

# 自動運転における手動運転切替え時のドライバの 快適覚醒評価のための生体情報を用いたモデルの検討

JADRAM NARUMON<sup>1</sup> LAOHAKANGVALVIT TIPPORN<sup>1</sup> 菅谷みどり<sup>1</sup>

**概要**：自動運転のレベル4では、ドライバが睡眠した後、覚醒し、運転を行うなどの状況が想定されている。ドライバがシステムから運転を引き継ぐ際に、事故防止のため覚醒度の維持および快適度の向上が必要である。快適度は、運転のパフォーマンスに影響があることから快適、覚醒を評価する仕組みが必要である。しかし、快適と覚醒を同時に評価する手法は十分提案されておらず、また、個別に評価する場合においても複数ある指標のうち何をを用いるべきか明確ではないという課題がある。さらに、生体情報は人ごとに値の範囲が大きく異なり、正確な評価が難しく、評価方法が確立していないという課題がある。本研究においては、客観的な人の快適覚醒の把握に生体情報を用いた評価を行うことを目的とした。また、快適・覚醒を心拍変動指標と、脳波の計測値を組み合わせた、快適覚醒手法を提案する。具体的に複数の脳波、心拍変動指標それぞれ主成分分析により統合することで、これらの課題に対応するものとした。自動運転時に睡眠したドライバを異なる刺激(風とアロマ)で覚醒させ、快適覚醒の変化させる実験を行い、統合された指標で評価した。その結果提案手法の有効性を示した。

**キーワード**：自動運転の切替え、快適覚醒、個人差、脳波、心拍変動

## 1. 背景

自動運転の目的の一つに、ドライバーの支援による運転の操作やミス抑制がある。日本の国土交通省によると、2021年では、死亡事故発生件数の7~8割が「ドライバの違反」に起因されているとされる[1]。特にドライバの眠気は、世界中の交通事故における死亡の主な原因となっている。そのため、自動運転の実用化により、ドライバの代わりにシステムが運転制御を行うことで、ドライバが原因の交通事故を大幅に減らすことが期待されている。

ただし、完全自動運転に至るにはいくつかの段階がある。米国のSAE(Society of Automotive Engineers)では自動運転システムレベルは0~5までの6段階で定義されており、レベル0(運転自動化なし)、レベル1(運転支援)、レベル2(部分運転自動化)、レベル3(条件付運転自動化)、レベル4(高度運転自動化)、レベル5(完全運転自動化)の分類がある[2]。中でもレベル4では、限定領域において、完全自動運転とされ、ドライバが全ての運転操作から解放されることから、ドライバは車内での睡眠が可能になる。自動運転時には、ドライバが運転タスクから解放され、運転作業の負荷が軽減される、覚醒度が低下する[3]。この際、睡眠または覚醒度が低下していたドライバがすぐに手動運転すると事故が発生する可能性があることが考えられる。

このように、完全自動運転に至る段階においては、従来の運転支援以上に、安全制御のための人の状態の把握が重要となる。特に、ドライバの眠気は事故の主な要因となることから、システムから人への運転制御の引継ぎ時の覚醒度向上の支援を考える必要がある。また、覚醒度以外にも、快適度も重要であるとされる。怒り、悲しみなどの負の感情はドライバの運転パフォーマンスに影響するとされる[4-8]。

Ünalらは、負の感情は運転に負の影響を与えることを報告した[4]。H.Caiらは、ドライバの感情状態は運転パフォーマンスに影響を与え、怒りや興奮状態は中立状態(快適、不快ではない状態)に比べて車線制御能力が低いことを示した[5]。また、Zimasaらは、ドライバの気分が運転の安全性に及ぼす影響を調べた。その結果、「幸せ、普通、悲しい」気分の中で、「悲しい」気分が最も危険認知する時間が長く、安全運転に負の影響を及ぼすと示唆した[6]。Jeonらは感情が運転に大きく影響し、怒りの感情は交通事故の発生確率の増加につながると指摘した[7]。一方で、Duらはレベル3の自動運転において、快適状態であるドライバはより運転引継ぎができることを示した[8]。このように、覚醒度の向上のみならずドライバの快適性の考慮も重要である。

本研究では、快適かつ覚醒となる状態を快適覚醒とし、これを実現するために重要な要素技術として、快適覚醒を客観的に評価する方法について検討するものとした。快適覚醒を客観的に把握する方法として、近年、侵襲的であるが客観性、信頼性が高い手法として、脳波や心拍などの生体情報を用いた評価方法が数多く提案されている[9-14]。しかし、次の3つの課題がある。(1) 快適度と覚醒度を同時に評価する手法は十分提案されていない。また、(2) 快適度と覚醒度の個別の評価については、それぞれ様々ある生理指標のうち何をを用いるべきか明確ではないという課題がある。さらに、(3) 生体情報は人ごとに値の範囲が大きく異なり、正確な評価が難しく、評価方法が確立していない課題がある。

このことから、本研究においては、客観的な人の快適覚醒の把握に生体情報を用いた評価を行うことを目的とした。課題に対し、まず(1)心理モデルに当てはめ快適・覚醒をそれぞれ、心拍変動の計測値から得られる指標と、脳波の計

<sup>1</sup> 芝浦工業大学  
Shibaura Institute of Technology

測値から得られる指標を独立して評価し、それらを組み合わせることで快適覚醒を評価する方法を提案する。さらに、正確な評価のために個人差を考慮し、主成分分析を用いて複数の手法を統合することで、(2)(3)の課題に対応するものとした。

提案手法の有効性を評価するために、自動運転のドライビングシミュレータを用いて睡眠したドライバを刺激で覚醒させ、ドライバの快適度と覚醒度の変化を調査する実験を実施した。その結果、生理指標による個人差を考慮した比較評価を行える可能性が示唆された。

本論文の残りの部分は以下のように構成されている。2節にて、関連研究を述べる。3節にて、提案について詳しく説明する。4節にて、実験内容を述べる。5節にて、分析方法と実験結果について述べる。6節にて、結果の議論を述べる。7節にて、本論文のまとめを述べる。

## 2. 関連研究

これまでに、ドライバの眠気を検知し、覚醒させる手法は様々提案されている。一般的にドライバの行動、ドライバの生体情報、そして車両情報を用いる3つの方法で分類される。ドライバの行動を用いる方法は、顔の表情、目の瞬き、頭の位置、あくびなどの情報から覚醒度を推定する。ドライバの行動と車両情報を用いる方法は非侵襲的な方法で使いやすい。しかし、ドライバの行動を用いる方法は照明の影響を受けるのに対し、車両情報を用いる方法は天候や道路の幾何学的条件に依存するため、信頼性が低くなり、正確な結果は得られないことがある。一方で、生体情報を用いる手法は正確な結果を得ることができるが、センサーなどの計測機器による侵襲性という課題がある[9]。脳波、心拍、呼吸、眼球運動などの生体情報を用いてドライバの覚醒度を評価する研究は多くある。その中で、脳波は覚醒状態の変化に伴う脳活動の変化を反映するものとされ、覚醒状態を評価する指標としてよく用いられる[10]。一般的に脳波は、 $\delta$  (0.5~4Hz)、 $\theta$  (4~8Hz)、 $\alpha$  (8~13Hz)、 $\beta$  (13~30Hz)、 $\gamma$  (30Hz以上)という周波数帯に分かれている。低周波数である $\delta$ 波、 $\theta$ 波、 $\alpha$ 波は、眠気の発生時に増加し、高速周波数である $\beta$ 波は、眠気の開始とともに活動が減少する[11]。したがって、 $\delta$ 波、 $\theta$ 波、 $\alpha$ 波、 $\beta$ 波の周波数帯域のパワーや比率は、眠気の指標として用いられている[12]。例えば、阿部らは脳波である $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 波から算出された $\alpha$ 波出現率(含有率)を用い、自動運転中のドライバに与える6種類のタスクの覚醒維持効果を評価した[13]。さらに、郭らは $\theta$ 波含有率、 $\alpha$ 波含有率、 $\beta$ 波含有率を用い、運転時におけるドライバの覚醒度と熱的快適感を評価した[14]。また、脳波や心拍変動などの生体情報を用いて快適を評価する研究もある。その中で、心拍変動(Heart Rate Variability; HRV)は、自律神経系のバランスの調整を反映するものとされる。例えば、心拍変動指標の pNN50

(Percentage of Normal to Normal intervals differing by more than 50 ms) は自律神経である副交感神経の活動と密接な関係があり、リラックス状態を評価するものとして使用される[15,16]。

また、脳波と心拍変動指標を組み合わせて快適度と覚醒度を評価する研究がある[16]。感情表現にするための感情モデルとして、ラッセルの円周モデル[17]が広く用いられている。ラッセルの円環モデルは、快-不快(valence)と覚醒-眠気(arousal)の2次元で定義された平面上に配置される感情を表現するモデルである。池田[16]らは、覚醒度を脳波、快適度を心拍変動の生体計測による評価し、ラッセル円環モデルの2次元座標上に、快・不快をX軸、覚醒をY軸として、対応付けることで感情を推定する手法を示した。林らは池田らの手法を用いてドライバの漫然状態を推定することができる可能性を示した[18]。

生体情報を用いた手法において、精神状態に対する反応感度は人それぞれ異なり、同じ課題によって引き起こされる生理反応も人によって異なる可能性があり、これを個人差の問題とされる[19]。したがって、生理指標による評価を行う際には、このような個人差を考慮する必要がある。しかし、林らの手法では、単一指標として快適度と覚醒度を評価した。単一指標はそれぞれ持つ情報が異なるから、評価可能な範囲に限られる。単一の指標を用いると人による個人差を対応できない場合が発生し、有効に快適度と覚醒度を評価できない可能性がある。

## 3. 提案

### 3.1 概要

本研究の目的は、客観的な人の快適覚醒の把握に生体情報を用いた評価を行うことである。課題に対し、まず(1)快適・覚醒を、心拍変動の計測値から得られる指標と、脳波計測値から得られる値を独立して評価し、それらを組み合わせることで快適覚醒を評価する方法を提案する。さらに個人差を考慮した評価を行うために、主成分分析を用いて複数の手法を統合する。これにより(2)(3)の課題に対応するものとした。

### 3.2 快適覚醒の評価モデル

快適覚醒の評価モデルについて述べる。本研究では、快適度と覚醒度を同時、かつ独立した計測により評価する目的で、池田[16]らの手法を用いる。池田らは、ラッセルの2次元(Arousal/Valence)モデルに従い、快適をX軸、覚醒をY軸とした2次元座標を用いる。さらに、X軸には心拍センサーから取得した値を心拍変動指標により評価した値、Y軸には脳波を取得し、脳波指標により評価した値を独立して割り当てる。X軸の心拍変動値は自律神経系の評価を行うが、これは快不快と関わるとされている[20]。一方、脳波は、中枢神経系の状態を計測するものとされ、覚醒を評価することができる[20]。このように、2軸を用いることで、それ

ぞれの軸にあった評価を行うことができる。さらに、基礎となる2次元座標は、心理分野で信頼性があるとされているモデルである[17]。このことから、独立した指標を、同時に扱うという目的を達成することができる。このことから、本手法を元に基盤となるモデルを構築するものとした。

### 3.3 快適度の軸、覚醒度の軸の構成方法

3.2節にて快適度の軸、覚醒度の軸それぞれ、心拍センサから取得した値を心拍変動指標により評価した値、脳波については脳波指標により評価した値を用いると述べた。しかし、心拍変動指標についても、脳波指標についても、指標は複数あり、どの生理指標を用いて評価するのかという問題については、関連研究で述べたように、単一指標で評価することは困難である。また、我々は単一快適指標と単一覚醒指標の有効性を調査したが[21]、人により評価しやすい指標は異なることから、単一指標を恣意的に選択することは困難である。

複数の各生理指標の負荷量に応じて負荷量を決める一つの有用な方法として、主成分分析(PCA: Principal Component Analysis)がある[19, 20]。各主成分には、固有値と寄与率、主成分負荷量という情報を持つ。固有値は、各主成分の分散に対応しており、主成分が保持している情報量を示している。寄与率は、各主成分が持っている情報量を比率(%)で示すものである。主成分負荷量は、各変数に対して係数として与えられるものである。主成分負荷量が大きいくほど、その変数は主成分と強く関連しており、主成分に与える影響力が大きくなるということを表し、主成分をよく説明する変数であると言える。このことから、我々は、最も固有値が大きい(最も情報量大きいを持つ)第一主成分による総合的な指標を導入することによって、各指標間の関係や特徴を把握することできると考える。本研究では、複数の生理指標の主成分分析を行い、第一主成分を総合的指標として、各指標の主成分負荷量による指標の重要度を判断する。複数の指標の重要度を考慮して1つの総合的な指標を統合することで、指標選択の問題を解決できると考えた。

したがって、本研究では、第一主成分を2次元座標上の快適軸と覚醒軸の評価値として用いる。複数の脳波指標と複数の心拍変動指標を独立し、それぞれの主成分分析を行う。第一主成分負荷量を算出し、これらの負荷量を係数として、第一主成分の式を作成する(式1)。 $z_1$ は第一主成分、 $a_{1n}$ は第一主成分負荷量、 $x_n$ は分析に用いた指標である。

$$z_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \quad (\text{式1})$$

この式は複数の指標重要度による新たな統合した指標(総合的指標)とする。複数の心拍変動指標から得られた第一主成分の式を $z_x$ として、X軸(快適軸)の評価に用いる。一方、複数の脳波指標から得られた第一主成分の式を $z_y$ と

して、Y軸(覚醒軸)の評価に用いる。 $z_x$ と $z_y$ は2次元座標上にプロットして図1のように評価する。

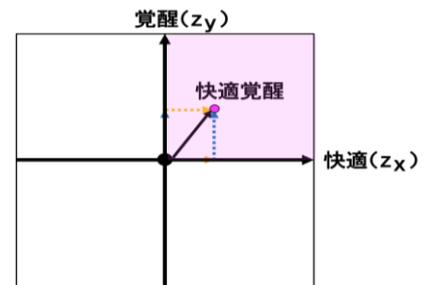


図1 快適覚醒の評価モデル

## 4. 実験

### 4.1 概要

本実験は、提案した快適覚醒モデルにもとづき、快適覚醒軸を構成するという提案の有効性を明らかにすることを目的に、実際の状況に近い例で評価を行った。

実験においては、自動運転を想定した実際の運転環境を準備した。また、自動運転時に睡眠する状態と、それを異なる刺激(風とアロマ)で覚醒させ、快適度と覚醒度を評価できるようにした。実験では、実際に自動車内で睡眠し、また運転するという動作を行うため、運転免許証を持つ、かつ車内で睡眠に入りやすい人を対象とした。実験協力者は、25~45歳、平均年齢36.4歳の男女5名(男:3名、女:2名)が実験に参加した。

### 4.2 実験装置

本実験では自動運転のドライビングシミュレータを用いて実施した(図2)。ドライビングシミュレータの環境構築はUC-win/Roadを利用した。



図2 ドライビングシミュレータ

ドライビングシミュレータの車内には、送風機、アロマのパイプ、手動運転に切替えるボタンを設置した。送風機により常温の風が体の上部に当たるようにした。アロマはパイプから出るようにした。実験では風とアロマで覚醒させるが、起きなかった場合、振動で覚醒させる。振動で覚醒させるために、Bellman & Symfon社のワイヤレスベッドシェーカを実験協力者の腹部につけた。

### 4.3 データ収集

#### 4.3.1 測定デバイス

本実験では、実験中、脳波、心拍変動、そして眼球運動 3 種類の生体計測が行われた。脳波の計測は NeuroSky 社の Mindwave mobile2 を使用した。心拍変動の計測は Switch Science の Pulse sensor と myBeat の心電計を使用した。眼球運動の計測は nac Image Technology Inc. の Eye tracking デバイスを用いた。図 3 にセンサーを装着している様子を示す。

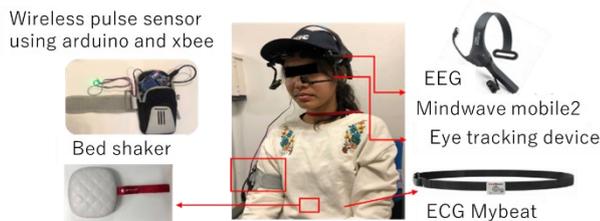


図 3 センサー装着様子

#### 4.3.2 生理指標

本研究では、脳波指標を用いて覚醒度を評価する。脳波を EEG(Electroencephalography)で計測するものとした。EEG は頭皮から検出できる電気を測定するもので、装置が安価かつ小型で、ヘッドギア状の機器を被らせるだけで計測できるという特徴がある。本研究では快適度の評価を行うため、脳波計測によるストレスが少ない EEG を採用した。

本研究では、MindWave Mobile2 により取得した  $\theta$ , Low  $\alpha$ , High  $\alpha$ , Low  $\beta$ , High  $\beta$ , Attention, Meditation を用いる。Attention は集中度, Meditation はリラックス度を表す NeuroSky 社独自のアルゴリズムから算出される値である。また、覚醒指標を算出するために、 $\theta$  波,  $\alpha$  波,  $\beta$  波のパワースペクトルを用いた。 $\alpha$  波は Low  $\alpha$  と High  $\alpha$  の和で、 $\beta$  波は Low  $\beta$  と High  $\beta$  の和とする。脳波の含有率 ( $R_i$ ) を計算するには式 2 を用いる[13]。 $P_i$  は脳波のパワースペクトルとする。

$$R_i = \frac{P_i}{P_\alpha + P_\beta + P_\theta} \quad (\text{式 2})$$

覚醒度の指標は  $\delta$  波,  $\theta$  波,  $\alpha$  波の含有率[13,14],  $\beta/\alpha$ [12], そして、Attention と Meditation の差分 (Attention-Meditation)[16] を用いる。

快適度を評価するために、心拍変動指標を用いる。一般的に心拍変動指標は、自律神経系の状態を測る指標として用いられる。自律神経は、内臓、血管などの働きをコントロールし、体内の環境を整える神経であり、意思とは関係なく独立して働いている。このため、情動・感情、疲労、ストレスなどの指標として計測評価されている。心拍変動指標の中で、pNNx ( $x: 10, 20, 30, 40, 50$ ) [22] は心拍変動の時間領域解析による指標であり、副交感神経系の指標と

して用いられる。本研究では、pNNx の値が小さい時に不快、値が大きい時に快適(副交感神経が優位な状態)として解釈する。pNNx は連続した隣接する心拍間隔の差が x ms を超える割合である。

#### 4.3.3 主観評価

主観評価は SAM 尺度(Self-Assessment Manikin)を用いた[23]。SAM 尺度は非言語的な手法であり、表情の違うアバターから自分の気持ちに最も近いものを表しているアバターを選択することで計測する。1~9 までの尺度で覚醒度(Arousal)と快適度(Valence)を評価する。

また、実験終了した後いくつかの質問で実験協力者にアンケートを回答してもらう。質問の例として、疲労感、眠気、自動運転中に寝ていた時の状況、目覚めたきっかけ、目覚めたあと運転中の気分、覚醒後の運転操作・走行方法などの認識、覚醒後に運転を再開の運転操作などである。

### 4.4 実験手順

本実験では、次の手順で実施した(図 4)。

- 1) 実験協力者が実験説明を受け、乗車前アンケートの回答、センサー装着をする。
- 2) 乗車し、ドライビングシミュレータの操作を慣れるまで練習走行を実施する。
- 3) 2 分間の安静状態の後、アンケートを回答する
- 4) 実験を開始し、自動運転下で実験協力者に睡眠してもらう。実験実施者が実験協力者の眼球運動から睡眠状態を監視する。睡眠を確認できた時、運転切替る報告を表示させ、目覚めるまで刺激(風、アロマ)で覚醒させる。起きなかった場合、振動で覚醒させる。
- 5) 実験協力者が目覚めた後、実験協力者が手動運転に切替るボタンを押し、運転を開始する。直進、曲がる(障害物を左右に避ける)、直進コースの順に運転して停車する。
- 6) アンケートを回答する。

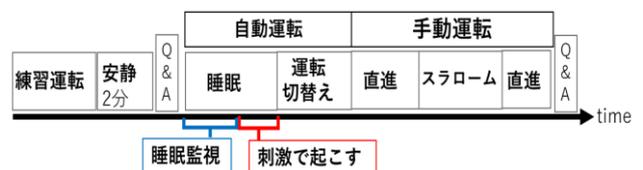


図 4 実験の手順

### 5. 結果

5 人の実験データの中で、アロマ刺激の条件で実験した時 2 人のデータが正常に取得できなかったため、3 人のデータを用いて分析した。分析手順として、まず、各条件に対する運転を開始してから運転終了までのデータを用いて主成分分析を行った。得られた第一主成分負荷量を基づい

て、第一主成分の式を作成した。作成した式に生理指標の値を代入して1つの指標として統合した。その後、統合した指標と単一の指標を比較した。最後に、統合した快適指標と覚醒指標を組み合わせて2次元座標上にプロットして、風とアロマによる快適覚醒状態を評価した。評価する区間は4区間に分けた。運転練習、安静状態、睡眠状態、そして運転状態である。各区間はそれぞれ1分間のデータを用いた。睡眠状態のデータは実験協力者が睡眠したと判断され、刺激を与える1分前のデータとした。また、運転状態のデータは睡眠から目覚めて運転開始後の1分間のデータとした。

### 5.1 覚醒評価（脳波指標）

覚醒評価において脳波指標を用いた。複数の脳波指標(α波含有率, β波含有率, θ波含有率, β/α, Attention-Meditation)のデータを用いた。実験協力者毎に主成分分析を行い、第一主成分負荷量を算出した結果、表1と表2にまとめる。表1は実験条件が風の場合の第一主成分負荷量を示す。

表1によると、第一主成分負荷量が最も高い指標は0.9以上で、実験協力者毎にそれぞれ異なり、それぞれβ/α, β波含有率, そして、α波含有率である。一方、負荷量が最も低い指標はθ波含有率とβ波含有率であり、第一主成分負荷量がほぼ0である。

表1 脳波指標による第一主成分負荷量（風）

	α波含有率	β波含有率	θ波含有率	β/α	Attention-Meditation
実験協力者1	-0.59	0.75	0	<b>0.937</b>	0.58
実験協力者2	0.249	<b>0.962</b>	-0.78	0.717	0.638
実験協力者3	<b>-0.954</b>	0.094	0.811	0.744	0.52

また、表2は実験条件がアロマの場合の第一主成分負荷量データを示す。表2によると、アロマの場合は風の場合と異なり、第一主成分負荷量が最も高い指標はα波含有率とβ/αである。α波含有率は実験協力者1と2にとって最も高い負荷量の指標である。一方、最も低い負荷量はβ波含有率であり、値が0.221となった。

表2 脳波指標による第一主成分負荷量（アロマ）

	α波含有率	β波含有率	θ波含有率	β/α	Attention-Meditation
実験協力者1	<b>-0.954</b>	0.076	0.801	0.735	0.462
実験協力者2	<b>-0.928</b>	0.221	0.649	0.82	0.547
実験協力者3	-0.831	0.41	0.453	<b>0.866</b>	0.672

次に、第一主成分の式を作成について説明する。例えば、実験協力者1において、表1による第一主成分分析負荷量を用いて、式3を作成した。風の場合の実験データを式3に代入することで、統合する覚醒度の指標の値が得られる。ただし、Attention-Meditationの値の範囲が-100から100までであり、他の指標と異なるため、脳波指標の値をz-score方法で標準化してから式3に代入した。

$$Z = (-0.59 * \alpha \text{波含有率}) + (0.75 * \beta \text{波含有率}) + (0 * \theta \text{波含有率}) + (0.937 * \beta/\alpha) + 0.58 * (\text{Attention} - \text{Meditation}) \quad (式3)$$

図5は練習、安静、睡眠、運転4区間の風の場合の実験データにおける、単一指標と統合した覚醒指標の結果を示す。図5では、左の縦軸がα波含有率, β波含有率, θ波含有率, β/α, そして統合した覚醒指標(PCA)の平均値を示し、右の縦軸がAttention-Meditationの平均値を示す。図5によると、統合した覚醒指標の値は全ての状態に対してβ/αとβ波含有率指標の結果と同じ傾向が見られる。Attention-Meditationとα波含有率は少し似ている傾向が見られる。しかし、θ波含有率指の結果とは全く同じ傾向が見られない結果となった。

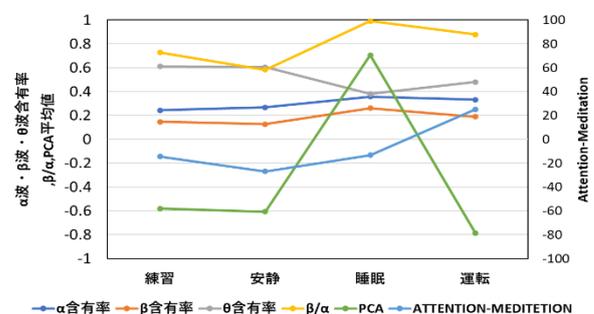


図5 実験協力者1の脳波指標の平均値（風）

実験協力者1のアロマの実験データを風の場合の実験データと同様に、表2より第一主成分分析負荷量を用いて、式を作成して統合する覚醒指標の値を算出する。式に脳波指標の値を代入する際に、風の場合と同じように脳波指標を標準化してから代入する。図6は練習、安静、睡眠、運転4区間のアロマの場合の実験データにおける、単一指標と統合した覚醒指標の結果を示す。図6の縦軸は図5と同様である。図6によると、全ての状態に対して、統合した覚醒指標(PCA)の結果はα波含有率と逆の傾向が見られる。β/α指標の結果と同じ傾向が見られる。他の指標との傾向があまり見られない。

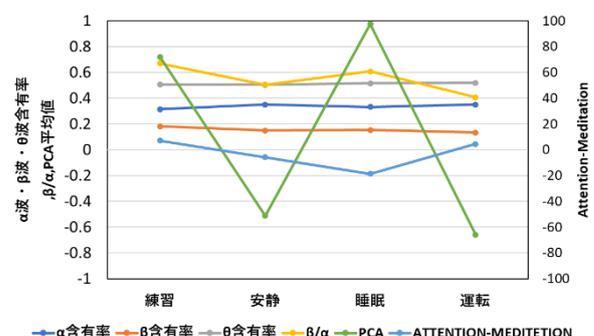


図6 実験協力者1の脳波指標の平均値（アロマ）

## 5.2 快適評価（心拍変動指標）

快適評価において、心拍変動指標を用いる。複数の脳波指標(pNN10, pNN20, pNN30, pNN40, pNN50)のデータを用いた。実験協力者毎に主成分分析を行い、第一主成分負荷量を算出した結果、表 3 と表 4 にまとめる。

表 3 は実験条件が風の場合の第一主成分負荷量を示す。表 3 によると、全ての指標の第一主成分負荷量が大きく、全ての実験協力者に対して pNN40 が最も大きい。

表 3 心拍変動指標による第一主成分負荷量（風）

	pNN10	pNN20	pNN30	pNN40	pNN50
実験協力者 1	0.7	<b>0.959</b>	0.98	<b>0.959</b>	0.951
実験協力者 2	0.667	0.864	0.928	<b>0.933</b>	0.893
実験協力者 3	0.571	0.787	0.867	<b>0.9</b>	0.832

表 4 は実験条件がアロマの場合の第一主成分負荷量データを示す。表 4 によると、アロマの場合も同様に全ての指標の第一主成分負荷量が大きく、全ての実験協力者に対して pNN30 が最も大きい。

表 4 心拍変動指標による第一主成分負荷量（アロマ）

	pNN10	pNN20	pNN30	pNN40	pNN50
実験協力者 1	0.723	0.877	<b>0.951</b>	0.925	0.892
実験協力者 2	0.74	0.832	<b>0.95</b>	0.899	0.889
実験協力者 3	0.795	0.886	<b>0.954</b>	0.912	0.897

統合する快適指標は、統合する快適指標と同じように第一主成分分析負荷量を用いて、式を作成する。今回用いた心拍変動指標は全て割合から算出したため、式に代入する際に標準化してから代入する必要はないと考えた。図 7 は練習、安静、睡眠、運転 4 区間の風の場合の実験データにおける、単一指標と統合した覚醒指標の結果を示す。図 7 によると、全ての状態に対して、統合した覚醒指標 (PCA)の結果は全ての指標の結果と同じ傾向が見られた。

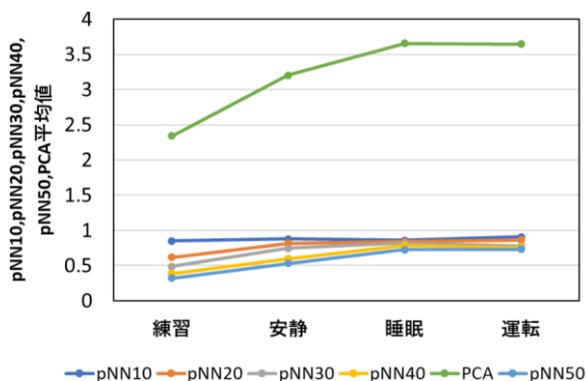


図 7 実験協力者 1 の心拍変動指標の平均値（風）

図 8 は練習、安静、睡眠、運転 4 区間のアロマの場合の実験データにおける、単一指標と統合した快適指標の結果を示す。

図 8 によると、風の場合と同様に全ての状態に対して、統合した覚醒指標(PCA)の結果は全ての指標の結果と同じ傾向が見られる。

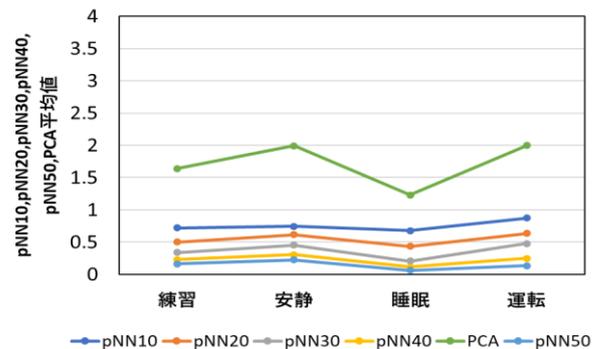


図 8 実験協力者 1 の心拍変動指標の平均値（アロマ）

## 5.3 2次元座標による快適覚醒評価

運転練習、安静状態、睡眠状態、そして運転状態の快適覚醒を評価するために、統合した快適指標と覚醒指標を組み合わせて 2次元座標上にプロットした。快適を横軸、覚醒を縦軸とした。グラフは上いくほど覚醒、右行くほど快適と解釈する。風とアロマによる快適覚醒状態の評価結果は図 9、図 10 に示した。

図 9 は実験協力者 1 の 2次元座標の快適覚醒評価を示す。睡眠での覚醒度と快適度は、風がアロマよりそれぞれ 2.4 と 1.3 の差で高かった。同様に、運転での覚醒度と快適度は、風がアロマよりそれぞれ 1.7 と 12.9 の差で高かった。さらに、睡眠から運転状態までの快適覚醒変化を見て刺激の効果を確認した。その結果、風の快適度は変化しないが、アロマは 0.8 上がった。一方、風の覚醒が 22.1 上がったが、アロマは 10.5 上がらなかった。

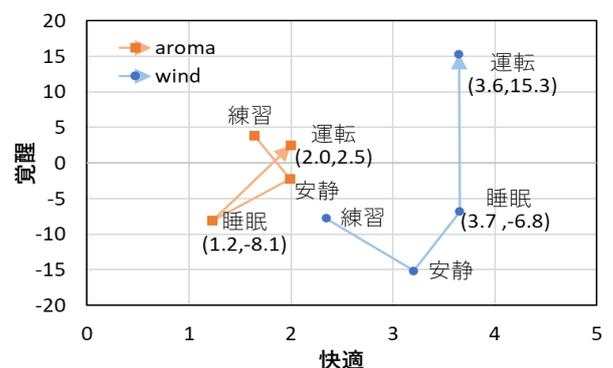


図 9 2次元座標の快適覚醒評価（実験協力者 1）

図 10 は実験協力者 3 の 2次元座標の快適覚醒評価を示す。睡眠での覚醒度と快適度は、風がアロマよりそれぞれ 0.4 と 23.0 の差で低かった。同様に、運転での覚醒度と快適度は、風がアロマよりそれぞれ 0.5 と 21.9 の差で低かった。

さらに、睡眠から運転状態までの快適覚醒変化を見て刺激の効果を確認した。その結果、風とアロマの快適度両方はそれぞれ 0.9 と 3.6 下がった。同様に、風とアロマの覚醒度もそれぞれ 1.0 と 2.5 下がった。

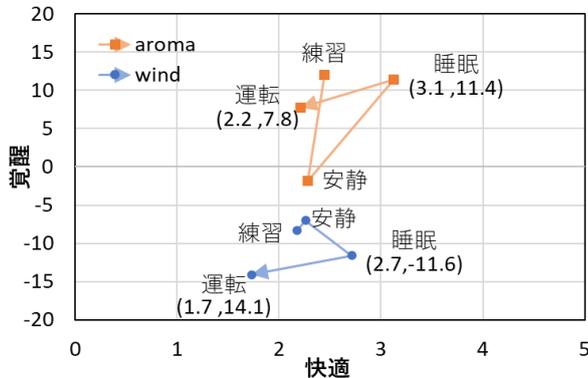


図 10 2次元座標の快適覚醒評価 (実験協力者3)

#### 5.4 主観評価

運転終了後、実験協力者に起きた時と運転した時の快適と覚醒について、SAM 尺度で回答してもらった。表 5 快適度の主観評価結果を示す。表 6 は覚醒度の主観評価を示す。運転時の覚醒度について、実験協力者 1,3 は、それぞれ 1 と 2 の差で風がアロマより高かった。運転時の覚醒度について、実験協力者 1,2,3 は、風がアロマと同じ結果である。また、起きた時から運転時までの変化を確認すると、快適度の結果では、実験協力者 2 の快適結果のみ差があり、風はアロマより 2 倍快適度が下がった。一方で、覚醒度の結果では、全ての実験協力者の結果は差がなかった。

表 5 主観評価 (快適)

	風		アロマ	
	起きた時	運転時	起きた時	運転時
実験協力者 1	6	6	5	5
実験協力者 2	5	1	3	1
実験協力者 3	5	5	3	3

表 6 主観評価 (覚醒)

	風		アロマ	
	起きた時	運転時	起きた時	運転時
実験協力者 1	5	5	5	5
実験協力者 2	1	1	1	1
実験協力者 3	3	3	3	3

## 6. 議論

実験結果について次の通り議論を述べる。

### (1) 個人に適した評価指標について

実験の結果では、実験協力者毎に複数の生理指標 (脳波と心拍変動指標) を用いて主成分分析を行い、第一主成分負

荷量を算出して、新たな快適指標と覚醒指標の式を作成して、指標毎の第一主成分負荷量を比較した。その結果、脳波指標では、実験協力者 1, 2, 3 それぞれ第一主成分負荷量が高い指標が異なる結果となった。具体的には、風の場合は、実験協力者 1, 2, 3 それぞれ  $\beta/\alpha$ ,  $\beta$  波含有率,  $\alpha$  波含有率である、アロマの場合は、実験協力者 1, 2, 3 それぞれ  $\beta/\alpha$ ,  $\alpha$  波含有率,  $\alpha$  波含有率であり、最も大きい負荷量の結果は明らかに差があった。このことは、単一指標で評価した場合、人により必ずしも評価指標に適合しないケースが存在することを示す。主成分分析を行うことで、どの人にとっても、複数指標の中から最適な指標と重みで評価できることが示唆された。

また、同じ人でも、異なる刺激 (アロマ, 風) による実験データを分析することによって、第一主成分負荷量が高い指標が異なる。例えば、実験協力者 1 において、風の場合は、 $\beta/\alpha$  が最も高い負荷量を持つが、アロマの場合は  $\alpha$  波含有率が最も高い負荷量を持つ。主成分負荷量が大いほど、各変数とその主成分に与える影響力が大きいのことを表す。したがって、人によって最も高い第一主成分負荷量が異なるということは、人によって有効な指標が異なることを示す。つまり、先行研究[19,21]で述べたように生理反応の個人差があることが示された。

一方で、心拍変動指標は、ほとんどの指標が第一主成分負荷量が高い結果となった。また、同じ刺激の場合、最も高い第一主成分負荷量を持つ指標が一致する結果となった。このことから、心拍変動指標については、指標の差は見られないことが指摘できる。その理由として、使用した pNNx はお互いに高い相関を持つことが挙げられる。このことから、今後、同じ RRI から算出した指標であっても、相関性が低い RMSSD などの指標を検討することが望ましい。

また、式を用いて 4 つの区間 (練習, 安静, 睡眠, 運転) における生理指標の平均を代入して統合した快適と覚醒を算出して、単一の指標と比較した。その結果、統合した指標は主成分負荷量が高い指標の結果と同じ傾向であった。一方で、主成分負荷量が低い指標は全く同じ傾向ではない。主成分負荷量が高いから低い順に一致する傾向が下がる。このことから、複数の指標の主成分負荷量により一つの指標に統合して評価すると、単一指標より情報を多く持つが、有効性が低い指標は総合な評価に影響ないと考えられる。そのため、提案した手法が生理指標による個人差の問題を対応できる可能性があると考えられる。

### (2) 快適覚醒評価の方法について

統合した快適と覚醒指標を組み合わせて 2 次元座標を作る評価について、実験協力者によって、風とアロマによる快適と覚醒の変化が異なることが明らかに見られた。実験協力者 1 の結果において、覚醒の評価のみの場合は、風とアロマ両方睡眠から運転状態までの覚醒が高くなったが、風はアロマより 2 倍高くなった。また、運転での覚醒度は、風が

アロマより 1.7 の差で高かった。この結果は、主観評価結果と一致しないが、アンケート結果によると実験協力者 1 のみ、覚醒後眠気はなく、より覚醒な状態で運転を開始した。また、快適評価は、睡眠から運転状態までは、風の快適度は変化しないが、アロマは 0.8 上がった。本結果は、アロマの主観評価と一致しないが、アンケート結果によると、開始前より眠気は覚めた・疲労感なし・気分は練習走行との違いなしという結果なので、快適になるという結果と一致したと考えられる。今回の実験では、睡眠・運転中に、主観評価を取得できなかったため、提案した指標の精度を検証できなかったが、アンケートの結果に基づいて対案した統合指標は評価できる可能性があると考えられる。

主観評価の結果では、起きた時と運転時の快適度と覚醒度の評価は変化がなかった。原因として、実験終了後に評価し、直感で回答できなかったから正確に回答ができていない可能性がある。

### (3) その他の課題

今回の実験ではいくつかの問題点があった。まず、ドライバが睡眠した時の判断について第三者による主観的な評価を用いたため、2 つの刺激を与える前の状態が同じではない可能性がある。また、実験する際に、車内に様々なセンサーを使用したため、脳波と心拍変動の計測に影響が及ぼされた。さらに、今回は 3 人の実験協力者のデータのみ分析した。今後、実験設計や指標の精度の評価方法を改善し、実験協力者の人数を増やす必要がある。

## 7. まとめ

本研究では、快適覚醒を評価することを目的に、主成分分析を用いて快適と覚醒それぞれ心拍変動と脳波指で評価する手法を示した。また、有効性を検証するために自動運転のドライビングシミュレータを用いて睡眠したドライバを風とアロマ 2 つの刺激で覚醒し、ドライバの快適と覚醒の変化を調査した。その結果、生理指標による個人差を確認することができた。また、複数の指標を統合して評価することで生理指標による個人差の問題を対応できる可能性があることが示唆された。主観評価の取得方法の問題で、提案した評価方法の評価精度を検証することができなかったが、アンケート結果と比べて評価できる可能性があることがわかった。今後は実験設計や指標の精度の評価方法を改善し、実験協力者の人数を増やす予定である。

## 参考文献

[1] “令和 3 年における交通事故の発生状況等について”, <https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/jiko/R03buns eki.pdf>, (参照 2022-05-12).

[2] SAE: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicle, J3016-201609.2016.

[3] T. Hirose, D. Kitabayashi, and H. Kubota. Driving Characteristics of Drivers in a State of Low Alertness when an Autonomous System

Changes from Autonomous Driving to Manual Driving. SAE Technical Paper. 2015, 2015-01-1407.

[4] A.B. Ünal et al.. Driving with music: Effects on arousal and performance. *Transportation Research Part F*.2013, vol.21, p. 52–65.

[5] H. Cai, Y. Lin, and R. Mourant. Study on Driver Emotion in Driver-Vehicle-Environment Systems Using Multiple Networked Driving Simulators. *Driving Simulation Conference*. 2007, p.1-9.

[6] Zimasa, T., Jamson, S. and Henson, B. Are happy drivers safer drivers? Evidence from hazard response times and eye tracking data’. *Transportation research. Part F. Traffic psychology and behaviour*. 2017, vol.46, p. 14–23.

[7] Jeon, M., Walker, B. N. and Yim, J.-B.. Effects of specific emotions on subjective judgment, driving performance, and perceived workload. *Transportation research. Part F. Traffic psychology and behaviour*. 2014, vol.24, p. 197–209.

[8] Du, N. et al.. Examining the effects of emotional valence and arousal on takeover performance in conditionally automated driving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.2020, vol.112, p. 78–87.

[9] M. Ramzan, H. U. Khan et al.. A Survey on State-of-the-Art Drowsiness Detection Techniques," in *IEEE Access*. 2019, vol. 7, p. 61904-61919.

[10] Johnson, R. R. et al. Drowsiness/alertness algorithm development and validation using synchronized EEG and cognitive performance to individualize a generalized model. *Biological psychology*.2011, vol. 87, no. 2, p. 241–250.

[11] Majumder, S. et al. On-board Drowsiness Detection using EEG. *Current Status and Future Prospects*. 2019, p. 483–490.

[12] Eoh, Hong J., et al.. Electroencephalographic study of drowsiness in simulated driving with sleep deprivation. *International journal of industrial ergonomics*.2005, vol. 35, no. 4, p. 307–320.

[13] 阿部 晃大, 古谷 涼, 伊東 敏夫.自動運転時のドライバ覚醒維持を目的とした 各種タスク効果の脳波解析による比較. 2018,49 巻 2 号,p.422-427.

[14] 鐘声郭., 元基小竹, 実鎌田.室内空間における覚醒度および熱的快適感の違いによる自律神経系指標と中枢神経系指標の類似性と相違性. *日本機械学会論文集*. 2017, vol. 83, no. 849, p. 16–00516 – 16–00516.

[15] Shaffer, Fred, and J. P. Ginsberg.. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*.2017, vol. 5, p. 258.

[16] Ikeda, Yuhei, et al.. Estimating Emotion with Biological Information for Robot Interaction. *Procedia Computer Science*. 2017, vol. 112, p. 1589–600.

[17] James A. Russell. A Circumplex Model of Affect. *Journal of Personality and Social Psychology*.1980, vol.39, no.6, p.1161-1178.

[18] 林 亮輔, 川上 洋平, 菅谷 みどり.運転時の漫然状態推定における生体計測手法. *研究報告ユビキタスコンピューティングシステム(UBI)*. 2019, vol. 2019-UBI-62, no. 4, p.1-10.

[19] Miyake, S. Multivariate Workload Evaluation Combining Physiological and Subjective Measures. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*. 2001, vol. 40, no. 3, p. 233–38.

[20] 三宅 晋司. 商品開発・評価のための生理計測とデータ解析ノウハウ～生理指標の特徴, 測り方, 実験計画, データの解釈・評価方法～. *エヌティーエス*.2017.308p

[21] Jadram, Narumon, et al.. Preliminary Experiment for Driver’s Comfortable State Using EEG and HRV During Semi-Autonomous Driving. *Advances in Human Aspects of Transportation*, Springer International Publishing. 2021, p. 373–81.

[22] 印藤智一, 菅原俊継, ほか.. New stress markers by analyzing heart rate variability. *北海道科学大学研究紀要 = Bulletin of Hokkaido University of Science*. 2020, vol.48, p. 133–140.

[23] P.J. Lang, M.M. Bradley, and B.N. Cuthbert.. *International affective picture system (IAPS)*. Affective ratings of pictures and instruction manual. *Technical Report*.2017, p. 1–4