

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：63905

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11515

研究課題名（和文）実物体の把持における素材情報の神経表現の役割

研究課題名（英文）Role of the neural representation of material in perception and grasping of real material objects

研究代表者

横井 功 (YOKOI, Isao)

生理学研究所・技術課・技術職員

研究者番号：50592747

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）：我々の生活環境に存在する物体は様々な素材（金属、木材など）によって作られている。これらの素材が知覚される神経メカニズムを明らかにするために、さまざまな素材を見ているときの神経活動をマカケザルの下側頭葉（IT）で調べた。大部分のITニューロンは素材画像について選択的反応を示した。様々な素材の実物体を見ながら触れる視触覚経験によってITニューロンの素材カテゴリー表現は変化し、その視触覚経験の影響は一定期間維持されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々は目の前の物体を眼で見るだけで、対象物体がどの素材によって作られているかを瞬時に判断することができ、さらに視覚的な情報（色や形）だけでなく触覚的情報（硬さや重さ）も感じ取ることができる。この素材知覚の多感覚性がどこで、どのように処理されているかの理解が一層進むものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Objects in our living environment are made of various materials (metal, wood, etc.). To understand the neural mechanisms underlying the material perception, we examined the neural activity in the inferior temporal cortex (IT) while the macaque monkeys were viewing the various materials. Most IT neurons showed selective responses to the material images. The material category representation of IT neurons was affected by the visuo-haptic experience of touching and seeing the real objects of various materials, and the influence of the visuo-haptic experience was maintained for about half a year.

研究分野：神経生理学

キーワード：素材 経験 下側頭葉 視覚 触覚

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世の中に存在する物体は様々な素材(金属や木材など)によって作られている。我々は対象の物体がどのような素材によってつくられているかを知覚すること(素材知覚)によって、物体を正しく操作することが出来る。これまでに、ヒトとサルの機能的MRI(磁気共鳴画像)を用いた研究によって、腹側視覚経路の高次視覚野が素材知覚に関与していること、長期の視触覚経験が後部側頭葉の素材表現を変化させ視覚だけでなく、視触覚情報を表現するようになることが明らかにされている(Hiramatsu et al., Neuroimage 2011; Goda et al., J Neurosci 2014; Goda, Yokoi et al. 2016)。しかしながら、この脳領域のニューロンが、ある素材を見ているときにどのような反応特性によって素材情報を処理しているのか、ある素材で作られた実物体に触れているときにどのような活動を示すのかは明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、腹側視覚経路の高次視覚野である下側頭葉(IT)のニューロンがどのように素材情報を処理しているのかをニューロンレベルで明らかにすることである。

3. 研究の方法

始めに、二ホンザルに実物体把持課題を訓練した。実物体把持課題では、サルの目の前に実物体呈示装置を設置する。呈示装置は、回転テーブルによって呈示する実物体を切り替え、シャッター扉によってタイミングを制御し、実物体を呈示する。サルは目の前に呈示された実物体を一定時間(1.2秒間)握ることで報酬を得る。課題訓練には、単色と幾何学模様(9種類、灰、白、黒、水玉模様等)の円柱棒を使用した。課題成功率が安定した後、様々な素材の実物体(図1A)を呈示し、行動反応を記録した。実物素材刺激セットは9種類の素材カテゴリー(金属、ガラス、陶器、石材、樹皮、木目、皮革、布、毛)によって構成され、各素材カテゴリーについて4種類のサンプルを使用した(合計36刺激:9素材カテゴリー x 4サンプル)。実物体把持課題が終了した後、電気生理記録を行うために、注視課題を訓練した。注視課題では、サルの目の前にコンピューターディスプレイを設置する。サルはディスプレイ上に呈示された小さな点を注視することを一定時間(2秒間程度)続けることで報酬を得る。注視課題を遂行中に、様々な素材の画像(図1B)を視覚刺激として呈示した。実験に使用した画像素材刺激セットは合計36刺激によって構成され、実物素材刺激セットを写真撮影して作成した。訓練終了後、下側頭皮質に微小金属電極(直径200 μ m)を刺入し、単一細胞外電位記録法を用いてニューロン活動を記録し、視覚刺激に対するITニューロンの視覚応答を記録した。

4. 研究成果

実物把持課題におけるサルの行動反応

円柱棒を用いて訓練した後、実物素材刺激セットに含まれる実物体を28日間繰り返し呈示した。2頭のサルはすべての実物素材刺激について80%以上の課題成功率を示した。1頭のサルにおいて特定の素材カテゴリーについての課題成功率が低い傾向が見られ、過去の研究と似た行動反応が確認された(Yokoi et al. 2018)。

当初の研究計画では、暗室下で実物把持課題を行わせ、課題遂行中のニューロン活動を記録することを計画していたが、暗室下ではサルの課題成功率が低く、行動が安定しなかったため計画を一部変更して研究をすすめた。

様々な素材に対する下側頭皮質ニューロンの反応

注視課題を遂行中のサルに様々な素材の画像(図1B)を視覚刺激として呈示し、2頭の二ホンザルから合計245個(サル1:111、サル2:134)のニューロン活動を記録した。電気生理実験終了後、磁気共鳴画像装置(MRI)を用いて構造画像を撮像し、電極の刺入跡を追跡した。さらに、

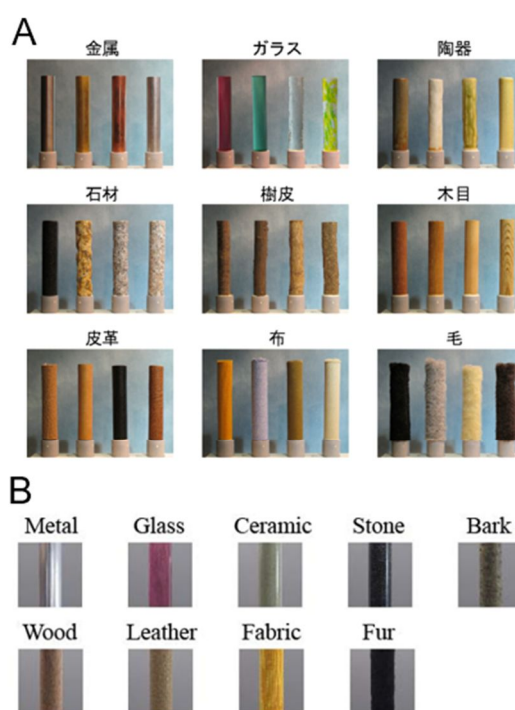


図1 実験に使用した実物素材刺激と画像素材刺激
実物素材セット(A)は9素材カテゴリーで構成される。画像素材セット(B)は実物素材セットを写真撮影して作成した。

機能的MRIを用いた研究によって素材知覚との関与が示されている脳領域(素材関連領域、Goda et al., J Neurosci 2014)を構造画像に重ね合わせ、電気生理実験での記録位置と比較した。電気生理実験の記録範囲(平均7 mm x 4.5 mm)は、中心が機能的MRIの素材関連領域に対して5 mm程度前方に位置し、後端が素材関連領域と重なっていた。画像素材刺激セットについて選択的反応を示したニューロンは、電極を刺入した範囲内で広く分布していた。

視触覚経験が下側頭皮質ニューロンに与える影響

実験に用いた2頭のサルは、実物把持課題において様々な実物素材に触れる前に、同一の画像素材セットを用いてIT野からニューロン活動を記録されている。実物把持課題の前後で記録されたニューロン活動を比較し、様々な実物素材に触れた経験がITニューロンの素材表現に与える影響を調べた。

実物把持課題の前では、記録されたITニューロンの85%が画像素材セットについて選択的反応を示した。また、多くニューロンが数種類の素材カテゴリーに属する複数の刺激に対して強く反応する傾向を示し、素材カテゴリーについて中程度の選択性を示した。一方、実物把持課題の後では、選択的反応を示すニューロンの割合は比較的少なかった(74%)。また、素材カテゴリー選択性の強度は実物把持課題前よりも後ほうが低い傾向を示した。これらの結果は、実物把持課題において様々な実物素材に触れた視触覚経験がITニューロンの反応特性を変化させた可能性を示唆する。

次に、素材カテゴリー選択性に注目し、経験がITニューロンの素材カテゴリー表現に与える影響を調べた。類似度解析(Representational similarity analysis, Kriegeskorte et al., 2008)および相関解析(Kiani et al., 2007)を用いて、ITニューロンの素材カテゴリー表現を解析した(図2A)。また、同様のパラダイムで実験を行った先行研究(Goda, Yokoi et al. 2016)では、経験直後(約30日後)に脳活動計測が行われていることに着目し、経験からの時間経過についても解析を行った。電気生理記録の記録期間はその技術的制限から長くなる傾向がある。本実験においては、実物把持課題終了から2または3ヶ月後に電気生理記録を開始し、約9ヶ月後まで記録を行った。この記録期間を3つの区間(early, middle, late)に分けて素材カテゴリー表現を解析した。はじめに、電気生理実験によって記録されたITニューロンによる素材カテゴリー表現(DSM-SU)と機能的MRIによって計測した脳活動による素材カテゴリー表現(DSM-fMRI)との相関を解析した(図2B)。実物把持課題前と実物把持課題後の全ての区間で記録されたITニューロンのDSM-SUは対応するDSM-fMRIとの相関を示したが(図2B, Before, After all)、実物把持課題の前後間でほとんど差を示さなかった。しかしながら、early区間(経験終了から125日以内)におけるDSM-SUは、実物把持課題後のDSM-fMRIと高い相関を示した(図2B, Early)。次に、DSM-SUとヒトの感性評価による素材カテゴリー表現(DSM-Psy)との比較を行った。DSM-SUとDSM-Psyは、実物把持課題前には有意な相関を示さないが、実物把持課題前後のearly区間において有意な相関を示した。これらの結果は、ITニューロンの反応特性および素材カテゴリー表現は視触覚経験によって変化し、その影響が一定期間後に弱くなることを示唆する。素材カテゴリー表現の変化は、個々のニューロンの選択性または特定の選択性を示すニューロンの割合の変化、もしくはその両方によって生じている可能性が考えられる。

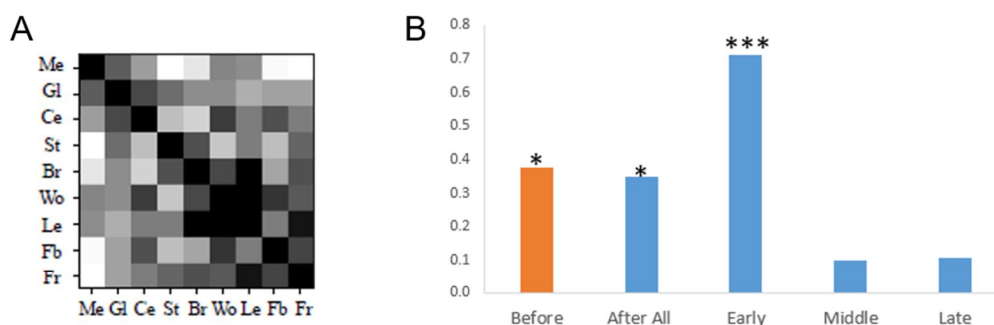


図2 経験によるITニューロンの素材カテゴリー表現の変化

A: 類似度解析によるITニューロンの素材カテゴリー表現

ラベルは各素材カテゴリーを表し、各区画の明るさは素材カテゴリー間の距離を示す。

B: ITニューロンの素材カテゴリー表現の相関と機能的MRIの素材カテゴリー表現との相関

把持課題直後の電気生理実験区間(Early)において、機能的MRIデータとの高い相関が見られた。

*: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$

実物体に対する下側頭皮質ニューロンの反応

画像素材刺激に対する反応を記録した後、少数ではあるが同一のニューロンにおいて、実物素材刺激を呈示しニューロン活動を記録した。呈示する実物素材刺激は画像素材刺激によって測定された反応選択性に基づいて選択した。多くのニューロンが、強い反応を生じた画像素材刺激に対応する実物素材刺激に対して明らかな視覚応答を示し、画像素材刺激セットに似た選択的反応を示した。ITニューロンの素材選択的な反応が様々な素材によって作られた実物体の素材知覚に関与している可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yokoi Isao, Tachibana Atsumichi, Minamimoto Takafumi, Goda Naokazu, Komatsu Hidehiko | 4. 巻 120 |
| 2. 論文標題 Dependence of behavioral performance on material category in an object-grasping task with monkeys | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Neurophysiology | 6. 最初と最後の頁 553 ~ 563 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1152/jn.00748.2017 | 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2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Isao Yokoi |
| 2. 発表標題 Neuronal responses to material images in the inferior temporal cortex of the monkey |
| 3. 学会等名 The 9th Okazaki / Tuebingen / Beijing Joint Symposium |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 横井功 |
| 2. 発表標題 二ホンザルは「素材」をどう知覚するか |
| 3. 学会等名 NBRP二ホンザル第15回公開シンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

NIPS Research: 素材の種類に依存した二ホンザルの行動反応
http://www.nips.ac.jp/nips_research/2018/08/post_236.html

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|