

BCI適用を目的とした時間知覚関連脳部位のfMRI解析による調査

卒業論文要旨 星野研究室 1170122 早坂 涼佑

1 はじめに

近年、BCI (Brain Computer Interface) の研究が盛んに行われている。BCIは、筋萎縮性側索硬化症患者や脊髄損傷患者などの全身麻痺患者に向けたコミュニケーションの支援など、生活の質を向上させるサポートツールになると期待されている。現状のBCIでは運動野や言語野、視覚野、聴覚野を用いた研究が多いが、それらの研究はひとつの領域のみを用いたシステムが多く、全身麻痺患者のサポートツールとしての限界がある。今後は、多数の領域を組み合わせたシステムや新しい脳部位の活動を利用していくことでBCIが発展していくと考える。本研究では新しい脳部位の活動を利用することを旨とし、時間知覚に関する脳活動の利用を検討する。

運動や食事、睡眠など人が生きるうえで関わるのが時間である。時間は、人の認識と行動の基本的特性である。時間論についての研究は古く、心理学や医学、物理学、工学などの分野で取り扱われている。これまでに脳計測機器を用い、さまざまな時間知覚に関する研究が行われており、その実態は少しずつ解明されつつある。時間知覚についての脳活動領域は、前頭前野や大脳基底核、小脳、右下頭頂小葉が上げられるが、一定した見解が示されていない。

そこで我々は、時間知覚の課題として、時間測定時に活動する脳部位をfMRI計測により調査し、BCIに用いることができるかを検討する。

2 秒当て課題

本研究では時間測定の実験課題として秒当て課題を用いた。秒当て課題とは、指定した秒数のタイミングでボタンを押すという課題である。本実験では指定する秒数(以下、カウントタイム)とシチュエーションの2種類の条件を設定した。以下に各条件の項目を示す。

- 5s counts
- 10s counts
- 眼：開眼、画面：表示なし (Open eyes)
- 眼：閉眼、画面：表示なし (Close eyes)
- 眼：開眼、画面：表示あり (Stopwatch)

カウントタイム(●)は、秒数の差から脳活動部位に差があるかを検証するために設定した。シチュエーション(■)は、眼の開閉、画面の表示有無による脳活動部位の違いを見るために設定した。条件は以上の2(カウントタイム)*3(シチュエーション)の計6通りで実験を行った。

3 実験方法

秒当て課題を遂行しているときの脳活動をfMRI計測により解析を試みた。fMRI画像の撮像にはSIEMENS社製のMAGNETOM Verio 3Tを用いた。実験課題は、Math Works社製のソフトウェアであるMatlab R2014aを用いて実験プログラムの作成・実行・制御およびログの記録を行った。実験デザインにはブロックデザインを用いた。課題内容として、各被験者はfMRI撮像を伴う実験(セッション)を6回行った。セッションごとにカウントタイムを交互に入れ替えた。セッション内には課題ブロックと安静ブロックが交互に配置されており、課題ブロックは9回設定した。一つの課題ブロックではいずれかのシチュエーションで課題を行い、3課

題ブロックごとにシチュエーションを変更した。よって各被験者は各条件のタスクを9回ずつ行った。カウントタイムとシチュエーションは被験者ごとに順不同とした。

実験は、被験者21名(平均:21.42歳、標準偏差:1.99)に対して行った。被験者には注意事項として、課題遂行時に手や足など体でタイミングを取らない、声を出さないように教示した。実験のログとして、被験者によるボタン押下時間を記録した。

fMRI画像については時間的、空間的な前処理を施したあと、各被験者の個人解析と全被験者による集団解析を行った。前処理、個人解析、集団解析にはMatlab上で動作するSPM12を用いた。

4 結果と考察

本章では、ログ解析とfMRI解析に用いるデータの選定と各シチュエーションの難易度について述べ、その後、ログの結果を考慮したfMRI解析結果を述べる。結果からBCIに用いることができるかを検討する。

4.1 被験者のログ解析

被験者21名のログを確認したところ、途中で寝てしまった被験者やカウントタイムを間違えた被験者がいた。fMRI解析において、被験者内のデータ数を揃える必要があるため、各被験者に対してシチュエーションごとのデータ数を揃えた。5s countsでは6個、10s countsでは30個のデータを除去した。

課題間に差があるかを調べるために、多重比較のボンフェローニ法を用いた。ボンフェローニ法の特徴として検定の多重性を避けるために、検定全体の有意水準を検定数で割った値を有意水準にする。F検定をClose eyesとStopwatchで行ったところ、等分散ではなかった。従って、各シチュエーションによるウェルチのT検定を行い、その後、多重比較をした。表1、表2に多重比較の結果を示す。

Table 1 Multiple comparison of 5s counts

	Open eyes and Close eyes	Close eyes and Stopwatch	Open eyes and Stopwatch	Significance level
P value of T test	0.147	0.001	0.001	P < 0.017

Table 2 Multiple comparison of 10s counts

	Open eyes and Close eyes	Close eyes and Stopwatch	Open eyes and Stopwatch	Significance level
P value of T test	0.466	0.001	0.001	P < 0.017

5s countsのOpen eyesとClose eyesについて $p=0.147$ と有意差はなかったが、Close eyesとStopwatchは $p=0.001$ 、Open eyesとStopwatchは $p=0.001$ と有意差があった。10s countsのOpen eyesとClose eyesについて $p=0.466$ と有意差はなかったが、Close eyesとStopwatchは $p=0.001$ 、Open eyesとStopwatchは $p=0.001$ と有意差があった。これらのことから、実験課題時のシチュエーションとしてはStopwatchが課題として易しく、Open eyesとClose eyesは課題として難しいと考えられる。

4.2 脳画像解析結果

fMRI 解析をした結果、カウントタイムでの脳賦活差は見られなかった。本稿では、5s counts と 10s counts のデータを合わせた解析結果について報告する。

各シチュエーションの集団解析結果 ($p < 0.05$, FWE) の脳表面賦活画像を図 1 に示す。脳表面賦活画像では右下頭頂小葉 (IPL) と右下前頭回 (IFG) に有意な活性化が見られた。

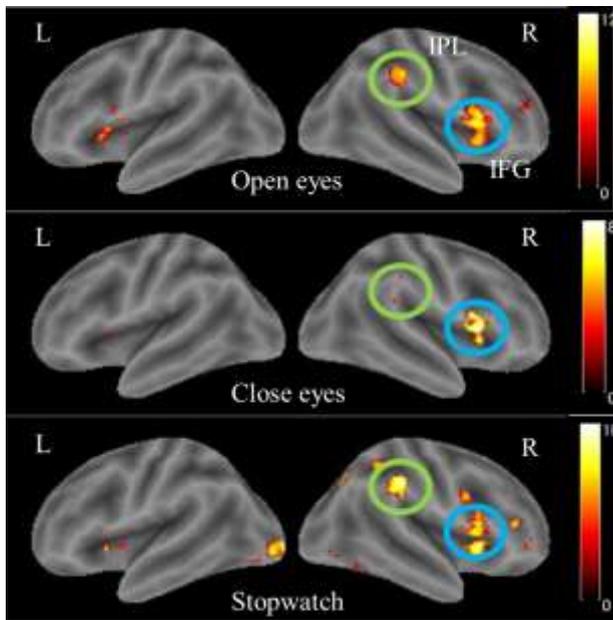


Fig. 1 The brain activation imaging of 3 situations
Green circle is right inferior parietal lobule (IPL)
Blue circle is right inferior frontal gyrus (IFG)

4.3 BCI への検討

まず、右下頭頂小葉について述べる。時間知覚に関わる脳部位として右下頭頂小葉に加え、前頭前野、大脳基底核、小脳が上げられる。大脳基底核や小脳について時間知覚の関与を報告しているが、先行研究では一貫した脳賦活は見られなかったとある (1)。右下頭頂小葉における時間知覚の関与は多くの神経イメージングで報告されている。脳卒中のための右下頭頂小葉の機能不全や経頭蓋磁気刺激 (TMS) によって作成された仮想病変は、時間測定の障害をもたらし、右下頭頂小葉が時間間隔を推定するために重要であることを示唆している (2,3)。右下頭頂小葉の活性化は、幅広い持続時間の刺激に反応して示されている (4)。Hayashi らは右下頭頂小葉に時間長についての機能があると報告している (1)。本実験結果からも右下頭頂小葉に有意差があったことから時間知覚についての機能があることを示唆する。しかし、Hayashi らの結果における脳活動の中心は、右下頭頂小葉の下表面 ($x, y, z = 58, -42, 30$) に位置していたのに対し、本実験で観測された右下頭頂小葉の活動は上表面に位置していた (Open eyes ($x, y, z = 54, -36, 58$); Close eyes ($x, y, z = 62, -30, 48$); Stopwatch ($x, y, z = 54, -32, 46$))。さらに以前の研究で示された右下頭頂小葉における陰性反応とは対照的に、本研究における右下頭頂小葉における BOLD 応答は陽性であった (1)。これらの結果は本実験結果が時間知覚において異なる役割を果たすことを示唆している。しかし、実験目的が異なるので詳細な機能については本実験からでは確かめることはできない。本実験結果は主観的な時間測定についての脳賦活ではないかと予測している。課題の難易度が簡単だと多くの脳領域が活性化し、難しいと簡単な課題に比べて脳活動領域が減少し、極性が逆になる部分もあると報告がある (5)。図 1

より、各シチュエーションにおける右下頭頂小葉の有意に賦活した voxel の数はそれぞれ Open eyes が 499voxels, Close eyes が 24voxels, Stopwatch が 739voxels であった。ログ解析結果では、Stopwatch が易しく、Open eyes と Close eyes は難しいという結果が得られたが、fMRI 解析結果では、Stopwatch が易しい課題となり、Open eyes は難しく、Close eyes がさらに難しいと考えられる。以上の結果から、時間測定課題の難易度によって右下頭頂小葉の脳賦活差が見られた。よって、時間測定課題難易度の差による右下頭頂小葉の脳活動は、BCI に用いることができると考えられる。

右下前頭回については、文献を調査したところ、時間知覚との関連を示唆するものは見つからなかった。しかし、下前頭回の機能としてリズムの生成、再生に関与するという報告が Konoike らによってされている (6)。本実験の秒当て課題は体でリズムを取らない、声を出さないという指示をしたことから、リズムの生成には内言が用いられたと考える。このことから、右下前頭回は時間測定ではないが、リズムの生成として BCI で用いることができると考える。

以上のことから、脳表面上にある部位で右下頭頂小葉と右下前頭回が BCI として用いることが可能であると考える。

5 おわりに

本研究は、時間測定についての脳機能を fMRI 計測により調査し、BCI に用いることができるかを検討した。

実験結果から、右下頭頂小葉と右下前頭回に有意な活性化が見られた。右下頭頂小葉は先行研究でも支持されていたように、時間知覚についての機能があることを示唆する。しかし、下頭頂小葉で得られた MNI 座標は、先行研究とは違いう上表面に位置していたため、時間知覚について異なる役割を果たすと考え、本研究では主観的な時間測定についての機能ではないかと考える。また、難易度の違いから脳活動が減少し、計測できない場合があることを考える。右下頭頂小葉は時間測定として BCI に用いることは可能であると考える。右下前頭回はリズムに関わるという先行研究を支持し、リズムを BCI として用いることが可能であると考える。今後は、時間測定やリズムを用いた BCI システムの提案を目指す。

文献

- (1) M. j. Hayashi, T. Ditye, T. Harada, M. Hashiguchi, N. Sadato, S. Carlson, V. Walsh, R. Kanai: Time Adaptation Shows Duration Selectivity in the Human Parietal Cortex, PLOS Biology (2015), pp. 1-27
- (2) D. L. Harrington, K. Y. Haaland, N. Hermanowicz "Temporal processing in the basal ganglia" Neuropsychology, Vol. 12, No. 1 (2015), pp. 3-12
- (3) M. Wiener, R. Hamilton, P. Turkeltaub, M. S. Matell, H. B. Coslett "Supramarginal gyrus stimulation alters time measurement" Journal Cognitive Neuroscience, Vol. 22, No. 1 (2010), pp. 23-31
- (4) P. A. Lewis, R. C. Miall "Brain activation patterns during measurement of sub- and supra-second intervals" Neuropsychologia 41 (2003), pp. 1583-1592
- (5) A. C. Livesey, M. B. Wall and A. T. Smith "Time perception: manipulation of task difficulty dissociates clock functions from other cognitive demands" Neuropsychologia, (2006), pp. 1-11
- (6) N. Konoike, Y. Kotozaki, H. Jeong, A. Miyazaki, K. Sakaki, T. Shinada, M. Sugiura, R. Kawashima, K. Nakamura, : Temporal and Motor Representation of Rhythm in Fronto-Parietal Cortical Areas: An fMRI Study, PLOS ONE, pp 1-19, 2015.