



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 26-1

研究テーマ

次世代モビリティ社会を踏まえた移動空間評価手法の開発研究

研究代表者：	名古屋大学教授	山本	俊行
共同研究者：	名古屋大学教授	森川	高行
	名古屋大学准教授	三輪	富生
	名古屋大学特任准教授	金森	亮
	名古屋大学特任准教授	薄井	智貴
	名古屋大学特任講師	佐藤	仁美
	日建設計総合研究所上席研究員	安藤	章
	日建設計総合研究所上席研究員	児玉	健
	日建設計総合研究所主任研究員	笥	文彦
	日建設計総合研究所研究員	金	希津

平成 29 年 7 月

新道路技術会議

目次

研究概要	1
第 1 章 調査目的	4
1.1 研究目的.....	4
1.2 研究の実施体制	4
第 2 章 走行実験の実施概要.....	5
2.1 名古屋市指定コースの走行実験	5
2.2 高速道路指定区間での走行実験	5
2.3 日常の運転を対象とした走行実験.....	6
2.4 さいたま市での簡便な生体計測実験	6
第 3 章 実験データの取得と分析	7
3.1 運転時の生体反応の計測.....	7
3.2 名古屋市内走行実験のデータ基礎分析.....	9
3.3 運転挙動と道路環境による生体反応.....	12
3.4 機械学習を用いた複合生体データの特性分析	16
3.5 運転ストレスと交通事故との関係性	19
3.6 日常の自動車運転時の運転ストレスと生体反応.....	21
第 4 章 実走行実験結果から得られた運転ストレスと生体反応の普遍性と拡張性	25
4.1 生体反応の普遍性と拡張性	25
4.2 NIRS と視線移動量に関する可能性の知見	26
第 5 章 計測可能な生体仕様の選定と計測・評価手法のマニュアル化	29
5.1 計測可能な生体指標と計測方法	29
5.2 主観的ストレス指標も補足することが必要.....	35
5.3 車両挙動データも取得すれば精度向上が期待できる.....	35
5.4 計測機器の精度	36
5.5 モニター募集方法.....	37
第 6 章 ガイドラインの作成.....	39

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（平成 26 年度採択）
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.26-1	次世代モビリティ社会を踏まえた移動空間評価手法の開発研究	名古屋大学教授 山本 俊行

ストレスフリーな道路移動空間と交通事故ゼロの社会を実現するため、運転ストレスの計測手法と評価手法の開発を研究目的として、一般市民モニターによる実道での運転ストレスの計測実験を行い、このデータを用いて、運転ストレスの構造的な要因解明とストレス値の高い道路区間の判別手法の研究開発を行った。

1. 研究の背景・目的（研究開始当初の背景・動機、目標等）

移動者の快適性やストレス等、従来は指標化と定量化が困難であった道路空間の質的側面の評価手法を開発し、道路事業の評価に活用することを目指している。また、従来、事後対策が中心であった交通事故対策について、生体情報を活用することで、予防的な視点での対策を可能にすることも期待される。具体的には、主観的評価（例：アンケートによる満足度や快適性等）、及び脈拍や脳波等の様々な生体現象等について、最適な指標の組み合わせを開発するとともに、政策立案者や評価者が感覚的に理解しやすい評価軸の開発を目指す。

2. 研究内容（研究の方法・項目等）

■平成26年度研究

- 1)モニターによる運転時生体情報等の取得
 - ・生体情報
 - ①心拍、②呼吸数、③発汗（SPR）、④皮膚温度、⑤脳血流、⑥唾液
 - ・生体情報以外の情報（道路・交通環境情報）

CANプローブ、ドライブレコーダー

2)モニター概要

大学院生、高齢者の合計6名で走行実験。

3)上記データを用いた分析

運転時生体情報から、運転ストレスの計測可能性を検討。

■平成27年度研究

- 1)本研究成果の実務活用に関する道路管理者へのヒアリング
生体情報による道路空間評価の有用性をヒアリング。

2)平成26年度取得データの詳細分析

運転ストレスの定義と定式化、及び機械学習を用いて、生体反応、及び道路特性や運転挙動特性を説明変数とする、ストレス区間予測モデルの構築。

■平成28年度研究

当該研究成果の実務への適用を考えた場合、より多くの一般ドライバーから取得可能な生体情報を選別することが必要になる。そこで、実務的計測の可能性が一番高いと考えられる心拍数を指標として、ストレス区間を予測することの可能性を追求することとした。

そこで、さいたま市で心拍データに基づき、運転ストレス計測実験を60名で実施。

1)運転ストレス区間予測の可能性分析

心拍数（ストレス発生後10秒後の値）のほか、車線数や歩車分離の実態、路上駐車等の道路・交通環境を組み合わせることで、精度高くストレス区間を予測することが可能となった。

2)運転ストレス計測マニュアルの整備

3か年の研究成果を踏まえ、生体情報の計測に関する経験をマニュアル化。

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

- ・運転ストレスを構造的に解明するとともに、機械学習モデルでストレス区間が予測できる判別モデルを構築.
- ・実務適用を見据え、生体データと道路構造や交通状況データのみでも、ストレス区間が予測できるモデルを開発.
- ・運転ストレスの構造的解明の分析

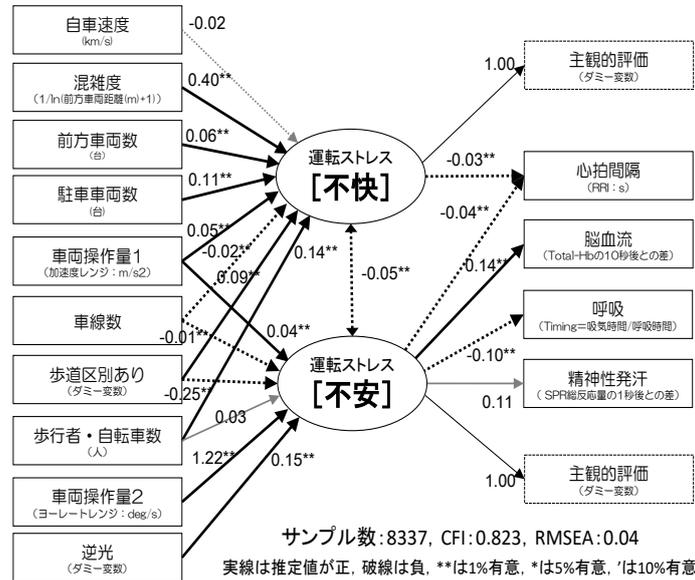


図 運転ストレスの因果構造の推定結果

4. 主な発表論文 (研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

- 1) 金森亮, 久保田穰, 安藤章, 山本俊行, 森川高行: 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, 第51回土木計画学研究発表会, 2015年6月.
- 2) 脇田佑希子, 三輪富生, 森川高行: 心拍データを用いた運転時の心理的負担場面に関する分析, 第51回土木計画学研究発表会, 2015年6月.
- 3) 佐藤仁美, 大竹穂子, 森川高行: 高齢者の運転ストレスと心拍数に関する基礎的分析, 第52回土木計画学研究発表会, 2015年11月.
- 4) Ryo KANAMORI, Akira Ando, Toshiyuki Yamamoto, Takayuki Morikawa: Preliminary Study on Driving-Stress with multiple physiological indicators in driving experiments, IEEE International Conference on Biomedical and Health Informatics(BHI2016), Feb 2016.
- 5) Ryo KANAMORI, Akira Ando, Toshiyuki Yamamoto, Takayuki Morikawa: Relationship between Subjective Driving-Stress and Multiple Physiological Indicators in Driving Experiment, IEEE International Conference on Biomedical and Health Informatics(BHI2017), Feb 2017.

5. 今後の展望 (研究成果の活用や発展性、今後の課題等)

- ・本研究でストレス計測の有効性を確認することができたが、今後実務適用に向けては、本成果の知見の普遍性を検証するため、より多くのモニターでの検証が必要.
- ・道路行政への実務適用に向け、生体データやCANデータ等の効率的に取得事業モデルの検討が必要(例えばETC2.0との連携等). 道路構造データについては、既存管理データの活用が考えられる.

6. 道路政策の質の向上への寄与 (研究成果の実務への反映見込み等)

事故発生後の事後的な対策でなく、予防的な知見として、当該手法の道路行政への適用意義は高いと考えている. 今後の実務適用のためにも、「5. 今後の展望」に関する課題対応を、国交省と共同で進めることが必要だと考える.

7. ホームページ等 (関連ウェブサイト等)

特になし

第1章 調査目的

1.1 研究目的

(1) 研究の背景

従来の道路事業評価手法は、主に交通需要予測による混雑改善効果や費用対効果等経済効率性に着目したものであった。また、交通安全対策も、事故多発区間の改良といった事後現象に基づく取組みが主であった。

今後わが国は、人口減少に伴う交通量減少が予想される反面、超高齢社会の本格化や国際化による外国人の増加等、道路ユーザーの多様化が一層進むため、経済効率性だけでなく、移動者ニーズと合致した快適性や安全性を確保することが必要不可欠となる。また、パーソナルモビリティ（以下、PMと称す）や自動運転車両等次世代モビリティシステムの出現により、道路に求められる空間仕様も多軸化することが予想される。さらに、人口減少と財政逼迫化が進む中、公共交通経営は一層厳しく、自動車と公共交通の機能分担の明確化と融合が一層必要となる。高齢者社会では、交通事故を未然に防ぐ「予防対策」も重要である。

一方、近年、医学分野でのストレス研究や脳活動による感性研究が一定の成果を挙げ始めており、これら生体情報を道路政策評価に活用することが期待できる。

(2) 研究目的

本委託研究は、移動者の快適性やストレス等、従来は指標化と定量化が困難であった道路の質的側面の評価手法について検討する。具体的には、主観的評価(例えば、アンケートによる満足度や快適性等)、及び脈拍や発汗、脳血流等の様々な生体情報等について、最適な指標の組合せを開発するとともに、政策立案者や評価者が感覚的に理解しやすい評価軸を開発する。

1.2 研究の実施体制

表1-1 実施体制

氏名	所属・役職
○山本 俊行 (研究代表者)	名古屋大学・教授
森川 高行	名古屋大学・教授
三輪 富生	名古屋大学・准教授
金森 亮	名古屋大学・特任准教授
薄井 智貴	名古屋大学・特任准教授
佐藤 仁美	名古屋大学・特任講師
安藤 章	名古屋大学・客員教授，日建設計総合研究所・上席研究員
児玉 健	日建設計総合研究所・上席研究員
金 希津	日建設計総合研究所・研究員
寛 文彦	日建設計総合研究所・研究員

第2章 走行実験の実施概要

本研究では、実道でのストレス計測実験を3か年に亘り実施し、そのデータを用いて、分析を実施した。

実験の概要は、以下の通りである。

2.1 名古屋市指定コースの走行実験

初年度では、次頁の名古屋市内の指定コースを対象に、高齢者3名、学生3名を対象とした合計6名で、計27回の走行実験を実施した。

続いて、2か年目には、大学生3名で追加実験を行った。

そして3か年目には、サンプル数のさらなる増加を目的に、被験者15名に対して2回、計30回の走行実験を実施した。

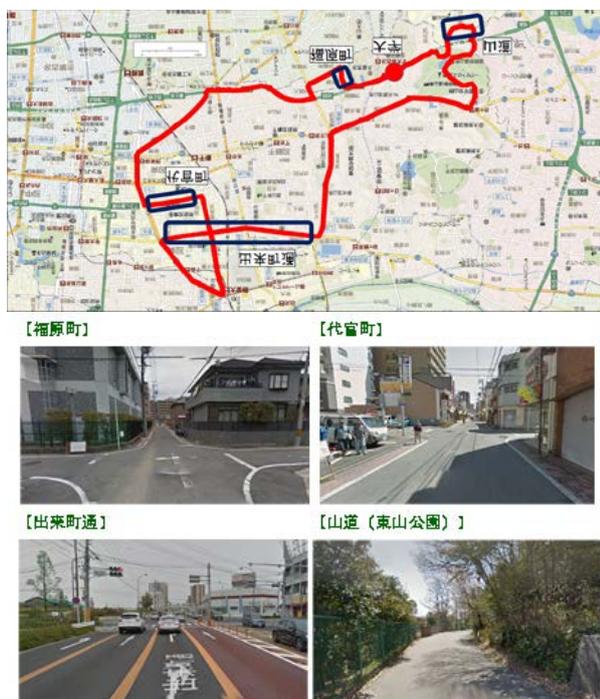


図2-1 名古屋市内走行実験コース

【3か年での実験モニター数】

- ・男子学生：9名
- ・男性：3名（42歳，49歳，52歳）
- ・女性：3名（31歳，52歳，56歳）
- ・男性高齢者：5名（66歳，69歳）
- ・女性高齢者：2名（67歳，76歳）
- ・プロ男性：3名（43歳，47歳，50歳）：タクシードライバ，配達ドライバ

計測する生体反応データは心拍，呼吸，精神性発汗，脳血流，視線移動量である。

2.2 高速道路指定区間での走行実験

高速道路での走行実験として、本年度は東名高速道路（静岡IC→浜名湖SA），新東名高速道路（浜松SA→新静岡IC），首都高速道路（用賀IC→都心環状線→用賀IC）の3区間を、運転頻度に応じて募集した11名に対して走行実験を実施した。



図2-2 高速道路指定区間での生体反応データ計測機器装着状況

なお、計測する生体反応データは心拍、脳血流、視線移動量である。

2.3 日常の運転を対象とした走行実験

指定コースではなく、通常の運転時の運転ストレス申告や生体反応データ計測を目的に、さいたま市内・周辺部の居住者を対象に2週間のデータ計測を依頼した。計測したデータは①自家用車へのドライブレコーダー装着による前方映像とGPSの位置情報と速度、②心拍データ、③運転ストレス箇所や内容の申告、である。被験者数は60名であり、10台のドライブレコーダーと心拍計測機器を用いて、順番に実験を実施した。

2.4 さいたま市での簡便な生体計測実験

平成28年度は、今後の当該ストレス計測手法の実務適用を目指し、本実験で計測した生体情報のなかで最も簡便な生体情報である「心拍数」のみの捕捉を目的とし、さいたま市内で61人のモニターによる実験を実施した。



図2-3 日常走行実験での貸出機器

表2-1 走行実験内容の整理

	地域・区間	被験者数	回数・期間	生体データ
一般道路 指定コース	名古屋市	24人	2回/人	心拍、呼吸、精神性発汗、脳血流、視線移動量
高速道路 指定区間	東名・新東名 (静岡県内) 首都高(用賀IC⇄都心環状線)	11人	3区間/人	心拍、脳血流、視線移動量
一般道路 通常走行 (指定コースなし)	さいたま市・周辺部	61人	2週間/人	心拍

第3章 実験データの取得と分析

3.1 運転時の生体反応の計測

(1) 各生体反応データの指標

本研究では運転時の生体反応として、a)心拍、b)呼吸、c)皮膚温、d)精神性発汗、e)脳血流、と複数の生体反応データと自車前後の交通状況を計測できる実験環境を構築した（図 3-1-1 参照）。

各生体反応の計測結果を解釈するため、テストコースでの運転時を対象に、着座安静時からの変化を比較する。被験者は男子大学院生 3 名である。被験者数の増加と多属性化は今後の課題である。代表的な生体反応データの指標は以下の通りである。

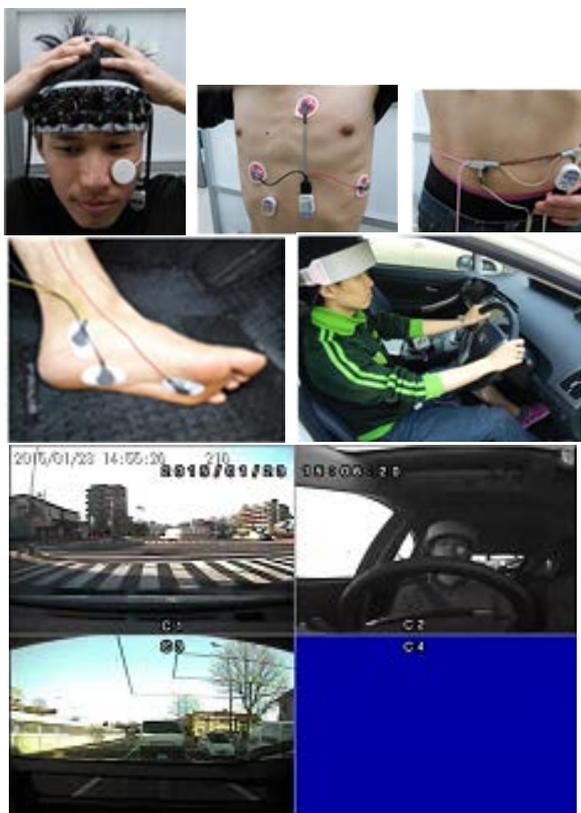
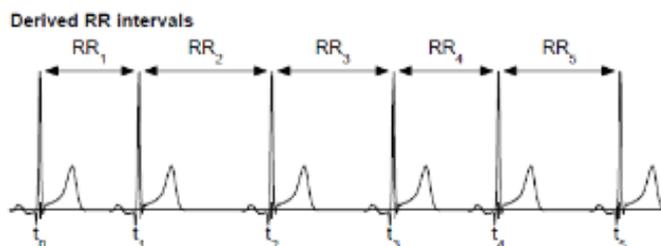


図3-1-1 複数生体反応計測環境

a) 心拍指標

心拍については、2 分間の生体反応を 5 秒毎にスライドさせ、次の各指標を算出する。

- \overline{RR} (RR interval) [ms] : 心拍間隔として R 波の間隔を特定し、2 分間の平均値



- SDNN (Standard deviation of RRI) [ms] : 心拍間隔の標準偏差

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (RR_j - \overline{RR})^2}$$

where RR_j : j th RR interval, N: total number of successive intervals

- RMSSD (Root mean square of successive differences) [ms] : 隣り合う心拍間隔差の RMS

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} (RR_{j+1} - RR_j)^2}$$

さらに、心拍変動のパワースペクトル解析により VLF (Very Low Frequency) : 0.00-0.04 Hz, LF (Low Frequency) : 0.04-0.15 Hz, HF (High Frequency) : 0.15-0.40 Hz, の 3 つの周波数領域に区別し、比率等を指標とする。

- Relative_LF [%]: $LF[\%] = LF[ms^2] / \text{Total power}[ms^2] * 100\%$
- Normalized_LF [n.u.]: $LF[n.u.] = LF[ms^2] / (\text{Total power}[ms^2] - VLF[ms^2])$
- LF/HF: $LF/HF = LF[ms^2] / HF[ms^2]$

b) 呼吸指標

呼吸については、腹部の動きを計測し、2分間の生体反応を5秒毎にスライドさせ、次の各指標を算出する。

- 呼吸間隔[ms] (Resp) :呼吸による最大ひずみの間隔を特定し、2分間の平均値
- 呼吸タイミング (Respiratory Timing) :呼吸の総時間 (T_t) は呼気時間 (T_i)、吸気時間 (T_e)、呼気後ポーズ時間 (T_p) に区別され、 $Timing = T_i/T_t$

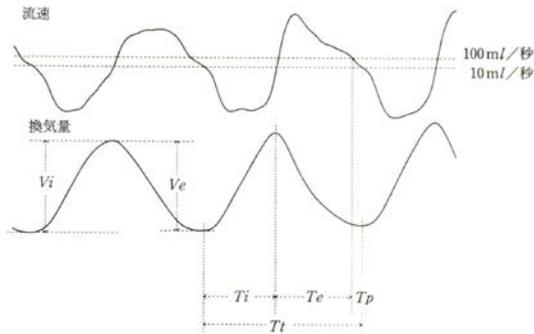


図11-8 サイクル分析における呼吸測度の計測方法 (Umezawa, 1992 を改変)

流速と換気量から6つの速度を求める。呼気後のポーズ時間 (T_p) は流速が秒あたり100ml以下に低下した時間を計っている。
 T_i : 呼吸時間 T_i : 吸気時間 T_e : 呼気時間
 T_p : 呼気後ポーズ時間 V_i : 吸気量 V_e : 呼気量

※新 生理心理学〈1巻〉生理心理学の基礎より

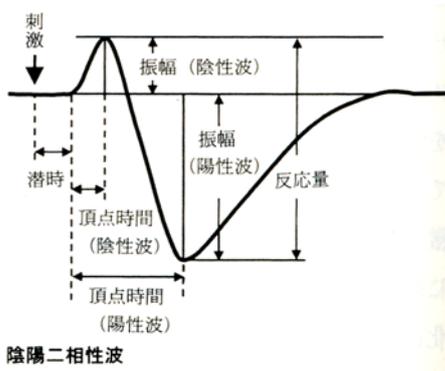
c) 皮膚温指標

皮膚温 (Skin_temp) は鼻横部にて計測し、1分間の連続的变化を5秒毎にスライドさせ、平均値を算出する。

d) 精神性発汗指標

精神性発汗は左足裏にて計測し、平均的な精神性発汗の反応が数秒とされているため、5秒間の陰陽双方の反応量を1秒毎にスライドさせ、次の指標を算出する。

- 総反応量 (SPR_all) : 5秒間の反応量 (陰陽の絶対値) の積分値
- 基準化反応量 (SPR_index) : 総反応量を5秒間の最大反応量にて基準化 基準化反応量 = 総反応量/最大反応量



※新 生理心理学〈1巻〉生理心理学の基礎より

e) 脳血流指標

脳血流は前頭部にてNIRSにて計測し、1分間の連続的变化を5秒毎にスライドさせ、次の指標を算出する。

- Oxy-Hb: 16箇所の観測結果から近似SpO2が75%以上を妥当な計測箇所とし、これらの酸素化ヘモグロビン量の変化の平均値
- Total-Hb: 酸素化ヘモグロビン (OxyHb) と脱酸素化ヘモグロビン (deoxyHb) の和

(2) テストコース走行実験

他車や歩行者・自転車の影響を除き、運転自体による生体反応を計測するため、テストコースにて走行実験を実施した。1回3分程度、右左折や停止、車線変更を含むコースを設定し、安静を挟んで合計2回の実験を行った。

a) 運転挙動の判別

運転挙動による生体反応の差異も考慮できるよう、テストコースでの運転挙動を5秒毎に「通常走行」「回転(右・左折)」「車線変更」「待機」「停止・減速」「発進・加速」の6種類に分類し、CANデータを用いて判別モデルを構築する。

判別モデルは、CANデータの閾値によって運転挙動を判別し、事後的に解釈できる決定木を採用する。運転挙動間でデータ数に偏りがあるため、最もデータ数が少ない「車線変更」にデータ数を揃え、各運転挙動のデータはランダム抽出している。また、CANデータの説明変数は車速、加速度、ヨーレートを使用した。

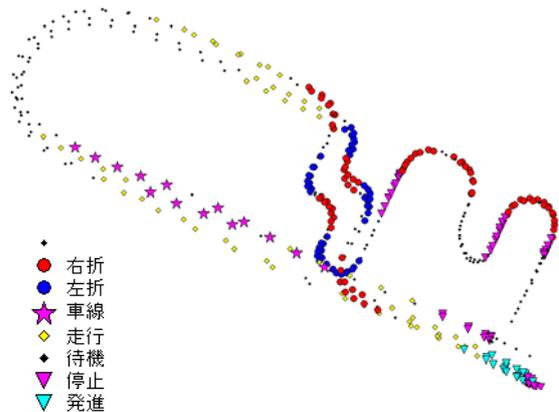


図3-1-2 テストコースでの走行コースと運転挙動の特定

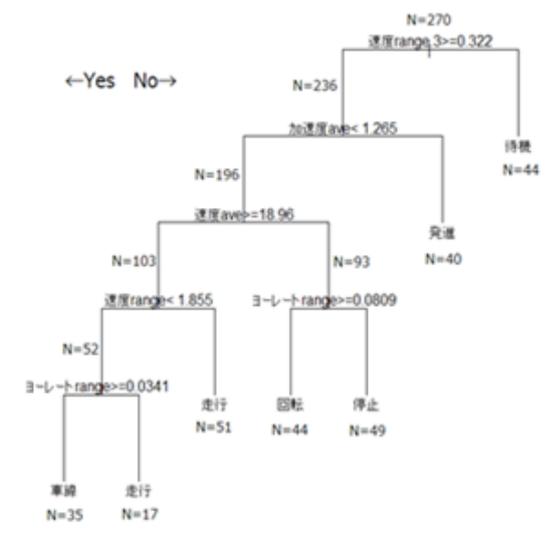


図3-1-3 決定木による運転挙動判別モデル

判別モデルの結果を図 3-1-3 に示す。なお、速度 ave : 1 秒間の平均速度、速度 range : 1 秒間の最大速度と最小速度の差、加速度 ave : 1 秒間の平均加速度、ヨーレート range : 1 秒間の最大ヨーレートと最小ヨーレートの差、が説明変数として利用された。またテンフォールドクロスバリデーション (10-fold cross-validation) の結果、79.3%の再現性があることを確認した。

(3) 生体反応結果

被験者 A~C のテストコース走行実験時の 2 回の安静時からの生体反応の差を表に整理した。ハッチ箇所は既存研究にて報告されている望ましい (理想的な) 生理反応と同じ傾向であることを示す。

表より、心拍間隔である「RRI」、呼吸タイミング「Resp_timing」、SPR の総反応量「SPR_all」は、安静時と比較して期待されるストレス反応が得られており、生体反応指標として利用価値が高いと考えられる。残りの生体指標は同様の活動でも被験者間で反応傾向が異なったり、制御された環境下での実験ではないため、様々な影響が含まれている可能性がある。

表3-1-1 テストコース走行時の生体反応データ (事前安静時との差分)

	走行1			走行2		
	A	B	C	A	B	C
RRI	-127.69	-144.17	-71.37	-108.39	-140.49	-71.68
Sdnn	41.19	11.91	12.03	23.91	8.77	6.61
Rmssd	36.25	-12.43	7.51	30.86	-11.76	-9.70
Relative_LF	7.72	5.97	22.01	-3.33	1.54	0.97
Normalized_LF	-5.16	38.91	27.29	-16.93	33.67	33.84
LF/HF	-0.30	5.23	1.11	-0.73	3.27	1.38
Oxy-Hb	0.05	-0.85	-0.49	0.24	-0.82	0.19
Total-Hb	0.17	-0.89	-0.32	0.24	-0.85	0.35
Skin_temp	-0.38	1.22	0.42	-0.01	1.57	0.54
Resp	-7.87	-780.98	-659.38	185.88	-639.59	-707.19
Resp_timing	-0.01	-0.04	0.00	-0.01	-0.04	-0.02
SPR_all	0.61	0.32	0.59	1.20	0.20	0.88
SPR_index	-9.14	-61.59	-3.37	-37.20	-69.05	-5.29

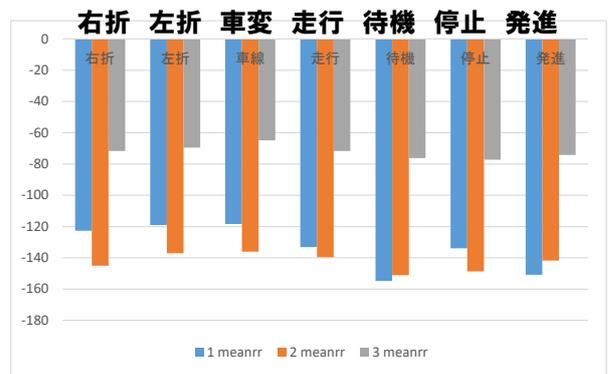


図3-1-4 運転挙動別RRI

一方、運転挙動別に生体反応を確認したが、どの指標においても大きな差異は見られなかった。

3.2 名古屋市内走行実験のデータ基礎分析

(1) 走行実験の概要

実際の運転時に感じる「不安・不快」を運転ストレスと定義し、名古屋市内に設定した実験走行コースを複数の生体反応計測を行いながら、被験者に運転してもらった。

実験走行コースは以下の通り、60~75 分程度のコース (大学を起終点とした左周り) であり、住宅街内 (福原町) や歩車混合の商店街 (代官町)、バスレーンや矢印信号現示のみの幹線道路 (出来町通)、先の見通しが悪い山道 (東山公園) を含む。

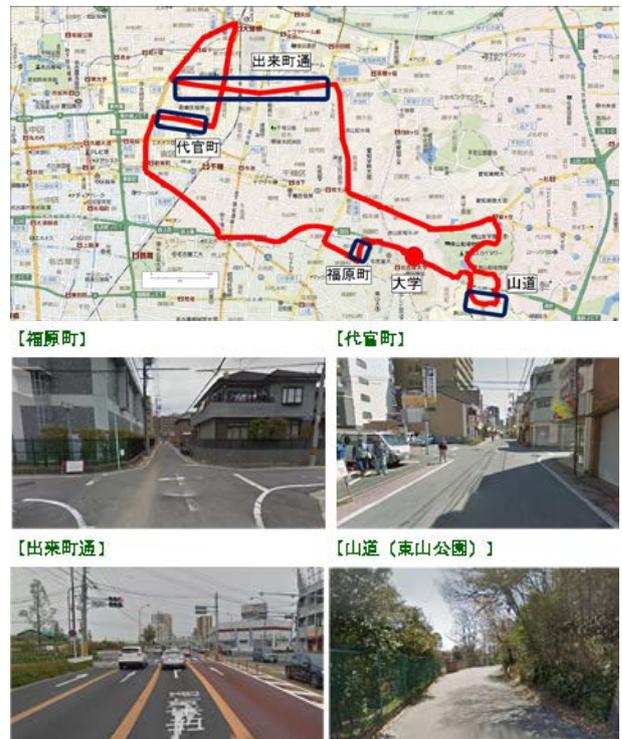


図3-2-1 名古屋市内走行実験コース



図3-2-2 車線数



図3-2-3 歩道・中央分離帯・出入口状況

また、車線数、歩道や中央分離帯の有無、側方部の店舗・駐車場の出入口の有無の道路構造は以下の通りである。

(2) 運転ストレス申告箇所と内容

運転ストレスの分類として「不安（心配）」、「不快（怒り）」、「疲労」を用いた既存研究もあるが、本研究では1時間強の指定走行コースの運転時であるため個人が主観的に感じる「不安」、「不快」に注目する。

運転ストレスの原因としては、道路構造に関する静的なもの、急な車両、歩行者・自転車等の飛び出しなど動的なものが想定されるが、今回は被験者のコメントや動画による交通状況を確認し、次の6個に分類した。

- ・幅員や信号など「道路構造」
- ・渋滞など「交通状況」
- ・前車両との希望走行速度差や割り込みなど「他車両の動き」
- ・歩行者や自転車など自動車以外の影響として「人・自転車の動き」
- ・路上・側道や工事車両の駐車である「駐車・工事車両」
- ・雨や逆光など「天候」

被験者によって感じる運転ストレスは異なり、また不快・不安は個人差はあるが、原因は道路構造や他車両の動きの件数が多い。

ここで、被験者Aの合計5回の走行実験時に申告された運転ストレスは36件であり、これらの分類と

原因、5段階のストレス強度（1：小-3：中-5：大），具体的な理由は以下の通りである。被験者Aの場合、不快と不安は同程度の数を申告しており、動的に変化する他車両や人・自転車の動き、路上駐車関連が多くなっている。ストレス申告箇所は想像通り、片側1車線で歩道区分や中央分離帯がない区間で多い。

表3-2-1 被験者Aの主観的運転ストレス申告内容

分類	原因	強度	理由
不快	道路構造	1	直射日光が当たり、さらに長い信号待ち
		1	信号待ち長い
		1	信号待ち長い
	他車両の動き	3	対向右折車出過ぎ
		1	両サイドからの割り込み
		1	路駐を避けて右車線にはみ出してくる大型車
		2	強引な割り込み
		2	前方車両の予期せぬ動き
	人・自転車の動き	5	前方車両の急ブレーキ
		1	並走車の割り込み
		1	自車両に気付かず車道中央の歩行者
	駐車・工事車両	1	車道を横断する歩行者
		2	路駐車をかわしながらのすれ違い
		1	路駐
		1	路駐
2		工事	
2		右折時に右側に路駐があり、左右確認の妨げに	
1		大型車の路駐	
不安	道路構造	2	交差点近くの路駐
		1	交差点近くの路駐
		2	狭い道でのすれ違い
	人・自転車の動き	1	狭い道でのすれ違い
		2	左折前、動きの予測しづらい歩行者
		2	子供
駐車・工事車両	2	動きが予測できない自転車	
	2	対向車線の路駐車両の奥に歩行者	
	2	車道を歩く歩行者	
天候	2	狭い道での路上駐車、動きの予測できない歩行者	
	2	動きの予測できない歩行者	
	1	動きが予測できない自転車	
	天候	2	右折前の工事による車線変更
		1	工事による幅員減少
	天候	1	直射日光まぶしい
		1	直射日光まぶしい

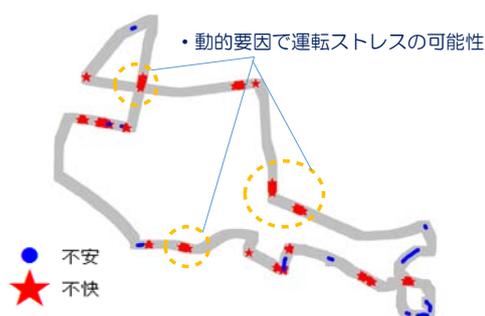


図3-2-4 被験者Aの運転ストレス申告箇所（分類別）

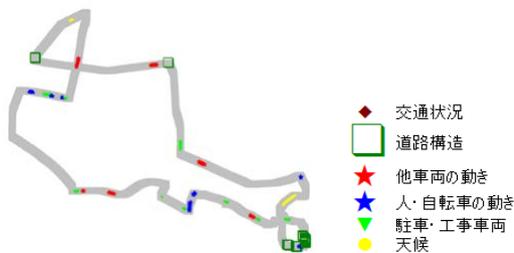


図3-2-5 被験者Aの運転ストレス申告箇所（原因別）

(3) 主観的運転ストレスと生体反応

被験者 A から申告された運転ストレス箇所における生体反応を確認する。今回は最も取得間隔が大きい車両位置情報 (GPS 情報) に合わせ、ミリ秒単位で計測されている生体反応データと CAN データを 1 秒毎に集計した。

運転ストレスの申告箇所の平均的な生体反応 (事前安静時との差分) を表 3-2-2 に整理した。表よりデスクワークやテストコース走行でストレス指標としての有用性を確認した心拍間隔 (RRI), 呼吸タイミング (Resp_timing), 精神性発汗反応 (SPR_all) は、名古屋市内の走行実験における運転ストレス申告時にも生理的に期待される反応が得られている。さらに心拍関連指標 (Relative_LF, Normalized_LF, LF/HF) や皮膚温でも従来のストレス下で解釈可能な反応を示している。

続いて、運転ストレスを「不快」と「不安」とに区別して、生体反応を確認する。表より、不快と不安では平均的な生体反応データの動きと異なる場合があり、例えば、RRI では不快はプラス側、不安はマイナス側と反対の反応を示すなど、大きく異なる。走行実験回数や被験者数が限定されるが、対象とする運転ストレスに応じて、生体反応を選択していくことが有用な場合がある可能性もある。

表3-2-2 被験者Aの運転ストレス時の生体反応データ (事前安静時との差分)

	全ストレス	安静時との有意差	不快	不安	不快と不安の有意差
RRI	-2.87		3.17	-16.23	有
Sdnn	15.26	有	15.49	14.77	
Rmssd	3.39	有	2.63	5.06	
Relative_LF	4.26	有	4.37	4.02	
Normalized_LF	9.59	有	10.55	7.45	有
LF/HF	21.07	有	30.43	0.35	有
Oxy-Hb	-0.35	有	-0.41	-0.24	有
Total-Hb	-0.44	有	-0.49	-0.33	有
Skin_temp	0.38	有	0.41	0.31	有
Resp	284.15	有	570.21	-349.28	有
Resp_timing	-0.05	有	-0.04	-0.07	有
SPR_all	2.11	有	2.30	1.71	
SPR_index	-62.41	有	-61.08	-65.36	

(4) 運転ストレスと原因との因果構造

心理学的ストレスモデルの 1 つであるラザルスモデルは、潜在的ストレスラーに対して個人の認知的評価によってストレス反応としての情動反応が生じると考える (図 3-2-6 を参照)。この文脈に沿えば、主観的に報告された運転ストレスは運転時に認知的評価を経たストレス反応であり、自分自身で制御困難な生体反応データから、潜在的な個人の運転ストレス状態を推計することができると考えられる。

本研究では、運転ストレスと原因との因果構造を把握するため、構造方程式モデルを構築して要因分析を行う。被験者 3 名 (全 19 回) の走行データを集約し、複数の道路状況の観測変数で運転ストレスが規定され、生体反応データと申告に影響を与えている、と仮定 (MIMIC モデル) した構造方程式モデルを運転ストレスの分類 (不快と不安) 別に構築した。モデルの推定結果は以下の通りである。全サンプル数は 8,337 であり、これは運転ストレスが申告されていないデータをサンプリングして利用しているためである。適合度指標である CFI は 0.82, RMSEA は 0.04 と妥当なモデルと判断できる。

運転ストレスの「不快」に関して、生体反応データでは個別に心電データから算出される RRI で測定できる可能性が高い結果となった。また、混雑度や他車両の存在が「不快」を高める原因であり、駐車車両 1 台は走行前方車両よりも 2 程度 (=0.11/0.06) の影響を与える。混雑時や歩行者・自転車対応時など、車両操作量が大きくなると、不快度も大きくなり、さらに車線数が増えるとストレス度は軽減するが、歩行者・自転車の存在は駐車車両以上の正の影響がある (歩行者等 : 0.14/人, 駐車車両 : 0.11/台) と考察できる。

運転ストレスの「不安」は RRI に加えて、脳血流や呼吸、発汗など複数の生体指標で測定できる可能性が高い結果となった。車両の前後 (加減速) だけでなく、回転 (ヨー角) の動きも不安度を高め、道路線形 (先の見通しが悪い山道など) が影響を与えている。また、車線数が増えるとストレス度は軽減され、

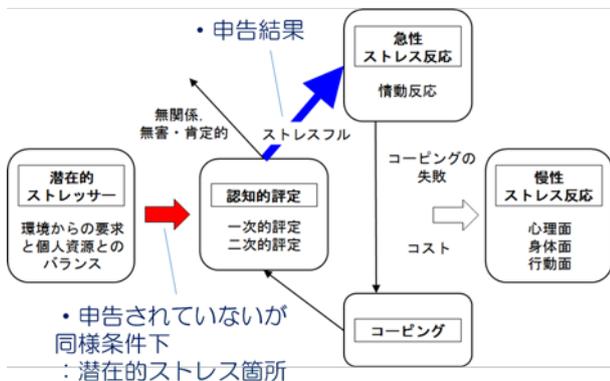


図3-2-6 心理学的ストレスモデルと潜在的運転ストレスの考え

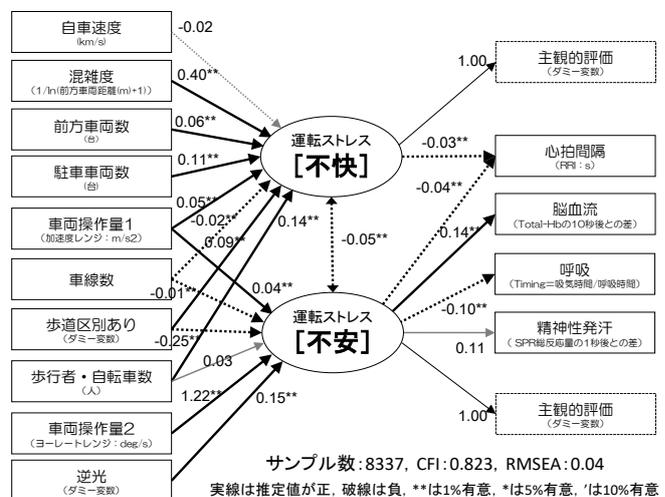


図3-2-7 運転ストレスの因果構造の推定結果

さらに歩道区別の整備は有効である（軽減効果は1車線増加：0.01，歩道区別：0.25と25倍）。一方、映像データで確認された逆光状態は、前方確認がしづらくなり、運転時の不安を増大させることが明らかになった。

このように、個人差のある運転ストレスを計測するためには有用な生体反応データがストレス分類によって異なること、因果構造として交通状況関連の施策効果が議論できるように仮定したモデルが精度良く推定できることを確認した。

3.3 運転挙動と道路環境による生体反応

(1) 実走行データの運転挙動判別

テストコースデータで構築した運転挙動判別モデルを名古屋市走行実験データに適用し、運転挙動のラベル付けを行った。ある走行データの結果を以下に示す。

映像データとの部分的な確認の結果、テストコースと比較して、実際の一般道走行実験データは他車両や歩行者等の影響で判別精度が低下している。特に車線数が1車線でも道路線形が曲線的だと「車線変更」や「回転」と判別されるなど、詳細な運転挙動の判別は難しいことが分かった。更なる精度向上は必要であるが、実際の走行データの教師データとしてのラベル付けは膨大な作業時間を要することから、今回は、実際の運転挙動と差異の少ない「通常走行」を主に扱い、また、「通常走行」「待機」以外の4種類の挙動を「その他」と分類して分析を実施する。

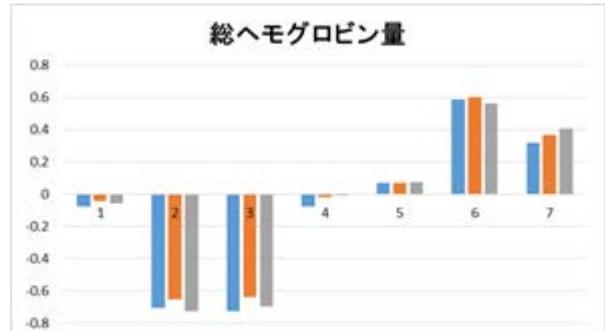
(2) 運転挙動判別の生体反応

「通常走行」、「待機（信号待ちなど停止時）」、「その他（右左折、加減速時、車線変更時など）」に運転挙動を分類し、その際の生体反応の差異を検証する。走行実験1回毎に運転挙動別に生体反応データを集計し、平均値と分散を算出し、運転挙動間の平均値の差を検定した。

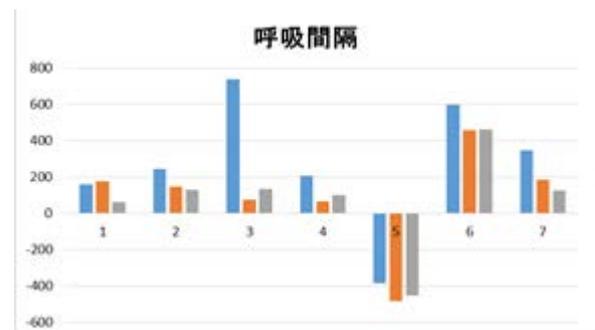
一例として、被験者Aの7回分の走行データの分析結果は以下の通りである。なお、生体反応データとしては、心拍間隔（RRI）、総ヘモグロビン量、呼吸間隔を選択した。



心拍間隔(RRI)



総ヘモグロビン量



呼吸間隔

図3-3-2 被験者Aの運転挙動判別生体反応の平均値

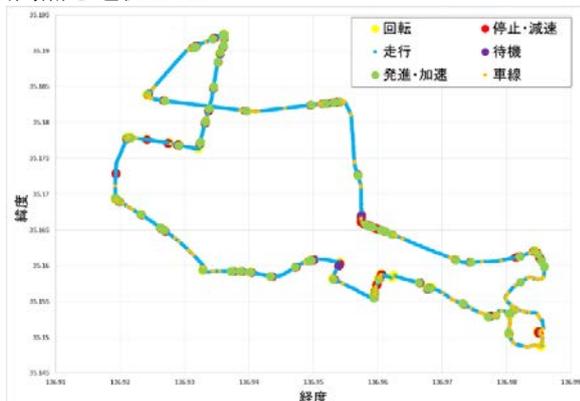


図3-3-1 運転挙動判別結果

表3-3-1 被験者Aの運転挙動別生体反応の平均値

			1	2	3	4	5	6	7
セット数		待機	235	181	189	185	186	211	218
		その他	88	64	77	52	73	60	82
		走行	178	180	174	190	181	178	170
心拍 間隔	平均値 (msec)	待機	69.21	-3.35	-22.07	-11.14	-17.94	-79.79	-65.09
		その他	34.52	-3.36	-25.08	-18.38	-18.87	-76.76	-62.47
		走行	11.67	-8.75	-23.79	-27.57	-15.79	-31.29	-75.44
	待機 vs. その他	t 値	8.2	0.0	0.5	1.2	0.2	0.6	0.4
		有意	1%						
	待機 vs. 走行	t 値	15.8	1.4	0.4	4.2	0.8	11.5	2.0
		有意	1%			1%		1%	5%
	その他 vs.走行	t 値	5.0	1.0	0.2	1.5	0.7	8.1	2.0
		有意	1%					1%	5%
総へモ グロビ ン量	平均値 (mM・ mm)	待機	-0.051	-0.702	-0.722	-0.075	0.068	0.484	0.321
		その他	-0.088	-0.648	-0.638	-0.018	0.070	0.755	0.368
		走行	-0.088	-0.724	-0.695	-0.010	0.077	0.747	0.405
	待機 vs. その他	t 値	4.2	2.1	2.4	1.5	0.1	8.6	1.1
		有意	1%	5%	5%			1%	
	待機 vs. 走行	t 値	4.2	1.1	1.0	2.8	0.6	14.3	2.5
		有意	1%			1%		1%	5%
	その他 vs.走行	t 値	13.5	2.7	1.6	0.2	0.4	0.3	0.8
		有意	1%	1%					
呼吸 間隔	平均値 (msec)	待機	40.52	243.84	737.32	204.02	-386.44	274.93	347.11
		その他	171.98	145.37	75.07	66.43	-486.10	247.87	185.58
		走行	292.91	127.51	132.12	99.56	-456.71	467.56	122.41
	待機 vs. その他	t 値	5.4	2.5	4.7	2.9	3.4	0.4	2.6
		有意	1%	5%	1%	1%	1%		5%
	待機 vs. 走行	t 値	7.9	2.7	4.3	3.4	3.8	6.0	5.4
		有意	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
	その他 vs.走行	t 値	3.3	0.3	1.8	0.7	1.0	3.4	1.0
		有意	1%		10%			1%	

各運転挙動に対する呼吸間隔の反応について注目すると、図表から「その他」、「通常走行」の運転挙動は、「待機」の運転挙動よりも呼吸間隔が狭く、ストレスを受けている状態であると類推される。また、呼吸間隔に関しては他の生体反応よりも t 検定において有意な差がみられ、またその傾向がおおむね一致している。一方、心拍間隔や総へモグロビン量に関しては有意な差がみられたデータは少ない。

(3) 道路環境別の生体反応

次にテストコースと同様の走行条件である「通常走行」時に限定し、道路環境ごとに条件分けを行い、

生体反応の比較行う。

対象とする道路環境は「車線数」、「歩道」、「出入口」であり、映像データから条件を判断している。

- ・車線数：今回は1車線の場合と2車線以上の場合で条件分けを行う
- ・歩道：今回は1車線のみ部分における歩道の有無について条件分けを行う。定義は道路交通法に従う
「歩行者の通行の用に供するため縁石線又はさくその他これに類する工作物によって区画された道路の部分」(道路交通法 2015)
- ・側方からの出入口：今回は1車線のみ、もしくは

2車線以上の道路で1番左の車線を走行している場合における側方からの出入口(道路沿いの店舗、駐車場への出入口など)の有無で条件分けを行う。

a) 車線数

車線数は1車線の場合と2車線以上の場合で生体反応の比較を行っている。心拍間隔や総ヘモグロビン量では一様な傾向を得ることはできなかった。しかし、呼吸間隔に関しては7回行った走行実験ですべて2車線以上の場合と比べて、1車線の場合時に呼吸間隔が狭まっており、t検定でも1%有意を示している。よって、2車線以上の場合よりも、1

車線の場合の方が運転者の生体反応、特に呼吸に影響を与えていると考えられる。

b) 歩道

心拍間隔に注目すると、対象セット数は小さくなるが3回目と、6回目、7回目の実験において、有意差があり、すべて段差歩道無しの条件で心拍間隔が狭まっている。よって、段差歩道がない条件下の方でストレスを受ける傾向があると示唆される。しかし、他被験者においては、段差歩道の有無で各生体反応の平均値の有意差が見られず、心拍間隔の狭まりは大学院生Aのみの傾向であり、全体的には段差

表3-3-2 被験者Aの車線数に対する生体反応集計

			1	2	3	4	5	6	7
セット数		1車線	33	28	36	29	28	34	32
		2車線以上	145	152	138	161	153	144	138
心拍間隔	平均値 (msec)	1車線	61.12	15.32	-40.88	-49.40	-24.07	-79.06	-67.68
		2車線以上	44.91	-13.18	-19.33	-23.63	-14.28	-71.37	-77.24
	t値		2.4	4.2	2.6	2.6	1.9	0.8	1.3
	有意		5%	1%	1%	5%			
総ヘモグロビン量	平均値 (mM・mm)	1車線	-0.029	-0.839	-0.673	0.049	0.027	0.510	0.224
		2車線以上	-0.064	-0.702	-0.701	-0.020	0.087	0.576	0.448
	t値		1.7	2.3	0.5	0.8	1.7	1.7	3.5
	有意		10%	5%			10%	10%	1%
呼吸間隔	平均値 (msec)	1車線	-13.48	-381.81	-28.47	-28.13	-592.77	155.01	-177.80
		2車線以上	76.95	221.33	174.02	122.56	-431.81	533.13	192.03
	t値		3.2	2.9	5.2	2.6	2.7	5.9	5.8
	有意		1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%

表3-3-3 被験者Aの歩道有無に対する生体反応集計

			1	2	3	4	5	6	7
セット数		歩道あり	22	19	21	20	20	22	24
		歩道無し	11	9	15	9	8	12	8
心拍間隔	平均値 (msec)	歩道あり	54.12	18.44	-26.46	-53.41	-18.48	-64.01	-62.45
		歩道無し	75.12	8.74	-61.08	-40.50	-38.03	-106.67	-83.39
	t値		1.3	0.6	2.3	0.8	1.6	2.2	1.9
	有意				5%			5%	10%
総ヘモグロビン量	平均値 (mM・mm)	歩道あり	-0.010	-0.772	-0.654	0.141	0.020	0.521	0.169
		歩道無し	-0.066	-0.981	-0.701	-0.156	0.046	0.489	0.387
	t値		2.0	1.6	0.5	2.5	0.4	0.4	2.8
	有意		10%			5%			1%
呼吸間隔	平均値 (msec)	歩道あり	23.42	-266.54	-41.85	-42.53	-544.43	238.22	-186.11
		歩道無し	-87.29	-625.18	-9.73	3.88	-713.61	2.46	-152.86
	t値		2.7	0.8	0.6	0.5	1.4	3.2	0.2
	有意		5%					1%	

歩道の有無で運転者へ与える影響は小さいと考えられる。

c) 出入口

出入口の有無の2条件間の平均値で統計的に差が存在しないことがわかる。出入口の有無によって運転者に与えられる影響は小さい。

(4) 運転挙動と道路環境による生体反応のまとめ

これまでは被験者Aの走行データのみ注目して検定結果を確認したが、過年度にデータ収集・整備した6名、27回分の走行データを用いて考察する。表3-3-5は生体反応が5%有意で確認された実験回数をまとめた表である。表内の数値が大きければ大きいほど、その条件が多くの実験回数でストレスであったことがわかる。

運転挙動に関して、呼吸間隔のデータに着目すると「待機」時に比べ、「その他」や「走行」状態のときは呼吸間隔が狭まり、既存の生理的反応と同一の結果であることからストレスを受けていると解釈できる。また心拍間隔においても「待機」時に比べ、「その他」の状態では心拍間隔が狭まっていることがわかる。一方で、「その他」と「走行」のデータ間に関

しては、特に顕著な生体反応の差は確認されなかった。

次に道路環境の3条件に着目すると、車線数では各生体反応において特徴的な傾向が見られた。心拍間隔と呼吸間隔は、車線数が1車線のみ条件の時に、間隔が狭まっていることから車線数が2車線以上の時よりも1車線である方がストレスであると考えられる。一方、総ヘモグロビン量は2車線以上の条件時に増加しており、脳が活性化している状況といえる。脳の活性化がマイナスの影響を及ぼすとは断定できないが(適度な緊張度が運転に必要であり、緊張度がなくなると眠気をもたらすことから)、運転時に受けるストレスは単一の種類ではなく複数の要素が絡み合っていると考えられる。段差歩道や出入口の条件に関しては有意差が確認された結果は少ない。従って、これら道路環境の2条件はあまり運転者の生体反応に影響を与えないと推測される。

表3-3-4 被験者Aの出入口有無に対する生体反応集計

			1	2	3	4	5	6	7
セット数		出入口あり	37	18	27	32	23	24	30
		出入口無し	25	17	25	28	18	26	27
心拍間隔	平均値 (msec)	出入口あり	45.77	36.56	-22.62	-46.17	-33.91	-67.96	-61.29
		出入口無し	58.24	-0.73	-42.19	-31.48	-28.47	-72.89	-72.60
	t 値		1.4	3.5	1.7	1.1	0.7	0.3	1.1
	有意			1%					
総ヘモグロビン量	平均値 (mM・mm)	出入口あり	-0.031	-0.777	-0.708	0.002	0.011	0.454	0.316
		出入口無し	-0.078	-0.818	-0.612	0.074	0.041	0.577	0.355
	t 値		2.6	0.4	1.1	0.7	0.6	2.2	0.4
	有意		5%					5%	
呼吸間隔	平均値 (msec)	出入口あり	37.75	-95.93	-19.74	-58.14	-530.08	278.91	-28.29
		出入口無し	-38.58	-425.14	26.06	-25.79	-637.39	206.21	-127.56
	t 値		2.0	1.0	0.8	0.5	1.3	0.9	1.1
	有意		10%						

表3-3-5 各条件と生体反応による生体反応の集計表

		心拍間隔		総ヘモグロビン量		呼吸間隔	
①	②	①	②	①	②	①	②
待機	その他	0	10	11	3	0	21
待機	走行	5	9	10	4	0	25
その他	走行	8	2	3	8	2	3
1車線のみ	2車線以上	13	3	0	15	25	1
歩道あり	歩道無し	3	4	5	2	2	3
出入口あり	出入口無し	6	2	3	3	5	3

3.4 機械学習を用いた複合生体データの特性分析

以上の分析結果より、運転ストレスの定義と要因を解明することができたが、今後は、生体データや道路構造データ、さらには運転挙動データ（CANデータから取得）等を組み合わせることで、より一層精度が高く、運転ストレス区間を予測する手法の開発が求められる。これにより、ストレスの高い区間を、効率的に捕捉することが可能となり、道路行政への適用可能性が高まると考えている。

そこで、本研究では、機械学習の一つであるランダムフォレストとサポートベクターマシンにより、ストレスと非ストレスの判別可能性より、実道での運転ストレス指標を推計する手法を検討する。

なお、本研究で機械学習を適用する意義は、各生体データにはストレス反応時間の時間差があり、単純な多変量解析モデルでの分析が困難であること、また説明変数が極めて多義にわたる等、モデルとしての複雑性が高いため、機械学習を適用することとした。

(1) 分析方法の概要

a) ランダムフォレストの理論

ランダムフォレストとは、決定木モデルの精度を高めるために開発された機械学習アルゴリズムの一種である。決定木モデルを弱学習器とする集団学習アルゴリズムであり、ランダムサンプリングされた教師データによって、学習した多数の決定木を用いる。その概要を以下に示す。

- 与えられたデータから B 組のランダムサンプルを生成する。
 - 総説明変数が M のとき、 \sqrt{M} の変数を教師データとしてランダムサンプリングする。
- 各サンプルを用いて B 本の未剪定かつ、最大の決定木を生成する。
 - 分岐ノードはランダムサンプリングされた変数の中の最善のものを用いる。
- 作成した B 本の決定木による多数決によって、一つの新たな分類器を構築する。

RF は決定木をランダムに生成・統合し、より有効性の高い分類器を構築して分類を行う。そのため、決定木モデルに比べて精度が高く、また、過学習を行わないという利点がある。特徴量加工による重要度とジニ係数による重要度が算出されるため、説明変数の影響度がわかる。

b) サポートベクターマシンの理論

サポートベクターマシンは、簡単に言ってしまうと、 N 次元の特徴量を持つ教師データを N より高度な次元数 N' に写像し、データを分類する超平面を作成することで未知のデータを特徴量により分類する。豊田ら(2008)を参考に記す。

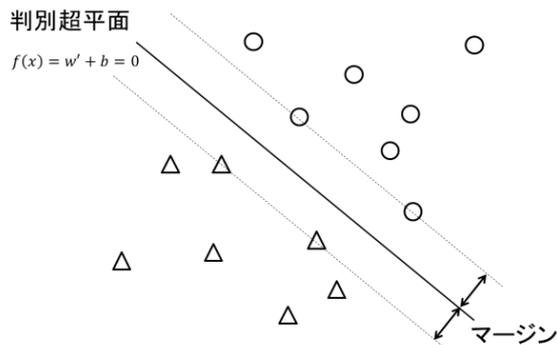


図3-4-1 判別超平面による分類

分類のため式(5.1)により教師データを定義する。

$$(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i) \quad x_i \in R^n, \quad y_i \in \{+1, -1\}, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (5.1)$$

ここで、 y_i は真ならば+1、偽ならば-1となる教師値である。

図3-4-1に、二次元上の真データを(丸)、偽データを(三角)分類する問題を例に、概略を示す。

真データと偽データを線形分類する判別超平面 $f(x)$ は、式(5.2)により定義される。

$$f(x) = w'x + b = 1 \quad w \in R^n, \quad b \in R \quad (5.2)$$

この時、 w は係数行列、 b は閾値である。ここで、判別超平面に近接するデータとの距離(マージン)を最大化することで、精度よく分類することができる。図3-4-1における実線が判別超平面、破線が判別超平面と平行にひかれたマージンを表す超平面である。破線は、式(5.3)であらわすことができる。

$$f(x) = w'x + b = \pm 1 \quad w \in R^n, \quad b \in R \quad (5.3)$$

また、マージン d は、判別超平面上の任意の点 x' から両破線までの距離の和である。 x' は式(5.2)を満たすことから、式(5.4)が導ける。

$$d = \frac{|w'x' + b + 1|}{\|w\|} + \frac{|w'x' + b - 1|}{\|w\|} = \frac{|1|}{\|w\|} + \frac{|-1|}{\|w\|} = \frac{|2|}{\|w\|} \quad (5.4)$$

式(5.4)より、マージンを最大化するということは、 $\|w\|$ を最小化することと同義であるため、凸二次計画問題を解く。凸二次計画問題とは線形の不等式制約を含んだ二次関数の最適化問題である。具体的には、ラグランジェの未定乗数法を次の目的関数と不等式制約を解く。

$$\text{目的関数: } \frac{\|w\|^2}{2}$$

$$\text{不等式制約: } y_i(w'x_i + b) \geq 1 \quad (5.5)$$

ここで、式(5.5)をラグランジェの未定乗数法により計算すると、以下の式が導かれる。

$$L(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{i^*=1}^l \alpha_i \alpha_{i^*} y_i y_{i^*} x_i' x_{i^*} \quad (5.6)$$

このとき、次の式(5.7)の制約を考慮し、最大化することにより、主問題である目的関数を最適化することができる。

$$\alpha_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \quad (5.7)$$

また、図3-4-2のように線形分類不可能な場合に、多少の誤差分類を許容するソフトマージンと、高次元への写像を行うカーネルトリックという技法の概念が重要となる。

ζ_i はスラック変数と呼ばれる値であり、マージン内に誤分類を含むデータが入っている状態を表現する。この際、目的関数は式(5.8)の制約のもと、次の式(5.9)のように表現される。

$$\frac{\|w\|^2}{2} + C \sum_{i=1}^l \zeta_i \quad C > 0 \quad (5.9)$$

ここで、 C は判別超平面からの逸脱度を伝える母数で、ペナルティ母数といわれる。

また、高次元への x_i 写像 $\Phi(x_i)$ を利用すると、次の式(5.10)を最大化することとなる。

$$L(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{i^*=1}^l \alpha_i \alpha_{i^*} y_i y_{i^*} \Phi(x_i)' \Phi(x_{i^*}) \quad (5.10)$$

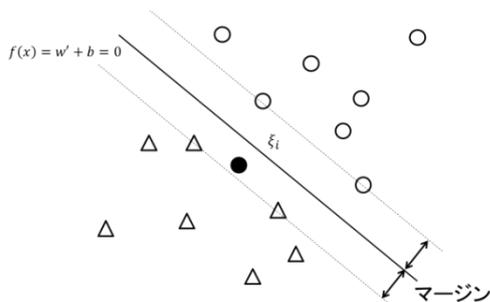


図3-4-2 誤差を容認した分類

式(5.10)に含まれる $\Phi(x_i)$ の内積を、 x_i の内積の関数として表現したものをカーネルといい、 $k(x_i' x_{i^*})$ と表記する。つまり、式(5.10)を次の式(5.11)のように表記できる。

$$L(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{i^*=1}^l \alpha_i \alpha_{i^*} y_i y_{i^*} k(x_i' x_{i^*}) \quad (5.11)$$

カーネルとして、線形カーネル、多項式カーネル、RBF(ガウシアン)カーネル、シグモイドカーネルの4つが代表的である。本研究では、RBFカーネルを使用する。

$$\text{RBFカーネル: } k(x_i' x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad (5.12)$$

(2) 分析データ

特定の区間の科学集を防ぐため、各サンプル間に1秒以上の間隔をあける、という制限を設けランダムサンプリングした、ストレス区間 125 サンプル、非ストレス区間 125 サンプルの合計 250 データを教師データに、ランダムフォレスト、サポートベクターマシンによってストレス・非ストレスの判別適合度を調査する。判別データは、全経路における 279829 サンプル (ストレス区間 35301 サンプル 12.6%・非ストレス区間 244528 サンプル 87.4%) を対象に分析する。説明変数を表3-4-1にまとめる。

表3-4-1 説明変数

CANデータ	生体データ		道路構造データ		
自転車加速度	Oxy-Hb	Oxy-Hb(95%)	車線数	信号無交差点	障害物
車速	deOxy-Hb	deOxy-Hb(5%)	規制速度	信号有交差点	福原町
アクセル開度	Oxy+deOxy		路上駐車	信号無T字路左に道路	代官町
舵角信号	SpO2	SpO2(5%)	歩道の有無	信号無T字路右に道路	バスレーン
ブレーキ油圧	呼吸		中央分離帯	信号有T字路左に道路	山道区間
ヨーレート	体温	体温(5%)	側方余裕の有無	信号有T字路右に道路	
	発汗	発汗(95%)			
	RRI	RRI(5%)			
	LF/HF	LF/HF(95%)			

(3) 精度評価

本研究では、精度評価の指標として、正解率、適合率、再現率、F値を用いる。それぞれの算出方法は表3-4-2のとおりである。

(4) 分析の結果

本節では、分析の結果を示す。

a) ランダムフォレストの結果

ランダムフォレストの再現率、適合率、F値、正解率を表3-4-3に示す。教師データの値がすべて1であるため、過学習の可能性はある。しかし、教師データがストレスと非ストレスの構成比が50:50で成り立っていることを考慮すると、ある程度の精度を持っていると考察できる。

特徴量加工による重要度とジニ係数による重要度を図3-4-3、図3-4-4にまとめる

車速、発汗がどちらでも最上位に位置している。

また、Oxy-Hbは、特徴量加工による重要度では5番目、ジニ係数による重要度では6番目に位置している。このことから、車速、発汗、Oxy-Hbは比較的説明力の高い指標だということがわかる。

表3-4-2 精度評価指標の算出方法

	実際がストレス	実際が非ストレス
推定がストレス	SS	NS
推定が非ストレス	SN	NN
再現率	$\frac{SS}{SS + SN}$	$\frac{NN}{NS + NN}$
適合率	$\frac{SS}{SS + NS}$	$\frac{NN}{SN + NN}$
F値	$\frac{2 \times \text{再現率} \times \text{適合率}}{\text{再現率} + \text{適合率}}$	$\frac{2 \times \text{再現率} \times \text{適合率}}{\text{再現率} + \text{適合率}}$
正解率	$\frac{SS + NN}{SS + SN + NS + NN}$	

表3-4-3 ランダムフォレストの精度

	教師データ		判別結果		
	ストレス	非ストレス	ストレス	非ストレス	
再現率	1.00	1.00	再現率	0.88	0.71
適合率	1.00	1.00	適合率	0.31	0.98
F値	1.00	1.00	F値	0.45	0.82
正解率	1.00		正解率	0.73	



図3-4-3 特徴量加工による重要度

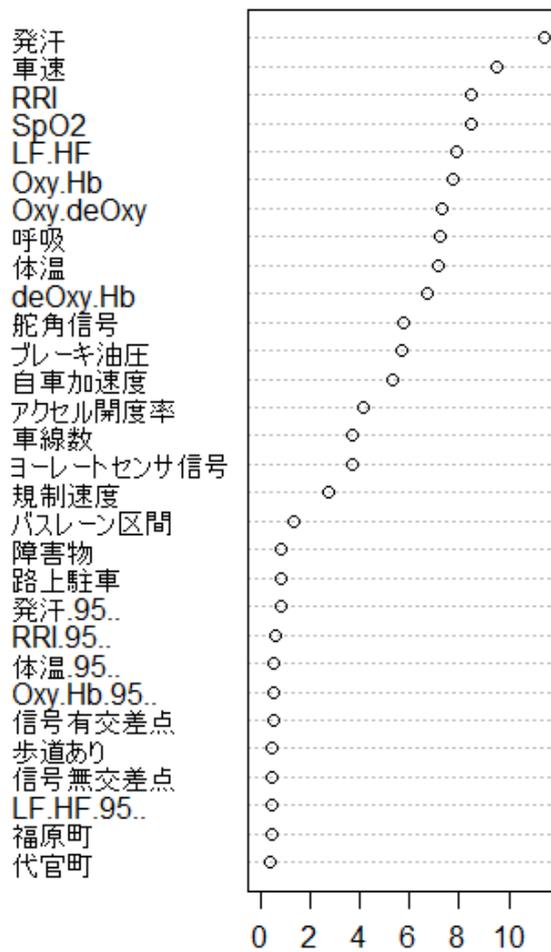


図3-4-4 ジニ係数による重要度

表3-4-4 サポートベクターマシンの精度

	教師データ		判別結果		
	ストレス	非ストレス	ストレス	非ストレス	
再現率	1.00	1.00	再現率	0.30	0.96
適合率	1.00	1.00	適合率	0.51	0.9
F値	1.00	1.00	F値	0.38	0.93
正解率	1.00		正解率	0.87	

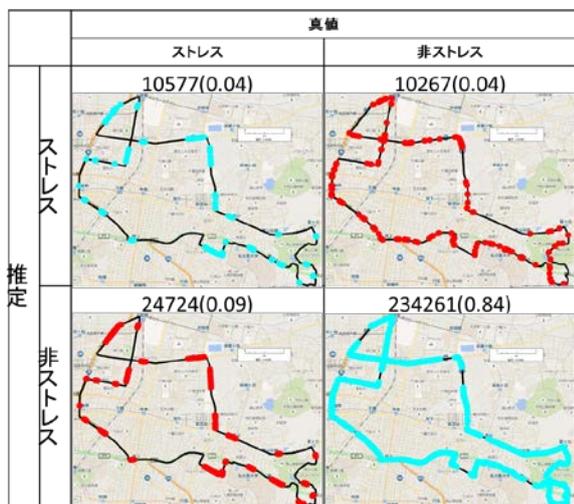


図3-4-5 機械学習モデルによるストレス区間の予測結果

b) サポートベクターマシンの結果

サポートベクターマシンの再現率, 適合率, F 値, 正解率を表 3-4-4 に示す. こちらも教師データの結果から過学習の可能性を感じるが, 正解率 0.87 という高い精度の判別機となっている.

ランダムフォレストとサポートベクターマシンの結果から, 少ない教師データからでも, CAN データ, 生体指標, 道路構造データを組み合わせることで正解率が 9 割近い精度でストレスと非ストレスを判別することが可能であることを示すことができた.

3.5 運転ストレスと交通事故との関係性

(1) 運転ストレスマップの可能性

現在, プローブデータの有効活用の 1 つとして, 加減速の大きな箇所を蓄積し, 地図上に示すことで, ヒヤリハット箇所の事前情報としている. 加減速は個人のドライバーの運転操作や交通状況によって大きく異なるが, 集合知として情報共有が進められている. 同様に, 個人差の大きな運転ストレスについても, 主観的な報告値自体やモデル化された潜在的な運転ストレスを蓄積することで, 交通事故対策や経路選択時や走行時の情報提供の基礎データとしての活用が期待される.

今回は名古屋市走行実験における主観的に申告された運転ストレスの発生頻度を道路区間別に集計し, 道路交通センサデータを説明変数としてモデル化を行い, 発生要因を考察する. さらに交通事故の発生頻度を同様にモデル化し, 運転ストレス頻度との関係性, 運転ストレスをデータ蓄積する有用性を議論する.

(2) 交通事故と運転ストレスの発生頻度

本研究では, 愛知県内の幹線道路を対象とした交通事故数データを使用する. 今回は公益財団法人交通事故総合分析センター(イタルダ)の交通事故・道路統合データベースのデータ提供を受けた. イタルダは警察庁から提供される交通事故のデータ(交通事故統計データ)と国土交通省から提供される道路データ(道路交通センサデータ)とを統合している. なおデータは平成 25 年(2013 年)の交通事故データであり, 平成 22 年の道路交通データである.

図 3-5-1 は, 1 年間の交通事故件数別の道路区間数を示したものである. 区間数はセンサ区分となっている. 愛知県内のセンサ 4167 区間のうち 1000 区間以上で交通事故は発生していないが, 典型的な頻度モデルの適用が有効と考えられる.

図 3-5-2 は, 名古屋市走行実験における指定コースにて被験者が申告した運転ストレス数別の区間数を集計した結果である. ここでの区間数は, DRM の交差点区間である. この運転ストレス頻度データは, 過年度にデータ整備された延べ 27 回の走行実験データを使用している. 運転ストレスデータはゼロの地点は除外している.

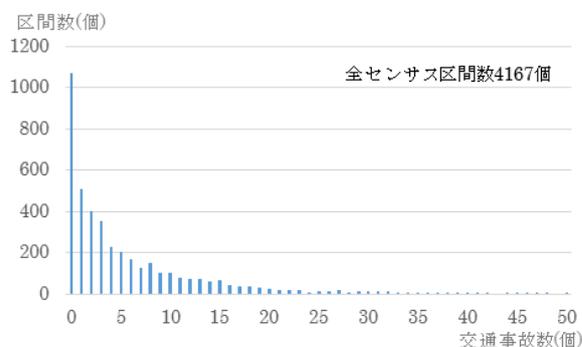


図3-5-1 交通事故数の頻度分布

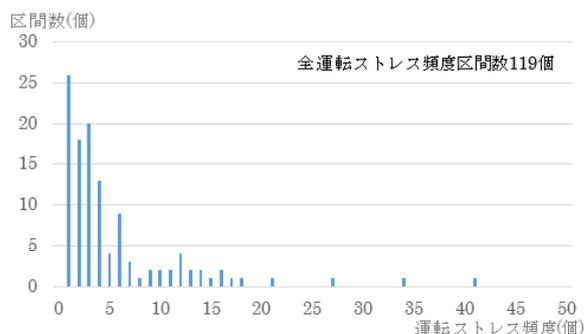


図3-5-2 運転ストレス申告数の頻度分布

(3) 交通事故と運転ストレスの発生頻度モデル

a) 運転ストレスの頻度モデル

運転ストレスの申告がないとき、つまりストレス頻度がゼロとなる区間は除外されている。よって、ゼロを含まないゼロ切断型のデータとなるために、ゼロ切断モデルを適用する。

負の二項分布の累積分布関数 F は式(1)のように表される。

$$\begin{aligned} \Pr(Y_i = y) &= F_{NB}(y|\mu, \theta) \\ &= \frac{\Gamma(y + \theta)}{\Gamma(y + 1)\Gamma(\theta)} \left(\frac{\theta}{\theta + \mu}\right)^\theta \left(\frac{\mu}{\theta + \mu}\right)^y \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty x^{s-1} e^{-x} dx \quad (s > 0) \quad (2)$$

ここで $i = 1, 2, \dots, n$ は n 個の観測値の数であり、 Y_i は計測上 i 番目の観測値である。また、 $y = 1, 2, \dots$ は Y_i がとることができる負ではない整数の集まりである。ここで μ は平均であり、 θ はサイズパラメータである。

$$\begin{aligned} \Pr(Y_i = y | Y_i > 0) &= \frac{\Gamma(y + \theta)}{\Gamma(y + 1)\Gamma(\theta)} \left(\frac{\theta}{\theta + \mu}\right)^\theta \left(\frac{\mu}{\theta + \mu}\right)^y [1 \\ &- F_{NB}(0)]^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

ここでゼロ切断型の負の二項分布の累積分布関数とはゼロより大きいという条件を付けた条件付確率で表され、(3)のような式となる。

パラメータ推定に統計ソフト”R”のパッケージ”VGAM”を適用し、推定結果は以下の通りである。

パラメータ推定結果から、一般国道ダミーや都道府県道ダミーがプラスとなり、規格が高い道路で運転ストレス頻度は大きくなる傾向にある。また、車道幅員と規制速度はマイナスになり、車道幅員、規制速度が小さくなるほど運転ストレス頻度が大きくなることを示している。これは車線幅員が狭くなることで不安に感じることや、規制速度が低く走行速

度が遅くなることでイライラすることによってストレスを感じていると解釈できる。

また、このモデルから運転ストレスの頻度の期待値は次の式(5)で算出でき、対象外の道路区間への適用が可能となる。

$$\begin{aligned} \text{運転ストレス頻度} &= \exp(-5.041 \\ &+ 0.716 \times \ln\left(\frac{\text{交通量}}{\text{両側車線数}}\right) \\ &+ 1.880 \times \text{一般国道ダミー} \\ &+ 1.501 \times \text{都道府県道ダミー} \\ &- 0.116 \times \text{車線幅員} - 0.063 \times \text{規制速度} \\ &+ 2.001 \times \text{中央分離帯ありダミー} \\ &+ 0.716 \times \ln(\text{区間延長}) \end{aligned} \quad (5)$$

推計された運転ストレス頻度と交通量との相関係数は0.25であり、それぞれ独立した説明変数とみなして、交通事故の頻度モデルを構築する。

b) 交通事故の頻度モデル

愛知県内の全ての道路交通センサス区間を対象に、交通事故頻度モデルとして負の二項分布を仮定してパラメータ推定する。なお、運転ストレスを推計する上で交通量などが必要となるため、交通量が計測されていない区間は除外した。

本研究ではパラメータ推定に統計ソフト”R”のパッケージ”pscl”を適用した。

運転ストレス頻度の影響を検証するため、運転ストレスを導入した場合としない場合で比較した。また、単路と交差点で区別するのはセンサスの観測区間が交通量で区別しているため大きく、センサスの観測交通量が交差点で有効ではないと考えたためである。

単路部では推計した運転ストレス頻度はプラスとなった。このことから運転ストレス頻度が増すと、交通事故数が増える関係性にあることが確認できる。ただし、有意差は10%有意水準であり、運転ストレス頻度の推計値がある場合とない場合でのAIC(赤池情報量基準)の差異もない。今回の運転ストレスの推計値は交通量などが説明変数となっており、推計値ではなく頻度自体を組み込んで関係性を把握することが求められる。その他、交通量、歩道ありダミーやDIDで商業地域ダミーはプラスになり、交通量が大きい道路ほど交通事故が増える傾向にあること、歩道がある場所やDIDでは歩行者が多くなることから、交通事故発生頻度の増加要因と考えられる。大型混入率、山地ダミー、規制速度がマイナスになっていること

から、大型車が多く混入していること、山地であること、規制速度が大きいことによって交通事故数は小さくなるのがわかる。これは大型車混入率と山地ダミーに関しては普段慣れていない状況や道路環境によって運転者の意識や注意力がより強くなって

表3-5-1 運転ストレス頻度モデルの
パラメータ推定結果

説明変数	推定値	有意
定数項	-5.041	
サイズパラメータ	-0.291	.
ln12 時間交通量/両側車線数	0.719	
一般国道ダミー	1.880	**
都道府県道ダミー	1.501	***
ln 区間延長(m)	0.716	*
規制速度(km/h)	-0.063	*
車道幅員(m)	-0.116	***
中央分離帯ありダミー	2.001	***
AIC	620.8	
最終対数尤度	-301.4	

いるのではないかと考えられる。規制速度は単調な道路環境であるため交通事故が起きにくいのではないかと考えられる。

交差点部に関して推定された運転ストレスは有意になり、プラスになっている。このことから運転ストレスが増すと交通事故数が増えることがわかる。ただし、交差点部では適切な交通量を説明変数として採用することができておらず、運転ストレスが代理変数となっている可能性も高い。また、一般国道ダミー、規制速度、車道幅員の推定値はマイナスとなった。このことから交差点部では規格が高い道路で交通事故が少なく、信号設置による効果とも考えられる。

表3-5-2 単路部での交通事故モデルの
パラメータ推定結果

説明変数	推定ストレス あり		推定ストレス なし	
	推定値	有意	推定値	有意
定数項	-12.172	***	-12.359	***
推定ストレス	0.013	.		
ln12 時間交通量	0.971	***	0.992	***
一般国道ダミー	-0.167	***	-0.136	**
ln 区間延長(m)	0.570	***	0.589	***
規制速度(km/h)	-0.020	***	-0.022	***
車道幅員(m)	0.030	***	0.026	***
大型混入率(%)	-0.026	***	-0.026	***
歩道ありダミー	0.619	***	0.624	***
中央分離帯ありダミー	0.302	***	0.368	***
DID で商業地域ダミー	0.763	***	0.757	***
DID 商業地域以外ダミー	0.485	***	0.482	***
山地ダミー	-0.582	***	-0.595	***
AIC	13167		13168	
最終対数尤度	-13139		-13142	
サイズパラメータ	1.572		1.569	

表3-5-3 交差点部での交通事故モデルの
パラメータ推定結果

説明変数	推定ストレス あり		推定ストレス なし	
	推定値	有意	推定値	有意
定数項	-7.403	***	-8.131	***
推定ストレス	0.088	***		
ln12 時間交通量	0.970	***	1.105	***
一般国道ダミー	-0.187	***	0.045	
規制速度(km/h)	-0.011	***	-0.017	***
車道幅員(m)	-0.015	**	-0.026	***
DID で商業地域ダミー	0.188	**	0.157	**
DID 商業地域以外ダミー	0.220	***	0.229	***
AIC	17847		17979	
最終対数尤度	-17829		-17963	
サイズパラメータ	1.025		0.973	

3.6 日常の自動車運転時の運転ストレスと生体反応

これまでは名古屋市内の指定コースでの走行実験データを用いて分析を行ったが、一般ドライバーが日常の自動車運転時の運転ストレスと生体反応に着目する。生体反応としては容易に装着可能である心拍のみを対象とし、運転中に感じた不快・不安の運転ストレスを事後的に報告してもらう実験を実施し、基礎分析を行った。

(1) 日常の自動車運転を対象とした実験概要

埼玉県さいたま市周辺の居住者を対象に、一般ドライバーの自家用車にドライブレコーダーを2週間装着してもらい、普段の運転の様子を記録した。その際、心拍計測器をつけて運転中の心拍数を測定する。また「稼働日誌」と「運転ストレス記録」の2種類の日報を書いてもらい、運転状況を把握した。

a) 稼働日誌

ドライブレコーダー稼働時間と心拍計測器装着記録を月日、何時何分から何時何分までかを記載してもらった。これにより家族で共有している自家用車であっても、被験者自身が運転しているか判断できる。

b) 運転ストレス記録

ドライブレコーダーを記録している間の運転中に感じたストレスに関して、運転終了後に振り返りながら記録用紙に記載する。被験者が感じたストレスは、「不快」または「不安」の2種類に分け、ストレスを感じた状況をできるだけ詳しく自由に記述してもらう。同時に、今回の研究の新たな提案として各ストレスをもし回避しようとした場合、迂回してもいい時間すなわち「ストレス回避のための迂回時間」と、ストレスを回避しようとした場合、支払ってもいい金額すなわち「ストレス回避のための支払い意思額」を回答してもらった。

なお、今回の実験で「不快」「不安」は次のように定義してある。

- ・不快：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など
- ・不安：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など

運転ストレスの申告内容データに加えて、分析に用いるデータは以下の通りである。

a) ドライバーの生体データ

ドライバーが運転中にストレスを感じた際、その反応が心拍に影響を与えると仮定し、被験者には心拍数を計ってもらった。心拍計測機器を腕にはめて運転してもらい、同時に心拍受信機器としてスマートフォンを渡し、心拍数データを保存した。

表3-6-1 運転時の不満報告表

内容	不満度	箇所	状況	日時	回避する場合	
不安 不快	高 中 低	(交差点や通り名など)	(できるだけ詳しく)	月・日・時・分頃	増加時間 (分/回)	支払い額 (分/回)
(例) 不快	中	○交差点にて □駅方面に走行	専用車線も矢印信号もない交差点で右折する際、複数の後続車があり、右折タイミングを見計らうときに感じた	2017/8/16 20時30分頃	2	10

b) 自動車の速度データ

ドライブレコーダーの速度データを用いる。GPSによる速度変換であり、ある程度の誤差を含むことに注意が必要である。

c) 道路構造データ

ドライブレコーダーの映像から、運転ストレス影響を与えると想定される道路構造データを一秒毎に目視にて記録していく。今回、抽出したデータは全体車線数(本)、中央分離帯の有無、歩車分離帯の有無、街路樹の有無、進行方向側の車線数、である。

d) 交通状況データ

道路構造データに加えて、歩行者数なども運転を妨げる要因として考慮する必要がある。今回、抽出したデータは路上駐車数、前方自転車数、前方歩行者数、逆光の有無、天気(晴れ、雨、曇りのいずれか)、自車と同じ車線を通る前方車両数、自車が通る車線より左側の車線を通る前方車両数、自車が通る車線より右側の車線を通る前方車両数、である。路上駐車、歩行者、自転車利用者に関しては、映像に映りこんだ瞬間から、写らなくなる瞬間までを記録してある。

運転中にストレスを与えると思われる要因は道路構造だけでなく、前方歩行者や前方に走る自転車の数などもあるとおもわれる。したがって、本研究では申告のあったストレス件を一つ一つドライブレコーダーで確認をしていき、記載内容と照らし合わせて

ストレス体感時間をとった。

(例)トラックが2台停車して避けるのが面倒だった

→ドライブレコーダーにおいてトラックが映像に映った瞬間から映像に映らなくなるまでの時間を測定

この時間を「ストレス体感時間」とし、ストレス体感時間の前後2分間を含む時間帯を対象にドライブレコーダーの映像からデータ起こした。具体的なデータ項目は以下の通りである。路上駐車の数(映像に映りこんだ数)、前方自転車の数、前方歩行者の数、逆光の有無、前方を走る車両の数、天気(晴れているかどうか)。

(2) 運転ストレスの基礎的分析

被験者35名から得られた主観的な運転ストレスの申告内容を発生要因別に整理した。

発生要因として以下の6つに整理する。これらは経路探索時の情報更新程度(動的データか静的データか)も考慮して区分している。

- 幅員や信号など「道路構造」: 車線数、中央分離帯の有無、歩道区分の有無
 - 渋滞など「交通状況」: 速度、前方車両距離、加減速など(CANデータ)
 - 前方車両の割り込みなど「他車両の動き」:(視認できる)前方車両数
 - 歩行者や自転車の影響「人・自転車の動き」:(視認できる)歩行者・自転車数
 - 路上駐車や工事車両など「駐車・工事車両」:(視認できる)駐車車両数
 - 雨や逆光など「天候」: 逆光の有無
- 運転ストレス申告総件数: 728件/61人、不快: 383件(52.6%)、不安: 341件(46.8%)、無回答: 4件。

また、被験者の運転ストレス申告内容の自由記述の一例として、発生要因別に整理した結果は次の通りである。

表3-6-2 運転ストレスの要因別申告件数

不快 383件	道路構造	57件
	交通状況	92
	他車両の動き	141
	人・自転車の動き	46
	駐車・工事車両	44
	天候	3
不安 341件	道路構造	130件
	交通状況	14
	他車両の動き	99
	人・自転車の動き	69
	駐車・工事車両	12
	天候	17

<道路構造>

- ・道路が狭く、電柱も貼り出していて通りづらい
- ・T字路で右折する際、ブロック塀が邪魔で状況把握が困難
- ・狭い道でなおかつS字カーブになっていて圧迫感

<交通状況>

- ・日常的に渋滞が起こる道
- ・対向車線で渋滞. 交差点右折時に対向車がいたため右折できず

<他車両の動き>

- ・青信号なのに前の車が進まずストレスを感じた
- ・タクシーが無理な割り込みをしてきた
- ・前の車がハザードをつけて路駐するかとおもい、狭い道だからイラっとしたが、建物の駐車場へバックで入って行っただけだった

<人・自転車の動き>

- ・自転車が不安定な動きをして車道を通った
- ・歩き方が危険な親子二人組がいた
- ・路肩にとまっていたトラックの運転手が横を通過するときに路肩から運転席にでてきた

<駐車・工事車両>

- ・カーブにトラックが路上駐車していて通りづらい
- ・コンビニの横に路上駐車. しかも左側に寄せず、とめているため、結局対向車が通り過ぎるまでいけず、相当イラつく.
- ・電話工事をしていたため、片側通行になっていた.
- ・工事用の車両が止まっていたため、警備員が対応していたが雑な対応でいらついた

運転ストレス申告があった際の被験者のストレス体験時間をドラレコ動画データから計測した. 体験時間の計測は、第3者(学生バイト)が申告内容に

表3-6-3 運転ストレスの体感時間

ID	運転ストレス申告数(件)	ストレス体感総時間(秒)	ストレス割合(%)
1	27	435	0.87
2	17	261	1.02
3	7	973	0.83
4	6	112	0.27
5	3	558	1.30
6	60	1431	4.02
7	4	82	0.14
8	6	901	2.60
9	1	15	0.03
10	11	1017	1.56
11	15	120	0.23
12	13	258	0.46
13	8	710	2.32
14	7	247	0.73

基づく事象が動画データにて確認できる時間としており、必ずしも被験者の主観的な時間と一致していないことに注意が必要である.

動画データ確認が終了した14名分のストレス申告数と体験時間、走行1回辺りのストレス体験時間割合は以下の通りである.

走行1回当たりの運転ストレス体感時間の割合は平均1%強であり、15分程度の走行の場合10秒の体感時間となり、非常に小さいことがわかった. 一方でドライバーにとって運転ストレス事例は大きなインパクトがあると想定され、運転ストレスを回避する経路探索の指標化は重要であると考えられる.

(3) 運転ストレスの発生要因の分析

ドライブレコーダーの映像、心拍数、速度をもとにストレス体感時間とその前後2分間において1秒毎にデータを整理した. 申告のあったストレスに関し、ストレス体感時間の間はストレスを感じているとし、その前後2分間においてストレスを感じていないと仮定し、多項ロジスティック回帰分析を行い、運転ストレス発生要因分析を行う.

以下のロジスティック回帰分析は、通常の回帰分析とは違い、被説明変数が「ストレスを感じる」、「ストレスを感じ無い」といった「0-1」で表現されるため用いる.

$$l = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \tag{6.1}$$

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-l)} = \frac{1}{1 + \exp(-b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 - \dots - b_px_p)} \tag{6.2}$$

l: ロジット(対数オッズ), p: ストレスが発生する確率, b₀: 定数, b₁~b_p: 偏回帰係数

説明変数としては、速度(km/h)、全体車線数(本)、中央分離帯の有無、歩車分離帯の有無、路上駐車台数(台)、前方自転車(人)、前方歩行者(人)、心拍数変化(1秒)、心拍数変化(3秒)、心拍数変化(5秒)、心拍数変化(10秒)、逆光の有無、前方車両数(台)、曇りと雨、自車通過車線が左端車線、を用意した.

今回の分析ではまずストレスを感じているすべてのデータを取り、次にストレスデータと同数のストレスを感じていないデータをストレス体感時間の前後2分からランダムに抽出した. ただし、ストレス体感境界付近は明確にはならないのでストレス体感時間前後10秒間の非ストレスデータは除いてある.

パラメータの推定結果は以下の通りである. ストレスに影響を与えるものは速度、全体車線数、歩車分離帯、路上駐車、前方自転車、前方歩行者、逆光、

前方車両数, 心拍変化 (10 秒間の変化), 曇りと雨, という結果になった. また, 変数が 1 上がるとストレス発生確率が高くなる変数はオッズ比より, 路上駐車, 前方自転車, 前方歩行者, 逆光, 前方車両数, 心拍変数 (10 秒), 曇りと雨という結果になった. 心拍については, ストレスを感じてから 10 秒後に心拍変化が大きくなることが明らかになった. 曇りと雨に関してはオッズ比がかなり高くなっており, データに偏りがあるのでデータ数を増やし精度を上げる必要がある.

本結果から, 生体指標と運転ストレスの関係分析として心拍数は重要な指標になりえる可能性が確認され, 一般被験者に対するデータ収集の有効性も確認できた.

表3-6-4 運転ストレスに関する
ロジスティック回帰モデルの推定結果

	パラメータ	z値		オッズ比
定数項	-0.905	-3.15	**	
速度	-0.0178	-4.20	***	0.982
全体車線数	-0.381	-4.09	***	0.684
歩車分離帯	-0.540	-4.02	***	0.583
路上駐車	1.76	9.40	***	5.80
前方自転車	0.415	3.53	***	1.52
前方歩行者	0.210	2.48	*	1.23
逆光	0.994	7.00	***	2.70
前方車両数	0.599	5.86	***	1.82
心拍変化(10秒)	0.0457	2.12	*	1.05
曇りと雨	5.64	23.0	***	281
サンプル数	3474			
AIC	2213.6			

第4章 実走行実験結果から得られた運転ストレスと生体反応の普遍性と拡張性

4.1 生体反応の普遍性と拡張性

今回の研究目的は運転時の快適性、不快や不安などの運転ストレスとした従来は計測自体や定量化が困難な主観的評価に対して、生体反応データにて定量化することが大きな目的である。そのため、名古屋市指定コースでの走行実験では、現時点で運転操作に影響を及ぼさない範囲内で最大限の計測できる組合せを調整し、心拍、呼吸、皮膚温、精神性発汗、脳血流、視線移動量を計測できる環境を構築した。

主観的評価である運転ストレスと生体反応データとの関係を振り返ると、複数の道路状況の観測変数（速度、加速度、舵角などCANデータで計測可能な変数）で運転ストレスが規定され、生体反応データと主観的申告（ある時は申告し、ある時は申告しない心理学的な個人個人のコーピングの差異も含む）に影響を与えている、と仮定（MIMICモデル）した構造方程式モデルの構築が有効であると考えられる。なお、本分析手順は特許出願済みであり、重要な研究成果の一部として今後、公開予定である。

・金森亮，山本俊行，森川高行，安藤章：
運転時の心理状態解析方法，特願 2016-124111。

サンプル数の充実とモデルの精緻化は今後の課題であるが、構造方程式モデルの結果から、運転ストレスと関連性の高い生体反応データとして、心拍間隔が挙げられる。制御がされた環境下での暗算などの負荷（ストレス）を課した際、心拍間隔は安静時よりも短くなるとの報告事例が蓄積されており、今回の走行実験結果においても潜在的な運転ストレス変数と負の関係性が有意であることが確認された。昨今の健康志向とウェアラブル計測技術の進展により、心拍は腕時計型計測器などで被験者の負担が少なく、容易に計測可能な生体反応データの1つである。また本研究でもさいたま市での一般市民を対象とした

走行実験でも導入実績があり、さらにバスやトラックのドライバーの疲労計測機器としても注目をされているなど、今後の生体反応データとして収集事例が増えることと考えられる。心拍データは心拍間隔（RRI）やその逆数である心拍数、パワースペクトル解析にて多様な指標を用意することができ、さらには心筋梗塞などドライバーの容体急変も観測できるため、自動運転車両の車内装置としても注目されている。

一方、運転ストレスの要因として静的と動的に整理して振り返ると、構造方程式モデルの結果から、車線数や歩道区別有無などの静的要因の影響は小さく、動的要因（速度変化、前方車両数や人・自転車数）の方が影響は大きいことが改めて確認された。運転挙動の条件を決定木モデルにて「テストコースと同様の走行状態」とした場合、名古屋市内指定コースの走行実験データ分析の結果から、1車線道路区間を走行している場合は多車線道路区間を走行しているよりも心拍間隔が小さくなり、運転負荷が高い傾向にあることを確認した。一方、歩道区分や駐車場出入口の有無は統計的には有意な差異は確認されなかった。これらの結果から、運転負荷を軽減させることを目的とした際、所要時間最小化にだけでなく、従来からオプションであったように道路幅優先など出発時の経路案内時には車線数は重要な指標であることが確認できた。

運転ストレスの動的な要因は出発時には予測困難であり、適切な経路案内への反映は難しい。ただし、さいたま市の一般市民を対象とした走行実験から、申告された運転ストレスの体感時間は総運転時間の1%程度であり、個別データの蓄積による経路案内のカスタマイズ化、さらには申告された運転ストレス箇所を地図上で蓄積し、急ブレーキ多発箇所（ヒヤリハットマップ）と同様に集合知として活用することが有用であろう。

その他、構造方程式モデルの結果から、運転ストレスと生体反応データの関係性では脳血流や精神性

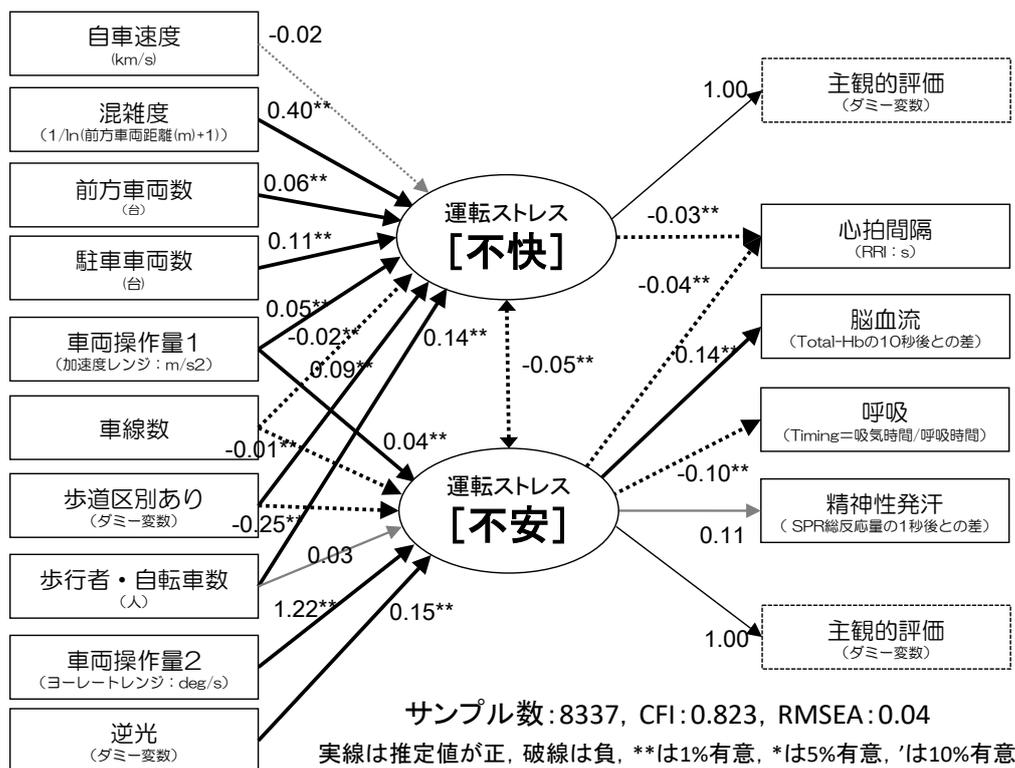


図4-1-1 運転ストレスの因果構造の推定結果 (再掲)

発汗, 呼吸が有意である説明変数であった。これらの生体反応データはまだ一般的に計測することは困難であるものの、今回の走行実験結果から有用である可能性を確認し、今後もサンプル数を増加し、統計的検証を実施する必要がある。特に呼吸数に関しては、道路構造など静的要因のストレス検証でも有用であったことから、より一般的な運転時の計測方法の検討が求められる。本研究では腹部の動きを歪センサで観測し、一回当たりの呼吸数を特別なプログラムで抽出する必要がある。別の観測方法としては鼻の下に感熱センサを貼り付け、息による温度変化を計測することがあり、有効な計測手法の検討が残されている。

最後に、本研究では計測技術の限界から対象外となったが、今後の有効な非侵襲型生体反応データとして脳波が注目されている。睡眠時の解析が一般化しているが、リラックスしている状態を検出する事例が蓄積されており、運転挙動などによるノイズ除去が可能となれば、一般市民が直観的に理解できる生体反応データとなる可能性は高い。

4.2 NIRS と視線移動量に関する可能性の知見

今回の研究では、RRI や NIRS 等の従来の生体反応データのほかに、視線移動量に関する生体データの捕捉を行った。

この検討の意図するところは、脳計測は精密機器が必要であり被験者の負担が大きいこと、また脳計測機器については軽量化・単純化の見通しが立っていないことがあげられる。さらに、脳計測は視覚情

報によって賦活されることから、視線情報と密接な関係があることが予想される。

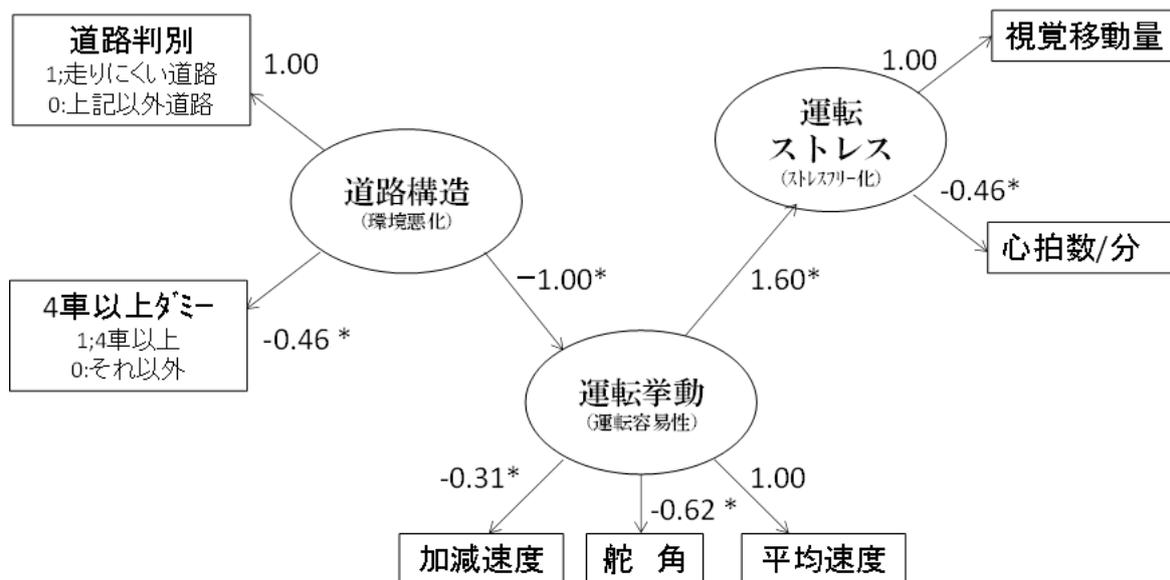
これらの点を踏まえると、視線情報を脳反応の代理指標として適用することができるのではないかと、この視点で本研究を実施した。

但し、脳研究は、未だ緒についたばかりの領域であり、本研究での成果だけでは、その有効性を十分に議論することができない。そこで、本研究では、既往研究をレビューすることで、その可能性を示すに留め、今後の研究成果に本件の有効性を委ねたいと考えている。

従来の交通心理学研究で得られている知見では、それぞれの指標が依存関係を持つ結果で表現されている。たとえばドライバーの眼球運動の運転経験による違いについては、Mourant らによれば熟練者は未熟練者より前方視界上の運転に関連する対象物を注意深く探索するため眼球移動距離は長く、注視時間は短いと実車による市街地町走行実験結果より報告されている。

Underwood らは運転中の VTR 記録動画実験を行い運転熟練と視線の関係の研究を実施しているが、これに対して Carter らは熟練者の注視時間の方が長いと報告している。

森らは、これに対し眼球移動時間に関しては Mourant らや Underwood らとは異なる結果を示している。一方、注視時間に関しては明確ではないが、Carter らの結果と同様のものを示している。これらの相違の発生原因の一つは、先行研究における運転場面は市街地走行のあらゆる交通場面を含んだ結果



部位	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8
p値	0.478	0.000	0.142	0.00	0.000	0.004	0.660	0.000
判定		**		**	**	**		**
部位	Ch9	Ch10	Ch11	Ch12	Ch13	Ch14	Ch15	Ch16
p値	0.000	0.047	0.280	0.000	0.000	0.000	0.687	0.186
判定	**	*		**	**	**		

図4-2-1 昨年度の研究成果 (視覚情報と運転特性、脳の関係)

であるのに対し、森らの結果は、右左折時に限定された場面における実験室内での結果であることによると考えられる。また、森らの交通規制の違いによる影響に関する結果に関しては、三浦は運転時の精神的負荷の大小に対して、高負荷の場合には注視回数が多く、注視時間は短くなると報告している。こうした原因に関して、三浦は運転時のドライバーの眼球運動を視覚的注意の面から検討し、視覚情報処理に要する資源一定仮説によりこれを解明している。

一方で、脳活動と視線の関係については、以下の研究成果がある。

対面にある物体の視線方向認知は、緩急運動等の視覚情報をもとに上側頭溝領域が担うことを Pertettら (1985年) が既に証明しているが、実生活シーンで検証を試みた研究では、以下のものがある。柴田は、商品陳列棚に表示された商品を見た時の脳の反応を分析している。この時も能反応は NIRS により計測している。この結果、商品陳列棚の商品を手に取り、選択行動をとった際、前頭前野背外側部から下前頭前野にかけて脳活動が行われたことが示された。

また、鈴木らによれば、近赤外線分光法によって脳活動を計測する光トポグラフィ装置と、視線情報を測定するアイトラッカー装置を用いてテレビコマーシャル視聴時の顧客の生体反応情報を測定し、実

験中の脳活動データ、視線データと実験後のアンケートデータを統合した新しい消費者行動分析手法を行った。実験の結果、呈示されたコマーシャルに対して満足を感じている被験者は、脳活動に二つのピークが現れる傾向が認められた。また、性別に分けて比較した結果、視線に関して大きな違いは見られなかったが、ほとんどの条件に対して男性の場合、脳活動が活性化している事などが認められた。

一方、栗山らの行った研究は、感情を表現を、脳と眼球計測の視点から関連付けるものであった。具体的には、比喩文解釈時における脳活動と眼球運動がどのように行われているのかを検討している。fMRI を用いた先行研究では平叙文と比較して比喩文では「右下前頭回」が活性化することが明らかになっているが、眼球運動と同時に脳活動を測定した研究はほとんどない。この研究では、解釈に動きを伴う比喩と動きを伴わない比喩の脳活動と眼球運動の比較を行うことを目的として脳血流量と眼球運動の同時測定を行い、脳内の活性部位や注視時間などの差を検討することを目的としている。その結果、一次体性感覚野に相当すると考えられる部位の Oxy-Hb が活性化する傾向がみられた。

以上のように、運転時における眼球運動に関する研究実績は既にある。また眼球運動が脳活動に一定の影響を及ぼしていることは主にマーケティング分

野での研究で幾つか報告がなされている。この点から、本研究が着眼する、脳の賦活状況を眼球運動から推定することは、一定の可能性のあるものと考えられる。そのため、今後は、より多くの研究実績を重ねることで、その妥当性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Mourant, R. R. and Rockwell, T. H. : Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers, *Human Factors*, Vol.14 , pp. 325-335, 1972.
- 2) Underwood, G., Chapman, P. Brocklehurst, N., Underwood, J., and Crundall, D.: Visual Attention While Driving: Sequences of Eye Fixations Made by Experienced and Novice Drivers, *Ergonomics*, Vol. 46 , pp.629-646, 2003.
- 3) Carter, C. J., and Laya, O. : Driver's Visual Search in a Driving Simulator, In Gare, A. G., Brown, I. D. and Haslegrave, C.M., (Ed.) *Vision in Vehicle VI*, pp21-31, Amsterdam: Elsevier., 1998.
- 4) Seya, Y., Nakayasu, H., Patterson P.: Visual search of trained and untrained drivers in a driving simulator, *Japanese Psychological Research*, Vol. 50, No. 4 , pp. 242-252, 2011.
- 5) 柴田智広：購買意思決定過程の測る化-ニューロエコノミクスからニューロマーケティングへ-, *電子情報学会誌* vol96, no8,2013.
- 6) 鈴木義彦, 白肌邦生, 小坂満隆：近赤外線分光法と視線計測の融合による消費者行動分析手法の提案
- 7) 栗山直子, 寺井あすか, 山岸侯彦, 中川正宣, 楠見孝：緋勇解釈時の NIRS による脳血流量と眼球運動の同時測定, *日本心理学会第 74 回大会発表論文集*, p869, 2010.

第5章 計測可能な生体仕様の選定と計測・評価手法のマニュアル化

5.1 計測可能な生体指標と計測方法

生物の持つ重要な性質の一つに「恒常性(ホメオスタシス)」がある。これは、生体の内部または外部の環境変化にかかわらず、状態を一定に保とうとする性質である。ストレス反応とは、一定に保たれている生体のバランスが崩れた状態(ストレス状態)から、ホメオスタシスによって回復する際の反応のことである。

ホメオスタシスの機能をつかさどる自律神経系、内分泌系、免疫系がストレスにより影響されて引き起こされる諸生体指標の反応を観察することで、ストレス反応を観察する。

ストレスに対する自律神経反応としては、交感神経活動の亢進と副交感神経活動の弛緩としてとらえられることが多い。自律神経機能の分析は、ストレス反応を観察するうえで客観的な評価としてよく用いられている。本研究では、ストレス状態において自律神経機能に深く関係する発汗、脳血流、脳内酸素飽和度、心拍、顔面皮膚温度、呼吸、唾液を用いる。

以下にそれぞれの詳細を記す。

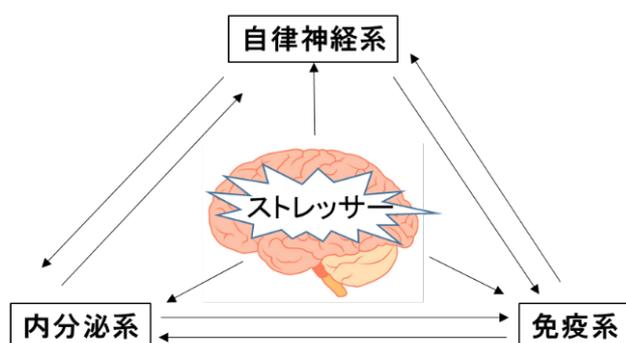


図5-1-1 ストレッサーに対する反応ネットワーク

(1) 発汗

発汗は、暑熱刺激、いわゆる暑さによって誘発される暑熱性発汗と、緊張や情緒の変動などの精神的な刺激によって誘発する精神性発汗の2つに大別できる。表5-1-1におおまかな特徴をまとめる。手掌、足底部の皮膚は精神性発汗のみであるため、これらの部位に電流を流して見かけ上の抵抗の変化をみることで緊張状態を観察することができる。

a) 計測手法

皮膚インピーダンス(SIC: Skin Impedance Change)と皮膚電位活動(SPA: Skin Potential Activity)の2種類がある。これら両者には緩やかな波とその上に乗る急峻な波がある。SICの緩やかな波を皮膚インピーダンス水準(SIL: Skin Impedance Level), 急峻な波を皮

表5-1-1 発汗の特徴

	暑熱性発汗	精神性発汗
発汗部位	手掌, 足底部以外の全身の皮膚	手掌, 足底部の皮膚
発汗刺激	暑熱刺激	精神性刺激
発汗量	多い	少ない
発汗潜時	長い	短い
汗腺	エクリン腺	エクリン腺
	暑熱性発汗	精神性発汗
発汗部位	手掌, 足底部以外の全身の皮膚	手掌, 足底部の皮膚
発汗刺激	暑熱刺激	精神性刺激



図5-1-2 発汗の取得方法

膚インピーダンス反射(SIR: Skin Impedance Reflex)と呼び、SPA の緩やかな波を皮膚電位水準(SPL: Skin Potential Level)、急峻な波を皮膚電位反射(SPR: Skin Potential Reflex)と呼ぶ。

本研究では、運転中の短期間なストレスを評価する目的であるため、敏感に反応する指標である SPR を計測する。

精神性発汗部位である足底部に電極を装着して、電極間の電位差を測定する。

b) ストレス反応

通常時は、ほぼ一定の値であるが、精神性発汗が起こると電極間の電位差が変化する。

(2) 脳血流量

近年、医学分野での脳診断技術の向上がめざましい。代表する技術の一つとして、近赤外線分光法(Near Infrared Spectroscopy:NIRS)があげられる。そもそも、人が視覚や聴覚、触覚、嗅覚、味覚などの五感から取り入れた情報を脳に伝達する際に酸素化ヘモグロビン(Oxy-Hb)は毛細血管を経由して脳内に酸素を供給し、脱酸素化ヘモグロビン(deOxy-Hb)となる。つまり、NIRS とは、脳内の酸素化ヘモグロビンや脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化をみることで、脳内酸素供給量、つまり脳活動の度合いを測定するという技術である。

ヘモグロビンは光を散乱させる性質をもつが、酸素化するとその吸収・散乱の度合いが変化する。NIRS はその程度を測定し、酸素化ヘモグロビン濃度の変化を計測する。

a) 計測手法

ヘモグロビンやその他の生体構成物質は可視光(波長 400~700nm)をほぼ吸収し、波長が 900nm 以上のものは水に吸収される。したがって、近赤外光(波長 700~900nm)は生体を透過しやすく、「生体の窓」とも言われている。

しかし、近赤外光は生体を透過するが、頭部は頭蓋骨が厚く、透過が困難である。そのため、光ファイバを用いて頭部表面から近赤外光を脳内に照射し、大脳皮質で吸収・散乱した光を集光する。このさい、**図 5-1-3**にあるように、送光プローブと受光プローブの間隔を 30mm とすると、頭部表面より約 20mm

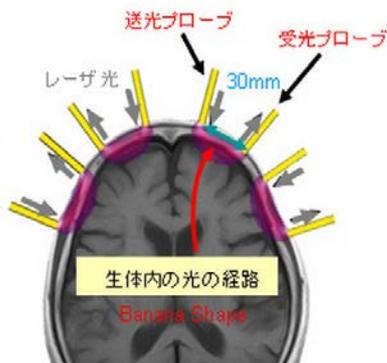


図5-1-3 NIRSの概要 (島津製作所)

程度の深部でのヘモグロビンの活動を見ることがで

きる。

modified Lambert Beer Law に従うと、式(2.1)が成り立つ。

$$A = \mu_a L + B = -\ln\left(\frac{I_r}{I_o}\right) \quad (2.1)$$

ここで、 A は吸光度、 μ_a (mm^{-1}) は吸光係数、 L (mm) は実効光路長、 B は散乱により検出されなかった光の損失、 I_o 、 I_r (W/m^2) は、送光、受光の強度である。

また、 μ_a は、以下の式(2.2)のように吸収体のモル吸光度数 ϵ ($mm^{-1}mM^{-1}$) と、モル濃度 C の積で表すことができる。

$$\mu_a = \epsilon C \quad (2.2)$$

酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの吸光度 A は、式(2.1)、(2.2)より、以下の式(2.3)のようにあらわすことができる。

$$A = (\epsilon_{oxy} C_{oxy} + \epsilon_{deoxy} C_{deoxy}) L + B \quad (2.3)$$

特定波長 λ の生体への入射光のうち、生体内で吸収と散乱を受けて生体外に戻ってきた光量とその変化量を $I_r(\lambda)$ と $\Delta I_r(\lambda)$ 、酸素化ヘモグロビンの吸光係数を $\epsilon_{oxy}(\lambda)$ 、脱酸素化ヘモグロビンの吸光係数を $\epsilon_{deoxy}(\lambda)$ 、酸素化ヘモグロビンの濃度変化を ΔC_{oxy} 、脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化を ΔC_{deoxy} とすると以下の式(2.4)が成り立つ。

$$-\text{Log}\left[\frac{I_r(\lambda) + \Delta I_r(\lambda)}{I_r(\lambda)}\right] = (\epsilon_{oxy}(\lambda) \times \Delta C_{oxy} + \epsilon_{deoxy}(\lambda) \times \Delta C_{deoxy}) \times L + B \quad (2.4)$$

ここで、異なった2波長 λ_1 、 λ_2 を用いたとき、式(2.4)を利用すると、以下の2式(2.5)、(2.6)が成り立つ。

$$L \times \Delta C_{oxy} = \frac{\epsilon_{deoxy}(\lambda_1) \Delta A(\lambda_2) - \epsilon_{deoxy}(\lambda_2) \Delta A(\lambda_1)}{\epsilon_{deoxy}(\lambda_1) \epsilon_{oxy}(\lambda_2) - \epsilon_{deoxy}(\lambda_2) \epsilon_{oxy}(\lambda_1)} \quad (2.5)$$

$$L \times \Delta C_{deoxy} = \frac{\epsilon_{oxy}(\lambda_2) \Delta A(\lambda_1) - \epsilon_{oxy}(\lambda_1) \Delta A(\lambda_2)}{\epsilon_{deoxy}(\lambda_1) \epsilon_{oxy}(\lambda_2) - \epsilon_{deoxy}(\lambda_2) \epsilon_{oxy}(\lambda_1)} \quad (2.6)$$

これらの式によって、ヘモグロビン変化量を算出する。しかし、実効光路長が不明であるため、実効光路長との積である濃度長変化量で求める。

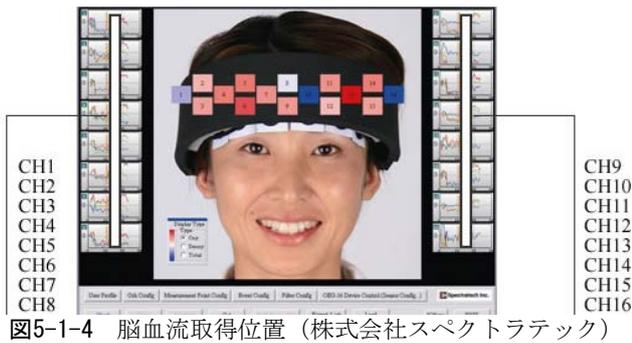


図5-1-4 脳血流取得位置 (株式会社スペクトラテック)

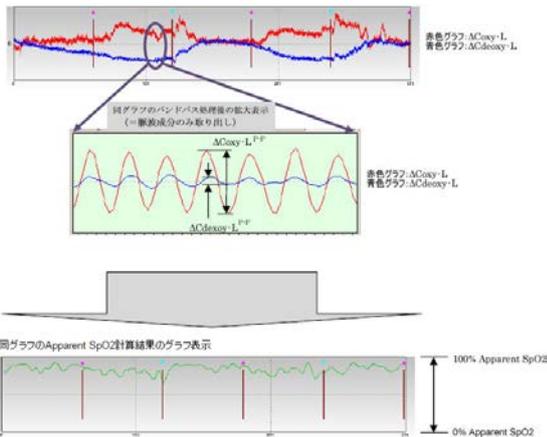


図5-1-5 Apparent SpO2 (株式会社スペクトラテック)

本研究では、図 5-1-4 に示すように、16 チャンネルの酸素化ヘモグロビン、脱酸素化ヘモグロビンの濃度長変化量を計測する。

また、Apparent SpO2(見かけの動脈血酸素飽和度)という指標も使用する。得られたヘモグロビン変化 ($L \times \Delta C_{oxy}$, $L \times \Delta C_{deoxy}$) の 1 心拍動内での最大振幅 $L^{P-P} \times \Delta C_{oxy}$, $L^{P-P} \times \Delta C_{deoxy}$ を用いて、以下の式 (2.7) で求める

$$SpO2 = \frac{L^{P-P} \times \Delta C_{oxy}}{L^{P-P} \times \Delta C_{oxy} + L^{P-P} \times \Delta C_{deoxy}} \quad (2.7)$$

ただし、本研究で使用する脳血流量測定機器特有の算出方法であるため、一般的な SpO2 とは異なる。

b) ストレス反応

ストレスがかかると交感神経が亢進状態になり、脳が活性化されるため脳内で使用する酸素量を増やそうとする。すると、 ΔC_{oxy} が増加し、 ΔC_{deoxy} が減少する。Apparent SpO2 はストレス状態での分析はいまだなされていないが、一般的な SpO2 は低下するといわれている。

(3) 心拍変動

心拍変動は、自律神経系による解析の中でも多く研究されてきた生体指標である。心拍の特徴としては、非侵襲であり、比較的 low コストで安易に計測が可能ながあげられる。

心拍変動を利用した指標として、代表的なものに

心電図 (ECG)

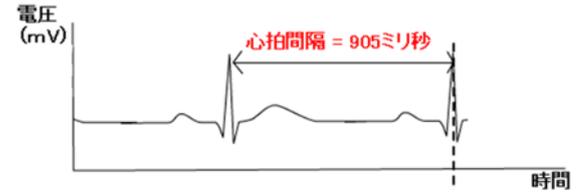


図5-1-6 心拍間隔 (RRI)

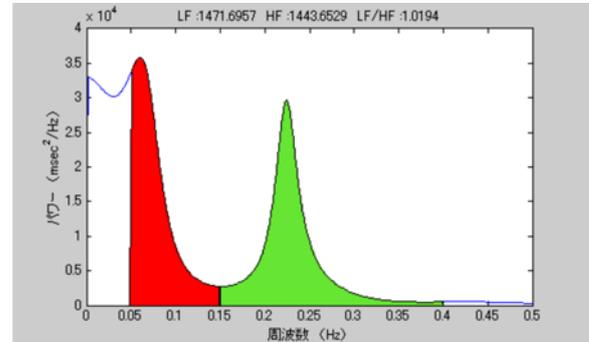


図5-1-7 LF/HF

心拍間隔(RRI), LF/HF などがある。RRI とは、心拍のピークとピークの間隔時間を示す(図 5-1-6 参照)。低周波間隔 LF(図 5-1-7 赤色部分)とは、心拍の 0.05~0.15Hz(10 秒程度の周期)のスペクトル成分を示し、血圧の変化に由来する。LF は交感神経に影響を受ける。高周波間隔 HF(図 5-1-7 緑色部分)とは、心拍の 0.15~0.4Hz(3~4 秒程度の周期)のスペクトル成分を示し、呼吸に由来する。HF は、副交感神経に影響を受ける。LF/HF は、副交感神経と交感神経のバランスを推定することができるといわれている。

a) 計測手法

心拍の計測手法は数多くの種類がある。簡単なものでは、腕時計型のものや指を当てるだけのものがある。しかし、正確な測定には胸部に検出用の電極を取り付けるものが一般的である。電極間の電流の動きにより、心電図を得ることができる。

b) ストレス反応

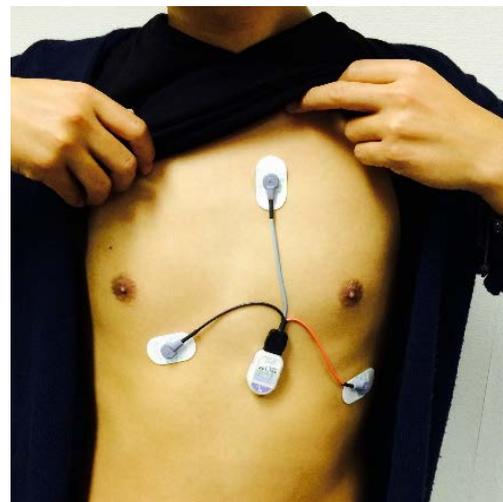


図5-1-8 心拍計測

一般的には、ストレス状態において RRI が低下(心拍数が上昇)する。緊張すると、心拍数が上がる、という経験は誰しもあるだろう。また、LF/HF は増加する。交感神経の影響がある LF は増加し、副交感神経の影響がある HF は低下するためである。

(4) 顔面皮膚温度

対表面温度、つまり皮膚温度には外的因子だけでなく内的因子も大きな影響を及ぼす。外的因子としては、放射、対流、蒸散などによる熱交換があるので、気温、湿度、気流、着衣の量、熱放射の有無などがあげられる。内的因子として、自律神経の影響を受けている欠陥運動神経機能と汗腺機能があり、これらはストレスや精神機能に影響されることがわかっている。皮膚温度の決定因子は約 80% が皮下血流量に影響されるといわれている。この際、残りの 20% は着衣両代謝量などや外気温、湿度である。しかし、本研究は自動車内での運転行動のみで実験を行うため、環境要素は無視する。顔面皮膚温度の中でも、特に顔面鼻部温度は運転ストレスにおいて利用可能性があるとされている。(山越ら 2010.)

a) 計測手法

一般的に、皮膚温度の計測手法は 2 種類存在する。ひとつは、サーミスタという大きな負の抵抗温度係数を持った半導体を利用する方法である。温度が上昇すると抵抗が減少、温度が低下すると抵抗が増加する。もうひとつはサーモグラフィといい、赤外線放射エネルギーを検出することで対象の温度を面で捉えて計測する方法である。サーミスタは一箇所しか温度情報を得ることができないが、サーモグラフィは動的部位での取得が困難である、という難点を持つ。本研究は、前者のサーミスタを用いて、鼻部付



図 5-1-9 顔面皮膚温度計測



図5-1-10 呼吸計測

近の皮膚温度を計測する。

b) ストレス反応

ストレスがかかると、交感神経を興奮させ、血管が収縮する。そのため、血流が悪くなり体温調節機能が低下する。

(5) 呼吸

呼吸は、他の生理指標に比べ、ストレス計測に用いられることは少ない。その理由は、利用価値が低いわけではなく、データの解析方法や計測方法に問題があるためである。吸気の際に心拍が増加し、呼気の際に心拍が減少するように、生理現象において呼吸は非常に重大な役目を果たしている。しかし、呼吸は他の生体指標と比べ非常に主体的な「動作」の側面を持っているため、分析が難しい。

a) 計測手法

呼吸活動の計測技術は、主に鼻孔用ピックアップ法とひずみセンサによる呼吸バンド法があげられる。理由としては、どちらも簡便であり、非侵襲、非拘束で被験者に負担が少ないためである。本研究では、ひずみセンサによる呼吸バンド法を用いる。

b) ストレス反応

ストレスがかかると、呼吸数は増加傾向にあるといわれている。しかし、ストレスが著しく高まると浅い呼吸ではなくなり、一回の呼吸量が増加するため、ストレス反応の傾向は一概には扱えない。呼吸によるストレス計測は難しいことが知られている。

(6) アミラーゼ

5.1 で述べたとおり、ストレスを感じると交感神経だけでなく内分泌系や免疫系にも影響を及ぼす。ス



図5-1-11 アミラーゼ取得



図5-1-12 アミラーゼ計測

トレスにより、構成が変化する分泌液も存在し、これらをストレスマーカーと呼ぶ。唾液もストレスマーカーの一種であり、ストレスによりさまざまな成分が変化することが知られている。アミラーゼもそのひとつである

a) 計測手法

取得チップを舌の裏側に30秒押し当て、唾液を採取する。唾液は、他の連続的に計測するデータと異なり、特定のポイントで取得する形となる。

b) ストレス反応

ストレスがかかると、唾液腺細胞で作られた免疫作用のある酵素やアミラーゼのような消化酵素が分泌される。したがって、ストレスがかかると、アミラーゼの濃度が増加する。

(7) 筋電図

筋電図は、直接的にはストレスには関係ない。

5.1.(1)で紹介した発汗計測において、足を置き換える、足指を動かすなどの動作の際にも電極が反応してしまう。これを除去するため、足の動きを感知するために足の筋電図を取得する。

また、運転中には周辺状況確認のために前方に乗り出すことや、姿勢の直しなども見られる。これにより、心拍数が変化することもありえるため、姿勢の動きを感知するために腹部腹筋上皮、背部背筋上皮の筋電図も取得した。

(8) アイトラッキング

アイトラッキングは、人間の目の動き(視線計測)の計測を行うものであり、角膜反射法に基づいたものである。これは、角膜に近赤外線を照射し、眼球の動きを映像解析することで、人が「どこを・どのように」見たかがわかるものである。

近年、アイトラッキングは、「注意、興味」を示す指標としてマーケティング分野で積極的に利用されるようになってきている

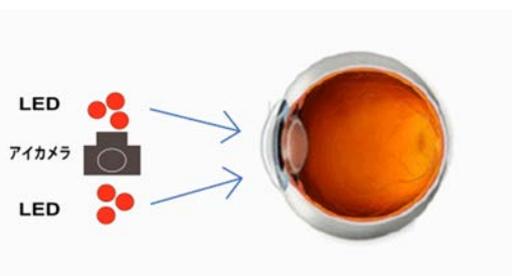


図5-1-13 角膜反射法のイメージ



図5-1-14 tobiiアイトラッキング

c) 計測手法

アイトラッキングの計測機器としては、tobii社のものが最も軽量で、補足機能が高いと考える。図5-1-14のメガネを着用し、数点を注視するキャリブレーションを行うことで、視線計測を簡易に行うことができる。

眼球の注視点を1/100秒間隔でx軸、y軸、z軸で補足することができ、注視点だけでなく、眼球の運動量等を計測することが可能である。

d) ストレス反応

視線計測とストレスとの関連性を示す研究はないが、運転や散歩、または商品選択やその嗜好に伴い視線移動量(眼球運動量)が異なることを示す論文は幾つか報告されている。また、最近では、NIRS等の脳活動と関連付けて視線計測を分析する研究も報告されている。特に、視線対象物が、脳を賦活することも示されている。

本研究では、視線対象物が何であるか、また本研究の対象となるNIRSとの関連性をみることで、視線計測の有効な知見が得られることが期待できる。

以上の各項目の検討結果を踏まえ、各生体指標の適用可能性を次頁の表のように整理した。

表5-1-2 既往研究での生体反応知見と運転ストレス計測への知見
(網掛け部分は運転ストレスの計測に活用できると考えられる指標)

	概要と特徴	運転ストレス計測の視点	計測容易性
心拍変動(RRI)	ストレス刺激を負荷すると心拍数が増加する現象を示し、心拍のR波とR波の間隔を示すものであり、一般的なストレス指標として古くから活用されている。計測機器も小型化されたものが多く販売されている。	古典的な手法として、本研究においても採取する。	◎
呼吸活動	ストレス負荷時には呼吸が荒くなる等の傾向がみられるものの、適用事例はあまりない。但し、呼吸は血圧等に影響を及ぼす相互性があるため、その適用には様々な問題がある。歪みバンド等で簡易に計測できる。	計測が容易であるとともに、心拍等に影響を及ぼす点が指摘されているため、参考データとして採取する。	○
皮膚電気活動(発汗)	発汗には温熱性発汗と精神性発汗があり、精神性発汗が皮膚電気活動(EDA)であり、交感神経の緊張や覚醒水準の高さを示すとされている。EDA活用の有効性は期待できるが、従来の交通政策研究分野における適用事例はない。	有効な新しい指標として採取する。	○
皮膚温	様々な内的、外的要因が敏感に反応するといわれており、ストレス度が増すと交感神経を興奮させ、血管収縮がおこることが指摘されている。但し、外気温等の影響も受けやすいことから、計測方法にはサーミスタやサーモグラフィ等の高度な機器が必要である。	サーミスタやサーモグラフィには携行性、測定部位に運動を伴う時の限界等が指摘されているが、現状では適用可能と判断する。	○
眼球運動	瞳孔検査、瞬目がある。感覚、知覚、認知臨床として多く適用されており、交感神経が有意な場合は瞳孔が拡張する現象も確認されている。まばたきは、精神的に緊張している時に減少し、リラックス時に増加する。	計測には瞳孔検査機が必要で、実験室レベルでの実験しかできないため、本研究の適用対象外とする。	×
視線計測	興味や注視点を補足するうえで有効な手法である。最近では、行動内容や脳の賦活状態と関連付けて、視線計測の有効性を示す研究が進んでいる。また、運転の安全性を検証するため視線計測データを活用する研究報告もある。	ストレスを直接的に計測するものではないが、脳の賦活や注意力といった視点から、運転ストレスへの適用可能性が考えられる。	◎
尿検査	ホルモン、酵素、蛋白質により、各々情動活動に関する指標(カテコールアミン)、胃中酵素の排泄(ウコペプシン)、肉体負荷がわかるムコ蛋白等があるが、簡便性、即時性に欠ける。	採取せず。	×
唾液検査	非侵襲性、随時性、簡便性に優れている。コルチゾル、アミラーゼ、クロモグラニン等の成分があり、このなかでもアミラーゼ、クロモグラニンは反応が速やかであることが指摘されている。但し、何れも急性ストレスが対象であり、慢性の計測ができないこと、また時系列的な計測もできない点が課題である。	反応が良く、簡便に計測できるため、本研究では採取する。	○
脳波計測	脳波中枢神経計測を行う最も一般的な方法で、心理状態の連続変化、刺激に対する生体活動の微細な変化を捉えることができる。個人間、固体内の差異を偏することもでき、情報量も豊富で最近急速に研究が進む。但し、体動下での計測が困難な点は課題。また目を閉じた状態での計測となる。	体動、目を閉じる等の条件が必要なため、運転環境を計測することは困難。そのため、採択せず。	×
脳血流計測(NIRS)	脳血流が活発な部位を遠赤外線により計測する方法で、近年脳研究の進展に伴い、活動部位から個体の状態を計測することが可能になってきた。脳波同様に多くの情報量を含み、新たな研究領域として期待される。	新規研究分野であり、今後の展開が期待できるため、採取する。	○

(9) 生体指標のまとめ

運転ストレスの計測に適用可能な生体指標と使用機器、取得間隔、ストレス反応、取得部位を表5-1-3にまとめる。

今後、ストレス計測を行うには、表5-1-3に示す機器を活用することが考えられる。

5.2 主観的ストレス指標も補足することが必要

運転時のストレスが高まることにより、生体反応に影響が及ぼされることは、本研究の成果でも明らかとなった。

しかし、生体反応は、体動や微小な環境変化でも変動することから、生体反応の変化だけから、運転ストレスを特定することについては、今後一層のデータ取得と分析が必要だと考えられる。

一方で、本研究が行ったように、「主観的ストレス」を補足すれば、不快・不安時に生体反応が変化することは明らかであり、主観的ストレスを目的変数とし生体反応を説明変数とするストレスモデルを構築すれば、「不安・不快」ストレスを予測することができると考える。

以上のように運転ストレスの予測と計測にあたっては、生体反応の計測だけでなく、主観的ストレス指標をアンケート等により捕捉し、これらを踏まえてストレス予測モデルを構築し、道路行政における運転ストレス区間等を予測することが現実的だと考える。

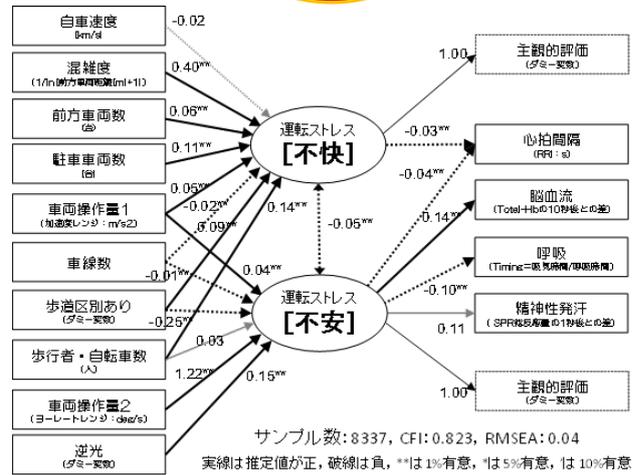
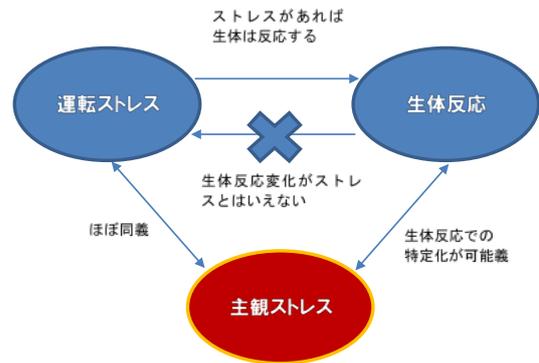


図5-2-1 主観的ストレスによる生体反応の特定化

5.3 車両挙動データも取得すれば精度向上が期待できる

本研究では、生体反応だけでなく、速度、加減速、舵角等の運転挙動を補足することで、運転状況を予測し、生体反応との関連性を分析する解析も行った。

表5-1-3 生体指標のまとめ

取得指標	使用機器	取得間隔	ストレス反応	取得部位
Oxy-Hb	Spectratech OEG-SpO2	0.08192sec	増加	前頭葉
deOxy-Hb			減少	前頭葉
SpO2			減少	前頭葉
体温	日本光電 Web7000 または、 トヨタテクニカルディベ ロップメント LiVo	0.001sec	減少	鼻部付近
RRI			減少	胸部
LF/HF			増加	胸部
呼吸			減少 or 極大	腹部
発汗			増加	左足裏
アミラーゼ	NIPRO 唾液モニター	区間ごと(非連続)	増加	口内
視線計測	Tobii Pro Glass 2	1/100sec	-	視線・眼球移動量

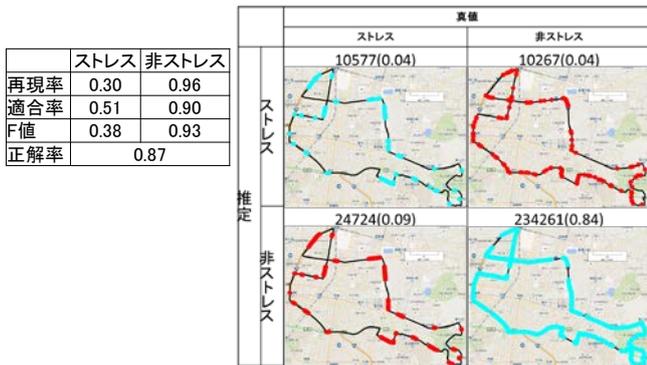


図5-3-1 機械学習の一種サポートベクターマシンによるストレス区間の予測結果例

具体的には CAN データ (Controller Area Network) により、車両の挙動特性と生体反応の変化、さらには主観的ストレスの3つでの分析を行った。

その結果、生体反応だけでなく、CAN から得られる車両挙動データを組み合わせることで、主観的ストレスに基づく、運転ストレス区間を精度高く予測できることが示された。

一方で、生体反応や車両挙動には反応発生時間のタイムラグがあることから、従来の多変量解析手法では、十分な精度のモデル構築が困難であることも示された。

そこで、本研究の成果としては、このようなモデルを構築するため、AI (人工知能) の一種である機械学習を活用したモデル構築が有効であることが示された。但し、機械学習モデルは、従来の多変量解析モデルのようなパラメータ影響が明確にわからないことから、ストレス区間の予測そのものを目的とするのであれば十分だが、その因果関係を知りたい等の構造分析では必ずしも有効であるとは言えない。

5.4 計測機器の精度

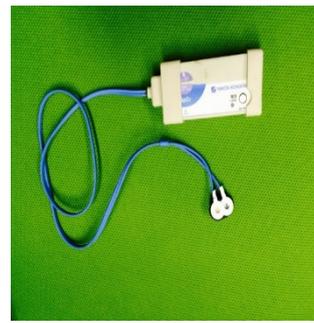
(1) WEB7000, 及びLivoについて

本研究では、WEB7000 と Livo の 2 機種を利用し、体温、発汗、RRI の生体反応計測を行った。WEB7000 は、センサ端末を体に装着するもので、端末と本体は無線により通信する仕組みである。そのため、被験者は比較的自由に体を動かすことができ、自動車運転等の一定量の運動を伴う場合の実験計測に有利と考えられた。

しかし、実際の実験時には、無線環境がうまく作動せず、データ取得が十分にできない事象が数多く発生した。

一方、Livo は、各端末センサが有線で計測機器本体に接続されている、運動面での制約はあるものの、運転行動であれば、問題なく計測することができ、WEB7000 のように、データ取得ミスの事象は発生しなかった。

このように計測機器によって、その得失が大きいことから、今後の実験にあたっては、プレ実験を行い、実験目的に適った適切な機器選定を行うこと



WEB7000 の端末



WEB7000 の本体



Livo の端末

図5-4-1 端末側より無線で本体にデータを飛ばす仕組み

が重要である。

(2) 携帯用心拍計測器

最近では、スポーツ管理用の機器として、心拍数を簡易に計測できるものが市販化されている。また、スマートウォッチ等のウェアラブル機器においても、心拍数を簡易に計測することができる。

しかし、スマートウォッチ等の多くの市販品は、1秒間隔等の一定間隔での心拍数を記録できるものはない。(たまかな日レベルでの変動しか記録されていないものがほとんどである)

そのなかで、Polar 社が販売する活動量計測器は、1秒単位での心拍数を長時間保存できる唯一の機器であり、本来スポーツ管理を目的としていることから携行性も高い。一方で、Polars 社の機器には大きく2種類のものがある。一つは簡易な胸巻型のセンサ、もう一つは腕時計型のセンサである。

胸巻型のもは、センサそのものは大変シンプルなものであり、センサとスマホを bluetooth で連動さ



図5-4-2 胸巻型心拍計測機器（スマホと連動）



図5-4-3 腕時計型心拍計測機器

せ、スマホの GPS データとセットでクラウド上に心拍データを逐次蓄積保管する仕組みとなっている。もう一つの腕時計型は、腕時計のみで計測とデータ保管が腕時計端末側に蓄積される仕組みとなっている。

この2つの機器の違いは、胸巻型は、スマホの GPS データと連動するため、心拍データと位置データが連動して管理できる点である。腕時計型には GPS データが捕捉できない欠点がある。

一方で、胸巻型は、センサとスマホの bluetooth 接続が不安定で、また操作が複雑のことから、高齢な被験者の場合、その管理に相当な苦勞を要する。また、胸巻型であることから、女性モニターへの依頼が難しいこと、また長時間着用すると接着部分の痒みを訴えるモニターが多かったことも課題の一つといえる。そして、スマホのバッテリー持続時間も重要な課題であった。Bluetooth 通信、GPS 捕捉機能等を同時に行うことから、スマホの電力消費は通常より多く、実験開始後、補充充電がないと一日のデータ捕捉は不可能であった。

このように簡易な心拍数計測機器においても、各々の得失があることから、実験計画を踏まえ機器選定を慎重に行うことが極めて重要である。

(3) 唾液アミラーゼ

唾液アミラーゼは、一定時間、ドライバーが口内で一定時間、テスターをくわえる必要があることから、実験計測が大変難しかった。また、取得データも安定性のあるものではなかった。

(4) 視線計測

最近、メガネメーカーによる眼球付近の電位計測



図5-5-1 計測状況例

を行うことができるものが市販されているが、これは視線対象を明確にできるものではなく、また瞬きを主な計測指標としていことから、眠気等の検知には効果的であるが、視線計測はできない。

そのなかで、tobii 社のものが傾向性、装着時の違和感の無さからも最も評価が高く、また視線捕捉率も極めて高いものであった。

(5) NIRS

NIRS は、医療用の大型機器が中心であるなか、SPECTRA Tech 社のものは携行性が一番高いと考えられたが、頭部には相当の圧迫感があり、さらに長時間計測を想定したものではないことから、運転ストレス計測のような長時間計測を伴う実験では、被験者の負担が相当大きく、またバッテリーが持たないことなどが課題としてあげられる。

NIRS 計測は、今回行った一連の実験のなかで、最も負担が大きいことから、一般的な計測項目ではなく、精緻かつ多面的な計測を行う際の少数サンプルとして導入することが望ましいと考える。

なお、本研究では、NIRS と視線計測には一定の関連性が期待できることが示されたことから、視線計測で補完することも期待できるが、この点については、今後もその妥当性を示すべき多くの研究実証が望まれる。

5.5 モニター募集方法

運転ストレスの計測には、主観的評価の聞き取りが必要なこと、またモニター負担が大きい生体反応計測機器を多く装着する必要があることから、モニター募集が相当に大きな課題となった。

また、高齢者モニターについては、当該実験では先進的なセンシング機器の装着を求めることから、高齢者の反応が大変厳しいこともわかった。

そのため、今後はより多くの研究実績を重ねることで、特に運転ストレスを代表することができる生体データを明確にし、簡易な方法で大量に取得できる方法の開発が求められる。

現在の生体計測機器のなかでは、心拍数の計測機器が、最も簡易である。しかし、心拍がストレスを代表する可能性はまだ明示できていないので、この点についても引き続き研究実績を積み重ねる必要がある。

また、今回の研究のように、モニターを募集し、生体データを精緻に計測する方法は、費用面でも大変負担が大きいこと、またモニター募集が難しいことから、今後は簡便にデータ取得ができるビジネスモデルや計測機器の開発が求められる。

例えば、市販の心拍計測機器や、今後製造が期待されるメガネ型の簡易視線計測機、さらには自動車車内で装備されることが期待される発汗計測器やRRI計測等、車両やウェアラブル機器と連動した生体計測機の普及、及びETC2.0と連動したデータ取得の仕組み等を具体的に検討することが求められる。

第6章 ガイドライン の作成

最近では、各種生体反応計測機器の携帯性と計測精度が向上しており、健康管理の観点から数多くの生体センサの市販化が進んでいる。

本研究の成果からも、生体反応データは、運転ストレスを計測するために効果的な指標であることは示された。

一方で、生体反応データの計測は、被験者の負担も大きいことから、適切な実験計画、さらには個人情報保護に係るデータ管理の仕組みも大変重要になる。

これらの点を踏まえ、今後道路行政に、生体反応データを活用するうえでの基本的な考え方を下記のガイドラインとして整理する。

(1) 主観的ストレス等関連データを組み合わせたストレス評価モデルの構築

生体反応データは、道路構造等に起因する運転ストレスを予測するための有効な指標だと考えられる。しかし、生体反応データのみから、運転ストレス区間を予測することは困難である。

そこで、運転ストレス区間を予測するためには、次のデータの取得も同時に行うことが求められる。

- ・主観的ストレスをヒアリングやアンケートで補足すること
- ・CAN やドライブレコーダー等、クルマの走行挙動データを補足すること

これらのデータを組合せ、多変量解析モデルやAIを活用することで、運転ストレス区間予測モデルを開発し、潜在的な危険道路箇所を把握することができる。

これらの区間について、道路利用者へのアンケートやヒアリング調査を行うことで、潜在的ストレス区間の原因を把握するとともに、道路改良に役立てることが期待できる。

(2) 運転行動目的に適った計測機器の選定

生体反応を計測できる機器には、最近様々な機器が市販化されている。しかし、道路行政に役立つデ

ータは、GPS 等でストレス箇所の位置情報が明確であること、また1秒単位等一定間隔での生体データ捕捉ができることが求められる。

また、運転中の計測が必要となることから、車内に搭載できるサイズのものであること、さらに運転行動の邪魔になるような機材は避けなくてはならない。

これらの点を踏まえ、実験目的にあった適切な機器の選定が重要である。本報告書に示す機器も現段階で有効なものであり、生体計測センサは、日々進化していることから、その時点時点で、市場調査を行い、実験環境と目的に適った適切な機器を選定する必要がある。

(3) 階層的にデータ取得の工夫

生体反応データの取得は、被験者への負担が大きい。そのため、大規模な実験（大量サンプルの取得を目指した実験）によるデータ取得は困難であると考えられる。

そこで、本研究が行ったように、NIRS、アイトラッキング、RRI、発汗、CAN 等、精緻にデータを取得し、運転ストレス区間を予測するモデル開発を行うステージと、RRI とドライブレコーダーデータといった、今現在市販化と普及が進んでいる機器を活用することで大規模なデータ取得するステージの2つを準備することも効果的だと考える。

これらデータとモデルを組合せることで、精度の高いモデル開発も期待できる。

(4) 道路行政データとの一体管理の有効性

上記とも関連し、運転ストレス区間の予測には、生体反応データだけでなく、道路構造データや交通事故データと組合せ、効果的なストレス予測モデルを開発することが必要である。そのため、今現在ある道路行政に関するオープンデータとの関連性を明確にすることが必要である。本研究でも、GISによる道路構造特性の把握や交通事故データ等の行政のオープンデータを活用した。今後、生体反応データを活用した研究実績を積み重ねるためにも、これらの道路行政に関するオープンデータを、研究者が容易

にアクセスできる研究環境の整備が求められる。

(5) モニターの募集方法と個人データの管理

本研究では、調査会社への協力依頼により、実験モニターを募集する方法をとったが、この方法ではコストが嵩むことから大規模実験や継続的なデータ取得実験の実施が困難である。

一方で、近年は交通安全意識の高まりから、職業ドライバーの健康管理と運転時の健康状態把握のためのサービスや、高齢者の交通安全教育等、運転者を対象とした様々なサービスが始められている。これらのデータを組合せことで、効率的な運転ストレスに関するビッグデータの取得が期待できる。

一方で、生体反応データは、大変深刻な個人情報であることから、これらの取得と保護にあたっては被験者本人の同意確認を十分に行うとともに、一定の数値データ化が進んだ段階、原データを抹消する等、被験者が安心できる実験環境の整備が必要となる。生体反応データを道路行政に活用するには、これらのガイドラインの策定も必要になる。