

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540418

研究課題名(和文) 神経ネットワークが創発する集団ダイナミクスのモデリング

研究課題名(英文) Modeling collective dynamics emerging from neuron networks

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：創製した自律振動素子間の結合様式を変え得る神経ネットワークモデルを構築した。素子の位相差に依存した可塑的結合系では、時間発展規則に応じて種々のクラスター状態が見出された。結合の対称性を制御できる系では、集団リズムの揺らぎはシステムサイズや結合の対称性に強く依存することが示された。揺らぎを加えた興奮性の可塑的結合系では、拡散結合に比べて小さなノイズ強度でコヒーレンス共鳴が起きること、高いコヒーレンスの誘起には、全結合数の数分の1程度の結合で十分であること(スモールワールド性)が見出された。

研究成果の概要(英文)：We have constructed neuron network models capable of changing the fashion of coupling between created self-sustained oscillatory elements. In the adaptive network varying the coupling weights depending on the phase difference between elements, various cluster states have been found according to the evolution law. In the system capable of controlling the coupling symmetry, we have shown that collective fluctuations strongly depends on both the size of the system and the coupling symmetry. In the excitable adaptive network subjected to the external noise, we have found that coherence resonance (CR) can occur at the smaller noise strength, compared with the case of a diffusive coupling, and a small fraction of possible long range connections is enough to obtain a great enhancement in CR, i.e., the constructed network has a small-world property.

研究分野：数物系科学

キーワード：ネットワーク 可塑的結合 集団ダイナミクス 自励振動反応

1. 研究開始当初の背景

神経細胞のような自律機能素子からなる集団が引き起こす集団ダイナミクスの理論的研究は、主に現象の本質的な部分を抽出し、単純化した位相方程式を用いて活発に行われており、集団ダイナミクスの多様性や普遍性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・ゾフ・ジャポチンスキー（BZ）反応をはじめとする自己触媒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, (2009)）。これまでの研究成果から、非線形系の集団ダイナミクスは、フィードバックの導入によって自在に制御できることが明らかになった。

「神経細胞間の結合は必ずしも局所的でも固定的でもない」という特性に注目すると神経ネットワークのモデル化には、素子間の状態や外場の変化に応じて結合状態が可塑的に変化するような結合様式を構築することが不可欠であるという考えに至った。これまでの研究成果から、目標とする可塑性結合様式の構築は、フィードバックのアルゴリズムをデザインすることによって実現した。

2. 研究の目的

シナプスは神経細胞間の情報伝達端子であり、シナプス伝達効率の可塑的な変化は脳における情報処理の実体である。本研究の目的は、このような生体特有の優れた情報処理を支えるアルゴリズムを非線形ダイナミクスの観点から理解し、これを踏まえて新しい非線形ダイナミクスの実験と理論の発展を促すことである。具体的には、神経細胞に倣って自己触媒反応をベースにした興奮性素子を創製し、これを可塑的に結合させ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する。更に、ノイズを含めた多様な外部擾乱によって本システムのコヒーレント挙動を制御し、新奇な自己組織化秩序構造の誘起を図る。

3. 研究の方法

(1) 光感受性ルテニウム錯体を触媒とする BZ 反応をベースにして、100~200 ミクロン径のゲルからなる興奮性素子を創製した。これをガラス基板上に離散的に固定し、図 1 のようなコンピュータ制御フィードバックシステムを用いて素子間結合を制御した。

(2) 可塑性結合については、素子対の興奮度

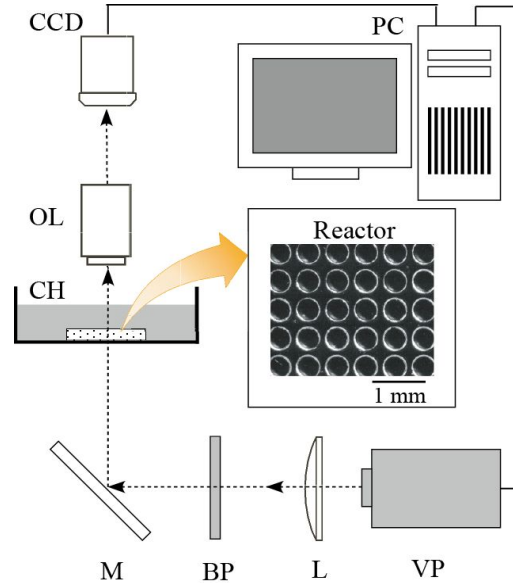


図 1. 光フィードバックシステム：PC, コンピュータ；VP, 液晶プロジェクタ；BP, バンドパスフィルター；M, ミラー；CH, 反応器；OL, 対物レンズ；CCD, ビデオカメラ。

合いや発火のタイミングの差、外界の状況に応じて結合様式を変えるようなアルゴリズムをデザインした。

(3) 可塑性結合によって誘起される新しい集団ダイナミクスや自発的秩序構造形成を探索した。

(4) 時間軸における確率的性質、素子の特性や空間配置のばらつき等の導入が、可塑性結合を持つ興奮性ネットワークの集団ダイナミクスに及ぼす効果を明らかにした。

(5) 可塑性結合興奮系の数理モデルを提案し、数値シミュレーションにより実験結果を再現した。

4. 研究成果

(1) 興奮性素子の階層的システム化とそれに伴う自己組織化現象の解明

BZ 反応をベースにして興奮性素子を創製し、BZ 溶液組成、錯体濃度、温度、ゲルの柔らかさ等を制御変数として、素子の振動性・興奮性について相図を作成した。

フォトリソグラフィーの微細加工技術を用いて、100 個の興奮性素子をガラス基板上に固定して集団化を図った。作成した素子アレイが長時間安定して機能できるように、BZ 反応溶液を連続的に供給・排出できる開放型のリアクターを開発した。

(2) 光感受性触媒を用いた BZ 反応系では、光の強弱によって反応を制御できる。この性質を利用して、光強度変化に基づいたフィードバックのアルゴリズムをデザインするこ

とによって、素子間の状態や外界の変化に応じて可塑的に結合様式を変え得るネットワークを実現した。

(3) 周期発火している可塑性結合ネットワークの自己組織化現象の解明

振動の位相差が小さい素子対では結合を強め、逆に位相差の大きい素子対では結合を

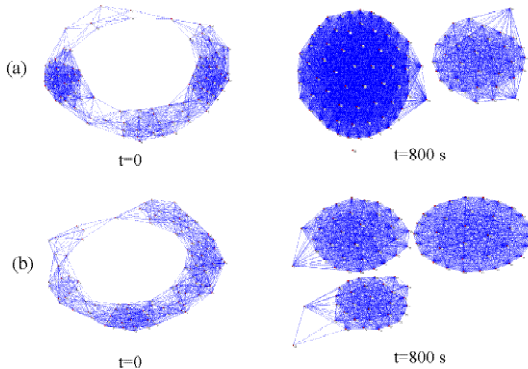


図 2. ネットワーク構造の時間変化(a) $\alpha=700$, $\beta=1$, (b) $\alpha=500$, $\beta=2$.

弱めるような可塑的結合をデザインした。結合関数は、フィードバック利得 α 、結合の時間発展を特徴づけるパラメータ β 、及び素子間の位相差の関数である。 α 、 β に依存して2クラスター状態や3クラスター状態が現れた。図 2 は、Pajek のアルゴリズムを用いてネットワークの時間発展を示したものである。初期では、ネットワークはランダムで結合数は多くはない。後期 ($t=800$) では、系は定常的になり、 β に依存して 2 クラスター状態や 3 クラスター状態が現れている。又、各クラスターでは、素子間結合が良く進んでおり、完全グラフに近い構造が現れている。各クラスターについて、複素オーダーパラメータ Z_m やクラスタリング係数 C_m の時間発展を調べ、各々を最大にする α の値は一致すること、 Z_m と C_m は類似の時間発展をすること、 Z_m や C_m 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。

(4) 周期発火している非対称結合ネットワークの集団揺らぎ

結合の対称性が集団ダイナミクスに及ぼす効果を明らかにするために、独立にノイズを印加した 100 個の振動性素子を、フィードバックを用いて直線的に結合した。素子数 N と結合の非対称度を表すパラメータ ε を様々に変化させて各素子の発火のリズムの揺らぎを調べた。図 3 は揺らぎの 2 乗偏差を連結した素子数に対してプロットしてのものである。対称に結合した系 ($\varepsilon=1.0$) では、素子数の増加に伴って発火の時間間隔のゆらぎの偏差値は、 N の平方根の逆数に従って小さくなる事が分かる。これは、対称結合系で

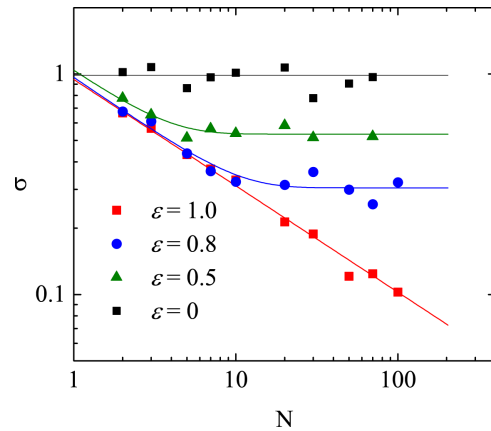


図 3. 揺らぎの強度の素子数依存性。

は、振動周期の揺らぎは中心極限定理に従うことを意味する。 $\varepsilon=0.8$ では N の増加に伴って直線からはずれ、一定値に漸近することが分かった。この傾向は s が小さくなるにつれて顕著になり、 $\varepsilon=0$ では、偏差値は素子数に全く依存せず一定になることが分かった。実線は理論曲線を示している。理論値と実験値が良く一致していることが分かる。これらの結果から、集団のリズムのゆらぎはシステムサイズだけでなく、結合の対称性に大きく依存することが明らかになった。

(5) 可塑性結合を持つスモールワールド性ネットワークの集団ダイナミクス

ノイズによって誘起されるコヒーレンス共鳴

100 個の興奮性要素からなる反応場について、オレゴネータを用いて実際の実験で実現可能な状況を数値シミュレーションした。特に、ランダムに選択された要素間のショートカットの影響に注目した。基本のネットワークは 100 個の要素を拡散結合によってリング状に連結することによって構成された。スモールワールド性を持つネットワークは、連結の繋ぎ替え (Watts-Strogatz モデル) によるか、又は新たな連結の付加 (Newman-Watts モデル) によって構築できる。前者のアルゴリズムの実装は実験的に困難なため、後者の方法を採用した。新たな連結の付加はフィードバックループを介して実現された。選択された要素間は、振動の位相差に応じて可塑的に変化するように結合された。各要素に白色ノイズが独立に印加され、誘起された振動の周期は修正オイラー法を使って計算された。可能な全連結数に対する新しい連結数の比 p 、フィードバック利得 (結合強度) α 、ノイズ強度 D を制御変数とした。

図 4 には、 D に対して振動のコヒーレンスの目安を与える量 R が、 $p=1$ の場合について示されている。何れの場合も R は D の増加につれて最大値を取る。これはコヒーレンス共鳴の特徴を示すものである。基本のリングネ

ネットワーク ($p=0$) の共鳴ピークに加えてより小さい D で新しいピークが現れ, α の増加に伴って成長することが分かる。基本ネット

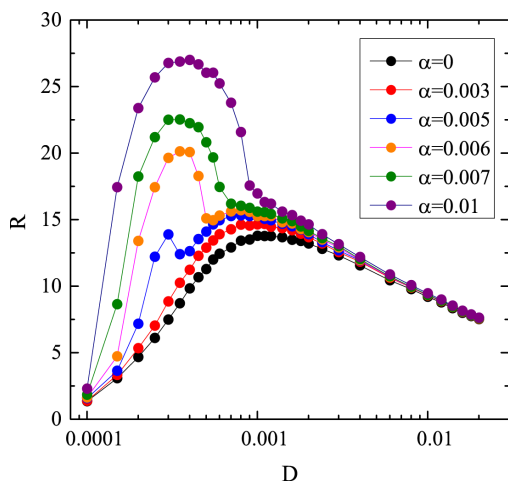


図 4. 種々のフィードバック利得 α についてノイズ強度 D の関数としてのコヒーレンス度 R ($p=1$)。 $\alpha=0$ は基本のリングネットワークの場合を示している。

ワークの共鳴に關与する相互作用は拡散結合である。一方, 新しいピークの形成は可塑的結合様式を持つ新しいリンクの付加によるものである。 α の増加は同位相の要素間結合を強め, 逆位相要素間の結合を弱める。しかし, ノイズ強度が大きい時には, 多くの発火がランダムに誘起され, その結果, 可塑的結合相互作用が平均的に小さくなる。それ故, 新たな結合の付加の効果は, 小さいノイズ領域に限られるように思われる。

共鳴の強さは p の増加と共に増加する。これは元々相互作用のない素子に, よりすばやく影響を及ぼすことが可能になることを意味する。即ち, α が大きい時, p の増加は益々共鳴を強めることが期待される。しかしながら, 高いコヒーレンスの獲得には, 必ずしも大きい p は必要ではなく, 可能な全結合数の 5 分の 1 程度で十分であることが分かった。これは, $p \sim 0.2$ 付近で構築されたネットワークは, スモールワールド性を持つことを意味する。同時に, 素子間距離の目安を与える平均パス長は $p \sim 0.2$ 付近で急激に小さくなる事も見出された。

更に, コヒーレンス共鳴に伴って位相同期が誘起されることが分かった。特に, $\alpha=0.01$ のように結合強度が大きくなると, ネットワークは, 小さい D で完全同期が起きることが分かった。これは, 素子間結合の可塑的变化が振動の時空コヒーレンスに重要な役割を果たすことを意味する。

空間揺らぎのコヒーレンス共鳴への効果
結合強度と新しい連結数を一定に保ち, 素

子の特性への不均一性の導入がコヒーレンス共鳴に及ぼす効果を調べた。その結果, 共鳴の強さは一層高められ, そのピークの位置はより低ノイズ側にシフトすることが明らかになった。不均一性の程度が中間的な時にピークの高さは最大になった。これは, コヒーレンス共鳴に最適な不均一性が存在することを意味している。

(6) まとめと今後の展望

本研究で立案した作業仮説は, 「可塑性結合によってネットワークの自己組織化能は著しく促進されるであろう」, 「時間的・空間的揺らぎは微弱信号受容や情報伝達に有用であり, その有用性はネットワーク化によって高められるであろう」, 「可塑性結合によって外場に対する感受性が増し, 集団ダイナミクスのコヒーレンスは高められるであろう」というものであった。これらの作業仮説は, 結合様式と揺らぎの多様な制御に基づいてほぼ検証された。これは, 神経細胞の情報処理の動作原理を理解する上で意義深いものと考えられる。同時に, 本研究の結果は, 生体现象に倣った新しい集団ダイナミクスの研究に更なる発展を促すものと考えられる。

今後は, 神経ネットワークのシナプス結合に倣ったアルゴリズムを本実験システムに実装することを試みる。その際, ネットワークの結合状態を自在に制御できる為には, 構成素子の均質化を図ることが不可欠である。フォトリソグラフィ用のフォトマスクを含めて, 試料作成条件・方法を再検討する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

K. Miyakawa, Coherence Resonance of Small World Networks with Adaptive Coupling, J. Phys. Soc. Jpn. 84, pp. 064003-1- 064003-4 (2015) (査読有)
DOI: 10.7566/JPSJ.84.064003.

石川大樹, 西山明子, 御園雅俊, 宮川賢治, 光双安定系における論理的確率共鳴, 福岡大学理学集報, 44 (1), pp.1-10 (2014) (査読無).

K. Miyakawa, T. Okano, and S. Yamazaki, Cluster Synchronization in a Chemical Oscillator Network with Adaptive Coupling, J. Phys. Soc. Jpn. 82 pp.034005-1-034005-6 (2013) (査読有)
DOI:10.7566/JPSJ.82.034005.

K. Narahara, M. Misono, and K. Miyakawa, External synchronization of oscillating pulse edge on a transmission line with regularly spaced tunnel diodes, Phys. Rev. E 87, pp.012902-1-012902-10 (2013) (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevE.87.012902.

坂本文隆, 宮川賢治, ノイズが誘起する新しいチューリング不安定性, 福岡大学理学集報, 42 (1), pp.9-14 (2012) (査読無).

[学会発表] (計 13 件)

坂本文隆, 宮川賢治, 疎水の反応場で現れる交差する化学波, 第 70 回日本物理学会年次大会 (東京都・新宿区, 2015 年 3 月 22 日)

坂本文隆, 宮川賢治, 局在したチューリングパターン, 日本物理学会秋季大会 (愛知県・春日井市, 2014 年 9 月 9 日)

Fumitaka Sakamoto and Kenji Miyakawa, Localized Patterns of Oxidized and Reduced Spots in the Belousov-Zhabotinsky Reaction incorporated into a Microemulsion (The IUMRS International Conference in Asia 2014, Fukuoka・Fukuoka 8.26)

坂本文隆, 宮川賢治, 光制御された反応場で現れる新奇な定常パターン, 第 69 回日本物理学会年次大会 (神奈川県・平塚市, 2014 年 3 月 29 日)

宮下裕也, 岡野太治, 坂本文隆, 宮川賢治, 非対称結合を持つ化学振動子系の集団ゆらぎ, 第 119 回日本物理学会九州支部例会 (福岡県・久留米市, 2013 年 11 月 30 日)

石川大樹, 西山明子, 御園雅俊, 宮川賢治, 雑音で動作する光論理素子, 第 119 回日本物理学会九州支部例会 (福岡県・久留米市, 2013 年 11 月 30 日)

岡野太治, 宮下裕也, 宮川賢治, ノイズ環境下における非対称に結合した化学振動子の同期現象, 日本物理学会秋季大会 (徳島県・徳島市, 2013 年 9 月 28 日)

石川大樹, 西山明子, 御園雅俊, 宮川賢治, 光論理素子における確率共鳴, 第 68 回日本物理学会年次大会 (広島県・東広島市, 2013 年 3 月 27 日)

Fumitaka Sakamoto and Kenji Miyakawa, Synchronization between Chemical Oscillators through Mechanical Contact and Connection (Workshop on Self-organization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter. Kyoto・Kyoto. 2013・2)

Fumitaka Sakamoto and Kenji Miyakawa, Oxidized and Reduced Spots induced in the Intermediate-State Background by the Turing Instability (Workshop on Self-organization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter. Kyoto・Kyoto. 2013・2)

石川大樹, 西山明子, 御園雅俊, 宮川賢治, 光論理素子における確率共鳴, 日本物理学会秋季大会 (神奈川県・横浜市, 2012 年 9 月 19 日)

坂本文隆, 西山明子, 山本裕樹, 宮川賢治, 化学反応を内包する液滴の同期現象, 日本物理学会秋季大会 (神奈川県・横浜市, 2012 年 9 月 19 日)

坂本文隆, 宮下裕也, 宮川賢治, 反応拡散系で出現する 3 安定状態, 日本物理学会秋季大会 (神奈川県・横浜市, 2012 年 9 月 19 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