

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 8日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540403

研究課題名（和文） アダプティブ結合を持つ能動要素ネットワークの自己組織化
—デザインと制御研究課題名（英文） Self-organization in a network of autonomous elements with
adaptive coupling—design and control

研究代表者

宮川 賢治 (MIYAKAWA KENJI)

福岡大学・理学部・教授

研究者番号：30037296

研究成果の概要（和文）：能動機能要素を色々な結合規則に従ってネットワーク化し、出現する自己組織化現象を解明し、制御した。遅延フィードバックを用いた活性要素の結合系では、コヒーレント共鳴や位相同期などの集団ダイナミクスは、遅延時間によって自在に制御できることを明らかにした。要素間の振動の位相差に応じて結合強度を変えるようにデザインしたアダプティブ結合系では、ネットワークの時間発展規則に応じて種々のクラスター状態が現れることを見出した。

研究成果の概要（英文）：We have constructed networks with various coupling laws, and investigated self-organization phenomena in such active systems and the control of such dynamics through various methods. In the coupled system of oscillatory or excited elements with time-delayed feedback, we have demonstrated that the collective dynamics, such as coherence resonance and phase synchronization, can be controlled by adjusting the delay time. In the adaptive network designed to change the coupling weights depending on the phase difference between oscillators, we have found that various cluster states appear according to the evolution law of the network.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2010年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2011年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：アダプティブ結合、能動活性要素、ネットワーク、自己組織化

1. 研究開始当初の背景

神経細胞のような能動機能要素からなる集団が引き起こす自己組織化現象の理論的研究は、現象の本質的な部分を抽出し、単純化した数理モデルを用いて位相ダイナミク

スの観点から活発に行われており、集団ダイナミクスの多様性や普遍則について理解が深まっている。一方、本研究に関連するベルーズフ・ジャボチンスキー（BZ）反応の実験的研究は、主に連続反応場でのパターンダイ

ナミクスに集中しており、非局所結合の要素集団のダイナミクスを正面から取り上げた実験的研究は少ない。

申請者はこれまで BZ 反応をもとにして、種々の自律的な活性要素を創製し、これらを局所的に結合し、同期現象やノイズによる秩序化現象（確率・コヒーレンス共鳴など）の解明に取り組んできた（Okano et al., Phys. Rev. E, (2007)）。

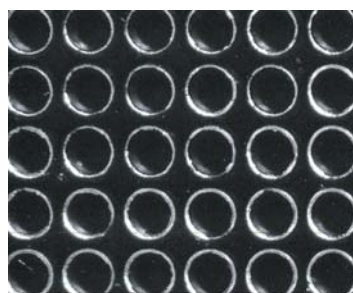
これらの研究成果から、活性要素のネットワーク化が不可欠であるという考えに至った。ネットワーク化を進める上で、「生細胞間の結合は、必ずしも局所的でも固定的でもない」ことに注目した。例えば、神経ネットワークにおけるシナプス結合のように、細胞の状態や外界の変化に応じて結合状態が変化する。このようなアダプティブ結合を持つネットワークの構築は、最近リミットサイクル振動子集団を使って動力学の理論的研究が行われているが、実験的には試みられていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、生細胞に倣って能動機能要素を創製し、これを色々な結合規則に従ってネットワーク化して行く過程で現れる時間的・空間的な自己組織化現象を系統的に解明し、そのコヒーレンスの制御を通じて生体機能のシステム原理を理解することである。具体的には、コンピュータ制御フィードバックの導入によってアダプティブ結合をはじめ、色々な結合規則をもつネットワークを実現する。このような動的結合ネットワークに現れる自己組織化やノイズ誘起秩序化現象を探索し、そのコヒーレント挙動を制御する。

3. 研究の方法

約 400 μm 径のマクロゲルに、ペルーズフ・ジャボチンスキー (BZ) 反応の光感受性触媒ルテニウム錯体を組み込み、BZ 溶液中で自励的に酸化・還元反応を繰り返す能動機能要素を作成した。マイクロ加工技術を用いて、種々の間隔をもつ要素数 10×10 のリアクターユニットを構築した。図 1 は間隔 100 μm の



1 mm

図 1 リアクターユニットの格子状アレイ

格子状のリアクターユニットアレイを示している。ユニットは直径 430 μm で、深さが 65 μm である。このユニット内にルテニウム錯体を組み込んだゲルを作成し、活性要素とした。この系では、光による抑制因子の制御が可能なので、この利点を生かしてフィードバック光による活性要素の結合様式の制御が可能である。本研究では、コンピュータ制御フィードバックループを測定システムに組み込み、外部パラメータによって要素の動的コヒーレンスを変え得るネットワークを実現した。BZ 溶液の温度は、 $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に保たれた。コンピュータ制御ビデオプロジェクターからの光は、460nm のバンドパスフィルターを通して下からサンプルに照射された。酸化・還元反応による透過光の色の変化は CCD カメラで検出され、イメージングシステムによって 8 ビット階調の光強度に変換された。

4. 研究成果

(1) BZ 反応の自律性を組み込んだ光感受性の能動機能要素の創製とその特性解明

用いた BZ 溶液組成では、 35 ± 5 秒の振動周期をもつ要素が得られた。周期の分布は、リアクターサイズのばらつきや温度揺らぎに起因すると思われる。

(2) 局所結合による能動機能要素の集団化と集団的コヒーレント挙動の解明

フォトリソグラフィの微細加工技術を用いて、100 個の能動機能要素をガラス基板上に 10×10 の格子状に 100 μm の間隔で固定し、局所結合を持つ要素アレイを創製した。要素を振動子とみなして位相同期やノイズによる共鳴現象（コヒーレント共鳴）などの基礎特性を調べ、本システムは集団化によって動的挙動のコヒーレンスを高められることを明らかにした。

(3) 大域的遅延フィードバックの組み込みによる局所結合ネットワークの構築とその動的コヒーレンスの制御

① 振動性要素の遅延ネットワーク

振動周期の分散 R と要素間位相差の分散 γ を指標にして、時間的・空間的コヒーレンスを調べた。結果、 R と γ は、遅延時間に対して周期的に変化し、その周期は自励振動の周期に一致することが分かった。図 2 は R と γ の遅延時間依存性を示している。これは、遅延時間によって時空コヒーレンスを自在に増減できることを意味する。遅延時間が反応の応答時間に一致する場合、適切な利得をもつフィードバックは、時空コヒーレンスを最大にすることが出来ることが分かった。十分に強いフィードバックでは、低い動的コヒーレンスをもつ完全同期状態が現れた。この状態は、遅延フィードバックの方法でのみ誘起可

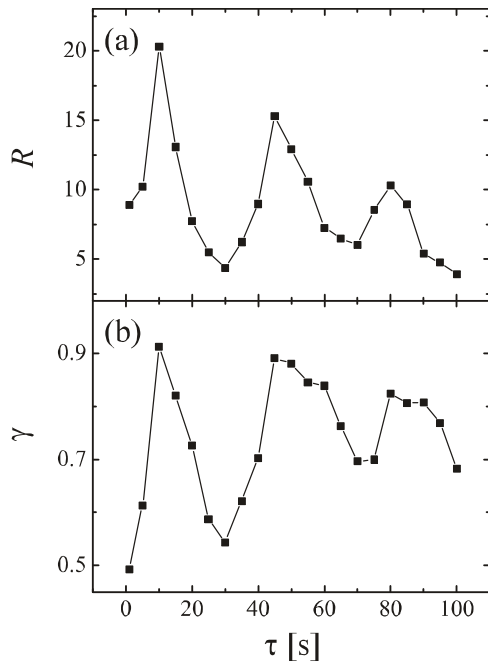


図2 時空コヒーレンスの遅延時間依存性

能な新奇コヒーレント状態とみなすことができる。実験結果は3変数オレゴネーターモデルを用いて数値シミュレーションを行い、実験をほぼ再現することができた。

② 興奮性要素の遅延ネットワーク

ノイズによって誘起された振動の周期の分散 R と位相差の分散 γ の遅延時間依存性は、振動性要素ネットワークと同様に、周期的に変化することを見出した。最初のピークの位置は反応の応答時間と一致し、ピーク間隔は反応の基本周期に一致した。また R を最大にするノイズ強度の下でフィードバック利得 k を大きくしていくと、閾値より大きい k でコヒーレンス共鳴や位相同期が促進されることが分かった。特に、遅延時間が反応の応答時間に等しいとき、その効果は最も顕著になった。逆に、遅延時間が反応の応答時間から大きく異なるとき、時空コヒーレンスは大きく下がった。これらの結果は、遅延時間と利得によって集団ダイナミクスのコヒーレンスを自在に増減できることを示している。

更に遅延フィードバックがノイズ誘起振動の時間スケールにどのような影響をもたらすかを調べた。その結果、ノイズ誘起振動の基本周期は、フィードバックの遅延時間に応じて変化することを見出した。これは、遅延フィードバックによるノイズ誘起振動の引き込み現象とみなすことができる。図3は、3変数オレゴネーターを用いた数値シミュレーションによって引き込みの様子を再現したものである。ある遅延時間の領域では、ノイズ誘起振動は、遅延フィードバックに引き込まれ、基本周期を変化させることが分かる。

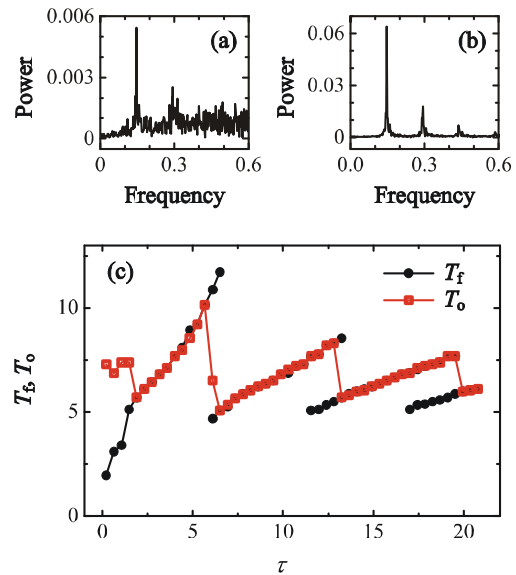


図3 (a) ノイズ誘起振動及び(b) フィードバック関数のパワースペクトル。(c) 遅延フィードバックとノイズ誘起振動の基本周期の遅延時間依存性。ここで、 T_f 、 T_0 は、それぞれフィードバック関数とノイズ誘起振動の基本周期である。

(4) アダプティブ結合ネットワークのデザインと新奇な自己組織化パターンの解明

ルテニウム錯体の光感受性を利用して、光強度を介したフィードバックによってアダプティブ制御を実現した。要素間の振動の位相差が或る値以下の要素対では結合を強め、その値を超える要素対では結合を弱めるようなアルゴリズムをデザインした。アダプティブ関数は、フィードバック利得 α 、結合の

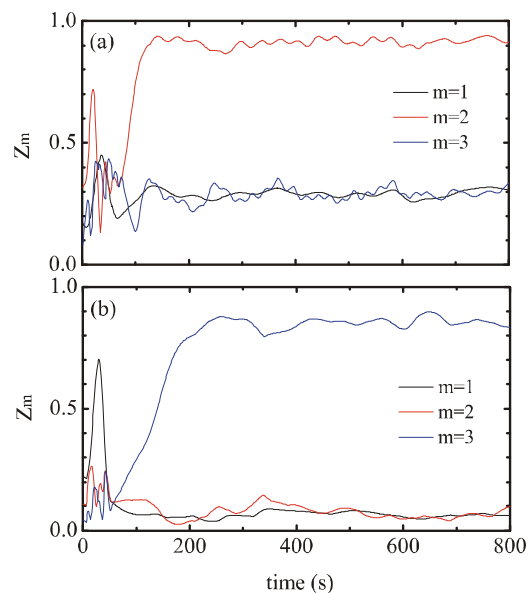


図4 オーダーパラメータの時間発展：(a) $\beta=1$ 、(b) $\beta=2$ 。ここで、 m はクラスター数を表している。

時間発展を特徴づけるパラメータ β 、及び位相差の関数である。 β に依存して、ネットワークは時間経過と共に逆位相で振動する2クラスター状態や $2\pi/3$ の位相差で振動する3クラスター状態を示すことが分かった。

各クラスタリングについて、複素オーダーパラメータ Z_m を用いてその時間発展を調べ、最大の Z 平衡値を示す最適な α が存在することを明らかにした。図4は、 Z_m の時間発展を示している。更に、ネットワーク構造を定量的に特徴づけるために、クラスタリング係数 C の時間発展を求め、 Z_m と類似の時間発展をすることを見出した。 Z_m が最大になる強度 α で C は最大になることが分かった。更に、全要素対間の平均距離の α 依存性を求めた。その結果、 Z_m や C が最大になる構造はスモールワールド性を持つことが分かった。

結合強度を常に一定に保つ場合には、クラスタリング現象は観測されなかった。このように、結合の時間発展アルゴリズムを用いてネットワークのダイナミクスの制御が可能であることを明らかにした。

実験と同じアダプティブ結合アルゴリズムを用いて、オレゴネータを基本にした数値シミュレーションを行った。その結果、クラスタリング現象について Z_m や C の時間発展を含め、観測結果を良く再現することができた。

(5) ノイズによって誘起されるアダプティブ結合ネットワークに特有のコヒーレント挙動

ホップ分岐の閾値を僅かに超えた強度の光を参照光として照射して、興奮性ネットワークを構築した。ノイズを参照光に重畳し、アダプティブ結合の下でのノイズによって誘起される秩序化現象を調べた。外部ノイズによって誘起される振動のコヒーレンス度 R を用いて、 R を最大にするノイズが存在すること(コヒーレンス共鳴)、アダプティブ結合のアルゴリズムによって R の最大値は異なることを見出した。今後、クラスタリングを引き起こすアルゴリズムと R を最大にするアルゴリズムの関係を追究して行く。

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7件)

- ① M. Misono and K. Miyakawa: Chaotic Behavior and Noise-Induced Order in a Laser Diode System with the Feedback Employing Rb Atoms, J. Phys. Soc. Jpn. 80, pp.124803-124803-6 (2011) (査読有)
- ② M. Misono and K. Miyakawa: Noise-induced phase locking and frequency mixing in an optical bistable system with delayed

feedback, J. Phys. Soc. Jpn. 80, pp.114801-1-114801-6 (2011) (査読有)

- ③ K. Miyakawa, A. Yoshinaga, and D. Ariyoshi: Textures in thin films of nematic liquid crystals induced by strongly focusing a circularly polarized laser, Phys. Rev. E 83, pp.031704-1-031704-6 (2011) (査読有)
- ④ T. Okano and K. Miyakawa: Control of noise-induced coherent behaviors in an array of excitable elements by time-delayed feedback, Phys. Rev. E 82, pp.027202-1-027202-4 (2010) (査読有)
- ⑤ M. Misono and K. Miyakawa: Noise-induced phase locking and frequency mixing in a Schmitt-trigger inverter with delayed feedback, J. Phys. Soc. Jpn. 79, pp.034801-1-034801-6 (2010) (査読有)
- ⑥ T. Okano and K. Miyakawa: Feedback-controlled dynamics in a two-dimensional array of active elements, Phys. Rev. E 80, pp.026215-1-026215-6 (2009) (査読有)
- ⑦ M. Misono, T. Todo, and K. Miyakawa: Coherence resonance in a Schmitt-trigger inverter with delayed feedback, J. Phys. Soc. Jpn. 78, pp.014802-1-014802-4 (2009) (査読有)

[学会発表] (計21件)

- ①坂本文隆, 西山明子, 山本裕樹, 宮川賢治: 光制御された反応場で自発的に現れる3安定状態、第67回日本物理学会年次大会(西宮、2012年3月25日)
- ②坂本文隆, 西山明子, 宮川賢治: チューリング不安定性を介して出現する新規な定常パターン、第117回日本物理学会九州支部例会(佐賀、2011年12月4日)
- ③西山明子, 坂本文隆, 宮川賢治: 微小液滴中の自己触媒反応による力学振動、第117回日本物理学会九州支部例会(佐賀、2011年12月4日)
- ④山崎省二, 宮川賢治: 適応結合した化学振動子系のクラスタリング、第117回日本物理学会九州支部例会(佐賀、2011年12月4日)
- ⑤山崎省二, 岡野太治, 宮川賢治: 遅延フィードバックをもつ可変結合化学振動子系のダイナミクス、日本物理学会秋季大会(富山、2011年9月22日)
- ⑥西山明子, 坂本文隆, 宮川賢治: 細胞サイズ液滴における振動反応のダイナミクス、日本物理学会秋季大会(富山、2011年9月22日)
- ⑦坂本文隆, 宮川賢治: チューリング不安定性を伴う振動反応パターンへの光外場効果、日本物理学会秋季大会(富山、2011年9月23日)
- ⑧御園雅俊, 宮川賢治: 帰還のある光双安定

系における確率共鳴、日本物理学会秋季大会（富山、2011年9月22日）

- ⑨大下淳、高本一郎、御園雅俊、宮川賢治：帰還のある光双安定系におけるコヒーレンス共鳴と確率共鳴：ビット列入力、第66回日本物理学会年次大会（新潟、2011年3月28日）
- ⑩中島渉、御園雅俊、宮川賢治：半導体レーザーとRb原子の結合系におけるカオスおよびノイズによる制御Ⅱ、第116回日本物理学会九州支部例会（長崎、2010年12月5日）
- ⑪坂本文隆、宮川賢治：チューリング不安定性を示す反応場へのノイズ効果、日本物理学会秋季大会（大阪、2010年9月23日）
- ⑫高本一郎、御園雅俊、宮川賢治：帰還のある光双安定系におけるコヒーレンス共鳴、日本物理学会秋季大会（大阪、2010年9月24日）
- ⑬西山明子、吉永あつき、有吉大記、宮川賢治：集束円偏光レーザーによる液晶の配向制御、日本物理学会秋季大会（大阪、2010年9月26日）
- ⑭岡野太治、山崎省二、宮川賢治：可変結合振動子ネットワークの自発構造形成、第19回非線形反応と協同現象研究会（横浜、2010年1月9日）
- ⑮吉永あつき、宮川賢治：集光レーザー場における液晶ドロップレットの配向ダイナミクス、第115回日本物理学会九州支部例会（宮崎、2009年12月6日）
- ⑯坂本文隆、宮川賢治：チューリング不安定性を伴う振動パターン、第115回日本物理学会九州支部例会（宮崎、2009年12月6日）
- ⑰中島渉、岡野太治、御園雅俊、宮川賢治：半導体レーザーとRb原子の結合系におけるカオスおよびノイズによる制御、第115回日本物理学会九州支部例会（宮崎、2009年12月6日）
- ⑱岡野太治、宮川賢治：動的に結合した化学振動子集団のクラスターリング、第115回日本物理学会九州支部例会（宮崎、2009年12月6日）
- ⑲岡野太治、宮川賢治：可変結合を有する化学振動子ネットワークのダイナミクス、日本物理学会秋季大会（熊本、2009年9月28日）
- ⑳坂本文隆、宮川賢治：化学反応波の伝搬の局在化、日本物理学会秋季大会（熊本、2009年9月28日）
- ㉑中島渉、岡野太治、御園雅俊、宮川賢治：Rb原子透過光を帰還した半導体レーザー—ノイズによるカオス制御—、日本物理学会秋季大会（熊本、2009年9月28日）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮川 賢治 (MIYAKAWA KENJI)

福岡大学・理学部・教授
研究者番号：30037296

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし