

令和 6 年 4 月 9 日現在

機関番号：32643

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K07718

研究課題名（和文）数学能力の神経基盤に関する定量的脳情報モデルの構築

研究課題名（英文）Quantitative Modeling for the Neural Basis of Mathematical Ability

研究代表者

中井 智也（Nakai, Tomoya）

帝京大学・先端総合研究機構・客員研究員

研究者番号：60781250

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）：本研究は、数学能力の認知神経基盤を複数の観点から明らかにした。まず、形式によらない数学演算の脳表現が演算子カテゴリーモデルにより得られることを示し、さらに人工ニューラルネットワークモデルによって数学課題中の脳活動を予測する定量モデルを構築した。続いてフランスとの国際共同研究により、5歳児および8歳児を対象とした発達脳機能データをもとに、数年の義務教育によって数処理に関する脳表現が変化することを明らかにした。続いて理論言語学を応用した学際共同研究を通じて、数式の統語構造を統一的に説明する理論を発表した。これらの成果はPLOS Biology誌をはじめとする複数の国際誌において掲載された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、近年発展が著しい人工知能技術と脳機能イメージング技術を融合させて数学能力に関するモデルを構築した世界初の成果である。また、数学は先端的な人工知能技術を理解するためには必要不可欠であり、数学能力の個人差の脳神経機序を理解することは、効率的な数学学習や計算障害の鑑別に役立つ可能性がある。特に本研究で明らかになった5歳児および8歳児の数処理の脳機能は、数学教育の初期段階において脳機能の変化を定量的に調べることができることを示している。このような発達脳機能データを人工知能技術と組み合わせることで、将来的により精度の高いモデル構築につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：In this project, we revealed the cognitive neural basis of mathematical ability from multiple perspectives. First, we showed that brain representations of format-independent mathematical operations can be obtained using categorical operator model, and brain activity during mathematical tasks was predicted using an artificial neural network model. Subsequently, through international collaboration with French researchers, we uncovered how brain representations related to number processing change with education based on the data from 5- and 8-year-old children. Furthermore, we applied theoretical linguistics to explain syntactic structures of mathematical expressions. These results have been published in several international journals, including PLOS Biology.

研究分野：認知神経科学

キーワード：fMRI 数学 人工ニューラルネットワーク 符号化モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

数学能力はヒトに特異的な能力であり、現代において科学技術の基盤をなす能力である。先行研究ではヒトの頭頂葉において特定の個数に選択的な応答が報告されており(Harvey, Science 2013)、ヒト頭頂葉において数処理能力に特化した部位が存在することを示唆している。しかしながら、ヒトが高度な数学能力を生み出す神経基盤は、これまでほとんど研究されてこなかった。

研究代表者はこれまでの研究において、ヒトの数学能力に関わる言語的要因に注目し、言語理論による分析を数式に適用することによって、従来言語能力に選択的な領野とされてきた下前頭回の数学能力への寄与を明らかにする研究を行ってきた(Nakai & Okanoya, Sci. Rep. 2018)。しかしこの方法では、複雑な認知機能である数学能力を計算モデルに落とし込むことが困難であった。そこで研究代表者は、数学に特化したニューラルネットワークをヒトの数学能力のモデルとして利用することにより、従来モデル化することが困難であった数学能力の神経基盤に関する定量的モデルを構築することを考えた。

### 2. 研究の目的

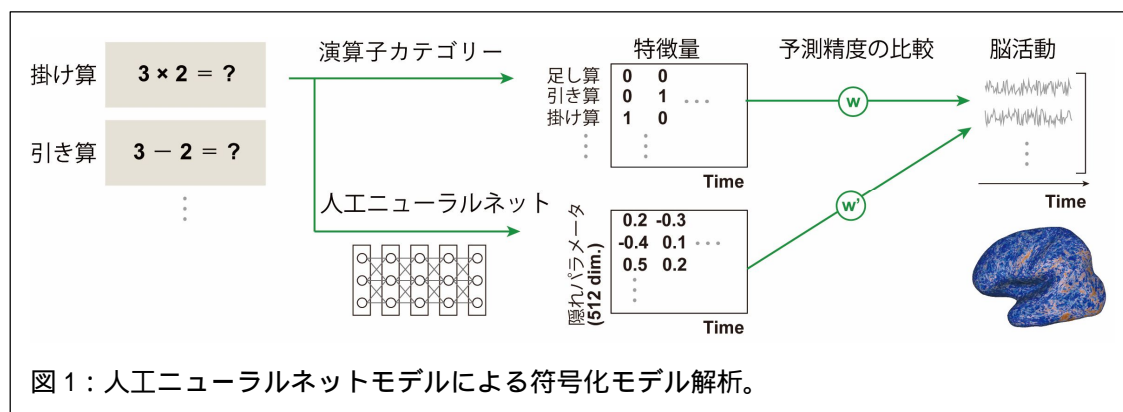
本研究は、ヒトの数学能力の神経基盤を、先端的な脳機能イメージング技術と人工知能技術を組み合わせることにより明らかにすることを目的とするものであった。人工知能技術の中でも、本研究では特に数学のニューラルネットワークモデルに焦点を当てた。

### 3. 研究の方法

(1)本研究では、数学に関わる脳活動を定量的に評価するために、人工ニューラルネットワークモデルを導入した。モデルとしては従来自然言語処理のために開発されたものを拡張した TP-Transformer を採用した。機能的時期共鳴画像法 (fMRI) 実験で呈示する数式を人工ニューラルネットワークモデルに入力することにより、数学能力に関連する特徴量を抽出した。人工ニューラルネットワークの各層における出力を特徴量として利用した。

8名の被験者を対象に、それぞれ3回のfMRI実験を実施した。課題として数学文章課題と数式課題を用意し、それぞれの課題について足し算、引き算、掛け算、割り算およびそれらを組み合わせた9種類の条件を用意した。機能的MRI画像をMultiband-EPI法により計測し、参照用解剖学的画像としてMPRAGE法による脳構造画像を計測した。実験はすべて情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センターにおいて実施した。

得られた脳活動データおよび、抽出した数学特徴量を用いて、特徴量と脳活動の関係を説明する符号化モデルを構築した(図1)。特徴量としては演算子を独立したカテゴリーとして想定した演算子特徴量、さらに人工ニューラルネットワークを利用した潜在特徴量を使用した。学習データに対する過適合を防ぐためにL2正則化つき線形回帰を用いた。構築した符号化モデルにより、学習に用いていない新規のデータについての予測精度を計算した。さらに学習によって得られた重み行列の可視化作業を行うことによって、人工ニューラルネットワークモデルの脳内表現を調査した。



(2)本研究では続いて、異なる年齢層における数学能力の脳機能まで研究対象を拡大し、フランス・リヨン神経科学研究センターのJerome Prado博士との国際共同研究を実施した。46名の8歳児と、43名の5歳児を対象として数量認知課題を行い、その際の脳活動をfMRIで測定した。刺激はドットパターンの非記号数量刺激とアラビア数字の記号数量刺激を用意した。各刺激について数量が一定の順応条件と数量が変化する非順応条件が存在し、脳活動からそれら2条件を分類するモデルをサポートベクトルマシンで構築した。

(3)さらに、数学能力のモデルとして理論と人工ニューラルネットワーク関連を調査するため、研究代表者は異分野との共同研究に着手した。理論言語学の見地から数式の統語構造を調べるため、

金沢星稜大学の松本大貴助教と共同研究を実施した。

#### 4. 研究成果

(1) カテゴリカルな演算子特徴量がどの程度脳活動を説明できるかを調べるために、数学文章課題と数式課題による脳活動データのモデル予測精度を比較した。どちらの課題についても、頭頂葉・前頭葉および後頭葉の広い範囲において脳活動を有意に予測することができた。また、数学文章課題のデータで構築したモデルが数式課題のデータを予測する(また、数式課題のデータで構築したモデルが数学文章課題のデータを予測する)形式間予測も成功した。さらに、得られた重み行列に対して主成分分析を実施したところ、特に左右頭頂間溝において数学文章課題と数式課題において類似した演算子の脳表現があることが判明した。この研究は *European Journal of Neuroscience* 誌から出版された (Nakai & Nishimoto, *Eur J Neurosci* 2023)。

続いて、数式課題のみに注目した解析により、人工ニューラルネットワークから抽出した潜在特徴量からカテゴリカル演算子特徴量と同様の精度で脳活動を予測できることを示した。演算子特徴量に基づく脳機能のマップを、潜在特徴量を利用することで再構成することができた。再構成精度は人工ニューラルネットワークのより深い層から抽出した特徴量ほど高くなることが明らかになった。さらに、潜在特徴量を利用することでモデル学習に利用していない新規の演算子について脳活動からデコーディングすることに成功した。これらの結果は人工ニューラルネットワークがヒト脳の数学機能に関するモデルとして有効であることを示している。この成果は *NeuroImage* 誌から出版された (Nakai & Nishimoto, *NeuroImage* 2023) (図2)。

(2) リヨン神経科学研究センターとの国際共同研究では、5歳児に関して、数量と数字データによって構築したモデル間で有意な形式間デコーディングが右下頭頂小葉において観測された。このような形式間デコーディングは8歳児では観測されなかった。この結果は、義務教育において数学学習に多くの時間を割く以前の段階においては数字と数量は類似した脳表現を持つが、数年間の義務教育後にはそれらの脳表現が分離していくことを示している。この成果は *PLOS Biology* 誌に掲載された (Nakai & Nishimoto, *PLOS Biol* 2023) (図3)。

(3) 本研究では理論言語学(統語論)において二重目的語構文の分析に使われる *Applicative* に注目し、足し算や掛け算を含む任意の2変数関数の表現が *Applicative* によって統一的に分析できる可能性を示した。また本研究は等号記号をコピュラとして、移項を内的併合として解釈する可能性も示した。本研究結果は、数学の統語処理に関する脳機能イメージング研究で仮定されていた構造に対して再考を促すものである。この成果は *Cognitive Psychology* 誌に出版された (Matsumoto & Nakai, *Cogn Psychol* 2023)。

今後の展望として、*PLOS Biology* 誌の研究で利用した発達脳機能データに対して符号化モデルを構築することで、数学能力に対する人工ニューラルネットワークモデルの有効性をより幅広い年齢層に対して検証する。また、*NeuroImage* 誌の研究で利用したモデル以外の幅広い人工ニューラルネットワークによる脳活動の予測精度を比較することにより、ヒト脳の数学能力表現に最も類似したモデルを調べる。また、*Cognitive Psychology* 誌で提案した理論研究を人工ニューラルネットワークモデルによる構成論的研究と接合することにより、学際的な見地から数学の脳機能を解釈することを目指す予定である。

#### <引用文献>

- Harvey, B. M., Klein, B. P., Petridou, N., & Dumoulin, S. O. (2013). *Science*, 341(6150), 1123-1126.
- Matsumoto, D., & Nakai, T. (2023). *Cognitive Psychology*, 146, 101606.
- Nakai, T., & Okanoya, K. (2018). *Scientific Reports*, 8(1), 12873.
- Nakai, T., & Nishimoto, S. (2023). *NeuroImage*, 270, 119980.
- Nakai, T., & Nishimoto, S. (2023). *European Journal of Neuroscience*, 57(6), 1003-1017.
- Nakai, T., Girard, C., Longo, L., Chesnokova, H., & Prado, J. (2023). *PLOS Biology*, 21(1), e3001935.

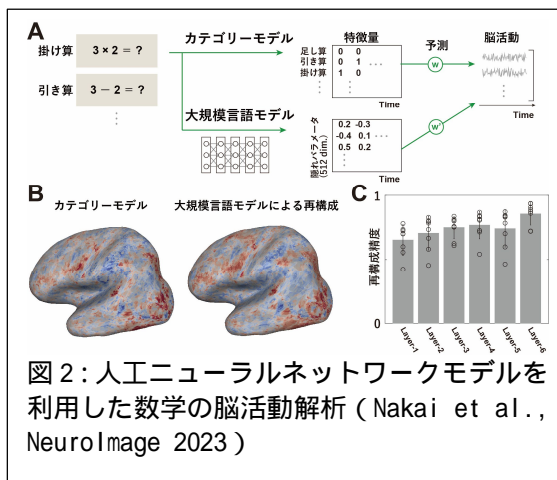


図2: 人工ニューラルネットワークモデルを利用した数学の脳活動解析 (Nakai et al., *NeuroImage* 2023)

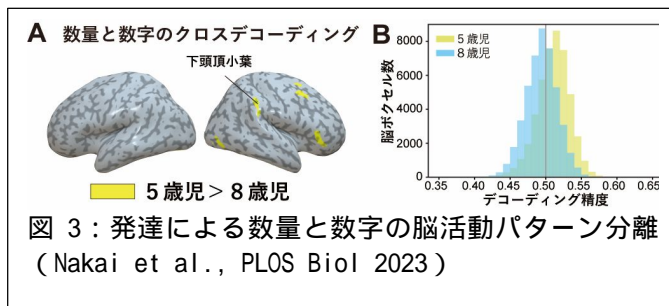


図3: 発達による数量と数字の脳活動パターン分離 (Nakai et al., *PLOS Biol* 2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Nakai Tomoya, Nishimoto Shinji	4. 巻 57
2. 論文標題 Quantitative modelling demonstrates format invariant representations of mathematical problems in the brain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 European Journal of Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1003 ~ 1017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ejn.15925	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakai Tomoya, Nishimoto Shinji	4. 巻 270
2. 論文標題 Artificial neural network modelling of the neural population code underlying mathematical operations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 119980 ~ 119980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2023.119980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakai Tomoya, Nishimoto Shinji	4. 巻 5
2. 論文標題 Representations and decodability of diverse cognitive functions are preserved across the human cortex, cerebellum, and subcortex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 1245 ~ 1245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-022-04221-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakai Tomoya, Girard Clea, Longo Lea, Chesnokova Hanna, Prado Jerome	4. 巻 21
2. 論文標題 Cortical representations of numbers and nonsymbolic quantities expand and segregate in children from 5 to 8 years of age	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PLOS Biology	6. 最初と最後の頁 e3001935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pbio.3001935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Cohen Dror, Nakai Tomoya, Nishimoto Shinji	4. 巻 256
2. 論文標題 Brain networks are decoupled from external stimuli during internal cognition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 119230 ~ 119230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2022.119230	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsumoto Daiki, Nakai Tomoya	4. 巻 -
2. 論文標題 Syntactic theory of mathematical expressions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PsyArXiv	6. 最初と最後の頁 1 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.31234/osf.io/87pmy	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Daiki Matsumoto, Tomoya Nakai	4. 巻 146
2. 論文標題 Syntactic theory of mathematical expressions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Cognitive Psychology	6. 最初と最後の頁 101606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cogpsych.2023.101606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Nakai, Jerome Prado	4. 巻 -
2. 論文標題 From brain to education through machine learning: Predicting literacy and numeracy skills from neuroimaging data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PsyArXiv	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) 10.31234/osf.io/fwyz	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomoya Nakai, Laura Rachman, Pablo Arias Sarah, Kazuo Okanoya, Jean-Julien Aucouturier	4. 巻 18
2. 論文標題 Algorithmic voice transformations reveal the phonological basis of language-familiarity effects in cross-cultural emotion judgments.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0285028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0285028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomoya Nakai, Rieko Kubo, Shinji Nishimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Cortical representational geometry of diverse tasks reveals subject-specific and subjectinvariant cognitive structures	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 bioRxiv	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) 10.1101/2024.01.26.577334	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Nakai Tomoya
2. 発表標題 Brain representations of symbolic and non-symbolic magnitudes become estranged over development
3. 学会等名 The Mathematical Cognition and Learning Society (MCLS) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakai Tomoya
2. 発表標題 Brain representations of symbolic and non-symbolic quantity become estranged with education: Evidence from between-format and between-age decoding
3. 学会等名 Flux 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中井智也
2. 発表標題 記号接地から記号分離へ 数学学習による記号と地の変化
3. 学会等名 コミュニケーション&人間とは何か? セミナーシリーズ 第7回セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoya Nakai
2. 発表標題 Computational approach to brain mechanisms of mathematical cognition
3. 学会等名 LaPsyDE; Scientific Focus (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoya Nakai, Rieko Kubo, Shinji Nishimoto
2. 発表標題 Subject-invariant structures of multitask representations in the association cortices
3. 学会等名 第7回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoya Nakai, Shinji Nishimoto
2. 発表標題 Exploring the neural population code of mathematical thought: insights from distributed representations in artificial neural networks
3. 学会等名 第33回日本神経回路学会全国大会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------