



システムは先端技術を現代社会に接地する

木村 英紀*

Systems is the Contact Surface between Advanced Technology and Modern Society

Hidenori KIMURA*

Abstract— Increasing complexity of the modern society that requests diversified services need excellent systems to connect advanced technology and the society. The systems innovation is the advent of constructing, operating and evolving excellent systems. This article presents a general perspective of systems innovation in the past, present and the future. Special emphasis is placed on the role of systems innovation that converts manufacturing industry to service industry through the progress of automation. Also, the characterization of excellent systems is presented with relation to digitalization.

Keywords— Systems Innovation, Excellent Systems, Automation, Services

1. はじめに

言うまでもなく私たちはシステムに囲まれて生活している。家電製品も自動車も PC も携帯電話も、使っている工業製品はほとんどが複雑なシステムである。私たちの生活を支えるライフラインである電気やガスや水も複雑な供給システムを通して送られてくるし、鉄道やバスなどの交通機関や郵便・宅配便などあらゆる流通のネットワークもシステムである。

銀行やクレジットカードなどの決済も巨大なシステムが背後で動いている。さらに言えば、税金や年金、医療保険、株式市場などもシステムとして機能している。身の回りでシステムでないものを見つけるのは難しい。システムが社会にもたらす恩恵はこのように限りなく大きい。それにも拘わらず私たちはシステムそのものを「見る」ことは出来ない。私たちがシステム化された社会で生きていることを感じるのは、しばしば発生する「システムの障害」に出会うときである。ある場所で起こった小さな不都合がシステムを通して広い範囲で大きなダメージを生み出す。システムは「現代の魔物」といってよい。

システムは私たちの周辺の「もの」や「コト」が共通

して持つひとつの属性である。システムという共通性を抽出することによって見えてくるものは何か？それが現代の社会や経済や技術を理解するうえでどのような意義をもつか？本稿ではそれを私たちの味方に手なずけるにはどうしたらよいか？を考え、その課題に技術がこれまでどのように対処してきたかを述べるためにシステムイノベーションの事例を紹介する。システムイノベーションを日本でも推進するために最近設立された「システムイノベーションセンター（SIC）」の活動とその理念についても触れる。

2. システムイノベーションの歴史

システムは「要素を集めて一つの目的を達成する統合体である」と定義されている [1]。これは昔からあるシステムの定義である。確かにシステムは要素の集まりであるが、要素はさらに詳しくみればシステムでもあるし、システムもその上位のシステムから見れば要素である、という要素とシステムの持つ二面性に注意する必要がある。どちらの視点に立つかで見方が大きく変わるが常に両者の側面を意識する必要がある。この二面性が技術の本質であることはすでに 60 年以上前にアーサー・ケストラーが指摘している [2]。

ここ 10 年ほどイノベーションの議論が盛んである。ところがイノベーションの議論ではなぜか要素の見方が支配的である。要素の見方とは、対象の特定機能に注目

*一般社団法人システムイノベーションセンター副センター長
東京都新宿区西新宿 6-12-7 ストック新宿 1F B-19 号

*Systems Innovation Center, Stoke Shinjuku 1F B-19, 6-12-7 Nishi Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo

Received: 20 April 2020, Accepted: 13 May 2020.

し、そこでの性能評価を閉じた基準で行うことである。新しい材料やデバイスの発明、機器の性能の飛躍的向上など、要素技術のブレークスルーがイノベーションとして認知されてきた。イノベーションの事例研究として定評のある [3] では日本におけるイノベーション 23 例について議論しているが、これらはすべて要素技術である。実は海外でも同じような偏りがみられる。イノベーションの議論で必ず引用されるクレイトン・クリステンセンの「イノベーションのジレンマ」[4] でも、取り上げられているのはすべて要素技術である。それではシステムの側にイノベーションがなかったのだろうか？ もちろんそうではない。システムにも巨大なイノベーションが林立しているのである。すでに述べたように私たちが生きている現代はシステムの時代である。むしろシステムにおけるイノベーションが技術をけん引して来たと言っても過言ではない。技術の歴史から二つのシステムイノベーションの事例を取り出してこのことを示そう。

おそらく現代技術の歴史でもっとも大きな意義をもつシステムイノベーションは 20 世紀初頭の電力の発送電システムであろう。これを推進したのはトーマス・エジソンである。19 世紀末の白熱電球の発明競争に勝ち抜いたエジソンは、「誰でもいつでも好きな時に好きなだけ」電力を使えるシステムの構築を目指してニューヨーク市内に発電所を建て、近隣のユーザに送電を開始した。これが全米に広がる送配電のネットワークになるには 30 年の月日と膨大な研究開発の努力を必要としたが、エジソンの描いた当時としては空想の域を出なかったプランが完璧に実現したのである。このための技術は要素の開発も必要であったが、主として今でいう電力ネットワークにかかわるシステム技術がコアとなっていたのは間違いない。特に負荷変動にも関わらず周波数と電圧を一定に保つ制御技術は困難なシステム課題であった。

電力ネットワークとほぼ同じ時期に製造業の分野で起こった大きなシステムイノベーションは、ヘンリー・フォードのコンベアラインによる自動車生産システムである。コンベアベルトを用いた流れ作業による生産は軽工業や食品加工などでは 19 世紀末から用いられてきたが、自動車のような重くて部品数がたくさんある製品にはコンベア生産は無理だと思われていた。フォードは数年間のたゆまぬ生産方式の改良を重ねて T 型フォードの製造でそれをほぼ完全な形で実現した。T 型フォードの価格は約 4 分の 1 になり、それを製造したハイランド工場の生産量は 5 倍になったという。これによって、金持ちの専有物であった自動車は庶民にも手の届くものとなり全米にモータリゼーションの波を引き起こしただけでなく、工業製品としての自動車の標準形式とその生産システムの基本概念を確立した点で、まさにシステムイノベーションの名にふさわしい。1913 年に公開された

ハイランド工場のラインの「デトロイトジャーナル」の記事見出しは、「システム・システム・システム」だったそうである。

他にもシステムイノベーションの例は技術史上数多い。軍事面ではイギリスのレーダを主な要素技術とした全土の防空警戒網がある、その他アポロ計画、そしてインターネットとその上での検索システム、GPS などきりが無い。日本でも新幹線の運行予約システム、年産 1000 万トン達成した製鉄所の生産管理システムなどで先導的な力を発揮した。これについては参考文献 [5] を参照されたい。

技術史を紐とくと、このようにシステムイノベーションが技術の進歩を強力にけん引して来たことが分かる。システム化が進むことによって技術は高度となり社会は複雑になっていく。要素技術の新しい成果がシステムによって社会に展開されそれを通して人々の生活が向上し快適性が増す。システムは技術と社会の接点であると言ってよい。システムの発展を軸とした技術史を描くことは今後に残された興味ある課題である。

3. オートメーションとシステム化

ここ 10 年来「製造業のサービス業化」が話題になっているが、この現象とシステム化は関連が深い。この現象の背景にあるのはオートメーションの発展である。オートメーションはその名の通り「自動化」である。人間がやる仕事を機械にやってもらうことであり、昔から人間が技術に託してきた素朴な願いでもある。技術が発展するにつれてその願いも実現するものが増え、オートメーションは技術の進歩を促す大きな力のひとつとなった。人が経験と勘にもとづいて臨機応変にやってきたことをすべて機械に任せるには、人間がやってきたことを整理し、それを隅々に至るまで完全に機械に移し変えなければならない。言い換えれば、暗黙知を形式知に置き換えることである。そこで必要となる全体と部分を整合性をもって結ぶこと、バランスの良い負荷の配分、ボトルネックの除去などその作業はシステムを作ることとほぼ同等である。オートメーションを進めるにはシステム化を進めなければならないし、よいシステムが出来上がるとオートメーションの性能は向上する。オートメーションとシステム化は手を取り合って進歩の道を歩んできたと言ってよい。

製造業のオートメーションはプロセス産業から始まった。イギリスの化学工場で、人間が計器を見ながら操作していたバルブの開閉を計算機の出力で置き換えた「直接計算機制御」(DCC) が実現し話題になったのは 1950 年代の後半である。組み立て加工産業でオートメーションを推進したのはメカトロニクスであり、その頂点に立

つのがロボットと工作機械である。日本が先導した分野でもある。

ロボットを生産ラインに導入して自動化（省力化）を実現しようとする、単にこれまで人がやっていた仕事をロボットに置き換えるだけでは効率向上にはつながらない。ロボットを導入するためには、ライン全体に及ぶ沢山の技術項目をクリアしなければならないので生産ライン全体をあらためてシステムとして整備し統合することが必要となる。オートメーションとシステム化が最も密接につながり合った分野でもある。

シーケンス制御はその過程で生まれたオートメーションの核となる技術である。シーケンス制御は工程を順序良くこなし、状況に応じて計算機が判断して処理を進める。様々の工具を順番に用いる加工工程を自動化したマシニングセンターは、対象物の取り付け、切削、移動、工具取り換え、取り外しなどを自動的に行う。シーケンス制御を一つの機械で実現した典型的なオートメーション装置である。シーケンス制御を担う末端の制御器の記憶容量や処理速度が大きくなると処理の分散化が始まる。分散化は計算機のマルチタスク化を必要とし、システム化に新しい課題を生み出す。例えば1990年代に日本で生まれた自律分散制御方式は、生物を範としたプロセスシステム化のひとつの理念と手法の提案であり、その優れた発想は現代でも学ぶところが大きい[6]。

やがてオートメーションは工場の外に出た。自動化の波は工場での労働からオフィスを含む様々の事業所での作業に広がり、さらに家庭や研究開発の現場に広がって行った。オフィスオートメーション、ラボラトリーオートメーション、ホームオートメーションなどの言葉が生まれ、世間でもてはやされた。関連する多くの製品とビジネスが生まれ、「サービス」の重要性がクローズアップされてきた。人々の要求に直接応じ、快適さを与えるサービスこそが究極の技術の目標であり、そこで生み出される価値が他のすべてに優先される技術の価値であるとする考え方が次第に技術の世界を支配するようになった。当たり前のことであるが、それを社会に浸透させるのに力があつたのはオートメーションの普及である。「ものづくり」に代わって「コトづくり」が強調されるようになったのもこのことが背景にある。

オートメーションはいささか手垢のついた古い言葉ではあるが、現在関心を集めている自動運転はオートメーションの極致であるように、いまだに最先端の技術開発を担う分野である。第4次産業革命も見方によってはオートメーションの究極的な実現を目指しているともいえる。

4. プラットフォームとエコシステム

今産業界で話題になっているデジタル・トランスフォーメーション（DX）とシステムの関連について述べる。本特集号の巻頭言で、齊藤氏は「DXはプラットフォーム上に作られたエコシステムが人々にこれまで以上に価値あるサービスを提供することである」と述べておられる[7]。DXについては様々の議論があるが、それらと比べて実に簡にして要を得た定義と思う。

プラットフォームという言葉が最初に製造業で使われたのは自動車産業であると言われている。自社ブランドの製品が増えるに従い、いちいちゼロから作り始めるのではなく、車体やエンジンなど基礎的な部品はすでに販売中の製品の部品を流用すれば手間もコストも節約できる。こうして複数の個別製品に共通する部品の枠組みが生まれ、それをアメリカのメーカはプラットフォームと呼んだ。日本では「車台」と称していたそうである。これは一つの企業の中での製品の間の共通性を抽出することによる効率化であるが、それを複数の企業に拡大すればもっと効果が出てくる。しかしそこには知財の問題が絡んでくるので競合関係にある同一業種の企業の間ではなかなかうまく行かない。1970年代から90年代にかけて実施された通産省（現経産省）主導の国家プロジェクトは、国の資金援助のもとに国が非競争領域を設定して企業を超えたプラットフォームを作る試みであったと言える。

サービスを主体に考えるとき、企業・業種を超えた協力は一層必要になる。人々や社会のサービスに係る要求はきわめて多様で複雑でそして変わりやすい。モノへの要求はある意味で単純で理解しやすいが、コトへの要求は多様で変幻自在であり、ユーザが望むサービスを実現するには様々の製品やサービスを組み合わせることが必要になる。「バリューチェーン」の実現である。それを一つの企業が行うのは無理がある。どうしても企業間あるいは業界間の連携が必要となる。それが新しい事業であれば、利益とリスクの配分など企業間の立ち入った合意も必要となる。研究開発と製造・販売の分業も必要になってくる。このような形での企業間連携が最近多く見られるようになったが、これは通常「エコシステム」（事業生態系）とよばれている。エコシステムは複数の企業を巻き込むので、これまで以上に複雑で大規模なサービスシステムが必要となる。このようなシステムをゼロから作り出すのは大変である。そこでそれらのシステムの共通部分が抽出され、それを担当する技術的な仕組みと経済的なメリットを保証するシステムが現われた。これがプラットフォームである。プラットフォームを利用することによってエコシステムはゼロからシステムを作る必要がなく、プラットフォームが提供する開発環境を利用して効率的にサービスシステムを構築する

ことが出来る。自動車産業で始まった車台の共有と原理的に同じことである。プラットフォームを使うことにより企業間の協業と分業の姿が互いに透明となり、意思疎通も楽になる。プラットフォームはソフトウェアの世界での OS と同じ役割を果たしているといつてよい。

このようにシステムが複雑になり、システムが目指す機能が多様化することによってシステム構築の共通部分がプラットフォームとして分離独立し、残された個別機能の実現を託されたのがエコシステムである。これはサービスの重視とその効率的な実現への要求が生み出したシステムの新しい発展の姿である。一種の分業であるが、エコシステムとプラットフォームの分離は、企業連携というサービス業の新しい要請のもとで生み出された新しい分業の姿であり、それが直接システム化にかかわっている点でシステムイノベーションの新しいパラダイムと言える。そこではモジュール化とモジュールを繋ぐインターフェイスがシステム技術の核となるが、ここではこれ以上は深入りしない。

この方式のひとつの問題は、システムの技術的な課題の多くは、要素技術・システム技術を問わずプラットフォームに託されている、ということである。エコシステムが意図する様々のサービスはその可能性がプラットフォームの能力にゆだねられ、プラットフォームの技術的な課題となる。それによって技術がプラットフォームに占有される恐れが生じる。

5. データの有用性

サービスと並んで企業間連携を促す要因はデータである。データが重視され始めたきっかけは、意思決定の合理性を担保することの重要性が次第に認識されてきたことにある。企業は日常的に様々の意思決定を行っている。意思決定を行うための要因が増え複雑化するにつれて、誤った意思決定を行ってしまう確率が増える。意思決定の精度を担保するには、そのベースとなる情報、すなわち整理されたデータが必要になる。そのデータは自社で得られるとは限らない。一般にメーカーが自社の製品の性能を向上させるために必要なデータの多くはユーザーのもとにある。例えば航空機のエンジンを作っている会社は、自社のエンジンを搭載した航空機の運航実績を知る必要があるが、それはキャリアーの整備会社のもとにある。つまりデータを価値あるものとするには、異なる業種の連携が必要となる。

最近の計算機の発達現場でのユーザーの持つ情報収集能力を飛躍的に増大し、さらに統計学やデータ科学の進展は、データが持つ可能性を大きく高めた。このように、データの利活用は、エコシステムを作る大きな動機とそのメリットの証しになっている。今後のシステム構

築ではこれまで以上にデータを確保、蓄積、整理、活用、保存することに留意する必要がある。いまデータサイエンスの振興が叫ばれているが、「何のためにデータを使うか？」の視点が抜けている議論を聞くことが多い。その意味でも、データ科学とシステム科学をセットにした振興策が必要である。

6. 卓越したシステムとは？

システムイノベーションとはシステム構築を通してイノベーションを達成することである。それにはよいシステム、もっと言えば水準を超えた「卓越したシステム」(Excellent System) を構築し、さらにそれを運用進化させなければならない。それでは卓越したシステムとは何か？ 月並みな条件はすぐにいくつか出てくる。「ユーザーの期待(価値)を満足する」「効率が良い」「故障や操作ミスが起こりにくい」「構成に透明性がある」「スケーラブルである」「コストが受け入れられる」「環境変動に容易に対応できる」などである。これらの要件をすべて満たすシステムはなかなかないが、これだけでは普通の意味でのよいシステムであり、イノベーションの名に値する卓越したシステムとは言い難い。

MIT の IDSS (Institute of Data, Systems and Society) の Director である Munther Dahleh 教授は、「システムを評価する軸として、技術 (technology)、人間 (people)、経済 (economy) の三つがある。この三つのどの視点から見てもよいシステムであれば、それは excellent systems とよばれる資格があるのではないか」との意見である。技術の軸は、最先端の技術がその可能性ぎりぎりまで使われその効果を発揮していること、人間の軸は、システムを利用する人あるいは社会の要望を満たし期待する価値が実現できること、経済の軸はシステムがその運用者に利益をもたらすことへの経済的な incentive を生み出すことである。この三つの軸のどれにおいても遜色がなく、それらが調和して互いに補い合っシステムが現実を動かし価値を生み出すシステムが卓越したシステムの資格をもつ、と言っている。言われてみれば当然であるが、卓見である。そしてその三つの中心にあってシステムを駆動するのがデータである。Munther 教授の持っているイメージを図にあらわすと Fig. 1 のようになる。

ちなみに IDSS は MIT にシステム研究の新しい教育研究組織として誕生した。その誕生にあたってこの結論を得るために何か月も議論したとのことである。筆者は3月初めに IDSS を訪問してきたが、興味ある読者は訪問記 [8] を参照されたい。

この三つの軸は、DX の構造と整合している。DX を構成するのは「プラットフォーム」「エコシステム」「サー

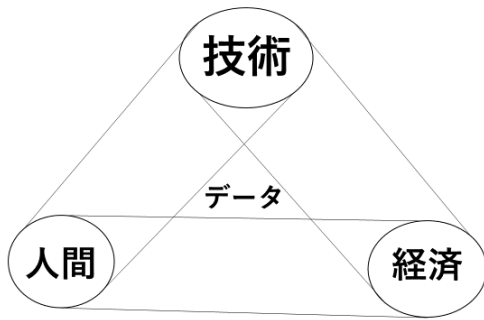


Fig. 1: Three evaluation axis of systems.

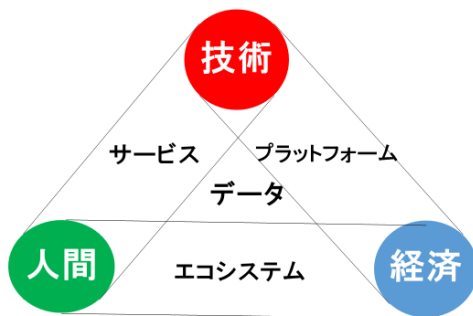


Fig. 2: Structure of Digital Transformation.

ビス」の三つの要素であると4節で述べた。そこで述べた通り、プラットフォームはサービスにかかわる技術がどの程度広い市場を獲得できるかにかかわっており、システムの三本柱で言えば<技術>と<経済>の結合点に位置している。その場合<人間>はそれを外から利用する立場にある。エコシステムは、人間や社会が期待する価値を経済的な合理性をもって持続可能な展開が出来るかどうかにかかわっており、その意味で先ほどの三本柱で言えば<人間>と<経済>がどう結びつくかが試金石となり、<技術>はそれを支援する立場にある。最後にサービスは、技術が人間に最終的にどのように奉仕できるかが課題であり、その意味で<技術>と<人間>の結びつき方にその成否がかかっている。その場合<経済>はそれを外部から評価する立場にある。この関係を図1に重ねて描いたのが Fig. 2 である。

図1はシステムを構築、運用する場合、広い視点でバランスよく評価しなければならないことを訴えている。我々はともすれば目先の一つの視点からシステムを見がちである。技術的に優れているから、利益を上げているから、今の社会に受け入れられているから、などの方的な理由でシステムを評価しがちである。それへの警告として図1は意味がある。図2はDXの基本的な構造を示したもので、未完成であるが一つの理解の仕方として意

味があると思われる。<技術><人間><経済>のシステムの三本柱が<プラットフォーム><エコシステム><サービス>のDXの三つの構成要素とうまくかみ合っていることをご理解頂きたい。この新しいパラダイムを新しく創設されたSICの活動の指導原理として発展させていきたいと思う。

7. むすび

最後に僭越ながら筆者のシステムイノベーションにかかわる個人的な経緯を述べさせて頂き、むすびに代えたい。

筆者は11年前に「ものづくり敗戦」といういささか刺激的なタイトルの本を書いた[9]。この本での主な主張は、技術が生み出す付加価値が要素からシステムに重心をシフトしているにも関わらず、日本の技術がそれに対応出来ていないため競争力に陰りが生じているということであった。その主張を現実に反映させるために、科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)の吉川弘之センター長のご意向でCRDSに「システム科学ユニット」を創設して頂き、そこで日本の社会の「システム化」の戦略を立てることになった。しかし、当時の科学技術政策では科学技術基本計画に盛り込まれた分野重点化の流れが支配的であり、重点4分野(ナノテク、情報、ライフサイエンス、環境)への集中的な投資の掛け声のもとで、知の統合と分野越境を旗印とするシステム化の重要性をアピールするシステム科学ユニットの声は届かなかった。私の能力不足もあるが、何よりも慣行化された各省庁各部署間での予算配分はたとえ何が起こっても毎年微差の変動しか許されない縦割りの厳しさと、それが生み出す慣性の大きさに驚きたじろぐだけであった。

筆者がJSTを辞めたあと、ドイツの第4次産業革命の活動が活発になりその情報が日本にも届くようになると、心ある日本の指導者にこのままでよいのかという危機感が生まれた。第4次産業革命は調べるとその本質はまさにシステム化にある。その結果、知の統合を推進する横幹連合に経産省から関連する調査依頼があり、それが「(社)システムイノベーションセンター」(SIC)の設立に結びついた。この経緯は、本特集号の藤野氏の記事に詳しく書かれているのでご参照頂きたい[10]。SICは危機感を共有した企業のリーダーが先頭に立つ、日本におけるシステムイノベーションを推進する産業界主導の組織である。センター長には日立製作所でデジタル化を副社長として担当したファナック副社長の齊藤裕氏にお引き受け頂き、多様な業種の経営リーダーに理事として運営にあたって頂いている。

産業界だけでなく、学会からもシステム科学技術とその関連テーマを研究しておられる多くの先生方に参加し

て頂いている。「ものづくり敗戦」発刊から10年、筆者としてはようやくその念願が実現する素地が出来たことになる。日本の産業の競争力回復の推進母体として大いに期待したい。

参考文献

- [1] 科学技術振興機構：システム科学の俯瞰報告書 (2015) <https://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2015-FR-06.html>
- [2] アーサー・ケストラー：機械の中の幽霊，日高，長野 訳，べりかん社 (1969).
- [3] 武石 彰ほか：イノベーションの理由：資源動員の創造的正当化，有斐閣 (2012).
- [4] クレイトン・クリステンセン：イノベーションのジレンマ，玉田ほか 訳，ハーバードビジネススクール出版 (2011).
- [5] 木村英紀：システムイノベーションとは何か (1)，SIC ニュースレター，Vol.1-1 (2020).
- [6] 計測と制御：自律分散制御特集号，計測自動制御学会，Vol.29，No.10 (1990).

- [7] 齊藤 裕：巻頭言「デジタル化とシステム化～デジタルリゼーションにおけるシステム化の課題と日本の現状～」，横幹，Vol.14，No.1 (2020).
- [8] 木村英紀：MIT IDSS 訪問記，SIC ニュースレター，Vol.2-4 (2020).
- [9] 木村英紀：ものづくり敗戦，日経出版 (2009).
- [10] 藤野直明：第4次産業革命とシステムの経済～パラダイムシフトとシステム変革への要請～，横幹，Vol.14，No.1 (2020).

木村 英紀



1965年東京大学工学部計数工学科卒。1970年東京大学大学院博士課程修了，工学博士。同年大阪大学基礎工学部助手。1987年大阪大学工学部教授。1995年東京大学工学部教授。2001年理化学研究所生物制御研究室 TL。2009年理化学研究所トヨタ連携センター長。2011年科学技術振興機構研究開発戦略センター上席フェロー。2013年早稲田大学招聘研究教授。2019年(社)システムイノベーションセンター副センター長。専門 制御理論，生物制御。IFAC Giorgio Quazza Medal 受賞。SICE 功績賞受賞。
