

1. 「基礎・境界」が成し遂げたこと、今後に期待できること

1-2 非線形問題の理解を越えて ——新しい分野への展開——

Getting Over Folded Knowledge Related to Nonlinear Problems:
Stepping into Untrodden Field

引原隆士

1. はじめに

本会基礎・境界分野の100年は、電気電子通信に関わる物理現象の解析・理解から、技術としての汎用化のための理論の確立、及びその利用への道筋であった。中でも、非線形問題は基礎・境界分野の中においても科学的興味にあふれた対象であり、時としてエポックメイキングな対象であったと言っても言い過ぎではない。その長い過程で新たな観点から繰り返されてきた非線形問題解決の研究の流れを見ることで、将来の未踏領域開拓の手掛かりを得ることができる。このように、学会の在り方は研究成果の公表にとどまるものではない。

本稿では、本会による非線形問題に関する研究への関わりについて若干述べるが、特に歴史をたどるものではない。非線形問題に関わる研究は、本会の枠を超えており、それらの全容を述べることは不可能である。したがって、今後の非線形問題に関わる研究がどのようにあるべきか、そして今後の可能性を秘めているかについて私見を述べる。同時に、なぜ学会が必要か、あるいはソサイエティというコミュニティが必要かについて、研究者が取るべき立ち位置に関連して述べる。これが今後の基礎・境界分野の在り方の将来を決めると考えるからである。

2. 身近な研究対象としての非線形問題

本会の前身となる電気通信学会で、非線形力学に関わる課題を議論する母体となったのは、非直線理論研究専

門委員会という研究者のコミュニティが生まれたことによる⁽¹⁾。

それらの研究会で議論された研究課題をある研究会資料⁽²⁾から眺める。その研究会は電子通信学会、日本機械学会、京大数理解析研究所が主催となって開催され、線形振動論で解析的に扱えない、現実の物理・工学系における振動現象を扱い、現象の確定系によるモデル化、実験データの解析とモデルに基づく数値解析、力学理論によるモデルにおける解の存在証明、振動の制御、システムの最適化などの検討について、サーベイと研究発表がなされている。また、常微分方程式で表される確定系だけでなく、ランダムな入力を含む系の解析から、非周期的な振動現象の理解についても検討されている。工学的な応用対象の時代的な要素を取り去ると、現在の非線形問題に関する研究領域で議論されている多くの課題の芽生えや、類似の議論がなされている。このことは、コミュニティがその共通認識を継承して、発展させてきていることを意味し、それこそが日本の研究領域の深掘りを可能にしてきたものと言うことができる。

逆に遡ると、当時の研究の根源は、明治維新直後に欧米から輸入された科学技術を具体化する過程において、学習した理論体系では扱い切れない研究の対象として、認識されている。その指摘は寺田寅彦⁽³⁾、中谷宇吉郎⁽⁴⁾らの随筆などに見て取れる。しかし、それらは余りに情緒的で詩的であって、科学的な論証に至っていない。

等身大の、身近な自然現象の中に見られる複雑な現象の理解や予測は、スケール則を満たせばミクロからマクロまで現れる。一見単純な現象が分岐、相転移を繰り返し、多様な状態に至ることを説明することは本質的課題として興味深い。地震のような災害も、予知という科学的な興味に加え、災害への備えという安全という意味の啓発は、人間社会に不可欠である。これらは全て、非線形特性を有する系に生じる現象理解に関わる研究の夢で

引原隆士 正員：フェロー 京都大学自然科学域電気電子工学系
E-mail hikihara.takashi.2n@kyoto-u.ac.jp
Takashi HIKIHARA, Fellow (Platform of Natural Science, Kyoto University, Kyoto-shi, 615-8510 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.100 No.6 pp.409-413 2017年6月
©電子情報通信学会 2017

ある。

すなわち、非線形問題は特別なものではなく、水の流れや振動など身の回りの等身大の現象から、地震や気象といった大規模な地球規模の現象に至るまで、我々が避けて通れないものであり、その様々な対象に対して、時代的必要性、すなわち応用も含めた興味から繰り返し研究対象とされ、時間を掛けて科学の域までたどり着いた領域とすることができる。

3. 非線形系へのアプローチ

振動は、機械系だけでなく、電気電子回路、化学反応系、生態系、市場経済など様々な系に現れる、状態量の時間的な変化である。非線形な復元力を有するバネ—質点系を見ると、複数の平衡点が共存する結果、初期値によってその解の時間発展が異なることが分かる。非線形振動の時間変化や、定常的な正弦波からひずむ特性を解析することが、非線形振動のアプローチの最初であるのは自然なことである。これは常微分方程式のモデルの妥当性を検証する Newton のアプローチ⁽⁵⁾の延長にある。そして、次に瞬時瞬時の時間変化から離れ、解が存在する状態空間の構造を理解し、写像と解集合の構造を解析する数理的アプローチが取られる。これは Poincare が示したアプローチ⁽⁵⁾である。更に物理あるいは工学の観点から、系のエネルギーに着目し、固有値と振動周波数の関係から、パワースペクトルに基づくアプローチが加えられてきた。これは Wiener のアプローチ⁽⁶⁾となる。これら全てのアプローチは、今でも基本的な解析手法であるが、それらの解析を超えた理解が必要となっている⁽⁷⁾。多くの系の研究、解析が進み、既に単純な系への理解は完了したように扱われている。例えば、ブームが過ぎて今では興味が失われているカオス^(用語)振動の力学系的な理解は、限られた系では解析的に説明されているが、多くの系では、現象論と局所の分岐理論にとどまり、確定系と確率系の狭間における理解が完了したとは言えない⁽⁸⁾。そこに立ちだかるのが大域構造や、無限あるいは連続という状態へのアプローチの非力さである⁽⁹⁾。

このように、一つの非線形力学系が理解できる解析法が、そのまま他の非線形系に適用できるわけではない。現象、対象に応じて新しいアプローチを見いだしていかなければならない。そのようなアプローチを絶えず構築

していくことが非線形問題の本質でもあり、その中で新しい研究課題が生まれてくる可能性がある。

非線形問題に関わる研究は、対象のモデル化、モデル若しくはデータに基づく解析手法の開発、手法の一般化、制御若しくは設計を、時代に応じた対象に対してスパイラルに繰り返し、数理解物理的理解から工学的応用を模索してきた。そしてこれからもそれが継続されることは間違いない。すなわち、科学技術のアプローチそのものであったと言える。したがって、非線形問題へのアプローチを探ることはすなわち、境界領域、未踏領域の科学へのアプローチの方法を模索し、トライアルする術を構築する作業にほかならない。

4. 未踏領域への挑戦とその姿勢

本会がこの 100 年、非線形問題に関わる研究において、創成から発展、そして成熟を自ら経験してきた。正に、日本の非線形に関わる基礎科学から工学的応用まで、その中心に本会があった。それが日本の非線形問題に関わる研究のユニークさである。しかしながら、カオス発見⁽⁸⁾からも既に 55 年を過ぎ、この分野も成熟期に入って久しい。

図 1 に研究の発展とパラダイムシフトのイメージとして筆者が用いている図を示す。現在の非線形問題に関わる研究は成熟期にある。産業界や国家から、技術のパラダイムシフトを求める声がかまびすしいが、研究の大きな転換であるパラダイムシフトの方法論など誰も知らない。このシフトは状態が活性化エネルギー（ポテンシャル）の峠を越えて初めて生じる⁽¹⁰⁾が、その峠の高さは中からは見えない。多くの場合、パラダイムシフトが起きたことを後から理解するにとどまる。非線形問題に関わる研究分野では、この成熟期において何をどのように研究すべきか分からない、見つからないというつぶやきが、昨今若い研究者から発せられることがある。

本会の基礎・境界分野においても、従来の対象とは異なる境界領域の非線形問題に関連した、未踏領域の挑戦が始まっている。列挙することは目的ではないが、生命の起源に関する研究、細胞分裂に関する研究、脳の機能に関する研究、思考の成り立ちに関する研究などの生命に関する研究がある。あるいは、神経、回路、通信、交通、エネルギー、そして社会のネットワークというものの普遍性、機能とは何かを明らかにする研究がある。電流、電子を経て量子そしてスピンの至るより深度の高い物理の制御、分子レベルの操作に関わる研究から、DNA の機能性に関わる研究がある。マクロな対象として、リプログラム形の回路の研究など、従来静的なものと考えられてきた構造が動的に変化するシステムの研究がある。更に、異なる時間スケールで、異なる物理レイヤのダイナミクスが共存するシステム、地球規模の多重

■ 用 語 解 説

カオス 非線形システム、そのモデルである非線形常微分方程式で表される系の解（状態）で、不規則に位相（状態）空間を推移する振動現象。初期値に対する応答が鋭敏で、不安定な解をちゅう密に含む。

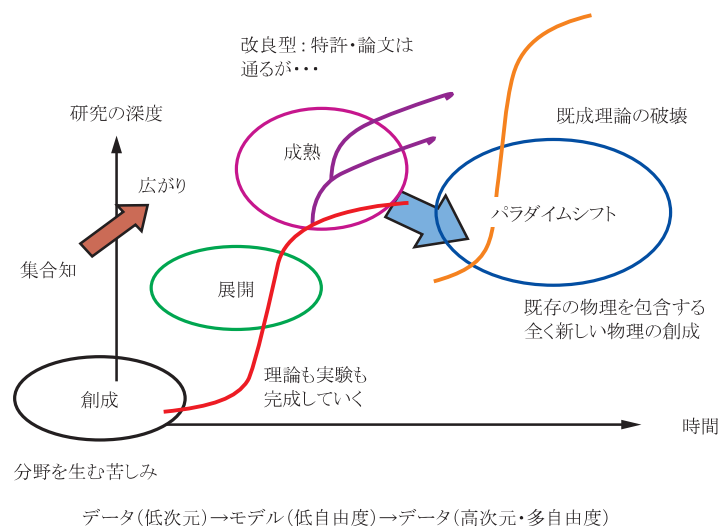


図1 研究の発展とパラダイムシフトのイメージ

化されたダイナミクスの研究などもある。全てのテーマが、ローカルな特性だけでなくグローバルに非線形に結合して直接に関係している。どう考えても、研究課題が見つからないというつぶやきとはそぐわない。

確かに、本会の非線形問題に関わる研究の中心は、電気電子回路における発振器、振動子などの非線形素子とその結合回路周辺の研究にとどまってきた。過去 50 年の研究の主要な分野においては、これらが興味の対象であった。しかし、そこで我々がこれまで達成されてきた成果を、同じ次元にとどめることは全く意味がない。課題が見つからないのではなく、同じことを繰り返すことに安住しているだけで、その知見の展開を図っていないだけなのではないだろうか。基礎として学習しても、それが直接に過去の研究領域外の研究につながっていない。このことを指して研究課題が見つからないというつぶやきになっているものと理解される。

基礎・境界領域に100周年という線引きをしても何の意味もない。必要なことは、構築してきた知見を元に荒れ野、未踏領域に率先して分け入る果敢な意識を育てることであろう。京大の長尾真元総長が同窓会の講演会で後輩の前に「新しいテーマに取り掛かるときに、全ての論文を3か月で読破し、1年たって論文が書けなければ勉強不足、3年たって国内トップにならなければ努力不足、10年たって世界一流にならねば能力不足」という警鐘⁽¹⁾を聴衆である若手、学生に発しられた。完成した研究者が新しい領域に踏み込む姿を若い人に見せていかなければ、指導を受けた者が努力をいとわずトライすることはない。研究者が、居心地が良い場所にとどまって、その結果として数多くの場合の結果が集まったからといって、その中から突然新しい分野が生まれることにはならない。

5. 集合知から生まれる研究

本会が100年の間変えていない環境がある。それは、会員である研究者が各自の研究課題に関して論文を執筆し、論文誌の編集委員会がその論文を査読し、出版するというものである。この形は、1665年にイギリスで発刊された *Philosophical Transactions* が始まりである⁽¹²⁾。本会の英文誌が *Transactions* の名称を踏襲しているのもそこに由来する。一方、会誌は *Journal* である。*Journal* の呼称は同じ年にフランスで発刊された *Journal des savants* に由来する。深い洞察の上にこの二つの冊子の形態を取って、学会が会員の研究成果を公開し議論する場を作ってきた。すなわち、研究者のコミュニティを作り上げてきた。非線形問題のコミュニティもこの論文誌を中心に醸成され、そして新しく電子媒体のみの論文誌を発刊するに至っている。学会は、これらの過程の中から、世界に先駆けた研究成果を数多く公開し、人を育ててきた。そして当たり前にも国外の学会、論文誌でその成果の評価を受けることを可能にしてきた。ところが、その結果、自らが母体としてきたコミュニティを放棄し、学会自体の活動成果を海外の学会や出版社に身売りするべきとする主張も現れる。それは最終段階のジビリティの課題を改善したいとする会員の本音でもある。本会の抱える今後100年への本質的な課題はそこにある。

学会の在り方として、論文誌を発刊して、その会員の成果を会員で共有するという閉じたモデルは、相互扶助の精神の維持が失われたとき、瓦解する。その結果、新たな収益を求めるビジネスモデルが市場原理という掛け声で導入される。要するに、学会が何のために必要かということに答えることができない。学会は、科学技術の本質に基づいて、論文を査読・編集・出版する権威を有し、そしてその著者と成果を成果の公開という手段で守

る、論文の著者が信頼を置く組織である。現在、過去から現在の学術情報が、論文誌、学会誌、ジャーナルの紙という固定媒体から離れた情報として一人歩きし始めている。論文には、オリジナリティ、先取性、そして有用性などの多様な評価軸がある。ところが、先に述べたように情報として一人歩きし始めた論文は、タイムスタンプとのお墨付きを与えられた後には、もう論文誌というくくりの意味を全く失う。論文ごとの違いは、どの論文誌が評価したかという、由来評価だけになりつつある。

印刷機の普及が可能にした 350 年の歴史を持つ論文誌という形態の場が、学会という組織のよりどころであり、きずなであった。現在、それが小さい粒度の論文という情報になったとき、その意味を再考する必要がある。今や論文は誰でもいつでもどこでも書け、一般公開することができる。それは人の権利である。学会が唯一そこに寄与しているのは、査読というコミュニティが価値を認める母体となるシステムである。すなわちそれが、これまで本会が取ってきたコミュニティにおける集合知を支える柱であった。それを自ら放棄したとき、コミュニティをつなぐルールや規律がなくなってしまう。更には、より高い基準のものをもてはやすだけの風潮は、研究の中身ではなく、単なる数値でのみの議論となり、コミュニティの疑心暗鬼を増長している。

非線形問題に関わる研究者が守るべきものは、研究者のコミュニティである。基礎・境界領域が守るべきものは、個別のテーマや分野に特化したこつぽの集団の議論ではなく、異分野や境界領域の課題への視野を広げる考え方を尊重し、「研究の創成」を庇護して押し上げる環境である。しかしながら、国際化という風は、この閉鎖性のあるコミュニティを無視する。それゆえに、多くの会員がジレンマを抱えて、国外と国内の二重の研究活動を強いられる。これはそのまま、日本の社会の近代から今日までの構図である。

先に述べたように、基礎・境界領域がコミュニティを内に向けるか外に向けるか、その態度を問われている。今、国境のない科学・技術が向かうべきは、人の拡散ではなく、学会、研究会、論文誌を介した、コミュニティの維持と発展的な展開である。多くの場合、できない、不十分という評価に伴うのが常であるが、逆にそこに可能性があると信じなければならない。グローバル化による統一が失う多様性と、ローカル化が固執する主張とは別物である。多様性を認めるダイナミックな、コミュニティを作り上げてこそ、本当の集合知が生まれる。

6. 「おわりに」に代えて

最後にあえて反論が予想される意見を記す。非線形問題の分野において、1961 年のカオスの発見は後に大き

なエポックとなったことは衆知のとおりである⁽¹³⁾。このカオスの発見に関して、物理現象を実験により科学的に特定し、その論証を行った論文が国内で最初に出版されたのが本会論文誌である⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾。その結果に至る議論は、非線形問題研究専門委員会の前身である非直線理論研究専門委員会のコミュニティで行われている⁽¹⁶⁾。カオスが発見された日の記録⁽¹⁷⁾から 2 週間後に行われた正に研究萌芽の議論である。カオスは数理的発明ではなく物理現象の発見である。存在が先にあって、説明する数理は必要条件しか提示できていない。カオスと呼ばれる現象は自然に存在し、多くの人が見てきたかもしれない現象である。しかし、それが既知の現象とは異なるということ、当時の解析技術を駆使し、数理的考察を踏まえて、最初に特定したのは上田皖亮（当時京大大学院生、現名誉教授、本会フェロー）である。少なくとも本会の会員が、そのことを間違えて認識し、個人が見たとか、中国の古典に概念が述べられているとか、論文でコメントされているとか、根拠をたどれない意見で扱うことは、論文・研究データという研究者がよって立つ根本的な手段を否定することにほかならない。基礎・境界領域が、今後も科学技術を担うのであれば、発見という行為を正当に評価する公正な意識を持つべきである。昨今、当然として要求される研究公正に鑑みても、容易に理解できるであろう。そうでなければ、本会が、基礎・境界領域が、今後の 100 年の先頭を切って科学に貢献することはできない。学会は、査読を経た論文誌によりその研究成果のタイムスタンプを保証し、議論をサポートし、結果を評価して世に問いながらコミュニティを維持し、発展させる存在であるべきである。そして 350 年それを維持してきた。誰がその論文を多く見たかという人気投票ではない。創生期の研究と研究者を守れなければ、新しい分野に果敢に挑む若い研究者は本会からは現れない。知ったかぶりをして、客観性のない意見の一方に荷担することも、科学者としては御法度である。我々が唯一許されるのは、理論と実験と数値計算、それらのいずれか二つ以上の論証を駆使し、存在することを示す科学的手法に乗っ取った議論だけである。それ以外は物語である。

基礎・境界領域、そして非線形問題に関わる研究分野を、将来の可能性を秘めた分野として意識して担っていくのが、本会のこれからであることを期待したい。

謝辞 本稿を執筆する機会を与えて頂くと同時に、原稿内容について忌憚のない御意見を頂戴した、土居伸二京大教授（平成 28 年度 NOLTA ソサイエティ会長）にはこの場を借りて御礼申し上げます。また、日頃御指導頂く、NOLTA ソサイエティの皆様にも、末筆ながら御礼申し上げます。

文 献

- (1) 遠藤哲郎, “電気・電子・通信分野に於ける非線形振動の研究,” 信学 FR 誌, vol. 2, no. 2, pp. 31-39, Feb. 2008.
- (2) 非線形問題合同研究会講演論文集, 日本機械学会, 電子通信学会, 京都大学数理解析研究所, Aug. 1971.
- (3) 寺田寅彦, 寺田寅彦随筆集, 岩波文庫, 1963.
- (4) 中谷宇吉郎, 中谷宇吉郎随筆集, 岩波文庫, 1988.
- (5) R. Abraham and H.E. Marsden, Foundations of Mechanics, W.A. Benjamin, 1967.
- (6) N. Wiener, Cybernetics, MIT Press, 1948.
- (7) I. Mezić, “A Schrödinger-type formalism and observable wave functions in dynamical systems,” NOLTA2016, p. 375, Japan, Nov. 2016.
- (8) Y. Ueda, The Road to Chaos, Aerial Press, 1992, <http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/71101?locale=ja>
- (9) Y. Ueda, “Basin-filling Peano omega-branches and structural stability of a chaotic attractor,” NOLTA, vol. 5, no. 3, pp. 252-258, July 2014.
- (10) 林 和弘, “オープンサイエンスに広がる学術情報流通と研究評価の新展開,” 放置すれば日本の科学そのものが衰弱する: 孤立する日本の研究プラットフォーム, 総合研究開発機構(NIRA)研究報告書, 2015.
- (11) 長尾 眞, 京都大学工学部電気系教室同窓会洛友会会報, no. 211, http://www.rakuyukai.org/kaiho_backnumber/211/2.htm
- (12) 金子 務, オルデンバーグ, 中公叢書, 2005.
- (13) T. Hikihara, P. Holmes, T. Kambe, and G. Rega, “Introduction to the focus issue : Fifty years of chaos : Applied and theoretical,” Chaos, vol. 22, no. 4, p. 047501, 2012.
- (14) 林 千博, 上田暁亮, 赤松則男, 板倉秀清, “周期的外力を加えた自励振動系の動作,” 信学論 (A), vol. J53-A, no. 3, pp. 150-158, March 1970.
- (15) 上田暁亮, 赤松則男, 林 千博, 非線形常微分方程式の計算機シミュレーションと非周期振動, 信学論 (A), vol. J56-A, no. 4, pp. 218-225, April 1973.
- (16) 林 千博, 柴山 廣, 上田暁亮, “周期的外力を加えた自励振動系に発生する概周期振動,” 信学研資, 非直線理論, Dec. 1961, <http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/24274>
- (17) Y. Ueda, “Strange attractors and the origin of chaos,” in The Impact of Chaos on Science and Society, C. Grebogi and J.A. Yorke, eds., Chap. 17, pp. 324-354, UNU, 1997.

(平成 29 年 1 月 3 日受付 平成 29 年 1 月 24 日最終受付)



ひきはら たかし
引原 隆士 (正員: フェロー)

1987 京大大学院博士課程単位取得退学, 関西大を経て, 1997 京大大学院工学研究科助教授, 2001 同教授. 2012 年から現在まで同大学図書館機構長, 附属図書館長. 主として非線形力学の工学的応用に関する研究に従事し, 研究分野はナノ・マイクロ系からパワーエレクトロニクス, 電力伝送系にわたる. 京大工博. 電気学会, システム制御情報学会, IEEE, APS, SIAM 各会員, 2013~2014 本会基礎・境界サイエティ会長. 現在, NOLTA 誌編集委員長, 2015 本会論文賞, 喜安善市賞, システム制御情報学会賞論文賞 (2009, 2013, 2015), Energies, MDPI Best Paper Award 2015 など各受賞.