

平成 21 年 4 月 2 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560379

研究課題名（和文）カオス回路ネットワークに発生する位相パターンによる
情報処理に関する研究研究課題名（英文）Information Processing by Phase Patterns Generated in
Chaotic Circuit Networks

研究代表者

西尾 芳文 (NISHIO YOSHIFUMI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：80253227

研究成果の概要：本研究では、多様な位相パターンを発生する大規模カオス回路ネットワークを構築し、回路実験・計算機による数値シミュレーション・理論解析を通して、大規模カオス回路ネットワークの位相パターンの特徴を明らかにするとともに、その情報処理への応用についての調査を行った。特に、新たな解析手法として、ネットワークに発生する位相パターンのカオス的な自己スイッチング現象をマルコフチェーンでモデリングする手法を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	600,000	4,000,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 通信・ネットワーク工学

キーワード：結合発振器・非線形回路・カオス・複雑系・時空カオス・カオス同期・クラスタリング・カオスの遍歴

1. 研究開始当初の背景

結合発振回路は、自然界の様々な現象を記述するモデルとして知られており、古くから数多くの研究がなされてきている。特に、二つの発振回路が結合した系に対しては、様々な結合形状をもつ系に発生する同期現象の安定性や発生条件などについて深く研究がなされている。一方、生体の様々な器官、特に神経系が多数の発振回路を結合したネットワークで記述することができるだろうということは比較的古くから指摘されている。近年、脳における情報処理がニューロンに入

力されるパルスの時空間パターンにより支配されていることを示唆する研究成果が多数発表されてきており、多様な位相パターンを生成するシステムモデルを提案し、発生する現象を解析することの重要性が高まってきた。しかしながら、大規模発振回路のネットワークにみられる諸現象についての研究はあまり多くはなく、十分に研究されているとはいえないのが現状である。これは従来の研究のほとんどが同相で同期する系を基本としており、その場合、多次元的に結合しても全ての発振回路が同相で同期しまう

ことが多く、多次元化による解析の困難さの増大に比べ、得られる結果が新規性に乏しいものとなるためであると考えられる。申請者はこれまでに、結合の方法を工夫することにより位相がずれて同期するような結合発振器回路を提案し、解析を行ってきた。また、その知見を活かして、系を大規模化することにより多様な位相パターンが発生可能であることを示唆してきており、この研究をうまく発展させれば、上記の要求に応えることができると考えている。

一方、近年、比較的低位元の方程式で記述される非線形系に発生するカオス発振現象は、その発生機構などが理論的に解明されてきており、複数のカオス発生系の結合系に代表される、より高次元の系にみられる複雑な現象に注目が集まってきている。申請者は、現在までに複数のカオス発生回路を結合したネットワークにみられるカオス発振の疑似同期状態が不規則に遍歴する現象やより複雑な時空カオス現象についての調査を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究では、多様な位相パターンを発生する大規模カオス回路ネットワークを構築し、回路実験・計算機による数値シミュレーション・理論解析を通して、「位相パターンの安定性に関する調査」・「位相パターンへの情報の埋め込み」・「位相パターンのカオス的遍歴の制御」を行うことにより、大規模カオス回路ネットワークの位相パターンの特徴を明らかにするとともに、その情報処理への応用を調査することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 対象とするカオス回路ネットワークの決定

本研究では、対象とするネットワークの構成要素となるカオス発生回路を決定することが重要である。また、そのカオス回路を結合するネットワークの形状を決定することも重要となる。回路の種類とネットワークの結合形状には膨大な組み合わせがあるが、これまでのカオス回路の結合系に関する研究で得た経験と知識を活かして、多様な位相パターンを発生するカオス回路ネットワークを決定する。決定にあたっては、実際に小規模のネットワークを試作し回路実験で現象を確認しながら行う。また、回路実験や計算機シミュレーションの容易さ、自然現象との対応なども考慮する必要がある。

(2) 回路実験による位相パターンの調査

百個程度までのカオス発生回路からなる

カオス回路ネットワークを実際に作成し、回路実験を行う。発生する様々な位相パターンの測定は複数のオシロスコープを並列に使用し行うことを予定している。初期値の与え方やパラメータを変化させ、発生する位相パターンがどのように変化するか調査する。特に、各カオス回路の不安定性を増していくことにより、位相パターンが空間的・時間的にカオス的に変化するような現象が発生することが予想される。どのようなパラメータで、このような位相パターンのカオス的な振る舞いが発生するかについて調査を行う。

(3) 計算機シミュレーションによる位相パターンの調査

計算機シミュレーションを行い、回路実験で観測された位相パターンの発生、及び、そのカオス的振る舞いを確認する。また、パラメータを変化させたときの、位相パターンの変化の様子などを詳細に調査する。特に、相転移が起こるパラメータの周りでの分岐現象については、回路実験ではその確認が困難であるので、数値シミュレーションによって始めて確認される現象も多いことが予想される。

(4) 位相パターンの安定性と発生メカニズムの調査

発生する多様な位相パターンについて、その安定性を非線形力学系の理論を用いて詳細に調査する。また、計算機シミュレーションで得られた位相パターンのカオス的な振る舞いのデータに対し、統計的な手法を用いて、空間的・時間的伝搬の特徴の詳細を明らかにする。次に、パラメータや初期値の変化の影響を詳細に調べ、位相パターンのカオス的伝搬の生成メカニズムを理論的に解析する。リアプノフ指数、エントロピー、ハウスドルフ次元など低自由度カオスの解析に用いられてきた指標を基にして、大規模カオスの定量的分析を行う。

(5) 位相パターンの分類

発生する位相パターンを理論的に得られた安定性を基準として分類する。また、位相パターンの空間的な伝搬の分類については、これまでほとんど報告されておらず、本研究を通して明らかにされることが期待される生成メカニズムを基準として分類することを考えている。

(6) 位相パターンへの情報の埋め込み

発生する位相パターンへの情報の埋め込みについて調査する。ネットワークサイズやカオス回路の数と埋め込まれる情報量との関係なども調査し、有効なネットワークの結合形状なども明らかにする。

4. 研究成果

(1) 多数の発振回路を結合したネットワークに見られる位相パターン

結合発振器は、系全体の消費エネルギーを最小化するように同期する傾向があるが、結合方法を工夫することにより、様々な位相パターンが発生する可能性があることを確認した。特に回路間が位相差をもって同期する星状結合を基本結合とすることにより、ネットワークが多様なパターンを生成することを確認した。

(2) カオス回路の結合ネットワークに見られる奇妙な同期現象の解析

複数のカオス回路をRC回路を共有するような形で結合した系の同期状態を調査し、これまで見られなかった位相差を保って同期する現象が発生する可能性があることを確認した。図1に2個のカオス回路の場合のコンピュータシミュレーション結果を示す。

(a)(b)はカオスアトラクタ、(c)はリサージュを表している。また、(d)は時間波形であり、2つのカオス波形が約140-150度程度の位相差を保って同期していることがわかる。図2に対応する回路実験結果を示す。また、結合数を変化することにより、この同期状態が発生する領域が大きく変化することも確認した。

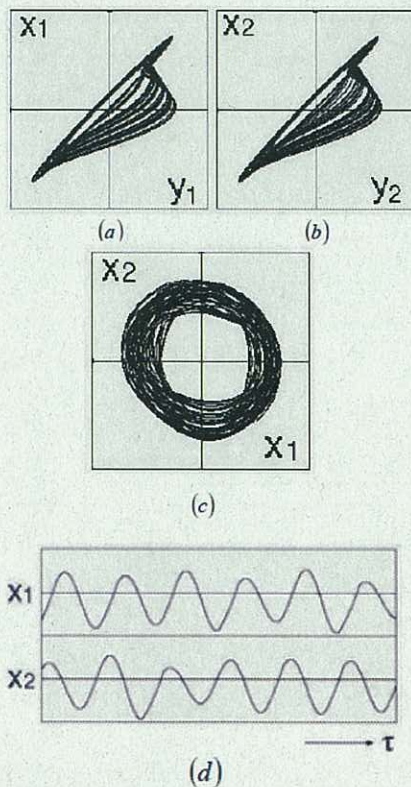


図1 RC共有型カオス結合回路の奇妙な同期現象(コンピュータシミュレーション結果)

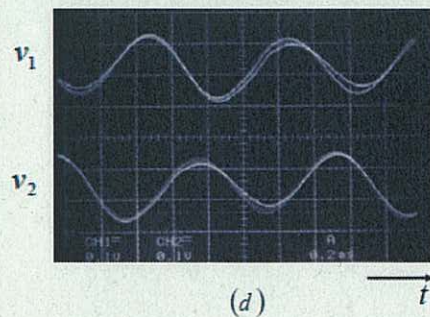
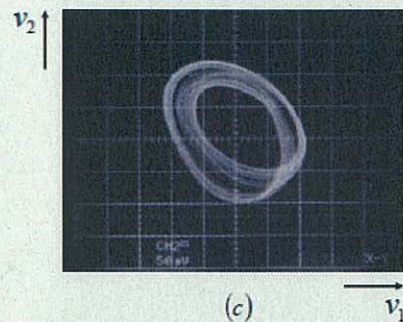
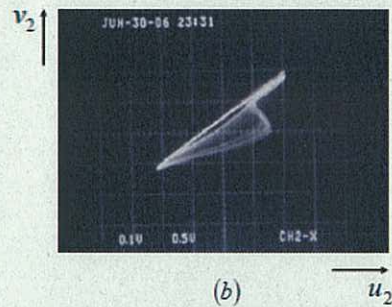
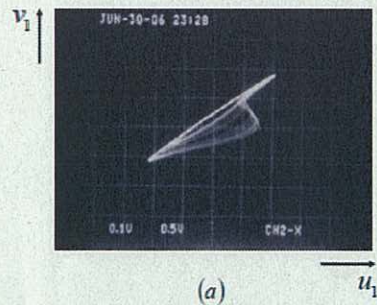


図2 RC共有型カオス結合回路の奇妙な同期現象(回路実験結果)

(3) 自己組織化写像のダイナミクスの調査

大規模非線形回路ネットワークである自己組織化写像の特性に変化をもたせて、そのダイナミクスの調査を行った。さらに、これらの自己組織化写像が、データ抽出に応用できる可能性があることを確認した。

(4) 相互インダクタで結合したカオス回路に見られるクラスタリング現象の解析

多数のカオス発生電子回路を相互インダクタで結合した回路モデルを対象とし、発生するカオス同期のクラスタリング現象の調査を行った。図3にクラスタリングとそのスイッチング現象に関するコンピュータシミュレーション結果を示す。このクラスタリングのパターンが自律的に遷移する現象をマルコフチェーンでモデリングし、その統計的特徴を明らかにすることができた。

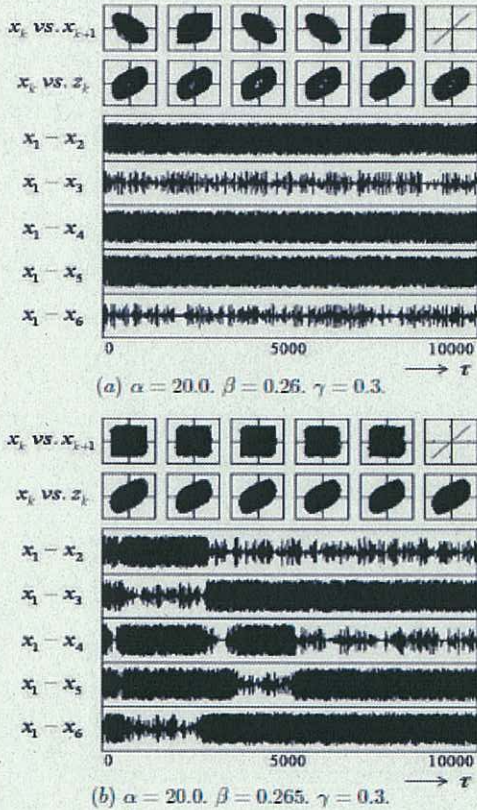


図3 相互インダクタで結合したカオス回路にみられるクラスタリング現象

(5) 二つのカオス回路を交差結合した系に見られる状態遷移現象の解析

二つの簡単なカオス回路をインダクタを介して交差結合した系の調査を行った。これまで観測することができなかった興味深い状態遷移現象がみられることを、回路実験と数値シミュレーションの両方で確認することができた。さらに、結合係数と遷移時間の関係についても調査を行った。

(6) 二つのカオス回路を交差結合した系に見られる同期現象の解析

二つの簡単なカオス回路をインダクタを介して交差結合した系に見られる同期現象の調査を行った。振動波形の正負が切り替わる点に、解の小さい振動の同期が関与していることを明らかにすることができた。

(7) 伝送線路のクロストークによるカオス同期の解析

伝送線路を含むカオス回路を並べて配置した回路(図4)について調査を行った。伝送線路を有限のLC梯子型回路で置換し、クロストークの効果を相互インダクタと相互キャパシタでモデル化し解析を行った(図5)。伝送線路に発生するクロストークが原因で、カオス同期が見られることを明らかにした。また、同期平面の安定性を数値的に調査し、カオス同期が発生することを裏付けた。図6に示すように、同期平面が不安定になると、カオス同期が崩壊することも確認することができた。

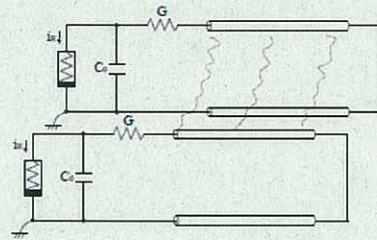


図4 伝送線路を含む回路の結合系

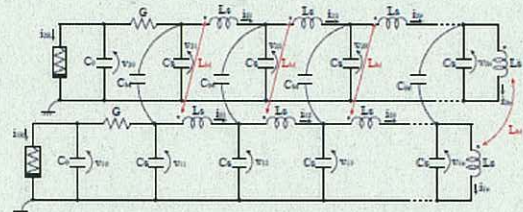
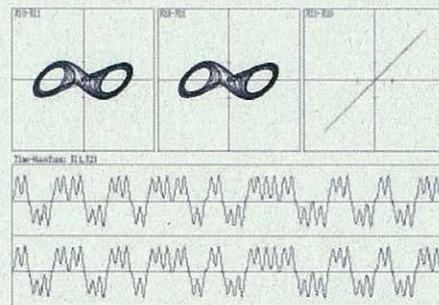
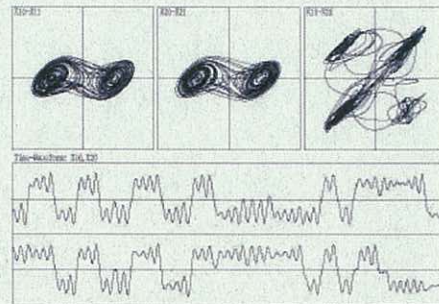


図5 伝送線路のLC回路によるモデル化



(a) $\alpha = 0.5, \beta = 17.0, \alpha\gamma_C = \gamma_L = 0.5$



(b) $\alpha = 0.4, \beta = 19.0, \alpha\gamma_C = \gamma_L = 0.4$

図6 カオス同期とその崩壊

(8) 多数のカオス回路の結合系に見られるスイッチング現象の調査

カオス回路ネットワークに発生する位相パターンは、構成要素である各カオス回路のカオス性を強くしたり、あるいは、結合の強さを調節したりすることにより、位相パターンが不安定化し、そのパターン間を解が不規則に遷移するカオス的スイッチング現象が発生する。本研究では、位相パターンのカオス的スイッチングがみられる2種類のタイプのカオス回路ネットワーク(図7と図8)を対象とし、その振る舞いの統計的な特性を明らかにし、スイッチングをマルコフチェーンでモデリングする手法を開発した。

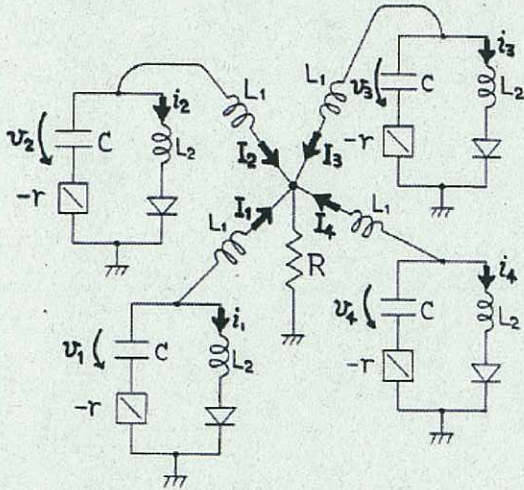


図7 カオス回路1

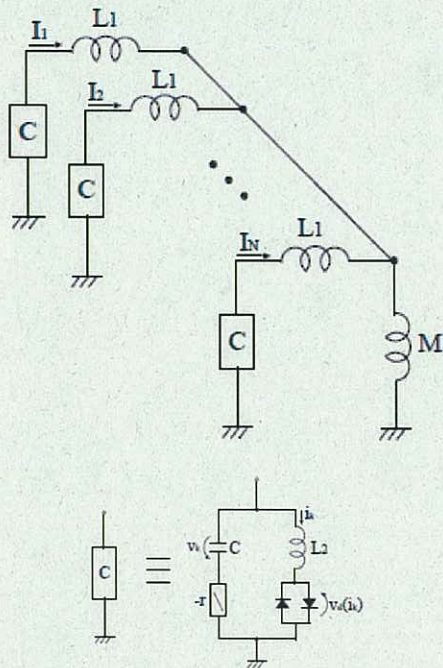
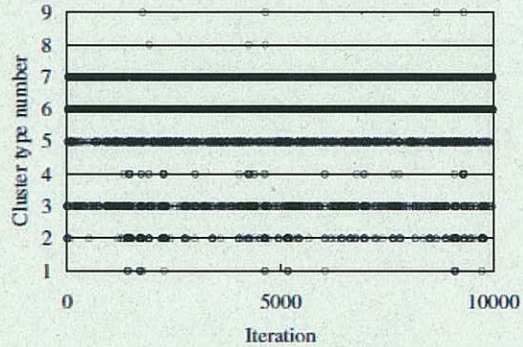
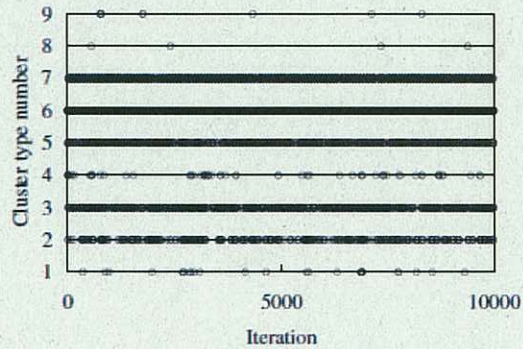


図8 カオス回路2

カオス回路1では、カオスの4相同期に基づく6種類の位相同期パターンとスイッチングの遷移時だけに現れる3種類の間状態を定義し、その状態間のスイッチングをマルコフチェーンでモデル化し、統計的解析を行った。カオス回路2では、位相パターンが形成するクラスタリング状態を分類し、そのクラスタタイプのスイッチングをモデル化した。図9にカオス回路2(回路数が6個の場合)にみられるクラスタタイプのスイッチング現象とそのマルコフチェーンによるモデリング結果を示す。



(a) Computer simulation.



(b) Markov chain.

図9 クラスタタイプのスイッチング
(a) コンピュータシミュレーション結果
(b) マルコフチェーンによる現象の再現

本手法は、系の状態が有限の離散状態として定義され、その遷移に関する情報が何らかの方法で得られれば、回路やネットワークに依存せず適用できるので、特に大規模なネットワークのコントロールなどに有効であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

- ① Taisuke NISHIO and Yoshifumi NISHIO, "Periodic Pattern Formation and its Applications in Cellular Neural Networks" IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 55, no. 9, pp. 2736-2742, Oct. 2008. (査読あり)
- ② Yoshifumi NISHIO, "Chaos Synchronization by Crosstalk of Transmission Lines" Proceedings of International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, pp. 63-64, Jul. 2008. (査読あり)
- ③ Yumiko UCHITANI and Yoshifumi NISHIO, "Investigation of State Transition Phenomena in Cross-Coupled Chaotic Circuits" Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 2394-2397, May 2008. (査読あり)
- ④ Shuichi AONO and Yoshifumi NISHIO, "A User Authentication Protocol Using Chaotic Maps" RISP Journal of Signal Processing, vol. 12, no. 1, pp. 25-30, Jan. 2008. (査読あり)
- ⑤ Yumiko UCHITANI, Ryo IMABAYASHI and Yoshifumi NISHIO, "State Transition Phenomenon in Cross-Coupled Chaotic Circuits" Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 397-400, Sep. 2007. (査読あり)
- ⑥ Yuta KOMATSU, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Clustering Phenomenon of Chaotic Circuits Coupled Symmetrically by Mutual Inductors" Proceedings of European Conference on Circuit Theory and Design, pp. 823-826, Aug. 2007. (査読あり)
- ⑦ Haruna MATSUSHITA and Yoshifumi NISHIO, "Competing and Accommodating Behaviors of Peace Self-Organizing Maps" RISP Journal of Signal Processing, vol. 10, no. 5, pp. 371-376, Sep. 2006. (査読あり)
- ⑧ Yuta KOMATSU, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization of Chaotic Circuits with Asymmetric Coupling by Nonlinear Mutual Inductors" Proceedings of International Conference on Signals and Electronic Systems, vol. 1, pp. 71-74, Sep. 2006. (査読あり)
- ⑨ Koichi MATSUMOTO, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "On Phase Synchronization of Simple Coupled Chaotic Circuits" Proceedings of

International Conference on Signals and Electronic Systems, vol. 1, pp. 75-78, Sep. 2006. (査読あり)

- ⑩ Haruna MATSUSHITA and Yoshifumi NISHIO, "Tentacled Self-Organizing Map for Effective Data Extraction" Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1929-1936, Jul. 2006. (査読あり)
- ⑪ Masato TOMITA, Haruna MATSUSHITA and Yoshifumi NISHIO, "Data Extraction by Self-Organizing Map Containing Neurons with Additional States" RISP Journal of Signal Processing, vol. 10, no. 4, pp. 243-246, Jul. 2006. (査読あり)
- ⑫ 西尾芳文, 上手洋子, "結合発振回路にみられる同期現象; van der Pol 発振器の結合系" 信号処理学会誌, vol. 10, no. 3, pp. 145-152, May 2006. (査読なし)

[学会発表] (計2件)

- ① Yoshifumi NISHIO, "Synchronization in Two Coupled Auto-Gain-Controlled Oscillators with Time Delay" International Workshop on Continuous-Discrete Electronic Systems, 2008年6月10日, 香港(中国).
- ② 内谷友美子, 西尾芳文, "簡単なカオス回路を交差結合させたことにより発生する現象の調査" 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2008年1月31日, 北海道大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西尾 芳文 (NISHIO YOSHIFUMI)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授
研究者番号: 80253227

(2) 研究協力者

荒井 伸太郎 (ARAI SHINTARO)
愛知工科大学・工学部高度交通システム研
究所・研究員
松下 春奈 (MATSUSHITA HARUNA)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・特別研究員
青野 修一 (AONO SHUICHI)
セサミテクノロジー株式会社・研究員
中野 優 (NAKANO MASARU)
浜松ホトニクス株式会社・社員
木内 隆暁 (KINOCHI TAKAAKI)
三洋電機株式会社・社員
桑野 紘範 (KUMENO HIRONORI)
徳島大学・大学院先端技術科学教育部・博
士後期課程学生