

論文の内容の要旨

論文題目 ラットとヒトを用いたメタ認知的な行動制御のシステムの理解

氏名 結城 笙子

序論

メタ認知とは「知っていることを知っている」などとも言い換えられるように、自身の認知に関する知識や認知のことである。特に方略制御としての側面に重きを置くと、メタ認知とは、自身の認知状態に関する表象を利用した制御プロセスであり、その機能は自身の認知状態を利用した柔軟で効率的な行動方略制御を可能にすることとされる。

この機能を実現するためには、少なくともメタ認知的な手掛かりを行動や方略の制御に反映させるための機構が存在する必要がある。しかし、過去のヒトを対象とした研究からは、メタ認知的な手掛かりを利用すること自体に何らかの認知的コストがかかり、それによるパフォーマンス上の損失を上回る利得が得られる状況でなければ、行動の最適化にはつながらないことが示唆されている。そうであれば、メタ認知的な手掛かりをただ反映させるだけの機構では不十分である。方略制御としてのメタ認知には、メタ認知的な手掛かりと、これと同時に存在する非メタ認知的な手掛かりのうち、どちらをどの程度最終的な行動決定に反映するかを適切に調整するシステムが必要であると考えられる。しかし、このようなメタ認知に基づく行動制御の行動レベルでの性質や、これを成立させている神経基盤は未だ明らかではない。

第1章

ラットを対象に、メタ認知的な手掛かりに基づいた行動制御が可能かを検討した。使用したメタ認知課題では、遅延多肢位置合わせ課題の見本合わせ直前に、そのまま見本合わせを続行するか、正答時の報酬を減らすことと引き換えに、回避するかを選択できた。すなわち、正答が出来るような場合のみ選択的に課題の続行を選択し、正答できなさそうであれば回避することが、ラットにとって報酬最大化に最も適うように設計されていた。この課題選択は実際の見本合わせより前に要求されるため、課題選択時点で見本合わせの正誤の予測に有効な手掛かりは、見本位置の記憶確信度のみである。つまり、記憶確信度が高い場合のみ記憶課題に進み、低い場合は非記憶課題に進むことがラットにとって最適な行動制御であった。記憶確信度が高い場合に選択的に課題続行を選択していたのであれば、その自分で選んだ際の正答率は、記憶確信度によらず続行を強制された条件での正答率より高くなると予測されるため、この差分をメタ認知的な行動の指標、選択効果とみなした。

結果、6肢遅延位置見本合わせ課題を基礎課題として用いた場合、実験に用いた全個体で強制課題続行時の正答率と選択課題続行時の正答率の間に有意な差が見られた。さらに、この6肢遅延位置見本合わせ課題を用いた場合は、見本位置が呈示されず、課題選択と見本合わせ部分だけが要求される見本なし試行において、通常試行よりも有意に多く回避を選択するという結果が見られた。これらの結果から、6肢遅延位置見本合わせ課題を用いた場合には、ラットでもメタ認知能力を示すと言える。

しかし、基礎課題としてよりチャンスレベルの高い2肢遅延位置見本合わせ課題を用いた場合には、強制課題続行時の正答率と選択課題続行時の正答率の間に有意な差は見られなかった。この結果の違いは、課題のチャンスレベルが低く記憶確信度を課題選択に利用することの効用が高い場合に選択的にメタ認知的な行動制御が生じていたことを示唆する。

第2章

前章ではチャンスレベルごとに異なった個体を用いていたため、チャンスレベルの違いによる影響が同個体内でも生じるかは明らかではない。そこで、同一の個体内でも実験条件を切り替え、これに応じたメタ認知的行動の変化が生じるかを検討した。そのような行動制御の変化が見られれば、メタ認知の調整機構の存在をより強く示唆するものと考えられる。

チャンスレベルの高い課題である2肢課題を行っていた個体を、チャンスレベルの低い6肢課題を用いて再訓練し、選択効果が見られるようになるかどうかを検討した。さらに、課題のチャンスレベルと同様に基礎課題の正答率に影響を与えうる要因として、見本提示後、比較刺激の呈示までの時間の長さがあると考えた。これらを検討するため、新規個体

を訓練し、課題選択レバー呈示までと呈示後の時間を延長した。その結果、選択効果は、個体内で課題のチャンスレベルがより低い場合や、見本提示から弁別までの間隔が長い場合など、その課題で正答するのがより難しい状況で出現しやすくなることが明らかとなった。この結果は、第 1 章の個体間比較から示唆された仮説を支持し、本研究で注目する課題選択が比較刺激の数や遅延時間の長さといった特定の特徴量によって制御されるものであるというよりも、より一般的に環境への適応を捉えており、またラットが状況に応じたメタ認知的行動の切り替えが可能であること、ひいてはメタ認知的行動の調整機構を持つことを示唆する。

第 3 章

メタ認知的な行動制御とその調節機構の神経基盤を解明するために、メタ認知のモニタリングの神経基盤についての知見が既にあり、かつ全脳からの脳活動計測が可能なヒトを対象に、MRI を用いてメタ認知的な行動制御中の脳活動を計測した。

参加者は、ラットを用いた実験と同様の構造を持つ遅延音見本合わせ課題に、見本合わせ直前の得点に関するリスク選択 (高リスク・高リターンか低リスク・低リターン) を導入したメタ認知課題を課された。この課題でも、見本音に対する記憶確信度が高い場合に選択的に高リスク・高リターンを選択し、そうでない場合には低リスク・低リターンを選択することが最も有効な戦略となっていた。また、ラット課題と同様に、このリスク選択が可能な条件と、どちらかのリスクしか選べない強制条件が設定され、高リスク・高リターンを選択した条件と、それを強制された条件での正答率の差分をメタ認知的な行動の指標とした。

メタ認知的な行動制御に関与する脳内ネットワークを検討するために、まずメタ認知課題のリスク選択フェイズにおいて、選択可能条件で強制条件よりも有意に活動が増大する領域を探索した。その結果、内側前頭前野の腹側部と背側部、楔前部にメタ認知的なリスク選択時に特異的な活動がみられた。

これらの領域について、参加者内での記憶確信度に基づくリスク選択に応じた機能的な関係の変化を検討した。内側前頭前野の腹側部と背側部、楔前部間の機能的結合は、高リスク・高リターンを選択した試行で低リスク・低リターンを選択した試行よりも有意に高くなることが分かった。さらに、参加者間で、メタ認知の行動指標、つまり高リスク・高リターンを選択した場合の正答率と、それを強制された場合の差分が大きい参加者ほど、内側前頭前野の腹側部と背側部間の機能的結合の同様の条件間差分も大きくなっていたことが明らかになった。これらの結果は、内側前頭前野と楔前部を結ぶ脳内ネットワークがメタ認知に基づく行動制御に関与し、とくに内側前頭前野内での情報のやりとりがその調

整に対応することを示唆する。

第4章

本研究がここまでで示したのはあくまで行動と神経活動の相関関係である。そこで、前章で行った実験で取得したデータを用いて追加解析を行い、内側前頭前野の腹側部と背側部、楔前部をつなぐメタ認知関連ネットワーク内の情報伝播の方向性、ひいては階層性を第4章として検討した。

手法としては Dynamic causal modeling (DCM) 法によるモデルベース解析を用いた。DCM は関心のある領域間が実験的操作とは独立に基本的な結合をもつところに、特定の領域の活動賦活が何らかの実験的操作によって励起され、その影響が元々の結合に応じて関心のある領域間で伝播していく、という過程をモデリングすることで、関心領域間の情報の伝播の方向性、さらには階層性の検討を可能とするものである。

モデルの推定は、前章における解析の結果に基づき、内側前頭前野の腹側部と背側部、楔前部、そしてリスク選択画面の呈示という視覚的な情報がメタ認知関連ネットワークを駆動すると考えられたため、視覚野を含めた4領域を用いて行われた。まず参加者毎に、すべての領域が課題と独立に双方向で結合でき、また視覚野の賦活は課題や条件によらず、リスク選択画面の呈示によって上昇するものの、メタ認知課題でリスク選択が可能な場合のみ、この賦活の増加を受けて関心領域内のすべての結合が変化するというモデルを一度当てはめ、そこから最終的に最も当てはまりの良いモデルを参加者間共通で1つ求めた。

最終的に選択されたモデルを解釈すると、メタ認知的なリスク選択時には、課題と独立に参加者間で一貫してみられていた前頭前野内側部の背側部から腹側部、楔前部という情報伝播経路から、前頭前野内側部の腹側部から背側部、そして楔前部へという経路への切り替えが生じていたことが示唆された。

討論

本研究はメタ認知に基づく行動制御のシステムの理解をめざし、まずラットの行動レベルの実験からその制御の規則性を探索し、メタ認知的行動を調整するような機構が広く動物でも共有されていることを示した。次にヒトを対象とした脳活動計測から、メタ認知的行動制御の脳内での実装を検討し、内側前頭前野の腹側部と背側部、楔前部がメタ認知的な行動制御に関与し、特に内側前頭前野内の情報伝播がその調節機構と対応していることを示した。これらの結果から、本研究はメタ認知的な手掛かりに基づく行動制御の性質と、その性質を支える脳内システムについて今後より深く検討可能なモデルを提供することに成功したと言える。