

機関番号：53801

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500245

研究課題名（和文） 文脈依存応答に関連する神経ネットワークの自己組織化の研究

研究課題名（英文） Self-organization of neural networks in the primary visual cortex related to context dependent response

研究代表者

宮下 真信 (MIYASHITA MASANOBU)

沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・准教授

研究者番号：20443038

研究成果の概要（和文）：第一次視覚野細胞は視野上に提示された視覚刺激の関係によって応答修飾を受けるが、この文脈依存応答に関連する神経ネットワークの自己組織化数理モデルを構築した。この数理モデルによって得られた神経ネットワークに対して、スパイク放電型や発火頻度型の神経モデルを適用し、プラッド錯視刺激に対する応答を調べた。その結果、コンポーネントとパターン知覚の交替には、抑制性の相互作用が重要な働きをしていることがわかった。

研究成果の概要（英文）：We proposed a mathematical model of self-organization of the geniculocortical inputs and long-range horizontal connections in the layer 2/3 of primary visual cortex which relate to the context dependent visual responses. To reveal the possible involvement of the primary visual cortex in the perceptual transition from component motion to pattern motion with the stimulus contrast of plaid illusion, we performed simulation of a neural network composed of the spiking neuron model, whose retina-LGN-visual cortex afferent connections were determined by the self-organization model, and examined neuronal response properties to plaid stimuli. We found that the component-pattern transition is induced by the regulation of neuronal activities by the intracortical interaction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009年度	200,000	60,000	260,000
2010年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：数理神経科学

科研費の分科・細目：認知科学

キーワード：ゲシュタルト心理学, 錯視現象, 第一次視覚野, 長距離水平結合, 皮質マップ, 単純型細胞, 複雑型細胞

1. 研究開始当初の背景
大脳皮質第一視覚野(V1野)の入力層(4層)には単純型と呼ばれる細胞が存在し、4層細胞

から投射を受ける上位層(2/3層)には複雑型細胞が存在する。これまでに、多くの生理実験によって、カニツアの三角形のように物

理的には存在しない主観的輪郭線の認識には V1 野における近距離的には興奮性の遠距離的には抑制性が優位となる相互作用や、2/3 層における長距離水平結合が関係していることが報告されてきた。しかしながら、長距離水平結合の形成メカニズムや皮質内相互作用が文脈依存応答にどのような役割を果たしているのかについては明らかになっていない。そこで、本研究では、外側膝状体(LGN)–V1 野 4 層–2/3 層の経路並びに 2/3 層における長距離水平結合に関する神経ネットワークの自己組織化数理モデルによって、文脈依存に関連した神経ネットワークの形成を明らかにすることを目的とした。また、得られた神経ネットワークを使って、視覚刺激入力に対するモデル細胞の応答を求め、皮質内相互作用を抑圧した場合に文脈依存応答にどのような影響があるのかを調べることを目的とした。

2. 研究の目的

(1) LGN –V1 野 4 層–V1 野 2/3 層の神経ネットワークの自訴組織化数理モデルを構築し、4 層における単純型細胞、2/3 層における複雑型細胞並びに関連する皮質マップの形成を再現する、また、V1 野 2/3 層における神経ネットワークの自己組織化数理モデルへと拡張し、長距離水平結合の形成を再現する。

(2) 自己組織化数理モデルによって得られた神経ネットワークに神経ダイナミクスの数理モデルを適用し、モデル視覚野細胞の刺激コントラスト依存性など文脈依存性やゲシュタルト要因に対する応答特性を調べる、また、興奮性/抑制性の皮質間相互作用を抑圧した場合における細胞応答の変化について解析し、文脈依存応答を与える神経ネットワークについて考察する。

3. 研究の方法

(1) 2/3 層の複雑型細胞は、空間位相特性が異なる 4 層の単純型細胞の出力が収斂して形成される。そこで、まず外側膝状体(LGN)–V1 野 4 層間について神経細胞のゲート作用に関する数理モデルを構築する。また、V1 野 4 層–V1 野 2/3 層間の学習に減衰時定数の異なるグルタミン酸レセプタの作用を取り入れ、モデルを精緻化する。次に、視覚入力によって誘発されるモデル 2/3 層の細胞間の長距離水平結合形成に関する数理モデルを構築し、シミュレーションで得られた結果の解析をおこなう。

(2) 神経ネットワークの自己組織化数理モデルによって得られた結果に、スパイク放電型や発火頻度型の神経モデルを適用し、

モデル視覚野に視覚刺激を提示した場合の皮質細胞の応答をシミュレーションによって再現する。ここでは、ゲシュタルト要因として知られている、線分の長さチューニング特性、刺激コントラスト依存性について調べる。さらに、刺激コントラストに依存してパターン知覚とコンポーネント知覚が交替するブラッド錯視刺激を与えた場合の応答特性についても調べる。また、興奮性/抑性の皮質内相互作用のバランスを変えたとき、細胞の応答特性がどのように影響を受けるかを調べ、文脈依存応答に関連する神経ネットワークについて考察する。

4. 研究成果

(1) 2/3 層の複雑型細胞には、4 層の空間位相の異なる単純型細胞からの入力収斂していることが知られている。Hebb 学習は、同期的活動をするシナプス前細胞をシナプス後細胞へと結合させるように働く。しかしながら、空間位相の異なる単純型細胞は非同期的な活動をすると考えられるため、Hebb 学習によって複雑型細胞の形成を説明することは難しい問題とされてきた。本研究では、グルタミン受容体のサブタイプが誘発する膜電位変化をモデル化し自己組織化数理モデルを精緻化した。図 1 は自己組織化数理モデルによって得られた、V1 野 4 層における方位マップと受容野の結果である。また、図 2 は 2/3 層における受容野である。本モデルによって、ネコやサル V1 野に見られる方位マップや単純型、複雑型細胞の時空間構造を再現することに成功した。また我々は、方位マップが生後発達期の一定期間における視覚経験に依存して改編されることを実験で示してき

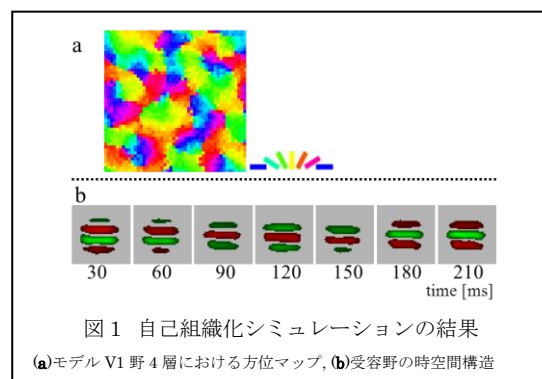


図 1 自己組織化シミュレーションの結果
(a)モデル V1 野 4 層における方位マップ、(b)受容野の時空間構造

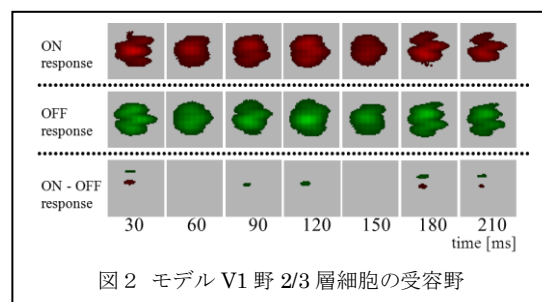
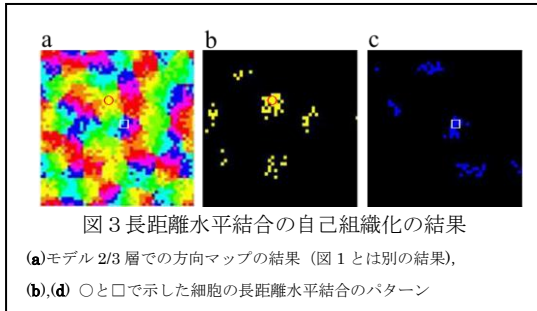


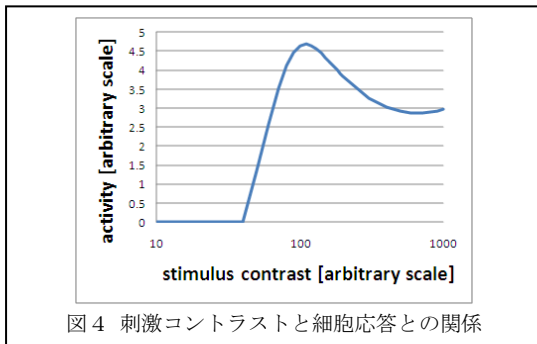
図 2 モデル V1 野 2/3 層細胞の受容野

たが、本シミュレーションによってもこの感受曲線を再現することに成功し、数理モデルの妥当性を検証した。

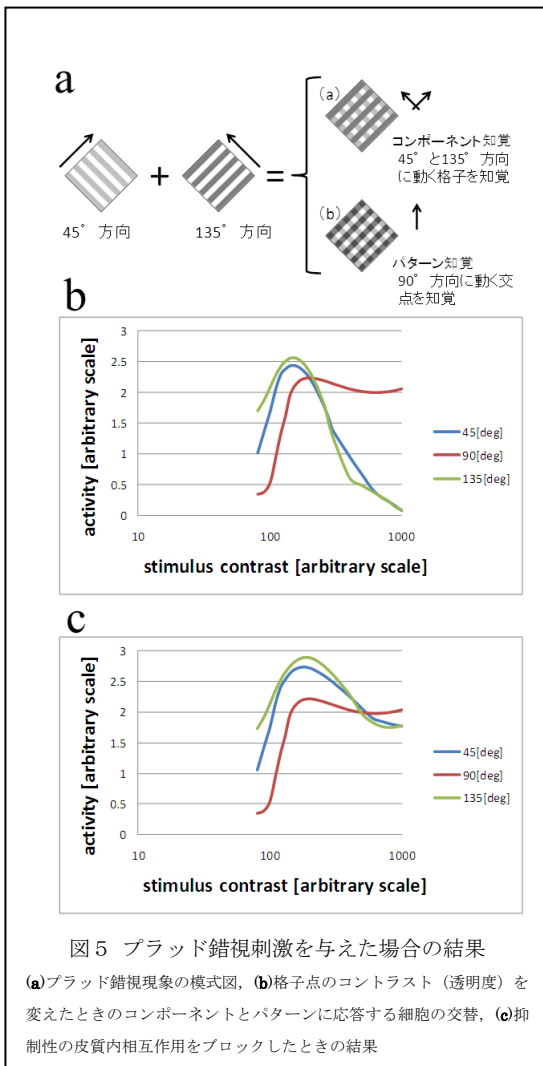
(2) ネコヤサルの2/3層には長距離水平結合が存在することが知られているが、我々は Hebb 学習に基づいた長距離水平結合の自己組織化数理モデルを構築した。図3はシミュレーションで得られた長距離水平結合のパターンを示した結果である。各細胞は線分の運動方向に対して選択性を有しているが、方向選択性が類似な細胞間に興奮性の水平結合が形成されることがわかった。



(3) 自己組織化された LGN-V1 野4層間の神経ネットワークに、スパイク放電型の神経細胞を適用し、ゲシュタルト要因である線分長チューニング、コントラスト依存性について調べた。図4は、線分刺激のコントラストチューニングカーブを求めた結果である。生理実験で報告されているように、コントラスト強度を高くしてゆくと、LGN 細胞の応答は飽和していない状態であっても、皮質細胞の応答は一定コントラスト以上で出力スパイクの頻度が一定レベルとなることが再現された。モデル皮質における抑制性相互作用をブロックすると高コントラスト刺激時における応答の飽和が消失することがわかった、また、脱抑制作用のみをブロックした場合には、高コントラスト刺激時で細胞応答が完全に抑圧されることがわかった。以上の結果から、視覚野における興奮性/抑制性の相互作用が文脈依存の応答に重要な働きをしていると結論された。



(4) 自己組織化数理モデルによって得られた神経ネットワークにおける文脈依存応答について詳細に調べるため、ブラッド錯視刺激を使ってモデル細胞応答特性を調べた。ブラッド錯視とは、2つの異なる方向に運動する格子を重ね合わせて提示した場合、格子の交点のコントラストが低いときは(透明度が低いとき)、2つの格子模様が独立して運動するように見えるコンポーネント知覚をすのに対し、交点のコントラスト強度が高くなると(透明度が高い)、交点が2つの格子の運動方向のベクトル和方向に動くように見えるパターン知覚をする現象である(図5a)。本研究では、スパイク放電型モデル並びに発火頻度型モデルを使って、モデル皮質細胞でコンポーネントに応答する細胞やパターンに反応する細胞が交点のコントラストに依存してどのような応答を示すか調べた。図5aに示すように、45度方向と135度方向に運動する2つの格子を重ね合わせてシミュレーションを実行した。その結果、コントラストが低い場合には、刺激コンポーネントに反応する45度と135度方向に選択性のある細胞群の活動が優位となるのに対



し、コントラスト強度が高い場合には、パターンに応答する 90 度に選択性のある細胞の活動が優位となる交替が自発的に起こることが示された (図 5b)。このことは、ブラッド錯視に関連する細胞活動が V1 野レベルですでに起きていることを示唆する結果である。また、抑制性の 90 度方向の運動に選択性のある細胞から 45 度, 135 度に選択性のある細胞への抑制性結合のみを選択的に遮断した結果、コンポーネントに反応する細胞からパターンに反応する細胞への活動の優位性の交替が遮断されることがわかった (図 5c)。すなわち、文脈依存反応の一種であるブラッド錯視現象は、パターンに反応する細胞からコンポーネントに反応する細胞への抑制性相互作用によって引き起こされることが予測された。

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 6 件)

- ① Wakabayashi N., Miyashita M., Tanaka S., A theoretical study of orientation map alteration induced by single-orientation exposure in the developing brain. IEICE Technical Report, 査読無 110, 2011, 1-6.
- ② Kurebayashi D., Kurebayashi K., Miyashita M., Tanaka S., A mathematical model of a visual cortical network for the generation of plaid illusion. IEICE Technical Report, 査読無 110, 2011, 7-12.
- ③ Iannella NL, Launey T, Tanaka S. Spike timing-dependent plasticity as the origin of the formation of clustered synaptic efficacy engrams. Front Comp Neurosci 査読有 14 doi: 10.3389/fncom.2010.00021.
- ④ Tanaka S, Miyashita M., Constraint on the number of synaptic inputs to a visual cortical neuron controls receptive field formation. Neural Comput. 査読有 21: 2009, 2554-80.
- ⑤ Tanaka S, Tani, T, Ribot J, O'Hashi K, Imamura K. A postnatal critical period for orientation plasticity in the cat visual cortex. PLoS ONE, 査読有 4, 2009, e5380.
- ⑥ Ribot J, Tanaka S, O'Hashi K, Ajima A. Anisotropy in the representation of direction preferences in cat early visual cortex. Eur. J. Neurosci. 査読有, 27: 2008, 2773-2780.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 若林和, 宮下真信, 田中繁, 発達期における単一方位視体験による方位マップ改編に関する理論研究. 電子情報通信学会 N C 研究会, 2011 年 3 月, 玉川大学.
- ② 紅林大地, 紅林広亮, 宮下真信, 田中繁, プ

ラッド錯視を引き起こす視覚神経ネットワークの数理モデル. 電子情報通信学会 N C 研究会, 2011 年 3 月, 玉川大学.

- ③ Miyashita M., Tanaka, S., Relationship between cortical structures of ocular dominance and binocular disparity: a model study. Society for Neuroscience, 2010 年 11 月 米国サンディエゴ, .
- ④ Miyashita M., Tanaka, S., A self-organization model for disparity selective simple cells and their related columnar structures. 日本神経科学会, 2010 年 9 月, 神戸.
- ⑤ Kurebayashi, K., Miyashita, M., Tanaka, S., Inhibitory circuits in the visual cortex control the generation of plaid illusion. 日本神経回路学会, 2010 年 9 月, 神戸.
- ⑥ Kurebayashi K., Kamiya N., Miyashita M., Tanaka, S., Effects of disinhibition on contrast-dependent responses of visual cortex neurons: a model study. 日本神経回路学会, 2009 年 9 月, 仙台.
- ⑦ Miyashita M., Tanaka, S., マカクザル V1 および V2 における色選択性マップ形成の数理モデル. 日本神経科学会, 2009 年 9 月, 名古屋.
- ⑧ Miyashita M., Tanaka, S., A theory of experience-dependent formation of binocular-disparity sensitive neurons in the visual cortex: Roles of interocular inhibitory interaction in the LGN. Society for Neuroscience. 2009 年 10 月, 米国シカゴ.
- ⑨ Miyashita M., Tanaka, S., Possible roles of interocular inhibition in LGN for the receptive field formation of visual cortical neurons. 日本神経科学会, 2008 年 9 月, 東京.
- ⑩ Miyashita M., Tanaka, S., Self-organization of complex-cell receptive fields and orientation-direction joint maps in layer 2/3 of visual cortex. Society for neuroscience, 2008 年 10 月, 米国ワシントン DC.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮下 真信 (MIYASHITA MASANOBU)
沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・
准教授
研究者番号：20443038

(3) 連携研究者

田中 繁 (TANAKA SHIGERU)
電気通信大学・教授
研究者番号：70281706