

近赤外分光法を用いた ドライバーの脳血流動態測定による 運転行動の分析に関する基礎的な研究

植田 拓郎¹・谷口 栄一²・山田 忠史³・中村 有克⁴

¹学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:tttakuro@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²フェロー会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)

E-mail:taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)

E-mail:t.yamada@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院助教 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)

E-mail:nakamura@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

ドライバーの運転行動の分析として、生理指標を用いたものが研究されている。本研究では、生理指標の1つとして脳の働きを示す脳血流動態に着目した。ドライビングシミュレータ上に車線減少部を表現し、走行中のドライバーの、脳の複数個所における脳血流動態を近赤外分光法によって測定した。

結果として、車線減少部を通過する際に、脳血流動態が変化する箇所があることが確認できた。また、脳血流動態の評価方法としてoxy-Hb濃度長比率を定義した。oxy-Hb濃度長の分析から、車線減少部の長さが脳血流動態に影響を与えていた可能性がある。

Key Words : *Near Infrared Spectroscopy, Driving simulator, Cerebral blood flow dynamics, Temporal region, Driving behaviour*

1. はじめに

道路の走行性の評価のための研究は多く行われているが、その主な手法としては、ドライバーに対する走行中や走行後のアンケート調査や、道路構造からの評価である。しかしアンケートによる評価は、ドライバーのその時の感性によるところが大きく、同じ人でも調査回ごとに評価が異なることがある。また、印象や記憶に残らなくてもドライバーの負担となっている箇所が評価できていない可能性がある。一方、道路構造による評価は、実際に走った際の評価とおおまかに一致すると言われているが¹⁾、あくまでドライバーの感じた評価であり、個人差による影響がある可能性がある。そこで、近年自動車走行の評価方法のために、人間の生理指標を用いて運転行動の分析を行う方法が提案されている^{2), 3), 4)}。運転中のドライバーは交通状況の認知と、それを受けた判断の繰り返しにより運転を行っているといわれている。これ

らの認知、判断は人間の脳の働きによるものである。そこで生理指標の1つとして、ドライバーの脳の働きを示す指標を調べることによってドライバーの運転行動を分析することができる可能性がある。本研究では、測定が非侵襲的で被験者を固定する必要が無いという特徴のある、NIRSを使用して運転中のドライバーの脳血流動態を測定する。また、ドライバーの脳血流動態に影響を与える環境を制御し、運転行動の詳細なデータを取得するため、実車ではなく、室内でドライビングシミュレータを用いて実験を行った。本研究の目的として、基礎的な実験により、ドライバーの脳血流動態と運転行動の関係を調べることを目指す。

2. NIRSとは

本研究では人間の脳を調べるための手法としてNIRS

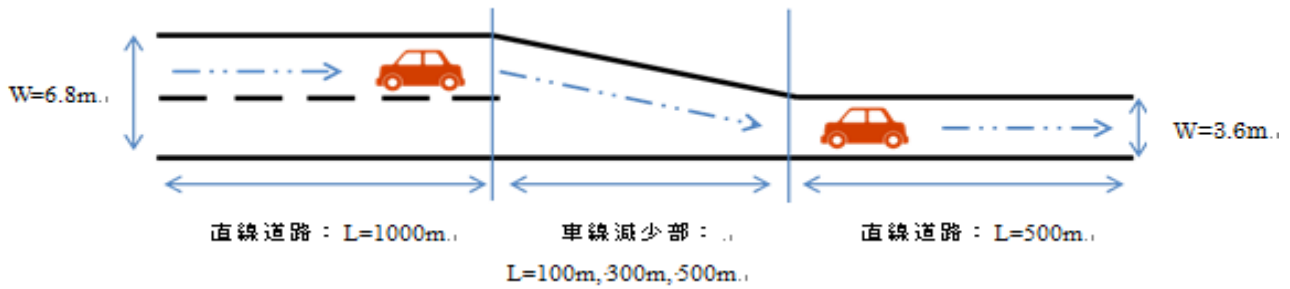


図4 測定コース模式図

(近赤外分光法, Near Infrared Spectroscopy)を使用した。NIRSでは近赤外光を頭表に照射することにより、非侵襲的に酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) と脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) の、測定開始時からの変化量を測定する。NIRS測定の模式図を図2に示す。図2に示す様に頭表上に近赤外光を照射する送光プローブと、頭内を通して頭表上に返ってきた近赤外光を測定する受光プローブを設置する。送光プローブから照射された近赤外光は頭皮や頭蓋骨、脳表を通過し、散乱、反射をして再び頭表に返ってくる。このとき近赤外光は、主に脳表の毛細血管中のヘモグロビンによって吸収され、照射した時よりも減衰して頭表に返ってくる。NIRSの原理となっているものはLambert-beer則であり、減衰の度合を表す吸光度と、光が通過した液体の濃度の関係を示したものである。それによりNIRSでは、受光プローブでの検出光量が小さくなるほど、近赤外光がより多くのヘモグロビンに吸収された、つまり近赤外光が通過した箇所のヘモグロビン濃度が高いといえる。得られたデータはヘモグロビン濃度(mmol/l)と、近赤外光が通過した距離である光路長(cm)の積である、濃度長 (mmol/l*cm) という単位によって表される。このようにして測定されたNIRS信号の意味として最も一般的に用いられているのは、脳表の毛細血管の血液量の変化で検出光量に変化が生じるといふ、脳機能賦活に起因するヘモグロビン濃度変化である⁶⁾。実際の測定では図2のように、送光プローブと受光プローブの組を複数設置する。これにより、脳表面全体での広い範囲で、測定箇所毎に脳血流動態を測定することができる。ただし、NIRS測定によって得られるヘモグロビンの濃度長変化は、頭の構造の個人差によって、測定が難しい光路長との積である、濃度長という単位によって表されているため、濃度長の単位の測定値がそのまま生体のヘモグロビン状態を示しているとは限らない。仮に正しく示しているとしてもそれらと脳活動との関連はまだ十分に説明されていないというのが現状である。本研究では脳血流量の増加が脳の賦活によるものであるとして、運転時のドライバーの脳血流動態を分析する。

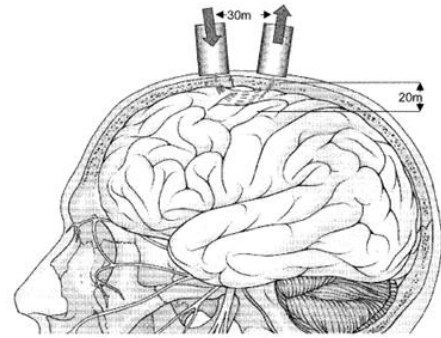


図2 NIRS 測定の模式図



図3 測定の様子

3. 実験方法

現実での道路を走行する際には、ドライバーの脳血流は交通状況に加え、様々な要因によって影響を受けると推測される。そこで本研究ではそれらの要因を少なくし、被験者間で同じ状況を再現するため、室内実験を行い、ドライビングシミュレータを使用した。ドライビングシミュレータでの実験では、運転状況を揃えることができる上に、運転時の行動の様々なデータを同時に測定することができ、脳血流と運転行動の分析が詳細にできる。測定の様子を図3に示す。被験者はハンドル操作、ブレーキ操作、アクセル操作、方向指示器操作を行う。走行コースは2車線から1車線に減少し、左車線から右車線へ合流する車線減少部とした。走行開始地点から車線減

少が始まる地点の間に 1000m の直線区間を設け、道路が 1 車線になる地点から走行終了地点までに 500m の直線区間を設けた。被験者以外の自動車は全て普通車で、右車線のみに毎時 500 台で発生させ、50km/h で走行させた。測定コースの模式図を図 4 に示す。道路以外の構造物から被験者が影響を受けないよう、周りに視界を遮るような建物は設置していない。被験者には、動作による脳血流への影響を極力減らすために頭の動きは最小限に留めること、実際に公道を走行しているように振る舞うこと、安全運転を心がけること、制限速度は 60km/h を守ること、ギア及びサイドブレーキの操作はしないこと、車線が減少を始める地点から車線変更を始めることを指示した。被験者は 22 歳から 25 歳の健康な男性 6 名であり、全員普通自動車免許を取得していた。6 人中 1 人が左利きであり、残りは全て右利きである。いずれも実験前に被験者に対して実験目的、測定方法、身体への影響等について十分な説明を行い、研究協力への同意を得た。

今回の実験では車線が減少を始める地点と車線が 1 車線となる地点の間である、車線減少部の長さがドライバーの脳血流に異なった影響を与えると予想し、測定を行った。車線減少部の長さが短くなる程、車線変更までの短い時間で視覚情報を認知し、判断する必要がある、ドライバーの脳の賦活が大きくなると推測される。走行コースとしては、車線が減少を始める地点と車線が 1 車線になる地点の長さを 100m、300m、500m の 3 パターン用意し、各被験者に 2 回走行してもらった。他の条件は全て同じである。

NIRS による脳の測定箇所は 48 か所であり、主に側頭部を中心とした測定を行った。図 5 に示す箇所は測定プローブの脳表での位置であり、測定箇所はそれらの間である。図 6 に測定プローブと測定箇所の位置関係の図を示す。赤丸が送光プローブ、青丸が受光プローブ、白四角が測定位置である。

4. 実験データの解析方法と結果

NIRS 測定により得られたデータには、実際には心拍や呼吸によるノイズが含まれており、脳血流動態を知るためにはこれらのノイズを取り除く必要がある。本研究では、時間的に局在化した周波数成分のある生体信号の解析に適した、離散ウェーブレット解析の多重解像度解析を用いて測定データからノイズの除去を行う⁷⁾。測定データに含まれるノイズの周波数と要因を表 7 に示す。

運転中のドライバーの脳血流動態は、自身の運転行動の他にも、周囲の環境の影響を受けていると考えられる。

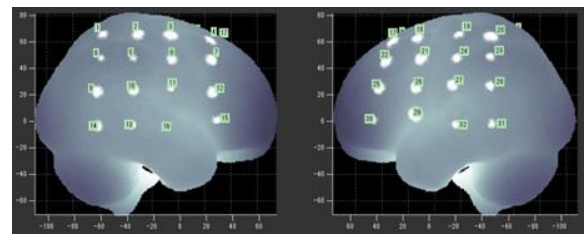


図 5 脳表での測定プローブ箇所



図 6 測定プローブ番号と測定位置

表 7 測定データに含まれるノイズ

詳細成分	周波数 (Hz)	ノイズの要因
d1	1.6	心拍 (0.8~1.7Hz)
d2	1.34	
d3	0.55	呼吸 (0.2~0.33Hz)
d4	0.29	
d5	0.21	動脈圧反射 (0.08~0.17Hz)
d6	0.07	呼吸反射 (0.02~0.03Hz)

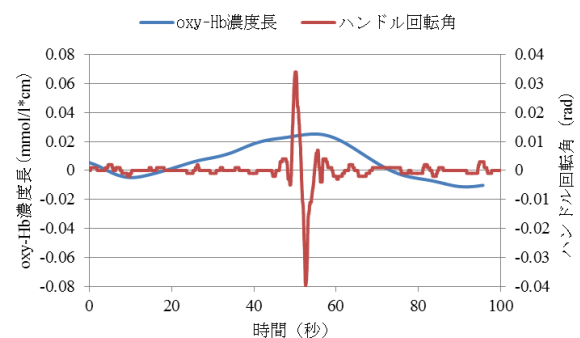


図 8 被験者 A の 45ch の oxy-Hb 濃度長とハンドル回転角

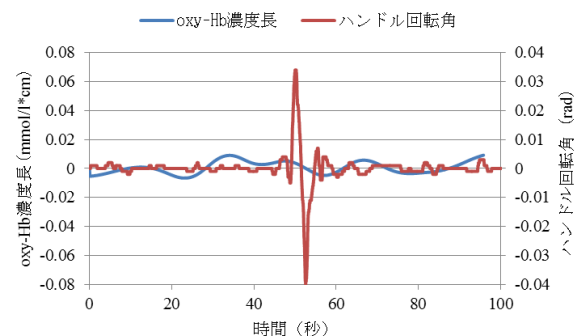


図 9 被験者 A の 31ch の oxy-Hb 濃度長とハンドル回転角

また、脳血流の変化の傾向には個人差があり、今回は個人毎の脳血流の増減の傾向を見ていくこととする。

ドライバーのハンドル操作と、脳血流動態を表すとされるoxy-Hb濃度長の関係の一例を図8に示す。測定箇所は被験者Aの45chであり、左脳側の上側頭溝周辺の一点である。グラフ上でのハンドル操作は右回りを正としている。ハンドル回転角が大きく変化している箇所は車線変更時のハンドル操作によるものである。グラフより、ハンドル操作を始める前の、車線減少部に差しかかる前から脳血流が上昇していることが確認できる。このことは、この測定箇所での変化は、実際に車線変更のためのハンドル操作を行う前より、道路の状況の認知や、車線変更のタイミングの判断を脳で考えていたためであると考えられる。また、車線変更のためのハンドル操作を終えてもすぐには脳血流は減少せず、少し経過してから減少を開始していることが確認できる。しかし図9に示す様に、同じ被験者でも、測定箇所によってはoxy-Hb濃度長がハンドル操作の周辺であまり変化しないものも見られた。測定箇所は31chであり、左脳側の後頭頂葉皮質の一点である。これらより、脳表の測定箇所ごとに、車線減少部の走行時に脳血流が変化する箇所と、変化しない箇所があることがわかった。車線減少部の走行時に脳血流動態が変化する測定箇所は、主に左右の脳の下側にあった。その一方で、脳血流動態と加速度、速度については明確な関連は見出すことができなかった。今回の実験条件では脳血流動態は様々な要因に影響を受けていると考えられるため、これらの2つは脳血流動態に与える影響が比較的小さく、脳血流への影響が確認できなかった可能性がある。

本研究では、側頭部を中心に48箇所測定を行ったが、その中で隣り合っている測定箇所のoxy-Hb濃度長の増減の傾向を調べたところ、同じような増減の傾向を示した箇所があった。隣り合った測定箇所のoxy-Hb濃度長の挙動の一例を図10に示す。グラフで示された測定箇所は、被験者Bの20chと、20chを中心とした6箇所の計7か所であり、右脳側の前頭前野にある。oxy-Hb濃度長の大小の程度は異なっているが、増減は同じ傾向を示していることが見られる。隣り合った測定箇所でも同じような増減の傾向を示すことは、測定箇所が脳の同じ部位にあり、当該部位周辺が運転時のに賦活しているからであると考えられる。

次に、脳血流動態の車線減少部の長さの違いによる影響を調べるため、oxy-Hb濃度長の大小を評価することを考える。先述のように、NIRSによって得たデータの単位は(mmol/l*cm)という、濃度と光路長の積で表される。光路長とは、近赤外光が頭の中を通過したとされる距離であり、個体差や測定箇所による違いのため、測定箇所

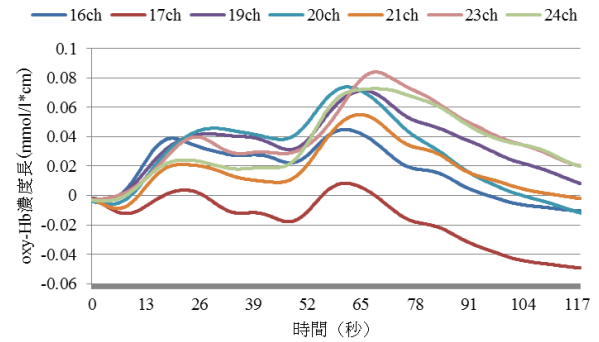


図10 被験者Bの20ch周辺のoxy-Hb濃度長

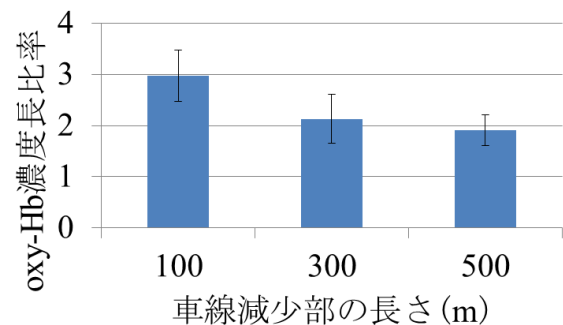


図11 上側頭溝周辺のoxy-Hb濃度長比率

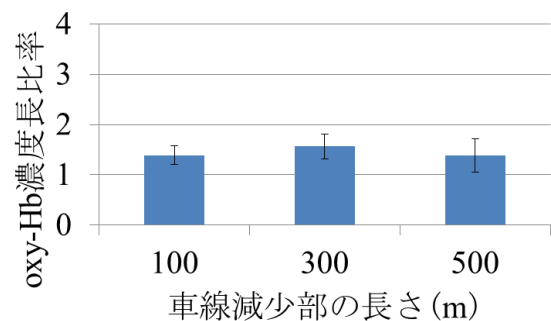


図12 後頭頂葉皮質のoxy-Hb濃度長比率

毎に違う値をとっていると推測されるが、生体内である光路長を正確に測定することはできない。測定データの中で、脳の賦活を量的に表しているとされるものはoxy-Hb濃度であり、異なる測定箇所間の比較を行うには、測定箇所毎に異なる、光路長の影響を排除する必要がある。そこで、oxy-Hb濃度長同士の割り算によって単位を無次元化し、光路長の影響を取り除く。光路長を取り除いたものをoxy-Hb濃度長比率と定義し、算出にあたっては、車線減少部走行時のoxy-Hb濃度長の平均値を、その前の直線道路走行時のoxy-Hb濃度長の平均値で除した値を用いた。これによって異なる測定箇所間で同じように評価が可能になるため、車線減少部の長さによる違いを検討する。本研究ではこのoxy-Hb濃度長比率の被験者全員の平均値を、ある脳の部位に対応する測定箇所毎に比

較した．視覚による注意に関係のある上側頭溝周辺に相当する測定箇所や，視覚情報の処理に関係のある46野に相当する測定箇所に着目すると，図11の様に車線減少部の長さが短くなるほど，oxy-Hb濃度長比率が多くなるという結果が得られた．この結果は，実験条件から車線減少部の影響を受けていると思われる．そして，車線減少部の長さが短くなるほど短時間で視覚情報を認知し，処理しなくてはならず，脳が賦活したからであったと考えられる．その一方で図12に示す後頭頂葉皮質の様に，車線減少部の長さや脳血流量に関連が見られない箇所も見られた．これは，後頭頂葉皮質が体性感覚に関連のある部位であり，運転行動は体性感覚に影響を与えず，車線減少部の長さや賦活の割合に関係がなかったからであると考えられる．

車線減少部の長さの影響を調べるため，NASA-TLXによるアンケートによって，主観的なメンタルワークロードを同時に調べた．NASA-TLX 得点の算出にはAWWL(adaptive weighted workload)得点⁷⁾を使用した．AWWL得点の被験者全員の平均値を図13に示す．車線減少部の長さが短くなるほど，メンタルワークロードが大きくなっている．今回の実験では，メンタルワークロードを感じるとされる箇所が車線減少部のみであり，この結果は車線減少部の長さの影響によるものであると考えられる．メンタルワークロードと同じ傾向を示したoxy-Hb濃度長比率の箇所があることから，これらには関連があると考えられる．

5. 結論と今後の課題

本研究ではNIRSを用いて，運転中のドライバーの脳血流動態を測定した．基礎的な実験として，ドライビングシミュレータ上の車線減少部を走行した際の脳血流動態を複数の測定箇所でも測定した．車線減少部の通過時に，脳血流動態を示すoxy-Hb濃度長の変化を示す脳の箇所があることが確認できた．また，測定箇所が近く，同じ脳の部位にある場合，同じようなoxy-Hb濃度長の挙動を示すことが見られた．これらの結果より，運転中においても，脳の賦活が起きていたことが確認できた．適切な脳の測定箇所を選択することにより，ドライバーの運転行動と脳血流の関係性を詳しく調べることができると考えられる．さらに，測定箇所の異なるoxy-Hb濃度長を評価するため，oxy-Hb濃度長比率を定義した．結果として，車線減少部の長さが短くなるほど，oxy-Hb濃度長の値が大きくなった．実験条件から，車線減少部の長さを反映していると考えられ，運転行動と脳血流動態が関係してい

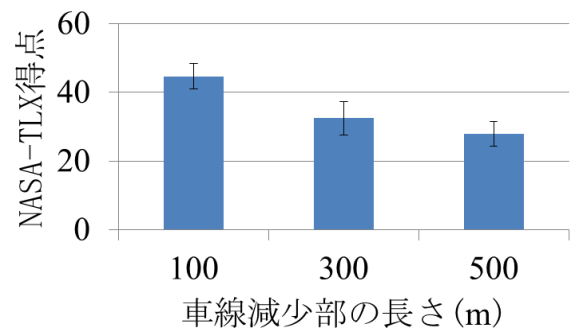


図13 NASA-TLX AWWL得点

ると考えられる．

今後の課題として，運転時の脳血流動態に影響を与える要因の詳細な分析や，運転中の脳血流動態の挙動に関するデータの蓄積が挙げられる．脳血流動態は，測定時の体調等の生体としての影響と，体を動かすことによる影響，そして脳の賦活による影響を受けていると考えられる．それら個別の要因のみを与えた実験を行うことによって，どのような行動がどのように脳血流動態に影響を与えるのかを個別に分析する必要がある．それらの分析や，データ蓄積によって運転時の脳血流が意味することの理解が進むものと考えられる．さらに，運転行動と脳活動の関係が明らかになることにより，運転時の評価につながると考えられる．

参考文献

- 1) 井坪慎二，奥谷正，橋本幸浩良，前川友宏：走りやすさマップデータを用いた日本の道路ネットワークの現状分析，土木計画学研究・講演集 Vol.35 CD-ROM，2007．
- 2) 谷口栄一，丸山篤司，山田忠史，安東直紀：近赤外分光法を用いた脳血流動態測定による都市内道路の走りやすさ評価に関する研究，第30回交通工学研究発表会論文集，pp277~280，2010．
- 3) Shang, T., Wang, S. and Zhang, S.: The Effect of Map Information on Brain Activation During a Driving Task, Lecture Notes in Computer Science, LNBI4689, pp236~245, 2007.
- 4) 井原昌孝，内田敬：近赤外光センサによるドライバーの心的状況の定量的計測手法に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.27, No.3, 2010．
- 5) 富田稔：NIRS シグナルに及ぼす諸因子，認知神経科学 Vol.12 No.1, pp36~43, 2010．
- 6) 精山明敏，遠藤大樹，熊谷悠香，関淳二：マルチモダル計測によるヒト脳機能の解明（招待セッション：光イメージング），IEICE technical report, 108(209), pp33~36, 2007．
- 7) 三宅晋司，神代雅晴：メンタルワークロードの主観的評価方法-NASA-TLX と SWAT の紹介及び簡便法の提案，人間工学，29(6)，pp399~408, 1993．

(2013.7受付)