

電子情報工学専攻

Advanced Electronic and Information Engineering Course

平成27年度 専攻科特別研究論文

ソースコードの構成要素による 前頭葉活発化の要因分析

Factorial Analysis for Prefrontal Lobe
Activation with Code Components

指導教員名 上野 秀剛, 内田 眞司

論文提出者名 幾谷 吉晴

独立行政法人 国立高等専門学校機構

奈良工業高等専門学校 専攻科

National Institute of Technology, Nara College

Faculty of Advanced Engineering

ソースコードの構成要素による 前頭葉活発化の要因分析

Factorial Analysis for Prefrontal Lobe Activation with Code Components

幾谷 吉晴
Yoshiharu Ikutani

独立行政法人 国立高等専門学校機構
奈良工業高等専門学校 専攻科 電子情報工学専攻
大和郡山市矢田町 22 番地 (〒 639-1080)

National Institute of Technology, Nara College, Faculty of Advanced Engineering
22 Yata-cho, Yamatokoriyama, Nara 639-1080, Japan

Abstract— Brain activity measurement, such as fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging) and NIRS (Near-Infrared Spectroscopy), has been used recently to quantify program comprehension process. However it is still unclear what brain activity measurement can evaluate and analyze. This paper investigates what factor of source code activates developers' frontal pole during program comprehension. We conducted three experiments each relates to memorizing, calculation, and conditional branches in source code. We measured subjects' frontal pole during the tasks with NIRS. The result indicates that the subjects' brain activated when 1) conduct a complex calculation, 2) memorize multiple values, and 3) variables and conditional branch appear in the same time. The results suggest that NIRS evaluates complex tasks in program comprehension without affect of simple calculation.

Keywords— Program comprehension, Brain activity, Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS), Frontal pole

関連業績リスト

1. 幾谷吉晴, 上野秀剛, “NIRS によるプログラム理解時の脳活動計測,” 第 19 回電子情報通信学会関西支部学生会, pp.86, 2014.
2. Y. Ikutani, and H. Uwano. “Brain activity measurement during program comprehension with NIRS,” Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), 2014 15th IEEE/ACIS International Conference on. IEEE, 2014.
3. Y. Ikutani and H. Uwano, “Brain activity measurement during program comprehension with NIRS,” International Journal of Networked and Distributed Computing, vol. 2, no. 4, pp.259-268, 2014.
4. 幾谷吉晴, 上野秀剛, “ソースコード中の変数と条件分岐による脳活動の差,” 第 21 回ソフトウェア工学の基礎ワークショップ (FOSE2014), pp.5-14, 2014.
5. 幾谷吉晴, IEEE Computer Society Japan Chapter FOSE Young Researcher Award, 2014.
6. 幾谷吉晴, 上野秀剛, “ソースコード中の変数と条件分岐による脳活動の差,” コンピュータソフトウェア, vol. 32, no.3, pp.84-90, 2015.
7. 幾谷吉晴, 上野秀剛, 中川尊雄, “脳波計測を用いたプログラム理解タスクの判別,” 第 22 回ソフトウェア工学の基礎ワークショップ (FOSE2015), pp.239-240, 2015.

目次

1.	はじめに	1
2.	関連研究	3
2.1	神経科学における脳活動計測	3
2.2	プログラム理解における脳活動計測	4
3.	NIRS による脳活動計測	5
3.1	NIRS	5
3.2	前頭極	5
3.3	CBSI によるノイズ除去	6
3.4	標準得点化処理	7
4.	実験	8
4.1	計測条件	8
4.2	N-Back 課題	8
4.3	暗算課題	9
4.4	プログラム課題	10
4.5	評価方法	11
5.	結果と考察	13
5.1	N-Back 課題	13
5.2	暗算課題	13
5.3	プログラム課題	15
5.4	脳活動の時間変化の分析	16

6.	おわりに	20
	謝辞	21
	参考文献	22

目次

4.1	計測装置	9
4.2	暗算課題のタスク	10
4.3	プログラム課題のタスク	11
5.1	N-Back 課題の被験者別評価値	14
5.2	N-Back 課題の被験者全体の傾向	15
5.3	暗算課題の被験者別評価値	16
5.4	暗算課題の被験者全体の傾向	17
5.5	プログラム課題の被験者別評価値	18
5.6	プログラム課題の被験者全体の傾向	18
5.7	プログラム課題時の Oxy-Hb の時間変化	19

1. はじめに

プログラムを理解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作業の1つである。プログラム理解の効率化は開発工程全体の効率化に繋がるため、開発者の行動分析に基づいた教育方法や支援手法の開発が行われている。しかし、プログラム理解の過程は外部からの直接的・定量的な評価・分析が難しい。

人間が頭の中で行う認知活動を定量的に分析する方法として、脳活動計測がある。近年、プログラム理解の分野においても脳活動計測を利用した研究が発表されている [1, 2]。従来のプログラム理解研究に比較して、脳活動計測を用いることの利点は2つある。第一に、脳活動を評価することで、認知活動であるプログラム理解を定量的に計測できる点である。これにより、Think-aloud 法やインタビューなどのプログラム理解を定性的に分析する方法と比較して、短時間で容易に分析できるようになる。第二に、既存の脳機能研究の結果を基礎にした議論ができる点である。プログラム理解を、文章理解や数値計算などと関連付けて考察できることは、従来とは異なった新たな知見を生み出すと考えられる。

脳活動の計測装置としては、近赤外線光を用いる NIRS(Near-Infrared Spectroscopy) や、磁場を利用する fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging) が利用されている。脳活動計測がよく用いられている神経科学分野と比較して、プログラム理解の実験で実施されるタスクは所用時間が長い。また、長時間計測したときでも作業中の開発者へ与える負荷が小さく、姿勢を拘束しないことが必要となる。種々の脳活動計測装置の中でも、NIRS は以下の特徴からプログラム理解の計測に適している。

1. 装置が小型で軽いため、長時間の計測でも被験者への負荷が小さい,
2. 被験者の姿勢に対して拘束が少ない [3],
3. 電磁ノイズや体動によるノイズに比較的高い耐性を持つ [4].

脳活動計測を利用することで、これまで直接的な分析が困難だったプログラム理解の過程を認知機能の観点から評価できる。それによりプログラム理解に必要な能力や特性が明

らかになれば，どのような人がソフトウェア開発者に適しているのか，またどのような教育が有効なのかを明らかにできると期待される．しかし，プログラム理解時の脳活動を計測した研究は未だ少数であり，脳活動計測がプログラム理解のどのような認知機能を計測できるのか分かっていない．本稿では，記憶と暗算を対象にした基礎的なタスクと，短いコード片を用いたプログラム理解タスクの合計 3 種類の課題試行時の脳活動を計測する．それにより，NIRS による脳活動計測がプログラム理解のどのような要素を分析・評価できるか明らかにする．ここで得られた知見は，今後プログラム理解という複雑な認知活動を脳活動を用いて分析する際の基礎となる．

2. 関連研究

2.1 神経科学における脳活動計測

fMRI や NIRS に代表される計測装置の進化に伴い、人間の数値計算や言語理解などさまざまな分野で脳活動計測を利用した研究が行われている。一般的に神経科学の分野においては、着目する活動に関連する脳部位を特定した後に、活動に係る認知機能（例：文章理解や記憶など）を細分化し、どの認知機能が脳部位の活性化と関連するか特定するアプローチが取られる。着目する活動に関連する脳部位の特定と、脳部位が関連する認知機能の詳細な分析を個別に行う理由として、計測する装置によって計測できる脳部位が限定されること、それぞれの計測に適したタスク設定が異なることが挙げられる。

Ferstl らは自然言語で記述された文章を理解する際の文脈推定機能に関連する脳部位を実験で調査し、前頭前野背外側部が活性化したことを示している [5]。また、彼らは文章の文脈を理解するための能力として 1) 論理的な文脈の理解と、2) 文章が表現する感情的な文脈の理解の 2 つに着目した実験を行い、前頭前野背外側部が感情的な面における文脈の推定によって活性化することを示している [6]。数値計算の機能に関する研究においても、Menon らが数値計算を行うときに角回が活発化することを報告している [7]。数値計算の機能には 1) 実際に数値を計算する能力と、2) 記憶として蓄積された簡易な計算結果を参照する能力が考えられる。Grabner らは角回の活発化は計算結果を記憶から参照するときに行われることを確認している [8]。

プログラム理解は記憶や計算、文脈の理解など様々な機能を統合して行われる複合的な活動と考えられる。そのため、プログラム理解を対象とした脳活動の計測においても、プログラム理解と関連する脳部位を特定する実験と、その部位がプログラム理解という活動を構成する複数の機能のうち、どれと関連するか分析する実験の双方が必要になる。本稿ではプログラム理解に必要となる機能を脳活動から分析する前段階として、プログラム理解において重要と思われる 3 つの認知機能（記憶、数値計算、条件分岐の理解）を対象と

し、前頭葉の脳活動を分析する．それによって、プログラム理解時のどのような活動によって前頭極が活発化するのかを明らかにする．

2.2 プログラム理解における脳活動計測

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 [1]．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前頭葉や側頭葉の一部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ュミレーションする際の前頭葉の脳血流を NIRS で計測している [2]．実験の結果は、変数や制御構造を難読化したプログラムの理解時に脳活動が増加すること、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．いずれの研究でも、プログラム理解時に前頭葉の脳活動が活発化することを示唆しているが、プログラム理解のどのような要因により前頭葉が活発化したかは分かっていない．脳活動計測がソフトウェア開発のどのような支援に有効かを特定するためには、前頭葉の計測がプログラム理解のどのような面を評価できるかを明らかにすることが求められる．

本研究では、着目する認知活動（変数の記憶、条件分岐の理解）のみが差分になるよう調整した課題を行うことで、それぞれの活動が被験者の前頭葉へ与える影響を計測する．また記憶と暗算を対象にした基礎的なタスクを合わせて実施することで、プログラム理解時に前頭葉が活発化する要因の分析を試みる．これにより、前頭葉の脳活動がプログラム理解のどのような認知活動の影響を反映するのかを明らかにする．またプログラム理解に含まれる様々な認知活動、およびその影響の強さを脳活動という観点から個別に計測することで、ゆくゆくはどのような能力の訓練がプログラム理解の習熟に有効かを明らかにできると考えられる．

3. NIRS による脳活動計測

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) が増加し、脱酸化ヘモグロビン (deOxy-Hb) が減少する [3, 9]。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 [9]。一方、deOxyHb は脳活動増加に対して増加する場合と減少する場合の両方が現れることが報告されている [9]。そこで本稿では、NIRS による脳活動評価の指標として OxyHb を用いる。

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計測できず、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 [10]。そのため、NIRS で計測した脳活動信号の値は計測開始時を基準とした相対値となる。加えて、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 [11] ため、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。また、複数の認知活動が連続するプログラム理解の分析には、時間情報を保ったままデータ中のノイズを除去できる方法が求められる。本稿では、時間情報を保ったままノイズを除去する手法である CBSI[4] と標準得点化処理を組み合わせることでプログラム理解に適した NIRS の分析を試みる。

3.2 前頭極

前頭極は、前頭葉の一部で、その中でも最も額側の脳皮質を指す。前頭極はこれまでに、作業記憶やエピソード記憶などの記憶機能への関連や、マルチタスクの処理への関連が示唆されている [12][13]。プログラム理解時には変数の記憶や制御構造の理解など、ソース

コード中の数値や制御フローを記憶しておかなければならない状況が多く存在すると考えられる．また Siegmund らは実験により，プログラム理解に作業記憶と関連のある脳部位の活発化を示している [1]．したがって，NIRS による前頭極の計測により，プログラム理解時の記憶への負荷を定量的に計測できると考えられる．

一方で，前頭極の脳活動増加は，特定の認知機能に依らないタスクの困難さに関連する可能性も示唆されている [14]．中川らは実験により，難読化したプログラムの理解時に前頭極の脳活動が活発化することを示している [2]．この結果は，前頭極の脳活動計測によりプログラム理解の難しさを定量的に評価できる可能性を示唆する．

いずれの研究もプログラム理解時に前頭極が活発化することを示唆しているが，どのような認知機能により活発化するか，またどの程度の認知負荷が与えられた際に活発化するかは分かっていない．プログラム理解研究において NIRS による脳活動計測がどのように利用可能かを検証するためには，そもそもどのようなことが分析可能なのかという知見が必要となる．本稿では，プログラム理解タスクと，記憶と暗算を対象にした基礎的なタスクを合わせて実施することで，プログラム理解時の前頭極活発化の要因の分析を試みる．

3.3 CBSI によるノイズ除去

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ため，解析前にノイズの除去が必要である．本稿では Xu らが提案する OxyHb と deOxyHb の相関に基づいたノイズ除去手法 CBSI (Correlation Based Signal Improvement) を用いる [4]．脳のある部位で神経活動が増加すると，その部位の OxyHb が増加する一方，deOxyHb は減少することが知られている．一方で，体動や呼吸など神経活動以外による変動では，OxyHb も deOxyHb も同様に増加もしくは減少する [4]．そこで OxyHb と deOxyHb に負の相関がある変化を脳活動増加に起因した変化，正の相関がある変化をノイズとして，信号からノイズを除去する．以下に手順を示す；

1. Exponential moving average(EMA) によってスパイクノイズおよび大局的なドリフト成分を除去する．
2. 以下の式によって OxyHb , deOxyHb の値を補正する．

$$x_0 = \frac{1}{2}(x - \alpha y)$$
$$y_0 = -\frac{1}{\alpha}x_0$$

ここで x, y は補正前の OxyHb, deOxyHb を表し, x_0, y_0 は補正後の OxyHb, deOxyHb を表す. x, y は平均が 0 になるように正規化されている. また α は, x と y の標準偏差の比で, 次の式で求められる.

$$\alpha = \frac{std(x)}{std(y)} = \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{\Sigma y^2}}$$

Xu らのノイズ除去手法を使うと, ノイズの影響を抑え, 脳活動増加に起因する信号変化を鮮明に捉えることができる. また他のノイズ除去手法とは異なり, 信号が持つ時間情報がほぼ保存されるため, タスクに同期した変化を正確に評価することが可能になる.

3.4 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. 本稿では, CBSI 法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綱島らの手法 [10] 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, μ は X の平均, σ は X の標準偏差である.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

4. 実験

4.1 計測条件

作業記憶を対象にした N-Back 課題，暗算を対象にした暗算課題，および短いコード片を理解するプログラム課題の合計 3 種類の課題を行う．それぞれの課題試行時の前頭極の脳活動を，TMS international BV 製の NeXus10 - MarkII を用いて 128Hz のサンプリング周波数で計測する．図 4.1 に計測装置の外観と装着時の様子を示す．N-Back 課題には 10 名（全員男性），暗算課題およびプログラム課題には 20 名（内女性 2 名）が被験者として参加した．被験者は奈良工業高等専門学校で，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った．実験前に実験内容を口頭で説明し，同意を得たあとに装置をとりつけた．体動によるノイズを抑えるため，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した．

4.2 N-Back 課題

N-Back 課題は作業記憶に関わる脳機能局在を調べるためにもっともよく利用される実験パラダイムのひとつである [13]．被験者はタスク開始前に N （1 から 3）を提示され，続いて数字（1 から 4）がスクリーン中央に 1.8 秒おきに 20 回表示される．被験者は表示されている数字が N 個前と同じならば手元のボタンを押し，異なるならば無視する．

実験デザインにはタスクとレスト（安静状態）を交互に実施するブロックデザインを採用する．N-Back 課題ではタスクブロックを 36 秒，レストブロックを 30 秒とし， $N=1,2,3$ のそれぞれのタスクをランダムな順序で 1 度ずつ実施するセットを 3 回繰り返す．タスク中は画面に表示される問題へ回答し，レスト中は提示される十字記号を注視しながら安静にする．

1-Back では直前の数字ひとつを覚えていればよいが，2-Back と 3-Back では複数の数字を覚えておかなければならない．加えて， N の値が大きくなるにつれて，個々の数字

を記憶に保持しなければならない時間が長くなる．したがって，この課題試行時の脳活動を計測することで，前頭極がどの程度の記憶負荷が与えられた場合に活発化するかを推定する．

4.3 暗算課題

暗算課題は図 4.2 に示す 3 種類の異なる難易度の暗算をするタスクから構成される．それぞれのタスクは以下の規則に従って出題される．

- 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．
- 中タスク：1桁の整数3つによる足し算．
- 高タスク：小数点の引き算と割り算．

実験デザインにはブロックデザインを採用し，タスク，レストのどちらも1ブロック32秒とする．難易度低，中，高のそれぞれのタスクを順に1度ずつ実施するセットを3回繰り返す．タスク中は画面に表示される問題を解き，レスト中は画面に提示される十字記号を注視しながら安静にする．また，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．そのため，1問あたり



(a) 装置の外観



(b) 装着時の様子

図 4.1 計測装置

の時間が長すぎるとタスク中になにもしない時間が生じてしまい、タスクの内容にかかわらず脳活動が低下する可能性がある。暗算課題では、各タスクの難易度に合わせ、出題数を低タスクで16問(2秒/問)、中タスクは10問(3.2秒/問)、高タスクは2問(16秒/問)とする。

プログラム理解時には、カウンタのインクリメントなどの単純な計算から、ビジネス論理を数式化した複雑な計算まで、さまざまな難易度の数値計算が含まれる。暗算課題時の脳活動を計測することで、前頭極がそもそも数値計算により活発化するのか、またどの程度の数値計算を試行する場合に活発化するかを推定する。

4.4 プログラム課題

プログラム課題は図 4.3 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。各タスクでは被験者に3つの変数に格納される値を求めてもらう。それぞれのタスクの内容は以下の通りである。

- 整数タスク：各変数の値が整数から計算される。
- 変数タスク：各変数の値が整数と変数から計算されるため、変数値を記憶する必要がある。

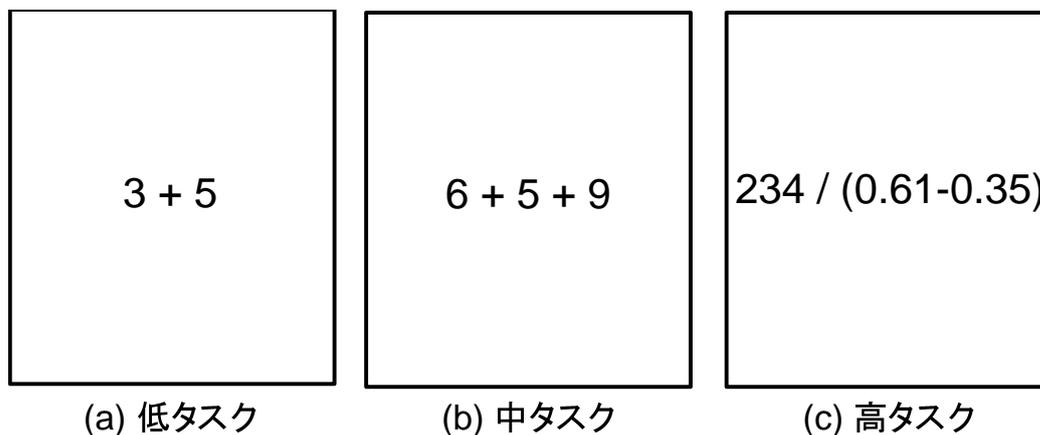


図 4.2 暗算課題のタスク

- 条件分岐タスク： 各変数の値が整数と変数から計算される．計算には変数値を記憶した上で条件分岐を判断する必要がある．

実験デザインは暗算課題と同様のもの（1 ブロック 32 秒，自動的に問題を切り替え）を採用する．整数，変数，条件分岐のそれぞれのタスクを順に 1 度ずつ実施するセットを 3 回繰り返す．各タスクの難易度に合わせ，出題数を整数タスクで 4 問（8 秒/問），変数タスクで 3 問（10.6 秒/問），条件分岐タスクで 2 問（16 秒/問）とする．

本稿では，プログラム理解時の基礎的な要素として，変数に対する操作（暗算と記憶）および条件分岐の理解に着目する．この課題時の脳活動を計測し，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を，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を分析する．

4.5 評価方法

評価には，課題の傾向をよく反映する [9] とされる Oxy-Hb を用いる．脳活動の計測データに CBSI を適用しノイズを除去したあと，標準得点化处理をかけることで被験者毎に Oxy-Hb の値を正規化する．タスクによる脳の活動量として，直前の安静状態における Oxy-Hb の平均値を基準としたタスク中の変化量を用いる．タスク t における Oxy-Hb

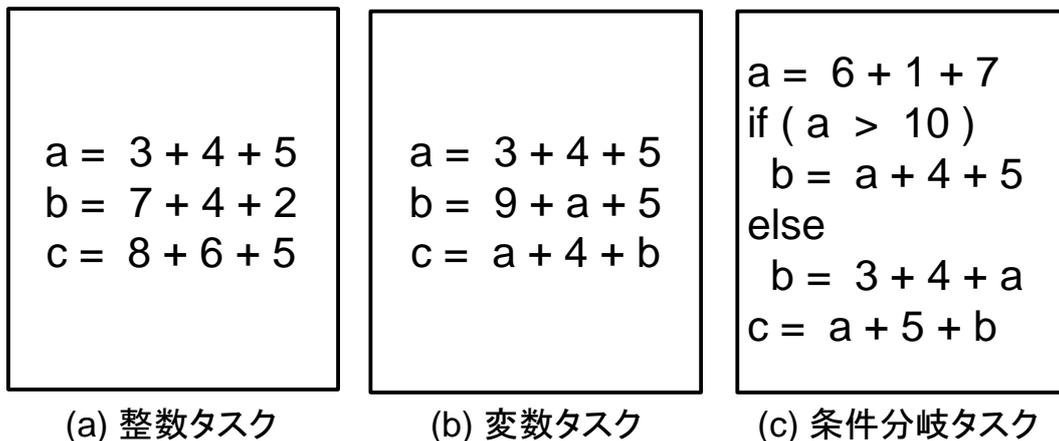


図 4.3 プログラム課題のタスク

の計測値 t_i ($[i = 0, 1, \dots, n_t]$) と, t の直前の安静状態 r における Oxy-Hb の計測値 r_j ($[j = 0, 1, \dots, n_r]$) から, 安静状態の平均値 (基準値) $rest$ とタスクによる活動量 $activity$ を求める.

$$rest = \frac{1}{n_r} \sum_{j=0}^{n_r} r_j$$
$$activity = \sum_{i=0}^{n_t} (t_i - rest) \cdot \tau$$

ここで, τ はデータの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総和を表す. $activity$ の値が正の場合にはタスク時の脳活動がレスト時に比べ増加したことを, 値が負の場合には減少したことをそれぞれ示す. また値が 0 の場合にはタスク時の脳活動が直前のレストと変わらないことを示す.

5. 結果と考察

5.1 N-Back 課題

N-Back 課題の被験者毎の *activity* の分布を図 5.1 に示す．縦軸がそれぞれのタスク時における脳活動の評価値 *activity* を示し，横軸はそれぞれの被験者を示す．9 人中 7 人の被験者において，2-Back または 3-Back の試行時の *activity* がもっとも高くなった．しかし，被験者 G では 1-Back の *activity* が 3-Back の評価値を全体として上回った．中川らの実験においても，10 人中 2 人の被験者が他の被験者が示した傾向とは逆の傾向を示している [2]．したがって，本稿で行った実験においても，全体のおよそ 10–20% の被験者が逆傾向を示す可能性が考えられる．

N-Back 課題の被験者全体の傾向を図 5.2 に示す．縦軸がそれぞれのタスク時における脳活動の評価値 *activity* を示す．ひとりの被験者は各タスクを 3 回ずつ試行しているため，全試行の *activity* の平均を各被験者の代表値としている．図上のアスタリスクは，そのタスクにおける *activity* の全被験者の平均値が有意 (片側 t 検定, $p < 0.01$) に 0 より大きい場合に表示し，そのタスクにより前頭極の脳活動が有意に増加したことを示す．実験の結果，被験者全体の傾向として，2-Back (*activity* の中央値 : 0.15) と 3-Back (*activity* の中央値 : 0.37) の試行時に前頭極の脳活動が有意に増加した．一方 1-Back 試行時には *activity* の中央値が -0.17 と低く，脳活動の増加は見られなかった．

この結果から，ひとつの数字を記憶する程度の記憶負荷では脳活動増加は現れない一方で，複数の数字の同時記憶や長時間の値の保持を行う場合には前頭極が活発化すると考えられる．また被験者全体として， N の値が大きくなるにつれて *activity* の中央値が高くなる傾向が見られた．N-Back 課題の性質から N の値が大きくなるほどタスクが困難になると考えられるため，この結果は前頭極がタスクの困難さを反映している可能性を示唆する．

5.2 暗算課題

暗算課題の被験者毎の *activity* の分布を図 5.3 に示す。20 人中 14 人の被験者において、難易度高タスク試行時の *activity* がもっとも高くなった。しかし、被験者 G, Q では難易度低タスクの *activity* がもっとも高くなった。暗算課題の被験者全体の傾向を図 5.4 に示す。実験の結果、高タスク (*activity* の中央値：0.68) の試行時のみ前頭極の脳活動が有意に増加した。低タスクと中タスクでは *activity* の中央値がそれぞれ -0.39 , 0.07 と低く、脳活動の増加は見られなかった。

この結果から小数点の引き算や割り算を含む難易度の高い暗算を行う際には前頭極が活発化するが、2 つから 3 つの数字の和を求めるような単純な暗算では前頭極の脳活動に変化が現れないと考えられる。プログラムを理解する過程にはカウンタのインクリメントなどの単純な計算が多く含まれる。このような暗算に対して NIRS の計測結果が反応すると、他の活動による影響が覆い隠されてしまい、計測が困難になる。本実験の結果は、前頭極の脳活動が単純な暗算の影響を受けず、プログラム理解の分析に影響しないことを示

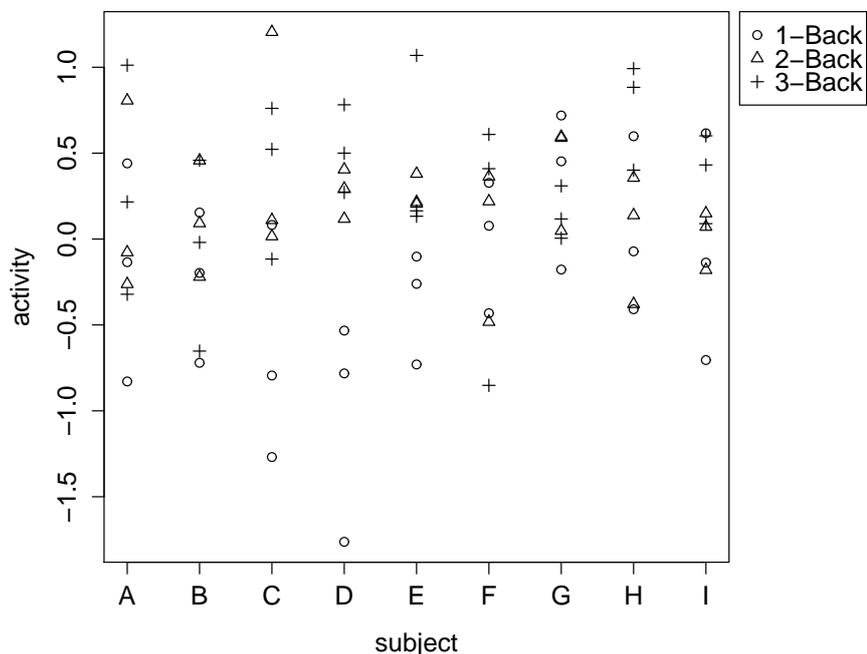


図 5.1 N-Back 課題の被験者別評価値

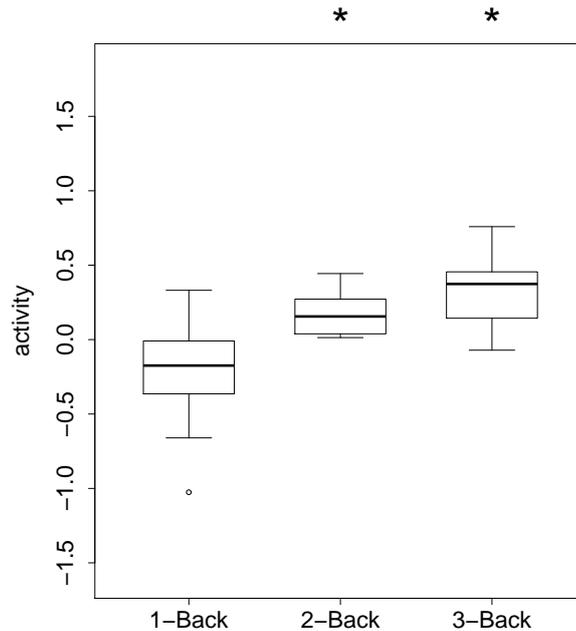


図 5.2 N-Back 課題の被験者全体の傾向

唆する。また N-Back 課題と同様に、暗算の難易度が高くなるにつれて *activity* の中央値が高くなる傾向が被験者全体として見られた。記憶と暗算という認知機能が異なると仮定すると、この結果は前頭極が特定の認知機能に依らないタスクの困難さに反応することを示唆する。

5.3 プログラム課題

プログラム課題の被験者毎の *activity* の分布を図 5.5 に示す。20 人中 10 人の被験者において、条件分岐タスク試行時の *activity* がもっとも高くなった。一方、9 人の被験者において整数タスク試行時の *activity* がもっとも高くなった。特に被験者 N, P, Q では、整数タスク試行時の *activity* が、他のすべてのタスクの評価値よりも高くなった。プログラム課題の被験者全体の傾向を図 5.6 に示す。被験者全体として、条件分岐タスク (*activity* の中央値: 0.61) の試行時のみ前頭極の脳活動が有意に増加した。整数タスクと変数タスクでは中央値がそれぞれ 0.06, -0.35 と低く、脳活動の増加は見られなかった。

条件分岐タスクを解くためには、(a) 3 つの整数の和の暗算、(b) 高々 2 つの変数の記憶、(c) if 文による条件分岐の判断の 3 つの作業が必要になる。N-Back 課題および暗算

課題の結果を加味すると、(a) と (b) による負荷が原因で前頭極が活発化したとは考えにくい。整数、変数タスクでは現れず、条件分岐タスクのみ現れる条件は (c) だけである。したがって、実験の結果から条件分岐の理解時に前頭極が活発化する可能性が示唆される。また N-Back 課題および暗算課題で見られたタスクの困難さによって前頭極の活動が増加する傾向から、条件分岐の理解がプログラム理解を困難にしている可能性が示唆される。中川らは実験により変数や制御構造を難読化したプログラムの理解時に脳活動が増加することを示している [2]。本稿の結果は、彼らが施した処理の内でも特に制御構造の難読化がプログラム理解を困難にし、その負荷が前頭極を計測した NIRS 信号に現れたことを示唆する。しかし、20 人中 9 人の被験者において整数タスクの *activity* がもっとも高くなるなど、プログラム課題では被験者間の脳活動値の分散が N-Back 課題や暗算課題に比べて大きくなった。これはプログラム課題が、他のタスクに比べさまざまな認知機能を含む複合的な課題であったためと考えられる。被験者間の評価値の分散が高まった原因の特定は今後の課題である。

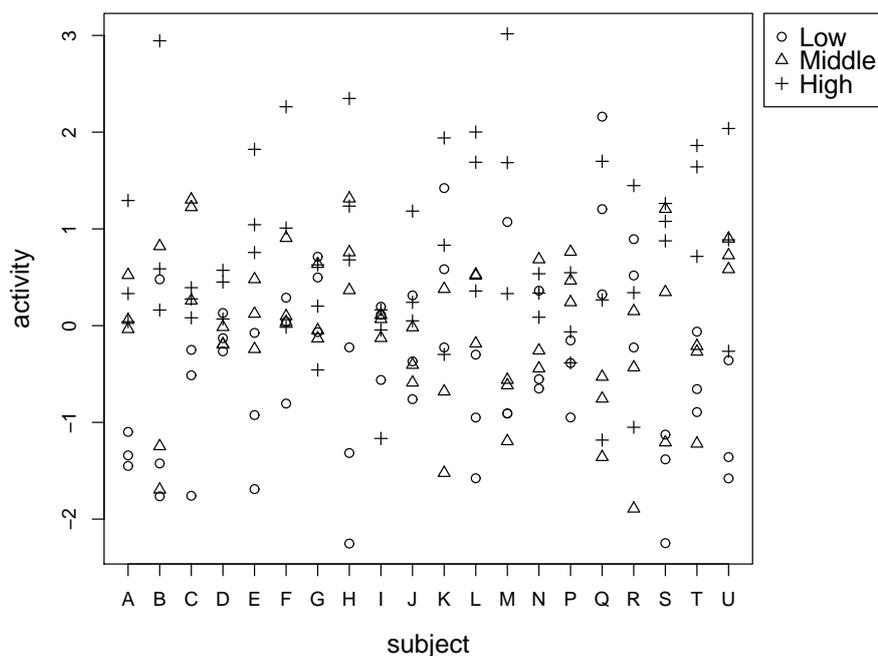


図 5.3 暗算課題の被験者別評価値

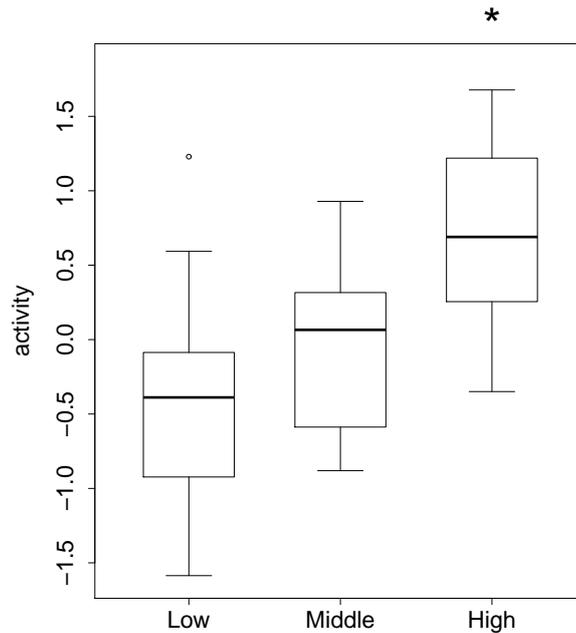


図 5.4 暗算課題の被験者全体の傾向

5.4 脳活動の時間変化の分析

図 5.7 に、プログラム課題時のある被験者の Oxy-Hb に、CBSI によるノイズ除去をかけて得られた信号を示す。図の縦軸は正規化後の Oxy-Hb の値を、横軸は時間を示す。図中の色が着けられた範囲はタスクブロックを、つけられていない範囲はレストブロックを意味する。図中の特に 1 サイクル目および 3 サイクル目において、タスク時に被験者の脳活動が増加し、レスト時に減少する傾向が見られる。この結果は、信号が持つ時間情報を保存する CBSI を採用することで、プログラム理解時の脳活動の時系列変化を評価できる可能性を示唆する。

NIRS はその特性から他の脳活動計測装置では困難な端末を実際に操作しながらプログラム理解を実施する様子の計測に利用できる。特に視線や作業履歴などの行動データを併用することで、開発者がどのような場合にプログラム理解を困難に感じるかを分析できると考えられる。また脳活動の時間変化の分析から、開発者がどのようなサブタスクを経て、最終的なプログラムの理解に到達するのかを認知活動レベルで評価できる可能性がある。

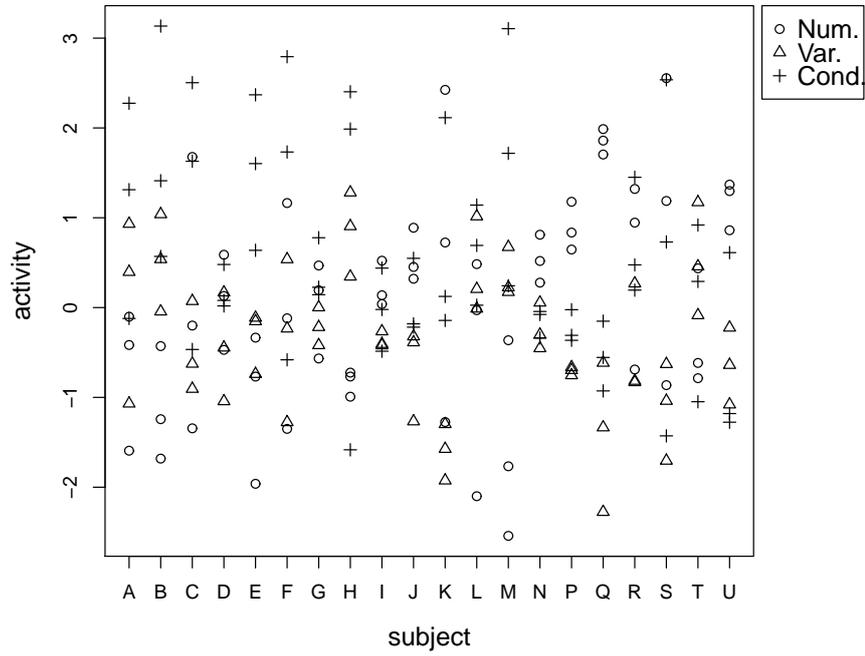


図 5.5 プログラム課題の被験者別評価値

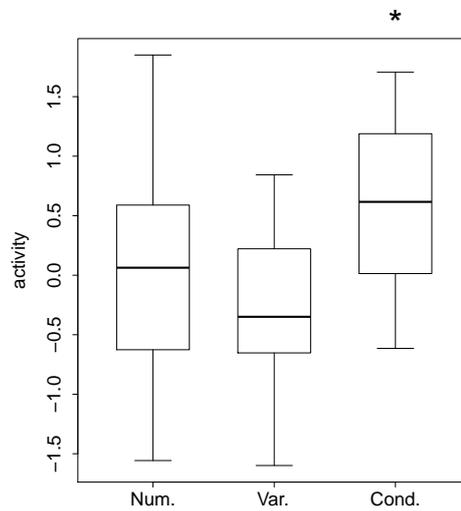


図 5.6 プログラム課題の被験者全体の傾向

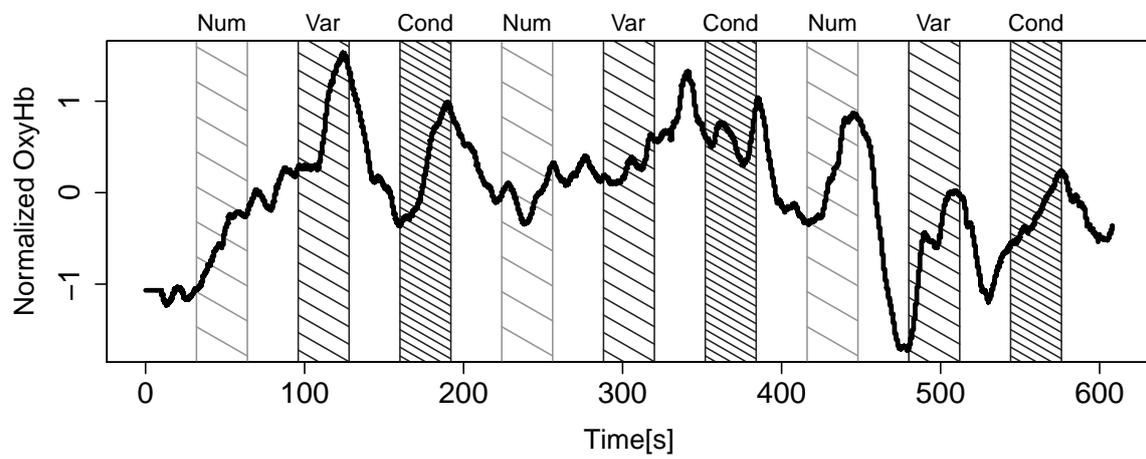


図 5.7 プログラム課題時の Oxy-Hb の時間変化

6. おわりに

本稿では、NIRS による脳活動計測がプログラム理解のどのような要素を分析・評価できるか明らかにするため、3 種類の課題試行時の前頭極の脳活動を計測する実験を行った。結果は条件分岐の理解時に脳活動が増加すること、およびこの脳活動増加は取り組んでいるタスクの困難さに関連する可能性を示唆した。またプログラム理解に含まれる単純な暗算や変数の記憶に対しては前頭極の脳活動はほとんど影響されないことが示された。実験結果から、NIRS を利用した前頭極の計測により、プログラム中の制御フローの理解の困難さを定量的に評価できると考えられる。今後、メソッドやクラスに対する抽象化や再帰のような複雑な制御フローを含むプログラムを対象に実験し、どのようなプログラムの理解が困難なのかを調べることは興味深い発展のひとつである。

本稿で用いたプログラム理解の課題は、高々 6 行程度の単純で短いソースコードを対象にしている。より規模の大きいソースコードや設計が複雑なソースコードの理解、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利用したプログラム理解の分析は今後の課題である。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。

NIRS は計測が簡便で被験者の拘束性が低いなどプログラム理解研究に適した特徴をもつため、この分野において複数の応用が可能であると考えられる。本稿ではソースコード理解時の記憶と暗算に対する負荷を対象としたが、仕様書や設計書、UML に代表される図について理解のしやすさを調べることも可能であると期待される。他の脳活動計測装置では困難な、IDE を用いたプログラム実装時の脳活動を計測し、熟練者と初心者の差がどのような場所に現れるのかを検討することも本研究の発展として考えられる。また NIRS による脳活動の時間変化の分析から、プログラム理解のどのようなタイミングで開発者が困難を感じるかを特定することも有益である。

謝辞

被験者として参加して下さった 30 名の奈良高専の学生の方々に感謝申し上げます。査読いただいた岩田先生に感謝申し上げます。最後に実験の全般にわたり指導して下さった上野先生に感謝申し上げます。

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] J. Siegmund, C. Kästner, S. Apel, C. Parnin, A. Bethmann, T. Leich, G. Saake, and 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.
- [2] T. Nakagawa, Y. Kamei, H. Uwano, A. Monden, K. Matsumoto, and 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.
- [3] M. Ferrari and 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. 921–935, 2012.
- [4] X. Cui, S. Bray, and A. L. Reiss, “Functional near infrared spectroscopy (NIRS) signal improvement based on negative correlation between oxygenated and deoxygenated hemoglobin dynamics,” *Neuroimage*, vol. 49, no. 4, pp. 3039–3046, 2010.
- [5] E. C. Ferstl and D. Y. von Cramon, “The role of coherence and cohesion in text comprehension: an event-related fMRI study,” *Cognitive Brain Research*, vol. 11, no. 3, pp. 325–340, 2001.
- [6] ———, “What does the frontomedian cortex contribute to language processing: coherence or theory of mind?” *Neuroimage*, vol. 17, no. 3, pp. 1599–1612, 2002.
- [7] V. Menon, S. Rivera, C. White, G. Glover, and A. Reiss, “Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing,” *Neuroimage*, vol. 12,

- no. 4, pp. 357–365, 2000.
- [8] R. H. Grabner, D. Ansari, K. Koschutnig, G. Reishofer, and F. Ebner, “The function of the left angular gyrus in mental arithmetic: evidence from the associative confusion effect,” *Human brain mapping*, vol. 34, no. 5, pp. 1013–1024, 2013.
 - [9] Y. Hoshi, N. Kobayashi, and 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.
 - [10] H. Tsunashima, K. Yanagisawa, and M. Iwadate, “Measurement of brain function using near-infrared spectroscopy (NIRS),” 2012.
 - [11] S. Coyle, T. Ward, C. Markham, and G. McDarby, “On the suitability of near-infrared (NIR) systems for next-generation brain–computer interfaces,” *Physiological Measurement*, vol. 25, no. 4, pp. 815–822, 2004.
 - [12] S. Gilbert, S. Spengler, J. Simons, J. Steele, S. Lawrie, C. Frith, and P. Burgess, “Functional specialization within rostral prefrontal cortex (area 10): a meta-analysis,” *Cognitive Neuroscience, Journal of*, vol. 18, no. 6, pp. 932–948, 2006.
 - [13] A. M. Owen, K. M. McMillan, A. R. Laird, and E. Bullmore, “N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies,” *Human brain mapping*, vol. 25, no. 1, pp. 46–59, 2005.
 - [14] A. M. O. Kalina Christoff, “Improving reverse neuroimaging inference: cognitive domain versus cognitive complexity,” *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 10, no. 8, pp. 352–353, August 2006.