

# 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

山本 愛子<sup>1,a)</sup> 上野 秀剛<sup>1,b)</sup>

**概要:** 脳波 (Electroencephalogram:EEG) は人の脳活動を非侵襲で簡単に測定する手法としてさまざまな研究分野で用いられている。本研究では、プログラムの実装戦略を推定する際に現れる脳波の特徴を分析する。被験者実験では、不足部分のあるソースコードに対して実装戦略を考えるタスクを与え、そのタスク中とタスク後のプログラムの脳波を計測する。その後、計測した脳波に含まれる周波数成分を分析し、実装戦略を推定できた脳波と推定できなかった脳波を比較する。指標は、脳波の周波数成分である  $\alpha$  波と  $\beta$  波、および 2 つの比率である  $\beta / \alpha$  を用いる。実験の結果、実装戦略を推定できたプログラムの脳波には  $\alpha$  波が有意に多く含まれており、脳波によってプログラムの状態を定量的に検知できることが示唆された。時系列分析の結果、タスク後半にかけてタスクの影響が強く現れることが明らかになった。

## 1. はじめに

近年、プログラミング教育に関心が高まっており、大学をはじめとする教育機関や企業ではプログラミング技法を学ぶ学習者が増加している。効率的な学習のためには、プログラムの実装がうまくいっていない学習者を発見し、その状態に応じた指導をすることが望まれるが、学習者の理解度や思考の状態を外部から把握することは難しい。我々は効率的なプログラミング教育を実現するためにプログラムの理解状態を定量的に把握する手法として脳波 (Electroencephalogram:EEG) に着目している。脳波の周波数成分は心理状態や暗算・推測などの知的活動で増減するといわれており、知的活動の 1 つであるプログラミングも脳波に影響を与えたと考えられる。本研究では学習者が陥る様々な状態のうち、学習した文法やアルゴリズムをどのように用いて目的の処理を記述するか（以降、実装戦略と呼ぶ）がわからない状態を対象とする。文法やアルゴリズム自体の理解が不足している場合と比較して、実装戦略が思いついていない状態は他者の介入がなければ解決が難しく、教育者の指導が特に重要だと考えている。

我々はこれまでにプログラミング中の脳波を計測し、実装戦略を推定できたときと、できなかったときのプログラムの EEG を実験的に分析した。実験の結果、推定ができた時のプログラミング中に計測された  $\alpha$  波が推定できなかったときよりも有意に大きい傾向が見られた。この結果

はプログラムが実装戦略を推定したか識別するための指標としてプログラミング中の脳波が有用であることを示唆している。

本稿ではプログラミング中に計測した脳波から周波数成分の時系列変化を分析する。プログラミングによって変化する脳の状態は時間とともに変化すると推測される。そのため、実装戦略の推定ができたときに、その影響が強く表れる時間帯と現れない時間帯があると考えられる。推定の有無がより強く現れる時間帯を明らかにすることでより短時間で精度の高い識別が可能になり、被計測者の負担軽減になると考えられる。そこで本稿では、時系列分析を行い、周波数成分 ( $\alpha$  波,  $\beta$  波) を 1 秒ごとに計算し、実装戦略が推定できたときとできなかったときで傾向を比較する。

## 2. 関連研究

### 2.1 脳波と心理状態

計測した脳波から人の心理状態を観測する研究がさまざまな研究分野で存在する。満倉は、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 [1]。人間の感性（ストレス、興味度、集中度、好き、嫌いなど）を対象に、被験者実験によりパターン認識手法で各感性の強さと脳波の関係を推定した結果、11Hz と 16Hz の周波数成分が同時に増加することが人間の“嫌”な状態を示すことを明らかにした。Christian らの研究では、脳波はソフトウェアユーザの感情と関連があり、ユーザビリティ評価に適用できることを示している [2]。

本研究が対象とするプログラミング中の脳波において

<sup>1</sup> 奈良工業高等専門学校  
National Institute of Technology, Nara College  
a) yamamoto@info.nara-k.ac.jp  
b) uwano@info.nara-k.ac.jp

も、実装戦略が推定できたときには高い集中度や実装戦略を作れた事による高揚、喜びといった感情が含まれると考えられる。反対に実装戦略が推定できないときには、緊張状態が継続するとともにいらだちや不快感といった感情が含まれると考えられる。本稿では、実装戦略の推定の有無によってプログラマの状態が変化し、それに伴う脳波の変化からプログラマの状態が識別できるか実験で評価する。

## 2.2 脳活動計測を用いたプログラム理解の研究

プログラミング作業者の脳活動を計測し、プログラム理解度やプログラマの状態との関連を調査している研究が複数報告されている [3][4][5]。脳活動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。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 [3]。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。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 [4]。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。

上記の研究から、プログラム理解度やプログラマの状態は脳活動と関連があるといえる。本研究ではプログラムの実装戦略を推定する際のプログラマの脳波を計測し、実装戦略を推定できたことが脳波に反映されるか調査する。

## 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 [6]。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 1 に示す国際式 10-20 電極法 [7] 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おり、検査や研究の目的によって使用する電極を決定する。

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 [8]。

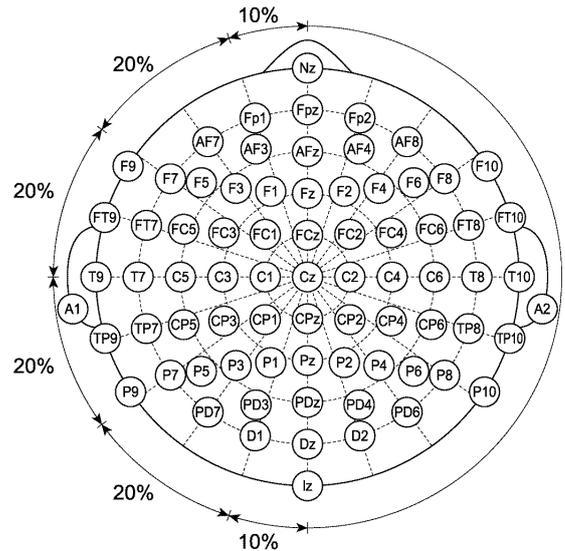


図 1 国際式 10-20 電極法

### 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 [9]。各帯域の名称と周波数帯域を以下に示す。

- $\delta$  波: 0.5~4Hz
- $\theta$  波: 4~8Hz
- $\alpha$  波: 8~14Hz
- $\beta$  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、 $\alpha$  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、緊張や不快な感情を抱いているときや日常の思考状態では  $\beta$  波が出現する。 $\gamma$  波は、不安で興奮しているときに出現する [8][9]。これらの周波数帯域の内、 $\alpha$  波と  $\beta$  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 [9]、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 [10]。また、 $\alpha$  波と  $\beta$  波の比率は脳の活動を計測するための指標としてよく用いられている。

本研究において、実装戦略を推定できなかった状態では、推定できたときに比べて緊張や不快な感情が大きくなると考えられる。したがって、実装戦略を推定できたか否かによって心理状態に差異が生じ、それに伴って脳波の  $\alpha$  波と  $\beta$  波の周波数成分にも差異がみられると仮定し、実験で検



[a] 装置の外観 [b] 装着時の様子

図 2 計測装置

証する。

## 4. 実験

一部が欠けたソースコードと仕様からなる問題を提示し、仕様を満たすプログラムを考えてもらうタスクを被験者に与え、脳波を計測する実験を行う。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 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 名のみがい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。本装置は脳波だけでなく、脳血流、脈波、呼吸、発汗、心電を生体信号としてリアルタイムに計測・解析するシステムである。図 2 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、脳波用の電極は最大 8 チャンネルまで使用できる。計測したデータは Bluetooth 経由で PC に転送され、CSV ファイルに出力される。

実験者は、1 台の PC で装置の制御と、データの記録、および問題の提示をする。被験者には PC に接続した別のディスプレイで問題を提示する。被験者は、問題を見て頭の中で実装戦略を考える。脳波以外の体動によるノイズ（アーチファクト）を抑制するためにキーボードやマウスなどの操作は一切行わない。また、同様の理由から、被験者はヘッドレスト、肘掛け、足置きを備えた椅子に座り、椅子の高さやディスプレイの高さを事前に調節する。

問題提示のために、図 3 に示す実験用ツールを C# 言語で作成した。本ツールはテキスト形式で保存された問題と制限時間を被験者に表示する。

### 4.2 タスク

実験ツール上に提示される問題文に従って、実装戦略を口頭で解答してもらうタスクを設定する。プログラム問題は、自然言語で書かれたプログラムの仕様と Java で書かれたソースコードからなる 12 問を用意する。ソースコードは不足部分が 1 問につき 1 箇所あり、被験者は不足部分にどのような処理手順でソースコードを書けば仕様を満

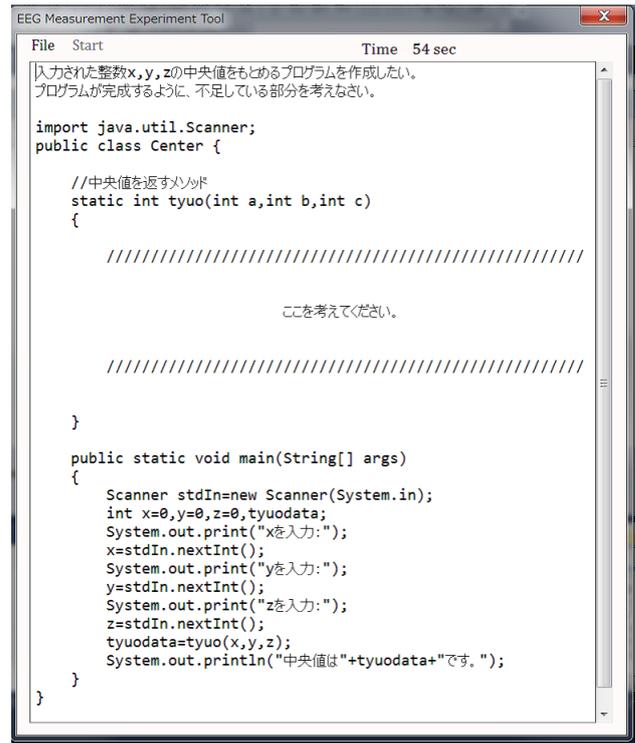


図 3 タスク提示ツール

たすか考える。問題文は 1 問ごとにディスプレイ上に表示する。

プログラム問題は、すべての問題で実装戦略を推定できる被験者や、すべての問題で推定できない被験者が現れないように、以下の 5 段階の難易度を設定し、用意する。

- 難易度 1：条件分岐のみで構成
- 難易度 2：1 重 for 文と条件分岐で構成
- 難易度 3：2 重 for 文や 3 重 for 文と条件分岐で構成
- 難易度 4：メソッドを 2 つ使用
- 難易度 5：再帰的アルゴリズムを含むメソッド 3 つを使用

タスクとして提示する問題の一覧を表 1 に示す。被験者に提示するタスクの順番は、順序効果を考慮しカウンターバランスを行う。

タスクには制限時間を設け、1 問につき 60 秒間とする。その後、被験者は実験者に口頭で回答を述べる。被験者が述べた回答を受けて、実装戦略を推定できたか否かを実験者が評価する。被験者には回答の正否は伝えない。なお、本稿では回答が誤っている場合であっても、なんらかの実装戦略を回答した場合には実装戦略を推定できたと評価する。

### 4.3 脳波計測

1 つ目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、およびタスク後の脳波を計測する。タスク中の脳波を 60 秒間、タスク後の脳波を 120 秒間計測する。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

表 1 タスク

	ファイル名	概要
A	Median.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	CaseChange.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	Product.java	配列の積をもとめる
H	Caesar.java	シーザー暗号の生成
I	QSort.java	クイックソート
J	Trans.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	Leap.java	閏年の判定

休憩が必要か被験者に尋ね、5 分程度の休憩を取る。

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現象のアーチファクトが入りにくいいためである。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ため、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

実験の流れについての説明と、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

4.3 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、実装戦略を考えてもらう。

##### (4) 口頭での解答

考えた実装戦略を述べてもらい、実装戦略を被験者が推定できたか評価する。

##### (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 時系列分析

タスクの影響が強く現れる時間帯を明らかにするために時系列分析を行う。分析は、タスク中に計測された脳波と、タスク後に計測された脳波双方について行う。タスク中の脳波は、計測開始時身体が大きく動いた被験者が多かったため、筋電位によるノイズの影響を考慮し、タスク開始直後の 5 秒を除いた 55 秒間を分析対象とする。タスク後の脳波は全 120 秒間を分析の対象とする。分析の流れを以下に示す。

##### (1) ノイズ除去

計測した脳波に 2-50Hz の Infinite Impulse Response (IIR:無限インパルス応答) バンドパスフィルタにより、体動、眼球運動などのアーチファクトの除去を行う。

##### (2) フーリエ変換

被験者  $s$  がタスク  $n$  を実施した際の  $t$  秒におけるノイズ除去済みの脳波を  $BW(s, n, t)$  とする。計測周期 256/sec より  $N=256$  で  $BW(s, n, t)$  に対し FFT をかけ、毎秒のパワースペクトルを得る。パワースペクトルを求める周波数範囲は  $\alpha$  波と  $\beta$  波として定義されている周波数帯域である 8Hz~30Hz とする。

##### (3) 成分抽出

得られたパワースペクトルから、 $\alpha$  波の帯域である 8Hz~14Hz、 $\beta$  波の帯域である 14Hz~30Hz、それぞれの帯域の成分を抽出する。

$$\alpha(BW(s, n, t))$$

$$\beta(BW(s, n, t))$$

##### (4) 正規化

脳波は個人差が大きいため、抽出された成分データを被験者の平均値で正規化する。ここで、 $T_S$  はタスク開始時間を、 $T_E$  はタスク終了時間を、 $N$  はタスク数を表す。

$$Norm\alpha(s, n, t) = \frac{\alpha(BW(s, n, t))}{\frac{1}{(T_E - T_S)N} \sum_{t=T_S}^{T_E} \sum_{n=1}^N \alpha(BW(s, n, t))}$$

$$Norm\beta(s, n, t) = \frac{\beta(BW(s, n, t))}{\frac{1}{(T_E - T_S)N} \sum_{t=T_S}^{T_E} \sum_{n=1}^N \beta(BW(s, n, t))}$$

##### (5) 全被験者の毎秒の平均値を算出

各被験者が各タスクにおいて実装戦略を推定できたか否かを  $Success(s, n)$  で表す。

$$Success(s, n) = \begin{cases} 1 & \text{推定できた (Success)} \\ 0 & \text{その他 (Fail)} \end{cases}$$

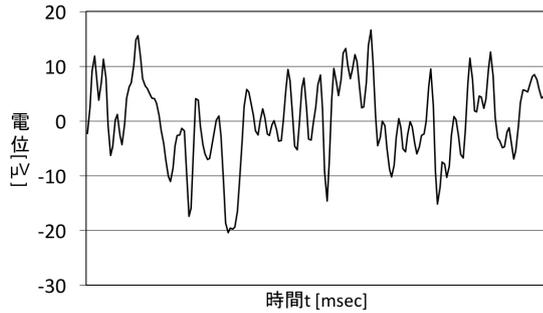


図 4 計測した脳波の例

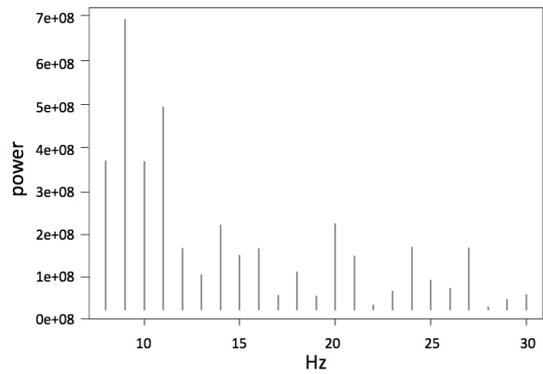


図 5 パワースペクトルの例

推定ができた場合とできなかった場合、それぞれにおける正規化後の  $\alpha$  波と  $\beta$  波の全被験者の平均値を秒ごとに求め、それぞれ  $S\alpha$ ,  $S\beta$  と  $F\alpha$ ,  $F\beta$  とする。ここで、 $SuccessTask$  は  $Success$  のタスク総数、 $FailTask$  は  $Fail$  のタスク総数を表す。

$$S\alpha(t) = \frac{\sum_{s,n,Success(s,n)=1} Norm\alpha(s,n,t)}{SuccessTask}$$

$$F\alpha(t) = \frac{\sum_{s,n,Success(s,n)=0} Norm\alpha(s,n,t)}{FailTask}$$

$$S\beta(t) = \frac{\sum_{s,n,Success(s,n)=1} Norm\beta(s,n,t)}{SuccessTask}$$

$$F\beta(t) = \frac{\sum_{s,n,Success(s,n)=0} Norm\beta(s,n,t)}{FailTask}$$

## 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 4 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 に示す。

$Success$  と  $Fail$  それぞれの、タスク中における  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta/\alpha$

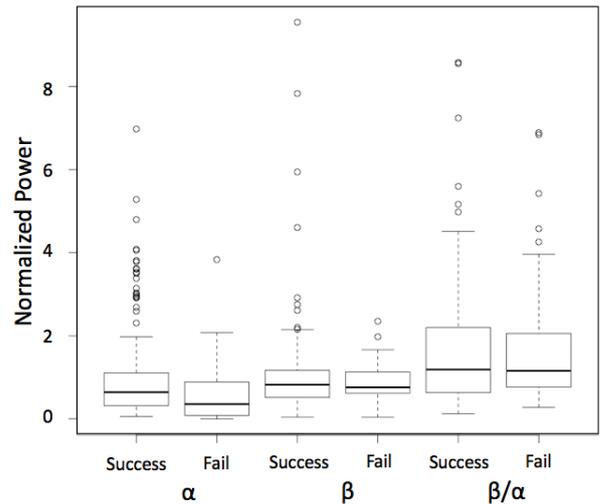


図 6 タスク中の各指標

を図 6 に示す。図が示すように、いずれの指標も  $Success$  が  $Fail$  より大きい傾向が見られた。3つの指標について、それぞれ F 検定で分散を調べ、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 検定を用いて各指標の  $Success$  と  $Fail$  との差を検定した。その結果、 $\alpha$  は  $p=0.049$  (Welch の t 検定)、 $\beta/\alpha$  は  $p=0.035$  (Student の t 検定) で、有意差が見られた。 $\beta$  は  $p=0.406$  (Student の t 検定) で有意な差が見られなかった。

この結果は、プログラマが実装戦略を推定できたかどうかの指標として周波数成分の中で  $\alpha$  と  $\beta/\alpha$  が適していることを示唆している。 $\beta$  は日常の思考状態で常に多く出現する指標であるため、実装戦略を推定の有無に関わらず  $\beta$  が多く出現すると考えられる。加えて本実験においては、プログラミング作業中に脳波計測装置を装着するという通常の作業環境との違いによって被験者に緊張や不快な感情などの精神的負担がかかった可能性がある。3.2 節で述べた通り、緊張や不快な感情を抱いているときには  $\beta$  が出現することから、実験環境による精神的負担がかかったことで  $\beta$  に影響が出たと考えられる。以上より  $\beta$  はプログラマが実装戦略を推定できたかどうかの指標としては適していないといえる。

また、3つの指標全てにおいて外れ値が多く見られ、最大で全被験者の平均より 7 倍近い  $\alpha$  や  $\beta$  が計測される場合があった。この原因としてはノイズ除去処理で取り除けなかった筋電位によるノイズや個人差が考えられる。

次にタスク中の脳波に対して、時系列分析を行った結果を述べる。全被験者の  $\alpha$  の平均値を図 7 に、 $\beta$  の平均値を図 8 に示す。いずれの図も実線は各秒における指標の値を示しており、点線は近似直線を表している。図 7 から、 $Fail$  はタスクの開始から終了まで大きな変化がみられなかったのに対し、 $Success$  はタスク開始 10 秒以降に一貫し

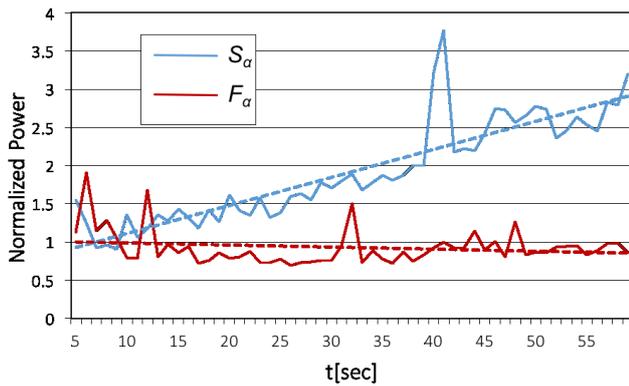


図 7 タスク中の  $\alpha$

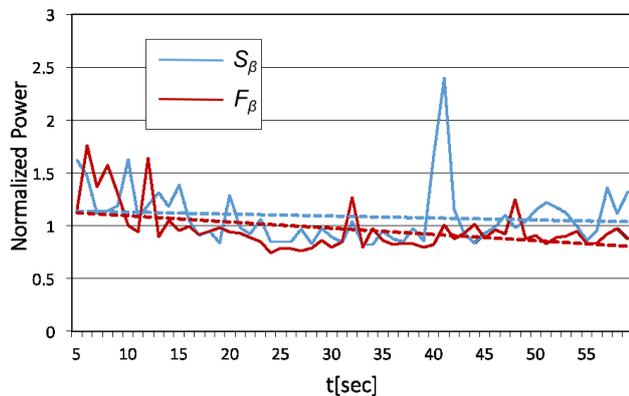


図 8 タスク中の  $\beta$

た増加傾向が見られた。一方、図 8 では *Success* と *Fail* に大きな差は現れなかったが、近似線をみると 10 秒以降から終了にかけて *Success* は *Fail* に比べて  $\beta$  が多いことがわかる。

タスク中の脳波では実装戦略を推定できたときに  $\alpha$  が後半にかけて増大したことから、タスクの影響は後半になるにつれて脳波に強く現れているといえる。また、図 7、図 8 共に *Success* の 40 秒頃に大きなスパイク波が見られた。原因として、ある被験者の計測結果に含まれている大きなスパイク波が影響した可能性が考えられる。各被験者の計測結果を目視にて調査した結果、各被験者の各タスクにおける  $\alpha$ 、および  $\beta$  の両方で多くのスパイク波が含まれており、いずれも *Fail* に比べて *Success* で多くのスパイク波が見られた。スパイク波については 5.3 節で考察する。

## 5.2 タスク後の脳波

*Success* と *Fail* それぞれの、タスク後における  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\beta/\alpha$  を図 9 に示す。タスク中に計測した脳波と同様に *Success* と *Fail* 間で各指標の大きさに差がみられたが、外れ値が大きく、また  $\beta/\alpha$  についてはタスク中の脳波とは反対に *Fail* の値が大きい傾向が見られた。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

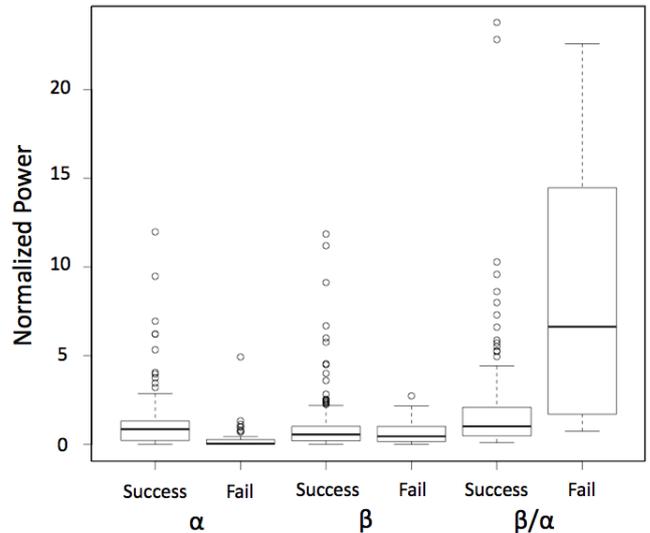


図 9 タスク後の各指標の比較

の *Success* と *Fail* との差に対して t 検定を行った。その結果、 $\alpha$  は  $p = 0.003$  (Student の t 検定) で、*Success* が *Fail* に比べて有意差が見られた。 $\beta$  は  $p = 0.147$  (Student の t 検定)、 $\beta/\alpha$  は  $p = 0.343$  (Student の t 検定) で有意差が見られなかった。この結果は、プログラマが実装戦略を推定した後の脳波からも、 $\alpha$  波を用いることで推定の有無を識別できる可能性があることを示している。

また、タスク後とタスク中の脳波と比べると、タスク後のほうが  $\alpha$  波が強い。タスク中は開眼しているために 3.2 節で述べた  $\alpha$  波減衰の影響を受けた脳波を計測している。そのため、推定の有無によって  $\alpha$  波が変化したとしても、その差が現れにくい可能性がある。

本実験の結果は、タスク後に計測した脳波であっても推定の有無によって  $\alpha$  波の変化が持続しており、かつ、開眼による  $\alpha$  波減衰の影響を受けない脳波を計測できることを示している。教育機関や企業で計測する場合には体動をはじめとするノイズが計測結果に大きく影響するため、できるだけ大きな振幅で脳波をとらえることができるタスク後の閉眼安静状態での計測の方がタスク中に比べて精度が高いと考えられる。ただ、タスク中の開眼状態でも有意差が得られたことから、閉眼安静状態をとらずに計測しても振幅は小さくなると思うが、今回の結果と同様な結果が得られるのではないかと推測している。

また、タスク後における *Fail* の  $\beta/\alpha$  はタスク中の結果に比べてデータのばらつきが大きい。表 2 にタスク中およびタスク後の *Success*、*Fail* それぞれにおける  $\alpha$ 、 $\beta$  の中央値およびタスク中とタスク後の差を示す。

表 2 からタスク中とタスク後における *Fail* で、 $\alpha$  の中央値の変化が  $-0.6$  に対し、 $\beta$  はその約 2 分の 1 の  $-0.307$  しか変化していない。これがタスク中に比べてタスク後の  $\beta/\alpha$  のばらつきが大きくなったことに影響したといえる。

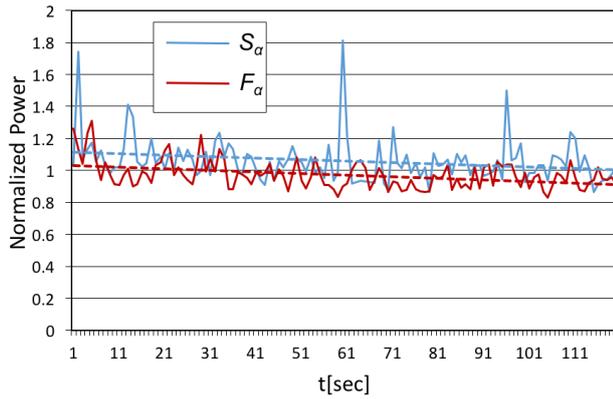


図 10 タスク後の  $\alpha$

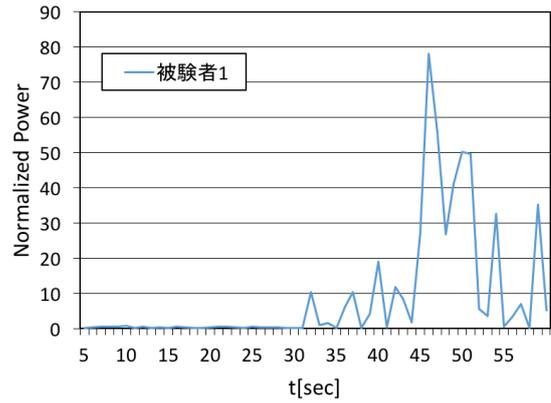


図 12 被験者 1 の *Success* における  $\alpha$

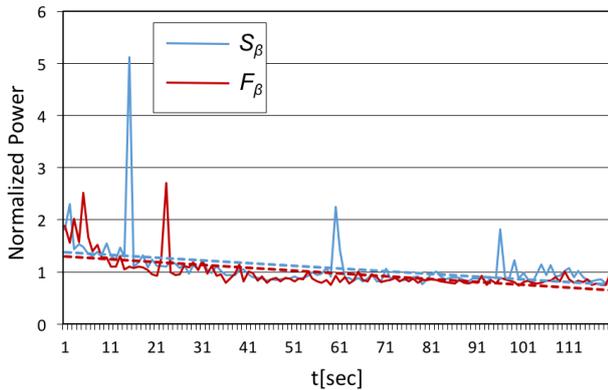


図 11 タスク後の  $\beta$

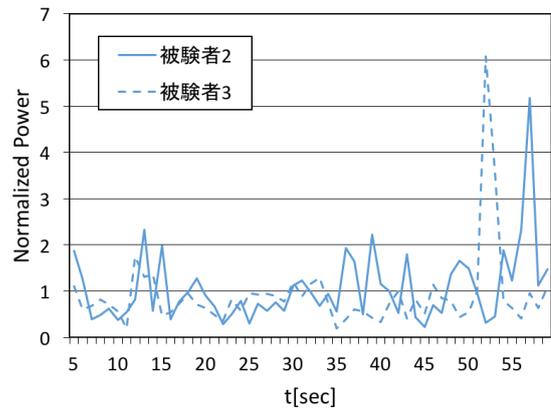


図 13 被験者 2 および 3 の *Success* における  $\alpha$

表 2 各指標の中央値

指標	タスク中		タスク後		差	
	Success	Fail	Success	Fail	Success	Fail
$\alpha$	0.661	0.647	0.845	0.047	+0.184	-0.600
$\beta$	0.823	0.760	0.559	0.453	-0.264	-0.307

次にタスク後の脳波に対して、時系列分析を行った結果を述べる。全被験者の  $\alpha$  の平均値を図 10 に、 $\beta$  の平均値を図 11 に示す。図 10 から、 $S_\alpha$  と  $F_\alpha$  の両方で時間が経過するほど減少する傾向が見られる。近似線を見ると計測開始から終了まで一貫して  $S_\alpha$  は  $F_\alpha$  よりも値が大きい。図 11 から、 $\beta$  は  $\alpha$  と同様に時間が経過するほど減少する傾向が見られたが、 $S_\alpha$  と  $F_\alpha$  の間に顕著な差は見られなかった。

時系列の分析結果から、 $\alpha$  波は一貫して *Success* が *Fail* より大きく、また、*Success*、*Fail* ともに時間の経過と共に減少していた。これは、時間の経過と共に  $\alpha$  波が大きくなったタスク中の結果とは異なる傾向となった。タスク後の脳波には、計測開始時点で推定の有無による影響が含まれており、時間経過と共にその影響が失われていったと考えられる。したがって、タスク後に計測する場合、開始直後の時間帯の脳波を分析に用いることでより高精度な識別が可能になるといえる。

図 10、図 11 の双方で、タスク中の場合と同様にスパイクが多く見られる。各被験者の各タスクの結果について目視で確認した結果、 $\alpha$ 、 $\beta$  の両方で *Fail* に比べて *Success* で多くのスパイク波が見られた。

### 5.3 脳波成分に含まれるスパイク波

本実験の結果、タスク中とタスク後の脳波の双方において、 $\alpha$ 、 $\beta$  にスパイク波が多く見られた。各被験者の各タスクにおける  $\alpha$ 、 $\beta$  の変化を見ると、スパイク波を含む場合が多く見られ、特に大きなスパイク波を持つ被験者のデータが平均に影響している可能性が示唆された。図 12、図 13 に実装戦略の推定に成功した (*Success*) タスク中に計測された被験者個人の  $\alpha$  を示す。被験者 1 は 45 秒付近に他の被験者の 13 倍のピークを持つスパイクが現れており、その後 10 秒間高い値を維持している。同様のスパイクは他の被験者や他のタスクにも多く、図 13 に示すように被験者 2 や 3 もピークの高さは異なるが同様にスパイクが現れている。

本実験で計測したタスク中の脳波 204 個 (17 人  $\times$  12 タスク) のうち、96 個について、 $\alpha$  の時系列変化を目視で確認したところ、*Success* の 27.1%(26 個)、*Fail* の 7.3%(7

個)で1つ以上のスパイクが確認された。すなわち、タスク中で計測する脳波では、*Fail*に比べて*Success*の $\alpha$ でスパイク波が多い傾向が見られた。 $\alpha$ は、リラクセス、集中、高揚、ひらめきなどで出現する[9]ため、実装戦略を作れた事による高揚やひらめきが $\alpha$ を出現させているのではないかと推測している。しかし、本稿で行った分析では脳波成分の時系列変化に含まれるスパイク波を目視で確認しており、脳波が持つ個人差やノイズとの区別についても行ってない。スパイク波と*Success*, *Fail*の関係については今後の研究で判断指標の検討を進める必要がある。

#### 5.4 教育現場における脳波計測

本研究の結果を実際の教育現場で用いる際の分析方法について考察する。前節までの結果から、タスク中の後半とタスク後の前半(すなわち、タスク完了の前後)に計測した脳波の周波数成分に、実装戦略を推定できたか否かが差として現れることがわかった。実際の教育現場では学習者ごとに課題を開始するタイミングが異なることに加え、課題ごとに実装戦略の推定に必要な時間が異なるため、特定の時間帯を分析に適した領域として示すのは難しい。

ここで、プログラミング学習者が課題を解く際に行っていると思われる一般的な流れを考える。学習者は課題を提示されると、その課題を解くためのアルゴリズムや必要な文法、構造について考える。課題に適していると思われる実装戦略を考えついたら、その内容をIDEなどで実装し、実行・修正を行う。このとき、実装を開始するのは、1)実装戦略が思いついた場合と、2)実装戦略は思いついていないがとりあえず手を動かし始めた場合の2通りが考えられる。すなわち、IDE等を用いてソースコードの入力を開始した時点を実験におけるタスクの完了時点と見なし、その前後の脳波を分析することで学習者が実装戦略を立てた上でソースコードを書き始めたか識別できると考えられる。脳波計測から実装戦略を立てたかどうかを区別することで、支援が不要な学習者の作業を妨げることなく、実装戦略を思いついていないまま実装を始めた学習者に対して優先的に支援が可能になる。

## 6. おわりに

本稿では、プログラマが実装戦略を推定できた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、被験者実験を行った。実験では被験者が不足部分のあるソースコードを読み、不足部分にどのような処理手順でソースコードを書けばよいのか考えるタスクを与えた。タスク中とタスク後に脳波を計測し、実装戦略を推定できたタスクと、推定できなかったタスクにおける周波数成分の差異を分析した。

実験の結果、タスク中の脳波においては、実装戦略を推定できたタスクで $\alpha$ と $\beta/\alpha$ が有意に大きかった。タスク

後の脳波においては、実装戦略を推定できたタスクで $\alpha$ が有意に大きかった。時系列分析の結果、プログラミング中に計測した脳波に含まれる $\alpha$ 波が計測時間後半にかけて大きくなる傾向が見られ、作業開始からの時間経過によって脳波の状態が変化していることが示唆された。この結果から、プログラミング中の脳波から推定の有無を識別する際は、作業開始直後の脳波は用いずに後半の $\alpha$ を指標とすることで、より短い計測時間で精度の高い分析ができる可能性がある。今後、脳波の周波数成分を用いた機械学習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。

各被験者の各タスク中における $\alpha$ ,  $\beta$ の変化を見ると、*Fail*に比べて*Success*の $\alpha$ でスパイク波が多い傾向が得られた。スパイク波と*Success*, *Fail*の関係については今後の研究で判断指標の検討を進める必要があると考えている。加えて個人差を考慮した、プログラマの脳波の分析方法の確立も本研究の興味深い発展のひとつである。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費基礎研究(C)16K00114の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] 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).
- [2] Christian Stickel, Josef Fink, Andreas Holzinger：“Enhancing Universal Access - EEG Based Learnability Assessment”；Universal Access in Human-Computer Interaction. Applications and Services, Vol.4556, pp.813-822, (2007).
- [3] 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), pp.24:1-24:4, (2012).
- [4] 中川 尊雄, 亀井 靖高, 上野 秀剛, 門田 暁人, 鶴林 尚靖, 松本 健一：“脳活動に基づくプログラム理解の困難さ測定”；コンピュータ ソフトウェア, Vol.33, No.2, pp.78-89, (2016).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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: Hypersonic effect”；Journal of Neurophysiology, Vol.83, No.6, pp.3548-3558, (2000).