

特集 1 数千オーダーの精神神経疾患脳 MRI データから何がわかるのか？**1. 戦略的国際脳科学研究推進プログラム（国際脳）での
大規模 MRI 研究—高精度データ取得・解析の将来**林 拓也^{1, 2)}, 麻生 俊彦¹⁾, 田中 沙織^{3, 4)}, 花川 隆^{5, 6)}, 笠井 清登⁷⁾, 小池 進介⁸⁾

抄録：近年の脳 MRI 研究では、撮像技術の著しい進歩により高精度データの取得が可能になる一方で、機種間でのデータの質のばらつきや研究成果の再現性における課題が指摘されている。戦略的国際脳科学研究推進プログラム（国際脳）では、これらの課題に対応するため、国内 18 機関の多施設による高精度 MRI 研究を展開し、健常人および神経精神疾患患者 7,000 名以上の大規模データを収集した。本プログラムでは、MRI 装置・機種を超えて調和した撮像プロトコル（HARP）を開発・導入し、特にトラベリングサブジェクトを活用した装置間差の評価や、高時空間分解能の構造 MRI（空間解像度 0.8mm）、機能的 MRI（2.4mm, 10 分間）や拡散 MRI（1.7mm）を 30 分以内のプロトコルで実現した。さらに、HCP Pipeline を基盤とした標準的前処理解析手法の確立や、脳機能や微細構造の多様な解析アプローチの開発により、国際的にも高い水準の脳機能データベースを構築した。今後、本研究で得られた高精度データと解析手法は、脳の機能構築の解明や精神神経疾患の病態理解、さらには診断・予後予測への応用が期待される。

日本生物学的精神医学会誌 36 (1) : 2-7, 2025

Key words : MRI, brain connectome, brain biomarker, harmonization, database

Large-scale MRI research in Japan Brain/MINDS Beyond — future directions in high-precision data collection and analysis

- 1) 理化学研究所生命機能科学研究センター 脳コネクティクスイメージング研究チーム (〒 650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 6-7-3) Takuya Hayashi, Toshihiko Aso : Laboratory for Brain Connectomics Imaging RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research. 6-7-3 Minatojima-minamimachi, Chuo-ku, Kobe-Shi, Hyogo 650-0047, Japan
- 2) 京都大学大学院医学研究科 脳コネクティクス講座 (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田近衛町) Takuya Hayashi : Brain Connectomics, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University. Yoshida-Konoe-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan
- 3) 奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 情報科学領域 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5) Saori Tanaka : Graduate School of Science and Technology, Division of Information Science, Nara Institute of Science and Technology. 8916-5 Takayama-cho, Ikoma-shi, Nara 630-0192, Japan
- 4) ATR 脳情報通信総合研究所 数理知能研究室 (〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2) Saori Tanaka : Department of Neural Computation for Decision-making, Advanced Telecommunications Research Institute International. 2-2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288, Japan
- 5) 京都大学大学院医学研究科 脳統合イメージング分野 (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田近衛町) Takashi Hanakawa : Integrated Neuroanatomy and Neuroimaging, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University. Yoshida-Konoe-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan
- 6) 京都大学大学院医学研究科附属脳機能総合研究センター (〒 606-8507 京都市左京区聖護院川原町 54) Takashi Hanakawa : Human Brain Research Center, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University. 54 Shogoin-kawahara-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8507, Japan
- 7) 東京大学大学院医学系研究科 脳神経医学専攻臨床神経精神医学講座 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1) Kiyoto Kasai : Department of Neuroscience, Division of Clinical Neuroscience, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, The University of Tokyo. 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan
- 8) 東京大学大学院総合文化研究科附属進化認知科学研究センター (〒 153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1) Shinsuke Koike : Center for Evolutionary Cognitive Sciences, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo. 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

【林 拓也 E-mail : takuya.hayashi@riken.jp】

はじめに

2018 年度から 2023 年度にかけて、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) の支援により、戦略的国際脳科学研究推進プログラム (以下「国際脳」、英語名称は Brain/MINDS Beyond) が実施された。本プログラムは、AMED 革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プログラム (革新脳) における脳 MRI 研究を強化・発展させる目的で開始された。

近年、MRI 撮像法や解析技術は著しい進歩を遂げている。特に、高解像度撮像技術の進展や、機能的 MRI (fMRI) の時間分解能の向上により、より詳細な脳機能の観察が可能となってきた。しかしながら、機種間でのデータ品質のばらつきや脳機能の MRI 研究成果の再現性の不十分さという 2 つの重要な課題が国際的に指摘されていた。これらの課題に対処するため、国際脳では精度の高い機能的 MRI 技術の開発と大規模データの収集という 2 つの戦略的アプローチを採用した。

ヒトの脳皮質機能の理解は、長らく脳機能局在論に基づいて進められてきた。細胞構築による脳領域の分画化研究の歴史は長い、一次視覚野と二次視覚野の境界は明瞭である一方で、ほかの多くの境界領域では明確な判別が困難である。また歴史的にも Brodmann, Vogt & Vogt, Economo & Koskinas, Bailey など、著明な解剖学者の間で分画化に大きな違いがみられたことも、脳分画化の解釈を一層困難なものとしてきた。動物実験においても電気生理学的な機能分画と細胞構築の差異について議論が続いてきた。

国際脳の開始直前の 2016 年に、米国ヒト脳コネクトームプロジェクト (HCP) において、非侵襲的 MRI 技術により、微細構造や機能的結合性や回路の特徴に基づいた新しいヒト脳領域の分画図が発表された^{3, 18)}。この成果は、Brodmann 以来の非常に大きな科学的進歩として評価されている。国際脳ではこれらの最先端技術を基盤として、国内 18 機関の多施設により当初の予定の 3 倍近い 7,000 名以上の高精度な機能的 MRI データが収集された。このデータにはトラベリングサブジェクト (旅行被験者) を含む健常人や神経精神疾患患者が含まれており、解析技術の開発とデータベース化が進められてきた。特に脳の安静状態における自発的活動 (デフォルトモードなど) やその機能回路の解明が進み、健常の脳機能回路の同定だけでなく、病態の解明にも寄与することが期待されている。こうした成果は大

脳皮質の分画化を正確に行うための前処理と共に、今後公開されるデータベースを介して広く活用されることになる。

1. 高精度機能的 MRI データの取得

国際脳では、MRI 装置・機種を超えて調和した撮像プロトコール (Harmonized Protocol: HARP) が策定された⁷⁾。このプロトコールは、3 テスラ MRI 装置の使用、32 チャンネル頭部コイルの採用、そしてマルチバンド EPI (MB-EPI) シーケンスの使用を基本要件として確立された。装置メーカーを問わない方針で開発が進められ、メーカー間の技術協力体制のもと、複数のメーカーに対応したプロトコールが作成・公開されている。

装置間差を評価する手法として、同一被験者が複数施設を移動して MRI 撮像を受けるトラベリングサブジェクト (旅行被験者) 方式を採用し、異なる装置で撮像された同一被験者のデータを直接比較することで施設間・MRI 機種間差の補正技術を開発し、データの質の標準化が行われた。このアプローチは先行する文部科学省・脳科学研究戦略推進プログラム (脳プロ) でも採用され、その有効性が実証されている²⁰⁾。

国際脳の開始時期は MRI 技術の大きな進歩の時期と重なっている。特に注目すべき技術革新として、MB-EPI、別名マルチスライス同時励起画像 (SMS) 法がある。この技術は撮像時間の短縮や空間分解能の向上を実現する技術で、1980 年代に発案されたものの実用化には相当の時間を要した。2000 年代に入って複数の受信用コイルエレメントをもつ頭部コイルにより高速撮像が現実的となり、さらに画像の再構成技術との組み合わせにより、2010 年代に実用化された。実際に同法は HCP や英国バイオバンクプロジェクト (UK Biobank)⁹⁾ の大規模研究に用いられている。

MRI 撮像時の空間・時間分解能の設定には、明確な根拠が示されている。脳皮質の平均的な厚さは 2.6mm とされる⁵⁾ が、高解像度化には撮影法の制限により画質低下を伴う。これらを踏まえて国際脳では、空間分解能を皮質厚よりも高い分解能を確保しつつ同時に画質を担保する事前評価を行うことで、より詳細な機能観察を可能にした。構造画像については 0.8mm、機能的 MRI は 2.4mm の空間解像度とした。機能的 MRI 画像の時間分解能は繰り返し時間 (repetition time: TR) を 0.8 秒に設定し、最低 10 分以上の撮像を行うことで機能的変化をよ

り詳細に捕捉した。拡散 MRI については 1.7mm の空間解像度に設定することで、信号ノイズ比 (SNR) による誤差や空間的歪みの少ない神経突起の皮質分布の観察を可能にした。これらは UK Biobank や HCP から得た知見にも基づいて細かい改良を加え設計されており、臨床現場での 30 分以内で効率良く高性能なデータを得る手法として適したプロトコルである。また各施設におけるプロトコル導入前後にはカウンセリングや試験計測データの QC やメンテナンスなどのサポートも行われ、データの質が担保された。その結果大規模研究でしばしば問題になるプロトコル違反 (意図しない間違いも含めて) の割合も非常に少ないのも特徴的である。

とはいえ機能的 MRI の信号変動の 9 割はノイズといわれている。機能的 MRI の品質を保つことの重要性は撮像段階から認識すべきであり、そのために頭部の固定法による被験者の動きの抑制にも気を遣う必要がある。品質の確認には SNR を基本とした評価手法が有用で、具体的には撮像 1 回あたりの SNR と機能的 MRI の繰り返し回数から品質を推定する。特に、(時間的 SNR = 繰り返し撮像時の画像平均を画像の標準偏差で除した値) × (繰り返し回数の平方根) が簡便な指標として用いられている¹⁰⁾。同じ 3 テスラの装置で同じ調和プロトコルを使用しても、この品質指標は機種によって異なることが国際脳では明らかになり、それに応じた対策も重要である。

なおマルチバンド EPI シーケンスが導入できない装置に対しては、代替的なアプローチも用意されている。この場合、時間分解能を 1.5 ~ 2 秒に落とし、撮像時間を 20 ~ 30 分に延長することで、同程度の品質のデータ取得が可能となる (ただし、被験者の長時間撮像に伴う不安や疲労など体調や倫理面での配慮が必要となる)。また認知課題遂行時の機能的 MRI のプロトコルも提供されている。

2. 高精度データの前処置解析

MRI 画像の高性能化・高解像度化に伴い、MRI 画像の「前処理」における解析技術にもより高度な手法が求められるようになってきている。前処理とは、画像取得後から実際の比較検討・統計を行うための本処理までの間に実施する一連の処理を指す。具体的には、MRI 装置からのデータ抽出、画像フォーマットの変換、磁場不均一性や渦電流などに起因する歪みの補正、フレーム間や異なる画像間の動き補正、脳の形や信号の標準化、ノイズ除去など

が含まれる。これらの処理は互いに密接に関連しているだけでなく、撮像プロトコルの詳細とも強く結びついているため、プロトコルから前処理解析までの全工程を包括的に把握した分析が必要となる。

このように多くの条件を網羅し考慮した最適な手法を研究者が独自に構築するのは非常に困難になりつつあるため、ある程度確立された方法に従ってデータ取得と前処理を行うことが推奨される。しかしすべての要素を理解し、膨大な時間をかけて最適化した手法を個々の研究者が開発することは現実的ではないため、国際脳においては、Human Connectome Project (HCP) Pipeline を中心とした前処理技術を採用している。

これら前処理の具体的な手順と各工程の重要性を理解することは、データの質を担保するうえで不可欠である。特に歪み補正や動き補正、ノイズ除去などの基本的な処理が適切に行われていない場合、後続の解析結果の信頼性や再現性に重大な影響を及ぼす可能性がある。そのため標準化された前処理パイプラインの実行は、研究の再現性と信頼性を確保するうえで重要な役割を果たす。特に大規模な多施設研究データの場合は、施設間差や撮像条件の違いによる影響を最少にするパイプラインの選択がきわめて重要となる。HCP Pipeline は、こうした要件を満たす堅牢な処理基盤として国際的に認知されており、高品質かつ統一的な解析が可能となっている。国際脳の前処理には独自の技術の開発も進んでいる¹⁰⁾。

3. 本処理解析・高次統計・データベース化

前述の前処理の完了後に、本処理としてデータから脳機能構造を評価・統計処理を実施する。この過程には、脳機能・構造・連絡性そのもののモデリングやモデルに基づいた評価項目の算出、さらに統計処理の前段階としてのデータの準備などが含まれる。たとえば皮質構造の解析では、皮質厚、皮質面積、皮質体積などの基本的な指標に加え、より高度な解析も実施される。具体的には、T1 強調画像と T2 強調画像から作成する T1/T2w ミエリン皮質表面画像⁴⁾や、拡散強調画像から作成する神経突起密度²⁾などの微細構造特性の評価が可能となる (図)。また、拡散強調 MRI 画像からは白質内の交差性の神経線維連絡をモデル化し、神経線維連絡を模した「拡散連絡性」も算出可能である。

脳機能を安静時機能的 MRI 画像から推定するに

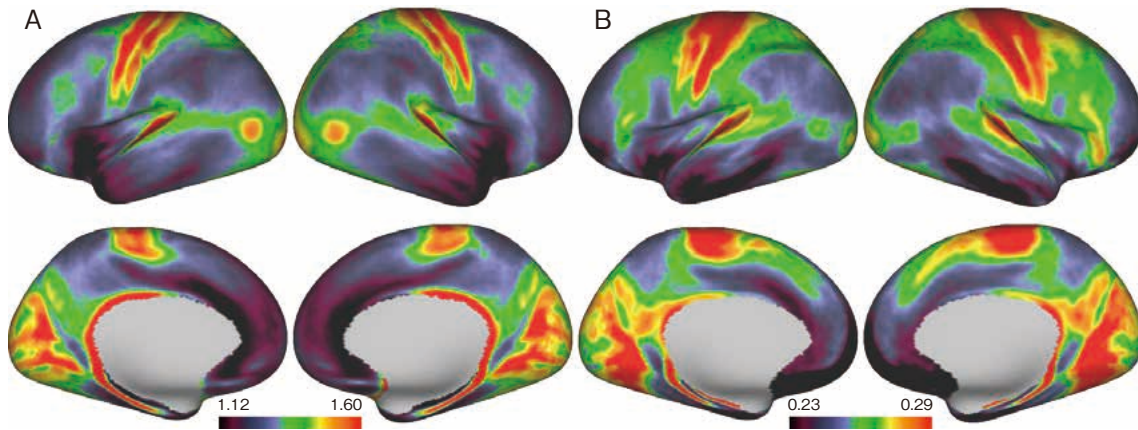


図 国際脳・大規模データから得た日本人 250 例の脳皮質の機能構築マップ

A) 米国 HCP・ワシントン大学で開発された技術である T1w/T2w ミエリンマップ⁹⁾による日本人 250 例の平均。
 B) 国際脳・理研を中心とし米国・英国との国際連携で開発された脳皮質神経突起マップ¹⁰⁾の日本人 250 例の平均。両者、類似した脳皮質表面上のコントラストを呈するが T1w/T2w ミエリンマップは皮質内の主要な脂肪成分であるミエリン（非神経細胞であるオリゴデンドロサイトの細胞膜表面に密集する）のコントラストを表す。一方で、神経突起マップは皮質内の柱状の構造を呈する神経細胞膜構造である神経突起（軸索と樹状突起を総称した名称）の分布を表す。それぞれの皮質内の微細構造の特性を表すとされ、今後、発達や加齢との関連性や健常者や精神疾患患者での脳機構・病態解明への応用が期待される。

は、主に 2 つの重要なアプローチが存在する。第 1 のアプローチは、Brodmann らが行ってきたように、脳皮質には独立した領域（機能分画）が存在するという前提に基づくものである。前述の Glasser らによる片側の脳半球 180 の脳領域の地図を基盤とすることで、多個体における各分画の相違や分画間の機能・構造連絡性の差異を調べることが可能となり、脳の機能分画化に基づいた機能解明と病態理解に重要な知見をもたらしている。機能的連絡性は 2 つの領域の信号値の相関係数を算出により評価されることが多いが、共分散や部分相関などの分析手法¹⁶⁾なども提案されており、生物学的機構との関連性の解明も必要である。

第 2 のアプローチは、領域や分画の前提を置かず、脳全体における機能・構造の特性を画素・頂点ごとに分析する方法である。広大な脳皮質は必ずしも明瞭な境界線で区分できる分画のみで構成されているわけではなく、神経活動が領域間で部分的に重畳している可能性が示唆されている。特に高次の脳機能、意識、学習、記憶、言語、創発性の発現には、複数の機能にかかわる連合野やその機能回路が関与していると考えられる。このような重畳性のある機能回路を推定するモデルとして、時間的独立成分分析による手法¹⁵⁾や、ベイジアン手法による確率的機能回路推定手法 (PROFUMO) などが提案されており、今後のさらなる応用研究が期待されている。

国際脳プログラムの特徴である多機種・メーカー

の MRI 装置で取得されたデータ構成は、メーカーや装置の違いによる測定値のバイアスを考慮した「調和」を統計的に行う必要がある。これに対し、いくつかの手法が提案され、補正が可能であることが明らかになってきている。大規模データからの脳機能構造の解明を進めるうえで、この調和は重要なアプローチとなっており、技術開発の臨床応用という観点でも不可欠と考えられる。実際、国際脳で集積されたトラベリングサブジェクトデータは、すでに先行して非制限公開されており、多施設臨床データの調和のみならず、機種間差の理解や前処理技術開発などの研究にも利活用されている^{8, 13)}。こうした大規模データを、品質評価結果と共に国内外の研究者が効果的に利活用できるデータベース構築も重要な課題として認識されている^{1, 17)}。国際脳データは、生データ・前処理後データとも近日中に公開される予定である。特筆すべき点としては、国内の霊長類 MRI データも含めたデータセット⁶⁾も公開され、ヒトの脳の分析手法の妥当性をヒト・霊長類双方のデータから検証することで、トランスレーショナル研究の推進に貢献すると考えられる。

おわりに

脳 MRI は非侵襲の脳の分析手法として新時代を迎え、高精度なデータの取得、分析手法の標準化、定量的かつ網羅的な分析が必要な時代になってきている。これまでに AMED 革新脳では統合失調症の

脳機構解明^{11, 12)} やうつ病のバイオマーカー開発¹⁹⁾ などが進められ、精神疾患の治療へとつながる成果を上げている。国際脳で得られたデータは国際的にも類を見ない高い品質であり、今後のさらなる高次レベルのデータ分析や数理を用いた分析により、脳の機能構築や神経精神疾患の病態の理解や診断や予後予測に関して有用な知見を提供すると考えている。

謝辞

本研究はAMED 国際脳 (JP18dm0307004, JP18dm0307006, JP21dm0307004, JP18dm0307003, 24wm0625001) により支援をうけた。また研究の推進に技術的支援をうけた Stephen Smith (オックスフォード大学), Gary Zhang (ロンドン大学), Stamatiou Sotiropoulos (ノッティンガム大学), David C Van Essen, Matthew F Glasser (ワシントン大学セントルイス医学校), 本論の執筆の支援をうけた小林玲子氏 (理化学研究所脳コネクティブイメージング研究チーム) に謝意を表す。

倫理的配慮

本論文に記載した筆者らの研究に関してすべて倫理的配慮を行っている。

利益相反

本研究成果に関する利益相反は存在しない。

文 献

- 1) Eke DO, Bernard A, Bjaalie JG, et al (2022) International data governance for neuroscience. *Neuron*, 110 : 600-612.
- 2) Fukutomi H, Glasser MF, Zhang H, et al (2018) Neurite imaging reveals microstructural variations in human cerebral cortical gray matter. *NeuroImage*, 182 : 488-499.
- 3) Glasser MF, Coalson TS, Robinson EC, et al (2016) A multi-modal parcellation of human cerebral cortex. *Nature*, 536 : 171-178.
- 4) Glasser MF and Van Essen DC (2011) Mapping human cortical areas in vivo based on myelin content as revealed by T1- and T2-weighted MRI. *J Neurosci*, 31 : 11597-11616.
- 5) Glasser MF, Smith SM, Marcus DS, et al (2016) The Human Connectome Project's neuroimaging approach. *Nat Neurosci*, 19 : 1175-1187.
- 6) Hayashi T, Hou Y, Glasser MF, et al (2021) The nonhuman primate neuroimaging and neuroanatomy project. *NeuroImage*, 229 : 117726.
- 7) Koike S, Tanaka SC, Okada T, et al (2021) Brain/MINDS beyond human brain MRI project : a protocol for multi-level harmonization across brain disorders throughout the lifespan. *NeuroImage Clin*, 30 : 102600.
- 8) Maikusa N, Zhu Y, Uematsu A, et al (2021) Comparison of traveling-subject and ComBat harmonization methods for assessing structural brain characteristics. *Hum Brain Mapp*, 42 : 5278-5287.
- 9) Miller KL, Alfaro-Almagro F, Bangerter NK, et al (2016) Multimodal population brain imaging in the UK Biobank prospective epidemiological study. *Nat Neurosci*, 19 : 1523-1536.
- 10) Oi Y, Hirose M, Togo H, et al (2023) Identifying and reverting the adverse effects of white matter hyperintensities on cortical surface analyses. *NeuroImage*, 281 : 120377.
- 11) Okada N, Fukunaga M, Miura K, et al (2023) Subcortical volumetric alterations in four major psychiatric disorders : a mega-analysis study of 5604 subjects and a volumetric data-driven approach for classification. *Mol Psychiatry*, 28 : 5206-5216.
- 12) Okada N, Fukunaga M, Yamashita F, et al (2016) Abnormal asymmetries in subcortical brain volume in schizophrenia. *Mol Psychiatry*, 21 : 1460-1466.
- 13) Saito Y, Kamagata K, Andica C, et al (2023) Traveling subject-informed harmonization increases reliability of brain diffusion tensor and neurite mapping. *Aging Dis*, 15 : 2770-2785.
- 14) Smith SM, Beckmann CF, Andersson J, et al (2013) Resting-state fMRI in the Human Connectome Project. *NeuroImage*, 80 : 144-168.
- 15) Smith SM, Miller KL, Moeller S, et al (2012) Temporally-independent functional modes of spontaneous brain activity. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 109 : 3131-3136.
- 16) Smith SM, Miller KL, Salimi-Khorshidi G, et al (2011) Network modelling methods for FMRI. *NeuroImage*, 54 : 875-891.
- 17) Tanaka SC, Kasai K, Okamoto Y, et al (2024) The status of MRI databases across the world focused on psychiatric and neurological disorders. *Psychiatry Clin Neurosci*, 78 : 563-579.
- 18) Van Essen DC, Ugurbil K, Auerbach E, et al (2012) The Human Connectome Project : a data acquisition perspective. *NeuroImage*, 62 : 2222-2231.
- 19) Yamashita A, Sakai Y, Yamada T, et al (2020) Generalizable brain network markers of major depressive

disorder across multiple imaging sites. PLoS Biol, 18 : e3000966.

- 20) Yamashita A, Yahata N, Itahashi T, et al (2019) Harmonization of resting-state functional MRI data

across multiple imaging sites via the separation of site differences into sampling bias and measurement bias. PLoS Biol, 17 : e3000042.

■ ABSTRACT

**Large-scale MRI research in Japan Brain/MINDS Beyond
— future directions in high-precision data collection and analysis**

Takuya Hayashi^{1,2)}, Toshihiko Aso¹⁾, Saori Tanaka^{3,4)}, Takashi Hanakawa^{5,6)}, Kiyoto Kasai⁷⁾, Shinsuke Koike⁸⁾

- 1) *Laboratory for Brain Connectomics Imaging RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research*
- 2) *Brain Connectomics, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University*
- 3) *Graduate School of Science and Technology, Division of Information Science, Nara Institute of Science and Technology*
- 4) *Department of Neural Computation for Decision-making, Advanced Telecommunications Research Institute International*
- 5) *Integrated Neuroanatomy and Neuroimaging, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University*
- 6) *Human Brain Research Center, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University*
- 7) *Department of Neuroscience, Division of Clinical Neuroscience, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, The University of Tokyo*
- 8) *Center for Evolutionary Cognitive Sciences, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo*

While recent advances in MRI technology have enabled high-precision brain imaging, challenges remain in data quality consistency across different MRI systems and research reproducibility. Brain/MINDS Beyond addresses these issues through a large-scale MRI study across 18 Japanese institutions, encompassing over 7,000 participants (healthy controls and neuropsychiatric patients). The program introduced the Harmonized Protocol (HARP) for standardization across different MRI manufacturers and models. Using traveling subjects to assess inter-scanner variations, we achieved high-quality multimodal MRI data within a 30-minute protocol, including structural (0.8mm isotropic), functional (2.4mm isotropic, 10min), and diffusion MRI (1.7mm isotropic). The study established standardized preprocessing methods based on the HCP Pipeline and developed various analytical approaches for investigating brain functional and microstructural architecture. The resulting high-precision database and analytical framework provide a robust foundation for understanding brain organization and neuropsychiatric pathophysiology, with promising applications in clinical diagnosis and prognosis prediction.

(Japanese Journal of Biological Psychiatry 36 (1) : 2-7, 2025)
