

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年 5月 21日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19760253

研究課題名（和文） 揺動外力による非線形ダイナミカルシステムの同期と制御

研究課題名（英文） Synchronization and control of nonlinear dynamical systems by noisy forcing

研究代表者

中尾 裕也（NAKAO HIROYA）

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：40344048

研究成果の概要（和文）：自律的な非線形振動を示す非線形システムに、一定の入力ではなく時間的に変動する共通入力を与えると、系の出力の再現性が向上することや、複数の系が同期することが知られている。この現象を解明するために、リミットサイクル振動子に対する位相縮約理論をはじめとする非線形動力学や確率過程の手法を用いて詳細な理論解析を行った。また、非線形系振動を示す電気回路を用いた実験によって理論的予言を定量的に検証した。

研究成果の概要（英文）：It is known that nonlinear dynamical systems exhibiting autonomous nonlinear oscillations tend to improve their output reproducibility or synchronize with each other when driven by common temporally fluctuating inputs instead of constant inputs. To understand this phenomenon, detailed theoretical analysis was performed using the methods of nonlinear dynamics and stochastic processes, in particular, the phase reduction theory for limit-cycle oscillators. Theoretical results were quantitatively verified using experimental electronic circuits exhibiting nonlinear oscillations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	570,000	3,570,000

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：非線形理論・回路

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

(1) 非線形リズムを示す単一の動的システムに、弱い揺動外力の同一の時系列を繰り返し与えると、出力の再現性 (reproducibility) が向上する場合があることが知られていた。また、これに等価な状況として、複数の結合していない同等な動的システム群に共通の弱い揺動外力を与えると、それらが同期 (synchronization) する場合があることも知られていた。これらの現象は広範な対象に共通に見られるものであり、そこには何らかの普遍的なメカニズムが存在することが予想されていた。

(2) 例えば、ラットの新皮質の神経細胞を用いた通電実験において、細胞に一定の電流入力を与えると、細胞の膜電位スパイクの発生タイミングは各種の揺らぎのため実験の試行毎に大きく異なるが、変動する電流入力を与えた場合、スパイクの生成タイミングが試行間で精度良く一致し、再現性が向上する (Mainen & Sejnowski, 1995)。レーザー発振実験においても、一定の外部入力ではなくカオス的あるいはノイズ的な変動入力を与えると、出力信号のプロファイルがよく一致する (Uchida & Roy, 2004)。さらに生態学においても、海を隔てたふたつの島の羊の個体数の変動に、共通の気候変動に起因する強い相関が生じること (Grenfell et al., 1998) や、動物性プランクトンの培養実験において、エサの植物性プランクトンの量に共通の揺動を与えると、異なる培地間の個体数に相関を持たせられること (Fontaine & Gonzalez, 2005) が示されている。

(3) 上記の現象について、研究代表者は非線形な動的素子の典型例であるリミットサイクル振動子に対する詳細な解析を行っていた。特に、ノイズを受けた力学系を記述する確率微分方程式の手法と、非線形振動子の解析手法である位相縮約法を併用することにより、弱い揺動外力を受けたリミットサイクル振動子は、その詳細によらず一般に、常に再現性の向上、あるいは同期現象を示すことを明らかにしていた。その際、リミットサイクルの振動に対する位相応答関数が本質的な役割を果たすことを明らかにし、それが満たすべき条件を得ていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究計画では、以上の研究代表者の結果をもとに、基礎科学的な立場から、より

幅広い状況を一般的に取り扱えるような理論的枠組の構築と、電気回路などを用いた実験的検証、さらには、得られた知見に基づく揺動外力を用いた非線形システムの制御手法の提案を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究の開始時期までに行われていた揺動外力による同期現象の解析は、Lyapunov 指数と呼ばれる指標を用いた同期状態の統計的な線形安定性の解析にほぼ限られていたが、これは同期状態に関する局所的な情報しか与えない。同期状態に関する大域的な情報を得るためには複数の振動子間の位相差の確率分布自体を見る必要があるが、これを予言する理論は存在しなかった。そこで、リミットサイクルの位相縮約法や平均化法と確率微分方程式の手法を組み合わせる事により、振動子間の位相差の確率分布の従う方程式を導出し、そこから得られる理論的結果を数値計算と比較検討した。

(2) 研究代表者による理論は、いくつかの条件を満たすリミットサイクル振動子に対して一般的に適用可能なものであり、任意の実験系を用いてその検証をできるはずであったが、1-(2) で述べた実験等はこのような理論とは無関係に行われたものであり、研究代表者らの理論の定量的な検証にはなっていなかった。そこで、制御が最も容易なリミットサイクル振動子系として、非線形振動を示す電気回路を用い、これにコンピュータで制御したランダム外力を与えることにより、揺動外力による同期現象が確かに生じる事の確認と、さらに電気回路の位相応答関数を実際に測定して同期特性と比較することによる理論の定量的な検証を行った。

(3) 集団レベルでの揺動外力による同期現象等の解析を重要な研究課題のひとつとして取り扱った。現実の系においては、例えば脳内の各部位のように、多数の動的な素子が相互結合を通じて集団レベルのコヒーレントな挙動を示していることが多い。この場合にも、各集団に相関のある揺動外力を与えることで異なる集団間の同期などを実現できるはずだが、そのような状況は理論的には取り扱われていなかった。集団振動を示す大域結合振動子の可解モデルや、現実的な神経細胞集団のネットワークモデルの詳しい解析を通じて、集団レベルでの揺動外力による同期現象に関する理論を発展させた。

(4) 当時、揺動外力による同期現象に関する一般的な理論が構築されているのはリミットサイクル振動子に対してのみであったが、各種の実験や数値シミュレーションは、この現象がカオス素子や確率的素子などにおいても生じる普遍的なものであることを示していた。それらの系に対する理論の構築が困難な理由は、リミットサイクルに対する強力な解析手法である位相縮約法がそのままでは適用できないためであったが、研究代表者は、ある種の拡張した位相応答関数を導入することにより、カオス素子等に対しても位相縮約理論に基づく一般性を保った取り扱いが可能だと予想していた。この予想を具体化して、より広範な力学的状況まで取り扱い可能な一般論の構築を試みた。

4. 研究成果

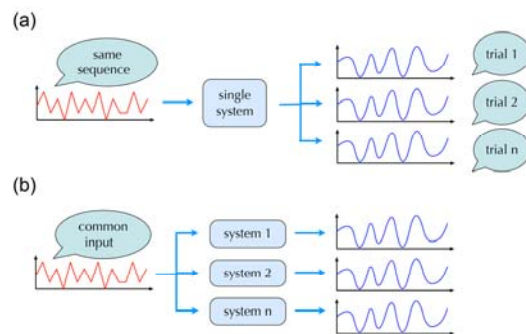
(1) [論文⑦⑩] 3-(1)で述べた方法によって共通揺動外力を受けた複数の振動子間の位相差の確率分布の従う Fokker-Planck 方程式あるいは Frobenius-Perron 方程式を近似的に導き、それらの方程式から得られる予言を直接数値計算と比較して良い一致を得た。この方法により、揺動外力によって振動子は単に同期するだけではなく、外力の与え方によっては複数のグループに分かれるなどのコヒーレンス現象を生じることが分かった。これにより、揺動外力による同期現象は、より一般には揺動外力に誘起されるコヒーレンス現象の簡単な場合であることが判明した。

(2) [論文⑥⑨] 3-(2)で述べたような周期的な非線形振動を生じる電気回路を2種類デザインして揺動外力による同期現象が実際に生じる事を示すとともに、それらの電気回路の位相応答特性を実際に測定し、理論的な予言を定量的に確認した。同時に、研究代表者らの従来の理論をより一般的な状況に適用できるように拡張し、また数理的により洗練された形で定式化した。

(3) [論文②⑧] 3-(3)で述べたように、単一の振動子ではなく、複数の素子のネットワーク結合系が集団として非線形振動を生じているような状況に対する揺動外力の効果に関する理論解析を行った。特に、集団的な振動のマクロな位相応答関数を、ネットワークを構成する個々のミクロな振動子の位相応答関数に関係づける理論的枠組みを構築した。またその結果を利用して、蔵本タイプの大域結合位相振動子系のマクロな集団振動間に生じる共通揺動外力による同期現象を解析した。

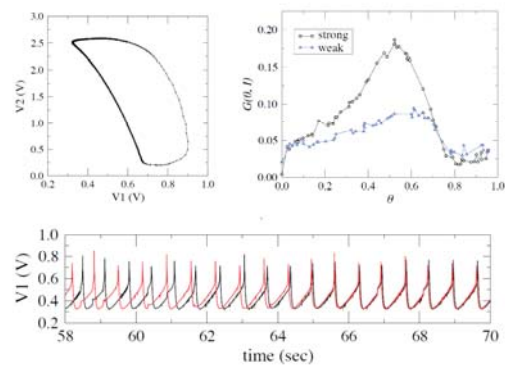
(4) [学会発表①] 3-(4)で述べたように、リミットサイクルではない非線形振動を理論的に扱える枠組みの構築の第一歩として、周期性の強いカオス振動子を取り扱った。この場合にも揺動外力による同期現象が生じる事は確認されているが、その状況を定量的に扱える理論は存在しなかった。そこでカオスに由来する揺らぎを確率ゆらぎとして取り入れた拡張された位相縮約法を用いた解析を発展させた。現時点では得られた結果を予備的に学会発表しただけだが、今後より詳しく解析してその結果を論文にまとめる予定である。

(5) [その他の論文および学会発表] 本研究課題と直接的・間接的に関係するテーマとして、ネットワーク結合振動子系が示す各種の非線形ダイナミクスの研究を行った。例えば大域結合位相振動子モデルを用いたセンサーネットワークのパケット送信タイミング制御の問題[論文①]や、ノイズを受けたリミットサイクル振動子の厳密な位相縮約法に関する問題[論文④]などに関する研究を行った。また、ネットワーク結合力学系のダイナミクスという観点から、複雑ネットワーク上の非線形振動子系や活性・抑制因子系の挙動を解析した。



揺動外力による(a)単一の系の再現性の向上と

(b)複数の同等な系の同期(b).



非線形振動を示す電気回路のリミットサイクル、位相応答、ランダムインパルスによる同期 (実験)

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 11 件)

- ① "Self-organizing timing allocation mechanism in distributed wireless sensor networks", Hisa-aki Tanaka, Hiroya Nakao, and Kenta Shinohara, IEICE Electronic Express (ELEX) 6, 1562-1568 (2009).
- ② "Collective dynamical response of coupled oscillators with any network structure", Hiroshi Kori, Yoji Kawamura, Hiroya Nakao, Kensuke Arai, and Yoshiki Kuramoto, Phys. Rev. E 80, 036207 (1-9) (2009).
- ③ 解説「非線形振動子の位相縮約理論とその応用」, 中尾裕也, システム／制御／情報 53, 316-322 (2009).
- ④ "Stochastic phase reduction for a general class of noisy limit cycle oscillators", Jun-nosuke Teramae, Hiroya Nakao, and G. Bard Ermentrout, Phys. Rev. Lett. 102, 194102 (1-4) (2009).
- ⑤ "Diffusion-induced instability and chaos in random oscillator networks", Hiroya Nakao and Alexander S. Mikhailov, Phys. Rev. E 79, 036214 (1-5) (2009).
- ⑥ "Experimental synchronization of circuit oscillations induced by common telegraph noise", Ken Nagai and Hiroya Nakao, Phys. Rev. E 79, 036205 (1-6) (2009).
- ⑦ "Averaging approach to phase coherence of uncoupled limit-cycle oscillators receiving common random impulses", Kensuke Arai and Hiroya Nakao, Phys. Rev. E 78, 066220 (1-8) (2008).
- ⑧ "Collective phase sensitivity", Yoji Kawamura, Hiroya Nakao, Kensuke Arai, Hiroshi Kori, and Yoshiki Kuramoto, Phys. Rev. Lett. 101, 024101(1-4) (2008).
- ⑨ "Phase coherence in an ensemble of uncoupled limit-cycle oscillators receiving common Poisson impulses", Kensuke Arai and Hiroya Nakao, Phys. Rev. E 77, 036218(1-17) (2008).
- ⑩ "Noise-induced synchronization and clustering in ensembles of uncoupled limit-cycle

oscillators", Hiroya Nakao, Kensuke Arai, and Yoji Kawamura, Phys. Rev. Lett. 98, 184101 (1-4) (2007).

⑪ "Noise-induced turbulence in nonlocally coupled oscillators", Yoji Kawamura, Hiroya Nakao, and Yoshiki Kuramoto, Phys. Rev. E 75, 036209 (1-17) (2007).

[学会発表] (計 20 件)

- ① 2010.3.23, 秦重史, 新井賢亮, 中尾裕也, 「カオス振動子の確率的な位相縮約と共通ノイズ同期現象」, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山大学.
- ② 2010.3.20, 河村洋史, 中尾裕也, 新井賢亮, 郡宏, 蔵本由紀, 「大域結合振動子系における集団位相結合関数」, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山大学.
- ③ 2010.3.20, 中尾裕也, 「複雑ネットワークにおけるラプラス固有ベクトルの局在性」, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山大学.
- ④ 2010.3.9, 中尾裕也, 「スケールフリーネットワーク上の結合振動子系のダイナミクス」, ネットワークダイナミクス研究会 (電子情報通信学会非線形問題研究会), 上智大学.
- ⑤ 2010.2.2, Hiroya Nakao, "Self-organization of non-uniform dynamical patterns in complex networks of diffusively coupled oscillators", Workshop : Fluctuation and noise in living organisms II, RIKEN (Wako), Japan.
- ⑥ 2010.1.6, Hiroya Nakao, "Self-organization of non-uniform dynamical patterns in complex networks of diffusively coupled oscillators", Dynamics Days 2010, Evanston (Illinois), USA.
- ⑦ 2009.11.14, 中尾裕也, 「ランダム振動子ネットワークにおけるカオスとクラスタリング」, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 屋久島環境文化村センター.
- ⑧ 2009.11.13, 秦重史, 中尾裕也, 「gamma インパルスに駆動される非線形振動子の同期現象 - 位相ロックからノイズ同期へ -」, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 屋久島環境文化村センター.
- ⑨ 2009.9.27, 寺前順之介, 中尾裕也, G. B. Ermentrout, 「ガウスノイズを受ける非線形振動子の位相縮約」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学.

⑩ 2009.9.27, 中尾裕也, A. S. Mikhailov, 「ランダム振動子ネットワークにおける拡散誘起不安定性とカオス」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学.

⑪ 2009.9.26, 秦重史, 中尾裕也, 「Gamma インパルスに駆動される非線形振動子の同期現象・位相ロックからノイズ同期への遷移」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学.

⑫ 2009.9.25, 中尾裕也, A. S. Mikhailov, 「ランダムネットワーク上の活性・抑制因子系における Turing パターン」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学.

⑬ 2009.9.11, 中尾裕也, 「結合振動子ネットワークのダイナミクス」, 京都大学数理解析研究所研究集会「マクロ経済動学の非線形数理」, 京大会館.

⑭ 2009.9.10, 中尾裕也, 「Turing patterns in network-organized activator-inhibitor systems」, 第 19 回日本数理生物学会大会, 東京大学.

⑮ 2009.8.19, 中尾裕也, 「ランダム振動子ネットワークにおける拡散誘起不安定性とカオス」, 京都大学数理解析研究所 研究集会「双曲型力学系から大自由度力学系へ」, 京都大学.

⑯ 2009.3.29, 河村洋史, 中尾裕也, 新井賢亮, 郡宏, 蔵本由紀, 「大域結合振動子系の集団位相感受性」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学.

⑰ 2008.12.18, 中尾裕也, 「Diffusion-induced instability and chaos in random oscillator networks」, 機械工学における力学系理論の応用に関する研究会, ハートフルスクエアー岐阜.

⑱ 2008.5.6, Hiroya Nakao and Alexander S. Mikhailov, "Turing patterns on random networks", Bio-inspired Complex Networks in Science and Technology: From Topology to Structure and Dynamics, International Workshop and Seminar, Dresden, Germany.

⑲ 2008.2.18, Hiroya Nakao and Alexander S. Mikhailov, "Turing patterns in random networks", Dynamics and evolution of biological and social networks, Palma de Mallorca, Spain, February 18-20, 2008.

⑳ 2007.9.17, "The analysis of phase coherence of an ensemble of uncoupled limit-cycle oscillators via averaging of a jump-diffusion Kolmogorov equation", Kensuke Arai and Hiroya Nakao, 2007 International Symposium on

Nonlinear Theory and its Applications, Vancouver, Canada.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/~nakao>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中尾 裕也 (NAKAO HIROYA)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号:40344048

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし