

私の考える複雑なシステム



千葉商科大学特別客員教授
(サイエンスアカデミー)

寺野 隆雄
TERANO Takao

プロフィール

1978年 東京大学修士課程修了
1978～1989年 電力中央研究所
1990～2004年 筑波大学・講師・助教授・教授
2004～2018年 東京工業大学・教授
2018年～ 産業技術総合研究所・千葉商科大学研究員ほか東京工業大学・筑波大学名誉教授 工学博士

本稿は、2018年4月14日に実施された東京工業大学における著者の最終講義の内容に基づいています。

1. はじめに

この『私の考える複雑なシステム』というタイトルは、『社会システム全般』を意味しています。社会システムの中で、一番小さくて大変なのが家庭の経営です。国家、世界を論じていたほうがよほど楽だと感じています。世の中でいう「複雑なシステム」は、Complex Adaptive System、いわゆる複雑適応系となるわけですが、これは少し狭い。「カオス」(Chaotic System)も複雑な挙動は示すけれども、実は簡単に書いてしまう。複雑なモノ・コトを相手にしたいと思っただけでも、我々はどうしても、物事を単純にしたいわけです。そこで、昔からいろいろなへりくつをこねて世の中がわかった気になってしまう。太陽は誰が作って、月は誰が作って…、どこの神話にもありますが、これも何とかへりくつを付けて、世の中をわかったようにしてしまいます。それと同じことがやはり学問の世界でも起きています。しかし現実、家庭の間

題も含めて非常に複雑に見えます。

私の立場は、複雑なシステムを理解する新しい方法として、エージェント・ベース・モデリングと、進化計算の考え方をもっと積極的に使おうではないかというものです。エージェントで複雑な社会を見るというような考え方と、ダーウィン流の進化的な考え方は、非常に相性が良いと信じています。エージェント・ベース・モデリングでは、人間でも、組織でも異質な要素を多数準備しておいて、その多数の相互作用の中から、創発する現象を観測する方法をとります。さらに、進化計算では、構成要素を数多く準備しておいて、それを組み合わせることによって、生物が進化するように新しいコト・モノをいくらかでも作り出していきます。この2つの原理によって、複雑なシステムを理解しようというものです。なぜ、このような考え方に至ったかについては、長くなるのでここでは述べませんが、例えば、人工知能誌に書いた解説をご覧ください¹。

2. エージェント・ベース・モデリングの考え方

エージェント・ベース・モデリングのマイクロ・マクロリンクの話をしていきます。まずエージェントというのは、内部状態と意思決定と通信機能の3つを持ったような主体のことです。これは、人間のモデルであってもいいし、組織のモデルであってもいいし、また分子みたいなモノであってもいい。そうするとエージェントのマイクロなインタラクションの中から、ボトムアップな影響でマクロな秩序が創発します。モデルを作る、世の中を見たいという立場からいくと、マイクロな状況は詳しく観察できないので、マクロの現象を見て、それでマクロ変数間のモデルを作るといようなやり方で、学問が大体進んできました。例えば、エージェン

トが物々交換をしているうちに、貨幣が創発します。貨幣は連続量ですから、そこでいろいろな方程式モデルが作られて、計量経済学のモデルとなります。これをエージェント・ベース・モデリングでは、ゼロから作り直していると言えるかと思います。ただ、ここまでは、例えば統計力学でも同じ議論が成り立ちます。マイクロな分子の影響というのがはじまりで、それらのインタラクションの中からマクロな秩序が出てきて、圧力とか温度というような概念が出てきます。それをきちんと扱うことによって統計物理ができてくるわけです。

ここまでは自然現象も社会現象も同じです。しかし、ここからが社会現象では違います。

エージェントが内部状態と通信機能を持つとなると、マクロな秩序が個別のエージェントから観測できることになります。その結果、マクロの秩序からトップダウンな影響がマイクロなレベルに伝わってこれによってエージェントの行動が変わってしまいます。これが社会現象全般にいえるような、複雑な動きということになります。マクロな状況をマイクロなエージェントが観測できると言った途端に、マイクロ・マクロ・リンクという複雑なインタラクションが生じてきます(図1)。

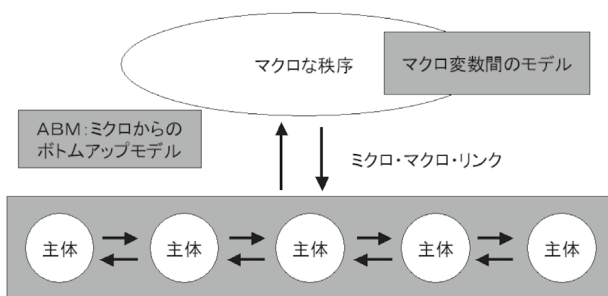


図1 エージェント・ベース・モデリングとマイクロ・マクロ・リンク

これを、できることなら直截的にプログラム化したというのが、私がエージェント・ベース・モデリングに近づいたきっかけになったわけです。このプログラミングそのものは、そう難しくありません。しかし、そこから先が非常に難しくなります。難しさは以下の3点にまとめられます(図2)。

まず1つ目は理論と現実とをうまく結びつける必要

があります。例えば、ゲーム理論がありますが、それが実際のSNSの集団行動とか何とかになると、現実問題になります。この2つを意識しながらモデリングしなければいけない。

2つ目に、これは境界領域になりますから、自然科学、社会科学と工学技術の時間スケールの差を意識しなければなりません。自然科学の理論は測定技術の範囲ですと正しくなければなりません。社会科学としては、理論として1世紀ぐらい保ってほしい。ところが、我々、工学分野の技術者としては、10年も持てばいいのです。10年経つと、また古い技術書を持ってくると新しくなったりすることが起こります。このスケール感の差というのが、モデル化するとき非常に面倒なことを引き起こします。

3つ目の側面として、この、出来上がったモデルが正しいかどうかということです。1つは、妥当性評価。もう1つの方でシステムが正しいということ、逆に保証するだけでいい。例えば株の取引で、ストップ高ストップ安という制度がありますが、あれは、たとえば20%株価が動いたらストップ高にする、というのは、根拠なしに値を決めているわけです。こういうことが世の中にはたくさんある。モデルを現実に合わせては何かできるのですが、新しい仕組みをデザインすることを考えると、モデルが正しく動くかどうかは、説得力の問題になります。利用者の立場では納得力の問題です。この辺がエージェント・ベース・モデリングの非常に難しいことになります。

・ 理論と現実

- 例: ゲーム理論/経済学 対 人間の集団行動



・ 物理学、社会科学と工学技術の時間スケールの差

- 例: 物理学: 永久、社会科学: 1世紀、工学技術: 10年

・ 妥当性評価とシステムの保証

- 例: 避難行動予測の結果は正しいか
交通渋滞予測を信じるか

図2 エージェント・ベース・モデリングの難しさ

その意味で、物理学と情報科学の重要性というような議論が吉田民人先生の論説にみられます²。20世紀は物理学の世界であり、物に対する第1原理を発見して、それを利用するというのが学問の王道でした。

21世紀の社会は、情報科学の世界で、複雑なことのデザインをきちんとやらなければいけないというのです。我々は世の中をつくることができるので、そのとき何が起こるかというのは、物理科学の原理だけではどうしても理解できません。第1原理が存在しないところで複雑な物を扱うのが、我々の社会問題に対するアプローチです。そうするとどうすればいいか、というところ、シミュレーションが登場します。うまくモデルを作ってシミュレーションしなければいけないということになります。

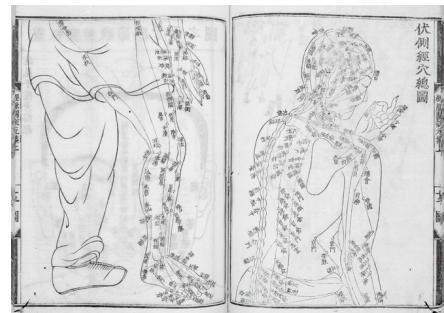
3. 共通言語の必要性

しかし、その一方で、さきほどの神話の世界ではありませんが、世の中を単純にしてみたいのが人間の感性です。これをうまくまとめたのが、ノーベル経済学賞を受賞したカーネマンの『ファスト&スロー』という本です³。これを見ますと人は思いもよらないことは考えられないと、人は考えることをサボり続けるということが繰り返し述べられています。そうすると、要は我々の研究を進めていく中でも、どうしてもサボるほうが成果が出るようになります。そうすると、タコツボの中にいるほうが楽になってくるわけです。学問の世界で専門家になるためには、タコツボが必要なのは認めます。しかし、これはあまりよくないことだろうなというふうに、私は考えます。

タコツボの中にこもらないようにするためには、まず共通の言語を持つてくる必要があります。もし、共通の言語がなければ、それを作らなければいけません。この例として挙げられるのは、ちょっと不思議ですが、東洋医学で使う人体のツボの概念です。ツボはもともと人体に備わっていると考えられがちなのですが、実はツボは発明された概念です。なぜならば、流儀によってツボの位置も名称も少しずつ違うのです(図3)。

東洋医学は流儀によって、治療法が少し異なってはきますが、このツボの用語を使うことで、簡単に、知識が伝承できてしまうわけです。つまり、ツボに名前を付けるということ自体が、それによって診療方法を説明できるようになったというわけです。診療方法が説明できると、それによって、伝達が容易になるし、このツボの押し方は間違っているというような情報も

伝えることができます。



- 「ツボ」は発明されたもの
- 「ツボ」を使った診療方法の説明ができることが重要！

図3 共通言語の重要性

ですから、複雑な問題をみんなで考えるためには、どこかで共通言語を持たなければいけないというふうに思います。それが、信じることなのですが、現在のように学問の進歩が早い領域では、これがなかなかできないわけです。意識的に共通言語を作る努力をしなければいけないというふうに考えています。

共通言語の必要性について、こんな話があります。Complexity Science Hubはウィーンに最近できた研究所ですけれども、20年くらい前に複雑適応系で一世を風靡したサンタフェ研究所が最近元気がないので、その代わりにウィーンにつくりましょうという意気込みでいます。研究所の本では、43人の科学者が、「複雑系」(complexity)について、それぞれ語っています⁴。その前書きの面白いところを意識してみます。「複雑系の学問を進展させるためには、個々の研究者は、社会・人文科学も自然科学も問わず、それぞれの分野の専門知識を持つと同時に、ふたつの共通言語を持つ必要があります。それは、数学に関する基本的な知識とコンピュータモデリングができる知識です。専門知識と共通言語を持つことによって、はじめて学問の境界や社会問題の境界を破ることが可能となります。」私はこの内容に全面的に賛成するものであります。

そういうわけで、社会問題全般に対応するためには、横断型のアプローチがどうしても重要になります。例として、統計物理学のやり方に、非常に強力な平均場近似という手法があります。これを使うと、いろいろなモデルの解析に利用できて、近似的な計算ができるようになります。しかし、このためには、単純化するための仮定が重要です。その一方で、エージェント・ベース・モデリングでは、エージェントの挙動

とそのまわりの世界の状況を、ボトムアップに記述さえすれば、コンピュータ上でシミュレーションできてしまいます。その記述は、コンピュータにもわかるし、わかりにくいことは確かですが人間にも理解できます。しかしこれは、実験的になって、特に第1次原理がないような世界でのモデルですと、膨大なパラメータ調整が必要になります。

たとえば、人口動態の重力モデルは、ニュートンの重力方程式がもとになっているわけですが、重力定数に当たるパラメータで結果はどうにでもなります。エージェントでモデル化すると、とりあえず、人の移動は観察できます。ということは、両方のアプローチは相補的な関係にあって、社会問題のモデル化をするときは、この物理学の方法と計算科学の方法の両方をきちんと考えておかなければいけないわけです(図4)。


- 平均場近似 ← 物理学
 - ☺ 解析的
 - ⊗ 強力な近似だが単純化した問題にのみ適用可能
- 
- シミュレーション ← エージェント・ベース・モデル
 - ☺ 直接コード化可能
 - ⊗ 実験的・多数のパラメータ調整 などなどが必要

図4 社会問題への横断型アプローチ

4. システムをつくること

ここで、システムを作ることに話を移します。人工知能ブームの影響もあって、最近、いろいろな所で「先端的なシステム」の話聞きます。特にビジネス分野ですと、いろいろなことができる巨象のようなシステムが作られています(図5)。

ところが、この象を作るというところで体力を使い切るケースが多いのです。体力を使い切るとどうなるかという、この象に頼り切って業務が全部進みます。個々人が象を直接扱うことは、とても許されません。それで、組織の構成員に賢い方が多いとなると、象の一部を切り取ってきて、鼻のシステムを作ったり牙のシステムを作ったり、耳のシステムを作ったりという事で業務を回してしまうようになります。業務がうまく回っているという限りでは、これ自身はそう悪いことでもないのですが、今の人工知能・ビッグデータ

の大波が来ると、鼻や牙を再び象に作り直さないといけません。そうすると、つぎはぎだらけのフランケンシュタインみたいになってしまうわけです。

これが今のビッグデータをきちんと使おうとして、大企業で起こっていることではないかと、私は思っています。最近の人工知能ベンチャーの方々は、よく「ディープラーニング学習で何とかしてみます」というようなことで売り込んで来られるのですが、これで鼻の部分の賢くすることはできても、象を作り直すことはできないでしょう。そうして、鼻ばかりにこだわっていると、いろいろ変なことが起こってくるのです。

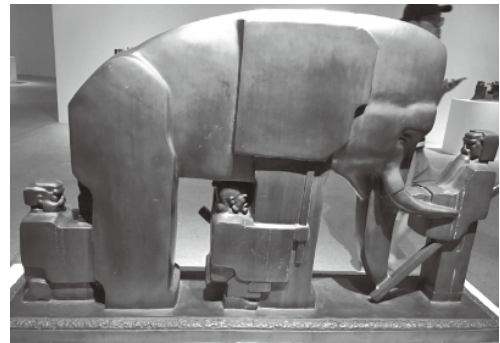


図5 大規模システムは「盲人、象をなでる」現象を引き起こす
(写真：中国・武漢現代美術館より)

システム化することは元来非常に面倒なことで、しかもいったん完成するとすぐ古くなります。そのため、分割して一部だけの機能を利用するか、思い切って捨てて再構築をする必要がでてきます。この再構築には、金と期間と勇気が必要で、そこに経営判断が入ってきます。銀行の業務システムの再構築に何でそんなにコストがかかるのかと思うかもしれませんが、それが事実です。

ところが、一方の最近のビッグデータの傾向などを見ても、データ量がディープラーニングするには3桁ぐらい少なかったり、またデータが汚なかったり、もともと存在しないのに学習で賢いシステムを作れませんか、というような話になっています。

システムを相手にする場合、我々には、分析、設計、発想の全ての能力が必要になるわけです。分析は理学の世界です。設計開発は工学の世界です。あと、発想は感性の世界です。この3つがうまく組み合わせられないと、良いシステムにはなりません(図6)。いずれにしても、ルイスキャロルの『不思議の国のアリス』に出てくる「赤の女王の定理」じゃありませんけれども、走り続けなければどんどん古くなることを認識し

ておかなければなりません。

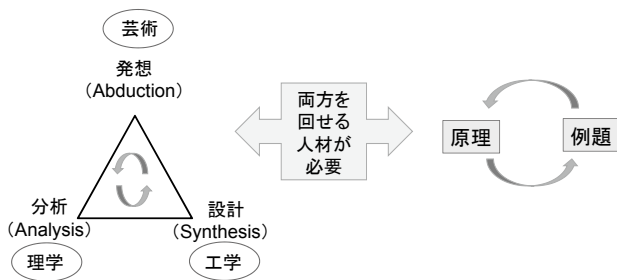


図6 システム化要件と分析・設計・発想の繰り返し

システムも簡単にはしたいのですが、その一方で、対象を複雑なままで扱うことができないだろうかということに、私自身大きな興味があります。ただ、社会の問題はシステム化だけで解決できるわけではありません。最近、『Word of the Year by Oxford Dictionary 2017』で選ばれた「Post-Truth Era」ということばがあります。ここで強調されているのが、真実 (truth) よりその影響 (impact) を重視する時代であるということです。例えば、現代はSNSのインパクトが非常に強調されています。ただし、これも、例えば10年くらい経ってしまうと、「昔はSNSでみんなだまされていたのだよね」とかいう話題になるかと思えます。フェイクニュースだとか風評被害などが社会問題になっていますが、私は、これはいい傾向だと思っています。昔は大きな組織でないと情報操作はできなかったのですから。

個人の力が非常に強くなっているがゆえに、「post-truth」という考え方が影響力を持つようになったと思っています。個人の力が強くなった理由は、いろいろあるとは思いますが、ひとつはコンピュータの進歩ということで、まとめさせていただきます。

1977年をまず基準にとります。1977年はエポックメイキングな年で、このときに「Apple II」が発売されています。同時にジャンボ機ボーイング747が初飛行しています。「Apple II」とジャンボ機が、その頃、技術的に同等な物だったとすると、「Apple II」は4キロバイトのメモリーで1メガヘルツに届かないようなスピードで動いています。価格は35万円でした。ジャンボ機はそのとき300トンの人間貨物が運べ、1000キロメートル/時ぐらいで飛んで100億円で、これが当時のスーパーコンピュータ「Cray-1」と同

じような値段だったといわれています。

では、メモリーが運べる量でCPUのスピードが速度だとする、2018年の今ではどうなるか。アップルで今一番速いのは「iMac Pro」で、128ギガバイトのメモリーを積んで18コアXEONプロセッサ、ワンプロセッサだとサイクルタイムは3.2ギガヘルツです。これが全体で150万円ぐらいで買えます。ジャンボ機が同じスピードで進歩すると、今では300億トンの貨物が運べ、6000万キロメートル/時で飛んで(これは光よりはるかに速いです)、400億円ぐらいで買えることになります。

こんな進歩の速さですから、コンピュータの新しい使い方が個人の力に影響を及ぼすのも当たり前です。

5. これからどうするべきか

日本の学術の状況を見ていると、不愉快な真実が非常に気になります。大学研究者、教育者に余裕がない、余裕がある人は多分いません。研究予算が選択と集中の結果、競争的過ぎます。加えて、大きな企業で、いわゆる企業の中央研究所がなくなっていますし、企業で研究者といわれている方でも、好きなことをやっている方はほとんどいません。

一方、2017年度のJSPSの科研費の助成総額は、全体で2300億円弱です。これにIPS細胞もスーパーコンピュータも入っているわけです。Amazonの研究費は226億ドルだそうです。日本で一番多いのはトヨタで約93億ドル。わが国の企業の研究開発費の総額は、ちょっと古いデータになりますが、大体12兆円とか13兆円ぐらいの金額です。そのうち、企業から大学に移っているのが300億円から400億円。いくら優秀な研究者であっても、これだけ金額に差があると敵うわけがありません。これが我が国の学問の非常に悲惨な状況なのです。

では、我々はどうすればよいのでしょうか。無力な我々にも以下の2つの対応策があると考えます。

まずは、国際化です。国際化は、実はあまりお金がかかなくなっています。「欧米でやっているから日本でも…」という文言はいまだに研究提案を作る上で役に立つセリフです。実際のところ、中国のほうが進んでいることは多いのですが、そして、上を説得する

のに使う文言に迫力を持たせるのが、「黒船が来た！」という表現です。「黒船が来たのだから何とかしてよ」と。「開国しましょうよ」という説得は割に簡単にできます。しかし、黒船が来るのを待ってはいけません。黒船を積極的に裏で操るべく、国際協力を進めていくことが大事です。黒船をお互いに操りましょうという話をする、海外の研究者と話が通じることが多いです。特に、国際共同研究は非常に金銭の取りやすい分野ですので、そういうことをどんどんやっつけていけばいいと考えます。

もう一つは「ガンダム化」です。最近のスマートフォンは、実は生身の人間を強化するガンダムになっています。(誰だかわかりませんが) 敵と戦うためには、モバイルスーツをきちんと着ましょう。機械翻訳に頼っても、Skypeに頼ってもいいですから、外に出て行ってきちんと話をしましょうということです。この「ガンダム化」というのは、そう大変なことではないはず。全然ことばの通じない国では、いまのスマートフォンでも十分ガンダムになります。さらに、もう10年ぐらいでもうちょっと賢くなるはずですし、VR眼鏡だとか、遠隔操作のいろいろなデバイスとか、そういうのがどんどん出てくるはず。英語を頑張って、丸腰で戦うようなまねはやめましょう。そう高い金額を使わなくても、しっかりと戦えるでしょう。

さて、システム化を促進するためには、システムは一般に目が見えなく、かつ、動的であることを肝に銘じておく必要があります。「今のコンピュータを100倍速くします」と言うと、まあ分かりやすいわけですね。それに比べて、「システムをよくすると100倍速く問題が解けますよ」と言うのは、なかなか理解されません。「こういうことを作りたいのです、これが重要です」と言うと、「難しくて分からない」と、大体トップに文句を言われます。「簡単な例を出せ」というのが、次のお題になるわけですが、一生懸命考えて簡単な例題を持って行くと、当たり前じゃないかと言われます。結局、優れたシステム科学者に育つため

には、まずは、専門分野の知識を教わること。加えて、分からないことを他人に教えることが、非常に重要だと思っています。

6. おわりに

システム科学者には、それぞれの専門領域に対する知識と、そのような問題にも対応できるような領域横断的な視点との両方が重要です。このような立場に立てる人間が、世界中、特に日本で不足しているというのは、非常にまずい状況です。ということで、まとめにさせていただきます。これで結論になるわけです。定年を迎えるような年をとった人間は、ノウハウを活かした社会実装に従事しましょう。そして、どうやるかはよくわからないところではありますが、若者に金と権力をできるかぎり与えましょう。これには、たいしたコストはかからないはず。

講演でしばしば使っているスライドを紹介して終わりにさせていただきます。

バルセロナのピカソ博物館にこんなステートメントがありました。「Art is the lie that helps us see the reality」もうひとつは、ダンカン・ワッツのテキストで、『偶然の科学』が日本語のタイトルですが、元のタイトルは「Everything is Obvious: Once You Know the Answer」となっています⁵。

この2つの文を少し変えてやると、私の考える複雑なシステム、エージェント・ベース・モデリングにちょうど適切な表現になります。

- ・ Agent simulation is the lie that helps us see the reality.
- ・ Something will be obvious once you know the agent simulation.

今後のエージェント・ベース・モデリングに期待しましょう。

参考文献

- 1 寺野隆雄 (2016) 「研究のネットワークがつながるとき」『人工知能 レクチャーシリーズ: 「つながりが創発するイノベーション」 [第6回]』Vol. 31, No. 2, pp. 287-298.
- 2 吉田民人 (1999) 「21世紀の科学 - 大文字の科学革命 -」『組織科学』Vol.32, No. 3, pp. 4-26, 1999.
- 3 Kahneman, D. (2011) *Thinking, Fast and Slow*. Penguin Books. 村井章子 (訳) 『ファスト&スロー』早川書房, 2014年.
- 4 Complexity Hub Vienna (ed.) (2016) *43 Visions in Complexity*. World Scientific.
- 5 Watts, D. (2011) *Everything is Obvious: Once You Know the Answer*. Atlantic Books. 青木創 (訳) 『偶然の科学』早川書房, 2014年.