

非線形数理講座の紹介



研究室紹介

鈴木秀幸*

Division of Nonlinear Systems, Modeling and Optimization

Key Words : Nonlinear Dynamics

1. はじめに

本稿では、大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻非線形数理講座を紹介させて頂きたいと思います。まず成り立ちを簡単に振り返ると、本講座は2002年4月の情報科学研究科の発足と一緒に創設され、初期のスタッフは、魚崎勝司教授、山本吉孝助教授、畠中利治助手でした。その後、魚崎教授の定年退職を受けて2008年11月に八木厚志教授が後任に就き、さらに八木教授の定年退職を受けて2016年4月に後任として筆者が着任しました。現在のスタッフは、教授・鈴木秀幸、准教授・山本吉孝、助教・畠中利治の3名です。本講座は当初より一貫して非線形現象の数理的なモデル化、解析、そして応用を目指した研究を行ってきました。2010年に八木教授による非線形数理講座の紹介記事[1]がありますので、本稿では新たに着任した筆者の研究を中心に紹介致します。

2. 非線形ダイナミクスとその応用

世の中には非線形力学系でモデル化される現象が数多くあります。非線形力学系の複雑で豊かなダイナミクスは、それ自体が魅力的な研究対象であるだけでなく、多様な分野において、複雑な現象やシステムの理解や問題解決のためにも重要な役割を果たすことになります。そのため、私はこれまで、非線

形ダイナミクスに関する基礎研究と、実現象の数理モデリングによる応用研究を二本の柱として、研究を行ってきました。

基礎研究に関しては、実現象の数理モデルに共通して重要な構造・特性として、「ハイブリッドシステム（離散性・不連続性を持つシステム）」、「多体結合系のダイナミクス」、「ダイナミクスと計算」の3つのテーマを中心に研究を進め、新しいシステムやモデルの提案・解析を行ってきました。

応用研究に関しては、脳・神経系、電力システム、交通流、感染症などに対して、分野横断的に研究を進めてきました。単に非線形ダイナミクスに関する既存の知見を応用するだけではなく、応用分野の課題から興味深い構造や特性を発見し、基礎理論にも貢献してきました。

これらの基礎・応用研究は明確に二つに分かれるものではなく、むしろ縦糸と横糸として絡み合う形で研究を進めています。この相互作用について、以下に研究の具体例をいくつか紹介しながら、説明したいと思います。

まず、高電圧システムにおいて絶縁が重要であることは言うまでもありませんが、絶縁体の欠陥等により生じる「部分放電」という現象は絶縁体のさらなる劣化を招くため、その理解や解析・診断は一つの重要なテーマとなっています。部分放電の数理モデルには、瞬間的な放電に起因する不連続性が自然と現れます。その中でも単純で決定論的なコンデンサーモデルのダイナミクスに非自明な自己相似性を発見しました[2]。これは、部分放電の観測データの分布が複雑な形状（フラクタル）となることの理論的説明を与える結果です。また、このモデルから導出される不連続な区間写像を「二重回転写像」として提案し、その自己相似的構造を解明しました[3]。この写像は、区間写像としてはinterval trans-



* Hideyuki SUZUKI

1973年12月生

東京大学 大学院工学系研究科 計数工
学専攻 博士課程 (2001年)
現在、大阪大学 大学院情報科学研究科
情報数理学専攻 教授 博士(工学)
数理工学

E-mail : hideyuki@ist.osaka-u.ac.jp

lation mapping (ITM) というクラスに属するほか、より広くは piecewise isometry (PWI) というクラスに属しており、単純なシステムであっても複雑な挙動を示すことが知られていますが、その複雑な挙動を生み出す仕組みを二重回転写像に対して具体的に解析したことになります。

また、交通流に関して、都市の中で交通信号の自律分散的な制御が有効であることが指摘されていますが、このような制御によって生じる交通信号と車両の相互作用を記述する新しい多体結合系モデルを提案しました[4]。これは車両の流れと信号の切り替えをスイッチトフローシステムによりモデル化するもので、信号の切り替えによる不連続性を有するハイブリッドシステムとなります。そのビリヤードダイナミクスがカオス的であり、交通信号が強磁性相転移を示すことを明らかにしました[4]。車両のセルオートマトンモデル([5]など)の統計力学が渋滞を説明することはよく知られていますが、交通信号も統計力学の対象になることを初めて示し、「交通信号の統計力学」の概念を提案するものです。

この交通モデルに着想を得て、機械学習・数理脳科学の分野において、確率的な神経回路モデルであるボルツマンマシンの決定論的実装としてカオスボルツマンマシンを提案しました[6,7]。これは新しい決定論的マルコフ連鎖モンテカルロ法であり、現在その圧倒的な性能により脚光を浴びている深層学習の基礎となったボルツマンマシンを効率的にハードウェア実装できる可能性があります。森江隆教授(九州工業大学)との共同研究ではCMOS回路実装の研究も進んでいます。また、カオス・ハイブリッド力学系に基づく新しい複雑系計算原理を提案するものもあります。関連して、機械学習分野で提案されている決定論的サンプリング法である herding 系の複雑な挙動に対してカオス的ビリヤードダイナミクスによる説明を与えました[8]。この herding 系は上に述べた piecewise isometry (PWI) の一例となっており、工学的には $\Delta\Sigma$ 変調や誤差拡散法の一種の拡張と見ることもできます。現在、この herding 系を Gibbs サンプリングに応用した herded Gibbs 法に関する研究を進めています。

以上のように、部分放電、交通流、神経回路など、対象となる応用分野や現象が全く異なっていても、そこには共通する基礎的な構造があります。筆者は、

「ハイブリッドシステム」、「多体結合系のダイナミクス」、「ダイナミクスと計算」の基礎的な観点に着目しながら、分野横断的な応用研究を進めてきており、今後もこのような研究を続けていきたいと考えています。

3. 電力システムの非線形数理研究

つぎに、実現象の数理モデリングによる応用研究の一例として、電力システムに関するプロジェクト研究を紹介したいと思います。

近年、太陽光発電や風力発電などの導入が急速に進みつつありますが、これらの再生可能エネルギー電源は発電量が天候に左右されるため、安定的・効率的に利用するためには従来型の電源とは大きく異なる考え方が必要となります。より多くの再生可能エネルギーを最大限に活用しつつ、電力の安定供給を実現するためのシステム理論が求められています。

このような問題意識のもと 2012 年度に発足した JST CREST 研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開（略称：EMS）」（研究総括：藤田政之 東京工業大学教授）において、筆者らの研究課題「再生可能エネルギーの大量導入を考慮した電力システムの複雑ネットワーク動力学モデル構築とその最適化理論の創成」が採択され、領域内では数少ない数理研究を担うチームとして、2012 年 10 月から 2015 年 3 月まで、「電力系統の複雑ネットワークモデル」、「最適化理論の応用」、「自然エネルギー予測」の 3 項目について研究を進め、電力系統モデル構築と安定性解析、サイバーセキュリティ指標の解析手法の提案、新しい発電量予測手法の提案などの成果をあげました。

2015 年度からは EMS 領域全体が「最強チーム」と呼ばれる 5 つの異分野融合チームへと再編され、筆者らは研究課題「太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築（略称：HARPS）」（研究代表者：井村順一 東京工業大学教授）に主たる共同研究者として参画しています。HARPS プロジェクトは、太陽光発電の大量導入のもとで調和した電力供給を実現するための、次々世代電力系統制御のシステム理論を構築することを目標としており、この中で筆者らのグループは、これまでの CREST 研究を基盤として、「電力系統の階

層的モデル」、「太陽光発電量の時系列予測」の2項目について、他のグループと連携しながら研究を進めています。

2016年4月に筆者が非線形数理講座に着任したことから、本研究も本講座を拠点として実施することとなりました。電力システムは多様な非線形現象と関連していると同時に、社会的に重要な課題もあり、非線形数理の観点から学術・社会ともに貢献できるように引き続き研究を進めて参ります。

4. おわりに

以上、筆者の研究を中心に駆け足で紹介させて頂きましたが、非線形数理講座全体としても、同様の観点から、非線形現象の数理的なモデル化、解析、応用を目指した研究を行っています。特に、工学・情報科学等を含めて、様々な分野において分野横断的な応用研究を積極的に進めることも重要であると考えておりますので、共同研究等にご興味がありましたら、ぜひお声がけ下さい。

最後に、いつも様々な支援を頂いている研究室や専攻の教員・秘書・学生ほかメンバーの皆様、そして学内外の数多くの共同研究者の皆様に、あらためて感謝申し上げます。また、JST, JSPS, NEDOなどによる支援に感謝致します。

参考文献

- [1] 八木厚志, 非線形数理講座の紹介, 生産と技術 **62** (2010), 66-68.
- [2] H. Suzuki, K. Aihara, and T. Okamoto : Complex behaviour of a simple partial discharge model, Europhysics Letters **66** (2004) 28-34.
- [3] H. Suzuki, S. Ito, and K. Aihara, Double rotations, Discrete and Continuous Dynamical Systems **13** (2005), 515-532.
- [4] H. Suzuki, J. Imura, and K. Aihara, Chaotic Ising-like dynamics in traffic signals, Scientific Reports **3** (2013), 1127.
- [5] Y. Taniguchi and H. Suzuki, A traffic cellular automaton with estimation of time to collision, Journal of Cellular Automata **8** (2013), 407-416.
- [6] H. Suzuki, J. Imura, Y. Horio, and K. Aihara, Chaotic Boltzmann machines, Scientific Reports **3** (2013), 1610.
- [7] H. Suzuki, Monte Carlo simulation of classical spin models with chaotic billiards, Physical Review E **88** (2013), 052144.
- [8] H. Suzuki, Chaotic billiard dynamics for herding, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE **6** (2015), 466-474.

