

令和元年6月27日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01959

研究課題名(和文) 階層的なカテゴリ認識の神経基盤

研究課題名(英文) Neural mechanism of hierarchical categorization

研究代表者

川崎 圭祐 (Kawasaki, Keisuke)

新潟大学・医歯学系・准教授

研究者番号：60511178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：カテゴリ認識における抽象化過程の神経メカニズムについては適当な動物モデルが存在せず直接的な知見がない。本研究では3つの階層レベル(具体レベル, 中間レベル, 抽象レベル)を持つ, 階層カテゴリ課題を作成してこの問題に取り組んだ。呈示された自然画像のカテゴリを記号を用いて明示的に答える課題について、2頭中2頭のニホンサルで学習可能であることが示された。さらに、各階層における反応潜時の解析から、サルにおいてもヒトの行動実験と同様に抽象レベルの反応潜時が中間レベルの反応潜時よりも早いという結果が得られ、ヒトとサルにおいてカテゴリ認識処理の類似性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

抽象的な概念を用いたカテゴリ認識は、ヒトの知的活動を支える基本的かつ重要な認知機能である。しかし、これまでカテゴリ認識における抽象化過程の神経メカニズムに関しては、適当な動物モデルが存在せず直接的な知見がなかった。本研究課題ではサルにおいて三層の階層性をもつ階層カテゴリ課題を開発し、2頭中2頭の被験体において、学習が成立することを示すことに成功した。今後、脳活動計測を行い、概念形成の脳内メカニズムの検証を進めることが可能になった。

研究成果の概要(英文)：Abstraction is a key computing underlying our intelligent capacity such as thinking, inference and linguistic activity. However neuronal basis of the cognitive process is largely unknown mainly because a lack of an appropriate animal model which enable us to measure and manipulate the direct neural activity. In this project, thus we developed a hierarchical categorization task for monkeys. We show that two out of the two monkeys learned the hierarchical categorization in which the monkey has to explicitly classify the natural categories with three abstraction levels. We also investigated the neural representation of face and its subcategories. Neural activities were recorded by electrocorticogram, local field potential and multi-unit activity in inferior temporal cortex (ITC). The results suggest that the finer category clusters are heterogeneously distributed even outside their parent category cluster and dynamically increase heterogeneity along with the cortical processing in the ITC.

研究分野：神経生理学

キーワード：カテゴリ認識 概念化 視覚認知 抽象化 階層構造 概念形成

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物体のカテゴリ認識、概念的認識は、推論、思考、言語活動などを支え、ヒトの心的活動にとって基本的で重要な認知機能である。心理学的研究からカテゴリ認識には階層性があり、多くの研究で基礎レベル、上位レベル、下位レベルの3つの抽象レベルがあることが示唆されていた。一方、これまでサルをモデル動物としたカテゴリ認識の神経基盤の生理学的研究では、主に形の類似性に基づいた物体のカテゴリ認識の研究が進められてきていた。多くの大脳領域から逐次的に単一ニューロン活動の記録した研究や解剖学的な研究、破壊実験などから下側頭葉皮質、腹外側前頭葉皮質、眼窩前頭葉皮質、嗅周皮質がこれらのカテゴリ認識に重要な役割を担うという知見が蓄積されていた。カテゴリ学習に伴って下側頭葉皮質ではカテゴリ境界特徴に応答するニューロンが増えることや、腹外側前頭葉皮質にはカテゴリの違いをコードするニューロンが多く存在することが報告されていた。しかし、これまでカテゴリ認知における抽象化過程の神経メカニズムに関しては、適当な動物モデルが存在せず直接的な知見がないため、カテゴリ認識の階層性がこれらの領野でどのように符号化されているのか不明であった。

2. 研究の目的

(1) 本研究課題では、カテゴリ認識の階層性に注目して、サルが階層的な物体カテゴリを明示的な記号を用いて分類する課題(階層的カテゴリ-シンボル化課題)を作成して、サルが階層的カテゴリ-シンボル化課題を習得できるか行動学的に検証する。同時に物体のカテゴリ認識において重要性が示唆されている複数の関連大脳領域から皮質脳波(EEG)計測を行うことによって、具体性の高い低位のカテゴリ情報と抽象性の高い高位のカテゴリ情報がどのように符号化され、柔軟に読み出されるのか、複数領野間の情報の流れを定量化するアプローチと多点電気刺激を組み合わせることで明らかにしていく。

(2) これまでサルを用いた研究で豊富な知見が存在する知覚的なカテゴリ認知について、階層的なカテゴリ構造がどのように下側頭葉皮質で符号化されているか明らかにする。特に顔とそのサブカテゴリ-について検討する。

3. 研究の方法

(1) 新たに考案した階層的カテゴリ-シンボル化課題をニホンザルに訓練する。この課題では、画像として呈示された自然物体のカテゴリを記号を用いて、場合によって、具体レベル、中間レベル、抽象レベルの3つの階層レベルのいずれかで明示的に答える必要がある。行動実験系を確立した後、課題遂行中のサルから皮質脳波(EEG)法を用いて複数の関連大脳領域から神経活動を記録する。

(2) 複数の異なった種の動物の顔画像を用意し、それぞれの種には複数の個体を、またそれぞれの個体には、複数の異なった方向を向いた画像を用意する。注視課題遂行中のサルに画像を呈示しEEG法と刺入式アレイ電極を組み合わせ、その時の応答を記録する。顔全体、顔の種別、顔の向き、個々の顔をデコードする時の神経活動パターンを同定する。

4. 研究成果

(1) マカクザルにおける階層カテゴリ構造の学習

ヒトにおける認知心理学的研究からカテゴリ認識には階層性があり、多くの研究で基礎レベル、上位レベル、下位レベルの3つの抽象レベルがあることが示唆されている(図1)。抽象化の過程はカテゴリ認知の本質であり、推論や思考といった基礎となる認知機能である。

認知機能の神経メカニズムの生物学的基盤を明らかにするためには、神経細胞の活動を直接高い時空間分解能で計測するため、また賦活実験や不活性化実験を含めた神経活動

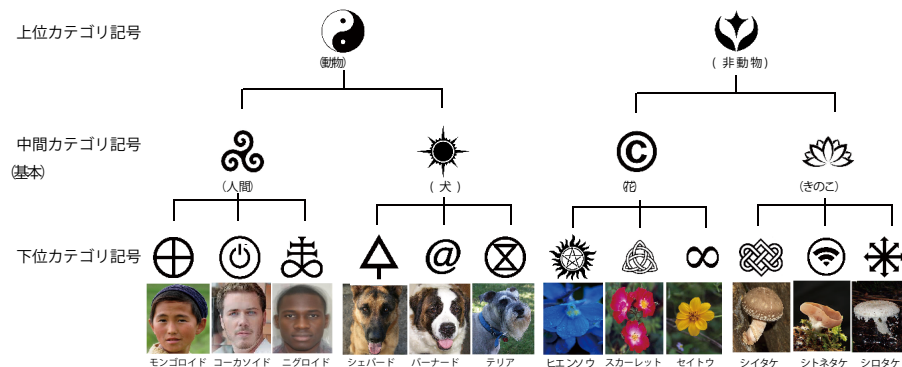


図1. 階層的なカテゴリ認識: 最下段に示した物体は基礎レベル(たとえば左から3例では“ヒト”、本実験では“中間カテゴリ記号”)下位レベル(人種名、同じく下位カテゴリ記号)、上位レベル(“動物”、同じく上位カテゴリ記号)で記述される。

の操作的手法を導入するために、モデル動物系の確立が必須である。本研究では、抽象化過程の神経メカニズムを明らかにするために、マカクザルモデルの確立に成功した。階層的なカテゴリ-シンボル化課題を考案して、マカクザルで行動学的に検証した。実験には2頭のサルを用いた。2頭のサルは共に、3層の階層構造を持つ記号と物体画像の多対多の対応関係を学習した(図2)。また、各階層における反応潜時の解析から、サルにおいてもヒトの行動実験と同様に抽象レベルの反応潜時が

中間レベルの反応潜時よりも早いという結果が得られ、ヒトとサルにおいてカテゴリ認知処理の類似性が示唆された。

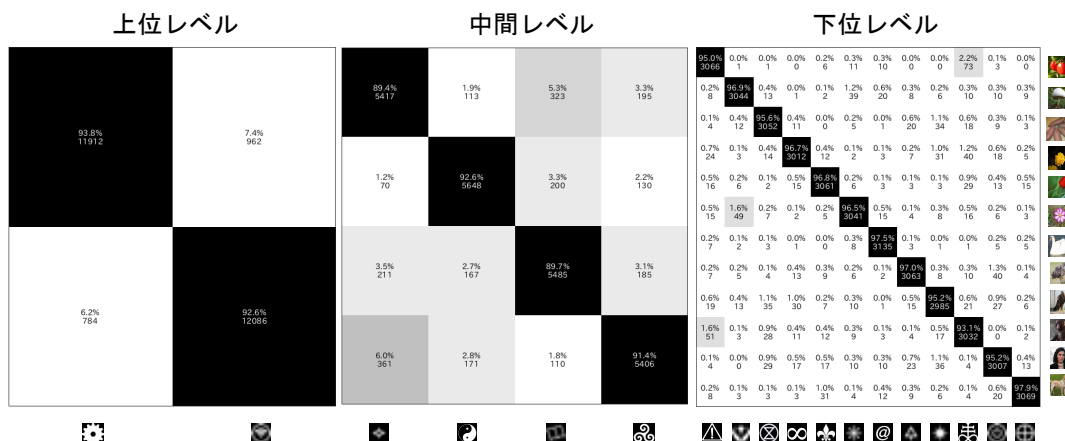


図 2.マカクザルにおける階層カテゴリの学習
最右縦軸に示したそれぞれの物体画像を横軸に示した記号を用いて、上位レベル、中間レベル、下位レベルの3つの抽象レベルで答えることができた。各マスには、縦横の対応する組み合わせへの応答確率を示しており、色が濃い（黒い）方が、高い応答確率を示している。3階層全てで90%以上の高い正当率で記号と物体の組み合わせを学習した

(2) サル下側頭葉皮質における顔の階層的サブカテゴリ表象
複数の異なった種の動物の顔画像（それぞれの種には複数の個体、またそれぞれの個体には複数の異なった方向を向いた画像が含まれる）(図3)に対する下側頭葉皮質の応答を皮質脳波 (ECoG), 局所電場電位 (LFP), 複数単一細胞活動電位 (MUA)を同時に計測した。

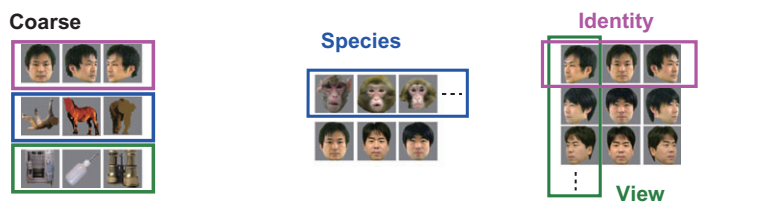


図 3.階層的サブカテゴリからなる顔画像セット

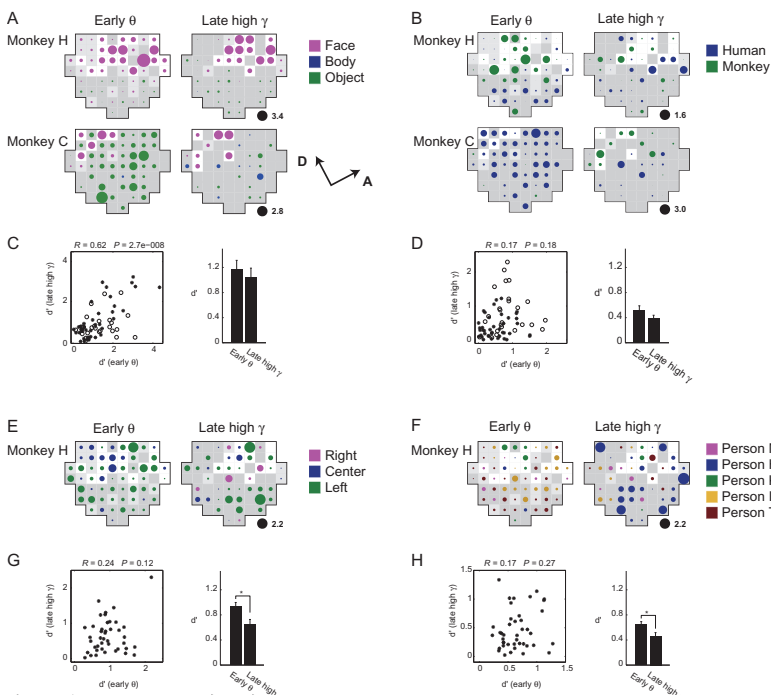


図 4.顔と顔サブカテゴリの脳内分布
顔全体 (A, C), 顔の種別 (B, D), 顔の向き (C, E), 個別の顔 (D, F) を符号化する神経細胞時間分布と時間ダイナミクス。

その結果 (図4), 視覚応答の短潜時成分の低周波域のLFP/ ECoG 応答には、粗いカテゴリを判別するのに十分な情報が含まれていることが分かった。これらの応答は空間的には加算され、数 mm の皮質領域に均一に広がっていた。視覚応答の長潜時成分の高周波域のLFP及びMUA 応答にはより細かいカテゴリを判別するための情報が含まれていた。これらの応答は、空間的には不均一で、空間加算によって減弱した。顔全体を符号化する神経細胞は、皮質上に微小領域にクラスターを形成しており、時間的に安定であった。一方、顔のサブカテゴリを符号化するニューロンは時間

間的にダイナミックな挙動を示し、時間と共にその空間分布の不均一が増した。これらの結果は、顔のサブカテゴリが空間的には不均一な領域でダイナミックに表象されており、顔全体を静的に表象する皮質領域の外側にもおよぶことを示している。物体カテゴリが下側頭葉皮質の静的マップに表象されるという従来の通説を覆す知見として、雑誌 *Cerebral cortex* に掲載された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Miyakawa N, Majima K, Sawahata H, Kawasaki K, Matsuo T, Kotake N, Suzuki T, Kamitani Y, Hasegawa I. Heterogeneous Redistribution of Facial Subcategory Information Within and Outside the Face-Selective Domain in Primate Inferior Temporal Cortex. *Cerebral cortex*. 2018; doi:10.1093/cercor/bhx342.
- ② Toda H, Kawasaki K, Sato S, Horie M, Nakahara K, Bepari AK, Sawahata H, Suzuki T, Okado H, Takebayashi H, Hasegawa I. Locally induced neuronal synchrony precisely propagates to specific cortical areas without rhythm distortion. *Scientific reports*. 2018; 8 7678. doi:10.1038/s41598-018-26054-8.

[学会発表] (計16件)

- ① T. Hayashi, K. Kawasaki, R. Akikawa, I. Hasegawa, J. Egawa, T. Someya, A. Iijima; Anticipating of other's behavior on the basis of understanding other's false beliefs in rhesus monkeys (*Macaca fuscata*). Neuro2018, Kobe, July 26-29, 2018
- ② N. Liu, K. Ohashi, K. Kawasaki, T. Suzuki, T. Matsuo, A. Iijima, I. Hasegawa; Neural activity during spelling the names of objects in the macaque prefrontal cortex. Neuro2018, Kobe, July 26-29, 2018
- ③ N. Okita, K. Kawasaki, Y. Takahashi, T. Suzuki, I. Hasegawa; Time-frequency representation of the responses for animate and inanimate objects in inferior temporal and medial dorsal prefrontal cortex. Neuro2018, Kobe, July 26-29, 2018
- ④ S. TANAKA, K. KAWASAKI, I. HASEGAWA, T. SUZUKI, M. KAWATO, M. SAKAGAMI; Spatial and temporal distribution of value-related and the visual information in the macaque lateral prefrontal cortex. Society for neuroscience, Washington, DC Nov 11-15, 2017
- ⑤ Y. Takahashi, K. Kawasaki, T. Hongo, K. Menaka, T. Suzuki, A. Iizima, T. Matsuo, T. Teramoto, I. Hasegawa; Category information in prefrontal and inferior temporal cortex for animate or inanimate categorization in macaques. Neuro2017, Chiba, July 20-23, 2017
- ⑥ S. Tanaka, K. Kawasaki, I. Hasegawa, T. Suzuki, M. Kawato, M. Sakagami; Distribution of value related information in the multiple areas of the macaque prefrontal cortex. Neuro2017, Chiba, July 20-23, 2017
- ⑦ S. TANAKA1, K. KAWASAKI, I. HASEGAWA, T. SUZUKI, M. SAKAGAMI; Modulation of value information coded in the lateral prefrontal cortex by the decoded neurofeedback with the electrocorticographic (ECoG) signals. Society for neuroscience, San Diego, CA Nov 12-16, 2016
- ⑧ H. DATE, K. KAWASAKI, M. OZAY, T. HONGO, I. HASEGAWA, T. OKATANI; Modeling electrocorticography signals on the macaque inferior temporal cortex in space, time and frequency domains using hierarchical visual features of convolutional neural networks. Society for neuroscience, San Diego, CA Nov 12-16, 2016
- ⑨ H. TANIGAWA1, K. MAJIMA, R. TAKEI, K. KAWASAKI, H. SAWAHATA, K. NAKAHARA, A. IIJIMA, T. SUZUKI, Y. KAMITANI, I. HASEGAWA; Decoding recalled color imagery using ECoG signals in the macaque inferior temporal and prefrontal cortices. Society for neuroscience, San Diego, CA Nov 12-16, 2016
- ⑩ Y. Suda, M. Tada, T. Matsuo, K. Kawasaki, T. Suzuk, I. Hasegawa, K. Matsumoto, K. Kasai, T. Uka; Functional localization of neural subprocesses underlying mismatch negativity generation in macaque auditory cortex. Neuro2016, Yokohama, July 20-22, 2016
- ⑪ M. Tada, Y. Ishishita, Y. Suda, T. Matsuo, K. Kawasaki, T. Suzuki, K. Kirihara, I. Hasegawa, K. Matsumoto, N. Saito, T. Uka, N. Kunii, K. Kasai; Localization of auditory steady-state response (ASSR) in humans and non-human primates as measured using electrocorticogram (ECoG). Neuro2016, Yokohama, July 20-22, 2016
- ⑫ H. Toda, K. Kawasaki, M. Horie, K. Nakahara, A. K Bepari, H. Sawahata, T. Suzuki,

H. Takebayashi, I. Hasegawa;

Direction-specific spectral shift of local field potentials in the rat visual cortices found by a combination of electrocorticogram and optogenetics. Neuro2016, Yokohama, July 20-22, 2016

- ⑬ H. Sasaki, H. Tanigawa, K. Kawasaki, A. Iijima, T. Suzuki, I. Hasegawa;
Directional influences through theta band activity between macaque inferior temporal and prefrontal cortices during memory retrieval. Neuro2016, Yokohama, July 20-22, 2016
- ⑭ T. Hongo, K. Kawasaki, I. Hasegawa;
Animate or inanimate symbolized categorization in macaques. Neuro2016, Yokohama, July 20-22, 2016
- ⑮ H. Date, K. Kawasaki, M. Ozay, T. Hongo, I. Hasegawa, T. Okatani;
Correspondence between the representations of convolutional neural networks and the activities in inferior temporal cortex measured by electrocorticography. Yokohama, July 20-22, 2016
- ⑯ S. Tanaka, K. Kawasaki, I. Hasegawa, T. Suzuki, M. Sakagami;
Decoding the value related information from the ECoG signal recorded from the multiple areas of the prefrontal cortex. Yokohama, July 20-22, 2016

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 隆文

ローマ字氏名：Suzuki Takafumi

研究協力者氏名：松本 有央

ローマ字氏名：Matsumoto Narihisa

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。