解説

ブレイン-マシン インタフェースの現状と将来

Development and Future of Brain-Machine Interface

長谷川良平

Abstract

近年の医工学技術の進歩は，これまで治療が困難と思われてきた手足の運動や言語機能に重篤な脳障害を持つ患者が，他者と円滑に意思疎通を行ったり，電動義手を自在に制御したりできるような道を開きつつある．その代表的な手段として最近，社会の注目を集めているのが，ブレイン-マシン インタフェース（BMI：Brain-Machine Interface）という脳と外部機器を直結する技術である．つい最近まで SF 映画の中だけの話かと思われていたこの技術は，今や少子高齢化の進む現代社会の様々な問題を解決するイノベーション技術として期待されている．本稿では，BMI のコア技術である高次脳機能解明に向けた実験・解析手法を現場の研究者の立場で紹介するとともに，世界で進行中の BMI 研究の現状や，筆者の目指す新しいタイプの認知・情動型 BMI の開発に向けた取組みを紹介する．その上で，将来の展望や課題に対しても考察を加える．

キーワード：ブレイン-マシン インタフェース，ブレイン-コンピュータ インタフェース，意思決定，認知，情動

1. はじめに

近年，飛躍的に進歩を遂げた脳科学の知見を，医療や教育，産業などに応用する動きが活発になってきている．従来的な基礎的脳科学が「脳を理解する」ためのニューロサイエンス（Neuroscience）と呼ばれてきたことを考えると，このような「脳を活用する」ための技術開発はニューロテクノロジーと呼ぶことができる．図1に示すように，ニューロサイエンスの着実な進歩を基盤としつつ，ニューロテクノロジーは更に急速に発展しつつある新学問領域である．ニューロサイエンス自身，生理学や心理学などの多くの基礎学問分野の融合領域であるが，ニューロテクノロジーは，更にその成果を実社会に結び付ける役割を持っている．具体的な応用先としては教育や生涯発達分野，あるいは経済・経営分野も重要な候補であるが，何といっても「ブレイン-マシン インタフェース」（BMI：Brain-Machine Interface）による医療介護福祉分野への貢献が期待されている．

脳と機械を直接つなぐ BMI 技術に関するほう芽的研究はかなり以前から散発的に行われてきたが，それが一つの研究分野として意識されるようになったのは今世紀に入ってからである．日本でも各分野の研究者や研究コーディネータ，患者の団体，そしてメディアの活動と呼応して政府も動き，2007 年，閣議決定された長期政策である「イノベーション 25」に BMI 技術が盛り込まれた．それを受けて，様々な省庁においてその行政課題に対応した幾つかの BMI 関連プロジェクトが動き出している．本稿では，最近の BMI ブームの背景となる高次脳機能研究の歴史を踏まえて，特にモデル動物を用いて開発が進んでいる侵襲的 BMI 研究の現状を概観するとともに，今後の BMI の展望について考察する．

2. ＢＭＩの仕組み

BMI，つまり「脳と機械のインタフェース」という言葉そのものが持つ意味は意外にあいまいである．だれの脳のどこの部分をどんな機械と何のためにつなぐのかまでは定義されていない．もちろん，この技術が世の中に知られるようになったきっかけである，Nicolelis 博士や Donoghue 博士らによる研究から「サルやヒトの脳内から記録した神経活動によってロボットアームやコンピュータカーソルを動かすのが BMI」と思われていることも多い[(1),(2)]．確かにこのような技術は「狭義の BMI」といえるが，ほかにも様々な種類の BMI があり，それに応じて必要なコア技術や仕組みも異なっている．そこ

長谷川良平　独立行政法人産業技術総合研究所脳神経情報研究部門
E-mail　hase-p@ni.aist.go.jp
Ryohei P. HASEGAWA, Nonmember (Department of Neuroscience Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba-shi, 305-8568 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.91 No.12 pp.1066-1075 2008 年 12 月

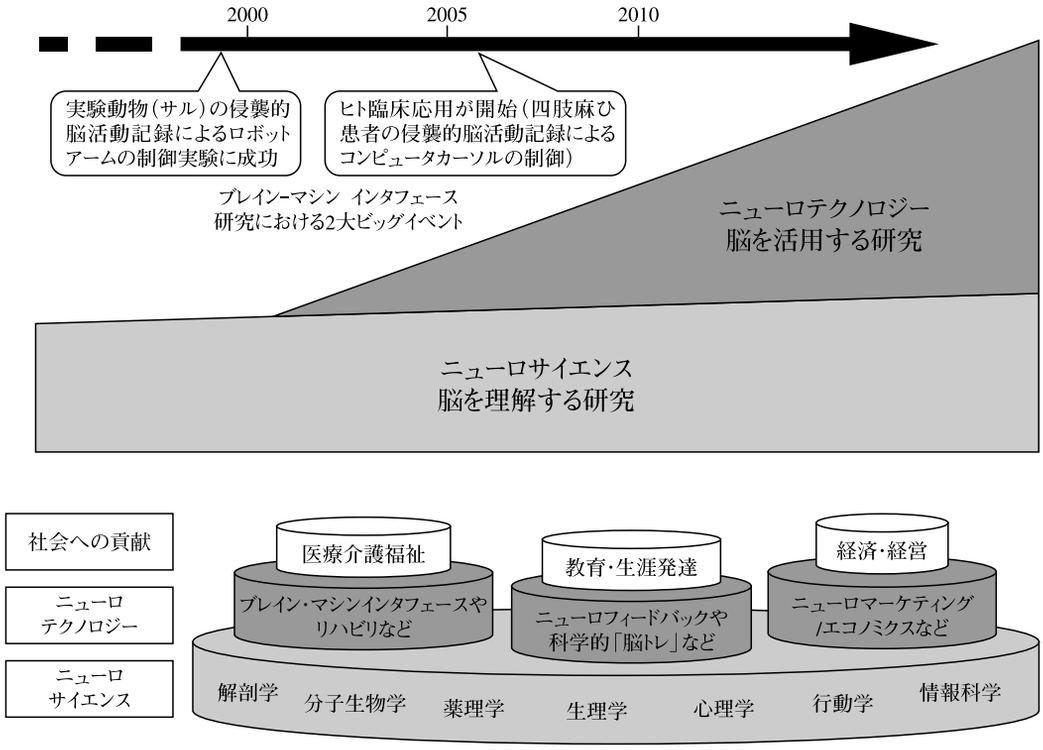


図1　ニューロサイエンスから派生したニューロテクノロジー研究の代表例として位置付けられるブレイン-マシン インタフェース技術

で本章においては，まずBMIを幾つかの観点からタイプ分けし，それぞれのタイプに関してその特徴をとらえていくことにする．

2.1　生体への影響：侵襲的か非侵襲か

脳研究では，脳組織に侵入し，何らかのダメージを与える可能性がある操作を「侵襲的」と表現することがある．例えば，神経生理学分野においては，実験動物を対象にして神経活動記録用の金属電極や薬液注入用のカニューレを一時的に脳内に刺し入れたり，デンタルセメント等の固定剤によってそれらを長期間，頭骨や頭蓋内に設置したりする（いわゆるインプラント）．このような技術は，古くからニューロサイエンス分野において脳を詳しく知るため，そして直接・間接的に脳疾患の予防法や治療法の開発に貢献するために使われてきた．脳の特定領域に存在すると仮定される特定の機能を調べるには実際にその脳領域に直接アクセスするのが効率的だからだ．ニューロテクノロジーとしての侵襲的BMIにおいても，補償しようとする機能と関係のある脳領域に直接アクセスすることで，詳細な情報の入出力が可能となる．

一方，体の外から脳活動を間接的に測定する非侵襲技術，例えば頭皮上に伝わる脳波を細かい時間精度で計測することが可能なEEG，血流量の増減を間接的指標として脳の広い領域（深部を含む）の活動パターンを視覚化するfMRI，更に近赤外光の透過性を指標として使って血中ヘモグロビン濃度（これも局所脳活動の指標）を安全に，かつコンパクトな装置で測定可能なNIRSなどの計測技術を利用した非侵襲的BMIも盛んになりつつある（詳しくはATR川人博士による解説[3]を参照）．非侵襲データではその信号の意味（どのような脳情報を表しているか）があいまいな一方，健常者を対象とした実験が容易であり，特にEEGを用いたBMIは，かつてからブレイン-コンピュータ インタフェース（BCI）とも呼ばれ，盛んに研究されている．

一般的な見解では，侵襲的技術は高い精度，早いスピードで脳内情報の入出力が可能な点が非侵襲的技術よりも有利であり，非侵襲的技術はその名のとおり，侵襲的技術よりも安全であることからヒトに対する実験が盛んに行われている．このような特徴を反映し，侵襲派と非侵襲派に分かれてどちらの技術が優れているかという排他的議論も（現在でも）なされている一方，二つの技術を場合によって使い分けたり，両方の技術を同時に利用したりする立場の研究者もいる．筆者もそのような使い分けや同時利用に賛成である．

いずれにせよ，生体への侵襲性と取得できる情報量とのバランスの中でどこに比重を置くかによって大きなタイプ分けがあるということを覚えておいて頂きたい．しかし，これとは別の観点のタイプ分けもあり，それを次に述べる．

2.2 脳情報の伝達方向：読み出すのか書き込むのか

BMI には，インタフェースを挟んで脳と機械の二つのシステムの間で「情報がどちらの方向に伝達されるか」によって二つのタイプの通信技術が関与する．筆者は，脳から機械に情報が伝達される場合を「読出し技術」(図 2 (a))，機械から脳に情報が伝達される場合を「書込み技術」(図 2 (b)) と表現している．ここで注意して頂きたいのは，脳研究者である筆者のひいきによって脳を主体とした表現がなされていることである．つまり，「読出し」は「脳から読んだ情報を機械に書く」の前半部分を述べた表現，「書込み」は「機械から読んだ情報を脳に書く」の後半部分を述べた表現なのである．

ちなみに脳を主体とした類似の表現として「出力型」とか「入力型」という区分もある．しかし，この表現だと情報の伝達方向に関しての話なのか，本来の脳の機能としての話なのか（つまり，出力＝運動，入力＝感覚），混乱が生じやすいと思われる．そこで本稿ではあえてこの表現を避けている（脳機能による区分は事項に述べる）．

さて，本題に戻って，私たち脳研究者は実際にはどうやって脳から情報を読み出したり，どうやって脳に情報を書き込んだりするのだろうか？このトピックスに関しては筆者による文献(4)も参考にして頂きつつも，そのサマリーを以下に述べる．

まず「読出し技術」に関してであるが，侵襲的に脳から情報を読み出すときに最も効率的と思われている手段が，脳の情報処理の単位である神経細胞（ニューロン）の活動を，微小金属電極などを用いて細胞外で記録することである．この記録方法で得られるデータは活動電位（アクションポテンシャル）と呼ばれるディジタル的な信号である．この活動電位の発火頻度が生体内外のイベントとの関連で変化するとき（増加する場合が多いが減少することもある），脳内でそれについての情報処理が行われていると推測できる．どれくらいはっきりとそのイベントと関連した処理が行われているかを知る指標は主に三つ，①タイミング，②選択性，③変化量である．①のタイミングとは，イベントとどれくらい時間的に近いかである．例えば感覚情報の処理に密接にかかわっているとすれば，感覚入力があった直後，なるべく早い時間に活動変化が生じるはずである．②の選択性とは，もしニューロン活動が具体的な情報をコードしているとすれば特定のイベントに関してのみ変化するはずである．例えば指を曲げる運動に関与するニューロンがあるとしても，どの指を曲げるかに応じて活動するかしないか変わるはずであり，そのニューロンが担当しない指も別のニューロンが担当しているはずである．③の変化量は若干，付加的な要件であるが，「あるイベントとの関係で活動変化の激しいニューロンがたくさん見つかる脳領域の方が，変化をするとしても少しだけの変化しかしないニューロンばかりの脳領域よりも関与の度合いが強い」という経験的推定に基づくものである．この法則は同じ大脳皮質内の別領域で比較する場合などには当てはまる場合も多いが，皮質と皮質下の核のニューロンとを比較する場合などでは必ずしも当てはまらないこともある．

ニューロサイエンスではこれら三つの指標に関して，「脳活動＝f(イベント)」というコーディングを調べるのに精力が注がれるが（つまり順問題を解く），ニューロテクノロジーである BMI ではそのデータに基づいて「イベント＝f^{-1}(脳活動)」というデコーディングを行う必要がある（つまり逆問題を解く）．BMI 技術においては，演算速度の速い PC や特殊な装置を用いて，素早く（リアルタイムで）脳活動を解析することが重要と思われがちである．しかし，実は，優れたデコーディングアルゴリズム（ソフトウェア）がなければ，幾らハードウェアの性能が良くても「脳内でどのような情報が表現されているか」＝「脳は機械に対して何をしたいと思っているのか」が分からない．逆に，BMI 研究をしたいと思ってもハードウェアにかけるお金がないとあきらめ

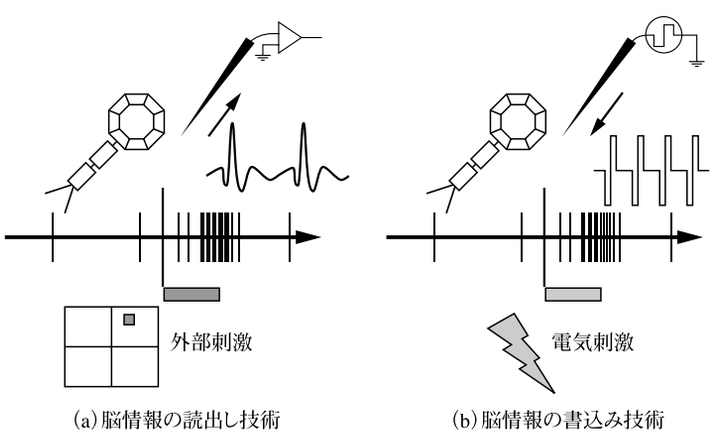


図 2　BMI のコア技術　　脳情報の読出し技術（活動電位記録）や書込み技術（微小電気刺激）．

る必要はない．オフラインデータしかなくても，それをリアルタイムデータと仮定してデコーディングアルゴリズム手法を考案するのも BMI にとって重要な要素技術の研究なのである．

次に「書込み技術」に関してであるが，侵襲的に脳に情報を書き込むときに最も効率的と思われている手段は，脳組織内に対する微小電気刺激である．ニューロンが発生させる活動電位とよく似た電気パルスを局所的かつ一時的に与えることによって，その部位に存在するニューロン群を賦活させ，更にはニューロン群の属する神経ネットワークの持つ機能を人工的に働かせることが可能となる．なお，「読出し技術」である活動電位の記録法では単一ニューロンに焦点を当てることが比較的容易だが，（生きた動物の脳で通常の微小金属電極を使う限り）電気刺激技術によってニューロン１個だけを賦活することは事実上，不可能である．ただし，多くの脳領域において，近い細胞群同士が機能的にまとまった構造体（特に有名なのが大脳皮質のコラム）を形成しており，刺激に用いる電流量を調節することで限定した行動（特定の感覚の生起や特定の筋の収縮など）を誘発できる場合も多い．

微小電気刺激は，脳の運動関連領野で行われたときに最も顕著にその効果を知ることができる．特定の身体部位が高い再現性を持って動くからである．人工的な電気パルスによって特定の筋肉が収縮するために動く場合もあるが，目の場合などは，たとえ最初の目の向きがどこであり，それに応じて動かす必要のある眼筋の組合せが変わっても，特定のベクトルの動き（視線移動）が誘発される場合もある．また，人工感覚システムにおいて，感覚情報を伝達する末梢神経や感覚情報処理に関与する脳領域を賦活するために，この電気刺激が用いられる．

以上のように BMI には情報の方向性に関して，脳から情報を「読み出す」方向と脳に情報を「書き込む」方向の二つのタイプが存在する．ただし，2.1 で紹介した侵襲的 BMI にはこの両タイプの概念が含まれている一方，一般に非侵襲的 BMI を論じるときは主に「読み出す」タイプに関する技術を指す．書込み用の非侵襲的 BMI 技術として，臨床や基礎研究でヒト対象に用いられている「経頭蓋磁気刺激」（TMS：Transcranial Magnetic Stimulation）という，頭皮上に置いた電磁石コイルから遠隔で脳内にパルス磁界を発生させる特定脳領域の神経活動を誘発する技術も存在する．この技術では，脳内に電極を刺入することはないが，その連発刺激によりてんかん発作を誘発する危険性が指摘されており，純粋な意味での「非侵襲」といえるかどうかに関しては議論がある．

3. BMI の社会的インパクト

さて，これまで BMI に関する基礎的な技術的側面を解説してきたが，4. で具体的な開発事例に入る前にいったん，社会のニーズに関して整理をしておくべきであろう．欧米はもとより高齢化社会の先進国日本では毎日のように医療保険や年金制度の問題がニュースに流れてきている．負担と給付のバランスの難しさも気になるところであるが，高齢化による疾病構造の変化と現代人のライフスタイルとの関係に関しても注意が必要である．高齢者になると身体機能の全般的低下に加えて，脳梗塞や脳卒中，認知症，パーキンソン病などの発症による脳機能の障害も増えてくる．また，脳自体に問題はなくとも，脊髄や末梢神経，身体各部に生じる問題のために，結果的に脳が十分機能しない場合もある．そのようなハンディを持つ人も，昔ながらの大家族や「御近所付き合い」の活発なコミュニティの中で手厚いサポートがあればいいのだが，少子化，核家族化，都市化の社会の中では，（国や個人に負担の大きい）有料の介護サービスを受けるか，なるべく他人に頼らず日常生活を営むことが必要となってきているのが現状である．

実際，私たちは脳や身体に障害を持った後も，障害から来る制約を受けることなく自由に動き回り他者とコミュニケーションをとり，職場に復帰したり様々な趣味に興じたりしたいと考えるだろう．実は，次世代医療技術として期待されている BMI であるが，その主たる対象となる患者の多くは「BMI がないと死ぬ」という状況にいるわけではない．むしろ，安全性確保に向けた開発段階である現状の技術レベルでは，BMI のために外科手術をする方が，リスクが大きい場合さえあり得る．ところが，人工視覚や脳動義手を必要とする人の場合，ハンディキャップを我慢して生活することも不可能でないにもかかわらず「生活の質（QOL：Quality Of Life）」を向上させるためにあえてリスクのある侵襲的 BMI のための手術を望む人もいる．つまり，BMI はその技術的な先進性のみならず，人々の価値観の変化を反映し，これまで主流だった「死なないための医療」から今後，重要になってくる「より良く生きるための医療」を目指しているという点でも社会的なインパクトが大きいのである．

4. BMI 研究の事例紹介

感覚器官や末梢神経のダメージのために視力や聴覚が失われた患者は数多い．このような患者に対して，外界の物理的な情報を人工的なセンサ（カメラやマイク）を通して電気信号に変換した後，上述したような電気刺激を中心とした「書込み技術」によって脳内に信号を伝達する試みが既になされている．これが「感覚書込み型

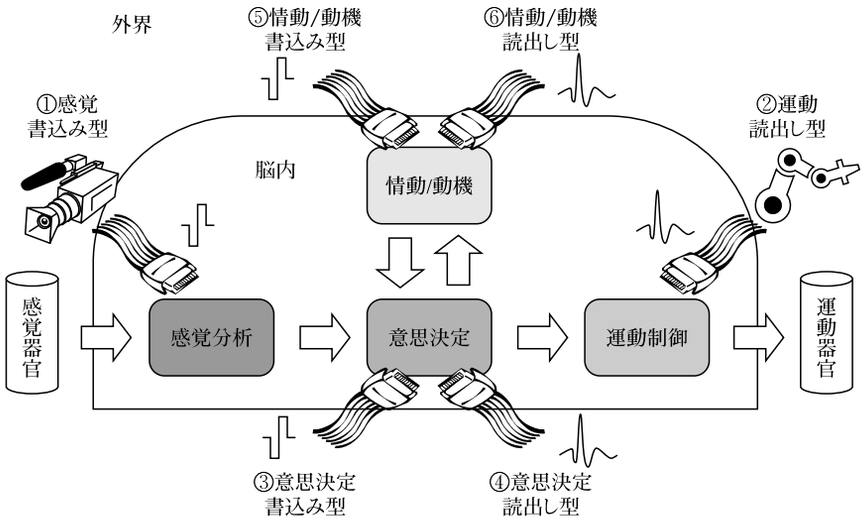


図3　感覚や運動，その他，様々な脳機能を補償するBMI技術

BMI」である（図3の①）．また，運動器官のダメージ（手足の欠損）や脊髄損傷などによって脳からの運動指令が筋活動として働かない場合もある．このような患者の大脳の運動関連領域から運動実行の信号を読み出し，電動義手（ロボットアーム）の制御や電動車いすの運転をさせようとする試みが「運動読出し型BMI」である（図3の②）．このような感覚，運動機能は外界と近く，物理的な情報との対応がとりやすいために研究が進んでいる．なぜなら物理的な情報量と神経活動との相関を調べることによって，運動や感覚の情報処理が脳内のどこでどのように行われているか明確化しやすいからである．ただし，感覚や運動関連の皮質は脳の中でも広い面積を占めるために，感覚書込み型BMIにおいて視野を広くカバーしつつ高い解像度で視覚を再現するための電気刺激を行ったり，運動読出し型BMIにおいて自由度の大きい腕の様々な運動と関係したニューロン活動を記録するためには数百～数千という微小電極をアレー上に配置して脳内に埋め込むことが必要と考えられている．そのため，感覚書込み／運動読出し型BMIの開発者の現在の関心は，より多くの電極をより安全に埋め込み，それを感染防止のために皮下に埋め込んで無線でコントロールする点にある．

以上のように感覚や運動機能といった機能に関して開発が進む一方，感覚と運動を媒介する機能があることも忘れてはいけない．私たちは本能行動に強烈に支配されている昆虫などとは異なり，同じ感覚情報の入力に対しても異なる運動情報を出力する能力を有している．気候や食生活，住環境の変化が激しい環境に住む哺乳類，特に霊長類にとっては，状況や文脈に応じた意思決定を行う中枢機能がよく進化しているのだ．筆者は，これまで主としてサルを用いた神経生理学的技術をツールとして意思決定とそれに付随する認知・情動にかかわる脳内機構を調べる基礎的実験（ニューロサイエンス）を行ってきた．その過程において研究成果をより直接的に医療や産業に応用できないか考えるようになり，米国留学後職を得た産業技術総合研究所（つくば市）で，認知・情動に関する脳内情報を活用するニューロテクノロジー的技術開発に取り組んでいる．その一環として，意思決定に関する情報を読み書きする技術（図3の③と④）や，意思決定の内容や精度に影響を与える情動や動機情報を読み書きする技術（図3の⑤と⑥）を用いたBMI（これらを総称して仮に「認知・情動型BMI」と呼ぶ）を提唱し，自ら開発を開始するとともにその重要性や各分野の専門家・若手研究者の参入を呼び掛けている．

本稿では筆者自身の研究のうち，学会や論文誌上で既に具体的な研究成果を発表している「意思決定の脳内機構とその解読アルゴリズム」を重点的に紹介する（米国ノースウェスタン大学と共同で行ったもの：図3④のケース）[(5)～(7)]．この一連の研究では「眼球運動を行うか(Go)，行わないか(No-go)」という2択の意思決定を必要とするGo/No-go課題（図4(a)）をサルに訓練した．そして，前頭連合野や前頭眼野などの大脳皮質を最高次中枢とする動眼神経ネットワーク（図4(b)）に属する上丘と呼ばれる脳幹の一領域から課題遂行中のニューロン活動を記録した．ところで従来型の研究では意思決定の違いによってニューロン活動に違いがあるかどうかを調べるためには，条件ごと（Go/No-go）に多数の試行の活動の平均値を算出し，比較する場合が一般的であった（試行ごとの活動誤差が比較的大きいため）．本研究では，試行ごとの活動誤差が少ない上丘ニューロンの安定した活動パターンに着目し，「上丘活動を観察し，そこから何らかの関数（ここでは仮想意思決定関数，Virtual Decision Function ＝ VDF と呼ぶ）を導くことができれば（図4(c)），単一試行における意思決定の予

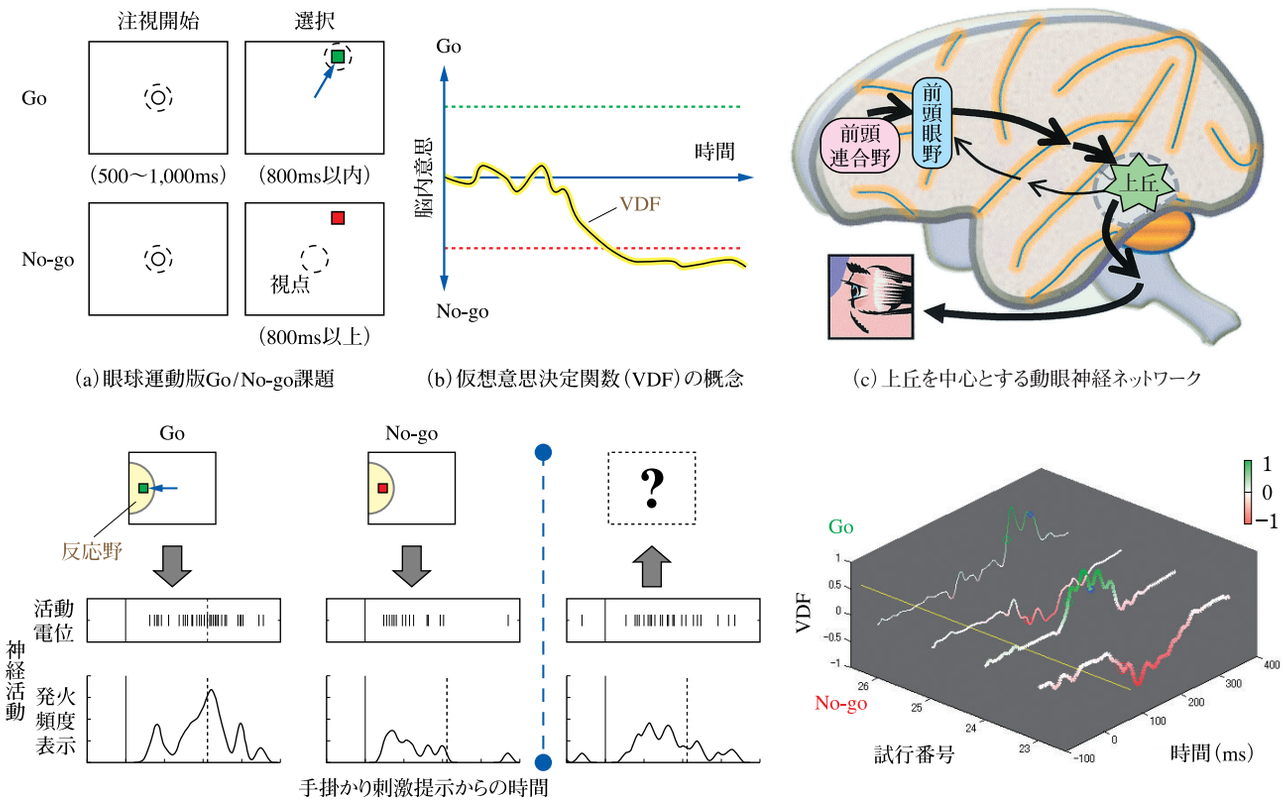
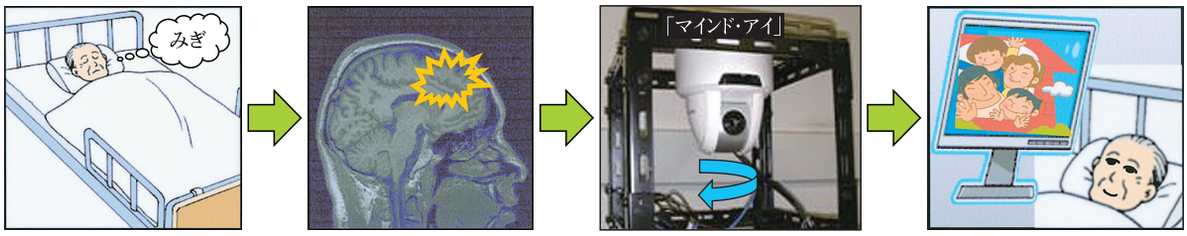


図4　脳内意思読み取り技術の開発例

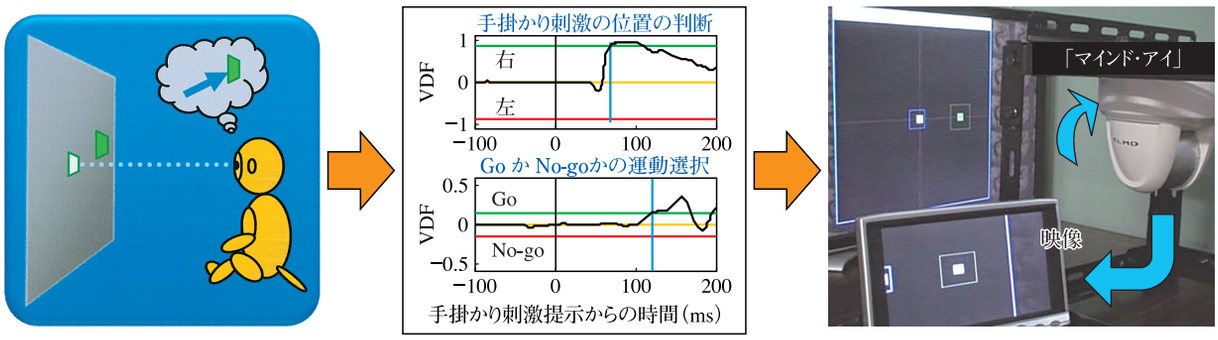
測（図4(d)）が可能である」という仮説を立てた．この仮説を検証するため，視覚的手掛り刺激の提示にタイムロックされた上丘ニューロンの活動（ミリ秒ごと）を説明変数に，サルが最終的に選択した行動を2値化した値（Go＝1，No-go＝−1）を予測変数にして回帰分析を行った．その分析結果を用いて，各試行においてVDFを導き（図4(e)），それによる脳内意思の予測と実際のサルの選択を比較したところ，わずか数個（2～5個）のニューロン活動からでさえ，高い精度で（90%近くの試行）脳内意思決定が予測できることが示された（詳しい日本語解説は文献(8)を参照）．

この研究は，リアルタイムでの外部機器制御を主体としたものではないが，それでも以下のような世界でも初めての成果を含んでいる．その一つ目は，従来，注目されていた大脳皮質前頭連合野のような「最高次」と呼ばれる脳領域に比べても活動変化，時間経過，共に負けないクオリティの意思決定信号を脳深部の中脳に位置する上丘で発見し，たった数個の上丘ニューロンでも認知型BMIに役立つことを示したこと．次に，認知神経科学的発想とも関連があるが，外界からは観察が不可能な脳内だけでの「しない」という選択肢[9]も含めた脳内での内的な意思決定過程の時間的変化を単一試行活動から推定・視覚化したこと（VDF）．更に，その結果に基づき，脳波ベースのBCIの予測（最低2～3秒）と比較してハイスピード（刺激提示から約0.15秒）で最終的な意思決定の内容を予測することが可能であると示したこと，などである．これらの結果が示唆することは，比較的少数のカテゴリーとして表現可能な脳内意思決定に関してであれば，数百という電極を用いた生体への負荷の大きい従来型の大形のインプラントを用いなくても，数個のニューロンの活動を記録できる小形のインプラントから解読に必要な十分な情報を入手することができるということである．

現在，我々は新たな生理学的実験を行いつつも，これまでの脳活動データやその他多様な生体信号を活用して様々な外部機器を制御するシステムの開発にも取り組んでいる．その一つが，今回紹介したサルの実験データを利用してロボットカメラを制御する「マインド・アイ(心の眼)」プロジェクトである（図5）．このプロジェクトでは，インターネットでつながっている遠隔地のロボットカメラ（エルモ社製）を脳内意思で動かすシステムの開発を進めている．この際，安全性が確保されたときには関連脳領域内に設置した微小電極による神経活動の直接観察技術を利用することも可能であると考えられるが，現状でも脳波などの非侵襲的脳活動計測の技術が利用できる．このシステムが完成すれば，重篤な運動障害によって長期入院している，手足の操作が不自由な患者さんでも，遠隔地の家族や友人の視覚環境をインタラク



(a) ロボットカメラ＝「マインド・アイ」を用いた遠隔コミュニケーションシステムの開発構想



(b) 課題遂行中のサル脳活動を信号ソースとした「マインド・アイ」の制御デモ

図 5　脳内意思による福祉機器制御の例

ティブな動作が可能なカメラによって共有することが可能となる（図 5 (a)）．まずは，上述したサルの脳内電極から記録した神経活動を疑似リアルタイムの制御信号として再利用したデモンストレーションを試みた．ただし，本プロジェクトとの関連においてカメラを複数の方向（まずは 2 方向）に動かせるように，左右それぞれの上丘（左の上丘は右視野，右の上丘は左視野の情報処理を担当）から同時記録された数個ずつのニューロン活動に着目した．そしてこれらのニューロン群の活動に対して，2 種類の VDF を単一試行ベースで計算した．この 2 種類というのは，左右の視野のどちらに手掛かり刺激が提示されたかを示す VDF とその位置に実際に眼を向けるかどうかを示す VDF である．これらの VDF によって外界に対する視覚的判断と運動選択の両方の意思決定の予測が可能であることを確かめた[7]．この予測結果を用いて，素早く「マインド・アイ」に伝えて動作制御を行い，それに応じたカメラ映像のフィードバックを得るという，脳活動と連動して動く福祉機器モデルの試作に成功した（図 5 (b)）（2008 年 7 月開催された日本神経科学大会シンポジウム講演で紹介）．まだオフラインデータによる擬似リアルタイムデモの段階であるが，次のステップでは，リアルタイムで測定中の動物のニューロン活動やヒトの脳波などを信号源とし，「マインド・アイ」の制御をリアルタイムに行うことで「実際に眼を動かさなくても念じただけで見たい方向の映像を見ることができる」システムの開発を進めている．

ところで意思決定を含む行動全般に作用する要因＝脳内プロセスとして重要な情動や動機に関する脳機能も基礎研究としては盛んに行われているものの BMI の対象としては未開拓領域である．脳疾患や外科手術の副作用でやる気の極端な低下や感情の平板化などの症状を示す患者も多い中，「情動／動機型 BMI」（図 3 の⑤と⑥）も次世代医療技術としてはきっと役に立つと思われる．筆者は，以前の研究で，難しい課題を遂行中のサルの前頭連合野のニューロン活動をオフラインで単一試行解析を行った結果，ニューロン活動の背景活動（ベースラインの発火頻度）にやる気や集中力などの情動情報が含まれることを見いだした[10]．この経験や技術を生かして，今後は認知・情動に関する BMI の開発プロジェクトも計画している．

以上のように，筆者の興味に限ってもやるべきことはたくさん残されている．「BMI は欧米で進んでいて日本ではやることはない．やってもかなわない」という意見も聞くことがあるが，現場の人間の目から見ると新規参入の余地は無限に広がっている．

5.　実用化に向けて

BMI の研究を推進する立場にある筆者にとって「BMI の実用化にはどんな問題があるか？」という質問には非常に困らせられる．既に多くの人が BMI の技術的・倫理的問題を指摘している中，BMI 開発を目指す研究者自らが更に「内部告発」することによって，研究推進の流れを自ら妨げるのではないかと心配するからである．しかし，問題点をクリアにすることによってだれか賢明な人から助言や解決法の提示を得られるかもしれない．

それを期待して，以下に自分で気付いた幾つかの課題／問題点を列挙する．

5.1 本質的課題

BMI は端的にいえば「手段」の名称である． BMI 実用化においては，医療にせよ産業にせよ同じ「目的」を達成しようとする既存技術との競合になる．そこで脳研究者が BMI の優位性を主張するためには，他の技術のことも十分熟知し，更には同じ土俵で対等に比較評価できる環境が今後必要となってくるだろう．それによって「BMI によるサポートが他の技術よりも劣っている」あるいは「幾らスペックで客観的に勝っていても実際に患者に聞いてみたら， BMI 技術を使用したがらない」という結果になる可能性もある．それが分かったとき，BMI 研究者は果たしてどうするのであろうか？基礎出身の脳研究者がかかわることが多い中，医工学応用分野の苦労はまだまだ十分に浸透しているとはいえない．これは BMI 実用化に向けて， BMI 研究者が越えなくてはならない大きな壁であろう．

5.2 技術的課題

一部既に文中で触れたが，現在の BMI の開発においては，長期間安全，安定して機能するインプラント（埋込多電極や増幅器，無線機）や，脳内情報を正確に解読するアルゴリズム，更には BMI によって制御する福祉機器（電動義手や電動車いす，電動文字盤）など，様々な要素技術が存在し，そのすべてをここで論じきることは不可能である．今回，一つだけブレークスルーが必要な技術分野を挙げるとするならば，それは脳に存在する多様な情報を電気生理学的技術以外を用いて取得することである．上述したように，侵襲的 BMI では金属電極が脳と電気的接点（ニューロン活動の記録や電気刺激など）となっていた．しかし，脳の本来の働き方を考えると，神経回路網においてニューロンからニューロンへディジタル信号を送るための活動電位は脳内情報処理の一側面にしかすぎない．例えば，古くから基礎研究のツールとして，マイクロダイアリシス法が用いられてきた．この方法では微小半透膜プローブを動物の脳内に刺入し，灌流液から回収された成分を分析することによって各種の神経伝達物質の局所的な動態を観察したり，逆にそれらの阻害剤などの薬物を微量に組織内に送り込んで生理学的・行動学的影響を与えたりすることが可能である．電気的信号を媒介する従来技術を電気的 BMI（エレクトリカル BMI）と呼ぶならば，化学物質を媒介とするこのような技術をリアルタイムで制御する化学的 BMI （ケミカル BMI）も登場するかもしれない（共に筆者の造語）．もちろん，マイクロダイアシス装置では，秒単位で，かつリアルタイムの分析を行うのは困難かもしれないが，この技術以外にも近年，爆発的な勢いで開発が進んでいる CMOS 等イメージセンサを用いて生体内の多様な化学変化を測定する技術／装置[11]などは時間・空間解像度も高く，将来，ケミカル BMI のコアデバイスになると期待できる．脳疾患の中には特定の脳領域というよりは，特定の神経伝達物質の働きに異常があったり，脳の働き方の異常を電気的活動よりも化学的活動によって観察した方がよかったりする場合もあり，エレクトリカル BMI を補完するためにも，ケミカル BMI の開発が切望される．

ところで BMI には幾ら工学的技術が進んでも依然として残る技術的課題がある． BMI という言葉に含まれるインタフェース（interface）は，本来，それぞれ別々の目的のために存在する二つのシステムを連動させて，新たな機能を実現するための第 3 のシステム（ハード及びソフトウェア）といえる．もし，インタフェースが機械と機械を結び付けるものであれば話は工学の中で完結するだろう．あるいは個体としてのヒトと機械との効率的な相互作用を目指すヒューマンインタフェースは，行動科学／心理学と工学との融合促進によって既に高いレベルにまで研究が進んでいる．しかし， BMI はまだそこまで達していない．パソコンに慣れていると携帯電話でメールを書くのは非常に困難であるが，どの文字を打ちたいかということは少なくとも明確である．しかし，脳の活動を漠然とモニタしていても，一体，何をしたいと思っているのか分からない．たとえ，「こういう脳内意思を反映しているはず」と思っても本当にそうなのか実際に行動で答えさせなければ定かではない．つまり，コーディングに関してもデコーディングに関しても脳というシステムの理解はまだまだ遅れており，脳がどのように働いているのかに関してもっともっと詳しく知る必要がある．実際に，BMI の開発で有名な研究室の多くは，一方で地道な基礎研究を積み重ね基礎分野においても優れた成果を出している．ニューロサイエンスの研究者とニューロテクノロジーの研究者は別々であってもいいのだが，基礎と応用との両分野の研究が相互に効率良く作用することが現在の BMI 研究にとっては重要である．そのためには同じ研究室で両分野の研究が行われることが理想であるが，「二兎を…」というまでもなく，それを実現するのは大変難しい．

5.3 意識的課題

常に具体的な臨床応用への道筋を考える責務が生じてきた侵襲的 BMI の研究者には，特に意識的改革が必要である．（たとえ意義ある基礎研究の範囲内としても）これまで実験動物に対して行われていた侵襲性の高い実験操作を極力減らし，患者のモデルとして扱う必要がある．医療現場ではスペックが高い反面，侵襲性も高い BMI 技術を作るより，スペックは「そこそこ」でも侵襲性や副作用が低い BMI を作る方が期待されていると想定される．

臨床応用につながる侵襲的BMI研究を行っているからといって，実験動物にどんな侵襲作用も正当化されると安心するのではなく，むしろ，実験動物に対してもヒト患者と同じ視点でとらえるように発想を変える必要がある．もちろん，あえて疾患モデルを作る作業が関与するなど，厳密にヒト患者と同じようにケアすることは不可能である．特に，安全性の高いと思われる新型のインプラントなどを作っても，すぐに患者に使っても大丈夫かどうか分からないために，動物でそれを試す場合もある．何といっても患者の命の方が大事なのだ．

「性能の向上vs．安全性の確保」,「患者のモデルとしての動物vs．患者が危険な目に合わないための動物」…これらの矛盾したベクトルをうまく解消・発展させて，早期にかつ着実に侵襲的BMIを臨床応用のフェーズに導くためには絶妙な「バランス感覚」が必要となってくるであろう．

5.4 倫理的課題

世の中では他者の心を無意識的に変えることを「マインドコントロール」，他者の心を無断で盗み読むことを「マインドリーディング」と呼んでいる．これはまさに認知型BMI（図3の③と④）そのものの概念である．このような類似性があることをもってBMIが「マッドサイエンティストの申し子」のように表現されているのを見たり聞いたりすることがある．確かに世間の人々が心配する気持ちも分かるが，正直いって，現在のBMI技術をだれかが悪用しようと思ってもマインドコントロールやマインドリーディングと呼べるレベルのことをするのは不可能に近い．倫理的な問題点に関して倫理学の専門家が学術的な観点から厳しめの指摘をすることがあっても当然であるが，一般の人がよく実態を知らずにBMI技術を恐れているとすれば，きっとSF映画やアニメが影響した「過大評価」が原因となっているかもしれない．もちろん，近い将来にBMI技術の性能が10倍くらいアップすることは十分あり得るが，そうだとしてもBMI技術の適用を受ける患者は，自ら望んでその技術を利用するはずである．ただし，手足の運動や言語機能に障害を持つ人を対象としている以上，将来，BMIが実用化したときの課題としてBMI装置のスイッチのオンオフを自由にできる仕組みや環境についても考慮することに意義はあるだろう．

もっと現実に即した倫理的問題としては，もし日本でBMI治療を受ける患者が出てきたとすれば，（BMIによるマインドリーディングのためでなく）ニュースバリューの高さゆえに世間の注目と監視を受けてプライバシーがなくなることだ．また，世の中には美容整形によって肉体改造をしている人々がたくさんいる中で，たとえ自らのQOL向上にとって重要という判断でBMI治療を決意しても，（BMIによるマインドコントロールのためでなく）「脳だけは神聖な臓器であって決して触れてはいけない」という信念を持つ人が，患者の気持ちを知ろうともしないで自らの価値観を押し付けてくる可能性もある．

そういう人たちの気持ちも分からないではない．自分にもし娘がいたら，きっと成人してもピアスの穴を開けるのにさえ反対すると思う．その一方で，もし生後，聴覚障害が見つかって人工内耳を付ければ治る可能性が高いならば，なるべく早くその手術を受けさせるだろう．これらの判断は自分にとっては当たり前のことに思えるのだが，違う考えの人もたくさんいるだろう．また，BMIや臓器移植などは，自分自身に適用するものであるかどうか，自分の家族に対してか，赤の他人に対してか，など適用対象次第で全く異なる結論になる場合もある．BMIに限らず倫理の問題は，グローバルな結論を出すのを焦らず，まずは個別の事例に関してよく検討し，賛成する人，反対する人，それぞれの理由を分析する必要があると思う．もしかしたら，お互いに持っている知識が異なっているだけで，情報を共有することで意見が一致するかもしれない．

6. おわりに

かつて，BMIに関連した研究をする某先生が，その講演で「私はBMI技術を直接，臨床応用するつもりはありません．しかし，BMI技術をツールとして用いることによってこれまで知られていなかった脳の働きを詳細に知ることができ，脳科学がより進むと思っています」と述べておられた．その当時，応用への展開ばかりを考えていた筆者は「なるほど，そういう考え方もあるのか」と感心した．いわゆる基礎から応用への一方的な技術移転だけでなく，応用のために開発された装置や解析手法が基礎研究における強力なツールとなることもあるのだ．実際，BMIとの関連で開発された多電極が基礎研究者にも役立っている．しかし，侵襲的BMIを必ずしも臨床応用に展開させない人々の理由はほかにもあるかもしれない．例えば生物学系や心理学系の脳科学者にとっては，BMIの対象となる患者と接する機会を持つことは皆無かまれであり，直感的に医療応用を敬遠しても不思議ではない．ある意味，正しい決断である．医者を含め，新しい治療法の導入には常に倫理的な問題や医療訴訟等の問題が付随する．それらを考えると基礎系出身の筆者も正直いって，最初は足がすくむ思いであったが，BMI研究を通じて知り合いになった臨床系の研究者や医師の方々から応援して頂くようになり，それを励みに何とか頑張っているのが現状である．

日本にもBMI開発を目指す研究者・医師は増えているが，個人的には次の二つの態度で研究開発を進めようと思っている．一つ目は，臨床応用を焦らず，将来の（日

本での）臨床応用に備え，実験動物を中心として安全性の確認や性能向上にじっくり時間をとって地盤固めを行うこと．これは，欧米に対して10年以上遅れているともいわれることに対する焦りの気持ちを抑えるためである．二つ目は，たとえ臨床応用が将来のことだとしても，動物実験を行う研究室と医療機関との連携を積極的に強めていくことである．既に筆者自身も幾つかの病院の医師の方々に大変お世話になっている．患者用の手術室なんて見るものすべて新鮮であるし，医師の方々の苦労話を聞いたり，かつそれを乗り越えて日々，社会に直接貢献している姿を垣間見たりするのもすべて勉強になり，やる気も出てくる．そして，いつか，できる限り近い将来に自分も脳科学を通じて社会に少しでも役立てる日が来るのを夢見て研究生活を送る機会を与えてくれたBMIに感謝をしている．

文　　献

（1） J. Wessberg, C.R. Stambaugh, J.D. Kralik, P.D. Beck, M. Laubach, J.K. Chapin, J. Kim, S.J. Biggs, M.A. Srinivasan, and M.A. Nicolelis, "Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates," Nature, vol.408, pp.361-365, 2000.

（2） L.R. Hochberg, M.D. Serruya, G.M. Friehs, J.A. Mukand, M. Saleh, A.H. Caplan, A. Branner, D. Chen, R.D. Penn, and J.P. Donoghue, "Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia," Nature, vol.442, pp.164-71, 2006.

（3） 川人光男，"ブレイン・ネットワークインタフェース，" 信学誌，vol.91, no.2, pp.123-130, Feb. 2008.

（4） 長谷川良平，"侵襲的ブレイン・マシン・インターフェイスと動物実験モデル，" 季刊脳21， vol.11, no.2, pp.38-48, 2008.

（5） R.P. Hasegawa, Y.T. Hasegawa, and M.A. Segraves, "Single trial-based prediction of a go/no-go decision in monkey superior colliculus," Neural Netw., vol.19, pp.1223-1232, 2006.

（6） R.P. Hasegawa, Y.T. Hasegawa, and M.A. Segraves, "Prediction of a go/no-go decision from single-trial activity of multiple neurons in monkey superior colliculus," Lect. Notes Comput. Sci., in press (presented in 14th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP2007), Kitakyushu, Nov. 2007).

（7） R.P. Hasegawa, Y.T. Hasegawa, and M.A. Segraves, "Neural prediction of multidimensional decisions in monkey superior colliculus," IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.7, pp.2118-2124, July 2008.

（8） 長谷川良平，"サル上丘ニューロンの活動に基づく意思決定過程の予測，" ブレイン・マシン・インタフェース―脳と機械をつなぐ，「脳を活かす」研究会（編），第1章-3，オーム社， 2007.

（9） R.P. Hasegawa, B.W. Peterson, and M.E. Goldberg, "Prefrontal neurons coding suppression of specific saccades," Neuron, vol.43, no.43, pp.415-425, 2004.

（10） R.P. Hasegawa, A.M. Blitz, N.L. Geller, and M.E. Goldberg, "Neurons in monkey prefrontal cortex that track past or predict future performance," Science, vol.290, pp.1786-1789, 2000.

（11） 澤田和明，"pH イメージセンサの開発，" 映情学誌， vol.62, no.3, pp.317-321, 2008.

（平成20年4月9日受付　平成20年7月4日最終受付）

長谷川（はせがわ）　良平（りょうへい）

京大大学院理学研究科博士課程了（霊長類研究所行動神経研究部門に所属し，学位取得）．その後米国国立衛生研究所（NIH），ノースウェスタン大に在籍．これまで主としてサルを対象とし，眼球運動と単一ニューロン活動を指標として高次脳機能の神経機構を調べる研究を行ってきた．2004から産総研の脳神経情報研究部門に所属．2008-09からニューロテクノロジー研究グループグループ長に就任．