

Title	Theoretical and Experimental Study on Coupled Oscillators by using Belousov-Zhabotinsky Reaction
Author(s)	宮崎, 淳
Citation	大阪大学, 2006, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/47217
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏 名	みやざき じゅん 宮 崎 淳
博士の専攻分野の名称	博 士 (学 術)
学 位 記 番 号	第 2 0 7 1 2 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 18 年 9 月 27 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 生命機能研究科生命機能専攻
学 位 論 文 名	Theoretical and Experimental Study on Coupled Oscillators by using Belousov-Zhabotinsky Reaction. (Belousov-Zhabotinsky 反応を用いた結合振動子系の理論・実験的研究)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 木下 修一 (副査) 教 授 菊池 誠 教 授 井上 康志 助教授 時田恵一郎

論 文 内 容 の 要 旨

自然界には多くの自発的なリズムを刻むリミットサイクル振動子が存在し、それらが多数集まると相互作用を介して同期現象と呼ばれる協同的なリズムを形成することが知られている。この協同的なリズムが一つ一つの要素からどのように形成されるのか明らかにすることは、相転移との類似性からも非常に興味深い。

本研究は、Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応と呼ばれる振動反応を用いて、同期現象の普遍側面の解明を目的に研究を行った。BZ 反応とは、数種類の薬品の混合により引き起こされる、周期的に溶液濃度の変化する化学反応であり、実験的にも簡単に扱うことができる。しかし開放系という観点から非平衡系熱力学の確立に多大な貢献を残してきた。エネルギー、物質の流入のある非平衡開放系では自発的に秩序が形成される。BZ 反応の薬品を混入すると反応により最終的には熱平衡状態へと移行するのであるが、その間の非平衡状態ではエネルギーの供給を受けて多様な秩序が形成される。溶液をシャーレなどに入れ薄く広げると同心円・ラセン模様が形成されることが知られている。これら BZ 反応の時間・空間的なパターンは生命現象とも驚くほどの類似性をそなえているのが特徴である。

本研究では第一に位相モデルに基づき同期現象を正確に記述することを目的とした。位相モデルとは、振動子を位相という一つの自由度で特徴付け、結合が弱い仮定の下でその時間発展を記述する方法である。しかし、この位相モデルを実際の系に対して適用するには二つの振動子間の相互作用を表す周期関数（結合関数）を具体的に決定する必要がある。本研究では、この結合関数が二つの結合振動子を用いて振動周期のずれを様々な位相差において測ることにより決定できることを理論的に示した。さらに、この方法を二つの連結された BZ 反応系へ実験的に適用し、その有用性を実証した。そこで測定された結合関数は正弦関数とは大きく異なっており、二つの結合 BZ 反応系でみられる同位相・反位相の同期が、この結合関数を用いて定量的に説明されることを示した。この方法で求めた結合関数は、一般により多数の結合振動子系に対しても有効であると考えられる。特に系が同一の振動子で形成される場合には、振動子間の相互作用を同一の結合関数として取り扱うことができる。例として、三つの結合系における振舞いについて、二つの BZ 反応系で測定された結合関数を用いて解析を行った。その結果、完全同位相、部分同位相、3 相の三種類の同期モードが実現されることが予測された。これらの同期モードは実際の三つの結合振動反応系に対しても報告されており、本手法が多数の振動子で形成される系に対しても有効であることを示唆している。

第二に双安定系でみられる同期現象の解明を目的に研究を行った。二つの静的な双安定系が周期的外力とノイズの影響下にある場合には確率共鳴と呼ばれるある種の同期現象が見られることが従来の研究から知られている。一方、静的な双安定系に加え、リミットサイクルと静的定常状態との双安定系も神経・心筋細胞、化学振動系など非平衡系の幅広い分野で存在する。このような双安定系ではより多様な同期的振舞いが予測される。本研究では円筒形のガラス管を用いて BZ 反応の攪拌状況を制御することにより、この双安定系を実験的に実現し、最も簡単な結合の例としてこの反応槽を送液により一方向に結合した系における同期現象を探った。結合が小さいときには揺らぎにより二つの状態間を不規則に遷移する間欠振動が観測された。送液速度を大きくし、結合を大きくすると二つの状態間をより頻繁に遷移する様子が観測された。また、このとき周期的外力に対してある最適のタイミングに遷移することが分かった。実験結果を説明するため BZ 反応の基本モデルであるオレゴネーターに結合項とノイズ項を含めてシミュレーションを行い、間欠振動を定性的に再現することができた。

これら BZ 反応を足がかりに得られた知見は一般の結合振動子系に適用することができ、多くの発展性を備えている。特に位相モデルによる同期現象の解析・予測手法は、直接的な基本方程式に基づいた同期解析とは異なり、振動子の振動・結合メカニズムなどの詳細に立ち入らずに系を統一的に取り扱うことができる利点がある。そのため、この手法を他の振動組織に対しても幅広く展開していくことが可能である。たとえば生体内において生命維持に不可欠な役割を担う心筋・神経細胞集団の動的振舞いをより正確に記述・予測していくことが可能となり、医療面での応用も期待される。また将来、リズムを刻む細胞一つ一つを操作し機能性組織を作りあげていく際にも、本研究で提案された手法が有効であると期待される。

論文審査の結果の要旨

本研究は、振動子を結合させて生じる同期現象を、位相モデルを用いて解析して結合についての普遍的な法則を見だし、それを振動反応系で有名なペロウズフージャボチンスキー反応に適用して、その法則の正当性を理論的・実験的に確認したところにその新規性・重要性がある。

結合振動子系は、蛍の同期明滅や心筋細胞の同期など自然界に広く分布しており、自然界では結合により新しい機能を発現することに役立っていると見られている。しかし、自然界の振動子系はその振動や結合のメカニズムが複雑なため、理論的・実験的な研究の進展が妨げられていた。本研究は、振動子を位相という 1 つの自由度だけで特徴付け、結合が弱いという仮定の下で、位相の時間発展で結合現象全体を記述する位相モデルを採用した。さらに、振動子間の結合を表す結合関数の形を具体的な系でも決定できるようにするため、結合による振動周期のずれをいろいろな位相差において測定することで決定するという新しい方法論を見いだした。この方法は、結合現象を振動子や結合の詳細によらず記述できるという極めて応用性の高い方法である。このモデルをペロウズフージャボチンスキー反応に適用したところ、同相同期・逆相同期の出現を定量的に再現することができた。

本研究の応用展開は、生命現象に関わるさまざまな振動子系、たとえば、心筋細胞、神経細胞などの解析に、そのメカニズムの詳細に立ち入ることなしにマクロな同期現象の解析ができることが期待されており、さらに、工学、社会学、経済学の分野でも応用可能など、今後のマクロな現象、機能発現の新しい研究手段の開発に大きく貢献するものと期待できる。

よって、本論文は博士（学術）の学位論文として十分価値あるものと認める。