

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20357

研究課題名(和文) 反応拡散ネットワーク上における局在構造の形成原理の解明

研究課題名(英文) Localized structures on reaction-diffusion networks

研究代表者

秦 重史 (Shigefumi, Hata)

鹿児島大学・理工学域理学系・准教授

研究者番号：70735927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではネットワーク状の媒質において反応物質が拡散する場合に、物質が媒質の一部に局在する現象を扱い、局在構造の形成原理の解明を試みた。主に理論解析と数値実験を通して解析を行った。得られた主な成果は次の通りである。(1) 物質の濃度が一樣な(つまり局在構造が存在しない)状態において、一定の条件が満たされると一樣状態が不安定になり、自発的に局在構造が形成されることを見出し、この条件を解析的に導出した。(2) 一定の条件が満たされると形成された局在構造が媒質上を伝播することを数値実験により見出し、その統計的な性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

局在構造を形成する反応拡散モデルはこれまで主に連続媒質上で解析が行われ、局在構造の形成メカニズムの理解が進められてきた。一方、複雑ネットワーク上に局在構造を形成するモデルはこれまでに提案されておらず、ネットワーク上で物質の局在化が起こるメカニズムは明らかになっていない。本研究では従来とは異なる機構によりネットワーク上で局在化が起こり得ることを示した。これは基礎的な結果であるが、我々の身の回りで起こる物質の局在化現象を理解する上で重要な知見である。

研究成果の概要(英文)：We analyzed the mechanism of the species localization in reaction-diffusion networks. We proved analytically that uniform distribution of species becomes unstable when a model parameter exceeds a certain threshold. Numerical results suggest that stationary particle-like structures (spots) develop spontaneously after the instability. We also found numerically that the stationary spot becomes unstable after another instability, which leads the onset of translational motion of the spot. After this instability, the spot moves over the entire network.

研究分野：非線形動力学

キーワード：パターン形成 複雑ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

近年、ネットワーク状の構造を持つ媒質における動的過程が広く研究されている。特に、ネットワーク上において反応因子が拡散的に移動する過程は、拡散により導かれる因子の様な分布とは異なり、時空間に不均一な分布を形成し得ることが知られている。反応拡散ネットワークと呼ばれるこのシステムは、生物の形態形成、生態系における捕食・被捕食ダイナミクス、交通網を介した感染症の拡大など、実世界のネットワーク媒質における動的過程を記述する手段として重宝される。さて、実世界においては、しばしば反応物質が系の一部分に集中する局在化が見られる。しかしながら、これまでに反応拡散ネットワークにおいて局在構造を形成する数理モデルは提案されていない。

なお、申請者らは過去にネットワーク上における局在するパターンを報告したが、これの実体は大域的パターンであり、その局在性は「ネットワーク上に大域的に生じるパターンのテンプレートがもつ局在性」に起因するものであった [S. Hata et al., *Sci. Reps.* (2014)].

2. 研究の目的

本研究の目的は、ネットワーク上において局在構造を形成する数理モデルの構築、および、構築した数理モデルの解析を通じた局在化が起こるメカニズムの同定である。

3. 研究の方法

主な研究方法は数理モデルの理論解析と数値実験である。ネットワーク上で局在構造を形成する反応拡散モデルの構築、およびその理論解析を行う。また、数理モデルの数値実験を通して、形成される局在構造が持つ統計的性質を調べる。

4. 研究成果

a) ネットワーク上で局在構造を形成する数理モデルの構築

これまでに、ネットワーク上における反応拡散ダイナミクスを記述するモデルが提案されている。これに葉脈の形成過程で用いられる「運河仮説」を想定した機構を取り入れることで、ネットワーク上で局在構造を形成することに成功した。このモデルはパラメータがある閾値を超えると一様平衡状態が不安定になり、系に定常な局在構造が形成される。さらに別の閾値を超えると局在構造が定常性を失い、ネットワーク上を伝播することが数値実験により確認できる。図1に伝播状態の数値実験の例を示す。

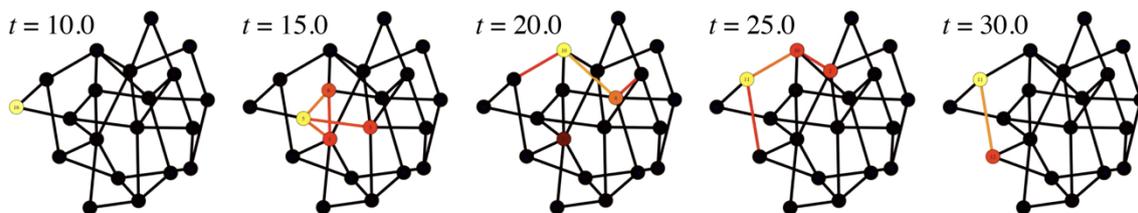


図1：ネットワーク上を伝播する局在構造。ノードの明暗は一様分布からの濃度差を表している。一様分布から濃度が異なる状態（局在構造）が時間経過とともにネットワークのノードを伝播していく。

b) 一様平衡状態が不安定化する条件の導出

線形安定性解析を通して、(a)において一様平衡状態が不安定になる条件を導出した。特にネットワークが1次元鎖の場合は条件を解析的に求めることができた。一般のネットワークの場合にはネットワークがスパースであることを仮定し、結合行列を近似評価することで安定性の条件を導出した。上記が数値実験の結果とよく整合することを確認した。なお一般のネットワークの場合に行った近似評価は、ネットワーク構造が特定の規則的な構造（コミュニティ構造、階層構造など）を持たず、次数に不均一性を持つランダムネットワーク（バラバシ・アルバートモデル、エルデシュ・レニーモデルなど）の場合により数値実験の結果とよりよく整合することが確認できた。これは上記の近似評価がネットワークノードの次数（ネットワーク全体の構造では

なく、ネットワークを構成する各ノードの局所的な性質)に基づくことから妥当な結果と言える。

c) 局在構造が定常性を持つ条件の精査

(a)において局在構造の定常性が不安定になる条件を数値的に調査した。特に、ネットワーク構造やモデルパラメータが不安定化に与える影響を精査した。得られた相図において、定常構造・伝播構造を形成するパラメータ領域の境界は極めて複雑な形をなしていることがわかった。上記の境界を数理モデルから解析的に導くことはできなかったが、過去に調べられていたもの(例えば [K. Krischer, *Phys. Rev. Lett.* (1994)] など)とは異なる機構が背後にあることが示唆される。

d) 伝播する局在構造の性質の調査

(c)の不安定化が起こった後、局在構造がネットワーク上を伝播する場合に、局在構造がネットワークの一部に長時間滞在する傾向が数値実験を通して確認できる。そこで各ノードを訪れる回数、およびその滞在時間など、伝播ダイナミクスの統計的な性質の、ネットワーク構造とモデルパラメータに対する依存性を広く調査した。結果、不安定化の直後、局在構造は次数の小さいノードに滞在する確率が高く、滞在時間も長い傾向があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazuyuki Sakoda, Hiroki Hata, Shigefumi Hata	4. 巻 9
2. 論文標題 Residue Effect of Parallel Interference Canceller in Belief Propagation Decoding in Massive MIMO Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications	6. 最初と最後の頁 13-17
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 Kazuyuki Sakoda, Hiroki Hata, Shigefumi Hata	4. 巻 65
2. 論文標題 Chaotic Encryption for Belief Propagation Decoding in Massive MIMO Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Communications Technology and Electronics	6. 最初と最後の頁 172-178
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 迫田和之, 秦浩起, 秦重史	4. 巻 J105-B
2. 論文標題 信号点間距離一定のカオス暗号と大規模MIMOにおけるBP復号	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 535-542
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11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 上川慎太郎, 秦浩起, 秦重史
2. 発表標題 素子の時定数がエイジング転移に与える影響
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上川慎太郎, 秦浩起, 秦重史
2. 発表標題 振動素子と減衰素子の振動数差がエイジング転移に与える影響
3. 学会等名 第126回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上川慎太郎, 秦浩起, 秦重史
2. 発表標題 振動素子と減衰素子の振動数差がエイジング転移に与える影響
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuyuki Sakoda, Hiroki Hata, Shigefumi Hata
2. 発表標題 Residue Effect of Parallel Interference Canceller in Belief Propagation Decoding in Massive MIMO Systems
3. 学会等名 2019 2nd IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Kamikawa, Shota Inagawa, Hiroki Hata, Shigefumi Hata
2. 発表標題 Synchronization dynamics of coupled-oscillator systems with damaged elements
3. 学会等名 Conference on Complex systems 2002 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigefumi Hata, Tsubasa Sakai
2. 発表標題 Degree and weighted degree of hypergraph
3. 学会等名 Workshop on dynamical processes on networks (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigefumi Hata, Tsubasa Sakai
2. 発表標題 Degree and weighted degree of hypergraph
3. 学会等名 Workshop in Ghent University (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 迫田和之, 秦浩起, 秦重史
2. 発表標題 大規模MIMOにおけるBP復号の誤り推定値の挙動：分類とその比率
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲川翔太, 秦浩起, 秦重史
2. 発表標題 振動素子と減衰素子が混在する系における同期現象
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 濱田祐輔, 秦重史, 秦浩起
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いたセルオートマトンの解析
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秦重史
2. 発表標題 ハイパーグラフにおいて高次相互作用が次数に与える影響
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------