

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04433

研究課題名（和文）刺激選択性の起源：新奇視覚カテゴリ獲得に伴う神経 行動連関の縦断的变化の解明

研究課題名（英文）The origin of stimulus selectivity: Longitudinal brain development during the acquisition of novel visual category

研究代表者

松吉 大輔 (Daisuke, Matsuyoshi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子生命科学研究所・研究員

研究者番号：70547017

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：高次視覚カテゴリは、脳の異なる領域で選択的に処理されている。しかし、それらの活動を即時的に調べるだけでは「そもそも視覚カテゴリ選択性はどのようにして獲得されたのか」という根本的な問いには答えられない。そこで本研究はこの脳の刺激選択性の起源を明らかにするため、長期間学習による新奇視覚カテゴリの獲得過程をMRIと行動の縦断的測定によって検討した。その結果、マクロ脳構造レベルでは変化がないものの、ミクロ脳機能・構造レベルでは学習による神経系の再組織化・変化が生じる可能性が示された。新奇な高次視覚カテゴリ獲得過程において、脳は構造・機能の両面で変化することで、効率的な心的処理を支えていると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新奇な高次視覚カテゴリが獲得される脳・行動メカニズムの一端が解明されることは、刺激選択性という脳の根本的動作原理の理解を促進する。カテゴリカルに処理することは一見するとステレオタイプな処理・反応を促すことを意味するようであり、望ましくない反応形成のようにも感じられる。しかし、ヒトの脳・認知は全てのモノを細部に渡って処理できるほどの能力を有していない。そのため、カテゴリを形成してそのカテゴリにおける平均的な特性を脳内に保持しておくことで、効率的な処理が可能になると考えられる。従って、ヒトのカテゴリ獲得過程の研究には、ヒトの効率的な認知・脳処理の鍵が隠れていると考えられ、さらなる研究が望まれる。

研究成果の概要（英文）：Higher-order visual categories are selectively processed in different regions of the brain. However, immediate examination of these activities alone does not answer the fundamental question, “How was visual category selectivity acquired in the first place? To elucidate the origin of stimulus selectivity in the brain, we investigated the acquisition process of novel visual categories by long-term learning using MRI and longitudinal behavioral measurements. The results indicated that learning may cause reorganization and change of the neural system at the micro-brain functional and structural levels, although there is no change at the macro-brain structural level. During the process of acquiring novel higher-order visual categories, the brain is thought to undergo both structural and functional changes that support efficient mental processing.

Translated with DeepL.com (free version)

研究分野：認知神経科学

キーワード：刺激選択性 可塑性 高次視覚カテゴリ MRI 縦断研究

1. 研究開始当初の背景

高次視覚カテゴリの認識は、脳の異なる神経アーキテクチャによって担われていることが明らかになっている (Kanwisher et al., 1997; Grill-Spector et al., 2014)。それらは脳の後頭葉から側頭葉底面(腹側)にかけて存在しており、顔選択的領域は紡錘状回顔領域 (fusiform face area, FFA)、身体選択的領域は外線条身体領域 (extrastriate body area, EBA)、風景・場所選択的領域は海馬傍回場所領域 (parahippocampal place area, PPA)、文字選択的領域は視覚文字形態領域 (visual word form area, VWFA)、物体選択的領域は外側後頭複合体 (lateral occipital complex, LOC) とそれぞれ呼ばれている。

しかし、なぜ限られたカテゴリだけが脳に特別な場所を与えられたのだろうか? 「これらが進化的に意味のあるカテゴリだから」という理由でないことは、後天的にしか学習できない文字の選択的領域があることから明白である (Polk & Farah, 1998)。従って、全てのカテゴリではないにせよ、脳は経験によって選択的領域を構築可能なほどの可塑性を持つことが示唆される。新奇な視覚カテゴリの獲得過程を捉えることができれば、少なくとも「どのように」刺激選択性が生じたかを明らかにでき、脳に特別な場所が存在することの意味を理解できるかもしれない。

2. 研究の目的

本研究では高次視覚カテゴリにおける「刺激選択性の起源」を明らかにすることを目的に、長期的な学習による高次視覚カテゴリ獲得過程の縦断的行動・MRI 測定を行う。多くの既存の研究は、カテゴリ選択的領域の活動を指標として実験条件による変化を測定するばかりで、「その選択性がどのように獲得されたのか」という根本的な問いには全く答えていない。

そのため、本研究では 1) MRI と行動による 1 年以上の長期間の縦断的測定と、2) 機能(fMRI) と構造(拡散強調 MRI [dMRI]/構造 MRI [sMRI]) のマルチモーダル MRI 測定という学術的独自性の高い 2 点の方法によって、この問題の解決を試みる。

1 年以上の長期間の縦断的測定を行う理由は、長期的な学習を行わせることにより、視覚カテゴリの獲得が十分に担保されると考えられるためである。これまでの研究では、新奇な視覚物体 ('Greeble') の学習によって、単なる物体であるにも関わらず顔選択的領域である FFA の活動が上昇することが報告され、FFA が顔のみに限らない仔細な弁別に関与すると主張されている (Gauthier et al., 1999)。しかし、彼女らの研究ではたった数時間の学習をさせたのみであり、カテゴリが十分獲得されたとは言えない。事実、後の研究により FFA のみならず脳の様々な領域の活動が上昇していることが示され、FFA が積極的にその弁別に関与したというよりも、単に直前に学習した物体に対して高い注意状態にあっただけであると指摘されている (Kanwisher, 2017)。そこで本研究では、1 年以上に渡る長期的な学習を行わせることで、新奇な高次視覚カテゴリ獲得が十分に担保される状況を作り出す。そして学習期間中の縦断的測定により、神経 行動連関の可塑的变化を継時的に捉える。

機能と構造のマルチモーダル MRI 測定を行う理由は、単なる活動のみには留まらない、脳の構造レベルをも含めた可塑的变化を捉えるためである。最近の研究では、6 歳児において授業での学習に伴い文字選択的領域である VWFA の活動が上昇することが報告されている (Dehaene-Lambertz et al., 2018)。しかし、この研究でも他の領域 (FFA 等) の活動上昇が観察されている他、学習ではなく単に発達的变化を捉えているに過ぎない可能性も否定できず、視覚カテゴリ獲得に特異的な変化を捉えるには至っていない。また、十分な学習は神経系に構造上の変化を生じさせると考えられるが、fMRI のみでは可塑的变化を捉えることは難しい。従って本研究では、拡散強調 MRI (dMRI) ならびに構造 MRI (sMRI) を併用して神経系の構造的変化を継時的に捉えることで、視覚カテゴリ獲得に伴う脳の可塑的变化を機能と構造の両面で統合的に理解し、脳の視覚カテゴリ選択性の起源に迫る。

3. 研究の方法

本研究では特に、カテゴリ獲得の程度を行動指標として定量化可能な新奇文字カテゴリ獲得を行うため、ハングルの長期間学習を行った。ハングルは朝鮮半島で使用される文字であり、外国語として学習あるいは朝鮮半島文化に近い者でなければ読むことのできない新奇文字である。

視覚カテゴリ学習・獲得の行動指標には倒立効果を用いる。倒立効果とは、逆さま(倒立)で呈示された場合に、正立で呈示された時と比較して顕著に認識が難しくなる現象であり、特に顔において顕著に生じる (Yin, 1969)。他には文字やよく学習した物体などにおいても生じるが、一般的な物体に対しては生じない。例えば、車好きの人々では車画像の大きな倒立効果が生じるが、素人では殆ど倒立効果は生じない (Curby et al., 2009)。知識問題を用いるという考えもありえるが、それだけでは「視覚」カテゴリの獲得とは言えないため、この倒立効果(正立と倒立での行動成績の差分)を用いることで、視覚カテゴリがどの程度獲得されているかの客観的行動指標とすることができるだろう。

また、機能的 MRI (fMRI) 測定においては、申請者が既に行った倒立効果 fMRI 研究の生物物理学的モデリングを用い、単なる活動のみならず領域間の結合強度においても脳機能を捉える

(Matsuyoshi et al., 2015, J Neurosci)。また拡散強調 MRI (dMRI) と構造 MRI (sMRI) 測定との併用により、脳部位ごとの皮質厚や体積・表面積等のマクロ指標、神経線維走行や神経突起密度、ミエリン量等の脳微細構造のミクロ指標の取得により、構造レベルの可塑的变化を検討する。

4. 研究成果

コロナウイルス禍および新 MRI 機導入の影響により、検査を長期間に渡って中止せざるを得なかったため、大人数での検査から少人数での縦断測定に切り替えて検討を行った。最終結果については未公開であるため、本稿では支障のない範囲での公開に留める。論文データ・コードについては次の web サイトにて公開予定である。<https://github.com/dicent>

日本語を用いた文字ローカライザー fMRI 課題の予備実験の結果、VWFA-1 と VWFA-2 が頑健に賦活することを確認できたので (図 1)、本実験ではこの VWFA-1/2 を中心に、長期間学習に伴う脳の構造・機能的変化を捉えることとした。

脳のマクロ構造レベル (体積・皮質厚) では、加齢の影響を差し引くと学習に伴う大きな影響は見られなかった (図 2)。このことは、少なくとも母語に成熟した後の追加的な非母語の文字/言語学習においては、脳の大局的構造は殆ど変化しない可能性を示している。ただし、さらに長期間かつ十分に文化に浸透するという経験・学習は大局的構造にも影響を与える可能性は否定できない。一方、脳のミクロ構造レベル、機能的賦活・結合レベルにおいては、学習に伴う変化が確認できた。これらの結果は、ミクロレベルの脳構造・活動・結合の調節により文字という新奇な高次視覚カテゴリの獲得が行われていることを示唆している。今後は、各脳指標間及び行動との関係性を解析することで、高次視覚カテゴリ獲得の神経行動基盤のさらなる理解を深める。

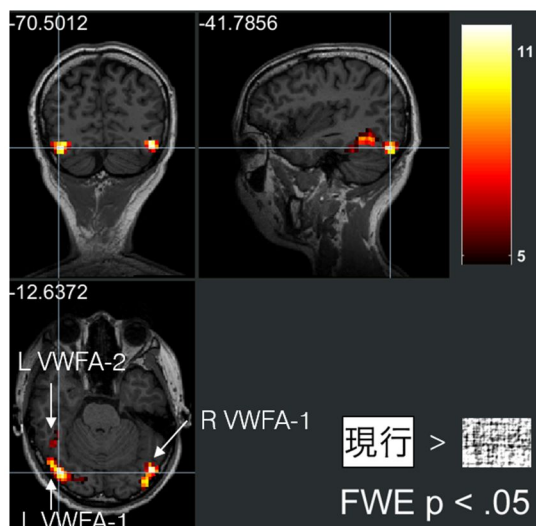


図 1 文字に選択的に反応する VWFA

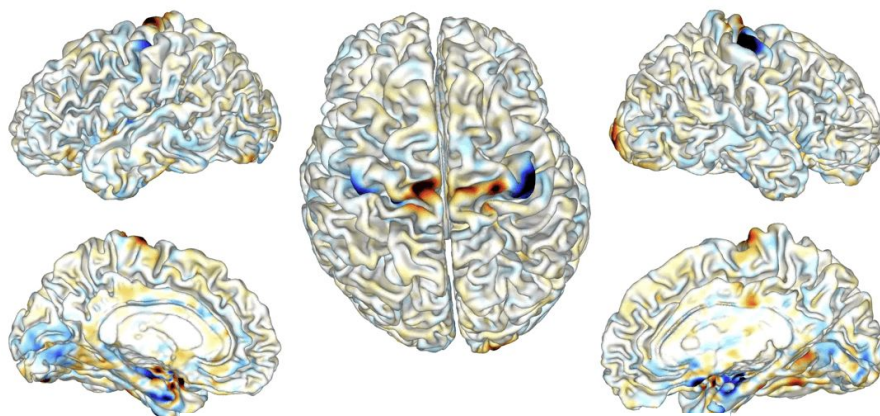


図 2 脳のマクロ構造レベルの変化

< 引用文献 >

- Curby KM, Glazek K, Gauthier I (2009) A visual short-term memory advantage for objects of expertise. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 35:94-107.
- Dehaene-Lambertz G, Monzalvo K, Dehaene S (2018) The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLoS Biol* 16:e2004103.
- Gauthier I, Tarr MJ, Anderson AW, Skudlarski P, Gore JC (1999) Activation of the middle fusiform 'face area' increases with expertise in recognizing novel objects. *Nat Neurosci* 2:568-573.
- Grill-Spector K, Weiner KS (2014) The functional architecture of the ventral temporal

- cortex and its role in categorization. *Nat Rev Neurosci* 15:536-548.
- Kanwisher N (2017) The quest for the FFA and where it led. *J Neurosci* 37:1056-1061.
- Kanwisher N, McDermott J, Chun MM (1997) The fusiform face area: A module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *J Neurosci* 17:4302-4311.
- Matsuyoshi D, Morita T, Kochiyama T, Tanabe HC, Sadato N, Kakigi R (2015) Dissociable cortical pathways for qualitative and quantitative mechanisms in the face inversion effect. *J Neurosci* 35:4268-4279.
- Polk TA, Farah MJ (1998) The neural development and organization of letter recognition: Evidence from functional neuroimaging, computational modeling, and behavioral studies. *Proc Natl Acad Sci USA* 95:847-852.
- Yin RK (1969) Looking at upside-down faces. *J Exp Psychol* 81:141-145.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Fujimoto Yuka, Fujino Junya, Matsuyoshi Daisuke, Jitoku Daisuke, Kobayashi Nanase, Qian Chenyu, Okuzumi Shoko, Tei Shisei, Tamura Takehiro, Ueno Takefumi, Yamada Makiko, Takahashi Hidehiko	4. 巻 467
2. 論文標題 Neural responses to gaming content on social media in young adults	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Behavioural Brain Research	6. 最初と最後の頁 115004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbr.2024.115004	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 Matsuyoshi Daisuke, Isato Ayako, Yamada Makiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Overlapping yet dissociable contributions of superiority illusion features to Ponzo illusion strength and metacognitive performance	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 BMC Psychology	6. 最初と最後の頁 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40359-024-01625-9	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 Jitoku Daisuke, Kobayashi Nanase, Fujimoto Yuka, Qian Chenyu, Okuzumi Shoko, Tei Shisei, Matsuyoshi Daisuke, Tamura Takehiro, Takahashi Hidehiko, Ueno Takefumi, Yamada Makiko, Fujino Junya	4. 巻 15
2. 論文標題 Explicit and implicit effects of gaming content on social media on the behavior of young adults	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 1332462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpsyg.2024.1332462	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 Son Shuraku, Arai Makoto, Toriumi Kazuya, Andica Christina, Matsuyoshi Daisuke, Kamagata Koji, Aoki Shigeki, Kawashima Takahiko, Kochiyama Takanori, Okada Tomohisa, Fushimi Yasutaka, Nakamoto Yuji, Kobayashi Yuko, Murai Toshiya, Itokawa Masanari, Miyata Jun	4. 巻 13
2. 論文標題 Association between enhanced carbonyl stress and decreased apparent axonal density in schizophrenia by multimodal white matter imaging	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-39379-w	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 Matsuyoshi Daisuke, Watanabe Katsumi	4. 巻 -
2. 論文標題 People have modest, not good, insight into their face recognition ability: a comparison between self-report questionnaires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Psychological Research	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) 10.1007/s00426-020-01355-8	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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 1. 佐原慈佳・山田真希子・平野好幸・松吉大輔・西村春輝・相澤裕紀・八幡憲明・清水栄司・小島隆行
2. 発表標題 前夜の睡眠の質が翌日のサリエンスネットワークやデフォルトモードネットワークに及ぼす影響
3. 学会等名 第101回日本生理学会大会, 北九州国際会議場 (福岡県北九州市)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 2. 佐原慈佳・山田真希子・平野好幸・松吉大輔・西村春輝・相澤裕紀・八幡憲明・清水栄司・小島隆行
2. 発表標題 前夜の睡眠の質と翌日のfMRIとの関連性
3. 学会等名 第51回日本磁気共鳴医学会大会, 軽井沢プリンスホテルウエスト (長野県北佐久郡軽井沢町)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 1. 佐原慈佳・小島隆行・平野好幸・松吉大輔・西村春輝・相澤裕紀・山田真希子・清水栄司
2. 発表標題 fMRIなどから得られる脳機能評価に対する直前の睡眠の質の影響
3. 学会等名 第48回日本脳科学学会, 浜松市地域情報センター (静岡県浜松市)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 1.Suzuki, T., Matsuyoshi, D., & Watanabe, K.
2. 発表標題 Correlations among geometrical illusions dissociate length illusions from size illusions
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV 2019), Osaka, Japan. (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 松吉大輔	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 500
3. 書名 日本視覚学会編「視覚の事典」(分担執筆「視覚的記憶」)	

1. 著者名 松吉大輔	4. 発行年 2022年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 500
3. 書名 日本神経科学学会編「脳科学辞典」(分担執筆「実行機能」「中央実行系」「音韻ループ」)	

1. 著者名 Hiroaki Taiyo Hamada, Ryota Kanai, Daisuke Matsuyoshi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 2200
3. 書名 Encyclopedia of Behavioural Neuroscience 2nd edition (Grey matter analysis of MRI images: Introduction to current research practice)	

〔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
---------	---------