

生理指標を活用した 運転士の心身状態の推定



中川 千鶴
Chizuru Nakagawa
人間科学研究部
上席研究員



鈴木 綾子
Ayako Suzuki
人間科学研究部
人間工学研究室
主任研究員



菊地 史倫
Fumitoshi Kikuchi
人間科学研究部
人間工学研究室
主任研究員

はじめに

この研究の最終目標は、運転士の心身状態をセンシングし、運転に適した覚醒レベルを維持できるようサポートすることです。適切な行動や判断を妨げる心身状態として、心理的な動揺などの過度の緊張、眠気などの覚醒レベルの低

下(以後、覚醒低下)があります。緊張の状態(緊張／非緊張)は生理指標に表れることから、鉄道総研ではさまざまな生理指標を計測するシステムを構築し、鉄道運転シミュレーターを用いた実験を実施してきました。(図1)。日常的に生じる緊張や覚醒低下における生理変化は個人

図1 実験の様子¹⁾



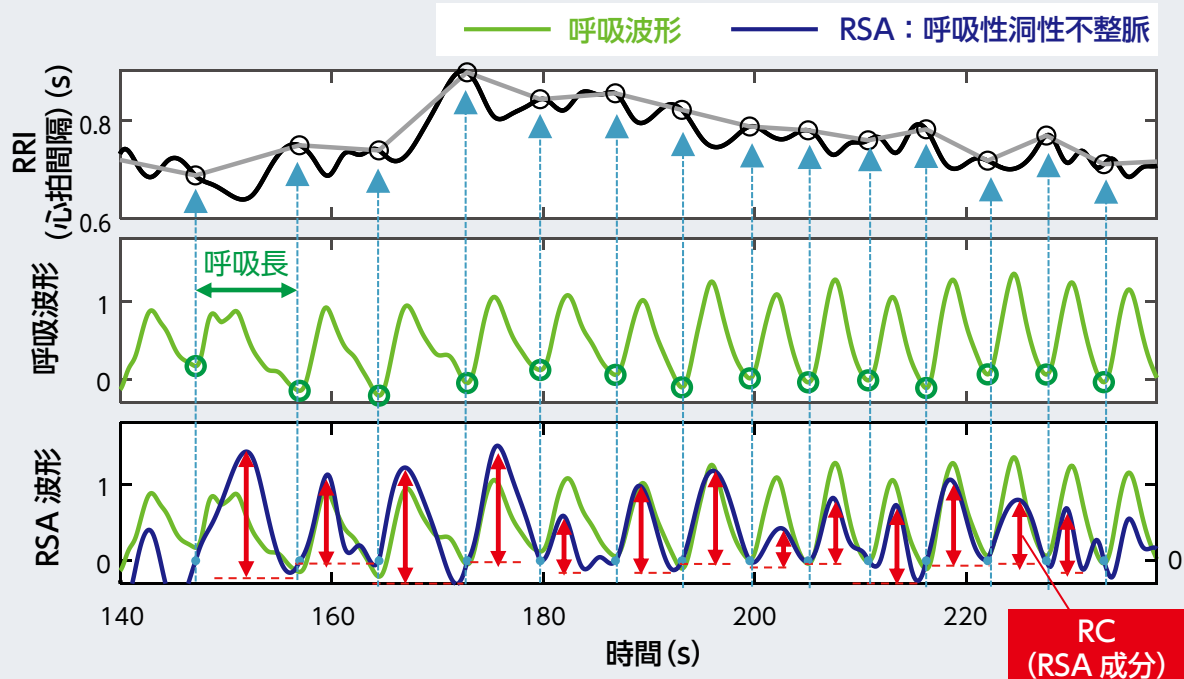


図2 心拍変動・呼吸・RSAの関係²⁾

差がとても大きく、一律な判定基準を設けることができません。そこで、過度の緊張や覚醒低下などで運転に適した状態から逸脱したことを検知するために、検知に適した実用的な生理指標の選定と個人差問題の解決に関する取り組み¹⁾²⁾について紹介します。

生理指標の活用

将来的に運転席で活用するには、装着が簡単なセンサーで、すぐに計測できる生理指標が望まれます。生理指標はさまざまなものがありますが、安定性や測定の簡便さを考えると、心拍

や呼吸が適しています。事実、脈波を活用して心拍数をとらえる腕時計型の活動量計が多く市販されています。加えて、心拍に生じる呼吸と同調したゆらぎから、迷走神経という副交感神経の活動状態もわかります。副交感神経の活動状態がわかると、人体が状況をどのようにとらえているかを推測することができます。[コラム](#)

心拍変動と呼吸の対応を示す例として、測定データを図2に示します。上段が心拍間隔(RRI)、中段が呼吸波形、下段が、[RSA](#) [コラム](#)と呼吸波形です。RRIの○印は、呼吸の吸気時点(呼吸波形の極小値)に一致し、呼吸リズム

コラム「自律神経系」

自律神経とは、生命を維持するために自動的(自律的)に活動する神経系のことです。心臓や呼吸もこの神経が制御しています。自律神経は拮抗する交感神経と副交感神経から成り、この2つが綱引きをしながら状況に応じた制御をしています。

人間の体は狩猟時代からほとんど変わっていません。生き延びるためには緊急事態において「闘争・逃走」モードに即座に切り替わることが重要で、このモードに特化した交感神経系が活性化して心拍数や血圧・呼吸数を上昇させて対応してきました(残念ながら「筋肉」優先のモードなので現代の緊急時には適さない場合があります…)。一

方、「沈静・休息・エネルギーの蓄え」モードでは副交感神経系が活性化して心拍数や呼吸数を低下させます。ただし副交感神経は休息だけでなく、息を潜めた冷静な状況判断でも活発になる点に留意が必要です。

生理指標の中でも最も使われているのは心拍です。測定しやすいだけでなく、心拍のゆらぎ(心拍変動)に血液循環を制御する自律神経の状態が現れるからです。

心拍変動には、呼吸に同調した成分「呼吸性洞性不整脈(RSA: Respiratory Sinus Arrhythmia)」が現れます(図2)。これは、迷走神経という副交感神経を介しているので、RSAの大きさに迷走神経の活性状態が現れます。

と同調（増減は反転）していることがわかります。呼吸を活用したRSA抽出をするため、先行研究³⁾より簡便な方法によるRSA指標としてRC（Respiratory Components：呼吸性成分，[図2](#)下段の赤い矢印）を提案しました¹⁾。

実験内容

実験システムと実験参加者

鉄道運転を模擬した簡易運転シミュレーターを用いて、一般成人男性10名（平均年齢32.4歳）を参加者とした実験を行いました。実験参加者には事前に十分な説明を行い、同意を得たうえで有償で実施しました¹⁾²⁾（[図1](#)）。

測定項目

生理指標は、心電図、呼吸波形、脳波、瞳孔径を測定しましたが、ここでは心電図と呼吸波形データの結果を紹介します。

主観評価は、実験中に30秒ごとの合図音のたびに覚醒レベルを5段階（1：眠気を感じる，2：少し眠気を感じる，3：ふつう，4：少し緊張・動揺を感じる，5：緊張・動揺を感じる）で回答してもらいました。

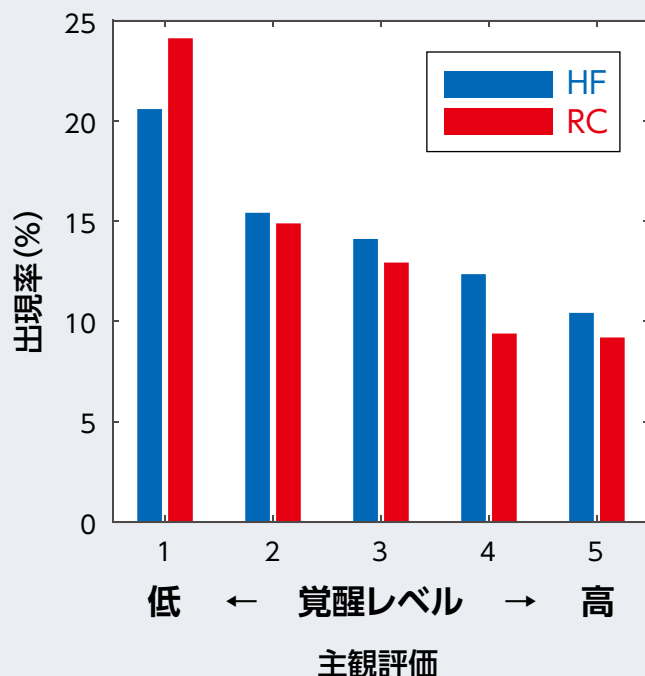
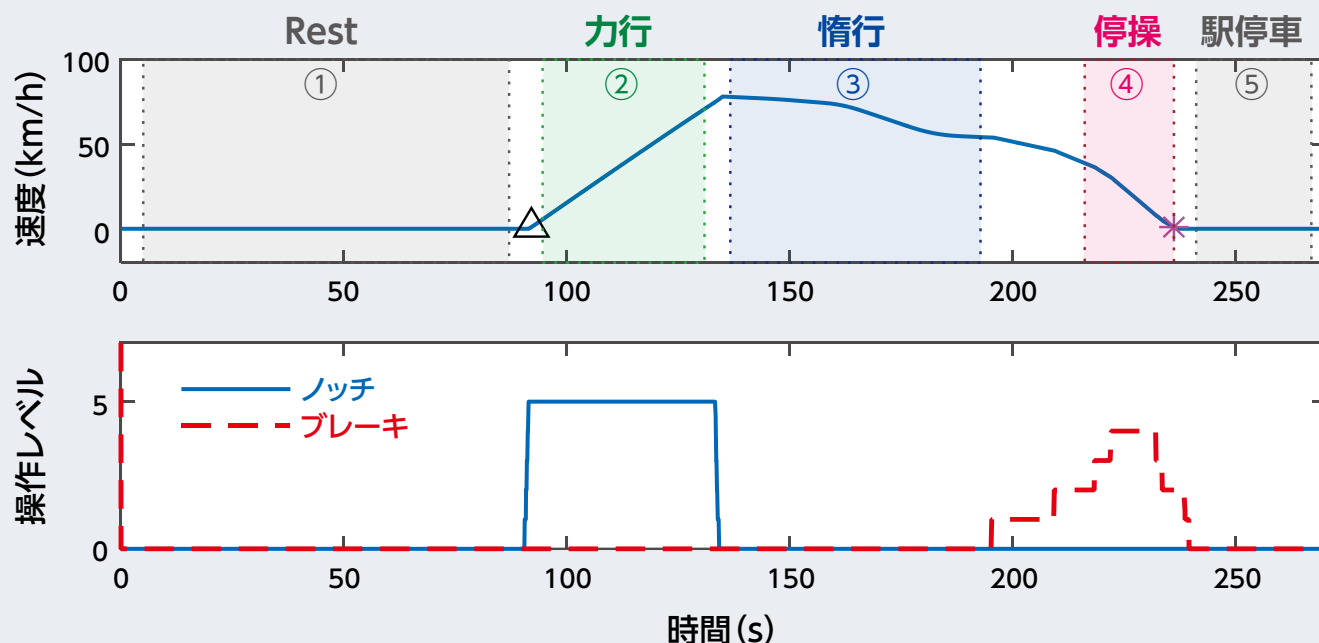


図3 主観評価ごとのHFとRCの増加判定率²⁾

実験課題

実験では、習熟課題、線路内支障物課題、タイムプレッシャー課題の3種類の課題を実施し、いずれの課題も4駅間を運転する10分程度の試行とし、始発駅と終着駅では90秒間停車し安静に近い状態を測定しました。習熟課題（鉄道

図4 速度と運転操作による運転フェーズ分類例¹⁾



の運転に慣れるための課題)は8回(午前:T1～T6, 午後:T7, T9), 線路内支障物課題(途中の踏切に自動車が進入)は4回(T8, T10～T12), タイムプレッシャー課題(余裕時分のない時刻表に沿って各駅に定刻に到着するように教示し, 成功したら以後の課題を免除し実験終了)は1回以上(T13～最大T18)の試行としました。

結果

RCの有効性検証

副交感指標として一般的なHF[®]と提案指標RCを比較しました。覚醒レベルの主観評価値ごとにHFとRCの増加判定の出現率を調べたところ(図3), いずれも覚醒レベルが低いほど出現率が高く, もっとも覚醒レベルの低い主観評価「1」では, RCの出現がHFより顕著でした。この結果から覚醒レベル低下に対しRCがより有効な指標と考えられます¹⁾²⁾。

個人差問題への対応

個人差に影響されずに緊張状態を判定できるよう, 個人ごとに有効な生理指標を選定する方

法を検討しました¹⁾²⁾。具体的には「強い緊張を生じやすい場面(強緊張区間)」と「覚醒レベルが低下しやすい場面(非緊張区間)」のデータを比較し, 緊張状態に応じて特徴的な変化をする指標を個人ごとに探すことにしました。

強緊張/非緊張な状態になりやすい運転場面を選定するため, 代表的な運転フェーズとして以下の5つの区間(図4)を定義し, そのときの主観評価値を調べました。

- ①Rest: 始発・終着駅の停車区間
- ②力行: フルノッチ加速走行区間
- ③惰行: ノッチオフでの走行区間
- ④停車操作(停操): 駅停車操作区間(停車直前の20秒間)
- ⑤駅停車: 途中駅の停車区間

HF

HF (High Frequency Components: 高周波成分)とは, 心拍変動を周波数解析して, 呼吸リズムが含まれる可能性が高い0.14～0.4Hz帯域の成分から算出される生理指標で, 副交感神経指標とされています。しかし帯域が固定されているため, 呼吸がこの帯域から外れたり, 発話など呼吸の変動影響が大きいという欠点があります。

図5 運転フェーズごとの高覚醒/低覚醒評価の出現率¹⁾

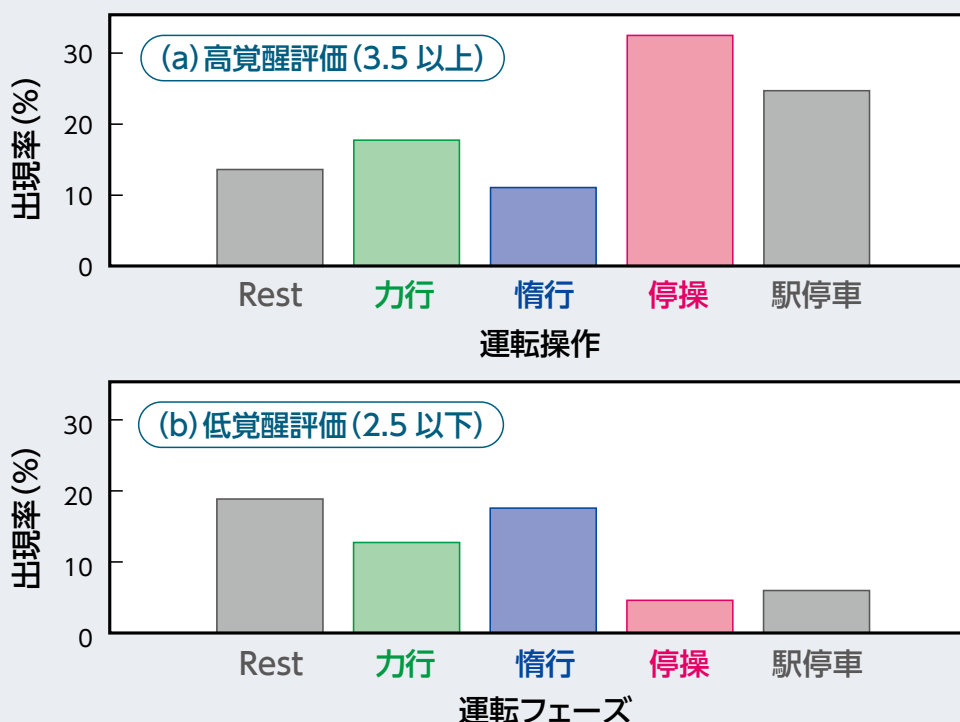


表1 選定した5つの生理指標²⁾

No	生理指標	内容	非緊張	強緊張
1	心拍間隔	拍動の時間間隔 (s)	増加	減少
2	呼吸長	1回の呼吸の長さ (s)	増加	減少
3	RC	呼吸ごとのRSA成分	増加	減少
4	心拍規則性	心拍間隔の規則性	変動	一定
5	呼吸規則性	呼吸間隔の規則性	変動	一定

5つの区間ごとに、主観評価3.5以上(高覚醒評価)の出現率と主観評価2.5以下(低覚醒評価)の出現率を求めました(図5(a)(b))。図から、高覚醒評価は停操区間でもっとも多く、低覚醒評価はRest区間でもっとも多いことがわかります。また、慣れや課題内容も緊張状態に影響することから、非緊張区間としては課題に慣れたT3～T7試番でのRest区間を、強緊張区間としては、最初のT1～T2試番とタイムプレッシャー課題T13～T18試番での停操区間を用いることにしました。

有効指標の選定

有効指標の候補は、心拍と呼吸から得られる心拍間隔、呼吸長、RC、心拍規則性、呼吸規則性の5つとしました(表1)。

表1は、強緊張・非緊張状態での各指標の典型的な変化も示していますが、この変化が生じない人もいます。なお、変化判定のルールは複雑なので詳細な説明¹⁾はここでは省略します。

有効指標の選定は、正解区間(判定がでるべき区間、強緊張判定なら緊張区間)に判定の80%が含まれることを条件としました。実験参加者ごとに有効指標を選定した結果を表2に示します。有効指標として選定された生理指標を●印で示し、赤色は強緊張、青色は非緊張の指標として選定されたことを示します。参加者によって有効指標が異なることや、これらの指標ですべての実験参加者の強緊張・非緊張両方

表2 参加者ごとの有効指標の選定結果²⁾

参加者 ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
心拍間隔	●●		●	●	●●			●		
呼吸長	●●	●●	●●	●	●	●	●	●	●	●
RC			●	●	●	●	●	●●	●	●●
心拍規則性				●			●		●	●●
呼吸規則性			●		●	●●	●●		●●	●

●：非緊張判定に有効

●：強緊張判定に有効

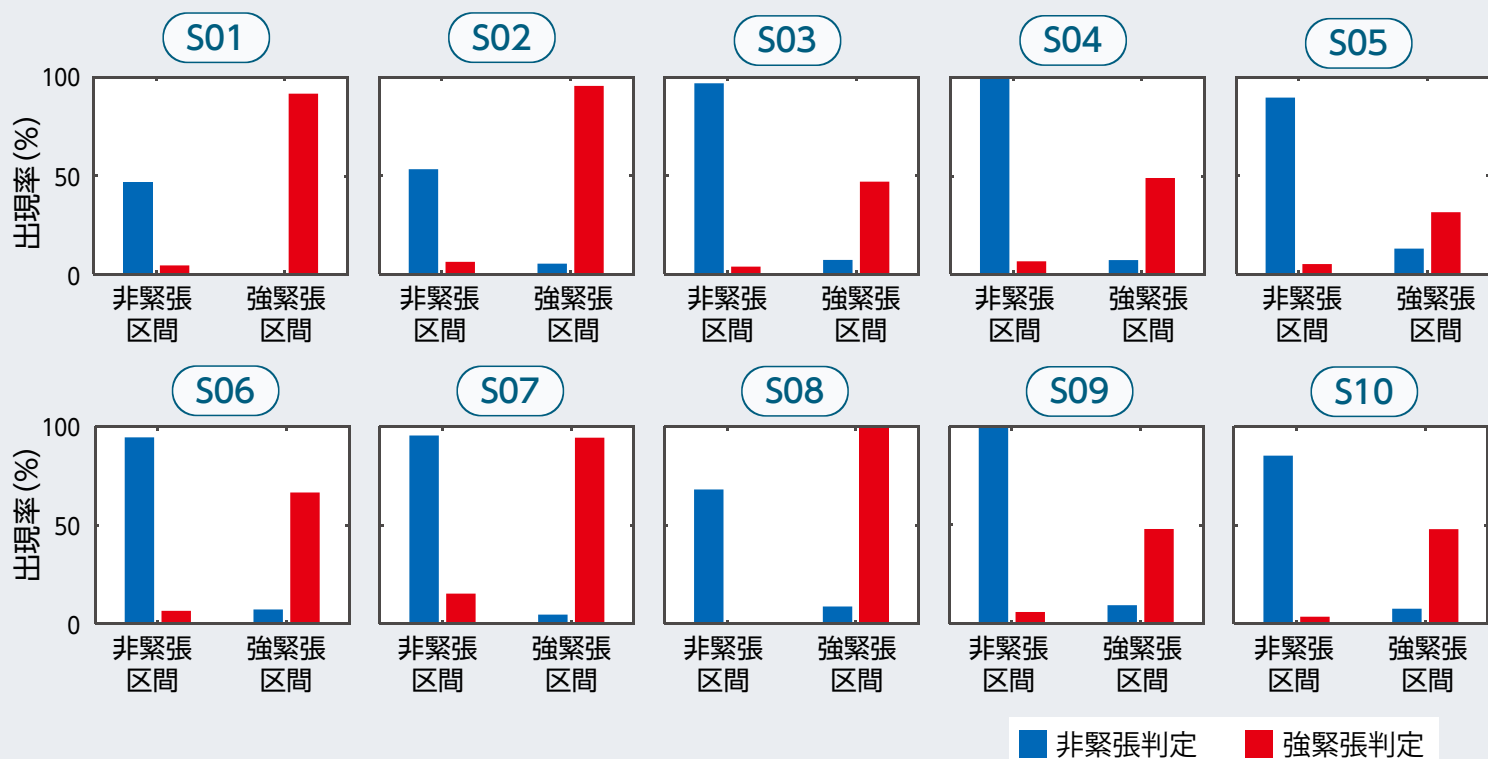


図6 参加者ごとの非緊張・緊張判定の出現率

の判定が可能であることがわかります。とくに、呼吸長は全参加者で、RCは10人中8人で有効指標として選定されており、呼吸が重要な指標であることがわかります。

次に、参加者ごとに、強緊張判定の有効指標(表2)のいずれかが変化した場合を強緊張状態、同じく非緊張の有効指標が変化した場合を非緊張状態と判定しました。各判定が、強緊張区間と非緊張区間で出現した割合を図6に示します。10個の図はそれぞれ参加者ごとの結果を示し、図の横軸は非緊張区間と強緊張区間を、縦軸は非緊張区間・強緊張区間における判定の出現率を示します。グラフの青いバーは非緊張判定、赤いバーは強緊張判定の出現率です。全参加者で、非緊張区間では非緊張判定、強緊張区間では強緊張判定が多く出現し、正判定(判定がでるべき区間にでている、例えば、非緊張区間では非強緊張判定)は、10人中8人で50%以上の出現率となりました。一方、誤判定は全参加者で15%以下となりました。この結果から、個人ごとに有効指標を選定する提案手法は

緊張状態の推定に有効と考えられます。

まとめ

運転業務時の使用に適した生理指標の選定と、個人差による推定精度の低下対策を両立するため、測定が簡便な心拍と呼吸から算出できる5つの指標のなかから、個人ごとに有効指標を選定して緊張状態を推定する方法を提案しました。今後は、運転に適した状態からの逸脱検知に生理指標を用いる方法についてさらに検討し、運転業務に適した覚醒状態維持のサポートに活用していく予定です。RRR

文 献

- 1) 中川千鶴, 鈴木綾子, 菊地史倫, 渡部貴浩, 秋保直弘, 小島崇: 個人毎に最適化した複数生理指標による強緊張状態の推定に関する検討, 人間工学, Vol.52, No.2, pp.84-95, 2022
- 2) 中川千鶴, 渡部貴浩, 秋保直弘, 小島崇, 吉江幸子, 鈴木綾子: 生理指標を活用した運転士の心身状態の推定, 鉄道総研報告, Vol.36, No.1, pp.11-16, 2022
- 3) 小谷潔, 古川健太, 高増潔: 呼吸情報に着目した高精度な呼吸性洞性不整脈の抽出法, 生体医工学, Vol.41, No.3, pp.197-204, 2003