

パフォーマンス-認知負荷モデルを用いた精神負荷作業中の認知状態推定手法

瀬尾 恭一*¹ 國政 秀太郎*¹*² 下田 宏*¹ 石井 裕剛*¹

The Inference Method of Cognitive States while Performing Mental Tasks Based on Performance-Mental Effort Modeling

Kyoichi Seo*¹, Syuntaro Kunimasa*¹*², Hiroshi Shimoda*¹, and Hirotake Ishii*¹

Abstract - There are few researches that consider both cognitive performance and mental workload in the field of intellectual productivity studies and cognitive load theory (CLT) studies, and most of them focus on only one of them. The authors therefore have proposed a Performance-Mental Effort model which deals with both of them. In the model, the cognitive states are classified into four categories which reflect their performance and mental effort. A subject experiment was conducted where their cognitive task performances and physiological indices such as heart rate and pupil diameter were measured. As the result, the estimated states from the measured data based on the proposed model could well explain the detail changes of their cognitive states.

Keywords : Cognitive model, Task Performance, Cognitive Load Theory, Mental Effort, Physiological index

1. はじめに

情報化が進む現代社会において、単純作業の多くは計算機によって処理されるようになり、人間の労働の中で高度な知的作業が占める割合は年々大きくなっていく。特に、企業や研究機関において高次の知的作業の価値は顕著に高まっており、経済的および社会的利益を得るためには知的生産性の向上が重要である。知的生産性の向上にはその評価手法の確立が必要であり、現在まで数多くの研究が行われてきた [1-4]。これらの研究では、作業執務者の知的生産性評価として、実験用に設計されたタスクを使用し、その作業の効率や成績をもって知的生産性としている。しかし、知的生産性はストレスや疲労、モチベーションといった人間の内的要因により変化する一方で、これらの統制は非常に困難である。より詳細な知的生産性評価やその変化が生じた原因の追求には、作業を通じたアウトプットだけでなく、心理状態や認知負荷などの内的要因の検討が必要であるが、後者を考慮した研究は非常に少ない。

一方、人間の知的能力と内的要因の関係に着目した研究は他分野に多く存在し、特に作業記憶や認知負荷に関する Cognitive Load Theory (CLT) 研究 [5-8] がその例として挙げられる。CLT 研究では、認知負荷理論に基づき、人間の認知負荷を測定することで内的

状態の特定を試みている。主に教育デザインや作業環境の設計に利用されており、その点において知的生産性研究と良く類似している。認知負荷の評価手法には、心拍や瞳孔径などの生理指標を用いる手法があり、多くの研究でその有効性が証明されている [9-16]。さらに、作業に対するパフォーマンスと認知負荷との2つを同時に評価することで、知的活動の理解に繋がる、と Paas ら [6,7] は示唆している。

しかし、知的生産性研究や CLT 研究においてパフォーマンスと認知負荷の両方を考慮した研究は少なく、いずれもその一方の評価に留まっている。そこで、著者らはその両方を考慮したパフォーマンス-認知負荷モデルを提案し、作業執務者のパフォーマンスと認知負荷を推定することで提案モデルで想定される複数の認知状態を推定する手法を開発した [17]。提案手法は、従来の作業パフォーマンス評価に加え、認知負荷の指標とされる心拍数および瞳孔径から作業の認知負荷を評価し、作業執務者の認知状態を推定する手法である。これにより、従来では評価不可能であった、作業執務者の詳細な内的状態を評価することが可能となる。しかし、この提案手法は実験による十分な検証が行われていない。そこで本研究では、被験者実験によってこの提案手法の妥当性評価を行った。これにより提案手法の有用性が確認されれば、提案手法を用いたより詳細な知的生産性評価が可能になると期待される。

*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

*2: 現在, 大阪ガス株式会社

*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

*2: Present, Osaka Gas Co., Ltd.

2. パフォーマンス-認知負荷モデルを用いた認知状態推定手法

従来の知的生産性研究では、タスクの作業記録から評価を行う手法が主流であった。しかし、そういった評価手法は執務者の認知状態や精神負荷といった内的要因は主観評価に留まっている。知的生産性が執務者の内的要因に影響される以上、より詳細な知的生産性評価には、この内的要因の客観的評価を組み込んだ手法が望ましいと考えられる。

内的要因を考慮した評価手法として、著者らはパフォーマンス-認知負荷モデル (図1) を用いた認知状態推定手法を開発している [17]。パフォーマンス-認知負荷モデルは、作業執務者の認知状態を仮定するモデルで、執務者の認知状態はパフォーマンスおよび精神負荷の高低から4つに分別される。4状態のうち、High Working State (以下 High W. S.) は高認知負荷・高パフォーマンスの状態、この状態下の執務者は高い知的生産性と同時に、疲労の蓄積が予想される。Optimal Working State (以下 Optimal W. S.) は低認知負荷・高パフォーマンスの状態、この状態下の執務者は作業への習熟や好調から高い認知効率で作業を処理しており、高い知的生産性が期待される一方で疲労の蓄積は軽微と予想される。Low Working State (以下 Low W. S.) は低認知負荷・低パフォーマンスの状態、執務者は休息を取っていると考えられる。そのため疲労回復の効果が期待され、低パフォーマンスではあっても知的生産性の観点から必ずしも避けるべき状態ではない。最後の Bad Working State (以下 Bad W. S.) は、高認知負荷・低パフォーマンスの状態である。この状態は、執務者の集中が何らかの原因で阻害されているときに観察されると考えられる。提案モデルではこの4つの認知状態が遷移していくことで知的生産性が変化するとしている。よって、この認知状態の遷移状況を推定することで、作業パフォーマンスの変動を生じた執務者の内的要因の解釈といった、従来の作業パフォーマンスあるいは認知負荷のどちらか一方のみの評価では不可能であった、詳細な知的生産性評価が可能になると考えられる。

また、著者らはこの認知状態の推定手法として、作業記録と生理指標計測とから得られたデータを併用する手法を提案している。手法の概要を図2に示す。提案手法では、まず作業パフォーマンスを推定する特徴量として、認知タスクを遂行した際の作業記録 (解答時間、解答時間の分散、エラー率) を、認知負荷を推定する特徴量として、心拍数、瞳孔径を記録し、それらを引数としたルールベースファジィ推論によってそれぞれから作業パフォーマンスおよび認知負荷を推定、

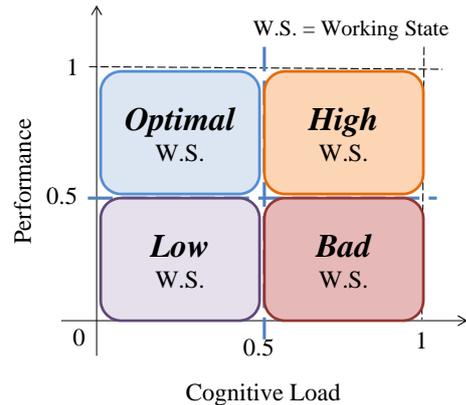


図1 パフォーマンス-認知負荷モデル
Fig.1 Performance-Mental Effort Modeling.

定量化する。ルールベースの設定には従来の生理指標に関する知見等を採用している。次に、定量化した作業パフォーマンスと認知負荷を特徴量として、同様に認知状態を推定する。これにより、時間経過とともに変化する執務者の認知状態推定を可能としている。

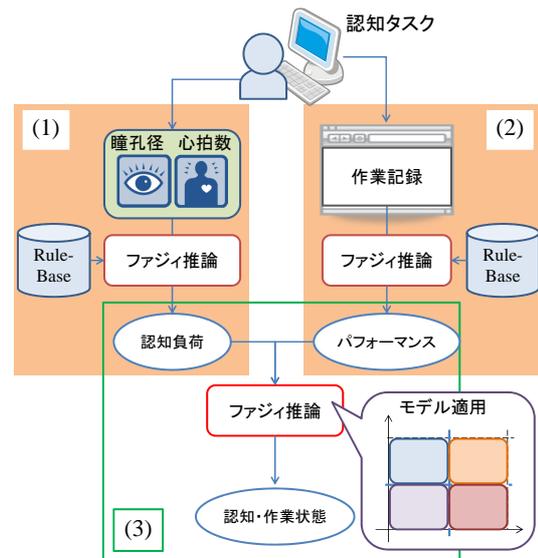


図2 認知状態推定手法のアルゴリズム
Fig.2 Cognitive State Inference Algorithm

しかし、この手法の検証として行われた実験 [17] は被験者数6名のみであり、また被験者の体調規制など実験設計が不十分であった点などから、手法の有効性は示唆されたものの、妥当性の評価が十分にされたとは言い難い。本研究では、実験手法の改善および被験者数の増員により、提案手法を評価した。

3. 評価実験

3.1 目的

まず、2.章で述べた手法で用いる、パフォーマンスおよび認知負荷の特徴量が入力として妥当であるかを評価し、次に提案手法が認知状態を推定する上で

実験を取りやめ、正常なトラッキングが確認できた被験者には、続いて2日目に行う2桁および4桁の暗算タスクを各5分間練習させた。スクリーニングを行った結果、1名の被験者において著しいトラッキングエラーが認められたため、その被験者は初日のみの参加となった。その後2日目に実施する実験の説明を行い、被験者に活動量計測器を渡した。その上で、実験2日目の前日から当日まで活動量計測器を装着した上で、健康的な生活を送るよう教示した。具体的には、前日は十分な睡眠時間を取り、アルコール・カフェインの摂取を抑えるよう教示した。また活動量計測器を装着させることで、被験者に強い義務感を与え、生活習慣を強く統制することで実験への影響を極力排除した。また、アンケート用紙も渡し、実験日当日に前日の睡眠時間や当日の体調などを記入させた。

3.5.2 実験2日目

2日目に実際の計測実験を行った。計測機器装着後、まず1桁暗算を行った。これは、実験開始時にしばしば見られる被験者のモチベーション上昇がタスクA・Bに与える影響を抑えるために実施した。続くタッピングでは、3.4節で述べたタスクを1桁にしたものが画面に提示され、これに対し被験者はランダムな数字を解答する。つまり、暗算タスクから知的能力を必要とする認知プロセスを省いたものになっている。生理指標計測時には、タスク実行時の体動から生じる、認知負荷に影響を持たないアーチファクトが計測され、認知負荷推定の結果に影響を及ぼす可能性があるため、その影響を確認するためタッピングを暗算タスクの対照タスクとして採用した。タスクAおよびタスクBは2桁暗算あるいは4桁暗算のいずれかであり、桁数が昇順あるいは降順になる被験者がそれぞれ同程度になるようランダムに割り振り、順序効果を打ち消した。各タスク終了後にはNASA-TLX [18]によってタスクに対するモチベーションや精神負荷などに関する主観的評価を行わせた。また、被験者には続いてタスクCが存在すると1日目に説明したが、2回目のNASA-TLX終了後にタスクCはダミータスクであったと説明し、実施せず実験を終了した。これは1桁暗算と同様、実験終了間際のモチベーション上昇が与える影響を抑える目的で実施した。

4. 結果

2日目に参加した被験者のうち1名の心拍計測データに異常が見られ、2名が実験中に体調不良や眠気を訴えた。以上の理由から計3名を除き、27名のデータを解析対象とした。各タスクにおけるNASA-TLXのメンタルワークロードの結果を表1に示す。NASA-TLXのメンタルワークロードに対するあるt検定をかけた結

果、有意差が認められた ($p < 0.001$)。つまり、2つのタスクは異なる認知負荷を与える点で有効であったと考えられる。

表1 各タスクのメンタルワークロード
Table 1 Mental Workload on each Task.

平均値 (標準偏差)	
2桁暗算	4桁暗算
55.2 (9.3)	64.1 (7.0)

作業記録に関する特徴量の結果を表2に、生理指標に関する特徴量を表3に示す。作業記録に関する特徴量 (解答時間、分散性およびエラー率) について対のあるt検定をかけた結果、それぞれで有意差が認められた (それぞれ $p < 0.001$)。生理指標に関する特徴量 (瞳孔径および心拍数) について、各タスクを水準として分散分析を行った結果、瞳孔径では $F(2, 52) = 24.90$, $MSe = 4.45 \times 10^{-2}$, $p < 0.001$, 心拍数では $F(2, 52) = 8.85$, $MSe = 9.18$, $p < 0.001$ となり、各特徴量ともにタスクによる効果が認められた。さらに各特徴量に対してtukey多重検定を行った。結果のグラフをそれぞれ図6, 図7に示す。

表2 各タスクの平均特徴量 (解答時間・分散性・エラー率)

Table 2 Means of each Feature Values (Solution Time, Variance, and Error Rate)

特徴量	平均値 (標準偏差)	
	2桁暗算	4桁暗算
解答時間	4.13 (1.33)	11.24 (2.80)
分散性	1.03 (1.06)	10.72 (8.23)
エラー率	3.81 (3.08)	16.27 (12.65)

表3 各タスクの平均特徴量 (瞳孔径・心拍数)

Table 3 Means of each Feature Values (Pupil Diameter and Heart Rate)

特徴量	平均値 (標準偏差)		
	タッピング	2桁暗算	4桁暗算
瞳孔径 (mm)	3.87 (0.44)	4.01 (0.47)	4.24 (0.55)
心拍数 (bpm)	73.8 (13.0)	75.09 (11.7)	77.18 (12.5)

パフォーマンス推定の結果を表4および認知負荷推定の結果を表5に示す。パフォーマンス推定について対のあるt検定をかけた結果、有意差が認められた ($p < 0.001$)。また、認知負荷推定においてタッピング、2桁暗算および4桁暗算を水準として分散分析を行った結果、 $F(2, 52) = 26.42$, $MSe = 0.01$, $p < 0.001$ となった。さらにtukey多重検定を行った結果のグラフを図8に示す。

次に、各認知状態について推定結果を評価した。各タスクの認知状態の平均適応度を表6に示す。それぞれの状態の適応度について対のあるt検定を行った結果、すべての状態で有意差 (High W. S. において

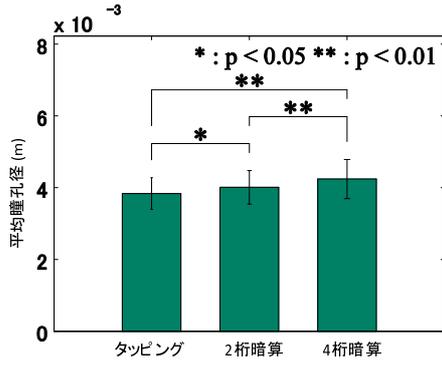


図 6 各タスクごとの平均瞳孔径
Fig. 6 Means of Pupil Diameter on each Task.

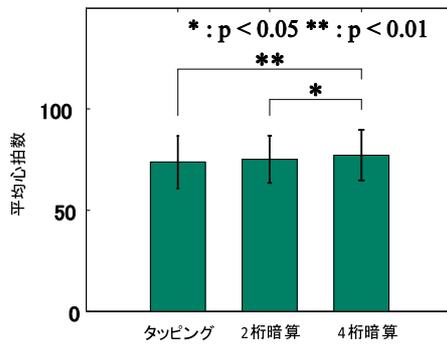


図 7 各タスクごとの平均心拍数
Fig. 7 Means of Heart Rate on each Task.

表 4 各タスクの平均パフォーマンス
Table 4 Means of Performance on each Task.

特徴量	平均値 (標準偏差)	
	2桁暗算	4桁暗算
パフォーマンス	0.71 (0.21)	0.33 (0.22)

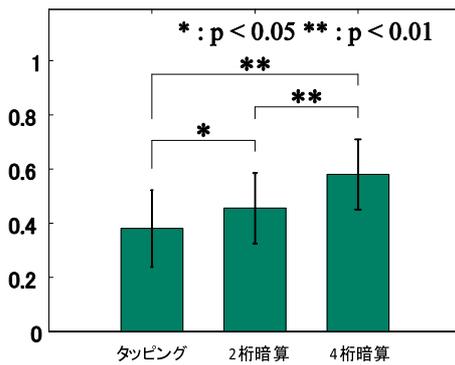


図 8 各タスクごとの平均認知負荷
Fig. 8 Means of Mental Effort on each Tasks.

表 5 各タスクの平均認知負荷
Table 5 Means of Mental Effort on each Task.

認知負荷	平均値 (標準偏差)		
	タッピング	2桁暗算	4桁暗算
認知負荷	0.38 (0.14)	0.46 (0.13)	0.58 (0.13)

$p < 0.01$, その他 3 状態において $p < 0.001$) が認められた. また, 各推定の例として, 2 名の被験者 A, B の 2 桁暗算の推定結果と 4 桁暗算の推定結果をそれぞれ図 9~図 12 に示す.

表 6 各タスクの認知状態の平均適応度
Table 6 Mean Compatibilities of each Cognitive State.

認知状態	平均値 (標準偏差)	
	2桁暗算	4桁暗算
High W. S.	0.24 (0.12)	0.16 (0.13)
Optimal W. S.	0.37 (0.18)	0.13 (0.09)
Bad W. S.	0.12 (0.11)	0.36 (0.18)
Low W. S.	0.11 (0.10)	0.22 (0.11)

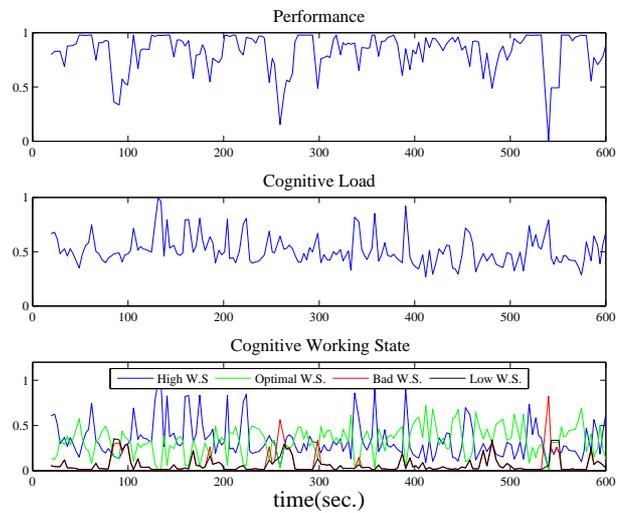


図 9 被験者 A の 2 桁暗算での推定結果
Fig. 9 Inference Output of the Subject A for 2-Digit Mental Arithmetic Task.

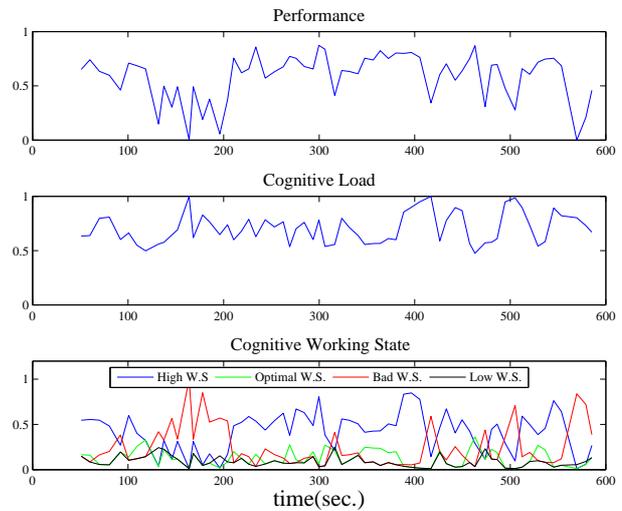


図 10 被験者 A の 4 桁暗算での推定結果
Fig. 10 Inference Output of the Subject B for 4-Digit Mental Arithmetic Task.

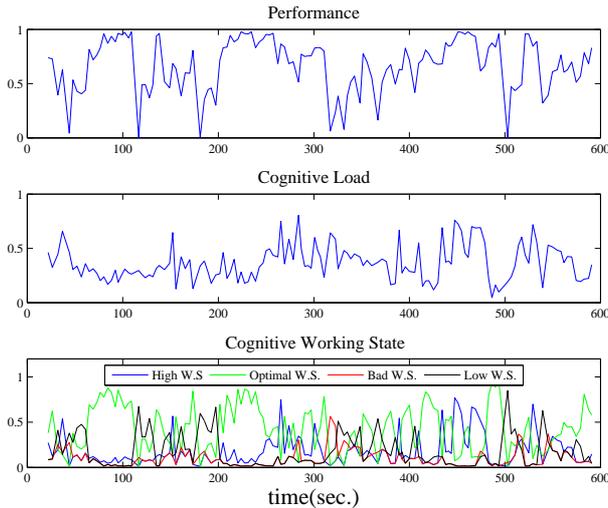


図 11 被験者 B の 2 桁暗算での推定結果
 Fig. 11 Inference Output of the Subject B for 2-Digit Mental Arithmetic Task.

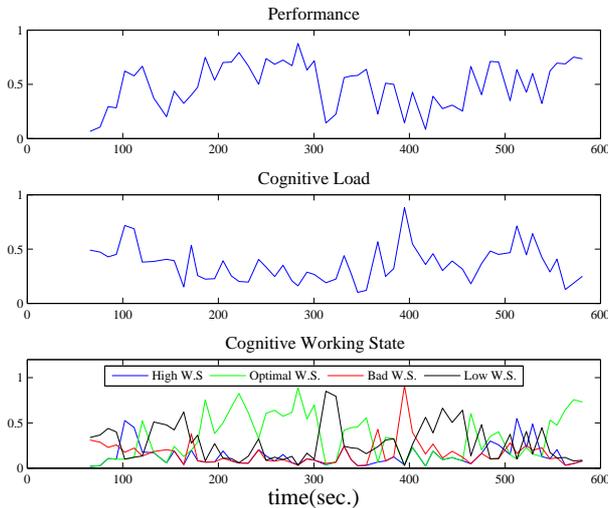


図 12 被験者 B の 4 桁暗算での推定結果
 Fig. 12 Inference Output of the Subject B for 4-Digit Mental Arithmetic Task.

5. 考察

5.1 各入力特徴量

実験結果から、各特徴量がタスク難易度によるパフォーマンスおよび認知負荷の変動を表し得る指標であることが確認された。しかし、図 7 で示した tukey 多重検定の結果では、心拍数においてタッピングと 2 桁暗算間に有意差は見られなかった。短期記憶に負荷をかけるタスクを用いた実験ではコントロール群とタスク群で心拍数の有意差が認められている [14,16] が、これらの研究で用いられたタスクは 5~7 チャンクの短期記憶容量を要求するもので、本研究では 4 桁暗算と同程度である。他の水準間では有意差が認められており、既往研究の結果と一致しているため、高認知負

荷時に心拍数が有意に上昇することは示唆できるが、2 桁暗算のように比較的認知不可の低いタスクは上昇値が小さく、そのためタッピングとの有意差が表れなかったと考えられる。以上より、心拍数は認知負荷を反映する指標ではあるが瞳孔径に比べ変動が小さく、短期記憶に高い負荷がかかる条件で有意な心拍数の上昇が見られると考えられる。

5.2 推定結果

パフォーマンス推定では、タスク難易度によるパフォーマンスの変動が認められた ($p < 0.001$)。認知負荷推定では分散分析によりタスクの効果が認められ ($F(2, 52) = 26.42$, $MSe = 0.01$, $p < 0.001$)、図 8 で示す通り各タスク間で有意差が認められた。これらの結果は 3.1 節で述べた仮定に従っており、提案手法の推定結果が妥当であることを示している。

認知状態の推定結果では、タスク難易度の上昇に従って High W. S. および Optimal W. S. は適応度が低下し、Bad W. S. および Low W. S. の適応度が上昇することが分かった。特に、Optimal W. S. では 2 桁暗算および 4 桁暗算でそれぞれ平均値が 0.37 および 0.13, Bad W. S. ではそれぞれ 0.12 および 0.36 と他の状態に比べて差が大きい。従って、低難易度であれば高パフォーマンス低認知負荷、高難易度であれば逆に低パフォーマンス高認知負荷であるという想定が満たされていると言える。

5.3 認知状態遷移の検討

実際の推定結果例である被験者 A および被験者 B の推定結果から考えられる作業状態や認知状態について考察を述べる。

まず、図 9 に示した被験者 A の 2 桁暗算時の推定結果について、認知状態は High W. S. および Optimal W. S. がほぼすべての作業時間で優位に現れ、特に 100~250 秒区間や 350~400 秒区間で High W. S. の高いピークが複数形成されている。このような 2 状態の優位がよく見られたのは、タスクの難易度が低く、作業に集中できていたためと考えられる。一方で、Low W. S. と Bad W. S. に注目すると、それぞれ、100 秒、180 秒、250 秒、480 秒、550 秒、600 秒付近で、他の時間と比べやや高い適応度が認められる。これらのピークは、High W. S. が優位である区間の後によく見られ、この被験者は疲労の蓄積などが原因で作業のペースが低下していると考えられる。しかし、それぞれ 2 状態のピーク形成後、High W. S. や Optimal W. S. が優位となっているため、作業へ再び集中できていると考えられる。ここで、被験者がさらに作業へ集中しやすいように適切な休息のタイミングを提案するのなら、Low W. S. や Bad W. S. のピークが認められる区間はもちろんのこと、High W. S. が優位である

時間が長い区間 (例えば 100 秒～250 秒など) の後に休息を促すと良いと考えられる。

図 10 に示した同被験者 A の 4 桁暗算時の推定結果について、2 桁暗算の場合とは異なり、High W. S. と Bad W. S. が優位である様子が分かる。また、前半 100 秒～200 秒および後半 400 秒～600 秒では Bad W. S. が現れやすくなっているが、これらの時間帯での状態遷移に注目すると、前半と後半で Bad W. S. の生じた原因が異なっている可能性が考えられる。前半では常に Bad W. S. が最も高い適応度を示しており、後に High W. S. が優位になることから、タスクに慣れるまで作業への集中が十分でなく、さらに 4 桁暗算という高難易度のタスクを遂行しているために、Bad W. S. が現れやすくなったと考えられる。一方で、後半の Bad W. S. のピークについては、400 秒以前では High W. S. が優位であることから、High W. S. での疲労蓄積によって Bad W. S. が現れやすくなったと考えられる。さらに、その後 High W. S. と交互にピークを形成する様子が見られることから、疲労による影響を強く受けた結果 Bad W. S. への遷移と High W. S. への復帰を繰り返しており、作業への集中が高くない状態であると考えられる。このように同じ Bad W. S. でも、認知状態遷移の時系列データを見ることで、前後の遷移状況から異なる解釈が可能になる。したがって、例えば前半の区間を作業への集中が十分になるまでの準備期間と解釈して、この時の Bad W. S. を無視し、後半の Bad W. S. のピーク発生時には被験者に休息を促すことで適切な疲労回復を図ることができると考えられる。

次に、図 11 に示す被験者 B の 2 桁暗算時の推定結果を見ると、被験者 A とは異なり、Low W. S. が優位である時間帯がいくつか確認される。さらにそれぞれのピークの後、Optimal W. S. が優位となっている場合が多く、この被験者は適宜休息を取りながら作業を行っていると考えられる。しかし、300 秒を過ぎると、これまで適応度の低かった Bad W. S. のピークが現れ始め、逆に Optimal W. S. 優位な状態の継続時間は短くなっており、他の状態のピークが頻出している。このような状態遷移は、2 桁暗算の単調さによる疲労の蓄積が原因であると考えられ、Optimal W. S. 優位であってもある程度の疲労蓄積が生じたと考えられる。

図 12 に示す同被験者 B の 4 桁暗算時の推定結果を見ると、2 桁暗算と同様 300 秒より前では Optimal W. S. 優位が続くが、300 秒を過ぎたあたりから Low W. S. や Bad W. S. が顕著に出現している。2 桁暗算時の推定結果を併せると、被験者 B は 300 秒付近で休息を促すことで、より良い作業への集中が期待されると

考えられる。

このように、提案手法によって各 4 状態の推定結果を時系列的に解析することで、600 秒という短時間の作業でも様々な状態が変化し、被験者によってその状態遷移が異なるパターンを示す様子が確認された。さらに、それぞれ 4 状態がどのように遷移するかを見ることで、被験者の作業状況のある程度推測でき、適切な休息タイミングの検討が可能となった。今後はこの認知状態推定手法を用いて、様々な執務環境の評価や改善案の検討を行うことができると考えられる。

しかし、本実験で用いた暗算課題は単調かつ比較的単純なルールのタスクであり、その他様々な認知タスクによる検討だけでなく、より高度な知的能力を必要とするタスクによる検討も行う必要がある。また、被験者がタスクを行った 10 分という時間も、実業務と比較すると短時間である。今後は長時間の実験も検討し、実際の知的作業環境により近い条件下で本手法を評価する必要がある。

6. 結論

本研究では、執務者の作業パフォーマンスと認知負荷との両方を考慮した、パフォーマンス-認知モデルに基づく認知状態推定手法の検証を行った。本手法による認知状態推定の妥当性評価として、パフォーマンスおよび認知負荷推定が正答に行われているか確認するため、2 種類の難易度のタスクを用いた被験者実験を行った。実験結果から、本手法において推定されたパフォーマンスおよび認知負荷がタスク難易度に従ってそれぞれ有意に低下および上昇することが確認されたため、本手法による推定の妥当性が示唆された。

また、10 分という短いタスク間でも、常に認知状態が変動している様子が確認できた。前後の状態遷移も含めると、より詳細に執務者の認知状態を推測できる可能性が示唆された。

今後は高度、または多様な知的能力を必要とする認知タスクや、長時間のタスク遂行による認知状態推定への影響も検討し、より正確な知的生産性評価手法の実現を目指す。

参考文献

- [1] 下田宏, 服部瑤子, 富田和宏, 河内美佐, 石井裕剛, 大林史明, 寺野真明, 吉川榮和: オフィスワークのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究- プロダクティビティ評価法 CPTOP の開発-; ヒューマンインターフェースシンポジウム 2006, Vol.1, No.1321, pp.145-150 (2006).
- [2] 岩川幹生, 近辞佑樹, 榎本健治, 宮城和音, 下田宏, 石井裕剛, 寺野真明: 知的生産性改善評価のための新パフォーマンステストの開発; ヒューマンインターフェースシンポジウム 2008, pp. 273-280, (2008).

- [3] Wargocki, P., Wyon, D.P., Fanger, P.O.: Productivity is Affected by the AirQuality in Offices; *Healthy Building 2000*, pp. 635-640 (2000).
- [4] Thorne, D.R., Genser, S.G., Sing, H.C., Hegge, F.W.: The Walter Reed performance assessment battery; *Neurobehavioral Toxicology & Teratology*, Vol 7, No.4, pp. 415-418 (1985).
- [5] Brünken, R., Plass, J.L., Leutner, D.: Direct Measurement of Cognitive Load in Multimedia Learning; *EDUCATIONAL PSYCHOLOGIST*, Vol. 38, No. 1, pp. 53-61 (2003).
- [6] Paas, F., Tuovinen, J.E., Tabbersm H., Pascal, van Gerven, W. M.: Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory; *EDUCATIONAL PSYCHOLOGIST*, Vol. 38, No. 1, pp. 63-71 (2003).
- [7] Paas, F., van Merriënboer, J.J.G.: The efficiency of instructional conditions: An approach to combine mental effort and performance measures; *Human Factors*, Vol. 35, No. 4, pp. 737-743 (1993).
- [8] Ayres, P., Paas, F.: Cognitive Load Theory: New Directions and Challenges; *Applied Cognitive Psychology*, Vol. 26, No. 6, pp. 827-832 (2012).
- [9] Hess, E.H., Polt, J.M.: Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving; *Science*, Vol. 143, pp. 1190-1192 (1964).
- [10] 山本博巳, 清水康敏: 数字列記憶実験における瞳孔面積と瞬目時間の変化; *テレビジョン学会誌*, Vol. 45, No. 3, pp. 370-376 (1991).
- [11] Halverson, T., Estep, J., Christensen, J., Monnin, J.: Classifying Workload with Eye Movements in a Complex Task; *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 56, No. 1, pp. 168-172 (2012).
- [12] Iqbal, S. T., Adamczyk, P. D., Zheng, X. S., Bailey, B. P.: Toward an Index of Opportunity: Understanding Changes in Mental Workload during Task Execution; *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 311-320 (2005).
- [13] Stanners, R.F., Coulter, M., Sweet, A.W., Murphy, P.: The Pupillary Response as an Indicator of Arousal and Cognition; *Motivation and Emotion*, Vol. 3, No.4, pp.319-340 (1979).
- [14] 石橋富和, 大谷璋, 三浦武夫: 精神負担の指標としての心拍数, *産業医学*, Vol. 10, No. 7, pp. 377-379 (1968).
- [15] Kennedy, D.O., Scholey, A.B.: Glucose administration, heart rate and cognitive performance: effects of increasing mental effort; *Psychopharmacology*, Vol. 149, No. 1, pp. 63-71 (2000).
- [16] Backs, R.W., Seljos, K.A.: Metabolic and cardiorespiratory measures of mental effort: the effects of level of difficulty in a working memory task; *International Journal of Psychophysiology*, Vol. 16, No. 1, pp.57-68 (1994).
- [17] 國政 秀太郎, 瀬尾 恭一, 下田 宏, 石井 裕剛: パフォーマンス-認知負荷モデルを用いた精神負荷作業中の複数の認知状態推定手法, *ヒューマンインタフェースシンポジウム 2013*, pp.177-184 (2013).
- [18] Hart S. G., Staveland L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research, Hancock P. A., Meshkati N. (Eds.), *Human mental workload*, pp.139-183, (1988).