

本田財団レポート No. 142

第 120 回 本田財団懇談会（2011 年 12 月 13 日）

「生き方としての科学」 ～オープンシステムサイエンスのすすめ～

株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所
代表取締役会長

所 眞 理 雄

講師略歴

所 眞理雄 (ところ まりお)

(株)ソニーコンピュータサイエンス研究所代表取締役会長



《略 歴》

慶應義塾大学助手、専任講師、助教授を経て1991年より同大学理工学部教授。その間、コンピュータシステム、ソフトウェア、ネットワークなどに関する研究で国際的な成果を挙げた。1988年に(株)ソニーコンピュータサイエンス研究所を創立し、取締役副所長に就任。基礎的かつ応用可能なオリジナリティーの高い研究成果を挙げ、世界的な研究所に育てる。1998年よりソニー(株)にて執行役員上席常務、CTOなどを歴任。2011年より現職。また、慶應義塾大学特任教授、(独)科学技術振興機構CREST DEOSプロジェクト研究総括を兼務。

- | | |
|-------|------------------------------------|
| 1947年 | 東京都生まれ |
| 1974年 | 慶應義塾大学理工学部助手 |
| 1975年 | 慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了 |
| 1979年 | カナダウォータールー大学計算機科学科客員助教授 |
| 1980年 | 米カーネギーメロン大学電気工学科・計算機科学科客員助教授 |
| 1984年 | 慶應義塾大学理工学部助教授 |
| 1988年 | 株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所を設立し、取締役副所長 |
| 1996年 | 慶應義塾大学理工学部教授 |
| 1997年 | 慶應義塾を退職し、ソニー株式会社執行役員上席常務に就任 |
| 1998年 | 株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所代表取締役社長 |
| 2000年 | ソニー株式会社CTOに就任 |
| 2006年 | 独立行政法人科学技術振興機構CREST DEOSプロジェクト研究総括 |
| 2008年 | ソニー株式会社を退職 |
| 2009年 | 慶應義塾大学特任教授に就任 |
| 2011年 | 現職 |

《主な受賞歴》

- | | |
|-------|--------------------|
| 2005年 | フランス共和国 国家功労賞オフィシェ |
| 2010年 | パリ第6大学名誉博士号 |

《主な著書・編著》

- | | |
|-------|---|
| 1987年 | 『Object-Oriented Concurrent Programming』MIT Press |
| 1988年 | 『計算システム入門』岩波書店 |
| 2009年 | 『オープンシステムサイエンス—原理解明の科学から問題解決の科学へ』NTT出版 |
| | 『天才・異才が飛び出すソニーの不思議な研究所』日経BP社 |
| 2010年 | 『Open Systems Science-from Understanding Principles to Solving Problems』IOS Press |

ほか多数

本田財団第120回懇談会

生き方としての科学
オープンシステムサイエンスのすすめ

Science and the Way of Living –
Encouragement of Open Systems Science

2011年12月13日
(株)ソニーコンピュータサイエンス研究所
代表取締役会長
所 眞理雄

本日はお忙しいところをお集まりいただきまして、ありがとうございます。本田財団の懇談会は今回で 120 回と伺っております。年 4 回やっても 30 年ということで、非常に由緒がございます。こういう機会をいただきましたことを心から感謝しております。これまでの懇談会のご講演者を拝見すると素晴らしい方ばかりで、私のような者がここに来て話をしてもいいのかだいぶ迷いましたが、今までの人生も恥のかき通しでしたので、ここでもまた恥をかかせていただくということで、お付き合いいただければと思います。

さらに、タイトルを何にするかというのは随分悩みましたが、「生き方としての科学」というタイトルを付けさせていただきました。何を言っているのかというのは、後の方で種明かしができるのではないかと考えております。

■ 従来の科学方法論とその成果

科学というのはギリシャの古典期のプラトン、ピタゴラス、アリストテレス、アルキメデスというところから始まってきたと考えることができます。ローマ時代になると土木建築、その他の技術に結び付き、16 世紀になるとまたさらに新しい科学としてコペルニクス、ガリレオ、デカルト、ニュートンなど、近代科学へとつながっていきます。そして、より専門化して現在の科学技術へとつながっているのではないかと思います。



図－1

〈図－1〉 20 世紀になると、まさにこれまでの科学の集大成と言えるような成果が出てきました。産業の勃興、経済の発展、医療の拡大、生活水準の向上などがなされてきました。そして、多くのさまざまな種類の問題が解決されたと言えます。



図－2

〈図－2〉 これまでの科学の最大の功労者は誰か。1 人をあげるということは全くできませんが、科学技術の発展にとりわけ重要な貢献をしたという点で、デカルトをあげさせていただきます。デカルトは 1647 年に『方法序説』というたいへん有名な本を出しました。そ

んなに厚い本ではありませんが、中に書いてあることを要約すると、4つの点があげられると思います。明証的に真であると認めたもの以外は受け入れない。問題を小さな部分に分ける。単純なものから始めて複雑なものへ再合成をしていく。4番目に、見落としがないかすべてを見直す。

我々がよく記憶しているのは最初の3つです。本当に明証的に真であるものと認めたもの以外は認めてはいけません。そして問題を小さな部分に分けてそれぞれの小さな問題を解く。それを合成していけば元の問題が解ける。しかしながらもう一つあるのです。最後に見落としがないかすべてを見直す。見落としがないかすべてを見直すというのはたいへん重要なポイントで、これが今は必ずしもなされていないのではないかという気がします。1647年にこの『方法序説』を出していますが、この結果が今日の科学技術の礎を築き、人類の発展に多大な寄与をしてきたとすることができます。

■ 巨大で複雑な 21 世紀型課題



図－3

〈図－3〉 先ほど言ったように、いろいろな問題が解けたということなのですが、21世紀になって解けていない問題もたくさんあることが分かっています。地球環境の問題、持続可能性の問題、もう少し細かく言えばエネルギーの問題、地球温暖化の問題、人口、食料、生物多様性、貧困、格差、安全保障、さらには生命や健康の問題も解けたようで解けていません。

この他にも、安全性の問題があります。世界経済は現在極めてフラクチュエーション（変動）が激しい。食料の問題もいろいろ出てきています。そして情報、交通などのインフラストラクチャーが巨大なシステムになってくる中での不具合とか、故障とか、アタックというような問題が出ています。

こういう問題はもう少し整理するとどんな問題なのか。巨大で、複雑で、常に変化する統合システムの問題だと言えます。別の角度から見ると、将来をできる限り予測して解決に向けての策を実行していく問題だとも言うことができます。このように、まだ解けていない問題がたくさんあります。

■ 既存方法論に対する疑問



図－4

〈図－4〉 デカルトの方法論をもう一度振り返ってみましょう。デカルトの方法論は、要素還元主義とか Reductionism とも言われています。この方法には 2 つの大きな特徴があります。1 つは外界からの遮断、ある問題を切り出して問題として形式化できる。別の表現をすれば、領域が定義可能だということになります。第 2 は、単純な問題群への分割が可能ということです。

実はこの 2 つは暗黙の仮定であって、我々が高校や大学で、物事はこういうふうに分かれる、定義できる、分割できるということを習った時に、例えとして出てくるのはほとんど物理の問題です。物理の問題は、これに極めてよく合うと言えらと思います。

一方で、先ほど述べたような常に変化している問題、将来を予測しなければいけない問題というのは、外界から遮断して領域が定義可能なのかどうか。問題として定義されたとしても、それを分割していくことができるのかどうか。こういった大きな疑問が湧いてきます。地球環境の問題、持続可能性の問題、安全性の問題、すなわち巨大・複雑、常に変化する統合システムの問題、将来をできる限り予測して解決へ向けた策を実行するような問題というのは、これまでの科学方法論で解決できるのでしょうか。

これらの問題は 既存の方法論で解けるのか？

- ・ 細分化された研究分野
- ・ 見落としが無いが見直すシステムの欠如
- ・ そもそも、これらの問題は分割可能・
組み合わせ可能なのか？
- ・ 時間軸を伴う全体的視野の欠如
- ・ 要素還元主義だけでは解けない？

Aristotle
BC384-322



2011.12.13

© Mario Tokoro

5

図－5

〈図－5〉 今我々がやっているサイエンスは、極めて細分化された専門性の高いことをやっています。細かくやっていくことに関しては、たいへん深いところまで知ることができています。ところが、例えば見落としがないかどうかを見直すシステムはあるでしょうか。大学や大学院の学部を考えてみると、いろいろな学部になり、それがまた学科に分かれていますが、ある問題を解決している場合に、見落としがないかというのはどうやってチェックしているのか。専門家の中で専門の議論が行われている。しかし、その専門性を外れたところで本当に見落としがないかどうかというのは、どうやってチェックしているのか。これが1つ目の疑問です。

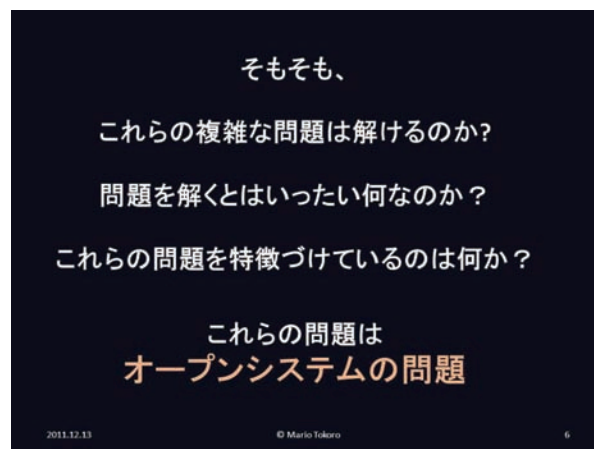
次は、そもそもこれらの問題が分割可能なのか。分割したものが後になって合成できるのか。地球環境の問題は、気象の問題、海流の問題、人口の問題、食料の問題、CO₂の問題など、いろいろな問題が絡み合っていて、どこかだけを持ってきて「これが解けた」と言ってしまうといいのだろうか。さらには、時間軸を伴う全体的な視野の欠如があるのではないか。ある時点では解けているけれども、将来にわたってそれが成り立つのかどうか。こういう判断をしていかなければならないのではないかと思います。そうなってくると、要素還元主義だけで本当にすべてのものが解けるのでしょうか。

■ 問題解決への視点～オープンシステム～

もともと私は大学におりました。私が助教授をやっていた 1987 年にソニーの土井利忠さんが私のところに来て、最初はソニーにとって何かいいことはないかということで話が始まったのですが、「世界の研究所を創ったらどうですか」と言ったら、「どんな研究所がいいか考えてください」と言われました。それで次回に研究所の概要を書いて持っていったら、「じゃあこれでやりましょう」と言って研究所を創ることになってしまいました。ソニーという会社はそうした素晴らしいところがいまだにあります。1988 年には、研究所を土井利忠さんと一緒に設立しました。

ソニーコンピュータサイエンス研究所（以下、ソニーCSL）では基礎的、本質的で、しかも応用可能な研究を行うと最初から決めていました。ですから、論文を書くことは目的ではありません。世の中を本当に変えるような研究をやろう。当初は人工知能、自然言語、分散システム、ネットワークなどをやってきました。

研究を続けていくと結果は出ますが、本当にそれが成果と言えるのか、何か仮定をしてしまって、その中で自分が楽しんでいるだけで、本当に世の中にフィードバックできているのだろうか、私自身も不満を持ち始めました。なぜだろうか、ということのを常に考えていましたが、その時に行っていた人工知能、自然言語の問題、分散システムの問題、ネットワークの問題というのは、実はすべて捉えどころがない、定義がものすごく難しい問題でした。ですから、これを解けばこの問題が解けたということにはなかなかありません。



図－6

〈図－6〉　そこでたどり着いたのがオープンシステムという考え方です。そもそもこれらの複雑な問題は解けるのか。問題を解くということはどういうことなのか。物理で定式化された問題を解くことと、地球環境をどうしていったらいいかというのは、だいぶ次元が違うだろうし、生命や健康に対しての解を出すというのは、今までの問題解決とは違うのではないかと、これらの問題を特徴付けているものは何か。そういったことをずっと考えるはめになってしまいました。

その後、さらに我々の研究所でテーマとして始まったのは、生物、生命、健康の問題、そして地球環境、エネルギーの問題、持続可能性の問題、さらに自然システムや人工システム

の安全性の問題などを取り扱うようになってきました。そうすると、例えばどこまでやれば安全だと言い切れるのか、どこまでやったら健康だと言い切れるのか。こういう大きな問題になってきてしまいました。

そこでずっと悩んだ末に、きっと我々はオープンシステムにチャレンジしているのだろう。それならば、オープンシステムの問題というのは、今までとは違った解き方をしていかなければならないのではないか、と考えるようになってきました。

■ オープンシステムの特徴

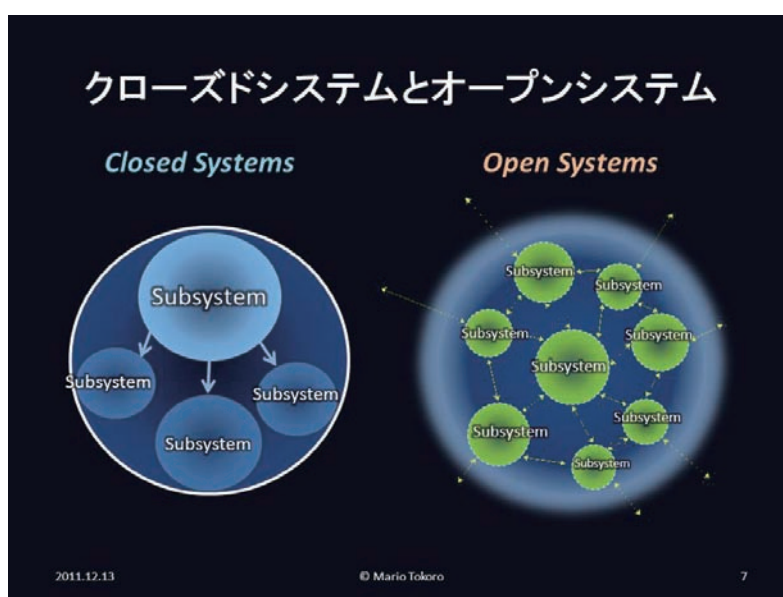


図-7

〈図-7〉 クローズドシステムとオープンシステムの比較は皆さんご存じだと思います。クローズドシステムでは、システムの境界が一定であって、外部との相互作用が限定的。システムの構造は固定的で、サブシステム間のインタラクション（相互作用）も固定的である。これに対してオープンシステムになると、問題領域を定義しきったつもりでも何か漏れている。もしくは他の新しい問題が発生してくる。システムの内部について言えば、サブシステムに分割できたと思っても、これが時々刻々変化している。したがって、固定的にいくつのサブシステムがあってどういうインタラクションをしているかを言うことがたいへん難しい。そのように対比することができます。

もともとすべてのシステムはオープンであって、クローズドシステムというのは、「closed system hypothesis（閉システム仮説）が成り立つ部分」というのが本当は正しい表現ですが、我々はそちらを常に問題解決のベースにしてきました。しかし、それはあくまで仮説であった。

地球環境について言えば、気象、海流、人口、食料、工業化、汚染、炭酸ガス濃度などが相互に密接に関係していて、常に変化している。生物や生命について言えば、体というのは

もともと受精卵から始まって、胎児、幼児、子供、青年、老年、そして最後は死ということで、常に変化している。

インターネットもそうです。ネットワークの中は常にどんどん変わっています。新しい要素が付け加わっています。ソフトも毎日変わっています。ユーザーもどんどん変化しています。そのため、固定的に捉えることができない。しかしながら、我々はそういう問題にチャレンジしていかなければなりません。

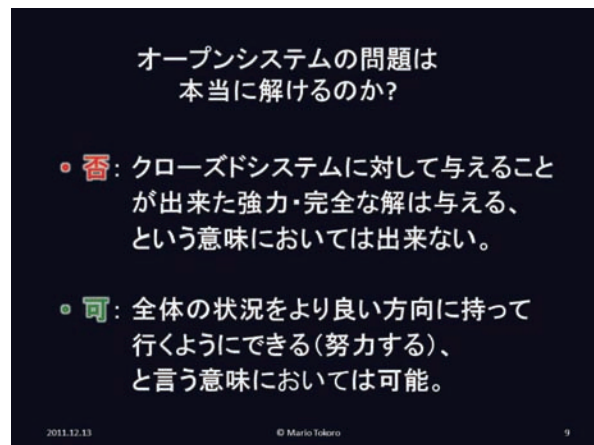
クローズドシステムとオープンシステム		
Closed Systems		Open Systems
一定、定義可能	システムの境界	定義しきれない
一定	外界との相互作用	時間とともに変化
固定	システムの構造	時間とともに変化
平衡系	システムの捉え方	時間発展系
可逆	可逆性	不可逆
可能	再現性	不可、一回性
可能	可分解性	不可
外部観測者	視点	内部観測者

2011.12.13 © Mario Tokoro 8

図－8

〈図－8〉　まとめてみますと、システムの境界が一定であるのに対して、定義しきれない。外界との相互作用が一定であるのに対して、時間とともに変化する。システムの構造も固定であるのに対して、時間とともに変化する。システムの捉え方が平衡系であるのに対して、時間発展系である。クローズドシステムが可逆性であるのに対して、オープンシステムは不可逆性である。再現性もクローズドシステムは可能、オープンシステムは不可、もしくは一回性である。分解可能性も可能に対して不可である。さらに外部観測者の視点が取れたクローズドシステムに対して、究極的には自分自身もそのシステムの中に入ってしまうという意味で、オープンシステムでは内部観測者の視点しか取れないのではないかと考えています。

■ オープンシステムにおける『解』とは



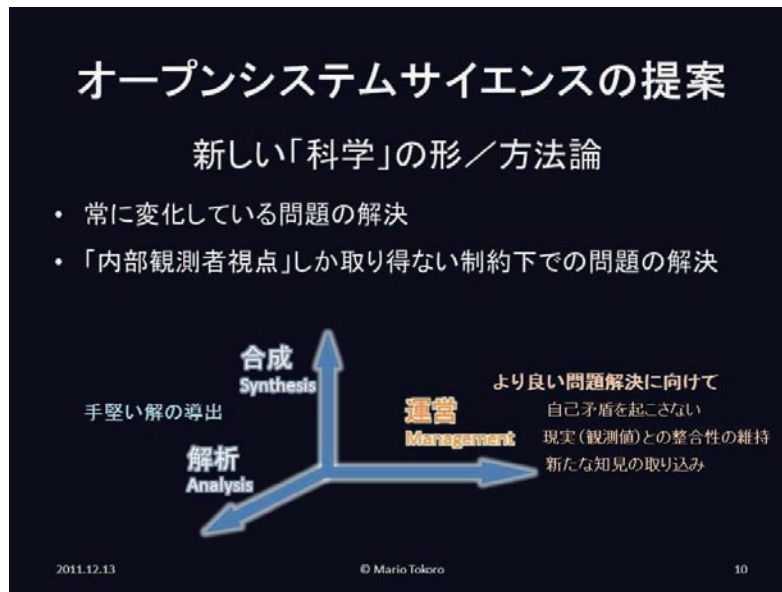
図－9

〈図－9〉 そうなってくると、オープンシステムの問題は本当に解けるのか、という大きな問題にぶちあたります。今まで、クローズドシステムで我々が問題を解いたつもりになっていた問題の解き方と同じような解が得られるかと言ったら、これは無理だろう。クローズドシステムに対して与えることができた完全な「解」という意味では、それは不可能だろう。しかし、全体の状況をより良い方向に持っていく、という意味においては可能だろう。これにはたいへん危険も伴います。いいだろうと思ってやったことが、結果的に必ずしも良くない場合もある。そうしたら、その場で何が問題であったかを探り、それを直していく。しかも、その時間は元へは戻らない。その時点でそれを何とか良い方向に持っていく。こういった作業をしていかなければならないと考えました。

巨大で複雑で常に変化するシステムを、一定期間変化しないクローズドシステムの連続として捉えれば、別に今までの解き方でいいではないか、という議論もあるかもしれません。それも一生懸命に考えましたが、巨大なシステムというのは、全体を見回した場合には常にどこか変化している、ネットワークはどこか変化している。人間の体も、ある部分は固定的かもしれないけれども、変化している部分もある。ですので、変化している区間と変化しない区間を分けることは極めて難しいのです。

さらには、変化しない部分についてはある程度解けていて、その変化をしているところがどんな原理に基づいているのか。また、それらの間の相互作用は何か。これらが我々の現在の興味を中心であると考えました。そうであれば、最初から物事をオープンシステムとして扱うという問題の定式化、解決の方法を考えていかなければならないのではないかと考えるに至りました。

■ これからの科学方法論『オープンシステムサイエンス』



図－10

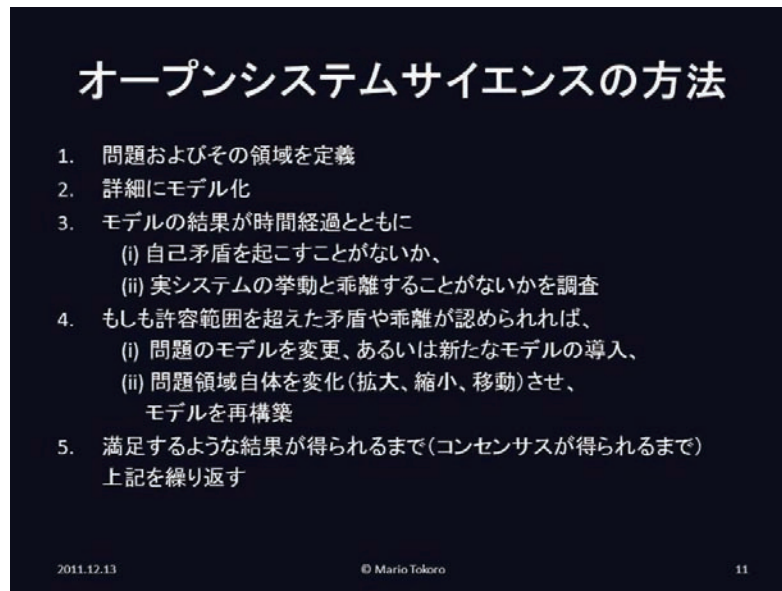
〈図－10〉 それではどうしたらいいか。これは言うのは簡単ですが、考えるのは本当に難しいのです。常に変化している問題を取り扱わなければならない。そして、内部観測者視点しか取り得ないような制約下で問題を解決していかなければいけない。これまでの科学的な方法というのは、解析（analysis）と合成（synthesis）でしたが、これに対して時間的な運営（management）という軸を入れざるを得ないのではないか。そのように 2008 年に言い切りました。

結局、より良い問題解決に向けて自己矛盾を起こさないことを常に考える。また、現実観測値との整合性を、どうやったら維持できるのかを考える。さらに、新しい科学的知見は毎日出てきますし、新しいデータも上がってきます。また、新しい理論も出てきます。そうした中で、これらを常に取り込みながら、より良い方向に向けて努力をしていくということだろうと考えました。

そうすると、解析と合成ではこれで解けた、というある種の一区切りがありますが、運営を入れた途端にエンドレスの努力になってくる。そういった意味では、問題の解決というのは問題が与えられてそれを解決するのではなくて、問題を解決するためのプロセスを実行することであり、より良い方向に常に持っていくための努力を行うことである。これは過程、すなわち「プロセス」になるのではないかと思います。

■ オープンシステムサイエンスの具体的方法

では、これを具体的にどうやって実践すればいいのだろうか。ここまでだとあまり具体性はありませんが、これもやはり具体的にしなければいけないということで、それから 2 年ぐらい悩んだ結果、次のようなことを考えました。バージョン 1.0 かもしれませんが、これを現時点でオープンシステムサイエンスの方法としてご紹介したいと思います。



図－11

〈図－11〉 1 番目は、問題およびその領域を仮に定義する。次に、これに対してできるだけ詳細にモデル化する。できる限り第 1 原理をベースとしてモデル化する。そして、モデルの挙動が時間経過とともに自己矛盾を起こすことがないか、実システムの挙動と乖離することがないか、すなわち実際に測定したデータと違わないか、こうしたことをちゃんと調べる。もし許容範囲を超えた矛盾や乖離が認められれば、問題のモデルを変更する。あるいは新たなモデルを導入する。

これに加えて、さらに問題領域自体を変化させる必要があると考えました。すなわち拡大したり、場合によっては大きすぎて取り扱えないから一時的に縮小したり、少し右側に移動させる、左側に移動させるといったことをやって、与えられた問題意識から離れないようにしながら、解きやすい形に変化させる。そうしてモデルを再構築して、満足するような結果が得られるまで、時間経過とともに自己矛盾を起こさず、実システムの挙動と乖離することがないように、このプロセスをぐるぐる回す。

すなわち、問題のモデルを変更したり、先に仮に定義した問題領域自体を変化させたりして、問題を解いていかなければならないのではないかと考えました。

方法論の比較	
方法序説	オープンシステムサイエンス
1. 明証的に真であると認めたもの以外は受け入れない 2. 問題を小さな部分に分ける 3. 単純なものから始めて複雑なものへ 4. 見落としが無いかすべてを見直す	1. 問題およびその領域を定義 2. 詳細にモデル化 3. モデルの結果が時間経過とともに(i) 自己矛盾を起こすことがないか、(ii) 実システムの挙動と乖離することがないかを調査 4. もしも許容範囲を超えた矛盾や乖離が認められれば、(i) 問題のモデルを変更、あるいは新たなモデルの導入、(ii) 問題領域自体を変化(拡大、縮小、移動)させ、モデルを再構築 5. 満足するような結果が得られるまで(コンセンサスが得られるまで)上記を繰り返す
2011.12.13	© Mario Tokoro 12

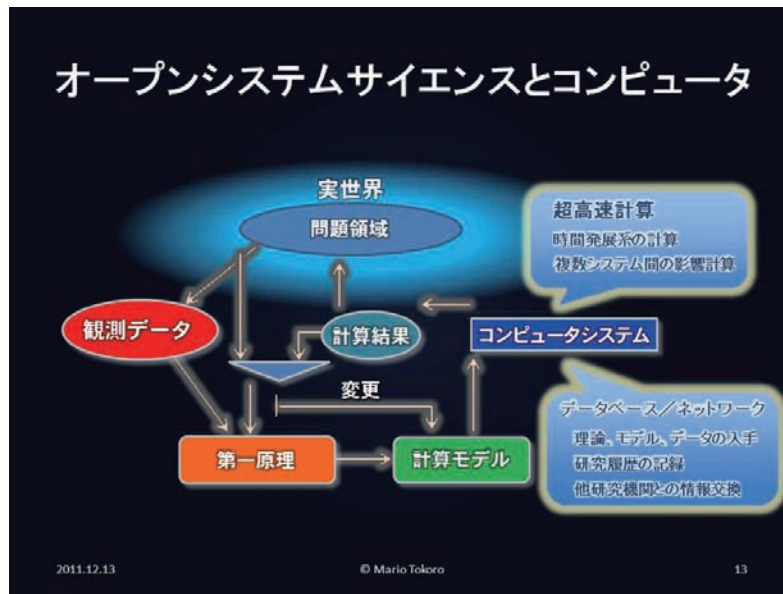
図－12

〈図－12〉 これを『方法序説』と比較してみます。『方法序説』は明証的に真であると認めた以外は受け入れない。境界領域を固定して問題を小さな部分に分ける。その小さな部分を解決して隣の部分と合成して、またそれを解決する。このようにして単純な小さなものから始めて、複雑なものへと再合成する。見落としがないかすべてを見直す。これは内側に向けて理解を深めていくという方法だと言えます。

一方、オープンシステムサイエンスの方法は、問題およびその領域を定義して、モデル化していろいろ調べていった結果、満足するような結果が得られなければ、また問題およびその領域を定義し直す。ですから、外側に向かってゆく方法と言えるのではないかと思います。

もちろん『方法序説』の方法を否定していません。これがベースですが、これだけで常に変化している巨大な問題を解こうとすると、自分はこの専門で見たからこういう答えであると言って、時として他の人の意見に耳を貸さなくなってしまう。そうではなくて、全体をどうやって解くかという中で、部分ごとの知見を最大限活かしていく。ですから、内に向かう部分と外に向かう部分の両方を同時に行っていくというのが、これからのサイエンスの方法ではないかと考えています。

■ コンピュータで進むサイエンス



図－13

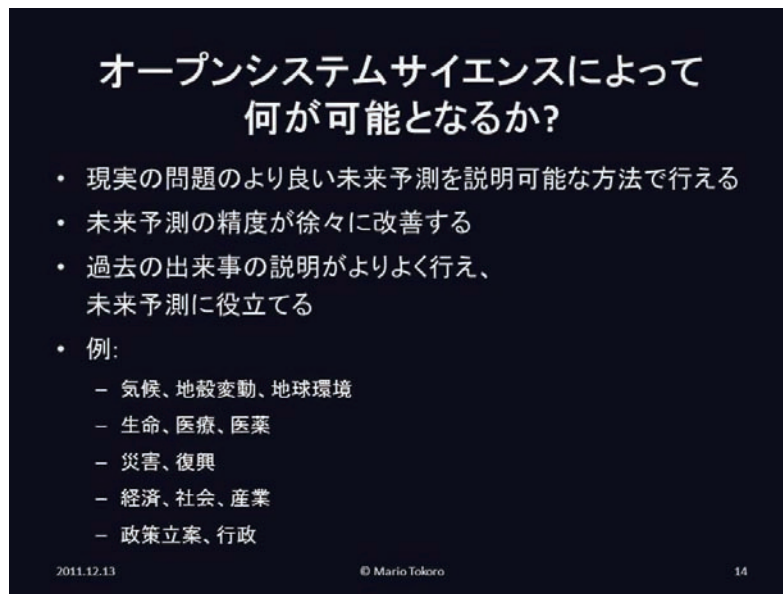
〈図－13〉 私はもともとコンピュータ屋です。実はこのオープンシステムサイエンスというのは、素手で戦おうとするとたいへんなことになります。いろいろなことを知らなければいけない。他の新しい知見をどんどん入れなければいけない。常にデータを持ってこなければいけない。そうした中で、コンピュータを使うとこの方法が現実になるのではないかな。

実世界の中で仮に問題領域を定義する。これに関する多くの観測データを集めてきて、それをベースにして第 1 原理と計算モデルを作って、コンピュータシステムの中に入れていろいろ計算する。計算結果が現実の観測データと一致するかどうか。一致しない場合には、原理や計算モデルを変更する。そしてまたこれをぐるぐる回し、さらには問題領域も変化させていく。

コンピュータは超高速計算、時間発展系の計算ができます。最近だと「京」というコンピュータが世界 1 位になって、これを使うとまた様々な計算ができますし、複数システム間の影響の計算もできます。まだあまりやられていませんが、1 つの問題を解くだけではなくていくつかの問題を同時に解いていくことも、ハイパフォーマンズコンピュータを使うことによって、これからますます容易にできるようになると思います。

さらにコンピュータの強みというのは、データベースとネットワークにもあります。それらは、理論やモデルやデータの入手が極めて容易になるし、研究履歴をすべて記録していくとこれを相互に利用しあうことができる。その結果、他の研究機関との情報交換もしやすくなる。そういう意味で、これからのサイエンスを行うにあたって、コンピュータがますます必須のものになってくるのではないかと考えています。

■ オープンシステムサイエンスが拓く未来

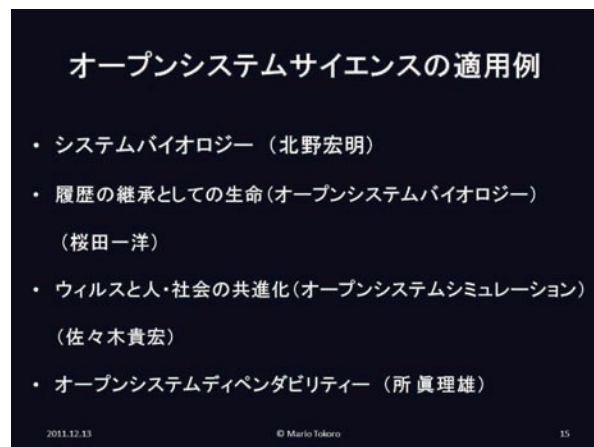


図－14

〈図－14〉 さて、オープンシステムサイエンスによって何が可能となるだろうか。現実の問題の、より良い未来予測が説明可能な方法で行われるようになるだろう。未来予測の精度が徐々に改善していく。もちろん過去の出来事の説明もより良く行われて、未来予測に役立てることができる。そうして、先ほど言った気象、地震、地殻変動、地球環境、生命、医療、医薬、災害、復興、経済、社会、産業、政策立案、行政に貢献できると思います。

特に政策立案、行政といったところでは、これまで我々サイエンティストの貢献は限定的だったと思います。それはある意味で専門的すぎてしまって、現実に応用するためにはいくつもの専門領域の知見を集めてこななければならないということがあって、なかなか役に立ちませんでした。今後オープンシステムサイエンス的な考え方を入れることによって、こうした分野への貢献も可能になってくるのではないかと思います。

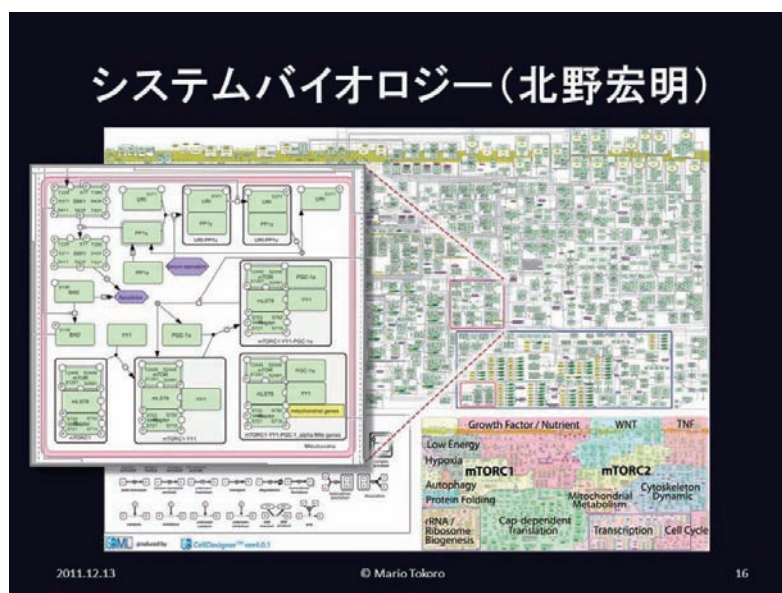
■ オープンシステムサイエンスの成果



図－15

〈図－15〉 ご説は分かったけれども、具体的に本当に役立つのかという疑問を皆さんお持ちだと思いますので、事例をお話させていただきたいと思います。この多くはソニーCSLで行ったものです。一番下の研究は科学技術振興機構（JST）のCRESTの予算をいただいて、私自身が研究所の外でやっている研究成果です。こういうところにオープンシステムサイエンスの考え方がピッタリ合って、たいへんいい成果を上げていると考えています。

■ 成果例①オープンシステムバイオロジーの確立



図－16

〈図－16〉 最初はシステムバイオロジーです。これはソニーCSLの現在の社長で、研究所所長の北野宏明が十数年前に考えついた方法です。北野はもともとコンピュータサイエンスや人工知能の学者でしたが、人工知能をいろいろやってみてもどうも埒が明かない、もっと

本質的なことをやりたいということで、生命や生物という方向に彼の興味が移っていきました。

彼は、生物学者や病理学者たちが出した個々の要素還元主義に基づいた研究成果、例えばある部分がある状態の時に、ある変化が起こるとこうなる、といった結果を集めてデータベース化して、専門用語で言うとパスウェイネットワークというネットワーク構造を作成していきました。そして、これで老化のシミュレーション、線虫やショウジョウバエなどの発生過程のシミュレーションができることを発見しました。

そして彼がたどり着いたのは、生命というのはネットワークの構造として表せるかもしれないと言い出したわけです。そして、ネットワークの構造とその変化をシステムとして捉える、「システムバイオロジー」という学問領域を創りました。2000 年頃にはこれをかなり明確な形で提唱して、教科書を書き、また MIT Press から「Journal of Systems Biology」というジャーナルを発刊しています。最近では、おそらく世界中で 20 校以上の大学がシステムバイオロジー学科や学部を構成するようになってきています。

具体的な成果としては、がんの発生メカニズムの解明、ロングテール医療による治療法などがあります。がんというのは、ネットワークの中のどこかがやられてしまうわけですが、そこを標的として何か薬を打ち込む。これでがんが治ればいいのですが、もし治らないとがんが変化してその薬剤に対抗する力をがんが持ってしまい、再発してしまう。こういったことが分かってきています。

そうした中で、どこかが悪いとしたらそこだけをやっつけるのではなくて、真綿で締め付けるようにその周りのノード（ネットワーク内の個々の要素）に対しても低量の薬剤を投与すると、これで全体的にがんが良くなっていく。そのような治療法を提唱して、実際の医療や製薬の現場でも使われるようになっていきます。

■ 成果例②エピジェネティクスがもたらすヒトの多様性

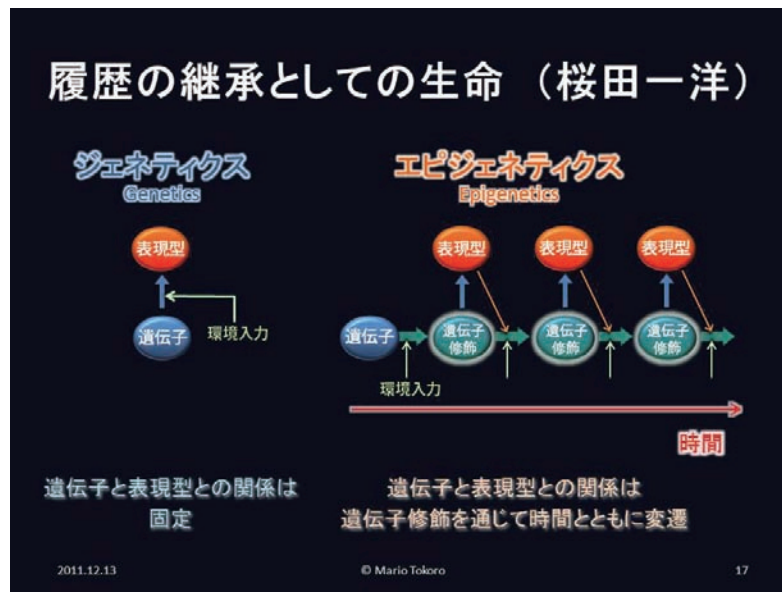


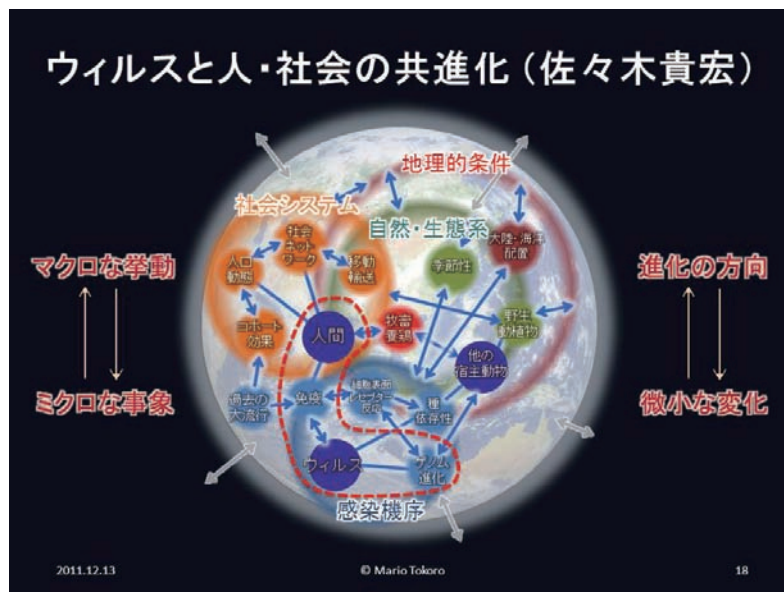
図-17

〈図-17〉 ソニーCSLに桜田一洋という研究者がいます。桜田は、幹細胞による組織維持機構がヒトの疾患の発症と治療に重要な役割を果たしているとの知見を得て、幹細胞創薬と再生医療という領域を開拓しました。その中でエピジェネティクスの重要性を唱えています。エピジェネティクスというのは、ジェネティクスに対抗するものです。ジェネティクスというのは遺伝的な情報ですが、エピジェネティクスというのは遺伝的な情報の後の情報で、DNA配列の変化を伴わずに伝達される、遺伝子の機能変化を言います。

具体的にはDNA配列の修飾ということになりますが、細胞分裂をする際に内部および外部環境からの入力を、エピジェネティクスとして細胞内に記憶する、動的で不可逆な過程が備わっています。それぞれの人によって遺伝子は少しずつ異なりますが、これをベースにして個別の医療をやっていこうという考え方が、最近だいぶ進んできました。桜田はこれに加えて、エピジェネティクス、すなわち遺伝子プラス後天的な経験、それまでの病気など、いろいろな環境情報を入れた形での個別の医療をしていかなければならない、ということを強く唱えていて、その方法論を開発しています。

また、遺伝には後天的なものは影響しないとされていましたが、そうでもないらしいのです。遺伝子から、環境入力で遺伝子修飾がされて表現型になっていく。さらにこれが世代間でも伝えられる部分がある。これらも含めたテラーメイド医療をしていくべきだと言っています。

■ 成果例③インフルエンザとオープンシミュレーション



図－18

〈図－18〉 その次は、佐々木貴宏という研究者が行っている研究です。佐々木は、病原体と人や社会がどのように共進化していくかということ、コンピュータ上でシミュレーションすることにチャレンジしています。具体的には感染症、実際はインフルエンザを例にしていて、インフルエンザがどのように伝播するかを、コンピュータ上のモデルで再現しています。

こうした話はこれまでないわけではありませんが、これまでのほとんどが「病原体対ヒト」という形の、二項対立的な現象の捉え方として行われてきました。すなわち、ウィルスと人間の間の遺伝子と免疫の関係、という形で解こうとしてきました。彼はそうではないだろう、まずウィルスについてはゲノムの進化がどんどん行われて常に変化している。人間について言えば、単に 1 人の人を取り出してきて、ウィルスとの関係という形で問題を解くことはできないのではないか、こういったことを言い出しました。

人を延長した先には社会があり、病原体の奥にはその源流としての生態系があり、それらもすべて一括りにした形できちんと理解していかなければいけない、ということを行っています。これはまさに、オープンシステムサイエンスそのものなのです。人間の周りに牧畜、養鶏、他の宿主、野生生物種、大陸海洋配置、季節性の問題、飛行機などの移動・輸送があり、社会ネットワーク、人口動態、コホート（共通の因子を持った個人の集合）、過去の大流行などを、全部統合してやっていかなければならないのです。

彼は、ウィルスのゲノムの進化に焦点を当てています。ゲノムは毎年の季節性インフルエンザでも多少変化していますが、大きな変化はありません。しかし何年かに 1 度、香港何型とかロシア型という大きな変化があって、これがパンデミック（世界的流行）になります。これがどうして起こるのか。少しずつの蓄積だけでは説明しきれない。そういうものを何とか解こうとしていて、全体をひっくるめた形での解決に向けて努力をしています。

■ 成果例④人工システムのディペンダビリティー

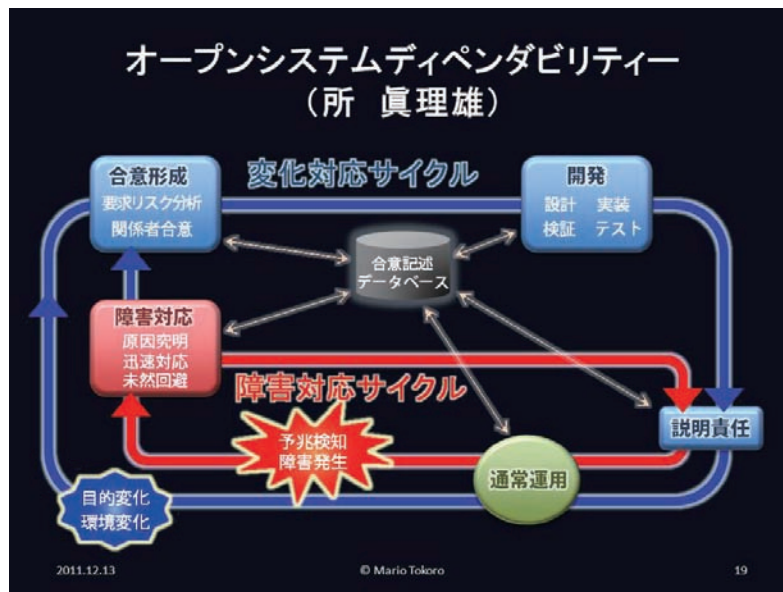


図-19

〈図-19〉 例はいくつもありますが、最後の例としてこれは私自身がやっている問題領域で、エンジニアリングの問題です。巨大で複雑な人工システムのディペンダビリティーに関する研究です。ディペンダビリティーというのは安全性や信頼性などをひっくるめて、安心できるということを総称する用語で、一言で言えば頼りがいがある、ということになります。

我々が毎日使っているシステム、例えば銀行システムや証券システム、製造業、物流業、販売業など、現代の企業はネットワークと巨大なソフトウェアをベースにしてビジネスを行っていると言っても言いすぎではありません。さらに我々の毎日の生活を考えてみれば、こちらに来る時にも信号機が連携して点滅している。さらには電車に乗る時に、Suicaをかざすとそこでゲートが開いて乗ることができる。運行システムも、コンピュータでコントロールされた形で車両が運行されている。飛行機でも同じように管制システムがある。

このように、現在のシステムというのは、複雑で巨大なソフトウェアとネットワークからできている。もちろんメカニカルな部分も入っている。そして、もともとある目的のために作られたシステムが、後で他のシステムともつながってしまうという意味で、なかなか追い切れないくらい極めて複雑になっています。例えば今、JRの改札口システムはどうなっているのかと聞かれても、そう簡単に答えられません。それは毎日変化している。そういった状況になっています。

しかし、そういうものの中で我々は生活していますし、それらが安全で安心して使えるようにしていかなければならない。どうやったらディペンダビリティーが確保できるのだろうか。あまり細かいことは申し上げませんが、その方法というのはまず障害が起こることを前提としてシステムを作ることです。

今までのやり方だと、障害が起こらないことを前提としていました。起こらないように作った。ところが、起きてしまった。福島原発でもそうだと思います。しかし、起こること

を前提として、起こった場合に被害を最少にして、サービスをできるだけ継続する。そのためのシステム設計と、運用に関する十分な合意を取っていこうと考えました。

最初にシステムを作って、それがどんどん変化していきますが、その間にも常に関係者が合意を形成していった、システムに変更を加えていく。万が一何か起こってしまった場合は、きっちりと説明責任を果たさなければいけない。今の企業の最大の問題は、社会的な責任の全うです。これは「説明責任」ということになります。

これを行うために、合意形成と説明責任の間に合意記述のデータベースを置いて、物を作る時にどう作ったか、どう変更したかを必ずこの中に入れておく。また、なぜそれを行ったかということも入れておく。それでも事故が起こってしまう。起こってしまった時には、できるだけ未然回避して迅速対応、被害最少、原因究明をし、これに基づいたフィードバックを合意形成のところに戻して、システムを変更していく、もしくはその場の対応をしていく。そして説明責任を全うしていく。こういった方法が必要だということで、開発を進めています。

これまでは、実際の開発で使われるところと運用時に障害が起こったところが、別々のシステムとして設計されていました。これを統合してすべての情報を 1 つの合意記述データベースに押し込めることによって、常に変化しているシステムに対して、常に障害の対応ができることになります。この方法はたいへん新しい方法なので、現在 ISO/IEC などを用いた国際標準化が進められています。この作業はまだ 2、3 年かかってしまうと思いますが、そうした形で我々の考えたものが世界の標準として、世界中の人工システムの安全性に寄与していくことができるのではないかと考えています。

■ まとめ～生き方の科学としてのオープンシステムサイエンス～

まとめ

- ・ 複雑、巨大、常に変化する統合システムの問題
- ・ 未来予測、解決に向けて施策の実行を要する問題
- ・ 「問題解決」の意味:
「解析」、「合成」+「マネージメント」
強力・完全な解 より良い方向へ
- ・ オープンシステムサイエンスの提案
対象領域のモデルを変えたり、
対象領域自体を変化させながら解決策を探る方法論
- ・ 何が可能になるか
現実の問題のより良い未来予測を説明可能な方法で行える

2011.12.13 © Mario Tokoro 20

図－20

〈図－20〉 では、まとめに入らせていただきます。現在我々が取り扱わなければならない問題は、複雑、巨大、常に変化する統合システムの問題です。そうでない問題は大体解けて

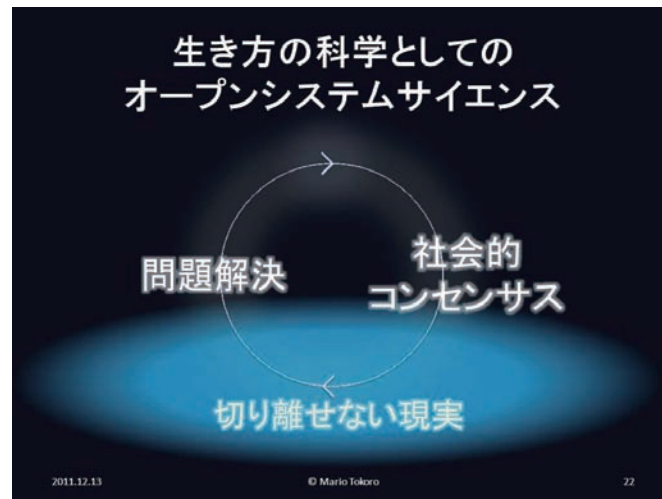
しまいました。未来を予測し、解決に向けた施策の実行を要する問題、今何かしなければいけない、しないでおくということはより悪くなる。こうした問題です。

そうすると、今までのような意味で問題が解けた、解けないではなくて、より良い方向に向かって毎日努力していくことが重要になります。その意味では、解析、合成に加えてマネジメントが必要である。強力な解が求められればいいけれども、全部に対して強力な解は求められない。そういう場合には、より良い方向に持っていくべきである。そのための方法として、オープンシステムサイエンスを提案しました。対象領域のモデルを変えたり、対象領域自体を変化させたりしながら、解決策を探っていくという方法論です。この結果、現実の問題のより良い未来予測を、説明可能な方法で行えるのではないかと思います。

要素還元主義とオープンシステムサイエンス		
Reductionism		Open Systems Science
定常システム	対象	時間とともに変化するシステム
基本原理の解明	目的	相互関係の理解による解決
内へ	方向性	外へ
現実から切り離して取り扱う	対象の扱い方	現実の中で取り扱う
強力・完全な解	求められる解	より良い方向への行動
責任の切り離し	責任	責任の継続
正義	立脚する価値観	人間性
職業としての科学	態度	生き方としての科学
2011.12.13	© Mario Tokoro	21

図－21

〈図－21〉 もう一度、要素還元主義とオープンシステムサイエンスを比較してみます。対象が定常システムであるのに対して、時間と共に変化するシステムである。目的は基本原理の解明であったのに対して、相互関係の理解による解決になってくる。方向性は、リダクシヨニズム（要素還元主義）だと内側に向いていたのに対して、オープンシステムサイエンスでは外側に向いていく。対象の取り扱いも、現実から切り離して取り扱うのではなくて、現実の中で取り扱っていかなければならない。求められる解が、リダクシヨニズムでは強力で完全な解であったのに対して、オープンシステムサイエンスではより良い方向への行動である、とすることができると思います。その結果、切り離しができないので責任も切り離せない。自分が何かを実行してしまうと、その責任は継続する。こういうことになってきます。



図－22

〈図－22〉 ここでようやく、タイトルにあげさせていただいた、生き方の科学としてのオープンシステムサイエンスの話になります。先ほど申し上げたように、1995 年位まで自分で一生懸命に研究していても、私には非常にフラストレーションがありました。それは、内に向かっていくことだけをやっていました。でも、自分の研究テーマは実際には外に向かっているテーマだった。そういったところでのフラストレーションが、オープンシステムサイエンスという方法論を考えることによって、非常に緩和されました。自分は本当に人の役に立つことをやっているのだということを、ちゃんと自信を持って言えるようになったのです。そういったわけで、オープンシステムサイエンスを考えてきて良かったなと思っています。

オープンシステムサイエンスにおける問題解決というのは結局、社会的なコンセンサス、この社会というのは誰かという大きな問題がありますが、大きく言えば社会的なコンセンサスを得ることができる、ということだと思います。

問題解決がされたというのは、社会的なコンセンサスをベースとしていますが、サイエンスというのは一方において、社会的なコンセンサスを得るための道具でもあります。サイエンスを用いて、社会的なコンセンサスを作っていく。社会的なコンセンサスをもとに、問題を解決していく。もしくは、「問題がある程度解決された。一応ここで満足しよう」ということが言える。こうしたループになってきているのではないかと思います。

さらにオープンシステムサイエンスの特徴というのは、現実世界との切り離しができない、ということにあると考えています。外への科学は、すなわち現実から切り離さない科学です。現実の中で取り扱う科学、表現を変えると、現実の中にある科学ということ忘れてはいけません。今やっているものは現実の中に常にある。そういう科学的な態度ではないかと思います。責任が切り離せないというのは継続するということですから、その時点で最善の努力をして、ひょっとしたら間違っているかもしれない、という可能性も含みながら行動していかなければならない、ということになってくると思います。

このように、対立から協調の科学へ。自分の周りにも常に目を配って、こちらが解けてあっちも解ける。あちらが解けて自分の部分も解ける。これらを常に考えていく科学が必要ではないかと思っています。そして、少し言い過ぎかもしれませんが、この方向を進めていく

ことで、正義のための科学ではなくて、人間性のための科学、もしくは人間性と相反しない科学、人に優しい思いやりのある科学ができてくるのではないかと思います。

もちろん科学には専門性が必須です。そしてそこには、職業としての科学があります。しかしながら同時に、生き方としての科学、それも万人の生き方としての科学があると思います。しかしこれらが現在、大きく離れてしまっているように思えてなりません。これらは分かれてはいけない。常に共通の基盤の上に立っていなければならないと考えています。

最後の方はサイエンスの話からずれてしまったところもあるかと思いますが、私の最近考えていることを皆様にご披露させていただきました。ご清聴ありがとうございました。

〈MEMO〉

- このレポートは平成 23 年 12 月 13 日東商スカイルームにおいて行われた、第 120 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。本田財団のホームページにも掲載されております。講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得て下さい。

発 行 所 **公益財団法人 本田財団**
104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103
<http://www.hondafoundation.jp>
発 行 者 原 田 洋 一