

生理指標を活用した運転士状態推定の基礎的検討

中川 千鶴* 秋保 直弘* 吉江 幸子**
 小島 崇*** 渡部 貴浩* 鈴木 綾子*

Basic Study on Assessment of State of the Drivers Based on Physiological Indices

Chizuru NAKAGAWA Naohiro AKIU Sachiko YOSHIE
 Takashi KOJIMA Takahiro WATANABE Ayako SUZUKI

With a view to support to the drivers for preventing human-error induced accidents, an experimental environment (physiological indices measurement system) was designed incorporating various cutting edge measurement technologies, which makes it possible to measure variations in the physiological state of the drivers when carrying out driving tasks. Some basic tests were conducted using the measurement system on an ordinary adult placed in a driving simulator. Given disparities in the results of the physiological indices from person to person, it has been difficult up until now to use the indices quantitatively. However, it has been confirmed that there appears to be a way to reproduce typical variation patterns based on a combination of multiple indices relatively easy to measure, such as heart rate, breathing etc.

キーワード：運転士，生理計測，人間工学，状態モニタリング，脳機能

1. はじめに

列車の運転業務では、運転士が常に心身共に良好な状態を維持し、万一、突然の災害や事故等に遭遇して心理的動揺が生じた場合も、速やかに適切な判断や対応ができる心身状態に復帰することが大切である。

本研究の最終目的は、運転士の心身状態を生理量等の計測データから把握・推定し、日常業務およびアクシデント発生時に運転士をバックアップする対策の提案である。この実現には、基礎研究と実用研究の2つの要素が必要となる。基礎研究では、運転士の様々な生体情報を運転履歴とともに分析し、運転士の生理心理モデルを構築することが、実用研究では、運転席に構築でき、運転士の負担が少ない計測手法を提案することが求められている。現在、基礎研究に取り組み始めたところである。

初めに、実験環境の整備として、鉄道総研内にシミュレータを用いた鉄道運転作業中の様々なデータ取得が可能な生体情報複合計測システムを構築した。これは、頭部全体の脳波、視線、心電図、呼吸、発汗など多様な生理計測と、複数台のカメラによる行動計測が可能なシステムである。この構築には脳機能計測を活用するため、慶應義塾大学との共同研究で行った、簡易鉄道運転シミュレータを用いた、運転作業時の様々な生理指標を測定する実験も参考とした。

本稿では、生体情報複合計測システムを紹介すると

* 人間科学研究部 人間工学研究室
 ** 人間科学研究部 生物工学研究室
 *** 車両構造技術研究部 走り装置研究室

もに、基礎研究から得た主な知見として、突発事象による心理的動揺および動揺からの回復過程における脳波、心拍、呼吸、瞳孔径の変化や、唾液中の成分を用いたストレス反応の調査の結果を報告する。

2. 心理的動揺時の心理過程仮説

心理的動揺時は「頭が真っ白になる」との表現があるように、現状認識が困難な状態であるため、主観評価に頼らない状態推定が求められる。そこで、心理的動揺を生じさせる事象が発生した後の心理過程を、心理的動揺がない「心理過程①」と心理的動揺がある「心理過程②」に大別し、それぞれの状態での自律神経系の活動を表1のように仮定した。自律神経系は交感神経系と副交感神経系から成り、一般的には、交感神経系は興奮した状態で活発になり、副交感神経系はリラックス・休息状態で亢進するとされるが、冷静に情報収集するような状態でも賦活するという報告もある¹⁾。心理的動揺が生じない場合は冷静に状況把握を行って適切な行動に移ると考えられ、自律神経系の反応としては、相対的に情報収集に徹する副交感神経系の反応が生じると考えられる。一方、心理的動揺が生じると神経が興奮状態となり交感神経系が優位になると考えられる。実際には、図1のように、心理的動揺を全く生じずに状況把握等の適切な行動に移る Type A (心理過程①) と、一時的に心理的動揺が生じるものの速やかに回復して適切な行動に移行する Type B (心理過程②→①)、心理的動揺が持続する Type C (心理過程②) が考えられる²⁾。

3. 生体情報複合計測システムの構築

3.1 計測システムとしての要件

昨今、社会的には腕時計タイプやウェアタイプなど、様々なウェアラブルデバイスがあるが、精度が高いとはいえないものも多い。精度が上がらない理由のひとつは、生理指標の変化は個人差が大きく、共通の判定アルゴリズムが必ずしも当てはまらないことが挙げられる。旅客の安全を担う運転士に、その状態変化を通知する場合、誤動作は避けなければならない、通知の精度が必要である。著者らは、過去の生理計測研究において、軽微な生理変化は、個人によって異なる生理指標に表れるという知見を得ている³⁾。この知見をもとに、本研究では複数の生理量を活用することで個人差の問題を解決することを検討した。このため、運転動作中のあらゆるデータを最新技術を用いて実験で取得できるよう、生体情報複合計測システム（図2）を構築した。

3.2 計測システムの構成

(1) 高密度センサ脳波計測システム

脳活動計測の方法には、機能的磁気共鳴画像（fMRI）や近赤外光脳計測（NIRS）などもあるが、身体拘束性が比較的低いことや時間分解能・空間分解能の高さなどから、高密度センサ脳波計測システム（NetStation GES400, EGI）を選定した。この高密度脳波計は、ネット状に繋がられた128個の電極が頭部全体を覆うため、ほぼ頭部表面全域の密度の高い脳波計測が可能である。

表1 事象発生後の心理過程と自律神経系の仮説²⁾

心理過程	心理的動揺	心理過程	自律神経系
①	なし	状況把握→判断	副交感系優位
②	あり	心理的動揺	交感系優位

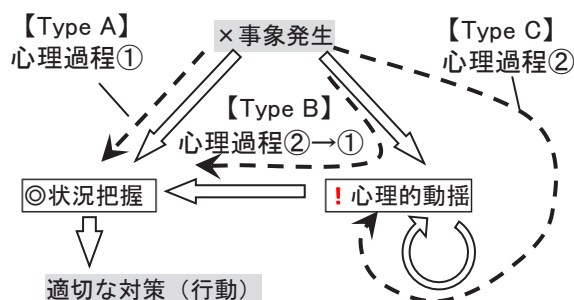


図1 事象発生後の心理過程の仮説²⁾

また、脳波は10 μ V程度の微弱電位変化であるため、通常の脳波測定では、頭皮とセンサの間に導電ペーストを注入する必要があるが、このセンサは電極面のスポンジに生理食塩水を含ませることで測定できる。これにより、センサを装着するための時間が大幅に短縮できる。

(2) 生理計測システム（心拍、呼吸、発汗等）

脳活動以外の生理量として、心拍、呼吸、発汗、体温等を測定するための生体信号収録装置（PolymateV, ミユキ技研）を導入した。最大48チャンネルの同時計測

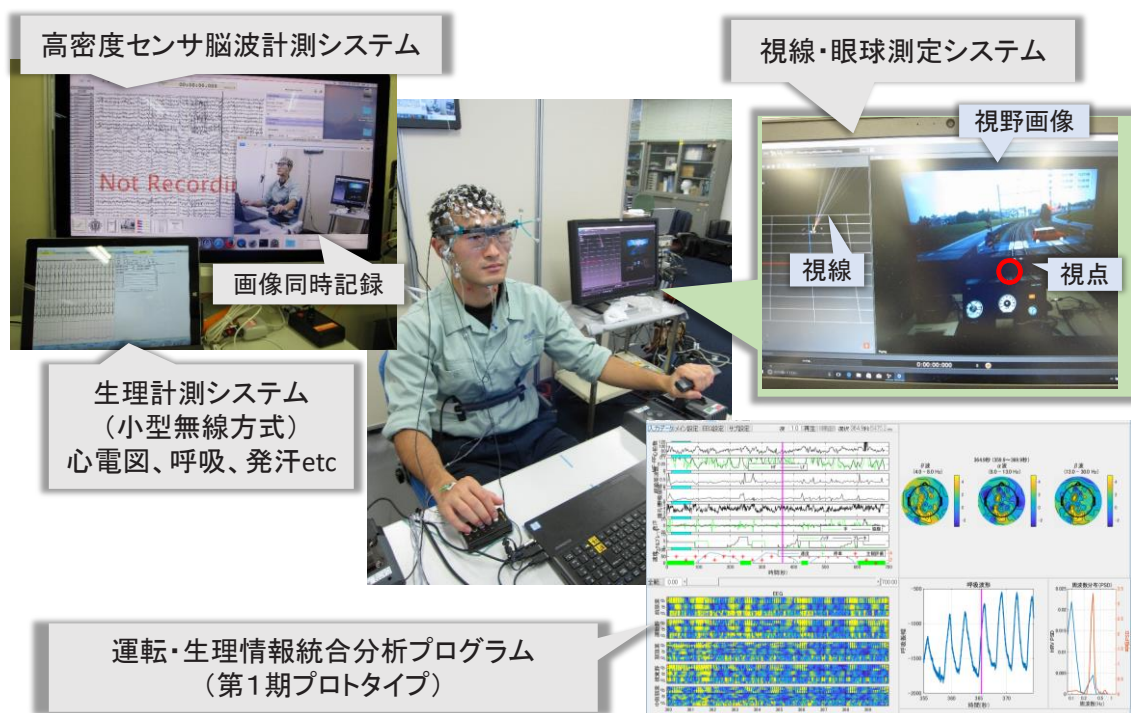


図2 生体情報複合計測システムの概要

が可能で、電磁ノイズに強いアクティブ電極を装備し、Bluetoothによる無線計測が可能である。バッテリー駆動で連続12時間計測できる。

(3) 視線・眼球計測システム

視線計測と瞳孔径などの眼球測定ができるアイトラッカー (glass2, tobii) とモーションキャプチャシステム (Motive Tracker, OptiTrack) を連動させ、従来の単一装置では不可能であった、頭部の動きや動作を制約せずに視線を推定することを実現している。

(4) 運転・生体情報統合分析プログラム

上記(1)～(3)に加え、全測定データを統合的に把握・分析するため、同期計測した運転ログ、脳波、自律神経系指標、行動量を一元的に表示できる「運転・生体情報統合分析プログラム」を開発した。脳波成分の頭部での活動分布や、データを同期させて表示でき、心拍変動など各種生理指標の自動算出が可能である。

3.3 計測システムの特徴

本システムに含まれる高密度脳波計測は、てんかん治療のための医療目的やMRIと併用する基礎研究に用いられることが多く、本研究のように、実際の作業に準じた活動時の計測に用いる例は少ない。これに加え、実環境に近い状況で、多数の生理指標、行動量、視線計測を同期計測して心理生理状態の推定を目指した前例はなく、極めて先駆的な測定システムである。また、これらの多様なデータを統合解析するソフトウェアの構築により、より直感的かつ簡便にデータ相互の関連性について検討することができる。また、運転作業中の計測だけでなく、振動台上での測定、ヘッドマウントディスプレイなどVR技術と組み合わせた行動実験での計測も可能である。

4. 模擬運転作業中の特徴的な生理変化の検出

鉄道における運転作業中の生体情報を計測するため、運転シミュレータを用いた模擬運転作業を行う実験を3期に分けて実施した(第1実験、第2実験、第3実験)。第1実験は実環境により近い運転時間や運転課題を実験条件とし、第2実験は運転士の状態推定に有効な生理指標の抽出を行うために1回の課題時間を短くして回数を増やすなどの変更を加えた。第3実験は第2実験の結果の再現性を確認するため、ほぼ同じ条件で実施した。本稿では、これらの実験から主要な結果を報告する。

4.1 実験方法

4.1.1 実験システム

生体情報複合計測システムは様々な運転シミュレータで測定が可能だが、本実験では大型TVモニターとワンハンドル型コントローラなどで構成した簡易鉄道運転シ



図3 実験の様子

ミュレータと組み合わせた。シミュレータ制御には、鉄道運転シミュレーションソフト (Bve trainsim) を用いた。制御用のノートPCをTVモニターの手前に設置し、ノートPCの画面には速度計、圧力計、時計、戸閉め表示灯を表示した(図3)。

4.1.2 実験の流れ

実験参加者に対しては、実験前に口頭および書面にて、実験内容について十分な説明を行った上で同意書を得た。いずれの実験も、1名の実験参加者が休憩を挟みながら模擬走行課題を繰り返し行った。なお、第1実験では約30分(9駅間を走行)の課題を7回実施し、第2、第3実験では約10分(4駅間を走行)の課題を15～18回実施した。課題間に約10分の休憩を取り、午前の課題終了後に昼食休憩を約50分取った。実験参加者には、実験中は時刻表に従い、制限速度内で運転するよう指示した。また、非常時には非常ブレーキをかけて警笛を鳴らすよう伝えた。実験中は一定間隔で合図音を鳴らし、実験参加者に自身の活性レベルを押しボタンで回答してもらった(詳細は後述)。また、課題終了ごとに簡単な質問紙に回答し、午後の課題の前後のみ唾液測定(後述)を実施した。

4.1.3 運転シナリオ

課題内容は、運転操作に慣れるための習熟課題(MST)を午前中および午後の初回に実施した後に、線路内に支障物があるアクシデント課題(ACC)や、運転時分に余裕が少ないタイムプレッシャー課題(TM)などを行った。また、第2、第3実験では、TM課題でプレッシャーをより強く感じさせるため、速度超過せずに定刻に終点到着した場合は残りの課題を免除にした。

4.1.4 主な計測項目とデータ分析方法

(1) 生理量

生体情報複合計測システムを用いて、脳波、心電図、呼吸波形、瞳孔径を測定した。また、掌の電位変化から精神性発汗活動を、体幹部の電位変化から温熱性発汗活動を計測した。課題の前後に唾液を摂取し、ストレスに

特集：人間科学

より増加するとされる唾液成分（クロモグラニンA：以下、CgA）⁴⁾を測定した。

(2) 主観評価

模擬運転台に配置した押しボタンで主観評価を回答してもらった。評価値は、第1実験では「非常に眠い」～「ふつう」～「非常に覚醒」の7段階、第2、第3実験では「眠気を感じる」～「ふつう」～「緊張・動揺を感じる」の5段階とした。運転中の合図音（第1実験は1分、第2、第3実験は30秒間隔）のたびに、参加者はその時点で心理状態を回答した。

4.1.5 実験参加者

実験参加者は、一般から募集した20～40代の男性で、普通自動車免許を持ち、月1回以上の鉄道利用を募集条件とした。各実験の実験参加者は10～14名であった。

4.2 実験結果と考察

突発的な事象による心理的動揺状態における生理量の変化を分析し、心理的動揺の生理指標による検出について検討を行った。なお、行動遅延の指標として、支障物（倒木）を発見してからブレーキ操作までの時間（以後、反応時間）を用いた。「発見（時点）」は、カーブ後の支障物が画面に現れた時点と定義した。

第1実験において、支障物に気づかず通過した例や測定不備等を除く9人（参加者ID：S02～04, S07～09, S11, S12）の反応時間を図4に示す。なお、反応時間が短い順にデータを並べている。反応時間が最も短かった

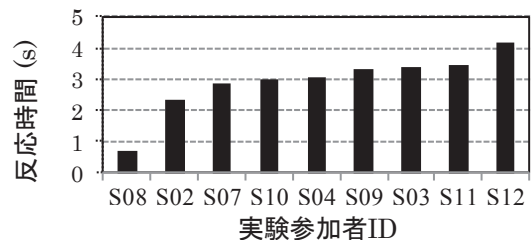
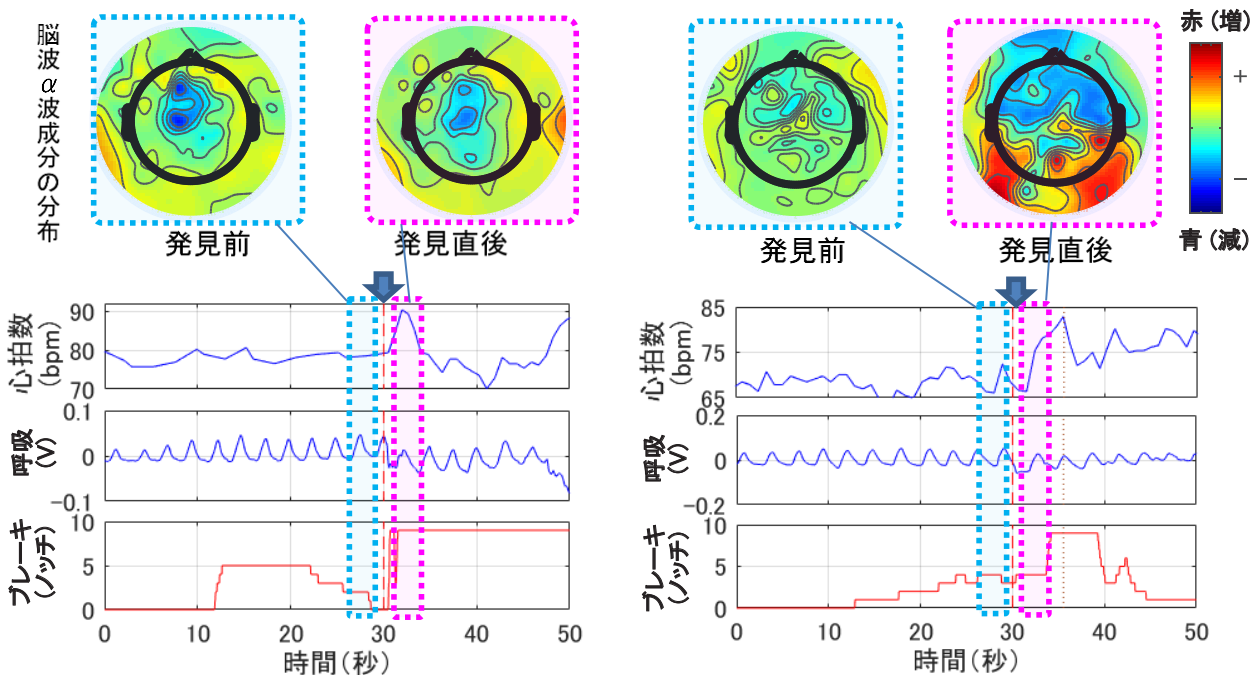


図4 支障物発見時の各生理指標（第1実験）

のはS08,最も長かったのはS12の実験参加者であった。そこで、S08とS12の支障物発見前後の脳活動を調べた（図5）。図上部の極座標等高線図は、頭部を円で疑似的に表したもので、中心が頭頂、上部が顔面方向である。個々の図は、倒木発見前後の3秒間の脳波α波の成分分布を示す。下の3段のグラフは心拍数,呼吸波形,ブレーキ操作ログで、矢印が倒木発見時点を示す。

(1) 脳活動

脳の活動状態を把握する方法として、脳波を周波数成分に分解する方法があり、代表的なものとして、α波（8～13Hz）がある。α波は、認知や運動における抑制や認知処理の中断・待機状態、覚醒中の安静状態で増加し、暗算などの精神負荷や刺激の予測で減少すると言われる⁵⁾。図5においても、反応時間が最も短かったS08は、発見前後のα波成分分布に変化がないが、反応時間が最も長かったS12は、発見直後に前頭前野（頭頂より前の部分）が青く変化しており、α波の減衰を示した。前頭前



(a) S08 (反応時間最短)

(b) S12 (反応時間最長)

↓：倒木発見

図5 アクシデント課題における各種生理指標の変化の例

野は認知や状況判断など高次の脳活動が行われる部分であり、状況を把握できず精神負荷が高まったことで、α波が減衰したと推測される。なお、第2、第3実験の結果においても、反応時間が4秒以上のケースで、同様のα波の減衰がみられ、この変化を捉えることで、図1の心理モデルに示した心理過程②（心理的動揺の状態の継続）が検出できる可能性が高い。

(2) 自律神経系指標（心拍・呼吸等）

非常ブレーキまでの時間が最短であったS08では、発見直後に心拍数が上昇し、交感神経系の賦活が一時的にみられるものの、すぐに心拍の減少と呼吸間隔の伸長という副交感神経優位の反応を示した。一方、ブレーキ操作が最も遅かったS12は、発見直後から心拍数が上昇して20秒後まで高い心拍数を維持し、かつ呼吸振幅が減少して呼吸が浅くなる交感神経系優位の反応が持続した。この結果から、S08は図1の心理モデルにおいて、一時的に心理過程②になるものの、速やかに冷静な心理過程①に移行するTypeB、S12は心理的動揺の状態が続く心理過程②のTypeCと推察できる。

(3) 瞳孔径

第1実験での眼鏡非使用者7名についてアクシデント課題での瞳孔径の変化を調べた。ここでは、倒木発見直前の30秒間を「平常時」、倒木発見から非常停止するまでの時間（平均16秒間）を「異常時」と定義する。

平常時と異常時の瞳孔径を比較した結果、7名すべてが倒木発見直後に瞳孔径が拡大しており（図6）、平常時に対する異常時の増加は統計的に有意であった（ $F(1,6)=40.11, p<.01$ ）⁶⁾。原因としては、異常事態発生による覚醒度の上昇により交感神経系の活動が優位になり、瞳孔が散大したことが考えられる。しかし、非常ブレーキまでの反応時間が最長であったS12以外の6名は、倒木発見後10秒以内に倒木発見前の瞳孔径±5%の範囲に戻った。これは一時的に心理的動揺が生じて交感神経系優位になったものの、速やかに冷静な状態（副交感神経系優位）に戻る、図1のTypeBの過程を示したと考えられる。

(4) 唾液中のストレスホルモン

生体のストレス反応として、視床下部-下垂体-副腎（HPA系）の内分泌系に関連した系と青斑核/ノルアドレナリン系の交感神経系に関連した系の2つ経路が知られている⁴⁾。クロモグラニンA（CgA）は、後者に関連する指標とされおり、内分泌系と比較して、精神的ストレスに対する応答が速いとの報告⁴⁾などを踏まえ、運転課題中の刺激に対するCgAの応答について検討した。

唾液量が十分量採取できた参加者9名（S04, S05, S08～10, S12～15）について分析した結果を図7に示す。アクシデント課題の1つ前の練習課題の後と比べ、アクシデント課題の後では、CgAが上昇したのは、9名中5

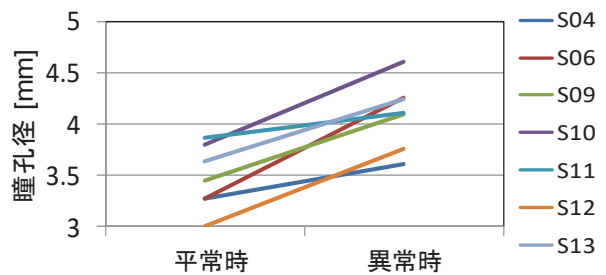


図6 支障物発見前後の瞳孔径⁶⁾

名(56%),わずかな上昇も含めると7名(78%)であった。CgAが上昇した7名のうち、課題後の質問紙で、「動揺」と「疲労」の評価が上昇したのは5名、「緊張」の評価が上昇したのは4名であった。一方、「眠気」の評価は7名中5名で変化せず、CgAの上昇は、心理的動揺などの精神的变化による交感神経系の活性化を捉えた可能性がある。

(5) 個人差と個人内の変化パターン

個人内の生理指標変化の定量化に向けて、第2実験のデータを用いて個人特性の違いを検討した。日常的に起こりうる集中・緊張状態が予想される駅停車操作に着目し、午前中に実施した6回の習熟課題から2,4,6回目の習熟課題（MST2, 4, 6）を選定し、測定状態が比較的良好な4名のデータを図8に示した。図の棒グラフの左側（図中の「休」）は、準安静状態（始発駅停車中の30～45秒目の15秒間）、右側（図中の「操」）は、駅停車操作時（次駅に停車する直前の15秒間）での生理指標の平均値である。上段から、①心拍数、②心拍変動（心拍間隔のゆらぎ）、③LF/HF（自律神経活動指標）、④呼吸周波数、⑤呼吸振幅、⑥瞳孔径を示す。なお、準安静時（休）に対する緊張・集中状態（操）の指標の増減を図中の矢印の上下で示した。

指標の増減傾向が3回の試行すべて同じになった指標を点線の丸で囲んだ。図から、参加者によって丸で囲ま

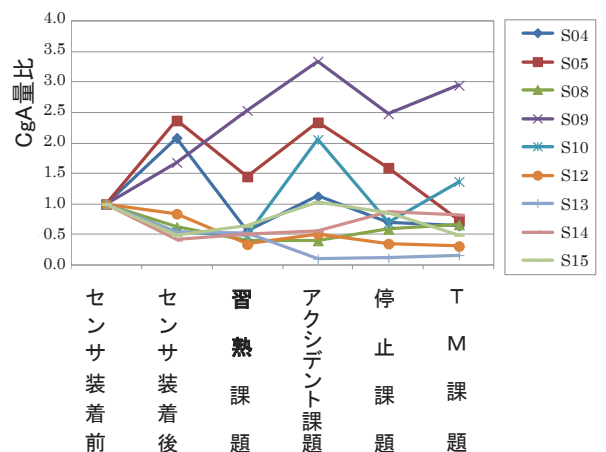


図7 センサ装着前を1とした場合のCgA量比

特集：人間科学

れた指標が異なることや、同じ指標の変化傾向が逆（S04とS05の心拍数）の場合があった。これが生理指標の個人差であり、個体間データを統計処理しても、有意な変化傾向を見出しにくい理由である。呼吸周波数のみが4名の参加者すべてで増加したが、その他は参加者間で共通する変化はみられなかった。この結果は、軽度の緊張状態では、必ずしも典型的な交感神経系優位の反応を示すとは限らないことも示している。

以上のように、個体間では個々の指標の増減パターンが異なっているが、同一個人内では特定の指標の増減パターンに再現性が見られた。しかし、緊張の程度や他の指標も含め、今後、より詳細な分析を行う必要がある。

5. まとめ

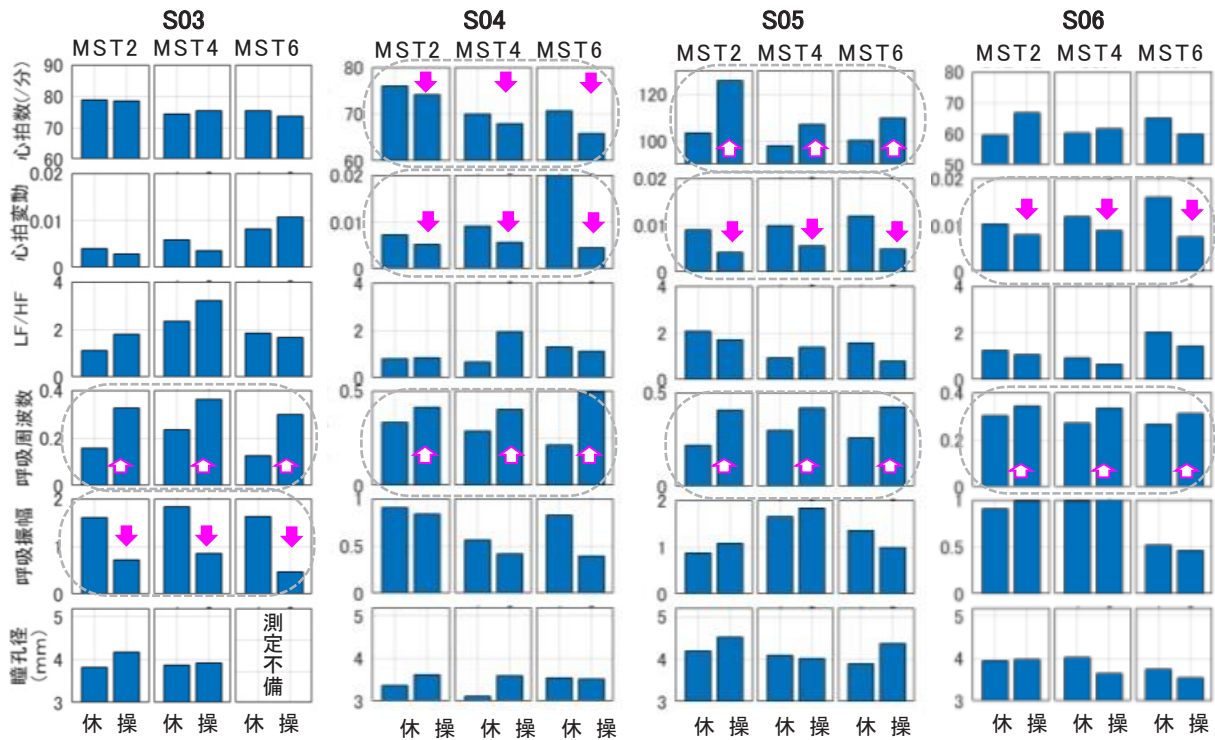
頭表面全域を測定可能な脳波測定装置を含む生体情報複合計測システムを構築した。これを活用して、模擬運転作業時の脳活動を含む生理計測実験を実施した。この結果、適切な行動への反応遅延が生じた実験参加者において特徴的な脳波変化が観察された。また、日常的に生じる程度の緊張や集中状態では、全参加者に共通する生理変化は見出されず個人差があることがわかったが、個人内の反応には再現性がみられた。

今後は、これらの知見をもとに仮説を検証し、脳波と自律神経系の個人内反応パターンを併用して、生理量に

よる生理心理状態推定法を構築し、将来的には運転士支援システムの実用化につなげたい。

文献

- 1) 大須賀美恵子：“生理学実験入門 第4回自律神経系指標の計測”，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol. 7，No.4，pp.285-290，2005
- 2) 中川千鶴，秋保直弘，吉江幸子，小島崇，池畑政輝，鈴木綾子，牛場潤一：鉄道運転作業時の心理的動揺における自律神経系指標変化の基礎的検討，日本人間学会第57回大会論文集，Vol. 52，pp.322-323，2016
- 3) 中川千鶴：VE酔い（動揺病）評価に用いるための自律神経指標の検討：大型4面立体映像提示装置と6軸モーションを用いて，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol. 3，No.2，pp.9-15，2001
- 4) 中根英雄，新規精神的ストレス指標としての唾液中クロモグラニンA，豊田中央研究所R&Dレビュー，Vol. 34，pp.17-22，1999
- 5) 開一夫，金山範明（編）：脳波解析入門，東京大学出版，2016
- 6) 秋保直弘，中川千鶴，吉江幸子，小島崇，池畑政輝，鈴木綾子，牛場潤一：鉄道運転作業時の心理的動揺における瞳孔径変化の基礎的検討，ヒューマンインタフェース学会論文集，pp.359-362，2016



休：準安静状態 操：停車直前15秒

図8 駅停車中と停止操作中の生理指標値の比較