

AK-1-2

非線形振動の制御とその工学的応用

— 非線形システムの解析からデザインへ —

Control of Nonlinear Vibrations and Its Engineering Application

— From Analysis to Design on Nonlinear System —

引原隆士

Takashi Hikihara

京都大学大学院工学研究科電気工学専攻

Kyoto University, Department of Electrical Engineering

1. まえがき

2011 年度電子情報通信学会よりフェローの賞を頂くことができたのは、ひとえに恩師を始め、非線形問題研究専門委員会、NOLTA サブソに関係される先生方のご指導の御蔭です、改めて御礼申し上げます。

以下、筆者の研究からフェローの受賞に関わる研究の一旦をご紹介します、何がしか非線形分野の研究を始め、進める人の参考になれば幸いに思います。

2. 非線形振動の研究事始め

非線形振動の研究に最初に従事したのは、学生の時に Duffing 方程式の解析を指導教授である上田院亮教授に指示されたときからである。しかしながら、その研究に従事する以前から林千博先生のテキストでいろいろな非線形常微分方程式の解析結果、特にそのパラメータ空間における解の存在領域の詳細な図を見ていた。特に鉄共振の非線形性を有する自励系、非自励系方程式の解析は、同時に様々な近似解法の良い例題集であったと思う。内容を評価する程の実力は無く、その説明のままに読んでも「なぜ」に対する答えに辿り着けず、消化不良な気持ちがあったことを覚えている。現象の詳細な説明はあったが、正直言ってそれ以上には理解に至らなかった。

その後の研究室で受けた貴重な指導を細かく書くスペースは無いが、一旦この研究を離れる大きな出来事がある。それは、Duffing 系で指導教授からもう一度カオスの発生領域に関わる分岐図を洗い直すことを要請されていた中で、大域分岐の一つである Blue Sky Catastrophe を実験データで見落としたことである[1]。アナログ、デジタル計算器双方の結果において、分岐集合のラインを安易に連続につないだために、そこに新たな分岐があることを見落とした事実がある。その時に分岐集合のラインが不自然にひずむことが美的に気持ち悪いと思いながらも、追求できなかった。このことが切掛けとなり、自ら限無く分岐を追いかけるタイプの仕事ができないことを理解した。そして、しばらくの間非線形常微分方程式の解析に基づく振動の分類（カオスを含む）に距離を置き、実験中心に非線形現象の物理をしっかりと見直すという方向に軸足を移した。

この間に得たことは、非線形分野の研究にも、取り組む研究者の性格に適した手法（領域）とそうでない手法（領域）があることを理解し、自分に適した手法で挑んで行くことが大切であるということであった。

3. 非線形振動の制御の模索

指導教授の元を離れて 4 年間主として電力変換、電気機器制御の分野で研究を進めた。その間に、得たことは、制御理論はクリアでそれ自体美しいものであるが、対象の記述が限定的であるということであった。機器制御の状態を安定に維持するためには、外乱に対してシステムのそここで発生する振動をモグラたたきの様に抑制する必要がある。H 無限大制御の様な方法の提案は、いずこでも同じ様な問題に困っていることを如実に表していた。その結果として、制御系を含めたシステムは元々の系とは異なるものになることに抵抗感があった。なぜなら、システムの振動、すなわち共振による応答は、それ自体がシステムの機能を生んでいるということを見無視していると感じたからである。その頃の上司の教授による「できるだけ制御せずに制御せよ」という禅の公案の様な問いかけは、今から言えば至言であった。

当時取り組んだのは交流吸引型磁気浮上システムの開発である。当初提案を行った時には、「そんな方法では浮かない！」とその道の権威と言われる方に学会で言い切られた覚えがある。しかしながら、そのシステムに関して、現象に基づく丁寧なモデル化と、古典的な制御理論に捕われずに、スライディングモード制御、切り替え制御などを用いて状態軌道を合成するという考えに基づいて浮上を数値的に確認し、また理論的にも納得し、そして最終的に実験系で非接触浮上を実現した。その浮いた瞬間の手に掛かる力の変化は今でも覚えている。これは、当時もう無いと思われていた磁気浮上の新しい方式の一つとして数え上げて頂いた。この非線形システムでもカオスが生じた[2]。しかし、カオスが出ない系にすることは浮上とは相容れないものとなることから、非線形な対象に対してどのようなアプローチを取れば機能性が生み出せるかという点が大きな疑問として残った。そしてこの結果が、その後米国コーネル大学、まさに当時非線形研究のメッカの一つとなったグループ、における在外研究に道を開いた。

4. 非線形振動研究への回帰と人

米国コーネル大学工学部機械航空工学科が行き先であった。そこで得たものは、後の 10 年以上の研究を支え、昨年開催した IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos: Applied and Theoretical へ繋がる人脈作りの始まりであった。もちろんこの大学に無条件で受け入れられたのは上田院亮先生の学生であったことが第一の理由であったと思う。Pro-

fessor Francis Moon に師事し、超伝導磁気浮上フライホイールのダイナミクスの研究を皮切りに、その後、超伝導磁気浮上系の非線形振動の研究に従事し、結合振動子系の波動伝搬、そして遅れフィードバック系の研究につながる多くの研究の端緒を掴むことができた。行き詰まった時に得た Prof. Moon と Professor Philip Holmes のコメント、モデル作りで悩んだ時に得た Professor Andy Ruina のアプローチ、Prof. Holmes が Princeton 大学に異動するに当たって行われた後任選考の一連の講演会などは、この時でなければ得られなかった経験である。また来学された Professor Celso Grebogi のカオス制御の講演とその後の議論は著者のその後の研究を大きく変えた切掛けであった。

在外研究、立場はポスドクであった。この立場で成さねばならないこととして言われたことがある。ポスドクは、着任後最初の 1 週間で示されたテーマに関して、実験系ならば実験装置を動かして、その設定および得られた結果を指導教員と議論できるようになり、2 週間後にはその調整から新しい実験を始め、3 週間後にはその内容をさらに議論し、1 ヶ月後には論文になる直前のデータにまで至ることが生き残る条件であると。その通りを実践した。それしか著者には非線形研究者に帰属する手段が無かったし、その毎日が楽しかった。

果たして、二つの結果を得、2 ヶ月後にはそれらが間違いないものであることを確信した。一つは高温超伝導浮上系の浮上振動における縦振動のカオス、もう一つは自励振動による超伝導磁気浮上系の浮上支持力の変化であった。結果の一部は Prof. Moon の超伝導磁気浮上の専門書に掲載された。残りの滞在期間は、論文投稿作業と同時に、新しく来られた研究者への指導、講義のデモ、TA の補助など大学の教育への関与を求められ、またその自由を許す環境であった。これらは新しい研究環境への模索につながった。論文を作成する作業にも丁寧な指導を頂いた。本人にデータの議論の上で書ける所まで書かせ、一文一文を丁寧に訂正する。そしてどの論文誌に適するかをまた丁寧に議論し、その方向で再度書き直す。今でも学生の指導で実践する手法である。論文は、帰国 3 ヶ月前に投稿し、そして帰国後掲載された[3]。他の結果はそれからさらに 1 年後に掲載された[4]。

5. カオス制御からその応用／展開

掲載された論文は、自らが実験系のカオス及び非線形振動の研究者であることを表明したものとなったことは明らかであった。かつて Blue Sky Catastrophe を我々の前に指摘した Dr. Bruce Stewart が上田皖亮教授に「こんな論文をお前の元学生が書いている」と知らせたと聞いている。論文は研究者の渾身の結果としてあるが、それが指導教授の目に触れること程怖くもあり嬉しいものは無い。それは自立した研究者として自分がある証であると思われる。

カオス制御の実験的研究はそんな中始めた研究である。自ら戻ることが無いと思った Duffing 系のカオスの制御を行うことに取り組んだ。それが Pyragas の遅れフィードバック制御法[5]によるカオス制御の実験的検討である[6]。この結果は、おそらく当時電子回路以外の系ではじめて連続系においてカオス制御を実現した成果であった。論文タイトルにもう少し大胆であるべきだったと今なら思うが、自分の性格を考えても妥当な線であった。このとき選んだ

論文誌が、かねて在外研究の結果を投稿した Physics Letters A である。それらの投稿の経緯から実験データに好意的な Editor に巡り会えたことは幸いであった。

理論的な研究が多くなされ、その制御特性の限界に関する論文等も親しい方々が出版されたが、自らはその制御の実験の感覚を大切に、その遅れ系の無限次元の系がどのように有限次元のアトラクタに収束していくかについて執着した[7]。これは未だに大きな問題であることは間違いなく、アトラクタをリフティングして無限次元で考えてもその収束のメカニズムは見えない。このような感覚は、実験で培われた感覚である。物理的感覚重視は稚拙な研究スタイルかもしれないが、他の研究テーマにおいてもその感覚を大切にしている。著者の勘が良いと評した方が居るが、勘ではなく自然な感覚の蓄積だろう。著者が最初の失敗以来学ばねばならないと思った研究能力であった。

カオス制御の応用はもうここまでくれば確実なテーマとなった。京大に異動後の学生 山末耕平君（東北大学）が学位論文とその展開で原子間力顕微鏡(AFM)の振動制御に応用し、安定化を達成した[8]。これは、制御がその測定結果に及ぼす影響を排除して、本来の物性表面の形状とは何かをその分野の研究者にも問う結果であったと考えている。このスケールの領域では、さらに AFM による原子のマニピュレーションの物理原理について議論を自ら展開した[9]。

遅れフィードバックのカオス制御の考え方は、その収束時に制御入力が無くなるということが物理系では重要な特性である。カオス軌道の回帰性により制御の可能性を担保すると同時に、カオスに埋め込まれた不安定周期解の安定化につながることに大きな意味がある。回帰性は、回転振子であれば円筒位相面上で付与される特性であり、遅れフィードバック制御の適用が可能となる。それを実現したのがパラメトリック振子の回転起動であり、横井裕一君（長崎大学）その学位論文で実験的に完成した[10]。

これらの研究の過程で大きなものを得た。それは先行研究を決して否定的に引用しないことである。先行する研究者を味方にするには研究を豊かにするし、学生などの派遣を伴う共同研究につながる。こういったことを常に意識し、踏み誤らない様に常に戒めなければならない。

制御して制御しない、そして機能を得るということは、システムデザインのあり方の一つである。特に計測し、制御の効果を得ること自体難しいナノ、マイクロ領域、さらには分布系等では、もう一度システムのダイナミクスに基づいた議論を原典に戻って考えることが重要である。

6. あとがき

著者がフェローの賞を頂く切掛けとなった研究の一部を研究の経緯の中に位置付けて述べた。別のストーリーは勿論ある。それを述べるのは他の機会に譲りたい。

文献

- [1] Y. Ueda, et al., in *Dynamical Systems Approaches to Nonlinear Problems in Systems and Circuits* (SIAM, 1988).
- [2] システム/制御/情報, Vol.37 (11), 677 (1993).
- [3] Phys. Lett. A 191, 279 (1994).
- [4] Phys. C, 250, 121 (1995).
- [5] Phys. Lett. A 170, 421 (1992).
- [6] Phys. Lett. A, 211, 29 (1996).
- [7] PRE 69, 056209 (2004).
- [8] Phys. Lett. A, 373, 3140 (2009).
- [9] PRL, 102, 215502 (2009).
- [10] Phys. Lett. A, 375, 1779 (2011).