

近赤外光センサによるドライバー心的状況の定量的計測手法に関する研究*

A Method for Measuring Driver's Mental Reactions by Using Near Infrared Sensor*

井原昌孝**・内田敬***

By Masataka IHARA**・Takashi UCHIDA***

1. はじめに

交通事故の予防を目的として、カーブにおける注意喚起のための反射材の設置や、住宅地における道路幅員の意図的な減少といった様々な施策がうたれている。しかし、これらの施策が交通事故予防に役立っているのかについて、ドライバーの心的状況からの検証はされてこなかった。実際にこれら施策がドライバーに対して何らかの働きをしていれば、ドライバーは、例えば反射材を見ることによって心的状況を変化させ、当該場所での運転に対する注意が喚起され、緊張などを高めているはずである。

そこで本研究では、ドライバーの心的状況を定量的に計測する手法として客観的なデータが入手可能な生理指標に注目する。生理指標の中でも心的状態、特に緊張度などを定量的に扱うために、交感神経のみに支配されている浅部抹消血管の収縮運動によって変化する血中ヘモグロビンの酸素飽和度の変動に着目する。既往研究として内田ら¹⁾²⁾によってこの生理指標を用いて心的状態を表現できる可能性が示唆されている。本研究の目的は、ドライバー心的状況の定量的な計測手法として、本研究で提案する手法が有効であるかどうかを検証する。そして緊張度など心的状態を把握するための指標を提案する。本研究における酸素飽和度の計測には無侵襲的測定かつ簡易に計測が可能なバイタルセンサ¹⁾(反射型 Near Infrared センサ)を用いた。

2. 心的状況の計測手法

本研究で用いるバイタルセンサはセンサ本体(駆動部・ロガー)とグラスファイバーで接続されたプローブ部で構成される。プローブ部から照射される光は皮膚を通過し、血液中のヘモグロビンにより反射され、その反射された光をPD(Photo Diode)で受光し、反射光強度値を計測する。血液中のヘモグロビンは、主に4個の酸素

*キーワード: 緊張度評価、酸素飽和度、走行実験

**学生員、大阪市立大学大学院工学研究科

(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138、

TEL:06-6605-2731、FAX:06-6605-3077)

***正員、博(工)、大阪市立大学大学院工学研究科

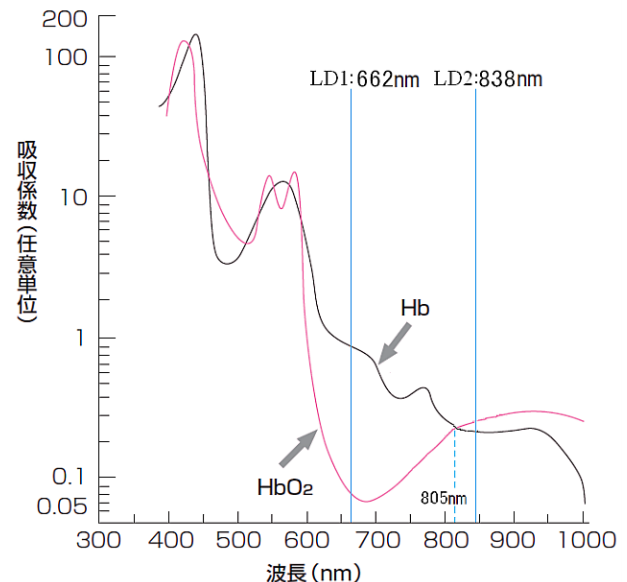


図1 波長に対する吸光特性図(シスメックス³⁾を一部改変)

が結合した酸素化ヘモグロビン(HbO₂)と、1個の酸素も結合していない還元ヘモグロビン(Hb)が存在するが、酸素の結合の割合によって照射光の吸光特性が変わる。したがって、酸素飽和度すなわち酸素化ヘモグロビン(HbO₂)の比率に応じて血液の吸光率は変化する。波長に対するHbO₂とHbの吸光特性を図1に示す。

本研究では照射光として、LD1: 662nm(赤色光)とLD2: 838nm(近赤外光)の異なる2波長を用いている。図1に示すように、LD1、LD2は不動点(HbO₂、Hbそれぞれの吸光係数グラフが交差する点; 805nm)を挟んでいるため、1波長の場合とは違い、計測誤差の縮小や飽和度の時間的変化をより正確に計測することを可能としている¹⁾。HbO₂とHbの吸光特性をみると、LD1では酸素飽和度の上昇に従って吸光係数は小さくなりLD2では酸素飽和度の上昇に従って大きくなる。つまり酸素飽和度の上昇に対して反射光強度LD1は上昇、LD2は下降とお互い反対方向に連動する。また酸素飽和度の上昇以外にも、単純に血流量が上昇すれば、反射光強度LDは上昇する。

しかし実際には変動要因はこれら2つ以外にもある。交感神経系以外からの影響による心拍数の変動や被験者の筋運動、さらには機械特性や測定時の誤差などがある。これ

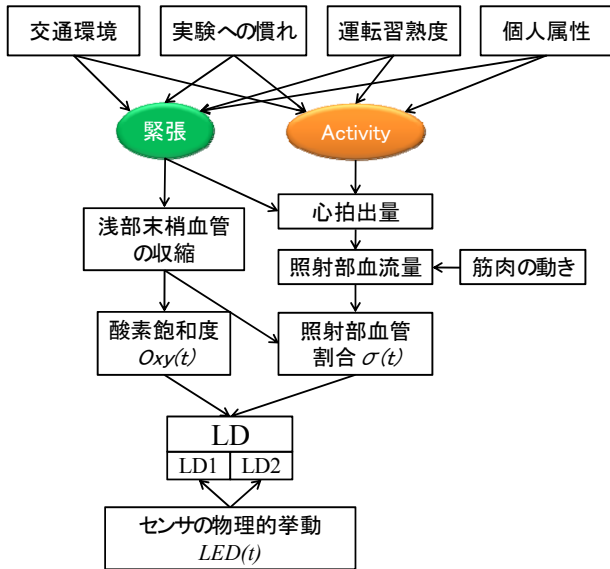


図2 LD に対する変動要因の関係図

に緊張状態の程度は、交通環境や運転の習熟度、実験への慣れなど多岐にわたる。これらを関係図にして図 2 に示す。

このように様々な変動要因が重なり、酸素飽和度と照射部の血管割合に反映され、反射光強度 LD の変動に影響を及ぼすと考えられる。

次に反射光強度から酸素飽和度と血流量が計測可能かについて、立式から検討する。光の反射光強度が透過強度に比例するとし、Lambert-Beer の法則⁴⁾に加え、照射部血管割合を考慮すると、LD の値は

$$LDn(t) = I_{on} \cdot 10^{-\varepsilon_{hn}(Oxy(t)) \cdot L \cdot \sigma(t)} + LED_n(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{hn}(Oxy(t)) = Oxy(t) \cdot (1 - \varepsilon_{Oxn}) + (1 - Oxy(t)) \cdot (1 - \varepsilon_{Ren}) \quad (2)$$

$n = 1 \text{ or } 2$

LD_n : LD1 or LD2

I_{on} : LDn の照射光強度

I_{in} : LDn の反射光強度

$\varepsilon_{hn}(Oxy(t))$: $Oxy(t)$ に対する LDn の反射光係数

L : 光の透過距離

ε_{Oxn} : LD_n に対する酸素化ヘモグロビン吸収定数

ε_{Ren} : LD_n に対する還元ヘモグロビン吸収定数

$Oxy(t)$: 時間 t における血液中の酸素飽和度

$\sigma(t)$: 時間 t における LDn の照射部血管割合

$LED_n(t)$: 時間 t における LED_n のドリフト

と表わせる。LD1 と LD2 から $Oxy(t)$ は

$$Oxy(t) = \frac{\log_{10} \left(\frac{I_{01} \cdot LD2}{I_{02} \cdot LD1} \right)}{(\varepsilon_{Re1} - \varepsilon_{Re2}) - (\varepsilon_{Ox1} - \varepsilon_{Ox2}) - (\varepsilon_{Re1} \cdot \varepsilon_{Ox1} - \varepsilon_{Re2} \cdot \varepsilon_{Ox2})} \quad (3)$$

のように絶対値の算出が可能となる。つまり反射光強度 LD から酸素飽和度が表わせることがわかる。しかし絶対値を算出するためには具体的な照射光強度と光の透過距離が必要となる上に、被験者間ではほぼ意味をなさない。そこで本研究では、酸素飽和度と照射部血管割合の

変動を相対的に捉えるために反射光強度 LD1、LD2 を用いた相対的な心的指標を提案する。LD1 と LD2 の変動は相反することに着目し、 $w \times LD1 \pm (1-w)LD2$ について考える。簡易化のため、本研究では重み $w=0.5$ として、以後 $LD1 \pm LD2$ とする。「酸素飽和度」「照射部の血管面積割合」の変動に対して、LD1、LD2、 $LD1 \pm LD2$ の変動を図 3 に示す。これは図 1 の HbO_2 - Hb 間の吸光係数の差と対応している。これをみると、LD1・LD2 は酸素飽和度、 $LD1+LD2$ は血流量に対して線形な関係にあることがわかる。これらより、緊張度によって変化する酸素飽和度の相対的指標として $LD1-LD2$ を「緊張度指標」、血管割合の相対指標として「血流量指標」とする。

そこで本研究ではバイタルセンサによる計測で得られる LD1、LD2 に加え、心的状況を表わす指標として緊張度指標： $LD1-LD2$ 、血流量指標： $LD1+LD2$ を用いることにより、心的状況の定量的計測の有用性を検証する。

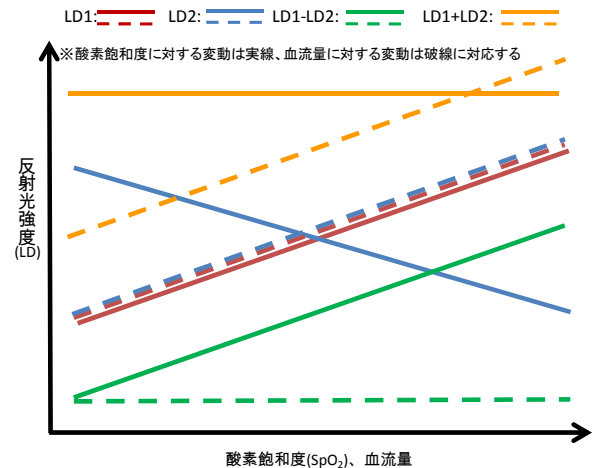


図3 酸素飽和度、血流量それぞれに対する各値の関係

3. 走行実験の概要

本研究では、ドライバー心的状況を定量的に計測するために主に酸素飽和度によって変化する反射光強度 (LD1, LD2) を計測する。走行実験の目的は、実験器具をドライバーに装着し、時間軸で連続して計測を行うことによって、主に反射光強度が変動している地点、交通環境を把握し、被験者の反応特性を明らかにしていくことである。

図 4 に実験で用いたバイタルセンサの装着状況とバイタルセンサを示す。バイタルセンサで計測されたデータには LD1 と LD2 の 2 種類があり、LD1 ブロックと LD2 ブロックに分かれる (各ブロック 0.5 秒)。各ブロック内で一番小さい値を min、一番大きい値 Max として取得する。これにより、毎秒の LD1 と LD2 の最小値、最大値を得る。最小値とは光線の非照射時の値 (ダーク

値)である。最小値は、光線照射により被計測物やプローブ自体が熱を帯び、その放射光を感知することによる値のドリフトや計測時の環境光の影響を反映する。これを最大値から差し引くことで、前述の影響を取り除く。実際の分析データとして用いているものは各 LD の最大値から最小値を引いた LD Max-min 値を用いている。なお、実際の実験中にはこれに加えて、環境光の影響を除くためにアルミホイルとサポーターを装着した。

表 1 に実験概要を、表 2 に被験者概要を示す。被験者は計 20 名を用いた。本稿では主に被験者 A～E の 5 名に絞り、分析データを挙げる。これら 5 名は複数回実験を行った被験者のうち、運転習熟・未習熟、(運転習熟者に関しては)左手固定・未固定という実験条件を有している被験者を選んでいる。非固定のためハンドル操作が発生する被験者に対しても実験中は不必要に左手は動かさないように依頼した。

走行ルートを図 5 に、各走行区間におけるおおよその所要時間を表 3 に、阪神高速環状線の概略図を図 6 示す。なお、表 3 における a～e は図 5 と対応している。本研究では、交通量が多くループ状になっている阪神高速環状線を主な実験ルートとしている。環状線の大回り、小回りを各 3 周設けることによって被験者の慣れなどについても計測可能とした。また実験中盤に小回りにルートを変更することによって、同一ルートを 3 周走ってきた被験者に対して刺激として新たなルートを用意している。被験者は走行すべきルートとレーン(一部)を指示されるのみで、速度等は任意とした。走行実験中は 2 台のカメラによって、被験者の動き(主に手)や周りの交通環境を記録している。これら情報と計測される反射光強度の関係は時間で対応づけられる。

なお、被験者 N の i 回目、第 I 回実験における大回り 1 周目、地点 P のことを以後、N-i(I)、1-P と表記する。

4. 計測部位の検討

分析に用いるデータは、分合流が存在し、同一のルートを走れる点から主に阪神高速環状線(大回り、小回り 1～3 周)のデータとし、これに加えて、環状線との比較のために高速(帰り)のデータという 7 区間のデータを用いる。

実験では指と手首の 2 部位で測定を行ったが、どちらがドライバー心的状況、特に緊張の計測に繋がる酸素飽和度を計測するのに適しているのかについて検討する。両部位ともに計測原理は同じであるが、指と手首では生体組織の差による反射光強度の影響や、ハンドル操作など手の動きによって影響を受ける度合いも異なってくると考えられるためである。



図 4 バイタルセンサ(左図)とプローブ装着状況(右図)

表1 実験概要

実験概要		
	第 I 回実験	第 II 回実験
実験日時	2008/11/27～12/09	2010/01/29,30
実験回数	24回	6回
計測部位	ともに計2ヶ所 左手中指付け根、左手手首外側	

表2 被験者概要

被験者	実験回数		運転習熟	左手固定 (ハンドル操作無)
	第 I 回実験	第 II 回実験		
A	2回	1回	○	3回目のみ
B	2回	1回	○	全て
C	2回	1回	○	3回目のみ
D	1回	1回		
E	1回	1回		
F,G	各2回	0回	○	
H～M	各1回	0回	○	全て
N～S	各1回	0回		
T	0回	1回		
計20人	計24回	計6回		

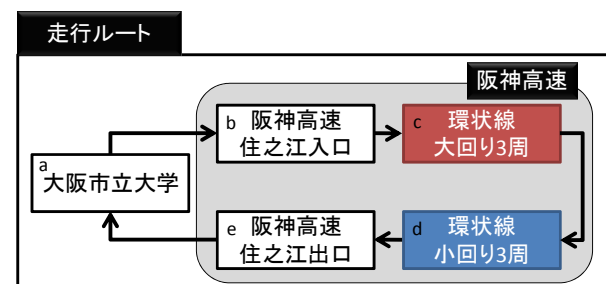


図 5 走行ルート

表3 各区間におけるおおよその所要時間

走行区間	a-b間	b-c間	c	d	d-e間	e-a間	計
所要時間	15分	5分	30分	15分	5分	15分	85分

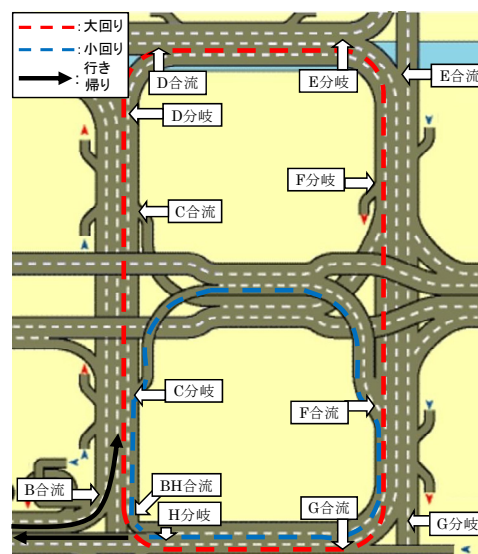


図 6 阪神高速環状線概略図 阪神高速道路 HP より改変

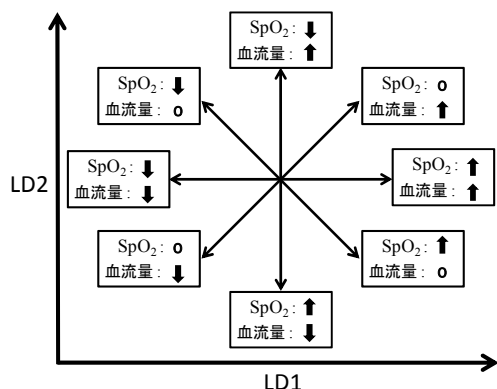


図7 LD1とLD2平面における点の遷移に対する要因図

計測値である LD1 と LD2 の変化要因について、視覚的に簡便に知るための図を図 7 に示す。1 例をあげると、右方向に移動した時には酸素飽和度が上昇し (LD1:上昇、LD2:下降)、血流量も上昇(LD1,LD2:ともに上昇)したために、結果として LD1 が上昇し LD2 は変動しなかったととらえている。

(1) 1人の被験者に関する詳細検討

まずは被験者 A について計測部位の検討を行う。被験者 A を選んだ理由としては、実験回数が 3 回と最多であり、被験者内比較ができること、計測ミスや渋滞などもあまりなくデータに欠損がないことである。ただし A-1(I)では大回りを 4 周している。

まずは A-1(I)、大 1 から高速帰りのデータにおける LD1 と LD2 の区間別散布図を図 8- a)に示す。

全体の分布形状は、実験全体が大きく何に影響されているのかを表わし、区間毎の移動は区間レベルで見たときや、区間毎の形で見たときには区間内においてどういった変動要因が働いているのか、もしくは計測されているのかを表わしている。

図 8- a)の全体の分布形状に着目すると、手首は強い正の相関がみられるが、指は上部で負の相関が少し見られるが全体として相関は弱い。原理的には酸素飽和度に応じて横軸 LD1、縦軸 LD2 の散布図においては負の相関を示すはずである。ところが、手首は実験全体として正の相関が強いことから血流量の影響が支配的であり、指は酸素飽和度と血流量両者が重なり合った結果だと考えられる。

区間毎の移動をみると、手首では実験序盤(大回り 1~3 周)では指、手首ともに右下方向へ遷移していることがわかる。つまり酸素飽和度の上昇が確認できる。実験中盤(大回り 3~小回り 2 周)に左下方向へ移動後、終盤(小回り 2 周~高速(帰り))ではほとんど区間毎に移動はみられない。つまり中盤以降は血流量の支配が強くなる、もしくはあまり変動がみられていないことがわかる。指についても同様にみていくと、実験序盤では右下もし

● 大回り1周目 ● 大回り2周目 ● 大回り3周目 ● 大回り4周目
● 小回り1周目 ● 小回り2周目 ● 小回り3周目 ● 高速(帰り)

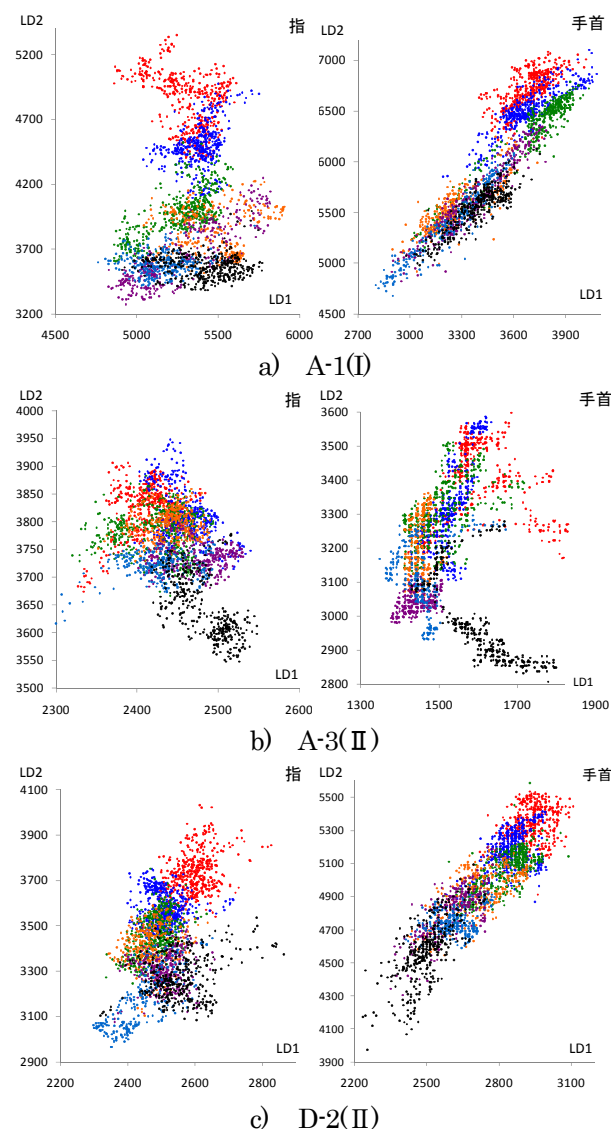


図8 区間別 LD1とLD2 散布図

表4 主な変動要因

a) A-1(I)				
被験者A 1回目	指		手首	
全体の変動	酸素飽和度	血流量		血流量
区間毎の変動	実験序盤	酸素飽和度	血流量	酸素飽和度
	実験中盤	酸素飽和度	血流量	血流量
	実験終盤	酸素飽和度	血流量	血流量
区間毎の形(長径方向)	酸素飽和度	血流量		血流量
b) A-3(II)				
被験者A 3回目	指		手首	
全体の変動	酸素飽和度	血流量		血流量
区間毎の変動	実験序盤	酸素飽和度	血流量	血流量
	実験中盤	酸素飽和度	血流量	血流量
	実験終盤	酸素飽和度	血流量	血流量
区間毎の形(長径方向)	酸素飽和度	血流量	酸素飽和度	血流量
c) D-2(II)				
被験者D 2回目	指		手首	
全体の変動		血流量		血流量
区間毎の変動	実験序盤	酸素飽和度	血流量	血流量
	実験中盤	酸素飽和度	血流量	血流量
	実験終盤	血流量	血流量	血流量
区間毎の形(長径方向)	酸素飽和度	血流量		血流量

くは下方向へ移動している。つまり酸素飽和度、もしくは酸素飽和度と血流量の影響がみられる。実験中盤では右方向へ移動後、左下方向へ移動している。実験終盤では再度右方向への移動が見られる。つまり中盤、終盤でも酸素飽和度と血流量の影響が重なり合って表れている。

次に区間毎の形をみると、指においては多くが横方向を長径とする楕円を描いている。つまりこの区間内に多くみられる変動の要因は酸素飽和度と血流量と推察される。手首では左斜め下から右斜め上方向を長径とする楕円を描いている。つまり区間内に多く見られる変動の要因は血流量が多いことがわかる。以上を表 4-a)にまとめる。

次に被験者内での比較のために A-3(II)について検討する。LD1 と LD2 の区間別散布図を図 8-b)に示す。なお A-3(II)では被験者は左手を固定して実験を行った。

図 8-b)をみると、A-1(I)と同じ視点で全体の分布形状は、指では相関は弱い、手首では強い正の相関がみられる。ただし特に手首では実験の極序盤と、最も終盤では強い負の相関が表れている。

区間毎の移動についてみると、指では実験序盤で右下へ移動後に左下移動、実験中盤でも右下へ移動後に左下へ移動していることがわかる。実験終盤では右下方向へ移動している。つまり全体を通して区間の移動には酸素飽和度、血流量の両者の影響が見られる。手首では実験の序盤では左上方向、中盤では左下方向、終盤では右下方向という動きがみられる。つまり序盤、終盤は酸素飽和度、中盤は血流量の影響がみられる。

区間毎の形についてみると、指では左斜め上から右斜め下方向を長径とする楕円が多くみられる。つまり区間内で酸素飽和度の支配が強いことがわかる。手首では序盤と終盤には左斜め上から右斜め下方向を長径とする楕円が見られるが、全体としては左斜め下から右斜め上方向への楕円が多くみられる。つまり酸素飽和度と血流量の支配が見られる。以上を表 4-b)にまとめる。

(2) 被験者を通じた検討

次に被験者を通じた検討を行うために、運転に習熟していない被験者のうち、実験回数が多い D-2(II)をみる。LD1 と LD2 の区間別散布図を図 8-c)に示す。

図 8-c)をみると、全体の分布形状は指が少し弱いものの、正の相関がみられる。

区間毎の移動は、実験序盤では左下へ遷移後、下へ動き、中盤では若干右下へ遷移し、その後左下へ移動している。終盤では右上へ遷移していることがわかる。

区間毎の形は、指では楕円というより円に近いものが多い。つまり酸素飽和度と血流量の影響が両者重なっている。手首では A-1(I)、A-2(II)と同様に左斜め下から右斜め上方向への楕円が多くみられる。

(3) 計測部位の検討のまとめ

表 4 に 2 名、3 回の実験における変動にはどのような要因が作用しているかをまとめた。これをみると手首では全体、区間毎の移動、区間内の変動全てにおいて、ほぼ血流量が支配している。一方で指では酸素飽和度と血流量の支配が見られる。特に A-3(II)→A-1(I)→D-2(II)というハンドル操作がない→普通→多いという順番に血流量の影響が強くなることから、ハンドル操作と血流量には関係性があると考えられる。

以上から、特に緊張とのかかわりがある酸素飽和度の影響が強くなる指での計測が望ましいといえる。

5. 心的標値の検討

心的状況を知るための計測値として LD1、LD2 が存在し、心的状況の相対的指標値として緊張度指標 LD1・LD2 と血流量指標 LD1+LD2 を提案した。しかし提案した指標が計測値よりも実際のデータに対して有用であるかどうかについて検討を行う。また本節では前節の内容を踏まえて指のデータを載せる。

(1) 長期的な反応特性

被験者反応の計測は、そのこと自体が心的な負担を強いられると思われる。被験者に対するヒアリングでも実験そのものに対する緊張は確認できた。一方で走行ルートは大回り、小回りとも 3 周走行するために同一コースを走ることによる慣れとリラククスも被験者の観察や被験者からのヒアリングから得ている。つまり実験全体には緊張が存在し、これは経時変化とともに消失していくものと考えられる。また同一コースの走行によって、緊張状態の消失は促進されると思われる。以上のことを踏まえたうえで、実験全体という長期的反応をみていく。

まず図 9-a) LD1 と b) LD2 についてみる。本研究では LD1 と LD2 の変動比は等しいと仮定すれば「LD1 が大きく上昇し、LD2 は変化なし」という変動は、酸素飽和度が上昇し、LD1 は上昇・LD2 は下降、血流量が上昇し、LD1 も LD2 も上昇したために、結果として LD1 が大きく上昇し、LD2 は変化がなかったと判断できる。実際に大回り 1 周目(赤)をみると、LD1 は上昇し LD2 は下降している。つまりこの区間で酸素飽和度の上昇が起こったため、LD1 は上昇し LD2 は下降したといえる。また LD1 の上昇幅に対して、LD2 の下降幅の方が若干大きいことから、若干の血流量の低下もあったといえる。

このように計測値 LD1、LD2 から酸素飽和度や血流量について言及は可能であるが、直接分析はできず、分析には LD1 と LD2 の組み合わせを踏まえるという 1 段階が必要であり、見通しが悪い。

次に提案した LD1-LD2、LD1+LD2 をみる(図 9 c) d)。これを見ると、大回り 1 周目(赤)では LD1-LD2 は上昇している。一方で LD1+LD2 は若干下降しているものの、あまり変動をみせていない。つまり緊張度指標は上昇し、酸素飽和度は上昇、血流量は若干の下降をしているという前述の LD1 と LD2 の変動の組み合わせから得られた結果と一致していることがわかる。加えて大回り 1 周目における LD1-LD2 の上昇つまり緊張の緩和は被験者からのヒアリングより「1 周走り、ルートを把握するとだいぶ緊張はほぐれた」という旨の内容を得ている。小回り 1 周目に入ると、LD1-LD2 は低下しており酸素飽和度が低下していることが確認できる。これはそれまで走行していた大回りから小回りという新たなコースに入ったことをふまえると順当な結果だと言える。

以上より、提案した指標値は、計測値と比べて分析に際し利便性が高く、被験者のヒアリングと走行区間との整合が取れていることから、計測値よりも緊張度指標 LD1-LD2 と血流量指標 LD1+LD2 が望ましい。

(2) 短期的な反応特性

次に短期的な反応をみる。A-1(I) 小 1-F における 1 分間のデータを図 10 に示す。なお、LD1-LD2(SpO₂) は、交通環境との整合を見る際に、上昇すれば緊張状態に遷移したと視覚的に分かりやすいと判断したため、軸を反転させている。

これを見ると、長期と同様に LD1 と LD2 の変動の組み合わせからは、酸素飽和度と血流量の変動がわかる。例えば、車線数が減少している部分を見ると、LD1 は下降、LD2 は上昇しているため、緊張度は上昇し、血流量は変動があまりなかったとわかる。しかしこれも同様に見とおしが悪い。一方で提案した LD1-LD2、LD1+LD2 をみると、LD1-LD2 は上昇しており、緊張度の上昇、LD1+LD2 は変動しておらず、血流量の変動はないという前述したことがそのまま直接捉える事ができる。つまり、この指標を用いることによって、特に短期的な場合においては交通環境との整合を検証する際の見通しが大きく向上する。

以上より、短期的な場合においても提案した指標値は、計測値と比べて分析に際しての見通しが大きく向上することがわかる。またこれ以後のグラフは相対的な変動を見やすくするために、LD1-LD2(SpO₂) と LD1+LD2(血流量)の 2 つのみを図示していく。

6. 心的指標の適用

(1) 実験全体に対する適用

前節で検討した LD1-LD2 (「SpO₂」と表記) と LD1+LD2 (「血流量」) と表記) を実験データに適用する。

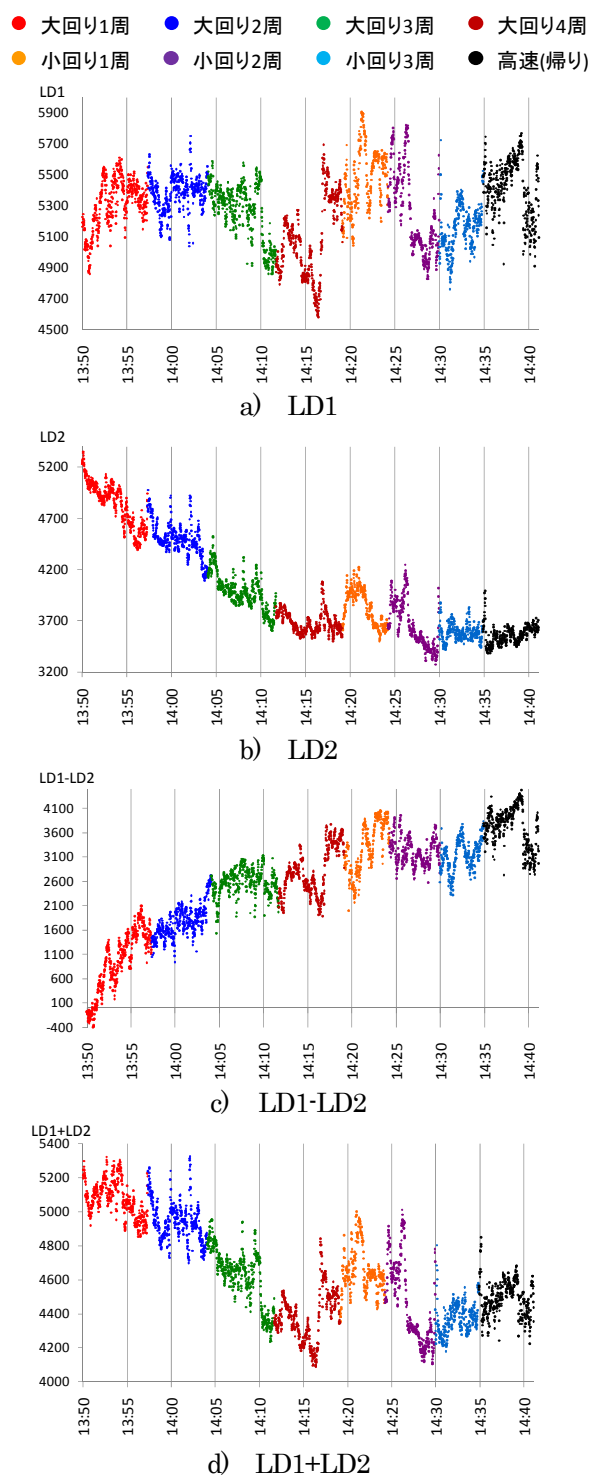


図9 被験者 A における各値の区間別経時変化

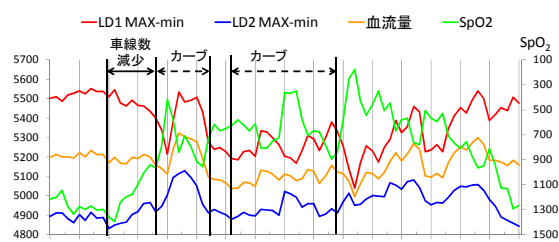


図10 A-1(I) 小 1-F
LD1、LD2、LD1-LD2、LD1+LD2 の経時変化

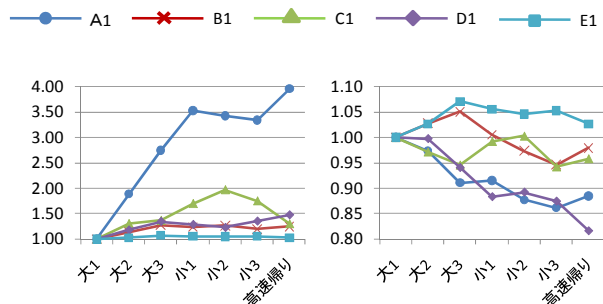


図 11 各区間の平均値 LD1-LD2(左) LD1+LD2(右)

なお、絶対値ではなく、被験者内における相対比較のみが意味を持つ。被験者別の LD1-LD2 と LD1+LD2 の区間毎の平均値を図 11 に示す。なお、大回り 1 周目を 100%とし、これを基準とした変動率を用いている。

図 11 の左図をみると、LD1-LD2 は大回り 1 周目にかけて程度に差はあるが全員上昇している。つまり全被験者で、実験前半に緊張が緩和し出していることがわかる。これはヒアリングとも一致した結果となっている。その後、C-1(I)以外の被験者では小回り 1 周目もしくは 2 周目において上昇が止まる、もしくは下降に転じている。これは新たなコースの走行を始めたことによって、若干緊張状態に移ったと考えられる。またこれ以後は大きな緊張の緩和は計測されていないことから、実験そのものに対する緊張は大回り 3 週のうちにほぼ消失したと考えられる。またこの実験そのものに対する緊張は運転習熟者の方が早く消失することが多かった。

次に LD1+LD2 をみると、こちらは一様な傾向はみられないが、これは LD1-LD2 と LD1+LD2 が単純に相関や逆相関していないことを表わしている。LD+LD2 が全て減少傾向にあれば、それは LD2 の影響が LD1-LD2 と LD1+LD2 に強く表れていることを表す。つまり LD1-LD2 と LD1+LD2 が単純な逆相関になっていないことから LD1 に対する LD2 の変動比は過剰に大きいもしくは小さいことはないといえる。

また運転習熟者における LD1+LD2 の高速(帰り)では、小 3 に対して上昇がみられる。これは実験が終わり、後は直線の走行を残すだけとなっているため、運転習熟者は運転見習熟者に比べて、スピードを出して帰ることが多かったのを反映しているものと思われる。このことから LD1+LD2 の増大はいわゆる「テンション」あるいは「やる気」の上昇という状態にあると思われる。「やる気」(仮称)指標としての確立の可能性があり得ると考えている。

以上より、実験全体という長期的な視点に対して提案した LD1-LD2 と LD1+LD2 を適用した場合、緊張度指標 LD1-LD より長期的な緊張状態の有無とその継続期間の把握可能性が示唆された。また高速(帰り)における

LD1+LD2 の上昇からはやる気とも表現できる心的状況を表わしている可能性が示唆された。またこれら 2 指標が完全に独立しているとまでは言えないでも、単純な相関関係になっていないことが確認できた。wの重みを書きらかにし、より独立した関係として表わすことは今後の課題となる。

(2) 受動的行動に対する反応

次に短期的な指標の変動についてみていく。まずは受動的な行動に対する反応をみる。受動的な行動とは主に車線数の減少と行った道路線形要因やカーブ、他車による車線変更や被合流などがある。ここでは主に道路線形要因についてみていく。

表 2 に記載の通り、被験者 A~C は運転に習熟しており、被験者 D、E は運転には不慣れである。また被験者 C は高速道での運転を頻繁に行っている被験者である。加えて、A-3(II)、B-1~3、C-3(II)は左手を固定して運転している。

各被験者の LD1-LD2、LD1+LD2 の時系列反応を図 12 の a)~f)に示す。なお目盛りは 5 秒区切りとなっており、酸素飽和度(SpO₂)については、緊張度の指標として扱うために軸を反転させ上昇すると緊張、下降するとリラックスという表現に変えている。

まず車線数の減少についてみていく。ほぼ全てにおいて緊張度指標 LD1-LD2(SpO₂)は上昇傾向がみられる。これは車線数が減少することによる圧迫感やカーブ手前という道路線形要因によって被験者が緊張したと考えられる。ただし、C-3(II)においては 4 秒移動平均によって平滑化された線では上昇は見られていない。普段から高速道路を走り慣れている C-3(II)はあまり緊張しなかったと思われる。

次にカーブについてみていく。大回りの地点 D においては緩やかな左カーブ後に右カーブが存在し、小回りの地点 F においては下りを伴う右カーブが存在している。これを見るとカーブにおいてはほとんど全ての被験者で緊張度指標の上昇がみられる。またこれはカーブの数と対応していることもわかる。ゆえにこれがカーブによるハンドル操作によって起こっているものか、カーブを走行することによって引き起こされている緊張などの心的状況の変化かが区別がつかない。そこで左手を固定しハンドル操作をしていない C-3(II)に着目する。これをみると、1 つ目の緩やかな左カーブでは反応はほぼみられないが、2 つ目の右カーブでは緊張度指標が上昇していることがわかる。他の被験者では 1 つ目の緩やかな左カーブにおいても緊張度指標が上昇していることを踏まえると、カーブにおいてはハンドル操作による影響と心的状況の変化による影響が重なって表れていると考えられる。

また反応は、反応要因を過ぎると徐々に消えていく。そして反応が起こる前の水準、リラックスに近い水準に漸近していくことがほぼ全ての被験者で確認できている。また反応が消える時間は、ハンドル操作をしている人ほど早く、左手を固定している人ほど徐々に消えていくものが多くみられた。

(3) 能動的行動に対する反応

次に能動的な行動に対する反応をみる。能動的な行動とは自身による合流や、車線変更などである。

まず、合流についてみる。図 12 の a)、b)は織り込み区間を有するが車は比較的少なかった。一方で図 12 の c)では車が多く、織り込み区間で自身による合流が必要となっていた。その結果として、図 12 の c)では合流中の長い間、緊張状態が高い状態が保たれていることが確認できた。ここから道路線形要因によって反応は起こるが、交通環境による影響が大きいことが示唆される。

次に図 12 の d)~f)についてみる。小回りの F 地点は自身による積極的な合流が必要となる地点であり、この合流部では図 12 の d)~f)全てで緊張度指標の上昇がみられる。加えて、d)と e)、f)を比べると、d)は e)、f)よりも早くに緊張のピークを迎えていることがわかる。他の被験者、特に運転に習熟している被験者でも早めのピークが見られ、運転に習熟していない被験者では遅めのピークが見られた。運転に習熟している被験者では、合流前に交通状態を確認する少し前の時点ピークを迎えて、運転に習熟していない被験者はいざ合流という時点においてピークを迎えているのではないかと考えられる。このことから、短期的な反応において運転習熟者と運転未習熟者で、異なる反応特性が確認できる。

また地点 F でも、合流を終えて他の車と道なりに並走し始めるとゆっくりと値を下げていき、リラックス水準ともいえる水準に漸近していくことが確認できる。

次に車線変更についてみる。ここでは特に被験者に対して指示を行い、車線変更を行わせた。地点としては地点 B~C 間である。車線変更は追い越し車線から走行車線までの往復を行った。この時系列変化を図 13 に示す。これを見ると、車線変更開始時から緩やかに緊張度指標が上昇していくことが確認できる。また血流量指標も緩やかに上昇していることがわかる。つまり車線変更に伴い、他車の行動などを確認し緊張したと考えられる。また車線変更後は緊張度、血流量指標ともに値を降下させていることがわかる。

各行動に対する反応をみたが、被験者を問わず、道路線形要因や合流部などで、一般的に緊張するであろう場面で緊張度指標の上昇がみられた。また合流部などでは特に運転未習熟者から特に緊張したというヒアリングも得られ、被験者の意識や交通環境と緊張度指標の整合

— SpO₂ — 血流量 — 4秒移動平均SpO₂ - - - 4秒移動平均血流量

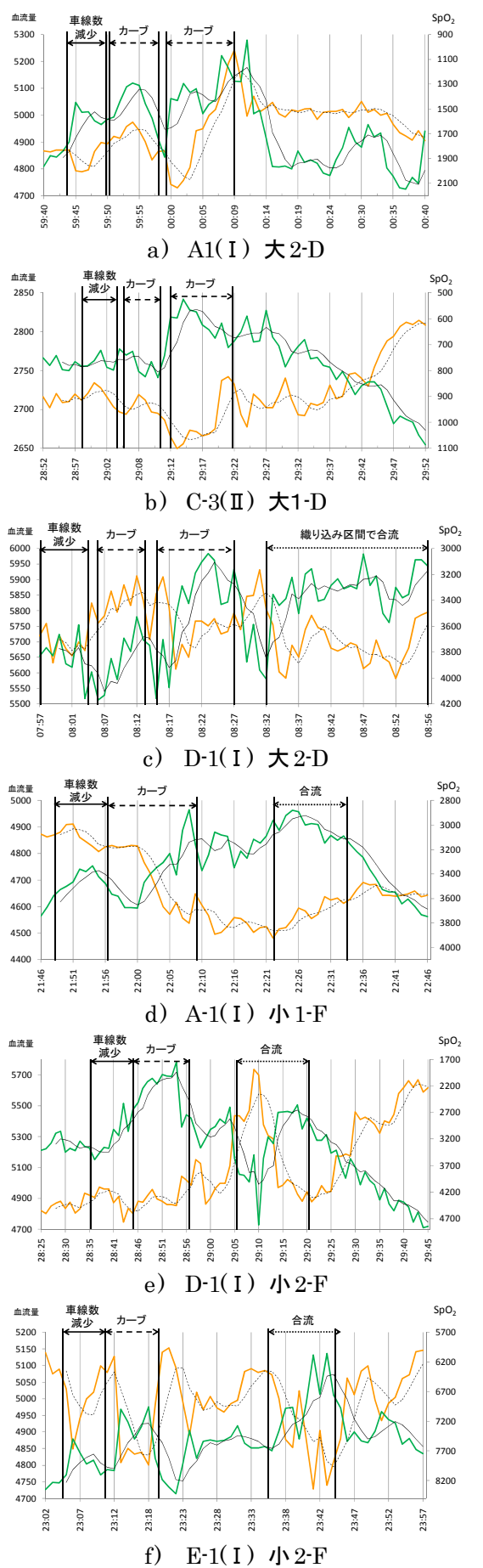


図 12 各被験者の LD1-LD2、LD1+LD2 経時変化

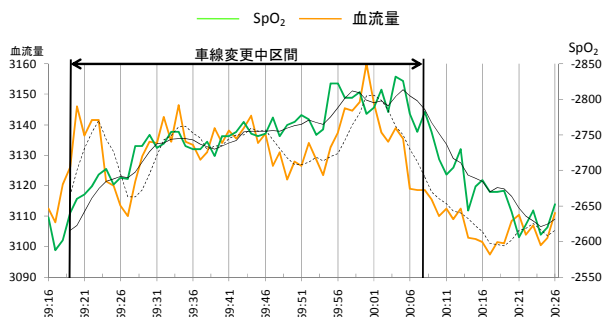


図 13A-3(II) 大 3 LD1-LD2、LD1+LD2 経時変化

がとれていることが確認できる。

以上から、短期的な反応に対して緊張度指標を用いることによって、ドライバーに緊張を強いる要因の把握可能性、緊張状態の有無や変動に加え、緊張が継続する時間の把握可能性、緊張後のリラックス水準への漸近の把握などに加え、運転習熟者と未習熟者という個人属性による反応特性の違いも把握可能性が示唆された。

7. 計測の安定性

計測の安定性について述べる。計測の安定性とは、同一被験者においては日数が経っても、同様の反応結果が得られるのかどうかということに絞る。

(1) 反射光強度の絶対値とレンジ比

まずは計測値についてみる。各種値のレンジとレンジ比を表 5 に示す。レンジについては、外れ値を除くために大回り 1 周目から高速(帰)までのデータについてヒストグラムを作成し、95%のデータを含むレンジを用いた。

これを見ると、計測値のレンジは異なることが多い。特に第 I 回実験と第 II 回実験では計測値である LD1、LD2 が大きく異なっている。第 II 回実験は第 I 回と比べて 1/9 のレンジになっているものもある。これは機械の出力が 1 年経過するうちに弱くなったなど機械特性が原因に考えられる。しかしレンジ比でみると、LD1/LD2 は A-1(I)と A-3(II)という比較でも変わらず、他の第 I 回実験と第 2 回実験でもレンジ比の変動は小さくなくても 1/2 程度である。

表5 被験者別 レンジとレンジ比

被験者	回	実験	レンジ				レンジ比 (LD1-LD2)/(LD1+LD2)
			LD1	LD2	LD1+LD2	LD1-LD2	
A	1回目	第 I 回	800	1600	1000	3800	0.50
	2回目	第 I 回	800	450	450	1250	1.78
	3回目	第 II 回	150	300	150	750	0.50
B	1回目	第 I 回	900	800	850	1200	1.13
	2回目	第 I 回	3000	3000	2800	2200	1.00
	3回目	第 II 回	200	200	150	450	1.00
C	1回目	第 I 回	1600	1300	800	4600	1.23
	2回目	第 I 回	2600	1600	2000	3600	1.63
	3回目	第 II 回	200	250	200	500	0.80
D	1回目	第 I 回	1400	2400	500	1600	0.58
	2回目	第 II 回	300	750	500	1300	0.40
	3回目	第 I 回	950	800	700	2000	1.19
E	1回目	第 I 回	500	600	500	900	0.83
	2回目	第 II 回	500	600	500	900	0.83

また(LD1-LD2)/(LD1+LD2)のレンジ比をみると、3 回実験を行っている被験者では 1 回目実験後、2 回目実験では値を下げて、3 回目実験は計測値の絶対値は下がっているにもかかわらず 2 回目と比べて値を上昇させている。(LD1-LD2)/(LD1+LD2)のレンジ比が小さくなることは、つまり血流量指標の変動に対して緊張度指標の変動が小さくなることである。これは 1 回目実験と 2 回目実験の実施間隔が 1 週間ほどであったため、実験に対する慣れなどが働き、緊張度指標の全体的な変動が小さくなったものと考えられる。そして 3 回目実験では 1 年間ほど実施期間があいたために値が回復、もしくは 1 回目よりも大きくなったと考えられる。

以上から、実施期間があいても緊張度の計測が鈍感になることはあまり考えられない。反対に同じ被験者内で短い期間に実験を何度も行うと緊張度指標の変動幅は小さくなり一定の幅に収束すると考えられる。また計測機の出力が落ち、計測値の絶対値が小さくなったとしても、LD1 と LD2、LD1-LD2 と LD1+LD2 の相対的な大小関係は維持されることがわかる。

(2) 反応特性の安定性

次に、同一被験者内で緊張を誘因すると思われる同一の要因に対して、どの程度同様の反応を示すかについて検討する。

図 14 に被験者 A と被験者 D が同じ地点 D の分流ポイントに差し掛かり、車線数が減少する時点を基準とした 5 秒間の変化を表わす。またそれぞれの区間の変動幅を考慮するために(LD1-LD2)-(LD1-LD2)_{区間 min}を区間変動幅で割った値を用いている。

これらをみると、被験者 A では全て上昇傾向にあり、2~4 秒の間にピークを迎えており、同一被験者内での計測の安定性がうかがえる。一方で被験者 D においては、上昇するときもあれば、横ばい、わずかながらに下降することもある。しかし 2~4 秒の間に山形のピーク値を全ての周で迎えていることがわかる。

このように、計測の安定性が低い被験者でも同様の反応は、判断を行う時間を数秒広げることによって計測

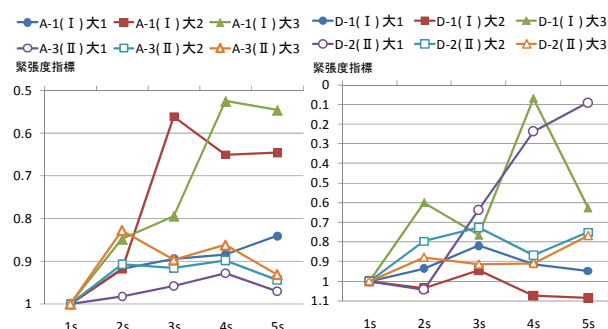


図 14 地点 D 分流ポイント 5 秒間の LD1-LD2 の変動
A-1(I)と A-3(II)(左図)、D-1(I)と D-2(II)(右図)

が可能となる。ただし、同様の反応とする判断を行う時間を大きく取った場合には本当にそれが同様の要因に対する反応なのかに注意が必要となっており、この判別は今後の課題となる。また第Ⅰ回実験と第Ⅱ回実験では計測値の絶対値は大きく異なるが相対的な変化を見ると、大きく異なることが確認できる。これらからも心的状況を計測するために支障をきたさないレベルでは計測の安定性がうかがえる。

8. まとめ

本研究では、近赤外光センサによって心的状況の表現を試みた。その結果、実験そのものという長期的な緊張の有無とその継続期間や、車線数の減少や合流といった短期的な交通環境による緊張度の有無の計測可能性が示唆された。また車線数の減少による緊張度や、合流部の反応のピークを迎える早さについては運転習熟者と運転未習熟者で差が見られた。これにより、運転習熟という個人属性による緊張度変化も計測可能であることが示唆された。そして緊張反応後は、リラックスしている水準まで値を漸近させていくこともわかった。また計測手法の安定性としては、相対的な大小関係を扱うときには問題はないことが確認できた。

今後の課題としては、心的指標と交通環境に対する反応の整合性を担保するために、被験者が認識している要

素とその時間を明らかにすることに加え、本研究で得られた知見が確かなものかを検討するために、特に同一被験者や運転未習熟者の更なるデータの収集が必要となる。そして本研究では詳しく扱えなかった血流量指標を緊張度指標と組み合わせて用いることによってドライバーの心的状況を更に詳細に表わせる手法を確立していくこととなる。

本研究はH19~21年度科学研究費補助金(萌芽研究19656128)の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 内田敬, 田名部淳: バイタルセンサを用いたドライバーの心理状態計測に関する研究, 交通安全対策振興助成研究報告書, 佐川交通社会財団, No.21, p.44-48, 2006.
- 2) 浅野信幸, 内田敬, 日野泰雄, 吉田長裕: ドライバーの心的緊張度評価における NIR センサの反応特性に関する研究, 土木学会関西支部, 年次学術講演概要, IV-56, 2008.
- 3) シスメックス株式会社: 末梢血管モニタリング装置 基礎データ集, http://www.sysmex.co.jp/astim/scientific/pdf/astim_su.pdf.
- 4) 日本生理人類学会計測研究部会: 人間科学計測ハンドブック, p.175, 技法堂出版, 1998.

近赤外光センサによるドライバー心的状況の定量的計測手法に関する研究*

井原昌孝**・内田敬***

これまでの交通施策は、ドライバーの心的状況の考慮が不十分であった。この原因の1つに、ドライバーの心的状況の定量的計測手法が確立されていないことがある。

本研究では近赤外光センサを用いて、ドライバーの血中酸素飽和度を計測し、心的状況として特に緊張状態の定量的計測手法を提案する。走行実験による反応データを用いて分析を行い、被験者の長期的な緊張状態の有無と継続時間、短期的な緊張と交通環境との整合が確認できることについて論じる。

A Method for Measuring Driver's Mental Reactions by Using Near Infrared Sensor*

By Masataka IHARA**・Takashi UCHIDA***

There are a lot of measures for the prevention of the traffic accident now. However, whether these measures work effectively from respect of the psychological condition is not considered. Because a method for measuring driver's mental reactions has not been established. Then, the purpose of the study is to propose a method for measuring driver's mental reactions by using Near Infrared Sensor. The sensor gives physiology index that is an oxygen saturation of the hemoglobin. This paper shows the utility of the technique and stability of this method.
