脳卒中片麻痺上肢機能障害へのアプローチ —Brain computer interface 技術の応用—

Rehabilitation of Post-stroke Upper Extremity Paresis —Efficacy of an Electroencephalogram-based Brain Computer Interface—

大田 哲生

旭川医科大学病院リハビリテーション科

Key words :
brain computer interface
stroke
rehabilitation
electrical stimulation
spasticity

Spinal Surgery 27 (3) 216-220, 2013

Abstract

With the advent of brain computer interface, several methods are developed in its application for rehabilitative treatment. We devised a new rehabilitation system using an electroencephalogram-based brain computer interface, which successfully improved paretic upper extremity function in stroke patients. Patients were requested to decrease amplitudes of sensory motor-rhythm during motor imagery. While imaging extension of the affected fingers, patients were asked to alter EEG with a visual feedback of their brain activities. In several months, new voluntary electromyographic activity was measurable in patient's paretic finger extensors.

Subsequently patients are treated with specific electrical stimulation called integrated volitional electrical stimulation (IVES). IVES controls stimulation strength automatically following patient's will to extend their paretic fingers. Activation of the damaged hemisphere was confirmed by fMRI analysis.

It is important to reduce spasticity of the paretic limb prior to application of these methods. Injection of botulinum toxin type A should be considered in order to make the paretic finger movement easy.

はじめに

脳卒中片麻痺患者の上肢機能に対するリハビリテーション（以下、リハ）としては、一般的に関節可動域（range of motion : ROM）訓練、上肢巧緻性訓練、利き手交換などが行われている。たとえ麻痺側の上肢機能が改善しなかったとしても、非麻痺側上肢の使用で、たいいていの日常生活動作（activities of daily living : ADL）は自立可能であり、歩行や ADL が自立した段階で入院治療を終了することが多い。ところが、退院する際に患者からよく聞かれることの 1 つとして、「まだ手が動かないんですけど」という言葉がある。確かに、ある程度の随意性をもった麻痺側上肢に対するアプローチは行われているが、重度麻痺を呈する麻痺側上肢に対するアプローチには有効な手段がなく、積極的に行われてきたとはい

えない。近年、さまざまな技術の進歩もあり、重度の上肢機能障害に対するリハアプローチが行われるようになってきており、今回、その中でも brain computer interface (BCI) の技術を応用した方法を中心に紹介する。

BCI の技術を応用

BCI とは、人間が意図するところを、脳波を分析することで読み取り、その情報を機器に出力する技術である。この技術を応用することで、手足に麻痺を認める患者であったとしても、皮質の活動を認めていれば、脳波をコントロールすることで思い通りに電動装具を動かしたり、自在にコンピュータのカーソルを動かしたり、好きなときにテレビの電源を on-off したりすることが可能となる。この技術は Hochberg ら¹⁾が 2006 年に頸髄損傷

旭川医科大学病院リハビリテーション科 / 〒078-8510 旭川市緑が丘東 2 条 1-1-1 [連絡先: 大田哲生]

Address reprint requests to : Tetsuo Ota, M.D., Department of Physical Medicine & Rehabilitation, Asahikawa Medical University Hospital, 2-1-1-1 Midorigaoka-higashi, Asahikawa-shi, Hokkaido 078-8510, Japan

Fig. 1 BCI を用いたトレーニング風景

正面のモニターに脳波活動がリアルタイムでビジュアルフィードバックされる。患者はモニターをみながら ERD を思い通りに起こせるようにトレーニングする。麻痺側手指伸展の指示通りに ERD を起こせると、他動的に手指が伸展される仕組みになっている。

四肢麻痺患者に応用し、運動野から得られた脳波の情報だけで電子メールを開いたり、義手を動かしたことを報告しており、その後、さまざまな技術開発が行われている。Hochberg ら¹⁾が用いたのは脳の運動野に直接電極を挿入する侵襲的な方法で、外科的手技を要するため特殊な技術が必要であった。また感染予防も重要な問題と考え、われわれはより簡便に行えるよう、表面電極を用いた非侵襲的な方法でこのような技術を確立できないか検討してきた。

具体的には μ リズムの事象関連脱同期 (event-related desynchronization: ERD) を指標とする方法で、Hashimoto ら²⁾が開発した手法を用いて研究を行った。 μ リズムは頭部の中心部に出現する 7~11 Hz の α 波に似たアーチ状の波で、 α 波とは異なり開眼で抑制されることがないため、リハビリ訓練を行うには適していると判断された。この μ リズムは対側の手を握ると消失 (μ リズムの事象関連脱同期) する特徴をもっており、実際の行動を伴わずに手足の動作を想像するだけでも同様の脱同期を起こす。この特徴を利用して、脱同期が起きたことをもって、患者が麻痺した手足を動かそうと意図しているものと判断するようにした。この非侵襲的な方法で患者の意図を適切に読み取れるかどうかを Hashimoto らはインターネット上の仮想空間におけるアバターの操作で証明した。つまり、四肢に随意性を認めない筋ジストロフィー患者が、脳波だけでアバターを思い通りにコントロールし、他者が操作するアバターと仮想空間で交流させコミュニケーションをとることを実現させたのである。この際、患者が足を動かすことを意図することでアバターを前進させ、患者が右手を動かすことを意図することで

アバターに右を向かせ、患者が左手を動かすことを意図することでアバターに左を向かせることに成功するとともに、継続的にこの操作を行うことで体性感覚運動野の興奮性が可塑的に変化することを明らかにした。

リハビリへの応用

BCI の使用による体性感覚運動野の興奮性の変化をいかにしてリハビリに応用するかが次の課題となる。麻痺側的手指伸展が困難な慢性期脳卒中患者を対象に BCI の技術を応用したリハビリ訓練を施行した。具体的には、損傷脳の手の運動を支配する体性感覚運動野領域近傍と考えられる頭皮上に表面電極を設置し、麻痺側手指を伸展するように意図することを患者に課題として与えた。その際、患者の正面に設置したモニター上を星が左から右に流れ、損傷側の体性感覚運動野で ERD が認められると、星は下方にリアルタイムで移動するようプログラムを設定した。さらに、麻痺側手指伸展の指示に従って的確に損傷脳の体性感覚運動野で ERD が認められた際には、**Fig. 1** に示すような装置で他動的に手指が伸展されるようにした。詳細は Shindo ら³⁾の報告を参照いただきたい。この方法で、損傷脳の体性感覚運動野における ERD を患者自身が自分の思い通りにコントロールできるようにトレーニングしたところ、**Fig. 2** に示すように、トレーニング前に認めなかった麻痺側総指伸筋の筋活動を表面電極で記録することが可能となった。

ほかの慢性期脳卒中患者で同様のトレーニングを 1 カ月施行した際の fMRI の画像を **Fig. 3** に示す。麻痺側手指の伸展動作 (意図) を課題として与えているが、トレーニング初日に認めていなかった損傷側の体性感覚運

Fig. 5 IVES 使用後の fMRI

2 週後の損傷脳では明らかな活動は認めなかったが、4 週後では損傷側の体性感覚運動野近傍での活動が認められた。

BCI の概念は機器を用いた機能代償として発展してきたが、今回用いた方法のように、患者が動作を意図したときに、リアルタイムで麻痺肢を他動的に動かすことで感覚フィードバックを脳に返し、運動と感覚の協調を再度促すことにより、麻痺肢の機能回復を図るというリハの概念に基づいた利用方法があると考え。

次のステップ

先に示したように、麻痺肢の筋活動が得られるようになると、その筋活動を利用した機能改善の方法が重要となる。次にわれわれが行う麻痺側上肢へのアプローチは電気治療である。低周波を利用した上肢の機能改善方法であるが、ここで用いられるのは単なる電気刺激ではなく、村岡ら⁴⁾が開発した随意運動介助型電気刺激 (inte-

grated volitional electrical stimulation : IVES) と呼ばれる方法である。この方法は記録電極と刺激電極が同一であり、患者の麻痺肢の筋活動を記録し、その電位が得られた筋に対して刺激を行うことができるという特徴がある。さらに、行われる刺激強度は一律ではなく、記録された電位が弱いときには少しの刺激を、記録された電位が強いときには多くの刺激を与えるようになっており、患者が少しだけ動かそうと意図したときには軽くアシストし、大きく動かそうと意図したときには強い電気刺激でアシストするという風に、患者の意図に合わせた刺激が行われることが大きな特徴となっている。

この装置を 1 日に 6 時間装着し入院中の日常生活を行ってもらった回復期リハ病棟入院中の脳卒中患者の麻痺側手指運動時の fMRI 画像を Fig. 5 に示す。IVES 使用後 2 週間の時点では損傷側に明らかな活動は認めなかったが、4 週間使用後には損傷側の体性感覚運動野近傍の血流増加が認められ、末梢に対する電気刺激ではあるものの、IVES 使用の効果は確実に脳機能に影響していることが示された。

痙縮の治療

脳卒中患者の上肢機能の改善を図るうえで避けて通れないのは痙縮のコントロールである。先に述べたアプローチを行うにしても、痙縮が強いと麻痺肢の随意性が損なわれるため、痙縮の軽減を図ることは重要となる。脳卒中治療ガイドライン 2009 では、痙縮のリハとして薬の内服とボツリヌス療法がグレード A の治療として強く勧められている。内服薬は副作用のため内服継続が困難な患者も少なくない。したがって、局所作用の期待できる注射による治療がよりよいと考える。これまで、フェノール水溶液による motor point block が行われることが多かったが、感覚障害を引き起こしたり、手技に熟練を要するなどの問題点があった。2010 年 10 月より上下肢の痙縮に対してボツリヌス療法が保険適応となり、痙縮の治療方法は大きく変わろうとしている。ボツリヌス療法は、手技がフェノール水溶液による motor

point block より簡単であるうえに、痙縮軽減効果もてきめんであり、前述の新しい機能回復訓練とボツリヌス療法による痙縮治療をうまく組み合わせて行っていくことが今後必要になってくると思われる。

おわりに

近年における脳卒中片麻痺患者の上肢機能障害に対する治療方法の進歩はめざましく、これまであきらめられていた機能障害に対しても回復が望める時代になっている。患者の希望を叶えるべく、新たな治療方法の併用を検討していくことが重要となる。

謝 辞

本研究は文部科学省の脳科学研究戦略推進プログラムおよび内閣府の革新的技術推進費に基づき、慶應義塾大学理工学部リハビリテーション科学研究室の牛場潤一先生、慶應義塾大学医学部リハビリテーション医学教室の里宇明元先生、木村彰男先生、慶應義塾大学月が瀬リハビリテーションセンターのスタッフの方々とともに行われたものであり、ご協力いただいた皆様に深謝いたします。

文 献

- 1) Hochberg LR, Serruya MD, Friehs GM, et al : Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature* 442 : 164-171, 2006
- 2) Hashimoto Y, Ushiba J, Kimura A, et al : Change in brain activity through virtual-reality-based brain-machine communication in a chronic tetraplegic subject. *BMC Neurosci* 11 : 117, 2010
- 3) Shindo K, Kawashima K, Ushiba J, et al : Effects of neurofeedback training with an electroencephalogram-based brain computer interface for hand paralysis in patients with chronic stroke—a preliminary case series study. *J Rehabil Med* 43 : 951-957, 2011
- 4) 村岡慶裕, 鈴木理砂, 島岡秀奉, 他 : 運動介助型電気刺激装置の開発と脳卒中片麻痺患者への使用経験. *理学療法* 31 : 29-35, 2004