

21世紀のシステムをどう捉えるか

How Should We Recognize Systems in 21st Century ?

吉村 忍

Shinobu Yoshimura

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻
Department of Systems Innovation, University of Tokyo

Abstract: Department of Systems Innovation has been initiated in Graduate School of Engineering, University of Tokyo since April, 2008. For the purpose of considering the direction of the researches and education in the Department, this article describes how we should recognize systems in 21st Century, referring to the discussion of Science Council of Japan about Large Scale and Complex Socio-Economical Systems and the capability for innovation of such systems.

21世紀の社会と工学

人口が増大し、環境・エネルギー・資源制約が次第に強まる中で、持続可能な社会システムの構築が人類共通の課題として浮上してきている。しかし、その課題の解決に向けての取り組みは困難を極めており、そればかりか、人間の生み出した人工システムが必ずしも人間の生活向上に役立つとは言えなくなりつつある。

どのような個人であれ、組織であれ、また人工物や、専門技術であっても、それら単体が独立して存在することは極めて稀であり、周囲の環境や複数の他者との関係性を有し「システム」を構成する。このような観点から、個々の要素だけでなくさまざまな要素の総体として全体を捉えるシステム思考の重要性が指摘されて久しい。

現在、工学が扱うべき対象である人工物あるいは人工システムは、「ターゲットの拡散」、「スコープの拡散」および「ディシプリンの拡散」という3つの拡散現象の潮流に直面している。

ターゲットの拡散： 従来は構築物や工業製品などの物象的人工物の設計と製造技術を専ら対象としてきた工学が、ソフトウェア、ヒューマンウェア、マネジメント、ロジスティックス、サービス、社会制度などの抽象的人工物の設計と実装にも関与するようになってきた。また、物象的人工物にも多様なソフトウェアやセンサーが組み込まれ、それらが他の人工物群や環境とネットワーク化されるなど、物象的人工物と抽象的人工物の融合も進んでいる。

スコープの拡散： 人工物の大規模化、複雑化が進

むにつれて、ミクロで局所的な相互作用からマクロで大局的な相互作用までを連続的に考慮することや、設計と製造だけではなく企画、維持管理、廃棄、再利用といった人工物のライフサイクルを扱う必要が生じてきた。

ディシプリンの拡散： 科学技術の社会全体への影響が大きくなり、また抽象的人工物の設計と実装に関与するにつれて、従来の自然科学系、数理科学系の限定された知識や視点だけでは問題解決が困難になり、分野横断のおよび、分野特有の知識、視点、方法論が幅広く要求されるようになってきた。

さらに、20世紀終盤から21世紀初頭にかけて、ある種の人工システムは、われわれの認識をはるかに超えて巨大複雑化し、かつ社会経済的にも大きな影響を持つものが増えてきている。

第20期(2006.10-2008.9)の日本学術会議 総合工学委員会 巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会では、「空間的ないし物理的ないし社会的広がりが巨大であり、その中に内包される多数の要素の相互関係が複雑であり、かつその性能と信頼性が社会や経済に大きな影響を与えるシステム」を、「巨大複雑系社会経済システム」と定義し、その本質的特性の抽出を行い、その創成力を強化するための方策に関する提言を2008年6月に発表した[1]。巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に関する議論は、2008年10月からスタートする第21期学術会議においても引き継がれたが、本講演者はこの分科会に幹事として関わってきた。本講演では、システム創成学の教育研究の方向性について、この観点から議論を行いたい。

システム創成学専攻の設立理念と重点分野

2008年4月にスタートした東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻の設置目的は、人間、人工物、自然を多面的、俯瞰的視点からとらえるシステム科学を基礎として専門領域に細分化された工学知を統合し、自然や社会と調和のとれた革新的システムの実現のための原理と方法論に関する研究教育を展開する、ことである。

さらに、専攻の設置目的を達成するために、以下の4重点分野・1プロジェクトについて教育研究活動を展開することとした。

(1) 人工物ネットワーク

先端科学技術の応用による単体としての人工物の設計製造ばかりでなく、複合的な社会環境での使用を考慮した合理的実装が必要となる。そこで、時空間的に配置された多数の人工物で構成されるシステム(System of Systems)を対象に、全体最適化および個別要素の設計、製造、運用を高度にマネジメントするための方法論を確立することによって、ものづくりの新たな視点を確立し、新しい価値を創出するための工学についての研究・教育を展開する。

(2) グローバル循環システム

グローバル化された循環社会を構築するためには、循環すべき対象として、資源、エネルギーや人、製品をはじめ、情報、価値、サービスなども考慮しなければならない。従来、局所的なシステム構築だけではなく、多面的、俯瞰的視点から、工学知の統合や、グローバルなモデル化などのアプローチが必要不可欠である。そこで、自然、人間、社会、人工物の共生を達成し得るグローバルで高付加価値の循環システムに関する研究・教育を展開する。

(3) 社会経済システム

人間の認知心理や行動決定に関する知見と、社会経済現象の数理に関する知見を基礎として、人間行動を明確化し、数理モデルに基づくシミュレーションを活用するなどして社会経済システムに関わる制度や機能の設計、実現を可能とし、活力ある豊かな社会の実現に貢献する工学についての研究・教育を展開する。

(4) 先端知デザイン

最新の科学的知見や最先端の技術イノベーションを駆使し、既存システムを根本から再構築することにより、新たな機能をもつ革新的システムの創出が

期待できる。そこで、先端的工学知や他分野との境界領域に発生した工学知の活用、さらにそれらを複数組合せることによって新たな工学知を生成することによるシステム創成の方法論について研究・教育を展開する。

(5) サービスデザイン

サービスは自然産品でも工業産品でもない対象を扱う経済活動(第3次産業)と考えられてきたが、ITの発達によるサービスの多様化、高度化や製造業に伴うサービス業務の展開によって、特に先進諸国においてその比重が増している。一方、抽象化された機能の総体としてサービスを捉えるならば、経済的な効用だけをサービスに期待するのではなく、多様な価値による効用を熟慮しなければならない。そこで、価値に対する不完全な評価を許容しながらも価値の最大化を議論できる評価手法や、サービスのモデリング、シミュレーションのための新たな工学知を創出することによって、サービス・システムの最適化、イノベーションを実現するための研究・教育を展開する。

巨大複雑系社会経済システム

システム創成学専攻で取り上げた4重点分野、1プロジェクトの位置づけについて再考するために、日本学術会議での「巨大複雑系社会経済システム」に関する議論[1]を振り返ってみよう。

巨大複雑系社会経済システムとは、空間的あるいは物理的あるいは社会的広がり巨大であり、その中に内包される多数の要素の相互関係が複雑であり、かつ社会や経済に多大な影響を与えるシステムと定義する。ここに、社会経済システムと呼ぶ理由は、このようなシステムは、経済的活動を通じた社会システムとして我々に作用するからである。巨大複雑系社会経済システムは、システムの巨大さ、複雑さ、社会経済との関係によって、いくつかの形態がある。

第一は人工システムが単体として大規模複雑系であるものである。宇宙システムなどがこれにあたる。第二は単体として大規模であっても構造は複雑とは限らないが、社会経済と複雑に相互作用するので、巨大複雑系社会経済システムと考えるべきシステムである。原子力システムなどがこれにあたる。第三は、単体として規模は大きくないものの、人間の介在により結合されて巨大なネットワークを構成し、その間の関係性が複雑となり、社会経済システムに埋め込まれた人工システムがある。例としてはインターネットなどがあげられる。

表面的には様々な形態をとる巨大複雑系社会経済システムであるが、それらには次のような共通特性

がある。

第一の特徴は、巨大複雑系社会経済システムにおいては、ある特定のシステムに着目しても、設計・開発段階や利用・普及段階、あるいはシステム創成の初期段階や発展段階によって、システムの主な特性が大きく変動するという点である。たとえば、原子力システムは、設計・開発段階ではシステムの設置者と規制側がトップダウン的に、しかも限られた専門家のみが関わりクローズドな状況で設計される。しかし、利用・普及段階では、様々な不特定多数の人間（ユーザであったり、地域住民であったり、保守点検にあたる検査官や作業員など）が係ることになることから、ボトムアップ的でオープンなシステムとしての特性が顕著になってくる。

宇宙システムにおいても、衛星は事業者のトップダウンのかつクローズドなシステムとして設計・開発・運用されるものの、通信など社会への展開を考えるとボトムアップ的でオープンなシステムとなってくる。

携帯電話については、個々の機器を設計するプロセスはトップダウン的であるが、それがマーケットの中で利用され、そこで出される要望が設計・運用側にフィードバックされながら次第に成長するプロセスはボトムアップ的である。さらに技術の普及が進むと技術の標準化の機運が生じ、これはトップダウン的に進められる。すなわちボトムアップ的行為とトップダウン的行為が相互作用しながら、さらにシステムが成長する。

第二の特徴は、巨大複雑系社会経済システムにおいては、さまざまなフェーズにおいて人間系が深く関与し、その関与の仕方がそのシステムの特徴付けに重要な役割を果たしているという点である。たとえば、少数の専門家が構想や設計に関連する場合から、多様な専門的バックグラウンドを有する専門職員や技術者、作業員が製作、運用・管理に関連する場合や不特定多数の一般ユーザがマーケットを介して関連する場合まで幅広い。また、社会や人間系との関係においてそのシステムの価値が決まってくる。

人工システムのクラス分類

人工システムの特徴を、それを取り囲む環境とそのシステムの目的という視点から、次の三つのクラスに分類し捉えることとする。

クラス I: 完全情報問題

目的および環境に関する情報が観測者にとって既知であり、問題を完全に記述できる。このクラスの問題では、最適解探索が中心課題となる。

クラス II: 不完全環境情報問題

目的に関する情報は既知であるが、環境に関する情報が観測者には予測できず、問題を完全に記述できない。このクラスの問題では、環境の変化に応じて適応的解探索が中心課題となる。

クラス III: 不完全目的情報問題

環境ばかりでなく、目的に関する情報も観測者には予測できず、問題を完全に記述できない。このクラスの問題では、目的も同時に決めていく必要がある共創的解探索が中心課題となる。

クラス I は、環境と目的に対してクローズドなシステム、クラス II は、環境に対してオープンなシステム、クラス III は目的（設計や管理の行動主体）に対してもオープンなシステムといえる。

クラス II, III としての巨大複雑系社会経済システム

巨大複雑系社会経済システムにおいては、人工システムを社会（環境）や人間（目的）から孤立した系として扱うことはできず、本質的にクラス II ないしクラス III のシステムとならざるを得ない。また、たとえ設計時にはクラス I の人工システムとしてクローズドな環境でトップダウン的に設計されたとしても、利用され、普及することによって、後天的にクラス II ないしクラス III としての特性を帯びようになる。クラス II あるいはクラス III としての特性を有するシステムを、クラス I であるかのように認識し取り扱うときに様々な齟齬が発生する。

したがって、個々の巨大複雑系社会経済システムの表層の特性に惑わされることなく、クラス II ないしクラス III としてのシステムの本質的な特性を理解した上で、そのようなシステムを構想、設計、製作、管理・運用できることが肝要である。

なお、巨大複雑系社会経済システムの創成においては、個々の要素技術よりも、これらのシステムのシステムコンセプト、システムアーキテクチャ、ビジネスモデル、デファクトスタンダード、サービスデザイン、リスク管理手法、成長するシステムなどの創成力がより中心課題として浮上してこよう。

システム創成学のメインターゲット

様々な「もの」「こと」を個々の要素の単なる集合ではなく、それらが有機的につながったシステムとして捉えることの重要性は、さまざまな場面、さまざまな分野で指摘されている。また、我々はそう

したシステムを扱うためのシステム科学の様々な方法論を獲得してきた。しかし、21世紀においてシステム創成学が主たるターゲットとすべきシステムは、クラスIのシステムではなく、クラスII, IIIとしての特性を有する巨大複雑系社会経済システムであり、それらを如何にデザインし、制御し、運用していくか、について研究、人材育成の両面から積極的にチャレンジしていくべきであろう。

いくつかの事例をあげよう。交通・輸送の基本技術は、自動車や列車、船舶などの人工物であるが、低燃費で安全性に優れた人工物を構築できれば、交通の引き起こす諸課題、すなわち交通渋滞や環境負荷、交通起因のCO₂問題、都市の空洞化、地方の公共交通衰退、物流などは解決するであろうか。交通問題における環境は何か、目的は何か、利害関係者は誰か、ということ突き詰めて考えて行くと、巨大複雑系社会経済システムとして交通システム、交通の関わる諸現象をとらえ直し、クラスII, クラスIIIとしての特徴を考慮した上で、課題の解決に取り組むことの重要性が浮かび上がってくる。

原子力システムにおいても、同様の問題認識が可能である。個別の原子力技術のレベル向上を図り、それらを寄せ集めるだけで、次世代原子炉を実現できるのか。また、自然現象と人工システムの相互作用が本質的な問題であり、しかもその影響が様々な利害関係者に及ぶ原子力耐震問題を、要素技術の視点だけで解くことができるのか。むしろ、巨大複雑系社会経済システムとして原子力耐震問題をとらえ直し、クラスII, クラスIIIとしての特徴を考慮した上で、課題の解決に取り組むことが肝要であろう。

さらに、サービスの問題を考えると、すぐれた技術を実装したサービスが必ずしも社会的価値を有するとは限らないことは自明であろう。また、サービスの目的も、提供者から見れば、サービスによって金銭的な利益を生み出すことであるが、ユーザにとっては、サービスの価値や満足度は、各個人の感性や心に依拠する問題となる。

また、従来日本の国力の源泉の一つであった製造業分野においても、今やモノづくりプロセスにおいて単に生産効率を上げることが本質的な課題なのではなく、いかにして、消費者に受け入れられる人工システムを効率的に生産できるか、持続可能社会づくりに貢献できる人工物を生産し、提供するのか、そのための方法論の開発が求められている。ここでも、ものづくりプロセスを巨大複雑系社会経済システムとしてとらえ直し、クラスII, クラスIIIとしての特徴を考慮した上で、課題に取り組むことが求められる。

この他、金融問題、医療問題、環境・エネルギー・

資源問題、など、巨大複雑系社会経済システムとして捉えるべき課題は増えてきており、システム創成学においては、そうしたシステムを分析・理解するための方法論、設計・運用するための理論・方法論を構築し、果敢に巨大複雑系社会経済システムの創成に挑戦していくことが期待されているのではないだろうか。また、そのための人材育成に取り組んでいくことこそが求められていると感じている。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、システム創成学専攻内での議論及び日本学術会議 総合工学委員会 巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会の議論を大いに参考にさせていただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 柘植綾夫他：提言「巨大複雑系社会経済システムの創成力について」、第20期日本学術会議 総合工学委員会 巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会、(2008.6)

オープンシステム：システムの設計要件が外部環境から影響を受けて変化し、構成要素も外部環境との間で出入りがある。このため、システムは外部環境から常に影響を受けている。環境変化に対応して柔軟にシステムの変化や進化が起こる、また、後発の要件や構成要素を取り込めるという利点がある反面、意図的な制御が困難になるという欠点もある。

共創：狭義には、複数の主体の相互作用によって、有効な解を創出することであり、普通、主体の組み合わせには、人工物と人工物、人と人工物、人と人、組織と組織などがある。ここではさらに、環境や目的に関する情報が不完全な状況下において、成立可能な人工システムの機能と、環境や目的を同時に創出すること。

クローズドシステム：システムの設計要件や構成要素（人間系を含む）が確定しており、それらの情報のみで自己完結的にすべてが決定されるシステム。統合度を高められるという利点がある反面、システムの変更がしにくいという欠点がある。

トップダウン型システム：比較的少数の設計者によって、問題設定、要求仕様設定、設計、構築の順に構築されるシステム。

ボトムアップ型システム：個々の構成要素や個々の設計要件に埋め込まれた情報を手がかりとして、システムが自発的に構成されるシステム。