

運転時における身体的および精神的疲労で 変化する脳活動とその脳機能回路の評価

稲垣 圭一郎

Evaluation of brain activity and its brain functional circuitry altered by physical and mental fatigue during driving

Keiichiro Inagaki*

Fatigue is one of the crucial factors in human error-related traffic accidents. Despite the development of highly advanced intelligent transport systems, fatigue-related traffic accidents have not decreased. The factors inducing driver fatigue are classified into mental and physical categories. Physical fatigue results from muscle strain due to prolonged driving and operations. Mental fatigue, on the other hand, results from the continuous mental effort required for driving, including repeated perception and decision-making regarding driving situations and route planning. Monitoring driver fatigue can help prevent fatigue-related traffic accidents. Therefore, researchers have studied its relationship with various biomarkers such as sleep state, eye movement, facial expression, and electroencephalography (EEG) activation levels. Moreover, studies have revealed the relationship between fatigue and cognitive performance, which is affected by factors such as extended periods of driving. Furthermore, the strategy, quantity, and quality of driving operations and perception differ in various traffic environments. For instance, driving stress levels vary depending on factors such as the number of vehicles on the road, traffic congestion, and road conditions. However, the brain activity associated with mental and physical workload due to the traffic environment and its factors remains unknown. In particular, the relationship between mental and physical stress resulting from varying levels of operation and perception in different driving environments, the accumulation of driver fatigue caused by such stress, and the related brain activity are still unclear. In this study, we focused on investigating the mental and physical workload that accumulates in drivers and induces physical and mental fatigue, as well as the related brain activity and its functional connectivity caused by different traffic environments. The results confirmed differences in theta- and alpha-band spectral responses, which are associated with driver fatigue, across different traffic environments. Especially, difference of theta-band functional connectivity was observed in brain region related to special perception. Further examination of the causal relationship showed that mental and physical workload were associated with fatigue-related spectral responses depending on the traffic environment. These findings imply that the level of cognitive and operational load inherent in driving environments plays a crucial role in driver fatigue.

Keywords : Functional connectivity, Phase lag index, EEG, Perception, Driving

1. はじめに

近年、高度道路交通システム（ITS）技術は著しく進歩しており、特に AI 技術が関与するものは目覚ましい発展を遂げている。このような近年の ITS 技術の発展により、道路上に設置されたセンサーを活用し、他車両や障害物の状況を認識することで、ドライバーの行動を通信によりリアルタイムに支援するシステムなど道路における運転支援システムの導入と高度化が進んでいる。また、高度に発達した AI を活用した危険物検知や自動運転など、交通事故防止を目的とした様々な自動車技術も導入されている。しかしながら、こうした ITS 技術の進歩にもかかわらず、交通事故は未だ後を絶たない。交通事故要因のなかでもヒューマンエラーによる事故は、現在の ITS 技術をもってしても防ぐことが困難であり、さらには死亡事故や重大事故につながる事が多く、大きな社会問題となっている。

ヒューマンエラーによる交通事故の主な原因は、脇見運転、不適切な運転操作、誤認、安全不確認などである。これらのヒューマンエラーは、同乗者による運転者の集中力の変動^{1),2)}、睡眠不足や疲労による運転者の心身機能の低下³⁻⁵⁾、単調な道路環境での長時間運転などの走行環境要因⁶⁻⁹⁾など、いくつかの要因に分類できる。なかでも疲労は重要な研究テーマであり、自動車運転だけでなく、列車^{10),11)}や航空機の運航^{12),13)}でも問題となっている。前述の ITS に関する研究・技術開発が進んでいるにもかかわらず、疲労に起因する交通事故は減少していない⁵⁾。自動車の運転と疲労に関する先行研究では、運転手の疲労要因を精神的なものや身体的なものに分類している^{14),15)}。身体的疲労は、長時間の運転による筋緊張^{16),17)}、アクセル、ブレーキ、ハンドル操作などの運転中の操作、睡眠不足による身体能力の低下によって引き起こされる。一方、精神的疲労は、運転状況や経路計画に関する認知・知覚処理や意思決定など運転における精神的努力の蓄積によって生じる^{4),18-20)}。

疲労に関連する交通事故は運転者の疲労をモニタリングすること事前に防止できる可能性がある。これまでに、覚醒状態^{5),20),21)}、眼球運動²²⁻²⁵⁾、表情^{26),27)}、脳波（EEG）活性化レベル^{14),28-32)}、脳内の機能的結合³³⁻³⁵⁾など、さまざまなバイオマーカーとの関係が研究されている。こうしたのバイオマーカーのうち EEG は、疲労に関連する脳活動の変化だけでなく、運転行動との関係も同時に評価できるため、有用な指標と考えられている²⁸⁾。これまでの研究では、ドライバーの疲労の増加と関連して、脳波のデルタおよびシータ活動³⁶⁾、シータ～アルファ帯域活動^{14),37)}、アルファ帯域活動^{38),39)}の増加が報告されている。運転中の精神的疲労に焦点を当てた研究では、デルタ、シータ、アルファ帯域の活動が増加していることが示されている⁴⁰⁻⁴²⁾。Tran らは、精神的疲労に関してシータおよびアルファ帯域のスペクトル応答で大きな増加を示し、デルタおよびベータ帯域では小さい増加を示すと報告している⁴³⁾。このように、精神的疲労を含む運転疲労が、EEG の周波数スペクトルのシータからアルファの帯域に観測されることが知られているが、そのような疲労を引き起こす具体的な運転要因には、不明な点が多い。

単調な環境での長時間の運転⁶⁻⁸⁾や睡眠不足^{5),20),21)}などの要因によって影響を受ける疲労と認知能力の関係は、ドライビングシミュレータや実車両での研究によって明らかにされている。しかしながら、運転操作の量や認知の質は、都市部や高速道路などの交通環境によって異なる。例えば、単調な環境で長時間運転すると運転者の疲労が生じることは広く報告されている。さらに、運転ストレスのレベルは、交通量、混雑、道路状況などの運転条件の違いによって影響を受ける可能性がある⁴⁴⁻⁴⁷⁾。このような背景の中で、特に、運転環境の違いによる操作や認知のレベルの違いから生じる精神的・身体的負荷や、そのようなストレスの蓄積によるドライバーの疲労に関連する脳活動は未知のままである。

本研究の目的は、異なる交通環境運転時のドライバーの精神的・身体的作業負荷と、それらに関連する脳活動を調査することである。本研究では、ドライビングシミュレータを用いて交通環境と交通密度を変化させた環境運転における脳波計測により、これら进行评估した。具体的には、市街地、渋滞、高速道路における運転シナリオを、認知的小および操作的要求のレベルを変えて再現し、認知的小および運転的要求が疲労に及ぼす影響と、それに関連する運転中の脳波応答を調査した。さらに、脳波応答は、スペクトル解析ならびに Phase Lag Index(PLI)による機能結合解析で評価し、さらにそれらとの因果関係を評価するため

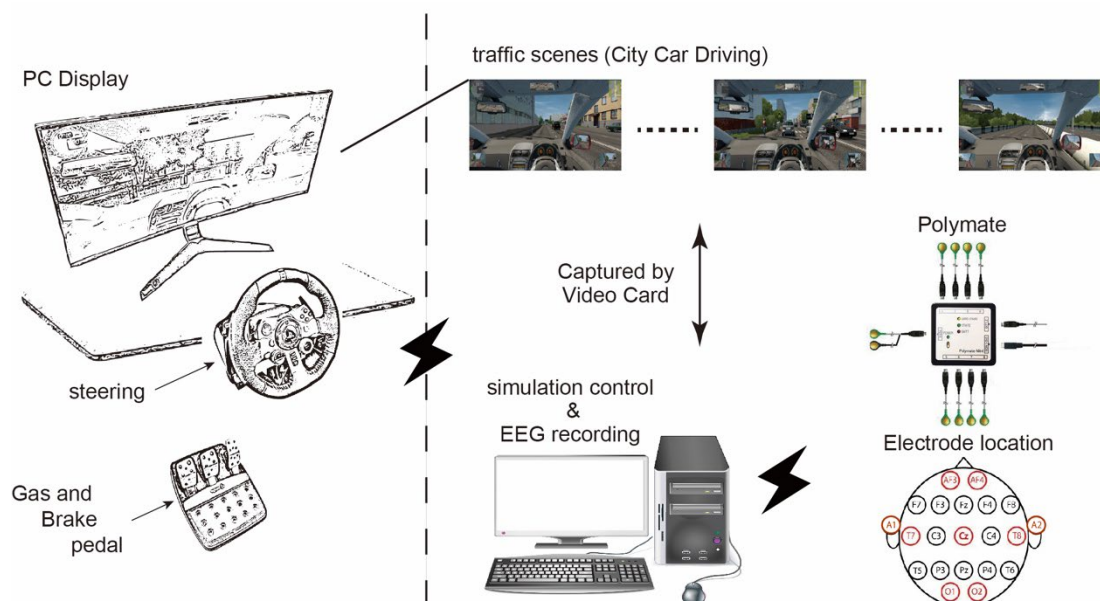


Figure1 Experimental setup and electroencephalography (EEG) recording system during driving simulations. The experimental setup consisted of a personal computer (PC) display, stereo speakers, a steering controller, gas and brake pedals, a high-performance PC for data collection, traffic scene capture, and driving simulator control, an adjustable driver's seat, and an EEG recorder. A 9-channel EEG setup with electrodes was placed at 7 sites (AF3, AF4, T7, T8, Cz, O1, and O2) covering the entire brain area, along with two reference sites (A1 and A2) according to the International 10–20 electrode positioning system. City Car Driving was used as the driving simulator. 文献 65 より抜粋

に、NASA-TLX⁴⁸⁾を用いた作業負荷評価、疲労に関するアンケート、および運転実験中の認知・操作行動の分析を行った。

2. 実験方法

2.1. 実験参加者

実験には、19 歳から 23 歳（平均年齢 21.5 ± 0.87 歳）で運転免許を持つ男性 12 名が参加した。参加者は全員、健康状態や神経学的な問題はなく、運転免許証に記載されているように、眼鏡やコンタクトレンズによる強制視力が正常視力であった。実験に先立ち、各参加者に実験の目的と詳細を説明し、インフォームド・コンセントを得た。実験前に、カロリンスカ眠気尺度⁴⁹⁾の日本語訳版を用いて覚醒度を評価し、参加者全員が同尺度の覚醒状態の基準を満たすことを確認した。

2.2. 実験環境

図 1 は、脳波計測と運転シミュレーションのための実験セットアップを示している。実験セットアップは、パーソナル・コンピュータ (PC) ディスプレイ (LG 34GL750-B, 1920×1080)、ステレオ・スピーカー、ステアリング・コントローラー、アクセル・ペダル、ブレーキ・ペダル (Logicool G29 Driving Force Feedback Racing Wheel)、データ収集、交通シーンのキャプチャ、シミュレーター制御用の高性能 PC (Intel Core i9 プロセッサー 3.30GHz, 128GB RAM, NVIDIA GeForce RTX3070 8GB VGA カード)、調節可能な運転座席、EEG レコーダー (Polymate AP108, ミユキ技研株式会社) で構成されている。エンジン音はステレオスピーカーから 80dB 以下の音量で発せられるようにした。PC ディスプレイと参加者の頭部との距離は約 60cm で、先行研究^{50),51)}で報告されているように、自動車運転中に観察される機能的視野 (約±20

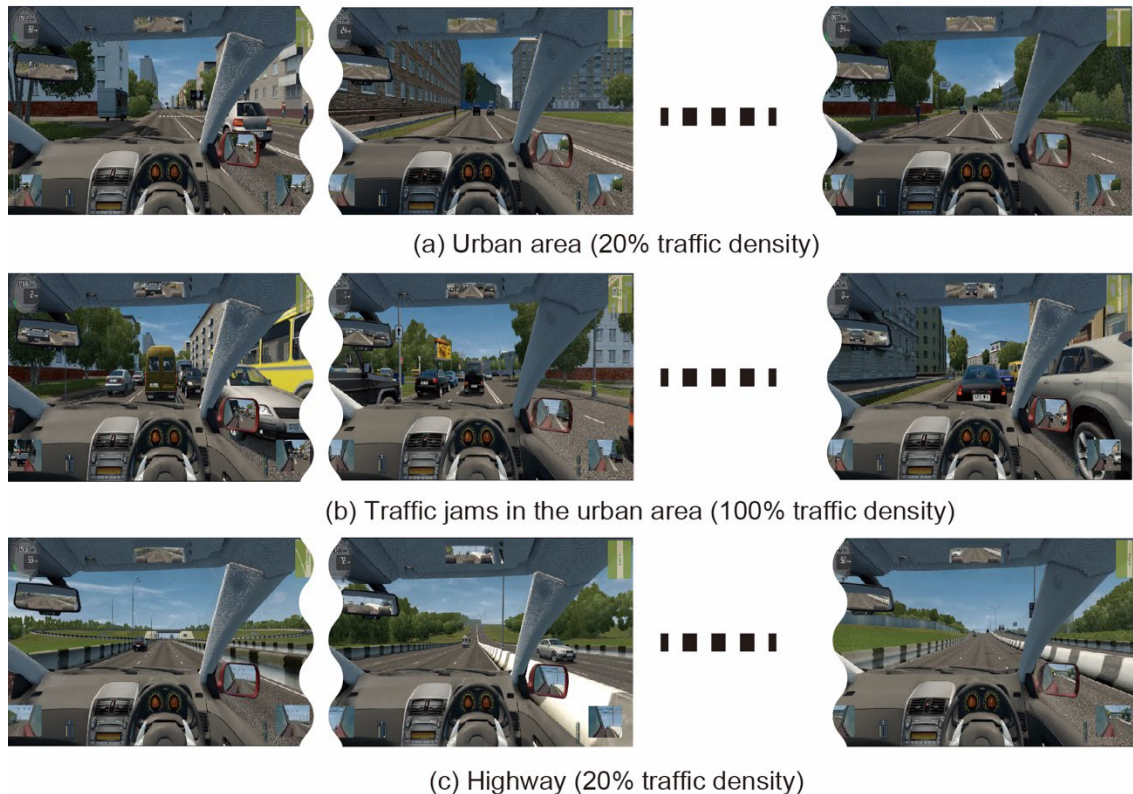


Figure 2. Stimulus scenarios for three different traffic conditions: (a) urban driving with 20% traffic density, (b) congested driving (100% traffic density), and (c) highway driving with 20% traffic density. The duration of driving for each condition was 30 min. 文献 65 より抜粋

度)を包含する約 ± 30 度の視野環境を確保した。

実験では、ドライビング・シミュレーション・ソフトウェアとして「City Car Driving」(Forward Development Ltd.)を使用した。このソフトウェアの交通シーンは、30fpsでPCのディスプレイに映し出した。なお、実験時においてドライビングシミュレータの走行シーンは、ドライバーの知覚と車両操作の事後分析用にビデオカードでキャプチャされた。

2.3. 運転シナリオ

長時間の自動車運転は、精神的疲労と肉体的疲労の両方を引き起こす。図2は、実験で使用した運転シナリオをまとめたものである。運転者の疲労とこれら精神的・身体的要因の因果関係を調べるため、市街地の通常運転、都市部の交通密度の高い場所(渋滞)での運転、通常の交通密度の高速道路での運転の3つの異なる交通状況を用意した。市街地走行では、一般的な交通状況をシミュレートするために交通密度を20%(以下、市街地と呼ぶ)に設定し、渋滞走行(以下、渋滞と呼ぶ)では交通密度を100%に設定した。高速道路走行(以下、高速道路と呼ぶ)については、交通密度を20%に設定した。運転中の疲労は通常、約30分後に生じることが研究により報告されている^{8),52),53)}。したがって、各条件の運転時間は30分とした。

運転シナリオでは、主に運転条件ごとに運転操作と認知量を制御した。具体的には、交通密度20%の市街地走行では、交通シーンへの認知と運転操作が必要であったが、渋滞走行では、アクセル・ブレーキ操作など運転操作が主となり、シーン認知は少なかった。高速道路走行では、道路標識や他車両を探索するためシーン認知は多いものの、ペダル操作やステアリング操作を中心とした運転操作が少なかった。

2.4. 実験プロトコル

ドライビングシミュレータによる実験に先立って、参加者にはシミュレータに慣れさせるためにドライビングシミュレータによる運転を 60 分間実施した。この慣れの段階を経て、参加者には上述の交通シナリオの 1 つを 30 分間運転させた。30 分間のドライビングタスク終了後、参加者には疲労に関するアンケートを回答させた。このアンケートは、疲労の程度を 0 から 100 のスケールで視覚的に評価するもので、スコアが高いほど疲労の程度が高くなるようにした。疲労を公平に評価するため、各運転条件は別日の同時時間帯に実施した。以下に述べるすべての実験手順および脳波計測は、ヘルシンキ宣言に従って実施され、中部大学倫理委員会の承認を得た（プロトコル# 20210016）。

2.5. 脳波計測

参加者には運転席に座り、座席を好みの位置に調整させた。実験中、参加者には交通規則を守り、通常の運転状況と同じように運転するよう指示した。全参加者の脳波を Polymate AP108 を用いて記録した。国際 10-20 法⁵⁴⁾に則って、脳領域全体をカバーする 7 部位（AF3, AF4, T7, T8, Cz, O1, O2）と 2 つの基準部位（A1, A2）からなる全 9 チャンネルで脳波計測を実施した。電極を配置する前に、頭皮の油分による脳波信号の劣化を避けるため、アルコールに浸したペーパータオルで頭皮を拭いた。サンプリング周波数は 500Hz に設定した。疲労に関連する反応が通常この部位で観察されるためフーリエスペクトル解析では、後頭部電極（O2）から測定された EEG 信号に焦点を当てた²⁸⁾。

2.6. 脳波解析

異なる運転環境における精神的・身体的負荷の変動と疲労の発生との因果関係を調べるため、まず、3 つの異なる運転条件それぞれにおいて、精神的負荷に関連する認知量と身体的負荷に関連する運転操作量を分析した。先行研究では、異なるタスク間での疲労発生の質的・量的な差異が報告されている⁵⁵⁾。運転という文脈では、運転者が体験する精神的・身体的負荷は運転環境によって異なる。本研究では、このような点を考慮し、ドライビングシミュレータ実験で撮影された映像データを解析することで、3 つの異なる運転環境における精神的・身体的負荷を推定した。本研究では、精神負荷は、信号、歩行者、横断歩道、標識、他車両などへの認知回数（量）として定義した。身体的負荷は、右左折、車線変更、アクセル・ブレーキペダル操作などの運転に関わる操作量として定義した。

脳波信号の周波数スペクトルを得るために高速フーリエ変換（FFT）を用いた。FFT に先立ち、脳波データをバンドパスフィルタ（4-45Hz、ゼロ位相デジタルフィルター法）により処理した。その後、標準偏差の 3 倍を超える顕著な信号やスパイク状の急峻な信号をアーチファクトとして除去した。無作為に選択された 1 秒のエポックに対してハニング窓処理を施したのち FFT をした。パワースペクトルを計算するために、ドライビングセッションの最初と最後の 2 分間でエポック処理と FFT 計算を 1000 回繰り返した。得られたパワー周波数スペクトルを平均し、以下のように確率分布 $p(k)$ に変換した：

$$p(k) = \frac{s(k)}{\sum_{k=1}^{nyq} s(k)} \quad (1)$$

ここで、 $s(k)$ は周波数 k における平均化されたパワースペクトルであり、 nyq はナイキスト周波数（250Hz）である。なお、最初と最後の 2 分間でエポックの抽出は全データ区間を均等にサンプルするようにした。最後に、運転によって誘発される疲労に関するこれらのスペクトル応答を比較するために、最初の 2 分間から計算されたスペクトル応答から最後の 2 分間から計算されたスペクトル応答を差し引くことによって、シータおよびアルファ帯域のスペクトル応答の変化を決定した。次に、PLI を用いて脳神経回路の機能的結合を評価した。PLI の解析⁶⁶⁾では、脳波に対してバンドパスフィルタを適用し、測定対象となる周波数帯域（ θ 波 α 波 β 波 γ 波）を抜き出した。その後、抽出した各周波数帯域のデータに対してヒルベルト変換を用いて信号の位相を計算することで、2 つの計測チャンネル間の信号の位相差を計算した²⁾。ここで

PLI の計算式を式(2)に示す.

$$PLI_{ab} = \left| \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T \text{sign}(\Delta\phi_{ab}(t_i)) \right| \quad (2)$$

次にチャンネルに結合する入力 of Node degree を解析した. Node Degree は特定の計測チャンネルに入力する全チャンネルの PLI の平均(式(3))で求めることができ, ある脳領域に対するその他の脳領域との結合の強さを定量化することができる.

$$ND_a = \frac{1}{K-1} \sum_{b=1, b \neq a}^K PLI_{ab} \quad (3)$$

本研究では, 疲労を反映することが知られているシータ帯域 (4~8Hz) およびアルファ帯域 (8~13Hz)²⁸⁾で PLI と Node Degree 解析を実施した.

2.7. 身体と精神負荷量の評価

各交通条件での運転実験後, 運転による作業負荷を NASA-TLX 尺度を用いて評価した. NASA-TLX は, 精神的負荷(MD), 身体的負荷(PD), 時間的負荷(TD), パフォーマンス(OP), 努力(EF), フラストレーション(FR)を考慮し, 作業負荷を主観的に評価するものである. 本研究では, まず各指標を 0 から 100 までの範囲で点数化した. このとき点数が高いほど作業負荷が高いこととした. 次に, 各参加者の作業負荷指標を一对比較することにより, 運転課題に対する各指標の寄与度を決定した. この比較には, 6 つの作業負荷指標で 15 組の組合せを用意し, 各組から運転課題の全体的な作業負荷により寄与する指標を選択した. これらの比較における各作業負荷指標の選択頻度を集計し, 各作業負荷指標の重みとし, 加重作業負荷 (WWL) を以下のように算出した.

$$WWL = \frac{\sum_{i=1}^6 (w_i \cdot v_i)}{\sum_{i=1}^6 w_i} \quad (4)$$

ここで, w_i と v_i はそれぞれ, 各ワークロード指標の重みとスコアである.

2.8. 統計量の評価

統計的有意性は paired Student's t-test を用いて評価し, 効果量は Cohen's d⁵⁶⁾で評価した. なお, 統計解析は EZR ソフトウェア⁵⁷⁾を, 効果量の計算には G*power⁵⁸⁾を用いた.

3. 結果

はじめに, 各運転シナリオにおけるドライバーの疲労と誘発される脳波スペクトル応答との関係を調べた. 図 3 および図 4 は, 各運転シナリオにおけるスペクトル応答の変化と, シータ帯域からアルファ帯域のスペクトル応答の平均を示している. 最も大きなスペクトル反応の変化は, 市街地走行中のシータ帯域とアルファ帯域で観察された (0.0032 ± 0.0023). 渋滞走行時にはシータ帯域とアルファ帯域の活動は低下した (0.0016 ± 0.0030). 高速道路走行では, シータ帯域とアルファ帯域で活動が低下した (-0.0004 ± 0.0038). これらの結果を, 各条件について paired Student's t-test を用いて比較した. 市街地走行と高速道路走行では, シータ帯域とアルファ帯域の活動変化に有意差が認められた ($p < 0.01$, Cohen's d = 1.14). 市街地走行と渋滞走行 ($p = 0.066$, Cohen's d = 0.59), 渋滞走行と高速走行 ($p = 0.08$, Cohen's d = 0.59) では有意差は認められなかった.

図 5 は, 各走行シナリオにおける WWL と NASA-TLX の各要因をまとめたものである. WWL の平均値は, 市街地走行 (61.07 ± 11.03) および渋滞走行 (67.00 ± 19.23) において, 高速道路走行 (48.57 ± 13.09) よりも高かった. MD も高速道路走行 (50.45 ± 26.23) より市街地走行 (68.64 ± 10.89), 渋滞走行 (67.73 ± 22.49) で高かった. PD は渋滞走行時 (61.82 ± 27.49) が最も高く, 次いで市街地走行時 (50.00 ± 16.37), 高速道路走行時 (38.18 ± 18.86) の順であった. TD は, 市街地走行 (56.36 ± 23.36) および渋滞走行 (51.82 ± 29.40)

において、高速道路走行 (36.36 ± 16.11) よりも高かった。OP 得点はシナリオ間で同程度であった (市街地: 35.91 ± 23.04 , 渋滞: 37.27 ± 27.58 , 高速道路: 30.45 ± 23.10)。EF 得点は、市街地走行 (77.27 ± 14.82) が渋滞走行 (67.25 ± 25.26) および高速道路走行 (64.09 ± 24.84) よりも高かった。FR 得点は渋滞運転 (74.54 ± 20.27) が最も高く、次いで市街地運転 (65.00 ± 21.11)、高速道路運転 (64.09 ± 16.62) の順であった。WWL および NASA-TLX の各要因の運転シナリオ間の統計学的差異を、paired Student's t-test を用いて評価した。WWL については、市街地走行と高速道路走行 ($p < 0.01$, Cohen's $d = 1.120$)、渋滞走行と高速道路走行 ($p < 0.05$, Cohen's $d = 1.032$) で有意差が確認された。MD では、市街地走行と高速道路走行 ($p < 0.05$, Cohen's $d = 0.908$)、渋滞走行と高速道路走行 ($p < 0.05$, Cohen's $d = 0.706$) で有意差が認められた。PD は、渋滞走行と高速道路走行との間でのみ有意差を示した ($p < 0.01$, Cohen's $d = 1.003$)。TD は市街地走行と高速道路走行との間でのみ有意差が認められた ($p < 0.05$, Cohen's $d = 0.997$)。EF では、市街地走行と高速道路走行との間にのみ有意差が認められた ($p < 0.05$, Cohen's $d = 0.644$)。OP と FR については、どの組み合わせでも有意差は認められなかった。

図 6 は、運転操作と認知量をまとめたものである。運転操作と認知量の合計は、市街地走行 (265.91 ± 31.41) が最も多く、次いで渋滞走行 (213.45 ± 30.93)、高速道路走行 (196.63 ± 14.20) の順であった。すべての組み合わせで有意差が認められた (市街地-渋滞: $p < 0.01$, Cohen's $d = 1.683$, 市街地-高速道路: $p < 0.01$, Cohen's $d = 2.964$, 渋滞-高速道路: $p < 0.05$, Cohen's $d = 0.823$)。市街地走行 (115.00 ± 15.90) および渋滞走行 (122.91 ± 22.33) の運転操作量は、高速道路走行 (80.27 ± 10.76) よりも多かった。市街地走行と高速道路走行 ($p < 0.01$, Cohen's $d = 2.557$)、渋滞走行と高速道路走行 ($p < 0.01$, Cohen's $d = 2.432$) で有意差が認められた。認知量は、市街地走行 (150.91 ± 20.49) が最も多く、次いで高速道路走行 (113.36 ± 6.19)、渋滞走行 (90.54 ± 13.72) の順であった。すべての組み合わせで有意差が認められた (市街地-渋滞: $p < 0.01$, Cohen's

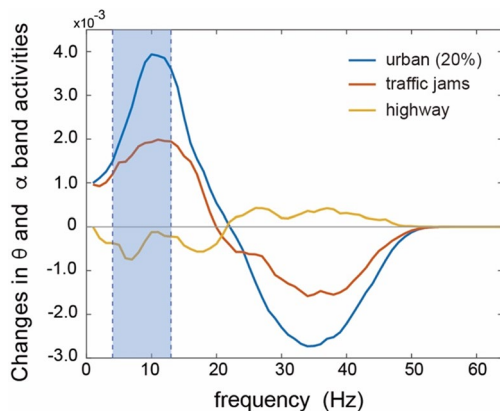


Figure3 Grand averages of the normalized power spectrum between the initial 2 min and the final 2 min of driving in three different traffic conditions. The solid blue, orange, and yellow lines represent urban driving with 20% traffic density, congested driving, and highway driving, respectively. Pale blue areas show theta and alpha-band (4–13 Hz) activities. 文献 65 より抜粋

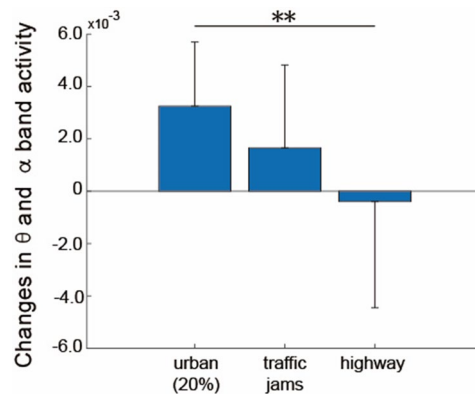


Figure4 Average changes in the theta to alpha-band spectral responses between the initial 2 min and the final 2 min of driving in three different traffic conditions. ** indicates statistical significance ($p < 0.01$), evaluated by Student's t-test. The error bar indicates one standard deviation. 文献 65 より抜粋

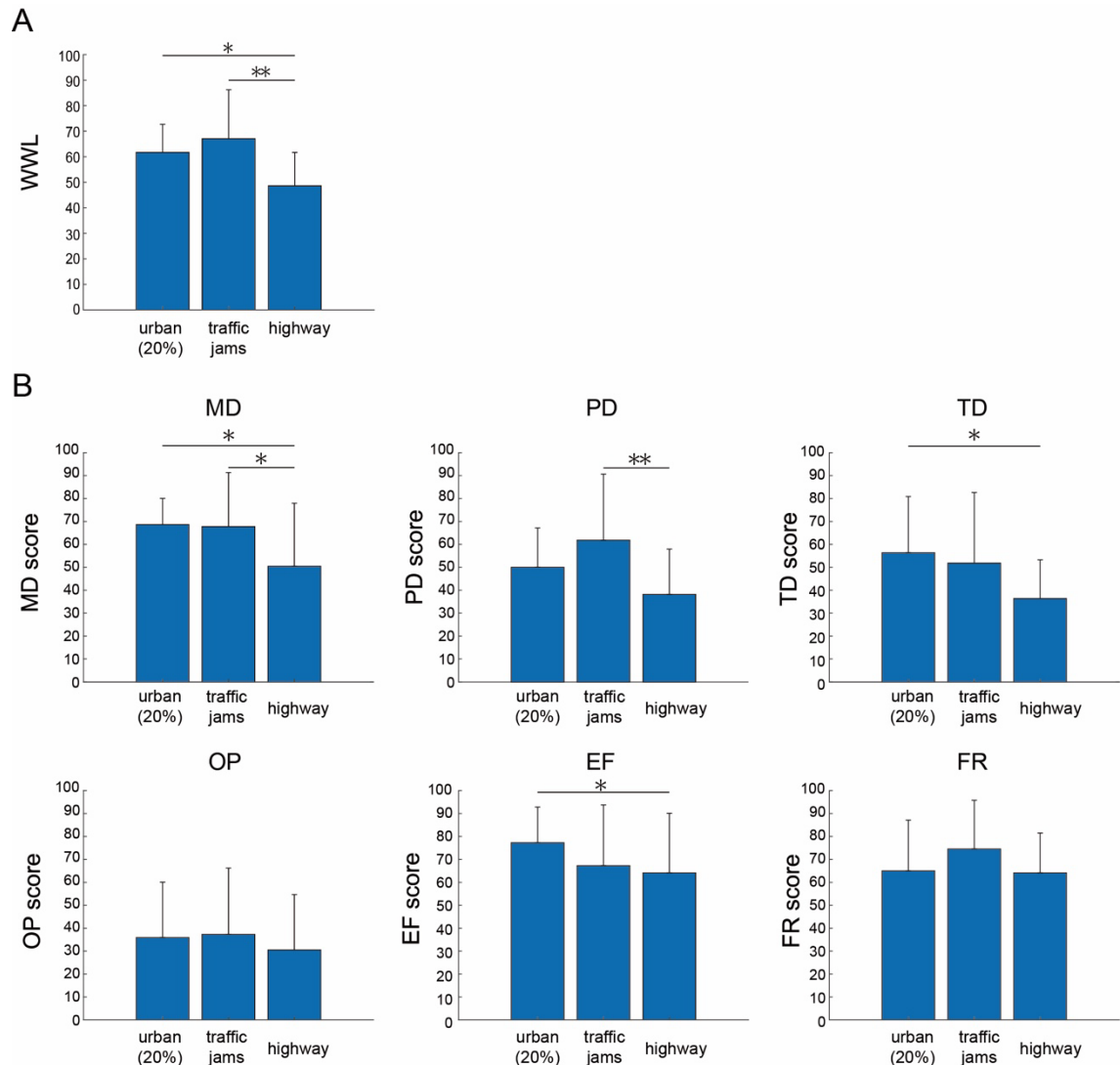


Figure5 The weighted workload (WWL: (A)) and individual scores (MD, PD, TD, OP, EF, and FR, (B)) on the NASA-TLX during driving in three different traffic conditions. * and ** indicate statistical significance ($p<0.05$ and $p<0.01$, respectively), evaluated by Student's t-test. The error bar indicated one standard deviation. 文献 65 より抜粋

$d=3.461$, 市街地-高速道路: $p<0.01$, Cohen's $d=2.480$, 渋滞-高速道路: $p<0.01$, Cohen's $d=2.141$). これらの結果は、の 2.3 節の運転シナリオで述べた運転操作と認知量の関係を裏付けるものである。

図 7 は、WWL と比較したシータバンドとアルファバンドのスペクトル応答の変化、運転操作と認知量とシータ帯域～アルファ帯域のスペクトル応答の変化運転操作と認知量と WWL の散布図をそれぞれ示している。シータおよびアルファ帯のスペクトル反応の変化と WWL との間のピアソンの相関係数は、市街地走行、渋滞走行、高速道路走行でそれぞれ 0.94, 0.90, 0.93 であった。シータおよびアルファ帯のスペクトル反応の変化と、運転操作と認知量との相関係数は、市街地、渋滞、高速道路走行でそれぞれ 0.88, 0.94, 0.90 であった。WWL と運転操作と認知量との相関係数は、市街地走行、渋滞走行、高速道路走行で、それぞれ 0.95, 0.96, 0.95 であった。

図 8 は、各環境運転時の PLI で評価した脳神経ネットワークの機能的結合のうち有意差が確認されたものをまとめたものである。その結果、シータ帯域において左前頭 (AF3)、右側頭 (T8) において高速道路と市街地走行で有意な変化 ($p<0.05$) が確認された。また、右後頭 (O2)、右側頭 (T8) において市街地走行と渋滞において有意な変化 ($p<0.05$) が確認された。

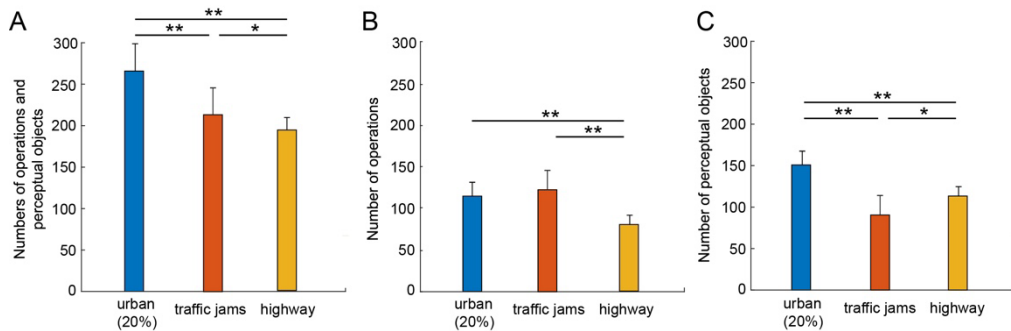


Figure6 Numbers of vehicle operations and perceptions of traffic objects during driving in three different traffic conditions. * and ** indicate statistical significance ($p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively), evaluated by Student's t-test. (A), (B), and (C) represent the total number of operations and perceptions, number of operations, and number of perceptions, respectively. The error bar indicates one standard deviation. 文献 65 より抜粋

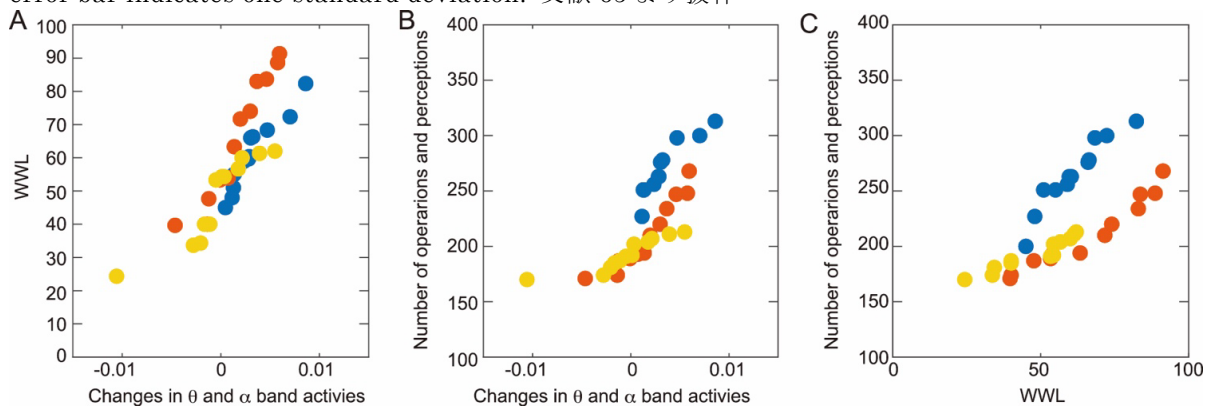


Figure7 Scatter plot showing the relationship between (A) changes in theta- to alpha-band spectral response (initial versus final 2 min of driving) and WWL, (B) changes in theta- to alpha-band spectral responses (initial versus final 2 min of driving) and number of operations and perceptions, and (C) WWL and number of operations and perceptions. Blue, orange, and yellow-filled circles represent the three different traffic conditions urban driving with 20% traffic density, congested driving, and highway driving, respectively. 文献 65 より抜粋

図 9 は、疲労度調査票による疲労度を示している。市街地、渋滞、高速道路のシナリオで参加者が報告した疲労レベルは、それぞれ 72.27 ± 10.52 , 62.27 ± 29.79 , 46.81 ± 18.49 であった。統計的な差は、市街地走行と高速道路走行との間のみ認められた ($p < 0.01$, Cohen's $d = 1.693$)。市街地走行と渋滞走行 ($p = 0.18$, Cohen's $d = 0.451$)、渋滞走行と高速道路走行 ($p = 0.12$, Cohen's $d = 0.621$) では有意差は認められなかった。

4. 考察

本研究では、脳波を用いて、さまざまな運転環境によって誘発される精神的・身体的作業負荷を調査した。ドライビングシミュレータを用いて、認知と運転操作の要求レベルが異なる 3 つの異なる運転条件をシミュレートした。その結果、Lal と Craig¹⁴⁾, Awais ら³⁷⁾が報告したように、3 つの運転条件でシータ帯域とアルファ帯域のスペクトル応答に違いがあることが確認された。特に、市街地走行と渋滞走行において、疲労に関連した増加が認められた。シータ帯域およびアルファ帯域のスペクトル応答、NASA-TLX を用いた主観的作業負荷評価、精神的および身体的作業負荷量に関連する運転操作量および認知量の間にも高い相関が確認された。これらの結果から、運転環境に内在する運転者の知覚や操作に関わる負荷量が、運転者の疲労を誘発する本質的な要因であることが示唆された。

本研究は、疲労の指標となるシータ帯域およびアルファ帯域のスペクトル応答と、異なる運転条件下に

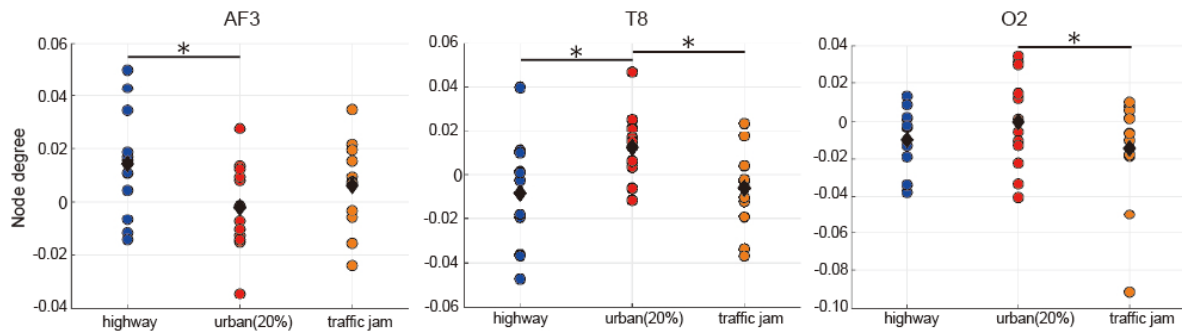


Figure 8 Strength of connectivity of brain network for AF3, T8 and O2 in driving different condition. * indicates statistical significance ($p < 0.05$), evaluated by Student's t-test.

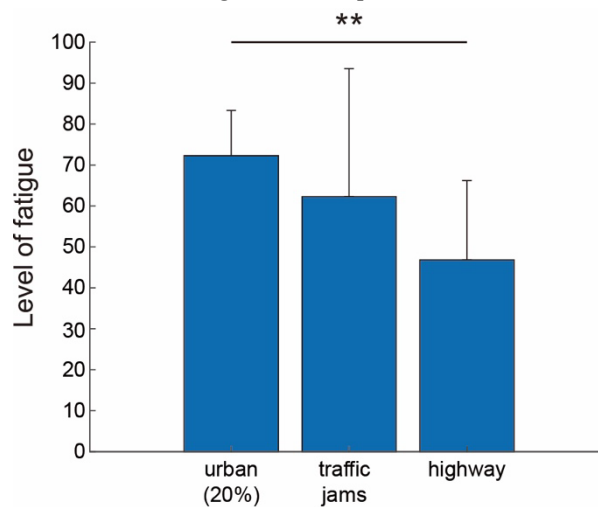


Figure9 Levels of fatigue assessed using a questionnaire during driving in three different traffic conditions. ** indicates statistical significance ($p < 0.01$), evaluated by Student's t-test. The error bar indicates one standard deviation. 文献 65 より抜粋

における運転操作と認知量との関係性を評価した。ここでは、これらのスペクトル応答と、異なる運転環境における運転操作や認知といった身体的要求や精神的要求との因果関係について考察する。これまでの研究で、精神的疲労は、運転状況に関する知覚的評価と意思決定を繰り返すために必要な精神的努力から生じることが示されており^{4),18-20)}、一方、身体的疲労は、ペダル操作やステアリング操作などの動作に伴う累積的な身体的努力から生じることが示されている^{16),17),20)}。疲労の発生は、質的および量的なタスク関連因子の両方と密接に関連している⁵⁾。本研究では、認知および運転操作量の累積負荷(図6左)は、シータおよびアルファ帯スペクトル活動の変化と類似した傾向を示すとともに、高い相関を示した(図4および図7)。しかしながら、運転操作や認知量を個別に検討した場合には、このような類似性は認められなかった(図6中、右)。したがって、認知と運転操作に関する負荷評価が、異なる運転条件下におけるドライバー疲労の定量化につながるものと考えられる。本研究でシミュレートした運転条件では、市街地走行では運転状況の認知と運転操作の両方が必要であったが、渋滞走行では主に運転操作が必要であった。一方で、高速道路運転では、高い認知負荷が必要であった。これらの結果は、認知と運転操作の双方に対する要求が最も高い市街地走行で疲労が生じやすいことを示唆している。さらに、渋滞運転における疲労の主な原因は運転操作に伴う身体的ストレスであるのに対し、高速道路運転における疲労の主な原因は認知活動に伴う精神的ストレスであることも併せて示唆された。

次に、NASA-TLX スコアを用いて、異なる交通環境におけるシータ帯域およびアルファ帯域のスペクトル応答の変化と主観的作業負荷評価との関係を調べた。NASA-TLX から得られる WWL は、タスクの

複雑さや難易度に基づいて疲労を反映し、スコアが高いほど疲労が増加する⁵⁵⁾。平均 WWL は、図 4 に示されるように、疲労を示すシータ帯域およびアルファ帯域のスペクトル応答、ならびに認知および運転操作量と高い相関があった（図 6, 左）。図 5 の結果から、市街地走行では MD, PD ともに高く、渋滞走行では PD が顕著であり、高速道路走行では MD が高くなることが確認された。これらの要求の累積負荷は、それぞれの運転環境の複雑さ、困難さを反映していると推測される。こうした傾向は、シータ帯域とアルファ帯域のスペクトル応答にも反映されている。さらに、各運転条件の NASA-TLX スコアを分析した結果、MD と PD の両方が、渋滞時の運転で高くなることがわかった。市街地走行では、MD と PD は高いままであったが、PD は渋滞走行よりわずかに低かった。最後に、高速道路走行では MD が PD を上回った。これらの結果から、市街地走行では精神的負荷と身体的負荷の両方が疲労に寄与していることが示唆された。また、高速道路走行では精神的負荷が主に疲労に寄与していることも示唆された。渋滞運転時では、MD と PD スコアは総じて高く、今回のスペクトル応答や運転操作量、認知量とは傾向が異なっていた。また、一対比較で求めた WWL の重みを調査した結果、NASA-TLX の FR 成分は、MD や PD に比べて渋滞時の WWL への寄与が大きかった。したがって、WWL の傾向は、渋滞のスペクトル応答や運転操作量、認知量とは異なる可能性がある。また、渋滞時の運転者のストレスは様々な要因が絡むことが報告されており[59]、FR 得点に比べ MD や PD の寄与が少ない本結果は、主観的な NASA-TLX の評価で観察されたように、運転者間のばらつきを反映している可能性がある。

最後に、各環境走行時の脳神経機能ネットワークを PLI 解析で評価したところ、シータ帯域において左前頭（AF3）、右側頭（T8）において高速道路と市街地走行で有意な変化が、右後頭（O2）、右側頭（T8）において市街地走行と渋滞において有意な変化が確認された。これら領域は、認知活動や視覚情報処理に関与することが知られているが、他周波数領域における機能結合との関係などをより深く調査し、さらなる脳機能との評価を進めることでより詳細な脳機能とそれに関与する機能ネットワークにおける疲労の影響を評価できるものと考えられる。

謝辞

本研究は中部大学先端研究センター 2024 年度プロジェクト 4 の援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Vollrath M, Meilinger M, Krüger H., How the presence of passengers influences the risk of a collision with another vehicle. *Accident Analysis & Prevention*, (2002) 34:649-654.
- 2) Sheykhsfard A, Haghighi F, Das S. How does talking with passengers threatens pedestrian life? An analysis of drivers' performance based on real-world driving data. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, (2023) 95:464-479.
- 3) Otmani S, Pebayle T, Roge J, Muzet A. Effect of driving duration and partial sleep deprivation on subsequent alertness and performance of car drivers. *Physiology & behavior* (2005) 84:715-724.
- 4) May JF, Baldwin CL. Driver fatigue: the importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* (2009) 12:218-224.
- 5) Sprajcer M., Dawson D, Kosmadopoulos A, Sach EJ, Crowther ME, Sargent C, Roach GD. How Tired is Too Tired to Drive? A Systematic Review Assessing the Use of Prior Sleep Duration to Detect Driving Impairment. *Nature and Science of Sleep* (2023) 15:175-206.
- 6) Schmidt EA, Schrauf M, Simon M, Fritzsche M, Buchner A, Kincses WE. Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident Analysis & Prevention* (2009) 41:1087-1093.
- 7) Larue GA, Rakotonirainy A, Pettitt AN. Driving performance impairments due to hypovigilance on monotonous

roads. *Accident Analysis & Prevention* (2011) 43:2037-2046.

8) Zhang Y, Ma J, Zhang C. et al. Electrophysiological frequency domain analysis of driver passive fatigue under automated driving conditions. *Sci Rep* (2021) 11:20348.

9) Ma J, Gu J, Jia H, Yao Z, Chang R. The Relationship Between Drivers' Cognitive Fatigue and Speed Variability During Monotonous Daytime Driving. *Front. Psychol.* (2018) 9:459.

10) Fan C, Peng Y, Peng S, Zhang H, Wu Y, Kwong S. Detection of Train Driver Fatigue and Distraction Based on Forehead EEG: A Time-Series Ensemble Learning Method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System* (2022) 23:13559-13569.

11) Fan C, Huang S, Lin S, Xu D, Peng Y, Yi S. Types, Risk Factors, Consequences, and Detection Methods of Train Driver Fatigue and Distraction. *Comput Intell Neurosci.* (2022) 2022.

12) Hu X, Lodewijks G. Detecting fatigue in car drivers and aircraft pilots by using non-invasive measures: The value of differentiation of sleepiness and mental fatigue. *J Safety Res.* (2020) 72:173-187.

13) Hamann, A., Carstengerdes, N. Assessing the development of mental fatigue during simulated flights with concurrent EEG-fNIRS measurement. *Sci Rep* (2023)13: 4738.

14) Lal SKL, Craig A. A critical review of the psychophysiology of driver fatigue. *Biological Psychology* (2001) 55:173-194.

15) Zeng C, Mu Z, Wang Q. Classifying Driving Fatigue by Using EEG Signals. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022.

16) Sabir AA, Isha ASNB. Assessing the Fatigue Related Psychological Risk Factors among Oil and Gas Tankers Drivers in Malaysia", *International Review of Management and Marketing* (2016).6:138-142.

17) Ospina-Mateus H, Jimenez LAQ. Understanding the impact of physical fatigue and postural comfort experienced during motorcycling: A systematic review. *Journal of Transport & Health* (2019) 12:290-318.

18) Grandjean E. Fatigue in industry. *Br.J.Ind.Med.* (1979) 36:175-186.

19) Gastaldi M, Rossi R, Gecchele G. Effects of driver task-related fatigue on driving performance. *Procedia-Social and Behavioural Sciences* (2014) 111:955-64.

20) Ahn S, Nguyen T, Jang H, Kim JG, Jun SC. Exploring Neuro-physiological correlates of drivers' mental fatigue caused by sleep deprivation using simultaneous EEG, ECG, and fNIRS data. *Frontiers in human neuroscience* (2016) 10.

21) Yang JH, Mao S, Tijerina L, Pilutti T, Coughlin JF, Feron E. Detection of driver fatigue caused by sleep deprivation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part A: Systems and humans* (2009).39:694-705.

22) Xu J, Min L, Hu L. Real-time eye tracking for the assessment of driver fatigue. *Healthc. Technol. Lett.* (2018) 5:54-58.

23) Di Stasi L, Renner R, Catena A, Andres C, Calais JJ, Velichkovsky BM, Pannasch S. Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data. *Transportation research part C: emerging technologies*, (2012) 21:123-133.

24) Kurosawa Y, Mochiduki S, Hoshino Y, Yamada M. Measurement of Fatigue Based on Changes in Eye Movement during Gaze. *IEICE TRANS. INF. & SYST.*, (2020) 5:1203-1207.

25) Lyapunov SI, Shoshina II, Lyapunov IS Tremor Eye Movements as an Objective Marker of Driver's Fatigue. *Hum Physiol* (2022) 48:71-77.

26) Tianjun Z, Zhang C, Wu T, Ouyang Z, Li H, Na X, Liang J, Li W. Research on a real-time driver fatigue detection algorithm based on facial video sequences. *Applied Science* (2022) 12

27) Li D, Zhang X, Liu X, Ma Z, Zhang B. Driver fatigue detection based on comprehensive facial features and gated recurrent unit. *Journal of Real-Time Image Processing* (2023) 20.

28) Lal SKL, Craig A. Driver fatigue: psychophysiological effects. *The Fourth International Conference on Fatigue and Transportation*, (2000) Australia.

- 29) Zuraida R, Iridiastadi H, Sitalaksana IZ, Suprijanto S. An analysis of EEG changes during prolonged simulated driving for the assessment of driver fatigue. *Journal of Engineering and Technological Sciences* (2019) 51:290-302.
- 30) Li W, He Q, Fan X, Fei Z. Evaluation of driver fatigue on two channels of EEG data. *Neuroscience letters* (2012) 506:235-239.
- 31) Wang H, Dragomir A, Abbasi NI, Li J, Thakor NV, Bezerianos A. A novel real-time driving fatigue detection system based on wireless dry EEG. *Cognitive neurodynamic* (2018) 12:365-376.
- 32) Tian Y., Cao J. Fatigue driving detection based on electrooculography: a review. *J Image Video Proc.* (2021) 33.
- 33) Chen J, Wang H, Wang Q, Hua C. Exploring the fatigue affecting electroencephalography based functional brain networks during real driving in young males. *Neuropsychologia* (2019) 129:200-211.
- 34) Li G, Wang J, Xu W, Wu K, Liu Y, Bezerianos A, Sun Y. Self-Regulation Phenomenon Emerged During Prolonged Fatigue Driving: An EEG Connectivity Study. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* (2023) 31:4895-4906.
- 35) Wang H et al., Dynamic Reorganization of Functional Connectivity Unmasks Fatigue Related Performance Declines in Simulated Driving. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* (2020) 28: 1790-1799.
- 36) Lal SKL, Craig A. Driver fatigue: electroencephalography and psychological assessment. *Psychophysiology*, (2002), 39(3):313-321.
- 37) Awais, M, Badruddin N, Drieberg, M. Driver drowsiness detection using EEG power spectrum analysis. 2014 IEEE REGION 10 SYMPOSIUM, (2014), 244-247.
- 38) Zhang, Y, Ma, J, Zhang, C, Chang, R. Electrophysiological frequency domain analysis of driver passive fatigue under automated driving conditions. *Sci. Rep.*, (2021), 11:20348
- 39) Simon, M, Schmidt, EA, Kincses WE, Fritzsche M, Bruns A, Aufmuth C, Bogdan M, Rosenstiel W, Schrauf M. EEG alpha spindle measures as indicators of driver fatigue under real traffic conditions. *Clin Neurophysiol.*, (2011), 122(6):1168-1178.
- 40) Xiaoli, X, Jiangbi, H, Xiaoming, L, Pingsheng, L, Shuyun, W. The EEG changes during night-time driver fatigue, 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (2009), 935-939,
- 41) Borghini G. et al., Assessment of mental fatigue during car driving by using high resolution EEG activity and neurophysiologic indices," 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 6442-6445.
- 42) Gharagozlou, F, Nasl Saraji, G, Mazloumi, A, Nahvi, A, Motie Nasrabadi, A, Rahimi Foroushani, A, Arab Kheradmand, A, Ashouri, M, Samavati, M. Detecting driver mental fatigue based on EEG alpha power changes during simulated driving. *Iran J Public Health.* (2015), 44(12):1693-700
- 43) Tran Y, Craig A, Craig R, Chai R, Nguyen H. The influence of mental fatigue on brain activity: Evidence from a systematic review with meta-analyses. *Psychophysiology*, (2020) 57(5):e13554.
- 44) Antoun M, Ding D, Bohn-Goldbaum EE, Michael S, Edwards KM. Driving in an urban environment, the stress response and effects of exercise. *Ergonomics* (2018) 61:1-9.
- 45) Rigas G, Goletsis Y, Bougia P, Fotiadis DI. Towards driver's state recognition on real driving conditions. *Int J Veh Technol* (2011) 2011:617210.
- 46) Matthews G, Tsuda A, Xin G, Ozeki Y. Individual differences in driver stress vulnerability in a Japanese sample. *Ergonomics* (1999) 42:401-415
- 47) Dwight AH, David LW. The relationship between traffic congestion, driver stress and direct versus indirect coping behaviours. *Ergonomics* (1997) 40: 348-361.
- 48) Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index) Results of empirical and theoretical research. In P.A. Hancock and N. Meshkati (eds.). *Human Mental Workload*, North-Holland 139-183 (1988).
- 49) 7(14)erstedt T, Gillberg M Subjective and objective sleepiness in the active individual. *Int. J. Neurosci.* (1990)

51:29-37.

50) Ball K, Beard B, Roenker D, Miller R, Griggs D. Age and visual search: Expanding the useful field of view. *Journal of the Optical Society A* (1988) 5:2210-2219.

51) Edwards JD, Vance DE, Wadley VG, Cissell GM, Roenker DL, Ball KK. Reliability and validity of useful field of view test scores as administered by personal computer. *J Clin. Exp. Neuropsychol.* (2005) 5:529-543.

52) Saxby D J, Matthews G, Hitchcock EM, Warm JS, Funke GJ, Gantzer T. Effect of Active and Passive Fatigue on Performance Using a Driving Simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (2008) 52:1751-1755.

53) Saxby DJ, Matthews G, Neubauer C. The relationship between cell phone use and management of driver fatigue: It's complicated. *J. Saf. Res.* (2017) 61:129-140.

54) Jasper H. The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (1958) 10:371-375.

55) Alhaag MH, Ramadan MZ, Al-harkan IM, Alessa FM, Alkhalefah H, Haider M, Abdelaty A, Sayed E. Determining the fatigue associated with different task complexity during maintenance operations in males using electromyography features. *International Journal of Industrial Ergonomics* (2022) 88.

56) Cohen, J. *Statistical power analysis for the behavior science*. 2nd ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates (1988).

57) Kanda, Y. Investigation of the freely-available easy-to-use software "EZR" (Easy R) for medical statistics. *Bone Marrow Transplantation* (2013) 48:452-458.

58) Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A. G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav. Res. Method* (2007) 39:175-191.

59) Hennessy DA, Wiesenhal DL. The Relationship between traffic congestion, driver stress and direct versus indirect coping behaviours. *Ergonomics* (1997) 40:348-361.

60) Arafa, A, Saleh, LH, Senosy, SA. Age-related differences in driving behaviors among non-professional drivers in Egypt. *PLoS One*. (2020) 15(9):e0238516.

61) Huo, F, Gao R, Sun, C, Hou, G. Age differences in hazard perception of drivers: The Roles of Emotion. *Front. Psychol.* (2022) 13:867673.

62) Zhang, H., Ni, D, Ding, N, Sun, Y, Zhang Q, Li, X. Structural analysis of driver fatigue behavior: A systematic review, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, (2023) 21: 100865.

63) Yang, Y, Wong, A., McDonald, M. Does gender make a difference to performing in-vehicle tasks?. *IET Intell. Transp. Syst.* (2015) 9.

64) Fountas, G, Pantangi, SS, Hulme KF, Anastasopoulos, P. The effects of driver fatigue, gender, and distracted driving on perceived and observed aggressive driving behavior: A correlated grouped random parameters bivariate probit approach. *Analytic Methods in Accident Research* (2019), 359-365.

65) Adachi, M, Nobukawa, S., Inagaki K. Assessment of driver fatigue-related brain responses and causal factors during driving under different traffic conditions., *Front. Appl. Math. Stat.*, 2024, 10:10:1426253.

66) Tsurushima, M., Otsu, K., Nobukawa, S., Wagatsuma, N., Inagaki, K. Assessment of functional connectivity induced by driving experience, *Nonlinear Theory and Its Applications IEICE*, vol.14, no2, pp.559-568, 202