

**国際連携を見据えた
戦略的脳科学研究の推進方策について
－中間取りまとめ－**

平成29年8月1日

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会／学術分科会 脳科学委員会
国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会

目 次

要旨	3
1. 序論	5
2. 脳科学研究を巡る国際動向と我が国の現状	
2-1 米国及び欧州の脳科学研究の状況	8
2-2 その他の国の脳科学研究の状況	11
2-3 我が国の脳科学研究の状況	13
2-4 脳科学研究における我が国及び海外の特徴	16
3. 国際連携を見据えた我が国の研究開発戦略	
3-1 国際連携を見据えた我が国の研究開発戦略の方向性	19
3-2 各研究分野の推進方策	23
3-3 データ、リソースの共有	34
3-4 人材育成	36
(参考資料)	
1. 国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会の設置 について(第35回脳科学委員会決定)	38
2. 国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会委員名簿 (第2回まで)	39
3. 国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会の設置 について(第38回脳科学委員会決定)	40
4. 国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会委員名簿 (第3回以降)	41

要 旨

1. 脳科学研究を巡る国際動向等

- ✓ 世界的に、脳の理解を飛躍的に進める上で国際連携にも重点を置きつつトップダウン的にプロジェクトを実施することが不可欠との認識の下、脳科学研究を国家プロジェクトとして強力に推進する動きが顕著になっている（例：米国 BRAIN Initiative (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies Initiative)、欧州 HBP (Human Brain Project) 等)。
- ✓ G7 伊勢志摩サミット等の国際的な枠組みにおいても、精神・神経疾患の克服に向け、脳科学分野での国際連携の重要性が再確認された。
- 我が国も、その特色・強みを生かしつつ国際連携を進めることで、脳科学研究を大きく発展させることが期待できる。

2. 国際連携を見据えた我が国の研究開発戦略

<我が国の脳科学研究の特徴>

- ✓ 我が国の脳科学研究の特色（強み）は、非ヒト霊長類研究の知見・基盤技術、げっ歯類等を用いた遺伝子操作技術や顕微鏡イメージング、非侵襲的 BMI (Brain Machine Interface) におけるデコーディング技術、MRI (Magnetic Resonance Imaging) 装置の全国的普及、PET (Positron Emission Tomography) トレーサーの開発力、個別の研究（ニッチ研究）の高さなど。
- ✓ 一方、大規模データベース化や分野間の連携・橋渡し等に課題。

<国際連携を見据えた脳科学研究の推進方策>

- ✓ 国際連携を見据えた脳科学研究の推進に当たっては、これまで我が国が各分野で先鋭化させてきた脳科学研究を、領域の壁を取り払って融合させるとともに、既存の国内外の研究開発とも連携して取り組むことが必要。
- ✓ 最終的な目標と取り組むべき研究分野は、以下のとおり。

目標：ヒトの脳の動作原理等の神経回路レベルでの解明を目指す。また、精神・神経疾患の早期発見・早期介入の実現や新たな脳型アルゴリズムに基づく人工知能 (AI) の開発に貢献する。

(1) 正常と疾患とその中間段階を含むヒト脳の経時的臨床データの比較研究

発達期における発達障害・統合失調症や青年期から中年期におけるうつ病、老年期における認知症といった世代や病態を跨いだヒト脳に関するデータを、統一プロトコールでの MRI 撮像等により定期的なタイミングで取得し、正常と疾患、その中間段階を比較することによって異常・変化の発生時期や神経回路の異常・変化を特定する。

(2) 非ヒト霊長類脳とヒト脳の比較研究

非ヒト霊長類等での研究において、(1) で明らかになった疾患等に関する神経回路の構造や活動を計測、操作することによって、各神経回路の機能と認知・行動の間の因果関係を立証する。さらに疾患等との関係性を明らかにする。

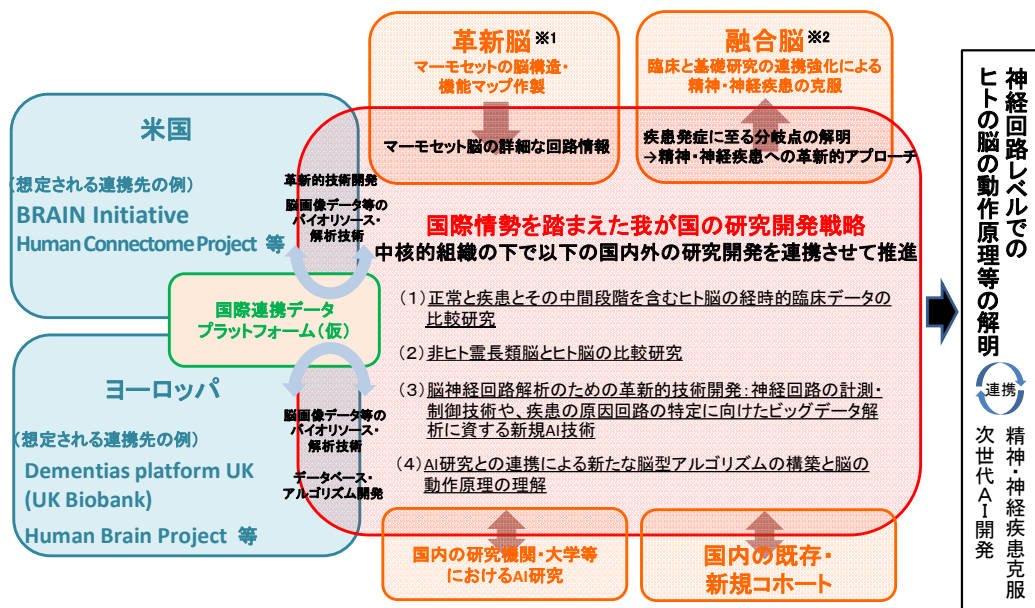
(3) 脳神経回路解析のための革新的技術開発：神経回路の計測・制御技術や、疾患の原因回路の特定に向けたビッグデータ解析に資する新規AI技術

(1)、(2) を行う上で必要な神経回路の計測・制御技術を開発するとともに、神経回路の時系列データを適切にモデル化できる新しいAIによって病態に強く関係する回路を特定する技術を開発する。

(4) AI研究との連携による新たな脳型アルゴリズムの構築と脳の動作原理の理解

現在のAIでは視覚野の回路構造に基づく深層学習と、行動心理学の知見を起源とする強化学習が主要な要素であるが、(1)～(3)とAI研究が連携することにより、少数サンプルからの学習、多様な状況における問題の解決を可能とするヒトの持つ柔軟な認知機構を解明して、新たな脳型アルゴリズムを構築し次世代のAIの開発に貢献するとともに、それらを通して脳の動作原理のより深い理解にフィードバックする。

- ✓ 以上の推進に当たっては、各分野の調整や海外機関との連携において中核的な役割を果たす組織が必要。



国内の他プロジェクトや他研究機関、国外の研究機関と共同で実施

※1 革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト
 ※2 脳科学研究戦略推進プログラム 臨床と基礎研究の連携強化による精神・神経疾患の克服

1. 序論

脳科学研究は、人間とは何かという根源的な問いに答える基礎研究であると同時に、脳の発達障害・老化の制御や、精神・神経疾患の病因解明及び予防・診断・治療法の開発、失われた身体機能の回復・補完を可能とする技術開発をもたらし、医療・福祉など国民生活の質の向上に最も貢献できる研究分野の一つである。また、ここで見いだされた脳の計算原理は現在の AI のアルゴリズムに応用されるなど、その成果は広く社会に適用されてきている。

近年の計測技術や情報処理技術の発展の下、脳科学研究における世界的な動向として、米国では平成 25 年（2013 年）4 月に BRAIN Initiative が発表された。また、欧州では平成 25 年（2013 年）1 月に HBP が EU フラッグシッププロジェクトに選定され、脳科学の大型研究プロジェクトが実施されている。その他の国でも国家プロジェクトとして活発な研究開発が実施又は計画されている。

我が国においても、現代社会が直面する様々な課題の克服に向け、脳科学研究に対する社会からの期待はますます高まっている。このような中、文部科学省では、「社会に貢献する脳科学」の実現を目指して、社会への応用を明確に見据えた脳科学研究を戦略的に推進するため「脳科学研究戦略推進プログラム」（脳プロ）や、霊長類の高次脳機能を担う神経回路の全容をニューロンレベルで解明し、精神・神経疾患の克服につながるヒトの高次脳機能の解明のための研究開発・基盤整備を加速させるため「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト」（革新脳）を実施してきている。

各国の大型脳科学研究プロジェクトに共通する特徴は、①脳情報の読み出しや制御に関係する革新的な技術の開発を目指す、②脳全体の構造や機能のマップを作成することで、全脳レベルでの脳機能の解明を目指す、③脳の理論や計算機科学を活用した融合型研究を目指す、④得られた脳に関するデータを公開し、精神・神経疾患の克服に活用する等にある。個々の研究者のボトムアップ的な努力のみでは脳という複雑な臓器全体の機能解明は難しいため、かつてのヒトゲノムプロジェクトの発想のように、国際連携にも重点を置きつつトップダウン的にプロジェクトを実施することが、脳の理解を飛躍的に進める上で不可欠であるとの共通の認識に基づいている。

これらの大型研究の成功のためには、BRAIN Initiative は脳を理解するのに必要な革新的な技術開発、HBP は計算論に基づいた脳のモデル化、革新脳は霊長類モデルを活用したマップ作成という各プロジェクトの特色を生かしつつ、相互に緊密な連携・協力を行うことが不可欠と考えられている¹。

¹ 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2017 年）」参照

このような国際連携の気運の高まりの下、平成 28 年（2016 年）2 月、G サイエンス学術会議の共同声明において、「脳の理解、疾病からの保護、国際的な脳関連リソースの開発」として以下の 4 つの目標が提案された。

- 1) 国際協力の下での基礎研究の推進
- 2) 脳疾患の診断、予防、治療に向けた国際プログラム
- 3) 脳の理論モデルと脳を基盤とした人工知能の開発
- 4) 社会科学と行動科学を神経科学と統合することによる、脳に対する意識の高い社会の要素としての教育の向上、生活マネジメントの改善

同年 5 月、G7 伊勢志摩サミットでの首脳宣言の附属文書「国際保健のための G7 伊勢志摩ビジョン」において、「活動的な高齢化のための研究開発とイノベーション」に関し、以下の具体的な行動を G7 首脳がとることがコミットされた。

- 1) 人々が自ら選択した設定で年齢を重ねること及び認知症患者を含む高齢者の生活の質の向上を可能にするような生涯を通じた健康的な高齢化を推進する研究開発の重要性を認識する。
- 2) この関連で、以下の重要性を認識する。
 - i) 研究開発プログラムのマッピングを通じ、認知症などの脳疾患を含む脳機能についての根本的な側面に対処する持続的な研究や国際連携を促進し、加えて、国際的で学際的な研究の取組の加速と新技術の開発を行うこと。
 - ii) 開かれた科学及び、加齢に伴う問題に関連する脳科学分野での研究データおよび論文等の公的資金による研究成果の共有を促進すること。
 - iii) 高齢者の活動的な社会参加の促進を目指す活動的な高齢化に関するグッド・プラクティスを共有し、社会科学的研究と医療・ICT・ロボット支援を統合して家族や社会の負担を軽減することにより、相互学習を奨励すること。
 - iv) 早期の検知と治療及び管理のための製品及びサービスの開発、治験及び拡充を行うこと。

International Brain Initiative (IBI) の発足に向けて

平成 28（2016 年）9 月、米国で開催された脳科学に関する国際会合「Coordinating Global Brain Projects」において、データ・ツール・リソースを国際的に共有するために IBS（International Brain Station：国際ブレインステーション（仮称））の構築が提案され、米国国務省の発表「International Brain Initiative Launch and VIP Dialog : Towards an International Brain Station)」では、

「（認知症を始めとする精神・神経疾患の）病態解明が、日本のリーダーシップの下での G7 の優先事項となった。米国は日本、ドイツ、アルゼンチン、国際連合貿易開発会議との協力の下、International Brain Initiative の発足を宣言する。これは仮想的な International Brain Station をその一部とし、この組織は国際的な基礎脳科学、疾患関連脳科学における協力を推進するものである。」

と述べられているように、国際連携の必要性が国際的な共通認識であることが改めて確認され、我が国を含む各国が参加を表明した。

このような状況の下、我が国の脳科学研究が国際競争力を維持しつつ発展するとともに、世界の脳科学研究の発展にも貢献していくためには、戦略的に国際連携を推進することが求められている。

本報告書(中間取りまとめ)は、脳科学研究を巡る国際情勢と我が国の現状を踏まえ、国際連携を見据えた我が国の脳科学研究の今後の推進方策について検討した結果を取りまとめたものである。

なお、本報告書の内容については、引き続き検討を行うこととしている。

2. 脳科学研究を巡る国際動向と我が国の現状

2-1 米国及び欧州の脳科学研究の状況

① 米国 BRAIN Initiative

BRAIN Initiative は、平成 25 年（2013 年）4 月に国策として発表された計画で、脳を理解するための革新的技術開発を基盤とし、シナプスから全脳レベルのネットワークの全体像を解明することを目的としている。

プロジェクト運営には主として 3 つの資金提供機関が寄与しており、それぞれ異なる研究対象課題に対して研究資金を提供する形をとっている。NIH (National Institutes of Health) が米国民の健康の確保を目的として 7 つのプロジェクトを、NSF (National Science Foundation) が基礎科学の充実を目的として 5 つのプロジェクトを、DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) が国防を目的として 3 つのプロジェクトをそれぞれ支援し、各機関が独自の目的を保持しつつ、脳のネットワーク解明という大きな目標に集束させる体制がとられている。

政府予算規模は、初年度の平成 26 年（2014 年）の約 1.1 億ドルから平成 28 年（2016 年）には約 3.2 億ドルに拡大している。平成 26 年（2014 年）6 月の NIH ワーキンググループが今後必要な資金として平成 28 年（2016 年）度以降 10 年間で総額 45 億ドルを提示しており、平成 29 年（2017 年）度には、DOE (Department of Energy) や、情報科学における技術開発を進めている IARPA (Intelligence Advanced Research Projects Activity) から予算要求がなされ、政府全体での平成 29 年（2017 年）度予算案は約 4.4 億ドルに上っている²。このように米国では脳科学研究に関する加速的な投資拡大がなされ、それに見合った研究成果が期待されている。

また BRAIN Initiative の特徴として、連邦政府予算のみならず、米国内の民間の有力な研究機関や財団からの寄付などの強力な支援があり、アレン脳科学研究所やハーワード・ヒューズ医学研究所、カブリ財団、ソーク研究所から一年あたり約 1 億ドルもの投資がなされている。一方で、このように多くの資金提供機関が関係しているため、相互の関係は複雑である。

BRAIN Initiative ではアレン脳科学研究所やジャネリアファームなど、技術開発や試料・データ蓄積を担当する強力なハブとなる研究機関が存在し、大規模かつ効率的に運営がなされている。さらに、研究機器メーカーやベンチャー企業等との共同開発、研究者間でのコンソーシアムなどの形成が活発である。アレン脳科学研究所や Google 社の参加によって、情報科学を含む多種多様な人材が参入し、殆どの研究分野・技術で先駆的・指導的な位置を占めて世界をリードしている。

² 米国では大統領の交代に伴い、BRAIN Initiative の平成 30 年（2018 年）度予算案として前年度比 55% 減の金額が提示されるなど情勢が流動的であることから、今後の動向には引き続き注目していく必要がある。

一方で米国では、霊長類の研究が比較的困難であり、巨大製薬企業が存在するものの、中枢神経薬、特に精神疾患に対する創薬に消極的な傾向という状況にある。

BRAIN Initiative のうち、NIH が平成 26 年（2014 年）に取りまとめた「ブレイン 2025」で提示している優先的科学的目標としては以下のものがある。

- 1) 健康・疾病時における役割を定めるため、各種脳細胞の特定と実験での利用
- 2) シナプスから脳全体の神経回路マップを様々な分解能で作製
- 3) 神経活動の大規模モニタリング法の開発・応用による機能している脳の動画作製
- 4) 神経回路のダイナミクスを変更する精密な介入ツールを用いた脳活動と行動の関連づけ
- 5) 新たな理論・データ分析ツールの開発を通じて精神機能の生物学的基本を理解するための概念的基盤の構築
- 6) ヒトの脳を理解してその異常を治療するための革新的な技術の開発と総合的ヒト脳研究ネットワークの設立・支援
- 7) 健康・疾病時において神経活動の動的パターンがどのように認識・感情・知覚・行動に変換されるかを発見するために、他の目標達成を進める中で生まれた新技術と概念的アプローチの統合

NIH では、これら 7 つの目標に沿ってグラントを提供してきている。ただし、2) の神経回路マップ（BAM (Brain Activity Map)）の作製は大きな経費を要するため、当面、そのためのツール作りを優先することとしている。これに関し、NIH では平成 24 年（2012 年）からヒトを対象とした核磁気共鳴画像（MRI）や脳磁図（Magnetoencephalography : MEG）によるニューロンの連結の状況を解明するための大規模研究として Human Connectome Project (HCP) を実施している。具体的には先端的計測機器開発を行うグループと横断的大規模コホート研究を行うグループによって、MRI 技術などの改善や被験者の脳検査結果のデータベース化が行われている。第 1 期（平成 24～27 年（2012～2015 年））は専用の MRI scanner の開発や 1,200 名の被験者データを単一の装置にて収集し、第 2 期として世代別研究、複数機種収集による応用研究、疾患研究が開始されている。計測、解析のプロトコール、プログラムとともに、収集された MRI およびメタデータは順次公開され、データシェアリングのシステムも構築済である。平成 28 年（2016 年）7 月にはその成果が Nature 誌に発表され、機能的 MRI によりヒトの脳の各部位を詳細に検出するソフトウェアを開発し、数百人の脳のデータを基に、脳をその機能により 180 もの細かい部位に分けた新たな脳マップが作製された。

また、IARPA では、情報科学における知見の社会実装を目指して技術開発を推進するために、ハイリスク・ハイリターンな挑戦的プロジェクトを中心に支援が行われている。

② 欧州 Human Brain Project (HBP)

欧州では、ヒトの全脳のシミュレーションを目指した HBP を、BRAIN Initiative とほぼ同時期の平成 25 年(2013 年)1 月に、EU FET(Future and Emerging Technologies) フラッグシップ・プログラムの 2 つの対象のうちの 1 つに選定し、平成 25 年(2013 年)からの 10 年計画で 10 億ユーロ(欧州委員会(EC)から 5 億ユーロ、残りは他の財源から拠出予定)の拠出を決定した。これは、平成 17 年(2005 年)から実施されていた、スーパーコンピュータを用いてラットの大脳皮質の一部を再現する BBP(Blue Brain Project)の成果を踏まえてヒトの全脳に研究対象を拡大したもので、24 か国、112 機関が参画した。

HBP は情報通信技術と生物学を収束することでヒトの脳をシミュレーションすることにより理解することを目指し、神経科学、臨床科学、計算機科学の 3 研究領域から構成され、13 の研究テーマ(戦略的マウスデータ、戦略的ヒトデータ、認知機能のアーキテクチャなど)を設定している。

HBP の具体的な目標は、「ニューロインフォマティクス」「脳シミュレーション」「ハイパフォーマンス・コンピューティング」「医療インフォマティクス」「ニューロモルフィック・コンピューティング」「ニューロロボティクス」の 6 つのプラットフォームの開発であり、特にコンピュータサイエンスに重点が置かれた設計で、実験的基礎研究はそのためのデータ提供という位置づけとなっていた。それに対して脳・神経科学研究者からの異論によって、以前よりもシステム神経科学に重点を置いた計画へと修正がなされた。また、HBP は多国家の参加によるプロジェクトであるため全体的なプログラム調整に工夫が必要であり、マネジメント体制の立て直しも図られている。EC は平成 27 年(2015 年)10 月に HBP の連携協定を承認し、平成 28 年(2016 年)4 月から運用を始めている。

HBP では、英国における認知症研究に代表されるように各国の強みを生かした研究計画において進展が期待される。電気生理学など欧州は伝統ある分野で強みを有し、MRI やポジトロン断層法(PET)の装置や技術の開発も進んでいる。

一方で、霊長類の研究が極めて困難であり、巨大製薬企業が存在するものの、中枢神経薬、特に精神疾患に対する創薬には企業が消極的な傾向にある。

なお、HBP の取組とは別に、英国の UK biobank では、50 万人以上の高齢者を中心として生活習慣病が遺伝と環境要因の相互作用でどう発生するかについてのコホート調査が進められている。認知症に関連した脳イメージングをバイオマーカー化した研究が精力的に実施され、最近では米国 HCP とも連携してプロジェクトを進めている。このように英国では、自国で蓄積されたデータについて国際連携を活用して解析し、最終的には自国民に利益を還元するという効果的な体制が組まれている。また英国では、30 以上の認知症コホートを統合し、200 万人以上のデータベースを共有して基礎研究の加速を目指している。認知症治療薬の臨床試験は、認知機能が低下する前の MCI(Mild Cognitive Impairment: 軽度認知障害)やそれより早期で遺伝的高リスク患者を対象として実施することが鍵と考えられつつあり、英国ではこれらのコホート研究をベースに認知症治療薬の早期臨床試験の対象者の絞り込みを計画するなど、認知症の基礎研究・

コホート研究から創薬、臨床試験までを統合し、一体化して進める仕組みが存在する。

2-2 その他の国の脳科学研究の状況

米国、欧州以外の国においても、中国、韓国、オーストラリア、カナダに代表されるように、大型の脳科学研究を国家プロジェクトとして行うことが議論され、具体化されつつある³。

① 中国

中国では政府の第13期五か年計画にあわせ、Brain Science and Brain-Inspired Intelligence を15年間の長期計画で開始することが計画されている。一体両翼（one body two wings）、すなわち神経科学研究を胴体として、Brain Machine Intelligence（BMI）研究（AI研究を中心としたコンピュータ、数理科学との連携）と脳疾患研究を両翼とした一体化した研究開発体制を考えている。

本プログラムは、「認知機能の神経回路機構」「脳疾患の早期診断と介入」「中国医学の知見の活用」「霊長類研究」「脳に学んだ計算原理・計算機開発」「人間の知性をもった機器の開発」を柱としている。

これまで中国は、分子やゲノムの研究は非常に盛んであり、精神・神経疾患のゲノム研究では人口の多さを活用できることが強みとなっている。一方、本プロジェクトでは「Highly Cognitive Neuron Brain Function」への注力を考えている。欧米の優れた研究者を招聘したり、海外に出て活躍した研究者を本国に呼び戻したりして、システム神経科学や脳機能イメージング等の高度な人材による付加価値の高い研究分野に少しずつ軸足を移しており、近年はハイインパクトな研究成果が急増している。また、豊富な霊長類リソースによる研究が大きな特徴であり、その中でもマーマセット研究に特徴のある我が国とは異なり、これまでの研究開発基盤が既に存在するマカクサルを中心に据えた研究体制を採っている。霊長類の遺伝子組換え技術を活用して、ヒトの精神・疾患の霊長類モデルを作成する試みが積極的に行われ、倫理規定の確立が進められている。

漢方薬・生薬の歴史をもとにした中国医学の活用が図られている点も特徴的である。

② 韓国

韓国では平成28年（2016年）にKorean Brain Initiativeを平成30年（2018年）からの10年計画（総額約340億円）として発表した。研究開発とインフラ整備を両輪とし、基礎研究とその応用の連結を目指している。

研究開発では「様々な階層での脳マップの作製」「脳機能マッピングのための新技術開発」「AI研究」「神経疾患に対する個別化医療を標的」を、インフラ整備では「学際的

³ 学術誌「Neuron」Volume 92, Issue 3 (2 November 2016) 参照

なトレーニングコースによる人材育成」「持続可能なインフラの強化」「国内外のネットワーク強化」「基礎と臨床をつなぐ研究開発を推進することによる脳科学関連産業の推進」を掲げ、画像、解析技術、AI、医療を4本柱としている。インフラ整備、人材育成に重点に置いている点が特徴的である。脳科学の工学応用のために欧米の高度な人材を招いている。

③ オーストラリア

オーストラリアでは28人の研究者から成る委員会ABA(Australian Brain Alliance)を結成し、平成28年(2016年)からABI(Australian Brain Initiative)の準備を始めた。「Cracking the Brain's Code」の標題の下に研究者を組織化している。

4つの挑戦として、

- ・生涯にわたる脳機能を適正に維持・回復させること
- ・脳機能の回復のために神経活動記録インタフェースを開発、神経活動を制御すること
- ・様々な年齢層における学習の神経機構を解明すること
- ・脳の理解に基づく計算機の開発のための研究を推進すること

を掲げており、平成29年(2017年)に様々な会合を開催し内容を策定していく予定となっている。

オーストラリアの特徴としては、脳を変化していく組織と捉えて、脳の可塑性や学習の神経機構、年齢に伴う脳の変化として発達・老化の理解等を目指している。また、歴史的に強い神経科学会とともに心理学会が初期のころから参加しているという特徴がある。

「死の谷」、すなわち基礎研究における発見から応用研究、あるいは基礎研究から臨床へのギャップが大きいことを強く意識し、その解決に向けた取組を積極的にABIの対象としている。マイナンバー制によって保健制度が充実し、データ追跡がしやすく臨床データベースに強みを有する。霊長類専用の画像研究センターが存在する。

④ カナダ

カナダでは、20年前に科学者と財界人によって脳科学研究の振興のために設立された団体Brain Canadaに対し、平成23年(2011年)に政府がBrain Canadaとともに民間1億ドル、公的資金1億ドルのCanadian Brain Research Fundというマッチングファンドを設立した。平成28年(2016年)にそれぞれ2,000万ドルずつ増額され、現在の総額2億4,000万ドルとなっている(実際にファンドを受けているのは1億7,660万ドル)。

「One Brain One Community」を標語に、学際的、共同的、ハイリスク・ハイリターンな研究を推進するために、チームグラント、プラットフォーム支援、人材育成の3種のグラントに力を入れている。歴史的に神経科学研究に強みがある。

2-3 我が国の脳科学研究の状況

＜我が国の脳科学研究に関する経緯＞

これまでの我が国における脳科学研究は、多様な発想を生かしつつ、学際的・融合的な脳科学の発展を促進することを目的とした科学研究費補助金等によるボトムアップ型の基礎的な学術研究と、社会的要請が高く緊急性のある目標に沿った効率的な研究開発を行う集約的・戦略的なトップダウン型の研究がバランスよく推進されてきた。

大型の脳科学研究プログラム等は、以下のような経緯で発展してきた。(以下の表ではトップダウン型研究のみを記載した。これ以外に特定領域研究、新学術研究などのボトムアップ型研究も実施されている。)

我が国における大型脳科学研究プログラム等	
平成8年度～ 平成9年10月	戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究領域「脳を知る、守る、創る」開始 理化学研究所脳科学総合研究センター(BSI)の創立により、 我が国の脳科学研究の中核拠点をを目指す
脳科学研究の推進体制を整備=====	
平成19年11月 平成20年度	科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会／学術分科会の下に「脳科学委員会」を設置 「脳科学研究戦略推進プログラム(脳プロ)」開始 (「社会に貢献する脳科学」の実現を目指し、社会への応用を明確に見据えた脳科学研究を戦略的に推進) 科研費「新学術領域研究」の創設
平成21年6月	「長期的展望に立つ脳科学研究の基本的構想及び推進方策について」第1次答申
戦略的脳科学研究の方向性についての議論が進展=====	
平成25年6月	科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会／学術分科会 脳科学委員会の下に 「革新的技術による霊長類の神経回路機能全容解明に関する作業部会」を設置
平成25年7月	「革新的技術による霊長類の神経回路機能の全容解明構想の推進方策について」 (中間とりまとめ)
平成26年4月	「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト(革新脳)」開始 (霊長類の高次脳機能を担う神経回路の全容をニューロンレベルで解明し、ヒトの精神・神経疾患の克服や 情報処理技術の高度化に貢献)
脳神経回路の網羅的解析を大型プロジェクトとして推進=====	
平成26年9月	科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会／学術分科会 脳科学委員会の下に 「戦略的に推進すべき脳科学研究に関する作業部会」を設置
平成27年4月	日本医療研究開発機構の設置により、基礎研究から実用化まで一貫した研究開発の推進
平成27年10月	「社会への貢献を見据えた今後の脳科学研究の推進方策について」(中間とりまとめ)
平成28年4月	「脳科学研究戦略推進プログラム 融合脳」開始
基礎脳科学と臨床脳科学の緊密な連携についての本格的な取り組みが開始=====	

脳科学の多様性に対応するためには、このような基礎的な学術研究と集約的・戦略的研究のバランスのとれた研究推進体制を今後も堅持しつつ、さらに国際連携を活用し、より効果的に新たなイノベーションを生み出すことが重要である。

我が国における戦略的な脳科学研究の推進事業としては、戦略的創造研究推進事業(CREST)において、平成9年度より脳科学分野で「脳を知る」「脳を守る」「脳を創る」「脳を育む」(「脳を育む」は平成14年度より実施)の4領域での戦略的研究が開始された。平成20年度には科学研究費補助金による研究領域提案型の「新学術領域研究」が創設され、同領域研究で複数の脳科学関連課題が採択され、基礎脳科学と臨床脳科学

の分野や、更に人文社会科学や工学との連携強化により学際的な脳科学の発展を志向する領域研究も実施されている。

一方、集約的・戦略的なトップダウン型の研究としては、平成 20 年度より脳プロが開始されるとともに、平成 26 年度より、米国 BRAIN Initiative や欧州 HBP に相当するプロジェクトとして革新脳が開始され、国際的に広く認知されている。平成 28 年度からは、特に基礎と臨床脳科学の連携を強化し、研究室での実験データと臨床の現場での発見を共有しつつ研究開発を行うための枠組みが必要との観点から、融合脳プロジェクトが開始された。同プロジェクトでは、特に認知症、うつ病・双極性障害、発達障害・統合失調症といった主要な精神神経疾患の克服につながる研究を推進するための研究プログラムが実施されている。

<これまでの我が国の脳科学研究の主な成果>

➤ 脳科学研究戦略推進プログラム（脳プロ）

- ・ アルツハイマー病の簡便な早期診断法・治療効果測定法に資するバイオマーカー探索として、標的分子同定や測定法開発、検証を開始・強化
- ・ レビー小体型認知症の疾患修飾薬候補化合物を創製
- ・ 自閉スペクトラム症治療薬を目指し、オキシトシン点鼻剤の治験開始
- ・ 脳の MRI 画像を用いたうつ病の診断を可能にする先端人工知能技術の開発
- ・ BMI 技術を用いた新規リハビリテーション技術と体内埋込型デバイスによる運動・コミュニケーション機能の代替技術の開発
- ・ 脳の安静時 MRI 画像から精神疾患・発達障害を見分ける技術とデコーディッドニューロフィードバック法（DecNef）⁴による新規治療法の開発
- ・ 遺伝子改変マーマセット作成技術の高度化（ゲノム編集技術、piggy BAC による遺伝子導入技術、遺伝的背景均一個体作成技術）
- ・ ウイルスベクターを用いた非ヒト霊長類における回路選択的操作法の開発
- ・ デコーディング技術の高度化による脳活動情報の可視化
- ・ 脳障害からの機能回復と意欲との関係性の解明

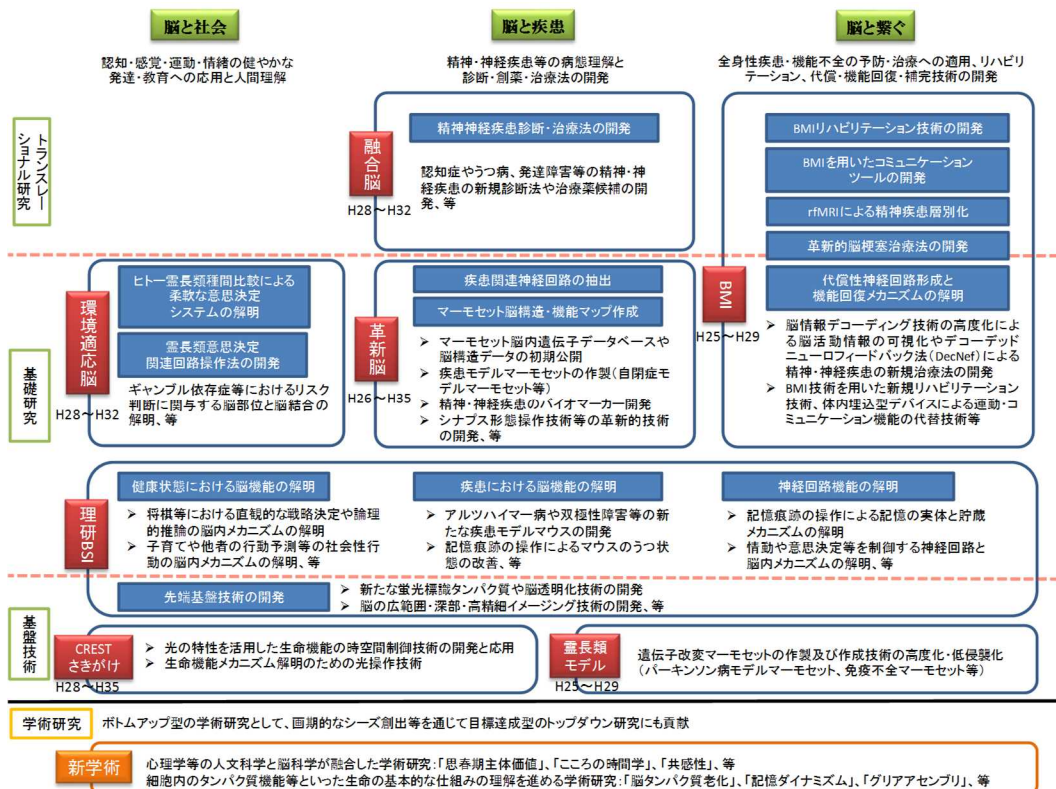
➤ 革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト（革新脳）

- ・ マーマセット脳内の遺伝子データベースサイト、脳画像データの 3D 化や動画をデータポータルで公開
- ・ 疾患モデルマーマセットの作製
- ・ 精神疾患バイオマーカーに関する動物種を越えた統合研究

⁴ ニューロフィードバック（特定脳領域の活動を被験者にフィードバックし、被験者自身による脳活動の操作をうながすことによって、その領域に対応した認知機能の増進や補綴を誘導するアプローチ）技術の一手法で、測定された脳活動パターンをもとに、機械学習アルゴリズムによって被験者の脳から情報を読み出し、その情報をリアルタイムで被験者にフィードバックするための方法。

- ・ シナプス形態を操作する新しい光遺伝学技術による運動学習機構の解明
- 理化学研究所脳科学総合研究センター (BSI)
 - ・ アルツハイマー病、パーキンソン病、ALS（筋萎縮性側索硬化症）、てんかん、統合失調症、双極性障害（躁うつ病）、自閉症等の原因究明、治療法開発
 - ・ 様々な蛍光標識タンパク質、透明化技術の開発による神経活動、生理現象等の可視化
 - ・ 神経分化機構、神経回路形成機構の解明（大脳皮質、成長円錐）
 - ・ 一次視覚野における臨界期、体性感覚野における可塑性の制御機構の解明
 - ・ 嗅覚、視覚などの知覚認知機構の解明
 - ・ 学習、記憶、情動、意思決定の脳内機構の解明（大脳皮質、小脳、海馬、扁桃体、手綱核、側坐核、大脳皮質等）
 - ・ 大脳皮質のトップダウン情報処理経路による知覚の制御、記憶固定化機構の解明
 - ・ 論理的推論の脳内機構、将棋における直観的戦略決定の脳内機構の解明／将棋棋士の脳の内メカニズムの解明社会行動の脳内機構の解明（子育て、社会的上下関係、近親者認知、他者意思の推定等）
 - ・ 学習、神経回路可塑性等の理論の構築

これらの成果を脳科学研究の体系の下に整理し直すと、以下のとおりとなる。



2-4 脳科学研究における我が国及び海外の特徴

我が国においては、例えば個別の分野では、非ヒト霊長類のモデル動物などの技術・リソース、DecNef (Decoded Neurofeedback) などの非侵襲 BMI 技術、MRI 装置の全国的な普及、PET トレーサーの開発力、顕微鏡や分析機器のメーカーの存在と技術開発力、さらには、個別の研究（ニッチ研究）の質の高さなどの強みがある。一方で、これら個別研究で発展してきた要素技術などの成果を元に、スピード感を持って高精度化・大規模化していく、あるいは実用化（産業化）していく点や、米国 ADNI 研究 (Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative) に象徴されるような大規模データベース化・リソース供給という点では海外、特に米国がリードしている。これは我が国の脳・神経科学研究における、ICT 関連人材や ICT 技術開発との連携の不足が背景にあると考えられる。同様に、分野間でのつながり（例えば実験と理論の間、動物研究とヒト研究の間、基礎研究から創薬研究への展開、心理系研究との融合等）の観点では橋渡し・連携の不足という課題も存在する。

これらの我が国及び海外の脳科学研究における主な特徴（強み、弱み等）と、それを元に、我が国として具体的に考えられる対策案を基礎脳・神経科学（動物・健常ヒト研究）と臨床脳・神経科学（疾患研究）分野に分けてまとめたものを、それぞれ次ページ以降に掲げた。

表1 脳科学における各国の特徴分析(強み、弱み等)

(○強み ●弱み △特徴)

代表的プロジェクト	米国 (BRAINI Initiative)	欧州 (Human Brain Project)	中国 (China Brain Project)	カナダ(Brain Canada)、 韓国(Korea Brain Initiative)、 豪州(Australian Brain Initiative)	日本(脳プロ、革新脳) (CREST、さががけ) (新学術領域)
個別分野の特徴	○ほとんどの分野・技術で先駆的・主導的な位置を占める ○技術開発やデータ蓄積を担当するハブとなる研究機関の存在	○伝統ある分野(電気生理など)が強い	△認知機能の回路機構、疾患の早期診断・介入、脳に学んだ計算原理・計算機開発、人間の知性を持った機器の開発、を研究の柱	△画像、解析技術、AI、医療の4本柱(韓国) ○神経科学会と心理学会が初期から参加(豪州) ○歴史的に神経科学が強い(カナダ・豪州)	○高水準の遺伝子操作技術 ○各種プロテオームの開発力 ○PETトレーサーの開発力 ○デコーディング技術(非侵襲的BMI) ○電気生理の基盤が整備 ○再生技術(IPS細胞)と治療 ●心理系研究者の参入・連携が必要
技術の特徴		○MRI・PET装置の開発も進む		△研究開発とインフラ整備を両軸、基礎と応用の連結を目指す(韓国)	○顕微鏡イメージング(国内メーカー) ○MRI台数多い(●海外メーカーが独占) ●最先端研究機器の創出・産業化力の強化が必要 ○大型計算機の活用
創薬の特徴	△巨大製薬会社 ●中枢創薬(特に精神疾患)に消極的		△漢方薬(CM)・生薬の歴史		○積極的な中枢神経系の創薬
データ・リソースの特徴	●霊長類の研究が困難 ○大規模かつ効率的な技術ツール・リソースおよび試料データ・リソース	●霊長類の研究が極めて困難 ●霊長類実験の倫理規定は確立中	○霊長類リソースが豊富(マカケザルを中心) ●霊長類実験の倫理規定は確立中	○データトレーニングしやすい臨床データベース(豪州)	△マウゼット研究を軸とする大型データベース開発を実施 ○霊長類研究の伝統と社会からの理解 ○霊長類の行動解析・遺伝子導入技術の先行 ●試料データ・リソースの規模の拡充が必要(脳画像、ゲノム、バイオマーカー試験、死後脳など) ●技術ツール・リソースの整備が必要(遺伝子、ベクター、動物、計測機器、解析ツールなど) ○比較的高い日本人の遺伝的均質性
その他の特徴	○研究機器メーカー・ベンチャー企業との共同開発、研究者間コンソーシアムの形成 ○アレン脳科学研究所やGoogleの参加による多種多様な人材の参入 ●資金提供機関が多く相互関係が複雑	○当初コンピュータサイエンスに重点が置かれ理論研究に強み ○各国の強みを活かした研究(英国における認知症研究など) ●多国家参加型プロジェクトなためプログラム調整に工夫が必要	△海外で経験を積んだ研究者を呼び戻し高付加価値研究にシフト	○Canada Brain Research Fund(産学官によるマッチングファンド)の支援(カナダ) ○3種のグラント体制(チームグラント、プラットフォーム支援、人材育成)(カナダ) △multidisciplinaryな次世代型人材育成とインフラ整備に重点(韓国)	○政府・AMEDが中心となった戦略的プロジェクト運営 ●若手の研究者・データサイエンティスト育成が必要 ●コンソーシアムでの支援体制の充実が必要 ●民間財団・ベンチャー企業の強化が必要 ●日本語を主体としたプロジェクト体制は外国人の参入障壁

●基礎から臨床への「死の谷」(各国共通の課題)

表2 我が国の現状分析と対策①

基礎脳神経科学(動物・健常ヒト研究)編

	日本が今後強化する必要がある点	日本が優位にある点	打つべき対策
分子神経科学	創薬への展開など、神経科学の他分野との連携の強化が必要	伝統的に質の高い研究(発生・回路・シナプスなど)	共同研究のさらなる推進
遺伝子改変・導入技術	世界的に開発のスピードアップ化	霊長類におけるウイルスベクター技術開発	リソース共有の恒久化
顕微鏡・イメージング技術	高精度化・高速化・広視野化・小型化の加速や技術の共有が必要	2大光学顕微鏡メーカー透明化技術が先行 独自の行動解析系の確立	メーカーとの技術開発 げっ歯類から霊長類への円滑な技術移転
光遺伝学・カルシウムプローブ	リソース共有の加速が必要	個別には世界をリードする研究が多い リソース整備も始まった	機能分子の組織的開発 リソース共有の恒久化・拡充
電気生理計測	大規模化・効率化が必要、若手研究者の育成が必要	伝統的に質の高い研究(基盤インフラも整う) 霊長類研究の伝統・実績	霊長類への革新技術導入 大規模化・効率化のためのソフト・解析法の拡充
MRI・PET	高磁場化・多機能化で欧米が先行	霊長類の詳細マッピング トレーサー開発	データ解析・公開の推進 国産技術・行動実験の導入
行動解析	心理系との連携強化が必要	霊長類の行動課題の実績	学際的な「文理融合」の推進
計算論	実験と理論の連携強化が必要 脳科学への参入促進が必要	デコーディング技術 大型計算機の活用(米国はクラウド活用)	マクロな発想の人材育成 AIとの相乗効果(AIの脳研究への応用/脳に学ぶ新たなAIの開発)

表3 我が国の現状分析と対策②

臨床脳神経科学(疾患研究)編

	日本が今後強化する必要がある点	日本が優位にある点	打つべき対策
脳画像・生理	データベース(DB)支援体制が不十分 研究用装置は外国製	計算論的神経科学との連携 多数のMRI装置 PETトレーサー開発	国産技術開発・解析支援 DB化支援 海外とのデータ共有
ゲノム	サンプルが1桁少ない 解析装置が外国製 解析技術者の育成が必要	遺伝的均質性が比較的高い 脳プロでコンソーシアム化 東北メディカル・メガバンク	リソース・DB化支援 Informatician育成 海外とのデータ共有
疾患鍵分子	基礎から臨床につなげる取組の強化が必要	高レベルの個別研究 大学では基礎と臨床が一体	DB化支援 橋渡し研究支援・人材育成 PPPの促進
iPS細胞	細胞モデルのさらなる強化が必要	日本で開発 脳オルガノイド作成技術	iPS研究と脳研究の連携 iPS細胞のバンク・DBの充実 海外への技術支援
バイオマーカー	大規模に試料を集積する体制が必要	高い解析技術(MSなど) 分析機器は国内産多い	海外サンプルの受入による共同研究の促進
死後脳	精神疾患脳の蓄積が少ない 産業界との連携強化が必要	神経疾患脳バンクは高水準 献脳に社会的理解がある	精神疾患脳集積の促進 PPPの設立
動物モデル	臨床につながるモデルは世界的にも未確立	基礎研究のレベル高い 霊長類モデル開発技術 基礎臨床連携が進んでいる	基礎臨床連携の更なる推進 理論・実験統合の推進 モデル動物確立と供給
創薬		日本の製薬会社は中枢薬開発で世界をリード(世界的には中枢創薬(特に精神疾患)から撤退の方向)	PPPの促進 アカデミア創薬支援

PPP: Private Public Partnership

3. 国際連携を見据えた我が国の研究開発戦略

3-1 国際連携を見据えた我が国の研究開発戦略の方向性

近年、米国 BRAIN Initiative や欧州 HBP 等、世界的に脳科学研究を国家プロジェクトとして強力に推進する情勢にあり、我が国も特色・強みを生かしつつ国際連携を進めることにより、脳科学研究を大きく発展させることが期待できる。

我が国の特色として、動物実験の研究分野では、革新脳や脳プロ「霊長類モデル動物の創出・普及体制の整備（霊長類モデル）」等のプロジェクトを進めてきたことによる非ヒト霊長類研究の豊富な知見や技術基盤があり、極めて高い研究水準にある。また、げっ歯類等を用いた遺伝子操作技術や顕微鏡イメージングなども、国際競争の激しさが増す中で高い研究水準を保っている。

ヒトを対象とする研究分野では、脳プロにおいて、「臨床と基礎研究の連携強化による精神・神経疾患の克服（融合脳）」で精神・神経疾患の診断・予防・治療法の開発に向けた研究開発が、「BMI 技術を用いた自立支援、精神・神経疾患等の克服に向けた研究開発（BMI 技術）」で非侵襲的 BMI におけるデコーディング技術の開発がそれぞれ進められている。また、東北メディカル・メガバンクをはじめとしたコホート研究が国内の各地で進められており、日本人の遺伝的均質性という有利な点を生かして、それらのデータを集約して解析することにより飛躍的に研究が発展することが期待できる。

AI 技術については米国が民間主導で大規模な投資をしているところであるが、我が国においても理化学研究所革新知能統合研究センター（AIP センター）の発足をはじめとした推進体制の整備が進められている。また、脳画像ビッグデータの解析という応用的な観点でも、脳型アルゴリズムの開発という基礎研究的な観点でも、脳科学と連携して発展させていくべき分野である。

このように、我が国は、各研究分野においては強みを有するが、脳の動作原理を解明し精神・神経疾患の早期発見・早期介入の実現や新たな脳型アルゴリズムの開発につなげるという世界共通の目標を達成する上では、我が国が各分野で先鋭化させてきた脳科学研究を領域の壁を取り払って融合し、世界の脳科学研究の進展に貢献することが必要である。

具体的には、分子生物学的なミクロレベルのデータや脳画像などのマクロレベルのデータの間をつなぐ神経回路レベルの機能を明らかにする必要がある。そのためには、正常と疾患とその中間段階を含む世代別のヒト脳画像データ等を比較することにより脳疾患に関連する脳部位を同定し、さらにマウセット等の実験動物での神経回路の構造と活動に関するデータとの比較検討による融合的研究を推進する。このような研究により、神経回路の機能がどのように実現され、それが内外からの作用によってどのように変化し、また異常が発生するのかを理解することが可能となる。

これらの最終的な目標は、以下のとおりである。

目標：ヒトの脳の動作原理等の神経回路レベルでの解明を目指す。また、精神・神経疾患の早期発見・早期介入の実現や新たな脳型アルゴリズムに基づく次世代 AI の開発に貢献する。

その上で、脳プロや革新脳などの我が国が既に推進している大型脳科学研究プログラムの現状も踏まえると、既存の国内外の研究開発と連携して取り組むべき研究分野は、以下のとおりである。

(1) 正常と疾患とその中間段階を含むヒト脳の経時的臨床データの比較研究

発達期における発達障害・統合失調症や青年期から中年期におけるうつ病、老年期における認知症といった世代や病態を跨いだヒト脳に関するデータを、統一プロトコルでの MRI 撮像等により定期的なタイミングで取得し、正常と疾患、その中間段階を比較することによって異常・変化がどの神経回路でいつ起こるのかを特定する。

- 脳プロや革新脳等で得られた成果・データや国内外のコホート研究の既存のデータを活用しつつ、必要となるデータを新たに取得する。
- 被験者のリクルートにあたっては既存事業の仕組みを活用する。
- 国際的なデータ共有のために、米国の HCP 等との連携を検討する。
- (1)～(4)の研究分野が連携できるデータベースの構築を目指す。
- データ取得技術が発展していくことに留意し、AI を活用した解析を行うことを念頭にデータベースの構築を進める。

(2) 非ヒト霊長類脳とヒト脳の比較研究

非ヒト霊長類等での研究において、(1)で明らかになった疾患等に関する神経回路の構造や活動を計測・操作することによって、各神経回路の機能と認知・行動の間の因果関係を立証する。さらに疾患等との関係性を明らかにする。

- 革新脳で得られた我が国の強みであるマーモセット脳の詳細な神経回路データを活用する。
- 脳における細胞の種類解析を、非ヒト霊長類およびヒトの研究でどのように行うのか検討する。

(3) 脳神経回路解析のための革新的技術開発：神経回路の計測・制御技術や、疾患の原因回路の特定に向けたビッグデータ解析に資する新規 AI 技術

(1)、(2)の研究を行う上で必要な神経回路の計測・制御技術を開発するとともに、神経回路の時系列データを適切にモデル化できる新しい AI によって疾患の原因となる回路を特定する技術を開発する。

- 神経回路の計測・制御技術については、脳プロや革新脳で培われた知見や技術基盤を生かし、げっ歯類等の動物も用いて効率的に技術開発を行うとともに、先進的な技術開発力を有する米国や欧州と連携する。
- ビッグデータ解析に資する新規 AI 技術については、(1) に示したような研究分野が連携できるデータベースの構築のためにはプロトコールの統一に加え、施設間のデータ補正を行う技術の開発が重要である。脳プロで開発された撮像統一プロトコールや施設間の補正技術の成果を活用しつつ、さらなる高度化を進める。
- 特に、ヒトの解析手法の開発にあたっては、脳プロで開発され世界的にも優位性のあるデコーディッドニューロフィードバック法 (DecNef、機械学習と強化学習法を組み合わせ、脳内に特定の情報パターンを生成) の成果を活用し、診断・治療技術の開発も念頭に置きつつ開発を進める。

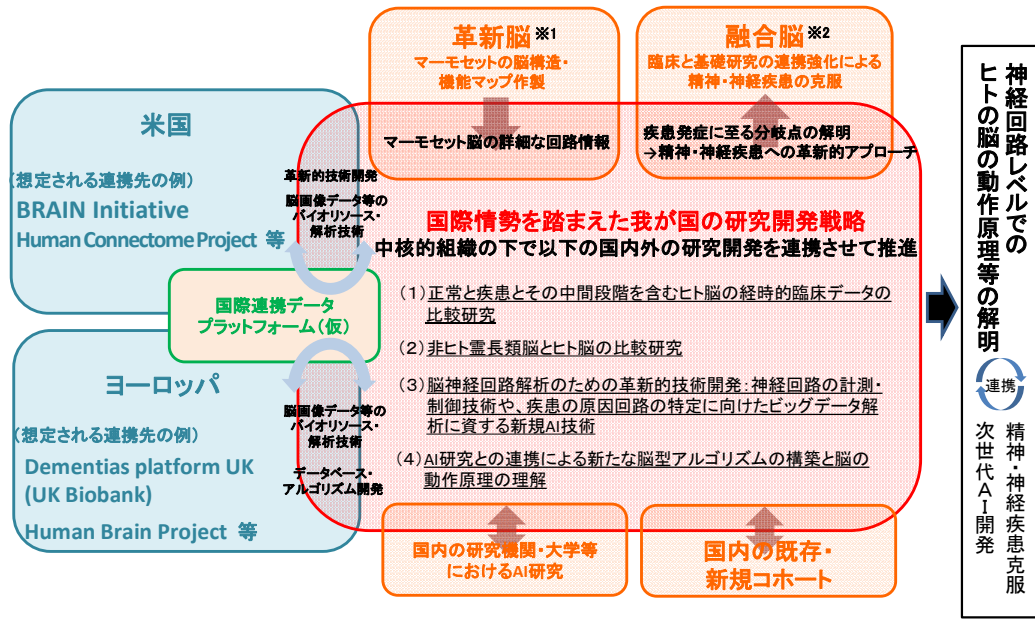
(4) AI 研究との連携による新たな脳型アルゴリズムの構築と脳の動作原理の理解

現在の AI では視覚野の回路構造に基づく深層学習と、行動心理学の知見を起源とする強化学習が主要な要素であるが、(1) ~ (3) の研究分野と AI 研究が連携することにより、少数サンプルからの学習、多様な状況における問題の解決を可能とするヒトの持つ柔軟な認知機構を解明して、新たな脳型アルゴリズムを構築し次世代の AI の開発に貢献するとともに、それらを通して脳の動作原理のより深い理解にフィードバックする。

- 当初より情報系の研究者が新しいアルゴリズムの開発のためにどのようなデータが必要かを検討し、(1)、(2) のデータ取得にあたって配慮する。
- 脳プロ等でのこれまでの研究で明らかになってきた、意識、注意、記憶等がヒトの脳の特徴である少数個のサンプルからの学習を可能にする神経機構であるとの仮説の検証を進める。
- 理研 AIP センター等の国内外の研究機関や大学との連携を検討し、脳研究と AI 研究を結び付ける。

以上の推進にあたっては、各研究分野の調整や海外機関との連携において中核的な役割を果たす組織が必要となる。

推進体制のイメージ



国内の他プロジェクトや他研究機関、国外の研究機関と共同で実施

※1 革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト

※2 脳科学研究戦略推進プログラム 臨床と基礎研究の連携強化による精神・神経疾患の克服

3-2 各研究分野の推進方策

これまでの分析を踏まえ、我が国が有する強みを生かして国際競争をリードし、また、弱みを補いつつ国際競争力を保つためには、我が国が各々の観点でどの機関・組織と国際的に連携するのが互いに効果的であるかを検討することが重要である。

取り組むべき各研究分野における目的や手法に応じて、国際的な連携先の例や連携の利点を以下の表のとおり整理した。

表4 国際的な連携先の例と連携の利点

取り組むべき研究分野	目的	手法	連携先(例)	利点
(1) 正常と疾患とその中間段階を含むヒト脳の経時的臨床データの比較研究	病的異常が未同定の多くの精神・神経疾患における脳病理変化の発見	Human biology (ヒトの疾患実態に基づきヒトの疾患制御に帰結する研究開発) にむけた基盤整備	UK biobank (英国) HCP (米国) ENIGMA (ヒト脳機能に関する海外多施設共同研究)	日本人データを用いた研究を国際的に進め、その結果を日本国民に還元。
(2) 非ヒト霊長類脳とヒト脳の比較研究	単なる脳画像データの蓄積のみでは不可能な、細胞から回路を経て行動に至る各階層をつないだ脳機能の理解とそれによる精神・神経疾患の病態解明	げっ歯類・非ヒト霊長類・ヒトの間で、脳の機能と構造の対応関係を明確化	HCP (米国) ENIGMA (ヒト脳機能に関する海外多施設共同研究)	種間比較において解析アルゴリズムの共有と新規開発は必須。欧米で先行しているヒトの画像データと解析アルゴリズムの共有と新規開発が見込まれる。
(3) 脳神経回路解析のための革新的技術開発: 神経回路の計測・制御技術や、疾患の原因回路の特定に向けたビッグデータ解析に資する新規AI技術	脳機能の理解や精神・神経疾患の病態解明に必要な脳機能の解析・操作技術の開発	実験研究のための要素技術開発と活用の効率化	BRAIN Initiative (米国) IARPA (米国) HBP (EU)	欧米で開発された新規技術を取り込み、霊長類研究に利用できる形で還元。
(4) AI研究との連携による新たな脳型アルゴリズムの構築と脳の動作原理の理解	新たな脳型アルゴリズムの創成と脳の動作原理の理解	AI研究との連携による脳機能の数理科学的研究の推進	IARPA (米国) HBP (EU)	AI研究分野の人材が豊富な欧米との連携により脳科学とAI研究の橋渡しを強化。

以下において具体的に4つの研究分野における当該研究の必要性、具体的な方策、国際協力と国際貢献、期待される成果について述べる。

(1) 正常と疾患とその中間段階を含むヒト脳の経時的臨床データの比較研究

Human biology (ヒトの疾患実態に基づきヒトの疾患制御に帰結する研究開発) に向けた基盤整備として、臨床バイオリソースデータの整備集約化は重要である。国内の臨床バイオリソースの中で、国際的な優位性が認められるものを選抜し、国際連携の枠組みの中でリソースの共有化を推進する必要がある。東北メディカル・メガバンク等を核として、日本人のコホートデータが急速に蓄積しつつあり、また精神疾患のデータ蓄積に脳プロや革新脳が寄与している一方、既存脳画像データベースは比較的小規模であり、相互のデータ共有や活用に関して本格的な議論が進んでいないことか

ら、規格の統一化や共有化を進める体制整備が必要である。脳プロ「BMI 技術」等で確立された多施設での効率的なデータ収集体制とデータマイニング技術を活用して、これまでに作られた約 2000 例の多疾患データベースを呼び水とし、これをデータ駆動型研究に活用可能なレベルまで飛躍的に拡充することが必要である。

米国では HCP において正常ヒト脳画像データの取得、解析技術が急速に進展していることから、この段階で我が国においても質の高い疾患脳画像を統一プロトコールで取得することは、ENIGMA (Enhancing Neuro Imaging Genetics Through Meta Analysis) に代表されるようなヒト脳機能に関する海外多施設共同研究への参加を容易にする点で時宜を得ている。一方、欧州では英国の UK biobank などにおいて精神・神経疾患患者の大規模データ・リソース蓄積が開始され、事業が軌道に乗りつつあるため、我が国において患者サンプルと脳画像がリンクしたリソースが形成されることによって相互作用が期待できる。日本人データを国際的に利用可能なリソースとすることは、これを用いた研究を国際的に進め、その結果を日本国民に還元することになり、メリットは大きい。

<必要性>

日本人から得られる遺伝的に比較的均質な臨床脳科学バイオリソース・データは世界的にも重要ではあるが、Imaging genetics など大規模データベース研究の領域では出遅れており世界をリードすることは困難である。個別に整備が進められてきたバイオ情報については、国内の一部にスーパーID 化による連結を推進する動きはあるが、国際連携については手つかずの状況である。また、脳プロ・革新脳にて国内の精神・神経疾患の臨床バイオリソースや情報 (MRI や PET の脳画像データ、血液、ゲノムサンプル、脳バンク等) の共有・公開が進展したが、国際化についての議論は進んでいない。

非ヒト霊長類研究では、革新脳によって世界をリードする立ち位置にいるが、そこで得られたデータを世界に情報発信することについては個々の研究者の努力に依存している状況にあるため、今後はより組織化した形で支援することが必要である。同じく iPS 細胞の基礎研究は高い水準を保ち、特に再生医療を指向した研究では先駆的な成果をあげる一方で、精神・神経疾患モデル iPS 細胞、あるいはそこから作成したオルガノイドの開発やそのバイオリソース化・データベース化を加速するには至っておらず、効率的に利用するための整備・集約化が必要である。

また、整備・集約化されたバイオリソース・データを有効活用するためには、持続的なメンテナンス体制を確立することも必要である。

<具体的な方策>

1. 国内に散在する精神・神経疾患関連の臨床脳科学バイオリソース・データリソースから国際連携の意義が高いものを選抜し、共通 ID に基づき特に縦断的情報をもとに統合データベース化する拠点を整備する。
2. (3) で開発した予測モデルを用い、縦断的データから特徴量の動的な変化を抽出し最適化していく「進化する」データベースの開発で我が国の独自性を出す。
3. 縦断多元脳画像、生体試料由来オミックス情報、臨床情報の縦断データベースと特徴量の動的変化を検出してデータベースを最適化するアルゴリズム開発を進める。並行して、ブレインバンク、iPS 細胞リソースなどをさらに推進し、精神・神経疾患の病理解明等にも国際連携を拡大する。そのため、動的変化の最終形としての死後脳情報((3)の顕微鏡研究と連携)や、精神・神経疾患モデル iPS 細胞やモデル動物由来のリソース((2)と連携)と、我が国の強みである透明化技術や脳画像技術・顕微鏡技術を融合し、その成果をデータベースに取り込む。
4. 海外のデータベースと連携するためのバイオリソース・ツール共同利用システム(情報の統合、公開、検索等)の共同開発を提案し、IBS(国際ブレインステーション(仮称))構想を後押しする。

<国際協力と国際貢献>

縦断多元脳画像では、我が国の脳プロ・革新脳で共通化された脳画像プロトコールによるデータを活かすために、得られたデータをまとめて維持管理・公開するサポートシステムを構築し、更には国際的な標準化を進める。ここでは、米国 HCP や英国 UK biobank、認知症関係の米国 ADNI 研究及び英国 Dementias platform UK、あるいはニューロインフォマティクスの国際的組織 INCF (International Neuroinformatics Coordinating Facility) 等との連携が想定される。また、死後脳のオミックス解析では米国で産学の PPP (Public Private Partnership) のプロジェクトとして情報を一般公開している CMC (CommonMind Consortium) や SMRI (The Stanley Medical Research Institute) との連携、臨床情報では米国 NIMH (National Institute of Mental Health) との連携が挙げられる。病理情報においては、我が国の強みである透明化技術や脳画像技術、顕微鏡技術とともに、米国や英国、EU のブレインバンクとの連携によって精神・神経疾患の病態やメカニズム解明につながる疾患データベース構築の国際貢献ができる。

<期待される成果>

特徴量の動的な変化に適応してデータベースを最適化していくアルゴリズムを世界に提供することで、新規の研究デザインの提案が可能になる。脳画像技術・顕微鏡技術と国際連携による死後脳研究を融合し大規模化・高速化を進めることで、病理的

異常が未同定の多くの精神・神経疾患における脳病理変化を発見することが可能になる。さらには、神経病理に基づく疾患の再定義によって精神・神経疾患の克服に向けた大きなブレイクスルーが期待できる。

(2) 非ヒト霊長類脳とヒト脳の比較研究

動物実験に基づくイメージング技術による階層融合的な脳研究を、ヒト脳の構造と機能の MRI による研究と組み合わせて実施することにより、単なる脳画像データの蓄積のみでは不可能な、細胞から回路を経て行動に至る各階層をつないだ脳機能の理解が可能になる。

ヒト高次脳機能の解明を目指した種間比較の前提として、情報処理システムの刻々の変動としてのヒトの「心のはたらき」を、個人レベルで神経ネットワークの活動として画像化しデータベース化することが必須である。心理学を含む認知科学領域の研究者とともに、機能的 MRI や PET をはじめとする非侵襲的計測・解析技術の標準化とイメージングデータ取得・解析手法の開発を進められるような、多領域にわたる共同研究を統合的に進める体制づくりが必要である。非ヒト霊長類とヒトの脳の機能構造画像データを比較するために、現在進行中の革新脳でのマーモセットの脳の構造・機能画像データベースを活用する。そのためには、AI を活用した変換技術によって非ヒト霊長類脳の神経回路データをヒト脳の神経回路データと結合する必要があるとともに、ヒトとマーモセットの中間に位置するマカクサルを足がかりとして種間比較を進めることが重要である。

また、(1) で述べたように、米国 HCP においては正常ヒト脳画像のデータ取得、画像技術が進展していることから、我が国においてこの段階で質の高い脳機能画像をプロトコルをあわせて取得することは、ENIGMA に代表されるようなヒト脳機能に関する海外多施設共同研究への参加を容易にする点で時宜を得ているとともに、異種脳への適用は種間比較研究に有用と考えられる。

<必要性>

伝統的な非ヒト霊長類の神経生理研究は、研究効率等の点から世界的に縮小傾向にある。ヒト脳画像研究では、画像処理 ICT 技術との連携不足のため、米国を中心に進んでいる大規模データベース化や HCP に代表されるような画像解析の高精度化で出遅れている。

一方で、諸外国と比べて、我が国は非ヒト霊長類研究のリソースを高レベルで維持しており、かつ MRI の普及率が非常に高い点など脳画像研究を推進するための潜在能力は高い。さらに、霊長類の神経ネットワークの解明を目指す革新脳に臨床研究グループが組み込まれていることによって、非ヒト霊長類研究とヒト脳画像研究の間の接点を有している点で我が国の優位性を見出すことができる。

臨床研究で高度に進化してきた脳画像研究手法を、非ヒト霊長類研究に単純に導入するだけでも脳科学の革新に繋がる可能性は高い。ただし、非ヒト霊長類の脳科学研究で得られた知見を、革新脳が目指すように病態理解を介してヒトの精神・神経疾患の克服に活かすためには、非ヒト霊長類脳の神経回路マップとヒト脳の神経回路マップの変換式を開発してつなぎ合わせる必要があるが、脳画像情報を種間で変換する技術の開発は世界的にも手付かずである。

脳画像を鍵技術として、構造や回路、機能という様々な脳情報について種を超えて同じフォーマットの下で取得し、種間ギャップを越えるような変換技術を開発できれば、非ヒト霊長類からヒトに至るまで脳がどのように変化・進化してきたのかを真に理解する新しい学問領域の創生につながると考えられる。

<具体的な方策>

1. 非ヒト霊長類・ヒト脳画像研究の計測・解析技術の共通プラットフォーム化
計測、解析などを共通プラットフォーム化し、情報科学・ICT エンジニアの協力を得つつ、ヒトと非ヒト霊長類の研究者がデータを共有しながら技術開発を進めることで、種間ギャップを埋めて神経回路情報（機能的 MRI/PET 機能情報、コネクトミクス、高精密解剖情報、細胞の種類の情報）を双方向的に変換する技術（ヒトから非ヒト霊長類へ、非ヒト霊長類からヒトへ）を開発する。種間の脳画像の対応マップの作成には AI 技術も活用する。
2. BMI/NFB（ニューロフィードバック）技術と疾患モデル研究の導入による神経回路と機能の因果関係の種間比較
完成形として HCP のような全脳網羅的のマッピングの変換を目指しつつ、理解が進んでいる個別回路については BMI/NFB 技術による神経回路と機能の因果関係の検証、あるいは同じ回路異常が発生することが想定される疾患モデル霊長類と臨床例による神経回路と機能の因果関係の検証を開始する。
3. 臨床研究データベースとの連携
脳プロ、革新脳で推進されている正常・疾患のヒト脳画像データベースとモデル動物の脳画像データベースをリンクさせて強力に発展させる。
4. げっ歯類研究、死後脳研究、画像と顕微鏡技術との橋渡し研究の展開
動物画像研究は、将来的にはげっ歯類研究と連結することで光遺伝学の技術を用いた、より精細な細胞レベルでの因果関係の検証を行う。非ヒト霊長類で顕微鏡技術と画像技術の橋渡しを始めることによって、死後脳研究とイメージングを結びつけるような疾患データベース研究にも貢献する。
5. これらの研究を推進するために必要な、脳科学情報技術者の育成を進める。

<国際協力と国際貢献>

米国 HCP との技術的連携が可能である。また、世界に先駆けて霊長類脳画像データベース並びにヒトと非ヒト霊長類の対応マップを公開することで、世界の脳科学の進展に貢献することができる。

<期待される成果>

ヒトの神経回路マップと非ヒト霊長類の対応付けがなされた神経回路マップが完成する。この神経回路マップから、ヒトで特に発達した皮質機能の理解など非ヒト霊長類からヒトに至るまでの脳進化の解明についてのヒントが得られ、ヒト固有の脳機能の理解を通じて、その障害としての精神・神経疾患の病態理解や早期発見・早期介入の実現にもつなげることが可能となる。また、精神・神経疾患モデル霊長類を用いた創薬研究から臨床研究へのトランスレーショナルリサーチの改善が期待できる。

(3) 脳神経回路解析のための革新的技術開発：神経回路の計測・制御技術や、疾患の原因回路の特定に向けたビッグデータ解析に資する新規 AI 技術

動物実験に基づくイメージング技術による階層融合的な脳研究は急速に進展しており、実験研究のための要素技術開発と技術活用の効率化が必須である。例えば、イメージング分野における技術革新は近年益々加速しており、クライオ電子顕微鏡による原子レベルでの生体高分子の機能構造連関の解明から、電子顕微鏡画像の立体再構築によるミクロコネクトーム、更に脳透明化やウィルストレーサーによる神経回路の全脳レベルでの網羅的解析、そして光遺伝学技術や化学遺伝学技術などの活用による回路機能の操作によってマクロレベルの回路機能と動物行動の間の因果関係の立証といった顕著な成果が得られている。また、これらの技術革新には国内の研究者も大きな貢献をしている。これらの急速な技術革新はげっ歯類を中心とした動物実験研究により展開していることから、げっ歯類における要素技術開発とともに、(2)の足がかりとなる非ヒト霊長類研究へ適用できる体制を整備することが重要である。

このような要素技術の開発に組織的に取り組んでいる米国 BRAIN Initiative との連携は時宜を得ており、欧米で開発された新規技術を我が国が取り込み、霊長類研究に利用できる形で世界に還元することで相互にメリットが得られる。現状において霊長類における技術開発が世界的に遅れ気味であることを考慮すると、我が国がリードできるチャンスがある。

また、精神・神経疾患の原因となる神経回路を特定するためには、脳画像などのビッグデータを解析する AI 技術の開発・活用が重要である。そのためには、脳プロ「BMI 技術」で開発している我が国の強みである脳情報デコーディング技術と DecNef 等のニューロフィードバック技術や、革新脳で構築を目指しているマーモセットの全脳コネクトームデータを核として、(1)のデータベースと組み合わせ、海外の大規模データベースとの連携体制を構築することが重要である。

<必要性>

カルシウム等の細胞機能動態可視化のためのプローブ、脳透明化技術、イメージング技術、電極技術などの要素技術は、まずはマウス・ラット等のげっ歯類を中心とするモデルで開発する必要があるが、次にこれらの技術を霊長類モデルなどでも利用可能なユニバーサルなものに仕上げるためには長い時間が必要であり、かつ個別の研究者の努力のみでは無駄が生じる場合も多い。従って、種を越えて要素技術を利用するための道筋を効率化し、最終的には高度化された技術を霊長類モデルでも活用するための枠組みを構築する必要がある。

なお、研究分野によっては本項目に記載のマウス・ラットや霊長類における研究のみならず、ショウジョウバエや線虫、ゼブラフィッシュ等に代表される小動物を用いた研究がより適している場合も多く存在し、世界トップレベルの研究を推進するためには、これらの分野の重要性が極めて高いことには変わりはないため、こうした技術を小動物から霊長類まで幅広い脳科学研究に活用することが重要である。

また、ヒト脳科学研究の分野では、脳画像に限らず行動指標や生体指標を含んだ大規模データベース化・精緻化が国際的に進んでいる。これによって、脳・行動データを多次元データとしてデータ駆動型のアプローチで扱うことが可能となり、従来の仮説検証型の解析方法に加えて、AI 技術の一つである機械学習によるデータ駆動型解析の活用が本格化している。大規模データベースでは我が国は米国や欧州に遅れを取っているが、多施設のデータから汎化性・信頼性の高い予測モデルを作成する機械学習アルゴリズムの開発では世界と渡り合えるレベルにある。また、ヒト脳画像研究の分野で、我が国がイニシアチブを取れる可能性が高い技術として DecNef があり、脳と行動の因果関係を解明するためのツールとしてインパクトのある業績につながっている。さらに、革新脳での全脳コネクトームデータの蓄積など、新しい脳機能の数理科学的研究にとって追い風の要素が存在する。

このような背景の下、今後我が国に求められる研究開発戦略として以下の 3 つの視点が重要である。

- ・ 多施設で取得されたデータから目的とすべき情報を適切に導く方法論の開発
- ・ 国際的に競争力のある多次元・多施設データベースの設計・構築・運営
- ・ 脳・行動の因果関係を解明する介入技術の先導的な開発と普及

<具体的な方策>

1. 主にマウス・ラット等のげっ歯類による研究を進めるとともに、そこで見いだされた新しい技術を、我が国の強みである霊長類研究へと技術移転して種間比較研究を行い、ヒトあるいはマーモセットやマカクサルなどの霊長類での知見蓄積につなげていく。
2. その過程で、シナプス操作、遺伝子操作などに代表される操作技術、蛍光プローブ等を含めた脳機能解析技術の開発を進める。特に我が国が強みを持つ脳透明化

技術や蛍光プローブ開発、国内メーカーの存在や技術開発力に優れる顕微鏡イメージング技術、iPS細胞モデル作成技術等を優先し、種間比較・技術移転を支えるためのリソースの基盤整備を、技術ツールリソースとデータリソースに分けて推進する。

3. また、げっ歯類から霊長類研究に発展させる過程でビッグデータ化したデータを利用するために、大型計算機、AI、あるいはモデル化などの研究・技術と連携することが必要である。そのため、10~20年後を見越した長期的視野で、理論系研究者の人材育成を早期に開始する。
4. ヒト個性の統合的理解を可能とする動的予測モデルを構築する。これまでの米国HCP等の大規模データベースと、それを用いたデータ駆動型の研究では、例えば疾患を判別するバイオマーカーやバイオタイプの同定などのように、ある集団の「静的」な特性を捉える解析が主流であった。しかし、このような研究では心や身体の状態の変化を個人レベルで予測することは不可能であった。これまでの集団の「静的」な特性を捉える解析を発展させ、個人の「動的」な機能レベルの状態予測を可能とするモデルの構築を目指す。具体的には、長期間においては発達・加齢が、短期間においては投薬等の要因が、個人内においてどのように脳・行動を変化させるかを予測するための動的メカニズムの同定を目指す。
5. ダイナミックに「進化する」多次元縦断データベースを設計する。動的な脳の状態予測モデル構築には、それを可能にする多次元縦断データベースの設計・構築が不可欠である。しかし、多次元の指標を多人数から継続的に収集することは実験者及び参加者のコストや資金の面で困難が予測される。また、不要なデータを大量に収集するという非効率を回避する必要もある。そこで、動的モデルに基づいて導き出され解析対象となる脳機能特性を効率的にとらえられる特徴量の抽出によって、継続的に収集する必要のある脳・行動指標の同定や、その収集のための最適化プロトコルの構築を行う。これは、動的モデルと多次元縦断データのインタラクションにより、多次元縦断データベースの最適化を行う、いわば「進化」するデータベースであり、(1)との連携によって可能となる。アウトプットの例として、疾患の判別を高精度で行うための脳・行動指標の最適組み合わせを、動的モデルと多次元縦断データベースから導出し、オンライン上に公開することで新規の研究デザインの提案が可能になる。
6. ヒト個性の統合的理解を可能とする脳・行動の因果関係を解明する介入技術の先導的な開発と普及を行う。DecNefは、自然な脳活動時空間パターンへの誘導を、脳情報解読(デコーディング)技術、実時間ニューロフィードバック、強化学習(神経オペラント条件付け)を組み合わせるツールとして我が国が世界に先駆けて開発し、ヒトの知覚・行動・心理状態を変容させるインパクトのある業績を出している。脳活動パターンから行動、学習、記憶、意識への因果関係を証明できるツールであり、ヒト個性を理解するためには強力なツールとなる一方、

その分子・ニューロンレベルの詳細なメカニズムは未だ明らかではない。そこで、サル・げっ歯類など動物実験における細胞記録、関連分子解明による分子／細胞レベルの理解と、システムレベルでの脳の理解を、階層を越えて統合し、DecNefの神経原理解明を促進する。これにより、脳と行動の因果関係に直接的にアプローチすることが可能となり、(2)における因果関係の種間比較において橋渡し的なツールとなることが期待できる。

なお、技術開発においては脳科学研究にとらわれず幅広く他の研究分野・技術分野との協力が不可欠である。

<国際協力と国際貢献>

国際的に電気生理学や光遺伝学等の技術開発を共有して進める研究者コンソーシアムに積極的に参加し、最新技術の規格化・共有を国際的に進める。具体的な最新技術の世界的な規格化・共有の例としては、電気生理学の分野における Open Ephys (オープンイーフィス) や、超小型の内視鏡型顕微鏡の作製から解析ソフトまで wiki 型のオープンリソースとして共有する Miniscope.org (ミニスコプオルグ) のようなコンソーシアムへの参画が挙げられる。データリソースについてもデータベースの国際規格化を推進する。また、欧米で開発された新規技術を我が国が取り込み、霊長類研究に利用できる形で世界に還元する。

また、動的予測モデルの創成においては、まずは静的なモデル、即ち事前分布の同定を行う必要がある。我が国の脳プロでの多疾患データベースや革新脳の全脳コネクトームデータとともに、海外の大規模データベースとの連携によってサンプル数を増やすことは有効性が高い。これら国際連携による世界規模のデータベースから得られる情報を基にして、我が国の強みである計算論的神経科学の知見や高度に整備されたデータをモデル同定精度の向上(例えば尤度の導出)に活かすことで、精度の高い動的な脳機能モデルを導き出す。以上の意味において、機械学習、計算論的神経科学、精神医学、心理学の緊密な協力を可能とする体制構築が不可欠である。

ダイナミックに「進化する」多次元縦断データベースの設計においては、データベース最適化のプロトコールを提供し、世界を先導する形で国際的データベースとの連携を行う。また我が国の多次元縦断データ自体が、遺伝的に比較的均質であることによる国際的優位性という背景を有することから、特に黎明期における有用性の検討においては必須なデータベースとして国際貢献することが可能である。

DecNef のヒトでの適用可能性をさらに拡大することは、我が国が主導的立場で世界のシステム神経科学を前進させることにつながる。

<期待される成果>

技術ツールリソースとデータリソースという 2 方向からのリソース支援を国際的な連携も含めて取り組むことにより、革新脳等の霊長類研究との相乗的な効果が期待できる。また、世界初の動的予測モデルの構築によってヒト個性の理解等のシステム神経科学の飛躍的な進展が期待できる。さらに、データベース最適化プロトコルの提唱、即ち「進化する」データベース設計による国際競争力の向上とともに、国際協力によって世界規模データを活用することで更なる高精度化も可能となる。

神経回路を計測・制御する技術や疾患の原因となる神経回路を特定する技術の開発によって、ヒトの脳の動作原理等の解明、ヒトの精神・神経疾患の早期発見・早期介入の実現、新たな脳型アルゴリズムの開発につなげることができる。

(4) AI 研究との連携による新たな脳型アルゴリズムの構築と脳の動作原理の理解

AI 研究との連携により脳機能の数理科学的研究を推進することは、(3)における神経科学研究に用いられるツールの開発への AI の利用(脳科学への応用)の他に、次世代脳型 AI を生む基礎的なアイデアの脳科学からの提示(脳科学からの提示)、AI を創ることにより脳を理解する(脳科学への還元)という観点からも重要である。脳プロ BMI 技術課題で開発している DecNef などの独自の BMI 技術や革新脳で構築を目指している全脳コネクトームデータを核として、脳科学と AI 研究の橋渡しとなる枠組みを形成するとともに、次世代の人材育成も試みる必要がある。AI 研究分野の人材が豊富な欧米との連携により脳科学と AI 研究の橋渡しを強化するために、IT 企業における AI と脳科学・医療との融合分野における活発な動きに鑑みて、米国 IARPA や欧州 HBP のみならず、企業との連携も含めた体制を考慮する必要がある。

<必要性>

AI 研究とその社会実装の進展に伴い、我が国でも本分野の研究基盤整備が進んでおり、今後、脳科学研究との連携によって相互に進展することが可能である。

<具体的な方策>

1. ヒト知能の理解につながる新しい脳型アルゴリズムを構築し、次世代 AI へ発展させる。AI 技術の発展と社会応用・実装が急速に進んでいる。例えば Alpha GO の開発で知られる Google DeepMind の医療・ヘルスケア分野への進出などが挙げられる。一方、我が国では、統計的機械学習などの理論的研究は活発なものの、理論的な先駆性は少なくとも、応用面での新規性で競争に勝つことが可能な深層学習などのアルゴリズム開発と応用では世界に水をあけられているのが現状である。また、深層ニューラルネットワークによる学習は、視覚野の一部の機能の実装には成功しているが、ヒト知能の実装には程遠い。そこで、脳研究と AI 研究の密な連携により、ヒトの脳で実際に起こっている学習メカニズムを考慮した、新しい AI アルゴリズムを生み出すことにつながる研究を推進する。脳研究の知

見を AI に実装することで、深層学習を超える次世代の AI の創出につなげるとともに、新しい AI アルゴリズムを通してヒト知能の動作原理のより深い理解へのフィードバックをはかる。

2. 新しいアルゴリズムやモデルにつながる革新的な研究に向けた長期的なスパンでの成果を期待する一方、現状の AI の直面している課題に焦点を絞った研究が必要である。例えば、脳が行っているような少数サンプルからの学習は AI の中心的な問題の一つであり、多様な状況における問題の解決を可能とするヒトの持つ柔軟な高次認知機能の解明と実装が待たれている。また実際の運動制御問題などを脳がどう解いているのか、脳の非線形ダイナミクスや神経発火の同期と学習システムの自由度などを考慮したアルゴリズム構築は、脳の動作原理の理解には不可欠である。これらの新しいアルゴリズムやモデルにつながる基礎研究は、動物を対象とした神経活動記録、イメージングや操作技術、ヒトを対象としたイメージングや操作など幅広いアプローチを想定する。
3. 脳研究と AI 研究の密な連携を推進するために、理研 AIP センター等の国内外の研究機関や大学との連携体制を強化する。具体的には、理研 AIP センターが脳研究と AI 研究を結びつける中核的な役割を果たし、そこに大学や研究機関、企業が協力することで、産学を越えた人材の交流や情報共有を行う体制を整備する。

なお、脳科学研究の理論系人材が、企業などの他のキャリアに流れてしまう課題も存在する。この分野で豊富な人材を有する欧米との連携も活用して、脳科学と AI 研究の橋渡しとなる枠組みを形成するとともに、次世代の理論系人材育成が急務である。

<国際協力と国際貢献>

これまで実施している米国 IARPA や欧州 HBP などの国家プロジェクトにおいては、AI 分野の人材が必要であると指摘されている。

現状の人工知能の欠点を認識し、ヒトの認知機能やその脳機構に学んだ新たな人工知能を作ろうという問題意識は世界中の多くの研究者に共有され、各地で具体的な取り組みが進んでいる。例えば、MIT (Massachusetts Institute of Technology) の Center for Brain, Mind and Machines、NIPS (Neural Information Processing Systems) Brains & Bits ワークショップ、NYU (New York University) Shanghai の Brain and AI ワークショップなどがある。平成 29 年 (2017 年) 5 月には Gatsby Computational Neuroscience Unit、新学術領域「人工知能と脳科学」、理研 AIP などの共催で Google DeepMind の研究者らも招いた合同ワークショップがロンドンで開催されたが、このような国際的なネットワーク作りに日本の研究者が積極的、継続的に関わり、若手を含めた多くの研究者の参画により知的啓発と技術的交流を進めていくことが求められる。

また、AI 分野の人材育成については、アカデミアだけでなく AI 研究分野の人材が豊富な海外の企業との連携も含めた体制構築が必要である。

<期待される成果>

脳研究と AI 研究の密な連携と人工知能の中心的課題に絞った協力体制により、AI 研究単独では生み出せない次世代脳型 AI の創出のみでなく、AI を創ることにより脳を理解することで、両分野の相乗的な効果が期待できる。また人工知能研究の基礎および応用分野での日本の国際競争力の向上が期待できる。

3-3 データ、リソースの共有

<現状分析>

- 開発された技術の高度化、種間移行、支援
 - ・ 新学術領域研究「学術研究支援基盤形成」において、その中で生み出された新技術を効率よく普及する取組が実施されているが、範囲は限定的である。
 - ・ 革新脳では、中核拠点の役割として開発された技術の高度化、種間移行、普及が求められている。
 - ・ 脳プロ「融合脳」では、精神・神経疾患の克服を目標として、疾患単位のチームが構成され、チーム内外の連携は促進されているが、実験技術の支援については明確な体制はない。
 - 有用な技術が見いだされた場合に、その高度化や、マウス、サル、さらにヒトへと種間移行を効率的に進め、更には迅速に全国的に広げるための支援のためのシステム構築が課題
- 基礎研究、臨床研究データの共有
 - ・ 基礎研究分野では、ニューロインフォマティクス国際統合機構（International Neuroinformatics Coordination Facility : INCF）の日本ノードがこれまでデータ集積、国際利用において一定の役割を果たしてきた。
 - ・ 脳プロ「脳科学研究を支える集約的・体系的な情報基盤の構築（課題 G）」で開発されたリン酸化タンパクのパスウェイデータベース（Kinase-Associated Neural Phospho-Signaling : KANPHOS）も、疾患研究において利用価値の高いものとして期待されている。
 - ・ 革新脳において、霊長類の神経回路データの蓄積が平成 26 年（2014 年）度より開始され、データ集積とそれを起点としたデータ駆動型研究の基盤となることが期待されている。
 - ・ ヒトの脳画像データについても、革新脳と脳プロの活動によって、共通プロトコールを利用した画像データの蓄積が開始されつつある。
 - 基礎研究と臨床研究のいずれにおいても、集積したデータを如何に共有し、

連結して行くかが課題

- リソースの共有
 - ・ 基礎研究におけるリソースの共有については、脳プロで開発されたウイルスベクターの共有、ナショナルバイオリソースプロジェクト(NBRP)でのマウス、ゼブラフィッシュ、ニホンザルの供給などが実施されている。
 - ・ 臨床研究においては住民コホート、疾患コホート研究でのリソース蓄積、脳プロや国内の複数の拠点で実施されている脳バンクの活動、精神・神経疾患のゲノム研究に関連した血液等のサンプルの蓄積が実施されている。
- リソースの共有についても、蓄積されたリソースを如何に複数の研究で共有して行くかが課題

<課題解決に向けた方策>

- 窓口となる研究機関におけるデータ、リソース蓄積、公開、支援体制の強化
 - ・ 国際的な連携を行うには窓口を一本化し、データの統合、標準化が必要となる。
 - ・ 大規模のデータ、リソース共有化のためのサービスを担う研究機関自体の整備が必要である。
- データ共有化を促進するための情報基盤の整備
 - ・ データ共有には多量のデータを通信することが必須であり、そのような体制整備が共有化の前提となる(世界最高速の学術情報ネットワーク「SINET」など)。
- 担当者のキャリア形成の促進
 - ・ データ、リソースの共有化を担当する研究者の業績評価、キャリアアップの可能性を担保することが必要である(「将来性のないポストではないか」と若手研究者に受け取られてしまう可能性)。

これらの課題を克服するための一つの手法として、技術ツールリソースやデータリソースを開発・集約・共有するためのインフラを配備した中核的組織の設置が考えられる。中核的組織では国内推進はもとより、国際連携のためのノードとしての機能を果たす。

イメージング技術を例に挙げると、光学顕微鏡・電子顕微鏡からMRI・PET等の多階層技術の高度化・開発・共有、更には得られたデータを集約しシームレスにつなぐ解析を効率的に行うため、国内研究の総合的推進のための中核的組織があることが望ましい。

また、我が国の革新脳や米国 BRAIN Initiative、欧州 HBP をはじめとする大型脳科学研究プロジェクトでは、最終的には画像等の膨大なデータを産生することになる。そのデータを元にして効率的かつ生産的に国際連携研究を行うためには、各プロジェクトのノードによって統一されたデータフォーマットでデータが蓄積され、ノード間での互換が可能であることが求められる。

国内で稼働している革新脳や種々のデータベース構築、バイオマーカー開発、バイオサンプルの集積ネットワーク、コホート研究を最大限に活用するために密な連携をする

とともに、国外で行われているプロジェクトと連携し、データの共有や大規模解析、リソースの交換が可能な体制にあることが重要である。このような機能を果たすことにより、情報科学者をはじめとした人材育成にもつなげて行くことができる。

＜具体的な連携の可能性＞

各研究分野について、データ、リソース共有の観点から連携の在り方について具体的な可能性を以下の表にまとめた。

表5 データ、リソースの共有のあり方：具体的な連携

研究分野	手法	データ、リソース共有の具体的な連携
(1) 正常と疾患とその中間段階を含むヒト脳の経時的臨床データの比較研究	Human biology(ヒトの疾患実態に基づきヒトの疾患制御に帰結する研究開発)にむけた基盤整備	国内臨床脳画像DB、エコテル、東北メディカル・メガバンクブレインバンク等の国際的な公開・活用に向けた体制を国際連携により整備(例:英語化)。
(2) 非ヒト霊長類脳とヒト脳の比較研究	げっ歯類・非ヒト霊長類・ヒトの間で、脳の機能と構造の対応関係を明確化	革新脳マーマセットDB、国内臨床脳画像DB(認知ゲノム共同研究機構など)等、国内で進行中のDBの国際標準化を目指して、先行するHCPやENIGMAとの戦略的・補完的な連携を推進。
(3) 脳神経回路解析のための革新的技術開発: 神経回路の計測・制御技術や、疾患の原因回路の特定に向けたビッグデータ解析に資する新規AI技術	実験研究のための要素技術開発と活用の効率化	国内での開発技術が国際標準とするような戦略を要する。例えば、革新脳マーマセットDBと既存げっ歯類DB(Allen Brain Atlas)の検索システムの共通化等。 日本で先進的に取り組まれている全脳活動からのdecoding技術等を国際標準化する方向で連携を模索。
(4) AI研究との連携による新たな脳型アルゴリズムの構築と脳の動作原理の理解	AI研究との連携による脳機能の数理科学的研究の推進	(1)と(2)の研究を進めるにあたり、情報分野などの担当者と意見交換をしながらデータ収集等を推進。

3-4 人材育成

各研究分野に必要な人材育成については前述した部分もあるが、国際連携の観点からの体系的な人材育成の方針を以下のとおり述べる。

＜人材育成に向けた考え方＞

人材育成は、①国際化、②学際化、③世代間、④組織体制の4軸からの観点が必要である。特に、②に関わる「AIと脳科学をつなぐ人材の育成と確保」が急務である。また、このような人材は、今後推進すべき研究の中核であるイメージングとデータベース技術開発にも大きな貢献が期待できる。即戦力となる人材を海外から招聘すると同時に、国内での人材育成を先を見据えて行い、脳科学を支える人材を切れ目なく確保する必要がある。また、心理系脳科学研究の国際化については、学術交流にとどまらず、世界をリードする人材の育成を積極的に推進する具体的方策を考え出す必要がある。まずは、サ

マースクールや学会等において企画シンポジウムとして支援し地道な人材育成を行っていくことから開始する必要がある。

<育成期間に応じた施策の在り方>

- ・ 即戦力の海外からの招聘（人材獲得）
- ・ 数週間までの短期（人材育成）：トレーニングコース・サマースクール（数日～数週間）、インターンシップサポート（数週間～数ヶ月）、国際学会やトレーニングコースへの参加助成
- ・ 数年程度の中期（人材育成・即戦力）：学生・フェローシップ（JSPS（日本学術振興会）特別研究員-AI 脳科学特別枠）、AI と脳科学をつなぐセミナー・画像処理コンテスト（例えば数年間毎年開催）の開催。国際的なコンソーシアムの立上げや運営を担うコーディネーターの戦略的な育成。
- ・ 長期の育成（次世代PI（Principal Investigator）の育成）：海外から招聘する若手研究者のテニュアトラック予算を確保し、次世代人材育成業務を付加。

<人材育成の枠組み等>

- ・ 脳科学国際人材育成コンソーシアム：いくつかの大学・研究所が連携して脳科学人材育成のコンソーシアムを立ち上げ、上に例示されたような企画（コース・セミナー・コンテスト）を主催するとともに、ファンディングや企業協賛の受け皿となる体制を構築する。新学術領域研究などですでに着手されている取組を母体に拡充していくことが現実的なプランと考える。
- ・ 事務部門の国際化：人材育成に関わるコンソーシアムの中核機関に国際連携による人材育成リエゾンオフィスを設置。

平成28年10月4日
脳科学委員会決定

国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する 作業部会の設置について

1. 設置の趣旨

我が国においては、脳科学委員会での議論等を踏まえ、「社会に貢献する脳科学」の実現を目指し、社会への応用を明確に見据えた脳科学研究を戦略的に推進するため、平成20年度より「脳科学研究戦略推進プログラム」が実施された。また、平成26年度より、霊長類の高次脳機能を担う神経回路の全容をニューロンレベルで解明し、精神・神経疾患の克服や情報処理技術の高度化等につなげるための基盤構築を目的とした「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト」を開始し、「脳科学研究戦略推進プログラム」等の関連事業との連携・協力により実施することとしている。

一方、近年世界各国で大規模な脳科学研究プロジェクトが開始されており、脳科学研究の推進が急務とされている。さらに、各国プロジェクト間の連携が求められており、平成28年の伊勢志摩サミットの成果文書では、「活動的な高齢化のための研究開発とイノベーション」として、「認知症などの脳疾患を含む脳機能についての根本的な側面に対処する持続的な研究や国際連携を促進し、加えて国際的で学際的な研究の取組の加速と新技術の開発を行うこと」の重要性が認識されている。また、平成28年9月に開催された「Coordinating Global Brain Projects」において、International Brain Station (IBS: 国際ブレインステーション (仮称)) の構築が提案され、日本を始め各国が参加を表明している。

このような状況を踏まえ、我が国において培ってきた「社会に貢献する脳科学」の現状や世界の脳科学研究の動向を調査した上で、今後日本の脳研究の進める方向性並びに具体的課題について議論するため、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会／学術分科会脳科学委員会運営規則第2条第1項の規定に基づき、脳科学委員会に「国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会」を設置する。

2. 調査検討事項

- (1) 世界における脳科学研究の現状と課題について (米国 BI、欧州 HBP、中国、韓国、日本 等)
- (2) 国際連携を見据えた日本が取組むべき戦略的、重点的に推進すべき研究課題について
- (3) 日本での推進体制及び効果的な連携のあり方について
- (4) その他

3. 設置期間

作業部会の設置が決定された日から平成29年2月14日までとする。

国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会

- 伊 佐 正 京都大学大学院 医学研究科 教授
- 磯 村 宜 和 玉川大学 脳科学研究所 教授
- ◎ 岡 部 繁 男 東京大学大学院 医学系研究科 教授
- 加 藤 忠 史 理化学研究所 脳科学総合研究センター 副センター長
- 定 藤 規 弘 自然科学研究機構 生理学研究所 教授
- 下 郡 智 美 理化学研究所 脳科学総合研究センター チームリーダー
- 田 中 沙 織 (株)国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所 室長
- 銅 谷 賢 治 沖縄科学技術大学院大学 神経計算ユニット 教授
- 花 川 隆 国立精神・神経医療研究センター 先進脳画像研究部 部長
- 渡 部 文 子 東京慈恵会医科大学 総合医科学研究センター 神経科学研究部 准教授

計 10 名 (敬称略 50 音順)

◎ : 主査、○ : 主査代理

平成 29 年 5 月 12 日
科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
学 術 分 科 会
脳 科 学 委 員 会

国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する 作業部会の設置について

1. 設置の趣旨

我が国においては、脳科学委員会での議論等を踏まえ、「社会に貢献する脳科学」の実現を目指し、社会への応用を明確に見据えた脳科学研究を戦略的に推進するため、平成 20 年度より「脳科学研究戦略推進プログラム」が実施された。また、平成 26 年度より、霊長類の高次脳機能を担う神経回路の全容をニューロンレベルで解明し、精神・神経疾患の克服や情報処理技術の高度化等につなげるための基盤構築を目的とした「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト」を開始し、「脳科学研究戦略推進プログラム」等の関連事業との連携・協力により実施することとしている。

一方、近年世界各国で大規模な脳科学研究プロジェクトが開始されており、脳科学研究の推進が急務とされている。さらに、各国プロジェクト間の連携が求められており、平成 28 年の伊勢志摩サミットの成果文書では、「活動的な高齢化のための研究開発とイノベーション」として、「認知症などの脳疾患を含む脳機能についての根本的な側面に対処する持続的な研究や国際連携を促進し、加えて国際的で学際的な研究の取組の加速と新技術の開発を行うこと」の重要性が認識されている。また、平成 28 年 9 月に開催された「Coordinating Global Brain Projects」において、International Brain Station (IBS: 国際ブレインステーション (仮称)) の構築が提案され、日本を始め各国が参加を表明している。

このような状況を踏まえ、我が国において培ってきた「社会に貢献する脳科学」の現状や世界の脳科学研究の動向を調査した上で、今後日本の脳研究の進める方向性並びに具体的課題について議論するため、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会／学術分科会脳科学委員会運営規則第 2 条第 1 項の規定に基づき、脳科学委員会に「国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会」を設置する。

2. 調査検討事項

- (1) 世界における脳科学研究の現状と課題について (米国 BI、欧州 HBP、中国、韓国、オーストラリア、カナダ、日本 等)
- (2) 国際情勢を踏まえた我が国の研究開発戦略のあり方について
- (3) 脳科学研究を推進するための国際連携の方針について
- (4) その他

3. 設置期間

作業部会の設置が決定された日から平成 31 年 2 月 14 日までとする。

国際連携を見据えた戦略的脳科学研究推進に関する作業部会

- 伊 佐 正 京都大学大学院 医学研究科 教授
- 磯 村 宜 和 玉川大学 脳科学研究所 教授
- ◎ 岡 部 繁 男 東京大学大学院 医学系研究科 教授
- 加 藤 忠 史 理化学研究所 脳科学総合研究センター 副センター長
- 定 藤 規 弘 自然科学研究機構 生理学研究所 教授
- 下 郡 智 美 理化学研究所 脳科学総合研究センター チームリーダー
- 田 中 沙 織 (株)国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所 室長
- 銅 谷 賢 治 沖縄科学技術大学院大学 神経計算ユニット 教授
- 花 川 隆 国立精神・神経医療研究センター 先進脳画像研究部 部長
- 渡 部 文 子 東京慈恵会医科大学 総合医科学研究センター 臨床医学研究所 教授

計 10 名 (敬称略 50 音順)

◎ : 主査、○ : 主査代理