

BMIが拓くリハビリテーションの新たな可能性

里宇 明元*

要旨：ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）は脳機能の一部と機械を融合させ、障害を低減するための技術である。われわれは2008年より開始された文部科学省脳科学研究戦略推進プログラムの中で非侵襲型BMIを臨床実証する中核拠点として、脳波BMIによるインターネット上仮想空間セカンド・ライフ内のアバターの制御および上肢電動装具の制御が可能な機能代償型BMIを開発し、臨床例で実証してきた。さらに、重度片麻痺例の上肢をターゲットとした機能回復型（治療型）BMIの開発に着手し、BMIニューロフィードバックトレーニングにより随意筋電の誘導や脳の可塑的变化の誘導が可能なことを示してきた。今後は、症例をさらに積み重ねていくとともに、脳機能イメージングおよび電気生理学的手法を用いて、可塑性誘導のメカニズムを解明していく予定である。

Key Words：脳可塑性，機能回復，機能代償，脳卒中，神経筋疾患

1. リハビリテーションにおける治療

リハビリテーションにおける治療は、機能障害そのものへのアプローチと代償的アプローチに分けられる（図1）。前者は麻痺や言語障害など、疾病の直接の結果として生じたからだの機能の障害を回復させるためのアプローチであり、リハビリテーション医療に携わる者は、常に最大の機能回復に向けて努力する責任がある。ただし、すべての機能障害が元に戻るわけではなく、病気の性質や程度によっては回復に限界があることも少なくない。したがって、もう一方の代償的アプローチも活用しながら、生活を送るうえでの障害の軽減に努めることが大切である

代償的アプローチには、1) 残った機能の活用（右手が不自由になった場合に左手で字を書くなど）、2) 補助具の活用（下肢の装具を使うことにより歩き易くするなど）、3) 環境の調整（手すりをつけることによりトイレの自立を助けるなど）が含まれる。機能障害が変わらなくても、代

償機能の活用により日常生活が送り易くなることはしばしばあるので、2つのアプローチをバランスよく組み合わせて、リハビリテーションチームの協働により、最大限の機能回復と対象者の生活の質の向上を目指すことが大切である。

本稿のテーマであるブレイン・マシン・インターフェース（Brain Machine Interface：BMI）は、近未来の技術であるが、失われた機能を補うこと（機能代償）に加え、脳機能そのものの回復を促す（機能回復）可能性があることが示唆されており、上述のリハビリテーションにおける2つのアプローチに対応づけて考えることが可能である。

2. BMIとは

脳卒中、脊髄損傷、脳性麻痺、神経・筋疾患、骨・関節疾患、切断などの原因により、「動くこと」が障害された方の数は、約176万人と推計されている⁷⁾。障害された、もしくは、失われた機

New possibilities of rehabilitation opened by BMI technology

*慶應義塾大学医学部リハビリテーション医学教室

Meigen Liu, MD, PhD：Department of Rehabilitation Medicine, Keio University School of Medicine

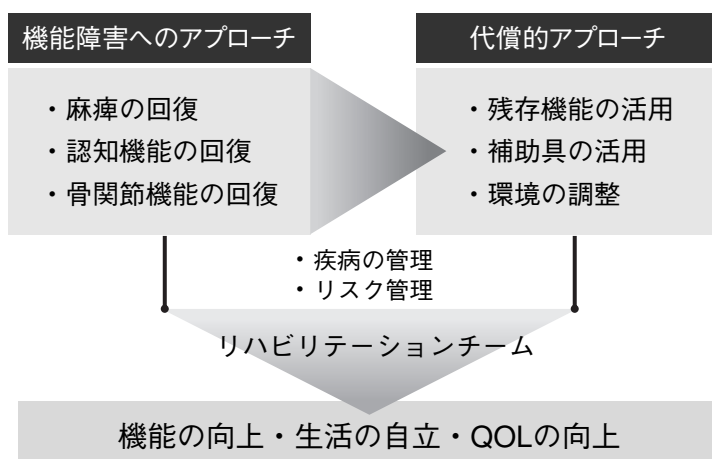


図1 リハビリテーションにおける治療

機能障害そのものへのアプローチと代償的アプローチに分けられる。BMIは、1) 失われた機能を補う、および、2) 脳機能そのものの回復を促す、という2つの目的を持っており、リハビリテーション治療の基本的枠組みに合致する。

能を補うための革新的な医療技術を開発し、実用化することは、本人の日常生活の自立を助け、生活の質を高め、社会参加を促すだけでなく、社会全体の医療・介護に係わる負担を軽減するうえで重要な課題である。

BMIは、脳機能の一部と機械を融合させ、障害を低減させるための技術である(図2)⁴⁾。近年、世界各国で精力的な研究が展開されるようになり、発表される論文件数も飛躍的に増加しつつあるが(図3)、BMIの臨床応用が実現すれば、障害を持つ方々にとって大きな福音となることが期待される。

BMIには、感覚系を介して外界の情報を脳に取り込む(コーディング)入力型BMIと脳活動を解読して(デコーディング)、外界に働きかける出力型BMIがある⁴⁾。さらに、BMIは、脳信号の読み取り方式により、直接、脳に電極を刺入して信号を読み取る侵襲型BMIと、頭皮上から脳波などを観測する非侵襲型BMIの2種類に大別される。侵襲型BMIは、米国を中心に研究が進み、locked-in syndrome⁵⁾や頸髄損傷²⁾などによる重度障害者が、パソコン上のカーソルを「考えるだけで」動かしたり、テレビのスイッチやチ

ャンネルを操作したりできるようになったなどの成果が報告されている。一方、非侵襲型BMIは、ドイツと米国を中心に応用を見据えた研究が進み、肢体不自由者¹⁾だけでなく、一般人のゲーム用入力装置としての応用も試みられている³⁾。

近年、日本でも精力的にBMIの研究が行われるようになり、近赤外分光法や脳磁図などを用いて非侵襲的に脳の活動を読み取る先端的技术と、優れたロボット技術を有するわが国が、近い将来、この分野で世界をリードすることが期待されている。

3. 日本におけるBMI研究の動向

a. 脳科学研究戦略推進プログラムの立ち上げ

BMIの研究開発には学際的な取り組みが不可欠であることを踏まえ、2008年から5年間の予定で、文部科学省脳科学研究戦略推進プログラム「日本の特長を活かしたBMIの統合的研究開発」(以下、脳プログラムと略す)が開始された⁸⁾。このプログラムは、独自のBMIを支える要素技術と高度先端的な医療機能を持つ国内6つの研究

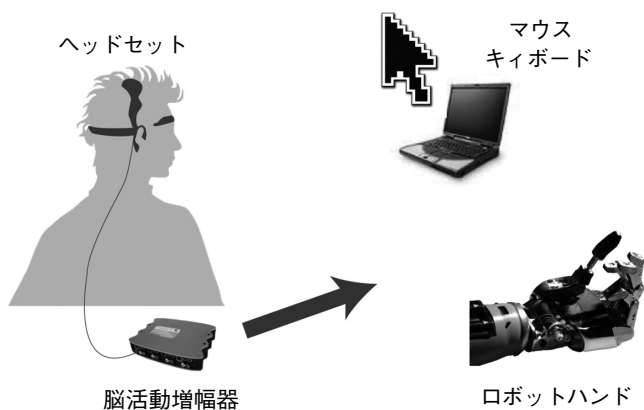


図2 Brain Machine Interface (BMI) の基本システム

BMIは、脳機能の一部と機械を融合させ、「念じただけで」外界を操作するための技術である。頭皮上脳波BMIの場合、その基本構成は、脳活動を記録するためのヘッドセット、脳活動の解読および増幅器、外部機器からなる。

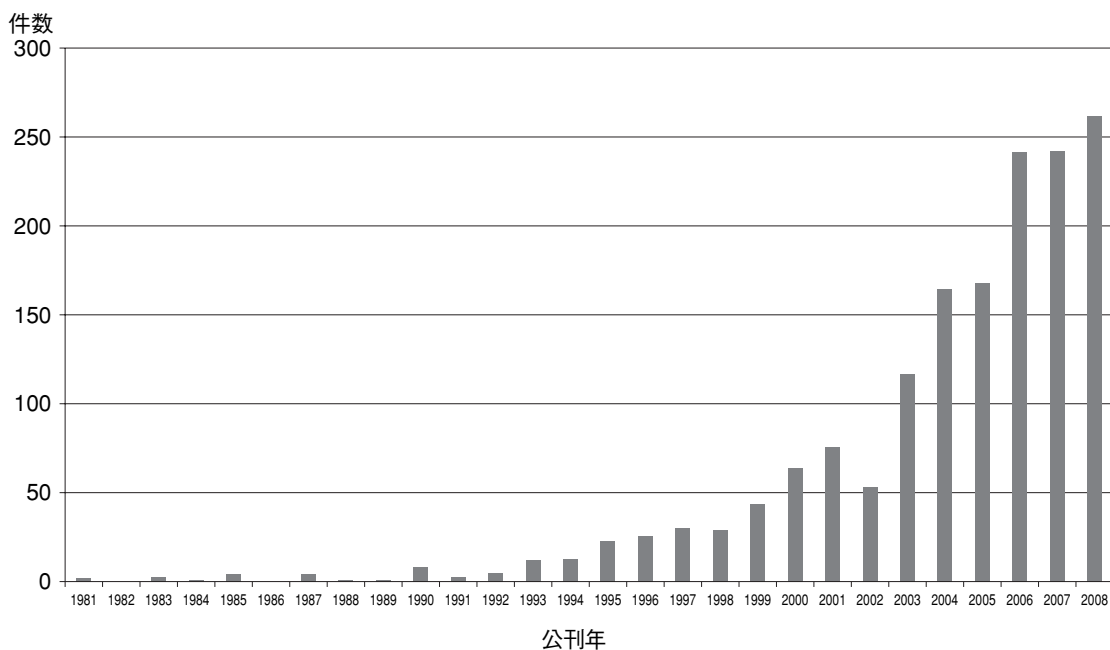


図3 PubMedで検索されたBMI関連論文件数の推移
2000年代に入り、論文件数が急増している。

拠点を中心に、BMIに関する研究を統合的・戦略的に推進することにより、わが国のBMI研究の競争力を高め、この分野で世界をリードするとともに、早期にBMIを臨床応用することを目指している。

b. 脳プログラムの目的

脳プログラムは、少子高齢化を迎えるわが国の持続的な発展に向けて、脳科学研究を戦略的に推進し、成果を社会に還元することを目指して展開されている。プログラムは、表1に示す4つの課題から構成され、この中で拠点形成研究である課題Aと個別研究である課題Bが、BMI研究に関わるプログラムである。課題Aの目的としては、1) 感覚運動統合に関する脳機能の計算論的理解にもとづき、脳内情報を低侵襲もしくは非侵襲的に解読する、2) 身体機能の治療、回復、補綴、補完を可能とするBMIを開発することにより、臨床応用に資する、3) BMI研究における日本の国際競争力を飛躍的に高める、の3点が掲げられている。

具体的な研究テーマとしては、1) 皮質脳波(EECoG)によるBMIの開発と臨床実験、2) 非侵襲型BMIを活用したリハビリテーション手技・

機器の開発と臨床実験、3) 近赤外分光法(NIRS)・脳波(EEG)の組み合わせによる高精度脳活動計測装置の開発、4) サルを用いた柔軟多機能マルチ電極の開発と脳活動・行動・認知情報の同時記録統合データベースの構築の4つが設定されている。

c. 研究体制

脳プログラム課題Aでは、国際電気通信基礎技術研究所(ATR)を中核機関として、それぞれ非侵襲型BMIおよび低侵襲型BMIの臨床拠点を担う慶應義塾大学(リハビリテーション医学)と大阪大学(脳神経外科学)、特殊電極、脳情報コーディング、制御システム、アクチュエータ、超小型集積回路等の基盤要素技術の開発を担うATR、東京大学、島津製作所、基礎研究を担う自然科学研究機構、神経倫理研究者が参画して、一体的に研究を推進する体制がとられている(図4)。

4. 慶應義塾大学における非侵襲型BMI研究

緊密な医工連携が日常的に可能であるという希有な環境を活かし、慶應義塾大学は非侵襲型BMIを臨床例で実証する中核を担っている。まず、同大理工学部が開発した頭表EEG-BMIについて、医学部リハビリテーション医学教室、月が瀬リハビリテーションセンターおよび複数の教育関連施設において、想定受益者である脊髄損傷、神経難病、脳卒中などの疾患群で実証実験を行い、その適応を明らかにするための研究が進められている。併せて、疾患・重症度ごとに脳波をデータベース化し、内外研究機関を支援するとともに、臨床的観点からBMIの仕様と要求を吟味する取り組みが行われている。さらに、家電、パーソナルコンピュータ、高精密ロボットハンド、外骨格型ロボット等の制御、および、より自由度が高い制御が可能と期待されているNIRS-EEG BMIを臨床例で実証することを目指している。これまでに達成された成果は以下のとおりである。

表1 脳科学研究戦略推進プログラムの課題

課題	内容
A	● 日本の特長を活かしたBMIの総合的研究開発 ● 中核拠点(ATR研究所)＋参画拠点5 ● 5年間
B	● 上記の個別研究課題 ● 採択数：18件 ● 3年間
C	● 独創性の高い霊長類モデル動物の開発 ● 採択数：1件 ● 5年間
D	● 社会的行動を支える脳基盤の計測・支援技術の開発 ● 中核拠点(東京大学)＋参画拠点7 ● 5年間

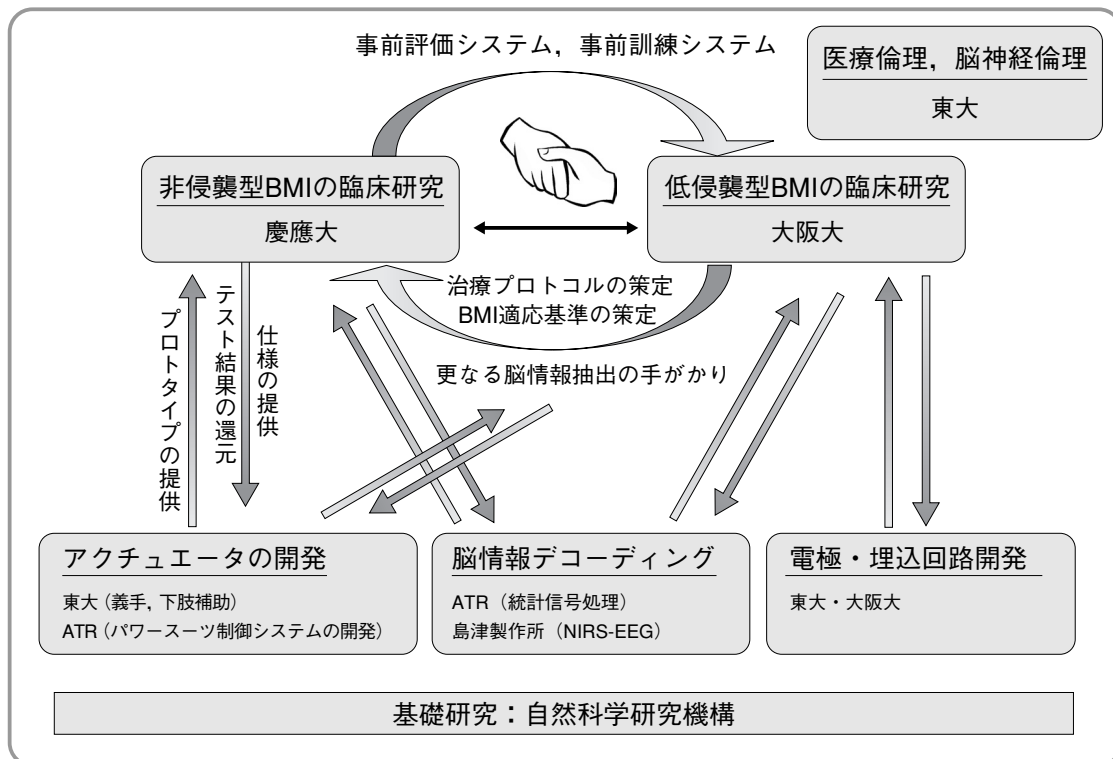


図4 脳科学研究戦略推進プログラム（課題A）における研究体制

a. 非侵襲型 EEG-BMI システムの開発

6チャンネル程度の少ないチャンネル数で得た EEG を分析し、高い精度で運動のイメージに関連した情報を取り出す信号処理方法を考案し、実用レベルに近い非侵襲型 EEG-BMI システムの開発に成功した（図5）。局所的脳活動の検出のために、2種類の空間フィルタで、異なる感度分布を持った脳波を導出し、両信号間でコヒーレンス関数を算出する。これにより、電極直下にある信号のみを選択的に検出することが可能となり、空間的に離れた位置にある神経細胞から発せられる信号および外部環境から照射されるノーマルモードノイズは除外される。

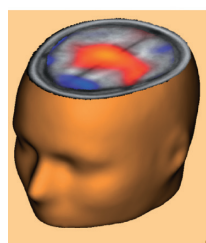
本システムでは、両側半球の C3、C4、Cz から脳波を記録し、運動企図に伴い、信号強度が変化する 8－13Hz および 15－30Hz のエネルギーを特徴量として、1) 線形識別法による弁別、2)

機械学習（support vector machine: SVM）による非線形弁別、3) オンラインで識別境界面を適合していく機械学習の新手法の3つを実装し、80%以上の判別精度を達成している。

このシステムを応用して、インターネット上の仮想世界であるセカンド・ライフTM内のキャラクターを念じただけで制御することに、健康者、筋ジストロフィー患者、頸髄損傷患者において成功した。さらに、EEG-BMIにより手関節と手指を動かすことが可能な電動装具の開発を行い、脳卒中例を対象とした動作の実証試験を実施中である。

b. 疾患・重症度別 EEG データベースの構築

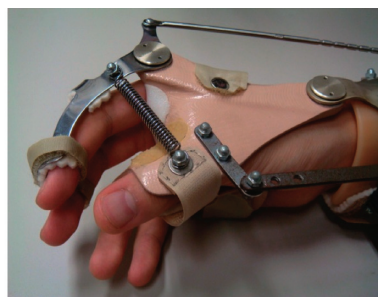
頸髄損傷2名、脳卒中16名、筋ジストロフィー1名、筋萎縮性側索硬化症8名の各症例について、上下肢の運動イメージ中に現れる頭皮 EEG



脳活動を非侵襲的に解読
(頭皮上脳波)



「エージェント制御システム」
(インターネット上仮想現実社会
「セカンドライフ」のキャラクターを操作)



「上肢把持装具の制御システム」
(麻痺肢に装着した電動式装具を
念じるだけで操作)

図5 機能代償型BMI開発における成果

頭皮上脳波から高い精度で運動イメージに関連した情報を取り出す信号処理方法を考案し、インターネット上の仮想世界であるセカンド・ライフTM内のキャラクターの制御、および、EEG-BMIにより手関節と手指を動かすことが可能な電動装具の開発に成功した。

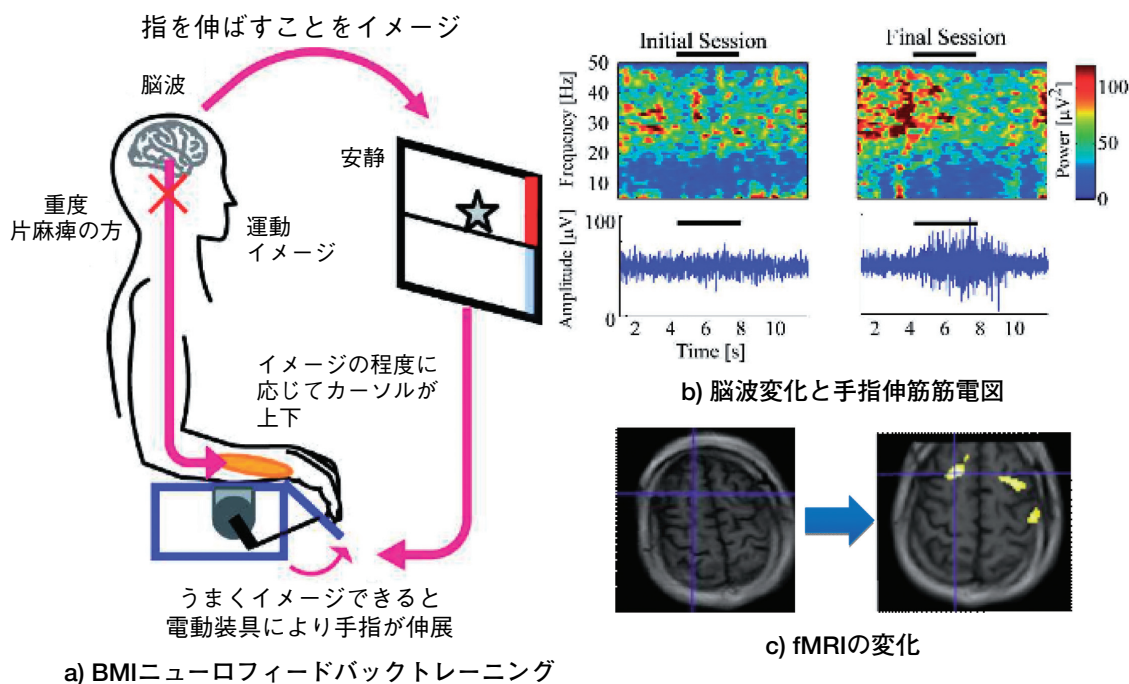


図6 BMIによる脳可塑性の誘導

脳波BMIを用いたニューロフィードバックトレーニングにより、重度麻痺筋に筋活動が誘発可能なことを確認した。さらにfMRIでも脳の可塑的变化が起こることが示唆された。

を収集し、重症度ごとに分類した。慶應義塾内部で運用しているBMIデータベースに対して、被験者の同意の下でEEGデータを登録した。この仮データベースは現在、慶應義塾内に限定して試験運用しているが、ここでの運用経験は、脳プログラム全体として構築中のBMIデータサーバーの設計へ活かすとともに、最終的には仮データベースをBMIデータベースへ統合し、脳科学研究の進歩に資することを目指している。

c. BMIによる可塑性誘導能についての検討

BMIが運動関連脳領域全般に及ぼす影響を評価するため、慢性期脳卒中患者4名にEEG-BMIを継続使用していただき、その際の事象関連脱同期を評価したところ、すべての被験者においてBMI継続利用後に著明な増大を認めた。次に機能的磁気共鳴画像を用いて、脳血流動態の変化を画像化したところ、体性感覚運動野、補足運動野、小脳において可塑的变化が生じていることを見出した。より軽度な運動障害に対する治療法であるconstraint-induced movement therapy (CIMT) 療法に関する先行研究においても、訓練後に同様の部位の活性化が認められているほか⁶⁾、健常者でも巧緻性タスクの実施時に当該領域が活性化することが知られている⁹⁾。したがって、BMIの継続利用は重度運動障害者において適切な運動トレーニング効果を誘導している可能性が示された。

EEGについての変化は、上記のほかに慢性期脳卒中患者12名でも実験を実施し、同様な事象関連脱同期の増大を認めた。また、いずれの患者においても麻痺側上肢伸筋群において随意筋電量の増加（あるいは不随意筋電量の減少）が認められ、そのうち約半数の患者では麻痺側上肢の随意性の向上が自覚された。このことは、BMIにより運動関連脳領域の可塑性を誘導することが可能なことを示唆している。今後は、可塑性誘導能のメカニズムを脳機能イメージングおよび電気生理学的手法を用いて解明していく予定である。

d. BMI利用時の脳活動解析

健常者および肢体不自由者の脳活動をEEGから高精度に推定するため、BMI使用時の脳活動

について、スペクトル相関解析とmatched filterを組み合わせたCommon Spatial Patternの一手法を開発した。これにより、健常者データのうちEEG判別精度が50～60%程度と著しく低いものについては、平均90%程度まで引き上げることに成功した。また、皮質脳波(EECoG)を用いたBMI開発を担当する大阪大学と共同してEECoGとEEGの同時記録を2例で実施し、EECoGで認められる高解像度脳活動の一部がEEGの15～30Hz帯域に含まれていることを見出した。このことは、EEGのみから高解像度の脳活動を推定する一助となり、EEG-BMIの精度向上に貢献するものと思われる。

5. BMIがもたらすもの

BMIはまだ発展途上の技術であり、解決すべき課題がいくつもあるが、その技術が確立され、臨床応用されるようになれば、以下のような波及効果がもたらされると期待される。

医療においては、1) 失われた機能を補うことによる肢体不自由者の日常生活の向上、生活の質の向上、社会参加の促進、2) BMIを用いた新たなリハビリテーション手法の開発による中枢神経可塑性の誘導、3) 動きを実現させるための軽量・装着容易な補装具や高精度ロボットハンドの開発、などの成果が期待される。

社会全体にとっては、1) 肢体不自由の方々の就労の促進、2) 介護ロボットや介護者パワーアシスト機器の開発による福祉医療産業の革新、3) 遠隔監視・遠隔操作住宅のための家電操作モジュールの開発、4) ゲームコントローラ、パソコン入力デバイスの革新による新たな市場の開拓、などの波及効果が見込まれている。

さらに、BMI研究は、脳科学、理工学、リハビリテーション医学、倫理学といった、従来、別個に扱われてきた学問分野を有機的に統合した新しい領域であることから、それぞれの分野をリードする先端的研究機関が統合的な研究を推進することにより、若手研究者は、学問横断的なみかた、考え方を養うことができ、将来、学界や医療産業

界においてリーダーシップを発揮できる人材の育成に貢献できると期待される。

以上のように、BMIは大きな可能性を秘めているが、人々の生活に真に役立つ技術として育てていくためにも今後の地道な研究の積み重ねが求められている。

文 献

- 1) Birbaumer N, Ghanayim N, Hinterberger T, et al : A spelling device for the paralysed. *Nature* 1999; 398: 297-298
- 2) Hochberg LR, Serru MD, Friebs GM, et al : Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia, *Nature* 2006;442: 164-171
- 3) <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=head-games-video-controller-brain>
- 4) 伊佐 正 : ブレイン・マシン・インターフェース研究の現状と展望. *脳* 21 2008; 11: 181-186
- 5) Kennedy, P.R., Bakay R.A. : Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection. *Neuroreport*. 1998; 9 (8) : 1707-1711
- 6) Kim YH, Park JW, Ko MH, et al : Plastic changes of motor network after constraint-induced movement therapy. *Yonsei Medical Journal*. 2004; 45 : 241-246
- 7) 厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部企画課. 平成 18 年身体障害児・者実態調査結果. 平成 20 年 3 月 24 日 <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/shintai/06/dl/01.pdf>
- 8) 脳科学研究戦略推進プログラム <http://brainprogram.mext.go.jp/>
- 9) Rao SM, Binder JR, Bandettine PA, et al : Functional magnetic resonance imaging of complex human movements. *Neurology* 1993; 43: 2311-2318