



Title	脳波解析に基づくModel Human Processorの検証と分岐処理モデルの提案
Author(s)	東野, 利貴
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105508
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

脳波解析に基づく Model Human Processor の 検証と分岐処理モデルの提案

提出先 大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月 2026 年 1 月

東野 利貴

発表論文，国際会議報告リスト

学術雑誌（査読あり）

1. Higashino, T., & Wakamiya, N. (2025). Revisiting the Model Human Processor: A neurophysiological investigation based on P300 and Bereitschaftspotential. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19, 1690746.
（博士論文 第3章に対応）
2. Higashino, T., & Wakamiya, N. (2021). Verification and Proposal of Information Processing Model Using EEG-Based Brain Activity Monitoring. *International Journal of Psychological and Behavioral Sciences*, 15(1), 10 - 17.
（博士論文 第2章に対応）

国際会議報告（査読あり）

3. Higashino, T., & Wakamiya, N. (2021, January). Verification and proposal of information processing model using EEG-based brain activity monitoring. *ICBENN 2021: International Conference on Brain Engineering, Neuroscience and Neurocomputing*.
（博士論文 第2章に対応）

研究概要

ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) の基礎理論である Model Human Processor (MHP) は、人間の情報処理を「知覚・認知・運動」から成る直列システムとして体系化した一方で、その神経生理学的基盤は提案から約 40 年にわたり未検証のままであった。加えて、従来の MHP は「正答」を前提とする単一経路モデルゆえに、現実のインタフェース操作で頻発する「誤答」や、熟練に伴う「自動的処理」を説明できないという理論的限界を残していた。本研究は、MHP の神経基盤を脳波計測により検証するとともに、この限界を超える動的な分岐処理モデルを提唱することを目的とした。実験では、MHP の基本反応モデル（単純・物理・名称・カテゴリー照合）に準拠し認知負荷を段階的に操作した課題を用い、事象関連電位（Event-Related Potential, ERP）と準備電位（Bereitschaftspotential, BP）を指標として 2 段階の検討を行った。研究 1 では、刺激呈示後約 100 ms に安定して出現する N100 が「知覚プロセッサ」と時間的・機能的に対応し、「認知プロセッサ」内で要求される照合・再認・分類といった処理段階の増加に伴い、P300 の潜時が段階的に延長することを示した。加えて、運動負荷のみを操作した追加実験により、P300 の潜時が反応時間とは独立して変化しないことを示し、P300 が運動プロセスとは独立した認知的評価および意思決定の完了を示す神経マーカーであることを特定した。研究 2 では、誤答が正答とは異なり、反応時間が系統的に短縮しており、明瞭な P300 および早期 BP を欠くことを見出した。さらに、正答試行においても、P300 を伴い認知的評価の完了後に生起する熟慮のプロセスと、P300 を欠き、短潜時で運動が実行される自動的プロセスという、質的に異なる 2 つの情報処理経路が混在していることを明らかにした。以上より、知覚後の情報処理は、単一の直列経路ではなく、状況に応じて P300 を伴う熟慮のプロセスとそれをバイパスする自動的プロセスへ動的に分岐することが実証された。本論文では、このメカニズムを組み込んだ新たな枠組みとして「分岐型 MHP モデル」を提案する。この分岐型 MHP モデルは、誤答や高速応答のメカニズムを認知科学における二重過程理論（System 1/2）と N100・P300・BP という神経マーカーで統合的に説明し、HCI の基礎理論と認知神経科学を橋渡しする枠組みを提供する。同時に、本モデルは、インタフェース設計における熟慮と自動化のバランスを検討するための理論的基盤を与え、誤操作の予測やスキル習熟度の客観的評価といった、将来的なインタフェース最適化研究への応用可能性を示すものである。

目次

研究概要	1
第 1 章：緒言	4
1.1 研究の背景と問題提起	4
1.1.1 デジタル社会における人間理解の重要性.....	4
1.1.2 Model Human Processor (MHP) の理論的背景	4
1.1.3 MHP の構造.....	5
1.2 本研究の目的と研究課題	10
1.2.1 本研究の基本的立場	10
1.2.2 研究課題 1：ERP を用いた MHP の神経生理学的検証.....	11
1.2.3 研究課題 2：二重情報処理経路の発見と分岐型 MHP モデルの提案	11
1.3 本研究のアプローチの概要	12
1.3.1 ERP／BP を用いた神経生理学的アプローチ.....	12
1.3.2 二段階（研究 1・研究 2）の研究デザイン.....	13
1.4 本研究の位置づけと学術的貢献	13
1.5 本論文の構成	15
第 2 章：ERP を用いた MHP の神経生理学的検証（研究 1）	16
2.1 研究目的	16
2.2 実験・分析手法	16
2.2.1 検証に用いる神経活動指標	16
2.2.2 実験被験者	17
2.2.3 実験タスクと手続き	18
2.2.4 脳波計測および前処理	20
2.2.5 分析指標の定義	22
2.2.6 仮説検証のための統計解析	23
2.3 結果	23
2.3.1 課題遂行の正確性（正答率）とデータ品質（試行数）	23
2.3.2 実験 α （ラテンアルファベット）	25
2.3.3 実験 α -3'（反応決定タイミング）	27
2.3.4 実験 β （ひらがな）	28
2.3.5 実験 γ （漢字）	30
2.4 考察	32
2.4.1 知覚プロセッサ（N100）の妥当性と解釈.....	32
2.4.2 認知プロセッサ（P300）の逐次的階層構造と負荷依存性.....	32
2.4.3 漢字処理（実験 γ ）における MHP の限界と並列的拡張	33
2.4.4 P300 と反応決定プロセスの時間的關係：認知－運動変換の兆候.....	34
2.5 本章の小结と次章への課題	34

第3章：二重情報処理経路の発見と分岐型 MHP モデルの提案（研究2）	38
3.1 本章の目的と研究2の位置づけ	38
3.2 実験・分析手法	39
3.2.1 方法論的検証：P300 と BP の分離計測（予備実験）	39
3.2.2 実験被験者	41
3.2.3 実験設定	41
3.2.4 実験タスクと手続き	41
3.2.5 脳波計測および前処理	42
3.2.6 分析指標の定義	42
3.2.7 仮説検証のための統計解析	44
3.3 結果	45
3.3.1 分析データの品質（試行回数）	45
3.3.2 仮説Aの検証：正答と誤答の行動的・神経学的差異	45
3.3.3 仮説Bの検証：正答試行群の再分類	50
3.4 考察：二重処理経路と分岐型 MHP モデルの提唱	53
3.4.1 MHP の限界と二重処理経路の発見	53
3.4.2 分岐型 MHP モデルの提案	54
3.4.3 認知科学における二重過程理論との関連	56
3.4.4 本章の限界と代替的解釈	57
3.5 本章の小结	57
第4章：総合考察	59
4.1 本研究の主要な成果の総括	59
4.2 本研究の学術的貢献	62
4.2.1 HCI 分野への貢献：MHP の神経生理学的基盤の確立	62
4.2.2 認知神経科学への貢献：二重過程理論への実証的証拠	63
4.3 HCI 分野への実践的含意（Implication）	63
4.4 本研究の限界と今後の展望	64
4.4.1 最大の課題：「分岐」の決定要因の未解明	64
4.4.2 「自動的プロセス（ α ）」の積極的解明と P300 判定の限界	65
4.4.3 後期 BP ピークの代替的解釈	65
4.4.4 サンプルサイズの制約と知見の一般化可能性	66
4.5 総括と結論	66
第5章：結論	68
参考文献	70
謝辞	74

第 1 章：緒言

1.1 研究の背景と問題提起

1.1.1 デジタル社会における人間理解の重要性

現代社会は、スマートフォンから自動車、工場の生産ラインに至るまで、あらゆる場面で人間とコンピュータのインタラクション（ヒューマンコンピュータインタラクション, HCI）に支えられている。このデジタル化の潮流は、人々の生活を豊かにし、生産性を飛躍的に向上させた一方で、操作ミス、情報過多によるストレス、誤判断といった新たな問題を生み出している。これらの問題の多くは、システムやユーザーインタフェース（以下、インタフェース）設計が、それを利用する「人間」の認知的特性や限界を十分に考慮していないことに起因する。

このような課題に対処するため、HCI 分野では「人間中心設計」の理念が広く採用されてきた (Norman, 1988; ISO 9241-210, 2010)。この理念の核心は、ユーザーの認知的プロセスを理解し、それに整合する設計を行うことである。

このためには、人間が外部刺激をどのように知覚し、理解し、判断し、行動するのかという一連の心的過程を定量的に捉えることが不可欠である。これが、人間情報処理（Human Information Processing）の研究の出発点である。このような人間中心的なアプローチは、HCI 分野の初期から一貫して議論されており (Dix et al., 2004; Preece et al., 2015)、ISO 9241-210 (2010) にも「人間中心設計」として明示されている。

1.1.2 Model Human Processor (MHP) の理論的背景

前節で述べた「人間中心設計」を実現するために、人間の情報処理過程を工学的に応用可能な形で体系化した代表的な成果が、Card, Moran, Newell による Model Human Processor (MHP) である (Card et al., 1983)。MHP は、「知覚から運動までの情報処理系列を要素分解して設計に応用できる」という強みを持ち、HCI やユーザビリティ評価に多大な影響を与えた (Card et al., 1983; John & Kieras, 1996)。

本モデルは、1960 年代以降の認知心理学の知見を基盤として成立した。本節では、MHP の理論的背景となった主要な認知モデルを概観する。

Neisser (1967) は、人間の行動を「知覚－認知－行動」の循環サイクルとして捉え、環境との相互作用の中で情報が動的に処理されることを強調した。Fitts & Posner (1967) は技能学習を「認知段階」「連合段階」「自動化段階」の 3 段階に分け、学習に伴う処理様式の変化を示した。また Rasmussen (1983) は、SRK モデルとして、熟練度に応じた行動の 3 層構造（「スキルベース」「ルールベース」「知識ベース」）を提案し、認知レベルによる行動制御モデルを体系化した。

こうした心理学的研究を工学的応用に拡張した代表的な成果が、Card, Moran, Newell による MHP である (Card et al., 1983)。MHP は、人間を情報処理システムとして捉え、知覚プロセッサ・認知プロセッサ・運動プロセッサという 3 つの主要モジュールで構成されるモデルである。それぞれのプロセッサには、標準的な処理時間（知覚プロセッサ 100 ms, 認知プロセッサ 70 ms, 運動プロセッサ 70 ms）が設定

されており、タスクを構成する認知操作（例：刺激の認識、意味の判断、反応の選択など）ごとに、対応するプロセッサの処理時間を積算することで、実験を行わずとも人間の反応時間（Reaction Time, RT）を予測できるという実用的特徴をもつ。

このように MHP は、当時の心理学的知見を工学的応用へと橋渡しする役割を果たした。これは「認知工学」という新しい学際領域の萌芽であり、後のユーザビリティ研究や HCI デザイン理論の礎となった。例えば、Norman (1986) が提唱した「行為の 7 段階モデル」は、ユーザーの目標達成プロセスをモデル化し、インタフェースデザインに認知科学的視点をもたらすなど、この分野の発展に貢献した (Norman, 1986; Hollnagel & Woods, 2005)。

また、MHP 以降、より統合的な認知アーキテクチャとして、ACT-R (Anderson, 2007) や SOAR (Newell, 1990) が提案され、知識表象と手続き記憶を統一的に説明する枠組みが整備された。さらに、並列分散処理モデル (Parallel Distributed Processing, PDP) (Rumelhart & McClelland, 1986) や、MHP を拡張した EPIC モデル (Kieras & Meyer, 1997) など、処理の並列性や動的特性を考慮した理論も展開している。

このように、人間の情報処理を説明する理論モデルは MHP に限らず、多数の候補が存在する。これらのモデルは、MHP との理論的距離や、重視する処理特性の違いに応じて整理することができる。ACT-R や SOAR は、知識表象と推論過程を統合的に扱う大規模な認知アーキテクチャとして発展してきた。

一方、PDP や EPIC モデルは、処理の並列性や動的特性を強調し、MHP の直列処理仮定を部分的に修正している。このように、各モデルはそれぞれ異なる理論的強みを有しており、研究目的に応じて適切な枠組みを選択する必要がある。

したがって、本研究は MHP のみを特権的な理論とみなすものではなく、これらのモデル群の中で、HCI 分野において標準的に用いられてきた MHP を代表的枠組みとして取り上げ、その妥当性と限界を神経生理学的に検証する立場をとる。

1.1.3 MHP の構造

(1) MHP の基本的枠組み

MHP は、人間を「情報処理システム」として定式化した認知アーキテクチャであり、人間が外部刺激を受け取り、理解し、行動するまでの一連の心的プロセスを、計算モデルとして表現するものである (Card et al., 1983)。

このモデルは、人間の行動を 3 つの情報処理モジュールからなる 3 層構造として定義している。

1. 知覚プロセッサ：外部刺激を感覚器官で受け取り、内部表象に変換する段階。
2. 認知プロセッサ：知覚された情報をもとに、過去の記憶との照合・判断・意思決定を行う段階。
3. 運動プロセッサ：判断結果に基づいて身体を動かし、外界に反応を出力する段階。

この 3 プロセッサはそれぞれ独立しており、情報は一方向的に流れる直列処理構造をとる (図 1.1)。各プロセッサは一定の処理時間をもって動作し、内部では有限容量の記憶バッファを介してデータを受け渡すと想定されている。図 1.1 に示すように、MHP は知覚・認知・運動という 3 層構造を明確に分離したアーキテクチャとして表現される。

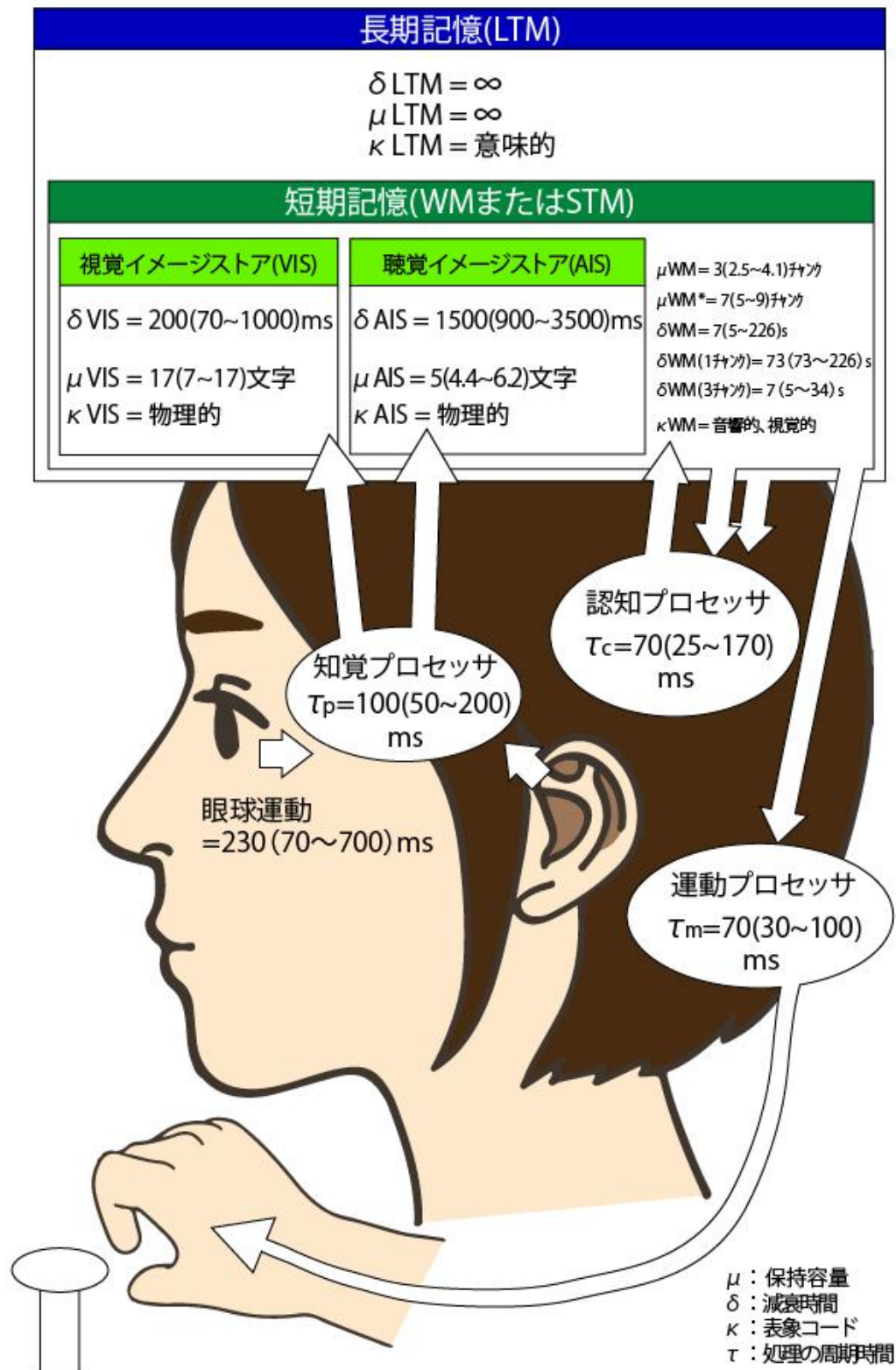


図 1.1 Card らによる MHP

τ は各プロセッサの処理時間（ミリ秒）， μ は記憶容量， δ は記憶の減衰時間， κ は減衰しない項目数を表す．VIS：視覚イメージ記憶，AIS：聴覚イメージ記憶，LTM：長期記憶，WM：作業記憶，STM：短期記憶

図 1.1 に示すように、MHP では知覚プロセッサに対応する記憶構造として、視覚イメージストア (VIS) と聴覚イメージストア (AIS) が想定されている。本研究では、これらをまとめて「視覚・聴覚レジスタ」と呼んでいる。視覚・聴覚レジスタは、外部から入力された感覚情報をきわめて短時間（約数百ミリ秒）保持する感覚バッファであり、図 1.1 のパラメータ μ （容量）と δ （減衰時間）で表される特性をもつ。

このように、VIS/AIS に一時的に保持された感覚情報は、知覚プロセッサを経て内部表象へと変換され、後続の認知プロセッサへと受け渡される構造になっている。

(2) 各プロセッサの構成要素と処理特性

■ 知覚プロセッサ

知覚プロセッサは、外部刺激を感覚入力として受け取り、物理的エネルギー（光・音・触覚）を知覚単位として符号化する役割を担う。主に視覚と聴覚の入力系を想定しており、心理学的研究に基づいて平均処理時間は約 100 ms とされている（Card et al., 1983）。

この段階の主要構成要素は次のとおりである。

- 視覚・聴覚レジスタ：極めて短時間情報を保持する感覚バッファ。
- 知覚符号化過程：入力された刺激を、内部表象（例：形状、色、音韻）に変換するプロセス。

知覚プロセッサの出力は、後続の認知プロセッサによって解釈される「知覚記号」として作業記憶に渡される。

■ 認知プロセッサ

認知プロセッサは、MHP の中核を成す処理系であり、受け取った知覚情報を短期記憶・長期記憶と照合し、意味を理解し、反応を決定する。

Card らはこのプロセッサをさらに以下の 4 つのプロセスに分け、表 1.1 に示すように、各プロセスの標準的な処理時間を提示している。

図 1.1 では、認知プロセッサに対応する記憶構造として、作業記憶と長期記憶が配置されている。作業記憶は、数秒～数十秒のあいだ保持される有限容量の短期記憶として位置づけられ、現在の課題処理に直接必要な情報を一時的に維持・操作する役割を担う。

本研究では、MHP における作業記憶を「短期記憶」とほぼ同義の概念として扱う。一方、長期記憶は、語彙知識や概念構造、過去の経験などを長期間にわたって蓄積する記憶系であり、作業記憶と相互作用しながら照合・再認・分類・反応決定といった認知プロセスを支える。認知プロセッサは、知覚プロセッサから受け取った情報を作業記憶に保持しつつ、長期記憶内の知識と照合することにより、意味理解や意思決定を行う。

表 1.1 MHP の認知プロセッサにおける各プロセスの機能と処理時間

プロセス	機能	代表的心理過程	平均処理時間
照合	知覚された刺激を短期記憶や長期記憶内の情報と物理的に照らし合わせる	パターン認識	約 70 ms
再認	記号や語の名称・意味的同定を行う	言語認知・名称判断	約 70 ms
分類	抽象的规则や概念に基づきカテゴリー判断を行う	意味分類・カテゴリー化	約 70 ms
反応決定	適切な行動を選択・決定する	意思決定・反応選択	約 70 ms

これらのプロセスは逐次的に働き、課題の複雑さによって経由するプロセスの数が増える。たとえば単純な刺激応答では「反応決定」のみを経るが、言語的・概念的判断を伴う課題では「再認」、「分類」など複数の過程を通過する。

■ 運動プロセッサ

運動プロセッサは、認知プロセッサで決定された行動命令を筋肉運動に変換する段階である。平均処理時間は約 70 ms とされる。このプロセッサの出力は、手や指などの身体運動として外部行動に現れる。

(3) 処理の時間的階層と情報の流れ

MHP における情報処理の基本構造は、3 つのプロセッサを情報が順次通過する直列モデルとして定義される。Card らは各プロセッサの標準的な処理時間を表 1.2 のように定義した。ただし、各プロセッサは独立した内部クロックを持って動作するため、システム全体としてはパイプライン処理による並列性が許容されている。すなわち、知覚プロセッサが時刻 t の刺激を処理している間に、認知プロセッサが時刻 $t-1$ の刺激を並行処理するといったオーバーラップが想定されている。重要なのは、個々の刺激に対する処理の流れや、各プロセッサ内部での処理はあくまで逐次的であるという点である。このような処理の並列性に関する考え方は、後に Queueing Network-MHP (QN-MHP) (Liu, Y et al., 2006) へと発展し、マルチタスク状況における人間の挙動予測に応用されている。

表 1.2 MHP の各プロセッサの標準的な処理時間

プロセッサ	平均処理時間 (ms)	処理時間幅 (ms)
知覚プロセッサ	100	50 ~ 200
認知プロセッサ	70	25 ~ 170
運動プロセッサ	70	30 ~ 100

(4) MHP における 4 つの基本反応モデル

MHP の枠組みをもとに、Card らは人間の基本的な刺激-反応行動を次の 4 種類に分類した。これらのモデルは、認知プロセッサ内で通過するプロセスの数と種類により、RT が系統的に変化することを示す。この処理系列の違いは、図 1.2 に示すように、単純反応を基礎とし、「照合」、「再認」、「分類」といった認知プロセスが段階的に蓄積（あるいは追加）されることによる処理時間の差として表される。表 1.3 に

示すように、単純反応（約 240 ms）から分類反応（約 450 ms）へと、経由するプロセスの増加に伴い RT が段階的に延長する（Card et al., 1983）。

表 1.3 MHP で分類されている 4 つの反応とその典型 RT

モデル名	概要	典型 RT
単純反応	単一刺激に対する単一反応	約 240 ms
物理的照合反応	形状の一致判断	約 310 ms
名称照合反応	同じ発音・記号判断	約 380 ms
カテゴリー照合反応	意味的・概念的分類	約 450 ms

図 1.2 は、これら 4 つの反応モデルにおいて活性化される認知プロセスの違いを視覚的に示している。RT の増大は、これらのプロセスが逐次的に積み重なることに起因すると考えられる。

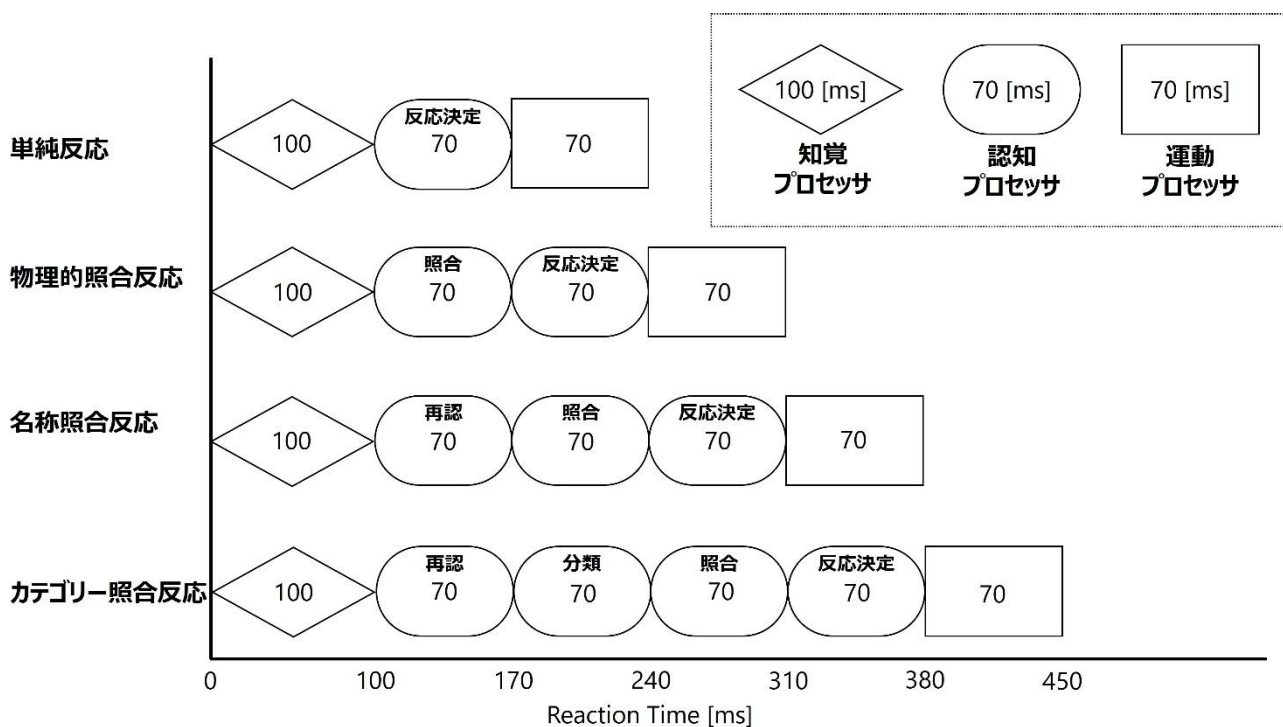


図 1.2 MHP で分類されている 4 つの反応モデルのプロセッサ・プロセスの構成

(5) 理論的意義と限界

MHP は、人間の行動を情報処理として体系的にモデル化した最初の包括的枠組みであり（Card et al., 1983）、その定量的モデル構造は今日でも RT 予測やインタフェース設計、タスク分析の基礎理論として広く活用されている。しかしその一方で、MHP にはいくつかの理論的・構造的限界が指摘されてきた。

第一に、MHP は行動観察に基づくモデルであり、各プロセスに対応する神経生理学的指標との対応関係が特定されていない（Newell, 1990）。第二に、直列処理仮定の単純化である。実際の認知処理はより並列的・動的であり、後続の EPIC モデル（Kieras & Meyer, 1997）などはこの点を修正している。第三に、

MHP は正答を前提とした規範的モデルであり、誤答や熟練効果といった動的な行動変化を説明できない (Rasmussen, 1983; Norman, 1981)。これらの限界を克服することが本研究の課題である。

また、MHP が提案された 1983 年当時は、神経生理学的手法が発展途上であり、脳活動の直接観測は困難であった。Card 自身も、MHP をインタフェース設計のための「工学的予測モデル」と位置づけており、個々の神経回路や脳領域と対応づけるような神経基盤の特定そのものを目的とはしていない (Card et al., 1983)。その後、Sutton らによる P300 の発見 (Sutton et al., 1965) や Donchin らによる認知負荷と P300 の関連性の示唆 (Donchin, 1981; Donchin & Coles, 1988) など、事象関連電位 (Event-Related Potential, ERP) を用いた認知機能の計測技術は確立されつつあった。しかし、これらを用いて MHP の情報処理段階を体系的に検証した研究はほとんどない。この「約 40 年間の空白」が生じた背景には、工学的応用を志向する HCI 分野と、基礎実験を主とする神経科学分野との間に存在した学際的統合の困難さがあったと考えられる。従来の MHP は、RT や正答率といった行動指標、すなわち外部から観察可能な行動データのみに基づいて構築されてきた。

なお、MHP の直列処理仮定に対する批判や拡張として、QN-MHP (Liu et al., 2006) や EPIC モデル (Kieras & Meyer, 1997)、さらには二重過程理論 (Sloman, 1996) や SRK モデル (Rasmussen, 1983) などが提案されている。これらの理論は、マルチタスク状況における処理の並列性や、自動的処理と熟慮的処理の切り替えといった現象を説明するうえで重要な役割を果たしている。しかし、それらの多くは、元来の MHP と同様に行動指標にもとづく理論モデルであり、各処理段階と神経活動との対応を体系的に検証した研究は十分ではない。

このように、MHP は人間行動の定量的理解に大きく貢献した一方で、神経生理学的基盤の欠如と、処理構造の静的・直列的な前提が限界として残されている。そこで本研究では、従来の行動指標のみに依拠した検証を超え、神経生理学的観点から MHP の妥当性を再検討する。本研究では、これらの行動指標に加えて脳波計測 (Electroencephalography, EEG) を導入し、MHP が想定する各処理段階を脳内の電気活動として直接観測する。これにより、MHP の抽象的なプロセス構造に神経生理学的指標との対応関係を明らかにすることを目指す。

本研究は、こうした拡張モデルの是非を直接検証する前段階として、まず MHP の基本構造そのものに対して神経生理学的な裏付けを与え、その上で単一処理経路仮定の限界を示すことを目的とする。

すなわち、本研究は MHP を出発点としつつ、EPIC や二重過程理論と整合的な拡張可能性を検討する位置づけにある。

1.2 本研究の目的と研究課題

1.2.1 本研究の基本的立場

前節で述べたように、MHP は、人間の情報処理過程を知覚・認知・運動といった直列的なプロセスとして定式化し、インタフェースの設計や作業評価において大きな役割を果たしてきた。しかし、MHP は行動指標にもとづく抽象モデルであり、各プロセスが脳内のどのような神経活動と対応しているのかは十分に検証されていない。また、MHP は基本的に単一の処理経路を前提としており、誤答や極端に高速な応答を含む多様な人間行動をどこまで説明できるのかは明らかでない。

一方、EPIC モデルや二重過程理論、Rasmussen の SRK モデルなどの研究は、自動的な処理と熟慮的な処理が状況に応じて切り替わる可能性や、複数の処理が並列的に進行する可能性を示している。すなわち、人間の情報処理は必ずしも単一の直列経路のみで説明されるとは限らないことが示唆されている。

本研究は、MHP を HCI における標準的な理論的枠組みとして位置づけ、その理論的課題を神経生理学的データにもとづいて検証し、必要に応じて拡張することを目的とする。そのために、本研究では、RT と同時に取得した脳波指標を用いて、MHP が想定する処理段階と、実際に観測される神経活動との対応を検討する。すなわち、本研究は、行動指標と神経生理学的指標を統合的に扱うことにより、MHP の妥当性と限界を再検討し、人間情報処理過程の理解を深めることを目指す。

1.2.2 研究課題 1：ERP を用いた MHP の神経生理学的検証

第一の研究課題は、MHP が提唱する知覚・認知・運動といった処理段階が、脳波計測によって観測される ERP の時間的特性と対応するかどうかを検証し、MHP の神経生理学的妥当性を評価することである。

具体的には、視覚刺激呈示後約 100 ms で出現する陰性電位 N100 と、約 300 ms 以降に出現する陽性電位 P300 に着目する。先行研究では、N100 は主として刺激の物理的特徴に対する初期の感覚処理を、P300 は刺激の意味づけや課題関連性の評価といった高次の認知処理を反映することが示唆されている。特に P300 の潜時は、刺激評価に要する時間（認知的負荷）に応じて変動することが知られており（Donchin & Coles, 1988）、本研究では、MHP が想定する知覚プロセッサと認知プロセッサの処理時間が、これらの ERP 成分の潜時とどのような関係にあるかを検討する。

具体的には、単純反応課題や物理的照合反応課題、名称照合反応課題、カテゴリー照合反応課題など、MHP の議論で典型的に用いられてきた課題を実装し、各課題における RT、N100 の潜時、P300 の潜時を測定する。そのうえで、課題間の処理負荷の違いが ERP 成分の潜時や振幅にどのように反映されるかを分析し、MHP の処理時間モデルと比較することにより、MHP の神経生理学的妥当性を評価する。

1.2.3 研究課題 2：二重情報処理経路の発見と分岐型 MHP モデルの提案

第二の研究課題は、MHP が前提とする単一の情報処理経路という仮定が、人間の多様な行動と神経活動をどの程度説明できるかを検討し、必要に応じて複数経路モデルへの拡張を行うことである。

MHP は、刺激の知覚から認知的判断、反応決定、運動出力へと情報が一方向に流れる単一の処理経路を想定している。しかし、実際の人間の行動には、十分な時間をかけて慎重に判断したと考えられる応答だけでなく、ほぼ自動的に生じたとみなせる高速な応答や、誤った判断に基づく誤答が含まれる。これらの多様な応答が、同一の処理経路上の処理時間のばらつきだけで説明できるのか、あるいは質的に異なる情報処理経路の存在を仮定すべきかは、理論的にも実務的にも重要な問題である。

本研究では、誤答や極端に高速な応答を含む試行を対象として、ERP 成分（特に P300）と、随意運動の準備過程に関連する準備電位（Bereitschaftspotential, BP）の時間的特性を解析する。もし、正答試行と誤答試行、あるいは高速応答試行と通常応答試行のあいだで、P300 や BP の出現パターンや潜時が質的に異なるのであれば、人間の情報処理には自動的プロセスと熟慮的プロセスからなる複数の経路が存在する可能性が高い。

したがって、研究課題 2 では、誤答および高速応答を含む行動データと神経活動データを総合的に検討し、MHP の単一処理経路仮説の妥当性を検証するとともに、自動的プロセスと熟慮的プロセスからなる二重の情報処理経路モデルを構築し、MHP における処理経路の分岐メカニズムを提案することを目的とする。

1.3 本研究のアプローチの概要

1.3.1 ERP／BP を用いた神経生理学的アプローチ

本研究の研究課題に答えるために、人間の情報処理過程をミリ秒単位で追跡し、その時間構造を MHP の仮定と比較する必要がある。そのため、本研究は脳波計測による神経生理学的アプローチを採用する。

脳波計測は、頭皮上に配置した電極間の電位差を記録する非侵襲的な計測手法である。ここで観測される数マイクロボルト (μV) オーダーの電位変動は、個々の神経細胞の活動電位そのものではなく、主として大脳皮質に整然と配列した錐体細胞の樹状突起において生じる興奮性および抑制性シナプス後電位の時空間的な総和を反映している。

具体的には、神経伝達物質の放出によりシナプス後膜のイオンチャネルが開閉し、細胞膜内外にイオン電流が流れることで、細胞外空間に電位勾配が生じる。単一のニューロンによる電位変化は極めて微弱であるが、大脳皮質の層構造に対して垂直に配向した多数の錐体細胞が時間的にある程度同期して活動することにより、頭皮上でも計測可能なマクロな電場が形成され、その源は電流双極子としてモデル化される。

脳波計測はミリ秒オーダーの高い時間分解能を有する一方、空間分解能は他の画像計測手法に比べて限定的ではあるが、本研究の主眼は処理段階間の時間関係を検証することにあるため、時間分解能の高さを優先して選択した。また、機器構成や計測環境の観点からも、反復試行を多数含む行動実験と併用しやすいという利点がある。

脳波データからは、刺激に時間同期した平均波形として ERP を抽出することができる。本研究では特に、視覚刺激に対する初期感覚処理を反映するとされる N100 と、刺激評価や判断過程を反映するとされる P300 に注目する。これらの成分は、MHP の知覚プロセッサおよび認知プロセッサの処理時間と対応づけて解釈できると考えられる。

さらに、本研究では、自発的な運動出力に先行して観測されるゆるやかな陰性電位である BP も解析対象とする。BP は運動野近傍の活動を反映し、運動実行の数百ミリ秒～数秒前から出現することが知られている。BP の出現タイミングや振幅を分析することで、認知的判断から運動準備・実行へと至る過程を、MHP の反応決定・運動プロセスと関連づけて検討することが可能となる。MHP の直列処理仮定に基づけば、BP は認知的評価 (P300) の後に続き、実際の運動実行 (ボタン押し) の直前に出現することで、認知から運動への橋渡しを担う成分として位置づけられると考えられる。本研究では、この時間的順序が実際に成立するのか、あるいは並列・分岐が生じるのかを検証する。

このように、本研究では反応時間とともに、N100・P300・BP といった複数の脳波指標を統合的に解析することにより、MHP の各処理段階と神経活動との対応関係、および単一処理経路仮説の妥当性を検討する。

1.3.2 二段階（研究 1・研究 2）の研究デザイン

本研究の目的を達成するために、研究デザインは大きく 2 つの段階から構成される。これを本研究ではそれぞれ研究 1 および研究 2 と呼ぶ。

研究 1 では、MHP が提唱された当初から議論されてきた典型的な反応課題を用いて、MHP の神経生理学的妥当性を検証する。具体的には、単純反応課題、物理的照合反応課題、名称照合反応課題、カテゴリー照合反応課題を実施し、各課題における RT、N100 の潜時、P300 の潜時を測定する。課題間で要求される処理内容や負荷が異なることから、MHP はこれらの課題における処理時間の違いを一定の規則性をもって説明することが期待される。研究 1 では、ERP 成分の潜時や振幅がこの予測とどのように対応するかを検討することで、研究課題 1 に取り組む。

研究 2 では、研究 1 で用いた課題構造を拡張し、正答試行だけでなく誤答試行や高速応答試行を含めたデータを収集する。研究 2 では、N100 および P300 に加えて BP を解析対象とし、異なるタイプの応答における ERP および BP の出現パターンを比較する。もし、誤答試行や高速応答試行において、P300 が顕著に減少する、あるいは BP の立ち上がりが変化するという質的な差異が観測されるのであれば、それは MHP の単一処理経路仮説に修正を迫る証拠となり得る。これらの検証を通じて、MHP の拡張を試み、研究課題 2 に取り組む。

すなわち、研究 1 が主として MHP の段階モデルと ERP 成分との時間的対応を検証することに焦点を当てるのに対して、研究 2 は、誤答や高速応答を含む多様な行動と神経活動を分析することにより、自動的プロセスと熟慮的プロセスからなる二重の情報処理経路モデルを構成することに焦点を当てる。この 2 段階の研究デザインを通じて、本研究は、MHP の神経生理学的妥当性の検証と単一処理経路仮説の検証・拡張という 2 つの研究課題に体系的に取り組む。なお、本研究がパラレルな構成ではなく 2 段階の連続的な構成をとる理由は、研究 2 での評価（処理経路の分岐や逸脱の同定）を行うためには、その前提として研究 1 において「標準的な処理過程（MHP の基本構造）」の神経学的基準が確立されていることが論理的に不可欠であるためである。

1.4 本研究の位置づけと学術的貢献

本研究は、人間の情報処理を説明する既存の理論枠組みのうち、特に MHP に焦点を当て、その理論的課題を神経生理学的データにもとづいて検証・拡張する試みである。MHP は、インタフェース設計やタスク分析の分野において標準的な参照モデルとして用いられてきた一方で、その各処理段階と脳内活動との対応は明示されておらず、また単一の直列的処理経路を前提としている点が、近年の二重過程理論や並列処理モデルの知見とどのように整合するのかという問題が残されている。

EPIC モデルや Rasmussen の SRK モデル、さらには System 1/System 2 に代表される二重過程理論は、人間が状況に応じて自動的な処理と熟慮的な処理を使い分ける可能性を指摘してきた。しかし、これらのモデルは、必ずしも MHP と同一の枠組みの中で議論されているわけではなく、MHP の各プロセッサと具体的な神経活動指標との対応も十分には検討されていない。その結果、HCI 分野では MHP が依然として広く使用されている一方で、認知神経科学分野で蓄積された知見との統合は十分に進んでいない。

本研究は、MHP を出発点としつつ、行動指標と脳波指標を統合的に解析することにより、MHP と認知

神経科学的知見との橋渡しを試みる点に独自性がある。本研究の位置づけと既存モデルとの関係を図 1.3 に示す。具体的には、N100・P300・BP といった脳波指標を用いて、MHP が想定する知覚・認知・運動といった処理段階の時間構造を検証し、さらに誤答や高速応答を含む試行の比較を通じて、単一処理経路仮説の限界と二重処理経路モデルの必要性を示す。

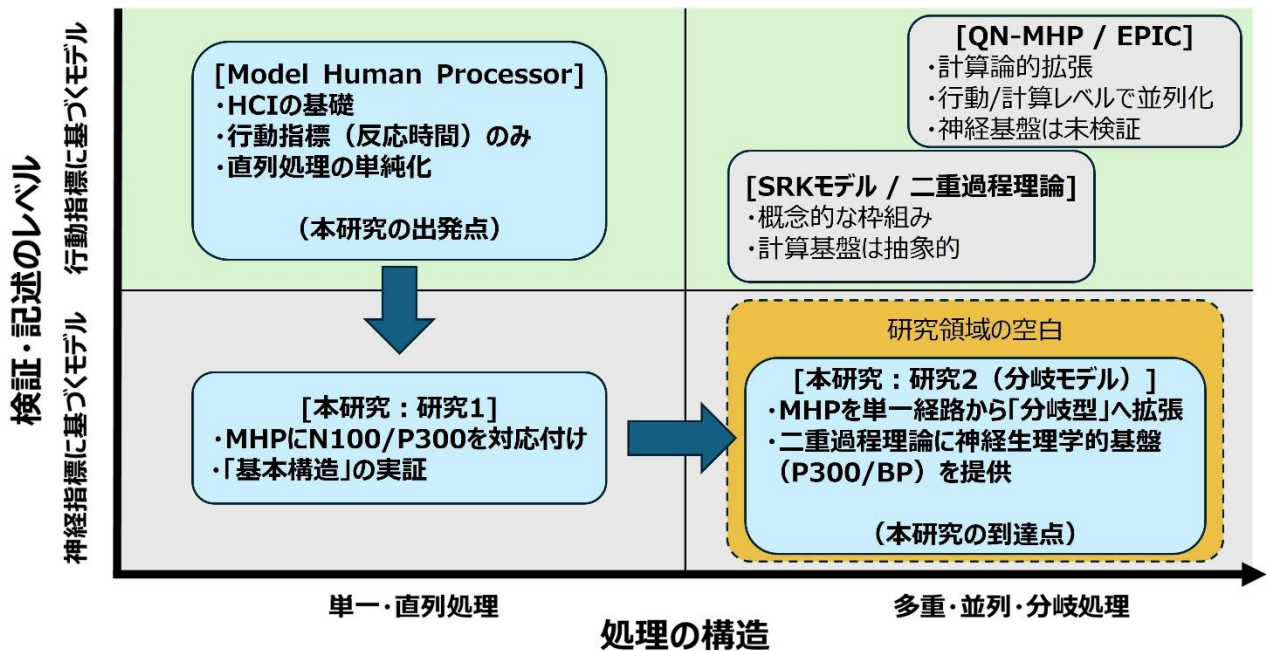


図 1.3 本研究の位置づけと学術的貢献の概要

既存の HCI モデル（MHP, QN-MHP/EPIC）および認知モデル（SRK, 二重過程理論）に対し、本研究は神経生理学的基盤（N100, P300, BP）を与えることでモデルを検証（研究 1）・拡張（研究 2）し、研究領域の空白を埋めるものである。

本研究の学術的貢献は、大きく次の 3 点にまとめられる。

第一に、MHP の各処理段階と ERP との時間的対応を実証的に検討し、MHP の神経生理学的妥当性について系統的な証拠を与える点にある。特に、N100 および P300 の潜時を MHP の知覚プロセッサおよび認知プロセッサの処理時間と対応づけて比較することにより、従来は行動指標のみに基づいて議論されてきた MHP の処理構造を、神経活動のレベルから検証可能にした。

第二に、誤答や高速応答を含む多様な行動データと ERP/BP を総合的に解析することにより、MHP が前提とする単一処理経路仮説の限界を示し、自動的プロセスと熟慮的プロセスからなる二重の情報処理経路モデルを提案した点である。このモデルは、MHP の構造を全面的に否定するものではなく、既存のプロセッサ構造を保持しつつ、状況に応じて処理経路が分岐するという形で拡張するものであり、MHP と二重過程理論との統合的理解に向けた一つの枠組みを与える。

第三に、HCI 分野における人間情報処理研究の方法論として、RT だけでなく特定の ERP 成分および BP を併用する実験パラダイムを提示した点である。本研究で用いた手法は、インタフェースやタスク設計の評価において、行動指標と神経活動指標を組み合わせるための一つの具体的な手順を示し

ており、今後の HCI 研究における生理指標活用の基盤となりうる。

以上のように、本研究は、MHP を中心とした人間情報処理モデルと認知神経科学的知見との統合を志向し、理論的・実証的・方法論的な側面から HCI および認知科学の発展に寄与することを目指すものである。

1.5 本論文の構成

本論文は、全体として次の構成をとる。

- 第 1 章 緒言：本章では、本研究の背景と問題提起、目的および研究課題、本研究で採用した神経生理学的アプローチと 2 段階の研究デザイン、本研究の位置づけと学術的貢献について述べた。
- 第 2 章 ERP を用いた MHP の神経生理学的検証：研究課題 1 に対応して、MHP の神経生理学的妥当性を検証するための実験（研究 1）について報告する。具体的には、MHP で典型的に議論されてきた複数の反応課題を用いて実験を実施し、RT と N100・P300 の潜時・振幅との関係を分析する。これにより、MHP の知覚・認知プロセッサが ERP 成分とどのように対応するかを検討する。
- 第 3 章 二重情報処理経路の発見と分岐型 MHP モデルの提案：研究課題 2 に対応して、MHP の単一処理経路仮説の妥当性を検証し、二重処理経路モデルを構成するための実験（研究 2）について報告する。研究 2 では、誤答および高速応答を含む試行を対象に、N100・P300 に加えて BP を解析し、応答タイプによる神経活動パターンの違いを検討する。その結果を踏まえ、自動的プロセスと熟慮的プロセスからなる二重の情報処理経路モデルを提案する。
- 第 4 章 総合考察：研究 1 および研究 2 の結果を統合し、MHP の理論的課題に対する回答を総合的に議論する。特に、MHP の各処理段階と神経活動との対応関係、単一処理経路仮説の限界、自動／熟慮の二重処理経路モデルの位置づけについて整理し、EPIC モデルや SRK モデル、二重過程理論との関係を含めて考察する。また、HCI 分野における応用可能性や実務的含意についても論じる。
- 第 5 章 結論：本論文全体を総括し、得られた知見とその意義をまとめるとともに、本研究の限界と今後の課題を述べる。本研究で提案した二重処理経路モデルの今後の検証方法と、他の認知機能・タスクへの適用可能性について展望を示す。

第2章：ERPを用いたMHPの神経生理学的検証（研究1）

2.1 研究目的

第1章で詳述したように、MHPは、人間の情報処理プロセスを工学的に応用可能な形でモデル化した、HCI分野における基礎理論の一つである（Card et al., 1983）。しかし、そのモデルは行動指標に基づいて構築された行動レベルの理論であるため、その神経基盤は未検証である。

本章は、本研究における第一段階の研究（研究1）として、このMHPの抽象的なプロセス構造の神経生理学的基盤を実証的に明らかにすることを目的とする。第1章1.2.2節で設定した研究課題1に基づき、具体的には以下の3点を明らかにする。

- ① 知覚プロセッサの神経基盤の特定：MHPが想定する知覚プロセッサの処理時間と、初期の視覚処理を反映するERP成分のうち初期感覚性成分であるN100との時間的対応関係を検証する。
- ② 認知プロセッサの処理時間構造の解明：MHPが提唱する4つの基本反応モデル（単純、物理的照合、名称照合、カテゴリー照合）において、認知的負荷の増大に伴いERP成分のうち高次認知的成分であるP300の潜時が段階的に延長するかを検証し、MHPの認知プロセスモデル（照合・再認・分類といった処理の蓄積）の妥当性を評価する。
- ③ 行動指標と神経指標の対応関係の検証：RTとERPの潜時の関係性を分析し、特にP300成分が認知プロセッサ内のどの時点で出現するかを特定することで、MHPの直列的な処理モデルの有効性と限界を評価する。

これらの目的を達成するため、MHPの理論的枠組みを忠実に再現した実験パラダイムを構築し、脳波計測により課題遂行中の脳活動を記録した。

2.2 実験・分析手法

2.2.1 検証に用いる神経活動指標

本研究では、MHPの処理段階と対応する神経活動指標として、N100とP300という2つのERP成分に着目した。これらは単に「代表的なERP成分」であるという理由だけでなく、以下の神経科学的根拠に基づいて選択したものである。人間の情報処理過程を反映するERP成分としては、刺激の物理的特性の変化や識別・注意の配分を反映するN200や、言語的な意味処理の不整合を反映するN400、あるいは運動準備の左右差を反映する側方化準備電位（Lateralized Readiness Potential, LRP）などが広く知られている。しかし、本研究の目的は、MHPが提唱する「知覚」から「認知」を経て「運動」に至る基本的な処理段階の時間的完了時点を特定することにある。そのため、特定の認知機能（葛藤や意味処理など）に特化した成分ではなく、処理段階の「入力（知覚符号化）」と「出力（意思決定完了）」を最も堅牢に反映する指標を採用する必要がある。したがって、本研究では、以下の2つのERP成分に着目した。

- N100: 視覚刺激呈示後約 100 ミリ秒で後頭部優位に出現する陰性電位である。この成分は、初期視覚野 (V1/V2) における特徴抽出過程を反映し (Luck, 2014), 刺激の物理的属性 (輝度, コントラスト, 形状) が神経表象として符号化される時点を示すとされている。MHP の知覚プロセッサが想定する処理時間 (約 100 ms) および機能 (感覚入力 of 符号化) と, 時間的・機能的に直接対応すると考えられる。
- P300: 刺激呈示後約 300 ミリ秒以降に頭頂部優位に出現する陽性電位である。神経生理学的には, 前頭-頭頂ネットワークにおける作業記憶の更新過程を反映し (Polich, 2007), 認知処理に必要なリソース (注意資源) の配分と文脈情報の統合を伴うことが示されている。重要なことに, P300 の潜時は課題の認知的負荷に応じて系統的に変動するため (Donchin & Coles, 1988), MHP の認知プロセッサ, 特に「物理的照合」「名称照合」「カテゴリー照合」といった課題における認知処理時間を定量化する神経マーカーとして適している。さらに, P300 は反応選択・決定過程とも関連することが報告されており (Verleger et al., 2005), MHP の「反応決定プロセス」の時間的推移を追跡する指標となる。

図 2.1 に, MHP の各プロセッサと, 本研究で主要な指標として着目する ERP 成分 (N100 および P300) との理論的な対応関係を模式的に示す。

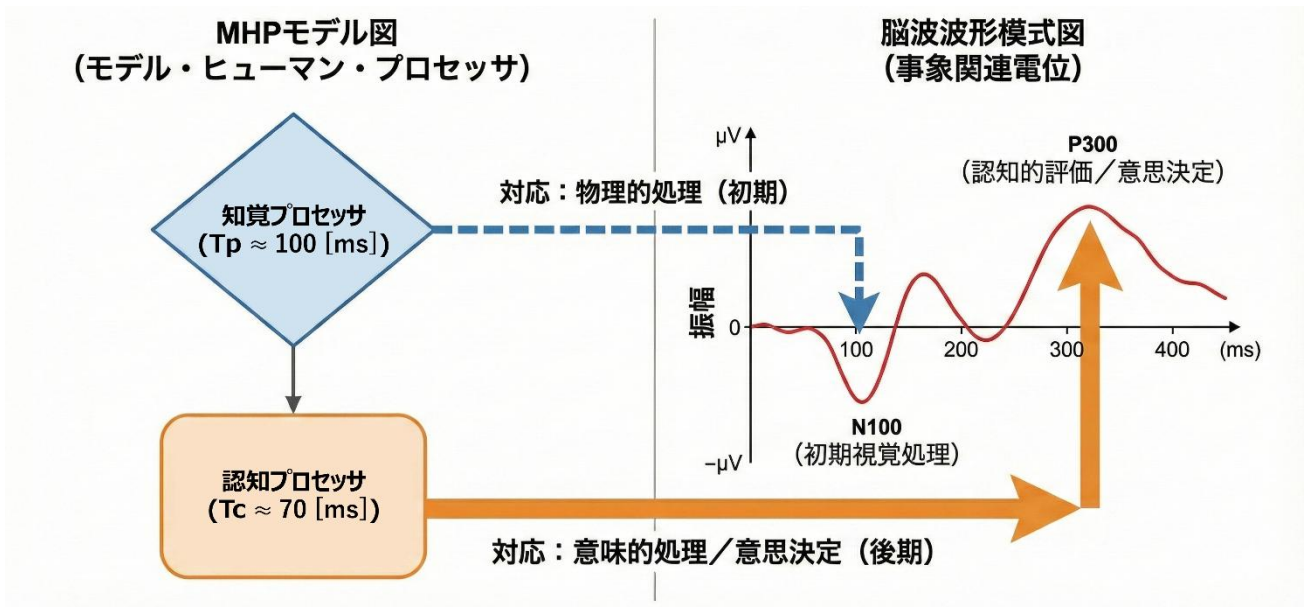


図 2.1 MHP プロセッサと脳波 ERP 成分の理論的マッピング

MHP の知覚プロセッサは N100 に, 認知プロセッサ (意思決定) は P300 に対応付けられる。実際の脳波には N100 と P300 の間に他の成分 (N200 等) が含まれる場合があるが, 本図では本研究が着目する主要な成分との対応関係を模式的に示している。

2.2.2 実験被験者

本研究の実験 (実験 α , β , γ) には, 実験目的について十分な説明を受けた健常な日本人大学生・大学院生が参加した。本章 (研究 1) の全ての実験は, 和歌山大学研究倫理審査会の承認を受けて実施した。

被験者には事前に実験内容とデータ利用目的を十分に説明したうえで、同意を得た。被験者はいつでも実験を中止できること、および個人情報が匿名化されることについても説明した。全被験者は、実験参加前に研究内容に関する説明を受け、同意を得た。

- 実験 α （ラテンアルファベット）：10名（男性8名、女性2名）が参加した。
- 実験 β （ひらがな）：7名（男性5名、女性2名）が参加した。
- 実験 γ （漢字）：8名（男性6名、女性2名）が参加した。

全被験者は、視力は正常または矯正視力（コンタクトレンズ・眼鏡使用）であった。利き手は、全員が右利きであることを確認した。

2.2.3 実験タスクと手続き

本研究では、MHPが提唱する4つの基本反応モデル（図1.2）に対応する一連の実験課題を設計した。これらの課題は、単純な知覚反応から、物理的形状、名称、そして意味的分類へと、段階的に認知プロセスの負荷が増大するように構成されている。

さらに、この検証の一般性を担保するため、刺激文字種を変えた3つの一連の実験（実験 α 、 β 、 γ ）を実施した。

全実験において、刺激は27インチ液晶ディスプレイ（DELL P2717H、解像度：1920x1080）を用い、黒色背景の中央に白色（フォントサイズ40）で呈示された。被験者は液晶ディスプレイから1m離れた暗室内に着座し、利き手でコンピュータマウスを操作した。各刺激の呈示時間は600ms、刺激呈示間隔は1000msから2000msの間でランダムに設定した。タスクの実施順序は被験者間でカウンターバランスが取られた（図2.2）。

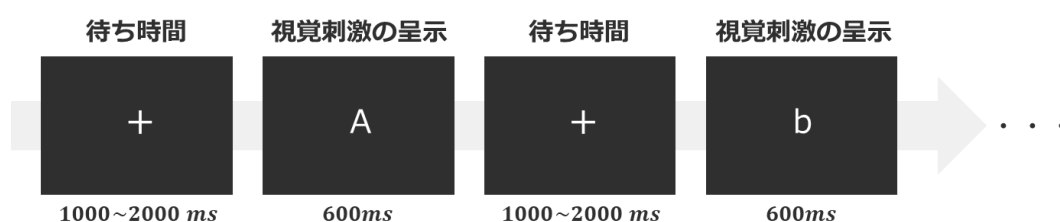


図 2.2 実験パラダイム

2.2.3.1 実験 α ：ラテンアルファベットによる基本検証

実験 α は、MHPの構築時に参照された心理学実験に準拠し、ラテンアルファベットを刺激として用いた。被験者（10名）には以下の4つのタスクを課した。各タスクは合計120試行で構成され、ターゲット刺激と非ターゲット刺激の呈示比率は1:3（ターゲット刺激30回）とした。

- Task 1（単純反応課題）：光刺激（円）が呈示されたら、即座に左クリックする。
- Task 2（物理的照合反応課題）：文字群（"A", "B", "C", "a", "b", "c", "1", "2", "3"）からラン

ダムに 1 つ呈示され、事前に教示された文字（"A"）と物理的に同一のものが呈示された場合のみ左クリックする。

- Task 3（名称照合反応課題）：文字群

（"A", "B", "C", "D", "E", "a", "b", "c", "d", "e", "1", "2", "3", "4", "5"）からランダムに 1 つ呈示され、事前に教示された読み（"/di/"）を持つ文字（"D"または"d"）が呈示された場合に左クリックする。本課題では、物理的形状が異なる「D」と「d」を同一のターゲットとして判定する必要がある。したがって、被験者は Task 2 のような視覚的な形状照合のみでは課題を遂行できず、入力された文字を一度音韻情報に変換して照合するプロセスが強制される。

- Task 4（カテゴリー照合反応課題）：文字群

（"A", "B", "C", "D", "E", "a", "b", "c", "d", "e", "1", "2", "3", "4", "5"）からランダムに 1 つ呈示され、事前に教示されたカテゴリー（「子音」）に属する文字（"B", "b", "C", "c", "D", "d"）が呈示された場合に左クリックする。

2.2.3.2 実験 β：ひらがなによる再現性検証

実験 β は、ラテンアルファベット（表音文字）で得られた知見が、他の表音文字体系でも再現可能か検証するため、日本語の「ひらがな」を刺激として用いた。被験者（7 名）には、実験 α と同様の認知的負荷構造を持つ 4 つのタスクを課した。各タスクは合計 120 試行で構成され、ターゲット刺激と非ターゲット刺激の呈示比率は 1:3（ターゲット刺激 30 回）とした。

- Task 1（単純反応課題）：光刺激（円）が呈示されたら、即座に左クリックする。
- Task 2（物理的照合）：16 種類のひらがな文字群（"う", "お", "さ", "す", "ち", "て", "ぬ", "の", "ひ", "へ", "ま", "む", "り", "に", "わ", "を"）からランダムに 1 つ呈示され、教示された文字（"す"）と物理的に同一の場合のみ左クリックする。
- Task 3（名称照合）：Task 2 と同一の文字群からランダムに 1 つ呈示され、教示された読み（"o"）を持つ文字（"お" または "を"）の場合に左クリックする。
- Task 4（カテゴリー照合）：Task 2 と同一の文字群からランダムに 1 つ呈示され、教示されたカテゴリー（「な行」）に属する文字（"に", "ぬ", "の"）の場合に左クリックする。

2.2.3.3 実験 γ：漢字による拡張的検証

実験 γ は、表音文字とは異なり、文字自体が意味を持つ「表意文字」である日本語の「漢字」を用いて、音韻処理と意味処理が時間的に段階を追って進むと仮定する MHP の逐次処理モデルが、これらの情報が不可分に結びついている文字体系においても適用可能か、その適用限界を検討することを目的とした。被験者（8 名）には、実験 α、β と同様の構造を持つ 4 つのタスクを課したが、特に Task 3 と Task 4 は漢字の特性を反映したものとした。各タスクは合計 120 試行で構成され、ターゲット刺激と非ターゲット刺激の呈示比率は 1:3（ターゲット刺激 30 回）とした。

- Task 1（単純反応）：光刺激（円）が呈示されたら、即座に左クリックする。
- Task 2（物理的照合）：15 種類の漢字文字群（"赤", "白", "緑", "黒", "林", "牛", "和", "当", "島",

“北”，“足”，“犬”，“矢”，“君”，“戦”）からランダムに 1 つ呈示され，教示された文字（“白”）と物理的に同一の場合のみ左クリックする．

- Task3（名称照合）：Task2 と同一の文字群からランダムに 1 つ呈示され，教示された「読み」（“Tou”）を持つ文字（“当”または“島”）の場合に左クリックする．
- Task4（カテゴリー照合）：Task2 と同一の文字群からランダムに 1 つ呈示され，教示された「意味のカテゴリー」（「色に関する漢字」）に属する文字（“赤”，“白”，“緑”，“黒”）の場合に左クリックする．

2.2.3.4 認知プロセスのタイミング検証（実験 α -3'）

実験 α に参加した被験者 10 名は，主要な実験（Task1 から 4）の終了後，MHP モデルにおいて，認知プロセッサ（意思決定）と運動プロセッサ（運動実行）が直列的に接続されているとする仮説を検証するため，後日，実験 α の Task3（名称照合）を改変した追加実験（実験 α -3'）にも参加した．この追加実験では，Task3'のみが実施された．

この追加課題（Task3'）では，認知的負荷（”/di/”の音を持つ文字の同定）は Task3 と同一だが，運動選択の負荷を増大させた．具体的には，”D” が呈示された場合は左クリック，”d” が呈示された場合は右クリックを要求した．タスクは合計 120 試行で構成され，ターゲット刺激と非ターゲット刺激の呈示比率は 1:3（ターゲット刺激 30 回）とした．もし P300 が「反応決定プロセスの完了時点」を反映するのであれば，運動選択が複雑化するこの課題では，RT だけでなく P300 の潜時も延長するはずである．

2.2.4 脳波計測および前処理

計測機器

全実験（実験 α ， β ， γ ）において，脳波計測は高精度アクティブ電極システム（BIOSEMI 社製 Active Two）を用い，サンプリングレートは全実験で 256Hz とした．刺激呈示のタイミングは液晶ディスプレイに取り付けられたフォトセンサーにより取得しており，そのトリガー信号は，OpenBCI Cyton Board を介して Active Two のトリガー入力ポートへ送信し，脳波データとミリ秒単位で同期させた（図 2.3）．

電極配置

国際 10-20 法に基づく 19 チャンネル（Fp1，Fp2，F7，F3，Fz，F4，F8，T3，C3，Cz，C4，T4，T5，P3，Pz，P4，T6，O1，O2）から収録した．

分析の方針

本研究では，MHP の基本モデルを検証した実験 α （ラテンアルファベット）の結果と，その一般化可能性および適用限界を検証した実験 β （ひらがな）・ γ （漢字）の結果を明確に区別して議論するため，両者の解析・考察を独立して行っている．

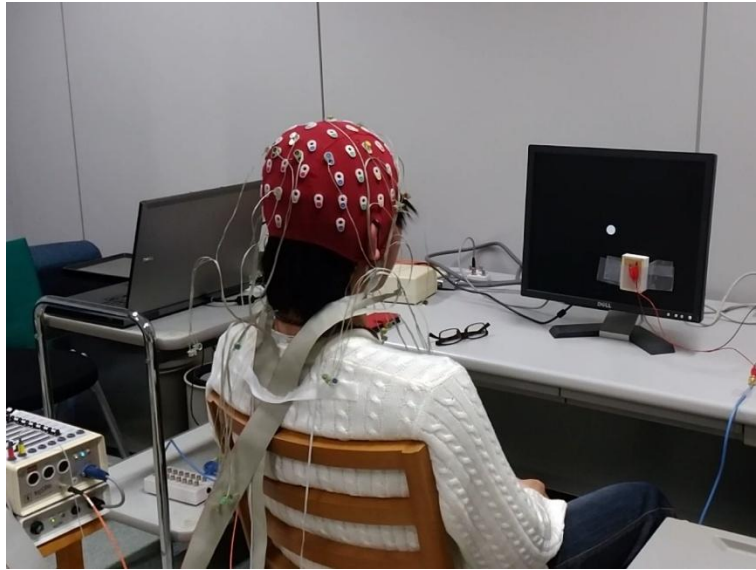


図 2.3 実験実施環境の概観

前処理

データの前処理および解析には、MATLAB R2020a (MathWorks 社) を用いた。計測された生データに対し、以下の処理を適用した。

1. フィルタリング：0.1 Hz から 30 Hz の帯域通過 FIR (Finite Impulse Response) フィルタ (Order=512) を適用した。
2. アーティファクト除去 (2 段階) :
 - (段階 1: 手動除去) 瞬目, 筋電, その他の突発的ノイズを含む試行を, 目視により手動で除去した。
 - (段階 2: 統計的除去) 残存する試行に対し, 統計的な外れ値除去を適用した。具体的には, 各電極において, 当該試行のベースライン期間 (刺激呈示前) の振幅平均値から振幅が $\pm 100 \mu\text{V}$ を超える試行を自動的に除外した。

加算平均

アーティファクト除去後の試行を用い, 被験者およびタスク条件ごとに加算平均波形を算出した (図 2.4)。さらに, 各条件における全体的な傾向を視覚化するため, 被験者全員の波形を平均した全被験者平均波形 (Grand Average) を作成した。

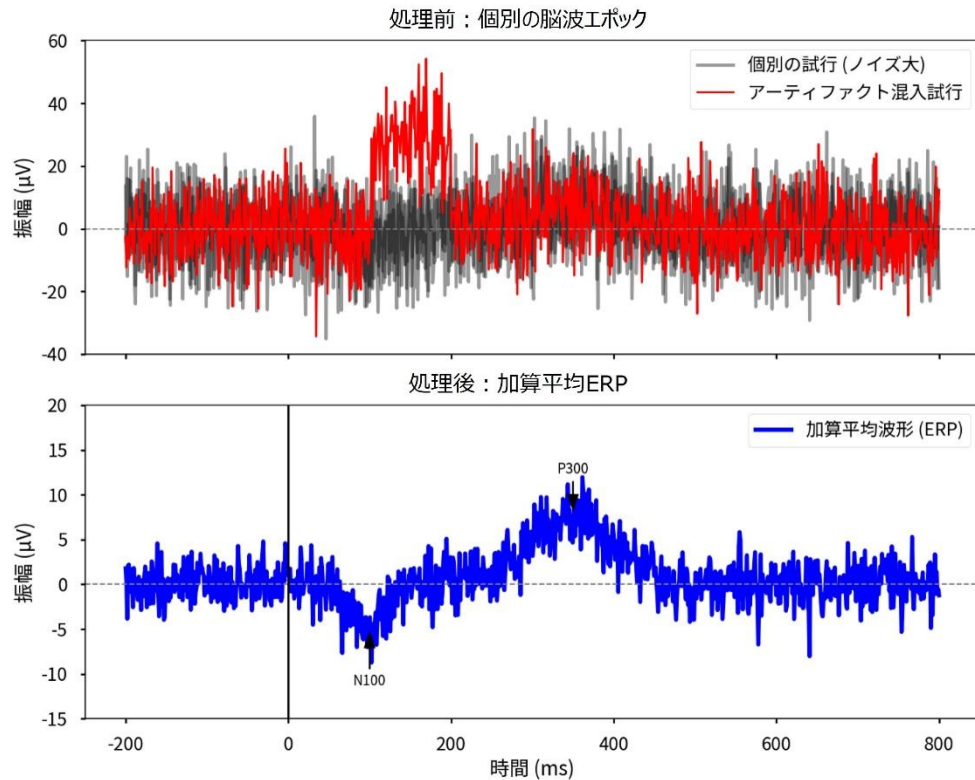


図 2.4 脳波データ処理の概念図

処理前（上段）は、ノイズや瞬目などのアーティファクト（赤線）を含む個別の脳波エポックを示す。処理後（下段）は、アーティファクト除去と加算平均を経て、ノイズが相殺され、N100 や P300 といった ERP が抽出される様子を模式的に示す。

2.2.5 分析指標の定義

神経活動指標（ERP 成分）の抽出

前処理済みのデータに対し、刺激呈示時刻（ $t=0$ ）を基準として以下の定義に基づき成分を抽出した。

- エポック化とベースライン補正：刺激前-200 ms から刺激後 800 ms でエポック化し、刺激前-200 ms から 0 ms の平均電位を用いてベースライン補正を行った。
- N100 の定義：
 - 時間窓：刺激呈示後 80 ms から 150 ms
 - 抽出基準：上記時間窓における最大陰性振幅（ピーク）を抽出し、その時刻を N100 の潜時、ベースラインとの差分を N100 の振幅とした。振幅が負方向に偏っていることを観測条件とした。
- P300 の定義：
 - 時間窓：刺激呈示後 250 ms から 700 ms
 - 抽出基準：上記時間窓における最大陽性振幅（ピーク）を抽出し、その時刻を P300 の潜時、ベースラインとの差分を P300 の振幅とした。二峰性の場合は主峰を採用した。

行動指標 (RT)

- 定義：刺激呈示時刻から、被験者がボタン押し（右手示指）を行った時刻までの時間差を RT とした。刺激呈示および応答のイベントタイムスタンプは、実験制御用 PC 上でミリ秒単位の精度で記録した。応答装置には USB 接続のマウスを用い、被験者は右手示指で左ボタン（Task 3'では左／右ボタン）を押下した。
- 機器遅延：一般的な USB マウスにおける機器遅延は数ミリ秒程度と報告されており、本研究で焦点とする数十～数百ミリ秒オーダーの処理時間に比べて十分に小さい。したがって、本研究ではマウスの機器遅延が RT の解釈に与える影響は無視できると判断し、特別な補正は行わなかった。
- 分析対象：正答試行のみを対象とし、条件ごとに平均 $\pm$ 2SD を超える試行を外れ値として除外した。

2.2.6 仮説検証のための統計解析

- 統計手法：ERP (N100, P300) の各潜時および RT について、事前に設定した仮説に基づき隣接タスク間の差を検討する計画的比較として、Wilcoxon 符号付き順位検定を適用した。
- 有意水準：統計的有意水準は $p < .05$ と設定した。

2.3 結果

2.3.1 課題遂行の正確性（正答率）とデータ品質（試行数）

本章の主要な結果である RT および ERP の分析に先立ち、本節では、それらのデータの信頼性を担保する 2 つの基本的な指標、すなわち課題遂行の正確性（正答率）と、ERP 分析に用いられたデータ品質（アーティファクトフリー試行数）について報告する。

- 課題遂行の正確性（正答率）

まず、全実験・タスクにおける平均正答率（%）と標準偏差（SD）を表 2.1 に示す。

表 2.1 各実験・タスクにおける平均正答率（%）と標準偏差（SD）

	Task 1	Task 2	Task 3	Task 3'	Task 4
実験 α (N = 10)	100.0 (0.0)	96.0 (3.5)	92.0 (4.8)	91.0 (5.1)	85.0 (7.0)
実験 β (N = 7)	100.0 (0.0)	96.5 (3.0)	93.0 (4.2)	—	87.0 (6.5)
実験 γ (N = 8)	100.0 (0.0)	95.0 (3.8)	82.0 (7.5)	—	79.0 (8.8)

表 2.1 が示すとおり，全実験において Task 1（単純反応）の正答率は 100%であった．MHP が想定する認知的負荷の増大（Task 2 → 3 → 4）に伴い，正答率は段階的に低下する傾向が認められた．特に実験 γ の Task 3（平均 82.0%）および Task 4（平均 79.0%）では，他の実験（ α ， β ）と比較して正答率が明確に低下しており，これらの課題が被験者にとって最も困難であったことが示された．重要な点は，最も困難であった実験 γ ・Task 4 においても平均正答率が約 80%を維持しており，フロア効果（課題が難しすぎることによる遂行不能）は生じていない点である．

● ERP データの品質（加算平均試行数）

次に，ERP 波形の信頼性（S/N 比）を担保するため，ERP の加算平均に最終的に用いられた被験者 1 名あたりの平均試行数（Count）と標準偏差（SD）を表 2.2 に示す．この試行数は，ターゲット刺激（各 30 回呈示）に対し，まず誤答試行を除外し，次に残った正答試行からさらにアーティファクト（瞬目，筋電など）が混入した試行を除去した結果，分析対象として残った試行の数を被験者ごとに算出し，それを平均した値である．

表 2.2 各実験・タスクにおける被験者あたりの平均加算平均試行数（Count）と標準偏差（SD）

	Task 1	Task 2	Task 3	Task 3'	Task 4
実験 α	28.8 (1.1)	26.1 (2.8)	24.0 (3.8)	23.1 (4.1)	22.0 (4.5)
実験 β	28.5 (1.3)	26.5 (2.5)	24.8 (3.5)	—	22.5 (4.2)
実験 γ	28.6 (1.2)	25.5 (3.0)	20.5 (4.8)	—	19.5 (5.1)

表 2.2 に示すとおり，加算平均に用いられた試行数は，正答率の低下（表 2.1）を反映し，認知的負荷が高いタスクほど減少する傾向が見られた．

最も試行数が減少した実験 γ ・Task 4 においても，平均 19.5 試行（SD = 5.1）が確保された．

2.3.2 実験 α （ラテンアルファベット）

図 2.5 に、Cz チャンネルにおける各タスク（Task 1 から Task 4 および Task 3'）の全被験者の平均波形である ERP 波形を示す。また、表 2.3 に各被験者の P300 の潜時値および平均値を示す。

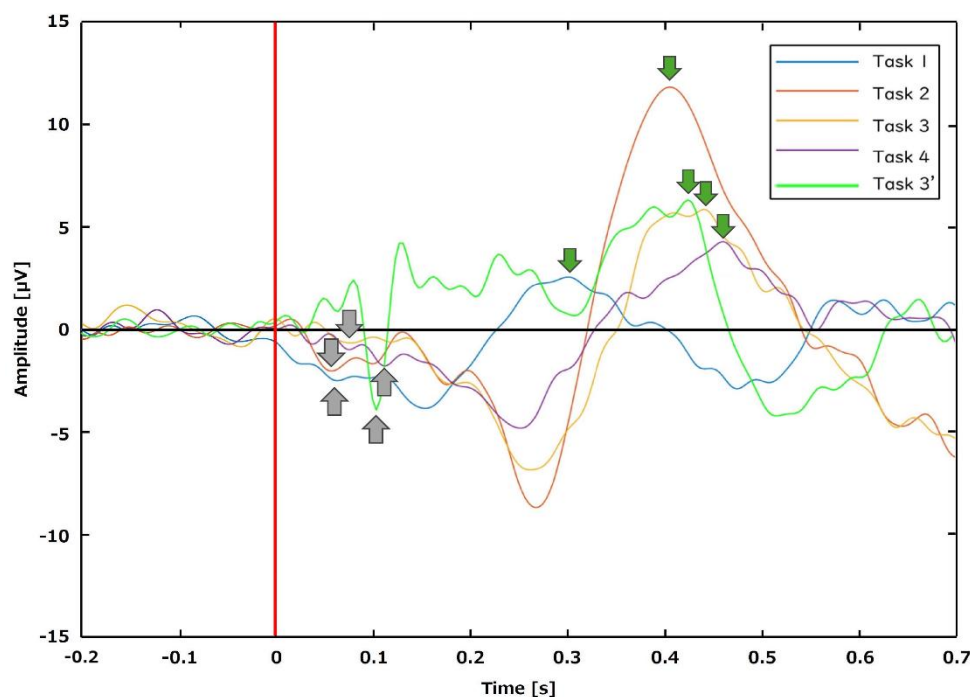


図 2.5 実験 α の各タスク（Task 1 から Task 4, Task 3'）における総加算平均 ERP 波形（Cz）
縦軸は振幅，横軸は刺激呈示が開始された時間を表す。赤軸（ $t=0$ ）は刺激呈示のタイミングである。
灰色の矢印は N100 のピークを示し，緑の矢印は P300 のピークを示す。

● N100

N100 成分の抽出方法および「観測された」とみなす基準は 2.2.5 節に述べたとおりである。図 2.5 に示すように，総加算平均波形では，すべての実験条件で約 100 ms 付近に陰性電位が認められた。この陰性電位について，N100 振幅値が $0 \mu V$ （ベースライン）よりも有意に小さいことを統計的に確認した（Wilcoxon 符号付き順位検定， $p < .05$ ）。さらに，個々の被験者レベル（個別波形）でも，2.2.5 節で定義した基準に基づく N100 の振幅は全条件でベースラインより一貫して負方向に偏っており，潜時も条件間で約 100 ms 前後の範囲に集中していた。なお，図 2.5 の総加算平均波形において N100 のピークは視覚的に平坦な形状を示しているが，個別の波形解析および統計的検定においては，N100 成分の出現（ベースラインに対する有意な陰性電位）が安定して確認された。したがって本研究では，これらの統計的根拠に基づき「N100 が観測された」と判定した。

● P300

図 2.5 および表 2.3 に示すとおり，P300 の潜時はタスクの認知的負荷の増大に伴い段階的に延長した．平均潜時は Task 1 (277 ms) < Task 2 (396 ms) < Task 3 (445 ms) < Task 4 (517 ms) の順であった．各タスク間の比較に Wilcoxon 符号付き順位検定を用いた結果，すべての隣接タスク間で有意差が認められた ($p < .05$)．

表 2.3 実験 α (α -3' 含む) における P300 潜時 (ms)

Wilcoxon 符号付き順位検定, * $p < .05$, n.s. = not significant

Subject	Task 1 [ms]	Task 2 [ms]	Task 3 [ms]	Task 3' [ms]	Task 4 [ms]
S1	302	408	410	596	423
S2	213	345	412	422	680
S3	209	370	625	398	652
S4	261	388	445	451	447
S5	267	380	394	403	463
S6	254	430	460	297	560
S7	277	400	441	428	371
S8	343	386	371	386	402
S9	373	429	437	412	612
S10	276	435	470	437	570
AVG.	277	396	445	423	517
Mean diff.	-	+120*	+49*	-22 n.s.	+72*

● RT

図 2.6 および表 2.4 に示すとおり，RT も P300 の潜時と同様に，Task 1 < Task 2 < Task 3 < Task 4 の順で段階的に増大した．Wilcoxon 符号付き順位検定の結果，すべての隣接タスク間で有意差が認められた ($p < .05$)．エラーバーは標準誤差を示す．

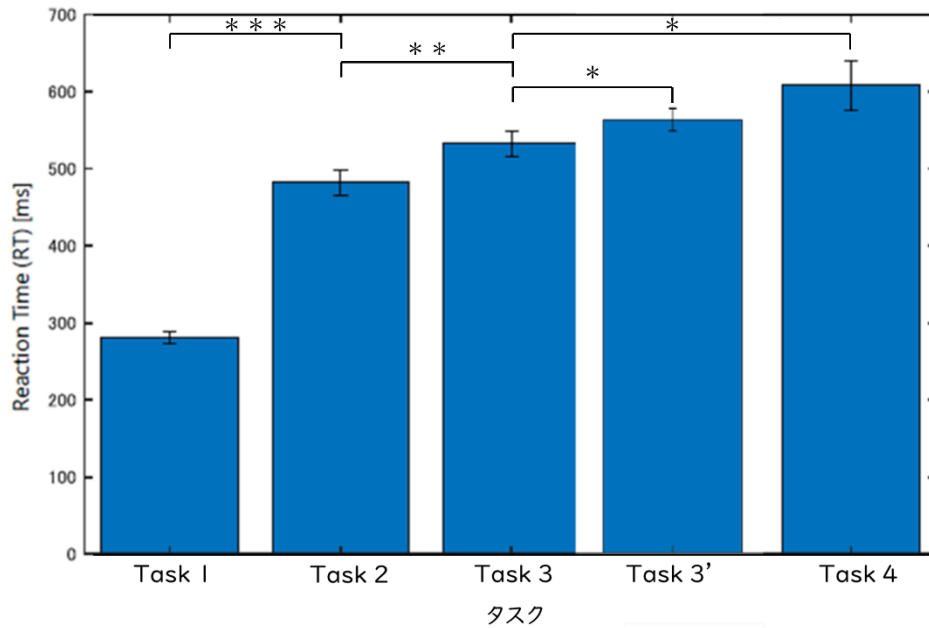


図 2.6 実験 α (α -3' 含む) のタスクごとの全被験者の平均 RT
エラーバーは標準誤差, 検定結果 * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

表 2.4 実験 α (α -3' 含む) における被験者毎の平均 RT

Subject	Task 1 [ms]	Task 2 [ms]	Task 3 [ms]	Task 3' [ms]	Task 4 [ms]
S1	272	506	599	635	753
S2	258	420	499	612	582
S3	286	465	516	591	617
S4	314	601	622	579	672
S5	244	475	497	570	513
S6	312	497	577	493	624
S7	298	450	526	510	728
S8	269	468	474	536	451
S9	280	458	487	548	532
S10	275	452	487	559	521
AVG.	281	482	533	563	599
Mean diff.		201	51	563-533 = 30	599-533 = 66

2.3.3 実験 α -3' (反応決定タイミング)

図 2.5, 図 2.6, 表 2.3, 表 2.4 に示されるとおり Task 3' (左右クリックによる運動選択課題) は, Task 3 (単一反応課題) と比較して, RT が有意に延長した. 一方で, P300 の潜時には有意差が認められなかった. また, ERP 波形の形状 (図 2.5) に着目すると, Task 3' は他のタスク (Task 2, 3, 4) と比較して, N100 から P300 にかけての陰性電位の落ち込みが浅いという特徴が観察された. ただし, P300 の陽性ピ

ーク自体の同定は明瞭であり，潜時の算出に支障はなかった。

2.3.4 実験β（ひらがな）

実験β（ひらがな）でも，MHP の理論予測と同様の結果が得られた（図 2.7，表 2.5）。P300 の平均潜時は Task 1（255 ms） < Task 2（424 ms） < Task 3（466 ms） < Task 4（544 ms）であり，タスク間で有意な段階的延長が認められた（ $p < .05$ ）。

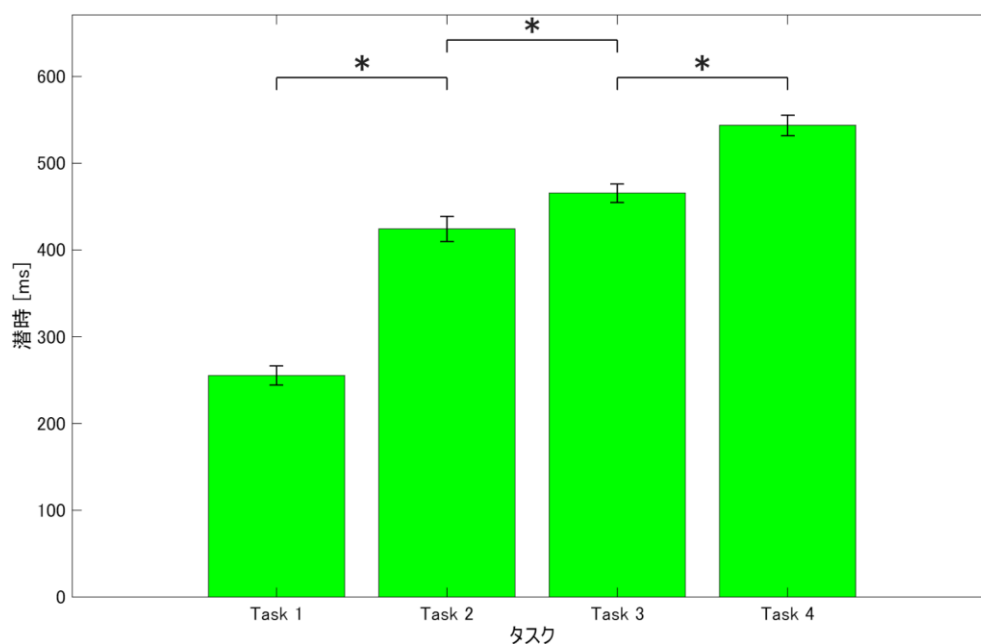


図 2.7 実験βにおける全被験者の P300 の平均潜時
エラーバーは標準誤差を示す。Wilcoxon 符号付き順位検定, $*p < .05$

表 2.5 実験βにおける P300 潜時（ms）

Wilcoxon 符号付き順位検定, $*p < .05$

Subject	Task 1 [ms]	Task 2 [ms]	Task 3 [ms]	Task 4 [ms]
S21	269	456	503	562
S22	230	413	464	515
S23	249	417	425	523
S24	222	351	445	546
S25	241	445	472	581
S26	269	464	452	577
S27	308	425	499	503
AVG.	255	424	466	544
Mean diff.	-	+169*	+41*	+78*

ひらがな課題の RT も、P300 の潜時（図 2.7）と同様に、MHP の予測と一致する段階的な延長を示した（図 2.8, 表 2.6）。平均 RT は Task 1（280 ms） < Task 2（463 ms） < Task 3（560 ms） < Task 4（583 ms）の順であり、すべての隣接タスク間で統計的に有意差が認められた（Task 1-2: $p < .001$, Task 2-3: $p < .01$, Task 3-4: $p < .05$ ）。

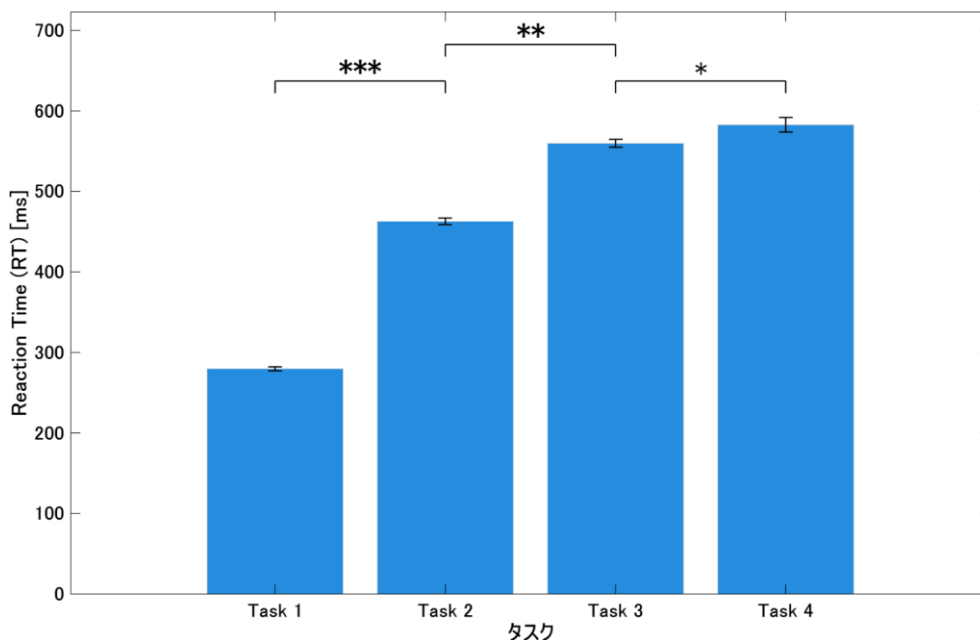


図 2.8 実験 β における全被験者の平均 RT

Wilcoxon 符号付き順位検定, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

表 2.6 実験 β における RT (ms)

Wilcoxon 符号付き順位検定, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Subject	Task 1 [ms]	Task 2 [ms]	Task 3 [ms]	Task 4 [ms]
S21	273	478	545	621
S22	275	453	548	570
S23	275	455	550	560
S24	280	463	560	585
S25	282	470	567	590
S26	285	472	570	600
S27	290	450	580	555
AVG.	280	463	560	583
Mean diff.		+183***	+97**	+23*

2.3.5 実験 γ (漢字)

漢字課題では、異なる傾向が観測された (図 2.9, 表 2.7). Task 1 (243 ms) と Task 2 (383 ms) の間には有意な延長が見られたが、特定の「読み」(例: “Tou”) を持つ文字を照合する Task 3 (425 ms) と特定の「意味的カテゴリー」(「色に関する漢字」) に属する文字を照合する Task 4 (439 ms) の間では有意差が認められなかった。

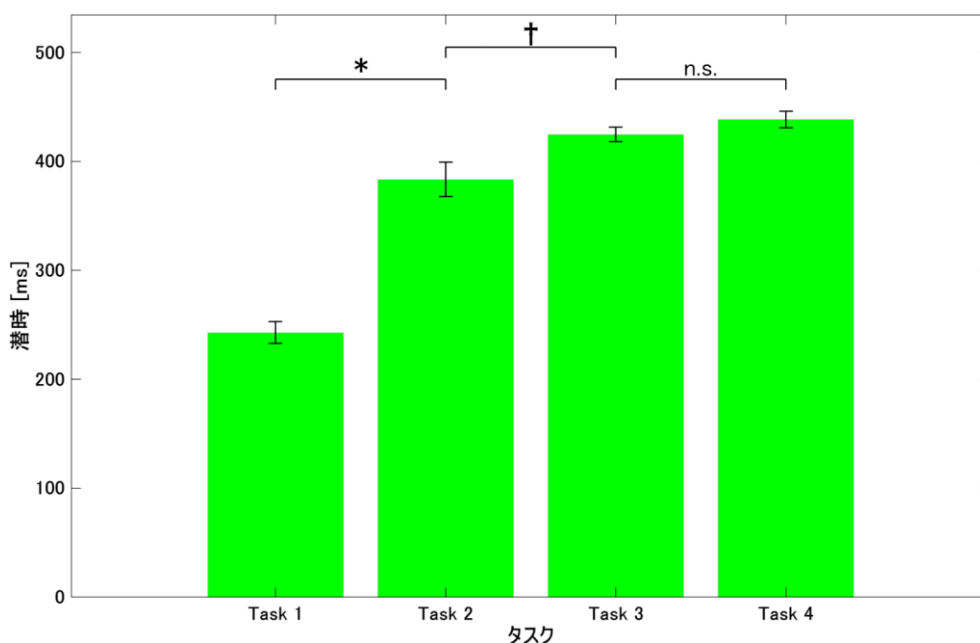


図 2.9 実験 γ における全被験者の P300 の平均潜時

エラーバーは標準誤差を示す。Wilcoxon 符号付き順位検定, * $p < .05$, † $p < 0.1$, n.s. = not significant

表 2.7 実験 γ における P300 潜時 (ms)

Wilcoxon 符号付き順位検定, * $p < .05$, † $p < 0.1$, n.s. = not significant

Subject	Task 1 [ms]	Task 2 [ms]	Task 3 [ms]	Task 4 [ms]
S11	257	445	460	468
S12	222	409	433	464
S13	277	335	429	452
S14	210	347	425	429
S15	249	425	417	425
S16	230	390	405	417
S17	218	378	425	433
S18	280	339	405	421
AVG.	243	383	425	439
Mean diff.	-	+141*	+42 †	+14 n.s.

漢字課題の RT は、P300 の潜時（図 2.9、表 2.7）と同様に、Task 3 と Task 4 の間で値が飽和し、有意差が認められないという特徴的なパターンを示した。図 2.10 および表 2.8 にその結果を示す。平均 RT は Task 1（275.0 ms）から Task 2（488.8 ms）、Task 3（578.8 ms）へと段階的に有意な延長が認められた（T1-T2: $p < .001$, T2-T3: $p < .01$ ）。しかし、P300 の潜時（表 2.7）で観測された「飽和」（+14 n.s.）と完全に並行し、Task 3（名称照合）と Task 4（カテゴリー照合）の間では、RT においても統計的に有意差は認められなかった（+11.2 n.s.）。

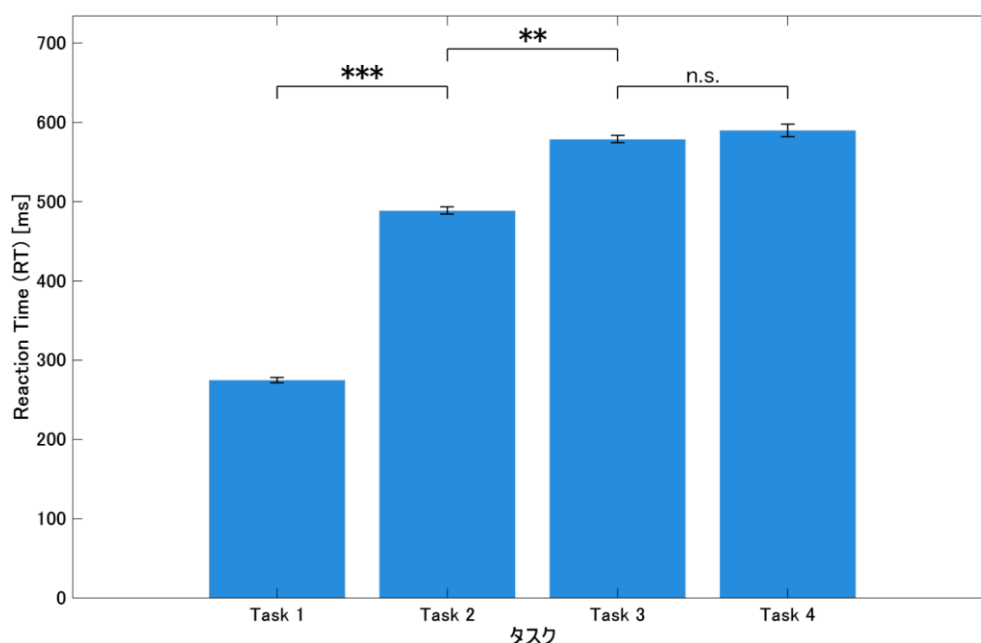


図 2.10 実験 γ における全被験者の平均 RT

Wilcoxon 符号付き順位検定, *** $p < .001$, ** $p < .01$, n.s. = not significant

表 2.8 実験 γ における RT (ms)

Wilcoxon 符号付き順位検定, *** $p < .001$, ** $p < .01$, n.s. = not significant

Subject	Task 1 [ms]	Task 2 [ms]	Task 3 [ms]	Task 4 [ms]
S11	275	495	585	595
S12	260	470	560	550
S13	280	490	580	600
S14	270	480	570	590
S15	285	500	590	615
S16	290	510	600	620
S17	265	475	565	580
S18	275	490	580	570
AVG.	275.0	488.8	578.8	590.0
Mean diff.		+213.8***	+90.0**	+11.2 n.s.

2.4 考察

本章の目的は、MHP の各処理段階に神経生理学的な裏付けを与えることであった。2.3 節で示したとおり、本研究で得られた行動データおよび神経生理学的データは、MHP の段階的処理モデルを検証する上で、その遂行妥当性と統計的信頼性の両面が確認された。ERP 計測を用いた 3 系列の実験結果から、MHP の妥当性と限界が明らかになった。以下では、得られた知見を (1) 知覚プロセス、(2) 認知プロセス、(3) 認知－運動変換プロセスの 3 点から考察する。

2.4.1 知覚プロセッサ (N100) の妥当性と解釈

すべての実験条件において、刺激呈示後約 100 ms に陰性電位 N100 が安定して観測された (図 2.5)。この潜時の一貫性は、刺激の種類 (アルファベット、ひらがな、漢字) や課題の負荷水準に依存しなかった。この結果は、知覚処理の初期段階である感覚入力 of 符号化が、後続する認知プロセスの負荷や処理時間の変動から独立しており、N100 の時点で完了していることを確認するものである。なお、図 2.5 の総加算平均波形において N100 のピークが比較的平坦に観察されたが、これは個々の被験者間における N100 潜時の微細なばらつき (ジッター) が、加算平均処理によって平滑化された影響であると解釈できる。個別の解析では明瞭なピークが確認されていることから、知覚プロセッサとしての反応自体は堅牢に生じていたと言える。

N100 は初期視覚野における感覚入力の符号化を反映することが知られており (Luck, 2014; Näätänen & Picton, 1987)、本研究の結果は、MHP が想定する「知覚プロセッサ」がこの神経過程と時間的・機能的に対応することを実証したといえる。

したがって、MHP における知覚処理 (感覚入力 → 符号化) は、神経生理学的には N100 出現時点で収束することが確認された。

2.4.2 認知プロセッサ (P300) の逐次的階層構造と負荷依存性

P300 の潜時は課題の認知的負荷に応じて段階的に延長し (図 2.5, 図 2.7)、MHP が提唱する認知プロセス (照合, 再認, 分類) の段階的蓄積を神経的に裏付けた。

この知見は、実験 α (2.3.2 節) の知見を実験 β (2.3.4 節) が完全に再現した点からも一般性が高く、表音文字処理における MHP の段階的処理モデルが行動レベル (RT) および神経レベル (P300) において強く支持されたことを示す。加えて、この P300 の潜時および RT の段階的延長は、2.3.1 節で示したとおり全タスクで高い正答率が維持されていたことに裏付けられており、観測された延長が単なる「速度と正確性のトレードオフ」ではなく、MHP が想定する純粋な認知プロセスの負荷増大を反映していることの妥当性を高めている。これは認知資源が処理階層に応じて時間的に再配置されることを示唆しており (Donchin & Coles, 1988; Polich, 2007)、MHP の逐次処理モデルを神経時間軸上で具体化したものである。

しかし、この延長は単純な処理時間の累積を意味しない。P300 は「文脈更新 (context updating)」や「意思決定の完了 (decision closure)」を反映することが知られており (Kok, 2001; O'Connell et al., 2012)、本研究で観察された段階的延長は、MHP が行動レベルで仮定した複数のサブステージ (評価・更新・選択) が、神経活動レベルにおいても時間的な連鎖 (逐次的な処理) として反映されていることを示す。

したがって、MHP における「認知プロセッサ」の内部構造（複数のプロセスの連鎖）が、P300 の潜時の段階的延長という形で神経生理学的に裏付けられた。

2.4.3 漢字処理（実験 γ ）における MHP の限界と並列的拡張

漢字課題では、Task 3（読みの照合）と Task 4（意味の照合）の間で P300 の潜時の有意な延長がみられなかった（図 2.9、表 2.7）。この結果は、意味処理段階で P300 の潜時の延長が飽和する可能性、あるいは読みと意味が（MHP が想定するような直列的な処理ではなく）ほぼ同時に、あるいは相互に影響を与えながら処理される可能性を示唆するものであり、表意文字特有の処理特性に起因すると考えられる。

なお、実験間の比較において、漢字課題（実験 γ ）の P300 の潜時および RT は、ひらがな課題（実験 β ）と比較して全体的に短縮している（例：Task 4 において実験 β は約 544 ms であるのに対し、実験 γ は約 439 ms）。MHP の標準モデルに従えば、画数が多く視覚的に複雑な漢字の方が処理時間を要すると予測されるが、結果は逆であった。これは、表音文字（ひらがな）が MHP の想定する「視覚 → 音韻 → 意味」という直列的な変換プロセスを順守する傾向が強いのに対し、表意文字（漢字）では視覚刺激の入力が音韻・意味表象への直接的かつ並列的なアクセスを可能にし、その並列活性化が意思決定プロセス全体を促進したためであると解釈できる。

すなわち、先行研究（Perfetti & Tan, 1998; Nakamura et al., 2005）が示すように、漢字では視覚的形態・音韻・意味情報が強く連合しており、「読み」を処理する時点で「意味」情報も自動的に活性化するためである。

この並列的情報活性化は、PDP モデル（Rumelhart & McClelland, 1986）や二重経路モデル（dual-route model）（Coltheart et al., 2001）の枠組みで説明できる。これらのモデルでは、音韻経路と意味経路が同時並行的に作動するため、MHP が前提とする厳密な「直列処理」（知覚 → 認知 → 運動）の仮定は成り立たない。2.3.5 節で示したとおり、この傾向は P300 の潜時だけでなく RT においても並行して観測された（Task 3 と Task 4 間で有意差なし）（図 2.10、表 2.8）。この認知（P300）と行動（RT）の両レベルで観測された「飽和」は、漢字のような表意文字の処理において、音韻（Task 3）と意味（Task 4）が厳密な直列処理ではなく、並列的あるいは相互作用的に処理されている可能性を示唆するものである。なお、漢字のような表意文字では、形態（Task 2）の処理段階において既に音韻や意味情報が自動的に活性化されている可能性も指摘されている（Perfetti & Tan, 1998）。Task 2（物理的照合）が Task 3 以降より有意に高速であった事実は、Task 2 の判断がその自動活性化の完了を待たずに行われたことを示唆するが、Task 3 と Task 4 の間で処理時間が飽和したという結果は、ひとたび文字内部の非視覚的情報（音・意味）へのアクセスが始まると、それらはほぼ同時に利用可能になるという漢字特有の処理特性を反映していると解釈できる。

したがって、MHP は「直列的な処理モデル」としては十分だが、「並列的・自動的活性化を伴う複雑な認知構造」への適用には限界があることが示された。

2.4.4 P300 と反応決定プロセスの時間的關係：認知－運動変換の兆候

追加実験 (Task 3') では、運動選択の負荷を増大させた結果、RT は有意に延長したが、それにもかかわらず P300 の潜時には変化が認められなかった (図 2.5, 図 2.6). この結果は、P300 が運動選択といった「運動出力の実行」プロセスからは独立していること、すなわち、それらのプロセスよりも時間的に先行する「認知的評価・意思決定」の段階を反映することを明確に示している. なお、Task 3' において ERP 波形の形状 (特に N100 後の陰性電位) が他のタスクと異なっていた点については、タスク構造の質的な違いに起因すると考えられる. Task 2 から Task 4 はターゲットに対してのみ反応する「Go/No-Go 課題」の性質を持つのに対し、Task 3' は左右の手を使い分ける「選択反応課題」である. 先行研究によれば、Go/No-Go 課題では刺激の識別や抑制に関連して N200 成分が強く出現する傾向がある一方、選択反応課題ではその活動様式が異なるとされる (Folstein & Van Petten, 2008). Task 3' で見られた陰性電位の減少は、この反応選択プロセスの導入に伴う N200 成分の変化を反映していると解釈できる. 本研究の主眼は P300 の潜時 (評価完了時間) による MHP の検証にあるため、この中間成分 (N200) の違いは結論に影響しないが、タスクの要求特性が脳活動の微細構造に反映された証左といえる.

P300 のピーク (意思決定の完了) から実際の反応 (運動実行) までの間には、時間的な乖離が存在する. この期間は、MHP のモデル構造において、認知プロセッサから出力された決定が運動プロセッサへと受け渡される「移行期間」に相当すると解釈できる. そこで本研究では、この区間を新たに「認知－運動変換プロセス」と定義する.

近年の ERP 研究では、P300 の出現から運動反応が開始されるまでの期間に BP や LRP が出現し、意思決定と運動出力の橋渡しを担うことが報告されている (Coles, 1989; Shibasaki & Hallett, 2006). これらの知見は、認知と運動を連続的に接続する神経機構の存在を支持している.

したがって、MHP における「認知プロセッサの終端」は、必ずしも「運動プロセッサの始端」と一致しない. 両者の間には、意思決定の結果を運動指令へと変換する「運動準備・変換層」が存在する可能性が高い.

この観点から、MHP を神経生理学的に拡張する場合、情報処理過程は以下の 3 層構造として再定義できる.

- ① 知覚プロセッサ (N100) : 感覚入力の符号化
- ② 認知プロセッサ (N100－P300) : 照合・評価・意思決定
- ③ 認知－運動変換＋運動プロセッサ (P300－反応) : 意思決定の運動出力化

本研究は、MHP における「認知－運動変換層」を初めて明示的に定義し、次章 (研究 2) で扱う BP 解析の理論的基盤を提供するものである.

2.5 本章の小結と次章への課題

本章 (研究 1) では、MHP の理論構造を、ERP 指標により神経生理学的に検証した. その主要な成果は以下の 4 点にまとめられる.

1. MHP の「知覚プロセッサ」は、刺激の種類や課題条件に依存せず安定して観測される N100 成分と時間的に対応し、その神経生理学的妥当性が支持された。
2. MHP の「認知プロセッサ」における処理（照合・再認・分類）の段階的な蓄積は、表音文字課題（実験 $\alpha \cdot \beta$ ）における P300 の潜時の段階的延長として確認され、理論モデルの逐次処理仮説を支持した。
3. 表意文字（漢字）課題では、音韻処理（Task 3）と意味処理（Task 4）の間に P300 の潜時と RT の両方に有意差が認められず（2.3.5 節）、MHP の厳密な直列処理モデルでは説明できない処理の「飽和」または「並列的活性化」が示唆した。
4. P300 は認知プロセッサの「完了」ではなく、その内部の「認知的評価・意思決定の完了」時点を反映することが示唆しており（2.3.3 節）、MHP の「認知から運動への移行プロセス」に未解明の中間段階が存在する可能性が示された。

これらの成果に基づき、MHP の 3 プロセッサ構成を神経生理学的時間軸上で再定義した情報処理モデルを図 2.11 に示す。これは、MHP の逐次処理が観測された実験 α （ラテンアルファベット）の結果を反映した、本研究の基本モデルである。

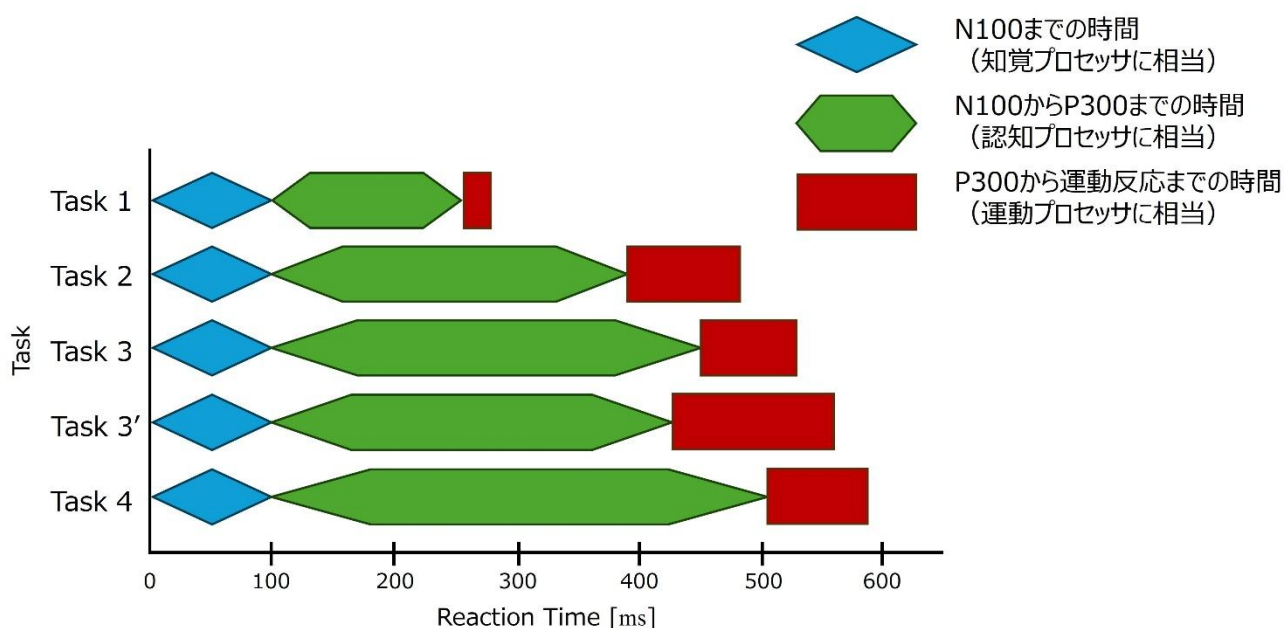


図 2.11 神経活動指標（N100, P300）を組み込んだ基本情報処理モデル（実験 α に基づく）

本図は、実験 α （ラテンアルファベット）の結果に基づき、情報処理過程を①知覚プロセッサ（N100 まで）、②認知プロセッサ（N100–P300）、③認知運動変換+運動プロセッサ（P300–反応）の 3 段階として再定義したモデルを示す。

本モデルでは、情報処理過程を以下の3段階に整理できる。

- ① 刺激入力から N100 まで：知覚プロセッサに相当（感覚入力の符号化）
- ② N100 から P300 まで：認知プロセッサに相当（照合・評価・意思決定）
- ③ P300 から運動反応まで：認知－運動変換および運動プロセッサに相当（意思決定の運動出力化）

これらの成果は、本章 2.1 節で設定した 3 つの検証目標（①から③）との対応に基づき整理できる。

まず、N100 成分が全課題において約 100 ms で安定して観測されたことは、検証目標①「知覚プロセッサの神経基盤の特定」に対応し、MHP が想定する知覚処理段階の妥当性を実証した結果である。

次に、P300 の潜時がタスクの認知的負荷の増加に応じて段階的に延長したことは、検証目標②「認知プロセッサの処理時間構造の解明」に対応する。この系統的变化は、MHP が想定する認知プロセス（処理）の段階的な蓄積を神経生理学的に支持する結果である。

さらに、RT と P300 の潜時の高い対応関係が確認されたこと、および Task 3' において P300 の潜時が変化しなかったことは、検証目標③「行動指標と神経指標の対応関係の検証」に対応する。これにより、P300 が運動実行そのものではなく、認知的意思決定の完了時点を反映する指標であることが明らかになった。

以上の結果は、第 1 章で理論的に提示した MHP の神経生理学的妥当性の検証目的（①から③）に整合し、本研究の第 1 段階（研究 1）の成果として、知覚および認知段階に神経的裏付けを与えた。

これらの結果は、第 1 章の検証目標をすべて満たすものであり、MHP の神経生理学的妥当性を一定程度実証したといえる。しかし同時に、これらの検証を通じて、従来の MHP モデルでは説明しきれない新たな課題も明らかとなった。

第一の課題は、MHP が前提とする厳密な「直列処理」モデルの構造的限界である。図 2.9 に示すとおり、表意文字である漢字課題（実験 γ ）では、Task 3（名称照合）と Task 4（カテゴリー照合）の間に P300 の潜時に有意な差が見られなかった。これは、表 2.3、図 2.7 の表音文字課題とは異なり、音韻情報と意味情報が並列的に処理されている可能性を示唆しており（2.4.3 節）、MHP の単純な逐次処理仮説では説明が困難である。この漢字課題（実験 γ ）の結果を図 2.11 と同じ形式で可視化したものを図 2.12 に示す。図 2.11 では Task 3 から Task 4 にかけて処理時間が段階的に延長していたのに対し、図 2.12 では両者の処理時間が飽和していることが視覚的に確認できる。

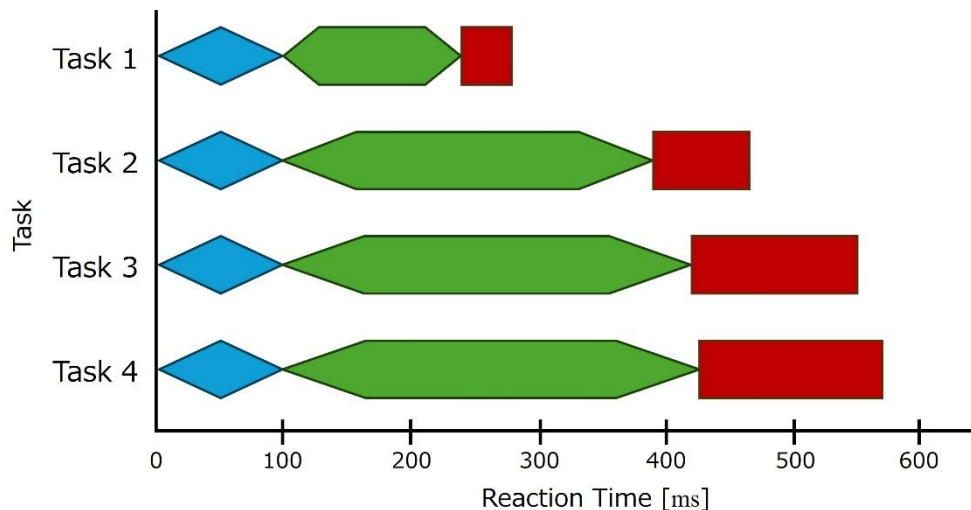


図 2.12 実験 γ における神経活動指標と情報処理時間（図 2.11 との対比）

本図は、実験 γ （漢字）の結果を示す。図 2.11 とは異なり、Task 3（名称照合）と Task 4（カテゴリー照合）の処理時間（N100–P300 間、および P300–反応間）がほぼ同等となり、処理時間の「飽和」が観測されたことを示す。

しかし、この課題は文字認識レベル（微視的レベル）での情報の並列的活性化に起因するものであり、MHP の直列的な処理構造そのものが持つ限界を示している。本研究で後に提案する分岐型 MHP モデルは、より高次の意思決定レベル（巨視的レベル）での経路選択を扱うものであり、この微視的な並列処理の問題を直接的に解決するものではない。したがって、本研究ではこの点を MHP の構造固有の限界として位置づけ、次章以降の拡張モデルの直接的な対象外とする。

第二の課題は、認知から運動への移行プロセスの内部構造が未解明である。③で示される「P300 から運動反応まで」の期間、すなわち認知から運動への移行プロセスの内部構造が未解明である。これは、MHP が想定する「認知プロセッサ → 運動プロセッサ」という直列的接続の中で、どのような神経活動が意思決定から運動出力へと橋渡しをしているのかが明らかでないことを意味する。先行研究では、この過程において BP が重要な役割を果たすことが知られている（Libet et al., 1983; Shibasaki & Hallett, 2006）。したがって、P300 以降に出現する BP を解析することで、「認知から行動への変換プロセス」の神経基盤を明らかにすることが次なる課題である。

第三の課題は、正答前提モデルの限界である。本章で扱った MHP モデルは「正答」を前提とした規範的処理経路であった。しかし、実際の人間の情報処理は、誤答・省略・高速反応など多様な分岐を含む。これらは、単一の直列的情報処理モデルでは説明できない「自動的」または「熟慮的」な複数経路の併存を示唆する。

以上の課題を踏まえ、本研究の第 2 段階（研究 2）となる次章（第 3 章）では、特に第二の課題（認知から運動への移行プロセス）と第三の課題（正答前提モデルの限界）の解明に焦点を当てる。具体的には、P300 に加えて運動準備過程を反映する BP を新たな神経マーカーとして導入する。さらに分析対象を「正答」試行だけでなく「誤答」や「高速応答」試行にも拡張することで、MHP が想定する単一の直列的処理経路では説明できない、人間の情報処理の多重性・分岐性（熟慮のプロセスと自動的プロセス）を実証的に検証し、MHP を拡張する二重経路モデルの神経生理学的基盤を検討する。

第3章：二重情報処理経路の発見と分岐型 MHP モデルの提案（研究2）

3.1 本章の目的と研究2の位置づけ

第2章（研究1）では、MHP が提唱する「知覚プロセッサ」および「認知プロセッサ」の基本構造が、N100 および P300 という ERP の時間的特性と強く対応することを実証した。この成果により、MHP の抽象的なプロセス構造に、約 40 年来欠けていた神経生理学的な基盤が与えられた。

しかし同時に、第2章の検討を通じて、MHP の理論的拡張を必要とする以下の2つの課題が浮き彫りとなった。第一は、第2章の分析結果から示唆された実証的な課題である。第2章（図 2.11）で示されたとおり、P300 成分は「認知的評価・意思決定の完了」を反映するものの、その後の「運動実行」までの時間には数百ミリ秒の延長が存在する。この「認知－運動変換プロセス」が MHP のブラックボックスとして残されている点である。第二は、第2章の前提条件そのものに関わる理論的な課題である。MHP は本来、「正答」を前提とした規範的モデルであり、第2章の分析もこの前提に則ったものであった。しかし、実世界で頻繁に生じる「誤答」や、熟慮を経ない「自動的な高速応答」といった多様な人間行動を、MHP の単一的な処理モデルでは説明できない点である。

これらの課題は、人間の情報処理が MHP の想定する単一の直列的な経路だけでは記述しきれない可能性を示唆する。そこで本章では、本研究の第二段階（研究2）として、これらの課題を実証的に検討する。

本章の目的は、MHP の単一処理経路仮説を批判的に検証し、人間の情報処理の多重性・分岐性を神経生理学的に明らかにすることである。

この目的を達成するために、本章（研究2）では、次の二つの観点から分析を拡張する。

1. BP の導入：第2章では、P300 を用いて「知覚－認知」プロセスの時間構造を検証したが、「認知から運動への移行プロセス」の神経指標は十分に検討されていなかった。本章では、随意運動の数百ミリ秒から数秒前から運動関連皮質（主に補足運動野や一次運動野）で観測される緩徐な陰性電位である BP に着目する。BP は、自発的な指運動やボタン押し課題において、運動開始に先行する運動準備・運動計画過程を反映することが知られている（Kornhuber & Deecke, 1965; Shibasaki & Hallett, 2006）。本研究では、刺激同期の P300 が「認知的評価・意思決定」の完了時点を示す指標であったのに対し、反応同期の BP を「認知－運動変換」の神経的マーカーとみなし、両者の時間関係を比較することで認知と運動の連鎖を検討する。他の候補として CNV (contingent negative variation) や LRP, さらには ERD/ERS などとも考えられるが、本研究では (i) 自発的なボタン押し課題に対して頑健に観測されること、(ii) 単一電極 (C3, Cz) で評価可能であり第2章の ERP 解析との連続性を保てること、から BP に解析対象を絞った。
2. 分析対象の拡張（誤答・高速応答の分析）：MHP の「正答前提モデル」の限界を検証するため、分析対象を「正答」試行だけでなく、「誤答」試行および極端に「高速な正答」試行にも拡張し、RT・P300・BP の時間特性を比較する。

これらのアプローチに基づき、本章では以下の2つの仮説を検証する。

- 仮説 A：誤答は、正答とは質的に異なる高速な処理経路によって生成される。その結果、RT は有意に短く、神経活動パターン（P300, BP）も正答とは明確に異なる形態を示す。
- 仮説 B：正答試行群は均一な処理経路によるものではなく、MHP に準拠した「熟慮的プロセス」と、それとは質的に異なる（仮説 A の誤答プロセスに類似した）高速な「自動的プロセス」という、2 つの神経活動パターンが混在したものである。

本章では、まず正答と誤答の行動指標（RT）および神経活動（P300, BP）を詳細に比較し、両者が質的に異なる処理経路を経由すること（仮説 A）を実証する。次に、P300 の観測の有無に基づき正答試行群を再分類する独自の手法（3.2.6 節）を用い、正答群内部に二重の処理経路が存在すること（仮説 B）を実証する。最終的に、これらの知見を統合し、MHP を拡張する新たな「分岐型 MHP モデル」を提唱する。

3.2 実験・分析手法

3.2.1 方法論的検証：P300 と BP の分離計測（予備実験）

本章（研究 2）の本実験は、P300（認知評価）と BP（運動準備）という機能的に異なる 2 つの神経指標の同時分析を中核とする。したがって、本実験の分析の妥当性を担保するため、本実験（研究 2）の被験者（後述の 3.2.2 節）が参加した予備実験において、構築した実験・分析環境がこれら 2 つの成分を意図どおりに分離・計測できるかを検証した。

3.2.1.1 予備実験のタスク

本検証では、P300 と BP をそれぞれ最適に誘発する 2 つの異なるタスクを実施した。

- Task 1-1（P300 の誘発）：P300 を誘発するため、古典的な視覚 Oddball 課題を実施した。被験者には、標準刺激（●シンボル, 75%）とターゲット刺激（▲シンボル, 25%）をランダムな順序で呈示した。なお、刺激呈示間隔は 1000 ms から 2000 ms の間でランダムに設定した。本タスクでは合計 124 回の刺激を呈示した。このタスクの重要な点は、認知評価（P300）と運動実行（BP）を分離するため、被験者にはボタン押しなどの物理的反応を求めず、ターゲット刺激の出現回数を黙読（心の中で数える）するよう教示した点である。これにより、運動準備（BP）の混入を排除し、純粋な認知評価プロセスとしての P300 を計測した。
- Task 1-2（自己ペース運動課題による BP の誘発）：BP を誘発するため、自己ペースのボタン押し課題を用いた。被験者には、スクリーン中央の注視点（+）を見つめ、外部からの刺激とは無関係に、自らの意図する任意のタイミングで（ただし一定間隔にならないよう）ボタンを押すよう教示した。これは、リズム生成に伴う予測的な活動や時間評価に伴う陰性電位（CNV 等）の混入を防ぎ、純粋な自発的意図に基づく運動準備を捉えるためである。タスクは約 180 秒間継続した。分析に際しては、実際のボタン押し時刻（ $t=0$ ）を基準に時間を遡って加算平均を行う「反応同期」の手法を用いることで、刺激呈示（P300）の影響を排除し、純粋な内発的運動準備プロセスとしての BP が適切に計測できていることを確認した。

3.2.1.2 予備実験の脳波解析

脳波計測の基本設定（電極，サンプリングレート等）は，3.2.5 節に記載の本実験と同一である．

- P300 (Task 1-1) : Cz 電極のデータを，ターゲット刺激 (●) の呈示 ($t=0$) を基準に，-200 ms から 800 ms でエポック化した．その後，各被験者について，(アーティファクト除去後の) 有効な試行 (エポック) を加算平均し，個人波形を算出した．さらにこれらの個人波形を全被験者で平均し，総加算平均波形として算出した．
- BP (Task 1-2) : C3 電極のデータを，ボタン押し ($t=0$) を基準に，-1500 ms から 500 ms でエポック化した．その後，各被験者について，有効な試行を加算平均し，個人波形を算出した．さらにこれらの個人波形を全被験者で平均し，総加算平均波形として算出した．

3.2.1.3 予備実験の結果

分析の結果，両成分の明瞭な分離・計測に成功した．

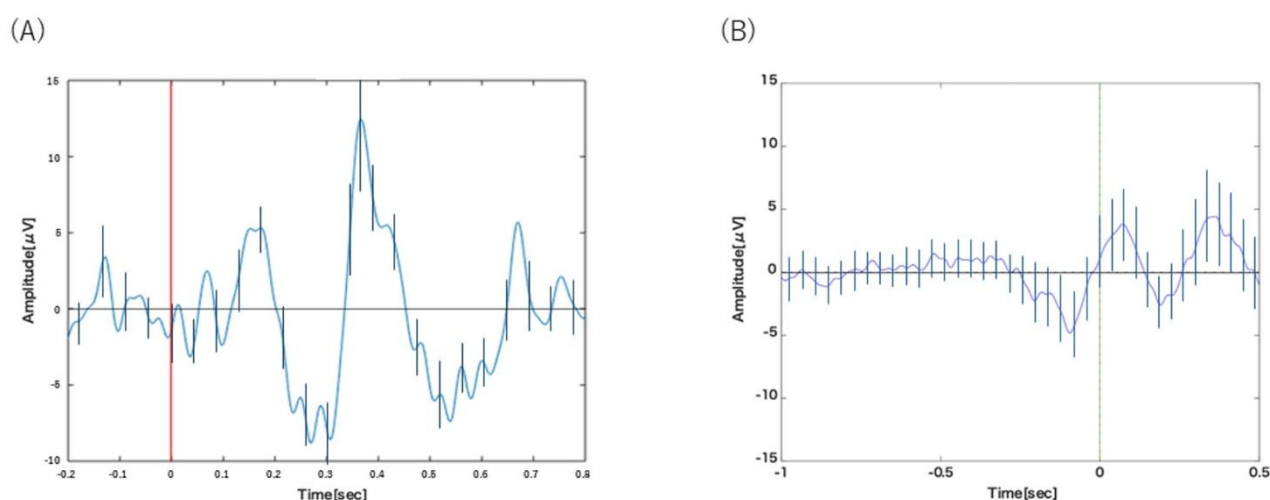


図 3.1 予備実験における P300 と BP の分離計測結果

(A) Task 1-1 において，赤軸で示したターゲット刺激呈示後 ($t=0$) 約 400 ms に明瞭な陽性電位 (P300) が観測された (平均試行回数 28.9 ± 0.57)．(B) Task 1-2 において，緑軸で示したボタン押し ($t=0$) に先立ち，約 -300 ms から -100 ms の区間にわたり緩徐な陰性電位 (BP) が観測された (平均試行回数 20.2 ± 1.23)．エラーバーは標準誤差．

図 3.1 (A) に示すとおり，Task 1-1 では，運動反応を伴わないにもかかわらず，ターゲット刺激呈示後約 400 ms に Cz 電極で明瞭な P300 が観測された．なお，視覚刺激課題における P300 の潜時は典型的に 300 ms から 500 ms の範囲で変動することが知られており (Polich, 2007)，本結果はその範疇に含まれる．また，図 3.1 (B) に示すとおり，Task 1-2 では，刺激呈示がないにもかかわらず，C3 電極でボタン押しに先立つ典型的な BP (緩徐な陰性電位) が観測された．

3.2.2 実験被験者

本章の実験（研究 2）には、実験目的について十分な説明を受け、第 2 章（研究 1）の実験被験者と異なる健常な若年成人 10 名（男性 9 名、女性 1 名、平均年齢 23.4 歳）が新たに参加した（前述の予備実験 3.2.1 にも同一の被験者が参加した）。全被験者は、視力は正常または矯正視力（コンタクトレンズ・眼鏡使用）であった。利き手は、全員が右利きであることを確認した。

本章（研究 2）の全ての実験は、大阪大学大学院情報科学研究科研究倫理審査委員会の承認（承認番号：202102）を受けて実施した。被験者には事前に実験内容とデータ利用目的を十分に説明したうえで、同意を得た。被験者はいつでも実験を中止できること、および個人情報が匿名化されることについても説明した。全被験者は、実験参加前に研究内容に関する説明を受け、同意を得た。

3.2.3 実験設定

実験環境は、シールドルームにて、刺激は 24 インチ液晶ディスプレイ（DELL P2412Hb, 解像度：1920x1080）を用い、黒色背景の中央に白色（フォントサイズ 40）で呈示された。被験者は液晶ディスプレイから 1 m 離れた暗室内に着座し、利き手でコンピュータマウスを操作した。

3.2.4 実験タスクと手続き

本研究（研究 2）は、第 2 章（研究 1）で MHP の検証に用いた課題設計（図 2.2）を踏襲し、認知負荷を段階的に増加させる 4 つのタスクで構成した。全タスクにおいて、視覚刺激は注視点（+シンボル）の後に呈示され、刺激呈示間隔は 1000 ms から 2000 ms の間でランダムに設定した。4 つのタスクの実施順序は、被験者間でカウンターバランスが取られた。

Task 2-1：単純反応課題

MHP の最も基本的な経路（知覚プロセッサ → 認知プロセッサ（反応決定のみ） → 運動プロセッサ）を測定するために設計された。被験者にはターゲット刺激（●シンボル）を 30 回呈示し、刺激を視認次第、可能な限り迅速にボタンを押すよう教示した。このタスクでは非ターゲット刺激は呈示されないため、誤答（Z）は発生しない。

Task 2-2：物理的照合反応課題

Task 2-1 の経路に加え、認知プロセッサ内に「照合」プロセスを追加する課題である。被験者には一連の文字（"A", "B", "C", "a", "b", "c", "1", "2", "3"）のセットを 1 試行に 1 文字ずつ呈示した。特定のターゲット文字（"B"）が出現した場合にのみボタンを押す。それ以外の刺激（非ターゲット）では反応しないよう教示した。タスクは合計 120 試行で構成され、ターゲット刺激と非ターゲット刺激の呈示比率は 1:3（ターゲット刺激 30 回）とした。

Task 2-3：名称照合反応課題

物理的照合に加え、「再認」プロセスを追加する課題である。刺激セットを拡張し

("A", "B", "C", "D", "E", "a", "b", "c", "d", "e", "1", "2", "3", "4", "5"), 被験者には特定の「読み」("/di:/")を持つ文字が呈示された場合（すなわち"D"または"d"）にボタンを押すよう教示した。タスクは合計 120 試行で構成され、ターゲット刺激と非ターゲット刺激の呈示比率は 1:3（ターゲット刺激 30 回）とした。

Task 2-4：カテゴリー照合反応課題

MHP モデルにおける最も複雑な経路（照合、再認、分類）を測定する課題である。Task 2-3 と同一の刺激セットを用い、被験者には特定のカテゴリー（「子音」）に属する文字（"B", "C", "D", "b", "c", "d"）が呈示された場合にボタンを押すよう教示した。タスクは合計 120 試行で構成され、ターゲット刺激と非ターゲット刺激の呈示比率は 1:3（ターゲット刺激 30 回）とした。

3.2.5 脳波計測および前処理

計測機器

脳波データは、OpenBCI Cyton システムおよび ThinkPulse アクティブ電極を用いて、国際 10-20 法に基づき計測した。サンプリングレートは 256 Hz とした。

電極配置

本分析では、P300 (P3b) が頭頂部で最大となる (Polich, 2007) ことから Cz 電極を、BP が右手運動野の対側（左半球）で最大となる (Shibasaki & Hallett, 2006) ことから C3 電極を、それぞれ主要な分析対象とした。参照電極は左右の乳様突起（マストイド）に設置し、接地電極は前頭部 (Fp1) に設置した。

前処理

データの前処理および解析には、MATLAB R2020a (MathWorks 社) を用いた。

1. フィルタリング：生データに対し、1 Hz から 30 Hz の帯域通過 FIR フィルタ (Order = 512) を適用した。
2. アーティファクト除去 (2 段階)：
 - (段階 1：手動除去) 瞬目、筋電、その他の突発的ノイズを含む試行を、目視により手動で除去した。チャンネル数が限定的であるため、独立成分分析 (ICA) のような自動化手法よりも、本研究の探索的性質に適した正確なデータクリーニングを優先した。
 - (段階 2：統計的除去) 残存する試行に対し、統計的な外れ値除去を適用した。具体的には、各電極において、当該試行のベースライン期間（刺激呈示前）の振幅平均値から $\pm 2SD$ を超える振幅が観測された試行をアーティファクトと定義し、分析から除外した。

3.2.6 分析指標の定義

3.2.6.1 試行の分類

Task 2-2, 2-3, 2-4 の各試行を、刺激と被験者の応答に基づき以下の 3 カテゴリーに分類した。

- カテゴリーX（正答）：ターゲット刺激が呈示され、被験者が正しくボタン押し応答を行った試行
- カテゴリーY（見逃し）：ターゲット刺激が呈示されたが、被験者が応答しなかった試行
- カテゴリーZ（誤答）：非ターゲット刺激が呈示されたが、被験者が誤って応答を行った試行。なお、本実験で用いる課題は単純な照合課題であるため、ここで生じる誤答は、熟慮の末の判断誤り（ミステイク）ではなく、主に反射的な反応による行為の失敗（スリップ）であると想定される。

3.2.6.2 行動指標

主要な行動指標として RT を算出した。RT は、刺激呈示時刻からボタン押し応答までの時間と定義した。

3.2.6.3 神経活動指標（P300 および BP）

本研究の核心的分析として、P300 と BP を同一試行データから異なる時間軸で抽出した。

- P300（認知評価）の抽出：
 - 電極：Cz 電極
 - 時間軸：刺激同期（Stimulus-Locked）。刺激呈示時刻（ $t = 0$ ）を基準に、-200 ms から 800 ms の範囲でエポック化
 - ベースライン補正：刺激呈示前の -200 ms から 0 ms をベースライン区間とし、各試行の平均電位を $0 \mu V$ に補正
 - 時間窓：刺激呈示後 250 ms から 600 ms
 - 抽出基準：上記時間窓における最大陽性振幅（ピーク）を抽出し、その時刻を P300 の潜時、ベースラインとの差分を P300 の振幅とした。二峰性の場合は主峰を採用した。
- BP（運動準備）の抽出：
 - 電極：C3 電極
 - 時間軸：反応同期（Response-Locked）。ボタン押し時刻（ $t = 0$ ）を基準に、-1500 ms から 500 ms の範囲でエポック化
 - ベースライン補正：-1500 ms から -1000 ms をベースライン区間とし、各試行の平均電位を $0 \mu V$ に補正
 - BP 開始潜時の定義：反応時刻（ボタン押し）を 0 ms とし、反応前 600 ms から反応後 100 ms の区間（-600 ms から +100 ms）において、波形がベースラインより明確に負方向へ偏位し、その状態が一定時間以上持続し始める時点をも BP の立ち上がりとし、開始潜時として同定。BP の後期成分は運動開始のおよそ 400 ms 前から傾きが増して顕著になるとされるため（Shibasaki & Hallett, 2006）、個人差やボタン押しと運動開始のずれを考慮して探索窓の開始を -600 ms まで拡張し、立ち上がりの取りこぼしを抑えた。なお、-600 ms から +100 ms は BP 開始を同定するための探索窓であり、必ず -600 ms から出現することを仮定するものではない。

- BP ピーク潜時の定義：同じ-600 ms から+100 ms の時間窓内で最大陰性振幅（ピーク）を BP のピークとし、その時刻を BP のピーク潜時、その振幅を BP のピーク振幅として抽出した。運動開始近傍の陰性成分は運動開始後 30 ms から 50 ms 程度持続し得ることが報告されており、反応時刻をボタン押しで定義する場合に 0 ms 以降へピークがずれ得る点を考慮して+100 ms を含めた (Hallett, 1994)。
- 妥当性の確認：自動検出結果について、全被験者・全条件の波形を確認し、明らかな検出ミスやアーティファクトに起因する点が含まれていないことを確認

3.2.7 仮説検証のための統計解析

統計的有意水準は $p < .05$ と設定した。

3.2.7.1 仮説 A の検証方針

仮説 A を検証するため、カテゴリーX（正答）およびカテゴリーZ（誤答）について、各被験者の平均 RT を算出した。各タスク（Task 2-2, 2-3, 2-4）内で、X と Z の平均 RT をペアサンプル t 検定を用いて比較した。

3.2.7.2 仮説 B の検証方針

仮説 B を検証するため、カテゴリーX（正答）の試行を、P300 の出現有無に基づいて試行ごとに再分類した。

- 分類基準：各正答試行において、Cz 電極の刺激呈示後 250 ms から 600 ms の時間窓内で、ベースライン期間（-200 ms から 0 ms）の平均電位から+2SD を超える明瞭な陽性ピークが検出された場合、その試行を「P300 検出・正答 (X+P3)」と分類した。この基準を満たさない試行は、「P300 不検出・正答 (X-P3)」と分類した。ここで SD は、ベースライン区間における電位の標準偏差を指す。本研究で図 3.4・図 3.5 に示したようなごく小さな陽性電位は、上記の閾値を満たさないため P300 とはみなさず、P300 不検出・正答 (X-P3) として扱った。
- 比較分析：この分類に基づき、X+P3 群と X-P3 群それぞれの平均 ERP/ BP 波形を算出し、さらに両群の RT をペアサンプル t 検定によって比較した。

3.3 結果

3.3.1 分析データの品質（試行回数）

本章の分析，特に仮説 B の検証は，正答試行を P300 検出（X+P3）と P300 不検出（X-P3）というサブカテゴリーに分類するという本研究独自の手法に基づいている．したがって，3.3 節の主要結果を提示する前に，これらの各カテゴリーにおいて，ERP および BP 波形を生成し統計的比較を行う上で，十分なデータ品質（ノイズ除去後の試行回数）が確保されていることを示す必要がある．

表 3.1 に，本実験（研究 2）の各タスクおよび主要分析カテゴリーにおける，アーティファクト除去後の平均試行回数と標準偏差を示す．

表 3.1 各タスク・分析カテゴリーにおけるノイズ除去後の平均試行回数（回）（N = 10）

Task	正答（X）	P300 検出・正答（X+P3）	P300 不検出・正答（X-P3）	誤答（Z）
Task 2-1（単純）	28.4（1.2） Range: [26-30]	-	-	-
Task 2-2（物理的）	23.4（1.9） Range: [19-28]	18.9（1.6） Range: [16-22]	4.5（1.0） Range: [3-6]	3.2（1.2） Range: [1-5]
Task 2-3（名称）	20.5（2.4） Range: [15-26]	15.3（2.0） Range: [12-19]	5.2（1.3） Range: [3-7]	6.0（1.6） Range: [4-9]
Task 2-4（カテゴリー）	17.8（2.7） Range: [11-24]	9.5（2.2） Range: [5-13]	8.3（1.6） Range: [6-11]	8.7（1.8） Range: [6-12]

表 3.1 から，以下の 2 点が確認できる．第一に，全ての分析カテゴリーにおいて，波形の加算平均と統計分析が可能な試行回数が確保されている点である．最も試行数が少なくなる傾向があった P300 不検出・正答（X-P3）や誤答（Z）カテゴリーにおいても，分析に最低限必要な試行を提供しており，本分析が一部の被験者の特異なデータに依存したものではなく，全被験者に共通する現象を捉えていることが示されている．

第二に，タスクの難易度（Task 2-2 → Task 2-4）が上がるにつれて，正答（X）全体の試行数が減少する．さらに，正答（X）の内訳に注目すると，最も困難な Task 2-4（カテゴリー照合）において，P300 検出・正答（X+P3）群（平均 9.5 回）と P300 不検出・正答（X-P3）群（平均 8.3 回）の試行回数がほぼ同数となっている．

3.3.2 仮説 A の検証：正答と誤答の行動的・神経的差異

3.3.2.1 行動データ（RT）

まず，正答（X）試行と誤答（Z）試行の RT を比較した．その結果を図 3.2 に示す．

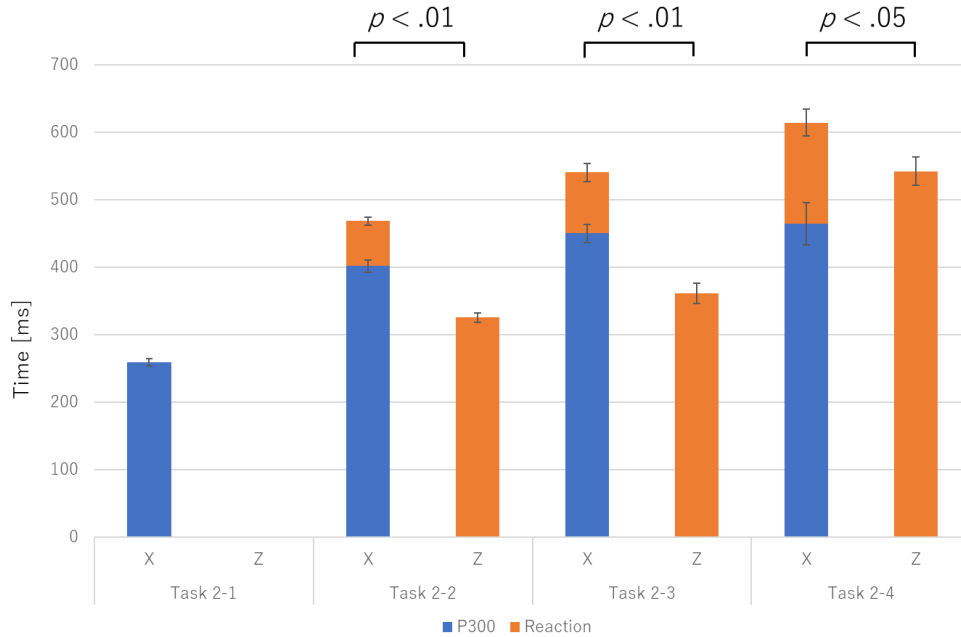


図 3.2 各タスクにおける正答 (X) と誤答 (Z) の反応時間および P300 潜時

縦軸は刺激呈示からの時間を表す。正答 (X) 群 (左側のバー) は積み上げグラフであり、全体の高さが平均反応時間 (RT) を示す。内訳として、青色は「P300 の潜時」、オレンジ色は「P300 のピークからボタン押しまでの時間 (RT との差分)」を表す。誤答 (Z) 群 (右側のバー) は、P300 が検出されなかったため、RT 全体を単色 (オレンジ) で示した。エラーバーは標準誤差を示す (積み上げグラフにおいては、青色部分が P300 の潜時の誤差、バー最上部が RT 全体の誤差を表す)。

注：Task 2-1 (単純反応) は非ターゲット刺激が存在しないため、誤答 (Z) 試行は発生しない。

図 3.2 に示すとおり、Task 2-2、2-3、2-4 のすべてにおいて、誤答 (Z) の RT は、正答 (X) の RT よりも一貫して有意に短かった。また、その差は極めて顕著であった (ペアサンプル t 検定)：

- Task 2-2 (物理的照合)： $t(9) = 14.52, p < .001$, Cohen's $d = 4.59$ (平均 RT X = 468.8 ms, Z = 325.6 ms)
- Task 2-3 (名称照合)： $t(9) = 11.01, p < .001$, Cohen's $d = 3.48$ (平均 RT X = 540.4 ms, Z = 368.5 ms)
- Task 2-4 (カテゴリー照合)： $t(9) = 2.31, p = .046$, Cohen's $d = 0.73$ (平均 RT X = 614.4 ms, Z = 553.4 ms)

なお、本研究は被験者内比較で分散が極めて小さいため、見かけ上大きな効果量が得られている。本分析において特筆すべき点は、統計的な有意差が認められただけでなく、その差の方向性がすべてのタスクにおいて一貫して「誤答の方が正答よりも RT が短い」という結果を示した事実である。

3.3.2.2 神経活動パターン

次に、これらの試行における神経活動パターンを比較した。図 3.3 に正答 (X) 試行の波形を、図 3.4 に見逃し (Y) 試行、図 3.5 に誤答 (Z) 試行における P300 (刺激同期・Cz) および BP (反応同期・C3) の波形を示す。なお、本節以降で提示するすべての脳波データ (図 3.3, 図 3.4, 図 3.5, 図 3.7) は、(3.2.1.2 節の手順で算出した) 各被験者の個人波形を、さらに全被験者 (N=10) で平均して算出した総加算平均波形である。

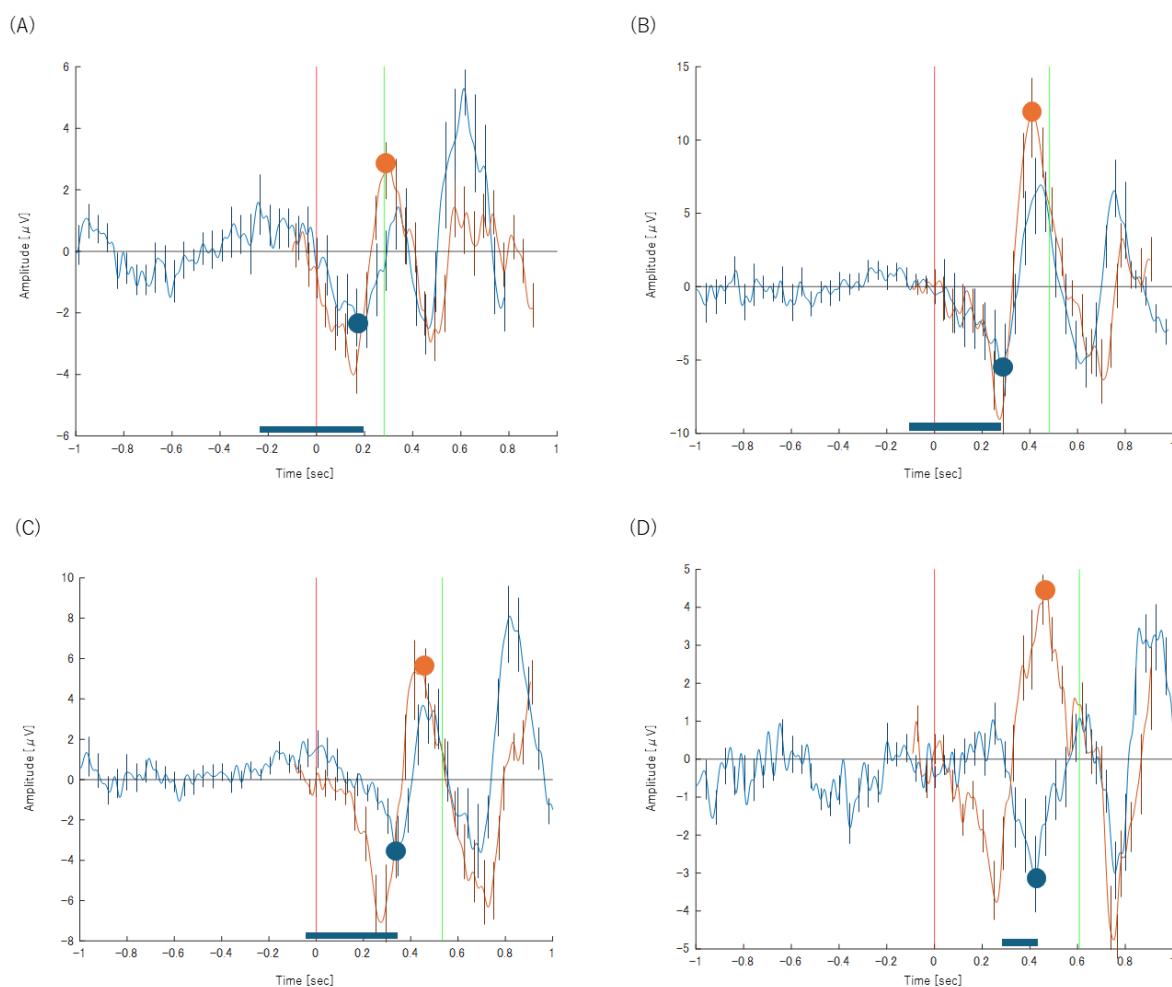


図 3.3 正答 (X) 群の神経活動波形 ((A) Task 2-1, (B) Task 2-2, (C) Task 2-3, (D) Task 2-4) 赤軸 ($t=0$) は刺激呈示のタイミングを示し、緑軸は平均 RT を示す。P300 (オレンジ) は刺激同期, BP (青) は反応同期で分析した波形だが、本図では比較のため、BP の波形を各条件の平均 RT 分だけ時間軸を補正し、刺激同期の共通時間軸上にプロットしている。P300 のピークをオレンジ色の丸印 (●) で、BP のピークを青色の丸印 (●) で明示する。また、x 軸上の青色の帯は、BP の立ち上がり開始からピーク到達までの準備期間を示す。エラーバーは標準誤差。

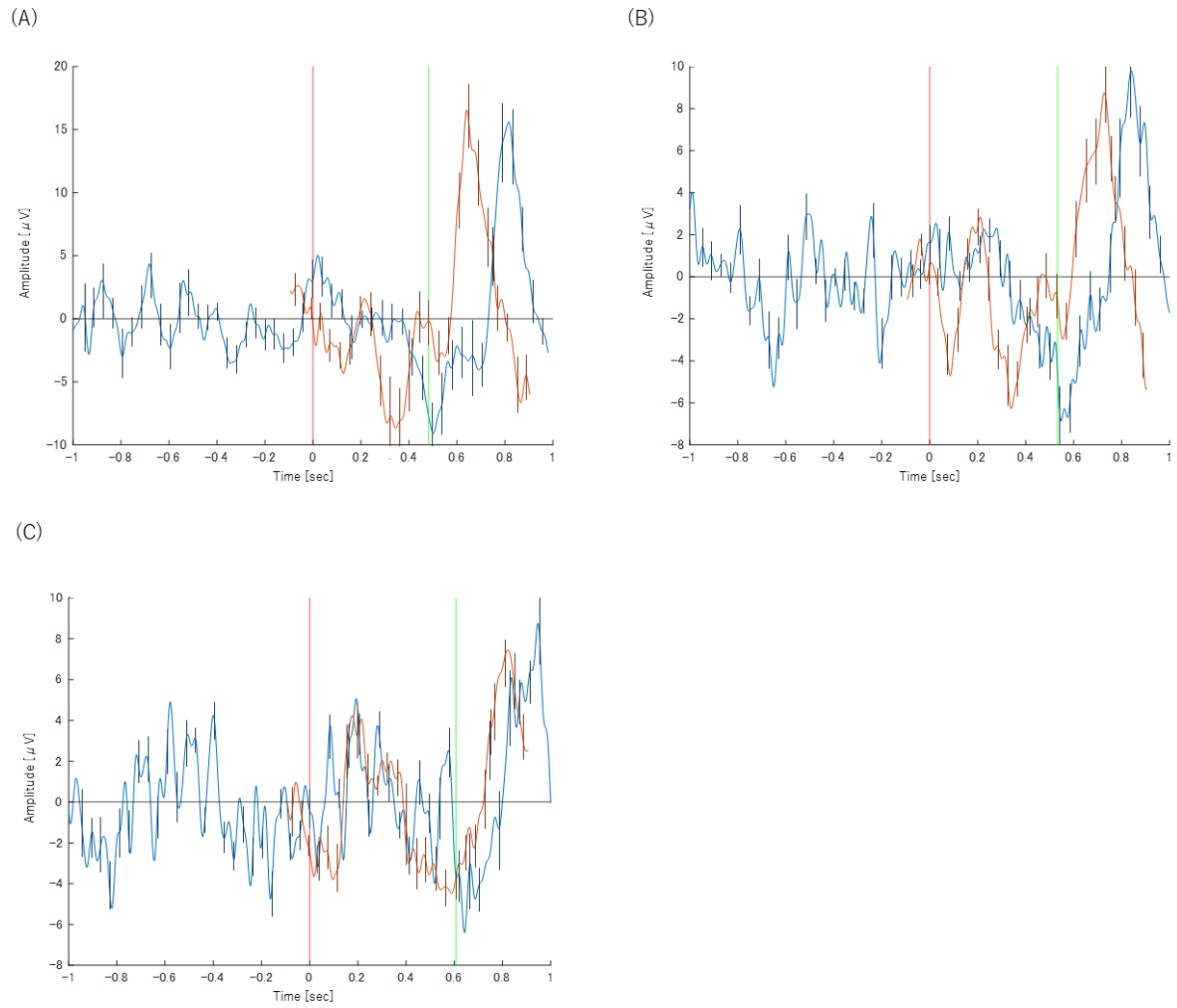


図 3.4 見逃し (Y) 試行における神経活動波形 ((A) Task 2-2, (B) Task 2-3, (C) Task 2-4)
 赤軸 ($t=0$) は刺激呈示のタイミングを示す. P300 (オレンジ) は刺激同期で分析した波形を示す. BP (青) については, Y 試行はボタン押し応答が存在しないため, 正答 (X) 試行の平均 RT を参照してプロットしている. 緑軸は, その参照とした平均 RT の位置を示す. エラーバーは標準誤差.

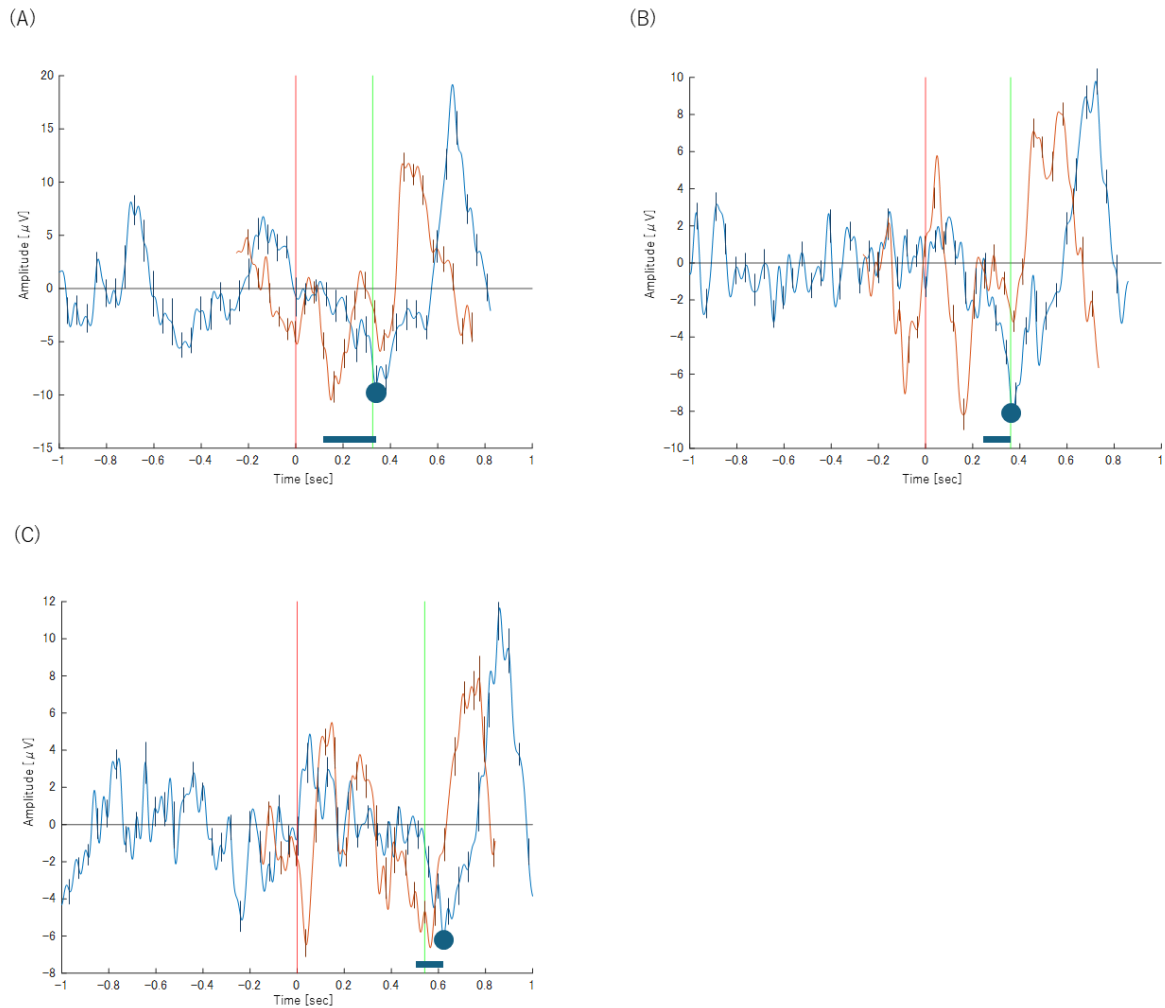


図 3.5 誤答 (Z) 試行における神経活動波形 ((A) Task 2-2, (B) Task 2-3, (C) Task 2-4)

赤軸 ($t=0$) は刺激呈示のタイミングを示し、緑軸は平均 RT を示す。P300 (オレンジ) は刺激同期、BP (青) は反応同期で分析した波形だが、本図では比較のため、BP の波形を各条件の平均 RT 分だけ時間軸を補正し、刺激同期の共通時間軸上にプロットしている。BP のピークを青色の丸印 (●) で明示する。また、x 軸上の青色の帯は、BP の立ち上がり開始からピーク到達までの準備期間を示す。エラーバーは標準誤差。

明瞭な正答波形 (図 3.3) とは対照的に、不正解試行である見逃し (Y, 図 3.4) および誤答 (Z, 図 3.5) では、タスク (Task 2-2, 2-3, 2-4) に問わず典型的な P300 様の陽性ピークは観測されなかった。

具体的には、分析対象とした Cz 電極の 250 ms から 600 ms の時間窓において、ベースラインから明瞭に逸脱する陽性電位はほとんど認められず、本研究で定義した P300 の判定基準 (3.2.5 節) を満たす試行はごく少数であった。例えば、図 3.5 (C) の約 230ms 付近に微細な陽性成分が観察されるが、これは本研究で規定した P300 の潜時窓 (3.2.6.3 節で定義した 250ms 以降) から外れるため、機能的な P300 としては扱わない。

さらに、BP の波形も、正答試行 (図 3.3) で見られる刺激呈示付近 (約 -200 ms から 0 ms) からピー

クまでの長い期間にわたる緩徐な立ち上がりとは異なり、運動反応直前の短い時間窓（およそ-100 ms から 0 ms）に陰性電位が集中し、急峻なピークを示すパターンが観察された。

なお、正答試行群（図 3.3）の内部で比較すると、最も認知的負荷の高い Task 2-4（図 3.3（D））において、BP の立ち上がり期間（図中の青帯）が他のタスクに比べて短縮している傾向が認められた。ただし、この短縮が見られた Task 2-4 においても、BP の開始位置は運動実行（ $t = 0$ ）よりも時間的に先行しており、誤答試行（図 3.5）や自動的プロセス（図 3.7）で見られる「運動直前での急峻な発生」とは異なる波形形状を示した。

3.3.3 仮説 B の検証：正答試行群の再分類

誤答試行が P300 不検出と高速な RT を特徴とすることが判明した（仮説 A）。この発見に基づき、「正答試行群（X）の内部にも、誤答（Z）と同様の P300 不検出・高速な処理経路が混在しているのではないか」という仮説（仮説 B）の検証に進んだ。3.2.6 節で定義した分類法に基づき、正答試行（X）を P300 検出・正答（X+P3）群と P300 不検出・正答（X-P3）群に分離し、それぞれの RT と神経活動を比較した。

3.3.3.1 行動指標（RT）の比較

図 3.6 に、3 つの試行群（X+P3、X-P3、Z）の RT を示す。

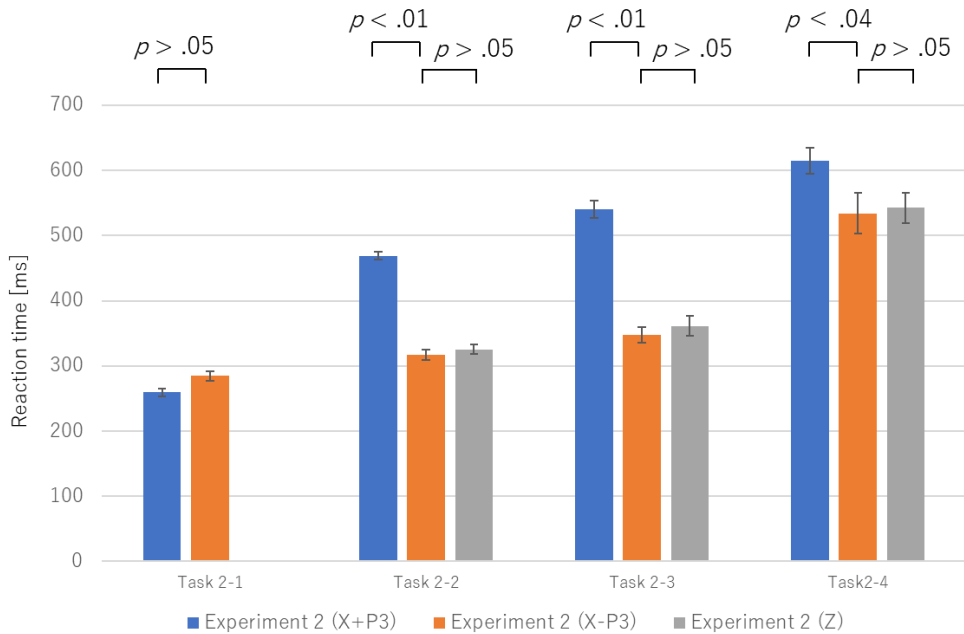


図 3.6 3 試行群（P300 検出・正答（X+P3）、P300 不検出・正答（X-P3）、誤答（Z））の RT 比較
P300 検出・正答（X+P3）群（青）、P300 不検出・正答（X-P3）群（オレンジ）、および誤答（Z）群（グレー）の反応時間（RT）の比較。エラーバーは標準誤差。

統計解析の結果、RT と P300 の有無の関係について、以下の 2 点が示された。

1. P300 の有無による RT の差異：P300 検出・正答 (X+P3) 群は、P300 不検出・正答 (X-P3) 群よりも一貫して RT が有意に遅かった (Task 2-2 : $t(9)=7.50, p<.001$, Cohen's $d=2.37$, Task 2-3 : $t(9)=9.51, p<.001$, Cohen's $d=3.01$, Task 2-4 : $t(9)=2.38, p=.041$, Cohen's $d=0.75$)。
2. P300 不検出群と誤答群の類似性：本研究の核心的知見として、P300 不検出・正答 (X-P3) 群の RT は、誤答 (Z) 群の RT と統計的に有意な差が認められなかった (Task 2-2 : $t(9)=1.05, p=0.321$, Cohen's $d=0.33$, Task 2-3 : $t(9)=-0.94, p=0.371$, Cohen's $d=-0.30$, Task 2-4 : $t(9)=0.45, p=0.663$, Cohen's $d=0.14$)。

3.3.3.2 神経活動パターンの比較

次に、この行動レベルでの分離が、神経活動レベルでも裏付けられるかを検証した。図 3.7 に P300 不検出・正答群 (X-P3) の波形を示す。

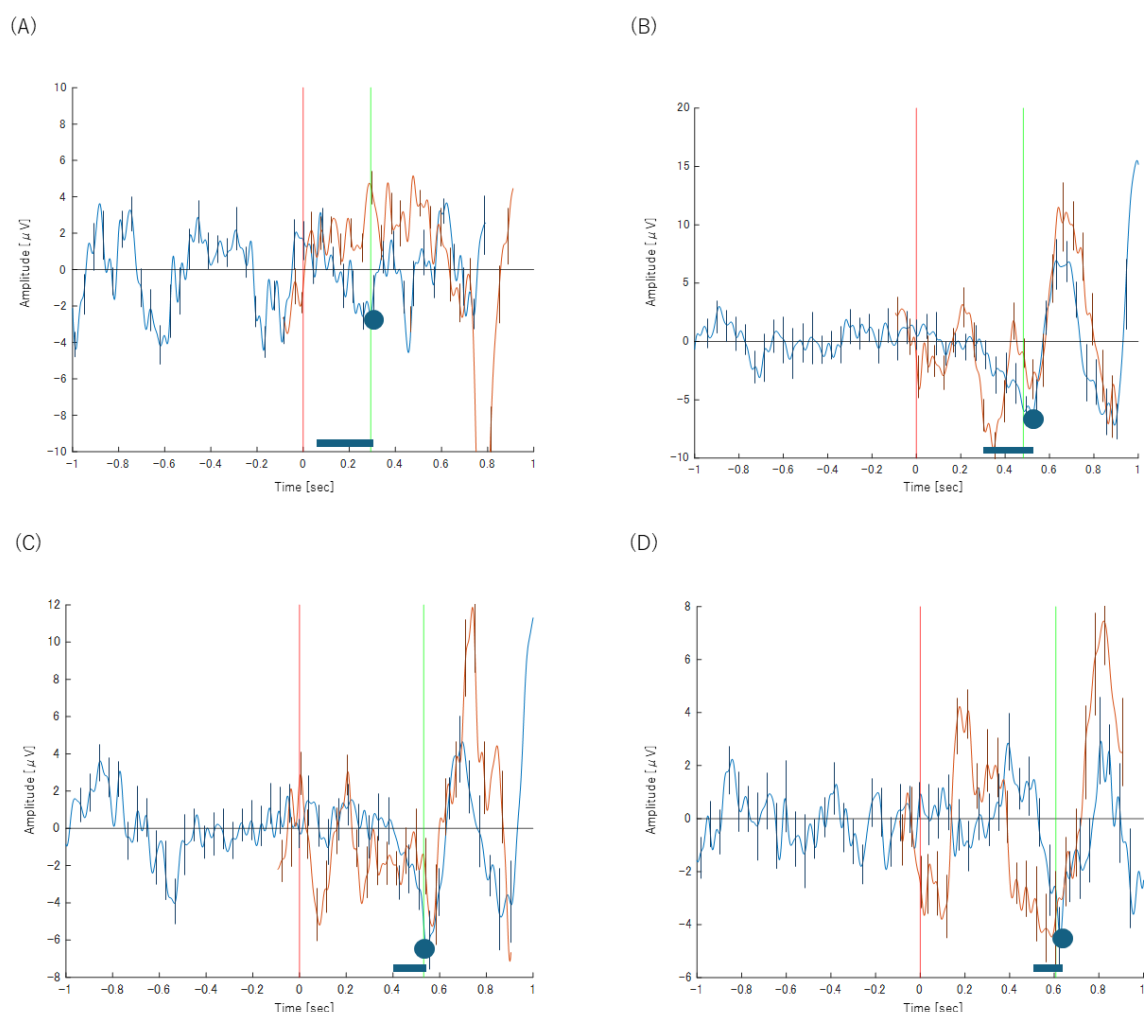


図 3.7 P300 不検出・正答 (X-P3) 群の神経活動波形 ((A) Task 2-1, (B) Task 2-2, (C) Task 2-3, (D) Task 2-4)

赤軸 ($t=0$) は刺激呈示のタイミングを示し、緑軸は平均 RT を示す。P300 (オレンジ) は刺激同期, BP (青) は反応同期で分析した波形だが、本図では比較のため、BP の波形を各条件の平均 RT 分だけ時間軸を補正し、刺激同期の共通時間軸上にプロットしている。BP のピークを青色の丸印 (●) で明示する。また、x 軸上の青色の帯は、BP の立ち上がり開始からピーク到達までの準備期間を示す。エラーバーは標準誤差。

図 3.7 に示された P300 不検出・正答 (X-P3) の波形は、特徴的な結果を示した。その神経活動パターンは、図 3.3 の正答 (X) とは全く異なり、むしろ図 3.5 の誤答 (Z) 試行のパターンと酷似していた。具体的には、以下の 2 点において、誤答 (Z) 試行と共通の特徴を示した。

1. P300 成分（オレンジ色，刺激同期）が，本研究で定義した振幅・潜時の基準を満たす陽性ピークとしては観測されない。
2. BP（青色，反応同期）が，正答試行で見られる運動前数百ミリ秒にわたる緩やかな立ち上がりを欠き，運動反応直前の短い時間窓（約-100 ms から 0 ms）において急峻な陰性ピークに到達する。

3.4 考察：二重処理経路と分岐型 MHP モデルの提唱

3.4.1 MHP の限界と二重処理経路の発見

第 2 章（研究 1）では，MHP の「知覚 → 認知」プロセスが N100 および P300 と対応することを確認した。しかし，本章（研究 2）の結果は，MHP の単一モデルの限界を明確に示している。

まず，仮説 A（誤答は正答と質的に異なる）は行動・神経の両面から強く支持された。一般的に，誤答は判断の迷いや葛藤（熟慮）の末に生じる場合があり，その場合，RT は正答よりも延長し，P300 等の認知成分も観測されると予測される。もし本実験の誤答がそのような性質のものであれば，正答と誤答を区別することに神経生理学的な意義は見出しにくい。

しかし，本実験の結果はその予測と対照的であった。誤答（Z）は正答（X）よりも一貫して RT が有意に短く（3.3.2.1 節 図 3.2），MHP が想定する「反応決定」プロセス（P300）が明瞭なピークとしては観測されなかった（3.3.2.2 節 図 3.5）。この「高速性」と「P300 の不検出」という特徴は，観測された誤答が熟慮の末の失敗ではなく，MHP の主要な認知段階をバイパスする高速な自動的プロセス（衝動的なスリップ）によって生成されていることを決定づける証拠である。すなわち，本研究で観測された誤答は，認知的な判断プロセスそのものの誤りである「ミステイク」ではなく，正しい意図に対する行為実行の失敗である「スリップ」としての性質を神経生理学的にも有していると言える。

したがって，行動の結果として生じた正答と誤答を区別して解析することは，結果的に脳内の処理モード（熟慮のプロセス vs 自動的プロセス）の違いを抽出するための妥当かつ有効な手続きであったと結論づけられる。特に Task 2-2, 2-3 における効果量（Cohen's d）は非常に大きく，被験者内比較における分散の小ささを反映しているものの，誤答が熟慮の末の失敗ではなく，より高速で衝動的なプロセスによって生じていることを強く示唆している。

次に，本研究の核心的知見として，仮説 B（正答群は二重プロセスの混在）が実証された。正答（X）試行群は均一ではなく，P300 検出・正答（X+P3）群と P300 不検出・正答（X-P3）群に分離できた。行動指標レベルでは，P300 不検出・正答（X-P3）群は P300 検出・正答（X+P3）群よりも有意に RT が短く，むしろ誤答（Z）群と統計的に差がなかった（3.3.3.1 節 図 3.6）。神経活動レベルでも，P300 不検出・正答（X-P3）群は P300 検出・正答（X+P3）群（図 3.3）とは全く異なり，誤答（Z）群（図 3.5）と酷似した「P300 不検出・後期 BP ピーク」というパターンを示した（3.3.3.2 節 図 3.7）。

これらの結果は，刺激入力後の情報処理が単一の直列経路を辿るのではなく，少なくとも二種類の経路に分岐することを示唆する。すなわち，

1. 熟慮のプロセス：P300 が検出され，RT が相対的に長い。これは MHP の想定する「知覚 → 認知（照合・再認・分類） → 反応決定 → 運動」の系列に対応する。

2. 自動的プロセス：P300 が不検出で、RT が相対的に短い。MHP が想定する「反応決定」段階を経ず、知覚から運動への直接的連合経路が作動する。

この自動的プロセスは、RT 短縮と誤答率上昇のトレードオフを伴う一種の高速処理経路である。したがって、正答であっても P300 を伴わない場合（X-P3）は、同様の神経基盤を持つと解釈される。

なお、一部の誤答（Z）試行および P300 不検出・正答（X-P3）試行の波形において、RT の後（例えば 400 ms 以降）に陽性電位が観測される場合がある。しかし、本研究における P300 は、運動実行に先行する認知的評価・意思決定の完了時点を反映する成分として機能的に定義されている。したがって、RT 以降に出現するこれらの陽性電位は、運動に伴うフィードバック電位やアーティファクトである可能性が高く、意思決定プロセスを反映する P300 とは区別されるべきである。それゆえ、これらの事後的な電位の存在は、「自動的プロセスにおいて意思決定関連の P300 が不検出である」という本研究の結論を左右するものではない。

以上より、これらの結果は、MHP の単一路線モデルを拡張する必要性を強く支持するものである。

3.4.2 分岐型 MHP モデルの提案

これらの実証結果（3.4.1 節）に基づき、第 2 章で提示した単一経路モデル（図 2.10, 図 2.11）の限界（特に第 2 章 2.5 節で課題として挙げた「認知から運動への移行プロセス」と「正答前提モデルの限界」）を克服・拡張する新たな「分岐型 MHP モデル」を提唱する（図 3.8, 図 3.9）。

本モデルは、MHP の知覚・認知プロセッサを通過した後の情報処理が「分岐点」を迎え、反応決定プロセスを経るか否かを動的に選択するという仮定に基づく。

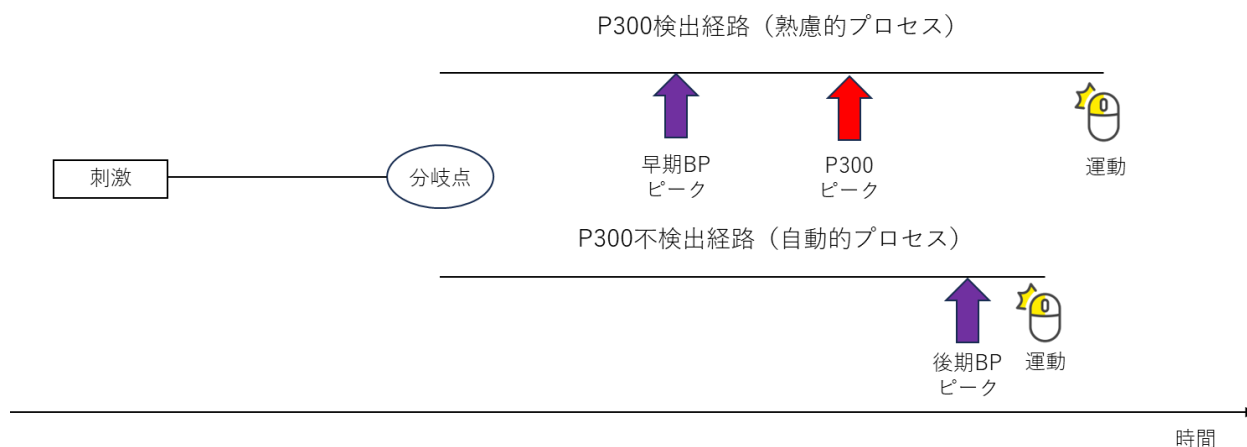


図 3.8 二重経路の神経生理学的タイムライン（概念図）

刺激後、処理が分岐する。（上段）「熟慮的过程」では、まず運動準備（早期 BP ピーク）が開始され、次いで認知的評価（P300 ピーク）が完了し、運動が実行される。

（下段）「自動的过程」では、P300 は観測されず、BP は運動とほぼ同時にピーク（後期 BP ピーク）を迎える。

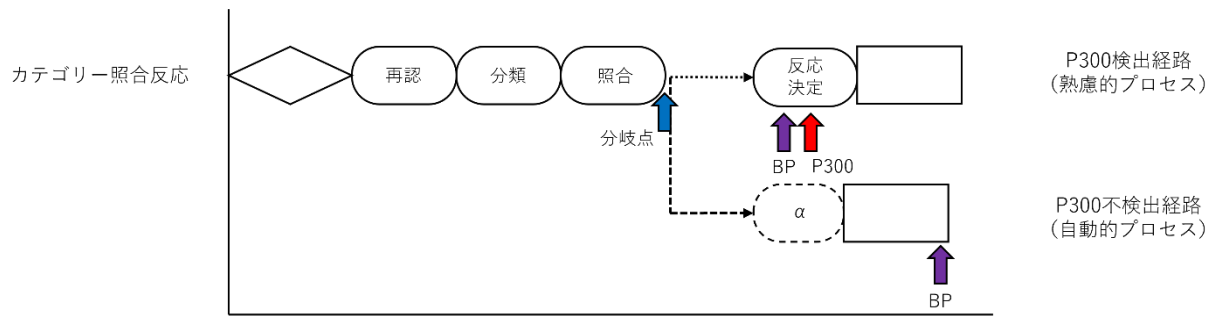


図 3.9 分岐型 MHP モデルの概念図 (Task 2-4 を例として)

「照合」プロセス後の分岐点において、処理が「P300 検出経路 (熟練のプロセス)」と「P300 不検出経路 (自動のプロセス)」の 2 つの経路に分かれる様子を示す。

本研究が提案する分岐型 MHP モデル (図 3.9) は、MHP の知覚プロセッサおよび認知プロセッサの一部 (情報の照合・再認・分類) を経由した後、処理が「分岐点」を迎えると仮定する。この分岐点において、情報処理の流れは MHP の「反応決定」プロセスを実行するか否かを動的に選択する。

各経路の特徴は以下のとおりである。

- 上部経路 (P300 検出経路) : MHP の「反応決定」プロセスを実行する経路であり、従来の MHP に相当する熟慮のプロセスである。
- 下部経路 (P300 不検出経路) : MHP の「反応決定」プロセスをバイパスする経路であり、本研究で新たに見出された自動のプロセスである (図中の α は未解明の自動のプロセスを示す)。

上部経路 (P300 検出経路) では、第 1 章および第 2 章で検証してきた従来の MHP に相当する熟慮のプロセスが実行される。神経活動としては、運動開始 ($t=0$) に先行して緩やかに立ち上がり到達する「早期 BP ピーク」と、それに続く P300 の出現を特徴とする。

この経路では、BP のピークが P300 のピークに先行する傾向があり、運動準備が認知評価の完了に先立って開始されることを示唆している。なお、Task 2-4 のように認知的負荷が高く P300 の潜時が延長する場合、結果 (3.3.2.2 節) で示したように BP の立ち上がり期間が短縮することがある。これは、認知処理の完了が反応実行 (RT) に近接した結果、運動準備に充てられる時間が時間的に圧縮されたためと解釈できる。

しかし重要な点は、このように準備期間が圧縮された場合であっても、BP の開始は運動実行よりも明確に先行している (早期 BP) という事実である。この特徴は、誤答や自動のプロセスで見られる「運動直前での急峻な発生 (後期 BP)」とは質的に異なるものであり、Task 2-4 が依然として熟慮のプロセスの範疇にあることを支持している。これは、第 2 章で課題として残された「認知から運動への移行プロセス」の内部構造の一端を明らかにするものである。

下部経路 (P300 不検出経路) では、MHP の「反応決定」プロセスを経由しない自動のプロセスが作動する (図中の α は未解明の自動のプロセスを示す)。この経路では P300 は出現せず、運動開始 ($t=0$) に極めて近接した時間窓に急峻に到達する「後期 BP ピーク」のみが観測される。これにより処理時間は大幅に短縮される。

この神経活動パターンは、図 3.5 に示した誤答試行、および図 3.7 に示した P300 不検出・正答試行で一貫して観測されており、本モデルの下部経路が実際の行動データおよび神経データに基づくものであることを示している。

この分岐型 MHP モデルは、第 2 章で提示された課題、すなわち「認知から運動への移行プロセス」（熟慮的経路における P300 と BP の関係性）と「誤答のメカニズム」（自動的経路の存在）の両方に対して、統一的な説明を与えることができる。

なお、本モデルにおける「分岐」は、知覚された情報がターゲットと合致するかを評価する「照合プロセス」の後に生じると定義される。したがって、MHP の 4 つの基本反応モデルのうち、この照合プロセスを含まない「単純反応」については、分岐の前提条件を満たさないため本モデルの適用対象外とする。すなわち、本研究が提案する分岐型 MHP モデルは、物理的照合反応・名称照合反応・カテゴリー照合反応という 3 つの反応において妥当する枠組みである。

3.4.3 認知科学における二重過程理論との関連

本研究で同定された「熟慮的プロセス」と「自動的プロセス」という二重経路は、第 2 章 2.4.3 節で文字認識（音韻・意味）の文脈で議論された「二重経路モデル（dual-route model）」とは異なる層の現象である。

第 2 章の二重経路モデルが情報の「入力・符号化段階」における微視的な並列処理を指すのに対し、本章で見出された分岐は、入力された情報をどう処理するかという「高次の意思決定・制御段階」における巨視的な経路選択を指すものである。

したがって、第 2 章で確認された漢字処理の並列性が MHP のプロセッサ内部の構造的限界を示唆するのに対し、本章の二重経路はプロセッサ間の接続様式の動的な可変性を示唆するという点で、両者は明確に区別される。本章の分岐は、より高次の意思決定段階における「二重過程理論（Dual-Process Theory）」（Sloman, 1996; Evans, 2008）と密接に対応すると考えられる。

二重過程理論では、人間の思考や意思決定が

- System 1：高速・自動・直感的処理
- System 2：低速・分析的・意識的処理

の 2 つのシステムにより担われるとされる（Stanovich & West, 2000）。

本研究の神経生理学的データは、この理論を支持する次の 2 つの直接的証拠を提供するものである。

- 「P300 検出・早期 BP」（X+P3）が System 2（熟慮的処理）の神経生理学的反映に対応し、
- 「P300 不検出・後期 BP」（X-P3 および Z）が System 1（自動的処理）の神経的特徴に対応する。

ERP を用いて System 1/2 に代表される二重過程を直接検証した先行研究は限られているが（De Neys, 2012; Bago & De Neys, 2019; Rossi et al., 2021）、本研究はそのギャップを埋め、両システムの分岐を P300/BP の時間構造として可視化した実証例の一つである。

さらに、P300 を「閾値までの意思決定変数の蓄積 (build-to-threshold)」として捉える近年のモデル (Twomey et al., 2015) とも整合的であり、自動的経路がこの蓄積過程を省略または短絡している可能性を示唆する。

3.4.4 本章の限界と代替的解釈

本章の議論には一定の限界が存在する。

1. 後期 BP ピークの機能的解釈

本研究ではこれを「準備なき衝動的運動」と解釈したが、代替的に「高い切迫感」や「反応葛藤」に起因する可能性もある。例えば、反応葛藤は前部帯状回 (ACC) の活動を反映する N200 成分や、誤答 (エラー) 反応後に観測される ERN (エラー関連陰性電位) といった別の ERP 成分と関連付けられることが多い (Gehring et al., 1993; Folstein & Van Petten, 2008)。これを区別するには、例えば反応抑制課題 (Go/No-Go) との比較が有効である。

2. 自動的プロセスの積極的メカニズムは未特定

本研究では X-P3 群を「P300 が不検出」と定義したが、これはあくまで P300 が検出されないという結果を記述したものであり、P300 の代わりにどのような神経メカニズムが積極的に作動しているのかを特定したものではない。今後は、運動前野・補足運動野の活動や皮質下構造を含めた脳波の信号源を推定する解析 (ソースローカライゼーション分析) により、自動的経路を積極的に駆動する神経発生源を特定する必要がある。

3. サンプルサイズと個人差

本研究のサンプル (N=10) は小規模であり、性別や認知スタイルによる個人差を十分に反映していない。今後は、より大規模かつ個人特性 (反省傾向や認知反応性) の測定を組み合わせることで、二重経路の作動傾向を定量的にモデル化できると考えられる。また、本研究では非常に大きな効果量が報告されたが、これらは被験者内デザイン (ペアサンプル) により安定した効果が検出されたことを示す一方、サンプルサイズ (N=10) に起因する効果量の過大推定の可能性も排除できない点に留意が必要である。

これらの制約を認めつつも、本研究が示した「行動・神経指標の二重性 (X+P3 vs X-P3/Z)」は一貫しており、人間の情報処理を動的・多経路的システムとして再定義する新たな枠組みを提供した点に本研究の意義がある。

3.5 本章の小結

本章 (研究 2) では、MHP の単一処理経路仮説の妥当性を、BP の導入と誤答分析を通じて、新たな実験 (N=10) に基づき批判的に検証した。

その結果、以下の 3 点が統計的詳細とともに明らかになった。

1. 誤答 (Z) 試行は、正答 (X) 試行よりも有意に RT が短く、P300 が観測されず、特異な BP 波形 (後

期ピーク)を示した。これは、誤答が MHP の記述する熟慮的プロセスとは異なる経路で生成されることを実証するものである。

2. 本研究の最も重要な発見として、正答 (X) 試行群の内部に、神経活動パターンおよび RT が異なる 2 つの処理経路が混在していることを実証した。一つは MHP に準拠する「熟慮的プロセス (P300 検出) (X+P3)」であり、もう一つは誤答 (Z) 試行と行動的・神経的 (P300 不検出・後期 BP) に共通の基盤を持つ、高速な「自動的プロセス (P300 不検出) (X-P3)」である。
3. これらの知見に基づき、本章では MHP を拡張する新たな「分岐型 MHP モデル」を提唱した。本モデルは、人間の情報処理が単一の経路ではなく、状況に応じて「熟慮的 (System 2)」経路と「自動的 (System 1)」経路を動的に使い分ける、より柔軟で適応的なシステムであることを神経生理学的に記述するものである。

第 2 章における MHP の基本構造の「検証 (研究 1)」と、本章における MHP の「拡張 (研究 2: 分岐型 MHP モデルの提唱)」という二段階の研究成果をもって、本研究の主要な実証的検討は完了した。次章 (第 4 章) では、これら 2 つの成果を統合し、本研究が HCI および認知神経科学の分野に持つ学術的意義と実践的含意について総合的に考察する。

第4章：総合考察

本研究は、HCIの基礎理論であるMHPに対し、その提案（Card et al., 1983）から約40年間神経生理学的な裏付けが十分に与えられてこなかったこと、および「単一の直列的処理経路」を暗黙の前提としてきたことという2点を、未解明の理論的課題として位置づけた。

これらの課題に応答することを第一の目的として、MHPの抽象的なプロセス構造に神経生理学的基盤を与えること、さらに単一・直列経路モデルの妥当性を批判的に検証し、人間の情報処理の多重性を記述する新たな「分岐型MHPモデル」を提唱することを第二の目的とした。

この目的を達成するため、本研究は2段階の研究アプローチを採用した。第2章（研究1）では、MHPの基本構造である「知覚プロセッサ」と「認知プロセッサ」が、それぞれN100とP300というERPの時間的特性と対応するかを検証し、モデルの「検証」を行った。続く第3章（研究2）では、新たにBPの分析と誤答分析を導入することで、MHPの単一経路仮説の限界を明らかにし、モデルの「拡張」として、熟慮的・自動的という二重処理経路からなる「分岐型MHPモデル」を提唱した。

本章では、これら2段階の研究（研究1・研究2）で得られた主要な知見を統合し、本研究全体の学術的貢献と実践的意義について総合的に考察する。

4.1 本研究の主要な成果の総括

本研究で得られた主要な成果は、以下の2点に集約される。

第一の成果（研究1：MHPの神経生理学的「検証」）

第2章（研究1）では、MHPが提唱する抽象的なプロセス構造が、現実の脳活動と時間的に対応することを実証した。具体的には、

1. 知覚プロセッサの特定：MHPが約100msと推定した「知覚プロセッサ」が、刺激の種類や課題の難易度によらず、刺激呈示後約100msで安定して観測される初期視覚野の活動（N100成分）と時間的・機能的に対応することを示した。
2. 認知プロセッサの特定：MHPが想定する「認知プロセッサ」内のプロセス（照合・再認・分類）の段階的な蓄積が、認知的評価・意思決定のプロセスを反映するP300成分の潜時の段階的な延長（Task $1 < 2 < 3 < 4$ ）として、神経生理学的に観測されることを示した。
3. 認知と運動の分離：運動負荷を増大させた課題（Task 3'）において、RTが延長するにもかかわらずP300の潜時は有意に変化しないことを示し、P300がMHPの「運動プロセッサ」から分離された「認知的評価・意思決定」の完了時点を反映する神経マーカーであることを特定した。

これらの知見は、HCI分野の基礎理論であるMHPが妥当であることを、行動指標（RT）のみならず神経活動レベルで実証したものであり、「MHPの神経生理学的裏付けが不足している」という理論的ギャップに対する応答として、本研究の第一の貢献となる。

第二の成果（研究2：MHPの「拡張」と分岐型MHPモデルの提唱）

第3章（研究2）では、第2章で残された課題（認知から運動への移行プロセス、誤答のメカニズム）を解明するため、BPと誤答分析を導入し、MHPの単一経路仮説の限界を検証した。

1. 自動的プロセスの特定と誤答メカニズムの解明：本研究は、MHPが想定する熟慮のプロセスとは質的に異なる、P300の不検出と反応直前の急峻な運動準備（後期BPピーク）を特徴とする「自動的プロセス」を特定した。このプロセスは、正答（X）試行よりも有意に高速な反応を示す一方で、正確性の担保を欠く傾向が認められた。その結果、本実験で観測された誤答（Z）試行は、主としてこの自動的プロセスに由来することが示唆された。すなわち、誤答は熟慮の末の判断ミスではなく、主としてこの自動的プロセスによる衝動的な運動実行に起因することが示唆された。
2. 二重処理経路の発見：本研究の最も核心的な発見として、正答（X）試行が均一なプロセスによるものではなく、質的に異なる2つの経路の混在であることを示した。
 - 熟慮のプロセス（X+P3）：MHPに準拠し、P300が観測され、反応が遅い経路
 - 自動的プロセス（X-P3）：P300が観測されず、反応が速い経路。行動指標および神経活動（P300不検出・後期BP）の両面で、誤答（Z）試行の神経基盤と類似
3. 分岐型MHPモデルの提唱：これらの知見を統合し、人間の情報処理が知覚後、単一の経路を辿るのではなく、「熟慮のプロセス（P300検出・早期BP）」と「自動的プロセス（P300不検出・後期BP）」へと分岐するという「分岐型MHPモデル」（図3.9）を提唱した。

この第二の成果は、「MHPが単一の直列経路を前提としている」という理論的限界に対して、そのまま対となる応答を与えるものであり、本研究の最大の理論的貢献である。

以上の研究1・研究2の成果を統合し、本研究が最終的に到達した「神経生理学的指標に基づく分岐型MHPモデル」を図4.1に示す。本図は、第2章で検証した基本モデル（図2.11）の直列的な時間構造を維持しつつ、第3章で実証された動的な経路分岐（図3.9）を組み込んだものである。ここでは、知覚プロセッサ（N100）および初期の認知プロセス（情報の照合）までは共通の経路を経るが、その後、P300と早期BPを伴う「熟慮的経路（上段）」と、それらを欠く高速な「自動的経路（下段）」のいずれかが選択される様子が、具体的な神経活動の時間軸上にマッピングされている。この図4.1は、MHPに神経生理学的基盤を与え、本研究が最終的に提案するモデル拡張（図4.2）の基盤となる核心的なメカニズムを示したものである。

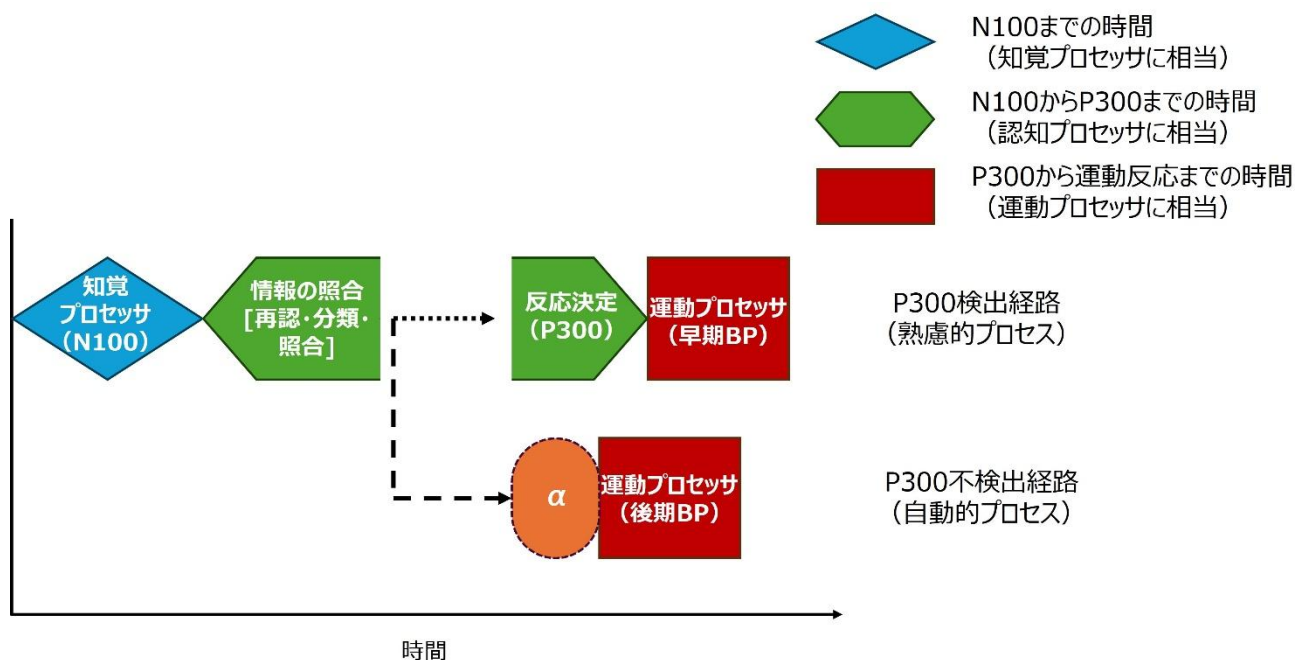


図 4.1 神経活動指標に基づく分岐型 MHP モデル

知覚プロセッサ（N100）および初期の認知プロセス（情報の照合）までは共通の経路を経る．その後、処理は分岐する．緑色の六角形（認知プロセッサ）の前半部分は、図 3.9 における「情報の照合」までの共通プロセスに対応し、後半部分は意識的な「反応決定」プロセスに対応する．上段（熟慮的过程）： 意識的な反応決定プロセス（P300）を経て、運動プロセッサ（早期 BP）へと至る．下段（自動的过程）： 意識的な決定プロセスをバイパスし、プロセス α （未解明の自動的过程）を経て、運動プロセッサ（後期 BP）へと至る．

さらに、この神経生理学的メカニズムを、Card らが提唱した MHP の基本反応モデルに適用することで得られる、本研究の最終的な成果物としての「拡張モデル構造」を図 4.2 に示す．

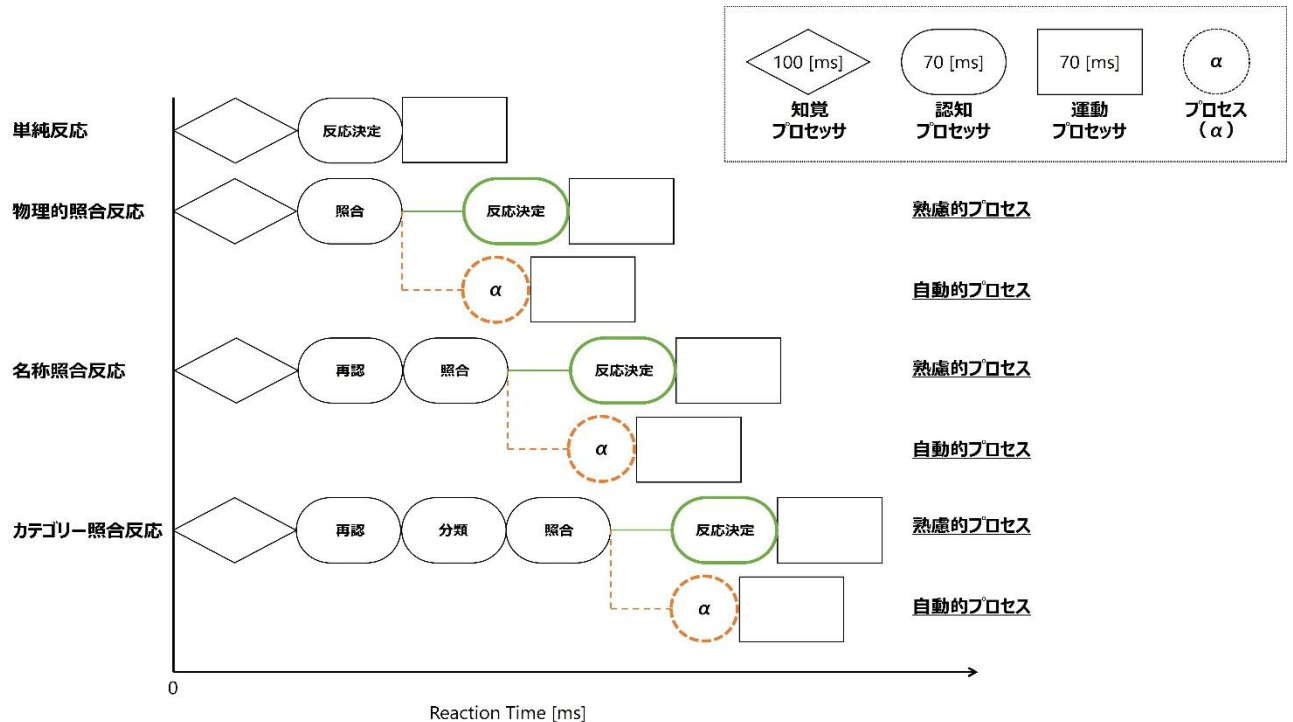


図 4.2 本研究により拡張された分岐型 MHP モデル

Card らの基本反応モデルに対し、本研究の実証結果に基づき拡張を行った構造図。単純反応を除く 3 つの反応（物理・名称・カテゴリー）において、照合プロセス後に処理が分岐し、従来の「熟慮のプロセス（実線）」と、意思決定をバイパスする「自動的プロセス（点線・ α ）」の二重経路をとることを示す。自動的プロセスを経由する場合、運動プロセッサの起動が早まり、RT が短縮される。

図 4.2 に示すように、照合プロセスを含まない「単純反応」では単一の経路が維持される一方、物理的・名称・カテゴリー照合反応においては、照合後に「熟慮のプロセス（青実線）」と「自動的プロセス（オレンジ点線）」への分岐構造が生じる。これにより、従来の MHP（単一経路モデル）では説明できなかった誤答の発生メカニズムや、熟練に伴う反応時間の短縮（ショートカット）を、同一の理論的枠組みの中で体系的に記述することが可能となった。

4.2 本研究の学術的貢献

本研究の学術的貢献は、HCI 分野における古典的モデル（MHP）と、認知神経科学における現代的理論（二重過程理論）とを、P300 と BP という客観的な神経指標を用いて橋渡しした点にある。

4.2.1 HCI 分野への貢献：MHP の神経生理学的基盤の確立

第一に、HCI 分野において教科書的に扱われてきた MHP (Card et al., 1983) という「行動モデル」に、具体的な「神経活動モデル」としての神経生理学的基盤を与えたことが挙げられる。MHP は行動指標というブラックボックスの出力から内部構造を推定したモデルであったが、本研究は N100・P300・BP という神経指標（ブラックボックス内部の計測）を用いて、その推定の妥当性と限界を実証した。

第2章で示した「N100 ≡ 知覚プロセッサ」, 「P300 ≡ 認知プロセッサ」という対応関係は, HCI の研究者がユーザーの心的プロセスを議論する上で, 行動指標に加えて脳活動という新たな定量的根拠を提供するものである。

4.2.2 認知神経科学への貢献：二重過程理論への実証的証拠

第二に, 第3章で提唱した「分岐型 MHP モデル」は, 認知科学における「二重過程理論 (Dual-Process Theory)」(Sloman, 1996; Evans, 2008) に対して, 新たな神経生理学的な証拠を提供する (3.4.3 節)。

二重過程理論は, 人間の思考が,

- System 1 : 高速・自動・直感的処理
- System 2 : 低速・分析的・意識的処理

の2つのシステムにより担われると仮定するが, その神経基盤については未だ議論が続いている (Keren & Schul, 2009; Evans & Stanovich, 2013)。本研究は, この理論的枠組みに対して, 以下の具体的な神経マーカーを提示した。

1. 「System 2」の指標としての P300 : 本研究の「熟慮のプロセス (X+P3)」は, 意識的な評価と意思決定を伴う System 2 の作動に相当する。この経路が P300 の明瞭な観測によって特徴づけられることを示した。これは, P300 が意識的な文脈の更新 (Polich, 2007) や, 閾値への意思決定変数の蓄積 (Twomey et al., 2015) を反映するという従来の知見とも整合する。
2. 「System 1」の指標としての P300 不検出 : 本研究の「自動的プロセス (X-P3, Z)」は, 意識的な熟慮 (System 2) をバイパスする System 1 に対応し, この経路が「本研究の判定基準を満たす P300 が検出されない」という特徴によって記述できることを示した。これは「P300 の有無」が System 1/System 2 の作動状態を区別する客観的な神経指標となり得る可能性を示す。
3. 運動準備パターンの解明 : さらに本研究は, System 2 (熟慮的) が「早期の緩やかな BP」を伴う意図的な運動準備を特徴とするのに対し, System 1 (自動的) が「反応直前の急峻な BP」を伴う衝動的な運動実行を特徴とすることを示した。

これらの知見は, 抽象的な理論であった二重過程理論に, P300 と BP という具体的な時間ダイナミクスを与えるものである。

4.3 HCI 分野への実践的含意 (Implication)

本研究の成果は, 基礎理論の検証にとどまらず, HCI の実践的なシステム設計に対しても重要な示唆を与える。従来の MHP モデルは, 主に「正答に至るまでの標準的な操作時間」を予測するためのツールであり, ユーザーの内部状態が「熟慮中」なのか「自動処理中」なのかを, 外形的な行動指標 (RT) のみから判別することは困難であった。本研究で提唱した「神経指標に基づく分岐型 MHP モデル」は, RT などの行動指標だけでは不可視であった情報処理の内部経路 (熟慮のプロセス vs 自動のプロセ

ス)を可視化することで、以下の新たなインタフェース最適化のアプローチを提供する。

1. 行動指標では検知不可能な「潜在的エラーリスク」のリアルタイム検出：本研究の結果は、誤答（スリップ）が「P300 不検出かつ後期 BP」という特有の神経パターンを有し、これが「自動的な正答」と神経基盤を共有していることを示した。これは、極端に短い反応時間で操作が行われたとしても、それが「熟練による安全な自動化」なのか「確認不足による危険なスリップ」なのかは、行動データだけでは区別できないことを意味する。本モデルを応用すれば、オペレータの P300/BP パターンをモニタリングすることで、行動上は正答していても脳内では認知的評価（P300）が省略されている状態（自動的プロセスの使用）をリアルタイムに検知できる。これにより、例えば「重要な操作において P300 が検出されなかった場合」にのみ、システム側から警告や二重確認を提示するといった、ユーザーの脳内処理モードに応じた適応的な安全支援が可能となる。これは、一律に操作を遅らせるような従来の安全設計とは異なり、操作効率と安全性を高次元で両立させるための具体的な指針となる。
2. 「プロセスの質的变化」に基づくスキル習熟度の客観的評価：従来のスキル評価は、タスク完了時間の短縮（学習曲線）を指標とすることが一般的であった。しかし、本研究の分岐型 MHP モデルによれば、パフォーマンスの向上には「熟慮的プロセスの高速化」と「自動的プロセスへの切り替え（分岐比率の変化）」という二つの要因が関与する。本研究の指標を用いれば、学習者が単に操作に慣れて手が早くなっただけ（熟慮的プロセスのまま）なのか、あるいは対象をパターンとして認識し、処理経路そのものを効率的なルートへと切り替えたのか（自動的プロセスへの移行）を、客観的に識別・評価できる。これにより、例えば「自動的プロセスへの移行が確認されるまでは次のステップに進ませない」といった、行動の速さではなく脳内処理の質的変容に基づいたトレーニングシステムの構築が可能となる。これは、形式的な操作スキルではなく、真の内面化を保証する新たな教育評価手法への道を開くものである。

4.4 本研究の限界と今後の展望

本研究は MHP の神経生理学的検証と拡張において一定の成果を上げたが、いくつかの限界が残されている。本節では、第 3 章 3.4.4 節でも触れた限界点を、本研究全体の文脈に即して整理する。

4.4.1 最大の課題：「分岐」の決定要因の未解明

本研究では、情報処理が「熟慮的プロセス」と「自動的プロセス」に分岐することを神経生理学的に示したが、「何がその分岐を決定するのか」という要因（図 3.9 の「分岐点」プロセスのメカニズム）については特定できていない。これは本研究の最大の限界であり、同時に今後の最も重要な研究課題である。

同じ被験者・同じタスクであっても、ある試行では熟慮的（P300 検出）に、別の試行では自動的（P300 不検出）になるのはなぜか。この分岐を制御する要因として、以下の仮説が挙げられる。

第一にタスク習熟度である。Rasmussen (1983) の SRK モデルが示唆するように、初心者は知識ベース（熟慮的）で行動し、熟練するにつれてスキルベース（自動的）に移行すると考えられる。なお、SRK モデルの中間段階である「ルールベース」制御については、その特性上、原則として P300 を伴う「熟慮的

プロセス」に分類されると考えられる。なぜなら、ルールの適用には通常、作業記憶上の情報と長期記憶内の規則との意識的な照合が含まれるからである。ただし、熟練が極度に進み、ルールが完全に内面化（スキル化）された段階に至れば、意識的な照合を要さない「自動的プロセス」へと移行する。本研究の分岐型 MHP モデルは、この SRK モデルにおける動的な移行過程を、P300 の有無という生理学的指標によって捉えるものである。

その他にも、時間的切迫、注意状態（マインド・ワンダリング）、刺激の顕著性などが分岐に影響する可能性があり、今後これらを系統的に操作する実験が必要である。

なお、本研究で検討した「MHP の単一処理経路仮説」は、プロセッサ内部で情報が並列に処理されるか否か（第 2 章で確認された漢字処理のような微視的な並列性）を問題にするものではない。ここで本質的な問題としているのは、知覚から運動に至る処理全体の巨視的流れが、どのような状況下でも必ず「認知・反応決定」を経由する単一のルート（一本道）であると仮定されている点である。すなわち、本研究で提案する分岐型 MHP モデルは、第 2 章で課題となった微視的な並列処理の問題を解決するものではなく、あくまで巨視的な経路選択のメカニズムを説明するためのものである。具体的には、各経路内の処理順序自体は直列的でありながらも、状況に応じて「熟慮のプロセス」と「自動的プロセス」という異なるルートへの分岐が生じると捉え直すことで、従来の仮説を拡張するものである。

4.4.2 「自動的プロセス（ α ）」の積極的解明と P300 判定の限界

本研究では、自動的プロセス（X-P3,Z）を「P300 が本研究の閾値基準を満たさない試行」として操作的に定義した。これは、P300 が「消失した」というよりも、「少なくとも Cz 電極の 250 ms から 600 ms 窓において、ベースラインから+2SD を超える明瞭な陽性ピークが観測されない」という意味である。

この定義および本研究の実験結果の解釈には、以下の二つの限界がある。

第一に、判定基準と課題特性に由来する「熟慮型誤答」の検出限界である。ごく振幅が小さい P300 や、潜時が著しく延長・変動した P300 が存在していても、本研究の検出基準（+2SD）では「P300 不検出」と分類される可能性がある（閾値依存性）。また、本実験で用いた課題は、時間をかけて慎重に処理すれば正答が容易な単純照合課題であったため、発生した誤答の大部分が「熟慮不足による衝動的反応（自動的プロセス）」に由来し、P300 を伴う「熟慮型誤答」自体が生じにくい環境であった可能性が高い。もし、熟慮しても正誤判断が難しい高難度課題であれば、P300 が出現した上での誤答も観察された可能性がある。したがって、本研究が捉えているのは、「誤答や高速正答のうち、自動的プロセスが優勢とみなせるサブセット」であり、熟慮的な評価を経たうえで生じる誤答の存在を完全に否定するものではない。

第二に、神経機構の同定不足である。本研究は脳波計測の頭皮上電位に基づき、波形レベルで自動的プロセスを特徴づけたにとどまり、その背後でどの脳領域がどのように連携しているかを積極的に特定したわけではない。今後は、ソースローカライゼーション、機能的磁気共鳴画像法（functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI）や脳磁図（Magnetoencephalography, MEG）との併用により、自動的経路を駆動する神経発生源（運動前野、補足運動野、基底核など）の特定が求められる。

4.4.3 後期 BP ピークの代替的解釈

自動的プロセス（X-P3）および誤答（Z）で観測された「後期 BP ピーク」（反応直前の急峻な陰性電位）

について、本研究では「準備なき衝動的運動」の指標として解釈した。しかし、これは一つの解釈に過ぎず、例えば「反応葛藤」や「切迫した意思決定」を反映している可能性も考えられる。

この点を切り分けるには、Go/No-Go 課題など葛藤の程度を操作できるパラダイムとの比較が有効であり、今後の検証が必要である (Gehring et al., 1993; Folstein & Van Petten, 2008)。ただし、いずれの解釈を採用するとしても、X+P3 と X-P3/Z の BP パターンが質的に異なること自体は変わらず、「熟慮のプロセス」とは異なる処理様式が存在を示すという本研究の結論は維持される。

4.4.4 サンプルサイズの制約と知見の一般化可能性

第3章の研究2はN = 10（男性9名、女性1名）という限られたサンプルサイズに基づいている。この点は統計的検出力および一般化可能性の観点から明確な限界である。一方で、主要な効果（例：Task 2-2, 2-3 における X 群と Z 群の RT 差）の効果量は $d > 3.0$ と非常に大きく、最も差が小さかった Task 2-4 でも $d = 0.73$ を示した。これは、「熟慮のプロセス」と「自動のプロセス」の差が、被験者内比較において頑健な現象であることを示唆している。

ただし、本研究の知見がどの程度まで他のタスクに一般化可能かについては慎重な議論が必要である。また、本モデルは「照合・評価後の分岐」を前提としているため、そもそも照合プロセスを含まない「単純反応」には適用されない点にも留意が必要である。

本研究の課題は、繰り返し呈示される視覚刺激に対する照合・再認・分類という比較的単純な設定であり、例えば「知識を問う早押しクイズ」のように、長期記憶からの意味検索や戦略的判断を伴う複雑な状況とは異なる。

直感的には、早押しクイズにおいても「問題文の意味を最後まで理解してから押す熟慮のプロセス」と、「途中の手がかりで直感的に押してしまう自動のプロセス」が併存すると考えられる。しかし、誤答の発生メカニズムについては、本実験の結果と異なる挙動を示す可能性がある。本実験で観測された誤答は、主に「スリップ（行為の失敗）」に相当し、評価プロセスの省略により P300 が観測できないと解釈できる。対して、知識を問う課題における誤答には、熟慮の末に誤った知識を選択する「ミステイク（判断の失敗）」が含まれる。ミステイクの場合、認知的な評価・決定プロセス自体は完了しているため、誤答であっても P300 が観測される可能性がある (Falkenstein et al., 1991)。したがって、本研究の知見（誤答における P300 不検出）の一般化可能性は、「刺激同期 P300 と反応同期 BP を用いて、衝動的なスリップ（自動的）と熟慮的な判断（熟慮的）の違いを捉えることができるタイプの課題」に主として限定されると位置づけるのが妥当であろう。

今後は、クイズ課題や意思決定課題など、より自然な HCI 文脈に近いタスクに本モデルを適用し、分岐パターンがどの程度再現されるかを検証することが求められる。

4.5 総括と結論

本章では、MHP の神経生理学的検証（研究1）と、その拡張としての分岐型 MHP モデルの提案（研究2）から得られた成果を統合した。

- 研究1では、MHP の「知覚」および「認知」プロセスが、それぞれ N100 および P300 という神経活

動と時間的に対応することを示し、「MHP に神経生理学的裏付けがない」という理論的ギャップに
応答した。

- 研究 2 では、BP および誤答分析を用いて、MHP の単一経路仮説を批判的に検証し、人間の情報処理が「熟慮的プロセス (P300 検出)」と「自動的プロセス (P300 不検出)」に分岐するという「分岐型 MHP モデル」を提唱した。

この分岐型 MHP モデルは、HCI における「誤答」と「熟練」の問題を、認知神経科学における「二重過程理論」の枠組みで統一的に説明する新たな視座を与える。本研究は、HCI 分野の基礎理論に神経科学的基盤を与えると同時に、認知神経科学の理論に HCI のタスク (MHP) という新たな実証パラダイムを提供し、両分野の橋渡しとなる枠組みを提示した。

第 5 章：結論

本研究は、HCI（Human-Computer Interaction）分野の基礎理論である MHP を対象とし、

1. MHP に神経生理学的な裏付けが欠如していること
2. MHP が単一の直列処理経路を前提としてきたこと

という 2 つの未解明な課題に応答することを目的とした。そのために、2 段階の研究アプローチ（研究 1・研究 2）を採用した。

第一段階（研究 1：MHP の検証）

MHP が提唱する抽象的な情報処理プロセスと、ERP の時間構造との対応関係を検証した。その結果、

- 「知覚プロセッサ」が初期視覚処理を反映する N100 成分と
- 「認知プロセッサ」の段階的な処理蓄積が P300 の潜時の段階的延長と

それぞれ強く対応することを示した。さらに、運動負荷を増大させた課題においても P300 の潜時が RT に追従して変化しないことを示し、P300 が「運動プロセッサ」から分離された「認知的評価・意思決定」の完了時点を反映する神経マーカーであることを特定した。これらの知見は、約 40 年間行動レベルで引用されてきた MHP に対し、初めて神経生理学的な基盤を与えるものである。

第二段階（研究 2：MHP の拡張）

研究 1 で残された課題（認知から運動への移行プロセス、誤答のメカニズム）を明らかにするため、新たに BP と誤答分析を導入し、MHP の単一処理経路仮説の妥当性を検証した。その結果、

- 正答試行群の内部に、P300 検出・早期 BP を特徴とする「熟慮のプロセス」と、P300 不検出・後期 BP を特徴とする高速な「自動的プロセス」という 2 つの処理経路が混在していること
- 後者の「自動的プロセス」は、行動指標（高速な RT）および神経活動（P300 不検出・後期 BP）の両面において、誤答試行の神経基盤と非常に類似していること

を見いだした。

これらの結果に基づき、本研究は従来の MHP を拡張する新たな「分岐型 MHP モデル」を提唱した。本モデルは、人間の情報処理が知覚後、常に単一の経路を辿るのではなく、状況に応じて意識的な評価を経由する「熟慮のプロセス」と、それをバイパスする「自動的プロセス」へと動的に分岐するという、より柔軟で適応的な情報処理像を描き出す。

本研究の学術的貢献は、主に次の二点にまとめられる。

1. HCI 分野への貢献：MHP に N100・P300・BP という客観的な神経基盤を与え、その妥当性と限界を明示した点。
2. 認知神経科学への貢献：二重過程理論（System 1/System 2）という抽象的枠組みに対し、「P300 の有無」と「BP の波形パターン」という具体的な神経マーカーを提示し、その実証的基盤を強化した点。

本研究は、HCI と認知神経科学という 2 つの分野を神経生理学的指標によって橋渡しし、人間情報処理の理解に新たな視座を提供した。今後は、本研究で提唱した分岐型 MHP モデルにおいて、「どのような条件で熟慮的経路／自動的経路が選択されるのか」という分岐要因（例：習熟度、時間的切迫、注意状態）を特定し、より現実の HCI 文脈に近いタスクへと適用範囲を拡張していくことが重要な課題となる。

参考文献

- Anderson, J. R. (2007). *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe?* Oxford University Press.
- Bago, B., & De Neys, W. (2019). Fast logic? Examining the time course assumption of dual process theory. *Cognition*, 179, 156–165.
- Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Coles, M. G. (1989). Modern mind-brain reading: psychophysiology, physiology, and cognition. *Psychophysiology*, 26(3), 251–269.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological review*, 108(1), 204–256.
- De Neys, W. (2012). Bias and conflict: A case for logical intuitions. *Perspectives on Psychological Science*, 7(1), 28–38.
- Dix, A., Finlay, J., Abowd, G., & Beale, R. (2004). *Human–Computer Interaction* (3rd ed.). Pearson.
- Donchin, E. (1981). Surprise! ... Surprise? *Psychophysiology*, 18(5), 493–513.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, 11(3), 357–374.
- Evans, J. S. B. T. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 255–278.
- Evans, J. S., & Stanovich, K. E. (2013). Dual-Process Theories of Higher Cognition: Advancing the Debate. *Perspectives on psychological science : a journal of the Association for Psychological Science*, 8(3), 223–241.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78(6), 447–455.
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human Performance*. Brooks/Cole.

- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology*, 45(1), 152–170.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A Neural System for Error Detection and Compensation. *Psychological Science*, 4(6), 385–390.
- Hallett, M. (1994). Movement-related cortical potentials. *Electromyography and clinical neurophysiology*, 34(1), 5–13.
- Hollnagel, E., & Woods, D. D. (2005). *Joint Cognitive Systems: Foundations of Cognitive Systems Engineering*. CRC Press.
- ISO 9241-210:2010. (2010). *Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems*. International Organization for Standardization.
- John, B. E., & Kieras, D. E. (1996). The GOMS family of user interface analysis techniques: Comparison and contrast. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 3(4), 320–351.
- Keren, G., & Schul, Y. (2009). Two is not always better than one: A critical evaluation of two-system theories. *Perspectives on Psychological Science*, 4(6), 533–550.
- Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1997). An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 12(4), 391–438.
- Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, 38(3), 557–577.
- Kornhuber, H. H., & Deecke, L. (1965). Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie*, 284, 1–17.
- Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., & Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain : a journal of neurology*, 106 (Pt 3), 623–642.
- Liu, Y., Feyen, R., & Tsimhoni, O. (2006). Queueing Network-Model Human Processor (QN-MHP) A computational architecture for multitask performance in human-machine systems. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 13(1), 37–70.

- Luck, S. J. (2014). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique* (2nd ed.). MIT Press.
- Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24(4), 375–425.
- Nakamura, K., Dehaene, S., Jobert, A., Le Bihan, D., & Kouider, S. (2005). Subliminal convergence of Kanji and Kana words: further evidence for functional parcellation of the posterior temporal cortex in visual word perception. *Journal of cognitive neuroscience*, 17(6), 954–968.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. Appleton-Century-Crofts.
- Newell, A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Harvard University Press.
- Norman, D. A. (1981). Categorization of action slips. *Psychological Review*, 88(1), 1–15.
- Norman, D. A. (1986). Cognitive engineering. In D. A. Norman & S. W. Draper (Eds.), *User Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction* (pp. 31–61). Lawrence Erlbaum Associates.
- Norman, D. A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books.
- O'Connell, R. G., Dockree, P. M., & Kelly, S. P. (2012). A supramodal accumulation-to-bound signal that determines perceptual decisions in humans. *Nature neuroscience*, 15(12), 1729–1735.
- Perfetti, C. A., & Tan, L. H. (1998). The time course of graphic, phonological, and semantic activation in Chinese character identification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24(1), 101–118.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148.
- Preece, J., Rogers, Y., & Sharp, H. (2015). *Interaction Design: Beyond Human–Computer Interaction* (4th ed.). Wiley.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(3), 257–266.
- Rossi, V., Pourtois, G., & Delplanque, S. (2021). ERP signatures of intuitive versus deliberative processes in decision-making. *Neuropsychologia*, 158, 107925.

Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1986). *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition* (Vol. 1). MIT Press.

Shibasaki, H., & Hallett, M. (2006). What is the Bereitschaftspotential? *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 117(11), 2341–2356.

Sloman, S. A. (1996). The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological Bulletin*, 119(1), 3–22.

Stanovich, K. E., & West, R. F. (2000). Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate? *Behavioral and Brain Sciences*, 23(5), 645–665.

Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150(3700), 1187–1188.

Twomey, D. M., Murphy, P. R., Kelly, S. P., & O'Connell, R. G. (2015). The classic P300 encodes a build-to-threshold decision variable. *European Journal of Neuroscience*, 42(1), 1636–1643.

Verleger, R., Jaśkowski, P., & Wascher, E. (2005). Evidence for an integrative role of P3b in linking reaction to perception. *Journal of Psychophysiology*, 19(3), 165–181.

謝辞

本論文は、大阪大学大学院情報科学研究科における博士課程の研究成果をまとめたものである。本研究の遂行および本論文の執筆にあたり、多くの方々から多大なる御指導と御協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

本研究の着想から遂行、そして論文の完成に至るまで、終始懇切丁寧な御指導と多大なる御鞭撻を賜りました。指導教員である大阪大学大学院情報科学研究科の若宮 直紀 教授に、心より深く感謝申し上げます。Model Human Processor の神経生理学的検証という学際的なテーマにおいて、HCI と神経科学の両視点から頂いた鋭い御指摘と温かい励ましがなければ、本研究を完遂することはできませんでした。

本論文の審査にあたり、副査として貴重な御時間を割いていただき、有益な御助言と御審議を賜りました。瀬尾 茂人 教授、戸谷 吉博 准教授、古川 正紘 准教授に厚く御礼申し上げます。特に、専門用語の定義や解釈の厳密性に関して頂いた御指摘は、本論文の論理的整合性を高める上で不可欠なものであり、深く感謝いたします。

脳波計測実験の実施にあたり、実験環境の構築やデータ解析の手法について有益な議論をしていただいたバイオインスパイアードネットワークワーキング講座の皆様、ならびに実験補助をしていただいた後輩の諸氏に感謝します。

また、本研究で行った一連の実験において、長時間の拘束と高い集中力を要する課題にもかかわらず、熱心に参加し協力してくださった被験者の皆様に、心より感謝申し上げます。皆様の協力なくして、本研究のデータを得ることは不可能でした。

本研究の一部は、和歌山大学にて実施いたしました。研究の初期段階において御指導・御協力をいただきました和歌山大学の曾我 真人 准教授をはじめ、諸先生方および関係者の皆様にも、この場を借りて御礼申し上げます。

最後に、博士課程への進学を理解し、長きにわたり精神的・経済的に支え続けてくれた家族に、心からの感謝と敬意を捧げます。