

平成21年4月1日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19800001  
 研究課題名（和文） 振動子ネットワークの応答と制御：基礎理論と生体システムへの応用  
 研究課題名（英文） Response and control of oscillator networks:  
 Fundamental theory and application to biological systems  
 研究代表者： 郡 宏 (KORI HIROSHI)  
 お茶の水女子大学・お茶大アカデミック・プロダクション・特任助教  
 研究者番号： 80435974

## 研究成果の概要：

振動子ネットワークの外部入力に対する応答理論を確立した。特に、どのような不均一性、どのようなネットワーク構造に対しても系統的に適用できる理論が完成した。集団が均一な場合はネットワーク研究で興味の持たれるラプラシアン行列の固有値問題に帰着し、通常興味の持たれる固有値ではなく固有ベクトルがネットワークダイナミクスに重要な役割を持つことが示された。さらに、理論の拡張として、複数のネットワークが相互作用する系の位相記述も確立できた。この拡張により、各ネットワーク内での結合が、ネットワーク間の同期現象にどのような作用をもたらすかが明らかになった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

研究分野： 総合領域

科研費の分科・細目： 情報学、感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：同期現象, ネットワーク, フィードバック制御, 概日リズム

## 1. 研究開始当初の背景

自励振動子ネットワークは、豊富で多様な時空間自己組織化現象を示す[Y. Kuramoto, Chemical oscillations, waves and turbulence, Springer Berlin (1984); A. Pikovsky, et al, Synchronization: A universal concept in nonlinear sciences, Cambridge university press, Cambridge (2001)]. 例えば、同期、非同期、クラスタ化、

様々な進行波や定常波、時空カオスなどが挙げられる。振動子ネットワークの研究は、特に、化学反応系や生物・生態系の自己組織化、また、脳やよりマクロな生体システムの機能の理解を目指して、大きく発展してきた。結合振動子系は、近年、その応用範囲を急速に広げている。いくつか例を挙げる。パーキンソン症候群や癲癇での特定の症状は、脳での異常な同期がその原因となっている

ことが知られており、振動子研究の医療への応用が期待される [P.A. Tass, Phase resetting in Medicine and Biology: Stochastic modeling and data analysis, Springer, Berlin (1999)]. 概日リズムは、時計細胞と呼ばれる自励振動子の集団が形成している。細胞性粘菌や真性粘菌でも集団振動現象によって生体の機能を作っている。交通流やパケット流の最適化を自律分散的な手法で行うときにも、結合振動子系の数理モデルを用いることができる。他にも、ロコモーションや脳での情報処理など、応用上重要な例が多数ある。

## 2. 研究の目的

これまでの振動子ネットワークの研究は、どのような条件で同期するのかについて集中的に研究されてきた。一方、外部摂動に対する応答は、これまでほとんど研究されていなかった。外部摂動に対する応答、特に、各振動子レベルの応答とネットワーク全体の応答を繋ぐ理論を完成させることが本研究の目的である。

上述した通り、振動子集団に対する応答の理論はこれまでなされていない。振動子集団を1つの振動子とみなし、その実効的な振動子に対して従来の手法を拡張することが、本研究の独創的な点である。集団内の結合に応じて応答特性が変化することを示し、集団が集団ゆえに作り得る可塑性に言及する。また、特色として、基礎理論研究と応用研究の双方を相補的に行うことがあげられる。確固たる基礎理論を土台とするため、応用研究の説得力が高まる。同時に、応用を見据えた基礎理論であり、基礎研究の意義が明確になる。本研究が完成すれば、振動子を集団とすることの利点に新しい観点を与えることができる。そして、概日リズムや癲癇といった振動子集団のかかわる生命機能の理解や工学や医学分野への応用の道が開ける。また、フィードバック制御の研究は、自律分散型情報処理の発展に寄与できる。

## 3. 研究の方法

外部入力、ネットワーク内での結合がともに弱い場合は、各振動子を位相のみで記述する、いわゆる位相モデルが使える。この場合は多くの計算を解析的に進めることができる。2 振動子、3 振動子系といった少数自由度から、大自由度まで段階的に計算を進めていく。その中で、一般法則を発見する。また、数値計算を相補的に用い、解析計算の検証や新しい発見に役立てる。

## 4. 研究成果

少数自由度の系での解析研究を進めていく中で、一般的法則とその記述方法を発見するに至った。その結果、どのような不均一性、どのようなネットワーク構造に対しても系統的に適用できる理論が完成した。集団が均一な場合はネットワーク研究で興味の持たれるラブラシアン行列の固有値問題に帰着し、通常興味の持たれる固有値ではなく固有ベクトルがネットワークダイナミクスに重要な役割を持つことが示された。さらに、理論の拡張として、複数のネットワークが相互作用する系の位相記述も確立できた。この拡張により、各ネットワーク内での結合が、ネットワーク間の同期現象にどのような作用をもたらすかが明らかになった。

さらに、理論を複数のネットワークが相互作用する系に応用した。これにより、ネットワークとネットワークがどのように同期するかをとらえる理論的枠組みを与えることができた。

構築された理論のデモンストレーションと実証のため、以下の解析計算と数値計算を行った。まず、ネットワーク構造がどのようにマイクロ・マクロリンクに影響を与えるかを、小さなネットワークの解析計算によって、具体的に示すことに成功した (Fig. 1 参照)。次に、不均一性のある大域結合振動子ネットワークを用い、ネットワーク構造ではなく不均一性によっても、固有ベクトルが非自明に変化することを明らかにした (Fig. 2 参照)。また、解析的な位相縮約が可能な振動子モデル (ニューロンのモデルとして有名な「シータニューロン」モデル) を用い、その結合系の集団応答関数を解析的に求めた。その結果、Type1と呼ばれる、位相応答関数が正の値しかもたない素子から、集団としての応答が正負両方をもつtype2に変化できることを示した (Fig. 2 参照)。Typeの違いはニューロンの挙動の重要な性質である。本研究の結果はニューロン間の結合によって、応答のタイプを変化させられる可能性を示したものである。

さらに、この一般的な解析結果を、ある結合リミットサイクル振動子系を用いて数値的に検証した (Fig. 3 参照)。振動子間の結合強度を変えると、集団応答関数が理論に定量的に従って変化することをたしかめた。この結果を用いると、2つの振動子集団の間に相互作用があったときに、集団同士がどのような位相関係で同期するかがわかる。適当な結合を集団間に導入する

ことで、同期状態から非同期状態への転移を示すことが予言され、これを数値計算によって確かめることができた。ネットワーク内部の結合様式によって応答性や同期性が変化することを示す好例であろう。

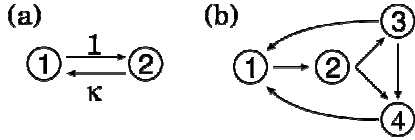


FIG. 1: Examples of weight vector  $U^*$ . Using Eq. (9), we find (a)  $U_1^* : U_2^* = 1 : \kappa$  and (b)  $U_1^* : U_2^* : U_3^* : U_4^* = 2 : 4 : 3 : 1$ .

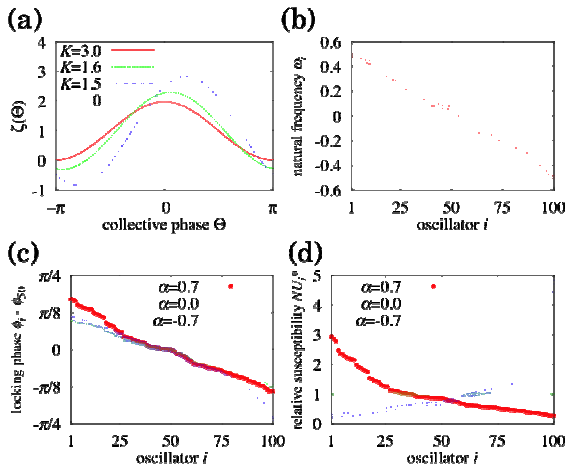


FIG. 2: Results for coupled phase oscillators. (a) cPRC  $\zeta(\Theta)$  for two coupled phase oscillators with  $\alpha = \pi/4$ . For  $K = 3.0, 1.6$  and  $1.5$ , the corresponding values of  $(\Delta\phi^0, U_1^*, U_2^*)$  are about  $(0.50, 0.77, 0.23)$ ,  $(1.08, 1.44, -0.44)$ , and  $(1.23, 1.91, -0.91)$ . Susceptibility  $U_i^*$  for coupled phase oscillators. (b), (c) and (d) are the natural frequency  $\omega_i$ , the phase difference  $\phi_i^0 - \phi_{50}^0$  in a phase locking state, and the susceptibility  $U_i^*$  for  $N = 100$  and  $K = 1.5$ .

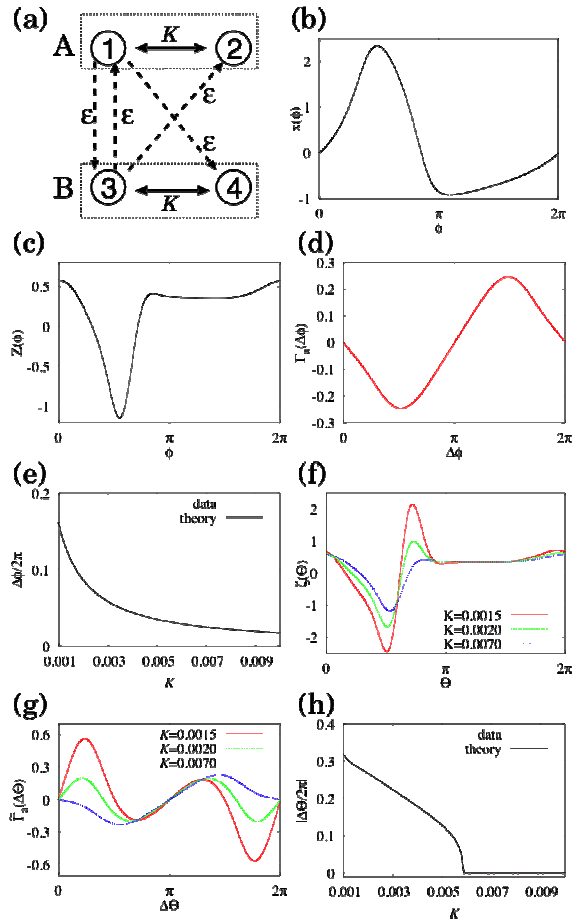


FIG. 3: Results for a network of limit-cycle oscillators. (a) the network structure under consideration. (b) waveform  $x(\phi)$  and (c) PRC  $Z(\phi)$  of an individual oscillator. (d) Coupling function  $Z(\Delta\phi)$  describing the interaction between oscillators in a subnetwork. (e) phase difference  $\Delta\phi^0$  in a subnetwork. (f) cPRC  $\zeta(\Theta)$  of a subnetwork. (g) collective coupling function  $\tilde{\Gamma}(\Delta\Theta)$  describing the interaction between the subnetworks. (h) phase difference  $\Delta\Theta$  between the subnetworks.

## 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 5 件)

①

著者名 : T. Harada, T. Yokogawa, T. Miyaguchi, H. Kori

論文課題 : Singular behavior of slow dynamics of single excitable cells

雑誌名 : Biophysics Journal

査読 : 有

巻, 頁 : 96 巻, 255~267

発行年 : 2009 年

②

著者名 : Y. Kawamura, H. Nakao, K. Arai, H. Kori, and Y. Kuramoto

論文課題 : Collective Phase Sensitivity

雑誌名 : Physical Review Letters

査読 : 有

巻, 頁 : 101 巻, 024101-1~024101-4

発行年 : 2008 年

③

著者名 : Hiroshi Kori, Craig G. Rusin, Istvan Z. Kiss,  
and John L. Hudson

論文課題 : Synchronization Engineering: Theoretical  
Framework and Application to Dynamical Clustering

雑誌名 : Chaos

査読 : 有

巻, 頁 : 18 巻, 026111-1~026111-13

発行年 : 2008 年

④

著者名 : Istvan Z. Kiss, Mark Quigg, Shi-Hyung Calvin  
Chun, Hiroshi Kori, and John L. Hudson

論文課題 : Characterization of Synchronization in  
Interacting Groups of Oscillators: Application to  
Seizures

雑誌名 : Biophysics Journal

査読 : 有

巻, 頁 : 94 巻, 1121~1130

発行年 : 2008 年

⑤

著者名 : Istvan Z. Kiss, Craig G. Rusin, Hiroshi Kori,  
John L. Hudson

論文課題 : Engineering Complex Dynamical  
Structures: Sequential Patterns and  
Desynchronization

雑誌名 : Science

査読 : 有

巻, 頁 : 316 巻, 1886~1889

発行年 : 2007 年

[学会発表] (計 2 件)

①

発表者 : 郡 宏

発表標題 : 振動子集団の位相ダイナミクスと制御

学会名 : 日本物理学会 第 64 回年次大会日本物理学会

発表年月日 : 2009 年 3 月 27 日

発表場所 : 立教大学

②

発表者 : 郡 宏

発表標題 : 集団位相応答のデザイン

学会名 : 日本物理学会 2008 年秋季大会

発表年月日 : 2008 年 9 月 22 日

発表場所 : 岩手大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

郡 宏 (KORI HIROSHI)

お茶の水女子大学・お茶大アカデミック・プロダクシ  
ョン・特任助教

研究者番号 : 80435974

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし