

201419059A

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・知的等障害分野）

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

(H25-身体・知的-指定-010)

平成26年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 中島 八十一

平成27(2015)年3月

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・知的等障害分野）

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
(H25-身体・知的-指定-010)

平成26年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 中島 八十一
平成27(2015)年3月

目 次

I. 総括研究報告

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 中島 八十一	----- 1
---	---------

II. 分担研究報告

1. システム脳神経科学に基づいた BMI による障害者自立支援機器の開発 神作 憲司	----- 7
2. 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 近藤 清彦	----- 25
3. Totally locked-in state (TLS) の臨床的特徴 長尾 雅裕	----- 29

III. 研究成果の刊行に関する一覧表	----- 33
---------------------	----------

IV. 研究成果の刊行物・別刷	----- 35
-----------------	----------

I. 総括研究報告

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））
総括研究報告書

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

研究代表者 中島 八十一 国立障害者リハビリテーションセンター研究所
脳機能系障害研究部長

研究要旨

脳から信号を取り出し、それを利用してコミュニケーションや運動の補助などを行おうとするブレイン-マシン・インターフェイス（BMI）技術を用いた障害者自立支援機器を開発する。これまで、視覚誘発性脳波を用いた BMI による環境制御を可能とし、ソフトウェア部及び着脱容易な脳波電極等ハードウェア部を開発した。これらの BMI 機器を用いた実証評価を進め、患者・障害者や病院スタッフ等からのフィードバックを受けつつ、その精度や使用感の向上、機能拡張のための研究開発を進めた。

平成 26 年度は、国リハにて、筋萎縮性側索硬化症（ALS）患者を対象として BMI 型環境制御装置を用いた病院や患者の居宅等における半年程度の長期実証評価を行った。評価には高周波の定常視覚誘発電位（SSVEP）方式等による簡易型を利用し、実用的とされる精度を確保した（>70%）。P300 方式を主とする従来型については、ALS および脊髄小脳変性症患者を主対象とした実験を進め、実用的な精度で BMI 機器を使用可能であることを確認した。着脱容易な BMI 用ゲル電極については実証評価を通してデータを蓄積し、ゲル成分の検討等を行った。BMI 型環境制御装置及び BMI 用ゲル電極・脳波キャップは、研究用途としての市販化に成功した。BMI 型上肢アシストスーツについては、日常使用を可能とするための軽量アシストスーツのさらなる軽量小型化やソフトウェアの改良を行い、脳卒中患者による試用を行った。

さらに、八鹿病院にて、ALS 患者の拡大・代替コミュニケーション使用状況を調査し、また都立神経病院にて、ALS 患者の意思伝達状況とその医用画像等について調査した。

研究分担者

神作憲司
国立障害者リハビリテーションセンター
研究所・脳機能系障害研究部脳神経科学
研究室長

近藤清彦
公立八鹿病院・副院長

長尾雅裕
東京都立神経病院・脳神経内科部長

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い、運動やコミュニケーションの補助、生活環境の制御などを行おうとする、「ブレイン-マシン・インターフェイス（Brain-Machine Interface: BMI）」もしくは「ブレイン-コンピューター・インターフェイス（Brain-Computer Interface: BCI）」と呼ばれる技術が注目されている。

本研究では、BMI 技術を障害者が実際に使えるようにするべく開発し、障害者が失った機能を取り戻し、活動領域を拡張することを目的とし、研究開発を進めている。

B. 研究方法

障害者が脳からの信号で環境制御およびコミュニケーション補助を行うための技術を研究開発しつつ実証評価を推進した。研究チームでは平成20年より関連研究を行ってきており、これまでに内製のシステム（ソフトウェア部）、脳波計・電極（ハードウェア部）等を開発し、それらを用いて患者・障害者を対象とする実証評価も開始した。

本年度は、国リハにて、筋萎縮性側索硬化症（ALS）、脊髄小脳変性症等の患者・障害者を対象とした実証評価を進めた。特に、ALS患者を対象として半年程度の長期評価を行った。評価対象の機器としては定常視覚誘発電位（SSVEP）方式で動作する簡易型BMI機器を使用した。

ソフトウェア部の開発では、オープン化およびクロスプラットフォーム化に向けたさらなる開発を行った。導電性ゲル電極については、成分や生産工程に関する検討を進めた。簡易型BMI機器、および導電性ゲル電極については市販化を行った。

脳からの信号で運動補助を行うためのBMI型上肢アシストスーツについては、日常使用を可能とするための軽量アシストスーツ（BRENDA）のさらなる軽量小型化、ソフトウェアの改良を行い、脳卒中患者による試用を行った。

また、八鹿病院にて、ALS患者の拡大・代替コミュニケーション使用状況を調査し、都立神経病院にて、ALS患者の意思伝達状況とその医用画像等について調査した。

C. 研究結果

国リハにて、患者・障害者を対象としたBMI機器の実証研究を進めた（これまで計158例）。長期実証評価試験については、ALS患者3名（男性、ALSFRS-R=0）を対象とし、SSVEP方式で操作する簡易型BMI機器を用いて半年程度の期間で行った。そ

の結果、操作精度については実用に足るとされる70%以上を確保することが出来た（平均77.7%）。実証評価は病院および患者居宅にて行ったが、特に居宅においては環境光の変化などのさらなるノイズ対策の必要性も示唆された。

ソフトウェア部の開発では、オープン化、クロスプラットフォーム化に向けてプログラムのモジュール化をさらに進め、本システムを用いた開発を行う際の環境を整備した。導電性ゲル電極については、従来から開発しているゲルについて成分の改良と生産工程の効率化を進めた。上記のSSVEPによる簡易型BMI装置と導電性ゲル電極については、研究用途としての市販化に成功した。

BMI型アシストスーツBRENDAについては、脳卒中患者1名が、表面筋電位により肘の屈曲・伸展を、SSVEPと表面筋電位によるハイブリッド制御により手関節の屈曲・伸展をアシストできることを確認した。

また、八鹿病院にて、ALS患者の拡大・代替コミュニケーション使用状況を調査し、都立神経病院にて、ALS患者の意思伝達状況とその医用画像等について調査した。このなかで、完全閉じ込め状態（TLS）のALS患者のMRI所見は様々で、TLSになった時点で必ずしも萎縮が高度なわけではないこと、進行したALS患者の多くで視覚誘発電位（VEP）が計測されること等が示唆された。

D. 考察

BMIの研究開発をすすめていくためには、基礎医学・臨床医学と工学などの、分野間の連携を推進していく必要がある。基礎医学・臨床医学と工学などの専門家が集い、情報収集・交換を行うために、「システム神経科学とリハビリテーション研究会」を国リハ学院にて開催し、これによりBMIの応用・実用化等について有意義な議論を行うことが出来た。

本研究では、研究分担者の神作が、システム脳神経科学に基づき、脳から効率的に有益な情報を抽出するための研究を行うとともに実用的BMIシステムの提案・開発を行った。研究分担者の近藤はALS患者の拡大・代替コミュニケーション使用状況を調査した。研究分担者の長尾はALS患者の意思伝達状況とその医用画像等について調査した。そして研究代表者の中島が、それらの統括を行った。こうした取り組みをさらに進め、BMIの応用・実用化へとつなげたい。

E. 結論

BMIを用いた生活環境制御装置による日常生活の補助や、コミュニケーションの補助、アシストスーツによる運動の補助を介して、障害者が失った機能を取り戻し、活動領域を拡張していく可能性が示された。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

原著論文

Sakurada, T., Kawase, T., Komatsu, T., Kansaku, K. Use of high-frequency visual stimuli above the critical flicker frequency in a SSVEP-based BMI. *Clinical Neurophysiology*, (in press) doi: 10.1016/j.clinph.2014.12.010

Ikegami, S., Takano, K., Kondo, K., Saeki, N., Kansaku, K. A region-based two-step P300-based brain-computer interface for patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Clinical Neurophysiology*, 125: 2305-2312, 2014. doi: 10.1016/j.clinph.2014.03.013

Kawase, T., Sakurada, T., Koike, Y., Kansaku, K. Estimating joint angles from biological

signals for multi-joint exoskeletons.

Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2014), 1489-1493, 2014. doi: 10.1109/SMC.2014.6974122

Takano, K., Ora, H., Sekihara, K., Iwaki, S., Kansaku, K. Coherent activity in bilateral parieto-occipital cortices during P300-BCI operation. *Frontiers in Neurology*, 5:74, 2014. doi: 10.3389/fneur.2014.00074

近藤清彦, 公立八鹿病院のALSケアチーム. *全国自治体病院協議会雑誌*, 53: 105-118, 2014.

総説

抄録・プロシーディング

Kawase, T., Sato, Y., Kansaku, K. A BMI-based robotic exoskeleton for neurorehabilitation and daily actions: Elbow and wrist movements controlled by EEG and EMG signals. Program No. 636.10. *2014 Abstract Viewer/Itinerary Planner*. Washington, DC: *Society for Neuroscience*, 2014. Online.

Takano, K., Xia, B., Chaudhary, U., Gallegos-Ayala, G., Furdea, A., Ruf, CA, Kansaku, K., Flor, H., Birbaumer, N. Brain communication in a completely locked-in-patient using an EEG system. Program No. 74.02. *2014 Abstract Viewer/Itinerary Planner*. Washington, DC: *Society for Neuroscience*, 2014. Online.

Takano, K., Ikegami, S., Kawase, T., Nagao, M., Komori, T., Kansaku, K. An application of P300-based BMI in patients with spinocerebellar ataxia. Program No. P3-363. *2014 JNS Meeting Planner*. Yokohama: *The Japan Neuroscience Society*, 2014. Online.

Komatsu T., Takano, K., Kansaku, K. A development of an environmental control system based on wideband SSVEP-BMI. Program No. P2-369. *2014 JNS Meeting Planner*. Yokohama: *The Japan Neuroscience Society*, 2014. Online.

Kawase T., Kansaku, K. A BMI-based robotic exoskeleton for neurorehabilitation and daily actions: Reaching and grasping

movements controlled by EEG and EMG signals. Program No. P3-370. 2014 JNS Meeting Planner. Yokohama: The Japan Neuroscience Society, 2014. Online.

大良宏樹、高野弘二、神作憲司. リアルタイム脳磁図によるニューロフィードバックトレーニングの研究開発. 日本生体磁気学会誌・特別号, 27(1): 8-9, 2014.

書籍

Kansaku, K. Practical noninvasive brain-machine interface system for communication and control. *Clinical Systems Neuroscience*. (Eds) Kansaku, K., Cohen, L.G., Birbaumer, N., Tokyo, Springer, (in press)

神作憲司. Brain-Machine Interface 研究の臨床応用. シリーズ<アクチュアル脳・神経疾患の臨床>神経難病医療. 辻省次 (編集). 中山書店, (印刷中)

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.

近藤清彦, 加戸敬子, 竹末千賀子, 人工呼吸器を装着した筋萎縮性側索硬化症 (ALS) 患者. 医学的音楽療法 基礎と臨床, 京都, 北大路書房, 149-164, 2014.

2. 学会発表

講演等

神作憲司. 電気通信大学脳科学ライフサポート研究センター・セミナー. 2015年2月; 東京.

神作憲司. 非侵襲 BMI による環境制御とコミュニケーションの補助. 第18回新潟神経内科シンポジウム. 2014年12月; 新潟.

神作憲司. 脳科学から考える発達障害. 第33回東日本外来小児科研究会・発達障害シンポジウム-領域横断的理解のために. 2014年10月; 東京. (特別講演)

シンポジウム等

Kansaku, K. NRCD researches: Brain-machine interfaces for persons with physical

disabilities. *Conference on Systems Neuroscience and Rehabilitation (SNR2015)*. March 2015; Tokorozawa, Japan. (conference organizer)

大良宏樹、高野弘二、神作憲司. リアルタイム脳磁図によるニューロフィードバック研究開発. 第29回日本生体磁気学会. 2014年5月; 大阪.

一般口演・ポスター

Sato, Y., Kawase, T., Takano, K., Kansaku, K. A rubber hand experiment using an EMG controlled robotic arm. *The 92nd Annual Meeting of the Physiological Society of Japan*. March 2015; Kobe, Japan.

Kawase, T., Sato, Y., Kansaku, K. A BMI-based robotic exoskeleton for neurorehabilitation and daily actions: Elbow and wrist movements controlled by EEG and EMG signals. *The 44th Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2014; Washington DC, USA.

Takano, K., Xia, B., Chaudhary, U., Gallegos-Ayala, G., Furdea, A., Ruf, CA, Kansaku, K., Flor, H., Birbaumer, N. Brain communication in a completely locked-in-patient using an EEG system. *The 44th Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2014; Washington DC, USA.

川瀬利弘、神作憲司. 日常生活動作補助に向けた軽量 BMI 型上肢アシストスーツの開発. 第1回脳神経外科 BMI 懇話会. 2014年10月; 大阪.

Kawase, T., Sakurada, T., Koike, Y., Kansaku, K. Estimating joint angles from biological signals for multi-joint exoskeletons. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2014): Workshop on Brain-Machine Interfaces Systems*, October 2014; San Diego, USA.

Takano, K., Ikegami, S., Kawase, T., Nagao, M., Komori, T., Kansaku, K. An application of P300-based BMI in patients with spinocerebellar ataxia. *The 37th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*.

September 2014; Yokohama, Japan.

Komatsu, T., Takano, K., Kansaku, K. A development of an environmental control system based on wideband SSVEP-BMI. *The 37th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. September 2014; Yokohama, Japan.

Kawase, T., Kansaku, K. A BMI-based robotic exoskeleton for neurorehabilitation and daily actions: Reaching and grasping movements controlled by EEG and EMG signals. *The 37th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. September 2014; Yokohama, Japan.

佐藤勇起、川瀬利弘、高野弘二、神作憲司. ロボットアームを筋電操作する際の身体錯覚. *第8回 Motor Control 研究会*. 2014年8月; つくば.

北垣佑介, 林和希, 中島彩沙, 藤原京香, 荻尾亮平, 堀井ゆかり, 平野佐代子, 梅井欣也, 井上田鶴代, 田路直美, 馬場崎鈴子, 近藤清彦, 神経難病患者の長期療養支援—療養介護事業における生活支援員の役割—. *第2回難病医療ネットワーク学会*, 2014.11.14; 鹿児島市.

近藤清彦, 人工呼吸器装着 ALS 患者に対する音楽療法. *第11回神経難病における音楽療法を考える会*, 2014.11.21; 東京.

Nakayama, Y., Matsuda, C., Shimizu, T.,

Mochizuki, Y., Hayashi, K., Nagao, M., Kawata, A., Oyanagi, K., Nakano, I., Coparison of communication ability stage with adverse clinical signs in patients with amyotrophic lateral sclerosis (ALS) on tracheostomy invasive ventilation (TIV). *The 25th International Symposium on ALS/MND*, 5 - 7 December 2014, Brussels, Belgium.

Hayashi, K., Mochizuki, Y., Nakayama, Y., Nagao, M., Shimizu, T., Isozaki, E., The cerebral lesion of amyotrophic lateral sclerosis (ALS) patients in communication stage V: totally locked-in state. *The 25th International Symposium on ALS/MND*, 5 - 7 December 2014, Brussels, Belgium.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

神作憲司、川瀬利弘. BMI 運動補助装置. (特願 2014-094471). 出願日 2014.5.1.

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

II. 分担研究報告

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：システム脳神経科学に基づいた BMI による障害者自立支援機器の開発

研究分担者	神作 憲司	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部脳神経科学研究室長
研究協力者	小松 知章	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部研究員
研究協力者	高野 弘二	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部研究員
研究協力者	川瀬 利弘	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部流動研究員
研究協力者	大西 章也	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部流動研究員
研究協力者	佐藤 勇起	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部派遣研究員
研究協力者	セバスチャン ハルダー	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部特別研究員
研究協力者	大良 宏樹	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部客員研究員
研究協力者	外山 滋	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 障害工学部生体工学研究室長

研究要旨

脳から信号を取り出し、それを利用してコミュニケーションや運動の補助などを行おうとするブレイン-マシン・インターフェイス（BMI）技術を用いた障害者自立支援機器を開発する。これまで、視覚誘発性脳波を用いた BMI による環境制御を可能とし、ソフトウェア部及び着脱容易な脳波電極等ハードウェア部を開発した。これらの BMI 機器を用いた実証評価を進め、患者・障害者や病院スタッフ等からのフィードバックを受けつつ、その精度や使用感の向上、機能拡張のための研究開発を進めた。BMI 型上肢アシストスーツの開発も行った。平成 26 年度は、筋萎縮性側索硬化症（ALS）患者を対象として BMI 型環境制御装置を用いた病院や患者の居宅等における半年程度の長期実証評価を行った。評価には高周波の定常視覚誘発電位（SSVEP）方式等による簡易型を利用し、実用的とされる精度を確保した（>70%）。P300 方式を主とする従来型については、ALS および脊髄小脳変性症患者を主対象とした実験を進め、実用的な精度で BMI 機器を使用可能であることを確認した。着脱容易な BMI 用ゲル電極については実証評価を通してデータを蓄積し、ゲル成分の検討等を行った。BMI 型環境制御装置及び BMI 用ゲル電極・脳波キャップは、研究用途としての市販化に成功した。BMI 型上肢アシストスーツについては、日常使用を可能とするための軽量アシストスーツのさらなる軽量小型化やソフトウェアの改良を行い、脳卒中患者による試用を行った。

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) / ブレイン-コンピュータ・インターフェイス

(Brain-Computer Interface: BCI)」の技術を用いることで、筋萎縮性側索硬化症

(amyotrophic lateral sclerosis: ALS)、脊髄損傷、脳卒中などにより運動機能に障害を負った患者や障害者のコミュニケーション補助、生活環境制御や運動機能補助等が可能となる。

我々は、Donchinらにより報告され、アルファベットのワープロ入力に用いられた P300 スペラー方式 (Farwell and Donchin, 1988, *Electroenceph Clin Neurophysiol*) を家電制御に拡張して、視覚刺激により誘発された脳波信号を利用し、デスクライトの点灯やテレビのチャンネル切り替えといった家電操作等が可能で環境制御システムを開発した (Komatsu, et al., 2008, *Neurosci Res Suppl*; Komatsu, et al., 2009, *Soc Neurosci Abstr*)。

当初は視覚刺激として輝度変化 (白/灰) を用いていたが、これに色変化 (緑/青) を加えると、健常被験者の使用感および操作精度 (正答率) が有意に向上することを明らかにした (Takano, et al., 2009, *Clin Neurophysiol*; Takano, et al., 2009, *Neurosci Res Suppl*)。さらに、頸髄損傷者による視覚誘発型 BMI の実証評価でも、条件によっては 90%以上の正答率を示すことなど、実用に耐えうる精度 (70%以上) で操作可能なことを報告した (Ikegami, et al., 2011, *Clin Neurophysiol*)。

これまでに BMI の実使用者と考えられる、意思決定が可能でもそれを表出することが困難な進行期の ALS 患者等を対象として研究を行った。また BMI 機器の視覚刺激による操作精度の違いを検討した。このなかで、ALS 患者 7 名 (ALSFRS-R=9.4、男性 3 名、平均 64.1 歳)、対照群として年齢・性別を合わせた健常者 7 名を被験者とした P300-BMI の実験を行なった。視覚刺激には、従来使用されている文字盤上での行・列毎の刺激を利用するものと、開発手法であるより大きな刺激を利用した 2 段階での文字入力

(region-based two-step speller) の 2 種類を用い、その精度について比較を行った。その結果、対照群では、視覚刺激の違いによる有意な精度の差は観察されなかったが、患者群においては開発手法を使用することで有意な精度の向上が観察された (Ikegami, et al., 2014, *Clin Neurophysiol*)。

さらに実用化に向けた中長期の機器試用や運用に向けた環境整備として、病院スタッフや介助者によるシステム運用のためのマニュアル作成や、マニュアルでは対応が困難な事態への対処を可能とするシステムの遠隔メンテナンス機能について研究開発を行った。

我々は、その開発機器を用いて患者・障害者を対象とした実証研究を進めてきた。それらの結果から、開発した BMI 機器について、ALS において 4,000 人強、脊髄小脳変性症 (spinocerebellar ataxia: SCA) 等を合わせて 10,000 人程度の潜在的なユーザーが見込まれることが示唆された。

また、平成 25 年度には、実用化に向けて 1 ヶ月程度の実証評価を行い、その結果を受けてシステムの改善や運用方法に関するノウハウの蓄積を行った。

本分担研究ではこれらの成果をもとに、ALS 患者を主対象とした実証評価研究について、病院や患者宅での本 BMI 機器の実用化に向けた半年程度の長期試験を含めて進めると共に、ALS 患者だけでなく脊髄小脳変性症患者等を対象とした試験を行った。

B. 研究方法

実証評価は本研究課題で開発した BMI 機器及びシステムを使用して行った。開発品に関する詳細は別項にて示す。評価対象としては ALS を主とし、脊髄小脳変性症などの患者・障害者についても評価を行った（これまで 158 例）。

ALS および脊髄小脳変性症の患者については公立八鹿病院、都立神経病院および国立病院機構箱根病院に通院もしくは入院中の患者とし、病院施設もしくは在宅環境にて実験を行った。

B-a. 簡易型 BMI 機器による長期実証評価

SSVEP 方式による簡易型 BMI 機器を用い、病院および患者宅において長期試験を実施した。

対象は公立八鹿病院に ALS で入院中の患者（被験者 A）および都立神経病院から紹介をうけた在宅の ALS 患者（被験者 B、被験者 C）とし、評価には操作の精度を用いた。

課題は被験者の状態に合わせて選択され、主として、選択対象となる LED に対して、指定通りに入力を行う課題、誤入力をしない

ようにする課題、指定の順序で一連の入力を行う課題を実施した。実施頻度は週に 1 度ないし 2 週に 1 度とし、各回について精度を記録した。

実験は、病院においては主に理学療法士により、患者宅においては研究者と理学療法士により行われた。

B-b. 脊髄小脳変性症患者等を対象とした BMI 機器の実証評価

ALS 以外の難治性疾患の患者についても実験を行った。被験者は都立神経病院および国立病院機構箱根病院に通院もしくは入院中の患者とし、脊髄小脳変性症患者 8 名（男性 2 名女性 6 名、平均年齢 62.4 歳）を対象として P300 方式の BMI 機器を用いて行った。対照群として年齢・性別を合わせた健常者を被験者とした実験も行った。

課題としては文字入力を、これまでの研究で精度の向上に有効性が確認されている輝度変化に緑と青の色変化を加えた視覚刺激を用いて行った。コマンド入力の為の視覚刺激の強調回数は被験者に応じて 6～8 回に設定した。脳波電極は基準電極 2ch、データ用のチャンネル 8ch に設置し、記録された脳波をオンラインで解析、正答率を評価した。解析には線形判別分析を用いた。

実験は BMI 機器を被験者の状況に合わせて適切に設置し進行した。課題には P300 方式を用い文字入力のパネルは 2 段階で 1 文字を入力する方式を用いて行った。入力の選択肢数は 54 とした。第一段階では 6 つのアイコンから、第二段階では 9 つのアイコンから選択を行い、文字を入力した。

表 1. 各被験者の平均精度の月毎推移(%)

	8月	9月	10月	11月	12月	1月
被験者 A	75.0	77.1	80.6	75.0	72.9	85.4
被験者 B	67.0	65.8	75.0	79.2	83.3	91.7
被験者 C	75.0	75.0	84.6	88.9	83.3	89.6

(倫理面への配慮)

ヒトを対象とする本研究は、全てヘルシンキ宣言に基づき、また、申請者の所属機関の倫理委員会の承認のもと行った。さらに、本研究の非侵襲脳機能計測法を用いた実験は、日本神経科学学会研究倫理委員会「ヒト脳機能の非侵襲的研究」に関する倫理小委員会による「ヒト脳機能の非侵襲的研究」の倫理問題などに関する指針等に基づき実施した。

被験者及び保護者・関係者から、口頭ならびに文書にてのインフォームドコンセントを徹底し、自発的な同意を得た上で実験を行った。実験中は無用な苦痛を与えないように配慮した。

本研究で実施したすべての実験について、被験者の個人情報などに係るプライバシーの保護に配慮し、被験者が如何なる不利益を受けないように配慮した。結果の公表に関しては検査・実験の受諾と同様に被験者及び保護者・関係者から、口頭ならびに文書にてのインフォームドコンセントを徹底し、承諾を得た。また、個人が特定されないように格別の注意を払った。

C. 研究結果

C-a. 簡易型 BMI 機器による長期試験

病院、患者宅の被験者とも期間を通した SSVEP の平均精度は実用的な精度とされる 70%を越えた (79.1%)。

各被験者の月毎の平均精度を表 1 に示す。全体として実用的な精度とされる 70%を越える精度で推移していることがわかる。被験者 A では精度に大きな変化は無いが、機器の操作において、音楽プレイヤーを使用し、曲を選択、再生をし、曲が終わるまで機器の誤動作が無い状態で利用できている。被験者 B では、継続的な利用に伴い、平均精度が向上している (75%→91.7%)。課題以外ではネットラジオの選局を行い、好みの局でラジオ番組を聞くことが出来ている。被験者 C については、日によって状態が大きく異なり、開眼が困難な場合もあったが、そのような状態であっても繰り返しの使用により精度が向上した。

C-b. 脊髄小脳変性症患者等を対象とした BMI 機器の実証評価

平均の正答率は、SCA 患者群において 70.6%、対照群において 69.5%であった (第一段階での正答率はそれぞれ 87.5%と 87.2%、第二段階での正答率はそれぞれ 79.0%と 67.2%であった)。SCA 患者群では 8 人中 5 名、対照群では 8 人中 6 人が 70%以上の正答率であった。SCA 患者群のうち、第一段階で 70%以上の精度を示した被験者において、第一段階 (6 択) と第二段階 (9 択) での正答率について比較した結果、第一段階で正答率が有意に高い (t 検定、 $p=0.0036$) ことがわかった。また対照群においてはこのよ

うな有意差はなかった (t 検定、 $p=0.44$) ことから、SCA 患者群では選択肢数を適切に設定することが重要であることが示唆された。

D. 考察

本課題では患者・障害者を対象とした実証研究を進めた。

本年度はBMI機器の実用に向けた長期試験を行った。課題の実施のみではなく曲の選択やラジオの操作など、被験者が日常で求める機能の提供も行った。精度は先行研究で実用的とされている精度に達することができたが、さらなる精度の向上が求められる。

多様な病態への対応については、これまで主として行ってきたALSのみならず脊髄小脳変性症患者においてもBMI機器が実用的な精度で使用可能であることが示唆される結果となった。

E. 結論

今後とも、BMI 機器を福祉機器として実用化するために、高精度で、操作感も良いシステムの開発を継続し、神経難病や神経外傷などにより日常生活動作やコミュニケーションに支障をきたしている患者・障害者の自立支援へとつなげたい。

分担研究課題（小課題）：BMI システムの開発・機器の市販化への取り組み

A. 研究目的

本研究課題はブレイン-マシン・インターフェイス (BMI) による障害者の自立支援機器の開発および普及を目的としている。研究開発当初は機器の動作精度や準備の煩雑さに加え、脳信号の計測に使用する機器が高価であることが問題となっていた。これまで本研究課題において、機器の精度を高めるため、および必要とされる機能を拡充するための BMI システム、機器使用にかかる準備や片付けの煩雑さを低減するための電極の開発などを行ってきており、本報告はそれを継承するものである。

これは BMI システムの入り口（開発）から出口（普及）までの多岐にわたる事項であるため、内容を以下の 3 つに整理して報告を行う。

[a] BMI システム開発（コア）

[b] BMI システム開発（アプリ）

[c] 開発機器の市販化

A-a. BMI システム開発（コア）

これは昨年度報告の小課題『BMI システムの開発』における開発項目[a]の続報にあたる。詳細はそちらに譲るとして、おおまかには「外付けの視覚刺激装置（LED）と Windows タブレットを用い 100Hz 迄」の SSVEP-BMI を提供できる軽量構成、そして「外付け装置を無くし 120Hz 駆動液晶搭載の Windows ノート PC のみを用い 60Hz 迄」おなじく提供できる最小構成の 2 種をこれまで実装し運用してきた。

しかし実際には、両者のメリットを併せた「外付け装置無しでタブレットのみ」という運用の望まれる局面があった（当然のデメリットとして、刺激提示を 30Hz 上限としユーザに点滅を意識させない高周波 SSVEP は諦めることとなるが）。そしてこの構成においては、これまで確認出来ていなかった不安定

化が特に I/O 周りを中心に認められた。よってその原因追及および対策を行うものである。

A-b. BMI システム開発（アプリ）

BMI 型環境制御装置 (BMI-ECS) に期待される機能のひとつは娯楽面にあり、昨年度 (H25) よりの ECS 試験運用においては、IR リモコンによる家電操作のなかにテレビのチャンネル変更機能が含まれていた（他の操作項目や動作精度等は昨年度報告を参照のこと）。加えて今年度は、新たに音楽再生機能を提供する。

いまひとつの大きなニーズとして、一昨年度 (H24) の関連小課題で述べたとおり Web ブラウズが挙げられている。その際 BMI によるブラウジング自体は報告済みであるが、これは P300 方式での操作に特化した実装であった。そこで本年は、SSVEP やその他生体信号により汎用的に使える仕様にて追加開発する。

A-c. 開発機器の市販化について

近年、脳波計の低価格化などにより、現実的な価格での BMI 機器の提供が可能な環境が整ってきている。そこでこれまでの開発品を市販化することで、今後の BMI 機器の普及を推し進めるものである。

B. 研究方法

B-a. BMI システム開発（コア）

I/O 不安定化の原因として、視覚刺激のための描画の負荷を想定し、検討した。一昨年度 (H24) に報告した『液晶ディスプレイによる LED 代替』技術検証機 (OS X + OpenGL 環境) では、ノート PC の普及帯と比べてよい Core i5 プロセッサ + オンボード GPU 構成においてすら、たかだか 3% 程度という極低負荷率を達成出来ていた。しかし諸

般の事情により昨年度の本実装時は、クロスプラットフォームを部分的に断念し Windows 固有の DirectX による描画を行っている（詳細は昨年度報告を参照のこと）。その時点で検証機と同等構成でも数倍の負荷率となっていた。

さらに、デスクトップやハイエンドノート（≒電源や排熱に余裕のあるシステム）に限ってなら最早4コア8スレッド以上は当然と
いてよいが、タブレットは未だ2コア4スレッドの世界に留まっている。従って上述の落差はさらに拡大し、ゆうに10倍以上という高負荷率となっており、これが不安定化の主因と考えられた。

むろんハードウェアの能力は年々向上するので、気にせずこのまま3、4年放っておくという選択肢が無いわけではない。ただ今回は積極的な回避策も容易に考えられたため、それを実装し検討する。

B-b. BMI システム開発（アプリ）

音楽再生については、むろん本システムに学習型の IR リモコンが含まれているため、リモコン付き CD ラジカセ等を導入すればシステムとしては特段の追加実装なしに機能を提供することができる。しかし今回は PC 上での音楽プレイヤーの利点に着目し、アプリケーション『foobar2000』を BMI 用 PC に導入した。foobar2000 は TCP ソケット等の通信による“制御窓口”を持たないが、昔ながらの引数つき呼び出しによるコントロール（アプリ起動中に呼ばれた実行ファイルは、複数起動ではなく起動済アプリの制御となる）を提供しており、これを利用した。

Web ブラウズについては、CSS 等を駆使することで画面上のリンク等にタグづけし、対応するコマンドで外部からの制御を可能とするブラウザプラグインが既に知られている。今回これをブラウザ（Opera）に導入し、BMI からコマンド発行することでブラウジングを可能とした。

B-c. 開発機器の市販化について

今回市販化したものは、SSVEP キット、BMI 用ゲル電極・キャップである。SSVEP キットは定常視覚誘発電位（SSVEP）方式による BMI を使用するためのキットである。このキットを元に必要なものを加えることで他の BMI 方式での動作が可能となるような拡張性を保持している。BMI 用ゲル電極は頭皮への電極の設置、除去が容易で長時間の使用が可能で電極であり、キャップはこの電極を使用する際に使用するものであり、簡便な使用が可能である。

C. 研究結果

C-a. BMI システム開発（コア）

一昨年度（H24）の段階で、BMI-ECS システムは『シングルプロセス/マルチスレッド』型から『マルチプロセス/マルチスレッド』型に転換済みである。当該システムの中核は3プロセスから成り、MVC デザインパターンを参考に

Model: 脳波信号処理

View: P300/SSVEP セル表示、オペレータのセルクリック処理

Controller: アプリケーションマネージャ

に切り分けた実装を行ってある（UI の一部 Form 等が C 側にあるため、厳密には MVC というより半ば M-VC 的ではあるが、デザインパターン論は本題ではないので深入りしない）。そして各プロセスは TCP ソケットにより連携している。このネットワークによる負荷は、視覚刺激描画に次いで高い。

そこでネットワークの実装方式を更新した。結果、連携用通信の負荷率は、更新前の 1/10 以下（普及帯の Core i5 環境下では直接計測不能の低さ。8 倍ないし 16 倍頻度でのダミー通信を行ってようやく 1/10 まで“高負荷”化し計測可能となったので、恐らくは数十分の一程度と考えられる）に抑制することが出来た。

この軽減分は刺激提示まわりの負担増を1/3程度まで補償しうるものであり、結果として不安定性も解消された。

C-b. BMI システム開発 (アプリ)

BMI-ECS による音楽再生については患者での運用データ収集を開始しており、その結果については対応の小課題報告を参照のこと。またメディアへの実験公開も行った。

ブラウジングは目下、健常者での運用テストを開始している。

C-c. 開発機器の市販化について

SSVEP キット

SSVEP キットの構成は視覚刺激の提示と制御を行うためのノート PC、BMI システムのソフトウェア、脳波計からなる。BMI システムのソフトウェアは SSVEP 方式以外の BMI 方式に拡張が可能であり、脳波計についても SSVEP 方式では 1ch のみの使用であるが、8ch の計測が可能であり、今後の拡張が可能でキットとなっており、これまでに研究用途ではあるが市販化につながった (大学 1 件)。

ゲル電極・キャップ

BMI 用ゲル電極はディスプレイ方式でケーブル部分の接続で使用できるように提供されている。本品は本研究課題で行っている長期試験にも使用されている。また、これまでに研究用途ではあるが市販化につながった (大学等 6 件)。

D. 考察

D-a. BMI システム開発 (コア)

上述の結果において触れなかった、具体的なネットワーク実装の更新点について述べる。本来は手法ないし結果で述べるべき事であろうが、ひたすらに技術的な話なので別添資料扱いでこちらにおいて記すものである。

ネットワークにおいて、クライアント/サーバ (以下 C/S) 型のシステムはごく大雑把に述べれば

[1] 任意のタイミングで他者に処理要求を送る存在 (クライアント)

[2] 不特定多数の他者からの要求に従い処理結果を返す存在 (サーバ)

より成る。要求と応答という非対称性が C/S には存在し、本システムがプロセス間連携に採用している TCP ソケットも、やはり C/S に分化している。そして極論すれば、処理要求がなければサーバは眠っていてよく、処理負荷を抑制出来る。

しかるに本 BMI-ECS の中枢をなす 3 プロセス間では、便宜上 C/S の別が定められた実装となっているが実はその非対称性がない。正確には非対称ではあるのだが、通信内容 (≒連携したい機能) 次第でその[1][2]が反転するため、事実上消えてしまうのである。結局、クライアントを兼ねるため眠れないサーバが走り続けて負荷となるか、いま一つ特殊な手法でこれを回避した場合、詳細は省くが最低でも通信 1 回ぶんのタイムラグが積み増される (それではシステムの動作負荷が抑制できても手放しで歓迎出来るものではない)。

よって今回、すべてのプロセスに C/S のどちらも実装し「サーバは受信専用」「クライアントは送信専用」の切り分けを徹底した。これにより原理的に眠れないサーバそのものを駆逐できたため、各プロセス間のソケット数が倍増したにも関わらず、較べるまでもない程の極低負荷率が達成出来ているのである。

現時点でのこの更新の影響は (せいぜい 3 + 1 プロセス構成なので) 限定的であるが、今後オプション機能を担うプロセスは随時増えてゆく予定であり、その際に真価を発揮することが期待される。

D-b. BMI システム開発 (アプリ)

全ての機器やアプリケーションを自前で BMI 対応化することは事実上不可能であるため、現実的には「外部からの制御を受け入れている機器やアプリケーションの枠組み

へ相乗りする」のが上策である。その観点では、次なる展開としてホームネットワーク向けの DLNA 対応は注目に値すると考えている。

D-c. 開発機器の市販化について

本研究ではこれまでの開発品について市販化を推し進めた。その結果研究用途ではあるが、販売実績があった。今後販売を継続することで、一層の BMI 機器の普及の一助となることを望みたい。

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。図 1 にチップ化したゲルの例を写真として示す。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。ゲルは適当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、完全な



図 1 ゲルチップ