

日本学術会議公開シンポジウム報告

—数理モデリング（数学と諸科学・産業との連携の観点から）—

日本学術会議数理科学委員会数学分科会

1 概要

2014年3月26日（水）午後1時～6時に日本学術会議講堂において、日本学術会議第3部数理科学委員会数学分科会主催、日本数学会・日本応用数理学会・統計関連学会連合共催で題記の公開シンポジウムが開催された。このテーマへの関心は高く、大学教員、企業の技術者等142名の参加があった。まず、数学分科会委員長楠岡成雄氏（東京大学）から、「数学分科会では、「数学と社会との関わり」をテーマとして、数学が社会へ貢献するための大学における人材育成教育や研究のあり方について議論してきた。その中でモデリングが大きなテーマとなった。モデリングは幅広いものであり、人文・社会科学、生命科学などにおける様々なモデリングがあるが、焦点を絞るために今回は産業、特に製造業との関わりを意識して公開シンポジウムを行う」と開会挨拶と開催趣旨説明があった。

今回のシンポジウムの構成は、4名による基調講演と基調講演者を含めた計9名のパネリストによるパネル討論の2部構成であった。高田章氏（旭硝子（株）、日本応用数理学会会長）、山本昌宏氏（東京大学）、三村昌泰氏（明治大学）、長松昭男氏（キャテック（株）／東京工業大学）による基調講演はそれぞれ質疑、コメント含めて30分であった。座長は、前田吉昭氏（慶應義塾大学）が務めた。後半のパネルディスカッションでは、中村振一郎氏（理化学研究所中村特別研究室）、小谷元子氏（連携会員、数学分科会委員、東北大学）、中尾充宏氏（連携会員、数学分科会委員、佐世保工業高等専門学校）、樋口知之氏（連携会員、統計数理研究所）、坪井俊氏（連携会員、東京大学）の各氏から10分間、モデリングに関する思い・考えを説明して頂き、パネル討論に入った。基調講演の司会を石井志保子氏（会員、数学分科会副委員長、東京大学）が行い、パネル討論の司会を萩原一郎氏（会員、数学分科会幹事、明治大学）が務めた。

2 基調講演

2-1 高田章氏「数理モデリングを考える／企業の立場から—産業応用の大航海時代を乗り切るために—」

2-1-1: 概要 古代の建築物（ピラミッド、パルテノン神殿、ローマの土木・建築技術）には規則性があり、既に、社会・産業の数理モデリングの概念が存在したと思われる。世界のモデリングの起源はローマ時代に遡ることができる。我が国の建造物も五重塔や法隆寺など規則性があるが、明治以降は、西欧への意識が強く、久米邦武編著「米欧回覧実記」（明治11年刊）では、西洋のあらゆる工業技術の基本をなしているのは、物理、化学、数学であり、さらに設計図を作り、模型をつくることをいとわないことが西洋の成功の秘訣であると述べられており、高度成長期までは欧米にキャッチアップするための数理モデリングを強く意識した時代が続いたといえる。

古今東西、数理モデリングを考える上で含蓄のある言葉として以下があげられる。1) プラトンのイデア論：我々が見ているものも「影」に過ぎない。2) ポワンカレ (1854-1912) の言葉：「異なるものを同じものとみなす技術こそ数学である」。3) ガリレオ・ガリレイ (1564-1642) の『賈金鑑識官』：「宇宙は数学という言語で書かれている。そしてその文字は三角形であり、円であり、その他の幾何学図形である。これがなかったら、宇宙の言葉は人間にはひとことも理解できない。これがなかったら、人は暗い迷路をたださまようばかりである」。

2-1-2：モデリングの例1：加熱サイクル，冷却サイクルからなる板ガラスの製造プロセスでの熱効率の良い設計検討事例

企業現場の数理モデリングに重要なことは、まず「数理モデルにどの現象まで組み込めば良いか？」である。可能性のある要因を全て組み込めば精度の良いモデルができるが、非現実的である。例えば、1ヶ月で対応が求められている時に、1年もモデル構築に関わることはできない。重要な事は、選択したモデルでどの程度説明できるか、オーダー・エスティメーションが出来るかである。本課題では、ガスあるいは空気が煉瓦に囲まれた空間（流路）を流れる。煉瓦は垂直方向に積まれているが、ガスあるいは空気との対流熱伝達を増大させるために乱流促進を意図して煉瓦の垂直面（流路）はデコボコさせている。正確には、デコボコした流路の中を流れるガスあるいは空気の乱流の方程式を解いて水平方向の流速の分布を計算しその結果として煉瓦とガスあるいは空気間の界面の対流熱伝達を求めなければならない。しかし、この研究は今から35年程前のもので、当時は2次元でも非定常の乱流計算をするソフトも計算資源もなかった。そこでガスあるいは空気の水平方向流速分布は計算せず、そのため乱流の大きさは不明だが、代わりに煉瓦とガスあるいは空気の界面の熱伝達係数（正確には無次元化したヌッセルト数）と断面平均のレイノルズ数の関係を、型試験装置を用いてプロットして実験からその関係を算出した。煉瓦の垂直面（流路）のデコボコ具合が違う積み方がいく通りかあったのでそれぞれの積み方に対して個別にヌッセルト数とレイノルズ数を求めた。実際の応用時には、ある煉瓦の積み方が決まるとそれに対応するヌッセルト数とレイノルズ数の関係（プロット曲線）を呼び出す。操作条件の流量がわかるとまずレイノルズ数が求まり、さらにはプロット曲線から対応するヌッセルト数がわかる。その後ヌッセルト数から煉瓦界面とガスあるいは空気との対流熱伝達係数が決まる。後はその対流熱伝達係数を使って煉瓦の温度とガスあるいは空気の温度が求まることになる。

2-1-3：モデリング例2：国家プロジェクト（NEDO，2008年-2012年）：“ガラス溶融技術「インフライトメルティング（気中溶解）」”

2015年頃に小型炉の実用化，2030年までに大型炉の実用化を目指している。この技術が実用化されれば、ガラス溶融プロセスの消費エネルギーは1/3程度に低減できる。気流・伝熱解析でシミュレーションが重要な役割を果たしている。箱の中にランダムに玉（原子）を詰めた場合を考えてみる。近くにある玉同士は化学結合のため特定の距離を取り、隣接する玉三個（A, B, C）のなす角度（A-B-C）を調べるとある特定の角度を取ろうとする。化学結合の影響で近くにある玉同士

はある位置関係を保ち、これは「短距離秩序」と呼ばれる。一方、距離がずっと離れると離れた玉同士の距離は無相関になってしまい、「長距離秩序」は無いという風と呼ばれる。ガラス材料の数理モデル構築の難しさは、まず①原子配置の不規則さにある。上述のように長距離秩序は無いが、短距離秩序は有りガラスの構造モデルは全く不規則である訳ではなく不規則性の定量化が重要となる。

2-1-4: ガラス分野シミュレーション技術の今後の展開と応用

図1に示す、材料設計（マイクロ）からプロセス技術（マクロ）までをつなぎ、ナノテクノロジーにも対応可能なシミュレーション技術『マルチスケール・シミュレーション』がガラスの分野でもますます重要となってくる。そして図2に示す第3の科学である計算科学と第4の科学であるデータサイエンスの融合も目指し産業界での数理モデリングの展開にも貢献して行く。

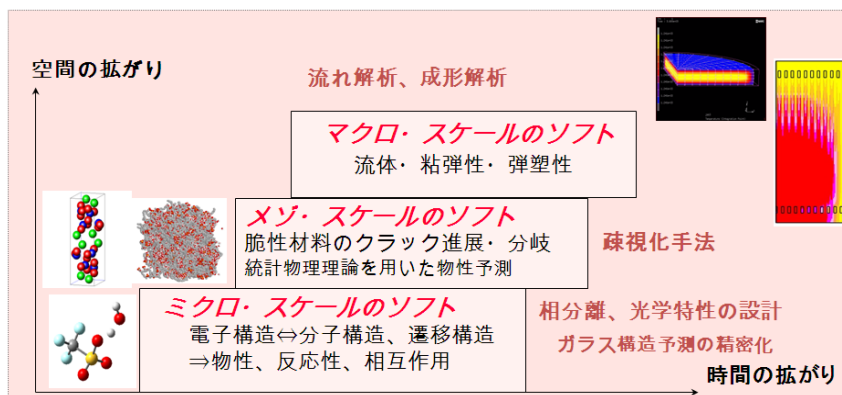


図1 ガラス分野シミュレーション技術の今後の展開と応用
『マルチスケール・シミュレーション』

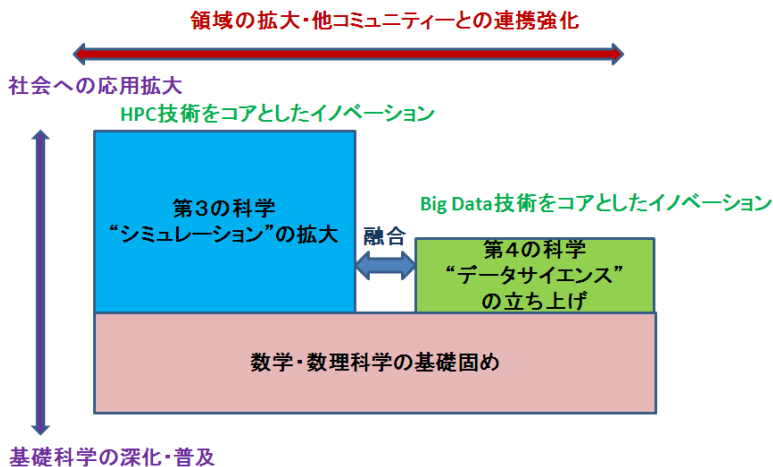


図2 産業界での数理モデリングの今後の展開案の一つ

2-2 山本昌宏氏「数理モデリングを考える：数学解析の立場から」

数学者の傾向は、第一原理に固執することであり、応用分野の研究者は経験を重視し、両者の使用言語も異なる。実りある異分野連携のため歩み寄りが必要である。そのために、数理モデルは、万国・異分野における共通言語になりうるもので、異分野の共同作業の土台である。次のようなケース・スタディで数学は公共の福利に役立つことが実証された。

2-2-1：高炉の効率的な操業のための管理

考えている現象の説明に特化し、複雑な現象を大胆に単純化することが重要である。その際、現場の研究者や作業員からの即時的なフィードバックによるモデリングプロセスの補完、検証、実用化へのステップを進めるのが良い。ここでの課題は、高炉の温度観測データに何故、異常状態が発生するのか、異常の予兆を検知する方法はあるか、そして正常状態から異常状態に移行する際に現象に内在する論理構造を数理的に考察することである。問題の本質は、温度計測値に影響を及ぼす高炉内部の状態変化の原因を、煉瓦内面の熱流束を指標として究明することである。1次元非定常熱伝導方程式の逆問題によってこれらの課題を解決し実用化に結びつけた。

2-2-2：粉塵問題

工場の煙突などからの粉塵粒子の飛散挙動を計算し降下粉塵量の推定を行うものである。スタンダードな Pasquill-Gifford モデルを第一原理（支配方程式）から見直すことよって修正し、良好なシミュレーションを行ったものである。Pasquill-Gifford モデルの欠点は、飛散物質の密度は気体密度に等しいと仮定し、また、パラメータの意味付けがわかりづらく物理法則との関連

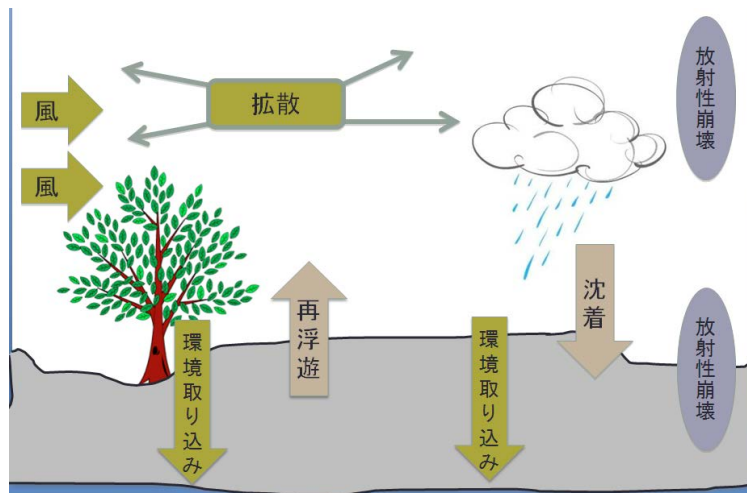


図3 放射性核種の環境中の動態

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = v \frac{\partial C_1}{\partial x} - \lambda_{dec} C_1 - \lambda_{down}(t) C_1 + \lambda_{up}(t) C_2$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = -\lambda_{dec} C_2 - \lambda_{env}(t) C_2 + \lambda_{down}(t) C_1 - \lambda_{up}(t) C_2$$

C_1 ; 大気中のセシウム濃度 λ_{down} ; 大気から地表に沈着する割合
 C_2 ; 地表中のセシウム濃度 λ_{up} ; 地表から大気に再浮遊する割合
 λ_{env} ; 大気から地表に沈着する割合
 λ_{phy} ; 大気から地表に沈着する割合

図4 放射性物質の環境中の動態を表すモデル(羽田野祐子, 市毛裕之: 筑波大学)

が不明であることである。これに対して新たに開発した、中川-伊藤-山本-李-竹内-譚モデルは、風と自然拡散による支配方程式の厳密解に基づいており、パラメータの意味が明快のため、パラメータによるマッチングも容易となり、シミュレーションの精度が大いに改良された。

その他、3.11 東日本大震災後の原子力発電所の事故により半減期の長い ^{137}Cs 等による大気汚染が問題となっている(図3)。セシウムの拡散モデルとして第一原理に基づく数学モデルを提案し(図4)、シミュレーションの改良を目指して、継続して検討している。最後に、「数学による社会貢献のためのモデリングは大学で教育可能か?」に関して、困難ではあるが、可能である! そのためには数学者と他分野・実験家との連携を保つ地道な活動が重要、と述べられた。

2-3 三村昌泰氏(明治大学)「自己組織化現象に対する数理モデリングとは」

2-3-1: 自己組織化

自己組織化とは、個体、粒子、細胞などシステムを構成する要素などが多数集まると、システムに新しい機能、構造が自律的に出現すること、つまり、個々の要素の機能が単純であっても、それらが構成するシステムに高度な機能、複雑な構造が自律的に出現することである。このようなシステムの解明には、構成する個々の要素の機能を理解するという「要素還元論」的アプローチだけでは十分ではない。言い換えれば、個々の要素の機能がわかれば、システムが理解出来るというものではなく、要素間の相互作用を理解することが重要なのである。このことは、このテーマに数理科学からの参入が可能であることを示しているであろう。

自己組織化という言葉は、1947年、イギリスの精神科医で、サイバネティクス、複雑系の研究の創始者である W. Ross Ashby (1903-1972) の著書“Principles of the Self-Organizing Dynamic System”において始めて登場したのである。更に、イギリスの数学者であり、計算機科学のパイオニアと言われる A. Turing (1912-1954) は1952年「生物の発生における大イベントである細胞分化、形態形成の仕組みは果たして生物的な機構だけで起こるのであるだろうか?」という疑問に

対して、「単純な機構しか持っていない細胞であっても、多数集まると、相互作用によって新しい機能、形態、パターンが自己組織的に生まれることがあるのではなからうか」という自己組織化的な考えを簡単な微分方程式を用いて主張した。しかしながら、この考えは、数学者である彼が、生物現象を記述するモデルを導出したのではなく、数学を使って説明したにすぎないということから、当時の生物界においてはまったく認められず、数学者の机上の空論であると片付けられたのであった。だが、1970年代に入り、自己組織化的仕組みで現れる現象が自然科学のみならず人文・社会科学の様々な分野で現れることが次第にわかってきたのである。これに呼応して数理学の分野において「自己組織化の数理」が一つの研究テーマになってきたのであった。

さて、我々の社会が現在抱えている問題の中に

- ◆ 地球環境変動の予測、影響評価、予防戦略
- ◆ 自然災害の予知、被害予測、復旧戦略
- ◆ 疫病の病原・伝染経路の解明と広域治療戦略
- ◆ エネルギー・食糧・水のグローバル安全保障
- ◆ 経済の信用・危機管理と市場安定化戦略
- ◆ 新機能材料の合成と健康・環境・情報への活用

等がある。これらの問題に共通している点は、ミクロレベル（個々の要素）を理解するだけでは社会というマクロレベルの現象を理解することが難しいということから、モデルからの理解が期待されている。しかしながら、これらの現象には、普遍法則や、第一原理が明らかでないことから、モデル構築を行なうことが最初の関門になっているのが現状である。

そのような状況の中で、マクロレベルのモデルをミクロレベルから組み立てていくのではなくて、トップダウンで構築するというアドホックなやり方でモデルを作り、その解析を通して現象を理解していこうという研究が進められている。その一例を以下に紹介しよう。

2-3-2：生物系に現れる自己組織化現象

対象はバクテリアのコロニー社会に現れる自己組織化現象である。ここでは酸化ストレスによって障害を受けている大腸菌の寒天培養である。この大腸菌は高濃度の酸素を含んだ養分で培養すると死滅するが、自らある化学誘因物質を分泌するし、その物質濃度の高い方に移動する（走化性）という性質をもつことから、集合することができ、そのことからストレスが弱められ、生きることが出来るのである。このとき、大きな一つの集合体を形成するのではなくて、クラスターをたくさん作る。その解釈としては、彼等は酸化ストレスに打ち勝つためには大きなコロニーを形成する方が良いが、逆に、コロニーの周囲から養分を摂取しなければならないから、コロニーは小さい方が良い。そこで、彼等は最適なサイズのコロニーを形成するのであろう。更に、養分濃度に応じて、誰かが指令したように幾何学的に異なる配置構造を形成するのである。

興味深いのは、ミクロレベルで各細胞の運動を見ると、単に鞭毛を回転させることから、直進運動 (running) と方向転換 (tumbling) を使って移動するが、誘因物質濃度に依存して tumbling

の頻度を変えるだけ、決して走化性物質の多い方には直接移動する機能は持っていないのである。彼等は養分を摂取することからの増殖と誘因物質を通しての走化性運動のもとで細胞間の相互作用のもとで、クラスターを形成し、どのようにして幾何学的な配置を形成するのであろうか。残念ながら、1個体の運動はわかっているが、膨大な数の細胞間の相互作用は不明である。そこで、この問題の解決に向けては細胞レベルよりも、集団として捉え、細胞密度の時空間変化を記述するマクロレベルのモデル構築に関心が集まり、日本、イギリス、ロシア、イスラエル等のモデル屋達によってそのモデリングが開始されたのである。最近、それらは自己組織化機構の可能性であることがモデルによって説明されたのである (Aotani, Mimura and Mollee (2010))。しかしながら、このモデルは、トップダウンから作られていることから、マイクロレベルの単純な細胞の運動と増殖からどうしてこのようなパターンが出現したのかはまだ説明していない。

このように自己組織化現象の解明にはマイクロ（細胞、個体等）とマクロ（ポプレーション、社会等）をつなぐことが不可欠であり、そのためにはあらたな数学理論の構築が必要であり、それにはモデルを作る集団と数理解析を行う集団の共同研究が求められる。明治大学はそれに答えるために2007年から、現象解明をミッションとする数理科学である現象数理学 (Mathematical Modeling and Applications) を提唱し、グローバルCOEプログラム「現象数理学の形成と発展」を展開してきた。今後も更なる展開を推進したいと思っている。

2-4 長松昭男氏「新しいモデリング電気・機械一体モデルの構築」

物理法則の正当性は、①実験と合うか、②対称性を有するか、の両者が成立することによって判断される。自然界の因果関係は、諸行無常、因果応報、万物流転、とされるように、この世には原因のない事象は存在しない。マクスウェルの方程式（真空中を伝わる電磁波）で表現される電磁気学は、エネルギーを直接表に出して扱う物理学であり、すべての事象・概念・法則がエネルギーに関する対称性と閉じた因果関係を有する。翻って、古典力学の特徴は次のように、不完全性にある。

①対称性が欠落

例：ニュートンの法則・フックの法則・運動量の法則の対称となる法則は存在しない。

②因果関係が閉じていない。

「力は神が与えた形而上の存在であり 力の原因は人知の範疇にはない」 デカルト

「力とは運動と静止の原因的原理である」 ニュートン 『重力と流体の平衡について』

「力学は どのような力にせよそれから結果する運動の学問でありまたどのような運動にせよそれを生じるに必要な力の学問である」 ニュートン 『プリンキピア』

→ 力学は「力が原因で運動が結果」のみの片道通行 力の原因は古典力学の対象外

③エネルギーが力と運動の陰に隠れている。

これら不完全性は、古典力学の欠点では決してない。運動の法則は、それが運動を変化させる

力でさえあればどのような力に対しても適用可能。

力学は、この不完全さを有するが故に「すべての物理学を支配する」という特異な優位性・汎用性を有する。例) 荷電粒子が電磁界の中で受けるローレンツ力は、運動の法則に従う。

これに対して電磁気学の法則は、電磁気力にしか適用できない。現在力学では、これらの不完全性は解決済み！しかし物造りでは、現在力学ではなく古典力学（ニュートン力学）を使うから物造りには古典力学の再構成が必要。古典力学が有するこの独特の特徴（不完全さ？）は、それを単独で用いる場合には何の不都合も生じないが、複合物理領域を横断して用いる場合（例：力学と電磁気学の一体モデル化）には障害となる。

力学は力と運動の関係から構成されているから、そのような概念がない電磁気学とは、そのままではつながらない。そこで次の3点に関して力学を再構成する。

①エネルギーを表に出す。

力学の基本概念を力と運動の関係、すなわち「力が作用しない物体は、運動を一定に保とうとし、力が作用する物体は運動を変化させる」から複合物理領域における唯一の共通保存量であるエネルギー、すなわち「力学的エネルギーの均衡状態にある物体は、それを保とうとし、その不均衡状態にある物体は、均衡状態に復帰しようとする」に移す。

②法則の対称性を実現する。

在来の力学法則と対称・双対の関係にある新しい力学法則の存在を示唆する。

③閉じた因果関係を実現する。

在来の古典力学には存在しなかった「運動が原因で力が結果」の因果関係を新しく弾性体の力学に導入し、従来の「力が原因で運動が結果」と合せることによって、閉じた因果関係を弾性体の力学の中に実現する。

これによって、力と運動間の因果関係上での対等・対称性を弾性体の力学の中に確保する。

閉じた因果関係の導入が可能なのは、力と運動が同一の場の中に生じる弾性体の力学のみ。他（例：剛体の動力学）では、力（例：万有引力）の原因は古典力学の対象外であり、力と運動の間に閉じた因果関係を実現するのは本来不可能。

「速度の作用反作用の法則（筆者独断の仮名）この場で対象に速度を与える（作用させる）ことを対象上にいる観測者から見れば、この場に作用速度と逆方向で同じ大きさの速度、すなわち、反作用速度を与えることに等しい。」この規定は「互いに一定の速度を有する場（慣性系）同士では力学法則は変化しない」というガリレイの相対性原理から由来。

速度の作用反作用の法則（仮名）は力学全体を支配。

力学と電磁気学間の新しい相似則に関する筆者の提案。

力学と電磁気学の間には、状態量・特性・法則・規定・エネルギー・仕事の全体にわたる相似則が存在する。これにより、両物理分野を同一のエネルギー現象として一体として扱う（例えば教育しモデル化する）ことができる。

表1 再構成をした古典力学（エネルギーを直接表に出す．法則の対称性を導入する．事象の閉じた因果関係を導入する）と古典電磁気学の機能表示比較例

特 性		物理機能線図	数 式
力学特性	質 量 M		$f = M\dot{v}$, $v = \int \dot{v} dt$
	弾 性 H		$v = H\dot{f}$, $f = \int \dot{f} dt$
電気特性	静 電 容 量 C		$I = C\dot{V}$, $V = \int \dot{V} dt$
	インダクタンス L		$V = L\dot{I}$, $I = \int \dot{I} dt$

1自由度系の例1

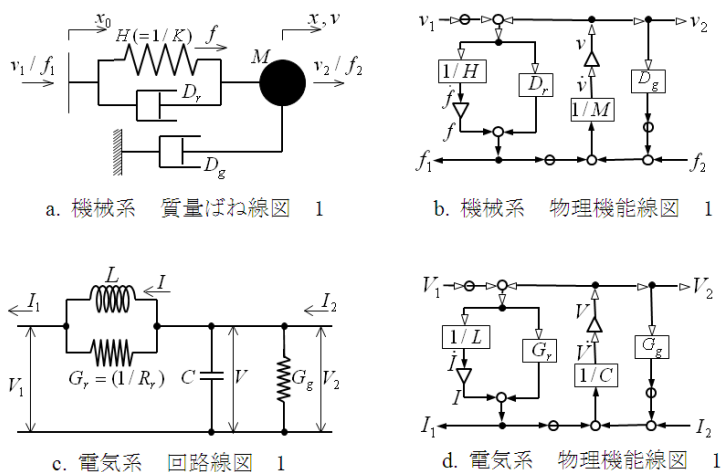


図5 改革をした古典力学（エネルギーを直接表に出す．法則の対称性を導入する．事象の閉じた因果関係を導入する）と古典電磁気学の相関性

3 各パネルリストのモデリングの思い・考え

3-1 中村振一郎氏「計算科学とは！」

冒頭、「本日たった一つの主張をします」の短い、力強い発声からスタート。「数学徒の皆さん、教職、サービス業、IT業務…、これまで数学系の卒業生が主に進出してきた領域を超えて、製造業・産業界の課題全体が皆さんの（学生、後輩の）コミットを待ち望んでいます。産業界は細分化された学門の枠におさまらない新しい課題の宝庫である！解ける可能性のある人にだけ問題は

顔をみせる！（問題は解をもとめて降りてくる！）課題が数学徒のチャレンジを待っている？辻井薫は花王研究所時代に偶然フラクタルワックスを見出した？

3-2 小谷元子氏「数理モデルによる材料科学機能の解明とスマートデザインに向けて AIMR におけるケース・スタディ」

すぐれた物性機能をもつ新物質創成は安心・安全で豊かな社会を支える基盤であり、科学技術立国を標榜する我が国にあって分野横断的に取り組むべき最重要課題である。文部科学省「世界トップレベル研究拠点形成（WPI）」プログラムの支援を受け、2007年に東北大学に Advanced Institute for Materials Research (AIMR) が設立された。

AIMRの研究目標は既存の研究分野を超えて融合研究を行うことで新しい材料科学を創造し、社会に貢献すること。特に異なる材料に共通な機能発現の背後にある基本原理を解明し、この原理に基づき新たな機能や新しい材料を予測する基盤を構築し、創エネルギー、省エネルギー、環境浄化に貢献するグリーンマテリアルの創製である。2012年より、分野融合を加速するために、数学の視点を取り入れることになり、数学ユニットが創設された。「数学的力学系理論を用いた非平衡材料」、「トポロジー的機能材料」、「離散幾何解析学を用いた階層構造材料」を数学-材料科学連携のターゲットとし、予測可能な材料科学を目指している。

材料科学は日本の強み（世界トップ）であり、大量のデータ、経験、アイデアが蓄積されている異なる背景、歴史を負った多様な材料研究がある。これらを俯瞰し、普遍的な枠組を作るべく物理的世界にない抽象的な概念や指標、情報化時代に活用できる数理モデルは無限の可能性が内在している。

東北大学には2006年より、情報科学研究科尾畑伸明教授が率いる応用数学連携フォーラムがある。数学と諸分野の出会いの場を提供しており、AIMRの数学-材料連携は、その下地のもとに始まったと言ってよい。このような分野を超えた人と人の出会いの場は重要である。

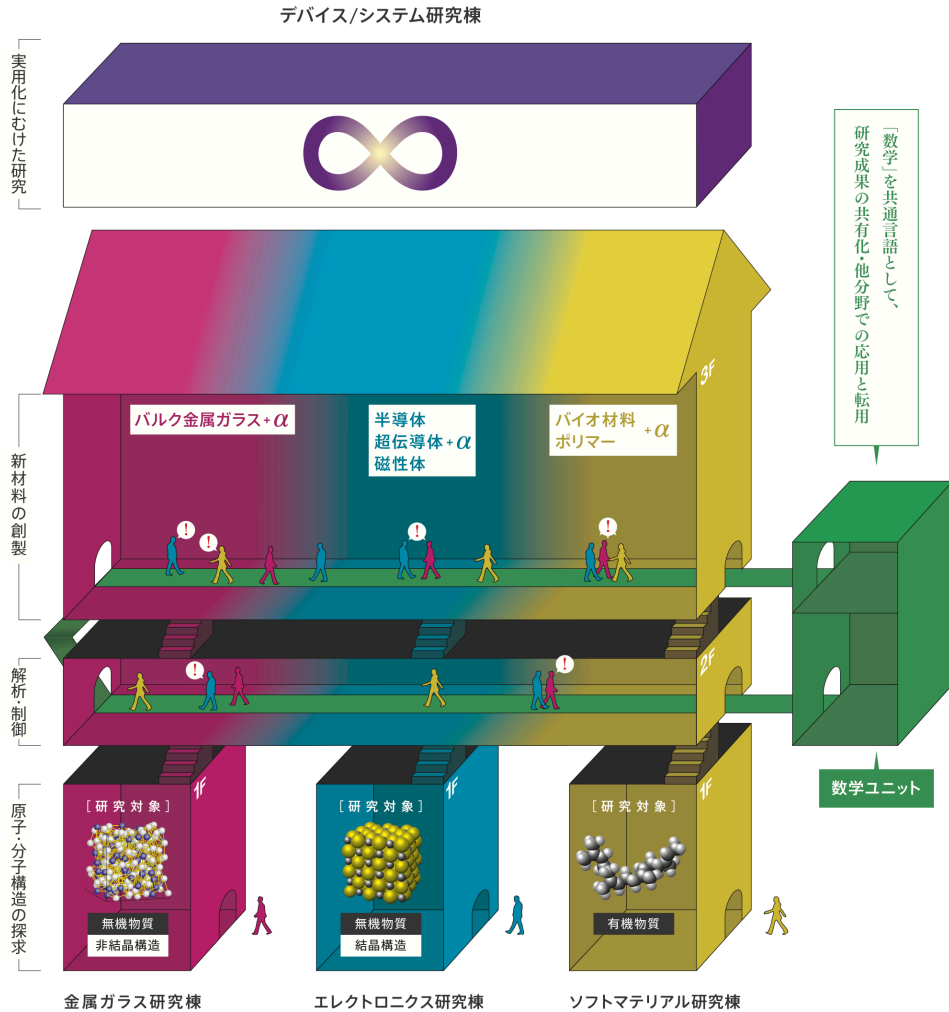


図6 AIMR で進められる戦略的な物質設計

3-3 中尾充宏氏「数学と産業界の連携：数理モデリング—人材育成の観点から—」

数値シミュレーションをはじめとして数理モデルにもとづく数値計算においては、「誤差」が避けられず、これは図のように階層構成をなしている。

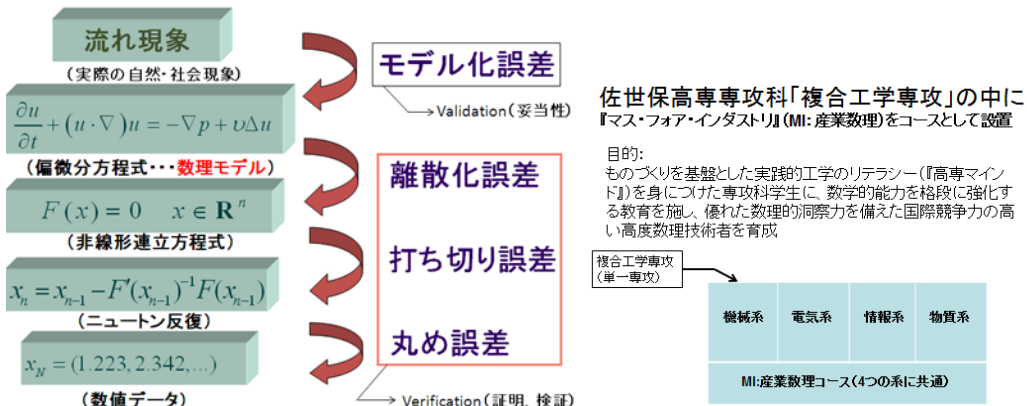


図7 数値計算における誤差／佐世保高専専攻科の構成概念

数理モデルを扱う数理科学者や数理技術者は、計算の信頼性の観点からも、これらの誤差の存在を正しく認識することが重要である。しかるに、近年「我が国モノづくり産業界における数学力の危機的低下」のため、その厳密な把握が危うい状況にある。これを救うためにも、産業界には「数学的に厳密な」扱いのできる数理的人材の育成が求められている。

このような趣旨のもとに、これまで博士レベルの人材育成として、九州大学では以下のような取り組みがなされてきた。

- ①21世紀COEプログラム「機能数理学の構築と展開」(2003-2008)の中で、新しい数学の学位「博士(機能数理学)」を創設。博士課程学生に長期インターンシップ(3ヶ月以上)を課し、社会貢献できる数学の展開と、博士の新たなキャリアパスを創出
- ②グローバルCOEプログラム「マス・フォア・インダストリ」(2008-2013)の中で、「新しい産業数学研究所(IMI: Institute of Mathematics for Industry)」を創設(2011)
- ③IMIの全国共同利用・共同研究拠点への認定(2013)

更に、ものづくり技術者の育成機関として実績がある佐世保高専の専攻科「複合工学専攻」の中に『マス・フォア・インダストリ』(MI:産業数理)コースを設置予定である。この専攻科新コースでは次の特徴を企画している。

- ①九州大学IMIと連携し、九大4年セミナーの受講(単位付与)など、IMI教員からの直接指導を受ける
- ②佐世保高専にMI担当の専任教員を配置し、高度な数学の専門教育を行う(新たに数学の専門科目8科目を設定)
- ③専攻科特別研究では、MI専任教員による指導に加え、本科の卒業研究の継続や、九大IMI教員による直接指導も可能とするなど、多様で弾力的な指導体制を整備
- ④九大IMIスタッフの研究指導・共同研究による九大大学院へのスムーズな進学
- ⑤高度な数理的能力の付加によって企業への就職も有利

3-4 樋口知之氏「予測とモデル」

対象に関する支配原理・法則が明確でない場合、諸現象に潜む「本質」部分を見出し、それを数学の言葉で表現したものを数理モデルと呼ぶ。この「本質」部分の切り出しは観察者が行うのだが、では誰が「本質」を本質と判断するのであろうか？もし、この作業も観察者が行うのであればそれ以降の議論は独善的とも言え、その観察者の行為は、自然から「本質」を凝縮したとする自分の“盆栽”を愛でる行為と同質である。数理モデルはしよせん複雑な現象や機能の近似にすぎず、その利用は便宜的でもあり、数理モデルを正しく改良し続ける改善行為こそがむしろ本質的なのである。

支配方程式が与えられたときも含めて、数理モデルが表現・予測する量が実際の観測・計測の値にぴったりと合うことは通常ありえず、その乖離の程度を表現する新たな数理モデル（目的関数）が実際の研究においては欠かせない。目的関数としては予測能力が一般的かつ普遍的であろう。予測能力の高いモデルを求め続ける一連の過程から、知識発見や意志決定において良い結果が得られることを我々は期待するのである（その様子をスパイラル構造で下図に表した）。「20世紀に入って科学がつまづいた原因は、予測の役割を軽視し、不確実の原因を、人間の不完全性ではなく、測定の不完全性にもとめるようになったことにあるのではないだろうか。」

結論：あらゆる分野において、「定性的理解から定量的予測への転換」の大きなうねり。そこに貢献すべき！

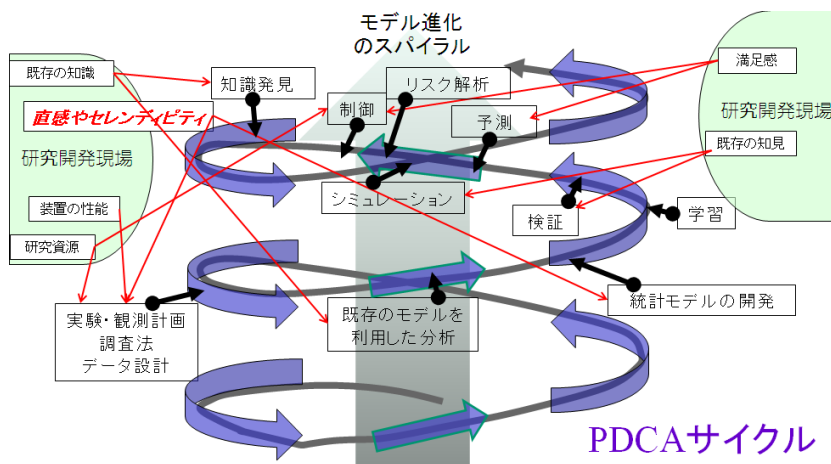


図8 知識循環と永続的なモデルの改良の概念

3-5 坪井俊氏「数理モデリング」

2002年以降、東京大学内で、医学・生命科学との連携にかかわった。ネットワークの解析、力学系研究の紹介、リボングラフを用いたタンパク質の構造の研究などがトピックであった。

2009年には「数学・数理科学と他分野の連携・協力の推進に関する調査・検討」(Math Survey)

が九州大学を中心に、東京大学・日本数学会・新日本製鐵の協力で行われ、これにも若干かかわった。

一方、東京大学大学院数理科学研究科では、2003年から21世紀COE、2008年からGCOE、2012年からリーディング大学院プログラム、生命動態システム科学推進拠点事業が行われている。研究科では、2013年に附属数理科学連携基盤センター（時弘哲治センター長）を設置した。その設立の理念は図9にあるとおりである。

社会と数理科学の連携の要請に基づき、文部科学省は平成19（2007）年度戦略目標「社会的ニーズの高い課題の解決に向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索（幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として）」を定めた。これに対応し、2007年から、西浦廉政研究総括の「さきがけ+CREST」研究領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」<http://www.jst.go.jp/crest/math/> が活動中であるのは皆さんもご承知のことである。ここで数理モデリングは協働の要である。

今年、平成26（2014）年度の戦略目標が次のように決定されている（2014.2.26）。

戦略目標：「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/02/attach/1344594.htm

達成目標：社会における諸現象のうち、現時点で支配原理・法則が明確でなく、数理モデル化ができれば社会に対して大きなインパクトが見込まれる現象について、数学・数理科学の研究者と応用分野の研究者などによる異分野協働などを通じて、数学がもつ抽象性・普遍性を活用し、諸現象に潜む複雑な構造の「本質」部分を数学的に見いだすことにより、以下の実現を目指す。

○現象を数学的に記述するモデルの導出

○導出された数理モデルの実証・検証及び評価のための数学的理論等の構築

このように数理モデリングは、表舞台に立つことになった。現在、募集対象研究領域の予告及び新規発足研究領域の案に関するご意見の募集（2014.3.18）がなされている。

<http://www.senryaku.jst.go.jp/teian.html>

平成26（2014）年度に研究提案募集を予定しているCREST・さきがけ新規研究領域（案）というページ <http://www.senryaku.jst.go.jp/teian/top/ryoikinew.html> があり、

現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築（CREST）

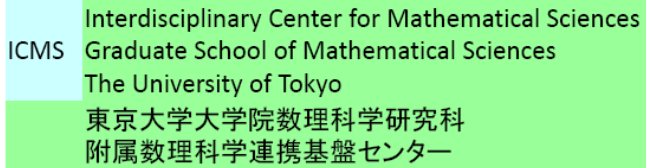
[http://www.senryaku.jst.go.jp/image/ryoiki\(1\).pdf](http://www.senryaku.jst.go.jp/image/ryoiki(1).pdf)

社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働（さきがけ）

[http://www.senryaku.jst.go.jp/image/ryoiki\(6\).pdf](http://www.senryaku.jst.go.jp/image/ryoiki(6).pdf)

が紹介されている。

東京大学大学院数理科学研究科附属連携基盤センターが諸現象を数学的に記述・解明するモデル構築のセンターとして機能することを期待したい。



数理科学連携基盤センター(ICMS)は2013年4月に、産業および諸科学との連携のもとで、学際的な数理科学の研究教育を進めるために設立されました。数学は科学の共通の言葉を提供していますが、それ以上に、実に様々な分野において、科学者が物事を全体として記述するための強力な手段を提供しています。従って数理科学は科学や技術の基礎として不可欠なものになっています。多くの科学分野や産業が、新しい数学の方法や数学の素養を持つ科学者を必要としており、数学とそのさまざまな応用分野との共生関係はますます広がっています。数理科学連携基盤センター(ICMS)では、諸科学や産業界との連携を通じて、数学研究を応用に結び付けていくとともに、そのための教育プログラムも整備していきます。

図9 東京大学附属数理科学連携基盤センター設立の理念

4 パネル討論での主な議論及びまとめ

各パネリストの講演概要は上述の通りであるが、改めて各パネリストの講演概要を更に短く整理すると次のようである。

高田氏は、企業現場の数理モデリングに重要なことは、まず「数理モデルにどの現象まで組み込めば良いか？」である。重要な事は、選択したモデルでどの程度説明できるか、オーダー・エスティメーション出来ることが重要であるとされた。

山本氏は、数学者の傾向は、第一原理に固執することであり、応用分野の研究者は経験を重視し、両者の使用言語も異なる。実りある異分野連携のため歩み寄りが必要である。そのために、数理モデルは、万国・異分野における共通言語になりうるもので、異分野の共同作業の土台である。最後に、「数学による社会貢献のためのモデリングは大学で教育可能か？」に関して、困難はあるが、可能である！そのためには数学者と他分野・実験家との連携を保つ地道な活動が重要、と述べられた。

三村氏は、個体、粒子、細胞などシステムを構成する要素などが多数集まると、システムに新しい機能、構造が自律的に出現する自己組織化のモデリングについて議論された。これまでマクロモデルはかなり説得力のあるモデルが構築されているが、例えば細胞の場合、ミクロレベルの単純な細胞の運動と増殖からどうしてこのようなマクロレベルのパターンが出現したのかは明らかにされていないとされ、ミクロとマクロをつなぐ数理が必要と述べられた。

長松氏は、産業の要である力学の再構築は、益々盛んとなる、電気-機械融合モデル推進などに欠かせないと主張され、具体的な再構築の説明がなされた。

中村氏は、数学を専門とする学生がもっと企業の問題を扱うべくそのような社会に飛び込むことの重要性を訴えられた。

小谷氏は、文部科学省「世界トップレベル研究拠点形成 (WPI)」プログラムの支援を受け、2007年に東北大学に Advanced Institute for Materials Research (AIMR) が設立された経緯、数学的力学系理論や離散幾何解析学と材料科学の協働、数学と諸分野の出会いの場の重要性を唱えられた。

中尾氏は、計算の信頼性の観点からも、誤差の存在を正しく認識することが重要であるが、近年「我が国モノづくり産業界における数学力の危機的低下」のため、その厳密な把握が危うい状況にありこれを救うためにも、産業界には「数学的に厳密な」扱いのできる数理的人材の育成が求められているとされ、御自身が校長をされている佐世保工専の取り組みを紹介された。

樋口氏は、数理モデルはしよせん複雑な現象や機能の近似にすぎず、その利用は便宜的でもあり、数理モデルを正しく改良し続ける改善行為こそがむしろ本質的なのである。あらゆる分野において、「定性的理解から定量的予測への転換」の大きなうねり。そこに貢献すべき！と結論されている。

坪井氏は、御自身の数理モデリングとの関わりの紹介と数理モデリングが数学と諸科学との協働の要であることが認知されてきていることなどを述べられた。

一方、我々は、日本学術会議第 22 期の数学分科会の成果の一つとして「数理科学と他分野科学・産業との連携」というタイトルで報告書を提出した。そこで取り上げられた、工学分野に絞ったモデリングに関する主な議論は、次の通りである。

①現象に基本方程式や実験式がある場合にも、それらの式を直接解析していく方法（ボトムアップ型）を採用する場合もあるが、基本方程式の系が巨大である場合は、着目している現象に焦点を絞る目的で、マクロ概念の導入や集中離散化によって得られる簡易化されたモデルを用いる方法（トップダウン型）を採用する場合も多い。

②基本方程式が見つからない場合は、異なる数学分野の技法を融合し、全く新しい定式化を行うことにより、数理モデルが得られるケースもある。

③ボトムアップ型のモデリング以外においては、モデリングには分野よっての違いや個人差がある。同じ工学系でも分野が違えば互いのモデルを理解する事は難しい状況であり、モデリングの共通言語化が重要になりつつある。

④モデリングの教育をどのように行うかは今後検討すべき課題であるが、先にも述べたようにモデリングには多様性があり、一つの教育システムとして統一して構築できるかどうかは明らかではない。

⑤特に支配原理や基本方程式が明確でない課題の場合にはそういった議論は一層困難であろう。一方で、数理的手法の援用により数理モデルが得られた場合には、数理的手法に関する教育の代表的なアプローチとして、一般論ではあるが次のような手順が考えられよう。

- (1) 経験や実験で得られたデータ群から基礎となる方程式を推測、
- (2) 基礎となる方程式からモデルを構築。

以上の論点と今回のパネリストの話題を参照してみると、相関性を見出すことができる。高田氏、山本氏のは、①の場合のモデリング法を述べられており、三村氏は、⑤の支配原理や基本方程式が明確でない課題を扱われている。長松氏のは、まさに③に対応している。樋口氏は、⑤の一般論の重要性を述べられている。小谷氏、中尾氏、坪井氏は場の重要性を唱えられ、中村氏は数学専攻の学生が新しい領域にチャレンジすることの意義などを唱えられている。山本氏は、①の第一原理が存在する場合のモデリング法の教育の可能性を主張されている。今後は、目途の立ちつつある①の教育を進めるとともに、④の教育をどのようにすべきかの議論も必要となろう。

以上に関連する多くのコメントも会場からあり、本セミナーは非常に盛り上がった。これを契機にモデリングに関する研究および教育がさらに進展する事を祈念したい。最後に今回御忙しい所、話題提供頂いたパネリストの方々に謝意を表したい。

文責 楠岡 成雄 (東京大学), 萩原 一郎 (明治大学),
石井志保子 (東京大学), 前田 吉昭 (東北大学)