

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540409
 研究課題名 (和文) 結合振動子系における同期現象とカオスに対するエイジングの効果
 研究課題名 (英文) Effects of aging on synchronization and chaos in coupled oscillators
 研究代表者
 大同 寛明 (DAIDO HIROAKI)
 大阪府立大学・工学研究科・教授
 研究者番号：70188465

研究成果の概要 (和文)：本研究の目的は自律的な振動子の集団中に何らかの原因により非自律的な振動子の割合が増えていく (これをエイジングと定義する) とき、集団のダイナミクス (特に同期現象やカオス) がどのように変容するかを解明することである。これはリズムを生成する機械や様々な生物リズムの発生源 (体内時計など) の劣化に対する応答を調べる上で重要な研究である。本研究は数学的なモデルを用いて、結合振動子系がエイジングに対し、パラメーター値や結合の様式に依存して、多彩な応答をなすことを示した。

研究成果の概要 (英文)：The present study aims at elucidating how large populations of coupled oscillators change their behaviors (in particular, synchronization and chaos), as some of its elements somehow turn inactive (non self-oscillatory), which process is here referred to as "aging". This problem is important, e.g. in assessing the robustness of machines based on coupled oscillators and generators of diverse biological rhythms such as body clocks against defects or deterioration. This study has shown using mathematical models of coupled oscillators that such a system can exhibit a wide variety of behaviors depending on parameters and its coupling architecture.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
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：結合振動子系、リミットサイクル、同期現象、エイジング、エイジング転移、クラスタリング、Stuart-Landau 振動子、時空カオス

1. 研究開始当初の背景

(1) 結合振動子系はレーザーや化学反応系などの物理化学的な系の研究や、機械・電気等の工学的な研究において重要な役割を果たしていることは言うまでもないが、生物学的あるいは生理学的な系の研究においても劣らず重要である。例えば、哺乳類の示す概日リズムは脳にある一対の視交差上核によって生み出されているが、それら一つ一つは8000個程度の時計細胞（マイクロな振動子）からなる大自由度結合振動子系（振動子集団）である。

(2) 振動子集団の理論的研究はウインフリーや蔵本によるリミットサイクル振動子集団の巨視的同期現象の研究に始まる。現在では、振動子集団の動力学・統計力学の理論的研究は非線形非平衡系の統計力学の新しい重要課題の一つとして、きわめて活発に行われており、このような理論の実験的検証も本格的になされつつある。

(3) このような研究は通常、すべての要素的振動子が自律的な振動子であるとして行われている。しかし、いかなる系も広い意味でのエイジングの影響を免れ得ない。つまり、文字通りの老化や事故、病気などによって系を構成する要素の一部が質的に変化（劣化）し、これが系全体の振る舞いに影響を及ぼすはずである。これは興味深くかつ重要な問題であるが、本研究代表者のグループが手をつけるまで研究されていなかった。

(4) 本研究代表者らは、自律的な振動子（active oscillator）の一部を非自律的な振動子（inactive oscillator：広い意味での減衰振動子）で置き換え、その割合を増やすことでエイジングのモデル化を行い、エイジング転移やその近傍での普遍的スケーリング則などの様々な興味深い成果を得た（この研究には科学研究費補助金の支援（平成16年度から平成18年度まで）が与えられた）。また、海外で追随する研究も登場した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、この研究をさらに発展させ、大自由度結合振動子系のダイナミクスに対するエイジングの効果（定性的非一様性の効果）を理論的に解明し尽くすことである。

当初の具体的目標は以下の3点であった。

(1) 結合振動子系のプロトタイプのモデルに対するエイジングの効果の包括的解明

(2) エイジングの定義の一般化とその効果

の解明

(3) 複雑ネットワーク上でのエイジングの効果の解明

ただし、研究の重点は(1)にあり、(2)と(3)は余裕がある場合に進めるというのが当初の計画であった。

3. 研究の方法

以上の研究は主として非線形振動子の代表的モデルの一つであるStuart-Landau方程式を用いて数値シミュレーションと解析的アプローチを併用して行った。Stuart-Landau方程式はホップ分岐点（振動の発生点）近傍にある系の振る舞いを普遍的に記述する方程式であり、しかも解析的取り扱いが比較的容易であることがその理由である。いくつかの課題については3名の大学院生と共同して研究を実施した。

4. 研究成果

本研究で得られた成果は、研究目的の項で述べた課題(1)に関するものに限定されている。これは、課題(2)と(3)はもともと予備的なものであったこと、および、課題(1)について予期しなかった興味深い結果が得られ、それに時間を割いたためである。しかし、課題(2)と(3)についても予備的研究は行っており、それらは今後の研究に生かしていく予定である。以下では、 K は振動子間の結合強度、 p は全系における不活性振動子の割合を表す。また、エイジング転移とは不活性な振動子の割合 p を増やしていったときに起こる非定常相（活性相）から定常相（不活性相）への転移現象を意味する（論文⑤）。

(1) 大域的拡散結合における非スカラー性の効果

Stuart-Landau (S L) 振動子結合系に対して、振動子間に非スカラー型の大域的拡散結合が働く場合のエイジングの効果の数値的かつ解析的に調べた。その結果、非スカラー性がある程度以上強くなると、 (K, p) 面において活性相と不活性相を分かつ境界（エイジング転移線）の形状が定性的に変化することが分かった。また、活性相における系のインコヒーレント状態について調べ、スカラー型結合の場合と異なり、そのような状態が安定化するパラメーター領域があることを見出した。この領域ではパラメーター値や初期条件に応じて極めて多様なインコヒーレント状態が現れることも分かった。同様の研究を非平衡化学反応系のモデルであるブラッセ

レーターの結合系に対しても行ったところ、新しいタイプのクラスタリングが起こることを見いだした。(論文③)

(2) 固有振動数の分布の効果

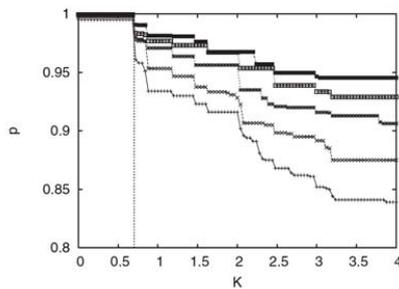
これまで扱わなかった、固有振動数の分布がある場合の研究をSL振動子結合系に対して行なった。特に、 (K, p) 面におけるエイジング転移や引き込み相転移の境界線を理論的に求め、シミュレーションの結果とよく一致することを確認した。また、カオスが発生する領域も発見した。(論文③)

(3) 局所結合系におけるエイジングの効果

上の(2)と同じく、これまで手つかずであった局所結合系におけるエイジングの効果の研究をSL振動子をリング状に並べ、最隣接相互作用させた系について行った。以下の①は当初の計画に沿った研究成果である。②と③は①の研究の過程で見つかった結果に基づく研究である。

①エイジング転移の臨界結合強度と熱力学的極限におけるエイジング転移の消失

まず、大域結合系と同じく、エイジング転移が起るための臨界結合強度が存在することを数値シミュレーションによって見つけた。そして、システムサイズが大きい極限における臨界結合強度を理論的に求め、シミュレーションの結果と一致することを確認した。次に、システムサイズが大きくなると (K, p) 相図上のエイジング転移線が上側に移動し、熱力学的極限でエイジング転移そのものが消失することを示唆する結果をシミュレーションにより得た。また、エイジング転移点での p の値と1との差はシステムサイズについて代数的に0に近づくことを見いだした。(論文④, ①)

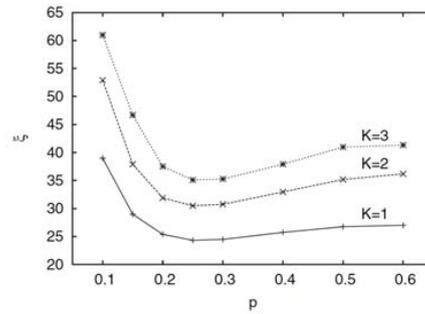


(K, p) 相図: エイジング転移線がシステムサイズとともに上昇 (論文④より)

②エイジングの進展に伴う無秩序誘起の同期現象

(K, p) 相図上のエイジング転移が起こる前の活性相において、一種の無秩序誘起の同期

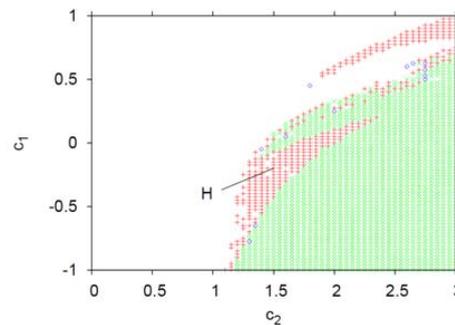
現象を発見した。不活性振動子の割合を増やしていく(エイジングの進展)と系の無秩序性が增大する。これは不活性化する振動子をランダムに選ぶためである。にもかかわらず、かえって振動子間の同期が促進される p の領域が存在する。この現象を位相の時空パターンや位相の空間相関関数を用いて調べた。(論文④)



位相の相関距離の p 依存性 (論文④より)

③時空カオスに対する不活性素子の効果

エイジングのない(つまり不活性素子のない)リングが時空カオスを示すパラメータ領域で、1個のアクティブな振動子をインアクティブに変えると、かなり敏感に時空カオスが消失することを発見した。また、パラメータを変えていくときに時空カオスが復活するシナリオを明らかにした。(論文②)



時空カオスの欠陥に対する敏感性 赤の領域が時空カオスが消失した領域 (論文②より)

本研究で得られた結果はこれまで研究されていたモデル系に比べ、より現実的な系に関するものであり、実験との比較や応用の上できわめて重要な役割を果たすものと期待される。

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6件)

- ① Hiroaki DAIDO, Dynamics of a partially inactivated population of coupled oscillators, Proceedings of 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 査読有り, 2009, pp. 163-166.
- ② Hiroaki DAIDO, Suppression and recovery of spatiotemporal chaos in a ring of coupled oscillators with a single inactive site, Europhysics Letters, 査読有り, Vol. 87, 2009, art. no. 40001, pp. 1-6.
- ③ H. Daido, N. Kawata, Y. Sano and S. Yamaguchi, Dynamics of a large population of coupled active and inactive oscillators: Effects of non scalar coupling and frequency distribution, 査読無し, AIP Proceedings, Vol. 1076, 2008, pp. 33-42.
- ④ H. DAIDO, Aging transition and disorder-induced phase coherence in locally coupled oscillators, Europhysics Letters, 査読有り, Vol. 84, 2008, art. no. 10002, pp. 1-5.
- ⑤ Hiroaki Daido and Kenji Nakanishi, Aging and clustering in globally coupled oscillators, Physical Review E, 査読有り, Vol. 75, 2007, art. no. 056206, pp. 1-16.
- ⑥ H. Daido, Dynamics of a large population of coupled active and inactive oscillators, Proceedings of the 15th IEEE International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems NDES' 07, 査読無し (招待講演のため) 2007, pp. 22-25.

[学会発表] (計18件)

- ① Hiroaki DAIDO, Dynamics of a partially inactivated population of coupled oscillators, 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, October 19, 2009, Gateaux Kingdom SapporoHotel, Sapporo, JAPAN.
- ② Hiroaki DAIDO, Dynamics of a partially inactivated ensemble of coupled nonlinear oscillators, 12th JAPAN-SLOVENIA SEMINAR ON NONLINEAR SCIENCE, October 8, 2009, Hotel Piramida, Maribor, Slovenia.
- ③ 大同 寛明, 1次元 Stuart-Landau 振動子結合系におけるエイジング転移, 日本物理学会 2009年秋季大会, 2009年9月27日, 熊本大学 (熊本市).
- ④ H. Daido, Dynamics of globally coupled

active and inactive oscillators: Aging transition, incoherence, and chaos, Japan-Slovenia Symposium on Nonlinear Science, 2008年11月12日, 東京都東京大学駒場キャンパス.

⑤ 河田憲宏, 大同寛明, 大域的非スカラー型拡散結合をもつ Stuart-Landau 振動子系におけるエイジングの効果, 日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月22日, 岩手県盛岡市 岩手大学上田キャンパス.

⑥ 佐野泰弘, 大同寛明, Brusselator 振動子の 大域結合系におけるエイジングの効果, 日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月22日, 岩手県盛岡市 岩手大学上田キャンパス.

⑦ 山口将吾, 大同寛明, 固有振動数にばらつきのある大域結合 Stuart-Landau 振動子系におけるエイジングの効果, 日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月22日, 岩手県盛岡市 岩手大学上田キャンパス.

⑧ N. Kawata, Y. Sano, and H. Daido, Effect of aging in large populations of oscillators with global non-scalar diffusive coupling, Dynamics Days Asia Pacific 5: The 5th International Conference on Nonlinear Science, 2008年9月11日, 奈良県奈良市 奈良県新公会堂.

⑨ S. Yamaguchi and H. Daido, Effect of aging in a large population of globally coupled oscillators with distributed natural frequencies, Dynamics Days Asia Pacific 5: The 5th International Conference on Nonlinear Science, 2008年9月11日, 奈良県奈良市 奈良県新公会堂.

⑩ H. Daido, Aging in a large population of coupled oscillators, Dynamics Days Asia Pacific 5: The 5th International Conference on Nonlinear Science, 2008年9月11日, 奈良県奈良市 奈良県新公会堂.

⑪ H. Daido, Dynamics of a large population of coupled active and inactive oscillators, 7th International Summer School/Conference "Let's face chaos through nonlinear dynamics", 10 July 2008, Maribor, Slovenia.

⑫ H. Daido, Aging transition and clustering in a large population of coupled nonlinear oscillators, The 3rd KIAS Conference on Statistical Physics: Nonequilibrium Statistical Physics of Complex Systems, 1 July 2008, Seoul, Korea.

⑭ H. Daido, Dynamics of a chain of coupled randomly inactivated oscillators, 9th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science, 12 November 2007, 大阪市 大阪市立大学.

⑮ H. Daido, Dynamics of a large population of coupled active and inactive oscillators, 15th IEEE International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES2007), 24 July 2007, 徳島市 四国大学コミュニティープラザ.

⑯ H. Daido, Aging, clustering, and diffusion-induced inhomogeneity in globally coupled oscillators, 8th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science, 3 July 2007, Maribor, Slovenia.

⑰ H. Daido, Dynamics of coupled qualitatively different oscillators: Aging and clustering, 2007 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, 28 May 2007, Snowbird, Utah, USA.

⑱ H. Daido, Aging of coupled nonlinear oscillators, Coupled Nonlinear Oscillators & Applications in Nanosystems, 26 May 2007, ITP-Kohn Hall Building, UCSB, USA.

[図書] (計1件)

① 大同 寛明 (分担), 自己組織化ハンドブック, NTS, 2009, pp. 202-206.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大同 寛明 (DAIDO HIROAKI)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：70188465

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし