

氏 名	リョウノ コウキ 漁 野 康 紀
所 属	理工学研究科 機械工学専攻
学 位 の 種 類	博士（理学）
学 位 記 番 号	理工博 第 236 号
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	遅延結合による非線形ネットワークシステムにおける同期とグラフ 分割
論文審査委員	主査 准教授 小口 俊樹 委員 教 授 長谷 和徳 委員 教 授 吉村 卓也 委員 教 授 増田 士朗

【論文の内容の要旨】

蛍の一斉明滅や神経細胞集団の相互干渉的な振る舞いをはじめ，動的な振る舞いを持つ複数のシステムが，互いに影響を及ぼしあい，全体として一つのネットワークを構成することで生じうる同期現象は様々な場面で観察される．同期はスマートグリッドなどの工学的応用とも深く関係し，自然科学や社会科学から工学に至るまで，幅広い学問分野で関心を集め，数多くの研究がなされている．なかでもシステム理論の観点から，ネットワーク内のシステム全てが同期を生じる，いわゆるネットワーク完全同期や，ネットワーク内の一部のシステムだけが同期を生じる部分同期が発生するための条件の導出は，線形行列不等式（LMI）やグラフ理論を用いることでこれまでもなされてきている．その一方で，システム間の結合には，信号の伝送速度や計算処理に依存する遅延時間が多少なりとも必ず存在する．したがって，結合における遅延時間の存在が同期の発生に及ぼす影響は検討されるべきであるが，十分にはなされていない．そこで本論文では，システム間の結合に遅延時間（むだ時間）を伴うネットワークの完全同期ならびに部分同期の発生条件について検討している．特に，システム間の信号の伝送遅延を考慮して，一定時間遅れて到達する他のシステムの出力信号と，自身の現在の出力との差の線形結合（以降，伝送遅延結合と呼ぶ）により構成されるネットワークシステムを本論文での対象とし，そこで生じる部分同期のパターンとその発生条件を明らかにし，それらとネットワークの構造との関係を詳らかにしている．

本論文は，以下の通り全 5 章から構成されている．

第 1 章「序論」では，本論文の研究背景と目的について述べたのち，本論文で扱う対象

システムを明確にし、同期問題の定式化を行う。これまでの多くのネットワーク同期問題に関する研究は、ネットワーク内の全てのシステムが同一のダイナミクスである場合を主に扱ってきているが、本論文では必ずしも同一であることを仮定せず、結合システムの解の終局有界性を保証するための各システムの強準受動性と、システムの収束性のみを仮定している。また、本論文を読み進めるために必要な数学として、グラフ理論の基礎事項を簡潔に与えたのち、グラフ分割の一方法である公平分割を導入し、同期パターン、同期多様体、公平分割の関係を明らかにする。

第2章「伝送遅延結合ネットワークのむだ時間依存同期」では、一般的な伝送遅延結合ネットワークにおいて生じる同期について、グラフ分割に基づく同期条件の導出を行う。グラフの公平分割を用いることで、発生しうる部分同期パターンを、同一システム、非同システムに関わらず統一的に推定することが可能となり、さらには外部入力を印可することによる同期パターンの制御の可否についても言及している。また、十分に大きな結合強度と小さなむだ時間に対しては、最少個数のセルを持つ公平分割に対応する同期パターンが生じること、より小さい結合強度に対しては、公平分割の中から、対応する同期多様体の安定性が保証される結合強度とむだ時間の組の下で、その公平分割に相当する同期パターンが発生することを明らかにしている。

第3章「伝送遅延結合ネットワークのむだ時間非依存同期」では、遅延の大きさに依存しない完全同期ならびに部分同期の発生について検討している。一般に、むだ時間の存在は、システムの安定性劣化を引き起こす傾向があることから、同期条件は結合強度とむだ時間に依存する。しかしながら、伝送遅延結合によるネットワークでは、むだ時間の大きさに依存せず同期を生じる場合があることが知られている。そこで、本章では、むだ時間の大きさに依存することなく同期が生じるネットワークの構造を明らかにする。まず、公平分割に対応する同期パターンがむだ時間に依存せずに現れるための LMI 形式の条件を導出する。つづいて、LMI の解が存在する公平分割を特定することで、むだ時間非依存同期のパターンを明らかにする。その結果、ネットワークに奇数個のノードから構成されるリング構造（奇サイクル）が含まれるならば、最少個数のセルから成る公平分割に対して LMI の解が存在し、その公平分割に対応する同期パターンがむだ時間に依存せずに発生することが明らかとなった。これは、各ノードが同一次数を持つ同一システムであるならば、最少個数のセルから成る公平分割はネットワーク全体を一つのセルにもつため、奇サイクルを持つネットワークではむだ時間に依存することなく完全同期が生じることを意味する。さらに、奇サイクルがネットワークに含まれない場合には、任意の隣接する2つのノードが異なるセルに含まれるような公平分割に対して LMI 条件は可解であり、むだ時間非依存の部分同期が生じることを明らかにしている。

第4章「遅延結合による不安定システムの同時安定化と同期」では、遅延結合による同期の応用例として、遅延結合による不安定システムの同期に基づく同時安定化について検討している。ほぼ同一な複数のシステムを射影同期に用いられる結合に遅延結合を付加し

双方向結合することにより，各システムを同期させ，かつ平衡点の局所同時安定化が達成できることを示している．適用例として，回転型倒立振子を用い，遅延がない線形結合では平衡点の安定化と同期は不可能であるが，遅延結合により同時安定化が達成されることを示し，数値シミュレーションと実験によって妥当性を検証している．

第 5 章は結論であり，本研究で得られた成果を総括している．