令和7年度 厚生労働科学研究費
長時間労働の医師への健康確保措置に関するマニュアル改訂のための研究
分担研究報告書

開瞼度に基づくPsychomotor Vigilance Test 反応速度推定技術の開発と検証
—簡便な医師の覚醒度評価法の確立に向けて—

研究分担者　氏名　阿部高志　所属　筑波大学国際統合睡眠医科学研究機構

研究要旨:

Psychomotor Vigilance Test（PVT）は持続的注意の客観評価の標準的手法の一つとされており、医師の覚醒度評価への応用が期待される。しかし、標準的な10分版PVTのみならず短縮版である3分版PVTであっても実施には作業の中断が必要という課題がある。本分担研究では、生体情報、特に開瞼度のみからPVT反応速度を機械学習により推定する技術を開発し、作業を中断せず簡便に医師の覚醒度を評価できる手法の確立を目指している。令和7年度は、本推定技術の検証研究を進めた。高精度アイトラッカーを用いた検証では、PVTおよび視覚探索課題（VST）のいずれにおいても断眠後に推定値が有意に低下した。Webカメラを用いた断眠下の検証でも、PVT反応速度の実測値・推定値ともに断眠の経過に伴って有意に低下した。さらに覚醒維持検査（MWT）中の生体指標を比較した検討では、PVT反応速度推定値は4時間の睡眠制限後に有意に低下した一方で、眠気指標として広く用いられているPERCLOS（PERcent time of slow eyelid CLOSures）には有意な変化が認められなかった。以上より、開瞼度に基づくPVT反応速度推定法は、断眠下および眼球運動を伴う課題、MWT中といった多様な状況で適用可能であり、PERCLOSよりも睡眠制限に対して感度が高い指標として一定の有用性が示唆されたが、推定精度および適用条件には課題が残る。将来的にはスマートフォンのカメラ等による簡便な覚醒度評価への発展が期待される。なお、1分間といった超短時間のPVT推定では3分版PVTに比して感度が劣る可能性があり、メガネ型装置(スマートグラス)等に搭載されたカメラからの連続的な開瞼度計測による補完も今後の検討課題である。

A. 研究目的

医師の長時間労働は、医療事故・医療安全の観点から看過できない問題であり、個々の医師の覚醒度を客観的かつ簡便に評価する手法の確立は、働き方改革と医療安全の両立に向けた重要課題である。持続的注意の客観的評価指標としてPsychomotor Vigilance Test (PVT;Basner

& Dinges, 2011）は、練習効果がほとんど存在せず、睡眠不足に対して鋭敏な感度を有することから、睡眠医学の領域で広く活用されている。

一方､標準的な10分版PVTはもとより、航空・運輸領域での使用が報告されている短縮版の3分版PVT(Benderoth et al., 2021）であっても、検査中は対象者が画面注視と反応キー押しを継続する必要があり、業務遂行中に作業を中断しなければ実施できないという運用上の制約がある。これは多忙な医師の業務スケジュールにおいて、連続的・経時的な覚醒度モニタリングを困難にする。

本分担研究では、生体情報、とりわけ非接触に取得可能な開瞼度のみから PVT 反応速度を機械学習により推定する技術の開発を進めている（Noguchi et al., 2024)。本技術が確立されれば、医師がスマートフォンや一般的なカメラデバイス、スマートグラスを用いて目元を測るだけで、作業を中断することなく自身の覚醒度を確認できる枠組みが構築できる。令和 7 年度は、これまで日常睡眠条件下で構築した推定モデルが、より厳しい条件である断眠下や、眼球運動を頻繁に伴う作業中、および覚醒維持検査（Maintenance of Wakefulness Test:MWT）中においても適用可能か、さらに既存の眠気指標であるPERCLOS(PERcent time of slow eyelid CLOSures）と比較して睡眠制限に対する感度が優れているかを検証した。

B. 研究方法

１．アイトラッカーを用いた断眠および視覚探索課題での検証

健常成人を対象に（解析対象18名、男性16名、平均年齢23.7±6.4歳；目標参加者数18名)、通常8時間睡眠条件と全断眠条件の前後にそれぞれ10分間のPVTおよび8分間の視覚探索課題（Visual Search Task：VST）を実施した。課題実施時は、机上に設置した非接触型アイトラッキングカメラにより開瞼度を取得した。さらに、先行研究のデータセットに対してハイパーパラメータチューニング（Gradient Boosting Decision Treeモデル、100回のランダム化実行）を行い、最頻最適パラメータを採用した推定モデルを再構築した。再構築したモデルを用いて、PVT中およびVST中の開瞼度からPVT反応速度を推定した。

２．覚醒維持検査（MWT）中の生体指標とPERCLOSの比較

健常成人19名を対象に（女性11名、平均年齢25.4±4.5歳、計136試行)、順応夜の後に通常8時間睡眠または4時間睡眠制限のクロスオーバーデザインで実施

した。各睡眠条件後の日中に、2 時間間隔で MWT を 4 回実施した。MWT 中は非接触型アイトラッカーにより記録を行い、眠気指標として PERCLOS、開瞼度に基づく PVT 反応速度推定値を算出し、睡眠条件間で比較した。

３．Web カメラを用いた断眠下での PVT 反応速度推定モデルの検証

上記１のうち Web カメラの取得に成功した健常成人 14 名（平均 23.9±6.96 歳、男性 12 名、女性 2 名、目標参加者数 18 名）を対象に 1 夜の全断眠中のデータを解析した。断眠前に第 1 セッションを行い、普段の就寝時刻から 1 時間ごとに計 10 セッションの PVT を実施した。課題中は対象者顔面を Web カメラで撮影し、動画から各時点の開瞼度を算出した。10 分間の PVT および開瞼度データは前半 5 分・後半 5 分に分割した上で、先行研究で構築した開瞼度ベースの PVT 反応速度推定モデル（Noguchi et al., 2024）を適用し、前後半の平均値を 10 分間の代表値として用いた。

（倫理面への配慮）

本研究はいずれも筑波大学医学医療系医の倫理委員会の承認を得て実施した。参加者には研究の目的・方法・予測されるリスクおよびデータの取り扱いについて文書および口頭で十分に説明を行い、文書による自由意思に基づくインフォームド・コンセントを取得した。取得データは個人を特定できない形に匿名化して管理し、アクセス制限を設けたサーバーに保存した。研究参加にともなう身体的負担および精神的負担に配慮するとともに、参加の同意はいつでも撤回可能であることを保証した。

C. 研究結果

１．アイトラッカーを用いた断眠下および VST での検証（野口ら、 2025、 日本睡眠学会第 49 回定期学術集会）

再構築したモデルを断眠データを含む検証データに適用したところ、実測値と推定値の級内相関係数（Intraclass Correlation Coefficient : ICC）は 0.52（moderate agreement）であった。PVT 課題では、実測 PVT 反応速度・推定 PVT 反応速度ともに断眠後に通常睡眠後と比較して有意に低下した（いずれも $p < 0.001$）。同様に眼球運動を伴う VST においても、実測 VST 反応速度および推定 PVT 反応速度のいずれもが断眠後に有意に低下した（いずれも $p < 0.001$）。これにより、本モデルが断眠条件下のみならず、眼球運動を頻繁に伴う作業中においても、覚醒度低下を反映する指標を出力可能であることが示された。

２．MWT 中の PVT 推定と PERCLOS の比較（Dzeng ら、 2025、 日本睡眠学会第 49 回定期学術集会／Worldsleep 2025 等）

睡眠制限後の MWT では、入眠潜時が有意に短縮し（$p = 0.002$, $d = 0.85$）、微小睡

眠頻度は有意に増加した（p = 0.003, d = 1.03）。本研究で開発した開瞼度に基づくPVT反応速度推定値も睡眠制限後に有意に低下した（p = 0.02, d = 0.85）。これに対し、眠気の生体指標として広く用いられているPERCLOSには、睡眠制限による有意な変化は認められなかった（p = 0.48）。すなわち、本研究で開発したPVT反応速度推定値はPERCLOSが捉えられない睡眠制限による覚醒度低下を検出可能であった。

3．Webカメラを用いた断眠下での検証（野口ら、 2025、 第 43 回日本生理心理学会大会）

PVT反応速度の実測値は断眠の経過とともに有意に低下した（p < 0.001）。同様に、開瞼度から得られた PVT 反応速度推定値もセッションに有意な主効果を示し、断眠開始前と比較して断眠経過に伴い推定値が有意に低下した（p = 0.003）。すなわち、Webカメラに基づく本モデルによる推定値は断眠による反応速度低下を概ね捉えていた。一方、個人内・時点ごとの実測値と推定値の級内相関係数（ICC）は0.29にとどまり、絶対値ベースの推定精度には改善の余地が残された。

D. 考察

本年度の検証により、開瞼度のみを入力とするPVT反応速度推定モデルは、①一夜の全断眠経過中（Webカメラ条件・アイトラッカー条件）、②眼球運動を頻繁に伴うVST中、③睡眠制限後のMWT中、という軽度の睡眠不足状況において、覚醒度低下を反映する指標を出力可能であることが確認された。

特に、MWT 中の生体指標を比較した検討において、PVT反応速度推定値は睡眠制限に対して有意に変化（p = 0.02, d = 0.85）した一方で、PERCLOSには有意な変化が認められなかった（p = 0.48）。PERCLOSは閉瞼時間の比率という単純な特徴量に基づくため、４時間睡眠制限後という軽度の睡眠不足状況下では十分な感度を発揮しにくい可能性がある。これに対し、本モデルは開瞼度の時系列パターンを機械学習により多角的に統合して PVT 反応速度を推定するため、PERCLOSでは検出困難な微細な覚醒度変動を捉えられたと考えられる。これらの結果は、医師が業務中であっても、作業を中断せずに PVT 相当の客観的覚醒度指標を取得し得るという、本技術の「実用可能性の一端を示すものの、精度向上が課題である。

一方、現状では Web カメラ条件の ICC が0.29、アイトラッカー条件のICCが0.52にとどまっており、個別時点における絶対値ベースの推定精度には改善の余地がある。今後は、断眠下のデータを学習データセットに組み込むこと、および、より多様な照明条件・撮影条件のデータを追加することにより、一般デバイスでの実装を見据えた精度向上が期待される。

また、航空・運輸領域では3分版PVTでも睡眠制限に対する感度が確認されている（Benderoth et al., 2021）が、1分間といった超短時間の PVT 推定では 3 分版や 10

分版に比して感度が劣る可能性が考えられる。この感度低下を補完する戦略として、Web カメラやスマートフォンを用いたデスク業務中の PVT 推定に加えて、メガネ型装置（スマートグラス）等の常時装着可能なデバイスにカメラを搭載し、業務中に連続的・受動的に開瞼度を取得することが有望である。短時間の点的評価ではなく長時間の連続的なモニタリングによりデータを蓄積することで、1 分版相当の超短時間の連続評価でも十分な感度・特異度を担保できる可能性がある。

本年度の成果は、医師の長時間労働に伴う覚醒度低下を業務中断なしに評価する基盤技術として位置づけられ、客観的覚醒度評価ツールの提案に向けた重要な一歩である。本研究は健常成人を対象とした検証であり、 医師を含む実臨床環境における適用可能性については 今後の検証が必要である。

E. 結論

開瞼度のみから PVT 反応速度を推定する機械学習モデルは、断眠条件下、視覚探索課題中、および覚醒維持検査中という多様な状況において覚醒度低下を反映可能であった。とりわけ、MWT 中の睡眠制限に対する感度は PERCLOS を上回り、本モデルが既存の眠気指標を補完または代替し得る有望な指標であることが示された。今後、モデル精度の更なる向上とスマートフォン・メガネ型装置等への実装を進めることで、医師の業務中における簡便かつ非接触な覚醒度評価が実現可能になると期待される。

F. 研究発表

１．論文発表

1） Abe, T. (2025). Forecasting Psychomotor Vigilance Test performance from facial videos. SLEEP, zsaf220.

２．学会発表

1） 野口宇宙, 安東弘泰, 阿部高志 (2025 年 5 月 24 日). Web カメラを用いた開瞼度計測による断眠下での Psychomotor Vigilance Test 反応速度推定. 第 43 回日本生理心理学会大会.
2） Dzeng Yuhua, 阿部高志 (2025 年 5 月 24 日). 睡眠制限に対して反応する覚醒維持検査中の脳波指標の探索. 第 43 回日本生理心理学会大会.
3） 野口宇宙, 安東弘泰, 阿部高志 (2025 年 6 月 28 日). 開瞼度計測による Psychomotor Vigilance Test 反応速度推定法の断眠下および眼球運動を伴う課題での検証. 日本睡眠学会第 49 回定期学術集会（広島）.
4） Dzeng Yuhua, 野口宇宙, 阿部高志 (2025 年 6 月 28 日). 睡眠制限に対して反応する覚醒維持検査中の生体指標の探索. 日本睡眠学会第 49 回定期

学術集会（広島）.

5) Noguchi, T., Ando, H., & Abe, T. (2025年9月8-10日). Development of a machine learning model to estimate psychomotor vigilance test response speed from eyelid opening degree. Worldsleep 2025, Singapore.

6) Dzeng, Y., Noguchi, T., & Abe, T. (2025年9月8-10日). Exploration of physiological markers sensitive to sleep restriction during the maintenance of wakefulness test. Worldsleep 2025, Singapore.

7) Noguchi, T., Ando, H., & Abe, T. (2025年12月1日). Development of a machine learning model to estimate psychomotor vigilance test response speed from eyelid opening degree. The 14th Annual WPI-IIIS Symposium.

8) Dzeng, Y., Noguchi, T., & Abe, T. (2025年12月1日). Exploration of physiological markers sensitive to sleep restriction during the maintenance of wakefulness test. The 14th Annual WPI-IIIS Symposium.

9) Dzeng Yuhua, 野口宇宙, 阿部高志 (2025年12月6日). 睡眠制限に対して反応する覚醒維持検査中の生体指標の探索. 2025年度日本生理人類学会フロンティアミーティング(秋期).

３．招待講演

1) 阿部高志 (2025年12月18日). 事故の予兆を科学する：睡眠不足による「漫然運転」のメカニズムと検知システム. 運輸デジタルビジネス協議会 WG02主催健康セミナー.

2 阿部高志 (2026年1月28日). 睡眠科学に基づく「覚低運転」の理解と検知. 山形大学Goodsleepコンソーシアム令和7年度第2回メンバーイベント（全体会）.

G. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む。)

該当せず。

H. 文献

1) Basner, M., & Dinges, D. F. (2011). Maximizing sensitivity of the psychomotor vigilance test (PVT) to sleep loss. Sleep, 34(5), 581-591.

2) Benderoth, S., Hörmann, H. J., Schießl, C., & Elmenhorst, E. M. (2021). Reliability and validity of a 3-min psychomotor vigilance task in assessing sensitivity to sleep loss and alcohol: Fitness for duty in aviation and transportation. Sleep, 44(11),

zsab151.

3) Noguchi, T., Ando, H., & Abe, T. (2024). Development of a vigilance estimation method using eyelid information from smartphone cameras. Asian Society of Sleep Medicine Interim Meeting 2024, Tokyo.

I. 謝辞

実験の遂行および解析に多大な貢献を頂いた野口宇宙氏，Dzeng YuHua 氏（筑波大学グローバル教育院ヒューマニクス学位プログラム），ならびに研究にご協力いただいた被験者の皆様に心より感謝申し上げる。