

修士論文

時間知覚の脳活動を用いた BCI システムの提案

Proposal of BCI system using brain activity of time perception

報告者

学籍番号: 1215046

氏名: 早坂 涼佑

指導教員

星野孝総准教授

平成 31 年 2 月 12 日

高知工科大学 電子・光システム工学コース

目次

第 1 章 序章	...1
1.1 研究背景	... 1
1.2 研究目的	... 3
第 2 章 脳の構造と脳活動計測	... 5
2.1 脳の構造と名称	... 5
2.1.1 下頭頂小葉 (英語)	... 6
2.1.2 島皮質	... 6
2.1.3 前頭前野	... 6
2.1.4 大脳基底核	... 7
2.1.5 小脳	... 7
2.1.6 下前頭回	... 7
2.2 脳活動	... 8
2.2.1 神経活動	... 8
2.2.2 血流動態と BOLD 信号	... 8
2.3 脳計測機器	... 9
2.3.1 Electroencephalography	... 9
2.3.2 Near-Infrared Spectroscopy	... 9
2.3.3 Magnetic Resonance Imaging	...10
2.4 国際 10-20 法	...11
2.3 BCI 研究例	...11
第 3 章 時間知覚	...13
3.1 時間知覚の心理学的モデル	...13
3.2 時間知覚の神経基盤	...14
3.3 時間の評価法	...14
3.4 時間知覚の課題	...14

第 4 章 時間生産課題 (fMRI)	...17
4.1 実験課題	...17
4.2 実験方法	...17
4.3 結果	...20
4.3.1 SPM 解析 (学部)	...20
4.3.2 PPI 解析	...23
4.4 考察	...24
第 5 章 時間生産課題 (NIRS)	...29
5.1 実験課題	...26
5.2 実験方法と環境	...28
5.3 結果	...31
5.3 考察	...31
第 6 章 時間知覚 BCI の提案	...32
第 7 章 終章	...34
謝辞	...35
参考文献	...36

第1章 序章

1.1 研究背景

私達は大小の数知れない機械に囲まれ暮らしているが、それら機械と私達の脳を直接つなぎ相互に作用させるシステムをブレイン・マシン・インタフェース (Brain-Machine Interface : BMI) と呼ぶ。狭い意味では、脳から得た信号をもとに、義手や義足を自らの手足のように自在に操作するためのインタフェースを指す (図1.1)。最近では、直接脳に電極を刺す方式 (侵襲式) をBMI と呼び、脳に電極を刺さない方式 (非侵襲式) をブレイン・コンピュータ・インタフェース (Brain-Computer Interface : BCI) と呼び分ける傾向が強い (本稿でも同様にBMI は侵襲式, BCI は非侵襲式として扱う)。これらの技術の応用例として、末期筋萎縮性側索硬化症 (Amyotrophic Lateral Sclerosis : ALS) 患者や脊髄損傷患者などの、全身麻痺患者のコミュニケーションの支援や生活の支援があげられる。ALS患者は、脳は正常に活動しているにも関わらず、全身の麻痺から発話やジェスチャーによるコミュニケーションが困難である。BCI (又はBMI) の技術を用いることにより、全身麻痺患者のコミュニケーションを支援し、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。

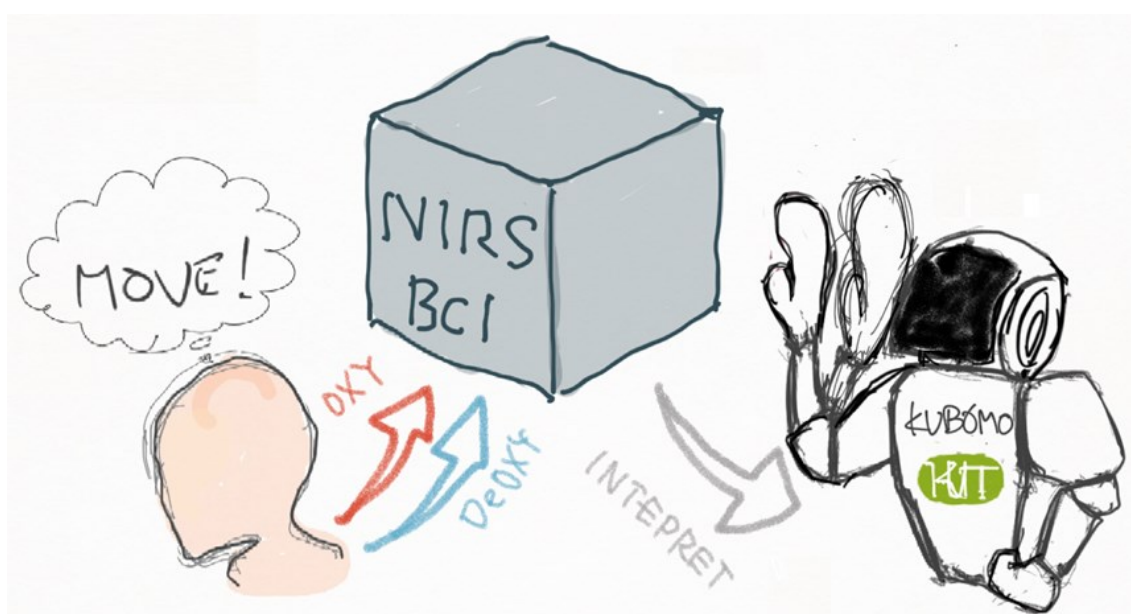


図1.1 ブレイン-コンピュータ・インタフェース

BMIは生体内外の事象と脳活動との対応が取り易いため、この分野の研究初期において多く採用され、基本理論構築に大きく貢献した。しかしながら、脳に直接アクセスすることの危険性や倫理面での問題が指摘されている。一方BCIは、人体に危険を与える可能性が低いため、ヒトを対象とした実験も盛んに行われており、現在はBCIの研究が主流にな

りつつある[1-3].

BCIを構築する為の非侵襲的な脳活動計測には、機能的磁気共鳴画像（functional magnetic resonance imaging : fMRI）, 近赤外分光法測定装置（near infrared spectroscopy : NIRS）, 陽電子放出断層撮影（positron emission tomography : PET）, 頭皮上脳電図（electroencephalography : EEG）, 脳磁図（magnetoencephalography : MEG）経頭蓋磁気刺激（transcranial magnetic stimulation : TMS）などがあげられる. このうち, EEG, NIRS はリアルタイムで信号の利用ができるため, BCIへの応用に適していると考えられている. 特にEEGはBCIへの応用例が先行研究において数多くあげられる[4-6]. しかしその一方で, EEGは電磁波によるノイズの影響を受けやすいことや, 使用時にジェルを皮膚表面に塗る必要があるなどの欠点がある. また, EEGを用いたBCIはP300電位, μ 波, β 波など普段制御することのない脳活動を利用する 경우가多く, 被験者には長期の訓練が必要となる[7]. 性能として, EEGは脳のある領域がいつ活動したかをどこまで精密に計測できるかという時間分解能は高いが, 脳のどこが活動したかを細かく計測できるという空間分解能は低い. fMRIは, 空間分解能は高いが時間分解能は低い. NIRSはfMRIと比べて時間分解能は同等だが, 空間分解能は低いといえる（図1.2, [8]参照）. BCIとしてのシステムの構築には空間分解能の高いfMRIにより脳部位の特定を行い, その脳部位の活動を用いてリアルタイムで計測と解析が可能なEEGやNIRSで実現することが理想であると考え.

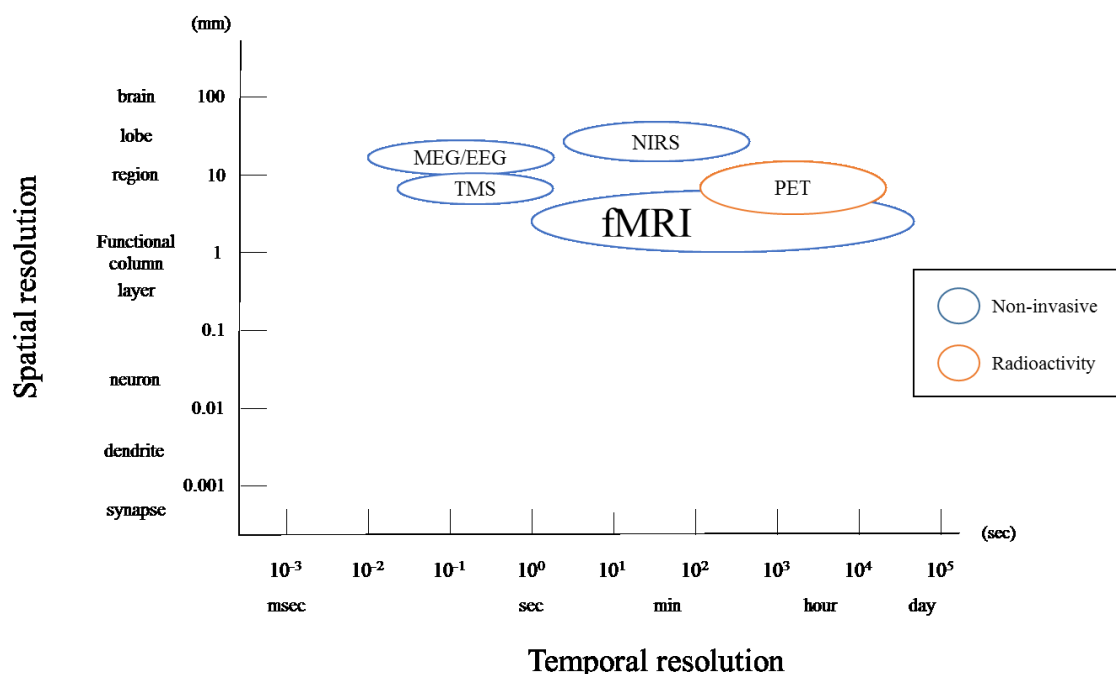


図1.2 脳活動計測法の空間分解能（対数軸）, 時間分解能（対数軸）[8]

これまでのEEGやNIRSを用いたBCIの研究では脳の運動野を計測し、前後左右の方向を考えたときの脳活動を用いてロボットの動作をさせるといったものが多い。運動野以外に視覚野や聴覚野、言語野を用いたBCI研究も存在する。今後は、多数の領域を組み合わせることや新しい脳部位の活動も利用していくことでBCIが発展していくと考え、本研究では新しい脳部位の活動を利用していくことを目指し、時間知覚に關与する脳活動の利用を検討する。

食事や運動、睡眠など人間が生きるうえで関わってくるのが時間である。時間は、人の認識と行動の基本的特性といえる。時間論の研究の歴史は古く、心理学や医学、物理学、工学とさまざまな分野で研究が行われている。最近では脳計測機器を用い、さまざまな時間に対する研究が行われ、その実態は少しずつ解明されつつある[9-13]。人の時間知覚には前頭前野や大脳基底核、小脳、縁上回などの部位が関わりとされている[14-17]。時間知覚に關与するとされている脳部位の調査には脳表面のほかに脳深部に位置するとされている大脳基底核なども含まれているので空間分解能に優れているMRIでの計測がよいと考える。

本研究では、時間知覚BCIの提案を目的としている。そのために、fMRI実験から時間知覚に關与するとされている脳部位をBCIで用いられるかを検討し、NIRSで計測可能か検証する。そして実験結果を踏まえて考えられるBCI案を述べる。

1.2 研究目的

本研究は時間知覚を用いたBCIシステムを提案することを目的としている。その基礎的検討として、本稿では以下の内容について述べる。

1. fMRI実験による時間知覚時の脳活動計測
2. NIRS実験による時間知覚時の脳活動計測
3. 関連脳部位の活動を用いたBCIシステムの検討

1では、fMRI実験による時間知覚の脳活動計測から脳表面上での活動の有無や条件による活動の違いを検討する。2では、fMRI実験で検討した内容をNIRSで検証する。3では、1や2の結果から時間知覚BCIの提案をする。第1章では研究背景と目的について述べた。第2章では、先行研究の紹介と共に脳の構造と脳活動計測について述べる。第3章では、時間知覚について述べる。第4章では、fMRI実験について述べ、第5章では、fNIRS実験について述べる。第6章では、時間知覚BCIの提案について述べる。最後に終章で結論を述べる。

第2章 脳の構造と脳活動計測

本章では脳の構造と脳活動計測について述べる。まず、脳の大まかな区分とその名称について述べ、本研究で取り扱う時間知覚に関与するとされている領域について先行研究の事例と共に述べる。脳活動については、その原理と代表的な脳活動計測機器について紹介する。

2.1 脳の構造と名称

神経系は中枢神経系と末梢神経系に分類され、脳と脊髄が中枢神経系である。脳の基本的な部位・名称に関して簡単に説明する。まず大脳の断面図を見ると、白色の部位を灰色がかった部位が覆っていることが分かる(図2.1)。灰色の部位は灰白質と呼ばれ、ニューロンの細胞体が密集しており、白色の部位は白質と呼ばれ、ニューロンの軸索が通っている部位である。表面には多くの皺のような脳溝とそれらに囲まれて膨らんだ脳回がある。大脳皮質は表面部に位置している灰白質のところであり、多くの精神機能が担われている。また、表面部だけでなく脳組織内部にも細胞体の密集した灰白質があり、神経核と総称する。ヒトの脳には多くの溝があり、皮質の面積が大ききことを意味する。大脳皮質は溝や形などの特徴から、前頭葉、側頭葉、頭頂葉、後頭葉の4つの脳葉に区分できる(図2.2)。これらの脳葉には、それぞれ異なった機能を持つ領野が存在する。次節では、本研究に関わる部位の機能について述べる。



図 2.1 ヒトの大脳断面図

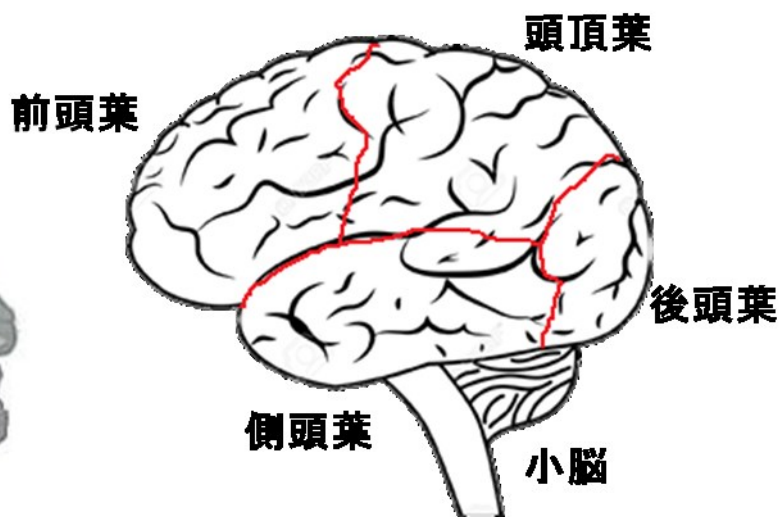


図 2.2 大脳皮質

2.1.1 下頭頂小葉 (図 2.3)

下頭頂小葉 (Inferior parietal lobule ; IPL) は頭頂葉の側面に位置し、縁上回と角回の二つの脳回に分けられる。角回は縁上回の後方に位置し、言語や認知、時間知覚などに関連する多数の処理に関わるとされている。時間知覚における下頭頂小葉の関与は多くの神経イメージングで研究されている[18-21]。脳卒中による右縁上回の機能不全または TMS によって作成された仮想病変は、時間推測の障害をもたらし、縁上回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[22,23]。右縁上回に時間長に応答するニューロン群の存在を示唆する報告がある[24]。また、縁上回は他人の言語を理解する働きがあるといわれるウェルニック野が一部に含まれる。角回や縁上回の障害でゲルストマン症候群になり、字を書くことができないことや計算ができなかったといったことから認知に関わることが報告されている。その他に伝導性失語や音韻性錯語は左縁上回の損傷で発祥することが多いとの報告もある[25,26]。

2.1.2 島皮質 (図 2.3)

島皮質 (Insula lobe) は側頭葉と頭頂葉を分ける外側溝の中に位置している。島皮質は前部と後部で機能的違いがある。前部では、感覚的な体験のための情動に関連した文脈情報を生み出すとされている。後部では、聴覚や体性感覚、骨格運動と関わっているとされている。島皮質には時間弁別課題で訓練を行ったときに、左島皮質で強い活性化が見られたとの報告がある[27,28]。また、右島は知覚的および行動的要求を伴うタスクにおいて、パフォーマンスの調整と評価に関与するという報告がされている[29]。

2.1.3 前頭前野 (図 2.3)

前頭前野 (Prefrontal cortex) の機能は注意や記憶、解決法略など多岐にわたるため、その機能に一致した見解は得られていない。Mangelsらは、秒範囲の時間弁別課題では前頭葉の影響が観察され、ミリ秒範囲では観察されなかったと報告している。これは相対的に作業記憶や注意の負荷の高くなる秒範囲の時間課題において、前頭前野の損傷が大きくなる可能性を示唆していた[11]。また、Rioらは基準間隔と比較間隔の刺激を連続に提示して、基準間隔に対する比較間隔の長短を判断させる課題を参加者に行わせ、そのときの脳活動を fMRI で測定した。基準間隔に対応する時間帯では両側の前頭前野と右下頭頂小葉が賦活し、これらは時間情報の符号化に関連することを示した[17]。

2.1.4 大脳基底核 (図 2.4)

大脳基底核 (Basal ganglia) は、大脳基底核の中の黒質から線条体へのドーパミンのコントロールが利かなくなるパーキンソン病や、注意欠落/多動性障害、ドーパミンの神経伝達の過剰が一因とされる統合失調症における時間感覚の変異から注目されている[30]. パーキンソン病患者ではミリ秒範囲の時間知覚障害や数十秒範囲の計時行動の困難が報告されている[31].

2.1.5 小脳 (図 2.2)

小脳 (Cerebellum) は、生物の時間知覚を調べるために一定間隔で繰り返される視聴覚刺激の不意の欠落を検出するようにサルを訓練させ調べたところ、小脳歯状核のニューロンが関わるという報告がある[14]. また、小脳の外側のネットワークを含む複数のニューロンの調整によって時間を表現する可能性が示唆されている[32].

2.1.6 下前頭回 (図 2.3)

下前頭回については時間知覚に関与するという報告はされていない. しかし、時間知覚に密接な関係を持つと考えるリズムに関与するという報告がされているためここで紹介する. 下前頭回 (Inferior frontal gyrus ; IFG) は、ヒトの脳の前頭葉に存在する脳回である. 下前頭回には運動性言語の中枢といわれるブローカ野も含まれている. 先行研究で時間知覚に関わるとしている文献はなかった. しかし、視聴覚によるリズムの実験で右下前頭回と右下頭頂小葉が関わるとの報告がある. リズムエンコーディング課題時に右手, 左手, 右足, 口のどの状態においても右下前頭回に有意な活性化があったことから、知覚されたリズム要素を時間的な流れに編成する際に重要な役割を果たすことを示唆した[33].

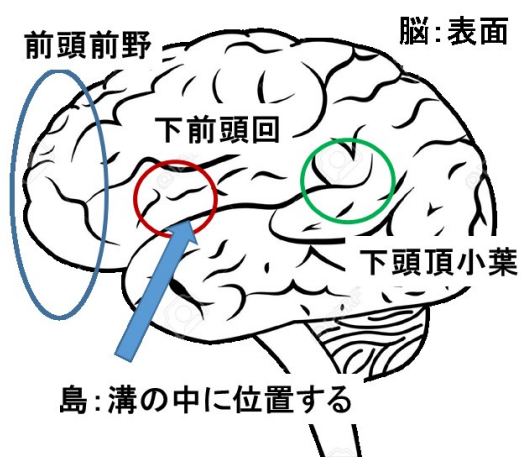


図 2.3 本研究で扱う脳表面の部位

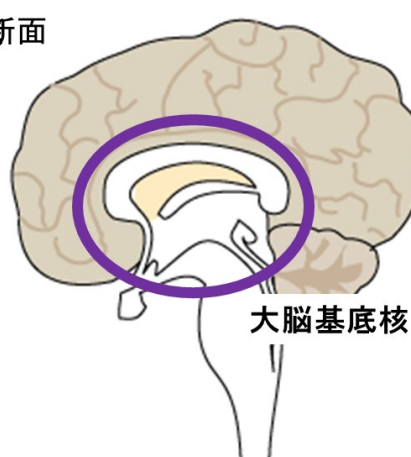


図 2.4 大脳基底核

2.2 脳活動

2.2.1 神経活動

ヒトの脳（大脳と小脳）には神経細胞（ニューロン）が数多く存在し、その数は1000億以上と言われている。さまざまな生理学的活動がニューロンの活動によって生じる。ニューロンが電氣的に活動するにはエネルギーを必要とする。ニューロンに限らず、私たちの細胞に必要なエネルギーはアデノシン三リン酸（adenosine triphosphate; ATP）である。ATPを作るには酸素によって糖（グルコース）を解糖する必要がある。ところが、酸素とグルコースは脳内にほとんど貯蔵されていないので、血液を介して酸素とグルコースを供給している。すなわち、神経活動（脳の一次信号）に伴って代謝活動や血流の増大が生じる（脳の二次信号）。この一連の過程を神経血管カップリングという[8]。

2.2.2 血流動態と BOLD 信号

神経細胞が活動すると、活動している神経細胞に酸素を供給するため、酸素と結びついてある酸素化ヘモグロビンが血液により運ばれる。酸素を細胞に渡したヘモグロビンは脱酸素化ヘモグロビンになり、酸素化・脱酸素化ヘモグロビンの比率が変化する。しかし、酸素化ヘモグロビンの減少を防ぐために血流量が変化する。その結果、多量の酸素化ヘモグロビンが活動している神経細胞に送られる（図2.5）。これにより、脱酸素化ヘモグロビンの絶対量は増加するが、酸素化ヘモグロビンの増加により、相対的に脱酸素化ヘモグロビンは減少する。酸素化ヘモグロビンは反磁性の特性を持ち、脱酸素化ヘモグロビンは常磁性の特性を持つ。これらのことから、脱酸素化ヘモグロビンはMRIの磁場を乱す要因であったが相対的に減少することにより、信号は強くなる。これがBOLD (Blood Oxygenation Level Dependent) 信号になる[34]。

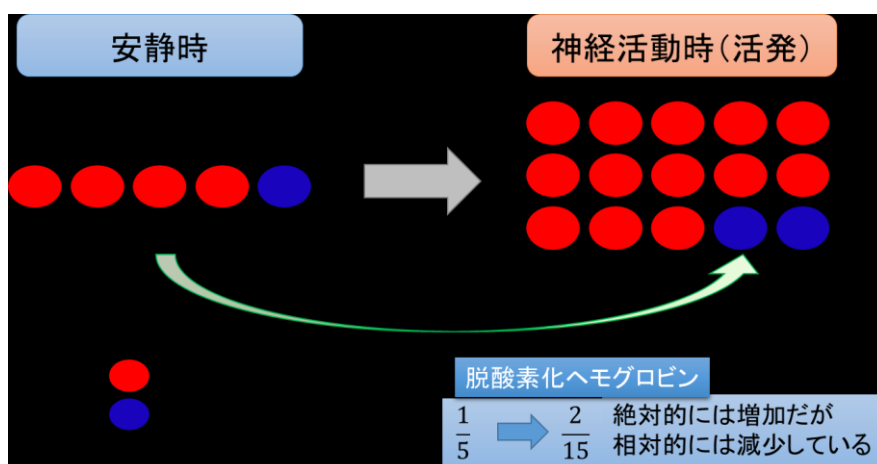


図2.5 脱酸素化ヘモグロビンの減少

2.3 脳計測機器

脳計測機器は脳の一次信号や二次信号を計測している。EEG, NIRS, MRI の計測原理を簡単に説明し、3つの脳計測機器について利点と欠点を述べる。

2.3.1 Electroencephalography [8]

脳電図 (EEG) とはヒト・動物の脳から生じる電気活動を頭皮上などに電極を置き、波形として記録するものことである。意識障害やてんかんなどの病気の検査に用いる。

ヒトの脳の灰白質には 1mm^3 あたり数万個の神経細胞が存在し、1つの神経細胞に対して数千から数万個のシナプスが存在する。神経細胞の活動電位がシナプスに到達するとシナプス後電位が発生する。シナプス後電位は興奮性シナプス後電位と抑制性シナプス後電位の2種類ある。興奮性シナプス後電位は、脱分極性の電位 (excitatory post synaptic potential: EPSP) が生じて活動電位が生じやすくなる。脱分極性とは電位が分極している状態からプラス方向に電位が変化することである。一方、抑制性シナプス後電位は、過分極性の電位 (inhibitory post synaptic potential: IPSP) が発生し、活動電位が発生しにくくなる。過分極性とは電位が分極している状態からマイナス方向に電位が変化することである。シナプス後電位の発生に伴って、神経細胞の細胞体とシナプス後電位が生じた尖樹状突起の間で細胞内電流が流れる。細胞内電流は細胞外へ流れ出て、細胞内へ戻る細胞外電流を形成する。個々の神経細胞が発生する電流は極めて小さいが、ある領域内の多数の神経細胞が短期間で一気に活動すれば、シナプス後電位が時間的・空間的に加重されて、頭皮上に置いた電極でも電圧の変化として計測することができる。EEG は脳の一次信号を計測している。以下に EEG の利点と欠点を述べる。

利点：安価，時間分解能が高い，リアルタイムで計測，解析が行える

欠点：空間分解能が低い，ノイズが乗りやすい

2.3.2 Near-Infrared Spectroscopy [8]

近赤外線スペクトロスコープ (NIRS) は、近赤外線を物質に照射し、透過してきた光を解析して非破壊的に対象物の構成成分を分析する方法で、食品科学や農業などさまざまな領域で用いられている。

生体に照射された光は吸収あるいは散乱によって減光されるが、生体組織がどのくらい光を吸収・散乱するのかは波長に依存している。通常、近赤外線である $700\sim 1300\text{nm}$ の波長領域が生体を透過しやすい性質をもっている。生体物質で近赤外領域の光を吸収するのは主として血液成分の赤血球に含まれるヘモグロビン (Hb), 筋肉中のミオグロビン (Mb), ミトコンドリアにおける電子伝達系の酵素であるチトクローム C オキシダーゼ (cyt.ox.) が上げられる。これらの吸収される程度が Hb, Mb の酸素化状態, cyt.ox. の酸化状態によって

変化することが利用される。NIRS では、生体に近赤外線を照射し、照射点から数 cm 離れたところで体外に現れた光を検出しその性状を解析して Hb 濃度変化を求める。以下に NIRS の利点と欠点を述べる。

利点：頭部に光源となるものと受光部となるフォトダイオードを装着するだけで計測可能，他の計測機器との同時計測も容易，リアルタイムで計測，解析が行える

欠点：EEG に比べて高価，深部は計測できない

2.3.3 Magnetic Resonance Imaging [34]

磁気共鳴画像法 (MRI) についての詳しい原理は3章で述べるのでここでは簡単な概要を述べる。地磁気の静磁場強度は約 0.00005T (テスラ) であり、現在最も普及している MRI の静磁場強度は 3T である。7T の MRI も開発されている。MRI は地磁気の約 60000 倍の磁場をもって脳計測を行っている。強力な磁場をもっているため、金属性のものを持ち込むことはできなく、その扱いには注意が必要である。MRI の磁場が人体に及ぼす影響については確認されていない。また、安全性については理論的に立証されていない。しかし、今日まで MRI の磁場は人体に影響がなく安全とされ、医療現場等で使用されてきている。MRI の手法として、sMRI (structural magnetic resonance imaging) と fMRI (functional magnetic resonance imaging) がある。一般的に MRI と呼ばれる方法は sMRI を指し、明瞭な体内外の構造を撮像するための手法であり、fMRI が脳活動を調べるために用いる撮像手法である。以下に MRI の利点と欠点を述べる。

利点：空間分解能が高い，身体のどの方向の平面についても画像を得ることができる，時間分解能も NIRS と同等

欠点：血流変化と活動電位の間には数秒の時間差があるので厳密な時間測定はできない，MRI 本体は非常に高価であり，維持にもコストがかかる。

表 2.1 脳計測機器比較

装置	時間分解能	空間分解能	リアルタイム性

本節では、脳計測機器の代表的な EEG, NIRS, MRI について述べた。その他の脳計測機器も含め、まとめを表 2.1 に示す。

2.4 国際 10-20 法

国際 10-20 法とは、NIRS や EEG などの脳計測のときに、センサーを頭部に配置する場所を決める国際標準の方法である。鼻根（ナジオン）と、後頭結節（イニオン）を結ぶ線の二等分点と、左と右の耳介前点を結ぶ線の二等分点の重なる点を Cz と呼ぶ。これが頭部の中心となり、脳表では中心回と大脳縦裂の交点付近となる。Cz とナジオンを結ぶ線および Cz とイニオンを結ぶ線を 5 等分し、左右耳介前面点と Cz を結ぶ線を 5 等分する。同じ等分点を結ぶと等高線ができ、その交点近傍に名称がついてある（図 3.5）。本研究でも国際 10-20 法を用いることで時間知覚に関与する脳部位の計測を行う。

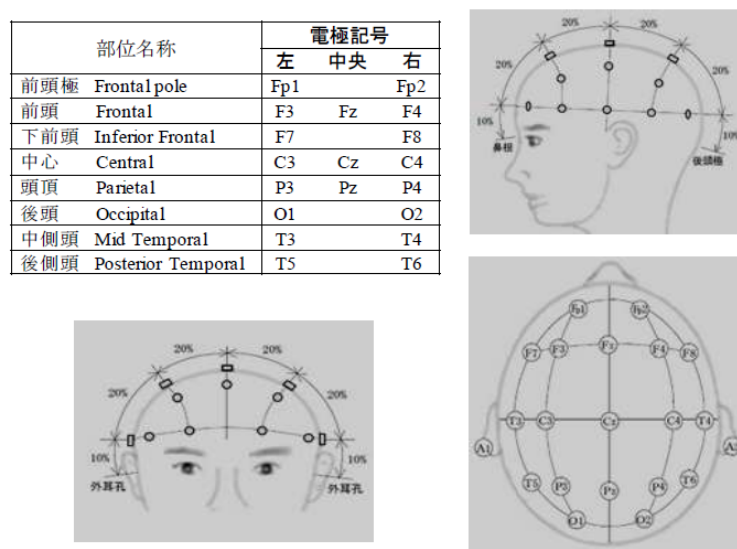


図 3.5 国際 10-20 法の電極配置

2.5 BCI 研究例

BCI の研究は、人体に影響を与えないためさまざまな研究が行われている。本節では BCI 研究を紹介する。脳の神経活動を外部の機器に取り込み、解析することで、車椅子の制御や文字入力支援などに応用する BCI の研究が盛んに行われている[35,36]。運動野を用いた研究例としては、手指運動時の NIRS 信号から左手の運動の開始と終了の推定を行うシステムや[37]、足の動作のイメージの有無を検出する BCI[38]がある。その他に、EEG を使用した手動作支援[39]や NIRS と機能的電気刺激を組み合わせ、脳活動レベルが高いと判定された期間に使用者の上腕二頭筋に電気刺激を加えてひじ関節の屈折運動を誘発させるというリハビリテーションシステム用 BCI も報告されている[40]。運動野以外にも、聴覚野や視覚野、

言語野を用いたものが存在する。視覚野と聴覚野による多感覚拡張現実技術を用いた BCI の開発[41], 聴覚を用いた意思伝達支援システムの開発が行われている[42]. 言語野は NIRS を使用した黙読を入力信号に利用した BCI の開発が報告されている[43].

第3章 時間知覚

本章では、時間知覚について述べる。運動や計画などヒトが生活するうえで時間は必ず関わってくる。時間とはヒトの認識と行動の基本的特性である。時間知覚の変調は、パーキンソン病や統合失調症、注意欠陥・多動性障害、自閉症などで見られることが知られている。これらの疾患群の病態理解や脳内メカニズムの解明に向けてさまざまな研究が行われている。まず、時間知覚の概念のベースとなる心理学的モデルについて述べる。次に、時間知覚の神経基盤について紹介する。その後、時間知覚の評価方法について述べる。

3.1 時間知覚の心理学的モデル

時間知覚の心理学的モデルは大きく2つに分類されている。一つは感覚的処理モデルである。感覚的処理モデルは何らかの内的な振動子やペースメーカーのような時間情報の基礎となるシステムを生体が持っているとは仮定している[44]。このモデルでは、連続的な時間の流れを離散量としてパルスや単位時間に置き換える変換過程により時間知覚を捉えようとしている。もう一つは認知的処理モデルである。時間とは無関係な情報の処理によって時間が知覚されると仮定している[45]。時間が長ければ、その中に含まれる情報も多くなる。従って、処理された情報量が多ければ、それに応じて時間が長いと知覚される。これらのモデルは、高次の記憶をも含めた情報処理に依存して時間知覚が成立することが示唆されている。また、感覚的および認知的という対立的な考え方に対し、両方の処理過程が時間知覚に関与する統合的なモデルも提案されている[46]。

時間知覚に関与する神経基盤は内部時計を仮定する感覚的情報処理モデルに沿って解釈されることが多い[47]。感覚情報処理モデルでは振動子やペースメーカーなどの時間情報の形成に必要な機構を直接仮定しているため、神経機構との対応を議論しやすいと考えられる。すべての感覚情報処理モデルは、時計、記憶、決定の主要な3つの過程から構成される点において共通している[48]。時計過程では、振動子やペースメーカーから一定の間隔で発生する信号を一時的に蓄積する。記憶過程では、作業記憶内に蓄積された信号を元に計時開始からの時間情報が維持され、参照記憶内に基準となる過去の時間情報が存在する。決定過程では、現在の時間情報と基準となる時間情報を比較検討し、反応を決定している。これらの過程がどのようなメカニズムで実現されているのか議論が続いている。

3.2 時間知覚の神経基盤

時間知覚の神経生理学的基盤に関する検討はさまざまな視点から行われてきた。従来からの神経心理学的および生理心理学的研究だけではなく、最近では、機能的磁気共鳴画像法（fMRI）や陽電子放射断層法（PET）を用いた脳機能画像研究により、重要な脳領域が示されてきた。時間知覚において重要な機能を担うのは、前頭、大脳基底核および小脳が明らかとなっている。

3.3 時間の評価方法

ヒトの時間に関する感覚はそのときの環境や内的状況によって変わってくる。あるときは時間が早く過ぎたと感じ、あるときはいつまでも時間が経たないように感じることもある。このような、ある出来事が生じてから時間がどのくらいの速さで過ぎるのか、あるいはどれくらいの時間が過ぎたのかというわれわれの内的な経験は、主観的時間と呼ばれる。主観的時間は、外的な時計を使わずに内的な時計によって客観的な時間を評価させる。心理学分野では、計時する時間の長さによって、その評価を時間知覚と呼ぶか、時間評価と呼ぶかが異なる。一般に5秒以内の心理的現在の範囲内での時間についての評価を時間知覚と呼び、5秒以上の長い時間は時間評価と呼ぶ[49]。時間知覚と時間評価ではそのメカニズムが異なっているとされるものの、ある時間を境として知覚と評価が明確に分かれるわけではない。本研究では、時間の範囲を決めずに大きい意味で時間知覚と呼ぶ。

3.4 時間知覚の実験課題

時間知覚についての研究方法にはいくつか種類が存在する。松田らは、一対比較法、カテゴリー評価法、マグニチュード評価法、再生法、言語的見積もり法、作成法、道具的条件付けの7つの方法を代表的な研究課題であるとしている[49]。一対比較法は2つの時間の長さを比較判断させる。カテゴリー評価法は長い、短い、中ぐらいなど何段階かのカテゴリーのいずれかに当てはめさせる。マグニチュード評価法は標準刺激とテスト刺激とで比較し、数値で表す。再生法は刺激を与え、その刺激と同じ時間を再生してもらう。言語的見積もり法は持続時間を秒、分、時間などの単位で見積もる。作成法は言葉で提示する時間を作成してもらう。道具的条件付けはある一定の長さの時間が経過したあとの反応に強化を与えることや、ある一定の長さの時間以上反応を続けた際に強化を与えるものである。

表4.1 心理的時間の研究手法[49]

一対比較法	提示された、あるいは経験した2つの時間の長さを比較判断させる
カテゴリー評価法	一つの持続時間を提示し、長いや短いなど何段階かのカテゴリーのいずれかに当てはめさせる。
マグニチュード評価法	ある時間の長さの時間を標準刺激としたとき、別の時間の長さを標準刺激と比較して数値で表す
再生法	実際に提示された、あるいは経験した持続時間と主観的に同じになるようにキー押しなどで時間を再生する
言語的見積もり法	実際に提示された、あるいは経験した持続時間を、秒、分、時間などの単位を用いて見積もる
作成法	秒、分、時間などの単位を用いてある時間の長さを言葉で提示し、その時間と主観的に等しいと思う時間を作成させる
道具的条件付け	ある一定の長さの時間が経過したあとの反応に強化を与えることやある一定の長さの時間以上反応を続けた際に強化を与える

篠原は、言語評価、作成、再生、比較の4種類が時間知覚課題に用いられる方法としている[50]。言語評価は、被験者が経験した時間の長さを常用時間単位（時間、分、秒）で表現する方法である。作成は、常用時間単位である長さの持続時間を教示し、被験者はその長さの時間を作り出すというものである。再生は、経験した時間の長さを言語的に表現するのではなく、実際になんらかの方法で再現するものである。比較は、テスト刺激と参照刺激を提示し、それを評価するというものである。これら4つの方法を表4.2に示す。

表4.2 時間知覚に用いる課題[50]

言語評価	被験者が経験した時程の長さを常用時間単位で表現する方法
作成	実験者が常用時間単位で、持続時間を教示し、被験者がその長さの時間を作り出す方法
再生	経験した時間の長さを、言語的に表現するのではなく実際になんらかの手段を用いて再現する方法
比較	刺激と刺激を比較して相対的に表現する方法

本研究では、表4.1 4.2における作成法(作成)に準ずる内容の課題を用いた。

第4章 時間生産 (fMRI)

本章では、fMRI を用いた時間生産課題について述べる。まず、実験課題についての説明を述べる。その後、実験方法と結果について述べる。結果については一般的な解析と機能的結合解析について述べる。最後に考察を述べる。

4.1 実験課題

本研究では時間測定の実験課題は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）の違いとシチュエーションの違いの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)

まず、カウントタイムの違いとして5秒を計測するタスク (5s counts) と10秒を計測するタスク (10s counts) の2通り行った。カウントタイムの違いは秒数の差から脳賦活に差があるかを検証するために設定した。次に、シチュエーションの違いについて述べる。Open eyes は眼を開けた状態で画面は表示なしで被験者に秒数を数えるよう教示した。Close eyes は眼を閉じた状態で画面は表示なしで秒数を数えるよう被験者に教示した。Stopwatch は眼を開けた状態で画面にストップウォッチを表示し、秒数を数えるように被験者に教示した。シチュエーションの違いは眼の開閉、画面の表示有無による脳賦活部位の違いを見るために設定した。条件は以上の2 (カウントタイムの違い) ×3 (シチュエーションの違い) の計6通りで実験を行った。

4.2 実験方法と実験環境

実験は21名の被験者に対して行った。被験者の視力は21名中14名が矯正あり、7名が矯正なしであった。矯正ありの被験者は非金属の眼鏡を着用した。被験者の利き手は2名が左利きでそれ以外は右利きであった。左利きの被験者2名については、コントローラーのボタン押し程度であれば右手でも不自由なく行えるとのことだったので、右手で実験を行った。被験者の年齢は、平均21.42歳で標準偏差は1.99であった。秒当て課題のような行為を、ストップウォッチで行ったことがあるかを被験者に尋ねたところ21名全員が行

ったことがあると答えた。

本実験では、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。撮像パラメータは、TR/TE = 2500/30ms, FoV = 192mm², Voxel size = 3.0mm³, slice thickness = 3.0mm であり、5s counts 時の 1セッションでは 105 スキャン、10s counts 時は 1セッション 123 スキャンで撮像した。撮像開始から 2 スキャンは組織の縦磁化が非定常であるため解析では除外した。さらに、位置情報を得るために 1.0mm³ の解像度の解剖画像を T1 強調画像で撮像した。実験課題は、Math Works 社製のソフトウェアである Matlab R2014a を用い、実験プログラムの作成・実行・制御および Log の記録を行った。実験課題の映像は、fMRI 室外に設置したプロジェクタから望遠レンズを通して、fMRI 装置の頭部側開口部に設置した樹脂性スクリーン上に投射した。被験者は頭部上方のヘッドコイル外部に固定した鏡を介してスクリーン上の映像を視認した。MRI 装置内にて操作可能な片手用ボタンコントローラを右手親指で操作することにより秒当て課題を遂行した。被験者はヘッドフォンを装着して実験中に音を聞くことができた。

実験デザインにはブロックデザインを採用した。ブロックデザインとは何種類かのタスクのブロックとその合間のレストのブロックからなる[51]。タスクは課題期間、レストは安静期間のことである。課題内容はセッションが 5s counts と 10s counts の二つあり、それぞれを 3 セッションずつ各被験者に対して行った。セッションの中にブロックデザインが構成されており、タスクに Open eye と Close eyes, Stopwatch が入る。各タスクは 3 回ずつ行った。よって各被験者は各条件のタスクを 9 回ずつ行った。タスクシーケンス例は図 4.1 に示す。

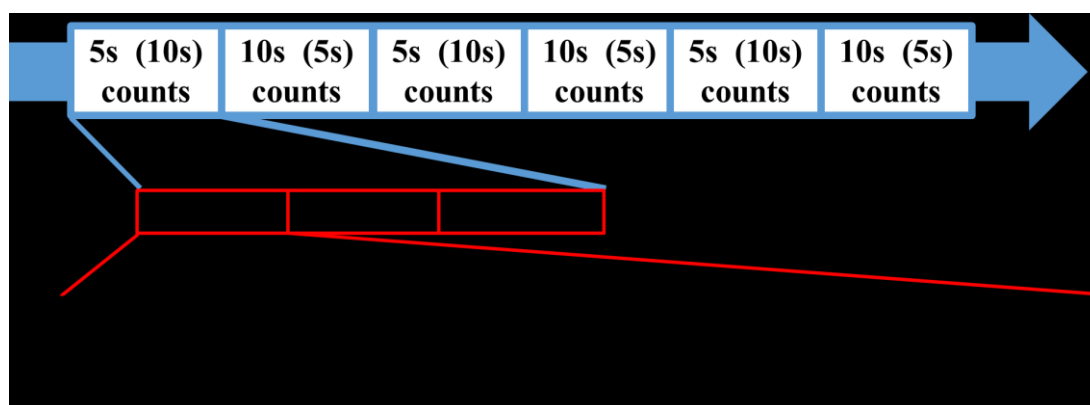


図 4.1 タスクシーケンス例

各セッション、各ブロックに対してカウンターバランスをとった。カウンターバランスとは、一般線形モデルの独立変数に潜在的な交絡因子が等しく影響するようにして、その効果を打ち消すことである[34]。実験の順番によって徐々に上達して成績が良くなる場合

や疲労によって成績が落ちる場合が考えられるため被験者間にカウンターバランスが必要となる。条件間のカウンターバランスをとるために 5s counts から始まる被験者と 10s counts から始まる被験者にわけ、セッションのタスクブロックも Open eyes, Close eyes, Stopwatch の順序を被験者ごとにランダムにした。

各セッションの流れは図 4.2 に示す。始めに、すべてのタスクで教示画面により次がどのタスクか提示した。Close eyes の場合は教示画面を見たときに目を閉じるようにあらかじめ教示した。教示画面が消えた後スタート音を鳴らして、Open eyes と Close eyes については数を数え始めるように教示した。Stopwatch も音を鳴らすことによって課題間に差を無くした。指示した時間に達したと被験者が思ったらボタンを押すように教示した。最後の終了音により Close eyes で閉じていた眼を開けるように教示した。被験者には注意事項として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。被験者の課題中の Log は、被験者がボタンを押した時間を記録した。

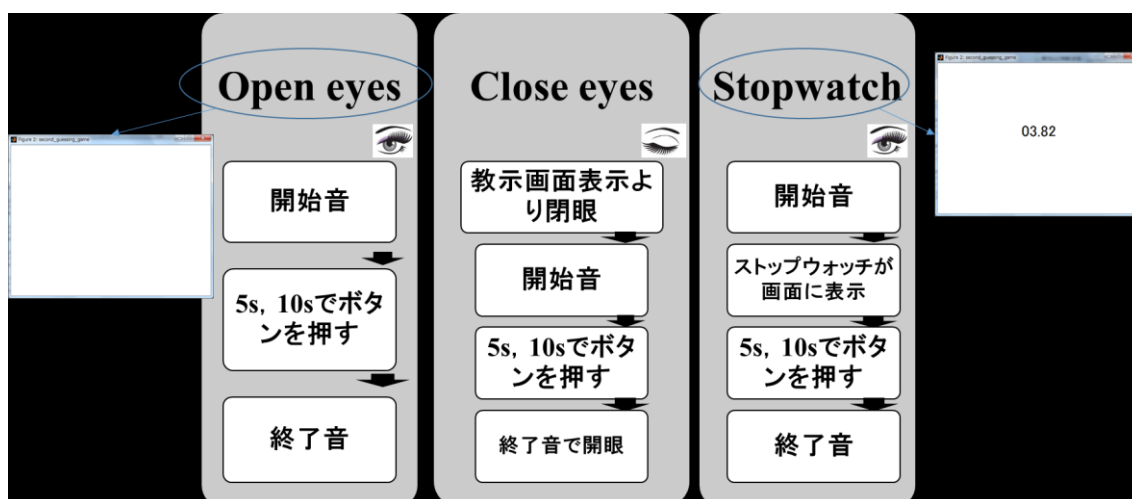


図 4.2 各セッションの流れ

被験者 21 名の Log を確認したところ、途中で寝た被験者や 10s counts を 5s counts と間違えて行った被験者がいた。MRI 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、被験者ごとにデータ数を揃えた。5s counts, 10s counts 共に各シチュエーションの総データ数は 189 個であり計 567 個であった。使用データ数は 5s counts が計 561 個で 6 個のデータを除去した。10s counts は使用データ数合計 537 個で 30 個のデータを除去した。

fMRI で計測した画像は SPM12 について分析し、fMRI 画像データを前処理した。たとえば、標準時間、空間。グループレベルで特に 2 回の測定時間を定義するために、2 回の測定時間のコントラスト画像に対して 1 回のサンプル t 検定を行った。各コントラストの結果として得られるボクセル値のセットは、SPM {t} を構成した。統計的な高さの閾値は、脳全体にわたるピークレベルでの複数の比較のために補正された $p < 0.05$ に設定した

(Family-Wise Error : FWE)。脳部位名は解剖学的脳地図である Anatomy toolbox[52]を参照した。図 6.2 の脳表面賦活画像は bspmview[53]を用いた。

4.3 結果

結果は、fMRI 画像の一般的な解析（本稿では SPM 解析と呼ぶ）と機能的結合の調査（PPI 解析）について述べる。

4.3.1 SPM 解析

解析は二つの結果について述べる。一つ目は、カウントタイムの 5 秒と 10 秒を合わせてタスクとレストの比較を行った。実験結果から 3 シチュエーションについて共通して有意差があった脳部位は左右島と右 MCC，右下頭頂小葉（縁上回），右下前頭回であった（表 4.1） [54]。BCI として用いるには脳の表面付近で計測することが必要となる。脳表面にある部位は右下頭頂小葉と右下前頭回であった。

表 4.1 各シチュエーションで共通して有意差があった脳部位[54]

Region Label	Extent	Peak MNI Coordinates			t-value
		x	y	z	
Open eyes (5s + 10s)					
R Insula Lobe	1097	44	16	6	12.269
R Inferior Parietal Lobule	499	54	-36	58	9.417
L Insula Lobe	185	-30	20	8	8.331
L Insula Lobe	185	-40	4	0	6.647
R MCC	145	6	18	44	8.064
L Insula Lobe	51	-46	0	12	7.375
Close eyes (5s + 10s)					
R Insula Lobe	508	44	14	6	8.750
L Insula Lobe	13	-34	10	10	6.774
R MCC	9	10	18	36	6.753
R SupraMarginal Gyrus	24	62	-30	48	6.728
Stopwatch (5s + 10s)					
R Insula Lobe	1372	38	18	4	10.630
R SupraMarginal Gyrus	739	54	-32	46	10.192
R MCC	179	6	18	40	8.199
L Insula Lobe	116	-38	4	2	8.072

二つ目は、目の開閉が BCI の要素となるか検討するためにシチュエーションごとの比較を行った。解析は Open eyes vs Close eyes，Close eyes vs Open eyes，Stopwatch vs Close eyes，Close eyes vs Stopwatch の 4 通りについて述べる。Open eyes vs Close eyes では左右舌状回，小脳に有意な活動が得られた ($p < 0.001$, uncorrected, 表 4.2, 図 4.3)。Close eyes vs Open eyes では下側頭回に有意な活動が得られた ($p < 0.001$, uncorrected, 表 4.3, 図 4.3)。

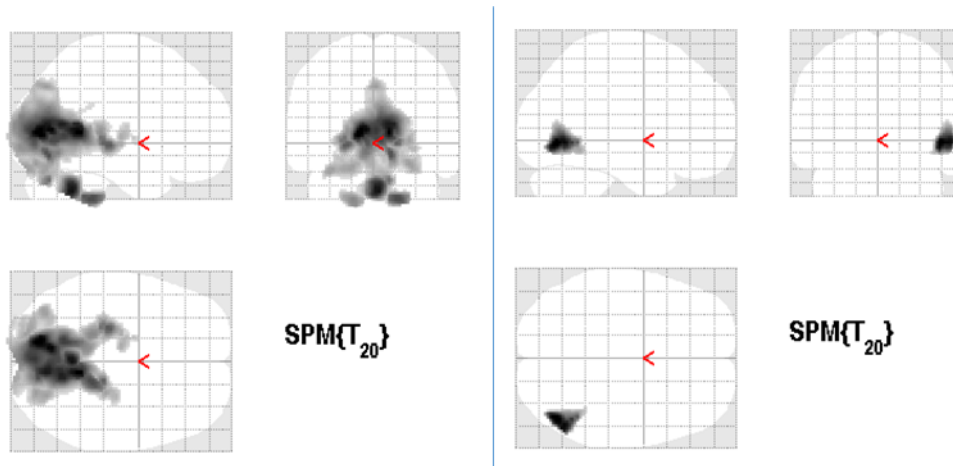


図 4.3 目の開閉の比較

(左 : Open eyes vs Close eyes, 右 : Close eyes vs Open eyes)

表 4.2 Open eyes vs Close eyes の解析結果

Region Label	Extent	t-value	MNI Coordinates		
			x	y	z
L Linual Gyrus	12847	11.129	-12	-80	6
R Linual Gyrus	12847	10.934	10	-50	6
R Cerebelum (IX)	12847	10.208	2	-54	-38

表 4.3 Close eyes vs Open eyes の解析結果

Region Label	Extent	t-value	MNI Coordinates		
			x	y	z
R Inferior Temporal Gyrus	495	5.726	48	-70	-4

Stopwatch vs Close eyes では右海馬, 右舌状回, 左下後頭回, 右下側頭回, 左上前頭回に有意な脳活動が得られた ($p < 0.05$, FWE) . Close eyes vs Stopwatch に有意な活動は得られなかった (図 4.4, 表 4.4) .

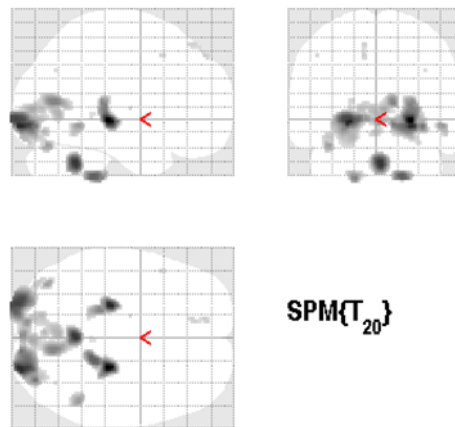


図 4.4 ストップウォッチと目の閉眼による比較

(Stopwatch vs Close eyes)

表 4.4 Stopwatch vs Close eyes の解析結果

Region Label	Extent	t-value	MNI Coordinates		
			x	y	z
R Hippocampus	311	13.139	24	-28	-2
R Linual Gyrus	1987	11.727	24	-96	-8
L Inferior Occipital Gyrus	1987	10.946	-24	-98	-2
R Linual Gyrus	1987	9.115	10	-68	10
R Cerebelum (IX)	211	11.374	2	-52	-36
R Inferior Temporal Gyrus	61	8.358	50	-50	-8
Cerebellar Vermis (6)	22	7.560	-2	-76	-12
L Superior Frontal Gyrus	15	6.951	-12	48	46

4.3.2 PPI 解析

SPM 解析で 3 situations から共通の脳活動として右 IPL と右 IFG が得られた。先行研究で右 IPL と右 IFG は時間に関わるとの報告があることから、これらは時間に関係すると考えられる。そのため、rIPL と rIFG に基づく条件の違いを調査するために機能的接続性について解析を行った。解析は心理生理学的相互作用 (PPI : psychophysiological interaction) を行った。PPI 解析とは、領域間結合分析手法の一つで、ある神経集団が別の神経集団に与える影響を評価するための手法である。PPI 解析は、一つの Seed 領域と別の領域との機能的結合が実験要因によって変化することを検討できる。

PPI 解析の Seed 領域に右 IPL と右 IFG を設定した。解析では閾値を $P < 0.01$ とした。右 IPL の PPI 解析では、右鳥距溝 (Calcarine gyrus) で有意な差が得られた。右 IFG の PPI 解析の結果は、右鳥距溝と舌状回で有意な差が得られた (図 4.5, 表 4.5)。



図 4.5 Open eyes2 部位による PPI 解析結果

表 4.5 Open eyes の右 IFG と右 IPL による PPI 解析結果

Region Label	Extent	t-value	MNI Coordinates		
			x	y	z
rIFG					
L Lingual Gyrus	134	3.8	-10	-80	2
R Calcarine Gyrus	37	2.8	14	-86	12
rIPL					
R Calcarine Gyrus	581	4.3	6	-84	12

4.4 考察

SPM 解析の結果から 3 シチュエーションについて共通して有意差があった脳部位は左右島と右 MCC, 右下頭頂小葉 (縁上回), 右下前頭回について時間知覚に関与するかを述べる。

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前頭前野, 大脳基底核, 小脳, 下頭頂小葉が上げられる[14-17]。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[24]。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。脳卒中のための右縁上回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, 右縁上回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た[22,23]。また, 下頭頂小葉の活性化は, 幅広い持続時間の刺激に応答して示されていた

[18]. さらに, 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 [24]. 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, 先行研究における脳活動の中心は右下頭頂小葉の MNI 座標 ($x, y, z = 58, -42, 30$) [24] 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の背側部分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. 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推測される.

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 [28]. 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. 脳賦活の広がりからも難易度による違いが見られると考える.

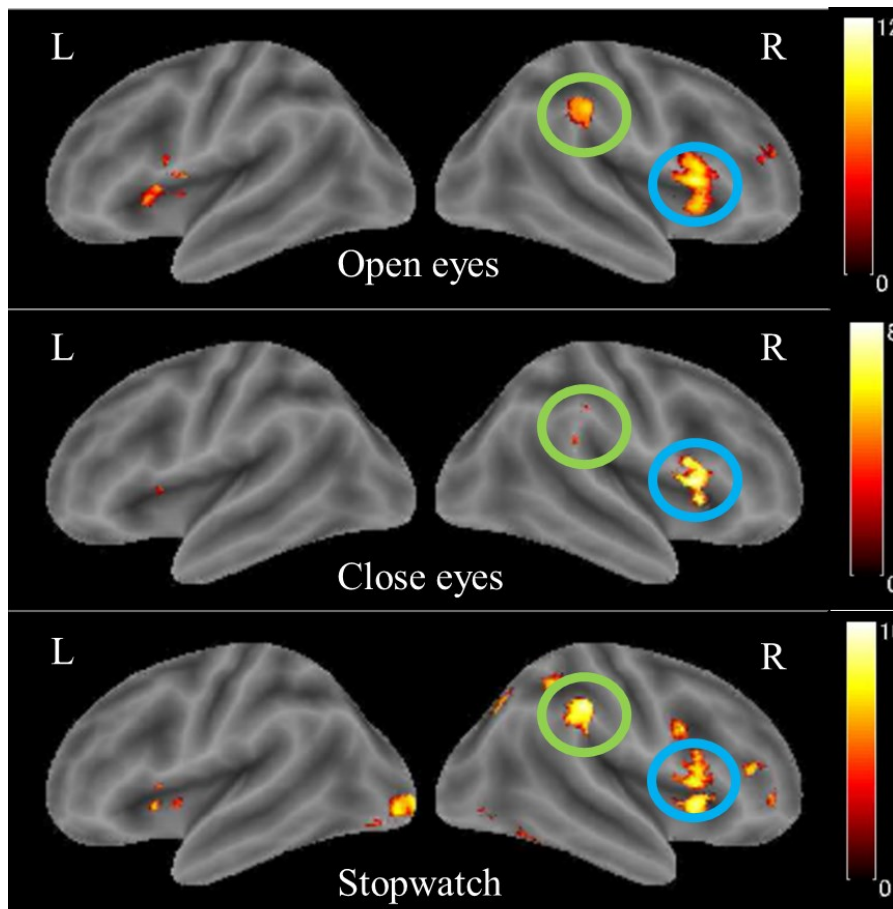


図 4.6 各シチュエーションの集団解析結果[54]

図 4.6 の青丸が下前頭回，緑丸が下頭頂小葉である．図 4.3 から Open eyes と Stopwatch は下頭頂小葉に脳活動を確認できるが，Close eyes ではほとんど脳賦活を確認することができない．右下頭頂小葉は難易度によって脳活動が見られないことがあると考えられる．また，Close eyes では他の時間に関連する領域が消えてしまった可能性があると考えられる．表 4.1 から全体的に脳活動の広がりから難易度によって差があると考えられる．このことから，脳活動による難易度を推測できる．脳活動による課題難易度は Stopwatch が簡単で，Open eyes が中間くらい，Close eyes は難しいと考えられる（図 4.7）．

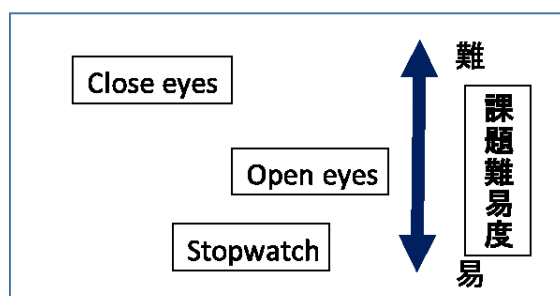


図 4.7 脳活動による難易度予測

本実験の3シチュエーションでは被験者のログの多重比較結果から Stopwatch が簡単で、Open eyes と Close eyes は難しいという結果が得られた（表 4.6, 表 4.7） [54]. 被験者による Log と脳活動との関係性は現状わからないため、今後調査していく必要がある。結果から得られた MNI 座標は脳表面にあるので難易度が簡単であれば BCI として用いることは可能と考える。

表 4.6 5s counts の各シチュエーションの多重比較の結果[54]

	Open eyesと Close eyes	Close eyesと Stopwatch	Open eyesと Stopwatch	有意水準
T検定のp値	0.147	0.001	0.001	0.017

表 4.7 10s counts の各シチュエーションの多重比較の結果[54]

	Open eyes と Close eyes	Close eyes と Stopwatch	Open eyes と Stopwatch	有意水準
T 検定の p 値	0.466	0.001	0.001	0.017

右島は先行研究で知覚についてのタスクコントロールに関与するという報告がされている[29]. 本実験においても被験者は時間を inner speech によって数えると考えられるため、inner speech によるタイミングのコントロールをするために右島は関与していたと考えられる。本実験結果から右島は3シチュエーションのすべてにおいて一番の広がり T 値になっていた。Peak 座標は右島だが広がり、脳表面まで到達していた。図 4.4 の脳表面の部位は右下前頭回であったことから時間知覚としての関与が考えられる。課題の難易度による脳活動の違いは見られた。しかし、下前頭回で文献を調査したところ、時間知覚との関与を示唆するものは見つからなかった。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[33]. 本実験の秒当て課題は体でタイミングをとらない、声を出さないという教示をしたことから、リズムの生成には inner speech

が用いられたと考える。本実験結果から、Inner speech は下前頭回でリズムの生成を行い、右島によってタイミングのコントロールをしていたと考える。これらのことから、右下前頭回は時間測定には関与する可能性がある。

数百ミリ秒の範囲内で持続時間差別の集中的な訓練を行ったときに左島で強い活性化が見られたとある[27,28]。本実験は回数を重ねるごとに被験者は訓練されていったと解釈することもできるため、訓練によって左島は活性化したと考えられる。左島は脳表面にはないのでBCIとして用いることは可能ではないと考える。

MCCについての機能はわからないが、MCCは脳深部であるのでBCIとして用いることは可能ではないと考える。

SPM解析の目の開閉による比較結果と目の開眼によるPPI解析結果で共通して舌状回に有意な活動が得られた。SPM解析の結果からは目の開閉による脳活動の違いが舌状回に現れることが考えられる。PPI解析の結果からは右IPLと右IFGで舌状回に有意な得られたことから、目を開けながら時間を数えることによって機能的結合関係にあることが考えられる。各条件に共通して舌状回に有意な脳活動が得られていないので、時間知覚の脳活動として舌状回が関与はしないと考える。しかし、時間知覚時に目の開眼と閉眼では舌状回に時間知覚に関連する差が得られると考えられる。今後の課題として時間知覚の脳活動と目の開閉による関連性をより詳しく調査することが上げられる。

第5章 時間生産課題 (NIRS)

本章では NIRS を用いた時間生産課題について述べる。NIRS は fMRI と同様に脳の二次信号を計測しているので fMRI で得られた結果は NIRS で測定できる可能性が高い[55]。よって、前章での結果を踏まえた NIRS 実験を行った。まず、実験課題について述べる。その後、実験方法と環境について述べる。そして、実験結果と考察を述べる。

5.1 実験課題

実験課題には fMRI 実験でも用いた時間測定の実験課題は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。NIRS で時間生産について計測できるか調査するために、タスクは5秒数えるのみとした。MRI 画像の結果と比較するためにタスクとレストの比較を行う。

5.2 実験方法と環境

本実験は20代の健常な男性1名を被験者とした。被験者は椅子に座り、4ボタンコントローラを右手に持った状態で机上にあるパソコンの画面を見せて実験を行った。

計測実験に用いた機能的近赤外分光法測定装置 (fNIRS装置)、日立メディコ:ETG-7100の外観を図5.1に、仕様を表5.1に示す。先述したNIRSの原理によって、頭皮下25~30[mm]間の脳皮質表面の脳血管中の酸化・還元ヘモグロビン濃度、これらを合わせた総ヘモグロビン濃度を計測する事が可能である。測定時にはキャリブレーションを行い、キャリブレーション時の状態を基準とした相対ヘモグロビン濃度から脳活動変化の時間・空間変化を可視化することができる。送受光のプロープ間の距離が3[cm]の場合、光路は頭皮から深さ2~2.5[cm]のバナナ状の領域になり、皮質表面の計測が可能となっている(図5.2)。プロープ間隔を離せば深部の計測が可能となるが、実際にはS/N比が低下するため、プロープ間隔は4[cm]程度が限界と言われている。本実験ではプロープ間は3[cm]としている。また、サンプリングタイムは0.1~10秒間で任意設定が可能であり、本研究ではサンプリングタイムは0.1秒で行った。

実験にはブロックデザインを用いた。ブロックデザインはタスクとレストのブロックで分かれて構成されている。タスクは被験者が5秒数えるのに10秒間の幅を持たせた。レストは15秒とした。

実験プログラムはPythonで作成した。課題のシーケンスを図5.3に示す。レストでは白の注視点を表示し、課題の始まる2.5秒前に赤の注視点を表示して、何も表示されなくなったら課題を始めるように被験者に教示した。タスクでは何も表示しなかった。

表5.1 ETG-7100 仕様

計測項目	酸化ヘモグロビン濃度変化 還元ヘモグロビン濃度変化 総ヘモグロビン濃度変化	
同時計測ch	最大72個	
光源	半導体レーザ2波長(695nm, 830nm) レーザクラス 1M(IEC60825-1) 各24個	
光検出器	24個	
プローブ	光ファイバ	送信用24本 受信用24本
	ホルダ	4×4(3個) 3×5(3個)
データ出力	ヘモグロビンタイムコースグラフ (テキスト形式, 静止画: bmp 形式) トポグラフィ画像データ (静止画: bmp 形式, 動画: avi 形式)	
サンプリングタイム	0.1~10[sec]	
外形寸法	600(W)×945(D)×1250(H)[mm]	
質量	約220[kg]	



図5.1 fNIRS装置 ETG-7100

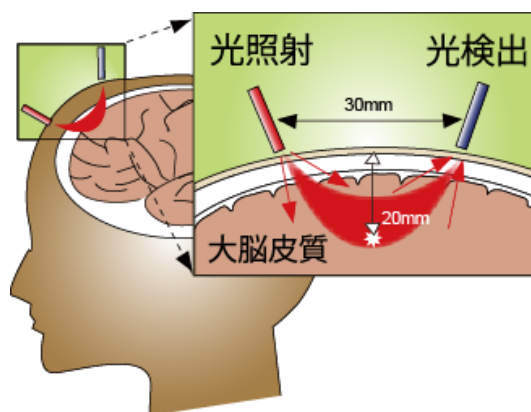


図5.2 測定原理概略

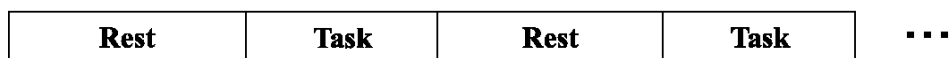


図 5.3 Task sequence

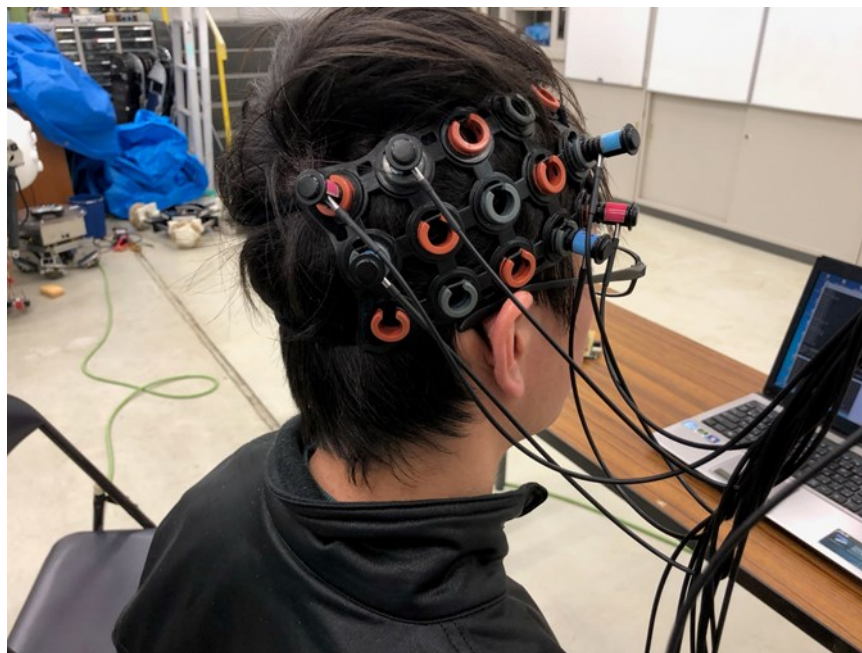


図 5.4 NIRS の計測風景

測定位置については国際 10-20 法に基づき決定した。測定領域は右 IFG と右 IPL とし、電極記号 F8, P4 とした。NIRS 実験での計測風景を図 5.4 に示す。

5.3 結果

実験は 2 回行った。1 回目と 2 回目の酸素化ヘモグロビンの生データを図 5.5 と図 5.6 に示す。実験のログを確認すると課題時に被験者がボタンを押せてない場合が多く、実験環境に問題があった可能性がある。実験環境について問題を調査、修正して再度実験を必要がある。

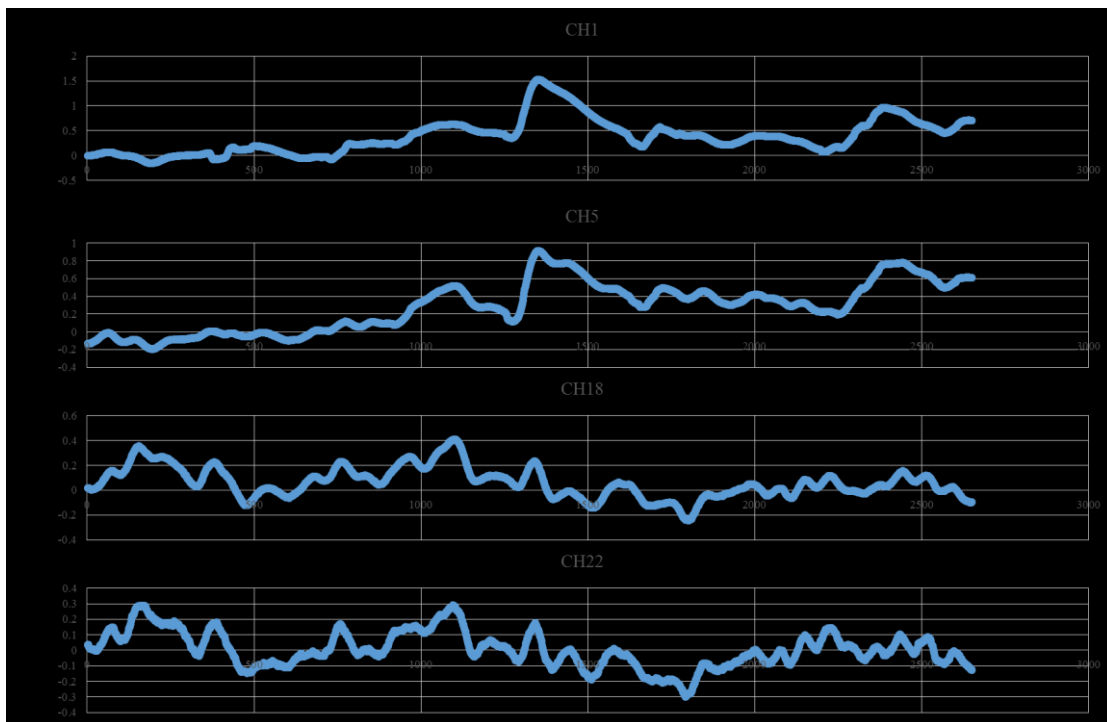


図 5.5 実験 1 回目の生データ

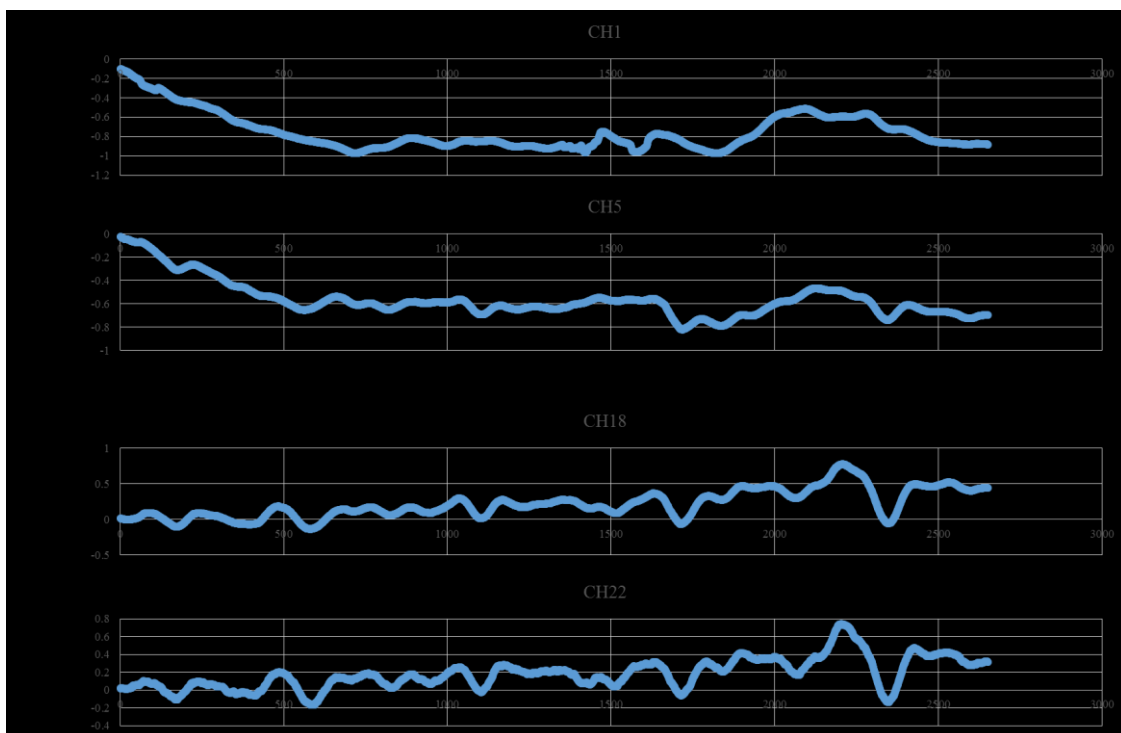


図 5.6 実験 2 回目の生データ

第6章 時間知覚BCIの提案

本章では、時間知覚 BCI の提案について述べる。

近年、BCI は全身麻痺患者のサポートツールとして期待されており、BCI の研究が盛んに行われている。例えば、車椅子の操作や文字認識の支援が用いられている。ここで、BCI を用いて車椅子を動かすことを考える。車椅子の操作は使用者が右手を挙げれば前へ動き、左手を挙げれば停止することとする。このとき、使用者の左右の運動野を計測し車椅子は操作される。このことから BCI に必要な要素を考えると次の3つが挙げられる。一つ目は、自発的であることである。二つ目は、脳表面に活動が得られることである。三つ目は、ON/OFF が明確なことである。これまでの BCI では、脳表面上に位置する運動野や言語野、視覚野、聴覚野を用いた研究が多く、一つの領域のみを使用したものが多い。今後、BCI の発展には、これまでに用いられていない脳領域を利用すること、そして多数の領域を組み合わせることで BCI 機能の向上が考えられます。

実験結果から得られたことは二つである。一つ目は、時間知覚に関与するとされている右 IPL と関与する可能性がある右 IFG が脳表面上で活動が得られたことである。これにより、NIRS や EEG などの BCI で用いられる脳計測機器で計測できる可能性がある。二つ目は右 IPL と右 IFG は舌状回と眼の開閉による差や機能的結合関係が示唆されたことである。これらのことから次の時間知覚 BCI 案が考えられる。オーディオ機器の音量の調節やリクライニングベットの上げ下げである(図 6.1)。目を開けながら時間を数えること、目を閉じながら時間を数えることでテレビや携帯電話の音量の調節に用いることができると考える。また、同様にリクライニングベットの上下にも用いることができると考えている。

BCI は全身麻痺患者のコミュニケーションの支援や生活の支援として期待されている。時間知覚 BCI はこれまでの BCI にはない脳部位を用いるため、実現すれば実用性の幅がさらに広がることが考えられる。

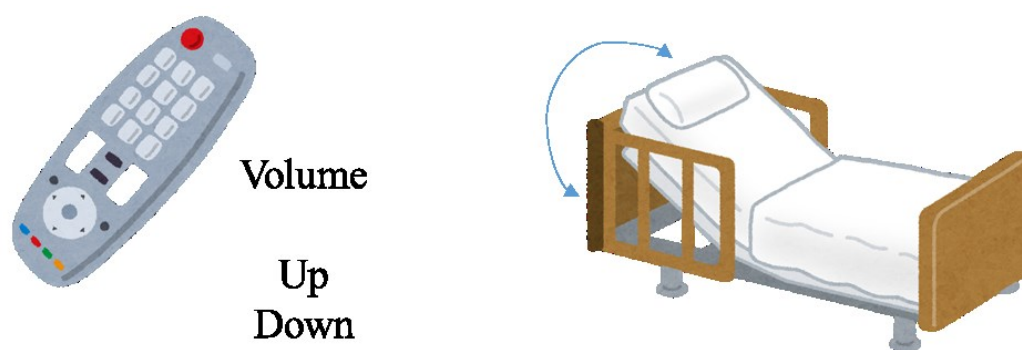


図 6.1 時間知覚 BCI 案

今後の課題として、次のことが挙げられる.

- ・ 難易度の統制した実験
- ・ NIRS 実験での被験者増加
- ・ 時間知覚と目の開閉による NIRS 実験

fMRI 実験では難易度の統制が出来ていなかったため、統制の取れた実験案を再考し、より結果として信憑性の高いものを目指すことが必要となる. NIRS 実験では被験者の人数が少ないため、被験者を増やすことが挙げられる. そして、本実験から得られた時間知覚と目の開閉による実験を行い、実際に BCI として用いることが出来るかを検証することが課題となる.

第7章 終章

本研究は時間知覚を用いた BCI システムを提案することを目的とした。本稿では、時間知覚の fMRI 実験や NIRS 実験を行い BCI 適用について検討した。

実験結果から得られたことは二つである。一つ目は、時間知覚に関与するとされている右 IPL と関与する可能性がある右 IFG が脳表面上で活動が得られたことである。これにより、NIRS や EEG などの BCI で用いられる脳計測機器で計測できる可能性が示された。二つ目は右 IPL と右 IFG は舌状回と眼の開閉による差や機能的結合関係が示唆された。これらのことから、オーディオ機器の音量の調節やリクライニングベットの上下動作を時間知覚 BCI として適用できるのではないかと考えられた。目を開けながら時間を数えること、目を閉じながら時間を数えることを BCI として適用することで全身麻痺患者のサポートツールの一つとなることが考えられる。

今後の課題として難易度の統制が取れた実験案を用いることや NIRS 実験での被験者の増加、時間知覚と目の開閉の実験を行っていくことが考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり，多忙にも関わらず親切な御指導，御助言を賜りました高知工科大学システム工学群准教授星野孝総先生に厚く御礼を申し上げます。

また，本研究に関してご助言してくださいました高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻三谷慶太氏，高知工科大学システム工学群准教授小林弘和先生，高知工科大学システム工学群准教授田上周路先生に対し深く感謝いたします。

ひいては，研究活動全般において御協力，御指導して下さいました **Soft Intelligent SoC** 研究室，知能ロボティクス研究室の諸先輩方，同輩諸氏に心より感謝の意を表します。

最後になりましたが，本研究活動を温かく見守ってくれた両親，家族一同に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 櫻井 芳雄, 八木 透, 小池 康晴, 鈴木 隆文. ブレイン-マシン・インタフェース最前線, 工業調査会, 2007.
- [2] 高橋聖. “脳型情報処理を用いたヒューマンインタフェースの実現に関する研究”, 日本大学理学部学術講演会論文集, 平成 22 年度, S4-22, pp.57-60
- [3] 岸悟志, 奥村允, 山中優希, 永野洋平, 長野明紀. “RI - MAN の動作制御を行う NIRS を用いた BRI システムの構築”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, ROMBUNNO.3L3-04
- [4] Dandan Huang, Peter Lin, Ding-Yu Fei, Xuedong Chen and Ou Bai, ”Decoding human motor activity from EEG single trials for a discrete two-dimensional cursor control”, Journal of Neural Engineering, Volume 6, Number 4
- [5] Chambayil, B, Singla, R, “Virtual keyboard BCI using Eye blinks in EEG”, Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 11-13 Oct. 2010, p466-470
- [6] Yuanqing Li*, Jinyi Long et al, “An EEG-Based BCI System for 2-D Cursor Control by Combining Mu/Beta Rhythm and P300 Potential”, IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 57, NO. 10, OCTOBER 2010
- [7] 加納 慎一郎. ”Brain-Computer Interface (BCI) におけるバイオフィードバック”, バイオフィードバック研究, 2009, 38 巻, 第 2 号, pp.27-33
- [8] 著: 宮内哲, 星詳子, 菅野巖, 栗城真也, 編: 徳野博信 “脳のイメージング” 共立出版, 2016
- [9] D. Bueti and E. Macaluso : Auditory temporal expectations modulate activity in visual cortex, NeuroImage 51, pp. 1168-1183, 2010
- [10] E, Fernández, L., Miró, E., Cano, M., et al: Age-related changes and gender differences in time estimation. Acta Psychol., 112, Acta Psychol 112, pp. 221-232, 2003
- [11] M. j. Hayashi, M. Kantele, N. Walsh, S. Carlson and R. Kanai “Dissociable neuroanatomical correlates of subsecond and suprasedond time perception” Journal of Cognitive Neuroscience Vol. 26, No. 8, pp. 1685-1693, 2014
- [12] 佐藤駿, 中沢仁 “短時間順応下での時間知覚—方位選択的処理の寄与—” The Japanese Journal of Psychonomic Science, Vol. 34, No. 1, pp. 45-52, 2015
- [13] 三戸秀樹, 宮田洋 “時間知覚研究とその周辺” 関西学院大学リポジトリ 人文論究, Vol. 28, No. 4, pp. 55-69, 1979
- [14] S. Ohmae, A. Uematsu, M. Tanaka: Temporally Specific Sensory Signals for the Detection of Stimulus Omission in the Primate Deep Cerebellar Nuclei, The Journal of Neuroscience, pp. 15432-15441, 2013

- [15] I. Nenadic, C. Gaser, H. P. Volz, T. Rammsayer, F. Hager, H. Sauer “Processing of temporal information and the basal ganglia: new evidence from fMRI” *Experimental Brain Research*, 2003, pp. 238-246
- [16] M. J. Hayashi, R. Kanai, H. C. Tanabe, Y. Yoshida, S. Carlson, V. Walsh and N. Sadato “Interaction of numerosity and time in prefrontal and parietal cortex” *The Journal of Neuroscience*, 2013, pp. 883-893
- [17] S. M. Rao, A. R. Mayer and D. L. Harrington “The evolution of brain activation during temporal processing” *Nature neuroscience*, Vol.4. No. 3, pp. 317-323, 2001
- [18] P. A. Lewis, R. C. Miall “Brain activation patterns during measurement of sub- and supra-second intervals” *Neuropsychologia* 41, 2003, pp. 1583-1592
- [19] B. Morillon, C. A. Kell and A.L. Giraud “Three stages and four neural systems in time estimation” 1998*The Journal of Neuroscience*, 2009, pp. 14803-14811
- [20] D. L. Harrington, L. A. Boyd, A. R. Mayer, D. M. Sheltraw, R. R. Lee, M. Huang, S. M. Rao, “Neural representation of interval encoding and decision making” *Cognitive Brain Research*, 2004, pp. 193-205
- [21] 栗山健一, 曾雌崇弘, 藤井猛 “時間認知の心理学・生理学・時間生物学的の特長と精神病理” *時間生物学*, Vol. 16, No. 1, pp. 23-30, 2010
- [22] D. L. Harrington, K. Y. Haaland, N. Hermanowicz “Temporal processing in the basal ganglia” *Neuropsychology*, Vol. 12, No. 1, pp. 3-12, 1998
- [23] 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, pp. 23-31, 2010
- [24] 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*, pp. 1-27, 2015
- [25] 横山絵里子, 中野明子 “頭頂葉に関連する高次脳機能” *高次脳機能研究*, Vol. 28, No. 2, pp. 56-63, 2008
- [26] 田川皓一 “失語症の画像診断” *高次脳機能研究*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-10, 2007
- [27] D. Buetti, S. Lasaponara, M. Cercignani, and E. Macaluso, “Learning about time: plastic changes and interindividual brain differences” *Neuron*, 2012, pp. 725-737
- [28] 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
- [29] M. A. Eckert, V. Menon, A. Walczak, J. Ahlstrom, S. Denslow, A. Horwitz and J. R. Dubno “At the heart of the ventral attention system: the right anterior insula” *Human Brain Mapping*, 2009, pp. 2530-2521
- [30] ヒトの脳はどうやって時間を計るのか~右縁上回における「時間の長さの脳内表現の解明~ http://www.nips.ac.jp/release/2015/10/post_307.html

- [31] Riesen, Jürg M., and Armin Schnider. "Time estimation in Parkinson's disease: normal long duration estimation despite impaired short duration discrimination." *Journal of neurology* 248.1, pp. 27-35, 2001
- [32] Wise, A. K., Cerminara, N. L., Marple - Horvat, D. E., & Apps, R. "Mechanisms of synchronous activity in cerebellar Purkinje cells." *The Journal of physiology*, 588(13), pp. 2373-2390, 2010
- [33] 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
- [34] S. A. Huettel, A. W. Song, G. McCarthy, 監訳：福山秀直 “fMRI 原理と実践 functional Magnetic Resonance Imaging 3rd edition” *メディカル・サイエンス・インターナショナル*, 2016
- [35] K. Tanaka, K. Mastunaga and Hus O. Wang “Electroencephalogram-based control of an electric wheelchair” *IEEE Transactions on robotics*, Vol. 21, No. 4, 2005, pp. 762-766
- [36] N. Birbaumer, N. Ghanayim, T. Hinterberger, I. Iversen, B. Kotchoubey, A. Kubler, J. Perelmouter, E. Taub and H. Flor “A spelling device for the paralyzed” *Nature*, Vol. 398, 1999, pp.297-298
- [37] 岡坂 翔, 星野 孝総, “NIRS-Based BCI における状態推定手法の提案”, 高知工科大学特別研究報告, 2013.
- [38] 加納慎一郎, 吉信達夫, and 星宮望. "足動作のイメージの有無を脳波から検出する BCI システムの基礎的検討." *電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス*, 106.370, pp. 9-12, 2006
- [39] 浜克己, 三嶋拓, 鈴木学, & 中村尚彦 “手動作支援を目的とした BMI の開発-同側手運動想起時の脳波識別の基礎検討” *函館工業高等専門学校紀要*, 50, pp. 1-6, 2016
- [40] 柳沢一機, 澤井英幸, and 綱島均. "NIRS-BCI リハビリテーションシステムのための脳活動判定法." *日本機械学会論文集 C 編* 79.797 pp. 43-55, 2013
- [41] 関本正志, 下野勇希, 赤尾旭彦, 磯村拓哉, 小川雄太郎, 小谷潔, 神保泰彦 “視覚と聴覚による多感覚拡張現実感技術を用いた Brain-Computer Interface の開発” *生体医工学*, Vol. 53, pp. 369,370, 2015
- [42] 渡辺謙, 千葉慎二. "聴覚刺激を用いた意思伝達支援 BCI システムの開発." *第 77 回全国大会講演論文集* pp. 411-412, 2015
- [43] 雑賀広記, 三浦直樹, and 王碩玉. "黙読を用いた Brain-Computer Interface の開発." *バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌*, Vol. 11, No. 1, pp. 61-66, 2009
- [44] M. Treisman, “Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the “internal clock”.”, *Psychological monographs: general and applied*, Vol. 77, No. 13, pp 1-31, 1963
- [45] Ornstein, R.E, “On the Experience of Time. Harmondsworth”, Penguin Books 1969.
- [46] E. A. C. Thomas, W. B. Weaver, “Cognitive processing and time perception.” *Perception and psychophysics*, Vol.17, pp363-367, 1975

- [47] Gibbon, J., Malapani, C., Dale, C. L., & Gallistel, C. R. "Toward a neurobiology of temporal cognition: advances and challenges." *Current opinion in neurobiology*, Vol. 7, No. 2, pp. 170-184, 1997
- [48] Matell, M.S. & Meck, W.H. "Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior." *BioEssays*, Vol. 22, pp. 94-103, 2000
- [49] 橋本優花里, 松田文子 "時間評価に関する神経心理学的研究の展望" 人間文化学部紀要8号, pp. 103-111, 2007
- [50] "時間評価の認知過程：作業記憶の役割" 大阪大学人間科学部紀要. 22, pp.71-94, 1996
- [51] 編著：菊池吉晃, 妹尾敦史, 安保雅博, 渡邊修, 米本恭三 "SPM8 脳画像解析マニュアル" 医歯薬出版株式会社
- [52] S. B. Eickhoff, K. E. Stephan, H. Mohlberg, C. Grefkes, G. R. Fink, K. Amunts, K. Zilles "A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data" *NeuroImage* 25, pp. 1325-1335, 2005
- [53] bspmview <http://www.bobspunt.com/bspmview/>
- [54] 早坂 涼佑, 星野 孝総, "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", 高知工科大学, 卒業研究報告, 2017
- [55] Xu Cui, S. Bray, D. M. Bryant, G. H. Glover, A. L. Reiss "A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks" *Neuroimage*, Vol. 54, No. 4, pp. 2808-2821, 2011