

論文内容の要旨

氏名：^{かわしま}川島 ^{きとし}哲史

博士の専攻分野の名称：博士（心理学）

論文題名：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

本論文は、認知制御と行動パフォーマンスの関係を生理心理学的観点から検討することを目的とした。このため本論文では、人間の認知制御を行動パフォーマンスに応じて3つのレベルに分類する認知制御モデルである Skill-Rule-Knowledge モデル（以下、SRK モデル）に基づいた検討を行った。また、認知制御に関係する生理的反応として脳波に着目し、近年、認知活動と関連して出現することで注目されている脳波である前頭部 θ 帯域の活動を中心とした実験的検証から行動パフォーマンスと認知制御の関係について解明することを試みた。本論文は、第1章の背景と目的、第2章から第4章までの実証研究、第5章の総合的考察から構成される。

第1章 本論文の背景と目的

第1章では、はじめに本論文の主要な概念である認知制御についての心理学的研究を概観し、認知制御を“行動の遂行に必要な一連の認知プロセス”と定義した上で、その研究の焦点が非慣習的な行動に対する制御のプロセスから慣習的な行動に対する自動的プロセスへの段階的移行であることを述べた。次に、SRK モデルについて、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ことを表したモデルであるため、制御のプロセスから自動的プロセスへの段階的移行を説明するモデルとして適していることを指摘した。また、SRK モデルの認知制御レベルであるスキルベース、ルールベース、知識ベースについて、それぞれの特徴について説明を行った。具体的には、スキルベースは熟練した行動、ルールベースはある程度慣習的な行動、知識ベースは新規や不慣れな行動に対して用いられる認知制御であることを説明し、技能習得の観点から考えた場合は知識ベース、ルールベース、スキルベースの順で認知制御が自動化されることを述べた。その後、SRK モデルのフレームワークの不足点として、実験的検討がほとんどみられないこと、脳活動との関連が検討されていないことを示した。

次に、認知制御と脳活動について、近年の研究を中心に概観し、認知制御に関連する脳部位として、前頭部に位置する前頭前野 (prefrontal cortex) と前帯状回皮質 (anterior cingulate cortex: ACC) が多くの研究で報告されていることを述べた。また、前頭部の中でも特に ACC の活動が認知制御に関連して増減することを指摘した。その後、認知制御と脳波の先行研究を概観し、脳波の中でも前頭部 θ 帯域が ACC に限局して出現することについて言及した。この活動は、記憶の符号化や検索、短期記憶の保持、新奇性やエラーの検出などに関連して増大することが報告されており、認知制御に必要な認知プロセス全般に反応する包括的な脳活動であることが示唆されている。また、エラーの検出後に活動が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可能性があり、学習における自動化の程度を予想できる脳活動として注目されている。こうした先行研究から、前頭部 θ 帯域の活動は、SRK モデルに対する脳活動の指標として機能する可能性があることを述べた。

最後に、本論文の具体的な目的として、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こと、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こと、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こと、4) これらの結果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ことの4点を挙げた。

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

第2章では、第1章で述べた目的を検討するため、SRK モデルの認知制御レベルであるスキルベース、ルールベース、知識ベースの特徴に基づいた3種類の暗算課題を作成し、これらの課題の違いが人間の代表的な背景脳波の周波数帯域である θ 帯域 (4-7 Hz)、 α 帯域 (8-12 Hz)、 β 帯域 (13-30 Hz) に及ぼす影響について実験的検討を行った。

課題のパフォーマンスを確認するため、課題ごとに標準化係数を算出して比較したところ、知識ベース、

ルールベース、スキルベースの順でパフォーマンスが上昇することが示された。また、背景脳波の活動は、安静時と比較して暗算課題時に各周波数帯域において増減することが示された。さらに、安静時を基準とした各周波数帯域の出現率を算出して分析した結果、前頭部における θ 帯域の出現率が課題間で異なったことから、背景脳波の中でも前頭部 θ 帯域の活動がSRKモデルの認知制御レベルの違いにより変動する可能性があることが示唆された。

一方で、研究の限界として、前頭部 θ 帯域の周波数帯域は先行研究によって統一されていないことから、第2章で対象とした4-7 Hzの周波数帯域と実際に前頭部 θ 帯域の活動が活性化している周波数帯域は異なっていた可能性を指摘し、今後は前頭部 θ 帯域の活動が活性化する周波数帯域を確認した上で検討を行う必要があることを述べた。

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

第3章では、第2章の限界を踏まえて、第2章と同様の暗算課題を用いて前頭部 θ 帯域の活動についてより詳細に検討した。このため、背景脳波の周波数帯域について高速フーリエ変換（Fast fourier transform: FFT）を実施し、前頭部 θ 帯域の活動が活性化する周波数帯域を分析した。また、第2章では標準化係数として平均化していた課題のパフォーマンスについて、解答数、解答時間、正答数、正答率といった個々の要因に分類して分析を行った。

その結果、課題のパフォーマンスは、解答数、解答時間、正答数については、知識ベース、ルールベース、スキルベースの順で上昇したが、正答率については知識ベースとルールベースの間に統計的な有意差が確認できなかった。また、FFTの結果から前頭部 θ 帯域の周波数帯域を確認したところ、5.4-8.0 Hzの周波数帯域に顕著な活性化が認められ、ACCの位置にあたる電極であるFz周辺に限局した活動が確認された。このことから、5.4-8.0 Hzを前頭部 θ 帯域の周波数帯域として設定し、安静時を基準とした相対電力を算出して課題間の比較を行ったところ、前頭部 θ 帯域の活動は知識ベースにおいて最も増大し、スキルベースにおいて最も減少することが明らかとなった。一方で、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合いによって知識ベース寄り、もしくはスキルベース寄りに近似する可能性が示唆された。

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—

第4章では、第2章で作成した3種類の暗算課題の内、知識ベースの課題を用いて、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検討を行った。具体的には、知識ベースの認知制御を用いる暗算課題を3回実施し、課題の習熟に伴う認知制御の自動化が前頭部 θ 帯域の活動に与える影響について経時的に測定を行った。課題の習熟を促すため、測定間には正否のフィードバックを行う練習期間を設けた。また、練習による効果を確認するため、1回目の測定時にルールベースとスキルベースの暗算課題を実施した。

その結果、課題のパフォーマンスは1回目、2回目、3回目の順で上昇したことから、練習の効果が認められた。また、ルールベースおよびスキルベースの課題との比較から、課題の認知制御レベルは3回目の時点で知識ベースからルールベースとスキルベースの中間程度まで移行したことが示された。対照的に、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明らかとなった。これらの結果から、前頭部 θ 帯域の活動は、課題の習熟による認知制御レベルの自動化に伴い減少していくことが示唆された。

第5章 総合的考察

第5章では、第2章から第4章までの実験的検証で得られた知見を述べ、これらの知見をまとめた総合的考察を試みるとともに今後の展望について述べた。第2章から第4章までに得られた知見は以下の4つとなる。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。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。3) 前頭部 θ 帯域の活動をSRKモデル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が、ルールベースの認知制御においては課題への習熟度に応じて変動する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。4) 知識ベースの認知制御を用いる課題に習熟していく過程において、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伴い、前頭部 θ 帯域の活動は減少していく。

これらの知見から、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という SRK モデルのフレームワークの指標として、前頭部 θ 帯域の活動が有用であることが示唆された。本論文では、これまで十分に検討されてこなかった SRK モデルのフレームワークに対する実験的検証や脳活動との関連を生理心理学的観点から明らかにしたことから、行動パフォーマンスの向上に伴う認知制御の段階的移行について、脳活動との関連も含めた新たな知見を提供することができたと考えられる。