

2023. 12. 7 開催
第 10 回 ACADEMIC CAFE
「複雑さを科学する
～制御と生成の側面から～」

複雑さと制御 ～相互作用と遅延の活用～

工学研究科 教授 小西 啓治

概要 単純な挙動(例えば単なる振動)を示す複数の「システム」は、相互に作用すると、複雑な挙動を呈する。しかし、この相互作用を「適切」に設定してやれば、工学的に有益な「秩序ある現象」が自己組織的に生じる。本カフェでは、この現象の活用例(電力ピークカット、AGVの配車制御、複数ロボットによるフォーメーション、熱音響振動の抑制)を紹介する。おもしろいことに、離れたシステム間では無視できない「相互作用の遅延」がよいエッセンスとなり、秩序ある現象にバリエーションを与えてくれる。

キーワード 相互作用, 遅延, 自己組織化, 発振器, カオス, 同期現象



座談会の様子

1. 複雑さとカオス

「複雑な現象」は我々の身の回りにあふれている。その多くは、多数の様々な「モノ」が絡み合っていて生じ、さらに、不確定なノイズにも影響されている。したがって、そのような現象を理解することが難しいことは、容易に想像できる。一方、ノイズなどを含まない簡単な微分方程式/差分方程式の「時間的に変動する定常解」には、「周期解(準周期解)」と「カオス」がある。周期解は、文字通り、周期的に動く規則正しい「解」であり、その動きは簡単に予測できる。一方、カオスは、これも文字通り不規則に動く「解」であるが、直感で容易に理解できないため、長らく見過ごされてきた [1]。

カオスは簡単な方程式の解にもかかわらず、長期的な予測が難しい。微分方程式の解は、初期値が決まると、その後の振る舞いが決定する。カオスもその特性を持ち合わせているが、ほんの少しだけ初期値がズレると、短期的な振る舞いは概ね同じなのだが、長期的には全く異なる振る舞いを呈する。このような特性により、ノイズなどで初期値が正確に定まらない現実世界のカオスは、解の長期的な挙動が予測できない。カオスは、複雑な

現象の中で、最もシンプルかつ基本的な現象あると見なすことができる。

2. 制御と相互作用

予測できないカオスの挙動は、当然ながら「制御」もできないと思われていた。しかし、1990年ごろ、簡単なフィードバック法により「カオス→周期解」と制御できることが示された [2]。ほぼそれと同時期に、複数のカオスが簡単な相互作用により「同期する」ことも示されている [2]。

これらの発見により、複雑な現象は、フィードバックや相互作用で操ることができるかもしれない、という期待が浮上してきた。本カフェでは、この相互作用によって複数の「モノ」を上手く制御することで得られた応用例について、発表者の成果を中心に紹介する。

3. 応用例 1 (ピーク電力のカット)

複数の世帯が、1つ系統から電力を受給している状況を想定する。ただし、各世帯には蓄電池が装備しており、この蓄電池を通して各世帯は電力を消費する。蓄電池は、その寿命を延ばすため、常に充電するのではなく、残量が少なくなった時に充電を開始し、満タンになれば充電を止めるように動作する。各世帯が自由に充電を開始すれば、

同時に多くの世帯が充電する期間も生じる。その場合、系統から供給すべき電力は大きくなり、電力ピークが発生してしまう。そこで、「残量がゼロ」または「残量が少ない、かつ電力の価格が安い」ときにのみ、充電を開始するようなアルゴリズムを提案した [3,4]。ただし、電力の価格は、少し過去における全世界帯の合計受給電力に比例するように設定する(遅延した価格)。電力の価格を通じて、各世帯が「相互作用」していることになる。

上記のような簡単な仕組みで、各世帯の充電開始時間が等間隔にバラつき、電力ピークを避けることができる。なお、この成果は、企業(デンソー)との共同研究で得られたものである [5]

4. 応用例 2 (AGV 配車制御)

工場内における製造ラインを想像して欲しい。各工程では、材料を機械/人が加工し、加工した品は一時的に蓄積され、その蓄積量が閾値に達した段階で、AGV (無人搬送車)がそれらを次工程へ配送する。これら一連の動作を繰り返すことで、製造ラインが安定的に動作する。ただし、上記の工程で並列に複数の機械/人が存在し、複数の AGV が次工程の 1 つの場所に搬送する場合、複数の AGV による輻輳が生じる可能性もある。

そこで、各機械/人における加工品の蓄積量の閾値が、「相互作用」を伴う簡単なルールによって調整されることで、AGV の輻輳は解消されることを見出した [6]。なお、この成果は、企業(NEC)との共同研究で得られたものである [7]

5. 応用例 3 (複数ロボットによるフォーメーション)

複数のロボットをある特定のフォーメーションに配置する研究が注目を集めている。ただし、これらの研究の多数は、一つの司令塔から全ロボットの情報を把握し、かつ、各ロボットに適切な指示を出す「集中制御」に基づいている。この制御の場合、司令塔が故障すると、全ロボットは動けなくなる。また、いくつかのロボットが故障すると、司令塔のルールを変更しなければならず、システム全体としてのロバスト性に難がある。

そこで、各ロボットには、隣のロボットの相対的な距離・角度に基づく簡単なルールを埋め込む。これにより、ロボット間の「相互作用」を実現し、司令塔がなくても、円形のフォーメーションが実現できることを示した [8]。幾つかのロボットが故障で離脱しても、ルールを変更することなくフォーメーションは維持でき、ロバスト性が格段に向上する。なお、このロバスト性は、応用例 1, 2 も有している。

6. 応用例 4 (熱音響振動の抑制)

ある程度の長さをもつパイプの一部を熱してやると、パイプ内の空気に温度差が生まれる。これにより、熱のエネルギーが音のエネルギーに変換され、パイプから大きな音が出る [9]。これは熱音響振動と呼ばれ、工学的に利用することもできるが、不要なことも多い。

複数のパイプが存在する状況では、パイプ間を細いチューブで接続することで、「遅延」された「相互作用」がパイプに実装でき、Amplitude Death という現象 [10] が生じる。この現象を通じて、パイプに生じる音は消去できる。このような研究は、開始されてから日が浅く、今後の展開が楽しみである [11]。

参考文献

- [1] ラルフ エイブラハム, ヨシスケ ウエダ: カオスはこうして発見された, 共立出版 (2002).
- [2] E. Ott: Chaos in dynamical systems, Cambridge Univ. Press (2002).
- [3] T. Fukunaga, T. Imasaka, A. Ito, Y. Sugitani, K. Konishi, and N. Hara: Dynamical behavior and peak power reduction in a pair of energy storage oscillators coupled by delayed power price, *Physical Review E*, vol. 93, 022220 (2016).
- [4] T. Imasaka, A. Ito, Y. Sugitani, K. Konishi, and N. Hara: Multi-phase synchronization for peak power reduction in energy storage oscillators coupled with delayed power price, *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, vol. 13, no. 3, pp. 544-557 (2022).
- [5] 特許: 第 5991228 号, 第 6523184 号
- [6] T. Ito, K. Konishi, T. Sano, H. Wakayama, and M. Ogawa: Synchronization of relaxation oscillators with adaptive thresholds and application to automated guided vehicles, *Physical Review E*, vol. 105, 014201 (2022).
- [7] 特許: 第 6991449 号
- [8] T. Nakamura, M. Tsukiji, N. Hara, and K. Konishi: Stability analysis of mobile robot formations based on synchronization of coupled oscillators, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, pp. 187-191 (2016).
- [9] 琵琶: 熱音響デバイス, コロナ社 (2018).
- [10] 小西, 杉谷: 結合発振器に生じる Amplitude Death, *Fundamentals Review*, vol. 16, pp. 76-82 (2022).
- [11] 杉谷: 科研費 基盤研究(C) 23K11245 (2023 年度-2026 年度)

発表者紹介

小西啓治 1969 年大阪市生まれ。1989 年大阪府立工業高等専門学校卒業。1991 年大阪府立大工学部卒業。1993 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。国立奈良工業高等専門学校、大阪府立大学工学部、公立はこだて未来大学複雑系科学科などを経て、2009 年大阪府立大学大学院工学研究科 教授。2022 年大阪公立大学大学院工学研究科 教授、現在に至る。複雑系科学とシステム制御の研究に従事。

