

現代化学 6

No. 471

CHEMISTRY TODAY

2010

脳と機械の融合はどこまで許されるか —BMI技術の倫理4原則の提案—

精密に構造制御した高分子合成
バイオトランジスターの開発
DNAを制御する分子クラウドニング



東京化学同人



ブレイン・マシン・インタフェース BMI 倫理 4 原則の提案

川 人 光 男
佐 倉 統

BMI 倫理 4 原則

- 原則 1** 戦争や犯罪に BMI を利用してはならない
- 原則 2** 何人も本人の意思に反して BMI 技術で心を読まれてはいけない
- 原則 3** 何人も本人の意思に反して BMI 技術で心を制御されてはいけない
- 原則 4** BMI 技術は、その効用が危険とコストを上回り、それを使用者が確認するときのみ利用されるべきである

はじめに

2010年の現代にもヒトのように真に知的なロボットは存在していませんが、60年も前にアイザック・アシモフは、ロボットの倫理規定を与えるロボット工学3原則（コラム参照）を提案しました。そして、ロボットに限ったことではなく人工物全般に当てはまることなどの批判を受けつつも、現在に至るまで、この規定は広く認識され、ロボット技術に関する社会的規範として定着しています。

一方、脳 (brain) の機能を機械 (machine) で補助、調整 (interface) する、あるいは脳 (brain) と機械 (machine) を人工的に接続 (interface) する、ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) 技術は、すでに一部、医療分野で実用化され、ゲームや情報通信、ロボット制御などの分野にも応用範囲が広がろうとしています。脳と機械を接続することによる主体の変革がどこまで許容されるのかなど、すでに倫理的・社会的な諸問題が指摘されていますが、その導入に関して社会的な規範になりうるものは、まだ提案されていません。そこで私たちは、本稿で、上記のBMI倫理4原則を提案し、学会、ジャーナリズム、業界、一般社会の議論を誘起したいと考えます。

ブレイン・マシン・インタフェースとは何か

脳神経科学と情報通信技術が結びついた新技術：ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) によって、種も仕掛けもありますが、超常現象の中でも人気の高い超能力について、そのいくつかが実現しつつあると言ったら専門外の人は驚くでしょう。念じただけで物体を動かす“テレキネシス (念動力)”は、考えただけでコンピューターを操作し、ロボットに命令を出し、車いすを動かすBMIとして実現しています (図1)。思い浮かべたことを印画紙に写し出す“念写”は、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) で計測した大脳皮質視覚野の活動から映像を再構成するデコーディング (脳情報解読) 技術として実現しています (図2)。瞬時に遠隔地に移動する“テレポーテーション (瞬間移動)”は、米国東海岸にいるサルの脳活動で京都にいるヒト型ロボットを制御する、インターネットを用いた双方向通信として実現しています (図3)。また心と心で直接情報をやりとりする“テレパシー (精神遠隔感応)”も、

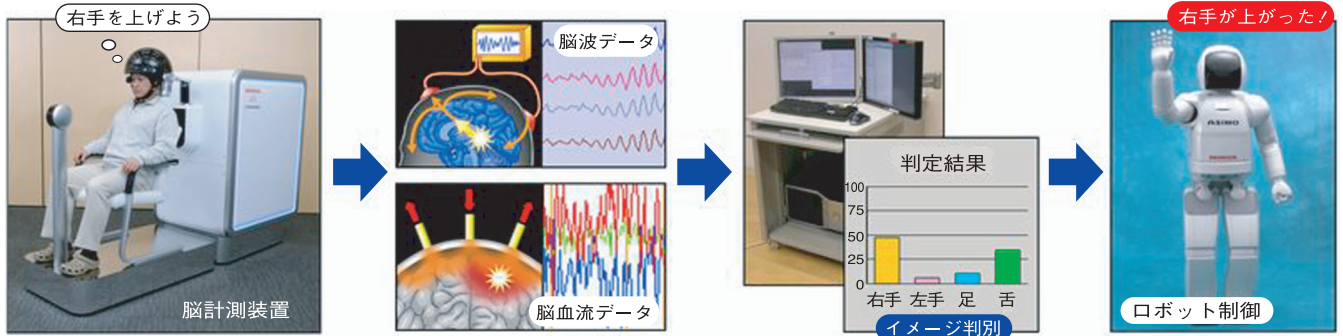
コラム ロボット工学3原則

第一条 ロボットは人間に危害を加えてはならない。また、その危険を看過することによって、人間に危害を及ぼしてはならない

第二条 ロボットは人間にあたえられた命令に服従しなければならない。ただし、あたえられた命令が、第一条に反する場合は、この限りでない

第三条 ロボットは、前掲第一条および第二条に反するおそれのないかぎり、自己をまもらなければならない。

2058年の「ロボット工学ハンドブック」第56版 (アイザック・アシモフ著、『われはロボット』(1950年)より)



米国デューク大学のグループなどは、2004年から脊髄損傷患者の大脳皮質運動野に半導体多重電極を1年にわたって埋め込んで、多数のニューロンの発火頻度を記録し、それをコンピューターで処理して、患者の意思に基づいて、コンピューターのカーソルを制御した。ホンダ、ATR脳情報研究所、鳥津製作所は2009年に協同で、近赤外光による脳血流計測と脳波計測を100点以上で同時に行い、被験者の訓練なしで、4種類の運動

(右手を上げる、左手を上げる、足を上げる、舌を出す)の想像を高精度で識別し、その結果を用いてヒト型ロボットASIMOの自律制御に成功している(写真)。大阪大学医学部脳外科、東京大学、ATR脳情報研究所は2009年に協同で、硬膜下においた電極によるいわゆる皮質脳波により、肩から指先までの高精度義手ロボットを制御し、物体をつかんだり離したりすることに成功した。

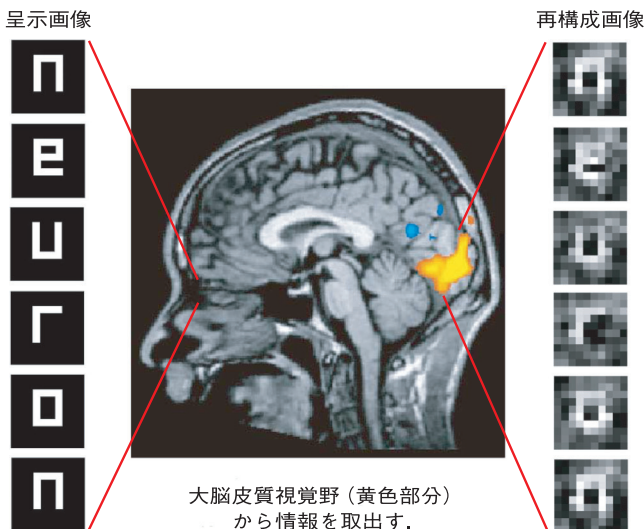
図1 テレキネシス

神経科学の研究トピックスとして研究され始めました(図4)。夢のようなBMI技術には、私たちの暮らしを豊かにするつぎの二つの道筋があります。

第1は、BMI技術の医療・福祉への応用です。ここでは、BMIをつぎのようにとらえることができます。『脳の

主要な三つの機能：感覚、中枢、運動を電気的な人工回路で再建、治療、増進する試み』。こういうふうに言うのと、やはりSF映画の絵空事のように思われるかもしれませんが、感覚機能と中枢機能についてはすでに実用化されています。人工感覚型BMIの代表は、世界で20万人の聴覚を再建した人工内耳です。人工網膜も実用段階に近づき、めまいを直す人工前庭器官も研究されています。薬も効かないパーキンソン病患者の震えをとめる脳深部刺激は国内だけでも千人の方の福音となっています。世界各国で激しく研究開発競争が行われているのは、筋萎縮性側索硬化症、脊髄損傷、脳卒中などで失われた運動とコミュニケーションの能力を再建し治療する運動制御型BMIです。日本は米国とドイツに10年研究が遅れているといわれていましたが、皮質脳波を使う低侵襲型BMIとリハビリテーションに役立てる治療型BMIの二つの応用で、文部科学省脳科学研究戦略推進プログラムの後押しなどもあって、世界のトップに躍り出ました。

第2は、BMIの情報通信分野への応用です。コミュニケーションと情報通信は言語、文字、印刷、電信、電話、インターネットなど、人とほかの動物との違いを際立たせる最も重要な技術といえますが、いまだに、文字、符号、音声、映像などデータを通信しているのに過ぎません。いかにいえば、私たちがコミュニケーションでやりとりしている脳内の感情、感性、情動、情報など、本当に知りたい伝えたいことを選んで、直接に通信する技術はいまだに存



大脳皮質視覚野(黄色部分)から情報を取出す。

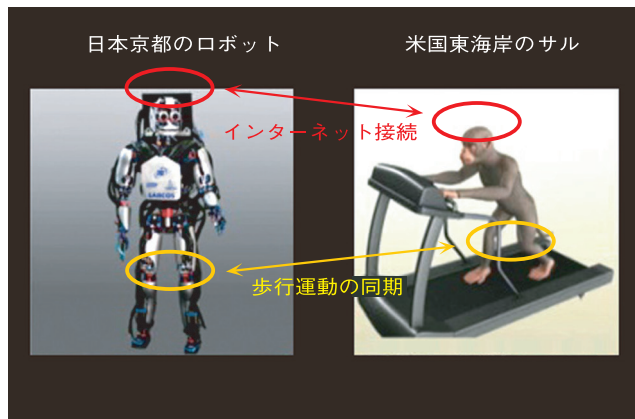
2008年に、ATR脳情報研究所の神経情報学研究室長・神谷之康らは、生理学研究所、情報通信研究機構との共同研究で、ヒトの大脳皮質視覚野の機能的磁気共鳴画像法(fMRI)信号から、ヒトが見ている10×10の白黒画像を再構成することに成功した。神谷室長らは、さらにヒトが思い浮かべている画像、あるいは夢を見ている際の画像のデコーディングに挑戦している。

図2 念写

在しません。そのために無用の大量データがネット上をさまよひ、膨大なエネルギーを消費して環境を破壊しています。医療と福祉の範囲に限らず、広く考えますと、『BMIとは、脳と情報通信機器を直接に接続する技術』とも言えます。従来の情報通信技術では、どんなに先進的なものでも、人の感覚受容器と運動効果器という狭い帯域をもつ隘路を通してしか、脳と脳がコミュニケーションできなかったものが、いわばテレパシー通信、以心伝心通信が可能になるのです。今まで言葉や身振りではうまく伝えられなかった細かいニュアンスや心のひだを表現することができるようになるかもしれませんし、頭の中で情報を選別して本当に伝えたいことだけを選んで、少量のデータを通信すれば、たちどころに意図がわかって、情報洪水にストレスを感じることなく、低エネルギー消費のコミュニケーションを享受できるようになるのではないのでしょうか。これ以外にもBMIの民生利用として、脳情報を使ったゲームはすでに商品化し、ロボット操作も研究されています。

ブレイン・マシン・インタフェースの倫理問題

革新的な技術は光の部分が強ければ強いほど、陰も暗くなるといわれます。BMIもまさにそのような例で、医療・福祉だけでなく将来の産業構造さえ変える可能性があ



米国デューク大学とATR脳情報研究所は科学技術振興機構・国際共同研究『計算脳プロジェクト』で、2008年に、米国東海岸にいるサルの脳と京都府ATRのヒト型ロボットCB-iをインターネットで双方向に結合し、サルの歩行運動とCB-iの歩行運動を同期させることに成功した。

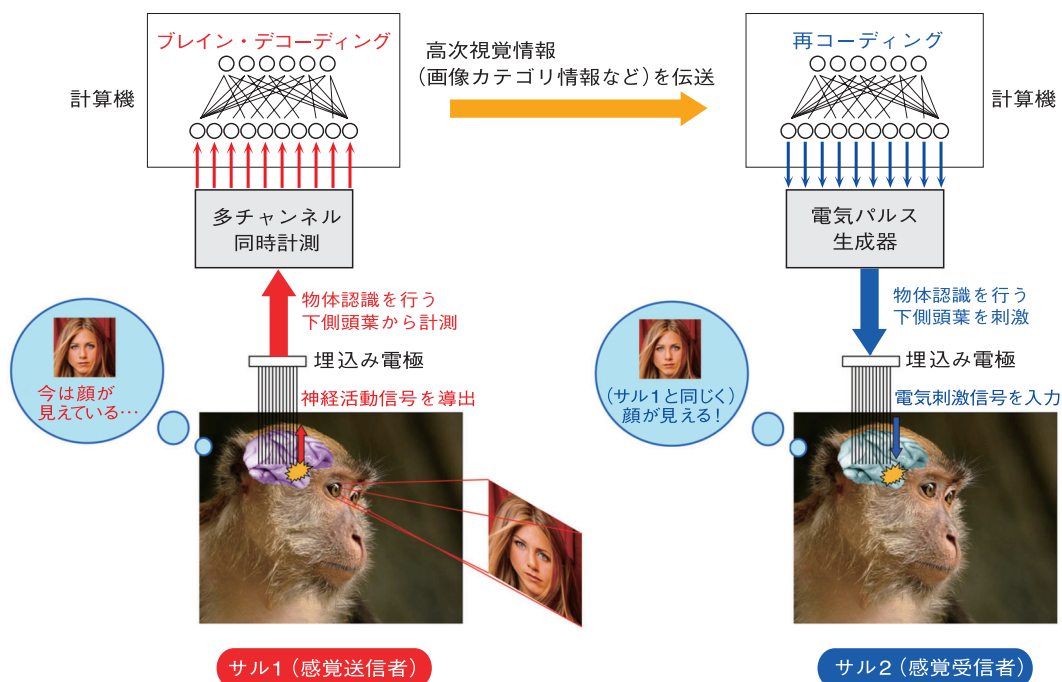
図3 テレポーテーション

る一方で、さまざまな倫理的・社会的問題が生じます。

まず、軍事利用の危険性があります。また、脳と情報通信機器を直接つなげば、脳がシナプス可塑性（神経細胞をつなぐシナプスの伝達効率が経験や学習などで変化して固定される性質）で変化します。BMIは機械が脳と直結しているのですから、人が車やワープロを使うことによって

科学技術振興機構は2008年から、さきがけ研究『脳情報の解読と制御』（研究統括：川人光男）を開始して、25の研究課題を採択している。そのうち、北城圭一：リアルタイムTMS制御による脳情報処理の操作的検証、林隆介：BMIを介した観察者間の知覚共有技術の開発は、いわばテレパシー通信につながる主観的視覚の共有のための基礎技術の研究開発を行っている。

図4 テレパシー
（作成：産業技術総合研究所 林隆介）



脳が変わる以上に、劇的な脳の変化が起きる可能性もあります。また、脳深部刺激などの電気刺激は、薬と違って脳の特定の部位にだけ影響を与えるのだからかえって安全であるという見方もある一方で、何千年の歴史をもつ薬と違って、どんな長期的影響が現れるか予想しがたいともいえます。また、治療はよいが、スーパーマンをつくり出すかもしれない能力増進にBMIが使われるのは道義的に許されるのかとか、脳が激しく変化する可能性があるのにゲームなどの娯楽に使うってよいのかという反論もあるでしょう。BMIの研究開発では、同時にこのような倫理的・社会的問題の考察も進めていく必要があります。

日本神経科学学会は新しく改訂した倫理規定でBMIを取扱い、また文部科学省脳科学研究戦略推進プログラムでは、研究の開始時から複数の倫理の専門家にプロジェクトに入らせていただくという画期的な試みを行い、いわゆる“脳神経倫理学”に真正面から取り組んでいます。BMIのような新しい技術が及ぼす影響については、専門家だけではわからないこともたくさんあります。社会の中でBMIをどのように使い、どう育てていくのか、社会と共に考えていくことが不可欠です。そしてそのためには、私たち研究者はBMI研究の実態と将来の影響についてできるだけわかりやすく社会に伝え、社会とのコミュニケーションを広くそして深くしていく必要があります。冒頭で提案したBMI倫理4原則は、そのためのきっかけとなることを目指しています。以下、倫理4原則のそれぞれについて、順に説明をします。

1. 戦争や犯罪にBMIを利用してはならない

第1の原則は、BMIの犯罪や戦争への使用を禁じます。米国でのBMI開発初期の資金がおもにDARPA（国防高等研究計画局）から来ていたことを思い出せば、この規定が杞憂に基づくものではないことがわかります。

2. 何人も本人の意思に反してBMI技術で心を読まれてはいけない

第2の原則は、BMI技術そのものというよりは、その要素技術、脳情報解読技術、デコーディング技術などによばれるものの使用に関する規定です。現在すでに、近赤外光計測と脳波計測を組合わせて頭に思い浮かべた4種類の運動を読み取ったり、fMRIで被験者が見ている白黒画像を再構成したり、あるいは10秒後に足し算をするかひき算

をするかを予測することができるようになっていきます。米国では、fMRIを利用した嘘発見器を開発するベンチャー企業が複数起業しました。しかし、私たちがマインドリーディングという言葉から連想するような、ヒトが隠しておきたいと思っている秘密を脳から読み出すような技術の開発には、まだ時間がかかるでしょう。けれども、他人が思っていることを読み取る技術を、たとえば黙秘を続ける犯罪容疑者に対して適用すべきだという社会的要求は、ときには高いものになるかもしれません。しかし技術が不正確な状態で応用だけが先走ってしまえば、冤罪をはじめとするさまざまな悲劇を起しかねません。そのような解読技術は、たとえ犯罪者が対象であっても、本人の意図に反しては、決して適用してはいけないという宣言です。

3. 何人も本人の意思に反してBMI技術で心を制御されてはいけない

第3の原則が対象としている危険は、脳深部刺激技術として、一歩手前まで来ているといえます。パーキンソン病のような神経疾患だけでなく、うつ病などの精神疾患の治療にこの技術は応用範囲を広げようとしています。これは広く解釈すれば、BMI技術を使ったマインドコントロールといえます。そのような制御技術は、本人が望まないかぎりは、決して適用してはいけないというのが、ここで宣言していることです。

4. BMI技術は、その効用が危険とコストを上回り、それを使用者が確認するときのみ利用されるべきである

第4の原則は、BMI技術の本質つまりシナプス可塑性による脳の変容を理解する必要がある最も微妙なものです。たとえば脳卒中の患者がBMIリハビリテーションで運動能力を回復したとして、そのとき脳は確実にリハビリテーションの前から変化しています。場合によっては、その人の性格も変わっているかもしれません。それでも、この技術を適用したほうがよいか、考えてもらう必要があります。実際、脳腫瘍を摘出したり、てんかんの病巣を取除いたあとで、患者やその家族から、この類の訴えが出ることもあるそうです。医療と福祉の分野では、そうはいつでも効用が危険よりも大きいことは比較的確認しやすいでしょう。しかし、ゲームに適用する場合はどうでしょうか。消費者は、危険性をきちんと認識しているでしょうか。第4の原則を遵守するためには、日進月歩の技術の将来の危険

性を予測すること、受益者が、効用、危険、コストをどのように主観的に評価するかという困難な問題を二つ含んでおり、研究者・技術者と社会との良好なコミュニケーションが不可欠となります。

もちろん、ここで提案した4原則だけでBMIに関する倫理的・社会的問題がすべて解決できるというものではありません。脳の状態が変化していく場合、「本人」とはどの状態の「その人」を意味するのか、BMIの「使用者」とは、使う人の家族も含まれるのか、医師や専門家はどのようにかわり、どのような権限をもつべきなのか…などなど、さらに微妙なグレーゾーンが存在します。

しかし、これらの問題には、いつでもどこでも成り立つ正解は存在しません。使用者の状態や家族との関係など、さまざまな要因を考慮しながら、その都度、適切に対処することが求められます。つまり、BMIの倫理的・社会的問題は、専門家だけでは解決できず、社会全体が共に考え、共に解決していく必要があるのだと思います。

4原則は、あくまでもそのきっかけであり、一方で、抛り所になってくれればと思います。

おわりに

BMIは脳神経科学の基礎研究で生まれたシーズ技術が感覚補綴^{はてつ}や、神経難病の治療、リハビリテーションの促進

などの臨床応用につながった、トランスレーショナルリサーチの大成功例の一つです。しかし、その逆方向、いわばリパース・トランスレーショナルリサーチも大変期待されています。つまり、BMIの基礎技術であるデコーディング技術が認知神経科学の有望な実験手法を支え、あるいは皮質脳波や神経記録のための完全埋め込み（無線、非接触電源供給システムを含む）BMIシステムの開発が、長時間、非拘束で動物から大量の脳活動データを取得することにより、神経科学を根底から変えるかもしれないなどの、いわば応用から基礎への逆流・還流です。BMIが今後も脳科学の一大応用分野として社会に貢献すると共に、脳科学自体を変革する起動力として、立派に育ってほしいと切に希望しています。そして、そのためには社会と専門家の協同関係が何としても必要です。本稿で提案した4原則がその協同関係を構築する試みの触媒として役に立つことを祈っています。

専門家と社会のコミュニケーションチャンネルを確立するためには、たとえば、本稿の読者が意見や提言を寄せたい場合の窓口となるアドレス、あるいは議論のプラットフォームとなるURLがあると理想的なのですが、まだ用意されていません。学会や国の研究プロジェクトで、こういった窓口を用意していくことも、私たち専門家にとっての差し迫った課題であると考えています。

付記 BMI技術と化学の関係は？

BMI技術と化学とは、一見、遠い関係にあると感じられるかもしれませんが、すでに化学の関連する分野でもBMI技術に資する研究は行われており、近い将来には、直接的にBMI技術を支える化学研究が行われることも予想されます。また、逆にBMIの研究が化学を活性化させる状況も生まれると思われま

す。非標識で非侵襲的に脳を可視化・計測できる分光分析の技術においては、分析精度が高くなるにつれてますます医療応用の実現性が高まり、自ずとBMI技術との関係が深まってゆきます（本誌p.22の図1では、ATR脳情報研究所と島津製作所による成果が紹介されています）。

生体適合材料や有機-無機複合材料の研究開発は、脳と機械を無理なく接続することのできる材料を提供してゆくかもしれません。

また、生体分子を用いる埋込み型ナノデバイスの研究は、信号の入出力・生体情報処理などの面でBMI技術を支援できる可能性があります。

生体分子そのものに関する基礎研究も例外ではありません。光信号を電気信号に変換するイオンチャンネルであるチャンネルロドプシンの基礎研究は、視覚回復への応用研究を拓きつつあります（小誌2009年6月号、p.30）。

化学にはさまざまな技術を下支えする面があり、出口にあたる技術とのつながりが直接的には見えにくいかもしれませんが、しかし、化学研究が社会に及ぼすであろう影響やその意味を化学の立場から考え、BMI技術が抱えるような倫理問題に関しても考えを述べてゆくことは、今後重要になると思われま

（現代化学編集グループ）