

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K02589

研究課題名(和文) コンピュータプログラミング学習の神経基盤に関わる基礎研究

研究課題名(英文) Basic research on the neural basis of computer programming learning

研究代表者

本郷 健 (Hongo, Takeshi)

大妻女子大学・社会情報学部・教授

研究者番号：60245298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：プログラミング学習初心者36名に15週間の講習会を実施した学習群とプログラミング学習をしない統制群31名との脳の神経可塑的变化の縦断解析を行った。プログラミング学習に伴う脳灰白質容積の変化は、左前頭極、右前頭極、右内側前頭回、左楔状部、右淡蒼球、左外側小脳、内側小脳、左淡蒼球の8領域で相互作用を示すことが初めて明らかにされた。さらに、最終作品の成績と右前頭極の変化量、及びテストの成績と右内側前頭回や左・右淡蒼球の変化量とが有意な正の相関のあることを明らかにした。このことは、プログラミング学習と汎用的能力(目的達成機能、演繹的機能、学習意欲)の訓練との関係を示す興味深い成果を得たといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、プログラミング教育が小・中・高等学校の普通教育において実施されている。しかし、その教育的意義についてのエビデンスは、脳科学や神経科学の観点からは明らかにされていない。そのような状況下において本研究は、世界に先駆けて、プログラミング学習により変化する神経基盤の解明を行うことができた。変化した神経基盤が司るとされる機能から、プログラミング学習が汎用的能力の開発に関係することを示す結果を得ることができた。ここで得られた成果は、今後のプログラミング教育の意義や指導法の開発に有用な情報となる。

研究成果の概要(英文)：We conducted a longitudinal analysis of neuroplastic changes in the brain between a study group of 36 beginners learning programming and a control group of 31 participants who did not learn programming for 15 weeks. For the first time, changes in brain gray matter volume associated with programming learning were found to interact in eight regions: left frontal pole, right frontal pole, right medial frontal gyrus, left cuneus, right globus pallidus, left lateral cerebellum, medial cerebellum, and left globus pallidus. Furthermore, we found significant positive correlations between final work performance and the amount of change in the right frontal pole, and between test performance and the amount of change in the right medial frontal gyrus and left and right globus pallidus. This is an interesting result showing the relationship between programming learning and the training of general-purpose abilities (purposeful function, deductive function, and motivation to learn).

研究分野：学習科学

キーワード：プログラミング教育 脳可塑性 MRI fMRI 脳灰白質 神経可塑的变化 情報教育 教育工学

1. 研究開始当初の背景

巨大なデータを効率的に扱うために、コンピュータプログラミングスキルの習得が重要な課題となってきている。学習指導要領では、「プログラミング的思考」の育成を目指して、小中高等学校の全ての段階でプログラミング学習が必修化された。導入を支持する報告書としては、総務省の報告書（総務省、2015年6月）や文部科学省の有識者会議がまとめた「小学校段階におけるプログラミング教育の在り方について（議論の取りまとめ）」などがある。それらの報告書では、プログラミング教育がもたらす効果を、指導を行った事業者の感じた効果をもとにまとめている。そこでまとめられた効果の根拠は、必ずしも客観的なデータに基づく成果とは言い難い。（政策的・社会的背景と「問い」）

プログラミング学習には、言語や数学など記号の操作力、論理的思考力、目標達成など、人の認知機能を支える能力が関わっていると考えられるが、「プログラミング的思考」に比較的特異的な能力あるいは神経基盤が存在するのか、あるいは記号の操作力など他の認知能力の基盤を流用しているのかは、過去に神経科学的研究がほとんど存在しないため明らかでない。（学術的「問い」）

本研究が持つ問題意識の解明には、今日的で社会的並びに普遍的で科学的な意義がある。

2. 研究の目的

プログラミング学習の基盤となる認知システムや神経基盤は、依然として不明な点が多い。プログラミング学習の神経基盤を調べた研究の幾つかは、プログラミング技能を持つ人がプログラミング課題をこなす際の脳の活性化を調べたものがある。機能的磁気共鳴画像法（fMRI）研究において、理工系学生が短いプログラムコードの理解に従事すると、左下前頭回三角部、左後部中側頭回、右中前頭回、右下前頭回三角部等が活性化した。この種の研究により、プログラミングにおける前頭葉（言語系を含む）の関与が指摘されている。しかし、別の観点からは人工言語であるプログラミング言語の理解は、自然言語処理系よりも多重要求系を活性化させるという主張もある。また、プログラミングコードを読んでいる間、デフォルトモードネットワークの活動は低下するという指摘もある。これらの先行するfMRI研究は、研究間での課題デザイン、参加者の専門性レベル、解析方法が異なるため、必ずしも一貫していない。

学習の神経基盤は、先行研究が示すように脳の構造変化でも探ることができる。例えば、細田らは、外国語の学習が局所的な可塑的变化を誘発することを明らかにしている。

しかし、我々の知る限り、プログラミング学習に関する構造的な神経可塑性の研究は報告がない。一般に、学習を成功させるには、必要なタスクを実行するための領域固有な神経基盤と汎用的な神経基盤（持続性など）の両方が必要と考えられる。この点、前頭極皮質は目標志向の持続性など汎用的な神経基盤を形成することが報告されており、前頭極皮質はメタ認知制御に関係しているとの報告もされている。

そこで、本研究の目的は、未成年者または成人を対象とし、プログラミングの学習活動が脳構造あるいは脳活動に与える影響をMRIやfMRIにより測定することで、プログラミング学習に伴う脳の神経可塑的变化を半定量的に評価することにある。このことによって、プログラミング学習活動が特定部位の神経の可塑的变化を生み出す特徴を確認し、プログラミング学習活動と脳の学習メカニズムを関連付ける基礎的資料を得ることである。これら一連の研究成果を通して、プログラミング教育の教育的意義や指導法を考察するための基礎資料を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、先の研究目的を達成するために、初めてコンピュータ・プログラミングを学習する大学生を対象に、以下の3つの研究目標を設定した。

研究目標1：構造的磁気共鳴画像（MRI）のボクセルベース・モルフォメトリ（VBM）解析により、神経可塑性変化を示す脳領域を同定する。このことで、プログラミング学習により、①脳の構造的変化が生じるか。②構造的変化が生じた場合に、その部位を特定する。③特定した部位はどのような機能と関係しているかを分析する。

研究目標2：研究目標1で同定した部位の構造的変化量とプログラミング学習に対する自己認識との関係を明らかにする。

研究目標3：プログラミング学習の進展につれて、課題解決下の賦活部位は変化するかを明らかにする。

・学習者群（LG）に対して

①MRI撮像：36名（平均年齢：18.4歳、標準偏差またはSD：0.5、範囲：18.0～19.0歳、左利き1名）を学習前、学習の中間期、学習後の3回計測した。

②fMRI撮像：36名中の15名に対して中間期と学習後の2回計測した。

③アンケート質問及び色彩マトリクス検査：参加者全員に実施した。

④学習評価テスト：学習期間の中間期、学習後の2回測定する。

・統制群 (CG) に対して

①MRI 撮像 : 31 名 (平均年齢 : 18.4 歳、標準偏差または SD : 0.5、範囲 : 18.0~19.0 歳、左利き 1 名) を学習前、学習後の 2 回計測した。

(1) プログラミング学習と評価

実験に使用したプログラミング

表 1 LG の観察及び検査項目

言語は「Processing」である。講習会 (全 26 回 (各回 90 分)) は、講義とパソコンを使った演習で構成され、15 週で行われた。講義と演習は以下の 8 つのブロックに分かれていた。(①座標系、基本的な図形の描き方の学習とその演習、②変数、整数、実数、乱数、その演習、③ループ構造と中

項目	学習前	学習期間の中間	学習後
同意取得	○		
MRI 撮像	○	○	○
fMRI 撮像		○	○
アンケート	○		○
色彩マトリックス検査	○		
プログラミング学習評価テスト		○	○

間試験、④分岐構造とアニメーション基礎とその演習、⑤配列とその演習、⑥関数、引数とその演習、⑦再帰とその演習、⑧最終試験と与えられたテーマに基づくプログラミング作品の制作、である。参加者全員に年齢、利き手、性格、得意な言語や数学の認識、プログラミング学習への興味などの事前アンケート評価を行った。学習成果は中間 (13 回の講習会を終えた時点) と終了時に評価された。中間試験ではプログラミング言語の基礎知識を問う問題を含む 40 分のペーパーテスト (例 : 未完成の簡単なプログラムを完成させる) を実施した。受講開始から 6 ヶ月後に、LG 参加者に対して、プログラミング学習の是非や学習過程への参加行動 (学習時間や学習方法) について質問した (以下、「事後アンケート評価」と呼ぶ)。最終試験は、プログラミング言語の高度な知識、プログラムの流れや構造を問う問題を含む 40 分のペーパーテストであった。中間試験と期末試験では、知識とその応用力を評価するため、2 回の試験の平均を算出し、「テストスコア」として使用した。最終作品制作では、参加者にテーマを与え、そのテーマに沿ったプログラミング作品を作成させた。また、作品の評価は予め決められた評価プロトコルに沿って、複数の講座の講師から提出されたスコアの平均値を最終作品スコアとした。

また、研究目標 3 のための中間及び講習会終了後に行われた fMRI 撮像下を実施した実験課題の内容は、コード実行の出力を予測する (コード実行)、不完全なコードを完成させる (コード完成)、プログラミングの「バグ」を見つける (バグ発見) の 3 種類のプログラミング関連問題であった。

(2) 神経可塑的变化及び脳活動の測定

安静時の脳活動、T1 強調画像、拡散テンソル画像、及びプログラミング学習中における脳の活動を fMRI により測定した。学習前の MRI 撮像はコース開始の 1~2 週間前 (平均 9 日間) に撮影し、学習後の MRI は全ての講習会終了後 1~3 週間以内に撮影した。MRI 及び fMRI の撮影は、国立神経・精神医療研究センターの 32 チャンネルフェーズドアレイ受信コイルを装備した 3.0T スキャナー (Skyrafit; Siemens, Germany) で行った。

(3) 解析及び分析

高解像度 3 次元 T1 強調画像解析は、SPM12 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) と CAT12 toolbox (<http://www.neuro.uni-jena.de/cat/index.html>) を用いた VBM 解析を行った。全参加者の脳内 GMV、白質体積、全脳体積を算出し、マスキング用画像を作成した。学習前の LG と CG の横断的な VBM 解析を行った。2 群の縦断解析は、CAT12 にある「2 群縦断データ」を利用した。統計デザインは flexible factorial design として、時間因子とグループ因子の 2 要因の相互作用として同定された脳領域の脳灰白質容積の変化量 (Δ GMV) を算出した。関心領域の Δ GMV と行動評価 (テストスコアと最終作品の評価スコア) のピアソン相関を求めた。

4. 研究成果

研究目標 1 についての研究結果

① 学習前の横断的 VBM 解析により、LG と CG に GMV に有意差が認められなかった (FWE 補正後 $P < 0.05$)。すなわち、異なる集団から抽出された可能性を排除した。

② プログラミング学習に伴う GMV の変化では、縦断解析により、左前頭極 ($x, y, z = -24, 64.5, 6$)、右前頭極 ($x, y, z = 25.5, 60, 6$)、右内側前頭回 ($x, y, z = 19.5, 51, 1.5$)、左楔状部 ($x, y, z = -1.5, -99, 15$)、右淡蒼球 ($x, y, z = 15, 9, 0$)、左外側小脳 (後小葉と結節, $x, y, z = -1.5, -87, -30$)、内側小脳 (口蓋と扁桃, $x, y, z = 9, -66, -61.5$)、左淡蒼球 ($x, y, z = -10.5, 7.5, -3$) の 8 領域で相互作用を示すことがわかった。その一例を図 2 に示す。

③ 学習行動評価と ROI の Δ GMV に有意な相関関係が存在していた。右前頭極は最終作品スコアと右内側前頭回や左・右淡蒼球はテストスコアと有意な正の相関関係があった。その一例を図 3 に示す。図 3 の左図は右前頭極の Δ GMV と最終作品スコアを右図は右内側前頭回と Δ GMV とテストスコアの相関関係を示す。

以上の結果から、研究目標 1 について以下の研究成果を得た。

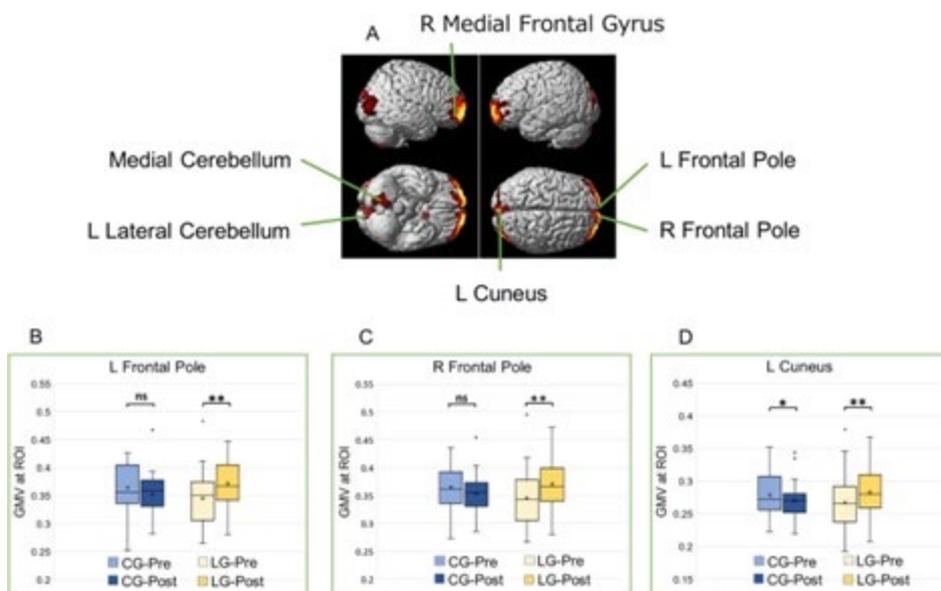


図 2 学習前後で脳灰白質容積 (GMV) が有意に変化した部位と変化量の例
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhac425>

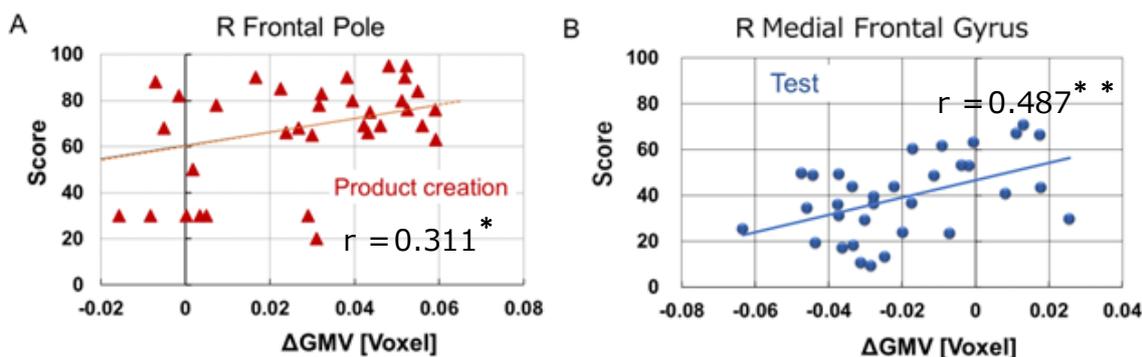


図 3 学習行動評価と ROI の Δ GMV との関係の例
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhac425>

(1) 研究目標 1 の成果

- ① MRI を使った灰白質容積 (GMV) の縦断解析により、プログラミング初心者の学習前後の脳の構造的変化を初めて明らかにした。
- ② プログラミング学習によって、左前頭極、右前頭極、右内側前頭回、左楔状部、左外側小脳、内側小脳、右淡蒼球、左淡蒼球の 8 部位で有意な神経可塑的变化の出現を明らかにした。
- ③ 右前頭極の Δ GMV は最終作品スコアと正の相関があった。右前頭極は目的達成機能 (粘り強さ、やり抜く力) に関する部位と考えられており、プログラミング学習は目的達成機能と有意な関係あることが示された。
- ④ 右内側前頭の Δ GMV はテストスコアと正の相関があった。内側前頭回は演繹的機能に関する部位と考えられており、プログラミング学習は演繹的機能の訓練と関係することが示された。
- ⑤ 左・右淡蒼球の Δ GMV はテストスコアと正の相関があった。淡蒼球は報酬を予測して意欲と関係する部位と考えられており、プログラミング学習は意欲の訓練と関係することが示された。
- ⑥ プログラミングの学習には、複数の脳領域が関与していることが明らかになった。

以上の様に、プログラミング初心者の学習は汎用的能力 (目的達成機能、演繹的思考機能、学習意欲) の訓練と関係していることが明らかになった。

(2) 研究目標 2 の成果

研究目標 (1) で有意に変化した部位の変化量とアンケート評価から、以下の成果を得た。

- ① 右内側前頭回の Δ GMV と数学的因子得点と正の相関があった。

- ② 右内側前頭回の GMV が増加したグループは、「素早く応答してくれないものにはイライラする」傾向は少なく、「コンピュータを操作することが楽しくなる」、「思ったことを明確に表現するようになった」、「プログラミングはよい経験であった」と認識していた。
- ③ 左・右淡蒼球では、学習前後の GMV の変化量と数学的因子と正の相関、共同的達成因子と負の相関があった。
- ④ 左・右淡蒼球の GMV が増加したグループは、「一人で考えた」、「論理的に考えることに向いている」、「コンピュータ（機械）を操作するのは楽しいと思うようになった」と認識している。
- ⑤ 内側小脳では、学習前後の GMV の変化量と共同的達成因子と負の相関があった。
- 以上の様に、プログラミング学習初心者に生じた有意に変化した部位の脳灰白質容積の変化量と学習に対する自己認識との間に有意な関係が存在していることを明らかにした。

(3) 研究目標3の成果

課題を解決している時に賦活する部位は、学習の進展とともに変化することを明らかにした。細は現在、国際ジャーナルへ原著論文として投稿中である。

<引用文献>

- ①Siegmond J, Kästner C, Apel S, Parnin C, Bethmann A, Leich T, Saake G, Brechmann A. Understanding understanding source code withfunctional magnetic resonance imaging. Proc Int’ l Conf Software Eng (ICSE).2014:36:378-389.
- ②Peitek N, Siegmond J, Apel S, Kastner C, Parnin C, Bethmann A, Leich T, Saake G, Brechmann A. A look into programmers’ heads. IEEE TransSoftw Eng. 2020:46(4):442-462.
- ③Ikutani Y, Kubo T, Nishida S, Hata H, Matsumoto K, Ikeda K, Nishimoto S. Expert programmers have fine-tuned cortical representations of sourcecode. *eNeuro*. 2021:8(1):1-16.
- ④Ikutani Y, Uwano H. Brain activity measurement during programcomprehension with NIRS. Int J Netw Distrib Comput. 2014:2:259-268.
- ⑤Ivanova AA, Srikant S, Sueoka Y, Kean HH, Dhamala R, O’ Reilly UM, Bers MU, Fedorenko E. Comprehension of computer code relies primarilyon domain-general executive brain regions. *eLife*. 2020:9:e58906.
- ⑥Zatorre RJ, Fields RD, Johansen-Berg H. Plasticity in gray and white : euroimagingchanges in brain structure during learning. Nat Neurosci.2012:15:528-536.
- ⑦Hosoda C, Tanaka K, Nariai T, Honda M, Hanakawa T. Dynamic neuralnetwork reorganization associated with second language vocabularyacquisition: a multimodal imaging study. J Neurosci. 2013:33(34):13663-13672.
- ⑧Hosoda C, Tsujimoto S, Tatekawa M, Honda M, Osu R, Hanakawa T. Plastic frontal pole cortex structure related to individual persistence for goalachievement. *Commun Biol*. 2020:3(1):194.
- ⑨Burgess PW, Scott SK, Frith CD. The role of the rostral frontal cortex (area10) in prospective memory: a lateral versus medial dissociation.*Neuropsychologia*. 2003:41(8):906-918.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hongo Takeshi, Yakou Takao, Yoshinaga Kenji, Kano Toshiharu, Miyazaki Michiko, Hanakawa Takashi	4. 巻 33
2. 論文標題 Structural neuroplasticity in computer programming beginners	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 5375 ~ 5381
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/cercor/bhac425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Hishikawa, Kenji Yoshinaga, Hiroki Togo, Takeshi Hongo, Takashi Hanakawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Changes in functional brain activity patterns associated with computer programming learning in novices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Brain Structure and Function	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21203/rs.3.rs-2239916/v1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本郷健、八高隆雄、吉永健二、鹿野利春、宮崎美智子、米山泰夫、花川隆
2. 発表標題 プログラミングの学習が神経可塑的变化に与える影響（続報）
3. 学会等名 日本教育情報学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本郷 健,八高 隆雄,沼澤 秀,鹿野 利春,宮崎 美智子,米山 泰夫,花川 隆
2. 発表標題 プログラミングの学習が神経可塑的变化に与える基礎的研究
3. 学会等名 日本教育情報学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本郷 健、八高 隆雄、沼澤 秀、鹿野 利春、宮崎 美智子、米山 泰夫、花川 隆
2. 発表標題 コンピュータプログラミングの学習と神経可塑的变化
3. 学会等名 日本生理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本郷 健、八高 隆雄、鹿野 利春
2. 発表標題 プログラミング学習の進展に対するアンケートと脳灰白質容積の可塑的变化 からの考察
3. 学会等名 日本情報科教育学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本郷健、八高隆雄、吉永健二、鹿野利春、宮崎美智子、花川隆
2. 発表標題 プログラミング学習に対する自己認識と脳灰白質容積の可塑的变化の分析
3. 学会等名 日本教育情報学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	鹿野 利春	京都精華大学・メディア表現学部・教授	
	(Kano Toshiharu)		
	(20770168)	(34317)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------