



イノベーションが卓越したシステムを作って
実現できる時代が到来

GAFA

SICニュースレター「論説・寄稿」集（第1巻）

（2019年度、2020年度掲載分）

 一般社団法人
システムイノベーションセンター
Systems Innovation Center (SIC)

はじめに

本書は2019年1月設立の一般社団法人システムイノベーションセンター（SIC）発行の広報誌「SIC ニュースレター」（Web 発行）に掲載された2019年度、2020年度の記事を、12篇の「論説」を中心に、非会員からの「寄稿」（3篇）、「組織紹介」（2編）、「コラム」（3篇）の順に掲載時の内容を改変することなく集約したものである。それぞれの掲載順は「SIC ニュースレター」への掲載順となっており、各著者の所属先名および肩書は掲載当時のものである。

なお、「SIC ニュースレター」のアーカイブに関しては、SIC のホームページの下記 URL に公開している。

https://sysic.org/center_activity_cat/sic_letter

2021年1月

©一般社団法人システムイノベーションセンター(SIC) 2021

本著作物の権利は一般社団法人システムイノベーションセンターに帰属します、
無断複製、無断転載を禁止します。

目次

ページ

SIC センター長就任挨拶 齊藤 裕 (SIC 代表理事・センター長)	1
---	---

論説

論説1 システムイノベーションとは何か?	3
木村英紀 (SIC 理事・副センター長)	
論説2 オペレーションズ・マネジメント (OM) : OM で今、何ができるか	17
松尾博文 (神戸大学)	
論説3 DX 推進を握る3つのキー	21
浦川伸一 (損害保険ジャパン株式会社)	
論説4 DX は日本企業に自己革新を求めている	27
宮田一雄 (富士通株式会社)	
論説5 いつか来た道—人工知能ブームとシステム技術—	35
寺野隆雄 (千葉商科大学、東京工業大学・筑波大学名誉教授)	
論説6 SIC における産業界とアカデミアとの連携の進め方	44
吉村 忍 (東京大学)	
論説7 システムイノベーションのためのシステム構造化手法の期待と展望	49
青山和浩 (東京大学)	
論説8 デジタルトランスフォーメーションDXとそれを支えるシステムとは何か?	59
島田太郎 (株式会社東芝)	
論説9 一番ピン思考による開発革新	65
人見光夫 (マツダ株式会社)	
論説10 DX を推進する人財の育成 -- 実践現場の視点から	72
森 敬一 (KDDI 株式会社)	
論説11 Society5.0 時代のシステムイノベーション : 新たなシステムデザインアプローチに向けて	78
白坂成功 (慶應義塾大学)	
論説12 Socitey5.0 の実現を目指す新たなシステムズアプローチ	85
貝原俊也 (神戸大学)	

寄稿（非会員）

- 寄稿1 知の総合と事実情報—文理融合型のシステムイノベーション—・・・92
奥 雅春 様（株式会社 smart-FOA）
- 寄稿2 デジタル社会における人と機械の新たな関係・・・104
野中洋一 様（株式会社日立製作所）
- 寄稿3 エネルギーシステムとイノベーション・・・110
荻本和彦 様（東京大学）

組織紹介

- 組織紹介1 数理・データサイエンスの研究基盤力強化と統計数理研究所の使命・118
椿 広計（統計数理研究所）
- 組織紹介2 デジタルアーキテクチャ・デザインセンター長就任にあたり・・・123
齊藤 裕（IPA デジタルアーキテクチャ・デザインセンター）

コラム

- コラム1 新型コロナウイルス「緊急事態宣言」について・・・132
木村英紀（東京大学・大阪大学名誉教授）
- コラム2 「緊急事態宣言」延長について・・・135
木村英紀（東京大学・大阪大学名誉教授）
- コラム3 東海道新幹線建設とアポロ計画・・・138
木村英紀（東京大学・大阪大学名誉教授）

巻末 SIC 正会員一覧

SIC センター長就任挨拶

SIC 代表理事・センター長 齊藤 裕（ファナック株式会社 副社長執行役員）



一般社団法人システムイノベーションセンター（SIC）の初代のセンター長に任命され、誠に身の引き締まる思いであります。今後、本センターが、様々な分野、領域でのシステム化に向けて、中核的な存在になるように、微力ながら全力で取組んで参りたいと存じます。

さて、現在、サステナブルな社会を目指して、人を中心にした「コト」に視点をおいて、社会を変革していくことが、SDGs に代表される国際社会共通の目標になっていますが、そうした時代背景にも後押しされ、先進的なデジタル技術の急速な進展が、社会のあらゆる領域に、これまでにない変革の可能性をもたらすデジタルトランスフォーメーションへの期待が各国、各企業で大きくなっています。

また、現在、ビジネスの領域では、最先端のデジタル技術と様々なデータを活用し、従来には無いサービスを提供する破壊的なイノベーションが勃発し、米国、中国などの新興 IT 企業が、データを資源として新たなビジネス生態系（エコシステム）を創り出し、グローバルで、従来のビジネス生態系を破壊しているのは、既に皆さんも良くご存じの通りです。

こうした現在の社会、産業界で現在進行中のデジタルトランスフォーメーション、破壊的なイノベーションには、核となる技術、ノウハウだけではなく、そうした「コト」を実現する「システム」が、その中核にあり、それ自体が競争力の源泉になっているといっても過言ではありません。

そして、デジタル化の特長を活かし、新たな形態で、それぞれの利用者へ最適なサービスを提供していくなど、こうした新しい「コト」の実現には、従来の縦割りの視点を超え、全体を俯瞰する視点で、各業界、各分野を跨ぎ、様々な「知」をもつ関係者、関係部署と横断的に連携しながら、その様々な技術、ノウハウなどを最大限に活用して、具現化していくアプローチ、いわゆる、「オープンイノベーション」と「システム化」が必要になります。

本センターでは、より良い社会への変革、競争力ある企業への変革に貢献するために、こうした優れたシステムの実現に不可欠である「オープンイノベーション」の場づくりを目指し、「システム」という共通の視点で、学术界、産業界が有する様々な知の融合、統合を図りながら、その実現に向けて活動できる環境づくりをして参りたいと考えています。そして、「システム化」に必要なリテラシーの底上げと「システム化」をリードする人材育成も含めて、社会、並びに参加企業が有する様々な課題の解決に加え、将来の発展に繋がる次代の「システム」の創造に向けての支援をおこなって参りたいと考えています。

会員の皆様と共に、今後のデジタル社会をリードしていく様々な「システム」の実現に向け、少しでも貢献していけるよう、本センターの活動を充実させていきたいと思っておりますので、宜しくご指導、ご支援のほど、お願い申し上げます。

2019年1月

論説1

システムイノベーションとは何か？

SIC 理事・副センター長 木村英紀（早稲田大学招聘研究教授、
東京大学・大阪大学名誉教授）

1. GAFA

SIC のホームページの最初の画面に小さく「GAFA」という字が書かれている。もちろんこれは Google、Apple、Facebook、Amazon の集合名詞である。なぜこの流行語をあえてホームページのトップに使ったのか、を説明することからこの文章を始めたい。

ご存知のように GAFA の 4 社に Microsoft を加えた 5 社が、ここ何年か世界の企業の時価総額 1 位から 5 位を独占している。このこと自体はそれほど驚くことではない。トップの寡占状態が続くことはどのランキングでも起こり得ることである。驚くのはその時価総額である。各社一兆ドルに手が届きつつある。一兆ドルと言えば日本円に換算すると日本の年間通常予算をはるかに超えている。ストックとしての時価総額とフローとしての国家予算を単純に比較することは出来ないが、それにしても世界市場が与えている 5 社への信認は巨大であるといってもよい。ちなみに日本で断然トップを占めるトヨタの時価総額はその 4 分の一程度である。

GAFA の事業は我々の生活に直接大きな変化をもたらしている。インターネットがここまで我々の生活に入り込んできたのは Google の検索エンジンのおかげといつてよい。Amazon は書籍と生活との距離を一挙に縮めその意味を大きく変えた。Facebook は人間と人間のつながりに新しい形と広がりをもたらした。Apple はスマホによって人々の生活スタイルを大きく変えたといつてよい。

GAFA が我々の生活にもたらしたインパクトの大きさが、市場の巨大な信認を生み出したのであろう。GAFA はすべて創立後 30 年程度の新興の企業である。そしてそのビジネスの成功にはいくつものドラマで彩られている。それについて紹介した書物も少なくない。しかしそのビジネスの成功を支えた GAFA の技術力については目を向ける人はあまり多くない。その技術力は卓越したシステム化（システム思考＋システム構築＋システム運用）の能力にあると筆者は考えている。卓越したシステム化力を動員して構築した卓越したシステムが GAFA の業

務を支え、そのビジネスの成功をもたらした。GAF A の事業はシステムの不断のイノベーションである。これが、SIC のホームページの冒頭に GAF A を載せた理由である。

GAF A は欧米のトップクラスの大学の博士課程修了者を大量に入社させ、また学術で優れた業績を上げた大学の研究者を研究開発の要員として好待遇で迎え入れている。GAF A の研究開発のレベルを見るため、機械学習の分野を例にとろう。この分野では、そこで発表することが研究者の評価に直結している権威のある国際会議がいくつかある。そのような国際会議のひとつが ICML(International Conference on Machine Learning) である。2018 年の ICML に投稿された論文の数は 2 4 7 3 件で、審査の結果採択された(会議で発表することが認められた)論文は 6 2 1 件、採択率は 2 5. 1 % である。国際会議としては極めて厳しい採択率といってよい。この中で発表論文数の多い大学や企業のランキングを見ると、Google が 2 位以下を遠く引き離して断然トップである。トップであるだけでなく、Google AI や Google Research、Deep Mind などの Google グループ(Alphabet) を合わせると全体の発表論文数の 1 3 % を占める。Microsoft は 7 位、Facebook が 9 位、Amazon が 2 2 位である。もうひとつの国際会議として NIPS(Neural Information Processing Systems) があるが、ここでも Google はダントツで、他の GAF A 企業も MIT や CMU など 4 一流大学にまじって健闘している。これらのトップレベルの研究者たちは一体何にその能力を用いているのだろうか？

Google の社業の核は言うまでもなく検索エンジンである。検索エンジンはデータベースにはつきもので、その意味で 1970 年代からあるシステムである。しかし、インターネットの検索となると話は別である。Webpage は世界で毎日何万となく誕生し、何万となく消える。内容も時々刻々更新される。そこから最新の情報を収集するためクローラーと呼ばれるロボットが世界中の Webpage を駆け巡る。1 0 億をはるかに上回ると言われる世界中の Webpage は、そのどれもが平均一日に 3 0 回は Google クローラーの訪問を受けているという。気の遠くなるような話である。クローラーが収集した情報は取り出しやすいように集約整理されてインデクサーと呼ばれる巨大なサーバーの集合に格納される。そして、ユーザからのリクエストに応じて必要な情報が取り出され、重要度に応じて出力される。検索エンジンのよさは応答の速さと情報の的確さで評価される。出てくるまで時間がかかるとか、欲しくもない情報ばかり出てくる検索エンジンは誰も使わないだろう。Google が登場する以前にも Web の検索エンジンは幾つもあった。激しい競争を経て今では Google のシェアは 9 5 % に達しているそうである。そうなったのは、目まぐるしく変容する Web 環境のなかで巨大な検索

エンジンをシステムとして適切に運用進化させていくことのできた Google の卓越したシステム化力によるもの以外ないものではないと思う。

検索エンジンの質を決めるひとつのポイントは、ユーザーのリクエストにもとづいて選ばれた Webpage の重要度を定める「ランキング」である。Webpage の重要性をインターネットの結合（リンク）の構造から評価する方法として、Google の創立者の一人であるページ は、スタンフォードの大学院生であった時に「ページランク」とよばれる Webpage のランキング法を提案しその結果を公開した。一時は自分の site のページランクの上がり下がりによって site の管理者が一喜一憂したものである。SEO(Search Engine Optimization)の火付け役になった。ページランクの手法はグラフ理論と確率論にもとづく数学的にもそれなりに深い内容があり、関連する研究論文が多数発表されている。現在ではページランク より優れた評価法がいくつも提案されページランクは用いられなくなったが、検索にはこのような学術的な基盤があり、Google はそのパイオニアでもあったことは知っておいてよい。

Amazon の出発点は本の通信販売である。最初のころは注文してから本が届くまで最低でも 2～3 日かかっていた。そのうち翌日配達が可能となり、一挙に通信販売の同業者から抜きで存在となった。それとともに急速に業容を拡大し、販売品を本から衣類や日用品や家具、さらに音楽や映像も手掛けるようになった。本だけなら在庫の抜き出しや梱包、発送はたとえ規模が大きくなってもそれなりに処理することは可能である。本以外の様々の商品を対象にするとなると困難は倍加するであろう。Amazon の流通センター（フルフィルセンターとよばれている）では仕分けと配送にももちろんロボットを使っているが、ロボットが商品のある棚に商品を取りに行くのではなく、棚自体がロボットとなって仕分け場所に移動してくるそうである。筆者は残念ながらまだその現場を見ていないが、おそらくそのやり方が効率を増すような商品の購入や配置を含む全体システムの最適化がなされているのだろうと考えている。最近では Amazon Fresh という会社を立ち上げ、生鮮食料品を注文して一時間以内に配送するビジネスをアメリカで始めているそうである。そのためにはさすがに配送センターでは難しく、実店舗が必要になる。すでにアメリカでは数百の実店舗が稼働しているらしい。それ以外にも「マーケットプレイス」とよばれるオークションのプラットフォームを作り、大きなブームを引き起こしている。筆者もそれを通して数多くの古本を購入した。Amazon の立ち上げた AWS は急速に伸び、現在では世界一のクラウドビジネスに成長しているのはご存じのとおりである。

Amazon は売り上げの割には利益が極端に少ない会社である。法人税を払っていないとの噂もある。理由は、利益の大部分を研究開発に投資しているからとの

ことである。その真偽は不明であるが、研究開発の主眼はシステム開発以外には考えられない。

Facebook について筆者は語るものを多く持っていない。世界に15億人といわれるユーザーの一人ではないからである。ただ、数ある SNS の中で文句なく覇者の位置を占めることが出来たのは、やはりそのシステムが優れていたからであろうと思う。

Apple のシステムイノベーションはやはりスマホ (iphone) に体现される。スマホは最先端のそしてもっとも典型的なシステム商品である。商品のシステム化は現代技術の一つのトレンドである。

製品のシステム化は複数の機能の統合として実現する。例えば「システムキッチン」である。水道、ガス、食器棚、調理台、レンジ、冷蔵庫などがまとまって配置され、料理が短い動線で出来るようにしたものをよぶ。暖房機とクーラーが統合されたエアコン、発電機と発熱器が統合されたコジェネ、プリンター・コピー機・ファックスが統合された複合機、ガソリンエンジンと電池が統合されたハイブリッド自動車、など工業製品のシステム化は枚挙にいとまがない。そしてその頂点に立つのがスマホである。スマホは、小さな筐体に電話・コンピュータ・カメラ・映写機、地図、懐中電灯など様々な機能を備えている。単体としてはシステム化が極限まで追求されているとあってよい。最近では健康モニターのための様々な身体センサーを備えたものもあり、高度な楽器演奏も可能となっている。スマホ以前にも様々な機能を備えた携帯電話や PDA (Personal Digital Assistant) とよばれる携帯型のコンピュータは存在したが、多様な機能を統合してそれを動かす OS を備えた携帯電話の開発はやはり Apple の功績に帰せられる。

GAF A の業務の真髄はシステムを構築し運用しそして進化させることにある。GAF A はその企業理念を体现し、その収益の拡大を図り、さらに新しいビジネスに挑戦するために次々にシステムのイノベーションを生み出してきた。GAF A で働いている優れた研究者はより大きな、より複雑な、そしてより高度な (スマートな) システムを目指して研究開発を続けている。

2. システムイノベーションの歴史

システムイノベーションの現代的な姿の例として GAF A について述べたが、システムイノベーションは GAF A から始まるものではないし、GAF A が代表的な例でもない。技術の歴史ではシステムイノベーションは数多くみられる。特に交通、

通信、エネルギーなどインフラ整備が進んだ19世紀後半から20世紀初頭にかけてはシステムイノベーションのラッシュが起こった。この中で突出しているのがトマス・エジソンによる送配電網の構築である。

19世紀末、当時照明に使われていたガス灯やアーク灯に代わる白熱電球は多くの企業や発明家の大きなターゲットであった。その発明競争に勝ったのがトマス・エジソンである。エジソンは、白熱電灯の発明だけでなく、それを人々が生活の場で自由に使えるような送配電システムを考えていた。白熱電灯の電源として電池を考えていた他の発明家たちとはその点で一歩抜きんでていた。エジソンは、コンセントを差し込めばいつでもどれだけでも自由に電力が使える、という当時とすれば夢のような人々の願いを実現しようとしたのである。そのためには発電・送電・配電を統合するシステムを構築しなければならない。

白熱電灯の発明競争に勝利した後、エジソンは送配電システムを実際を作ることに着手し、ニューヨーク市内に発電所を建設し近隣の事業所に電力を供給することを始めた。エジソンの構想はその実現のためには多くの曲折があり様々の技術的な困難を克服しなければならなかった。1930年代のMITの電気工学科では、教授の半数が送配電システムの安定化を研究していたそうである。後にアメリカの軍事研究の最高指導者としてマンハッタン計画を主導したベネパー・ブッシュは、当時のMITで電力ネットワークの解析のために「微分解析器」を発明し、それがのちのアナログ計算機の原型になったことは、電力システムを通じたシステムイノベーションの波及力を示している。

エジソンの、人々の夢を実現することを企業目標とする考え方は、GAFAの掲げる企業理念とも通じるものがある。エジソンの「電力」をGoogleの「知識」やAmazonの「商品」に置き換えれば、両者の共通性がうかがえる。誰でも簡単に欲しいものが手に入るようにするという目標は共通であるといってよい。システムの構築は人々のニーズに直結しているという事実がその背後にある。

同じ時期に起こったシステムイノベーションの例として、フォードによる自動車のベルトコンベアー生産方式を挙げておきたい。このイノベーションはインフラではなく生産方式のイノベーションであるが、そのインパクトは当時のシステムイノベーションの中で群を抜いていた。この生産方式によって自動車の生産性は大きく上昇し、価格は3分の1になった。その結果自動車は贅沢品ではなくなり、庶民にも手の届く日用品となった。アメリカを筆頭に全世界にモータリゼーションの波が押し寄せ、モビリティに大きな変革をもたらされた。自動車を「20世紀の恋人」とよんだ人がいるが、確かに自動車ほど20世紀を通じて人々に愛された商品はないだろう。それをもたらしたのがT型フォードのコンベアー生産方式であった。ベルトコンベアーによる生産はフォード以前にもあ

った。例えばミシンの製造ではコンベアー方式がすでに普及していた。また、豚の解体作業にもコンベアー方式が使われており、フォードはそれにヒントを得たと言われている。しかし自動車のような、重くて部品点数が多く、多様な数多くの工程を必要とする製品にコンベアー方式を用いるのはとてもできない、というのが当時の常識であった。フォードはその常識に抗してT型の生産にコンベアー方式を徐々に導入し、ほぼ6年かけて製造工程全体をコンベアー方式にすることに成功した。コンベアー方式にするにはこれまでと異なる部品やその組付け方法などに多くの改良改善を必要とする。複雑な各工程の間の部品の受け渡しや搬送には新しい技術が必要であり、工程にボトルネックが生じないように最適なスケジューリングを行う必要がある。コンベアー生産方式をシステムとして完成させるには、フォードとそのチームの「システム化力」が並大抵のレベルではなかったことが推測される。1913年にフォードのハイランド工場でT型フォードの全生産方式がコンベアーシステムになった時、その工場を見学した「デトロイトジャーナル」の記者が書いた記事の見出しは「システム・システム・システム」であったとのことである。

インフラとならんでシステム化が重視される分野の一つが軍事である。レーダはイギリスで最初に実用化されたが、その目的は肉眼では届かない遠方の敵をいち早く検知するためである。第二次大戦の初期にイギリスは来襲するドイツ機を待ち受ける時間を作るために、本土にレーダサイトのネットワークを配備し、それと空軍の基地を結びつける防空システムを構築した。Battle of Britainとよばれる数カ月に及ぶ空の戦いで、数の上では圧倒的に劣勢であったイギリスがドイツに勝利をおさめることが出来たのはレーダ防空システムのおかげと言われている。イギリスの勝利によって、ドイツはイギリス本土への侵攻をあきらめざるを得なかった。システムイノベーションが国を救ったと言える。

防空システムは、レーダという要素技術の能力をフルに生かした当時としては全くの新機軸のシステムであり、その成功はまさしくイノベーションの名に値する。防空システムは戦後の冷戦期ではアメリカにさらに大きな規模で引き継がれた。冷戦中はソ連の核を搭載した爆撃機の来襲に常に備えておくことはアメリカ政府にとっての至上命令であったといつてよい。そのために作られたのがSAGE (Semi-Automatic Ground Environment) である。1958年に稼働を始めたこのシステムは全米のレーダサイトをつなげ、敵機のレーダ映像からその速度、侵入方位、可能なターゲットを計算し、政府と全米軍に適切な対応を指令する計算機をベースとした通信システムである。この巨大なシステムには6万個の真空管、17万5千個のダイオード、1万2000個の当時実用化が始まったばかりのトランジスタが使われており、毎日数百個の真空管が取り換えられ

ていたそうである。大変なシステムであるが、27年間続いたこのシステムが実際には役に立たなかったのは人類にとって幸いであった。ちなみにこのシステムの開発にかかった費用120億ドルは、原爆を開発したマンハッタン計画の総費用を上回ったとのことである。SAGEは、記録されている限りコンピュータ通信の嚆矢であるだけでなく、オンライン処理と分散処理を初めて実用化したことでもコンピュータ技術の歴史にその名を残している。ちなみにSAGEの開発を担当したIBMは、SAGEで培った技術力を発揮してその後のコンピュータ業界を制覇したと言われている。システムイノベーションの波及効果の大きさがここでもみられる。

軍事目的に端を発するシステムイノベーションはほかにも数多い。インターネットとGPSはその双璧であろう。両者が私たちの生活に及ぼした大きなインパクトはここであらためて述べるまでもない。

日本もシステムイノベーションにはすぐれた成果を残している。ここでは、1960年代前半の新幹線の運行管理システムと、一貫製鉄所の生産管理システムを挙げておきたい。1964年に開業した東海道新幹線は時速200キロで最頻時に一時間に数本の列車を走らせていた。このような当時世界に類を見ない列車の運行を安全に行う運行管理のシステムは、地上と列車を結ぶきわめて精度の高い複雑なシステムが必要である。当時の国鉄はそれを構築し大きな事故を起こすことなく成功裏にそのシステムを運用し進化させてきた。現在では新幹線の最高営業速度は時速320キロ、最頻時には一時間に13列車を走らせている。運行管理システムと関連してあげておきたいのは列車の予約システムである。国鉄はすでに1950年代末から旅客の急増に対応するため、MARS (Magnetic electronical Automatic seat Reservation System) とよばれる自動予約システムの開発を始めていた。1960年から運用を開始したMARSは世界初の鉄道予約システムである。それ以前の予約発券業務は電話と筆記によるもので、駅の窓口で特急列車を申し込んで切符を手に入れるまで最低でも2分、場合によっては30分以上かかっていたという。MARSによりそれが30秒程度に短縮されたというから、大きなイノベーションであった。新幹線がスムーズに営業を始めることが出来たのも、MARSのおかげであると言われている。

日本の製鉄業は1960年代から70年代の初めにかけて、年産1000万トンの一貫製鉄所をいくつか建設している。製鉄の工程はきわめて複雑である。ここでは物質のあらゆる形態、すなわち固体・液体・気体・粒体・粉体、が現われる。また化学反応をベースとする連続工程と物理変形をベースとする加工工程が交錯する。工程の温度もマイナス200度から2000度までの広い範囲にわたる。そのうえ製鉄は注文生産である。注文生産である以上、各注文品のしかかり

が常に追跡され把握できていなければならない。このため生産管理が非常に複雑で難しい。当時最大の生産量を誇っていた US スチールの工場でも、人海戦術による生産管理が年産500万トンで限界に達していた。この限界を突破するには生産管理のシステムイノベーションが必要である。これを実現したのが日本の製鉄業であった。

新幹線の運行管理や製鉄の生産管理が実施された当時の日本にはコンピュータの技術基盤は貧弱であった。にもかかわらずこれが出来たことは大いに注目に値する。もちろんコンピュータの導入が最終的にはシステム構築の決め手になったが、コンピュータ以前にシステムの目的、構造、運用に関する深い理解と、作ろうとするシステムへの明快なビジョンがあったからこそ当時の世界のレベルを大きく超えたシステムを構築できたのである。ちなみに当時国鉄の鉄道技術研究所では、システム科学技術の原典の一つである「サイバネティクス」の読書会が行われていたとのことである。「サイバネティクス」が日本語に翻訳され注目を集めたのは、新幹線の営業が始まった後であるから、鉄道技研では日本でコンピュータ技術が成熟するはるか前からシステム技術を重視する技術哲学と、それを支える組織的な基盤があったことがうかがえる。IT がすべてであるとする IT 万能の風潮が日本の産業技術と経営を支配している現状に反省を促す歴史の一コマである。

3. 破壊的イノベーションとシステムイノベーション

<システムはイノベーションの議論の視野外であった>

前節までは GAFKA の核となる事業の成果は、すぐれたシステムの構築、運用、進化からもたらされたものであり、それが私たちの生活に大きなインパクトを与えていることから「システムイノベーション」と呼ぶにふさわしいことを述べた。そしてその淵源が、エジソンが着手した電力ネットワークにまでさかのぼること、フォードのコンベアー生産ラインやイギリスのレーダ防空ネットワークなど技術の歴史は多くのシステムイノベーションを生み出してきたこと、日本も高度成長期には世界のトップレベルのシステムイノベーションを達成したこと、を述べた。「古今東西」のシステムイノベーションの例を示すのが前節までのテーマであった。本節以降ではイノベーションにかかわる議論の中でシステムイノベーションを位置づけ、その社会、学術との関係について少し踏み込んで議論したい。

これまでのイノベーションに関する議論は要素技術、あるいは工業製品の技

術革新にほぼ限定されており、システムのイノベーションは視野に入っていない。例えば日本におけるイノベーションの事例研究として定評のある武石彰らの「イノベーションの理由」(有斐閣、2012年)で挙げられた23の事例はすべて要素技術、工業製品の革新である。新しいイノベーションのかたちとして「破壊的イノベーション」を提示して大きな反響をよんだクレイトン・クリステンセンの「イノベーターのジレンマ」(伊豆原弓訳、翔泳社2001年)も、そこで主に取り上げられているのはハードデスク、掘削機、電炉であり、それ以外の事例もCPU、50ccバイク、フラッシュメモリーなど工業製品にほぼ限られている。クリステンセンの議論を日本国内の状況にあてはめた藤本雄一郎の「破壊的イノベーション」(中央経済社、2013年)でも、主として議論されているのはカーナビ、ネットブック、太陽電池の三つの工業製品である。しかし、工業製品や要素技術にイノベーションの視点を絞ると、技術の進歩の大きな流れを捉えることは出来ない。エネルギー供給、流通、生産方式、経営支援、交通通信、ソフトウェア、医療など、産業を支えるインフラに関わる技術革新もあきらかにイノベーションであり、それらも視野に入れる必要があるのは今更言うまでもないことであろう。そうすると当然システムがイノベーションを駆動するエンジンとして浮かび上がってくるはずである。なぜそうならなかったかと言えば、ひとつはイノベーションの論客の多くが経営学者で、その主な関心事が技術革新それ自体よりもそれが引き起こした企業存亡のダイナミクスにあったからであろう。もう一つは、システムが否応なしにイノベーションの議論の視野に入ってくるには、今我々が見ているような現代技術の成熟が必要なことである。この点については重要な論点なので以下補足する。

<システムは技術の成熟とともに姿をあらわす>

システムという言葉が科学技術の各分野で求心力をもって使われ始めるのは、その分野の発展がある程度成熟し、他の分野との接点が広がり、その分野の位置づけをはっきりさせる必要が生じてからである。数年前から電子情報通信学会に「システムナノテクノロジー研究会」が生まれ、活発な活動を行っている。その数年前からアメリカのナノテクの研究者たちは「NBIC」と称する新しいコンセプトを提唱してそのプロモーションに励んでいた。N=ナノ、B=バイオ、I=情報、C=認知である。NBICを冠した研究組織やプロジェクトが各国で立ち上げられた時期がある。ナノテクの技術としての成熟と他分野への広がりを示している。「システムナノ」はその文脈から生まれたのである。

その傾向を先取りしていたのが生物学である。すでに30年ほど前から「システム生物学」が生物学の新しい領域として誕生し、現在では生物科学の主要な分

野に成長している。システムの視点を通して数学、物理学、工学を取り込み、生命の本質に迫ろうとする分野である。大学では学科名や専攻名に「システム」を付ける傾向はすでに1970年代から始まっている。例えば「機械工学科」が「機械システム工学科」に、「化学工学科」が「化学システム工学科」に、等である。

<破壊的イノベーションと「性能の供給過多」>

それではシステムがイノベーションの議論の表舞台に登場するためにはどのような成熟のレベルが必要であったか？それに答えを与えたのがクリステンセンである。クリステンセンは「性能の供給過多」が製造業のいたるところで起こり、その結果「破壊的イノベーション」の連鎖が起こったことを詳細に分析している。「性能の供給過多」とは、製品の性能が市場の要求するレベルを上回っていること、すなわち「オーバースペック」である。これは現代技術が高いレベルでの成熟度に達していることを意味している。技術の役割は人々のより高い期待に応えることであり、それを達成することが従来のイノベーションであった。彼はそれを「持続的なイノベーション」と呼び、それとは別のもっと衝撃力のある「破壊的イノベーション」が発生し、産業界の地殻変動を引き起こしていることを指摘し、そこに現代のイノベーションの本質を見た。ハイエンドに向かうイノベーションだけでなく、ローエンドに向かってバリューネットワークの変革、価格破壊と新市場の形成を伴う新しいタイプのイノベーションが起こっていることの中に現代技術の成熟のレベルを見出したクリステンセンの洞察は、見事というしかない。しかし、我々は全く別のイノベーションの可能性をそこに見る。それがシステムイノベーションである。ナノテクの技術としての成熟がシステムナノテクの構想を生み出したように、現代技術の総体としての成熟がイノベーションの新しい姿としてのシステムイノベーションを表舞台に押し上げるのである。

<医工連携が生んだシステムイノベーション>

システムイノベーションの現在の方向は、GAF Aのような巨大な最先端のシステムの構築・運用・進化もあるが、それとは別に、分野や専門を超える「知の統合」「分野の協創」をベースとした新しいシステムの開拓がある。ひらたく言えば、ひとつひとつの単体の性能は十分満足できるものとなった、これからはそれらの「組み合わせ」で勝負しよう、ということである。その動きで最近もっとも成功しているのは「医」と「工」の連携であろう。その典型的な事例が手術支援ロボットである。具体的には「ダビンチ」の実用化である。「ダビンチ」を用い

た手術は幾つかの部位のがんの手術では、手術時間、侵襲の度合い、出血量、合併症のリスク、術者の疲労度など多くの点で、医師単独の手術を大きく上回る成果を挙げている。このロボットに搭載されているハイビジョン3次元内視鏡、多関節アームと鉗子、マルチチャンネルコンソール、タッチスクリーン機能を持つモニターなど最先端医療機器がシステムとして見事に統合されている。システムとしての「ダビンチ」で忘れてはならないのが医師の教育プログラムと、マルチコンソールである。前者は手術というもっとも高度で危険な手技を術式の選択を含めて機械から学ぶという医学のパラダイム転換の端緒を生み出した。後者は術者以外の人間（例えば医学生）が実際の手術の進行を術者と同じ視点から臨場感をもって体験でき、医学教育にひとつのブレークスルーをもたらしつつある。これら周辺装置と運用・保守技術を含めたトータルシステムとしてのすぐれた構成が「ダビンチ」の成功をもたらしたといつてよい。

もう一つはヒトゲノム計画である。これは DNA の解読(sequencing)の自動化である。遺伝子の読み取りは実験装置を使って実験室で細々とするのが 1970 年代の遺伝学の研究スタイルであった。遺伝子情報の巨大さから、解読は大規模なオートメーションによる工場の「操業」として行うことが必要である。これは生き物を扱うための様々な技法手技に熟達した生物学者にとっては大きな発想の転換が必要であった。それを世界に先駆けて提案したのが日本の研究者であったが、日本では実現せず、それをヒトの遺伝子読み取りという壮大な事業としてリーダーシップを握り完成したのがアメリカであった。

専門分野の連携に関しては「医工」連携以外にも社会学、認知科学、農学などで急速に進行しつつある。分野が連携する時は必ず「システム性」が顕在化してくることを過去の事例が示している。

4. システムイノベーションとは何か？

<システムは変貌しつつある>

システムイノベーションを定義するにはまずシステムとは何か、に答えなければならない。しかし現状でこの問いに答えるのは難しい。たとえば「機能要素を結び付けて目的を達成するための統合体」というようなこれまで用いられてきた定義では現代のシステムの実像をとらえることが難しくなっている。ひとつはその規模と複雑さが途方もなく大きくなりつつあるからである。1 節で述べたインターネット検索エンジンは、すでに世界中に数億あるともいわれるインターネットのハイパーテキストを平均一日に 30 回クロールし、毎日数千万回

の問いに答えている。このようなシステムを感覚的に思い浮かべることは難しい。その背後にはそれを可能とした計算機科学、通信、ソフトウェア工学、センシング技術などの飛躍的な進歩がある。そして、これらのシステムが変動の激しい世界のなかで変化に対応するだけでなく変化を取り込みつつ進化し続けている。ひところのシステムとはいろいろな意味で大きく変貌したシステムの姿を我々は目の前にしている。これを適切に表現するシステムの定義は難しい。

＜システムイノベーションの構造＞

システムの新しい定義は今後の課題として、その役割について考えよう。巨大化複雑化するシステムは我々の理解の外に遠のき、ますますブラックボックス化しているが、一方、我々がシステムを利用することはますます多くなっている。エネルギー、食糧、交通通信、金融、医療、防災など我々の生活はシステムによって支えられている。我々はシステムがもたらすものやサービスによって生きている。それを供給してくれるのは科学技術である。システムは科学技術と社会を結び付ける接点（接面）である。逆に科学技術の成果を社会に接地するにはシステムがどうしても必要である。

科学技術が生活の隅々まで浸透していることを前提にシステムの時代を表現すると図1のようになる。世界は科学技術の層（知の層）と人が価値を感じて現実に生活している社会の層（価値の層）と、その両者を媒介するシステムの層、の三層構造である。

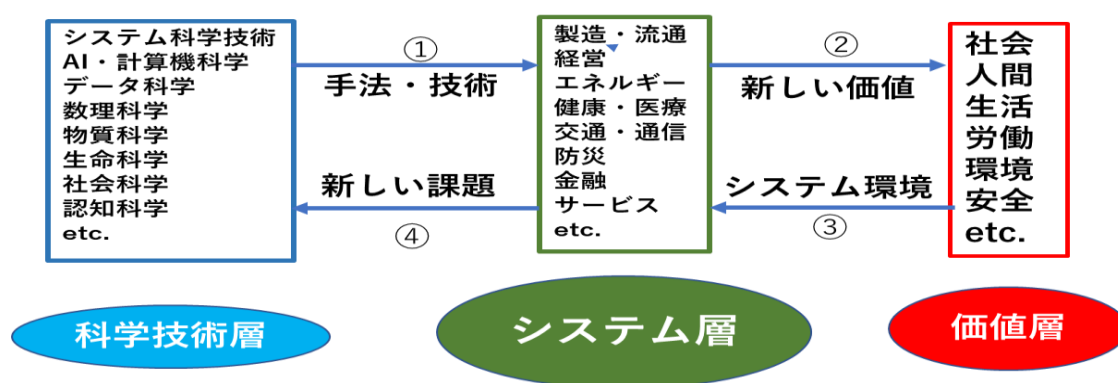


図1 システムイノベーションの構造

図1はシステムの現代世界における重要性をあらわしている。図1で①から④まで番号を付けた矢印は、層から層へ受け渡されるものを表現している。少し説

明すると以下のようになる。

- ① 「科学技術層からシステム層へ」・・・システム構築に用いられる先端技術・手法・理論など、主としてシステムの技術的な性能向上に用いられる。
- ② 「システム層から価値層へ」・・・システムが生み出す生活の質の向上・新しい価値、企業収益、生産性向上。
- ③ 「価値層からシステム層へ」・・・システム構築を受け入れる環境の整備、例えば縦割り組織の解消、規制の緩和、プラットフォームの整備など。
- ④ 「システム層から科学技術層へ」・・・ミッシングリンクを含む新しい研究課題の発掘、提起。技術のシームレスな結合の必要性、

この部分はもっと詳細な記述が必要であるが、ここではスペースの制約でこれ以上立ち入らない。詳しい検討は別の機会に譲りたい。

< 3層を結ぶシステムイノベーション >

システムイノベーションとは、「システムを構築、運用し、進化させることにより新しい価値を生み出す行為である」。システムは科学技術と社会を結びつける接面であることを強調したが、その具体的な構造が図1であり、図1のループを回すことによってシステムイノベーションが達成できる。ループの出発点は三つの層のうちどこでもよい。二層の間のループを部分的に回すことも必要である。システム層と科学技術層の間のループ(①-④-①)を回す目標は、「科学技術の成果を社会が最大限享受できること」が目標となる。価値層とシステム層の間のループ(③-②-③)は、「システム化によって人々の生活が豊かになり、企業や関連組織の収益が増大する」ことが目標となる。実際にはいくつかのループが同時多発的に発生し、相互に関連しながらシステム構築が行われ、イノベーションが進行することになる。システムイノベーションが、科学技術との接面と社会的価値との接面の両者を併せ持つことは他のイノベーションの場合と同様であるが、システムイノベーションについては「ビジネスモデル」に密接に結びついているから、価値層との接合が強調される傾向にあるので、学術との接合をあえて強調した。

図1には表現されていないが、システム層に含まれる個々のシステムドメインを統合するメタレベルの活動が始まっている。システムオブシステムズ、参照アーキテクチャ、データ標準化、などである。これらはシステムイノベーションを加速するシステム層内部の活動である。これについては今後議論していきたい。

5. まとめ

科学技術の進歩はあらゆる分野で加速している。その成果を合理的に、無理なく、しかもその可能性を余すことなく社会に吸収させるには卓越したシステムの構築が必要である。システム層と科学技術層との密接な結びつきが必要である。システムイノベーションセンター（SIC）が「学術協議会」を設置し、学術界の先生方のご協力を仰いでいる理由もここにある。

一方、社会はますます複雑になり、利害関係は錯綜変化し、合理的なシステムの構築を阻む障害はむしろ増えている。特に縦割り社会の弊害が強い日本では、システム構築がそれを克服する有力な理由付けと駆動力になり得る。SICの日本における存在意義のひとつが、システム層と価値層の間のギャップを埋めることにあると思う。

本稿で述べたことは、システムイノベーションの概念的な説明にとどまっている。システムイノベーションの概念をさらに豊かに肉付けしていくには、「第4次産業革命」や「connected industry」など現在進行中の様々の技術的、学術的、社会的、政治的な活動や主張をシステムイノベーションの視点から包括的にとらえ、位置付ける作業が必要である。そして、それを通して日本の進むべき道を提示していくことが出来るのではないかと思われる。この課題はSIC内部で今後活発に議論していきたい。

「システムイノベーション」という単語は少なくともテクニカルタームとしては欧米にはないようである。「システム」はあまりにもありふれた言葉なのでかえって見過ごされてきたのかも知れない。IoT、ビッグデータ、デジタルツイン、CPSなど外来 buzzwords が氾濫する中で、日本発の概念として定着発展させていきたい。センターの将来の発展もその成否にかかわっている。

(2019年6月25日原稿受領、Vol. 1.1, 1.2に掲載)

論説2

オペレーションズ・マネジメント(OM):OM で今、何ができるか

神戸大学 経営学研究科教授 松尾博文 (SIC 学術協議会会員)

オペレーションズ・マネジメント (OM) は、ビジネス(業務)プロセスの視点から、経営管理し、戦略を構築するビジネスの分野である。MBA コースでは、ヒト、モノ、カネの管理を扱う。ヒトの主要科目は組織行動、カネは会計とファイナンス、モノはマーケティング、OM、IT、そして、すべてを総合して経営戦略というのがグローバルに標準的なカリキュラムになっている。OM は、ビジネススクールの 10%程度の教員がその研究教育を担当している。日本のビジネススクールの OM 教員の比率は、ほぼ 0%である。その OM 科目のほとんどは、技術経営分野の研究者が片手間に教えており、グローバル標準の OM にはほど遠い。一方、現場では、米国上場企業の管理職の 40%、世界トップ 500 企業の CEO の 30%は MBA の学位保持者である。したがって、OM はグローバルのビジネス界では、基本の知識、視点、考え方の一つとなっているといえる。COO (チーフ・オペレーティング・オフィサー)、VP of Operations, VP of Supply Chain 等の管理職とその下の組織が配置されている。

筆者は、1984 年に、MIT で、OM 分野の研究で Ph. D. を取得し、84-99 年は、テキサス大学オースティンで、OM の研究教育に取り組んで、この分野が米国で、規模と影響力を拡大していく、その中にいた。80 年代の米国は、日本からの自動車・電機・半導体のグローバル競争にさらされた時期、計算機が ICT へと進化した時期にあたる。当時の米国ボストンでは、日本の製造業についての研究が盛んで、トヨタの JIT やサプライヤー管理のプロセスが研究された。また、ICT の進化を活用した BPR(ビジネスプロセス・リエンジニアリング)の実効性も確認され、ビジネスをプロセスの視点で把握し、管理、改革していく必要性が産業界で広く認識された。サプライチェーン・マネジメントが実践され、その研究も進んだ。米国のビジネススクールにおいても、80 年代の OM は、主要ビジネススクールでは研究されていたが、単なる定量分析分野と位置付けていた大学も多かった。しかしながら、1990 年頃、産業界からビジネススクールのカリキュラムの不備が競争力低下の一因であるという批判があり、それに対応するカリキュラム改革で、OM の研究教育内容も見直され、一挙に OM がビジネススクール内での

存在感を増した。

日本の製造業の強みはものづくりの能力であるといわれて久しい。ものづくりの力の源泉は、すり合わせであると信じられている。これは、くしくも、80年代の米国ボストンでの日本の製造業についての研究結果でもある。日本の自動車は、標準化された部品の単なる組み合わせでなく、精緻に部品設計から関係者が対面で濃密なすり合わせをして、最高の品質を安価に製造できているとした。このようなすり合わせも一つのプロセスの特徴であるが、Industrie 4.0が標榜しているような標準化とICT化での統合も一つのプロセスの特徴である。ある製品をどのようなビジネスプロセスで企画、製造、販売するかは、ビジネスの根幹にかかわる問題である。どのようなビジネスプロセスを構築するかは、ターゲット顧客、製品・サービス、それを提供するプロセスの設計、また、ヒト、モノ、カネをどうつなぐか、企業連携をどうするかを含めて、サプライチェーンやバリューチェーン全体を総合的に考察しなければならない。ICTがここまで進化し、グローバル競争と社会が複雑になった現在、旧態依然のビジネスプロセスの現状維持で、競争環境の潮流変化に対応できるはずがないと考えるべきである。

以上の議論を踏まえると、ビジネスプロセスの構築・再構築は、木村英紀先生の論説「システムイノベーションとは何か」に説明されているシステムイノベーションを経営のドメインで実行することに他ならないことがわかる。今、日本の産業界で最も必要なことは、工場のシステム化をさらに推進するとか、AIを導入してスマート化するとか、何か目新しい要素技術を導入して、現状を改善するというようなレベルの話ではない。今の経営のやり方を根こそぎ「システムイノベーション」するというような発想と覚悟が必要である。

1990年頃の米国は、日本に産業競争力で負けていることへの反省と改革の時代だった。米国の産業界において、complacency（成功者の独りよがり、自己満足）がもたらす弱点をどう解消するかという真摯な問いかけがあった。その回答は、現状を合理性と競争力のあるビジネスプロセスへと変革しなければならないという認識、並びに、痛みを伴う改革を実行するという覚悟だった。もちろん、現状の全否定ではなく、正確な現状認識、適切な反省、合理的な改革案の策定だった。今度は、日本が反省と改革を実行する番になった。今、ものづくりのcomplacencyから脱却する必要があるのではないか。日本人は勤勉で、すり合わせにたけて、精緻にモノを造って、事を運ぶことができる強みがあると慢心して、

組織とビジネスプロセスは現状維持で、ICT等の競争環境の変化に要素技術の部分的な導入でなんとか対応しようとしているのではないか。つまり、根こそぎ「システムイノベーション」しないといけないという認識とそれを実行するという覚悟がみられない。それでは、現状認識、改革案は何かということに少し触れてみる。

日本の製造業の現状は厳しい。製造業付加価値額の世界シェアは、中国が日本の3倍で格差は拡大中。米国は日本の1.5倍で、GAFAが情報の世界を独占中。一方、ドイツは、Industrie 4.0を中心に据えた戦略を着実に実行中。世界各国で、産業競争が激化し、政治的な思惑も錯そうする。日本は人口減少、高等教育・研究力は予算カットで低下し、産業全体の競争力も劣化しているという徴候を示している。現状維持は、選択枝としてはない。

改革の視点というのは、OMにおいては、ビジネスプロセスの視点になる。日本の産業全体について、個々の業務の連鎖を、誰が、誰のために、何を、どのように行っているかのレベルで把握し、その連鎖がもたらす製品・サービスの効率・効果はどうか。ICTの導入、企業連携等をして、業務の連鎖の設計をどのように刷新すると、競争に耐えうるのか。刷新されたプロセスと人とのかかわりはどうなり、そこで機能する人材をどう育成するのか。情報はどのようにリンクし、共有されるのか。結局、目標となる財務諸表のボトムラインをタイムリーに達成するために、何に投資して何をして、どのようにグローバルな競争力を確保するかが問題となる。変革が必要と認識するCEOは、ビジネスプロセスの視点から、現状をどのように変革するかを考える必要がある。

原則現状維持のメンタリティは、日本では根強い。日本の産業界では、職業訓練はOJT(on the job training)が主で、ビジネスプロセスの現状維持は与件である。したがって、MBA教育を受けた者がビジネスプロセスの改革案を示したところで、根本的に理解できる同僚、上司がいなくて、孤立する。米国では、管理職のMBA比率が40%であり、必ずしもその数字が望ましいとはかぎらないが、40%の管理職がOMについて理解しているということを念頭に置く必要がある。日本では対応する数字はほぼ0%である。日本における組織内MBA比率、あるいは、少なくともOMを理解する管理職比率を増加させないと、現状のビジネスプロセスを変えるというようなことは、議題にもあがらないことになる。改革をトップダウンで実施するとしても、組織の管理職の人たちが理解できない戦略は、単なる、トップの暴走となる。

結論として、企業のビジネスプロセス改革は、経営のシステムイノベーションに帰着する。経営のシステムイノベーションのためのOMからの提言は、次の二つである。

- ① 改革の必要性を認識する経営者は、ビジネスプロセス改革の視点から考え、その改革案に適するように組織を再編成する。ここで、組織体制の現状維持を与件として、組織を活性化し、変革を促すという今では無意味となった旧来のアプローチをとらない。
- ② 管理職、課長以上の人材が広く、ビジネスプロセスの概念、運用、改革について理解するという目的の研修を実施する。部長への昇任の条件として、ビジネスプロセス改革への貢献の実績を問う。つまり、組織の現状維持を前提とした過去の実績とか、現状維持のための調整能力を問うのではなく、SICの言語でいう、システムイノベーションの思考、実行能力を持つ人材を昇任させる。

ビジネスプロセスの発想、思考ができる人材が会社組織内に広く、高密度で存在し、ネットワーク化されれば、真の改革は可能である。経営学というのは、理工学ほど時間をかけずに学べる。時々、学んでないのにわかっている人がいるものである。多数の人が基本的なOMコンセプトを学べば、その中で、「一を聞いて十を知る」ことができる素頭と経営センスのいい人が突出する。その卓越した人が改革をリードすることになる。そういう流れをつくるためには、基本的なOMコンセプトを理解する人の密度をまず増やすということが早道になる。

システムイノベーションは、ビジネス界では、ビジネスプロセス変革を目的とした根こそぎの組織改革と理解してください。

(2019年7月9日原稿受領、Vol. 1.3に掲載)

論説3

DX 推進を握る3つのキー

損害保険ジャパン日本興亜株式会社 取締役常務執行役員 浦川伸一（SIC 理事）

はじめに

グローバルにデジタル技術を基軸としたビジネス革新が叫ばれ、デジタルトランスフォーメーション（以下 DX）が日本経済でもブームとなっている。一方で、日本経済が確実に DX で大きな地殻変動を起こしているという実感は乏しい。先進国日本で、米国や中国、あるいは EU 諸国の一部で進んでいるような DX が、GDP の一角を担うほどの盛り上がりを示さないのはなぜであろう。例えば個人金融資産の大半は金融機関に預けているのにも関わらず、キャッシュレス化は一向に浸透せず、ライドシェアビジネスも黎明期から脱し切れていない。国が推進する Society5.0 の具体化もこれからである。

システムイノベーションセンターが設立に至った背景は、企業や社会の課題をシステム化、それも部分最適ではなく全体最適で解決に導くべき、という高い志がある。「これからの日本は、欧米での DX を参考にしつつも、日本の良さに着眼し、独自のビジネスモデルにより DX を推進すべきである。」という意見が各方面から上がっている。そこで本稿では、日本の勝ち筋と言われているイノベーションエコシステムに焦点を当て、経済界に身を置く立場から、一向に進まない日本の DX 推進を自分事として捉え、ブレークスルーへの道のりを模索してみたい。

DX を妨げている見えない壁

日本経済が DX に高い関心を持ちつつも事業シフト出来ていないのは、現業を抱えているという点以外にも理由・背景があると捉えている。成功している他国では、産業界に常に革新を生み続けるため、スタートアップ、大企業・中小企業などの産業界に加え、大学・研究機関、投資家、民間 NPO、財団、公的機関など、社会の多種多様な主体（以下、企業等各主体）が有機的・自律的につながった上で、人材やノウハウ、資金が循環するインフラが構築されている。

日本の場合、長い日本経済発展の歴史から、各業界が確立され、発展を遂げたこともあり、業界や企業に分散された多種多様なシステムやデータを、企業や業種の枠を越えて連携・共有することのハードルが極端に高くなってしまった。個別には実に秀逸なデータやシステムを保有しているにも関わらず、これらが隠蔽化された状態では、イノベーションエコシステムは望めない。イノベーションを連携や共有で推進し、平行してプライバシーとサイバーセキュリティの確保による安心・安全・高品質な取り扱いを確保することができれば、日本の勝ち筋は見えてくるはずである。ただ、一企業の立場で考えた場合、総論では合意するものの、エコ化のための具体的な一歩に踏み出せないいくつかの障壁がある。その一例を列挙したい。

1) 警戒心

エコシステムへの参加は、一企業で成し得ない社会システムを作るという高い志を持った上でビジネスデザインを行うことが肝要だと考える。競争相手や普段付き合いのない業界との連携は、慣れていないとどうしても警戒心が出てしまう。折角コンソーシアムなどの団体を作っても、自らのノウハウやデータを提供することに躊躇してしまうため、参加する企業等各主体は他の参加者の出方を様子見し、勉強会や情報収集レベルに陥りがちである。

2) システムプラットフォーム

標準化されたシステムプラットフォームは、エコ化の推進に不可欠な要素の一つと考えている。エコロジーを社会インフラとして普及させた前例として、Industry4.0のドイツや、国が主導したエストニアなど、全体最適をベースに各種標準化やインフラ整備を推進し成功した例がある。ITを総合的に管轄する省庁のない日本では、企業等各主体が同時平行的に無連携に部分最適システム構築を進めるため、標準化をベースとした連携が二の次になっている。

3) ビジネスプラットフォーム

システムプラットフォームに加え、ビジネススキームとしてのプラットフォーム確立も極めて重要な要素と考える。参加する企業等各主体に有機的かつ自律的な連携を前提とした強烈なビジネススキームのイメージがない限り、トランスフォーメーションは生まれないのではないかと懸念する。また、データやシステムの提供形態やプライシング、責任分担、個人情報取り扱い、サイ

バー対策など、あらかじめ制定すべきスキームも多い。

4) DX マチュリティレベル

経団連が 2019 年 2 月に発行したレポート「AI 活用原則」で、「AI-Ready 化」という表現が使われている。DX を牽引する主要テクノロジーの一つが AI であり、企業等各主体は AI を十分に活用できるよう AI-Ready な状態にすることが肝要という提言である。これは、企業等各主体同士が例えば AI×データの相互利用を通じて連携されたビジネスモデルを実現しようとした場合に、保持しているデータや AI システムの品質面の成熟度（マチュリティレベル）が企業等各主体間で不統一だと、連携してもやり取りするデータや処理結果に信頼性が得られず、高品質なビジネス展開が出来なくなってしまう。

上記 4 点はいくまでも当職が考える障壁例であり、全てではないだろうが、大きな志を抱いて、これらの障壁をブレイクスルーする議論すべき、と考えている。

DX 推進を握る 3 つのキー

DX を推し進めるにあたってのポイントは様々な意見があるが、当稿では①DX ビジネスモデル、②システムアーキテクチャー、③AI×データ（AI-Ready）を 3 つのキーと捉えてみた。

① DX ビジネスモデル

1960 年代より始まった電算化の流れは、人手で実施していた業務を、コンピューターに代替させることによる効率化の歴史であった。一方 DX によるビジネスモデルの変革は、デジタル技術をベースに新たなビジネスモデルを創出するという文脈であるため、既存ビジネスモデルをどう改善すべきか、という発想ではブレイクスルーできそうもない。既存の事務プロセスや商品・サービス、業界の垣根などを論理的に括り直し、デジタル技術を基軸にビジネスを一から組み立て直す。平成の時代になかなか踏み出せなかったビジネスモデル変革が今求められている。

これらの変革を巻き起こすには、やはり尖った人材とそれを邪魔しない社会風土が必須であろう。企業など組織の枠を取っ払い、Digital Native な人材にテクノロジーとビジネスを学ばせ、ビジネスモデル創出の機会を与える。システムイノベーションセンターの活用も一つのアイデアだろう。例えば、大企業は

デジタル部門のような出島組織あるいは子会社を作り、予算含め権限を完全移譲し、自由にビジネス創出を任せる。また、ヘルスケアや自動運転、スマートフードなど、具体的なビジネスケースに応じてビジネス創出プロジェクトを有期的に立ち上げる。コンソーシアムとはせず、期限を決め、参加者に役割と権限を与え、ビジネス創出と収益を義務付ける。大企業のみならず、スタートアップやアカデミア、各種団体などもきちんと巻き込めるスキームを徐々に確立する。こういった活動を具体化していくべきだろう。

検討体制と並行して必要なのが、エコ化の前提となるビジネススキームの具体化である。例えば従来ビジネスモデルの典型である取引所の場合、取引所に使用料などを支払い、ルールに従って取引を行い、予め定めた手数料率で収益を得るなど、ビジネススキームが確立されている。新たなエコ化を推進する場合、最新テクノロジーを駆使すれば大掛かりなシステム装備がなくても、安価かつ早期の立ち上げが可能となってきた。参加スキームを決め、提供データや API についてのプロトコルや課金体系を整備し、利益配分の一連のメカニズムを徐々に立ち上げていけば、スモールスタートが可能であろう。

② システムアーキテクチャー

昭和の時代から存在する用語であるが、これからの DX 時代を司るシステムアーキテクチャーを深く理解し、自社システムを着実にその構想に準拠して再構築を進めている企業等各主体はまだ少ない。当稿では委細は語らないが、エコ化を推進するためには、企業等主体間がデファクトスタンダードなインターフェース、例えば restful API などに準拠し、接続容易性を担保せねばならないだろう。基幹システムもマイクロサービスアーキテクチャに準拠すべく、疎結合化を実装し、DX 時代の素早いビジネスモデルへの変化に対応できる業務インフラを構築することが望ましいだろう。オンプレミスのみならず、マルチクラウドやハイブリッドクラウドなど、仮想化技術を取り入れた柔軟運用も重要な時代になってきた。また、エンドポイントからサーバー保護まで、幅広いサーバーセキュリティ対策を網羅的に施すことも欠かせない。

API によるインターフェースがある程度標準化され、AI-Ready なシステム環境が整備されれば、準備が整った企業等主体同士から順次繋がり、自然とエコ化は進んでいくだろう。

API による標準インターフェース、システム全般の疎結合化、柔軟なコンピューティング環境、堅牢なサイバーセキュリティ対策は、どちらかといふとこれまで IT 部門の専権事項であった。時代は変わり、今後、CDO や CIO 以外の CxO が

幅広くこういったシステムアーキテクチャーに高い関心を払い、投資判断出来る事が企業等各主体の差別化要素となりつつある。

③ AI×データ (AI-Ready)

2013年以降、第三次AIブームが到来し、コンピューティングパワーの進展により、ディープラーニングが急進展し、本格的に情報システムへの実装が進み出した。DXの発展において、AIを無視して語る事は出来ない時代となった。AIはこれまでの情報システムと大きく異なり、インプットとなるデータによりその精度が大きく左右される特徴を有する。このため、AIの特性を語る際には、常に「AI×データ」と表記した方がその性格を表しやすいと考え、当稿ではこの表記を採用している。

企業等各主体が何らかのビジネススキームによってシステム連携をする場合、データや機能の連携が行われるが、これまでの連携とDX時代の連携の大きな相違点の一つが、データあるいは機能いずれかまたは両方にAI×データの関与が増大する点である。単純に取引データや商品・顧客データなどをやり取りするのとは異なり、AIで学習させたデータやデータセット、処理結果が流通し、AI機能をAPIなどによるシステム間連携で呼び出すことが現実的となってきている。概念的にこの方向は今後進展すると考えるものの、実業務でAI×データ連携を具体化させる場合、品質面で考慮すべきことが多々ある。AIのシステム化は、その多くの工数を、こういったデータ整備に費やしている企業等各主体も少なくなく、AI-Readyを目指す上で障壁の一つとなっている。以下に、データに着目した考慮点を列挙する。

考慮点 1) データのカバレッジ

AI解析に必要とする範囲のデータを保持できているか

考慮点 2) データの偏り

特定領域にデータが集中したり、偏ったりしていないか

考慮点 3) データの鮮度

十分なサイクルでデータが更新されるなど、鮮度が保たれているか

考慮点 4) データのAI-Ready度

AI利用出来るデータ形式に変換され、必要なアノテーションが付加されるなど、AI解析に足る状態、すなわちAI-Readyなデータになっているか

考慮点 5) データのガバナンス

個人が特定されないレベルまで情報加工が適切になされるなど、個人情報保護の観点で十分な対応がなされ、DFFT を考慮しているか

データガバナンスもエコ化推進の重要な観点になってきた。最近注目を浴びている構想が、総務省が掲げている DFFT(Data Free Flow with Trust：データ流通圏構想)である。2019 年 6 月の G20 大阪で日本が提唱し注目を浴びた、信頼できるルールの中でデータの自由な流通を促進する、という構想である。グローバルに見た場合、データガバナンスは GDPR による EU 型、中国の国家統制型、米国等企業主導の GAFA 型など複数のガバナンスモデルが並存しており、データのエコ化を推進するには、DFFT を広め、合意点を指す必要があると痛感する。

終わりに

DX 推進を加速するための 3 つのキーについて言及してみたが、何よりも大切なことは、こういった問題認識を共有し、知恵を出し合い、確実に前に進めていくための推進力であると考え。システムイノベーションセンターが設立に至った理由もそこにある。ただ情報共有していても解決はしない。具体的にアイデアを持ち寄り、具体的なビジネスケースで議論し、具体的なアクションプランを定め、トライし、結果が出るまで粘りつよく繰り返すことが求められる。

イノベーションエコシステムで日本経済を成功に導くためには、資金と権限、人脈を有する「大人」が、才能ある次世代に託す必要があると強く感じている。ここでいう才能とは、例えば「最新テクノロジー×DX ベースの新ビジネススキームを深く理解し、自律的に実行できる能力」だと考えている。特にスタートアップや企業内の出島組織をリードする優秀人材に、大胆なデリゲーションを断行してはどうか。

参加している企業、アカデミアに加え、スタートアップなど各種主体も参加できるようなスキームも確立すべきであろう。本稿をきっかけに、様々な議論が始まり、システムイノベーションセンターがその軸となって活動の輪が広がっていければ幸いである。

(2019 年 8 月 19 日原稿受領、Vol. 1.4 に掲載)

論説4

DX は日本企業に自己革新を求めている

富士通株式会社テクノロジーソリューション部門

シニアフェロー 宮田一雄 (SIC 実行委員)

目に見えるモノや振る舞いに対して精緻でとても優れた感覚を持っている日本人が、目に見えない対象をシステムとして捉えるという欧米人が得意とするシステム思考を学び知的習慣にしていくことは、Society5.0 を標榜する日本社会にとって本当に重要なことだと思う[1]。

しかし、モノからコトへのパラダイムシフトが起きている変革期に、ビジネスを生業としている企業、特にサイロ化してしまっている大企業において、システム思考を輸入するだけで問題が解けるのかとも思う。複数の技術革新が、つながり(コネクティビティ)の向上という意味で統合されていくデジタルは、いままでの価値観を変える変革を企業に求めている[2]。システムは人間が作りあげて運用し続けるものだからこそ、テクノロジーに加えて、人とプロセスなどのソフト面においてもアカデミアの知見が必要で、松尾博文先生(神戸大学)のSICニュースレターVol. 1. 3(2019. 7. 31)のOMについての論説の指摘は正鵠を得ていると思う。

私自身は、プロセスシステムに分類されるITシステムのベンダー側のプロジェクトマネジメントのバックグラウンドしかなく、社会インフラのようなプロダクトシステムを構築した経験もなく浅学非才ではあるが、DXは今の日本が無くしつつあるチーム力や人づくりという日本の強みを再び生かす変革のチャンスだと捉えている[3]。企業変革の視点で個人の見解を述べる。

○なぜDXがうまくいかないのだろうか

日本でも多くの経営者がDXに対する危機感を直感的に感じている。そこで、優秀な経営企画部門に検討を指示する。経営企画部門は様々なコンサル企業などから情報収集を行い、シリコンバレーのスタートアップを見聞してトップとともに彼我の差を認識する。そこでシリコンバレーに優秀な人材を送りこみ情報収集をして、スタートアップの新技术を事業部門に伝える。しかし何も生まれ

ない。これが典型的な日本企業の姿ではないだろうか。多くの日本企業で「ピッチャーを送り込んでも日本側に受け止めるキャッチャーがない」、「PoC(Proof of Concept)疲れ」、「PoC でやった振り」という言葉を良く聞く。

DX が突き付けているのは、企業の事業部門に閉じた継続的イノベーションではない。製造業にとっては製造業の経営からサービス業の経営への破壊的イノベーション、すなわち現在の利益を支えている経営モデルを新たな経営モデルに変革して利益を出し続けろという経営に対するプレッシャだ。経営トップ自身が DX 推進のリーダーシップをとり経営モデルの変革に取り組まなければ DX はうまくいかないのだ。

モノを品質良く作ってグローバルにスケールすることに最適化して人を育成しプロセスを組み立ててきた製造業にとっては、違うタイプの人と新たなプロセスを作らないといけないわけだから、人材流動性の低い日本においては特に難易度が高い変革になると思う。

もちろん、日本にも経営トップの強い意志で DX に対する取り組みを進めている先進的大企業も多くある。しかし、新たなサービス事業で既存事業を上回る利益を出している日本企業はまだ見当たらないのではないだろうか。グローバルにみても、サテア・ナデラ CEO の 2014 年からのリーダーシップで、ソフトウェア“製品販売業”からクラウド“サービス提供業”に見事に変革したマイクロソフトしか私は知らない。GE でさえ、いち早く Predix という IoT サービスプラットフォームを立ち上げたにも拘らず、従来型の営業がサービスの売り方を知らずに自社製品を売りこんでしまい変革に失敗して、ジェフ・イメルト元 CEO が作ったソフト会社は売却されてしまった。サービスは作ったが、従来型の営業とプロセスを変えることができなかつた事が要因の一つだと思う。

○破壊される側の既存企業から DX を考える

GAF A の様な先進企業に破壊されない為に、既存の大企業はどのようにして過去からの自己を革新すればいいのだろうか？

DX について様々な有識者が様々な定義をしているが、VUCA という造語を作った IMD (International institute for Management Development)) が世界の企業の調査のベースにしているアカデミアの定義を前提に考えてみる。

IMD の定義 DX : デジタルビジネストランスフォーメーション

「デジタル技術とデジタル・ビジネスモデルを用いて組織を変革させ、業績を改善すること。第 1 にその目的が企業の業績を改善することであり、第 2 にデジ

タルを土台にした変革であること、第 3 にプロセスや人、戦略など組織の変化をとともなうもの[2]」

製造業の現場力で高度成長を成し遂げてきた日本では、経営の変革が求められる第 3 のポイントが最も重要で難しいと思う。だからこそ、組織の変化をとともなうという事を理解して、企業トップが強い意志をもって変化への抵抗を乗り越えて欲しい。現在の安定した利益を出している間に、将来の飛躍の為に、新たな経営モデルを創出して人とプロセスを変え利益を出し続ける構造に変革する事を目指すべきなのだ。トヨタが 2018 年に自動車の会社からモビリティサービス会社になるという宣言をして大規模な投資を継続し様々な企業と手を組んでいる姿が頼もしい。まさしく DX の 3 つの目的に向かって経営が意思をもって動いていると感じる。

○何を何に変革するのか

トップが「DX の時代だ。みんな変革しよう！」と言っても変革は起きない。全社員に「何を何に変えるか」を明確に伝えて経営資源を投入しないと具体的な変革は起きない。DX は企業にプロセスや人、戦略など組織の変化を求めるものだから経営トップがリードしないとできない変革だ。特に今稼いでいる現場の人の立場で考えると暫くは稼げない事業に人材をシフトするという全体最適への貢献を求められることになるから、全社員に将来の危機を根気強く伝え変革後の成功に至るストーリーを見せないと現場力の強い日本での変革は進まない。

現在、将来価値で評価され利益を出さない身軽な破壊者が投資マネーを使い圧倒的なスピードで開発した俊敏なサービスで攻めてきており、大手の製造業の強みであった既存の資産（人とモノ）と品質を作りこむ為の堅牢なプロセスが弱みになってしまっている。その為、自社のビジネスが DX の影響を受けるといふ前提の企業であれば、下記の変化への対応が必要になる。

（1）ビジネスプロセス：「製品が主」から「サービスが主」に変える

パナソニックの津賀一宏社長は昨年の「次の 100 年の暮らしをつくる」の講演で「ここまで 100 年は数年毎にモノを UPGRADE する製品の事業をやってきた。次の 100 年は個々人の要望に適応し続ける暮らしの UPDATE 企業になる」と宣言された[4]。

東京大学の五神真総長も「製品が主でサービスが従の資本集約型社会からサービスが主で製品が従の知識集約型社会にパラダイムが変わっている」とモノから知識やデータに価値が変化している事を指摘されている[5]。

すなわち、スマホやセンサー、インターネット、クラウドのテクノロジー進化により、個々人の嗜好や機器の情報に合わせてソフトウェアを UPDATE し続けるサービス提供能力が製造業にも求められる時代に変化している。この変化に対応する為には、製造業は強いリアルモノづくり力を生かすために、ソフトウェアを武器に迅速に変化に対応できるサービス提供企業に変革しないとイケない。

津賀社長が日経新聞の 2019・2・18 インタビュー記事で、パナソニックをどう変えていくのかという質問にこう応えている。「今のイノベーションはほとんどソフトウェアで起きている。ハードウェアの進化が一定段階になると、ハードを動かすソフトがイノベーションを起こす構図だ。ハードは単にソフトのイネーブラー（目的を可能にするもの）になる」「ハードの中にあるセンサーやアクチュエータの進化が重要で、ソフトの更新と結びついて顧客の望む機能を実現する。今はハードにソフトが入っているが、（ネットにつながった）クラウド上のソフトがハードを動かすのが次のステップだ」「完成品を顧客に渡すのは一見素晴らしいが、すぐにコモディティ化する。私たちがソフト企業になるかソフト企業と組まないかイノベーションは起こせない[6]」。慧眼だと思うが、モノの品質を担保する為に数十年かけて作り上げてきた人とプロセスを、スピードを最優先に UPDATE し続ける人とプロセスを変えることは一朝一夕ではできない為、経営には我慢が必要になる。

(2) ソフトウェア人材：「日本独自の SE 人材」を「グローバルなシステム人材」に変える

イノベーションのほとんどがソフトウェアで起きているのなら、ソフトウェア人材が重要になることは自明だ。しかし日本では質量ともに、本物のソフトウェア人材が圧倒的に不足している。日本の SE（システムエンジニア）は和製英語であり、世界では類をみない特殊なソフトウェア人材である[7]。これは MIT のマイケル・クスマノ教授が分析しているとおり、日本が IT を製造業のアナロジーで捉えてしまい多重下請け構造の産業を作ってしまったからだ[8]。DX 時代に求められるソフトウェア人材は今の SE とは違う。同志社大学の中田義文先生が日経新聞で「ソフトウェアの価値創造と日本」というテーマで 8 回に分けて連載された記事の内容が今の日本のソフトウェア人材の問題を的確に指摘されていると思う[9]。中田先生が定義する「ロジカルなクリエイター（論理的思考

能力と数学的能力に基づき人々に楽しさや便利さを提供できるアーティスト)」という表現の人材が、SICで育成しようとしている「システム人材」の候補と捉える事ができると思う。まさしく知識集約型社会にパラダイムシフトする日本の為に最も重要な人材だと思う。

ソフトウェアが主役になる時代、世界のソフトウェア人材の年収の半分と揶揄される日本のソフトウェア人材を新たな「システム人材」にリカレント教育で職種転換して、日本企業も世界と同等に「システム人材」を処遇して、優秀な日本の若者が「システム人材」を目指す日本に変革しなければ将来の成長はないと感じる[10]。

今回こそ、日本の経営者はソフトウェアが価値創造のための源泉である事を理解して「システム人材」の育成に投資して欲しい。

(3) 対価の得方：「売り切りモデル」を「リテンションモデル」に変える

お客様の御用を聞き自社のモノを売る為に必要だった営業の役割が、コト売りになる事により徐々に職種転換を求められてくる時代になる。モノの価値を売り切る時代から、顧客を虜にして利用者はそれなくして生活できない状況にして対価を得つづける、すなわちリテンションのための努力をしないとイケない時代に変化しつつある。世界では、アップル、アマゾン、ウーバーをイメージすればいい[11]。マイクロソフトはUPDATEモデルへの変革を見事に終えて、このステージに入り、カスタマサクセスチームを作り、自社のクラウドサービスを売る為にパートナー教育を始めている。自社の「製品を売りたい」から、お客様が「サービスを買いたい」を創る行動様式に変えるために人材の再教育が必要となる。営業はお客様の成功の為に行動するカスタマーサクセス人材への転換が求められる。

営業力の強い大企業では既存の営業組織が大きな抵抗勢力になりここでもトップの強いリーダーシップが求められる。大企業でも終身雇用を約束できない時代、放置しておく若手の優秀な営業から転職を図ることになるため、社内での職種転換が必須になる。

(4) 組織の形：「階層型」を「アジャイル型」に変える

大企業も始まりはスタートアップで俊敏だった。しかし、組織が大きくなれば機能分化してサイロ化するのは必然だ。なぜなら、欧米流のマネジメント手法には、システム内に内在する複雑性、不確実性、コンフリクトに対するアプローチに3つの大きな歪みがあるからだ。

組織が大きくなり複雑になれば経営者は自分で全てマネジメントできないから分けたくなる。その結果、会社全体を多くの事業本部に分割する。分割された事業本部の責任者にとって与えられた数値目標の達成はできるかどうか不確実な予算である。しかし目標達成は必須であり、自部門のパフォーマンスの最大化を目指すことになり部分最適になる。更に分割された現場では、無理な指示や予算だと感じてでも予算設定時に上司とのコンフリクトを起こしたくないのでとりあえず頑張る行動を引き起こし、問題先送りになり問題を大きくしてしまう。酷い場合には仕事量に対するリソース不足が限界を超えて、最近多発している品質問題の隠ぺいの様な事態を発生させてしまう[12]。

この様にして生まれた階層型組織構造では、全社横断的に行動して、素早く製品やサービスを市場に出し、顧客の反応に適応してUPDATEし続ける俊敏な企業には勝てない。そこで、環境変化に柔軟に対応できるアジャイル開発手法を開発部門だけではなく全社に展開して変化に対応できる俊敏な組織を作り始めている大企業が世界で増えている[13]。これは世界でも緒についたばかりで時間のかかる変革ではあるが、チームで助け合って俊敏に仕事をするのは日本人全員が持っているDNAである為、今なら十分にキャッチアップできると考えている。

以上の、人とプロセスにかかわる変革は現場主導では不可能であり、経営の強い意思が必要である。短期的な成果を株式市場から求められるサラリーマン社長にとって困難な道ではあるが、松尾先生の指摘する「根こそぎシステムイノベーション」が日本の再生の道だと私も感じている。

○科学的な経営への変革

今の日本があるのは現場力に基づく品質の高いモノづくり力、まさしく日本の現場の「すり合わせ力」だった。しかし、日本の誇るトヨタ生産方式やゴールを共有して自然に助け合うチーム力という日本独自のソフト面の強みを、米国は1980年頃から産学で科学してLEANやSCRUMとして形式知化して生産やマネジメントを標準化してきた。そして、欧米企業が得意なトップダウンで、LEANやSCRUMを現場に適用させる事で日本が得意だった「すり合わせ力」を生かし始めている。その結果、現場力のみで戦ってきた日本の生産性は相対的に低下し、特にサービスの生産性は世界に大きく劣後している。

多様な人の知識とチーム力がますます重要な社会になっているのに、組織活動についてのエビデンスに基づく変革が不十分ではないだろうか。野中郁次郎先生が『失敗の本質』で指摘したように、過去の成功体験への過剰反応により、

科学を無視して突っ走った日本軍にならないように、日本の経営者は日本の現実に基づく研究をしているアカデミアの知見を取り入れて科学的に組織を変革していくことが必要だと感じる。野中先生たちが作りあげ世界が認める知識創造理論を基礎にして、社会や企業がいかに構想力を発揮するかが問われる時代になっている[14]。

木村英紀先生（SIC 理事・副センター長）が指摘されている「要素としてのハードが付加価値の源泉ではなくなり、付加価値がシステム構築にシフトしている」事を経営に理解させ、ハード単体の価値提供からサービスとしてソフトとハードを組み合わせるシステムとして価値提供する企業への変革をリードする人材が重要となる。その為の SIC の今後の活動、特に「システム人材」の育成に大いに期待している。

参考文献

- [1]佐藤知一：「世界を動かすプロジェクトマネジメントの教科書」技術評論社、2015
- [2]マイケル・ウエイド他：「対デジタル・ディスラプター戦略」日本経済新聞社、2017
- [3]宮田一雄：「WA のプロジェクトマネジメント」ダイヤモンド社、2017

- [4]<https://channel.panasonic.com/jp/contents/24690/>
- [5]<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/suishinkaigo2018/innov/dai4/siryoku6.pdf>
- [6]<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO41132670Z00C19A2EA1000/>
- [7]<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%A0%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%8B%E3%82%A2%E6%A6%82%E8%A6%81>
- [8]マイケル A. クスマノ：「ソフトウェア企業の競争戦略」ダイヤモンド社、2004
- [9] <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO21778510S7A001C1SHE000/>
- [10] <http://www.meti.go.jp/press/2017/08/20170821001/20170821001-1.pdf>
- [11]弘子ラザビニー：「カスタマーサクセスとは何か」、英治出版 2019
- [12]ラミ・ゴールドラット：「何が会社の目的を妨げるのか」、ダイヤモンド社

2013

[13] ジェフ・サザーランド他：「アジャイル全社展開の実践法」
ダイヤモンド ハーバード ビジネス レビュー 2018・10

[14] 紺野登、野中郁次郎：「構想力の方法論」日経B P社 2018.7

(2019年10月17日原稿受領、Vol. 1.6に掲載)

論説5

いつか来た道—人工知能ブームとシステム技術—

千葉商科大学教授、東京工業大学・筑波大学名誉教授

寺野隆雄（SIC 学術協議会会員）

いつか来た道…

最近マスコミに人工知能に関する記事が出ない日はない。たとえば、こんな内容の記事を目にしたら、みなさまはどう思われるだろうか？「開発と応用の日米最新事情」、「アプリケーション最新ケーススタディ」、「進化する AI ツール」。きちんとした内容であれば、システム理論・技術の研究開発に携わっている方ならば、思わず手にとってしまうのではないだろうか？

実は、これは 1988 年に日経 BP 社から発刊された「エキスパートシステム最前線」という 3 部構成のムックの目次である。「日米の最新事情」という言葉を「GAFAxBATH の最新事情」に置き換え、「進化する AI ツール」を「進化する機械学習・深層学習ツール」に置き換えれば、そのまま「本日の特集記事」になってしまいそうである。

私と同年代の人工知能研究者は、第 2 次の AI ブームと、その後のリーマンショックに伴う、AI への失望、そして深層学習とその応用による 2010 年代からの第 3 次 AI ブームを経験している。そして、その中のひとは、毎年のように「ああ、今年もまだ AI ブームは続いたんだ」と感ずるそうである。

私の手元に 1990 年から 2004 年にかけて情報処理開発協会（JIPDEC）から発刊された AI 白書 5 冊がある。情報処理推進機構（IPA）から発刊された AI 白書 2017 と AI 白書 2019 も拝見させていただいた。また、日経 BP「この 1 冊でまるごとわかる人工知能ビジネス」（2015）なども読んでみた。

そう、最近の AI ブームは、システムの研究開発の観点からは、第 2 次 AI ブームのコピーそのものなのである。

第 2 次 AI ブームの時に直面したシステム開発・実装上の課題は現在でもそのまま残っている。本稿では「いつか来た道」で経験した内容を含めて、人工知能とシステム技術について考えてみたい。

技術社会システムのロバスト性とレジリエンス性について

「安心と安全はタダ、もしくはタダに近い」と、私は若い頃（と書いてしまおう）は信じていた。関西大震災で高速道路が崩壊し、また、東北大震災で原子力発電所がメルトダウンを起こすまでは、ロバストだと思っていた我が国の社会技術システムは頑健ではなかったのである。

さらに、事故に対してもすぐに復旧するはずの鉄道システムや送電システムも、今年の台風の被害からわかるとおり、レジリエントではなかった。「大規模な自然災害が発生しても、法律でしばられているように電力はすぐ復旧するので、とりあえず 48 時間ぶんの備えをしておけば十分である」という説明を、何度となく聞いたことがある。そして私が携わった緊急時対応のシステムに関する複数のプロジェクトにおいても、このような想定は暗黙のうちに了解されていた。したがって、私の関係したプロジェクトは、少なくとも計算機実験レベル、論文発表レベルでは「成功」したことになっていた。しかし、これらは「実用化」ではない。

いずれにせよ、我が国の基幹システムは、大規模な異常事象について対策が練られていたのは「想定内」の範囲のみであり、それを越えた事象については、耐えることも柔軟に対応することもできなかったわけである。

システムは大規模・複雑になればなるほど、その境界を明確に定めておかなければ、デザインも実装も不可能である。しかしながら、その境界は今日においては絶えず揺れ動いていることを前提にしておかなければならない。ところが、このような領域に対するシステム理論・システム技術はいまだ未熟であり、今後のいっそうの研究が必要不可欠である。

この点において、システムの要求定義から実装までを一貫した手順で実施しようとするモデルベース・エンジニアリングの考え方は、境界が静的で明確な問題に対してはうまく働くが、そうでない問題には不向きであると私は考えている。

人工知能について

人工知能の研究は、人間の知的な行動を人工的に（計算機上で）実現しようという試みから始まっている。そのおおもとはゴーレムという泥人形であったり、からくり人形であったり、またフランケンシュタインだったりする。しかし、ここで問題となるのは「知能」とは何かがいまだに明確になっていないことである。

人間の知能の本質を明らかにしようという人工知能 (AI) の立場と、人間の知能の性質を明らかにした上で、その能力をコンピュータ利用によって高めようという知能増幅器 (Intelligence Amplifier: IA) のせめぎあいの中で研究開発が進展していくところが人工知能の非常に興味深い性格である。ところが、人工知能研究が開始されたころには、このふたつの考え方の違いは明確には理解されていなかった。したがって、AI の研究の中で、役にたちそうなところが IA になり、それが成功を収めると独立した研究分野になっていき、人工知能とは思われなくなる。さらに具体的な応用例で失敗が続く、もしくは思ったような成果が出ないとなるとブームが去るというサイクルが繰り返される。

このような観点から考えると、最近話題になっている「人工知能は何ができるかできないか」という議論には本質的な矛盾があると考えられる。コンピュータではどうして実現できないと思われているようなテーマをコンピュータを使って実装しようと努力することが、人工知能研究の大きな動機付けになっているのである。論理計算、ニューラルネットワーク、タイムシェアリングシステム、オンラインのソフトウェアアップデートなど、今日我々が普通に使っている技術の多くは人工知能の研究の中から、あるいはその派生として生まれてきたのであるからである。

第二次の人工知能ブームで経験したこと

第二次の人工知能ブームでは最先端の技術はエキスパートシステムであった。これは探索・推論の技術、知識表現の技術を実問題へ適用しようという試みであった。これには二つの定義づけが可能である。第一の定義は専門家のタスクを代替するというシステムの機能面を強調する。第二の定義は、それ以前のプログラミング技術には用いられなかったシステム構成上の特徴を強調する。これはシステム開発者の立場にたつものである。

第一の定義は次のようなものである。「エキスパートシステムとは人間の知性を用いなければ解けないような特定分野の問題を解決するのに、専門家の経験的知識 (Heuristics) を計算機に組み込んで、人間に代わって、あるいは人間を支援して問題解決を遂行することを目的としてシステムである。」この定義は対象とする問題領域の特定のタスクを効率的にこなしていくためには、その領域の専門家の知識が重要な役割をはたすという知識工学の考え方に基づいている。これが「知識は力である」というスローガンに象徴されている。

第二の定義は次のようなものである。「エキスパートシステムとは問題解決に

知識を陽に利用するシステムであり、知識とそれを扱う仕組みとを、それぞれ知識ベースと推論機構として分離し、独立性の強いふたつの要素からシステムを構成するソフトウェアである。」この意味では、エキスパートシステムを知識ベースシステム (Knowledge-Based System) あるいは、知識システム (Knowledge System) と呼ぶ。このような観点からは推論機構と知識ベースの実現にはどのような手段をとっても良いわけで、ファジィ推論、論理プログラミング、制約プログラミング、ニューラルネットワークなどさまざまな手法が使われる。同じく知識ベースの実現には、フレーム、オブジェクト、意味ネットワーク、スクリプト、ブラックボードなどさまざまな手法が開発されてきた。

機械学習の基本的な方法もこの時代が開発されているが、それらはあまりエキスパートシステムには利用されなかった。それは大量のデータを自動的に収集する仕組みがなかったこと、インターネット上のデータの使用方法が明らかになっていなかったこと、当時のコンピュータの能力が低かったことによる。

第二次の人工知能ブームは1990年代初頭に突然終わりを告げる。我が国では、表面的には第五世代コンピュータプロジェクトが成功とはいえない状況で終了したこと、いわゆる平成バブル景気がはじけることによって企業の先端システムに対する研究投資が一気になくなってしまったことによる。

技術的な問題は何だったか？

しかし技術的には少し事情が異なる。要は「専門家の経験的知識」を収集し、定式化することが非常に難しく、せっかく実用化したシステムもすぐに古くなってしまったのである。エキスパートシステムという用語が少なくともマスコミから消えていった理由はルール形式で書かれたシステムは「知識」の可読性が良いという歌い文句とはうらはらに、実際のところ非常に個別性が高く保守性に乏しいというシステムだったのである。

たとえば、我が国の製鉄業では第二次の人工知能ブームの頃、各社各様の高炉の運転支援のためのエキスパートシステムを実装していた。高炉の制御という基本的には同じ対象の問題に対して、A社のシステムには数百のルールがあり、B社のシステムには2000を越えるルールがあるという具合に、さまざまなシステムが稼働していた。

当時、エキスパートシステムの実装方法の要は基本的には定性的なものであった。たとえば、専門家の知識を表現した「炉のX点の溶鋼の色が赤色であれば、コークス量を増やすべきである」というルール記述は、そのまま記号として

知識ベースに格納でき推論に利用できる。しかし、計測法が改善され、「溶鋼が赤色」という情報が「摂氏 1000 度」と測定できるようになった場合は、このような定性的な専門知識は、定量的な測定データとそれに対応する制御方法、制御プログラムとして、まったく別の方法で記述しなおさなければならない。知識ベースが巨大な場合はこれは非常に手間のかかる作業となる。結果として、いつのまにか高炉の制御システムは「エキスパートシステム」とは呼ばれなくなっていった。

そして今日、少なくともマスコミの報道によれば「データに基づく深層学習によって、高炉制御の AI 化」がふたたび試みられるようになってきている。第二次の人工知能ブームはあたかも存在していなかったかのように。

もちろん最新の技術を適用したとしても、システムは一度実装され運用が開始されると、その瞬間から不断のメンテナンス作業が必要になる。システムはすぐに古くなるのである。これにはふたつの理由がある。

一つ目の理由はシステム境界の変化に起因する。前節で述べた社会技術システムにみられるような外部環境の変化や上述した計測方法の改良などの技術進歩による変化である。システム境界が安定している場合には、少なくともコンピュータシステムは劣化することなく動き続けることができる。

二つ目の理由は万能な技術は存在しないということである。時流に乗った技術はもちろん存在する。人工知能の範囲で言えば第一次のブームの中心は汎用の問題解決機能であり、第二次のブームの中心はエキスパートシステムである。そして第三次ブームにおいては深層学習などの機械学習が中心技術である。特に今日ではコンピュータ関連の研究発表の機会が増えており、新しいアルゴリズムがただちにツールキットとして公開され、ほぼフリーで利用することができる。新しい技術に対する敷居が低くなったがゆえにすぐに活用され、その限界が明らかになる。このサイクルが非常に短くなってきていると感ずる。

データさえあれば…

「データさえ準備できれば機械学習で何とかできますよ。GPU つきのワークステーションか、クラウドコンピュータが使えれば問題ありません。データをください。ツールはありますから。」このような発言が「若手」の計算機科学研究者やベンチャー企業の「アナリスト」からしばしば聞かされる。さらに人工知能ブームに危機感を抱いた企業トップに命じられて「AI」の導入を急ぐ中堅以上の企業の担当者は非常に多い。そして多くの AI ベンチャーは企業から渡された何ら

かのデータをもとに三か月程度の短期間で何かの分析結果を出してくる。

しかし、当然ながらこの程度の結果では業務をシステム化することはできない。中規模以上の企業においてもデータがそもそも整理されておらず、何がシステム化に必要なデータかが認識されていないことがあまりにも多い。私の経験した三つの事例を示す。

一つ目は、スーパーマーケットの顧客の店内行動を分析しマーケティングに活かすための研究である。このプロジェクト開始当初はそもそもこの種のデータは全く存在しなかったため、RFID タグを利用したデータ収集システムを開発した。そして 1 週間分の顧客行動データを整理するのに半年程度の作業が必要であった。

二つ目は、大規模なロジスティックデータの分析から業務改善の方策を見出す研究である。このプロジェクトでは既存の業務システムから全国の 1 日分のデータを取得することがまず一仕事であった。業務システムが別会社で運用されていたため迅速にデータを取得することができなかったためである。さらにこの 1 日分のデータをいわゆるビッグデータとして分析するための前処理に 2-3 週間の作業が必要であった。

三つ目は、過去から現在にいたる大型工業製品のデータ分析である。この目標は製品サービスに関する意思決定プロセスの高度化にあった。対象企業はきわめて高度な情報システムを構築し運用していたにもかかわらず、関連会社を含めたシステムは統合されていなかった。さらに過去から現在に至る膨大なデータには矛盾が多く、開発側と営業側のデータの整合性が取れていない状況であった。そして企業担当者とともに各部門にヒアリングを実施し、二年以上に及んでデータクリーニング作業を行った結果、ようやく何が問題であったかが判明し、これらのデータを意思決定に利用するとともに、次期のシステムの仕様化につなげることとなった。ここで、初めて最近の統計パッケージや機械学習手法が適用できるようになる。

データがない、データがきたない、データは存在するが意識されていない…、このような状況は第三次人工知能ブームの中であって、日本中の企業で発生している現象であると思う。しかしながら、すでに数多くの実践的な教科書やネット上の情報は豊富に存在するので、深層学習を含む機械学習ツールを使いこなして業務システムに適用することは難しくはない。この意味では最近政府が発表した「人工知能技術者 20 万人/年」の育成計画自体もはや時代遅れのように感ずるのである。「民」にまかせる方が良い。

それならどうするか？

従来システム技術は問題解決に必要な知識を顕在化し、誰でもが使えるような形に定式化することを目標に進歩してきた。そこで、システム化して扱う問題を構造(Structure)と定義(Definition)という軸で整理する。世の中に存在する問題は、通常、構造が不明確で定義が明確(ill-Structured & ill-Defined)でないものである。問題解決システムを社会実装するためには、これを構造も定義も明確なもの(Well-Structured & Well-Defined)にしなければならない。たとえば、自動運転システムを社会実装するにはさまざまな工夫を凝らす必要がある。これには、一般的に2つのやり方が考えられる。悪構造な問題を良定義な問題に変換してから、社会実装にもっていきやり方と、悪定義な問題を良定義な問題に変換してから社会実装にもっていきやり方である。

前者は、学術的な接近法である。たとえば、よくわからない争いの問題を定義が明確な囲碁・将棋のゲームに変換し、これをコンピュータシステムとして実装する方法がこれである。このような問題では解きたい問題の定義は明確ではあるものの、どのように解けばよいのかがわからなかったために、従来は人工知能の問題として扱われていた。ここで対象となる「知能」とは、アルゴリズムとしてどれだけ効率的に実装できるかという点に存在する。多くの数理計画・整数計画に定式化されるオペレーションズ・リサーチ(OR)の問題はこの範疇にはいる。そしてこのような問題はアルゴリズムをうまく設計するという意味で情報科学的接近が中心となる。

それに対して、後者は「わざ」として伝承されるような問題に対する接近法である。たとえば、自動車の運転がうまいとか、プラント操作がベテランでなければできないといった問題がこれに相当する。エキスパートシステムをはじめとする第二期の人工知能ブームの時は、この解決に発見的方法を直接コンピュータシステム上に実現しようとした。これは人間の知的活動をコンピュータに実装するという点において、まさに人工知能の適用だったわけである。

こうして考えると、機械学習を中心とした人工知能の手法も情報科学的方法と人工知能的な方法とに分類できる。情報科学的方法は統計学から発展した統計的機械学習手法であり、人工知能的な方法は深層ネットワークを用いたニューラルコンピューティングの方法である。前者は理論的に明快であり、どこに限界があるのか比較的明確であるのに対して、後者は様々な分野ですばらしい成果を出しているにもかかわらず、何故うまくいくのか不明確であるという性質を持つ。

実は情報科学的な接近法と発見的手法による接近法との差異はさほど明確な

ものではない。機械学習の概念が情報科学・工学の観点から明確に定式化されたのは、最近であり、アルファ碁が発表されるまでは、囲碁のプログラム化には専門家の知識が不可欠であると思われていたのである。

以上の考察は図1のようにまとめられる。

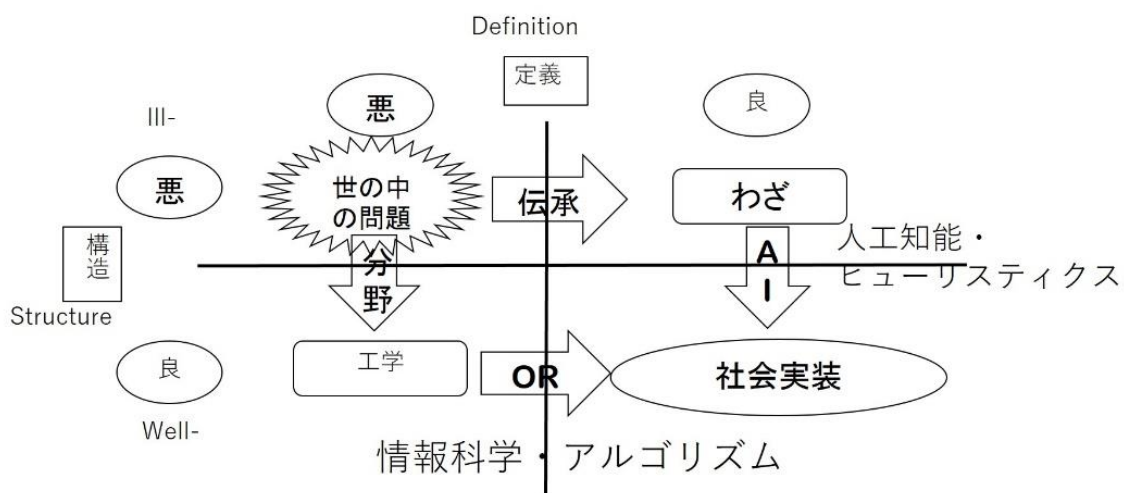


図1 問題の扱いと社会実装までの接近法

おわりに

本稿では最近の第三次の人工知能ブームがシステム技術の観点からは、かつての第二次の人工知能ブームのときとほとんど同様な状況にあることを述べた。本稿の中では具体的に文献を参照しなかったが、私の発表した関連する文献を以下に示すので、より詳しくはこれらを参照されたい。

参考文献

- [1] 寺野隆雄：人工知能研究の過去・現在・未来 - 人工知能から人口知能へ. 物理学会誌, Vol. 74, No. 7, pp. 454-462, 2019. (査読あり)
- [2] 寺野隆雄：第三次人工知能ブームを超えて-鉄鋼業におけるシステム化を考える-. ふえらむ(日本鉄鋼協会), Vol. 23, No. 12, pp. 641-650, 2018.
- [3] 寺野隆雄：人工知能技術を使いこなすには. 経営システム, Vol. 27, No. 4, pp. 207-212, 2018年1月.
- [4] 寺野隆雄：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, 2016年3月.

(2019年11月20日原稿受領、Vol. 1.7に掲載)

論説6

SICにおける産業界とアカデミアとの連携の進め方

東京大学教授・副学長 吉村 忍 (SIC 理事・学術協議会主査)

システムイノベーションを旗印に、様々な産業分野の多くの企業・産業人と、学术界の人材が集まるシステムイノベーションセンターにおける、両者の連携の進め方について考えてみたい。

従来の産学連携、特に日本で行われてきた多くの産学連携では、個対個、一研究室対一部署等で行われることが多く、その場合、相手を双方あるいはどちらか一方がよく知っているため、マッチングは比較的取りやすかったように思う。また、企業側の抱える直近のニーズと大学側のシーズがはっきりしており、それらがある程度オープンになっていると、ニーズ・シーズのマッチングも取りやすくなる。これらは、特に、鍵を握るシーズが特定の技術であったり特許等であると特に明確となる。もちろん、従来の産学連携でも課題はある。産学連携（共同研究）によって生まれた新しい成果物の知的所有権の所在や活用法について、担当者同士では合意できていたとしても、企業の知財部と大学の知財部の間で折り合いがつかなくなり破談となるケースも多く、これは、日本に限った話ではない。

このような従来型の産学連携に対して、東京大学では、五神真総長が総長に就任した2015年以来、組織対組織で進める新しい枠組みの取り組みを「産学協創」と称して強力に推進してきている。その特徴は、企業と大学のトップ同士が実現すべき未来社会像を共有し、企業と大学が組織対組織でがっちり組み合い、今後取り組むべき未来ビジョンを創生し、その上でその未来ビジョンに繋がる共同研究テーマ群を組成し、3年あるいは5～10年の中長期にわたり推進するというものである。未来ビジョンを創生するにあたり、それが両者にとって納得いくものであることと同時に社会も「なるほど」と納得するものであることが重要となる。そもそも、企業単独で対応したり解決できることであれば、わざわざそのようなテーマを産学協創に持ち込む必要はないし、特定の企業の利益だけのために、公共財としての大学全体のリソースを使って組織を上げて取り組むことはありえない。また、その未来ビジョンには公共性があるべきであると同時に、単なるスローガンではなく、社会的な賛同を得ながら経済的メカニズムを通し

て社会実装が推進されるようなものであることも求められる。さらに、未来ビジョンそのものやそのもとで推進される共同研究テーマの特徴として、「文理の協創」が多くの場合に本質的な役割を果たす。それは、一例として、よりよい未来社会を実現するための AI やデータ利活用のあり方を考えてみれば明らかなように、未来ビジョンに係るもので、純粋に自然科学や技術だけで解ける課題はなくなってきたからである。ただし、「文理の協創」という時には、文と理が equal の立場でぶつかり合う、あるいはぶつかり合いたいと思うことが求められる。

具体的な未来ビジョンの創生にあたっては、複数回開催されるラウンドテーブル (R T) という取り組みを通して、大学内の様々な部局、また企業内の様々な部署の人間が集まり多様な角度から議論し、徐々にその内容をまとめては、たたき、次第に形作っていく。R Tには、大学の産学協創担当理事や副学長、企業の経営や企画、研究のトップ層も参加する点も重要である。各回の R Tにおいては、企業側の問題意識の紹介と、参加教員のショートプレゼンを行うが、それは、それぞれを知るための準備段階にすぎず、その後、自由討論の中で、両者が取り組むべき未来ビジョンに関する議論を行う。未来ビジョンに関して、大学教員が答えを知っていて企業側に教授するということはもちろんあり得ないので、R Tではお互いのメンバーが、組織内の立場を忘れ、先入観抜きでフラットに議論に参加することが重要である。企業側の提示する問題意識に触発されて、大学教員側の頭が回転をはじめるとし、大学側の多様な観点からの自由な意見に触発されて、企業側メンバーの頭も働き出す。もちろん、R Tの1回目、2回目は、議論がさまよい議論が発散するだけであるので、企業側に少なからず不安がよぎるが、その議論を持ち帰り大学側でも整理し、企業側でも整理する中で、少しずつ未来ビジョンの芽が見えてくる。また、同時に、それならば今度はこのような視点で R Tの議論を進めたいという気付きもあり、それに適した新たな教員、また、企業側の別の部署の人間に集まってもらい、次の R Tを実施する。なお、当然ながら両者がこのような踏み込んだ議論を行うために、R Tに参加するメンバーには NDA を課す。ただし、このような産学協創の取り組みを通して形成される未来ビジョンや共同研究の成果は、ある程度進んだ段階では、オープンフォーラムを開催したり、著書を表したり、提言をまとめるなどして、社会に発信し、公論に提起して、さらに、大きな社会との相互作用ループを形成していく。

これまでの様々な企業との R Tの議論を通して気づいたことであるが、実は、できあがった企業組織においては、各メンバーは各自の所属する部署の所掌の範囲を超えるような議論に慣れておらず、議論が停滞することもしばしばある

という点である。自社の主として活動するビジネス分野が、現在のように大きく急速に社会変革が進む状況において今後どうなるのか、どこに展開していくべきかを考えているのは経営層の方々であるが、企業の中核を担う人材の思考はまず直近の技術課題解決やビジネス展開に焦点が定まっており、普段はそのような大きな視点で考える機会が少ないのではと感じている。であるからこそ、RTには企業のトップ層の方にも参加いただくことが肝要と考えている。

一方、大学の教員側も本来は自由な発想で自分自身の興味・関心に従い研究を進める自律的な存在であるはずなのに、最近の競争的研究資金への申請に慣れてしまい、また、いわゆる数値による評価に毒されてきており、はじめはそうした幅広の未来ビジョンの議論に乗れないようである。しかし、産業界からの刺激を通して、次第に頭が覚醒してくると、本来の大学人としての自由な発想を取り戻していくし、その刺激を受けて、企業側参加者も次第に覚醒していく。

なお、未来ビジョンの議論からはじめる産学協創のもう一つの効用は、現状からのフォアキャストに固執すると、制約が多すぎて途端にデッドロックにぶち当たってしまい、やらねばならないことが多すぎて途方に暮れてしまうところ、未来ビジョンを思い描くことにより、そこからバックキャストして、現状からのフォアキャストとのギャップに気づき、それを乗り越えるための策を考えはじめることができるという点である。東京大学の産学協創に関する公開情報として、日立東大ラボのHPを引用しておく(1)。この中から、日立東大ラボでまとめた著書や提言等にアクセスできる。また、「文理の協創」に関しては、日本学術会議の総合工学委員会が主催する無料の公開シンポジウム「総合工学シンポジウム 2020～文理の協創によって社会的課題に立ち向かう～」が3月12日午後に日本学術会議講堂で予定されているので、こちらも参考にしていきたい(2)。

さて、翻って、SICではどうだろうか。様々な産業分野の多くの企業がその趣旨に賛同し、多くの大学人も学術協議会メンバーとして名を連ねている。なお、私自身は、学術協議会に加わって、メンバーには個人として参加していると同時に、その人が所属する大学の学科・専攻・研究センターなどとSICをつなぐゲートウェイの機能も期待されていると考えている。たとえば、私が所属する東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻の教員や東京大学大学院人工物工学研究センターの教員などは多くがこのSICのスコープと共鳴し合うと感じている。このようなSICそのものが、これまで日本に存在しなかった新しい産学連携を進めるためのSystem of Systemsである。これらが有機的につながり、System of Systemsとして、特に産学連携に力を発揮していくためには、まだ、

何かが足りない。足りないと思われることを以下に列挙する。

- ①企業人も大学人も、それぞれの抱える課題や保有するシーズを理解できていない。特に、システム課題やシステム技術は、特定のテクノロジーや特許のように知りさえすれば使える、使用許諾さえあれば活用して課題が解決できるというものではない。そこに一つ大きなハードルがあると思う。
- ②当然のことながらどの企業にも企業秘密の壁があり、NDAなしの場でオープンに話せることは限られている。逆にオープンな場で語られることは、当たり前聞こえることばかりということもあり得る。
- ③システム課題においては、関連する分野や範囲が幅広く、一部を聞いただけではなかなか本質に迫れない。

上述した状況を乗り越えて、システム課題解決に向けて産学が連携を進めていくためには、企業のシステム課題と大学人のシーズを橋渡しする機能が必要であり、その際に、両者が安心して議論できる環境整備が必要である。前者は、企業課題と大学シーズを橋渡しするコーディネータ機能である。SICのような一般社団法人としての仕組みでは、産業人も大学人もある部分はボランティアとしてその活動に参画し、一社だけ、あるいは一大学人としての取り組みだけではできないような、情報共有やある種より大きな課題解決やブレイクスルーを狙っていると思う。したがって、両者を橋渡しするコーディネータ機能もボランティアとして提供されることが必要不可欠と思う。コーディネータ機能を務める人がSICにボランティアとして提供できるのは、その人のエフォートの5~15%ぐらいが限界と思う。

しかし、その橋渡し機能の結果、産学連携のマッチングが成立する、さらには、企業の持つ特定課題を解決したり、コンサルする体制が構築できるのであれば、それらは具体的な共同研究に移行していくことができるだろう。そのようにして、次第にお金も回るようになれば、持続可能となる。

このようなシステム課題とシーズのマッチングや課題解決の事例を積み上げながら、一方でシステム課題解決に係る協調領域のノウハウを共有化していければ、それがひいてはSICの、日本の大きな財産に成長していけるだろう。

このような観点からSICを動かすことこそ、最も間近で重要な我々にとっての

システム課題ではないかと考えている。

参考文献

- (1) <http://www.ht-lab.ducr.u-tokyo.ac.jp/>
- (2) <http://www.scj.go.jp/ja/event/pdf2/284-s-0312.pdf>

(2020年1月4日原稿受領、Vol. 2.1に掲載)

論説7

システムイノベーションのためのシステム構造化手法の期待と展望

東京大学 大学院工学系研究科 人工物工学研究センター教授
青山和浩 (SIC 学術協議会幹事)

はじめに：関係の変容による社会的構造の変化

現在、国の緊急事態宣言が解除されて経済活動を復活しようとしている状況であるが、新型コロナウイルス (COVID-19) 感染の第二波への備えは怠れない状況であることは変わらない。皮肉なことに、COVID-19 の感染拡大によって深刻化する様々な問題の顕在化は、私たちが生きる世界はシステムであることを痛感させることになっている。感染ルートの特定で認識される感染者の物理的接触は言うまでもないが、眼に見えない COVID-19 に対する恐怖は人の活動自体を制限し、社会的距離 (ソーシャルディスタンス) の言葉で象徴されるように、他人との関係に対する対応を大きく変えようとしている。感染を遮断するために、ロックダウンや外出禁止などは人と人との物理的な関係を断ち切り、人々の様々な関係を変容させてしまった。この変容が自己の内面を変容させ、社会システムを構成する様々な要素の変容が連鎖することによって、社会システム全体が変容しようとしている。

システムは様々な要素の相互作用からなると説明されるが、社会システムの基本構成要素である人をはじめ、様々な構成要素が変容し、それらの要素間の関係が変容することによって生起する社会システムの構造の変化をリアルタイムに観察している状況である。このような緊急的な状況で執筆依頼を受けた SIC のニューズレターの原稿として、何について書けば良いのか思い悩んだが、システムとアーキテクチャについて考えることを書き綴ることとし、With-Corona や Post-Corona の社会システムのデザインに向けての議論になれば幸いである。

システムと構造／アーキテクチャ

システムは多種多様な要素から構成され、それらの要素が相互作用することによって、要素が有する特性／機能の総和以上の特性／機能を発現する特徴を

有する。システムの存在については、システムの存在論（システムは実体として存在）やシステムの認識論（システムは認識によって存在）などが議論される。システムを構成する要素間の関係の存在については認識によって理解されることも多く、要素間の関係の認識によってシステムが認識されるとも考えられ、筆者は、システムは認識によって定義されると考えている。実在することはないシステムの境界は認識によって確定される。認識されたシステム境界の内部がシステムであり、そのシステムを構成する要素が議論される。それと同時に、システムの外部とシステムの関係が議論される。

ところで、SIC の活動に関係する組織として、IPA（独立行政法人 情報処理推進機構）の中にデジタルアーキテクチャ・デザインセンター（Digital Architecture Design Center: DADC）が、2020年5月15日に設立された。ここで使用されるアーキテクチャ（Architecture）の言葉は、Systems Engineering（システムズエンジニアリング）において重要な用語であり、今日、注目を集めつつある。

Systems Engineering に関する解釈は様々存在するが、Systems Engineering はシステムを理解（認識と解釈）し、システムをデザインし、マネジメントする体系であると考えられる。この体系の中で、システムを認識（解釈と理解）することが最も重要なことであると、個人的に理解している。システムを認識するという事は、構成要素の認識は勿論のこと、構成要素間に存在する関係の認識であり、要素と要素が関係によって結びついた構造がアーキテクチャ（構造）であると理解できる。

アーキテクチャを IEEE では「構成要素の設計や進化を左右するような、構成要素の構造、構成要素間の関係、そして原理や指針」、白坂成功（慶應義塾大学）は「システムと外界との関係及びシステムを構成する要素とその構成要素間の関係」と定義している。映画「Matrix」の中ではアーキテクチャの設計者であるアーキテクトが登場したように、情報システムの世界では昔からアーキテクチャという用語は多く用いられてきたが、建築家／建築技師は Architect と呼ばれ、造船技師は Naval Architect と称される。Architect は Engineer とは異なると認識されることも多く、システムの構成要素間の関係を強く認識し、構成要素とその要素間の関係をデザインする行為は、エンジニアによる設計とは違った様相を持つようである。

ものづくりでのアーキテクチャ：インテグラル・アーキテクチャ

製品設計において、Ulrich は製品アーキテクチャ(Product Architecture) という概念を提案した。Ulrich の製品アーキテクチャとは、製品を機能的・構造的な設計要素(コンポーネント)へと分割した上で、それら構成要素間の関係を形式的に捉える考え方である。具体的には、製品の機能要素を並べて関係のあるものを結んだ機能構造を作図し、機能要素から物理的コンポーネントへ対応づけ、相互依存的な物理的コンポーネント間のインターフェースを指定して製品アーキテクチャを設計する。このように、要素間の関係に着目したモデリングがアーキテクチャの設計として提案されている。

東京大学経済学部の藤本隆宏教授は、Ulrich の製品アーキテクチャの概念を日本のものづくりの特徴の議論へ適用し、「擦り合わせ」がものづくりの価値の源泉であるといったアーキテクチャ論を議論した。具体的には、Ulrich と同様に製品システムのモジュール・アーキテクチャとインテグラル・アーキテクチャを論じており、システムの機能要素と実体要素(物理要素)との対応関係をアーキテクチャと見做した上で、構造的特徴を議論することによって「擦り合わせ」の価値を議論している。

MIT のSue 教授は、アーキテクチャという用語は用いていないが、公理的設計(Axiomatic Design Theory for Systems)の中で機能要素と実体要素(物理要素)との対応関係について議論している。ここでは、独立公理と情報公理によって整理されている。

- ・ 公理1：独立公理 要求機能(RF)は、設計目標を記述する“最小個数の独立した必要条件”として定義される。このときFRの独立性は常に保たなければならない。
- ・ 公理2：情報公理 独立公理を満たす設計の中で、最小の必要情報量をもつものを最良の設計とする。

以上のように、公理的設計では要素間の関係を定量的に把握する指標として情報量の概念を導入している。良い設計は情報量を最小化されたものが良い設計として定義されている。複雑な関係は情報量が多く、簡潔な構造は情報量が小さいという指標で評価し、設計の特徴と、設計を効率よく進めていくための留意点について議論している。

- ・ Ulrich, Karl T., The role of product architecture in the manufacturing firm, Research Policy, 24, pp.419-440, 1995

- ・ 藤本隆宏, 製品アーキテクチャの概念・測定・戦略に関するノート, CIRJE ディスカッション・ペーパー・シリーズ, J-78. 2002
- ・ Suh, N. P., The Principles of Design, Oxford University Press, New York, 1990, (畑村洋太郎監訳, 『設計の原理—創造的機械設計論—』朝倉書店, 1992)
- ・ Nam P. Suh, Axiomatic Design Theory for Systems, Research in Engineering Design, pp.189-209, Springer-Verlag London, 1998
- ・ Suh, N. P., Axiomatic Design - Advances and Applications, Oxford University Press, New York, 2001, (中尾政之・飯野謙次・畑村洋太郎共訳『公理的設計：複雑なシステムの単純化設計』森北出版, 2004)

構造化手法 (Structural Modeling : SM) 手法 : 様々な要素の関係構造

多くの多種多様な要素が存在し、それらが相互に関係を持ちながら存在する現実の複雑な問題を、“要素の集合とその上に存在する関係の集合”であるシステムとして捉え、その構造をモデル化する手法として構造化手法 (Structural Modeling : SM) がある。この手法におけるシステム構造のモデル化は、1) 構成要素の抽出、2) 要素間の関係付け、3) 構造モデルの作成、4) 構造モデルの解釈と検討 の手順で実行される。ISM (Interpretive Structural Modeling) 法は、最も有名な構造化手法である。ISM 法の Interpretive が意味するように、構造化手法では「4) 構造モデルの解釈と検討」が重要な役割を担う。ISM 法以外にも、DEMATEL (DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory) 法などが知られており、「Trial and Evaluation」を行いながらシステムの構造を認識し、社会システムの問題解決で利用される。

機能要素、部品要素、物理要素などの様々な要素から構成される製品システムのシステム設計においても、要素の様々な種類の関係を考慮する必要があり、関係構造を俯瞰するための手法として構造化手法の利用は注目すべきである。

Design Structure Matrix (DSM) : 単一種類の関係構造

ISM 法は 1960 年代に提唱された歴史ある手法であるが、1990 年代に着目された構造化手法として Design Structure Matrix (DSM) がある。システムを構成する要素間の依存関係を分析するという観点で、DSM の Design の代わりに

Dependency が使用される場合もある。DSM は有名であるので知っている人も多いかと思われるが、ISM 法などの構造化手法と同様に、要素間の関係をマトリクスでモデリングすることによって、その関係構造を構造解析する手法である。汎用的な手法として提案されており、モデリングする対象となる要素は様々に許容される。製品の開発設計では、設計パラメータ間の依存関係や部品間の接続関係などが選択される。また、組織のマネジメントを分析する場合は、組織の構成員間の関係やタスクの先行関係などが選択される。構造解析の数学的手法は ISM 法の手法と同様であり、行と列を入れ替えながらマトリクス 内に相互関係の塊（クラスタ構造）などを見出し、複雑な構造から特徴ある部分構造を抽出することによって処理される。この抽出された部分構造に解釈を施し、構造を理解することになる。

このように要素間の関係を記述し、構造分析する ISM や ISM のモデリングには注意が必要である、モデリングする要素間の関係である。既述のように要素間の関係は様々存在する。依存関係であったり影響関係であったり、因果関係であったりとその列挙には厭わないが、同じ種類の要素の要素間には多様な関係が存在するので、モデリングの際には、構造を理解／分析する目的に相応しい関係を選択し、「2) 要素間の関係付け」を行う必要がある。要素の粒度も問題となるが、要素と要素間の関係の記述によって構造分析が実行されるので、その結果は入力データの正確さに影響を与えるため、関係の記述はそれ以上に重要である。このことはこの手法の弱点であるとも言える。

- Eppinger, Steven D. Innovation at the Speed of Information. Harvard Business Review. 79, 1, p.149–158. 2001
- 森 俊樹, 工程・組織効率化のための設計手法, 東芝レビュー Vol. 60 No. 1. p. 44-48, 2005
- The Design Structure Matrix (DSM), <https://dsmweb.org/multiple-domain-matrix-mdm/> (2020.05.31)

Domain Mapping Matrix (DMM) : 異なる種類の要素間の関係構造

ISM や DSM は任意の同一種類の要素に対して、その要素間の関係を構造化することを目的とするものであったが、異なる二種類の要素とそれらの要素間の関

係をモデリングする手法として Domain Mapping Matrix (DMM)がある。DMM の典型的な例として有名な手法としては QFD (Quality Function Deployment) を挙げることができる。QFD は三菱重工・神戸造船所で開発された日本発のグローバル手法である。QFD の詳細な説明は割愛するが、製品開発における顧客が製品に対して要求する品質 (要求品質) と、それを実現する製品特性 (設計品質) の対応関係を記述するモデルであり、その対応関係を品質標と呼ばれる表形式で記述する。

QFD の基本的な考え方は様々な要素間の対応関係に拡張され、TQM (Total Quality Management) の中心モデルとして活用されたりもした。TQM では、製品開発における様々なフェイズで考慮される様々な要素が対象となり、それらの要素間の対応関係を記述することによって、製品開発におけるマネジメントを実現した、先に述べたが、製品開発に対する異なる様々な視点から捉え、各視点で認識される要素間の関係に着目している。また、構造分析を主目的とするものではないが、様々な種類の変数間の関係を制約式によって関係づけられた構造マトリクスも外山らによって提案されている。DMM においては要素間の対応関係という一般的な関係に限定されず、タスクとリソース間の処理関係、タスクと入力/出力情報間の入力関係/出力関係など様々な関係が扱われることが特徴である。

- ・ 西村弘一(1972) : 「船の設計と品質表」, 品質管理, Vol23, 5月臨時増刊号, pp71-74
- ・ 鈴木康之(1972) : 「船舶用大形ディーゼル機関における設計改善活動の試み」, 品質管理, Vol23, 5月臨時増刊号, pp. 16-20

Multiple Domain Matrix (MDM) : 複合領域の要素間の関係構造

MDM (Multiple Domain Matrix) は、その名称が示すように、複合的なシステム領域を対象とし、異なる種類の要素とそれらの要素の様々な種類の関係を記述するモデルである。その具体的な構成要素は、様々な種類の DSM と DMM であり、それらが組み合わされることによってモデリングされる。別の表現を用いると、システム内の内部構造は DSM で考慮され、DMM はシステム間の構造を扱うとも説明できる。昨今ではシステムズエンジニアリングの対象として様々なシステムが相互関係する System of Systems (SoS) が注目されているが、この SoS を認識するためには、MDM 的な構造の認識手法、構造化手法は親和性が高いもの

と理解でき、MDMによるSoSを対象とした構造分析手法が待望されるところである。

MDMの特徴的な手法として、関係の類推がある。要素間のある種類の関係から、関連する要素間の別の種類の関係を類推する手法である。類推方法は関係の種類に応じて様々な議論が必要であるが、例えばAmazon等の商品のレコメンデーションではユーザの購入履歴を使ってユーザー間の関係を抽出し、多数の商品の中から購入を推薦する商品を推薦するといった関係の類推方法である。因果関係から優先関係を、優先関係から前後関係などを類推することは、関係の関係を認識することと理解でき、関係同士が関係づけられることは興味深い。

- Udo Lindemann, Maik Maurer, Thomas Braun, Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design, Springer Science & Business Media, 2008/09
- 青山和浩, 大泉和也, 古賀毅, 製品システム設計におけるシステムの構造分析とマネジメント- 横幹, 2016
- 外山味之 構造マトリクスとは, 第1回横幹連合コンファレンス 補助説明資料,
- 外山味之, 飯川雅孝, 構造マトリクスによる経営管理システムへのアプローチ, オペレーションズ・リサーチ, Vol.27 No. 7 1982 p402-408

構造化手法を用いた問題の可視化と問題定義

既述したデジタルアーキテクチャ・デザイン・センターの設置目的は、アーキテクチャデザインの重要性／必要性の認識がベースとなっている。デザインは問題解決のための行為であり、アーキテクチャデザインはアーキテクチャの問題を明確にし、その問題を解決することで理想とするアーキテクチャを実現する行為となる。そこでいうアーキテクチャをシステムの構造と解釈すれば、アーキテクチャデザインはシステムの構造が持つ問題を解決することになる。

一般的な問題解決のアプローチとしては、「問題＝目標－現状」で定義されるように、問題定義においては目標と現状の差分を明確にする必要がある。複雑な要素が絡むシステムなどは悪構造であり、現状を認識することが困難な場合が多いと言われる。したがってシステムデザインをするためにはシステムの悪構造を少しでも正しく認識することが重要となる。

本稿ではアーキテクチャというキーワードをシステムの構成要素と要素間の

関係からなる構造として捉え、様々な構造化手法を紹介し、それらの手法の特徴を議論してきた。それらの議論をベースに問題解決の方法を考えると、システムの構造化手法を駆使し、対象とするシステムの現状をモデリングし、問題となる部位を明確にすることが重要であると考えられる。現状のシステムを理想化するためのボトルネックとなる要素は何か、関係は何か、さらには必要な要素は、関係は何かを具体的に議論する必要がある。

これらの構造化手法は、システムを「可視化」することに相当する。「見えない問題は解決できない」と言われるが、システムが持つ問題を解決するためには、システムを「可視化」することが重要であり、「可視化」するために必要な方法論の構築が必要であろう。しかしながら現実的には、何を「可視化」すれば良いのかは曖昧であり、「可視化」するためには要素間の関係として何をモデリングすれば良いのか議論が必要である。さらには、要素間の関係は認識によってモデリングされるので、体系的にモデリングする手法の確立は必要不可欠である。

さらに、システムは階層構造を有すると指摘されることも多く、多様な領域を考えると同時に、階層構造を認識したシステムの理解は重要である。このシステムの階層性については、安浦は社会や産業の5階層モデルを示している。

- I. 制度・体制層（社会の制度や政治・経済体制）
- II. サービス・システム運用層（製品やコンテンツを組み合わせたサービスの運用）
- III. 製品・作物・作品層（一般利用者が直接購入し利用する対象）
- IV. 製造技術・生産技術・設計技術層（自然法則を利用した新しい技術の確立）
- V. 自然法則・自然現象層（自然界に内在する原理や法則の発見）

この階層モデルが示すことは、様々なレイヤーのシステムが存在しそれらのシステムの関係も含めたシステムの構造を把握する必要がある。各層には例えば下記に示すような関係構造が存在し、さらには階層間関係構造が存在する。このような関係構造をモデリングし、構造化手法を適用して全体システムの特徴、問題点を把握することは重要であると考えられる。

- I. 制度・体制層：様々な社会制度間関係構造
- II. サービス・システム運用層：モノやコトの関係構造
- III. 製品・作物・作品層：機能、モノの関係構造、対応関係構造
- IV. 製造技術・生産技術・設計技術層：モノを実現するコトの対応関係、順序関係構造

V. 自然法則・自然現象層：自然法則，現象における因果関係，影響関係構造

- ・ 安浦寛人，“日本の情報通信技術(ICT)の研究開発の方向に関する提言”
SLRC Discussion Paper Series, Vol.5, No.1, Sep. 2009

データ駆動型構造化手法への期待

昨今、多くのデータが収集され、活用されている。経済活動データ、顧客の購買データ、乗客の移動データ、物流データなど様々なデータが収集される。それらのデータを分析し、活用する活動も盛んである。昨今の人工知能に対する期待度が高まる中で、システムの要素、および要素間の関係の認識について期待することがある。これは、人工知能による特徴量の学習や相互関係である。丸山らは、高次元科学の提唱において多数のパラメータをもつモデルを用い、データから学習することで、従来、少数のパラメータをベースに人間が設計するのが難しかった特徴量を学習することの可能性を示している。また、深層学習のモデルが何を学習しているのか分からないという問題が指摘されるが、説明可能 AI (Explainable AI, XAI) という研究が盛んに進められている。例えば、精度を落として解釈の可能性を上げる研究や、学習時にどこが顕現性が高いかを可視化する研究や、人やモノのつながりを表すグラフ構造のデータから新たな知見を導く新技術「Deep Tensor」などの研究がある。このように、人工知能的な機械学習を有効活用した Data Analysis 手法の構築や、深層学習による特徴量の抽出手法など、膨大なデータから得られる情報の活用の期待は高まっている。

- ・ 丸山 宏：高次元科学への誘い
https://japan.cnet.com/blog/maruyama/2019/05/01/entry_30022958/
- ・ 原 聡，私のブックマーク 説明可能 AI (Explainable AI)，
人工知能学会，https://www.ai-gakkai.or.jp/my-bookmark_vol34-no4/
- ・ 富士，森田，後藤，丸橋，穴井，井形，Deep Tensor とナレッジグラフ
を融合した説明可能な AI、FUJITSU, 69, 4, p. 9-96 (2018)

おわりに：データの集約と学習，知能化と問題認識の連携

旧来の構造化手法では、そのモデリングにおいて人の豊かな経験に根差した知識を駆動し、システムを構成する要素や要素間の関係をモデリングしたが、その知識だけでなく、先に挙げたデータ駆動による因果関係や特徴量の抽出などによるモデリングの支援が期待できる。大澤らは多種多様なデータを集約して新たな価値を創成するシステムのデザイン手法を提案しているが、そのような取り組みに対しても、収集されるデータからシステムの構造を把握し、問題を明確にし、解決すべきポイントを把握する構造化手法の構築が待望される。

松尾は人間の知能を二階建てのものとしてモデル化することを提案している。一階部分（知覚運動系）は、高等な動物と同じく、周囲を知覚し、適応的に行動するための学習分であり、現実世界をトレーニングデータとして多数のパラメータをモデル化する。二階部分（記号系）は、言語や数字などの記号を扱い、一階部分（知覚運動系）を必要に応じて呼び出しながら、手続き的な処理を実行する。この二つの部分が連合し、人間の知能は構成されていると述べている、この構成において、知覚運動系において多数パラメータの相互作用から導かれる知識を、記号系に落とし込むことによって、多数のパラメータで学習されたモデルを、人間が理解可能な形で提示する可能性を示している。この知能の二階建モデルに構造化手法を組み合わせたことが考えられる。表現としては三階建てモデルとし、三階部分に、MDMのような複合領域を扱う構造化手法をベースとする構造系の知識を構築する。この構成によって、学習、知能、問題認識が連携するのではないかと期待する。このイメージは単なるアイデアに過ぎなく、今後の深い検討が必要である。

- ・ 早矢仕晃章，大澤幸生：“データジャケットを用いた異分野データ連携，” 人工知能学会誌，AI とデータ-データに基づく意思決定と社会イノベーション創出-特集，” Vol. 33, No. 2, pp. 140-148, 2018.
- ・ 松尾 豊，深層学習と人工物工学，第 10 回横幹連合コンファレンス，2019

(2020年6月4日原稿受領、Vol. 2.6 に掲載)

論説8

デジタルトランスフォーメーションDXとそれを支えるシステムとは何か？

株式会社東芝 執行役上席常務 最高デジタル責任者 島田太郎（SIC理事）
（兼）東芝デジタルソリューションズ株式会社取締役社長、東芝データ株式会社
代表取締役 CEO

1. DX の定義

DX という言葉が流行しているが、そのデジタルという言葉に惑わされてはいけない。DX で成功したと言われる企業の特徴を、考えるべきである。そこには、プラットフォーム、サブスク、データセントリック、ライトアセット、マッチング、マルチサイド等の特徴が上げられる。大切なのは、この様な特徴は特にソフトウェアを使わなくても可能な事である。なので、上記の様な特徴を持つビジネスモデルの組み立てがあって初めて、DX を行う事が出来るのである。だから、DX を行う為のソフトウェアと言うような謳い文句のソフトウェアを、過大な期待で導入すべきでない。大切なのはビジネスモデルなのである。

2. DX を支えるシステム

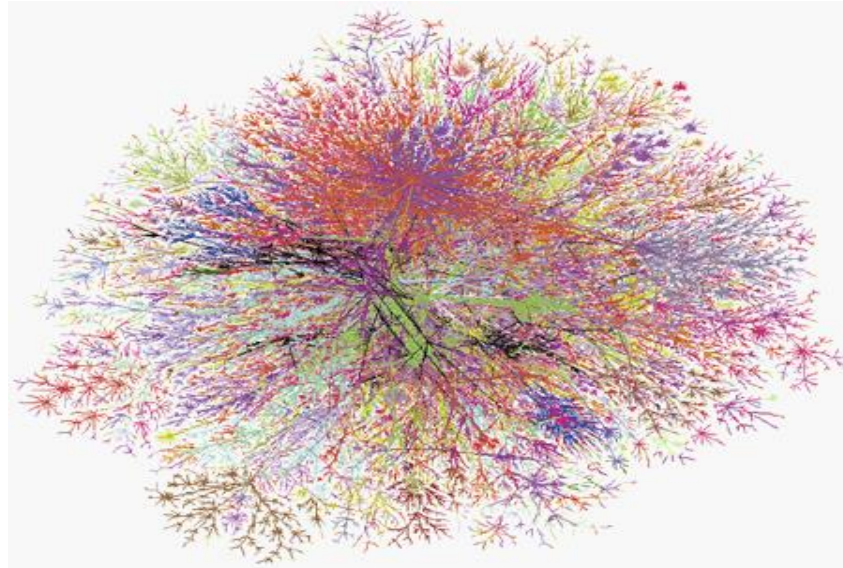
先ほど挙げた特徴は、一つ一つ解説するのに、1冊本が書けるくらいであるが、紙面の限りもあるので、この中でも SIC に関連が深いプラットフォームについて述べる事にする。

正確にはマルチサイドプラットフォームであり、もっと良い言葉はエコシステムだと思っている。この特徴は自然増殖するところにあり、自然増殖する仕組みを用意する事が重要である。それは、構造化された仕組みでは機能しない。

3. スケールフリーネットワーク

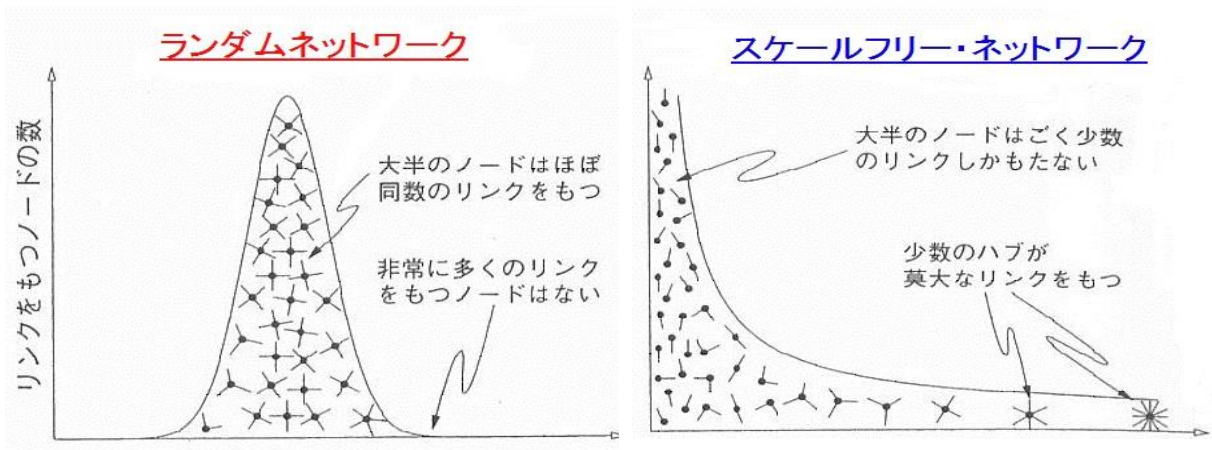
システムアーキテクチャーを構造化で捉える人が多い。構造化のメリットは、分かり易さであるが、エコシステムもしくは、マルチサイドプラットフォームは構造化では作ることにはできない。エコシステムとして、最も成功したのはイ

インターネット上のWEBである。WEBはリンクを貼る事により増殖する。この増殖した形を可視化すると以下の様になる。



このWEBのリンクの数が多い順番に並べると、正規分布ではなく、ベキ状分布となる。即ち、多数のリンクを持つ僅かのWEBと、殆どリンクを持たない大多数のWEBで構成されているのである。

この様なベキ状分布となるネットワークをスケールフリーネットワークと呼ぶ。実は、人間の友人関係もこのスケールフリーネットワークであり、WEBと似通った形になる。



4. スケールフリーネットワークの特徴

スケールフリーネットワークは、サンプル数を変化させても、形状が変わらないという特徴を持つ。会社で 20%の人が非常に働き、60%の人が普通に働き、20%の人が働かない。そしてそれが、100 人の会社でも、1000 人でも、10 万人でも同じなのである。即ちこれもスケールフリーネットワークなのである。

スケールフリーネットワークのもう一つの特徴は、パーコレーションを起こす事である。パーコレーションとは、状態が極端に変化することを言い、例えば水が気化する様なのは、これにあたる。インターネット上で、度々起こる新しいアプリが爆発的に増えるのもこのパーコレーション現象である。即ちスケールフリーネットワークを作る事が出来れば、それ自体が既に成功なのである。

5. スケールフリーネットワークの例

インスタグラムというソフトは、それ単体では何もできないただの箱である。コンテンツすら存在しない。しかし、フィルター等のコンテンツを魅力化するツールや、フォロー、タグ付けを可能にする事で、自動的にスケールフリーネットワークを生成する事ができるのである。ソフトウェアとしては、極めて単純なインスタグラムが、日本有数の企業の 100 倍近い、株式企業価値を産み出している事を忘れてはならない。Facebook、LINE、TikTok 全てスケールフリーネットワークジェネレーター（以降 SF ジェネレーターと呼ぶ）なのである。

その中でも、興味深いのは、マネーフォワードである。これは、用意された標準 API により、銀行間のシステムを個人にタグ付けさせるという事をさせている。これは今までの SF ジェネレータとは一戦を画していると共に、最初の戦いで遅れをとった日本が逆転できるチャンスがある事を示している。

6. Industrie4.0 と SF ジェネレーター

Industrie4.0 の成否は、管理シェルにかかっている。それ以外の何かを売りたい人の言葉に惑わされるべきではない。管理シェルは、スケールフリーネットワークを作る上での非常に重要な部品である。管理シェルそのものは、SF ジェネレーターでは無いが、管理シェルにより、物と物が直接会話できるように、翻訳をしてくれるのである。即ち IoT そのものである。Industrie4.0 は工場をターゲットにしている。そしてその工場こそが、構造化したシステムで動いており、

フレキシブルに増殖データが行き来する構造にはなっていないのである。管理シェルが完成し、更に情報を共有するルール整備が整うとそこにはスケールフリーネットワークが出現する事になる。

7. 日本のとるべき道について

スケールフリーネットワークを作るとは、世界標準を取る事と殆ど同じである。標準にはデジュールとデファクトがある。基本的にデジュールを成立させるには、技術的に圧倒的に突出しているか、規模の大きさが重要になる。特に規模について言うと、これを成立させる事ができるのは、米国、中国、そして一体としてのヨーロッパである。それ以外の国や地域は規模が小さすぎて、他国を説得する事は極めて困難である。

GDP のサイズが小さ過ぎる日本には、デファクトを取る方法しか残されていない。その方法には、技術的突出か、コモディティ化しつつある技術のオープン化がある。私は、日本はオープン化で勝負すべきだと考えている。例えば、IBM が AT バスを公開し日本の PC 業界が崩壊した事と同じことを今度は日本がやるべきなのである。

8. スケールフリーネットワークで世界標準を目指す東芝の取り組み

このスケールフリーネットワークの考えに基づき、様々な施策を東芝では取り組んでいる。全てを記述できないが、その一つにスマートレシートがある。スマートレシートは、紙のレシートでは無く、店舗等で支払いした際に自動的にレシートの情報を予めインストールした、スマートレシートアプリに転送するサービスである。これは、特定の店舗のサービスでは無く、店舗を跨いで使う事ができる。実際に沖縄や会津のスマートシティにおいては、このサービス展開が街をあげて進んでいる。

このシステムの優れたところは、違った店舗のレシート情報をレシートデータのオーナーである購買者個人自身が、データを統合していく事である。

店舗同士のデータをシステムインテグレーションしようとしても、成立しない。しかしマネーフォワードの様に、個人が紐付けすれば、その情報が収集でき、かつ自動的にこの情報は増殖していくのである。個人の買い物情報は、個人の認証のもとに、広告や、商品企画、統計等々様々な活用が可能である。これを、完全

に見える化した形で扱う事が出来れば、新たなプラットフォームがそこに出現する事になる。

東芝は POS ベンダーとして世界最大である。しかし東芝の POS 以外にも対応する為に、東芝データという別会社を設立している。

尚このスマートレシートのサービスは、店舗と個人には無償で提供するというモデル、則ちオープンモデルで、世界標準を目指している。

スマートレシート



The graphic features a yellow background with a white banner at the top containing the text 'スマートレシート'. Below this, a cartoon cow character holds a receipt that says 'スマートレシート'. To the right, the text reads 'スマホにレシートが届く、便利なアプリ'. The graphic is divided into two sections by a vertical dashed line. The left section, titled '2019年11月「渋谷PARCO」公式アプリとの連携開始', shows the PARCO 2019 logo and two smartphones displaying the app interface. The right section, titled '2020年度からモバイルTポイントアプリの中で電子レシートをご利用が可能に', features the text 'あなたのスマホがTカードに! モバイルTカード' and a hand holding a smartphone with a QR code. Below this text are three circular icons representing different T-Point programs: T-Point (Tカード), T-Point (Tポイント), and T-Point (Tポイント) with the slogan 'お買い物から!'. A copyright notice '© 2020 Toshiba Corporation' and the number '12' are located in the bottom right corner.

スマホにレシートが届く、
便利なアプリ

2019年11月
「渋谷PARCO」公式アプリとの
連携開始

2020年度から
モバイルTポイントアプリの中で
電子レシートをご利用が可能に

あなたのスマホがTカードに!
モバイルTカード

© 2020 Toshiba Corporation 12

9. ifLink®

IoTの問題は、IoTを簡単に違う会社の製品で出来ない事である。それを解決するために、IoTをifとThenに分け、それを様々な機器毎にマイクロサービスで用意する事により、スマートフォン等で簡単に自分のIoTを作るシステムを東芝では考案した。下の図の様に、ifのカードとThenのカードを組み合わせ、スマートフォンでQRコードを読み取ると自分のIoTができる。以下の例は、ボタンを押すとロボットが喋ると言う具合である。特定の会社のIoTしか繋がらない、もしくはGoogle、Amazon、Appleを通してのIoTという事では無く、本当の意味でのエコシステムを確立する可能性がある。ここで大切なのは、機器毎のマイクロサービスが広まる事である。開発以来3年間独自に進めた東芝では、

2020年春これをオープン化し一般社団法人化則ち非営利化しこの普及に乗り出した。2020年の7月時点で101社の賛同を得ている。ifLinkはまさにSFジェネレータなのである。

IF-THENカード

カードを組み合わせてスマホで写すだけでレシピの設定が可能

組み合わせる



写す →ルール設定



動く



© 2020 Toshiba Corporation 60

10. 最後に

システムという言葉にもとられるべきではない、スケールフリーネットワークの考え方は、一般にシステムと言われる物を開発して来た人からは、異質に写るかもしれない。しかし本当のアーキテクチャーとは、こういうものなのである。現実に Google、Amazon、Facebook、Apple、Microsoft の合計株式価値が、日本全体の株式価値を超える現代である。GAFAM の成功の秘密を良くベンチマークし、彼らが不得意である、インフラを含めた物を Cyber Physical Systems により新たなスケールフリーネットワークジェネレーターをデザインし、それをオープン化という方法で広める事が重要である。

なので、物から事という言葉は、危険である。そこには、未だに過去の日本のモデルでソリューションまで提供しようという気持ちが出ている。本来あるべきは、事が起こる場所を創造する事なのである。

注) ifLink®は東芝デジタルソリューションズ株式会社の登録商標です。

(2020年7月23日原稿受領、Vol. 2.8に掲載)

論説9

一番ピン思考による開発革新

マツダ株式会社 シニアイノベーションフェロー 人見光夫（SIC 理事）

はじめに

私はシステムズエンジニアリングを学んだ経験はないが SKYACTIV エンジン開発を通じて実践した方法がシステムズエンジニアリングの考え方に通じるとい話を伺い今回その考え方を記させていただき運びとなった。

SKYACTIV エンジンの開発に至った背景

まずこのエンジンを開発することになった背景から記す。バブル経済が崩壊しマツダは存続の危機にさらされた。早期退職の募集などを経て何とか生き延びていたが、非常に厳しい環境規制が現実のものとなりそうな時期にマツダは財務的に弱体化していた期間が長く、車の基本骨格、パワートレインなどが一世代古いものを使って凌いでいるという状況であった。

この時期の課題を整理すると

- 財務的に苦しいマツダとしては厳しい環境規制に 대응するためには内燃機関にかけるしかない。これでいかに対応するか。（急拡大していたハイブリッド、導入が始まった電気自動車などは、当時の我々が先頭集団で取り組んでもビジネスとして成立する可能性はなかった。）
- 規制対応するためには車両、パワートレインを全車種一気に刷新するしかなかった。財務面でも工数面でも決して潤沢ではないマツダがこのような初めての挑戦をいかに成功させるか。

苦しい時期であっても取り組むべき施策は一過性のものでなく将来にも続くものであるべきである。また課題は山積しているが各々の課題は絶対つながっているのでボーリングのように一番ピンにぶつければすべて転がるというような主要課題（以降一番ピンと呼ぶ）を見つけてそこへ集中することで多くの課題に対応可能にしようと考えた。

内燃機関改善

内燃機関主体で大きく燃費改善をするために、また将来にもつなげるために内燃機関の熱効率改善の全体像を描こうと考えた。それが図1である。

内燃機関の効率改善とはエネルギー損失低減にほかならず、排気損失、冷却損失、ポンプ損失、機械抵抗損失が主要なものである。それらを制御できる因子は最上位の概念で書けば制御因子と書いた列の7因子に集約される。エンジンの効率を改善しようとしているいかなる技術も、このどれか、または複数の因子を制御しようとしているものである。従ってこの制御因子を理想状態にできれば内燃機関のゴールともいえるわけである。

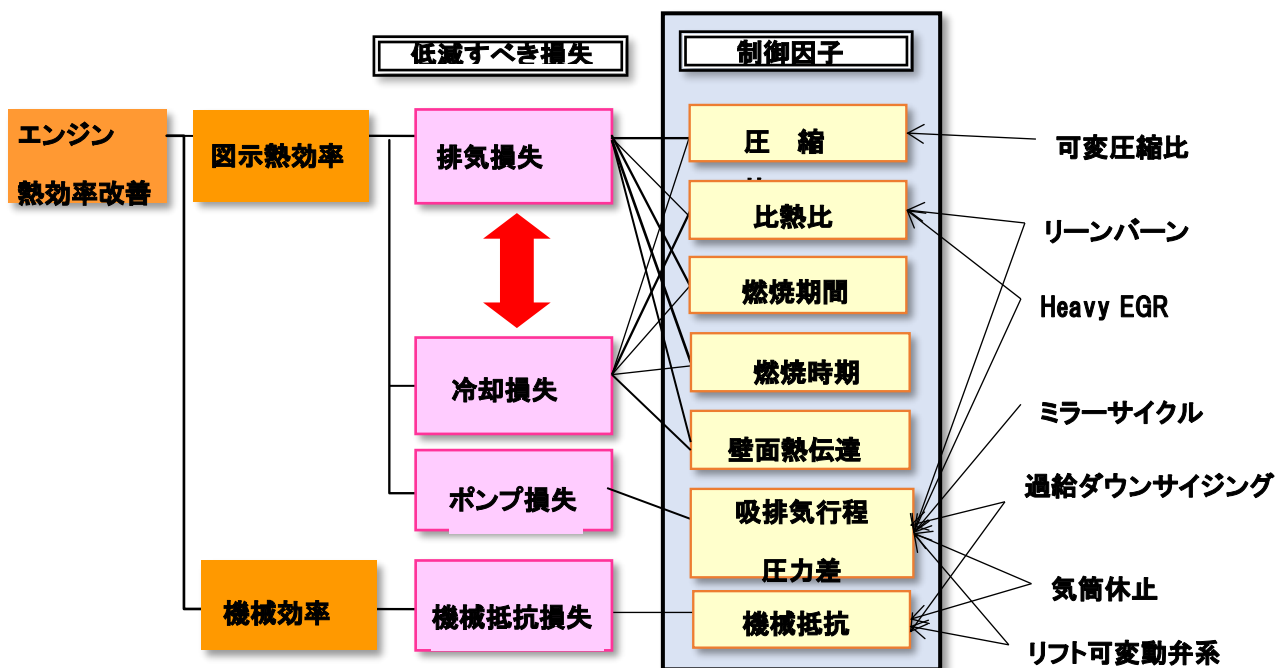


図 1 内燃機関の効率改善

オットーサイクルの理論熱効率は次の式であらわされる。

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

熱効率 η は圧縮比 ε と比熱比 κ で表される。図 1 の 7 つの制御因子のうち燃焼に関与する部分は上から 5 番目までの 5 つであるが主たる因子が圧縮比と比熱比で、その他 3 つは圧縮比と比熱比が見かけ上変化するのを制御するための補助因子的なものとなる。(あくまでも学術的な厳密さにはこだわらずに話を進める)

エンジンの細かな説明は主旨に沿わないのは理解したうえであえて述べるのは、何に焦点を当てれば将来に渡って進化を続けることができるか、つまり技術開発においても一番ピンを定めることが重要であるということを示すためである。

ガソリンエンジンは圧縮比を上げるよりも空気過剰 (リーン) で燃やすこと、つまり κ を大きくすることが効率を大きく上げることに繋がる。しかしリーン化を進めようとしたら圧縮比を上げて圧縮温度を高めることが必要になってくる。誤解を恐れずに言えば、圧縮比を高めること自体は幾何学的なものであるから簡単である。最大課題は高圧縮比化に伴う異常燃焼をいかに抑制するかにある。従ってゴールに進むための一番ピンは高圧縮比に伴う技術課題克服ということになる。第 1 世代、第 2 世代の SKYACTIV エンジンは燃焼成立にも苦労したが、高負荷域の異常燃焼克服があってこそ実現できたものである。さらに次の世代に進むためにも一層の進化が必要になる。

ディーゼルエンジンはすでにリーンで燃やせているので κ は十分高いかというところではない。ディーゼルエンジンに使う軽油は高温にさらされると非常に簡単に自着火してしまう。従って燃料を噴射したら十分空気とミキシングする前に着火してしまうので実際に燃えているところはかなり濃いところもあるため、その部分は κ は低い。さらに十分ミキシングしていないということは燃焼が起きる範囲が狭いということなので狭い範囲ですべての燃料が燃えるために燃えているところの温度は高くなる。そうすると NO_x が生成され、濃いところではすすが出る。この NO_x とすすの対応で多くのコストがかけられており、さらには燃費にまで犠牲を払っているのが現状である。つまりディーゼルエンジンの燃費改善とコスト低減の一番ピンは着火するまでの短時間で、いかに燃料と空気をしっかりミキシングさせられるかということにある。第 1 世代 SKYACTIV ディーゼルエンジンでは自着火するまでの時間を稼ぐために圧縮温度を低下させるべく低圧縮比化という手段を使った。次は燃焼室形状や噴射系の工夫でミキシングという機能を進化させ段々圧縮比は上げていく予定である。ただし第 1 世代で圧縮比は下げたとはいえ従来の高圧縮比エンジンより効率は高くなっている。高圧縮比のままでは NO_x やすすを減らすためにはピストンが一番上にある時期 (上死点) は温度が高すぎてミキシングする前に自着火するためピストン

が下降し始めてから燃料を吹かざるを得ない。従って爆発圧力による膨張仕事
が低下してしまう。低圧縮比だと圧縮温度が低いので上死点で燃料が噴射でき、
膨張行程すべてで膨張仕事ができるということになる。仕事をするのは圧縮で
なく膨張であるから低圧縮比のほうが有効な膨張比は高まるということである。

圧縮比を下げることで排ガス対応コストを抑え、燃費も従来以上に改善でき、
燃焼室内最高圧力を低下させつつ高トルクを実現できている。最高圧を抑えら
れているので内部の部品剛性も抑えられ抵抗低減もできてさらに燃費が改善で
けるという天使のサイクルが回せている。第一世代としては低圧縮比化がまさ
しく一番ピンであったと考えている。しかし真の一番ピンである短時間でミキ
シングを可能にする技術を、低温に頼らない方向で追い求めていくことで最終
的には圧縮比を高めて実質的な膨張比を高めていこうとしている最中である。

細かな話になったが、要は技術開発において、あるいは技術開発に限らず究極
のゴール、理想状態を描いてそこに至る roadmap を描き (図2)、課題全般を見
渡して一番ピンを定めてから取り組むべきだということを行わなければならない。

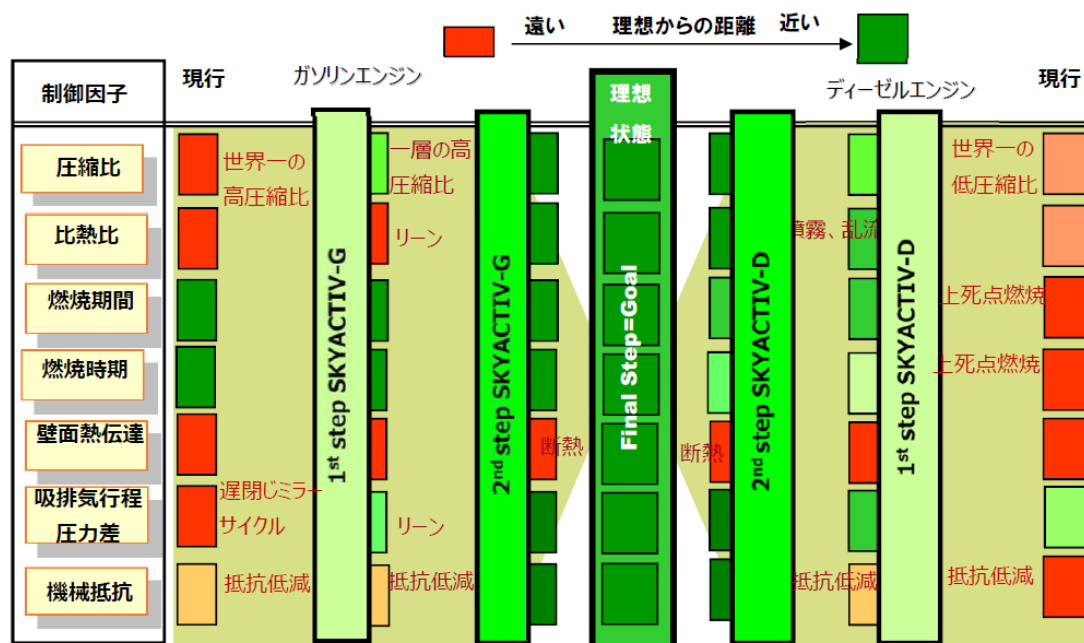


図 2 内燃機関改善の roadmap

開発革新 CAE からモデルベース開発

次の課題は少ない人数で一気に派生エンジンまで開発するのをどう考えてやったかということである。それまでの開発はアイデアを設計図面にして試作し、実機運転をして問題点を見つけ改善するという昔ながらの試行錯誤の繰り返し開発であった。このようなやり方では到底対応できないのでやり方を革新する必要があった。

まず徹底的に CAE 化を進めることであった。これは SKYACTIV エンジンを開発する前から取り組んでいたことであるが、SKYACTIV 開発に大いに威力を発揮できたのと、その後のモデルベース開発（以降 MBD と呼ぶ）への本格移行への序章として非常に有効であったと考えている。

なぜ CAE の活用に注力しようとしたかということ、先行開発領域はバブル崩壊後に多くの人員を商品開発領域にシフトされており、極度の人員不足となつてなかなか新しい技術への挑戦が進まなかったこと、商品開発部門は慢性的な開発遅れ、品質問題、コスト問題、人材育成の停滞、等々色々な問題を抱えていたのでこれらを解決するための一番ピンは何かと考えた結果である。

その関係を示したのが図 3 である。様々な問題の根源は実機に頼った試行錯誤による開発のやり方にあると考えて CAE を駆使した開発へ移行しようと考えた。これが意味するのは、すぐに物を作るのではなく作る前にしっかりと考える、そして思考実験の手段として CAE は使ってよいということである。よく考えないうちに出来が悪いものを作ると本質的でもないようなところで時間と工数が無駄に使われてしまうということと、とことん考えないですぐものに頼ると正しくメカニズムを理解しようとする習慣がつかなくなるからである。

この開発を通じて CAE 活用に懐疑的だったエンジニアも CAE の有効性を認識し、今では当然のごとく活用している。第 2 世代の SKYATIV エンジンも CAE による燃焼解析が大いに威力を発揮してくれて実現したと思っている。

CAE の効能は、人数の非常に少なかった先行部門のアイデア発想も助長し、商品開発部門の開発効率化にも大きく貢献し、適合などはかなりの部分が実機、実車に頼らないでできるようになったため、試作エンジンや試作車の数も減るという効果をもたらした。今ではモデルベース開発へと進化しており、業界内では開発人員がかなり少ないマツダが様々な種類のガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、トランスミッションを自前で開発できるようになった主要因の一つと考えている。

さらにはモデルベース開発を、プロジェクト早期の企画構想段階から有効活用し、全体最適の目標配分、手戻り防止の開発プロセス革新、働き方改革、労働人口減への対応、等々様々な課題対応へと効能を広げていこうと考えている。

CAE 活用からモデルベース開発が、新技術開発、商品開発、開発効率改善、プロセス改善などに大きく貢献し、マツダの開発におけるまさしく一番ピンになっていると考えている。

終わりに

関連会社を含めて会社組織もシステムである。つながりをしっかり把握して流れをよくすることを考えればシステムの効能は格段に上がるはずである。組織の中の色々な課題はシステムの中の課題であり、必ず関連性があるはずである。その関連性、つながりを見つけ一番ピンを見つけて対応すれば小さな会社でもそれなりに生きていけるのではないかと考えている。

(2020 年 8 月 25 日原稿受領、Vol. 2.9 に掲載)

論説10

DX を推進する人財の育成 – 実践現場の視点から

KDDI 株式会社 取締役執行役員専務 森 敬一（SIC 理事）

私が管掌する KDDI の法人ビジネス部門の中に「アジャイル開発センター」がある。元々、自社の新規ビジネスをアジャイル手法で開発する組織であったが、今では顧客企業の案件にも取り組んでいる。彼らのオフィスに入ると、プロジェクトを可視化したボードに向かって侃々諤々と議論する社員の姿があり、彼らが指さす先に顧客企業にとってのプロジェクトの目標を書き留めた付箋が貼り付けられているのが眼にとまる。彼らはお客様が実現したい価値をどう現実にするかを考え、日々共同作業している。

この数年間、私は、アジャイル開発センターだけでなく法人ビジネス部門の全社員がお客様と共に考え、共に歩むよう人財の育成に努めてきた。あらゆるモノに通信が溶け込んでいく時代にあわせ、デジタル・トランスフォーメーション（以下、「DX」）を推進する人財の育成と言い換えてもいいだろう。育成の取り組みはまだまだ道半ばであり、理論化されたものでもないが、今回良い機会を頂いたので実践経験としてまとめてみたい。



【写真 - アジャイル開発センター】

1. 私たちは何のための組織か

KDDI の法人ビジネス部門は、顧客企業に IT システム・ネットワークを提供し、その構築・運用を支援する活動を行ってきた。2000 年代以降、企業ビジネスでの携帯利用が進むとともに、グローバル化に伴う国際・国内ネットワーク高度化等の強い需要に支えられ、成長を持続していた。

しかし、2010 年代半ばに、競争の激化で単価の下落が激しくなり、事業採算が大きく悪化する事態に直面した。計画値未達が発生すると、営業部隊のクローゼンク力が足りない、商品企画・開発力が弱いと部門内が騒然とする。論点は多岐に及んだが、詰まるところ、お客様との接点がすべてであり、その実態を再確認

しようということになった。

社員へのヒアリングを繰り返し、拾い上げたお客様の声を突き詰めて見直したところ、私達の活動が必ずしもお客様に高く評価されていないという現実の姿が浮き彫りになった。自分たちの商材を単にプロダクト・アウト型で販売している事例もあれば、提示された要件の実現に汲々とし、プロとして必要なアドバイスができていない事例もあった。お客様の期待感を満たしていない、ニーズの変化を看取できていない等々、反省点は山のようにあったが、根本の課題として、「お客様に臨む姿勢」・「仕事に臨む姿勢」を見直さなければいけないと強く認識した。

私たちは何のためにある組織かについて社内議論を繰り返した結果、私たちがやるべきことを「お客様の本業に貢献すること」とし、「本業貢献」の四文字に集約した。そして、この本業貢献を行える人財の育成を、(i)能力開発、(ii)意識改革という2つのベクトルに分解し推進することにした。

同時に、顧客企業の本業は多岐に亘り、それへの貢献は必ずしも KDDI 1 社の手に負えないことも分かっていた。お客様の課題にあわせ、通信とその他の価値を融合し提供できるよう、高度な専門性を持つ企業との提携を積極的に進めた。特に提携先企業が KDDI グループとして内部化したいノウハウ・技術を持っている場合には、合弁により一緒に取り組むことをお願いした。例えば、KDDI Digital Design (DX コンサルティング； NRI と合弁) や Scrum Inc. Japan (アジャイル開発専門集団； Scrum Inc. と合弁) 等がそれに当たる。

2. 人財育成の実践 (1) 自分たちの強み・弱みを知る

変化を出すためには行動を変えることが何よりも重要だ。まず初めに、「現場に行こう」を標語に、営業だけでなくエンジニアも含め、顧客の製品・サービスが提供されている現場に足を運び、自分の眼で見ることを徹底させた。

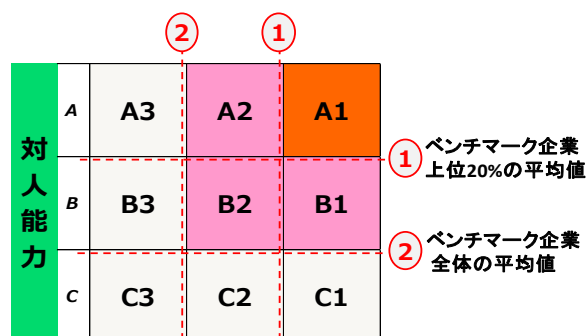
前節で触れた能力開発プログラム策定にあたり、プロとして IT 技術に習熟することは前提とし、顧客企業の横断的な課題を拾い上げ、ソリューションを共創するための2つの基本能力(コミュニケーション力と課題解決力)の強化を目標とした。そして、愚直に研修を繰り返した。

また、意識改革を進める前提は自分自身を知ることにある。お客様からどう評価されているか、同僚からどう評価されているかを理解するために、2つのアセスメント ((i) NPS®、(ii) 360 度評価) を取り入れた。

NPS®は、「Net Promoter Score」の略。顧客ロイヤルティ（企業やブランドに対する愛着・信頼の度合い）を数値化する指標で、欧米の Fortune 500 他で広く採用されている。私たちがお客様の目にどう映っているかはお客様のみが知る。そこで、この指標にこだわることにした。

これに併せ、部門全社員を対象に 360 度評価も導入した。顧客企業と共に考え、共に歩む姿勢は、全人格的に発現することであり、目標管理型評価ではカバーしきれない部分があると考えたからだ。アセスメント結果は、対課題能力、対人能力をそれぞれ X 軸、Y 軸にとり、高中低の 3 区分にマッピングし可視化させた。（右図参照） 現在もより多くの社員が図の右上の 4 つのボックス (A1, A2, B1, B2) に位置できるよう、結果の定点観測と社員へのフィードバックを継続している。

図 - 人財開発マップ



これらに重ねて、「変革ワークショップ」活動を立ち上げた。それは社員が同僚との対話を通じて自身が何をやりたいかを見つめ直す小集団活動であり、意識改革活動のコアと位置づけた。

これらの動きを受け、目標管理制度には社員の成長を促進する仕組みとしての役割を追加した。上司には部下毎の人財育成計画書の事前作成を義務づけ、目標設定・達成度合いの確認にとどまらず、部下にこういう人財になって欲しいという鮮明なイメージを伝え話し合う形に変えた。

これらに重ねて、「変革ワークショップ」活動を立ち上げた。それは社員が同僚との対話を通じて自身が何をやりたいかを見つめ直す小集団活動であり、意識改革活動のコアと位置づけた。

3. 顧客企業の動きから捉える DX

時を同じくして、顧客企業の中での IT 活用の位置づけも変化し始めた。各社の IT・情報システム部門からだけでなく、経営企画部門や新設の DX 推進部門からも声をかけて頂くようになった。

DX の射程・内容は各社各様で同じものはない。5G で何ができるか洗い出したので勉強会を開催したいという全社視点のご要望を頂くこともあれば、IT 部門にアジャイル開発を修得させたいので研修をという機能特化のご要望を頂くこともある。

お客様と対話を重ねる中で、私はDXを次の3つに分類し捉えている。

表 - DXの3分類

(1) デジタル社会の進展に合わせて事業領域を見直して変化・対応して行くこと
(2) 既存事業のプロセスにデジタル技術を実装し、品質・コスト・スピード・安全性等で競争力を上げて行くこと
(3) 働き方にデジタル技術を応用して生産性を上げ、変革を進める時間を作り出すこと

現時点では、(2)を目的としたDXが多いが、新型コロナウイルス感染症の影響の長期化で(3)のニーズも加速しているのは周知の通りである。

4. 人財育成の実践 (2) タテ型からヨコ型の変革へ

数年間の活動の結果、本業貢献事例も増え、広く社員間で事例を共有する事が出来るようになってきた。

そのタイミングで、法人ビジネス部門での「変革コンテスト」を開始している。顧客本業貢献や組織内業務の改革等、変革が問われる分野を特定し、変革の度合いや事業への貢献度をコンテスト形式で評価するものだ。部門の全社員が発表事例に対する評価に参加し、本業貢献する同僚の姿から学ぶ機会となっている。

また、第2節の最後に触れた変革ワークショップ活動を第2段階に進めた。360度評価が高い社員から「変革実践担当」を選出し、小集団活動の中心に置いた。社員の意識を変えるにはタテ（上意下達）型では限界がある。変革コンテストもそうだが、変革実践担当のお客様や仕事に臨む姿勢を同一職位・同年齢層の社員と共有するヨコ（共感）型に切り換え、変革の浸透を図った。

加えて、NPS®には更にこだわるようになってきている。経年変化を追うことにより私たち自身をより明瞭に理解できるようになってきた。スコアの伸びと売上げの伸びが正比例することも確認できている。

また、顧客案件現場でグループ企業が共同で提案・支援する機会が増加するにつれ、お互いの強み・弱みを理解し、ノウハウを補完しあう動きが自然発生してきた。

5. 成果と気づき

2019年7月に第3回を迎えた変革コンテストでは、発表者が、単なる事例紹

介ではなく、顧客企業の設立経緯や企業理念を紹介するようになっていた。発表者が、あたかも自分の企業であるかのように嬉々として顧客企業の未来を語る姿には手応えを感じる。

顧客企業のDXの射程が広がり、事業戦略を再定義するような難易度が高いプロジェクトも増えてきている。お客様から、『KDDIは次々とプロの方が出て来ますね。』というお言葉を頂けるようになってきた。私は目指すべき人財像を、「お客様と共に考え、共に歩む人財」、「先回りして自ら改善できる人財」と定義し、折に触れ社員と共有しているが、お客様からそういう人財としてお褒めの言葉を頂くことは、大変な励みとなっている。

顧客企業のプロジェクトの進め方も変化してきている。人対人だけでなく組織対組織でもよりオープンに接して頂けるようになってきた。顧客企業にいわゆるイノベーション・ラボ相当の組織があっても、機能分担の話しにならず、ラボ運営方法を相互学習しようという話を頂くことさえある。当社のエンジニアは以前にも増して高い専門性を期待されるようになってきているが、同時に、よりオープンで全人格的な接し方を望まれてもいる。多くのステークホルダーが関係するプロジェクトであるほどオープンでなければ完遂できないという背景もあるだろう。プロジェクト参画メンバーが視野を広げるための得難い学習機会となっている。

6. まとめ

冒頭、アジャイル開発センターの様子を紹介したが、現場にこそ人財育成の方向を考えるヒントがある筈だ。お客様とよく話し、短い時間間隔で試行を繰り返し、オープンに新しい価値を追求すること、これらを部門全体の実践価値として根付かせていくことが大切だと思う。

その上で、視線をどこまで上げられるかが問われる。顧客企業だけでなく、その先に社会を見据えるところまで持ち上げていきたい。KDDIは、「KDDI Accelerate 5.0」を策定し、IT企業の社会的使命にしたがい、次世代社会の実現に貢献することを発表している。今、世界はコロナ禍中にあり、医療や教育のような分野も含め様々な領域でDXが進みつつあるが、私たちがニューノーマルな生活様式で従前以上の生産性や自由を享受するためには、基底にある社会システムまで変革する視点を持つことが肝要だろう。引き続き、各社からオープンな研鑽の機会を頂き、社員の視野を広げ、「世の中の役に立つ人」に覚醒させていきたいと願う。

5G、IoT、AI 等 DX を進展させる技術が広がっていることにワクワクさせられるが、これらを有効に応用できる人があって初めて真に人間中心の未来社会に近づいていける。企業は、人が自律的に学習しつづけ（進化）、使命に目覚め（深化）、持ち味を存分に発揮し（真価）、お客様とともに社会価値を創造（新価）していく”シンカ”の場になれば良い。顧客企業や社会の課題の解決に全身全霊で取り組む社員を育成することが明るく活力ある社会づくりに直結すると信じている。

(2020年9月29日原稿受領、Vol. 2. 10に掲載)

論説11

Society5.0時代のシステムイノベーション： 新たなシステムデザインアプローチに向けて

慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科教授

白坂成功（SIC 学術協議会副主査）

1 はじめに

平成28年1月に閣議決定された科学技術基本計画において、日本が目指す姿として Society5.0 が示された。Society5.0 は、「サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会」¹⁾と定義されている。これには大きく3つの重要なポイントが含まれている。一点目は、サイバー空間とフィジカル空間の融合、つまり、それらの間に人が介在することなく、AI等の自動処理によって閉ループが成立することで人が介在することなくシステムが進化することである。二点目は、フィジカル空間がサイバー空間を通じて相互につながることであり、そして三点目は、人間中心、つまり実現手段ではなく、生み出す価値に着目していることである。このような Society5.0 の社会が実現されてくると、そこに含まれる“システム”はこれまでとは異なる性質を持つてくる。

本稿では、システムに関する概念を説明した上で、近年のシステムに特徴的で考慮すべき3つの点として、「システムとしての対象の拡大」、「環境の急激な変化」、および「重要なシステム特性と説明責任の増加」について説明する。そして、これらの特徴にどのように対応することが可能であるかについても述べる。

2 システムに関する基本的な概念

まずはシステムに関する基本的な概念を整理しておく。システムとは、「ハードウェア、ソフトウェア、ファームウェア、人、情報、技術、設備、サービスおよび他の支援要素を含む、定義された目的を成し遂げるための、相互作用する要素を組み合わせたもの」²⁾であると定義されている。つまり、システムの構成要素は、いわゆるハードウェアやソフトウェアだけではなく、人や情報などであることがもともと想定されている。また、システムは、いくら詳細に個別の要素を

みても決して理解できない。システムを理解するためには、その個別要素にとらわれるのではなく、全体を一つのものとしてとらえることが必要である。そのようなシステムをデザインし、実装するための方法論として、システムズエンジニアリングがある。システムズエンジニアリングとは、「システムの実現を成功させることができる複数の専門分野を束ねるアプローチおよび手段」²⁾と定義される。つまり、システムズエンジニアリングとは、複数の専門分野（例えば、電気工学、機械工学、ソフトウェア工学など）を統合し、束ねるためのアプローチである。実社会における課題解決や価値創造は、単一の専門分野だけで実現することは難しく、複数の専門分野の統合が必要となる。

3 Society5.0時代のシステムで考慮すべき点

上記のようにシステムは、ハードウェアやソフトウェアだけから構成されるものではなく、全体を捉える必要があるものであるが、Society5.0時代のシステムは、これまでとは異なった考慮すべき点が明確になってきている。ここでは考慮すべき3つの点をあげて説明する。

3.1 システムとしての対象の拡大

まず一つ目の特徴として、システムの対象の拡大について説明する。システムというと、ITシステムを頭に浮かべる方も多いのではないかと思う。また、飛行機やロケットなどのようにハードウェアが中心となるシステムを想像する人もいるかもしれない。しかし、上述したとおり、システムの定義上、その構成要素はハードウェアとソフトウェアに限られるものではない。現在のシステムでは、もっと幅広く考える必要がある。例えば、令和2年3月に内閣府から「SIPサイバー/アーキテクチャ構築及び実証研究の成果」として公表された「スマートシティリファレンスアーキテクチャホワイトペーパー」³⁾において示された「スマートシティリファレンスアーキテクチャ全体像」(図1)をみるとその対象範囲がわかる。この「スマートシティリファレンスアーキテクチャ全体像」は、スマートシティをデザインするとき、対象となる全体像である。スマートシティというと、テクノロジー、つまりソフトウェアやハードウェアが注目を浴びがちである。しかしながら、本来は、そこにいる人々であるスマートシティの「利用者」のためのものである。Society5.0でも「人間中心」を重要なキーワードとしている。つまり、テクノロジーだけを考えていてはダメである。実際に、このスマートシティリファレンスアーキテクチャ全体像では、右側に「都市OS」

を中心としたテクノロジーがあり、左側には人間系の「都市マネジメント」を置くことで、この両輪が「スマートシティサービス」には必要であることを示している。また、「都市OS」のさらに右側にそれを支えるスマートシティアセットがあり、「都市マネジメント」の左側には、その方向性を決定づける「スマートシティ戦略」が置かれている。さらに、下には、全てを貫く形で、「スマートシィルール」がおかれている。それらすべてがスマートシティサービスを通じて、利用者へ価値を提供するという形になっている。つまり、スマートシティをシステムとしてみると、これら全てがシステムを構成する要素となっている。スマートシティをデザインするというのは、利用者に価値を提供するために、これらを全体として捉えてデザインすることである。

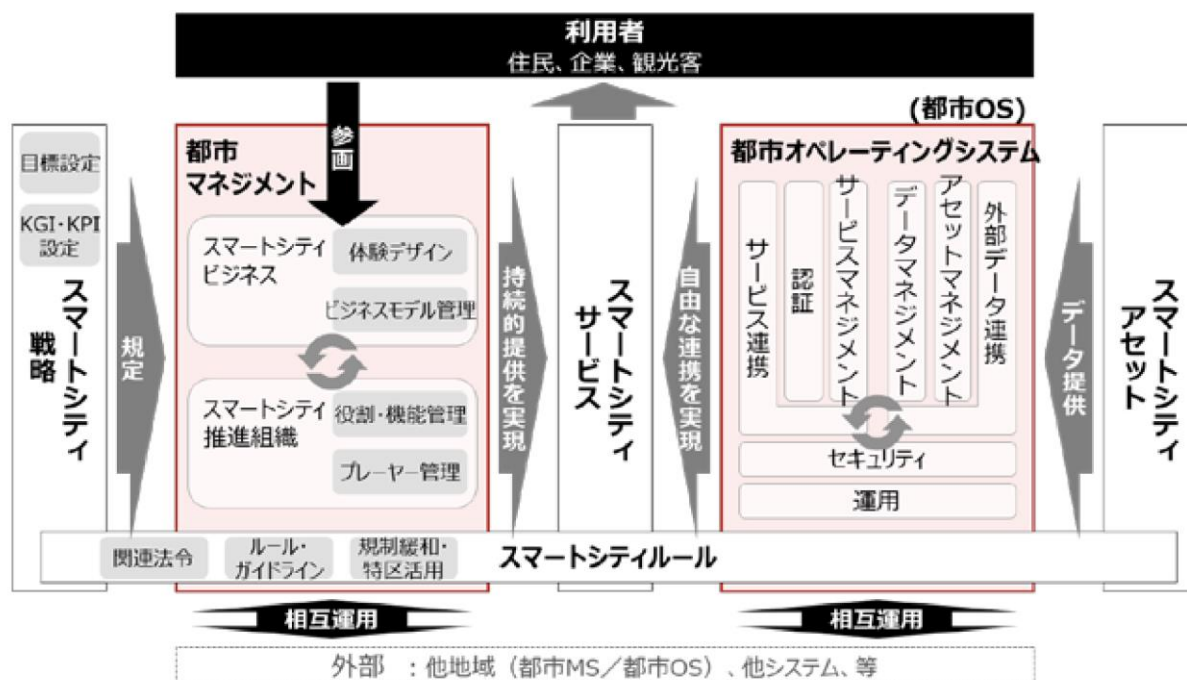


図1 スマートシティリファレンスアーキテクチャ全体像³⁾

一つ目の特徴として考慮すべきことに、システムそのものの質が変わっていることも挙げられる。上述したとおり、Society5.0では、これまでつながっていなかった分野同士がつながることを推進する。それぞれ独立して調達・運用・管理されているシステムが必要なときにだけ繋がって新たな価値をうむ。このようなシステムをSystem of Systems (以下、SoS)と呼ぶ。⁴⁾ SoSは、それぞれ独立して調達・運用・管理されるものが繋がって使われるものである。まさにスマートシティは、自治体単位で調達・運用・管理されるものであるが、利用者は、それらをまたがって利用する。つまり、東京から神奈川に移動したときに、スマ

ートシティの仕組みに連続性がないと利用者からすると利用がしづらくなってくる。つまり、SoS では、システム間の相互運用性(interoperability)が重要となってくる。単にシステムとして成立するだけでは不十分で、他のシステムの相互運用性を考慮する必要がある。これも Society5.0 のようにつながる社会を目指す場合には重要なポイントであり、そのときも単なる都市 OS の相互運用性だけでなく、都市マネジメント、スマートシティルール、スマートシティサービスの相互運用性も考慮する必要がある。

スマートシティのようなシステムでは多くの専門分野がかかわるため、多様な専門家の意見を統合する必要がある。このように多くの専門家の意見を統合し、システム全体のデザインを担うのがシステムアーキテクトである。つまり、システム全体のコンセプトを描ける人材である。ただし、単なる IT 分野のアーキテクトではなく、上記のような幅広い分野の専門家の意見を理解し、統合するためには、高い抽象化能力やコミュニケーション能力が必要となる。例えば、スマートシティの分野では、スマートシティアーキテクトの必要性が言われており。内閣府が推進するスーパーシティ構想では、未来都市を実現するための強力な推進機関にアーキテクトが必要であることが示されている。

3.2 急激な変化

次に二つ目の特徴として、急激な変化について説明する。VUCA という言葉をご存知だろうか？ VUCA とは、Volatility (変動)、Uncertainty (不確実)、Complexity (複雑)、Ambiguity (曖昧) から構成された言葉である。現在は VUCA の時代であると呼ばれ、先の予測ができない、計画通りにならない時代であると言われている。世界不確実性指数も増加の一途を辿っている。⁵⁾つまり、システムをめぐるものが激しく変化するために、将来が見通せない時代になってきたということである。ビジネス環境の変化、技術の変化、また AI によるシステムそのものの変化もおきるようになってきた。COVID-19 はまさにそれを決定づけた一例であると言える。

しかし、単純に世の中の変化が激しくなっただけではなく、我々自身が世の中の変化を受けやすい社会をつくっている。つながる社会は変化の影響範囲を広げることが加速する。システムがつながっていないときは、システムに影響を与える環境変化が起きても、影響をうけるのはそのシステムに限られる。しかしながら、システムがつながっていると、システムに影響を与える環境変化があると、つながっている他のシステムにもその影響が伝播する可能性が増加する。つまり、つながる社会は、世の中の変化の影響を受ける可能性が増大することになる。

これまでのシステムでは、外部との関係が変化しないと仮定したクローズシステムとして扱うことが通常であった。しかし、このように外部との関係が変化すると仮定したものをオープンシステムと呼ぶ。オープンシステムのデザインにおいては、2つのことをおこなわないといけない。一つは、環境の変化がシステムに影響を与えることになるべく早く気がつく必要がある。もう一つは、変化に対応するために、変化に対応しやすいシステムデザインをする必要がある。例えば、前者の一つのアプローチとして、「一般社団法人ディペンダビリティ技術推進協議会（略称 DEOS 協会）」では、設計時に設計者がどのような外部環境変化が設計に影響を与えるかを明示化するための手法として D-Case を提案している。D-Case を活用することで、ステークホルダ間で変化に対する合意議論を充分に行う事ができ、合意結果/結論に至った理由/議論の経緯を記録する事ができる。後者のアプローチとして、変化を考慮したアーキテクチャ設計があげられる。例えば、アーキテクチャ設計時に、必要となる機能とその実現手段を明示的に分離して設計する。これにより、技術の進歩により手段が変わっても、必要な機能が変わらない場合は、手段のみを変更することで対応が可能となる。これらのように環境が変化するという点については、環境の変化がシステムに影響を与えることに気がつく仕組みを導入することと、変化に対応するために、変化に対応しやすいシステムデザインをすることで対応が可能となる。

2020 年のものづくり白書では、このように変化に対応可能な組織の能力をもつことこそがダイナミックケーパビリティの本質であり、DX はその能力を高めることに貢献できることであると述べている。

3.3 重要なシステム特性と説明責任の増加

最後に、三つ目の特徴として、重要なシステム特性と説明責任の増加について説明する。MIT の調査によると、年々新たなシステム特性が追加され、さらにシステム特性に関する論文の本数が急激に増加していることが示されている。⁶⁾ システム特性とは、システム全体として捉えないと評価ができない特性のことであり、古くは品質(Quality)や安全性(Safety)などがこれにあたる。最近では、前述した相互運用性(Interoperability)や総合信頼性(Dependability)などその種類は増加しつづけている。つまり、環境の変化が激しく、システムの範囲が拡大しているにもかかわらず、システムとしてしか捉えられない特性が増えていくということになる。

さらにこれらに対する説明責任が求められることも増えている。例えば、IEC61508 や ISO26262 のような機能安全規格は、安全性の説明を要求している。鉄道の機能安全規格である IEC 62278 は、RAMS という名前のおり Reliability

(信頼性)、Availability (可用性)、Maintainability (保守性)、Safety (安全性) の4つのシステム特性の説明が求められている。現在では、さらに様々な対象において、機能安全規格という名前のもと、安全性およびその他のシステム特性の立証を求める規格がつくられている。この機能安全規格をはじめとしたシステム規格は、開発当初からトップダウンで考慮し、そのためのエビデンスを残すことをしなければならない。

今後のシステム規格への対応を考えると、あらゆるシステムの開発において、開発当初から、トップダウンで重要なシステム特性をデザインし、その立証のためのエビデンスを残すというプロセスの規定と、そのためのインフラ整備をおこなっておくことが必要である。日本人はトップダウンでおこなうリスクベース/ゴールベース開発が苦手であるということがよく言われるが、筆者は決してそうは感じていない。確かに、これまで必要がなかったため、そのような開発が行われてこなかった。このため、急に対応が難しいところはある。しかし一方で、必要性がうまれて、きちんと考え方を学び、それを実践することをはじめている会社では、徐々にではあるが、そういった開発をおこなっている。つまり、きちんと学び、実践をしていけば、そういった開発アプローチができる人材は日本でも育成が可能であるということである。

4 最後に

本稿では、Society5.0 を実現する上で重要であると考えられるシステムに特徴的な3つの点として、「システムとしての対象の拡大」、「環境の急激な変化」、および「重要なシステム特性と説明責任の増加」を紹介し、それらにどのように対応することが良いのかを示した。しかしながら、今回の提案は必ずしも確立した対応策でないのも事実である。今後は SIC のようにシステムに関する専門家が集まるコミュニティにおいて、研究者のシステムに関する知見や、実践者の経験知をもとにその対応策の進化と深化を進めることが Society5.0 の実現に重要であると考えている。

出典

1) 内閣府 Web サイト

https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/

2) INCOSE, Systems Engineering Handbook, 2015

- 3) 内閣府, スマートシティリファレンスアーキテクチャホワイトペーパー, 2020.3
- 4) Mark W. Maier, Architecting principles for systems - of - systems, Systems Engineering volumel, issue 4, 1998
- 5) 経済産業省, 2020年版ものづくり白書, 2020.5
- 6) Olivier L. de Weck, Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World, The MIT press, 2011

(2020年11月1日原稿受領、Vol. 2.11に掲載)

論説12

Society5.0の実現を目指す新たなシステムズアプローチ

神戸大学大学院 システム情報学研究科教授 貝原俊也 (SIC 学術協議会会員)

1. はじめに

第5期科学技術基本計画において「超スマート社会(Society5.0)」が提唱され¹⁾、さらに来年度からスタートする第6期科学技術・イノベーション基本計画では、さらに踏み込み、Society5.0を実現するためのイノベーション力の強化」に向けた指針が盛り込まれる予定である。そして現在、この超スマート社会の具現化と実現に向け、産学を中心にさまざまな研究開発が進められている。この超スマート社会の実現には、社会システムを構成するさまざまな異種のシステムをシームレスに統合し社会全体にとって新たな価値を創造するような社会システムのグランドデザインが必須となり、システムズアプローチが今まで以上に極めて重要な役割を持つことになる。

このような背景の下で、計測自動制御学会のシステム・情報部門における「スマーワールドの実現を目指す新たなシステムズアプローチ調査研究会(2017.1~2019.12)」およびその後継である「スマーワールド実現のための新たなシステムズアプローチの実展開を目指す調査研究会(2020.1~)」では、このグランドデザインを可能とする新たなシステムズアプローチについて部門横断的な調査・研究が進められてきた²⁾。そして、超スマート社会を構成するさまざまな異種の社会システムを抽象的なレベルでのシステムとしてとらえることを共有し、SoS(System of Systems)の新たな展開やアナリシス・アブダクション・シンセシスの循環による螺旋型システムズアプローチの考え方などが少しずつ明らかになりつつある³⁾。

さらにこの動きは、同じくシステム・情報部門の社会システム部会と連携をすすめる形で、科学技術振興機構(JST)の未来社会創造事業プログラム「超スマート社会の実現」領域における新規プロジェクトとして採択され⁴⁾、超スマート社会の実現に向けた新たなシステムズアプローチからの接近について積極的な活動が展開されている。

そこで本稿では、今後のシステムイノベーション実現に向けた一助となるべく、我々の研究活動の一部について概略紹介を行う。

2. 新たなシステムズアプローチ実現への取り組み

計測自動制御学会のシステム・情報部門において、2014年1月に「安心・安全・快適社会（スマーターワールド）実現のための新たなシステムズアプローチ調査研究会」が結成された。その中で我々は、スマーターワールドとして「世界中のあらゆるものが相互接続され、機能化・インテリジェント化が進んでいる環境下において、経済や交通・エネルギー・環境・資源・生態系といった世界規模の多様な諸課題が、高度な技術により解決されることで実現する安心・安全・快適な社会」と位置づけ、自律的・進化的により良く持続的に発展していくメカニズムを自身に内包した新たな世界の意味で”スマート”ではなく”スマーター”と命名した。

この母体となるシステム・情報部門には、システム基礎理論への取り組みとして、既に様々な研究の蓄積や取り組みがなされており、本調査研究会ではそれらを俯瞰しながら横断的に取りまとめ、新たなシステムズアプローチを追求するという観点から、部門を構成する各部会を代表する部会主査経験者を核として、日本全国のシステム科学を専門とする産学メンバー25名にて調査研究をスタートさせ、2016年12月まで活動を進めた。

その後調査研究会は、上述のように、スマーターワールドの実現を目指す新たなシステムズアプローチ調査研究会(2017.1~2019.12)」およびその後継である「スマーターワールド実現のための新たなシステムズアプローチの実展開を目指す調査研究会(2020.1~継続中)」へと活動が引き継がれ、現在、結成よりはや7年が経とうとしている。そして、今までの活動のアウトリーチとして、「計測と制御」に2回の特集^{5),6)}と、スプリングーに解説書⁷⁾を出版している。特に文献6)においては、システムズアプローチを(1)システム構造・モデリング、(2)システム最適化、(3)システムの適応・進化、(4)システム事例と分類して展望・解説し、最近注目されているデータ・ドリブンアプローチと、システムズアプローチが本来有するモデル・ドリブンアプローチの関係性についても解説がなされている。我々の今までの活動詳細については、これらを参考にされたい。

さて以降では、これらの活動から具体的な取り組みの一例として、社会システムを対象とするモデリングやシミュレーション手法の新たなアプローチについて、著者らの取り組みの一例を紹介する。

2.1 社会システムを対象とするモデリング・シミュレーション手法

超スマート社会の実現には、サイバー世界と実世界を高度かつ有機的に結合させ、多種多様なステークホルダより構成される社会システムに特徴的な時空間の異なる様々な意思決定を柔軟に取り扱える新たなシステムズアプローチが必須となる。また超スマート社会の特徴として、異種のシステムより構成され、さらにそれらのシステム群は社会共通のマクロモデルを媒介とし、メゾ・ミクロレベルにおいて時空間粒度の細かなさまざまな異種システムが混在しながら展開されるという一般的な階層構造を有しており、マルチスケール社会シミュレーションにより、異種システムがシームレスに融合された新たな超スマート社会のあるべき姿を指し示すことが可能となる。

ここで超スマート社会における IoT サービスプラットフォームでは、システム間の連携・統合による新たな社会的価値創出が目標とされている。我々はその実現に向けた方法論として、社会システムを構成する複数システム間のシームレスな融合を実現するための社会シミュレーションによる新たなシステムズアプローチと社会システムに固有な階層性についても着目し、個人行動モデルなどのマイクロモデルから産業構造などのメゾモデル、政策・経済評価などのマクロモデルを接続し、対象問題の特徴や狙いに応じてマイクロ・メゾ・マクロモデルをバランス良く利用可能なマルチスケール社会システムモデリング・シミュレーション手法の確立を目指している。

以降ではマルチスケール社会システムモデリング・シミュレーションについて、電力エネルギーシステムを事例として取り上げ概略を紹介する。

まずここでは図1に示される様な仮想的な都市を対象にその電力システムに着目する。そして本システムを取り巻くステークホルダとして、電力の需要者である一般消費者と事業者、電力の供給者である電力会社、さらに電力政策を行う政府機関を考える。また社会システムにおける時空間の影響範囲を考慮した意思決定と行動レベルにより、一般消費者と事業者をマイクロレベル、電力会社をメゾレベル、政府機関をマクロレベルと位置づけ、社会シミュレーションのためのモデル化を試みる。それぞれの入出力変数を整理し、マクロレベルをシステムダイナミクスモデル、メゾレベルをディスクリートイベントモデル、マイクロレベルをエージェントモデルでモデル化を行い、それぞれを一つの統合モデルとして連携し社会シミュレーションとしての実行が可能なプラットフォームの構築を試みる。そしてマルチスケールモデル間の連携の一例として、電力価格決定に、マクロ政策におけるエネルギーミックス(火力・水力・風力・原子力発電) ベースの電力会社による発電供給量と消費者の需要量および均衡メカニズムを実装したシミュレーション実験を行い、マルチスケールモデリング・シミュレーション

ン手法を用いることで、社会システムに対する SoS の概念にも通じた多種多様なステークホルダのインタラクティブで合理的な意思決定に基づくスマートな設計・運用・管理・意思決定の可能性について、その一端が示されている⁸。

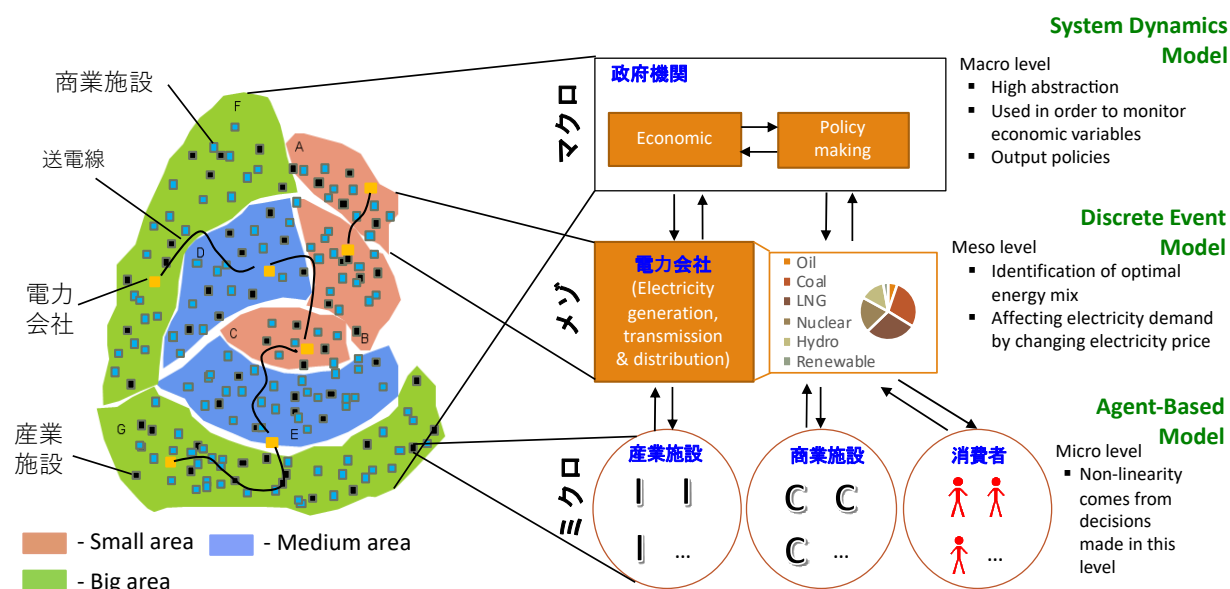


図1 マルチスケール社会システムモデリング（電力システムの事例）

3. JST 未来社会創造事業：システムズアプローチの社会政策

(COVID-19 対策)への展開

我々の新たなシステムズアプローチ構築に向けた取り組みは、今年度の未来社会創造事業に採択され、多数の参画メンバーとともに活動をスタートさせた。そして社会政策立案に向けたマルチスケール ABSS (Agent-Based Social Simulation) 手法の確立を目指し取り組みを進めている。

前述のように、超スマート社会における IoT サービスプラットフォームでは、システム間の連携・統合による新たな社会的価値創出が目標とされている。そこでその実現に向けたシステムズアプローチからの接近として、社会システムを構成する複数システム間のシームレスな融合を実現するためのエージェントベース社会シミュレーションと社会システムに固有な階層性についても着目し、個人行動モデルなどのマイクロモデルから産業構造などのメゾモデル、政策・経済

評価などのマクロモデルを接続し、対象問題の特徴や狙いに応じてマイクロ・メゾ・マクロモデルをバランス良く利用可能なマルチスケール社会シミュレーション手法を確立し評価を試みる。

ここで新たに提案する超スマート社会を対象としたマルチスケール ABSS による社会政策決定のためのフレームワークについて図 2 に示す。本フレームワークでは、多様なステークホルダーを内包した実社会を構成する多様な社会システムについて、個別システムへブレークダウンした後、個別システムにおける指標に基づいた支援シナリオシミュレーションを実施してアウトカムを推定し(アナリシス)、個別システムごとの複数のシナリオ分析の結果より全体システム評価を実施(シンセシス)する。そしてその結果より新たなシナリオを発想(アブダクション)して更なる超スマート社会の政策課題へとフィードバックし、このアナリシス-シンセシス-アブダクションのループを繰り返すことで、科学的根拠に基づいた社会政策決定を実現する。

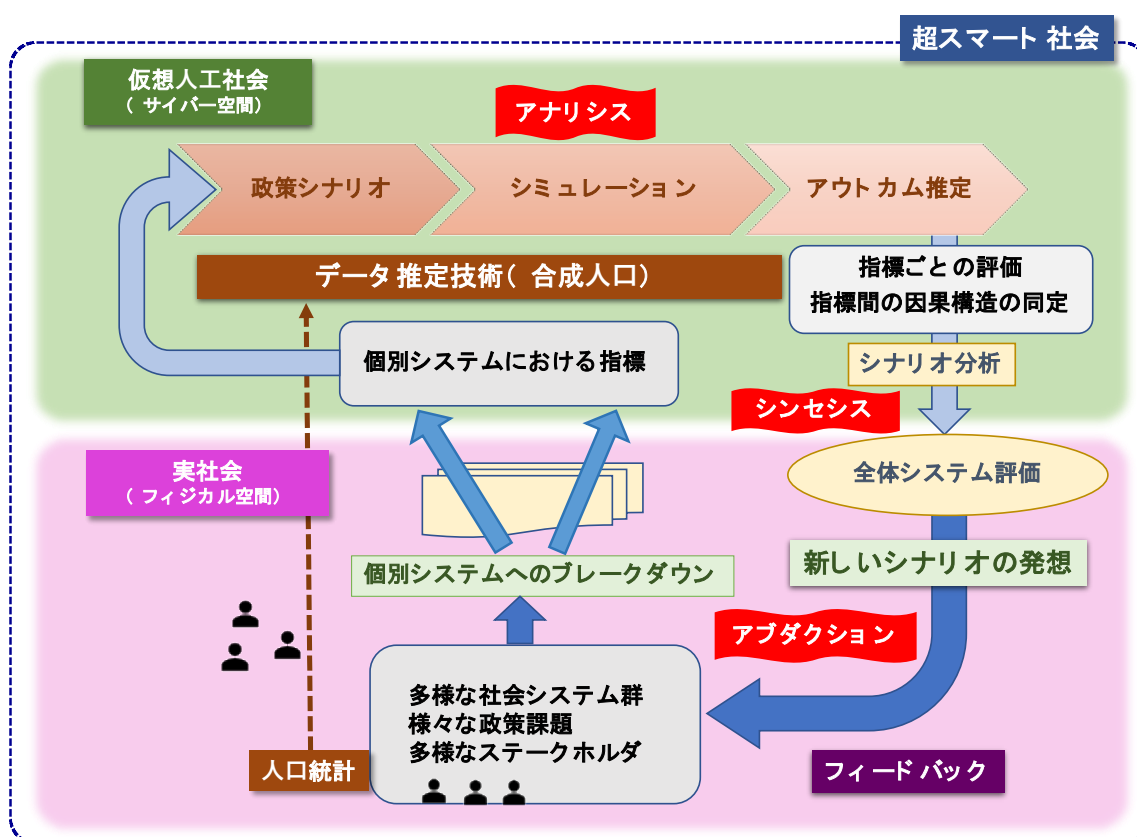


図 2 社会シミュレーションによる社会政策決定のためのフレームワーク

なおエージェントの行動モデルに利用できる社会システムに関する実データは入手が極めて困難である。しかしエージェントの行動モデルの妥当性とエージェントのパラメータ推定技術が社会シミュレーション結果の信頼性の確保にとって重要となる。そこで本プロジェクトでは個々の市民の世帯レベルの行動データについて、公開されている統計情報から推定するデータ推定技術を研究することで、モデルドリブンのシミュレーション技術とデータドリブなデータ解析技術の融合を試みていることも新たな点である。

4. おわりに

本稿では Society5.0(超スマート社会)の実現を目標に、新たなシステムズアプローチを追求してきた我々の研究活動の一端とともに、その具体的な有効性検証を目指す J S T のプロジェクトについて概要を紹介した。紙面の都合により紹介レベルにとどまっているが、これらの詳細については参考文献をご覧ください。

今後システムイノベーションを実現するための方法論を検討・深化させる上で本稿が何かのご参考となれば甚だ幸いである。

参考文献

- 1) 内閣府, https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html, 2020.11.20 アクセス.
- 2) 貝原俊也, スマターワールド実現にむけたシステムズアプローチの新潮流, 計測と制御, Vol. 55, No. 8, pp. 641-649, 2016.
- 3) 貝原俊也, スマターワールド実現にむけたシステムズアプローチ, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2017, pp. 757-762, 2017.
- 4) JST, <https://www.jst.go.jp/pr/info/info1467/pdf/info1467.pdf>, 2020.11.20 アクセス.
- 5) 計測と制御, 特集: スマターワールド実現のための新たなシステムズアプローチを目指して, 計測自動制御学会, Vol. 55, No. 8, 2016.
- 6) 計測と制御, 特集: スマターワールドへの実展開を目指す新たなシステムズアプローチ, 計測自動制御学会, Vol. 59, No. 12, 2020.
- 7) T. Kaihara, H. Kita, S. Takahashi (Eds.), Innovative Systems Approach for Designing Smarter World, Springer, 2020.

8) N. Nursultan, T. Kaihara, N. Fujii, D. Kokuryo, Three step approach for multiscale modeling of social systems, システム・情報部門学術講演会 2019 講演論文集, pp. 715-717, 2019.

(2020年11月23日原稿受領、Vol. 2. 12に掲載)

寄稿1

知の総合と事実情報—文理融合型のシステムイノベーション—

株式会社 smart-FOA 代表取締役社長 奥 雅春 様

1. はじめに

今日まで、IT はその正確さ、高速性という点から主に定型的な業務領域を効率化・自動化することでビジネスに大きく貢献してきた。この流れは、業務要件定義から始まるウォーターフォール型の標準アプローチとして定着してきた。現在は、IoT⇒ビッグデータ⇒AI が3種の神器といわれる流行になっている。ただここには人の活動という視点が明示的には取り込まれておらず、人の疎外感が漂う。それもあってか「人間中心の AI 社会」といった政策提言もなされている。

一方で、昨今のグローバルなビジネス環境は変化変動を常態化させてきた。いかに変化をすばやく察知し、状況の適確な判断を行い、工夫を凝らして臨機応変に対応していくかがビジネスの観点で問われてきている。これは、現場活動から経営活動まで幅広く、マネジメントの「認識⇒意思決定⇒行為」という変化変動する経営・活動サイクルを対象にしようということである。また、この観点には、「意味」「価値」「判断」「イノベーション」といった視点が欠かせない。これらは、現場 IT システムも避けて通れない課題となってきた。現に、この視点を意識していると思われる「デジタルトランスフォーメーション」という概念も出てきているが、明確な視座がないと大きな効果を生み出すことは困難に見える。

本稿では、この視点を踏まえ、人の現場活動をいかに IT で支援するかの一つのアプローチとして、東京大学ものづくり経営研究センターで講話や議論を重ね、また経済産業省発行の2017年度ものづくり白書に掲載して頂いた FOA (Flow Oriented Approach) を紹介してみたい。

2. 文理融合(総合知)の再考とデジタルトリプレット

システムイノベーションには異分野融合が必須であることが様々な観点から

指摘されるようになってから久しい。しかし、IT システムの側面からの具体的な方法論が明確になっているとはまだ言い難い。あらためてここで具体的アプローチのフレームワークを提案してみたい。

IT の進展と相まってあらゆる物理的な事象や情報をデジタル化、大量蓄積し、高度なアルゴリズムを駆使して高速分析するシステム的手段は飛躍的に進展してきた。これらの技術はまさに理系的な知の結晶である。「人間中心設計のデジタル社会」が描く物理世界とバーチャル世界の融合によるデジタル社会(デジタルツインな社会)もこの理系・工学系的な技術進展の延長線上に描かれた社会の在り方である。

これに対して、日々の生活、仕事上で生じる様々な事象に対する人間の欲求、理性、文化・思想、倫理観等に即して生まれる「意味」や「価値」、そこから沸き起こる「判断」、そして人間の創造がもたらす「イノベーション」といった文系知の視点は、理系や工学系で直接取り扱うことは緒についたばかりであり、従来から文系領域の主要課題とされてきた。

しかし、変化変動が当たり前の時代においては、デジタルツインの世界がもたらすデジタルライゼーションの恩恵を享受しながらも、定型的な業務を超効率的・超高速に自動化・効率化してきた IT でさえ捉えきれない予測を超えた急峻な変化が起こりえる。変化が起こる度に発生し、増大する IT の改変コストやタイムロス、見過ごせないレベルになってきており、俊敏なビジネスアクションにとっては足枷となりかねない。

これを裏付けるように、実際にも「データレイクの沼化」や個別システムの乱立による「サイロ化」といった様々な IT 特有の問題が浮き彫りになってきている。これらは、世の中の様々な事象やビジネス上の変化変動に対して、IT や組織がいかに現状延長線上でのデジタル化を促進していったとしても、絶え間ない変化変動に即応しきれずに膠着し、鈍化していく組織の現状を如実に物語っている。

そういった意味で、非定型的でいかようにも変化する世の中の事象に対して歴史的に即応してきた人間の変化に対する対応力(=世の中の変化から「意味」や「価値」を感じ、「判断」し、時に「イノベーション」を想起する人間本来の能力)を、さらに研鑽するための理系知と文系知を総合する新たなシステムアプローチが不可欠あり、このシステム的な枠組み作りが今後の国際競争力の源泉にもなってくる。現に、変化変動の時代に突入した社会は、情報量の爆発とともに「意味」や「価値」が多様化する中で、IT の恩恵を享受しつつも、さらに人を活かした新たな「イノベーション」の創生に向けて必死に動き始めようとしている。

新たな知やイノベーションを求めて様々な知を総合し活用しようとするのは人やその活動・生活においてであり、上述の課題も単に技術的側面だけから捉えるのではなく、その知を総合しようとする人側の要請から結果的に生じてきていると捉えるべきであろう。このような観点に立つとき、理系的な英知の延長線上で描かれるデジタルツインの世界に、さらに、人や組織の活動の中の「意味」「価値」「判断」「イノベーション」といった文系知の視点が加わった「デジタルトリプレット」の世界」をデザインしていくことで変化変動に真に即応し「人間中心設計のデジタル社会」を下図 1 に示すような知を総合する¹フレームワークとして描けないだろうか。

知の総合フレーム

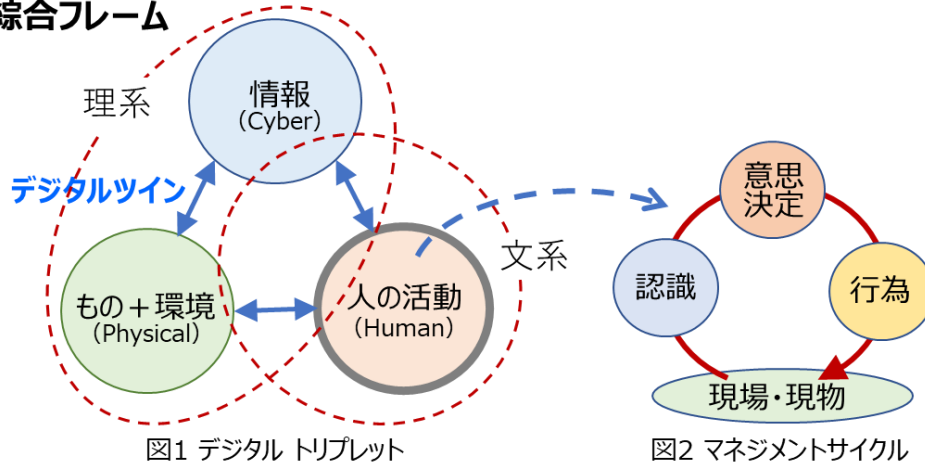


図1 デジタルトリプレット

図2 マネジメントサイクル

この観点に立つ文理融合的なシステムとしてのアプローチはまだ少なく、今後の人間中心設計のデジタル社会が目指すべき方向は、この「文理の融合」と共に人間的な「意味」や「価値」、「イノベーション」の視点から、システムとしてユーザが主体的に、即座にかつ自由自在に情報をインキュレートし、その情報を共有・共鳴・思考し、さらに創造していくという新たな情報処理システムの枠組みづくりであろう。

この人や人の活動のデジタル化アプローチは、2通り考えられる。一つは、進展著しいAI研究からの文系知を直接的に理系知化する理系アプローチが一般的であろう。二つ目は、知の総合という観点からのアプローチで、ものづくり領域で、生産技術（理系知）×改善（文系知）の相乗効果によって高い製造力を発揮してきた日本ならではの『知を総合する現場活動』からの文系アプローチが考えられる。ここでは後者を例に解説を試みる。

¹ 一般に知識や知は様々な分類・表現されているが、ここでは文脈に沿って大きく理系知と文系知とに分けている。

3. ものづくりの現場の2つの情報と現場活動

ここで、ものづくりビジネスに目を向けると、市場にマッチしたより良い商品を、より安くすばやく提供してることが求められる。ものづくり現場の組織活動でみれば、大きく2つの活動に分けられる。1つはものづくりを始める前に行われる設計活動（生産計画・準備も含まれる商品設計全般の活動）であり、2つ目は、実際にもものを作る活動（現場改善や管理が含まれる製造活動全般）である。

ものづくりだけでなく、一般に組織活動には何らかの情報が伴い有機的に結びついた様々な情報活動の集合体になっている。

筆者らは、ものを設計して作り出す時点を境目にして、ものを作る前の情報を事前情報（＝設計情報）と呼び、作り始めてから発生する情報のことを事後情報（＝現場の事実情報）と呼んでいる。なぜ2つに分けるかといえば、これら2つの情報は、その性質や取扱いが大きく異なるからである（図3）。

	設計情報	事実情報
発生タイミング	事前情報	事後情報
業務の型	定型	非定型
標準	標準化に向く	標準化不向き
情報流路	「もの」への転写	人・組織へ蓄積
アプローチ	演繹的	帰納
コントロール	意図的	意図せず
要素関係性	全体整合的	因果関係

図3 事前情報/事後情報

事前情報としての設計情報は、意図して設計した結果の情報であり、全体を明確に決め、細部に落としていくという演繹的な設計アプローチをとることが多い。一方、事後情報としての現場の事実情報（以降簡単に「事実情報」とする）は、実際に生産活動を始めてから生じる有意な事象の情報（異常、故障、良品/不良、在庫など）であり、意図しない現場の個々の事象の積み上げから知見・経験・体験を組み上げていくという帰納的なアプローチが主になって、人による仮説生成（アブダクション）につながっている。

これを前述のデジタルトリプレットの観点で見ると、ここでいう設計情報は、標準化を好みまさに業務要件定義やナレッジを通してデジタル化されていくデジタルツインの世界で扱われる理系知の情報である。一方で、事実情報は、想定困難な絶え間ない変化変動の中で起きるダイナミックな事象を、その事象に関連する設計情報とその事象を取り囲む周辺状況とから、その事象を察知する個々人の「意味」や「価値」「判断」（文系知）を通して捉えていく、むしろ標準化を嫌う情報である。また、そういった意味ではこの事実情報というのは、人の中で積み上がっていく知の一角を形成し成長させていくための自然でかつ重要な源泉であると言える。

ものづくりの現場だけでなく一般的にもそうであるが、人の活動する現場には、この設計情報(スタティック)と事実情報(ダイナミック)の2つの情報が必ず存在している。ここで事後情報とした設計情報ですら市場で発生する様々な事実情報が起点となって生まれるとすれば、これは大きなサプライチェーン上でダイナミズムを持つ情報の連鎖になっていると考えることができる。

これからのデジタルライゼーションは、この非定型的で絶え間なく変化変動する言わばダイナミックな情報を、ちょうど「設計情報」のデジタル化と同様に、「事実情報」として明示的に分かりやすくコンテンツ化し、IoTの最新技術を駆使して自由自在に、即座に、そしてグローバルに発信、共有・共感できるようにすることが極めて重要となるであろう。

さらに現場の変化に伴ってこの事実情報も変化していくため、臨機応変な対応を必要とする現場では、この変化する事実情報をすばやく吸収できるITシステムが必須であることは言うまでもない。デジタルツインと共鳴しながら変化変動を人間の文系知の側面と融合しイノベーションを創発していく世界観が、デジタルトリプレットなのである。

ここで、設計情報、事実情報と人の活動との関連を見ておこう。前述の文脈に沿って、従来の知見を基にすると2つのモデルが考えられる。

一つは、図4_1のように計画・目標があって、それに向かって活動が構成され、事実(現場の事象)は外乱と考えるモデルである。計画・目標を起点とするこのモデルが一般的であろう。代表格がP(計画)からは始まるPDCAサイクルである。全体最適的ではあるが、目標がなければ活動が始まらない受け身の活動となる可能性も残る。欧米流のトップダウン思想を反映したモデルである。

一方、現物・現場の思想をベースにする事実に基づく現場活動は、図4_2のように、現場の事実を起点に活動が始まり、戦略や目標は様々な判断の制約条件として考える事実認識から始まるモデルとして表現できる。部分最適的ではあるが、ここから現場の主体的な活動が浮かび上がる。代表格は認識が最初に来るCAPDサイクルや「See⇒Think⇒Plan⇒Do」という日本の現場活動のモデルである²。

² 「直感の経営「共感の哲学」で読み解く動態経営論」著者:野中郁次郎、山口一郎 に詳しい。

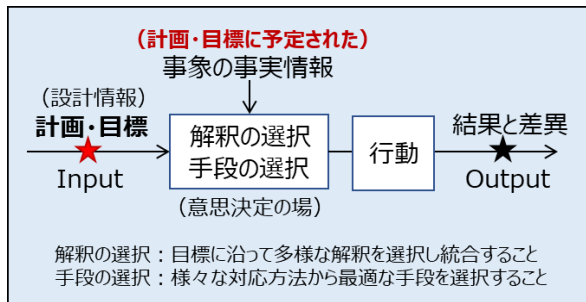


図4_1 目標起点の現場活動のモデル

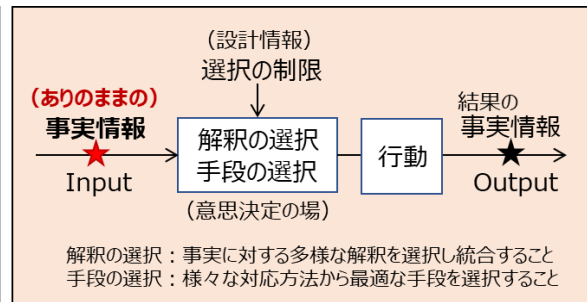


図4_2 事実起点の現場活動モデル

この2つのモデルはサイクルを成しており、どちらでもよさそうに見える。しかし、データの活用の観点から強調しておきたいのは、図4中に朱記しているようにデータに対する態度が違ってくる点である。

変化変動の時代には、すばやく周辺状況を含めて事実をありのままに捕捉することが不可欠であり、それによって些細な兆候や不規則な変化も、予期しない大きな気づき、ヒントやイノベーションにつながる可能性が高いからである。この見方は現物現場の思想と通底する重要な点であり、デジタル化することで失ってはならない点である。さらに事実情報をデジタル化し、ネットワークを活用することで、共有範囲を格段に広め、全体最適な視点での活用をもたらすという従来活動の弱点を克服する新たな可能性も大いに期待できる。したがって、俊敏なビジネスモデルの構築を狙う企業にとっては後者の事実起点の現場活動モデルがよりフィットしたモデルであると言えよう。

ここで、事実情報をもとに現場活動を支援するITシステムを構築する上での課題を整理すると、

- ① 現場の事象を現場活動にとっていかに分かりやすいコンテンツの形でデジタル化するか
- ② 現場の変化に伴う事実情報の変化をいかに容易に吸収できるシステムとして実現するか
- ③ データに対してどのような態度で臨めば、人の知の活性化やイノベーションに結び付くか

であり、これらについて、それぞれ、続く各節で、解説してみたい。

4. 現場の事実情報とは？

事実情報とは、現場で生じる事実（有意な事象）を人が伝達・共有するときの情報のことと定義している³。この事実情報のモデルとして、5W1H という伝達規範が一般的であり、これを下敷きにしてこの伝達規範の構成要素に基づく3つの情報の塊（“イベント情報”、“背景情報”、“説明情報”）から構成される情報とした。これらには背景情報として実践活動を通じたノウハウや体験・知見と言った情報、また説明情報として図面や生産計画、規格標準類の情報とから成り、理系・文系の2つの知を結び付けた情報と言える。この事実情報のモデルをデジタル化したものを（図5）、現場で発生するイベント（事象）の意味を相手に分かりやすく伝えるという点から「意味ありメッセージ」と呼んでいる。

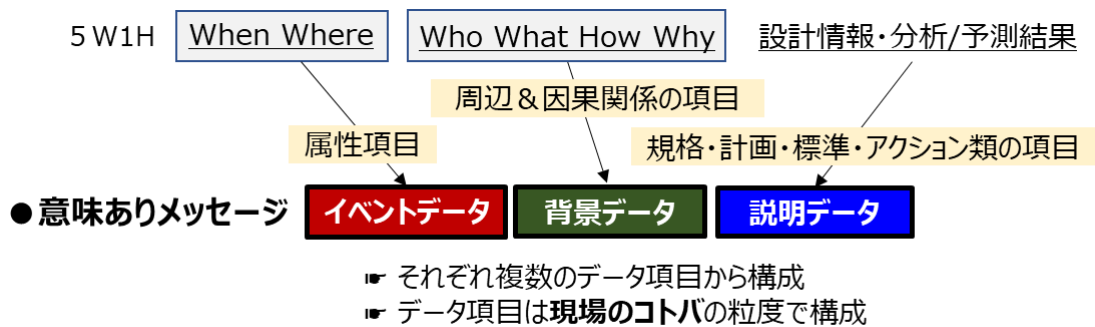


図5 意味ありメッセージの構成

このようにして5W1Hから構成される意味ありメッセージには、所属組織のもつ「意味」「価値基準」「判断基準」が明に暗に含まれることになる。故に人にとって分かりやすく扱いやすい情報となる。ものがインターネットにつながるIoT領域で、人が取扱いやすい形のコンテンツにして現場ITシステムを構築するという考えは、先に述べた帰納的なアプローチにとっては自然なシステム化の実現形であろう。

³ 東京大学 MMRC ディスカッションペーパー 2017—MMRC—493

ものづくり現場における「事実情報」とその活用：ITを活用した新たな情報活用システムの検討 奥雅春、大木清弘

これが FOA のコンセプトであり、このコンセプトに基づくシステムを筆者らは「事実情報システム」と呼んでいる。

そして、この意味ありメッセージをデジタルトリプレットの世界観でデジタルツインと融合していくことにより（図6）、ITやIoTの進展と共に、従来にない人間にとっての高可視性、可読性を実現し、組織に今まで以上に広い共有をもたらし、閉塞しがちな組織間の壁を超え多様な気づきや仮説が生み出される基盤になると考える。

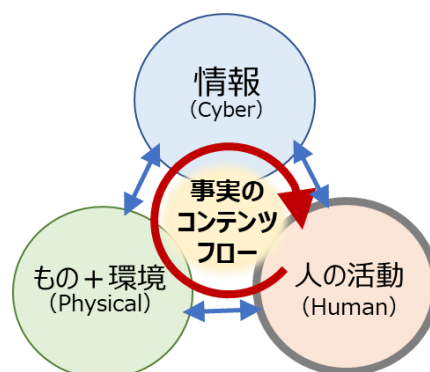


図6 事実情報システム連携

現場での気づきや察知という観点では、大きく次の3つのパスが挙げられる。

- ① 実際の現物・現場からの気づき（IT化以前の気づき）
- ② データ分析のAIが教えてくれる気づき（AIや分析からの気づきやヒント）
- ③ データそのものからの多様な気づき（データからの仮説創造）

データから気づきを得る手法としては「データ⇒ビジュアライゼーション（視覚化、見える化）⇒気づき」が一般的である。しかし、これには課題がある。活動から要求される視点は多種多様であり無数のパターンを準備する必要がある、裏を返せばフォーカスを鮮明にするが故に多様な気づきの可能性が排除されるという点である。過度な視覚化からは現場の思考不全が懸念される。

分かりやすさを求める意味ありメッセージの意義は、③のパスの多くのデータ群から得られる直接的で多様な気づきである。一般的な視覚化の前に、どこを視覚化すればよいのか、視覚化したあと見えてどうするのか、結果に至るプロセスや周辺に潜む異常、現場の困り事・不祥事的なこと不安全なことなどは、予め要件定義することが難しい。意図しない気づき、つまり“あれっ、なぜかな？”という仮説を自分の直感・知見・ノウハウと照らしてデータから直接見出すことにある。つまり、活動にとって重要な視覚化の前後を補完し、共有力を高め仮説創造を豊かにすることにある。

予め設計・マニュアルによって予定されたデータ群を個々に可視化し、気づきを得る可能性も大いにあるが、ネットサーフィンをしていてハッと気づかされるような意図しない気づきはなかなか得られにくい。スタティックなデータ群を機械的に分析し、受動的にそれらを眺め、思考する従来の取り組みに加えて、変化変動するダイナミックな事象を自然にかつ、能動的に直接捉えていくことが

大切であり、このプロアクティブなアクションと意図しない気づきを生み出すデジタルな仕組みこそが、人の活動のエンパワメントにつながる事実情報システムのもつ大きな第一の特徴である。

しかし、この意味ありメッセージは事実情報を単にデジタル化しただけであり、現場 IT システムとしてはまだ不十分である。システムには「構築、活用、運用」という3つの面が必ず存在し、それぞれを現場で活動するユーザを軸に、しっかりサポートするシステム基盤があってこそ、真に意味ありメッセージが活動の中で活かされてくる。

5. 事実情報システムに期待される機能

実際に変化変動に対峙する現場においては、下記のような要求事項やシステム特性が挙げられる。これらは、いずれも現場におけるシステム構築・活用・運用といった3つの面で必ずと言ってよいほど求められるユーザ要件であり、事実情報システムでは、これらの要求事項やシステム特性を総称して“ユーザオーブン性”と呼んでいる。

- ① 構築面では、スモールスタートが可能でバウンダリーレスな拡張が簡単に行える自律分散的なシステムであること ⇒自律分散性（全体データ非構造化）
- ② 活用面では、現場の臨機応変な判断・アクションに対応するため、リアルタイムな活用を可能にするシステムであること ⇒オンザフライ性（いきなり、準備なしに、とっさの場面での活用）
- ③ 運用面では、変化する環境や技術に対応するために、全体を停止しないオンラインでの局所的な改造が可能なシステムであること ⇒新陳代謝性（成長型の構造）

これらのニーズに関してはシステム設計者も十分認識している点であり、これまでも個別システムの中でその実現に取り組んできたが、一般化するには実現ハードルの高いテーマである。

ただ、3節で挙げた事実情報の性質を受け継ぐ意味ありメッセージの諸性質からは、比較的容易にシステムへの実装が可能となる（頁の制約もあり詳述は省く⁴⁾。また現場 IT システムを設計情報領域と事実情報領域の2つに分け疎結合化して取り扱うことを可能にし、現場特有の問題を分離・吸収し、システムのサイロ化やスパゲティ化を軽減するという効果も期待できる。意味ありメッセー

⁴⁾拙著「日本版インダストリー4.X」ダイヤモンド社、2018年10月発行の第2部で詳述している。

ジとこのようなシステム特性を機能実装したシステム基盤を一体で駆動させるのが、事実情報システムである。

変化変動しながら成長する現場と同期して、意味ありメッセージを軸とする成長型の動的なサイクルを持つ情報処理システムの実現は、事実情報システムのもたらす大きな第二の特徴である。

筆者らは、上記の機能を組み込んだ事実情報システムを構築するツールとして「FOA-Studio」という現場改善プラットフォームのパッケージを提供している。

6. 事実情報システムが生み出すマネジメントイノベーション

従来、現場データの活用は、主に各組織内の業務効率化を狙いとして行われてきた（図7_1）。いまだにこの延長線上にある。だが、IoTが普及し、ものだけでなく人の行動や活動データも収集可能な環境が整ってきた中では、固定化、標準化された組織や業務の中で、必要なデータを必要なときにだけ見るという態度では不十分である。まだこのような企業も多いが、ここに捕らわれていると道を見誤る。

大切なのは、発想を変え、現場で生じるダイナミックなリアルデータ（事実情報）が、擬人的に定型化した組織や活動の変革を要請していると捉えることである。現場のものや設備は無数の情報を発信しており、それを人の感性でありのままに捉えていこうという前述した態度である（図7_2）。そこから、おのずと従来とは違った対応方法や新たな活用が見えてくるはずであり、マネジメントの出番である。

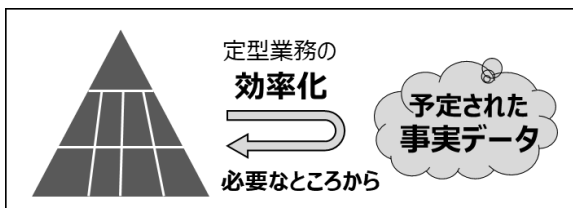


図7_1 従来視点

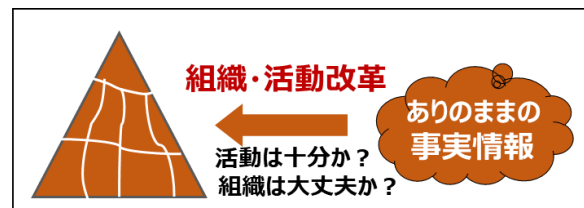


図7_2 新たな視点

効率的に自動生成された月次定型のコスト実績集計やマクロ KPI を見て指示しているだけでは、変革に乗り遅れる。重要な変化は初期には小さく現れることが多く、ドリルダウンしようにも丸められてマクロ指標には表れてこないからである。

組織が積極的に変化変動を捉える視点に立つための組織マネジメント的なア

アプローチの一つに DAC 広場 (Dynamic Action Chart)⁵がある。

日々の現場には、朝のブリーフィングに始まり、様々な事実をベースにするフォロー会議といった重要な議論・意思決定の“場”がある。現場の事実から得られる個々人の様々な気づきや解釈が生じ、それを互いにぶつけ合い連鎖しあうことで新たな解釈や知見が生まれてくる。これが草の根的なイノベーションとなり、時には大きなイノベーションにつながっていく。様々な知恵や発見・発明を生み出すところでもある。まさに日本の得意な改善であり現物現場である。

この“場”に、デジタル化した事実情報を加えた“場”(DAC 広場)にすることで、さらに新たな気づきを加え俊敏な活動を起こそうということである。

実際にも、大型の海外工場建設のストレッチな目標に対して、このようなフォロー会議の「場」を設定して、意味ありメッセージから現場の日々変化する活動 KPI シート (DAC シート) を作成し、日々の状況を事前共有する。そして、問題意識を持った参加者が DAC シートから得られた気づきや問題を議論し対策案を練り、また沈殿している制度やルールのみずみ拾い上げて議論、判断し、迅速に改良・改善を重ねていく。その結果、従来からは想定できないほどの全く異質なフォロー会議が出現し、数十倍の費用対効果が得られた。

この DAC 広場の発想も、分かりやすく即座に扱える意味ありメッセージがあったからこそ生まれた。このマネジメントや業務の変革を促す活用も事実情報システムの重要な点であり、最も大きな第三の特徴と言える。

7. まとめと今後の展望

本稿では、文理融合(総合知)の観点からデジタルトリプレットを提案し、具体的な一つのアプローチとして、理系知と文系知をのり付けする事実情報(意味ありメッセージ)を定義した(FOA コンセプト)。また、事実情報をシステム化する上での要点やその活用でのインパクトについても言及した。本文でも触れたが、これらの考え方は人の活動があるところには広く適用できると考えている。

これに関しては、必ずしも文系からのアプローチではなく、認知科学や脳科学といった理系アプローチからも可能であるという識者もおられよう。しかし、その意義や活用、知の成長といった側面までを考えれば、文系知からのアプローチからとするほうがより自然であり、知の融合による新たな視座を見出すことが

⁵ 東京大学 MMRC ディスカッションペーパー 2017—MMRC—498

変化/変動時代の事実情報ベースのマネジメント:「DAC 広場」の有効性の検討 大木清弘、奥雅春

期待できるからである。

今、日本の製造現場には豊富なリアルデータの蓄積があり、分析・活用の面で海外製造業を一步リードしているという主張がある、確かに一理ある。しかし、これを作り出してきたのは従来の現場の力である。過去のデータだけに頼っていたのでは未来はない。現場がこれからもデータ眼力を磨き、自ら新たなリアルデータを作り出していくしかない。今も輝きを失わない日本流の現場改善の考え方に、さらに意図しない気づきを誘発する動的な仕組みが加わりかつマネジメントがそれをリードするとき、変化変動時代を乗り越える IT や AI を駆使する新たな現場力が生まれると考えている。

データ活用領域で、欧米の後塵を拝する中、スマートファクトリー領域で、従来のメイドインジャパンから文理融合した IT で現場をエンパワメントするメイドバイジャパンを発信していくことが、世界のものづくりへ貢献できる道であり、SIC の活動の一助となれば幸いである。

著者プロフィール

奥 雅春（おく まさはる）様 masaharu.oku@smart-foa.com

株式会社 smart-FOA 代表取締役社長、一般社団法人 FiMA（事実情報処理研究会）代表理事

1973 年ブリジストン入社。1989 年から買収直後のファイアストーン社に派遣。2000 年にはタイヤ生産技術の取締役就任、2002 年からは取締役常務執行役員（生産および生産技術管掌）、退任後は玉川大学客員教授、東京大学ものづくり経営研究センター特任研究員、日本 IE 協会顧問を歴任。2011 年 smart-FOA を設立、現在に至る。

（2019 年 9 月 19 日原稿受領、Vol. 1.5 に掲載）

寄稿2

デジタル社会における人と機械の新たな関係

株式会社日立製作所 研究開発グループ テクノロジーイノベーション統括本部
生産イノベーションセンタ 主管研究長 野中洋一 様

これまでの3度の産業革命を通じてグローバル化が加速し、多くの人々が雇用を求めて国境を越えて移動するようになった。経済は、総人口に占める子供(0~14歳)の割合が30%未満、高齢者(65歳以上)の割合が15%未満の場合に劇的に成長する飛躍的経済成長の機会があると考えられており、これに基づくドイツの飛躍的経済成長の機会は1950年以前に始まり1990年に終了し、日本は1965年に始まり1995年に終了している[1]。そして現在、両国の社会は、労働力の成熟化、機械やインフラの老朽化といった社会的な問題が懸念されている。

これらの問題を解決し、生産効率を高く維持したまま持続可能な社会を構築するために、両国はサイバーフィジカルシステム(Cyber Physical System, CPS)、AI(Artificial Intelligence, 人工知能)、ロボティクスなどのデジタル技術を、ドイツではIndustrie4.0、日本ではSociety5.0と呼んで社会の次世代の成長エンジンとして適用を進めている。

このデジタル社会においては、人が機械とやり取りする振り舞い(相互作用)と、人と人が直接やり取りする相互作用にそれほど違いがないものになってきており、その結果として、コミュニケーションの対象としての人と機械のギャップが薄まりつつある。この技術発展におけるコミュニケーションの変化に対して、社会の変革が追いついていないとは言えず、老朽化した社会インフラや旧来のコミュニケーション手段が残る現代社会に対して、大きな変革力をもたらしている。そしてこの変革力は生活の隅々にまで行き渡り、人と機械の相互作用に大きな影響を及ぼし、仕事の手順や雇用条件にも影響を与えている。

この問題について、今回、ドイツ Industrie4.0 の中心的人物の一人である Henning Kagermann 教授(略歴参照)をリーダー、筆者をサブリーダーとし、ドイツ工学アカデミーacatechのプロジェクトとして、ドイツと日本の産学の有識者が集まった。そして、スマート社会、スマートマニュファクチャリングに関する以下のような点について、両国の現状と将来に対する考え方について議論を重ねた。

- ✓ 労働の構造・品質・生産性の変化、その将来

- ✓ 人種・文化・社会インフラ・働き方が更に多様化する社会における課題、その中で持続的イノベーションを起こすための考え方
- ✓ 人と機械の共生のあり方

そしてこの議論の結果をディスカッション・ペーパー “Revitalizing Human-Machine Interaction for the Advancement of Society” として上梓した[2]。

このプロジェクトでは、人と機械の新しい相互作用の仮説、および、その仮説を実現するための社会的要件を提言した。すなわち、社会的課題がデジタル技術によって解決すると一般に考えられているが、それまで人が行っていた認識を必要とする定型的な作業を機械が代替していくため、デジタル技術による社会的課題の解決には社会変革や労働構造の変化が必要となる。そして、この変化の中で、持続可能な社会を確立するためには、人が付加価値の高い仕事を継続的に創造し、かつ、時代遅れになりそうな仕事から高付加価値の仕事にいつでも移行できるようになることが必要となる。さらに、機械が付加価値の低い仕事を負うだけでなく、機械が人とやり取りすることによって付加価値の高い仕事を継続的に生み出していく仕組みになることも必要となる。こうした要件によって、人が生涯を通してスキルを向上し、付加価値の高い仕事を継続的に創造する、人間中心の製造システムを実現できると提言した。このシステムにより人と機械の相互作用が活性化し、人と機械の両方がデジタル社会を構築する役割を担うことができる。

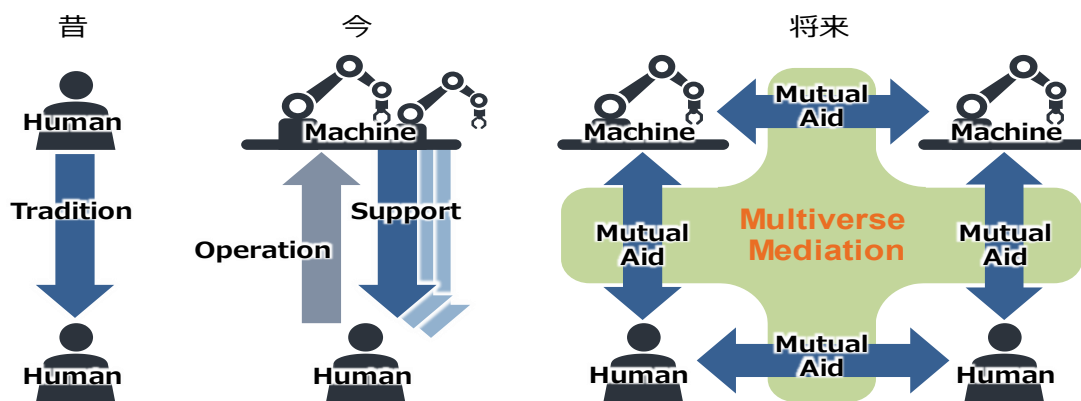


図1. 人と機械の相互作用の昔、今、将来(Source: 日立)

この提言の中で、人と機械の相互作用について、昔、今、そして将来の姿を議論した[3]。図1はその議論をまとめた模式図である。左側の図は、昔の人と機械の相互作用を表現している。いわゆる人と人の間の伝統的なモデルであり、技能者が知見やスキルを初心者言葉や身振りで伝えることで技術伝承や技術の

洗練化を図る。この方法は、変化が激しく瞬時に情報が社会を駆け巡るデジタル社会では、知識の伝達という意味では効率的ではない。中央の図は、現在の人と機械の相互作用を表現しており、自動車、家電、スマートフォンのように、機械は人の行動範囲を飛躍的に広げ、作業の効率を飛躍的に向上させ、知識の伝達・共有の広さ、深さ、速さを飛躍的に高めた。このように機械は人の能力不足を補うために機械は不断の支援を人に与えているが、その支援が過度になると人が本来備えるべき能力を退化させていくリスクを含み、持続的社会的実現に課題があると今回論じた。これは医療の現場で観察される” Learned non-use” と呼ぶ現象、外界からの刺激に対して反応する身体は、刺激がなくなるとその特定の身体機能が退化していく現象について、例えばスマートフォンによって情報を瞬時に取得できる一方で検索や洞察などの力が衰えていくリスク、自動車などの移動手段の多用によって歩行能力が衰えていくリスクなども同様の現象とみることができる今回論じた。すなわち、機械からの過度の支援は、人が本来備えるべき身体能力やクリエイティビティを退化させる可能性があり、デジタル社会における人と機械の相互作用のあるべき姿は今とは違う別の何かが必要と結論付けた。

そこで今回、人と機械の両方の持続可能な成長を促すために、人と機械が共有するデジタル知識基盤が社会的に必要であると提言し、“Multiverse Mediation” と今回名付けた。この共有デジタル知識基盤が人-人、人-機械、機械-機械の相互作用を随時補助し、補助して得た人と機械の振る舞いや知見を蓄積し共有していく。例えば人と人のコミュニケーションにおいて言語の随時変換だけでなくその時々で参考となる情報を提供しコミュニケーションを活性化する、人と機械のコミュニケーションにおいて機械の操作方法の提供だけでなく人のスキルの成熟度に応じた運用方法の提供でコミュニケーションを活性化するなど、人のクリエイティビティを持続的に発揮させ、人と機械が持続的社会的実現に向けて効果的に貢献することを説いた。

この Multiverse Mediation という概念は未だ議論尽くされておらず、蓄積した人と機械の知見を、個人、家族、企業、国などの階層でどう共有していくかなど、知識共有の構造や運用について、これから更に議論し設計していく必要がある。いずれにせよ、今まではデジタル技術の社会適用が個人や企業など私的な目的と価値が主体であったものが、持続的社会的を築いていくためにはデジタル技術の公共性をどうしていくかが鍵となると結論付けた。

また、この概念を実現するために関係する組織論や技術開発の萌芽についても議論し、事例を持ち寄り整理してディスカッション・ペーパーに掲載した。例えば労働構造の変化に対する労働者の再学習・再就職に関する社会的支援の方

針や仕組みについては、ドイツと日本の中で類似点・相違点など多く指摘され、非常に興味深い議論となった。

この日独共同プロジェクトは、ディスカッション・ペーパーを上梓し一旦区切りをつけたが、議題の重要性を鑑み、議論の枠組みを日独で拡大し、新たにプロジェクトを起こして推進していく計画である。

今回、社会的に解くべき課題をどう認識しているか、どう解決していこうとしているのか、ドイツと日本の類似性と相違性を改めて相互認識する良い機会となった。両国は同じゴールを目指しているものの、歴史的背景や社会構造の違いから、解決策を見出すまでの過程が同じとは限らないことを双方知りえたことは、貴重な経験となった。社会的に解くべき課題を世界全体で議論し解決させていくためには、こういった多様性を尊重し共通のゴールを目指していく姿勢が重要となろう。

Kagermann 教授ご略歴（ご本人の許可をもらって掲載）



Prof. Dr. Henning Kagermann

Henning Kagermann is the former president of acatech - National Academy of Science and Engineering and holds the chair of its Board of Trustees. acatech provides independent and science-based advice to policymakers and civil society.

In 2017, Henning Kagermann was appointed Global Representative and Advisor of the Platform Industrie 4.0 by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy and the Federal Ministry of Education and Research. Moreover, Prof. Kagermann holds the chair of the Steering

Committee of the Innovation Dialogue between the German government and the scientific and business communities. The Steering Committee of the National Platform Future of Mobility (NPM) is also chaired by him.

As a former member of the German Federal Government's HighTech Forum and the Industry-Science Research Alliance, Prof. Kagermann plays a key role in the promotion of strategic projects such as Industrie 4.0, web-based service innovations (Smart Services) and autonomous systems.

Henning Kagermann holds a post-doctoral thesis in physics and is former CEO of SAP.

参考文献

- [1] 米国国家情報会議, ” 2030 年 世界はこう変わる アメリカ情報機関が分析した「17年後の未来」”, 講談社, 2013年4月
- [2] H.Kagermann, Y.Nonaka, “Revitalizing Human-Machine Interaction for the Advancement of Society”, acatech DISCUSSION, October 2019
<https://en.acatech.de/publication/revitalizing-human-machine-interaction-for-the-advancement-of-society-perspectives-from-germany-and-japan/>
- [3] 株式会社日立製作所, “Multiverse Barrier Free - Revitalize Human-Machine Collaboration”, Hitachi Brand Channel, 2019年5月
<https://www.youtube.com/watch?v=fKjN3PPbUhk>

著者プロフィール



野中 洋一 様

㈱日立製作所 研究開発グループ

テクノロジーイノベーション統括本部 生産イノベーションセンタ 主管研究長
1992年 ㈱日立製作所 生産技術研究所入社、産業用ロボット応用システム、デジタルエンジニアリング技術、生産制御技術などの研究開発に携わる。2001年 米 MIT 客員研究員。2017年から IEC/ISO Joint Working Group 21 “Smart Manufacturing Reference Model(s)” Task Force 5 リーダ、2018年から京都大学大学院 情報学研究科 数理工学専攻 連携教授、2019年から IEC System Committee “Smart Manufacturing” Working Group 3 コンビナなど兼務。日本機械学会、精密工学会、計測自動制御学会、CIRP、日本工学アカデミーの会員。2015年10月より現職。工学博士。

(2020年1月24日原稿受領、Vol.2.2に掲載)

寄稿3

エネルギーシステムとイノベーション

東京大学 生産技術研究所 エネルギーシステムインテグレーション研究部門

特任教授 荻本 和彦 様

1. はじめに

新型コロナウイルスの猛威が全世界の社会・経済活動に大きな打撃を与え続けている。人類の発展に伴う地球環境への影響への対応が大きな時代の要請になる中、近年の自然災害や今まさに渦中にある疫病の蔓延を含めた不確実な環境の中で、我々はその将来をより確実かつ安定なものにできるか、知恵を絞り努力を重ねる必要がある。

エネルギー需給においては一次エネルギー供給の大きな割合を化石燃料が占めている。これに対して、一次エネルギー供給を低炭素排出の再生可能エネルギーなどにより代替し、需要側では化石資源の燃焼利用を削減するための電化を加速させ、それらに伴う諸課題の解決が必要と考えられている⁽ⁱ⁾。本稿では、エネルギーシステムの今後の変化と、安定性、経済性、環境性そして安全性(3E+S)を確保するための多軸的取り組み、そのためのシステムイノベーションの役割について述べる。

2. エネルギーシステムの変化

第一の変化は、電化である。

電化は古くて新しいエネルギー利用の変化である。これまで、家庭、業務、産業、運輸の様々な分野において、利便性、経済性などの視点で電化が進められてきた。これに加え、現在は、エネルギー部門の低炭素化のために、再生可能エネルギーや原子力の発電による一次エネルギー供給の有効活用と、需要側での化石資源の燃焼を避け、一次エネルギーの消費量を低減するという視点で、一層の電化が進められている。

これから電化が進展する分野としては、ヒートポンプや電磁加熱を始めとする家庭・業務・産業における様々な温度帯での温熱供給や、バッテリー技術の発達を背景とした電気自動車を始めとする運輸分野である。産業の多様なエネル

ギー用途や運輸のうち長距離トラック・航空・船舶など、さらにハードルの高い分野の電化も期待されている。

第二の変化は、再生可能エネルギー発電の大量導入である。

太陽からの放射や地球の熱や運動を起源とする再生可能エネルギーのうち、太陽光発電、風力発電は、多くの国・地域でほぼ共通して大きな導入量が期待される。しかし、出力が時間や天気により大きく変動するこれらの発電技術の大量導入が進むと、出力の変動性と不確実性が増加し、これまでの出力を調整できる火力発電や揚水発電などによる電力システムの安定で経済的な運用が難しくなる。

第三の変化は、分散型資源の大量導入である。

発電側で導入が進む太陽光発電や風力発電は、数 kW のルーフトップ PV をはじめとし、配電網あるいは低圧の送電線に接続される多数の比較的小容量の設備であることが多い。需要側では、ヒートポンプ式の空調・給湯に加え、EV 充電器、定置式バッテリーなど、新たなニーズに対応した多様な小容量の技術が導入される。

これらの容量が小さく分散して配置される分散型資源のうち、太陽光発電や風力発電は、本来可能な発電出力の範囲内で、有効電力を調整することができる。需要側の分散型資源は、電気の利用をタイムシフトし、さらには使用量を細かく調整することもできる。このような分散型資源による有効電力の調整に無効電力を加えた様々な調整の機能は、発電側は発電量の減少、需要側は電力の使用ニーズの一部の制限を伴うが、送配電網の電圧の逸脱や過負荷の回避や需給バランス維持のための周波数制御など、電力システムの運用に様々な付加価値を提供することができる⁽ⁱⁱ⁾。(図 1) 分散型資源は、自端で検出する電圧や周波数に基づく自律制御、あるいはシステム全体の最適化にもとづく遠隔の管理・制御により実施される。このような分散型資源の調整力の積極的な活用を、分散型資源の能動化と呼ぶ。また、分散型資源としての電源は、従来の火力、原子力発電などの集中型電源の場合のように個別の設備事故が電力システム全体の需給に大きな影響を与えないという利点を持つ。

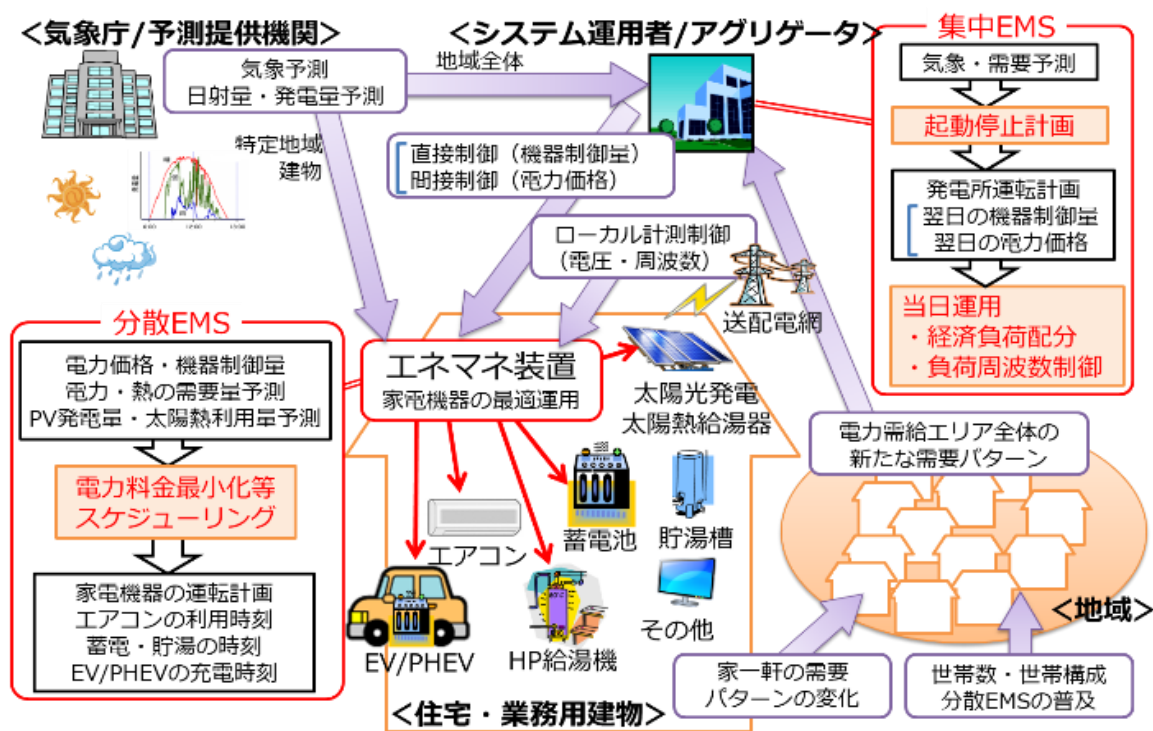


図1 分散型資源の能動化 (荻本研究室)

しかし、ユニット数が1000のオーダーである集中型電源よりはるかに数が多く、100万台あるいは1000万台に上る分散型資源が導入される状況では、それらの利用が電力システムの運用に貢献し、悪い影響を与えないようにすることは、数をはるかに少ない集中型の設備のみの場合と大きく異なる新たな管理・制御体系を確立する事が必要となる。

3. 多軸的な取り組み

新たな電力・エネルギーシステムへの移行には、これまでに挙げた変化を実現しそれに伴う可能性を最大限活用し諸課題を克服し、安定性、経済性、環境性そして安全性(3E+S)を確保することが必要である。これを遅滞なく進めるためには、複数の軸による並行した取り組みが必要となる。

第一の軸は、エネルギー全体の視点に基づく戦略策定である。

将来の電力システムに関しては、電力分野の専門家により電力システムを中

心にした議論が行われることが多い。しかし、大幅な電化のもとでの再エネと分散型資源の大量導入に対する課題解決では、電力システムはエネルギーシステムそして社会全体とより密接に関係する。このため、エネルギーシステムの将来を考えるためには、エネルギーシステム全体、電力システムおよび各分野の専門家を加え、エネルギー全体からの総合的な視点にもとづく議論が必須である。

そして、次に述べる第二の軸である安定供給のもとで、近頃しばしば議論される「再生可能エネルギー100%」について、これを、どのような手段を講じて、どのような段階を経て、どこまで実現するかについて、俯瞰的な道筋としての戦略策定は喫緊の課題である。

エネルギー戦略の策定は、概念的な検討に留まらず、定量的な検討が必要である。図2に示すような、多様な要素を包含したエネルギー全体と時間粒度の高い分析の必要な電力分野の検討を連携して行うことで、より広い課題に対しより有利な対応策を備えた、より優れた戦略の策定につながる。また、戦略に続く具体的な設備形成、新たな技術や制度の価値評価、制度設計、ビジネス開発などには、より精度の高い検討を組み合わせることが必要である。

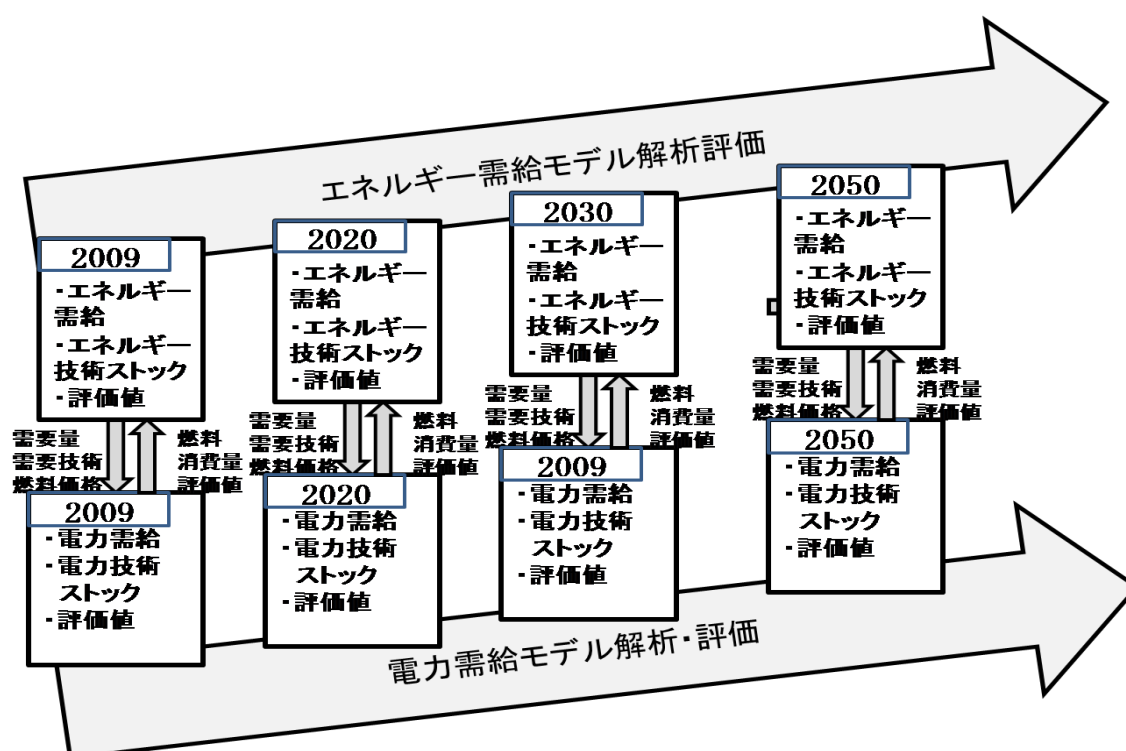


図2 エネルギーと電力の連携解析ⁱⁱⁱ

第二の軸はネットワークの視点である。

供給そして需要に着目しがちなエネルギー問題であるが、電力は送配電網、ガスは導管網により供給と需要が結ばれる。大きなネットワークを形成することで、再生可能エネルギー発電や需要の地点による変動をならすことができる。また、ネットワーク内の貯蔵設備を活用することで、時間的なならし効果が得られる。ネットワークは、分散電源や新たな電化による需要を支え、それらからの様々な調整力の提供を可能にするためのインフラとして、需要や供給の増減に応じた適切な拡充あるいは縮小の設備形成を計画することが重要である。

第三の軸は、安定供給である。

再生可能エネルギーの導入増加による変動性と不確実性の増加と、貯蔵が難しい電力のエネルギー需給における割合の増加に伴い、ネットワークを含むシステム運用は難しくなり、事故・災害による停電や悪天候や紛争にともなう恒常的な供給不足などの可能性が高まり、社会・経済への影響は大きくなる。このため、最近しばしばレジリエンスとも呼ばれるエネルギーの安定供給の確保は、これまで以上に大きな課題となる。

あらゆるものがデジタル的に管理、運営される時代になり機能性は向上する、専用線を使用できる集中型電源でもハッキングなどの問題が報告されるなど、無数の分散型資源の情報と管理・制御データを様々な主体が共有する段階では、情報セキュリティの確保はより重要な課題となる。

エネルギーならではの視点では、大規模停電や供給途絶などの最悪の状態を回避するために、需給運用の継続性が重要である。システム異常時の自律的な運転機能、冗長性のある運用と設備形成など、狭い意味での最適化に陥らない頑健性の確保が必要である。

第四の軸は、分散型資源および多様な技術の管理と活用である。

規制下の従来型の電力・エネルギーシステムでは、限られた数の事業者が限られた数の大規模設備を設置し、運営していた。これに対し今日では自由化で参入した多数の所有者が無数の小規模の分散型資源を運営する。このため、一旦設置された分散型資源を改修することは難しいため、将来必要となる機能はあらかじめ備えておくことが必要となる。これを実現するためのルールはグリッドコードなどと呼ばれ、欧米でその制定、運用が先行している。グリッドコードは、設備の導入普及と使用期間を考えると、10～20年先までの設備の運用と維持・管理に有用な内容であることがこれからの分散型資源の導入と運用には不可欠

である。

第五の軸は、制度と規制の新たな役割である。

1980年代の英国で始められた自由化の流れは市場化として全世界に広まった。エネルギー分野においては電力、ガスが自由化されている。自由化された市場では、卸市場価格などの価格シグナルが、毎日の取引や運用を最適化し、さらに長期の設備投資を牽引する。このため、市場制度は短期、長期の価値を適切に反映できることが極めて重要である。欧米を含め現在の卸電力市場では、再生可能エネルギーの大量導入により、市場価格が低下し、ゼロあるいは負の値も出ている。市場を取り巻く環境の変化に応じて、さらには将来のニーズを予測して、遅滞なく諸制度を改善することが求められる^(iv)。

また、エネルギー分野の大きな変化の中で、市場メカニズムのみでは長期の設備形成を牽引できない状況が顕在化した。また自由化のもとでは事業者は技術開発など長期の投資は難しい、このため、必要な発電能力を確保するための容量メカニズムや先に述べたグリッドコードなど、規制機関には、将来の変化を見据えた非市場の施策の役割が重要になる^(v)。

4. システムイノベーション

エネルギーシステムにおけるこれからの変化と、それに対する多軸的な取り組みについて述べた。また、これまで述べた主に技術的な変化や物理的な課題に対し、エネルギー部門の市場化の中で、市場価格を通じた需要と供給の反応には、人間の意思決定、行動の不確実性の課題も存在する。

エネルギーという大規模システムにおけるこれらの変動性、不確実性、多様性、管理・制御の対象数の拡大の中で、毎日のシステムを効率的、効果的に運営し、戦略的な設備形成を実現するためには、人と機械の、それぞれの特性を活かした分担と協業が必要になる。機械は、定常的および一定のダイナミクスのもとで、一定の確実な意思決定が期待される。人は、適切な情報収集とその判断結果を適切に反映する枠組みの用意があれば、前例の乏しい状況に柔軟に対応することができると思われる。

米国の独立システム運用者（ISO）の電力市場運営と電力システム運用で用いられる非線形の混合整数計画などの各種の最適化手法を駆使した運用システムは、機械と人間の高度な協業の例である。機械は、数千の大規模発電所と数千万の需要を、数千の送電の運用と数千の地点別価格によって結びつける。近年では、

比較的小規模の太陽光発電や風力発電、さらには需要側の蓄電池など無数の設備の管理・制御の取り込みも始められている。また、このような小規模で無数の分散型資源に対しては、住宅や業務用建物のエネルギーマネジメントやEV充電管理に代表されるような、アグリゲータによるプラットフォームによる個別の管理・制御、ISOのシステムとの連携も始められている。Internet of Things、すなわちネットワークに接続された「実物」の大規模な世界が展開しつつある。

今後のエネルギーシステムの変化とそこでの多軸的な取り組みにより課題を解決し可能性を追求するために、システムイノベーションが果たす役割は大きい。システムイノベーションの究極的な到達点の一つは、通常時はより大きな対象を集中的に運用することで効率性を追求し、災害発生などの異常時にはそれぞれの需要あるいは需要群がエネルギー需給を自律的に維持してロバスト性を持つという、集中/分散のシステムが冗長性を持って協調するシステム、そしてそのシステムを継続的に改善できる仕組みを内包することと考えられる。

5. まとめ

エネルギーシステムは、エジソンによるニューヨークでの直流配電から始まり、欧州全体、あるいは北米全体を覆う電力システムへの拡大、さらには電力システムとガスシステム、それぞれのシステムの社会システムや個別の新たなサービスへの連携など、その地理的範囲と含まれる要素の規模や多様性から、世界最大のシステムである。エネルギーシステムは、生活と様々な社会・経済活動を支えるインフラとして新たな技術と目標のもとでこれから大きく変化する。今回触れなかったが、さらに先の変化として、「交流電力システムの質的变化」と「大規模エネルギー貯蔵の必要性和新たな二次エネルギー」への対応も必要である。

この大変革の時代、これまで蓄積された設備を維持運営しつつ、かつ技術、制度の両分野でこの変化を受け身ではなくリードしてゆくためには、エネルギーシステムの要素にとどまらずシステム自体のイノベーションが課題解決の鍵となる。コロナ禍による非日常を、新しい発想と行動のためのチャンスとしたい。

文 献

(i) 荻本和彦；低炭素社会における電力システム，IEEJ 雑誌 Vol. 129 .No. 1 特集解説，pp16-19 (2009)

(ii) 荻本和彦, 岩船由美子, 片岡和人, 池上貴志, 八木田克英, 電力需給調整力向上に向けた集中・分散エネルギーマネジメントの協調モデル_荻本_IEEJ B 部門大会, I-16 (2011)

(iii) 荻本和彦, 赤井誠, 近藤康彦, 末広 茂, 黒沢厚志: 電力需給計画モデルとエネルギー計画モデルの連携による長期電力需給解析, JSER 研究発表会講演論文集 15-4 (2009)

(iv) IEA: Re-powering Markets (2016)

邦訳 https://www.nedo.go.jp/library/repowering_markets.html

(v) 荻本和彦, 占部千由; グリッドコードの意義と取り組み, 太陽エネルギー学会 学会誌, Vol. 46. No1, pp7 (2020)

著者プロフィール

荻本 和彦 (おぎもと かずひこ) 様

東京大学 生産技術研究所 特任教授 エネルギーシステムインテグレーション研究部門

1979 年東京大学工学部卒業, 電源開発株式会社入社。2008 年より現職。

エネルギーインテグレーションとしてエネルギー技術戦略、物質・エネルギー需給解析・評価、動的エネルギー需給解析・評価、集中/分散のエネルギーマネジメントと再生可能エネルギー導入、エネルギーシステムの診断・評価とリスクアセスメントなどを研究、博士 (工学)。

(2020 年 4 月 28 日原稿受領、Vol. 2. 4 に掲載)

組織紹介1 統計数理研究所

数理・データサイエンスの研究基盤力強化と統計数理研究所の使命

情報・システム研究機構理事, 統計数理研究所長 椿 広計 (SIC 学術協議会会員)

統計数理研究所と情報・システム研究機構

私が勤務する統計数理研究所(以下、統数研)は、統計科学・数理科学の理論研究と諸学術分野への応用研究を行う大学共同利用機関と呼ばれる研究所です。大学共同利用機関というのは聴きなれないかもしれませんが、大学等の研究活動に資する共同研究事業や共同研究基盤を提供することがミッションとなっています。統数研は、この種の大学共同利用機関を束ねる「大学共同利用機関法人情報・システム研究機構(以下、ROIS: Research Organization of Information and Systems)」を形成する4つの研究所の一つです。ROISは、複雑な現象を情報とシステムという視点で捉え、分野を超えた融合研究の創成を目指しています。

生命現象をシステムと捉え研究する国立遺伝学研究所(遺伝研)、環境をシステムととらえ研究する国立極地研究所(極地研)という分野型2研究所と、情報学という横断的基幹科学を研究する国立情報学研究所(情報研)、そしてやはり横断的学術組織としての統数研の4研究所が存在します。統数研だけ「国立」となっていませんが、これは統数研だけが昭和19年6月、戦時下に米国が第二次大戦を科学戦・数学戦としたことに対抗して設立された研究所で、当時は国立という概念が無かったからです。

なお、ROIS以外には、国立国語研究所など6機関からなる人間文化研究機構、国立天文台など5機関からなる自然科学研究機構、素粒子原子核研究所・物質構造科学研究所からなる高エネルギー加速器研究機構があります。

これらの大学共同利用機関は、国立大学法人総合研究大学院大学(総研大)で対応する専攻教育も行っており、統数研は統計科学専攻を運営しています。統計科学専攻は、滋賀大学データサイエンス学部や横浜市立大学データサイエンス学部が後期博士課程学生の育成を開始していない現在、わが国唯一の博士(統計科学)を取得できる大学院です。現在、国立大学における数理・データサイエンス教育強化拠点コンソーシアムの6教育研究拠点として、北海道大学、東京大学、滋賀大学、京都大学、大阪大学、九州大学が指定されていますが、東京大学拠点

の駒本文保数理・情報教育センター長は総研大統計科学専攻の第1期生、同センターの北川源四郎特任教授(6大学コンソーシアム担当)は、前ROIS機構長、元統数研所長であり、総研大修了生、統数研元教員が、東京大学のみならず、京都大学、大阪大学、九州大学、早稲田大学、慶応大学、同志社大学、理化学研究所など多くの大学等の数理・データサイエンスの中核的人材に成長しています。

統数研の3つの事業

統数研は3つの事業を展開しています。第1は、3基幹研究系(数理・推論研究系、モデリング研究系、データ科学研究系)による統計数理理論研究の深化です。林の数量化理論、赤池情報量規準、北川のパーティクルフィルターなどデータサイエンスやシステム科学を支えてきた基幹理論を今後も研究開発することが最大の使命です。近年産業界にも大きなインパクトを与えた人工知能も統計的学習理論と数理最適化の複合システムですが、それらの基礎理論は数理・推論研究系の研究領域です。

第2は、諸学術産業界との共同研究を強化するために2010年から開始したNOE(Network of Excellence)形成事業です。つまり、統数研をハブとして諸研究機関・学会・民間などの研究活動を繋ぎ必要な研究を活性化する活動です。この支援のために、4センター(リスク解析戦略研究センター、統計的機械学習研究センター、ものづくりデータ科学研究センター、医療健康データ科学研究センター)を配置しています。ものづくり研究センターが研究した機械学習方法は新規物性を持つ物質開発の中核的方法論となり、数多くの産学共同研究が組織されています。

第3が、2011年から開始した統計思考力を備えたT型人材育成事業で、このために統計思考院という組織を設置しています。T型人材というのは、固有領域のドメインの知と横断的データサイエンスの知との2つを活用できる研究者を指します。2019年4月のブラックホール撮像に不可欠であったスパース画像モデリングを統数研池田思朗教授が行って以降、国立天文台との共同での人材育成事業が加速し、天文学と統計学のT型人材育成のため、国立天文台助教が2020年度から5年間統計思考院に出向することも決まっています。

データサイエンス推進機関としての情報・システム研究機構と統計数理研究所

2016年以降 ROIS が最も注力しているのは、データサイエンスの推進です。このため、ROIS 法人本部直轄組織として「データサイエンス共同利用基盤施設 (DS 施設)」を設置し、諸学術の「データ共有支援」、「データ解析支援」、「データサイエンティスト育成支援」の3つの共同利用基盤育成を7つの室・センター(「ライフサイエンス統合データベースセンター」、「極域環境データサイエンスセンター」、「社会データ構造化センター」、「人文学オープンデータ共同利用センター」、「ゲノムデータ解析支援センター」、「データ同化研究支援センター」、「データサイエンス推進室」)で行っています。現在、4つの大学共同利用機関法人と総研大が設立する連携体設立構想が進捗しており、DS 施設は全ての大学共同利用機関の担う学術をデータサイエンスという観点から進化させるミッションを果たすことになると予想されます。

統数研は DS 施設データ共有事業の中で「社会データ構造化センター」の活動を支援しています。例えば、総務省統計局統計データ利活用センターや多くの大学関係者と協働して、国が統計作成のために収集した調査票データを探索的に分析可能とする「オンサイト施設」の運営並びに利活用推進を支援するために、その利用者の拡大とネットワーク化を図る「公的統計マイクロデータ研究コンソーシアム」の運営を手掛けています。

また、「データ解析支援」については統数研データ同化研究センターで展開していた次世代シミュレーションに関する研究事業を DS 施設「データ同化研究支援センター」に移管しました。2014年から2019年までデータ同化研究グループは、現在コロナウイルスの感染シミュレーションを指揮している北海道大学西浦博教授をオーガナイザーとして、毎年夏期大学院を「感染症数理モデルによる流行データ分析と問題解決」をテーマに開催しました。世界から数十人の若手研究者が毎年統数研に10日間集中滞在してデータ同化の技術を学びました。一方、統数研が平成30年度まで運用していた共同利用環境であるデータ同化スーパーコンピュータシステムは、世界最大の共有メモリー型スーパーコンピュータで動的・複雑なシステム現象の解明や製品・サービスリリースプロセスの最適化への期待を持たれ、産業界も利用していたのですが、現在は稼働を停止しました。現在、データとシミュレーションとの融合を発展させる次期システムの概算要求を準備しているところです。

更に、統数研統計思考院は、データサイエンス指導者（棟梁クラス）育成を目的に、2018年度から ROIS 予算で Leading Data Analytic Talent 育成カリキュラムの開発と研修・修了認定などを行ってきました。2020年度からは DS 施設データサイエンス推進室と協働して、特定学術の専門知を有する助教レベルの若手研究者を対象に、データサイエンス活用の知と研究指導力を育成する、データサイエンス研究指導者育成を試行開始することになっています。

日本のデータサイエンス人材―絶望的状况の克服は可能か―

米国政府労働統計局は、2018年現在 4.3 万名の修士統計学専攻修了生クラスの統計専門職就労者が米国に存在すること、それが 2028 年までに約 1 万名増員されるという推計を出しています。残念ながらデータサイエンス高度専門職人材を育成する拠点は、日本では 2015 年の滋賀大データサイエンス学部設置以降、やっと僅かに立ち上がったばかりで、年間 1 万名の就労者輩出とは 2 桁近く規模感が異なっています。中国や韓国を含む先進国のみならず、アジア・アフリカ諸国でも大学にデータサイエンス推進の拠点である統計学科が存在しない国など無かったつけが回ってきたことは明らかです。

内閣府の主導で、2020 年 3 月に文理を問わず大学入学生 50 万人に数理・データサイエンス・AI のリテラシーレベルの教育プログラムを各大学が開発し、実効的教育プログラムは国が認定する仕組みを構築しようという動きが具体化しました。しかし、そもそもそれを教える教員や e-learning の仕組みが全く見えていません。

統数研は決して教育機関ではありません、しかし、大学における統計教員の絶対的不足については、その育成に関する社会的責任を果たせという外部の声が日々強くなっています。それが、上記データサイエンス研究指導者育成試行プログラムに ROIS、統数研が敢えて一歩踏み込んだ理由です。ROIS や統数研の活動については、近年の数理・データサイエンスへの関心増大にも関わらず、予算増額されている状況ではありません。

2021 年度は赤池情報量規準（AIC）提唱から 50 年、AIC は累積引用件数でなく、単年度引用件数も現在単調に増加しています。統数研はこの種の基幹理論研究環境を維持しつつ、産業界などとの価値共創の方法を開発し、次世代数理・データサイエンス研究者育成を軌道に乗せなければならない二正面作戦を企図しなければならない難しい状況にあります。そういう中、**SIC と統数研は 2020 年 4 月に連携・協力協定を結ぶことが確定しました**ので、何らかの日本の劣勢を回

復可能な事業形成ができればと考えますので。よろしくお願ひ申し上げます。

(2020年3月30日原稿受領、Vol. 2.4に掲載)

組織紹介2 デジタルアーキテクチャー・デザインセンター(DADC)

デジタルアーキテクチャー・デザインセンター長就任にあたり

IPA デジタルアーキテクチャー・デザインセンター長 齊藤 裕
(SIC 代表理事・センター長、ファナック株式会社取締役副社長執行役員)

1. はじめに

この度、2020年5月15日にIPA(独立行政法人 情報処理推進機構)に「デジタルアーキテクチャー・デザインセンター (Digital Architecture Design Center)」(以下、DADC)が設立され、私が、そのDADCセンター長に就任いたしました。現在、IPAでの週二日の勤務を開始し、関係者と議論する中で、DADC設立の目的とやるべきことが明確になってまいりました。既に概略については、ご存じの方もおられると思いますが、本稿では、その紹介をさせていただきます。

2. DADC 設立の概要

今回のDADCは、新たなデジタル技術や多様なデータを活用して経済発展と社会課題の解決を推進していく Society5.0 の実現を目指して新たに施行された「情報処理の促進に関する法律の一部を改正する法律」(令和元年法律第67号)を受け、設立されています。

本法律には、(1) 企業のデジタル面での経営改革、(2) 社会全体でのデータ連携・共有の基盤づくり、(3) 安全性の構築、等が規定され、関連する業務をIPAに追加すること、が盛り込まれ、こうした背景を受けて、本センターは、産官学での連携体制の構築も意図して、IPAの社会基盤センターと有識者会議が連携した組織として設置されました。そして、多様なステークホルダーの方たちに参画して頂きながら、社会、産業構造の変革を実現するシステム化を加速する社会全体でのデータ連携・共有の基盤など、デジタル社会に必要な、かつ透明性・公共性・中立性の確保も要求される「アーキテクチャ」設計を行うことがミッションになっています。また、合わせて、この活動を通して日本の社会、産業界に不足している「アーキテクチャ」設計力の強化をすることが期待されています。

今年度後半には、「アーキテクチャ」に関する政策の方針について議論し、同

センターで取り組むテーマの決定を行う政府会議と、「アーキテクチャ」設計の具体的な方向性について技術的・専門的な知見から助言を行う有識者会議を編成していく予定です。その有識者会議の議論を取り纏める座長には、「アーキテクチャ」設計における学術的知見を活かすため、SICの学術協議会の副主査である慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科の白坂成功教授が就任される予定です。

3. DADCの機能

次に、本センターに期待されている機能について、紹介します。本センターの取り組む方向として、以下の3つの機能を有することを期待されています。

一つめは、政府や事業者の依頼に応じて、異なる事業者間や社会全体でのデータやシステムの連携を容易にするために必要な全体の設計図である「アーキテクチャ設計」、二つめは、設計を主導できる「専門家育成」、三つめは、将来的にアーキテクチャ設計が必要となりうる領域に関する実現可能性調査とか、国内外の関係機関との情報交換、連携方法検討などの「調査と国際連携」です。

そして、具体的なアーキテクチャ設計として、以下の3分野に優先的に取り組んでいきます。

- (1) デジタル化に伴い新たな規制体系の確立や規制手法の高度化が求められる規制分野
- (2) より効率的で無駄のないシステム構築が求められる政府・公共調達分野
- (3) 業種横断で多様なプレイヤーが関与するため中立的な全体整理が求められる産業基盤分野

本年度は、まず昨年度 NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）からの受託で調査を行った3テーマである、スマート保安、自律移動ロボット、モビリティサービスから設計に着手しています。そうした具体的なシステムの検討を通じて、わが国が目指している人中心のデジタル社会“Society5.0”の実現に向け、あるべき「アーキテクチャ」の設計を行ない、社会、産業界のデジタルトランスフォーメーション（以下、DX）を支援していく予定です。さらに、将来的に、わが国においてアーキテクチャ設計が求められる領域については、上記テーマに加えて、“Soceity5.0”の実現に資する提案を民間等から公募する予定にしています。

また、「DADC は第一線で活躍する多様な人材が能力を発揮できる場」というメッセージを発信しながら、引き続き各テーマのプロジェクトリーダーや主要なアーキテクトなどの公募を通じて、上記を実現できる組織の確立に向け、体制強化を図っていく予定です。

4. 期待されているアウトカム

本センターの活動に（経済産業省が）期待しているアウトカムについては、民間、そして産業界や社会の全体に対して、以下のようにコメントされています。まず、民間に対して期待しているアウトカムは、本センターの活動を通じて、経営者への「アーキテクチャ」の理解を促すことで、今後のデジタル時代に適応した経営のDXに繋がり、同時に、分野を超えた新たな価値を創出していく民間企業のビジネスを実現することです。また、産業界や社会の全体に対して期待しているアウトカムは、本センターの「アーキテクチャ」設計を通じて、今後、さらに発展していくデジタル時代の社会・産業のシステムを「階層・モジュール」構造へとリードするなどして、複雑なことや新しいことが簡単にできる価値連鎖の起こりやすい「アーキテクチャ」を有する産業・社会構造に変革していくことです。

期待されているアウトカムの観点として、SIC では社会・産業のシステムのイノベーションを実現する「システム化」に焦点を当てているのに対して、上記のように、DADC では、「アーキテクチャ」設計に焦点を当てています。何故、「アーキテクチャ」なのか、これまでのDADCの関係者との議論を通じて、以下、その考え方と狙いを整理してみました。

5. 目指す「アーキテクチャ」のデザイン

まず、目指す「アーキテクチャ」とは、何を言っているのか、こういった「アーキテクチャ」の設計をイメージしているのかについて、紹介します。

1) 社会変化と「アーキテクチャ」

これまでの社会は、「人」中心というよりは、「モノ」や「インフラ」中心だったと言われていました。そのアンチテーゼとして、“Society5.0”のコンセプトでも、「人」中心の社会を目指すとしています。これは取りも直さず、ハードウ

ウェアをベースにして、現実空間（=フィジカル空間）で“築き上げてきたということ”です。そして、現在の社会構造は、「モノ」（ハードウェア）と「人」の関係を中心にして、これまで長い歴史をかけて、根本的な価値を守るという目的のもとに、社会と法権力を構造化して制約する「アーキテクチャ」で出来上がっています。その「アーキテクチャ」のもとに、法、市場、社会規範が相互に絡み合いながら、様々な活動を規制し、社会システムの発展を促す自由と秩序を維持してきました。そして、「モノ」や「インフラ」を中心においた数多くの”部分最適な“システムが、産業界、社会には出来上がっています。

昨今、デジタルテクノロジーやデータを活用したデジタルエコノミーが、今世紀、業態や規模に関わらずあらゆる企業にとって成長のエンジンとなり、そうした企業の「サービス」と「人」の関係に焦点を当てたデジタルビジネスの拡大により、フィジカル空間のリアルな生活やビジネスに仮想空間（=サイバー空間）を用いたサービスが入り込み、社会構造も急激に変化しています。

そして、現在、デジタルエコノミーをリードしている米中企業が、こうした社会構造の変革を促すデジタルビジネスを拡大し、躍進を続ける一方で、デジタル化の波に乗り遅れているわが国でも、この遅れを挽回する切り札として、社会課題の解決と経済発展を両立させながら、一人ひとりが快適で活躍できる「超スマート社会」、前述の“Society5.0”というコンセプトを掲げ、官民挙げて、デジタルビジネスの拡大や社会構造の変革に取り組んでいます。

2) システムの変化と「アーキテクチャ」

こうしたデジタルビジネスの拡大により、今後、社会や産業にある様々なシステムがサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステム、いわゆる Cyber Physical System（以下、CPS）として実現され、サイバー空間をフルに活用したシステムへと社会全体のシステムを変革させていくことが予想されています。その目的は、“ソフトウェアをベースにしてサイバー空間上で”、業界や会社を超え、フィジカル空間にある既存の「モノ」を中心にした“部分最適な”社会のシステムを、「コト」を中心にした「人」に“最適な”社会のシステムに発展させることです。こうした発展の過程で、これまでの“ハードウェアをベースにしてフィジカル空間上で”実現されていた社会構造を変える様々なシステムの変革（システムイノベーション）が、次々に起こっていきますが、作り上げていくシステムを“全体最適”な形態で進化させていくには、いわゆる「アーキテクチャ」が不可欠になります。

一方で、こうしたサイバー空間上で、成長し、発展するシステムに対しても、

これまでの社会の発展を促した自由と秩序を維持することは、絶対条件になります。しかし、“ソフトウェアを中心にサイバー空間上で”発展するシステムに対し、“ハードウェアをベースにフィジカル空間で”構築されている現在の「アーキテクチャ」のもとでの、法、規範、市場による規制では対応できません。新たなガバナンスへの変革が、合わせて不可欠になります。これは、同じ根本的な価値を守るといふ目的のもとに、“ソフトウェアをベースにサイバー空間上で”発展していくシステムに対して、そのシステムの構造自体を新たな「アーキテクチャ」で規定し、法をベースに規制する（サイバー空間の法としての）「コード」を組み込んでいく“Governance Innovation（以下、GI）”の実現を意味します。そのためには、いわばサイバー空間に新しい国を作るような発想が重要になります。

3) デジタル社会と DADC

現在、DADC で推進しているスマート保安、自律移動ロボット、モビリティサービスなどをテーマとしたワーキング活動では、民間企業や政策当局の課題を共有した上で、多様なステークホルダーの利害とか、全体としての価値連鎖までも考慮にいれ、様々なデジタル技術を活用しながら、ビジネスの形を柔軟に設計できる reconfigurable なモデルとして、それぞれのエコシステムを考慮にいれて、「アーキテクチャ」設計を実施する予定です。同時に、上記の GI を意識しながら、法や規範を含む、わが国の社会システムとしてのグランドデザインを描きながら、社会全体の「アーキテクチャ」を試行錯誤しながら検討していきます。

上記のグランドデザインで想定するデジタル社会におけるシステムが実現する姿は、例えば、様々な仕事、業務の多くがサイバー空間上でアルゴリズム化（例えば、AI による自動処理）され、フィジカル空間にあるロボットなどのマシンと繋がりながら、（サイバー空間上の）ソフトウェア機能により、マシンが動作し、モノが生産され、人にサービスが提供される CPS の世界です。

こうした CPS の時代には、前述のとおり、あらゆる産業分野で「モノ」から「コト」へのサービス化、ソフトウェア中心へのシフトが進みます。そして、IT 産業分野で進化してきた XaaS に代表されるような分野を超えた新たな価値を、ダイナミックに、スピーディに創出していける柔軟性と拡張性を特徴とするようなビジネスプロセスを実現する「アーキテクチャ」のシステムをもつことが、民間企業の競争力を左右するようになります。また、革新されたビジネスモデルを開発する企業が産み出していく多くのシステムが、様々なステークホルダーが参加できる「オープンなエコシステムの SoS (System of Systems)」の上で相互

に連携して、しかもアジャイルに変化しながら、複雑な社会システムを作り出していきます。こうした複雑な社会システムには、新興 IT プラットフォームの「エコシステム」のガバナンス、「アーキテクチャ」と「コード」によるガバナンスが求められます。

このような CPS の時代のデジタル社会にわが国の発展を継続していくには、デジタルエコノミーに順応し、新たなビジネスモデルで発展していく民間企業（例えば、モノづくりに関わる卓越した技術、スキルを有する既存企業）の DX 実現と合わせて、現在の自由と秩序を確保しつつ、価値の創造と連鎖の起こりやすい構造に変革していく産業界や社会全体の DX 実現が共に求められています。

私は、本センターでの活動を通じて、社会全体に跨るサイバー空間上に、複雑さに対応し、分野を超えた新たな価値を創出していける柔軟性と拡張性をもった「アーキテクチャ」を設計することが、民間企業や産業界や社会の DX を整然と実行できるようにしていくためには不可欠と考えています。

4) 今後のデジタル社会に向けて

社会システムの「アーキテクチャ」設計には、将来のデジタル社会のシステムのイメージが必要になります。以下、私なりの私見を紹介します。

サイバー空間を利用して出来上がる社会システムのモデルとしては、アナログ的には現実のフィジカル空間で出来上がっている社会システムが良いモデルになります。例えば、サイバー空間を活用して、人にマシンに、サービスを提供する上では、現在の行政機関に相当するデジタル行政機能も必要です。また、例えば、フィジカル空間における電気・ガス・水道のような公益に深く関係し、日常生活に必要不可欠なサイバー空間上でのユーティリティサービスを提供する公益事業に相当するデジタルユーティリティ機能も必要と思います。

個人的には、デジタル社会では、そうした様々な現実空間に存在する機関が有する同等の機能を、サイバー空間上に当該のインフラとして構築し、当該の機関に相当するプラットフォームが、現在の社会インフラ企業のようにサービスを提供し、そして、そうしたサイバー空間上のデジタル行政機能・デジタルユーティリティ機能をベースにして、様々な民間企業が CPS を活用したデジタルビジネスを拡大、発展していくような産業界や社会のシステムが出来上がっていくイメージをもっています。

そして、現在の社会を上記のデジタル社会のシステムへと変革していくには、現在の社会システムをサイバー空間上に、「階層・モジュール」構造として再整理して、既存の仕組みを unbundle 化、rebundle 化することによって社会の仕組

みを変え、複雑なことや新しいことが簡単にできる価値創造と価値連鎖の起こりやすいエコシステムを実現することが必須と考えています。

私自身は、本センターの「アーキテクチャ」設計を通じて、今後のデジタル社会でのわが国の発展に向けて、ユーザに対する規範、規制、インセンティブなど、こうしたエコシステムを健全に発展させる「コード」を用いた、新たなガバナンスも実現しながら、社会構造に変革していくこと、システムのイノベーションを支援することこそが、公的機関としての DADC のターゲットと考えています。

6. 最後に：SIC への期待

最後に、DADC のセンター長としての SIC の皆様への期待を述べさせていただきます。

1) 今回の新型コロナウイルス感染症から見えてきたこと

今回の新型コロナウイルス感染症（COVID-19）対策では、人との接触率を削減する対策として、インターネットを活用したリモートワーク、ビデオ会議などが定常的に行われるようになり、今後、様々な日常生活の活動や企業での業務などに、デジタル化が浸透していく契機にもなっています。

そして、これまでのグローバルレベルでのデジタル社会に向けた社会構造、産業構造の変革が、更に加速すると予想されています。そうした中で、昨今、この新型コロナウイルス感染症への対応を通じて、非常に明確になったこと、それは、我が国のデジタル化能力、つまり「システム化」能力欠如です。

この件については、先日も、政府が策定する 2020 年度版「統合イノベーション戦略」（7 月中旬に閣議決定）の概要案にも、新型コロナウイルス感染症の拡大を受けて、デジタル化の遅れが明らかになったと指摘されており、危機感を持ってデジタル化を加速させることなどが明記されているとか、戦略案にも、新型コロナや相次ぐ大規模災害で、「わが国のデジタル化の遅れ、スピード感や危機感の不足が露呈」と指摘し、教育や研究、公共事業、物流などあらゆる分野でデジタル化・リモート化に向けた基盤整備を進めると明記されているという報道もありました。

2) SIC と DADC の連携について

現在、SIC は、産業界と学术界が連携し、企業の「システム化」支援、優れた社会システムの構築に向けた「システム化」支援、「システム化」人材育成とい

ったことを事業の柱にして、システム思考、システム構築、システム運用といった「システム化」に向けた活動を通じて、企業の課題、社会の課題を解決することを目的としていますが、まさに、我が国に最も必要な活動になっているということが明確になったと思います。

そして、こうした SIC の活動の一つに社会のシステムイノベーションの支援があり、Society5.0 などの実現に向けた長期ロードマップの策定、システム産業の発展に伴う産業構造の変化を含めたグランドデザインの策定、具体的社会実装に繋ぐシナリオ（青写真）を描き、政府への提言をする、ということが挙げられていますが、この SIC の活動が産業界を中心にした「システム化」にあり、政府側の活動が DADC の「アーキテクチャ」設計とすれば、全体最適な社会システムの実現に向けた両者の活動はマッチングします。つまり、産学連携での SIC が描く、システム設計図に、ガバナンスを含めた、社会、産業界の公的な視点でのアーキテクチャ設計を DADC の役割として担い連携することが、Society5.0 実現に向けたシステム開発の産学官連携プロジェクトのフォーメーションではないかと考えています。

既に、現在の DADC の「アーキテクチャ」設計に要求されているテーマの中には、業界を跨るようなプラットフォームの実現も含まれています。前述の社会システムのモデルのイメージにある行政機関、公益事業機関のようなプラットフォームも考えて行く必要があります。私自身は、SIC での産学連携での WG テーマでの取り扱いも視野に入れながら、SIC と DADC が連携し、具体的な社会実装を考慮に入れながら、デジタル時代にも豊かな社会を実現するサイバー空間上に「階層・モジュール」構造の「アーキテクチャ」を有する社会システムへと変革する、いわゆる「システムイノベーション」を実現することが、両センターのあるべき方向ではないかと考えています。

3) SIC への期待

現在、内閣府を初め、各所で活躍されている方々から、様々な期待と連携したいというお言葉を多々頂いていますが、実体としての DADC の体制構築との兼ね合いで、どういう優先順位で、そういうスケジュールで、そうした要望、要求に対応して行こうかと議論している最中です。私自身は、そうした議論をしながら、今後の DADC のミッションとコア人材の議論を通じて、将来の IPA の姿もイメージしながら、組織固めをして行こうと考えています。そして、困った時、ふと後ろを振り返ると産業界と学术界がしっかりと連携して、DADC を後ろでしっかりと支えてくれる SIC がいる、と思うだけで肩の荷がおります。SIC と DADC を兼任するセンター長として、今後、人材育成も含めて、更に、密にコミュニケーション

ョンを行い、SIC と DADC との良い関係づくりと共に、一体感を持った活動にして行きたいと考えています。是非、SIC の皆様の DADC 活動への参画、私も含めた DADC メンバーへのご指導とご支援を期待しています。

(2020 年 7 月 3 日原稿受領、Vol. 2.7 に掲載)

コラム1

新型コロナウイルス「緊急事態宣言」について

東京大学・大阪大学名誉教授 木村英紀 (SIC 理事・副センター長)

コロナウイルスに対処する政府や自治体による「緊急事態宣言」や「外出禁止令」などの強硬措置の発令が取り沙汰されている。感染者の数が増えるにつれてそれを早く出せと政府に詰め寄る声もメディアやネットには多くなり、政府も近く腰を上げそうである。そこでこの問題を「システム思考」にもとづいて少し考えてみたい。感染症の数理モデルの論文を書いたことはあるが、感染拡大の数理モデルについては全くの素人なので専門家の先生にとっては見当違いのことを言っているかも知れないが、その場合はご容赦願いたい。

言うまでもなく、感染は人と人との接触から発生する。その機会をなるべく小さくすることが「緊急事態宣言」の最大の目的である。感染は感染者と健常者との接触によっておこる。ところが人と人との接触全体を規制する「緊急事態宣言」は、何の問題もない健常者と健常者の接触も規制する結果となる。ここが問題である。

感染者はすでに感染したことが分かり治療を受けている感染者（以下「顕在感染者」）と、感染に自分も含めて誰も気が付いていない感染者（以下「潜在感染者」）に分かれる。前者はすでに隔離されているので感染源にはならないから、感染が新しく発生するのは潜在感染者と健常者との接触である。潜在感染者は不明だからそれも含めて人と人との接触すべてを対象に最小化しようとするのが「緊急事態宣言」の意図である。

人はこの場合潜在感染者と健常者からなる。人と人との接触のうちで潜在感染者と健常者との接触の割合はどれくらいか、定量的な議論は「接触」の定義によってまちまちであろうが、どんなに多くみても潜在感染者の割合以上は出ないであろう。つまり人口全体に占める潜在感染者の割合以下である。従って、「緊急事態宣言」の効果は潜在感染者の割合に比例すると考えられる。

潜在的感染者がどれだけいるかは不明であるから推測するしかない。東京都の場合を例にとろう。2020年4月4日現在、東京都の顕在感染者の数は約900人である。これはまだ増える傾向にあるから潜在感染者を仮にその50倍とすると約45,000人である。東京都の人口は約1400万人であるから潜在

感染者の比率は約0.32%である。各潜在感染者が2人の新しい感染者を生むとしてその重みを2倍にしても0.7%以下である。非常に大雑把な議論で恐縮であるが、0.7%のために残り99.3%を巻き添えにすることがどのように正当化されるか、は考えてみる必要がある。「緊急事態宣言」は国や自治体の莫大な財政負担を生じるだけでなく、健常者の生活にとって大切な他人との交流と職業活動の自由を奪うことになる。もちろん、生命を守ることは至上命令であり、何物にも優先するという意見もあろう。ただ、経済危機による生活破綻が生命を奪う可能性も考慮する必要がある。冷静なバランスの取れた意志決定はリスク管理の常識でもある。

感染者を45,000人とすることは根拠がない。様々の具体的な感染のケースに通じている当局は潜在感染者数のもっと精度の良い予測が出来るはずである。まさにビッグデータの解析であり、最近盛んになりつつある社会ネットワークの分野の成果を使えばそれなりの手法があるはずである。必要な場合はモニターグループを作り、PCR検査を経時的に行うことも考えられるだろう。分からないから全部をやる前に、「緊急事態宣言」の効果を評価するための潜在感染者数の推定を行うべきではなかろうか？その数値が例えば45,000人の10倍であれば、潜在感染者と健常者との接触はすべての人同士の接触の7%に近づく。その場合は緊急事態宣言の発令はそれなりの効果があり従って正当性がある。

毎日の新しい顕在感染者の増加数がニュースの焦点になっていることにも疑問を呈したい。最近検査した人の数が増えているので、それに伴って発見される感染者が増えるのは当たり前である。新しく検査を受けた人の中で顕在感染者が何人出たか、その割合こそが重要ではないだろうか？この割合の経時変化の記録はなぜか見つからない。

新聞報道やその他メディアによると、政府・自治体は感染者が見つかるとその行動軌跡を徹底的に調査し、接触した人の検査や防護に力を注いできたとのことである。これは一般の人と人との接触ではなく、潜在的感染者と健常者との接触をピンポイントで減らそうとする方策と理解できる。その任に当たっている「クラスター班」の努力を高く評価する。現在まで「ぎりぎり持ちこたえている」のはこの努力があつてのことではないか。可能な限りこの努力を続けて欲しい。欧米の悲惨な状況が日本もいずれやってくる、とする悲観論が根強いようであるが、欧米と異なる日本の状況もある。何よりも日本人は清潔好きである。海外に旅行するといつも実感させられる。幕末に来日したヨーロッパの外交官が、「どこの国にも見られる貧困と不潔さの結びつきがこの国にはない」と書いている。コロナ禍のさなかで味わうべき言葉と思う。クラスター班の努力と並んで

日本の現状を持ちこたえさせている大きな要因と考えたい。

「緊急事態宣言」に意味がないといっているのではない。たとえわずかの割合でも潜在感染者と健常者の接触の機会を減らし潜在感染者の増加を抑えることに貢献することは確かである。必要なことは、それよりもはるかに大きなボリュームの健常者同士の接触まで制約してしまうことによるダメージをきちんとモデル化し、両者を定量的にバランスさせたいうえでの統合的な意思決定を行うことである。「システム思考」はそれを要請している。

今後の見通しは誰もわからない。自主的な外出自粛は国民の義務である。各個人が誠実に実行すべきであり、すでにかかなりのレベルで実行されている。また、「医療崩壊」を避けるための病院以外の軽症者向けの隔離施設の準備も急ピッチで進められている。繰り返しになるが、それでも「緊急事態宣言」が必要であれば潜在感染者の推定値を発表して頂きたい。

(2020年4月4日原稿受領、Vol. 2.4に掲載)

コラム2

「緊急事態宣言」延長について

東京大学・大阪大学名誉教授 木村英紀 (SIC 理事・副センター長)

緊急事態宣言が3週間延長される。前号で、現状の感染状況についての正確な認識と、人々の生活や経済へのダメージについての分析が十分でないままに緊急事態宣言という劇薬を投与することへの疑問を「コラム」で表明した。ふたを開けてみてメディアが報じたアンケート調査の結果では、宣言を歓迎する声が圧倒的で、遅すぎたとの回答も多かったのが驚いた、これなら劇薬の副作用も十分受け入れる用意が人々にはあるはずで、私の心配はある意味杞憂であった。しかし潜在感染者数をつかんでいない状況は続いているようで、専門家会議の2020年5月1日のレポートではそれを認めており、これについての強い批判がネットでは見られるようになった。

コラム1で私が提案した、ランダムなサンプリングで人の集団を作りその感染状況を計測して潜在感染者の数を推定するアイデアは、アメリカですでに3月下旬からかなり大規模に行われていたことを知った。ただし検査の方法はPCRではなく抗体検査である。その精度は高くないだけでなくその意味づけは諸説ある。ただしそれなりの情報をもたらすことは確かであり、現状把握の有力な手法とし日本でも本格的な実施を期待したい。

さて緊急事態宣言継続についてであるが、その根拠となっている前述の5月1日付専門家会議のレポート「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」(以下「提言」)(i)についての疑問点を述べてみたい。まず分析結果を宣言延長に結びつける論拠がアバウトな表現になっていて、専門家の発言よりは政治家の発言に聞こえてならない。例えば、「未だかなりの数の新規感染者数を認めており、現在の水準は、データが明確に立ち上がりはじめた3月上旬やオーバーシュートの兆候を見せ始めた3月中旬前後の新規感染者数の水準までは下回っていない状況である。」(下線筆者)などである。後述する英国のレポートとは大違いである。

「提言」で筆者が最も注目したのは、新規感染者数の発症日のチャート((i)に掲載されている図1右)である。これは政府のみが知り得るデータであり、感染の現状を知るためには有用な情報である。ところがそれによるとその数は4

月1日にすでにピークアウトしてその後漸減しており、「宣言」が出た4月7日にははっきり減少の傾向が見えている。東京都の場合はさらにそれより2日ほど早い。感染から発症までの潜伏期間を考えると、発症のピークは3月末にはすでに到達していたと考えられる。「宣言」による接触減がその後の発症減に貢献したことは事実であろうが、「宣言」という劇薬を投じなくても当時の人々の自主的な協力が続けばそれなりに漸減していた可能性は高い。「宣言」とその延長の有効性について公平な事後評価をぜひ望みたい。

ご存知と思うがスウェーデンは他国に比べ緩い対策を取っている。いくつかの行動制約と要請は行っているが、通常の店舗の営業や企業活動にはこれといった制約は課していない。だからと言って感染が広がっていないわけではなく、感染による死者の人口比は世界4位である。もっと強い政策をとるべきであるという圧力を国の内外から受けているが、政府の姿勢は不動である。その背景には、ウィルスの感染に対抗する最終的な手段は集団免疫しかない、という確信があるとのことである。集団免疫を得るにはその過程で多くの犠牲者が出ることは避けられないが、スウェーデン政府はそれを受容している。その是非は別として、長期展望に立った合理的な意思決定として評価したい。

イギリスも3月中旬まではスウェーデンと同じ方針であった。それを180度変えたのが、Imperial Collegeの研究グループのレポート（以下「レポート」）(ii)である。このレポートの内容は「提言」でも詳しく説明され、どうやら専門家会議はこのレポートを範として取り入れているようである。このレポートは5つの規制政策の効果を数理モデルによる予測シミュレーションの結果で示している。シミュレーションの前提となる各種パラメータは、中国や韓国でのデータの丁寧な分析結果などにもとづいて設定されている。この種の計算結果は最近ではネットでいろいろな人が公開しているが、それらとは比較にならない厚みと説得力をもっている。

このレポートで筆者がもっとも注目したのは次のフレーズである。

We do not consider the ethical or economical implication of either strategy here, except to note that there is no easy policy decision to be made. Suppression, while successful to date in China and Korea, carries with it enormous social and economic costs which may themselves have significant impact on health and well-being in the short and longer-terms.

(ここで suppression (制圧) とはレポートが提案している 2つの政策のひとつで、もう一つはスウェーデン流の mitigation (緩和) である。)

ここに私が前号のコラムで伝えたかったことが凝縮されている。

新型コロナウイルスのもっとも厄介な性質は、自覚症状のない感染者でも他者への感染力を十分もつことである。そのため、一人でも潜在感染者がいれば、集団免疫が達成されていない限り常に感染の拡大が生じ得る。これがレポートのタイトルでもある「non-pharmaceutical intervention」の本質的な限界でもある。第2波、第3波が常にあり得るのである。だからワクチンか実効的で安全な療法 (pharmaceutical intervention) が確立されない限り行動規制を続けなければならない。つまり長期戦が避けられない。

出来れば感染学者を中心とした専門家会議とは別に、「宣言」がもたらす様々な社会への影響を踏み込んで抽出検討するもう一つの専門家会議を設定して頂きたいと思う。強制措置がもたらす様々なダメージ、すなわち経済破綻による犠牲、成長の後退、体育施設閉鎖による健康悪化、教育の休止、観光地の荒廃、など、レポートが言う enormous social and economic cost を、例えばDVの増大など数値化できないものも含めて、底辺まで踏み込んで具体的に分析して欲しい。そして6月からは二つの専門家会議の結論を統合した長期的な、しかも日本の現状 (例えば死亡率の圧倒的な低さなど) をきちんと考慮した戦略を実施して頂きたいと思う。これがシステム思考のアプローチである。

残念ながらイギリス政府の方向転換は結果として実を結ばなかった。感染爆発は抑えられず、死者の数では世界第三位という不名誉な立場となってしまった。ともあれ、このレポートはモデルが国の政策を直接動かしたひとつの貴重な例である。システム思考の在り方としてSICでも大いに参考になると思う

註

(i) <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000627254.pdf>

(ii) <https://www.imperial.ac.uk/mrc-global-infectious-disease-analysis/covid-19/report-9-impact-of-npis-on-covid-19/>

(2020年5月5日原稿受領、Vol. 2.5に掲載)

コラム3

東海道新幹線建設とアポロ計画

東京大学・大阪大学名誉教授 木村英紀（SIC 理事・副センター長）

東海道新幹線の建設とアポロ計画は、ほぼ同時期に日米それぞれで実施された大きなプロジェクトである。両者を比べること自体おこがましい、と思う人は多いかも知れない。一方は月に人を送るという長年の人類の夢の実現を目指す世界的なスケールの計画であり、他方はアジアの片隅の国の高速列車の建設である。予算額も参加した人間の数も、そして目標の技術的な困難さもアポロ計画とは比べ物にならないほど新幹線は小さいと思うのが普通である。しかし、敗戦の痛手からまだ完全に回復していない貧乏国が、外国に借金までして世界に例を見ない新しい鉄道の概念を提示して、狭い複雑な地形と人口密度の高い国土に実現することの困難さは、無人の宇宙に向かって無尽蔵の資金をつぎ込み、強大国アメリカが国の威信をかけて遂行した計画とは違う次元の難しさがあつたはずである。しかも営業開始以来半世紀以上経ってまだ大きな事故を起こしていないだけでなく、国際的な高い評価を得て類似のプロジェクトがいくつも海外で実現している。これはアポロ計画にはないことである。

どちらのプロジェクトも巨大なシステムイノベーションを実現したが、イノベーションとしては2つの側面がある。ひとつはそれが最終的に作り出した成果物のシステムとしての卓越性である。アポロ計画が作り上げた宇宙船は40万個の部品をもつきわめて複雑なシステムであり、またその打ち上げのために作ったサターンロケットも巨大で複雑なシステムである。新幹線は時速200キロで走る列車を作り出し、それを安全に走らせる運行システムを実現したが、それらは複雑で巨大なシステムである。どちらも「プロダクトシステム」のイノベーションである。

もう一つは、プロジェクトを進めるマネージメントのシステム化である。どちらも長期にわたる（アポロ計画は約8年、新幹線は約6年）開発の過程で様々な工程が順序良く効率的に実行され、参加者全体の認識の共有が図られなければならない。この過程でもっとも重要なことは、多数の異分野の技術者研究者の知を集め、時間的経過のプロセスでプロダクトの実現に向けてその統合と成熟が図られなければならない。これは「プロセスシステム」のイノベーションである。

プロダクトがシステムとして複雑であれば、それを作り出すプロセスも複雑

となる。従ってプロダクトシステムのイノベーションは必ずプロセスシステムのイノベーションを伴う。両者を結びつけるのは「システム統合」である。

アポロ計画のシステム統合がシステム工学を軸に行われたことは周知の事実である。システム工学はアポロ計画以前からアメリカ軍の技術開発で使われていたが、アポロ計画ではそれが本格的に採用され、様々な側面からアポロ計画の成功に大きく貢献したと言われている。システム工学は当時の日本にはまだ入っていない。それでは、東海道新幹線の建設ではシステム統合にどのようなツールが使われたのであろうか？文献[1]はこの疑問に答えているので、一つの見解として紹介する。

JR の前身の日本国有鉄道（国鉄）では 1954 年ころに業務効率化のツールとしてオペレーションズリサーチ（OR）が導入された。しかし、一部の電気部門の幹部の思い入れはあったが、OR が国鉄の業務改善に生かされることはなかったとのことである。OR に代わって国鉄でその技術文化に影響力を持ったのはノーバート・ウィーナーによって提案されたサイバネティックスである。サイバネティックスは鉄道通信委員会によって 1954 年に国鉄に導入された。1948 年に出版された有名なウィーナーの著書「サイバネティックス」が日本語に翻訳される 3 年前である。1960 年に発足した電子工学研究委員会（ICE）は、積極的にサイバネティックスを国鉄業務の電子化とシステム化のガイドラインとして取り組むことを決め、国鉄の経営陣もそれを了承した。ICE の委員長は電電公社（現 NTT）の前理事長の梶井剛氏である。国鉄は 1963 年に「鉄道のためのサイバネティックス」と題する国際シンポジウムを開催し、その後少なくとも 80 年代まで毎年それを続けている。

サイバネティックスをシステム化の指導原理として求めた理由はおそらくサイバネティックスが生物との親和性、生物のシステムとしての優越性を強く意識し、生物と技術の相同性を制御と通信を通して主張していたからであろう。鉄道を生物の血管として捉えその高度化と重要性を理解する見方は多くの鉄道マンにとって魅力ある考え方であったのであろう。「血液は温度を上げると活性度が上がる。サイバネティックスは血液の温度を上げる役割を果たす」というような言葉が鉄道の分野では流布されていたようである。また、OR やシステム工学と違ってサイバネティックスは緩やかな指導原理である。何かを強く指示規制する法則はない。そのシステム観は多様性を許す。サイバネティックスを国鉄内で推進した技師長の島秀雄は、サイバネティックスの部内展開を「アイデアキャンペーン」と考えていたようである。ちなみに島は新幹線生みの親といわれている。

このようなサイバネティックスの浸透が新幹線建設にも影響を与えたのは容

易に想像される。新しい鉄道であるから様々な新しい課題に直面し、技術的な意思決定とそれを支える高い技術力が必要である。まずは軌道が広軌か狭軌か、レールの寿命を決める重さ、許される路面の最大傾斜、最小曲率、車体の重量、電圧、風圧、など相互に関連する諸元を決めていくことが必要である。流体力学、機械工学、電力工学、音響学、土木工学など多くの異なる専門分野の間の知の流通と統合、それによる全体最適化が必要となる。新幹線プロジェクトではこれらを「システム解析」とよび、フローチャートを主な手段として知の流通と認識の共有を図ったそうである。アポロ計画でNASAが「PERT」を使って業務の整理と可視化を行ったことに対応している。さらに、東京・大阪を3時間で結ぶ列車を一時間に6本以上走らせる「ビジネスモデル」を正当化するためには、未来の日本社会に対する明確なビジョンとそれを支えるシステム思考が欠かせなかったはずである。

新幹線建設に携わる数百人の技術者は、国鉄本社の仕切りのない大部屋に詰めて、隔てのない対話と議論を行ったそうである。プロセスシステムとしての新幹線建設はシステム工学の厳密な規範力ではなく、サイバネティックスの精神である生命調和的なシステム力のもとで遂行された。

建設中の新幹線の現場を訪れたことのあるNSFのDirectorであるガイフォードステイブは、1967年のアメリカの下院公聴会で、アポロ計画と新幹線計画が技術開発の手順と手法が表面上極めて似た形であったことを証言し、国鉄のシステム統合のレベルの高さを高く評価している。両者は同じようにめざましい成功を収めた。しかしその原動力となった技術文化の基盤は全く異なっていたのである。

SICが目指すシステムイノベーションは、欧米の後追いではない日本の技術文化の良い面を吸収したいと考えている。新幹線とサイバネティックスの深い関係は、もしそれが事実とすればSICにとって大いに価値ある情報である。

参考文献

[1] Yasushi Sato, Systems approach in the Japanese National Railways: How was the systems integration of Shinkansen done? *Historia Scientiarum*, vol.17-2, pp.65-88, 2007

(2020年9月2日原稿受領、Vol.2.9に掲載)
