BRAIN-AI × HITE

脳とAIが融合する未来を、科学と人文知から考察する越境型プロジェクト

A cross-border project on the future of the brain-AI hybrid from the perspectives of science and humanities

ERATO「池谷脳AI融合プロジェクト」× RISTEX「人と情報のエコシステム」研究開発領域

BRAIN-AI × HITEプロジェクトは、JST/ERATO「池谷脳AI融合プロジェクト」（BRAIN-AI）とJST/RISTEX「人と情報のエコシステム」研究開発領域（HITE）が連携して実施する、脳とAIが融合する未来を科学と人文知から考察する越境型プロジェクトです。

近年著しく進展が進む人工知能研究と脳神経科学研究を融合するBRAIN-AIの取り組みは、これまで制限されていた脳活動の限界を突破し、人間の能力の拡張をもたらし得る可能性を秘めています。

一方で、ヒトの脳の中という究極のプライバシー情報の扱いや、能力増強テクノロジーが将来もたらし得る格差拡大の可能性、Brain-Computer Interface（BCI）によってなされた意思決定は誰による意思なのかというアイデンティティを巡る哲学的課題など、BRAIN-AI の取り組みにはまだまだ検討されなければならない課題が残されています。

こうした状況をふまえ、BRAIN-AI × HITEプロジェクトでは、BRAIN-AIの研究に取り組む研究者と、HITE領域からELSIや哲学を専門とする研究者によるコラボレーションを進めています。研究の初期の段階から、その技術が人間や社会に与える影響を人文・社会科学の深い知見に基づいて考察することで、脳AI融合の研究が人間にとって真にウェルビーイングをもたらし得るものとなることを目指し、活動を進めていきます。

JST/ERATO「池谷脳AI融合プロジェクト」（BRAIN-AI）
http://www.ikegaya.jp/ERATO/about.html

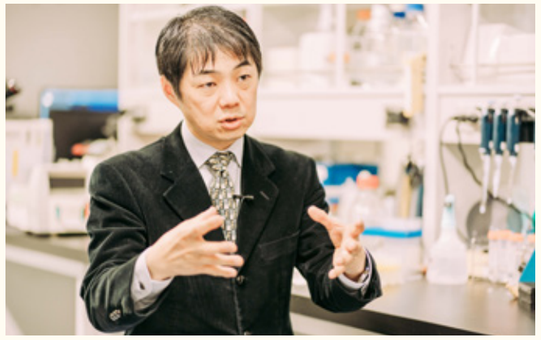
JST/RISTEX「人と情報のエコシステム」研究開発領域（HITE）
https://www.jst.go.jp/ristex/hite/

BRAIN-AI×HITE

脳とAIが融合する未来を、科学と人文知から考察する越境型プロジェクト

ERATO
池谷脳AI融合
プロジェクト

RISTEX
「人と情報のエコシステム」
研究開発領域



ERATO

01 新たな「脳」を目指して 池谷 裕二
10 池谷脳AI融合、4つのビジョン 池谷 裕二
16 最先端の幻肢痛治療に見る、「脳のリプログラミング」の可能性 柳澤 琢史
19 脳モデルの解析によって、未知なる脳のはたらきを知る 西本 伸志
22 脳AI融合研究の実験室 松本 信圭

HITE

26 脳AI融合研究に、人文学者が関わること 標葉 隆馬 石田 柊
28 哲学の視点から考える脳神経科学とAIのもたらす未来 鈴木 貴之
31 ELSI / RRI とは何か？
34 脳とAI研究年表
35 参考文献

38 BRAIN-AI×HITEの取り組み
40 プロジェクトメンバー

CiNet
脳情報通信融合研究センター
Center for Information and Neural Networks
NICT

池谷脳AI融合プロジェクトとは？

この10年のAIの進歩によって、脳神経科学の研究は大きな発展を遂げてきました。AIを用いることで、これまで解明されてこなかった脳の理解が進むばかりか、脳の未知なる能力をもひらく可能性をも示唆されています。「池谷脳AI融合プロジェクト」（BRAIN-AI）は、まさに脳とAIの融合による新たな科学を開拓するべく、JSTの戦略的創造研究推進事業「ERATO」の一環として2018年10月から始動したプロジェクトです。この先、脳とAIがつながる未来には何が待っているのでしょうか。

新たな「脳」を目指して

東京大学・大学院薬学系研究科 教授
池谷 裕二

近年のAIの進歩は目覚ましい。AIはいま、深層学習という人間の脳の仕組みを模した手法などによって、私たちの脳の理解をも革新し続けている。脳とAIを融合させることで、未知なる脳の可能性をひらき、新たな科学への道をつくる。それが「ERATO 池谷脳AI融合プロジェクト」のミッションだ。プロジェクトを率いる池谷裕二に、プロジェクトについて、そしてこれからの脳と科学のあり方について聞く。

—— 脳がAIとの共進化をはじめた

この約10年間は、脳神経科学にとって大きなターニングポイントが訪れました。それは、まさにこの「ERATO 池谷脳AI融合プロジェクト」で掲げているように、脳神経科学とAIの融合がきっかけとなっています。

AI、すなわちコンピュータ・プログラムは、かつては人間の知能の営みのごく一部を再現する程度のものでした。しかし、コンピュータの性能が指数関数的な成長を遂げ、人間の脳の仕組みを模倣したニューラルネットワークによる「深層学習」をはじめとした高度な機械学習の発達によって、脳神経科学の研究はかつてないスピードで進んでいます。

AIがもたらした一番の功績は、データの解析に関わる部分です。脳神経科学では、脳の活動を電気生理学的な手法で記録し、それらを解析することで、研究にとって有用な知見を得ていくことが主な手法です。そうしたデータ解析は「フーリエ変換」や「相関解析」などの古典的な数学的手法に長らくたよってきました。

もちろんそうしたアプローチは、飛躍的に脳の理解を進めました。しかし脳は、現状の技術で解析がしやすいように活動しているわけではありません。つまり、これまでの脳神経科学は、現段階の解析手法でわかる範囲でしか、脳のメカニズムを理解できてなかったといえます。

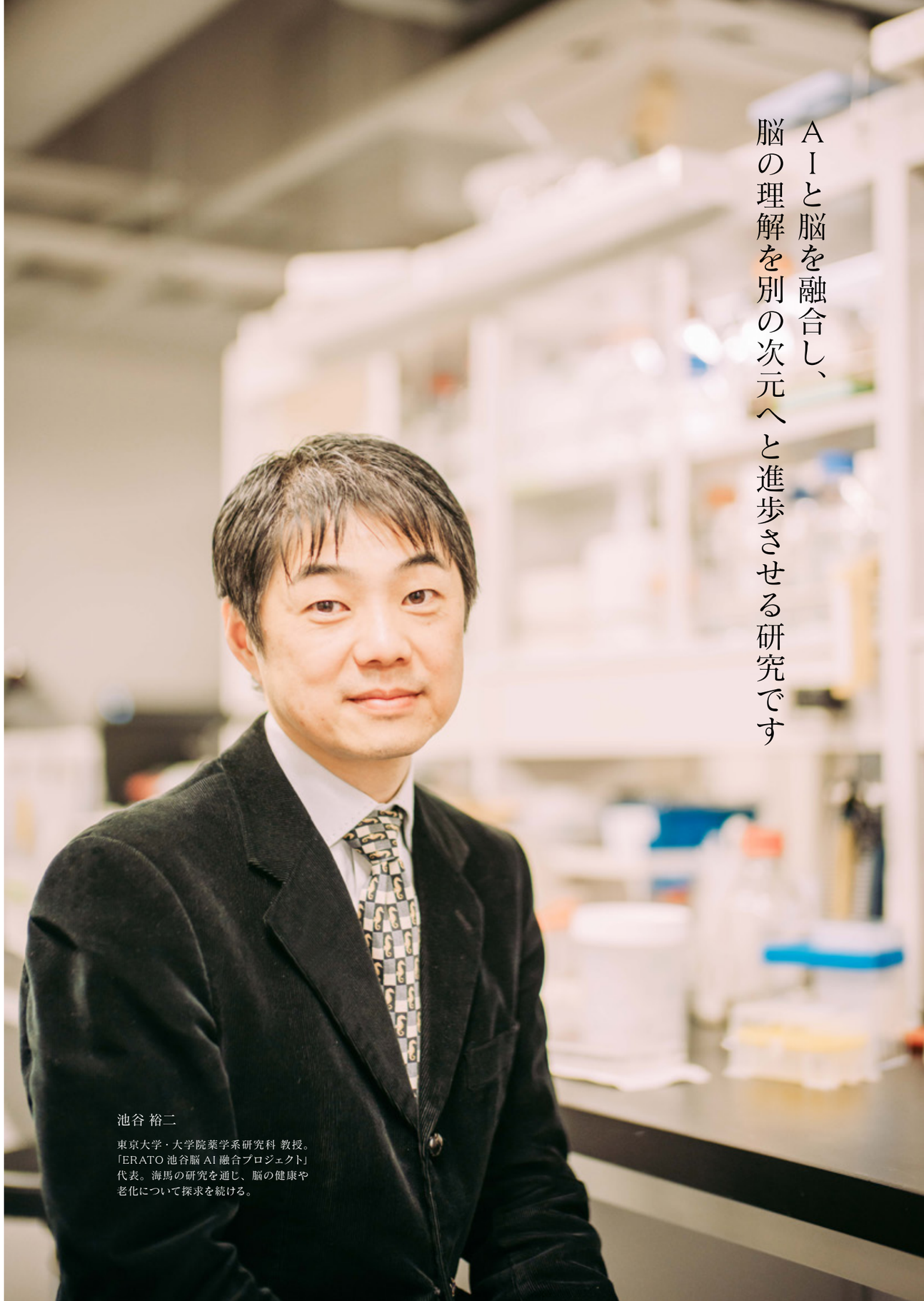
AIや機械学習は、特定の領域では人間を超えた能力を持っています。これにより、脳神経科学は人間だけの理解に頼った科学から、人間と機械学習が融合して生み出す理解に基づく、まったく新しいプロセスに変わりつつあります。

その成果は目覚ましいものがあります。たとえばこのプロジェクトに参画している、医師であり研究者でもある柳澤琢史教授（大阪大学高等共創研究院・P16-18）は、AIを用いて患者の脳から情報を取り出し、その情報を患者の脳へフィードバックすることで、疾患を治療する研究をしています。いわば「脳のリプログラミング」による医療です。

現在私たちは柳澤教授と協働し、記憶の機能回復に取り組んでいます。たとえば認知症の患者は、もの忘れや記憶違いなどで日常生活にさまざまな障害を抱えていますが、柳澤教授の研究では、私たちのこれまでの研究成果である海馬の電気生理の大規模記録を統合し、治療を見据えた記憶力の操作法を開発しています。同臨床試験はすでに大阪大学での臨床試験の承認を得て進められています。

また、西本伸志教授（大阪大学大学院生命機能研究科・P19-21）は、AIを用いて脳の「モデル化」を進めています。従来の脳神経科学は、脳に関する様々な知見をもたらしてきました。西本教授が挑むのはそれらの知見を統合し、AIによって脳の仕組みを大局的に把握することです。そうして、生物における全ての脳に共通する原理を解明しようとしています。言ってみれば、脳のなかのマップをつくるような作業です。

脳のモデル化が実現すれば、たとえばサルやネズミのような、人間とは異なる種の動物の脳も把握することができるかもしれません。まさにAIと脳を融合し、脳の理解を別の次元へと進歩させる研究です。



AIと脳を融合し、
脳の理解を別の次元へと進歩させる研究です

池谷 裕二

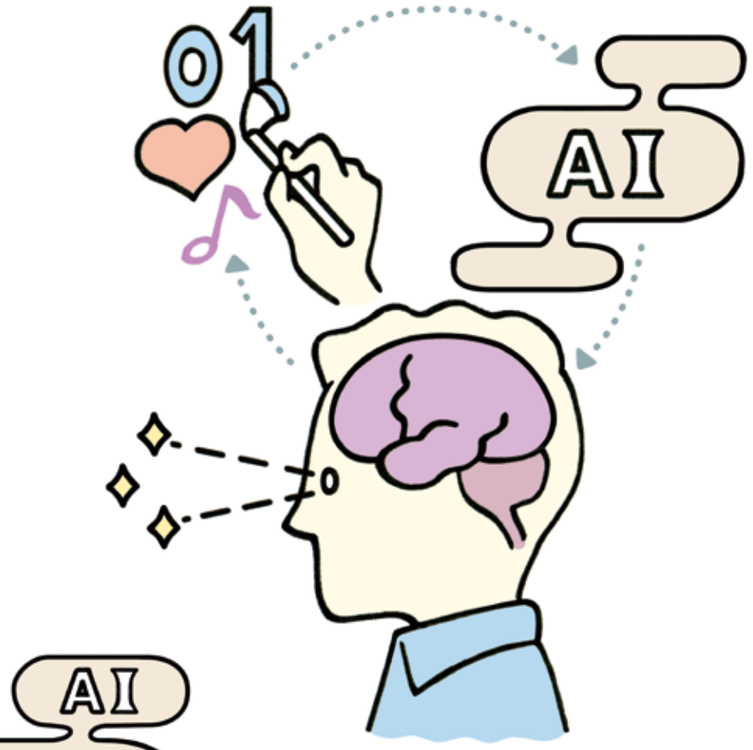
東京大学・大学院薬学系研究科 教授。「ERATO 池谷脳 AI 融合プロジェクト」代表。海馬の研究を通じ、脳の健康や老化について探求を続ける。

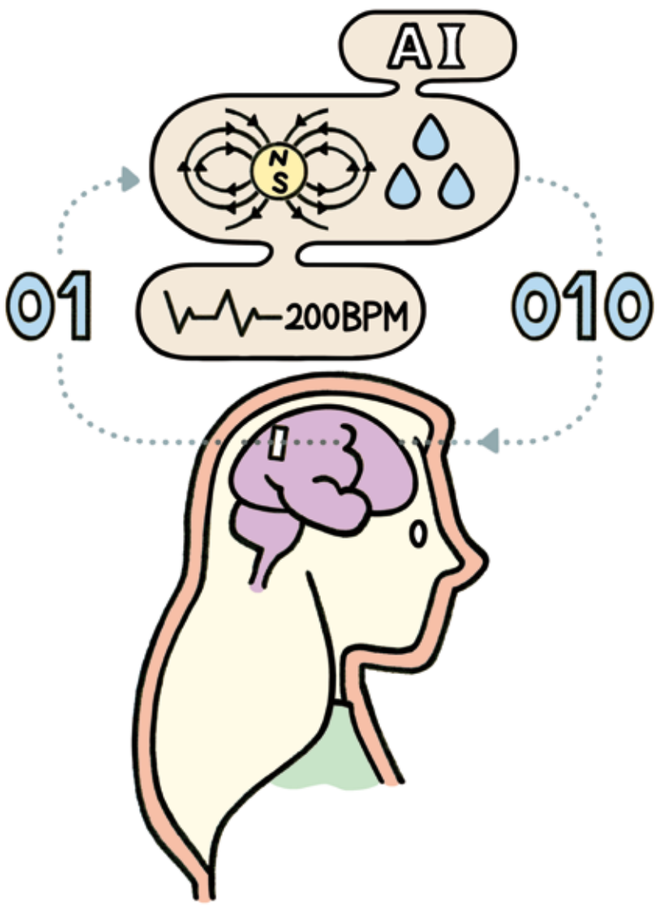
池谷脳AI融合、4つのビジョン

— 01

脳 AI 解読

AI を用いて脳の活動を解読することで、さまざまな疾患の原因を解明し治療に結びつけることができる。また、本人は自覚していない、隠れた脳の情報を引き出し、フィードバックすることで新しい身体感覚や機能を獲得できる可能性もある。





— 02

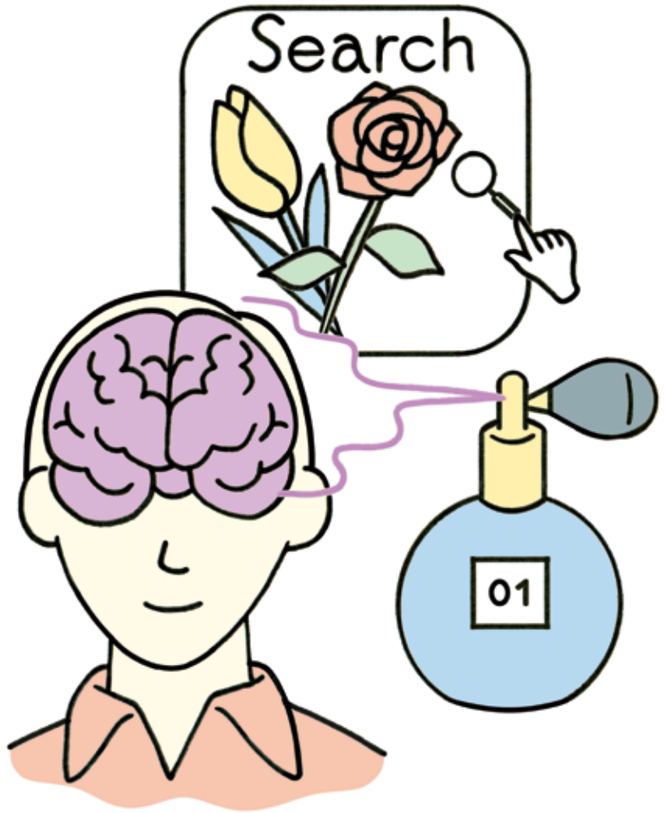
脳チップ移植

侵襲的（生体に直接侵入すること）な手法によって、脳内にチップを移植することで情報を入出力し、主にフィードバックの手法として機能させる。地磁気や身体の水分量や心拍数など、各種センサーから取得された情報を脳に与えることで、新しい人間の機能拡張の可能性を開拓する。しかし現時点では、侵襲的手法の安全性に懸念を抱く人も多く、人への実装はこれからの課題となる。

— 03

脳とインターネットの融合

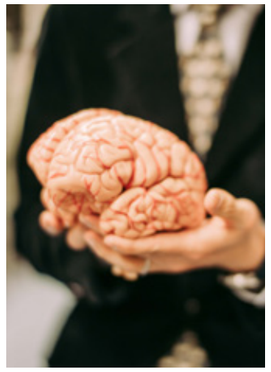
脳をインターネットに接続することで、多様な情報が瞬時に検索可能となる。たとえば、現在のインターネットは視覚や聴覚情報がメインだが、触覚や嗅覚の情報を検索できるようになるかもしれない。また、念じるだけで部屋の照明や温度を調節する、脳を IoT 化することも視野に入る。



— 04

脳脳融合

AI を介して複数の脳を接続することで、文字や言葉を超えたコミュニケーションを実現する。さらには、愛犬や愛猫など、種の異なる動物とのコミュニケーションすら実現できるかもしれない。ただし、脳は究極の個人情報であるため、この実現のためには適切なガイドラインの整備が不可欠である。



—— 脳は拡張していく

「ERATO 池谷脳 AI 融合プロジェクト」では現在、さまざまな実験を通して AI と脳を融合することで、脳の機能を拡張できることを確認しています。

たとえば、人間固有の言語である英語とスペイン語を、ネズミに聞き分けさせる実験を行っています（P23 参照）。ネズミは生来的に、英語とスペイン語を聞き分けることはできません。実験では 10000 回以上のトレーニングを行いましたが、一切判別ができませんでした。しかし、英語とスペイン語には明確な音の違いがあります。音が違うということは、その物理的振動が異なるということですから、ネズミの耳の鼓膜では、英語とスペイン語が異なった振動で伝わっているはずです。

そこで私たちは、AI によるフィードバックを用いて言語の判別を可能にしようと考えました。音声の信号はまず、鼓膜から脳に伝わります。そして鼓膜から電気信号に置き換えられて脳幹を経由し、視床から第一次聴覚皮質へと伝わります。この経路の神経活動を記録し、機械学習によって言語の判別を行います。その判別結果を脳刺激パルスに変換し、ネズミの脳へフィードバックしたのです。

その結果、ネズミは英語とスペイン語を学習し、判別することに成功しました。この実験の興味深い点は、初めて聞くフレーズでも判定ができること、そして、機械学習のプロセスを取り外しても効果が持続するということです。この実験は、AI の活用によって、脳は生来的には獲得不可能な機能を会得できることを示しました。つまり脳機能は拡張できるという証明の一歩となったのです。

この研究成果の応用として将来的に検討しているのは「学習障害」へのアプローチです。現在、いわゆる読み書き能力や計算力について、平均的な学習能力から隔たりのある人々は学習障害と呼ばれています。しかし、これらは本当に障害なのでしょうか？　そもそも私たちはほんの少し前まで、文字も数字も知らない世界で荒野を走り回り、狩りをしていたわけです。そう考えると、現代社会において「学習障害」と名が付けられてしまった方々は、現代の学校制度が生み出した犠牲者ともいえるでしょう。

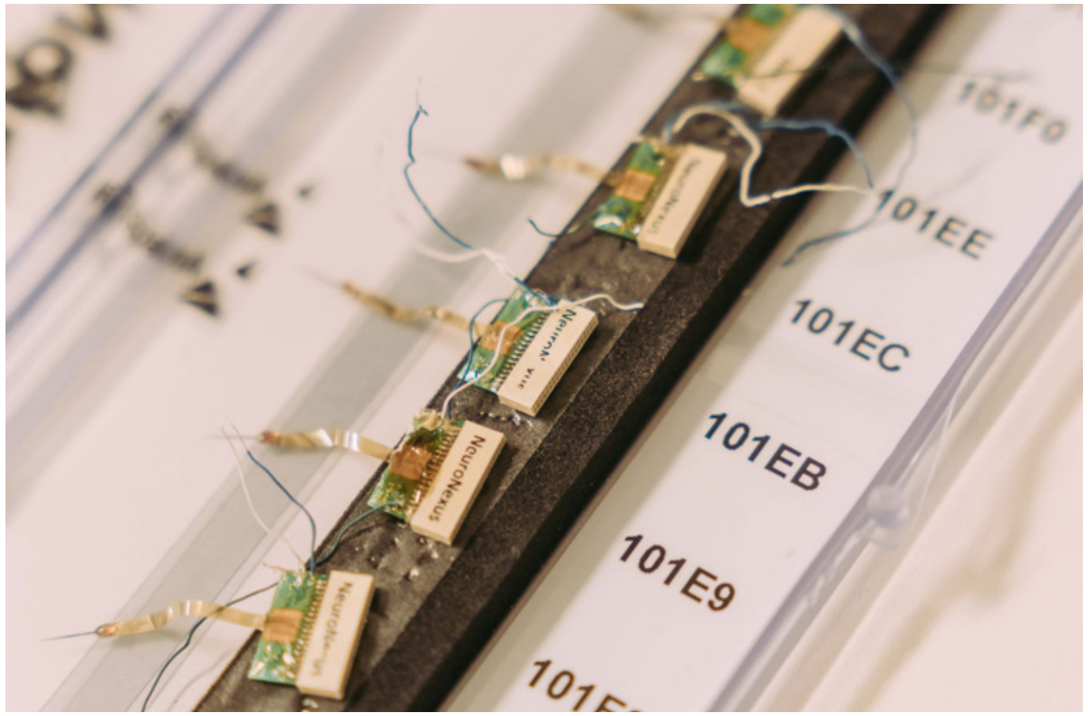
そうした人々が脳の機能を拡張することで社会に適応することは非常に有益だと私は考えています。今後はこの実験の対象を絵画や音楽にも広げ、より多くの知見を獲得していきたいと考えています。

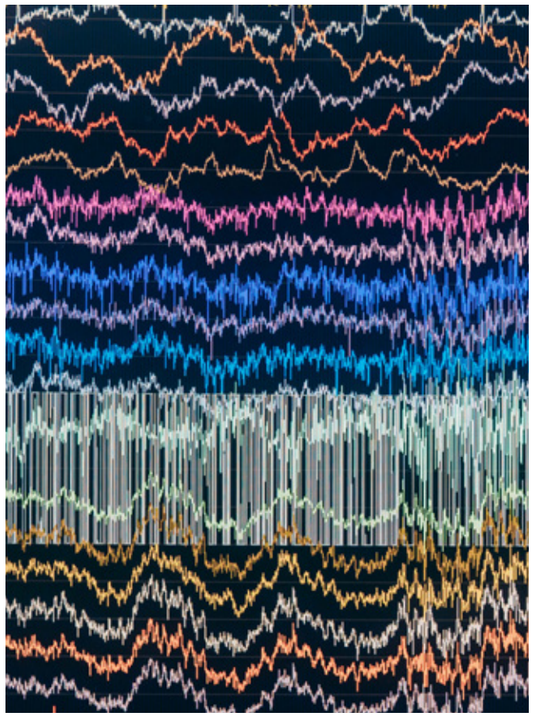
—— 自分で自分の身体を
コントロールできるようになる

私たちは呼吸や身体の動きを調節することはできても、血圧や心拍数などを調節することはできません。なぜでしょうか？　それは私たちの身体がそのように設計されているからです。

私たちはバイオフィードバック（※）を用いた実験で、通常は認識できない心拍数を自在に調節できる可能性を発見しました。その実験（P22 参照）では、ネズミの脳に電極を刺し、自分の心拍数が上がっているか下がっているかを把握できるようにしました。そして、このネズミに、心拍数を下げるようにするトレーニングを行います。するとネズミの心拍数は約 400BPM から 200BPM にまで下げられるようになったのです。これは人間で言えば、自身で呼吸や心拍数をコントロールするヨガの極地にいってしまったようなものでしょう。

この実験の興味深いところは、実際のトレーニングでは何ヶ月、人によっては何年もかかって習得するようなことを、短期間で実現したことです。さらに装置を取り外しても効果は持続することを確認しています。これは私たちの学習に対する考え方を大きく変える発見





※バイオフィードバック…自覚や制御が困難な身体の生理機能を、電子機器などを介することで認識・制御下に置く技術・手法。

だと言えるでしょう。

現在、同じバイオフィードバックを用いて、血糖値を自在に下げる試みを進めていますが、すでに世界で初めてネズミの長期間の血糖値を測定することに成功しています。もしも本人の意志で血糖値を下げることができれば、健康増進につながるほか、糖尿病や認知症の治療などに応用できる可能性があります。

社会の側に立って、科学を見てみよう

「脳と AI の融合」というテーマは非常に挑戦的です。私たちは脳神経科学と AI の交差点で、いまもっともエキサイティングな時間を過ごしていると感じています。しかし、この研究が、社会の人々の目にどう映るか、どのように社会のなかで受け入れられていくのか、こうした懸念点も含めて、私たち研究者は、この脳で想像して行動しなければならない。それは科学者の仕事でもあり責務です。

最先端科学を追求するプロジェクトにおいて、ELSI（倫理的・法的・社会的課題）について確かな考えを持つことは、いまや科学の社会的責任です。私たちはその必要性から、RISTEX の研究開発領域「HITE（人と情報のエコシステム）」との協業を始め、社会の側に立って自分たちの研究を見つめ直すという実践を重ねています。

そこで、ELSI の専門家の方々との勉強会を重ね、歴史の中で人々はどのようにして新しい科学やテクノロジーを受け入れ、またその過程でどのような摩擦や議論があったかを学ぶとともに、脳と AI の融合において考えられる倫理的課題についての議論を進めています。また、ソーシャルメディアの使い方などの情報発信のガイドラインを研究室内で共有することを通し、社会との対話の方法を模索しています。

科学者は、どうしても研究対象と向き合う時間が長いため、世間知らずになりがちです。その結果として、私たちが社会に対し、不要な警戒心を抱かせてしまうことに無自覚であったり、あらぬ期待を煽ってしまったりすることがあります。

AI はこれからますます私たちと脳の関係性を変えていきます。その関係性を、より良いかたちで提供していくことも、科学者の仕事の一部だと思っています。

AI がもたらす、科学におけるパラダイムシフト

脳神経科学はこれから、AI と共進化していくことは間違いありません。しかし、私たちはいまだに AI のことがよくわかっていません。機械学習によって、さまざまなことがわかるようになりました。脳のことだけではありません。チェスや囲碁の世界のチャンピオンに勝つことから、タンパク質の立体構造、農作物の生産量の予測や株価の予測まで、機械学習は、人間が何十年、何百年かけても到達しえなかったことを、このわずか 10 年足らずで成し遂げてしまいました。

しかし私たちは、AI がなぜそのような結果を導き出すのか、とくに深層学習と言われるような領域では、そのプロセスは十分にわかっていません。機械学習というものは、他ならぬ人間の脳の働きを模したものであったにも関わらず、その内部の演算様式は、もはや人間の理解を超え始めているのです。

そして私たちはその AI をつかって、科学を実現している。これはどういうことなのか、科学者はきちんと考えておく必要があります。私の考えとしては、いま、科学の捉え方そのものが大きく変わってきている、パラダイムシフトにいるということです。

そもそも科学というものは、人間が真理を理解する営みです。よって、理解する主体はあくまで人間であるということが科学の大前提です。そして人間に理解できていないことは、科学的には未解明ということになります。

では、人間が理解できていない AI を使って解明してゆく営みは、科学ではないのでしょうか？

AI によって脳神経科学は進歩しましたが、AI がどう解析したかがわからない以上、その多くは未解明のままということになるのでしょうか？

私はいま、科学的ではないもので脳神経科学を実践し、脳と AI が融合する最先端で、科学そのものが変わろうとしている瞬間を目撃しているのだと思っています。

科学はいま、大きな変化の中にいるのです。そもそも科学が、従来の宗教的観点や価値との齟齬を生み、相互に相容れないものになったことすら、歴史的な視点で見れば、わりと最近の話です。これから先の未来、AI を使った科学が、科学の王道になっていても不思議はありません。そうした変化はむしろ歴史では必然的ですらあります。

AI が脳をどんどん進化させていく。脳で科学する私たちは、脳と AI を融合させることを通して、科学そのものを進化させているのかもしれません。きっといま私たちは、科学についてもっと新しい脳で考えるべき時代に生きているのでしょう。そんな未来の科学を理解できるように、脳の機能を拡張してゆくことも、あるいは必要なのかもしれません。

最先端の幻肢痛治療に見る、「脳のリプログラミング」の可能性

大阪大学・高等共創研究院 教授
柳澤 琢史

柳澤琢史教授は BCI を医療に応用し、
失われた四肢に痛みを感じる病気「幻肢痛」の治療を行っている。
BCI によって脳をリプログラムするという、
まったく新しい医療のアプローチが生まれている。

柳澤 琢史

大阪大学高等共創研究院 教授。2009 年、大阪大学大学院医学系研究科修了。博士（医学）。ERATO「脳 AI 融合プロジェクト」研究メンバー。

—— 研究内容について教えて下さい。

柳澤琢史（以下、柳澤）：私は脳神経外科医として、医療と脳研究に携わっています。主には治療目的で、てんかんなどの脳外科治療を受けている患者様の協力をいただき、人間の脳とコンピュータを接続する技術「ブレインコンピュータインターフェイス」（BCI）の研究をしています。ERATO 池谷脳 AI 融合プロジェクトでは、外科医として治療法を開発してきた経験から、脳と AI の融合によって何が模索できるかを提案していくことが私の仕事です。

—— どのような BCI 技術を研究しているのでしょうか？

柳澤：主に侵襲的な方法（外科手術を行い、脳内あるいは脳の表面に電極を設置する手法）によって計測する脳波を使った BCI を開発してきました。たとえば身体のすべてが動かなくなる、ALS（筋萎縮性側索硬化症）の患者さんが、脳で思い浮かべるだけで自らの意志を伝えたり、ロボットを動かして外界と関わることができたりする技術です。最近は AI を用いることでより低侵襲な方法でも実用的な脳波が読み取れるようになってきており、ますます可能性が広がっています。

AIと共進化する医療

—— 脳と AI の融合という点では、どのような試みをされていますか？

柳澤：患者さんの脳から取得したデータを AI を使って分析し、その情報を患者さんにフィードバックすることで、症状の原因となっている異常な脳活動を変えてしまう、つまり「脳をリプログラミング」することで、脳の疾患を治療する研究をしています。たとえば事故の怪我で手を切断してしまったり、手はあるけれど神経が断裂してしまい、身体からの感覚や運動がうまく働かない方などが患う「幻肢痛」という病気があります。幻肢痛は、ある

はずのない四肢の痛みを感じてしまう病気で、治療法はまだ確立されていません。その原因は、失ったはずの手を動かす脳活動がまだ機能しており、異常な脳活動を引き起こしているからだと言われています。そこで脳をリプログラムし、異常な脳活動を消してしまうことで治療しようというのが私の仮説です。

—— 「脳のリプログラム」はどのようにして行うのでしょうか？

柳澤：フィードバックを用いて脳活動に変化を与えることで行います。たとえば幻肢痛では、BCI で手を仮想的に復元し、動かすという手法を用いています。まず患者さん自身の、まだ存在する方の手（例えば右手）の映像を撮影し、それを反転して、失われた手（左手）を仮想的に映像内で復元します。次にその映像を見ながら、脳活動の読み出しと出力を行えるデバイスである BCI を使って、患者さん自身が脳活動を使って手を握ったり開いたりしてもらうトレーニングを行います。こうして患者さん自身の脳活動で「幻肢」を動かすことで、脳が変化します。この変化を目的に合わせて起こすことで、新しい感覚を獲得したり、治療を行ったりすることができます。

—— どうして脳をリプログラムすることで幻肢痛がやわらぐのでしょうか？

柳澤：幻肢痛を患う患者様の脳内にはまだ失われた手、「幻肢」を動かす脳活動が残っています。しかし、この脳活動をどのように変えたら幻肢痛が緩和できるのかが医学的に分かっていませんでした。研究者の間では、幻肢を動かす脳活動を「強めるべき（実際に動かす）」と考える派と、「弱めるべき（動かさないようにする）」と考える派に分かれていました。そこで私は、どちらが正しいのかを確かめるために、患者さんに BCI を使ってもらい、まず幻肢を動かすために使われている脳活動で、ロボットの手を制御し、自分の幻肢を動かすつもりでロボットの手を動かしてもらいました。これは脳にとって、失われた手が再建されたことと同様ですから、幻肢を動かす脳活動は強まります（脳活動が強まるようにリプログラムされる）。すると患者さんは余計に痛がるようになりました。そこで次は、反対側の手の脳活動、つまり残った「健常肢」を動かすための脳活動を使って、ロボットの手を動かしてもらうことにしました。少しややこしいのですが、現実にある手は動かさず、脳で念じるだけで、ロボットの手を動かすような作業をイメージしてください。こうすると、脳内の幻肢を動かす脳活動は使われなくなるため、

弱くなります（脳活動が弱まるようにリプログラムされる）。

結果として、この脳活動を弱くするアプローチによって患者さんの幻肢痛が軽減しました。現在は3日間トレーニングすると、その後5日間にわたって30パーセント以上、幻肢痛が軽減することが分かっています。治療の実現と医学的な発見の両方を実現できた試みでした。

―― AI技術はどのように関わってくるのでしょうか？

柳澤：脳活動を正確に推定したり、治療によって脳活動を効果的に調整したりするために、包括的に用いています。また、治療を重ねることで脳にどのような影響をもたらすかの理解にも役立てられます。また今後は、脳内で想像したことを画像や映像、音声として出力する意思伝達の部分も実現したいと考えています。現在は、人の顔、風景、文字といった、映像・画像のカテゴリをある程度推定できるようになっています。また、想像した内容に応じて、推定された画像を画面に出力することもできるようになってきました。今後はAIによる脳活動の解釈とフィードバックをより改善し、想像内容を映像化する精度を上げていきたいと考えています。

―― AIは医療をどのように進化させると思われますか？

柳澤：AIは医師の仕事を奪うわけではなく、共進化するパートナーだと考えています。たとえば私はAIを医療の診断にも使っています。たとえば脳波をAIで解析することで、診断にとって有意な情報を取り出したりしています。AI単独で何かができるというより、医師がうまく使うことで、これまでよりも質の高い診療や医療を実現していけると考えています。また実際のところ、脳の病気はまだまだ治すことができないものが多いのです。未来の話ですが、失われた脳の機能をAIで代替するようなことができたら、現在と全く異なる医療のかたちが生まれるでしょう。そんなことにも期待をしています。

―― 研究におけるELSIなど、倫理における議論の重要性についてどうお考えですか？

柳澤：私が取り組んでいる分野は、医療のみならず、身体機能を拡張する（エンハンスメント）という側面も持っています。私たちは、しゃべる、行動するといった、身体的な運動によって外界とコミュニケーションをしており、BCIは、主にこうした運動能力を失った患者さんに届ける医療です。しかし運動以外でコミュニケーションができることが社会に示されると、患者さんにとっては画期的な医療ですが、健常者にとっては新しい能力であり、身体拡張の一手となります。この両義性について、患者さんへの理解を促すことはもちろん、適切な社会認知をつくりあげていくことは非常に重要なことだと考えています。私としても、医療として効果があり、サイエンスとしても新しいことが実現できることがモチベーションですから、社会に適切に理解され、受け入れられていくことは何よりの喜びですね。

AIは共進化するパートナーだと考えています

脳モデルの解析によって、未知なる脳のはたらきを知る

大阪大学大学院生命機能研究科 教授
西本 伸志

西本伸志教授が試みているのは、ブラックボックス化している脳の情報処理の“暗号解読”だ。
実現すれば、未来では脳レベルでパーソナライズされた社会が実現できるという。
脳の暗号解読の全貌と課題について聞いた。

西本 伸志

大阪大学大学院生命機能研究科 教授。専門は知覚・認知神経科学、知覚情報処理。大阪大学基礎工学部飛び級中退、同大学院基礎工学研究科修了。博士（理学）。カリフォルニア大学バークレー校、情報通信研究機構を経て、2021年より現職。ERATO「池谷脳AI融合プロジェクト」グループリーダー。

―― 研究内容について教えて下さい。

西本伸志（以下、西本）：私たちの研究は、言ってみれば脳の「暗号解読」です。何かを聞いているとき、見ているとき、あるいは読んでいるとき、つまり私たちが何かを体験しているとき、つねに脳は活動しています。脳の活動は、無数にある神経細胞の発火として現れます。これらは私たちには理解することができていない、体験が暗号化された、いわば「脳の言葉」と言えます。私は体験、すなわち認知活動によって生じる脳の神経活動を網羅的に解析し、脳の暗号化のメカニズムを解明することで、脳の言葉を理解したいと考えているのです。

—— 脳の暗号解読はどのようにして行われるのでしょうか？

西本：まず大きく分けて、私たちの体験とそれに対応する脳活動があると考えます。たとえば何かの映像を見たとき（体験）、脳内では映像の特徴をとらえて脳活動に反映するための処理が行われています。この体験と脳活動の関係性を記述するのに、両者を入出力関係として捉えて一方から他方を予測するモデルを作ることが有効であると私たちは考えて研究をしています。これを「モデリングアプローチ」と呼びます。任意の体験と脳活動の関係について、その間を司る特徴を介して記述するモデルを構築することができれば、例えば知覚している内容（前述の例で言えば映像）を、脳活動からあらためて再構成（デコード）することも可能になると考えています。こうした脳活動モデルの解析が進めば、これまでわからなかった脳の機能を網羅的に理解することにつながると考えています。人間の脳の複雑な認知のプロセスを把握していくことが脳活動のモデル化です。

—— 脳活動のモデルはどのようにして生み出されるのでしょうか？

西本：モデルをつくる上で、AI や機械学習の手法が大きな役割を果たします。MRI（※）によって記録された脳活動と体験の関係を記述する際に、機械学習由来の様々な特徴を利用します。動画を見るとき、言語を使うとき、音を聞くとき、内省するとき、論理や計算をするときなどで、脳内ではそれぞれの特徴に対応した活動が表れます。たとえば、映像を見るというタスクを行っているとき、脳内では、色を認知したり、動きを認知したり、あるいは過去の記憶を参照したりする活動がダイナミックに、かつ複数の箇所で共起しています。こうした多様な特徴と脳活動の時空間パターンの関係を調べていくのですが、これらの解析に機械学習を用いることで、これまでの研究では把握しえなかった関係性、あるいは脳内における情報表現や機能構造を把握していくことができるようになってきています。

脳情報をモデル化した
パーソナルブレイノミクス

——「ERATO 池谷脳 AI 融合プロジェクト」では、まさに AI と脳の融合を標榜していますが、先生の研究とはどのように関わるのでしょうか。

西本：私たちの研究では AI をつかって脳をモデル化していますが、脳研究に AI を用いること自体は自然な流れだと感じています。私たちは世界からさまざまな情報を受け取り、この世界を生きるエージェントです。そして新種のエージェントが AI だとも言えるでしょう。この世界を私たちと共有している AI は、何らかの目的を持つために生み出されたものです。これらのエージェントが相互作用することは、お互いの理解を深め、進歩につながると考えられます。たとえば現在の AI には、人間のように様々なタスクに対応したり、自律的な意思決定をしたりすることはできません。しかし、より人間に近いロボットや AI をつくろうとしていく際に、人間の複雑な認知モデルの研究結果が参考になっていくと思います。脳モデルの理解を進めることで、AI 融合による新たな可能性を模索すること、それが ERATO 池谷脳 AI 融合プロジェクトで現在進めていることです。

※ MRI …「磁気共鳴画像法」と呼ばれる、人体を傷つけることなくその内部構造や活動を三次元的に計測する技術。脳の機能解剖学的検査や、病気の影響の評価、あるいは治療の指針となる情報を得ることができる。

—— 脳のモデリングアプローチには、今後どんな応用が期待できるでしょうか？

西本：たとえば現在、パーソナルゲノミクス（個人のヒトゲノムによる、全塩基配列の情報）はさまざまな応用が模索されています。私は脳の情報にも類似したインパクトがあると感じています。すなわち「パーソナルブレイノミクス」です。パーソナルブレイノミクスにおいて必要なものが、現在私たちが取り組んでいる脳活動のモデリングなのです。

—— パーソナルブレイノミクスは、人間社会をどのように変えていくと思いますか。

西本：定量化された“個性”をさまざまな人間活動に応用していくことができます。たとえば教育です。それぞれ異なる人間は、異なる個性を持っています。現状の教育現場では、異なる個性を持つ人々がいるにもかかわらず、概ね同じ学習方法で指導されています。しかし、個々人の脳のモデルや特性が分かれば、この教育のフォーマットを変えられる可能性もあります。たとえば、教育を受ける人の脳を「映像の方が理解しやすい脳」や「文字情報の方が理解しやすい脳」に分類し、脳の個性に沿ってパーソナライズされた学習を提供することができるかもしれません。現在はまだ遠い未来の話ですが、そうした応用の可能性も大いに考えられると思います。

—— そうした研究成果や技術が社会に実装されていくとき、ELSI や人間の価値観に関する議論に関してどうお考えですか？

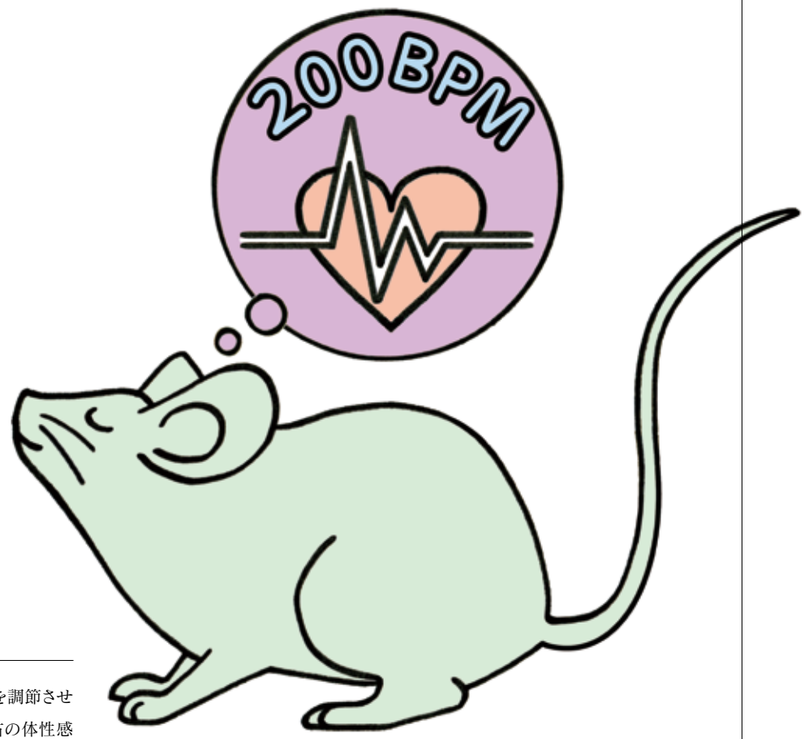
西本：ELSI は、新しい研究領域のルールづくりに影響していく上でも、非常に重要なことだと考えています。サイエンスは国に関係なく進みますが、社会応用などを模索していく段階になると、それぞれの国固有の文化や法律に直面することになります。そのため、ルールづくりの段階から、つまりELSIとしてダイバーシティを担保しておくことはサイエンスにとって重要なことだと考えています。たとえばパーソナルブレイノミクスにおいては、脳を究極の個人情報として扱うことになります。脳という極めて繊細な個人情報をどのように扱うべきなのか、また脳のことがよりわかってきたとき、人々はどう考え、どう生きて行動していくのか。人文科学の見地も取り入れながら、議論を重ねていくべき部分だと思います。

AI はこの世界の
新種のエージェントといえるでしょう

脳AI融合研究の実験室

脳とAIをつなぐと、何ができるのか？
脳AI融合研究を進めるにあたって、
日々進められている実験プロジェクトについて、
池谷研究室の松本信圭助教に詳細を聞いた。

心拍数を調節するネズミの“ヨガマスター”

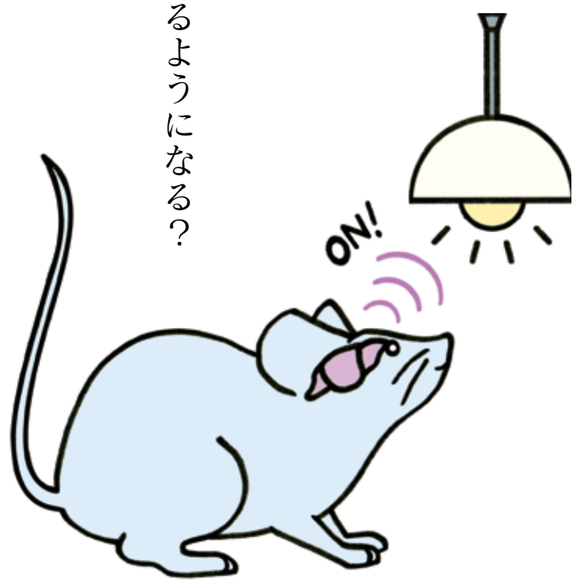


バイオフィードバック（※1）によって、ネズミに自身の心拍数を調節させる実験。準備としては、ネズミの脳の報酬系（※2）と、左右の体性感覚皮質を刺激できるように、ネズミの脳に1本ずつ電極を刺す。次に実験を行うネズミの基本的な心拍数を測定する。心拍数を下げることを目的とする実験では、心拍数が下がったら、左の体性感覚皮質に刺激を与え、上がれば右の体性感覚皮質に刺激を与える。左右どちらに刺激が与えられるかで、ネズミは自身の心拍数が下がっているか、上がっているかを自覚することができる。そして、目標となる数字まで下がったら、報酬系が刺激されて気持ちよくなるという仕組みだ。

このトレーニングを続けた結果、最終的に心拍数は、平均の約400BPMが平均200BPMにまで下がった。人間で言えば、相当なトレーニングを積まなければ至れないヨガの極地にバイオフィードバックで到達したようなものである。サイエンスとしては、胸髄や腰髄による、交感神経が支配しているはずの心拍数が、どのようにして下がるのかはまだ分かっておらず、脳へのフィードバックとの関係から解明が待たれる研究対象である。また今後は同様の手法で体温や血糖値など、抗肥満機能や認知機能、抗老化作用など有用な作用のある対象へと実験を広げていく予定だという。

※バイオフィードバック…自覚や制御が困難な身体の生理機能の値（例えば、心拍数や血圧）を、電子機器などによって明示的に本人に提示し、本人の認識・制御下に置く技術・手法。
※2 報酬系…欲望や願望を持って活動しているときに活性化する脳内の神経系。逆に、報酬系を電気刺激することで、当事者は快感や多幸感を得られる。このような報酬や罰を用いて、特定の行動を自発的におこなうように学習させる手法は「オペラント条件付け」と呼ばれる。

ルーム照明を脳で操作できるようになる？



IoTが発展するいま、脳からの信号で家電をコントロールできるようになるかもしれない。この実験では、部屋の照明をネズミが自身でコントロールできるかを調べていく。ここではネズミは穴があると鼻をつっこむ性質（ノーズポーク）を利用し、左右の壁にノーズポークできる穴の空いた箱を用意する。そして、右をポークすると明るさが上がり、左だと下がるように細工をし、4段階の明るさを自身で調節できる。

飼育箱は3群用意され、1群はネズミ自身ですべて調節できる「自己調節群」、2群は自身で調節はできず、自己調節群の日照サイクルと連動した「被調節群」。そして3群は12時間ごとに照明のオンオフが切り替わるのみという単純な明暗サイクルの「対照群」。この飼育箱で、10日～30日間ネズミを飼育してみたところ、「自己調節群」は、ルーム照明を自身でうまく調節して生活リズムを生みだしていることが確認できた。さらに、各群のネズミのストレス状態を調べるため、糞に含まれるコルチコステロンを定量化していくと、「自己調節群」がもっとも少なく、次いで「対照群」、もっともストレスが高いのが「被調節群」だということが分かった。また、学習成績も自己調節群がトップだった。つまり、ルーム照明を自己調節できるネズミはストレスも減り、学習成績も上がることが確認されたのだ。現在は脳波を用いて、ネズミが起きてきたら自動的に暗くし、眠くなったら自動的に明るくなるようにする実験を開発している。

ネズミに英語とスペイン語を識別させる

機械学習を用いることで、ネズミは人間の言語の違いを識別することができるようになるのだろうか。ここではまず、何度もスペイン語と英語を相互に聞かせる実験をした。ネズミが穴に鼻をつっこむノーズポークという性質を選択ボタンのように扱い、正解の穴につっこめば報酬としてエサを与えていった。しかし10000回以上の実験を繰り返しても、正答率は5割程度にとどまり、ネズミには英語とスペイン語の違いは識別できないことが分かった。

しかし、実際のところ脳の反応レベルでは識別している、つまり英語とスペイン語を聞かせた時の神経活動は異なるという仮説を立てた。英語とスペイン語は、それぞれ異なる振動パターンで鼓膜に伝わる。音声の信号は鼓膜から脳に伝わり、脳幹を経由し、視床から一次聴覚皮質に伝達される。そこで一次聴覚皮質に電極を32本刺して神経活動を記録した。そして機械学習に言語を判別させ、判別結果を脳刺激パルスに変換し、ネズミにフィードバックした。結果、2000回目まで成績は同様だった。しかし、6000回以上聴くと成績は上がり、最終的には7.5割にまで達した。さらにデータセットを変え、新しいフレーズでも識別できるかを実験したところ、同じ程度の成績で識別できることが分かった。つまりネズミは、英語とスペイン語の本質的な音の違いを学習しているということである。今後は音楽や絵画を識別する実験を計画中だ。

HITE
（人と情報のエコシステム）
ELSI/RRIの実践

「人と情報のエコシステム（HITE）」はJSTのRISTEX（社会技術研究開発センター）が2016年より始動した公募型研究開発領域です。ここでは、ビッグデータを活用したAIやロボットなどの情報技術が社会に普及する時代において、それらの技術がどのように社会に受け入れられ、また人間の価値観や意識はどう変化するのかといった人間中心の視点に基づき、人文社会科学の知見を取り入れた分野越境型の研究を多く推進してきました。

「BRAIN-AI×HITEプロジェクト」では、HITEに参画する哲学、ELSI研究などの専門家を交えて、これからの脳AI融合研究における技術が、人々や社会にどのような影響を与えるかを考察していきます。

脳AI融合研究に、人文学者が関わること

大阪大学社会技術共創研究センター 准教授
標葉 隆馬

大阪大学社会技術共創研究センター 特任研究員
石田 柊

「脳 AI 融合」という言葉からは、近未来的な想像が湧く人もいれば、人の倫理に反するのではないかという懸念を持つ人もいるだろう。言葉のイメージだけが先行しやすい時代にこそ、ELSI の専門家が研究の初期段階から関わり、ともに倫理的課題やこれからの技術発展のビジョンを描く必要性が生まれている。BRAIN-AI × HITE プロジェクトに ELSI 担当として携わる、標葉隆馬教授と石田柊研究員に話を聞いた。

石田 柊
大阪大学社会技術共創研究センター特任研究員。専門は規範倫理学・応用倫理学。2022 年 3 月東京大学大学院総合文化研究科博士後期課程単位取得退学。2021 年 9 月より現職。

標葉 隆馬
大阪大学社会技術共創研究センター 准教授。専門は科学社会学・科学技術社会論・科学技術政策。2006 年 3 月京都大学農学部応用生命科学科卒業。2011 年 3 月 京都大学大学院生命科学研究科博士後期課程修了。総合研究大学院大学・助教、成城大学・准教授などを経て現職。

格差、プライバシー、過剰な期待 … あらゆる倫理課題を検討する

── 将来的に脳と人工知能の融合に関わる技術の開発や普及が進む過程で、ELSI を検討する上ではどのような課題が生じると思いますか？

標葉隆馬（以下、標葉）：先端科学領域では「分配的正義」というキーワードが頻出します。どういうことかというと、先端科学技術の成果や恩恵というものは往々にして経済的に豊かな人だけが享受する状態に偏りがちだという問題があります。そこで、そうした恩恵に誰もがアクセス可能であり、それぞれの背景に応じて適切に恩恵を得ることができるようにするべきだという議論が出てきています。さらには、そのための仕掛けを研究開発側も考えていくことを強く求められるようになりました。それは脳神経科学のみならず、さまざまな先端科学領域の政策や国際学会のガイドラインにも明記されるようになっています。

この先、脳 AI 領域の技術が実用化された時にも、誰がその技術を利用できるのかという問題が生じることが予想されます。また、それにアクセスできる人とできない人との間にどのような差が生じるのか、さらにはそれを使うのが当たり前の社会になったときに格差や差別などの問題は生まれてしまうのか。このような分配的正義とそれに伴う不平等や差別の問題についての議論が必要だと思います。また少し違った視点として、どれだけ有用な技術があったとしても、「自分は利用しない」と言える自由は担保されるのか。またその選択で不利益を被らないためにはどのような仕掛けが必要なのかなども課題になりえます。

脳神経科学の話題は個人のプライバシーに深く関わるものであると同時に、在住する国や社会階層などの属性によってその恩恵の享受の度合いが大きく変わってしまうという側面があります。ともすると、メンタルプライバシーの侵害や格差の拡大につながり、さらに経済的格差などが顕在化することでセキュリティリスクにもつながる深刻な課題ではありますが、それらの問題は研究開発に携わる当事者の方々も感じていることでもあるので、その分ガイドラインの策定などの議論をする際に共通認識を持ちやすい面もあります。

ほかにも、それぞれの科学技術に対する社会からの期待をマネジメントすることも重要です。例えば教育利用や病気の治療などへの活用が期待された脳神経科学など、期待感が高く懸念点が必ずしも積極的に語られていなかった時代が長い分野は、過剰に期待されてきた分、後から問題提起をされた時に激しい揺り戻しが来る可能性があります。それを現段階からどのようにマネジメントして良いかたちに落とすかも重要な課題だと思います。

── 脳 AI 融合プロジェクトには、人の心に関連するテクノロジー特有の課題もありそうです。

標葉：おっしゃる通りですね。例えば「認知エンハンスメント」や「道徳エンハンスメント」といわれるキーワードがよく話題になります。一例として、凶悪犯罪を犯した人に対して、脳にアプローチすることで彼らの攻撃性を抑えるアプローチが可能となった場合、それは倫理的にどこまで許されるのかという議論があります。他者や社会の安全の確保という利点はあれど、やはり人権侵害になりかねないとも言える介入の仕方ですから、そう簡単な話ではありません。そのような実用例が想定される場合にどう扱うかは事前に議論されるべきです。

石田柊（以下、石田）：「感情エンハンスメント」も議論の対象になります。これは操作の倫理学に関わるテーマでもありますが、テクノロジーによって半ば強制的に気分をよくするなどの介入のことを指します。また、エンハンスメントがあるということはその逆の側面の可能性も指摘されてきました。例えば、外的介入によって相手にストレスを与えたり、相手の認知能力や道徳性を下げたりするという介入も考えられます。

標葉：もうひとつの課題は、技術が進歩する速度があまりに速いので、法律を整えるスピードが追いつかないことです。そうなると研究の当事者たちが学会の指針や業界指針、規範などを通して自主的にブレーキをかけて縛っていかないと問題が山積して対処できなくなってしまいます。明文化され法的な拘束力を持つ法律などのハードローに対し、業界内のガイドラインなどをソフトローと呼びますが、このようなソフトローの役割は大きく、それを整える際には当事者である研究開発側の研究者たちにも議論に参加していただくことが大切です。そうでないと当事者不在のまま制定された法律などのルールを望まない形で押しつけられることになるかもしれませんし、それによって研究開発にも過剰な形で支障をきたすことになりかねません。

議論の蓄積を共有し合う

── 先進的な研究に人文社会学の研究者が関わることには、どんな意義があると思いますか？

標葉：先端科学の研究をやっている科学者・研究者は、ELSI に関わるテーマの重要性を理解されていたとして

も、世界的に過酷な競争環境の中で、なかなかそれらの課題を十分に議論するような時間を割くのが難しい状況にあります。一方で科学技術の社会的課題を扱ってきた我々のような研究者は、多少なりとも過去の議論の流れや関連する論点、分析する手法といった専門性を持ち合わせています。両者が良い形で協働できることで、議論をより良い形で進めていくことにつながると思います。

石田：私の専門である倫理学にフォーカスしてお話しすると、倫理学が対象領域の活動をただ縛るだけであれば、研究者にとって協働するメリットがほとんどありません。しかし倫理学が蓄積してきた知見は規制だけではなく、むしろ規制の緩和を根拠づけるために活用することもできるはずです。極論を言えば、倫理的な側面だけ考えると新しい技術なんかわざわざ使わないほうが最も安全ということになってしまいますが、これだけ技術が発展するいま、実際はそうもいかないですよね。科学の恩恵を最大化するためにも、新しい分野の研究をすることに伴う倫理的リスクに対峙するための先導役を倫理学者が担う意義はあると思います。

私たちが研究をしている事柄は明日すぐに役立つ知識ではないかもしれませんが、さまざまな倫理の問題が想定されていくなかで意味のあることをしているという実感はあります。それこそが醍醐味ですし、倫理学者も伊達や酔狂で研究をしているわけではないことを、しっかりと世の中に見せていきたいと考えています。

—— 先端的な研究開発と専門外の人々とのコミュニケーションを図る上で、今後はどのようなアプローチが可能だと思いますか。

標葉：科学技術の研究開発に携わる方は、常に悩みながらも自分たちの生産する知識を世の中に役立てたいと考えていると思います。実はその悩みこそが技術を社会に実装をする際に最も重要な論点に近い場合が多いのではないかと思います。なぜなら、それらの悩みは個別の悩みではなく過去に議論されてきた事柄でもあるため、リアルタイムに直面している悩みと紐付けて考えることで、その技術を社会の中にいかにして根付かせるかに関わる論点を先取りすることができるからです。ですから、できるだけ早い段階から共有していく必要があると思います。また言語化が難しい場合もあるため、ELSI の研究に携わる我々が社会に伝える新たな「ことばづくり」のお手伝いもできればと思います。

哲学の視点から考える、脳神経科学とAIのもたらす未来

東京大学大学院総合文化研究科 教授
鈴木 貴之

新しい技術によって変化する価値観や倫理を考える上では、哲学の知見が不可欠となる。脳神経倫理学や「人工知能の哲学 2.0」などのプロジェクトを通して、脳神経科学や AI の発展を哲学の分野から見通してきた鈴木貴之教授は、BRAIN-AI × HITE プロジェクトに哲学チームとして携わるひとりだ。国際的に議論されている脳神経科学の倫理をはじめ、これからの議論の筋道をつくる倫理的な視座について尋ねた。

鈴木 貴之

東京大学大学院総合文化研究科教授。著書に『ぼくらが原子の集まりなら、なぜ痛みや悲しみを感じるのだろう』（勁草書房、2015 年）、『100 年後の世界』（化学同人、2018 年）、『実験哲学入門』（編著、勁草書房、2020 年）、『脳神経科学リテラシー』（共著、勁草書房、2010 年）ほか。

—— 鈴木先生のご研究の内容について教えてください。

鈴木貴之（以下、鈴木）：私の専門は心の哲学です。これは、人間の脳と心の関係に関する理論的な問題を考える分野です。その応用問題として、人工知能の哲学や精神医学の哲学、そして脳神経倫理学にも取り組んでいます。

—— 脳神経倫理学とはどのような研究分野なのでしょうか。

鈴木：脳神経科学研究やその応用に関連する倫理学的な問題、あるいは社会的な問題について考える分野で、応用倫理学と呼ばれる分野のひとつです。応用倫理学には、例えば医療に関しては、安楽死や臓器移植などに関する問題を考える医療倫理や生命倫理と呼ばれる分野があり、環境問題に関しては、地球温暖化の問題や資源の枯渇といった問題について考える環境倫理という分野があります。同様に、脳神経科学研究やそこで開発された技術の利用に関連して生じるさまざまな問題を扱うのが脳神経倫理学です。

脳神経倫理学は、医療倫理や遺伝子倫理など、応用倫理学の既存の分野とも密接に関係しています。例えば遺伝子を操作して人間の能力を増強する技術が将来実用化された場合にどのような問題が生じるかは、1990 年代から議論されてきました。脳神経倫理学で

も、それと類似の問題が議論されています。頭が良くなる薬が将来実用化された場合にどのようなことが起きるかといった問題です。このように、別の分野で議論されている内容を参照しつつ、人間の脳に関して新たに生じる倫理的問題を考えるのが脳神経倫理学です。

約 20 年にわたる
脳神経倫理の議論

―― 脳神経科学の知見が技術転用されるとき、どのような課題が生じると思われますか。

脳神経科学の技術転用としては、脳の活動を読み取る方向性と、脳に介入して脳の働きを人為的に操作する方向性の二つがあり、それぞれに関して大きな問題がひとつずつあります。

前者に関するものは、脳の活動からその人の心を読み取るマインドリーティングに関連する問題です。脳の活動を解析すれば、ある人が嘘をついているかどうか、あるいは何を視覚的にイメージしているかを読み取ることが現在でもある程度可能です。そうした研究がさらに進むと、この技術をマーケティングに活用しようと考える企業が消費者の脳を無許可で読み取り、売れる商品を開発したりセールスに活用したりすることが可能になるかもしれません。また、司法分野では、犯罪者の脳の活動を読み取り、それにもとづいて責任能力を評価し、量刑判断の参考にするといったことも考えられます。これらの技術を利用することの是非を誰が判断するのかも問題になります。

一方で、後者の脳の働きに介入して能力を高めるエンハンスメント（能力増強）に関する問題も重要です。脳に介入することで人の記憶力や頭の回転の速さなどを改善することは、一見すると人類の発展につながる素晴らしいことのようにも思われます。しかし、そのような技術が高額で、富裕層しか利用できないものだとすれば、新たな格差を生むことにもつながります。あるいは、仕事の生産性を向上させるために企業が従業員にエンハンスメントを強要することも考えられるでしょう。

このような脳神経倫理学に関わる議論は、すでに 20 年くらい続いています。その中でもマインドリーディングの問題とエンハンスメントの問題は、二つの大きな問題として議論され続けています。

―― 脳 AI 融合プロジェクトに対しては、哲学という視点からどのように関わることができそうでしょうか？

鈴木：まず、脳神経倫理などですでに進められている議論を参照しつつ、脳 AI 融合プロジェクトで生じうる新たな問題を発見することが考えられます。脳と機械を接続する技術はブレイン・マシン・インターフェース（BMI）と呼ばれ、すでに研究が進められています。脳 AI 融合プロジェクトでも、頭の中で「暗くなれ」と思うだけで部屋の電気のスイッチを切るというような技術の可能性が検討されています。しかし、パッと頭の中で思い浮かべるだけで何か変化を生み出せることは、良い結果につながることもあれば悪い結果につながる場合もあります。BMI を軍事利用する研究もありますが、ほんの少し思いがよぎっただけでミサイルが発射されてしまえば、人の命に関わるようなことにもなりかねません。

もちろん、一見すると便利に見えるものが悪い結果をもたらす可能性はどの技術にもありえます。したがって、研究開発や実用化にブレーキをかけるのではなく、そうした問題に注意をしながらも、世の中にプラスになるように使っていく方法を模索することが大切です。そのとき、人間の意識的なコントロールに委ねることには限界があるかもしれません。そこで、良くない結果をもたらすような使い方を人間がした場合でも、テクノロジーの側でコントロールするといった研究も同時に必要になるでしょう。こういったことを考えるのが第一の役割です。

新たな社会への
ビジョンを描く

もうひとつの役割は、科学技術の研究開発の指針となるビジョンを考えることです。たとえば、エンハンスメントによって先天的な能力の制約から解放されたならば、われわれはいまよりも幸せになれるのでしょうか、あるいは、エンハンスメントによる競争が激化したり、できることの選択肢が増えすぎて途方に暮れてしまったりして、むしろ不幸になるのでしょうか。

このような問題を考えるには、どうすればより良い社会が実現できるのか、科学技術はそのためにどう役立つのか、そもそも良い社会とは何なのか、こういったことに関するビジョンを描くことが最終的な課題になるはずです。そうしたビジョンを科学者の方々とともに考えることは、科学技術の研究開発にとってもプラスになると思います。

哲学や倫理学は、科学技術の開発や社会実装に制約をかけるようなものと考えられがちですが、もっとポジティブな提案も可能なはずです。哲学を古代ギリシャまでたどると「良い生とはなにか、良く生きるにはどうしたらよいのか」ということが哲学の大きな関心であることが分かります。哲学の立場からより良い社会を実現させるための技術を考えることは、哲学本来のあり方に立ち返るということでもあるわけです。

―― 脳 AI 融合の研究チームと人文社会学の研究者が共同で関わっていく意義についてはどう考えていらっしゃいますか？

鈴木：科学技術それ自体は中立的な存在で、問題は使い方次第だと考えられがちです。しかし、かならずしもそうではないかもしれません。例えば、SNS が社会に浸透することで、人間のコミュニケーションのあり方自体が悪い方向に変容しつつあるのかもしれない、というのはその一例です。科学技術はかならずしも中立ではないという認識を共有しつつ、技術の実用化にあたってどのようなことが起こりうるか、それにどう対処すべきかを一緒に考えていきたいと思います。

―― 「脳 AI 融合」という言葉はインパクトがあるが故に、研究の実態よりも大きく誤解されたかたちで世の中に広まってしまう可能性もあります。一般の方々とコミュニケーションについてはどうお考えでしょうか？

鈴木：「脳 AI 融合」という言葉はもともと非常に SF 的な響きをもっているので、研究の実情を知らない人には、「マッドサイエンティストが面白半分で脳と AI をつなげている」という受け止め方をされてしまう危険性もあります。したがって、興味本位の研究などではなく、身体が不自由な人がより自由に生活することを可能にするなど、その知見を社会に役立てる意図があっての研究であることを積極的に伝えることが重要だと思います。また、社会実装に伴う格差の拡大などに関する問題についても、研究者はそのような問題が存在することを認識しており、対策も考えているというプロセス自体を発信し続けることも重要なのではないでしょうか。

ELSI / RRI とは何か？

インタビュー：標葉隆馬・石田柊

ELSI / RRIが生まれた背景

新たな科学技術を社会実装する際に生じうる、プライバシーや人権の保護、法的責任の所在といった様々な課題、倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal, and Social Issues）に関連する研究領域は1960年代からありましたが、あくまでも傍流の議論でした。しかし1990年代に科学技術の恩恵を最大化してリスクを最小化した活用ができる社会を形成していくために、先端科学の研究開発の過程でELSIを包括的に分析対象にする動きが出てきました。

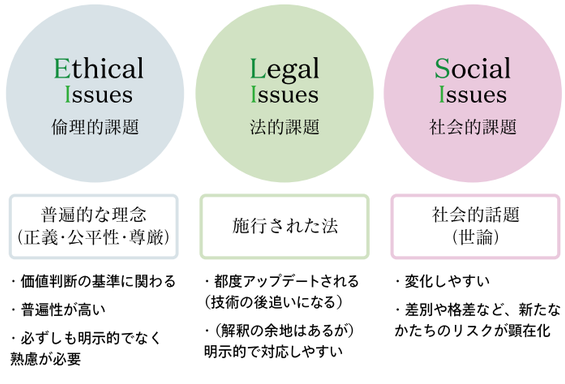
具体的な契機となったのは1990年代に米国で発足されたプロジェクト「ヒトゲノム計画」です。ゲノム研究を進めることにより、遺伝子検査の結果により保険の加入や就職に影響があるなど、それまで見えてこなかった課題が生じることが予想されたため、ELSIの研究にもまとまった予算が割かれるようになりました。現在はあらゆる科学技術領域においてELSIの問題を考えることが重視されています。こうした議論の蓄積を踏まえて、科学技術研究の進め方や科学技術人材の育成、科学教育などもふくめたプロセスをデザインして、社会的なインパクトを最大化していくために作られた枠組みが、責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and Innovation: RRI）です。

ELSIやRRIに携わる研究者は、調査や分析をした結果を論文に書くだけではなく、現場の研究開発に携わる研究者と連携しながら、より良い研究開発のための提言や提案、論点の整理をコンスタントに提示していきます。そういった動きはこれまでの日本ではあまり見られませんでしたが、脳AI領域ではアカデミアだけではなく民間企業などとも連携して進められつつあります。

ELSI、テクノロジーアセスメントの手法とは？

我々のプロジェクトで、先端科学技術分野のELSIやRRIに関わる論点のテクノロジーアセスメントを進める場合、メディア分析とアンケート調査、市民参加型の対話手法など複数の分析アプローチを組み合わせることで共通した論点を探っていきます。手法の「三点観測」のようなアプローチを行うことで、論点のコアとグラデーションが明らかになるので、ある程度の幅の中で懸念や関心が収斂しているということを可視化できます。

「ELSI」の分類



出典：https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/XR/CRDS-FY2021-XR-02.pdf, P3,「ELSIの分類」（岸本・朱 2020）

メディア分析のアプローチは大枠で三つあります。ひとつは、どのタイミングでどの単語が何回使われたかを定量的に分析する定量テキスト分析です。脳神経科学に関して実施した結果、2000年代初頭の脳トレブームの時には脳神経科学の教育利用への期待感が高く、2010年代に入った頃には病気の治療への期待感が垣間見えるキーワードのつながりが見えてきました。

次に、あるテーマが出てきた際にコーディングルールと呼ばれる特定の語られ方やポイントを押さえて集計する内容分析も行っています。ここで言うコーディングとは、例えば特定の事象に関する報道を分析する際に、何をもって好意的かあるいは批判的か、倫理に関するテーマを扱った記事だ、政策的課題について言及した記事だなど、そこに登場するテーマを判断する基準を作り、それによってコンテンツを数値化したりカテゴリに分類したりする作業のことを指します。

さらに、個別の記事がどのようなニュアンスで書かれているのかを分析する言説分析という手法を加えた三種類の方法を組み合わせ、マクロトレンドの差や時系列ごとにどのテーマが注目されてきたか、ELSIに関わる課題の語られ方の特徴の比較などを行いました。その結果、脳神経科学は他分野（例えば、遺伝子組換えや再生医療）と比較して、高い期待感とともに語られ続けてきたテーマであるという特徴があります。逆に言えば、期待感に比して潜在的な課題が社会の中で必ずしも共有されていない。このことを踏まえて議論する必要があると明らかになりました。

ELSIの実践事例

科学技術と社会とのコミュニケーションに関して、GMO（遺伝子組換え作物）の事例は、社会的な懸念や反発を十分に予測できず研究者サイドの対応も遅れてしまったという教訓をもたらしました。その反省から、社会的な懸念や関心に先んじたモニタリングをしていくことが重要であるという共通認識が持たれるようになりました。

ナノテクノロジーや合成生物学などの領域では、かなり早い段階から分析が進み、それを踏まえたロードマップや施策も行われたこともあってか、かなり円滑に論点の整理や議論が機能し、研究開発の指針形成にも活用されてきたと思います。

このような事柄を考えるときに、一つ興味深い点は、立場によってリスクの見え方が異なることです。例えば、再生医療に関して一般市民からヒアリングをした結果、健康寿命の延長が年金制度の先延ばしにつながることや、高齢者が労働し続けることへの懸念が示されました。つまり、技術による健康寿命の延長の恩恵を最大限に生かすなら、科学者のみならず公共政策や福祉制度もふくめた様々な専門家と連携をする必要があります。

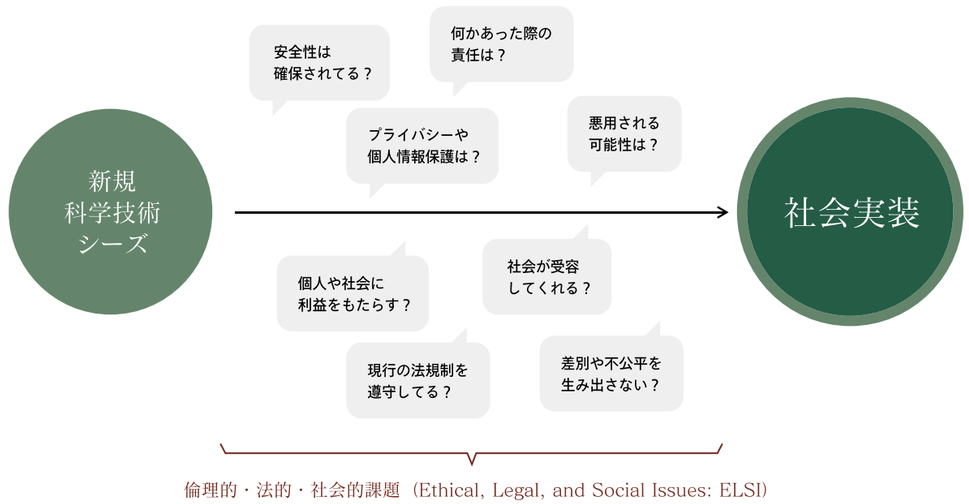
「neurorights（脳神経関連権）」の現状

脳神経科学とその応用によって顕在化した倫理的問題を扱う動きの中で、「neurorights（脳神経関連権）」は、2017年前後から欧州を中心に脳神経倫理学におけるキーワードとして取り上げられるようになりました。具体的には次の五つがneurorightsとして提唱されています。(1) 認知的自由の権利 (2) 精神的プライバシーの権利 (3) 精神の不可侵の権利 (4) 心理的連続性の権利、(5) 脳神経科学を応用した技術のために不平等や差別を受けない権利です。

論点となるのは、ブレインテック研究の成果から生まれた恩恵を誰もが利用可能にできるか、といった平等性の担保と、社会に実装されていく過程で新しい差別や問題が起きないようにすることなどです。また、これまでに懸念されてきた、脳神経科学に関わる倫理的課題も回避されないといけません。それらをふくめたものを権利として定義付けて制度設計を積極的に行う動きがあります。

この議論の背景には、脳神経科学研究と並行してELSIが研究されていたことがあります。それをベースに国際的なガバナンス体制やレギュレーションを作っていく動きがあったからこそneurorightsについても積極的に言及されるようになりました。今後も同様にELSIの研究が新たなテクノロジーの社会実装に関する議論に貢献していくものと思われます。

新規科学技術を社会実装するまでには数々のハードルを乗り越えなければいけない



出典：https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/XR/CRDS-FY2021-XR-02.pdf, P20,「ELSIの分類」（岸本・朱 2020）

脳とAI研究年表

解説：鈴木貴之

脳神経科倫理学と人工知能研究は、それぞれどんなプロセスを歩んできたのか？双方の変遷に詳しい鈴木貴之教授が解説する。

脳神経倫理学関連の話題

- 1969 ニューヨーク州に生命倫理学の研究機関ヘイスティングス・センターが設立される。（生命倫理学研究の本格化）
- 1990 米国国立ヒトゲノム研究所がELSI研究プログラムを開始する。 ※1
- 90's fMRIを用いて生きた人の脳活動を計測することが可能になり、脳神経科学が大きく進展。
- 1996 哺乳類で初の体細胞クローンである羊のドリーが誕生。
- 2000 ヒトゲノムの概要が解読される。
- 2002 デイナ財団などが開催した会議をきっかけに、脳神経倫理学への関心が高まる。
- 00's 米国などで、ADHD治療薬リタリン（メチルフェニデート）の能力増強目的での利用が問題となる。
- 2003 米国で大統領生命倫理評議会が、能力増強テクノロジーに関する報告書『治療を超えて』を公表。 ※2
- 2005 四肢麻痺患者の脳にコンピュータチップを埋め込む手術が行われる。（ブレイン・マシン・インターフェイス研究の本格化） ※3
- 2006 京都大学の山中伸弥教授の研究グループがiPS細胞を作成。
- 2013 脳神経科学とその応用の推進を目的とする巨大プロジェクトとして、米国でBRAIN Initiative、EUでHuman Brain Projectが始まる。

人工知能研究関連の話題

- 1956 米国で開催されたダートマス会議で、人工知能という言葉がはじめて用いられる。（AI 研究の始まり）
- 50's-60's 第１次人工知能ブーム。汎用問題解決器などの開発が試みられる。
- 80's 第２次人工知能ブーム。エキスパートシステムなどの開発が試みられる。
- 1997 IBMのスーパーコンピュータ、ディープ・ブルーがチェスの世界チャンピオンに勝利する。
- 2005 レイ・カーツワイルが『ポスト・ヒューマン誕生』（原題は The Singularity is Near）を出版し、シンギュラリティという言葉が一般的となる。
- 2012 画像認識のコンテストで、深層ニューラルネットワークを用いたシステムが好成績を収める。（第３次人工知能ブームの始まり）
- 2013 オックスフォード大学の研究グループが、AI の発展によって約３分の２の職が失われるというレポートを発表。
- 2017 AlphaGoが、囲碁の世界レーティング１位だった柯潔に勝利する。

1950 / 1960 / 1970 / 1980 / 1990 / 2000 / 2010 / 2020

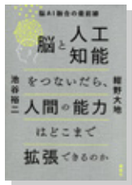
年表用語解説

※1 【ELSI 研究プログラム】
1990 年、ヒトゲノムの塩基配列すべてを解読することを目標とするヒトゲノム計画が米国で開始された。ヒトゲノムの解読は、遺伝子治療などの可能性を開くと同時に、遺伝子差別や遺伝子改良など、さまざまな倫理的問題を引き起こす可能性をはらんでいる。これらの問題に対処するため、ヒトゲノム計画は倫理的・法的・社会的影響 (Ethical, Legal, and Social Implications, ELSI) を検討するプログラムを立ち上げ、年間の研究予算の 5%をこのプログラムに用いることを定めた。これを契機として、科学技術の研究開発の場面で ELSI を検討することが一般的となった。

※2 【『治療を超えて』】
米国では、大統領直属の生命倫理評議会が、大統領の諮問を受けて、生命倫理のさまざまな問題に関する報告書を作成している。2003 年には、能力増強テクノロジーを主題とした報告書『治療を超えて』が作成された。この報告書では、遺伝子改良、頭を良くする薬（スマート・ドラッグ）、スポーツにおけるドーピング、不老長寿テクノロジー、気分を改善する薬など、さまざまな能力増強テクノロジーの利点と問題点が多角的に検討されている。能力増強の是非は、今日に至るまで、脳神経倫理学の中心問題の一つとなっている。

※3 【BMI 研究】
2000 年代前半、デューク大学のミゲル・ニコレリスの研究グループは、脳に埋め込まれた微小電極を利用して、サルが念じるだけでロボットアームを動かすという研究を発表した。2006 年には、ブラウン大学のジョン・ドナヒューの研究グループが、同様の技術を利用して、四肢麻痺患者が念じるだけでコンピュータ画面上のカーソルを動かすという研究を発表した。このように、脳と機械を接続する技術、すなわちブレイン・マシン・インターフェース (BMI) はすでに現実のものとなりつつあり、その利用の是非もまた、脳神経倫理学の重要な主題となっている。

推薦図書



紺野大地・池谷裕二
『脳と人工知能をつないだら、人間の能力はどこまで拡張できるのか』講談社、2021

脳 AI 融合プロジェクト代表の池谷氏と同研究室の紺野大地による、脳× AI の未来と研究実践の詳細を記した入門編的一冊（標葉）

信原幸弘・原塑・山本愛実編
『脳神経科学リテラシー』
勁草書房、2010

脳神経倫理学の主要な話題をわかりやすく解説している（鈴木）

森村進
『幸福とは何か』
筑摩書房、2018

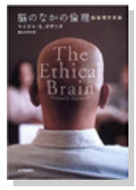
幸福（well-being）という身近なテーマを立ち止まって考えるための一冊
現代福利論のコンパクトな教科書（石田）

江間有沙
『AI 社会の歩き方―人工知能とどう付き合うか』
化学同人、2019

AI が社会に浸透するときに起こる変化を推察し、具体的な事例を交えながら技術との付き合い方を紹介する（標葉）

標葉隆馬
『責任ある科学技術ガバナンス概論』

ELSI や RRI を知るための一冊。
科学技術政策の現状と課題をはじめ、
科学と社会に関わるテーマを包括的に解説（標葉）



マイケル・ガザニガ
『脳の中の倫理―脳倫理学序説』
梶山あゆみ訳、紀伊國屋書店、2006

2000 年代に脳神経倫理学研究が盛んになったきっかけのひとつ（鈴木）

鈴木貴之
『100 年後の世界―SF 映画から考える テクノロジーと社会の未来』
化学同人、2018

近未来のテクノロジーと社会の関係をより広く論じた自著（鈴木）

池田喬・堀田義太郎
『差別の哲学入門』
アルパカ、2021

ありそうでなかった「差別の哲学」入門書
日常にある差別や偏見について理論的に論じている（石田）

寿楽浩太
『科学技術の失敗から学ぶということ：リスクとレジリエンスの時代に向けて』
オーム社、2020

科学技術の「失敗」と呼ばれる事件の紹介から、
今後の科学技術の普及について様々な
学びが得られる（標葉）

BRAIN-AI×HITEの取り組み

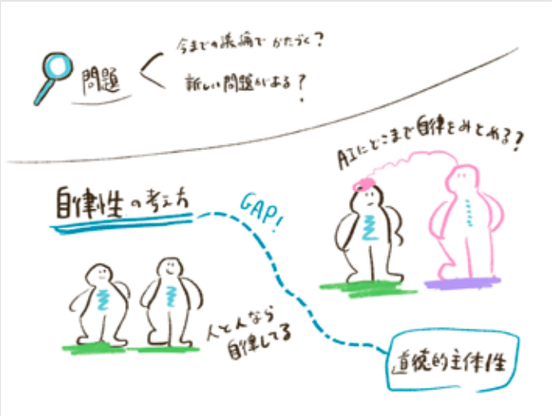
2021年度からスタートしたBRAIN-AI × HITEプロジェクトは、これまで隔月で勉強会を開催。BRAIN-AIチームからは、プロジェクトの発足した背景や目的のほか、研究内容を社会に発信していく上での懸念や研究者という立場からの課題をシェアし、一方のHITEチームはこれまでのELSI研究における理念や先行事例、哲学的視点から見た議論を展開してきました。これらの議論をベースとしながら、文献調査やメディア分析、市民アンケートなどを通して、脳AI融合研究をどのように社会に伝えていくかの方法論を探り、冊子やウェブなどのメディア展開を通じて発信していく予定です。

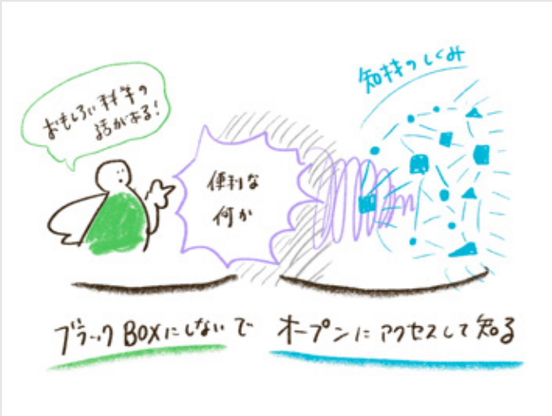
プロジェクトタイムライン

		2021年度					2022年度					
		7月	9月	11月	1月	3月	5月	7月	9月	11月	1月	3月
全体	勉強会の実施	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
活動内容	ガイドライン素案							**調査分析**（インタビュー、ワークショップ、文献調査等）				
	技術インパクトの言語化 / マッピング	**調査分析**（インタビュー、ワークショップ、文献調査等）										
	市民アンケート / ELSIノート	**調査分析**（アンケート、インタビュー等）										
	議論の可視化（グラフィックレコーディング）	各勉強会にて議論を可視化する**グラフィック　レコーディング**を実施										
	メディア発信						**冊子発行・ドキュメンタリー動画公開**		**動画配信など（予定）**			

勉強会のグラフィックレコーディング（一例）

グラフィックレコーディング：清水淳子

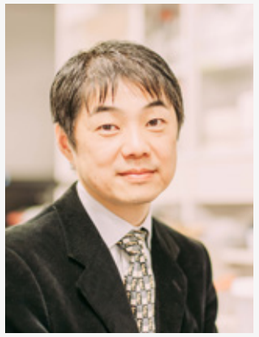




プロジェクトメンバー

BRAIN-AI

JST/ERATO 池谷脳AI融合プロジェクト



池谷 裕二
東京大学・大学院薬学系研究科 教授

Aurelio Cortese
国際電気通信基礎技術
研究所(ATR)

柳澤 琢史
大阪大学・高等共創研究院
教授

西本 伸志
大阪大学
大学院生命機能研究科 教授

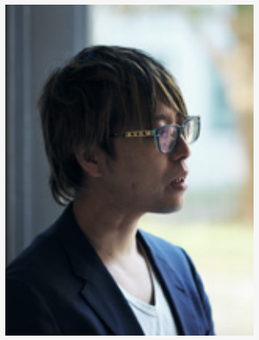
松本 信圭
東京大学・大学院薬学系研究科 池谷研究室 助教

HITE

JST/RISTEX 人と情報のエコシステム

テクノロジーアセスメント

城山 英明
東京大学大学院法学政治学研究科
教授 / HITE領域総括補佐



標葉 隆馬
大阪大学社会技術
共創研究センター 准教授

石田 柊
大阪大学社会技術
共創研究センター特任研究員

哲学

信原 幸弘
東京大学 名誉教授
/HITE領域アドバイザー

鈴木 貴之
東京大学大学院総合文化研究科
教授

メディア

塚田 有那
一般社団法人Whole Universe
代表理事 / 編集者・キュレーター

BRAIN-AI × HITE
2022 年 6 月発行

Management:
茅明子、芳賀健一、小川広美、東出学信、平尾孝憲 (JST/RISTEX)
柘植仁美、青山直樹、小山健一、今林文枝、大濱隆司 (JST/ERATO)

Creative Director, Editor:
塚田有那 (Whole Universe)

Photgrapher:
三田村亮 (P1-21, 24, 36-37)
鷲崎浩太朗 (P15-17)

Writer:
森旭彦 (P8-23 | mojimoji LLC)
高橋ミレイ (P26-33 | CuePoint LLC)

Illustration:
鈴木暢男 (P10-11, P22-23)

Art Director, Designer:
長谷川弘佳 (H Inc.)

Published by
科学技術振興機構 (JST)

科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency