



卒業研究報告書

平成27年度

研究題目

脳波によるプログラム解法の見当がついた状態の識別

指導教員 上野秀剛 講師

氏名 山本愛子

平成28年2月18日 提出

奈良工業高等専門学校 情報工学科

脳波によるプログラム解法の見当がついた状態の 識別

上野研究室 山本 愛子

人の脳活動を非侵襲で簡単に測定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。プログラム理解における作業者のプログラム理解度や状態と生体情報には関連があり、生体情報の中でも脳波は、ストレスの影響の計測やユーザビリティの評価など人の心理状態を測る指標として有用性があると考えられている。脳波は、他の脳活動測定装置と比べて時間分解能が高い上に、測定が手軽であり、プログラム作業時における脳活動の計測に適していると考えられる。プログラム作業中の作業者の心理状態の推定から作業状態の識別を行う指標として、脳波は有用な可能性があり、プログラムの理解が不十分な作業員への迅速な支援に用いるツールとして実用性が高いと期待される。そこで本稿では、プログラム作業員がプログラムの解法の見当がついたか否かを脳波の周波数成分の指標によって識別できるか検証する。指標は α 波の大きさ、 β 波の大きさ、 α 波と β 波の大きさの比を用いる。検証実験では被験者にプログラム問題のタスクを与え、タスク中とタスク後の脳波を計測した。タスク中、タスク後それぞれに含まれる周波数成分を分析し、解法の見当がついたときとそうでないときの違いを考察する。実験結果より、タスク中、タスク後ともに解法の見当がついたときに α 波が増加した一方で、見当がつかなかったときは α 波と β 波の比が増加したことがわかった。この結果は、脳波がプログラミングにおいて、作業員が解法の見当がついているか否かの識別を行う指標として有用であることを示唆する。

目次

1	はじめに	2
2	関連研究	3
2.1	脳波と心理状況の関連性	3
2.2	生体情報を用いたプログラム理解の研究	3
3	脳波	5
3.1	計測方法	5
3.2	周波数が示す特徴	6
3.3	周波数分析	6
4	実験	8
4.1	実験環境	8
4.2	タスク	9
4.3	脳波計測	11
4.4	手順	12
4.5	分析	12
5	結果と考察	14
5.1	タスク中の脳波	14
5.2	タスク後の脳波	16
5.3	各個人の成分の比較	17
6	おわりに	19
7	謝辞	20
	参考文献	21

1 はじめに

現在、プログラミング作業において作業に行き詰まりを感じ、支援を必要としている状態の作業者の把握が迅速にできていない。作業者の状態は外観に現れず、外部からの観測が難しいためである。しかし、プログラミング作業を行う教育・開発現場で作業の効率や教育の効果の向上を図るには、作業者に対してできる限り迅速な支援をするべきである。本研究ではできる限り迅速な支援を行うために、プログラミング作業者の状態をより短時間で把握する方法として脳活動計測の有効性を検証する。外観では難しい作業者の状態の把握を脳活動によって可能にしたい。

本研究では、プログラミング作業者がプログラムを理解しているときとそうでないときに脳波に差異が存在するか検証する。本研究におけるプログラムを理解している状態とは、既存のソースコードの動作を理解することではない。処理したい内容に対してどのような処理手順でソースコードを書けばよいのか、アルゴリズムのアイデアが思いついた状態を意味する。本稿では、正誤は考慮せず、アイデアを思いついた状態を“解法の見当がついた状態”と呼ぶ。

解法の見当がつかないとき、作業者はストレスを感じイライラしている心理状態にあると考えられる。一方、解法の見当がついているときは、比較的ストレスが少なく、快感を抱いている心理状態にあると考えられる。つまり、解法の見当がついた状態とそうでない状態は作業者の心理状態に反映されると考えられる。人間の心理状態は脳の観測で得られる脳波と密接な関係があるといわれている[6]。脳波の周波数成分である α 波と β 波はリラックス状態や精神活動状態によって変動するとされており[1]、さまざまな作業における心理状態の計測に用いられている。また、脳波は他の脳活動測定装置と比べて時間分解能が高い上に、測定が手軽で低コストであるから、プログラム作業時における脳活動の計測に適している[4]。そこで、本研究ではプログラム問題のタスクを与えたときの脳波を計測し、解法の見当がついたタスクと見当がつかなかったタスクで脳波に差異が存在し、プログラミング作業者の状態の識別方法として脳波の有用性を検証する。

2 関連研究

2.1 脳波と心理状況の関連性

人の脳活動を非侵襲で簡単に測定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。満倉は、17年前から脳波からその意味を検出する研究をしており、小型の脳波計測器のみで人の感性を取得できる装置を構築し、脳波からストレスを検知するシステムを提案している [4]。水野らは、作業環境が作業効率の観点のみならず、ストレスとして心身状態に及ぼす影響を客観的に計測する指標として脳波の有効性を検証している [8]。上野らの研究では、ソフトウェアのユーザビリティ評価の際に人間の心理状態を定量的・客観的に評価する方法として脳波の有用性が確かめられている [6]。森田は、暗算課題および視覚野に特化した画像処理課題を用いて、安静時、課題遂行時の脳波と心電図を同時測定し、脳の2つの部位の間に成立しているネットワークを調べた。その結果、低域 θ 波の脳部位間のネットワークは課題に対する集中度の高さを反映すると推測された [5]。

本研究が対象とするプログラム理解においても、解法の見当がついた状態とそうでない状態では作業者の心理状態が異なり、脳波にその状態が反映されると考えられる。そこで本研究では、プログラム作業中の作業者の心理状態の推定に脳波が有用だと推測し、脳波を用いて脳活動を測定する。

2.2 生体情報を用いたプログラム理解の研究

プログラミング作業者を対象に、人間の生体情報から作業者のプログラム理解度や状態を計測している研究が複数報告されている。Siegmundらは、fMRIを用いてプログラム理解における脳の部位ごとの活性化を調査している。最大18行の短いソースコードを理解するタスクを対象とした実験の結果、問題解決、記憶、および文章理解に関係する脳領域がプログラム理解時に活発になることを示している [10]。中川らは、プログラム理解活動を定量的に評価することを目的に、前頭前野の脳血流を計測することでプログラム理解に困難が生じている状態の判別が可能か検証する実験を行った。実験により、課題の難易度によって脳活動に差があり、課題の序盤から中盤にかけて脳血流値の正の変化量が最大になると示している [9]。広瀬らは、知的作業、特にプログラミング作業における作業者の内的状態をマクロにモニタするために、心電図 (ECG) を利用した作業に対する集中度を計測する手法を提案している [11]。

上記の研究から、プログラム理解における作業者のプログラム理解度や状態と生体情報には関連がある。生体情報からプログラムの理解度を計測する研究の主な目的は、プログラムの理解が不十分な作業者への支援や作業の効率向上である。脳波は前節でも述べたように、測定が手軽な上に低コストであるため、

プログラムの理解が不十分な作業員への迅速な支援に用いるツールとして実用性が高いと考えられる。そこで、本研究では脳波計測からプログラム作業員の状態の識別が可能か実験によって検証する。

3 脳波

脳波とは、頭皮の各部に電極糊をつけた電極を置き、脳から生じる電気活動を電位を縦軸、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、スポーツ科学、工学などさまざまな領域で用いられている。

3.1 計測方法

脳波は100 μ V程度の微弱なものであるために、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、脳波計とは電子計測装置のなかでも特に精密な装置が必要である。脳波は、頭皮上に装着した電極から計測される。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させる必要がある。したがって、電極を装着する際は予め装着する部位をよく脱脂した上で、電極糊をつけた電極を圧着する。電極の配置は図3.1に示す国際式10-20電極法[4]に則って行う。国際式10-20電極法では耳のアースを除き19箇所の装着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。

脳波の導出法には主に基準電極導出法と双極導出法の2種類の方法がある。基準電極導出法では、脳電位の電場内に装着した計測用電極と、電場外に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。脳電位は2つの電極の電位差として測定される。一般に脳波には、脳の限局した領域に発生する要素と、比較的広い範囲から同じように記録される要素とがある。双極導出の2つの計測用電極の電極間隔が狭い場合には、脳の広い範囲

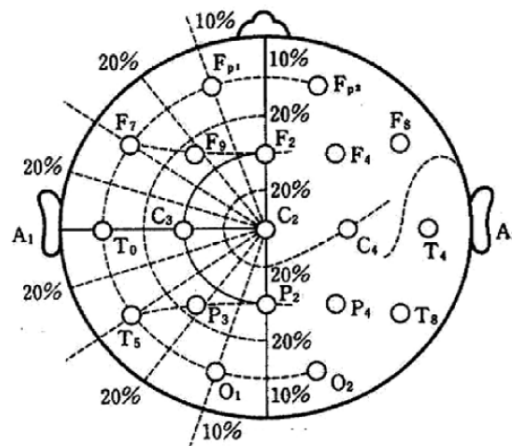


図 3.1 国際式10-20電極法

から同じように記録される要素は，両法の電極にほぼ同じように記録されるから，合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，優勢な背景成分を除去して，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 [3].

3.2 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とおりである．

- δ 波: 0.5~3Hz
- θ 波: 4~7Hz
- α 波: 8~13Hz
- β 波: 14~30Hz
- Γ 波: 30Hz 以上

δ 波や θ 波は睡眠状態にあるときに出現する． α 波は安静状態にあるときに強く表れる周波数帯域で，リラックスし，何かに没頭しているときに出現する．他の周波数帯域の波と比べて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， α 波の振幅が低下して不連続になる．また， α 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 α 波減衰と呼ぶ．また，緊張したり日常の思考状態では β 波が出現し， α 波減衰の状態が持続する． Γ 波は，不安で興奮しているときに出現する [1][3]. これらの周波数帯域の内， α 波と β 波はリラックス状態や精神活動状態によって変動するとされており [1], さまざまな作業における人間の心理状態の計測指標に用いられている [7]. また， α 波と β 波の比率は脳の活動を見るための指標としてよく用いられており，上野らの研究でも β/α をタスク後の心理状態を測るための指標として用いられた．上野らの実験では，精神的負荷が多いときや不快に感じている際に α 波が減少し， β 波と β/α が増加することが検証されている [6].

3.3 周波数分析

一般的に脳波の分析では，計測したデータに含まれる周波数ごとの成分の大きさを調べる周波数分析を行う．周波数分析をするには，時間の経過にともなって複雑な電位変動を示す脳波を不規則な振動現象とみなし，高速フーリエ変換 (FFT) を用いてパワースペクトルを求めることが多い．FFT は離散フーリエ変換 (DFT) における計算の無駄を省くため，三角関数の周期性を利用した計算技法で，

DFTに比べ計算時間は速いが、データ点数は2のべき乗でなければならないという制約がある。

FFTをする前に、エイリアシングの混入に注意してアナログデータをA/D変換して離散データにする。エイリアシングの混入を防ぐにはアナログフィルタで高周波をカットするか、求めたい周波数よりも2倍程度高周波成分までをサンプリングしておく。また、サンプリング長も低周波カットとして問題となり、これらはサンプリング定理として知られている。サンプリング定理とは、「サンプリング長を T 秒、サンプリング間隔を S 秒とすると、高周波側は長さ S ごとの平滑化による $1/2 \cdot S$ 以上の周波数の高周波カットオフフィルタとして作用し、低周波数側では $1/2 \cdot T$ 以下の周波数の低周波カットオフフィルタとして作用する」とまとめられる。

FFTによってパワースペクトルを求める一般的な手順は以下の1から6である。なお、観察したい周波数よりもはるかに低い周波数の変動成分をトレンドという。

1. データの決定

サンプル数が 2^N (N は整数) のデータを用意する。

2. トレンドの除去

トレンドをフィルタで除去する。

3. データウィンドウ

ある区間のデータをそのまま用いると、データの最後と最初が不連続なデータになるのでスペクトルに大きなゆがみが生じる。そのため、データに窓関数をかけてデータの両端をなだらかに0に近づけ、データの最初と最後の段差を取り去る。

4. FFTの計算

t を時間、 x を計測した脳波の生データ、 $g(x)$ をすべての実数と定義したとき、パワースペクトル $f(t)$ は以下の式で求められる。

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)(\cos(2\pi xt) + j\sin(2\pi xt))dx$$

5. スペクトルの平滑化

スペクトルは一般に振動が激しいので、周波数領域で一定のバンド幅をもつ窓関数を乗じて移動平均をとり、平滑化操作をおこなう。

6. スペクトルの表示

各スペクトルは、0からナイキスト周波数までの周波数軸に対して表示する。

4 実験

プログラム問題を与えたときの作業者の脳波を計測する被験者実験を行う。被験者は奈良工業高等専門学校情報工学科の学生17人で、年齢は16歳から20歳、全員がプログラミングの基礎講義を受講済みである。

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。脳活動の計測装置はナノテックイメージ社製NeXus-10 MARK IIを用いる。NeXus-10 MARK II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・解析できるシステムである。図4.1に装置の外観と装着時の様子を示す。本装置の計測周期は256/sec、脳波用の電極は本研究では1チャンネルのみ使用するが、最大8チャンネルまで使用できる。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される。

実験者は、1台のPCで装置の制御と、データの記録、および実験タスクの提示をする。被験者にはPCに接続した別のディスプレイでタスクを提示する。被験者の作業は、問題を見て頭の中で解法を考えてもらうのみで、キーボードやマウスなどの操作は一切行わない。また、目的とする生体情報（信号）以外のゆらぎ電位成分をノイズをアーチファクトという。本実験では体動によるアーチファクトを抑えるため、被験者はヘッドレスト、肘掛け、足置きを備えたイスに、事前に椅子の高さやディスプレイの高さを調節して座ってもらった。



[a] 装置の外観



[b] 装着時の様子

図 4.1 使用した計測装置

使用したPCは、CPUがIntel(R) Core(TM)i5-3380M 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ために使用するディスプレイは21.3インチで、解像度は1920 x 1200[ppi]、向きは横向きである。タスク提示に用いるツールとして、

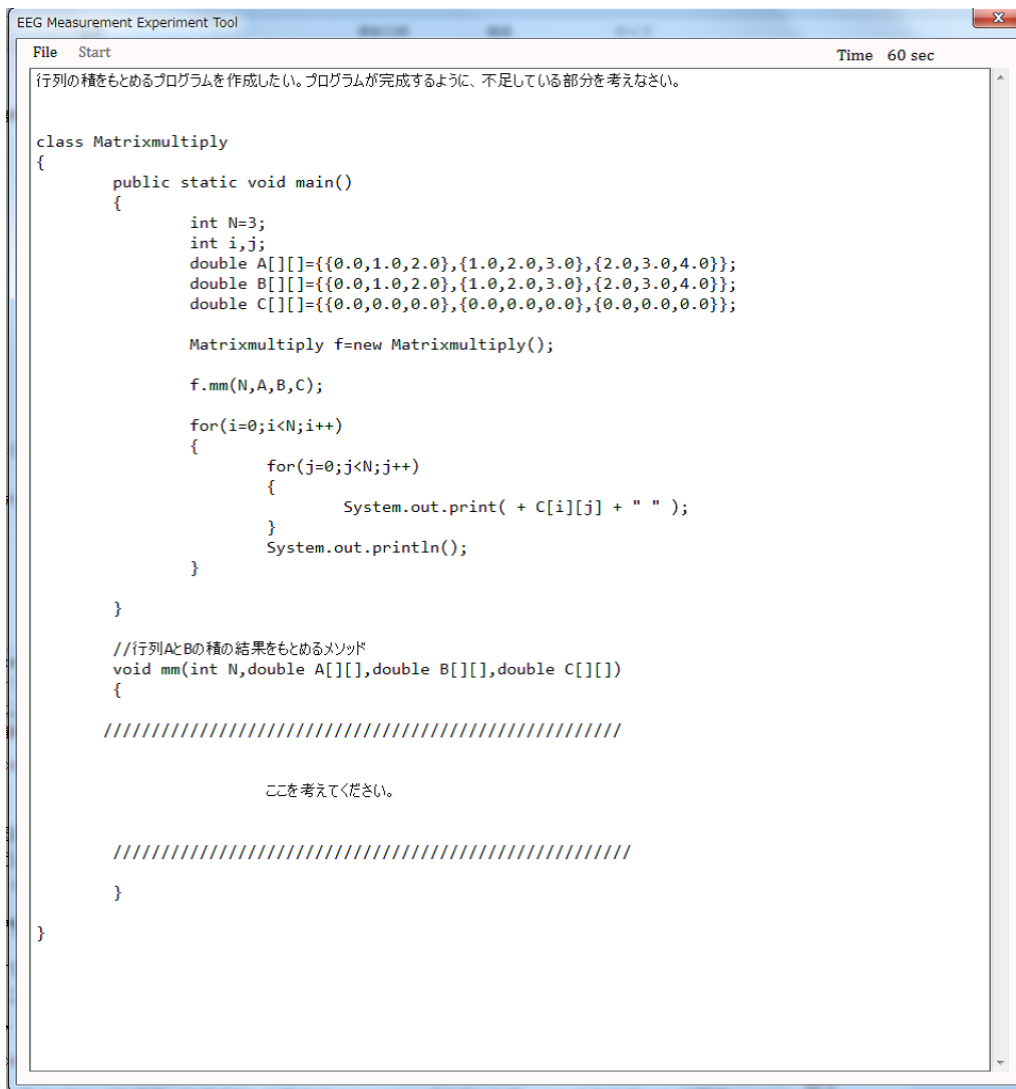


図 4.2 タスク提示に用いたツール

EEG Measurement Experiment ToolをC#言語で作成した。プログラム全体の行数は132行である。ツールの外観を図4.2に示す。実験者はツールの左上のFileから表示したいプログラム問題を選択するが、Startボタンを押すまで問題はディスプレイに表示されない。被験者に実験開始の合図をした上で、Startボタンを押す。このとき、問題が表示されるとともにツールの右上に表示する60秒のカウントダウンも始動する。

4.2 タスク

実験で被験者に課すタスク内容について説明する。実験ツール上に提示されるプログラムの問題文に従って、プログラムの解法を口頭で解答してもらうタスクを設定した。被験者1人につき12問のプログラム問題を与えた。問題文は1問

ごとにディスプレイ上に表示する。本学のプログラミングの基礎講義で用いられている言語がJava言語なので、問題はJava言語を用いて作成した。問題は、全被験者が解法の見当がついた状態とつかなかった状態、2種類の状態を計測できることを目指して作成した。問題の内容は、被験者が本学の2学年から5学年であることを考慮して作成し、難易度は5段階用意した。2学年の学生がまだメソッドを講義で学んでいないため、難易度1から3ではmainメソッドのみを使用する問題を用意した。最も高難度な難易度5では、4学年から5学年でも60秒では理解が難しいと期待できる複雑なアルゴリズムの問題を用意した。各難易度についての説明を以下に示す。

- 難易度 1: 条件分岐のみで構成されるプログラム
- 難易度 2: 1重for文と条件分岐で構成されるプログラム
- 難易度 3: 2重for文や3重for文と条件分岐で構成されるプログラム
- 難易度 4: メソッドを2つ使用するプログラム
- 難易度 5: メソッドを3つ使用し、再帰的アルゴリズムを必要とするプログラム

タスクとして提示する問題の一覧を表4.1に示す。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。

表 4.1 タスク

	ファイル名	概要
A	Center.java	3値の中央値をもとめる
B	Copy.java	配列の要素を逆順に他の配列にコピー
C	EightQueen.java	8王妃問題
D	FizzBazz.java	条件に従った出力の変更
E	Henkan.java	英字の大文字小文字変換
F	Max.java	3値の最大値をもとめる
G	Multi.java	配列の積をもとめる
H	Secret.java	シーザー暗号の生成
I	Sort.java	クイックソート
J	Tenti.java	転置行列をもとめる
K	Triangle.java	左上が直角の三角形の表示
L	Uruudoshi.java	閏年の判定

問題の答えを考える時間は制限時間を設け、60秒間とする。そして、被験者に口頭での解答を行ってもらい、回答内容の正誤を実験者が判断する。口頭解答が終わり次第、タスク後の脳波を計測するために120秒間閉眼安静状態になっても

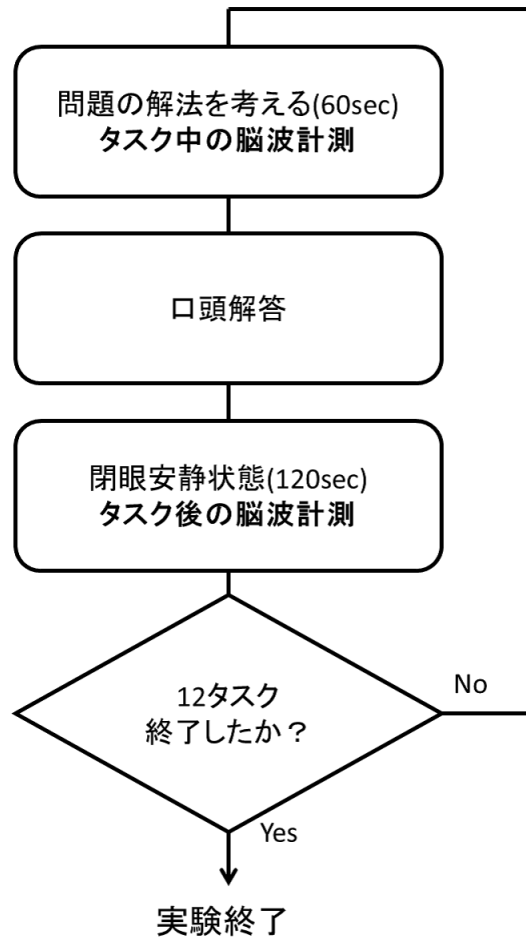


図 4.3 計測の流れ

らう。計測の流れを図4.2に示す。問題の多さから被験者の疲労を考慮して、実験の途中で随時休憩が必要か被験者に尋ね、5分程度の休憩を取る。

4.3 脳波計測

1つめのタスク開始前に被験者に脳波計測装置を装着し、タスク中、およびタスク後の安静状態の脳波全てを計測する。本実験でタスク後に閉眼安静状態で脳波を計測した理由は、 α 波は開眼状態においては減衰し、閉眼状態において増加する[1]という点である。 α 波の減衰では、振幅が小さくなるだけでなく、まばたきから生じる筋電位によるアーチファクトなどが多く含まれてしまう。大橋はタスクによって変化した脳波が60秒から100秒の間持続すると報告しており[2]、タスクによる脳波の変化をタスク後に計測した脳波で見られると考えられる。そこで本研究では、タスクによる変化を測定できる上に α 波減衰が起こらないタスク後の閉眼安静状態の脳波を計測する。

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)，計測用電極を後頭部(Pz)に配置した．計測用電極を後頭部(Pz)に配置した理由は，後頭部は筋電位など脳波以外の生体现象のアーチファクトが入りにくいためである．電極の装着不良によるアーチファクトを防ぐために被験者には頭部用ネット包帯を着用してもらう．また，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ので実験中はできるだけ体を動かさないように被験者に指示する．

4.4 手順

実験の手順を以下に示す．

1. 実験説明・準備

実験についての説明と，脳波計測時の注意を行う．例題として用意した問題を用いて，タスクの内容を説明する．

2. 装置の設定

4.1節で説明した3箇所電極をつけ，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計測する．

3. タスクの実施

ディスプレイに問題を60秒間表示し，解法を考えてもらう．

4. 口頭での解答

考えた解法を口頭で述べてもらい，解法の見当がついているか評価する．

5. タスク後脳波計測

閉眼安静状態を120秒間維持し，脳波を計測する．

6. 全タスクの実施

手順3, 4, 5を12回繰り返す．

4.5 分析

実験で計測した脳波データにフィルタをかけた後，脳波に含まれている α 波と β 波の成分を，FFTによって得られるパワースペクトルから求める．本研究では，IIRバンドパスフィルタとバターワースフィルタを用いる．これらのフィルタ処理を行った脳波に対してハミング窓をかけ，高速フーリエ変換(FFT)を施し，パワースペクトルを求める．パワースペクトルを求める周波数範囲は α 波と β 波として定義されている周波数帯域である8Hz~30Hzとする．得られたパワースペクトルから， α 波の帯域である8Hz~13Hz， β 波の帯域である14Hz~30Hz，それぞれの帯域の成分抽出をおこなう．

脳波は個人差が大きいいため、抽出された成分データを各被験者の平均値で正規化する。また、 α 波と β 波の比率を調べるために正規化後のデータから α と β の比率を計算する。以後、正規化後の α 波の大きさを α 、 β 波の大きさを β と呼び、 α と β の比率を β/α と呼ぶ。 α と β 、 β/α を計測指標とし、それぞれの大きさを比較し分析する。正規化した各タスクにおける α 、 β 、 β/α を、解法の検討がついた状態とついていない状態に分類し、グループ間の指標の差を分析する。

3.2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。本研究では、解法の見当がつかないときは精神的負荷が多く不安に感じている状態と考え、 α は小さく、 β と β/α は大きくなると推測する。反対に、解法の見当がついたときはアイデアを考えるのに没頭しており、不安は相対的には少ない状態と考え、 α は大きく、 β と β/α は小さくなると推測する。分析結果の取得後、検定を行い、3つの指標のグループ間の差が統計的に有意なものであると確認する。まず、F検定により、得られた指標が等分散性の有無を確認する。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、等分散性が無い場合、Welchのt検定を用いる。

5 結果と考察

5.1 タスク中の脳波

計測した脳波データの例を図5.1に、脳波を解析して得られたパワースペクトルの例を図5.2に示す. 見当がついた時と、つかなかった時の2グループについて、タスク中の α , β , β/α の値を図5.3の箱ひげ図に示す.

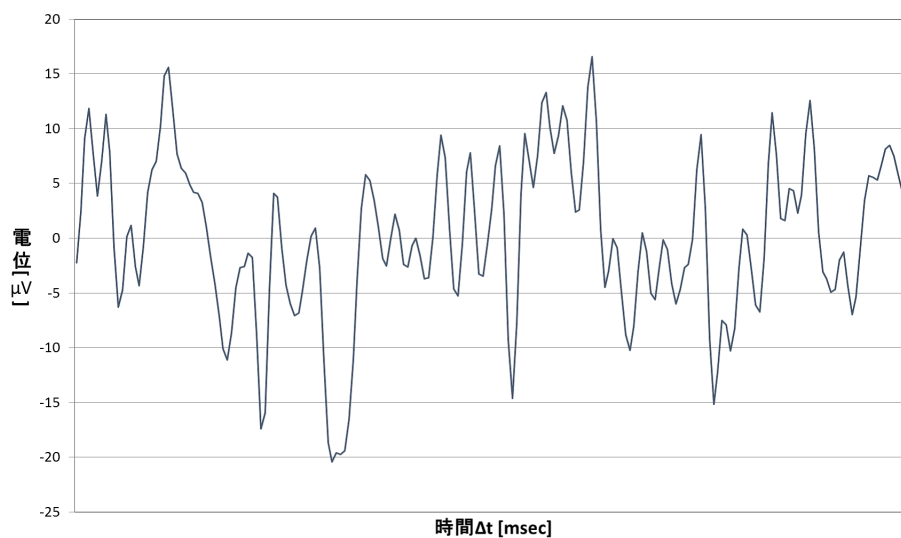


図 5.1 計測した脳波の例

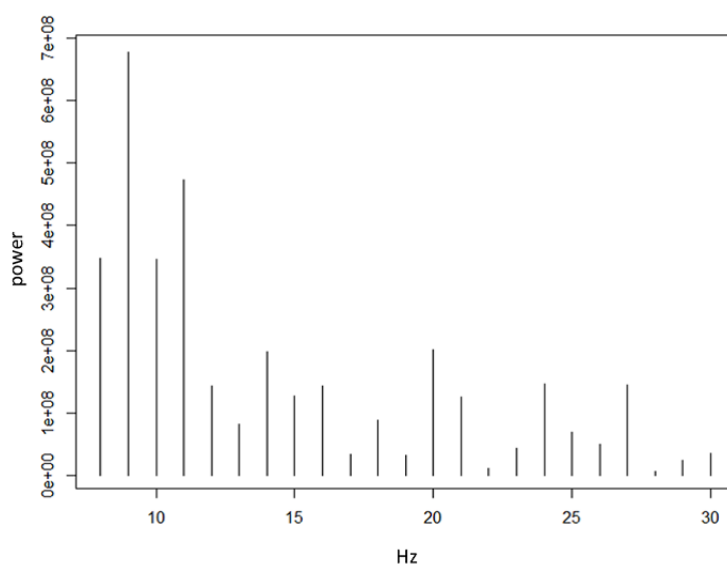


図 5.2 パワースペクトルの例

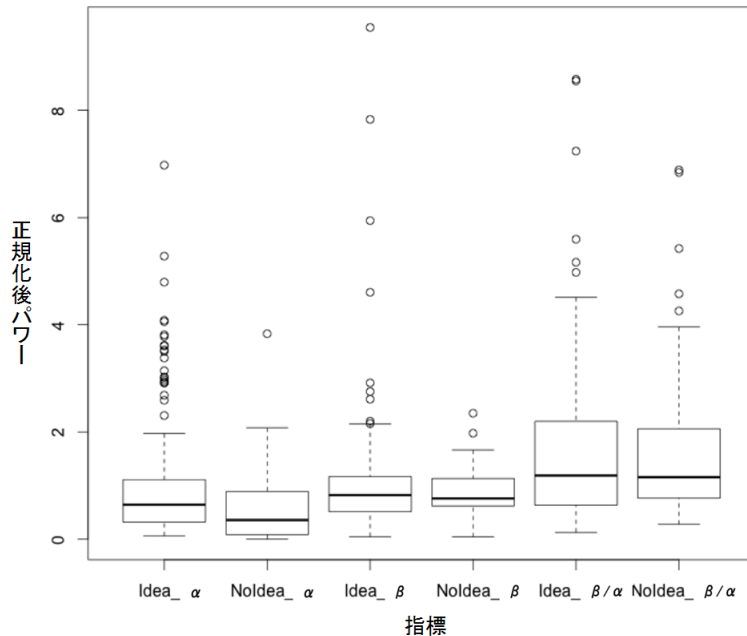


図 5.3 タスク中の各指標の比較

箱の中央付近のヨコ線はデータの中央値を表し、箱のヨコ線は下側がデータの第1四分位数、上側が第3四分位数を表す。箱の上下の短いヨコ線は下側がデータの最小値、上側がデータの最大値を表す。箱の外側にある点は外れ値である。以降、解法の見当がついた状態を *Idea*、見当がなかった状態を *NoIdea* と表示する。図5.3から、すべての指標で外れ値が多いものの、*Idea* と *NoIdea* の α は中央値が0.661と0.647、平均値が1.061と0.759といずれも *Idea* のほうが大きかった。 β についても同様に中央値で0.823と0.760、平均値で1.032と0.874といずれも *Idea* のほうが大きかった。 β/α については中央値が1.187と1.157、平均値が1.616と2.366となり、違いが見られた。

3つの指標について、それぞれF検定で分散を調べ、その結果に基づいて各指標の *Idea* と *NoIdea* との差に対してt検定を行った。その結果、 α は $p = 0.049$ (Welchのt検定)、 β/α は $p = 0.035$ (Studentのt検定) で有意差が見られた。 β は $p = 0.406$ (Studentのt検定) で有意差が見られなかった。以上の結果から、作業中の脳波は解法の見当がついたかどうかと関連があり、プログラミング作業者の状態の識別指標として α や β/α が有用である可能性が示された。また、3つの指標全てにおいて外れ値の多さが目立った。原因の1つとして被験者の個人差が考えられるが、これについては5.3節で考察する。以上の結果から、作業者が解法の見当がついたかどうかは、作業中の脳波に含まれる α の大きさに関係があったと考えられる。プログラミングのタスク中の脳波を計測すると、計測した脳波に含まれる α によってプログラミング作業者の状態を識別できる可能性が示された。

5.2 タスク後の脳波

Idea と *NoIdea* の2グループについて、タスク後の α , β , β/α の値を図5.4の箱ひげ図に示す。*Idea* と *NoIdea* の α は中央値が0.845と0.047, 平均値が1.157と0.377といずれも *Idea* のほうが大きかった。 β も同様に, 中央値で0.559と0.453, 平均値で1.083と0.668といずれも *Idea* のほうが大きかった。 β/α については中央値が1.007と4.803, 平均値が3.344と14.960といずれも *NoIdea* のほうが大きかった。3つの指標について, それぞれF検定で分散を調べ, その結果に基づいて各指標の *Idea* と *NoIdea* との差に対してt検定を行った。その結果, α は $p = 0.003$ (Studentのt検定), β/α は $p = 0.002$ (Studentのt検定) で有意差が見られた。しかし, β/α については, 17件中1件のデータで他の10倍程度の大きな値があり, 結果に影響していると考えられる。この値を除外して再度検定した結果, $p=0.343$ (Welchのt検定) と有意差は見られなかった。 β は $p = 0.147$ (Studentのt検定) で有意差が見られなかった。

以上の結果から, タスク後の脳波の計測結果では3つの指標のうちとくに α の大きさに関係があったと考えられる。また, タスク後の脳波にはアーチファクトが少なく α 波減衰も起こらないことから, タスク中の脳波と比べて解法の見当がついたかどうかを識別するための指標としてより適切であると考えられる。一方で, タスク後の脳波を用いた分析を行う場合, 本実験の実験設定のように安静状態が必要になり, 計測に必要な時間も長くなる。今後, 教育現場の学生や企業の新人研修などでの利用が簡易になるよう, タスク後とタスク中の脳波それぞれを用いた分析が可能になることが望ましい。

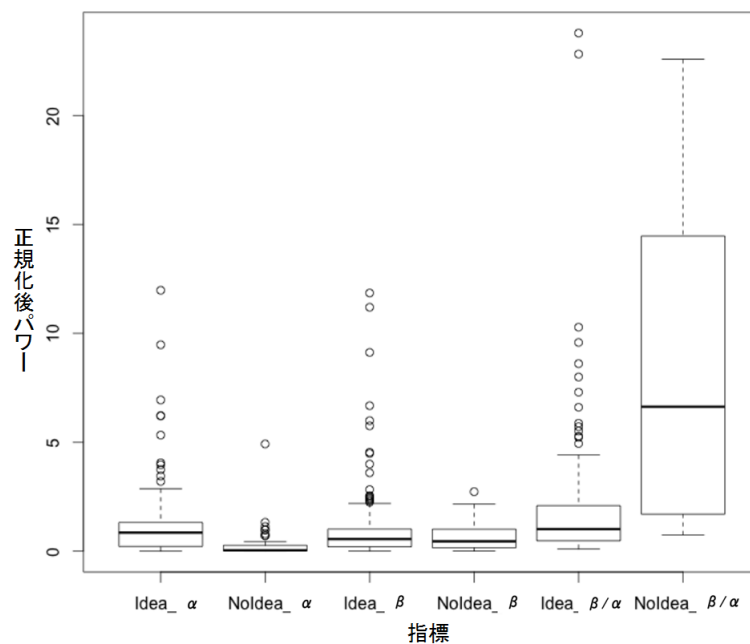


図5.4 タスク後の各指標の比較

5.3 各個人の成分の比較

5.1節で述べたとおり，本実験の結果は個人差による影響を受けた．図5.5は *Idea* のタスク後における各被験者の α の値を示す．x軸は被験者17人のID(1~17)を示し，y軸は正規化後の α の大きさを表す対数軸である．図5.5から脳波にはかなり大きな個人差が含まれていたと読み取れる．図5.5で被験者10の値がいずれも0.01未満になっており，他の被験者と比べて極端に値が小さい．脳計測を行っている研究の多くで，一部の被験者で極端に値が異なる場合や，傾向が反対になる場合が報告されている [9]．本研究の結果も個人差によって受けた影響を考慮し，タスク後の各被験者について *Idea* と *NoIdea* の差を分析する．表5.1に各被験者ごとの *Idea* と *NoIdea* における各成分の値を示す．各成分の値はいずれも中央値で，p値はt検定の結果を示す．また，有意差を確認したp値が0.05未満のものにはアスタリスクを付す．

被験者17人中12人で *Idea* の α が大きく，9人で有意差が見られた．同様に， β は17人中6人で *NoIdea* の値が大きく，1人に有意差が見られた． β/α は17人中15人で *NoIdea* の値が大きく，9人に有意差が見られた．以上の結果は，従来研究と同様に，個人差が大きいものの，個人内では安定しており，プログラムの解法の見当がついているかどうかの指標として有用である可能性を示している．個人差を考

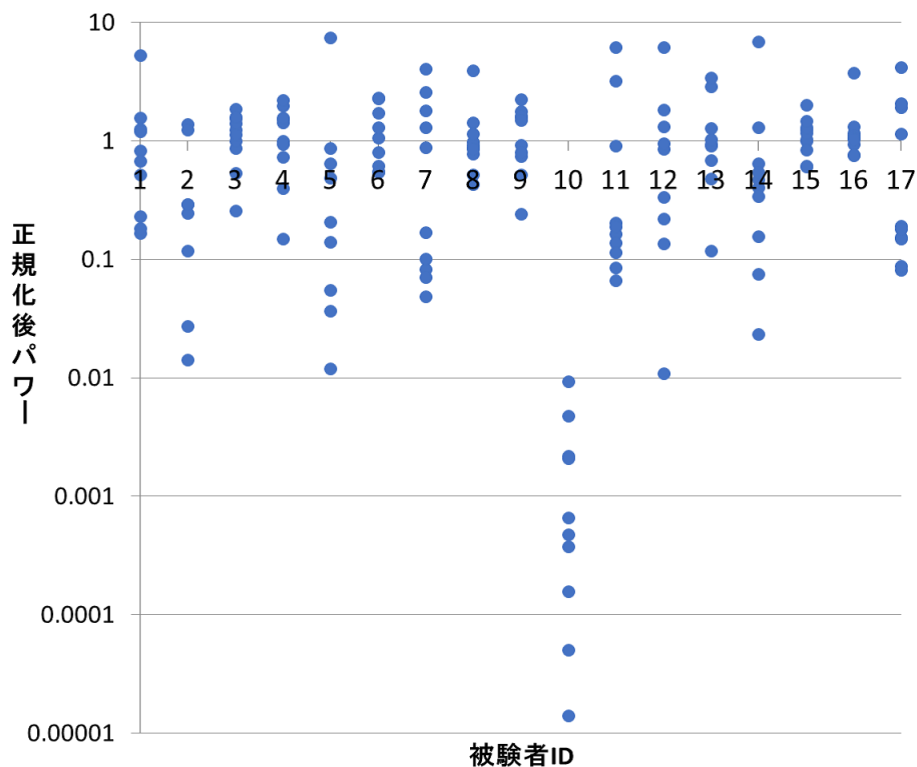


図 5.5 各個人の α

表 5.1 各個人の成分の比較

被験者	α			β			β/α		
	Idea	NoIdea	p 値	Idea	NoIdea	p 値	Idea	NoIdea	p 値
1	0.754	0.009	0.036*	0.579	0.027	0.756	1.104	3.722	0.001*
2	0.270	1.230	0.182	0.686	1.499	0.048*	2.496	1.096	0.244
3	1.186	0.256	0.000*	0.464	3.563	0.299	0.349	13.30	0.003*
4	1.212	0.025	0.000*	0.330	0.206	0.647	0.613	7.156	0.000*
5	0.206	0.028	0.492	0.195	0.046	0.117	2.004	1.656	0.670
6	1.071	0.044	0.049*	0.591	0.077	0.091	0.944	1.488	0.903
7	0.529	0.442	0.520	0.781	0.618	0.338	2.860	4.129	0.991
8	0.907	0.036	0.006*	0.803	0.370	0.076	0.844	13.49	0.001*
9	1.219	0.001	0.029*	0.066	0.033	0.361	0.079	40.94	0.001*
10	0.001	0.001	0.676	0.004	0.005	0.339	7.306	19.66	0.910
11	0.176	0.357	0.617	0.709	0.987	0.979	3.501	24.32	0.025*
12	0.856	0.029	0.290	0.296	0.184	0.546	0.632	5.974	0.546
13	0.941	0.067	0.010*	0.418	1.164	0.987	0.755	12.14	0.000*
14	0.442	0.541	0.511	0.732	0.811	0.809	1.469	3.992	0.807
15	1.101	0.344	0.029*	0.800	1.231	0.783	0.913	3.206	0.003*
16	1.073	0.031	0.041*	1.024	0.508	0.050	0.633	16.22	0.024*
17	0.187	0.891	0.812	0.207	0.786	0.812	1.026	1.170	0.812

慮した，解法の見当の有無を識別するための分析方法を確立することは本研究の興味深い発展のひとつである．

6 おわりに

本稿では、プログラミング作業者が解法の見当がついた状態か識別する方法として、生体情報のひとつである脳波に着目し、被験者実験をした。タスク中とタスク後に脳波を計測し、解法の見当がついたと評価したときと、見当がつかなかったと評価したときとで生じる周波数成分の差異を分析し、プログラミング作業者の状態の識別方法として脳波の有用性を検証した。本実験では、識別指標として8~13Hzの帯域の α 波と14~30Hzの帯域の β 波、 α 波と β 波の大きさの比である α/β を用いた。

実験の結果、タスク中の計測結果では、見当がついたと評価したタスクで α と β/α が優位に大きかった。タスク後の計測結果では、見当がついたと評価したタスクで α と β/α が優位に大きかったが、 β/α は他のデータと極端に値の差が大きい1件のデータを除くと有意差が見られなかった。3つの指標のうち、タスク中、タスク後いずれの計測結果でも解法の見当がついたと評価したタスクで比較的大きく有意差が見られた α 波が作業者の状態の識別に最も適しているといえる。計測した脳波に含まれる α 波の大きさによって、プログラム作業者の状態の識別が可能になると検証された。

また、脳波の波形にはかなり明瞭な個人差のあったので、各被験者ごとに解法の見当がつくときと、つかないときとの脳波を比較した結果、被験者の半数以上で解法の見当がついたときに α 波が有意に大きかった。よって、脳波は個人差の影響を受けるが、見当がついたときと見当がつかなかったときの α 波の大きさには有意な差が存在し、プログラミング作業者の状態の識別指標として有用である。本研究の結果から、プログラミング作業者の脳波に含まれる α 波の大きさを指標に用いると、プログラミング作業者の状態を識別できるといえる。プログラミング作業者の状態を識別する方法として脳波計測の有用性が確かめられた。脳波をプログラミング作業者の状態を識別する指標として用いることは、迅速な作業者の状態の把握が可能になり、適切な支援によって作業効率や教育効果を高められると考えられる。

本研究の今後の発展として、タスク中を計測した際のまばたきなどによる体動から生じるアーチファクトの検知や除去の方法があげられる。将来、教育現場などでの実用を考慮すると、タスク中の脳波による識別を可能にすることが今後望まれると考えられ、タスク中の脳波を計測したときに含まれるアーチファクトの検知や除去の方法を確立する必要がある。また、あくまで本実験ではプログラミング作業者の状態の識別に脳波計測が有用であると示したのみであり、実際に識別はできていない。今後、機械学習を用いて脳波に含まれる α 波の大きさによってプログラミング作業者の状態の識別を可能にしたい。

7 謝辞

本論文の執筆および研究をすすめるに当たり，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，査読教員である松尾先生と指導教員である上野秀剛講師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23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] 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).
- [2] 大橋力:”マルチメディアと脳”;電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol.79, No.4, pp.468-475, (1996).
- [3] 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).
- [4] 満倉靖恵:”脳はウソをつかないー脳波で判るあなたの真実ー”;日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol. 118, No. 4 pp. 461-465, (2015).
- [5] 森田尚亨:”脳波コヒーレンスを用いた脳活動の推定について-ワーキングメモリ課題遂行中の脳活動の推定-”;高知学園短期大学紀要, Vol.42, pp.13-26, (2012)
- [6] 上野秀剛, 石田響子, 松田侑子, 福嶋祥太, 中道上, 大平雅雄, 松本健一, 岡田保紀:”脳波を利用したソフトウェアユーザビリティの評価ー異なるバージョン間における周波数成分の比較”;ヒューマンインタフェース学会論文誌 Vol.10, No.2, pp.233-242, (2008).
- [7] Oohashi, T., Nishina, E., Honda, M., Yonekura, Y., Fuwamoto, Y., Kawai, N., Maekawa, T., Nakamura, S., Fukuyama, H., Shibasaki, H. : Inaudible high-frequency Sounds Affect Brain Activity: Hypersoniceffect ; Journal of Neurophysiology, Vol.83, No.6, pp.3548-3558, (2000).
- [8] 水野由子, 田中康仁, 林拓世, 岡本永佳, 西村治彦, 稲田紘:”精神作業時における作業効率と関連した脳波・脈波の定量解析”;生体医工学 Vol. 48, No. 1 pp.11-24, (2010).
- [9] 中川尊雄, 亀井靖高, 上野秀剛, 門田暁人, 松本健一:”脳血流計測に基づくプログラム理解行動の定量化”;ソフトウェア工学の基礎XIV(ソフトウェア工学の基礎ワークショップ FOSE2013), pp.191-196, (2013).
- [10] Siegmund, J., Brechmann, A., Apel, J, Kastner, C., Liebig, J., Leich T. and Saake, G. : ”Toward Measuring Program Comprehension with Functional Magnetic Resonance Imaging,” Proceedings of the ACM SIGSOFT 20th International Symposium on the Foundations of Software Engineering (FSE ' 12), No.24, (2012).
- [11] 広瀬通孝, 石井威望:”知的作業の客観的評価の手法”;日本機械学会論文集 C編, Vol.51, No.471, pp.3153-3158, (1985).