

令和元年5月21日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2014～2018

課題番号：26520201

研究課題名(和文) マウス全半球膜電位伝播波の甘利神経場モデルによる解析

研究課題名(英文) Amari neural field for mice brain activity

研究代表者

佐藤 譲 (Sato, Yuzuru)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号：30342794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：非局所的結合を持つ甘利神経場モデルを用いてマウス全半球の膜電位ダイナミクスを解析しました。脳科学の問題として自発活動時の膜電位伝播波の現象論を、数理科学の問題として神経場の標準モデルと時空連続な計算論を研究し、以下の成果を得ました。(1)神経網データベースに基づき、神経場モデルの構造を同定しました。(2)マウス全半球計測データに基づき、自発活動時の膜電位伝播波の現象論を構築しました。(3)膜電位伝播波の頑健性、孤立波パルサーの構成可能性を示しました。(4)非局所結合が曲率を持った神経場と数理的に同等であることから、神経場の空間構造がスポット解の安定性と分裂プロセスに影響することがわかりました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非局所的な結合を持つ興奮-抑制系である甘利神経場モデルを用いてマウス全半球の膜電位ダイナミクスを解析しました。具体的には、脳科学の問題として自発活動時の膜電位伝播波の現象論を、数理科学の問題として神経場の標準モデルと時空連続な計算論を研究しました。結果として、神経網データベースに基づく甘利神経場モデルの構造を同定し、マウス全半球自発活動の現象論を構築しました。また神経場モデルにおいて現れる様々な時空ダイナミクスが普遍的であること、そのダイナミクスの安定性は神経場のネットワーク構造や幾何構造に支配されていることがわかりました。

研究成果の概要(英文)：Dynamics of membrane potential in mice whole brain is studied by using Amari neural field model with non-local coupling. As neuroscience, the phenomenology of the membrane potential propagation wave seen in spontaneous activity is studied. As mathematical science, the standard model of neural fields and the space-time continuous computation theory are studied. The results are the followings: (1) We identified the structure of the networks of neural fields based on the Allen Brain Atlas database. (2) The phenomenology of the membrane potential wave seen in spontaneous activity is constructed. (3) Robustness of the propagation wave and constructivity of the pulsar of the solitary wave are shown. (4) Since the non-local coupling is mathematically equivalent to the spatial curvature of the neural fields, it is found that the spatial geometry of neural fields influences the stability and division process of the solitary waves.

研究分野：非線形物理学、力学系理論、複雑系

キーワード：甘利神経場 マウス全半球膜電位計測 進行スポット解 非局所結合ネットワーク 非自励力学系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

甘利神経場モデルは非局所的な結合を持つ興奮-抑制系の神経回路網モデルであり、数学的には人工神経回路網の時空連続極限として導出されます。先行研究として佐藤謙(研究代表者)は甘利俊一(理化学研究所)らと空間二次元の神経場を解析して、安定な孤立波と複雑な衝突現象を見いだしました。このモデルはとくに空間が二次元以上の場合については、数学的解析や非線形現象論の研究がこれまでほとんどなされていませんでした。これは、方程式が積分項を含む等数学的に複雑であることに加えて、生体内の神経場計測実験が極めて困難であるため、実験で現象を検証することが不可能な抽象モデルであったためである、と考えられます。ところが近年、少数の神経細胞の局所的な計測データの積み重ねにより神経網の詳細構造がデータベース化されており(Allen Brain Atlas: <http://connectivity.brain-map.org>)、このデータベースに基づいて神経場モデルの非局所作用素を具体的に同定することが可能となります。さらに重要な背景として、2011年以降、Optogeneticsの技術を援用することにより、行動しているマウス全半球の大域的な神経活動を高精度で実測することが可能になってきている(例えばUCLの島岡大輔らによる実験)ということがあげられます。安定孤立波の衝突現象については、西浦廉政(東北大学)らにより三成分の反応拡散系に対する現象論の数学的解析がなされており、この理論は二成分の神経場の現象論へと拡張可能です。ここに至って、反応拡散系を代表とする非線形偏微分方程式系の散逸構造研究に培われた数学的基盤と、マウス全半球膜電位ダイナミクス計測実験や神経回路網データベースが支える実証的基盤に基づいて、実験脳科学に貢献しうる神経場ダイナミクスの標準モデルとその現象論構築の可能性が浮かび上がります。さらに、本研究で与えられる標準モデルは、領野間の情報伝達過程を含み、時空連続な情報表現に立脚した新たな計算論の基礎となります。この計算論は、単一の神経細胞と軸索のモデルであるHodgkin-Huxley方程式に理念的に依拠した電気回路-神経回路メタファーと本質的に異なる大域的な情報処理の理論になることが研究代表者らによって示唆されていました。

### 2. 研究の目的

非局所的結合を持つ興奮-抑制系である甘利神経場モデルを用いてマウス全半球の膜電位ダイナミクスを解析します。具体的には、脳科学の問題として自発活動時の膜電位伝播波の現象論を、さらに数理科学の問題として神経場の標準モデルとその現象論、および時空連続な計算論を研究します。

### 3. 研究の方法

神経場の標準モデルとその現象論を構築し、時空連続な計算論を探求します。とくに以下の三つの課題(A), (B), (C)に取り組みます。

(A) 神経網データベースに基づいて甘利神経場モデルの非局所作用素を同定します。Allen Brain Atlas (<http://connectivity.brain-map.org/>)のデータを適度に粗視化し、甘利神経場の非局所作用素に含まれるネットワーク関数 $w(x)$ を同定し、方程式に実装します。

(B) マウス全半球の大域的神経活動計測実験に基づき、自発活動時の膜電位伝播波の現象論を確立します。具体的には(A)で同定された $w(x)$ を甘利神経場の実装し、数値計算により安定孤立波の生じる境界条件を解析します。この際、複数の実験条件に基づく全半球膜電位データを参照します。

(C) 課題(A), (B)の結果をふまえ神経場の標準モデルを導出し、時空連続な計算論の構築を行います。作業記憶の形成と操作の問題を安定孤立波の衝突現象として定式化していきます。

#### 4. 研究成果

(1) 神経網データベースに基づき、甘利神経場の非局所作用素の構造を同定しました。これに基づいた数値計算を行い、孤立進行波が生じることを確認しました。

(2) マウス全半球の大域的神経活動計測実験のデータに基づき、自発活動時の膜電位伝播波の現象論的解釈を行いました。単純な神経場のスポット解が長距離結合によって特徴的周波数を持つようになり、麻酔を外部一定入力とみなした場合、その値の減少に伴い進行波の速度が速まるという仮説を得ました。

(3) 自発活動時の膜電位伝播波の動的な頑健性、およびスポット解の生成系(パルサー)が長距離結合によって構成可能性であり、このパルサーが結合の長さに比例する特徴的周波数を持つ性質を数値実験で示しました。

(4) 空間的に非一様な形を持つ神経場ダイナミクスを考えると、その幾何構造がスポット解の安定性と分裂プロセスに影響することがわかりました。神経場の曲率が一定であるなど、単純な形状の場合には数学的な理論が存在し、ネットワーク表現される非局所結合が非一様な曲率を持った神経場と数理的に同等の効果を持つことがわかりました。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

1. Yuzuru Sato, Daisuke Shimaoka, Koichi Fujimoto, and Gentaro Taga, "Neural field dynamics for growing brains," NOLTA, vol. 7:2, pp. 226-233, (2016). 査読有
2. Yuzuru Sato, Nihat Ay "Information flow in learning a coin-tossing game," NOLTA, vol. 7:2, pp. 118-125, (2016). 査読有
3. Yuzuru Sato, "Robust pattern construction in two-dimensional neural field," Proc. AFCA, pp.85-89, (2015). 査読有
4. Kota Hiratsuka, Yuzuru Sato, and Zin Arai, "Computability and Complexity of Julia Sets: a review," NOLTA, vol 5:4, pp.410-423, (2014). 査読有
5. 他1件

〔学会発表〕(計7件)

1. Yuzuru Sato, "Anomalous dynamics and intermittency in random dynamical systems," Marseille neuroscience workshop, (2017)
2. 佐藤譲, "Pattern dynamics and memory in neural field dynamics," 「ヒト脳の形態形成から行動生成に至る発達のダイナミクス」研究集会, (2016).
3. Yuzuru Sato, "Neural Field dynamics for growing brains," AAAS panel presentation, AAAS, Washington DC, USA, (2016).
4. Yuzuru Sato, "Robust computation in neural field," AFCA keynote talk, CANDAR, Sapporo, Japan (2015).
5. Yuzuru Sato, "Asymmetric game dynamics and its applications," SAET, Tokyo, Japan (2014).
6. 他2件

〔その他〕  
ホームページ等

<http://www.math.sci.hokudai.ac.jp/~ysato/>

## 6. 研究組織

(1)研究分担者  
該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名： 島岡 大輔

ローマ字氏名： Daisuke Shimaoka

研究協力者氏名： 藤本 仰一

ローマ字氏名： Koichi Fujimoto

研究協力者氏名： 多賀 巖太郎

ローマ字氏名： Gentaro Taga

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。