

複数生体データ計測による 運転ストレスに関する基礎的分析

金森 亮¹・久保田穰²・安藤 章³・山本俊行⁴・森川高行⁵

¹正会員 名古屋大学特任准教授（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

E-mail: kanamori.ryo@nagoya-u.jp

²非会員 トヨタ自動車株式会社

³正会員 株式会社日建設計総合研究所

E-mail: andoua@nikken.jp

⁴正会員 名古屋大学教授

E-mail: yamamoto@civil.nagoya-u.ac.jp

⁵正会員 名古屋大学教授

E-mail: morikawa@nagoya-u.jp

本研究は、従来の心拍だけでなく発汗や脳血流など複数の生体データを計測し、実走行時のドライバーの運転ストレスについて分析する。ストレス箇所はドライバーの主観的判断であり、その際の生体データ反応を分析し、運転ストレスの客観的な定量化を目指す。走行実験は名古屋市内で90分弱の指定コース（バスレーン、商店街、住宅街、山道を含む）で実施した。基礎的分析から主観的判断による運転ストレス箇所と生体データ反応には一定の関係性が確認でき、今後の指標化に向けた課題を整理する。

Key Words : Driving stress, Biological data, Driving experiment

1. はじめに

道路利用者、特にドライバーの満足度は主として所要時間短縮にて計測できると仮定し、道路整備・改良や経路情報案内の指標となってきた。一方で人口減少に伴う総交通量減少、通勤・通学・業務交通量減少が予想される中、利用者個別の満足度との合致を目指し、所要時間に基づく最短経路案内の他、走りやすさ（例えば、道幅の考慮など）や環境負荷軽減を考慮した経路案内もなされつつある。今後、高齢者や外国人など道路利用者の多様化が一層進むため、快適性や安全性など所要時間短縮といった経済効率性指標に加えて、個別満足度を高める要素の指標化が期待される。

本研究では、自動車運転時の個別満足度指標として、ドライバーの主観的判断に基づく運転ストレスに着目し、生体データなどから定量化することを目指す。運転ストレスは、個別ドライバーの運転時の「不安」（具体的には、苦手な運転シーン（右折、車線変更、合流、駐車など）や不案内な地域での運転）、「不快」（具体的には、他車の無配慮運転（割り込み、譲らない、煽りなど）や先の読めない渋滞区間の運転）と仮定し、これらに該当

する運転状況をドライバーに主観的に申告してもらい、生体データの変化や運転挙動を分析する。

本研究の特徴としては、①ドライビングシミュレータではなく、実際に名古屋市内にて走行実験を行い、生体データと車両のCAN（Controller Area Network）データを計測・収集していること、②一般的な心拍変動に加えて、発汗や脳血流など複数の生体データを同期計測していること、が挙げられる。

本稿では、複数生体データ計測による実走行実験の概説、学生被験者の主観的運転ストレス時の生体データ分析、運転ストレス時を判別する機械学習モデル構築について報告し、今後の課題を整理する。

2. ストレス時の生体反応と運転時の計測方法

広義のストレスはセリエの学説がよく知られており、ストレス（Stress）状態は、外界からの要求・刺激などストレッサー（Stressor）に対する生体の非特異的な反応（汎適応症候群）と定義される。これは生理的ストレス研究モデルに位置づけられ、どのような刺激がどう生体

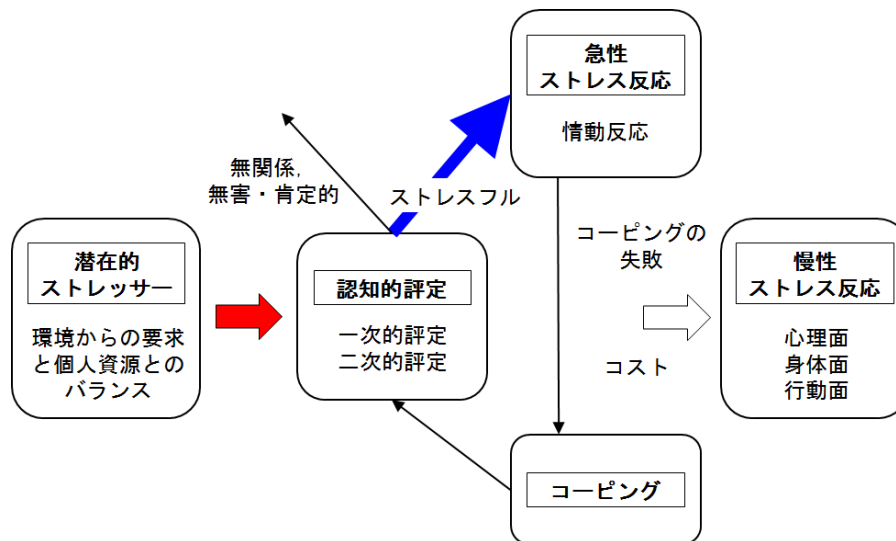


図-1 心理学的ストレスモデルの概要¹⁾

に影響するのかを探求する。一方、同一の刺激・環境でも主観的評価にてストレス状態にあるかが異なるように、受け止め方のプロセスに力点を置いたモデルが心理学的ストレスモデルとなる（図-1参照）。

本研究は、主観的判断にて運転ストレスを申告しており、個人差があり、生体データにて生理的なストレス反応が確認されても、申告されていない場合もある。図-1の心理学的ストレスモデルにおけるストレスから出る「赤」矢印が生体反応（生体データの結果）、認知的評価から急性ストレス反応の「青」矢印が主観的判断による運転ストレスに対応する。また、運転自体による計測誤差も無視できないが、今後、運転挙動による生体データ反応や同一個人に対する複数回の走行実験にて、これらの誤差は特定・除去できる可能性はある。

(1) ストレスに対する生体反応

一般的なストレスに対する生体反応としては、中枢反応、抹消反応、内分泌系・免疫系に区分される。以下、文献2を参考に生体反応の箇所と計測対象を簡単に整理する。

中枢反応：脳波、事象関連電位、fMRI（機能的核磁気共鳴画像）、NIRS（近赤外光脳内血流計測）

抹消反応：自律神経系反応

- ・心臓循環器系：心電図、血圧、脈波
- ・呼吸器系：呼吸率
- ・温熱系：核温、皮膚温
- ・汗腺活動：皮膚電位

視覚・運動系反応

- ・眼球運動、瞳孔運動、瞬目活動

骨格筋反応：筋電図

内分泌系・免疫系：血液、唾液、胃液、尿、涙など

(2) 運転時に計測する生体データ

被験者が実際に運転を行う走行実験にて生体データを計測するため、運転自体に支障のない範囲で計測できるよう工夫した。具体的にはより拘束が少なくなるよう小型・軽量で無線にて信号送信可能な計測機器も利用し、心電図、呼吸、表面温度、発汗を計測する。また、脳活動の非侵襲的計測としてNIRSにて脳血流を計測する。本研究で計測する生体データとストレスに対して期待される生理的な反応は次の通りである。

a) 脳血流

最近のセンサ技術向上により、中枢神経系活動、特に脳機能活動を非侵襲的に計測することが可能となりつつある。本研究ではNIRS（Near InfraRed Spectroscopy）にて脳の局所的血流量の変化を計測する。脳血流内では、酸素化ヘモグロビン（Oxy-Hb）が脳内に酸素を供給し、脱酸素化ヘモグロビン（deOxy-Hb）となることが知られ、NIRSはOxy-HbやdeOxy-Hbの濃度変化から脳内酸素供給量、つまり脳活動の度合いを測定する技術である。一概にストレス時の反応は特定できないが、脳機能活動が活発な際はOxy-Hb濃度は増加し、deOxy-Hb濃度は減少する。

本研究での脳血流計測は図-2(a)の通り、前頭部16箇所の脳内酸素供給量を計測でき、コードはあるものの（頭部を左右に動かす程度の）運転に支障はない。本研究で採択した計測機器はSpectratech OEG-SpO2（株式会社スペクトラテック）であり、独自の指標としてApparent SpO2（見かけの動脈血酸素飽和度）が算出される。これは一般的なパルスオキシメーターにて測定されるSpO2とは単純比較できないが、酸素利用量と解釈できるため、ス

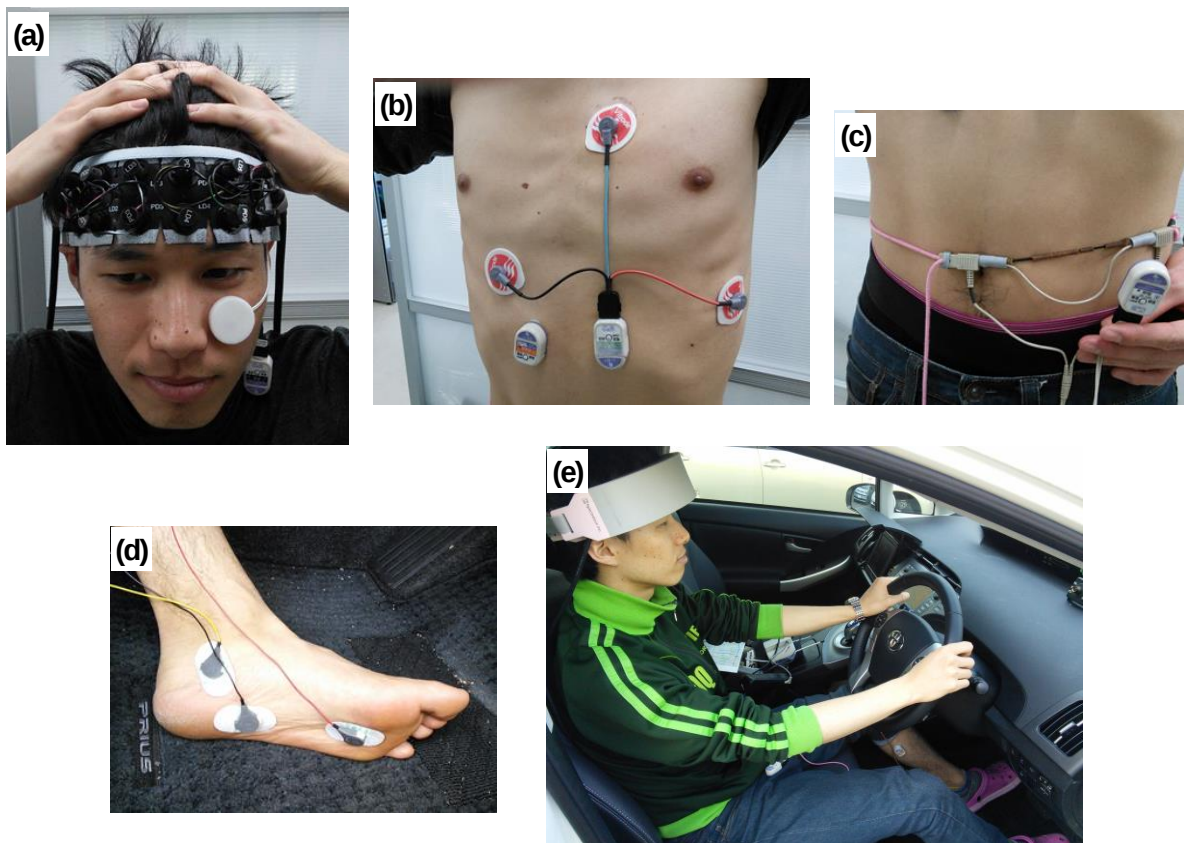


図-2 運転時の生体データの計測状況

トレス時には低下すると考えられる。

本研究では計測機器による独自の計測信頼度が低くない箇所Oxy-Hb濃度、deOxy-Hb濃度、Apparent SpO2の安静時からの変化量を生体データとして利用する。

b) 心電図

自律神経系反応の計測で多く研究されてきた生体データの1つが心拍であり、心電図にて記録される。本研究での心拍計測は図-2(b)の通りであり、無線にて信号送信可能なため、コード等による運転支障はない。心拍変動を利用した指標として、心拍間隔 (RRI) , LF/HFが有名であり、本研究でもこれらを生体データとして利用する。

RRIは、心室が収縮直前に脱分極する際に発生する電流であるR波の間隔時間である。心拍数 (HR : Heart Rate) とは、 $HR=60s/RRI$ の関係がある。RRIを短縮させるのは交感神経系、延長させるのは副交感神経系が作用するとされ、交感神経系は緊急事態に対峙するために活動し、副交感神経系は休息・休養を希求するために活動する。したがって、ストレス時にはRRIは低下すると期待される。

また心拍は呼吸や血圧・血管運動と連動して変動しており、RRIの変動係数や周波数分析にて0.02~0.06Hzは体温調節系の変動、0.07~0.14Hzは血圧調整系の変動でLF (Low Frequency) またはMayer Wave、0.15~0.50Hzは呼吸

性不整脈の影響でHF (High Frequency) と説明されている。ここで、LF/HFは交感神経の活性度を表す指標として利用されることもあり、ストレス時には上昇すると期待される。

c) 呼吸率

呼吸率 (呼吸の速さ) の増加は自律神経系の興奮によって生じるため、ストレス時の反応として計測可能である。また、呼吸サイクルが吸気時間、呼気時間、ポーズ時間から構成されるとした場合、ストレス時にはポーズ時間が短縮する傾向にある。ただし、呼吸率を正確に計測することは困難を伴い、ノイズが入り込む余地が大きい。

本研究では図-2(c)の通り、腹部のひずみセンサによる呼吸バンド法にて計測を行った。しかし、前方・左右確認時など運転挙動によって正確に計測できている状態を保持できず、ひずみ波形から呼吸数を算出することはできていない。今回は参考値として、ひずみ度合 (計測値そのもの) を利用している。

d) 皮膚温

核心部温と異なり皮膚温は、環境温などによって常に変動しているが、血流量の多寡によって依存する。ストレス時などの緊張時は表在性の抹消血管が収縮し、皮膚温は低下し、逆に安堵時に回復することが知られている。

本研究では比較的感度が高い鼻部周辺の皮膚温を計測することとし、図-2(a)の通り、鼻部横・眼下部にサーミ

スターを装着した。

e) 発汗（皮膚電位）

ストレス時など交換神経が興奮した場合のみに、精神的発汗が手掌や足底ににじみ出ることが確認されており、皮膚電気活動にて電氣的に計測する。一般的に刺激から3秒以内に出現する反応といわれている。また電位法で測定される発汗反応が皮膚電位反応（SPR：Skin Potential Response）であり、本研究でも採択した。

計測箇所は運転時に（AT車なので）主として動かすことがない左足の足底であり、計測状況は図-2(d)の通りである。生体データとしては安静時からの変化幅（陽性・陰性側の絶対和）を利用する。

f) 筋電図

ストレス計測とは関係はないが、今回の運転時の特別な挙動（生体データの異常値）の有無を確認するため、腹部、背部、足部の筋電図を計測した。

3. 走行実験概要

本研究で実施した走行実験について、設定した走行経路、実験車両、生体データ計測状況について説明する。

(1) 名古屋市内走行経路

実際の運転時のストレスを把握するため、名古屋市内に1時間程度の走行経路を設定した。走行経路は図-3(左)に示す。

名古屋大学を出発地・到着地として、名古屋市内を時計回りに一周する経路とした。事前に運転ストレスが生じやすいと想定した区間を含め、被験者の負担は少ない経路となっている。想定した区間は、「福原町内」、 「代官町通」、 「バスレーン区間」、 「山道区間」であり、それぞれの特徴は以下の通りである。また、該当区間の様子として、Google Mapのストリートビューを図-3(右)にまとめた。

「福原町内」：住宅街の直線道路区間であり見通しは良いが、道幅は1車線道路で狭く、一時停止交差点が多い。また、終盤は上り坂になっており、途中の交差点での停止・発進は負担が大きい。

「代官町通」：歩道が区切られていない商店街通であり、歩行者や自転車利用者が車道に多い区間。路上駐車・停車車両も多く、擦れ違いや自転車の飛び出しなどに注意を払う必要がある。

「バスレーン区間」：基幹バスとして有名な出来町通でバスレーンが道路中央側（右側）にある。多車線道路であるが、信号は全て矢印にて表示されるため、遠くからは信号表示を認識しづらい。さらに右折車線が直進車線とバスレーンに挟まれるため、右折待機時は両側から車両通過がある可能性がある。

「山道区間」：東山動植物公園付近の狭く、見通しの悪い山道。一部、車道に電柱が設置されているため障害物を避ける必要がある。

なお、実験走行経路の道路構造特性として、GISを利用して数値データ化した。データ化した内容は、以下の21項目である。

[1]規制速度、[2]中央分離帯の有無、[3]中央分離線の有無、[4]側方余裕の有無（75cm以上か）、[5]歩道の有無（ブロック区切りの有無）、[6]信号の有無、[7]T字路、[8]交差点、[9]信号手前での車線増加、[10]横断歩道、[11]歩道橋、[12]路面の車線案内、[13]車線案内表示板、[14]一時停止線、[15]高速道路の出入口、[16]分離と合流、[17]駐車場などからの進入口、[18]バス停、[19]橋の下、[20]道路上の電柱などの障害物、[21]眠気覚ましのガタガタ区間

(2) 実験車両

今回の実験車両は大学が保有するトヨタプリウスを利用した。実験車両を利用することで、GPS位置情報、CANデータ、車両前後とドライバーの動画を分析に利用できる。



【福原町】



【代官町】



【出来町通】



【山道（東山公園）】



図-3 実験走行経路



図-4 運転時の動画データ（右下C4は入力なし）

位置情報とCANデータ、動画データは同期されており、0.0167秒間隔で取得される。CANデータは、[1]自動車加速度、[2]車速、[3]アクセル開度、[4]ブレーキ油圧、[5]蛇角信号、[6]ヨーレート、[7]前方車両距離、[8]曲率半径、[9]勾配角度、[10]左右ウィンカー動作有無、などが収集可能となっている。動画データは図-4の様に事後的に再生可能であり、ドライバーの運転ストレスの主観的な申告時の状況を確認することができる。

運転ストレスの主観的判断は、事後的な動画データ確認となる。ただし、運転時間が1時間以上となるため、運転中にストレスを感じている際にドライバー自身（または同乗者）にスイッチを押してもらい、発生時刻・箇所の参考値とした。スイッチ・データはCANデータの一部として取得されるため、時刻は同期されている。

(3) 生体データ

前述したとおり、今回の走行実験では生体データとして、脳血流、心電図、呼吸、皮膚温（顔面）、発汗（左足底）、筋電図（腹、背中、左足）を計測しながら被験者は運転することとなる。図-2(e)は今回の実験時の運転環境の写真であり、生体データ計測時の運転に大きな問題はないことが分かる。生体データの取得間隔は脳血流は0.0819秒、その他は0.0010秒である。

(4) 実験手順

生体データは体調や精神状態にも左右されやすいため、運転前に事前アンケートをとり、その日の運転者の状態を記録する。また、運転前後に5分間の安静時間をとる。実験走行終了後、運転者に動画データとストレス区間のスイッチ・データから主観的に判断した理由と程度に関して補足してもらった。

(5) 被験者数と実験回数

今回の実験では男性健常者を被験者とした。被験者数は20歳代の大学院生3名、60歳代の高齢者3名である。そ

れぞれ、3回以上の走行実験を行い、運転ストレスに関する主観的判断の個人差を分析できるようにした。なお、天候は雨天時は避け、出発時刻は昼間とし、同一人間での調整はない。

4. 運転ストレスに関する基礎分析

本稿では学生被験者1名のある走行実験データ1回分について、運転ストレスの主観的申告区間、ストレス申告区間の生体データの反応状況、ストレス申告区間と生体データとの相関分析について報告する。

(1) 運転ストレスの主観的申告区間

主観的な運転ストレスの申告区間を図-5、その内容を表-1にまとめる。図-5の青い区間が申告区間であり、番号は表-1に対応する。

表-1より、“不安”に区分される運転ストレスが多いことが分かる。運転ストレス強度は1～5のレベルを設定

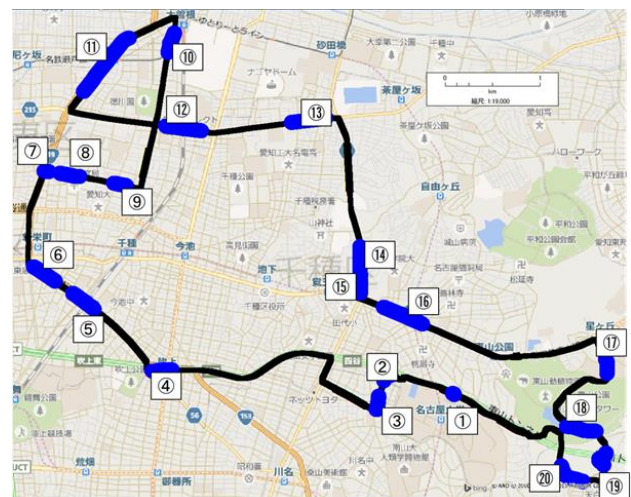


図-5 運転時の動画データ

表-1 運転時の動画データ

番号	ストレス強度	種類	内容
1	2	不安	駐車場からなかなか出られない
2	3	不安	歩行者
3	3	ヒヤリハット	狭い道、自転車の飛び出し
4	3	イライラ	工事につき車線変更
5	3	イライラ	対向車+路上に自転車
6	2	イライラ	路駐を避ける
7	2	不安	中央線上に人
8	2	不安	歩行者、対向車
9	3	ヒヤリハット	歩行者や自転車の予測できない動き
10	2	不安	右折からの路上駐車
11	2	イライラ	車線変更のタイミングを失う
12	2	不安	バスレーン、交差点内でカーブ
13	2	不安	大型車こわい
14	2	ヒヤリハット	前方で車線変更
15	3	渋滞イライラ	渋滞、車線変更
16	3	渋滞イライラ	のろのろ運転
17	3	不安	すり抜け
18	2	イライラ	自転車逆走
19	3	不安	カーブミラーが見えづらい山道
20	2	不安	見通しの悪い交差点

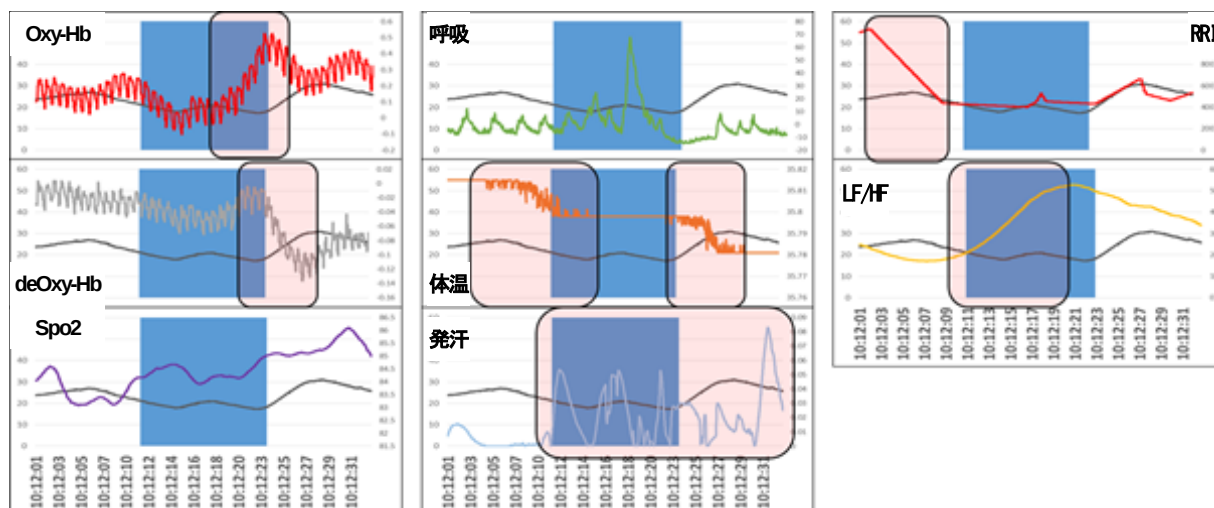


図-6 ヒヤリハット時の生体データの変化（ストレス番号：8）

したが、最大は3となり、主観的には中程度のストレスを受けていると判断している。

(2) ストレス申告区間の生体データの反応状況

運転ストレス区間前後の生体データの変化をみるため、“ヒヤリハット”のストレス番号8の箇所について分析する。

運転ストレス区間の前後10秒を抜き出したものを図-6にまとめる。場所は「代官町通」であり、連続して歩行者や自転車を通り過ぎる際の運転時である。図中の背景の青い部分が運転ストレス申告区間であり、黒い線が速度を表す。また、図は左上からOxy-Hb、deOxy-Hb、SpO2、中央上から呼吸、体温、発汗、右上からRRIとLF/HFの変化となる。赤網掛け部分は、生理的に期待されるストレス反応を示している区間である。

SpO2、呼吸を除いて、生理学的に期待されるストレス反応が確認できる。しかし、体温とRRIは申告区間前から変化が確認され、発汗とLF/HFはストレスを認識してすぐに反応している。運転ストレスの指標化を目指すには、各生体データに対する適切な反応時間を検討する必要がある。

(3) ストレス申告区間と生体データとの相関分析

続いて、運転ストレス申告区間を1、それ以外の区間を0として、生体データとの相関関係をみる。また各生体データがストレス環境下で生理的に期待される反応傾向への95%タイル値とストレス区間の適合率も同時に示す。この際、呼吸は適切な数値での扱いが難しいため、対象から除いた。

相関の高い順に表-2にまとめる。Oxy-Hbが最も相関が高いものの、相関係数は0.15である。相関係数の符号から、体温とRRIで一般的なストレス反応と逆の傾向があることがわかる。また、95%タイル値の適合率はOxy-Hb

表-2 運転ストレス区間と生体データとの相関係数

指標	相関係数	95%タイル値
Oxy-Hb	0.15	35%
発汗	0.12	13%
deOxy-Hb	-0.10	24%
体温	0.07	15%
LF/HF	-0.02	13%
RRI	0.02	9%
SpO2	-0.01	16%



図-7 運転ストレス区間とOxy-Hbの反応の高い位置関係

で35%と最も高く、次いでdeOxy-Hbが24%となっている。参考として、Oxy-Hbの95%タイル値以上の区間と運転ストレス申告区間の位置関係を図-7に示す。

以上より、単一の生体データから主観的判断に基づく運転ストレス区間を判別・定量化することは難しく、今後、複数の生体データを利用し、それぞれの反応時間も考慮した運転ストレスの判別・定量化が望まれる。

5. 運転ストレス判別の機械学習モデル

運転ストレスに関する基礎分析から、主観的な申告区間と生体データには単純な関係性は把握できなかったため、ここで機械学習にて運転ストレスの判別モデルを構築し、今後の方針を述べる。

本稿では機械学習による判別モデルとして有名なサポートベクターマシン（SVM）を適用する。

特定区間の過学習を防ぐため、運転ストレス区間とそれ以外の区間に対し、教師データは1秒以上の間隔を空け、ランダムサンプリングした。その結果、運転ストレス申告区間、非ストレス区間、それぞれ125サンプルの合計250データを教師データとして準備した。なお、全走行実験におけるサンプル数はGPS位置情報数で279,829サンプル（運転ストレス申告区間：35,301サンプル（12.6%）、非ストレス区間：244,528サンプル（87.4%））である。また今回準備した説明変数は表-3の通りである。

サポートベクターマシンによる教師データの正解率は100%であり、運転ストレスと生体データ、CANデータ、道路構造データの複雑な関係を適切に判別できる能力を有することが分かる。また、全サンプルに対して教師データの影響はほとんど無いと想定し、教師データから生成した判別モデルを走行実験の全データに適用した（交差検証に該当）。その結果、正解率は87%であった。ただし、運転ストレス区間の再現率は30%（非ストレス区間は96%）、適合度は51%（非ストレス区間は90%）となり、250サンプルと小さな教師データにて構築された判別モデルであるためか、全データに対する判別精度は高いとはいえない。さらにSVMの判別モデルでは説明変数の重要度など、説明要因について生体データの生理

的反応の妥当性を評価できないなど、他の判別モデル構築も検討した方が良いといえる。

6. まとめ

本研究では、新たなドライバーの満足度指標として運転ストレスに着目し、生体データなどからの定量化を目指し、複数生体データを計測しながら、実走行実験の方法と結果について報告した。室内実験であるドライビング・シミュレーターを利用しないため、運転挙動に大きな影響を及ぼさないことを第一目標に生体データ計測機器を選定し、運転ストレスの主観的判断、車両CANデータ、道路構造データと組み合わせて分析できることを確認した。

学生被験者1名のある走行実験データを対象とした基礎分析では、主観的な運転ストレス時の生体データは期待された反応を示すこともあるが、単一の生体データ取得では反応しないこともあること、定量化には反応時間など詳細な検討が必要であることが分かった。また、運転ストレスと生体データ反応は複雑な関係性にあり、精度の高い機会学習モデルを構築はできるが、汎化能力に改善の余地が残ることを確認した。

今後の課題、研究方針としては、より多くのサンプル数の確保、SVMに代わる機械学習モデルとしてランダムフォレストによる説明変数の重要度評価などを考えている。また説明変数として、交通量や前方車両との距離など動的環境変数を取り入れていきたい。さらに、個人の走行実験結果、判別モデルの要因を蓄積し、運転ストレスと生体反応、道路環境（交通状況と構造など）との関係性について一般化していきたいと考えている。

表-3 機械学習判別モデルの説明変数

CANデータ	生体データ	
自車加速度	Oxy-Hb	Oxy-Hb(95%)
車速	deOxy-Hb	deOxy-Hb(5%)
アクセル開度	Oxy+deOxy	
舵角信号	SpO2	SpO2(5%)
ブレーキ油圧	呼吸	
ヨーレート	体温	体温(5%)
	発汗	発汗(95%)
	RRI	RRI(5%)
	LF/HF	LF/HF(95%)

道路構造データ		
車線数	信号無交差点	障害物
規制速度	信号有交差点	福原町
路上駐車	信号無T字路左に道路	代官町
歩道の有無	信号無T字路右に道路	バスレーン
中央分離帯	信号有T字路左に道路	山道区間
側方余裕の有無	信号有T字路右に道路	

謝辞：本研究で利用した計測機器の一部は名古屋市立大学横山清子教授よりお貸りしたものです。また生体データ処理では名古屋大学高橋一誠研究員よりアドバイスをいただきました。本研究の一部は、は国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム」、国土交通省 新道路技術会議の支援によって行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小杉正太郎：ストレス心理学-個人差のプロセスとコピーング、川島書店、2002年。
- 2) 宮田洋：新生理心理学-1巻-生理心理学の基礎、北大路書房、1998年。

(2015.4.24 受付)