

近赤外分光法を用いたドライバーの脳血流測定による都市内道路の走りやすさ評価*

Evaluation of driving performance on urban streets based on the measurement of brain activation with near infrared spectroscopy

丸山篤司**・谷口栄一***・山田忠史****・安東直紀*****

By Atsushi MARUYAMA**・Eiichi TANIGUCHI***・Tadashi YAMADA****・Naoki ANDO*****

1. はじめに

近年の脳診断技術の向上に伴い、人間の主観評価の客観的な分析が行われているⁱ。本研究では、近赤外分光法(Near Infrared Spectroscopy: NIRS)を用いて、自動車を運転中のドライバーの脳の前頭前野における血流動態を測定しⁱⁱ、都市内道路の走りやすさを客観的に評価する方法を検討する。

脳の前頭前野は思考、判断など人間の脳の高次な機能をつかさどる部位であり、その部位の脳血流量が増えることはその部位が活発に活動していることを意味する。前頭前野の血流動態の解釈については、現在も確立されているとは言いがたいが、血流が増加するときは脳が賦活されており、減少するときはリラックス状態にあるという見解が多く見られる。本研究においては、走行中のドライバーの脳血流動態を測定し、都市内道路の走りやすさの客観的指標としての可能性を検討する。

本研究は、走りやすさを客観的に分析することにより、快適性、安全性に関する道路、交通の改善を視野に入れている。またあるノード間において、所要時間は最短ではないが最も快適に走行可能な経路を導くことができる経路選択モデルの構築が可能であるかについても今後検討する予定である。

また、脳の前頭前野における血流動態の測定と同時に、ストレスを表すとされる唾液アミラーゼ活性値、心拍数についても測定を行う。

*キーワード：交通行動分析，交通意識分析，経路選択

**学生員，工修，京都大学大学院工学研究科，
(京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3231, FAX075-950-3800)

***フェロー，工博，京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3229, FAX075-950-3800)

****正会員，工博，京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3230, FAX075-950-3800)

*****正会員，工博，京都大学大学院工学研究科，
(京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3230, FAX075-950-3800)

2. 近赤外分光法 (NIRS) とは

活発な神経活動を示す領域は多くの酸素を必要とする。また酸素は血液中のヘモグロビンによって運ばれ(酸素を持つヘモグロビンを酸素化ヘモグロビンという)，酸素が消費されて脱酸素化ヘモグロビンとなる。この酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)と脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)の変化量を測定することにより神経系の活動を間接的に測定することができる。

本研究においてNIRSによる脳血流動態の測定はModified Lambert Beer則に基づいている。近赤外光を吸収する主な生体物質は、水およびヘモグロビンであり、それらの吸収は波長がおおよそ700nmから1200nmにおいて小さく、吸収されにくいために生体内を散乱されながらも数十cm進んだ光を検出することができる。また酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンでは吸光特性が異なるという性質がある。つまり波長により、両ヘモグロビンの吸収の強さが異なるので、2種類以上の波長の光を用いれば両ヘモグロビンの変化量を検出することができる。

Modified Lambert Beer則により、生体内に照射された光の減衰は吸光度 A で式(1)のように表される。

$$A = \mu_a L + B = -\ln(I_r / I_0) \quad (1)$$

ここで、 A は吸光度、 ϵ [$\text{mm}^{-1}\text{mM}^{-1}$]はモル吸光係数、 C [mM]はモル濃度、 L [mm]は実効光路長、 B は散乱により検出器で検出されなかった光の損失、 I_0 、 I_r [W/m^2]は入射光および検出光の強度である。吸収係数 μ_a は吸収体のモル吸光係数 ϵ [$\text{mm}^{-1}\text{mM}^{-1}$]とモル濃度 C [mM]の積で式(2)のように表すことができる。

$$\mu_a = \epsilon C \quad (2)$$

本研究では酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの濃度について計測するので式(1)，(2)より吸光度 A を式(3)のように表す。

$$A = (\epsilon_{\text{oxy}} C_{\text{oxy}} + \epsilon_{\text{deoxy}} C_{\text{deoxy}}) L + B = -\ln(I_r / I_0) \quad (3)$$

次に2波長 λ_1 、 λ_2 を用いた場合、ある状態から他の状態へ血流動態が変化したときの吸光度の変化 ΔA

(λ_1)と $\Delta A(\lambda_2)$ を用いると、 ΔC_{oxy} (酸素化ヘモグロビン濃度変化), ΔC_{deoxy} (脱酸素化ヘモグロビン濃度変化)が式(4), (5)より求まる. ただし実効光路長 L が不明なため, L との積でしか求まらない. 実効光路長 L は入射点と検出点の間の距離よりもずっと長く, 散乱体の吸収及び散乱の強さ(吸収係数 μ_a [mm^{-1}]と散乱係数 μ_s [mm^{-1}]), 媒体の厚さ, 入射・検出間距離に依存する.

$$L \cdot \Delta C_{oxy} = \frac{\epsilon_{deoxy}(\lambda_1)\Delta A(\lambda_2) - \epsilon_{deoxy}(\lambda_2)\Delta A(\lambda_1)}{\epsilon_{deoxy}(\lambda_1)\epsilon_{oxy}(\lambda_2) - \epsilon_{deoxy}(\lambda_2)\epsilon_{oxy}(\lambda_1)} \quad (4)$$

$$L \cdot \Delta C_{deoxy} = \frac{\epsilon_{oxy}(\lambda_2)\Delta A(\lambda_1) - \epsilon_{oxy}(\lambda_1)\Delta A(\lambda_2)}{\epsilon_{deoxy}(\lambda_1)\epsilon_{oxy}(\lambda_2) - \epsilon_{deoxy}(\lambda_2)\epsilon_{oxy}(\lambda_1)} \quad (5)$$

実行光路長 L を求めることは非常に困難なため本研究では $L \cdot \Delta C_{oxy}$ および $L \cdot \Delta C_{deoxy}$ を測定値として用いる.

3. 実験概要

被験者は, 京都市内に設定したルートを走行する. 走行ルートを図1に示す. 被験者の額に赤外線照射, 検出プローブを装着し, 走行中のドライバーの前頭前野における血流動態を測定する. 測定には NIRO-200(浜松ホトニクス)を用いる. 走行ルートの道路の状況を表1に示す. 表中の走りやすさは国土交通省の走りやすさマップに基づくものである. また GPS を用いて, 車両の位置と速度を記録する. 被験者の特性を表2に示す.

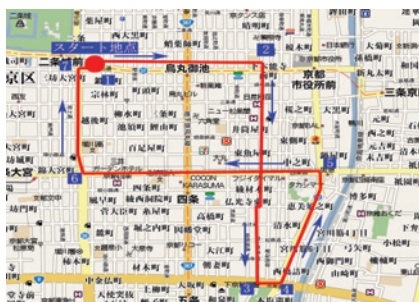


図1 走行ルート

4. 実験結果および考察

実験開始から終了までの全被験者のoxy-Hb濃度変化の平均値と分散値を, 図2に示す. 被験者2, 6, 8のoxy-Hb濃度変化は平均値が負の値をとり, 分散値も小さい. 被験者2, 6, 8, は被験者内において相対的に運転経験が豊富であり, 運転に慣れていてこと

表1 道路の状況

リンク	ノード	道路幅員(m)	車線数	歩車分離	走りやすさ	交通量(台/h)	距離(m)
a	1→2	35	片側3車線	○	A	1208	1266
b	2→3	4	1車線	×	D	データなし	1637
c	3→4	38	片側4車線	○	A	1310	280
d	4→5	15	片側2車線	○	B	1203	947
e	5→6	13	片側2車線	○	B	567	1836
f	6→7	46	片側4車線	○	A	2000	811

表2 被験者の特性

被験者	年齢	運転歴(年)	運転時間(h/週)
1	24	3	0
2	37	19	1
3	26	5	0
4	23	4	0
5	23	3	0
6	56	31	1
7	23	1	0
8	22	3	6

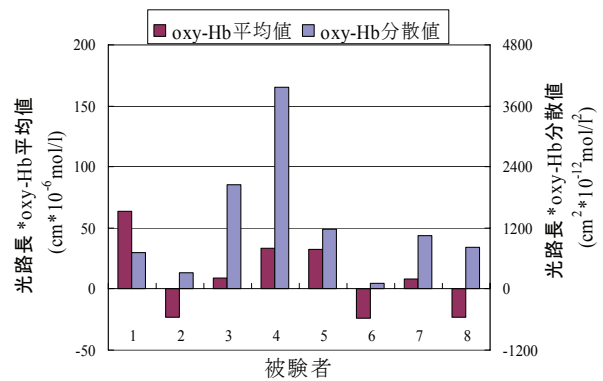


図2 被験者ごとのoxy-Hb濃度変化の平均値, 分散値

からこのような結果が得られたと考えられる. 囲碁やテレビゲームなどの複雑な認知活動においても, 熟練者はそうでない被験者に比べ oxy-Hb 濃度が低下する傾向が見られている.

次に, 被験者2, 3のヘモグロビン濃度変化と車両走行速度を図3, 図4に示す. 赤がoxy-Hb濃度変化, 青がdeoxy-Hb濃度変化, 緑が車両の走行速度を示している. 図3からわかるように被験者2にはoxy-Hb, deoxy-Hb共に顕著な変化は見られなかった. 被験者3はdeoxy-Hb濃度に大きな変化がないものの, oxy-Hb濃度には変化が見られた. また被験者1, 3, 8においては, 信号での車両停止時にoxy-Hb濃度が上昇し, 発進時に減少する傾向が見られた. 矢印で示した時間において車両が停止している. ただし, すべての信号においてこの傾向が見られたわけではない.

この現象の一つの解釈として, 次のように推測することも可能である. 今回の実験で測定している脳の前頭前野は, 行動のための計画を司っており, 車両が交差点で停止している間は賦活されるが, 車両が走行を開始すると, 運転行動に移るので, 運動を司る脳の他の部位が賦活され, 前頭前野のoxy-Hb濃度が減少すると推測される. なおこのことを検証す

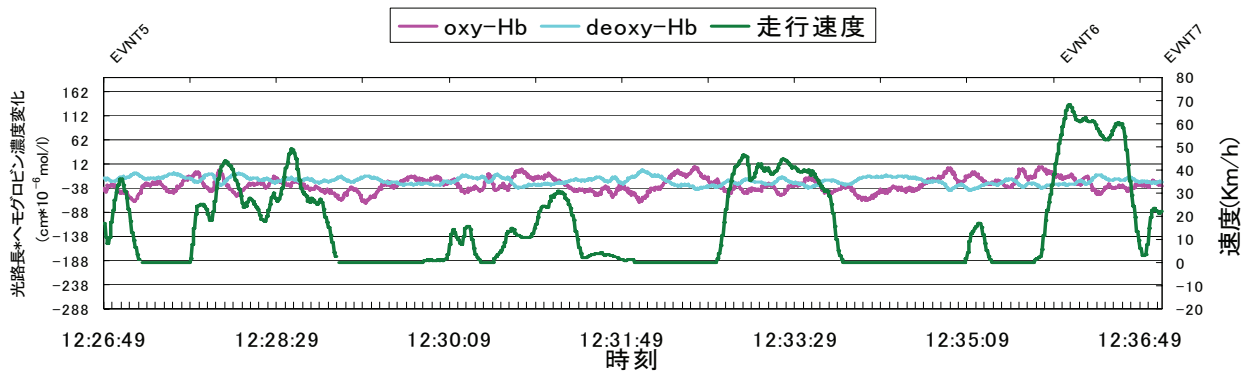


図3 ヘモグロビン濃度変化 (被験者 2)

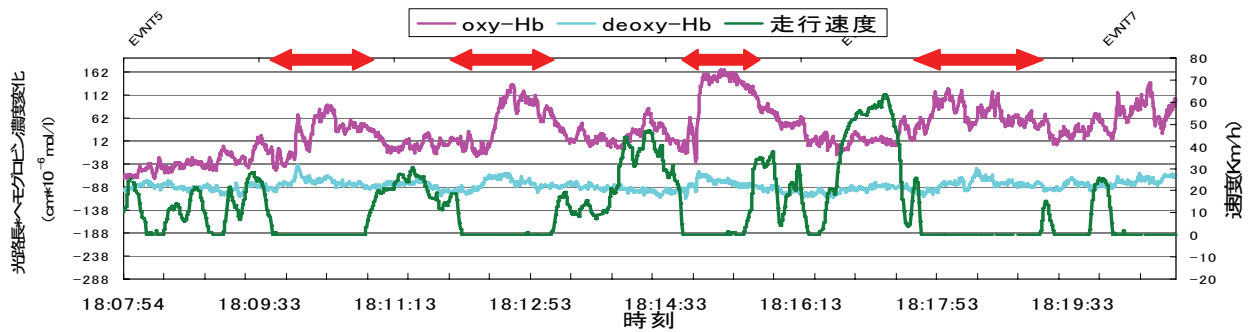


図4 ヘモグロビン濃度変化 (被験者 3)

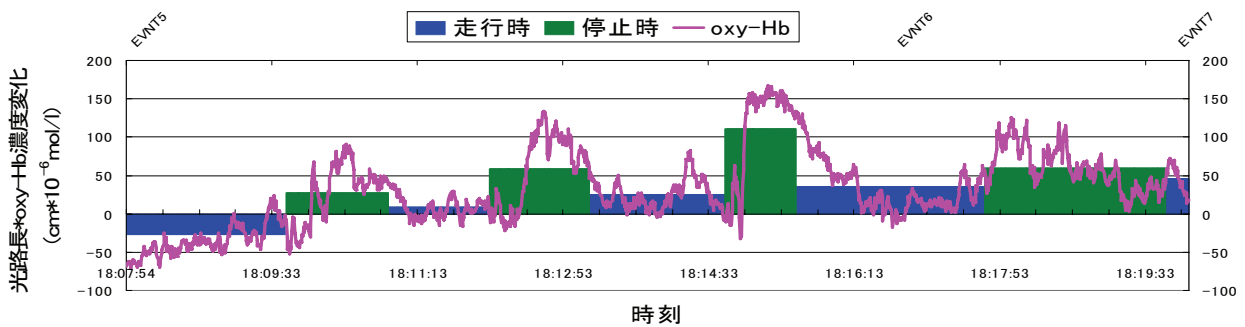
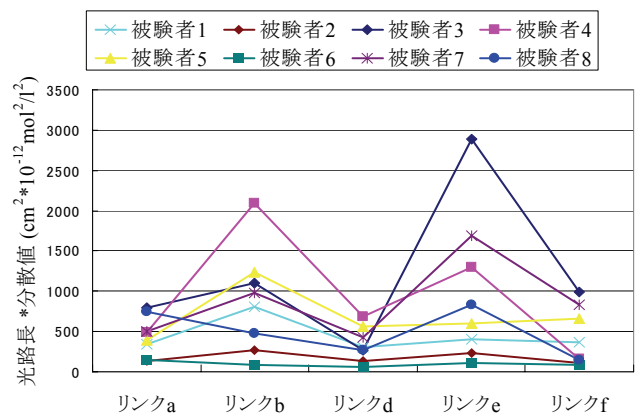


図5 走行時と停止時における oxy-Hb 濃度変化

るためには、今後脳の他の部位の測定が必要である。車両の停止時と走行時における oxy-Hb 濃度変化の平均値を表したものを図 5 に示す。青が走行時の平均値、緑が停止時の平均値を表している。またそれぞれの色が示す時間において車両が走行、停止を行っている。この図から車両走行時と停止時の差を見ることができる。また走行時間の経過と共に oxy-Hb 濃度平均値が上昇している傾向が見られる。

次に、リンクごとの oxy-Hb 濃度変化の分散値の平均を示したものが図 6 である。また各リンクの走りやすさおよびセンサス交通量を同時に示す。Oxy-Hb 濃度変化の平均値は基準とするヘモグロビン濃度の値の影響を受けること、また平均値はルート上の走行順序による影響を受けると考えられることから、リンクごとの比較においては oxy-Hb 濃度変化の分散値



リンク	a	b	d	e	f
走りやすさ	A	D	B	B	A
交通量(台/h)	1208	データなし	1203	567	2000

図6 リンクごとの oxy-Hb 濃度変化の分散値

を用いることとする。

走りやすさ D のリンク b では分散値が高いことがわかる。またリンク e では走りやすさが B であるが、リンク e は交通が集中し日常的に渋滞していることから交通量が少なく、oxy-Hb 濃度変化の分散値は高くなっている。国土交通省が発行する走りやすさマップにおける走りやすさは、道路の構造のみを考慮して作られたものであるが、道路の構造だけではなく、交通量や交通混雑が oxy-Hb 濃度変化の分散値と関係があると考えられる。

次に、各リンクの oxy-Hb 濃度変化の分散値を示す図 7 から、リンク旅行速度が高いリンクでは分散値が小さく、分散値が大きいリンクはリンク旅行速度が低いことがわかる。リンク旅行速度が高く分散も高いリンクは全く見られなかった。

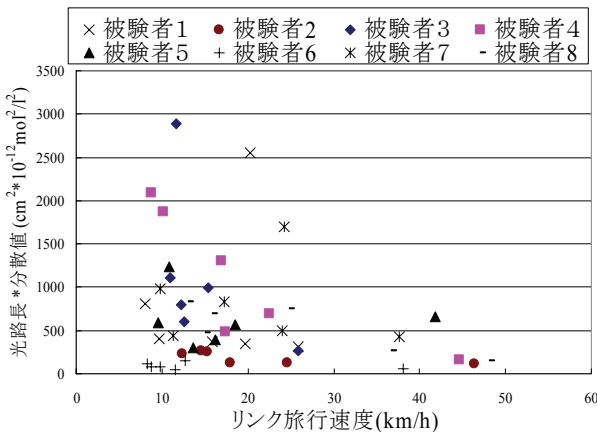


図 7 リンク旅行速度と oxy-Hb 濃度変化分散値

リンクごとの旅行速度と、oxy-Hb 濃度分散値を図 8 に示す。円滑な走行速度を保つことができたリンク d やリンク f では分散値が低くなっており、走りやすさ D のリンク b や日常的に渋滞しているリンク e では分散値が高いことがわかる。またこの図 8 からリンクを 3 つに分類することができる。リンクタイプ A は、平均走行速度が高いことから、走行に要する時間が短く、oxy-Hb 濃度変化の分散値が小さいことから、快適な走行ができるリンクといえる。リンクタイプ B は、平均走行速度が低いことから、停車や減速をする機会が多く、走行に要する時間が長く、分散値が大きいことから、走行にストレスを感じているリンクといえる。リンクタイプ C は、そのどちらでもないリンクに該当する。

また唾液アミラーゼ活性について、測定可能であった被験者 4 人の測定結果を表 3 に示す。運転により被験者の唾液アミラーゼ活性値の上昇が見られた。心拍数に関しては、有意な変化を見ることができなかった。

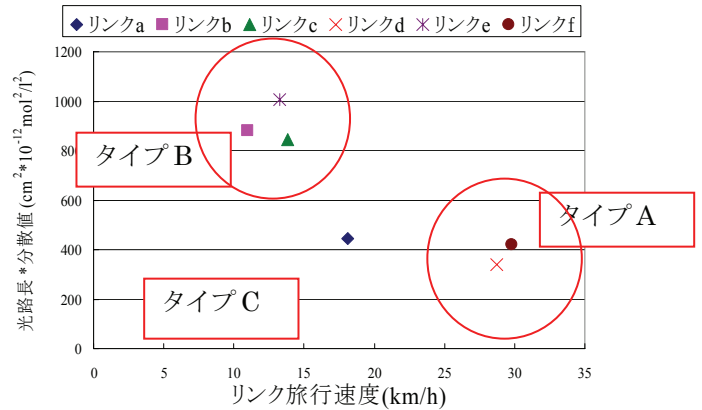


図 8 リンク旅行速度と oxy-Hb 濃度変化分散値

表 3 唾液アミラーゼ活性値

被験者No	AMY実験前(kU/L)	AMY実験後(kU/L)
1	57	70
2	27	43
3	48	79
8	24	32

5. まとめ

今回の実験では、ドライバーの運転暦が長いのか、あるいは運転頻度が高い被験者について、運転中の前頭前野における oxy-Hb 濃度変化が少なく、初心者ドライバーでは、運転中の oxy-Hb 濃度変化が大きかった。これは NIRS を用いて被験者の運転特性を表すことができる可能性を示している。また、国土交通省の走りやすさマップにおいて走りにくいとされているリンクでは運転中の前頭前野の oxy-Hb 濃度変化の分散値が高く、逆に走りやすいとされているリンクでは分散値が低かった。これらの NIRS によるリンク評価の結果は、リンクの走りやすさを客観的に評価できる可能性を示している。

また今後は、唾液アミラーゼ活性値、心拍変動についても走りやすさの指標となりうるかを検討する。更なる実験を行い、複数の指標を用いることにより、本実験から得られた結果の妥当性をより精緻に検討するとともに、より多面的な経路評価にも取り組む予定である。

参考文献

- ⁱ Hoshi Y, Tamura M: Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neuronal function during mental work in man., *Neurosci Lett*, 1993, 150: 5-8
- ⁱⁱ Tao Shang, Shuoyu Wang, and Shengnan Zhang: The Effect of Map Information on Brain Activation During a Driving Task, *Lecture Notes in Computer Science*, LNBI 4689, pp.236-245, 2007