



ニューロテクノロジーと人類の未来

金井良太 (アラヤ)



ムーンショット開始時のビジョン



現在の人類の課題

人類は脳と身体という生物的ハードの制約から、
ぜんぜん自由になっていない。

→ **機械との融合によるホモデウス化が必要**



「人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会」が実現される

生物的制約は、人間の制約の大部分を占める

生物的制約

- (時間・空間) 身体的移動や操作機能の**時空間的スケールの限定**
- (身体) 老化や疾病による**身体機能の低下**や不全
- (身体・空間) 放射能、熱、圧力、酸素の有無、ウィルス感染などに対する**身体の脆弱性**
- (脳・時間) 脳という計算速度、学習速度ともに**遅いハードウェア**
- (脳) 進化的に形成された情動や報酬系の**制御不能性**
- (脳) 知的能力などの非デジタル性による**機能拡張の難しさ**



これらを「**脳と機械の融合**」により解決する

産業革命は、基幹となる学術分野とともに起きてきた

これまでの歴史

第一次産業革命

機械化の時代

蒸気機関・機械・鉄道・
交通
熱力学

18-19世紀

第二次産業革命

大量生産の時代

電気・石油・下水道など
電磁気学

19世紀後半

第三次産業革命

自動化の時代

原子力・コンピュータ
インターネット・スマホ
量子力学・情報理論

20世紀（21世紀初頭）

第四次産業革命

情報化の時代

ソフトウェア・AI・バイオ・
量子コンピュータ
人工知能など

21世紀-現代

これからの歴史

第五次産業革命

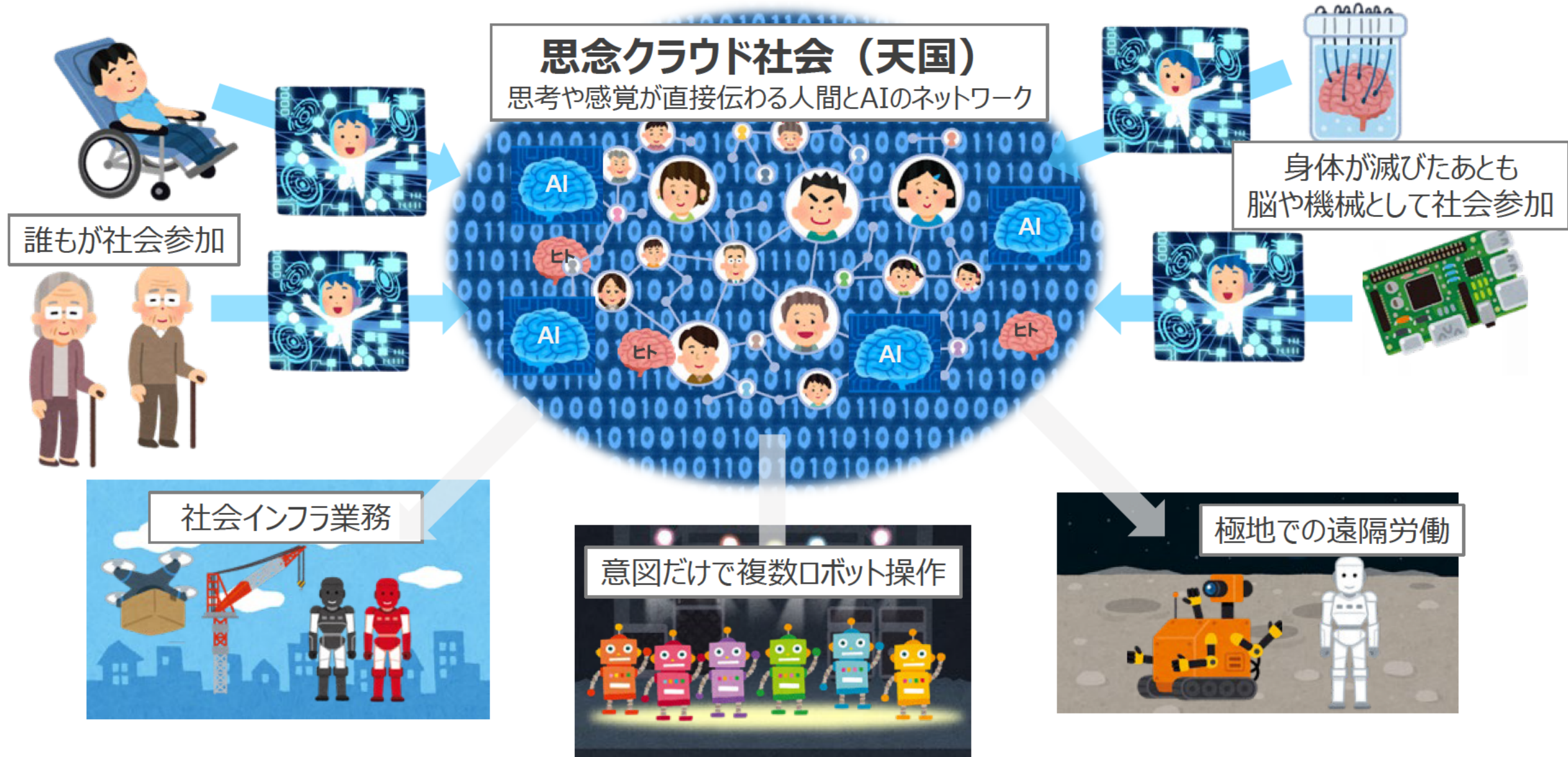
電脳化の時代

BMI・身体拡張・電脳化・人工意識・思念クラウド
神経科学・情報の物理学

2020年~2050年

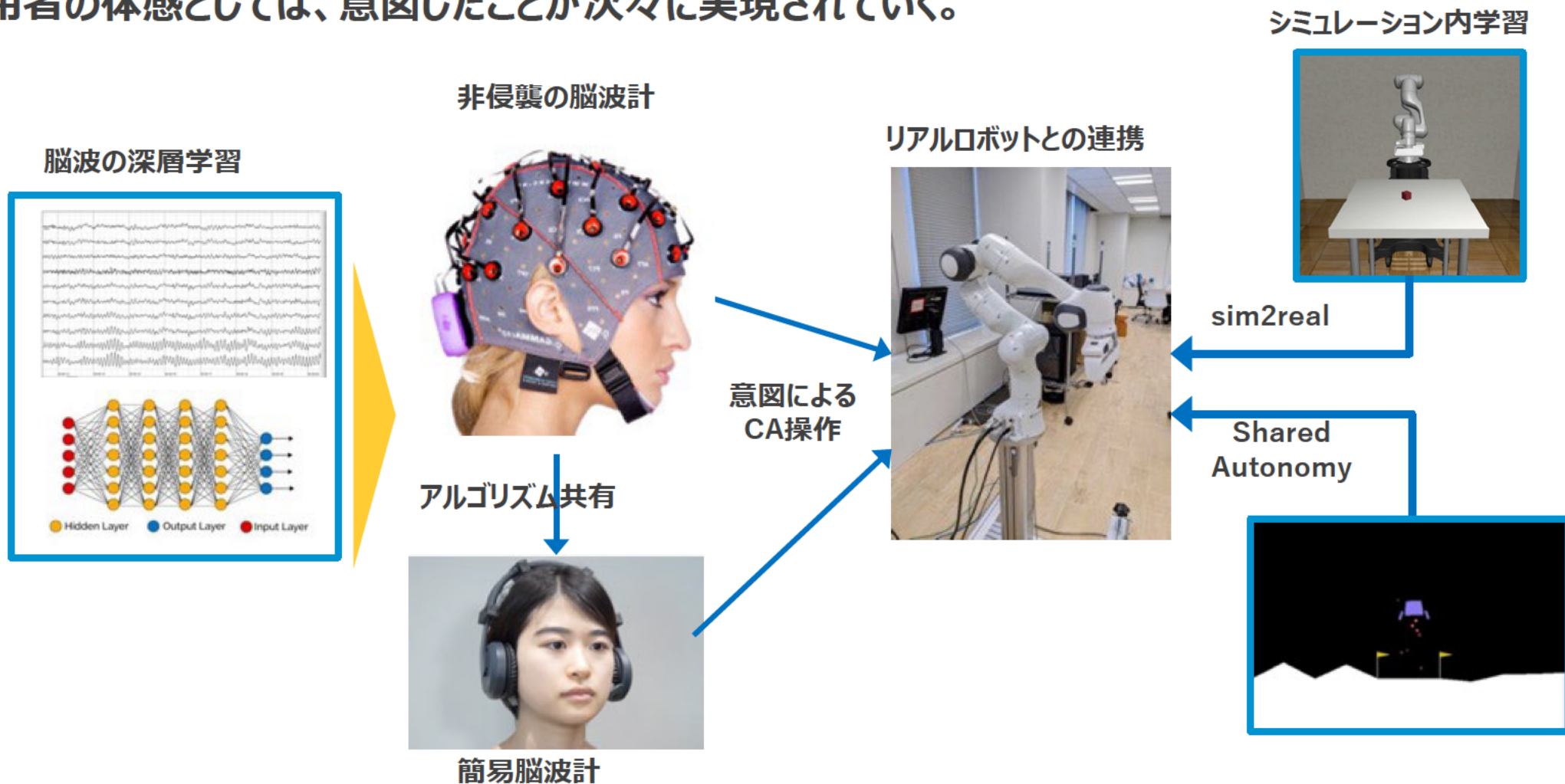
- この世界を切り開く産業を興す。
- 関連した学問を発展させる。

2050年、脳とAIを直接つないだ思念クラウド社会から 遠隔ロボットを介して物理世界に降臨するホモデウスと化す。



ムーンショットの初期的アプローチ：AI支援型BMI

- 脳波から次のアクションの意図を読み出し、智能化されたロボットとシェアード・オートノミーを用いて実現する。
- 利用者の体感としては、意図したことが次々に実現されていく。



非侵襲の進展



非侵襲BMIにおいて2つの潮流がゲームチェンジを引き起こしている

1. 脳波におけるスケーリング則

脳波から解読できる情報が限定的であると考えられていたが、大量に集めてAIに学習させると、これまで不可能と思われていたことも実現できる兆しがある。

2. ユースケースの探索

ユースケースが広く探索されるようになり、いくつか有望な領域が見え始めている。

- リハビリ領域（牛場教授のLIFESCAPES社）
- ゲーム領域（アラヤでのBMIゲームの体験）

AIにおけるスケールング則とは



LLMs kept improving with more data, more compute, more parameters.

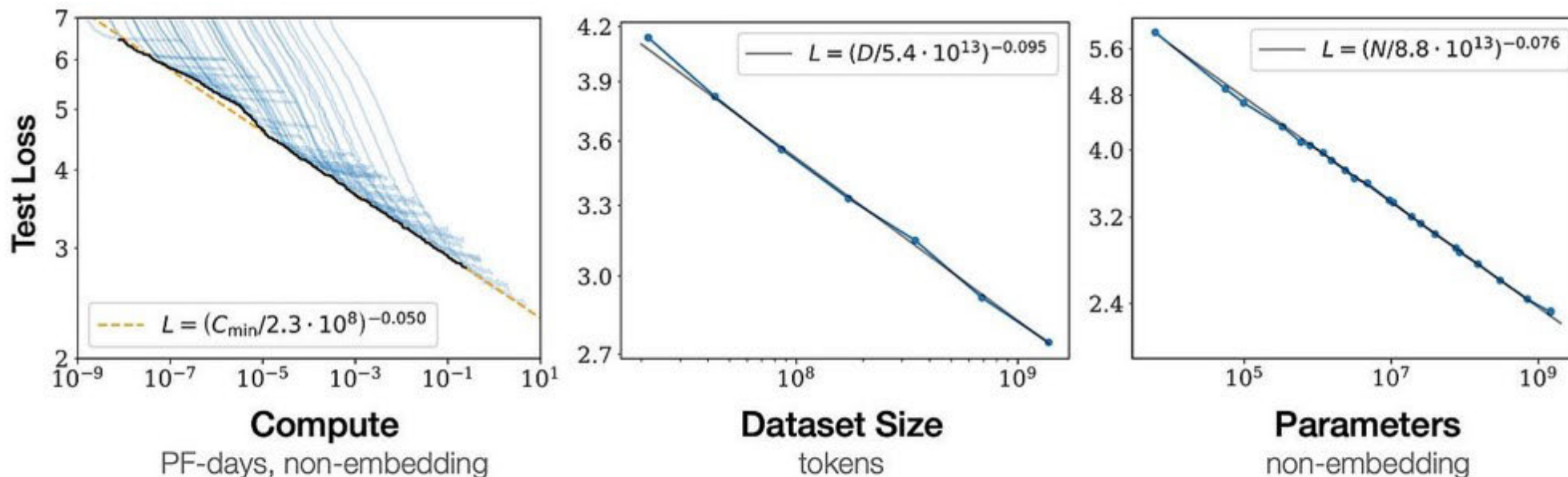


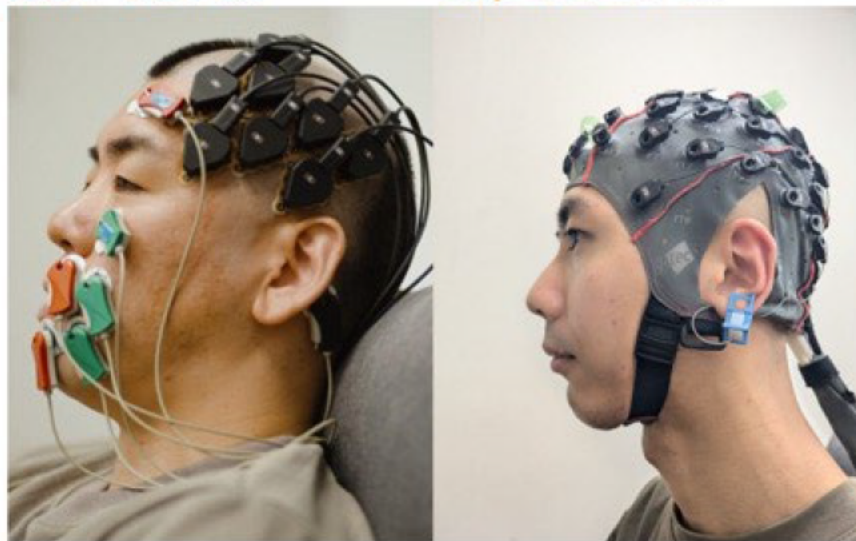
Figure 1 Language modeling performance improves smoothly as we increase the model size, dataset size, and amount of compute² used for training. For optimal performance all three factors must be scaled up in tandem. Empirical performance has a power-law relationship with each individual factor when not bottlenecked by the other two.

脳波におけるスケーリング則

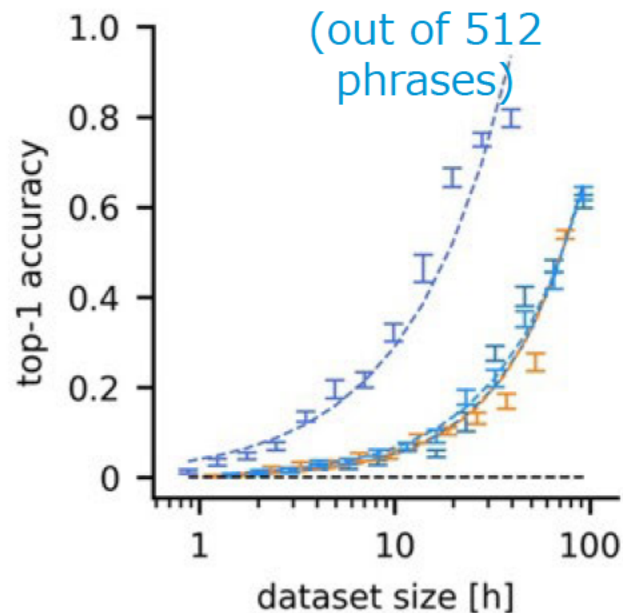


発話解読において我々がデータスケーリング則を発見した

ultra high density (UHD)
128 / 1024 ch cap 62 / 62 ch



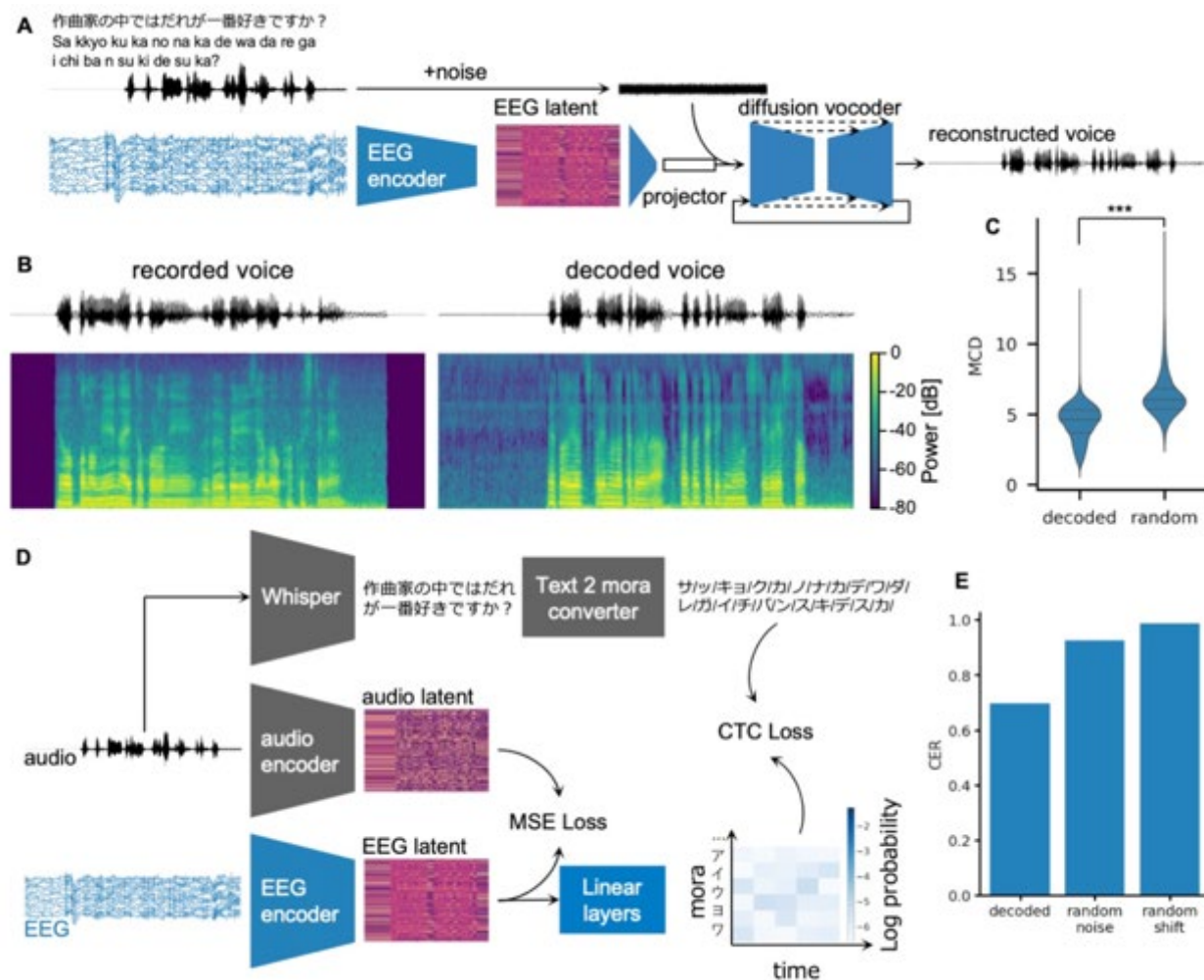
79.8%



脳波におケールスケーリング則

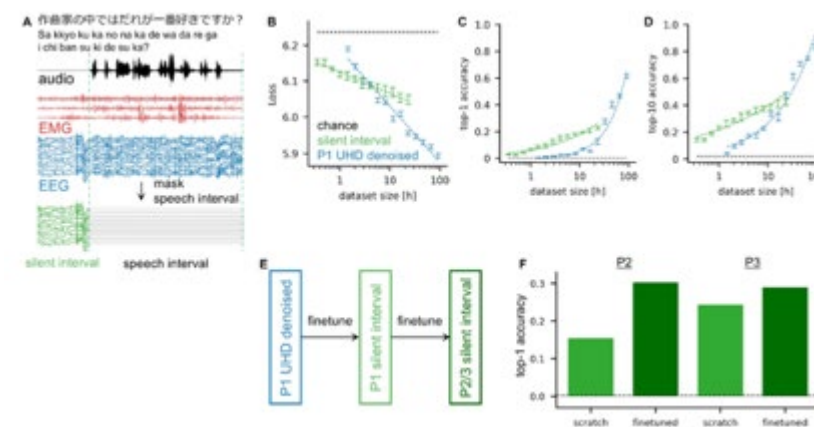


We discovered scaling law of EEG in speech decoding.

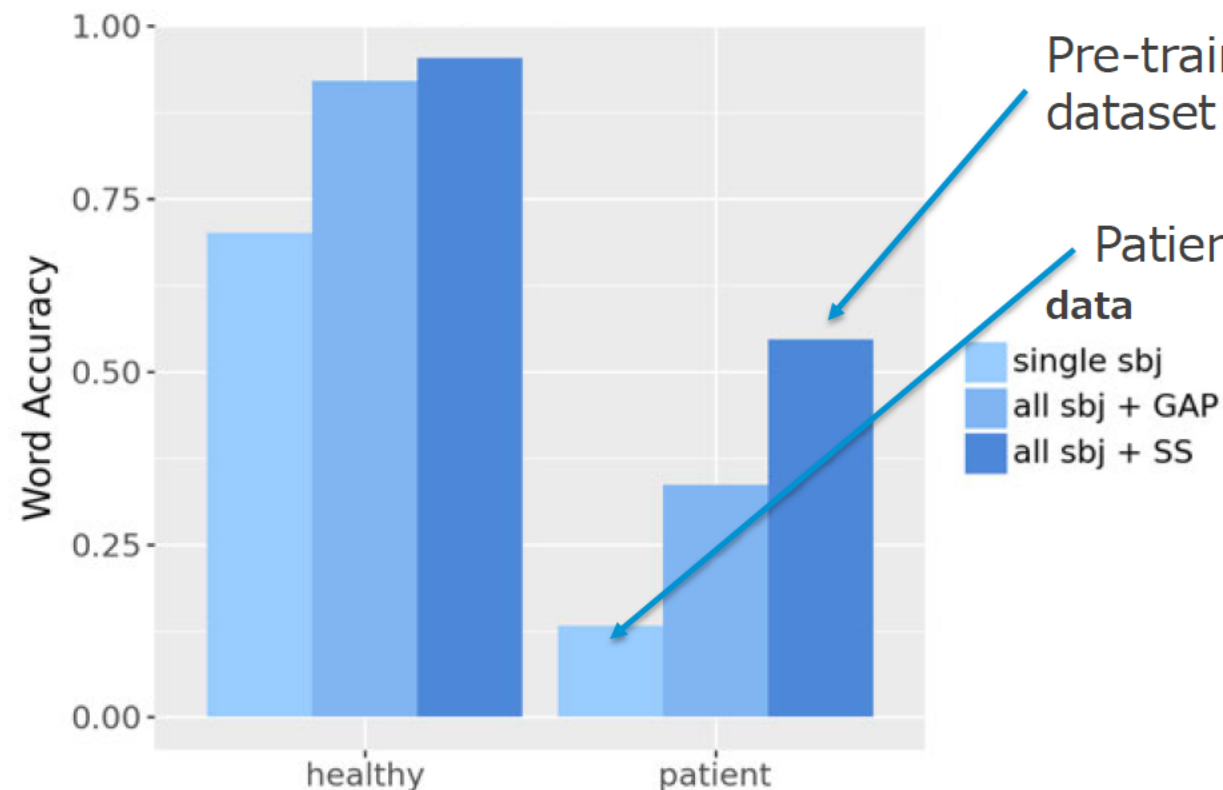


F Decoded speech from audio (Whisper and MeCab) vs Decoded speech from EEG

Best samples	ボクワタメイキオツクル (bo ku wa ta me i ki o tu ku ru)	ボクワタメイキオツク (bo ku wa ta me i ki o tu ku)
	ワタクシガサッキノデキゴトオハナストカノジョワラッテ (wa ta ku si ga sakk ki no de ki go to o ha na su to ka no jo wa wa ratt te)	ワタクシサッキオモデキゴトダソストカノジョワラッテ (wa ta ku si sakk ki o mo de ki go to da so su to ka no jo wa wa ratt te)
	センセーフカオスクメテ (se n se - wa ka ta o su ku me te)	センワカオスクメテ (se n wa ka ta o su me te)
	キミガノソコムコレワナンノコヤダ (ki mi ga no zo ki ko mu ko re wa na n no ko ya da)	キムカナタンニカコロトニトデワナトオツメルサ (ki mu ka na ta n ni ka ko ro to - ni to - de wa na to o tu me ru sa)
	ハナシテルアイダニドッカニ (ha na si te ru a i da ni dokk ka ni)	タマモヤマリワナクシニアアタノワイカロ (ta ma mo ya ma ri wa na ku si ni a a ta no wa i ka ro)
	アメノミナモトヌシノカミ (a me no mi na mo to nu si no ka mi)	アメノタガアルマーブニメミセンガホツオカビ (a me no ta ga a ru ma - bu ni me mi se n ga ho tu o ka bi)
Worst samples		



患者の発話を実現する



Pre-training on a large healthy-subject dataset: **54.5%**

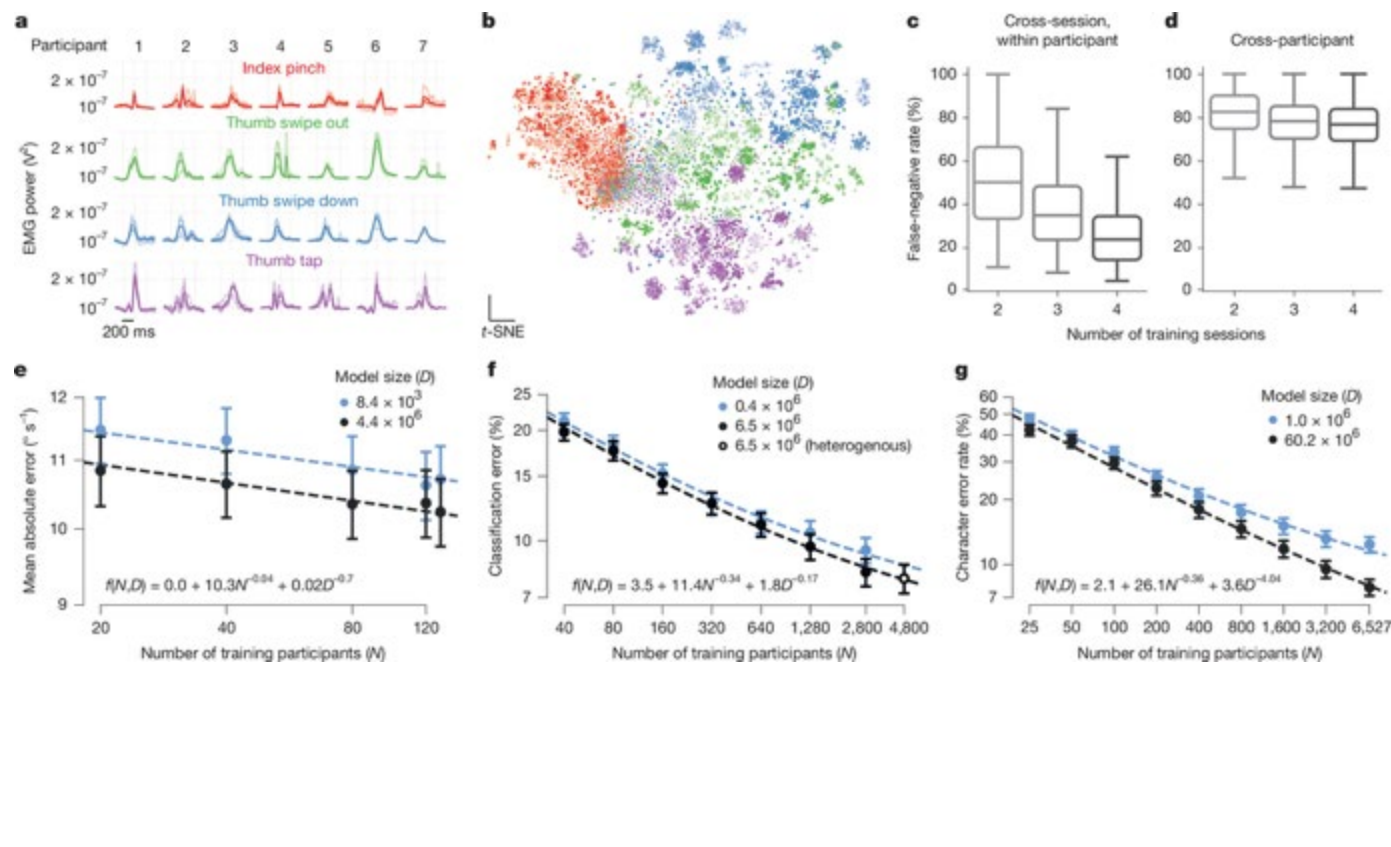
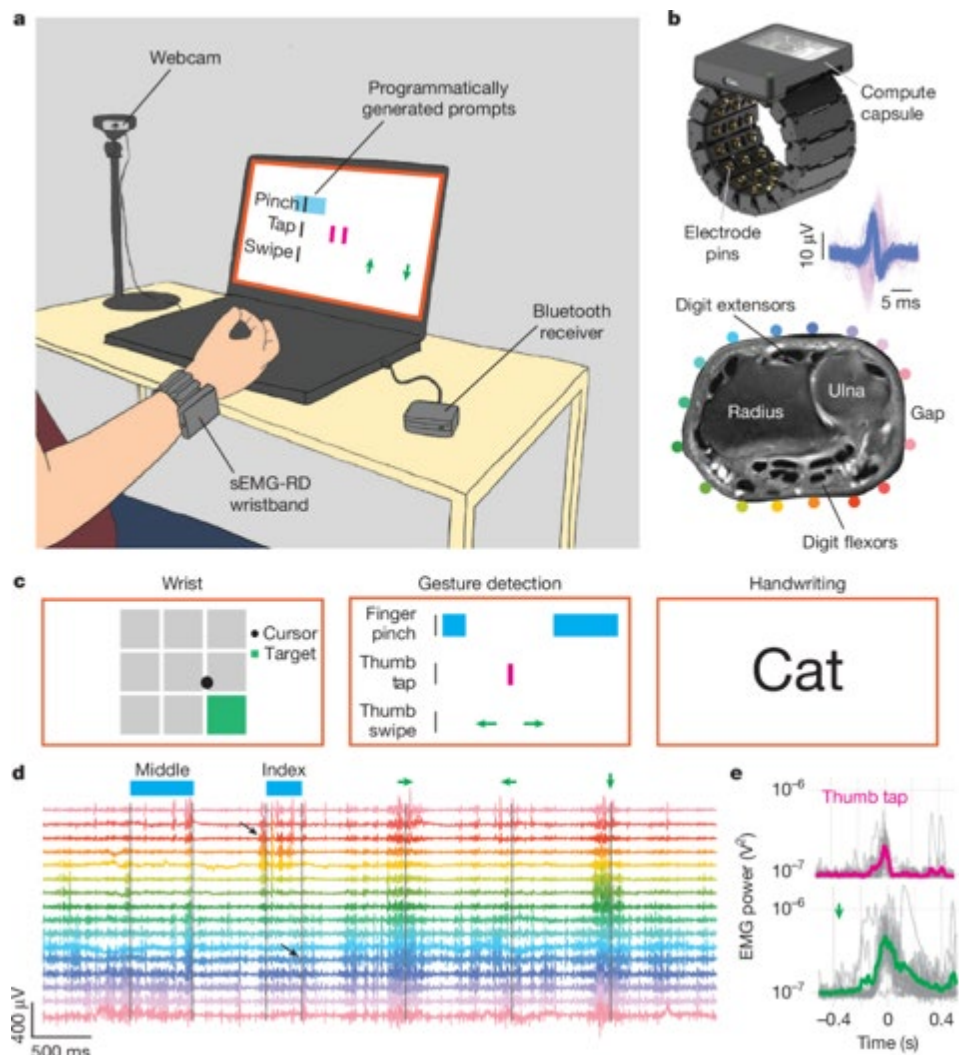
Patient's data only: **13.2%**

Pre-training on 300 h of healthy-subject data lifts a fully locked-in patient's word accuracy from 13.2 % to 54.5 %



<https://moov.ooo/article/645a1b0692174f167ab055b4>

筋電のスケーリング則



Classification of hand-written characters keeps improving with more data.

画像と脳活動のスケーリング則



Scaling laws for decoding images from brain activity

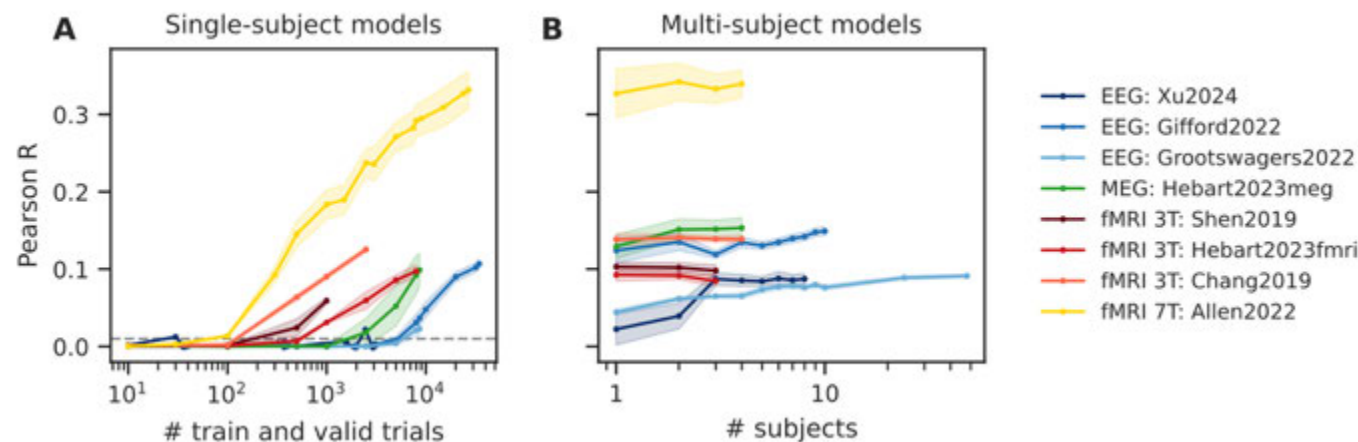
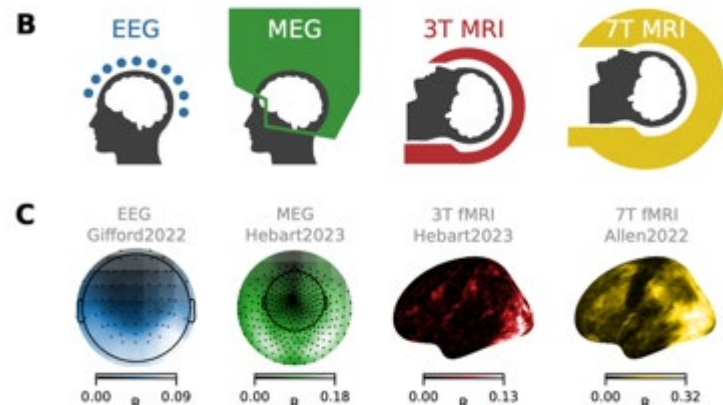
Hubert Banville^{1,*}, Yann Bénétrix^{1,*}, Stéphane d'Ascoli¹, Jérémy Rapin¹, Jean-Rémi King¹

¹Meta AI
*Equal contribution.

Generative AI has recently propelled the decoding of images from brain activity. How do these approaches scale with the amount and type of neural recordings? Here, we systematically compare image decoding from four types of non-invasive devices: electroencephalography (EEG), magnetoencephalography (MEG), high-field functional Magnetic Resonance Imaging (3T fMRI) and ultra-high field (7T) fMRI. For this, we evaluate decoding models on the largest benchmark to date, encompassing 8 public datasets, 84 volunteers, 498 hours of brain recording and 2.3 million brain responses to natural images. Unlike previous work, we focus on single-trial decoding performance to simulate real-time settings. This systematic comparison reveals three main findings. First, the most precise neuroimaging devices tend to yield the best decoding performances, when the size of the training sets are similar. However, the gain enabled by deep learning – in comparison to linear models – is obtained with the noisiest devices. Second, we do not observe any plateau of decoding performance as the amount of training data increases. Rather, decoding performance scales log-linearly with the amount of brain recording. Third, this scaling law primarily depends on the amount of data per subject. However, little decoding gain is observed by increasing the number of subjects. Overall, these findings delineate the path most suitable to scale the decoding of images from non-invasive brain recordings.

Date: January 29, 2025

Correspondence: (hubert)j.b., (ybenetr)ix., (sdasc)oli., (jrapin), (jeanremi)king@meta.com



Scaling laws in various modalities of non-invasive brain measurements.

Ethics of Neurotechnology



Building Trust

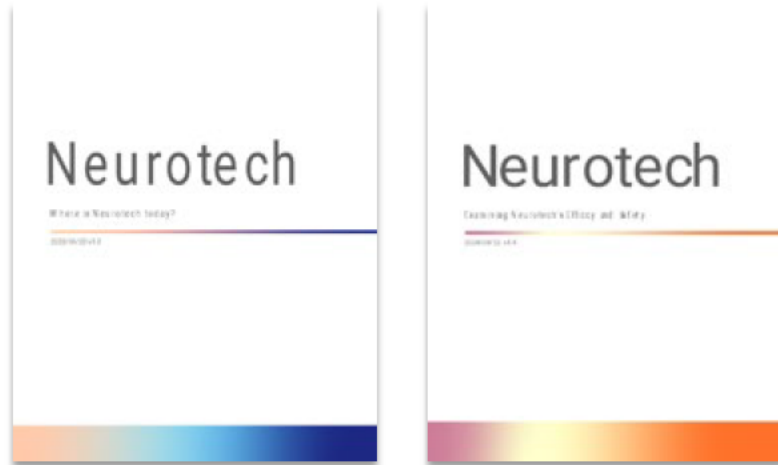
We are developing guidelines for users and developers of emerging neurotechnology.

PIs: Dr. Takemi (Keio) & Dr. Kanai (Araya)

Contribution to UNESCO's Recommendation

Our outcomes are featured by OECD and we actively participate in drafting UNESCO's Recommendation. (Kanai, Vice Chair).

It was adopted by Member States in May 2025.

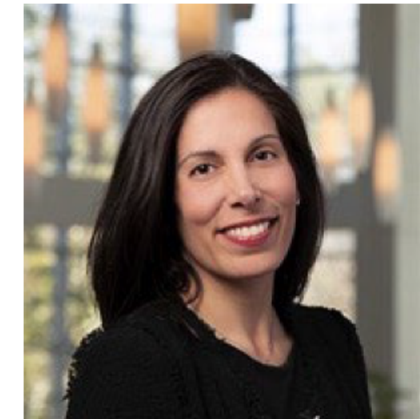


Neurotech Guidebook & Evidence book

Co-Chair



Hervé Chneiweiss
(INSERM, France)



Nita Farahany
(Duke, USA)

<https://www.unesco.org/en/ethics-neurotech/expert-group>

<https://trustedneurotechnology.org/>

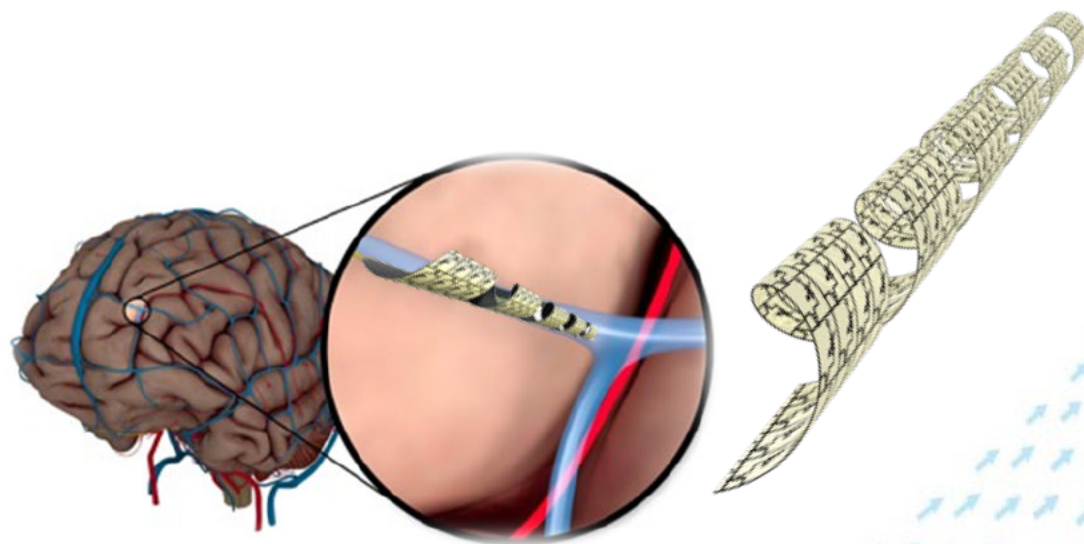
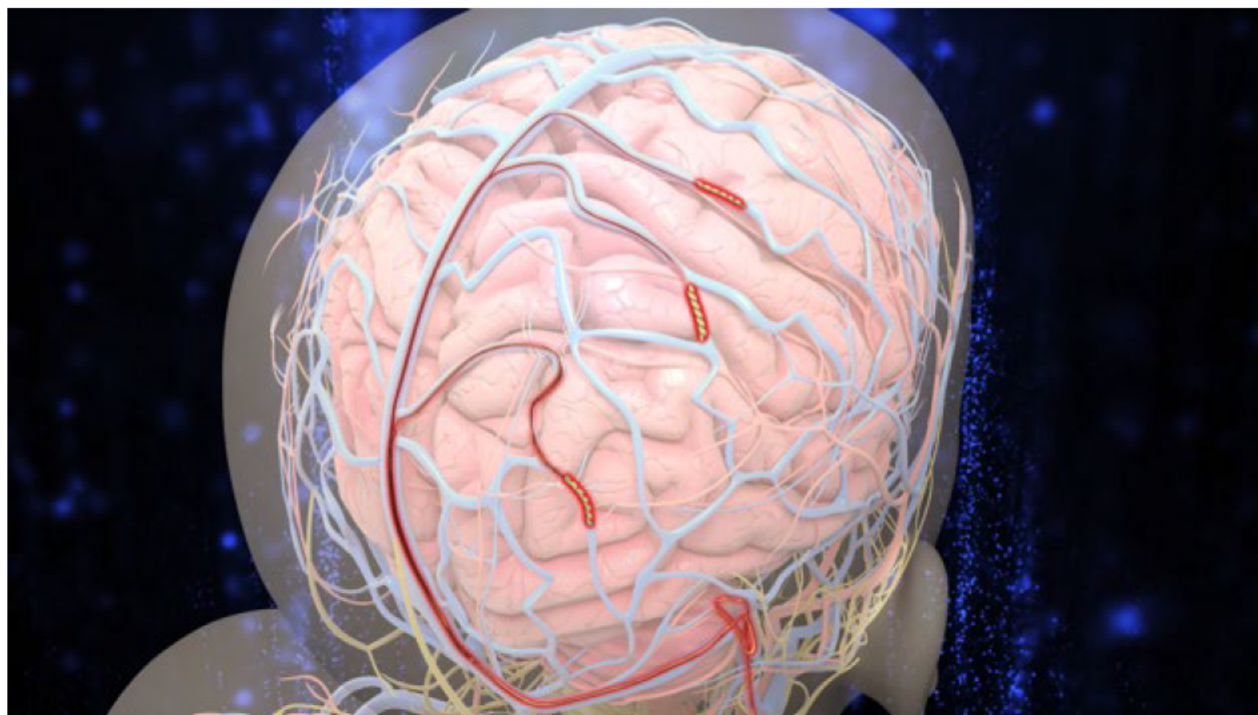
極低侵襲BMI



血管内から素材技術を活かした新しい脳活動計測技術を開発

BMIに対する新しいアプローチを開発しており、皮質静脈を通じて脳にアプローチしている。このアプローチは低侵襲であり、BMIに革命をもたらす可能性がある。

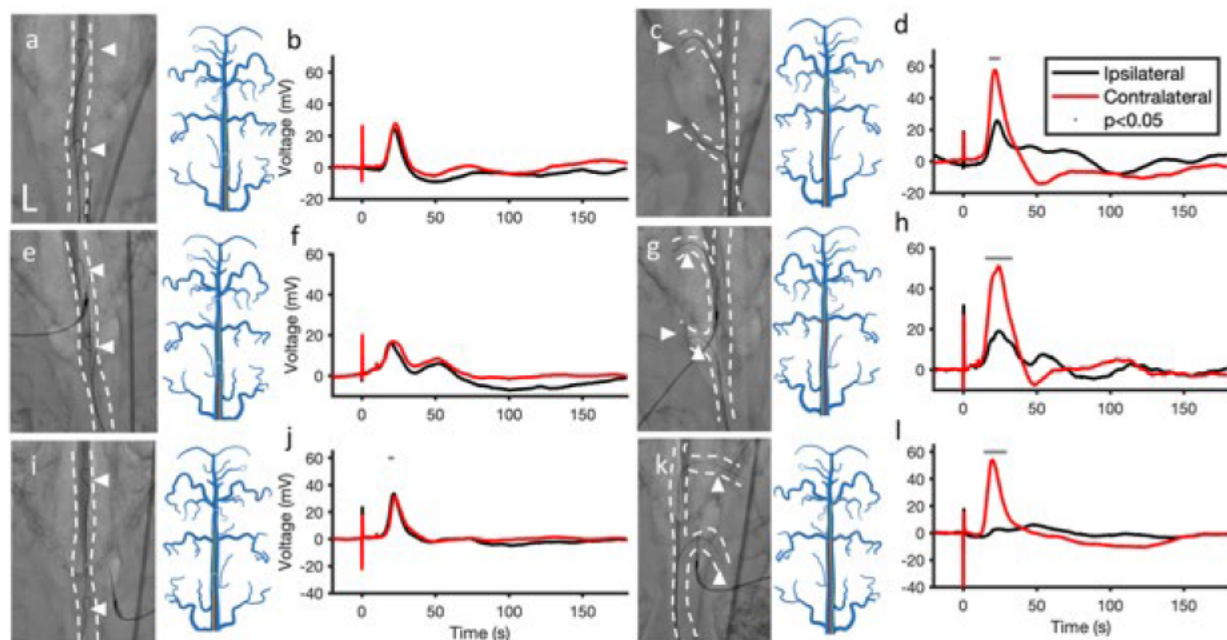
(MSに参画している関谷、中村、柳澤の大阪大学のチームと、メルボルン大学のGraydenチームの連携)



極低侵襲BMI

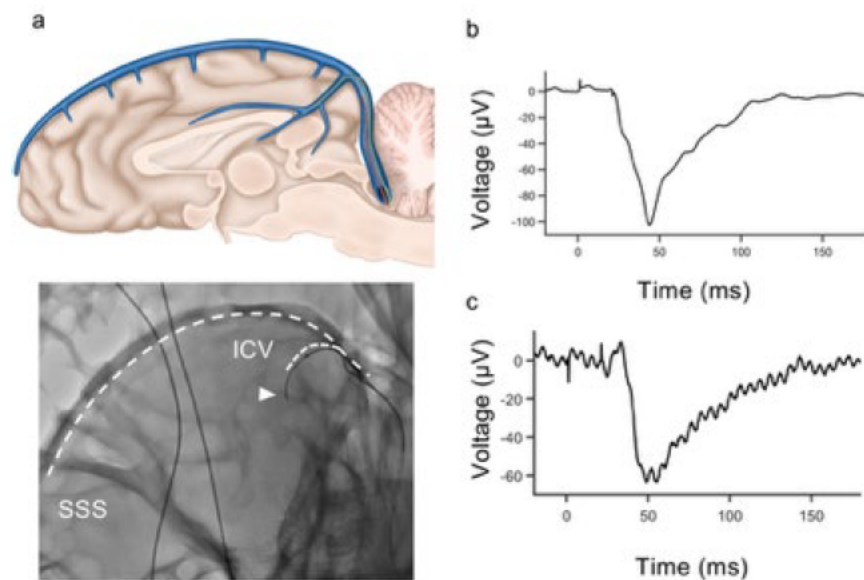
ブタでの血管内脳波を皮質静脈より計測に成功

体性感覚誘発反応



ブタのSSS(左)と脳表静脈(右)に留置した血管内電極を用いて、ブタの前足を刺激した場合の体性感覚誘発脳波(somatosensory evoked potential, SEP)を評価した。SSSに留置した旧来型の血管内脳波では、左右の足の刺激による誘発電位の違いが少ないが、脳表静脈に留置された電極を用いると、左右の違いが明瞭になることが示された。

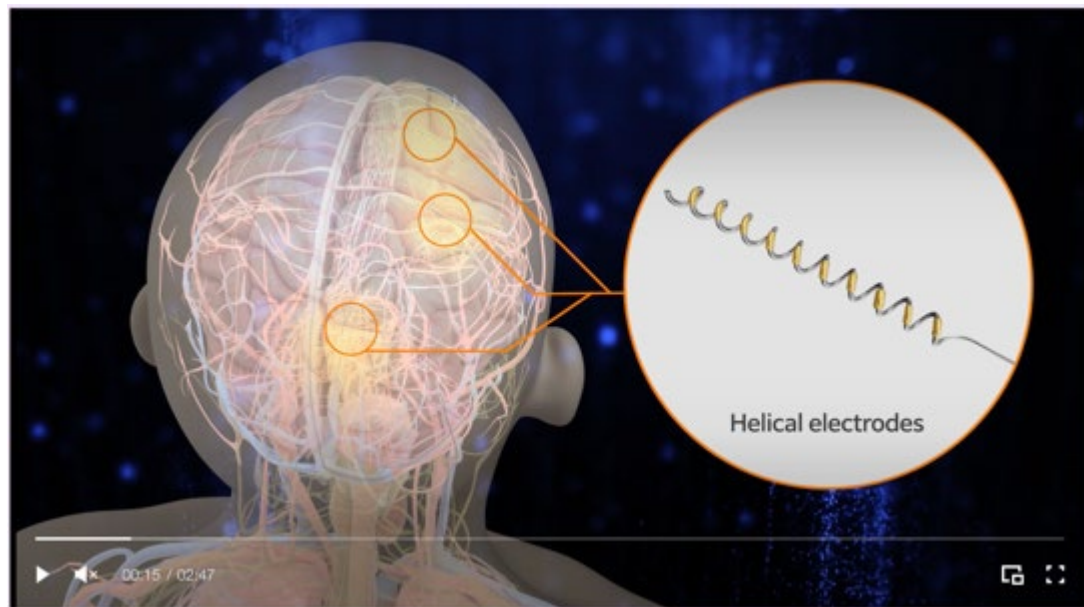
視覚誘発反応



後頭葉の一次視覚野に近い深部静脈に電極を留置した。(b) 深部静脈に留置した電極と横静脈洞に留置した電極の間で計測された視覚誘発反応(Visual evoked potential, VEP)。

(c) ブタの後頭部の頭皮に設置した電極で計測したVEP

スピントアウト企業: ivec社



CEO
柳澤琢史教授
大阪大学

ivec社は、JSTムーンショット型研究開発事業の金井の「Internet of Brains」から生まれた**スピントアウト企業**で、開頭を伴わず血管内から脳波を高精度に計測する低侵襲BMIの実用化を目指している。

独自の極細・柔軟な電極により、脳表から深部まで幅広い脳領域へのアクセスを狙える点が特徴で、Synchronなどの先行企業に対しても、より**広範な脳部位から信号を取得できる**ことが技術的な優位性を有する。

侵襲型BMIの主戦場 (私見)

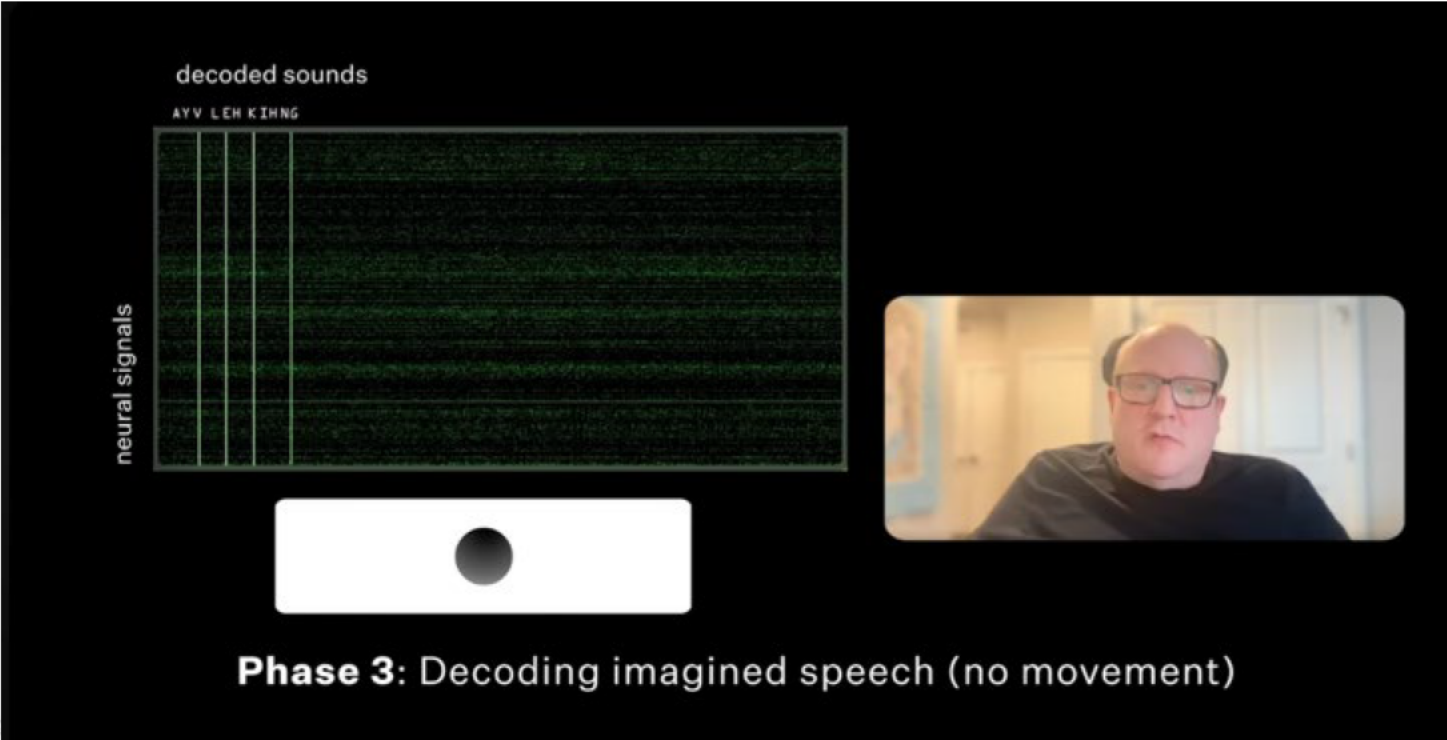
侵襲型BMIは不可避な進化を起こす

- 高帯域インターフェースは侵襲に収束する
- 極低侵襲・ECoGは過渡的技術

	代表的企業・プロジェクト	技術的特徴	私見
刺入型電極	<ul style="list-style-type: none"> • Neuralink • Blackrock Neurotech 	<ul style="list-style-type: none"> • 単一ニューロンレベルの高解像度記録 • 高帯域・リアルタイム双方向制御 • 実証が最も進んでいる 	侵襲型であっても、医療目的で安全性が確立され、 健常者でも最も王道な選択肢 となる。
BioHybrid型	<ul style="list-style-type: none"> • Science Corporation • Kacy Cullen Lab (UPenn) 	<ul style="list-style-type: none"> • 幹細胞由来ニューロンをデバイスに組み込み軸索・樹状突起が脳内へ自然に伸びる • シナプス結合により脳と接続 • マイクロLED + 電極で刺激・記録を実施 	軸索の誘導制御などの技術的課題はあるが、深部刺激などでは実用性が期待できる。 刺入型を将来的に超越する 可能性がある。
光学的BMI	<ul style="list-style-type: none"> • ムーンショット目標 1 	<ul style="list-style-type: none"> • オプトジェネティクスを用いた光ファイバーによるインターフェース • 入出力を広範囲で高精度でできる • 主にげっ歯類での研究では広く使われてきている 	脳への信号入力において優位性があり、認知症などの患者に対して 記憶増強を実現できる可能性 があり、市場的に急成長する可能性がある。
ナノ粒子インターフェイス	<ul style="list-style-type: none"> • Kahira Technologies 	<ul style="list-style-type: none"> • 腕からの注射などでデバイスを体内に導入 • 脳の特定の病変部位を自律的に認識して、血液脳関門 (BBB) を通過し、目的の場所に定着 • ワイヤレスでニューロンと入出力 	潜在的なインパクトは大きいですが、まだ一般のニューロサイエンスの研究にも到達していないため、 かなり長期的なもの となる。

王道の刺入電極

Neuralinkでは、すでに想像している言葉の解読に成功している。

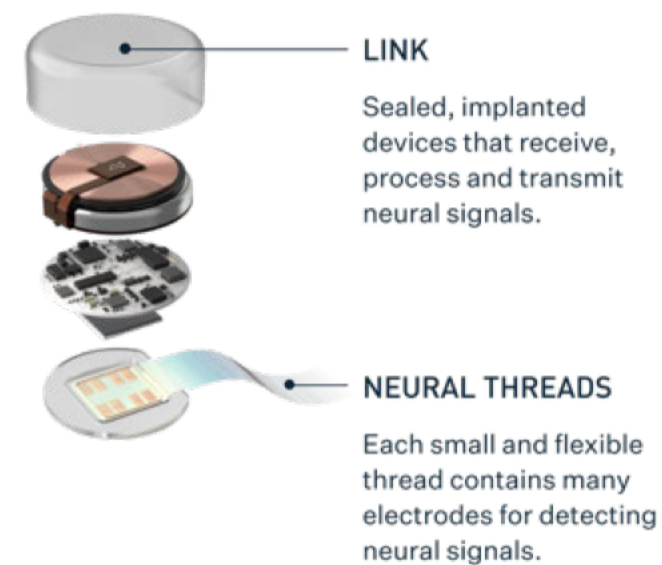


decoded sounds
AYV LEH KIHNG

neural signals

Phase 3: Decoding imagined speech (no movement)

<https://neuralink.com/trials/speech-restoration/>



BioHybridの衝撃

Scienceでは、ニューロンを使ったBMIを開発している

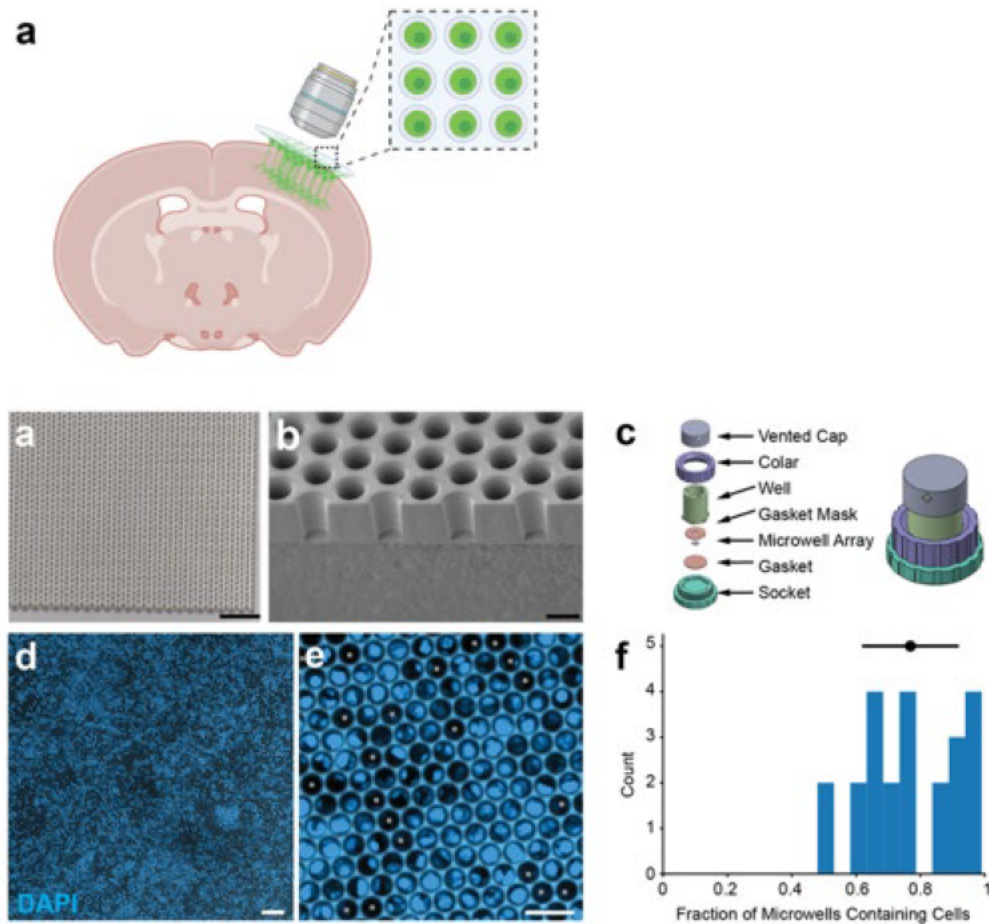
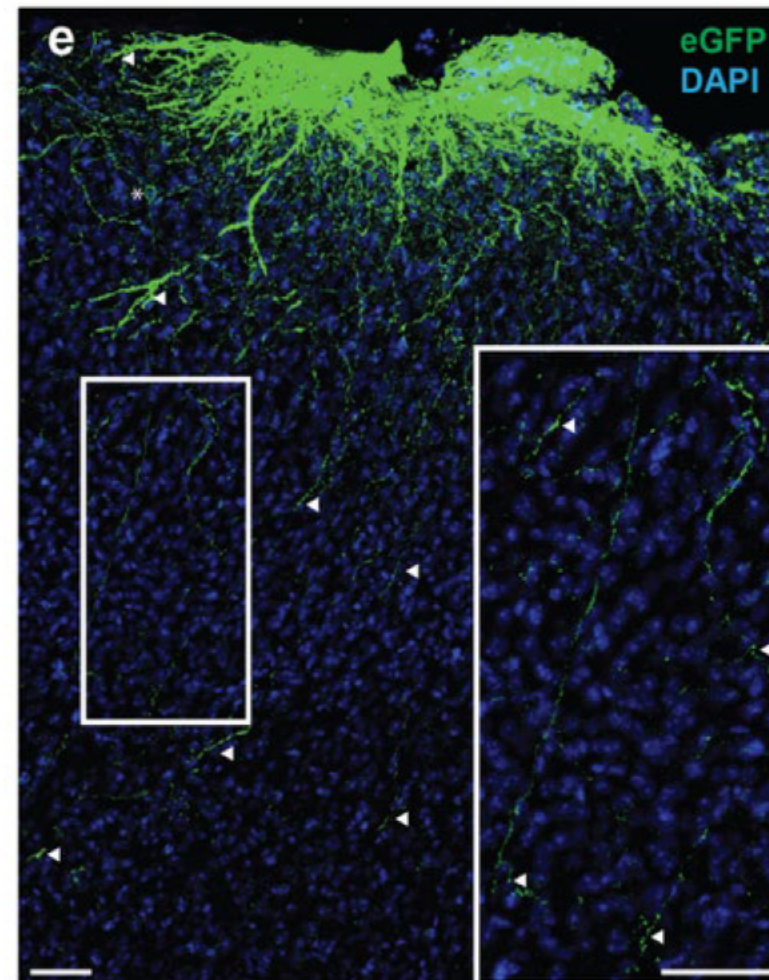


Figure 1: Fabrication and loading of microwell scaffolds

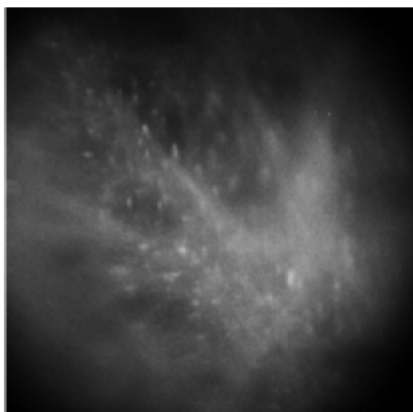


<https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.11.22.624907v1.full.pdf>

光学式BMIへの挑戦（ムーンショット）

大型動物（ヒツジ）の脳におけるカルシウム蛍光体の発現を開発

ヒツジの大脳皮質で可視化可能なニューロンを得るための適切なアデノウイルス血清型と発現戦略を見つけることは困難な課題であると予想していた。しかし、最初の試みで蛍光性GCaMP6構造体の明確な発現が得られた。



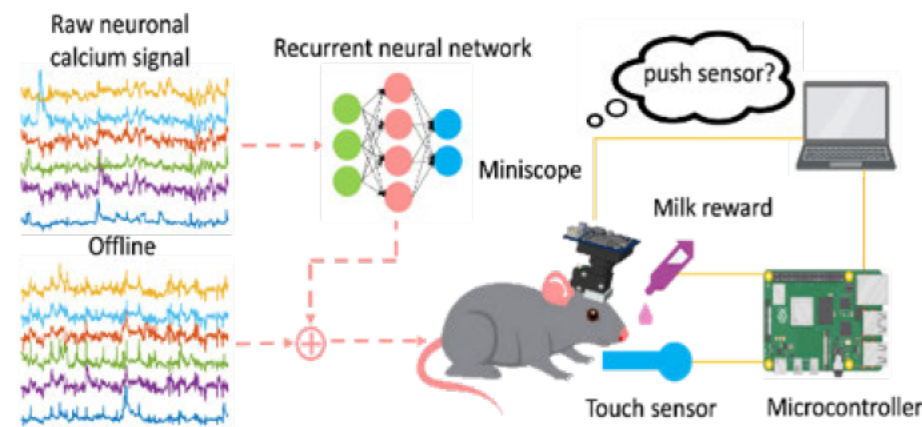
ミニスコープ Version 4 デバイスを使用し、ベクター注入2週間後のヒツジの皮質ニューロンで発現しているGCaMP6蛍光体

マウスが意図のみで給餌装置を作動させることができることを実証。



動物はまず前肢でセンサーに触れることで液体報酬を供給する給餌チューブを活性化することを学習するように訓練された。左運動野の上に配置されたミニスコープからの多ニューロン信号が特徴付けられデコードされ、センサー/給餌器の接続が無効化されたときに動物が自発的に給餌チューブを活性化できるようになった。

認知駆動型自己給餌システム



リカレントニューラルネットワーク分類器を訓練した後、複数のニューロンからの活動（色付きのトレース）がリアルタイムで記録される。ミルク報酬は最初にタッチセンサーを活性化した後提供され、その後はタッチセンサーは無効化され、リアルタイムミニスコープ信号デコーディングを介して自発的な制御が可能になる。

現在、神経画像を高めるための光学素子（トリプレットレンズとGRINレンズアレイ）を設計している。脳表面への適用という点で平面センサーの最終形態も進展した。非常に軽量なリボンコネクタに取り付けられた既存のセンサーをいくつか修正しており、センサーテストにおいて大きな柔軟性を提供する。また、高フレームレートと光感度を持つ高度なCMOSセンサーを最適化してシステムの感度を最大化する。

これらの光学式BMIの技術が大型動物で利用できるようになったら、今後は記憶の補助に活用が可能か実証を進めていく。

ナノ粒子等のマイクロデバイスの可能性

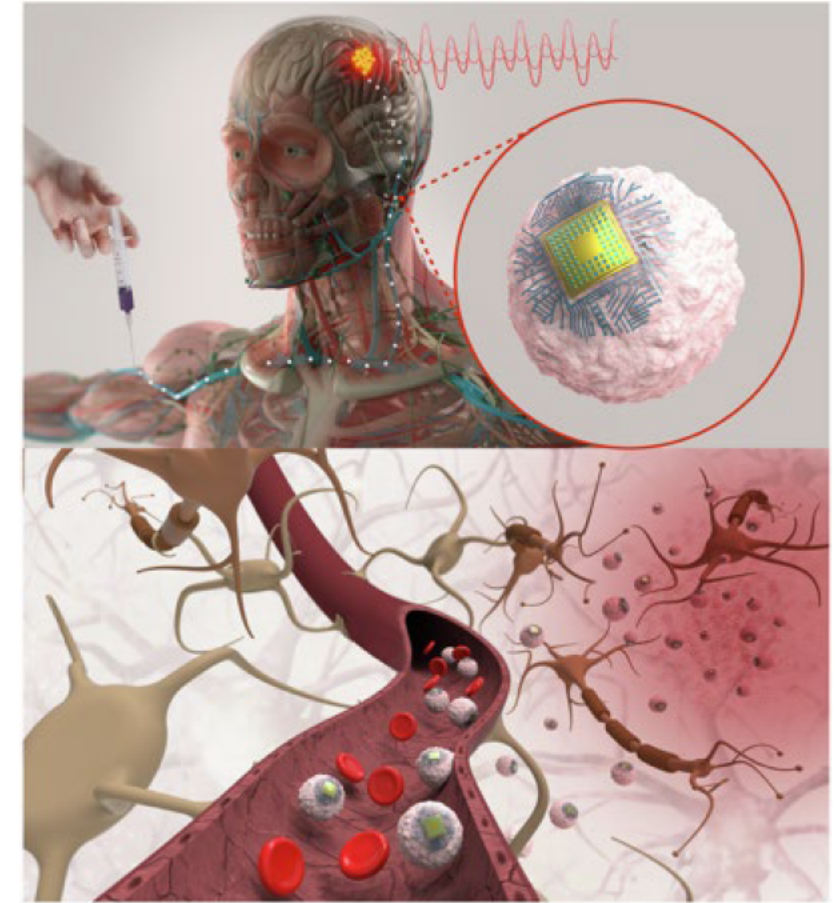
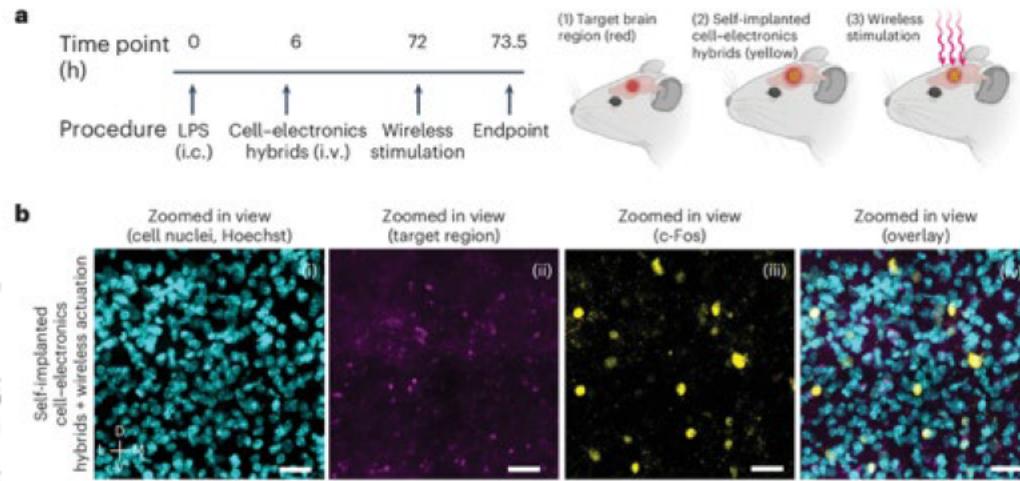
超小型電子デバイスを免疫細胞につけて炎症部位にデリバリーし刺激

Article | [Open access](#) | Published: 05 November 2025

A nonsurgical brain implant enabled through a cell–electronics hybrid for focal neuromodulation

[Shubham Yadav](#), [Ray X. Lee](#), [Shivam N. Kajale](#), [Baju Joy](#), [Monochura Saha](#), [Preet Patel](#), [Loey Bull](#), [Sarah Cao](#), [Samir Mitragotri](#), [David Bono](#) & [Deblina Sarkar](#) 

Nature Biotechnology (2025) | [Cite this article](#)



<https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.11.22.624907v1.full.pdf>

今後は脳だけでなく全体内

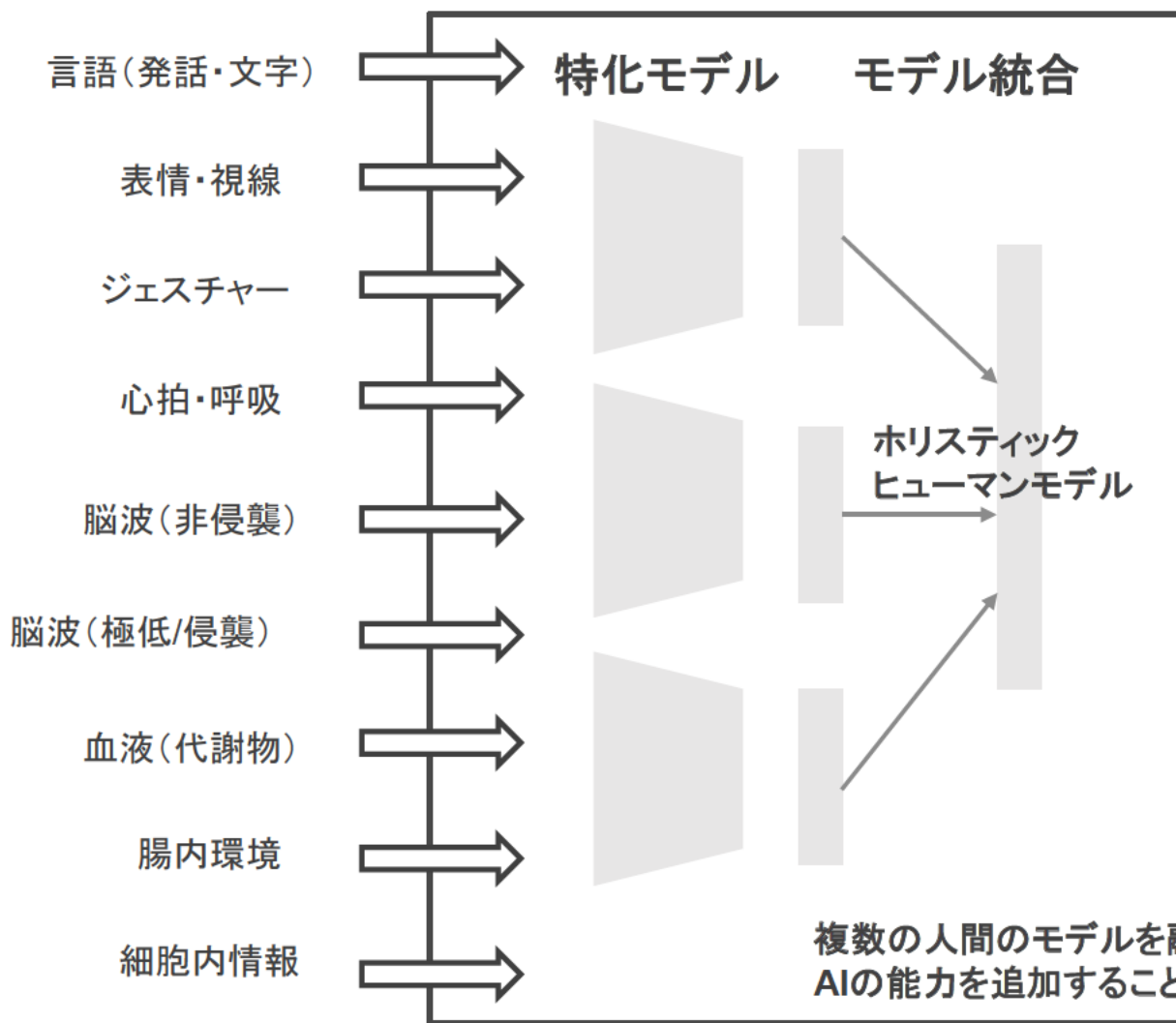
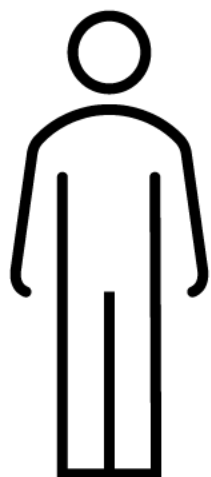


ユーザー

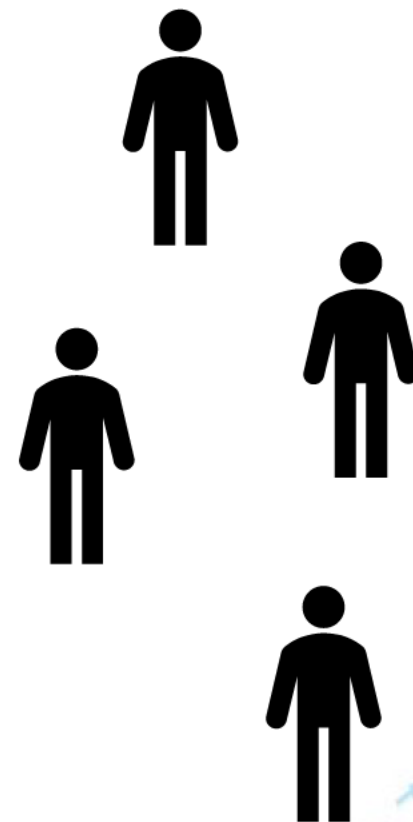
多様な生体入力

HH-AIプラットフォーム

人間の体内含むAIエージェント



コピー生成



それぞれが独自に活動するが、
お手柄はユーザーのもの。

運動から記憶へ



次の10年で、BMIの主戦場は身体や運動の補助から、認知と記憶の領域に入る

記憶増強BMIの誕生

- すべての人間の意識的経験は、海馬などのインターフェイスによりすべて保存可能となる
- 外部記憶装置からの脳への刺激により、すべての記憶を自由に思い出させることができる。
- 他者との記憶の共有が可能になる
- 体験していないことについても自由に情報を引き出せるようになる

シナリオ

- 市場規模としては認知症の領域が大きく、そこで侵襲型のBMIによる記憶補助技術がスタートする
- そのときに刺入型BMIか光BMIが主たる役割を果たす
- 記憶補助の機能が患者による利用で安全性と簡便性が確立していき、健常者も利用を希望するようになる。
- 健常者での利用が始まる。
- 新しい記憶を介したネットワーク社会が誕生する。
- 脳とAIの融合が始まる。

今後の課題



ニューロテクノロジーは様々な分野を横断するが、これに対応できる制度と体制づくりができるか？

- 研究領域としては、神経科学だけでなく、医学、材料科学、情報学、AI、法学倫理学、など多岐にわたる融合が必要。
- 領域的には、アカデミアだけではなく、事業化するためのスタートアップ創出、医療機器承認等の具現化、国際ルールメイキングを伴う社会実装、など様々な専門性を持った人材が協調していくことが重要。
- これらの要素は省庁間での協調も必要とする。医療機器という観点では厚労省の役割が重要かもしれないが、事業化に向けたエコシステムづくりは経産省、そして脳情報がネットワーク化されていく世界においては総務省の役割は重要だろう。
- これらの異分野間での協調連携の実現が、来るニューロテクノロジーによる変革において、日本が主導権を握っていくには極めて重要である。

AIは知能の外部化だった
次に来るのは知能の内在化である