

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12748

研究課題名（和文）不均一な相互作用を持つネットワークシステムに生じる安定化現象の解析・設計

研究課題名（英文）Stability analysis and design of the stabilization phenomenon in network systems with heterogeneity interactions

研究代表者

杉谷 栄規 (SUGITANI, YOSHIKI)

茨城大学・理工学研究科（工学野）・助教

研究者番号：40780474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：多数の要素から構成される電力網、通信網などの複雑なネットワークシステムの挙動の予測・制御は大変難しい。複雑系科学の分野では、これらネットワークシステムを簡易な振動子ネットワークとして数理モデル化し、研究・調査している。本研究では、振動子ネットワーク内の要素間の情報伝達の不均一性（ばらつき）が、システムの安定性にどのような影響を与えるのかを工学的な視点から調査した。その結果、特定のネットワーク構造において、適切な相互作用の不均一性が、システムの安定性を向上させることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、工学システムの不要な振動除去へ応用が期待されている「振動停止現象」と呼ばれる現象に着目をし、調査・研究をおこなった。直感的には、ネットワーク内の情報伝達が等しい方が、振動子ネットワークを安定化させやすいと感じるが、得られた研究成果は、適切な不均一性（ばらつき）があったほうが安定化させやすいというものであった。この結果は、システムの不均一性を上手く利用すれば、システム内の振動除去を容易におこなえることを示している。

研究成果の概要（英文）：It is very difficult to predict and control the behavior of complex network systems, such as power grids and communication networks, which are composed of many elements. In the field of complex systems science, these networked systems have been mathematically modeled as simple oscillator networks and have been studied and investigated. In this study, we investigated from an engineering point of view how the heterogeneity of the information transfer between the elements of the oscillator network affects the stability of the system. The results show that an appropriate heterogeneity of interactions improves the stability of the system.

研究分野：複雑系科学

キーワード：振動停止現象 発振器ネットワーク 遅延結合 グラフ理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多数のサブシステムから成る電力網、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。

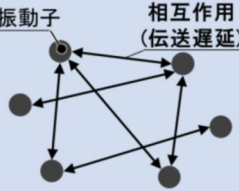
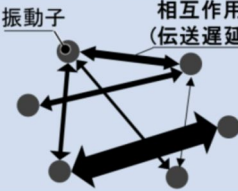
結合振動子ネットワークの全振動子の振動がある条件下で停止する現象を、振動停止現象と呼ぶ。この現象は直流マイクログリッドの電圧安定化や、熱音響システムの振動抑制など、大規模な工学システムにおける不要な振動抑制への応用に期待されている。しかし、既存の研究は、主に物理学分野でおこなわれ、振動停止の発生メカニズムの解析に重点を置いている。振動停止を工学システムで活用するには、現象の解析だけでなく振動停止を誘発する相互作用の設計が必要不可欠である。

研究代表者は、そうした相互作用の設計に制御工学を活用して取り組み、着実に研究成果を上げてきた。これまでの研究では解析を容易にするため、「ネットワーク内で全ての振動子間の相互作用が等しい」という理想的な仮定を設けていた。しかし、相互作用が全て等しいネットワークは現実的でない。振動停止現象を工学システムへ応用するには、これまでの成果をさらに拡張し、相互作用の不均一性(ばらつき)を考慮する必要がある(表1)。

2. 研究の目的

電力網などの挙動が複雑な大規模ネットワークに生じる振動停止現象は、重要なシステム安定化現象の一つである。研究代表者は、この振動停止現象を誘発するパラメータの設計に取り組んできた。これまでは理想的なネットワーク(振動子間の相互作用が全て均一)を設計の対象としていたが、最近、直積グラフや伝達関数表現を用いることで相互作用が不均一であっても解析可能であることを見出した。そこで本研究では、不均一な相互作用を持つネットワークで振動停止現象を誘発するためのパラメータ設計手法を提案する。実システムへの応用を念頭に、要素間の伝送遅延も考慮し、むしろ積極的に利用することでネットワーク安定化の指針を探る。本研究では、予測や制御が極めて難しい大規模ネットワークシステム制御・設計に向けた基盤的知見を提供することを目的とする。

表1: ネットワークシステムの数理モデル

	これまでの研究	応募研究
結合振動子ネットワーク		
特徴	相互作用が均一(理想的)	相互作用が不均一(現実的)
目的	ネットワークシステムを安定化する相互作用の解析・設計	

3. 研究の方法

(1) ブロック対角化によるネットワークの細分化:

ネットワーク構造を限定することで、特性式をブロック対角化し、システムを細分化することで解析・設計を目指す。主に取り組むグラフ構造を以下に示す。

直積グラフ: 直積グラフから構成されるネットワーク構造の隣接行列は、適切な行列により、その直積グラフを構成するサブグラフの大きさに細分化することができる。予備研究では、この性質を利用することで、2種類の結合遅延を持つ直積グラフの解析および設計をおこなった。本研究では、任意の数の結合遅延まで上記の結果を拡張する。

リンググラフ: リングネットワークにいくつかのショートカットパスを加えたネットワークにおいて、リングとショートカットパスにそれぞれ異なる結合遅延を加え、遅延のパラツキと安定性との関係を調査する。

バーベルグラフ: 2つの全結合ネットワークをブリッジで結合したバーベルグラフにおいて、全結合内の遅延とブリッジ内の遅延と振動停止現象の安定性について理論的に解析をおこなう。

(2) 非対称遅延ネットワークの周波数領域解析

遅延が非対称かつ不均一な場合において、制御工学の周波数領域解析を利用することで、安定性の解析が容易におこなえることを示す。

リンググラフ: 予備研究において、非対称遅延結合された離散時間発振器ネットワークにおいて、ネットワーク構造がリンググラフに限定されるとき、振動停止現象の安定性が特定の対称ネットワーク構造における振動停止現象の安定性と等価であることを示した。本研究では、制御工学で用いられる周波数領域解析を行うことで、発振器が連続系の場合でも同様の結果が得られるかの検証をおこなう。

ツリーグラフ: ツリーグラフは、巡回路を持たないグラフ構造であり、工学システムでも様々な場所で使用されている。本研究では、ツリーグラフの特徴を利用し、周波数領域解析をすることで、非対称遅延ネットワークでの安定性解析が対称遅延の解析と等価になることを示す。

#### 4. 研究成果

不均一な相互作用のネットワークでは、振動停止現象の解析・設計は困難と言われていた。代表者は、ネットワークの構造をある程度限定することで、均一の相互作用ネットワークと同様に振動停止現象の解析・設計ができることを示した。これにより、より現実に近いネットワークでの設計が可能になった。主な成果と今後の展望について以下に述べる。

研究方法（1）の主な成果について：

様々なネットワーク構造において、ブロック対角化を用いて問題を細分化することで、解析・設計が容易にできることを示した。また、各相互作用内の遅延間に、ある一定の規則があれば、遅延の値に関係ないパラメータの設計ができることも示した。興味深い結果としては、調査した全てのネットワーク構造において（～），相互作用が均一な場合（遅延が全て同じ）に比べ、不均一な方が、振動停止が生じるパラメータ領域が広い傾向にあることである（図1）。これは、実際の工学システムにおいて、安定化を誘発したい場合、あえて各システム間の相互作用に（適切な）不均一性を持たせたほうが良い場合があることを示唆している。

他の研究との関連として、相互作用の不均一性が同期現象の安定化に寄与することはいくつかの論文で示されていた（AISync として知られている）が、振動停止現象の安定化に寄与することは示されていない。また、本研究で用いたブロック対角化による解析方法は、振動停止現象だけでなく、そのほかの自己組織化（同期、クラスター同期、スプレーステイト）などの解析・設計などにも用いることができる。

研究方法（2）の主な成果について：

遅延の不均一性だけでなく非対称性も考慮したリングまたはツリーネットワーク構造において、ある特定の条件を満たすとき、振動停止現象の安定性が、遅延が均一なネットワークのものと等価になることを示した。本研究の成果を用いることで、これまで設計が困難であった非対称かつ不均一な遅延を持つネットワークにおいても均一なネットワークと同様に相互作用の設計が可能となる。本研究では、リングまたはツリーのみに注目をして研究をしてきたが、これらを組み合わせることでより複雑なネットワーク構造においても同様の結果が得られると期待される。

本研究では、主に、相互作用の不均一性を考慮したが、発振器自体の不均一性を加えることでより容易に振動停止現象の誘発が行える可能性がある。これまでの先行研究では、発振器の不均一性を考慮したものはあったが、それと同時に相互作用の不均一性を考慮したものは考えられていない。相互作用および発振器の不均一性と振動停止現象のロバスト性に関する検証は今後の課題である。

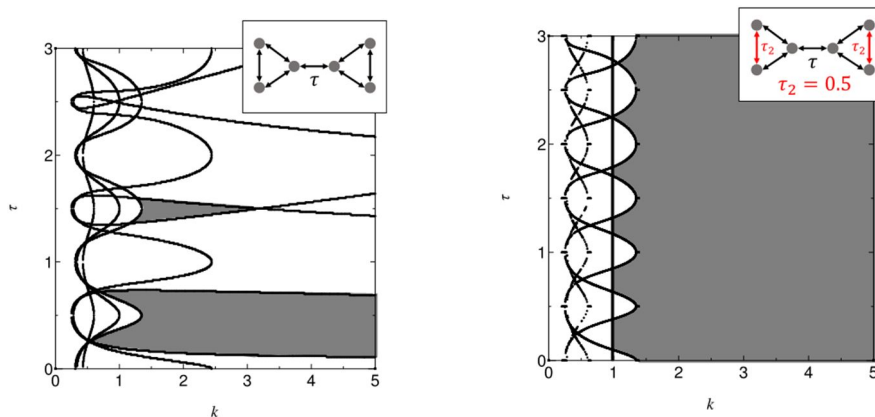


図1：6個の発振器から成るネットワークにおける振動停止が生じるパラメータ領域（灰色部分）. (左) 均一な遅延, (右) 不均一な遅延.

## 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 0件）

1. 著者名 Sugitani Yoshiki and Konishi Keiji	4. 巻 E101
2. 論文標題 Delay-Independent Design for Synchronization in Delayed-Coupled One-Dimensional Map Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Fundamentals,	6. 最初と最後の頁 1708-1712
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 Sugitani Yoshiki, Konishi Keiji	4. 巻 96
2. 論文標題 Design of coupling parameters for inducing amplitude death in Cartesian product networks of delayed coupled oscillators	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 42216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.96.042216	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 Sugitani Yoshiki, Konishi Keiji, Hara Naoyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Delay-independent design for chaotic synchronization in delay-coupled Bernoulli map networks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 162-172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.8.162	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Tetsu Iwamoto, Yoshiki Sugitani, Shinnosuke Masamura, Keiji Konishi and Naoyuki Hara
2. 発表標題 Suppression of oscillation in delay-coupled oscillator networks with slow switching topology
3. 学会等名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Kikuchi and Yoshiki Sugitani
2. 発表標題 Stability analysis of amplitude death on Cartesian product of multiple delayed-coupled Stuart-Landau oscillator networks
3. 学会等名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Okigawa and Yoshiki Sugitani
2. 発表標題 Stability analysis of amplitude death in ring coupled Stuart-Landau oscillators with heterogeneous connection delays
3. 学会等名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiki Sugitani
2. 発表標題 A suitable connection delay in shortcut paths enhances the stability of amplitude death in ring of delay-coupled oscillators
3. 学会等名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kikuchi Takahiro, Sugitani Yoshiki
2. 発表標題 Stability analysis of amplitude death in delayed coupled oscillators on a cubic graph with three different connection delays
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sugitani Yoshiki
2. 発表標題 Stability analysis of partial amplitude death on five delay-coupled Stuart-Landau oscillator
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 沖川裕貴, 杉谷栄規
2. 発表標題 非対称結合遅延を持つリング型高次元写像ネットワークに発生する振動停止現象の解析
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菊地貴裕, 杉谷栄規
2. 発表標題 3つの異なる遅延で結合された立方体グラフ構造を有する結合発振器群に生じる振動停止現象の解析
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉谷栄規
2. 発表標題 遅延結合Stuart-Landau発振器群における部分同期と部分振動停止現象の安定性解析
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----