

# Model Human Processor と運動準備電位の比較と矛盾点の検証

清水 菜々子† 東野 利貴‡ 曾我 真人†

## 1. はじめに

ヒューマン・コンピュータ・インタフェースを考えるにあたって、人間がどのように認識・判断・行動という認知処理を行なっているかを知ることが重要となる。人間の認知処理過程をモデル化することにより、人間の行動が予測可能となり、より良いインタフェースの設計が可能になる。そこで、人間の認知処理過程をモデル化したものに、Model Human Processor (MHP) がある。MHPを用いることで、人間が視覚や聴覚の刺激を知覚してから、ボタンを押すかどうかを判断し、ボタンを押すまでのプロセスにかかる時間を予測することが可能である。しかし、MHPは経験則に従い処理時間を予測したものであり、脳活動の側面からはあまり検討されていない。そこで、本研究では随意運動に関連して出現する特徴的な脳波である運動準備電位 (Readiness Potential: RP) が認知処理過程におけるどの時刻に出現するかを確認し、そのタイミングが MHP と矛盾していないかの検証を行なった。

## 2. Model Human Processor と 4 つの基本的ユーザ・パフォーマンスについて

MHP は、Card らによって提案された人間の認知処理過程のモデルである[1]。認知処理過程とは、入力情報を処理し、出力を行うまでの、入力処理 (知覚)・認知処理 (認知)・出力生成 (運動) の 3 つの過程のことであり、MHP では、知覚に要する平均時間を 100ms、認知に要する平均時間を 70ms、運動に要する平均時間を 70ms として定めている (図 1)。

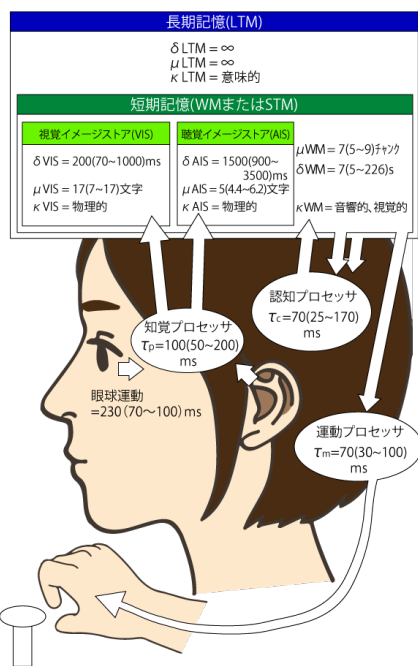


図 1 Model Human Processor

また、人間の認知処理において、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と呼ばれる 4 つの基本的ユーザ・パフォーマンスが存在する。単純反応は何らかの視覚刺激が呈示されたときに行う反応、物理的照合反応は事前に記憶していた記号と呈示された記号が同じときに行う反応、名称照合反応は事前に記憶していた文字の名称と呈示された文字の名称が同じときに行う反応、カテゴリー照合反応は事前に記憶していた文字のカテゴリーが呈示された文字のカテゴリーと同じときに行う反応である。これら 4 つの反応の認知処理過程を図 2 から図 5 に示す。また、4 つの反応は MHP を用いて図 6 に示すように表すことができる[2]。

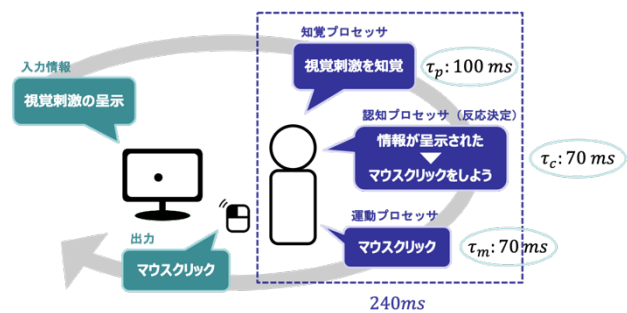


図 2 単純反応

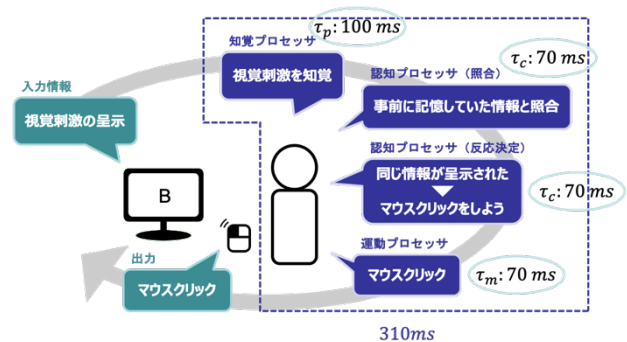


図 3 物理的照合反応

†和歌山大学, Wakayama University

‡ 大阪大学, Osaka University

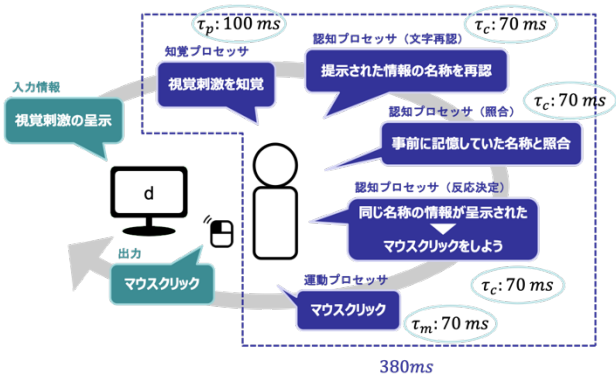


図4 名称照合反応

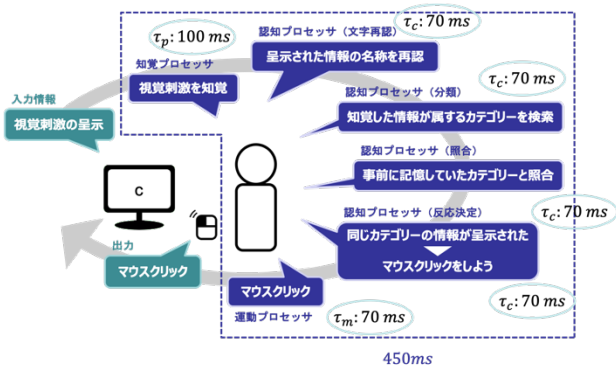


図5 カテゴリー照合反応

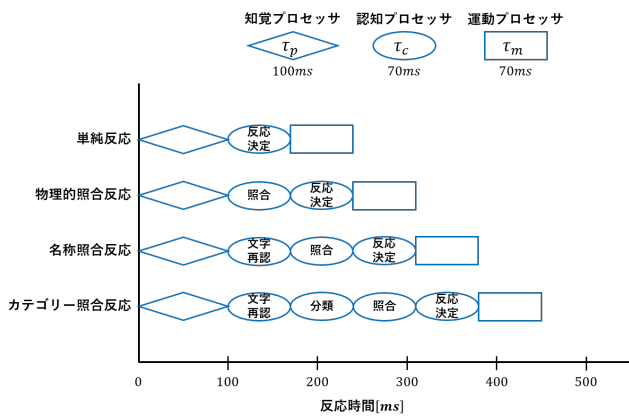


図6 MHP で表した4つの反応

### 3. Model Human Processor と運動準備電位の矛盾

RP は、Kornhuber らによって発見された脳波であり、随意運動に 550ms 先立って出現する微小な電位の変化であり、負の方向へ電位が変化する[3]。この RP は、随意運動の準備に関連する脳波であり、運動野で観測される。

RP の出現するタイミングは、随意運動の 550ms 前であり[4]、それは MHP における運動プロセッサの終了地点より 550ms 前に該当する。また、随意運動の準備が脳内で行われるのは、情報を知覚した後から実際に運動に移るまでの区間、すなわち認知プロセッサの区間であると考えられる。しかし、図 7 に示すように単純反応、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応の 4 つの反応において、運動プロセッサの終了地点から 550ms 前は、認知プロセ

ッサの区間より前の地点になっており、RP の出現位置が MHP と矛盾していることが分かる。

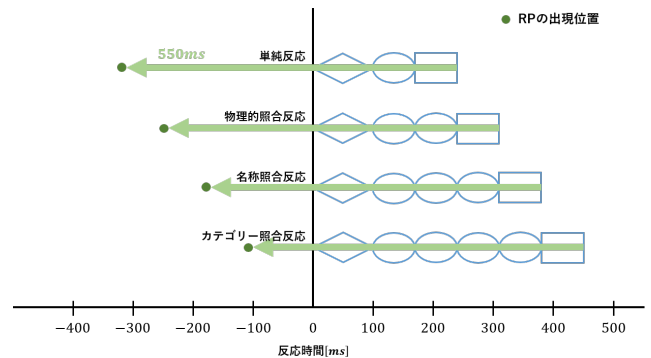


図7 MHP と RP の矛盾

### 4. 研究目的

MHP において、脳内で運動の準備が行われるのは、認知プロセッサの区間である。しかし、RP の出現位置が随意運動の 550ms 前であるため、認知プロセッサの区間より前に RP が出現することになり矛盾が発生する。そこで、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する実験を構築し、実験中の脳波を計測することで、RP がどの地点で出現するかを確認し、この矛盾点についての検証を行った。

### 5. 先行研究

MHP を脳活動の側面から検証した研究として、東野らが 2017 年に発表した“Investigation of Model Human Processor by EEG Measurement”がある[5]。この研究では、4 つの基本的ユーザ・パフォーマンスに対応する実験を行うと同時に、脳波を計測し、MHP の処理時間の予測の正当性を検討している。実験の結果、すべての反応において、特徴的な脳波である N100, P200, P300 が検出された。感覚刺激の大脳皮質到着に関する脳波である N100、注意を向けるように指示された刺激を知覚した際に反応を示す P200 は、すべての反応で出現までの時間に大きな違いが見られなかったため、これを MHP における知覚プロセッサに相当するものとしている。また、P300 は注意を向けている刺激が呈示されたときに出現し、反応に対する刺激の関連度によって振幅が変化することが知られているため、刺激の意味を理解したときに出現すると考え、MHP の認知プロセッサの過程に相当するものとしている。なお、P300 のピークの出現までの時間が、カテゴリー照合反応を除き、単純反応、物理的照合反応、名称照合反応の順に伸びていることが、MHP の認知プロセッサの数が、単純反応、物理的照合反応、名称照合反応の順に増えていることと共通している。これらの結果より、MHP は脳活動の側面からもおおむね説明できるとしている。

### 6. 実験手法

本研究では、4 つの反応に対応する 4 つの実験を用意した。視覚刺激を呈示するためのディスプレイを被験者から 1m 離れた位置に設置し、被験者には脳波計を装着してもらい、利き手にマウスを握ってもらった。実験は、脳波計を装着した被験者に視覚刺激を呈示し、事前に教示した視

覚刺激（ターゲット刺激）が呈示されたら左クリックを、それ以外の視覚刺激が呈示されたら右クリックを行ってもらうという形で行った。また、視覚刺激の呈示からマウスクリックまでの時間を反応時間（Reaction Time: RT）として記録した。各実験における視覚刺激、ターゲット刺激を表1に示す。視覚刺激は、注視点（+）が呈示された画面と、視覚刺激が呈示された画面を交互に呈示した（図8）。注視点の呈示時間は、1000-2000msの間でランダムにした。これは、視覚刺激が呈示されるタイミングをずらすことで、被験者が視覚刺激の呈示されるタイミングを覚えてしまうことがないようにするためである。視覚刺激は600ms間呈示した。各実験において、視覚刺激の回数ほどの視覚刺激も30回になるように設定した。これは、脳波解析を行う際に加算平均処理を行うためである。また、呈示される視覚刺激の順番および4つの実験の順番は被験者ごとにランダムである。

表1 視覚刺激の種類

	視覚刺激	ターゲット刺激	ターゲット刺激の出現確率[%]
単純反応	●	●	100
物理的照合反応	A, B, C, a, b, c, 1, 2, 3	B	11
名称照合反応	A, B, C, D, E, a, b, c, d, e, 1, 2, 3, 4, 5	/di:/と読む記号 (D, d)	13
カテゴリー照合反応	A, B, C, D, E, a, b, c, d, e, 1, 2, 3, 4, 5	子音 (B, C, D, b, c, d)	40

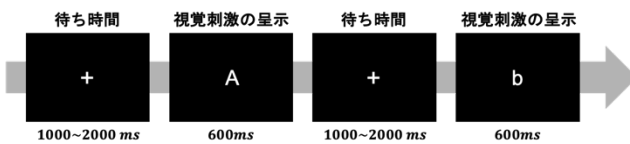


図8 視覚刺激の呈示方法

なお、脳波計測にはBIOSEMI Active Twoを用い、サンプリングレート512Hzで計測を行った。電極の配置は国際10-20法に基づいている（図9）[6]。

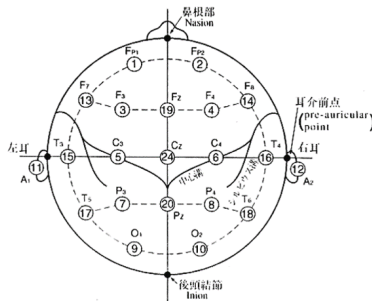
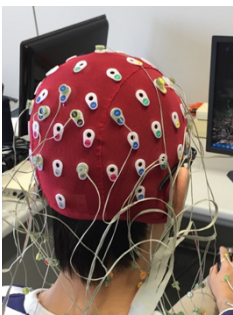


図9 BIOSEMI Active Two と電極配置（国際10-20法）

## 7. 解析手法

取得した脳波のデータから被験者ごとの加算平均波形を導出するまでのデータ処理の過程を図9に示す。脳波のデータから眼電位のデータを除算することで、眼球運動やま

ばたきによるノイズを除去し、1-30Hzのバンドパスフィルタを適用することで、脳波以外の現象によるノイズを除去した。ノイズを除去した脳波のデータを、トリガー（マウスクリックの位置）を起点に-1000msから500msの区間で分割した。分割したデータ一つ一つに対して、視覚刺激呈示の位置を起点に-700msから-500msの区間の平均電位をベースラインとして、ベースライン補正を行った。その後、RTが平均±2SD（標準偏差の±2倍）を超えるデータを外れ値として除外し、加算平均を行った[7][8]。また、被験者ごとの加算平均波形をさらに加算平均することで、総加算平均波形を導出した。総加算平均波形では、実験条件とは無関係な個人差や測定誤差が消え、平均的な波形を取得することができる[9]。

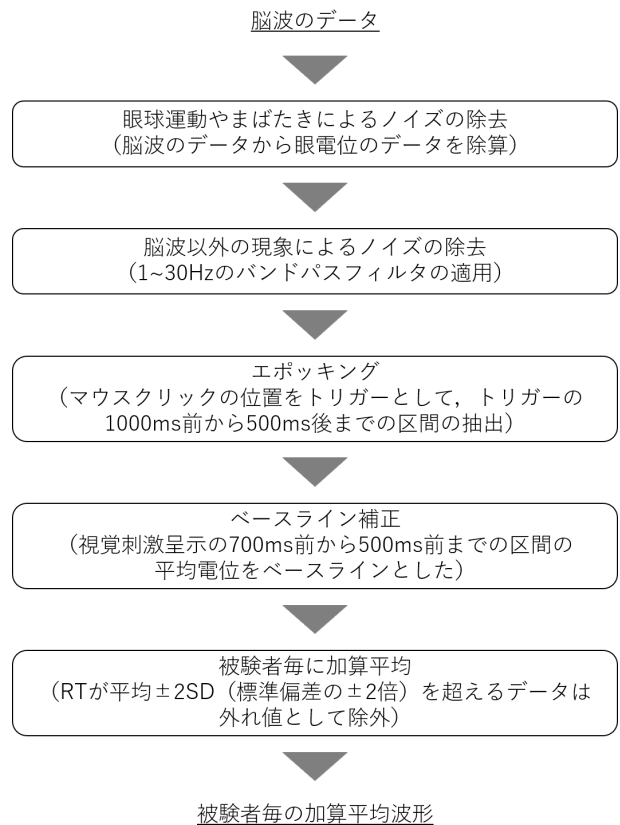


図9 脳波データ整形の過程

## 8. 実験結果

実験に参加した被験者は、10名の健康な和歌山大学の関係者（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。また、解析に用いたデータは、RPが検出される運動野の位置であるC3の電極のデータである。

### 8.1 4つの実験における総加算平均波形

4つの実験における総加算平均波形を図10に示す。図10において、0msの位置はマウスクリックの位置を、赤線は視覚刺激呈示の位置を示している。なお、グラフの横軸は脳波の振幅（μV）を、縦軸は時間（sec）を表している。

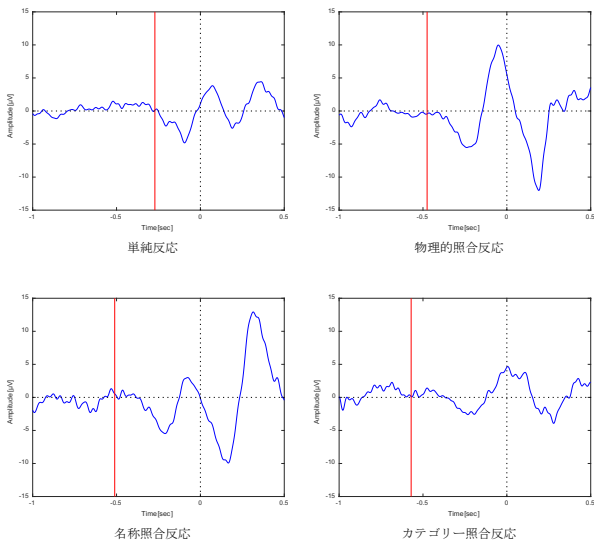


図 10 4つの反応における総加算平均波形

## 8.2 4つの実験における反応時間

4つの実験におけるRTの平均値、分散を表2に示す。

表 2 4つの実験におけるRTの平均値と分散

	RTの平均値[sec]	RTの分散[sec <sup>2</sup> ]
単純反応	0.2819	0.0223
物理的照合反応	0.4799	0.0488
名称照合反応	0.5253	0.0558
カテゴリー照合反応	0.6144	0.0964

4つの実験におけるRTについて、有意水準5%で一元配置分散分析を行なった。多重比較の結果(表3)、4つのモデルのRTには有意差があり、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RTが優位に長くなっていることが分かった。4つの実験におけるRTの平均値、標準誤差、p値を図11に示す[10]。

表 3 多重比較

a1: 単純反応, a2: 物理的照合反応, a3: 名称照合反応, a4: カテゴリー照合反応  
Pair: 組合せ, Diff: 差分, t-value: t値, df: 自由度, p: p値, adj.p: 調整済みp値

Pair	Diff	t-value	df	p	adj.p	
a1-a3	-0.2433	16.1651	9	0.0000	0.0000	a1<a3***
a1-a2	-0.1979	15.1922	9	0.0000	0.0000	a1<a2***
a1-a4	-0.3325	12.0282	9	0.0000	0.0000	a1<a4***
a2-a4	-0.1346	4.4989	9	0.0015	0.0045	a2<a4*
a2-a3	-0.0454	4.1433	9	0.0025	0.0050	a2<a3*
a3-a4	-0.0892	3.5578	9	0.0061	0.0061	a3<a4*

+p<.10, \*p<.05, \*\*p<.01, \*\*\*p<.001

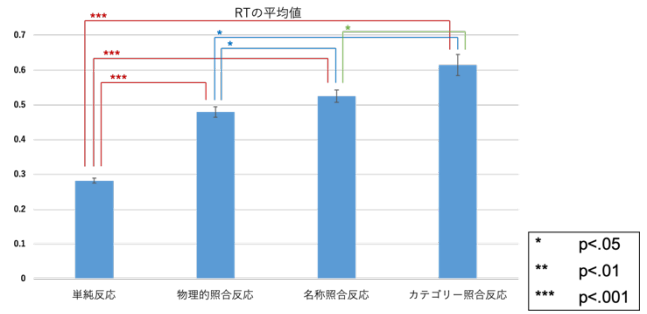


図 11 4つの実験におけるRTの平均値、標準誤差、p値 (エラーバーは標準誤差を示す)

## 8.3 4つの実験における運動準備電位の出現位置

4つの実験における総加算平均波形およびRPが出現し始めた位置(波形の振幅が有意に負に振れ始めた位置)を図12に示す。図12において、0msの位置はマウスクリックの位置であり、赤線は視覚刺激呈示のタイミングを示している。なお、水色の区間は、帰無仮説を「平均がゼロで分散が未知の正規分布である」として、1標本t検定を行い、有意水準5%で棄却された区間である。

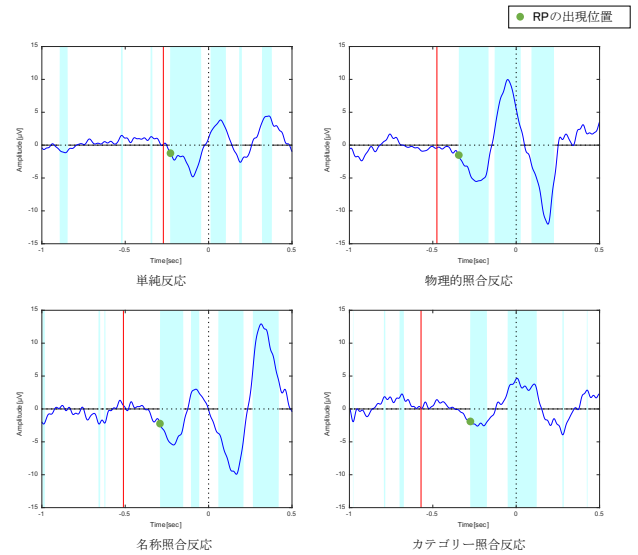


図 12 RPの出現位置

また、MHPにおける4つのモデルでの認知処理過程の予測、RPの出現位置、マウスクリックの位置を図13に示す。なお、図13において0msの位置は視覚刺激呈示のタイミングである。図13より、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応では、RPの出現位置は認知プロセッサの区間であることが分かる。しかし、単純反応では知覚プロセッサの区間でRPが出現していた。



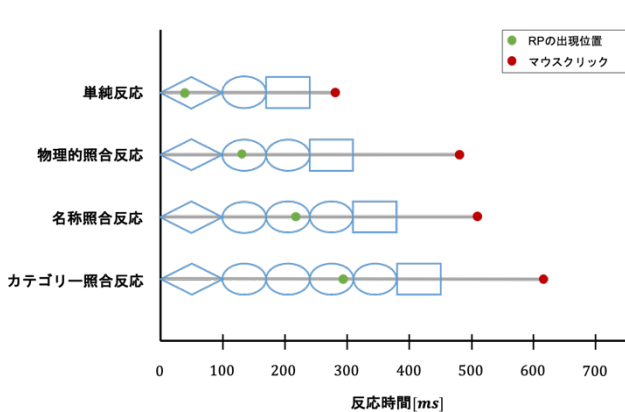


図 13 MHP におけるモデルと RP の出現位置

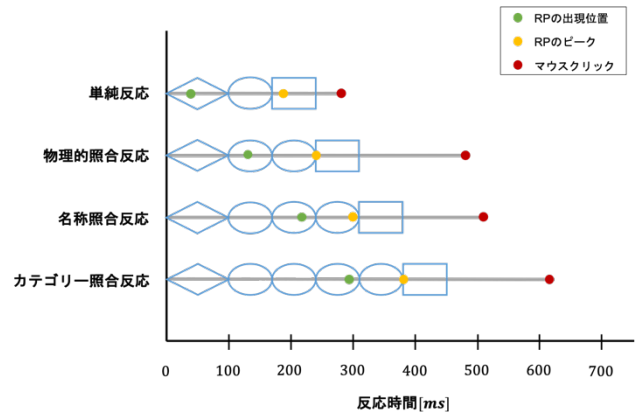


図 15 MHP におけるモデルと RP のピーク位置

#### 8.4 4つの実験における運動準備電位のピーク位置

4つのモデルにおける総加算平均波形およびRPのピークの位置 (RPの出現区間において波形の振幅が有意に最大になる位置)を図14に示す. 図14において, 0msの位置はマウスクリックの位置であり, 赤線は視覚刺激呈示のタイミングを示している

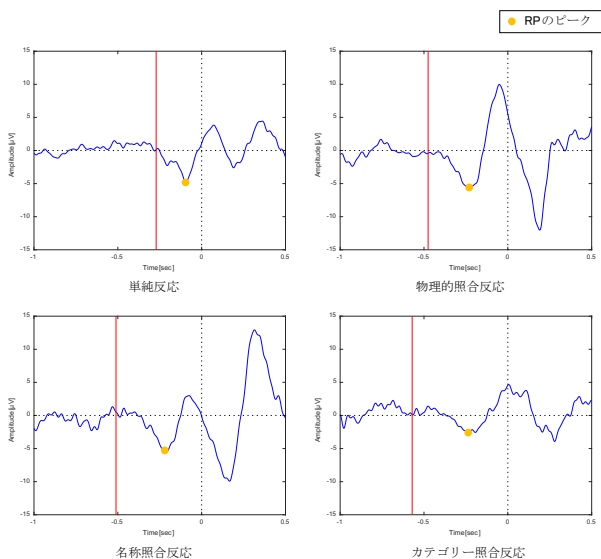


図 14 RP のピーク位置

また, MHP における 4 つのモデルでの認知処理過程の予測, RP のピークの位置, マウスクリックの位置を図 15 に示す. なお, 図 15 において 0ms の位置は視覚刺激呈示のタイミングである. 図 15 より, 各反応において, 視覚刺激呈示から RP のピークが出現するまでの時間が, 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伸びていることが分かる. この結果は, MHP における認知プロセッサの数が, 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増えていることと共通している.

### 9. 考察

本実験で得られた結果より, 以下の 4 点の考察が得られた.

#### 9.1 反応時間の長さ

RT の長さは, 単純反応, 名称照合反応, 物理的照合反応, カテゴリー照合反応の順に有意に長くなっていった. MHP で表した 4 つの基本的ユーザ・パフォーマンスの RT は, 図 6 で示したように, 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長くなる. すなわち, 今回行った 4 つの実験の RT は, MHP における RT の予測と一致した.

#### 9.2 運動準備電位の出現位置

RP の出現位置について, 物理的照合反応, 名称照合反応, カテゴリー照合反応では, 認知プロセッサの区間で出現した. そのため, 物理的照合反応, 名称照合反応, カテゴリー照合反応においては, MHP は脳活動の側面から見ても問題がないといえる. 一方, 単純反応では, 知覚プロセッサの区間で RP が出現した. 単純反応は, 視覚刺激が呈示されたらマウスクリックを行うという, 他の 3 つの反応と比較しても非常に簡単な反応である. そのため, 実際に視覚刺激を知覚するよりも前から, マウスクリックをしようという準備状態に脳内であった可能性が考えられる. しかし, 脳内がマウスクリックの準備状態にあったとしても, 実際にマウスクリックを行うかどうかの決定を行うのは, 視覚刺激を知覚した後と考えられるため, 単純反応の認知処理過程を「知覚→認知 (反応決定) →運動」と予測した MHP のモデルに間違いはない.

#### 9.3 運動準備電位のピーク位置

RP のピークの位置は, MHP における認知プロセッサの反応決定の位置が, 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遅れるのと同様に遅れている. よって, RP のピークの位置は MHP における反応決定の位置に相当すると考えられる.

#### 9.4 運動準備電位の出現位置について

図 13 に示すように, 随意運動の 550ms 前に RP が現れなかった理由について考察する. Libet の実験によって RP が随意運動の 550ms 前に出現することが明らかになったが, Libet の実験は, 被験者に任意のタイミングでボタンを押してもらい, その時の脳波と反応時間を計測するという内容

であった。そのため、本研究で行った実験と実験の内容が大きく異なる。したがって、本実験での RP の出現位置が図 7 での RP の出現位置とは異なる位置になったと考えられる。

## 10. まとめ

本研究では、経験則的に導かれたモデルである MHP が脳活動の側面からも正しいかどうかを検証するために、特徴的な脳波である RP に着目し、4つの基本的ユーザ・パフォーマンスに対応する実験を構築して、その実験中の脳波を計測した。実験の結果、RT は単純反応、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有意に長くなっており、MHP における RT の予測の傾向と一致した。RP の出現位置は、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応では、認知プロセッサの区間であり、単純反応では、知覚プロセッサの区間であった。また、視覚刺激呈示から RP のピークが出現するまでの時間は、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増加していることが分かった。これは、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 MHP における認知プロセッサの数が増えていることと対応している。したがって、物理的照合反応、名称照合反応、カテゴリー照合反応では、MHP は正しいことが分かった。一方、単純反応では、RP が知覚プロセッサの区間で出現したが、単純反応が他の 3 つの反応と比べて非常に簡単な反応であるため、視覚刺激を知覚するよりも前から脳が運動の準備状態になった可能性が考えられる。そのため、単純反応においても MHP は間違っているとはいえない。以上より、MHP は特徴的な脳活動である RP の側面からも概ね説明できることが分かった。

## 11. 今後の発展

本研究では、MHP の理論が脳活動の側面から正しいかどうか、RP に着目して検証を行ったが、他の特徴的な脳波についても計測し、検証していくことで MHP が脳活動の側面からの正しいかどうかを証明することができる。人間の認知処理過程の予測を行うモデルである MHP が他の特徴的な脳活動の側面からも正しいことが証明できれば、MHP に則って設計したヒューマン・コンピュータ・インタフェースの信頼性を脳活動の側面からも保証することができるようになる。

## 参考文献

- [1] S. K. Card, T. P. Moran, A. Newell, "The Psychology of Human-Computer Interaction", Crc Press, 1983.
- [2] 古市康一, 溝口文雄, 編, "インタフェースの化学 (知識情報処理シリーズ 5)", 共立出版, pp. 49-76, 1987.
- [3] H. H. Kornhuber, L. Deecke, "Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale", *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 第 284 巻, pp. 1-17, 1965.
- [4] Benjamin Libet "Do We Have Free Will?" *Journal of Consciousness Studies* 6(8-9), pp.47-57, 1999
- [5] T. Higahino, Y. Asano, M. Soga, "Investigation of Model Human Processor by EEG Measurement," *Procedia Computer Science*, 第 112 巻, pp. 2040-2047, 2017.
- [6] 松田信義, 菅野剛史, "臨床検査技術学 (7) 臨床生物学", 医学書院, 1995.
- [7] Swartz Center for Computational Neuroscience, "What is EEGLAB?", Swartz Center for Computational Neuroscience, [オンライン]. Available: <https://sccn.ucsd.edu/eeeglab/index.php>. [アクセス日: 2019年2月7日].
- [8] 実吉綾子, 前原吾朗, "はじめよう実験心理学 MATLAB と Psychtoolbox を使って", 勁草書房, 2015.
- [9] 入戸野宏, "心理学のための事象関連電位ガイドブック", 北大路書房, 2005.
- [10] 井関龍太, "ANOVA 君-井関龍太のページ", 2018年1月4日. [オンライン]. Available: <http://riseki.php.xdomain.jp/index.php?ANOVA%E5%90%9B>. [アクセス日: 2019年2月7日].