

し、試作機よりも小型の LED フリッカーを新規に開発し、用いた (図 2)。視覚刺激提示面のサイズは 4cm × 4cm である。まず、健常者 (12 名) を対象とし、30-70Hz (5Hz 刻み) の周波数帯域における SSVEP の応答を検証した。ここで、先行研究において、点滅視覚刺激によって誘発される脳波 (P300) を利用した BMI システムでは、点滅刺激の「色」が操作制度に影響を与えることが示唆されており、また提示色間の「輝度差」も脳波誘発に重要な要素であることが報告されている (Takano et al., 2009, Clin Neurophysiol)。これらの知見を踏まえ、本実験においては、① LED flicker 提示刺激の色は緑/青の交替点滅方式とし、②青緑間における輝度差は、「青高輝度+緑低輝度」「青低輝度+緑高輝度」「青緑等輝度」の三種類の条件を採用した。

#### B-b. 高周波刺激による BMI システム操作

続いて、「青低輝度+緑高輝度」の輝度差刺激を用い、BOTAS の制御実験を行った。刺激の周波数は「41, 43, 45Hz; visible condition (臨界融合周波数以下の刺激)」と「61, 63, 65Hz; invisible condition (臨界融合周波数以上の刺激)」を採用した。この BMI システム操作課題には、健常者 12 名および脳卒中患者 (右上肢片麻痺) 1 名が参加した。



図 2: LED フリッカー (小型機)

### C. 研究結果

#### C-a. 高周波帯域における SSVEP 特性

等輝度の刺激を提示した際には、高周波帯域 (55Hz 以上) では SSVEP の誘発が認められず、BMI には不向きな刺激様式であることが明らかとなった。一方、両色間に輝度差が存在する条件では、70Hz 程度まで周波数を上げて SSVEP が誘発されやすいことが確認された。

また、各刺激に対する不快感を visual analog scale を用いて被験者に回答してもらった。その結果、臨界融合周波数以下の刺激では、等輝度条件が一番低い不快感を示した。しかしながら、60Hz 以上の高周波刺激を提示した際には、今回採用した 3 種類の輝度差条件間において不快感の差はなく、どの刺激に対しても低い不快感を示す回答が得られた。

#### C-b. 高周波刺激による BMI システム操作

健常者を対象とした実験では、visible および invisible condition の両条件において、高い精度での BOTAS 制御に成功した。それぞれの条件における平均識別精度は、93% (visible) ならびに 88% (invisible) であった。さらに、各条件における BOTAS 制御実験課題遂行前後において、目の疲労を測定するため、フリッカーテストを行った。その結果、visible condition における約 40 分の BOTAS 制御課題遂行に伴い、臨界融合周波数が 55Hz から 52Hz へ減少することが確認された。一方、invisible condition では、同じく約 40 分の BOTAS 制御課題遂行後においても、臨界融合周波数の変化は認められなかった。

脳卒中患者が参加した実験結果では、識別率は visible condition で約 89%、invisible condition で約 83%と比較的高い識別精度を示した。また、課題遂行前後に実施したフリッカーテストでは、visible condition においては約 4%の臨界融合周波数の低下が認められたが、invisible condition では不変となり、健常者と同様の傾向を示すことが確認された。

#### D. 考察

健常者ならびに脳卒中患者による実験結果から、SSVEP を用いた BMI システムでは、脳波を誘発するための視覚刺激に関する色や輝度差を適切に調整することが重要であるといえる。このようなパラメータ調節の結果、高周波帯域の視覚刺激が採用可能となり、

装着者が刺激のちらつきを知覚することなく BMI システムを利用することが可能となった。

特にヒトの知覚特性として、臨界融合周波数の低下が、目の疲労を反映しているという知見を踏まえると、60Hz 以上の視覚刺激は、SSVEP を用いた BMI に非常に適した刺激であるといえる。つまり、将来 BOTAS によるリハビリテーション訓練を行う場合にも、比較的長時間の利用が容易となったといえる。このような脳の視覚情報処理特性を踏まえてリハビリ機器を構築することで、臨界融合周波数以上の高周波帯域でも制御精度を保ちつつ、かつ目の疲労を生じさせにくいような、実用性を有した系の実現が可能となる。

## 分担研究課題（小課題）：BMI用脳波電極の開発

### A. 背景と目的

BMIに用いる電極は、従来の脳波測定に比べてより日常的に、かつ長時間にわたって連続的に使用されることが予想される。そのため、装着や取り外しが容易であること、電極交換の手間がかからないように数日乃至数週間の長期にわたって連続的に装着可能であること、頭皮への負担が少ないことなどの諸条件を満たすものでなくてはならない。

しかし、これまでに用いられている脳波測定用電極は、頭皮と電極との間のインピーダンスを下げるために、使用前に電極の上に導電性ペーストを充填するものが多く使われている。ペーストを使用する場合、頭髪が電極と頭皮との間に挟まっても、ペーストが頭髪の裏に回り込むため電極と頭皮との間の導通が確保される。しかし、ペースト式電極の場合、装着の度に電極にペーストを充填するので手間がかかる他、電極を取り外した後に頭髪や頭皮に残るペーストを除去しなければならない。このため、ペーストを使用しないペーストレス型電極が求められている。

そこで、本研究ではBMIに使用可能な電極の開発を行うことを目的とした。理想的には、目的とするペーストレス電極は以下の性質を満たすべきである。

- ①十分な柔軟性を有することで、頭皮上で加圧すると髪の毛の間を容易に通り抜けて頭皮に達すること。
- ②使用後に頭皮や髪の毛に残留しにくいこと。
- ③高い導電率を有するとともに使用中に成分の乾燥などにより導電率の低下が起こ

らないこと。

- ④頭皮に接触しても危険性がないこと。
- ⑤長期保存が可能であること。

我々は、昨年度までに導電性ゲルを用いた電極がBMI電極として有効であることを見出している。これは、一種の保水性の高いゲルである。使用の際に脳波の測定部位に貫通孔のある専用のヘッドキャップを被り、この貫通孔にチップ形状のゲルを挿入して上から銀塩化銀電極で蓋をする。電極を押しつける際に、髪の毛の間をゲルが変形して通り抜け皮膚に達する。このときゲル自体が導電性なので、電極はゲルを介して頭皮と電気的に繋がることとなる。ゲルは適度な粘弾性を有するために、上記の様に押し付けるだけで変形して頭髪の間を通り抜けるばかりでなく、従来の導電性ペーストとは異なり、使用後も固形のままなので簡単に除去することが可能である。保水性も高いので、使用中に乾燥することなく長時間の使用が可能であり、乾燥により髪の毛や頭皮に固着することもないという特徴を有する。また、密閉容器に入れている限り、長期保存が可能であることも見いだしている。

この様に優れた特性を有するものの、これまでチップ形状のゲルを作製するのに多くの手間がかかり、被験者の数や頻度を増やして臨床試験を実施しようとしても供給が迅速にできないという問題があった（これまでは大きなゲル塊を作製し、そこからゲルチップに抜き型を刺して一個々々手作業で取り出していた）。また、この方法では作製されるチップの形状やサイズが必ずしも同じに



ならなかった他、抜き型を差し込むときに削りカスが生じ、これがゲルチップ使用後に除去する際にゴミとして頭髮に残る場合があった。そこで、本年度は効率的に導電性ゲルチップを作製する方法を検討した。

## B. 方法

導電性ゲル電極は、まず材料を混合し、液状のままディスペンサーシステムにセットして分注し、最後に加熱処理をすることによってチップ化した。図1に使用したディスペンサーシステムの外観を示す。同システムは、複数の装置から成り立っているが、大きく分けるとディスペンサー本体とそのコントローラー（武蔵エンジニアリング、ML-5000XII）、ディスペンサー本体をXYZの方向にシーケンス制御で自動運転するロボットシステム（武蔵エンジニアリング、SHOTmini200s）、ディスペンサー内の液が沈殿しないようにする攪拌機（武蔵エンジニアリング、RMU-02）、およびディスペンサーにエアを供給するコンプレッサーなどからなる。また、分注に用いた型には生化学実験用のサンプルチューブホルダー（64穴）を用いたが、完成したゲル（固形）を取り出し易くするために、穴の底を抜いて全て貫通させた。ディスペンサーシステムにホルダーをセットする際には、これら貫通孔をあらかじめマスキングテープ（粘着性が低い）で塞いでおき、ゲルが固化後にテープを剥がし、孔の片側から押し出すことで取り出した。

## C. 結果と考察

ゲル化前の材料液は、均一な液ではなく、材料が分散した液体である。このため、常時攪拌しないと、作製後のゲルチップの性状が

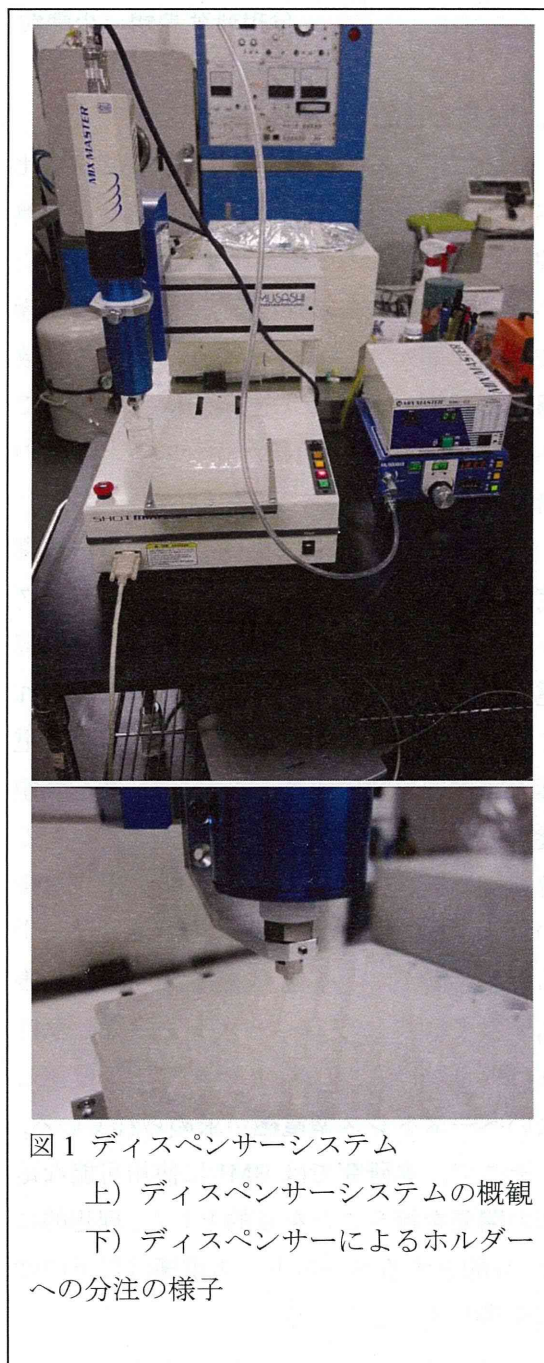


図1 ディスペンサーシステム

上) ディスペンサーシステムの概観

下) ディスペンサーによるホルダーへの分注の様子

作製順に変化して行くことがわかった。このため、攪拌機によって、液の分注の最中にも攪拌し続ける様にした。これにより、均一な性状のゲルチップを得ることができた。なお、ゲル液はその前処理（攪拌や加熱）によって粘度が異なってくるため、吐出量のコントロールが難しかった。ディスペンサーは押し出し時間の間隔と圧力をセットして用いるが、

毎回の材料液の粘度にバラツキがあるため、ロボットシステムを動かす前に予備吐出を行い、その量によって圧力と時間を調整した。そのため、作製後のゲルのサイズはほぼコントロールすることが可能となった。

また、当初は、ディスペンサーから液を吐出する際は、ホルダーの孔の真上にディスペンサーの先端をロボットで移動し、数秒間液を吐出し、さらに一定時間休止した後に次の孔の上に移動する様にロボットを制御した。しかし、ゲル液は粘性が高く、ディスペンサーから押し出したときに必ずしも真下には向かわず、ディスペンサー先端から横に出ることも多々あった。粘度の高い分散液であるため、液の内部に粒子があると、それにより押し出された液の速度が均一ではないことが一因と考えられる。また、静電気の影響もある様に見受けられ、ホルダーの孔の内壁に引き寄せられている様子が観察された。このため、ホルダーの孔の入口とディスペンサーの先端との間に距離があると、吐出液がホルダーの孔の内壁に付着し、固化時のゲルの上面がフラットにならないことがあった。そこで、ディスペンサーを孔の真上に移動後、さらに先端部を可能な限り孔の内部まで入れ、そこで液を吐出する様にした。これにより、吐出液が予定していない方向に向かうことが少なくなり、再現性良く円筒形のゲルチップを作製することができるようになった。図2に作製したゲルチップを示す。

なお、ディスペンサーシステムでゲルチップを作製するようになってからは、同じ量の材料でおよそ倍量のチップが作製できるようになったため、材料の節約にもなることがわかった。また、完成後のゲルチップのバラツキは、個々の重量を調べることで容易に管理で



図2 ディスペンサーシステムを用いて作製したゲルチップ

きることがわかった。作製効率をさらに上げるためにホルダーを2個に倍増し、途中でホルダーを交換することで128個のゲルチップを一時に作製する様にしたが、ゲルチップ重量にバラツキは見られないため、ディスペンサーシステムを利用することにより、スケールアップにも繋がることがわかった。

#### D. まとめ

今回、ディスペンサーシステムを利用することで、ゲルチップを効率良く、かつ再現性良く作製できるようになった。作製法がシステマティックになったため、今後企業に作製を依頼する際の参考にもなるものと思われる。



## 分担研究課題（小課題）：BMI型上肢アシストスーツの開発

### A. 研究目的

本小課題では、脳卒中や脊髄損傷などにより上肢に麻痺のある患者を対象に、脳波から患者の運動意図を読み取り、患者の上肢を動かすアシストスーツを開発している。

第一の開発機として、リハビリ訓練を行う際に、その上肢運動の補助を行うことを想定した、BMI型上肢アシストスーツの実装を進めている。本機では、主に定常視覚誘発電位 (Steady-state visual evoked potential: SSVEP) と呼ばれる脳波を用いた制御系の実装を行っており、BOTAS (BMI-based Occupational Therapy Assist Suit; Sakurada et al., 2013, Front Neurosci) と名付けた (図1)。

昨年度までにおける BOTAS システム開発では、多様な補助動作を実現するため、事前に登録された教示動作の再生や、運動速度の調整・手先運動軌道の自動生成などを行うソフトウェアのアップデートを行った。本年度は、より装着者の運動意図を柔軟に反映するための非同期制御 (asynchronous control) を実現するため、装着者の脳から SSVEP が検出されている間 (装着者が視覚刺激を注視している間) のみ、制御コマンドを逐次的にシステムに送るという処理を加えた。この SSVEP による制御システムを利用し、健常者ならびに脳卒中患者による動作実験を行い、脳波のみによって装着者の意図を反映した操作が実現可能であることを確認した。

また、昨年度我々は、アシストスーツ BOTAS に対し、これまでの脳波による制御に加えて、表面筋電位を用いたより随意性の高いアシスト動作 (到達運動) を行う機能を

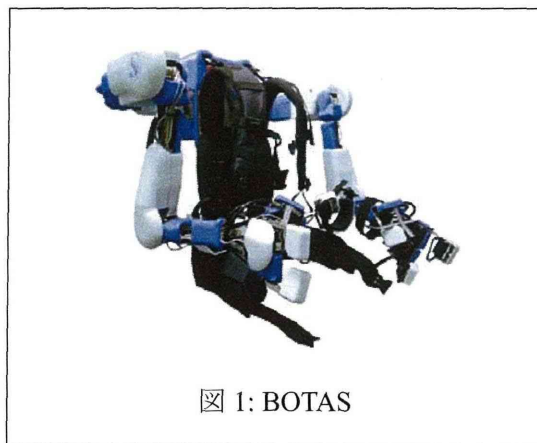


図 1: BOTAS

追加した。本年度は、表面筋電位によるアシストを把持動作にまで拡張し、到達運動と合わせて合目的な運動を随意的に行えるようにした。

また、BOTAS は大型の駆動力供給ボックスを必要とし、装着した状態での移動が困難であった。このため、昨年度より、より軽量で日常生活における使用が可能な、脳波・表面筋電位によって制御されるアシストスーツ BRENDA (BMI-based Robotic Exoskeleton for Neurorehabilitation and Daily Activities) を新たに開発している。本年度は、この BRENDA を実際に脳波と表面筋電位により制御する系を構築し、その動作を確かめた。また、指部分の機構の改良、制御系の内蔵、肘・手首をアシストするバージョンの開発を行った。

以下では、これら BOTAS および BRENDA の制御系に関する本年度の研究・開発について詳細を述べる。

### B. 研究方法

#### B-a. BOTAS 制御系の改良

BMI型上肢アシストスーツBOTASは、主に脳からの信号により、上肢の合目的動作およびその補助を行うものとして開発を進めている。以下では、ハードウェア仕様、安全性、脳波による駆動システム、表面筋電位による駆動システムについて紹介する。

#### ハードウェア仕様

BOTASはリハビリテーション訓練用の上肢動作補助を主たる目的として設計されている。アシストスーツ一式は、背負い式の体幹フレーム、開リンク構造をもつ二対のアーム（腕状で屈伸可能な構造）およびエンドエフェクタ（手指状で開閉可能な構造）、それらへの駆動力供給ボックスから構成され、商用100V電源により動作する。

片腕あたり9自由度の動作関節を有し、そのうち指屈曲-伸展、手首回内-回外、肘屈曲-伸展、肩屈曲-伸展の各動作（6自由度）について、アクチュエーターによる動作が可能となっている。それにより、作業療法様の把持運動や到達運動などを補助可能とする。

#### 安全性

安全性についてはソフトウェア、ハードウェア両面からの対策を行っている。ソフトウェアとしては力覚センサーからの情報をモニタし、装着者に一定以上の負荷がかからないように設定されている。また、装着者の関節可動域から運動空間を設定することで、無理のない範囲で到達運動などの軌道を設定できる機能を搭載した。ハードウェアとしては肘置きを設置による腕の自重を支える機構や、装着感向上を目的として柔軟素材で作成された腕固定ベルトの取り付けなどを行い、より装着者への負荷を軽減するための工

夫を凝らしている。また、緊急停止スイッチや強度設計は従来からの仕様を踏襲し、装着者の人体が保護されるよう安全対策が施されている。

#### 脳波による駆動システム

これまでのBOTASのBMIシステムでは、運動イメージによる感覚運動リズムやP300様脳波由来の信号を利用するシステムが構築され、健常者1名による検証では、右上肢の運動イメージに由来する脳波からのアシストスーツ制御に成功した。また、頸髄損傷者1名、健常者2名が、P300様脳波由来の信号によりアシストスーツを動作させることに成功している（Komatsu et al., 2010, Soc Neurosci Abstr）。

一昨年度までの開発では、装着者がアシストスーツを「動かしたい」という運動意図に同期させて駆動させるため、SSVEPと呼ばれる視覚刺激誘発性の脳波を利用したシステムを構築した。健常者12名および頸髄損傷者3名による検証の結果、特段の訓練がなくとも高い精度で駆動が可能であることを確認した（Sakurada et al., 2011, Soc Neurosci Abstr）。さらに、視覚刺激のパラメータとして、高周波の刺激を用いても適切に駆動できることを確認した（Sakurada et al., 2012, Soc Neurosci Abstr）。

しかしながら、BOTASの駆動させる際には、事前に登録された一連の運動内容（到達運動や把持運動など）を再生するという手段が用いられてきた。この制御手段は、一旦動作が再生されてしまうと、装着者やオペレータ側からの緊急停止処理などのコマンドを除き、動作内容が全て完了するまでの間その他の制御コマンドを受け付けられないという柔

軟性に欠ける側面を持っていた。そこで、本年度ではこのような制御手法に対し、より装着者の意図を反映した非同期制御

(asynchronous control) を実現するためのシステム改良を行った (Sakurada et al., 2013, Soc Neurosci Abstr)。

具体的には、システム側が常に装着者の脳波をチェックし、事前に設定した脳波強度に関する閾値との比較結果や、サポートベクターマシーンによる識別結果に基づき、SSVEPの検出を行う。この識別を0.1秒ごとに行い、SSVEPが誘発されていると判断されているフレームごとに逐次的な制御コマンドをBOTASへ送るように設計した。このような制御手法により、例えば前方への到達運動の補助を行う場合であれば、装着者が意図する場所で補助動作を止める、などの制御が可能となり、随意性が向上した。

#### 表面筋電位による駆動システム

上記の脳波による駆動システムは、特に関節を全く動かすことができない完全麻痺患者に対して適用できるため大きな価値があるが、装着者が動作を始めようとしてから実際に動作が始まるまでに数秒の遅れが生じることや、アシスト対象とする運動の種類を限定する必要があることなどが、機能や性能を制限していた。一方で、上肢の運動機能がわずかにでも残存している不全麻痺患者が対象である場合は、パワーアシスト装置などで使用されている表面筋電位を用いた制御によって、動作の遅れを小さくしたり、対象とする運動の種類を大幅に増やしたりできる可能性がある。そこで昨年度は、表面筋電位による関節角度推定手法 (川瀬ら、2012、信学技報) を用い、8つの筋から測定した表

面筋電位から肩・肘計2自由度における平衡位置 (筋張力が釣り合う姿勢) を推定し、アシストスーツBOTASの肘関節を使用者の上肢の運動意図に合わせてリアルタイムに動かすシステムを開発した (Kawase et al., 2012, Soc Neurosci Abstr)。本年度は、これを把持動作にまで拡張するため、8つの筋からの表面筋電位を用いて肘・手関節・指計3自由度 (肘の屈曲・伸展、握り動作中の手関節・指の曲り角度) の関節角度を推定することで、アシストスーツBOTASにより肘関節による到達運動と指の運動を実現するシステムを開発した (Kawase et al., 2013, Soc Neurosci Abstr)。

#### B-b. BRENDAの開発

BOTASは現在のところ、片腕あたり数十kgの駆動力供給ボックスを必要とし、再配置可能ではあるが持ち運びは困難である。現状、作業療法様のリハビリテーション動作を行う装置 (神作、松田、特許第4618795号、特願2005-206468) としてはその使用は可能であるが、装具に近い形で身につけることで、日常的に使用可能なBMI機器として利用できる、より軽量なアシストスーツが求められていた。

昨年度より、この要求に答えるアシストスーツとして、脳波と表面筋電位を用いて上肢麻痺患者のアシストを行うための、より軽量なBMI型上肢アシストスーツBRENDAを開発している。以下、そのハードウェア仕様と、表面筋電位と脳波による制御について述べる。

#### ハードウェア仕様

BRENDAは、右上肢の肘と指 (母指、示



指+中指、薬指+小指)計4自由度をアシストし、肘については生体信号に基づき関節のインピーダンス(外力に対する硬さ)を調整することが可能な仕様としている。本年度は、日常生活での実用性を向上させるため、指の開閉を行う機構を改善することにより、アシスト時の把持力を増加させた。また、関節付近に装着されたLEDにより、表面筋電位および脳波によるアシストの大きさ、装着者自身が出力した力の大きさなどを可視化し、装着者やその周りにいる療法士などがアシストの効果を確認できるようにしている。

昨年度はコントローラとして外部接続のノートPCを使用していたが、本年度は組み込み用PCを本体に内蔵することにより、小型の脳波・表面筋電位計測装置と組み合わせることで、アシストスーツに関する装置すべてを装着したまま移動を行うことができるようにした。

さらに、手関節の麻痺患者に対するリハビリテーションを想定し、これまでの肘・指用BRENDAをベースとして、肘・手関節をアシストするバージョンの開発を行った。

#### 表面筋電位と脳波による制御

本年度は、装着者の表面筋電位と脳波によりBRENDAを制御するシステムを実装し、健常者を装着者として動作確認をした。このシステムでは、2つの筋からの表面筋電位により肘の屈曲・伸展を、1チャンネルの脳波電極から得た視覚誘発電位(SSVEP)に基づき手の握り・開き動作をアシストする。SSVEP用の視覚刺激としては、高周波点滅刺激用LEDフリッカーによる40Hzの刺激を用いた。

## C. 研究結果

### C-a. BOTAS 制御系の改良

表面筋電位による把持・到達運動のアシストについて、健常者6人を被験者とし、アシストを受けた被験者がボールを皿に入れるタスクを行えるかを検証したところ、3名が70%以上の試行でタスクに成功した。また、頸髄損傷患者(損傷レベルC6)1名を被験者とした実験では、肘のみを表面筋電位で動かす設定のもと、被験者は10回すべての試行でボール運び課題に成功した。

### C-b. BRENDA の開発

BRENDAの表面筋電位と脳波による制御について、健常者1名を被験者として動作を検証したところ、BRENDAを着用した被験者は肘の屈曲・伸展動作および手の握り・開き動作のアシストを操作することができた。

## D. 考察

BOTASに対する制御手法として、逐次的にコマンドを送る非同期制御方式を取り入れることによって、装着者の運動意図をより柔軟に機器の動作へと反映することが可能となった。また、表面筋電位によるアシストによって、日常生活や作業療法でよく使用される把持運動に対応させることができた。これにより、将来アシストスーツによるリハビリテーション訓練を行う場合にも、多様な運動課題に適用しやすくなったといえる。

またBRENDAの指機構の改良、制御系の内蔵により、日常生活での使用における実用性が向上したと考えられる。また、手首・肘用BRENDAを開発したことで、より多様な病態への対応が広がるものと考えられる。

今後、BMI技術を用いた装着者の運動意

図を反映したシステムが、どの程度リハビリテーションとして効果的な手法となりえるか、基礎的な検証も併せて進めていきたい。

**A. 研究目的**

脳からの信号を計測し、それを利用して機器操作を行う「ブレイン-マシン・インターフェイス（Brain-Machine Interface: BMI）」の技術の研究開発を行う際に、脳機能の作動原理に関する情報を用いることで、システムのさらなる最適化が可能となる。また、その作動原理となっている神経基盤を対象としたトレーニングを行なうことによって、機器操作に適した神経活動を誘導し、さらなる性能向上が期待される。

本分担研究では特に、将来的なニューロフィードバック・トレーニングの導入を考慮した、リアルタイム解析のための系の高度化をその目的とする。具体的には、脳の皮質内の電流を推定する技術を用いることによって、これまでセンサーレベルだったために存在した、(1) マルチセッションで頭部位置が変化し、それに伴い信号が変化するという問題、(2) 複数被験者の合わせ込み（レジストレーション）の方法の欠如の問題を解決すること、複

数の脳領域間の機能的結合をフィードバックすることを可能とする。本年度は全脳で機能的結合パターンがどのように表現されているかを検討するとともに、機械学習を応用することによって、機器操作中の脳活動パターンを復号化するための手法を検討した。

**B. 研究方法**

機器操作中の脳活動パターンを復号化するための手法を検討するために用いた、リアルタイム MEG を用いた BMI 系の構成を図 1 に示す。これは、脳内位置に基づいた信号をフィードバックできるようにするために、ビームフォーマーという信号源位置特定技術をリアルタイム MEG に実装したものである（Ora et al., 2013, J Integr Neurosci）。機能的結合の推定には虚部コヒーレンス (imaginary coherence) という結合度指標を用いた。MEG で一般的に用いられているノイズ除去技術や本研究で用いている信号源位置特定技術を用いると、複数の脳領域の電流推定結果に

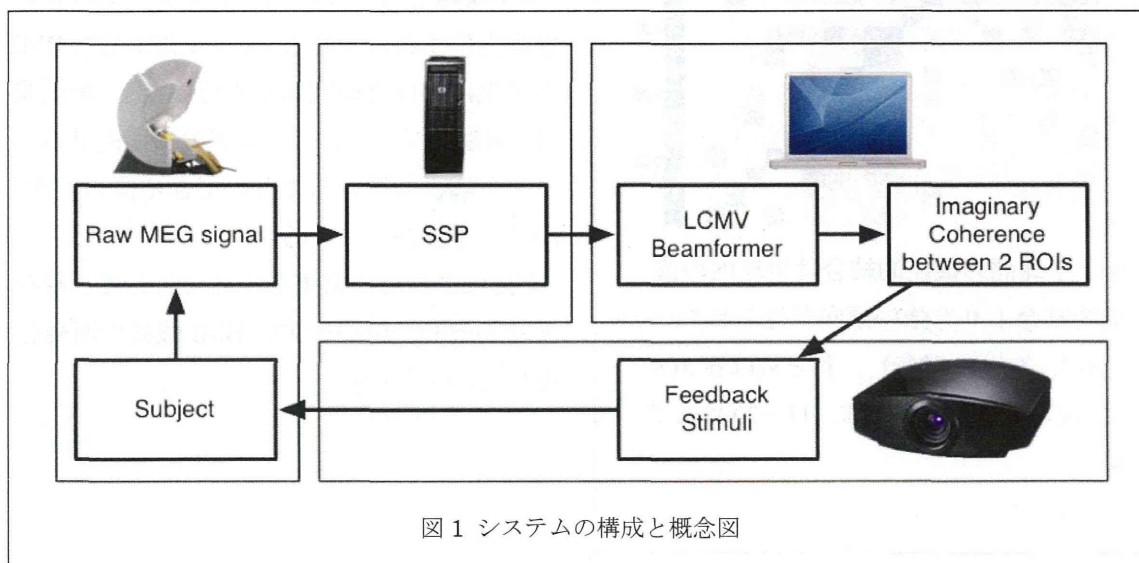


図 1 システムの構成と概念図

偽の相関が混入し得るが虚部コヒーレンスを用いることで、その様な偽の相関を取り除くことができる。また、神経伝達に基づく脳領域間の真の相関は取り除かれずに残ることが期待される。

本年度は全脳で機能的結合パターンがどの様に表現されているかを検討するために、大脳皮質内に配置された関心領域 (ROI) の全ての組み合わせの機能的結合を解析した。

取得した脳磁図信号は、signal-space projection (SSP) を用いて、外部ノイズが除去され、linearly-constrained minimum variance (LCMV) ビームフォーマーが適用された。それによって皮質内の信号源の位置が推定される。脳領域間の機能的結合は、虚部コヒーレンス値を計算することによって推定した。脳磁図装置内の健常被験者 (N=3) は、左右に提示された明滅する視覚刺激 (5 または 6 Hz) の一方に注意を注ぐ様に教示

された。この際注意を注ぐ方向はランダムに教示された。このデータを対象に van Dijk ら (2010, J Neurophysiol) の ROI を使い、全脳にわたる機能的結合のネットワークを解析した。特に、タスク中の半球内や半球間の機能的結合の強さの傾向と、すべての ROI の組み合わせの機能的結合を Sparse Multinomial Logistic Regression によってパターン解析した。

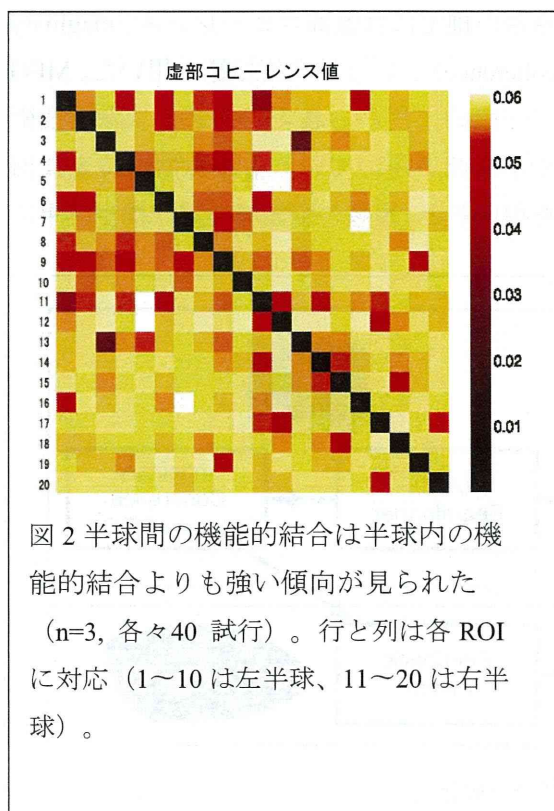
### C. 研究結果

リアルタイム MEG を用いた BMI 系の高度化のために、全脳で機能的結合パターンがどの様に表現されているかを検討するとともに、機器操作中の脳活動パターンを復号化するための手法を検討した。全脳を対象とした解析では、半球間の機能的結合の方が半球内の機能的結合よりも強かった。さらに全 ROI の組み合わせの機能的結合を対象としたパターン解析では、タスク中に注意を向けた方向 (左右) を識別した結果、平均 80% (70 ~ 88%) の正解率を得た。

### D. 考察

本小課題では、MEG のリアルタイム解析系を高度化することにより、より効率的な BMI の実現に向けた研究開発を行った。実験結果は、脳磁図データには、全脳の機能的結合パターン解析に用いることのできる情報を含むことを支持している。

今後はこれらの結果を組込むことで、現在より効率的で使いやすい BMI 機器の開発を進めていきたい。





## A. 研究発表

### 1. 論文発表

#### 原著論文

Sakurada, T., Kawase, T., Takano, K., Komatsu, T., Kansaku, K. A BMI-based occupational therapy assist suit: asynchronous control by SSVEP. *Frontiers in Neuroscience*, 7:172, 2013.

Ora, H., Takano, K., Kawase, T., Iwaki, S., Parkkonen, L., Kansaku, K. Implementation of a beam forming technique in real-time magnetoencephalography. *Journal of Integrative Neuroscience*, 12(3):331-41, 2013.

#### 総説

神作憲司. ブレイン-マシン・インターフェイス (BMI) による環境制御. *医学のあゆみ*. 246(12): 1059-1065, 2013.

神作憲司. リハビリテーション分野におけるブレイン-マシン・インターフェイス (BMI) 技術. *研究開発リーダー*. 10(2): 4-9, 2013.

神作憲司. 脳波による実用的な BMI 研究開発. *認知神経科学*. 14(3): 185-192, 2013.

#### 抄録・プロシーディング

Ora, H., Kansaku, K. A functional connectivity pattern analysis applied to a MEG/SSVEP data. Program No. 809.05. *2013 Abstract Viewer/Itinerary Planner*. San Diego: Society for Neuroscience, 2013. Online.

Ikegami, S., Kawase, T., Takano, K., Nagao, M., Komori, T., Kansaku, K. A P300-based brain-computer interface for spinocerebellar ataxia patients. Program No. 373.18. *2013 Abstract Viewer/Itinerary Planner*. San Diego: Society for Neuroscience, 2013. Online.

Kawase, T., Sakurada, T., Koike, Y., Kansaku, K. A BCI-based OT-assist suit for paralyzed upper extremities: grasping movements controlled by EEG and EMG signals. Program No. 374.02. *2013 Abstract Viewer/Itinerary Planner*. San Diego: Society for Neuroscience, 2013. Online.

Sakurada, T., Kawase, T., Komatsu, T., Kansaku, K. Critical flicker frequency and a high-frequency SSVEP-based brain-computer interface. Program No.80.20. *2013 Abstract Viewer/Itinerary Planner*. San Diego: Society for Neuroscience, 2013. Online.

Wada, M., Suzuki, M., Agarie, H., Takaki, A., Miyao, M., Kansaku, K.. A crossed hand illusion task with autistic children. Program No. O1-9-1-2. *2013 JNS Meeting Planner*. Kyoto: The Japan Neuroscience Society, 2013. Online.

Ora, H, Takano, K., Kawase, T., Iwaki, S., Parkkonen, L., Kansaku, K.. Implementation of beamforming technique and imaginary coherence analysis in real-time MEG. Program No. P1-1-230. *2013 JNS Meeting Planner*. Kyoto: The Japan Neuroscience Society, 2013. Online.

Sakurada, T., Kansaku, K.. Effect of top-down attention during bimanual movements. Program No. P1-1-87. *2013 JNS Meeting Planner*. Kyoto: The Japan Neuroscience Society, 2013. Online.

#### 書籍

神作憲司. ブレイン-マシン・インターフェイス (BMI) による環境制御. 別冊・医学のあゆみ. *BMI Brain-Machine Interface の現状と展望*, 吉峰俊樹, 川人光男 (編集). 医歯薬出版, pp. 92-98, 2014.

神作憲司. 脳波で操作する環境制御システムの開発. *次世代ヒューマンインタフェース・開発最前線*, エヌ・ティー・エス, pp. 383-391, 2013.

### 2. 学会発表

#### 講演等

神作憲司. 未来生活における BMI を用いたインテリジェントハウス. *大和ハウス・生活支援ロボット商品開発会議*. 2014年1月; 奈良.(講師)

神作憲司. 脳からの信号で機械を操作する. *統計数理研究所・公開講演会*. 2013年11月; 立川

Kansaku, K. Practical non-invasive

brain-machine interface system for communication and control. *Seminar: Center for Neuroprosthetics at EPFL*. September 2013; Lausanne, Switzerland.

#### シンポジウム等

Kansaku, K. NRC researches: Brain-machine interfaces for persons with physical disabilities. *Conference on Systems Neuroscience and Rehabilitation (SNR2014)*. March 2014; Tokorozawa, Japan. (conference organizer)

神作憲司. 脳情報を利用した機器操作. 第9回マルチモーダル脳機能研究会. 2013年11月; 千葉.

神作憲司. 非侵襲型BMIによる障害者自立支援機器の開発. 第71回日本脳神経外科学会総会・特別企画「私の未知・未踏への挑戦1」. 2013年10月; 横浜

#### 一般口演・ポスター

川瀬利弘、櫻田武、神作憲司. 把持動作・到達運動を補助するハイブリッドBMI型アシストスーツ. 第30回国立障害者リハビリテーションセンター業績発表会. 2013年12月; 所沢.

Ora, H., Kansaku, K. A functional connectivity pattern analysis applied to a MEG/SSVEP data. *The 43rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2013; San Diego, USA.

Ikegami, S., Kawase, T., Takano, K., Nagao, M., Komori, T., Kansaku, K. A P300-based brain-computer interface for spinocerebellar ataxia patients. *The 43rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2013; San Diego, USA.

Kawase, T., Sakurada, T., Koike, Y., Kansaku, K. A BCI-based OT-assist suit for paralyzed upper extremities: grasping movements controlled by EEG and EMG signals. *The 43rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2013; San Diego, USA.

Sakurada, T., Kawase, T., Komatsu, T., Kansaku, K. Critical flicker frequency and a high-frequency SSVEP-based brain-computer

interface. *The 43rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2013; San Diego, USA.

和田真、神作憲司. マウスの身体像錯覚に関する研究:第1報. 第73回日本動物心理学会大会. 2013年9月; 筑波.

櫻田武、神作憲司. 能動的注意が生み出す両手運動の合目的性. 第7回Motor Control研究会2013年9月; 東京.

大良宏樹、高野弘二、川瀬利弘、岩木直、ラウリパルコネン、神作憲司. リアルタイム脳磁図におけるビームフォーミング技術の実装. 第7回マルチモーダル脳情報研究会. 2013年7月; 東京.

Wada, M., Suzuki, M., Agarie, H., Takaki, A., Miyao, M., Kansaku, K.. A crossed hand illusion task with autistic children. *The 36th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. June 2013; Kyoto, Japan.

Ora, H., Takano, K., Kawase, T., Iwaki, S., Parkkonen, L., Kansaku, K.. Implementation of beamforming technique and imaginary coherence analysis in real-time MEG. *The 36th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. June 2013; Kyoto, Japan.

Sakurada, T., Kansaku, K.. Effect of top-down attention during bimanual movements. *The 36th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. June 2013; Kyoto, Japan

## B. 知的財産権の出願・登録状況

### 1. 特許取得

外山滋、神作憲司、高野弘二. 脳波測定用電極、脳波測定用部材、及び、脳波測定装置. (特願 2011-262032, 国際出願番号: PCT/JP2012/080707, 国際公開番号: WO2013/080992). 出願日 2011.11.30. 国際出願日 2012.11.28

外山滋、神作憲司、高野弘二、池上史郎. 脳波測定用電極、脳波測定用電極付きキャップ及び脳波測定装置. (特願 2013-094936). 出願日 2013.4.30

外山滋、神作憲司、高野弘二、池上史郎. 脳波測定用電極、脳波測定用電極付きキャップ及び脳波測定装置. (優先番号

2009-257366). 優先日 2009.11.10. (特許第  
5277405 号, 特願 2010-119930). 出願日  
2010.5.25. 登録日 2013.5.31.

2. 実用新案登録  
なし

3. その他  
なし

厚生労働科学研究費補助金（障害者対策総合研究事業（身体・知的等分野））

分担研究報告書

ブレイン-マシン・インターフェイス（BMI）による障害者自立支援機器の開発に関する研究  
分担研究課題：筋萎縮性側索硬化症患者の拡大・代替コミュニケーション使用状況の検討

研究分担者 近藤 清彦 公立八鹿病院 副院長・脳神経内科部長  
研究協力者 米田 正樹 公立八鹿病院 中央リハビリテーション科 理学療法士  
研究協力者 東垣 毅 公立八鹿病院 中央リハビリテーション科 作業療法士  
研究協力者 北村 佳子 公立八鹿病院 中央リハビリテーション科 作業療法士

研究要旨

当院の拡大・代替コミュニケーション（AAC）使用状況の傾向と課題を検討するために、ALS 患者 12 名を対象として、診療録から後方視的に調査した。その結果、AAC 必要性は発話の実用度に左右されており、TPPV がその一要因となっていた。また、使用頻度が多かった AAC は、ハイテクエイドが伝の心、ローテクノンテクエイドは Yes サインで、一患者での併用は最大 5 種類であった。AAC 導入においてはなるべく発話困難に備えて可能な限り早期から、複数の AAC スキル習得を積極的に支援する必要があることが示唆された。

A. 研究目的

筋萎縮性側索硬化症（以下 ALS）ではその進行過程において球麻痺や気管切開・人工呼吸器装着によって発話が困難となり、その場合は拡大・代替コミュニケーション（以下 AAC）が必要となる。近年 AAC 分野においては様々な機器が開発され、当院でもその使用や適合を作業療法士等が支援する機会が増している。そこで本研究では現在の AAC 使用状況を調査し、その傾向と課題を検討した。

B. 研究方法

対象は、2013 年 7 月時点で当院脳神経内科を診療中の ALS 患者のうち、意思伝達方法に作業療法士等が関与する 12 名で、

診療録から後方視的に調査した。対象者の年齢は平均 70.0 歳（60～82 歳）、療養期間 32～225 ヶ月であった。入院 8 名、在宅 4 名で、侵襲的人工呼吸療法（以下、TPPV）を行っている患者が 11 名（92%）、ALSFRS-R は 0 点 10 名、1 点 1 名、12 点 1 名であった。

（倫理面への配慮）

患者に対し苦痛や危険を強いることのないように十分注意するとともに、患者のプライバシーを尊重する。データの発表にあたっては患者が特定されないように配慮した。

C. 研究結果

発話の明瞭度は全く分からないが 1 名、



発話困難が 11 名であり、そのうち 2 名はわずかな眼球運動はあるものの AAC 非適応で表出困難な状態であった (表 1)。

AAC はハイテクエイドとローテクノンテクエイドの 2 種類に分類し、ハイテクエイドが伝の心 6 名 (50%)、レッツチャット 2 名 (17%) であった。また過去にハイテクエイド使用経験がある患者が 2 名だった。ローテクノンテクエイドはジェスチャーをシンボル化した Yes サインが 10 名 (83%) と最も多く、次いで透明文字盤 9 名 (75%)、表情 8 名 (67%)、読唇 4 名 (33%) であった (表 1)。

全てのハイテクエイドは TPPV 導入後からの使用開始となっており、TPPV から使用開始までの期間は 7~1888 日で中央値は 126 日であった (表 1)。

#### D. 考察

今回の結果から、日常生活での AAC 必要性は発話の実用度に左右されており、TPPV がその一要因となっていた。AAC 選択についてはハイテク・ローテクノンテクエイドの併用が基本であり、一人で最大 5 種類を生活場面に応じて使い分けていることが分かった。AAC 導入は特にハイテクエイドで難しく、TPPV から最短 7 日でスムーズに伝の心を使用開始できる方もいれば、その反面で導入のタイミングが合わなければ実用に至るまでに 1000 日を超過する方がいることも明らかになった。以上のことより AAC 導入においてはなるべく発話困難に備えて可能な限り早期から、複数の AAC スキル習得を積極的に支援する必要があることが示唆された。

またハイテクエイドは調査時点で既に

使用終了していた 2 名も加えると、12 名中 10 名 (83%) の使用実績となり、その導入を積極的に取り組んでいることを示している。しかし特定の機器に偏っている傾向も伺え、病院が所有している機器の有無に影響されることが考えられるため今後の課題としたい。

進行した ALS 患者において、コミュニケーション手段が確保されることは、身体状況を訴えるためだけでなく、その人の存在の意味や尊厳を高めていくために重要であり、たとえ四肢麻痺状態になっても生きていてよかったと思ってもらえることにつながり、高い QOL (Quality of life) を保つことを可能とさせると思われる。

#### E. 結論

AAC 導入においてはなるべく発話困難に備えて可能な限り早期から、複数の AAC スキル習得を積極的に支援する必要がある。

#### F. 健康危険情報

なし

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

近藤清彦：ALS の呼吸器療法. 脊髄外科 27 (3) : 221-229,2013

##### 2. 学会発表

佐藤正之、加藤奈津子、大村悠介、田部井賢一、中野千鶴、阿部真貴子、藤田梨紗、木田博隆、冨本秀和、近藤清彦：右被殻出血による musical anhedonia の一例. 第 37 回日本神経心理学会総会 2013.9.12-13

札幌市

近藤清彦：公立八鹿病院における ALS ケア 23 年間のまとめ 公立八鹿病院における ALS ケア 23 年間のまとめ 第 1 回日本難病医療ネットワーク学会 2013.11.8 大阪市

東垣毅、北村佳子、近藤清彦：筋萎縮性側索硬化症患者の拡大・代替コミュニケーション使用状況 第 1 回日本難病医療

ネットワーク学会 2013.11.8 大阪市

竹末千賀子、近藤清彦：ALS 患者への音楽療法の取り組み～患者と家族、援助者のここを支える～ 第 1 回日本難病医療ネットワーク学会 2013.11.8 大阪市

**H. 知的財産権の出願・登録状況**

(予定を含む。)

なし

表 1 拡大・代替コミュニケーション (AAC) 使用状況

患者	発話状況	ハイテクエイド	ローテクノンテクエイド				TPPV 後ハイテク開始日数
			Yes サイン	透明文字盤	表情	読唇	
1	発話困難	伝の心	Yes サイン	透明文字盤	表情	読唇	1888
2	発話困難	レッツチャット	Yes サイン		表情	読唇	1372
3	発話困難	伝の心	Yes サイン	透明文字盤	表情		149
4	発話困難	伝の心	Yes サイン	透明文字盤	表情	読唇	103
5	発話困難						
6	発話困難	(レッツチャット)					
7	発話困難	レッツチャット	Yes サイン	透明文字盤	表情		200
8	発話困難	伝の心	Yes サイン	透明文字盤	表情		15
9	発話困難	伝の心	Yes サイン	透明文字盤	表情	筆談	7
10	全く分からない	(ペチャラ)	Yes サイン	透明文字盤	表情	用事盤/文字盤	
11	発話困難	伝の心	Yes サイン	透明文字盤			20
12	発話困難		Yes サイン	透明文字盤		読唇/用事盤	

※ ( ) 内は過去に使用経験あり

厚生労働科学研究費補助金（障害者対策総合研究事業（身体・知的等分野））

分担研究報告書

ブレイン-マシン・インターフェイス（BMI）による障害者自立支援機器の開発に関する研究  
分担研究課題：Totally locked-in state（TLS）の臨床的特徴

分担研究者 長尾雅裕 東京都立神経病院 脳神経内科 医長

研究要旨

筋萎縮性側索硬化症（ALS）のうちどのような患者が TLS に移行し、また TLS 患者ではどのような機能が保たれているかについて放射線学的電気生理学的に検討した。TLS になる患者は発症してから呼吸器を装着するまでの期間が平均 1.5 年で通常の ALS 患者が 3-4 年であることを考えると短いことがわかった。頭部 MRI では大脳萎縮を認めるが、その程度は患者によって様々であるが、高度進行例も後頭葉は保たれていた。誘発脳波でも VEP は誘発され、視覚路が画像的にも生理学的にも TLS で進行した場合にも最も保たれる経路であると考えられた。

A. 研究目的

筋萎縮性側索硬化症（ALS）は一次及び二次運動神経が変性消失する神経疾患である。運動神経変性の進行は運動機能を損なうばかりでなく、運動機能に依存した意思伝達能力を大きく損なうこととなる。運動障害が著しく進行し、眼球運動を含めすべての随意運動が不可能になると意思伝達不能な完全閉じ込め状態（totally locked-in state TLS）となる。TLS にたいして意思伝達手段を確保するための試みは今まで成功しているとは言い難い。今回は臨床像から TLS の特徴を明らかにし、TLS での意思伝達の可能性について考えた。

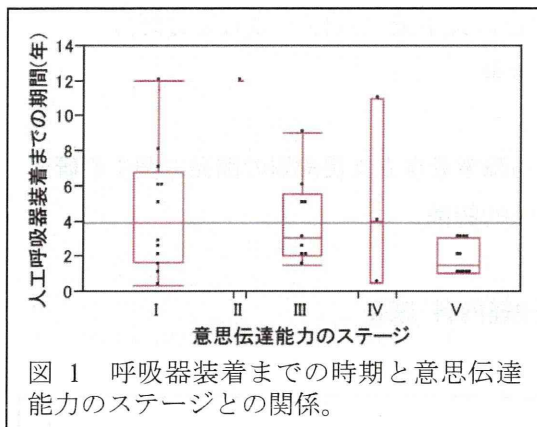
B. 研究方法

意思伝達手段と ALS の運動障害の程度との関連を理解するために、我々は ALS の意

思伝達能力を I から V の stage に分けて検討してきた 1)。I が既存の手段で文章レベルで意思伝達可能、II が単語レベルなら可能、III が Yes-No レベル、IV が Yes-No が困難でもたまにできるレベル、V はいかなる手段でも意思伝達不可能という意思伝達障害の軽い方から重い方にむけての stage 分類である。今回、37 例の症例について意思伝達の障害度分類を試みた。その中で stage V に該当する症例は 10 例あった。Stage V の患者はすべて TLS 患者であった。その TLS 患者 10 例について臨床経過と意思伝達能力の stage との関連を検討した。また頭部 MRI、SPECT、誘発電位について検討した。

（倫理面への配慮）

患者に対し苦痛や危険を強いることのないように十分注意するとともに、患者のプライバシーを尊重する。データの発表にあ



たつては患者が特定されないように配慮した。

### C. 研究結果

意思伝達能力の障害度 stage と臨床経過を検討した結果、stage V に該当する ALS 患者は呼吸器装着にいたるまでの期間が、平均で 1.5 年で stage I から IV までが 3-4 年の経過があることと比較して有意に短かった ( $P < 0.01$ ) (図 1)。一方、罹病期間は stage の差に関係がなかった。頭部 MRI では、後

頭葉を除くほとんどすべての大脳、脳幹の萎縮を示した (図 2)。ただその萎縮の程度には症例間で差を認め、非常に軽度な萎縮にとどまる症例もあった。SPECT では、MRI での脳萎縮の強い例では後頭葉以外の著明な取り込み低下を認めた。誘発脳波が検査された 6 例で SEP は 6 例すべて検査され、ABR4 例、VEP3 例であった (3)。SEP では半数の症例で N20 が消失する一方、VEP では検討されたすべての症例で P100 を認めた。

### D. 考察

意思伝達能力の stage V に該当する患者は眼球運動含め、随意運動が障害された TLS であった。TLS では呼吸器装着までの期間が短いことがわかった。一方、罹病期間では各 stage 間で差がなかったことは、ALS が長期経過すると全て TLS になる訳ではな

