

# ソースコード中の変数と条件分岐による脳活動の差

Difference in Brain Activity by Variable and Conditional Branch in Source Code

幾谷 吉晴\* 上野 秀剛†

あらまし 本論文では脳活動を非侵襲に測定する手法である NIRS を用いてソースコードに含まれる変数と条件分岐が脳活動へ及ぼす影響を実験により調査する。被験者に変数や条件分岐を含まないコードと含んだコードをそれぞれ理解する課題を与え、そのときの脳血流を計測した。被験者 20 人の脳活動を NIRS によって計測した結果、変数の記憶を必要とする課題において有意に高い脳活動が見られた。一方で、異なる難易度の暗算を行う課題では有意な差は観測されず、NIRS による脳活動の計測がプログラム理解の研究において有用なツールである可能性が示唆された。

## 1 はじめに

人間の認知活動や創造的行動を分析するために脳活動計測が用いられている。言語学の分野においては文章の理解時や発声時の脳活動を計測することで、言語の理解や認知における脳の働きを定量的に評価している [1] [2]。脳活動を非侵襲に計測する装置として近赤外線光を用いる NIRS(Near-Infrared Spectroscopy) [3] [4] や、強力な磁場を利用した fMRI(functional magnetic resonance imaging)、神経活動に起因した電流の変化を測る EEG(Electroencephalogram) などがある。

プログラム理解の分野においても、脳活動に着目した研究が少数ながら存在する [5] [6]。プログラムを理解し、ソースコードを変更することは開発のみならず拡張や保守など様々な工程で必要となる基本的な作業の 1 つであるため、その効率化はソフトウェア開発の円滑化や時間短縮に繋がる。しかし、その過程は外部からの計測が難しく、直接的・定量的な評価が難しい。プログラム理解における脳活動を定量的に評価することで、人がプログラムを理解する過程や、プログラム理解の能力を向上させる手法の開発につながると期待される。

本研究では、プログラム理解を複数の要因で構成される活動と仮定し、被験者実験で要因と脳活動の関係を調査する。特に本稿ではソースコード中の変数に対する操作（暗算および記憶）と条件分岐に着目し、それぞれを理解するときの脳活動を NIRS で計測する。NIRS は他の装置と比べ、装着が容易で身体的な拘束も少ないため、プログラミングを対象とした長時間の計測が可能である。また、時間分解能も高く、複数の認知活動が作用し時間的変化にも関心の高いプログラム理解研究に適している。実験では変数を含むコード片と、変数と条件分岐を含むコード片、どちらも含まないコード片を用意し、それぞれの理解時の脳活動を計測する。また、プログラムを理解する過程に含まれる数値計算（暗算）による脳活動への影響を計測するために、難易度に差をつけた暗算を解く際の脳活動を計測する。

## 2 関連研究

### 2.1 NIRS を用いた脳活動計測

人の脳活動を非侵襲に測定する手法の中でも、NIRS は計測装置が小型で軽く、電磁ノイズに強いことから言語や聴覚、BMI(Brain Machine Interface) など様々な分野で利用されている [7] [8]。NIRS は他の脳活動測定装置と比べて、測定時の被験者への拘束が少なく、時間分解能が高いとされている [9]。一方で、fMRI に比べると

\*Yoshiharu Ikutani, 奈良工業高等専門学校 電子情報工学専攻

†Hidetake Uwano, 奈良工業高等専門学校

空間分解能が低く、大脳皮質表面の脳活動しか測定できないほか、計測の開始時を基準とした相対値しか計測できないため、頭部組織の厚みに差のある個人間や部位間を比較することは難しい。また、NIRSで計測した脳活動信号は、伝送ケーブルの揺れや被験者の心拍、呼吸などの影響を受ける [10] ため、解析には適切なノイズ除去処理が必要となる。

NIRSを用いた計測の問題を解決するためにこれまでに複数の手法が提案されている。三家らは心拍などの身体的要因に起因したノイズを除去するためにトレンド解析と移動平均を応用した解析方法を提案している [11]。綱島らは、離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を用いたノイズ除去と、標準得点化によって被験者間の比較や統計処理を可能にする方法を提案し、その有効性を検証している [12]。これらの手法を利用することで、ノイズの影響を抑えた上でNIRSで計測した脳活動信号の被験者間比較が可能になる。本研究では綱島らの方法を利用して、NIRSで計測した信号のノイズ除去・統計解析を行う。

## 2.2 脳活動測定を用いたプログラム理解研究

SiegmuntらはfMRIを用いた計測でプログラム理解が脳のどの部位で、どのように行われているか調査している [5]。その結果、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。中川らはプログラムをメンタルシミュレーションする際の前頭葉の脳血流をNIRSによって計測している [6]。実験の結果は、課題の難易度によって脳活動に差が出ることで、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ことを示している。

プログラム理解には数値の計算や変数の値の記憶、条件分岐による分岐の理解など多くの要因が関わっていると考えられる。中川らが行ったメンタルシミュレーション課題にはこれら複数の要素が含まれている。そのため、各要素が被験者の脳へ個別に与える影響については明らかになっていない。プログラム理解時の被験者を分析するためには、各要素が個別に脳へ与える影響を区別して計測することが望ましい。本研究では、変数と条件分岐に着目した課題を行うことで、それぞれの要素が被験者の脳活動へ与える影響を明らかにする。

## 3 NIRSによる脳活動の計測

### 3.1 NIRS

NIRSは脳内の神経活動の増加にともなって発生する血流変化を測定することで間接的に脳活動の変化をとらえる手法である。脳のある部位で神経活動が増加すると酸化ヘモグロビン (Oxy-Hb) が増加すると共に脱酸化ヘモグロビン (deOxy-Hb) が減少する [4] [13]。NIRSは近赤外線光を頭部に照射し、その反射光からOxy-HbとdeOxy-Hbの変化量を計測する。特にOxy-Hbは血流変化をよく反映する [13] ため、NIRSを用いた脳活動測定の評価値としてよく用いられる。

現在広く利用されているNIRSの問題点として、ヘモグロビン濃度の絶対値を求めることができず、頭部組織の厚みが異なる個人間や部位間の比較が困難である点が上げられる。そのため、計測結果として得られる値は計測開始時を基準とした相対値となる。また、NIRSで計測した脳活動信号は、伝送ケーブルの揺れや被験者の体動、心拍や呼吸など生理活動に影響を受ける [10]。そのため、アーチファクトの抑制が難しく、データの解析に際しては適切なノイズ除去処理が必要となる。

### 3.2 離散ウェーブレット変換による多重解像度解析

図1に本稿の実験においてNIRSを用いて計測した脳活動の例を示す。横軸はタスク開始からの時間、縦軸はOxy-Hbの数値を示す。図は、NIRSで計測した信号がノイズを多く含んでおり、タスクによる脳活動の変化をとらえるのが難しいことを示している。そのため本稿では綱島らの提案する離散ウェーブレット変換による

ソースコード中の変数と条件分岐による脳活動の差

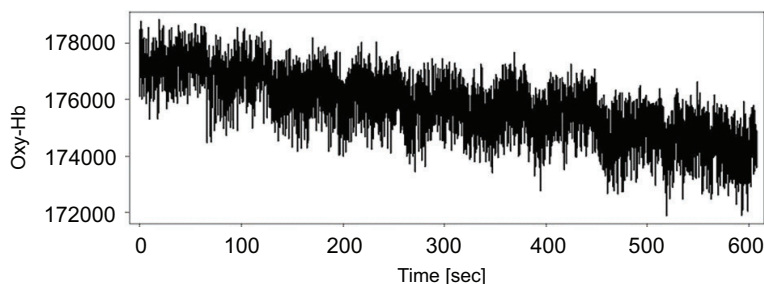


図1 NIRS で計測した脳活動信号

多重解像度解析を用いてノイズを除去する [12].

図2に離散ウェーブレット変換で図1の信号を近似成分と詳細成分に分解した結果を示す. 図の  $d1$  から  $d15$  は分解後の詳細成分で, それぞれが異なる周波数を持っている. この中で  $1\text{Hz}$  以上の成分 ( $d1$  から  $d7$ ) は, 体動などに起因した計測ノイズであると考えられる. また  $0.015\text{-}0.50\text{Hz}$  の成分 ( $d8$  および  $d9$ ) は呼吸の周期と一致するため呼吸によるノイズ,  $0.005\text{-}0.15\text{Hz}$  の成分 ( $d10$  および  $d11$ ) は Mayer 波の周期と一致する [10] ことから, 血圧変動に起因したノイズと考えられる. したがって,  $d1$  から  $d11$  までの成分を除去し, それ以外の成分から信号を再構成することで, 計測データ中に混入したノイズを除去できる.

### 3.3 標準得点化処理

NIRSによって計測されたデータは開始時を基準とした相対的な変化量であるため, そのままでは被験者間の比較や統計処理ができない. 綱島らはウェーブレット変換によるノイズ除去後の信号を標準得点化することで, 被験者間の測定値の比較や統計処理を可能にする方法を提案している [12]. 本稿では, 全被験者の信号から平均的な脳活動を得るために, 綱島らの手法を用いる. ノイズ除去後のデータを平均が0, 標準偏差が1になるように次の式によって標準得点化する. ここで  $X$  はノイズ除去後のデータ,  $\mu$ ,  $\sigma$  はその平均と標準偏差である.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

## 4 実験

### 4.1 概要

実験では, 被験者が2種類の課題を行っているときの脳活動を1ch-NIRSで計測する. 被験者は奈良高専の学生20名(男性18人, 女性2人)で, 年齢は17歳から20歳, 全員が右利きでプログラミングの基礎講義を受講済みである. 実験ではタスクと安静状態を交互に実施する. タスクでは32秒間に画面に表示される複数の問題を解いてもらう. 被験者の体動や発話によるノイズを抑制するため, 解答の発話や入力を行わず, 一定間隔で自動的に問題を切り替える. 安静状態では32秒間, 画面に提示される十字記号を注視し, 安静にしてもらう.

### 4.2 プログラム課題

変数と条件分岐が脳活動に与える影響を計測するための課題で, 図3に示す整数, 変数, 条件分岐の3種類のタスクから構成される. いずれのタスクにおいても被験者には3つの変数に格納される値を求めてもらう. 各タスクの内容を以下に示す.

- 整数タスク: 各変数の値が3つの整数から計算される.

## FOSE2014

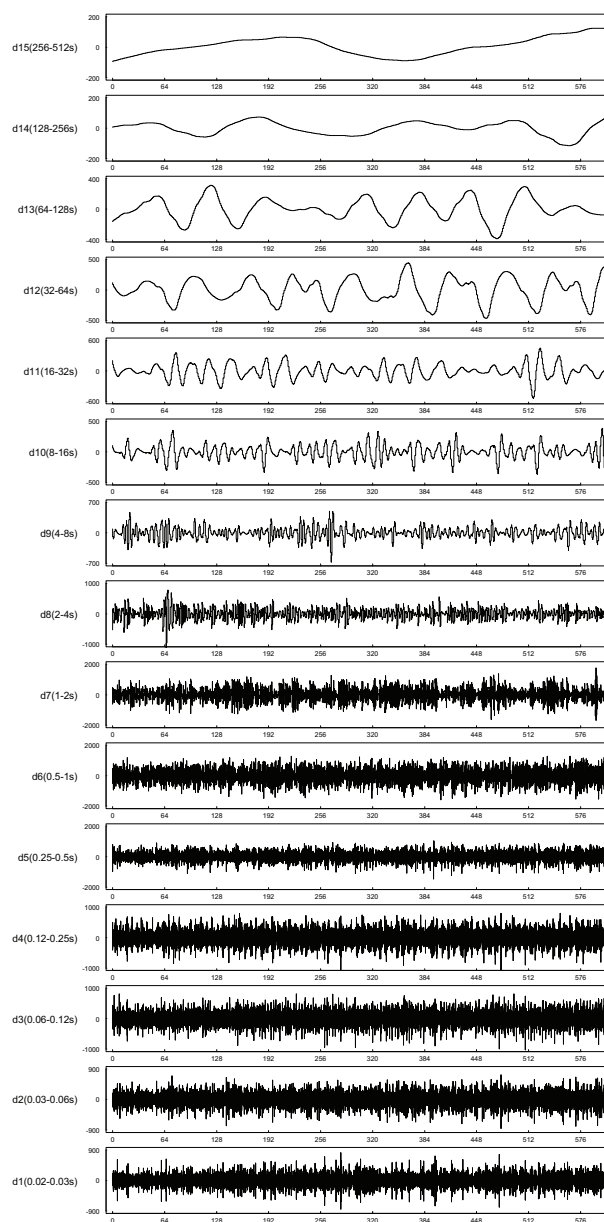


図 2 離散ウェーブレット変換による信号の分解

- 変数タスク：各変数の値が3つの整数と変数から計算される。計算には変数の値を記憶する必要がある。
  - 条件分岐タスク：各変数の値が3つの整数と変数から計算される。計算には変数の値を記憶した上で if-elses 文の分岐を判断する必要がある。
- 本実験では問題が一定間隔で自動的に切り替わるため、1問あたりの時間が長すぎるとタスク中にも関わらずなにもしない時間が増えてしまい、脳活動が低下する

ソースコード中の変数と条件分岐による脳活動の差

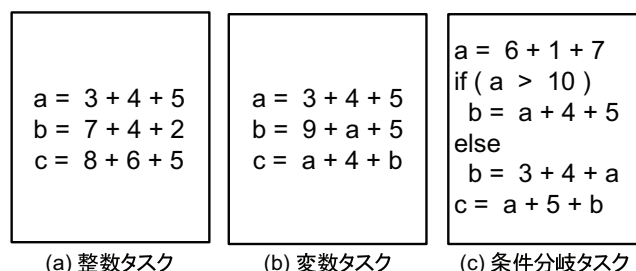


図 3 プログラム課題のタスク

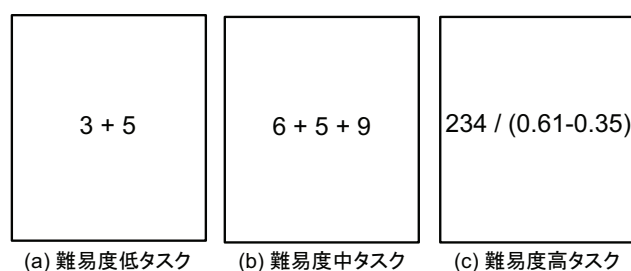


図 4 暗算課題のタスク

恐れがある。そこで本稿ではタスクに含まれる変数や条件分岐の数に合わせて各タスクの出題数を調整する。本実験ではタスク 32 秒間に整数タスクは 4 問 (1 問あたり 8 秒)、変数タスクは 3 問 (1 問あたり 10.6 秒)、条件分岐タスクは 2 問 (1 問あたり 16 秒) 出題する。

整数タスクと変数タスクの結果を比較することで変数による影響が、変数タスクと条件分岐タスクの結果を比較することで条件分岐による影響が分析できる。一方で、プログラム課題はタスクごとに計算の量や扱う値の桁数に差があるため、暗算の難易度による差を含んでいる可能性がある。本稿では、暗算の難易度による影響を確認するために次節で説明する暗算タスクを実施する。

#### 4.3 暗算課題

暗算難易度の差が脳活動に与える影響を計測するための課題で、図 4 に示す 3 種類の難易度のタスクから構成される。いずれのタスクにおいても被験者には画面に提示される式の解を暗算で求めてもらう。各タスクの内容を以下に示す。

- 難易度低タスク：1 桁の整数 2 つによる繰り上がりの無い足し算。
- 難易度中タスク：1 桁の整数 3 つによる足し算。
- 難易度高タスク：小数点の引き算と割り算。

暗算課題においてもプログラム課題と同様に、タスクごとの出題数を簡単なものほど多く、難しいものほど少なくなるように調整する。本実験ではタスク 32 秒間に難易度低タスクは 16 問 (1 問あたり 2 秒)、難易度中タスクは 10 問 (1 問あたり 3.2 秒)、難易度高タスクは 2 問 (1 問あたり 16 秒) 出題する。

#### 4.4 実験環境

被験者には暗算課題とプログラム課題それぞれで、3 種類のタスクを順に 1 度ずつ実施するセットを 3 回行ってもらう。実験の開始前に実験内容を口頭で説明し、同意を得た後に装置を取り付け、プログラム課題、暗算課題の順に計測する。計測に

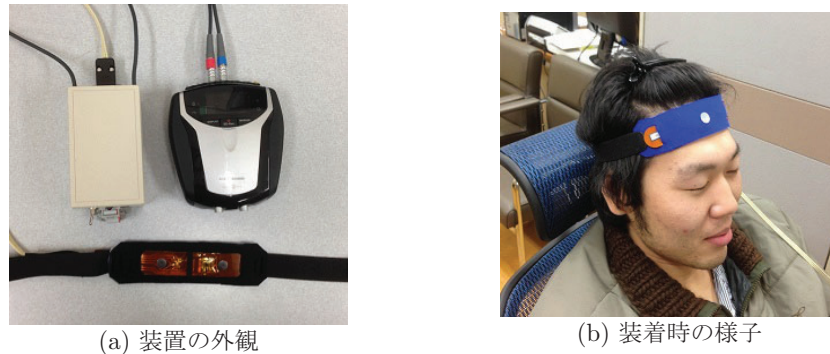


図5 計測装置

は TMS international BV 製の NeXus10 を用いる。図5に装置の外観と装着時の様子を示す。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。また、体動によるアーチファクトを抑えるため肘掛けとヘッドレストがあるイスに被験者を座らせ、できるだけ体を動かさないよう指示する。

被験者の額部分に装置を装着し、128Hzのサンプリング周波数で脳活動を測定する。測定部位は前頭極（前頭葉の前方部分）とした。前頭極は短期記憶や計画的な行動などの高次な機能に関連するとされる。今回の課題では、変数値の記憶や条件分岐の判断によって脳活動が増加すると考えられる。

#### 4.5 評価方法

評価には Oxy-Hb を用い、離散ウェーブレット変換による多重解像度解析によってノイズを除去する。本実験では32秒のタスクと32秒のレストが交互に反復されるため、図2に示した詳細成分の内、64秒の周期を持つ  $d_{13}$  が実験タスクに関連した脳活動の変化である可能性が高い。加えて  $d_{13}$  の前後成分である  $d_{12}$  および  $d_{14}$  も、タスクに関連した脳活動変化を反映している可能性が高い。そこで、実験で計測された Oxy-Hb の信号を離散ウェーブレット変換で分解し、ノイズと思われる成分を除去した後、タスクに関連する成分 ( $d_{12}$ ,  $d_{13}$  および  $d_{14}$ ) から信号を再構成する。さらに、再構成した信号を3.3節の式で標準得点化し、タスクによる脳活動の変化量を算出する。

タスクによる脳活動の変化量として、直前の安静状態における Oxy-Hb の平均値を0としたときのタスク中の活動量を用いる。タスク中の Oxy-Hb  $f_i$  ( $[i = 0, 1, \dots, n]$ ) と、直前の安静状態の Oxy-Hb  $r_i$  ( $[i = 0, 1, \dots, n]$ ) から、安静状態の平均値（基準値） $rest$  とタスクによる活動の変化量  $activity$  を以下の式で求める。

$$rest = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n r(t)$$

$$activity = \sum_{i=0}^n (f_i - rest) \cdot \tau$$

ここで、 $\tau$  はサンプリング周波数の逆数である。 $activity$  は各タスクにおける基準値からの変化の和を表し、この値が高いほど脳活動が活発になっていることを示す。

## 5 結果と考察

### 5.1 プログラム課題

図6に全被験者の再構成信号をそれぞれ標準得点化し、加算平均した結果を示す。横軸は実験開始からの時間、縦軸は標準得点化後の Oxy-Hb を示す。図から、タス

ク時には脳活動が増加し、安静状態で脳活動が減少していることが分かる。また変数タスクが他のふたつのタスクに比べて Oxy-Hb の値が高く、直前の安静状態から大きく増加する傾向があることが分かる。

図7に全被験者の各タスクにおける activity の分布を示す。横軸はタスクの種類、縦軸は activity の値を示す。図から変数タスクが他のタスクに比べて高い水準に分布していることが分かる。多重比較 (Ryan 法) を行った結果、整数-変数タスク間および、変数-条件分岐タスク間において有意差 ( $p < 0.05$ ) が確認された。

## 5.2 暗算課題

全被験者の再構成信号を加算平均した結果を図8に示す。1セット目の難易度中タスクに大きな増加が見られるが、2セット目では難易度低タスクと難易度高タスクが増加しており、反対に難易度中タスクで脳活動が減少している。図9に全被験者の各タスクにおける activity を示す。図からいずれのタスクも同じような範囲に評価値が分布していることが分かる。多重比較 (Ryan 法) を行った結果、いずれの組み合わせにおいても有意差は見られなかった。

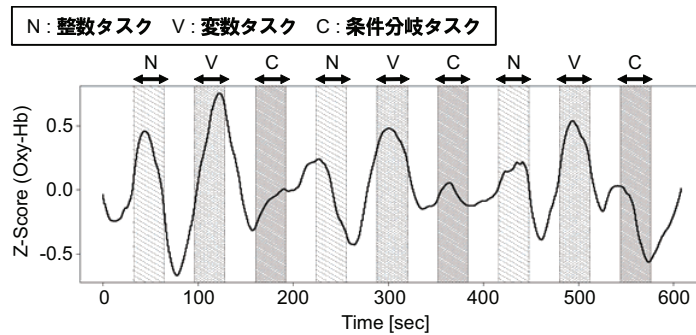


図6 プログラム課題時の脳活動変化

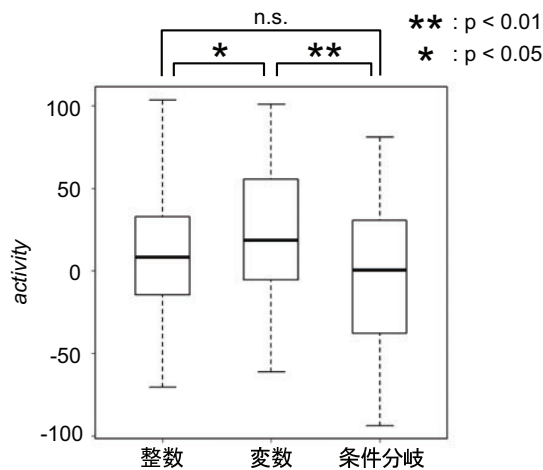


図7 各タスクの脳活動 (プログラム課題)

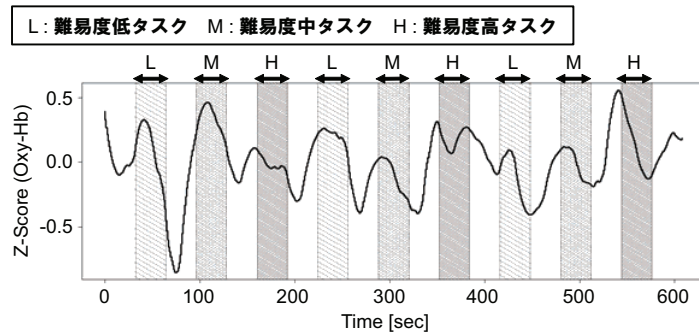


図 8 暗算課題時の脳活動変化

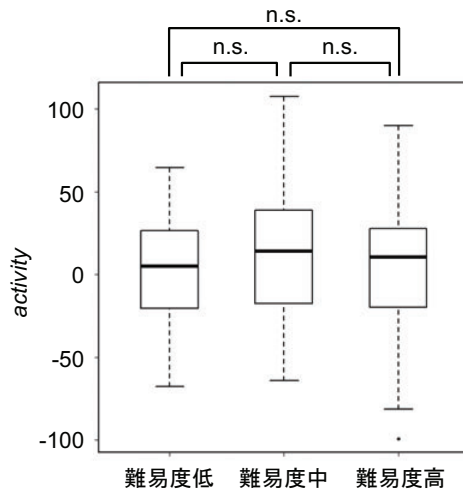


図 9 各タスクの脳活動 (暗算課題)

### 5.3 プログラム理解時の脳活動

プログラム課題では変数タスクにおける脳活動が整数タスクと条件分岐タスクよりも有意に高かった。整数タスクと比べ、変数タスクには式変数に出現するため値を記憶するための負荷が脳活動に影響したと考えられる。中川らの研究においても変数の数が多いプログラムのメンタルシミュレーション時には、変数が少ないプログラムに比べて、前頭葉の脳活動が高くなった [6]。本研究の結果は彼らの結果と同様に、プログラム中の変数の動きを理解することに前頭葉が関わっている可能性を示唆している。

また、常に 1 桁の数字しか計算しない整数タスクに比べて変数タスクでは変数に格納された 2 桁の数字も扱うため、計算の負荷が脳活動に影響した可能性がある。しかし、暗算課題において異なるタスクの間に有意な差は見られず、本研究で計測対象とした前頭極には計算の負荷の影響は現れないと考えられる。プログラムの動作にはループの繰り返し回数をインクリメントするような単純な計算が多く含まれるが、前頭極を計測することで簡単な計算による脳活動の影響を受けずに変数の記憶による負荷を計測できることが示唆される。



ソースコード中の変数と条件分岐による脳活動の差

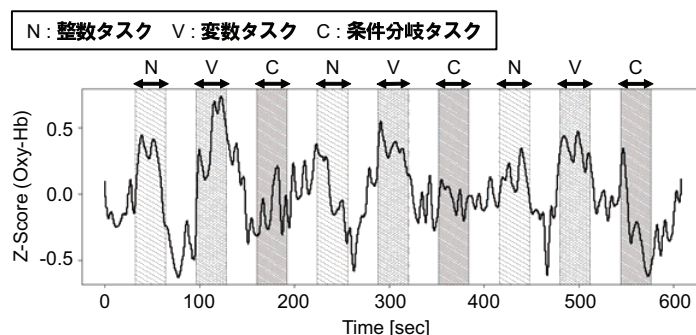


図 10  $d_{10}$ ,  $d_{11}$  を含んだプログラム課題時の脳活動変化

変数タスクで有意差が見られた一方で、条件分岐タスクでは脳活動に大きな差は見られなかった。本稿の実験で用いた条件分岐タスクは変数が定数以上かどうかで分岐する、比較的単純な条件式を用いたため、脳活動に負荷が現れなかった可能性がある。また、タスク時間中に提示される問題数が整数タスク（4問）や変数タスク（3問）に比べて条件分岐タスク（2問）は少なく、被験者に与える負荷が小さかった可能性がある。条件分岐式による前頭葉への負荷の有無を明らかにすることは今後の課題である。

#### 5.4 ノイズ除去と時間分解能

本研究では、脳活動信号に含まれるノイズをウェーブレット変換による多重解像度解析で除去した。ウェーブレット変換は特性上、低周波数成分になるほど細かな変化を反映しにくく、NIRSのメリットのひとつである高い時間分解能を十分に活かすことができない。

NIRSの時間分解能を有効に利用する分析方法として、高周波数成分をより含めた信号の再構成が考えられる。脳血流は神経活動の時間変化を数秒のオーダーで反映することから、8秒から32秒周期の $d_{10}, d_{11}$ 成分は呼吸などによる影響を含むものの、タスクによる脳活動の変化を反映している可能性が高い。図10に $d_{10}$ から $d_{14}$ から再構成した全被験者の脳活動の平均波形を示す。 $d_{10}$ と $d_{11}$ を含まない信号（図6）に比べて、タスク中の詳細な脳活動の変化が反映されているのが分かる。この信号から各タスクにおける $activity$ を求めた結果、 $d_{10}$ と $d_{11}$ を含まない信号と同様に整数-変数タスク間および、変数-条件分岐タスク間において有意差( $p < 0.05$ )が見られた。これは、 $d_{10}$ ,  $d_{11}$ 成分もタスクによる脳活動変化を含んでおり、分析に有用である可能性を示している。ウェーブレット変換で分解した詳細成分について、どこまでがプログラム理解のタスクに関連する成分か評価し、分析手法として確立することは今後の課題である。

## 6 おわりに

本稿ではプログラム理解における変数と条件分岐の理解が脳へ与える影響を調べるため、2種類の課題を行っているときの脳活動を測定した。NIRSを用いて測定した前頭極の脳活動信号に、多重解像度解析を用いたノイズ除去と標準得点化処理を適用することで異なるタスク間における脳活動の差を比較した。

実験の結果、変数の値を記憶する必要があるタスクでそれ以外のタスクよりも有意に高い脳活動が計測された。また、難易度が異なる暗算タスクの間には脳活動の違いが見られないことから、前頭極を計測することで数値計算による脳活動の影響

を受けることなく、プログラム理解における記憶への負荷を評価できる可能性が示された。この知見はプログラム理解時の脳活動を分析するうえでのひとつの手がかりになると考えられる。

本稿では単純なソースコードのみを対象として実験を行った。より規模の大きいソースコードや複雑な設計を用いたプログラムの理解、または要求仕様書などソースコード以外のドキュメントを対象に同様の計測を行うことで、プログラム理解における脳活動を明らかにすることは今後の課題である。例えば、継承やそれに伴うポリモーフィズムなどを含むオブジェクト指向プログラムの理解や、レビューによる要求仕様書の妥当性検証における脳活動の計測は興味深い対象である。また、自然言語で書かれた文章の理解能力とプログラム理解能力の関係や、論理的思考能力との関係について分析することも、プログラム理解過程の理解に有用であると考えられる。本研究で得られると期待される成果の応用として、脳活動に基づいた開発者の能力の定量評価が挙げられる。高い開発能力を持つ開発者や熟練度を脳活動から定量的に評価することで、教育支援や採用をより効率的に行えると期待される。

**謝辞** 本研究の一部は JSPS 科研費 若手研究 (B) 24700038 の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- [ 1 ] E.C.Ferstl, D.Y. von Cremon, “The role of coherence and cohesion in text comprehension: an event-related fMRI study”, *Cognitive Brain Research*, Vol.11, pp.325–340, 2001.
- [ 2 ] B.Horwitz, K.Amunts, R.Bhattacharyya, D.Patkin, K.Jeffries, K.Zilles, A.R.Braun, “Activation of Broca’s area during the production of spoken and signed language: a combined cytoarchitectonic mapping and PET analysis”, *Neuropsychologia*, Vol.41, pp.1868–1876, 2003.
- [ 3 ] E. Watanabe, Y. Yamashita, A. Maki, Y. Ito, H. Koizumi, “Non-invasive Functional Mapping with Multi-channel Near Infra-red Spectroscopic Topography in Humans,” *Neuroscience Letters*, Vol.205, pp.41–44, 1996.
- [ 4 ] 江田英雄, “MEG, NIRS の測定原理,” *日本機械学会誌*, Vol.111, No.1080, pp.10–13, 2008.
- [ 5 ] J. Siegmund, C. Kastner, S. Apel, C. Parnin, A. Bethmann, T. Leich, G. Saake, A. Brechmann, “Understanding understanding source code with functional magnetic resonance imaging.” In *Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering(ICSE2014)*, pp.378–389, 2014.
- [ 6 ] T. Nakagawa, Y. Kamei, H. Uwano, A. Monden, K. Matsumoto, D. M. German, “Quantifying programmers’ mental workload during program comprehension based on cerebral blood flow measurement: a controlled experiment,” In *Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering(ICSE2014)*, pp.448–451, 2014.
- [ 7 ] M. Ferrari, V. Quaresima, “A Brief Review on the History of Human Functional Near-Infrared Spectroscopy(fNIRS) Development and Fields of Application,” *Neuroimage*, Vol.63, No.2, pp.921–35, 2012.
- [ 8 ] S. Coyle, T. Ward, C. Markham, G. McDarby, “On the Suitability of Near-Infrared(NIR) Systems for Next-Generation Brain-Computer Interfaces,” *Physiological Measurement*, Vol.25, pp.815–822, 2004.
- [ 9 ] G. Strangman, J. P. Culver, J. H. Thompson, D. A. Boas, “A Quantitative Comparison of Simultaneous BOLD fMRI and NIRS Recordings during Functional Brain Activation,” *Neuroimage*, Vol.17, No.2, pp.719–731, 2002.
- [10] S. Coyle, T. Ward, C. Markham, “Physiological Noise in Near-infrared Spectroscopy: Implications for Optical Brain Computer Interfacing,” In *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Engineering in Medicine and Biology*, pp.4540–4543, 2004.
- [11] 三家礼子, 盛川浩志, 栗原俊介, 河合隆史, 田村義保, “時系列解析による NIRS データの信号処理,” *ヒューマンインターフェース学会誌*, Vol.11, No.2, pp.163–172, 2009.
- [12] H. tsunashima, K. Yanagisawa, M. Iwadate, “Measurement of Brain Function Using Near-Infrared Spectroscopy (NIRS),” *Neuroimaging-Methods*, Prof. Peter Bright (Ed.), 2012.
- [13] Y. Hoshi, N. Kobayashi, M. Tamura, “Interpretation of Near-Infrared Spectroscopy Signals: A Study with A Newly Developed Perfused Rat Brain Model,” *Journal of Applied Physiology*, Vol.90, No.5, pp.1657–1662, 2001.