



---

# 卒業研究報告書

令和4年度

---

研究題目

プログラミングにおける実装戦略思考時と  
ソースコード記述時の脳波比較

---

指導教員 上野秀剛 准教授

---

氏名 曾我部龍輝

---

令和5年1月26日 提出

奈良工業高等専門学校 情報工学科

# プログラミングにおける実装戦略思考時と

## ソースコード記述時の脳波比較

上野研究室 曾我部 龍輝

人の脳活動を非侵襲的かつ簡単に計測する手法として脳波 (Electroencephalogram: EEG) がさまざまな研究分野で用いられている。ブローカ野は人の脳の部位であり、言語野と言われているほど、言語に関係している部位である。本研究ではブローカ野に着目し、プログラミング作業の中で文法処理を行っていると考えられるソースコード記述時に着目する。プログラミング言語は言語ごとの特有のルールがあり、文字を並べることで意味を持つものであるから、言語であると考えられる。従来、脳を機能ごとに計測する研究は脳を部位ごとに計測できるfMRIを用いる場合が多い。しかし、fMRIは装置が極めて高価であり、また、被験者の姿勢を大きく制限する必要がある。一方で、脳を計測する装置の1つである脳波計測装置はfMRIと比べて時間分解能が高い上に計測が手軽であり、被験者の姿勢に対する制限も少ないことからプログラム作業時における計測に適していると考えられる。プログラミング作業中のブローカ野の活性化を見る指標として脳波は有用な可能性があり、プログラミング支援を迅速に行うための手段として実用性が高いと期待される。本研究では周波数分析を用いて測定した4チャンネル、周波数ごとの差異を分析する。指標は $\delta$ 波、 $\theta$ 波、 $\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\gamma$ 波それぞれの強さを表すパワースペクトルと、 $\alpha$ 波と $\beta$ 波のパワースペクトルの比を用いる。被験者実験では被験者に実装戦略タスクとソースコード記述タスクを与え、タスク中の脳波を計測する。実装戦略タスク中はプログラミング言語の文法想起を行わないため、ブローカ野は活性化しないと考えられる。一方で、ソースコード記述タスク中は文法想起を行うため、ブローカー野が活性化すると考えられる。脳を計測する場所は国際10-20法におけるF3, F7, C3, T3の4チャンネルとする。各チャンネルの脳波から各周波数成分のパワースペクトルを算出し、2つのタスク間の違いを比較する。実験の結果、全てのチャンネルの全ての周波数成分において実装戦略タスクよりソースコード記述タスクの値が高かった。特に、F7チャンネルの $\theta$ 波、 $\beta$ 波、 $\gamma$ 波で有意差が見られた。この結果は、ソースコード記述時にブローカ野が活性化することを示唆する。また、プログラミング作業を対象として脳波を計測している研究において、今までほとんど分析されてこなかった $\gamma$ 波が、機能を調べるときに有用である可能性を示唆する。

# 目次

1	はじめに	1
2	関連研究	4
2.1	言語とブローカ野	4
2.2	ブローカ野とプログラミング	4
3	脳	6
3.1	脳波	6
3.1.1	計測方法	6
3.1.2	周波数が示す特徴	6
3.2	ブローカ野	7
4	実験	9
4.1	実験環境	9
4.2	タスク	10
4.3	脳波計測	12
4.4	手順	13
4.5	分析	14
5	結果と考察	15
6	おわりに	19
	謝辞	20
	参考文献	21

# 1 はじめに

プログラミング作業を行う教育・開発現場で作業効率や教育の効果の向上を図るために、プログラミング教育において脳波を活用した研究が進んでいる[1]。本研究室においてもプログラミング作業者がアルゴリズムの実装方法の見当が付いた状態であるか脳波から識別する研究が行われている[1]。これらの研究はプログラミングの作業全体としてプログラムの意味を理解できたか、もしくはアルゴリズムを理解することが出来たかを識別することを目的としている。しかし、プログラミングの作業は仕様を理解してから対応するソースコードの作成を完了するまでに異なる複数の段階に分かれていると考えられる。本研究では次のように各段階を定義する。

- 問題を自然言語で提示されて意味を理解する段階
- 理解した問題を実装するために必要なアルゴリズムやデータ構造の組み合わせ(以降, 実装戦略)を考える段階
- 考えた実装戦略をプログラミング言語に合わせてソースコードを記述する段階
- コンパイルを行いコンパイルエラーが出た時になぜエラーが出ているかを確認する段階
- コンパイルエラーを修正する段階
- exeファイルが正常に実行できたものの仕様通りの挙動がしなくバグを探す段階
- 修正戦略をプログラム言語に合わせてソースコードを記述する段階

プログラミング作業者はこれらの段階を行き来しながら仕様通りのプログラムを完成させると考えられるが、各段階にはそれぞれに特有の難しさがああり、すべての段階において正しい理解をしなければプログラミングの作業は正しく完了しない。そのため、先行研究に基づいてプログラムを理解できていないことが分かっても、複数ある段階のどこで躓いているか分からなければ、適切な支援や指導を行うことが困難である。例えば、自然言語の意味を理解する段階で躓いている作業員に対して指導を行う場合、問題の意味をわかりやすく説明すべきである。なぜならば、プログラミング教育の場はプログラミングを行うことが目標であり、この段階では時間をあまり使うべきではないからである。そのため、作業員がこの段階を行っていると指導者が識別することが出来れば、アルゴリズムなどの話をせず問題の意味を解説するだけで済む。実装戦略を考える段階で躓いている作業員に対しては一定時間以上考えさせた後に必要なアルゴリズム

ムのヒントを与えることができる。ソースコードを記述する段階で躓いている作業員に対しては、必要な関数の書き方を説明すればよい。コンパイルエラーの意味が分からない作業員に対してはコンパイルエラーの意味を説明すればよい。このように各段階を識別できるようになることで、必要な解説をすることが出来る。加えて、作業員がどの段階の作業を行っているか区別できれば、プログラムの完成までにより時間を要する、より支援が必要な人に対して的確な支援を行うことが出来るようになる。また、作業員がどこの段階の作業に時間がかかっているか判定できれば、その段階に対応した練習問題を重点的に練習することでより効率的な学習が可能になる。

本研究では上述したプログラミングの段階の一部である1)実装戦略を考える段階、2)ソースコードを記述する段階の2種類を対象を絞り、脳波から作業員がどちらの段階の作業を行っているかで違いが生じるか検証する。実装戦略を考える段階は問題文を理解した後の段階である。この段階では、問題文に対応したプログラムを作成するために必要なアルゴリズムやデータ構造を組み合わせる必要がある。そのため、数学的思考などが必要になる段階だと考えられ、プログラミングを行う際に一番初めに躓きやすい段階である。この段階においてはフローチャートを書く際に単語を想起することがあるが文法的な処理は行わないため、ブローカ野は活性化しない。ソースコードを記述する段階では、各プログラミング言語の決まりに従い、実装戦略をソースコードに変換する必要がある。この時に必要になると考えられる能力は、各プログラミング言語ごとの決まり(文法)を想起することである。プログラミングは一定の決まりに従い文字記号を連ねて、意味を表すものであり言語の一種といえる。そのため、ソースコードを記述する際にプログラミング言語の文法を想起することからキーボードを打たなくてもブローカ野が活性化すると考えられる。この異なる2つの段階に属する作業を行う場合、必要な機能が異なると考えられる。

脳は機能局在性があることが知られており、実行する作業に必要な能力ごとに活性化する脳部位が異なる。その中でも左半球前頭前野にあるブローカ野は言語の表出と書記運動の計画実行を行っていることが分かっている。また、言語の表出を伴わない文法処理時にブローカ野とその周辺領域が賦活することが示唆されている [2]。

本研究では、自然言語で与えた問題文をフローチャートに変換する段階を実装戦略タスクとし、フローチャートをソースコードに変換する段階をソースコード記述タスクとして、この2種類のタスクを被験者に与え、その時の被験者の脳波を測定する。

脳活動を計測する手法としては脳血流を計測する方法 (PET,fMRI,OT) と脳細胞の電磁気活動を計測する方法 (MEG,EEG) がある。脳波 (EEG) は他の脳活動計測の方法に比べて時間分解能が高い上に、計測が手軽で低コストであるから、プログ

ラミング作業時における脳活動の計測に適している。よって、本研究では実装戦略思考時とソースコード記述時のブローカ野の脳波に違いが生じるか検証する。

実装戦略思考時とソースコード記述時で使っている機能が違うことが検証することで、すべての段階でどの部位を使っているかを検証するための足掛かりになる。それに加えて、脳機能的に別物だと証明することでフローチャートを書いたからソースコードを記述するという、一見面倒な作業の必要性が脳科学的に証明することが出来る。

## 2 関連研究

### 2.1 言語とブローカ野

ブローカ野は人の脳の一部で、言語野と呼ばれるほど言語と密接に関係していることが示唆されている。ブローカ野と言語の関係をfMRIを用いて計測する研究や、病気や怪我によってブローカ野に相当する部位が機能していない人を対象に調査を行った研究が行われている。これまでの研究の結果は、言語に関する役割の中でも特に文法的な処理に関わっていることが示唆されている。

Caplanらは、11人の被験者が構文の複雑さが異なる文について、正しい構造だと判断したときの局所脳血流 (rCBF) を Positron Emission Tomography (PET) により測定した。その際、被験者は「double」という単語を1秒間に1回の割合で声に出すことを指示され、文章を声に出して読むことを抑制した。その結果、構文的に複雑な構造を処理することに関連してブローカ野で見られる血流量の増量が、それらの文章を声に出して発生することによるものではなく、構文形式自体を処理することから生じることを示した[2]。

Kimらによると成人後に第二言語を取得した人と、発達初期で第二言語を習得した人を対象に第二言語を扱うときブローカ野が使われているかを調査した結果、前者では母国語と第二言語を使うときで使用されている部位が空間的に分離してすることがわかった。後者では、同じ部位で使用されていることが分かった[5]。これに対し、Tatsunoらが行った第一言語と第二言語を習得する際に、年齢、習熟度、言語課題要求の要因によって皮質の活性化がどのように変化するか研究した。13歳(13歳群)と19歳(19歳群)の被験者を対象に、機能的磁気共鳴画像法を用いて、過去形動詞の識別に関わる皮質活性と動詞のマッチングに関わる皮質活性を比較検討した。その結果、ブローカ野はあらゆる言語の習得に不可欠な言語特異的機能を担っていることが示唆された[6]。

Mussoらは、イタリア語と日本語を混ぜて作った普遍文法(UG)に沿ったものと沿っていないものを、ドイツ人の被験者に学習してもらった。その結果、ブローカ野の活性化は、言語の種類に関係なく、UGに対応している、本当の言語習得にのみ特異的であった。このように、ブローカ野では、生物学的制約と言語経験が相互に作用して、新しい言語に対する言語獲得を可能にしている[7]。

### 2.2 ブローカ野とプログラミング

プログラミングとブローカ野の関係を調べた研究はわずかだが存在する。

Ivanovaらの研究では、fMRIを用いてpythonで書かれたコード、ScratchJrで書かれたコード、文章問題を理解する時の脳部位Multiple Demand (MD)システムと言語システムの反応を調べた。その結果、python、ScratchJrのどちらでもMDシステムはコードを理解する際に強い反応を示したのに対し、言語システムは文章問題を

理解する際に強い反応を示したが、コード問題に対しては弱い、あるいは全く反応を示さなかった [4].

この研究の結果はプログラミングと言語野は関係ないことを示しているのではなく、コード理解に限定して言語野が関与していないことが示唆されている。よって、本研究のテーマである、ソースコードを記述するという部分にはこの結果を適用することはできない。

本研究は、実装戦略時とソースコード記述時のブローカ野の活性化を脳波によって調べる。これまで、ブローカ野とプログラミングの関係を調べた研究はほとんどない。また、今まで行われてきたブローカ野を調べた研究はほとんどがfMRIを用いたもので費用がかかる。脳波計測装置は他の脳計測装置に比べると比較的安価であり、測定も行い易い。また、プログラミングと脳の間関係を調べてきた今までの研究はほとんどがソースコードを理解するというものや、周波数成分をみることで心理状態を見てきた。このように従来研究ではほとんど行われなかった実験手法で実験を行う。

## 3 脳

### 3.1 脳波

本研究では、脳情報の中で脳波を用いる。脳波とは、頭皮の各部に電極糊を付けた電極を置き、脳から生じる電気活動の電位を縦軸、時間を横軸にとって記録したものである。人の脳活動を非侵襲で測定できる手法として、医学、生理学、心理学、スポーツ工学、工学など様々な領域で用いられている。

#### 3.1.1 計測方法

脳波は数十  $\mu\text{V}$  程度の微弱なものであるため、これをゆがみなく増幅し、記録する高感度の増幅記録装置が必要である。そのため、脳波計とは電子計測装置の中でも特に精密な装置が必要である。脳波は、頭皮上に装着した2つの電極のわずかな電位差から計測される。電極をそのまま皮膚に接触させると分極が起こり、電位を導出できないので、皮膚と電極の間には電解質を含んだ電極糊を介在する必要がある。したがって、電極を装着する際はあらかじめ装着する部位を脱脂した上で、電極糊を付けた電極を圧着する。電極の配置は図1に示す国際式10-20法[10]に則って行う。国際式10-20電極法は耳のアースを除き19箇所装置位置が指定されているが、実際には、検査や研究の目的によって使用する電極の数が決まる。

脳波の導出法は主に基準電極導出法と双極導出法の2種類がある。基準電極導出法では、脳電位の電場内で装着した計測用の電極と、電場外で装着した基準電極の2つの電極の電位差として脳電位を測定する。双極導出法では、基準電極を用いず、2つの計測用電極を脳電位の電場内に置いて記録する方法である。一般に脳波には、脳の現局した領域に発生した要素と、比較的広い範囲から同じように記録される要素がある。双極導出法の2つの計測用の電極の電極間隔が狭い場合には、脳の広い範囲から同じように記録される要素は両方の電極にほぼ同じように記録されるため、相殺されてほとんど脳波記録には現れなくなる。したがって、計測用電極の電極間隔が狭い場合に電位差を計測する際は基準電極導出法を、優勢な背景成分を排除して、部位差を強調する目的で計測する際には双極導出法を選択する[9]。

#### 3.1.2 周波数が示す特徴

脳波は、国際脳波学会によって、周波数帯域ごとに付けられた分類および名称が定められている。各帯域の名称と周波数は以下の通りである。

- $\delta$  波：0.5～3Hz
- $\theta$  波：4～7Hz

電極の配置 (10-20 法)

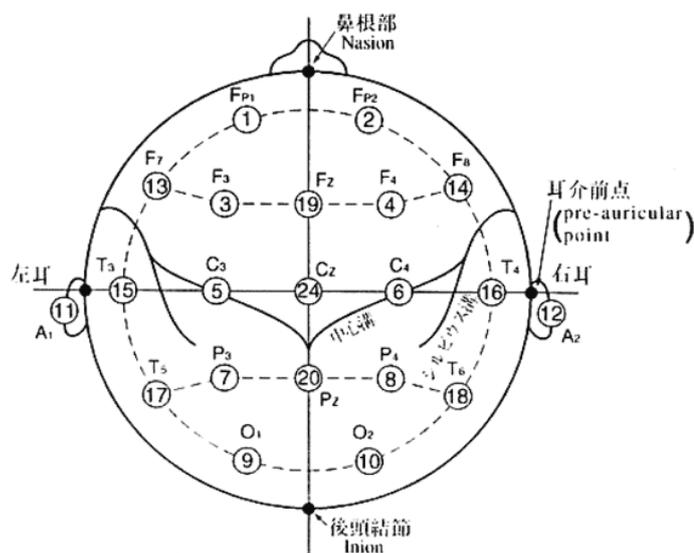


図 1 国際 10-20 法

- $\alpha$  波 : 8~13Hz
- $\beta$  波 : 14~30Hz
- $\gamma$  波 : 30Hz 以上

$\delta$  波や  $\theta$  波は睡眠状態にあるときに出現する。  $\alpha$  波は安静状態にあるときに強く表れる周波数帯で、リラックスし、何かに没頭している時に出現する。他の周波数帯域の波と比べても振幅も連続性も最も高い。眠気を感じるなど覚醒が低下してくると  $\alpha$  波の振幅が低下して不連続になる。また  $\alpha$  波は開眼すると大幅に減少し、閉眼すると再び出現する。一般的にこれを  $\alpha$  波減衰と呼ぶ。また、緊張したり、日常の思考状態では  $\beta$  波が出現し、  $\alpha$  波減衰の状態が持続する [8]。  $\gamma$  波は興奮している時、記憶、思考、判断などの脳の高次機能と関わりがあるとされている。

### 3.2 ブローカ野

ブローカ野とは、ブロードマン領野の BA44 と BA45 を合わせた解剖学的領野のことを示す。下前頭回において、BA44 は弁蓋部に、BA45 は三角部に対応する [11]。ブローカ野位置を図 2 に示す。

文法知識を適用して文構造を構築していく過程である統辞処理 [13] において、BA44 と BA45 に加えて左半球の運動前野外側部 (lateral premotor cortex: LPMC) が選択

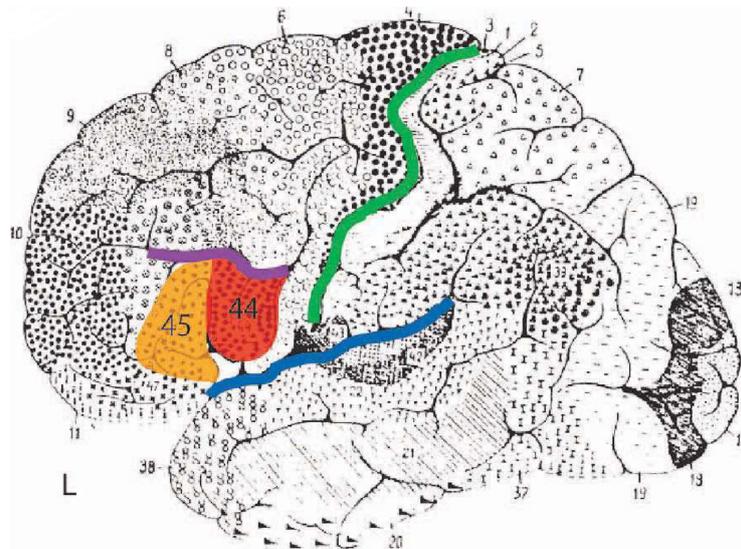


図2 ブローカ野

的に活動することが明らかになっている [12]. また、経頭蓋骨磁気刺激 (Transcranial Magnetic Stimulation : TMS) 法を用いて、単語の視覚定時から150ms後にブローカ野へ刺激すると、文法処理が促進されるという実験結果からも、ブローカ野が統辞処理を担うことが示唆される [14].

ブローカ野が統辞処理の中核として機能するということを証明するためには、fMRI実験による脳活動の課題と相関だけでなく、ブローカ野の損傷に伴う文法障害を示す必要がある。そこで左前頭前野に腫瘍がある患者を対象に文法機能を調べた結果、ブローカ野または左LPMCに腫瘍がある患者群では、2者関係を伴う能動文・受動文・かき混ぜ文のすべてで文法障害が示されたが、この2領域以外の左前頭前野に腫瘍がある患者群は異常が認められなかった。特にブローカ野に腫瘍がある患者群では、受動文とかき混ぜ文の誤答率が高く、左LCPに腫瘍がある患者はかき混ぜ文での誤答率が高いことが明らかになった [15]. 以上の結果からブローカ野が文法中核として機能することが分かる。

本研究では、プログラミング言語が自然言語と同じだと仮説を立ててソースコード記述時に文法想起が行われてブローカ野が活性化すると考えた。

## 4 実験

ディスプレイに提示された問題文に対応するフローチャートを想起するタスク（実装戦略タスク）と、ディスプレイに提示されたフローチャートに対応するJavaのソースコードを想起するタスク（ソースコード記述タスク）の2種類を被験者に与え、脳波を計測する。タスク中に計測した各電極の脳波から $\delta$ 波, $\theta$ 波, $\alpha$ 波, $\beta$ 波, $\gamma$ 波, $\beta/\alpha$ を求め、実装戦略タスクとソースコード記述タスクで比較する。被験者は奈良工業高等専門学校で情報工学を専攻している20歳から22歳の学生8人で、全員がJavaによるプログラミング基礎講義を受講済みである。実験の期間は2022年12月21日から2023年1月5日までで、一人当たりの所要時間は2時間である。被験者には事前にチャップマンの利き手テスト[16]を受けてもらい右利きであることを確認した。左利きの人は先天的に言語野が右脳に存在している可能性があるため、実験の対象から除外した[4]。

### 4.1 実験環境

実験は被験者1名と実験者2名のみが居る静かな部屋で実施する。脳活動計測装置はナノテックイメージ社製NeXus-10 MARK IIを用いる。本装置は脳波だけでなく、脳血流、脈波、呼吸、発汗、心電、皮膚漏といった生体信号をリアルタイムに計測できるシステムである。本装置の計測周期は256/sec、脳波用の電極は最大8チャンネルまで使用できる。本研究では4チャンネルを使用する。計測されたデータはbluetooth経由でPCに転送され、csvファイル形式で出力する。図4にNeXus-10 MARK IIの本体を示す。

実験者は1台のPCで装置の制御を行い、もう1台のPCに接続したディスプレイで被験者に問題を提示する。問題文に対する解答はフローチャートの場合は紙にシャープペンシルで記入してもらい、ソースコードの場合は問題提示に使用するPCにキーボードで入力してもらう。このときEclipseを使用し、EclipseでMainプロジェクトを作成するとき自動で生成される内容以降を記述してもらった。タスク中の体動によるノイズ（アーチファクト）を抑制するために、タスク中にキーボードやマウスの操作は一切行わない。また、同様の理由からひじ掛けを備えた椅子に座り、ディスプレイの位置や座る場所などを事前に調節する。

使用するPCは脳波計測用PCのCPUがIntel(R)Core(TM)i5-3380 2.90GHzでメモリ搭載量は4GBである。被験者に問題を提示するPCのCPUが11th Gen Intel(R) Core(TM)i7-11370H 3.30GHzでメモリ搭載量は16GBである。被験者に問題を提示するために使用するディスプレイは24インチで、解像度は1920x1200[ppi]、向きは横向きである。問題文、およびフローチャートはPNGファイルで作成し、全画面に表示した。



図3 NeXus-10 MARK IIの外装



図4 装着時の様子

## 4.2 タスク

実装戦略タスクとソースコード記述タスクの2つを被験者に解いてもらう。

実装戦略タスクにおいて被験者は提示される問題文に沿ったプログラムのフローチャートを想起する。問題文は日本語で書かれたプログラムの仕様で、図5に提示例を示す。タスク開始と同時に問題文1つを10秒間提示し、被験者は黙読する。被験者には事前に、問題文を読んでいる間は問題の内容を理解するだけで、フローチャートを想起しないよう指示する。問題文の提示後、120秒の間に被験者はフローチャートを想起する。被験者はフローチャートの想起が完了した時点で、実験者にその旨を口頭で伝える。一部のタスクを除いて想起したフローチャートの説明は求めず、次のタスクに進む。各被験者につき1つのタスクにおいて想起したフローチャートを紙に書くよう指示する。紙に記述するタスクは被験者ごとにランダムとし、事前にその旨を伝えておく。また、回答の正否は記録しない。

実装戦略思考時ではフローチャートを単語で表現するため、統辞処理は行わない。そのためブローカ野は活性化しないと考えられる。

練習タスクは、本番と同じ形式で行い、わからないところなどがあれば質問を聞く。質問がなければ、120秒間閉眼安静状態になってもらい本番に挑む。

ソースコード記述タスクにおいて被験者は提示されるフローチャートに沿った



図5 実装戦略タスクの問題提示例

プログラムのソースコードをJava言語で想起する。問題のフローチャートはJIS規格に従った記号を用いて作成する。図6にフローチャートの提示例を示す。ソースコード記述タスクでは問題のフローチャートはタスク中にも被験者に提示したままとする。フローチャートは日本語で書かれた問題文よりも大きくなり、記憶することが大変である。また、ソースコード記述タスクでは実装戦略を全く考えてほしくない中でフローチャートを隠してしまうとやりたい内容から実装戦略を行う可能性が考えられる。よって、フローチャートを提示させたままとする。先行研究[4]においてビジュアルプログラミング言語であるScratchを理解するタスクにおいて、ブローカ野は働かないという結果がある。本タスクで被験者に提示するフローチャートはScratchと表記方法が類似しており、フローチャートを理解する場合においてもブローカ野は働かないと考えられる。しかし、ソースコード記述時には統辞処理が行われていると考えられることからブローカ野は活性化する。解答の想起と回答方法、タスク時間などは実装戦略タスクと同様とし、回答を求めるタスクにおいてはPCにキーボードでプログラムを記述してもらう。

2つのタスクで同じプログラム問題6問を用いる。タスクの一覧を表1に示す。本研究では、作業者がその作業を行っている時のデータが必要なため、正解不正解の影響がない。そのため、難易度は低く設定することで、問題文が複雑になり、記憶してもらうことをできるだけ減らすよう問題文もできるだけ簡素化する。問題の順番は、順序効果を考慮しカウンターバランスを行った。

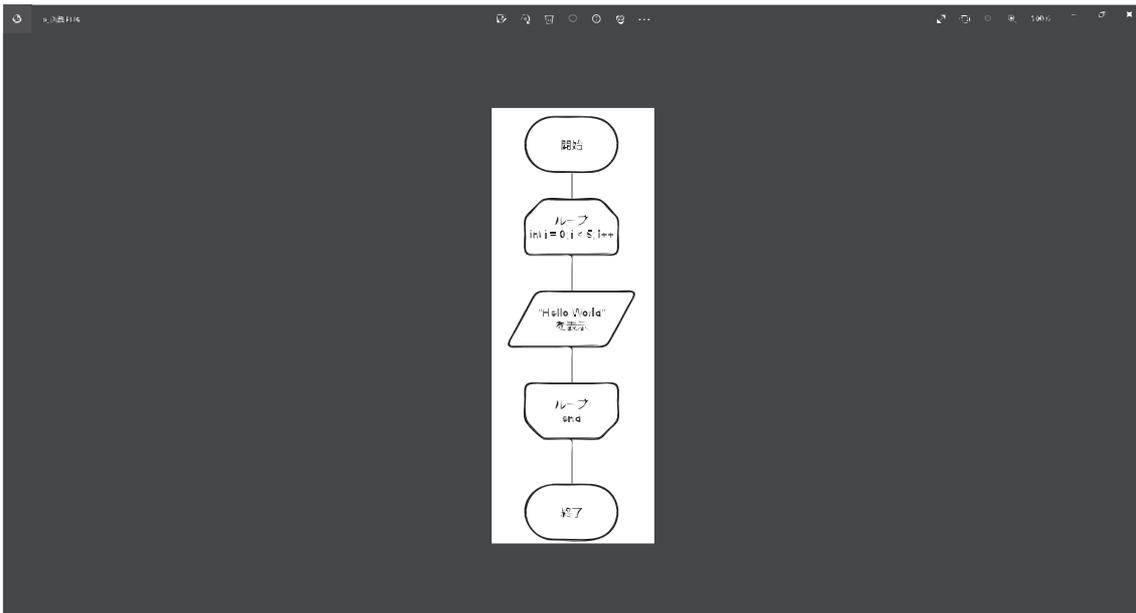


図6 ソースコード記述タスクの問題提示例

表1 タスク

	概要
A	入力した値を階乗する
B	入力した値が小さい順か判定する
C	できるだけ少ない硬貨で支払いをする
D	タクシーの料金を計算
E	5の倍数で”bar”を出力
F	10進数を2進数に変換

### 4.3 脳波計測

実装戦略タスクの練習問題開始前に被験者に脳活動計測装置を装着し、タスク中、及びタスク後の脳波を計測する。タスク中以外の脳波データは分析には使用しない。

脳波の計測に用いる電極は、グラウンド電極を右耳(A2)とし、導出法については基準電極導出法(片側耳朶法)を用いて、基準電極を左耳(A1)、計測用電極4電極をF3, F7, T3, C3に配置した。計測用電極をこれらに配置した理由は、ブローカ野をEEGで測定している先行研究[3]にならった。脳波は筋電位によるアーチファクトにより影響を受けやすいため、タスク中はできるだけ体を動かさないように指示する。また、タスク結果を記述する時も大きく体を動かすと付けていた電極が外れたり、ずれる可能性があるため最小限の動きをするよう指示する。

## 4.4 手順

実験の手順を以下に示す。

### 1. 実験の説明・準備

実験の説明と、脳波計測時の注意を行なう。戦略思考タスクとソースコード記述タスクの概要を伝える。

### 2. 装置の設定

4.3節で説明した6箇所にて電極を付け、脳波計測装置の設定を行う。脳波が正常に取れているかを確認するために閉眼安静状態の脳波を測定する。正常に取れていることが確認できたら、練習問題を解いてもらい質問がないかを確認する。

### 3. 閉眼安静状態

ひとつ前に行った問題による脳波への影響を除去するために、閉眼安静状態を120秒間維持する。

### 4. 実装戦略タスクの問題確認

10秒間、ディスプレイに問題文を表示した後、問題文の表示を停止する。

### 5. 実装戦略思考タスクの実施

120秒間フローチャートを想起してもらい、見当がついた時点でその旨を口頭で実験者に伝えてもらう。120秒間で想起できなかつた場合、その旨を被験者に伝え、次の手順へ進む。

### 6. フローチャートの記述

1タスクにおいて、回答を考えているか確認するためにフローチャートを紙に記述してもらう。

### 7. 全問題の実施

手順3, 4, 5を6回繰り返す

### 8. ソースコード記述タスクの説明

ソースコード記述タスクの説明を行い練習問題を行ってもらい、質問がないかを確認する。

### 9. 閉眼安静状態

ひとつ前に行った問題による脳波への影響を除去するために、閉眼安静状態を120秒間維持する。

#### 10. ソースコード記述タスクの実施

120秒間ソースコードを想起してもらい、見当がついた時点でその旨を口頭で実験者に伝えてもらう。120秒間で想起できなかった場合、その旨を被験者に伝え、次の手順へ進む

#### 11. ソースコードの記述

1タスクにおいて、回答を考えているか確認するためにソースコードをPCに入力してもらう。

#### 12. 全問題の実施

手順9, 10を6回繰り返す

### 4.5 分析

実験で計測した脳波データをタスクごとに分割し、周波数ごとのパワースペクトルを求める。得られたパワースペクトルから $\delta$ 波の帯域である1Hz~4Hz,  $\theta$ 波の帯域である4Hz~8Hz,  $\alpha$ 波の帯域である8Hz~13Hz,  $\beta$ 波の帯域である13Hz~30Hz,  $\gamma$ 波の帯域である30Hz~45Hzの成分抽出を行う。 $\gamma$ 波の帯域の定義は30Hz以上とされるのが一般的だが、電源の周波数である60Hzでアーチファクトが増えるため、影響を受けないよう45Hzまでと設定した。

脳波は個人差が大きいため、抽出された成分データを各被験者の電極と周波数帯域ごとに平均値で正規化する。また、 $\alpha$ 波と $\beta$ 波の比率を見るために正規化後のデータから $\alpha$ 波と $\beta$ 波の比率を計算する。以後、正規化後の $\delta$ 波の大きさを $\delta$ ,  $\theta$ 波の大きさを $\theta$ ,  $\alpha$ 波の大きさを $\alpha$ ,  $\beta$ 波の大きさを $\beta$ ,  $\gamma$ 波の大きさを $\gamma$ ,  $\alpha$ 波と $\beta$ 波の比率を $\beta/\alpha$ と呼ぶ。 $\delta$ と $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\beta/\alpha$ を計測指標とし、それぞれにおける大きさを比較し分析する。正規化した各タスクにおける $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\beta/\alpha$ を、各電極ごとの実装戦略タスクとソースコード記述タスクの差を分析する。3.1.2節で述べたが、関連研究から周波数が表す特徴が報告されている。本研究は、実装戦略タスクとソースコード記述タスクの間で何らかの差が出ることで、脳波から作業者がどちらの作業をしているかを識別可能か検証することが目的である。加えて、差が出た時になぜ出たのかも周波数特性から検討する。分析結果の取得後、検定を行い、24個の指標のグループ間の差が統計的に有意なものか確認をする。まず、F検定をより、得られた指標が等分散性か有無を確認する。等分散性がある場合、群間の有意差検定にStudentのt検定を用い、等分散性がない場合、Welchのt検定を用いる。

## 5 結果と考察

本章では、被験者8人に対して実験を行った結果を示す。

計測した脳波データの例を図7に、脳波を解析して得られたパワースペクトルの例を図8に示す。計測した脳波は0~45Hzになるようフィルタリングされている。

表2,3,4,5にF3,F7,C3,T3の各電極における周波数帯域ごとのパワースペクトルの平均値を示す。すべての電極のすべての周波数帯域において、実装戦略タスクよりソースコード記述タスクの値が大きい。すべての電極および周波数帯に対してF検定で分散を調べ、その結果に基づいて各タスクとの差に対してt検定を行った。p値を見るとF7電極の $\theta$ 波、 $\beta$ 波、 $\gamma$ 波が有意( $p < 0.05$ )であり、他の電極では有意な差は見られなかった。

実装戦略タスク(S)とソースコード記述タスク(W)のF7電極におけるの $\gamma$ 波の分布を図9に箱ひげ図で示す。箱の中央付近の横線はデータの中央値を表し、箱の下端がデータの第1四分位数、上端が第3四分位数を表す。箱の外側にある点は外れ値である。図9からF7の $\gamma$ 波では、外れ値が多いものの、実装戦略タスクとくらべてソースコード記述タスクの第1四分位数、中央値、第3四分位数ともに大きく、分布が異なることを示している。有意差の見られたF7の $\theta$ 波、および $\beta$ 波についても同様の傾向が見られた。

有意差が見られた3つの周波数帯域のうち、最も有意差が大きいのは $\gamma$ 波であることが図3からわかる。3.1.2項でも述べたが、 $\gamma$ 波は高次機能に関係している。ブローカ野で行われている文法処理は高次的な処理であるため、文法処理を伴うソースコード記述タスクにおいて実装戦略タスクよりも $\gamma$ 波のパワースペクトルが高くなったと考えられる。また、ブローカ野であるブロードマンの脳地図でBA44とBA45のほぼ真上に来る電極がF7である。F7だけで差が出たことを踏まえるとブローカ野の活性化を判定できるのは狭い範囲になっていると考えられる。今後、脳波で機能局在性を確認するときは心理的な分析よりも範囲が狭くなり、狭い間隔で測定することが必要になると考えられる。

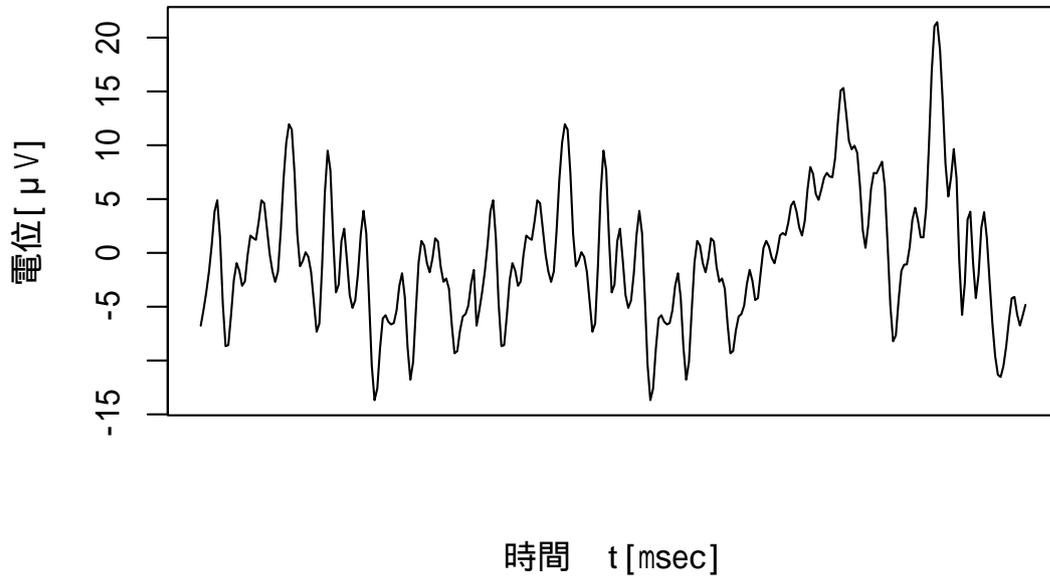


図7 計測した脳波の例

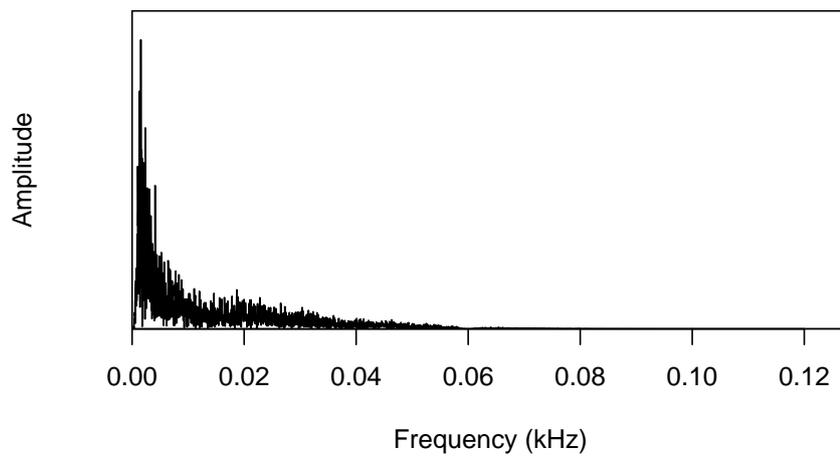


図8 パワースペクトルの例

表2 電極F3の周波数帯域ごとのパワースペクトル

周波数帯域	実装戦略タスク	ソースコード記述タスク	p値
$\delta$ 波	0.9317	1.0683	0.2087
$\theta$ 波	0.9175	1.0825	0.1364
$\alpha$ 波	0.9256	1.0744	0.2564
$\beta$ 波	0.9102	1.0898	0.1434
$\gamma$ 波	0.9031	1.0969	0.1270
$\beta/\alpha$	1.0106	1.0677	0.1856

表3 電極F7の周波数帯域ごとのパワースペクトル

周波数帯域	実装戦略タスク	ソースコード記述タスク	p値
$\delta$ 波	0.9035	1.0965	0.0974
$\theta$ 波	0.8517	1.1483	0.0427
$\alpha$ 波	0.8293	1.1707	0.0513
$\beta$ 波	0.8058	1.1942	0.0328
$\gamma$ 波	0.7829	1.2171	0.0286
$\beta/\alpha$	0.9725	1.0247	0.2890

表4 電極C3の周波数帯域ごとのパワースペクトル

周波数帯域	実装戦略タスク	ソースコード記述タスク	p値
$\delta$ 波	0.9544	1.0456	0.3662
$\theta$ 波	0.9384	1.0616	0.2599
$\alpha$ 波	0.9506	1.0494	0.4280
$\beta$ 波	0.9385	1.0615	0.2786
$\gamma$ 波	0.9302	1.0698	0.2312
$\beta/\alpha$	1.0520	1.0086	0.1988

表5 電極T3の周波数帯域ごとのパワースペクトル

周波数帯域	実装戦略タスク	ソースコード記述タスク	p値
$\delta$ 波	0.9574	1.0426	0.3888
$\theta$ 波	0.9513	1.0487	0.3260
$\alpha$ 波	0.9484	1.0516	0.3721
$\beta$ 波	0.9294	1.0706	0.2207
$\gamma$ 波	0.9232	1.0768	0.2281
$\beta/\alpha$	0.9936	1.0361	0.2897

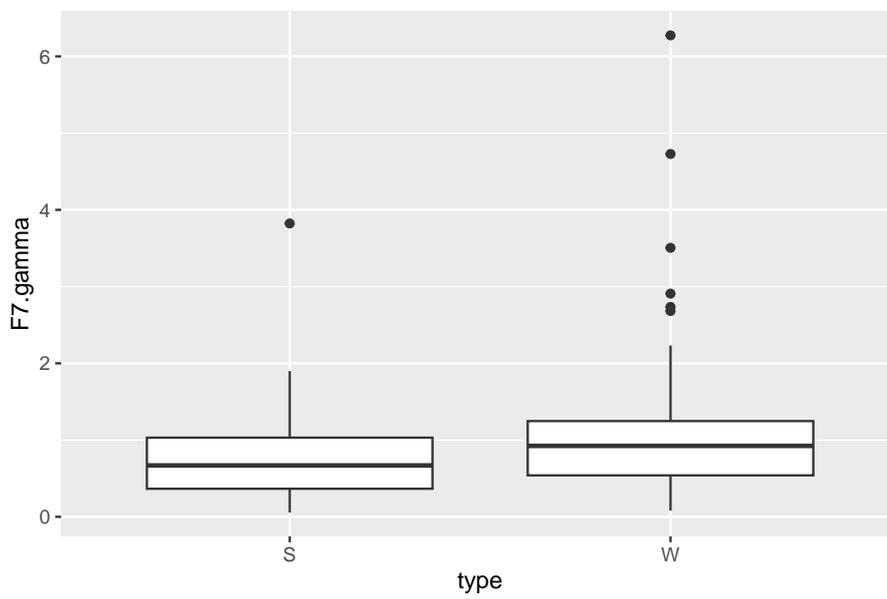


図9 実装戦略タスクとソースコード記述タスクの比較

## 6 おわりに

本研究では、実装戦略タスクとソースコード記述タスクでブローカ野の脳波に違いが生じるかを検証するため被験者実験を行った。実装戦略タスク中とソースコード記述タスク中に生じるブローカ野の脳波の周波数成分ごとの差異を分析した。計測する電極の位置は国際10-20法を基準としてF3, F7, C3, T3とした。本実験では、指標として0.5~3Hz帯域の $\delta$ 波, 4~7Hz帯域の $\theta$ 波, 8~13Hz帯域の $\alpha$ 波, 14~30Hz帯域の $\beta$ 波, 30Hz以上が帯域の $\gamma$ 波,  $\alpha$ 波と $\beta$ 波の大きさの比である $\beta/\alpha$ を用いた。

実験の結果、実装戦略タスクとソースコード記述タスクでF7電極の $\theta$ 波,  $\beta$ 波,  $\gamma$ 波の3つで有意差が見られ、ソースコード記述タスクのほうが値がパワースペクトルの値が高かった。それ以外の電極および周波数帯では有意差は確認できなかった。有意差が生じた3つの中で一番大きく有意差が生じたのは $\gamma$ 波であった。 $\gamma$ 波は高次機能にかかわりがあるとされている周波数帯域である。また、ブローカ野で行われている文法的な処理は高次な処理であるため、文法処理を伴うソースコード記述タスクにおいて $\gamma$ 波が多く出るのは自然な考えである。また、F7電極はすべての周波数帯で実装戦略タスクとソースコード記述タスクのパワースペクトルの差が大きく、実装戦略思考時とソースコード記述時での差異を確認したい場合にF7が有用であることが分かった。

本研究の今後の発展として、今後プログラミングのほかの段階に注目して、すべての段階の特徴を見つけることが挙げられる。本研究の結果より、従来あまり調べてこられなかった $\gamma$ 波が重要になると考えられる。例えば、戦略思考時にMDが関係することが考えられる。そこで、戦略思考時とソースコード記述時でMDを計測し、差異が生じるかを検証し、差異があれば2つのタスク間で脳波による識別が可能になる。また、本研究では被験者が8人と少数であったため、被験者を増やし再実験を行うことで有用性の証明ができる。また、被験者ごと、タスクごとに分析を行うことで個人差やタスク間の特徴を分析し、個人差やタスク間での差異があるか確認することも有用な発展である。

本研究では、F3, F7, C3, T3のみ計測を行い分析した。これらのことからほかの部位でどのような動きをしているかは議論の対象にはできない。一つの可能性として考えられるのは、ソースコード記述記述時を行う際に、被験者がキーボードを打点するイメージを行った影響で運動野が活性化している可能性も考えられる。これらの検証も今後の課題に挙げられる。

## 謝辞

本研究の執筆および研究を進めるに当たり、多くの方々に協力して頂きました。この研究を卒業論文として形にすることが出来たのは、査読教員である山口賢一教授と指導教員である上野准教授の熱心なご指導のおかげです。ありがとうございました。また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた上野研究室の皆様や、貴重な時間を割いて被験者実験に参加して下さった11名の学生の皆様へも心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 山本愛子, “脳波によるプログラム解法の見当がついた状態の識別”, 奈良工業高等専門学校卒業論文, (2016)
- [2] Caplan, D., Alpert, N., Waters, G., Olivieri, A., ”Activation of Broca ’ s area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation”, *Human brain mapping*, Vol.9, pp.65-71 (2000)
- [3] 平田里佳, 入部百合絵, 深井健太郎, 桂田浩一, 新田恒雄, ”音声想起時脳波からの単語認識”, *人工知能学会全国大会論文集*, Vol.JSAI2019, p.1, (2019)
- [4] Ivanova, Anna A., Srikant, Shashank., Sueoka, Yotaro., Kean, Hope H., Dhamala, Riva., O’Reilly, Una-May., Bers, Marina U., Fedorenko, Evelina., ”Comprehension of computer code relies primarily on domain-general executive brain regions”, *eLife*, Vol.9, pp.1-24 (2020)
- [5] Kim, K., Relkin, N., Lee, KM., ”Distinct cortical areas associated with native and second languages”, *Nature*, Vol.388, pp.171–174 (1997).
- [6] Tatsuno Y, Sakai KL, ”Language-related activations in the left prefrontal regions are differentially modulated by age, proficiency, and task demands”, *J Neurosci*, Vol.25, No.7, pp.1637-44 (2005)
- [7] Musso, M., Moro, A., Glauche, V., ”Broca’s area and the language instinct ”, *Nat Neurosci*, Vol.6, pp.774–781 (2003)
- [8] 宮田洋, 藤澤清, 柿木昇治, 山崎勝男, ”新生理心理学-生理心理学の基礎,” 北大路書房 (1998).
- [9] 堀忠雄, ”生理心理学人間の行動を生理指標で測る”, 培風館 (2008).
- [10] 満倉靖恵, ”脳はウソをつかない—脳波で判るあなたの真実—”, *日本耳鼻咽喉科学会会報*, Vol.118, No.4, pp.461-465 (2015).
- [11] 山田垂虎, 酒井邦嘉, ”ブローカ野における文法処理”, *BRAIN and NERVE*, Vol.64, No.4, pp.479-487 (2017)
- [12] Ryuichiro Hashimoto, Kuniyoshiko L Sakai, ”Specialization in the Left Prefrontal Cortex for Sentence Comprehension,”, *Neuron*, Vol.35, No.3, pp.589-597, (2002)
- [13] 金野竜太, 小野賢二郎, ”fMRI からみた統辞処理の神経機構”, *高次脳機能研究 (旧失語症研究)*, Vol.36, No.2, pp. 255-262 (2016)
- [14] Kuniyoshi L Sakai, Yasuki Noguchi, Tatsuya Takeuchi, Eiju Watanabe, ”Selective Priming of Syntactic Processing by Event-Related Transcranial Magnetic Stimulation of Broca’s Area”, *Neuron*, Vol.35, No.6, pp.1177-1182 (2002)

- [15] Ryuta Kinno, Yoshihiro Muragaki, Tomokatsu Hori, Takashi Maruyama, Mitsuru Kawamura, Kuniyoshi L. Sakai, "Agrammatic comprehension caused by a glioma in the left frontal cortex", *Brain and Language*, Vol.110, No.2, pp.71-80 (2009)
- [16] L.J.Chapman, J.P.Chapman, "The measurement of handedness", *Brain and Cognition*, Vol.6, No.2, pp.175-183 (1987)