

連続的な意思決定過程におけるメタ認知の神経及び行動メカニズム

Neural and Behavioral Mechanisms of Metacognition Under Sequential Decision-Making Processes

南條 啓孝^{1,3}, 山本 哲也^{1,2}, David Aguilar-Lleyda³, 赤石 れい³, 定藤 規弘^{1,2}
Yoshinori Nanjo, Tetsuya Yamamoto, David Aguilar-Lleyda, Rei Akaishi, Norihiro Sadato

¹自然科学研究機構生理学研究所, ²総合研究大学院大学, ³理化学研究所脳神経科学研究センター
National Institute for Physiological Sciences, The Graduate University for Advanced Studies, R IKEN CBS,
yoshinori.nyanjo@gmail.com

概要

本研究は、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) により、ヒトのメタ認知プロセスを支える神経基盤を明らかにすることを目的とした。確信度評定を伴う連続的な知覚意思決定課題を健常成人 34 名が行い、その間の脳活動を fMRI で撮像した。その結果、意思決定に対する確信度に応じて前内側前頭前野が、連続する意思決定において判断を切り替える制御プロセスに背側前帯状皮質が関係することを示した。更に、前帯状皮質周囲領域に両プロセスに共通する神経活動が確認でき、メタ認知プロセスに空間的な関連性が示された。

キーワード: ifMRI, medial prefrontal cortex, metacognition

1. 背景と目的

我々は自己の認知を俯瞰することで、意思決定や学習能率を向上させることができる。このような自己の認知を監視し、後続する行動を制御するプロセスから成る高次機能は、メタ認知として知られている[1, 2]。メタ認知の監視 (メタ認知的モニタリング) は、認知についての認知の表現でも知られている。これは我々が日常的に遭遇する、tip of tongue (TOT, 何かを思い出す時に喉まで出かかっているが思い出せない状態) と関連があり、よく例示される。TOT 状態では対象を思い出すことはできないがそれを”知っているということ”を認識(知って)いる” というメタ認知的モニタリングの一例である。我々が対象を思い出すための戦略の1つとして、記憶の検索時間を調節することが考えられる。このようにモニタリングの情報を受けて、後続する行動を制御するプロセスはメタ認知的コントロールとよばれ、両者は連続的な関係をもっている。

近年の認知神経科学研究では、メタ認知のモニタリングに焦点を当てて研究が進められてきている。参加者は知覚意思決定を行い自らの意思決定に対して、それがどの程度尤もらしいか確信度を評定させるパラダイムが用いられている[3]。確信度評定により、認知(知覚的意思決定)に対する認知(確信度)であるメタ

認知的モニタリングを表現することができると考えられている。確信度を用いて個人ごとに推定されるメタ認知感度などのモデルパラメータと MRI 構造画像のボクセル密度[3]や fMRI 信号[4]との個人差が検討され、外側の前頭棘皮質や前頭前野の関与が示されている。

多くの研究がメタ認知的モニタリングに着目してきたが、メタ認知は監視と制御の両プロセスから成り、制御過程まで含めて検討しなければメタ認知の理解は難しい。一方、メタ認知の神経基盤が検討され始めた2000年初期は、監視よりもむしろ error detection などの制御過程に重きがおかれ、特に内側前頭前野が重要な役割を担うと考えられてきた[5]。しかし、監視と制御の単一過程では両プロセスに関連する神経活動を検討することができないという問題点があった。

本研究は、上記の問題点を解決しメタ認知プロセスの神経基盤を明らかにするために、確信度評定を伴う連続的な知覚意思決定課題を設計し、課題中の脳活動を fMRI で撮像した。我々は 1) モニタリングは前頭前野、2) コントロールは前頭前野内の別の領域、3) 両プロセスは共通領域が存在すると仮説をたて、以下ではこれらを検証した。

2. 方法

2.1 参加者

本研究は、右利きの日本人健常成人 34 名が実験に参加した [女性: 24 名, 男性 10 名, Mean±s.d. = 23.6±3.5 歳, 範囲: 20 歳から 34 歳]。4 名は、T2w 画像が取得できていない理由により、MRI データ解析から除外した。

2.2 実験刺激及び実験課題

実験課題は、MATLAB R_2018b (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) にアドオンした Psychtoolbox-3 で制御された。液晶ディスプレイプロジェクター (解像度 =

1280×1024, 距離=190.8cm, 視角=1.02 度) からミラ一越しに見たスクリーン上に, 黒背景に 2 つの白丸からなる視覚刺激を等距離に呈示した (図 1A). 参加者は右手に光学式反応ボタンボックスを持ち, 左右のボタンを用いて大きさ弁別と確信度評定を行った.

本実験では, 強制二肢選択パラダイムによる確信度評定を伴う連続的な知覚意思決定課題を実施した. 課題は, 最初意思決定に対する確信度が後続する意思決定(選択を変更するかどうか)にどのように影響するかを調べるために設計された. 1 試行内において, 各参加者はまず, (1) スクリーン上の 2 つの円形刺激をみて (1s), どちらの円形刺激が大きいのか弁別するよう求められた. 刺激差は 4 段階 (0.75, 1.5, 3.0, 6.0%) から構成され, 画面中央の左右に呈示された. その後, (2) 参加者は左右どちらの刺激が大きく感じたかボタン操作で回答し, 50 点から成るスケール (1=最小確信度, 50=最大確信度) を用いて確信度評定を行った (2s). 続いて, (3) 1.5 秒のインターバルがあり, その間に 1 回目の決定が画面中央の左右どちらかの位置に呈示された. 最後に, (4) 同じ円形刺激が再度呈示され (1s), (5) 弁別と確信度評定を同じ刺激に対して行わせた. 毎試行後には判断の正確さに関する結果は呈示されなかった. 本実験は, 上記を 48 試行行うランを計 4 ラン実施した.

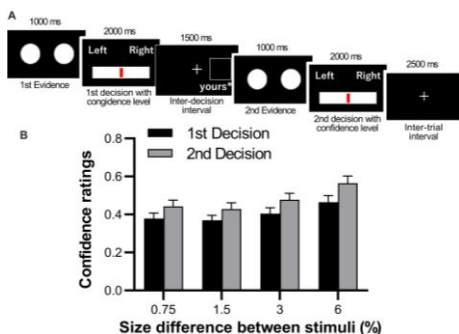


図 1. (A) 実験課題. (B) 確信度評定. 全参加者の確信度の平均値を示す. 評定値は 0-1 の範囲で標準化しており, 誤差は standard error of mean (SEM) である.

2.3 行動データ解析

2.3.1 確信度評定

知覚意思決定における確信度は, 外的な刺激差の影響を受けて変動することが知られている[6]. 本実験においても同様に, 各参加者の確信度が刺激差によって影響されるか検討するために, 各参加者の確信度の平均値を刺激差(4 段階)及び判断(2 回)ごとに求め, 刺要因の効果を調べた.(図 1B)

2.3.2 判断の心変わり (Change of Mind)

本研究は, メタ認知の監視及び制御の両プロセスに焦点を当てている. メタ認知における制御過程を行動上検討する方法の 1 つは, 監視 (確信) が後続する意思決定に与える影響を調べることである. しかし, 確信度は刺激差などの外的な要因の影響を受け変動することが知られており, 単純に確信度を扱うと外的に誘発された刺激由来の確信の影響を調べることになる. 本研究ではメタ認知がもつ内的な成分に焦点をあてるために, 各刺激差における 1 回目の意思決定に対する確信度の中央値を基準にして, High/Low Confidence 試行に全試行を分割する処理を施した. その後, 1 回目から 2 回目にかけて判断を変更する確率を求め, 最初の確信が後の意思決定に与える影響を調べた (図 2).

2.4 MRI データ取得

各参加者の MR 画像は, 3T MRI scanner (MAGNETOM Verio 3T; Siemens Healthineers, Erlangen, Germany) で, 標準的な 32-channel phased-array coil を用いて全脳から取得された. 機能画像は, multi-band gradient-echo echo-planar image (EPI) sequences (TR = 1,000 ms, TE = 35 ms, flip angle = 65 deg, FOV = 192 × 192 mm², matrix size = 96 × 96, slices thickness = 2.5 mm, 60 slices to the transversal brain, voxel size = 2.0 × 2.0 × 2.5 mm³, multi-band acceleration factor = 6, phase-encoding direction = anterior to posterior) 取得された. 各ランは, 520 volume から構成された. 機能画像取得前に, spin-echo EPI 画像が異なる位相 encoding 方向で撮像された. T1-, T2-構造画像は別のセッションにて, Yamamoto et al., 2021 と同様に撮像された[7].

2.5 MRI データ解析

前処理は, Human Connectome Project (HCP) Pipelines v4.0.1[8] を用いて, 傾斜磁場の非線形性補正, 頭の動き補正, 磁化率変化による画像歪み補正, 頭部位置合わせ及び標準化, ノイズ除去, 空間的平滑化 (FWHM: 6mm) が EPI 画像に対して行われた.

前処理後のデータは, statistical parametric mapping (SPM) 12 software (Wellcome Trust Centre for Neuroimaging University College London) により, 一般線形モデル (GLM) を用いて解析された. 固定効果による個人レベル解析では, 以下 6 つの回帰子を用意した. 1st decision (1 回目の刺激呈示から確信度評

定終了までの3秒間): High/Low Confidence 試行の2種類, 2nd decision (2回目の刺激呈示から確信度評定終了までの3秒間): High/Low Confidence 試行において, Switch (判断を変更)と Stay (同じ判断を繰り返した)試行の4種類. 上記のイベント時系列に対して, 標準血行動態応答関数で畳み込んだ時系列を回帰子として使用した. 104sの high-pass filter 及び AR(1)で自己回帰モデルを適用した.

ランダム効果による集団解析では, メタ認知的モニタリング及びコントロールに関わる神経基盤を描出した. 確信の効果を調べる為に, 1回目の意思決定における確信の差 (high > low confidence)に one-sample t-test を行った. 次に, 判断の心変わりに関わる神経活動を描出するために, Switch と Stay の神経活動の差を one-sample t-test で求めた. これらの集団レベルでの解析は, クラスターレベルで閾値を定めた ($p < 0.001$ uncorrected, $p < 0.05$ FEW corrected at cluster level). 最後に, これら両プロセスに共通する神経活動があるか検討するために, 描出されたメタ認知的モニタリングに関連する領域を基に mask を作成し, コントロール領域対して inclusive mask として用い conjunction 解析を行った.

3. 結果

3.1 確信度評定

まず, 参加者の確信度評定が, 刺激差の影響を受けるか検討した. 各参加者の各刺激差における確信度を 1st/2nd decision 各々で平均値を求めた. この確信度に対して我々は, 反復測定 2 要因分散分析を行い, 有意な主効果を確認した [刺激差: $F(3, 99) = 22.18$, $p < 0.001$; 判断数: $F(1, 33) = 19.61$, $p < 0.001$]. 一方, 交互作用は有意ではなかった [$F(3, 99) = 2.36$, $p = 0.076$]. この結果から, 確信度は, 外的な刺激の影響を受けることが確認できた.

3.2 判断の心変わり

続いて, 内的に生成されたメタ認知的モニタリングが後続する意思決定へ与えるか検証するために, 1回目から2回目の意思決定にかけての change of mind を評価した. 先の確信度の解析により, 確信度は外的な刺激の影響を受けることが確認できた. 従って, 2.3.2の中央値による全試行の分割が刺激の影響を低減させる上で1つの解決策といえる. その後, 高/低

確信試行の間で判断の変更確率に違いがあるか対応のある t 検定を行い, 有意な差を確認した [high: 0.120 ± 0.019 (Mean \pm SEM); low: 0.205 ± 0.019 (Mean \pm SEM); $t(33) = 4.59$, $p < 0.001$; 図 2A].

次に我々は, この確信が参加者の正解不正解の応答とは独立に後続する意思決定へ影響しているか調べた. 図 2A は確信度により全試行を分割したが, この中にはその判断が正解/不正解であった試行が混在している. そこで参加者自身の応答とは独立に確信が change of mind に与える影響を調べるために, 反復測定 2 要因分散分析を行った (図 2B). その結果, 有意な主効果 [確信: $F(1, 33) = 19.54$, $p < 0.001$; 応答: $F(1, 33) = 66.02$, $p < 0.001$]及び交互作用 [$F(1, 33) = 10.72$, $p = 0.002$]を示した. この結果は, 内的に生成された確信が, 参加者自身の応答修正とは独立に change of mind に影響を与えていることを示している.

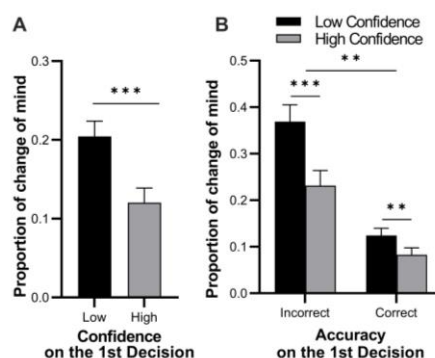


図 2. 行動データ解析結果. (A) 確証バイアス. (B) error detection. 誤差は, SEM を示す.

3.3 メタ認知的モニタリングの神経表象

メタ認知的モニタリングに関係する神経活動を描出するために, 高確信と低確信試行の神経活動の差を検討した (2.5 参照). その結果, 前内側前頭前野 (amPFC)において有意な活動が確認できた (図 3B).

3.4 change of mind の神経基盤

次に, change of mind を支える神経基盤を調べる為に, switch と stay を比較した. 我々は, 主に背側前帯状皮質 (dACC)及び下頭頂小葉 (IPL)において有意な活動を示した (図 3A).

3.5 共通領域

最後に, 両プロセスにおける神経活動の空間的な関連性を調べた. ここまでの結果をみると, 両プロセスは空間的に異なる神経表象をもつように見える. しか

し、行動データ (図2)は、両プロセスに関連性があることを示している。我々はこれら2つのプロセスにおいて共通の神経基盤があるか調べる為に、conjunction解析を行った (2.5参照)。その結果、前帯状皮質周囲領域 (perigenual ACC)で、両プロセスに共通する有意な神経活動を確認した (図3B)。

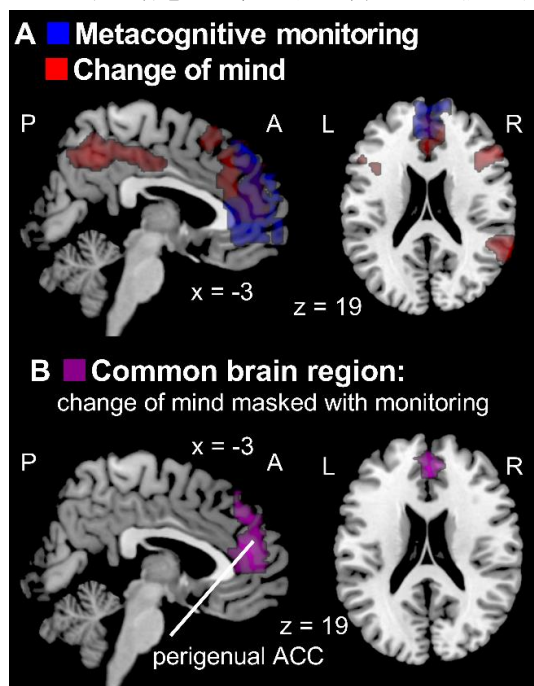


図3. (A) メタ認知プロセスの神経基盤. (B) 両プロセスに共通する神経基盤.

4. 考察

本研究は、連続的な意思決定過程におけるメタ認知の行動及び神経基盤を検討した。行動では、内的に生成されたメタ認知が後続する意思決定に影響する機能的役割があることを示した。今回の研究において扱った確信は、刺激の影響を最小化する解析処理を施している点から、内的に生成された成分に着目していると捉えることができ、記憶や学習などで扱われた従来のメタ認知の概念と合致すると考えられる [1]。

メタ認知的モニタリングの神経基盤として、本研究では amPFC が描出された。先行研究では、主に外側部で表象されていたのに対し [4]、今回の所見は内側であった。この違いは、先行研究はメタ認知感度と神経活動の個人差に焦点を当てていたのに対して、今回は個人内の解析を行っている点にあると考えられる。従って、個人内のメタ認知的モニタリングは前頭前野の内側で、その個人差は外側で表象されることが示唆される。一方、制御過程では、dACC という前頭前野の

異なる領域の活動を示した。この領域は、認知制御に関係する議論があり、それらの所見とも整合的である [9]。最後に、両プロセスは、perigenual ACC において共通する基盤があることが示された。この領域は、単一試行における制御よりも長期的な制御過程に関係すると考えられている [10]。本実験は連続的な意思決定を扱っており、本領域が監視と制御過程の橋渡しをの役割を担っているのではないかと考えられる。

5. 参考文献

- [1] Flavell JH. Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive-developmental inquiry. *American Psychologist*. 1979;34: 906–911. doi:10.1037/0003-066X.34.10.906
- [2] Nelson T O, Narens L. METAMEMORY: A THEORETICAL FRAMEWORK AND NEW FINDINGS. 1990.
- [3] Fleming SM, Weil RS, Nagy Z, Dolan RJ, Rees G. Relating introspective accuracy to individual differences in brain structure. *Science*. 2010;329: 1541–1543. doi:10.1126/science.1191883
- [4] Fleming SM, Huijgen J, Dolan RJ. Prefrontal contributions to metacognition in perceptual decision making. *Journal of Neuroscience*. 2012;32: 6117–6125. doi:10.1523/JNEUROSCI.6489-11.2012
- [5] Shimamura AP. What is metacognition? The brain knows. *The American Journal of Psychology*. 2000;113: 142.
- [6] Lebreton M, Abitbol R, Daunizeau J, Pessiglione M. Automatic integration of confidence in the brain valuation signal. *Nat Neurosci*. 2015;18: 1159–1167. doi:10.1038/nn.4064
- [7] Yamamoto T, Fukunaga M, Sugawara SK, Hamano YH, Sadato N. Quantitative Evaluations of Geometrical Distortion Corrections in Cortical Surface-Based Analysis of High-Resolution Functional MRI Data at 7T. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2021;53: 1220–1234. doi:10.1002/jmri.27420
- [8] Glasser MF, Sotiropoulos SN, Wilson JA, Coalson TS, Fischl B, Andersson JL, et al. The minimal preprocessing pipelines for the Human Connectome Project. *NeuroImage*. 2013;80: 105–124. doi:10.1016/j.neuroimage.2013.04.127
- [9] Bustamante L, Lieder F, Musslick S, Shenhav A, Cohen J. Learning to Overexert Cognitive Control in a Stroop Task. *Cogn Affect Behav Neurosci*. 2021;21: 453–471. doi:10.3758/s13415-020-00845-x
- [10] Roberts AC. Prefrontal Regulation of Threat-Elicited Behaviors: A Pathway to Translation. *Annual Review of Psychology*. 2020;71: 357–387. doi:10.1146/annurev-psych-010419-050905