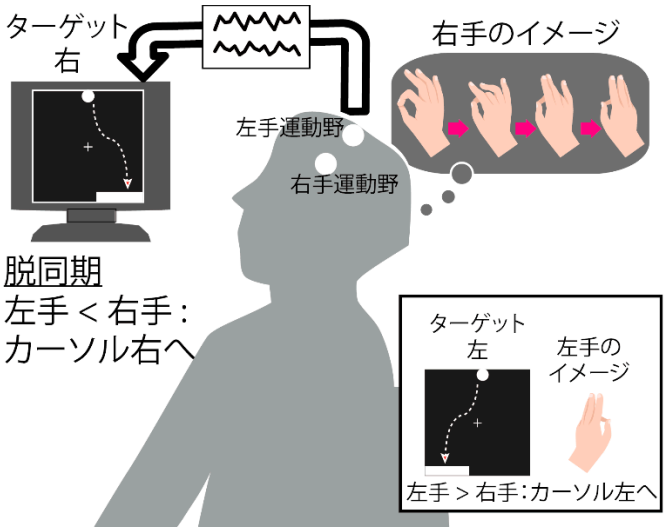
196　ブレイン・マシン・インターフェイスの個人差解明	笠原　和美

【目的】ブレイン・マシン・インターフェイス（BMI：Brain-Machine Interface）は、患者の脳活動を読み取り、その活動に基づいて車椅子やコンピューターなどの機械を動かすことで、病気やけがにより失われた脳機能を代替する技術として研究されている。一方、この BMI の操作能力には個人差があり、上手く使いこなせない患者も多い。その理由としては、脳の機能や構造、病態など一人ひとりの「脳」が異なることが挙げられる。我々は、BMI 技術を臨床に応用するためには、まずこの操作能力の「個人差」が脳の何に由来するかを解明し、そして個々の脳に合わせたテーラーメイドな BMI を提案する必要があると考えた。

【方法】健常被験者 24 名を対象に脳波に基づき駆動する脳波 BMI と機能的磁気共鳴画像法（fMRI：functional Magnetic Resonance Imaging）の同時計測を行った。この手法は、被験者が自発的に脳波をコントロールすることで BMI を操作すると同時に、操作中の脳活動を fMRI で計測する「脳波」と「fMRI」の同時計測である。本研究では、脳波 BMI の操作成績と fMRI で計測された脳活動を算出し、BMI 操作成績に影響する脳活動領域やその特徴を明らかにした。さらに、別の健常被験者 18 名を対象に、経頭蓋直流電気刺激による BMI の操作成績への影響を観察した。

【結果】高成績者と低成績者の BMI 操作中の脳活動を比べたところ、成績によって活動する領域に差はなかった。一方、その活動の広がり（活動体積）は、低成績者が高成績者よりも大きく、特に前部帯状皮質、下頭頂小葉、被殻で顕著であった。成績向上を狙った陽極経頭蓋直流電気刺激は、BMI 操作成績を向上させなかった一方で、運動誘発電位の振幅を減少させた。この運動誘発電位振幅の減少は、BMI を操作する時よりも安静時に顕著であった。また、陽極経頭蓋直流電気刺激による運動誘発電位の変化は、刺激前に成績が低い被験者で変化が大きく、刺激前に成績が高い被験者は変化が乏しかった。以上の結果は、BMI の操作に関わる個人差を解明するための糸口として非常に重要な知見であり、本成果は 2021 年 3 月に開催された IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies で paper award を受賞した。

本研究で用いたブレイン・マシン・インターフェイス



196. ブレイン・マシン・インターフェイスの個人差解明

笠原　和美

*沖縄科学技術大学院大学 神経計算ユニット

Key words：ブレイン・マシン・インターフェイス，個人差，磁気共鳴画像法，脳波

緒　言

ブレイン・マシン・インターフェイス（BMI : Brain-Machine Interface）は、患者の脳活動を読み取り、その活動に基づいて車椅子やコンピューターなどの機械を動かすことで、病気やけがにより失われた脳機能を代替する技術として研究されている［1］。一方、この BMI の操作能力には個人差があり、上手く使いこなせない患者も多い。その理由としては、脳の機能や構造、病態など一人ひとりの「脳」が異なることが挙げられる。我々は、BMI 技術を臨床に応用するためには、まずこの操作能力の「個人差」が脳の何に由来するかを解明し、そして個々の脳に合わせたテーラーメイドな BMI を提案する必要があると考えた。

我々は、これまでに BMI 操作能力が運動野の皮質体積の大きさに相関することを明らかにした［2］。この結果は、事前に患者一人ひとりの脳皮質体積を計測することで、BMI 操作能力を予測することを可能にした。さらに臨床応用に向け、パーキンソン病患者の BMI 操作に関する研究も公開した［3］。我々のこれまでの研究は、BMI 操作能力の個人差を脳情報から予測しており、これらの結果は将来的な臨床応用の一助になりうる。一方、操作できない患者が、なぜ BMI を上手く操作できないのか、その個人差のメカニズムや解決方法は不明のままである。

我々は、BMI が実際に患者の手助けとなるには、行動と脳構造の相関だけではなく、実際に操作能力の低い患者が「どのような」脳メカニズムを用いて BMI を操作しているのか、解明する必要があると考えた。そこで本研究は、BMI 操作中の脳活動を調べ、脳活動の広がりが操作能力と関係することを明らかにした。さらに、BMI 操作能力の向上を目的に経頭蓋直流電気刺激を施行し、BMI 操作信号及び操作成績に対する影響を調べた。その結果、非侵襲脳刺激は BMI の操作信号であるα帯域の脱同期を増強する可能性を示唆したが、直接的に操作成績を改善するには至らなかった［4］。この論文は、2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies において発表し、Paper award を受賞した。

方　法

1. 本研究の BMI システム

運動をイメージすると、運動野の 9.5～12.5 Hz（α波）帯域脳波が、安静時に比べて減衰する［5］。この脳波の減衰を「α波の脱同期」という。本研究で使用する BMI は、手指をタッピングするイメージをしている時の「α波の脱同期」を脳波計で計測し、その脳波信号をオンラインで解析し、画面上のボールを動かす「オンライン脳波 BMI」である。α波の脱同期が、左側＜右側の場合、ボールが右へ落下し、左側＞右側の場合、左へ落下する（図 1）。この BMI を自在に操作するには、左手と右手のイメージを手掛かりに、左右の脱同期が明確に区別される必要がある。

*現在の所属：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人間情報インタラクション研究部門

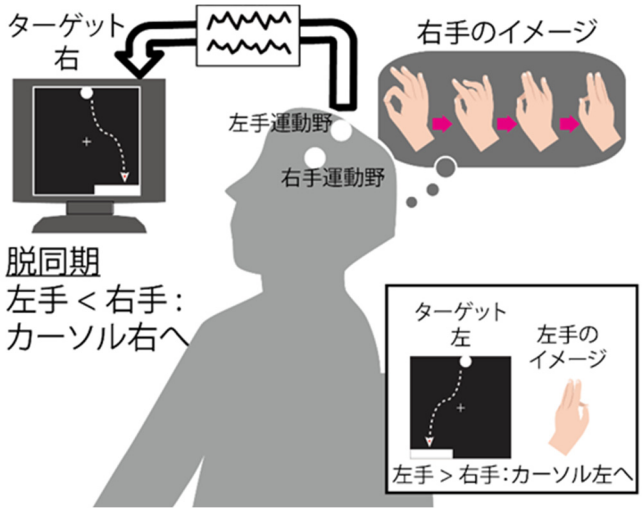


図 1. 本研究で用いた BMI 操作システム

被験者は、ディスプレイ下部に表示された左右のターゲットに応じて、左手及び右手のタッピングをイメージするように指示された。イメージ中の脳波をオンラインで解析し、運動誘発電位の左右差を算出した。その計算結果は、ディスプレイ上部のカーソルの下降に合わせて、左右の位置としてカーソルを移動させた。右下部にターゲットが表示されたときは、被験者は右手のタッピングをイメージすることで、運動誘発電位を左<右にし、カーソルが右下部に落ちるように BMI を操作する。

2. BMI 操作中の脳活動

健常被験者 24 名を対象に脳波 BMI と機能的磁気共鳴画像法（fMRI）の同時計測を行った。この手法は、被験者が自発的に脳波をコントロールすることで BMI を操作すると同時に、操作中の脳活動を fMRI で計測する「脳波」と「fMRI」の同時計測である。本研究では、脳波 BMI の操作成績と fMRI で計測された脳活動を算出し、BMI 操作成績に影響する脳活動領域やその特徴を明らかにした。

3. 経頭蓋直流電気刺激による BMI 操作への影響

健常被験者 18 名を対象に、経頭蓋直流電気刺激による BMI の操作成績への影響を観察した。経頭蓋直流電気刺激は、1 ミリ程度の微弱な直流電流を頭蓋の外から流すことによって、非侵襲に課題成績を向上または抑制できる技術である［6］。そこで我々は、この陽極経頭蓋直流電気刺激によって、BMI の操作成績を向上できると考えた。

結果および考察

1. BMI 操作中の脳活動

高成績者 12 名（操作成績が 63%以上）と低成績者 12 名（同 63%未満）の BMI 操作中の脳活動を比べたところ、成績によって活動する領域に差はなかった。一方、その活動の広がり（活動体積）は、低成績者が高成績者よりも大きく、特に前部帯状皮質（Anterior Cingulate Cortex）、下頭頂小葉（Inferior Parietal Lobule）、被殻（Putamen）で顕著であった（図 2、Cluster-level FWE $p<0.05$ corrected）。反対に、高成績者が低成績者よりも大きな広がりを持つ領域はなかった。

この結果は、BMI 操作の上手な被験者ほど、脳の活動領域が狭く、課題遂行に費やす負荷が低かったと考える。従って、BMI 操作の下手な被験者も訓練し熟達することによって、課題遂行に費やす負荷を減らし、操作成績を向上できる可能性がある。一方で、BMI 操作の上手な被験者は、学習をしなくても最初から BMI 操作のコツを掴んでいるため、負荷が小さかった可能性がある。この場合、BMI 操作の下手な被験者は、繰り返し訓練しても成績が改善しない可能性も否定できない。今後は、低成績者の操作信号に直接影響するような手法も検討する必要がある。

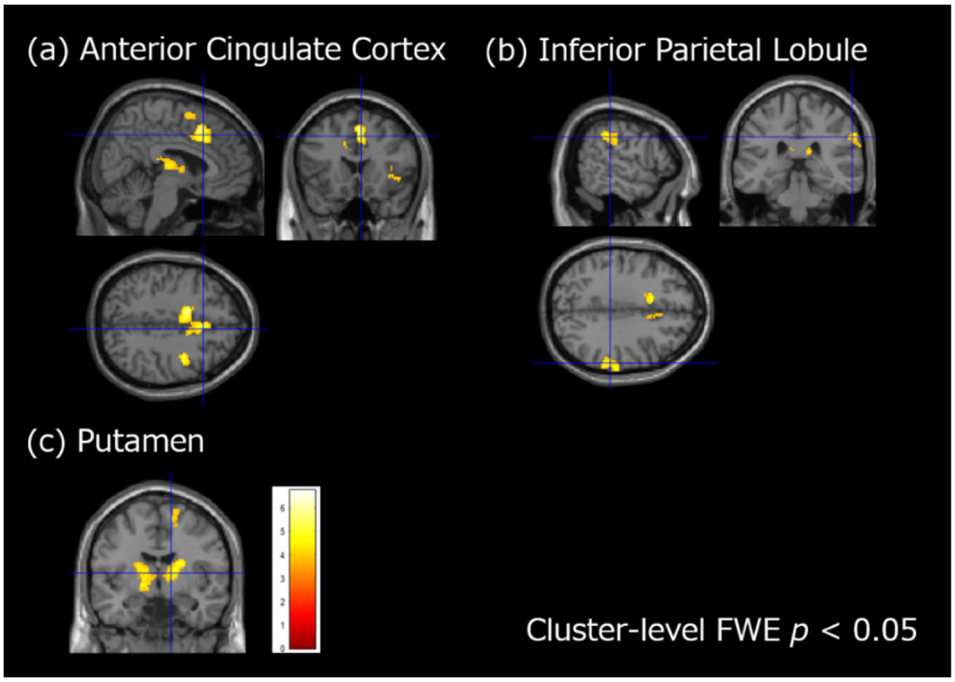


図 2. 低成績者 12 名が高成績者 12 名より脳活動の広がりが大きかった 3 領域

成績によって活動する領域に差はなかったが、その活動の広がりは、低成績者が高成績者よりも大きかった（Cluster-level FWE p<0.05 corrected）。低成績者が高成績者より大きかった活動領域は主に下記の 3 つであった。また、高成績者が低成績者よりも大きい領域はなかった。

a）前部帯状皮質（Anterior Cingulate Cortex）。

b）下頭頂小葉（Inferior Parietal Lobule）。

c）被殻（Putamen）。

2. 経頭蓋直流電気刺激による BMI 操作への影響

陽極経頭蓋直流電気刺激は、BMI 操作成績への向上効果を狙ったが、その成績を向上させなかった。一方で、比較群として偽刺激を行ったシャム刺激群は、学習効果が見られやや成績が向上する傾向にあった（図 3a）。次に、運動誘発電位は陽極電気刺激によって振幅が減少した。この運動誘発電位振幅の減少は、BMI を操作する時（イメージ時）、比較条件時（非イメージ時）のどちらにも起こったが、特に何もしないコントロール条件、つまり安静時に顕著であった（図 3b）。陽極経頭蓋直流電気刺激による運動誘発電位の変化は、刺激前に成績が低い被験者で変化が大きく、刺激前に成績が高い被験者は変化が乏しかった（図 3c）。また、シャム刺激の学習効果は、このような傾向はなかった。

本結果は、陽極経頭蓋直流電気刺激が BMI の操作信号である運動誘発電気を直接的に変化させる可能性を示唆した。一方、刺激の効果は、課題遂行時と安静時の両方で顕われたため、操作信号にイメージ時と安静時の運動誘発電位の差を用いた本 BMI では差がつかず、操作成績の改善には至らなかったと考える。今後は、イメージ時と安静時の運動誘発電位の特徴を捉え、各々に特異的に効果のある刺激条件を検討したい。

BMI で使用される「脳情報を解読し、機械を動かす」情報処理技術は、既に世界中で著しい研究成果が上がっている。例えば、機械学習を用いてどの脳領域のどの周波数が BMI 操作に適切か判別することで、操作成績を向上できる［7］。また、深層学習を脳信号の判別に用いると、従来の手法より BMI 判別精度が向上するという報告もある［8］。一方、BMI 操作能力が低い被験者の学習は難しいことが知られているにも関わらず、BMI の学習や操作能力の個人差に関わる脳のメカニズムを明らかにした本報告は、これまでに我々とベルリン工科大の Blankerz 教授のグループ［9］のみで、本着眼点は独創的かつ学術的インパクトも高い。

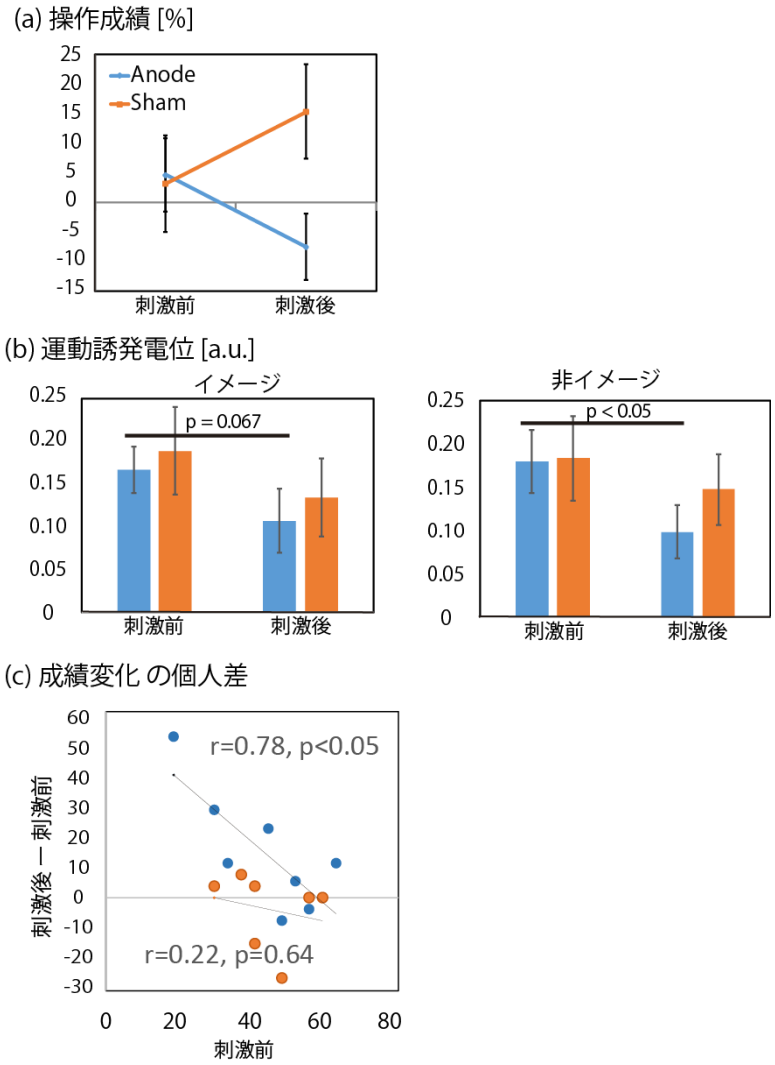


図 3. 経頭蓋直流電気刺激が及ぼす BMI 操作成績の変化

a) 操作成績の変化。操作成績は、偽刺激群は緩やかに促進する一方、陽極刺激群の成績は悪化する傾向にあった。

b) 運動誘発電位の変化。運動誘発電位は、イメージ時（BMI 操作時）において、刺激によって、振幅が減少する傾向にあった（Paired t test、p=0.067）。さらに、非イメージ時（安静時）において、刺激によって振幅が有意に減少した（Paired t test、p=0.05）。

c) 成績変化の個人差。陽極刺激群の運動誘発電位の変化は、刺激前の操作成績と相関した（r=0.78、p<0.05）。一方、シャム刺激群の運動誘発電位の変化は、刺激前の成績から説明できなかった（r=0.22、p=0.64）。

共同研究者・謝辞

本研究の共同研究者は、京都大学大学院医学研究科医学部教授の花川隆先生と沖縄科学技術大学院大学神経計算ユニット教授の銅谷賢治先生である。

文　献

1) Neuper C, Müller-Putz GR, Scherer R, Pfurtscheller G. Motor imagery and EEG-based control of spelling devices and neuroprostheses. Prog Brain Res. 2006;159:393-409. PMID: 17071244. DOI: 10.1016/S0079-6123(06)59025-9.

2) Kasahara K, DaSalla CS, Honda M, and Hanakawa T. Neuroanatomical correlates of brain-computer interface performance. NeuroImage 2015 Apr 15;110:95-100. Epub 2015 Feb 4. PMID: 17071244 DOI: 10.1016/S0079-6123(06)59025-9

3) Kasahara K, Hoshino H, Furusawa Y, DaSalla CS, Honda M, Murata Mand Hanakawa T. Initial experience with a sensorimotor rhythm-based brain-computer interface in a Parkinson's disease patient. Brain-Computer Interfaces. 2018 2-3(88-96), Epub 2018 Feb 26 DOI:10.1080/2326263X.2018.1440781.

4) Kasahara K, Nakamura T, Uehara K, Ogata Y, Doya K, Hanakawa T. Effects of transcranial direct current stimulation in brain-computer interface. 2021IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), In publication.

5) Wolpaw JR, Birbaumer N, Heetderks WJ, McFarland DJ, Peckham PH, Schalk G, Donchin E, Quatrano LA, Robinson CJ, Vaughan TM. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting. IEEE Trans Rehabil Eng. 2000 Jun;8(2):164-73. PMID: 10896178. doi: 10.1109/tre.2000.847807.

6) Kasahara K, Tanaka S, Hanakawa T, Senoo A, Honda M. Lateralization of activity in the parietal cortex predicts the effectiveness of bilateral transcranial direct current stimulation on performance of a mental calculation task. Neurosci Lett. 2013 Jun 17;545:86-90. Epub 2013 Apr 27. PMID: 23628670. doi: 10.1016/j.neulet.2013.04.022.

7) Blankertz B, Krauledat M, Curio G, Muller K. The Berlin Brain-Computer Interface: Machine Learning Based Detection of User Specific Brain States. JOURNAL OF UNIVERSAL COMPUTER SCIENCE 2006 Jun 28: 12(6):581-607

8) Meeting brain-computer interface user performance expectations using a deep neural network decoding framework. Schwemmer MA, Skomrock ND, Sederberg PB, Ting JE, Sharma G, Bockbrader MA, Friedenberg DA. Nat Med. 2018 Nov;24(11):1669-1676. Epub 2018 Sep 24. PMID: 30250141. doi: 10.1038/s41591-018-0171-y.

9) Haufe S, Meinecke F, Görgen K, Dähne S, Haynes JD, Blankertz B, Bießmann F. On the interpretation of weight vectors of linear models in multivariate neuroimaging. Neuroimage. 2014 Feb 15;87:96-110. Epub 2013 Nov 15. PMID: 24239590. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.10.067.