

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01754

研究課題名(和文)皮質における形状表現の形成 - 図地分離と物体の中間表現

研究課題名(英文) Generation of Intermediate Representation of Shape based on Figure-Ground Segregation

研究代表者

酒井 宏 (Sakai, Ko)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80281666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：視覚の機能は、どこに何があるかを知ることである。網膜にはカメラと同様に外界の像が写る。大脳皮質にある視覚野は、網膜像のどの部分がどの物体であるかを決めなければならない。これを図地分離という。図地分離に失敗することは、その物体の形状を間違えることに直結する。本研究では、図地分離によって物体の形状が抽出される脳のメカニズムの解明を進めた。形状知覚は複数のステップによって行われ、皮質V4野で物体形状の中間表現が形成されていることが明らかになった。さらに、形状は数十の細胞が群として表現していることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日常的に見る光景は千差万別であり、移動とともに時々刻々と変化する。しかし私達は、初めて見る光景や物体であっても、図地分離に失敗して形状を誤って知覚することは滅多にない。これは、皮質における図地分離の頑健性と秀逸性を示している。視覚皮質のメカニズムは、今日のAIブームの立役者である Deep Learning として応用され、画期的な成果を出している。しかし、脳が実際にどのような計算をしているのかは、まだ殆ど判っておらず、未知の原理・数学体系があるものと考えられている。本研究で明らかにした中間表現の形成・群表現は、脳の計算原理の一端を明らかにしたものである。

研究成果の概要(英文)：The function of vision is to understand where and what are objects. The images of the outside world are projected onto the retina. The visual cortices need to determine which regions in the retinal image are what objects, which is so called figure-ground (FG) segregation. If the brain failed to correctly segregate figure from ground, it directly led to the incorrect recognition of the object. The present study investigated the cortical mechanisms that perform the construction of object shapes by FG segregation. The study suggested that the perception of shape is constructed through multiple steps, and that the intermediate-level representation of object shape is constructed in the cortical area V4. Moreover, the study suggested that a few tens of neurons represent object shape in a distributed manner.

研究分野：認知神経科学

キーワード：認知科学 神経科学 実験系心理学 情報工学 視覚科学

## 1. 研究開始当初の背景

これまで申請者らは、心理物理実験・電気生理実験・計算実験を総合して、自然光景における図地分離の視覚メカニズムを理解する研究を実施してきた。まず、ヒト知覚空間において凸性・閉合性・対称性(Gestalt 要因)が符号化されていることを示した。これを利用して、知覚空間に均一に分布する自然輪郭刺激のデータセットを構築した。このセットを利用した電気整理実験により、V4 神経細胞が図地選択性をもつことを発見した。しかし、単一細胞の図地識別率はチャンスレート(50%)を若干上回る程度であり、単一細胞では自然画像の図地分離が難しいことを示した。また、変調潜時が反応潜時から 20ms 程と早い一方で、反応後期(100ms~)に図地識別率が上昇することから、求心性信号による proto-type の早期形成と、帰還によるダイナミックな神経機構による図地の形成が進んでいくことが示唆された。このように、V4 細胞が群として図地を符号化していることが示された[Sakai et al., SfN 2016]。また、V4 細胞は輪郭の曲率を符号化していること、その反応は輪郭の図方向(B0)に依存することが報告されている[El-Shamayleh & Pasupathy, J. Neurosci. 2016]。これらの知見から、V4 細胞群が図地と輪郭を基に、物体形状(網膜投影形状)に対応する面表現を形成しているとの仮説を着想した。

計算論的解析法の進歩によって、皮質表現の理解が進む可能性が示唆され始めている。実用可能になった強力な機械学習(Deep Learning)を利用することにより、スパイク列のもつ時間情報を解析できる可能性がある。自然画像群への神経応答の次元解析によって、物体表現に必要な特徴の数(物体を識別・表現するために必要な細胞数)も提案されてきている[Lehky et al., Neu. Comp., 2014]。また、自然画像群の分解によって高次視覚野(AIT)細胞が表現する情報(受容野特徴)が提案されてきている[Lehky & Tanaka, Curr. Opin. Neurobiol. 2016]。これらの解析に最適な電気生理実験を実施して、多面的・総合的に解析することにより、物体の中間表現とその形成過程を理解することが可能になると着想した。

## 2. 研究の目的

本研究は、物体形状の皮質中間表現を理解し、それが形成される神経メカニズムを解明することを目的とする。これを通して皮質における物体認識の形成過程を理解する。V2 から求心性入力を受ける V4 細胞は、単に図地分離または曲率等の局所形状を表現しているのではなく、両者を統合した物体形状の中間表現を形成しているとの仮説を検討する(図1)。自然光景を対象として、表現理解を目論んだサル電気生理実験を構成し、情報学的技法を利用して発火の頻度とタイミングに内包される中間表現に対応する情報抽出を行う。これらを総合して面を基礎とした中間表現を理解すると共に、皮質モデルを構築・解析して中間表現を形成する神経機構を理解する。V4 単一細胞では表現困難な物体(図)形状を、比較的少数の V4 細胞の群が符号化(中間表現)していること、及びその表現が形成される神経機構を明らかにすることを目的とする。

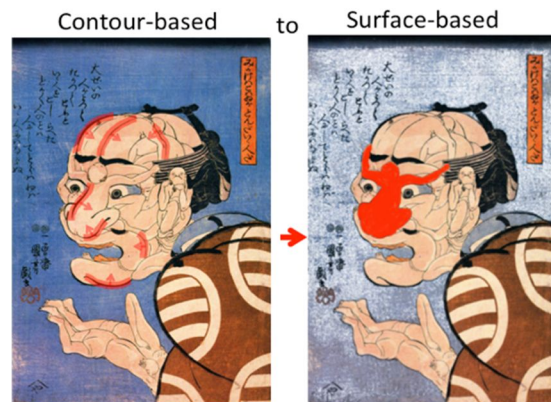


図1. V2 で輪郭からの図方向が得られ(左)、これらが統合されて V4 で面(図領域)が決まり、物体の中間表現が形成される(右)。

### 3. 研究の方法

中次視覚皮質における中間形状表現を探索するために、自然画像パッチ(図2)に対するV2, V4 神経細胞からの信号記録を得て解析を実施する。V4 からの記録に加えて、V2 からの記録についても解析を行って、情報表現がどのように変化し、中間表現が構成されていくかを明らかにする。

面表現に対応する反応受容野および周辺領域の空間的構造を算出するアルゴリズムを利用して、V2, V4 神経細胞の受容野空間構造を算出する。具体的には、Spike Triggered Average 法, Spike Triggered Covariance 法, Tensor 法を試みる。V2, V4 それぞれの神経細胞群の差異から、中間表現がどのように構成されていくかを示す。図地と輝度コントラストに注目して、これらに対応する最適刺激を算出する。また、神経信号の次元解析を実施して、中間表現に寄与する細胞数を同定する。どれだけの細胞が集団となると、どの程度正しく図地が判断できるかを検討する。どの細胞を群とすべきかは不明であるので、機械学習によって推定する。これによって、自然画像中の図地を正しく判定するために必要な細胞数が同定できる。これを、同時記録した(時間情報を含んだ)細胞群、および記録セッションがことなる(同時性がない)細胞群の両方で算出して、発火タイミングの寄与を明らかにする。

大域情報および求心・遠心性神経機構の寄与を検討するために、心理物理実験・計算実験の比較検討を実施する。計算実験ではCNNを利用して、その遠心性信号を制御することによって、それぞれの役割を同定する。計算実験と神経信号・心理実験の比較を実施することによって、神経機構における遠心性信号の役割を明らかにすることを試みる。さらに、これまでの解析を総合して、発火神経細胞が群としてダイナミックな神経活動をして中間形状表現を形成する神経機構モデルを提案する。

### 4. 研究成果

H29 年度に導入した GPGPU 計算機および H30 年度に導入した汎用計算機によって神経記録解析を実施した。32 微細電極によって記録した神経信号から中間形状を表現するために要する情報論的特徴を解析した。記録した神経信号から、最適受容野・周辺構造を算出した。V4 細胞の応答が図地によって変調する現象は知られていたが、図地のどのような空間配置が個々の細胞応答の変調を引き起こすかは知られていなかった。Spike Triggered Average 法, Spike Triggered Covariance 法によって図地ならびに輝度コントラストに対応する受容野・周辺構造を算出した(図3)。この結果を基に細胞応答を再現する混合モデルを構築し、V4 細胞の応答のうち図地が寄与する程度を明らかにした。また、STA, STC の解析によって V4 神経細胞が実際にどのような図地に応答するのかが明らかになった。また、V2 神経細胞が輪郭から見てどちら側に図があるかを示す Border Ownership 選択性に注目して、B0 選択性細胞の受容野・周辺構造を算出した。これを処理の基礎ユニットとして、皮質における図地情報の算出・処理を記述するモデルを構築した。さらに、

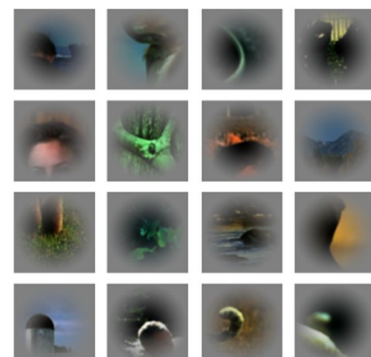


図 2. 自然光景(BSD)から切り出したパッチ刺激の例。

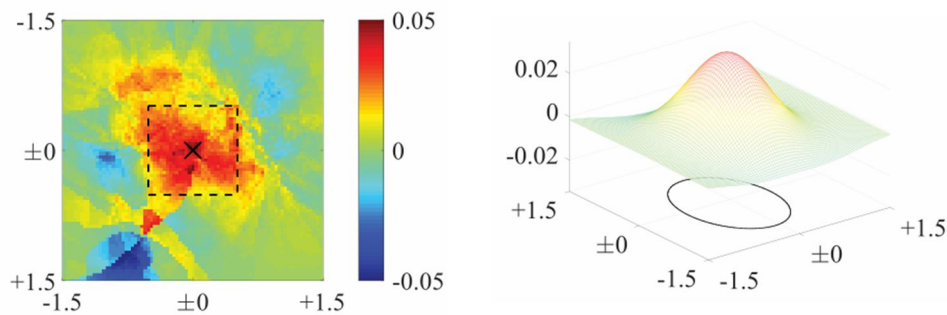


図3. 算出した図地に対する受容野の例。(左)赤系が図,青系が地を示す。波線は推定受容野位置。(右)Gaussian 近似した最適図地構造。この細胞は, 受容野中に図がある刺激に対して強く反応する図選好性細胞であることが判る。

次元解析によって, 40 程度の細胞からなる群が 80% 程度の正答率を生じ得ることが判った。また, 発火の同時性は寄与しないことが判った。

Deep Learning を利用して自然物体識別における中間表現を解析した。特に, 発火の頻度とタイミングに注目して, 内包される情報を解析した。発火のタイミングが一定の情報を有していることが判った。記録した細胞から数十の細胞を選んで, その spike train から, どの位置に図と地があるかを推定することができた。

心理実験を実施して, 自然画像パッチの図地知覚のしやすさを定量的に評価することに成功した。大域情報が与える図地知覚が, 局所情報が与える図地知覚とは異なる刺激は稀であり, 数%に過ぎないことが判った。一方で, 具体的に大域情報(closure, size, etc.)のうち何が寄与するかは明らかにならなかった。これと電気生理実験の結果を合わせることにより, 神経細胞反応と知覚特性の関係を明らかにすることが可能になった。図地を知覚しやすい画像パッチほど, 神経細胞も正しく図地を判別できることが明らかになった。このことは, V4 図地選好性細胞が図地知覚に寄与していることを示す。このような結果を総合して, 発火神経細胞が群としてダイナミックな神経活動をして中間形状表現を形成する神経機構モデルを提案した。

これらの結果から, 神経細胞が群としてダイナミックな神経活動をして, 図地情報を抽出し中間形状表現を形成していることが判ってきた。数十程度の細胞細胞で一つの対象を表現し, 多様な自然画像に対しても 80% 程度の正答率で図地分離ができることが判った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 N. Wagatsuma, M. Urabe and K. Sakai	4. 巻 9
2. 論文標題 Interactions evoked by the contradiction between border ownership discrimination and figure-ground segregation.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2018.01681	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 Y. Sakata, K. Kurematsu, N. Wagatsuma and K. Sakai	4. 巻 36
2. 論文標題 Invariance to low-level features and partial transfer over space in the tilt aftereffects evoked by symmetrical patterns.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Optical Society of America, A	6. 最初と最後の頁 283-291
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAA.36.000283	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 K. Kimura, Y. Yamane, H. Tamura, K. Sakai	4. 巻 17
2. 論文標題 Spatial Structure of Receptive Fields and Surrounds in Response to Local Figure-Ground Configuration in Monkey V4.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Austrian Journal of Intelligent Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 N. Wagatsuma, M. Urabe and K. Sakai	4. 巻 E103-D
2. 論文標題 Distinct saccades during figure-ground segregation and border-ownership discrimination.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE, Trans. Inf. & Syst.	6. 最初と最後の頁 1126-1134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2019EDP7020	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37件(うち招待講演 4件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 K. Sakai, K. Tanaka, R. von der Heydt, and E. Niebur
2. 発表標題 Receptive Field Structure of Border Ownership-selective Cells in Response to Direction of Figure.
3. 学会等名 Computational Neuroscience Meeting (CNS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sakai, K. Kimura, Y. Yamane, and H. Tamura
2. 発表標題 Figure-Ground Detection by a Population of Neurons with a Variety of Receptive-Field Structures in Monkey V4.
3. 学会等名 Computational Neuroscience Meeting (CNS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noriyo Shibata, Ko Sakai
2. 発表標題 Emotion modulates multiple colors for a short duration.
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Vision (APCV 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouji Kimura, Yukako Yamane, Hiroshi Tamura, Ko Sakai
2. 発表標題 Antagonistic receptive-field structure of V4 neurons detects local figure-ground organization in natural image patches.
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Vision (APCV 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Sakai, K. Kimura, M. Shishikura, Y. Yamane, H. Tamura
2 . 発表標題 Responses to figure-ground organization in natural image patches by monkey V4 neurons.
3 . 学会等名 Society of Neuroscience, Annual Meeting (SfN 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kimura, Y. Yamane, H. Tamura and K. Sakai
2 . 発表標題 Spatial Structure of Receptive Fields and Surrounds in Response to Local Figure-Ground Configuration in Monkey V4
3 . 学会等名 International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Sakai, K. Kimura, Y. Yamane, and H. Tamura
2 . 発表標題 Figure-Ground Coding in Monkey V4 --- Receptive Field Structure and Population Coding.
3 . 学会等名 Annual Meeting, Japanese Neuroscience Society (Neuro 2019)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Ko Sakai
2 . 発表標題 Cortical Representation of Figure and Shape ---Towards understanding the construction of an object in the visual system
3 . 学会等名 Centre for Integrative Neuroplasticity, Dept. of Biosciences, University of Oslo (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Ko Sakai
2. 発表標題 Cortical Representation of Figure and Shape
3. 学会等名 Faculty of Science and Technology, Norwegian University of Life Sciences (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Mori and K. Sakai
2. 発表標題 Analysis of real-world illumination -Lighting changes perception of specularity-
3. 学会等名 Lux Pacifica, Eighth, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sakai
2. 発表標題 Intermediate Representation of Figure and Shape in the Visual Cortex
3. 学会等名 Institute for Theoretical Physics, University of Bremen, Seminar (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sakai
2. 発表標題 Cortical Representation of Figure and Shape
3. 学会等名 Institute of Perception, Action and Behavior, University of Edinburgh, IPAB Seminar, (招待講演)
4. 発表年 2017年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究テーマ概要のご紹介  
<http://www.cvs.cs.tsukuba.ac.jp/research.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
研究分担者	田村 弘  (Tamura Hiroshi)  (80304038)	大阪大学・生命機能研究科・准教授    (14401)	
研究分担者	山根 ゆか子  (Yamane Yukako)  (70565043)	大阪大学・生命機能研究科・特別研究員(RPD)    (14401)	