

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26280047

研究課題名(和文) 図地の知覚と皮質におけるその群表現 --- 自然光景の理解に向けて

研究課題名(英文) Cortical Representation of Figure-Ground --- Toward Understanding Natural Scenes

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) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：視覚の目的は、光景中の何処に何があるかを知ることにある。図地分離は、光景を理解する上で基礎となる根源的な問題である。本研究では、複雑な自然光景のなかで背景(地)から物体領域(図)を分離する視覚メカニズムを明らかにすることを試みた。特に、電気生理実験・計算実験を並列してタイムリーに実施することにより、神経活動の記録にとどまらず、自然光景の中で細胞が群として図地分離を計算し得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：The aim of the visual system is to know what objects are located on where in a scene. The segregation of figural regions from a background is a fundamental problem in understanding scenes. Here, we have examined the cortical mechanisms underlying the discrimination of figures from the ground. Specifically, the combination of electrophysiology and computational studies has enabled us to find that a small group of neurons in the intermediate-level visual areas is capable of computing figure-ground discrimination in natural scenes.

研究分野：認知神経科学，計算論的神経科学，視覚科学

キーワード：認知科学 神経科学 脳・神経 画像・文章・音声等認識 心理物理実験 知覚 視覚 計算神経科学

1. 研究開始当初の背景

図地分離の基礎となっていると考えられているのは、図方向(Border Ownership)選択性細胞である。視覚皮質 V2, V4 の半数以上の細胞は、輪郭が受容野(CRF)上にある場合、そのどちら側に図があるかに依存して反応を変化させる(BO細胞)。申請者らは、図方向選択性の起源は、細胞の周辺変調・促進にあることを提案し(e.g., Sakai & Nishimura, J. Cognitive Neurosci. 2006; Wagatsuma & Sakai, J. Vision 2008), このモデルは広く議論されるに至っている(e.g., Zhang & von der Heydt, J. Neurosci. 2010; Sakai et al., SfN 2007 [oral session])。さらに、このモデル細胞が群となれば、図方向識別能力が約3倍になることが判ってきた。

自然画像への反応は、申請者らが計算論的モデルで予測したのに始まり(図1A-B: Sakai et al., SfN 2007), von der Heydtらが同一の刺激に対する単一細胞(V2)からの記録を開始している。まだ少数であるが自然輪郭に対してBOを示す細胞の存在を報告している。申請者らも予備実験によってこのことをV4で確認した。しかし、自然輪郭に対しては、個々の細胞のBO選択性が低いことが判った。BO細胞は群として図方向を分散表現し、これが図地分離の基礎となっていると考えられる。

2. 研究の目的

視覚の目的は、光景中の何処に何があるかを知ることにある。図地分離は、光景を理解する上で基礎となる根源的な問題である。本研究では、複雑な自然光景のなかで背景(地)から物体領域(図)を分離する視覚メカニズムを明らかにする。特に、心理物理実験・電気生理実験・計算実験を並列してタイムリーに実施することにより、自然光景における図地分離の知覚現象・神経機構・計算機構を明らかにする。

具体的には、(1)自然画像に対する図方向選択性(BO)細胞の応答と機能を明らかにする。そして、(2)BO細胞が符号化している特徴はGestalt 要因(e.g., 凸性や閉合性)であることを示す。さらに、(3)BO細胞の群化が図地分離の基礎となっていることを示す。最後に、(4)図地知覚における求心性・遠心性神経機構の機能分担と、(5)図表現神経機構を提案する。

本研究では、自然画像中の多数の輪郭をその特徴に基づいて系統化する。これを生理実験・心理物理実験・シミュレーションに共通の刺激として供し、一貫した実験を実施する。これによって、自然画像に対する知覚現象と、それに対応する神経基盤・計算機構を明らかにするという特色をもつ。特に、自然画像が内在する統計的性質を基礎として、多数細胞が群として示す機能が知覚に一致することを明らかにする点で独創的である。

3. 研究の方法

自然画像を対象として図地分離の神経機構を理解するためには、低注意状態の動物から広視野刺激(10~20°)に対する多数の細胞反応を同時記録することが必要である。大型スクリーンに刺激を呈示し、鎮痛不動化したサル(V4)から微小多点電極によって神経記録を行うことにより、この要求を実現できる。自然画像の性質を定量的に系統化して、生理実験・心理実験・計算実験に一貫して供して対応した解析を実施することにより、知覚に対応する神経機構とその計算機構の理解が可能になる。

4. 研究成果

電気生理実験を実施して、自然画像に対する視覚皮質(V1, V4)にある神経細胞の応答を記録・解析し、その機能の理解を進めた。まず、電気生理実験に供する自然輪郭刺激を作成した。このために、心理物理実験を計画・実施して、ヒト知覚に対応した自然輪郭特徴の定量方法を提案した。多様な輪郭をもつ自然画像パッチについて、凸性・閉合性・対称性を要因として、系統的な刺激群を作成することに成功した(図1, Sakai, et al., Frontiers in Psychology, 2015)。

電気生理実験では、まず微小多点電極記録におけるCRF位置の自動調整機構を構築し、

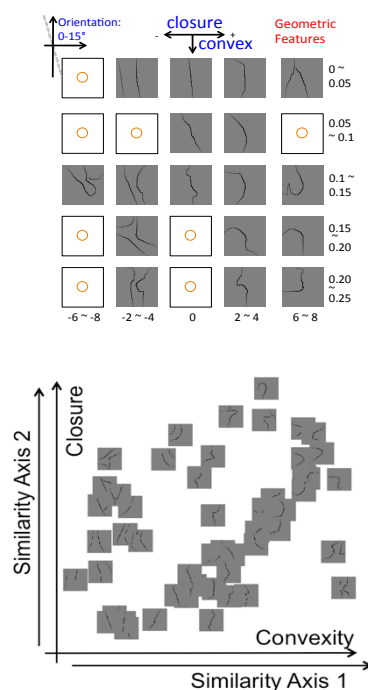


図1. (上)凸, 閉合を軸として配列した刺激パッチの例。白は自然画像中に該当するものが無い。(下) MDSの結果の例。凸, 閉合が輪郭の類似性を有意に説明する。この方法によって、自然画像中から知覚空間に対応した系統的な刺激群を作成できた。

この精度を確認した。多点電極記録では、事前に各細胞のCRF位置を同定することは困難である。そこで、少数の電極の反応から、CRFを推定するシステムを構築した。作成した自然輪郭刺激群を鎮痛不動化した動物に呈示して、視覚神経細胞の反応を微小多点電極より記録した。多数(100個程度)の細胞からの同時記録を得ることに成功した。これらの記録をspike sortingし、各細胞のCRF位置、方位選択性、BO(Border Ownership)選択性、図地等に対する応答を解析した。その結果、図地分離に関連する応答を示す細胞を数十個認めることができた。これら細胞応答の解析により、図地知覚を生起する神経メカニズムの解明にアプローチすることが可能となった。

自然画像に対する視覚皮質(V1, V4)にある神経細胞の応答を記録・解析し、その機能の理解を実施した。定量的な知覚対応をもつ系統的な自然輪郭刺激を呈示して記録を行った。構築した微小多点電極記録におけるCRF位置の自動調整機構システムを稼働させ、作成した自然輪郭刺激群を鎮痛不動化した動物に呈示して、視覚神経細胞の反応を記録した。多数(計1,000個超)の細胞からの同時記録を得ることに成功した。これらの記録をspike sortingし、各細胞のCRF位置、方位選択性、BO選択性、図地(FG)等に対する応答を解析した。Visual Response, CRF位置等の制約を満たす、図地分離に関連する応答を示す細胞を数十個程認めた。この他、選好する輪郭特徴等についても解析を行ったが、予想していたGestalt要因への依存性は認められなかった。

自然画像に対する視覚皮質(V4)にある神経細胞の応答を解析し、刺激の位置を系統的に制御した時の反応から、細胞が図または地に対する選好性を示すかどうかを総合的に解析した。さらに、刺激呈示前、呈示後0-100ms, 100-200msの時期に分けて、BO・FG選択性および同期について解析し、この結果から神経機構の制約について考察した。神経応答は70msでFG変調を示した。このことは、feed-forwardが重要な役割を果たしていることを示唆する。

計算実験を行って、記録した細胞応答を統合することによって相当の図地識別率が得られることが判った。これらの解析から、V4の相当数の神経細胞がFG選択性を示し、それらが群として図地識別を行っていることが示唆された。

FG選択性を示す細胞群の反応の統合による図地表現について、さらなる解析を行った。単一のFG選択性細胞の示す自然画像に対する図地識別の正答率は55%程度であったが、20個程度のモデル細胞群は80%程度の正答を示し得ることが判った。この結果は、V4細胞は集団として図地を表現していることを示す(図2, e.g., Hasuike, et al., 2015, 2016)

光景を理解する上で基礎となる根源的な問

題である図地分離に注目して、電気生理実験・心理物理実験・計算実験を総合して皮質メカニズムの理解を試みた。従来は四角形などの簡単な図形についてしか研究がされてこなかったが、本研究では自然画像を刺激として利用した。これにより、複雑な自然光景のなかで背景(地)から物体領域(図)を分離する視覚メカニズムを明らかにすることを試みた。心理物理実験によって、自然画像から広い知覚特徴空間に分布するように画像パッチをサンプルした。この刺激群を呈示したV4からの神経記録は、FG選択性細胞の存在を示した。計算実験では、これらの細胞反応を統合することによって、自然画像中の図地分離が可能になることが示された。

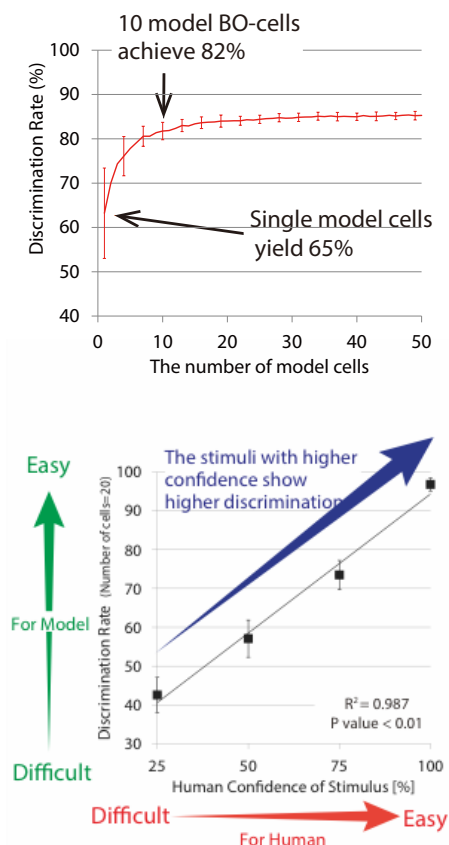


図2. 電気生理実験に基づいたモデル細胞を利用して、生理実験では得られない細胞反応の統合による識別能力を検討した。(上)図地識別率を、統合するモデル細胞数の関数として示した。単一細胞では識別率は65%であったが、10~20個のモデル細胞反応を統合すると識別率は80%を超えた。このことは、V4細胞群は自然画像に対して実用的な図地識別ができることを示す。(下)図地識別知覚の容易さは、刺激パッチに含まれる輪郭の形状によって異なる。モデル細胞の示す識別率を、ヒトが示す識別容易程度との関数として示した。両者は良い相関を示した。このことは、生理実験に基づくモデル細胞が、ヒト知覚を再現することを示す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件) 全て査読有

- 1) Sparse coding generates curvature selectivity in V4 neurons. Y. Hatori, T. Mashita and K. Sakai (2016) *Journal of Optical Society of America, A*, Vol. 33, No. 4, pp. 552-537, doi: 10.1364/JOSAA.33.000527
- 2) Neurons in the Inferior Temporal Cortex of Macaque Monkeys are Sensitive to Multiple Surface Features from Natural Objects. H. Tamura, H. Otsuka, Y. Yamane (2016) bioRxiv 086157, <http://dx.doi.org/10.1101/086157>
- 3) Similarity in Neuronal Firing Regimes across Mammalian Species. Y. Mochizuki, ..., Y. Yamane (39 番目), H. Tamura (40 番目), ..., S. Shinomoto (著者合計、54 名) (2016) *J. Neuroscience* 36:5736-5747, DOI:10.1523/JNEUROSCI.0230-16.2016
- 4) Representation of local figure-ground by a group of V4 cells. M. Hasuike, Y. Yamane, H. Tamura and K. Sakai (2016) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9947, pp. 131-137, doi: 10.1007/978-3-319-46687-3_14
- 5) Perceptual Representation of Material Quality - Adaptation to BRDF-morphing Images -, K. Kudou and K. Sakai (2016) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9947, pp. 208-212, doi: 10.1007/978-3-319-46681-1_25 (Oct. 18, Kyoto)
- 6) Perceptual Representation and Effectiveness of Local Figure-Ground Cues in Natural Contours. K. Sakai, S. Matsuoka, K. Kurematsu and Y. Hatori (2015) *Frontiers in Psychology*, Vol. 6, Article 168503, November 2015, <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01685>, doi: 10.3389/fpsyg.2015.01685
- 7) Facilitatory mechanisms of specular highlights in the perception of depth. K. Sakai, R. Meiji and T. Abe (2015) *Vision Research*, Vol. 115, B, pp. 188-198, doi:10.1016/j.visres.2015.05.001
- 8) Neural construction of 3D medial axis from the binocular fusion of 2D MAs. W.

Qiu, Y. Hatori and K. Sakai (2015) *Neurocomputing*, Vol. 149, Part B, 546-558, doi: 10.1016/j.neucom.2014.08.019

- 9) Figure-Ground Segregation by a Population of V4 cells --- A Computational Analysis on Distributed Representation. M. Hasuike, S. Ueno, D. Minowa, Y. Yamane, H. Tamura and K. Sakai. (2015) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9490, pp. 617-622, doi:10.1007/978-3-319-26535-3_70
 - 10) Early Representation of Shape by Onset Synchronization of Border-Ownership-Selective Cells in the V1-V2 Network. Y. Hatori and K. Sakai (2014) *Journal of Optical Society of America, A*, Vol. 31, No. 4, 716-729, doi: 10.1364/JOSAA.31.000716
 - 11) Spatial Range and Laminar Structures of Neuronal Correlations in the Cat Primary Visual Cortex. H. Tanaka, H. Tamura, I. Ohzawa (2014) *J. Neurophysiology* 112:705-718, DOI: 10.1152/jn.00652.2013
 - 12) Organization of Local Horizontal Functional Interactions between Neurons in the Inferior Temporal Cortex of Macaque Monkeys. H. Tamura, Y. Mori, H. Kaneko (2014) *J. Neurophysiology* 111:2589-2602. doi: 10.1152/jn.00336.2013.
 - 13) Perception of Symmetry in Natural Images --- A Cortical Representation of Shape. K. Sakai, K. Kurematsu, and S. Matsuoka (2014) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8836, pp. 135-141, doi:10.1007/978-3-319-12643-2_17
- [学会発表] (計 43 件)
- 1) Representation of local figure-ground by a group of V4 cells. M. Hasuike, Y. Yamane, H. Tamura and K. Sakai (2016) *Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2016*, (Oral Presentation), pp. 131-137, doi: 10.1007/978-3-319-46687-3_14 (Oct. 17, Kyoto)
 - 2) Perceptual Representation of Material Quality - Adaptation to BRDF-morphing Images -, K. Kudou and K. Sakai (2016) *Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP)*

2016, (Oral Presentation) pp.208-212,
doi: 10.1007/978-3-319-46681-1_25
(Oct.18, Kyoto)

3) Figure-Ground Segregation by a
Population of V4 cells. K. Sakai, M.
Hasuike, D. Minowa, Y. Yamane, H. Tamura
(2016) *Society for Neuroscience, Annual
Meeting 2016*, 54.25 (Nov. 12; San Diego,
CA)

4) Simultaneous Representation of Shape
and Material --- Adaptation to Material
Alters the Perception of Depth ---, K.
Sakai and T. Oyakawa (2016) *Vision
Sciences Society, Annual Meeting 2016,
Abstract; Journal of Vision*, 16, article
36.4006 (May 15, 2016; St. Petersburg,
FL)

5) Adaptation to Symmetry Axis. Y.
Sakata and K. Sakai (2016) *Vision
Sciences Society, Annual Meeting 2016,
Abstract; Journal of Vision*, 16, article
43.3038 (May 16, 2016; St. Petersburg,
FL)

6) Figure-Ground Segregation by a
Population of V4 cells --- A
Computational Analysis on Distributed
Representation. M. Hasuike, S. Ueno, D.
Minowa, Y. Yamane, H. Tamura and K.
Sakai. (2015) *Proceedings of
International Conference on Neural
Information Processing (ICONIP) 2015*,
(Oral Presentation), pp.617-622, doi:
10.1007/978-3-319-26535-3_70 (Nov. 10,
Istanbul, Turkey)

7) Adaptation to Symmetry Axis ---
Towards Understanding the Cortical
Representation of Shape ---. K. Sakai, K.
Kurematsu and Y. Sakata (2015) *Asia-
Pacific Conference on Vision 2015*,
Abstract in Session 3: Talk Learning &
Adaptation (July 10, 2015, Singapore)

8) Direction of Figure in Natural
Contours by Population Coding of
Surround-Modulation Models and V4
Neuronal Activities. M. Hasuike, Y.
Nakata, Y. Yamane, H. Tamura and K.
Sakai (2015) *Asia-Pacific Conference on
Vision 2015*, Abstract in Session 14:
Symposium: Vision & Machine Learning
(July 11, 2015, Singapore)

9) Cortical Representation of Material:
Adaptation to Reflectance Distribution
Function. K. Kudo and K. Sakai (2015)

AEARU CS-WT workshop 2015, Abstract,
p.73 (Feb. 26, Tsukuba)

10) Curvatures of Natural Contours
Facilitate Neural Responses of Figure-
Ground. M. Hasuike, Y. Yamane, H. Tamura
and K. Sakai (2015) *AEARU CS-WT workshop
2015, Abstract*, p.74 (Feb. 26, Tsukuba)

11) The Simultaneous Perception of
Material Qualities and Depth in Human
Vision. T. Oyakawa and K. Sakai (2015)
AEARU CS-WT workshop 2015, Abstract,
p.75 (Feb. 26, Tsukuba)

12) Global and local properties in the
perception of figure-ground. M. Urabe
and K. Sakai (2015) *AEARU CS-WT workshop
2015, Abstract*, p.76 (Feb. 26, Tsukuba)

13) Synchronous Firing Caused by Natural
Image Contours. D. Minowa, Y. Yamane, H.
Tamura and K. Sakai (2015) *AEARU CS-WT
workshop 2015, Abstract*, p.77-78 (Feb.
26, Tsukuba)

14) Vertical and Horizontal Structures
of Neuronal Correlations in the Cat
Primary Visual Cortex. H. Tanaka, H.
Tamura, I. Ohzawa (2015) *Neuroscience
2015, Society for Neuroscience 45th
annual meeting* (Oct. 17-21, 2015;
Chicago, USA)

15) Active Exploration of Visual Scenes
by Humans and Monkeys. Y. Yamane, J.
Ito, M. Suzuki, I. Fujita, S. Grün, H.
Tamura (2015) *JNNS 2015, 25th Annual
Conference of the Japanese Neural
Network Society* (Sep. 2-4, 2015; Tokyo,
Japan)

16) Preference to Faces in the Gaze
Target Selection. S. Izumi, P. E.
Maldonado, H. Tamura (2015) *JNNS 2015,
25th Annual Conference of the Japanese
Neural Network Society* (Sep. 2-4, 2015;
Tokyo, Japan)

17) Distinct Scan Modes in Monkey's
Free Viewing of Natural Images and
Related Neuronal Activities. J. Ito, Y.
Yamane, I. Fujita, H. Tamura, S. Grün
(2015) *ECVP2015, The 38th European
Conference on Visual Perception* (Aug.
23-27, 2015; Liverpool, UK)

18) Active Exploration of Visual Scenes
by Monkeys: Behavior and Neuronal
Activity in Primary Visual Cortex and

Inferior Temporal Cortex. Y. Yamane, J. Ito, M. Suzuki, I. Fujita, S. Grün, H. Tamura (2015) *Neuro 2015, 38th Annual Meeting for Japan Neuroscience Society* (Jul. 28-31, 2015; Kobe, Japan)

19) Laminar Structures of Loose and Precise Neuronal Correlations in the Cat Primary Visual Cortex. H. Tanaka, H. Tamura, I. Ohzawa (2015) *Neuro 2015, 38th Annual Meeting for Japan Neuroscience Society* (Jul. 28-31, 2015; Kobe, Japan)

20) Saccade Related Layer Specific Local Field Potential Activity in Macaque V1 during Free Viewing. R. Meyes, J. Ito, Y. Yamane, I. Fujita, H. Tamura, S. Grün (2015) *Eleventh Göttingen Meeting of the German Neuroscience Society* (Mar. 18-21, 2015; Göttingen, Germany)

21) Simultaneous Perception of Material Qualities and Depth. T. Oyakawa and K. Sakai (2015) *Proceedings of Japan Neural Networks Society*, Annual Meeting, p. 78 (Sep. 3, 2015)

22) Capability of Figure-Ground Discrimination by a Population of V4 cells. M. Hasuike, Y. Yamane, H. Tamura and K. Sakai (2015) *Proceedings of Japan Neural Networks Society*, Annual Meeting, p. 76 (Sep. 3, 2015)

23) Perception of Symmetry in Natural Images — A Cortical Representation of Shape. K. Sakai, K. Kurematsu, and S. Matsuoka (2014) *Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2014*, (Oral Presentation) pp. 135-141, doi:10.1007/978-3-319-12643-2_17 (Nov. 4, Kuching, Malaysia)

24) Sparseness and surface representation in the generation of curvature selectivity. Y. Hatori, T. Mashita and K. Sakai (2014) *Vision Sciences Society, Annual Meeting 2014, Abstract; Journal of Vision*, 14, article 23.343 (May 17, 2014; St. Petersburg, FL)

25) Perceptual characteristics of natural contours and their contributions to figure/ground segregation. K. Sakai, K. Kurematsu and S. Matsuoka (2014) *Vision Sciences Society, Annual Meeting 2014, Abstract; Journal of Vision*, 14,

article 26.338 (May 17, 2014; St. Petersburg, FL)

26) A search for material representation in the cortex. T. Oyakawa and K. Sakai (2014) *The Proceedings of Annual Conference of Japanese Neural Network Society*, 42-43 (Sep. 27, 2014, Hakodate)

27) Preference to faces in the gaze target selection. S. Izumi, P. E. Maldonado, H. Tamura (2014) *X Reunion Anual de la Sociedad Chilena de Neurociencia* (Oct. 1-4, 2014; Valdivia, Chile)

28) Layer Specificity of Ongoing and Evoked Neuronal Activities in the Inferior Temporal Cortex of Macaque Monkeys. J. Ito, Y. Yamane, I. Fujita, H. Tamura, S. Grün (2014) *Bernstein Conference* (Sept. 2-5, 2014; Göttingen, Germany)

29) Laminar Profile of Ongoing and Evoked Neuronal Activities in the Inferior Temporal Cortex of Macaque Monkeys. J. Ito, Y. Yamane, I. Fujita, H. Tamura, S. Grün (2014) *ECVP 2014, The 37th European Conference on Visual Perception* (Aug. 24-28, 2014; Belgrade, Serbia)

[その他]

ホームページ等

<http://www.cvs.cs.tsukuba.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

田村 弘 (TAMURA, Hiroshi)

大阪大学・大学院生命機能研究科・准教授

研究者番号 : 80304038

山根ゆか子 (YAMANE, Yukako)

大阪大学・大学院生命機能研究科・特任講師

研究者番号 : 70565043