

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24531169

研究課題名(和文) 異学習環境下での数学的処理の神経基盤とその可塑性機序の解明

研究課題名(英文) Investigation of experience-dependent plasticity of adaptive neural systems related to mathematical processing

研究代表者

矢田部 清美 (Yatabe, Kiyomi)

慶應義塾大学・先導研究センター・助教

研究者番号：90455410

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：数学的処理には頭頂間溝といった特定の脳部位が関与していることが知られている。本研究では発達やトレーニングなどによる課題の遂行能力の向上に他のどの脳部位が関与しているのかを検討した。心理学的検査や近赤外分光法や磁気共鳴画像法を用いた脳画像検査により、処理が定着した被験者群では前頭-頭頂および大脳皮質-基底核回路での形態的および機能的変化がみられた。これらの結果よりこうした部位も数学的処理を用いた課題遂行に関与していることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：A substantial body of evidence suggests that there is a common brain area, such as the intraparietal sulcus, which consistently activates during mathematical processing across tasks and subjects. We have attempted to determine which other brain areas, if any, are affected by development in and training of mathematical reasoning, and have found morphological and functional changes in the fronto-parietal and cortico-basal ganglia circuits of participants, using psychological and brain measurements involving near-infrared spectroscopy and magnetic reasoning imaging.

研究分野：発達心理学

キーワード：数学的処理 近赤外線分光法 核磁気共鳴画像法

1. 研究開始当初の背景

数学的処理をどのような神経基盤が支えているのかということは古くから興味を持たれてきた。最近になり、広く課題間や個人間に関わらず、頭頂間溝といった特定の脳部位が関与していることが脳画像検査法などで明らかになってきている。しかし一方、問題解決の戦略や被験者の言語使用などにより関与する脳部位が異なるとの報告もなされている。数学的課題の遂行能力の向上が個人の最終的な目標だとすると、こうした数学的課題の問題解決に関わる脳部位への発達やトレーニング・経験による影響がどのようなのか検討する必要があると考えた。

なお、研究代表者の機関変更に伴い、研究環境が変わり、研究計画当初予定していた実験計画を修正せざるを得なかった。しかし、数学的処理といった高次脳機能を必要とする問題解決に対し、経験差のある個人間・課題間における行動的及び生理的反応の差異を検討することについて、言語環境などの異なる被験者群を検査することに代わり、年齢など発達の異なる被験者群を検査することで、目標をおおむね達成することができた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、数学的処理といった高次脳機能を必要とする問題解決・スキル獲得に対する神経基盤とその可塑性機序を明らかにすることである。上述のように、従来数学的処理には特定の認知モジュールが機能していることが知られている。本研究では数学的処理に他の言語・感覚運動処理等にも広く用いられる認知モジュールも関与しているのか、それらに経験や発達の違いが影響するのかを検討した。

3. 研究の方法

本研究では、ヒトを対象として、クロス・セクション分析（横断分析・共時的分析）とコホート分析（時系列分析・通時的分析）の双方を検討した。

それぞれの分析法において、心理学的検査と生理学的検査を実施した。生理学的検査において、核磁気共鳴画像法と近赤外線分光法をそれぞれ用いた。それぞれの分析法において、数学的処理といった高次脳機能処理で、言語・感覚運動処理等にも広く用いられる認知モジュールが関与する可能性を考慮し（主な発表論文等 [2] [11] 等参照）、言語・感覚運動野を含む全脳分析を行った。

核磁気共鳴画像法では、共同研究者の確立した脳の可塑性を測るための実験手法（主な発表論文等 [1] [9] [12] 等参照）を用

いた。課題前後の脳構造画像を取得し、各脳部位の脳構造指標を算出した。近赤外線分光法では、研究代表者が加わった乳幼児を対象とした検査で有効性の確認できた光信号取得法（主な発表論文等 [10] 等参照）を参考に、課題を解いている最中の参加者の脳表に照射した光をおよそ三センチメートル離れた脳表で取得した。Beer-Lambert 公式によって得られた光信号を変換した値を該脳部位の血流変化指標とした。核磁気共鳴画像法で使用する機器環境による参加者への心身の負担を考慮し、若年層を含む参加者群の評価は、すでに乳幼児・小児実験などでその検査の有効性が確認できている近赤外線分光法で行った。

本研究は研究代表者および研究分担者の所属組織の倫理委員会の承認を得て行った。参加者および参加者が未成年者の場合にはその保護者にも事前説明を行い、同意を得て、参加を開始した。データについては個人を特定できないよう配慮した。

4. 研究成果

(1) クロス・セクション分析（横断分析・共時的分析）

- ① 問題解決を図り問題空間内を探索するオンラインゲーム（Hanoi の塔課題）における成人（健常大学生 61 名）の意思決定行動と核磁気共鳴画像法による脳構造画像検査結果の関係を分析した。その結果、課題遂行を終えることができた参加者（課題完遂者）では、課題遂行を終えることが出来ず途中でリタイヤしてしまった参加者（辞退者）よりも大脳基底核の一部である両側の尾状核の体積が有意に発達していることがわかった ($p < 0.01$) (図 1 参照)。これらの差は事前に測った参加者のやる気度や知能指数では説明できないものであった。

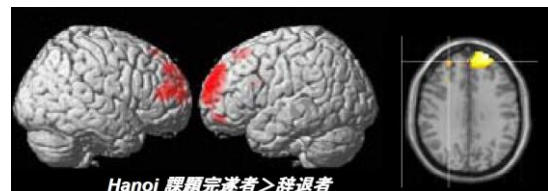


図 1

- ② 推論課題における児童期群（健常小学生 12 名）・思春期群（健常中高生 12 名）・成人期群（健常大学生 12 名）の行動と近赤外線分光法による脳血流動態検査結果の関係を分析した。その結果、三群の成績は有意に年齢の高い群が高く、最も成績のよい成人期群では他の群に比較して両

側の前頭前野皮質—下頭頂葉間 (PFC-IPL)の脳機能結合が有意に高いことがわかった(FDR corrected < 0.05) (図 2 参照)。

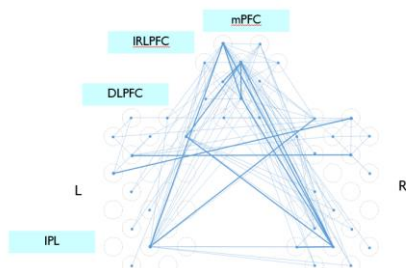


図 2

(2) コホート分析 (時系列分析・通時的分析)

- ① 数系列記憶学習における成人の行動と核磁気共鳴画像法による脳構造画像検査結果の関係を学習期間の前後で分析した。まず、成人 (健常大学生 40 名) を対象に、2 ヶ月の系列記憶学習を行った。被験者が覚えた数系列は 2 ヶ月で平均 330 個 (SD ±32) だった。その結果、学習群では学習前後の脳構造を比較すると右半球の運動野 (ブロードマン 6 野) および左半球の上側頭回 (Superior temporal gyrus) の灰白室体積が学習後に有意に発達していることが明らかになった。また、同数系列記憶課題の課題遂行をより容易にするために、成人 (健常大学生 41 名) を対象に、頻繁に報酬を与えながらの学習を 5 週間行った。全被験者について、学習前後に脳構造・安静時脳機能結合 MRI (rsfMRI) データを取得した。全目標達成者で、学習前に比べて学習後には運動前野の灰白質体積が発達し運動前野近傍の拡散異方性があがっていた。次に学習前後の脳構造変化を群間で比較してみた結果、頻繁に報酬を受けた群の課題完遂者では、統制群に比べて、運動前野に加え、前頭極 (frontopolar ブロードマン 10 野 BA10) の灰白質の体積が有意に発達していた。さらに、rsfMRI 解析においても、統制群に比べ頻繁に報酬を受けた群では、学習後に側坐核と運動前野・前頭極・後部帯状回の機能的結合が有意に上昇していた (図 3 参照)。また、probabilistic tractography 法を用いて基底核と前頭極を結ぶ解剖的結合連結強度について検討した結果においても、頻繁に報酬を受けた群において統制群より、基底核-前頭極の連結強度が有意に発達していた (図 4 参照)。

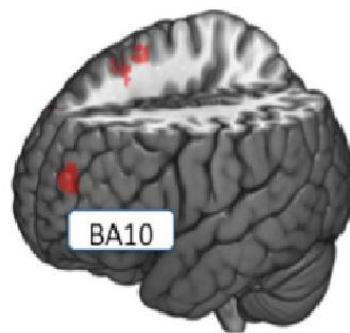


図 3

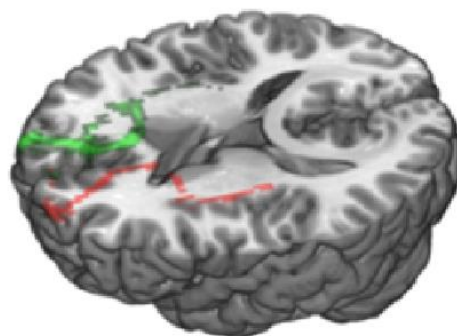


図 4

- ② 推論課題における児童期群 (健常小学生 12 名)・思春期群 (健常中高生 12 名)・成人期群 (健常大学生 14 名) の行動と近赤外線分光法による脳血流動態検査結果の関係を学習期間の前後で分析した。その結果、学習群 (trained) では統制群 (control) より前頭—頭頂の機能的結合が高くなっていった (図 5 参照)。また、課題応答時間が早い参加者ほど前頭—頭頂の機能的結合が有意に高くなっていった (図 6 参照)。

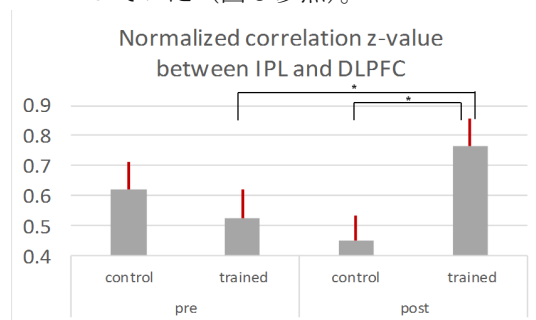


図 5

これら複数の実験結果から、数学的処理に他の言語・感覚運動処理等にも広く用いられる認知モジュールも関与していること (認知統制 cognitive control)、また行動や生理的反応にみられるそれらモジュールの関与は学習や経験により変化しうることが示唆された。さらに処理が定着した被験者群では前頭

一頭頂および大脳皮質－基底核回路での形態的および機能的変化がみられた。これらの結果よりこうした部位も数学的処理の遂行に関与していることが示唆された。

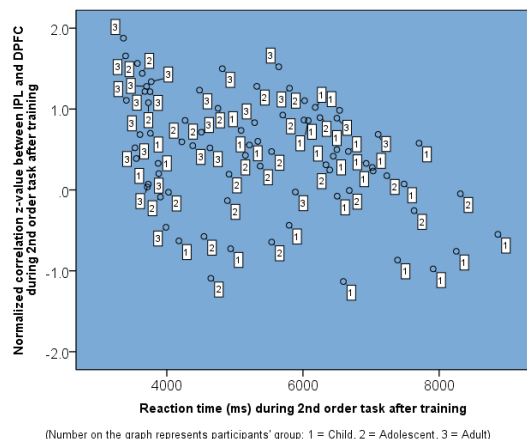


図 6

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

[1]

著者名: Hosoda, C., Tanaka, K., Nariai, T., Honda, M., & Hanakawa, T.

発行年 (西暦): 2013

論文標題: Dynamic neural network reorganization associated with second language vocabulary acquisition: A multimodal imaging study.

雑誌名: The Journal of Neuroscience

巻: 33

ページ: 13663-13672.

査読の有無: 有

[2]

著者名: Yatabe, K., Inagaki, M., & Watanabe, K.

発行年 (西暦): 2012

論文標題: Motor cortical beta oscillations are modulated by mastery of observed handwritings.

雑誌名: Kasei Engineering International Journal

巻: 11

ページ: 225-233.

査読の有無: 有

[学会発表] (計 13 件)

[1]

発表者名: 矢田部清美, 星野英一, 直井望, 山田玲子, 皆川泰代.

発表標題: 児童期から青年期にかけての前頭葉機能発達: 近赤外線分光法による研究

学会等名: 公開シンポジウム「論理と感性の

新たな学際研究に向けて」

発表年月日: 2015 年 2 月 1 日

発表場所: 慶應義塾大学 (東京・港区)

[2]

発表者名: Yatabe, K.

発表標題: Maturation cerebral hemodynamic changes in prefront-parietal regions used in relational reasoning among participants from late childhood to young adulthood.

学会等名: Logical Inference and Proofs

Franco-Japanese Workshop

発表年月日: 2015 年 1 月 12 日

発表場所: Keio University (Tokyo, Minato-ku)

[3]

発表者名: 細田千尋, 花川隆, 本田学, 岡ノ谷一夫, 大須理英子.

発表標題: 脱三日坊主: 基底核・前頭極の機能・解剖的結合を強化する学習法

学会等名: 包括脳ネットワーク 冬のシンポジウム

発表年月日: 2014 年 12 月 12 日

発表場所: ホテルガーデンパレス (東京, 文京区)

[4]

発表者名: Yatabe, K., Hoshino, E., & Minagawa, Y.

発表標題: Maturation cerebral hemodynamic changes in prefront-parietal regions used in relational reasoning among participants from late childhood to young adulthood.

学会等名: 2014 International Symposium Vision, Memory, Thought: How Cognition Emerges from Neural Network

発表年月日: 2014 年 12 月 6 日

発表場所: The University of Tokyo (Tokyo, Bunkyo-ku)

[5]

発表者名: Hosoda, C., Okanoya, K, Honda, M., Osu, R., & Hanakawa, T.

発表標題: Dynamic neural network reorganization associated with improvement of prospective metacognition.

学会等名: The 44th Annual Meetings for Society for Neuroscience

発表年月日: 2014 年 11 月 15 日

発表場所: Washington DC (U.S.A.)

[6]

発表者名: Yatabe, K., Hoshino, E., Akahane-Yamada, R., Naoi, N., & Minagawa, Y.

発表標題: Learning-induced cerebral hemodynamic changes during non-native

phonemic category processing in relation to maturation from late childhood to young adulthood.

学会等名: The 37th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society

発表年月日: 2014年9月13日

発表場所: Pacifico Yokohama Convention Center (Kanagawa, Yokohama)

[7]

発表者名: Yatabe, K., Hoshino, E., Akahane-Yamada, R., Naoi, N., & Minagawa, Y.

発表標題: Correlations in hemodynamic fluctuations between cortical regions during non-native phonemic category processing among participants from late childhood to young adulthood.

学会等名: The 20th Annual Meetings of Architectures and Mechanisms for Language Processing

発表年月日: 2014年9月5日

発表場所: Edinburgh (U.K.)

[8]

発表者名: Yatabe, K.

発表標題: Häodynamische Veränderungen im fronto-parietalen Netzwerk bei Kindern und Jugendlichen: Ergebnisse einer funktionellen Bildgebungsstudie mit Nahinfrarotspektroskopie.

学会等名: Seminar at UniClinic for Pediatric and Adolescent Psychiatry, Psychosomatics, and Psychotherapy.

発表年月日: 2014年9月1日

発表場所: Aachen (Germany)

[9]

発表者名: Hosoda, C., Tanaka, K., Tatekawa, M., Honda, M., Osu, R., & Hanakawa, T.

発表標題: Neural substrate of making it through the goal.

学会等名: The 43rd Annual Meetings for Society for Neuroscience

発表年月日: 2013年11月11日

発表場所: San Diego (U.S.A.)

[10]

発表者名: Minagawa, Y., Hoshino, E., Yatabe, K., Imafuku, M., Sato, H., Yoshimura, M. & Maki, A.

発表標題: Emergence of prefrontal function engaging in self-referential vs. external-focused attention in 5-6 month-old infants.

学会等名: The 36th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society

発表年月日: 2013年6月21日

発表場所: Pacifico Yokohama Convention Center (Kanagawa, Yokohama)

[11]

発表者名: Yatabe, K., Hosoda, C., Watanabe, K., & Hanakawa, T.

発表標題: Mastery of action shapes our visual recognition.

学会等名: The Cognitive Neuroscience Society 20th Annual Meeting

発表年月日: 2013年4月16日

発表場所: San Francisco (U.S.A.)

[12]

発表者名: Hosoda, C., Tanaka, K., Osu, R., Honda, M., & Hanakawa, T.

発表標題: The More / Less, the More / Less Brain Structure.

学会等名: The 42nd Annual Meetings for Society for Neuroscience

発表年月日: 2012年10月14日

発表場所: New Orleans (U.S.A.)

[13]

発表者名: Yatabe, K., Inagaki, M., & Watanabe, K.

発表標題: Retrieval of Representations of Mathematical Facts Shaped by Education.

学会等名: The Fourth Asian Conference of Education

発表年月日: 2012年10月12日

発表場所: Ramada Hotel (Osaka, Kita-ku)

〔図書〕 (計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢田部 清美 (YATABE, Kiyomi)
慶應義塾大学・先導研究センター・特任助教
研究者番号：90455410

(2) 研究分担者

細田 千尋 (HOSODA, Chihiro)
東京大学・総合文化研究科・研究員
研究者番号：20578976

(3) 連携研究者

なし