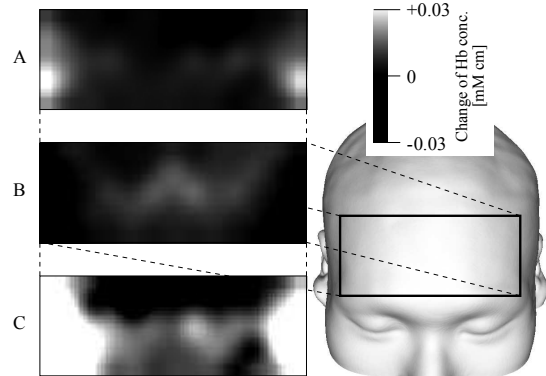


Fig.4 Functional brain imaging of untrained subject

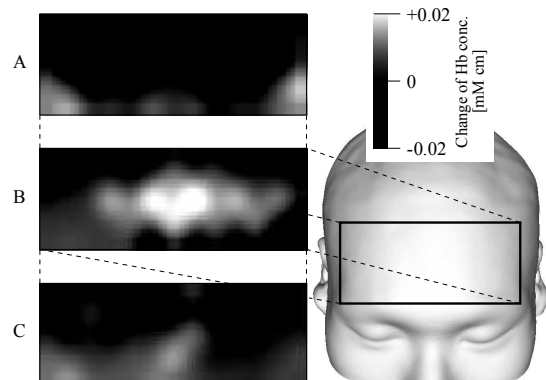


Fig.5 Functional brain imaging of trained subject

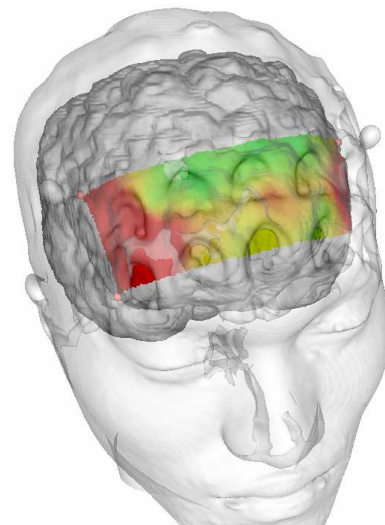


Fig.6 Result of functional mapping onto brain surface

3.4.2 解析結果

タスク関連の変化が顕著であったチャンネルの再構成した信号（32 チャンネル）と車両走行速度を図 3 に示す。2 名の被験者（熟練者 1 名，初心者 1 名）の oxy-Hb の信号から脳機能画像を作成した。結果を図 4 および図 5 に示す。これは，図 3 の A，B，C の時刻に対応している。

図 4 に示す初心者については，駅停止作業中に前頭前野外側部において血流の増加が観測できる。特に，停車した際（C の時刻）に血流が著しく上昇していることがわかる。一方，図 5 に示す熟練者も前頭前野外側部での活動が観測できるが，その活動は初心者に比べて大きくないことがわかる。被験者 A（初心者）のブレーキ操作時の機能画像を，MRI 画像をもとにして，脳表にマッピングした結果を図 6 に示す。この画像から，ブレーキ操作に関連する活動部位は，前頭連合野の背外側部，主にブロードマンの 46 野付近であることがわかる。

4 習熟により変化する脳活動の計測

列車の運転において，定位置に列車を停止させる操作は，フィードフォワード制御とフィードバック制御から構成されているが，初心者は，ブレーキのノッチ操作量が多いことから，フィードバック制御が主体となっていると考えられる。これに対して熟練者は，初心者に比べてノッチ操作が少なく，フィードフォワード制御の比率が高いと予測できる。初心者と熟練者の脳機能の違いは，このような運転操作の違いを反映していると考えられる。そこで，初心者が運転に熟練する過程において，熟練過程と脳活動の変化を検討する実験を行った。

4.1 実験方法

初心者である被験者 A が熟練者と同等の運転操作を行えるよう訓練し，運転技術の習熟により脳活動にどのような変化があるかを調べた。運転練習は同様の路線で 1 日 30 分（約 8 走行）の 4 日間行った。

4.2 ブレーキ操作量のばらつきを用いた運転操作における習熟の解析

脳機能計測などの生体指標は環境からの刺激により，様々な影響を受ける。そこで，ブレーキ操作の操作量から正規化したヒストグラムを作成し，比較することで運転操作の習熟を評価することにした。

初心者ほど大きな操作幅の頻度が高く，習熟するに従い小さな操作幅の頻度が高くなると考えられる。また，駅停車のブレーキ操作は，初心者に近いほど操作量のばらつきが大きいと考えられる。そこで，ブレーキ操作量のばらつきにより，習熟を評価できる可能性がある。一般にブレーキ操作量が多いほど，減速度に大きな変化が生じるので，乗り心地が悪く，質の悪い運転操作と理解できる。

ブレーキ操作量のデータを蓄積により，通常よく用いられるブレーキ操作量 u_k ，すなわち平均ブレーキ操作量 $\bar{u}$ が求まる。平均ブレーキ操作量 $\bar{u}$ に対するブレーキ操作量 u_k の平均 2 乗誤差 ε^2 でブレーキ操作量のばらつきを評価する。列車が停止目標位置に停止すると，ブレーキ操作量 u_k を得る。 $\bar{u}$ に対する平均 2 乗誤差 ε^2 は式 1.1 で得られる。

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_k - \bar{u})^2 \quad (1.1)$$

$\bar{u}$ を求めるには，ある程度ブレーキ操作量のデータ蓄積が必要である。実験から， $\bar{u}$ は -1 に近い値となることがわかった。そこで，データが蓄積されていない場合は， $\bar{u} = -1$ として，簡易的に式 1.2 により評価できる。

$$\varepsilon_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_k + 1)^2 \quad (1.2)$$

4.4 解析結果

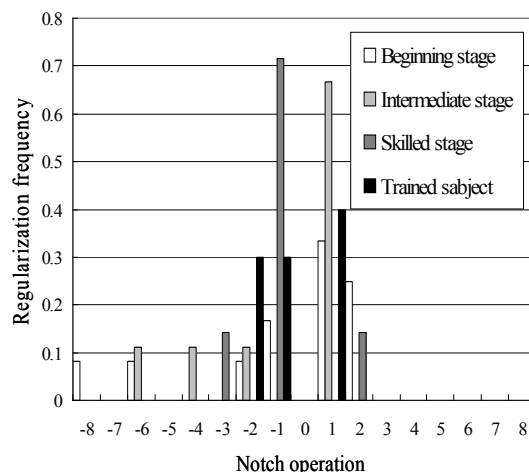


Fig.7 Histogram of stop operation

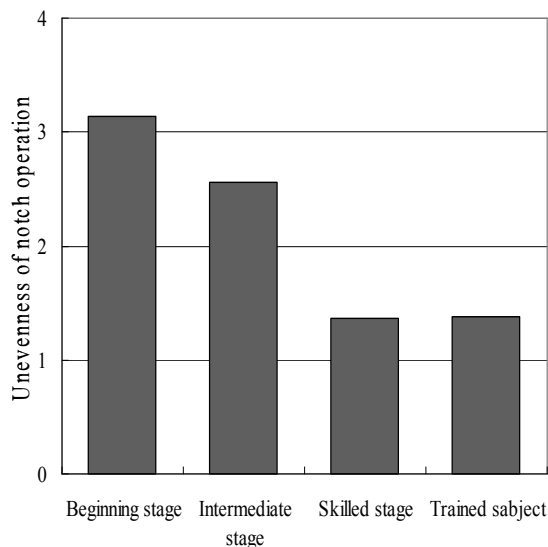


Fig.8 Evaluation of proficiency

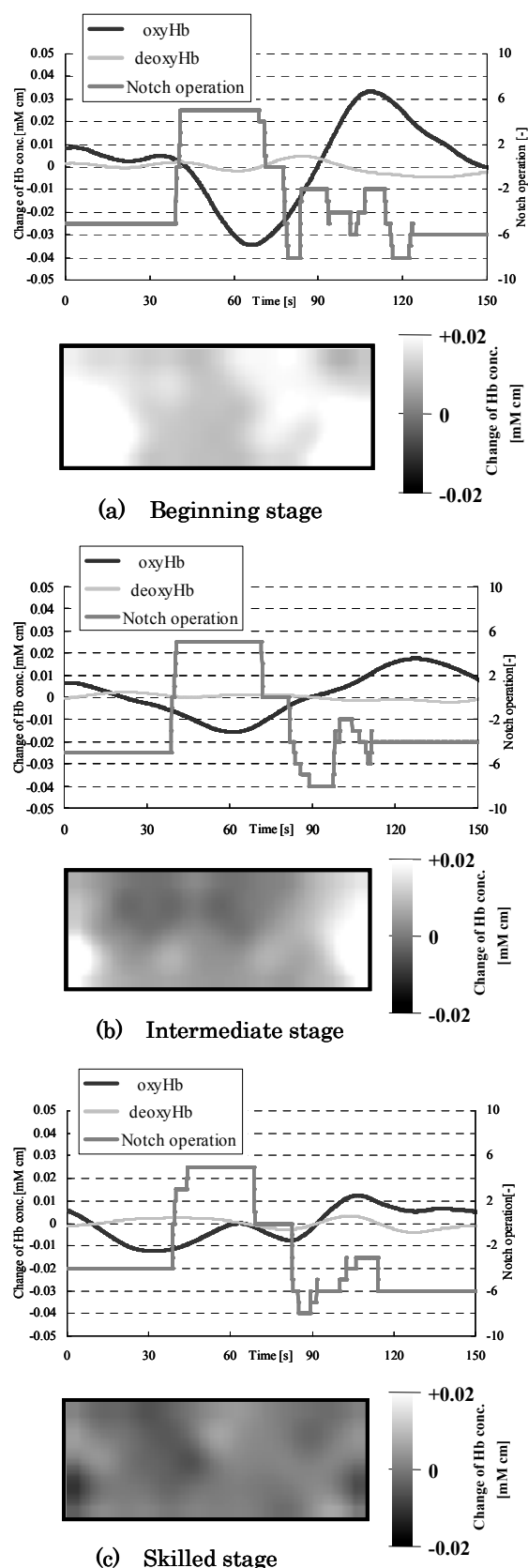


Fig.9 Relation between operation result and brain function in training process

図 7 は駅停車におけるブレーキ操作において各操作幅の正規化した頻度を表したヒストグラムである。負

の値はブレーキを緩めた操作，正の値がブレーキを込め直した操作を表している。初期の段階では大きな操作幅の頻度が高いのに対し，訓練後では，熟練者と同様に，小さな操作幅の頻度が高くなっていることがわかる。

図 8 は式 1.2 から求めたブレーキ操作量のばらつきである。被験者 A の運転操作は初期の段階では大きくばらついていたが，練習期間後には小さくなり，熟練者である被験者 C に近づいていることがわかる。以上のことから，初心者であった被験者 A は運転練習によって，運転操作に習熟したと考えられる。

4.5 運転操作の習熟による脳活動の変化

被験者 A の列車運転実験の初回から，約 3 ヶ月毎の脳機能画像および，脳血流と運転操作に関するグラフを図 9 に示す。運転操作のグラフは正領域が加速，負領域が減速時に行われた操作を示している。(a)～(c)を比較したところ，運転操作が習熟し，向上してゆくに従い，前頭前野背外側部での活動が小さくなってゆくことが見られた。

このことから運転の習熟に前頭前野背外側部での活動が影響していると考えられる。

5 まとめ

機能的近赤外線分光装置 (fNIRS) を用いて，列車運転シミュレータ運転中の脳機能計測を行った。初心者が運転に習熟してゆくに従い，前頭前野背外側部において脳活動が小さくなることがわかった。

その結果，運転士の異常な状態を脳血流変動で生理学的に評価できることが期待される。また，ブレーキ操作量のばらつきから運転にたいする習熟が客観的に評価できる可能性が示された。今後，fMRI や心拍，連続血圧計などを用いて fNIRS との同時計測を行い，脳血流の生理学的意味や活動部位などを検討してゆく。

参考文献

- 1) 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，p. 141-151 (2000)
- 2) 綱島，小島，塩沢，高田：人間-機械評価用列車運転シミュレータの開発と脳機能計測への適用，信頼性，Vol. 26，No. 7，p. 617-626 (2004)
- 3) FF. Jöbsis: Non-invasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters, Science, No. 198, p. 1264-1267 (1977)
- 4) S. A. Huettel, A. W. Song and G. McCarthy: Functional Magnetic Resonance Imaging, Sinauer Associate, Inc. (2004)
- 5) Daubechies: Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF Regional Conference Series In Applied Mathematics: Society for Industrial and Applied Mathematics, No. 61 (1992)
- 6) Daubechies: Orthonormal bases of compactly supported wavelets, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 41, No. 7, p. 909-996 (1988)