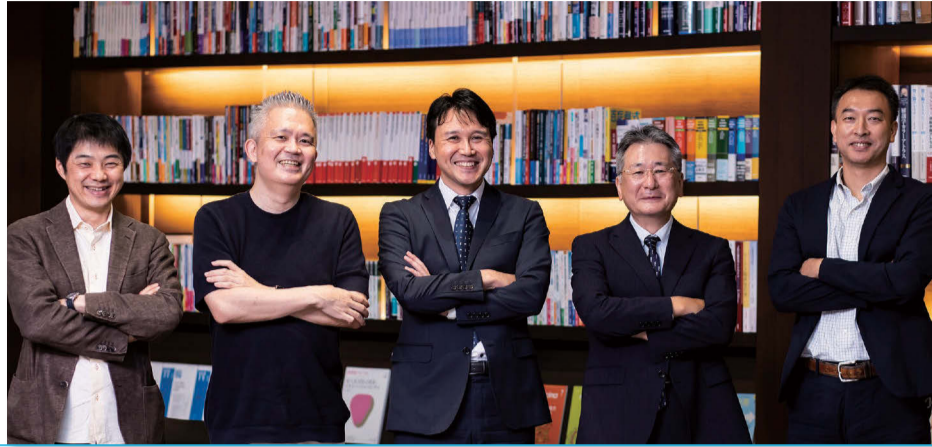


新年号特集 脳とAIをつなぐBCI——臨床応用はどこまで近づいているのか

BCI 研究が描く 2050 年の医療

脳とコンピュータをつなぐ BCI 研究が近年急速に進化した背景には、AI の登場がある。今、医療応用の可能性はどこまで現実性を持つのか。BCI の国内大規模プロジェクトに参画する研究者と、侵襲型デバイスを臨床で用いる脳神経外科医が出席した本座談会では、医療応用に向けた研究の現状と課題を議論。BCI が患者の希望に応え、そして社会に受容される 2050 年を展望する。



大阪大学高等共創研究院 教授
柳澤 琢史氏◎司会

東京大学大学院薬学系研究科
薬品作用学教室 教授
池谷 裕二氏

株式会社アラヤ 代表取締役
金井 良太氏

自治医科大学医学部脳神経外科 教授
川合 謙介氏

東京都医学総合研究所
脳・神経科学研究分野 プロジェクトリーダー
西村 幸男氏

柳澤 BCI 開発への産業界の参入が、大きなインパクトを与えています。米国の Neuralink が 2019 年に発表した、ヒトを対象に BCI の臨床試験を行うとの方針は、日本の研究者にも驚きを与えました。中国でも同様に、商業化に向けてデバイスを作る動きがあります。背景には、AI を用いた「第 4 次産業革命」への注目から、ニューロサイエンスを産業に応用したいとの期待の高まりがあります。池谷 Deep Learning の登場で脳信号の Decoding (解読) 精度が飛躍的に向上したのは、BCI の臨床応用に向けた研究が加速するターニングポイントと言えます。発声や文字起こしなどは自然言語処理技術の進展によるところが大きいですね。脳科学研究の技術だけでなく、工学分野を含め科学の全体的な底上げが貢献しています。

金井 特にここ 5 年ほどの進歩は目覚ましいものがあります。2021 年には、Deep Learning を用いて大脳皮質の活動から、発話しようとする文章を解読したと報告されました¹⁾。今後は脳信号を読み取るだけでなく、生成にも AI 技術の活用が見込まれ、実用化のイメージもよりリアリティを持ちます。川合 脳神経外科領域においても、コンピュータのデータ処理能力や記録メディアの進歩に伴い、頭蓋内電極の空間的な高密度化や記録周波数の広域化が進められています。電極の高密度化によって、脳機能の局在や信号処理の新たな知見が 2010 年代以降相次ぎ、難治性てんかんやパーキンソン病に対する治療の考え方が変わりました。西村 以前の BCI は運動機能回復のためにロボットアームは動かせても、感覚まではうまく伝達できませんでした。ところが、Decoding 技術の向上の他、運動と感覚の双方向性機能再建に閉回路型双方向 BCI が登場するなど、BCI 研究の状況は大きく様変わりしています。柳澤 つい 10 年ほど前は、刺入型電極による BCI でなければ実用的な BCI に要する精度を得られないと考えられていました。それが AI の登場と Decoding 精度の向上を受け、多チャンネルの信号から取得できる情報の最大化だけでなく、出力する言語の文脈からの推定や、脳以外の情報との組み合わせも可能となったわけです。私たちの研究グループもこれまでに、計測される皮質脳波や、脳から出る微弱な磁気を計測する脳磁図を使った BCI を開発し、AI による解読で意図を読み取りようとしています。金井 この先、読み取り技術だけでなく入力技術の向上も BCI 研究の動向を左右するでしょう。ヒトへの臨床応用は現状ではまだ難しいものの、神経細胞の活動を光で制御する光遺伝学 (optogenetics) のような革新的手法も注目を集めていますね。池谷 2021 年には、光受容タンパク

質の一種であるチャンネルロドプシンを用いた視覚復元が、初めてヒトを対象に行われました。となれば、脳活動の制御への応用もそう遠くないでしょう。私たちの研究室でも、マウスではありますが、そうした脳への信号送信の技術開発を行っています。柳澤 侵襲型 BCI 開発の転換点として、研究開発に参入する医師が増えたことも見逃せません。10 年前は刺入電極を扱う研究機関は米国でもわずか 2 大学だけで、皮質脳波はてんかん患者での計測にとどまっていた。それが今では、米国の多数の大学やオランダ、フランスの参入もあり、皮質脳波でも埋め込み型デバイスを中心に医療応用をめざした医師主導の臨床研究が進んでいます。BCI 研究は今、ハード、ソフトの両面で実にエキサイティングな状況と言って良いでしょう。計測技術や AI による脳情報解読技術がさらに発展することで、治療ターゲットとなる疾患が増えると期待されます。

福度と生産効率の向上が共存できる未来を見据えています。柳澤 具体的にどのような研究を行っていますか。池谷 私たちの研究室では 4 つのアプローチで実験を進めています (図 1)。1 つはマウスに情報センサー内蔵チップを埋め込み、脳の活動を AI で解読する「脳チップ移植」、2 つ目は潜在的な神経情報を解読し、脳にフィードバックする「脳 AI 融合」、3 つ目は AI を介して脳をインターネットに接続する「インターネット脳」、そして 4 つ目が複数脳の AI 連結による脳機能創発「脳脳融合」です。柳澤 AI と脳の融合は、医学分野にとどまらず産業界でも関心の高いトピックですね。AI と脳の研究を行う金井さんは現在、内閣府が主導するムー



柳澤 琢史氏

やなぎさわ・たくふみ 2004 年阪大医学部卒。09 年同大学院医学系研究科修了。博士 (医学)。同大学院医学系研究科保健学専攻神経機能診断学助教。同大国際医工情報センター臨床神経工学寄附研究部門講師などを経て、18 年 4 月より現職。BCI 技術を ALS 患者への適用や難治性疼痛である幻肢痛治療に応用する研究を行う。文部科学大臣表彰若手科学者賞 (2013 年)、てんかん財団研究褒賞 (2021 年) など受賞。内閣府ムーンショット型研究開発事業では侵襲型 BMI の臨床応用に向けた開発を担う。



川合 謙介氏

かわい・けんすけ 1987 年東大医学部卒業後、同大医学部脳神経外科教室入局。米国立衛生研究所 (NIH) 訪問研究員、東大医学部脳神経外科准教授などを経て、2013 年 NTT 東日本関東病院脳神経外科部長 (脳卒中センター長、てんかんセンター長兼任)。16 年より現職。専門の脳神経外科ではてんかんの外科治療を中心に行う。「てんかん診療ガイドライン」作成委員会委員として「てんかん診療ガイドライン 2018」(医学書院) の策定に携わる。共著書に「臨床てんかん学」(医学書院) など。

国内で進む BCI の大規模プロジェクト

柳澤 国内の BCI 研究に目を向けると、臨床応用に向けた大規模プロジェクトが既に動き出しています。まず、科学技術振興機構 (JST) による戦略的創造研究推進事業 (ERATO) 「脳 AI 融合プロジェクト」に関して、池谷先生から研究内容をご紹介します。池谷 私がリーダーを務めている、この ERATO プロジェクトでは、脳と AI の新たな共生様式を模索しています。将来的にめざすのは、脳と AI を連動させた新しい学術領域「知能エンジニアリング」の創出です。人々の命を救う、病気を治す、障害をサポートするなど実質的に役に立つ医学研究を念頭に置きながらも、さらにその先、社会構造や人間行動が脳と AI の融合によってさらに最適化され、人類の幸

January
2022

新刊のご案内

医学書院

●本紙で紹介の和書のご注文・お問い合わせは、お近くの医学専門書店または医学書院販売・PR部へ ☎03-3817-5650
●医学書院ホームページ (https://www.igaku-shoin.co.jp) もご覧ください。

今日の治療指針 2022年版
私はこう治療している
総編集 福井次矢、高木 誠、小室一成
デスク判: B5 頁2224 定価: 20,900円[本体19,000+税10%]
[ISBN978-4-260-04776-0]
ポケット判: B6 頁2224 定価: 16,500円[本体15,000+税10%]
[ISBN978-4-260-04777-7]

治療薬マニュアル 2022
監修 高久史郎、矢崎義雄
編集 北原光夫、上野文昭、越前宏俊
B6 頁2882 定価: 5,500円[本体5,000+税10%]
[ISBN978-4-260-04783-8]

症例で学ぶ外科医の考えかた
外科診療の基本がわかる30症例
原書編集 de Virgilio C. Grigorian A
訳者代表 今村清隆
B5 頁248 定価: 6,600円[本体6,000+税10%]
[ISBN978-4-260-04784-5]

緊急 ACP
VitalTalk に学ぶ悪い知らせの伝え方、大切なことの決め方
編集 バイタルトーク日本版
著 伊藤 香、大内 啓
A5 頁160 定価: 2,530円[本体2,300+税10%]
[ISBN978-4-260-04860-6]

誰も教えてくれなかった皮膚の診かた・考えかた [Web動画付]
松田光弘
A5 頁264 定価: 4,400円[本体4,000+税10%]
[ISBN978-4-260-04679-4]

老人のリハビリテーション (第9版)
原著 福井園彦
執筆 前田眞治、下堂蘭恵
B5 頁440 定価: 6,600円[本体6,000+税10%]
[ISBN978-4-260-04805-7]

PT臨床評価ガイド
編集 島 昌史、藤野雄次、松田雅弘、田屋雅信
A5 頁656 定価: 6,820円[本体6,200+税10%]
[ISBN978-4-260-04295-6]

PT国家試験専門問題
できるもん・でたもん 一問一答!!
編集 「標準理学療法学・作業療法学」編集室
四六判 頁652 定価: 4,620円[本体4,200+税10%]
[ISBN978-4-260-04862-0]

いたみの教科書
「疼痛医学」ダイジェスト版
編集 一般財団法人 日本いたみ財団
A5 頁120 定価: 2,420円[本体2,200+税10%]
[ISBN978-4-260-04906-1]

看護コミュニケーション (第2版)
基礎から学ぶスキルとトレーニング
篠崎恵美子、藤井徹也
B5 頁152 定価: 1,980円[本体1,800+税10%]
[ISBN978-4-260-04793-7]

看護のための教育学 (第2版)
編著 中井俊樹
編集 小林忠資
B5 頁144 定価: 2,530円[本体2,300+税10%]
[ISBN978-4-260-04884-2]

看護学生のための物理学 (第6版)
佐藤和良
B5 頁216 定価: 2,530円[本体2,300+税10%]
[ISBN978-4-260-04685-5]

ンショット型研究開発事業（以下、ムーンショット研究）でプロジェクトマネージャーを務め、西村先生と私と共に侵襲型BCIの実用化をめざしています。同プロジェクトのうち特にBCI技術の発掘を担う「共通基盤技術開発」の目的をお話してください。

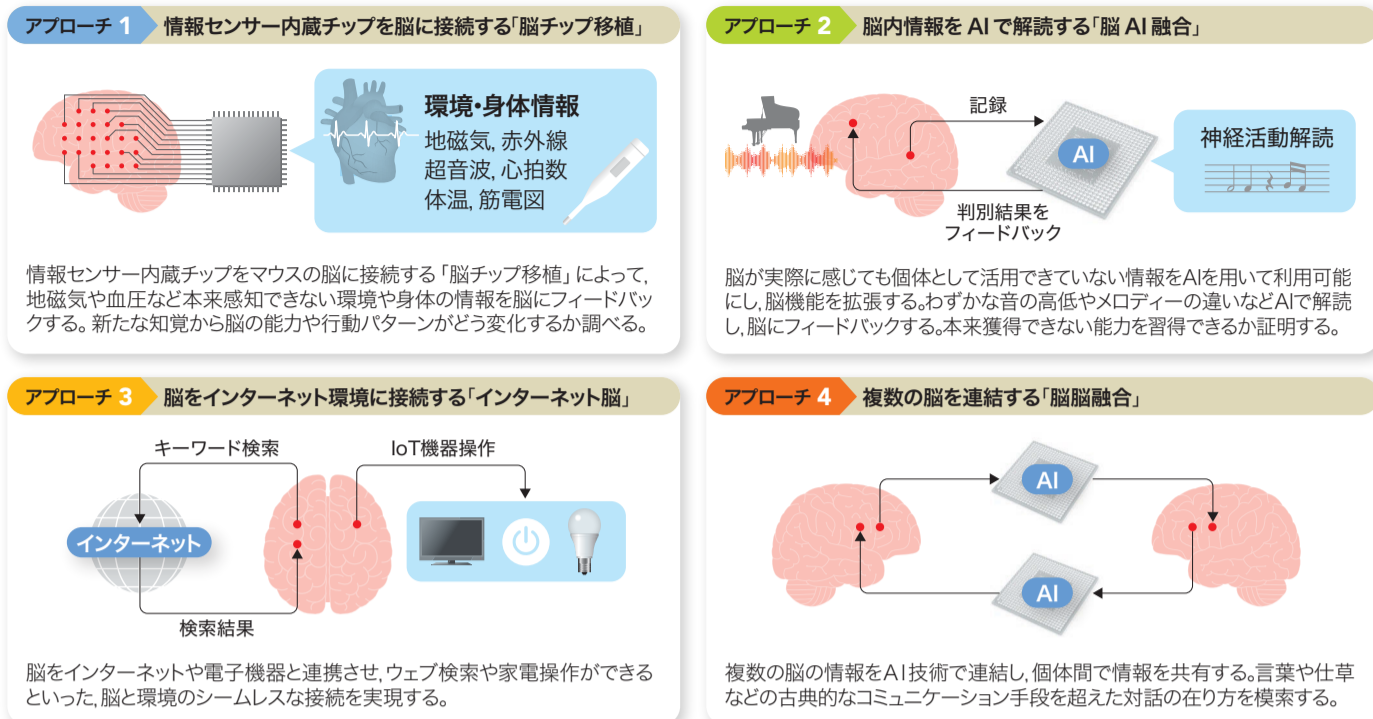
金井 脳へ詳細な情報を伝達するインターフェース技術の探索、より具体的には、BCIの情報入力として可能性のある技術を見いだすことで、実用的なBCI開発をめざしています。本プロジェクトを通じ、産業界とも連携しながら脳科学研究を推進し、社会全体が幸せになるエコシステムを創りたい。侵襲を伴うBCIの実用化にはリスクもあり開発に時間がかかりますが、情報の入出力を脳と直接できる研究をヒト対象に進めたいと考えています。

柳澤 ムーンショット研究に従事する傍ら、企業の立場からBCI研究にどうかかわっているのでしょうか。

金井 株式会社を2013年に立ち上げました。集めた脳情報を産業用途に使えるよう、標準的な手法で大規模データベース化すれば脳の研究自体が格段に進むのではないかと考えたからです。脳の機能について根源的にわかっていない面が多くあります。それらが解明されることで臨床応用の可能性が広がり、ビジネスサイドからの貢献も可能になるのではないかと。さらに一研究者・起業家としては、「意識のあるAI」の開発に関心を持っています。MRI画像の収集と有効活用からヒトの特性を明らかにし、将来、脳の変化を予測する技術開発までつなげたいと取り組んでいます。

柳澤 金井さんと共にムーンショット研究にも参画する私は、皮質脳波を使

図1 ERATO「脳AI融合プロジェクト」の4つのアプローチ（池谷氏提供）



った侵襲型BCIの臨床応用をめざして研究と開発を続けてきました。今から10年前の2012年、運動麻痺患者に硬膜下電極を留置したBCIが実現し²⁾、2013年にはALS患者に電極を留置する臨床研究を実施しました³⁾。運動を意図する脳波の計測によって、脳波だけでコンピュータを操作し文字入力ができるようになったのです。それは研究として大きな前進でした。ところが被験者の患者さんに退院時、「正直言えば、もっとすごいことができるといった」と失望されていたのです。試行錯誤した結果とはいえ、臨床応用はまだ遠いとの印象を持ったのを覚えています。

その後は、高次元で高精度の全く新しいBCIをめざして研究を進め、人が想像によって映像を制御する技術のProof of concept（概念実証）が最近になって得られました。例えば現在、JSTの戦略的創造研究推進事業（CREST）にて進めている研究では、京都大学の神谷之康先生が開発された技術で、想像した内容を画像化する技術を頭蓋内脳波に適用しようとしています⁴⁾。実現すれば、運動野の活動が弱くなったALS患者でも、映像の想像から、思いを伝えられると期待されます。また、ALS患者特有の不安定な脳波から、情報を安定して取り出す解読技術も開発を継続中です。かつて患者さんの期待した「もっとすごいこと」が10年越しに実現できそうな手応えを得ています。

「脳の可塑性」を引き出す人工神経接続とは

柳澤 西村先生とは2013年に、日本医療研究開発機構（AMED）の「脳科学研究戦略推進プログラム」で共同研究を行いました。専門の侵襲型人工神経接続の位置付けをご紹介ください。
西村 私たちのグループは、コンピ

ュータを介して2つの脳部位をつなぐ人工神経接続の研究を通じ、脳卒中や脊髄損傷者の運動機能回復を促す脳機能再建法の開発と実用化をめざしています（図2）。私がニューロサイエンスに取り組むようになったきっかけは、人の心や意識を脳はどう制御するのに関心を持ったことです。そこで脳の機能と運動機能の再建を、サルを用いた動物実験から始めました。

現在までに脊髄損傷モデルのサルで脊髄損傷部位を跨ぎ、コンピュータを介して脳と脊髄をつなぐ侵襲型人工神経接続による上肢の運動機能再建⁵⁾と、脳梗塞モデルのサルで脳と麻痺した筋肉をつないだ侵襲型人工神経接続システム⁶⁾、磁気刺激を用いて筋肉と脊髄歩行中枢をつないだ非侵襲型の人工神経接続システムを開発し⁷⁾、それを用いて下肢麻痺のある脊髄損傷者の歩行運動に成功しています。脳卒中患者でも同様の研究ができるよう準備を進めています。

柳澤 近年のBCIは、脳の神経活動をあらかじめ学習したDecoderによ

って脳波を解読する流れがあります。一方で西村先生の人工神経接続は、Decodingにより脳情報を解読するのではなく、脊髄の多極刺激で脊髄と大脳皮質の新たな神経接続を作り、脳の可能性を引き出す点が特徴ですね。

西村 生物の根本的な能力である脳の可塑性を引き出すことを重視しているからです。実際に私たちの研究では、脊髄損傷者の脊髄を1か所刺激しただけで歩行機能が再建しています⁷⁾。

池谷 脊髄にも、歩行を助けるペースメーカーのような機能が備わっているわけですか。

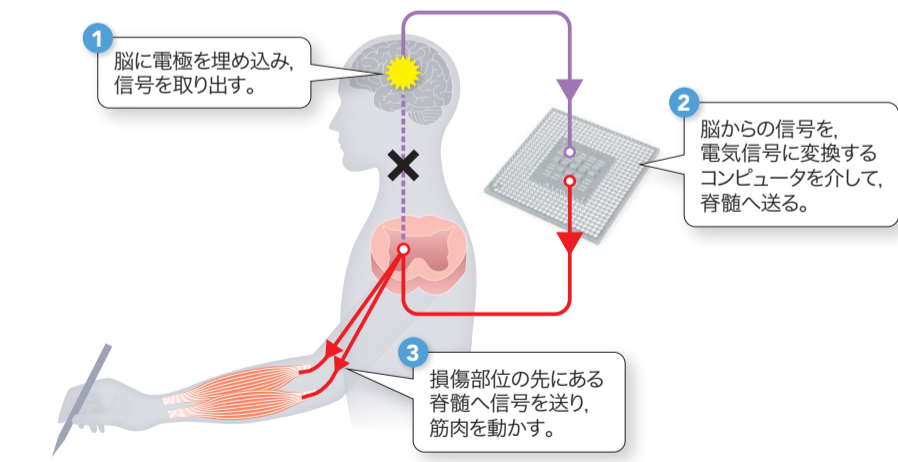
西村 そうですね。脳以外からも刺激を読み取ることで、ボランタリー（随意的）な制御が可能と考えています。

川合 自律神経系はどうでしょうか。中枢の自律神経系が制御可能になれば、さまざまな神経疾患の治療も展望が開けるのではないかと臨床家として希望が湧きます。

西村 現在、自律神経系をターゲットにした人工神経接続の研究も進めてい

図2 脳とコンピュータをつなぐ人工神経接続の概要（西村氏提供）

人工神経接続とは、脳から神経活動を直接読み取り、コンピュータを介して脊髄や筋に電気信号を伝達する技術。人工神経接続を通して随意制御可能な生体信号を記録し、脊髄損傷や脳卒中によって消失してしまった運動の経路を、コンピュータを介して損傷を免れた神経同士を接続する。神経構造へ電気信号を伝達することで経路選択的な神経可塑性を誘導し、再び運動を促す可能性を持つ。



池谷裕二氏

いけがや・ゆうじ 1998年東大大学院薬学系研究科にて博士（薬学）取得。2002～05年米コロンビア大生物科学講座客員研究員、東大薬学部講師、同准教授を経て14年より現職。神経科学および薬理学を専門とし、海馬や大脳皮質の可塑性を研究する。日本学術振興会賞（13年）、日本学士院学術奨励賞（13年）他、受賞多数。18年よりERATO脳AI融合プロジェクトの代表を務め、AIチップの脳移植によって新たな知能の開拓をめざす。「単純な脳、複雑な「私」」「進化しすぎた脳——中高生と語る「大脳生理学」の最前線」（いずれも講談社）など一般向けの著書も多数手掛ける。

無料 Webセミナー

『medicina』 & 『総合診療』 コラボ企画

医学書院

磨け！ 問診力

～診断に迫る“+α”のテクニック

リアルタイム配信 2022年1月8日（土）13:00-15:00

アーカイブ配信：2022年1月9日（日）～2月8日（火）23:59

※アーカイブ配信期間に視聴予定の方も、お申込みはリアルタイム配信日までにご登録ください。リアルタイム配信終了後の新規お申込みはできません。

講師



志水 太郎 先生
獨協医科大学
総合診療医学講座



上田 剛士 先生
洛和会丸太町病院
救急・総合診療科

『medicina』2021年11月号
「外来で役立つ Aha！クエスチョン—この症状で、次は何を聞く？」

『総合診療』2021年6月号
「この診断で決まり！ High Yield な症候たち—見逃すな！キラリと光るその病歴&所見」

がコラボレーション！
両特集を企画した志水太郎先生と上田剛士先生が、問診のチカラとコツを熱く語ります。診断に迫る“+α”の問診技術を身につけてみませんか？



新年号特集 脳とAIをつなぐBCI——臨床応用はどこまで近づいているのか

ます。さらに最近、人の意欲や喜怒哀楽といった心理的な面にもアプローチしており、人工神経接続による心の制御にも関心を持っています。

医療応用が先行する埋め込み型電気刺激療法

柳澤 川合先生が治療に当たる難治性てんかんは、体内埋め込み型電気刺激療法の臨床応用が進む分野で、欧米では医療機器としての承認が次々に行われています(図3)。埋め込み型デバイスを用いた治療の現状はいかがでしょう。川合 埋め込み型デバイスによるパーキンソン病の治療は既に20年以上の歴史があります。それ以前は脳の一部を切除や凝固破壊していたものが、電気刺激で代替されるようになったのです。てんかんにも応用され、神経機能障害の改善を目的に機能的脳神経外科領域では、脳の残存機能をいかに賦活化させるかに関心が集まっています。

一方で、てんかんの手術では一時的に脳に電極を埋め込んで、切除する脳領域を決めるのですが、この電極からの記録や刺激によってヒトの脳の高次機能に迫る研究が発展した経緯があります。2000年代には電極が高密度化し、単一ニューロン活動記録も行われるようになりました。これが侵襲型BCIの開発にもつながっています。私たちも2013年に、日本で初となる単一ニューロン・皮質脳波計測用電極を開発し、その留置手技を報告しました⁸⁾。薬剤抵抗性てんかんの治療に用いられる迷走神経刺激療法(Vagus Nerve Stimulation: VNS)も2005年から個人輸入で臨床研究を行い、日本でも2010年に薬事承認され、保険適用と

なっています。そうこうしている間に、埋め込み型デバイスを用いた侵襲型の治療である発作反応型電気刺激療法(Responsive Neuro Stimulation: RNS)が欧米で開発されたのです。2000年代前半から米国で治験が始まり、2013年に承認。現在は米国内でのみ使用されています。柳澤 脳波を解析して刺激も加えるRNSは、侵襲型で閉回路型BCIの先駆けとも言え、近い将来デバイスとして一般化が見込まれます。川合 大脳基底核や視床に埋め込み型デバイスを入れて治療する脳深部刺激療法(Deep Brain Stimulation: DBS)は既に日本でもパーキンソン病に対して普及しています。つい最近、閉回路型が世界に先行して日本で使用開始されました。てんかん治療では、欧州での承認に続き米国でも視床前核をターゲットとした治療法が2018年に承認されています。薬剤抵抗性てんかんに対し有意の発作減少効果が得られると明らかになっています^{9,10)}。

池谷 てんかん治療では脳のどこを刺激するのですか? 発作抑制のメカニズムが解明されているのでしょうか。川合 刺激部位はさまざまで、大脳皮質のてんかん焦点そのものから、海馬、視床、視床下角や小脳でも効果が得られます。電気刺激で発作が止まる事実

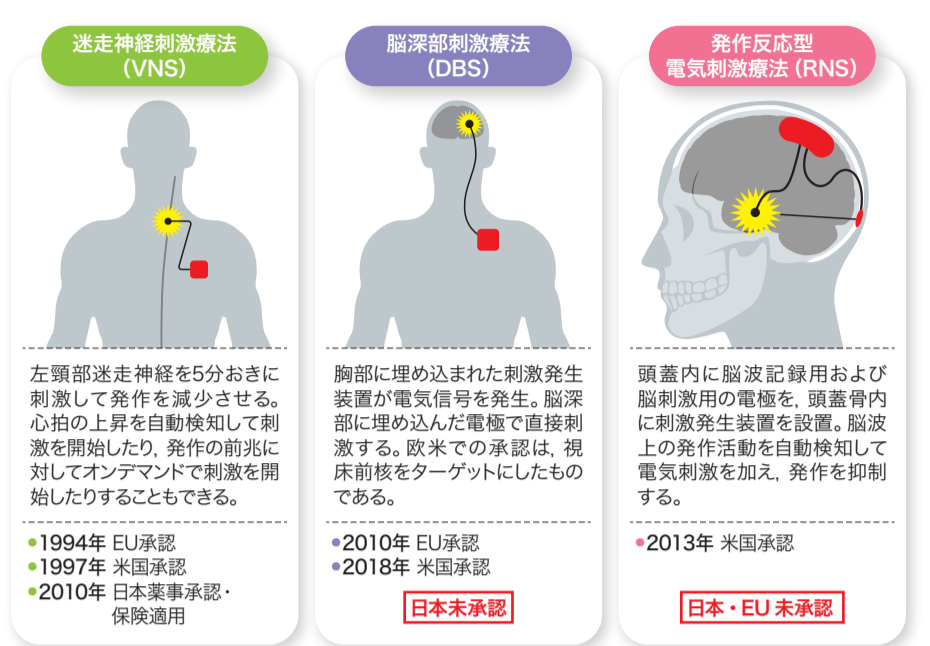
は、頭蓋内電極を使った脳機能マッピング検査の際に、電気刺激で誘発された発作活動が再度の電気刺激で止まるとする経験で、以前から知られていました。異常同期活動のリセット機構などと推察されますが、メカニズムの詳細は不明です。電気刺激による急性の発作停止だけでなく、数年かけて徐々に治療効果が高まるのは、長期にわたる慢性的な刺激が脳の状態を変化させ、てんかん原性を徐々に低下させている可能性があります¹¹⁾。柳澤 RNSを9年間留置した結果、発作抑制率が改善した報告もあります¹²⁾。年単位で徐々に発作頻度が低下するのは、RNSによって脳自体が変化している可能性を示唆しています。池谷 すると、根本治療にまでつながる可能性がありますね。西村先生や川合先生の研究に共通するBCI研究のキーワードは「脳の可塑性」ではないでしょうか。脳とAIの可塑性によってBCIを用いた治療が成立するわけで、脳がどれだけ柔軟に変化できるかがBCI研究の成功を左右すると見ています。柳澤 脳の可塑性に着目したBCIの一つに、薬では治らない幻肢痛の治療があります。私たちは慢性疼痛に対するNeurofeedback治療の研究として、大脳皮質での運動感覚表象の異常な可塑的变化を、BCIによって適切な表象に誘導することで痛みを軽減できると示しました¹³⁾。同様に自閉スペクトラム症(ASD)やうつ病などを脳活動から治療する試みも進んでいます。池谷先生のおっしゃった「脳の可塑性」

に注目しながらBCI研究を進展させられれば、これまで薬物治療だけでは改善が難しかった疾患にも適応拡大の可能性が広がります。

期待高まるBCI研究、乗り越えるべき課題は

柳澤 技術革新によって埋め込み型デバイスの開発が進み、臨床応用の視界が開けてきた一方で、乗り越えるべき課題がいくつもあります。その一つがデバイス・ラグの解消です。川合先生のご指摘の通り、埋め込み型デバイスが海外で実用化されても日本で使えるかは不透明です。川合 欧米で承認を経た医療機器が日本で迅速に承認されるよう、臨床医として求めています。特に、パーキンソン病治療に開発されたDBSのてんかんへの適応拡大と、RNSの国内承認です。ところが、医療機器の承認を得るためのレギュレーションや市場規模の問題で、日本側の販売業者がなかなか見つからない現状があるわけです。医療機器の開発と製品化にはベンチャー企業の参画も待たれます。西村 すぐに使える「モノ」がない現状に私も危機感を持っています。現在の薬事承認制度のままでは、仮に海外から輸入できても研究は後追いとなり、新たに創出しようにも承認まで時間がかかってしまいます。池谷 このままでは日本の勝ち筋を見いだすのは難しいかもしれませんが、視点を置き換えてみてはどうでしょうか。海外との「競争」よりも「協調」。つまり、研究開発は海外と連携しながら、日本は質の高い製品を開発し輸出する。この協調が円滑にできる体制を整えれば、日本のBCI研究はもっと活性化すると考えます。西村 それには、ニーズの高い領域を見極めた集中的な投資が今以上に求め

図3 難治性てんかん治療における体内埋め込み型電気刺激療法の種類と承認状況 てんかんの非薬物治療法として体内埋め込み型電気刺激療法の研究と臨床応用が行われている。VNSは日本でも治療件数が2000例を超え、緩和的治療として位置付けが明確になっている。DBSは日本でもパーキンソン病の治療目的として承認されているが、てんかん治療では未承認。RNSも米国内の使用にとどまっている。



られます。他国では開発面でターゲットを絞り、集中的にそのテーマの研究を行う戦略を取っています。かつて日本では刺入電極の研究が進む欧米に対抗して、低侵襲型 ECoG や非侵襲型 BCI を中心としたプロジェクトが推進されました。それによって Decoded Neurofeedback (DecNef) の技術は大きくリードした成功事例がある。柳澤 国内に数多くある MRI を使い、脳機能を視覚化する fMRI-neurofeedback (fMRI-NF) などの研究は日本の強みでした。西村 Neuralink の参入は何が革新的だったかと言えば、産業界で力のある実業家が BCI 研究を「やる」と宣言して資金を集中させ、目標に向けて邁進する意志の強さを示した点です。日本の iPS 細胞の研究はノーベル賞受賞の効果もあり法整備とともに大規模な予算が充てられています。同様のムーブメントが日本の BCI 研究に起きると良いでしょう。柳澤 国も徐々に対応を進めています。AI を用いた医療技術が増えているのを受け、SaMD (Software as a Medical Device) と呼ばれる医療機器プログラムの早期実用化を促す取り組みを PMDA が推進し、より柔軟な承認に変わっています。侵襲型 BCI 装置として承認を得る場合、承認時に使ったソフトを変えるには新たな審査が必要でした。日々更新される脳情報解読の部分である AI が、ハードと別の承認ができるよう改善されようとしていることは、日本の BCI 研究にとって追い風です。金井 AI の産業応用への期待の高まりからここ数年、投資も呼び込んでいます。まだ研究段階でも、研究者の数が急速に増えて産業につながる基礎研究の加速化が起きている。侵襲型 BCI の研究が進む今こそ、国内において安全で簡便に扱えるようになれば、社会

られます。他国では開発面でターゲットを絞り、集中的にそのテーマの研究を行う戦略を取っています。かつて日本では刺入電極の研究が進む欧米に対抗して、低侵襲型 ECoG や非侵襲型 BCI を中心としたプロジェクトが推進されました。それによって Decoded Neurofeedback (DecNef) の技術は大きくリードした成功事例がある。柳澤 国内に数多くある MRI を使い、脳機能を視覚化する fMRI-neurofeedback (fMRI-NF) などの研究は日本の強みでした。西村 Neuralink の参入は何が革新的だったかと言えば、産業界で力のある実業家が BCI 研究を「やる」と宣言して資金を集中させ、目標に向けて邁進する意志の強さを示した点です。日本の iPS 細胞の研究はノーベル賞受賞の効果もあり法整備とともに大規模な予算が充てられています。同様のムーブメントが日本の BCI 研究に起きると良いでしょう。柳澤 国も徐々に対応を進めています。AI を用いた医療技術が増えているのを受け、SaMD (Software as a Medical Device) と呼ばれる医療機器プログラムの早期実用化を促す取り組みを PMDA が推進し、より柔軟な承認に変わっています。侵襲型 BCI 装置として承認を得る場合、承認時に使ったソフトを変えるには新たな審査が必要でした。日々更新される脳情報解読の部分である AI が、ハードと別の承認ができるよう改善されようとしていることは、日本の BCI 研究にとって追い風です。金井 AI の産業応用への期待の高まりからここ数年、投資も呼び込んでいます。まだ研究段階でも、研究者の数が急速に増えて産業につながる基礎研究の加速化が起きている。侵襲型 BCI の研究が進む今こそ、国内において安全で簡便に扱えるようになれば、社会

られます。他国では開発面でターゲットを絞り、集中的にそのテーマの研究を行う戦略を取っています。かつて日本では刺入電極の研究が進む欧米に対抗して、低侵襲型 ECoG や非侵襲型 BCI を中心としたプロジェクトが推進されました。それによって Decoded Neurofeedback (DecNef) の技術は大きくリードした成功事例がある。柳澤 国内に数多くある MRI を使い、脳機能を視覚化する fMRI-neurofeedback (fMRI-NF) などの研究は日本の強みでした。西村 Neuralink の参入は何が革新的だったかと言えば、産業界で力のある実業家が BCI 研究を「やる」と宣言して資金を集中させ、目標に向けて邁進する意志の強さを示した点です。日本の iPS 細胞の研究はノーベル賞受賞の効果もあり法整備とともに大規模な予算が充てられています。同様のムーブメントが日本の BCI 研究に起きると良いでしょう。柳澤 国も徐々に対応を進めています。AI を用いた医療技術が増えているのを受け、SaMD (Software as a Medical Device) と呼ばれる医療機器プログラムの早期実用化を促す取り組みを PMDA が推進し、より柔軟な承認に変わっています。侵襲型 BCI 装置として承認を得る場合、承認時に使ったソフトを変えるには新たな審査が必要でした。日々更新される脳情報解読の部分である AI が、ハードと別の承認ができるよう改善されようとしていることは、日本の BCI 研究にとって追い風です。金井 AI の産業応用への期待の高まりからここ数年、投資も呼び込んでいます。まだ研究段階でも、研究者の数が急速に増えて産業につながる基礎研究の加速化が起きている。侵襲型 BCI の研究が進む今こそ、国内において安全で簡便に扱えるようになれば、社会

られます。他国では開発面でターゲットを絞り、集中的にそのテーマの研究を行う戦略を取っています。かつて日本では刺入電極の研究が進む欧米に対抗して、低侵襲型 ECoG や非侵襲型 BCI を中心としたプロジェクトが推進されました。それによって Decoded Neurofeedback (DecNef) の技術は大きくリードした成功事例がある。柳澤 国内に数多くある MRI を使い、脳機能を視覚化する fMRI-neurofeedback (fMRI-NF) などの研究は日本の強みでした。西村 Neuralink の参入は何が革新的だったかと言えば、産業界で力のある実業家が BCI 研究を「やる」と宣言して資金を集中させ、目標に向けて邁進する意志の強さを示した点です。日本の iPS 細胞の研究はノーベル賞受賞の効果もあり法整備とともに大規模な予算が充てられています。同様のムーブメントが日本の BCI 研究に起きると良いでしょう。柳澤 国も徐々に対応を進めています。AI を用いた医療技術が増えているのを受け、SaMD (Software as a Medical Device) と呼ばれる医療機器プログラムの早期実用化を促す取り組みを PMDA が推進し、より柔軟な承認に変わっています。侵襲型 BCI 装置として承認を得る場合、承認時に使ったソフトを変えるには新たな審査が必要でした。日々更新される脳情報解読の部分である AI が、ハードと別の承認ができるよう改善されようとしていることは、日本の BCI 研究にとって追い風です。金井 AI の産業応用への期待の高まりからここ数年、投資も呼び込んでいます。まだ研究段階でも、研究者の数が急速に増えて産業につながる基礎研究の加速化が起きている。侵襲型 BCI の研究が進む今こそ、国内において安全で簡便に扱えるようになれば、社会

られます。他国では開発面でターゲットを絞り、集中的にそのテーマの研究を行う戦略を取っています。かつて日本では刺入電極の研究が進む欧米に対抗して、低侵襲型 ECoG や非侵襲型 BCI を中心としたプロジェクトが推進されました。それによって Decoded Neurofeedback (DecNef) の技術は大きくリードした成功事例がある。柳澤 国内に数多くある MRI を使い、脳機能を視覚化する fMRI-neurofeedback (fMRI-NF) などの研究は日本の強みでした。西村 Neuralink の参入は何が革新的だったかと言えば、産業界で力のある実業家が BCI 研究を「やる」と宣言して資金を集中させ、目標に向けて邁進する意志の強さを示した点です。日本の iPS 細胞の研究はノーベル賞受賞の効果もあり法整備とともに大規模な予算が充てられています。同様のムーブメントが日本の BCI 研究に起きると良いでしょう。柳澤 国も徐々に対応を進めています。AI を用いた医療技術が増えているのを受け、SaMD (Software as a Medical Device) と呼ばれる医療機器プログラムの早期実用化を促す取り組みを PMDA が推進し、より柔軟な承認に変わっています。侵襲型 BCI 装置として承認を得る場合、承認時に使ったソフトを変えるには新たな審査が必要でした。日々更新される脳情報解読の部分である AI が、ハードと別の承認ができるよう改善されようとしていることは、日本の BCI 研究にとって追い風です。金井 AI の産業応用への期待の高まりからここ数年、投資も呼び込んでいます。まだ研究段階でも、研究者の数が急速に増えて産業につながる基礎研究の加速化が起きている。侵襲型 BCI の研究が進む今こそ、国内において安全で簡便に扱えるようになれば、社会

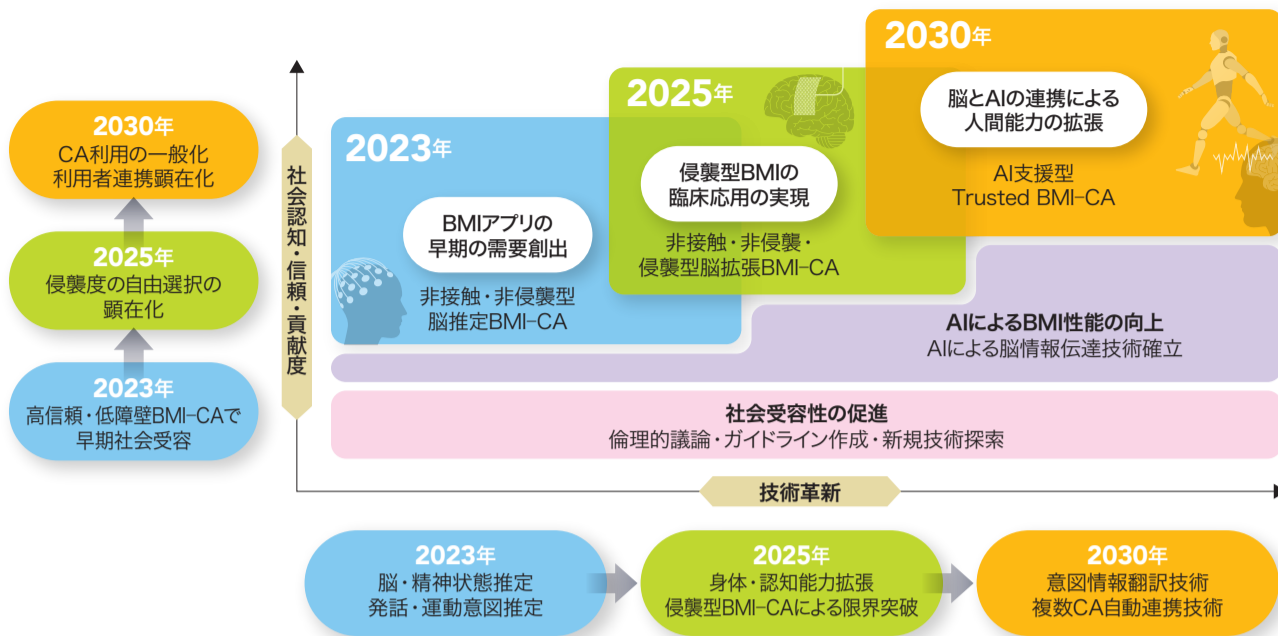


西村幸男氏

にしむら ゆきお 1991年日大文理学部卒。横浜国大大学院教育学研究科、千葉大大学院医学研究科修了。博士(医学)。米ワシントン大客員研究員、自然科学研究機構生理学研究所准教授、京大医学研究科神経生物学准教授などを経て、2017年より現職。専門は神経生理学。脳とコンピュータをつなぐ人工神経接続、心による身体運動制御機構、スポーツ脳科学などに関心を持つ。受賞に経産省 Innovative Technologies 2013 特別賞(13年)、日本学術振興会賞 JSPS PRIZE(15年)など。内閣府ムーンショット型研究開発事業では「人工神経接続による身体と心の制約からの解放」を研究課題に取り組む。

Advertisement for 'WEB 内科塾' (WEB Internal Medicine Academy). Features include: 'トップ指導医たちが吟味を重ねた1,200超の良問が内科系専門医試験合格をサポート!' (Top mentors have selected over 1,200 excellent questions to support internal medicine specialist exam success); '内科系専門医試験対策のためのオンライン問題集' (Online question bank for internal medicine specialist exam preparation); 'スマホ・PCで知識をアップデート!' (Update knowledge on smartphone/PC!); 'WEB 内科塾' logo; '主なエディター' (Main Editors) listing 筒泉 貴彦 (Takizumi Takahiko) and 山田 悠史 (Yamada Yūshi); '収録内容 (計1,248問)' (Content: 1,248 questions) including 'THE 1 内科専門医問題集', 'THE 2 内科専門医問題集', and 'THE 総合内科ドリル'; '定価: 30,800円 (28,000円+税10%) : 1年間' (Regular price: 30,800 yen (28,000 yen + 10% tax) for 1 year); QR code for 'WEB 内科塾'.

図4 ムーンショット型研究開発事業におけるInternet of Brains実現へのロードマップ（金井氏提供）
 ムーンショット型研究開発事業ではBrain-Machine Interface (BMI) の技術革新と社会受容の両立による、①需要創出、②臨床応用の実現、③脳とAIの連携による人間能力の拡張（Cybernetic Avatar : CA）をめざしたロードマップを描いている。倫理的議論やガイドラインの作成は、社会受容を促進する基盤として位置付けられる。



への普及も見えてくるでしょう。
柳澤 少数でも成功事例が得られれば、後の研究も続くはず。今後はどのようなアプリケーションが患者さんの生活の質を改善できるか。そして医療にどのような恩恵をもたらすのか。有効性や安全性確保の在り方まで議論を深化させる必要があります。日本も侵襲型BCIを使う体制を早期に整備し、医療応用のための研究が続けられる環境を作らなければなりません。
金井 研究者を志す若者が減り、優秀な人材を集めるのが難しい状況も課題です。日本をニューロサイエンティストが集まろうと思える魅力的な場所にしなければなりません。私が起業した理由の一つは、研究者が活躍できる場を作りたかったからなのです。
柳澤 BCIは医学側だけで完結することは難しい領域であり、医学・工学の連携と、アカデミアと産業の融合が発展のカギを握ります。分野の垣根なく人材が移動できる環境が重要です。人材が活発に行き来して、企業やアカデミアなど複数の機関に所属する人が増えれば、研究は一層進むでしょう。

信頼性を高め、利用者の希望をかなえるために

柳澤 ムーンショット研究では2050年に向け、「人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」を目標に掲げています。2050年には少なくとも、脳の運動と感覚機能の代替や、言語機能の理解と再建ができるのではないかと。脳卒中や精神疾患、認知症など、脳機能の障害による疾患と共存しながら生活を維持できる社会の実現に、希望を抱いています。2050年までの臨床応用に向けたプランをどう描いているかお聞かせください。
西村 現在行っている動物実験を臨床応用につなげたいと考えています。さ

らに、四肢麻痺の人の脳活動を人工神経接続経路で読み取り、その結果を機能の残存している脳や脊髄に損傷領域を跨いで電気刺激によって伝え、麻痺した自身の身体を自分で動かし、触った物の感覚を得るまで進化させたいとの構想を持っています。
柳澤 侵襲型BCIによって、自分の身体を介する以上の外界との相互作用を私たち人間にもたらすとすると、今まで想像できなかった価値観や世界観が社会に登場するかもしれません。金井さんはムーンショット研究で、脳と脳をつなぎ他者とコミュニケーションし合えるBCI研究をめざしていますね。
金井 はい。私たちは今、得た情報を頭の中で抽象化して言語にし、それを相手を読み取る循環の中でコミュニケーションを成立させています。それがインターネットを介し、自分が頭の中で考えている情報を他者に伝達できれば、直接一緒に思考できるのではないかと。AIを介して他者が抽象化した概念と交流できる世界が、近い将来実現するのも夢ではないでしょう（図4）。
池谷 複数の脳の情報をAIで連結して個体間で情報共有する「脳脳連携」によって、言葉や仕事といった従来のコミュニケーション手段を超えた対話の在り方について、私たちのプロジェクトでは研究しています。古典的な会話ツール、例えば声帯を使った発声やキーボードによる文章タイプは、どうしても時間がかかりますよね。特に抽象的な概念を伝えたいときには、言語化に苦勞します。そうした情報は言葉を介さずに脳から脳へと直接伝えられたら良いかと考えています。
川合 ユングが唱えた集合的無意識の概念も、ひょっとしたら電極をつないで実現するかもしれないわけですか。脳卒中や脳腫瘍で、脳のさまざまな機能領域の損傷を診る外科医としては、BCIで脳の可塑性を高め、失われた機

能を補えるようになる日を待ち望んでいます。それに加えて個人の可塑性だけでは対処できない機能についても、他者の脳の助けで補える可能性があれば、これほど夢のある話はありません。
柳澤 私も同じような構想を持っています。AI搭載のブレインチップを脳につなぎ、失った機能を再建できれば、脳も心臓や腎臓と同様に人工的に機能を置き換えられる組織になるだろうと。脳外科で治療できないことも多い脳卒中や精神疾患が、BCIによるコントロールの対象になる日も近いかもしれません。ただ、技術の濫用で人々に不幸をもたらさないためには、健康を守る方向付けが医療に求められます。
西村 おっしゃる通り、留意すべきは倫理面の課題です。新しい技術がめざすのは、今苦しむ人を救うこと。日本は安全性に対して慎重過ぎるかもしれません。クリエイティブな発想の足かせになる規制は緩和を求めたい。そのためには私たちサイエンティストも高い倫理観を持ち、患者をはじめ利用者の希望をかなえるために慎重かつ大胆に研究を進めなければなりません。
池谷 倫理面の問題は私も常に念頭に置いて研究を進めています。例えば、侵襲型と非侵襲型のどちらがBCIのヒト臨床応用に適しているか。実験用のマウスも非侵襲的であるほうが、倫理上もちろん好ましい。しかし、侵襲型によって時空間的に得られる情報の精度が高いことも確かです。侵襲性に伴う倫理と安全性の壁をどう乗り越えるか。ヒトへの応用となると当然、社会受容が課題になります。時間をかけて議論すべきテーマです。
金井 池谷先生のご指摘の通り、私たちの最終的な目標の一つに、BCIが社会に受け入れられることがあります。現在ムーンショット研究では、新しいBCI製品がどの程度信頼できるかサイエンティストが評価し、一般の人が適



金井良太氏

かない・りょうた 2000年京大理学部卒業後、05年蘭ユトレヒト大で人間の視覚情報処理メカニズムの研究により博士号取得（Cum Laude）。米カリフォルニア工科大、英ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン研究員、英サセックス大准教授（認知神経科学）を経て、13年に株式会社アラヤ創業。産業界におけるAIと脳科学の実用化に取り組む。ET/IoT Technology Award(19年)、JEITA ベンチャー賞（20年）など多数受賞。20年以内閣府ムーンショット型研究開発事業プロジェクトマネージャーとしてBCIの実用化に取り組む。

切か不適切かを判断できる基準作りを行っています。Neuralinkに象徴されるTech企業の参入でBCI領域への投資を呼び込み、非侵襲型BCIの普及が先行するでしょう。非侵襲型の手軽さから玉石混交のデバイスが登場し、正しく計測できるか不明瞭な製品が流通する懸念もある。脳に関する製品への不信感から、研究の発展が阻害されないよう努めなければなりません。
柳澤 サイエンスの進歩によって私たち人間の可能性が広がる一方、進化したからといって人々が必ずしも幸福になるかはわかりません。飛躍的な進歩が期待されるニューロサイエンスの分野において、どうすれば健康を維持・向上できるか道筋を示す責任が、医療界そして私たちサイエンティストに求められます。（了）

参考文献

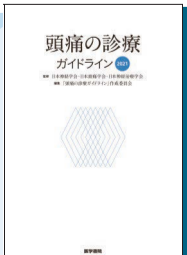
- 1) Moses D, et al. N Engl J Med. 2021 [PMID : 34260835]
- 2) Yanagisawa T, et al. Ann Neurol. 2012 [PMID : 22052728]
- 3) Yoshimine T, et al. Rinsho Shinkeigaku. 2013 [PMID : 24292005]
- 4) Shen G, et al. PLoS Comput Biol. 2019 [PMID : 30640910]
- 5) Nishimura Y, et al. Front Neural Circuits. 2013 [PMID : 23596396]
- 6) Kato K, et al. Nat Commun. 2019 [PMID : 31619680]
- 7) Sasada S, et al. J Neurosci. 2014 [PMID : 25122909]
- 8) Matsuo T, et al. Neurosurgery. 2013 [PMID : 23632765]
- 9) Fisher R, et al. Epilepsia. 2010 [PMID : 20331461]
- 10) Salanova V, et al. Neurology. 2015 [PMID : 25663221]
- 11) Starnes K, et al. Brain Sci. 2019 [PMID : 31635298]
- 12) Nair DR, et al. Neurology. 2020 [PMID : 32690786]
- 13) Yanagisawa T, et al. Neurology. 2020 [PMID : 32675074]

頭痛に携わる医療者必携の診療指針、最新のエビデンスをもとに大幅改訂！

頭痛の診療ガイドライン2021

頭痛診療のバイブル「慢性頭痛の診療ガイドライン2013」が8年ぶりの改訂。二次性頭痛についてのCQが加わり、頭痛に携わる医療者のニーズにさらに幅広く対応。

監修 日本神経学会
 日本頭痛学会
 日本神経治療学会
 編集 頭痛の診療ガイドライン
 作成委員会



救急蘇生の現場を支える基本のガイドラインが5年ぶりの改訂

JRC蘇生ガイドライン2020

日本蘇生協議会による救急蘇生のガイドラインが5年ぶりに改訂された。編集委員会、作業部会による徹底した議論によって検討され、まとめられたガイドラインは、蘇生現場のコンセンサスとしてまさに必携の書である。すべてGRADEによる評価を採用した国際基準のガイドラインである。新たに「妊産婦の蘇生」「海外での課題」の章を追加し、補遺にはCOVID19への対応をまとめた。救急蘇生の現場で奮闘するすべての人へ。

監修 日本蘇生協議会

