



卒業研究報告書

令和2年度

研究題目

複数の周波数成分に着目した
プログラム理解の把握

指導教員 上野秀剛 准教授

氏名 柴田海翔

令和3年1月26日 提出

奈良工業高等専門学校 情報工学科

複数の周波数成分に着目した

プログラム理解の把握

上野研究室 柴田 海翔

プログラム理解を適切に支援することは、ソフトウェア保守におけるコスト削減に貢献する。しかしプログラムを理解しているかどうかは主に精神的な活動であるため外観から把握することは難しい。これまでの研究では内部状態を外観から把握する手段として生体情報を用いることでプログラムの理解状態を把握した。本研究では、プログラマがソースコードを理解している間の脳波を計測し、周波数によって δ 波、 θ 波、Low α 波、High α 波、Low β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波の6つの計測指標に分類する。被験者を正答者、誤答者、未回答者の3つのグループに分類し、各周波数成分の特徴の違いを分析する。実験では、質問・仕様書・ソースコードの3つのタブを用意し、被験者に質問に答えてもらう。質問に正しい回答をできた人を正答者、正しくない回答をした人を誤答者、制限時間内に回答ができなかった人を未回答者として分類する。測定した脳波を周波数帯域ごとに分類し、パワースペクトルを算出した。算出された結果が偶然によって得られたものではないことを示すためにt検定を行った。結果は、Low β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波において正答者、未回答者間と誤答者、未回答者間で有意差が見られた。未回答者よりも正答者、誤答者のパワースペクトルが大きくなっていることがわかった。これらの結果から β 波、 γ 波がプログラムのプログラム理解状態を把握する指標となる可能性が示唆された。

目次

1	はじめに	1
2	関連研究	2
2.1	脳波を用いた精神的活動の計測	2
2.2	プログラム理解状態の推定	2
3	脳波	4
3.1	計測方法	4
3.2	周波数が示す特徴	4
3.3	計測データ	5
4	実験	7
4.1	実験環境	7
4.2	タスク	8
4.3	実験の手順	10
4.4	分析の手順	12
5	結果と考察	13
6	おわりに	16
	謝辞	17
	参考文献	18

1 はじめに

ソフトウェア保守において、プログラム理解にかかるコストは全体の中で大きな割合を占める [1]. プログラム理解を支援することでソフトウェア保守にかかるコストを減らすことができる. プログラムのプログラム理解状態をリアルタイムに把握することでそれぞれの理解状態に応じた支援が可能になる. しかし、プログラム理解のための活動は主に思考といった精神的な活動となっているため、プログラム理解状態を外観から把握することは難しい.

プログラムの状態を把握する方法として生体情報を外部から測定する方法がある. 生体情報の1つである脳活動や眼球運動は、思考状態や心理状態と関係があることが知られており、アンケートやインタビューと比較して個人の主観が反映されないことからプログラム理解に関する研究においてよく用いられている [2, 3, 4].

脳活動を計測する手法の中でも脳波は時間分解能が高いことから作業中のプログラムの状態をリアルタイムに識別できる [2]. これまでの研究では特定の周波数成分からプログラムの状態を識別することで脳波計測の有用性が示されている [2, 3]. そのため、脳波はプログラムの状態を把握する方法として適していると考えられる.

脳波は国際脳波学会によって定められた周波数帯域ごとに名称がつけられており、心理状態によって各周波数成分の強さが変化することがわかっている. 脳波の周波数成分である α 波や β 波はリラックスしている状態や思考している状態、 γ 波は精神活動や視覚情報処理といった脳活動によって出現する [7].

これまでの研究ではプログラムの理解状態を把握する指標としてリラックス状態に関連のあるとされている α 波や思考状態と関連のあるとされている β 波を用いた分析が行われていた [2]. プログラムはプログラムを理解する時、視覚から得られた情報を脳で処理することで理解しようとしていると考えられる. このプロセスにおいて視覚情報処理と関連のある γ 波が理解できていない人より理解できた人の方が多く出現すると考えられる. また、脳波の各周波数成分においてより詳細な分類をすることによって、より詳細な心理状態との関連を示すことができる. このことから本研究では α 波は High α 波, Low α 波に, β 波は High β 波, Low β 波に, γ 波は Low γ 波, Mid γ 波にそれぞれ分類することで、より詳細な心理状態の計測が可能になる [7]. よって本研究では、複数の周波数成分にプログラムのプログラム理解状態が反映されると仮定し、脳波を周波数帯域ごとに計測し分析する.

2 関連研究

2.1 脳波を用いた精神的活動の計測

人間の精神的活動は外観から把握することは困難となっている。そこで人間の精神的活動を外部から計測する手法として脳波を用いた手法が様々な研究分野で用いられている。

武者らは計測された脳波から怒りや喜びといった感情を推定する方法を提案している [8]。計測に使用した10個の電極の内2個の電極で記録される電位の相互相関関数を特徴量とし、全ての電極の組み合わせから人間の感情に関する特徴量を捉えようとした。Mullerらは脳波や視線といった生体情報を用いて感情とタスクの進捗を推定する手法を提案している [4]。タスクを途中で中断しインタビューによって愉快度と興奮度を数値で回答してもらうことで、この2つの指標がタスクの進捗に相関関係があることが分かった。

これらの研究から脳波と人間の精神的活動には関連があることが分かっている。そのため本研究では、プログラムの理解状態を把握する指標として脳波の周波数成分を用いる。これまでの研究では人間の精神的活動を計測する指標として α 波や β 波といった特定の周波数成分について分析している。本研究では、プログラムの理解状態に関連があると考えられる γ 波や基礎律動である Δ 波や θ 波と合わせて分析する。分析した結果からそれぞれの周波数成分にプログラムのプログラム理解状態がどのように反映されるかを検証する。

2.2 プログラム理解状態の推定

非侵襲的に計測できることとアンケートやインタビューより個人の主観が反映されないことからプログラムのプログラム理解状態を把握するために様々な研究が行われている。

SiegmundらはfMRIを用いてプログラム動作理解時の脳領域の活性化パターンを明らかにした [9]。fMRIを用いることで人間の脳の血流変化から脳活動を測定することができる。被験者にバグ検出を行ってもらい、プログラムを理解した時に被験者の問題解決、暗記、文章理解に関連する脳領域が活性化することが示されている。しかし、fMRIは被験者が装置の上で横になって脳活動を計測する必要がある。そのため、実環境でプログラムのリアルタイムな支援を行うことが難しい。被験者を拘束することなく脳活動を計測する方法として脳波を用いる研究が盛んに行われている。石田は計測した脳波のうち α 波、 β 波を計測指標としてプログラムを理解できた人とできなかった人の差を分析した [2]。プログラムがプログラムの動作を理解している時に α 波、バグを正しく判断できた時に β 波が大きくなることを明らかにした。

これらの研究からプログラマのプログラム理解状態を把握するのに脳波計測の有用性が示されている。本研究ではプログラマのプログラム理解状態の把握が目的となっているため、脳波を用いた分析が適切だと考えられる。これまでの脳波を用いたプログラム理解状態の把握が目的となっている研究では α 波と β 波の2つの計測指標を用いて分析していた[2, 3]。そのため本研究では脳波の周波数成分をより詳細に分析するために α 波をLow α 波, High α 波に分類し, β 波をLow β 波, High β 波に分類する。また, α 波, β 波以外の周波数成分である δ 波, θ 波, Low γ 波, Mid γ 波も同様に分析する。それぞれの周波数成分には人間の心理状態と関連があることが分かっている[7]。本研究ではプログラマのプログラム理解状態が心理状態に関連があると仮定して, 各周波数成分をプログラマの理解状態で分類する。プログラムを理解できた時と理解できなかった時で分類した各周波数成分に違いがあるか調査する。

3 脳波

3.1 計測方法

脳波とは，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 [10]. 脳波は，頭皮上に装着した電極から計測される．電極の配置は図 3.1 に示す国際式 10-20 電極法に則って行う [11]. 国際式 10-20 電極法は各座標に対応した脳の部位が明らかになっており，最も広く使用されている脳波の記録法である．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．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 [5].

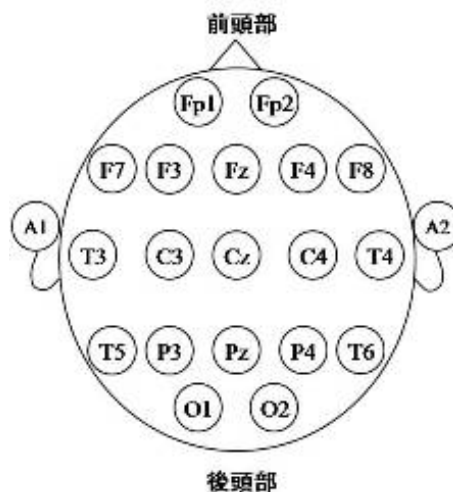


図 3.1: 国際式 10-20 電極法

3.2 周波数が示す特徴

一般的に脳波は時間の経過にともなって複雑な電位変動を示す不規則な振動現象とみなされ，高速フーリエ変換(FFT)を用いてパワースペクトルが求められる．脳波からパワースペクトルを求める際には，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を用いる [6]. 各帯域の名称と周波数帯域，各帯域の周波数成分が多くを表 1 に示す．

δ 波や θ 波は睡眠状態にあるときに出現する． α 波は閉眼安静時でリラックスした状態の時に出現する． α 波は安静時・覚醒時共に見られる波形だが，リラックス

周波数成分	周波数帯域	心理状態
δ 波	0.5-2.75[Hz]	ノンレム睡眠, 無意識
θ 波	3.5-6.75[Hz]	直観的, 創造的, 想起, 空想, 夢
Low α 波	7.5-9.25[Hz]	リラックス, 平穏, 意識的
High α 波	10-11.75[Hz]	リラックスしているが集中している, 統合的
Low β 波	13-16.75[Hz]	思考, 自己および環境の認識
High β 波	18-29.75[Hz]	警戒, 動揺
Low γ 波	31-39.75[Hz]	記憶, 高次精神活動
Mid γ 波	41-49.75[Hz]	視覚情報処理

表 1: 脳波の分類

ス状態時には α 波の振幅が大きくなり, 反対に緊張時には α 波の振幅が小さくなり β 波の出現が見られるなどの特徴がある [7]. α 波は Low α 波, High α 波に分類することができる. Low α 波は α 波のうち, 主にリラックスしている状態の時に出現する. High α 波は α 波のうち, 主に集中状態に出現する. 緊張感を持った集中状態ではなく, リラックスしながら集中している状態に多く出現する. β 波は思考状態にあるときに出現する. β 波は Low β 波, High β 波に分類することができる. Low β 波は β 波のうち, 主に思考している状態に出現する. High β 波は β 波のうち, 主に警戒している状態や動揺している状態に出現する. γ 波は知覚といった高次精神活動によって出現する [7]. γ 波は Low γ 波, Mid γ 波に分類することができる. Low γ 波は γ 波のうち, 主に記憶するときや知覚といった高次精神活動に出現する. Mid γ 波は γ 波のうち, 主に視覚から得られた情報を処理するときに出現する. このように, 各周波数成分の出現率は心理状態と関連がある.

3.3 計測データ

計測された脳波データの例を図 3.2 に示す.

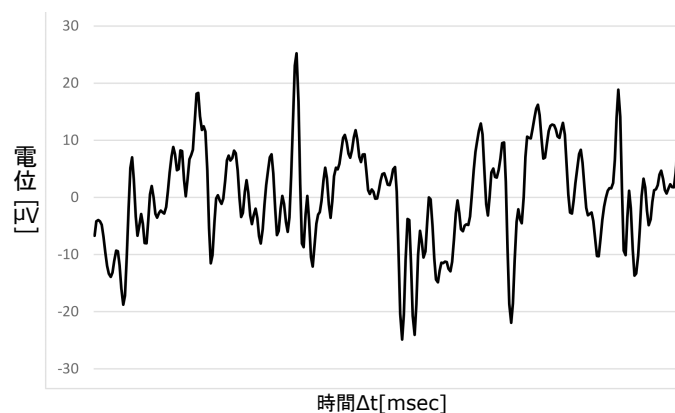


図 3.2: 計測した脳波データの例

図3.2から本研究で計測される脳波の電位は $-25\ \mu\text{V}$ から $25\ \mu\text{V}$ となっている。そのため、計測された脳波の振幅は $0\ \mu\text{V}$ から $25\ \mu\text{V}$ となっている。本研究で得られた脳波はサンプリング周波数を 256sps とする。そのため、1秒間に256回脳波を計測する。

脳波は個人差が大きくなることが分かっている[11]。脳波を計測し、個人間の各周波数成分の差を調査する場合、脳波の個人差をなくす必要がある。そのため、被験者ごとに平均値で正規化する必要がある。本研究における正規化の方法について以下に示す。

1. 各被験者の脳波データのパワースペクトルを取得する
2. 各被験者のパワースペクトルの平均値を算出する
3. 各被験者のパワースペクトルを2.で算出した平均値で除算する

被験者ごとに正規化した結果から、各周波数成分ごとの出現率がわかる。本研究ではプログラムの理解状態を正答者、誤答者、未回答者の3つに分類する。各周波数成分の出現率からプログラムの理解状態を識別できると仮定し、正規化された脳波のデータを分析する。

4 実験

プログラム課題を被験者に提示し、タスク中の脳波を計測する。被験者は奈良工業高等専門学校（NIT）の学生5人で、年齢は19歳から20歳、全員がJavaによる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。体動によるアーチファクトを抑えるために、ひじ掛け・足置きを備えた椅子に座り、頭部と体をできるだけ動かさないように指示する。実験に使用するのは、脳波計測装置、タスク提示用PC、脳波計測用PC、記録用PCである。脳波計測に用いるハードウェアは、ナノテックイメージ社製 Nexus-10 MARK II と計測用のノートPC1台である。Nexus-10 MARK II は計測周期は256Hzであり、計測された脳波はBluetooth経由で脳波計測用PCに転送され、1-45Hzの周波数の脳波のデータがCSVファイル形式で出力される。計測用のノートPCは、Windows 7 Intel(R) Core(TM)i5-3380M 2.90GHz でメモリ搭載量は4GBである。図4.1に装置の外観と装着時の様子を示す。



(a) 装置の外観



(b) 装着時の様子

図 4.1: 脳波計測用装置

脳波計測に用いるソフトウェアは、Nexus-10 MARK IIに対応したソフトウェアであるBioTrace+ Softwareである。ソフトウェアはBluetoothによってNexus-10 MARK IIから脳波データをリアルタイムで受信し、記録する。CSVファイル形式で記録した脳波を出力できる。図4.2は計測時の動作画面である。上半分が脳波の生データであり、リアルタイムで脳波が表示される。左下のSTART、および右下のENDボ

タンは課題の開始・終了時を記録するためのボタンで、出力されるCSVファイルに「Start」または「End」が記録される。

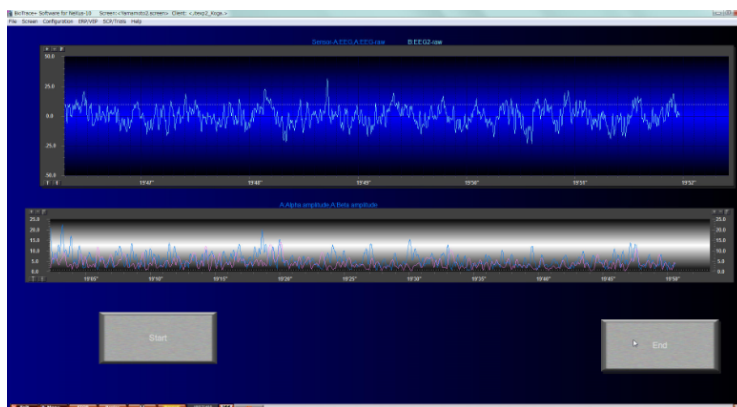


図 4.2: BioTrace+動作画面

2つ目のソフトウェアは上野准教授が作成した実験ツールである。実験ツールはタスクの提示を行う。タスクは3つのタブに分けて提示する。タスク内容は4.2で説明する。また、実験ツールはtobii Eye Tracker 4Cから得た視線データを記録し、CSVファイルで出力する。キーボードのspaceキーでタスクの表示・非表示の切り替え、右キー、左キーでタブの切り替えが出来る。実験時には、できるだけ体動を抑えるためにspaceキーと右、左キーをそれぞれボタンに割り当てたコントローラを使用する。実験に使用したコントローラとタスク提示ツールの動作画面を図4.3に示す。



(a) コントローラ

```
1 public class Main {
2     public static void main(String arg[]) {
3         int a = 1, b = 4;
4
5         while (b > 1) {
6             a = a * b;
7             b--;
8         }
9
10        System.out.println(a);
11    }
12 }
13
14
15
16
17
18
19
```

(b) タスク提示ツール動作画面

図 4.3: プログラム課題に用いた機器

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。タスクは被験者1人につき16問与える。被験者にタスクを見せ、ソースコードの動作を理解しているか確

認するための問いに口頭で回答してもらおう。回答内容が事前に用意した解答と一致していればソースコードの動作を理解しているとみなす。一致していなければソースコードの動作を理解していないとみなす。タスクには制限時間が設けられており、一定時間を超えると未回答者として分類する。回答内容が解答と一致しているかは被験者には伝えない。被験者は制限時間以内に入力フォームの問いが分かったら、spaceキーを割り当てたコントローラのボタンを押して回答する。

被験者に提示するものは、プログラムの仕様、ソースコード、出力フォームの3つで、それぞれタスク提示ツール上の異なるタブに表示される。図4.4に実験に使用したプログラムの仕様、ソースコード、出力フォームの例を示す。

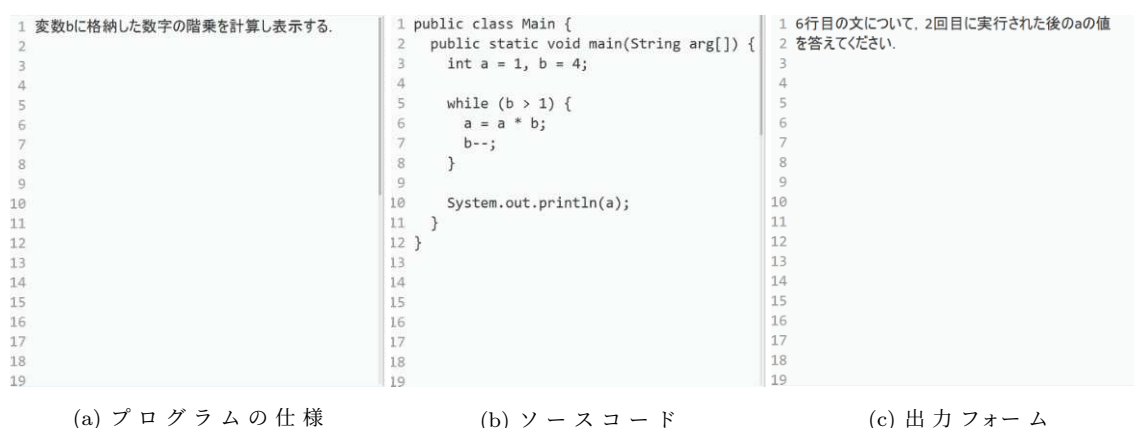


図 4.4: タスクの提示物

図4.4の説明をする。プログラムの仕様には、図4.4(a)のようにプログラムの概要が日本語で書かれている。ソースコードには、図4.4(b)のようにプログラムの仕様に合ったソースコードが書かれている。ソースコードは全てJava言語を用いて作成する。出力フォームには、図4.4(c)のようにソースコードの動作が理解できたか確認するための問いが日本語で書かれている。図4.4(c)の場合の正答は12である。

本研究では、プログラム動作を理解している時と理解していない時の脳波を分析する。そのためプログラム動作を理解したグループと理解していないグループに分け、統計的な分析を行う。その際、どちらかのグループにデータ数が偏ってしまうと片方のグループのデータ数が不足し、統計手法を用いることができなくなる。よって、データ数が偏らないようにタスクを設定したい。

プログラム動作を理解するのが簡単なタスクは理解している状態になりやすいと期待できる。反対にプログラム動作を理解するのが難しいタスクはプログラム動作を理解していない状態になりやすいと期待できる。よって、低難易度のタスクと高難易度のタスクを半分ずつ用意すれば、理解している状態と理解していない状態を均等に分けることができるはずである。よって、本実験では低難易度と高難易度のタスク数は8問ずつとする。低難易度のソースコードは全てmain

メソッドのみを使用する。1重の繰り返し文や条件分岐で構成された理解が容易と思われるソースコードを使用する。高難易度のソースコードは複数メソッドの使用や再帰構造によって制限時間以内での理解が難しいと期待できる複雑なアルゴリズムを使用する。

タスクとして提示する課題の一覧を表2に示す。各被験者に提示する問題の順番は、順序効果を考慮しカウンターバランスを行う。カウンターバランスとは提示するタスクの順番が被験者全体でつり合いが取れるよう被験者毎にタスクの順番を変えることである。

表2: 実験に使用したタスクの一覧

	ファイル名	仕様
1	Factorial.java	階乗の計算
2	SearchMax.java	最大値検索
3	PrimeNum.java	素数判定
4	SearchMedian.java	中央値検索
5	Power.java	累乗計算
6	Swap.java	2つの数値の入れ替え
7	Contained.Substring.java	指定した文字列が含まれているか判定
8	ReverseString.java	文字列を反転させる
9	TowerOfHanoi.java	ハノイの塔
10	NumOfRoute.java	経路数を求める
11	MakePermutation.java	順列を全列挙する
12	Combination.java	組み合わせを漸化式から求める
13	PayMoney.java	支払う硬貨の組み合わせを求める
14	StrCombination.java	文字列の組み合わせを求める
15	JOI14pre3.java	2014年情報オリンピック予選 問題3
16	lcm_gcd.java	最小公倍数と最大公約数を求める

タスクには予備実験を基に決定した制限時間を設定する。予備実験は低難易度のソースコードを理解するには十分で、かつ、高難易度のソースコードを理解するには不十分な時間を測定するために行った。予備実験では2人の被験者を対象に、低難易度のタスクから最も難しいと思われるタスクを2つ、高難易度のタスクから最も簡単と思われるタスクを2つ行ってもらい所要時間を計測した。この予備実験に使用したタスクは本実験には使用しない。予備実験の結果を基に、制限時間を2分30秒とした。

4.3 実験の手順

実験の順序を以下に示す。

```

1 public class Main {
2     public static void main(String arg[]) {
3         int a = 1, b = 4;
4
5         while (b > 1) {
6             a = a * b;
7             b--;
8         }
9
10        System.out.println(a);
11    }
12 }
13
14
15
16
17
18
19

```

(a) 変更前のソースコード

```

1 public class Main {
2     public static void main(String arg[]) {
3         int a = 1, b = 4;
4
5         while (b >= 1) {
6             a = a * b;
7             b--;
8         }
9
10        System.out.println(a);
11    }
12 }
13
14
15
16
17
18
19

```

(b) 変更前のソースコード

図 4.5: 変更前後のソースコード

1. 実験の説明

実験概要，脳波計測時の注意点を説明する。

2. 装置の装着・設定

脳波計測装置 NeXus-10 MARKII を被験者に装着し，設定する。

3. 練習問題

1タスクの流れを被験者に確認してもらうために，練習タスクを実施してもらう。

4. 動作理解タスクの実施

ディスプレイにタスクを2分30秒間提示し，プログラムの動作を理解してもらう。

5. 解答

被験者には動作を理解した時にコントローラのボタンを押して答えを口述してもらう。

6. 変更後タスクの実施

ディスプレイに変更後のタスクを1分間提示し，仕様を満たすか判断してもらう。

7. 解答

被験者には仕様を満たすか判断できた時にコントローラのボタンを押して答えを口述してもらう。

8. 全タスクの実施

1タスク当たり手順4～7を1回を行う。全タスクである16タスクを行うため、手順4～7を16回繰り返す。

4.4 分析の手順

各被験者のタスク中の脳波を周波数成分ごとに分析する。脳波のデータは被験者一人につき16タスクあるので5人×16の80個分のデータが計測される。得られた脳波データに対して個々にFFTをかけていき、表1に示した周波数帯ごとに成分抽出する。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平均値で正規化する。

正規化後のパワースペクトルを、質問に対して正しい回答ができた人(以降、単に正答者とする)、間違った回答をした人(以降、単に誤答者とする)、制限時間以内に回答できなかった人(以降、単に未回答者とする)の3つのグループに分ける。3つのグループ間で正規化後の δ 波、 θ 波、Low α 波、High α 波、Low β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波をそれぞれ計測指標として、t検定によって有意差がみられるかどうかを調べる。

本実験において正答者と誤答者のいずれも質問に対して回答できていることから、プログラムを正しく理解できたと考えていると思われる。そのため、自分では理解できていると思いついておりこの2つのグループにおいて有意差は見られないと考えられる。一方で、未回答者は質問に対して回答できていないことからプログラムを理解できていないことが分かる。そのため、正答者と誤答者のグループと未回答者では心理的に理解できたかどうか異なり、 β 波、 γ 波といった思考、高次精神活動と関係のある周波数成分において有意差がみられると考えられる。

5 結果と考察

被験者実験によって得られた5人の脳波データを正規化した結果を図5.1に示す。縦軸は正規化後の脳波、横軸は被験者の分類になっており、左から正答者、誤答者、未回答者となっている。それぞれの正規化されたデータは箱ひげ図で示されている。箱の中の横線はデータの中央値を表し、箱の横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。箱の上下の短い横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。

図5.1から δ 波、Low β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波において正答者、誤答者、未回答者の順に高くなっていることが分かる。また、 θ 波、Low α 波、High α 波において誤答者、正答者、未回答者の順に高くなっていることが分かる。 δ 波、 θ 波、Low α 波、High α 波、Low β 波、High β 波、Mid γ 波において第1四分位数と第3四分位数の値が正答者、誤答者間で変化が少ないことがわかる。未回答者について各周波数帯域の値を見ると β 波、 γ 波で低くなっており、特にHigh β 波、Low γ 波、Mid γ 波において最大値、第3四分位数が低くなっている。

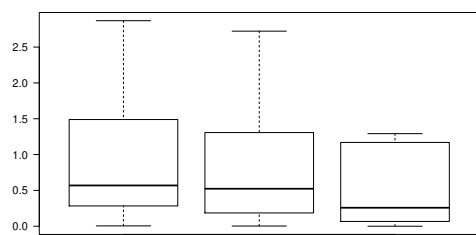
実験で得られた結果から求められる正答者、誤答者、未回答者の各周波数帯域の平均値と3つのグループそれぞれの間でt検定した結果を表3に示す。また、p値が0.05未満のものにはアスタリスクを1つ付す。

表3: 正答者、誤答者、未回答者のパワースペクトル

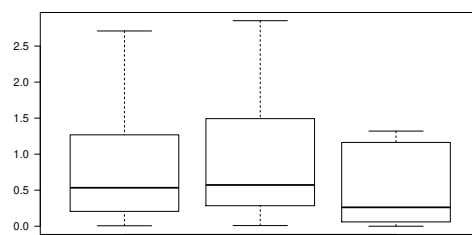
	パワースペクトル			p 値		
	正答	誤答	未回答	正-誤	誤-未	正-未
δ	1.170	1.012	0.901	0.705	0.604	0.485
θ	1.170	1.015	0.791	0.709	0.577	0.463
Low α	1.160	1.033	0.742	0.757	0.462	0.396
High α	1.143	1.053	0.690	0.813	0.328	0.329
Low β	1.036	1.182	0.357	0.695	0.016*	0.030*
High β	1.119	1.227	0.127	0.806	0.007*	0.003*
Low γ	1.167	1.201	0.168	0.941	0.005*	0.048*
Mid γ	1.192	1.209	0.120	0.966	0.001*	0.022*

表3から、平均値は δ 波、 θ 波、Low α 波、High α 波において正答者、誤答者、未回答者の順に高くなっていることが分かる。また、Low β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波において誤答者、正答者、未回答者の順に高くなっていることが分かる。したがって、誤答者、正答者、未回答者の3つのグループで各周波数成分の平均値を比べると未回答者の平均値が3つのグループのうち一番低くなっている。未回答者の周波数成分のうちLow β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波の平均値が他の周波数成分の平均値と比較して低くなっていることが分かる。

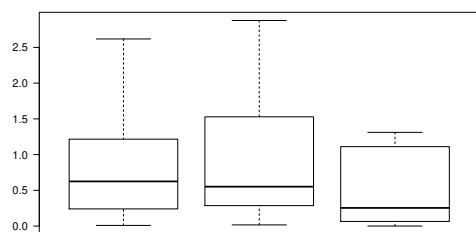
以上が実験から得られた結果である。この結果が正しいかどうかを検証するためにt検定を行う。t検定により得られたp値を見ると誤答者、未回答者間と正



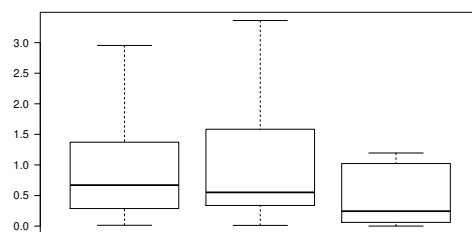
(a) δ 波



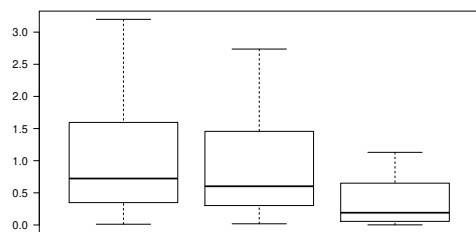
(b) θ 波



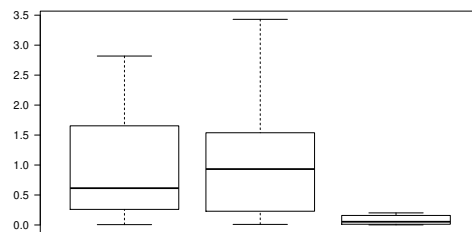
(c) Low α 波



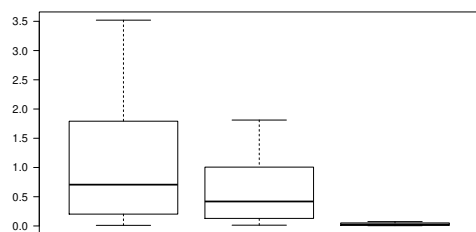
(d) High α 波



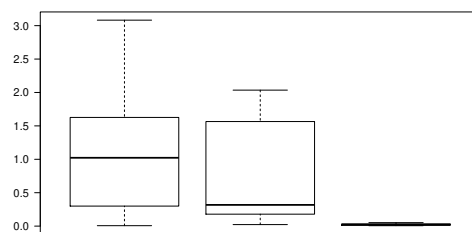
(e) Low β 波



(f) High β 波



(g) Low γ 波



(h) Mid γ 波

図 5.1: プログラム理解時の脳波の比較

答者、未回答者間のLow β 波, High β 波, Low γ 波, Mid γ 波の値が0.05未満になっており4つの周波数成分には有意差が見られた。つまり, Low β 波, High β 波, Low γ 波, Mid γ 波において誤答者より未回答者の方が低く, 正答者より未回答者の方が低いことが明らかになった。

4.4節で示した仮説では, 思考状態であるときに出現するLow β 波, High β 波や, 知覚といった高次精神活動によって出現するLow γ 波, Mid γ 波が未回答者の脳波よりも正答者, 誤答者の脳波に多く出現することが示唆されていた。実験の結果とt検定によるp値から未回答者よりも正答者, 誤答者のLow β 波, High β 波, Low γ 波, Mid γ 波が高くなっていることが明らかになった。このことから仮説は正しかったといえる。このような結果になった原因を考察する。プログラマがプログラムを理解しようとしている時, 視覚から取り入れたソースコードの情報を脳内で処理し, 理解しようとしている。Low β 波, High β 波, Low γ 波, Mid γ 波が理解できなかった人より理解できたと考えてる人の方が大きくなるということは, 視覚情報処理と思考の過程で2つのグループに差がみられると考えられる。理解できたと考えているグループは理解できなかったグループと比べて視覚から取り入れる情報が多く, プログラムを理解するためにより高次の思考していると考えられる。

6 おわりに

本研究ではプログラマのプログラム理解状態を識別することを目的として、プログラム理解時の脳波における複数の周波数成分について分析した。実験では5人の被験者にプログラミング課題を解いてもらい、質問に回答してもらうことで被験者がプログラムを理解できたかどうかを確認した。計測した被験者の脳波を正答者、誤答者、未回答者に分類した。3つのグループにおいてそれぞれ δ 波、 θ 波、Low α 波、High α 波、Low β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波の周波数成分の差を分析した。

分析の結果から正答者、誤答者間では有意差が見られず、正答者、未回答者間と誤答者、未回答者間ではLow β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波に有意差が見られた。Low β 波、High β 波、Low γ 波、Mid γ 波において正答者と誤答者で未回答者より高いパワースペクトルが見られた。このことから、被験者本人がタスクを正しく理解できたと考えている正答者と誤答者のグループと、理解できていないと自覚している未回答者のグループでは視覚情報処理や思考状態に差があると考えられる。

本研究では β 波と γ 波が正答者、誤答者のグループと未回答者のグループを分類するとき用いる指標になることが示唆された。ソフトウェア保守現場で適切な支援を行うためにはプログラムを正しく理解でき開発者とプログラムを正しく理解できていると考えているが実際は理解できていない開発者、プログラムを理解できていない開発者を区別する必要がある。本研究の結果から脳波のみによる識別は難しいと考えられる。

本研究の分析結果から視覚情報処理がプログラマの理解状態に関連があることが示唆された。そのため、今後の研究では、比較的容易に視覚情報を計測する方法として視線計測を用いた分析が必要になってくると考えられる。視線計測は脳波と同様に生体情報の一種であり、プログラマの理解過程が反映される。視線を計測することで正答者と誤答者の理解過程にどのような差がみられるかを分析すれば、正答者と誤答者の識別に有用と考えられる。正答者と誤答者を識別することができれば本研究の結果から脳波と視線を同時に計測することで正答者、誤答者、未回答者の3つのグループの識別が可能になり、更なるソフトウェア保守におけるコストを減らすことが可能になるだろう。

謝辞

本論文の執筆，及び本研究を進めるにあたり多くの方々に協力していただきました。指導教員である上野准教授には，お忙しい中，研究に対する助言，論文の添削など多くの助力をいただきました。査読教員である岩田准教授をはじめ，松村教授には研究に対する大変貴重な意見をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Thomas D.LaToza, D.Garlan, James D.Herbsleb, Brad A.Myers: "Program comprehension as fact finding", 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conference and the ACM SIGSOFT Symposium on the Foundations of Software Engineering (ESEC-FSE'07), (2007).
- [2] 石田豊実: "生体データと作業履歴に着目したプログラム理解過程の分析", 奈良工業高等専門学校卒業論文 (2018).
- [3] 山本愛子: "プログラムの実装戦略推定時における脳波の時系列分析", 奈良工業高等専門学校卒業論文 (2018).
- [4] Muller, Fritz: "Stuck and Frustrated or In Flow and Happy: Sensing Developers' Emotions and Progress", In Proceedings of 2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering, Vol.1, pp.688-699(2015).
- [5] 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)
- [6] 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).
- [7] 坂本佑太, 吉田幸二, 宮地功: "簡易脳波計による学習時の思考と記憶の比較分析", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO)2012シンポジウム論文集, pp.724-729(2012).
- [8] T. Musha, Y. Terasaki, H. A. Haque, G. A. Ivanitsky: "Feature Extraction from EEGsAssociated with Emotions", Artificial Life and Robotics, Vol.1, pp.15-19(1997).
- [9] J. Siegmund, C. Kanster, S. Apel, C. Parnin, A. Bethmann, T. Leich, G. Saake, A. Brechmann: "Understanding Understanding Source Code with Functional Magnetic ResonanceImaging", Proceedings of the International Conference on Software Engineering (ICSE), pp.378-389(2014).
- [10] 音茂龍司, 辻貞敏: "よくわかる脳波判読第3版":金原出版株式会社 (2015).
- [11] 村上郁也: "イラストレクチャー 認知神経科学":株式会社オーム社 (2013).