

令和2年度
日本大学学位請求論文

認知制御と行動パフォーマンスに関する
生理心理学的研究

日本大学大学院文学研究科
心理学専攻博士後期課程

川島 哲史

目次

第 1 章 本論文の背景および目的	
1.1. はじめに	1
1.2. 本論文の構成	3
1.3. 認知制御	5
1.3.1. 心理学における認知制御の研究	5
1.3.2. Skill-Rule-Knowledge モデル	8
1.4. 認知制御と脳活動	13
1.4.1. 認知制御に関連する脳部位	13
1.4.2. 認知制御に関連する脳波活動	16
1.4.3. 認知制御と前頭部 θ 帯域の活動	19
1.5. 本研究の目的	25
第 2 章 Skill-Rule-Knowledge モデルに基づく認知制御レベルの 違いが背景脳波の活動に及ぼす影響	
2.1. 序論	26
2.2. 方法	28
2.2.1. 実験参加者	28
2.2.2. 実験装置・実験刺激	28
2.2.3. 手続き	30
2.2.4. データ分析	30
2.3. 結果	34
2.3.1. 行動パフォーマンス	34
2.3.2. 脳波活動	34
2.4. 考察	54
2.5. 結論	57

第 3 章 Skill-Rule-Knowledge モデルに基づく認知制御レベルの 違いが前頭部 θ 帯域の活動に及ぼす影響	
3.1. 序論	58
3.2. 方法	60
3.2.1. 実験参加者	60
3.2.2. 実験装置・実験刺激	60
3.2.3. 手続き	61
3.2.4. データ分析	62
3.3. 結果	64
3.3.1. 行動パフォーマンス	64
3.3.2. 脳波活動	64
3.4. 考察	73
3.5. 結論	77
第 4 章 課題の習熟による行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響 ——Skill-Rule-Knowledge モ デルに基づいた検討——	
4.1. 序論	78
4.2. 方法	80
4.2.1. 実験参加者	80
4.2.2. 実験装置・実験刺激	80
4.2.3. 手続き	81
4.2.4. データ分析	82
4.3. 結果	87
4.3.1. 行動パフォーマンス	87
4.3.2. 脳波活動	87
4.3.3. 主観的反応	88
3.4. 考察	106
3.5. 結論	109

第5章 総合的考察	
5.1. Skill-Rule-Knowledge モデルと脳波活動の関連	110
5.2. 今後の展望	116
参考・引用文献	118
謝辞	135

第 1 章

本論文の背景および目的

1.1. はじめに

私たちは、日々の生活の中でその時々環境や状況に応じた行動を選択することができる。こうした行動を実行するためには、必要な情報のみに注意を向ける、不要な情報を抑制する、必要な情報を保持する、行動を切り替えるなど様々な認知活動を必要とする。また、対面した状況が非慣習的なものであった場合は、自身の知識や記憶を参照して行動のプランニングをする必要がある。このように環境や状況に応じて自身の認知機能を制御する能力は認知制御 (cognitive control) と呼ばれ、行動の起点となる刺激の入力から目標となる行動の出力までの認知活動を調節するメカニズムとして知られている (Houghton & Tipper, 1996)。認知制御は、学習や練習を繰り返すことにより意識的なものから無意識的なものに変化していく。例えば、私たちは九九を暗記している。7×8は?と問われれば、ほとんどの人は無意識的に56という答えが思い浮かぶだろう。では、小学生の低学年の頃はどうか? おそらく、意識的に計算して答えを出していたはずである。その後、学習や練習を繰り返すことにより現在のような無意識的に答えを出せるようになっていく。本論文では、このような意識的な制御のプロセスから無意識的な自動的プロセスへ移行を行動パフォーマンスと関連付けて検討を行う。

認知制御は、脳に由来した活動であり、大脳新皮質の前方の領域に位置する前頭前野が神経基盤であることが知られている (Stuss & Alexander, 2000)。脳活動は、脳波 (electroencephalography: EEG)、脳磁図 (magnetoencephalography: MEG)、陽電子断層画像 (positron emission tomography: PET)、近赤外分光法 (near infrared spectroscopy: NIRS)、機能的磁気共鳴画像 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) など、様々な脳機能測定法を用いて測定することができる。本論文では、これらの脳機能測定法の内、脳波を用いて脳活動を測定する。脳波は、人間の脳から生じる電気活動を頭皮上に置いた電極で記録したものであり、電気活動であるために時間分解能に優れていることが特徴である。また、他の脳機能測定法と比較して測定装置が小型であり、頭部を固定する必要がないため実験

室外において測定することも可能である。したがって、脳波を用いて得られた知見は、様々な領域に応用できると考えられる。

1.2. 本論文の構成

本論文の構成を Figure 1.1 に示した。

第 1 章では、研究の背景と研究の概要について説明した。まず、本論文の主要なテーマである認知制御という概念について概観し、本論文で認知制御のモデルとして用いる Skill-Rule-Knowledge モデルの概要と不足点を取り上げた。その後、認知制御と脳活動の関係について、脳部位および脳波活動に分類して概観した。最後に、本論文の目的について述べた。

第 2 章では、Skill-Rule-Knowledge モデルに基づいた実験課題を作成し、Skill-Rule-Knowledge モデルの認知制御レベルの違いが背景脳波の活動に与える影響について検討を行った。

第 3 章では、背景脳波の中でも、特に認知制御と関連が示唆されている前頭部 θ 帯域の活動に焦点を当て、Skill-Rule-Knowledge モデルとの関係について検討を行った。

第 4 章では、課題を習熟していく過程における前頭部 θ 帯域の活動の経時的変化について検討を行った。

第 5 章では、第 2 章、第 3 章、第 4 章で得られた知見から総合的な考察を行い、今後の展望について述べた。

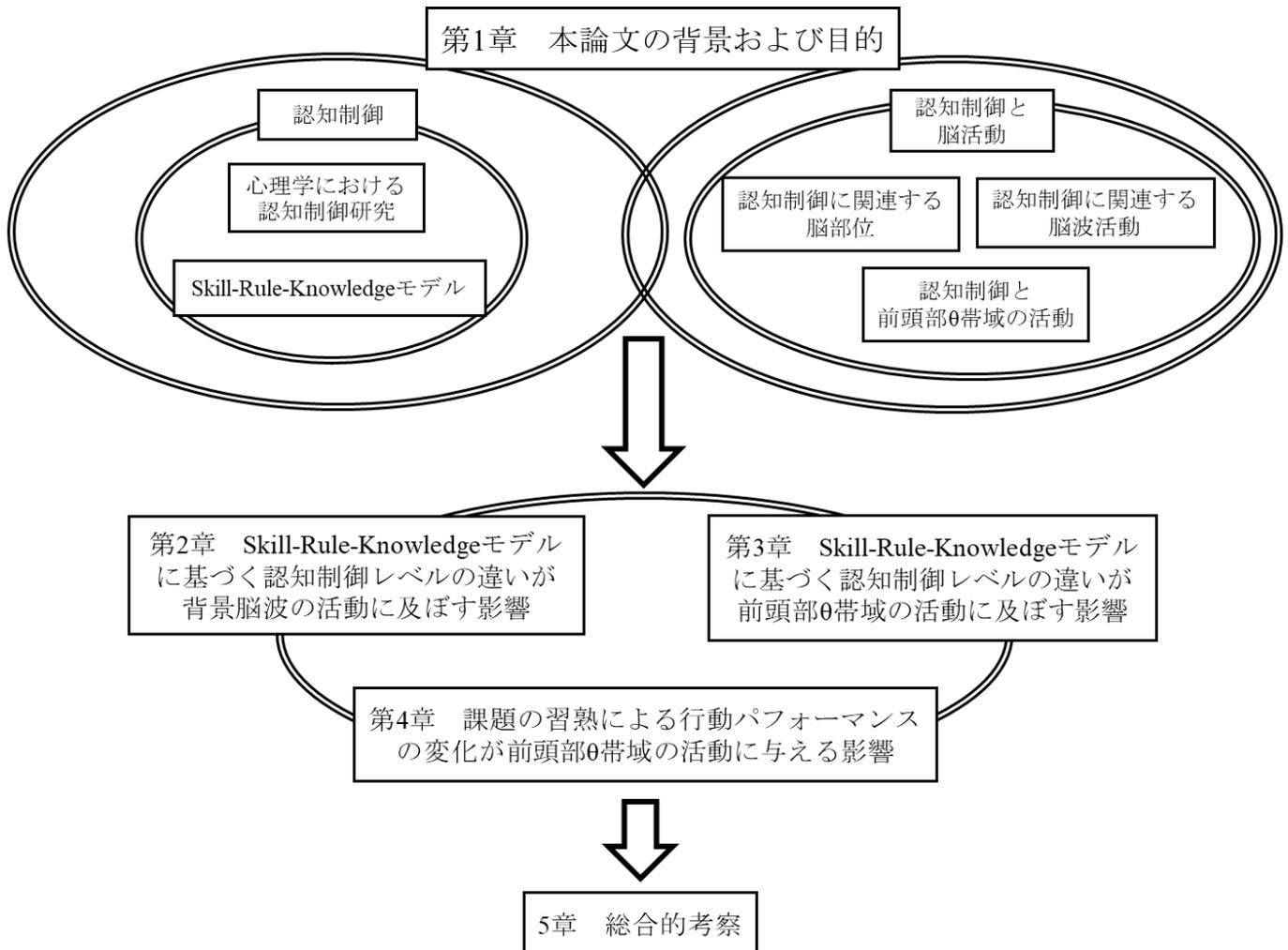


Figure 1-1. 本論文の構成

1.3. 認知制御

1.3.1. 心理学における認知制御の研究

私たちは何かしらの行動をする際に、必要な情報に注意を向けたり、不要な情報を無視する、状況に応じて行動を切り替える、あるいは止めるといった認知活動を自然に行っている。このように状況に応じて認知活動をコントロールする能力は、認知制御と呼ばれており、行動の遂行に必要な一連の認知プロセスであるとされている。認知制御には、注意 (attention)、抑制 (inhibition)、情報の更新 (updating)、ルールの切り替え (shifting) など、行動の遂行に必要な様々な認知プロセスを含んだ包括的な概念となっている (Miyake & Shah, 1999)。こうした認知制御の定義には、以下のようなものがある。

“新しい行動パターンを促進し、非習慣的な状況における行動を最適化する認知プロセス”

(Gillbert & Burgess, 2008)

“内的目標に沿った認知と行動の調整に関係し、進行中の処理デマンドに応じて課題の遂行をオンラインで調整することを仲介する”

(Cho, Orr, Cohen & Carter, 2009)

“目立たない、もしくは新奇な応答を優先して、自動的な反応を克服するマインドセットを確立する能力”

(Fernandez-Duque & Knight, 2008)

“行動の目標が、学習された刺激と反応の関連付けの範囲を越えた場合に、その行動を生成または調整するときに呼び出されるプロセスもしくはメカニズム”

(Cooper, 2010)

“適切な反応を優先し、瞬間的な衝動を抑える能力”

(Verguts & Notebaert, 2009)

前述のように、認知制御の定義は広狭存在する。具体的には、広義で認知制御を行動の遂行に必要な一連の認知プロセスと捉えており、狭義で認知制御を抑制などの特定の認知機能に限定して捉えている。本論文では、認知制御を、“行動の遂行に必要な一連の認知プロセス”とする定義を採用する。

認知制御という用語は、1975年にPosner & Snyder (1975)が使用して以来、様々な研究において用いられるようになった。認知制御における多くの研究は、ルーチン（または“自動 (automatic)”）的プロセスと非ルーチン（または、“制御 (controlled)”）的プロセスの区別、もしくは、それらの段階的な移行が対象とされている (Gillbert & Burgess, 2008)。ここでの、自動的プロセスとは、単語の読み上げや文字の読み書きなどの十分に学習された習慣的な行動に対する認知プロセスを指している。一方で、制御的プロセスとは、自動的プロセスのように行動に対して確立された刺激と反応の関連付けがない場合、もしくは、何らかの内的、外的要因で行動にエラーが発生した場合に、その状況に応じて行動を生成したり、調整するといった非習慣的な行動に対する認知プロセスを指している。

こうした潮流の先駆けとなった研究として、Shiffrin & Schneider (1977)が挙げられる。Shiffrin & Schneider (1977)は、アルファベットと数字から構成される記憶セットを用いた視覚探索課題において、2100回以上の試行を遂行する過程で、実験参加者の反応時間が徐々に短縮していくことを示した。この結果から、練習の初期では、遂行が遅く逐次的で意識的な努力を要する制御的プロセスを必要とするが、練習の後期では遂行が早く並列的で意識的な努力を必要としない自動的プロセスに移行していくことを示唆した。Shiffrin & Schneider (1977)の研究における重要な点は、練習によって認知プロセスが自動化されていくことを示したことである。しかしながら、Shiffrin & Schneider (1977)の研究では、こうした自動性がどのように得られていくのかという習熟過程については検討されていなかった。

Shiffrin & Schneider (1977)の研究は、練習によって自動性が獲得されていくことを示したが、その過程については検討されていなかった。このことは、1970年代後半が認知制御

という用語が用いられて間もない時期であり、認知制御という概念自体があまり知られていなかったために、認知制御を説明する理論もほとんどみられなかったことに起因すると考えられる。一方で、現在においては、認知制御という用語は広く浸透しており、その理論についても有力な研究が数多く存在する (e.g. Baddeley & Hitch, 1974; Baddeley, 2000; Baddeley, 2012; Ericsson & Kintsch, 1995; Logan, 1988; Logan, 2002; Miyake & Friedman, 2012; Miyake & Shah, 1999; Noman & Shallice, 1986; Rasmussen, 1983; 1986)。本論文では、認知制御のモデルとして、Rasmussen (1983; 1986) が提唱した Skill-Rule-Knowledge モデルを取り上げる。このモデルは、行動パフォーマンスに応じて認知制御が段階的に異なるという特徴をもち、認知制御における研究の焦点である制御的プロセスと自動的プロセスの区別や段階的な移行について適したモデルである。

1.3.2. Skill-Rule-Knowledge モデル

Skill-Rule-Knowledge モデル（以下，“SRK モデル”とする）は，Rasmussen（1983;1986）が提唱した人間の認知制御モデルの 1 つであり，エコロジカルインターフェイスデザイン（ecological interface design: EID）における主要な概念の 1 つとして設計された。EID は，生態心理学（ecological psychology）の考え方を基にしたインターフェイス設計のフレームワークであり，複雑な作業環境における不慣れな状況や予期しないイベントに対する人間の認知的負荷を軽減させるインターフェイスを作成することを目的としている。この背景から，EID は，原子力発電所（Vicente & Rasmussen, 1990; 1992）において初めて適用されたことを皮切りに，コンピューターネットワーク管理，医療，航空（Vicente, 2002; Burns & Hajdukiewicz, 2004）などの様々な専門的分野に対して適用される実用的なインターフェイス設計のフレームワークとして知られている。

SRK モデルは，生態心理学の理念を基とする EID の主要な概念の 1 つであることから，現実的な場面における人間の認知制御を想定したモデルとなっている。このことから，SRK モデルでは，人間の行動パフォーマンスに応じた 3 段階の認知制御が想定されている。Figure 1-2 に SRK モデルの概念図を示す。これらの認知制御は，知識ベース（Knowledge based），ルールベース（Rule based），スキルベース（Skill based）という 3 段階に分類されており，直面した状況に応じて適切な認知制御が選択され実行される（以下，本論文では，SRK モデルにおける 3 段階の認知制御（知識ベース，ルールベース，スキルベース）をまとめた用語として“認知制御レベル”を用いる）。以下に，SRK モデルにおける認知制御レベルの特徴と使用される状況を説明する。

知識ベース（Knowledge based）

知識ベースは，不慣れや新規な状況に対して用いられる認知制御とされている。ここで

の、知識とは概念的・構造的なモデルの所有といった限定的な意味であるとされており、過去の経験などから形成された方略 (strategy) などが該当するとされている。不慣れや新奇な状況では、過去の経験からのルールやノウハウが存在しないため、状況を分析し、自身が保持している方略などを用いて最適と思われる目標を複数設定し、それらをシュミュレーションもしくは実行するという並列型の情報処理が必要となる。したがって、知識ベースの認知プロセスは、問題解決型のプロセスとも呼べる。

ルールベース (Rule based)

ルールベースは、ある程度習慣化 (ルーチン化) された状況に対して用いられる認知制御とされている。ここでの、ルールとは過去に成功を取めた経験や他者からの教示などで獲得されるとされている。この認知制御では、知識ベースとは異なり、遂行する行為や行動に対するルールやノウハウを保持していることを前提としており、それらを用いた意識的なフィードフォワード制御 (予測的制御) が行われる。

スキルベース (Skill based)

スキルベースは、熟練した状況に対して用いられる認知制御とされている。ここでの、スキルとは、既に確立された技能を指すとされている。この認知制御では、遂行する行為や行動に対する刺激や意図を知覚すると、即座に自動化された感覚運動パターンが生起され、実行される。この感覚運動パターンは、自動化されたサブルーチンの幅広いレパートリーの中から特定の目的に適した組み合わせを構成する能力に依存するとされている。この能力は、Rasmussen (1983;1986) において“内的な動的な世界モデル”と表現されており、感覚入力から動作までの行動パターンの生成には“スキーマ”に依存するとされている。

“スキーマ”は、長期記憶における外部環境から行為や行動に関するルールや手続きの蓄積によって形成される。また、スキルベースの認知制御は、ルールベースと同様のフィードフォワード制御であるとされているが、その制御は無意識的であるとされている。

これらの特徴から、SRK モデルの認知制御レベルは、知識ベース、ルールベース、スキルベースの順で遂行する行為や行動のパフォーマンスが上昇していくことを想定している。また、SRK モデルでは、知識ベースとルールベースは意識的な認知制御、スキルベースは無意識的な認知制御とされていることから、知識ベースとルールベースは制御的プロセス、スキルベースは自動的プロセスに該当すると考えられる。

一方で、Figure 1-2 が示す通り、SRK モデルは、感覚入力から動作までの認知プロセスが知識ベース、ルールベース、スキルベースの順で短縮していくことを想定している。Rasmussen (1986) では、SRK モデルの認知制御レベルを技能獲得の観点からとらえた場合、最終段階はスキルベースであることが述べられている。したがって、SRK モデルに基づいて、認知プロセスの自動化を説明すると、練習の初期では、行為や行動に対するルールやノウハウが存在しないために知識ベースの認知制御を用いるが、試行回数の増加に伴い、結果のフィードバック等によりルールやノウハウを獲得することでルールベースの認知制御に移行し、さらに過剰学習することで、無意識的に行為や行動が遂行できるスキルベースの認知制御に到達すると考えられている。

SRK モデルの特筆すべき点は、EID の主要な要素として設計された背景から、感覚入力から動作までの認知プロセスを、既存のモデルのような一直線上に並べた形ではなく、行動パフォーマンスに応じた段階型の形で表している部分にある (Reason, 1990)。このことにより、SRK モデルは、既存のモデルと比較してより現実の状況に近似した認知制御モデルであるとされている (Reason, 1990)。そのため、認知制御のモデルとして SRK モデルを用いた場合、得られた知見は一般化しやすいと予測される。また、このような特徴から、SRK モデルのフレームワークは認知制御における研究の焦点の 1 つである制御的プロセスから自動的プロセスへの段階的移行を表すためのモデルとして適していることが考えられる。そのため、本論文では、認知制御と行動パフォーマンスの関係について、SRK モデルのフレームワークに基づいた検討を行う。

一方で、SRK モデルにはいくつかの不足点も存在する。1 つ目は、SRK モデルのフレー

ムワークを用いた実験的検討がほとんどみられないことである。SRK モデルを用いた研究の大部分はヒューマンエラーに焦点を当てたものであり、ヒューマンエラーの原因を解釈するために SRK モデルのフレームワークを用いる程度に留まっている。そのため、SRK モデルのフレームワークを用いた実験的検討は十分に検討されておらず、特に、SRK モデルの認知制御レベルを特徴づける変数については研究が進んでいない。また、SRK モデルは前述の出自から医療や航空、原子力発電所などの高度な専門技能を対象に用いられることがほとんどであり、読み書きや会話、暗算などの基礎的な技能に関して適用できるかについても検討されていない。2 つ目は、SRK モデルが認知制御の神経基盤 (Miller & Cohen, 2001; Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, Howerter & Wager, 2000) とされる脳部位や脳活動との関連もほとんど検討されていないことである。近年では、認知制御は脳部位の中でも特に前頭部領域との関連することが多くの研究から示唆されている (Burgess & Stuss, 2017; Stuss & Alexander, 2000)。そのため、認知制御のモデルとして SRK モデルを用いるためには、SRK モデルのフレームワークが脳活動とどのように関連しているかを検討する必要があると考えられる。そこで本論文では、SRK モデルの認知制御レベルの特徴に沿った基礎的な技能に関する実験課題を作成し、脳活動との関連を含めた実験的検討を行う。

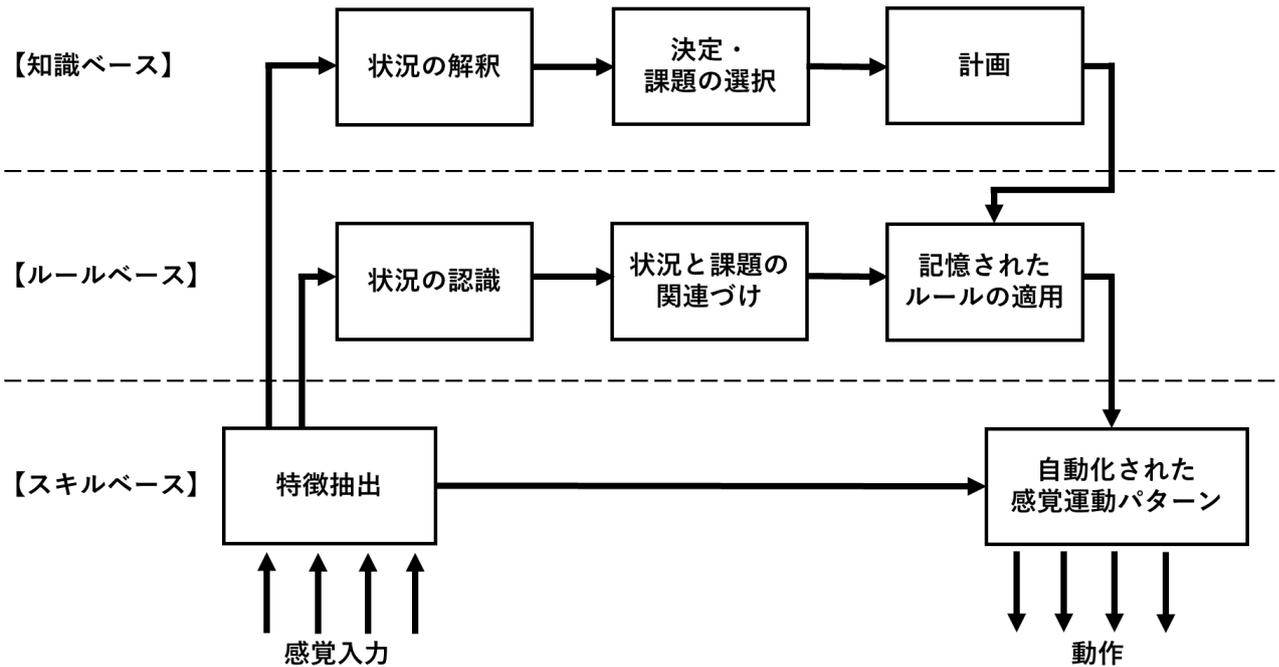


Figure 1-2. Skill-Rule-Knowledge モデルの概念図

Rasmussen (1986) をもとに作成。モデル図は、感覚入力から動作までの流れを表している。図中の下段がスキルベース、中段がルールベース、上段が知識ベースの認知制御を表している。また、黒色の矢印は、認知プロセスの流れを表している。

1.4. 認知制御と脳活動

1.4.1. 認知制御に関連した脳部位

(1) 前頭前野

認知制御の神経基盤は、一般的には前頭葉の中でも前方に位置する領域である前頭前野に存在するとされている (Burgess & Stuss, 2017; Stuss & Alexander, 2000)。認知制御と関連する脳領域の特定は、主に神経心理学的課題 (例: ウィスコンシンカード分類課題 (Wisconsin card sorting test: WCST), ストループ課題 (Stroop test) など) を用いて、前頭葉病変を持つ患者と健常な対照群との比較から知見が蓄積されてきた (Miller & Cummings, 1999; Roberts, Robbins & Weiskrantz, 1998)。例えば、WCST では、前頭部領域に損傷を持つ実験参加者は、健常な対照群と比較して保続的なエラーが多いことが報告されている (Milner, 1963)。また、ストロープ課題においても、前頭部領域に損傷を持つ実験参加者は、健常な対照群と比較してエラーが多くなる傾向にあり、また反応時間の増加もみられることが報告されている (Stuss, Floden, Alexander, Levine, & Katz, 2001; Perret, 1974)。

近年では、ニューロイメージングの技術の進歩により、さらに認知制御に関連した脳領域の特定が進んでおり、前頭前野の中でも特に、背外側前頭前野 (dorsolateral prefrontal cortex: DLPFC)、眼窩前頭皮質 (orbitofrontal cortex: OFC)、前帯状回皮質 (anterior cingulate cortex: ACC) の領域が認知制御と関連して活動することが示唆されている (Alvarez & Emory, 2006)。また、これらの領域は、特定の認知活動と関連することも示唆されている。DLPFC は、課題の維持や切り替え、計画、抑制、ワーキングメモリ、問題解決、抽象的思考などに関連することが示唆されている (Alvarez, & Emory, 2006; Clark, Bechara, Damasio, Aitken, Sahakian, & Robbins, 2008)。ACC は、感情、意思決定、パフォーマンスのモニタリング、エ

ラー検出などに関連することが示唆されている (Allman, Hakeem, Erwin, Nimchinsky, & Hof, 2001)。OFC は、衝動性の抑制、記憶の符号化などに関連することが示唆されている (Stalnaker, Cooch, & Schoenbaum, 2015)。

(2) 背外側前頭前野と前部帯状回皮質

これらの脳領域の中において、特に認知制御との関連が深い領域は、DLFPC と ACC であるとされている。このことは、認知制御のプロセスを神経メカニズム的側面から説明しようとする研究において多くの知見が蓄積されている (Banich, 2009; Christoff & Gabrieli, 2000; Duncan & Owen, 2000; Miller & Cohen, 2001; Miyake et al., 2000; Petrides, 2005; Stuss & Alexander, 2007)。これらの研究の文脈では、DLFPC は、ワーキングメモリの概念に関連付けられることが多く、記憶貯蔵庫 (音韻ループと視空間スケッチパッド) と中央実行系に近似した機能が含まれている (Miller & Cohen, 2001)。一方、ACC は、行動の遂行に対するモニタリングとエラー検出に関連付けられており、一種の監視システムとして位置づけられている (Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll, & Cohen, 1998)。

このような認知制御における DLFPC と ACC の役割について、Banich (2009) は、既存のモデルの理論を統合した制御カスケードモデル (cascade-of-control model) から説明を試みている。このモデルでは、DLFPC が行動の遂行に関するルールの作成および選択を、ACC が反応の実行とモニタリングを担うとされている。行動の遂行に際しては、環境からの意図や刺激に対して、DLFPC がルールの作成および選択の情報を ACC へと送り、ACC が反応の実行とモニタリングを行う。この場合に、ACC がエラーを検出すると、その情報を DLFPC に送り返すことでルールの作成と選択が修正されるという一連のサイクルを形成している。したがって、ACC が認知制御におけるプロセスの最終段となり、エラーの可能性が高いほど、ACC の活動が増大することが示唆されている (Banich, 2009; Milham, Erickson, Banich, Kramer, Webb, Wszalek & Cohen, 2002)。一方で、ACC の活動は、練習に伴うパフォ

パフォーマンスの上昇により減少することも示唆されている (Milhan, Banich, Claus & Cohen, 2003)。この ACC の活動の増減について, Banich (2009) では, DLFPC によるルールの作成と選択の質に依存するとしており, DLFPC から送られてくる情報が効率的になるにつれて, ACC の活動は大幅に減少すると説明している。

以上のことから, 認知制御の関連する脳領域として, 前頭前野が特定されており, その中でも DLFPC と ACC の領域が認知制御に対して重要な役割を持つと考えられる。そして, 認知制御の必要性は, 主に ACC の活動の変化によって観測される可能性がある。しかしながら, 認知制御は, 前頭前野に特異的な機能ではないことも示唆されている (Alvarez, & Emory, 2006)。これは, 前頭前野が他の皮質領域や辺縁系, 脳幹部位との広範な接続を含むことから, 認知制御には他の皮質との相互的な接続が必要とされると考えられるためである。一方で, 前頭前野は認知制御を必要とする際に, 必ず活性化を伴う。そのため, 前頭前野の活動は, 認知制御における特異的な領域としてではなく, 認知制御の必要性に対する指標として解釈するべきであると述べられている (Alvarez, & Emory, 2006)。このことから, 前頭前野の活動のみでは, 認知制御という概念全体を説明するには不十分であるが, その指標としては機能する可能性が考えられる。

1.4.2. 認知制御に関連する脳波活動

(1) 脳波

脳波は、人間の脳から生じる電気活動を頭皮上や脳表、脳深部などに置いた電極から記録する脳機能測定法の1つである。脳波は、1929年に Hans Berger によって初めて報告された脳活動であり (Berger, 1929)、この報告以来、心理学を含む様々な研究分野で用いられている。脳波以外の脳機能測定法には、脳磁図や陽電子断層装置、機能的核磁気共鳴画像、近赤外光血流計測などがあるが、脳波は、これらの脳機能測定法と比較して空間分解能で劣るが、時間分解能が秀でており、測定も手軽な点が利点である (宮内, 2013)。また、測定に際して頭部を固定する必要が無く、体動に対してある程度の耐性があるため、実験室外においても測定が可能である。そのため、得られた知見は実験室のみならず、現実の場面においても応用できる可能性が期待される。

脳波は、周波数帯域によって、主に以下の5種類に分類されている (堀, 2008 ; 大熊・松岡・上埜・斎藤, 2016)。

δ (デルタ) 波 (帯域) : 0.5~3 Hz (4 Hz 未満)

θ (シータ) 波 (帯域) : 4~7 Hz (8 Hz 未満)

α (アルファ) 波 (帯域) : 8~12 Hz (13 Hz 未満)

β (ベータ) 波 (帯域) : 13~40 Hz (13~35 Hz もしくは、13~30 Hz とする場合もある)

γ (ガンマ) 波 (帯域) : 40 Hz 以上の周波数

これらの周波数帯域は、背景脳波 (もしくは基礎律動) と呼ばれており、一般的には人間の意識水準と関連するとされている (山本, 2000)。 θ 帯域は、人間が眠気を覚える覚醒から入眠への移行期に優勢となり、その後、深い眠りに移行すると δ 帯域が優勢となる。

安静時のリラックスした状態では、 α 帯域が優勢となる。不安や怒り、または暗算などの精神作業を行っている状態では、 β 帯域が優勢となる。 γ 帯域については、不明な点が多いが、近年では θ 帯域との位相の同期により視覚記憶課題時における記憶の保持に関連しているという報告がある (Sauseng, Klimesch, Heise, Gruber, Holz, Karim, Glennon, Gerloff, Birbaumer, & Hummel, 2009)。

(2) 事象関連電位

このような脳波と認知制御の関連については、事象関連電位 (event-related potential: ERP) を用いた検討が行われている (Folstein & Van Petten, 2008; Walsh & Anderson, 2012)。ERP とは、外的あるいは内的な事象 (刺激や運動など) などに対して時間的に関連して生じる一過性の電位変動とされている (入野・堀, 2000)。ERP の波形は、電位変動を示す性質の異なる複数の成分 (components) が時間的および空間的に重なり合ったものであると考えられている。こうした ERP 成分は、陰性 (negative) であれば N、陽性 (positive) であれば P と呼ばれ、出現順序や潜時によって分類されている。ERP は、特定の事象に同期して出現するが、この活動は上述の背景脳波に重畳して生じる上に電位が非常に微弱であるため、ERP を可視化するためには、特定の事象を 100 回以上繰り返し、それらの事象を加算平均することで事象と無関係な背景脳波を相殺するという手法がとられる。

ERP 研究の文脈では、認知制御と関連する ERP 成分として、主に N2 に代表される陰性電位群が報告されている (Gratton, Cooper, Fabiani, Carter & Karayanidis, 2017)。N2 は、前頭部領域の電極から導出される ERP 成分の 1 つで、検出した刺激に対する新奇性やストループ課題などにおける刺激の一致と不一致の検出に関連して出現することが示唆されている (Folstein & Van Petten, 2008)。また、N2 と同様の陰性電位として、エラー関連電位 (error-related negativity: ERN)、フィードバック関連陰性電位 (feedback-related negativity: FRN)、正反応陰性電位 (correct-related negativity: CRN) が存在する。ERN はエラー検出に関して特

に敏感な ERP 成分であり (Folstein & Van Petten, 2008), FRN は行動の結果が良いか悪いかといった動機付け(報酬と罰)に関連する ERP 成分とされている (Walsh & Anderson, 2012)。また, CRN は, 正反応に対する反応や方略の強化に関連する ERP 成分とされている (Grützmann, Riesel, Kaufmann, Kathmann, Heinzl, 2019)。これらの ERP 成分は, ACC を発生源としていることが示唆されており (Botvinick, Braver, Barch, Carter, Cohen, 2001), 内側前頭前野陰性電位 (medial frontal negativity) とも呼ばれている (小野・安部・山口, 2012)。

1.4.3. 認知制御と前頭部 θ 帯域の活動

(1) 事象関連ダイナミクス

前項では、認知制御と関連する脳波活動として、N2 や P300 といった ERP 成分を取り上げた。これらの ERP 成分は、電位が非常に微弱なために背景脳波と重畳すると可視化できないことから、特定の事象を繰り返し測定し、それらを加算平均してノイズである背景脳波を相殺する必要があった。しかしながら、最近の脳波研究の文脈では、ERP においてノイズとされていた背景脳波自体が特定の事象に関連して変動することが示唆されている (Makeig, Debener, Onton, Delorme, 2004)。例えば、ERP 成分の内、視覚性の誘発電位である P1 は、背景脳波である α 帯域の位相の同期を反映していることが報告されている (Makeig, Westerfield, Jung, Enghoff, Townsend, Courchesne & Sejnowski, 2002)。

このように、脳波活動を ERP のみならず背景脳波を含めて包括的に捉えた概念として、事象関連ダイナミクス (event-related dynamics) が提唱されている (Makeig et al., 2004)。事象関連ダイナミクスでは、脳波活動を周波数 (frequency)、振幅 (power)、位相 (phase) という 3 次元で捉えている。Figure 1-5 に事象関連ダイナミクスの概念図を示す。この図では、y 軸 (縦軸) が試行間コヒーレンス (inter-trial coherence: ITC) (試行間で脳波活動の位相がどの程度相関しているかを示す指標)、x 軸 (横軸) が事象関連スペクトル摂動 (event-related spectral perturbation: ERSP) (事象によって生じる脳波活動のパワーの増減を示す指標)、z 軸 (奥行き) が周波数 (frequency) (脳波活動の周波数帯域) を示している。この座標空間の中には、前述の ERP に加えて、主に、事象関連同期 (event-related synchronization: ERS)、事象関連脱同期 (event-related desynchronization: ERD)、部分的位相リセット (partial phase resetting: PPR) の 4 つの要素が存在する。ERS は、位相はランダムであるがパワーだけが一過性に増大する現象であり、ERD は対照的に減少する現象である。ERS と ERD は、事象に同期した現象ではないため、ERP のように波形を加算平均する必要がなく、周波数

解析などによって解析区間内における特定の脳波周波数のパワーの増減を検討することができる。PPR は、事象に同期して特定の周波数帯域の位相がリセットされる現象であり、ERS や ERD のようなパワーの増減を伴わないとされている。前述した P1 と α 帯域の関連は、 α 帯域の PPR によって引き起こされるとされている (Makeig et al., 2002)。また、ERP についても、事象関連ダイナミクスの座標空間 (Figure 1-5) では、従来の加算平均によって背景脳波を相殺して可視化するという捉え方ではなく、脳波周波数自体に対して、ERP が起きる可能性も考慮されている。そのため、事象関連ダイナミクスの概念から ERP を説明すると、特定の脳波周波数に対して事象に対して位相が同期し、パワーが一過性に増大するという現象となる。

(2) 前頭部 θ 帯域

こうした事象関連ダイナミクスの概念において、近年では、認知制御と密接に関連する背景脳波として、前頭部正中線上に限局して出現する θ 帯域 (以下、前頭部 θ 帯域) の活動が多くの研究において注目されている (Cavanagh, Cohen & Allen, 2009; Cavanagh & Frank, 2014; Cavanagh, Zambrano-Vazquez, Allen, 2012; Cohen, 2011; Cohen & Cavanagh, 2011; Gratton et al., 2017)。この脳波活動自体は、1962 年に石原・吉井 (1962) によって報告されており、その後、Fm θ (frontal midline theta rhythm) という用語で呼ばれるようになった (Ishihara & Yoshii, 1972)。Fm θ は、“前頭部正中線部附近にもっとも優勢に出現する theta rhythm で、ふつうは 6-7 c/sec の周波数を持ち、精神作業などで増強される。一定の睡眠段階にあらわれることもある。”と定義されており (山口, 1983a; 1983b; 1983c)、内田クレペリン検査のような連続的な暗算課題において増大して出現することから (Ishihara & Yoshii, 1972)、精神作業に関連する背景脳波として、1960~1980 年代に日本において活発に研究が行われていた。

今日においては、脳機能測定技術の発展やパーソナルコンピューターの性能の向上によ

様々な解析法の汎用化に伴って、前頭部 θ 帯域の研究は飛躍的に進んでおり、記憶の符号化と検索 (Jacobs, Hwang, Curran & Kahana, 2006)、短期記憶の保持 (Itthipuripad, Wessel & Aron, 2013)、新奇性やエラーの検出および行動のモニタリング (Cavanagh et al., 2012) などの認知プロセスを反映して活動することから、認知制御に必要な認知プロセスに関連する包括的な脳活動であるとされている (Cavanagh & Frank, 2014)。

認知制御における前頭部 θ 帯域の重要性は、この活動が、認知制御において重要な脳領域である ACC を由来とする複数の ERP 成分における共通した“シグネチャ”である点にある (Cavanagh & Frank, 2014)。ACC に由来する ERP 成分は、前項にて取り上げた N2, ERN, FRN, CRN などが該当し、新奇性の検出、行動の抑制、動機付け、エラーの検出とモニタリングなど、認知制御に必要不可欠な認知プロセスを反映している。そして、これらの ERP 成分は、ともに前頭部正中線上に限局し、 θ 帯域の ERS を伴うという共通点が存在する (Cavanagh & Frank, 2014; Cavanagh et al., 2012)。そのため、前頭部 θ 帯域は、ACC 由来の ERP 成分の根底にある脳波であり、ACC 由来の ERP 成分の認知プロセスを反映する脳活動であることが示唆されている (Cavanagh & Frank, 2014)。また、これらを裏付ける研究として、EEG や MEG による電源推定 (Hanslmayr, Pastötter, Bäuml, Gruber, Wimber & Klimesch, 2008; Ishii, Shinosaki, Ukai, Inoue, Ishuhara, Yoshimine, Hirabuki, Asada, Kihara, Robinson & Takeda, 1999)、EEG と fMRI の同時測定 (Gevins, Smith, McEvoy & Yu, 1997; Debener, Ullsperger, Siegel, Fiehler, Yves von Cramon, Engel, 2005)、人間とサルとの侵襲的測定 (Phillips, Vinck, Everling & Womelsdorf, 2014; Wang, Ulbert, Schomer, Marinkovic & Halgren, 2005) などにおいて前頭部 θ 帯域の活動が ACC に由来するものであるという報告がされている。以上のことから、前頭部 θ 帯域は、認知制御に対する脳活動のインジケータとして機能する可能性が考えられる。

また、前頭部 θ 帯域の活動は、学習と自動化に関連することも報告されている (Cavanagh, Frank, Klein & Allen, 2010; Crivelli-Decker, Hsieh, Clarke & Ranganath, 2018; Luft, 2014; Romero, McFarland, Faust, Farrell, Cacace, 2008)。学習に関する前頭部 θ 帯域の研究の文脈では、前頭

部 θ 帯域の活動は、エラーを検出した後に増大することから報酬（正しい行動）に対する予測誤差を表していることが報告されている（Cavanagh & Frank, 2014; Cavanagh et al., 2010）。そのため、刺激に対する前頭部 θ 帯域の活動の増減により、学習における自動化の程度が予測できる可能性が示唆されている（Cavanagh & Frank, 2014）。例えば、Crivelli-Decker et al. (2018) は、連続した学習の過程における前頭部 θ 帯域の活動を測定し、刺激の呈示順序が一貫した条件とランダムな条件の比較を行った。その結果、学習初期では、一貫した条件とランダムな条件の間で、前頭部 θ 帯域の活動に差はみられなかったが、学習の後期ではランダムな条件では学習初期と比較して前頭部 θ 帯域の活動が変化しなかった一方で、一貫した条件では前頭部 θ 帯域の活動の減少がみられたことを報告している。また、Pathania, Leiker, Euler, Miller & Lohse (2019) では、ビデオゲーム中の脳波活動を測定し、前頭部 θ 帯域の活動は、難易度の上昇により増大するが、練習によるパフォーマンスの向上により減少することを報告している。これらのことから、前頭部 θ 帯域の活動は、認知制御を必要とする場合において増大するが、練習や学習によって行動が自動化されるに伴い減少していく傾向を示すと考えられる。

このような練習や学習による認知制御の自動化は、前頭前野と海馬（Hippocampus）における θ 帯域の位相同期が関連している可能性も示唆されている（Crivelli-Decker et al., 2018; Ekstrom, Caplan, Ho, Shattuck, Fried & Kahana, 2005; Lega, Jacobs & Kahana, 2012; Long, Burke & Kahana, 2014）。海馬は記憶の形成や定着に重要な役割を持つ脳部位であることが知られており、その活動は θ 帯域に代表されて観測されることが報告されている（Mitchell, McNaughton, Flanagan & Kirk, 2008）。そして、前頭前野と海馬の θ 帯域における位相は、記憶の符号化に関連して同期し、ACC を含んだ新皮質における θ 帯域の活動を増大させることが報告されており、特にエピソード記憶の形成において重要であることが示唆されている（Klimesch, 1999）。このことから、Crivelli-Decker et al. (2018) では、前頭部 θ 帯域の活動は、学習における初期段階で重要である可能性を示唆している。

これらのことから、本論文では、SRK モデルと関連する脳活動として、前頭部 θ 帯域を取り上げる。前頭部 θ 帯域は、認知制御に関連した認知プロセスを包括的にカバーすることのできる脳活動であり、練習や学習によるパフォーマンスの向上に伴い活動が変動することから制御のプロセスから自動的プロセスへの段階的移行と SRK モデルを関連付ける生理的変数として適していると考えられる。

(3) θ 帯域以外の脳波周波数帯域

脳波活動は、0.5~40 Hz 以上の広範囲な周波数から形成されており、周波数に応じて δ , θ , α , β , γ という特定の周波数帯域に分類されている。この内、 θ 帯域の周波数帯域は 4-7 Hz という非常に狭い範囲に限定されている。このため、認知制御の必要性に応じて前頭部 θ 帯域の活動が変調した場合、他の周波数帯域も同様に変調している可能性が考えられる。例えば、認知制御に伴う前頭部 θ 帯域の ERS は、 α 帯域の ERD を伴うことが報告されている (Klimesch, 1999)。また、認知制御に伴う後頭部領域の β 帯域の ERS は後頭部領域における θ 帯域の ERD を伴う (Braboszcz & Delorme, 2011 ;van Son, de Rover, De Blasio, van der Does, Barry & Putman, 2019)。したがって、認知制御時に伴う前頭部 θ 帯域の活動の変調は、他の周波数帯域の変調にも関連していると考えられる。これらのことから、本論文においても θ 帯域のみならず、脳波周波数全体の変動を検討することが必要であるだろう。

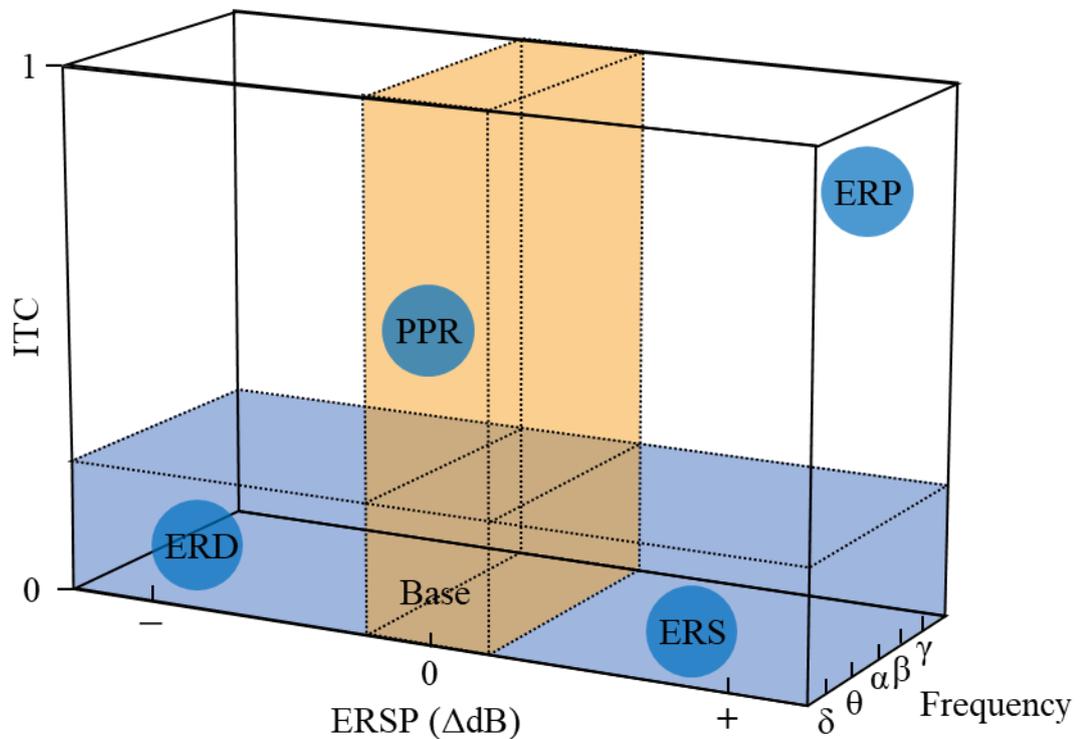


Figure 1-5. 事象関連ダイナミクスの概念図 Makeig et al., (2004) をもとに作成。

この図は、縦軸が試行間コヒーレンス (inter-trial coherence: ITC) (試行間で脳波活動の位相がどの程度相関しているかを示す指標) を、横軸が事象関連スペクトル摂動 (event-related spectral perturbation: ERSP) (事象によって生じる脳波活動のパワーの増減を示す指標) を、奥行きが周波数 (frequency) (脳波活動の周波数帯域) を表している。また、ERS が事象関連同期 (event-related synchronization: ERS) を、ERD が事象関連脱同期 (event-related desynchronization: ERD) を、PPR が部分的位相リセット (partial phase resetting: PPR) を、ERP が事象関連電位 (event-related potential: ERP) を表している。

1.5. 本論文の目的

以上を踏まえて、本論文では、認知制御に関連した脳活動として背景脳波を取り上げ、行動パフォーマンスと認知制御の関係について SRK モデルのフレームワークに基づいた実験的検討を行うことを目的とする。まず、第 2 章において SRK モデルと背景脳波の関係を明らかにする。その際、SRK モデルの認知制御レベルの特徴に基づいた実験課題の作成を行い、この課題を用いて脳波周波数ごとに検討を行う。次に、第 3 章では、第 2 章で作成した課題を用いて、認知制御において特に重要な脳活動とされる前頭部 θ 帯域の活動に焦点を当て、SRK モデルとの検討を行う。さらに、第 4 章では、第 2 章で作成した課題を用いて、課題の習熟に伴う行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域に与える影響について検討を行う。最後に、第 2 章から第 4 章で得られた知見より、SRK モデルと脳波活動の関係を総合的に検討する。

以上をまとめると、本論文の目的は以下の 4 点となる。

1. SRK モデルにおける認知制御レベルの違いが背景脳波の活動に与える影響について検討する。
2. SRK モデルにおける認知制御レベルの違いが前頭部 θ 帯域に与える影響について検討する。
3. 課題の習熟による行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域に与える影響について検討する。
4. 本論文から得られた知見に基づいて、SRK モデルと脳波活動の関係について総合的な考察を行う。

第 2 章

Skill-Rule-Knowledge モデルに基づく認知制御レベルの違いが背景脳波の活動に及ぼす影響¹

¹ 第 2 章は，“川島哲史・依田麻子 (2018). 認知制御レベルの違いによる脳波活動の変動. 日本大学心理学研究, 40, 1-10.” に掲載された。また，“川島哲史・太田直斗・依田麻子 (2018). 課題難易度の差異が脳波 θ 帯域の出現量に及ぼす影響. 日本心理学会第 82 回大会発表論文集, 415.” において発表された。

2.1. 序論

SRK モデルは、人間の行動パフォーマンスに応じて、認知制御を知識ベース、ルールベース、スキルベースの3段階に分類したモデルである (Rasmussen, 1986)。SRK モデルは、生態心理学に起源をもつ EID の主要な要素の1つとされており、原子力発電所のオペレーターなどの複雑な技能における行動パフォーマンスに対応した現実的な認知制御モデルとなっている。生態心理学は、実験室のような人工的な環境ではなく、現実的な行動を重視する特徴がある。このことから、SRK モデルも実験的な検討に基づいた設計ではなく、人間の現実的な行動に基づいて認知制御の段階が設計されている。実際に SRK モデルは、航空交通管制 (Borghini, Aricò, Di Flumeri, Cartocci, Colosimo, Bonelli, Golfetti, Imbert, Granger, Benhacene, Pozzi & Babiloni, 2017) や医療 (Wentink, Stassen, Alwayn, Hosman & Stassen, 2003) などの高度な技能を必要とする領域において用いられている。しかし、こうした背景故に SRK モデルでは、読み書きや会話、暗算などの基礎的な技能に関しては検討されてこなかった。

一方で、認知制御という概念は、前頭前野を神経基盤としていることもあり、脳活動とは切り離すことはできないと考えられる。しかし、認知制御のモデルである SRK モデルと脳活動の関係を検討した研究は、現状ではほとんどみられない。そこで、第2章では、SRK モデルと背景脳波の関係を検討する。また第2章では、この目的のために SRK モデルの認知制御レベルの特徴に基づいた実験課題を作成する。実験課題の内容としては、暗算を取り上げる。この理由としては、主に高度な技能 (原子力発電所のオペレーターや航空交通管制官、医療など) を対象として検討されている SRK モデルについて、より日常的な技能にも適用できるかどうかを検討するためである。もし、SRK モデルを日常的な技能に適用できるのならば、心理学をはじめとする広範な学術分野において SRK モデルに基づいた検討ができる可能性がある。また、もう一つの理由としては、暗算の難易度を調整すること

により、SRK モデルの認知制御レベルに対応させることができるためである。

以上のことより、第2章では、SRK モデルの認知制御レベルに基づいた暗算課題を作成し、これを用いて、SRK モデルの認知制御レベルの違いが背景脳波に及ぼす影響について検討することを目的とする。また、作成した暗算課題についても行動パフォーマンスの結果から評価を行う。

2.2. 方法

2.2.1. 実験参加者

本実験への参加者は男性大学生 18 名（平均年齢 20.8 ±1.76）であった。すべての実験参加者は右利きであり，裸眼もしくは矯正視力において本実験の課題遂行に支障のない視力を有していた。実験に先立ち，実験参加者には実験内容の概要を説明し，実験参加への同意を署名によって書面で得た。また，本実験は日本大学文理学部研究倫理委員会によって承認を受けた（承認番号 29-64）。

2.2.2. 実験装置・刺激

本研究では，実験課題を 24 インチディスプレイモニター（HP 社製 V243）に呈示した。リフレッシュレートは 60 Hz であった。実験課題は Psychopy ver.1.85.4 を用いて作成し，制御した。すべての実験は座位状態で実施し，モニターとの視距離は約 40 cm であった。実験参加者の反応はテンキーにより取得した。

実験課題は，Rasmussen（1986）の SRK モデルの知見から 3 種類の認知制御レベルに対応させた暗算課題を作成した。課題は Skill task（以下，ST），Rule task（以下，RT），Knowledge task（以下，KT）の 3 種類から構成した。以下に各課題の特徴と作成理由について記述する。

スキルベースの認知制御は，熟練した行動に対して，意識的な制御なしに無意識的（自動的）に動作が実行されることが特徴である。暗算の場合は，呈示された瞬間に解答できるような問題が該当すると考えられる。そこで，ST は九九を課題として採用した。具体的

には、1×1 から 9×9 まで問題をランダムに呈示する課題とした。また、解答が二桁の場合は十の位を空欄とした。

ルールベースの認知制御は、意識的な制御を必要とし、状況の解決に向けて既に学習されたルールや手続きを適用することが特徴となる。暗算の場合は、九九のように解答を暗記できている問題ではなく、暗算で解答が可能であるが複数回の計算が必要な問題が当てはまると考えられる。このことから、RT は、解答に 2 回の計算が必要な計算式（例えば、 $25 \times 2 + 15$ ）を採用した。具体的には、 $\circ \circ \times \circ + \circ \circ$ 、 $\circ \circ \times \circ - \circ$ 、 $\circ \circ \div \circ + \circ \circ$ 、 $\circ \circ \div \circ - \circ \circ$ の 4 種類の計算方法からなる問題をランダムに呈示する課題とした。また、計算の難易度を調整するために解答は 100 以下とし、ST と同様に解答が二桁の場合は十の位を空欄とした。

知識ベースの認知制御は、ルールベースの適用でも解決できない新規および不慣れな状況に対して実行されることが特徴である。この場合、目的を達成するために必要なプランが複数検討され、最も目的に適したプランが採用され実行される。しかし、暗算において知識ベースの認知制御は通常起こり得ない状況であると考えられる。そこで、本研究では知識ベースの課題として、RT と同様の計算難易度でありながら、計算記号（+、-、 \times 、 \div ）を特定の記号（Figure 2.1）に置き換えた問題を作成した。この課題は計算を行う際の計算記号の役割が不明であるため、実験参加者は解答から計算記号を推測して暗算を行う必要がある。ST、RT、KT のイメージ図及び KT で使用した計算記号を Figure 2.1 に示す。

脳波は、多チャンネルデジタル脳波計 Active Two（BIOSEMI 社製）を用いて頭皮上 128 チャンネルから測定した。Figure 2.2 に Active Two における電極配置図を示す。測定条件は、サンプリング周波数 2048Hz、低域通過フィルター 100Hz、高域通過フィルター 0.16Hz であった。基準電極は CMS とした。また、すべての測定は実験室において一定の環境下（室温 $22.2 \pm 0.7^\circ\text{C}$ 、湿度 $51 \pm 6\%$ ）で行い、頭皮-電極間のオフセット電圧は 262mV 以内とした状態で実施した。

2.2.3. 手続き

課題開始前にベースラインを測定するために開眼状態での安静（以下、開眼安静）を 300 秒間測定した。この間、実験参加者にはモニター画面上に表示した注視点（550×550 mm）に視点を固定するよう指示した。その後、暗算課題を行った。暗算課題は課題条件（ST, RT, KT）毎に 180 秒間のブロックを 2 ブロック行い、ブロック間には 90 秒の休憩を設けた。課題の実施順序は実験参加者内でカウンターバランスをとった。また、KT のみ 1 回目と 2 回目のブロックにおいてそれぞれ異なる計算記号を用いた（Figure 2.1）。各課題条件の開始前に 5 問の練習試行を設けた。暗算課題では、実験参加者に対して、手元に置かれたテンキーを用いて、制限時間の間に出来るだけ多くの問題を間違わずに行うことを教示した。また、実験参加者がテンキーによる入力に慣れていない可能性があったため、暗算課題開始前に約 60 秒間の練習期間を設けた。具体的には、実験参加者が入力したテンキーの種類を画面上に表示し（例えば、テンキーの“1”を入力した場合、画面上に“1”と表示される）、入力したテンキーが正しいかを確認した。

2.2.4. データ分析

記録した脳波は、脳波解析ソフト EMSE（Source Signal Imaging Inc. 製）を用いて解析を行った。解析に先立ち、4-30 Hz のバンドパスフィルター（減衰特性（12dB/oct））を使用し、目視により脳波波形および瞬目波形を同定した上で独立主成分分析（Jung, Makeig, McKeown, Bell, Lee, & Sejnowski, 2001）を実施して瞬目成分を分離した。その後、各条件における前後 50 秒間を除いた中間の 80 秒間を解析区間とし、その区間に対して 5 秒ずつ高速フーリエ変換（fast Fourier transform: FFT）を行い、計 16 個のデータを抽出し、加算平均した上で電位パワ値（ μV^2 ）を算出した。窓関数には hanning window を使用した。また、開

眼安静においても同様の解析を行った。その際、全ての解析においてFFTを実施する前に脳波波形から $100\ \mu\text{V}$ を超える区間は解析から除外した。算出した電位パワ値における θ 帯域 (4-7 Hz), α 帯域 (7-12 Hz), β 帯域 (13-30 Hz) の出現率を確認するため、4-30 Hz の電位パワから各周波数帯域の比率を算出した。また、開眼安静と比較した各課題条件時の脳波周波数の出現率を確認するため、開眼安静の電位パワから各課題条件の電位パワの比率を算出した。

暗算課題の課題難易度の設定を確認するため、各課題条件における180秒間の解答数、解答時間、正答率(正答数/解答数)のそれぞれに対してz得点を算出し、それらの平均を標準化係数として算出した。また、分析に先立ち、解答時間が0.15秒以内の解答については誤反応として除去した。

標準化係数の統計検定には課題条件(ST, RT, KT)を独立要因とした1要因3水準分散分析を行った。脳波周波数については、 θ 帯域, α 帯域, β 帯域それぞれに対して課題条件(開眼安静, ST, RT, KT)と電極部位(Fpz, Fz, Cz, Pz, Oz)を独立要因、脳波周波数の出現率を従属変数とした2要因分散分析を行った。また、開眼安静を基準とした脳波周波数の出現率についても、 θ 帯域, α 帯域, β 帯域それぞれに対して課題条件(ST, RT, KT)と電極部位(Fpz, Fz, Cz, Pz, Oz)を独立要因、出現率を従属変数とした2要因分散分析を行った。必要な場合にはChi-Mullerの ϵ による自由度修正を適用した。多重比較にはBonferroni法を用いた。統計分析における有意確率は5%未満とした。

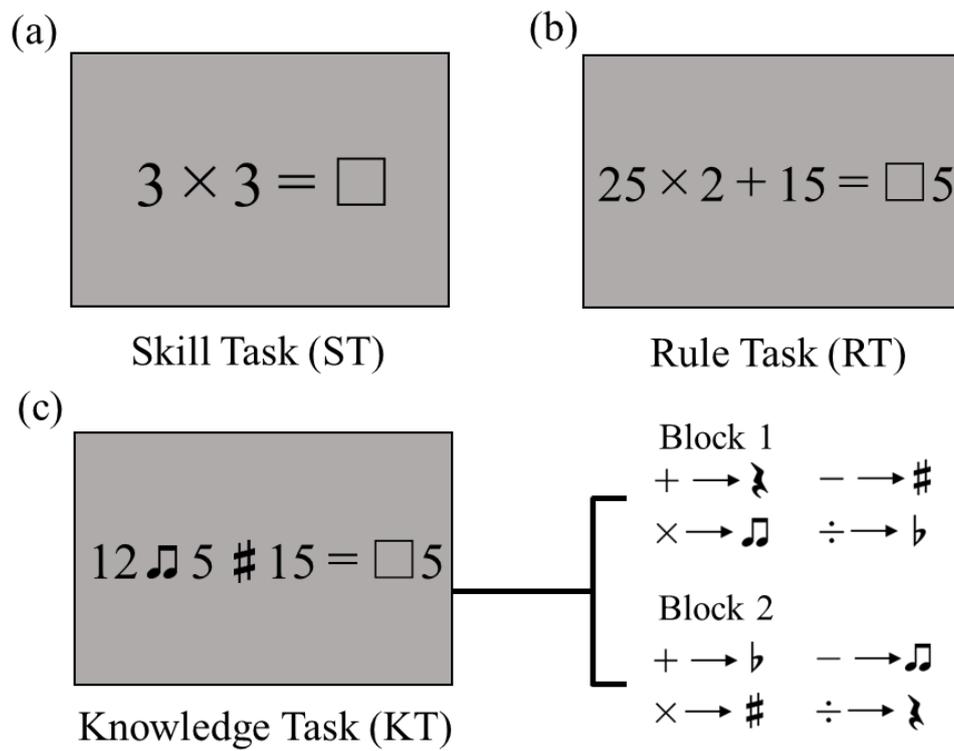


Figure 2.1. 実験課題の刺激例。

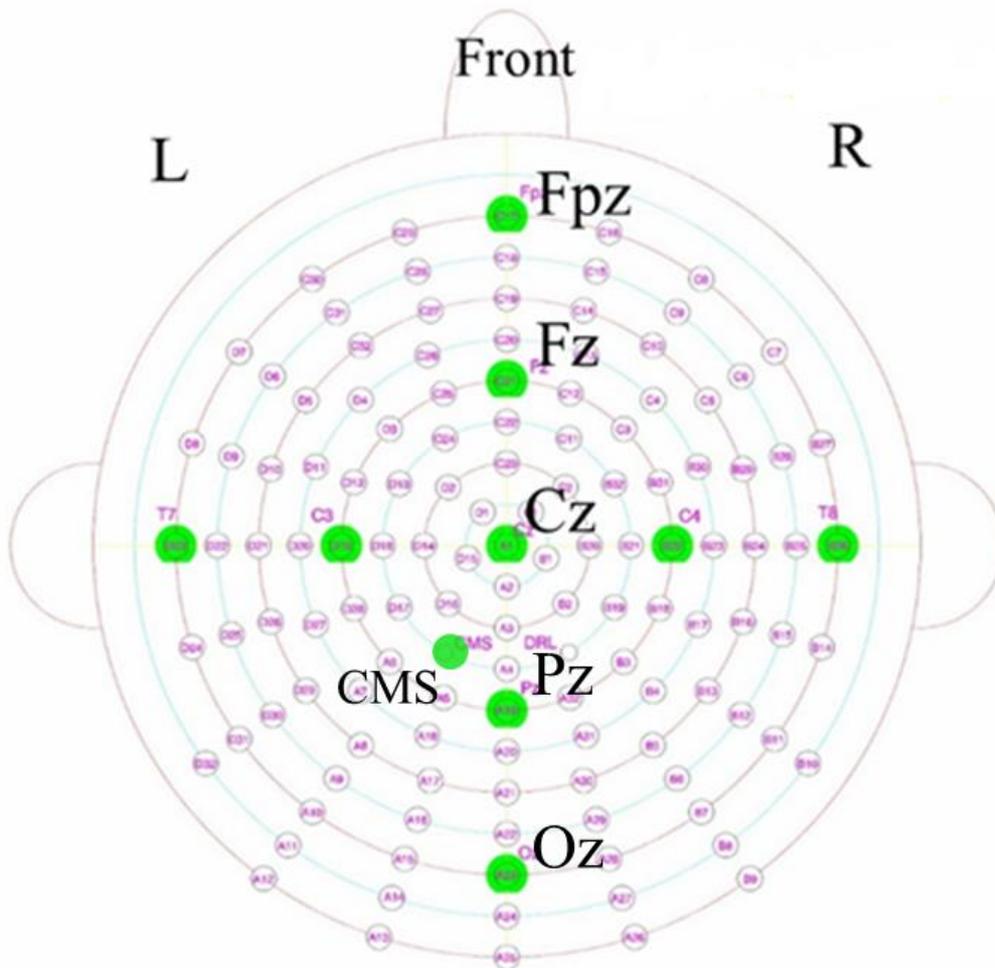


Figure 2.2. 128 チャンネルデジタル脳波計における電極配置図。

2.2. 結果

2.3.1. 行動パフォーマンス

Figure 2.3 に標準化係数の結果を示す。標準化係数は1要因3水準分散分析の結果、主効果が有意であった ($F(2, 18) = 243.88, p < .001, \eta_p^2 = .94$)。多重比較の結果、STがRT, KTより標準化係数が高く、RTもKTより標準化係数が高かった。

2.3.1. 脳波活動

脳波周波数 (4-30 Hz) を基準とした各周波数の出現率 開眼安静を含む各課題条件 (開眼安静, ST, RT, KT) における脳波周波数 (4-30Hz) の電位パワ値の平均を基準 (100%) とした θ 帯域 (4-7 Hz) の結果を Figure 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 に示す。 α 帯域 (7-13 Hz) の結果を Figure 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 に示す。 β 帯域 (13-30 Hz) の結果を Figure 2.12, 2.13 に示す。

θ 帯域 θ 帯域においては、課題条件 ($F(3, 51) = 16.86, p < .001, \epsilon = .77, \eta_p^2 = .50$) および電極部位 ($F(4, 68) = 30.90, p < .001, \epsilon = .49, \eta_p^2 = .65$) の主効果が有意であった。多重比較の結果、課題条件では開眼安静と比較して ST, RT, KT における出現率が高かった (Figure 2.4)。また、電極部位では Fpz と Fz の出現率が Cz, Pz, Oz より高く、Cz の出現率が Pz, Oz より高い結果となった (Figure 2.5)。

また、課題条件×電極部位の交互作用が有意であった ($F(12, 204) = 8.64, p < .001, \epsilon = .39, \eta_p^2 = .34$)。そこで、各課題条件における電極部位の要因について単純主効果検定を行ったところ、ST ($F(4, 272) = 28.05, p < .001, \epsilon = .49, \eta_p^2 = .62$)、RT ($F(4, 272) = 26.46, p < .001, \epsilon = .49,$

$\eta_p^2=.61$), KT ($F(4, 272)=38.68, p<.001, \epsilon=.49, \eta_p^2=.70$) が有意であった。多重比較の結果、ST では、Fpz と Fz の出現率が Cz, Pz, Oz より高く、Cz の出現率が Pz, Oz より高い結果となった。RT においても ST と同様に、Fpz と Fz の出現率が Cz, Pz, Oz より高く、Cz の出現率が Pz, Oz より高い結果となった。さらに、KT においても ST と同様に、Fpz と Fz の出現率が Cz, Pz, Oz より高く、Cz の出現率が Pz, Oz より高い結果となった (Figure 2.6)。また、各電極部位における課題条件の要因についても単純主効果検定を行ったところ、Fpz ($F(3, 255)=27.24, p<.001, \epsilon=.78, \eta_p^2=.62$), Fz ($F(3, 255)=24.24, p<.001, \epsilon=.78, \eta_p^2=.59$), Cz ($F(3, 255)=14.09, p<.001, \epsilon=.78, \eta_p^2=.45$) が有意であった。多重比較の結果、Fpz, Fz, Cz において、開眼安静より ST, RT, KT の出現率が高い結果となった (Figure 2.7)。

α 帯域 α 帯域においては、課題条件 ($F(3, 51)=30.60, p<.001, \epsilon=.58, \eta_p^2=.64$) および電極部位 ($F(4, 68)=3.89, p<.05, \epsilon=.38, \eta_p^2=.19$) の主効果が有意であった。多重比較の結果、課題条件では、開眼安静の出現率が ST, RT, KT より高かった (Figure 2.8)。電極部位では、Cz の出現率が Fpz, Fz より高く、Pz の出現率が Fpz より高く、Fz の出現率が Fpz より高い結果となった (Figure 2.9)。

また、課題条件×電極部位の交互作用が有意であった ($F(12, 204)=6.28, p<.001, \epsilon=.38, \eta_p^2=.27$)。そこで、各課題条件における電極部位の要因について単純主効果検定を行ったところ、ST ($F(4, 272)=5.73, p<.01, \epsilon=.38, \eta_p^2=.25$), RT ($F(4, 272)=3.42, p<.05, \epsilon=.38, \eta_p^2=.17$), KT ($F(4, 272)=6.85, p<.01, \epsilon=.38, \eta_p^2=.29$) が有意であった。多重比較の結果、ST では、Cz の出現率が Fz より高く、KT では、Cz の出現率が Fpz, Fz より高い結果となった (Figure 2.10)。また、各電極部位における課題条件の要因についても単純主効果検定を行ったところ、Fpz ($F(3, 255)=36.48, p<.001, \epsilon=.58, \eta_p^2=.68$), Fz ($F(3, 255)=36.89, p<.001, \epsilon=.58, \eta_p^2=.69$), Cz ($F(3, 255)=28.76, p<.001, \epsilon=.58, \eta_p^2=.63$), Pz ($F(3, 255)=17.60, p<.001, \epsilon=.58, \eta_p^2=.51$) が有意であった。多重比較の結果、Fpz, Fz, Cz, Pz において開眼安静の出現率が ST, RT, KT より高かった結果となった。(Figure 2.11)。

β 帯域 β 帯域においては、課題条件 ($F(3, 51)=5.50, p<.01, \epsilon=.99, \eta_p^2=.24$) および電極

部位 ($F(4, 68) = 16.28, p < .001, \epsilon = .39, \eta_p^2 = .49$) の主効果が有意であった。多重比較の結果、課題条件では、開眼安静と比較して ST, RT, KT における出現率が高かった (Figure 2.12)。電極部位では、Oz の出現率が Fpz, Fz, Cz, Pz より高く、Pz の出現率が Fpz, Fz, Cz より高く、Cz の出現率が Fpz, Fz より高い結果となった (Figure 2.13)。

また、課題条件×電極部位の交互作用が有意であった ($F(12, 204) = 3.60, p < .01, \epsilon = .53, \eta_p^2 = .18$)。そこで、各課題条件における電極部位の要因について単純主効果検定を行ったところ、ST ($F(4, 272) = 12.19, p < .001, \epsilon = .39, \eta_p^2 = .42$)、RT ($F(4, 272) = 16.73, p < .001, \epsilon = .39, \eta_p^2 = .50$)、KT ($F(4, 272) = 20.82, p < .001, \epsilon = .39, \eta_p^2 = .55$) が有意であった。しかし、多重比較の結果、有意な差はみられなかった。また、各電極部位における課題条件の要因についても単純主効果検定を行ったところ、Fpz ($F(3, 255) = 3.35, p < .05, \epsilon = .95, \eta_p^2 = .17$)、Fz ($F(3, 255) = 3.34, p < .05, \epsilon = .95, \eta_p^2 = .16$)、Cz ($F(3, 255) = 6.30, p < .001, \epsilon = .95, \eta_p^2 = .27$)、Pz ($F(3, 255) = 5.50, p < .001, \epsilon = .95, \eta_p^2 = .25$)、Oz ($F(3, 255) = 7.47, p < .001, \epsilon = .95, \eta_p^2 = .31$) が有意であった。しかし、多重比較の結果、有意な差はみられなかった。

開眼安静を基準とした各脳波周波数の出現率 θ 帯域 (4-7 Hz) の結果を Figure 2.14, 2.15, 2.16 に示す。 α 帯域 (7-13 Hz) の結果を Figure 2.17, 2.18 に示す。 β 帯域 (13-30 Hz) の結果については統計的有意差が認められなかったため示していない。

θ 帯域 θ 帯域においては、電極部位の主効果が有意であった ($F(4, 68) = 7.26, p < .01, \epsilon = .40, \eta_p^2 = .30$)。多重比較の結果、Fpz と Fz の出現率が Cz, Pz, Oz より高く、Cz の出現率が Pz より高い結果となった (Figure 2.14)。

また、課題条件×電極部位の交互作用が有意であった ($F(8, 136) = 4.76, p < .05, \epsilon = .29, \eta_p^2 = .22$)。そこで、各課題条件における電極部位の要因について単純主効果検定を行ったところ、RT ($F(4, 204) = 3.96, p < .05, \epsilon = .40, \eta_p^2 = .19$)、KT ($F(4, 204) = 14.38, p < .001, \epsilon = .40, \eta_p^2 = .46$) が有意であった。多重比較の結果、RT では有意な差はみられなかった。KT では、Fpz の出現率が Fz, Cz, Pz, Oz より出現率が高く、Fz の出現率が Cz, Pz より出現率が高い結果となった (Figure 2.15)。また、各電極部位における課題条件の要因についても単純主効果

検定を行ったところ、Fpz が有意であった ($F(2, 170)=12.28, p<.001, \epsilon=.94, \eta_p^2=.49$)。多重比較の結果、KT の出現率が ST, RT より出現率が高い結果となった (Figure 2.16)。

α 帯域 α 帯域においては、電極部位の主効果が有意であった ($F(4, 68)=3.87, p<.05, \epsilon=.49, \eta_p^2=.19$)。多重比較の結果、Oz の出現率が Fz, Cz, Pz より高い結果となった (Figure 2.17)。

また、課題条件×電極部位の交互作用が有意であった ($F(8, 136)=4.98, p<.001, \epsilon=.58, \eta_p^2=.23$)。そこで、各課題条件における電極部位の要因について単純主効果検定を行ったところ、ST が有意であった ($F(4, 204)=8.93, p<.001, \epsilon=.49, \eta_p^2=.34$)。多重比較の結果、Oz の出現率が Fpz, Fz, Cz より高い結果となった。また、各電極部位における課題条件の要因についても単純主効果検定を行ったところ、Pz ($F(2, 170)=4.16, p<.05, \epsilon=.43, \eta_p^2=.19$)、Oz ($F(2, 170)=7.53, p<.05, \epsilon=.43, \eta_p^2=.31$) が有意であった。多重比較の結果、有意な差はみられなかった (Figure 2.18)。

β 帯域 β 帯域においては、主効果および交互作用ともに有意な差はみられなかった。

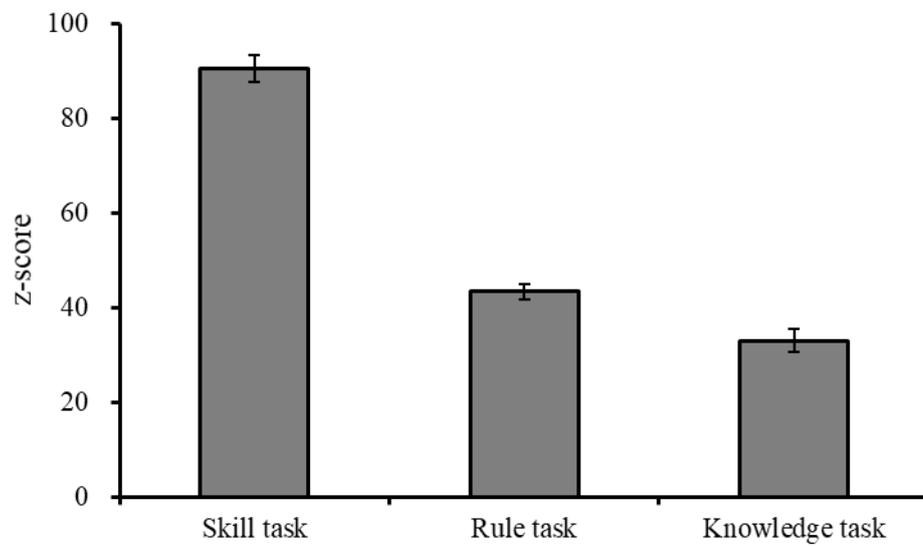


Figure 2.3. Skill task, Rule task, Knowledge task における行動パフォーマンスの標準化係数の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

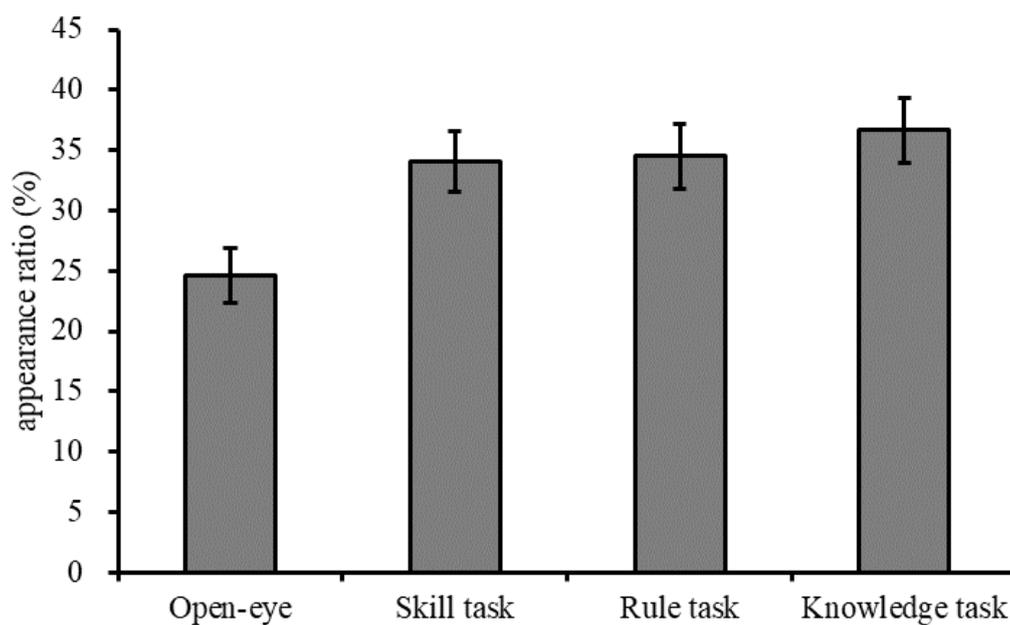


Figure 2.4. θ 帯域における課題条件ごとの出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

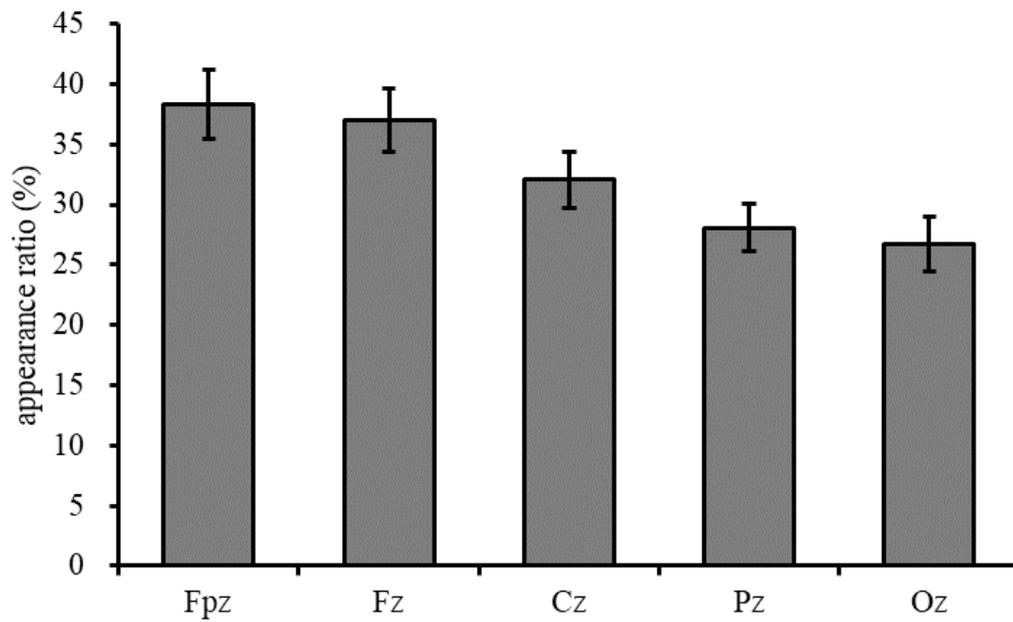


Figure 2.5. θ 帯域における電極ごとの出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

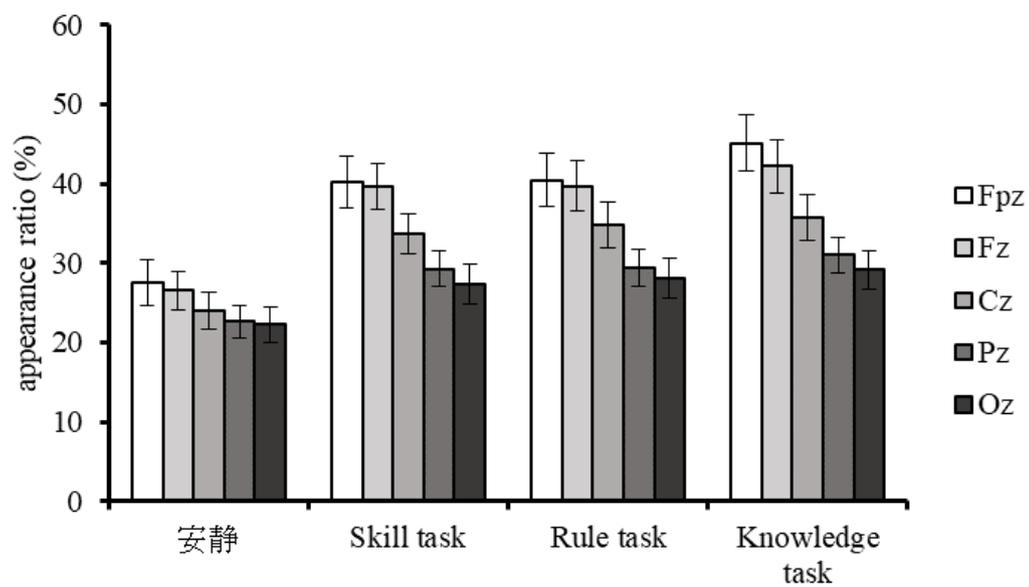


Figure 2.6. θ 帯域における課題ごとの電極の出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

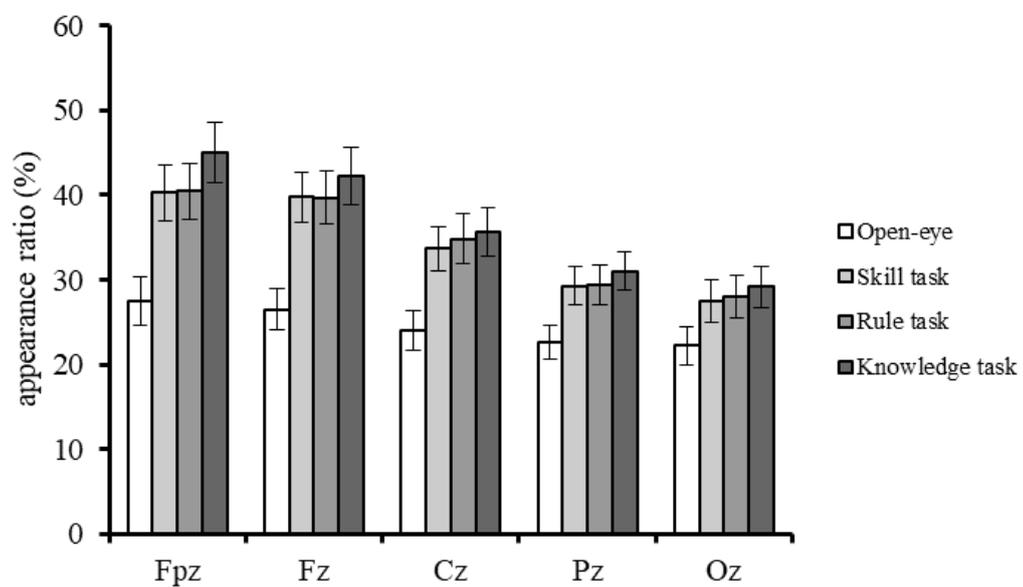


Figure 2.7. θ 帯域における電極ごとの課題の出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

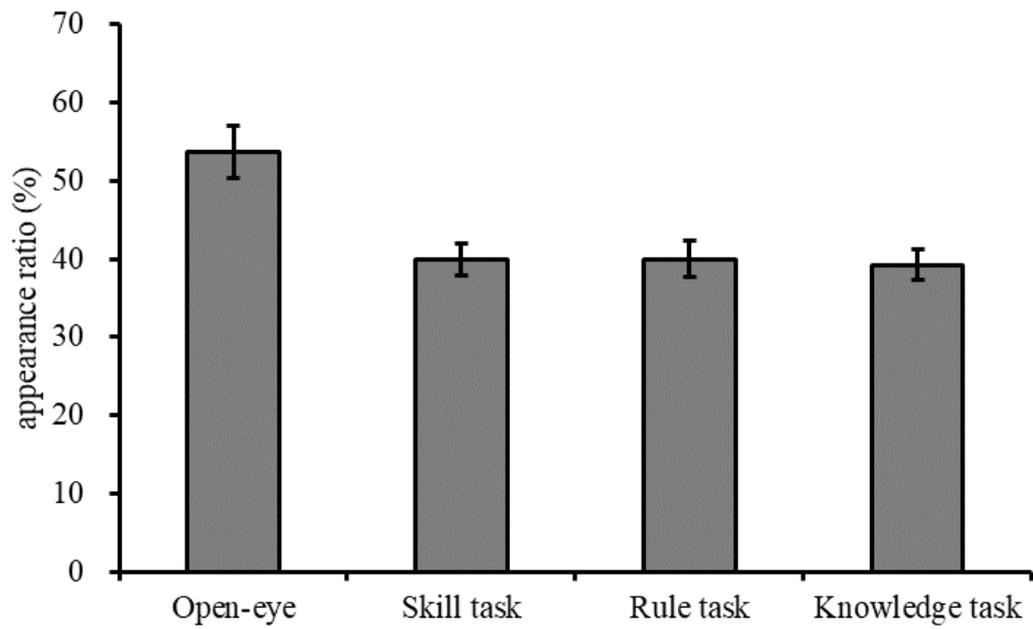


Figure 2.8. α 帯域における課題ごとの出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

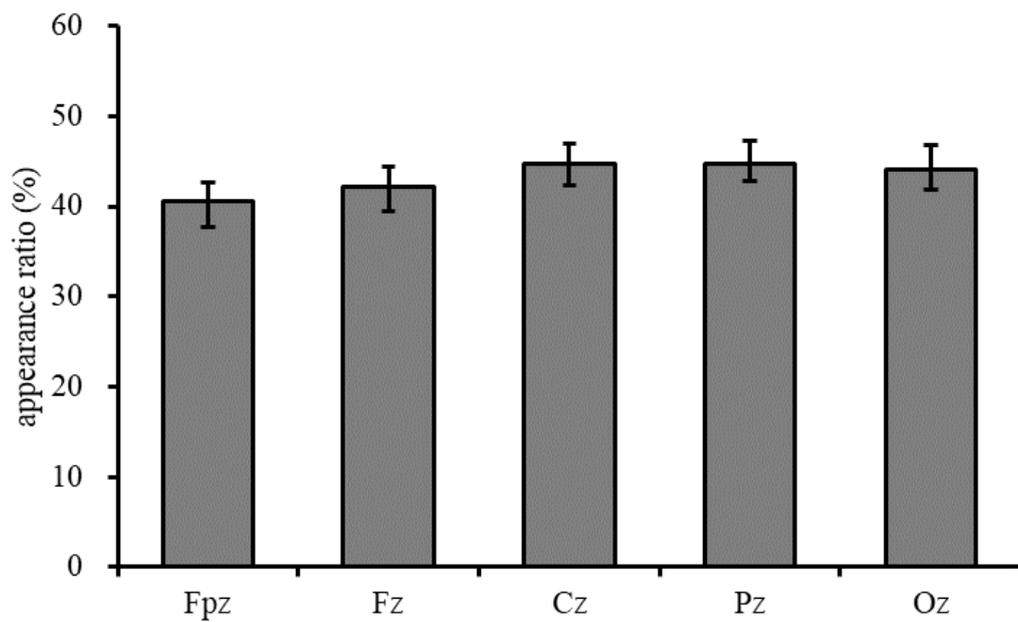


Figure 2.9. α 帯域における電極ごとの出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

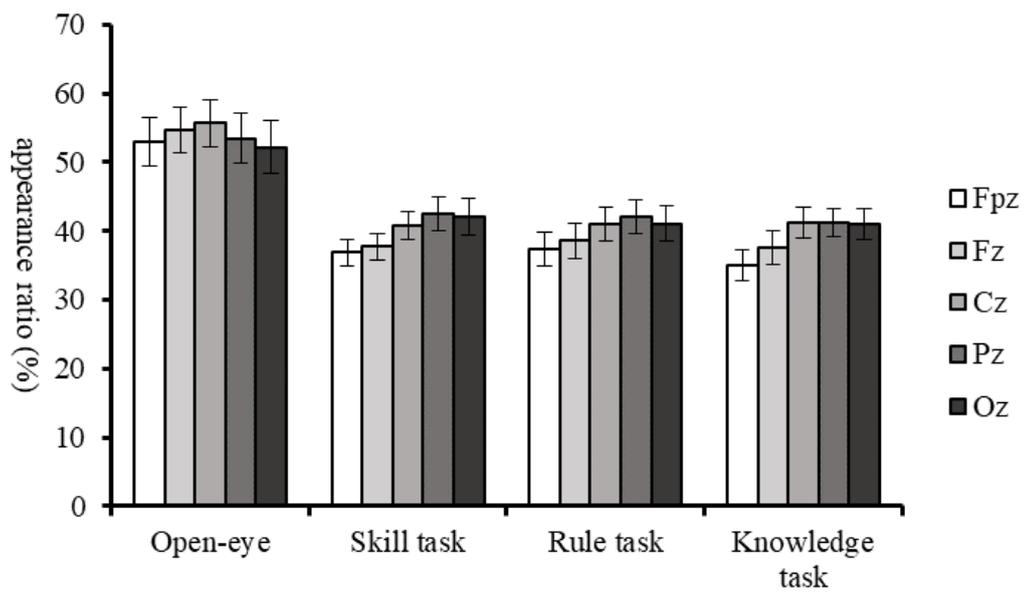


Figure 2.10. α 帯域における課題ごとの電極の出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

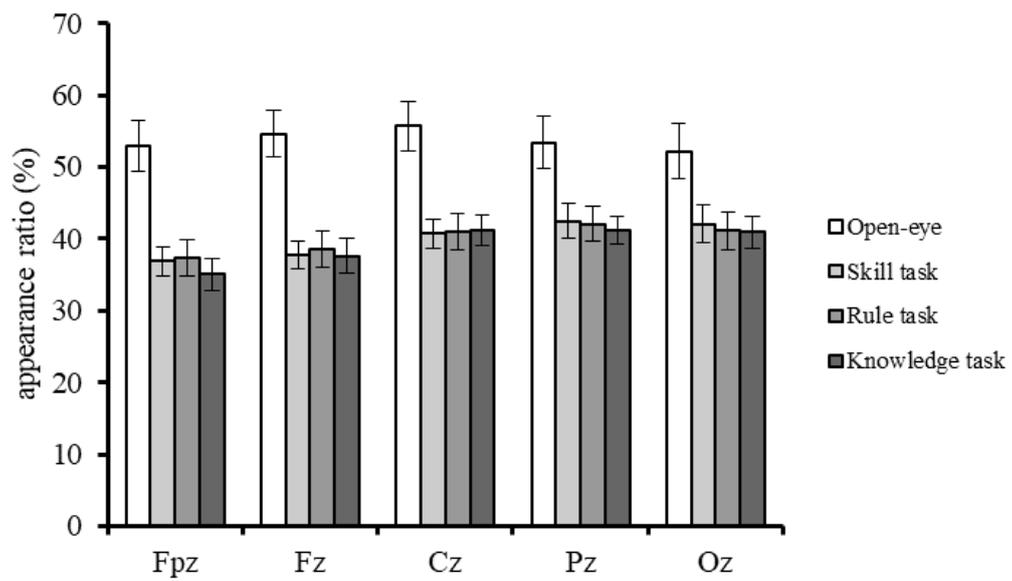


Figure 2.11. α 帯域における電極ごとの課題の出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

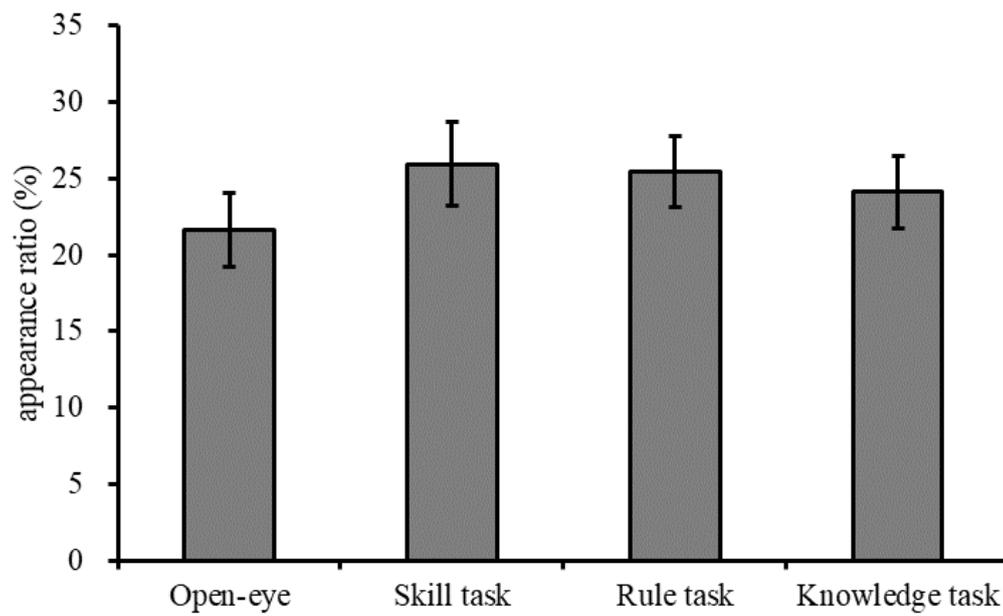


Figure 2.12. β 帯域における課題ごとの出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

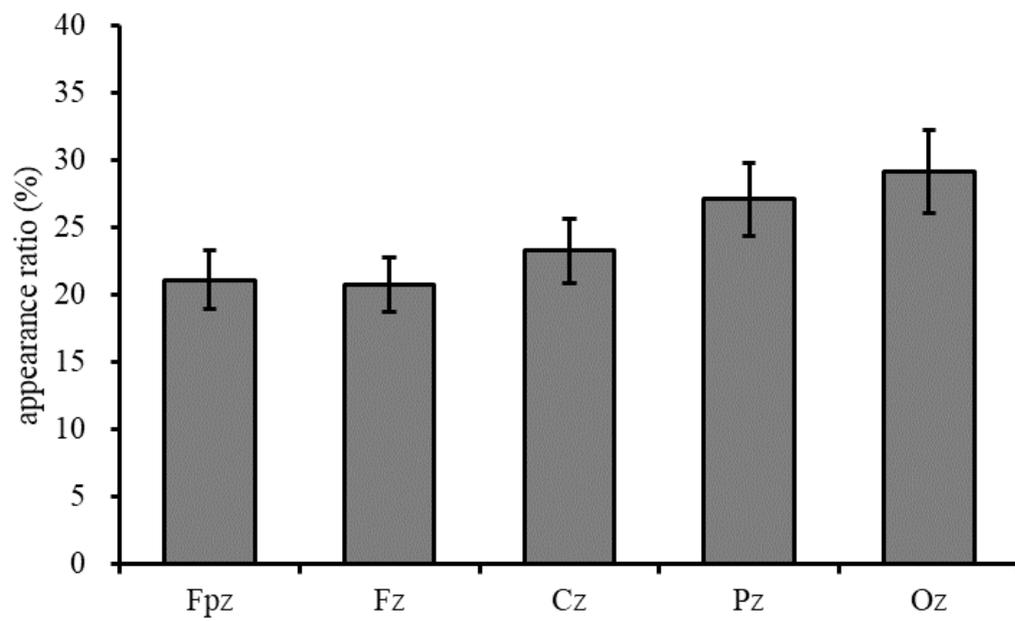


Figure 2.13. β 帯域における電極ごとの出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

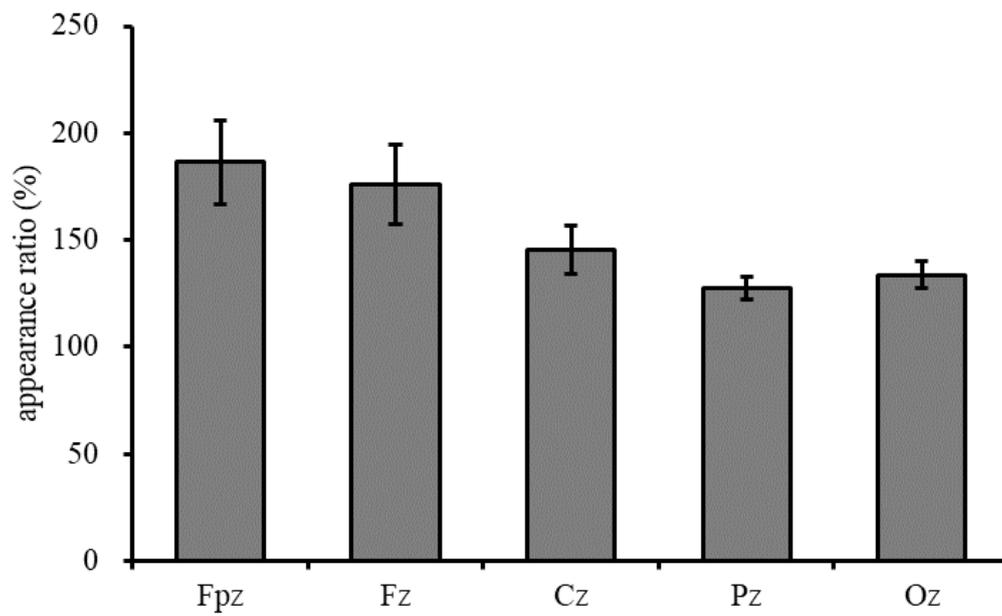


Figure 2.14. θ 帯域における開眼安静に基準とした電極ごとの出現率の平均と標準誤差。

エラーバーは標準誤差を示す。

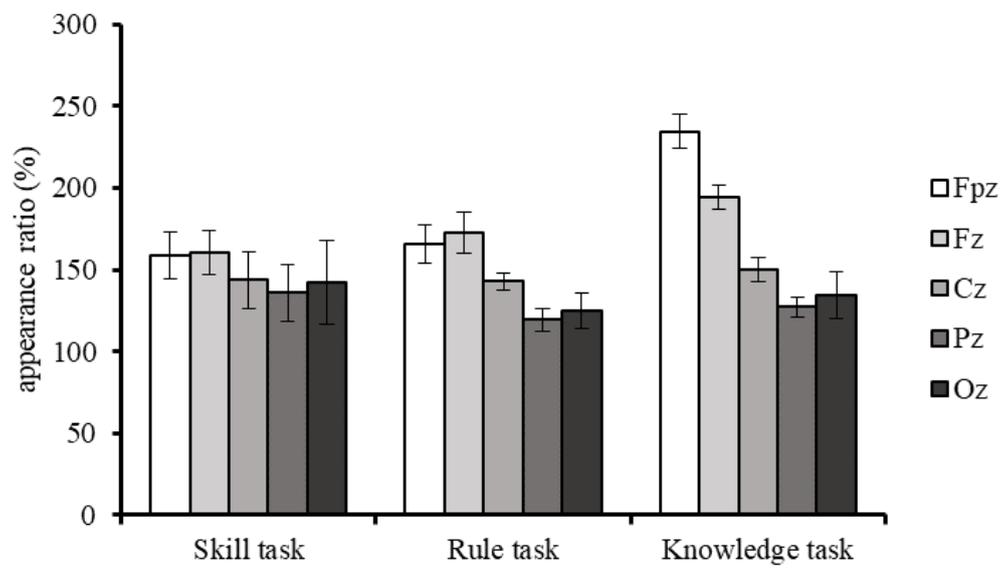


Figure 2.15. θ 帯域における開眼安静に基準とした課題ごとの電極の出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

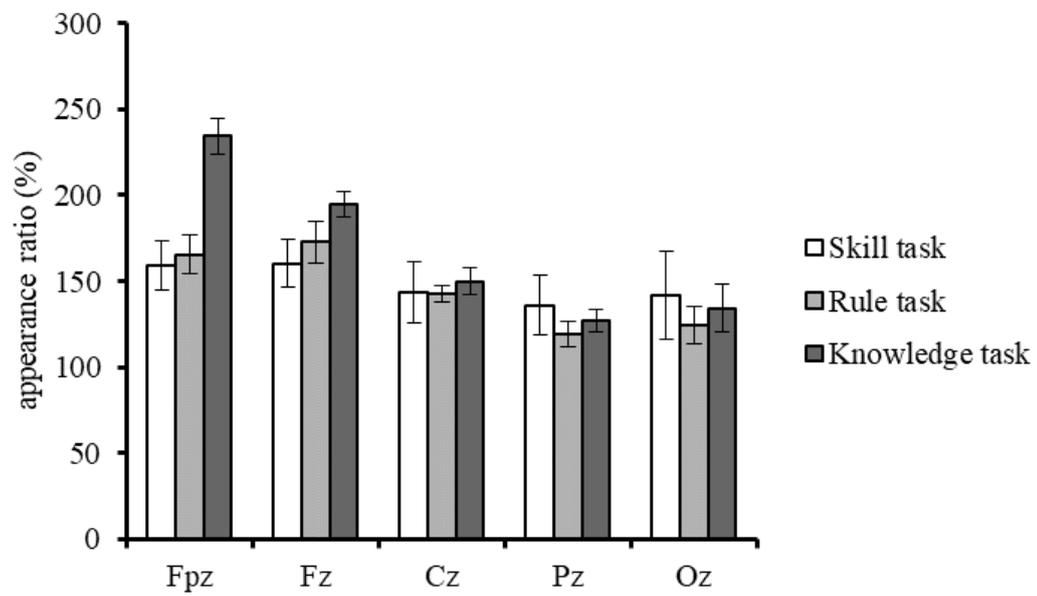


Figure 2.16. θ 帯域における開眼安静に基準とした電極ごとの課題の出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

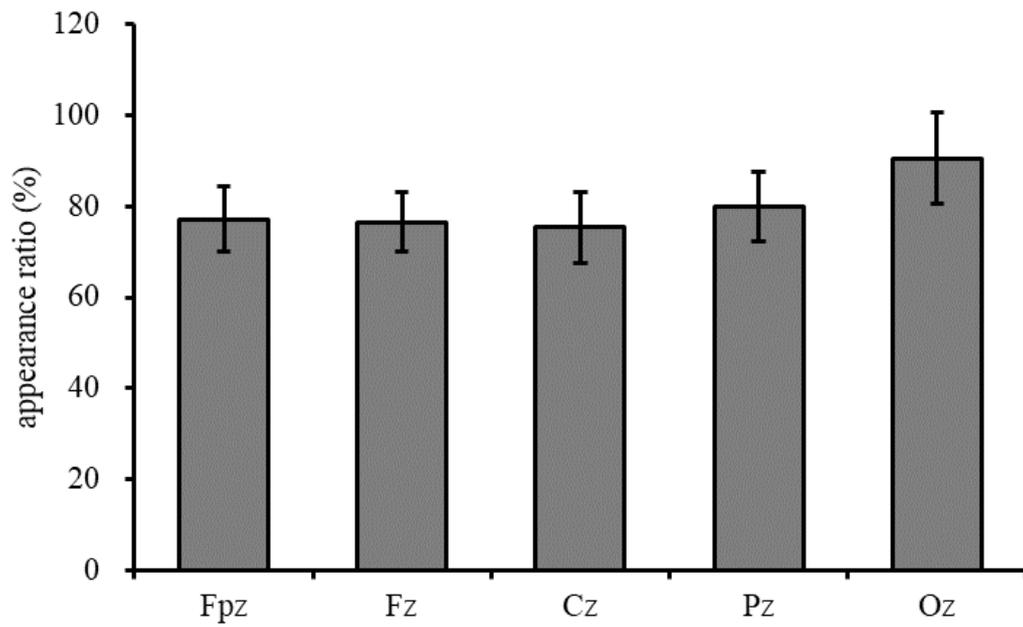


Figure 2.17. α 帯域における開眼安静に基準とした電極ごとの出現率の平均と標準誤差。
エラーバーは標準誤差を示す。

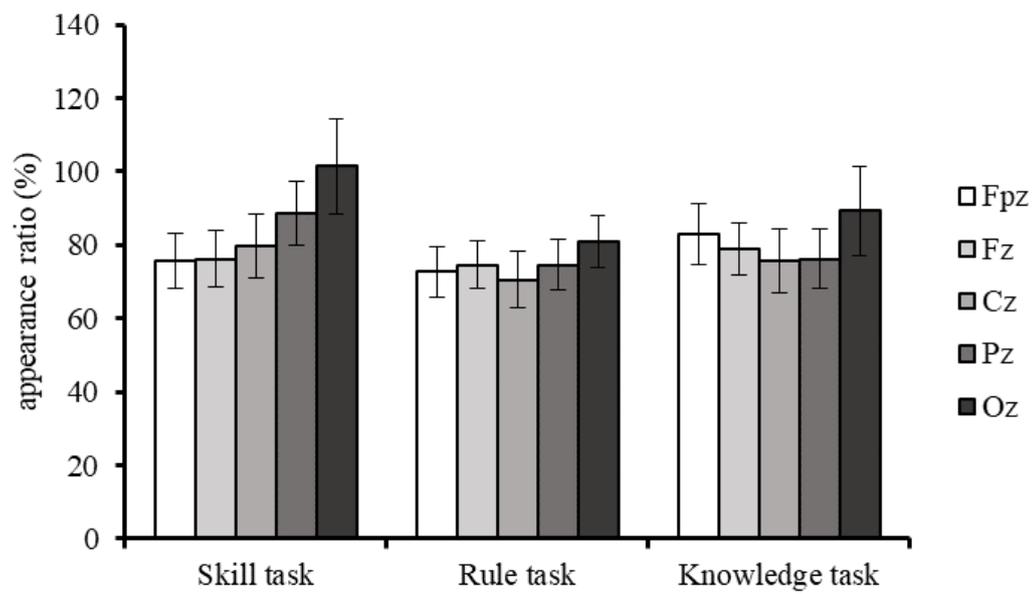


Figure 2.18. α 帯域における開眼安静に基準とした課題ごとの電極の出現率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

2.4. 考察

第2章の目的は、SRKモデルの認知制御レベルの違いが背景脳波に及ぼす影響について検討することであった。そのため、SRKモデルの認知制御レベルの特徴に基づいて、知識ベースの課題であるKT、ルールベースの課題であるRT、スキルベースの課題であるSTを作成し、検討を行った。

行動パフォーマンスの結果から、作成した暗算課題は、KT、RT、STの順で標準化係数の値が上昇した。SRKモデルの認知制御レベルは、知識ベース、ルールベース、スキルベースの順で行動パフォーマンスが上昇していく。したがって、この結果は、作成した暗算課題がSRKモデルの認知制御レベルの特徴と一致していることを示すと考えられる。一方で、第2章で行動パフォーマンスの指標とした標準化係数は、解答数、解答時間、正答率などを標準化した数値であるため、行動パフォーマンスにおけるこれらの要因については検討できていない。そのため、これら要因におけるパフォーマンスがSRKモデルの特徴と異なっている可能性が考えられる。今後は、行動パフォーマンスについて、個別に分類して検討していく必要があると考えられる。

脳波周波数全体(4-30 Hz)に対する θ 帯域(4-7 Hz)、 α 帯域(7-13 Hz)、 β 帯域(13-30 Hz)の出現率について、 θ 帯域と β 帯域では、開眼安静時と比較して暗算課題時に増加する傾向にあり、 θ 帯域では前頭部の電極において、 β 帯域では後頭部においてその傾向が顕著であった。前頭部における θ 帯域の活動は、認知制御を必要とする際に増大することが報告されている(Cavanagh et al., 2014)。また、 β 帯域は、短期記憶の維持に関連しており、記憶の保持に関連して、後頭部において活動が増大することが報告されている(Engel & Fries, 2010; Spitzer & Blankenburg, 2011; Spitzer, Wacker & Blankenburg, 2010)。一方、 α 帯域の出現率については、開眼安静時と比較して暗算課題中で減少した。 α 帯域は、安静時に優勢に出現することが知られているが(Berger, 1929)、認知的な作業によってERDを伴う

ことも報告されている (Kitamura, Nishida, Yoshimura, Mii, Katsura, Ueda, Ikeda, Pascual-Marqui, Ishii & Kinoshita, 2017; Pfurtscheller & Aranibar, 1977)。これらの知見から、各周波数帯域の活動は、開眼安静時と比較して暗算課題時における認知制御の必要性を反映して変動したことが示唆される。

θ 帯域について、課題条件ごとの電極部位間の比較では、KT, RT, ST において前頭部の電極の出現率が頭頂部および後頭部の電極より増加した。この結果は、認知制御時における前頭部 θ 帯域の活動と合致する (Cavanagh et al., 2014)。また、電極部位ごとの課題条件間の比較では、Fpz, Fz, Cz において θ 帯域の出現率が開眼安静時より暗算課題中において増加した。Fpz と Fz については、前頭部の電極であるため、先述の前頭部 θ 帯域の活動の増加と考えられるが、Cz については、頭頂部の電極であるため興味深い結果である。前頭部 θ 帯域の活動は、Fz を中心として限局して出現するため (山口, 1983a; 1983b; 1983c)、この活動が Cz における θ 帯域の出現率を増加させた可能性が考えられる。

α 帯域について、課題条件ごとの電極間の比較では、KT, ST において Cz の出現率が前頭部の電極より増加した。Kitamura et al. (2017) は、算術課題中に頭頂部の α 帯域の活動が減少することを報告しており、上述の結果と対照的である。ただし、Kitamura et al. (2017) は、 α 帯域を α_1 (8-10 Hz) と α_2 (10-12 Hz) に分類しており、頭頂部での活動の減少がみられたのは α_1 のみであると報告している。第2章では、 α 帯域を分類していないため、この結果については、今後検証が必要である。また、電極部位ごとの課題条件間の比較では、開眼安静の出現率が暗算課題時より増加した。この結果は、 α 帯域が安静時に優勢に出現するという報告 (Berger, 1929) と一致することを示唆する。

開眼安静を基準とした各脳波周波数帯域の出現率について、前頭部での θ 帯域の出現率は増加した一方で、 α 帯域の出現率は減少した。この結果は、同一周波数帯域内においても暗算課題時に前頭部における θ 帯域の活動の増加と α 帯域の活動の減少がみられることを示唆しており、認知制御時には、前頭部において θ 帯域の ERS と α 帯域の ERD を伴うという Klimesch (1999) の報告と一致する。

また、開眼安静を基準とした各脳波周波数帯域の出現率について、電極部位ごとに課題条件を比較したところ、前頭部における θ 帯域の出現率は、RT, STと比較してKTで最も増加した。知識ベースの認知制御は、新規や不慣れな状況において必要とされることから、ルールベースやスキルベースより認知負荷が高いとされている(Wirstad, 1988)。そのため、KTにおける θ 帯域の出現率の増加は、RTやSTと比較して、より制御的なプロセスを必要とした結果である可能性が考えられる。

他方、脳波周波数全体を基準とした θ 帯域の出現率は、開眼安静より暗算課題において増加したが、SRKモデルの認知制御レベルの違いによって変動しなかった。一方、開眼安静を基準とした θ 帯域の出現率では、前頭部の電極においてKTの出現率がRT, STより増加した。このことは、認知制御を必要とする際に、前頭部における θ 帯域の変動がSRKモデルの認知制御レベルの違いを反映する可能性を示唆している。

2.5. 結論

第2章では、SRKモデルに基づく認知制御レベルの違いが背景脳波の活動に及ぼす影響について検討するため、18名の男性を対象として実験を行った。そのため、第2章では、SRKモデルの認知制御レベルである知識ベース、ルールベース、スキルベースの特徴に基づいて、知識ベースの課題であるKT、ルールベースの課題であるRT、スキルベースの課題であるSTという3種類の暗算課題を作成した。背景脳波については、人間の基礎律動である θ 帯域(4-7Hz)、 α 帯域(8-12Hz)、 β 帯域(13-30Hz)の3つの脳波周波数を取り上げ、分析対象とした。また、作成した暗算課題の行動パフォーマンスについても分析を行った。

作成した暗算課題について、標準化係数を算出して分析した結果、課題の行動パフォーマンスは、KT、RT、STの順で上昇した。また、脳波について、全体の脳波周波数(4-30Hz)を基準として各脳波周波数の出現率を算出して分析した結果、 θ 帯域は、安静時と比較して課題時において出現率が高く、また後頭部より前頭部において出現率が高いことが示された。 α 帯域は、安静時と比較して課題時において減少し、前頭部より後頭部において出現率が高いことが示された。 β 帯域は、安静時と比較して課題時において出現率が高く、また前頭部より後頭部において出現率が高いことが示された。さらに、脳波について、安静時を基準とした各脳波周波数の出現率を算出して分析した結果、 θ 帯域の出現率のみが前頭部においてST、RTと比較してKTで高いことが示された。

これらの結果から、第2章で作成した暗算課題は、SRKモデルにおける認知制御レベルの特徴にある程度合致した課題であることが示された。また、脳波については、前頭部に出現する θ 帯域の活動がSRKモデルの認知制御レベルの違いによって変動する可能性が示唆された。

第3章

Skill-Rule-Knowledge モデルに基づく認知制御レベルの違いが前頭部 θ 帯域の活動に及ぼす影響²

² 第3章は, “川島哲史・依田麻子 (2020). 暗算課題における認知制御レベルの違いが前頭部 θ 帯域の活動に及ぼす影響——Skill-Rule-Knowledge モデルに基づいた検討——. *Health and Behavior Science*, 19, 1-8.” に掲載された。また, “川島哲史・依田麻子・依田光正 (2019). SRK モデルの認知制御レベルと前頭部 θ 帯域の活動における個人差の検討. *人間工学*, 55, 2B-3-5.” および “Kawashima, S., Yoda, A. (2019). The Effect of difference of cognitive control levels in SRK model on EEG frontal theta band. *Federation of the Asian and Oceanian Psychological Societies*, 1P-383.” において発表された。

3.1. 研究の背景および目的

第2章では、SRKモデルの認知制御レベルの違いによる脳波周波数の変動を検討した。その結果、 θ 帯域、 α 帯域、 β 帯域の活動は、安静時と比較して認知制御を必要とする暗算課題時に変動することが明らかとなった。また、こうした脳波周波数の変動は、暗算課題時における θ 帯域のERSと α 帯域のERDにおいて特徴的であった。さらに、脳波周波数帯域の中でも、特に前頭部における θ 帯域の変動が、SRKモデルにおける認知制御レベルの違いを反映する可能性が示唆された。

第1章で述べたように、前頭部 θ 帯域は、認知制御に関連して出現する脳活動として知られている (Cavanagh et al., 2009; Cavanagh & Frank, 2014; Cavanagh et al., 2012; Cohen, 2011; Cohen & Cavanagh, 2011; Gratton et al., 2017)。前頭部 θ 帯域の活動は、認知制御に際して重要な脳領域であるACCを由来とした活動であることが示唆されており (Gevins et al., 1997; Debener et al., 2005)、エラー検出やモニタリングに対して、活動が活性化することが報告されている (Cavanagh & Frank, 2014; Cavanagh et al., 2012)。第2章において、前頭部 θ 帯域の活動が、SRKモデルの知識ベースの認知制御を必要とするKTにおいて最も増大したことは、知識ベースの認知制御の特徴である問題解決型のプロセスを反映している可能性も考えられる。例えば、Ryu, Choi, Kim, Kim & Chio (2016)は、単純な感覚運動課題と比較して問題解決を伴うボードゲームの実施中に前頭部 θ 帯域の活動が増大することを報告している。そこで、第3章では、脳波周波数の中でも前頭部における θ 帯域に焦点を当てた検討を行う。

他方、 θ 帯域の周波数帯域は、慣習的には4-7 Hzとされているが (大熊ら, 2016; 堀, 2008)、前頭部 θ 帯域については、報告された研究によってそれぞれ対象としている周波数帯域が異なっており、統一されていない。Mazaheri & Picton (2005)では、脳波周波数のスペクトルは、実験課題や実験参加者によって変動することから、慣習的な固定された周波

第3章
Skill-Rule-Knowledge モデルに基づく認知制御レベルの違いが
前頭部 θ 帯域の活動に及ぼす影響

数帯域を設定するのではなく、研究ごとに適切な帯域を設定する必要があることを指摘している。実際、前頭部 θ 帯域の研究においても初期の研究では、6-7 Hz 付近の周波数帯域が活性化し、6-6.5 Hz にピークがみられることを報告している (Pellouchoud, Smith, McEvoy & Gevins, 1999; 山口, 1983a, 1983b, 1983c; Yamaguchi, Tsuda & Asada, 1990)。このことから、第3章では、前頭部 θ 帯域の周波数帯域にも着目して検討を行う。

また、第2章では、作成した暗算課題について、行動パフォーマンスの評価が標準化係数による検討のみであった。そのため、第3章では、第2章で作成した課題について、解答数や正答率といった個々の要因についても行動パフォーマンスの評価を行う。

3.2. 方法

3.2.1. 実験参加者

本実験への参加者は健常な男性 18 名（平均年齢 20.8 ± 1.76）であった。すべての実験参加者は右利きであり、裸眼もしくは矯正視力において本実験の課題遂行に支障のない視力を有していた。実験に先立ち、実験参加者には実験内容の概要を説明し、実験参加への同意を書面によって得た。

また、本実験はヘルシンキ宣言に則って実施し、実験に先立って日本大学文理学部研究倫理委員会による承認を受けた（承認番号 29-64）。

3.2.2. 実験装置・実験刺激

本研究では、実験課題を 24 インチディスプレイモニター（HP 社製 V243）に呈示した。リフレッシュレートは 60 Hz であった。実験課題は Psychopy ver.1.85.4 を用いて作成し、制御した。すべての実験は座位状態で行い、モニターとの視距離は約 40 cm であった。実験参加者の反応はテンキーにより取得した。

実験課題は、川島と依田（2018）で作成した暗算課題を使用した。この課題は、SRK モデルにおける認知制御レベルの特徴を基に作成されており、認知制御レベルが異なる ST, RT, KT という 3 種類の暗算課題から構成されている（Figure 2.1）。詳細については、第 2 章 2.2.2 の実験装置・刺激に記述しているため、省略する。

脳波は、多チャンネルデジタル脳波計 Active Two（BIOSEMI 社製）を用いて頭皮上 128 チャンネルから測定した（Figure 2.2）。測定条件は、サンプリング周波数 2,048 Hz, 低域通

過フィルター100 Hz, 高域通過フィルター0.16 Hz であった。基準電極は Common Mode Sence (CMS) とした。また, すべての測定は実験室において一定の環境下 (室温 22.2 ± 0.7 °C, 湿度 $51 \pm 6\%$) で行い, 頭皮-電極間のオフセット電圧を 262 mV 以内とした状態で実施した。

3.2.3. 手続き

本研究の実験プロトコルを Figure 3.1 に示す。課題開始前にベースラインとなる脳活動を測定するために開眼状態での安静 (以下, 開眼安静) を 180 秒間測定した。この間, 実験参加者に対して, モニター画面上に表示された注視点 (550×550 mm) を注視するように指示した。その後, 暗算課題を行った。暗算課題は課題条件 (ST, RT, KT) 毎に 180 秒間ずつ実施し, 課題間には 90 秒の休憩を設けた。すべての暗算課題は, 呈示された問題に解答するとただちに次の問題が呈示されるように設定し, 解答に関するフィードバックは行わなかった。課題の実施順序は, 実験参加者内でカウンターバランスをとった。また, 各課題条件の開始前に 5 問の練習試行を設けた。

暗算課題では, 実験参加者に対して, 手元に置かれたテンキーを用いて制限時間内に出来るだけ多くの問題を間違わずに解答するように教示を行った。また, 実験参加者がテンキーによる入力に慣れていない可能性があったため, 暗算課題開始前にテンキー入力に対する練習期間を設けた。具体的には, 実験参加者が入力したテンキーの種類を画面上に表示し (例えば, テンキーの “1” を入力した場合, 画面上に “1” と表示される), 正しい入力できていたかを確認した。

3.2.4. データ分析

記録した脳波は、脳波解析ソフト EMSE Suite Data Editor 5.6.0 (Source Signal Imaging Inc. 製) を用いてオフラインで解析を行った。解析に先立ち、すべての脳波データはサンプリング周波数を 2,048 Hz から 512 Hz にダウンサンプリングを行い、基準電極を CMS から 128 ヶ所の平均基準導出に変更した。その後、2-40 Hz のバンドパスフィルター (減衰特性 (12 dB/oct) および 49-51 Hz のバンドストップフィルター (減衰特性 (12 dB/oct) を使用し、目視により瞬目として同定したエポックを独立成分分析 (Independent component analysis: ICA) (Jung et al., 2001) を用いて原波形から分離した。その後、開眼安静および各課題に対して、課題開始後および課題終了前の各 10 秒間を除いた 160 秒間に対して、5 秒間の時間窓 (周波数分解能 0.2 Hz) で高速フーリエ変換 (Fast fourier transform: FFT) を実施した。FFT は、窓関数に hanning window を使用し、50% のオーバーラップ処理を行った。また、解析に際して、 $\pm 100 \mu\text{V}$ を超える時間窓は解析から除外した。FFT により得られたデータは、加算平均した上でパワースペクトラムに変換し、パワースペクトラム密度 (Power spectral density: PSD) (μV^2) を算出した。

次に、分析対象とする周波数区間を決定するため、実験参加者全員について、暗算課題中における θ 帯域 (4-8 Hz) の PSD をグランドアベレージして確認したところ、5.4-8.0 Hz をピークとする周波数活動がみられた (Figure 3.2) ため、第3章では、5.4-8.0 Hz を θ 帯域周波数帯域として分析を行った。その後、 θ 帯域 (5.4-8.0 Hz) に対して、課題条件ごと (開眼安静, ST, RT, KT) に実験参加者全員の PSD をグランドアベレージし、頭皮上トポグラフィを作成した。

暗算課題におけるパフォーマンスを確認するため、課題条件 (180 秒間) ごとの解答数、解答時間、正答数、正答率 (正答数/解答数) を算出した。また、分析に先立ち、解答時間が 0.15 秒以内の解答については尚早反応として除去した。

行動指標の検定は、課題条件 (ST, RT, KT) を独立変数、解答数、解答時間、正答数、

正答率をそれぞれ従属変数とした 1 要因 3 水準分散分析を行った。

θ 帯域の検定は、Fz の電極部位に対して、PSD (μV^2) から開眼安静を基準とした各課題条件の相対電力 (dB) (以下、 θ パワー) を算出し、課題条件を独立変数、 θ パワーを従属変数とした 1 要因 3 水準分散分析を行った。

すべての統計分析は、必要な場合には Chi-Muller の ϵ による自由度修正を行い、多重比較には Bonferroni 法を用いた。有意水準は 5%未満に設定した。

3.3. 結果

3.3.1. 行動パフォーマンス

Figure 3.3 に解答数, Figure 3.4 に解答時間, Figure 3.5 に正答数, Figure 3.6 に正答率の結果を示す。解答数は主効果が有意であり ($F(2, 34) = 175.32, p < .01, \eta_p^2 = .91$), 多重比較の結果, ST の解答数が RT, KT より多く ($ps < .001$), RT の解答数も KT より多かった ($p < .001$)。解答時間は主効果が有意であり ($F(2, 34) = 130.30, p < .001, \eta_p^2 = .89$), 多重比較の結果, ST の解答時間が RT, KT より短く ($ps < .001$), RT の解答時間も KT より短かった ($p < .001$)。正答数は主効果が有意であり ($F(2, 34) = 172.69, p < .001, \eta_p^2 = .91$), 多重比較の結果, ST の正答数が RT, KT より多く ($ps < .001$), RT の正答数も KT より多かった ($p < .001$)。正答率は主効果が有意であり ($F(2, 34) = 15.66, p < .001, \eta_p^2 = .48$), 多重比較の結果, ST の正答率が RT, KT より高かったが ($ps < .001$), RT と KT の正答率に差はみられなかった。

3.3.2. 脳波活動

開眼安静及び各課題条件における θ 帯域の頭皮上トポグラフィーを Figure 3.7 に示す。 θ 帯域における頭皮上トポグラフィーは, すべての条件において前頭部正中線上に局限した活動がみられた。

θ 帯域における統計分析の結果を Figure 3.8 に示す。分析の結果, 主効果が有意であり ($F(2, 34) = 3.73, p < .05, \epsilon = .79, \eta_p^2 = .18$), 多重比較の結果, KT における θ 帯域の活動が RT, ST より高かった ($ps < .05$) が, ST と RT の間に差はみられなかった。

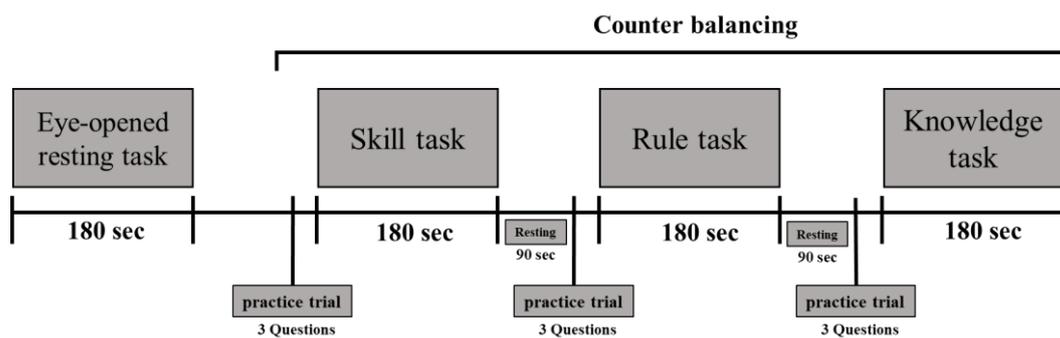


Figure 3.1. 実験プロトコル

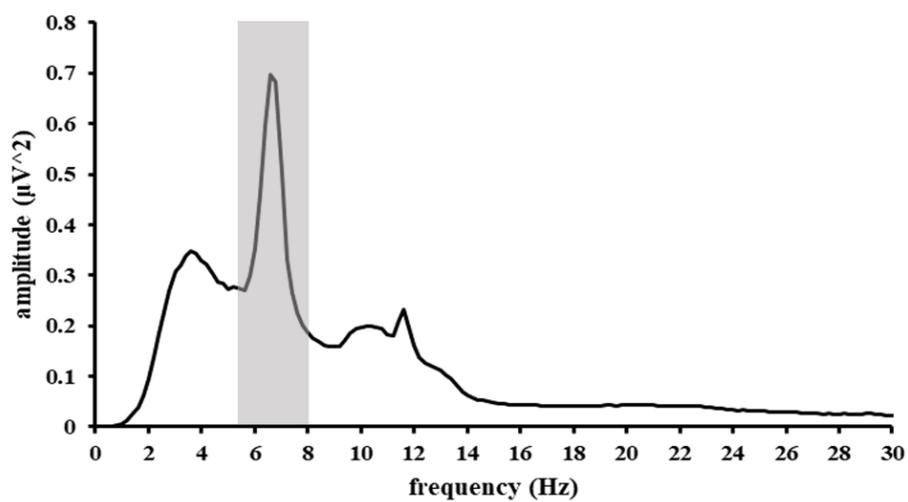


Figure 3.2. 実験課題中の脳波周波数のパワースペクトル。図中の灰色の範囲は、 θ 帯域においてピークがみられた周波数帯域 (5.4-8.0 Hz) を示す。

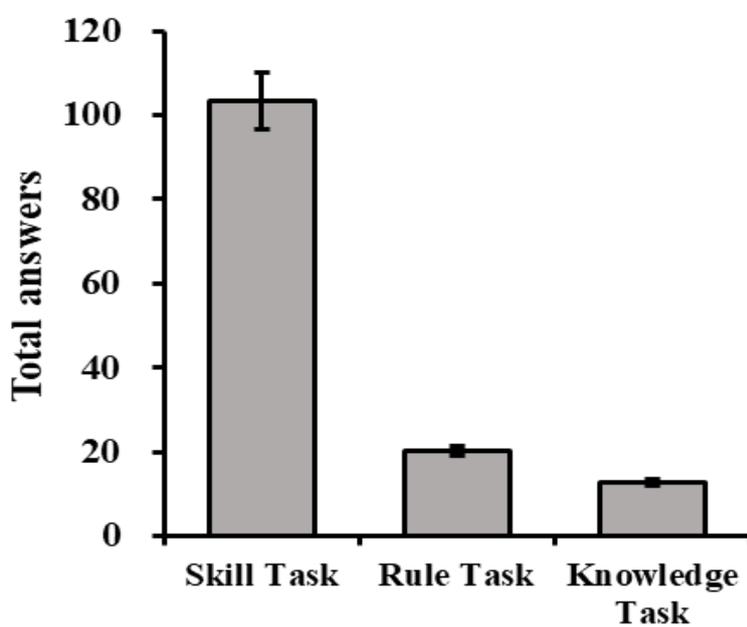


Figure 3.3. 実験課題ごとの解答数の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

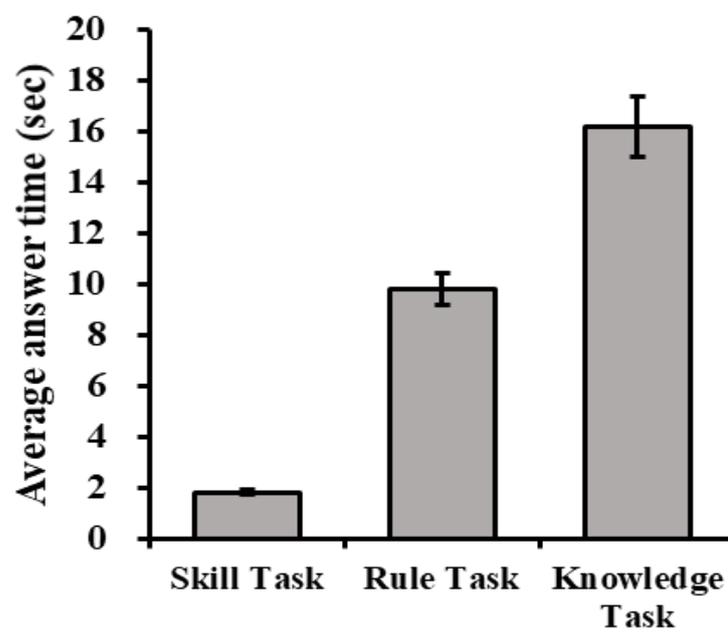


Figure 3.4. 実験課題ごとの解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

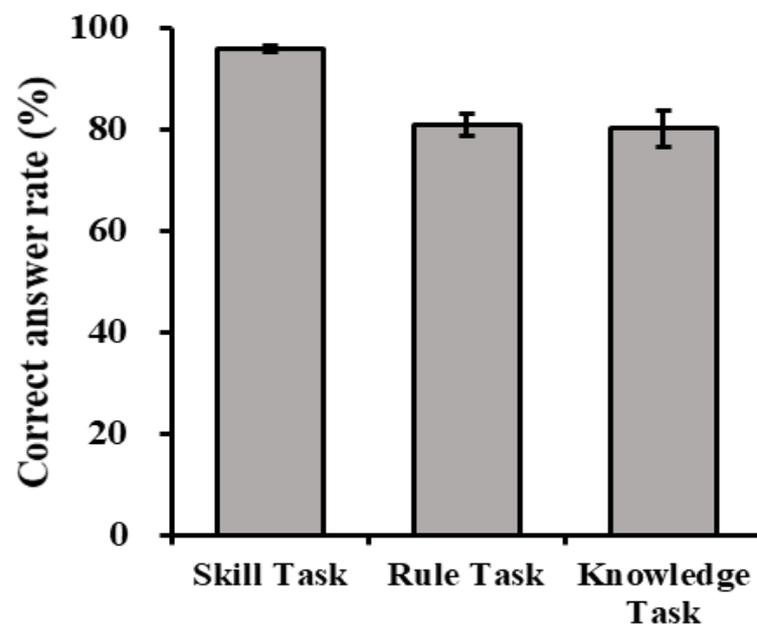


Figure 3.5. 実験課題ごとの正答率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

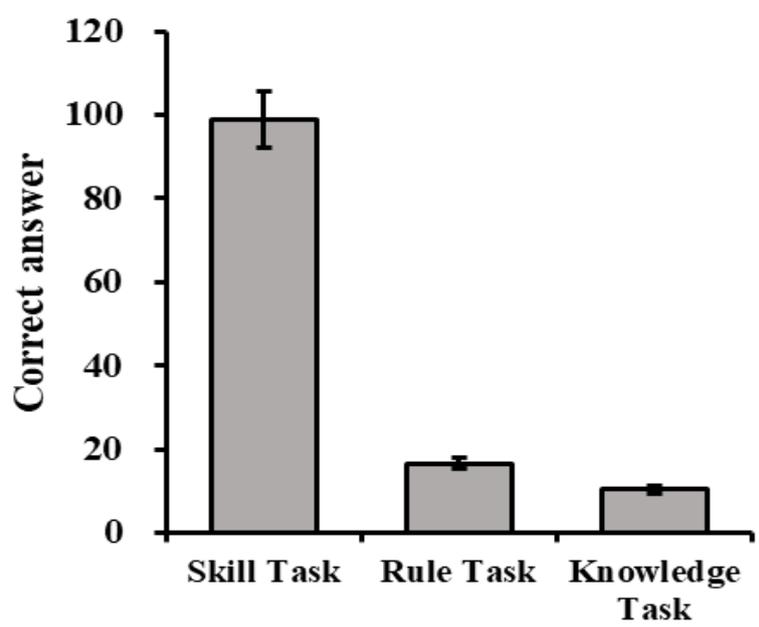


Figure 3.6. 実験課題ごとの正答数の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

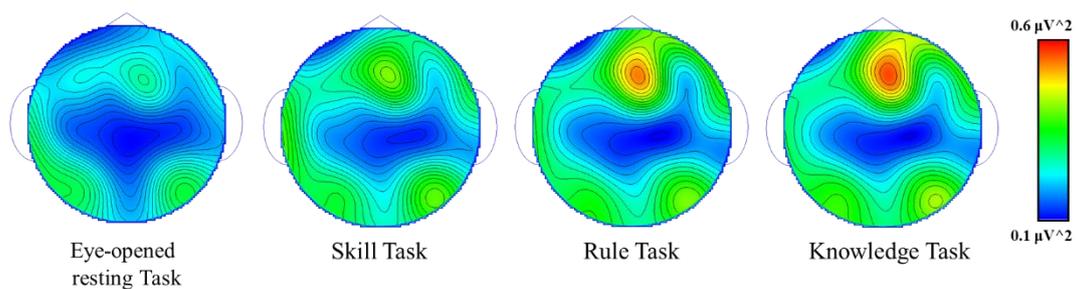


Figure 3.7. 開眼安静時および実験課題時における θ 帯域 (5.4-8.0 Hz) の頭皮上トポグラフィ。図中のカラーバーは電位パワ値 (μV^2) を示す。

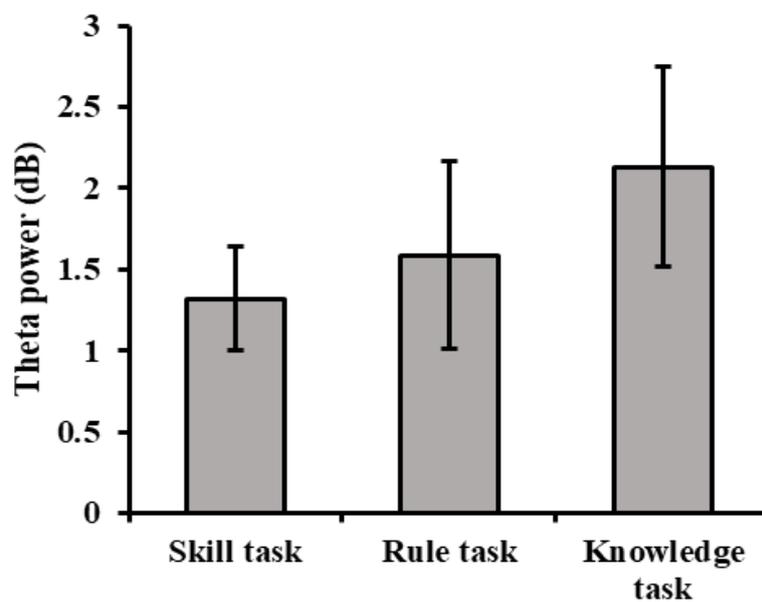


Figure 3.8. θ 帯域 (5.4-8.0 Hz) における課題ごとの θ パワーの平均と標準誤差。エラーバーは、標準誤差を示す。

3.4. 考察

第3章では、第2章で得られた知見から、脳波周波数帯域の中でも前頭領域における θ 帯域の活動に着目して検討を行った。

暗算課題中の脳波活動について、Fz の電極を対象として、FFT の結果をパワースペクトラム変換し、 θ 帯域の PSD を確認したところ、5.4-8.0 Hz の周波数帯域に顕著な活動がみられた。また、活動のピークは 6.6 Hz 付近であった。この結果は、初期の前頭部 θ 帯域の研究の知見 (Pellouchoud et al., 1999; 山口, 1983a, 1983b, 1983c; Yamaguchi et al., 1990) とほぼ一致するが、下限と上限の周波数帯域については、多少範囲が広がった。このことは、前頭部 θ 帯域の活動は、従来、慣習的に設定されてきた θ 帯域の帯域幅 (4-7 Hz) とは異なる周波数帯域で活性化する可能性を示唆している。すなわち、慣習的な θ 帯域の帯域幅に則って分析を実施した場合に、前頭部 θ 帯域の活動が不明瞭となる可能性がある。したがって、前頭部 θ 帯域の活動を分析する際は、事前に FFT など周波数帯域を確認するか、6.6 Hz をピークとした周波数帯域を設定する必要があるかもしれない。

行動パフォーマンスの結果について、解答数および正答数は、ST, RT, KT の順で減少した。また、解答時間についても同様の順で遅延した。これらの結果は、行動パフォーマンスが知識ベース、ルールベース、スキルベースの順で低下していく SRK モデルの特徴と一致する。したがって、第2章で示された実験課題の妥当性が再確認されたと考えられる。しかしながら、正答率については、疑問が残る結果となった。正答率は、ST が RT, KT より高い値であったが、RT と KT の間に差はみられなかった。SRK モデルの特徴に基づいた場合、RT より KT の正答率が低くなるはずである。このことは、実験前の教示と実験課題の特性が関係している可能性が考えられる。第3章では、制限時間内に出来るだけ多くの問題を間違わずに解答するように教示を行った。反応時間における速さと正確さはトレードオフであることが知られており (Wickelgren, 1977)、教示によりその両方を実験参加者に

求めてしまった可能性がある。また、第3章で使用した実験課題は、SRKモデルの認知制御レベルに基づいて作成されていることから、課題の難易度がST, RT, KTの順で高くなると考えられる。これらのことから、実験参加者は、RTにおいては速さを重視し、KTにおいては正確さを重視するという実験課題の種類により異なる方略を用いていたかもしれない。

θ 帯域における頭皮上トポグラフィーは、すべての課題条件で前頭部正中線上に局限した活動を示した。この結果は、前頭部 θ 帯域の先行研究 (Cavanagh et al., 2009; Cavanagh & Frank, 2014; Cavanagh et al., 2012; Cohen, 2011; Cohen & Cavanagh, 2011; Gratton et al., 2017) と一致するものであり、これらの活動が先行研究と同様の現象であることを示唆する。

前頭部 θ 帯域の活動については、KTの θ パワーがRT, STより高い値であった。この結果は、第2章における安静状態を基準とした θ 帯域の出現率の結果とも一致する。したがって、SRKモデルの認知制御レベルに基づいた場合に、前頭部 θ 帯域の活動は、知識ベースで最も増大し、スキルベースで最も減少する傾向を示すと考えられる。一方で、第2章と同様に第3章においても前頭部 θ 帯域の活動は、RTとSTの間に差がみられなかった。Rasmussen (1986) では、スキルベースとルールベースの関係性について、“スキル・ベースとルール・ベースのパフォーマンスの境界は、あまりはっきりしていない。多くは個人の訓練レベルと注意とに依存している” (pp.119) と述べられている。一般的には、訓練レベルが上がるにつれて認知制御の必要性は低下していくと考えられるため、前頭部 θ 帯域の活動も訓練レベルが上がるにつれて減少していくはずである。このことは、学習と前頭部 θ 帯域の活動の関係を検討したいくつかの研究によって支持されている (Crivelli-Decker et al., 2018; Pathania et al., 2019)。SRKモデルにおいて、技能獲得の最終段階はスキルベースであるとされている。このため、技能獲得の初期段階は知識ベースとなり、中間段階がルールベースとなると考えられる。上述の結果から、前頭部 θ 帯域の活動は、技能獲得の初期段階である知識ベースで最大となり、最終段階であるスキルベースで最少となることを考えると、技能獲得の中間段階であるルールベースでは、前頭部 θ 帯域の活動は、

実験課題への習熟の程度によって変動するのかもしれない。

本研究と同様に SRK モデルと脳活動の関係を検討した研究に Borghimi et al. (2017) がある。Borghimi et al. (2017) では、航空交通管制官を対象とした訓練シミュレーション中の実験から、知識ベースおよびルールベースの課題は、スキルベースの課題と比較して前頭部 θ 帯域の活動が増大するが、知識ベースおよびルールベースの課題の間には差がみられないことを報告している。本研究と Borghimi et al. (2017) の結果が異なる点は、前頭部 θ 帯域の活動において、ルールベースの課題がスキルベースの課題と差がみられるか、もしくは知識ベースの課題と差がみられるかである。一方、結果が共通する点は、スキルベースの課題と知識ベースの課題の間に差がみられることである。すなわち、ルールベースにおける前頭部 θ 帯域の活動が、スキルベース寄りであるか、もしくは知識ベース寄りであるかに違いがみられる。そして、この結果の相違は、実験課題における実験参加者の習熟度に依存している可能性が考えられる。本研究では、実験参加者は大学生以上を対象していることから ST および RT の内容には習熟しているが KT の内容には不慣れであると考えられる。一方、Borghimi et al. (2017) の実験参加者は航空交通管制官であるが、その内訳は熟練者(航空交通管制官のライセンス取得者) 15名と非熟練者(専門学校生) 22名であり、非熟練者の割合が多い。また、Borghimi et al. (2017) では、非熟練者において知識ベースの課題の達成率が低いこと、全体の平均としての前頭部 θ 帯域の活動も知識ベースとルールベースの課題の間にほとんど差がみられなかったことから、実験参加者はルールベースおよび知識ベースの課題への習熟度が同程度であったことが予想される。これらのことから、本研究の結果と Borghimi et al. (2017) の結果を考慮すると、ルールベースにおける前頭部 θ 帯域の活動は、課題への習熟度が低い場合では知識ベース寄りに、課題への習熟度が高い場合ではスキルベース寄りの活動に変動すると推測される。

他方、前頭部 θ 帯域の発生源である ACC は、行動の遂行におけるエラー検出とモニタリングに重要な脳領域とされている (Banich, 2009)。ACC の活動は、エラーの可能性が高いほど増大することが報告されており (Banich, 2009; Milham et al., 2002)、練習に伴うパフォ

パフォーマンスの上昇により活動が減少することが報告されている (Milhan et al., 2003)。このことから、KTにおける前頭部 θ 帯域の活動の増大は、エラー検出をモニタリングしていたことに関連する可能性がある。一方、RTとSTについては、実験参加者の属性と行動パフォーマンスの結果から実験課題の内容にある程度習熟していたと考えられるため、前頭部 θ 帯域の活動がKTと比較して抑制されたのかもしれない。

一方で、第3章の結果は、3種類の実験課題を用いた課題間の比較であるために課題ごとの質や強度が異なっている可能性も考えられる。また、本研究では、解答へのフィードバックを実施していないため、実験参加者は実際にエラー検出をモニタリングできていたかは不明である。このため、今後は前頭部 θ 帯域の活動について、フィードバックも含めた単一の実験課題における課題内の経時的変化を検討していく必要があると考えられる。

3.5. 結論

第3章では、SRK モデルに基づく認知制御レベルの違いが前頭部 θ 帯域の活動に及ぼす影響について検討するため、18名の男性を対象に検討を行った。そのため、前頭部正中線上の電極である Fz を対象として FFT を実施し、 θ 帯域の周波数帯域を特定した上で詳細な分析を行った。また、第2章で作成した SRK モデルの認知制御レベルの特徴に基づいた3種類の暗算課題 (KT, RT, ST) についても解答数、解答時間、正答数、正答率といった個別のパフォーマンスを算出し、分析を行った。

その結果、暗算課題のパフォーマンスについて、解答数、解答時間、正答率は KT, RT, ST の順でパフォーマンスが上昇したが、正答率は ST が最も高い一方で RT と KT の間に差はみられなかった。また、Fz の電極位置を対象とした FFT 分析の結果、前頭部 θ 帯域の活動は、5.4-8.0 Hz の周波数帯域で顕著であった。さらに、この周波数帯域について分析を行った結果、前頭部 θ 帯域の活動は KT において RT, ST より増加したが、RT と ST の間に差はみられなかった。

これらの結果から、前頭部 θ 帯域の活動は、慣習的な θ 帯域の周波数帯域である 4-7 Hz ではなく、5.4-8.0 Hz の周波数帯域において顕著であることが示された。また、この周波数帯域における前頭部 θ 帯域の活動は、知識ベースで最も増加し、スキルベースで最も減少するが、ルールベースについては課題への習熟度によって変動する可能性が示唆された。

一方で、第3章において実験課題として使用した3種類の暗算課題は、質や強度が異なっていた可能性があり、そうした要因が正答率の結果に影響していたことが考えられる。したがって、単一の実験課題に用いた課題内の経時的な変化を検討することが今後の課題として残った。

第4章

課題の習熟による行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響

—Skill-Rule-Knowledge モデルに基づいた検討—³

³ 第4章は，“川島哲史・伊藤 栞・依田麻子 (2020). 課題の習熟に伴う生理的反応の変化に対する縦断的検討（1）—前頭部 θ 帯域からの検討—. 生理心理と精神心理学, 印刷中.” および“伊藤 栞・川島哲史・依田麻子 (2020). 課題の習熟に伴う生理的反応の変化に対する縦断的検討（2）—心拍数・呼吸数からの検討—. 生理心理と精神心理学, 印刷中.” において発表された。

4.1. 研究の背景および目的

第 3 章では、SRK モデルの認知制御レベルの違いが脳活動に与える影響について、前頭部 θ 帯域の活動に着目した検討を行った。その結果、前頭部 θ 帯域の脳波周波数は、慣習的な θ 帯域の周波数帯域である 4-7 Hz ではなく、5.4-8.0 Hz の周波数帯域で活動を示し、ピークが 6.6 Hz にあることが明らかとなった。また、頭皮上トポグラフィーの結果から、第 3 章でみられた前頭部 θ 帯域の活動は、先行研究と同様のものであることが示された。さらに、前頭部 θ 帯域の活動は、知識ベースで最も増大し、スキルベースで最も減少するが、ルールベースにおいては、課題への習熟の程度によって知識ベース寄り、もしくはスキルベース寄りに変動する可能性が示唆された。

一方で、第 3 章ではいくつかの課題点も残った。1 つ目として、難易度の異なる課題に対して速さと正確さを求める教示を行ったことで正答率の結果が不明瞭 (KT と RT の正答率に差がみられなかった) となった可能性が挙げられる。第 3 章では、実験課題として、第 2 章で作成した 3 種類の暗算課題を使用した。これらの暗算課題は、SRK モデルの認知制御レベルの特徴に基づいて作成したために課題ごとの難易度が異なると考えられる。速さと正確さはトレードオフであることが知られている (Wickelgren, 1977)。そのため、実験参加者は KT と RT で、それぞれ異なる方略を用いていた可能性がある。例えば、課題難易度の最も高い KT では正確さを優先し、ある程度慣習的な課題である RT では速さを優先したかもしれない。2 つ目として、実験課題に対する実験参加者の習熟度を統制できていなかった点が挙げられる。第 3 章では前頭部 θ 帯域の活動の結果の解釈として、課題の習熟の程度によって変動する可能性を挙げた。一方で、第 3 章では、難易度が異なる暗算課題を用いた課題間の比較から検討を行ったため、実験参加者が使用した暗算課題に対してどの程度習熟していたかは不明であった。

そこで、第 4 章では、上記の問題点を踏まえて、単一の実験課題を用いて、その習熟の

過程における行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響について検討を行う。具体的には、第 2 章で作成した暗算課題の内、知識ベースの課題である KT を実験課題として、その習熟の過程における前頭部 θ 帯域の活動を検討する。また、KT の習熟の度合い確認するため、RT と ST との比較も行う。さらに、実験参加者の主観的な課題難易度を測定するため質問紙による評価も実施した。

4.2. 方法

4.2.1. 実験参加者

本実験への参加者は健常な男性 10 名（平均年齢 24.10 ± 3.25）であった。すべての実験参加者は右利きであり、裸眼もしくは矯正視力において本実験の課題遂行に支障のない視力を有していた。実験に先立ち、実験参加者には実験内容の概要を説明し、実験参加への同意を書面によって得た。また、本実験はヘルシンキ宣言に則って実施し、実験に先立って日本大学文理学部研究倫理委員会による承認を受けた（承認番号 01-16）。

4.2.2. 実験装置・実験刺激

SRK モデルに基づいた認知制御の効率化を検討するために 3 回の測定を実施した。各測定は実験参加者の都合を考慮した上で、3-7 日の間を空けて実施した。

実験課題として、川島・依田（2018）で作成した SRK モデルの認知制御レベルの特徴に基づいた暗算課題を使用した（Figure 4.1）。実験課題の内容は、2 章の 2.2.2 方法に記述しているため、詳細は省略する。以下に、実験課題の変更点を記述する。まず、KT で使用した記号を変更した（Figure 4.1 を参照）。また、KT で呈示される問題について、30 問の問題リストを作成し、このリストの中から問題が呈示されるように変更した。

実験課題は 24 インチディスプレイモニター（HP 社製 V243）に呈示し、モニターとの視距離は約 40 cm であった。実験制御は Psychopy ver.1.85.4 で行い、反応はテンキーを用いて取得した。

脳波は多チャンネルデジタル脳波計 Active Two（BIOSEMI 社製）を用いて頭皮上 64 チ

チャンネルから測定した (Figure 4.2)。測定条件は、サンプリング周波数 2048 Hz, ローパスフィルター 100 Hz, ハイパスフィルター 0.16 Hz であった。基準電極は Common Mode Sense (CMS) とした。また、すべての測定は実験室において一定の環境下 (室温 22.2 ± 0.7 °C, 湿度 51 ± 6 %) で行い、頭皮-電極間のオフセット電圧を 262 mV 以内とした状態で実施した。

4.2.3. 手続き

Figure 4.3 に実験プロトコルを示す。実験は、実験室内においてひじ掛け付き椅子に座位状態で実施した。すべての暗算課題の開始前にベースラインとなる脳活動を測定するために開眼状態での安静 (以下, 開眼安静) を 180 秒間測定した。この間, 実験参加者に対してモニター画面上に表示された注視点 (550×550 mm) を注視するように指示した。その後, 暗算課題を実施した。暗算課題について, 1 回目の測定では, KT の実施後に RT, ST を実施した。その際, RT と ST の実施順序は実験参加者ごとにカウンターバランスをとった。2 回目と 3 回目の測定は, KT のみ実施した。暗算課題に際して, 実験参加者には, 手元に置かれたテンキーを用いて呈示された問題を出来るだけ早く間違わずに解答するように指示した。3 問の練習試行後, ST は 180 秒間実施し, RT と KT は 10 問を 1 セットとして 3 セット実施した。RT と KT については, セット間に 90 秒の休憩をとった。各暗算課題では, 問題の解答後直ちに次の問題が呈示され, 解答に対する正否のフィードバックは行わなかった。また, 解答を 30 秒以内に入力できなかった場合は不正解と判定して直ちに次の問題を呈示した。

各課題の終了後, 質問紙を用いて実験課題に対する主観的課題難易度を 7 件法にて回答を求めた。項目のラベルは, 7 “非常に難しかった”, 6 “かなり難しかった”, 5 “難しかった”, 4 “どちらでもない”, 3 “簡単だった”, 2 “かなり簡単だった”, 1 “非常に簡単だった”

た”であった。質問紙は、1回目の測定では、ST, RT, KTの3種類について回答を求め、2回目と3回目では、KTのみ回答を求めた。

各測定の間（1~2回目の間、2~3回目の間）にはKTの練習期間を設けた。実験参加者には、1回目の測定終了後に実験時と同様の課題（KT）のプログラムが入ったUSBメモリーを配布し、PC上で課題を練習するように指示した。このプログラムでは問題の解答後に○と×による正否のフィードバックを行った。練習は、1~2回目の期間では6回の練習を、2~3回目の期間では6回以上の練習を行うように指示した。また、練習については、一夜漬けなど詰込みによる暗記を防ぐため、1~2回目では1日2回、2~3回目では1日3回までとし、なるべく静かな環境で集中して実施するように指示した。

4.2.4. データ分析

記録した脳波は、脳波解析ソフト EMSE Suite Data Editor 5.6.0（Source Signal Imaging Inc. 製）を用いてオフラインで解析を行った。解析に先立ち、すべての脳波データはオフラインでサンプリング周波数を 2048 Hz から 512 Hz にダウンサンプリングし、基準電極を CMS から 64ヶ所の平均基準導出に変更した。その後、2-40 Hz のバンドパスフィルター（減衰特性 12 dB/oct）および 49-51 Hz のバンドストップフィルター（減衰特性 12 dB/oct）を使用し、目視により瞬目として同定したエポックを独立成分分析（Independent component analysis: ICA）（Jung et al., 2001）を用いて原波形から分離した。その後、開眼安静および各課題に対して、5秒間の時間窓（周波数分解能 0.2 Hz）で高速フーリエ変換（Fast fourier transform: FFT）を実施した。FFTは、窓関数に hanning window を使用し、50%のオーバーラップ処理を行った。また、解析に際して、 $\pm 100 \mu\text{V}$ を超える時間窓は解析から除外した。FFTにより得られたデータは、加算平均した上でパワースペクトラムに変換し、パワースペクトラム密度（Power spectral density: PSD）（ μV^2 ）を算出した。算出した PSD は、川島・

依田 (2020) を参考に、 θ 帯域 (5.4-8.0 Hz) について、Fz の電極部位を対象として、開眼安静を基準とした各課題の相対電力 (dB) (以下、 θ パワー) を実験参加者ごとに算出した。

課題のパフォーマンスを確認するため、総課題実施時間、解答時間、正答率 (正答数 / 解答数) を算出した。また、分析に先立ち、150 msec 以下の解答については尚早反応として除去した。

総課題実施時間については、測定回数 (1 回目, 2 回目, 3 回目) を独立変数とした 1 要因 3 水準の分散分析を行った。解答時間、正答率、主観的難易度、 θ パワーについては測定回数 (1 回目, 2 回目, 3 回目, RT, ST) を独立変数とした 1 要因 5 水準の分散分析を行った。すべての統計分析は、必要な場合には Chi-Muller の ϵ による自由度調整を行い、多重比較には Holm 法を用いた。

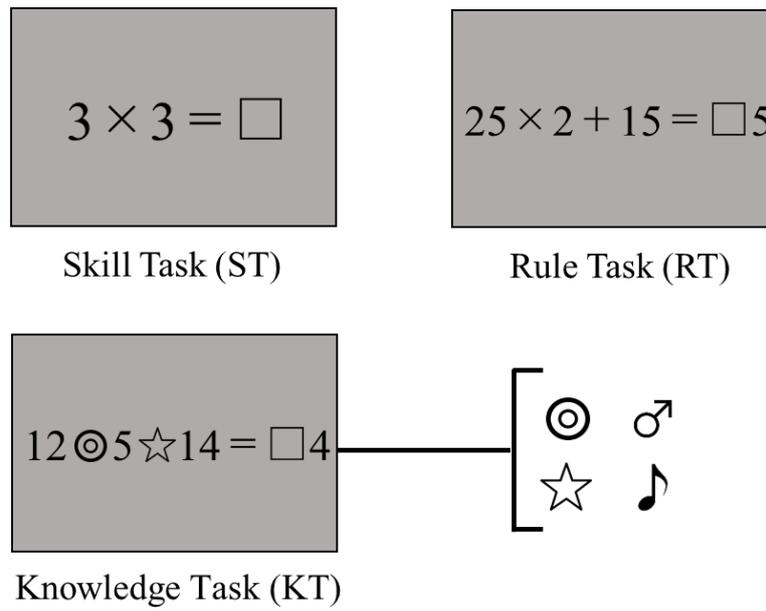


Figure 4.1. 実験課題の刺激例。

課題の習熟による行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響
 —Skill-Rule-Knowledge モデルに基づいた検討—

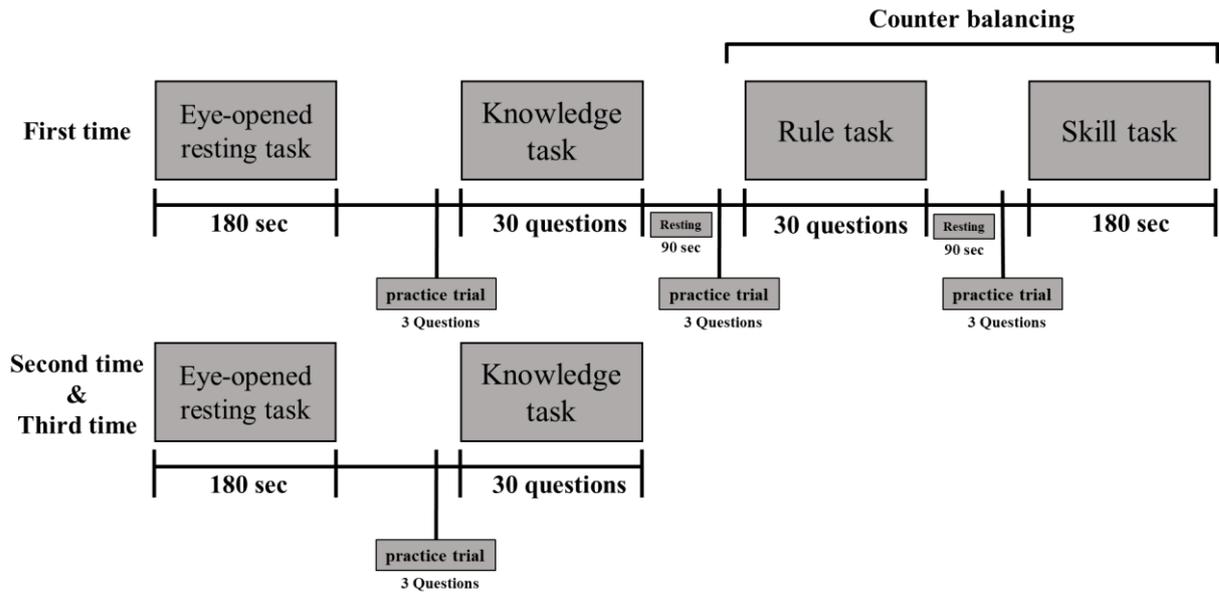


Figure 4.3. 実験プロトコル。

4.3. 結果

4.3.1. 行動パフォーマンス

練習期間について、1~2 回目の期間では、すべての実験参加者が 6 回の練習を完了した。2~3 回目の期間では、練習回数の平均は 10.70 (SD=1.25) 回であった。行動パフォーマンスについて、総課題実施時間の結果を Figure 4.4 に、解答時間の結果を Figure 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 に、正答率の結果を Figure 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 に示す。1 要因分散分析の結果、課題実施時間、解答時間、正答率の主効果が有意であった (課題実施時間: $F(2, 18) = 68.31, p < .001, \eta_p^2 = .88$; 解答時間: $F(4, 36) = 64.97, p < .001, \eta_p^2 = .88$; 正答率: $F(4, 36) = 26.92, p < .001, \epsilon = .28, \eta_p^2 = .75$)。多重比較の結果、総課題実施時間は 1 回目, 2 回目, 3 回目の順で値が短縮した ($ps < .01$)。解答時間は 1 回目, 2 回目, 3 回目の順で値が短縮した ($ps < .05$)。また、各測定と RT, ST の比較では、1 回目の解答時間は、RT, ST より延長した ($ps < .001$)。2 回目の解答時間は、RT と差がみられなくなったが、ST より延長していた ($p < .01$)。3 回目の解答時間は、RT より短縮したが、ST より延長していた ($ps < .01$)。また、RT より ST の解答時間は短かった ($p < .001$)。正答率は 1 回目より 2 回目, 3 回目で上昇したが ($ps < .001$)、2 回目と 3 回目の正答率の間に差はみられなかった ($p = .39$)。各測定と RT, ST の比較では、1 回目の正答率は RT, ST より減少した ($ps < .001$) が、2 回目と 3 回目の正答率は RT, ST との差がみられなかった。また、RT と ST の正答率にも差はみられなかった。

4.3.2. 脳波活動

脳波活動の結果、Figure 4.13, 4.14, 4.14, 4.15 に示す。1 要因分散分析の結果、主効果が

有意であった ($F(4, 36) = 8.91, p < .01, \varepsilon = .65, \eta_p^2 = .50$)。多重比較の結果、1回目より2回目、3回目の θ パワーが減少した ($ps < .05$)。また、有意傾向ではあるが、2回目より3回目の θ パワーが減少する傾向がみられた ($p < .10$)。各測定と RT, ST の比較では、1回目の θ パワーは ST より高かったが ($p < .05$)、RT とは差がみられなかった。2回目の θ パワーは RT, ST とともに差がみられなかった。3回目の θ パワーは RT より減少したが ($p < .05$)、ST とは差がみられなかった。また、RT より ST の θ パワーの方が低かった ($p < .05$)。

4.3.3. 主観的反応

主観的課題難易度の結果を、Figure 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 に示す。1 要因分散分析の結果、主効果が有意であった ($F(4, 36) = 34.84, p < .001, \eta_p^2 = .79$)。多重比較の結果、1回目と2回目の得点が3回目より高かったが ($ps < .001$)、2回目と3回目の得点に差はみられなかった。また、各測定と RT, ST の比較では、1回目の得点が RT, ST より高かった ($ps < .001$)。2回目の得点は RT, ST とともに差はみられなかった。3回目の得点は RT より低かったが ($p < .05$)、ST とは差はみられなかった。また、RT より ST の得点が低かった ($p < .05$)。

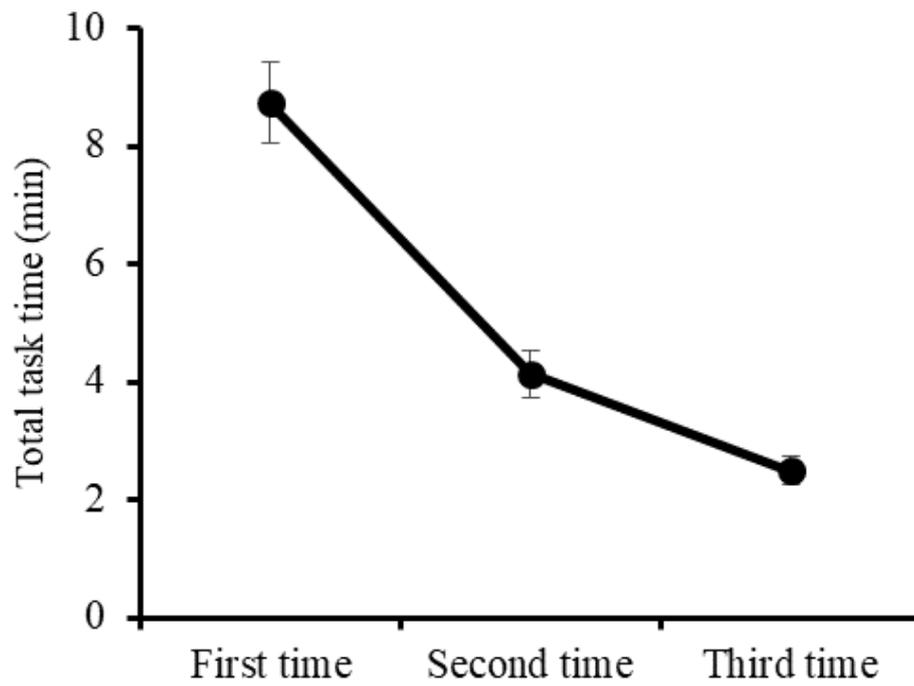


Figure 4.4. 測定ごとの総課題実施時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

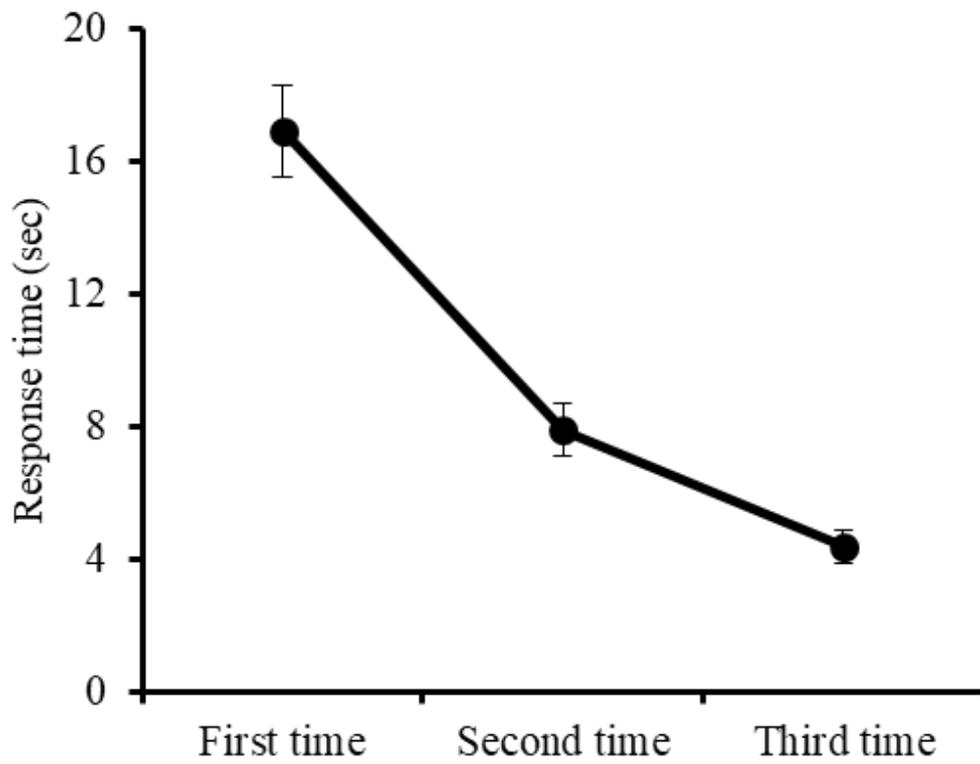


Figure 4.5. 測定ごとの解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

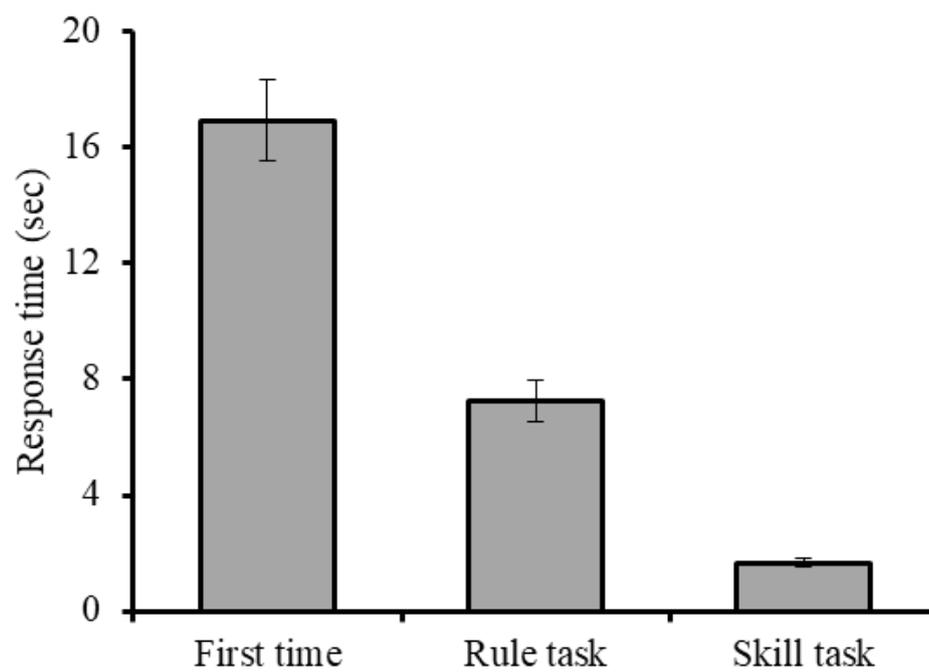


Figure 4.6. 解答時間における 1 回目, Rule task, Skill task の解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

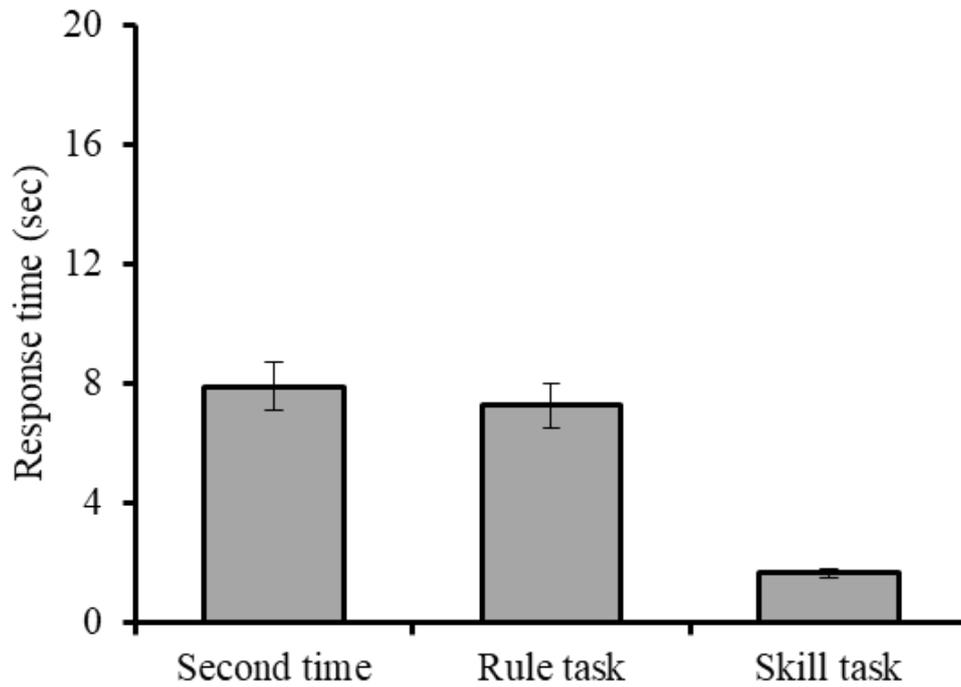


Figure 4.7. 解答時間における2回目, Rule task, Skill task の解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

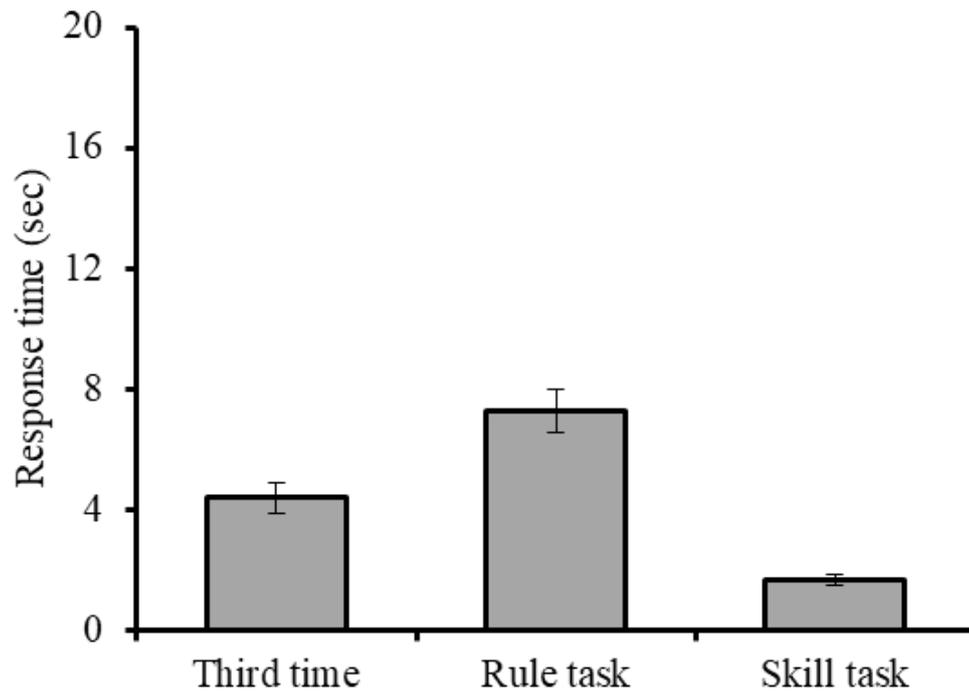


Figure 4.8. 解答時間における3回目, Rule task, Skill task の解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

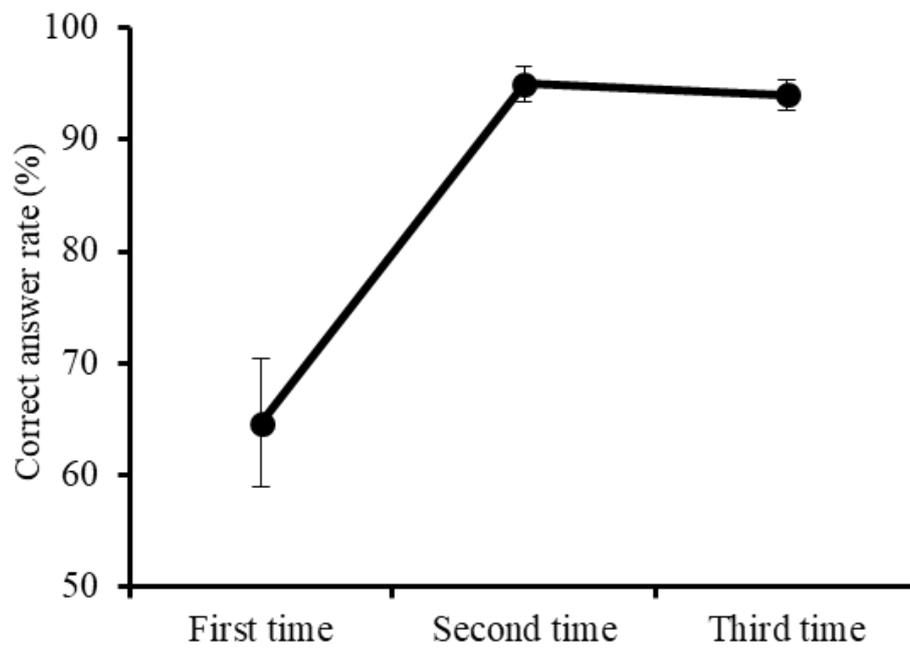


Figure 4.9. 測定ごとの正答率の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

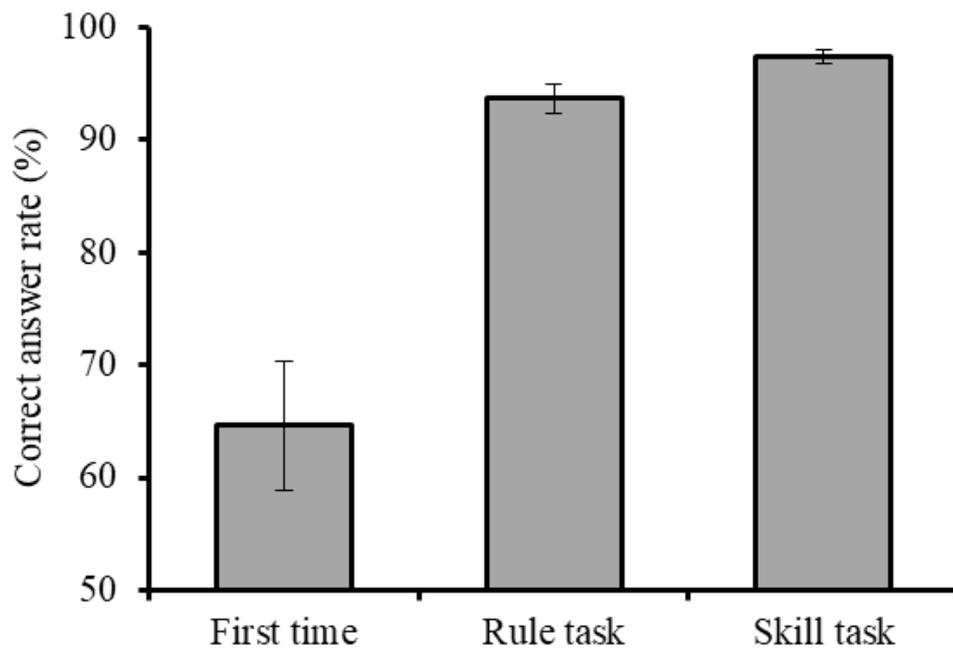


Figure 4.10. 正答率における1回目, Rule task, Skill task の解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

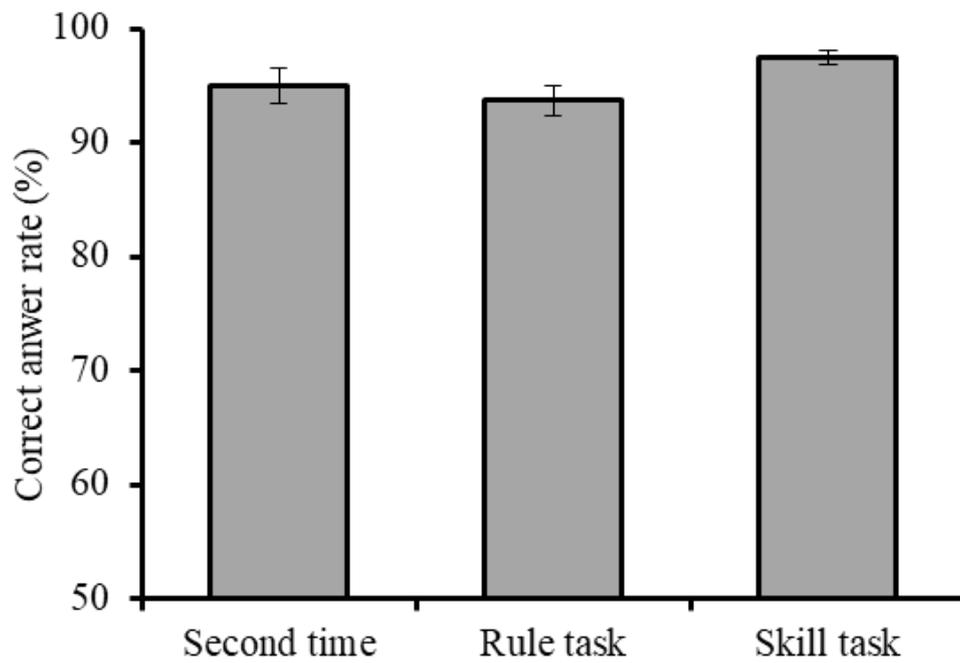


Figure 4.11. 正答率における2回目, Rule task, Skill task の解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

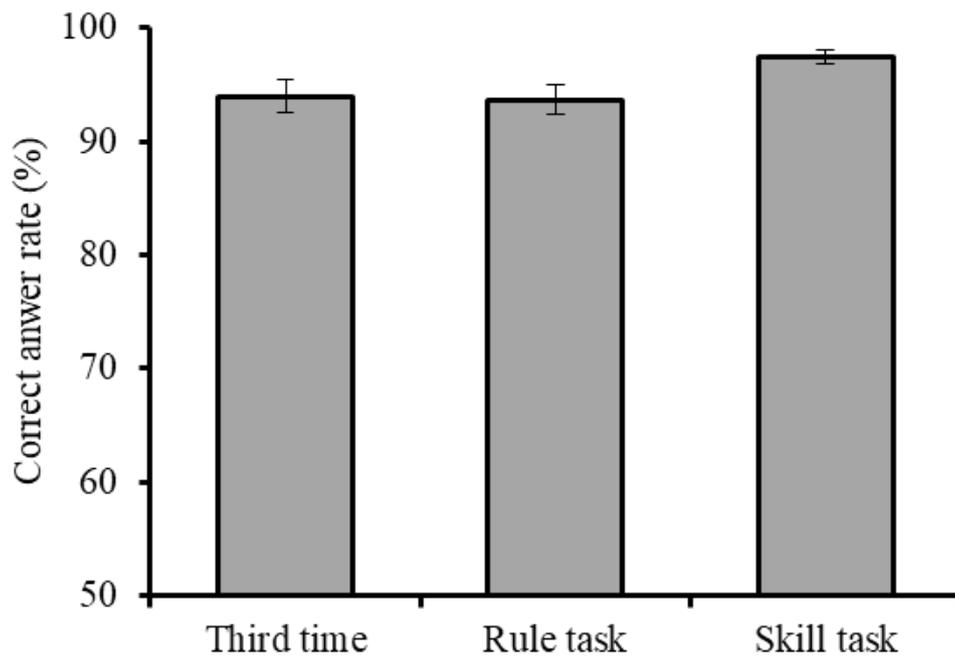


Figure 4.12. 正答率における3回目, Rule task, Skill task の解答時間の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

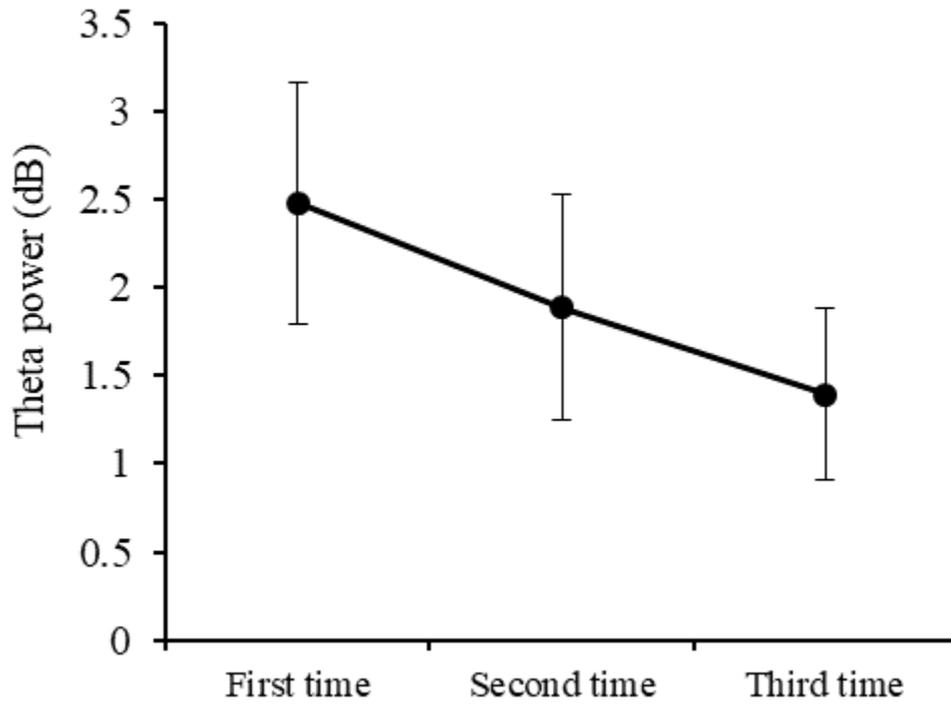


Figure 4.13. 測定ごとの θ パワーの平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

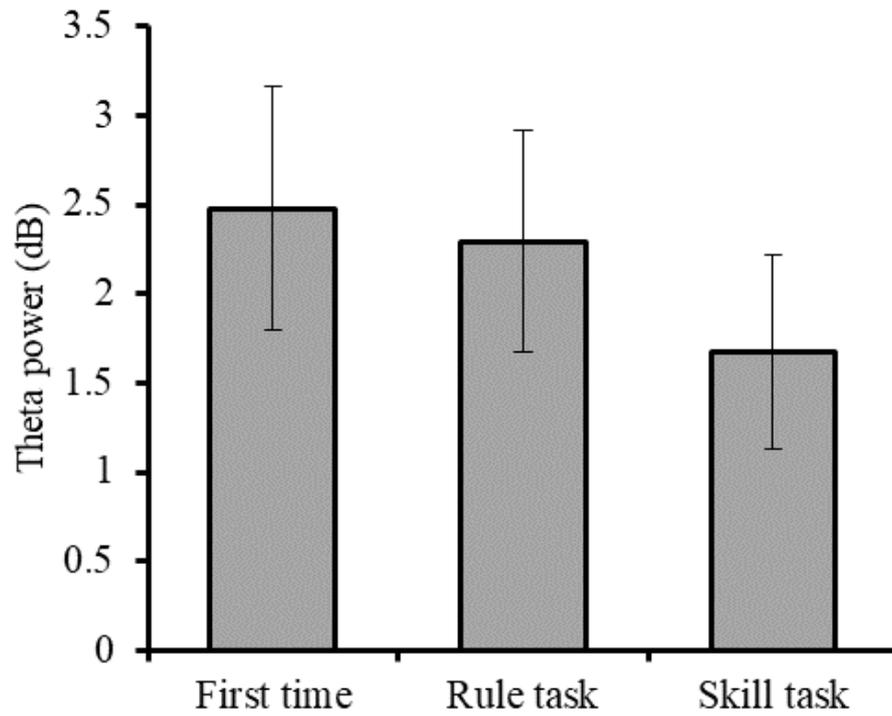


Figure 4.14. θ パワーにおける 1 回目, RT, ST の平均と標準誤差。

エラーバーは標準誤差を示す。

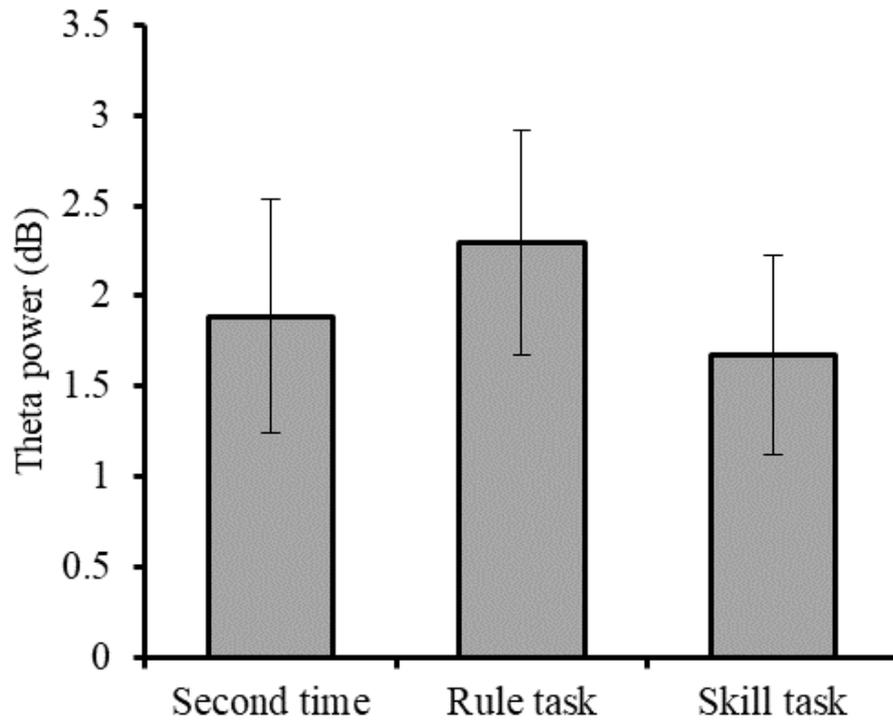


Figure 4.15. θ パワーにおける 2 回目, RT, ST の平均と標準誤差。

エラーバーは標準誤差を示す。

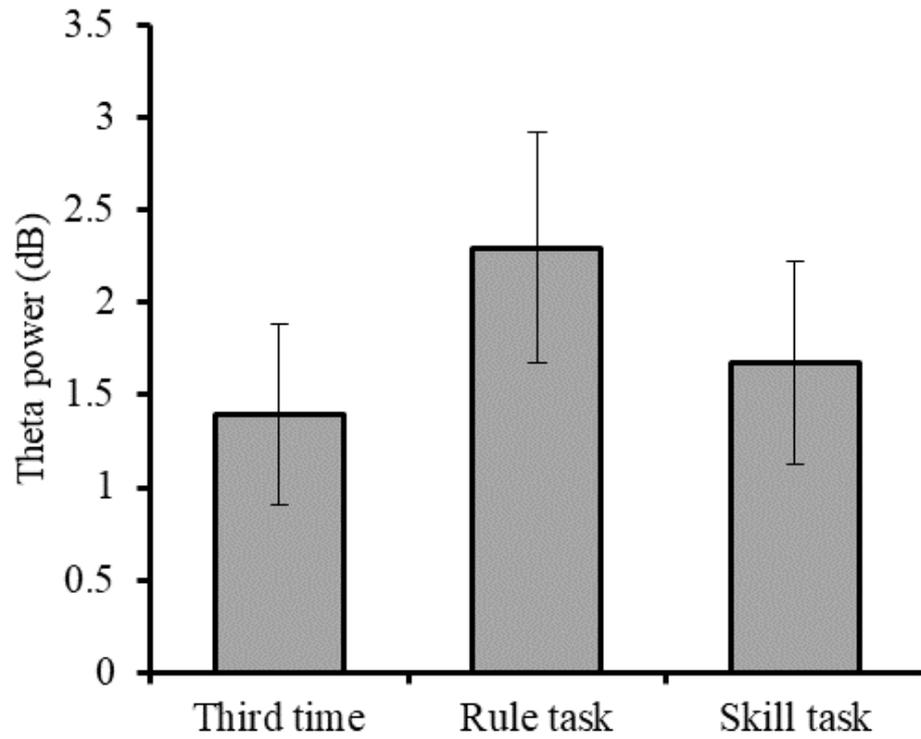


Figure 4.16. θ パワーにおける 3 回目, RT, ST の平均と標準誤差。

エラーバーは標準誤差を示す。

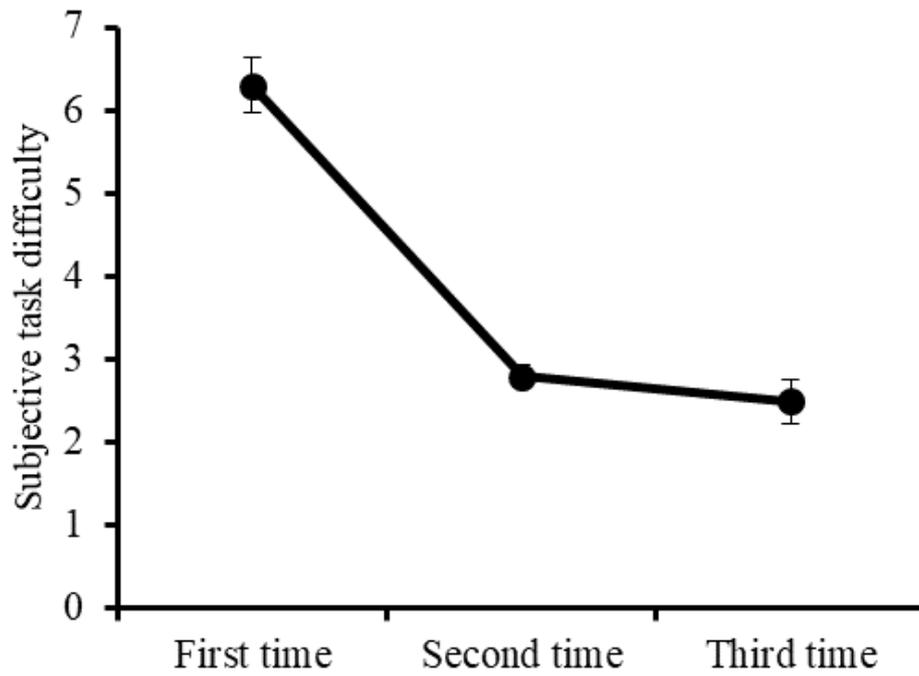


Figure 4.17. 測定ごとの主観的課題難易度得点の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

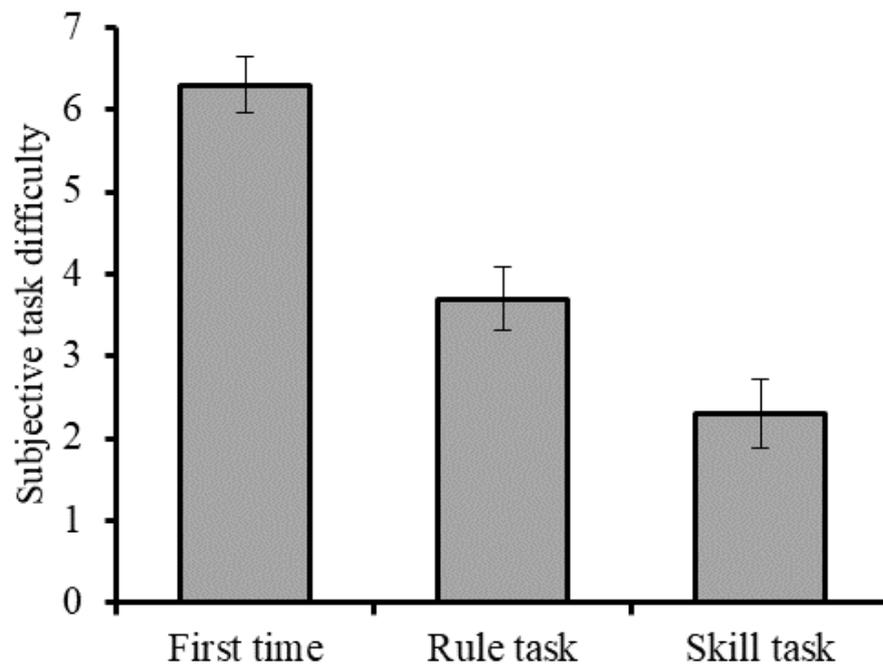


Figure 4.18. 主観的課題難易度得点における1回目, Rule task, Skill task の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

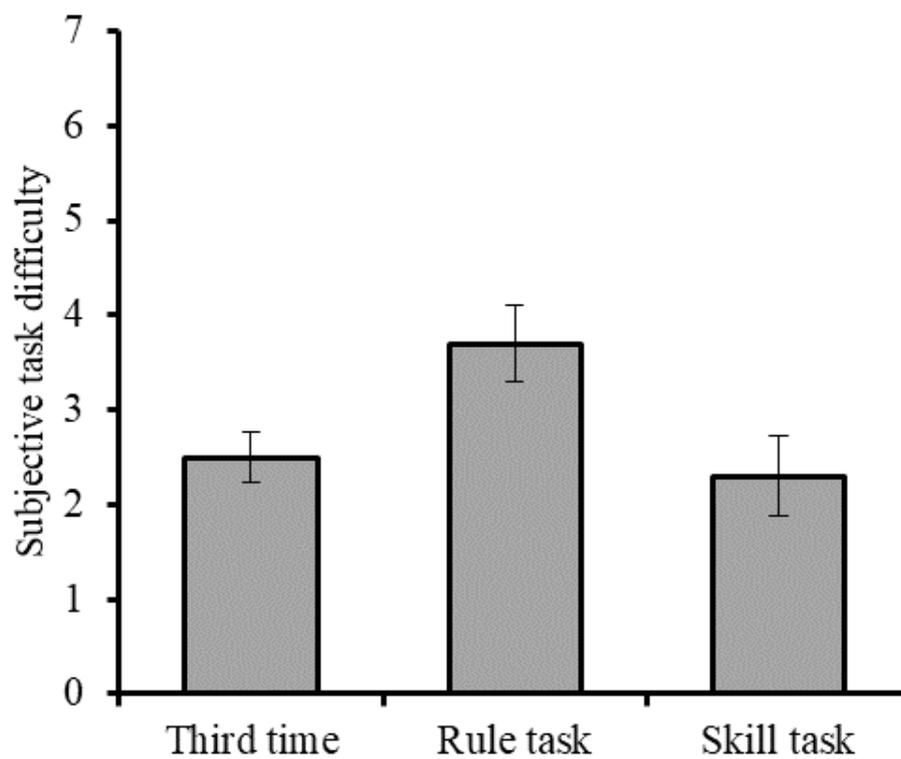


Figure 4.19. 主観的課題難易度得点における2回目, Rule task, Skill task の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

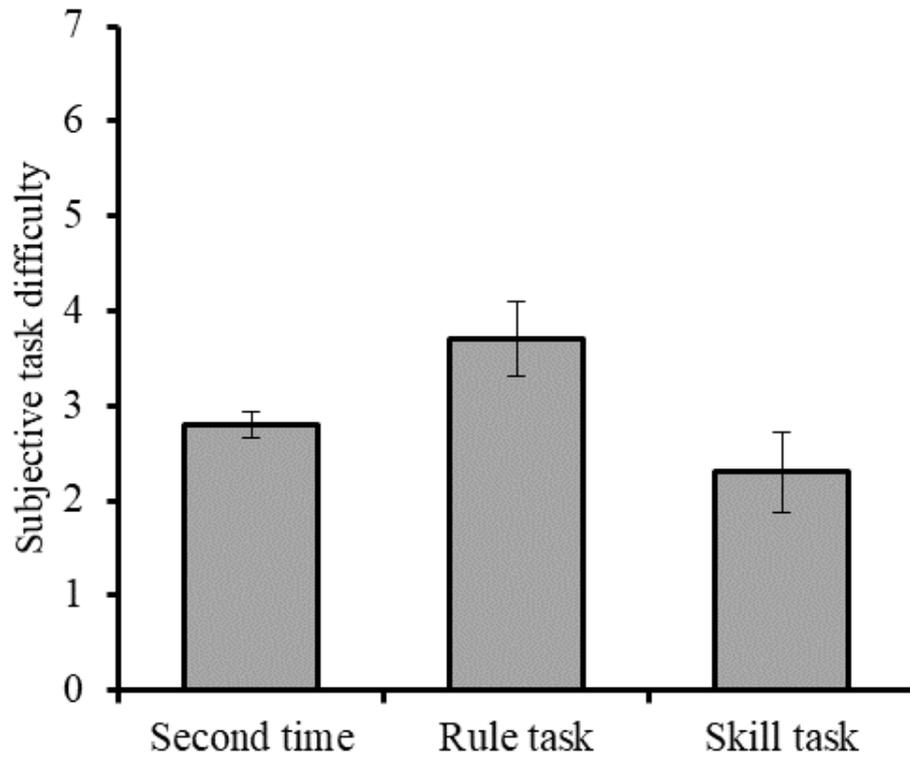


Figure 4.20. 主観的課題難易度得点における3回目, Rule task, Skill task の平均と標準誤差。エラーバーは標準誤差を示す。

4.4. 考察

第 4 章では、単一の課題を習熟する過程における行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域に与える影響について検討を行った。そのため、第 2 章で作成した暗算課題の内、知識ベースの課題である KT を実験課題として、練習期間を含めた 3 回の測定を実施し、その習熟の過程における行動パフォーマンスの変化と前頭部 θ 帯域の活動を経時的に測定した。

行動パフォーマンスについて、総課題実施時間および解答時間は、1 回目、2 回目、3 回目の順で短縮した。これらの結果は、実験課題として用いた KT の内容について、測定ごとに習熟していったことを示唆する。また、解答時間における各測定（1 回目、2 回目、3 回目）と RT、ST の比較では、1 回目の解答時間は RT、ST より長かったが、2 回目の解答時間は RT と同程度になり、3 回目の解答時間は RT より短かった。しかし、3 回目の解答時間においても ST より短縮はしなかった。KT は知識ベース、RT はルールベース、ST はスキルベースの特徴に基づいた課題であるため、実験参加者における認知制御は、知識ベースからルールベースへと移行し、ルールベースとスキルベースの間あたりまで到達したと考えられる。

正答率については、1 回目より 2 回目、3 回目の正答率が上昇したが、2 回目と 3 回目の正答率には差がみられなかった。また、各測定と RT、ST の比較では、1 回目の正答率は RT、ST より低かったが、2 回目以降は差がみられなくなった。SRK モデルにおいて、ルールベースとスキルベースの認知制御は成功を保證されているルールを保持していることを前提としているため、これらの認知制御では感覚入力から動作までの時間は異なるが、ともに正しい行動を実行できるはずである。第 4 章では、上述の解答時間の結果から、2 回目の測定時には認知制御がルールベースに移行していたと考えられるため、2 回目以降の測定において正答率が 9 割を超えていたことは成功を保證されたルールを獲得していたこ

とを意味すると考えられる。

主観的課題難易度については、1回目では、“非常に難しかった”から“かなり難しかった”の間で評価されていたが、2回、3回目では、“簡単だった”から“かなり簡単だった”の間まで評価が下がった。この結果は、1回目の測定時にはKTの内容を難しく感じたが、2回目と3回目の測定時には1回目の測定時と比較して簡単に感じたことを意味する。また、各測定とRT、STの比較について、1回では課題の内容をRT、STより難しく評価していたが、2回目ではRT、STと同程度の評価となり、3回目ではRTより簡単に評価していた。したがって、実験参加者は、3回目の測定時にはKTの課題難易度をSTと同程度に感じていたと考えられる。一方で、測定内（1回目、2回目、3回目）の評価では2回目と3回目の評価に差がみられなかったことと、前述した正答率の結果が2回目以降は9割を超えていたことを考慮すると、行動の遂行に関するルールを獲得した場合、課題に対する主観的な難易度の評価はルールベースとスキルベースの間であまり変化しない可能性もある。この点については、今後検討する必要があるだろう。

前頭部 θ 帯域の活動については、1回目、2回目、3回目の順で θ パワーが減少した。この結果は、前述の行動パフォーマンスの結果と照らし合わせて解釈すると、前頭部 θ 帯域の活動がSRKモデルのフレームワークと一致して増減していくことを示唆する可能性がある。具体的には、1回目の測定時は、実験参加者は、KTの内容に不慣れであったことから、知識ベースの認知制御を必要としたために前頭部 θ 帯域の活動が増大したが、2回目の測定時には、練習によりKTの内容に関するルールを獲得したため、ルールベースの認知制御に移行したことで前頭部 θ 帯域の活動が減少したと考えられる。そして、3回目の測定時では、さらに練習を重ねたことによりルールベースの認知制御がスキルベースの認知制御に近づいた、つまり認知制御が意識的なものから無意識的なものに近づいたことで前頭部 θ 帯域の活動がより減少したと考えられる。ただし、2回目と3回目の θ パワーの減少は有意傾向である点には留意する必要がある。この解釈は、エラー検出とモニタリングによるACCの活動の増大 (Banich, 2009; Milham et al., 2002) と練習によるACCの活動

の減少 (Milhan et al., 2003) と一致する。また、前頭部 θ 帯域と練習の効果を検討した研究においても、本研究と同様に練習に伴う前頭部 θ 帯域の活動の減少が報告されており (Jaquess, Lo, Oh, Lu, Ginsberg, Tan, Lohse, Miller, Hatfield & Gentili, 2018; Pathania et al., 2019), これらの知見は、本研究の結果を強く支持すると考えられる。

以上のことから、課題の習熟に伴い行動パフォーマンスが上昇すると、前頭部 θ 帯域の活動は減少していくことが示唆された。

本研究の意義は、こうした行動パフォーマンスの変化と前頭部 θ 帯域の関係を SRK モデルのフレームワークに基づいて検討したことにある。SRK モデルのフレームワークは、行動のパフォーマンスに応じて感覚入力から実際の動作までの認知プロセスが知識ベース、ルールベース、スキルベースの順で短縮するという人間における認知制御の自動化を段階的に表している。本研究の結果は、こうした段階的な認知制御の自動化の過程で脳活動がどのように関連しているかを示す一助になると考えられる。

4.5. 結論

第 4 章では、課題の習熟による行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響について、SRK モデルに基づいた検討を行うため、男性 10 名を対象として実験を行った。そのため、第 2 章で作成した SRK モデルの認知制御レベルに基づいた暗算課題の内、知識ベースの課題である KT を実験課題として、練習期間を含めた 3 回の経時的な測定を実施して検討を行った。また、第 4 章では、主観的課題難易度についても調査を行った。

その結果、KT のパフォーマンスについて、総解答時間、解答時間は、1 回目、2 回目、3 回目の順で上昇していくことが示された。正答率は、1 回目より 2 回目、3 回目において上昇し、2 回目と 3 回目の間に差はみられなかった。各測定と RT、ST との比較においては、解答時間では、1 回目の解答時間が RT より長かったが、2 回目では RT と同程度となり、3 回目では RT より短縮した。正答率では、1 回目の正答率が RT、ST より低かったが、2 回目以降は差がみられなくなった。また、前頭部 θ 帯域の活動は、1 回目、2 回目、3 回目の順で減少していくことが示された。さらに、主観的課題難易度については、1 回を 2 回目、3 回目より難しく評価していたことが示されたが、2 回目と 3 回目の間に差はみられなかった。RT、ST との比較では、1 回目の課題難易度を RT、ST より難しく評価していたが、2 回目では RT と同程度に評価し、3 回目では RT より簡単であると評価していた。

これらの結果を SRK モデルの認知制御レベルに基づいて解釈すると、実権参加者の認知制御は、知識ベースからルールベースへと移行し、最終的にはルールベースとスキルベースの中間あたりまで移行していたと考えられる。また、前頭部 θ 帯域の活動は、行動パフォーマンスが上昇するにつれて減少していくことが示された。これらの結果は、練習を重ねるにつれて実験課題に対する認知制御の必要性が低下したことで、前頭部 θ 帯域の活動も低下することを示唆すると考えられる。

第 5 章

総合的考察

5.1. Skill-Rule-Knowledge モデルと脳波活動の関連

本論文では、認知制御と行動パフォーマンス関係について、行動パフォーマンスに応じて認知制御が段階的に移行する認知制御モデルである SRK モデルのフレームワークに基づいた実験的検討を行った。また、認知制御に関連した脳活動として背景脳波に着目し、特に、前頭部に出現する θ 帯域である前頭部 θ 帯域の活動を中心とした生理心理学的観点から SRK モデルと脳活動の関係を解明することを試みた。

第 1 章では、心理学領域における認知制御の研究についてレビューし、認知制御の定義に狭義なものと同義なものがあること、本論文では、認知制御を“行動の遂行に必要な一連の認知プロセス”とする広義な定義とすることを述べた。また、認知制御の研究における焦点が、制御的プロセスと自動的プロセス、またはその段階的な移行であることを指摘した。その後、SRK モデルのフレームワークと認知制御レベルについて述べた上で、SRK モデルが現実場面に基づいた実用的なモデルであること、またその不足点について説明した。次に、認知制御の神経基盤とされている前頭前野についての先行研究を概観し、前頭前野の中でも特に ACC が認知制御に関連した脳部位であること、背景脳波の中でも前頭部 θ 帯域の活動が ACC を中心に局限することから認知制御に対する指標となる可能性があることを述べた。

第 2 章では、SRK モデルにおける認知制御の違いが背景脳波に与える影響について、SRK モデルの認知制御レベルの特徴に基づいた暗算課題を作成して、実験的検討を行った。その結果、認知制御を必要とする場合に θ 帯域、 α 帯域、 β 帯域の活動が変動すること、前頭部 θ 帯域の活動が SRK モデルにおける認知制御レベルの違いを反映する可能性が示唆された。

第 3 章では、第 2 章の結果を受けて、SRK モデルにおける認知制御レベルの違いが前頭部 θ 帯域の活動に与える影響について実験的検討を行った。その結果、前頭部 θ 帯域の帯

域幅は、慣習的に設定されていた θ 帯域の周波数帯域とは異なること、前頭部 θ 帯域の活動は知識ベースで最も増大し、スキルベースで最も減少することが示された。また、ルールベースにおける前頭部 θ 帯域の活動は、課題への習熟度によって知識ベースもしくはスキルベースの活動に近似する可能性が示唆された。

第 4 章では、知識ベースの課題である KT を実験課題として、課題の習熟による行動パフォーマンスの変化が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響について実験的検討を行った。その結果、行動パフォーマンスの上昇に伴って前頭部 θ 帯域の活動が減少していくことが示された。このことから、行動パフォーマンスと前頭部 θ 帯域の活動における経時的変化を SRK モデルのフレームワークで説明できる可能性について論じた。

要約すると、本論文で得られた知見は以下の通りとなる。

1. 認知制御を必要とする場合、背景脳波の活動が変動する（第 2 章）。
2. 背景脳波の中でも、特に前頭部 θ 帯域の活動が SRK モデルの認知制御レベルの違いに対して敏感である（第 2 章）。
3. 前頭部 θ 帯域の活動を SRK モデルのフレームワークに基づいて解釈すると、その活動は知識ベースの認知制御で最も増大し、スキルベースの認知制御で最も減少する。ただし、ルールベースの認知制御については、課題の習熟度に応じて知識ベースもしくはスキルベース寄りの活動に近似する可能性がある（第 3 章）。
4. 知識ベースの認知制御を用いる課題において、練習を重ねる過程でその認知制御がルールベース、スキルベースへと移行していくにつれて、前頭部 θ 帯域の活動は減少していく（第 4 章）。

これらの知見から、本論文では、認知制御モデルとしての SRK モデルの有用性と、そのインジケータとしての前頭部 θ 帯域の活動の意義について提案する。

第 1 章でも触れたように、認知制御に関連した多くのモデル（例えば、Noman & Shallice

(1986) など) は、感覚の入力から動作としての出力までの過程を行動パフォーマンスや習熟度に関係なく一直線上で表している。こうしたモデルは、不慣れな状況、もしくは制御的プロセスが必要となる場合においてはモデルの解釈が容易であり、有効であると考えられるが、そういった状況から習熟していく過程、またはある程度習熟された状況、さらには熟練された状況においては解釈が難しいと考えられる。近年、認知制御に関する多くの研究が制御的プロセスと自動的プロセスの区別、またはその段階的な移行に焦点を当てている (Gillbert & Burgess, 2008) にも関わらず、このような認知プロセスの区別や段階的移行を包括的に表現できるモデルが存在しないことは、認知制御という広範な概念の解釈を困難にしていた要因の1つであると考えられる。

この点について、SRK モデルでは、知識ベース、ルールベース、スキルベースという行動パフォーマンスに応じた段階的な認知制御の過程を想定していることから、不慣れな状況 (知識ベース) から熟練した状況 (スキルベース) までどのような認知制御が行われるかを解釈することは容易である。こうした段階構造は、SRK モデルが実際の作業現場における言語プロトコル研究を起源としていることに関係している (Rasmussen & Jensen, 1974)。また、SRK モデルは EID (第1章を参照) の主要な要素の1つでもあるため、実際の作業環境において適用可能なモデルとして作成されている。このため、我々が日常的に対面している状況や行動においても適用できると考えられる。しかし、SRK モデルは、その起源から主に原子力発電所のオペレーター (Vicente & Rasmussen, 1990; 1992) やコンピューターネットワーク管理、医療、航空 (Vicente, 2002; Burns & Hajdukiewicz, 2004) などの複雑で専門性の高い技能に対して用いられてきたことから、そのフレームワークを基礎的な技能に適用できるかどうかは検討されてこなかった。こうした中で、本論文では、実験的検討から暗算という基礎的な技能においても SRK モデルのフレームワークで解釈できることを示した。このことは、SRK モデルが基礎的な技能から専門性の高い技能まで幅広い範囲において、認知制御研究の焦点の1つである制御的プロセスから自動的プロセスへの段階的な移行を説明できる可能性を示唆している。したがって、本論文で得られた知見は、認

知制御という包括的な概念を一般化するための一助になると考えられる。

他方、SRK モデルのフレームワークをどのように評価するかについては、ほとんど検討されてこなかった。心理学の領域では、認知制御などの心的過程の指標として、反応時間 (response time) がよく使用される。反応時間は、一般的には刺激を知覚してから動作として観察可能な反応が表出するまでの時間を指すため、反応時間が長いほど、複雑な心的過程を要したと解釈される。しかし、反応時間には、感覚入力から動作までのすべての過程が含まれるため、反応時間の変化にどのような要因が関係しているか特定することは困難であり、解釈が難しいという点が存在する。このため、生理心理学や認知心理学の領域では ERP などの脳活動も併せて測定することが多い。第 1 章で触れたように ERP は、記憶やエラー検出、注意などの高次な心的能力を反映して出現することから、感覚入力から動作までの心的過程にどのような要因が関与しているかを解釈することができる。例えば、認知制御の研究では、P300 や N2 などの ERP 成分が多くの研究で用いられている。一方で、反応時間と同様に ERP にも問題点があり、同一の事象に対する反応を相当数測定し、それらを加算平均しなければ、可視化することができない。これは、ERP の波形に背景脳波が重畳すること原因となる。こうした背景脳波は、意識水準に関係するとされており、睡眠研究や覚醒水準の測定に用いられることが多い。しかし、近年では、事象関連ダイナミクスの提唱もあり、背景脳波も特定の事象に関連して活動することが認知されてきている。背景脳波の利点としては、ERS と ERD が挙げられる。これらの活動は、ERP とは異なり、特定の事象に対して反応を求める必要がないため、より現実的な場面においても応用できる可能性がある。

本論文では、認知制御に関連する背景脳波として、前頭部 θ 帯域に着目して検討を行ってきたが、第 3 章や第 4 章における結果は、前頭部 θ 帯域の活動が SRK モデルにおける認知制御レベルの違いを反映することを示唆している可能性がある。このことは、前頭部 θ 帯域の活動が SRK モデルのフレームワークを評価するインジケータとして機能する可能性を示しており、認知制御における制御的プロセスから自動的プロセスへの段階的移行

を脳活動の側面から評価することにも繋がると考えられる。

また、本論文における前頭部 θ 帯域の活動の検討は、そのほとんどを脳波記録の電極配置の国際基準である 10-20 法における Fz を対象として行っている。これは、前頭部 θ 帯域の活動が Fz を中心として出現するためであるが、このことは Fz の部位において脳波を測定できれば、本論文の知見をより現実的な場面に応用できる可能性も意味している。近年では、脳波測定のための電極も高性能化しており、電極自体にバッファアンプを搭載したアクティブ電極や頭髪や頭部形状の影響を受けにくいパルテノン電極が実用化されている。こうした電極を用いれば、現実的な場面における測定も敷居が下がると考えられる。例えば、現実的な場面における前頭部 θ 帯域の測定について、So, Wong, Mak & Chan (2017) では、単一チャンネルのワイヤレス脳波計を用いて、前頭部 θ 帯域の活動をメンタルワークロードの指標として用いることができるかを検討している。So et al. (2017) は、算術、タイピング、心的回転、語彙判別という 4 種類の実験課題において 3 つの難易度（低、中、高）を設定し、その課題中における前頭部 θ 帯域の活動を測定した。その結果、すべての実験課題において前頭部 θ 帯域の活動は、低難度で最も減少し、高難度で最も増大したが、中難度では低難度もしくは高難度のどちらかの活動に類似することを報告している。

一方で、So et al. (2017) は、前頭部 θ 帯域の活動の変化を課題の難易度のみで解釈しており、難易度の異なる実験課題において認知活動がどのような水準で制御されていたかまでは検討されていない。近年では、前頭部 θ 帯域の活動は、認知活動に関連して増減することから、生理心理学や神経科学以外の学術領域においてもメンタルワークロードなどの認知活動に紐づいた概念の指標として検討されてきている（e.g. Borghini, Astolfi, Vecchiato, Mattia & Babiloni, 2014; Dimitrakopoulos, Kakkos, Dai, Lim, deSouza, Bezerianos & Sun, 2017; Paxion, Galy & Berthelon, 2014）。しかしながら、こうした研究では、前頭部 θ 帯域の活動の背景にどのような認知活動や心理的要因が影響にしているかについては検討していない場合が多い。こうした点を考慮すると、本論文で得られた SRK モデルのフレームワークに基づいた知見は、今後、生理心理学的文脈以外にも前頭部 θ 帯域の活動を対象とした他領域

において行動パフォーマンスと認知制御の関係性を論じる上で重要な知見となるであろう。

5.2. 今後の展望

本論文では、認知制御に関連した脳活動として、前頭部 θ 帯域を取り上げ、この活動を中心に検討を行ってきた。しかしながら、前頭部 θ 帯域の活動に影響を及ぼすと考えられる要因の中には本論文では検討できなかったものも存在する。例えば、性格特性や知能などである。前頭部 θ 帯域の活動に影響する性格特性として、不安傾向や神経症傾向が報告されている (Mizuki, Kajimura, Nishikori, Imaizumi & Yamada, 1984; Yamaguchi, Kuwano & Tsujimoto, 1981)。Mizuki et al. (1984) では、神経症傾向や不安傾向といった性格特性が高い者は、そうでないものと比較して前頭部 θ 帯域の活動が出現しにくいことを報告している。したがって、今後は、これらの性格特性が高い者についても本研究の知見が当てはまるかどうかについても検討していく必要があるだろう。

また、前頭部 θ 帯域の活動は、知能と関係することも報告されている。例えば、Gevins & Smith (2000) は、ウェクスラー成人知能検査 (Wechsler Adult Intelligence Scale: WAIS) を用いた検討において、高得点群では低得点群と比較して持続的な作業や高い記憶負荷の条件において前頭部 θ 帯域の活動が選択的に増大することを報告している。他方、ワーキングメモリスパンテストを用いた検討では、高得点群は低得点群と比較して記憶負荷が高い場合に選択的に ACC の活動が増大することが報告されている (Osaka, Osaka, Kondo, Morishita, Fukuyama, Aso & Shibasaki, 2003)。これらの知見は、認知負荷の高い課題において適切な認知制御を用いることができるかどうかにかんして知能の高低や課題自体の難易度などが影響することを示唆していると考えられる。したがって、実験参加者の能力に見合わない高い難易度の課題については、前頭部 θ 帯域の活動が増大せずに減少する傾向となることが予想される。今後は、これらの点についても考慮する必要があるだろう。

また、背景脳波における ERS や ERD の研究では、前頭部 θ 帯域と特定の脳波周波数帯域の比率関係を検討しているものが多く存在する (Braboszcz & Delorme, 2011; Kitamura et

al., 2017; Klimesch, 1999; Sauseng et al., 2009; van Son et al., 2019)。例えば、 α 帯域は前頭部 θ 帯域の ERS の際に ERD を起こすことが知られており (Kitamura et al., 2017), θ 帯域と α 帯域の比率である θ/α 比は、認知機能に関連した指標として、アルツハイマー病のバイオマーカーとしても用いられている (Fahimi, Tabatabaei, Fahimi & Rajebi; 2017; Schmidt, Kanda, Basile, Lopes, Baratho, Demario, Jorge, Nardi, Machado, Ianof, Nitrini & Anghinah, 2013)。また、 θ 帯域と β 帯域の比率である θ/β 比についても認知活動と関連することが示唆されており、ADHD (注意欠如・多動症) のバイオマーカーとして用いられている (Clarke, Barry, Karamacoska & Johnstone, 2019)。さらに、 γ 帯域は、 θ 帯域の位相の同期により、視覚刺激時における記憶の保持に関連していることが報告されている (Sauseng et al., 2009)。これらの知見は、脳波周波数のダイナミクスが特定の周波数に特異的な現象ではないことを示唆しており、 θ 帯域と他の脳波周波数帯域の組み合わせを考慮することで本論文の知見をより拡大し、精緻化することができると考えられる。

このように、本論文では扱えなかった諸々の要因が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響や相互作用の影響を検討し、包括的な実証的データを蓄積していくことで、行動パフォーマンスと認知制御の関係に関する生理心理学的立場からの更なる知見の積み重ねが期待される。

参考・引用文献

- Allman, J. M., Hakeem, A., Erwin, J. M., Nimchinsky, E., & Hof, P. (2001). The anterior cingulate cortex. The evolution of an interface between emotion and cognition. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 935, 107–17.
- Alvarez, A. J., Emory, E. (2006). Executive function and the frontal lobes: A meta-analytic review. *Neuropsychology Review*, 16, 17–42.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in cognitive sciences*, 4, 417-423.
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual review of psychology*, 63, 1-29.
- Baddeley, A.D., & Hitch, G.J. (1974). *Working Memory*. Bower, G. A. (Ed.), *Recent advances in learning and motivation*. New York: Academic Press.
- Banich, M. T. (2009). Executive function: The search for an integrated account. *Current Directions in Psychological Science*, 18, 89–94.
- Berger, H. (1929). Über das Elektroenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 87, 527-570.
- Borghini, G., Aricò, P., Di Flumeri, G., Cartocci, G., Colosimo, A., Bonelli, S., Golfètti, A., Imbert, J. P., Granger, G., Benhacene, R., Pozzi, S., & Babiloni, F. (2017). EEG-Based Cognitive Control Behavior Assessment: an Ecological study with Professional Air Traffic Controllers.

Scientific Reports, 7, 547.

- Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 58-75.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 624–652.
- Braboszcz, C., & Delorme, A. (2011). Lost in thoughts: Neural markers of low alertness during mind wandering. *Neuroimage*, 54, 3040-3047.
- Burgess, P., & Stuss, D. T. (2017). Fifty years of prefrontal cortex research: Impact on assessment. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 23, 755-767.
- Burns, C. M. & Hajdukiewicz, J. R. (2004). *Ecological Interface Design*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747–749.
- Cavanagh, J. F., Cohen, M. X., & Allen, J. J. B. (2009). Prelude to and resolution of an error: EEG phase synchrony reveals cognitive control dynamics during action monitoring. *Journal of Neuroscience*, 29, 98–105.

- Cavanagh, F. J., Frank, J. M., Klein, J. T., & Allen, B. J. J. (2010). Frontal Theta Links Prediction Errors to Behavioral Adaptation in Reinforcement Learning. *Neuroimage*, 49, 3198.
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 18, 414–421.
- Cavanagh, J. F., Zmbrano-Vazquez, L., & Allen, J. J. B. (2012). Theta lingua franca: A common mid-frontal substrate for action monitoring processes. *Psychophysiology*, 49, 220-238.
- Cho, R. Y., Orr, J. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2009). Generalized signaling for control: Evidence from postconflict and posterror performance adjustments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1161-1177.
- Christoff, K., & Gabrieli, J.D.E. (2000). The frontopolar cortex and human cognition: Evidence for a rostrocaudal hierarchical organization within the human prefrontal cortex. *Psychobiology*, 28, 168–186.
- Clark, L., Bechara, A., Damasio, H., Aitken, M. R. F., Sahakian, B. J., Robbins, T. W. (2008). Differential effects of insular and ventromedial prefrontal cortex lesions on risky decision making. *Brain*. 131, 1311–1322.
- Clarke, R. A., Barry, J. R., Karamacoska, D. & Johnstone, J. S. (2019). The EEG Theta/Beta Ratio: A marker of Arousal or Cognitive Processing Capacity? *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 44, 123-129.

- Cohen, M. X. (2011). Error-related medial frontal theta activity predicts cingulate-related structural connectivity. *Neuroimage*, 55, 1373–1383.
- Cohen, M. X., & Cavanagh, J. F. (2011). Single-trial regression elucidates the role of prefrontal theta oscillations in response conflict. *Frontiers in Psychology*, 2, 30.
- Cooper, P., R. (2010). Cognitive Control: Componential or Emergent? *Topic in Cognitive Science*, 2, 598-613.
- Crivelli-Decker, J., Hsieh, T. L., Clarke, A., & Ranganath, C. (2018). Theta oscillations promote temporal sequence learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 153, 92-103.
- Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., Yves von Cramon, D., Engel, K. A. (2005). Trial-by-Trial Coupling of Concurrent Electroencephalogram and Functional Magnetic Resonance Imaging Identifies the Dynamics of Performance Monitoring. *Journal of Neuroscience*, 25, 11730-11737.
- Dimitrakopoulos, N. G., Kakkos, I., Dai, I., Lim, J., deSouza, J. J., Bezerianos, A., & Sun, Y. (2017). Task-Independent Mental Workload Classification Based Upon Common Multiband EEG Cortical Connectivity. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25, 1940-1949.
- Duncan, J., & Owen, A.M. (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends in Neurosciences*, 23, 475–483.

- Ekstrom, D. A., Caplan, B. J., Ho, E., Shattuck, K., Fried, I., & Kahana, J. M. (2005). Human hippocampal theta activity during virtual navigation. *Hippocampus*, 15, 881-889.
- Engel A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations—signalling the status quo? *Current opinion in neurobiology*, 20, 156-165.
- Ericsson, A. K., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102, 211-245.
- Fahimi, G., Tabatabaei, M. S., Fahimi, E., & Rajebi, H. (2017). Index of Theta/Alpha Ratio of the Quantitative Electroencephalogram in Alzheimer's Disease: A Case-Control Study. *Acta Medica Iranica*, 55, 502-506.
- Fernandez-Duque, D., & Knight, M. (2008). Cognitive control: Dynamic, sustained, and voluntary influences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 340–355.
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review. *Psychophysiology*, 45, 152–170.
- Gevins, A. & Smith, M. E. (2000). Neurophysiological measures of working memory and individual differences in cognitive ability and cognitive style. *Cerebral Cortex*, 10, 829-839.

- Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., & Yu, D. (1997). High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: Effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cerebral Cortex*, 7, 374-385.
- Gillbert, S., J., & Burgess, P., W. (2008). Executive function. *Current Biology*, 18, R110-114.
- Gratton, G., Cooper, P., Fabiani, M., Carter, S. C., & Karayanidis, F. (2017). Dynamics of cognitive control: Theoretical bases, paradigms, and a view for the future. *Psychophysiology*, 55, e13016.
- Grützmann, R., Riesel, A., Kaufmann, C., Kathmann, N., & Heinzl, S. (2019). Emotional interference under low versus high executive control. *Psychophysiology*, 56, e13380.
- Hanslmayr, S., Pastötter, B., Bäuml, H. K., Gruber, S., Wimber, M., & Klimesch, W. (2008). The electrophysiological dynamics of interference during the Stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 215-225.
- 堀 忠雄. (2008). 生理心理学 培風館
- Houghton, G., & Tipper, S. P. (1996). Inhibitory mechanisms of neural and cognitive control: Applications to selective attention and sequential action. *Brain and Cognition*, 30, 20-43.
- 石原 務・吉井 直三郎 (1962). 非行少年の異常脳波型について (2) 連続性シータ波. 臨床脳波, 4, 115-124.

- Ishihara, T., & Yoshii, N. (1972). Multivariate analytic study of EEG and mental activity in juvenile delinquents. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 33, 71-80.
- Ishii, R., Shinosaki, K., Ukai, S., Inoue, T., Ishuhara, T., Yoshimine, T., Hirabuki, N., Asada, H., Kihara, T., Robinson, S. E., & Takeda, M. (1999). Medial prefrontal cortex generates frontal midline theta rhythm. *Neuroreport*, 10, 675-679.
- 伊藤 栞・川島哲史・依田麻子 (2020). 課題の習熟に伴う生理的反応の変化に対する縦断的検討（2）－心拍数・呼吸数からの検討－. 生理心理と精神心理学, 印刷中.
- Itthipuripat, S., Wessel, R. J., & Aron, R. A. (2013). Frontal theta is a signature of successful working memory manipulation. *Experimental Brain Research*, 224, 255-262.
- Jacobs, J., Hwang, G., Curran, T., & Kahana, J. M. (2006). EEG oscillations and recognition memory: theta correlates of memory retrieval and decision making. *Neuroimage*, 32, 978-987.
- Jaquess, J. K., Lo, C. L., Oh, H., Lu, C., Ginsberg, A., Tan, Y. Y., Lohse, R. K., Miller, W. M., Hatfield, D. B., & Gentili, J. R. (2018). Changes in Mental Workload and Motor Performance Throughout Multiple Practice Sessions Under Various Levels of Task Difficulty. *Neuroscience*, 393, 305-318.
- Jung, T. P., Makeig, S., McKeown, M. J., Bell, A. J., Lee, T. W., & Sejnowski, T. J. (2001). Imaging Brain Dynamics Using Independent Component Analysis. *Proceedings of the IEEE*, 89, 1107-1122.

- 川島哲史・伊藤 栞・依田麻子 (2020). 課題の習熟に伴う生理的応答の変化に対する縦断的検討 (1) —前頭部 θ 帯域からの検討—. 生理心理と精神心理学, 印刷中
- 川島哲史・太田直斗・依田麻子 (2018). 課題難易度の差異が脳波 θ 帯域の出現量に及ぼす影響. 日本心理学会第 82 回大会発表論文集, 415.
- 川島哲史・依田麻子 (2018). 認知制御レベルの違いによる脳波活動の変動. 日本大学心理学研究, 40, 1-10.
- Kawashima, S., Yoda, A. (2019). The Effect of difference of cognitive control levels in SRK model on EEG frontal theta band. *Federation of the Asian and Oceanian Psychological Societies*, 1P-383.
- 川島哲史・依田麻子 (2020). 暗算課題における認知制御レベルの違いが前頭部 θ 帯域の活動に及ぼす影響 —Skill-Rule-Knowledge モデルに基づいた検討—. *Health and Behavior Science*, 19, 1-8.
- 川島哲史・依田麻子・依田光正 (2019). SRK モデルの認知制御レベルと前頭部 θ 帯域の活動における個人差の検討. *人間工学*, 55, 2B-3-5.
- Kitamura, Y., Nishida, K., Yoshimura, M., Mii, H., Katsura, K., Ueda, S., Ikeda, S., Pascual-Marqui, R. D., Ishii, R., & Kinoshita, T. (2017). Functional localization and effective connectivity of cortical theta and alpha oscillatory activity during an attention task. *Clinical neurophysiology practice*, 2, 193-200.

- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29, 169-195.
- Lega, C. B., Jacobs, J., & Kahana, M. (2012). Human hippocampal theta oscillations and the formation of episodic memories. *Hippocampus*, 22, 748-761.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95, 492-527.
- Logan, G. D. (2002). An instance theory of attention and memory. *Psychological Review*, 109, 376-409.
- Long, M. N., Burke, F. J., & Kahana, J. M. (2014). Subsequent memory effect in intracranial and scalp EEG. *Neuroimage*, 84, 488-494.
- Luft, B. D. C. (2014). Learning from feedback: The neural mechanisms of feedback processing facilitating better performance. *Behavioural Brain Research*, 261, 356-368.
- Makeig, S., Debener, S., Onton, J., & Delorme, A. (2004). Mining event-related brain dynamics. *Trends in Cognitive Science*, 8, 204-210.
- Makeig, S., Westerfield, M., Jung, P. T., Enghoff, S., Townsend, J., Courchesne, E., & Sejnowski, J. T. (2002). Dynamic brain sources of visual evoked responses. *Science*, 295, 690-694.

- Mazaheri, A., & Picton, W. T. (2005). EEG spectral dynamics during discrimination of auditory and visual targets. *Cognitive Brain Research*, 24, 81-96.
- Milham, M. P., Banich, M. T., Claus, E., & Cohen, N. (2003). Practicerelated effects demonstrate complementary roles of anterior cingulate and prefrontal cortices in attentional control. *Neuroimage*, 18, 483-493.
- Milham, M. P., Erickson, K. I., Banich, M. T., Kramer, A. F., Webb, A., Wszalek, T., & Cohen, N. J. (2002). Attentional control in the aging brain: Insights from an fMRI study of the Stroop task. *Brain & Cognition*, 49, 277-296.
- Miller, B. L., & Cummings, I. L. (Eds.) (1999). *The human frontal lobes: Functions and disorders*. New York: Guilford Press.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24, 167-202.
- Milner, B. (1963). Effect of Different Brain Lesions on Card Sorting. *Archives of Neurology*, 9, 90-100.
- Mitchell, J. D., McNaughton, N., Flanagan, D., & Kirk, J., I. (2008). Frontal-midline theta from the perspective of hippocampal “theta”. *Progress in Neurobiology*, 86, 156-185.

- Miyake, A., & Friedman, P. N. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21, 8-14.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41, 49-100.
- Miyake, A., Shah, P. (1999). *Models of Working Memory: Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control*. New York: Cambridge University Press.
- 宮内 哲. (2013). 脳を測る ―改訂 ヒトの脳機能の非侵襲的測定―. 心理学評論, 53, 414-454.
- Mizuki, Y., Kajimura, N., Nishikori, S., Imaizumi, J., & Yamada, M. (1984). Appearance of frontal midline theta rhythm and personality traits. *Folia Psychiatrica et Neurologica Japonica*, 38, 451-458.
- 入戸野 宏・堀 忠雄. (2000). 心理学研究における事象関連電位 (ERP) の利用. 広島大学総合科学部紀要IV理系編, 26, 15-32.
- Norman, D.A., & Shallice, T. (1986). *Attention to action: Willed and automatic control of behaviour*. In R. Davidson, G. Schwartz, & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self regulation*, Vol. 4 (pp. 1-18). New York: Plenum.

- 小野田 慶一・安部哲史・山口修平. (2012). フィードバック関連陰性電位研究の進歩.
臨床神経生理学, 40, 48-57.
- 大熊輝雄・松岡洋夫・上埜高志・斎藤秀光. (2016). 臨床脳波学 第6版 医学書院
- Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T., & Shibasaki, H. (2003).
The neural basis of individual differences in working memory capacity: an fMRI study.
Neuroimage, 18, 789-797.
- Pathania, A., Leiker, A. M., Euler, M., Miller, M. W., Lohse, K. R. (2019). Challenge, motivation, and
effort: Neural and behavioral correlates of self-control of difficulty during practice. *Biological
Psychology*, 141, 52 – 63.
- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2014). Mental workload and driving. *Frontiers in Psychology*,
5, 1344.
- Pellouchoud, E., Smith, M. E., McEvoy, L., & Gevins, A. (1999). Mental effort-related EEG
modulation during video-game play: Comparison between juvenile subjects with epilepsy and
normal control subject. *Epilepsia*, 40, 38-43.
- Perret, E. (1974). The left frontal lobe of man and the suppression of habitual responses in verbal
categorical behaviour. *Neuropsychologia*, 12, 323-30.

- Petrides, M. (2005). Lateral prefrontal cortex: Architectonic and functional organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences*, 360, 781–795.
- Pfurtscheller, G., & Aranibar, A. (1977). Event-related cortical desynchronization detected by power measurements of scalp EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 42, 817–826.
- Phillips, M. J., Vinck, M., Everling S., & Womelsdorf, T. (2014). A Long-Range Fronto-Parietal 5- to 10-Hz Network Predicts “Top-Down” Controlled Guidance in a Task-Switch Paradigm. *Cerebral Cortex*, 24, 1996–2008.
- Posner, M. I., Snyder, C. R. R. (1975). *Attention and cognitive control*. In R. L. Solso (Ed.), *Information processing and cognition: The Loyola symposium* (pp. 55–85). Hillsdale, Erlbaum.
- Rasmussen, J., & Jensen, A. (1974). Mental procedures in real-life tasks: A case study of electronic troubleshooting. *Ergonomics*, 17, 293–307.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13, 257–266.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering*. New York: Elsevier Science. (海保博之・加藤隆・赤井真喜・田辺文也 (訳) (1990). インターフェイスの認知工学—人と機械の知的かかわりの科学—海文堂)

- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press. (十亀 洋 (訳)
(2014). ヒューマンエラー 海文堂)
- Roberts, A. C., Robbins, T. W., & Weiskrantz, L. (Eds.) (1998). *The prefrontal cortex: Executive and cognitive function*. Oxford: Oxford University Press.
- Romero, G. S., McFarland, J. D., Faust, R., Farrell, L., & Cacace, T. A. (2008). Electrophysiological markers of skill-related neuroplasticity. *Biological Psychology*, 78, 221-230.
- Ryu, K., Choi, Y., Kim, J., Kim, Y., & Chio, S. (2016). Differential frontal theta activity during cognitive and motor tasks. *Journal of Integrative Neuroscience*, 15, 295-303.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Heise, K. F., Gruber, W. R., Holz, E., Karim, A. A., Glennon, M., Gerloff, C., Birbaumer, N., & Hummel, F. C. (2009). Brain oscillatory substrates of visual short-term memory capacity. *Current Biology*, 19, 1846-1852.
- Schmidt, T. M., Kanda, M. A. P., Basile, H. F. L., Lopes, S. F. H., Baratho, R., Demario, C. L. J., Jorge, S. M., Nardi, E. A., Machado, S., Ianof, N. J., Nitrini, R., & Anghinah, R. (2013). Index of Alpha/Theta Ratio of the Electroencephalogram: A New Marker for Alzheimer's Disease. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5, 60.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190.

- So, K. Y. W., Wong, W. H. S., Mak, J. J., & Chan, H. M. R. (2017). An evaluation of mental workload with frontal EEG. *PLoS One*, 12, e0174949.
- Spitzer, B., & Blankenburg, F. (2011). Stimulus-dependent EEG activity reflects internal updating of tactile working memory in humans. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 108, 8444-8449.
- Spitzer, B., Wacker, E., & Blankenburg, F. (2010). Oscillatory correlates of vibrotactile frequency processing in human working memory. *Journal of Neuroscience*, 30, 4496-4502.
- Stalnaker, T. A., Cooch, N. K., Schoenbaum, G. (2015). What the orbitofrontal cortex does not do. *Nature Neuroscience*, 18, 620–627.
- Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: A conceptual view. *Psychological Research*, 63, 289-298.
- Stuss, D.T., & Alexander, M.P. (2007). Is there a dysexecutive syndrome? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 362, 901–915.
- Stuss, D.T., Floden, D., Alexander, M.P., Levine, B., & Katz, D. (2001). Stroop performance in focal lesion patients: dissociation of processes and frontal lobe lesion location. *Neuropsychologia*, 39, 771-86.

- van Son, D., de Rover, M., De Blasio, M. F., van der Does, W., Barry, J. R., & Putman, P. (2019). Electroencephalography theta/beta ratio covaries with mind wandering and functional connectivity in the executive control network. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1452, 52-64.
- Verguts, T., & Notebaert, W. (2009). Adaptation by binding: a learning account of cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 252-257.
- Vicente, K. J. (2002). Ecological Interface Design: Progress and challenges. *Human Factors*, 44, 62-78.
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1990). The ecology of human-machine systems II: Mediating "direct perception" in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2, 207-249.
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1992). Ecological Interface Design: Theoretical foundations. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22, 589-606.
- Walsh, M. M., & Anderson, J. R. (2012). Learning from experience: event-related potential correlates of reward processing, neural adaptation, and behavioral choice. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36, 1870-1884.
- Wang, C., Ulbert, I., Schomer, L. D., Marinkovic, K., & Halgren, E. (2005). Responses of Human Anterior Cingulate Cortex Microdomains to Error Detection, Conflict Monitoring, Stimulus-Response Mapping, Familiarity, and Orienting. *Journal of Neuroscience*, 25, 604-613.

- Wentink, M., Stassen, L. P. S., Alwayn, I., Hosman, R. J. A. W., & Stassen, H. G. (2003). Rasmussen's model of human behavior in laparoscopy training. *Surgical Endoscopy And Other Interventional Techniques*, 17, 1241 – 1246.
- Wickelgren, A. W. (1977). Speed-accuracy tradeoff and information processing dynamics. *Acta Psychologica*, 41, 67-85.
- Wirstad, J. (1988). *On knowledge structures for process operators*. Goodstein, L. P., Andersen, H. B., & Olsen, S. E. (Eds.) *Tasks, Errors, and Mental Models* (pp. 50-69). London: Taylor and Francis.
- 山口雄三 (1983a). Fm θ (I). 臨床脳波, 25, 276-281.
- 山口雄三 (1983b). Fm θ (II). 臨床脳波, 25, 352-358.
- 山口雄三. (1983c). Fm θ (III). 臨床脳波, 25, 425-431.
- Yamaguchi, Y., Kuwano, S., & Tsujimoto, T. (1981). Properties of frontal theta bursts appearing on mental work. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 52, S48.
- Yamaguchi, Y., Tsuda, K., & Asada, H. (1990). Topography of frontal midline theta rhythms during serial calculation. *Electroencephalography and Neurophysiology*, 75, S163.
- 山本健一. (2000). 最新 意識と脳—心の電源としての意識— サイエンス社

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援をいただきました。

特に指導教授である依田麻子先生には、研究の進め方や枠組みについて細やかなご指導やご助言をいただき、生理心理学という分野について多くの示唆を得ることができました。ここに、心から感謝と御礼を申し上げます。

また、ご多忙の中、副査をお引き受けいただきました内藤桂津雄先生、齋藤慶典先生には、本論文の構成について貴重なご助言をいただきました。深く御礼申し上げます。

本論文は、修士課程時に森昭雄先生のもとで実験を重ねていた前頭部 θ 帯域の研究がベースとなっております。森昭雄先生には、脳波の研究手法や測定方法など多くのご助言をいただきました。心から感謝いたします。

本論文の実験には、多くの方々にご協力いただきました。貴重なお時間を割いて実験にご参加いただいた皆さまに感謝の意を申し上げます。

最後に、本論文のためにご協力いただいた全ての皆さまに心から感謝を申し上げます。本当にありがとうございました。

令和3年2月

川島 哲史