

未来への想像力を育む脳の進化

—メタ認知に基づくヒト知性の起源がサルの脳で明らかに—

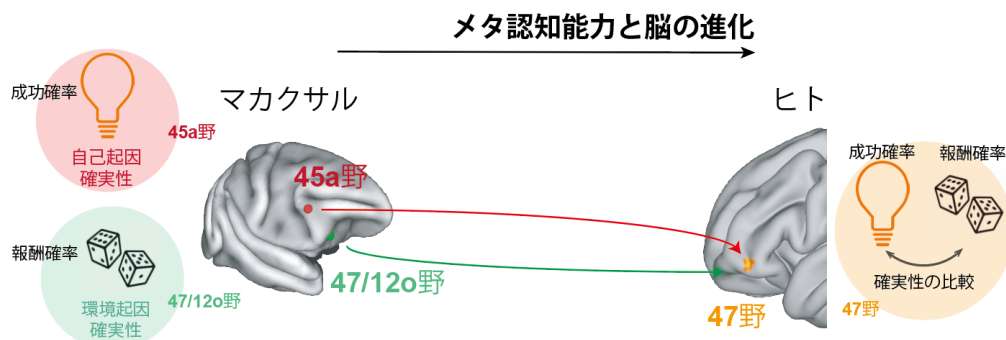
概要

理化学研究所（理研）脳神経科学研究センター思考・実行機能研究チームの宮本健太郎チームディレクターらの国際共同研究チームは、未来を想像し計画を立てる、ヒトに顕著なメタ認知^[1]能力の進化的起源をマカクサル^[2]（以下、サル）の脳に発見しました。

本研究成果は、ヒトと他の霊長類の大脳皮質、特に前頭葉を中心とするネットワークのどのような構造の違いが、ヒト特有の知性と人間らしさを生むのかを明らかにするもので、前頭葉の損傷・機能障害に起因する高次脳機能障害^[3]や前頭側頭型認知症^[4]の治療法・リハビリテーション技術の開発への貢献が期待されます。

今回、国際共同研究チームは、将来の知覚判断の成功確率を予測し、別の行動を選択した場合の報酬確率と比較する「展望的メタ認知課題」を開発し、この課題を行っているサルの全脳活動を機能的MRI（fMRI）^[5]で計測し、サルとヒトで比較しました。ヒトでは前外側前頭葉47野（47野）が、この報酬確率の比較のために欠かせない働きを担いますが、47野は進化的に新しく、サルには解剖学的に対応する脳領域が存在しません。しかし、サルもこの課題をヒトと同じようにうまく行うことができました。さらに、サルの場合、成功確率の予測と報酬確率の予測が、それぞれ別の進化的に古い前頭葉領域で担われ、情報が分散的に処理されていることが分かりました。このことから同じメタ認知に基づいた未来予測を行う場合でも、二つの前頭葉領域の関与を必要とするサルよりも、47野の局所神経回路のみで集積的に処理できるヒトの方が、効率性に優れ、この違いがヒト特有の知性を生む可能性が示唆されました。

本研究は、科学雑誌『*Nature Human Behaviour*』オンライン版（5月18日付：日本時間5月18日）に掲載されます。



背景

私たちは、未来の計画を立てる際、遭遇し得るさまざまな環境・状況とともに、それぞれの環境・状況下でうまく行動できるかを想像します。この未来の可能性を想像する能力のおかげで、実際の行為を伴うことなく、より良いプランを選択することができます。

例えば、土地勘のあまりない街へ演劇を見に行くために、どの交通手段で行くか計画を立てる場合、自分と環境のそれぞれに起因する確率（確実性）を考えます。車を運転して行く場合には、最適なルートを自分で的確に判断し、限られた時間で会場にたどり着けそうか（自己起因確実性）を、バスに乗って行く場合には、遅れがちなバスが定刻通りに到着しそうか（環境起因確実性）を、考えなければなりません。より確実に演劇の開始時刻に間に合うためには、この二つの確実性を正しく推定・比較し、適切な交通手段を選択する必要があります。

宮本チームディレクターらは、過去に、ヒトを対象にした研究を行い、自身の未来についての思考を俯瞰的（ふかんてき）に捉え評価する「展望的メタ認知」を担う前外側前頭葉47野（47野）が、未来の計画を立てる際に欠かせない役割を果たすことを発見しました^{注)}。しかし47野は進化的に新しい脳領域で、ヒトに近縁なサルにおいても、ヒトの47野と同様の神経回路の配線パターンを示すような解剖学的相同領域⁶⁾は存在しません。

そこで、国際共同研究チームは、47野を持たないサルは未来の状態を想像することができるのか、未来の状態を想像できるとしたら、脳の働きと仕組みは、ヒトの場合とどう異なるのかを検証することに挑みました。

注) Miyamoto et al., Identification and disruption of a neural mechanism for accumulating prospective metacognitive information prior to decision-making. *Neuron*, April 21, 2021.

研究手法と成果

国際共同研究チームは、言語報告のできないサルにおいても、未来の計画を立てる能力を客観的に計測できる方法確立しました。具体的には、自身が将来行う難しい知覚判断の成功確率を予測する「展望的メタ認知課題」をサルに行わせました。さらに、サルの全脳活動をfMRIで計測することで、未来を想像し計画を立てる能力の進化的起源をサルで探りました。

まず、この未来の計画を立てる場面を、ランダムドット運動方向判断⁷⁾を用いて再現しました。具体的には、「点の平均的な運動方向を正しく判別できると報酬がもらえるが、点の動きがランダムで分かりにくいため、その成功確率に応じてもらうことになる『自己起因確実性』オプション」と「点の動きが一樣で運動方向の判別は簡単だけれども、報酬が（点の数に応じて）確率的にしかもらえない『環境起因確実性』オプション」を比べ、より報酬がもらえる可能性の高そうなオプションを選んでもらう「展望的メタ認知課題」を開発しました（図1A、動画参照：<https://x.gd/RzVgK>（PW：Rikenpress））。

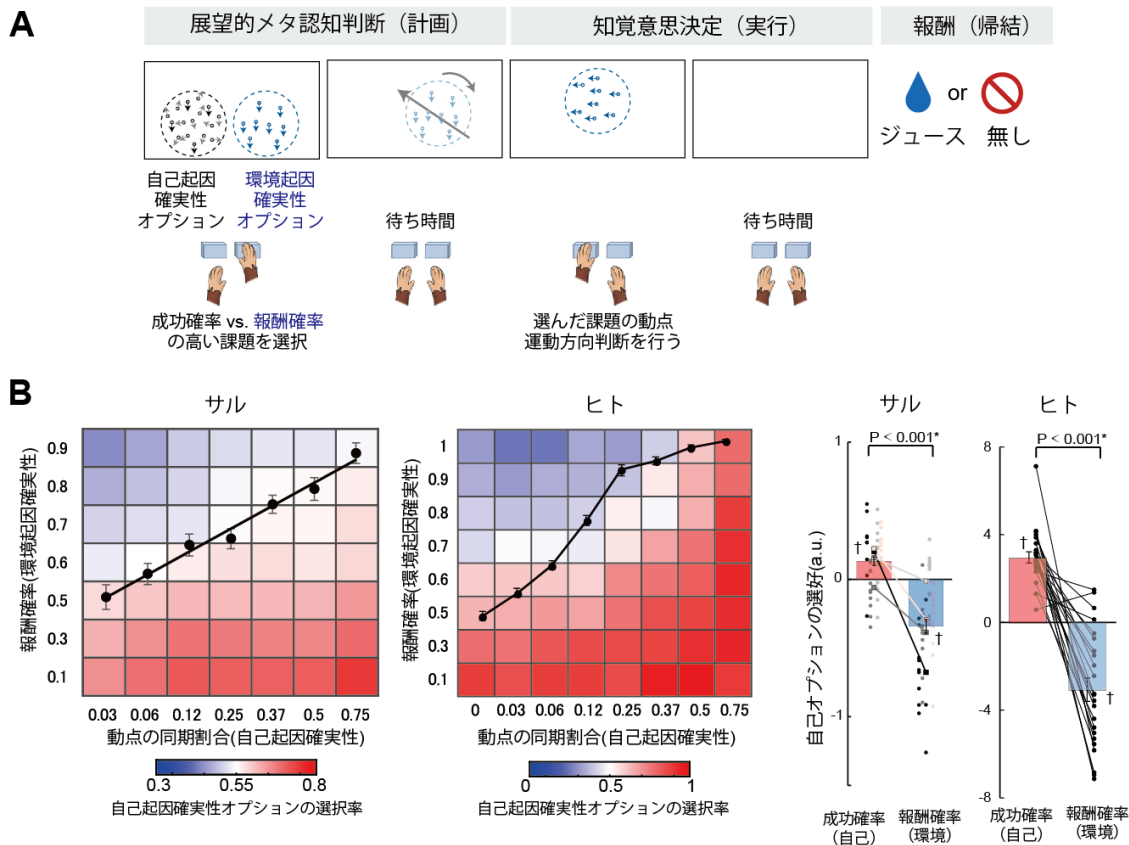


図 1 ヒトとサルが同じように解くことができる「展望的メタ認知課題」

(A) 展望的メタ認知課題の流れ。展望的メタ認知判断（計画）ステージでは、「点の平均的な運動方向を正しく判別できると報酬がもらえるが、点の動きがランダムで分かりにくいので、その成功確率に応じて報酬をもらうことになる『自己起因確実性』オプション」（成功確率はトライアルごとに変動するが、報酬確率は常に 100%）（左）と「点の動きが一樣で運動方向の判別は簡単だが、点の数に応じた確率的にしか報酬をもらえない『環境起因確実性』オプション」（報酬確率はトライアルごとに変動するが、成功確率は常に 100%に近い）（右）を比べ、より確率の高いオプションを選択することが求められた。次の知覚意思決定（実行）ステージでは選択したオプションのみが画面に残り、大多数の動点が左右のどちらに動いているか回答を求められた。正答した場合、選んだオプションの動点の数に比例した確率で報酬（ジュース）を受け取った。

(B) 左図：サルもヒトも、自己起因確実性オプションの成功確率を正しく予測し、環境起因確実性オプションで提示された報酬確率よりも予測した成功確率が高い場合に、自己起因確実性オプションをより高頻度で選んだ。実際に、黒線で示される二つのオプションの報酬確率の均衡線を境にして、オプションの選択を切り替えていた。右図：自己起因確実性オプションの選択（自己オプションの選好）に、課題の成功確率は正の、環境起因の報酬確率は負の影響を与えるが、課題の成功確率の効果は、サルの場合、ヒトと比べて小さかった。a.u. : arbitrary unit (任意単位) の略。p<0.001* : 有意水準 0.1%での有意差ありを表す。

サルが、「自己起因確実性」オプションの成功確率を正しく推定して、「環境起因確実性」オプションの報酬確率との比較ができれば、自身の未来の状態を想像できるといえます。サルにこの課題を行わせたところ、ヒトほどには成績が高くないものの、二つの確率を比較して最適なオプションを選べた（図 1B）ことから、サルも、未来を想像し計画を立てる能力を一定程度持っていることが分かりました。

次に、47 野を持たないサルは、どのようにして自己と環境に起因する確率を

比較しているのかを検証するために、サルが展望的メタ認知課題を行っている最中の全脳の神経活動を、fMRI で計測しました。

未来を想像し計画を立てる能力に関わる、最初の二つのオプションの確率を比較するステージに着目したところ、ヒトとサルの両方に存在する、腹外側前頭葉 45a 野 (45a 野) と外側眼窩前頭皮質 47/12o 野 (47/12o 野) が活動することを発見しました。具体的には、自己起因確実性オプションの課題の成功確率に比例して、45a 野の活動が上昇し、他方で、環境起因確実性オプションの報酬確率に比例して、47/12o 野の活動が上昇しました (図 2A)。

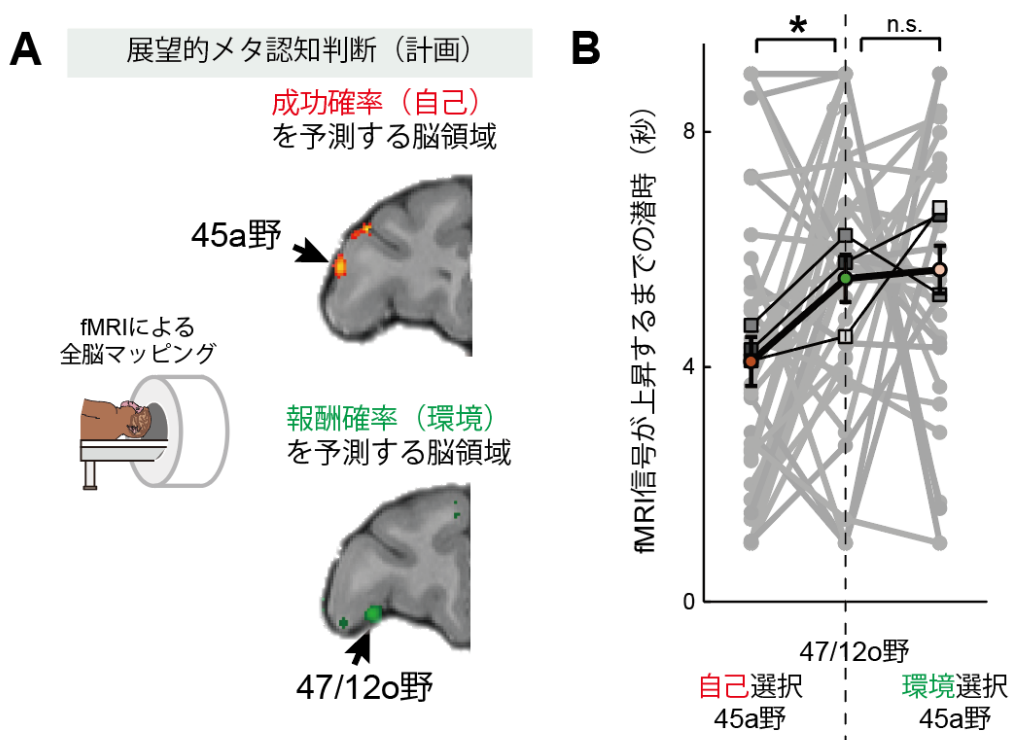


図 2 サルの 45a 野と 47/12o 野の、自己と環境に起因する未来を予測する相補的な働き

(A) 展望的メタ認知判断 (計画) におけるサルの神経活動を、fMRI を用いて全脳マッピングしたところ、課題の成功確率に比例して、腹外側前頭葉 45a 野 (45a 野) の活動が上昇し、報酬確率に比例して、外側眼窩前頭皮質 47/12o 野 (47/12o 野) の活動が上昇することが分かった。

(B) サルが「自己起因確実性」オプションを選んだ場合 (自己選択)、45a 野の方が 47/12o 野よりも早く信号が上昇していた。「*」: 有意水準 5%での有意差あり。ns: 「not significant (有意差なし)」の略号。

サルは、45a 野の活動の方が 47/12o 野の活動よりも早く上昇する (信号がピークに達するまでの時間) 場合に、「自己起因確実性」オプションを、そうでない場合に「環境起因確実性」オプションを、それぞれ選ぶ傾向があり (図 2B)、二つのオプションを比較してから神経活動の fMRI 信号の上昇までの時間の差が大きいほど、最適なオプションを正しく選択できていました。サルの場合は、45a 野と 47/12o 野の相補的な働きにより、ヒト 47 野の未来計画のための機能が代替されていることが明らかになりました。

さらに、経頭蓋超音波刺激法 (TUS) ^[8] を用いて、未来の確率予測に関わる 45a 野と 47/12o 野の神経活動をそれぞれ、非侵襲的かつ一時的に操作 (阻害) することで、サルの未来を想像し計画を立てるための行動がどのように変化するかを検証しました (図 3)。

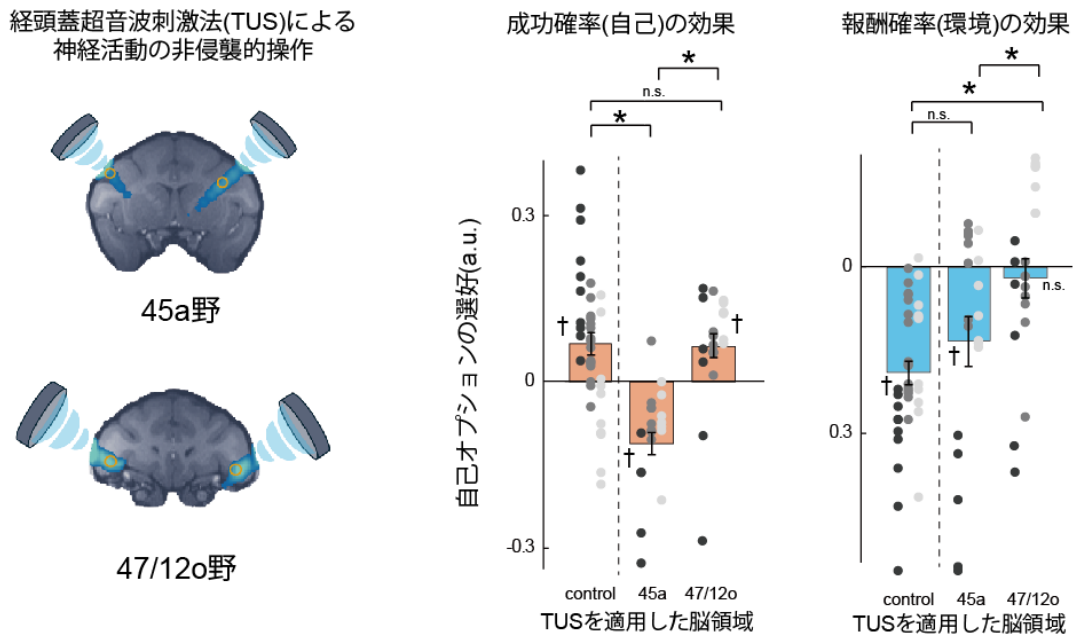


図 3 経頭蓋超音波刺激法 (TUS) による神経活動の阻害と未来予測能力への影響

TUS を用いて、45a 野の神経活動を非侵襲的かつ一時的に操作 (阻害) すると、サルは、「自己起因確実性」オプシヨンの課題確率を正しく推定できなくなった。対照的に、47/12o 野の神経活動を非侵襲的かつ一時的に操作 (阻害) すると「環境起因確実性」オプシヨンの報酬確率の情報を使えなくなった。この機能二重乖離 (かいり) は、45a 野と 47/12o 野の神経回路の分散性・独立性を示唆した。

この結果、45a 野の活動を阻害することにより、サルは、「自己起因確実性」オプシヨンの課題確率を正しく推定できなくなり、「環境起因確実性」オプシヨンの報酬確率のみに従って、オプシヨンの選択を行うようになりました。対照的に、47/12o 野の活動を操作 (阻害) すると、「環境起因確実性」オプシヨンの報酬確率の情報を使えなくなり、「自己起因確実性」オプシヨンの成功確率のみに従って行動するようになりました。こうしたことから、45a 野と 47/12o 野の神経回路の分散性・独立性が示唆されました。

最後に、サルの 45a 野・47/12o 野と、ヒトの 47 野、それぞれが形づくる神経回路の配線パターンがどのくらい似ているか、ネットワークの観点から定量化するために、安静時の fMRI 信号の同期性 (機能的結合) のパターンを比較する「フィンガープリント法^[9]」と呼ばれる解析を行いました。解析の結果、45a 野と 47/12o 野のつくるネットワークは、それぞれ単独ではどちらもヒト 47 野と似ていませんが、45a 野と 47/12o 野が合わさることによりつくられる包括的なネットワークはヒト 47 野と、非常に類似していることが見いだされました (図 4A)。つまり、ネットワークの網羅性の面でも、サルの 45a 野と 47/12o 野

は相補的にヒト 47 野に相当する役割を果たすことが分かりました。さらに、サルの 45a 野-47/12o 野の包括的なネットワークとの類似度を、ヒト脳の各部位について計測してマップ化したところ、未来を想像し計画を立てるのに寄与するヒト 47 野が際立って、その類似度が高い（パターンの違いを測るマンハッタン距離⁹⁾が短い）ことも見いだされました（図 4B）。とりわけヒト 47 野が、ヒトに近縁のサルの 45a 野と 47/12o 野がそれぞれ支配下に置く神経回路を統合・包摂するような形で、進化的に発達した可能性が示唆されました。

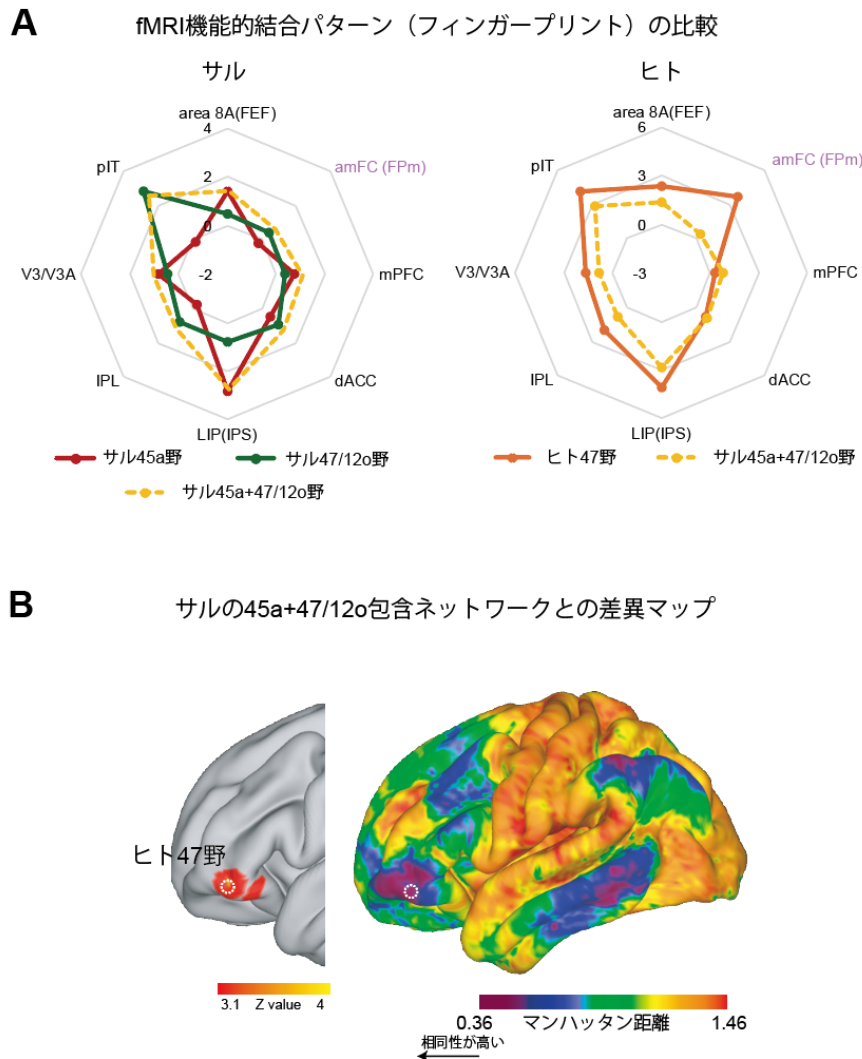


図 4 サル 45a 野・47/12o 野とヒト 47 野がつくる神経回路ネットワークのパターン比較

(A) 安静時の fMRI 信号の同期性（機能的結合）のパターンを種間比較すると、45a 野（赤）と 47/12o 野（緑）のつくるネットワークは、それぞれ単独ではどちらもヒト 47 野（オレンジ）と似ていないが、45a 野と 47/12o 野が合わさることによりつくられる包括的なネットワーク（黄）はヒト 47 野と似ていた。

(B) サルの 45a 野と 47/12o 野の包括的なネットワークと似たネットワークパターンを示すヒト脳領域は 47 野に限局していた。

今後の期待

本研究は、なぜヒトだけが、他の動物ではあまり発達していない、メタ認知と未来の想像力に基づいた知能を持てたのかを、ヒト47野を中心とした神経回路の効率性に基づいて明らかにしました。進化的に新しく、ヒトのみにしか存在しない47野が、全く新しく脳に加わった領域ではなく、他の霊長類にも存在する45a野と47/12o野の結合パターンを包摂するように出来上がってきたという発見は、脳の進化の新たな仕組みを提案するものです。

さらに、高次脳機能障害は、前頭葉の損傷に、前頭側頭型認知症は、前頭葉の組織変性と萎縮に、それぞれ起因することが知られています。宮本チームディレクターらの一連の研究成果は、未来の計画を立てる能力が47野の機能阻害によって低下することを示唆しました。45a野や47/12o野はヒトにも存在する脳領域なので、ニューロフィードバック法^[10]を用いて、これらの領域が協応して活動するように訓練を行えば、損傷したヒト47野の機能を代替できる可能性があります。このように、本研究で明らかになった、脳のネットワーク構造の進化の仕組みに着想を得た、リハビリテーション技術の開発への貢献が期待されます。

論文情報

<タイトル>

Brain activity, disruption, and connectivity comparisons identify origins of human metacognition in other primates

<著者名>

Kentaro Miyamoto, Simone D'Ambrogio, Caroline Harbison, Nicole Eichert, Urs Schuffelgen, Andrew Emberton, Jerome Sallet, Rogier B. Mars, Nima Khalighinejad, Matthew F. S. Rushworth

<雑誌>

Nature Human Behaviour

<DOI>

10.1038/s41562-026-02473-w

補足説明

[1] メタ認知

自分自身の認知活動（主に思考や知覚など）を認知し、主観的に評価する能力。内省とも呼ばれる。ヒトは、メタ認知能力に基づいて、過去の自分の行動を反省するだけでなく、未来の自分の行動とその帰結を想像していると考えられ、近年、教育分野でも重要な能力の一つとして注目されている。

[2] マカクサル

マカク属 (*Macaca*) に属するサルの総称。ニホンザル、台湾ザル、カニクイザルが含まれ、本研究ではアカゲザル（学名：*Macaca mulatta*）を研究対象とした。

[3] 高次脳機能障害

主に、外傷や脳血管障害（脳梗塞）による前頭葉の損傷に起因する、記憶・注意・認知の障害。計画を立てて実行する能力の低下を伴う。

[4] 前頭側頭型認知症

主に脳の前頭葉・側頭葉の組織が変性し、萎縮することで発症すると考えられている認知症の一つ。計画を立てて実行する能力の低下を伴う。

[5] 機能的 MRI (fMRI)

MRI（磁気共鳴画像装置）を使って、脳の血流反応を計測することにより、脳の活動を非侵襲的に測定する方法。機能的 MRI (fMRI) 法の基礎となっているボールド効果（Blood Oxygenation Level Dependent [BOLD]効果：血液酸素化レベル依存効果）は、小川誠二博士（現東北福祉大学特別荣誉教授）によって発見されたもので、世界で広く用いられている。fMRI は functional Magnetic Resonance Imaging の略。

[6] 解剖学的相同領域、フィンガープリント法

解剖学的相同領域とは、異なる生物種において、共通の祖先から受け継がれた、起源が同じで構造的・発生学的に類似した器官や領域。フィンガープリント法は、ヒトとサルなど異なる種の各脳領域について、解剖学的相同性を定量化する手法。それぞれの脳領域について、他領域との安静時 fMRI 信号の機能的結合によって計測される結合強度パターンをベクトルとして表現し、その類似度を比較することで、種間の脳領域の特徴を定量化する。これにより、脳上の空間的な位置関係によらず、進化的に対応する解剖学的相同領域をネットワーク構造に基づいて推定できる。

[7] ランダムドット運動方向判断

100 個の小さい点がめいめいさまざまな方向に動く様子を見て、より多くの点が動いている方向が左右のどちらなのかを判断するテスト。「自己起因確実性」オプションの難易度は、左または右に同期して動く点の割合（コヒーレンス）を、問題ごとに変えることでコントロールされている（正解すれば必ずジュースの報酬がもらえる）。一方、「環境起因確実性」オプションでは、全ての点と同じ方向に動き判断自体は簡単だが、正解した場合にジュースの報酬が確率的にしかもらえず、その確率の情報は、小さな点の数で示されている。

[8] 経頭蓋超音波刺激法 (TUS)

集束超音波刺激を用いて、頭蓋の外から脳の表面および深部を、高い空間解像度で非侵襲的・安全に刺激する方法。近年、うつ病治療など臨床的应用も模索されている。本研究では、反復刺激シーケンス技術を用いて、fMRI で同定した脳の特定の領域の活動のみを短時間継続的に阻害した。TUS は Transcranial Ultrasound Stimulation の略。

[9] マンハッタン距離

ヒトとサルの各脳領域の機能的結合強度の差の絶対値の総和のこと。本研究では、これを用いてヒトとサルのフィンガープリントの違い（数学的な距離）を評価した。

[10] ニューロフィードバック法

計測した脳活動をリアルタイムで表示し、目標とする脳状態になったときに、本人にフィードバックを与えることで、目標とする脳状態を自発的に再現できるよう訓練す

る方法。

国際共同研究チーム

理化学研究所 脳神経科学研究センター 思考・実行機能研究チーム
チームディレクター 宮本健太郎 (ミヤモト・ケンタロウ)

オックスフォード大学 (英国) 実験心理学部
教授 マシュー・ラッシュワース (Matthew F. S. Rushworth)
博士課程学生 シモーネ・ダンブロージオ (Simone D'Ambrogio)
リサーチフェロー ニマ・カリギネジャド (Nima Khalighinejad)

研究支援

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業基盤研究 (A)「霊長類の未来と他者への想像力に基づく行動生成的なメタ認知神経回路の解明 (研究代表者: 宮本健太郎)」、同学術変革領域研究 (B)「ヒトの社会的メタ認知に基づいた柔軟なコントラリアン行動の生成 (研究代表者: 宮本健太郎)」「コントラリアン生物学の創生: 逆張り戦略がもたらす新しい社会均衡のしくみ (研究代表者: 宮本健太郎)」、日本医療研究開発機構 (AMED) 脳神経科学統合プログラム「脳データ統合プラットフォームの開発と活用による脳機能と疾患病態の解明 (研究代表者: 岡部繁男)」による助成を受けて行われました。

発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。
理化学研究所 脳神経科学研究センター 思考・実行機能研究チーム
チームディレクター 宮本健太郎 (ミヤモト・ケンタロウ)
Tel: 050-3495-0149
Email: kentaro.miyamoto.wg@riken.jp

<発表者のコメント>

ヒト 47 野のネットワークと、サル 45a 野-47/12o 野の包括的なネットワークはほぼ同じパターンを示しましたが、唯一、前頭極 10 野と呼ばれる脳の先端部との結合の強さがサルではヒトほどに強くありませんでした。10 野は、新しい事柄を探索して評価するのに関わる領域として知られています。47 野と 10 野の結合は、ヒトの創造的な想像力と関係しているかもしれず、この二つの領域の関係にフォーカスを当てて、人間の人間らしさの起源を探究する研究を続けていきたいです。(宮本健太郎)



宮本健太郎

<機関窓口>

理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247

Email: ex-press@ml.riken.jp
