

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19881

研究課題名(和文) ネットワークシステムの無秩序性を活用した協調動作安定化とその制御・設計

研究課題名(英文) Stabilization of cooperative behavior utilizing disorder in network systems and its control and design

研究代表者

杉谷 栄規 (Sugitani, Yoshiki)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・講師

研究者番号：40780474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、振動子ネットワークに無秩序性を適切に加えることで、同期現象や振動停止現象などの協調動作の発生にどのような影響が与えられるのかを調査した。これまでは、解析の容易さから、そのような無秩序性の影響が調べられておらず、解析方法を提案する必要があった。複雑系科学および制御工学の知見を駆使し、無秩序性の影響を解析する方法を提案した。また、解析の結果、適切な無秩序性が、協調動作の発生を促進するという直感的な理解とは異なる興味不快成果を得た。さらに、数値シミュレーションおよび電子回路を用いた実験によって、協調動作発生のための適切な無秩序性について詳細に調査検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの研究では、解析の容易さから、振動子や相互作用の無秩序性についてあまり考慮されてこなかった。また、無秩序性は、協調動作に悪影響を与えるもの(不要なもの)と考えられてきていた。しかし、本研究の成果は、無秩序性が協調動作の促進をするという、これまでの直感的な理解に反するものであり、学術的に興味深く様々な分野での検討が期待される。また、この成果は、世の中の無秩序性が含まれるシステムの協調動作の解析に役立つほか、工学システムにおいて協調動作をさせるときに、あえて無秩序性を加えるなどの新しい設計指針を与え得る。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigate how the occurrence of cooperative behaviors such as synchronization and amplitude death can be affected by the addition of disorder to the oscillator network. In previous studies, the effects of such disorder have not been investigated due to difficulties of analysis. Thus, it was necessary to propose a new analytical method. We proposed a method to analyze the effects of disorder by using the knowledge of complex systems science and control engineering. The analysis yielded interesting results that differ from the intuitive understanding that appropriate disorder promotes the occurrence of cooperative behavior. Furthermore, we investigated in detail the appropriate disorder for the generation of cooperative behavior through numerical simulations and experiments using electronic circuits.

研究分野：複雑系科学

キーワード：同期現象 振動停止現象 結合発振器ネットワーク 結合遅延 無秩序

1. 研究開始当初の背景

電力網、通信網、交通網などの複雑で大規模なネットワークシステムは、多数のサブシステムから構成されており、それらが協調動作をすることで、ネットワークの機能を維持している。しかし、ネットワーク全体は非常に複雑なため挙動の予測・制御が大変難しい。複雑系科学の分野では、こうしたネットワークシステムを複数の振動子が相互に作用（影響）した結合振動子ネットワークとして数理モデル化し、その挙動の解析が盛んにおこなわれている。

結合振動子ネットワークに生じる代表的な協調動作が、「同期現象」である。これは、全振動子が同じ“位相”で振動をする現象であり、電力網の発電機の同期を筆頭に様々な工学システムで利用されている。また、振動子の相互作用により、全振動子の“振幅”がゼロになる現象は、「振動停止現象」として知られている。この現象は、直流マイクログリッドの電圧安定化や熱音響システムの振動抑制など、工学システムにおける不要振動の抑制への応用が期待されている。

先行研究の多くは、解析の容易さなどから、振動子や相互作用が全て同一という理想的な仮定を設けていた。協調動作を工学的に利用する立場からしても、ネットワーク内のサブシステムが同一のパラメータを持つという仮定は、理にかなっていない。一方で、生物学の分野では、同期するネットワーク内の振動子や相互作用に最大で20%程度のバラツキ（標準偏差）があることが観測されている。

研究代表者は、これまで同期現象や振動停止現象を誘発させるパラメータ設計に取り組んできた。研究を進める中で、最近、相互作用内の少量の無秩序性（バラツキ）が、振動停止現象の安定性を高めることを発見した。また同時期にアメリカの研究グループが、ネットワーク内の一部の振動子の無秩序性（パラメータ誤差）が同期の安定化に寄与することを報告した。

しかし、無秩序性と協調動作の関係については検討が始まったばかりであり、「**無秩序性がどの程度、秩序立った協調動作の安定性を促すのか**」について、詳細には明らかになっていない。そこで本研究では、上記の学術的問いに対し、同期現象と振動停止現象に着目して、制御理論および回路理論などの工学的分野の視点から挑戦した。

2. 研究の目的

結合振動子ネットワーク内の無秩序性と協調動作の関係を明らかにし、協調動作をするために最適な無秩序性を設計することを目的とする。対象とする協調動作は、工学的に利用価値の高い「(1)同期現象」, 「(2)振動停止現象」に絞る。

3. 研究の方法

(1) 同期現象

無秩序性と同期現象との関係を明らかにするために、本研究では各振動子の時定数（タイムスケール）に誤差を加え、その標準偏差を無秩序性として扱う（図1）。このとき、ネットワーク全体として一様な同期解が存在しないため、全振動子が全く同じ位相で同期（完全同期）することはない（図2）。すなわち、誤差関数などを用いた理論的解

析は困難であると考えられる．そこで，本研究では，数値的および実験的に，最適な無秩序性の度合い（標準偏差）を検証する．

(2) 振動停止現象

周波数の無秩序性

各振動子の周波数に無秩序性（誤差）を印加する．振動子として

Hopf 分岐近傍の標準的な振動子

を採用する．これにより，自励振動を持つ様々なシステムへの応用を可能とする．無秩序性をパラメータの不確かさとして扱うことで，ロバスト制御理論のパラメトリックアプローチにより，最適な無秩序性の設計をおこなう（図2の上側）．

相互作用の無秩序性

本研究では，通信網，電力網などでよく活用されるツリー構造ネットワークへの拡張を試みる．ツリー構造は，連結で閉路を持たないという特徴を持つ．この特徴と周波数領域解析を利用することで，相互作用に最適な無秩序性を設計する（図2の下側）．

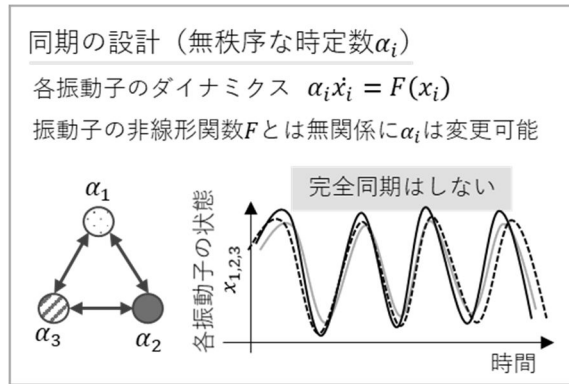


図1 同期現象の検討

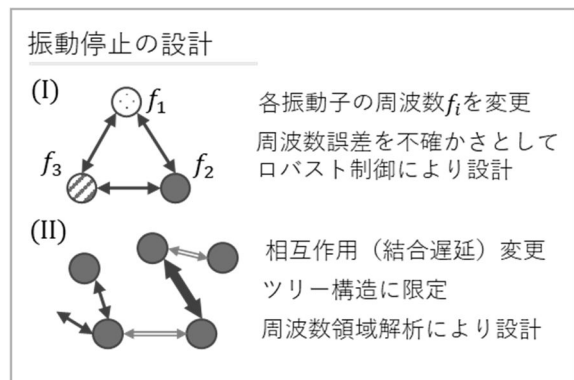


図2 振動停止現象の検討

4. 研究成果

研究の成果を同期現象と振動停止現象に分けて報告する．

(1) 同期現象

カオス的に振動する振動子を3つ結合した系において，無秩序がない場合に振動子が同期しない結合の強さで各振動子を結合しておいて，そこから徐々に時定数に分散（無秩序性）を与えた．その結果，分散値が0.05ほどで，振動子のカオス同期が観測された（図3参照）．これまでに観測された無秩序性が誘発する同期では，主に周期的に振動する振動子が扱われており今回発見された同期現象とは性質が異なる．さらに，この成果は電子回路を用いた実験においても確認できている．今回の成果は，自然界に存在する無秩序性（バラバラ具合）が，同期現象の誘発を促進しているという大変興味深いものである．また，これまで工学分野においては，振動をそろえる（同期させる）には，できるだけ各システム（振動子）をそろえる必要があるという先入観を持っていたが，本研究の成果が応用できれば，適切な無秩序性により，これまでより簡単に同期の誘発が行えたり，同期の安定性を強めたりなどが可能になる．今後は，さらに大規模なネットワークで無秩序性と同期との関係性を調べる必要がある．

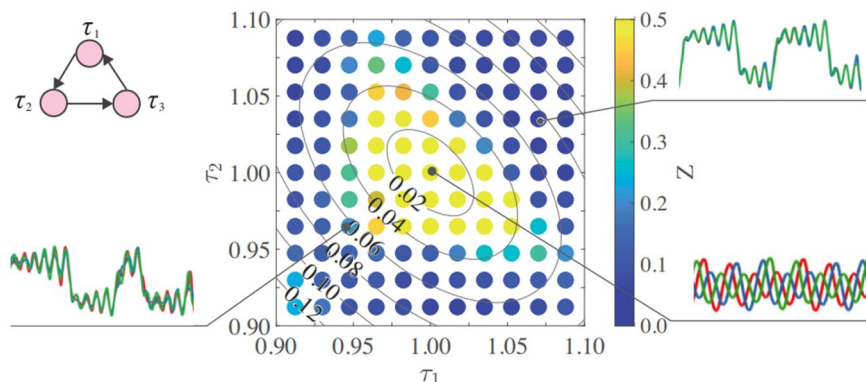


図 3 : 3 つの振動子を結合した系での同期の割合のカラープロット . 同期が達成される領域は青で , 達成されない領域は黄色である . 中央 $(\tau_1, \tau_2) = (1, 1)$ は , 振動子間に無秩序性が無いことを表し , 中央から離れるほど無秩序性 (分散) が加えられている . 中央から離れると同期達成している .

(2) 振動停止現象

周波数の無秩序性

二つの振動子を双方向に結合したシステムにおいて , 各周波数を適切にずらすことで周波数のズレがない場合よりも弱い相互作用で振動停止現象の発生を確認した (図 4 参照) . この現象は , 完全 2 部グラフネットワークにおいても確認されている . この成果は , 熱音響システムのように物理的制約のために相互作用の強さに上限がある工学系で活用できる可能性が高い . 今後は , より一般的なネットワーク構造での検証をおこなっていく予定である .

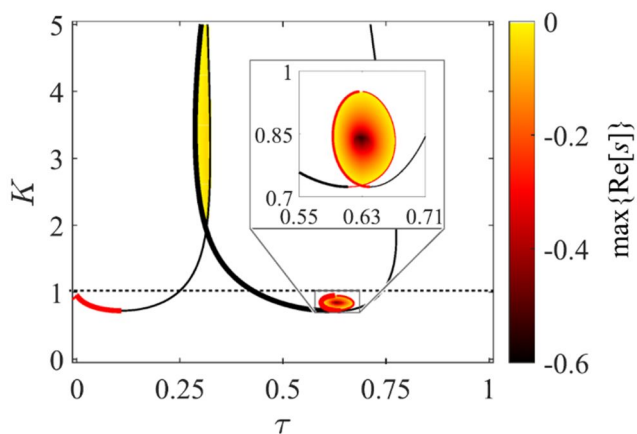


図 4 : 縦軸に相互作用の強さ , 横軸に結合遅延を表している . 色が塗られたパラメータで振動停止が確認できる . 左上の黄色い領域は , 振動子の周波数ズレがない場合に確認できる領域であり , 右下の小さい領域が今回新しく発見した領域である . 縦軸を比較すると , これまでより半分ぐらいの相互作用の強さで振動停止が生じている .

相互作用の無秩序性

ツリー構造振動子ネットワークにおいて、無秩序な相互作用で生じる振動停止現象の安定性を解析する手法を提案した。これまでは、相互作用が全て同一の場合でしか安定性を解析する方法がなかったので、本成果は、解析できるネットワークの幅を大幅に拡張したと言える。さらに、上記の結果を拡張子、一般のネットワーク構造でも同様に解析できることを明らかにした。具体的には、一般的なネットワークにおいては、ネットワーク内の閉ループに着目をすれば、非常にシンプルな解析が可能であることを明らかにした（図 5 参照）。本成果をさらに拡張子、将来的には、相互作用の設計までできるように研究を進めていきたい。

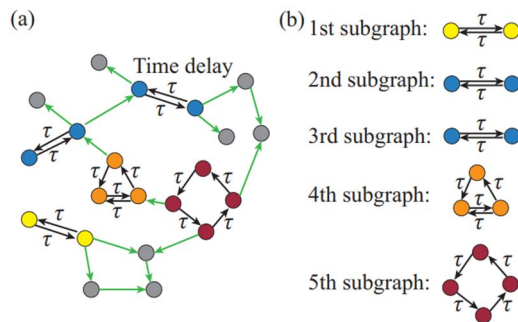


図 5：有効グラフ構造を持つネットワーク。解析したいネットワーク(a)があったとき、閉ループ構造に着目することで、(b)のようにサブネットワークに分割して解析が可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sugitani Yoshiki, Konishi Keiji	4. 巻 105
2. 論文標題 Amplitude death in delay-coupled oscillators on directed graphs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.105.064202	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 KONISHI Keiji, SUGITANI Yoshiki	4. 巻 16
2. 論文標題 Amplitude Death in Coupled Oscillators: An Approach from Robust Stability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE ESS Fundamentals Review	6. 最初と最後の頁 76-82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/essfr.16.2_76	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 Shinsuke Mizukami, Keiji Konishi, Yoshiki Sugitani, Takahiro Kouda, and Naoyuki Hara	4. 巻 104
2. 論文標題 Effects of frequency mismatch on amplitude death in delay-coupled oscillators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 054207-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.104.054207	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 Y. Sugitani, and K. Konishi	4. 巻 12
2. 論文標題 Delay-induced stabilization of coupled oscillators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 612-624
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.12.612	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 Y. Sugitani, Y. Zhang, and A. E. Motter	4. 巻 126
2. 論文標題 Synchronizing Chaos with Imperfections	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.16	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 該当する

1. 著者名 Y. Okigawa, Y. Sugitani, and K. Konishi	4. 巻 93
2. 論文標題 Amplitude death in oscillators coupled by asymmetric connection delays with tree graph topology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Physical Journal B	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjb/e2020-10018-5	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2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 R. Kawano, Y. Sugitani
2. 発表標題 Stability Analysis of Partial Amplitude Death in Delay-Coupled Star Networks
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Sugitani
2. 発表標題 Chaos synchronization by parameter heterogeneity
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------