

称号及び氏名 博士（工学） 岩本 哲

学位授与の日付 令和 5年 3月 31日

論文名 「ネットワークが時間的に変化する遅延結合発振器群の安定化現象」

論文審査委員 主査 小西 啓治

副査 林海

副査 森澤 和子

論文要旨

工学システムの大規模化・複雑化は現代社会が抱える大きな問題である。特に、電力の送配電網や通信ネットワークなど、私たちの身の回りには様々な「ネットワーク」システムが存在しており、ネットワークに接続されるサブシステムの数も、社会の発展と共に増加の一途を辿っている。無数のサブシステムによって構成される大規模・複雑なシステムを運用するためには、「制御」が必要不可欠である。しかし、サブシステムの状態を全て観測・推定して制御量を決定する「中央集権型」の制御は、サブシステムの増加に伴い困難となるであろう。このようなシステムに対して、サブシステム間の「相互作用」によって協調動作を促す「自律分散型」制御への転換が求められる。しかし、その協調動作を促す相互作用の設計は容易でなく、現在も幅広い分野で取り組まれている学際的な課題である。

非線形科学分野においては、一定のエネルギー供給によって自発的に振動（自励振動）する「発振器」に関する研究成果が多数報告されている。発振器間の相互作用を「結合」と呼び、複数の発振器を結合した「結合発振器」に生じる多様な協調現象は、学術的な興味から調査されてきただけでなく、工学システムに応用する試みもなされている。これらの協調現象の内、発振器の振動の位相が揃う「同期現象」は、複数のサブシステムによって構成されるシステムの「リズムを揃える」ことに利用可能であり、その応用例が報告されている。また、これらの協調現象の一つとして、発振器の振動が結合によって消滅する「安定化現象」の発生も知られている。この現象は、複数のサブシステムで構成される大規模な工学システムに生じる不要な振動が、中央集権型の制御を施さなくても、サブシステム間の相互作用だけで「自己組織的」に除去できる可能性を示唆している。この安定化現象は、発振器に内在する不安定な平衡点が結合によって安定化する「Amplitude Death (振動停止現象)」と、安定な平衡点が新しく出現する「Oscillation Death」に大別される。特に、振動停止現象は、安定化後の結合信号がゼロになる「非侵襲性」を有する

ため、工学システムの安定化に適用した際、少ないエネルギー消費で安定状態が維持できるというメリットも有している。

振動停止現象は非線形科学分野で精力的に研究されており、この現象を誘発する様々な結合方法が提案されている。その中でも、「遅延結合」は、情報やエネルギーの伝送遅延を考慮した相互作用であり、実システムにおいては避けられない「遅延」が安定化現象の誘発に有効活用できるという理由で、特に注目を集めている。しかし、遅延を含むシステムの安定性を解析することは困難であることが知られており、遅延結合で誘発される振動停止現象を扱っていた当初の先行研究は、シンプルな条件下での結合発振器のみを研究対象としていた。具体的には、発振器 2 個で構成される遅延結合発振器、発振器 3 個以上で構成される「全結合型」や「リング型」のネットワーク構造を伴う遅延結合発振器群などである。ただし、この 20 年間で、グラフラプリアンを活用した安定性解析の手法が進展し、様々なネットワーク構造を伴う遅延結合発振器群に生じる振動停止現象の安定性解析が可能となった。このような進展は、今後さらに大規模化・複雑化する「サブシステムが相互に影響を及ぼしあうシステム」の安定化手法として、振動停止現象が有力な候補となりえることを示唆している。

遅延結合発振器群に生じる振動停止現象に関する先行研究の多くは、「時間的に変化しないネットワーク」が伴うものを対象としてきた。しかし、我々の身の回りには、「時間的に変化するネットワーク」が数多く存在しており、その「ネットワーク構造」や「信号・エネルギーなどの伝搬の方向」は時々刻々と変化し続ける。このような「時変ネットワーク」を伴うシステムの安定性解析は容易でないことが知られている。加えて、信号やエネルギーの伝送に要する「遅延」が結合に含まれることで、その解析はより難しくなる。これに対して、Sugitani らは、ネットワーク構造が発振器の固有周期よりも非常に短い周期で「高速に変化する (Fast-Switching)」場合に限れば、遅延結合発振器群に生じる振動停止現象の安定性解析は、近似的に可能であることを示したが、数値的な検証だけに留まっていた。この結果を、実システムでも有用であることを示すには、誤差やノイズが含まれる実験状況下での検証が欠かせない。一方、Fast-Switching と対極に位置づけられる「低速に変化する (Slow-Switching)」場合、Fast-Switching で利用した近似法は利用できないが、従来の「時不変ネットワーク」を伴うシステムの安定性解析結果は、ある程度活用できる。したがって、Slow-Switching によって生じる現象は、全く手を付けられていないが、解析的に調査できる可能性も残されており、学術的に興味深い調査対象である。

本論文では、上記のような背景の下、下記の課題に取り組む。(課題 A) Fast-Switching ネットワークに生じる振動停止現象を実験的に検証する。(課題 B) 最小規模の Slow-Switching ネットワークに生じる新たな安定化現象を調査し、発生メカニズムを解明する。(課題 C) 課題 B における規模を拡張・一般化し、結合パラメータ・ネットワーク構造を設計する。(課題 D) 結合方向の Slow-Switching による安定化現象を調査する。これらの課題を解決することが、本論文の目的である。以下に各章の内容を示す。

第 1 章では、本論文の研究背景・目的・各章の概略を示した。

第 2 章では、Fast-Switching ネットワークに生じる振動停止現象を、電子回路で再現した(課題 A)。具体的には、カオス的な挙動を示すことで有名な Double-Scroll 発振回路で遅延結合発振器を実現し、ネットワーク構造の高速な時間的変化はアナログスイッチで実装した。最大 5 個の発振回路で構成される遅延結合発振器群において、スイッチング周期が十分に高速であれば、実験環境下で振動停止現象が生じる結合パラメータ領域は、先行研究の安定解析によって得られた領域と一致することを確認した。

第3章では、4個の発振器で構成される最小規模の Slow-Switching ネットワークにおける遅延結合発振器群の振る舞いを調査し、Amplitude Death (振動停止現象) や Oscillation Death とは異なる新たな安定化現象である「Amplitude Suppression (振動抑制現象)」が生じることを見出した。この現象は「ネットワーク構造の切り替え」「振動の抑制」「他の逆相同期への推移」「ゆるやかな振幅の増加」という4つの事象を繰り返し遷移することによって誘発されることを明らかにした(課題 B)。この発生メカニズムに基づき、結合パラメータの簡易な設計手順を提案した。また、この現象が生じる結合パラメータ領域を解析的に導出し、この領域は数値シミュレーションで得た領域と一致することを確認した。さらに、この現象は「誤差」や「ノイズ」には大きく影響されないものであることを、Double-Scroll 発振回路により実証した。

第4章では、第3章で得られた結果を拡張し、発振器の個数が4の倍数であれば、振動抑制現象が誘発できることを示した(課題 C)。第3章で得られたこの現象の発生メカニズムに着目し、「抑制を誘発する結合パラメータの設計手法」と置換行列を用いた「ネットワーク構造の設計手法」を提案した。特に、大規模システムの安定化手法として活用することを視野に入れ、最大800個の Stuart-Landau 発振器で構成される Slow-Switching ネットワークにおいても、提案手法は有効であることを数値シミュレーションによって確かめた。さらに、8個の Double-Scroll 発振回路で構成される Slow-Switching ネットワークにより、実験状況下でも提案手法による誘発が可能であることを検証した。

第5章では、4個の Stuart-Landau 発振器で構成される Slow-Switching ネットワークにおいて、「結合方向」の変化によっても振動抑制現象が生じることを示した(課題 D)。結合方向の切り替えと4相同期に着目し、振動抑制現象の発生メカニズムを明らかにした。第3章と第4章では、発振器の個数が4の倍数の場合のみを扱っていたのに対し、本章が扱う結合方向の切り替えでは、発振器が3個や5個の場合でも、「3相同期」「5相同期」を形成した後、振動抑制現象が誘発されることを数値的に示した。さらに、4個の Double-Scroll 発振回路で構成される Slow-Switching ネットワークを用いて、実験状況下においても振動抑制現象が誘発可能であることを確認した。

第6章では、本論文の結論と今後の課題を述べた。

審査結果の要旨

本論文では、ネットワーク構造が時間とともに変化する遅延結合発振器群に生じる安定化現象について、その安定性を解析し、安定化を誘発する設計も試み、さらに、電子回路による検証実験にも言及したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 発振器の固有周波数よりも十分に高い周波数で構造が変化するネットワークにも振動停止現象が生じることを電子回路で実証した。まず、カオスが生じることで知られている Double-Scroll 発振回路と遅延回路を組み合わせ、遅延結合発振器群を実装した。この遅延結合発振器群に振動停止現象を誘発する結合パラメータの領域は、安定解析に基づいて算出された領域と合致した。
- (2) 発振器の固有周波数よりも十分に低い周波数で構造が変化するネットワークには、振動停止現象とは発生メカニズムを異にする安定化現象 (振動抑制現象) が発生することに気づいた。まず、議論を簡単にするため、最小規模(4個)の遅延結合発振器群に焦点を絞り、

この現象の発生メカニズムの本質は、複数事象の遷移の繰り返しであることを明らかにした。さらに、この現象を誘発する結合パラメータの簡便な設計手順も与えた。また、この現象は、実験環境下でも頑健に発生することを、Double-Scroll 発振回路により実証した。

- (3) 上記で得られた成果は、4 の倍数個の発振器から構成される遅延結合発振器群にも適用できることを示した。具体的には、抑制を誘発する結合パラメータ・ネットワーク構造の設計手法を示した。また、8 個の Double-Scroll 発振回路を用いた実機検証も実施した。
- (4) 発振器の固有周波数よりも十分に低い周波数で「結合方向」のみが変化するネットワークにも振動抑制現象が生じることを見出した。この現象は、多相同期の形成を通じて発生することを明らかにした。また、4 個の Double-Scroll 発振回路を用いた実機検証で、この発生メカニズムの有効性を確認した。

以上の諸成果は、不安定化や振動の要因となる遅延時間が、システムの安定化に利用できることを明らかにしている。特に、ネットワーク構造を低速に変化させることで安定化を実現する研究成果は、不安定化している工学システムの安定運用に活用できる新しい基盤的な知見となる可能性も秘めている。また、これらの成果は、申請者が自立的に研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。