

(案)

提言

脳科学における国際連携体制の構築
－国際脳科学フロンティア計画と
国際脳科学ステーションの創設－



平成29年（2017年）〇月〇日

日本学術会議

基礎医学委員会

神経科学分科会

形態・細胞生物医科学分科会

機能医科学分科会

臨床医学委員会

脳とこころ分科会

この提言は、日本学術会議基礎医学委員会神経科学分科会、形態・細胞生物医学分科会、機能医学分科会、臨床医学委員会脳とこころ分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議基礎医学委員会神経科学分科会

委員長	岡部 繁男	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科神経細胞生物学分野教授
副委員長	合田 裕紀子	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所脳科学総合研究センターチームリーダー
幹事	大木 研一	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科統合生理学分野教授
幹事	岡野 栄之	(連携会員)	慶應義塾大学大学院医学研究科委員長、慶應義塾大学医学部教授
	大隅 典子	(連携会員)	東北大学大学院医学系研究科教授
	岡本 仁	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所、脳科学総合研究センター、副センター長
	川人 光男	(連携会員)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所脳情報通信総合研究所長・ATRフェロー
	後藤 由季子	(連携会員)	東京大学大学院薬学系研究科分子生物学教室教授
	酒井 邦嘉	(連携会員)	東京大学大学院総合文化研究科関連基礎科学系教授
	田中 啓治	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所脳科学総合研究センター副センター長
	津本 忠治	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所脳科学総合研究センターチームリーダー
	鍋倉 淳一	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構生理学研究所教授
	廣川 信隆	(連携会員)	東京大学医学部教授、同大学院医学系研究科特任教授
	本間 さと	(連携会員)	北海道大学脳科学研究教育センター招聘教授
	三品 昌美	(連携会員)	立命館大学総合科学技術研究機構教授

日本学術会議基礎医学委員会形態・細胞生物医学分科会

委員長	岡部 繁男	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科神経細胞生物学分野教授
副委員長	藤本 豊士	(連携会員)	名古屋大学大学院医学系研究科教授
幹事	仲嶋 一範	(連携会員)	慶應義塾大学医学部教授
幹事	渡辺 雅彦	(連携会員)	北海道大学大学院医学研究科教授
	藤吉 好則	(第二部会員)	名古屋大学細胞生理学センター客員教授
	今泉 和則	(連携会員)	広島大学大学院医歯薬保健学研究院基礎生命科学部門医学分野分子細胞情報学教授
	牛木 辰男	(連携会員)	新潟大学教育研究院医歯学系・教授
	内山 安男	(連携会員)	順天堂大学大学院医学研究科教授
	門松 健治	(連携会員)	名古屋大学大学院医学系研究科教授
	河田 光博	(連携会員)	佛教大学保健医療技術学部教授

黒岩	常祥	(連携会員)	東京大学名誉教授、日本学士院会員
小路	武彦	(連携会員)	長崎大学大学院医歯薬学総合研究科教授
高田	邦昭	(連携会員)	群馬県立県民健康科学大学学長
西	真弓	(連携会員)	奈良県立医科大学医学部・医学科第一解剖学教授
萩原	正敏	(連携会員)	京都大学大学院医学研究科形態形成機構学教室教授
廣川	信隆	(連携会員)	東京大学医学部教授、同大学院医学系研究科特任教授
米田	悦啓	(連携会員)	大阪大学名誉教授、国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所理事長

日本学術会議基礎医学委員会機能医科学分科会

委員長	本間	さと	(連携会員)	北海道大学脳科学研究教育センター招聘教授
副委員長	尾崎	博	(第二部会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科特任研究員
幹事	河西	春郎	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
幹事	南	雅文	(連携会員)	北海道大学大学院薬学研究院教授
	岡部	繁男	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科神経細胞生物学分野教授
	今井	由美子	(第二部会員)	国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所感染症態制御ワクチンプロジェクトプロジェクトリーダー
	飯野	正光	(連携会員)	日本大学医学部細胞分子薬理学部門特任教授
	上田	泰己	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科 機能生物学専攻教授
	垣塚	彰	(連携会員)	京都大学大学院生命科学研究科教授
	高木	都	(連携会員)	奈良県立医科大学医学部名誉教授
	鍋倉	淳一	(連携会員)	自然科学研究機構生理学研究所教授
	平井	宏和	(連携会員)	群馬大学大学院医学系研究科神経生理学教授
	加藤	総夫	(特任連携会員)	東京慈恵会医科大学医学部教授

日本学術会議臨床医学委員会脳とこころ分科会

委員長	山脇	成人	(第二部会員)	広島大学大学院医歯薬保健学研究科特任教授
副委員長	糸山	泰人	(連携会員)	国際医療福祉大学副学長・九州地区生涯教育センター長
幹事	池田	和隆	(連携会員)	公益財団法人東京都医学総合研究所参事研究員
幹事	齊藤	延人	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科脳神経外科学教授
	岡部	繁男	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科神経細胞生物学分野教授
	神尾	陽子	(第二部会員)	国立研究開発法人国立精神・神経医療研究センター精神保健研究所児童・思春期精神保健研究部長
	青木	茂樹	(連携会員)	順天堂大学医学部放射線医学講座教授、同大学院医学研究科放射線医学教授

内富 庸介	(連携会員)	国立研究開発法人国立がん研究センター支持療法開発センター長
小川 彰	(連携会員)	岩手医科大学学長
尾崎 紀夫	(連携会員)	名古屋大学大学院医学系研究科精神医学・親と子どもの心療学分野教授
笠井 清登	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
片山 容一	(連携会員)	湘南医療大学副学長・日本大学名誉教授
金生 由紀子	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科こころの発達医学分野准教授
嘉山 孝正	(連携会員)	山形大学学長特別補佐
神庭 重信	(連携会員)	九州大学大学院医学研究院精神病態医学・教授
内匠 透	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所脳科学総合研究センター精神生物学研究チーム チームリーダー
辻 省次	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科脳神経医学専攻神経内科教授
戸田 達史	(連携会員)	神戸大学大学院医学研究科神経内科学／分子脳科学教授
中島 聡美	(連携会員)	公立大学法人福島県立医科大学放射線医学県民健康管理センター特命准教授
樋口 輝彦	(連携会員)	一般社団法人日本うつ病センター理事長

本提言の作成に当たっては、以下の研究者にご協力いただいた。

伊佐 正	京都大学大学院医学研究科教授
柚崎 通介	慶應義塾大学医学部教授
高橋 良輔	京都大学大学院医学研究科教授
加藤 忠史	国立研究開発法人理化学研究所脳科学総合研究センター副センター長

本提言の作成に当たっては、以下の職員が事務を担当した。

事務局	中澤 貴生	参事官(審議第一担当)	(平成27年3月まで)
	井上 示恩	参事官(審議第一担当)	(平成29年3月まで)
	西澤 立志	参事官(審議第一担当)	(平成29年4月から)
	渡邊 浩充	参事官(審議第一担当)付参事官補佐	(平成28年12月まで)
	齋藤 實寿	参事官(審議第一担当)付参事官補佐	(平成29年1月から)
	角田 美智子	参事官(審議第一担当)付審議専門職	(平成27年12月まで)
	岩村 大	参事官(審議第一担当)付審議専門職	(平成28年1月から)

要 旨

1 作成の背景

ヒトの脳は人類の文明が拠って立つ基盤である。それゆえ、脳科学への投資は社会の未来への投資であり、各国は協調して脳を理解し、疾病から守り、その最適な発達を支援しなければならない。第42回先進国首脳会議（伊勢志摩サミット）においても、国際的な脳に関連したリソースの開発を目的として、並行して推進すべき複数の課題が議論された。それに先だって行われたGサイエンス学術会議において取りまとめられた脳科学に関する柱は以下の4項目である。

- 1) 国際協力の下での基礎研究の推進
- 2) 脳疾患の発症メカニズム解明、診断、予防、治療に向けた国際プログラムの推進
- 3) 脳の理論モデルと脳を基盤とした人工知能の開発
- 4) 脳科学の方法と成果を社会・行動科学と統合することによる教育・生活マネジメント改善プログラムの開発

この4項目について、その背景となる脳科学の現状を明確にし、その上で長期的な脳科学の方向性を議論する必要がある。更にその実現に向けて必要となる国際連携の在り方、脳科学リソースの内容、国内において実施すべき研究内容とそれを支える研究体制について、Gサイエンス学術会議の内容を更に発展・深化させた議論を行う必要がある。

このような認識に基づいて本提言は取りまとめられたものである。

2 現状及び問題点

脳を理解すること、また、脳の様々な機能がいかに行動に表われるかを理解することは、宇宙の起源を解明することに匹敵するほど複雑かつ困難な科学的試みであり、その実現には長期的な計画、持続的な努力、周辺科学分野との連携、技術革新などの複合的な要素をまとめあげ、人類の英知を結集した挑戦を行う必要がある。脳の構造と機能に関する基礎的理解は非常に困難な課題であるが、脳疾患の治療、脳を基盤とした人工知能の開発、さらには脳の性質により適合した社会組織を設計するためには、この問題を避けて通ることはできない。

このような現状の認識と今後の展望については、すでに記載した様に平成28年2月に開催されたGサイエンス学術会議において4項目の目標としてまとめられ、国際的連携により達成すべきことが合意された。脳科学の発展が人類の福祉に貢献することは、続いて平成28年5月に開催されたつくば科学技術大臣会合において発表された「つくばコミュニケ」、

さらに「伊勢志摩サミット成果文書」にも取り上げられている。このような国際的な議論及び合意を受けて、現時点での脳科学研究の国内及び国外の状況、長期的に脳科学が目指すべき方向性と具体的な目標、さらにその達成において重要となる国際連携プロジェクトと、それを実現するための中核的研究センターについて、包括的な議論を行いその内容を明確にすることが強く求められる。

3 提言等の内容

国際脳科学フロンティア計画と国際脳科学ステーションの創設

我が国がこの目標を達成するために、以下の4分野において、3カ国以上からなる複数の国際チームが連携した研究を遂行できる体制を構築する。

- 1) 基礎脳科学
- 2) 脳疾患の発症機構の解明, 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・行動科学と脳科学との統合

世界規模の多国間研究機構の成功例としては、日本のイニシアティブにより1987年に設立され現在も続いている「ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム (HFSP)」が挙げられる。その経験を礎として、本国際連携プロジェクトを国際脳科学フロンティア計画と命名し、その資金を日本が中心的に拠出し、事務局を日本に設置する。さらに、中核的研究センター(国際脳科学ステーション)を設置することを提言したい。国際脳科学フロンティア計画では、自らの新しい発想で研究を革新する若手を主たる対象とし、独創的、先進的な課題にチャレンジすることで、ブレークスルーを図るような国際的連携研究を支援する。国際脳科学ステーションでは、国際脳科学フロンティア計画で中核施設が必要な研究の支援を行う。さらに、常駐する研究者と訪問する海外の研究者との密接な共同作業によって初めて実現が可能な、大規模な装置や新しい技術の開発や、大規模データの集積や、その解析ソフトウェアの開発も行い、その成果の共同利用の機会を提供する。各国で個別に開発される様々な新技術や各国で発生する大規模データを集約し統合することによって、これまでとは異次元の革新的進歩を脳科学にもたらすための中核的役割を遂行する。

事務局は、個別連携プロジェクトの支援を行うだけでなく、各国固有に行われている大型脳研究プロジェクトとの連携や調整の促進、プロジェクト同士の連携促進のためのワークショップ等の開催や、研究成果普及のための国際的アウトリーチ活動等を行う。また、大型プロジェクトに対して国境を越えた研究費支援の仕組みを構築し、そのハブとしても役割を果たす。

目 次

1	はじめに	1
2	脳科学の現状と展望	2
(1)	脳科学における実験と理論の共鳴関係	2
(2)	予測機械としての脳	4
(3)	脳科学からより深い社会の理解へ	5
(4)	脳からこころを知る脳科学研究のために今後取り組むべきこと	6
(5)	脳の作動原理の理解に基づく脳疾患治療法の開発	10
(6)	脳科学から人工知能へ：機械にこころを組み込む	11
3	各国での脳科学研究の取り組みの現状	12
4	脳科学における国際連携の必要性	13
5	提言：国際脳科学フロンティア計画と国際脳科学ステーションの創設	16
(1)	提案の骨子	16
(2)	提案の意義	17
(3)	提案の実施体制	18
	<参考文献>	20
	<参考資料>	
1	本提案に至る審議の経過	25
2	関連分科会審議経過	26
3	分科会主催シンポジウム等	29
4	Gサイエンスアカデミー2016 共同声明	35
5	海外における脳科学の研究拠点例	39

1 はじめに

脳は分子から回路を経て個体機能の制御にいたる階層性を持っている。中間の階層を一段上がるごとに、下の階層では実現できない別の機能が生まれ、脳という物質的な存在から無形の存在である「こころ」が生み出されている。この物質的な存在である脳と「こころ」の関係を解き明かすことが脳科学にまさに期待されている。具体的な階層を考えた場合、分子の階層を一段上がると神経細胞の機能が生まれ、更に一段上がると神経回路の機能が生じる。さらに神経回路での情報処理は複数の脳内のシステムで感覚、運動、情動、自律神経調節などの機能を生み出し、これらのシステムの一段上にヒトとしての脳全体機能が立ち現れる。またヒトは社会と双方向性の関係を持つため、社会環境が脳を変え、最終的には分子レベルの変化となる場合もある。このように脳科学では、対象である脳を物質的に解析するだけでなく、脳の情報処理が上位の階層でどのように統合されるのかを解明する不断の努力を、理論と実験の両面から続ける必要がある。

近年、動物に適用できる様々な新しい技術が開発され、これらを駆使して、神経細胞を特異的に操作することによって、特定の神経細胞や神経回路に擾乱を加えた上で、動物の認知や行動を制御するシステム全体への影響を観察するという精密な因果律の検証に基づく研究が可能となった。また、ヒトに対しても、新しい技術の開発と改良によって、特定の行動や認知に関わって活動を変化する脳部位を同定できるようになった。さらに、脳の神経細胞や領域レベルでの活動の変化と、行動制御とを結びつける有力な理論も提唱されてきている。

このように近年実験と理論の相乗作用によって、脳科学は脳がどのようにしてこころの営みを生み出しているのかを明らかにし、この知識をもとに脳の機能異常がどのようにして脳疾患を引き起こすのかの解明を目指した研究が行われつつある。神経回路病態の解明を基礎として、神経変性疾患であるパーキンソン病の症状を劇的に改善させる脳深部刺激が開発され、神経回路病態の正しい理解が脳疾患の革新的治療技術を生み出すことが実証された。この成功により、神経回路操作が様々な難治性精神神経疾患の治療につながる期待が高まっている。このような背景から、世界では、脳機能の究極的解明を目指した様々な国家的プロジェクトが発足し、進行している。

本提言では、このような世界的状況において、各国で個別に開発される様々な新技術や各国で発生する大規模データを集約することによりこれまでとは異次元の革新的進歩を脳科学にもたらすために、日本がイニシアティブを取る国際連携研究体制として、国際連携プロジェクト（国際脳科学フロンティア計画）と中核的研究センター（国際脳科学ステーション）を創設することを提言したい。

2 脳科学の現状と展望

(1) 脳科学における実験と理論の共鳴関係

脳科学は、実験的研究と理論的研究とが常に密接な相互作用をしながら発展を遂げてきた。例えば小脳では、1967年に伊藤正男らによって“*The Cerebellum as a Neuronal Machine*” [1]が出版され、小脳の神経回路の解剖と電気生理学的特徴がまとめて示されると、2年後には“*A theory of cerebellar cortex*” [2, 3]と題した論文が発表され、平

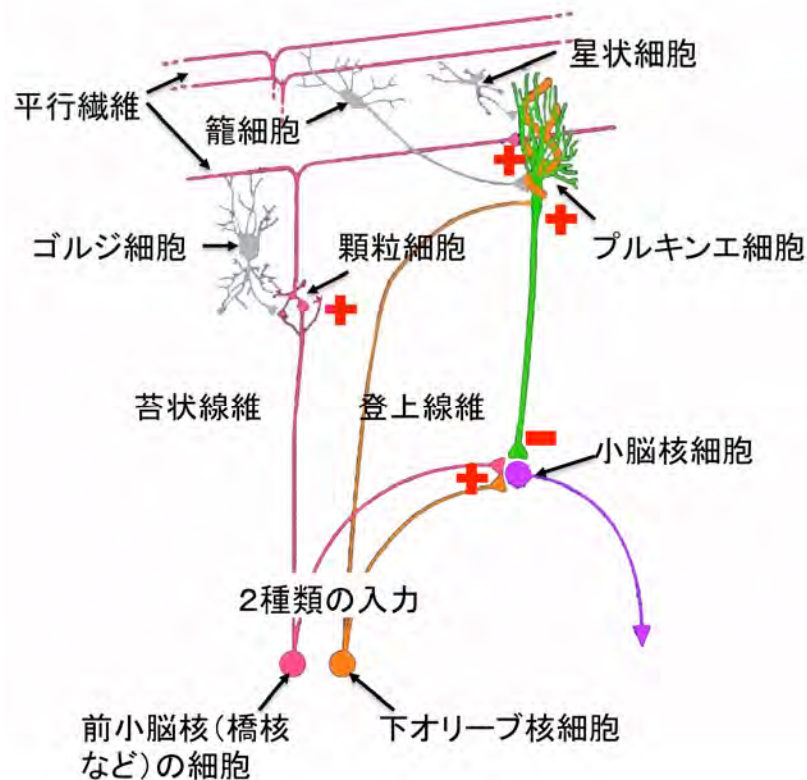


図1 小脳の神経回路[6]

シナプス結合の興奮性と抑制成果を+/-で表している。(文献[6]より改変)

行線維からプルキンエ細胞へのシナプス結合の強度を、登上線維の入力が教師信号¹として働いて変化させれば、小脳の神経回路はパーセプトロンと呼ばれる学習機械として働く可能性が指摘された。そして1982年には伊藤らによって、実際に平行線維からプルキンエ細胞へのシナプスに登上線維の入力によって長期抑制が誘発されることが報告された(図1) [4]。これらの研究はさらに、小脳の神経回路が、運動を正しく遂行するために運動制御に関わる神経細胞集団の発火状態を予測する内部モデルを蓄える装置であるとする川人・Wolpertらの理論へ発展している[5]。

¹教師信号: 小脳によって制御される運動が思い通りにうまく行ったかどうかを伝える信号

実験と理論の共鳴による著しい展開は、大脳基底核における行動プログラム学習の分野でも起こった(図2A, B)。1996年に脳を理論的に研究しているRead MontagueとPeter Dayanにより、Wolfram Schultzらによって観察された、サルが報酬を得たときの腹側被蓋野のドーパミン神経細胞(図2B)の応答が、Richard SuttonとAndrew Bartoらによって発展されていたTD(Temporal Difference)学習と呼ばれる強化学習²の理論の中で中心的な役割を担う報酬予測誤差に相応しい振る舞いをする事が指摘された(図2C) [7-9]。この発見を契機として、ドーパミン神経細胞とそれが支配する大脳基底核から成る神経回路がTD学習によって最大の報酬を得るための行動プログラムを習得できる学習機械だと考えられるようになった。この考えはその後、fMRI³を用いた人間の脳活動のイメージング結果を解釈する上でも利用されるようになり、神経経済学や神経市場調査学などと呼ばれる新しい研究分野の発展をもたらした[10]。

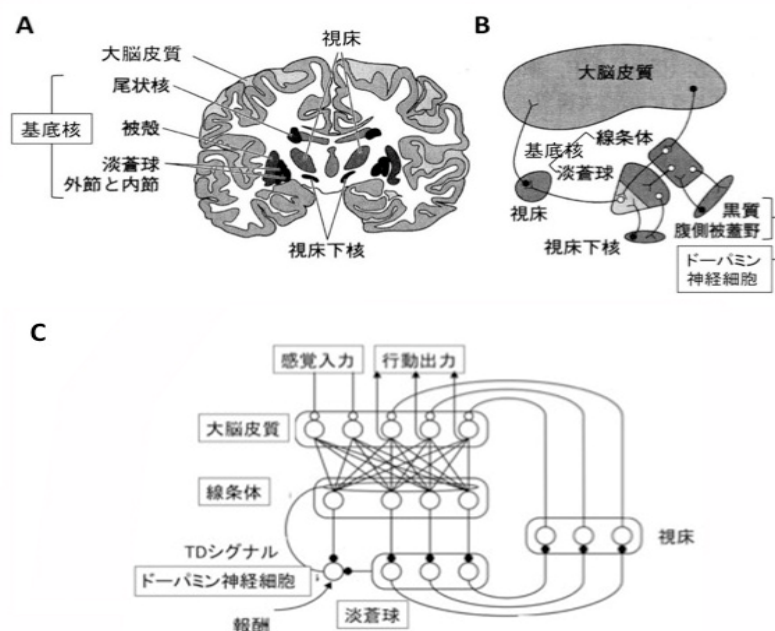


図2 大脳皮質-基底核-視床ループ神経回路と TD 学習[6, 13]

A, 大脳の断面: B, 大脳皮質-基底核-視床ループ: C, TD 学習の回路モデル
(文献[6]より引用)

脳の理論に関しては、まだ脳科学が揺籃期であった時代に、甘利俊一らが、神経細胞集団の統計神経力学、振動回路網理論、学習と自己組織化の理論をいち早く確立し、その後の計算論的神経科学の基礎を築いた。とくに神経場の力学は、作業記憶のモデルとして注目を集め、連想記憶の仕組みの解明などに用いられた。近年注目されている深層

² 強化学習: 行動を起こす前の報酬の予測値と、行動を起こしてから得られた実際の報酬との差(報酬予測誤差)に比例してシナプスの結合強度を変化させることによって、最大の報酬を得る行動を選択するように、図2のような神経回路を最適化できるという学習理論。

³ fMRI: 機能的核磁気共鳴イメージング(functional magnetic resonance imaging)の略。脳の領域ごとの活動を、局所血流中のヘモグロビンへの酸素結合度の変化に基づいて計測することによって可視化する技術。

学習 (Deep Learning) は、かつて甘利によって創始された確率降下学習法を、世界で初めて多層の神経回路に適用することによって発展された学習理論に基づいている。ここでは、一度は殆ど忘れられかけていたこの理論が、現代のコンピューターによる高い計算能力を利用することによって、高い汎用性を持つことが実証され、深層学習という名前を得て、いろいろな場面での実用研究につながった[11]。しかし深層学習には人間なら間違えようがない間違いを犯す例も知られており、学習方法に起因すると思われる未解決の問題が多く残っている[12]。そのため、現代の人工知能を開発していく上でも、脳科学の成果は重要な手がかりを与え続けることができる。人類が真に脳型の知性を持つ人工知能を持てるようになるためには、脳科学者と工学者との間の密接な交流が不可欠である。

(2) 予測機械としての脳

大脳には一次感覚野に始まる逐次的な領野の連鎖である経路がいくつも同定されている[14, 15]。個々の神経細胞が応答する感覚入力の特徴は高次野へ行くほど複雑となり、動物の知覚や思考過程を直接反映するものになる。そして、感覚入力に複雑な特徴を検出する処理がトップダウン⁴な注意を必要とせずに 150 ミリ秒ほどの短時間で行われることから、従来は、第一次感覚野に近い低次野から高次野へ向けてのボトムアップ⁵な経路に沿った情報の統合が強調されてきた[16, 17]。しかし、大脳領野間の結合はほとんどが双方向的であることは、これまで長い間知られており、近年大脳感覚経路においては、この双方向的結合を使って予測符号化(Predictive Coding)と呼ばれる情報処理が行われているとする説が注目を集めている(図3A)[18]。この仮説では、階層的構造を持った脳において、より高次の領野が低次の領野へと予測情報を提供し、低次の領野は予測情報と実際の情報とを照合して、予測と実際のズレを予測誤差情報として高次領野に送り返す。高次領野は、この予測誤差情報をもとに、より良い予測をできるようにシナプス結合係数を改良する。トップダウンな予測とボトムアップな入力が完全に一致する状態に達したとき、脳は、外界で起きるさまざまな出来事について、それぞれがどのような原因で起きたのかについての最適の推定ができるようになる。すなわち、脳は、外部世界の出来事の因果律を(確率論的に)模倣した“内部モデル”を獲得することになる。ヒトの脳の特徴であると言われている計画性や先読みなども、このような外部世界の内部モデル構築の延長で捉えることができる。

脳は、神経系及び神経内分泌系などを介して、全身臓器の統合的制御に関わっており、その機能破綻のメカニズムに関する研究の推進は、生体制御の統合的理解に貢献することが期待される。上述した内部モデルは、自律神経系を介した体の内的な状態のモニタリングにも使われ、自分が自分であるという認識(自己同一性)の獲得にも重要な役割を果たしている可能性がある(図3B)[19]。また、他者のこころの動きを疑似する内部モ

⁴ トップダウン：脳の中でより複雑な情報処理をすると考えられる領域から、感覚情報が直接入力される1次知覚領域への情報の流れの向き。

⁵ ボトムアップ：上記トップダウンとは逆向きの情報の流れの向き。

デルを自己の脳内に構築することによって、社会性や思いやりなどいわゆる“人間らしい”と言われるところの機能も可能となるものと考えられる[20]。

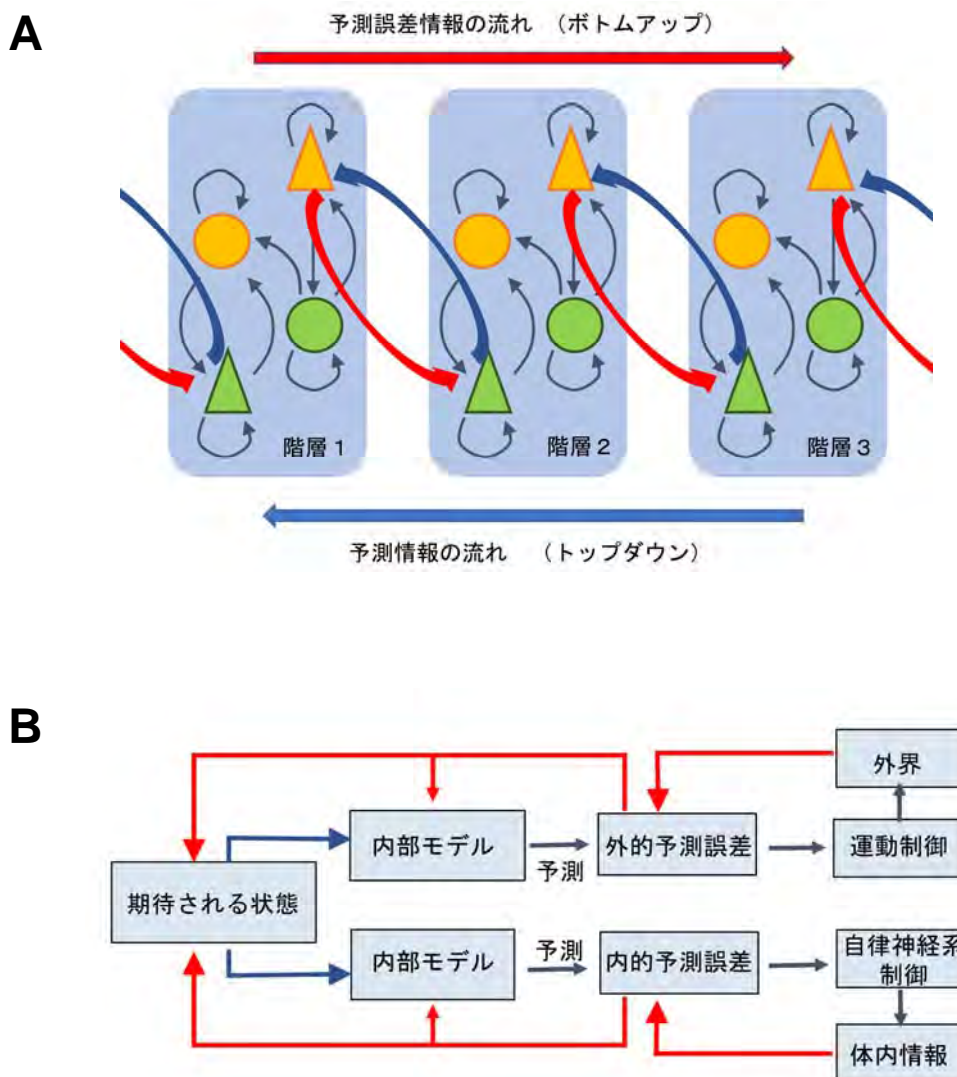


図3 階層的かつ並列的なヒトの大脳皮質による内部モデルの形成

A: 階層間での予測値と予測誤差の流れに関する仮説(文献[18]に基づき改変)。

B: 自律神経系による体内情報の内部モデル形成に関する仮説(文献[19]に基づき改変)。

(3) 脳科学からより深い社会の理解へ

これまでに述べてきたように、現代の脳科学は記憶、学習、意思決定、認知、意識といった個人のこころの重要な構成要素の仕組みを根源的に解明できる段階に差し掛かっている。さらには、自己と他者の区別に基づく自我の確立や他者への共感などこころの社会的機能の仕組みの解明に向かう研究も開始されている。また、親子のあいだの愛着[21]、オスとメスのつがいの間で成り立つ絆[22]、同種動物間の争いによる優劣の決定やそれに伴う社会的階層の形成[23]など、様々な動物の社会的行動の脳科学的仕組み

が、細胞と神経回路のレベルで明らかになりつつある。このような社会的行動は動物種を超えて共通に見られるものであり、動物での研究の成果は人間の社会的行動の理解に役立つはずである。

このように、これまでは哲学や社会学あるいは文学や芸術の範疇であったところ及びところどころの関わりの問題に踏み込む段階に、脳科学は達しつつある。脳科学は脳機能の生物学的・計算論的基盤を解明するだけでなく、経験的社会科学との間に幅広い研究交流の間口を持つことにより、人間社会と経済に対して大きな影響を与えるようになるであろう。例えば、脳がどのように新しい情報を獲得するかについての知識によって、新たな教育プログラムへのアプローチや、更に疑似科学的主張に基づく間違っただけのアプローチを防ぐための科学的基盤が得られると期待される。同様にヒトの行動に関するより適切な予測モデルを構築し、様々な社会的行動の予測に利用することが可能になると期待される。脳科学者は、自らの研究を深める努力だけでなく、人文・社会科学領域の専門家、さらには一般の人々に脳科学の現状を正しく説明し、これからの脳研究をどのように行うべきかに関して共に議論できる状況を醸成する必要がある。

(4) 脳からところを知る：脳科学研究のために今後取り組むべきこと

21世紀を迎えて、新しい計測・機能操作技術の発明とともに、脳科学は大きな発展期を迎えた。光遺伝学と呼ばれる一連の技術では、特定の神経細胞やその軸索に藻類由来の光感受性イオンチャンネルを発現させることによって、光線の照射によって特定の神経細胞の活動を活性化したり、抑制したりすることができるようになった⁶ [24]。遺伝子操作技術にも大きな展開があった。初期の遺伝子改変技術の多くはマウスやショウジョウバエなどの特定の動物種のみ適用が可能で、また目的とする系統を樹立するためには数カ月から数年を要したが、新しいCRISPR/Cas9技術⁷の登場によって原則的にはどのような動物種でも遺伝子改変系統作成が可能となった [25]。さらに、様々なウイルスベクターが開発され、時間、労力、資金を要する遺伝子改変動物の系統作成を行わなくても、ウイルス注入により特定の神経細胞に任意の遺伝子を導入することが可能になり、広く使われている [26]。脳機能の研究において従来は、様々な状況下での神経細胞の活動と行動との関連から神経細胞の機能を推定するという方法が主であったが、ここで述べたような新しい技術が開発され、これらを駆使して神経細胞を特異的に操作することが可能となり、特定の神経回路に擾乱を加えた上で、認知・行動制御システム全体への影響を観察するという精密な因果律の検証に基づく研究が可能となった。

神経細胞活動の計測技術においても、細胞内カルシウム濃度の変化を放出蛍光の強度の変化によって検知できるGCaMP⁸などの蛍光標識蛋白の開発 [27] と、2光子レーザー一頭

⁶ このような技術は光遺伝学(optogenetics)と総称される。

⁷ CRISPR/Cas9技術: 受精卵に標的ゲノム配列と相補的な配列を持つガイドRNAとこれに結合するCas9タンパクを注入することによって、ゲノム中の特定の箇所に欠失などの変異を導入する技術。この技術を応用して、ゲノム中の標的遺伝子を任意に改変(編集)することもできる。

⁸ GCaMP: 発光クラゲ由来の緑色蛍光タンパク(Green Fluorescent Protein)を改変し、細胞内のカルシウムイオン濃度の変化に応じて蛍光の強度を変化させる。神経細胞は、興奮すると細胞内カルシウムイオン濃度が一過性に上昇するので、こ

微鏡⁹をはじめとする様々な光学イメージング技術の発展によって、神経細胞集団の活動を網羅的に同時に記録することが可能になり[28]、細胞集団による情報表現の解明が進んだ。これらの計測・操作技術の革新は、海馬や扁桃体における記憶のメカニズムなど多くの重要な問題について画期的な発見をもたらした[29-31]。

一方、こころの解明においては、行動選択における大脳皮質-基底核-視床ループの果たす役割の解明が中心の一つになる可能性が唱えられている（図2, 4）[32-34]。

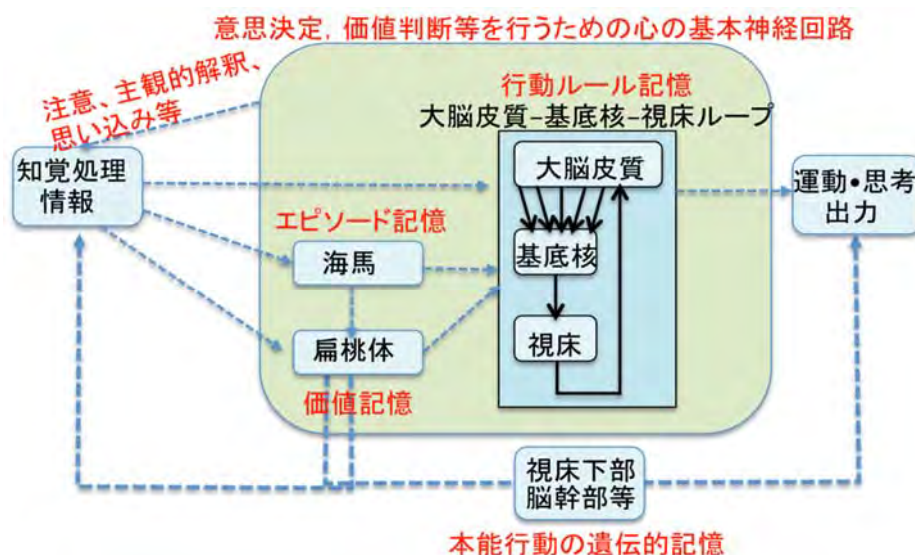


図4 大脳皮質・基底核・視床を含む、進化的に保存された脳機能を担う神経回路

情動に関わる行動のプログラムは、大脳皮質の前帯状回と眼窩野、基底核の側坐核と腹側淡蒼球、視床の内背側核からなる辺縁系ループに蓄えられる。側坐核へは扁桃体基底外側核と海馬からの入力もあり、それぞれ情動的価値と背景情報を伝える。一方、単純にボールを投げたり歩行したりする動作は、大脳皮質の運動野や前運動野、基底核の被殻と淡蒼球、視床の腹外側核からなる運動系ループによって制御される。このように、脳は、異なった種類の情報に対処するための行動プログラムを蓄えるために異なる複数の大脳皮質-基底核-視床ループを持つ並列コンピューターであると見なすことが可能である（図5）[35]。

のタンパクを神経細胞内に発現することによって、神経細胞の興奮を可視化することができる。

⁹2光子レーザー顕微鏡：顕微鏡の対物レンズを通して、蛍光タンパクの励起波長の2倍の波長のパルス状の強いレーザーを照射すると、焦点においてだけ、蛍光タンパクに2光子が同時吸収され、蛍光タンパクが励起されて蛍光を発する。この性質を利用し、焦点を2次元や3次的に走査することによって、標本の蛍光強度分布を可視化することができる。

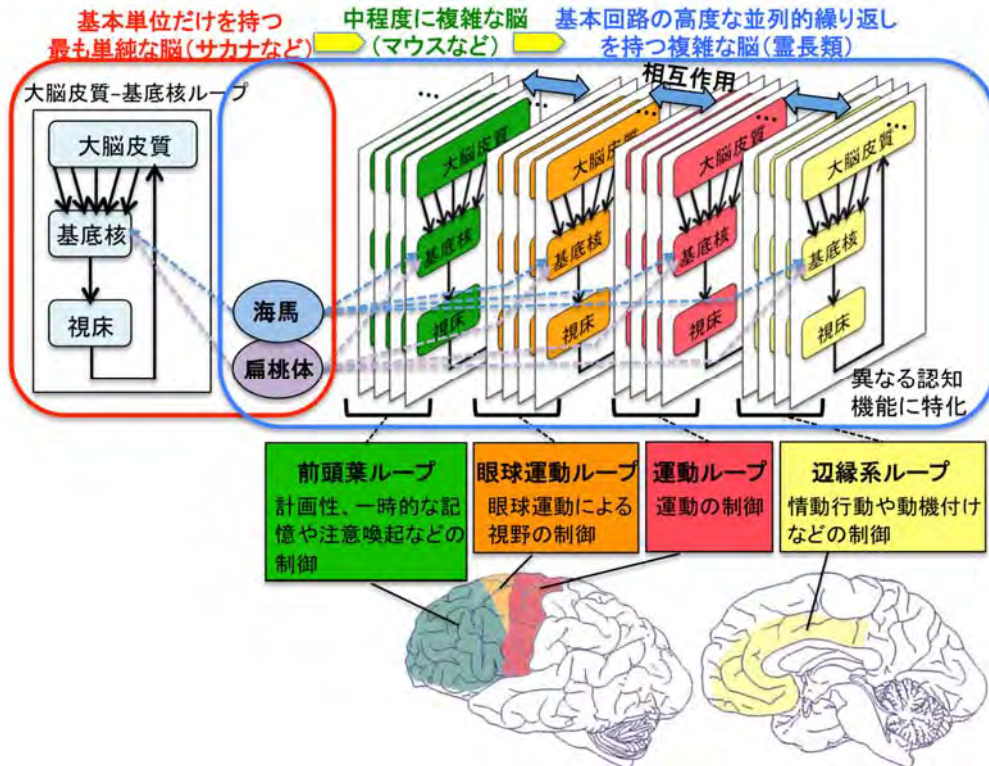


図5 ヒトの脳での大脳皮質-基底核-視床ループの重複

大脳皮質-基底核-視床ループは魚類からげっ歯類を経てヒトなどの霊長類の脳まで、共通して存在することが明らかになってきた[36]。生命の進化の過程では、一度大成功を収めた生物学的機能はその後保存され繰り返し使われ続ける。ヒトの脳に至る脊椎動物の進化の過程では、その初期段階で発明された大脳皮質-基底核-視床ループを重複させ、これらを階層的に連結することによって、より複雑な外部状況の変化を予測する内部モデルを構築して応答する機能が創発的¹⁰に生み出されたと考えられる。

今後、ここを解明していくためには、いくつかの研究を並行して推進していく必要がある。一つには、サカナ、マウスなど単純だが基本構造を持つモデル動物を使い、遺伝子操作技術、イメージング技術、光遺伝学などを駆使して、記憶、情動、意思決定、価値判断、などの進化的に保存された脳の基本的機能の作動原理を、分子、細胞、シナプスのレベルから行動に至る全ての階層に渡って徹底的に解明する(図4, 6)。一方で、より進化した高等動物の脳において、高度に繰り返される基本単位同士の並列的かつ階層的な相互作用によって、脳の創発的高次機能がどのように生み出されるのかを解明する(図5, 6)。

¹⁰創発: 部分の性質の単純な総和にとどまらない特性が、全体として現れること

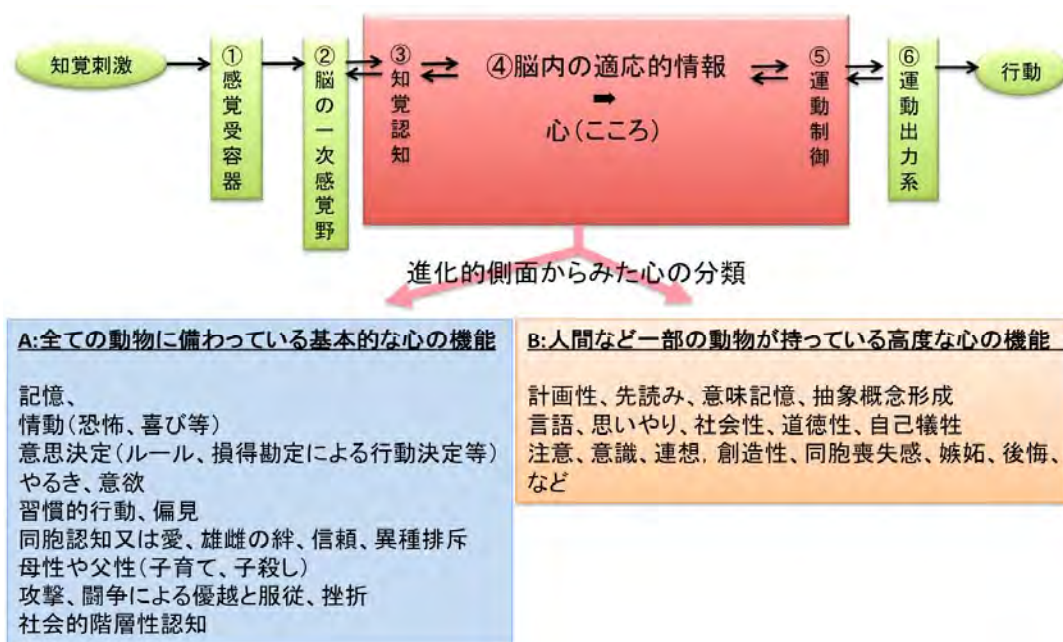


図6 進化的側面から見た心の分類

そして、既に述べたような脳内内部モデルの演算加工処理によって生み出される脳によるこころの動きの仕組みを解明するために、実験動物を使った介入的操作によって内部モデル構築に関わる神経回路の実態を明らかにする。さらに得られた結果を、ヒトに対して fMRI や PET¹¹などで得られたデータと照合し、ヒトに至る脳の進化的複雑化の過程を考慮した数理モデルを構築し、そこから新たな作業仮説を導く。また、ヒトの脳活動をより精密に計測するための新しい計測技術の開発も強く期待される。作業仮説に基づく新たな実験を動物とヒトで行い、実験、理論、作業仮説の間を循環することによって、ヒトのこころの脳科学的基盤が明らかになっていく(図7)。このように、今後の脳科学は、実験動物研究、ヒト脳研究、理論脳研究、新技術開発が4本柱となって、互いに相互作用しながら推進される必要がある。

¹¹ PET: 陽電子放射断層撮影(Positron Emission Tomography)の略。脳内の糖代謝活性のレベルや神経伝達物質の受容体の発現分布などを可視化できる。

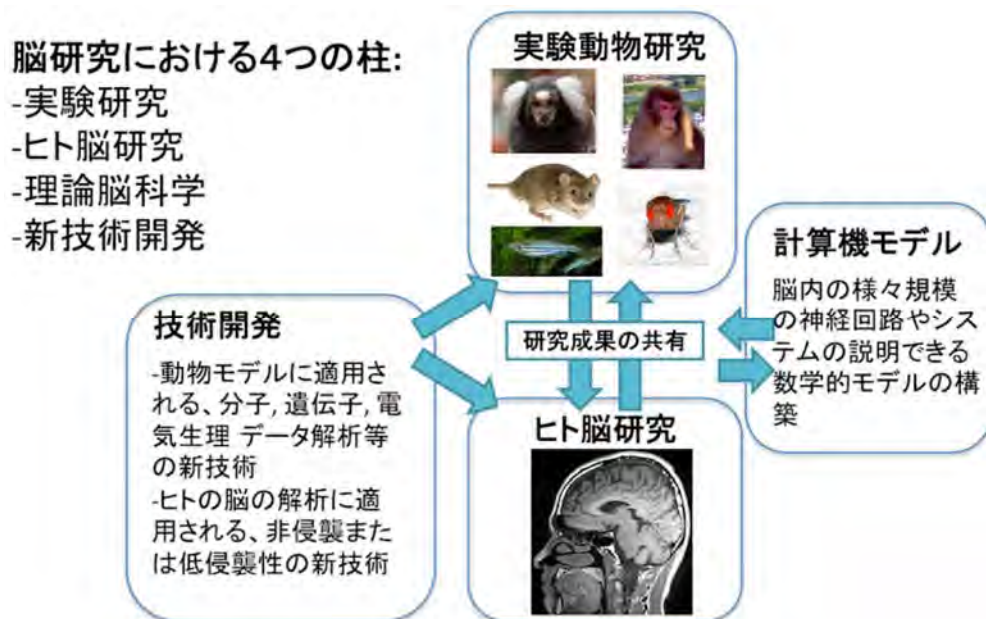


図7 脳研究における4本の柱

(動物の画像はWikipedia Commonsより引用、ヒトfMRI画像は田中啓治博士提供)

(5) 脳の作動原理の理解に基づく脳疾患治療法の開発

脳疾患は、個人の健康の増進、安寧、経済の生産性及び知的資本に対する全世界にまたがる国際的課題である。児童思春期における神経発達症（知的能力障害、自閉スペクトラム症等）、てんかん、摂食障害、青年期及び成人期における精神障害（うつ病、双極性障害、統合失調症等）、変性疾患（アルツハイマー病、パーキンソン病、筋萎縮性側索硬化症等）、神経免疫性疾患（多発性硬化症、視神経脊髄炎、自己免疫性てんかん等）、脳卒中、外傷性脳損傷、脳感染症、脳腫瘍、その他の慢性的な異常状態（ストレス、薬物依存症、栄養不良、頭痛、不眠・過眠等）などの脳疾患によって、世界的に毎年8百万人が死亡している[37]。過去20年で、脳疾患の社会的損失が41%増加している[38]。脳疾患は、高所得国¹²における障害調整生命年（DALY¹³）の36%を占める[39]。特に、認知症（アルツハイマー病を含む）とうつ病は、多大な経済的及び社会的コストを伴うことから、その克服は緊急の社会的課題である。

以上のような脳疾患は、脳の構成要素である神経細胞やグリア細胞自身や、それらを結合するシナプスの異常によって引き起こされると考えられている[40]。その予防や治療を行うためには、患者集団からの臨床症状、臨床経過、神経画像やゲノムなどに関する大規模データや生体・剖検材料のバイオリソースを集積し解析して原因遺伝子・リス

¹² 高所得国：OECDの開発援助委員会（Development Assistance Committee, DAC）のDACリストに基づく分類。

¹³ DALY: Disability Adjusted Life Yearの略。早死にすることで失われた年数と障害を有することで失われた年数の和で、障害の程度やそれを有する期間を考慮して調整した生存年数。疾病や障害に対する負担を総合的に勘案できる指標としてWHOが2000年以降使用している指標。1DALYは健康な1年の喪失を意味する。

ク遺伝子、各種バイオマーカーを同定する臨床研究の推進が重要である。人種により疾患の発症頻度は異なるので、国際共同研究は必須である。それとともに、適切な疾患モデル動物、モデル細胞・組織を開発して、遺伝子の機能異常から発症に至るメカニズムを解明する必要がある。先にも述べたように、CRISPR/Cas9 技術の登場によって原則的にはどのような動物種でも遺伝子改変系統作成が可能となった。我が国では、この技術を霊長類であるマウモセツトに適用して、ヒトと同様の遺伝子変異を持つ発症モデル動物の作製が進行している[41]。このようなモデル動物を使った病態の解明は、正常な動物における脳機能の作動機構の深い理解を基盤として、疾患モデル動物と比較検討することによって初めて可能となる。さらに疾患遺伝子変異を同定した患者から iPS 細胞を樹立して、神経系細胞あるいは脳オルガノイドに誘導することで、疾患モデル細胞・組織を作製することも可能となっている。これら疾患モデル生物やモデル細胞・組織を用いて発症メカニズムに関する知見が深まれば、新しい治療薬の標的を論理的に予測することが可能になり、治療法や治療薬開発への新しい道を切り開くことができる。

(6) 脳科学から人工知能へ：機械にこころを組み込む

共感や反感、即ち相手がどう感じているのかをおもんばかり、それに同意したり拒絶したりすることは、ヒトのこころの重要な機能の一つであるが、すでに述べたように、ヒトの脳は、階層的かつ並列的に連結された脳の神経ネットワークにおける内部モデルの構築によって、この機能を遂行している可能性は高い。逆に言えば、このような神経回路の構造とその作動原理を解明し、その成果を機械に移転すれば、ヒトに対して共感し思いやる人工知能を作ることが可能なはずである。脳科学の研究成果を人工知能に取り込むことによって将来、人工知能は新しい次元へと発展を遂げる期待が持たれる。

このような能力を獲得することで、人工知能が人間の生活をより良い形で支援するようになることが期待される一方で、他の急速に進歩する技術と同様、人工知能もその発展に伴う懸念が生まれつつあり、その社会的・倫理的・哲学的意味に関する国際連携に基づいた調査を実施する必要がある。

3 各国での脳科学研究の取り組みの現状

脳科学が、様々な技術や概念の革新に支えられて、爆発的な発展期を迎えているという共通認識を世界の先進国は持っている。

基礎脳科学においては、遺伝子と分子を特定するゲノミクスとタンパク質化学、神経回路を観察し操作するための光学的手法と遺伝子改変手法、さらにヒトの認識を研究するための様々な方式の脳機能イメージングなどの発展をもとにして、近年めざましい進歩を遂げてきた。しかしながら、動物モデルとヒトのいずれにおいても、十分な解像度で、かつ網羅的に複雑な神経回路網を研究する技術が未だに欠如していることが、今後のさらなる進歩の妨げとなっている。

このような困難を克服し脳機能の全容の解明という目標を達成するには系統的取組が必要であり、それにより個々の研究機関における研究を補完し進展させることができる。現在、大規模な脳科学プロジェクトが複数の国で同時に開始されている。

米国では、当時のオバマ大統領の主導によって、The Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Initiative が 2013 年に開始されている[42]。この国家的プロジェクトでは、2025 年までに 45 億ドル（約 5200 億円）を投じる計画で、革新的技術の開発によって、ショウジョウバエやゼブラフィッシュの稚魚の脳といった比較的単純な対象から始めて最終的にはヒトの脳において、脳全体の膨大な種類の神経細胞や神経回路の活動状況の時間的かつ空間的な変動や相互作用の実態を明らかにすることによって、脳機能の全容解明を目指している。また、欧州連合では、2013 年から、人間とマウスから得られたデータをもとに、脳の神経回路モデルを構築しようという Human Brain Project が、総額 10 億ユーロ（約 1200 億円）の規模で開始されている[43]。

同じく 2013 年に、日本では、小型の霊長類であるマーモセットの高次機能を担う神経回路の全容をニューロンレベルで解明することにより、人間の精神・神経疾患の克服や情報処理技術の高度化を目指す、“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”（革新脳プロジェクト）が、10 年間で総額約 400 億円（3 億 5 千ドル）の規模で開始されている[41]。日本のプロジェクトは、米国や EU のプロジェクトと比べて小規模であるが、欧米が重きをおく精緻な解析が可能ないげん類と、究極の目標であるヒトの中間に位置するマーモセットに焦点を絞っている点でユニークである。また日本における政府主導型の研究プロジェクトとしては、革新脳プロジェクトの他に、脳科学研究戦略推進プログラムとして、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）、柔軟な環境適応を可能とする意思決定・行動選択の神経システムの研究（意思決定）などの研究が行われている。

4 脳科学における国際連携の必要性

このようにヒトの脳の神経ネットワークの解明を最大限に効率良く行い、ヒト疾患発症機構解明につなげるためには、共通の規格のもとで作られたデータセットを使って、様々なモデル実験動物で得られた結果とヒトで得られた結果とを比較検討しながら推進することが重要である。また、前述したような多様なヒト疾患に直接学ぶための国際共同臨床研究を車の両輪として推進する必要がある。各国で行われている脳神経ネットワーク機能の解明・脳疾患発症機構の解明への努力には相補的な側面があり、国際協力体制の構築により相乗効果が期待される。また我が国の研究者は、革新脳プロジェクトで重点的に進められているマーマセツの高次機能を担う神経回路の全容の解明に関わる領域以外の研究においても、マーマセツ以外の霊長類（マカク）、げっ歯類（マウス、ラット）、魚類（ゼブラフィッシュ、メダカ）、無脊椎動物（ショウジョウバエ、線虫）などのモデル実験動物を使った研究や、ヒトを被験者とした脳活動の研究、動物種を超えて共通する神経細胞の分子レベルでの機能研究などにおいて、優れた成果をあげてきている。このような研究領域においても、我が国の研究者が他の国の研究と共同することによって、世界的な研究の推進に大きく貢献できる。

脳疾患発症機構の正しい理解に基づく治療法の開発においては、多くの患者からの症状やゲノムなどに関するデータを集積し、アカデミアと企業が協力してモデル実験動物における多様な実験を行う必要がある、国際協力体制による大きな相乗効果が期待される。

脳機能の理論的解明では大規模データによるシミュレーションが重要であり、新しい人工知能の開発においては様々なバックグラウンドを持った研究者の交流が相乗効果を発揮すると期待される。

以上のような、脳科学における国際連携の必要性が急速に高まっている状況で、第42回先進国首脳会議（伊勢志摩サミット）に関連して開催されたGサイエンス学術会議は、国際的な脳に関連したリソースの開発を目的として、脳科学に対する戦略的な支援が社会貢献につながる、並行して目指すべき以下の4つの目標を提案した[44]。脳科学の発展が人類の福祉に貢献することは、続いて平成28年5月に開催されたつくば科学技術大臣会合において発表されたつくばコミュニケ、さらに伊勢志摩サミット成果文書にも取り上げられている。国際連携により脳科学の一層の発展を目指すことは平成28年9月にニューヨークで開催された”Coordinating Global Brain Projects”国際会議、同時に開催された国際連合における”International Brain Initiative Launch and VIP Dialog: Towards an International Brain Station”においてもアメリカ合衆国を初めとする複数の国及び責任機関からの代表により合意されている（2016年9月20日付けの合衆国国務省の発表に明記）。

（目標-1） 脳の原理に関する基礎研究と技術開発の支援

- 1) 脳の分子、ゲノム、細胞レベルから神経回路ネットワークを経て行動に至る基礎的脳研究の支援

- 2) 脳の構造と機能の高解像で大規模な解析のための新技術の開発、特にヒトにおける開発
- 3) 技術開発、データシェアリング、人材の育成と交流に関する大規模プロジェクトの国際協力と協調的資金提供

(目標-2) 次世代統合的プログラムによる脳疾患への対処

- 1) 脳疾患が地球規模の健康危機であるという認識に基づく、発症メカニズム、予防、診断、治療に関する基礎及び応用研究の支援
- 2) 動物を含む有効な生物学的モデルを利用した、治療法開発のための新たなプラットフォームの構築
- 3) 高所得国と中低所得国¹⁴との間での協力関係の支援と公衆教育の強化

(目標-3) 脳を基盤とした新しいアプリケーション創出に向けた理論的脳科学の推進

- 1) 統一的な脳理論につながる基本原理の解明を目指し、理論科学、計算科学、統計科学、データ科学及び数学を駆使した学際的研究の支援
- 2) 脳科学のデータシェアリングに向けての国際協力の促進
- 3) 脳型人工知能とニューロテクノロジーの研究開発の加速
- 4) 脳型人工知能の安全性と有効性を議論する神経倫理学¹⁵に関する国際的対話の開始

(目標-4) 教育と生活のマネジメントに向けて脳科学と行動・社会科学の統合推進

- 1) 脳科学と経験的社会科学を統合する基礎及び橋渡し研究の支援

¹⁴高所得国と中低所得国:OECDの開発援助委員会 (Development Assistance Committee, DAC)のDACリストに基づく分類。

¹⁵神経倫理学: ヒトを対象とした脳機能画像研究、ブレイン・マシン・インターフェース (BMI) 技術を始め、人間の精神活動や高次脳機能への介入型研究が格段に進展したことを受けて、2000年頃からその重要性が指摘され始めた学問領域を指す。神経倫理学は通常、「脳神経科学の倫理学」、「倫理の脳神経科学」、「脳神経科学と社会」という3つの側面を持つ。神経倫理学は、脳神経科学研究の発展に伴う倫理的・社会的問題を扱う学問領域である。生命倫理や医療倫理と密接な関係がある応用倫理学の一分野であり、学際的な領域であるが、脳神経科学がもたらす新たな倫理的・社会的課題について対応するという理由から、生命倫理学などとは異なる新たな学問分野として位置づけるべきという考えが示されている。(脳科学辞典 磯部太一、佐倉統執筆部より引用)

- 2) 子供の教育と生涯学習のための科学的プログラムとツールの開発に向けた、ヒトの学習の生物学的及び認知的基盤に関する学際的研究の促進
- 3) 脳の性質に適合した生活マネジメントと社会的機能改善のプログラム・指針を開発するための研究及び国際協力の開始

5 提案：国際脳科学フロンティア計画と国際脳科学ステーションの創設

(1) 提案の骨子

我が国が、上記の目標を達成し、大規模な脳科学のプロジェクトに関する国際連携を、技術開発、データ管理、研究者の育成と流動性、そして資金提供の調整の面で促進するために、すでに各国で独自に個別に行われている研究活動を補完する形で、以下の4分野において、3カ国以上からなる複数の国際チームが連携した研究を遂行できる体制を構築する。

1) 基礎脳科学

2) 脳疾患の発症メカニズム解明、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

4) 社会・行動科学と脳科学との統合

世界規模の多国間研究機構の成功例としては、日本のイニシアティブにより1987年に設立され現在も続いている「ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム (HFSP)」が挙げられる。その経験を礎として、本国際連携プロジェクトを国際脳科学フロンティア計画と命名し、その資金を日本が中心的に拠出し、事務局を日本に置き、中核的研究センター(国際脳科学ステーション)を設置することを提言したい。国際脳科学フロンティア計画では、自らの新しい発想で研究を革新する若手を主たる対象とし、独創的、先進的な課題にチャレンジすることで、ブレークスルーを図るような国際的連携研究を支援する。国際脳科学ステーションでは、国際脳科学フロンティア計画で中核施設が必要な研究の支援を行う。さらに、常駐する研究者と訪問する海外の研究者との密接な共同作業によって初めて実現が可能な、大規模な装置や新しい技術の開発や、大規模データの集積や、その解析ソフトウェアの開発も行い、その成果の共同利用の機会を提供する。これにより、Gサイエンス学術会議において、我が国が中心となって提案した脳科学に関する共同声明の中で、その必要性を訴えた「国際的なプログラムとセンター」を実現化し、我が国の責任を果たすことができる。このような国際脳科学ステーションにおいて、各国で個別に開発される様々な新技術や各国で発生する大規模データを集約することによって、これまでとは異次元の革新的進歩を脳科学にもたらすための中核的役割を遂行することができる。

事務局は、個別連携プロジェクトの支援を行うだけでなく、各国固有に行われている大型脳研究プロジェクトとの連携や調整の促進、プロジェクト同士の連携促進のためのワークショップ等の開催や、研究成果普及のための国際的アウトリーチ活動等を行う。また、大型プロジェクトに対して国境を越えた研究費支援の仕組みを構築し、そのハブとしても役割を果たす。

現在米国でも、脳科学関連の大型技術開発の中核拠点として、Brain Observatoryの設立が提唱されている[45]。海外にもこのような拠点施設が設立された場合、国際脳科学ステーションは、これらの拠点施設と連携し、ハブ機関として機能することを目指す。

(2) 提案の意義

「基礎脳科学」に関しては、各国で行われている脳・神経ネットワーク機能の解明への努力には相補的な側面があり、国際協力体制の構築により相乗効果が期待される。また我が国の研究者は、革新脳プロジェクトで重点的に進められているマーマセツの高次機能を担う神経回路の全容の解明に関わる領域以外の研究においても、マーマセツ以外の霊長類（マカク）、げっ歯類（マウス、ラット）、魚類（ゼブラフィッシュ、メダカ）、無脊椎動物（ショウジョウバエ、線虫）などのモデル実験動物を使った研究や、ヒトを被験者とした脳活動の研究、動物種を超えて共通する神経細胞の分子レベルでの機能研究などにおいて、優れた成果をあげてきている。このような分野においても、日本がイニシアティブを取る国際連携研究を進めることによって、日本の国際的プレゼンスは一層高まると期待できる。

国際連携によって飛躍的發展が望める具体例として、各国ごとに固有に発展した異なる技術を組み合わせることによって、全く新しいイメージング技術や、その結果の解析技術の開発が挙げられる。我が国には、アカデミアと産業界の両方で、優れた光学顕微鏡技術が蓄積されており、このような技術と国内外の脳科学者が協力することによって、革新的イメージング技術を開発できる可能性が高い。また、脳の中で進化的に相同な部位や機能について、世界中で異なる動物で行われてきた研究のデータを統合することによって、新しい計算機モデルを生み出すことも期待される。脳科学に応用されうる諸基礎技術やそれに関して得られた知見は、そのまま広範な領域の生命科学あるいは創薬科学に応用されうるが多いため、国際連携に基づいた先端的な脳科学の推進やそれによって開発された諸技術は、生命科学領域全体の重要な基盤技術として広く応用されることが期待される。

また、現在世界で国家的プロジェクトとして推進されている研究は、特定の動物の全脳の神経結合の解明など、脳の様々な機能をより深く解明するための基盤となる研究である。ヒトの全ゲノムの塩基配列の決定という目標を掲げてこれを達成した Human Genome Project は、その後のゲノムの機能解明を大きく加速させた。同様に脳科学においても、現在進行している国家的プロジェクトによって整備される基盤情報を十分に活用し、脳の様々な機能の仕組みを最終的に明らかにするための次世代の国際研究も、世界の英知を集結して進める必要がある。この場合、認知、記憶、意思決定、社会性など、脳の機能的側面に着目し、テーマごとに、世界で有数な実験と理論の専門家がグループを作り、問題の解決に取り組むことが考えられる。実際に、このような取り組むべき課題別の国際共同研究も、提唱されている[46]。日本の研究者は、政府の主導での脳科学研究戦略推進プログラムや、科学研究費の新学術領域研究において、様々な戦略的課題ごとに研究グループを有機的に形成し、研究を大きく進めてきた実績がある。このよう

なグループ研究の運営によって培われてきたノウハウは、課題別の国際的研究において、日本がイニシアチブをとって共同研究を牽引する上で、大きな強みとなると考えられる。

「疾患の解明、診断、予防、治療」に関しては、国際連携によって、より多くのデータを共有することによって、人種や民族の差に関わらず原因に寄与する因子を同定し、さらに人種や民族ごとに固有に病因に寄与する因子を同定することによって、病因因子同士の相互作用を解明することができると期待できる。特に、日本人は欧米と比して遺伝的均一性が高いことがゲノム解析により病因を特定する際に利点となることから、我が国が率先して取り組むべき課題と位置づけられる。最終的に、このような病因因子のネットワークの解明に基づき、診断、予防、治療を計画できる。

「脳の理論モデルの解明」には、実験を深く理解できる理論家と、理論を深く理解できる実験家と、さらには膨大に膨らむ実験情報を集約し、その中から重要な情報を汲み出せる情報科学者との、密接な共同作業が欠かせない。先にも述べたように、現在の人工知能は、約半世紀前に提唱された脳科学に基づく計算機モデルに基づき大きな発展を遂げることができた。人工知能に、単なる学習や認知機能だけでなく、よりヒトに近い感性や情緒を持たせようとするならば、ヒトと動物の脳のより深い理解に基づく新しい計算機理論が必要であるが、そのような理論は、これらの科学者が、一堂に会して共通の課題に取り組むことによって初めて創り出せるだろう。また、そのような発展の場に、様々な世代の研究者が集うことによって、次世代を担う研究者が生まれると期待される。

「社会・行動科学と脳科学との統合」に関しても、脳科学者自身が人文・社会科学を新たに学び、人文・社会科学者自身が脳科学を学び使いこなせるようになることによって初めて、新しい展開が期待できる。欧米では既に、心理学や行動学は、新しいイメージング技術や実験動物を使った脳科学的研究手法を積極的に取り入れて大きな発展を遂げている。また、経済学や市場理論においても、脳科学を取り入れた新しい学問分野が生まれている。日本では、人文・社会科学と脳科学は、大学では文系と理系に属しており、その融合的研究や、それに携われる人材を養成することは未だ困難である。日本国内のセンターに、このような融合的研究を推進できる場を設ける意義は大きい。

今後、脳科学の大きな進歩によって、その成果は社会における人々の生活の様々な場面で応用される機会が増加すると考えられる。このような時代の到来に備えて、脳科学の成果の社会への応用に向けての倫理面での考え方や知的財産に関する国際的合意形成にも努力が注がれる必要がある。本提言で実現を目指す国際連携研究で、このような問題にも取り組むことによって、日本人研究者は、その合意形成の初期段階から参画することができる。

(3) 提案の実施体制

以上のような研究を実施するために、次のような体制を提唱する。

① 国際脳科学フロンティア計画における国際連携プロジェクト

国際脳科学フロンティア計画では、各国個別に行われている研究だけでは実現できずに、国際的に相補的な研究が組み合わさって引き起こされる協同現象によって初めて実現できる研究課題を支援する。特に、自らの新しい発想で研究を革新する若手研究者が、独創的、先進的な課題にチャレンジすることで、ブレークスルーを図るような国際的連携研究を支援する。

② 中核的研究センターとしての国際脳科学ステーションの設置

国際脳科学ステーションでは、国際脳科学フロンティア計画で中核施設が必要な研究の支援を行う。さらに、常駐する研究者と訪問する海外の研究者との密接な共同作業によって初めて実現が可能な、大規模な装置や新しい技術の開発や、大規模データの集積や、その解析ソフトウェアの開発も行い、その成果の共同利用の機会を提供する。

現在米国でも、脳科学関連の大型技術開発の中核拠点として、Brain Observatoryの設立が提唱されている[45]。海外にもこのような拠点施設が設立された場合、国際脳科学ステーションは、これらの拠点施設と連携し、ハブ機関として機能することを目指す。

③ 計画推進事務局の設置

計画推進事務局は、個別連携プロジェクトの支援を行うだけでなく、各国固有に行われている大型脳研究プロジェクトとの連携や調整の促進、プロジェクト同士の連携促進のためのワークショップ等の開催や、研究成果普及のための国際的アウトリーチ活動等を行う。また、大型プロジェクトに対して国境を越えた研究費支援の仕組みを構築し、そのハブとしても役割を果たす。

<参考文献>

- [1] 神経機械としての小脳 : Eccles J, Ito M, Szentágothai J (1967) *The Cerebellum as a Neuronal Machine*, Springer-Verlag New York.
- [2] 小脳皮質の理論 : Marr D. (1969) A theory of cerebellar cortex. *J Physiol.* 202:437-470.
- [3] 小脳は如何にして使われるか? : Blomfield S, Marr D. (1970) How the cerebellum may be used. *Nature.* 227:1224-1228.
- [4] 登上繊維による小脳のプルキンエ細胞の、グルタミン酸感受性と苔状繊維応答性の抑圧 : Ito M, Sakurai M, Tongroach P. (1982) Climbing fibre induced depression of both mossy fibre responsiveness and glutamate sensitivity of cerebellar Purkinje cells. *J Physiol.* 324:113-134.
- [5] 小脳における内部モデル : Wolpert DM, Miall RC, Kawato M. (1998) Internal models in the cerebellum. *Trends Cogn Sci.* 2:338-347.
- [6] 田中啓治、岡本仁(2006) 脳科学の進歩～分子から心まで～、放送大学教育振興会
- [7] 神経細胞は、予測と報酬をどうコードしているのか? : Schultz W, Dayan P, Montague PR. (1997) A neural substrate of prediction and reward. *Science.* 275):1593-1599.
- [8] 適応的神経回路の現代的理論の構築に向けて、期待と予測 : Sutton RS, Barto AG. (1981) Toward a modern theory of adaptive networks: Expectation and prediction. *Psychological Review* 88:135.
- [9] 強化学習入門 : Sutton RS, Barto AG. (1988) *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press
- [10] 人間の利他主義 : 経済的、神経科学的、進化的観点から。 : Fehr E, Rockenbach B. (2004) Human altruism: economic, neural, and evolutionary perspectives. *Curr Opin Neurobiol.* 14:784-790.
- [11] 深層学習による囲碁の習得 : Silver D, Huang A, Maddison CJ, Guez A, Sifre L, van den Driessche G, Schrittwieser J, Antonoglou I, Panneershelvam V, Lanctot M, Dieleman S, Grewe D, Nham J, Kalchbrenner N, Sutskever I, Lillicrap T, Leach M, Kavukcuoglu K, Graepel T, Hassabis D. (2016) Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature.* 529:484-489.
- [12] 神経系経路ネットワークにおける興味深い特性 : Christian Szegedy, Wojciech Zaremba, Ilya Sutskever, Joan Bruna, Dumitru Erhan, Ian Goodfellow, Rob Fergus. *Intriguing properties of neural networks.* arXiv:1312.6199v4.

[13] 意思決定における修飾因子: Doya K. (2008) Modulators of decision making. *Nat Neurosci.* 11:410-416.

[14] 視覚の情報処理における階層的構造: Van Essen DC, Mansell JH (1983) Hierarchical organization and functional streams in the visual cortex. *Trends in Neurosci.* 6(9): 370-375.

[15] 複合音の脳皮質による情報処理: Rauschecker JP (1998) Cortical processing of complex sounds. *Current Opinion in Neurobiology* 8: 516-521.

[16] ヒトの視覚系における情報処理速度: Thorpe S, Fize D, Marlot C (1996) Speed of processing in the human visual system. *Nature* 381: 520-522.

[17] 非注意下での視覚入力情報の分類: Li FF, VanRullen R, Koch C, Perona P (2002) Rapid natural scene categorization in the near absence of attention. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99: 9596-9601.

[18] 予測符号化を担う微小神経回路: Bastos AM, Usrey WM, Adams RA, Mangun GR, Fries P, Friston KJ. (2012) Canonical microcircuits for predictive coding. *Neuron.* 76:695-711.

[19] 体内状態検知に基づく推論、情動、及び具現化された自己: Seth AK (2013) Interoceptive inference, emotion, and the embodied self. *Trends Cogn Sci.* 17:565-573.

[20] 能動的推理、コミュニケーション、他者の理解: Friston KJ, Frith CD. (2015) Active inference, communication and hermeneutics. *Cortex.* 68:129-243.

[21] 視索前野と分界条床核による、父性行動と子殺し行動の制御: Tsuneoka Y, Tokita K, Yoshihara C, Amano T, Esposito G, Huang AJ, Yu LM, Odaka Y, Shinozuka K, McHugh TJ, Kuroda KO. (2015) Distinct preoptic-BST nuclei dissociate paternal and infanticidal behavior in mice. *EMBO J.* 34:2652-2670.

[22] オスとメスの絆形成の神経科学: Young LJ, Wang Z. The neurobiology of pair bonding. *Nat Neurosci.* 7:1048-1054.

[23] 2つの手綱核内領域による社会的闘争行動の制御: Chou MY, Amo R, Kinoshita M, Cherng BW, Shimazaki H, Agetsuma M, Shiraki T, Aoki T, Takahoko M, Yamazaki M, Higashijima S, Okamoto H. (2016) Social conflict resolution regulated by two dorsal habenular subregions in zebrafish. *Science.* 352:87-90.

- [24] 神経回路の特異的操作法: Rajasethupathy P, Ferenczi E, Deisseroth K. (2016) Targeting Neural Circuits. *Cell*. 165:524-134.
- [25] CRISPR-Cas9法によるゲノム編集: Hsu PD, Lander ES, Zhang F. (2014) Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell*. 157:1262-1278.
- [26] ウイルスベクターによる神経回路の操作法: Marshel JH, Mori T, Nielsen KJ, Callaway EM. (2010) Targeting single neuronal networks for gene expression and cell labeling in vivo. *Neuron*. ;67:562-574.
- [27] 神経細胞の活動指標として機能する蛍光タンパク: Ohkura M, Sasaki T, Sadakari J, Gengyo-Ando K, Kagawa-Nagamura Y, Kobayashi C, Ikegaya Y, Nakai J. (2012) Genetically encoded green fluorescent Ca²⁺ indicators with improved detectability for neuronal Ca²⁺ signals. *PLoS One*. 7(12):e51286.
- [28] 全脳の神経活動データから機能的神経回路モデルの構築: Naumann EA, Fitzgerald JE, Dunn TW, Rihel J, Sompolinsky H, Engert F. (2016) From Whole-Brain Data to Functional Circuit Models: The Zebrafish Optomotor Response. *Cell*. 167:947-960
- [29] 光遺伝学的刺激を使った海馬野記憶痕跡細胞の活性化による恐怖記憶の想起: Liu X, Ramirez S, Pang PT, Puryear CB, Govindarajan A, Deisseroth K, Tonegawa S. (2012) Optogenetic stimulation of a hippocampal engram activates fear memory recall. *Nature*. 484:381-385.
- [30] アルツハイマー病モデル動物での記憶痕跡細胞の活性化による記憶の想起: Roy DS, Arons A, Mitchell TI, Pignatelli M, Ryan TJ, Tonegawa S. (2016) Memory retrieval by activating engram cells in mouse models of early Alzheimer's disease. *Nature*. 531:508-512.
- [31] 扁桃野介在神経細胞のサブタイプによる恐怖学習の制御機構: Wolff SB, Gründemann J, Tovote P, Krabbe S, Jacobson GA, Müller C, Herry C, Ehrlich I, Friedrich RW, Letzkus JJ, Lüthi A. (2014) Amygdala interneuron subtypes control fear learning through disinhibition. *Nature*. 509:453-458.
- [32] 基底核神経回路による繋がりを持った行動シーケンスの形成機構: Jin X, Costa RM. (2015) Shaping action sequences in basal ganglia circuits. *Curr Opin Neurobiol*. 33:188-196.
- [33] 大脳皮質-基底核神経回路における強化学習の仕組み: Ito M, Doya K. (2011) Multiple representations and algorithms for reinforcement learning in the cortico-basal ganglia circuit. *Curr Opin Neurobiol*. 21:368-373.

- [34] 精神疾患における大脳皮質-基底核の機能異常: Gunaydin LA, Kreitzer AC. (2016) Cortico-Basal Ganglia Circuit Function in Psychiatric Disease. *Annu Rev Physiol.* 78:327-350.
- [35] 基底核をとる並列的皮質下神経回路ループ: McHaffie JG1, Stanford TR, Stein BE, Coizet V, Redgrave P. (2005) Subcortical loops through the basal ganglia. *Trends Neurosci.* 28(8):401-407.
- [36] 基底核の500万年にわたる機能的保存と進化: Grillner S, Robertson B. (2016) The Basal Ganglia Over 500 Million Years. *Curr Biol.* 26(20):R1088-R1100.
- [37] 精神疾患、神経疾患、薬物依存の社会的負担: Patel V. et. al. (2016) Addressing the Burden of Mental, Neurological, and Substance Use Disorders: Key Messages from Disease Control Priorities. *Lancet*, 387:1672-1685.
- [38] 精神疾患による死亡率の分析: Walker ER, McGee RE, Druss BG. (2015) Mortality in mental disorders and global disease burden implications: a systematic review and meta-analysis. *JAMA Psychiatry.* 72:334-341.
- [39] 人間の一生に影響する精神・神経疾患: Silberberg D, Anand NP, Michels K, Kalaria RN. (2015) Brain and other nervous system disorders across the lifespan - global challenges and opportunities. *Nature.* 527(7578):S151-154.
- [40] 統合失調症を新しい視点から再考する: Insel TR. (2010) Rethinking schizophrenia. *Nature.* 468:187-193.
- [41] 日本におけるマーモセット神経回路マッピングのための国家的プロジェクト: Okano H, Sasaki E, Yamamori T, Iriki A, Shimogori T, Yamaguchi Y, Kasai K, Miyawaki A. (2016) Brain/MINDS: A Japanese National Brain Project for Marmoset Neuroscience. *Neuron.* 92:582-590.
- [42] 米国のブレインイニシアティブ: Martin CL, Chun M. (2016) The BRAIN Initiative: Building, Strengthening, and Sustaining. *Neuron.* 92:570-573.
- [43] EUのヒューマン・ブレイン プロジェクト: Amunts K, Ebell C, Muller J, Telefont M, Knoll A, Lippert T. (2016) The Human Brain Project: Creating a European Research Infrastructure to Decode the Human Brain. *Neuron.* 92:574-581.
- [44] G7/G8サミットに向けた各国学術会議の共同声明 (Gサイエンス学術会議共同声明) : 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 (<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-gs2016-1j.pdf>)

[45] 米国での National Brain Observatory 計画の提案: Alivisatos AP, Chun M, Church GM, Greenspan RJ, Roukes ML, Yuste R. (2015) A National Network of Neurotechnology Centers for the BRAIN Initiative. *Neuron*. 88:445-448.

[46] 脳研究における課題別の国際的共同研究の提唱 : Mainen ZF, Häusser M, Pouget A (2016) A better way to crack the brain *Nature*. 539:159-161.

＜参考資料 1＞ 本提案に至る審議の経過

平成 28 年

- 8 月 30 日 神経科学分科会で、本提言に関するワーキンググループのメンバーを承認。
神経科学分科会内から：
本間さと、津本忠治、田中啓治、岡本仁、合田裕紀子
神経科学分科会外から：
伊佐正、柚崎通介、高橋良輔
- 9 月 10 日 ワーキンググループの第 1 回会議、提言内容の骨子についての議論。
- 12 月 14 日 提言の第 1 稿をワーキンググループ内で共有。以後メールにて意見交換

平成 29 年

- 1 月 12 日 ワーキンググループの第 2 回会議（Web 会議）提言案に関する協議を。
以後メールにて意見交換を行い、提案の第 2 稿を作成した。
- 1 月 22 日 第 23 期日本学術会議 2 部 4 分科会合同会議
（基礎医学委員会：形態・細胞生物医科学分科会、機能医科学分科会、神経科学分科会、臨床医学委員会：脳とこころ分科会）
提案の骨子を説明。各分科会に提案を送付し、4 分科会の共同提案とする可能性を、各分科会で検討することで合意。
- 2 月 22 日 各分科会からの意見を元に修正を加えた提案を共同提案とすることに合意。
- 月○日 日本学術会議幹事会（第 回）
提言「脳科学における国際連携体制の構築～国際脳科学フロンティア計画と国際脳科学ステーションの創設～」

<参考資料2> 関連分科会審議経過 第23期

基礎医学委員会 神経科学分科会 審議経過

平成27年

3月27日 神経科学分科会（第1回）

- 役員を選出
- 「脳とこころの提言」について

10月24日 神経科学分科会、脳とこころ分科会、脳と意識分科会合同会議（第2回）

- 活動状況報告
- 学術の大型研究計画検討について
- Gサイエンス2016について
- 3分科会の連携及び今後の合同企画について

平成28年

9月10日 神経科学分科会、脳とこころ分科会、脳と意識分科会合同会議（第3回）

- 活動状況報告
- 学術の大型研究計画検討について
- Gサイエンス2016について
- 3分科会の連携及び今後の合同企画について

平成29年

1月22日 神経科学分科会、機能医科学分科会、形態・細胞生物医科学分科会、脳とこころ分科会合同会議（第4回）

- 活動状況報告
- マスタープラン「多次元脳・生体イメージングの総合的推進」について
- 「国際脳科学フロンティア構想」について
- 今後の基礎医科学分科会及び脳科学関連分科会における連携について

基礎医学委員会 形態・細胞生物医科学分科会 審議経過

平成27年

3月12日 形態・細胞生物医科学分科会（第1回）

- 役員（委員長、副委員長、幹事）を選出
- 今後の活動について

10月24日 形態・細胞生物医科学分科会（第2回）

- 形態科学シンポジウムの準備状況について
- 今期の活動予定について

10月24日 第8回形態科学シンポジウム「生命科学研究の魅力を語る」高校生のための集い開催（九州大学病院地区）

平成28年

11月10日 形態・細胞生物医科学分科会（第3回）

- 形態科学シンポジウムの準備状況について

○今期の活動予定について

- 11月12日 第9回形態科学シンポジウム「細胞を見て、生命を理解する」高校生のための集い開催（大阪大学会館）

平成29年

- 1月22日 神経科学分科会、機能医科学分科会、形態・細胞生物医科学分科会、脳とこころ分科会合同会議（第4回）

○各分科会における今期活動について

○マスタープラン「多次元脳・生体イメージングの総合的推進」及び「国際脳科学フロンティア構想」について

○今後の基礎医学分科会間及び脳科学関連分科会間における連携について

基礎医学委員会 機能医科学分科会 審議経過

平成26年

- 11月28日 機能医科学分科会（第1回）メール審議

○役員を選出、特任連携会員の推薦

平成27年

- 3月30日 機能医科学分科会（第2回）

○第23期活動方針、日本生理学会における日本学術会議後援シンポジウム開催について

- 7月20日 機能医科学分科会（第3回）メール審議

○マスタープラン2017への応募について

平成29年

- 1月22日 神経科学分科会、機能医科学分科会、形態・細胞生物医科学分科会、脳とこころ分科会合同会議（第4回）

○マスタープラン「多次元脳・生体イメージングの総合的推進」及び「国際脳科学フロンティア構想」について

臨床医学委員会 脳とこころ分科会 審議経過

平成27年

- 3月5日-17日

脳とこころ分科会（第1回）メール審議

○委員長の選出

- 7月3日 脳とこころ分科会（第2回）

○副委員長・監事の選出、今後の審議の進め方について

○分科会提言テーマ候補として「中枢薬開発促進のための産学官連携」が挙げられた

10月24日 脳とこころ分科会（第3回）

○神経科学分科会、脳と意識分科会との合同開催

○3分科会の連携について、マスタープランについて

○合同分科会終了後に3分科会合同シンポジウムを脳とこころ分科会主催で開催

平成28年

4月1日 脳とこころ分科会（第4回）

○分科会からの提言テーマを「中枢薬開発促進のための産学官連携」とすることに決定

○提言作成ワーキンググループ（WG）の発足を予定

9月10日 脳とこころ分科会（第5回）

○神経科学分科会、脳と意識分科会との合同開催

○3分科会の連携について

○合同分科会終了後に3分科会合同シンポジウムを脳と意識分科会主催で開催

平成29年

1月22日 脳とこころ分科会（第6回）

○神経科学分科会、機能医科学分科会、形態・細胞生物医科学分科会との合同開催

○4分科会の連携について、マスタープランについて

○合同分科会終了後に4分科会合同シンポジウムを開催

1月31日-2月14日

脳とこころ分科会（第7回）メール審議

○提言案の検討、修正、承認

<参考資料3> 分科会主催シンポジウム等

平成27年

○「脳とこころ」・「神経科学」・「脳と意識」分科会 合同シンポジウム

『求められる「脳とこころの科学」～教育・医療・モノづくり～』

主催：第一部心理学・教育学委員会脳と意識分科会、第二部基礎医学委員会神経科学分科会、臨床医学委員会脳とこころ分科会

共催：日本脳科学関連学会連合

後援：日本医歯薬アカデミー

日時：2015年10月24日（土）14：00～17：30

場所：日本学術会議講堂（六本木：地下鉄千代田線・乃木坂下車3分）

開催趣旨：

日本学術会議第1部「心理学・教育学委員会 脳と意識分科会」、第2部「基礎医学委員会 神経科学分科会」「臨床医学委員会 脳とこころ分科会」の3分科会合同で「求められる「脳とこころの科学」～教育・医療・モノづくり」と題するシンポジウムを企画した。

教育・医療に関しては、3分科会の委員から演者を選択し、モノづくりに関しては、第3部の工学系から演者を推薦してもらい、社会的要請の強い脳とこころの科学に関する日本学術会議としてのメッセージを国民に発信することを目的として開催した。

社会的要請の強い「脳とこころの科学」に関して、日本学術会議の第1部、第2部、第3部の専門領域を超えて、各領域の我が国を代表する研究者がわかりやすく講演し、参加者からも大変好評であり、我が国の研究の在り方についても大きなメッセージを発信できた。3分科会合同会議においても、「脳とこころの科学」をテーマとした分野横断型の大型研究の枠組みについても検討する必要があるとの有意義な議論ができた。

プログラム

14:00 開会のあいさつ 山脇成人（3分科会合同シンポジウム世話人）

14:05 日本学術会議会長 大西隆

14:10-15:10 教育と「脳とこころ」

司会：荻阪満理子（大阪大学大学院認知神経心理学・教授）

演者1：脳の発達（大隅典子・東北大学大学院発生発達神経科学・教授）

演者2：こころの発達と教育（脳と意識分科会メンバー）

15:10-16:10 医療と「脳とこころ」

司会：樋口輝彦（国立精神・神経医療研究センター・総長）

演者3：うつ病（山脇成人・広島大学大学院精神神経医科学・教授）

演者4：認知症（岩坪 威・東京大学大学院神経病理学・教授）

<休憩>

16:30-17:30 モノづくりと「脳とこころ」

司会：岡部繁男（東京大学大学院・神経細胞生物学・教授）

演者5：ヒューマノイドロボット（川人光男・ATR 脳情報研究所・所長）

演者6：脳科学とモノづくり（岡田真人・東京大学大学院複雑理工学・教授）

○第8回形態科学シンポジウム

『生命科学研究の魅力を語る：高校生のための集い』

主催：日本学術会議基礎生物学委員会・統合生物学委員会合同細胞生物学分科会
基礎医学委員会形態・細胞生物医科学分科会

後援：日本細胞生物学会、日本解剖学会、日本顕微鏡学会、日本組織細胞化学会
日本医歯薬アカデミー

日時：平成27年10月24日（土）14:00～17:30

場所：九州大学病院地区 コラボステーションⅠ 視聴覚ホール

開催趣旨：

スーパーサイエンスハイスクール(SSH)校を中心に、医学・生物学研究に関心を持つ高校生に呼びかけ、医学・生物学研究の最前線を分かりやすく解説する。また第一線の研究者と高校生が気軽に語り合う場を設け、将来の医学・生物学研究を担う人材の啓発に資するものとした。

プログラム

14:00 開会挨拶

中野明彦（日本学術会議第二部会員、東京大学大学院理学系研究科教授）

14:05 講演会

座長：菊池 章（日本学術会議第二部会員、大阪大学大学院医学系研究科教授）

・講演1「幹細胞って何？～神経幹細胞を中心とした病気や再生医療に関する話題～」

中島欽一（九州大学大学院医学研究院教授）

・講演2「細胞同士のコミュニケーションの方法～精子形成での細胞接着分子の新しい役割～」

若山友彦（熊本大学大学院生命科学研究部教授）

15:45 高校生と語る会

司会：藤木幸夫（日本学術会議連携会員）・小路武彦（日本学術会議連携会員）

16:25-16:35 （休憩と会場移動）

16:35 交流会（コラボステーションⅡ 1階 コミュニティラウンジ）

17:25 閉会挨拶

内山安男（日本学術会議第二部会員、順天堂大学大学院医学研究科特任教授）

平成28年

○日本学術会議後援シンポジウム

「技術革新が拓く機能医科学の新たな展開」

主催：第93回日本生理学会大会 会長 高井 章・當瀬 規嗣

企画：基礎医学委員会機能医科学分科会

日時：平成28年3月22日 9:00～11:00

場所：札幌コンベンションセンター

開催趣旨：

本シンポジウムでは、第93回日本生理学会大会の企画シンポジウムとして、大会参加の生理学会員に、機能医科学領域における先端的技術開発とそれにより明らかとなった様々な生理機能を紹介することにより、細胞-組織-個体の各階層をシームレスにつなぐ新技術で生体システム研究の推進を目指すと共に、境界領域、融合領域における研究開発への挑戦を、特に若手研究者に促すことを目的とする。

プログラム

9:00~9:30 全身のATP代謝動態可視化技術

山本 正道（京都大学大学院医学研究科・特任講師）

9:30~10:00 全身透明化の開発と全細胞解明

上田 泰己（日本学術会議連携会員、東京大学大学院医学系研究科・教授）

10:00~10:30 経頭蓋磁気刺激法

美馬 達哉（京都大学大学院医学研究科・准教授）

10:30~11:00 メカノメディシン

成瀬 恵治（岡山大学大学院医歯薬学総合研究科・教授）

○「脳と意識」・「神経科学」・「脳とこころ」分科会 合同シンポジウム

「自己を知る脳・他者を理解する脳」～融合的アプローチによる社会脳研究の魅力

主催：日本学術会議 心理学・教育学委員会 脳と意識分科会、基礎医学委員会 神経科学分科会、臨床医学委員会 脳とこころ分科会

共催：日本脳科学関連学会連合

後援：日本医歯薬アカデミー・日本ワーキングメモリ学会

日時：平成28年9月10（土）13:00~17:00

場所：日本学術会議講堂

開催趣旨：

日本学術会議第1部「心理学・教育学委員会 脳と意識分科会」、第2部「基礎医学委員会 神経科学分科会」「臨床医学委員会 脳とこころ分科会」では、3分科会合同の第10回公開シンポジウム「自己を知る脳・他者を理解する脳」～融合的アプローチによる社会脳研究の魅力（仮題）を企画した。この合同シンポジウムは、学術会議の第1部と2部が連携し2007年以降毎年実施してきたシンポジウムである^(注)。

デカルトは「我思うゆえに我あり」という命題に自己認識の力を見いだした。本シンポジウムでは、これを「我思うゆえに他者（社会）あり」と拡張することで、社会的存在としての脳、つまり自己と他者を結ぶ脳の働きを「融合社会脳」の視点から展望する。3分科会の委員などから演者を選択し、人文社会科学、脳科学や情報科学が協調して新たに創出しつつある「融合社会脳」の先端研究を倫理、経済、美学から認知ロボット工学まで、さらに動物の社会脳、発達障害やうつなどの社会適応障害まで「自己と他者」を軸とした「融合社会脳」研究の未来展望をおこない、その魅力について語る。

国民的関心の高い社会と脳のかかわりを自己認知、他者理解や自他協調の脳内メカニズムを通して考え、健全な社会性を育む脳のはたらきを捉えることで、教育や社会に資する最新のメッセージを発信したい。

プログラム

13:00 開会のあいさつ

苧阪直行（日本学術会議第一部連携会員、「脳と意識」分科会委員長、京都大学名誉教授、日本学士院会員）

13:05 挨拶

大西隆 日本学術会議会長挨拶

13:10-14:10 融合社会脳研究からみた「自己と他者」—先端人文社会科学、脳科学と情報学の接合

司会：苧阪満里子（日本学術会議会員、大阪大学脳情報通信融合研究センター・教授）

演者1：融合社会脳科学の展望—脳の中の自己と他者

苧阪直行（日本学術会議連携会員、京都大学・名誉教授、日本学士院会員）

演者2：乳幼児の自己と他者の心の発見—認知ロボット工学から考える社会脳の芽生え

長井志江（大阪大学工学研究科・特任准教授）

14:10-15:10 動物の社会脳からみた「自己と他者」

司会：岡部 繁男（日本学術会議会員、東京大学大学院医学系研究科・教授）

演者3：「霊長類動物を用いた社会脳研究：ニューロンは自己と他者の情報をどのように表現するか」

磯田昌岐（自然科学機構生理学研究所・教授）

演者4：「手綱核による社会的上下関係を巡る闘争の制御」

岡本 仁（理化学研究所脳科学総合研究センター副センター長）

<休憩>

15:30-16:30 発達障害とうつからみた「自己と他者」

司会：山脇成人（日本学術会議会員、広島大学大学院医歯薬保健学研究院・教授）

演者5：「発達障害の早期発見と早期支援」

神尾陽子（日本学術会議会員、国立精神・神経医療研究センター精神保健研究所部長）

演者6：「自己制御理解にもとづくうつ病の治療支援—融合的アプローチ」

岡本泰昌（広島大学大学院医歯薬保健学研究院・准教授）

○「第9回形態科学シンポジウム：細胞を見て、生命を理解する高校生のための集い」

主催：日本学術会議基礎生物学委員会・統合生物学委員会合同細胞生物学分科会、基礎医学委員会形態・細胞生物医科学分科会

共催：日本細胞生物学会、日本解剖学会、日本顕微鏡学会、日本組織細胞化学会、

後援：日本細胞生物学会、日本解剖学会、日本顕微鏡学会、日本組織細胞化学会 大阪府教育委員会（協賛：公益財団法人 千里ライフサイエンス振興財団）

日時：平成 28 年 11 月 12 日（土）13:30～17:30

場所：大阪大学会館（豊中キャンパス）

開催趣旨：生命科学研究に関心を持つ高校生に呼びかけ、生命科学研究の最前線を分かりやすく解説する。また第一線の研究者と高校生が気軽に語り合う場を設け、将来の生命科学研究を担う人材の啓発に資するものとしたい。

プログラム

13:30 はじめに

大隅良典（日本学術会議連携会員、東京工業大学フロンティア研究機構特任教授）

13:35 特別講演

司会：内山安男*（日本学術会議連携会員、順天堂大学大学院医学研究科特任教授）

講演 1

『超解像ライブイメージングで初めて分かった細胞内の活動』

中野明彦*（日本学術会議第二部会員、東京大学大学院理学系研究科教授）

講演 2

『シナプスの刈込みと可塑性』

渡辺雅彦*（日本学術会議連携会員、北海道大学大学院医学研究科教授）

15:20 高校生へのメッセージ

司会：米田悦啓（日本学術会議連携会員、医薬基盤研究所理事長）

16:30 交流会

17:30 おわりに

平成29年

○「神経科学」「機能医科学」「形態・細胞生物医科学」「脳とこころ」分科会合同シンポジウム

「健康社会にむけた多次元脳・生体イメージングの総合的推進」

主催：第二部基礎医学委員会 神経科学分科会、形態・細胞生物医科学分科会、機能医科学分科会、臨床医学委員会 脳とこころ分科

共催：日本脳科学関連学会連合

後援：医歯薬アカデミー

日時：平成 29 年 1 月 22 日 13:30 ～17:20

場所：日本学術会議講堂

開催趣旨：多領域・多階層の構造・機能データを取得するために必要とされるイメージング技術、プローブ技術、それらを支える物理・化学的基盤の進歩は著しい。さらにこのような技術を利用して得られる大規模データを解析するための数理科学的な手法についても多くの進展がみられる。我が国は、光学機器やイメージングプローブ開発、これらを利用したイメージング研究では世界をリードする位置にある。一方で、欧米等ではイメージン

グセンターが多額の投資により設立され、物理・工学・数学・情報学から基礎医学、臨床医学、創薬への応用までを網羅した中核機関として機能し始めている。このような中核機関をハブとして、データベースの構築、ビッグデータの活用など、研究、教育、開発を体系的に行い、先端研究と同時に疾患の克服などの社会のニーズに答えるシステムが確立されつつある。熾烈な国際競争に打ち勝つため、今、求められているのは、我が国の生命科学研究者コミュニティーが一丸となった取組であり、イメージング科学の総合的な推進とそれを応用した臨床医学、特に精神・神経疾患の克服への活用である。本シンポジウムでは、脳や生体のイメージングとその応用について、現状でどこまで大規模・高速・高精度な読み出しが可能となっているのか、その技術を利用して解くべき生物学・医学的に重要な課題は何か、についての議論を行う。加えて、健康社会の実現に活かすイメージングセンターとそれを支えるオールジャパンのネットワークの枠組みについても議論を行う

プログラム

司会 岡部繁男（日本学術会議第2部会員、東京大学大学院医学系研究科・教授）

13：30 開会挨拶

本間さと（日本学術会議第2部会員、北海道大学脳科学研究育センター・
招聘教授）

第1部

13：35 イメージング技術と脳科学研究

伊佐 正（京都大学大学院医学研究科・教授）

14：05 多階層イメージング研究について：分子モーターと脳神経機能；遺伝子・分子・
動態・細胞・脳そして行動をつないで

廣川信隆（日本学術会議連携会員、東京大学大学院医学系研究科・特任教
授）

14：35 動物研究と生体イメージング

鍋倉淳一（日本学術会議連携会員、自然科学機構生理学研究所・教授）

<休憩>

第2部

15：15 ヒト研究と生体イメージング

定藤規弘（日本学術会議連携会員、自然科学機構生理学研究所・教授）

15：45 脳・生体イメージングにおける技術革新

宮脇敦史（理化学研究所脳科学総合研究センター・シニアチームリーダー）

16：15 生体イメージングによる新しい創薬科学の展開

萩原正敏（日本学術会議連携会員、京都大学大学院医学研究科・教授）

16：45 脳・生体イメージングとトランスレーショナルリサーチ

笠井清登（日本学術会議連携会員、東京大学大学院医学系研究科・教授）

17：15 閉会の挨拶

山脇成人（日本学術会議会員、広島大学大学院医歯薬保健学研究院・教授）

＜参考資料4＞ Gサイエンスアカデミー2016 共同声明

Understanding, Protecting, and Developing Global Brain Resources (仮訳)

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

ヒトの脳は最も貴重な文明の資産である。それゆえ、脳科学への投資は社会の未来への投資であり、各国は協調して脳を理解し、疾病から守り、その最適な発達を支援しなければならない。国際的な脳に関連したリソースの開発を目的として、Gサイエンス学術会議は、神経科学に対する戦略的な支援が社会貢献につながる、並行して目指すべき4つの目標を提案する。(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(AI)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。

脳を理解すること、また、脳の様々な機能がいかに行動に表われるかを理解することは、宇宙の起源を探索することに匹敵するほど複雑な科学的試みである。脳疾患の治療、脳を基盤としたAIの開発及び脳に対する意識の高い社会の促進に向けて、脳の構造と機能に関する基礎研究という困難な課題を避けて通ることはできない。基礎脳科学は、遺伝子と分子を特定するゲノミクスとタンパク質化学、神経回路を観察し操作するための光学的及び遺伝子改変手法、さらにヒトの認識を研究するための様々な様式の脳機能イメージングなどの発展を下に、近年めざましい進歩を遂げてきた。しかしながら、動物モデルとヒトのいずれにおいても、複雑な神経回路網の理解を可能にするのに十分な解像度で脳を研究する技術が欠如していることが未だに進歩の妨げとなっている。そのような技術があれば、コンピューター技術と組み合わせることで、脳機能をより明瞭に把握でき、認識についてのより深い理解と、脳疾患の根本的メカニズムの解明を可能にするであろう。この目標を達成するには、系統的取組が必要であり、それにより、個々の研究機関における研究を補完し進展させることができる。大規模な脳科学プロジェクトが、多くの国で、生物医学的な研究への様々な取組(次世代シーケンシング、精密医学、バイオバンキング等)と同時に開始されている。このプロジェクトにより、脳ネットワークのマッピングとレコーディングを遂行し、ニューロインフォマティクスのプラットフォームを構築する新技術が開発される [1]。しかしながら、科学的進歩の効率化と加速には、これらのプロジェクトは技術、人材、データに関して広範囲な国際的協調を進める必要がある。世界規模の多国間研究機構の成功例としては、日本のイニシアティブにより設立された「ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム(HFSP)」が挙げられる。

脳疾患は、個人の安寧、経済の生産性及び知的財産に対する世界規模の脅威である [2]。しかしながら、脳疾患に社会的な烙印(スティグマ)を押す傾向は根強く、それにデータ不足も伴って、脳疾患がもたらす不利な影響が明らかにならないことが多い。脳疾患は5つのグループに分類できる。すなわち、(A) 神経発達障害(精神遅滞、てんかん、自閉スペクトラム症等)、(B) 青年期及び成人期における精神障害(うつ病、双極性障害、統合失調症等)、(C) 変性疾患(アルツハイマー病、パーキンソン病等)、(D) 脳損傷(脳卒中、外傷性脳損傷、脳感染症、脳腫瘍等)、(E) 慢性疾患(ストレス、中毒、栄養不良、

頭痛、睡眠障害等)。毎年8百万人が、脳疾患が原因で死亡している [3]。過去20年で、脳疾患の発生率が41%増加しており、10年のうち1年は健康を喪失していることになる[4]。脳疾患は高所得国における障害調整生命年 (DALY) の36%を占め、低中所得国では29%となっている [4]。特に、認知症 (アルツハイマー病を含む) とうつ病は、多大な経済的及び社会的コストを伴う緊急の公衆衛生課題である。効果的な治療法を生み出すには、予測的妥当性を備えた細胞及び動物モデルの使用、及び政府・アカデミア・産業間の三者協力を含む、医薬品開発に対する新しい経済的取組が必要である。脳疾患は社会に過度の負担をかける：低中所得国においては、インフラ、リソース、資金へのアクセスが不十分であり、一方高所得国では研究や臨床関連の利害関係者の協調を欠く場合が多い。この問題に対処するには、世界的に蔓延する脳疾患と戦うための医学研究、診断、治療、リハビリ、介護を強固に統合した国際的なプログラムとセンターが必要となる。

脳は既知の世界において最も複雑な生物システムである。例えば、ヒトの中樞神経系は、最小限の学習をした後で複雑な意思決定を容易に下すことができ、この能力は最も効率の良いコンピューターをも凌駕する。脳機能の計算原理を理解するために、また定量的数理モデルを作り上げるために、理論的研究が不可欠である。脳回路とその行動中の機能の基本的理解には、理論、実験及び計算を方法論として等しく取り入れた取組が必要である。成功の可否は、生物学と共に、数学、統計学、情報科学、コンピューター科学を含む学際的かつ定量的アプローチにかかっている。重要な要素の一つは、大規模なデータセットの取得と解析である。データセットをできる限り広く共有し解析するためにはオープンデータの原則を認識すべきであり、特に公的資金による研究はその対象となる。脳に関する基本的な理論は、脳型コンピューティング、AIそして情報通信技術 (ICT) への応用を展開する上でも不可欠である。AIは当初コンピューター科学から生まれたが、ディープラーニングにおける最近の進歩は脳の理論 [5] に基づいており、将来のAIは更なる脳研究に基づくアルゴリズムの恩恵を受けるであろう。このアルゴリズムはまたブレイン・マシン・インターフェースや脳活動のデコーディング機器の設計にも役立つ。ただし、他の急速に進歩する技術と同様、AIもそれに伴う懸念が生まれつつあり、問題解決には神経科学と社会という文脈において、その社会的・倫理的・哲学的意味に関する国際連携に基づいた調査を実施することが必要である。

人間の文化は、多様な脳の機能によって生みだされ更新されていく動的な概念である。したがって、未来に向けて社会が発展する上で神経科学が果たす役割は、脳機能の物理的・生物学的・計算論的基盤の研究だけでなく、経験的社会科学との間に幅広の研究交流の間口を持つことができるかにも依存する。これらの相互交流により全体として神経科学はグローバルな社会と経済に対してより大きな影響を持つように方向付けられるであろう。神経生物学、行動科学及び社会科学の統合はまた、脳由来の情報を日常のヒトを対象とした用途に利用するための道筋を生み出す。このような学際的な収束が可能な、鍵となる例としては、学習の科学が挙げられる。脳がどのようにして生物学的・認知的・計算的アプローチにより新しい情報を獲得するかについての知識が得られ始めたことで、子供や大人のためのエビデンスに基づく教育プログラムの設計が大きく改善される可能性がある [6]。

またそのような知識によって、教育プログラムへのアプローチや、更に疑似科学的主張に基づくアプローチをコントロールするための科学的基盤が得られるかもしれない。同様に脳科学と行動及び社会科学とを統合することで、ヒトの行動に関するより適切な予測モデルを構築することが可能になる。このようなモデルは、経済的意思決定、リスク評価や社会的相互作用といった極めて幅広い分野で個人の役に立つことになる。全体として、脳機能についてのエビデンスに基づく理解は、個人の生活のマネジメントにおける理論と実践、組織における脳に関する知識に基づく政策、の両者を変革するであろう。これらの変革は持続可能かつ先進的なグローバル社会の発展に広く益するものとなる。脳科学、行動科学そして社会科学を統合することにより、世界規模での脳という資産を科学に基づいて開発していくための指針が得られる。

統一見解に基づき、Gサイエンス学会は4つの目標を提言する。

1. 脳の原理に関する基礎研究と技術を支援する

- 脳の細胞の分子及びゲノムレベルでの全体像から神経回路形成、機能マッピングから脳ネットワークと行動に至る基礎的脳研究を支援する。
- 脳の構造と機能を対象とした、高解像度で大規模な解析のための、脳のレコーディング及びイメージングの新技术の開発、特にヒトにおける開発を優先させる。
- 大規模な脳及び医学生物学のプロジェクトに関する国際協働を、技術開発、データ管理、研究者の育成と流動性、そして資金提供の調整の面で促進する。

2. 次世代の統合的プログラムにより脳疾患に対処する

- 脳疾患は地球規模の健康危機であることを認識し、その原因、予防、診断そしてリハビリを含めた治療に関する基礎及び応用研究を支援する。
- 動物を含む有効な生物学的モデルを利用した、治療法開発のための新たな経済的・科学的プラットフォームを構築し、アカデミアと産業界との協働を促進する。
- 高所得国と中低所得国との間での協力関係を支援し、脳疾患の調査と対応のための研究面及び臨床面での基盤強化を図ると共に公衆の教育を強化する。

3. 脳を基盤とした新しいアプリケーション創出に向けた理論的神経科学を推進する

- 理論科学、計算科学、統計科学、データ科学及び数学を駆使した学際的研究を支援し、統一的な脳理論を確立するための基本原理を明らかにする。
- 神経科学のデータ共有に向けての国際協力を促進し、脳型人工知能とニューロテクノロジーの研究開発を加速させる。
- 科学、政策、規制、管理の分野を網羅する形での、神経倫理学に関する国際的対話を開始し、脳を基盤とした技術とその応用の安全性と有効性の問題に取り組む。

4. 教育と生活のマネジメントに向けて脳科学、行動科学そして社会科学を統合する

- 脳科学、経験的社会科学それぞれにおける原理・技術・方法・理論を統合する基礎及び橋渡し研究を支援する。

- 子供のための教育、また生涯学習のための科学プログラムとツールの開発に向けた、ヒトの学習における生物学的及び認知的基盤に関する学際的研究を促進する。
- 個人及び組織を対象として、脳を基盤とした生活のマネジメントと社会的機能に関するプログラム・指針を開発するための研究及び国際協力を開始する。

引用文献

- [1] Huang Z. J., Luo L (2015) *Science* 350(6256):42-4. It Takes the World to Understand the Brain.
- [2] Patel V. et. al. (2015) *Lancet* S0140-6736 (15)00390-6. Addressing the Burden of Mental, Neurological, and Substance Use Disorders: Key Messages from Disease Control Priorities.
- [3] Walker E. R. et. al. (2015) *JAMA Psychiatry* 72(4): 334-41. Mortality in Mental Disorders and Global Disease Burden Implications: a Systemic Review and Meta-analysis.
- [4] Silberberg D. et. al. (2015) *Nature* 527: S151-S154. Brain and Other Nervous System Disorders Across the Lifespan: Global Challenges and Opportunities.
- [5] LeCun Y. et. al. (2015) *Nature* 521:436-44. Deep Learning.
- [6] Meltzoff A. N. et. al. (2009) *Science* 325: 284-8. Foundations for a New Science of Learning. __

＜参考資料5＞海外における脳科学の研究拠点例

Janelia Research Campus: <https://www.janelia.org>

ハワードヒューズ医学財団(Howard Hughes Medical Institute)によって設立された米国の研究所。革新的技術開発によって神経科学に革新をもたらす目的で、個別研究とともに様々な共同研究が行われている。



Allen Institute for Brain Science: <https://www.alleninstitute.org>

David Allenによって設立された研究所。大規模なチームワークによって、脳で情報がどのようにコードされているのかの解読に挑んでいる。これまでに、マウスの脳での、遺伝子発現のプロファイリングや、神経細胞種ごとに特異的に操作するための遺伝改変システムの作成を大規模に行なっており、その成果は逐次研究者コミュニティに公開されている。



提言等の提出チェックシート

このチェックシートは、日本学術会議において意思の表出（提言・報告・回答、以下「提言等」という）の査読を円滑に行い、提言等（案）の作成者、査読者、事務局等の労力を最終的に軽減するためのものです。

提言等（案）の作成者は提出の際に以下の項目をチェックし、提言等（案）に添えて査読時に提出してください。

	項目	チェック
1. 表題	表題と内容は一致している。	① はい 2. いいえ
2. 論理展開 1	どのような現状があり、何が問題であるかが十分に記述されている。	① はい 2. いいえ
3. 論理展開 2	特に提言については、政策等への実現に向けて、具体的な行政等の担当部局を想定していますか（例：文部科学省研究振興局等）。	1.部局名： 文部科学省研究振興局
4. 読みやすさ 1	本文は 20 ページ（A4、フォント 12P、40 字×38 行）以内である。※図表を含む	① はい 2. いいえ
5. 読みやすさ 2	専門家でなくとも、十分理解できる内容であり、文章としてよく練られている。	① はい 2. いいえ
6. 要旨	要旨は、要旨のみでも独立した文章として読めるものであり 2 ページ（A4、フォント 12P、40 字×38 行）以内である。	① はい 2. いいえ
7. エビデンス	記述・主張を裏付けるデータ、出典、参考文献をすべて掲載した。	① はい 2. いいえ
8. 適切な引用	いわゆる「コピペ」（出典を示さないで引用を行うこと）や、内容をゆがめた引用等を行わず、適切な引用を行った。	① はい 2. いいえ
9. 既出の提言等との関係	日本学術会議の既出の関連提言等を踏まえ、議論を展開している。	① はい 2. いいえ
10. 利益誘導	利益誘導と誤解されることのない内容である。	① はい 2. いいえ
11. 委員会等の趣旨整合	委員会・分科会の設置趣旨と整合している。	① はい 2. いいえ

※チェック欄で「いいえ」を記入した場合、その理由があればお書きください

記入者（委員会等名・氏名）：基礎医学委員会 神経科学分科会・岡本仁

参考：日本学術会議会長メッセージ、「提言等の円滑な審議のために」（2014年5月30日）。

<http://www.scj.go.jp/ja/head/pdf/140530.pdf>