

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03774

研究課題名(和文) 粘菌輸送管ネットワーク上のパターン形成に伴う時空間パターンの分岐現象と生物機能

研究課題名(英文) Bifurcation of spatio-temporal oscillation pattern on transportation network of slime mold

研究代表者

高松 敦子 (Takamatsu, Atsuko)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：20322670

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)：非線形振動子という柔軟で安定な振動を示す素子間の同期現象は、人工物から生物まで幅広い系で重要な役割を果たしている。その中で、同一の性質を持つ振動子集団でも、ある条件下では、同期する集団と非同期な集団に自発的に分かれてクラスター化する「キメラ状態」という現象が理論の上で発見された。本研究では、真正粘菌変形体という振動性細胞をモデル生物として、その成長過程における振動の時空間パターンを調べ、その存在を明らかにすることを目指した。数理モデルを組み合わせることで、粘菌における空間的に非対称な正と負の相互作用が、粘菌の成長に伴って現れる多様な振動パターンを生成する可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、非線形結合振動子系に現れる「キメラ状態」という現象は、理論上か、もしくは、単純な化学反応系でしか報告されて来なかった。生物における重要性は指摘されてきたが、これまでそのような報告はなかった。今回、おそらく初めて、生物での「キメラ状態」の報告となる。粘菌のような単純な系を用いることで、「キメラ状態」の生物学的意義を議論することができた。すなわち、粘菌はシステムとして、「キメラ状態」のしくみを利用し、振動の空間パターンを変化させ、環境に留まったり、逃れたりといった適応的な行動をしている可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：The phenomenon of synchronization among nonlinear oscillators, elements that exhibit flexible and stable oscillations, plays an important role in a wide range of systems from man-made objects to living organisms. In this context, a phenomenon called "chimeric state," in which a group of oscillators with identical properties spontaneously divides into synchronized and asynchronous clusters under certain conditions, has been theoretically discovered. In this study, using an oscillatory cell called a true slime mold as a model organism, to clarify its existence, the spatio-temporal patterns of oscillation during its growth process was investigated. By combining mathematical models, we showed that spatially asymmetric positive and negative interactions in slime molds may generate the diverse oscillatory patterns that emerge as the slime molds grow.

研究分野：生物物理

キーワード：結合振動子系 キメラ状態 粘菌 複雑ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

人工物から生物まで、非線形振動子間の同期現象は長い間研究者を引きつけてきた[1]。近年、複雑ネットワークの研究が進展すると、ネットワーク上の結合振動子系の振る舞いも注目されてきた[2]。さらに、同一の性質を持つ振動子集団でも、ある条件下では、同期する集団と非同期な集団に自発的に分かれてクラスター化する「キメラ状態」という現象が発見され[3]、現在に至るまで多くの研究者の興味を引いている[4, 5]。しかしながら、その研究の多くは抽象的な数理モデルを用いた数値シミュレーションや数学的な解析に関する研究が主流であり、自然現象、特に生命現象の中での報告はまだない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「キメラ状態」現象について、生物におけるその存在を明らかにすることにある。本研究では、振動性細胞である、真正粘菌変形体 (*Physarum polycephalum*; 以下単に粘菌と呼ぶ) をモデル生物として複雑ネットワーク上に現れる時空間振動パターンに着目することでこの問題にアプローチする。

3. 研究の方法

本研究は、観測実験結果と数理モデルによる解析結果を相互に比較することで進める。まず、2次元状に広がる粘菌の形態の時間的変遷と、振動の時空間パターンについて解析を行う。次に、粘菌に特化した結合振動子系の数理モデルを構築し、実験観測事実と照合しながら、これまで予備解析として得られていた多重振動数分岐現象の理解を進める。

4. 研究成果

(1) 2次元状の真正粘菌変形体の振動の時空間パターン分析

粘菌は細胞の厚みを振動させながら環境中を這い回る。その巨大な細胞を維持するために輸送管ネットワークを発達させた[6]。粘菌が新たな環境に置かれてから適応するまでの期間、ネットワーク形態は大きく変化する (図 1a)。

細胞の厚み振動について、画像を細かい区画に分けてその振動数を分析した結果、初期においては単一振動数であったものが、粘菌ネットワークが拡大するにつれ、離散的に複数の振動数成分を持つ状態に変化することがわかった (図 1b, c)。このような多重振動数へと変化するとき振動数が不連続に変化することから、その点がある種の分岐点であると考えられる。

同時に振動の時空間パターンを解析した結果、次のような特徴があることがわかった。分岐前は、大部分の領域で同位相同期し、外側のわずかな領域と反対位相同期していた (図 1c 左)。一方、分岐後には、領域を分割し、反対位相同期する部分と非同期のクラスターに分かれ (図 1c 中央)、さらに、時間経過した粘菌ネットワークではトラベル波も観察された (図 1c 右)。分岐後の振動の特徴として、反対位相やトラベル波として位相同期している部分の振動数は低く、振動数分布としては、はっきりとしたピークを示す。一方、どのクラスターにも属さない部分は非同期であり、振動数も高いことがわかった。

(2) 正と負の非対称相互作用を考慮した粘菌型結合振動子モデルの構築

これまで粘菌で見られた振動数分岐現象を再現する結合振動子モデルを構築した。(1)で観測された現象は、近年発見されたキメラ状態と呼ばれる現象ではないかと考えた。粘菌は、近くの前形質においては化学物質の拡散によって正の相互作用をし、遠くの前形質では、輸送管を通じた圧力差によって負の相互作用をされると考えられる (図 2a)。そこで、リング状に配した振動子間でこのような空間非対称な結合を持つ以下のような粘菌型の結合振動子モデルを構築した。

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega - \frac{1}{N} \sum_{j \neq i} G(\Delta x) \sin(\phi_i - \phi_j + \alpha)$$

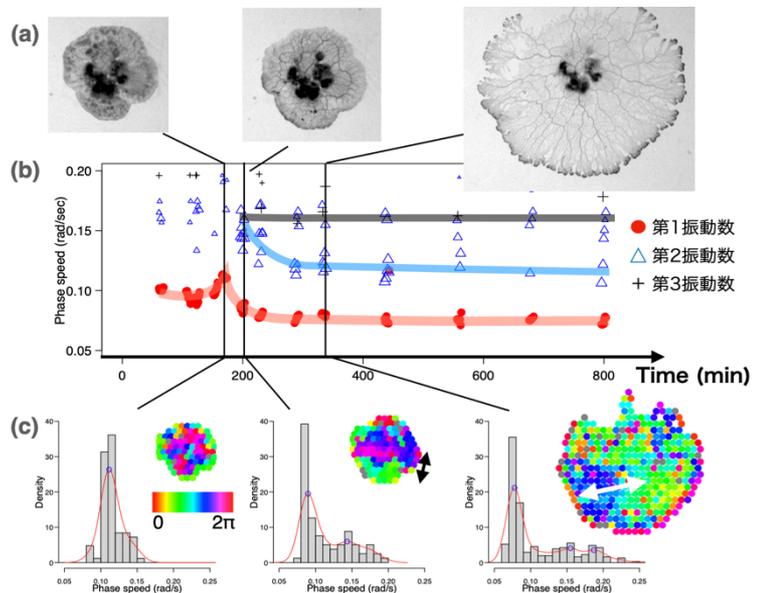


図 1 粘菌における振動数分岐現象: (a)粘菌輸送管ネットワーク, (b)振動数ピークの時間発展, (c)振動数分布と

ここで、 ϕ は各振動子の位相、 ω は固有振動数、 N は振動子の数を表す。 $G(\cdot)$ は相互作用関数であり、

$$G(\Delta x) = \frac{K}{2} \{A[\cos(2\pi\Delta x) - \cos(2\pi)] + [\cos(\pi\Delta x) - \cos(\pi)]\}$$

のように振動子間の距離 Δx に依存し、粘菌の部分間の相互作用を模倣する (図 2b)。

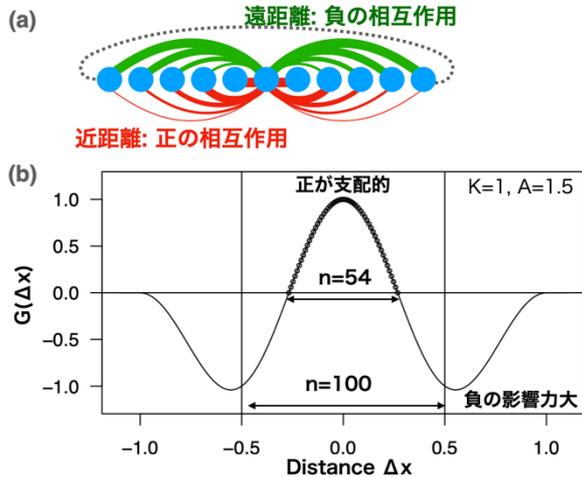


図 2 粘菌振動子間相互作用: (a)2 種類の相互作用の模式図, (b)距離依存の相互作用関数

同期部分のクラスター化、すなわち、キメラ状態が再現された。2 種類のクラスターの境界では位相スリップ現象が起こっており、振動数も、この 3 つのクラスター毎に異なることが確認された。従って、粘菌に見られた多重振動数は、キメラ状態に対応して生じている可能性が高いと言える。さらには、振動子数依存の振動数分布分岐の仕方が、粘菌輸送管ネットワークで見られたものと非常によく似ていることが確認された。

(3) 1 次元リング状の真正粘菌変形体

リング状の結合振動子系は、最も単純化された系であり、解析の際に非常に見通しが良い系でもある。そこで、実験系のアプローチとして、粘菌細胞自体をリング状に形成して、そのリングサイズを変化させた場合の振動パターンの解析を行った。

その結果、キメラ状の反対位相振動、トラベリング波などの振動パターンが確認された。このとき、位相同期する部分、境界、非同期部分の順に振動数は高くなることが確認され、1 次元結合振動子モデルの結果と対比させることができた。

(4) 2 次元ネットワークモデル

ネットワーク形状の影響を調べるために、端点を持つ直鎖状ネットワーク、網目状および樹状の 2 次元ネットワーク上で、同様の振る舞いを調べた (図 5)。その結果、どの形状でも、ネットワークサイズに依存して、同期、反対位相同期、トラベリング波の順に振動パターンが現れ、多重振動数も観測されることがわかった。特に、端点のあるネットワークでは、同位相同期のパターンは観測されなくなり、実際の粘菌に近づくことがわかった。ただし、これまで試したの 2 次元ネットワークでは、多重振動数の分離が観測しづらいことがわかった。特に、樹状型ネットワー

先行研究においてこれまでに調べられているのは、相互作用は正值でありその強さに非対称性のある結合振動子系であった。その場合には、位相同期するクラスターと、非同期のクラスターに分かれてキメラ化して振動することがわかっていた。今回、相互作用に、正負 2 重の非対称結合を考慮したことで、その二つの非対称性のバランスに応じて、多様なキメラ状態が観測されることがわかった。

まず、1 次元リング状の粘菌型結合振動子系における振動パターンを解析した (図 3)。ここで、粘菌が成長するにつれ、ネットワーク規模が大きくなるので、振動子の数をパラメータとした。その結果、振動指数に応じて、同位相同期から、非同期を経由し、反対位相、トラベル波へと振動パターンが変遷することがわかった。実験系で見られたような、反対位相振動部分と非同期

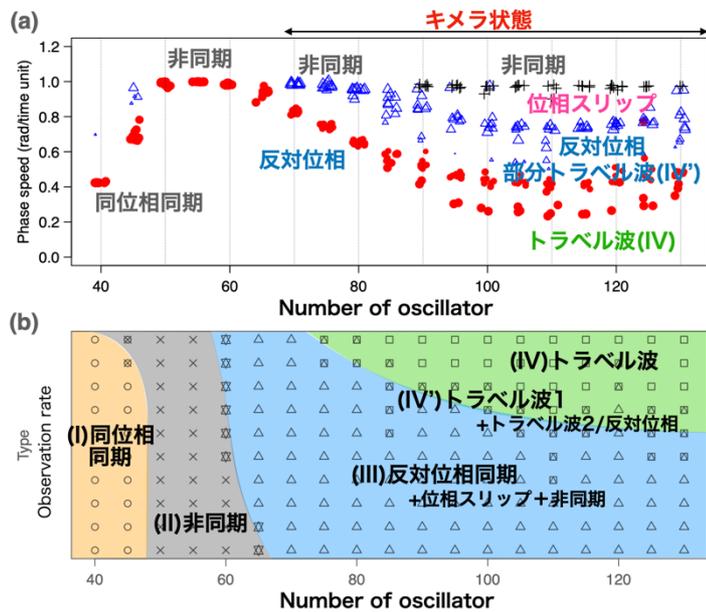


図 3 リング状の粘菌振動子モデルによる数値計算結果: (a)振動数の分岐図, (b)振動パターンの観察確率

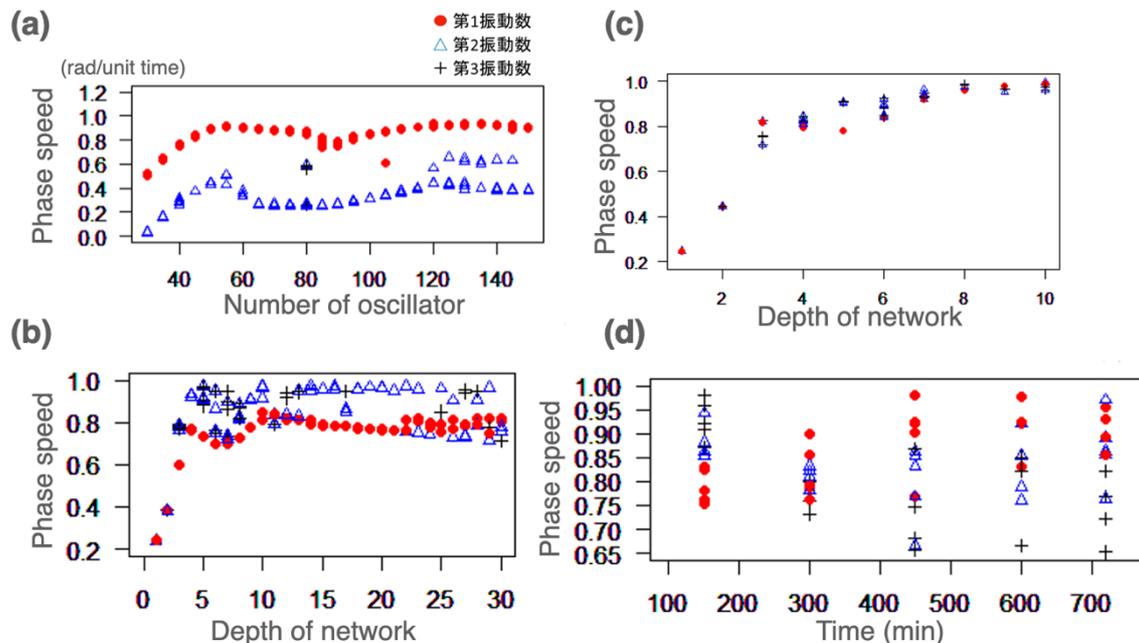


図4 様々なネットワークトポロジーにおける粘菌振動子モデルの数値計算結果（多重振動数分岐図）：(a)1次元鎖状, (b)2次元網目状, (c)2次元樹状, (d)粘菌輸送管ネットワークトポロジー

クにおいてこの傾向は顕著である（図4c）。その原因として、これまでのモデルでは、ネットワークトポロジーが対称であることが考えられた。そこで、トポロジーが非対称なネットワークを実現するために、実際の粘菌輸送管ネットワーク画像から抽出したトポロジー上に結合振動子を配置し、上述のモデルを適用した。その結果、ネットワーク中の統計量としては振動数分離が明瞭に観察されるようになった（図4d）。しかしながら、振動の時空間パターンの視点で見た場合、はっきりとしたカメラ状態としての観察は困難であった。つまり、反対位相クラスターや、トラベル波クラスターの存在がはっきりとは観察できなかった。実際の粘菌では、輸送管ネットワークを構成するリンクの太さ、長さは一様ではなく、太い管から、細かい管が分岐するような構造になっている。このような結合の強さに階層性を取り入れたモデルを今後検討する必要がある。さらに、トポロジーの非対称性が与える影響について、対称性をシステムティックに少しずつ崩した系で解析を行う必要があるだろう。

以上より、粘菌に見られた、多重振動数分岐現象は、相互作用に空間非対称性を持つことに起因して生じ、「カメラ状態」に極めて近い現象であることが確かめられた。最も興味深いのは、振動数が不連続に変化する分岐点である。このときの、粘菌の行動を観察すると、分岐前では、対称的に広がり、細胞の中心位置の移動は見られない。一方、分岐後では、ネットワーク形態が突如として大きく広がるようになり、重心位置の移動が開始する。粘菌はシステムとして、「カメラ状態」のしくみを利用し、振動の空間パターンを変化させ、環境に留まったり、逃れたりといった適応的な行動をしている可能性が示された。

参考文献

- [1] S. H. Strogatz, SYNC: Emergence of spontaneous order, Hyperion books, New York, 2003. (SYNC: なぜ自然はシンクロしたがるのか, 早川文庫, 2014.)
- [2] 中尾裕也, 複雑ネットワーク上の結合振動子系のダイナミクス, 2010.
- [3] Y. Kuramoto and D. Battogtokh, "Coexistence of coherence and incoherence in nonlocally coupled phase oscillators," *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 5, 380-385, 2002.
- [4] M. J. Panaggio and D. M. Abrams, "Chimera states: coexistence of coherence and incoherence in networks of coupled oscillators," *Nonlinearity*, 28, R67-R87, 2015.
- [5] J. F. Tetz, J. Rode, M. R. Tinsley, K. Showalter, and H. Engel, "Spiral wave chimera states in large populations of coupled chemical oscillators," *Nature Physics*, 14, 1-5, 2018.
- [6] A. Takamatsu, R. Okamoto, M. Ito, and T. Gomi, "Adaptation by environment-dependent dynamical network in Physarum," *Proceedings of 3rd International Symposium on Mobilligence Awaji*, 2009, pp.19-21, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高松敦子
2. 発表標題 粘菌輸送管ネットワーク上の多重振動数とキメラ状態の関係
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高松 敦子
2. 発表標題 粘菌輸送管ネットワーク上の時空間振動パターンと分岐現象
3. 学会等名 MIMS共同研究集会「生命現象の理解を深めるモデリングとネットワーク解析」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Shibata and Atsuko Takamatsu
2. 発表標題 Direct observation of branching rules in transportation network of Physarum plasmodium
3. 学会等名 第57回日本生物物理学会
4. 発表年 2019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
研究協力者	柴田 将広 (Shibata Masahiro)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	三木 渚 (Miki Nagisa)		
研究協力者	米岡 笑里 (Yoneoka Emiri)		
研究協力者	前田 航祐 (Maeda Kosuke)		

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