

モデル学は可能か

木村 英紀

1. はじめに

「モデル」という言葉は日常生活でもよく用いられる。例えば「プラモデル」とか「モデルガン」の場合には実物を形だけ模ねて作ったもので「模型」という日本語訳がそのまま当てはまる。これと正反対の使い方もある。小説や絵のモデルはモデルが本物で小説や絵がそれを模している。「モデルハウス」のような使い方とも同類である。この場合はプラモデルと比べてモデルと実在の関係が逆転している。モデルは実物のまねであると同時に実物もモデルをまねて作られる、という二面性をモデルは持っている。モデルという言葉は一筋縄では扱えられない奥行き深い意味を持っている。本稿では制御工学の立場からモデルについて考えてみたい。

モデルという言葉が初めて学術用語として用いられたのは、理論物理学のようである。武谷三男氏によると、長岡半太郎やラザフォードが原子核や電子の球体あるいは球殻を用いて原子の構造を表現したものを武谷三男氏が模型と呼んだのがモデルという言葉のはじまりであった、とのことである。武谷氏によると、ほぼ同時期にシュレーディンガーもモデルという言葉を作ったとのことで、少なくとも理論物理学では1930年代にはモデルという言葉が定着していたようである[1]。この時期はまだ計算機は実用化されていないので、モデルといえれば目に見える形を持った幾何学的な実体の配置を意味していた。

現代の科学技術はモデルに頼る度合がますます強くなっている。かつてはモデルは理論が正しいことを実証するためや仮説を検証するために主として使われた。この場合モデルによる計算結果はあらかじめ予想することができた。計算機の能力が向上するにつれ、現在では仮想的な現象を人為的に創出したり（例えば形態形成など）、人工生命の研究に見られるような未知の

現象を発見したりするためにも用いられている。モデルも複雑で大規模なものとなりつつあり、現在では数十万個の粒子を含む物質のモデル、数万の機器や装置からなる工場のモデルなどはめずらしくない。モデルの巨大化はとどまる所を知らない勢いで進んでいる。このような大規模なモデルではもはや結果を予測することは難しい。むしろ予測できるような結果を出すのでは面白くないのである。

モデルの目的が予測された結果を出すことから予測できない結果を出すことに重点が移った、ということももし事実であれば、そのことはかなり深刻な問題を含んでいる。モデルが示した「予測できない結果」を信じることは、モデルの仮想世界が実世界として受け入れられたことを意味する。モデルが一人歩きを始めたのであるが、このこと自体に問題がある訳ではない。モデルが意味を持つためには、それが何らかの意味で実世界に関する知見をもたらすからである。結果が実際の現象や実験結果と照合できないのであれば、その「正当性」をどのような手順で確認することができるだろうか？ これこそがモデルの問題の核心である。このような問題を取り扱うには、モデルに関する学、すなわち**モデル学**が必要である。

2. 制御工学とモデル

私の専門は制御工学である。15年ほど前、自動車のアクティブサスペンションを設計するお手伝いをしたことがある。サスペンションとは車体を車輪が支えるための機構で、普通はバネと粘性抵抗からなるパッシブな装置であるが、乗り心地や操縦性を上げるために油圧で駆動する装置を付加したのがアクティブサスペンションである。

制御系設計のためには車体とそれを支えるサスペンションのモデルが必要であるが、文献を探してもモデルが見つからない。一個のサスペンションをボディに取り付けたいいわゆる1/4モデルと言われるものはいて捨てるほどあるが、車体に四つのサスペンションを取り付けたフルモデルは自動車技術会、機械学会は

きむら ひでのり

獨理化学研究所

〒463-0003 名古屋市守山区下志段味字穴ヶ洞 2271-130

ろかアメリカ SAE の文献を渉猟しても見つからないのである。ただ一つイタリアの研究者が作った簡易モデルはあったがとても使い物にならない。

そこで自力でモデルを作ることになったが、これがやってみると結構難しい。車体と四つの車輪が変形体を介して結びついた構造体であるが、かなり複雑である。以前にロボットのモデルを作るときに使った Kanes の力学と呼ばれる新しい力学を使ってようやくモデルを記述したが、次はモデルに含まれるたくさんのパラメータの値を求めなければならない。そのため振動台に車を載せ、いろいろなモードで車を揺さぶってその挙動を計測し、最尤法でパラメータを求めた。モデルの検証も一部引っかかるころはあったがそれなりにうまく行った。あとはこれを線形化し、教科書どおりに制御系を設計してサスペンションに実装することである。

ところが結果がうまく行かない。コントローラのスイッチを入れると車がかたがたと震えてやがて座り込んでしまうのである。そこでモデリングからやり直すと面白いことが分かった。車体を剛体として考えると動きの自由度はヨー、ピッチ、ロールの三つしかないが（ただしヨーはサスペンションには無関係）これでは不十分なのである。「ワープ」と呼ばれる第 4 のモードを入れなければ車体の挙動を完全にうまく表現することができない。「ワープ」は車体の変形しないと生じないモードである。つまり車体は変形するのである。車体に課していた剛体という制約を取り去ったモデルにもとづいて設計した制御器を実装すると今度はうまく行き一挙にテスト走行まで進んだのである。

このように、制御では作ったモデルに対する評価が**実に厳しい**。モデルが正しいかどうかはそれにもとづいて作った制御系がうまく働くかどうか、で待ったなしの評価が下される。

モデルはよくできて設計のやり方が悪い場合は改善にそんなに手間がかからないが、設計のもとになっているモデルが悪い場合は始末が悪い。一からやりなおしという感覚が伴う。私たちのサスペンションの場合はまさにそうであった。一見実データをうまくシミュレートできているようでも、それが実体をうまく反映していなければ私たちの場合のようにやがて化けの皮がはがれるのである。

モデルについてこんなに厳しい評価が直ちに下される分野は他にはないのではないかと？ 制御の場合は設計が商用ソフトウェアの流通によってやりやすくなっ

ただ分だけ、モデリングに製品の品質が依存する度合いが増えた。対象が複雑になればなるほど依存の度合いは増える。設計はソフトウェアを使えばいまやルーチンワークであるが、モデリングは依然としてセンスと知識と経験がものを言う一品料理の世界である。

3. モデリングの困難

なぜモデリングは制御系設計のようなルーチンワークにならないのであろうか？ 端的に言えばそれが難しいからである。例えば自動車は私たちにとって身近なありふれた存在である。その力学的な挙動も普通のドライバーなら身体で体得している。それが特に不自然とは思えない。しかしそれを一つのモデルで定量的に記述しようとするとは意外に難しいことは前節で示した通りである。

難しい最大の理由は世の中には未知のことがまだまだ多いことである。モデリングを始めると、工学として教科書化されている事柄は実世界で起こる現象のごく一部をカバーしているに過ぎないことを思い知らされる。例えば潤滑油の温度依存性、物質を冷却したときの析出速度などはどこの教科書にも書いていない。しかし書いていないからといって省略できない。圧延機のモデルには圧延油の温度依存性、晶析装置のモデルには析出速度が必要なのである。

教科書になれば過去の文献を調べることとなるが、たとえ関連する文献が見つかったとしてもその多くは限られた特別の状況でのデータなので、目の前の対象に適用できるかどうか分からない。どうしても必要な場合は自ら実験し自前のデータでモデルを作るのが早道、という事になる場合が多い。しかし実験をやったからといって正確なモデルが得られるとは限らない。センサーノイズ、再現性など不確かさ要因はどこまでも付きまとう。さらに実験している環境が実際に制御を必要とする時の環境と一致するかどうかの保証はない。一部の機械系や電気系を除いて、モデリングが正確さと整合性をもとめる人間の知性を満足させる場合は少ない。

制御の場合、このような実機の泥臭い現実を知悉する現場の制御技術者にとって、数学的な状態空間モデルが、絵空事とまではいなくても現実性を欠いた理論のお遊びの道具にしか見えなかったのはよく分かる。少なくとも身銭を切って勉強するに値すると考えた技術者は少なかったのは当然と言える。制御工学では「理論と現実のギャップ」が延々と議論されてきたが、

その根源は、制御理論が設計の原点とするモデルのリアリティが欠如していた点にある[2].

モデルがリアリティを持ち始めたのはロバスト制御の成功がきっかけとなった。モデルの持つ宿命的不確かさが許容できることが理論的に保証されたことによって、抽象的な状態空間モデルも制御系設計のためのツールとして光を放つものとなった。80年代から90年代にかけて大きな成功をおさめたロバスト制御理論は、実世界と理論のインタフェースとしてのモデルにつきまとう不確かさを、実世界の側で克服するための初めての体系的な知である。地球環境モデルなどでモデルの不確かさが問題となり、一時深刻なモデル悲観論が生み出されたが[3], 制御理論は「実世界とモデルとの整合性」というモデルにかかわるもっとも本質的な問題に、実践的な立場から正面切って取り組むことによって悲観論を克服してきた。

4. モデルの客観性と普遍性

モデルの対象は世の中の森羅万象にわたる。しかし分野によってその意味は異なり、機能や表現の仕方や目的も多岐にわたる。その共通項をとった無難な定義は、「実世界の対象を何らかの形で抽象しそれを一定の記述形式のもとで表現したもの」がモデルとなろう。これでモデルとは何か、という問いに対する満足のいく答えになっているだろうか？ 例えば上で述べたモデルの定義は科学の理論にもあてはまる。科学の理論も実世界の抽象であり表現である。そうであるならば、科学の理論も一種のモデルなのであるだろうか？ ニュートン力学は世界の力学的モデルなのであるだろうか？ モデルという言葉にきちんとした意味を与えるためにはモデルを限定する必要がある。

モデルと科学理論の違いは一つは客観性の度合いにある。理論は完全に客観的でなければならない。すなわち誰もが正しいと認めて初めて理論のお墨付がもらえる。モデルは必ずしもそうではない。正しいかどうかを検証することができなければならない、という意味でモデルは客観的でなければならないが、一方ではモデルを作った人の考え方を入れることが出来、そのゆえに他者からの批判にさらされる、という点で主観的な側面を持つ。実世界を表現するやり方で理論の対極にあるのが芸術作品である。芸術作品は多様な解釈を許すという点できわめて主観的である。客観性を完全に否定するわけではないが、何よりも重要なのは作者の強烈な自我と個性である。実世界を表現する手段

表1 客観性/主観性

	客観性	主観性
理論	○	×
モデル	○	○
芸術作品	×	○

表2 普遍性/特殊性

	普遍性	特殊性
理論	○	×
モデル	○	○
芸術作品	×	○

として考えたとき、モデルは完全に客観的でなければならない理論と完全に主観的で構わない芸術作品との中間にある(表1)。モデルが客観性と主観性の二面性を備えていることはモデルが未知と既知の境界線に位置していることを示している。そうであるからこそモデルは常に発展の可能性を秘めたダイナミックな存在と言えよう。

モデルを普遍/特殊という切口から特徴を浮かび上がらせることもできる。理論と言えば普通は常に成り立つ普遍性を持つと考えられる。ニュートン力学は天体から地上まで巨視的な世界すべてを包括する力学の法則を記述している。その対極にあるのが芸術作品である。例えば絵画はある特定の場所で特定の対象を特定の時間に描いたものである。対象の特殊性が普遍性よりもきわだって主張される。モデルはこの切口からも両者の中間に位置している。モデルの対象は例えばA製鉄所のB圧延機のように具体的な機器でありシステムである。その意味でモデルは特定のものを対象としている。しかし圧延機のモデルはすべて「圧延」という物理現象を共通の基盤としているという点で普遍性を持つ。普遍性と特殊性の二面性もモデルの特徴の一つである(表2)。

5. モデルと要素還元主義

「複雑性の科学」のブームはようやく過ぎたようである。工学の対象はもともと複雑であったので、工学にも複雑性の科学が各分野に含まれている。モデリングはそれを横につなぐ規範である。

複雑性のキーワードに「要素還元主義批判」があり、モデリングと深いかわりがある。世界は本質的には単純な法則に支配されており、複雑さは単純さのマスクにすぎない、という考え方が要素還元主義である。

このことの是非は別としてモデリングでは対象を要素に分解する作業が本質的である。この作業を抜きにしてはモデルを作ることはできない。いったん対象を要素に分解し、要素をモデル化しそれを再びつなぎ合わせて全体モデルを再構成していくという方法以外にモデリングの手順は考えられない。これが要素還元主義と呼ばれるなら、モデリングはまさしく要素還元主義にもとづいている。ただし要素に分けることができ、しかもそれぞれの要素が単純であったとしても対象が単純であるとは限らない。問題なのは要素の数が多いかではなく、要素の種類が多さであり、結合の多さではなく結合の仕方である。工学では複雑性は要素の異種性と要素間の結合にある。

製鉄所にひときわ高くそびえ立っている溶鉱炉は、計算機が「油水のように」投入され自動化が極限まで進んでいると思われる製鉄プロセスのなかで自動制御が実施されていないほとんど唯一の装置である。自動制御ができない理由は溶鉱炉のモデルで信頼のおけるのがまだ存在しないからである。溶鉱炉は巨大な筒状の容器の中に固体、液体、気体さらに粒体、粉体が共存し、主なものだけでも10種類以上の物質が化学変化を通して常にその態容と空間的な配置を変えている。まさに複雑系である。

高炉はほんの一例で、現代のもの作りの現場では現象を記述する数式モデルが大きなウエイトを占めている。モデルの善し悪しが製品の善し悪しを直接左右する場合も少なくない。しかも多品種小量生産が進むにつれてモデルの数と種類は増大し、その保守や更新がきわめて困難な状況が生れつつある。複雑性と要素還元論をモデリングの視点からもう一度考え直してみる必要がある。

6. モデル学は可能か？

モデルの対象はほとんど無限に多様であり、モデルの目的もきわめて多岐にわたる。対象や目的に依存しない普遍的なモデルとモデリングの理論を作り上げることは可能であろうか？ 私は困難ではあるが可能と思う。というより、作らなければならないと考えている。科学や工学の理論は実世界の抽象であるが、初期

の段階では実世界にとらえられ未分化の状態にある。それが次第に体系化され整備されていくとともに実世界との分離が起こるが、むしろ分離は理論が成熟していくためのやむをえないプロセスである。

モデルについての理論はまだ実世界から未分化な目的や対象に依存した段階にある。大域的なモデルを作ること自体に対する懐疑論もある[4]。今後モデルの理論が発展し、普遍的な「モデル学」を確立されることを望みたい[5]。「モデル学」ができればモデルに関する共通の認識をベースにモデルにかかわる次のような問題が解決される。

- (1) モデルの不確かさがシミュレーションや予測、制御、決定にどのような影響を及ぼすか？
- (2) 構造モデルを作る体系的な方法はあるか？
- (3) 実世界の複雑さとモデルの不確かさはどのようにかかわっているか？
- (4) モデリングにおいて事前情報と事後データはどのように関連しているか？
- (5) 学習とモデリングの関係は？

モデル学は、学問の統合を指向する横断型基幹科学技術の中核となるであろう[6]。

参考文献

- [1] 武谷三男：“弁証法の諸問題”，理論社（1961）。
- [2] H. Kimura：“How does the model get reality”，Proc. 2nd Asian Control Conference, Seoul, pp. 3-10（1996）。
- [3] N. Oreskes et al.：“Verification, Validation and Confirmation of Numerical Models in the Earth Science”，Science, 263（1994）。
- [4] 牛田俊，木村英紀：“Just-In-Time モデリング技術を用いた非線形システムの同定と制御”，計測と制御，Vol. 44, No. 2（2005）。
- [5] H. Kimura：“Non-uniqueness, Uncertainty and Complexity in Modeling”，Journal of Applied Computation, Control, Signals and Circuits, Vol. 1, pp. 455-485（1998）。
- [6] 木村英紀：“横断型科学技術の重要性を主張する”，エコノミスト，平成14年5月21日号。