

# 米国における脳情報関連技術に関する 研究開発動向

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人 情報通信研究機構  
(北米連携センター)

## 目次

<b>1</b>	<b>米国における脳情報関連技術に関する研究開発動向</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BRAIN イニシアティブ</b> .....	<b>1</b>
2.1	概要 .....	1
2.2	これまでの歩み .....	3
2.3	予算動向 .....	4
<b>3</b>	<b>研究開発動向</b> .....	<b>7</b>
3.1	BRAIN イニシアティブ関連事業 .....	7
3.1.1	NIH による BICCN プロジェクト(脳情報データのアーカイブ構築と公開) .....	7
3.1.2	DARPA による Neuro-FAST プロジェクト(脳情報デコーディング) .....	11
3.1.3	DARPA による革新的人工装具の開発(BCI 研究) .....	13
3.1.4	IARPA による MICrONS プロジェクト(脳研究を基にした AI、マシンラーニングの改善) ....	16
3.1.5	FDA による BCI 関連機器の認可 .....	18
3.2	民間企業 .....	21
3.2.1	Neuralink .....	21
3.2.2	Facebook .....	23
3.2.3	Kernel .....	26

## 図表

図表 1: BRAIN イニシアティブに参加している組織例 .....	3
図表 2: BRAIN イニシアティブのこれまでの主な歩み .....	4
図表 3: BRAIN イニシアティブの当初の予算 10 年計画 .....	5
図表 4: BRAIN イニシアティブの各年度予算目安(大統領予算案ベース) .....	5
図表 5: 21 世紀治療法を基に今後 NIH に割り当てられる予算 .....	6
図表 6: BICCN が助成金を提供する 11 件のプロジェクト .....	9
図表 7: 各皮質部位における細胞の機能状況の記録 .....	12
図表 8: DEKA 社が開発した Luke Arm .....	14
図表 9: ピッツバーグ大学が開発した BIC で制御する義肢と義手 .....	15
図表 10: 脳によるシーン分解と要素クラスター化 .....	17
図表 11: Neuralink 社が開発中の neural lace .....	22
図表 12: Neuralink 社が開発中の neural dust .....	23
図表 13: ワシントン大学の光脳スキャナー利用の様子 .....	25

## 1 米国における脳情報関連技術に関する研究開発動向

米国における脳情報関連技術に関する研究開発は、官民で様々なプロジェクトが遂行されているところであり、連邦政府が主導している大型イニシアティブには、オバマ政権が立ち上げた「先端・革新的神経学技術を通じた脳研究イニシアティブ (the Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies Initiative)、通称「BRAIN イニシアティブ (BRAIN Initiative)」がある。このイニシアティブは、革新的な技術やツールの開発・導入を加速させることによって、ヒトの脳に対する理解を深め、最終的にアルツハイマー病やうつ病などの神経疾患の治療や予防にも役立つ手法を開発することを目指している。

他方、民間では、シリコンバレーを中心に活躍する企業らが独自のビジョンを持って研究開発を行っている。主要な企業には、起業家のイーロン・マスク氏 (Elon Musk) が創設したベンチャー企業の Neuralink、様々な消費者向けハードウェアの開発を進める Facebook、起業家のブライアン・ジョンソン氏 (Brian Johnson) が創設した Kernel 等がある。これらの企業も、神経疾患患者の治療や支援を目的としているものの、Neuralink が脳への埋め込み型の技術の開発に注力している一方で、Kernel が非侵襲性のアプローチを開発している等、技術のビジョンには違いがある。

ここでは、米国の官民組織が実施している関連研究開発プロジェクトについて、特に以下の様な技術に焦点を当て、各プロジェクトの概要や最近の動向、成果、応用・製品化の状況等について説明する。

- 脳情報デコーディング
- Brain-Machine Interface (BMI)
- Brain-Computer Interface (BCI)
- ブレインインターフェース
- 脳における情報処理をモデルとした新しい AI 技術
- 脳情報ビッグデータ

## 2 BRAIN イニシアティブ

### 2.1 概要

オバマ前政権は 2013 年 4 月、BRAIN イニシアティブの立ち上げを発表した。同イニシアティブは、2025 年を目途として脳機能の謎に迫り、アルツハイマー病や自閉症等の脳機能障害の治療方法の改善を図り、人間がどのように思考し、学び、記憶するのかについての理解を深める事を目的としている<sup>1</sup>。具体的に同イニシアティブでは、以下の様な取組を行うことが示されている<sup>2</sup>。

- 基礎研究や(応用分野への)橋渡し研究を実施すると共に、大学や民間の研究機関間で研究施設を共有する。

---

<sup>1</sup><https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/whitehouse.gov/files/documents/BRAIN%20Initiative%20FY17%20Fact%20Sheet.pdf>

<sup>2</sup><https://obamawhitehouse.archives.gov/blog/2016/03/20/new-investments-help-unlock-mysteries-brain>

- 多分野に跨る連携を促し、また若手研究者を支援するために、大学横断的な研究イニシアティブを構築し、シード助成金の創設・運用を行う。
- 官民パートナーシップを構築し、研究者とステークホルダーを繋ぐための地域的な(研究・産業)クラスターを構築する。
- 脳機能障害の診断、処置、治療に役立つ技術・手法の開発を加速させるため、患者支援団体の取組を支援する。
- 神経科学研究によって発生する膨大なデータの保存、共有、可視化、分析を実現・改善するために、情報技術インフラを整備する。
- 脳機能の解析を行う次世代の研究者、エンジニア、起業家を育て、更には BRAIN イニシアティブを通して開発された研究ツールや技術を普及させるため、教育や訓練プログラムを創設する。
- 神経科学や神経技術、神経疾患の処置や予防、治療に対する STEM 教育 (Science, Technology, Engineering and Mathematics: 科学・技術・工学・数学の意) の重要性についての知見や理解を広めるため、K-12(幼稚園~高等学校)の STEM 教育を整備する。
- 経済成長、雇用創出、診断、セラピー、医療用の関連機器や、脳関連のコンピューティング技術等の神経技術におけるイノベーションを促進する。
- 研究に対する奨励賞を設ける。

BRAIN イニシアティブの実施は、米国立衛生研究所 (NIH: 米保健福祉省傘下)、国防高等研究事業局 (DARPA: 国防総省傘下)、全米科学財団 (NSF: 独立機関) 等が主導し、近年は情報高等研究開発活動 (IARPA: 国家情報長官傘下)、食品医薬品局 (FDA: 保健福祉省傘下)、エネルギー省 (DOE) 等も加わり、関連の基礎研究を進めると共に、臨床応用や製品化にも注力を始めている。また、全米各所に拠点を構える研究機関や民間企業、財団等も連携している<sup>3</sup>。

以下の表は、2017 年 11 月時点で同イニシアティブに携わっていた組織を整理したものである。参加組織の中でも、参加組織間の連携や情報共有、一般への情報開示、BRAIN イニシアティブのウェブサイト (2016 年 11 月創設) の運営等を担当する中心的な組織らは、「BRAIN イニシアティブ・アライアンス (BRAIN Initiative Alliance)」と呼ばれる運営グループを組織している。アライアンス・メンバーは、以下の表内では太字で表記する<sup>4</sup>。

---

<sup>3</sup><https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/whitehouse.gov/files/documents/BRAIN%20Initiative%20FY17%20Fact%20Sheet.pdf>

<sup>4</sup> <http://www.braininitiative.org/alliance/>

図表 1: BRAIN イニシアティブに参加している組織例

種類	主な組織
連邦政府組織	<ul style="list-style-type: none"> <li>国防高等研究計画局 (DARPA)</li> <li>エネルギー省 (DOE)</li> <li>食品医薬品局 (FDA)</li> <li>情報高等研究開発活動 (IARPA)</li> <li>国立衛生研究所 (NIH)</li> <li>国立科学財団 (NSF)</li> <li>大統領府</li> </ul>
財団	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brain &amp; Behavior Research Foundation (ニューヨーク州)</li> <li>Kavli Foundation (カリフォルニア州オックスナード)</li> <li>National Photonics Initiative (ワシントン D.C.、ワシントン州ベリンガム)</li> <li>Pediatric Brain Foundation (ミズーリ州スプリングフィールド)</li> <li>Simons Foundation (ニューヨーク州ニューヨーク)</li> </ul>
研究機関	<ul style="list-style-type: none"> <li>アレン脳科学研究所 (ワシントン州シアトル)</li> <li>ハワード・ヒューズ医学研究所 (バージニア州アッシュバーン)</li> <li>ソーク研究所 (カリフォルニア州ラホヤ)</li> </ul>
大学	<ul style="list-style-type: none"> <li>ボストン大学 (Center for Systems Neuroscience、マサチューセッツ州ボストン)</li> <li>カーネギーメロン大学 (BrainHub、ペンシルバニア州ピッツバーグ)</li> <li>Neurotechnology Architecting Network (拠点複数)</li> <li>Pacific Northwest Neuroscience Neighborhood (拠点複数)</li> <li>アリゾナ大学 (Center for Innovation in Brain Science、アリゾナ州ツーソン)</li> <li>カリフォルニア大学機構 (Cal-BRAIN、カリフォルニア州)</li> <li>ピッツバーグ大学 (Brain Institute、ペンシルバニア州ピッツバーグ)</li> <li>テキサス大学機構 (UT System Neuroscience、テキサス州オースティン)</li> <li>ユタ大学 (Neurosciences Gateway、ユタ州ソルトレイクシティ)</li> </ul>
企業	<ul style="list-style-type: none"> <li>Blackrock Microsystems (ユタ州ソルトレイクシティ)</li> <li>Boston Scientific (マサチューセッツ州マルボロ)</li> <li>GE (マサチューセッツ州ボストン)</li> <li>GlaxoSmithKline (ペンシルバニア州フィラデルフィア、ノースカロライナ州リサーチ・トライアングル・パーク)</li> <li>Google (カリフォルニア州マウンテンビュー)</li> <li>Inscopix (カリフォルニア州パロアルト)</li> <li>Lawrence Livermore National Laboratory (カリフォルニア州リバモア)</li> <li>Medtronic (ミネソタ州ミネアポリス)</li> <li>NeuroNexus (ミシガン州アンハーバー)</li> <li>NeuroPace (カリフォルニア州マウンテンビュー)</li> <li>Ripple (ユタ州ソルトレイクシティ)</li> <li>Second Sight (カリフォルニア州シルマー)</li> </ul>
米国外の国・公的組織	<ul style="list-style-type: none"> <li>国家保健医療研究評議会 (NHMRC、オーストラリア)</li> <li>ブレイン・カナダ財団 (Brain Canada Foundation、カナダ)</li> <li>ルンドベック財団 (Lundbeck Foundation、デンマーク)</li> </ul>

出典: BRAIN イニシアティブの情報を基に作成<sup>5</sup>

## 2.2 これまでの歩み

2017年4月で5年目を迎えた BRAIN イニシアティブは、これまでに既に様々な取組みを実施してきた。イニシアティブの中核を担う NIH は、2017年10月時点で第4フェーズの研究助成金の付与を開始し、その

<sup>5</sup> <http://www.braininitiative.org/participants/>

額は、第3フェーズのほぼ倍である1億6,900万ドルに達した。またNIHは2017年秋より、ヒト、サル、マウスの脳の細胞や部位の種類や機能についてまとめた電子インベントリ「細胞センサス(Cell Census、詳細後述)」の構築を始めたと共に、神経倫理研究にも舵を切った。以下の表は、これまでの同イニシアティブの主な歩みを整理したものである。

図表2: BRAIN イニシアティブのこれまでの主な歩み

年	概要
2013年	<ul style="list-style-type: none"> <li>4月、オバマ前政権がBRAIN イニシアティブの創設を発表。</li> </ul>
2014年	<ul style="list-style-type: none"> <li>4月、オバマ前政権が、2015年会計年度におけるBRAIN イニシアティブの予算案や方針等をまとめたファクト・シートを発表。</li> <li>6月、NIHがイニシアティブにおける具体的な取組をまとめた140ページ強の報告書「BRAIN 2025: A Scientific Vision」を発表。</li> <li>9月、NIHが第1フェーズの研究助成金の付与(58件、計4,600万ドル)を開始。</li> <li>9月、オバマ前政権が、イニシアティブに関する図解(インフォグラフィック)<sup>6</sup>を発表。</li> <li>11月、ワシントンD.C.において、二日間に亘る研究者向けの会議を開催。</li> </ul>
2015年	<ul style="list-style-type: none"> <li>2月、オバマ前政権が、2016会計年度におけるBRAIN イニシアティブの予算案や方針などをまとめたファクト・シートを発表。</li> <li>2月、オバマ前政権が大統領府のブログに、イニシアティブについての記事を投稿。</li> <li>7月、イリノイ州シカゴにおいて、BRAIN イニシアティブ・アライアンスの最初の会合を開催。</li> <li>10月、NIHが第2フェーズの研究助成金の付与(67件、計3,800万ドル)を開始。</li> </ul>
2016年	<ul style="list-style-type: none"> <li>9月、ニューヨークで開催された国連総会において、国際BRAIN イニシアティブの創設を発表。</li> <li>10月、NIHが第3フェーズの研究助成金の付与(約7,000万ドル)を開始。</li> <li>10月、オバマ前政権がカーネギーメロン大学において、BRAIN イニシアティブ会議を開催。</li> <li>11月、BRAIN イニシアティブ・アライアンスの公式ウェブサイトの運営開始。</li> </ul>
2017年	<ul style="list-style-type: none"> <li>8月、NSFが国家神経科学インフラの拡張を目指した研究公募を開始。</li> <li>10月、NIHが第4フェーズの研究助成金(110件、計1億6,900万ドル)の付与を開始。</li> <li>10月、NIHの細胞センサス・ネットワークが、ヒト、サル、マウスの脳細胞の種類や機能についてまとめた電子インベントリ(細胞センサス)の構築を開始。</li> <li>10月、NIHが神経倫理学研究の開始を発表。</li> </ul>

出典: BRAIN イニシアティブ、大統領府等の情報を基に作成<sup>7</sup>

## 2.3 予算動向

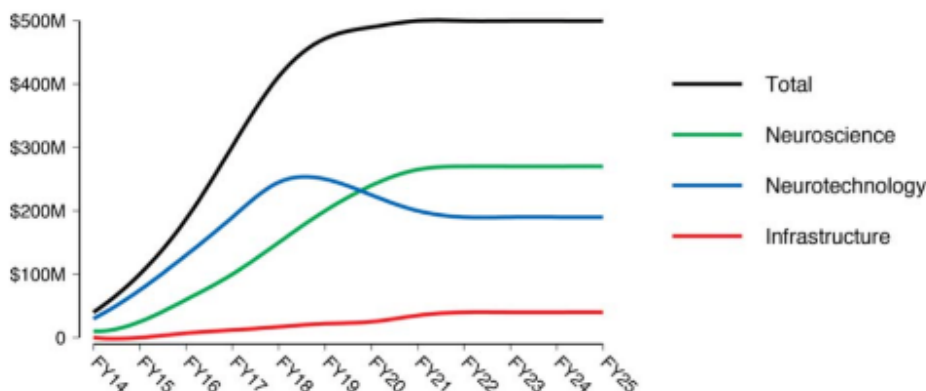
BRAIN イニシアティブの立ち上げ時には、2025年までの10年間で総額50億ドルの予算が投じられる計画であった。この予算は下記の図のとおり、神経科学、神経技術、関連インフラの大きく分けて3つの項目に投じられるものとされた。計画によれば、複数年に亘る研究計画を構築し、それに沿ったスケジュールや予算案を組むことで、イニシアティブの目的達成に向けた効果的な研究を実施できるとされていた。他方で、実際にプロジェクトにあたる研究者の間では、イニシアティブやその予算計画を野心的過ぎると指摘する声や、イニシアティブの目標が曖昧すぎると批判する声もあった。結果、BRAIN イニシアティブは、脳機能の全解明を目指すのではなく、あくまでも関連研究や民間からの投資を促す枠組や触媒として周知されるようになった<sup>8</sup>。

<sup>6</sup> <https://obamawhitehouse.archives.gov/share/brain-initiative>

<sup>7</sup> <http://www.braininitiative.org/milestones/>: <https://obamawhitehouse.archives.gov/node/300741>

<sup>8</sup> <https://www.aaas.org/blog/capitol-connection/what-exactly-obamas-100-million-brain-initiative>  
<https://medium.com/neurotechx/the-brain-initiative-the-race-to-understand-the-human-brain-c2fddfea271e>

図表 3: BRAIN イニシアティブの当初の予算 10 年計画



出典: アルゴンヌ国立研究所<sup>9</sup>

2014~2017 年度に連邦政府から捻出された BRAIN イニシアティブの予算目安(大統領予算案ベース)は、以下のとおりである。同イニシアティブは官民パートナーシップの枠組みで進められているため、この他に民間の財団や企業からの支援金も提供されている。例えば、ワシントン州シアトルに拠点を置く非営利バイオサイエンス研究所のアレン脳科学研究所(Allen Institute for Brain Science)<sup>10</sup>は、毎年 6,000 万ドルをイニシアティブに投入する事を約束している。同様に、ハーワード・ヒューズ医学研究所(Howard Hughes Medical Institute)は毎年 3,000 万ドルを、科学振興財団の Kavli Foundation は毎年 400 万ドルを 10 年間に亘って投入するとしている<sup>11</sup>。

図表 4: BRAIN イニシアティブの各年度予算目安(大統領予算案ベース)

	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度
NIH	4,000 万ドル	1 億ドル	1 億 3,500 万ドル	1 億 9,500 万ドル
DARPA	5,000 万ドル	8,000 万ドル	9,500 万ドル	1 億 1,800 万ドル
NSF	2,000 万ドル	2,000 万ドル	7,200 万ドル	7,400 万ドル
IARPA	---	---	(情報見当たらず)	4,300 万ドル
FDA	---	---	(情報見当たらず)	--
DOE	---	---	---	900 万ドル
合計	1.1 億ドル	2 億ドル	3 億 200 万ドル	4 億 3,900 万ドル

出典: 米議会調査局(CRS)や米科学振興協会(AAAS)の資料を基に作成<sup>12</sup>

また 2016 年 12 月に、「21 世紀治癒法(the 21st Century Cures Act)<sup>13</sup>」が施行され、精密医療イニシアティブ(Precision Medicine Initiative)や、がん撲滅ムーンショットイニシアティブ(the Cancer Moonshot Initiative)等の関連大型イニシアティブと共に、BRAIN イニシアティブにも 2026 年度まで予算が割り当てら

<sup>9</sup> <https://science.energy.gov/~media/ascr/ascac/pdf/meetings/201604/ASCAC-Cancer-Brain-Rick.pdf> (p.26)

<sup>10</sup> Microsoft のポール・アレン(Paul Allen)共同創業者が投資して設立した。

<sup>11</sup> <https://www.aaas.org/blog/capitol-connection/what-exactly-obamas-100-million-brain-initiative>

<sup>12</sup> <https://fas.org/sqp/crs/misc/R43580.pdf> (p.14); <https://www.aaas.org/blog/capitol-connection/what-exactly-obamas-100-million-brain-initiative>; <https://fas.org/sqp/crs/misc/R43944.pdf> (p.14); <https://fas.org/sqp/crs/misc/R44516.pdf> (p.11); <https://fas.org/sqp/crs/misc/R44888.pdf> (p.18);

<https://science.energy.gov/~media/ascr/ascac/pdf/meetings/201604/ASCAC-Cancer-Brain-Rick.pdf> (p.29)

<sup>13</sup> <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/34/>



れることが決まった。以下の図は、同法により NIH に割り当てられる各予算の配分を示しており、BRAIN イニシアティブに割り当てられる予算は、10 年間で 15 億ドル規模に達する見込みである。

図表 5: 21 世紀治癒法を基に今後 NIH に割り当てられる予算

Funding for NIH Innovative Research Initiatives under the Cures Act. <sup>14</sup>				
Fiscal Year	BRAIN	PMI	Cancer Moonshot	Regenerative Medicine
<i>millions of \$</i>				
2017	10	40	300	2
2018	86	100	300	10
2019	115	186	400	10
2020	140	149	195	8
2021	100	109	195	
2022	152	150	194	
2023	450	419	216	
2024	172	235		
2025	91	36		
2026	195	31		
10-Yr total	1,511	1,455	1,800	30

出典：米保健福祉省<sup>14</sup>

ただし実際の歳出額は、毎年の歳出法案の内容に依存し、またトランプ大統領は NIH や NSF の予算削減を掲げているため、今後も BRAIN イニシアティブに十分な予算が付与されるかは不透明な状況である<sup>15</sup>。実際に、トランプ政権下で最初に発表された 2018 年度大統領予算案では、BRAIN イニシアティブ関連予算への具体的な言及は無く、2018 年度予算の目安となっているのは、21 世紀治癒法で NIH への割り当てが決まっている 8,600 万ドルや、上院歳出委員会が労働省、保健福祉省、教育省の歳出法案で提案していた 4 億ドル（前年比 1 億 4,000 万ドル増）である。しかしながら、この歳出法案は委員会止まりとなり、成立はしていない<sup>16</sup>。また米科学振興協会 (AAAS) によれば、NSF の 2018 年度 BRAIN イニシアティブ予算も、NSF の全体的な予算縮小に伴い、2016 年度水準（7,200 万ドル）以下になる見通しである<sup>17</sup>。

加えて 2018 年 2 月末時点では、2018 年度の連邦政府予算は、前年度と同水準で予算を暫定的に拠出する継続予算決議 (continuing resolution) を繰り返し更新することによって賄われている状況であり、21 世紀治癒法などで定められている増額分以外では、大きな増額の見込みは無いと考えられる<sup>18</sup>。

<sup>14</sup> <https://www.hhs.gov/about/budget/fy2018/budget-in-brief/nih/index.html>

<sup>15</sup> <https://medium.com/neurotechx/the-brain-initiative-the-race-to-understand-the-human-brain-c2fddfea271e>

<sup>16</sup> <https://fas.org/sgp/crs/misc/R44888.pdf> (summary, p.18, p.20)

<http://www.sciencemag.org/news/2017/09/senate-spending-panel-approves-2-billion-raise-nih-2018>

<sup>17</sup> <https://www.aaas.org/news/energy-basic-science-some-space-programs-face-big-fy18-budget-cuts>

<sup>18</sup> <http://www.crfb.org/blogs/appropriations-watch-fy-2018>

### 3 研究開発動向

#### 3.1 BRAIN イニシアティブ関連事業

ここでは、BRAIN イニシアティブの枠組みで進められている、主要な関連研究開発プロジェクトの動向について紹介する。

##### 3.1.1 NIH による BICCN プロジェクト(脳情報データのアーカイブ構築と公開)

目的	脳データに関する大型のデータセットやテラバイト級アーカイブの構築、データの保管・解析ツールの開発と強化
時期	2017年10月～
主なパートナー	アレン研究所、コールド・スプリング・ハーバー研究所、ソーク研究所、南カリフォルニア大学、カリフォルニア大学サンフランシスコ校、マサチューセッツ工科大学(MIT)、カーネギーメロン大学、メリーランド大学ボルチモア校
予算	5年間で2億5,000万ドル
近年の主な成果	11件の研究プロジェクトに助成金配布を決定(2017年10月)
応用	解析したデータによって、神経疾患治療に従事する研究者や臨床医を支援

NIHは2017年10月、BRAIN イニシアティブ・細胞センサス・ネットワーク(BICCN: BRAIN Initiative Cell Census Network)と呼ばれるプロジェクトの立ち上げを発表した。このプロジェクトの目的は、マウス、ヒト、ヒト以外の霊長類の脳について、分子的、解剖学的、および機能的な観点から研究を実施し、関連データを収集・分析・共有するほか、研究施設や共同実験室、データ・アーカイブを構築・共有することである<sup>19</sup>。

このプロジェクトでは最終的に、テラバイト級のデータ・アーカイブが構築される予定であり、視覚化ツールやクラウド・コンピューティング等も活用された上で、加工前のデータ(raw data)と、研究によって新たに生まれたデータ(post-research data)の両方が配布される予定である。データへのアクセス権限は、脳データの種類によって決定される予定であり、マウスおよびヒト以外の霊長類の脳に関するデータは一般公開されるが、ヒトの脳データへのアクセスは、プライバシーに配慮し、権限を与えられた研究者にのみ限定される予定である<sup>20</sup>。

BICCNは既に、5つのグループに跨る11の研究プロジェクトに対し、年間5,000万ドルを5年間に亘り提供することを決めている(総額2億5,000万ドル)。これらの研究プロジェクトは、異なる種類の脳細胞に関する研究とデータの収集、およびそれによって生まれる大型データセットへの研究者のアクセスの確保、研究のためのビッグデータ・ツールの開発に取り組む予定である。BICCNによって収集されるデータの解析は、神経疾患治療に従事する研究者と、臨床医の業務に資することが期待されている<sup>21</sup>。

11プロジェクトのうち、アレン研究所は3件に従事する予定であり、これらのプロジェクトに付与される助成金の総額は5年間で約1億ドルに上る予定である。アレン研究所のほか、コールド・スプリング・ハーバー

<sup>19</sup> <https://www.healthdatamanagement.com/news/nih-brain-research-initiative-to-leverage-network-of-data-resources>

<sup>20</sup> <https://www.healthdatamanagement.com/news/nih-brain-research-initiative-to-leverage-network-of-data-resources>

<sup>21</sup> <https://www.healthdatamanagement.com/news/nih-brain-research-initiative-to-leverage-network-of-data-resources>

研究所、南カリフォルニア大学などは、研究者が視覚的に利用可能なマウス脳の 3D 地図を作成する事を目指しているが、地図作成にあたっては、アレン研究所が運営するマウス脳研究ツール「コモン・コーディネート・フレームワーク(CCF: Common Coordinate Framework)」がデータ標準として利用される。この地図が完成すれば、研究者は、個々の脳細胞の空間的な位置を確認し、脳細胞に関するデータにアクセスしたり、データを更新したりすることが可能になる。また BICCN では同様の地図をヒトと非ヒト霊長類向けにも構築する事を目指している<sup>22</sup>。BICCN を通しての助成金給付が決まった 11 のプロジェクトの概要は以下のとおりである。

---

<sup>22</sup> <https://www.healthdatamanagement.com/news/nih-brain-research-initiative-to-leverage-network-of-data-resources>

図表 6: BICCN が助成金を提供する 11 件のプロジェクト

グループ	担当組織	プロジェクト名	内容
脳細胞データ・センター (Brain Cell Data Center)	アレン研究所 (Allen Institute)	脳の単一細胞データのためのコミュニティ・リソース <sup>23</sup> (A Community Resource for Single Cell Data on the Brain)	哺乳類の脳の多様な細胞型と、その 3D 組織理論に対する理解を深めるための、基礎的データ・モデル、共通コミュニティ標準 (common community standard)、および科学的結果を開発・共有する。
マウス脳細胞センサス・センター (Mouse Brain Cell Census Center)	コールド・スプリング・ハーバー研究所 (Cold Spring Harbor Laboratory)	マウス脳細胞地図のための包括的センター <sup>24</sup> (A Comprehensive Center for Mouse Brain Cell Atlas)	マウス脳内の細胞多様性と構成の概要を示す、全脳細胞地図 (Whole Brain Cell Atlas) を構築する。地図構築に当たり、分子学や解剖学、画像、電算関連の技術を開発・統合する。この地図には、前脳投射神経細胞の包括的および詳細な解剖学的・分子的特性をまとめた、高解像度の前脳ニューロン地図 (Forebrain Neuronal Atlas) を統合すると共に、アレン研究所が有するマウス脳の研究ツールであるコモン・コーディネート・フレームワーク (CCF: Common Coordinate Framework) と互換性を持つようにする。
	アレン研究所 (Allen Institute)	マウスの包括的全脳細胞型地図 <sup>25</sup> (A Comprehensive Whole Brain Atlas of Cell Types in the Mouse)	脳内の正確な位置を示し、なお且つ細胞型についても分子的に定義された、マウスの全脳データベースを構築する。
	ソーク研究所 (Salk Institute for Biological Studies)	マウス脳地図のエピゲノミクス・センター <sup>26</sup> (Center for Epigenomics on the Mouse Brain Atlas)	脳を形成する多種多様な細胞の固有性・場所・コネクティビティの理解を深める研究を行う。実験用マウスをモデルとして利用する。
マウス脳細胞センサス共同研究室 (Mouse Brain Cell Census Collaboratory)	コールド・スプリング・ハーバー研究所 (Cold Spring Harbor Laboratory)	雌・雄マウス脳の細胞型解剖図作成のための共同研究室 <sup>27</sup> (Collaboratory for Atlasing Cell Type Anatomy in the Female and Male Mouse Brain)	雌・雄脳において分子的に定義された細胞クラス・細胞型の包括的・定量的地図作成する。この地図を作成するにあたり、標準化され、大部分が自動化されたプラットフォームを適用し、最終的に構築予定の統合細胞型脳地図 (Cell Type Brain Atlas) の構造的な基盤を整備する。
	南カリフォルニア大学	マウス脳の神経細胞型の解剖学的特性化 <sup>28</sup> (Anatomical Characterization of Neuronal Cell Types of the Mouse Brain)	マウスの辺縁系の神経細胞型の解剖学的特性化を行う。また、細胞型解剖学的データの 2D・3D 閲覧・解剖を可能にするため、ウェブ基盤視覚化プラットフォームを開発する。このプラットフォームは、アレン研究所の CCF と互換性を持つ様にする。

<sup>23</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9415946&icde=37463818](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9415946&icde=37463818)

<sup>24</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_details.cfm?aid=9415765&icde=37464359](https://projectreporter.nih.gov/project_info_details.cfm?aid=9415765&icde=37464359)

<sup>25</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_details.cfm?aid=9416010&icde=37464373](https://projectreporter.nih.gov/project_info_details.cfm?aid=9416010&icde=37464373)

<sup>26</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9416014&icde=37464312](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9416014&icde=37464312)

<sup>27</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_details.cfm?aid=9415873&icde=37464426](https://projectreporter.nih.gov/project_info_details.cfm?aid=9415873&icde=37464426)

<sup>28</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9416006&icde=37464570](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9416006&icde=37464570)

グループ	担当組織	プロジェクト名	内容
ヒトおよび非ヒト霊長類の脳細胞センサス共同研究室 (Human and Nonhuman Primate Brain Cell Census Collaboratory)	アレン研究所 (Allen Institute)	ヒトの脳細胞型・多面的地図 <sup>29</sup> (A Multimodal Atlas of Human Brain Cell Types)	コミュニティとの共有を目的とした、データ・リソースとしてのヒトの脳細胞型に関する包括的地図を作成する。細胞型を分類し、細胞型の機能を理解・予測するための神経モデリングを行い、更にはマウスとヒトの細胞型特性比較のためのツールを開発する。
	カリフォルニア大学サンフランシスコ校	発達中の脳の細胞解像度センサス <sup>30</sup> (A Cellular Resolution Census of the Developing Brain)	ヒトの脳発達の重要な段階に作られる特定の細胞型について研究を行い、同時にそれらの空間的・時間的マッピングを行う。また、発達中のヒトの脳を構成する要素を統合した高解像度地図を作成し、発達中の脳についての前例のない概観を提供する。
	MIT	マーモセット脳の分子・細胞地図 <sup>31</sup> (A Molecular and Cellular Atlas of the Marmoset Brain)	小型霊長類であるマーモセットを関連研究に利用するため、研究センターを構築する。このセンターにおいて、脳の機能と機能不全についての研究を行う。
生データ・アーカイブ (Archives of Raw Data)	カーネギーメロン大学	共焦点蛍光顕微鏡観察脳データ・アーカイブ <sup>32</sup> (A Confocal Fluorescence Microscopy Brain Data Archive)	研究者によるデータセット処理と、制限付きのデータセットの共有を可能にするため、全米規模の拡張可能な脳画像データ・アーカイブの構築を行う。このアーカイブには、データセットのデポジション、統合、再分配機能を備える。
	メリーランド大学ボルチモア校	神経科学マルチオミック・データ・アーカイブ <sup>33</sup> (The Neuroscience Multi-omic Data Archive)	BRAIN イニシアティブと関連脳研究を通じた、オミック・データを補完・配布するデータ・リポジトリである、神経科学マルチオミック・アーカイブ (NeMO Archive) を開発する。

<sup>29</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9414852&icde=37469568](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9414852&icde=37469568)

<sup>30</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9415877&icde=37469672](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9415877&icde=37469672)

<sup>31</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9415538&icde=37469704](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9415538&icde=37469704)

<sup>32</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9413855&icde=37469795](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9413855&icde=37469795)

<sup>33</sup> [https://projectreporter.nih.gov/project\\_info\\_description.cfm?aid=9413774&icde=37469973](https://projectreporter.nih.gov/project_info_description.cfm?aid=9413774&icde=37469973)

### 3.1.2 DARPA による Neuro-FAST プロジェクト(脳情報デコーディング)

目的	脳機能の可視化、デコーディング
時期	2014～2017 年(仮)
主なパートナー	スタンフォード大学、カリフォルニア工科大学
予算	3,000 万米ドル(2014～2017 年の 4 年間、仮) <sup>34</sup>
近年の主な成果	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CLARITY プロセス(生物組織の可視化手法)の確立(2014 年)</li> <li>• 光画像技術の開発(2017 年)</li> </ul>
応用	研究成果を、脳に損傷を負った米軍人等の脳機能の回復に資する

米国防総省傘下の研究機関である、国防高等研究計画局(DARPA)が運営している「神経機能、活動、構成、技術プロジェクト(Neuro-FAST: The Neuro Function, Activity, Structure, and Technology)」は、データ処理、数学的モデリング、新型のインターフェース等の複数のアプローチを通して、脳機能の可視化やデコーディングを目指している。このプロジェクトは、BRAIN イニシアティブの一環という位置づけで運用されており、DARPA はスタンフォード大学に助成金を付与し、研究の一部を委託している<sup>35</sup>。

過去数十年間に亘って神経科学者らは、脳機能の全貌を把握しようとしてきたものの、神経回路の詳細を解読するまでには至らなかった。今日においても、脳の細胞や神経回路、情報処理システム間の連動や作用に関する知識が限定されているため、脳機能についての理解は断片化されている。Neuro-Fast は、理解や知識が不足している脳機能の解明に迫ることに注力しており、最終的な目標の一つは、脳を損傷した米軍人等の脳機能回復に貢献する事である<sup>36</sup>。

Neuro-FAST は 2014 年、「CLARITY プロセス」と呼ばれる、生物組織を、組織と透明なヒドロゲルのハイブリット物質に化学的に変換する手法を確立した。この手法は、元々スタンフォード大学の研究チームが構想を練ったものであり、この手法を用いれば、完全な生物組織を透明な 3D 構造に変換して保存する事が可能となる。この手法を応用していけば、ゆくゆくは人間の脳全体の生物組織や細胞構造のより詳細な研究や分析が可能となると期待されている。この手法については、2014 年 6 月に DARPA が協力した BRAIN イニシアティブの取組の中では初めて、総合学術雑誌「Nature」にその手法やプロセスについてまとめられた論文<sup>37</sup>が掲載された<sup>38</sup>。

初期の CLARITY の手法では、組織の変換や可視化に係る時間が比較的遅く、小動物の脳の変換ではそれほど問題にはならないものの、ヒトの脳の組織の全てを可視化しようとした場合、約 80 年がかかると言われていた。しかしながら、Neuro-FAST の研究において、光シート顕微鏡(light-sheet microscopy)を用いる事により、この可視化プロセスの速度が大幅に改善され、ヒトの脳でも 220 日程度で可視化が可能となった。CLARITY は、今後も Neuro-FAST プロジェクトの主要な柱となっていくと見られ、CLARITY の精

<sup>34</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2014-06-19>

<sup>35</sup> <https://www.darpa.mil/program/neuro-function-activity-structure-and-technology>

<sup>36</sup> <https://www.darpa.mil/program/neuro-function-activity-structure-and-technology>

<sup>37</sup> <https://www.nature.com/articles/nprot.2014.123>

<sup>38</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2014-06-19>

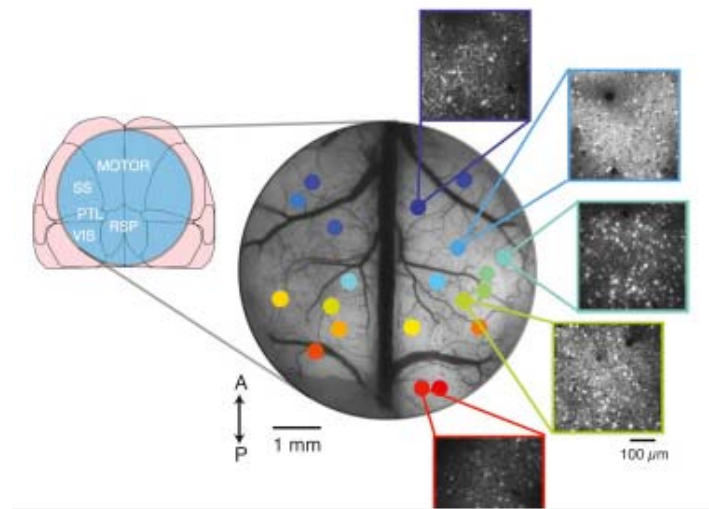


度は、遺伝学や光記録技術(optical recording technologies)、BCI等の周辺分野における技術革新によって更に改善される可能性もあるとして期待されている<sup>39</sup>。

また2017年5月には、スタンフォード大学がカリフォルニア工科大学と連携して、光画像技術を用いて、目覚めている状態のマウスの受動や意思決定を司る脳機能を可視化することに成功した。この実験については、神経科学雑誌「Neuron」にも掲載された<sup>40</sup>。この実験では、ある香りを嗅いだ場合には水を飲み、もう一つの香りを嗅いだ場合には水を飲むのを止める様に訓練されたトランスジェニックマウスが用いられた。マウスが香りによって水を飲む、飲まないの判断を行う場合、マウスの脳内では、香りという形態の情報が受動・判断されると共に、過去の記憶の中から、それぞれの香りに準じた行動を選別するという複雑な情報処理、意思決定が行われた<sup>41</sup>。

研究者らは、全皮質広視野カルシウム画像(whole-cortex widefield calcium imaging: ニューロンが機能した際に蛍光発光するように遺伝的に調整して撮影)と、2光子顕微鏡(皮脂の単一部分の分析に役立つ)を併用し、マウスの脳のほぼ全ての新皮質の活動を記録すると共に、個別の神経細胞や神経回路の様子を、十分な解像度で記録する事を可能にした。細胞単体の記録手法や、電極を用いた皮質横断的な記録手法を用いた従来の類似研究では、瞬間的には、哺乳類の脳の一部分の記録しか取れなかったが、この新しい手法により、より広範囲の瞬間的な記録を取ることが可能となった。この研究により、マウスが行った比較的単純な受動行動においても、新皮質に広く分布する神経回路や細胞が機能していることが判明した(以下の図参照)と共に、この様な行動においては前頭前皮質が主要な役割を担っているとする仮説も証明された<sup>42</sup>。

図表 7: 各皮質部位における細胞の機能状況の記録



出典: Neuron<sup>43</sup>

<sup>39</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2014-06-19>

<sup>40</sup> [www.cell.com/neuron/fulltext/S0896-6273\(17\)30343-4](http://www.cell.com/neuron/fulltext/S0896-6273(17)30343-4)

<sup>41</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2017-05-18>

<sup>42</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2017-05-18>

<sup>43</sup> [http://www.cell.com/neuron/fulltext/S0896-6273\(17\)30343-4](http://www.cell.com/neuron/fulltext/S0896-6273(17)30343-4)

一方で、この実験により新たな研究課題も生まれた。マウスの受動と意思決定の間に、皮質上の多くの細胞が機能したことが示されたが、具体的にどの細胞やニューロンがどのように機能したのかまでは不透明であった。そこで研究チームは、マウスの行動に機能したと思われるニューロンを異なる色の照明で色分けし、光遺伝子学や薬理学も適用した上で、複数回実験を行い、機能した細胞や脳の部分を突き止めることを試みた。最終的にこの実験により、研究者らはマウスの水を飲むという意思決定に作用した神経パターンを特定した。Neuro-FAST の研究チームは、次の段階の研究では、より多様な種類の行動や期待、感覚を伴った受動・意思決定における皮質上の神経系の機能や反応を分析するとしている<sup>44</sup>。

### 3.1.3 DARPA による革新的人工装具の開発(BCI 研究)

目的	利用者の思考を活用して義手を操作する、BCI の開発
時期	2006 年～
主なパートナー	ピッツバーグ大学、ジョンズ・ホプキンス大学(Johns Hopkins University)、DEKA 社
予算	DEKA とジョンズ・ホプキンスの研究予算 1 億 700 万ドル(2006 年～2013 年) <sup>45</sup>
近年の主な成果	<ul style="list-style-type: none"> <li>DEKA 社のロボットアームが FDA 承認を取得(2014 年)</li> <li>ピッツバーグ大学が、BCI を利用したロボットアームの実演実験についての研究論文を発表(2016 年)</li> </ul>
応用	上腕部分が不自由となった米軍関係者等の支援

「革新的人工装具 (Revolutionizing Prosthetics) プログラム」は、DARPA の生物技術局 (Biological Technologies Office) が 2006 年に始めたプログラムであり、前腕や手など、上肢部分が不自由となった米軍関係者等の治療・支援を目的とし、革新的な人工装具の開発を行っている。このプログラムは、BRAIN イニシアティブの一環と位置付けられており<sup>46</sup>、5 本指の手の複雑かつ幅広い動きを実現するために、義手利用者の残された筋肉から発信される神経信号の活用を試みている<sup>47</sup>。

このプログラムは元々、「ヒューマン補助神経デバイス (HAND: Human Assisted Neural Devices)」と呼ばれる、DARPA の過去のプログラムの成果に基づき立ち上げられた。HAND は 1990 年代に創設されたプログラムであり、義手の動きを制御する脳の運動野についての詳細なデータの収集に成功した<sup>48</sup>。HAND の研究結果を基に、現在実施されている革新的人工装具プログラムでは、義手利用者の思考を利用して義手を操作する脳操作人工装具の開発を目指している<sup>49</sup>。

このプログラム以外でも DARPA では、人口装具と無線通信が可能な BCI マイクロシステムの開発を目指すプログラム「ハンド固有受容・触覚インターフェース (HAPTIX: Hand Proprioception and Touch Interfaces)」などの BRAIN イニシアティブの関連プログラムを進めている。HAPTIX は、外部コンピュータに頼らず人工装具を制御する、完全埋め込み可能システムの開発を目指す補完的プログラムであり、ピッ

<sup>44</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2017-05-18>

<sup>45</sup> <http://www.jhuapl.edu/prosthetics/program/sponsor.asp>

<sup>46</sup> <https://www.darpa.mil/program/our-research/darpa-and-the-brain-initiative>

<sup>47</sup> <https://www.darpa.mil/program/revolutionizing-prosthetics>

<sup>48</sup> [https://opedge.com/Articles/ViewArticle/2007-11\\_01](https://opedge.com/Articles/ViewArticle/2007-11_01)

<sup>49</sup> [https://opedge.com/Articles/ViewArticle/2007-11\\_01](https://opedge.com/Articles/ViewArticle/2007-11_01)



ツバーク大学などの主要な参加機関は、革新的人工装具と HAPTIX の両プログラムから資金提供を受けている。<sup>50</sup>。革新的人工装具プログラムに参加している主な組織と、それぞれの組織の研究開発動向は以下のとおりである。

- **DEKA 社とジョンズホプキンス大学**…ニューハンプシャー州マンチェスターに拠点を置くモビリティ・ソリューション企業、DEKA Research and Development Corporation とジョンズ・ホプキンス大学は、「LUKE Arm」と呼ばれる人工装具を開発した。LUKE Arm では、脳信号を受信する神経を使用者の機能している筋肉群に埋め込み、それを利用して腕と、ロボット義手にかかっている圧力を使用者に伝えるフィードバック・システムを制御する。このシステムによって、従来の人工装具よりも、より正確かつ自然な義手の制御が可能となる<sup>51</sup>。

このプロジェクトにおいて、ジョンズ・ホプキンス大学の応用物理研究所 (Applied Physics Laboratory) は DEKA と協力し、プロジェクトのシステム・インテグレーターとして機能するとともに、臨床試験実施にあたり米食品医薬品局 (FDA: Food and Drug Administration) から要請される各種報告・申請書類と、FDA からの承認後に、製品を製造にあたり必須となる各種報告・申請書類を作成した。

DEKA とのその提携先は 2006 年に義手の開発に着手し、2014 年、義手の商業化と販売で FDA から承認を取得した。義手は当初「DEKA Arm」として知られていたが、その後、LUKE (Life Under Kinetic Evolution) Arm に名前を変え、2016 年に発売された。現在は DEKA がニューハンプシャー州マンチェスターに設立した Mobius Bionics が、LUKE Arm の製造と流通、販売を行っている。同社の製品は、使用者の神経システムを利用して繊細な動きを制御する、FDA 承認を取得した最初の先進的義手である<sup>52</sup>。

図表 8: DEKA 社が開発した Luke Arm



出典: Mobius Bionics<sup>53</sup>

---

<sup>50</sup> <http://www.upmc.com/media/NewsReleases/2015/Pages/improving-prosthetic-limb-function.aspx>

<sup>51</sup> <https://www.extremetech.com/extreme/182202-fda-approves-the-deka-arm-the-first-commercial-mind-controlled-prosthetic-arm>

<sup>52</sup> <https://newatlas.com/darpa-deka-luke-prosthetic-arm-mobius/44267/>

<sup>53</sup> <https://newatlas.com/darpa-deka-luke-prosthetic-arm-mobius/44267/>

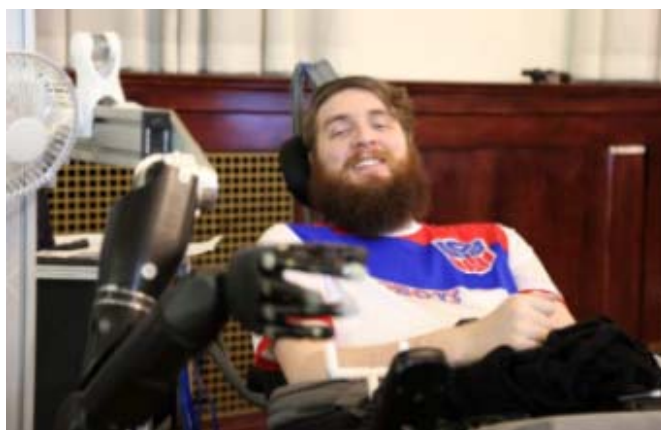
DEKA とジョンズ・ホプキンス大学は、2006～2008 年、2008～2010 年、そして 2010～2013 年の 3 フェーズに分けて、DARPA から合計 1 億 700 万ドルの資金を受領した<sup>54</sup>。

- **ピッツバーグ大学、Blackrock Microsystems 社、ジョンズ・ホプキンス大学…ピッツバーグ大学** およびピッツバーグ大学医療センター (University of Pittsburgh Medical Center) の研究者は、使用者の脳に埋め込んだ微小電極アレイを BCI として利用して、ロボットアームを動かす技術を開発した。この技術では、手の動きと感覚を制御するニューロンからの信号を、微小電極アレイによって受信し、ロボットアームを操作する。アレイは使用者の感覚野のニューロンを活性化するためにも利用され、腕からのフィードバックに基づき感覚を持たせることができる。ユタ州ソルトレイクシティ拠点の神経モニタリング・システム製造企業の Blackrock Microsystems がアレイとその制御システムを開発し、ジョンズ・ホプキンス大学の応用物理研究所がロボットアームを構築した<sup>55</sup>。

前述の DEKA のデバイスが埋め込み型神経を使い、BCI インプラントは使用しないのに対し、ピッツバーグ大学のデバイスは BCI によって制御される。BCI 利用に加え、ピッツバーグ大学のプロジェクトは、使用者の運動野と感覚野の両方と連動し、フィードバック・ループを完結させた点で画期的である。

2016 年 10 月、理学療法・リハビリテーション専門のロバート・ゴント助教授 (Robert Gaunt) 率いるピッツバーグ大学の研究班は、使用者の脳によって制御するロボットアームの実演に関する研究論文を発表した。このデバイスは、4 つの微小電極アレイによって感覚野を刺激することにより、人工装具が受けた感覚を複製している。使用者は、義手の指の感覚など、圧力やその強さを感知することはできるが、ロボットアームが触れた物体の温度は検出することはできない<sup>56</sup>。

図表 9: ピッツバーグ大学が開発した BIC で制御する義肢と義手



出典: ピッツバーグ大学<sup>57</sup>

---

<sup>54</sup> <http://www.jhuapl.edu/prosthetics/program/sponsor.asp>

<sup>55</sup> <http://www.neurosurgery.pitt.edu/news/paralyzed-man-regains-sense-touch>

<sup>56</sup> <http://www.neurosurgery.pitt.edu/news/paralyzed-man-regains-sense-touch>

<sup>57</sup> <http://www.neurosurgery.pitt.edu/news/paralyzed-man-regains-sense-touch>

ピッツバーグ大学は 2012 年にも、ロボットアーム制御のための高性能 BCI 開発に対し、NIH から 237 万ドルの研究資金を受け取っている。この研究は、神経科学理論と動物の脳のモデルを応用し、BCIを開発することに焦点を置いていた<sup>58</sup>。研究の結果、人工装具制御の重要なフィードバック・メカニズムとして、感触が重要であることが示唆された。この NIH 助成研究の成果は、それに続く DARPA 助成研究に貢献したとみられる。

### 3.1.4 IARPA による MICrONS プロジェクト(脳研究を基にした AI、マシンラーニングの改善)

目的	メソスケールでの脳機能の解析を基にした、マシンラーニング・アルゴリズムの改善
時期	2016 年~
主なパートナー	アレン研究所、ベイラー医科大学、ハーバード大学、プリンストン大学、カーネギーメロン大学
予算	5 年間で 1 億ドル
近年の主な成果	(情報見当たらず)
応用	米インテリジェンス機関が活用する AI 技術の機能向上

情報高等研究開発活動(IARPA: Intelligence Advanced Research Projects Activity)は、米国インテリジェンス・コミュニティのミッション遂行のため高リスク・高リターンの研究開発に資金を出す国家情報局長官室 (Office of the Director on National Intelligence) 内の一組織であり、国防総省傘下の研究機関である DARPA をモデルとして創設された。IARPA は 2014 年、脳の感覚情報(sensory information) 処理についてメソスケールで研究するプロジェクト「大脳皮質ネットワークに基づく機械知能(MICrONS: Machine Intelligence from Cortical Networks)」のための研究提案の募集を開始した。

これまでに解明されている脳機能のほとんどは、マイクロスケール(1 個、または数個程度のニューロン)やマクロスケール(百万個単位のニューロン)を単位としており、メソスケール(千個単位のニューロン)単位ではない。しかし、脳活動によって生産されるカルシウムイオンに反応して発光する蛍光タンパク質を利用する容積カルシウム画像検査(volumetric calcium imaging)など、最近の神経画像検査の進歩によって、脳のメソスケール研究の実施が可能となった<sup>59</sup>。

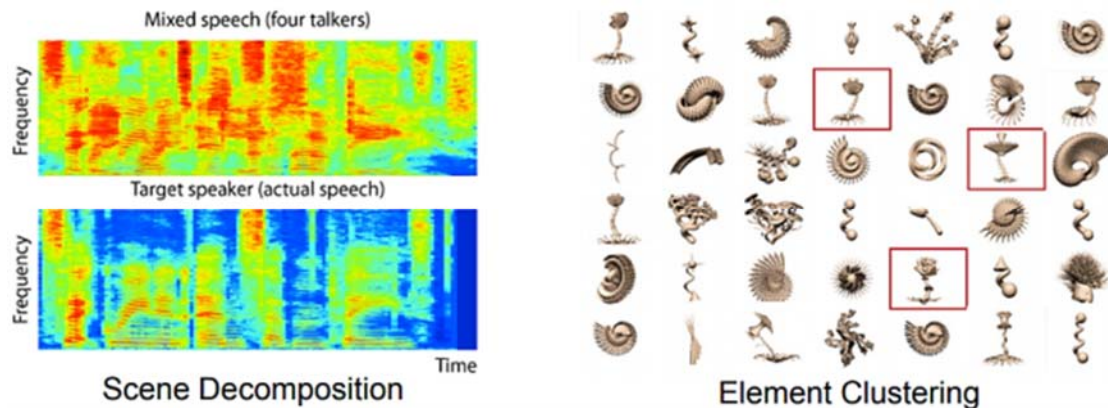
メソスケールでの脳機能の研究は、AI 技術やマシンラーニングの発展に大きく資するものと期待されている。MICrONS プロジェクトは、脳が感覚データ(sensory data)を数学的に抽象化し、学習、再現、転換する際に利用するアルゴリズムを解明し、最終的にマシンラーニング向けのアルゴリズムの開発に応用する事を目的としている<sup>60</sup>。以下の図の左側は、同時に話している 4 人の声の中から、聞き手が 1 人の話し手の声だけを識別する、シーン分解の様子を示している。また右図は、種類の違う花など、複数画像の中から似たような画像を特定する、要素クラスター化(element clustering)の様子を示している。これらの複雑な認識や一般化は、脳では実行可能だが、現在最先端を行くマシンラーニング・システムでは処理できない。

<sup>58</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3929226/>

<sup>59</sup> [https://www.iarpa.gov/images/files/programs/MICrONS/05-MICrONS\\_final.pdf](https://www.iarpa.gov/images/files/programs/MICrONS/05-MICrONS_final.pdf)

<sup>60</sup> <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/microns/microns-baa>

図表 10: 脳によるシーン分解と要素クラスター化



出典: IARPA<sup>61</sup>

MICrONS は研究期間を 5 年と定めており、以下の様な技術分野についての提案を公募した。これらの研究は、複数のフェーズに分けて実施され、それぞれのフェーズにおいて感覚情報処理のための神経アルゴリズムを解析し、それら成果に基づきマシンラーニング・アルゴリズムの開発を目指す。また、各フェーズで、マシンラーニング・アルゴリズム構築に必要な情報処理上の課題を特定し、次のフェーズでその研究を発展させる予定である<sup>62</sup>。さらに各研究グループは、研究期間中に解明する脳の構造と活動に関するデータベースを一般公開することが求められる<sup>63</sup>。

- 技術分野①…実験的なデザイン、理論的な神経科学、計算神経回路モデル、マシンラーニング、神経生理学データの収集、データ分析
- 技術分野②…神経解剖学データの収集
- 技術分野③…神経解剖学データを基にした皮質回路の再構築、神経生理学や神経解剖学データを基にした神経回路の再構築の保存、整備、アクセスに役立つ情報技術システムの開発

MICrONS プロジェクトは、IARPA が主導しており、IARPA はプログラムの目標設定、研究提案を募る一般調達通知書 (BAA: Broad Agency Announcement) の起草と発注、契約作業を手掛けたほか、現在は契約後の研究進捗を監視している。現在、以下 3 つの研究グループが MICrONS の枠組みで、それぞれ異なる手法を採用し、並走して研究を行っている。IARPA が米インテリジェンス機関の組織であることから、各研究の動向の詳細についての情報は限定されている<sup>64</sup>。

- **アレン研究所、ベイラー医科大学、プリンストン大学**…アレン研究所のカルシウム画像検査技術とベイラー医科大学の電子顕微鏡を使い、脳における神経活動を追跡する。その後、プリンストン大

<sup>61</sup> [https://www.iarpa.gov/images/files/programs/MICrONS/MICrONS\\_proposers\\_day.pdf](https://www.iarpa.gov/images/files/programs/MICrONS/MICrONS_proposers_day.pdf) (Slide 20)

<sup>62</sup> <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/microns>

<sup>63</sup> <https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2016/february/computers-learn-like-humans.html>

<sup>64</sup> <https://www.simonsfoundation.org/2017/09/11/using-artificial-intelligence-to-map-the-brains-wiring/>



学が独自のマシンラーニング・アルゴリズムを導入し、アレン研究所とベイラー医科大学が収集するデータに基づき脳機能を再現する予定である<sup>65</sup>。

- **ハーバード大学、MIT、米エネルギー省アルゴンヌ研究所**…顕微鏡を利用し、物体認識時のラットの脳の視覚野周辺の神経活動を検出することを目的としているほか、ラットが視覚情報をどのように処理しているかを解明する様々な実験を計画している。将来はエネルギー省アルゴンヌ研究所の粒子加速器を利用して視覚野の 3D 地図を作成し、それをハーバード大学と MIT において画像処理ソフトウェアで解析する予定である<sup>66</sup>。
- **カーネギーメロン大学、ハーバード大学ワイス研究所**<sup>67</sup>…カーネギーメロン大学において、カルシウム画像検査を利用し、視覚情報処理のための脳の神経活動を地図化する。カーネギーメロン大学が収集するデータを基に、ワイス研究所が脳構造データベースを作成する予定である<sup>68</sup>。

MICrONS プロジェクトは、従来の AI システムでは困難な、複雑な感覚処理タスクを実行する際の、メソスケールでの脳の活動と構造についてデータベースを構築・公開することにより、神経学的研究の進展に貢献することを目指している。IARPA は、これら研究成果を発表することにより、生物学を応用したマシンラーニング開発が促されるとしている。また MICrONS プロジェクトの成果は最終的に、米インテリジェンス機関が利用する AI 技術(感覚よりも、物体や個人の認識に注力)の機能向上に役立てられる可能性もある<sup>69</sup>。

### 3.1.5 FDA による BCI 関連機器の認可

目的	BCI 関連機器の販売認可を与える
時期	2014 年頃から活発化
主なパートナー	ヘルスケア・プロバイダ、医療機器製造業者、研究大学、NIH、DARPA <sup>70</sup>
予算	(情報見当たらず)
近年の主な成果	(情報見当たらず)
応用	BCI 関連機器の商用化

FDA は、食品・医薬品・医療機器の安全性を管轄する連邦政府機関である。医療機器は販売の前に FDA の承認審査を受ける必要があり、FDA は、それぞれの機器を約 1,700 種類に分類し、更にリスクの大きさに基づいて 3 クラスに分け、規制を定めている<sup>71</sup>。機器の製造元は、正式な承認申請を提出する前に、FDA に自社製品に対する評価や承認に関する助言を求める事ができ、FDA はこういった要請に対し、事前ガイダンスを発行する<sup>72</sup>。

<sup>65</sup> <https://www.simonsfoundation.org/2017/09/11/using-artificial-intelligence-to-map-the-brains-wiring/>

<sup>66</sup> <https://spectrum.ieee.org/biomedical/imaging/ai-designers-find-inspiration-in-rat-brains>

<sup>67</sup> ワイス研究所は、応用生物学的エンジニアリング (biologically inspired engineering) に特化するハーバード大学の研究所。

<sup>68</sup> <https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2016/february/computers-learn-like-humans.html>

<sup>69</sup> <https://spectrum.ieee.org/biomedical/imaging/ai-designers-find-inspiration-in-rat-brains>

<sup>70</sup> <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2560/13/2/023001>

<sup>71</sup> <https://www.fda.gov/MedicalDevices/DeviceRegulationandGuidance/Overview/ClassifyYourDevice/default.htm>

<sup>72</sup> <https://www.braininitiative.nih.gov/pdf/fda-508C.pdf>

BCI デバイスの審査と承認を担当するのは、FDA 医療機器・放射線保健センター (CDRH: Center for Devices and Radiological Health) の理学療法・神経療法機器局 (Physical Medicine and Neurotherapeutic Devices Branch) である。BCI 製造業者が研究段階で FDA の販売承認を取得したいと考えていることを、FDA は十分理解しており、BCI デバイスの承認審査方法、ならびに FDA として製造業者にどのようなガイダンスを提供すべきかについて検討を進めてきた<sup>73</sup>。

医療機器、特に BCI を製造する新興企業を適切に規制するため、FDA は 2014 年 11 月、メリーランド州ホワイトオークの FDA 本部でワークショップを開催した。ワークショップには、DARPA、NIH などの連邦研究機関や、ピッツバーグ大学などの大学、マサチューセッツ総合病院 (Massachusetts General Hospital) などのヘルスケア・プロバイダ、Medtronic などの医療技術ベンダーが参加した<sup>74</sup>。FDA はワークショップ参加者に対し、次の質問を投げかけた<sup>75</sup>。

- BCI 技術の重要なデザイン上の特性は何か。例えば、有用性や、運動機能・感覚フィードバック制御、複数プラットフォームとの互換性・モジュール性等を評価する、最適なアプローチは何か。
- BCI の持続可能性や、長期的な安全性と有効性を評価するにあたり、最適なアプローチは何か。例えば、埋め込み型アレイの長期的信頼性、埋め込み型アレイの構造的変化、そして信頼性のある非臨床 (非医学的) 試験のための共通プラットフォーム開発等を、どのように評価すべきか。
- 非臨床データによって、技術的ソリューションをどのように摸索することができるか。例えば、安全性、信頼性、機能を調べるための動物試験プラットフォームはどのように評価されるべきか。また、臨床試験の通常過程において、重要となる機能的な指標は何か。
- 共通のレギュラトリー・サイエンス (regulatory science、規制科学)<sup>76</sup>の目標追及において、連邦および非連邦政府機関が協力するにあたり、最も生産的なメカニズムは何か。

FDA は、BCI やインプラント機器の評価方法に関連し、3 つの観点からこれらの質問を行った。第 1 の観点は、機器が無菌かどうか、電気的安全性は確保されているかといった、機器の性能に関する非臨床面の観点である。第 2 の観点は、BCI デバイスによって生じる神経組織の損傷など、患者への医学的リスクに関する臨床面の観点である。第 3 の観点は、その他医療機器と統合され、異なる設定で導入される可能性のある機器に対する、モジュラー性を考慮した規制の観点である<sup>77</sup>。

ワークショップ参加者はこれら問題について議論し、FDA に以下の様な意見を提示した。

---

<sup>73</sup> <https://www.braininitiative.nih.gov/pdf/fda-508C.pdf> (Slide 7)

<sup>74</sup> <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2560/13/2/023001/pdf>

<sup>75</sup> <https://www.fda.gov/downloads/MedicalDevices/NewsEvents/WorkshopsConferences/UCM416692.pdf> (p.4-5)

<sup>76</sup> FDA が新しい機器や医薬品を規制するにあたって役立つ、ツールや標準、アプローチなどを開発するプロセスのこと。  
<https://www.fda.gov/ScienceResearch/SpecialTopics/RegulatoryScience/default.htm>

<sup>77</sup> <https://www.fda.gov/downloads/MedicalDevices/NewsEvents/WorkshopsConferences/UCM416692.pdf> (p.7-10)

### 臨床ユーザとメトリクス<sup>78</sup>

- **各機器の有用性とリスクを、客観的に判断しての評価**…インプラントと表面装着型の機器の違い、子どもと成人に対する影響の違いなど、機器の種類や患者の特徴に応じた、異なるリスク・プロファイルに基づく客観的リスク評価が必要である。
- **患者の意見を聞く必要性**…有用性とリスクについての患者の意見を、十分に考慮すべきである。
- **試験デザインと結果評価**…臨床試験では、患者が望む結果を基に評価を行うべきである。ただし、患者が望む結果は、デバイス製造業者が特定した結果とは異なる可能性があるため、注意が必要である。

### 非臨床デバイス試験<sup>79</sup>

- **ベンチ試験**…デバイスの機能、およびデバイス寿命などの物理的特性の検査、機械的・電氣的試験が必要不可欠となる。利害関係者は、デバイスの寿命、修理と交換に要する許容可能な時間について、基準を定めるべきである。
- **動物試験**…動物試験によって、そのデバイスを臨床試験に進める前に、安全性と信頼性について有益な情報を得ることができる。利害関係者は、どの種類の動物を、どういった数量で使用し、何を測定するかについて決定する必要がある。使用する動物モデルの種類は、BCI デバイスの種類と、何を測定するかによって決まる。例えば、人間と比べた脳の大きさや動き方の点で、齧歯動物は BCI インプラントの試験には適さないかもしれない。
- **コンピュータ・モデリング**…コンピュータ・モデリングは、BCI デバイスのリスク査定のために使用されてきた。またコンピュータ・モデリングは、適切な動物モデルが利用できない場合、動物試験の代替となり得るもので、負担が最も小さい種類の非臨床試験と言えるかもしれない。

### 規制について<sup>80</sup>

- **デバイスのモジュラー性**…FDA は従来、複数の機器が一つの包括的システムを構築していたとしても、個々の機器を基準として評価してきた。しかし BCI の場合、義肢やインプラントなどの複数の機器が統合されて一つのシステムとなっている場合がある。FDA が複数の機器が統合されたシステム全体を評価できれば、開発コスト削減や市場投入までの時間短縮につながる可能性がある。また、小企業の市場参入を促進し、市場競争を活性化する可能性もある。
- **標準化**…業界標準を設定すれば、デバイスのモジュラー性に関連する課題を解消できる可能性がある。しかし、開発の極端に早い段階での標準導入は、イノベーションを抑制しかねない。また、BCI の標準化を誰が主導するかも不透明である。

---

<sup>78</sup> <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2560/13/2/023001/pdf> (p.7-9)

<sup>79</sup> <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2560/13/2/023001/pdf> (p.9-10)

<sup>80</sup> <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2560/13/2/023001/pdf> (p.10-12)

このワークショップ開催以降、FDAがBCI関連機器向けの新たな大規模なガイダンスを発表したという情報は確認されていない。しかし、FDAのBCI規制は、医療機器に搭載されるすべてのソフトウェアとハードウェアに適用される予定であり、デバイスが治療や病状管理のためではなく、健康な人体に対する使用を意図したものである場合には、その機器に対する評価は格段に厳しくなると予想される。後述するKernel、NeuralinkといったBCI新興企業が、健康な人体の脳機能の増強ではなく、神経疾患治療を目的としているのも、FDAの承認を取り易くする狙いがあるものと見られる。

## 3.2 民間企業

### 3.2.1 Neuralink

目的	neural lace や neural dust 等の BCI 技術の開発・実用化
時期	2016 年 7 月～
主なパートナー	PayPal の共同創設者のピーター・ティール氏 (Peter Thiel) するなど
予算	少なくとも 2,700 万ドル (最大 1 億ドルとも言われる)
近年の主な成果	非公開の 12 社より、2,700 万ドルを調達 (2017 年 8 月)
応用	会話や筆記に頼らずに思考を共有できる脳-脳間通信の実現、脳の認知力と記憶力の向上など

Tesla や SpaceX の創業者と知られるイーロン・マスク氏 (Elon Musk) は 2016 年 7 月、Neuralink Corp. をカリフォルニア州で創設した。同社は、「neural lace」と呼ばれる技術を開発予定で、この技術では、小型の脳電極を脳に埋め込み、思考のアップロードとダウンロードを実現する。マスク氏によれば、この技術は、脳内に AI のレイヤーを埋め込むイメージで、これにより、ヒトの脳の認知力を強化することができるほか、てんかんや重度の「うつ」等の治療が困難な脳機能障害の治療にも効果があると言われている<sup>81</sup>。

同社は、マスク氏のほか、PayPal を共同創設したピーター・ティール氏 (Peter Thiel) が運営するベンチャーキャピタルからも投資を受ける予定で、すでに複数名の研究者を雇用している<sup>82</sup>。また同社は 2017 年 8 月のシリーズ A 資金調達で、非公開の 12 社から 2,700 万ドルを調達したと発表した。同社が資金調達について米証券取引所に提出した書類によると、Neuralink は最大 1 億ドルを調達できた可能性がある。同社は現在の資金レベルに満足しており、現時点で追加の調達は検討していない<sup>83</sup>。

neural lace は Neuralink が研究中の BCI 技術で、頭蓋骨の内側に針を使って網目ネットを注入する。注入された網目ネットが広がり、大脳皮質を覆う。この網目ネットは、神経活動を測定する電極で覆われている<sup>84</sup>。この技術は、エネルギー省傘下のローレンス・リバモア国立研究所 (Lawrence Livermore National Laboratory) で神経技術責任者 (Neurotechnologies Lead) を務めていた、バネッサ・トロサ博士 (Dr. Vanessa Tolosa: 柔軟性を有した電極を開発した)、ボストン大学 (Boston University) の元生物学准教

<sup>81</sup> <https://www.wsj.com/articles/elon-musk-launches-neuralink-to-connect-brains-with-computers-1490642652>

<sup>82</sup> <https://www.wsj.com/articles/elon-musk-launches-neuralink-to-connect-brains-with-computers-1490642652>

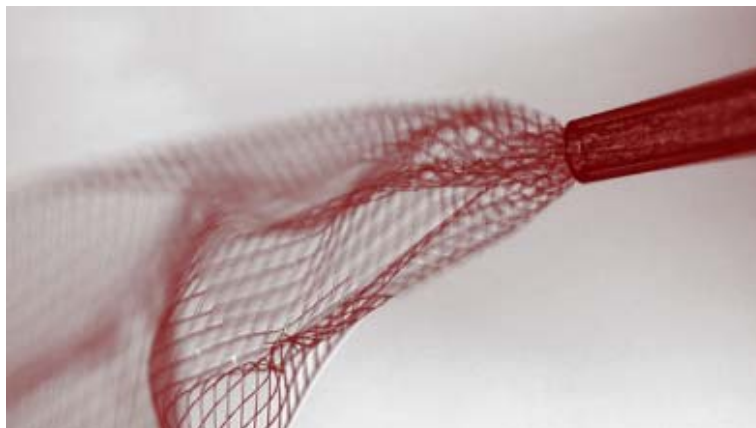
<sup>83</sup> <https://techcrunch.com/2017/08/25/elon-musks-brain-interface-startup-neuralink-files-27m-fundraise/>

<sup>84</sup> <http://www.techradar.com/news/neuralink>



授のティモシー・ガードナー博士(Dr. Timothy Gardner: 動物の神経活動を測定、刺激する BCI を開発した)などの Neuralink 研究員によって開発が進められている<sup>85</sup>。

図表 11: Neuralink 社が開発中の neural lace



出典: TechRadar<sup>86</sup>

Neuralink が開発中のもう一つの BCI 技術は、「neural dust」である。この技術は、Neuralink 共同創業者である DJ セオ博士(Dr. DJ Seo)の博士論文研究に基づいている。neural dust は、頭蓋骨の内部と外部にそれぞれ設置する通信機によって実現される予定であり、頭蓋骨の内側に設置する無線通信機を通しては、微細ノードに通信と電力を供給する。また頭蓋骨表面に設置する別の無線通信機によって、メモリー、処理能力、外部ネットワーキングを提供する。下図は、neural dust の概念図を示している<sup>87</sup>。

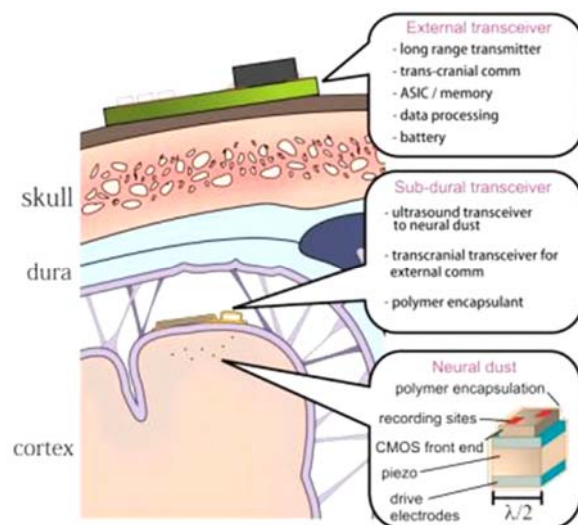
---

<sup>85</sup> <https://thenextweb.com/insider/2017/03/28/elon-musks-new-company-wants-to-merge-humans-and-machines-via-brain-implants/>

<sup>86</sup> <http://www.techradar.com/news/neuralink>

<sup>87</sup> <http://www.techradar.com/news/neuralink>

図表 12: Neuralink 社が開発中の neural dust



出典: TechRadar<sup>88</sup>

Neuralink が疾患治療目的の BCI 利用で FDA 承認を得ることができれば、その製品の安全性と信頼性が認められ、治療以外のアプリケーションにも、その利用を拡大する道が開ける可能性がある<sup>89</sup>。疾患治療に続く潜在的アプリケーションとしては、キーボードやスクリーンといった従来の入力デバイス利用の場合よりも、より高速な相互作用を実現する BCI 技術、会話や筆記に頼らずアイデアを共有できる脳-脳間通信 (brain-to-brain communications)、脳の認知力と記憶力の向上などが挙げられる<sup>90</sup>。Neuralink の創設者のマスク氏は、AI が人間の能機能をいずれ追い抜くことを懸念しており、BCI 技術の開発を通してヒトの脳の機能向上を行う必要があるとの見解を示している。これが同社の研究動機の一つとなっている<sup>91</sup>。

### 3.2.2 Facebook

目的	(インプラントを必要としない)人間の思考を文章化する BCI 技術や、皮膚を通して音を聞く技術等の開発
時期	2016 年 4 月~
主なパートナー	カリフォルニア大学サンフランシスコ校、カリフォルニア大学バークレー校、ジョンズ・ホプキンス大学、ワシントン大学等
予算	(情報確認できず)
近年の主な成果	(情報確認できず)
応用	子どもや、他目的インプラントを装着している患者向けの BCI 技術の実現

Facebook は 2017 年 4 月、同社の 60 名のエンジニアが BCI 技術の開発を行っていると発表した。同社が開発中のインターフェースは、光神経画像システム (optical neuroimaging systems)、もしくは光断層撮

<sup>88</sup> <http://www.techradar.com/news/neuralink>

<sup>89</sup> <http://www.techradar.com/news/neuralink>

<sup>90</sup> <https://techcrunch.com/2017/08/25/elon-musks-brain-interface-startup-neuralink-files-27m-fundraise/>; Digital <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/neuralink-elon-musk/>

<sup>91</sup> <http://www.techradar.com/news/neuralink>

影技術(optical tomography)を利用して、機器を体内にインプラントする事なく、人々が脳内で考えていることを文章化するという技術である。この開発を当初指揮していたのは、レジナ・デューガン氏(Regina Dugan)で、同氏は Facebook の研究開発部門の一つである Building 8 の統括も行って<sup>92</sup>。

Facebook がデューガン氏を雇用したのは 2016 年 4 月のことであり、Building 8 が研究を本格化させたのは 2016 年 10 月のことである。デューガン氏は以前は Google の先端技術・製品部門(Advanced Technology and Product Division)に在籍しており、DARPA の局長を務めたこともある。デューガン氏の雇用を通して、Facebook は Building8 を DAPRA スタイルの研究開発拠点とすることを目指し、この研究所では、最先端の研究に積極果敢に取り組む一方、時間厳守の研究が求められ、大学や民間企業との重度のパートナーシップも重要とされた<sup>93</sup>。

Building 8 は、カリフォルニア大学サンフランシスコ校とバークレー校、ジョンズホプキンス大学、ワシントン大学等と連携して研究を進めている。最終的にこの研究グループは、機器を体内にインプラントせずとも、利用者が文字にすることを望んだ思考を文字にすることを目的としており、そのスピードは一分間に 100 文字程度になると言われている。これは音声から文字をうち起こすよりも 5 倍速い速度であり、また音声を発さずに文字入力が可能であるため、利用者のプライバシーを守り易いという利点もある<sup>94</sup>。

Building 8 の技術についての情報は限定されているものの、ワシントン大学が開発してきた光脳スキャナー(optical brain scanner)と呼ばれる光断層撮影技術と類似している可能性がある。このスキャナーの利用者は、頭部に多数のセンサーを装着し、これらのセンサーは神経活動が活発となった脳の部分を、血流量を基に検知する(以下の図参照)。このスキャナーは、MRI で撮影するのとほぼ同様の画像を撮影可能と言われており、MRI の様に磁場で他の電子機器の機能を阻害する事もないため、子どもや、すでに他目的のインプラント(ペースメーカーや人工内耳など)を有している患者への利用に向いているとされる<sup>95</sup>。

---

<sup>92</sup> <https://techcrunch.com/2017/04/19/facebook-brain-interface/>

<https://gizmodo.com/here-are-the-first-hints-of-how-facebook-plans-to-read-1818624773>

<sup>93</sup> <http://www.businessinsider.com/facebooks-building-8-working-on-brain-computer-communication-platform-2017-1>

<sup>94</sup> <https://techcrunch.com/2017/04/19/facebook-brain-interface/>

<https://qz.com/1087435/facebooks-play-on-the-digital-assistant-market-may-hinge-on-telepathy/>

<sup>95</sup> <https://gizmodo.com/here-are-the-first-hints-of-how-facebook-plans-to-read-1818624773>

<https://source.wustl.edu/2014/05/optical-brain-scanner-goes-where-other-brain-scanners-cant/>

図表 13: ワシントン大学の光脳スキャナー利用の様子



出典: ワシントン大学<sup>96</sup>

また 2017 年 4 月時点で Building 8 は、皮膚を通して人間が音を聞くことができる様な技術の開発を進めている。この研究では、人間の皮膚に、聴力を司る内耳の蝸牛と同等の能力を持たせ、脳に音を伝える事を目的としている。このため Facebook は、皮膚に 16 の周波数に対応したアクチュエータ・システムを取り付け、9 つの単語を聞き取れるような実験を行っている<sup>97</sup>。

このほか Building 8 は、2 年間に亘って先端的な BCI 技術開発に従事することが可能なエンジニアを募集しており、エンコーディングやデコーディングを含むマシンラーニングの応用や、神経画像 (neuroimaging) データや電気生理学 (electrophysiological data) データの応用についての研究を行うことができる人材を探している。また、神経画像エンジニアの募集も行っており、このポジションでは、光や周波数、超音波等を用いた非侵襲性の神経画像技術の開発に焦点があてられる<sup>98</sup>。

しかしながら 2017 年 10 月、デューガン氏は 2018 年前半を目途に、Building 8 の統括職を辞する意思を発表した。具体的な理由は明らかにされていないものの、米メディアは、デューガン氏と Facebook の間で、今後の研究方針に対する意見の対立があったのではないかと推測している<sup>99</sup>。Facebook は 2017 年 9 月、Building 8 やその他の消費者向けハードウェアの開発を行う事業の統括者として、アンドリュー・ボスウォース氏 (Andrew Bosworth) を任命している。同氏は Facebook の古株の幹部の一人であり、それまでは広告・ビジネスプラットフォーム担当の副社長を務めていた<sup>100</sup>。この人事変更により、今後同社の BCI 開発の方針に変化が生まれる可能性がある。

---

<sup>96</sup> <https://source.wustl.edu/2014/05/optical-brain-scanner-goes-where-other-brain-scanners-cant/>

<sup>97</sup> <https://techcrunch.com/2017/04/19/facebook-brain-interface/>

<sup>98</sup> <https://techcrunch.com/2017/04/19/facebook-brain-interface/>

<sup>99</sup> <https://mashable.com/2017/10/17/facebook-regina-dugan-leaving/#3pNZEPT5OPqd>

<https://techcrunch.com/2017/10/17/facebook-consumer-hardware-chief-regina-dugan-is-leaving-the-company/>

<sup>100</sup> <https://techcrunch.com/2017/08/23/facebook-andrew-bosworth-is-taking-over-the-companys-consumer-hardware-efforts/>

### 3.2.3 Kernel

目的	(ニューロンからの電気刺激を測定可能な、)脳の神経活動を活性化させるプラットフォームの開発
時期	2016年～
主なパートナー	(情報見当たらず)
予算	1億ドル
近年の主な成果	新興企業 Kendall Research Systems (KRS) の買収と、研究目的の転換(2017年2月)
応用	アルツハイマー病やパーキンソン病等の神経変性疾患の治療

米 Kernel 社は、カリフォルニア州ロサンゼルスを拠点に活躍する起業家のブライアン・ジョンソン氏 (Bryan Johnson) によって 2016 年に創設された、ヒューマン・インテリジェンス (Human Intelligence: HI) 関連技術やソリューションの開発・販売を手掛けるスタートアップ企業である。ジョンソン氏は、2007 年に創設したモバイル、ウェブ支払いシステム開発企業の Braintree を PayPal に 2013 年に 8 億ドルで売却し、その資金のうちの 1 億ドルを活用して、Kernel のビジネスを開始した<sup>101</sup>。ジョンソン氏は、マシンラーニングの進歩が、神経科学研究や低侵襲インターフェースに役立つ超小型電子技術 (マイクロエレクトロニクス) の開発、BCI による神経疾患治療に大いに資すると考え、投資に踏みきった<sup>102</sup>。

Kernel は当初、脳の海馬にチップを埋め込むことで、脳の記憶力を改善することを目指し、それに役立つインプラント技術「memory implants」を開発していた。この技術は、南カリフォルニア大学のバイオ医療工学教授で、Kernel の初代技術責任者に就任したセオドア・バーガー博士 (Dr. Theodore Berger) の研究に基づいており、アルツハイマー等の患者の脳だけでなく、健康な脳の記憶力強化も対象とされた。バーガー博士氏は、マウスやサルの記憶をコンピュータ・チップに記録し、それを脳の海馬に埋め込む実験などを行っていたが、Kernel は後にこの技術の開発や商用化は、技術上、倫理上、規制上などの理由から非常に困難と判断し、プロジェクトを凍結した。これを受け、バーガー博士は 2017 年初めに同社を去った<sup>103</sup>。

その後 Kernel は、記憶力の強化から、うつ病やアルツハイマー病などの神経疾患治療を目的とした低侵襲の確立にビジネスの目標を定め直した。2017 年 2 月、同社はマサチューセッツ州ケンブリッジを拠点とする新興企業 Kendall Research Systems (KRS) を非公開金額で買収した。これは、KRS をバーガー博士の後任とし、脳から情報を収集するための新しい低侵襲の手法を研究するためである。KRS は、MIT 合成神経生物学グループ (Synthetic Neurobiology Group) のスピンオフとして、エド・ボイデン博士 (Dr. Ed Boyden) によって 2011 年に設立された。ボイデン博士は、他の神経科学的研究と共に、ニューロンを光で活性化するアプローチのパイオニアとして知られる<sup>104</sup>。

KRS の買収後、Kernel は、ニューロンからの電気刺激を測定可能な、神経活動を活性化させるプラットフォームの開発に取り組んでおり、プラットフォームと脳を相互させるために、表面に電極を装着した針状のプロ

<sup>101</sup> <https://www.wired.com/story/why-you-will-one-day-have-a-chip-in-your-brain/>  
<https://www.technologyreview.com/s/603771/the-entrepreneur-with-the-100-million-plan-to-link-brains-to-computers/>

<sup>102</sup> [https://medium.com/@bryan\\_johnson/kernels-quest-to-enhance-human-intelligence-7da5e16fa16c](https://medium.com/@bryan_johnson/kernels-quest-to-enhance-human-intelligence-7da5e16fa16c)

<sup>103</sup> <https://www.technologyreview.com/s/603771/the-entrepreneur-with-the-100-million-plan-to-link-brains-to-computers/>

<sup>104</sup> [https://medium.com/@bryan\\_johnson/kernel-acquires-krs-to-build-next-generation-neural-interfaces-d5dd60662b6c](https://medium.com/@bryan_johnson/kernel-acquires-krs-to-build-next-generation-neural-interfaces-d5dd60662b6c)



ープを用いたり、脳の血管に通した光ファイバーを用いる方法等を検討中である<sup>105</sup>。Kernel は、将来は脳と相互作用させる非侵襲的方法を模索したい考えだが、現在は様々な脳インプラントも検討視野に入れている。ほかにも Kernel は、脳から収集したデータを超高速処理するシステムの開発も手掛けている<sup>106</sup>。

Kernel は、自社のビジョンを実現するためには、官民組織から 10 億ドルの資金を調達する必要があるとみており、(Kernel は製品をまだ何も発表していないが)一つの製品を開発するには、市場投入までに 2 億ドルの資金と、7～10 年という期間を要する可能性があるとしている。商業化に成功すれば、製品あたり数十億ドルという市場価値を生むことも想定している<sup>107</sup>。ジョンソン氏は現在初期の開発に注力し、外部資本を調達していないが、将来のある時点でベンチャーキャピタル投資を受け入れる可能性がある<sup>108</sup>。

Kernel の研究の重要な目標は、脳と相互作用させる低侵襲の手法を開発することであり、これは埋め込み型の手法と比べると、FDA 等の規制当局からの承認を得やすいと考えられる。Kernel は、同社が開発したインターフェースの詳細を明らかにしていないが、KRS の買収や、KRS の創設者であるボイデン博士を上級科学顧問に任命したことにより、同博士の専門である光技術の研究を中心に行っている可能性が示唆される。

---

<sup>105</sup> <https://www.technologyreview.com/s/603771/the-entrepreneur-with-the-100-million-plan-to-link-brains-to-computers/>

<sup>106</sup> <https://www.theverge.com/2017/2/22/14631122/kernel-neuroscience-bryan-johnson-human-intelligence-ai-startup>

<sup>107</sup> [https://medium.com/@bryan\\_johnson/kernels-quest-to-enhance-human-intelligence-7da5e16fa16c](https://medium.com/@bryan_johnson/kernels-quest-to-enhance-human-intelligence-7da5e16fa16c)

<sup>108</sup> <https://www.theverge.com/2017/2/22/14631122/kernel-neuroscience-bryan-johnson-human-intelligence-ai-startup>