

P300 の潜時の違いによる Model Human Processor の検証

東野 利貴^{*1}, 清水 菜々子^{*2}, 曾我 真人^{*2}, 若宮 直紀^{*1}

^{*1} 大阪大学大学院情報科学研究科, ^{*2} 和歌山大学システム工学部

Validation of Model Human Processor due to difference latency of P300

Toshitaka Higashino^{*1}, Nanako Shimizu^{*2}, Masato Soga^{*2}, Naoki Wakamiya^{*1}

^{*1} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{*2} Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

Skill learning support repeats recognition, judgment and action interaction. The Model Human Processor (MHP) by Cardard et al. is modeled to predict the reaction time of this cycle. However, MHP predicts reaction time according to heuristics, not predicted from the aspect of brain activity. In this study, we investigated the validity of the prediction model of MHP reaction time from the aspect of brain activity by focusing on the difference latency of P300 by EEG. As a result of the experiment, the same trend as the prediction model of reaction time of MHP was obtained in the reaction time obtained in the experiment. As a result of EEG analysis, P300 was observed in all experiments, and it was found that the latency difference has the same tendency as the prediction model of reaction time of MHP. Therefore, the prediction model of reaction time of MHP is also appropriate from the aspect of brain activity was revealed.

キーワード: Model Human Processor, 反応時間, 脳波, 事象関連電位, P300

1. はじめに

スポーツスキルや芸術スキルといったスキルの学習支援では、認識、判断、行動のインタラクションサイクルを繰り返す。このサイクルの反応時間を予測できるようモデル化したものに、Card らによる Model Human Processor (MHP)がある⁽¹⁾。これは、被験者に刺激を提示し、刺激を認識してボタンを押すかどうかを判断し、ボタンを押すという行動を実行するまでの反応時間について予測が可能なモデルである。

しかし、この MHP は、行動を伴う多数の研究で報告されている反応時間をもとに、平均反応時間を割り出し、経験則から反応時間を予測したものであり、脳活動の側面から反応時間を予測したのではない。また、実際に脳活動の側面から検証を行っている研究は少ない。

以上より、脳活動の側面から MHP の反応時間の予

測モデルを検証するために、本研究では、MHP でモデル化されている 4 つの基本的ユーザーパフォーマンスに準じた 4 つの実験を行うと同時に脳波を計測し、脳波計測の結果から MHP の反応時間の予測モデルの妥当性を検証する。

本研究では、MHP で挙げられている 4 つの基本的ユーザーパフォーマンスであり、認知プロセッサの周期回数が異なる単純反応、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応に対応したそれぞれの実験を設計し、視覚刺激呈示から反応（マウスクリック）までの反応時間を計測すると同時に、脳波計測を行った。

被験者 10 名に実験を行った結果、反応時間において、単純反応、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応の順に反応時間が有意に長くなることがわかった。この結果は、MHP で挙げられている反応時間の予測モデルの傾向と一致している。よって、本

研究の実験で得られた反応時間から、MHP の反応時間の予測モデルを再認することができた。

次に、脳波計測において、実験ごとに解析を行った結果、4つの実験で、特徴的な脳波である N200, P300 が観測された。P300 は、オドボール課題でよく観測されるが、その心理的過程として、刺激に対する比較、評価、判断、選択的注意、認知文脈の更新に関与しているといわれている²⁾。MHP の反応時間の予測モデルでは、認知プロセッサにおいて認識、判断等のプロセスが含まれているため、この P300 に注目することで予測モデルの妥当性を検証できるのではないかと考えた。4つの実験で観測された P300 を比較した結果、単純反応、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応の順に P300 のピークまでの時間（潜時）が長くなっていることがわかった。この傾向は、MHP で挙げられている反応時間の予測モデルの傾向と一致している。よって、MHP の反応時間の予測モデルと本研究で行った実験で得られた P300 のピークまでの潜時が対応していることから、MHP の反応時間の予測モデルは脳活動の側面からも妥当性を持つことが明らかとなった。

2. Model Human Processor (MHP)

Model Human Processor とは、人間に感覚情報が入力され、それが処理され、運動系に対して出力指示がなされるという一連の流れを情報処理の観点からモデル化したものである¹⁾³⁾。そして、各処理の処理時間やメモリの記憶容量の目安を提示し（図1）、感覚情報の入力から運動系の出力までの反応時間を予測できる（図2）。具体的には、感覚情報が提示されてから運動を行うまでに、知覚プロセッサ、認知プロセッサ、運動プロセッサの3つのプロセッサを経ながら情報処理が進むとモデル化されている。

知覚プロセッサは、外界から感覚器に刺激が入力され、その刺激情報を作業記憶（WM）、短期記憶（STM）に保存するまでの処理に相当する。MHP では、知覚プロセッサの処理時間は 100 [50 ~ 200] ms 要するとしている。なお、○[▲ ~ Δ]ms という表記は、平均時間が○ms であり、その時間の範囲が▲ ~ Δms であることを表している。

認知プロセッサは、知覚プロセッサで脳に保存された記憶から、情報の照合・再認・分類などの処理や運動反応を行うか否かを決定するなど、人間情報処理モデルにおいて中心的な役割を果たしている。認知プロセッサは、必要な情報を獲得するまで何周期も繰り返される。また、認知プロセッサの1周期は、作業記憶の内容が長期記憶内の情報を活性化し、処理が行われ、その結果、作業記憶の内容が変更されるといった一連の処理である。MHP では、認知プロセッサの1周期の処理時間は、70 [25 ~ 170] ms 要するとしている。

運動プロセッサは、認知プロセッサにおいて、キーボードの打鍵やマウスの操作などの運動反応の実行が決定された場合に、その実行に携わる処理である。認知プロセッサによる反応決定から筋肉が活動し実際に運動を行うまでの時間が運動プロセッサの処理時間である。MHP では、運動プロセッサの処理時間は、70 [30 ~ 100] ms 要するとしている。

MHP では、認知プロセッサを周期回数によって、人間の反応を4つの基本的ユーザーパフォーマンスに分類している。それぞれ、単純反応、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応である。

単純反応は、ディスプレイに何らかの刺激が呈示されたらマウスクリックを行うといった行動である。処理過程の例としては、

1. ディスプレイに呈示された文字や記号は感覚器によって知覚されたのち WM に保存される。（知覚プロセッサ）
2. 情報が呈示されたら反応を行うという「反応決定」を行う。（認知プロセッサ）
3. 認知プロセッサで反応決定に従い、反応実行を行う。（運動プロセッサ）

である。この処理にかかる処理時間は、認知プロセッサ + 認知プロセッサ + 運動プロセッサ = 100 + 70 + 70 = 240 [105 ~ 470] ms 要する。

物理的照合反応は、ディスプレイなどに複数の種類の刺激が継続的に呈示され、事前に教示された刺激と呈示された刺激が同じであると判断されたときに、マウスクリックを行うといった行動である。物理的照合反応は、単純反応で挙げられている反応決定処理に加えて、教示された刺激と呈示された刺激が同一か照合する処理が必要である。よって、単純反応と比較して、

認知プロセッサの「照合」処理が反応時間に付加される。ゆえに、物理的照合反応にかかる処理時間は、310 [130 ~ 640] ms 要する。

名称照合反応は、ディスプレイなどに複数の種類の刺激が継続的に呈示され、事前に教示された刺激の名称（読みなど）と呈示された刺激の名称が同じであると判断されたときに、マウスクリックを行うといった行動である。名称照合反応は、物理的照合反応で挙げられた物理的「照合」の処理に加えて、記号の名称を LTM から「再認」する処理が必要になる。ゆえに、物理的照合反応の認知プロセッサの処理時間に、「再認」の処理の認知プロセッサの処理時間が付加される。よって、名称照合反応の処理時間は、380 [155 ~ 810] ms 要する。

カテゴリ照合反応は、ディスプレイなどに複数の種類の刺激が継続的に呈示され、事前に教示された刺激のカテゴリと呈示された刺激のカテゴリが同じであると判断されたときに、マウスクリックを行うといった行動である。カテゴリ照合反応は、名称照合反応で挙げられた「再認」の処理に加えて、呈示された刺激がどのようなカテゴリに含まれているかという情報を「分類」する処理が認知プロセッサで行われる。ゆえに、名称照合反応の認知プロセッサの処理時間に、「分類」の処理の処理時間が付加される。よって、カテゴリ照合反応の処理時間は、450 [180 ~ 980] ms 要する。

以上のように、呈示された刺激に対して、どのような比較判断が求められているかによって、認知プロセッサに要求される周期回数が異なり、最終的な反応時間が異なる。

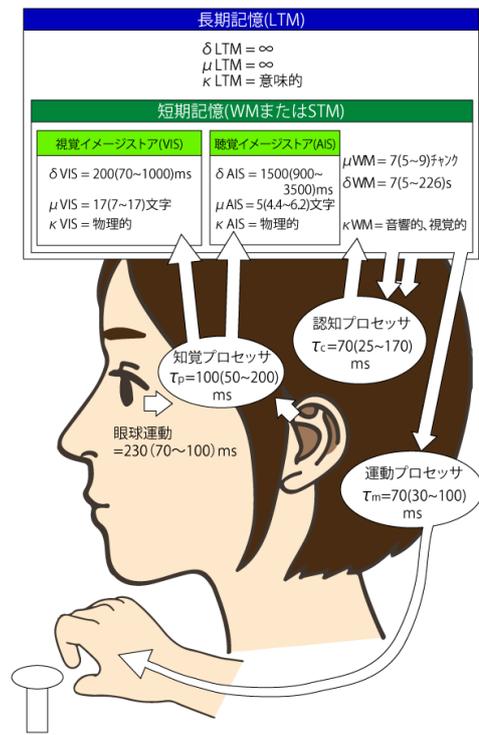


図 1 Model Human Processor

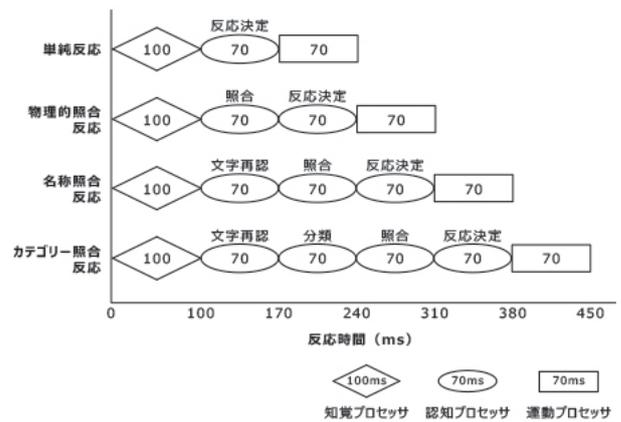


図 2 4つの基本的ユーザーパフォーマンスの反応時間

3. 先行研究

Card, Moran, Newell によって提唱された Model Human Processor (MHP)は、その予測モデルの妥当性の検証を含め様々な研究で取り上げられている(4)(5)(6)。また、この MHP を利用し、改良した研究も行われている(7)(8)。

しかし、多くの研究では、反応時間などの観点で MHP を採用しており、脳活動の側面から検証、議論している研究は少ない。我々の先行研究では、MHP に準じた4つの実験を行い、同時に脳波計測を行うことで、

MHP の反応時間の予測モデルの妥当性の検証を試みた⁹⁾。その結果、一部の被験者において、N200, P300 といった特徴的な脳波が観測された。しかし、先行研究では、単純反応課題において P300 が明確に観測できなかった。また、カテゴリ照合反応課題において、課題が易しく物理的照合反応課題に帰結してしまったため、P300 のピークまでの潜時に差が認められなかった。以上の問題から MHP の反応時間の予測モデルの妥当性を検証することができなかったが、脳波による MHP の反応時間の予測モデルの妥当性の検証の可能性を示した。本研究では、我々の先行研究の課題を改善する形で実験手法を再設計し、特徴的な脳波である P300 を用いた MHP の反応時間の予測モデル妥当性の検証を試みる。

4. 実験手法

4.1 実験目的

本研究では、MHP でモデル化されている 4 つの基本的ユーザーパフォーマンスの反応時間の予測モデルを脳活動の側面から検証するために、4 つの実験を行うと同時に脳波計測を行った。

4.2 実験環境

本実験は、脳波計測を行うため、蛍光灯等の電源ノイズの影響を考慮して暗室で行われた。実験の刺激は、視覚刺激としてコンピュータディスプレイに呈示された。被験者は、ディスプレイを正面に 1m 離れて座位にて実験を行った。また、被験者には、実験中のタスクに回答するために、利き手にマウスを握ってもらい、タスクに合わせてマウスクリックを行ってもらった。

4.3 実験設計

実験設計は、4 つの実験を通して、脳波計測でよく用いられるオドボール課題をベースに構成した。オドボール課題とは、頻度の異なる 2 種類以上の刺激をランダムな順で被験者に呈示し、被験者は低頻度の刺激 (Target 刺激) に対してのみ意識を集中し、マウスクリックを行うといった反応を行う課題である。このオドボール課題では、低頻度の刺激に意識を集中すると、事象に関連して生じる電位変化を捉えた事象関連電位 (Event-Related Potential: ERP) の 1 つである P300

と呼ばれる脳波が出現することが知られている。P300 とは、Target 刺激の約 300~600ms 後に陽性の電位変化を伴う脳波のことである。P は Positive (陽性) の頭文字である。P300 は、上述のオドボール課題で観測されることが多いが、選択や理解など、何らかの心的な判断を求めるほとんどの課題で観測され¹⁰⁾、その心理的過程として、刺激に対する比較、評価、判断、選択的注意、認知文脈の更新に関与しているといわれている²⁾。MHP の反応時間の予測モデルでは、認知プロセッサにおいて認識、判断等のプロセスが含まれているため、本研究では、この P300 に注目する。

被験者に呈示した視覚刺激は、4 つの実験を通して、注視点 (+) と刺激を交互に呈示した。注視点と刺激の呈示を 1 試行とする。刺激を呈示した回数は、Target 刺激が 30 回ずつ呈示されるように設計した。注視点 は、1000~2000ms の間隔でランダムに呈示し、刺激は、600ms に固定して呈示した (図 3)。

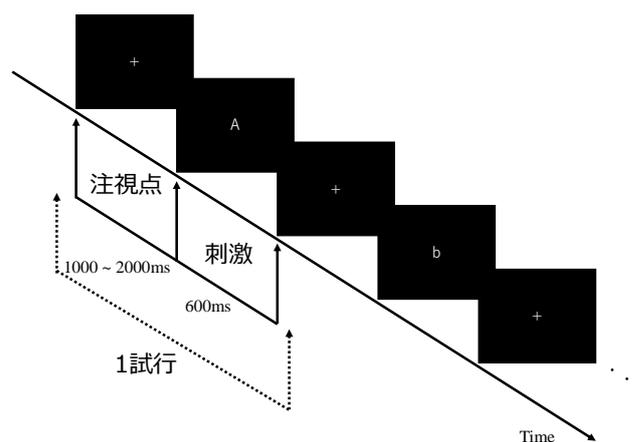


図 3 視覚刺激の流れ

実験は、MHP の 4 つの基本的ユーザーインターフェースに準じた 4 つの実験を行い、刺激呈示からマウスクリックまでの反応時間と脳波計測を行った。行った実験は以下である (表 1)。なお、実験順序の偏りによる慣れや疲労の影響を考慮して、カウンターバランスをとるために、被験者ごとに実験順序をランダムとした。

4.3.1 単純反応時間課題 (実験 1)

単純反応課題では、刺激として、ディスプレイに「●」を提示した。Target 刺激は「●」として、被験者には「●」が呈示されたらできるだけ早く左マウスクリックを行ってもらうように教示した。

4.3.2 物理的照合反応課題（実験 2）

物理的照合反応課題では、刺激として、ディスプレイに「A, B, C, a, b, c, 1, 2, 3」の中からランダムに1つの文字を呈示した。Target 刺激は「B」として、被験者には「B」が呈示されたらできるだけ早く左マウスクリックを行ってもらうように教示した。同時に、Target 刺激でない刺激の場合は、右クリックを行ってもらった。

4.3.3 名称照合反応課題（実験 3）

名称照合反応課題では、刺激として、ディスプレイに「A, B, C, D, E, a, b, c, d, e, 1, 2, 3, 4, 5」の中からランダムに1つの文字を呈示した。Target 刺激は、「/di:/と読む記号（正解は D, d）」として、被験者には「/di:/と読む記号」が呈示されたらできるだけ早く左クリックを行ってもらうように教示した。同時に、Target 刺激でない刺激の場合は、右クリックを行ってもらった。

4.3.4 カテゴリー照合反応課題（実験 4）

カテゴリー照合反応課題では、刺激として、ディスプレイに「A, B, C, D, E, a, b, c, d, e, 1, 2, 3, 4, 5」の中からランダムに1つの文字を呈示した。Target 刺激は、「アルファベットの子音（正解は B, C, D, b, c, d）」として、被験者には「アルファベットの子音」が呈示されたらできるだけ早くマウスクリックを行ってもらうように教示した。同時に、Target 刺激でない刺激の場合は、右クリックを行ってもらった。

表 1 刺激の種類

	刺激	Target刺激
単純反応課題	●	●
物理的照合反応課題	A, B, C, a, b, c, 1, 2, 3	B
名称照合反応課題	A, B, C, D, E, a, b, c, d, e, 1, 2, 3, 4, 5	/di:/と読む記号 (D, d)
カテゴリー照合反応課題	A, B, C, D, E, a, b, c, d, e, 1, 2, 3, 4, 5	子音 (B, C, D, b, c, d)

4.4 脳波計測

本実験では、マウスクリックタスク実験と同時に脳波計測を行った。実験で使用した脳波計は、BIOSEMI Active Two システムを使用した。計測箇所は、国際 10-20 法⁽¹¹⁾に基づいて電極を配置した（図 4）。サンプリング周波数は、512Hz として計測を行った。

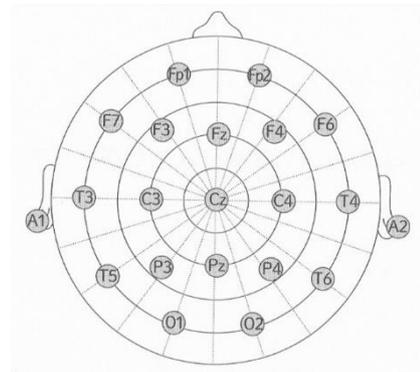


図 4 国際 10-20 法の電極位置

5. 実験結果

5.1 被験者

実験に参加した被験者は、10名の健康な大学生（男性 9名、女性 1名、平均年齢 22.4 歳、標準偏差 1.0 歳）である。すべての被験者は、実験内容について十分に理解しており、参加の同意を得た上で実験を行った。なお、本実験は、和歌山大学研究倫理審査委員会の承認を受け行われた。

5.2 反応時間

4つの実験で、Target 刺激呈示からマウスクリックを行うまでの時間を反応時間として計測した。その結果が図 5 である。反応時間の解析にあたり、各実験の Target 刺激に対して正しいマウスクリックを行った試行のみを採用した。また、標準偏差の 2 倍以上離れた反応時間は外れ値として解析から除外した。解析された反応時間は、実験の種類ごとにほぼ線型的に伸びており、単純反応課題である実験 1 が最も短く、対して、カテゴリー照合反応課題である実験 4 が最も長い結果となった。得られた反応時間から分散分析を行った結果、すべての実験の反応時間間で有意水準 5%以下として有意差が認められた。

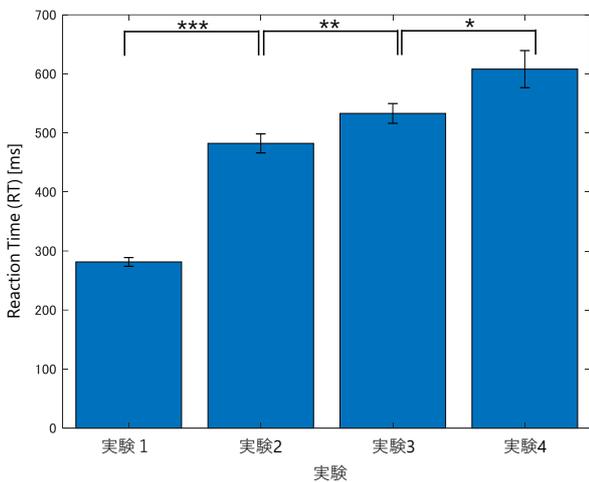


図 5 実験ごとの反応時間の結果

(エラーバーは標準誤差, $p^* < 0.05$, $p^{**} < 0.01$, $p^{***} < 0.001$)

5.3 脳波

4つの実験で、マウスクリックタスク課題中の脳波計測結果について報告する。脳波解析対象として、各実験の Target 刺激に対して正しいマウスクリックを行った試行のみを採用した。また、5.2の反応時間で外れ値として除外された試行や、 $100\mu V$ 以上の電位を計測した試行は解析から除外した。脳波解析に使用した電極位置は、P300がよく観測される Cz (頭頂部) である。

脳波解析の準備として、1~30Hzのバンドパスフィルタを適応し、電源ノイズなどのノイズを除去した。また、眼球運動に伴うアーチファクトの除去も行った。脳波解析は、上述の理由で除外された試行を除いた Target 刺激の試行中に得られた脳波を刺激呈示のタイミングをオンセット (0ms) として、被験者ごとに加算平均を行った。P300を含む事象関連電位は1試行あたりではそれほど大きく観測されないため、試行の加算平均を行う必要がある。次に、被験者ごとに加算平均で得られた脳波を被験者ごとの個人差の影響を小さくするために、すべての被験者の加算平均済の脳波を加算する総加算平均を行った。最後に、刺激呈示前 100ms から刺激呈示までの平均脳波を用いてベースライン補正を行った。その結果が図 6 である。なお、緑色の矢印は P300 のピーク位置を表している。

脳波解析の結果、すべての実験で、刺激呈示後 300~600ms の間に P300 が観測された。実験ごとの

P300 のピークまでの時間 (潜時) を比較すると、単純反応課題である実験 1 が最も短く、カテゴリ照合反応課題である実験 4 が最も長い結果となった。

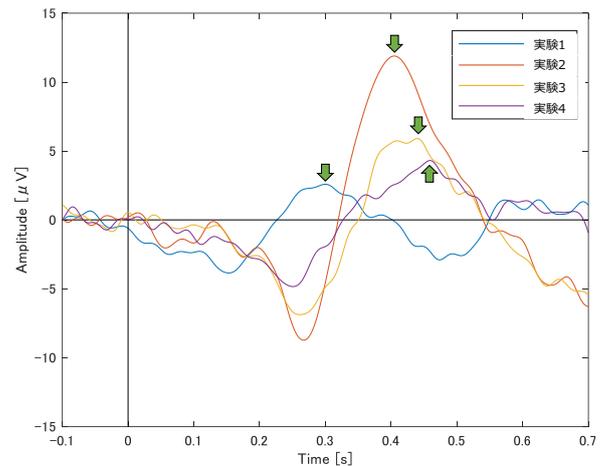


図 6 実験ごとの脳波計測の結果

(オンセットは刺激呈示のタイミング。緑色の矢印は脳波 P300 のピークを表す)

6. 考察

本研究の目的は、MHP でモデル化されている 4 つの基本的ユーザーパフォーマンスの反応時間の予測モデルを脳活動の側面から検証することである。これを明らかにするために、MHP に準じた 4 つの実験を行うと同時に脳波計測を行った。本研究で行った実験結果から考察を行う。

まず、実験で得られた反応時間について考察を行う。得られた反応時間は、図 5 より実験 1 < 実験 2 < 実験 3 < 実験 4 の順で有意に長くなっている。MHP でモデル化されている反応時間も単純反応 < 物理的照合反応 < 名称照合反応 < カテゴリ照合反応の順で長くなっている。本実験の結果は、MHP の反応時間の予測モデルの傾向と一致する。また、反応時間が長くなるという傾向だけではなく、本研究の各実験における反応時間は、MHP でモデル化されている反応時間 (2章) の範囲に収まっている。よって、MHP の反応時間の予測モデルを再認することができ、本研究の各実験が、MHP の予測モデルを反映した実験設計が行えていたことが確認できた。

次に、実験で得られた脳波から考察を行う。図 6 より、本研究のすべての実験で、刺激呈示後 300~600ms の間に P300 が観測された。観測された脳波が P300 で

参 考 文 献

あると示す根拠は、本研究の実験が P300 の観測でよく用いられるオドボール課題をベースに設計したことに起因する。また、P300 が観測される場合、同時に N200 と呼ばれる陰性の脳波が観測される⁽²⁾。本研究の各実験で得られた脳波は、P300 の観測前に陰性の N200 が観測されている。ゆえに、観測された大きな陽性の脳波は P300 であるといえる。実験の結果から P300 のピークまでの潜時は、実験 1 < 実験 2 < 実験 3 < 実験 4 の順に長くなっていることが分かった。この傾向は、図 5 の計測された反応時間の傾向と一致している。ゆえに、本研究の実験で計測された P300 は、実験内容と無関係ではなく、実験内容に対する脳活動を計測できていると考えられる。また、P300 のピークの潜時が実験ごとに長くなる傾向は、MHP でモデル化されている反応時間の傾向とも一致する。よって、各実験の P300 のピークまでの潜時が実験ごとに長くなっている傾向と、MHP でモデル化されている反応時間も反応の種類ごとに長くなっていることから、脳活動の側面から MHP の反応時間の予測モデルは妥当であることがわかった。

7. まとめ

本研究の目的は、MHP でモデル化されている 4 つの基本的ユーザーパフォーマンスに準じた 4 つの実験を行うと同時に脳波を計測し、脳波計測の結果から MHP の反応時間の予測モデルの妥当性を検証することである。MHP の反応時間の予測モデルに対応した 4 つの実験を行った結果、反応時間において MHP の反応時間の予測モデルを再認する結果が得られた。同時に、脳波計測を行った結果、すべての実験で特徴的な脳波である N200, P300 が観測された。また、P300 のピークまでの潜時は、認知プロセッサの周期回数が増える反応になるごとに長くなっていくことがわかった。よって、各反応に対応した実験で得られた P300 のピークまでの潜時が長くなっている傾向と、MHP でモデル化されている反応時間も反応の種類ごとに長くなっていることと対応することから、脳活動の側面から MHP の反応時間の予測モデルは妥当であることがわかった。

- (1) Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A., "The psychology of human-computer interaction", Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates (1983)
- (2) 加賀 佳美, 相原 正男, "P300 基礎", 臨床神経生理学, 41 巻 2 号(2013)
- (3) 古川康一, 溝口文雄共編, "インタフェースの科学", 共立出版, pp.50-74(1987)
- (4) Jastrzemski, T. S., & Charness, N., "The Model Human Processor and the older adult: Parameter estimation and validation within a mobile phone task.", *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 13(4), 224-248(2007)
- (5) Bonnie E. John, Allen Newell, "Toward an Engineering Model of Stimulus-Response Compatibility", *Advances in Psychology*, Volume 65, Pages 427-479(1990)
- (6) Muneo Kitajima and Makoto Toyota, "Simulating navigation behaviour based on the architecture model Model Human Processor with Real-Time Constraints (MHP/RT)", *Behaviour & Information Technology*, 31:1, 41-58(2012)
- (7) Liu, Yili and Feyen, Robert and Tsimhoni, Omer, "Queueing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-machine Systems", *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Volume 13 Issue 1, Pages 37-70(2006)
- (8) Wu, Changxu, and Yili Liu., "Modeling Human Transcription Typing with Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP)." *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 48, no. 3, 381-85(2004)
- (9) Toshitaka Higashino, Yudai Asano, Masato Soga, "Investigation of Model Human Processor by EEG Measurement", *Procedia Computer Science*, Volume 112, Pages 2040-2047(2017)
- (10) 開 一夫, 金山 範明, 河内山 隆紀, 松本 敦, 宮腰 誠, "脳波解析入門: EEGLAB と SPM を使いこなす", 東京大学出版会, p.102(2016)
- (11) Jasper H. H., "The ten twenty electrode system of the international federation", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 10, 371-375(1958)