

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871252

研究課題名(和文) 数学認知と神経基盤を共有する高次認知機能の学習効果

研究課題名(英文) Learning effects on math and high cognitive functions sharing the same neural substrate

研究代表者

丸山 雅紀 (Maruyama, Masaki)

大阪大学・免疫学フロンティア研究センター・特任助教

研究者番号：70443033

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)：数学能力と神経基盤を共有する認知機能を示すために、日常で得られる経験学習の差異で生じる個人差に着目し、数感覚と、痛覚などの認知課題を20名の健常成人に遂行させ、収集した行動データの相関を調べた。簡易的な解析を行った結果、数感覚と有意に正の相関を示す認知課題は得られなかった。今後、高度な解析の導入や被験者数の追加などにより統計解析の精度を高め、更に検証を進める。

学習課題を遂行させて計算式の文法認知を強化または弱体化させ、その効果の言語機能への汎化も調べた。16名の健常成人が実験に参加し、課題成績の上昇が確認された。今後、学習課題の前後に収集した言語機能のデータを比較し、学習効果の汎化を検証する。

研究成果の概要(英文)：This study probed cognitive functions that share a neural substrate with the human math abilities. Brain functions that are distinguished from each other but have a common neural substrate can show a positive correlation in behavioral performances. In this study, behavioral performances of a number comparison and other cognitive tasks were measured from 20 subjects. Preliminary analyses did not find any significant positive correlation among the tasks across the subjects. Further examinations on the correlation are going to be conducted with high statistical sensitivity, using more accurate analytic methods and more subjects' data.

Generalization of math training effect to linguistic skill was also investigated. This study has successfully developed a training task related to syntax of mathematical expressions. Behavioral and fMRI data acquired before and after the training are going to be analyzed to examine a generalization of the effect to linguistic cognition.

研究分野：認知神経科学

キーワード：学習 文法 言語 計算式 痛覚 認知

### 1. 研究開始当初の背景

現代において、複雑な算術思考を視覚的に小さくまとめて表現できる数式の表記方法が広く普及しているが、歴史的にはかつて、主に言語で表現されていたことが知られている。更に、言語と数式の文法構造は共に木構造で示せるので、言語の文法構造の認知に寄与する神経基盤は、数式文法の認知にも利用されていると一般的に考えられていた。事実、その仮説を支持するように、言語の文法理解を担う中心的脳領野の一つであるブローカー野において、数式文法認知に関連した脳活動が報告されている(1)。一方、Maruyamaら(2012)は簡単な計算式を被験者に呈示し、その文法構造に対応して大きく変化する脳活動は視覚野で生じ、言語の脳領野からは僅かであることを示した(2)。Maruyamaらの報告以後、数式文法の認知に対する、言語野以外の脳領野の寄与についての関心が高まったが、数学の脳機能とその他の認知機能との関連についての知見は不十分であった。

#### [引用文献]

(1) Friedrich, R., Friederici, A.D., 2009. Mathematical logic in the human brain: syntax. PLoS One, 4, e5599.

(2) Maruyama M., Pallier C., Jobert A., Sigman M., Dehaene S. 2012. The cortical representation of simple mathematical expressions. NeuroImage, 61, 1444-1460.

### 2. 研究の目的

数学能力と神経基盤を共有する認知機能を明らかにする。その目的を達成するため、学習などによる、数学能力の神経基盤の変容が他の認知機能に与える影響を、以下の取り組みで検証する。

#### (1) 個人差に基づく検証

日常経験による学習が一因となり自然に生じる個人差に基づき、数学の課題成績と相関する認知機能を探索する。

#### (2) 学習効果に基づく検証

実験的手法を用いて数式に関わる学習を被験者に遂行させ、他の認知機能への学習効果の汎化を検証し、神経基盤の共有について明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 個人差に基づく検証

数学の基礎的能力の一つである数感覚と、情動、視覚的アウェアネスならびに痛覚強度との神経基盤の共有性について検証した。

数感覚を計測する実験では、被験者に報酬と損失の金額を数字で同時に呈示し、数の大小を比較して、その提案を受諾または拒絶を選択する、二肢強制選択課題を与えた。被験者は2つのボタンを押し分けて回答し、ボタン押しの選択と反応時間の行動データを収集した。また、情動の神経基盤との共有性を検証するために、被験者が受諾を選んだ場合

の、獲得・損失金額を確率的に制御し、リスクの高い条件下での意思決定行動データも収集した。

視覚的アウェアネスの計測では、数字画像を16 ms間呈示し、0~90 msの時間が経過した後に、マスキング画像を200 ms間呈示した。被験者には、数字の見えの有無を回答する二肢強制選択課題を遂行させ、その行動データを収集した。

痛覚強度の計測では、皮膚通電刺激を用いて、皮膚上の異なる2点に痛覚を発生させ、強い方の刺激を2つのボタンを押し分けて報告する課題を被験者に遂行させた。

上記の4種類の行動実験(数感覚、情動、視覚的アウェアネス、痛覚)全てに二肢強制選択課題を使用したため、収集した行動データは課題間で容易に比較できる。行動データの解析には、ドリフト拡散モデル(DDM)を適用した。二肢強制選択課題における意思決定のDDMでは、時間積分された感覚などの入力信号が到達した境界と、到達に要した時間が、それぞれ選択と反応時間に対応する(図1)。

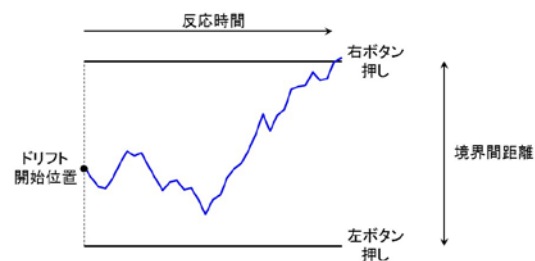


図1 左右のボタンを押し分けて意思決定する行動データに対応するドリフト拡散モデル。時間積分された信号(青線)が上または下の境界(太線)に到達すると、右または左のボタンが押される。

収集した行動データから、DDMのパラメータであるドリフト開始位置と、時間積分した信号のドリフト速度、ならびに境界間の距離を、各被験者・各課題に対して推定した。推定には階層型ベイズ手法を用いた。その手法は、被験者数が多く、被験者ごとのサンプル数が少ないデータに対して、より有効であることが知られている。

得られたDDMパラメータに対して、個人差に基づき、課題間で相関解析を行い、相関する課題の組み合わせを調べた。高い正の相関は、課題遂行に要する認知機能の間での、神経基盤の共有を示唆する。

#### (2) 学習効果に基づく検証

複数の演算の順位を示す、計算式の文法に関連した課題を被験者に遂行させ、課題の学習効果が言語文法の認知に与える影響を調べた。

学習課題では、4つの数字と、和・差・積の3つ演算記号、1組の開閉括弧で構成される計算式を被験者に呈示し[例:  $1 + 2 \times (3$

ー4) ]、一つだけ灰色で呈示された数字の位置が左右いずれの方向に偏位したかを回答させた。ここで、算数の初等教育に関する先行研究では、演算記号とその隣接する数字との距離が短く呈示されるほど、計算式の文法に従わず、その演算を優先してしまう児童の例が報告されている。本研究では、計算式の文法認知の強化を目指す課題において、灰色で呈示された数字の偏位が、優先順位の高い演算の演算記号の方向とする回答に対して、正解を意味する音のフィードバックと報酬金を与えた(順方向学習)。一方、文法認知の弱化を目指す課題では、優先順位の低い演算の演算記号の方向に灰色の数字が偏位していると回答した場合に、正解音と報酬金を与えた(逆方向学習)。いずれの学習でも、半分の試行において、数学記号は等間隔に呈示し(偏位なし)、残りの試行では、順方向学習では隣接する高順位の演算子の方向へ、逆方向学習では低順位の演算子の方向へ偏位させて呈示した。被験者には、灰色で呈示された数字の偏位方向を、左右のボタンを押し分けて必ず回答するよう指示した。全ての被験者は実験に2日参加し、順方向・逆方向の学習課題を異なる実験日に遂行した。

学習の効果を示すために、各実験日において、学習課題の前後に数学記号または文字の配列を呈示し、誘発された脳活動のデータを機能的MRIの計測手法で収集した。全ての配列は計9個の数学記号または文字で構成した。被験者には、以下の6種類の配列を呈示した。

- ① 数学記号が文法的に正しく並んだ計算式
- ② 文字が文法的に正しく並んだ言語文
- ③ 数学記号がランダムに並び、文法構造を全く持たない配列
- ④ 文字がランダムに並び、文法構造を全く持たない配列
- ⑤ 8個の数学記号と1個の文字が並んだ配列
- ⑥ 1個の数学記号と8個の文字が並んだ配列

①と③、②と④の比較により、言語と計算式の文法認知に関連した脳活動を検出する。また、学習課題の前後に計測した脳活動を比較し、学習の影響を検証する。計測中、呈示された配列に被験者が集中し続けるよう、①～④と⑤～⑥とを判別し2つのボタンを押し分ける課題を遂行させた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 個人差に基づく検証

20名の成人健常者からデータを収集した。被験者ごとに、それぞれの課題遂行時におけるDDMの境界間距離を推定し、課題間で相関解析を行った結果、有意な正の相関は得られなかった。また、数字あるいは電流値に対するドリフト速度の感度も、課題間で有意な正

の相関が得られなかった。一例として図2に、数比較課題と視覚的アウェアネス課題における境界間距離と、数感覚と痛覚に対するドリフト速度の感度の散布図と相関値を示す。

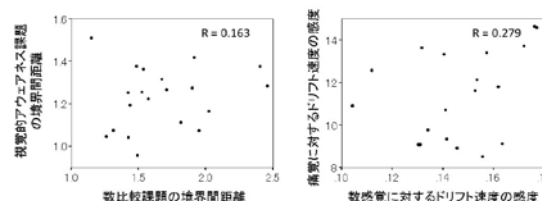


図2 境界間距離と、ドリフト速度の感度の散布図の一例。各点は、各被験者から推定されたDDMのパラメータを示す。散布図の右上の値は相関係数。

現在までに実施した簡便な解析からは、数感覚と視覚的アウェアネスならびに痛覚との間に共通の神経基盤が存在することを示唆する、有意な正の相関は得られていない。今後、収集した行動データに対するDDMの更なる最適化や、被験者数の追加などにより相関解析の統計的感度を高め、共通の神経基盤の有無について、検証の精度を高める。

##### (2) 学習効果に基づく検証

16名の被験者から行動データと機能的MRIデータを収集した。各日、被験者は休憩を挟みながら、5つのセッションに分割して学習課題を繰り返し遂行した。灰色で呈示された数字の知覚偏位方向に関する回答の行動データを解析した結果、セッションが進むに従って、順方向学習においては優先順位の高い演算子の方へ、逆方向学習においては低い順位の演算子の方へ、偏位して知覚される頻度が上昇したことが確認された(図3)。この結果は、本研究で開発した学習課題が、計算式における文法認知の強化と弱化に有効であることを支持している。また、順方向学習課題において、優先順位の高い演算子に数字を偏位して知覚した頻度が、逆方向学習課題において、優先順位の低い演算記号に偏位して知覚した頻度より高いことが判明した。先行研究では、演算子に対する数字の位置が計算式の文法認知に影響することが経験的に知られていたが、本研究は、文法認知が数字記号の知覚位置に影響することを明らかにした。

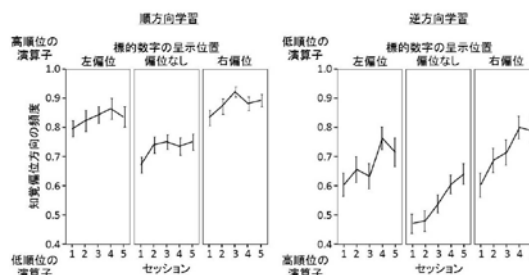


図3 順方向と逆方向の学習課題遂行時に

おける、計算式に含まれる灰色数字の知覚偏位方向の頻度。

計算式の文法の学習効果が確認されたので、今後は、学習課題前後に収集した行動データと機能的MRIデータを解析することにより、言語の文法認知への学習効果の汎化性を検証する。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) 丸山雅紀, 2014. ダイナミックな心の情報処理を眼球運動に基づき解読する, 電子情報通信学会技術研究報告, 114 (226) 43-48
- (2) 丸山雅紀, 2015. 数式を理解する脳の神経基盤, Clinical Neuroscience, 33, 936-938

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

丸山 雅紀 (MARUYAMA, Masaki)  
大阪大学・免疫学フロンティア研究センター・特任助教  
研究者番号：70443033