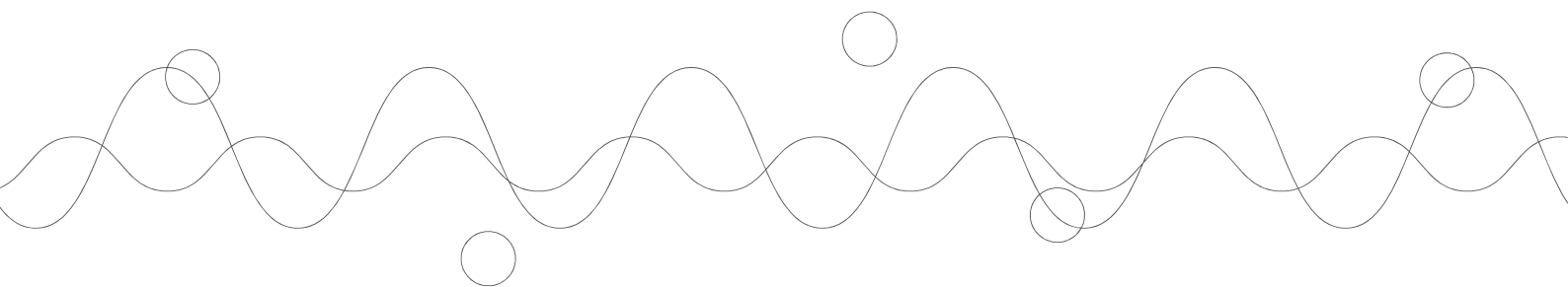


科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ 「ブレイン・マシーン・インターフェース（BMI）」分野 報告書



エグゼクティブサマリー

ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）に関する研究開発戦略作成のために、当該領域の専門家による戦略ワークショップを開催した。尚、BMI は、ライフサイエンス分野全体を俯瞰するワークショップ（2006年8月）の議論をふまえ、重要研究領域の一つとして JST 研究開発戦略センター江口グループが抽出したものである。

BMI とは、「脳と外界との情報の直接入出力を可能とする技術」である。この技術にとっては、脳内の情報を出力する、あるいは、外界の情報を脳に戻すことを可能にするインターフェースの研究開発が必要不可欠である。また、BMI による脳の変化（可塑的变化）を理解することが、技術的な性能の向上や安全性の確保にとり重要であり、一方、BMI に適した外部機器の自律的な制御や学習機構の設計は、有用な機器の作製に必要な要素である。このような BMI 研究開発全体のコンセプトに基づき、最終的に創出される社会的価値、要素技術、あるいは、研究開発の方向性について本ワークショップで議論を行った。

既存のマン・マシン・インターフェースとしては、筋電情報を用いるロボットスーツや人工内耳などの人工感覚器の一部が実用化されている。こうした技術を BMI はさらに発展、拡大するものと期待されており、これらの技術では困難であることの実現が求められている。また、既存技術の発展型という位置づけ以外に、これまでの身体を介する入出力の経路では扱えなかったもの、例えば、行動を起こす前の判断や意識・無意識といった情報を用いて、機器制御やコミュニケーションを実現する技術といった、全く新規な技術の創出が期待される。既存の技術の延長線上ではないこのタイプの BMI の出現は、従来のインターフェースを用いたコンピュータ操作を大きく変革するイノベーションにつながると期待されるものである。

BMI 研究開発による成果は、初期には侵襲性の高い医療目的の技術の創出が予想され、次に低侵襲型の生活の補助器具としての技術が提供され、長期的には非侵襲型あるいは超低侵襲型の技術により、健常者も含めた波及効果の大きい技術へと向かうことが想定された。期待される具体的な成果としては、脊髄損傷や脳卒中あるいは認知症などの傷害・疾患による麻痺や運動障害に対応した自由度の高い補綴器具や神経リハビリテーション技術、高齢者等の身体的弱者の機能補助システムの基盤技術が比較的早い時期に確立し、更に、通常の入出力手段を介さないこれまでにないコンピュータや外部機器との情報伝達手段、運動・感覚・認知等の脳機能の補助・向上システムなどが実現するものと考えられる。BMI を分類する際に、侵襲型と非侵襲型という区分がよく用いられているが、こうした区分は対立的な概念ではなく、使用する目的によりどちらを念頭に置くかを決定すべきであり、また、研究開発の過程では両者の組合せが重要である。

多くの BMI 技術では、脳からの情報の出力と外部情報処理を中心とした出力型 BMI と、脳への情報の入力と脳内情報処理を中心とした入力型 BMI の双方向の情報のやりとりを含

むものである。こうした BMI の研究開発を進める上で重要な研究開発課題としては次の 5 項目が考えられ、最終的な目的に応じてそれぞれの項目から適切な組み合わせを設定することが研究開発戦略上重要であると考えられた。

1) 脳からの入出力部位の決定:例えば運動を意図した研究では、運動を直接制御している脳部位からの信号の抽出が主に研究されているが、将来的には他の部位からの信号の抽出が重要になると考えられる。また、長期的な展望としては、無意識下の脳内情報などを活用するためにはどこから記録すべきか、ということが重要な課題である。

2) 推定アルゴリズムの設計:位置情報をデコーディングする技術が現状では主流であるが、将来的に義手の操作などでは個々の筋肉の活動に変換可能な脳内情報をデコーディングする技術にシフトしていくのではないかと考えられる。その場合、我が国において当該研究におけるこれまでの優位性がある。

3) 外部機器制御技術:自動制御や学習システムなど機器側の負荷を適切に設計することの重要性が指摘された。また、軽量、小型化が要求される。

4) 脳の入出力デバイス:脳の入出力方法は侵襲型と非侵襲型に大別されるが、両者は最終的に目指す BMI 機器によって選択する必要がある。また、研究開発の過程においては侵襲型と非侵襲型を組み合わせる進めることが重要である。個別には、侵襲型 BMI では安全に長期間継続的に使用できる記録・刺激電極の研究開発が最大のボトルネックである。非侵襲型の出力方法として可搬性を将来的な条件として考えると、脳波以外には近赤外イメージングの活用が考えられる。近赤外イメージング技術に関しては我が国に国際競争力があることから、この利用は戦略立案において考慮すべき重要点である。脳への入力に関しては、現状では侵襲型のみであり医療用途としてこの技術が将来的にも主流であろうと考えられる。

5) 脳機能変化予測:BMI の性能向上と共に何より安全性の観点から重要な研究課題である。出力型 BMI 使用時における感覚神経を介した正常なフィードバック入力であっても、脳がこれまでの予想を超えて変化することが、近年の BMI 研究から明らかとなってきた。入力型 BMI では、この脳の可塑的变化に関する研究がより重要な位置を占めるものと考えられる。

BMI の研究開発を進めるにあたっては、技術的な推進戦略と共に将来的な影響を想定して社会的コンセンサスを形成することが必要と考えられる。社会的コンセンサス形成を研究開発と共に進めるためには、研究者・技術者と一般の国民との意見・情報の共有が重要である。研究開発の当事者は BMI の研究開発過程やその社会実装において想定される状況に対する科学的な裏付けを提供する必要がある、こうした情報を取得するための研究も合わせて必要となる。

目次

第1章	目的および事前準備資料	1
1.1	ワークショップの目的	1
1.2	事前準備資料	1
第2章	ワークショップ内容	7
2.1	ワークショップの構成	7
2.2	BMI が実現する社会的価値	7
2.3	BMI 研究開発の重要課題	8
2.4	BMI 研究開発のロードマップ	10
2.5	BMI 研究開発における社会的コンセンサス形成の必要性	10
参考資料A. 講演録（抜粋）		
第1部	「BMI から生みだされると期待される重要な社会的価値」とその実現プラン	14
1.1	出力型 BMI（侵襲型）	
	「豊かな人間社会の創造に向けたブレイン・マシン・インターフェースの研究」	14
1.2	出力型 BMI（非侵襲型）	
	「非侵襲的 BMI の可能性」	19
1.3	入力型 BMI（人工感覚器）	
	「人工感覚器」	22
1.4	入力型 BMI（脳機能の操作・回復）	
	「BMI に期待される社会的な価値とは何か」	30
1.5	デバイス技術	
	「BMI デバイスの現状と課題」	35
1.6	非侵襲計測技術	
	「非侵襲脳機能計測技術と BMI」	41
1.7	皮質電極計測技術	
	「皮質電極計測技術」	47
1.8	ロボットメカニズム	
	「BMI への期待と展望 -技術的裏づけと日本の役割-」	50
第2部	BMI 研究開発を構成する要素に関する討論	56
2.1	侵襲型と非侵襲型のリスクとベネフィット	56
2.2	侵襲型が非侵襲型より精度の高い情報を出せるというのは本当か？	56
2.3	電極の課題	56
2.4	推定アルゴリズムと外部機器	57

2.5	基礎研究の重要性	5 8
2.6	BMI 技術のヒトへの応用	5 8
2.7	脳の可塑性	5 8
第3部	総合討論	6 0
3.1	日本でなぜ BMI をやるのか？	6 0
3.2	日本の強み	6 0
3.3	推進上の問題点	6 0
3.4	プラットフォーム	6 0
3.5	異分野融合	6 0
参考資料B.	プログラム	6 2
参考資料C.	参加者リスト	6 3

第1章 目的および事前準備資料

1.1 ワークショップの目的

本ワークショップは、ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）を中心とした研究開発領域に関する戦略を立案するため、当該研究領域の現状（研究動向や問題点）と今後の研究開発の方向性を見出すことを目的としたものである。また、BMI が創造する社会・経済的価値についても併せて議論を行う。ここでの成果は当該領域の研究開発戦略提言書（戦略プロポーザル）作成のための基礎資料として活用する。尚、本ワークショップに先立ち、ライフサイエンスの研究状況を俯瞰する作業を進め、2006年8月にライフサイエンス分野の俯瞰ワークショップを開催した。BMI という研究領域は、その俯瞰ワークショップでの議論をふまえて JST 研究開発戦略センター江口グループにおいて今後の重要研究領域の一つとして抽出したものである。

1.2 事前準備資料

1.2.1 BMI の定義

BMI に関する研究開発戦略のためのワークショップを開催するにあたり、まず BMI とは、「脳と外界との情報の直接入出力を可能とする技術」と定義し（図 1）、事前インタビュー及びワークショップ当日の議論を進めることとした。また、その BMI を形成する要素を参加者を含めた有識者のインタビューから抽出し、ワークショップ当日の議論の参考とした。

BMIのフレームワーク

BMIとは

脳と外界との情報の直接入出力を可能とする技術

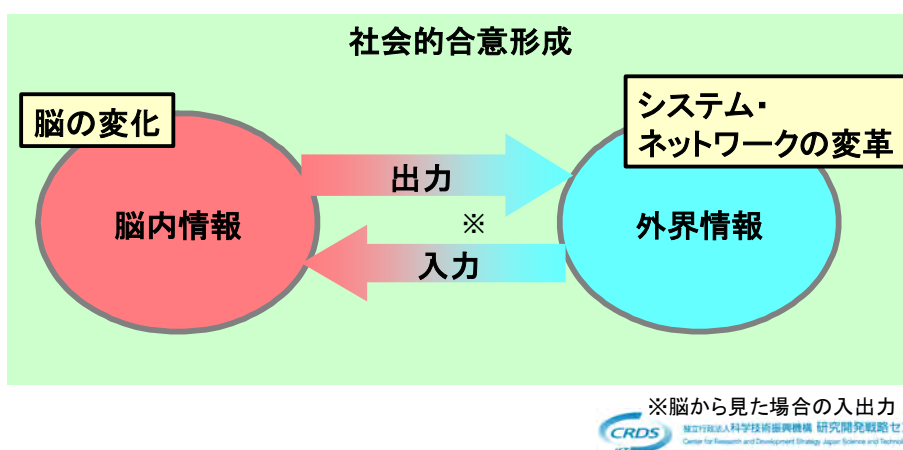


図1 BMI の定義

BMI の技術開発においては、脳内情報の出力と外界情報を脳に戻す入力を可能にするイ

ンターフェースが必要不可欠であり、それを実現する技術要素がまず重要である。しかしながら、単に脳からの入出力だけが問題ではなく、BMI による直接的な入力や本来の感覚器を介する入力により、脳の変化（可塑的变化）としてどのようなことが生じるのかという点は、人に適用する際の安全性と共に BMI の性能自体にも大きく関わるものとして注目した。また、外界のシステム、特にコンピュータでの情報処理の手段として、これまでに扱うことがなかった脳内情報を直接受け取ることにより、全く新しい方法で動作する外界システム・ネットワークの出現も念頭に置き、ワークショップでの議論を進めることとした。

将来 BMI が使える技術として社会に提供される場合はもちろん、研究開発の推進段階においても、倫理問題も含めた BMI 技術を社会が受け入れるためのコンセンサスの形成はきわめて重要であり、この点もワークショップでの議論の重要な観点として取り上げた。

また、このような BMI の全体像の中で、脳からの情報の出力と外部情報処理を中心とした BMI 技術を出力型 BMI、脳への情報の入力と脳内情報処理を中心とした BMI 技術を入力型 BMI としてこれ以降記述するが、多くの BMI 技術はこの双方向の情報のやりとりを含むものであることに留意しておく必要がある。

一方、BMI の研究開発それ自体の議論だけではなく、どのようなイノベーションに結びつき、それがどういった社会的価値の創出に繋がるかを議論することも本ワークショップの重要なテーマであった。BMI も含めたマン・マシン・インターフェースが提供する社会的価値がどのような全体像となっているかを確認するために、脳への入出力に関する経路が無いもの、及び、経路が有る場合はそれが本来人間が使っている感覚神経や運動神経を使用する生理的な経路か、電極などを使用する本来の生理的な経路を介さないものであるかといった技術面での指標を用いてマトリックスを作成し、既存あるいは今後想定されるマン・マシン・インターフェースのマッピングを行った（図 2，3）。

生理的な入出力を介する既存のマン・マシン・インターフェースとしては、筋電情報を用いるインターフェースや人工内耳などの人工感覚器の一部が既に実用化されている（図 2）。BMI 技術は、今後これらの技術をさらに発展、拡大させることがまず期待されている。しかし逆に見れば、これら既存の技術を上回ることが求められるわけであり、この点も議論すべきテーマとして取り上げた。

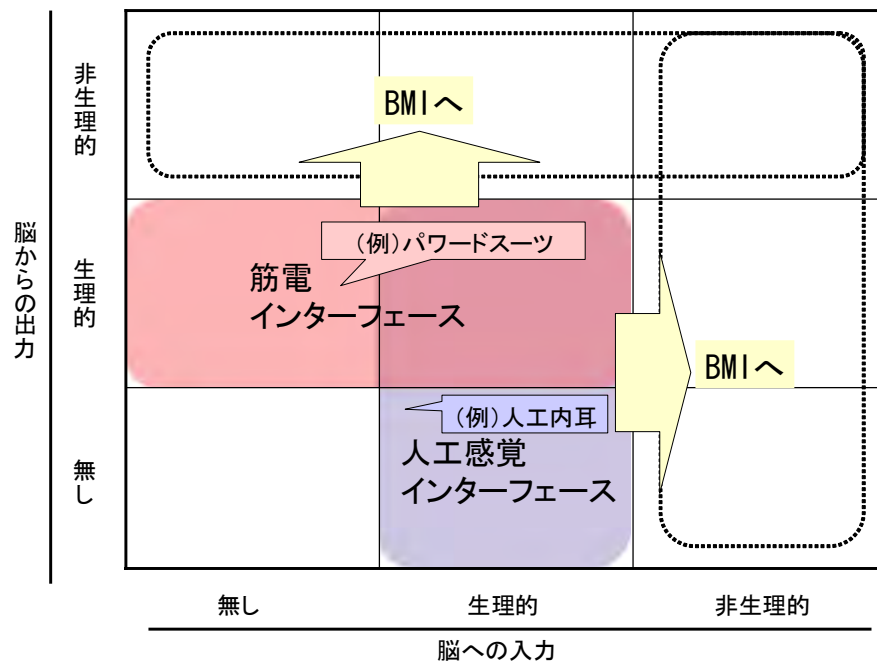


図 2 生理的入出力を介した既存のマン・マシン・インターフェース

また、このような既存の技術の発展型という位置づけのもの以外に、これまでの生理的な入出力の経路では扱えなかったような脳の情報に基づく BMI 技術、例えば、行動を起こす前の判断、意識であるとか、無意識であるとかといった情報を用いて、機器制御やコミュニケーションを実現する技術といった、新たなものが創出されることが期待される。特にこのような情報を取り扱うことになれば、従来のインターフェースを用いたコンピュータなどの操作とは全く異なる外部機器の大きな変化が起きる可能性を有しており、ワークショップにおいてはこのような見方からも BMI 研究開発の方向性を検討することとした。

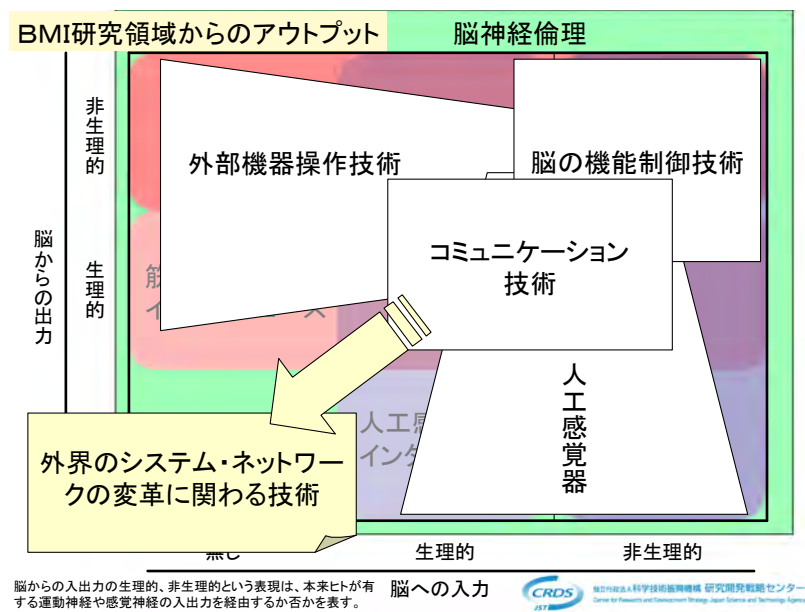


図 3 BMI 研究領域からのアウトプット

1.2.2 BMIの実現に想定される要素技術

BMIの実現にとってどのような要素技術の研究開発が必要であるかをワークショップにおいて議論するために、事前に専門家の方々のご意見や文献情報を元に出力型BMI及び入力型BMIについて議論すべき項目を抽出した。

出力型のBMIについては、まず脳からの出力の方法として、脳のどこから何をどの程度記録するのか、また、侵襲型や非侵襲型などどのような記録手段を用いるべきかということが重要な論点である。次に、記録した信号を外部機器に受け渡す推定アルゴリズムの中で、現状の運動情報を中心としたものからより高次機能に関連する情報までをどのように取り扱うか、更に、そのようにして生成された情報をどのように活用してどういった機器制御等が可能になるのかといった点が議論されるものと予想された。加えて、そのような出力型BMIの出現が、外部の情報システムをいかに変革しうるかを議論の対象として準備した(図4)。

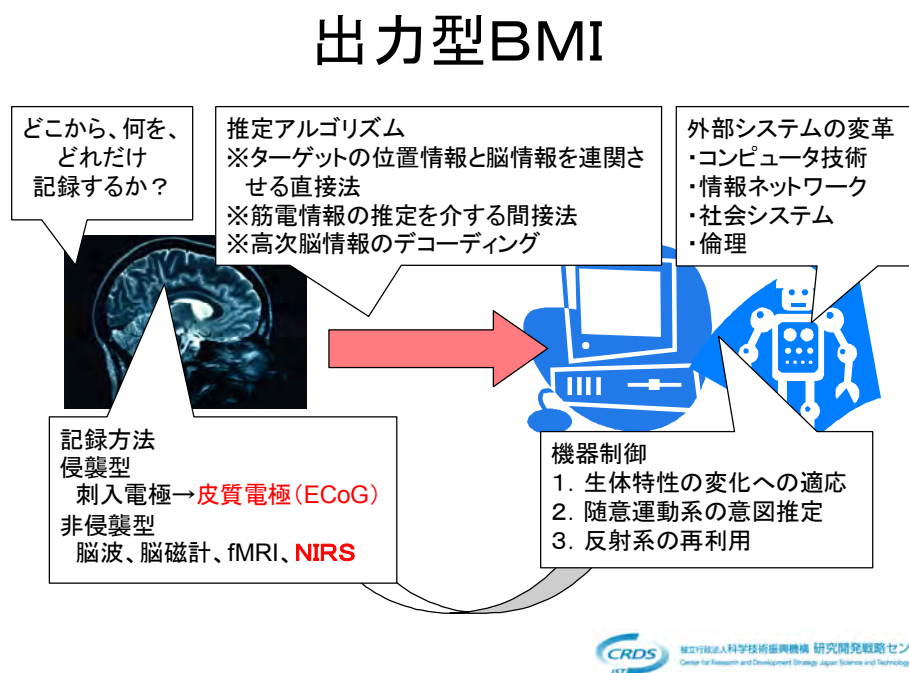


図4. 出力型BMI

一方、入力型のBMIについては、外界の情報を取得・変換する技術やそれらを脳に戻す技術が重要となる。多くの場合これらは侵襲的な方法であるが、非侵襲的な方法の可能性も議論すべき論点である(図5)。また、外部情報を脳のどこに戻すのか、あるいは感覚情報以外として利用しうるものがあり得るのか、あるのであればどういった情報を脳のどこに入力するのか、等も重要である。さらに、実際に脳への入力の際に最も問題となるのは安全性の確保である。ここでの安全性には、脳組織の傷害といった問題点に加えて、今までにない脳への情報入力 が脳機能に対して与える影響についての議論が必要であると考え

られた。

入力型BMI

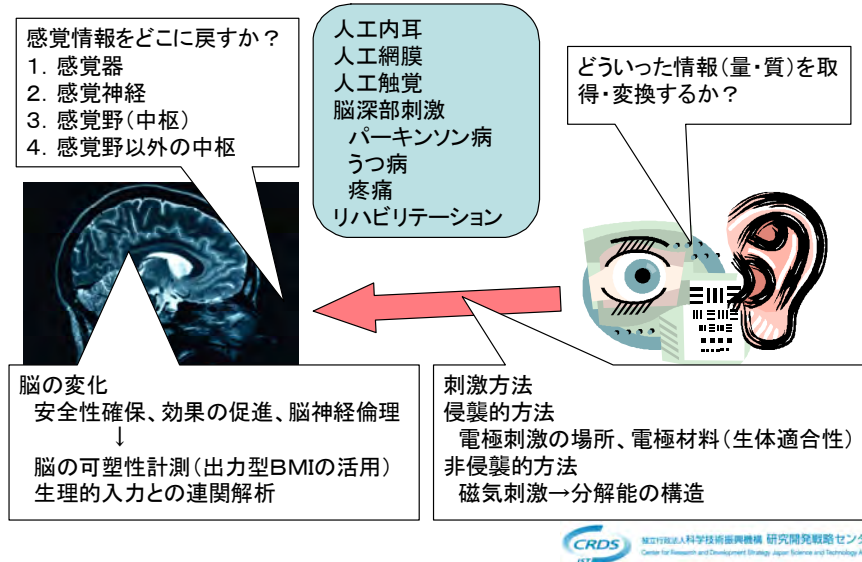


図 5 入力型 BMI

第2章 ワークショップ内容

2.1 ワークショップの構成

ワークショップではまず「BMI から生みだされると期待される重要な社会的価値とその実現プラン」という観点から、出力型 BMI（侵襲型、非侵襲型）、入力型 BMI（人工感覚器、脳機能の操作・回復）、デバイス技術、非侵襲計測技術、皮質電極計測技術、ロボットメカニズムの項目について、それぞれの専門家に話題提供して頂き、続いてそれに基づき全体で討議を行った。次に BMI の研究開発を構成する要素技術についての議論を受けて、最終的な社会的価値の創出に向けて我が国のとるべき戦略について総合議論を行った。

2.2 BMI が実現する社会的価値

BMI 研究開発の成果は、「健康で快適な生活」「安全で安心な社会」「学習する社会」「活力と競争力のある国」といった社会ビジョンの実現に貢献するものと考えられた。具体的には、脊髄損傷や脳卒中あるいは認知症などの傷害・疾患により引き起こされる麻痺や運動障害に対応した自由度の高い補綴器具や神経リハビリテーション技術、あるいは、高齢者等の身体的弱者の機能補助システムとして、BMI 研究開発の成果が比較的早い時期に活用されると考えられた。更に、これまでにない通常の入出力手段を介さないコンピュータや外部機器との情報伝達手段、運動・感覚・認知等の脳機能の補助・向上システムなどが長期的な研究開発により実現される技術として考えられた（図6）。

BMIが実現する社会的価値

- BMIの実現によって、「身体により制限されている人間の能力を拡大する」ことを実現する。

- － 疾患等による身体的な障害の克服
 - ・（例）脊髄損傷患者の歩行を可能にする。
人工網膜による視覚の回復
半身麻痺のリハビリテーション
- － 自然な身体機能の低下を補助
 - ・（例）介護を軽減する自立歩行等の補助
明瞭な会話の支援
- － 手足等の身体を介さない情報伝達手段の獲得
 - ・（例）超多自由度のロボット操作
運動・認知機能のトレーニング
身体では伝達困難な脳内情報の発信・受容
思考の外国語への翻訳
脳の記憶の外部保存

研究開発の過程で想定される対象テーマの推移

研究開発のアウトカムの波及効果の規模が拡大する。

図6 BMI 研究開発の投資意義

このように短期的には医療に限定されたアウトカムが想定された。こうした課題は個々の治療や介護を受ける当事者にとって深刻な問題であり、特に我が国の高齢化の進行からその増大が懸念される身体的弱者にとっての生活の質（QOL）の向上、あるいはそれに伴う本人及びその介護等に関わる人々の社会参加の促進に資することが期待される。一方、長期的には、前述のように多くの人々が活用できる技術へと展開することで、より社会・経済的な波及効果の大きなイノベーション創出へと繋がることが想定された。こうした社会価値が創出される時期などを念頭に、研究開発戦略を設計することが重要である。

2.3 BMI 研究開発の重要課題

BMI を大別する際に侵襲型と非侵襲型という区分がよく用いられている。しかしながらこうした区分は対立的な概念ではなく、使用する目的によりどちらを念頭に置くかを決定すべきものであり、また、研究開発の過程では両者の適切な連携が重要であることが確認された。

侵襲型、非侵襲型ともに、重要な研究開発課題としては図 2 のような 5 種類の項目が考えられた。これらは相互に関連し、また、最終的な目的に応じて適切な組み合わせを設定することが研究開発戦略上重要である。

BMI研究開発の重要課題

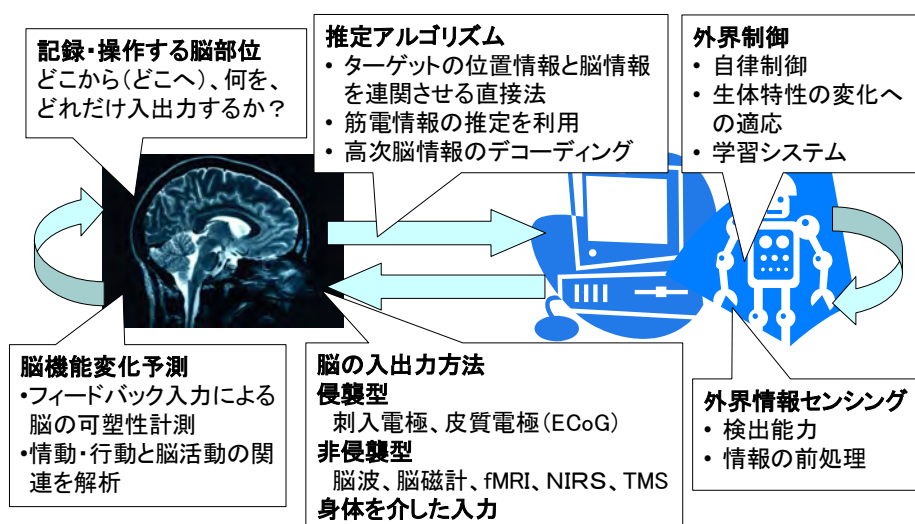


図 7 BMI 研究開発の重要課題

脳からの入出力部位に関しては、出力型 BMI では、運動を直接制御している運動野からの信号の抽出が現在主に研究されている。しかしながら、将来的には運動制御を目的としていても他の部位からの信号の抽出は検討されるべきである。また、長期的な展望として

考えられる無意識下の脳内情報などの活用を実現するために必要な信号抽出部位が、どこであるのかといった事などは将来的な課題である。

推定アルゴリズムについては、現状では義手の操作あるいはコンピュータモニタ上でのカーソルの制御が対象となっている。この際に利用している信号の多くは位置情報であり、その位置情報をデコーディングする技術が現状では主流であるが、義手の操作などでは、個々の筋肉の活動に変換可能な脳内情報をデコーディングする技術に、将来的にはシフトしていくのではないかと考えられる。その場合、我が国における当該研究の優位性を生かすことを今後の戦略立案に際し検討すべきである。

外部機器を制御する上で、**BMI** を介する機器への入力以外に、自動的・自律的に機器を制御する技術やそのための機械学習システムの設計などの重要性が指摘された。また、出力型 **BMI** も入力型 **BMI** も身体に装着する場合、特に埋め込み型では軽量、小型化が要求されている。

脳の入出力方法に関しては、社会において将来実現される技術とその研究開発過程での技術を目的に応じて適切に設定する必要がある、特に研究開発過程においては複数の計測技術の組み合わせが今後重要となることが予想された。計測手段を様々に組み合わせることは入力型 **BMI** 開発においても重要であり、例えば深部脳刺激（DBS）時の脳イメージング計測などがある。侵襲型 **BMI** では、安全に長期間継続的に使用できる記録・刺激電極の材質・形状等の研究開発が、研究開発全般を通して最大のボトルネックであると多くの専門家が認識している。また、侵襲性が現状の刺入電極より低いと考えられるもの、例えば皮質電極（ECoG）などの利用が将来の方向性として意識されるものと考えられた。非侵襲型の記録については現在の主流は脳波を用いたものである。可搬性を将来的な条件として考えると脳波以外には近赤外分光法（NIRS）の活用が考えられる。NIRS 技術に関しては他の技術と比較して我が国に国際競争力があることから、この利用は戦略立案において考慮すべき重要点である。ただし、NIRS 単独の **BMI** ではなく、他の技術との複合化が重要であると考えられた。脳への入力に関しては現状では侵襲型のみであり、医療用途としてはこの技術が将来的にも主流であろうと考えられる。これ以外に注目すべき入力方法としては、それ自身は **BMI** を介さない本来身体が有する感覚入力を介するものである。出力型 **BMI** により有効な制御を実現するために、出力した結果を視覚や触覚等によりフィードバックすることで、脳内の機能を可塑的に変化させる機序の解明が必要である。

脳機能変化予測は、**BMI** の性能向上に資すると共に、何より安全性の観点から重要な研究課題である。入出力方法のところでも述べたように出力型 **BMI** 使用時における感覚神経を介した正常なフィードバック入力であっても、これまでの予想を超えて脳が変化することが、現在行われて成果を挙げている **BMI** 研究から明らかとなってきた。入力型 **BMI** では、この脳の可塑的变化に関する研究がより重要な位置を占めるものと考えられた。本来、脳と外界の間にはインターフェースとしての身体があり、それを介した情報のやりとりの中で「こころ」が形成されているという考え方が本ワークショップでも示されたが、

ここに新たなインターフェースを導入することによる影響は詳細に検討を行うべき課題である。また、脳機能変化予測に関する研究開発は、「こころ」を科学の土俵に乗せるという可能性から、基礎的な脳科学研究としても重要視されるところである。

2.4 BMI 研究開発のロードマップ

BMI の波及効果は非常に多様であり、また、その成否に関わる要素技術の組合せも複雑であるので、この研究開発のロードマップを示すことは極めて困難である。しかしながら、初期には侵襲性の高い医療目的の技術に結びつく成果が多く予想され、それが低侵襲性の方向に向かい生活の補助器具としての技術が達成され、長期的には非侵襲性あるいは超低侵襲性の技術により健常者も含めた波及効果の大きい技術の確立へと向かうものと考えられた。ワークショップにおいての議論を基にしたこのような流れを背景に、短期、中期、長期の3つのフェーズに分けて、以下のようなロードマップによる社会的価値の創造（例）が想定された。

短期（5年後に達成）

- （1）侵襲型・非侵襲型で重度の障害を持つ方のための限定された必須機能の回復に資する機器の開発：例としては yes/no の判断に基づく機器制御、知的 DBS、人工知覚など
- （2）非侵襲型で、一般向けに作製されるゲーム機の限定的な補助入力装置やニューロマーケティング（製品・コンテンツ評価など）への応用技術

中期（10年後に達成）

- （3）侵襲型で、障害者及び運動機能が極度に低下している高齢者用の高機能運動能力の回復機器やリハビリテーション技術
- （4）非侵襲型で、健常者も含めた情報弱者に向けた情報通信機器への使いやすいインタフェース、パワースーツやロボットの制御、ある程度複雑な運動の再構築など

長期（20年後に達成）

- （5）著しく侵襲性の低いデバイス（柔軟可動電極、生体材料プローブなど）を活用した高自由度の外部機器制御技術
- （6）非侵襲型で、高機能の一般用コンピュータインタフェース、自動車安全運転システム、無意識の読み取りとマーケティングへの活用

2.5 BMI 研究開発における社会的コンセンサス形成の必要性

BMI の実現は様々な面で社会に大きな影響を与えることが想定される。そのために将来的な影響を想定して社会的コンセンサスを形成することが必要と考えられる。その際には、

単なる倫理的な判断のみならず、想定される状況に対応するために、研究開発の段階から BMI の性能にどのような要素を付加する必要があるかを検討し、事前に組み込んでいく必要がある。

BMI 技術により想定される社会的影響とその対応としては、「人の心を読むことへの倫理的問題への対応」、「読んだ心の情報の悪用への対策」、「ヒトの脳への直接的・間接的影響評価」、「BMI による社会システムの変化予測」などがある。一方、研究開発時にはヒトへの適用が必要となるので、この実施に際する倫理的な問題を取り扱う倫理委員会の整備等も必要と考えられる。

こうした社会的コンセンサス形成を研究開発と共に進めるためには、研究者・技術者と一般の国民との意見・情報の共有が重要である。また、研究開発の当事者は BMI の研究開発過程やその社会実装において想定される状況に対する科学的な裏付けを提供する必要がある、こうした情報を取得するための研究も合わせて必要となる。

資料編

A. 講演録（抜粋）

第1部「BMIから生みだされると期待される重要な社会的価値」とその実現プラン

1.1 出力型BMI（侵襲型）

「豊かな人間社会の創造に向けたブレイン・マシン・インターフェースの研究」

飯島敏夫 先生

1.1.1 BMIの研究動向

私どもはBMIの研究活動として、データベース構築を2年前から行っています（図9）。これは理化学研究所の脳科学研究センターと協力してやっているわけですが、インフォマティクスのジャパン・ノードというわけで、その中の1つとしてBMIプラットフォームというのをつくっております。私どもと東工大の小池先生——きょうはおいでになりませんが、京大の桜井先生、こちらにおいでの方の川人先生等々と協力いたしまして、こういうものをつくっております。

（図9）

BMIのデータベース構築が2年前から開始された

BMIプラットフォームについて



<http://bmi-pf.neuroinf.jp/modules/xoonips>

運用母体: BMIプラットフォーム委員会



東北大学 飯島敏夫 虫明 元



東京工業大学 小池康晴



京都大学 桜井芳雄



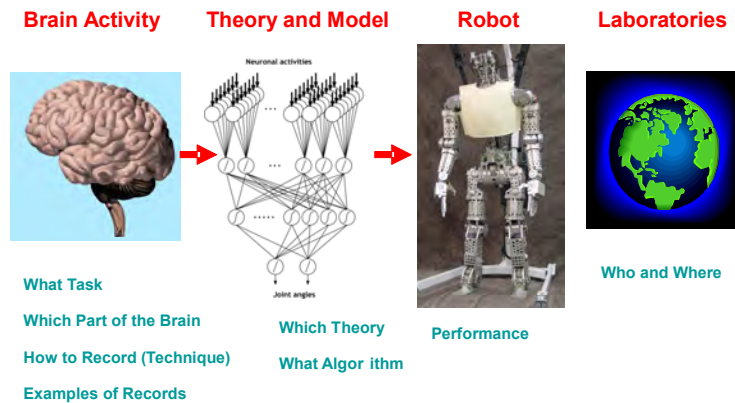
ATR 川人光男

理化学研究所脳科学総合研究センター神経情報基盤センター

それで、いろんな情報を集めておりますが、その中のコンテンツは、例えば、脳の活動を収集して、そこにいろんな研究者に available にしておくというところがあります。それから、theory of model、ロボティクス。これはみんな日本が強いところです。それから、こういう BMI 研究をどこが世界中でやっているんだろうかということも調べてあります。こういうものを見ていただければ、いろいろな情報がつかめるようになっております（図10）。

(図 10)

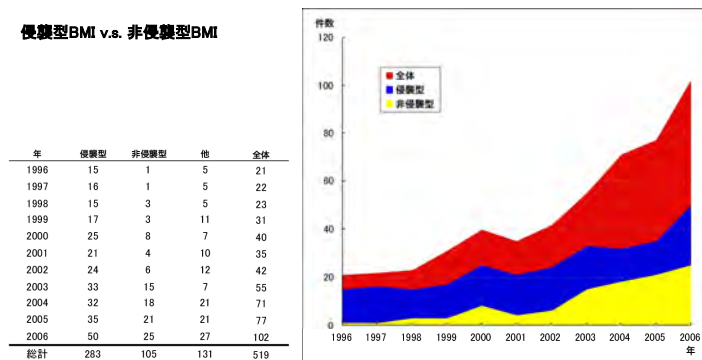
Contents of BMI



侵襲型と非侵襲型の研究開発動向ですが、これはなかなかおもしろいことがありますて、侵襲型というのは、こちらで見ると青、ブルーですが、およそ3倍ぐらいになっているわけですが、一方、それに対して伸び率から見ると、非侵襲型は非常に急激に伸びているんですね。このように、例えば、1件だったものが25件もできているわけです（図 11）。

各国における BMI 研究の急激な伸び

(図 11) 過去10年における BMI 関連論文数の内訳 (PubMed 調べ)



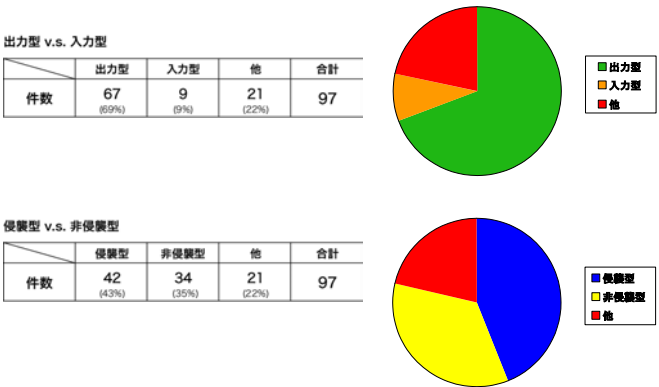
全体的な傾向としては、いずれは人間だれでも、例えば、先ほどの絵にありましたような剣山型みたいな電極をぶすつと刺されて気持ちいい人はいないわけですし、技術、テクノロジーの発達に伴ってできる限り非侵襲型に移行してもらいたいという思いはあるのではないのでしょうか。ただ、技術的な問題がそれになかなか追いついていないということだと思うんです。

これは直近の、例えば、Neuroscience Meeting でございますが、これは神経科学者がほとんど参加するようなアメリカの北米神経科学会というところでの話でございますが、ま

とめみたいになっています（図 12）。これは今年だけの話です。2006 年ですね。出力型か入力型かで見ますと、出力型が 67 に対して入力型はこのぐらいとなっているわけですから、出力型は確かに多いという話です。それから、侵襲型か非侵襲型かで見ますと、これは先ほどの傾向と似ていまして、侵襲型と非侵襲型がほとんど今は同等数ぐらいあるんだということがわかります。

各国における BMI 研究の急激な伸び

（図 12） NEUROSCIENCE 2006 (in Atlanta) における BMI 関連発表数の内訳

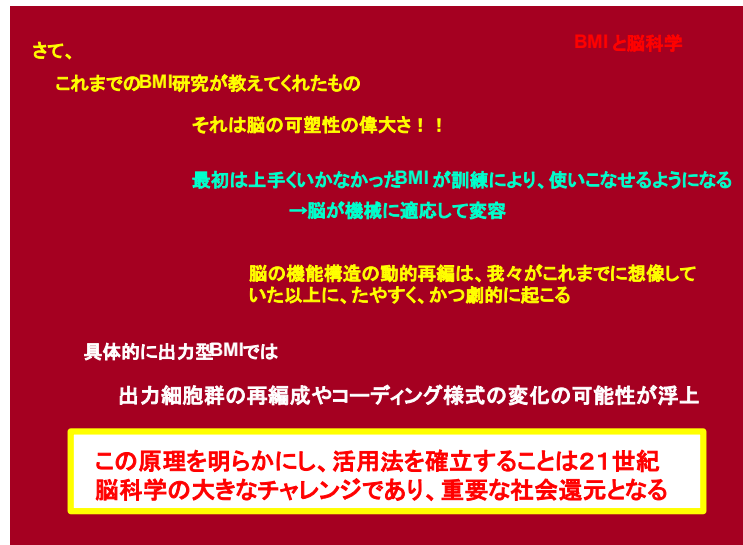


1.1.2 BMI 研究が教えてくれたものは何だったのか？

これは数年前に——2 年ぐらい前かな、私はこんなことを考えたことがあるんです。それは、結局、脳の可塑性の偉大さだったのではないかというのが、私の結論です。そういうことを文章に書いたことがあるんです（図 13）。

例えば、いろんな BMI の研究は、先生方も十分御存じなので細かいことは申し上げませんが、最初はうまくいかなかった脳と機械とのつながりが、だんだん訓練を経ているうちに使いこなせるようになるわけです。では、機械が変わっているのかというと、そうではなくて、どうも脳が機械に適応して変容しているんだという話みたいです。

(図 13)



脳の機能構造の動的再編は、我々がこれまでに想像していた以上に、たやすく、かつ、劇的に起こるんだということが、最近の私どもの理解になったと思います。具体的に出力型の BMI ではどんなことが問題になってくるのかということ、出力細胞群の再編成やコーディング様式の変化の可能性が出てきているわけです。こういうものの原理を明らかにして、相手を、敵を知って、その活用法を確立することは、21 世紀の脳科学の大きなチャレンジであって、重要な社会還元です。科学、サイエンスの社会還元となるだろうと考えている次第です。

1.1.3 出力型 BMI の研究課題

脳科学の課題としては、脳の機能構造の再編メカニズムや動的に変化する脳情報コーディングの実態を解明し、最終的に脳の可塑性を積極的に活用する手法を確立することです。

それから、理学、工学、あるいは、最終的な話としては計測技術と言ってもいいかもしれませんが、その課題としては、脳組織にやさしくて、長期安定性を有した革新的な侵襲型電極の開発ができれば、侵襲型を恐れる必要もないわけです。明らかに現状のテクノロジーからすれば、侵襲型と非侵襲型は大きな差があります。例えば、侵襲型は時間解像力、空間解像力が圧倒的にすぐれているわけです。ましてや、侵襲型の計測機器の原理は、結局、脳活動そのもの、神経活動そのもの、神経興奮そのもの、神経電流そのものをとるわけです。それに対して、非侵襲型は、脳の神経活動に伴う二次的な代謝シグナルの変動をとるわけですから、明らかに時間的におくれる。それから、血流をとるわけですから、明らかに空間的な解像力は劣るわけです。そういうもののギャップをどうやって埋めていくかということです。ですから、侵襲型電極に匹敵する記録能力を有する非侵襲型脳活動計測装置の開発ということです。

情報科学の課題としては、脳のコーディング様式が動的に変化する可能性が高く、これに対処できる新たな理論構築が必要だということです。

いずれの分野でも、大事なことは、日本は非常に強いんですね。ただ、研究が組織化されていない。今こそ組織化を図って、日本としてのリーダーシップを発揮すべきときであろうと考えるわけです。

1.1.4 社会へのインパクト

障害者に健常人に匹敵した社会生活を提供して、弱者なき社会をつくり出す。脳の動的再編能力とその的確な誘導法が明らかにされれば、広範な社会やその中の事象に活用可能で、それによって活力に富んだ豊かな人間社会がつくられるだろう。それから、人が会話や運動を伴わずに意思や希望を表現、伝達することが可能となるわけですから、今でも近づいています。革新的な通信技術ができるだろう。総論としては、上記学問分野の新展開と、計測技術や材料加工技術、システム制御技術などの飛躍的な向上が誘導されるはずであるということです。

以上

1.2 出力型BMI（非侵襲型）

「非侵襲的BMIの可能性」

神谷之康 先生

1.2.1 出力型 BMI の重要技術

まず1つ目ですが、特に出力型の BMI で重要になってくるのは、脳情報を解読、デコードするということです。少なくとも今我々が基にしている技術というのは、ある種の統計学習なわけです。つまり、何かが行動したり、ある心理状態を持っているときの脳活動をいっぱい集めてくるわけです。つまり、脳活動にある行動のパラメーターや心理状態のパラメーターを、タグ、ラベル付けしていくわけです。そういうラベル付けの作業をやって、ある程度トレーニング・データを使って、脳活動と行動のパラメーターの間のモデルをつくるわけです。

そのために何らかのトレーニング・データのようなものが必要になってくるわけですが、現在あるような脳計測装置ですと、非常に拘束された実験室の中での情報の取得になりますので、本当に自然な行動や心理状態を解読するのは、データをとるのは、非常に難しい。

例えば、右手を動かす、左手を動かすとか、縦か横かとか、簡単なものならできるんですが、感情を読み取って、それに応じて機械を操作したりということをした場合に、例えば、恥ずかしいという感情をデコードするために、実験室内でどうやったら恥ずかしい思いをさせられるのかとか、非常に難しい問題が生じるわけです。そういった点に関して、ウェアラブル・コンピューターというのがおもしろいアプローチになるのではないかと思います。これはまた後で個々に説明したいと思います。

それから、非侵襲的な技術に関して、出力の方は割とよく議論されるんですが、刺激の方は余り議論されていません。それに関して、実は私は以前は脳の刺激の方をやっていましたので、マルチチャンネル TMS (Transcranial Magnetic Stimulation) というのを簡単に紹介します。

1.2.2 ウェアラブル・コンピューター

また脳通信というのは、また夢のような話ですが、こういったことに関してハイパースキャニングという技術を開発しているところがありますので、それについても簡単に紹介したいと思います。

ウェアラブル・コンピューターは、皆さん御存じだと思いますが、いろんなセンサーやディスプレイがコンピューターとつながっていて、そういった装置を身につけているといったシステムです。つまり、センサー情報というのは、何を見ているか、顔などにつけたビデオで記録したり、いろんなセンサー情報で体の状態や環境を観測するわけですが、これに脳活動の計測もくっつけてしまえば、その人がどういう行動をしているとき、またどうしているものを見ているときに、脳がどう活動しているというのを、どんどん日常生活の中

でデータをためていくことができるわけです。ですから、実験室でコントロールされたような環境でデータを集めるのではなくて、実際の生活の中でどんどんデータを集めていて、それをさまざまなある種のデータ・マイニング技術によって、脳活動と行動パラメーターの関係を見ていくということも、将来、できるのではないかと考えています。

さらに、この絵にありますような、目につけているのはディスプレイですが、こういうディスプレイによってフィードバックも可能ではないかと考えています(図14)。侵襲型では、この間も BMI のワークショップでありましたように、動物で実際に感覚野にフィードバックを与えるような研究も徐々に進んでいるんですが、とりあえず手軽なフィードバックの方法として、こういったウェアラブル・コンピューター的なものを利用した方法もあるのではないかと考えています。



図 14 装着型ディスプレイ

1.2.3 マルチチャンネル TMS

マルチチャンネル TMS、経頭蓋磁気刺激という方法ですが、普通、TMS というのは、8 cm ぐらいの直径の大きなコイルを人の頭の上に置いて、そこに強い電流を流して、そこで変動地場を起こして、脳の神経活動を disrupt するという技術です。今あるのは大きな1つのコイルとか、せいぜい2つの8の字にしたコイルを使うんですが、これはたくさんの小さなコイルを頭の表面に並べるという方法です。これは、結局、MEG という磁気で脳を計測する技術と実は同じような問題を解くことになるんですね。

つまり、MEG というのは、頭の中で何か電氣的な活動が起こって、それによって生じる

地場を表面に置いたいろんなコイルからとって、その電流をはかることで、そこから逆に、脳の中のどこで電流が起こったかというのを調べる方法です。このマルチチャンネル TMS というのは、脳のある場所を刺激したい。それを決めておくんですね。その電流の向きを生じさせるのに、最適なコイルの電流を、コイル 1 個 1 個について決めてやるという方法です。そういった方法によって、かなり脳の好きな場所を刺激できるということです。

実際には技術的に非常に難しく、まず三次元方向にフォーカスできないという問題があるんですね。これは MEG と同じような逆問題がありまして、深さ方向で電流を制御することは難しいということ、それから、刺激のコイルを小さくするというのは非常に難しく、小さくすると、僕も何度か経験したことがあるんですが、刺激のコイルが破裂するということがよくあります。小さくすればするほど、そういうことが起こったりします。

実際、この Ruohonen 、Ilmoniemi という人たちのグループのラボを見学したことがあるんですが、彼らも一応プロトタイプみたいなものはつくっているんですね。コイル 3 個ぐらいのプロトタイプみたいなものはつくっているんですが、なかなかいろんな技術的な問題があって研究が進んでいないというような状況でした。これは非侵襲で脳にフィードバックを与える、入力していくという 1 つの方向かなという気もしています。

1.2.4 ハイパースキャニング

最後に、ハイパースキャニングというのは既の実現している技術で、アメリカのテキサスの Baylor College の Read Montague とか、カリフォルニア工科大学の Camerer さんとか、何人かいるんですが、そういったアメリカの研究者のグループがあるグループをつくりまして、それぞれの大学にある fMRI のスキャナーをつないでしまう。つないで、同時に被験者を入れて、その被験者同士が何か social なゲームをしているときの脳活動をとろうという研究をしているんですね。その際に、離れたところにあるスキャナーを同時に制御する技術を開発してしまっていて、それを彼らはハイパースキャニングと言っています。これを使ったおもしろい研究もいろいろされていて、去年、Science 誌にも、ニューロエコノミクスに関する論文が出ています。

これが、すぐ、SF のような脳と脳の通信というような感じにはならないと思うんですが、もちろんこういうのを使って社会的な行動をしているときのヒトの脳活動を調べることができますし、将来、脳を解してコミュニケーションするときに、どういった問題が起こり得るかというのを調べるテストベッド的な使い方もできるのではないかと思います。

以上

1.3 入力型 BMI（人工感覚器）

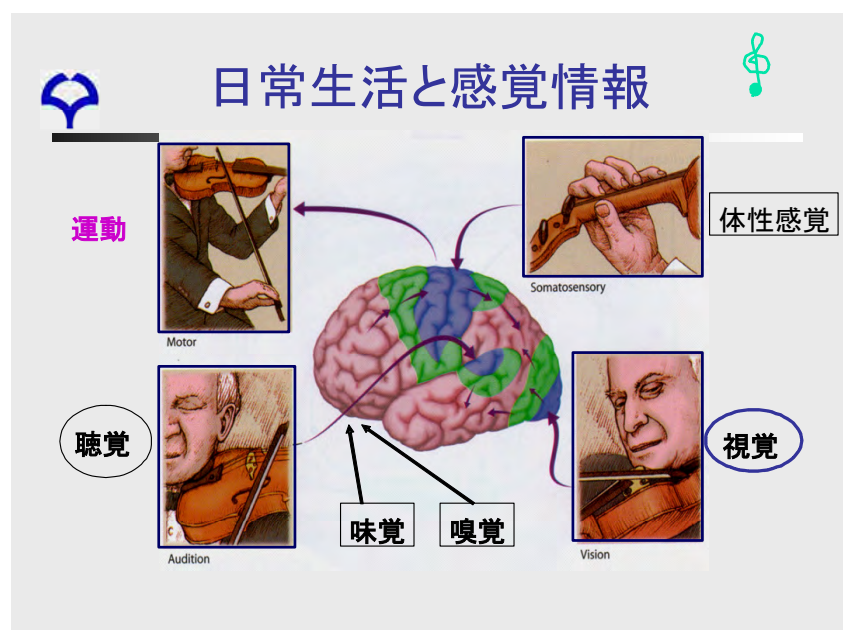
「人工感覚器」

不二門尚先 先生

1.3.1 日常生活と感覚情報

感覚情報については、御存じのように、視覚が恐らく 85% ぐらいあると思います。聴覚が恐らく 10% ぐらいで、そのほかを体勢感覚、味覚、嗅覚で補っている。我々は人工視覚に取り組んでいるわけですが、人工内耳が聴覚系ではうまくいっているのに、どうしてうまくいかないかというのをよく考えてみますと、前回の川人先生の人工内耳の話をお伺いしますと、結局、聴覚というのは、視覚を頼りにリハビリテーションが結構できる。リップ・リーディング、くちびるの動きで雑音みたいな音とくちびるの動きの情報をつかんでリハビリが進んでいくわけです。ところが、視覚の場合は、ほかの情報は恐らく体性感覚ぐらいだろうと思うんですが、それは非常に大まかな情報しかないので、なかなかそういうリハビリテーションも含めて情報量が多いことが要求される、そこが難しいと考えています（図 15）。

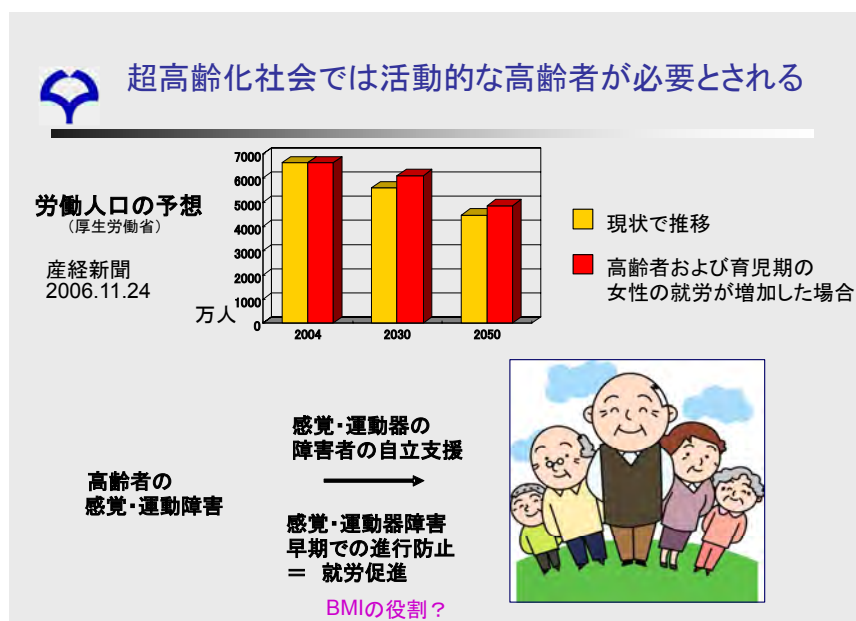
（図 15）



1.3.2 BMI から生み出されることが期待される社会的な価値

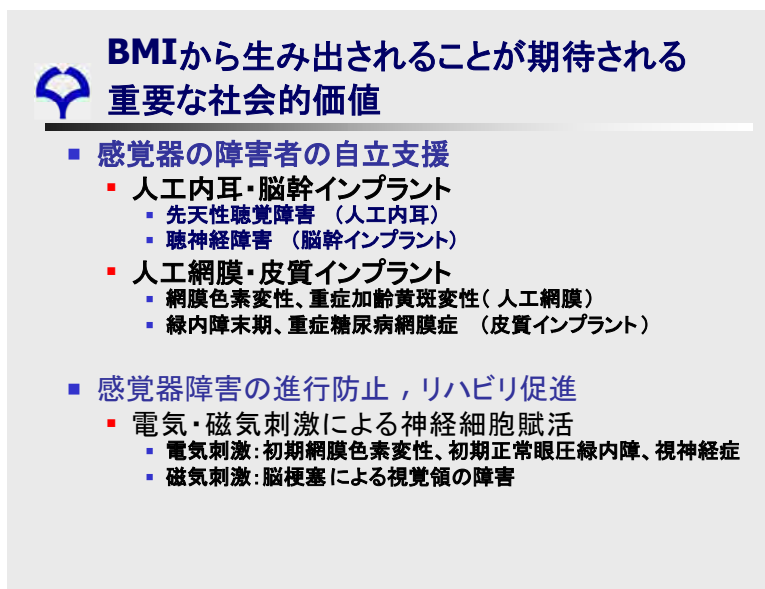
社会的な要求度というのは、労働人口がこれからどんどん減っていく（図 16）。特に黄色いラインがそうですが、2030 年、2050 年に行くと非常に減ってくる。高齢者及び育児期の女性の就労が増加した場合がオレンジの棒グラフです。2030 年ぐらいまでは 65 歳定年制でフルに頑張ってもらって何とか維持できますが、2050 年に行くと、それでも足りない。こういう場合には、出生率がふえればいいんですが、そうでないとすると、高齢者に目いっぱい頑張っていただきたいという時代が来るわけです。

(図 16)



我々が取り組んでいる感覚器、運動器の障害者に対して BMI がどういう貢献ができるか。2つの観点があると思うんですね。1つは、障害になってしまった人が、今、生活のいろいろな助けをほかの人からかりなければ生活できないという人の自立を支援することは、社会的に非常に大きなインパクトがある。もう1つは、もっと人数、マスで考えると、就労というのは、健やかで元気に生活すればいいというよりも、もう一步踏み出して、積極的に働けるということを考えると、障害というのはミニマムにとめて、現在、治療法のないものに対して治療法を生み出して、進行を防止してやると、就労促進になるだろう。それから、重症の人と軽症の人、それぞれに対して BMI が役割を果たせるのではないかという立場です (図 17)。

(図 17)



BMI から生み出されることが期待される社会的な価値としては、今言った2つの観点か

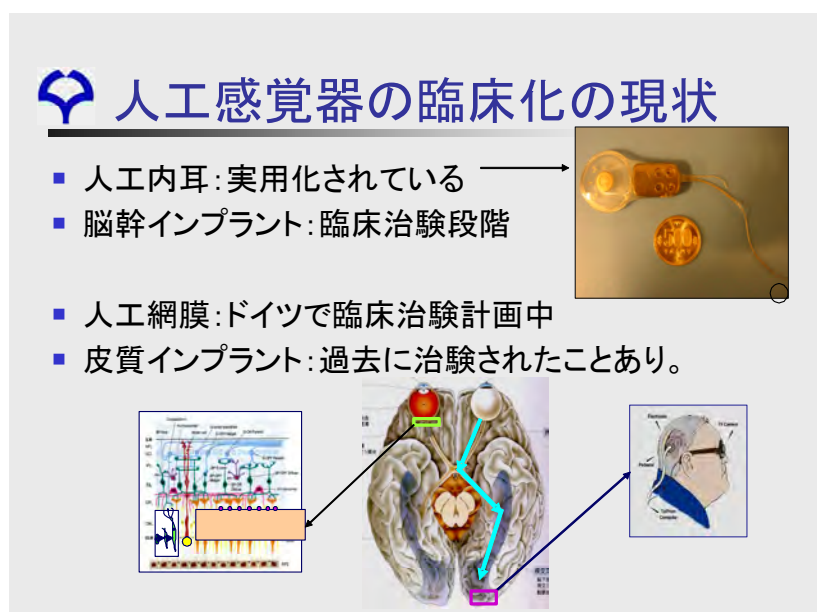
らいうと、感覚器の障害者の自立支援ということから考えると、人工内耳のほか、インプラントというのはかなり臨床化、実用化されつつあるわけです。人工網膜、皮質インプラントについては、今これからやりつつあるところですが、重症症例の網膜障害、あるいは視神経の障害だと皮質のインプラントということになります。

これは新しい観点で、この前もちょっと紹介したんですが、もう1つの軽症の方は、感覚器障害の進行防止で、今、治療法がないものに対して、**BMI** を使って、治療的に進行防止をする。先ほどの侵襲か非侵襲かでいうと、これは非侵襲に当たるわけです。我々がやっているコンタクトレンズ型の電極や、**TMS** を使って非侵襲的に神経活動を外から賦活してやる。我々はある程度エビデンスを出したんですが、視神経症に対しては電気刺激が進行防止、あるいは賦活に有効であろう。あるいは、網膜の障害や、緑内障は物すごく人口の比率が高いですが、そういうものに応用ができるのではないかと。**TMS** を使って脳皮質の神経細胞を賦活化してやると、例えば、視覚領の障害が起こったような人に対してもリハビリ促進になるのではないかとというようなことを考えています。

1.3.3 人工感覚器の臨床化

臨床化は具体的にはどうなっているかというと、人工内耳は、右に示すように、二次コイルを皮下に埋め込んでいる部分ですが、こういうふう実用化されている（図 18）。脳幹インプラントも、日本でも臨床治験が始まっている。それに対して、人工網膜は、ドイツが一番商品化が進んでいて、臨床治験を1～2年後にやる。皮質インプラントについては、過去にやられた経験があるけれども、現在のところは治験のスケジュールにはのっていないところが現状です。

（図 18）

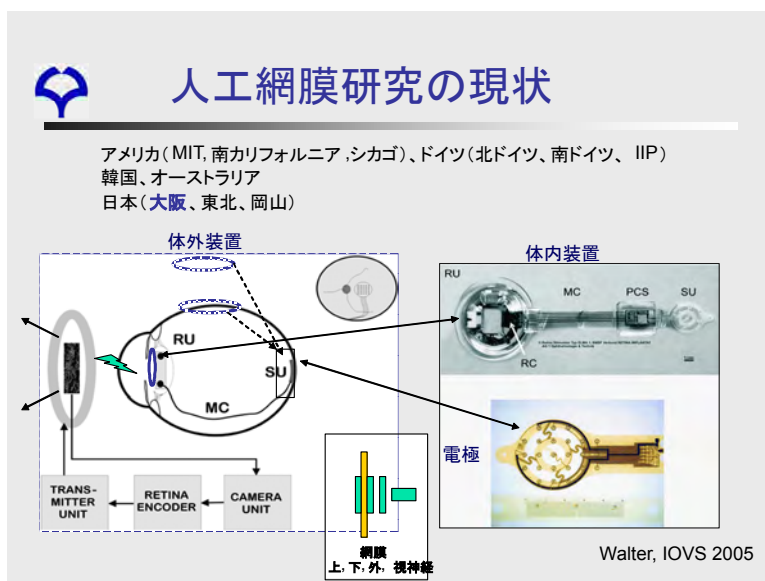


人工網膜の現状をごく簡単に言いますと、いろいろなグループがやっていて、我々大阪大学のグループもやっているんですが（図 19）、基本的に電極をどこに置くか、あるいは、

二次コイルをどこに置くかという違いで、目指す方向は大体似てきている。つまり、臨床的に実用化するためには、最初、1000 チャンネル、1500 チャンネルといったものを目指していたんですが、今は 25～49 極ぐらいの電極数で実用的なものをつくろうとしています。二次コイルを目の中に入れるか、眼球につけるか、皮下に置くかという選択肢があって、刺激電極を網膜の上に置くか、網膜の下に置くかで、我々のように、ある程度非侵襲ですが、網膜に接しないで強膜に置くか、あるいは、視神経にくっつけるかという選択肢があるわけです。こういう方法でどれがいいかということで、今、実用化に向けていろいろやっているというところです。

人工網膜は我々もやっていていろいろ問題点を見出したわけですが、結局、こういう侵襲型の機器は、ローテクのところでは実はハードルが非常に高い。コンピューターや体外で水に接しない部分で、IC を使ってやる部分というのは、日本も含めて世界じゅうでかなり進んでいるので、そちらは割とクリアできることが多いんですが、非常にローテクで、例えば、耐水性の高いパッケージング・システムを開発するとか、眼球運動に対して耐久性の高いワイヤーを開発するとか、電荷注入能力の高い電極を開発するとか、こういう点が実は非常に難しく、生体の安全性という意味では非常に大事ですが、時間がかかるという印象を持っています。

(図 19)



あとは、生体側の問題として、どうしても最初に重症の方を対象にするわけですが、そういう方は残っている神経細胞が少ない。したがって、たくさん電流を流さないといけないし、分解能も得られない。電極数を少なくしていくと、実は頭を動かすのと基本的に余り変わらない。頭を動かすんだったら1極の電極でもいいのではないかという話があって、役に立つ人工網膜を重症の人に最初に持ってくるというのは非常に難しい点があるということがわかりました (図 20)。

(図 20)



人工網膜の問題点

- デバイス側の課題(比較的ローテク)
 - 耐水性の高い Packaging System の開発
 - 眼球運動に対して耐久性の高い Wire の開発
 - 電荷注入能力の高い電極の開発
- 生体側の問題
 - 残存する網膜神経節細胞が少ない
 - 少ない電極数では形状認識が困難
(頭を動かして認識するなら1極電極でも OK?)

皮質埋め込み型電極については、加藤先生の方が多分お詳しいと思うんですが、基本的には侵襲型で、皮質に電極を置くか、それとも、剣山型の電極で脳を **penetrate** するか。私の知る限りの成果としては、トレーニングしたサルで、フォスフェンの方向に一致したサッケードが誘発されるということで、皮質型のものでも、剣山型のものであれば、限局した刺激ができて、それが実際にあるトポグラフィーに一致した方向を刺激するということになるわけです。ただ、やはり剣山型の電極は侵襲が大きい点、表面型の電極はてんかん発作等があるということで、臨床応用にはもう少し距離がある。長期的に電極抵抗が上がるというのも問題だというようなことを言っていました (図 21)。

(図 21)



皮質埋め込み型人工視覚

- ・ 皮質表面設置型
- ・ 剣山型電極型



現状;
トレーニングしたサルで、Phophene の方向に一致したサッケードが誘発される。

問題点;
剣山型電極は侵襲が大きい点
皮質表面設置型は、痙攣誘発の可能性がある点
長期的に電極抵抗が上がる点。

1.3.4 マイルストーン

2010 年ぐらいには大まかな形状認識ができる人工視覚を、まずドイツ、アメリカ、そし

て我々もキャッチアップしよう。皮質埋め込み型については、まだ動物実験レベルだろう。2015 年ぐらいになると、第 2 次の人工視覚で、文字が認識できればいいと思っています。皮質埋め込み型の電極については、恐らく臨床研究が始まるぐらいが 2015 年ではないかと考えています (図 22)。

(図 22)



Mile Stone

- 2010年:
 - **人工網膜**: 大まかな形の認識ができる人工視覚 (50極程度の電極): ドイツ、アメリカ、日本
 - **皮質埋め込み型電極**: 前臨床研究 (動物実験) アメリカ、日本
- 2015年:
 - **人工網膜**: 文字認識ができる人工視覚 (200-300 極程度)
 - **皮質埋め込み型電極**: 大まかな形の認識ができる人工視覚

BMI 実現に必要な要素は、我々の非侵襲的型の方ですが、最終目標は高くてもいい (図 23)。つまり、読書と歩行が可能だろう。それは社会に対する発信という意味です。それから、患者さんに対する希望を与えるためには目標は高くてもいいけれども、現実的な目標に対して、当初から並行して取り組まないと実現するものにならない。つまり、先ほど言いましたように、ローテクの部分でのハードルが結構高いわけです。あとは、臨床の現場とのフィードバックを密にして、安全に使いやすいものを実用化するということ。

(図 23)

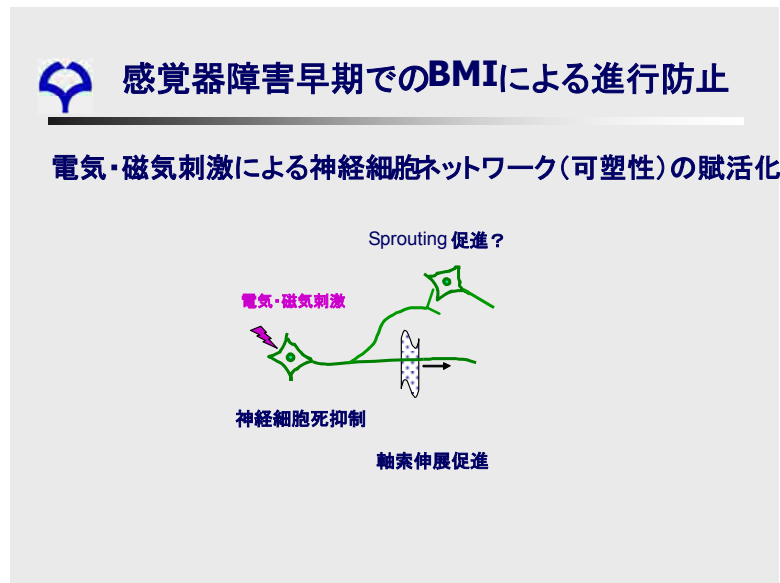


BMI (人工網膜) 実現に必要な要素

- **人工網膜の最終目標**: 読書と歩行が可能
 - 初期目標: 頭を動かして物体の形状の把握が可能
- **最終目標は高くてもよい**:
社会に対する発信
- **現実的な目標に対して平行して取り組む**
ローテク部分でのハードルが結構高い
- **臨床の現場とのFeed Backを密にする**
安全で使いやすくなければ実用化しない

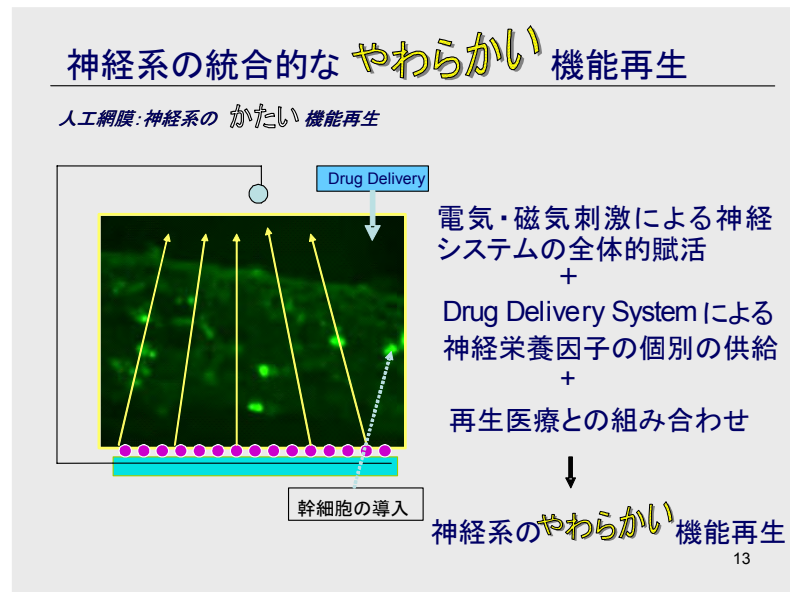
最後の話題としては、ぜひ並行してやっていきたいと思っているのは、早期の障害を BMI で治療する（図 24）。電気・磁気刺激による神経細胞死抑制と軸索神経の促進について、ある程度エビデンスを出すことができていますが、ひょっとすると、可塑性の賦活化、スプラウティングを促進するようなこともあるかもしれないし、またネットワーク自体の賦活化もあるかもしれませんが、こういう非侵襲の方法で神経細胞そのものを、やわらかい柔軟性のあるものを賦活化するということです。

（図 24）



これは最後で、前回も出したスライドですが、神経の統合的なやわらかい機能再生も並行してやっていくと、実は社会的な関連という意味では非常に大きい。それと、高度な BMI を並行してやっていくのが最終的な社会的な還元にはいいのではないかというのが、私の提案です（図 25）。

(図 25)



以上

1.4 入力型 BMI（脳機能の操作・回復）

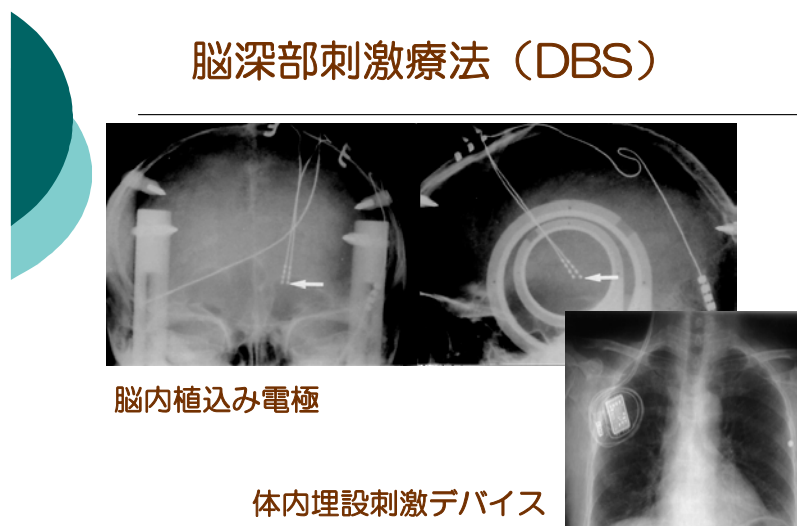
「BMI に期待される社会的な価値とは何か」

片山容一 先生

1.4.1 わが国の DBS の歴史

現在、使われております電極ではありますが、これは脳の深部に2本、トータルで8極。埋め込まれております（図26）。こういう電極を使って、体内に埋設したデバイスからパルスを送り込んで脳機能を制御するというものであります。これだけですと BMI とは言えないわけですが、これが発展していく過程で、1979 年ごろから我が国で始められたものですが、79 年に難治性疼痛、88 年に不随意運動、これはどちらも私のところでやったものです。この当時は全世界的に、一番多いときでも 15 施設ぐらいのところでは DBS が行われておりまして、このデバイスを開発した会社は、ずっとこの部門では赤字を出していたわけでありまして、ところが、90 年代の後半に入りまして、これが非常に有効な治療方法だということがわかって、我が国でも保険収載されて、社会的に認知されるところまで到達しているわけでありまして。

（図 26）

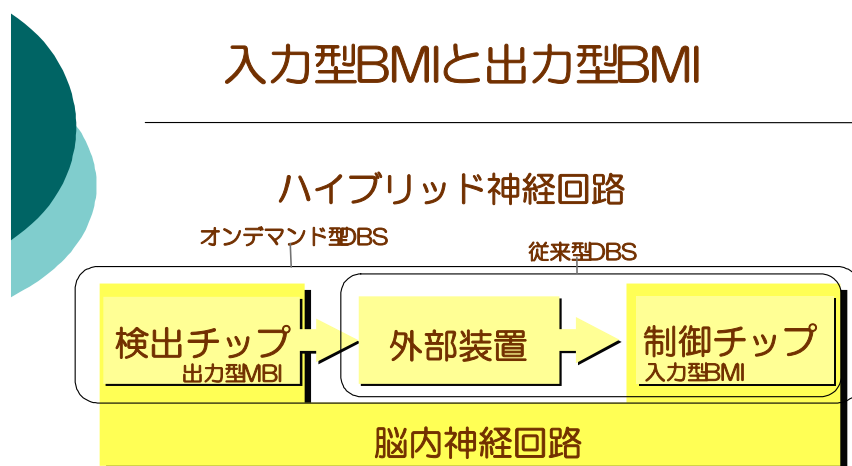


この時期にオン・デマンド型の DBS の開発が開始されました。これが、入力・出力機能を持っておりますので、BMI に大変似た方向に発展しつつあるという状況でございます。どういうことかといいますと、外部装置というのは体内に埋め込まれた刺激デバイスのことでありまして、これで脳に制御をするわけですが、このデバイスに、体内で発生するシグナルを利用して、自己完結的なループをつくるというような考え方が、入力 BMI と出力 BMI に大変似ているということでございます。

これが従来の DBS であります。今、開発が進められているオン・デマンド型の DBS というのは、この全体でありまして、脳内神経回路の中に人工的な神経回路を埋め込んだような形になっております。これは従来の DBS ですと、外部装置の部分に、本人の意思、あるいは第三者の意思がかかわっておりますので、BMI とは言いにくいところがあります。

が、この外部装置に脳内のシグナル、あるいは体内のシグナルを使って駆動させるようにいたしますと、これは本人の意思、あるいは第三者の意思が入っておりませんので、BMIのような意味合いを持ってくるということでございます（図 27）。

（図 27）



1.4.2 技術的課題

1 つは、電極の最適化が盛んに検討されております。現在の電極は、先ほどお見せしましたように、数 mm の結構大きな電極であります。電流の流れる方向性を変えとか、あるいは電流の流れる形状を最適化するような工夫が、最近はされております。そのためにはやはり電極の技術が重要でありまして、この辺の工学系の技術と並行して研究を進めなければいけない局面に来ております。

それから、電極はかなり大きいわけですが、これと信号処理装置との一体化がスケジュールに入ってきております。これは、脳内シグナルを同時に検出する電極ということがどうしてもアイデアとして出てくるものですから、電極が、刺激のための電極というだけではなくて、信号をピックアップするための電極という意味も持ってきているということです。

もう 1 つはバッテリーで、これは急速に今新しいものが開発されつつあります。既に市場に出す直前のところまで来ているものもあるそうでありますが、小型化、つまり現在のバッテリーは鎖骨の下に埋めるんですけども、これを頭蓋骨に埋め込むようにする。あるいは、現在のバッテリーは 5 年ぐらいの寿命で取りかえなければいけませんが、充電式にして長時間稼働できるようにする。こういったことが工夫されております。これが小さくなりますと、頭蓋骨の中におさめることができますので、患者さんの美容的な、あるいは心理的な安定性も大変高いものになると思われまます。

もう 1 つは、すべて脳内あるいは体内に埋め込まなくても、発信・受信ができるようにしておけば、相当複雑な制御が対外装置で行えるということも検討されております。これに

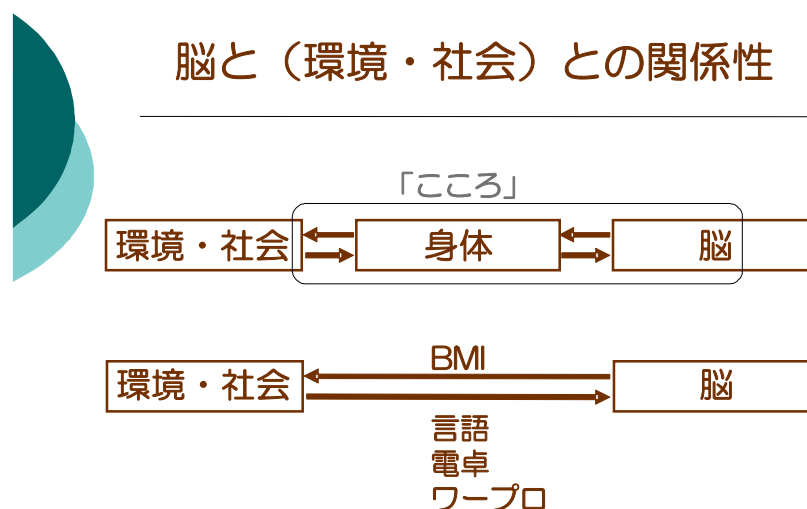
は発信・受信機能が必要です、この辺のところはまだ大分時間がかかるだろうと思いますが、アイデアとしては既に取り組みられています。

1.4.3 脳と（環境・社会）との関係性

この DBS をやってまいりまして非常に強く私どもが印象深く思っておりますのは、先ほども出ておりましたが、脳というのは非常にダイナミックに変化するということであります。それがこちらのもくろみどおりに変化してくれる場合もあれば、逆に困った方向に変化する場合もございます。脳損傷の後遺症のかかなりの部分が、実際には脳の機能が困った方向に変化していくということによって発生しているものでありまして、これを好ましい方向に導いていくという技術は大変重要であろうと思われます。

その際に、1つ、どうしても懸念されるのが、こういうことでございます。脳は環境や社会の中に埋め込まれて働いているわけですが、環境と社会に、直接、脳は情報交換をできる位置に置かれておりません。実際には環境や社会と脳とのコミュニケーションは身体を通じて行われているわけで、通常の脳の活動は必ず身体を経由しているわけです。この身体を経由して社会や環境とインタラクションをすることによって、健康と呼ばれる脳の活動がえられるわけでありますから、身体を飛ばして脳をつくるということは、実は大変難しいことなのではないだろうかと感じられます。今考えております BMI というのは、ここのところに検出と制御を加える、ある意味でのシャント、短絡を加えるわけでありますから、身体を経由せずに環境や社会との情報交換、あるいは脳と脳との直接の情報交換をしようというわけでありまして、脳をかなり予測しない方向に変えてしまうおそれがございます（図 28）。

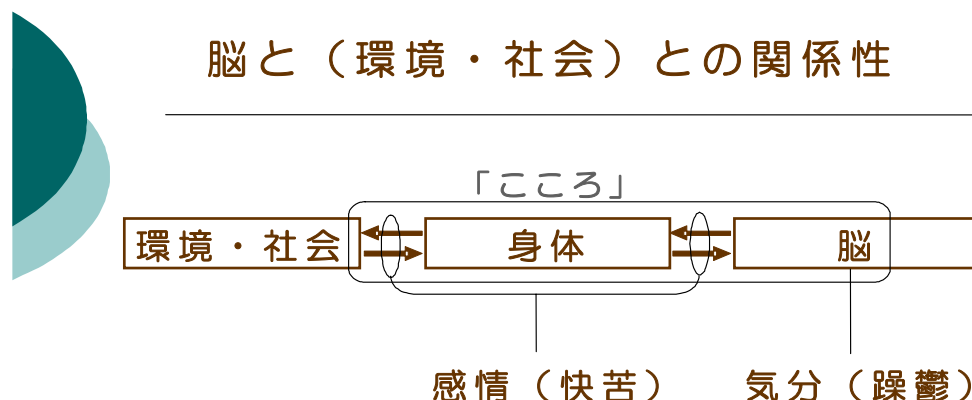
（図 28）



これをもう少し単純化いたしますと、こういうことだろうと思います（図 29）。通常の脳というのは、身体を経由して環境や社会とインタラクションして、ここに心というものをつくっております。10 年ほど前ですが、私の周りにいた脳科学者は、大体がかなりナイー

づな考え方をしております、心というのは脳がつくるものだと簡単におっしゃっておりましたが、最近はそういう考え方はかなりなりを潜めてきたように思います。心は脳そのもので生まれるのではなくて、脳が身体を経由して、環境と社会との間にインタラクションを行うことによって発生する。すなわち、関係性で発生するものだという理解の仕方をするようになってきていると思います。昔からこういうことは言われてきたわけでありまして、主に哲学や人間科学の分野では当たり前だったんだと思いますが、脳科学の分野では、最近、広くこういった考え方をするようになったと思います。

(図 29)



さて、ここで、BMI は何かといいますと、この身体の部分飛ばして、環境・社会と脳との関係性をとろうというわけでありまして。ですから、身体がつくり上げてきた脳に新たなかわり方をするという意味では、我々がこの十数年感じてきました脳の変わりやすさから考えますと、非常に危険なことをすることになるのではないだろうかと思ひます。身体を経由しないで脳と環境がかかわり合うという経験は、人間は既にしているわけでありまして。言語がそうでありまして、電卓もそうです。電卓を使うようになりまして、我々は暗算が下手になりました。ワープロを使うようになりまして、漢字を覚えられなくなりました。脳が随分変わってきたんだと思いますが、これと同じことを BMI はやろうとしているんだと思ひます。

1.4.4 最終的に社会に還元される科学技術

こういう脳と環境・社会とのかかわりの基本原則は、感情、あるいは脳そのものから発生する気分、この2つの要素があると思ひますが、ここにどうしても BMI ははまり込んでいく可能性があると思ひます。社会に還元する科学技術として我々が非常に期待を持っておりますのは神経リハビリテーションであります。これは損傷された脳の再学習であります、BMI を使うことによりまして、コンピューターが付加された脳の再学習をすることができるといふ点で、大変明るい感じがするのでありますが、ここには先ほど申し上げたような問題があるといふことです。

脳卒中後遺症というのは大変重大な社会問題でありますから、必要性は高い。これは我々の分野で行われてきた研究活動であります、大体8年ぐらいの経過でこういったことが進められてきましたので、15年ぐらいの間にはかなり具体的なものが出てくるだろうと思っております。

開発上の成果ですが、これは脳機能の再建という言葉で言いあらわせると思いますが、先ほどの感情や気分にかかわることがどうしても問題になるだろうというところから、脳の本来の機能とは異なる目的での利用が行われるようになるだろうと思います。もともとBMIやBCIという思想は、脳の本来の機能とは異なる目的で脳を使おうというところにありますので、これは避けられないだろうと思います。そうしますと、どうしてもここに入ってしまう可能性があります。感情の操作、あるいは気分の操作。感情は対象があるものでありまして、気分は対象のないものであります。そうすると、達成困難な理由としてどうしても浮上してくるのが倫理の問題であります。社会科学、人間科学との連携が必要であります。

脳卒中の後遺症に使う分には、これは大変社会的に意義のあることでありますが、これは医療政策に依存しております。我が国は極端な医療費抑制政策をとっておりますので、この分野での発展というのは、政策に依存して、恐らくかなり難しいのではないかと私は感じております。それよりもむしろゲーム化の方が先行するであろうと思います。こちらは経済的にも双方向の加速がかかる分野でありまして、感情あるいは気分に操作を加えることが可能になれば、このところに相当大きなマーケットが発生して、そのこと自体は実は問題なのではないかと思っております。

以上

1.5 デバイス技術

「BMI デバイスの現状と課題」

鈴木隆文 先生

1.5.1 意義・動機

まず、意義・動機ということで、特に社会的影響、大きなことは省略させていただいて、デバイスにかかわることだけ挙げたんですが、まず強調させていただきたいのは、とにかくデバイス（プローブ）開発が BMI のボトルネックになっているということです（図 30）。そして、課題が多いということですが、現状、どうなっているかといいますと、今あるデバイスでできる範囲内でだけ研究が進んでいるというのが現状です。アメリカの BMI もそうですし、人工視覚に関してもそうです。

そして、ちょっと特殊なのは人工内耳で、これは現状のデバイスでかなり役に立っている。これはいろいろ埋め込み場所が特殊であったり、チャンネル数、情報量が特殊であったり、関係の研究者の方の熱意等、その3つの条件がそろって、これだけは非常にうまくいっているんですが、人工内耳にしても、例えば、より多チャンネルのデバイスができれば、より高性能なものが、例えば、音楽を自在にとか、そういったことまでできるようになるだろうとは考えられています。

そして、あえて言いますと、デバイスを征する者が BMI を征すると、強調させていただきます。

（図 30）

意義・動機

- ・デバイス（プローブ）開発が**BMI技術発展のボトルネック**
- ・臨床応用に向け、課題多い
 - 現状のデバイスで可能な範囲内で研究が進む（BMI, 人工視覚, 人工内耳, etc.）
 - **デバイスを征する者が, BMIを征す**
- ★難しい課題ではある ★これまで注目されず予算も少なかった
- ・多機能化, 実用化研究が日米欧で進みつつある
- ・特に米国で報告が増えつつある
- ・いわゆる狭義のBMIだけでなく, リハビリ制御, 迷走神経刺激, FES, などの神経関係技術への応用, さらには埋込み型の医用デバイスに共通の課題の克服につながる.

私自身は、十数年にわたって、もともとは BMI、義手制御や人工心臓制御をやりたかったんですが、そのためにデバイスがなかったんで、それをつくるというところから始めて、ずっとウォッチといいですか、研究してきたんですが、ここ十数年、なかなか進んでいません。2つ理由があると思います。1つは、確かに難しい課題ではあって、十数年前にミ

シガンやユタが提案したものからなかなか進んでいないのが現状です。そして、これまで地味な分野で、注目されず、予算も少なかったです。予算面だけではなくて、実際に研究会で発表すること自体も、余りに地味だなという印象ですし、また、例えば、萌芽には出せるけれども基盤には出せないなというような感じの、そういうぐらいの地味さといえますか、小粒さであったのが現状です。

そして、実際にこの十数年、多機能化、実用化研究が着実に進みつつはありました。特にここ1～2年ですが、DARPAの予算をもらった方々だと思うんですが、北米神経科学会などで、もしくはIEEEの学会などで、アメリカのグループによる報告がふえつつあります。

もう1つ、強調させていただきたいのは、ここ十数年にわたって、ユタ、ミシガン以外の研究は、日米欧が横並びであったと、私自身は思っています。特にいいものがなかったというのも確かですが、いろいろなアイデアがそれぞれから出てきました。

そして、意義ですが、いわゆる狭義のBMIに使えるだけではなくて、狭義では補綴の意味合いでこれを書いたんですが、それだけではなく、リハビリの制御、もしくはDBS、さらには迷走神経刺激、FESなどの神経関係技術にはもちろんそのまま使えます。さらには、ここで生体適合性の課題などは、埋め込み型の医療デバイスには共通の課題の克服につながるものと考えています。

1.5.2 課題

きょう、私が特に強調したいのは、侵襲型の部分です(図31)。脳に侵入するということで、剣山型というものがありませんでしたが、後で述べますようにいろいろ問題があるので、極細にしたり、もしくは、さらに糸にしたりということがあります。もう1つは、ECoGというものがあります。脳外科の方と話をすると、脳外の方であっても、刺入型はいろいろ抵抗がある。よほど効能、いいことがあるというなら別ですが。それに比べると、ECoGは、我々はあけるという意味で障壁を感じるんですが、脳外の方にとっては非常に障壁が低い。ふだんから2週間、1カ月と埋めていらっしゃる。そういう意味で、これもなかなか高性能化は進んでいませんが、いいものがあれば使えるのではないかと考えています。

それから、もう1つ、ほかの方が多分おっしゃらないので強調したいのは、抹消神経のデバイスも大事ではないかということです。確かに手首で切断された患者さんでは、筋電を使って義肢制御はできるんですが、ひじまでしか残っていない場合には、手を制御する筋肉は前腕にありますので、結局、神経情報をとらなければいけなくなります。そして、もう1つ、大事なものは、リスクです。要するに、脳に埋めたときに、万が一の事故があったときには、重篤な障害が起こり得る。それに比べると、腕に埋めておいた方が、気軽と言っては何ですが、リスクが局限化される。また、信号ももともと筋肉まで来ていますので、解釈しやすい。それから、もう1つ、最近、私が思うようになったのは、表現はよくないんですが、「礼儀正しい」入出力であるということです。もともと脳は末梢神経を通じ

ただ情報の入出力を想定しています。ところが、直接入出力すると、もちろん無限の可能性はあるんですが、脳にとっては OS のルールを無視したプログラミングのように、メモリーがいろいろ書きかえられたり、いろいろ想定しない未知の影響がやはり出てくると思います。そういう意味で、末梢神経を通じたものは「礼儀正しい」入出力ではないかと思えます。一方で、末梢神経に埋めるのは非常に難しいです。脳に比べると、筋肉にもまれる位置にあり、しかも、神経自体が伸び縮みするので、とても難しいんですが、この研究も大事だと思います。ですが、未知の影響と今言いましたが、それも知るべきでありますし、無限の可能性は確かにあるので、脳は脳で研究は進めたいと思います。脳型のデバイス、脳に埋め込むデバイスです。

(図 31)

課題

■どこに接続して何を

- ・脳(侵襲的) 刺入型 針→剣山→極細剣山 or 糸型
(適用可能症例多い、無限の可能性)
- ・脳(半侵襲的) 脳表面 ECoG
- ・末梢神経 束刺入型, 束表面
(リスクの局限化, 信号解釈, 「礼儀正しい」入出力)

+多機能化 (Encapsulation制御, 生体適合性,
固さ制御, 位置制御, 選択)

- ・脳(非侵襲的) EEG, MEG, fMRI, fNIRS
→ 新原理, デバイス改良

そして、これらに関して、最近の流れは、多機能化です。もちろん1つは encapsulation と呼ばれる、長期で埋めて取れなくなるということを制御したいということです。生体適合性にかかわるものです。それから、もちろんやわらかくしたいので、刺すときはかたくして、その後、やわらかくできないか。そして、やわらかくした後、位置制御はどうするのか。それから、例えば、触れた部分だけ電極になるとか、そういう、相手を選択するような機能表面ではできないか。そういった多機能化を目指した研究が進みつつあります。

デバイスということでは、非侵襲的デバイスがもちろん大事です。もちろん埋めないにこしたことはないので、特に私自身は fNIRS などに期待していますが、こういったものが新原理やデバイス改良があってコンパクトにできれば、それにこしたことはないと思います。ただ、まだ難しいのではないかというのが個人的な感想です。

そして、従来型の神経電極ですが、これは、結局、ワイヤーを神経細胞の近くに置くという原理のままこの数十年変わっていません。例えば、タングステン針電極を、末梢神経でもいいですし、脳にでもいいですが、埋めれば、先端の数 μm を露出させておけば、シングルのユニットのデコーディングができます。それを個々に微妙に位置調節すると、多

数の多チャンネル計測ができます。これはラット用のデバイスなので小さいですが、見てのとおり数十チャンネルが限界になります。もちろん手間的にもそのぐらいが限界になると言われています。

そこで、MEMS の技術を使って、かなり古いですが、ミシガン大学やユタ大学が開発しました。これも提案はかなり古いものです。ようやく数年前にこういった形でヒトに埋められるようになってきました。

ですが、これで十分なのかというのがもちろんあります。当のユタ大、ミシガン大は、これらのデバイス研究をもちろん進めているんですが、IEEE などでは発表されるものは、1 つは、生体適合性のこと、それから、チップ化、無線化のことが発表されています。

そして、ここ 10 年、もしくはここ数年、ほかのグループでは、これでは問題だろうということで、特に太さ、かたさが問題にされてきました。ユタ大の 100 本の電極は、1 本 1 本はいわゆるタングステン電極と一緒に、 $100\mu\text{m}$ ぐらいのシャフト径でだんだん細くなっていきます。1 本刺すならいいですが、これを 100 本刺すと、しかも密に刺すと、体積として電極がとて大きくなくなってしまいます。組織へのダメージが大きいのではないかと。それから、もちろん個々に位置調節できないけれども、それでいいのか。ヒトに埋めた場合でも、実際、100 本のうち 20 チャンネルぐらいは何とかとれているがといった問題があります。なので、位置調節はどうするのか。それから、もちろんとれたものもずれてくるけれども、どうするのか。それから、結合組織の問題。チャンネル数をもっと大きくしたい。そういったことがプローブの課題としてあります。

そこで、多機能化がいろいろ言われておりますが、1 つは、やわらかくしたいということで、今申し上げた太さ、かたさを糸でカバーしようというものです。もちろん糸では刺さらないので、刺すときだけ、例えば、つららのイメージでいいんですが、ポリエチレングリコールとか、そういったものでコーティングして刺して、侵入後にはすぐ溶けてやわらかくなってほしいとか、いろいろな方法で何とか柔軟なものを刺すという研究が進められています。

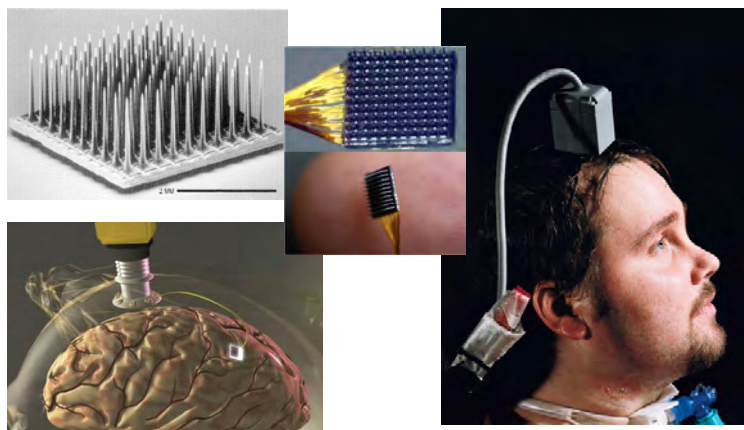
それから、これは手前みそですが、柔軟なだけではなくて、こういったストローのような構造をプローブの先端につけて、ストローの内部と外部に電極を配置していますが、そうすると、いろいろな、例えば、薬液入出力等と組み合わせられるのではないかとというものもあります。

これは、豊橋技科大の石田先生のグループのものですが、極細の剣山電極です（図 32）。こうやって書くと余りユタとの違いが見えませんが、数ミクロンの細さですので、これぐらい細いと細胞体にも刺さってしまう電極が出てくるということを、これはほかのグループでも、例えば、理研のグループでも以前されていましたが、お話としては伺っています。細胞体に刺さってしまうものも出てきてしまうそうです。これのいいところは、回路をつくった後に電極を生やしたいところにだけ菌の種をまいておいて、そこからこういったひげ結晶を成長させていきます。

末梢神経用の電極も、先ほど申し上げたように難しいんですが、再生原理を使ったものがいろいろ提案されています。これは我々のものですが、もちろん我々だけでなく、多数のグループでされています。

(図 32)

剣山型電極 Utah大学 Normann



PK. Campbell et al, IEEE Trans. BME, 38(8), 1991
LR. Hochberg et al, Nature 2006

これはユタ大学で末梢神経に埋められている例ですが、実際にとれた本数は少ない、しかも、感覚も粗い感覚しか生まれていなかったと、Warwick 先生のインタビューにあります。

というわけで、いろいろ課題があるんですが、まだこういった単なる電極としてやっていく分には未来は限定されてしまうだろうということで、別の原理での計測——例えば、パッチクランプ法をマイクロ化したようなものとか、そういった形のものが、しかも、任意の場所で——例えば、神経細胞に接した場所でだけ、ギャップ結合のようなものができて、そこでマイクロパッチクランプにできるといった、そういう別の原理がないと、位置調節に関して解ができないだろうという考えもあります。

イメージとしては、理想的には、刺したときはかたくて、刺した後はやわらかくなる。しかも、位置調節をどうやって不要にするかということ、神経細胞に接した部分だけが電極として働く。それ以外の部分は絶縁膜のままである。そういった形であれば位置調節が不要になるのでないかと考えられます。

1.5.3 プローブ研究のロードマップ

ロードマップとして、1つ、私は段階 A と C を強調したいと思います (図 33)。1つは、50 ユニット 1 週間です。50 という数字は、ニコレリス先生のデータにもありますが、40～50 を超えたあたりで急に推定精度がよくなるという、あのグラフによっています。これ以下だといろいろ推定精度は悪いです。これを 1 週間という数字は、これぐらいをクリアできると、ある程度は長くもちそうだという知見によります。これぐらいができるのが 1 つの段階 A です。それから、もっと先には 1000 ユニット——これは 50 で単純計算で割る

と 20 自由度の何かが制御できることになります。これをもちろん一生の間、数十年間、計測できることが段階 C です。

もちろんほかにも途中の段階はいろいろ考えられるでしょうし、またこれ以外にも、やめたくなったら一々抜かなくても溶けてなくなってほしいとか、いろいろな機能はつけたいと思いますが、この A と C を強調して、説明は終わりにしたいと思います。

(図 33)

プローブ研究(侵襲型) ロードマップ

- 段階A: 50ユニットを1週間 安定計測(推定)
- ・位置制御 or 数でカバー or 新原理
 - ・初期の組織適合対策
- 段階B1: 100ユニットを1週間 安定計測
- ・配線問題1
- 段階B2: 50ユニットを1年間 安定計測
- ・中期の組織適合対策
- 段階C: 1000ユニットを数十年間 安定計測
- ・長期の組織適合対策
 - ・配線問題2
-

以上

1.6 非侵襲計測技術

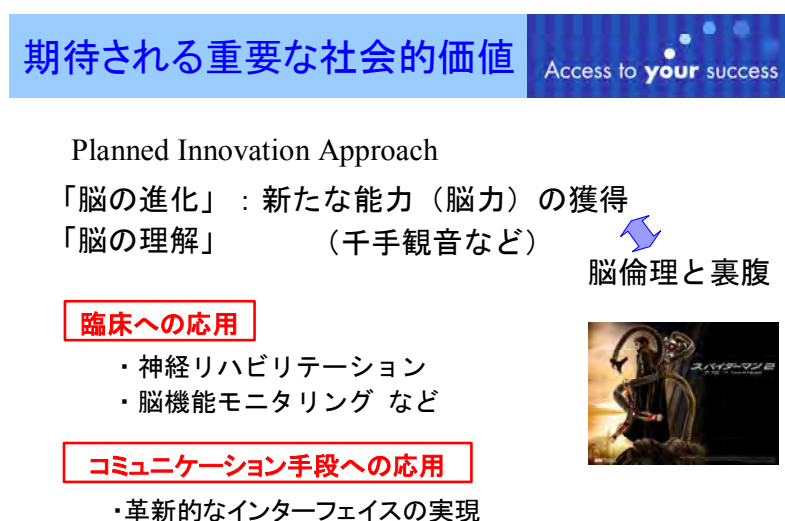
「非侵襲脳機能計測技術と BMI」

清水公治 先生

1.6.1 期待される社会的価値

私はメーカーの人間でして、どうしても製品化というところに視点が行ってしまうわけですが、今回の BMI というのが **planned innovation approach** ということで、何を最終的な目標にするかというのは非常に大事な事かなと思っています。先ほどから話題になっております、我々が BMI で脳にどういう影響を与えるのかということが非常に大事になってくると考えておるんですが、確かに生物学的な進化、それもさらには道具を使った進化という中で、ダイレクトに脳が外界とコミュニケーションするということで、よい意味では脳の進化、悪く言えば、脳の退化になるかもしれないし、新たな能力の獲得になるかもしれないし、あるいは能力の低下を引き起こすかもしれないということで、まさに神経倫理と裏腹になってくる。そういったところで、何を最終ターゲットにするかというのは非常に重要な課題だと考えています（図 34）。

（図 34）



1.6.2 非侵襲脳機能計測装置

非侵襲脳機能計測ということであれば、臨床への応用というところで大きなインパクトがあると思います。先ほどから御紹介があります神経リハビリテーション、脳の再構築——1つは再構築する、あるいは、それを促進するというところでの利用、もっと簡単に言えば、脳機能のモニタリングというところがあると思いますし、先ほどの脳と外界とのコミュニケーションというところで、千手観音ではないですが、今まで身体的な束縛の中で脳が機能していたところで、新たな革新的なインターフェースの実現ということも、ある意味で可能になるのではないかと考えています。

そうした場合に、出力型の BMI のツールとして、非侵襲脳機能計測のツールが数々ある (図 35)。神経活動をダイレクトに計測するものとして、脳波計、脳磁計があるんですが、最近では、その神経活動にダイレクトに結びつくような計測を fMRI あるいは fNIRS で行おうという研究も進んでいる。この中で一番大事なのは、拘束を受けない状態で計測できるかということが大きなポイントになる。こうなると、fNIRS と EEG が出力型の BMI のツールとしては非常に promising であると考えています。

(図 35)



その中の fNIRS ですが、fNIRS の長所、短所という原理的なものがどこにあるかということをもっと見極める必要があるかと思っています。光は、生体透過性を考えた場合、散乱と吸収を受けるということで、生体の内部まで入っていく、深くまで入っていくのは原理的な限界があるということで、その分解能には限りがある。逆に、局所だけで信号が拾えるということできると、高速化でデータを収集するという意味では意味がある。現在はまだトポグラフィーということで、測定チャンネルとしては数が限られているんですが、それをトモグラフィー化するという研究が進んでいます。そのときにリアルタイム性がどの程度維持できるかということもあるんですが、例えば、MRI でのフェイズド・アレイコイルのような局限した感度分布を持つことによって、データのサンプリング数を減らすとか、高速性が維持できるというようなリアルタイム性は、かなり fNIRS にはあるのではないかと考えています。こうした fNIRS の特徴をいかに有効に利用するかということに、このモダリティをブレイン・マシン・インターフェースにうまく利用できるかどうかにかかっていると考えています。

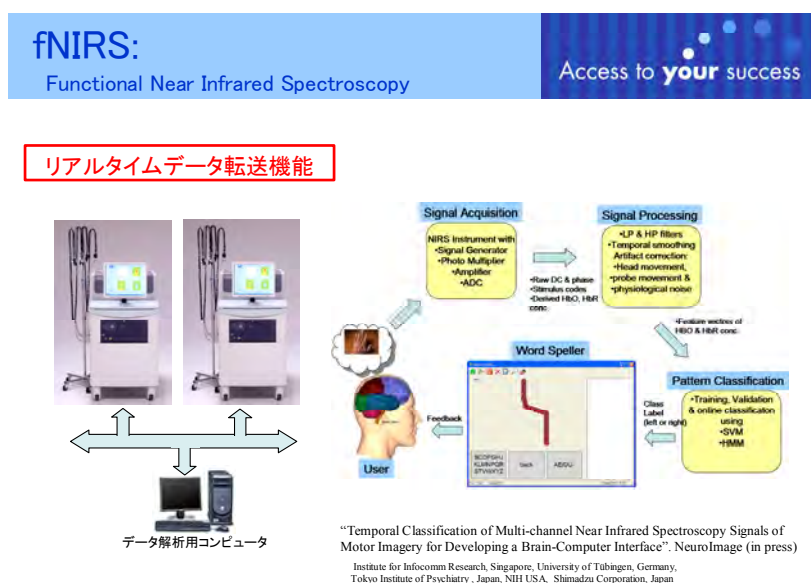
実際に今の fNIRS の状況ですが、多機能マルチモダリティ・フォルダーという形で、先ほど言いました EEG——これも 1 つの簡便な測定ツールですが、それとの同時計測が可

能になっております。光を使うことで、こうした電気信号との干渉性がないということが非常に大きな特徴であります。MRI と同じような形で、そういう計測が可能です。

fNIRS の大きな問題点は、断面、生体内が直接は見えないということであります。頭蓋下で計測する。そうしたときに、脳のどの部位の信号を取り出していくかということが非常に大事ですが、こうした形態画像とのフュージョン、重ね合わせ技術もかなり進んできているというところで、そうした研究を進める1つのバックグラウンドは整っているかなと考えています。

もう1つは、先ほどリアルタイムでデータ収集と言いましたが、リアルタイムでデータを転送する機能も、ブレイン・マシン・インターフェースを考える場合には非常に重要です。こうしたことに対しましても、データをリアルタイムで外にはき出すという、そうした研究ツールは既に備わっています(図36)。そうしたことから、現在、国内でも幾つかの施設で、ブレイン・マシン・インターフェースとして fNIRS を利用するという動きが実際にございます。まだまだ成果としては出ておりませんが、既にそういう研究が行われつつあります。

(図 36)



1.6.3 BMI を実現するための計測技術

こうした光計測による BMI を実現するための計測技術として大事なものは、そのもとになるデバイスの技術であります(図37)。現在、カプセル内視鏡であったり、モレキュラー・イメージングであったり、モレキュラー・イメージングの一種になるかもしれないですが、光のマンモグラフィーであったり、脳機能計測であったり、こうしたいろいろなモダリティがあるわけです。光の持つ特性のどういうものを使うかということを念頭に置きながら、光デバイスで研究を行うわけですが、残念ながら、今、行われているこういう医療分野では、先ほど医療政策という問題もありましたが、なかなか特化されたデバイスが使える

ないということが大きな問題になっています。実際、我々の使っているところでも、最も感度の高いフォトマルチプライヤー、光電子増倍管というものを使っております。半導体化することによって軽量化することができるわけですが、現在、アバランシェ・フォトダイオードですと、微弱な信号ですと、やはり S/N が悪い。増幅率の高い、高感度なということで、シリコン・フォトマルのようなものが出てきておりますが、そうした特化したデバイスの開発が、こうした市場を大きく膨らませるには必要です。

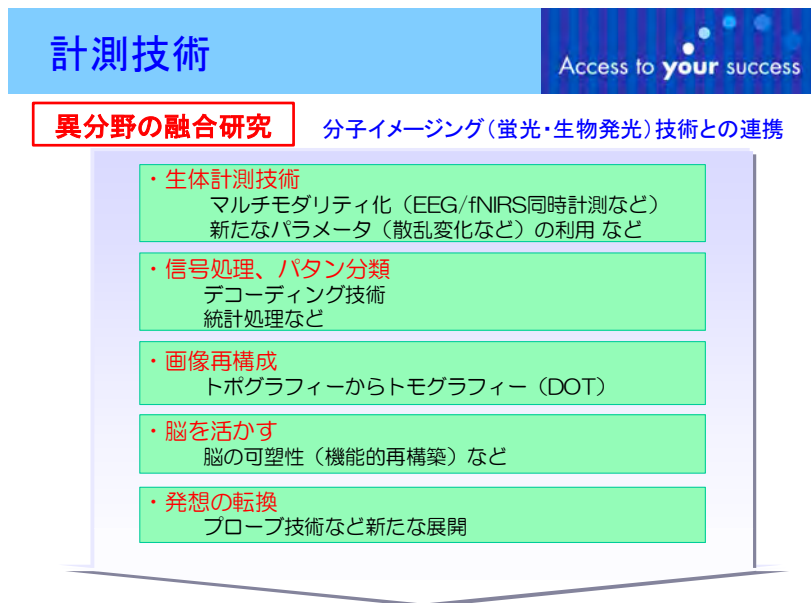
(図 37)



ただ、医療分野といいますと、なかなか市場の大きさから、こうしたものを開発することは難しいということで、**planned innovation approach** という形で、より大きな対象を目標にする中で、こうした分野でのデバイスが開発されれば研究が進むのではないかと考えております。

こうした計測技術について、幾つかのポイントをまとめてみました (図 38)。こうした分野はまさに異分野の融合領域ということだと思っています。光計測では、もう 1 つ、モレキュラー・イメージング、蛍光あるいは生物発光の技術がかなり進んでおりまして、こうしたものと連携は非常に大事になってくるわけですが、ここで挙げましたのは、生体計測技術で、これはマルチモダリティー化ということが 1 つ大きなポイントかと思います。新たなパラメーターとして **fNIRS** で使っておりますのは、オキシヘモグロビン、デオキシヘモグロビンといったところの濃度変化を見るだけですが、散乱変化を見る、あるいは酸素交換を直接見る、そうしたことから新たな計測の信号を出すことができると思います。もう 1 つは、信号処理、デコーディング処理といったところで、これは非常に大事なところでございます。再構成につきましても、先ほど申しましたように、トポグラフィーからトモグラフィーへという変換が起こるということがある。

(図 38)



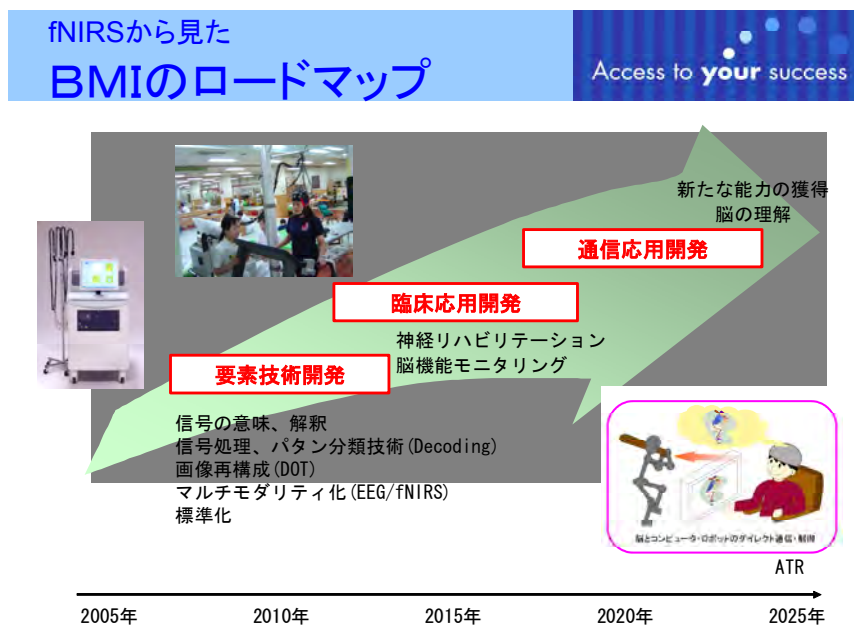
脳を生かすと書かせていただきましたのは、やはり非侵襲計測の場合、どうしても詳細なデータまでとるのは難しいということになりますので、脳の機能をいかに利用するかというところが、こうしたものの最終的な成果に大きく影響するのではないかと。

もう1つ、発想の転換と書きました。これは具体的なイメージはございませんが、モレキュラー・イメージングの場合は、遺伝子の発現レベルを画像化するわけですが、ダイレクトに見るのではなくて、分子プローブというものを使う。先ほどケミカルで見えないかというお話がありましたが、ある意味、そうした形で光の信号に脳信号を変えた後に、光検出器で見る。そうした新たな発想の展開もこういった中では必要かなということです。

1.6.4 BMI のロードマップ

最後は非常に粗いところがございますが、fNIRS から見たロードマップという形で簡単にまとめさせていただきました (図 39)。

(図 39)



以上

1.7 皮質電極計測技術

「皮質電極計測技術」

加藤天美 先生

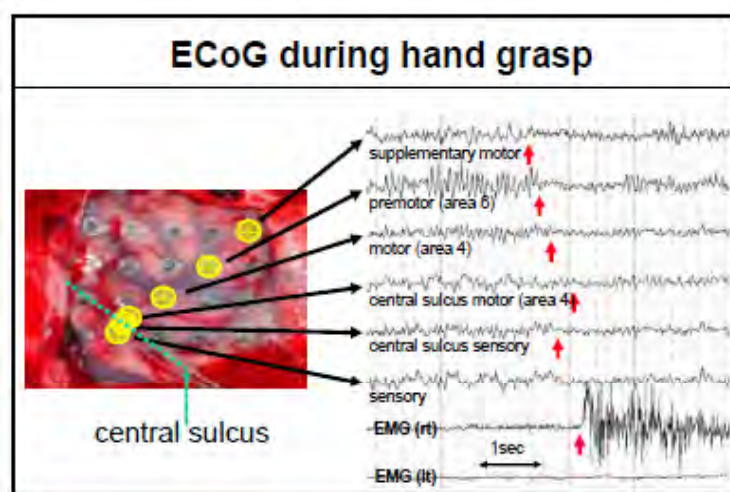
1.7.1 ECoG

私は脳外科医ですので、脳のことを、特に病気の脳がどうなっているかということを知りたい、それを病気の治療に応用したいということが、一番大きなモチベーションです。それで、先ほど電極の話でもありましたように、脳の中に物を刺すというのはなかなか控えられるものですから、手段としては ECoG を使う。これは、入力に関していいですと、神経カラムの電位を直接とらえることができるということが最大のメリットだと思います。それと、もう1つは、かなり広い範囲をカバーできる。余り侵襲とか、技術的な要素がなくても、広い範囲をカバーできて、脳のことがよりわかるのではないかとやっていることです。

確かに ECoG を見てみますと、脳波と同じようなことで、半侵襲型と書いてもらったんですが、これは既に臨床で用いられていまして、今我々が使っている電極では、3 mm ぐらいの有効直径がありますので、神経カラムとして数十個をカバーしているのではないかと考えています。

これは、治療のために脳表電極を入れた患者さんをお願いして、自発的な一定のリアクション運動をやってもらったんですが、supplementary motor area から premotor、それから motor、central circus の中、それから sensory で、目で見てもわかるぐらいに周波数が運動の前から変わってきて、情報の伝達が single event で視覚化できるというのは、実はこれがチャンピオン・データだったわけですが、物すごく驚きです (図 40)。

(図 40)



それで、例えば、握手運動とか、親指を立てるとか、ひじを曲げるとか、多彩ないろいろな運動が、desynchronization の速度というようなものでばっとわかるのかということで、脳表の電極を、これは運動開始 1 秒前を基準として、200ms、それから、その後と

いうのを見てみますと、何かパターンが違うようだ。案外、こういういろいろな運動もこの辺のところから **discrimination** できるのではないかと思ったわけです。

ところが、これをいろいろ解析しても、実は余りいい結論は出なくて、そのときに **ATR** というより高度な分析手段をやってみようという話になりました。これは神谷先生とうちの大学院生がやったんですが（図 41）、中心溝内ですから、一次運動野の **Area 4** のみをデータを使って、トリガーへの運動前後の **500msec** のデータを用いてデコーディングすると、いろいろ3つの運動が九十何%という割合で正解になる。運動前の意図の段階でデコーディングしても、**70~80%**のかなり高い確率で、こんなのだったら絶対に負けないじゃんけんマシンができるのではないか。そんなのはだれも使わないと思いますが、そんなことも考えました。

（図 41）

中心溝内のX1~X4のみ(Support Vector Machine)					
Trigger前後500msecのデータを用いてDecoding					
時間窓(msec)	10	50	100	250	500
正解率 (%)	91.3	91.3	91.3	95.7	84.0
Trigger前500~100msecのデータを用いてDecoding					
時間窓(msec)	10	20	50	100	200
正解率 (%)	78.3	73.9	82.6	76.8	79.7

ところが、私は、電極の数がふえればふえるほど、いい **discrimination rate** が得られるのではないかと思って、ほかの電極などを見てみますと、途端に正解率が下がってくるわけです。神谷先生はグー、チョキ、パーをやっていましたが、我々は握ったり、手首を曲げたり、ひじを曲げたりですが、そういうのが **discrimination** は悪い。ということで、実は脳は確かにいろいろな活動はしているんですが、ある特定の目的にかなうような活動はかなり狭いところでやっているということがわかりました。

今、もちろん針電極でユニット・ポテンシャルをとってというようなお話があつて、みんな一次運動領野に針を突き立てているわけですが、確かにその部分が情報が一番多い。それから、我々はほかにも **coherence analysis** も導入してみますと、動こうと思っている段階というのは、結構、ぼうっとしていて、どういう動きをするかというのは余り考えていないのではないかということまで、こういう電極スタディーでもちょっとずつわかってきたわけです。

1.7.2 ターゲットはてんかん

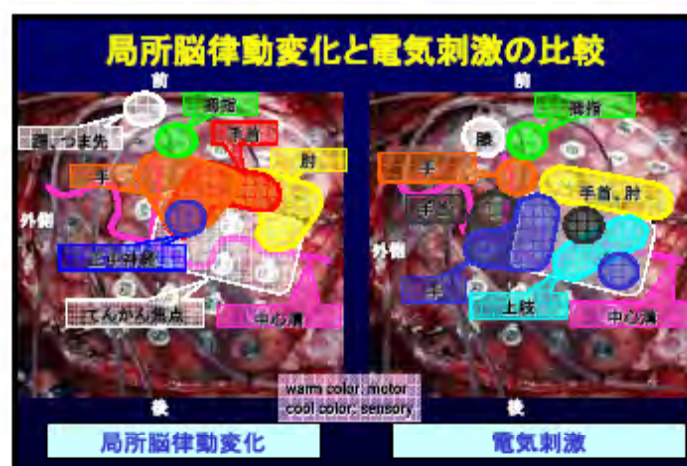
我々のターゲットは、実はてんかん患者が主です。てんかんというのは日本には 100 万人いますが、これは脳のシステム異常です。こういうのが **BCI**、**BMI** でわからないかとい

うことで、余り侵襲的なことをやると喜ばれないんですが、我々は患者を治療する立場ですから、いろいろやっています。

この患者さんは、実は一次運動感覚野に異常があることがわかっているんですが(図 42)、その部分に脳の機能が宿っていると手術できないということになりますので、こういうスタディーをやってみたわけです。もうちょっとベサートというソフィスティケートされたアナリシスを使いますと、確かに β 領域の **desynchronization** はあるんですが、**high-gamma** の領域の **synchronization** の方がかなり **distinct** にわかるのではないかな。

この辺のところは、実は **brain research** に去年ぐらいに試しのものが出ていたわけですが、これは、結構、**ECoG** を使うに当たって、**high-gamma** に注目するということがいいのではないかな。それを検証してみたんですが、我々は電気刺激で脳の機能を一時的に刺激したり、麻痺させたりして、その部分にどういう機能が宿っているかというのを見るわけですが、局所脳律動変化だけで判定したのがここです。電気刺激でも同じところに、親指の運動の領域があるということがわかった。手の領域に関していうと、こういうことがわかった。要するに、この部分を刺激すると、手がびくっとしたりということですが、律動変化はこういうふうにプレゼンテーションされる。かなりいいわけです。

(図 42)



そういうことで、**ECoG** は、場所だけではなくて、周波数変化、パワーの変化、いろいろなパラメーターがありますので、物すごく私はいいなと思っているわけですが、結局、こういう形でうまく対照されます。

てんかんというのは脳のシステム異常で、さっきの知情意ではないですが、大きな影響を与えるものですから、単に運動とか、感覚とか、あるいは機能領域の探究だけではなくて、てんかんの人に一体何が起きているのかということを見るというのは、かなり臨床的にも **justification** されますし、こういうものからより新たな **BMI**、**BCI** ができたらなと、これはマイナーな意見ですが、私は思っています。

以上

1.8 ロボットメカニズム

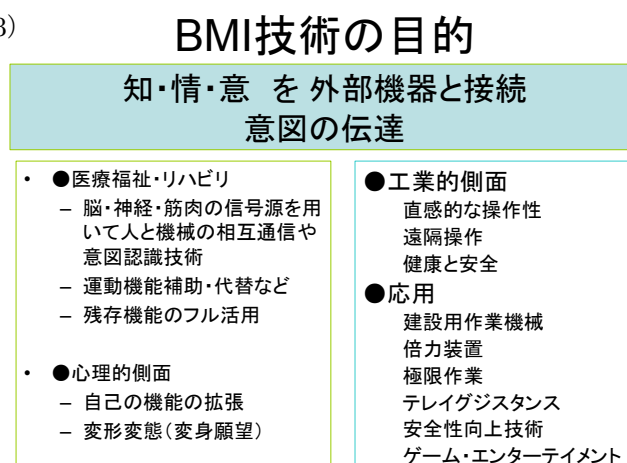
「BMI への期待と展望 -技術的裏づけと日本の役割-」

横井浩史 先生

1.8.1 BMI 技術の目的

私が考える BMI 技術の目的としましては、一言で言うと、知・情・意を外界と接続するための意思伝達の方法を何とかしようということです（図 43）。こういったものが実現しますと、恐らく最も医療・福祉とか、リハビリとか、こういったものに役に立つでしょうし、当然、工業応用としましては、**hazard environment** に対する対応とか、力の補助とか、または人工現実感みたいなもの、通常は経験できないような環境の印象までつくり出すようなことなど、さまざまな応用が考えられるのではないかと考えられます。もう 1 つ、これは最後の方に指摘したいんですが、心理学的な側面という意味で、自分の機能が拡張されることによる、人間としてこれまで味わったことのないような世界へ我々を導いてくれるのではないかと。また、変身願望みたいなものをかなえてくれる、そういった可能性、または危険等があるのではないかと考えています。

（図 43）

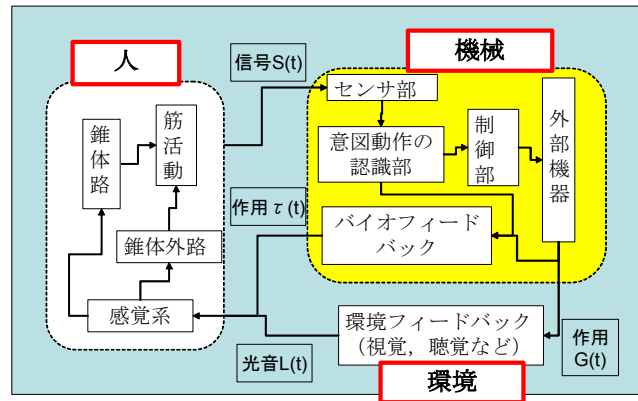


1.8.2 BMI のシステム像

今後、つくっていかねばいけない BMI のシステム像としては、こんな感じになります（図 44）。片山先生が指摘されたように、人間を、脳だけとらえるのではなくて、その中の筋活動まで、そして環境への総合作用までを想定して考えて、全体の BMI 像を考えていかなければならないのではないかと考えています。小池先生が研究されているような筋活動、そして脳のモデルのこういったもののコラボレーションなども非常に重要な方向性になるのではないかと考えています。

(図 44)

BMIのシステム像



私の視点としましては、どちらかという、機械の領域に集中しておりまして、いかにしてセンサーをつくり、意図推定、認識部、情報処理の方を何とかしていこうかということに集中しております。そのときに、できるだけ人間の脳活動、または身体活動に適合するような情報処理をつくっていききたいと思っておりますので、うまいフィードバックを考えまして、これまで人間が身体を経由して、身体感覚系を経由して、環境を見てきたものとほぼ等価な入力となるようなものをうまくつくって、人間をうまくだましていこうという視点で考えていきたいと思っております。

また、こういった BMI 技術ができていきますと、恐らくこんな種類の社会貢献ができるのではないか、及び、その達成の年限はこんな形になるのではないかというのを表にまとめてみました (図 45)。

(図 45)

BMI技術の社会貢献の形

分野	内容	緊急度	技術	経済効果	期間
運動機能再建・代替	・医工連携の代表的形態 ・身体障害・脊髄損傷・抹消神経系欠損・身体切断・本態性震蕩・筋萎縮性側索硬化症	高	脳計測精度 残存機能探索	少	5~10年
運動機能補助	・機能低下・高齢化に伴う運動機能と記憶能力、視聴覚など知覚系の疾患	高	筋電計測	中	3年~5年
神経系の再生	・神経活動との同期的フィードバック	高	時間分解能	少	5年
直感的なインターフェース応用	・複雑化高機能化する被動機器 (例えば、家電・自動車・建設作業機器) などの入力装置 ・モバイルテクノロジー	中	安全性	大	10年
コミュニケーションツール	・手紙から電話に代わる「密」なコミュニケーション手段 ・情動や個別知覚などの人にとって基本的に直接的な情報の伝送	低	コーディングの問題	大	3~6年 20年(複雑な場合)
外部記憶装置	・文字または映像により情報提示とフィードバック	低	情報の表現方法	大	5~10年

まずは、医療目的に類する部分です。運動機能の再建、代替、補助。これはパワード・スーツみたいな形でかなり実現されてきています。そして、あとは神経の再生。これは入

出力関係を、うまく同期的な形態を保証することによりまして、神経の再生を促すような方向で進歩していくのではないかと考えています。この上位3項目は、最も緊急度が高く、またこういったものを人間として失ってしまいますと、そういったものを何とかして復活させようとする希望が出てきますので、これを何とか早く実現して欲しいなと。また、日本としてもこういった方向で研究を進めて欲しいなと思っております。

一方、先ほど来、出てきていますコミュニケーション・ツールやインターフェース、直感的なインターフェース、こういった部門がありまして、これは自動車や建設機械などの入出力装置と考えられますので、経済的な効果が非常に大きいということで、それほど急ぐ話ではないんですが、日本の通商産業省系の考え方、センスからいいますと、こちらを急いで、少し日本の税収入をバックアップしたらよろしいのではないのでしょうかというセンスもあるかと思います。

あとは、こちらは緊急度は非常に低いんですが、きっと経済効果としては大きい。電話などにかわる手段です。ここで情動や個性や知覚といったものを伝送できると、非常におもしろい世界が待っているのではないかと。そういうものにきっと若者は大きく飛びつくのではないかと考えられます。恐らく脳の深部などで発生するような感情に関係するようなところの detection は、恐らくそんなに難しいことではないので、3～6年で試験的なシステムは実現できるのではないのでしょうか。ところが、そこで電話にかわるとなると、きっと20年以上かかるのではないかと考えます。

恐らく最後にこの外部記憶装置というものがあまして、これまで我々は文字または映像といったものによって情報伝送してきましたが、それを脳からの直接信号によって表現しようという問題が出てきます。これができますと、恐らく大きく情報の伝送の方法が変わってきて、人類がこれまでのほ乳類とは大きく異なる進化形態をとり得る——それがいいか、悪いかは別としてですが、そういう形態になっていくのではないかと考えます。

その中で、私として最も科学技術として進めたいなと思いたいのは、こういった方向性でありまして、自分の中にどれだけの機能が残っているだろうかということ、を、老若男女、障害者を問わず、計測できるような手段としてできてきますと、多分、生きていくためのモチベーション、そして、我々が年をとっていても、健康に、そして楽しく生きていけるための保証みたいな安心感を与えてくれるのではないかと考えています。

その中で必要とされる技術としましては、恐らくトレーニングを続けていった結果、目的の機能が達成できるのかどうかという、この観点、習熟度と呼ばれるようなものです。そして、そういった機能が達成されて、それが自分の目的と合致するのかどうかという、そういった客観的な評価が欲しい。そして、老化防止。筋力が低下していくのはしょうがないので、それをうまく補助力によって補って、脳の機能の低下を防ぎましょうという意味での老化防止へつなげたらいかがでしょうか。そして、あとは制御能力。現在、自分が持っている制御能力がどの程度で、どこをどう活性化させるとどのように変わるのか。そういったものの運動制御——私の分野では運動制御を載せてしまいましたが、もちろん感

覚、そして情報処理を含めてできるといい。最も期間的に早くできそうなのが、恐らく運動制御の機能になるのではないかな。

あとは、これはいいかどうか、わかりませんが、超人間的機能の探究が科学的興味として恐らく出てくるでしょう。今、手はほぼ 70 度、指まで入れますと、プラス 20~40 度ですが、それ以上の運動自由度を持った場合、こういったことが自由に操作できる人間も出てくるでしょう。そういったものが出てきた場合に、どのような世界が成り立つかということが、シミュレーションできるはずです。

1.8.3 BMI を支える技術

では、こういった BMI を支える技術としまして、どんなものがあるかといいますと、上から順に、まず計測。これは、先ほど清水先生からお話がありましたような、非侵襲の計測。そして、加藤先生のやられている ECoG。非常に精密な情報がうまくとれて、この情報処理の方法論が確立すると、あれが最も望ましい方法になるのではないかな、直接的な方法になるのではないかと私も考えます (図 46)。

(図 46)

BMIを支える技術

①脳・神経活動の計測

- モバイル環境下での意図・情動・身体運動など情報の計測

②情報処理

- 随意運動意図を推定し解析するための情報処理法
- 身体性の解析法(随意運動系と不随意運動系の関係)
- [生体反応に適合する学習理論や評価法\(個性適応\)](#)

③アクチュエータの設計

- 軽量・柔軟・即応性を備えた装着型の駆動系

④被動機器との接続

- [干渉駆動系](#)の構築と意図動作との接続関係の構築

⑤情報フィードバック

- 非動機器の状態や環境との物理的相互作用を[フィードバックするための情報提示法](#)

⑥これらの統合システム

- 各種応用に適合するシステム構成

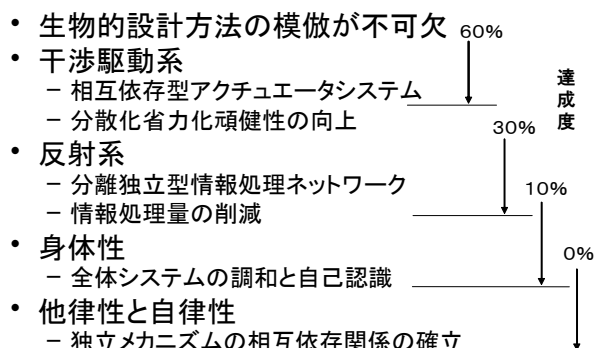
そして、あとは、身体性を保証したアクチュエーター。こういったアクチュエーターを備えた非同期との接続。こういったことを考えていかなければならない。うまく情報をフィードバックして、脳を操作したり、使いやすい状態になるように保証するような方法。これらを統合するようなシステムが必要となるでしょう。

1.8.4 ロボット工学的課題

では、ロボット工学的にそういったアクチュエーター系をうまくつくっていくにはどういうロードマップがあって、どの程度の達成度に現在いるかというのを、ざっと感覚的に示してみました (図 47)。

(図 47)

ロボット工学的課題



干渉駆動系に関しましては、東工大のロボット系の先生たちが長年にわたって研究し、今、多分実用化も含め、60%ぐらいの達成度になっているのではないかと考えられます。そして、反射系という形で筋肉の運動に直接対応するような独立型のモーターをそれぞれの関節に配置して、自分の力を補助してくれるような装置に関しては、価格が高いということを差し引いても大体 30%。それに対して、今度は身体性、ロボット・システムを自分の体に装着したときに、それが自分の体に適合しているか否かについての研究、及び、そのディスカッションというのは、ほとんどなされていないといいますが、スイスの人工知能研究者のロルフ・ファイファー先生や、あとはアメリカのロドニー・ブルックス先生や何かもさんざん 20 年近く前から言っていますが、何の進歩もないというのが現実で、脳と機械がつながることによって、やっとうこういったことが研究の土壌に乗るのではないかと考えております。

あと、最後に、どうしても欲しいのが、この自律性と他律性です。ここで、今、アクチュエーター系も情報処理系も分散化されて、非常に膨大なものになってくるんですが、これが自動的に動く反射系を構築していながら、全体として調和を必要とする身体性を有しなければならないということで、こういったものの自律性全体を、他律性と自律性がうまく調和するようなシステムを構築しなければならないと考えています。

1.8.5 情報处理的課題

情報处理的な問題はこのようになっていまして、まずは入出力系になれのモデルをうまく入れなければならないだろう (図 48)。それから、認識系では、うまく人間が何を考えているかを、個性適応の識別のアルゴリズムをうまく組むことによって、個人個人が全く別の反応をしても、それに対して応答できるようなシステムを組まなければならない。そこへ反射系みたいなものを導入しまして、反射系に対する対応も考えられなければならないので、身体上、**reorganization** が起きた方たちに対しても、刺激－反応マップをうまく作

成し、どんな方にも対応できるようなシステムを組んでいきたいと考えています。

(図 48)

情報处理的課題

個性適応・意図推定の研究レベル.

レベル1: 入出力系 5年～10年

- ・ 人の皮膚や筋肉の変形や疲労など生化学的な変性
- ・ 神経系の切断や損傷による知覚不全や運動意図の伝達不全.
- ・ 対策: **馴れモデル**の構築

レベル2: 認識系 8年～12年

- ・ 意思決定や情報処理の柔軟性や曖昧性などに代表される脳の可塑性(錐体路系).
- ・ 対策: **個性適応型の識別アルゴリズム**の構築

レベル3: 反射系 10年～15年

- ・ 反射系の再組織化による不随意運動経路の発生(錐体外路系)など, 生活パターンによって変化.
- ・ 対策: **刺激反応マップ(身体応答地図)**の作成

1.8.6 ロードマップ

これらをまとめますと、ロードマップはこうなっております(図 49)。1つだけ言いたいのは、倫理的課題が存在しまして、多くの人たちがサイボーグという言葉を使いますが、サイボーグが出てくることによって、心理学的なプロセスの中で、我々は一体何者であろうかという概念がきっと問題点として出てくるのではないかと考えております。

(図 49)

主要な研究項目(ロードマップ)

①脳の可塑性

- － 脳は、体調や生活様式などの変化に敏感に反応して、その活動状態を大きく変化させるため、運動や感覚などの賦活パターンを安定的に定位すること

②情報処理能力

- － モバイル環境下で膨大な脳情報を解析処理するためのコンピュータの開発.

③ロボット技術

- － 軽量化, 高出力化, 超寿命化, 安全性など

④環境ノイズ対策

- － 日常生活下では、さまざまなノイズが混入することが予想されるため、安全な被動機器の可動を保障すること.

以上

第2部 BMI 研究開発を構成する要素に関する討議（討議録より抜粋）

2.1 侵襲型と非侵襲型のリスクとベネフィット

- 現在、侵襲型、非侵襲型と大まかに分かれているのは、それなりにわかりやすい視点だが、要は、時間・空間解像度が高い神経活動を取りたいという侵襲型と、安全性を重視したいという非侵襲型というイメージが一般的な認識である。
- 将来的には侵襲型も安全なものを目指し、非侵襲型も時間・空間解像度の高いものを目指すという意味では、ゴールは恐らく両方が持っている、あるいは中間型のものではないかと考えている。そういう意味では、今の段階でも両方の研究をバランスよく続けていき、最終的には侵襲、非侵襲というような区分ではない、安全で脳内からもとれるというような電極、あるいは記録方法を目指していくというのが、1つのやり方と考える。

2.2 侵襲型が非侵襲型より精度の高い情報を出せるというのは本当か？

- 侵襲型の方が非侵襲型より、より精度の高い情報を出せると思われているが、実はそうでないという発表も多い。
- 大体、侵襲型の方は非侵襲型の悪口を言って、逆もまた真なりというのが、アメリカの人で、決着がついているわけではない。ただ、時間・空間の解像度を考えれば、原理的に言えば、針を刺した方がいいに決まっているだろうと私たちは思っているが、実現したシステムとして本当にそうかどうかというのは、また別の問題である。
- 結局、BMI、BCI というのは3つの要素があると多くの人が考えている。すなわち、アルゴリズムが学習する部分と、脳自身の可塑性というか、いわゆるバイオフィードバック的な、あるいはオペラント条件づけ的な脳が変化する部分、そして脳の中にもともとある自然な情報である。現在はこの3つの要素にどの方法も頼っているとは思いますが、そのうちどの方法を推し進めるのがどういった目的に合っているのかということを議論せずに、優劣を議論することはできない。

2.3 電極の課題

- 電極は、侵襲型、非侵襲型という前に、結局、何を求める電極なのかということが問題。つまり用途、目的が何かが重要である。例えば一次シグナル、つまり電流、電圧をとるのか、それとも二次シグナルで、いわゆる代謝性のシグナルをとるのか。また、運動制御や、脳の表象というのは何を表現しているのかということを見ようと思えば、一次シグナルを見る必要が出てくるが、yes/no あるいは go/no go みたいなタスク、課題であれば、二次シグナルのレベルでも済む可能性もある。それによって侵襲型、非侵襲型を選択すべきである。
- 刺入型電極についてだが、例えば、ある部位だけ機能表面があって、部位別の生体適合性といったことはかなり先の話のだと思う。ただ、バイオ MEMS という分野が

あって、特に最近、進歩が激しく、細胞膜、例えば、ギャップ接合とか、そういったことが、数年とか、10 年とか、そういった単位で電極の表面につけられるようになるのではないかと考えている。

- 脳表にべったり置く電極を使っているが、これがそれなりの用途で使われる可能性があるとするならば、頭蓋骨が一番、脳波と ECoG を分ける 1 つの隔たりとなる。頭蓋骨に細い穴をロボット技術であけて、頭皮下で線を束ねるやり方が、もしかしたら最も実用的な方法かもしれない。
- 記録型電極の分子イメージングを提案したい。例えば、**voltage sensitive dye**、膜電位感受性色素というのを使って、神経活動、膜電位の変化、つまり、神経の一次信号そのものをとらえて、時間・空間的な解像力がある程度満足できるものをもって使用しているが、そういうものを生体に応用できるだろうかということを考えたことがある。
- 今の NIRS の持っている限界、EEG の持っている限界、それを突破するには、様々な融合技術を組み合わせて、新しい検出系をつくっていくという必要がある。

2.4 推定アルゴリズムと外部機器

- 運動機能の実現においては一次感覚運動野がターゲットになるが、非侵襲でとる場合に、こういった信号が何を意味しているかが全くわからないので、実際には侵襲型も計測している。
- 電極を刺す方がデータが取りやすいという意見があるが、例えば、腕をコントロールする信号をとりたいと思ったならば、筋電からとった方がよさそうに思う（素人考えでは）。情報処理ということを考えると、ソースがあって、情報が伝わっていく先でどんどん情報は劣化する。しかし、中枢で腕を動かしたいと思っていて、末端の方が情報をとれるということは、プロセスとして逆。末端の方のノイズが少ないことになる。したがって、実際の脳の計測として、電極を刺していけば、大ざっぱでブローラな情報があつた方が役に立つかもしれない。
- 長年筋肉の活動は筋電図をはかってきたが、筋電図をはかれば、腕の運動などが力も含めてよく再現できる。したがって、筋肉の活動をとった方が運動は再現しやすいと思う。ただ、それだけではわからないものがあって、何をゴールとして運動しているのかというのは、筋電図だけだと途中ではわからない。それは脳の情報にはあらかじめあるにもかかわらず、筋電信号ではとれないので、そういうものをとろうと思うと、どこでとったらいいかはわからないが、脳の中でとらないと多分できないと思う。
- 情報の量と質の問題に集約される。量は多くても質が悪ければ役に立たない。それで、量が多ければいいが、質が高くてはいけない。その質をどうやって保証するかという方法に 2 つあるということで、質を高めるのにあらかじめその情報の意

味を突きとめておいて質を高めるという方法、これは神経科学的に正当なアプローチで、モデルを明確にして、情報の質を高めるということ。もう一方のやり方は、脳に情報の質を高めてもらうよう、学習してもらうというやり方。この2つが大別されている。

2.5 基礎研究の重要性

- 侵襲型と非侵襲型の関係だが、特に脳科学をやっている立場からすると、そこで記録されている神経活動が何を意味しているかということ自体が、まだ十分に理解されていないという状況である。また、ECoG や脳波がどれだけ神経活動の何を反映しているかということもよくわかっていないという状況であるから、実際、その神経の1個1個のニューロン活動と ECoG ないし脳波がどういう関係にあるかというその基礎研究が全くまだ非常に遅れていると感じている。そのところを改善することによって、BMI を動作するアルゴリズムの飛躍的な発展が望めると考える。

2.6 BMI 技術のヒトへの応用

- 人工網膜は記録するというよりは刺激するための電極で、記録電極と刺激電極で大きく違うのは、刺激電極の方は、電荷注入能力ということを考えると非常に制約があるということ。つまり、非常に小さな電極にしてしまうと、抵抗が高くなるので、十分な刺激が与えられない。したがって、余り小さいものはできない。そういう中で、実際、ヒトに応用するに当たり現実的には侵襲型しかあり得ないと考える。
- 試行的に患者へ使用する場合、その前提条件は、患者さんが物すごく困っているということで、わらをもつかむような気持ちで、現在の状況から抜け出したいと思っているということが1つの条件だと思う。
- リハビリテーションの分野では、非侵襲的な磁気刺激というのはかなり世界でもやられており、基本的なロジックは、病変半球を刺激することによって賦活するという考え方と、非病変半球を抑制することによって半球間抑制をとって、病変半球を相対的に上げるという考え方である。そこで使われているのは、TMS と direct current, nodal direct current を使う。それから、やや侵襲的になるのは、硬膜下ではなく硬膜外になるカンサスシティーのヌード関連で、実際、患者さんに使って治験が進められているという話を聞いている。

2.7 脳の可塑性

- BMI の出力装置を補綴装置として使う場合には、あらかじめ補綴すべきものがあった場合にどう働いていたかというのがわからないことがほとんどである。したがって、ナチュラルなことはある程度知った上で、可塑性があることを前提にした設計にしておかないと、実際問題としては使えないのではないと思う。

- BMI といった場合の可塑性というのは、余り不用意に使うべきではないと思う。というのは、全くありもしない領域が考えられない機能を発揮するということはまずないわけで、例えば、一次運動野を電気刺激することによって精神症状が出てくるとか、あるいは、ペイン・クリニックになるというのは、非常に **unlikely** な話である。しかし、それは実際に起こっている。では、何が起こっているのかということで、それは真摯な目できちっと解析していかなければいけない。

第3部 総合討論（討議録より抜粋）

3.1 日本でなぜBMIをやるのか？

- 今アメリカやドイツで進んでいるBMIやBCIの研究で答えが出ているのだったら、確かに追いかけてもむだなかなと思う。しかし、全くそうではない。電極の劣化の問題や性能の問題、あるいは、ごく一部の被験者しか使えるようにならないとか、たかだか0/1の制御しかできないとか、BMIに関しては長期安定の問題が全く残っている。すなわち今あるBMIやBCIが最終型ではない。今から十分研究して日本がトップになれる部分はたくさんあると考えている。

3.2 日本の強み

- まずシステム神経科学の非常に強い研究の系譜がある。また計算論の歴史もある。それから、島津さん、日立さん、横河さんのような非侵襲型の脳活動計測装置をつくって売っている大きなメーカーもある。非侵襲のデコーディングに関しては、日本でも質の高い成果が出ており、ロボットに関しては世界のトップであることは間違いがない。

3.3 推進上の問題点

- 日本発で治療技術を構築しようとする、侵襲型の場合はどうしても体の中に植え込まなければいけない部分があり開発は難しい。
- 国内で開発しようとしたときに、いかに早く認可がとれるかといったところのバリアが取れないと、基礎研究はあってもなかなか産業化に結びつかない。

3.4 プラットフォーム

- 電極でもいろいろなことが全国に散らばっていて連携していないということがある。アメリカと違うお金のつぎ込み方として、例えば、BMI特区のようなものをつくって、プラットフォームを構築する。意外と今ある日本の技術だけで、いろいろな社会的障害が取り除かれて、一気に爆発するようなことがあるのではないかと前々から考えている。

3.5 異分野融合

- 融合的、学際的ということを考えたときに、ロボティクスのサイドや、IEEEにもう少しなじみがあり、リハビリテーション工学や医療工学に精通したような立場の研究者の参画が必要であると考えている。

Appendix

参考資料B. プログラム

9 : 0 0 ~ 9 : 3 0 : 挨拶、趣旨説明、BMI 研究動向の概要説明

(JST/CRDS 担当者)

9 : 3 0 ~ 1 2 : 0 0 : 話題提供者プレゼンテーション (発表 1 0 分、質疑 5 分)

「BMI から生みだされると期待される重要な社会的価値」とその実現プラン

飯島敏夫先生：出力型BMI (侵襲型)

神谷之康先生：出力型BMI (非侵襲型)

不二門尚先生：入力型BMI (人工感覚器)

片山容一先生：入力型BMI (脳機能の操作・回復)

鈴木隆文先生：デバイス技術

清水公治先生：非侵襲計測技術

加藤天美先生：皮質電極計測技術

横井浩史先生：ロボットメカニズム

1 2 : 0 0 ~ 1 3 : 0 0 : 昼食

1 3 : 0 0 ~ 1 4 : 5 0 : BMI 研究開発を構成する要素に関する討論

1 4 : 5 0 ~ 1 5 : 1 0 : 休憩

1 5 : 1 0 ~ 1 7 : 0 0 : 総合討論

参考資料C. 参加者リスト

BMI ワークショップ参加者リスト

【日時】平成 18 年 11 月 27 月(月) 9 時～17 時

【場所】科学技術振興機構 研究開発戦略センター 2階会議室

【コーディネータ】

○川人 光男(株式会社国際電気通信基礎技術研究所 脳情報研究所

【外部討議者】

飯島 敏夫	東北大学大学院 生命科学研究科
池田 思朗	情報・システム研究機構 数理・推論研究系
伊佐 正	自然科学研究機構 生理学研究所
入来 篤史	理化学研究所 脳科学総合研究センター
片山 容一	日本大学 医学部
加藤 天美	大阪大学大学院 医学系研究科
神谷 之康	株式会社国際電気通信基礎技術研究所 脳情報研究所
河野 憲二	京都大学大学院 医学研究科
北澤 茂	順天堂大学 医学部
小池 康晴	東京工業大学 精密工学研究所
佐倉 統	東京大学大学院 情報学環・学際情報学府
清水 公治	株式会社島津製作所 経営戦略室
鈴木 隆文	東京大学大学院 情報理工学系研究科
高田 昌彦	財団法人東京都医学研究機構 東京都神経科学総合研究所
長谷川 良平	産業技術総合研究所 脳神経情報研究部門
福士 珠美	科学技術振興機構 社会技術研究開発センター
不二門 尚	大阪大学大学院 医学系研究科
宮井 一郎	特定医療法人大道会 森之宮病院
室山 哲也	日本放送協会 解説委員室
横井 浩史	東京大学 工学部

(50 音順、敬称略)

科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ
「ブレイン・マシーン・インターフェース（BMI）」分野
報告書

平成 19 年 3 月

独立行政法人科学技術振興機構
研究開発戦略センター
江口グループ

Copyright 2007 by CRDS/JST

無断での転載・転写を禁じます。

