SICニュースレター「論説・寄稿」集 （第5巻）

（2024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

本書は一般社団法人システムイノベーションセンター（SIC）（2019年1月設立）の広報誌「SICニュースレター」（月刊：web 発行）に掲載された2024年度(2024年1月～12月)の記事を、SIC代表理事・センター長 浦川伸一氏の「2024年　年頭の挨拶」を巻頭に、SIC理事・副センター長木村英紀氏の「コラム」、会員からの「論説」、非会員からの「寄稿」（一遍を除く）および会員からの「技術紹介」を掲載時の内容を改変することなく編集・集約したものです。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す。

なお、「SICニュースレター」のアーカイブは、SICのホームページ https://sysic.org/ に公開しています。

2025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） 2025.1

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

2024年　年頭の挨拶・・・

Ⅲ技術紹介（会員）
技術紹介1　工場施設の防災・減災のための地震対策
―シミュレーションによる問題解決の提案―　・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56
株式会社構造計画研究所
解析グループ　専門役員　梁川幸盛氏
エンジニアリング営業1部　担当部長　古川欽也氏
技術紹介2　激甚化する豪雨災害に備える：システム化で実現する新しい防災・・・・・ 68
株式会社構造計画研究所
気象防災ビジネス室　瀧川　宏樹氏
同　室長　奥野　峻也氏
エンジニアリング営業2部　室長　山口　裕美子氏

ⅣSIC役員一覧（2024年度）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・

2024年　年頭の挨拶

一般社団法人システムイノベーションセンター(SIC)

代表理事・センター長　浦川伸一氏(損害保険ジャパン株式会社)

皆様、新年あけましておめでとうございます

本年の干支は辰ですが、本来の干支は十干と十二支の組み合わせで60種類あるそうで、今年は甲辰(きのえたつ)とのこと。甲は十干の最初に出てくるもので、物事に対して耐え忍ぶ、あるいは生命や物事の始まり・成長を意味するようです。辰は皆さんもご存知の通り十二支唯一の架空の生き物ですが、自然万物が振動し、草木が成長して活力が旺盛にある状態を示すようです。

本センターの運営もコロナ禍を経て、リアルでの会合も復活、これまでの会員の皆様方の努力が結実し、変動・変革につながる年になると期待を持っております。2024年の年頭に当たりまして、一言ご挨拶申し上げます。

昨年、本センターの運営も、本格的にリアル開催が可能となり、対面の素晴らしさを改めて実感いたしましたね。総会、理事会、戦略委員会、実行委員会、人材育成協議会といった定期的な会議はもちろんのこと、SICニュースレターの毎月の発行やSICフォーラム、産学交流会、各種研修講座、各種分科会など、皆様のご協力により精力的に活動してまいりました。本センター活動も継続的な運営が定着していると思います。これまでご尽力いただいた会員の皆様には、心から感謝申し上げます。

昨年世界を席巻したキーワードの一つは、やはり「生成 AI」ではないでしょうか。この突如出現した、次世代 AI の技術力の高さに、多くの人が驚きを持って受け止めたのではないかと思います。ご存知の方もいらっしゃる通り、この生成 AI はこの1、2年急に出現したわけではなく、10年ほど前に登場した深層学習(Deep Learning)による AI のブレークスルーから、いくつかの技術領域が成長し、組み合わさって形成されています。

2012年以降に登場した Deep Learning は、機械学習(Machine Learning)の技術進化とコンピューティングパワーの進化が重なり、認識する層を何層にも深くすることが出来、精度が大幅に向上しました。

2017年には、Transformer という新たな深層学習モデルが登場。これは自然言語の解析において、attention 層という概念が登場し、各単語にレーティングを行い、文脈をリアルタイムに解釈するような技術です。これまでは、準備段階で沢山のデータを事前に学習させて学習済みモデルを作り、推論段階でこのモデルを使って実システムに実装をしていました。これを、リアルタイム処理のようなイメージで自然言語などを処理するようになったのです。これはまさに画期的な技術革新でした。

その後、Transformer は大規模基盤モデル(LLM : Large Language Model)に進化し、インターネット上に公開されている情報を大量に読み込ませた大規模な言語モデルをベースに、チャットなどの使いやすい UI を提供したため、世界中で一気に普及しました。

生成 AI の今後ですが、技術は今後も大幅に向上し続けると思われます。一方で、信頼で

きる LLM を形成することがより求められるでしょうから、複数の領域における「ガバナンス」がより重要になると考えています。1)データガバナンス、2)社会原則やガイドライン遵守のガバナンス、3)インターネット技術の信頼性に関するガバナンス、4)機械学習工学や品質管理に関するガバナンス、5)開発プロジェクトに関するガバナンスなどがその代表例でしょう。これらの詳細については、今年の SIC 戦略セミナーにて、皆さんと意見交換できるよう、準備して参ります。

もう一点は、昨年の念頭挨拶でも触れました DX ブームの昨今の動向についてです。企業内における DX は、各企業での取り組みが進んでいるように思いますが、企業を跨った DX や、データ利活用を軸とした DX などは、なかなか進みにくい状況が継続している印象です。

政府が G7 で DFFT(Data Free Flow with Trust)を提唱し、早くも 5 年が経過しました。DSA(Data Society Alliance : 一般社団法人データ社会推進協議会)をはじめ、非常に多くの取り組みが産官学から生まれ、検討がなされてきたと思います。

2023年4月の G7 では、西村康稔経済産業大臣(当時)から「ウラノス・エコシステム」という概念が提唱されました。これは、企業間の取引をデータ連携基盤で繋ぎ、データ利活用を促進し、企業を跨った DX を後押しする社会基盤で、元々は前斉藤センター長のご尽力によりデジタル庁・経済産業省・IPA(DADC)によって立ち上げた、「企業間取引将来ビジョン検討会」によって生まれた構想です。まだまだ知名度が高くない状況ではありますが、SIC としてこの政府の取り組みを後押しし、先導役となることを目指すこととしました。今後、IPA(DADC)と共にアーキテクチャ視点をしっかり押さえながら、政府をはじめ、経団連や経済同友会などの経済団体、DSA をはじめとする様々な団体とも連携し、データ利活用のための連携基盤を育てていきたいと考えています。

このように、技術進化の激しい昨今ではありますが、デジタル時代に合わせて、社会システムを再構築していくことが求められる時代では、前齊藤裕センター長もおっしゃっていた通り、強い覚悟・リーダシップ、志・ビジョン、インテリジェンス、チームが不可欠と考えます。本センターは、現在の社会、産業界での変化を社会構造の変革期と大局的に捉え、心あるリーダーの皆さんのために必要な「場」を作り、目指すべき社会の実現に向けて「情報」を共有し、産・学・官で知恵を出し合い、協力し合う、強固なチーム作りを推進してまいります。引き続き、皆さまの本センターに対するご支援、ご協力をお願い申し上げます。

最後になりますが、皆様にとりまして、本年が実り多き年になりますことを祈念して年頭のご挨拶に代えさせていただきます。

2024年(令和六年) 元旦

コラム　「システム4．0」

SIC理事・副センター長　木村英紀氏（東京大学・大阪大学名誉教授）

1．システムの発展を跡付ける

「現代はシステムの時代である」と問いかけても、「確かにその通りだね」との大方の共感は得られるが、「それがどうしたの」という気のない反応が返ってくることが多い。私たちは「システム」という言葉を日常的に使っているし、世の中にはシステムが溢れかえっている。システムという言葉に留意することによって何か新しい知見を見出すことは有りそうもないし、なにか実践的な指針が得られるとは感じていないからであろう。システムという言葉はあまりにも陳腐になってしまっているのである。

しかし、システムと言う言葉を意識して過去の歴史をあらためてひも解いてみると、この概念が大きな意味を持ち、重要な役割を演じてきたことが分かる。「システムの時代」が本当の意味で到来した今、この概念の持つ意味をもう一度問い直してみることが必要であることを痛感する。システムがこれまで果たしてきた役割を認識することを通して、今の社会や産業や技術が直面している深刻な課題が明らかになってくるはずである。

「複数の機能要素を集めて新しい機能を生み出す複合体」は、「システム」の最もありふれた定義である。Wikipedia によると「システム」の語源は、「共に立てたもの」という意味を持つ「シュステイーマ」（συστημα）というギリシャ語だそうである。συσは英語では syn で、synchronous のような「同期」「同時」を現わす接頭語である。今風の言葉で言えば「協業で作ったもの」であろう。非常に広い範囲の対象に当てはまる単語であり、それが「システム」という言葉が支持する対象の広さとしても反映されている。

多分その始まりは人間の複合体であろう。人工物のない時代では機能要素は人間しかあり得ない。つまり、人間同士が協力すること以外にシステムはあり得ない。狩猟や採取、農耕のための大小様々の人間関係のシステムが部族単位に自然発生的に作られていたに違いない。それだけでなく、例えばピラミッドのような巨大な建造物を作るには、数万人の労働力を長期にわたって差配する大きなシステムなしには不可能であろう。人々が集い生活する都市や国家や教会の形成も、自然発生的なシステムの構成事例と考えてよいだろう。人間を主な要素とするシステムは、「組織」と呼ばれることの方が多い。単純化を怖れずに言えば、歴史学とは組織の発生と消滅の論理的な分析を目的としているといってよい。組織をシステムの特殊ケースと考えれば、歴史学や考古学はシステム科学の一部である。

システムの進化の最初の大きな分水嶺となったのは、産業革命における機械の誕生である。機械は自然力に頼っていたエネルギー源を人工物に変え、人間の身体の動きに頼っていた作業を機械に置き換えた。機械をシステムとして捉えた最初の人はカール・マルクスと言われている。彼は産業革命という言葉もなかった200年近く前に、産業革命期の紡績機を念頭において、機械は、原動機、伝達機、作業機の3つの機能の異なる機械からなるシステムであると言っている[1]。マルクスは、道具と機械の違いはシステムであるかどうかであるとも述べている。機械のその後の発展を見ると、マルクスの予測は当たっているといえよう。ついでに言うと、マルクスは機械が「自動化」を究極の目標として進化していくことを予測しており、のちの「オートメーション」の出現を先取りしている。

もっともシステムらしい機械の発明は、20世紀初頭のエジソンによる電力の送配電システムであろう。その少し前の白熱電灯の発明は、人々の生活の様相を大きく変えた輝かしいイノベーションであったが、その効用をさらに推し進め、エネルギーの伝達を容易にしたのが送配電システムである。システムの構築が達成したイノベーションの最初のそして最大のものが送配電システムである。

もちろんそれ以前にも鉄道、水道などのインフラ、銀行や保険などの金融、郵便や電話などの通信などのセクターでシステムの構築は進められていたが、これらはある意味で自然発生的に作られてきたシステムである。それに比べて送配電システムはあらかじめシステムを想定し、関連する革新的な技術が主導し、その波及効果が産業全体に広がったシステムであるという点でひときわ光彩を放っている。

マルクスの指摘した機械のシステム化は2つの方向を辿った。一つは工程のシステム化であり、もう一つは製品のシステム化である。ヘンリー・フォードが生み出したコンベアラインによる自動車生産は、その生産効率を爆発的に上昇させ、アメリカ全土にモータリゼーションの波をひきおこした。

製品の高度化もシステムの高度化と軌を一つにしている。その事例は枚挙にいとまがないが、例えば住宅建設は最も目につくシステム化の例である。建設現場に大工を見なくなって久しい。オフイスオートメーション、ホームオートメーションが騒がれた時代はすでに過去になったが、今でもその歩みは続いている。

計算機の登場はシステムの発展に新しい時代を画した。情報を伝達、変換、保存する新しいシステムの可能性が開けたのである。このシステムがもたらす未来社会は「情報化社会」と呼ばれ、1980年代に多くの論者がその展望を語った。代表的な論者はアービン・トフラーである[2]。彼は様々の未来社会の姿を語っているが、その1例として、20年後の情報化社会では、ビジネスはすべて家庭で行うことのできる規模に分散化され、大企業は不要になると書いている。「リモート勤務」が標準となる、と言うのである。20年後の2000年になってもビジネスはそうならなかったのは見てのとおりである。また彼は家庭にいながら買い物ができるホームショッピングの可能性を予測した。家庭に置かれた VDT と電話を結んで家庭から商品の発注が出来るシステムである。ファックスの双方化と考えてもよい。電電公社はこれを実現するため、東京のあるエリアに試験的に「キャプテンシステム」と呼ばれるネットワークを構築した。これは当時としてはそれなりに先進的なものであったが、結局は加入者が増えずに立ち消えとなったようである。もちろん現在ではホームショッピングはとうの昔に実現している。

2.「システム4．0」の提案

人間のシステムから機械のシステムを経て情報のシステムに至るシステムの発展の歴史を跡付けてきた。「ソサイエテイ5．0」,「インダストリー4．0」、「ウェッブ3．0」など、今流行のナンバリングで発展の現段階を表現するやり方に従うと、人間のシステムは「システム1．0」、機械のシステムは「システム2．0」、情報のシステムは「システム3．0」ということになる。

すでに述べた情報化社会論が世の中の流れを先導し、メインフレームからサーバーや PC に計算機の主軸がシフトし、IT や ICT のシステム化の推進が政府の主要な産業政策の柱になったのは1980年代である。このころが「システム3．0」の最盛期とすれば、すでに40年も昔のことである。いまの「システム」はそのころの「情報のシステム」としての在り様をはるかに超えた存在に進化していると思われる。今新しく生まれつつあるシステムの在り様を的確に捉えた「システム4．0」を提起すべきと思うがいかがであろうか？

1980年代の「情報化社会論」で全く議論されていなかったのがインターネットである。すでに述べたように、その前ぶれであったデータ通信はようやく試されつつあったが、電話網をベースとしたその試みは成功しなかった。インターネットは「自律分散」と「創発」を核に据えたこれまでにない全く新しい原理に基づくシステムで、多くの産業システムのプラットフォームとなっている。インターネットが生み出したさまざまの新しいシステムは、これまでの「情報処理」のレベルをはるかに超えた技術を駆使し、膨大な利用者の知恵を集約し、想像もつかなかったビジネスやエンターテインメントを作り出している。筆者が最初にインターネットの恩恵に浴したのは電子メールである。往復で2週間はかかる航空郵便による海外の研究者との対話が、

「口語体」での交流に代わったことは研究者としての日常を大きく変えた。次はブログの時代である。あっという間に広がったブログの氾濫には、人々がこんなにも自己表現の意欲を持っていることに驚かされた。

電子メールが1対1の対話とすれば、ブログは1対多の対話である。やがて電子掲示板が登場して多対多の対話を可能とし、さらに SNS がその輪に「公共」の権威を与えた。SNS には最近様々の問題点が出てきているが、それらの克服により今後も様々な対話システムが登場し、社会を変えて行くことであろう。

インターネットほど顕著ではないが、「情報化社会論」で議論の遡上に乗らなかったもうひとつの新しいシステムが GPS である。当時はすでに技術的にはほとんど完成していたが、民生化されていなかったのである。地球上のあらゆる人とモノの所在場所とその移動を探索できることは、大げさに言えば文明の性格を変えたと言ってよい。GPS はインターネットと並んで、新しいシステム構築のプラットフォームになりつつある。

インターネットと GPS の二つの新しいシステム技術を取り上げたが、これ以外にも認証、医療、サービス、金融、エネルギーなどの分野で新しいシステム技術が生まれつつある。これらが目指している方向性をひとつの概念に絞るのは難しいが、ここではあえて「社会」を挙げたい。「人間」「機械」「情報」に次ぐシステムのキーワードは「社会」と考えたい。「システム4．0」は「社会システム」である。

3．卓越システム（Excellent System）

これまで人々はシステムに対して、「順調に動いていればよい」という受け身の捉え方が多かったと思う。 故障や停止をしなければよいのである。最近ではシステムの故障や停止の事例が急速に増大しメデイアをにぎわしているので、人々はますますその姿勢に傾きつつある。システムを構築する際も、そのような安全第一の構えを取り、無難なシステムを何となく作っていく場合が多いのではないだろうか？その結果、世の中には凡庸なシステムが溢れ、いったん故障が起こったら、内実を知らない人々が複雑さの網にからみとられ右往左往する状態が頻発している。いま社会がシステムで覆いつくされ、あらゆる政策や企画がシステムを構築することに帰着される現在、「システムの評価」の軸を設定することが重要ではないだろうか？つまり、良いシステムとよくないシステムを明確に分ける基準が必要なのである。そのため、「よいシステム」を「卓越システム」となづけ、その属性を以下のように定式化してみた。

- 目的がはっきりしている。
- システムの全体構成が理解しやすい。
- 出来ることとできないことの境界が明確。
- 運用しやすく、故障への対応が容易である。
- 拡張可能性（Scalability）がある。
- 技術の進歩を含む環境の変化に応じて進化できる。
- 利害関係者の多くを満足させることが出来る。
- 利用可能なテクノロジーを効率的に使っている。
- 堅牢で十分な持続可能性がある。
- システム構築、運用のコストが小さい。

皆様の身近のシステム、組織、手順、仕組みなどを常日頃から上記の基準に照らして検証していくことをお勧めする。これについては、さらに詳しい論考を行う予定である。

参考文献

[1] カール・マルクス 「資本論」第1部、第4編、第13章、第1節、大内兵衛訳、大槻書店、1965
[2] アービン・トフラー 「第三の波」 徳岡隆夫訳、中公文庫、1982
大月書店、1965

（2024年11月27日原稿受領：SIC ニュースレターVul.6.12 に掲載）

Ⅰ論説

論説1　Society 5.0 実現に向けて電力システムを再定義する

東京電力パワーグリッド株式会社
取締役副社長執行役員最高技術責任者
岡本　浩氏（SIC理事）

1. はじめに

筆者が携わる電力システムの分野では、グローバルに脱炭素化、分散化、デジタル化の波が進行しており、我が国では人口減少も加わって、かつてと様変わりした激動のさなかにある。再生可能エネルギーの急激な拡大、運輸部門・熱部門における電力化、AI/ML×ビッグデータにおける電力消費の拡大が進み、日本の産官学が掲げる Society 5.0 における人間中心のサイバー・フィジカル融合社会を原子力と再生可能エネルギーなど脱炭素化された電力で支えていくことが必要な時代となった。

本稿では、今まで研究開発と実務の両面で電力システムについて学び、電気事業の現場で時代の変化に接してきた立場から、テクノロジーの指数関数的進化がもたらす社会の変革の方向性を考察する。具体的にはネットワーク・ダイヤグラムにより産業革命の流れを俯瞰できることと、人体への理解が Society 5.0 実現の鍵であると考えられることを述べ、デジタル・インフラとの融合を必要とする新たな時代の電力システムが果たすべき役割を考えてみたい。

2. ネットワーク・ダイヤグラムで見る産業革命史

図 1 にエネルギー転換と産業革命の歴史を示す。ここで注目すべきは第二次産業革命の生じた1900年代初頭に電力システムの実装と自動車の大量生産が始まったことである。

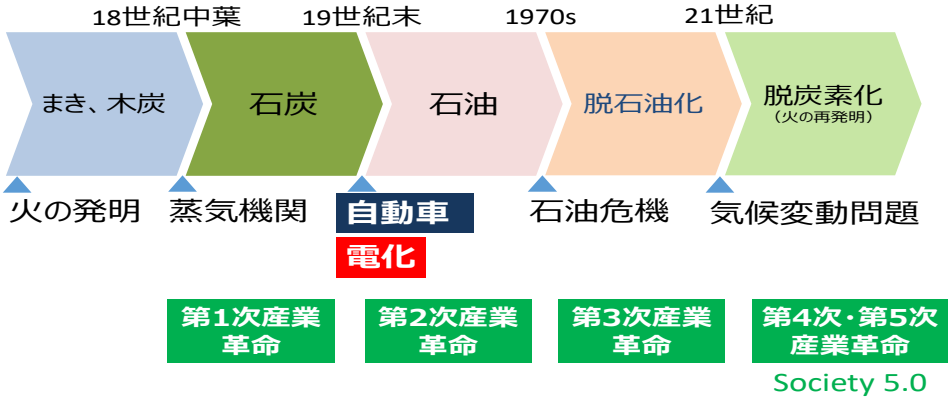


図 1. エネルギー転換と産業革命の推移

第2次産業革命前夜の工場では、工場内の単一の蒸気機関を動力源として、その動力を機械的なネットワーク（シャフト、ギア、ワイヤなど）によって機械負荷に伝達した（図 2 左）。ヘンリー・フォードはトーマス・エジソンによって創始されニコラ・テスラの交流システムの発明によって普及しつつあった電気モータを工場内の分散型の動力源として利用して、ベルトコンベアを稼働することで、工場内の生産性を飛躍的に向上させて自動車の大量生産に成功した（図 2 右）。電気モータは小型化しても高性能であることを活用したのである。140年前に電気と自動車の普及が重なったことは偶然ではない。

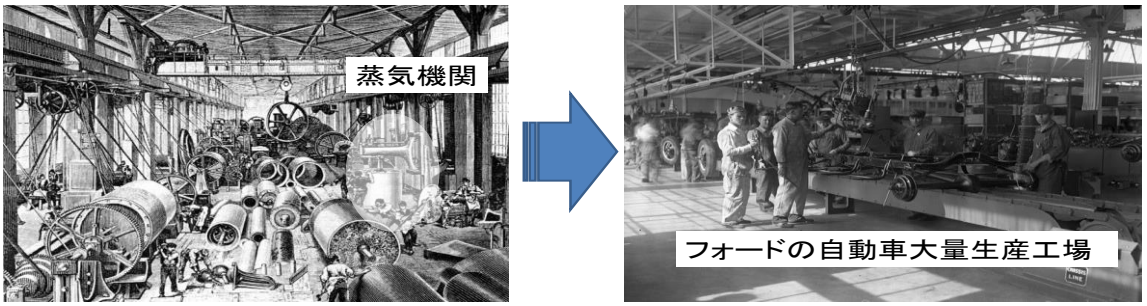


図 2. 第2次産業革命前後の工場内

工場にもたらされた劇的な変化をネットワーク・ダイアグラムで表現してみる。図 3 左に示された機械的なネットワークが図 3 右では電気のネットワークとベルトコンベアに置き換わっている。この2つのネットワークをつなぐのがモータである。結果として柔軟性を欠いた機械ネットワークがダウンサイズされ、ベルトコンベアの最適配置により生産性が大幅に向上した。電化の初期には、多くの経営者は単一の蒸気機関を単一の電気モーターで代替したため、そのインパクトはほとんどなかったが、動力の分散化にフォードが気づいたことで革命的な変化が訪れたのである。第2次産業革命期の数十年で、電化に乗り遅れた企業の大量絶滅が起こったと言われている[1]。

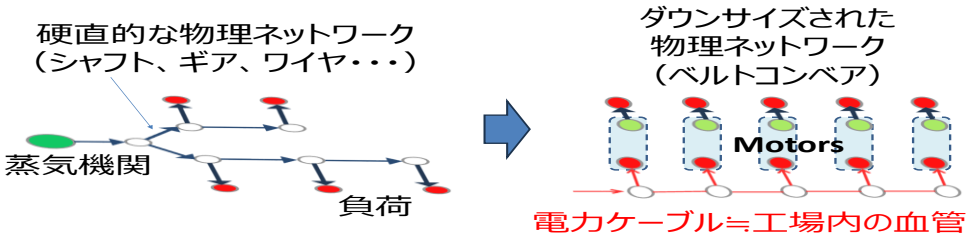


図 3. 第2次産業革命前後の工場内（ネットワーク・ダイアグラム）

工場内の電力ケーブルは、人体に喩えて見れば栄養や酸素を筋肉細胞に運ぶ血管に相当する。第1次産業革命では人体の筋骨を拡張する機械が発明されたが、第2次産業革命では血管が導入されて、より柔軟な生産が可能となった。

第3次産業革命は情報革命であると言うこともでき、コンピュータとそのネットワークの時代になり、机上の多くの仕事が自働化された。コンピュータとそのネットワークは、人体で言えば神経にあたり、AI/IoT の進展によって人間の神経の機能が拡張されていると言える。

第1次産業革命が社会に筋骨を、第2次産業革命が血管を、そして第3次産業革命が神経をもたらしたのだとすれば、来るべき Society 5.0 では、社会における筋骨・血管・神経の融合が生じる。

現在のクルマをネットワーク・ダイアグラムで表現すれば、図 4 左の通り、第2次産業革命前夜の生産性の低い工場と同形である。内燃機関の動力を硬直的な機械ネットワークが伝達しているため、モビリティという目的に照らして制約が大きい。第2次産業革命時と同様に電気モータをイン・ホイール化したりプロペラ駆動用の分散型動力源として活用すれば、より合目的で自由な形状のモビリティとなり、さらに神経系も導入することで、自働運転モビリティ・ロボットに変容する（図 4 右）。[2]

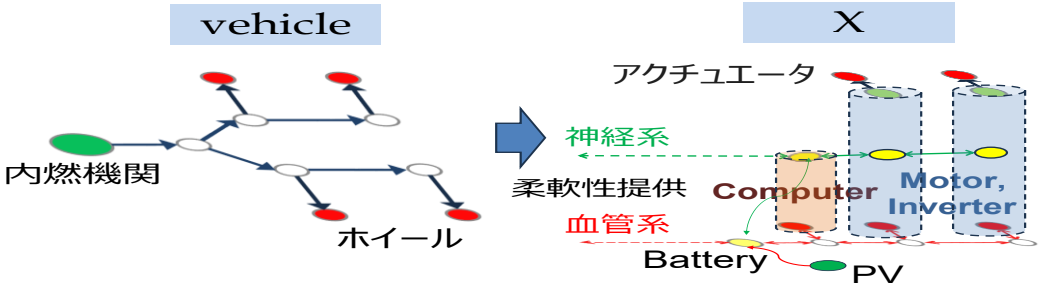


図 4. Society 5.0 で起こる Vehicle to X

図 4 右のマシンはもはやクルマとは言えないのでここでは X と呼称する。2027年頃にはマシン X の自働運転が1000ドル程度の CPU/GPU セットで実現できる。歴史は繰り返すと言われるが、この変化に対応できない企業は第2次産業革命時と同様の大量絶滅の危機にさらされる畏れがある。幸いにも変化に対応できれば、クルマと比べた X の制御性の高さから、道路・橋梁・トンネルという物理インフラもダウンサイズでき、これから進む人口調整局面に適応できるチャンスとなる。また X がモビリティとして稼働していないとき、その蓄電池と GPU という分散型資源を社会全体で活用すれば、X の経済性はさらに向上する。なお2027年頃に X 100万台が生産されると、その GPU の計算力は富岳10台分となり、蓄電池容量は現在の東京電力エリアにある揚水式発電所の電力貯蔵量に匹敵する。

3. 人体に学ぶ

産業革命においては、人類が自らの機能を拡張するため、社会に筋骨、血管と神経を導入してきたという解釈を述べた。医学・生物科学の分野では10年ほど前から神経と血管の密接な関係に関する研究が進展している。人体においてこれらのネットワークが伴走していることは古くから知られていたが、「血管・神経ワイヤリング」としてその形成過程が研究され、両者の密着性により神経から血管にシグナルが送られているだけでなく、血管から神経にもシグナルが送られることで、生体の恒常性（ホメオスタシス）が調整されているメカニズムも明らかになってきた[3]。

この分野の研究が最近になって急に進展しはじめたのは、血管と神経がそれぞれ医学において独立した大きな分野であり、両者に学際的交流が少なかったことにもよるらしい。これは電気事業と電気通信事業がマクスウェルの電磁界方程式という同じ物理原理を基礎としているにも関わらず（ニコラ・テスラの時代には両者は一つの領域を形成していた）、それぞれ大きな独立した産業分野として融合してこなかったことと似ている。逆に言えば、これらを横断して考えられれば社会に大きなインパクトをもたらす可能性がある。

我々は心と身体の存在を意識しているが、前者を司るのはもっぱら神経であり、後者の機能は神経と血管によって細胞に情報とエネルギーが伝達されることで成り立っている。Society 5.0 が想定するサイバー・フィジカル融合は、人間に喩えるならば心身の密接な協調であり、東洋における神秘的な心身一如の世界観に通じる部分がある。万物の霊長と言われる我々の極めて高度な生体機能はサイバー・フィジカル融合のお手本となるはずであり、社会の神経と血管であるデジタル・インフラと電力インフラの密接な関係が重要になる。

現在、デジタル・インフラの消費電力が急増しつつあり、図 5 に示した通りすでに確実なものだけで5年間で原子力発電6基に相当するデータセンターの新規接続が予定され、電力システムの需給と基幹ネットワークの潮流に大きなインパクトをもたらすと予測される。データセンターは既存の変電所などに近い位置に立地されるほど、系統接続のために新規に建設す

べき送電線が短くなり導入を早期化できる。近傍に再生可能エネルギーが豊富な地域では、その電力を地産地消することで、再エネ大量導入に必要となる電力グリッドへの投資を抑制する効果もある。理想的には地下変電所の上部にデータセンターを設置することが両者の密着した形成のモデルとなる。 今後モビリティや様々な産業活動の自働化が進むと、データの生成・消費地点に近いエッジへのデータセンター設置によりローカルに用いられるデータについては情報の地産地消圏を作ることが望ましく、エッジデータセンターから 5G/6G など低遅延で大容量の無線による高速通信が必要となる。この際に、エッジサーバーをローカルデータセンターとなる変電所に設置して、5G/6G の基地局のベースバンドユニット(BBU)機能もソフトウェアとして収容し、すでに変電所からの電線と光ファイバーが接続されている電柱や地上機器などの電力設備をアンテナ置き場として使うことで、少ない投資でのデジタルインフラの構築も可能となる(図 6)。さらに地域の再生可能エネルギーを活用できれば理想的である。その際に電力システムから発信すべきシグナルの内容については、次節で後述する。

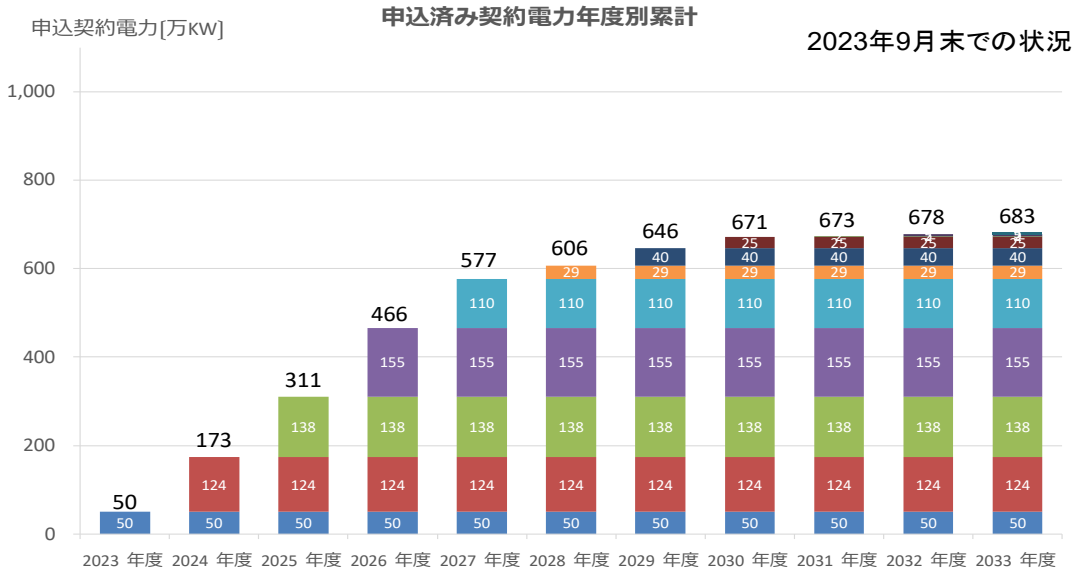


図 5. 新規データセンターの導入見通し(2023年上期末時点)

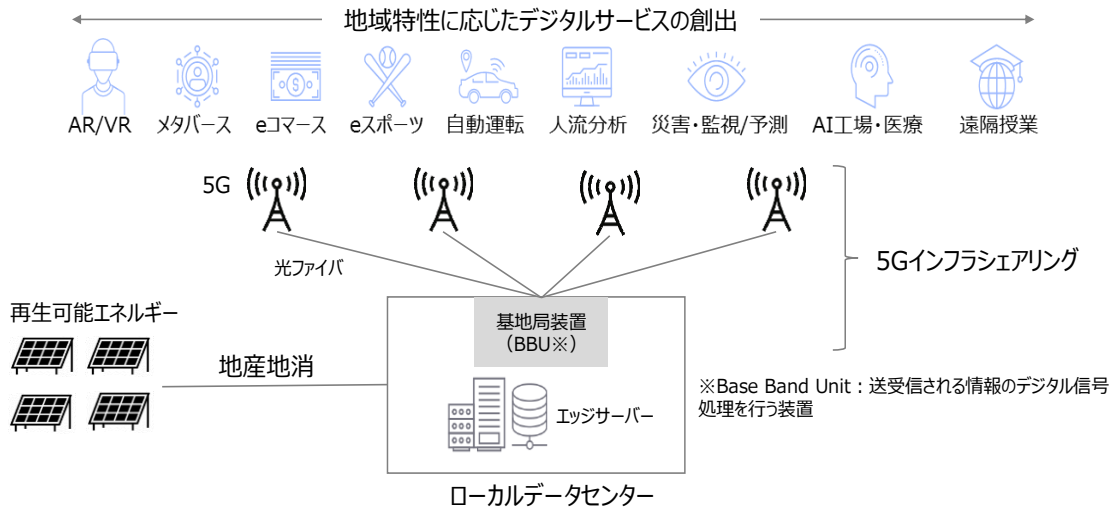


図 6. デジタルインフラと電力インフラの連携による
情報とエネルギーの地産地消化

まとめれば電力インフラとデジタル・インフラを密着して形成し、その密着性を活用して密接な連携を行うことが重要であり、そのことにより Society 5.0 における社会全体の恒常性調節を行う必要がある。

4. 人間中心の産業革命と電力システムの役割

当社は電力グリッドとデジタル・インフラを融合させてメッシュ状に地域に展開してモビリティと熱を自働化した上で、すべての活動をカーボンニュートラルな電気でまかなうことを目指している。図 7 はその構想を示したもので、筆者らは MESH 構想と呼んでいる。図 7 左下には自働運転される電動モビリティのネットワーク、右下にはヒートポンプを活用した電熱のネットワークを示している。

重要な技術はクラウド・コンピューティングである。クラウド・コンピューティングでは、演算を実行するインスタンスを仮想化することで、ある程度の遅延を許容できるアプリケーションであれば、世界中どこでも計算できるようになる。例えば、太陽光発電の出力（日照時間）に応じてデータセンターのワークロードをシフトさせれば、コンピューティングに使用する電力をカーボンニュートラルにすることができ、電力需給におけるグリッドの混雑を緩和することができる。

また、クラウド・コンピューティングで AI/ML を動かす場合、AI/ML の事前学習はあらかじめ任意のタイミングで行うことができる。電力が余剰しがちとなる春と秋には学習を強化し、不足する夏と冬は学習を控えめにする。このように電力の使用時期をずらすことで、余剰電力を水素などの物理的な貯蔵手段ではなく、サイバー空間に「知識」として蓄えることができる。東京電力パワーグリッドはすでに「アジャイルエナジーX」という子会社を設立し、分散コンピューティングによる再生可能エネルギーの融合を推進している。同社はブロックチェーンマイニングを通じて、再エネで発生した電力を暗号通貨として蓄え始めている。

サイバー空間内のメモリ、モビリティネットワーク内のバッテリー、熱ネットワーク内の貯湯タンクなど熱ストレージに加えて、産業の生産活動自体を春や秋にシフトして、その間の物流在庫を多めに持つなどとすれば、再生可能エネルギーの電力をあらゆる各産業の既存のバッファやストレージに形を変えて短期・長期に貯蔵でき、再生可能エネルギーとの共存が容易になる。このためには、電力システム側から電力需給や系統混雑状況を表すダイナミックな「価格シグナ

ル」を地点毎に発信することが有効となる。価格シグナルを活用した市場メカニズムによって、社会の自律的な行動変容を促すことができ、Society 5.0 の恒常性調節となる[5]。

図 4 右のネットワーク・ダイアグラムはモビリティマシン X を表現したものだが、ヒートポンプにより熱需要をまかなうことなども考えて、より一般的な形式に書き直したのが図 7 である。提供されるユーザ体験はモビリティ・サービスのみに限らないので、このマシン X のインプットはエネルギー、アウトプットはユーザ体験になる。さらに宇宙のフラクタル構造に注目すれば、マシン X の集積体としての住宅、ビル、工場も一般化された X で表現でき、さらにそれらが集積した地域も X、地域が集積された地球全体も X で表現できることになる。

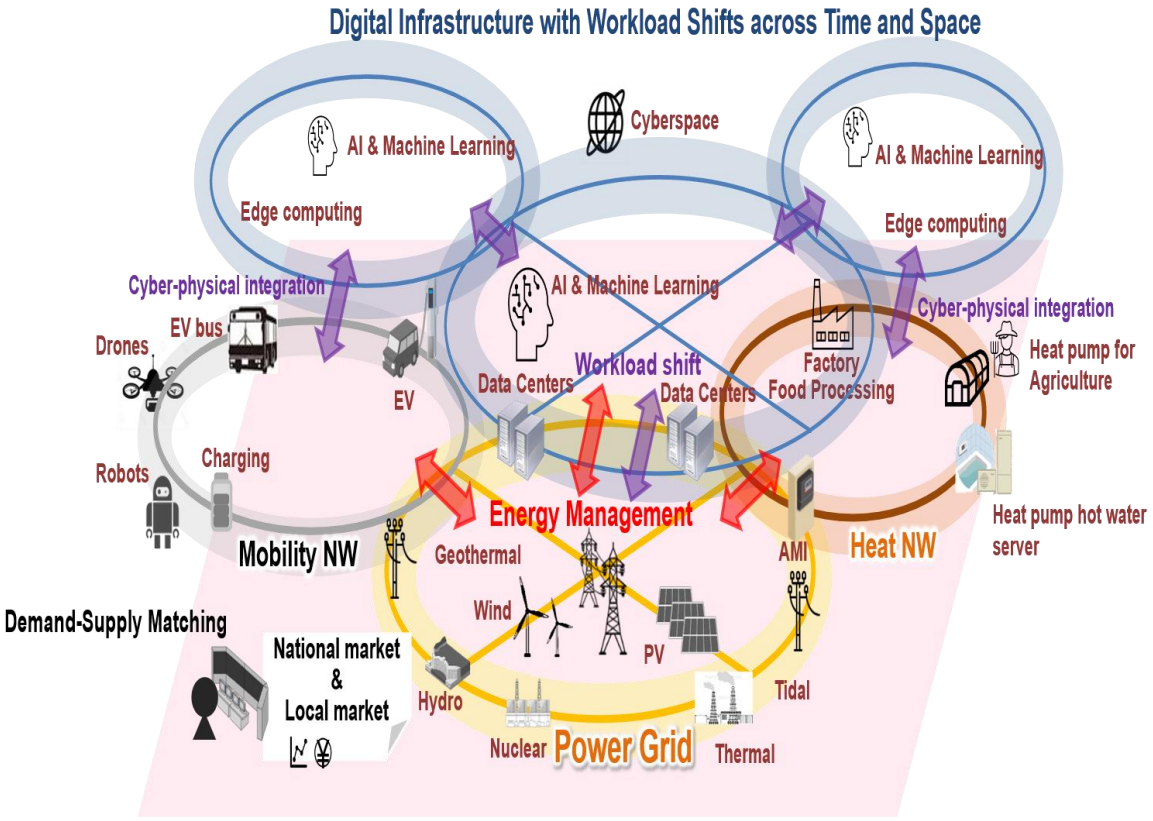


図 7. 電力グリッドとデジタルインフラを融合させる
MESH(Machine-learning Energy System Holistic)

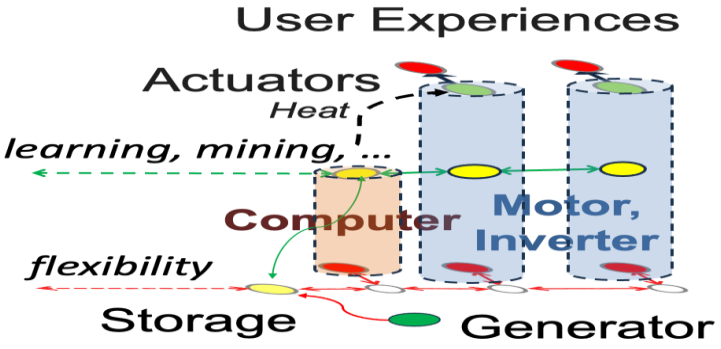


図 8　一般化された自働化マシン X [2]

この階層構造と、電力グリッドの階層構造を図 9 のように重ねることで、膨大な数のマシンやデバイスが接続される電力グリッドにおいて、粒度の高い価格シグナルを算出して発信することが可能である。具体的には、①お客さまの階層（弊社では Beyond the Meter として BTM 領域と呼んでいる）、②ローカルな地域の地産地消階層、③全国レベルの広域階層の3階層のエネルギー需給の最適化を、分散型階層制御の枠組みを使って発信することを想定している。3階層の連携のためには図 9 に示したような分散エネルギー取引市場を設置して、お客さまの階層と全国市場をカップリングする必要がある。

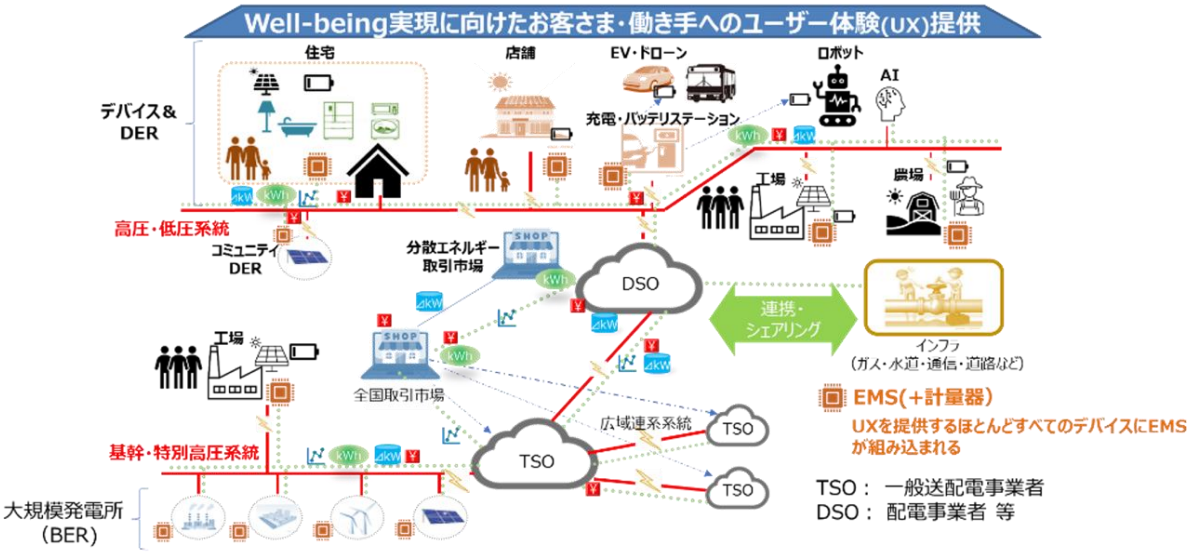


図 9. Utility 3.0 の実装案（2030年頃）

カーボンニュートラル化は、化石燃料の形でエネルギー輸入を国外に頼っている日本のエネルギー輸入を減少させることが期待されるが、より目標をあげて国内の脱炭素資源開発を進めてエネルギー輸出国となることを目指すべきである。そのためには海洋国家でもあり火山列島でもあるという特徴を最大限に活用し、洋上（風力のみならず原子力、潮力・潮汐力も活用）と水力・地熱のポテンシャルを最新のテクノロジーで掘り起こすことが重要である。重量の大きい電力ケーブルでは国外との連系が困難であるが、2027年にも欧州から北海道に北極海ルートで光ファイバーが直結されることを考慮すれば、国際光ファイバーでアジア諸国を欧米とつなぐゲートウェイとして AI 演算サービスを提供できる可能性もあり、海洋国家としての大きな飛躍につながるだろう。

5. おわりに

エジソンによる電気事業開始から間もなく設立された東京電燈のビジネスモデルは、電灯による照明サービスのサブスクリプションであった。電気事業の発展過程で BTM 領域で価値を生むのはもっぱら電機製造業の仕事となり、電気事業者が送配電設備を通じた供給に徹するようになった結果、電気事業におけるユーザ体験からの乖離も進んだと言えるが、指数関数的に進化するデジタル・テクノロジーと電動・電熱融合によるセクター間融合が進む中で、お客さまに提供するユーザ体験の向上と、そのための基盤インフラの役割の再定義が必要とされる新たな時代に入っている。

筆者は恩師の関根泰次東大名誉教授に「電力系統は生き物である」と教えられたが、変化の激しい業務の中で日々そのことを実感している。大学で学んだ数理計画、分散・階層制

御、ソフトウェア工学、人工知能、大規模システムの解析・最適化など、システムに関わる技術が活用できるシステム・オブ・システムズの時代となった[6]のは筆者にとって幸運としか言いようがない。

本稿を通じて、多くの方に Society 5.0 においてエネルギーと電力システムの果たす役割、そしてSICが掲げるシステム・イノベーションの重要性について一層の関心を持っていただき、厳しい人口調整局面で地球との共存を図りながら、持続的に地域のお客さまに価値をもたらし続けるために当社と協働していただけるならば、これに勝る喜びはない。

参考文献

[1] Andrew McAfee and Erik Brynjolfsson, 'Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future', 2017

[2] Hiroshi Okamoto, "Envisioning the future driven by the 4th Industrial Revolution: Electrification, Network Convergence, Vehicle to X and Utility 3.0", ELECTRA N°330 – October 2023

[3] 高橋淑子、「神経血管ワイヤリングの調節機構」、血管医学、Vol.14、No.3、2013

[4] Hiroshi Okamoto, " Utility 3.0: Japan's Utility of the Future", ELECTRA N°311 – August 2020

[5] F. C. Schweppe, R. D. Tabors and J. L. Kirtley, "Power/energy: Homeostatic control for electric power usage: A new scheme for putting the customer in the control loop would exploit microprocessors to deliver energy more efficiently," in IEEE Spectrum, vol. 19, no. 7, pp. 44-48, July 1982

[6] 木村英紀『現代システム科学概論：システム思考を支える知の基盤』、東京大学出版会、2021

筆者プロフィール

岡本　浩（おかもと　ひろし）氏

1993年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了、工学博士。同年東京電力入社。（公）日本科学技術振興財団理事、国際大電力システム会議（CIGRE）理事・執行委員、IEC 標準化戦略諮問委員会委員、スマートレジリエンスネットワーク代表幹事も務める。

（2023年12月30日原稿受領：SIC ニュースレターVul.6.3に掲載）

論説2　全社最適化を目指すスマート・ファクトリー実現に向けた取り組み

株式会社 JSOL

未来共創デジタル本部　シニアコンサルタント　大泉洋一氏

当社は、いわゆる IT ベンダーであり、筆者は同社で20年以上 IT 領域のコンサルティング業務を行ってきた。近年デジタル・トランスフォーメーション（DX）の実現による企業価値の向上が叫ばれて久しい中、筆者もお客様企業の DX の取り組みを微力ながら支援してきている。

本稿では、製造業におけるスマート・ファクトリーをテーマに、DX の推進について、当社の取り組みに自身の私見も含めて、お客様企業と取り組む DX 推進の現場の目線から考えを述べたい。

1．JSOL のご紹介

（1）当社の成り立ち

当社は、株式会社 NTT データと株式会社日本総合研究所を親会社に持つ IT ベンダーである。三井住友フィナンシャル・グループのシンクタンクである株式会社日本総合研究所から一般企業のお客様のシステムを扱う部隊が分社独立して設立された。その後 NTT データが資本参加（50％出資）し、これを機に株式会社 JSOL に社名変更し、現在に至っている（表 1）。

また当社は、2020年に理化学研究所、株式会社理研鼎業との共同出資により、株式会社理研数理を設立した。その取り組みの一端を、2024年度第1回SICフォーラム（2024年2月9日開催）で紹介させて頂いた。

1969年	住友銀行より分離独立し「日本情報サービス」を設立
1989年	「日本総合研究所」に社名変更
2006年	日本総合研究所から分社し「日本総研ソリューションズ」を設立
2009年	エヌ・ティ・ティ・データと資本提携し「JSOL」に社名変更

表 1　当社の沿革

（2）ビジネスの概要

当社は「今はない、答えを創る。」を旗印に、未来へのビジョンを持ってお客さまの真の課題に向き合い、解決するためのソリューションを提供することに力を注いでいる。IT コンサルティングからシステム構築・運用までの一貫したサービス提供を通じて培ってきた豊富な業務ノウハウとシステム開発力により、製造業や流通サービス業、金融・公共分野など幅広いお客さまにソリューションを提供している。当社は、前述の通り NTT データと日本総合研究所を親会社に持つが、両グループの仕事を受託している訳ではなく、図 1 にプライム案件の割合が 94％と示している通り、外部の一般のお客様から直接取引頂いている点が大きな特徴である。

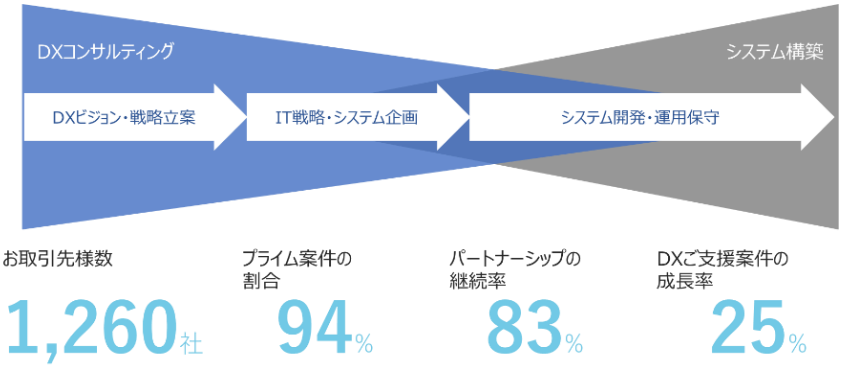


図 1　当社のビジネス領域、特徴

ERP 領域を中心にフロントオフィスからバックオフィスまで幅広い商材を取り扱っており、お客様企業の様々なニーズに応えるように取り組んでいる（図2）。これらのビジネス系のソリューションに留まらず、CAE（設計・開発支援システム）分野においても、ソフトウエア開発から技術サポート、受託解析など、モノづくりの高付加価値化に取り組んでいることも特徴の一つである。

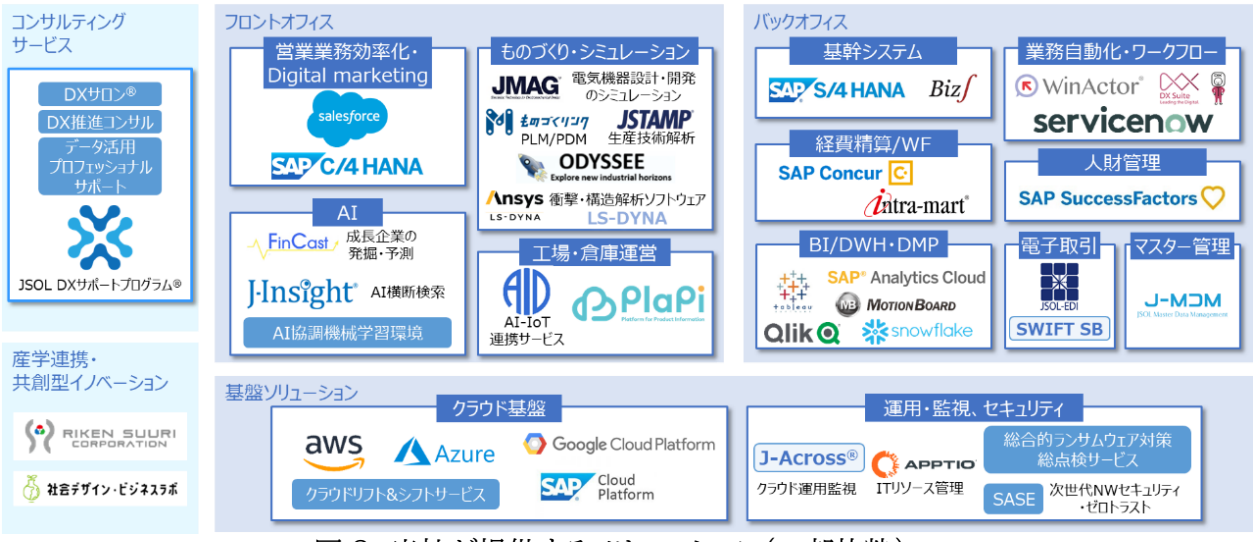


図 2　当社が提供するソリューション（一部抜粋）

(3)DX コンサルティングの取り組み

DX（デジタル・トランスフォーメーション）という言葉が登場し、各企業が DX 推進部門を立ち上げ、取り組みを進めるようになって久しい。これらの動きに合わせ、当社においても2019年にお客様企業の DX を支援する専門部署を設置し、筆者は同組織で DX コンサルティング業務を担当し、お客様企業の DX の取り組みの支援を行ってきている。

近年、いくつかの業種にターゲットを絞り、DX の実現の支援に取り組んでおり、その一つである製造業の DX、スマート・ファクトリーの実現に向けた活動について、現在の当社の取り組みに自身の私見も含めて考えを述べたい。

2. スマート・ファクトリーの目指す姿

(1)日本における現状

スマート・ファクトリーという言葉は、清威人氏が著書『スマート・ファクトリー ― 戦略的

「工場マネジメント」の処方箋』の中で用いたのが最初とされている。同氏は、スマート・ファクトリーの概念について、「ERP などの基幹システム、製造実行システム（MES）、現場の FA 機器がネットワークでつながった工場」と述べている（“スマート・ファクトリーの第一人者が語る日本のインダストリー4.0、IoT の現状と課題”.IoT ナビ. https://iot.aperza.com/2016/03/487/ ）。同氏が同記事の中で述べているように、「システムや生産機器からのデータを取得している製造業は多いが、それらの分析ができておらず、（中略）全体最適化につながるような分析ができていない」のが実情と思われる。

我々が多くのお客様企業と接している中でも、データを取得・蓄積しているが、活用できていないという企業は未だに多い。収集・蓄積したデータの活用についても、生産現場の個々の業務の改善・効率化に資する取り組みが大半を占めている。日本のスマート・ファクトリー実現に向けた取り組みは、生産現場の効率化（図 3 に示す「狭義のスマート・ファクトリー」）に留まっているのが現状と言わざるを得ない。サプライチェーン（図 3 の横軸）やエンジニアリングチェーン（図 3 の縦軸）、そして経営判断に資する情報提供まで、製造業の企業全体の最適化を目指すべきと考えている。

経済産業省も「IoT・ビッグデータ・AI・ロボットを活用し、エンジニアリングチェーンやサプライチェーンをネットワーク化・最適化・自動化すること」（経済産業省中部経済産業局「スマートファクトリーロードマップ」）としており、多くの企業もこれを目指していると認識している。

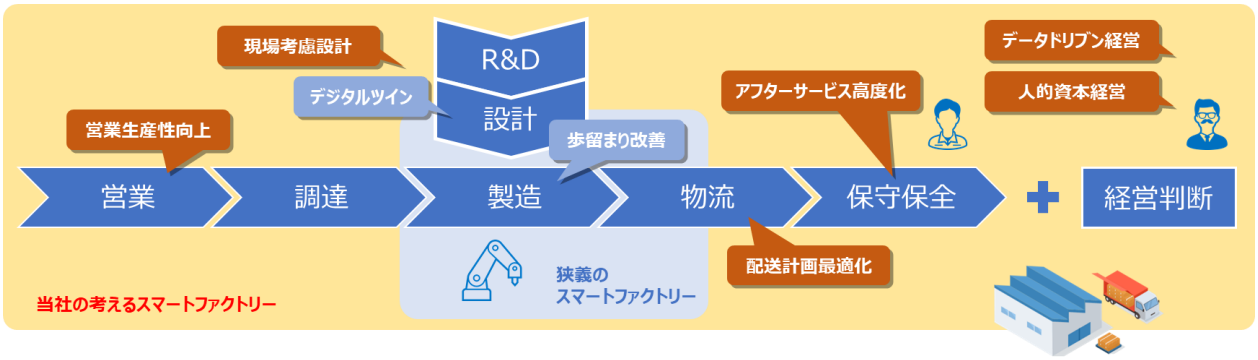


図 3　当社が考えるスマート・ファクトリー（狭義のスマート・ファクトリーとの比較）

（2）個別最適から全社最適化へ

前記した通り、日本における多くのスマート・ファクトリーの取り組みは、現状では個別最適にとどまっていると思われる。各部門／業務機能ごとにデジタル化の取り組みが行われ、そこで閉じてしまっている例が多い。全体最適を目指し、部門間で連携し、デジタル化の効果を高めることができる。以下では、その例を幾つか紹介する（当社事例に基づく。お客様情報を秘匿するため一部改変）。

① 受注見通しデータを用いた調達計画・生産計画の高度化（図4中の①）

営業部門が把握する受注見通しデータの精度を高め、その情報を調達部門に連携し、部品調達計画の精度を高めることができる。更に調達計画の精度向上により、部品の先行手配・生産計画の精度向上を図ることが可能となり、リードタイムの短縮に繋がる。

受注見通し対象の商品仕様から、そのコンフィグレーション情報を導出、部品表への連携を通じ、調達対象部品の仕様、数量、予定時期等を予測することで、上記が可能となる。

② クレーム情報の製品設計への反映（図4中の②）

アフターサービス部門がクレーム情報を SFA/CRM（Sales Force Automation/Customer Relationship Management）システムへ蓄積し、蓄積されたデータについて AI を使って分類分けし、設計部門が原因と考えられる情報を設計部門に提供する。設計部門は、連携された情報を次の製品設計に活用することが可能となる。

③ 故障予知に基づくプロアクティブ営業（図4中の③）

納入済製造装置に設置したセンサーからの予兆検知情報を、SFA/CRM システムへ自動連携し、フィールドサービス部門担当者がリアルタイムで状況監視できるようにし、この情報を受けて、予防対応等のプロアクティブな営業活動に繋げることができる。

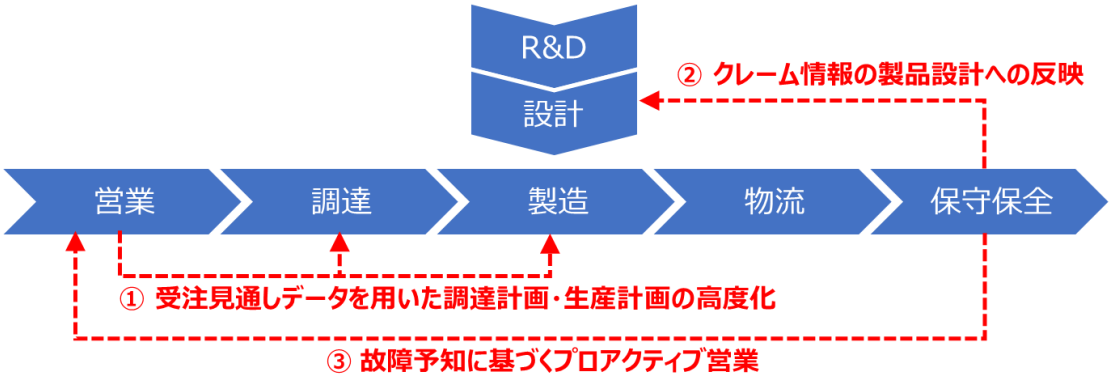


図４　部門間連携による高度化の例

以上は、社内の部門間連携による効果の例であるが、これが企業間連携に繋がれば、更に取引先企業全体を含むサプライチェーン全体が最適化され、より大きな効果を得ることが期待できる。

SIC（システムイノベーションセンター）のフォーラム等でも繰り返し紹介されている様に、欧州における Catena-X（自動車のバリューチェーン全体でデータを共有するためのアライアンス）や GAIA-X（自律分散型のデータ連携の仕組み、産業別に分化・組織された IDS：International Data Spaces というコンソーシアムで推進、前出の Catena-X はその自動車産業版に相当）の取り組みが進められている。日本においても、経済産業省の主導でウラノスエコシステムの取り組みが進められていることは、周知の通りである。

これらの取引先企業全体を含むサプライチェーン全体の最適化が実効性を発揮するためには、大前提として、企業内で情報連携できる状態が作り出されている必要がある。企業間連携による価値創出を実現するための前提としても、企業内組織間連携による全社最適化の実現は、非常に重要な足元の課題であると考えている。

3. 実現に向けた課題、解決に向けた方向性

(1)企業内、組織間の壁の存在

部門間連携による高度化・効率化の効果はかなり以前から指摘され、多くの企業でも取り組まれている。一方、これらの活動は各企業の各現場で個々に推進されているものの、日本の製造業全体の中で、抜本的に改革が進んだかといえば、No と言わざるを得ない。即ち、古くて新しい課題であると理解している。

ではなぜ、古くから言われているこれらの課題が、いまだに解決されないのか。その最も根本的な原因は、企業内の組織の壁の存在であると筆者は感じている。この原因の認識自体も多くの識者から指摘されていると思うが、解決されていない問題だと思う。

企業内では、部門ごとに事業目標の KPI が設定され、その達成に向けてそれぞれが取り組んでいる。このため、全社レベルの業績目標という大きな軸は一致しても、各現場レベルの活動では、必ずしも利害関係が一致しない。(図5)

例えば、前出の受注見通しデータを用いた調達計画・生産計画の高度化では、営業部門が提供する中長期の受注見通しデータが一定以上の高い精度で入力されることが前提となる。しかし、それが営業部門の KPI での評価に反映されない等、直接的に営業部門メリットにならない場合、営業部門は受注見通し情報を正確に入力することを行わず、実効性を伴わない結果となってしまう。

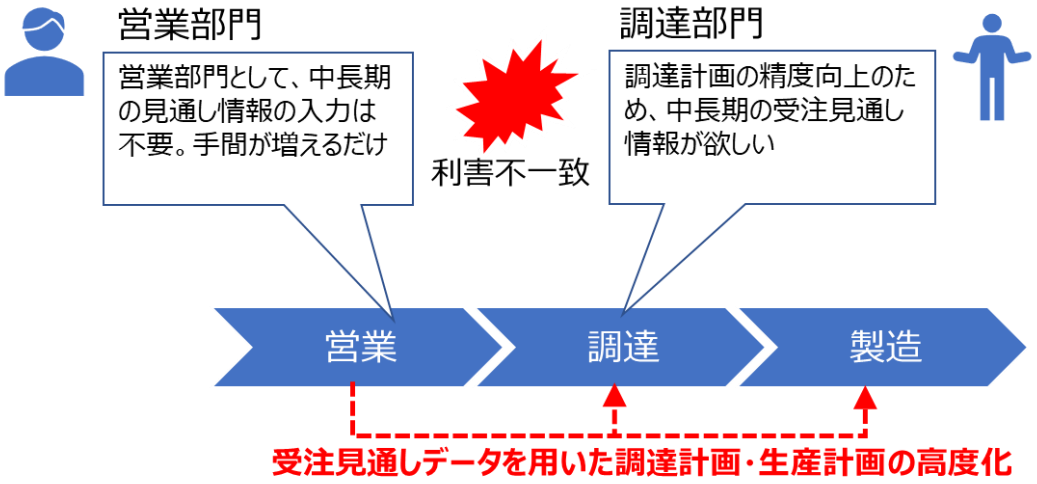


図 5　部門間連携の障害となる組織間の壁の例(営業部門と調達部門)

単に、両部門間を連携する仕組みを整備するだけでは、このような問題が生じ、課題解決に至らない。この例では、調達計画の精度向上の結果を営業部門の KPI に反映する(例:リードタイムの短縮による顧客満足の向上等)ような、制度運用上の見直しも併せて行うことが必要となる。

(2)JSOL のアプローチ

当社では、上記のような課題を抱える企業の課題解決支援に立ち会う機会が、少なくない。前述の当社の紹介に記載した通り、企業の様々な業務シーンを支援する商材を扱っており、必然的にそのような機会に接することになる。

前述の部門間連携による高度化・効率化の例のような業務シーンで活用される商材としては、SFA/CRM の「Salesforce」、部品表の「ものづくリンク」、統合マスター管理の「J-MDM」等が挙げられる。

当社では、お客様の抱える課題に対して、これらの商材を単に導入するということはせず、お客様の抱える業務課題の解決を意図し、必要に応じて業務変革とあわせて実装することを支援する。冒頭で述べたように、IT コンサルティングからシステム構築・運用までの一貫したサービスを提供しているというのは、このような意図による。

例えば、統合マスター管理を実現する際、部署ごとで異なる定義がされている情報を再整理するところから行う必要がある。例えば、商品コード一つをとっても、おなじ商品名でも意味すること(SKU:Stock Keeping Unit やバージョンの違い等を含む)が部門によ

って異なっている場合が散見される。これらを一つ一つ丁寧に紐解き、情報を汎化し、共通の定義を作り出すことを進めていく。
また、前出の営業部門と調達部門の連携を強化するためのKPIの見直しのような、制度運用上の見直し策も併せて打ち出していく。

このように当社では、お客様企業の全体最適を目指し、部門間で連携し、デジタル化の効果を高めるための取り組みを進めている。そのポイントを改めてまとめると、以下の通りである。

① 幅広い業務領域の商材を持ち、これらがカバーする広い領域でお客様のあるべき姿を描く（幅広い業務領域の実績に基づく知見が、これを可能とする）
② 単なるITソリューションを導入は行わず、制度の見直し、業務運用ルールの見直し等の業務変革を併せて実施することで、実効性を伴う課題解決を実現する（そのための、ITコンサルティングからシステム構築・運用までの一貫した支援）
③ 特に、全社最適を目指すスマート・ファクトリーの障害となる部門間の壁を取り払う施策の立案、その実現に向けた現場レベルの地道な変革の支援と併せてソリューションの実装を行うことで、価値の実現に寄与する

上記のような枠組みを、当社はアセットとして汎用化して整備しつつある。それにより、より迅速にお客様企業に価値を提供することが可能となる。上記のような取り組みを通じ、優れたお客様企業と共に変革を実現し、そのノウハウを更に新たなお客様企業に還元し、社会の価値を高めていくことを目指している。

（2024年4月26日原稿受領：SICニュースレターVul.6.5に掲載）

論説3　　CAEからMBDへ

マツダ株式会社
統合システム開発本部　MBD革新部　部長　津村信一氏

筆者は、現在MBD革新部という部署でパワートレインや車両、そして制御も含めたクルマ全体でのMBDの技術開発や量産開発適用を行っています。今回のテーマは非常に大きなテーマで、筆者ごときに語れるかどうか、甚だ自信はありませんが、特に筆者が深くかかわってきた車両開発の領域を中心にマツダの CAE/MBD の発展について、弊社の歴史も踏まえ論じていきたいと思います。

まず、最初にマツダにおけるCAE（Computer Aided Engineering）とMBD（Model Base Development）の言葉の定義について述べさせていただきます。一般的には、MBDはもともと制御モデルと制御対象モデルを用い、机上で制御開発を行うことを意味しています。しかし、車のシステムが複雑化したことにより、個々のシステムの相互影響を考えると、制御の対象が車全体へと広がりつつあります。この広がりにより、従来、CAE モデルと呼んでいた衝突、強度、振動、燃焼、車両運動などを扱うモデルのほとんどが、制御対象モデルとしての役割（プラントモデル）を求められるようになりました。また、マツダでは将来、開発の全てを机上化するという理想を掲げているため、CAE モデルと制御対象モデルを区別することは意味がなくなってきています。このため、数値モデルによる検討なども含め机上開発全てをMBD と定義しています。ということで、以降（特に7章以降）では、CAE/MBDという言葉は、あまり区分せずに使用しております[1]。

それでは、ここからマツダにおける CAE の歴史を述べますが、私の入社（1990年）以前の内容については、CAE の発展に貢献された諸先輩の記録を流用させていただいております。

1. CAE創世期（1965-80ごろ）

マツダにおいて、CAE（もしくは数値解析）を始めたのは1965年ごろのようです。有名大学の先生を指導教官として解析係を発足し、数値計算法を学び、内製のプログラムを用いて線形・非線形構造解析を始めました。有限要素法による強度剛性、振動、衝突、大変形解析では世界トップの技術レベルであったようです。この時代は世界中の有名な先生を2年に一度程度招聘してスキルアップを図っていました。 その後、オイルショックを経験し、立ち直る為に、技術開発要員を量産開発にシフトした結果、CAEの技術開発はストップし、技術力は業界下位レベルになったが、応用技術は進みました。（※：余談であるが、1965年ごろに発案された、プロ野球巨人の“王シフト”は、マツダ社員が社内のコンピュータで解析した。その当時から、コンピュータなど新し物好きの社風があったと言われている。）

2. 外部技術導入時代（1980-82）

それまでの内製ソフトによる解析に代わり、現在も NVH 解析などの基幹 CAE システムとして用いられている NASTRAN の企画導入、教育により、業界上位レベルに復興しました。この時代以降、基本的に CAE ソフトは汎用のソルバーを導入することとなりました。

3. 車全体の解析時代(1982-95)

それまでは、車体解析が中心でしたが、解析適用範囲をシャシー領域まで拡大発展させました。また、解析専任者が CAE を行うだけでなく、設計者でも解析を行うことや、増えてきた解析工数を効率化する目的で、マツダ独自の WISE(Widely Covered Intelligent System)、CPAS(CAE Process Automation System)など、CAE プロセスをサポートするシステムの開発が始まりました。

4. ル・マン優勝への MBD の貢献(1991)

筆者が入社して2年目に、マツダはル・マンで日本車初優勝という快挙を達成しました、残念ながら、当時私は関わっていませんでしたが、自分の周りにも手弁当でレース車両の解析などしながら貢献していた人はいました。

今回、この投稿を行うに当たり、ある役員から、ぜひル・マン優勝の陰で活躍した MBD を紹介してほしいと、いくつかの資料をいただきました。その一部は、自動車技術会誌[2]にも公開されていますが、あらためて、その内容を紹介します。

以下、自技会誌からの抜粋＞＞＞

①サーキットシミュレーションでの戦略策定

総合優勝は、優れた技術力あってのことだが、優勝するには技術だけでは十分でない。よく、ル・マンには魔物が住んでいるといわれる。24時間、この魔物とどのように戦うかの戦略が大切だ。我々は、ル・マンを知ることからはじめた。

まず、シミュレーション技術を駆使して、ル・マンサーキットの路面をモデル化した、そしてそこを走るための、車のモデル、ドライバーのモデル、を開発した。それを用いて最高の戦略を立てた。

ル・マンのサーキットはご存知の通り一般公道であり、年に一回この公道をサーキットにかえてレースが開催される。何人たりとも事前テストはできない。この頃コースの一部が変更され、各社ともその攻略法に悩んでいた。徹底したシミュレーション実験から、ル・マンのサーキットを走るためだけに必要な車の性能を明確化し、不要な贅肉はそぎ落とした。まさにル・マンを走るために開発された車だった。このサーキットに適合させるための、ブレーキ性能、空力ダウンフォース、エンジン性能が設計された。

すべての SPEC は戦略的に作りこまれた。そして、ドライバーのモデルを用い、このサーキットを最も早く24時間走り続けるための運転のし方がコンピュータではじき出された。スピードが早いだけがいいのではない。ブレーキでの熱の発生のさせ方を管理し24時間壊れないようにしないとならないし、エネルギー節約と早さのベストバランス点をみつけ、少ない給油回数、少ないタイヤ交換で、ピットインのロスタイムを減らさねばならない。最善の方法がコンピュータ実験され、その結果がドライバーに指示された。

最初は半信半疑だったプロドライバーも、国内での模擬テストで、シミュレーションの正しさを付きつけられ、一番良い走り方を全ドライバーが共有化できた。必勝パターンをデータ化した。

②1991年 ル・マン開戦

最高の戦略が決まったあと、車を仕上げるまでの時間余裕はなかった。ル・マンに送る車はヨーロッパで組み立てたが、車両完成はル・マン本番の直前だった。その最終仕様車をテストする場所も時間もなかった。最高車速3 50km／hにもなるこの車のテストには長い直線路が必要だった。急遽、イギリスのとある空港に飛び込みで掛け合い、滑走路を占有させてもらい最終テストは無事完遂した。

そしてル・マンが始まった。787Bからはリアルタイムで、ドライバ操作とメカの生データ信号が通信システムでピットへ送信された。ピットでは、必勝パターンのデータと適合しているかどうかをマネジメントし、ずれがある場合、リアルタイムで改善指示が飛んだ。

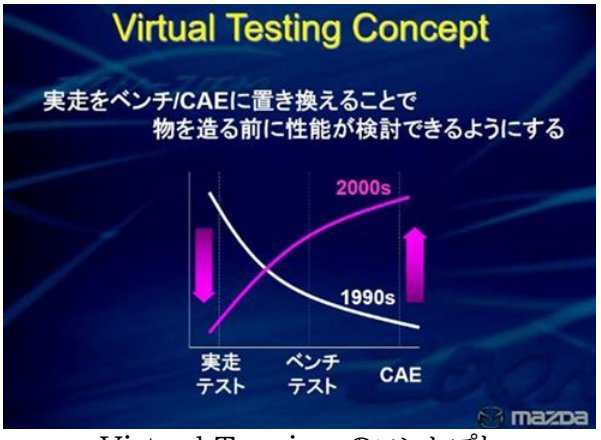
優勝した年、マツダは世界中でだれよりも、ル・マンのサーキットと、その攻略法を理解していた。そしてその戦略をチームの全員が共有していた。最高の技術と最高の戦略でル・マンを制した。24時間で、1周13．6kmのサーキットを実に362周、平均時速205．133km／h。これは前年度優勝したジャガーを上回るものだった。

＜＜＜＜ 以上

ここに書かれている「シミュレーション技術」こそ、当時の技術研究所を始めとするエンジニアが開発したクルマ一台モデルによる MBD 技術で、これを駆使して戦略を立て、優れたレースチームがこれを踏襲した結果、優勝という結果に結びついたのである。驚くべきは、当時の技術、計算リソースでクルマ一台モデルによるシミュレーションを作成していたことと、それを成果に結び付けていたことある。

5. MDI プロジェクト時代（1996-2003）

1996 に MDI（Mazda Digital Innovation）Project が開始されました。このプロジェクトは、開発効率の大幅な向上を目的に、デジタル技術を活用しようとするものでした。CAD ソフトの汎用化などいくつかのプロジェクトがありましたが、その一つに実研革新という領域があり、Virtual Testing というコンセプトの下で進められていました。これまで実機の実走テストでしか評価できていなかった性能を、ベンチテストへ、さらには CAE 評価への置き換えを可能とすべく、最新の実験計測装置や CAE ソフトの導入が行われました。この活動により、テストコースで実走評価をメインにしていた車両の耐久強度性能やロードNVH 性能などの一部が、ベンチで評価することが可能となりました。また、ベンチでロバストな計測が行えるようになったことで、CAE 結果との整合取りが容易となり、CAEの予測精度も格段に向上しました。



Virtual Teasing のコンセプト

6. Ford（Ford Motor Company）からの CAE 技術の導入（1996-2008）

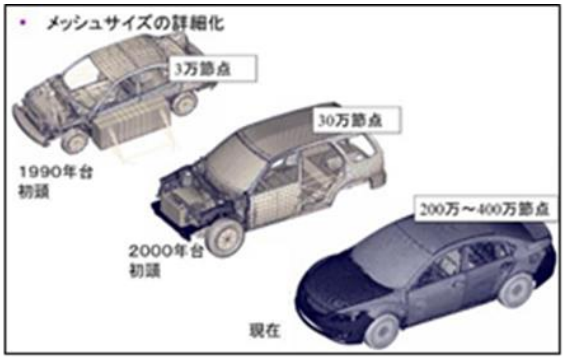
上記の MDI 開始とタイミング同じく、1996年に Ford がマツダの株式の33.4％を取得し、マツダは Ford グループの一員となりました。同時に、Ford の様々な情報がマツダに対して公開されるようになり、Ford の持つ高い CAE 技術を学び、導入することが可能となりました。1990年代の Ford の CAE 技術は質/量とも世界一で、スーパーコンピュータも世界一の容量を確保していました。また、Ford の CAE エンジニアは、世界中から集まっており、その数は約900人で、半数は博士号を持った研究者でした（当時のマツダの CAE 関係者は約100人で、博士号保持者は1人だった）。マツダ社員もFord のイントラネットが閲覧可能となり、その中にあるCAE 標準や解析手順を見ることができるようになりました。当時、私は耐久強度や NVH の CAE を担当していましたが、解析モデル作成から解析実施、結果評価に至るまで詳細なプロセスが文書化されていることや、耐久強度における寿命評価やNVH における音圧評価までが CAE で予測可能であることに衝撃を受けました。

1997年には、マツダの CAE エンジニア数名が Ford を視察するために、アメリカの R&D 拠点であったミシガン州の Dearborn 市に赴きレクチャーを受けました。それ以降、Ford との共通車台の開発も兼ねて、毎年数人のエンジニアが渡米し、Ford の CAE 技術を吸収しました。それらの技術を、次々に車種開発適用し、マツダの CAE技術は一気に世界レベルに追いついていきました。現地で学ぶ以外でも、定期的なテレビ会議で技術交流を行い、Ford はマツダの CAE エンジニアのスキルアップにも大きく貢献してくれました。

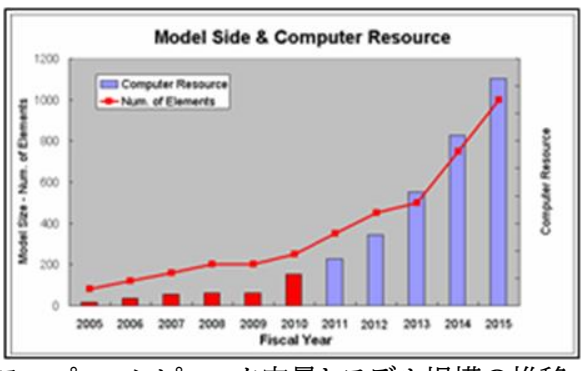
また、技術だけでなく、量産開発における CAE のプロセスや CAE ソフトのライセンス、計算資源なども共有しました。元々Ford グループのソフトライセンス数はマツダより桁違いに多く、Ford 価格はマツダ購入価格のおおよそ1/3の割安で購入されていた。この価格でマツダは購入できるようになるという経営的なメリットも発生しました。プロセスにおいても、Ford はとても洗練されたプロセスを持っていたが、スピードにおいてマツダが勝っており、この点はマツダが貢献できる数少ないポイントでした。

7. SKYACTIV 以降（2008-現在）

Ford グループを離れて以降も MDI2 プロジェクトなどを通じて、マツダの CAE は大きく発展していきました。特に PT 領域におけるSKYACTIV エンジンの開発が顕著な事例ですが、これに関してはマツダ技報など多くの文献が出ているので、ここでは割愛します。車両領域で言えば、衝突解析領域の発展が顕著であり、下図のように解析モデルの詳細化や計算機能力の増強と相まって、開発の効率化に大きく貢献しました（データは2015年時点）。



衝突モデルの詳細化



スーパーコンピュータ容量とモデル規模の推移

8. CAE から MBD へ

SKYACTIV の開発を通じて、パワートレイン、車両系とも CAE 技術は大きく発展しました。また、CAE の活用は開発領域にとどまらず、生産・製造部門にも広がり始めました。しかし、それぞれが個々に発展していったため、領域毎の進度にばらつきがあることや、ツールの導入やリソースの活用などにダブりなど無駄が発生していました。さらに、今後の電動化を見据えた場合、パワートレインと車両を別々に開発するのではなく、制御も含めたクルマ一台モデルで開発を行う必要が出てきました。そこで、2018年にパワートレインと車両系の CAE を統合した MBD 革新部が立ち上がりました（その後、制御系も加わる）。この部門の役割は、①企画段階から製造に渡る一気通貫した CAE プロセスを考案やクルマ一台モデルに準ずる CAE 技術の開発、②生産・製造部門やサプライヤとの共創活動のリード、③社内の MBD に関わるツールやリソースなどの集約、など MBD を用いた開発の革新を担っています。

現在、MBD 革新部では、“より「深く」、より「広く」、より「早く」”の方針を掲げて、日々活動しています。その内容を、少し詳しく述べます。

◆より「深く」

これまで培ってきた CAE の技術をさらに突き詰める、またはその技術を応用して電駆など新しい領域に活用していくことを目指します。

例えば、欧州や米国などでますます厳しくなる環境規制に対応するため、従来別々に行ってきた燃焼系の解析と後処理の解析を統合して行う MBD 技術を開発し、相互作用も活用して環境負荷低減の検討を可能にします。また、SKYACTIV の内燃機関の解析で磨いてきた流体系の MBD 技術を、EV の電池の温度管理や熱暴走の解析に応用して、早期に解析技術を創り上げます。

◆より「広く」

ここでの「広く」の意味は、2つの方向での広がりを意味します。一つは、これまでのようにパワートレイン/車両/制御を個々で検討するのではなく、全てを統合したクルマ一台モデルを用いて、リアルワールドでの振る舞いを検討できるモデル、解析技術の開発と適用を実現すること。もう一つは、社内の関連部門だけでなく、マツダの自動車開発に協力いただいてるサプライヤ殿の MBD 活動や共同研究を行っている大学や研究機関との共創という形での領域の広がりである。例えば、前者では、生産部門の塗装工場での粉

塵飛散の問題を設備自体をモデル化し、流体解析を用いて粉塵飛散のシミュレーションを実施することで改善案を検討するなどし、後者では、特に広島に拠点を置くサプライヤ殿と、解析モデルの流通を行ったり、MBD の技術サポートを行うなどしている。

◆より「早く」

ここでの「早く」には、“Fast”と“Early”の 2つの意味を込めている。すなわち、より高速に、より効率的に解析活動を行うことと、開発の早い段階で物事を決める Front Loading の2つの意味である。前者に関しては、MBD と親和性の高いAI を活用したり、最適化の技術を活用した自動化などに取り組んでいる。後者に関しては、開発初期の形状がまだ決まっていない段階（車形や諸元、大まかなレイアウトのみ決定）で扱える粒度の粗いモデルの開発とそれを用いた生存空間の探索や性能間の背反見える化などが行える MBD 技術の開発や適用を実施している。

9. おわりに

今回、「CAE から MBD へ」というテーマで、マツダの CAE/MBD の進化をテーマに書き進めてきました。この領域は、これまでも急速に進化してきましたが、業界は100年に1度の変革期を迎えており、電動化・自動化など、対応すべき課題は大幅に増えています。制御や AI など、新しい技術を取り入れながら、これまで以上のスピードでの進化を果たさねばならないと改めて認識している今日この頃です。

■参考文献

[1] 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発：マツダ技報 第 31 号（2013）
[2] 自動車技術会誌 2003 年 9 月号 技術の窓

（2024年7月23日原稿受領：SICニュースレターVol.6.8に掲載）

Ⅱ 寄稿

寄稿1　デジタル社会を豊かにするエコシステムのあり方について

独立行政法人情報処理推進機構
デジタルアーキテクチャ・デザインセンター　特命担当部長　尾山壯一氏

はじめに

情報処理推進機構（IPA）にデジタルアーキテクチャ・デザインセンター（DADC） が2020年5月に設置されて4年が経過した。筆者は、民間企業に勤務している身で、2023年4月に部分出向という形でIPAに受け入れていただき、DADCに所属することになった。出向後間もなくの2023年4月に G7 が開催され、西村康稔経済産業大臣（当時）から「ウラノス・エコシステム」という概念が提唱された。「ウラノス・エコシステム」は IPA が推進することとなり、10月に DADC 内に「ウラノス・エコシステム設立室」という小規模な組織が立ちあがり、室長を拝命した。名前から想像されるようにこの組織は時限立法的な組織であり、臨機応変に変わっていくし、変えねばならないという使命感を持って臨んでいる。

この論考では、今日の経営を取り巻く概況を俯瞰したうえで来るべきデジタル社会はどのようなものかを考察し、望ましいエコシステムの姿を検討する。

なお、次に述べる二つの理由から、本稿では「ウラノス・エコシステム」そのものについては、あえて記述しないこととしたい。理由の第一は、ウラノス・エコシステムについては、産学官の各分野において様々なご意見、ご期待があり、個人ごとにも幅広く多様なご意見がある。中には、トレードオフの関係にあり、かついずれも正しいということもしばしばある状況である。議論百出の現時点で「ウラノス・エコシステムとは」ということを総括して独断的に表現することはできないし、誠実さに欠けるのではないかと考えた次第である。第二の理由は、「ウラノス・エコシステム」についてはそれをリードする経済産業省、情報処理推進機構の公式情報がそれぞれのホームページに適宜発表、改訂されているので、筆者がここでそれをなぞって文章化してもSICニュースレターの読者の方々にとっては読む価値が少ないと考えたからである。むしろ、「デジタル社会におけるエコシステムがいかにあるべきか、それによるメリットやリスクは何があるか」という一般命題について、業務に携わっている経験から筆者が日頃考えていることをお示しし、世界をリードする民主導のエコシステムの構築・推進の一助になれば、と思う次第である。

また、業種横断、国家横断でのデータ連携は、欧州が早くから取り組んでおり、GAIA-Xの名のもとに相当数のユースケースが既にあり、外交や貿易の観点からも重要な取組である。

現状認識

今年1月に米国出張の機会があり、早めに渡米し CES（CES® is the most powerful tech event in the world — the proving ground for breakthrough technologies and global innovators.）に立ち寄った。CES は16年前まで出向元企業の仕事で定点観測した経験があり、時代を経たかつての CES との比較を述べたい。

5点の気づきがあった。まず、第1の気づきは、GAFAM の存在感がかつてに比べ圧倒的になくなった。実は、IT 企業に次世代 AI の方向性発表を期待していたので、肩透かしを食った。AI はむしろあらゆるものに搭載される普及期を迎えていることを痛感した。第2に金融関係も目立たなかった。Fintech 関連の展示が壁に沿って並んでいるのを見かけた程度だっ

た。第3は、メディアが会場にほとんどいなくなった。代わりに Youtuber が取材していた。第4には、CES の目玉であった家電関連展示と入れ替わる形で、自動車部品関連の展示が半数くらいを占めており、自動車関連産業の業界・市場の構造的変化に期待する新興企業と老舗企業がビジネスチャンスをうかがってビジネスパートナーを求める活気を感じた。第5に未来を予見するような大きな目玉のコンセプトがみられなかったことだ。

IT と金融とメディアは、米国の代表的産業分野であり、この主要3分野に存在感を感じないということは、大きな違和感に見舞われた。アメリカ帝国の陰りというと大げさかもしれないが、偽らざる実感であった。

CES での見聞を総合してみて、多くの企業が次の大きな目標や時代を画するコンセプトに象徴される潜在市場を失って、他の企業や顧客と足元でコラボレーションすることで身近にイノベーションを起こし、生き残りを図る時代に変わっている潮目の変化を強く感じた。これは、潜在巨大市場を作り出す、これまでアメリカが得意としてきた巨大投資ができなくなってきていることによるものではないだろうか。

視野を世界に広げると、金利上昇と金本位制への移行によるグローバルマネーサプライの縮小が起きており、これまでの異次元金融緩和による巨大投資時代から、ゆっくり成長する多極化時代に移行しはじめていると想定される。それにともない先進国がグローバルに通用するビッグコンセプトから、リージョナルに分散する、多様性と横の連携へと変化しているように考えられる。並行してグローバルサウスが台頭しつつあり、上記の傾向に拍車がかかるだろう。横のつながりで創発的な知恵出しが必要であり、まさにエコシステムが必要な時代になったのではないだろうか。

来るべきデジタル社会とそれを支えるエコシステムとコモンズの概念

来るべきデジタル社会は、どのような社会であろうか。

内閣府のホームページに Society 5.0 として描かれており、Society 5.0 で必要とされることとして、①サイバー空間とフィジカル空間の融合による持続可能で強靭な社会への変革、②新たな社会を設計し、価値創造の源泉となる知の創造、③新たな社会を支える人材の育成の3点があげられている。

まず、サイバー空間とフィジカル空間の融合（サイバー・フィジカル空間：CPS）ということだが、社会課題を解決し、社会の持続可能性や強靭性を高めることに資するものというと、その規模はとてつもなく大きくなるはずである。社会全体をサイバー空間に取りこむ仕掛けに育て上げることができる質・量とも豊かな拡張性が求められる。

サイバー空間とフィジカル空間を結びつけるものは「データ」に他ならない。フィジカル空間の資産や現象をセンサーなどでデジタルデータに表現し、サイバー空間にインプットして、必要な加工や計算、場合によっては AI などによる意思決定を通して、フィジカル空間の機械やディスプレイなどにデータとして返すことで、両空間の融合が図られる。これを社会規模で実装しようとするとデータモデルが統一されていないとならないし、それを組織の違いを超えて流通させる仕掛けが必要になる。データ流通機能、アプリケーション連携機能、それを支えるトラスト機能などの IT アーキテクチャを設計する必要がある。

また、こうした仕掛けを安全・安心に運用するためには、データ主権やデジタル完結によるデータの保護や正確さの担保が必要であり、法律や手続、組織等の社会制度もそれに合わせたものにする必要がある。こうした制度面のアーキテクチャはこれまでの企業システムで言うと、エンタプライズアーキテクチャ（EA アーキテクチャ）に相当するものである。

大規模な CPS を実現するためには、産学官の分野を超えた取り組みが必要であろう。

協創・共栄する取り組みを継続的に進めるために「エコシステム」が必要であるといわれている。ロン・アドナ―によれば、「エコシステムとは、パートナー同士が協力しあい、エンドユーザーに価値提案を行う構造のこと」と定義されており、「価値提案」を軸として協働と相互依存関係が重要であるとしている(1)。モノからコトへと価値が推移しており、価値の変化が激しいなか、固定的な価値提供では変化に対応しきれず、エコシステムでダイナミックに提供価値を変化させ続ける必要がある。
さらに、Society5.0で掲げる大きなスコープで考えると、業界や国境まで超えた様々な組織がエコシステムに参加することが必要であると考えられる。また、そのような巨大なエコシステムに求められる構造は、中央集権的なものではなく、自律分散的なものであるべきではないだろうか。
CPS はデータモデルなど共通要素を必要とするものの、エコシステム自体は一様ではなく、エコシステム・オブ・エコシスムズのような豊かな多様性を体現する必要があると考えられる。
　また、こうした横の連携にもとめられるリーダーシップは、従来のような上に立って牽引する形のリーダーシップではなく、より有機的で適応的なリーダーシップになるであろうと考えられ、例えば、量子的リーダーシップ(2)がその候補となるのではなかろうか。さらに、この大規模な取組は、多数の企業とアカデミアと政府の連携で築き上げ、運営していく必要がある。それを経済的かつ継続的に進めていくために必要なのが、コモンズの概念であるといえよう。

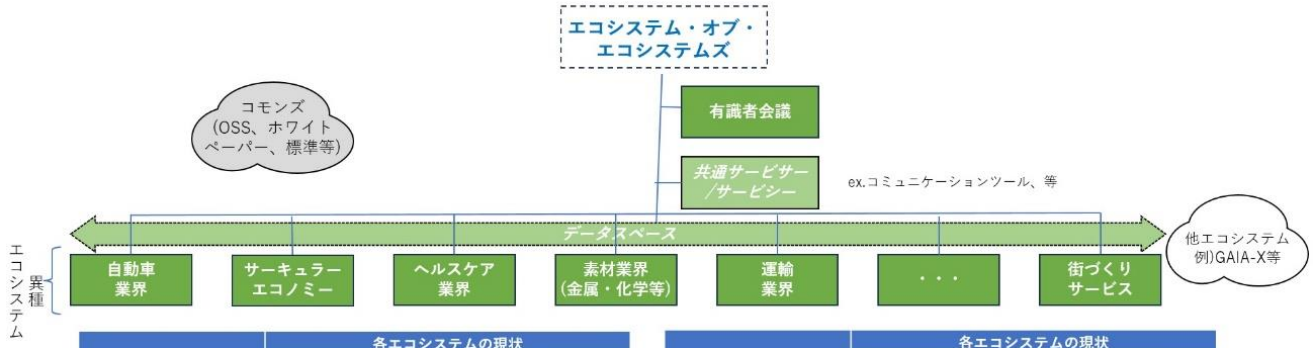
コモンズの育成と範囲の経済の活用による社会全体の最適化、強靭化

　コモンズは、日本では入会地と言われ、共用地のこととされている。江戸時代の里山や今日の漁場などもコモンズの一例である。ローレンス・レッシグは著書『コモンズ』(3)の中で、①公道、②公園や浜辺、③アインシュタインの相対性理論、④パブリックドメインにある著作物、をコモンズの例として挙げている。

　サイバー空間のコモンズとしてわかりやすい例が地図であろう。今日、IT 業者や地図業者が地図アプリを提供しているが、昔は地図と言えば紙に書かれており、地図帳のような厚手のものになっていた。また、特定の建物や自宅をはがき等で案内する時には、各々が最寄りの駅からの案内図を都度手書きなどする手間をかけていた。今日では、スマートフォンなどに搭載された地図アプリで目的地の位置を入力して、招待客とシェアすれば、ナビゲーションまでしてくれるようになった。だれでも利用でき、移動手段が車でも徒歩でも共通に利用できる意味で、コモンズと言える。時間とコストが大幅に削減できている。
　地図アプリとその上に共有される情報のように、それまで個別に調査、蓄積してきた情報を他の組織や人と共有することで、情報化とそのメンテナンスにかかる時間・コストを共同で負担することができ、社会全体で見た時間とコストの削減ができる。コモンズの候補としては、プラットフォーム、法、データモデル、開発方法論やツール類、共通的なサービス(例えばカタログや検索サービス)などがある。
　筆者がコモンズとして推したいものに、日本の強みと言われる「現場力」のコモンズ化と範囲の経済の応用がある。世界的に競争力の高い現場の「技」があるといわれるが、これまでは所属組織の「内部」にロックインされて既存のバリューチェインでしか活用が図られなかったのであるが、メッシュ状のいわばバリューネットワークで、広く拡販・活用できているようになるだろう。組織に内部化された「技」を「範囲の経済」の考え方で、モジュール化したサービスパッケージにして、例えば「技」サービスカタログから検索できるようにして、海外からでも「契約」サービスを利用してダイナミックなバリューネットワークで取引できるようになれば、日本

の伝統的な強みを国内のみならず、国際的にも活用でき、中小企業も含めた産業競争力の強化、成長につながると考えている。

下図に、ヘテロジニアスなエコシステムを包含するエコシステムの全体像とその管理フレームワークの例（制度と技術の両面）のイメージを上げる。管理フレームワークの構成や活用方法については、今後の検討が必要と考えている。



制度フレームワーク	各エコシステムの現状		
	自動車業界	素材業界	・・・
法律(国内・国際)	XXX法	YYY法	・・・
組織・団体	JAMA/JAPIA他	ZZZ	・・・
認証機関	監査法人X	監査法人Y	・・・
運営スキーム	QQQ	RRR	・・・
インセンティブ	SSS	TTT	・・・
規制等	UUU	VVV	・・・

技術フレームワーク	各エコシステムの現状		
	自動車業界	素材業界	・・・
認証機関	監査法人X	監査法人Y	・・・
データスペース	MMM	PPP	・・・
トラスト	eIDAS準拠等	LLL	・・・
データ共有	共有不可	共有可	・・・
データ蓄積	無	有	・・・
他コミュニティとの共有	一部有	当面無	・・・
SDK・テスト環境	コモンズA利用	コモンズB利用	・・・

CPS への AI 普及リスクの想定　－　巨大サービス企業の出現と複雑系による脅威の懸念

これは将来のリスクについての考察である。

ひとつめは、巨大 AI サービス企業が出現して中央集権的な CPS が出現し、SF で描かれるようなディストピアになるリスクが想定される。適切なガバナンスを確立し、安全を確保するような制度を社会に組み込む取組が必要だと考えている。

また、ふたつめとして、将来の CPS において、モノや機械が自分たちで外界を識別・判断して自律的に動くようになると、CPS 自体が複雑系化して、個々の要素が必ずしも持たない性質を全体が獲得するようなことが考えられる。こうした複雑系の設計や制御についてはまだ十分解明されていないので、今後の研究開発が望まれる。

まとめ

DADC では社会実装を通してアーキテクチャを設計するという方針でプロジェクトとアーキテクチャ設計を並行して進めている。

直近の成果としては、EV のカーボンフットプリントを算出するユースケースを開発し、運用を始めた。欧州の Catena-X との相互接続実証を実現すべく、推進中である。
さらに、SICセンター長の浦川伸一氏が経団連にもお声掛けいただきつつ、立ち上げ中のウラノス・エコシステム推進センター(民主導)との連携も始めている。
　そのような状況の中で、筆者の立ち位置は、ウラノス・エコシステムの設立を進めつつ、海外の取組を見聞したうえで、Society5.0 を実現するという日本がもつべきアーキテクチャを設計していくことを担っており、その立ち位置で日々業務をしながら考えていることをこの原稿を書かせていただいた。ここに書いたことは筆者の個人的な考えであり、DADC の取組そのものを表現しているわけではないことをお断りして、筆をおかせていただきたい。

参考文献

(1) ロン・アドナー(2022)『エコシステム・ディスラプション』(中川功一監訳)　東洋経済
(2) Danah Zohar(2022)『Twelve Principles of Quantum Leadership』
　(PDF) Twelve Principles of Quantum Leadership (researchgate.net)
(3)ローレンス・レッシグ(2002)『コモンズ』(山形浩生訳)　翔泳社

筆者プロフィール

尾山　壮一(おやま　そういち)氏
1983年4月　株式会社日立製作所入社　ソフトウェア工場配属
1990年9月　スタンフォード大学客員研究員(1年間)
2023年4月　情報処理推進機構　デジタルアーキテクチャ・デザインセンター
　　特命担当部長(部分出向)

(2024年5月12日原稿受領:SICニュースレターVol.6.6に掲載)

寄稿2　日本の物流におけるJR貨物の取り組みと課題

日本貨物鉄道株式会社
取締役兼執行役員　事業開発本部長　野村　康郎氏

1．はじめに

2024年4月より「働き方改革を推進するための関係法律の整備に関する法律」がトラックドライバーにも適用が開始され、時間外労働時間の上限が年間960時間に制限される、いわゆるトラックドライバー2024年問題がいよいよ本格化した。このままでは、2030年にはトラックで輸送されてきた貨物34％が運べなくなるともいわれている。

また、地球温暖化による甚大な自然災害が増える中、温暖化ガスCO2の発生量削減への取組みが世界的な共通課題となり、我が国においても2030年に2013年度比46％削減、2050年にはカーボンニュートラル実現が宣言された。我が国のCO2排出量の18％を占める運輸部門についても、排出量削減に向けた取り組みが求められている。

貨物鉄道輸送は、ひとつの列車で最大10トントラック130台分の貨物を一人の運転士で運ぶことが出来る。摩擦抵抗の少ないレールを走る電気機関車はエネルギーロスが少なく、トラックに比べてCO2の排出量はトンキロ当たり1／10である。

日本で唯一、貨物鉄道ネットワークを全国に有するJR貨物は、トラックドライバー不足による国内物流の停滞、物流における地球温暖化防止という、共に日本にとって重要な社会課題を解決する使命を担っている。

2．JR貨物の会社概要

日本貨物鉄道株式会社（JR貨物）は、国鉄分割・民営化により誕生したJR7社の一つであり、旅客会社6社の線路を走行し、北海道から九州までコンテナと専用貨車（車扱）による貨物輸送を行っている。一日当たりの列車走行距離を合計すれば、地球5周にも相当するが、それでも日本国内の物流量に対する比率は、トンベースで1％足らず、トンキロベースでも5％にも満たない（図1）。また、2023年に貨物鉄道開業150年という節目の年を迎え、長い歴史の中でそれぞれの時代のニーズに合わせ、様々な物資の輸送を担ってきた。宅配貨物をはじめとする積み合わせ貨物や食料工業品が近年輸送量が伸びている一方、紙・パルプや化学工業品は、在宅勤務やモバイル端末の拡大などによるペーパーレス化や中国経済の停滞による化学製品の輸出量の減少など、実態経済を反映したものとなってる（図2）。

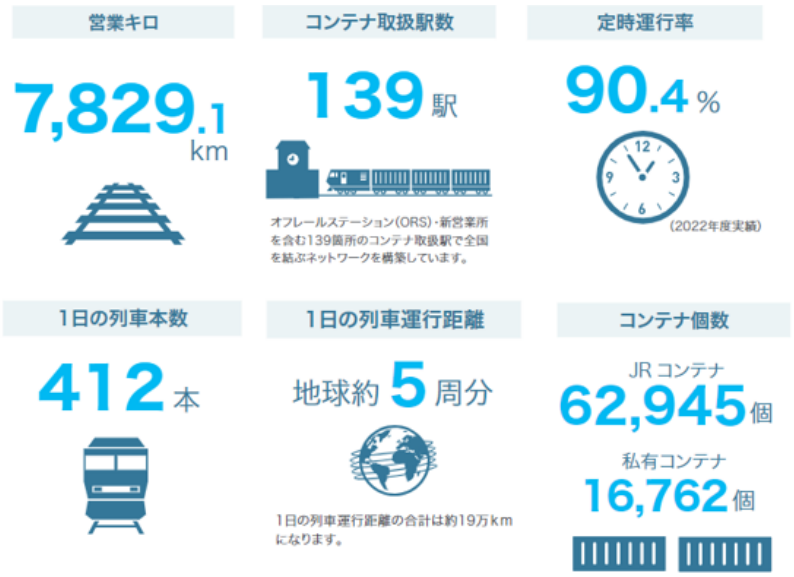
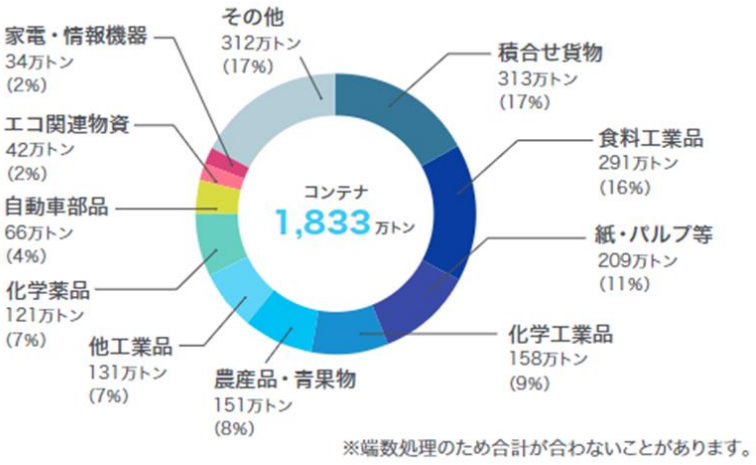


図1　鉄道事業の概要



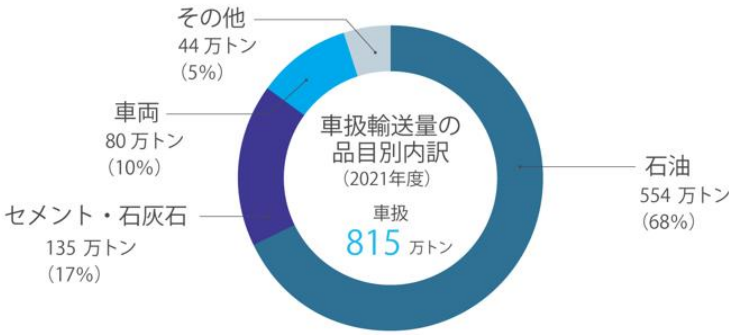


図2　鉄道輸送量品目別内訳

3.モーダルシフトへの取り組み

トラックによる幹線貨物輸送を、鉄道や船舶など、環境にやさしく大量輸送が可能な輸送モードに転換することをモーダルシフトという。モーダルシフトのメリットとして、トラックドライバー不足への対応、CO2 排出削減に加え、長距離輸送になるほど速達性やコストメリットが出てくる(図3)。鉄道コンテナの平均輸送距離が約900㎞となっていることからわかる様に、これまでは長距離輸送に強みを発揮し輸送サービスを展開してきたが、2024年問題を背景に、ドラックドライバーの労働時間規制により、一人のドライバーが一日で運べる距離が制限されることから、600㎞前後の中距離輸送でも利用実績が徐々に増えてきている。具体的な例を紹介すると、アサヒビール(株)様とキリンビール(株)様が共同で大阪から金沢まで共同輸送を開始されたり、アサヒビール(株)様単独で大阪から四国新居浜まで利用されたりしている(図4)。特にライバル企業が共同輸送では手を組んでおり、業種を超えた共同輸送や積み合わせ(重くて容積の小さな貨物と軽くて大きな貨物の混載)にも発展させていきたいと考えている。

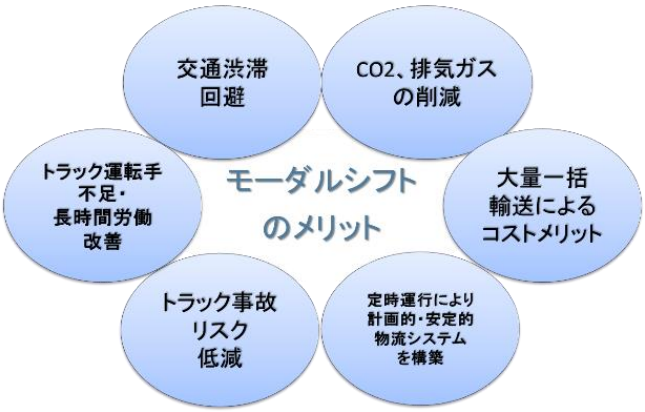


図3　モーダルシフトのメリット

図4　ビール会社のモーダルシフト事例

① 31フィートコンテナ輸送の拡充

31フィートコンテナは、トラック輸送において相当のシェアを占める10トントラックとほぼ同等の積載容量であることから、お客様の輸送単位や荷役作業を大きく変更することなく利用ができ、トラック輸送とのモーダルコンビネーションに取り組みやすいコンテナである（図5）。そのため、お客様からの引き合いも多く、コンテナの増備等が必要な状況となっている。ただし、12フィートコンテナと違い、まだ31フィートコンテナの数も少なく、コンテナ自体の価格も高額なことから、稼働率の最大化を図る必要がある。そのため、31フィートコンテナの往路と復路をそれぞれ業種の異なる企業間でマッチングさせ、ラウンド運用を行う事例や、複数社の製品を1コンテナに混載することで積載効率を高めた事例など、企業や業界の壁を超えた連携を進めている。また、政府では物流危機への対応策を検討する関係閣僚会議を開催し、物流を支える環境整備に向けた「物流革新に向けた政策パッケージ」を2023年6月に策定・公表した。また、同10月には、賃上げや人材確保等、早期に具体的な成果が得られるよう可及的速やかに各種施策に着手するとともに、2030年度の輸送力不足の解消に向け可能な施策の前倒しを図るべく、具体的な取組みを盛り込んだ「物流革新緊急パッケージ」を策定した。この「物流革新緊急パッケージ」においては、31フィートコンテナの利用拡大が提言されており、その方針に対応すべく、札幌・仙台・東京・名古屋・大阪・福岡といった6大都市各駅間の輸送ルートの拡充を図っていくほか、顧客やトラック事業者からなるコンソーシアム（共同企業体）を構築、政府の支援を得ながら、31フィートコンテナの増備や、貨車、トラックへのコンテナの積み卸しに必要な大型荷役機械の導入を拡大していく計画である。

図 5.3 1フィートコンテナと荷役機

② 専用列車「ブロックトレイン」の運行

往復で利用いただく専用列車を「ブロックトレイン」と呼び、宅配貨物を中心に利用が拡大、現在10列車が運行中である（図6）。2004年に運行を開始した佐川急便（株）様専用列車「スーパーレールカーゴ」は日本初の電車型貨物列車で、旅客列車と同様、複数の車両に駆動装置を分散配置した専用車両で、加減速に優れ、最高時速130Kmで東京と大阪間を毎日一往復している。

図6　ブロックトレインの種類

③ 積替えステーションによる一般トラックの鉄道利用促進

従来、鉄道コンテナ輸送では、貨物駅と顧客先間の道路輸送はコンテナ固定装置のついた専用トラックで行っている。これを、一般トラックで貨物駅へ荷物を持ち込み、コンテナに積替えを行うことができる「積替ステーション」の拡充を進めている（図7）。合わせて、手軽にパレットのレンタル・返却ができるレンタルパレットサービス「駅パレ」も進めている。「駅パレ」は、パレット利用に係る手間・コストの低減を図り、一般トラックとコンテナの積替えを容易にするだけでなく、集荷・配達含めた一貫パレチゼーション輸送の促進を目指している。

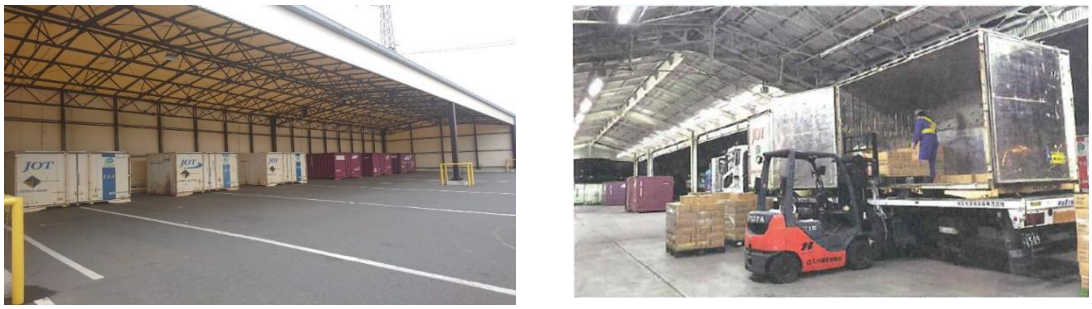


図7　積替えステーション（東京貨物ターミナル駅と熊本駅）

4．カーボンニュートラルへの取り組み

地球温暖化防止は人類にとっても解決すべき重要の課題であるが、JR貨物にとっても近年無視できない経営課題となっている。2018年7月豪雨では山陽線で約100日間の運休が発

生しているほか、2019年10月の台風19号、2020年7月の九州豪雨、2021年8月の西日本豪雨と、2018年以降、ほぼ毎年全国のどこかで甚大な自然災害が発生している（表1）。線路をはじめとする鉄道インフラ施設が長期間利用できない事態となり、貨物列車の運休による減収減益、それに伴う鉄道貨物輸送への信用の低下、顧客の利用見合わせなど、経営への影響は相当なものがある。地球温室効果ガス削減のために鉄道利用を促進すべき時に、温暖化が原因と考えられる異常気象による災害により、貨物鉄道輸送が利用できなくなる事態が発生している現実はやるせないものがある。一方、企業として信頼回復、鉄道貨物輸送復活をかけたBCP対策にも取り組んでおり、不通区間の輸送を船舶によりカバーすべく、内航船（通称499船）（図8）の共同保有や、迂回ルートが無く、災害発生リスクの高い山陽線では、トラック及び船舶での代行輸送体制、鉄道輸送の結節点として新南陽駅の機能整備を進めている。

表１　自然災害の影響事例

災害	平成30年 ７月豪雨	令和元年 東日本台風	令和３年 前線による大雨
発生～運転再開	2018.7.5～ 2018.10.13	2019.10.12～ 2019.10.29	2021.8.12～ 2021.9.5
影響日数	100日間	17日間	24日間
運休本数	4,421本	1,196本	900本
被害状況	山陽線・伯備線・予讃線不通、設備冠水 等	東北線・中央線・武蔵野線・しなの鉄道北しなの線不通、設備冠水 等	山陽線・中央線不通

図８　499船（2024年7月竣工予定）

JR貨物とそのグループは2050年カーボンニュートラルに貢献すべく、2つの視点で「環境先進企業」を目指している。1つ目の視点は「自分たちの CO2 削減」である。次世代省エネ型車両の積極的な導入や、建物・設備における省エネ技術の導入及び電化の推進、DX 等による列車運転や駅構内作業の効率化等の施策を推進するほか、再生可能エネルギー電力の導入や、代替液体燃料の導入等の施策も推進し、2050年度の CO2 排出量実質ゼロを目

指す。2つ目の視点は「お客様の CO2 削減」である。従来、企業が温室効果ガスの削減目標を設定する場合、その事業者自らによる温室効果ガスの直接排出であるScope1、他社から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出であるScope2に加え、最近では、自社に関連するそれ以外の排出量であるScope3についても積極的に削減していく動きがある。Scope3には、調達物流における輸送・配送や、販売物流における輸送・配送の CO2 排出も含まれており、目に見える形での CO2 削減効果の明示やインセンティブの仕組み作りなど、グリーン社会の実現に向けた取り組みを進めていく。

5. 貨物鉄道輸送を支えるシステム

システムイノベーションセンター様に投稿の機会を頂いたので、日々の貨物列車運行を支えているシステムについても紹介したい（図9）。基幹システムである「FRENS」システムは、JR 旅客会社の「MARS（マルス）」システムと同様な機能を持ち、ダイヤ情報及び列車の諸元情報をもとに、全ての貨物列車の「輸送枠（座席）」を一日単位で作成している。この「輸送枠」に対して、Web システムの「IT-FRENS」から鉄道利用運送事業者が貨物の予約申し込みをコンテナ単位で行う。

予約日当日、鉄道利用運送事業者が顧客から集荷してきたコンテナをトラックで駅に持ち込み、入場ゲートに設置された端末に予約番号などを入力すると、予約した列車の入線ホームが示され、同時に「TRACE」システムを搭載するフォークリフトに作業指示が出される。「TRACE」システムは GPS、4G モバイル通信、IC タグリーダー、PC から構成されたシステムであり、コンテナに取り付けられた IC タグからコンテナ番号を読み取り、ホームに置いた時は緯度経度情報、貨車に積載した時は貨車の IC タグから貨車番号と積載位置情報を取得、時間とリフト番号、オペレーターID と共に、データベースに格納される。つまり、全てのコンテナの位置及び積載情報、作業履歴がリアルタイムで管理されている。機関車には「PLANETS」システムが搭載され、運転士へのナビゲーションを行うと共に、秒単位で GPS を使って列車の現在位置を発信している。そのため、顧客は利用運送事業者を通じて、現在貨物がどこにいるかが確認できる。駅に到着したコンテナは「TRACE」を搭載したフォークリフトが発駅と同様 IC タグ情報を読み取り、ホーム上に置いた位置や、配達するトラックが正しいかの照合、引き渡し時間、オペレーターID などの情報をデータベースに記録する。

蓄積されたフォークリフト作業のデータや鉄道利用運送事業者のトラックの入場、出場時間、顧客や貨物データは、JR貨物にとって有用な情報となり、これらに基づき列車ダイヤの最適化やフォークリフトオペレーターの勤務体制の見直し、長期滞留貨物の削減、空コンテナ在庫の需要に応じた最適分配などに貢献している。また、フォークリフトにはカメラが取り付けられており、全ての作業を記録した動画データは、安全かつ品質の高い荷役作業の実践、事故防止にも役立っている。

一方、日本は少子高齢化が進み、労働人口の減少が予測されており、24時間体制で勤務するフォークリフトオペレーターの確保は年々難しくなっている。そこで、ハード面ではフォークリフトの遠隔操縦、無人運転をメーカーと技術開発を進めている。ソフト面では、フォークリフトの作業効率を最大化すべく、現在最も無駄な作業となっているコンテナホーム上に仮置きしているコンテナ群から目的のコンテナを取り出すために、手前においてあるコンテナを退かす「掘り起こし」作業を最小化するために、駅へのコンテナ持ち込み、持ち出し時刻の予測データや列車時刻などをもとに、作業順序及び仮置き場所の最適化、フォークリフトの作業計画を管理するシステムを開発している。このコンテナハンドリングシステムと無人作業フォークリフトを組み合わせることにより、そう遠くない将来には貨物鉄道駅の荷役作業において、相当程度の自動化、少人化が可能になると見込んでいる。

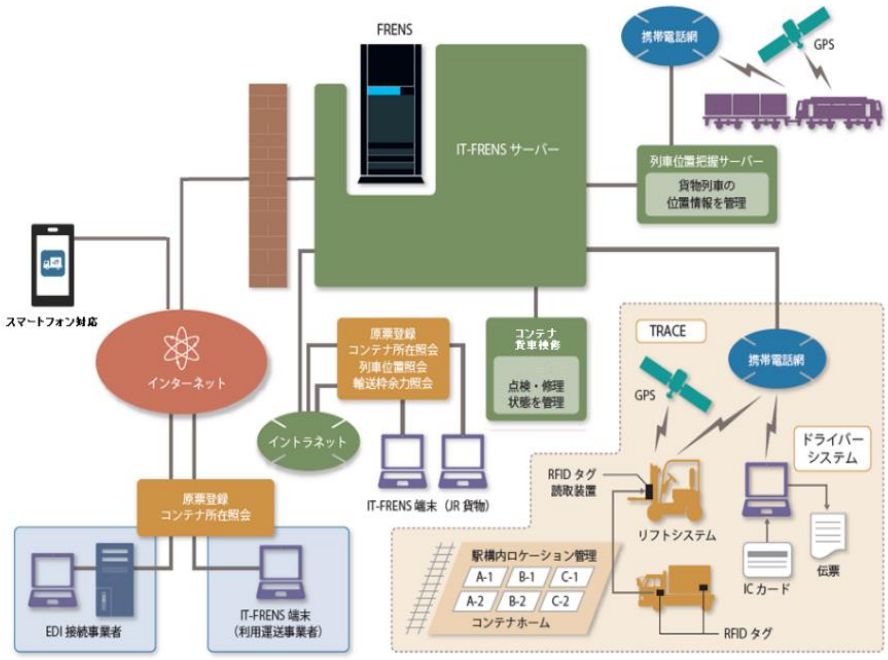


図9　貨物鉄道輸送を支えるシステムの構成

6. おわりに

北海道から四国、九州まで鉄道線路はトンネルを経由してつながっており、その鉄道ネットワークを利用して大量一貫輸送できる貨物鉄道輸送は、日本の労働力減少に伴うトラックドライバー不足や2024年問題、地球温暖化問題などの社会課題に対して、非常に有効な輸送モードである。しかしながら、自然災害に対する脆弱性から、キャリアとしての責務が十分果たせていない。

2024年1月に、自動運転システムの開発及び同システムを搭載した車両による幹線輸送サービス事業を目指すベンチャー企業、株式会社T2（注）に出資した。T2は2027年から東京～大阪間で自動運転トラックによる貨物輸送サービスを計画している。貨物鉄道と自動運転トラックで東京～大阪の幹線輸送を並行して担うことで、災害時の代行輸送手段の確保や、

貨物鉄道駅を結節点とした鉄道と自動運転トラックの連携輸送により、国内物流キャリアとしての役割を果たしていきたいと考えている。

（注） https://t2.auto/

筆者プロフィール

野村　康郎（のむら　やすお）氏
1983年3月　金沢大学工学部卒業
1983年4月　味の素ゼネラルフーヅ株式会社（現味の素AGF）入社
2003年6月　日本貨物鉄道株式会社（JR貨物）入社
2008年3月　明治大学大学院グローバルビジネス研究科卒業
2012年6月　JR貨物　情報システム部長
2017年6月　　同　　執行役員経営統括本部技術企画部長
2020年6月　　同　　業務創造推進部長
2021年6月　　同　　取締役兼執行役員　事業開発本部長
2024年6月　日本運輸倉庫株式会社　代表取締役社長　就任予定

（2024年5月23日原稿受領：SICニュースレターVul.6.7に掲載）

寄稿3　　欧州＆グローバル産業データ連携基盤の動向
～日本産業界への示唆～

ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会(RRI)
WG1 インダストリアルIoT推進統括 中島　一雄氏

はじめに

今年も日本は暑い夏に晒された。気候変動は日本だけでなく、世界中の生活やビジネスに大きな影響を与えている。加えて、地域の分断や高齢化の問題など、個社だけでは解決できないビジネス課題がこれまでにない規模で顕在化し、関連する規制も次々と生まれている。これらの課題解決に多くの関係者がともに取り組む必要性が認知され始めている。

一方、AI 技術の発展など課題解決のための技術的なイネーブラも生まれており、データドリブンな社会による課題解決やイノベーションの加速が進んでいる。本稿で取り上げるデータスペースの取り組みはそのための協調領域の活動ととらえることができる。本稿では主に欧州の例を紐解きながら、彼らのデジタルエコシステム形成の背景や工夫を共有する。これらの理解が日本のデジタルエコシステム構想の参考になることを期待する。

1. RRI の紹介

RRI は2015年、政府のロボット新戦略の実行主体として民間で組成された団体である。2024年5月時点で420社・団体の会員を擁し、製造業におけるビジネス変革やロボット利活用・イノベーションの推進など行っている。2016年には日独の政府間での連携協力に基づき独インダストリー4.0 との連携協力を開始している。それ以降、専門家会合の設置や共同での文書発行、講演の実施など顔の見える関係を築いてきた。こういった関係性の中での会話によりデータスペースに関してもより深い理解が可能となった。

2.製造業を取り巻く環境変化

欧州がデータスペースの取り組みを加速する背景には様々な要件が重なっているように見える。これらパズルのピースをいくつか取り上げる。

- モノの売り上げだけでは立ち行かない（サーキュラーエコノミー時代）[1, 2]
  サーキュラーエコノミーにおいては材料レベルのリサイクルだけでなく、一度作ったモノをできるだけ長く使う、他の用途に転用するなどが真剣に議論されている。大量消費からの脱却、使い続けるモデルへの転換が今後起きていく。これは製造業にとってはモノの売り上げが減ることを意味し、ビジネスとして売り上げを伸ばし存続していくためにはモノ売りだけでなく、モノに関連するサービスビジネスを増やしていくことが必要となってくる。つまりデータの利活用、またその基盤としてのデータスペースが必然として求められている。
- 欧州の危機感
  2018年にドイツから「B2C の世界でのデータ利活用は既に米中のプラットフォームジャイアントに抑えられてしまった。莫大な投資をして世界中でデータをかき集める仕組みを作っている。もはや同じレベルで投資できる国は欧州には存在しない。B2B の市場は守りたい。どうすれば良いのか、日本はどうするのか。」という問いかけを受けた。その後、

欧州は「データを集めない。データ主権に基づいた分散型のデータスペース」構想を編み出し、今に至っている。つまり、データスペースの動きは B2B の市場における米中への対抗策、とも考えられる。

- ビジネスエコシステムを考える[3]
  データスペースは欧州起点の概念だが、その構想には90年代から続くビジネスエコシステムに関する（特に）米国を中心とする過去の研究や実績をつぶさに検討した跡が読み取れる。ここには経営学の視点でのビジネスエコシステムの構想がなされている。多様な参画者による価値提供を実現する Multi Sided な構造、そして個社ではなく共同体としての運営などがそれにあたる。
- システムとしてのデータスペースと利用者側の Readiness のバランス（図1）
  前述のように欧州型データスペースは多様な参画者による価値提供を前提としているため、システム側は必要最小限の機能からなる「軽い」構造を指向しているように見える。一方でこれは利用者の企業の Readiness が整っていることを前提としている。つまり、社内のデータガバナンスが整っていることを求めるものである。では、欧州は本当に各企業の準備（Readiness）が整っているのか。実はここが欧州でも問題になっており、必ずしも当初の予定通りに進んでいるわけではない。今、欧州は企業の Readiness 向上に向けた取り組みを急ピッチで進めている。

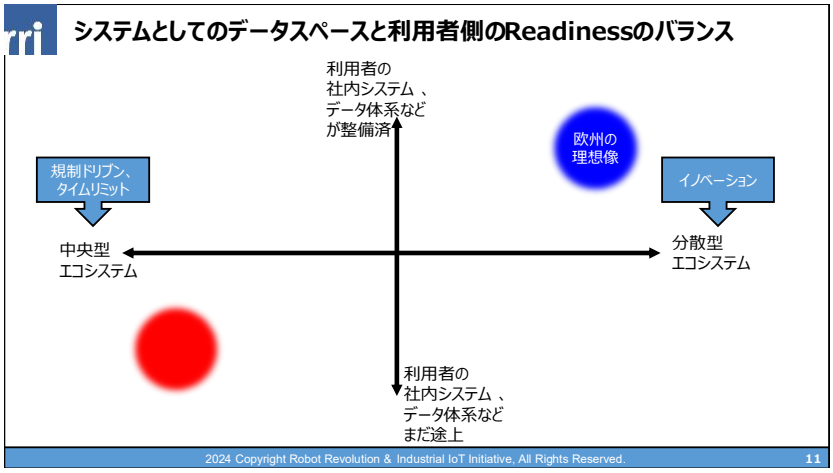


図1

3.Gaia-X、IDSA とデータ連携基盤のアーキテクチャー

ここではデータスペース入門として欧州の代表的な取り組みである Gaia-X や IDSA（International Data Spaces Association）の役割やキーとなる構造について触れる。

最初にデータスペースに関するよくある誤解について記しておく。英語で Data Space と耳にすると「データをためる場所」、「データを集める場所」と認識する方も多いと思うが、そうではない。データスペースは「データコミュニティの参加者が集う場所」と理解する方が正しいだろう。そこではデータの交換を行う提供者や利用者がお互いを確認したり、自分の欲しいデータを探したりといったデータ連携のために必要な機能を提供する場である。

欧州のデータスペース名称は末尾に -X がつくことが多く、どれがどのような役割を担っているか分かりにくい。これらの位置関係も理解が必要である。大きく3つのレイヤーに分かれていると考えるのが分かりやすい。最も下にはデータ連携の原則を決めている活動体（Gaia-X や IDSA など）が存在する（本稿では Trust に関する要件もここに含む）。この上にはドメイン毎のコミュニティ・場としてのデータスペースが存在する。代表的なものとして自動車業界の Catena-X やそれを包含した形の Manufacturing-X などがある。最上位にはアプリケーションやソリューションのレイヤーが位置する。ここは世界中の開発者・ベンダーに開かれている。例えば Catena-X 用のアプリを開発するために Catena-X の会員になる必要はない。ただし、Catena-X の認定を受ける必要がある。この図式は Apple Store のエコシステムによく似ている。世界中の開発者にアプリの開発を促し、モチベーションを与えているとも考えられる（図2）。

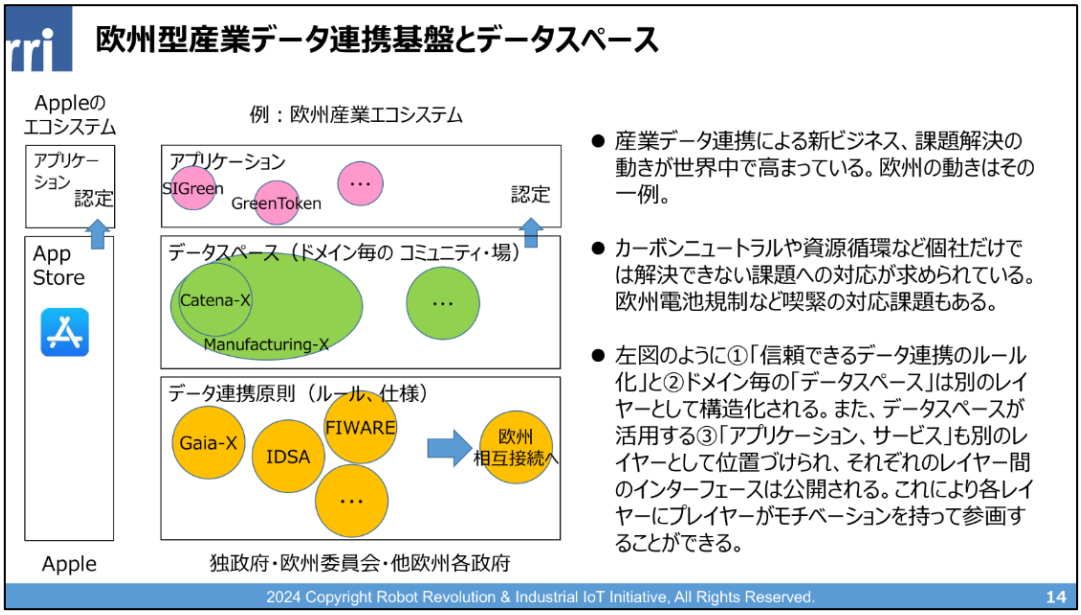


図2

Gaia-X は「データ連携の原則」を定めていると書いたが、それはどのようなものだろうか。図3には Gaia-X Federation services として Identity & Trust, Sovereign Data exchange, Federated Catalogue, Compliance が提示されている[4]。これらを規定することで、Data Space レイヤーにおいてデータの提供者・利用者間の信頼を確立する。

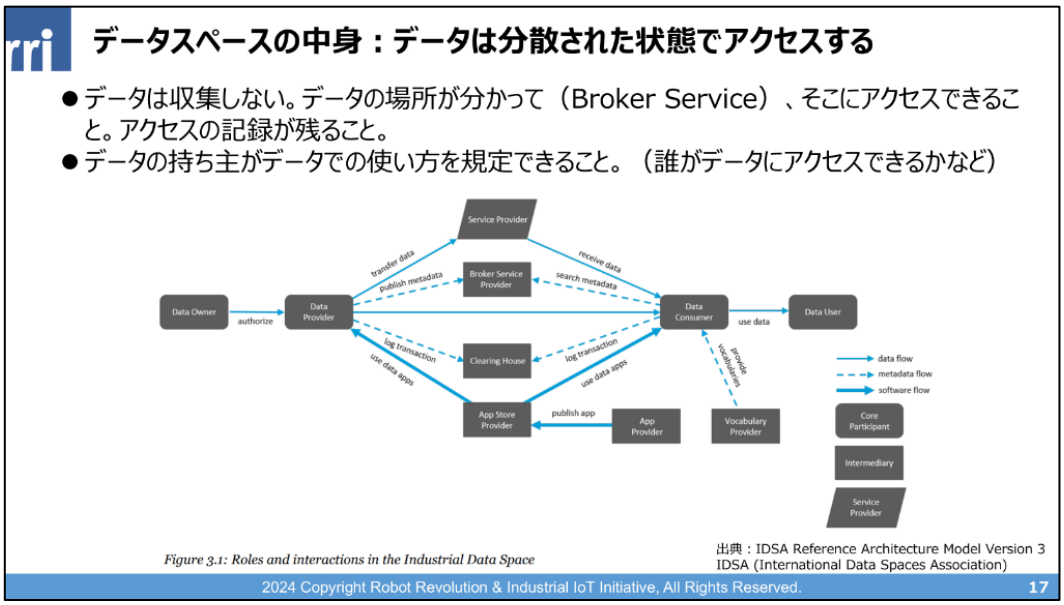


図3

IDSA では Reference Architecture[5]が概要をつかむ上での参考となる。図4ではデータの提供者、利用者以外にデータの所在を示すBrokerやデータトランザクションを記録するClearing Houseなどの役割が記載されており、「データを集めない」データスペースにおける仕組みが理解できる。「信頼できる」データ連携のためのコネクターに関しても一定のルールがある。認証されたコネクターを実装しているシステム同士がつながるという仕組みであり、欧州型データスペースに接続するためには、利用者やアプリ提供者はコネクターを実装する必要がある。

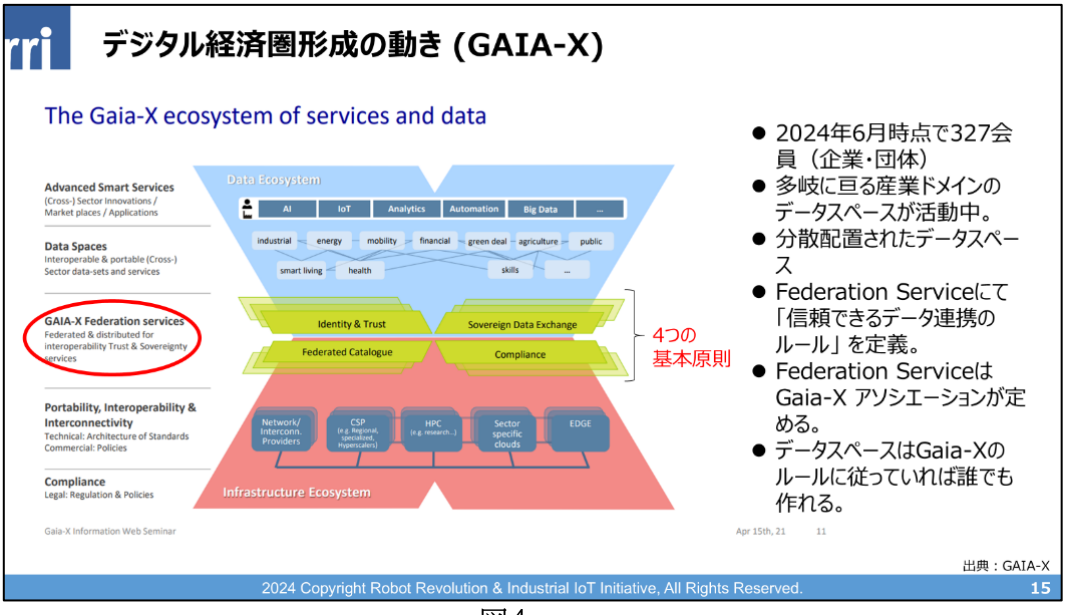


図4

4.例：Catena-X に見る欧州式デジタルエコシステム

ここでは自動車産業のデータスペースである Catena-X の例を参考にデジタルエコシステムの構造を見ていく。

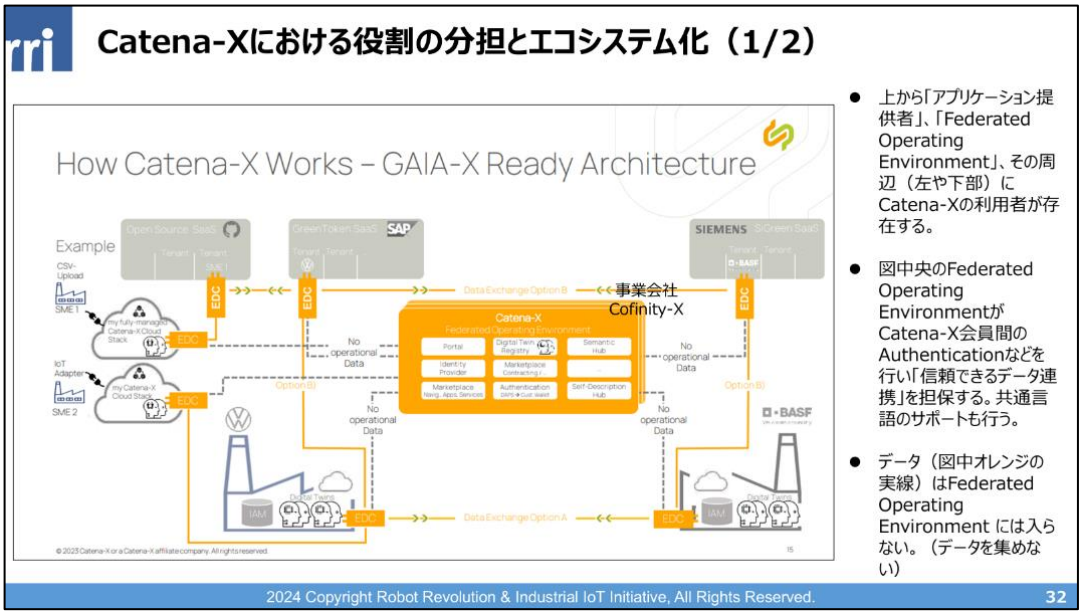


図5

アーキテクチャーとしては図5のような構造になっている。ここで着目すべき点は、中心にある Federated Operating Environment である。これは Catena-X からライセンスを受けた事業体が担うこととなっており、Catena-X の定めたルールに則って運営される。第一号の事業者として Cofinity-X がサービスを開始している。また、前述したようにアプリやソリューションは Catena-X の認定を受ければ誰でも提供できる仕組みとなっている。

開発においても分業の姿勢が見て取れる（図6）。Catena-X Association を中心に OSS のコミュニティや事業会社の役割分担が定められている。業界レベルでの取り組みとしての役割分担とインターフェースとなる規約類が公開されている点が、オープンなエコシステムを維持発展させる上で重要な役割を果たしている。多様な参画者により構成されこの仕組みはイノベーションの加速およびリスクの分散を意図していると思われる。

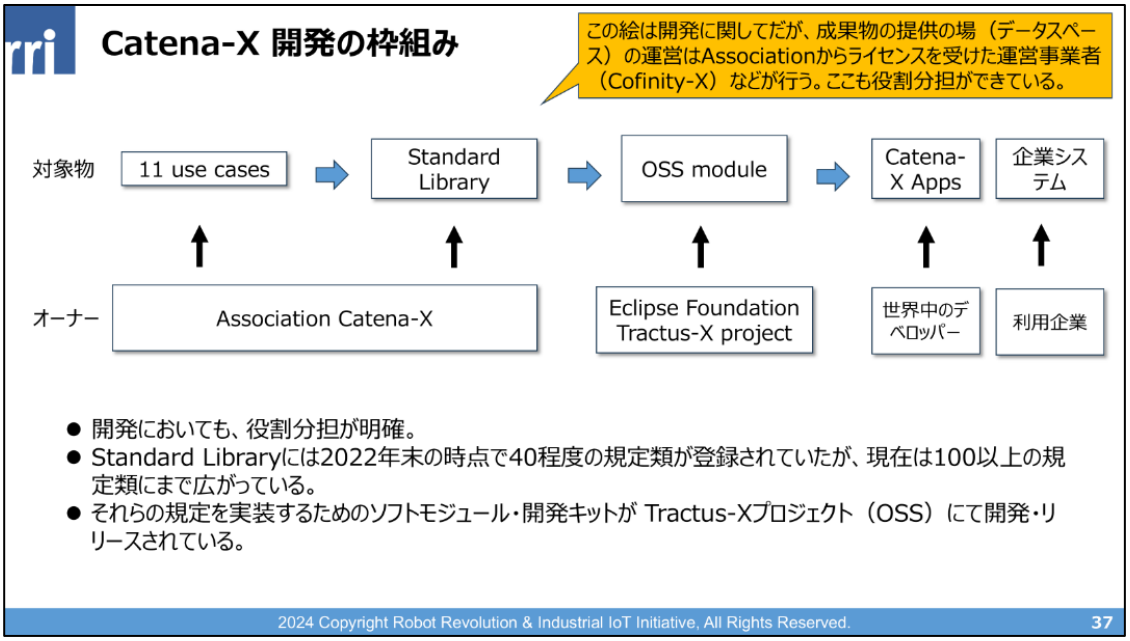


図6

5.欧州の今後

単体のデータスペースとしては Catena-X のように運用を開始したものもあり、今後様々な業種でデータスペースが立ち上がってくるものと思われる。また、デジタルエコシステム強化に向けたいくつかの取り組みが始まっている。

- 欧州共通のデータ連携基盤に向けて
  現在は Gaia-X、IDSA、FIWARE などデータ連携基盤だけでもいくつかの流派（仕様）が欧州に存在している。黎明期ということもあり、必ずしも一枚岩になっているわけではない。一方、将来的にデータスペース「内」でのデータ連携から、データスペース「間」でのデータ連携が必要と欧州は認識しており、流派（仕様）の違いを超えてつながる仕組みが必要となっている。この課題に対応するために欧州委員会のプロジェクト DSSC（Data Space Support Center）が始動しており、将来の統合モデルの検討が始まっている。各組織の違いを「正しい・正しくない」と議論するのではなく、将来的にどう寄せていくか、という視点で議論されている。
- 自動車から製造業全体へ
  Catena-X をひな形に製造業全体をカバーする Manufacturing-X の動きがドイツで始まっている。すでに Factory-X や Aerospace-X などが Manufacturing-X の傘の元、配置され、協調領域としての共通機能の定義や開発が始まっている。この共通機能を前提としてアプリやツール類の開発も進むと予想される。
- 国際化の動き
  欧州を起点として Global に産業データの連携を可能にする議論が始まっている。IMX（International Manufacturing-X）の動きである。現在、欧州委員会、スペイン、ドイツ、フランス、オーストリア、イタリア、オランダ、カナダ、アメリカ、韓国、日本、オーストラリアの産業イニシアティブが議論に加わっている。ここでの議論は標準化要件として

ISO や IEC などの SDO（Standards Developing Organization）へのインプットなど、製造に関するデータ利活用への一定の影響力を持つものと予想される。

6.まとめ

欧州で生まれた産業データ連携の取り組みをここまで見てきた。欧州市場からグローバルに、という意図も感じる。データ連携のための共通で信頼できるプロセスを整備するということは、これまで個社同士がそれぞれのやり方でコストをかけてつなげていた部分を協調領域として整備するという事であり、課題解決やイノベーションを加速するデジタルエコシステムとして圧倒的な強みとなるだろう。

これらは彼らが発行する夥しい文献類とも相まって、非常に完成度が高い印象を受ける時もある。一方、実態はどうなのか。先述のように現場では企業の readiness の課題が噴出しているとも聞く。システムとして理想を追いすぎたのではないか、とも感じることもある。今後、欧州勢がどのように対処していくか注目である。

上記、欧州の理想と現実は、日本にも多くの示唆を与える。特にデータガバナンスなど企業の DX が必ずしも進んでいない一方で規制対応のための時間が残されていない、となると、欧州型の「企業が一定の能力を持っている」を前提としたモデルが現実的なのか、という疑問はしっかりと考えるべき視点と思われる。システム側にある程度の機能を持たせるのも解である一方、将来のイノベーションの基盤、という視点では、多様な参画者が活躍する余地を盛り込む工夫も必要だろう。システムと利用者の readiness のバランスは、データスペースの形を固定化するのではなく、状況に応じて進化していく思考も必要ではないかと思われる。

日本でも産業データ連携の取り組みは加速している。日本発の DFFT（Data Free Flow with Trust）への国際社会の賛同は2023年の G7 デジタル・技術大臣会合[6]で強化された。国内では産業エコシステム形成に向けたウラノス・エコシステムの整備やデータ連携の原則についての DATA-EX の取り組みも加速している。また、産業界においては経団連夏季フォーラムの軽井沢宣言[7]にて産業データ連携基盤の重要性が指摘されている。RRI においても製造データスペースの検討が進んでいる。これらの関係者の一体となった取り組みが期待される。

（参考文献）

[1] WEF, 産業のサーキュラー・トランスフォーメーション:パートナーシップの役割, https://jp.weforum.org/publications/circular-transformation-of-industries-the-role-of-partnerships/

[2] 21 世紀政策研究所, サーキュラーエコノミー, http://www.21ppi.org/theme/data/240329 report CE.pdf

[3] Gaia-X Institute / Université Paris Dauphine-PSL, Position Paper: Economics of Data Sharing, https://gaia-x.eu/wp-content/uploads/2024/03/Study-on-the-emergence-and-creation-of-value-within-data.pdf

[4] Gaia-X, Gaia-X Federation Services, https://www.gxfs.eu/

[5] IDSA, The IDS Reference Architecture Model, https://internationaldataspaces.org/offers/reference-architecture/

[6] デジタル庁, G7 デジタル・技術大臣会合の開催結果, https://www.digital.go.jp/news/d5208f71-317d-425b-9677-c64a06000e3c

[7] 経団連, 夏季フォーラム 2024 軽井沢宣言, https://www.keidanren.or.jp/policy/2024/054.html

【筆者プロフィール】
中島　一雄（なかしま　かずお）氏
2018年に東芝デジタルソリューションズ株式会社よりロボット革命・産業 IoT イニシアティブ協議会(RRI)に出向。
現在、インダストリアル IoT 推進統括、および国際電気標準化 IEC / SyC Smart Manufacturing System Committee（SM）国内委員会 事務局長、IEC /SyC　SM AG1、WG1、WG2、WG3 の国際エキスパートを担当。
また、Industrial IoT 領域における日独連携の実行部隊としてドイツ側との窓口や米国 Manufacturing Institutes との交流を図っている。

（2024年8月27日原稿受領：SIC ニュースレターVol.6.10に掲載）

寄稿4　　みんなで創る次世代スマート工場

～デジタルツイン/サイバーフィジカルシステムで実現するスマート工場～

東京科学大学総合研究院デジタルツイン研究ユニット　特任助教　石倉　弘貴氏
同　　教授　藤澤　克樹氏

1. AI の発展とスマート工場

近年、深層学習（Deep Learning）をはじめとする AI が急速に発展しており、特に OpenAI[1]が2022年に発表した ChatGPT[2]を契機として、大規模言語モデル（Large Language Model; LLM）を活用した生成 AI は現在も活発に研究・開発が続いている。また、画像処理における深層学習の研究も進んでおり、カメラで撮影した画像内の物体を検知する技術として Yolo [1]シリーズが有名であり、2024年11月時点で Yolo 11[3]までが開発されている。年々精度と計算速度が向上し、実社会での応用のハードルも低くなっている。

スマート工場（スマートファクトリー）は、こうした AI や IoT を活用し、工場内の設備や機材のデータを分析し、効率的な生産活動を行う場である。AI や IoT の発展によって、生産設備や機器からの情報を収集・分析することが容易になり、スマート工場の実現が製造業における大きなトレンドとなっている。製薬・食品、大小の機械など、製造品目に関わらずスマート工場の導入は広まりつつあり、研究者によるさまざまな視点からの研究も行われている。直接スマート工場を対象としなくても、スマート工場での活用が期待される AI の研究も多数存在し、LLM や物体検知技術はその代表例である。

2. スマート工場とデジタルツイン・サイバーフィジカルシステム

スマート工場の実現には、デジタルツインとサイバーフィジカルシステム（Cyber-Physical System; CPS）[2]の二つの重要な技術が必要不可欠である。デジタルツインは、「リアル（物理）空間にある情報を IoT などで集め、送信されたデータを元にサイバー（仮想）空間でリアル空間を再現する技術」[4]を指し、CPS は「現実世界（フィジカル）で収集した様々なデータや情報を仮想空間（サイバー）で融合させ、分析や解析を行い、現実世界（フィジカル）へフィードバックすることで最適化を図る仕組み」[5]を意味する言葉だ。スマート工場の実現には、現場のデータを収集・活用し、その情報を基に現場にフィードバックするための仕組みが不可欠である。すなわち、デジタルツインで工場をデジタル化し、CPS を通じて現場のデータを解析しフィードバックするシステムがスマート工場と考えることができる。

---

[1] https://openai.com/ja-JP/

[2] https://chatgpt.com/

[3] https://docs.ultralytics.com/ja

[4] **ソフトバンク株式会社ビジネスブログ**
（https://www.softbank.jp/biz/blog/business/articles/202009/digital-twin/）より

[5] **三菱 IT ソリューションズ株式会社コラムページ**
（https://www.mdsol.co.jp/column/column_123_2169.html）より

図1はスマート工場における CPS の概念図である。例えば、工場内で働く従業員の安全確保と移動距離の削減のために、従業員の移動経路を最適化することを考える。まず、従業員の移動状況をデータ化する必要がある。ここで活用されるのが深層学習を用いた物体検知、物体追跡である。工場内にカメラを設置し、従業員の移動情報を動画として記録する。この動画に物体検知に関する AI を適用すると、従業員の動画内での位置情報を取得することが可能になる。さらに SORT [3]をはじめとする物体追跡と呼ばれる技術を適用することで、動画内に映った人物がどのような経路で移動しているかを自動的に取得することが可能となる。この移動情報のことを「動線」と呼ぶ。取得した動線情報(図の左下から左上への動き)をもとに、安全かつ効率的なルートを最適化等の技術で立案し(図の左上から右上への動き)、それを実際の従業員や管理者にフィードバックすること(図の右上から右下への動き)で効果的で安全な移動経路の確保を目指すことができる。

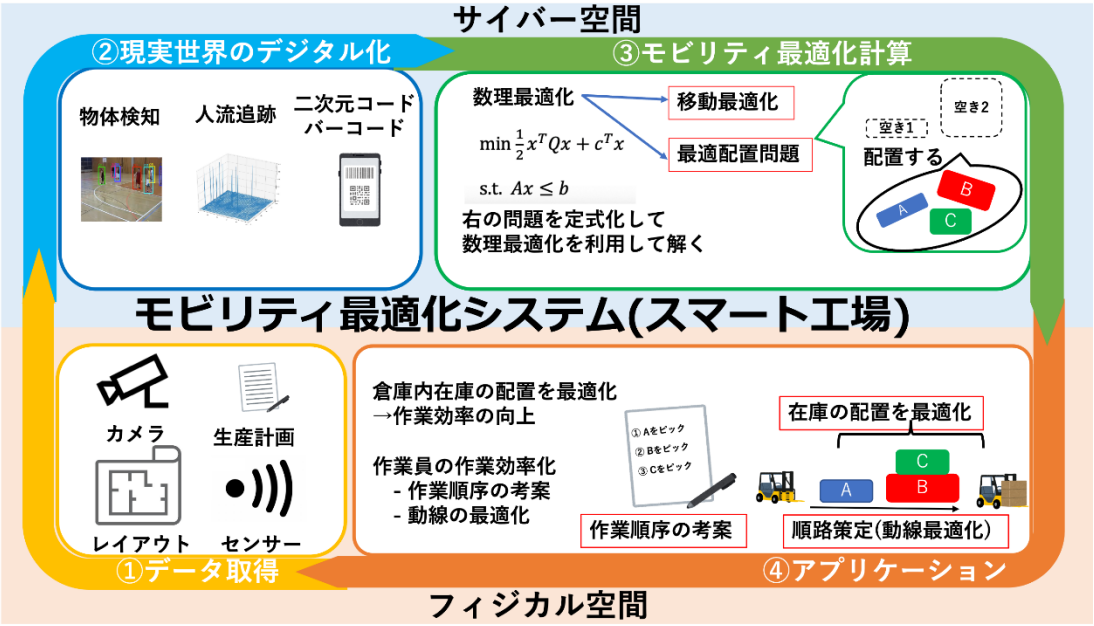


図1:スマート工場に関する CPS の概念図

他にも生産活動を考える上で重要な事項は多数存在する。例えば、リアルタイムや数日といった短期間を対象にすると「生産設備の効率的な運用方法の策定」、「異常品の検知」、数週間から数ヶ月といった中期的な目線では、「生産計画の策定」、「簡単に移動可能な設備、資材の配置の変更」などを考えることができる。また年単位などの長期的な取り組みでは、「工場の大規模なレイアウト変更」、「新商品の開発」などを考えることが可能である。いずれの取り組みでも「現状のデータを取得する」、「取得したデータを解析する」、「解析したデータを現場にフィードバックする」という CPS の根幹の流れを形成することは、スマート工場において非常に重要である。

3. 筆者らの目指すスマート工場の姿

筆者らはロート製薬株式会社と共同でスマート工場の実現に向けた研究を2019年から開始している。2022年10月には、ロート製薬の持つ国内の大規模生産拠点である上野テクノセンターのスマート工場化に関するプレスリリース[6]を発表した。上野テクノセンターを対象に、我々は二つのアプローチでスマート工場の実現を目指している。それが「アプリケーションドリブン」と「データドリブン」である。

「アプリケーションドリブン」は「ヒト・モノの検知追跡機能を追加し、工場全体で移動最適化及び、生産・移動能力推定による改善案提示機能」である。つまり、工場全体での生産活動を通して、製造のボトルネックになっている事象に直接アプローチしその解決を図ることで生産効率の向上を実現する。工場の従業員の動線最適化や、資材の配置最適化などが該当する。これらは現在の状況を取得し、改善の方向性をあらかじめ定めておき、改善のために必要な操作、改善後の理想的な状態を考えていく。

「データドリブン」は「工場全体で生成される複数データを学習データとする」改善方法の作り方である。現在では、LLM をはじめ AI が人間よりも遥かに多くのデータをインプット、学習し、アウトリーチすることが可能となった。「生産活動の中で取得する映像、画像、センサーなどの数値データや日報やQCサークル等の人間の言語によるデータ」を大量に使ってAIを学習し、これまでの生産活動では考えられていなかった新たな価値の発掘・創造を目指すことが、このデータドリブンにおける重要なポイントである。「データドリブン」では、人間(労働者)と AI は共存、協調し、スマート工場での生産効率の向上という同じ目標を目指すことになる。ロート製薬のスマート工場では、このような「人と AI の共進化」も目指している。

4. 数学を活用したスマート工場のアプリケーション

ここでは、筆者らが藤澤克樹研究室の学生とともに上野テクノセンターのスマート工場実現に向けて行ってきた研究の一部を紹介する。上野テクノセンターは非常に大規模な生産拠点である。そのため、ここでの生産活動を全てデジタル化し最適化することは非常に困難である。そこで、上野テクノセンターでの生産活動の中でボトルネックとなっていた自動倉庫のモビリティ最適化から取り組むこととなった。

自動倉庫とは、荷物の運搬に機械を使うことで人手を使わずに荷物の出し入れを可能とした倉庫である(図 2)。上野テクノセンターではその生産力の高さから、資材や中間製品、梱包材など非常に多くの物品をこの自動倉庫で管理している。工場での生産状況に合わせて、搬送機械(クレーン、Automated Guided Vehicle、Sorted Transfer Vehicle)が物品の出し入れを行っている。自動倉庫に関する研究では、搬送機械を効率的に制御することで物品の運搬にかかる時間を削減し、効率的な生産活動に繋げていく。

[6] https://www.rohto.co.jp/news/release/2022/1026_01/

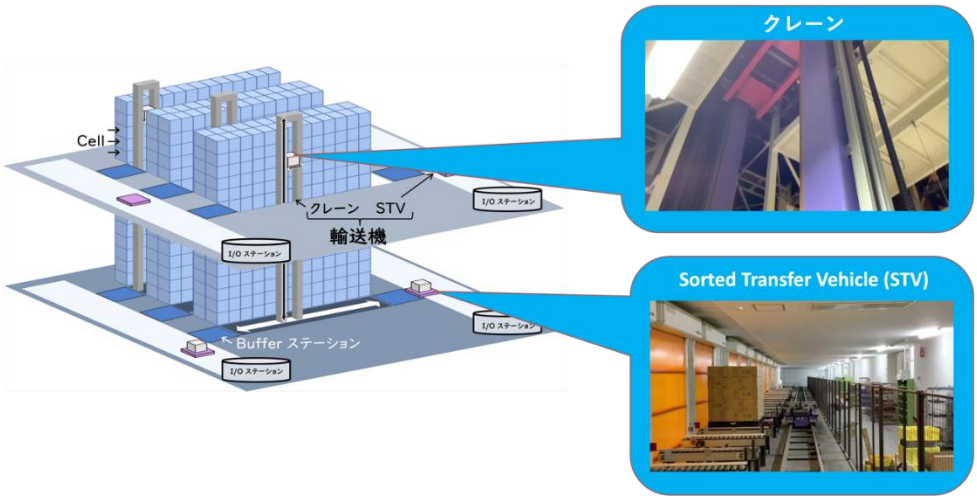
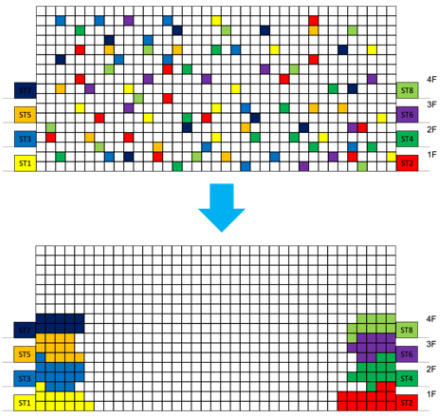


図2：自動倉庫の概念図

筆者らは自動倉庫を対象に2つの研究を行ってきた（図3）。一つ目は「夜間棚替え」と呼んでいる研究である。上野テクノセンターは24時間稼働の工場ではない。そのため、工場が操業を停止している夜間はクレーンが停止している。この時間帯を活用し、倉庫に保管されている荷物の配置換えを行い、翌日の操業での荷物の搬送時間を削減することを目指す。CPS の流れを踏まえると、まずは現場の情報を収集することから始まる。夜間棚替えでは、倉庫に保管されている荷物の配置と、翌日に計画されている出庫予定の荷物の情報を収集する。次に、倉庫の状態を搬送時間の削減を目指す最適化モデル（数式）として定式化し、どのように配置換えを行えばいいかを計算する。最後に、配置換えをするために必要な荷物の運搬指示をクレーンに与え、実際に荷物の配置を変更する。

【夜間棚替え】
→工場の操業が停止している間（例：夜間）に倉庫内の荷物を再配置する



【自動倉庫運用最適化システム（リアルタイム最適化）】
→工場の操業中にデータを取得し、倉庫内の機械の制御をリアルタイムに最適化する

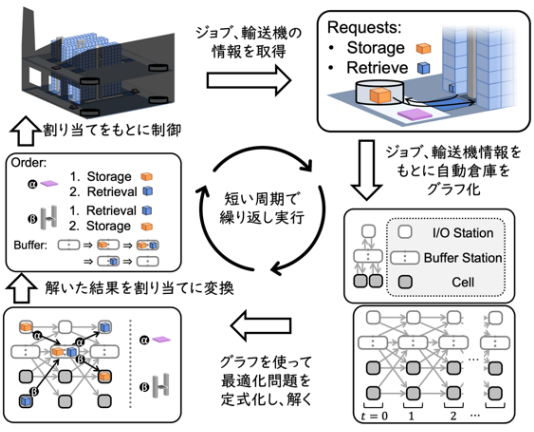


図3：自動倉庫に関するモビリティ最適化の取り組み

効果の検証は、机上実験と実証実験の2種類を行った。まずは机上実験として、自動倉庫のシミュレータを開発し、実際の工場を使用せずに夜間棚替えの効果を検証した。机上実験時には、前述したプレスリリースにある新工場は稼働していなかったため、すでに20年以上稼働していた既設工場を対象とした。その結果を図4に示す。左の図は翌日に出庫する荷物のみを対象に、クレーンの運搬時間を比較した結果である。「夜間棚替え」の実行の有無で、約75%の運搬時間の短縮が可能であることがわかる。また、当日出庫が決まった荷物や入庫される荷物など、その日に運搬した全ての荷物を対象にした運搬時間の比較でも20%前後の運搬時間削減が可能であった。実証実験は、プレスリリースにある新工場で行った。実証実験を行った当時、新工場は稼働を開始したばかりで既設工場と比較すると荷物の運搬が少なく、その効果は既設工場でのシミュレーション実験に比べるとあまり大きくなかった。しかし、そのような状態でも運搬時間の削減は実現しており、「夜間棚替え」の運搬時間削減に関する効果を実際の自動倉庫を使用した場合でも確認することができた。

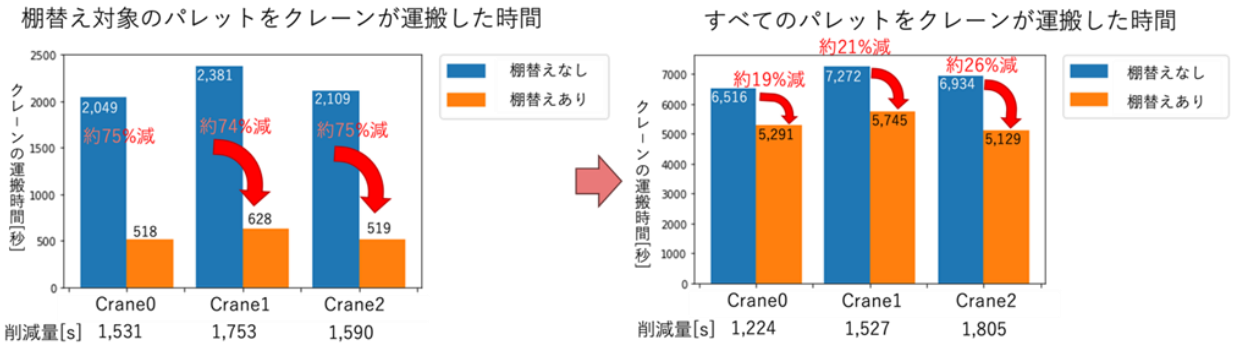


図4：夜間棚替えによる荷物の搬送時間の削減効果

もう一つは工場の操業中に、搬送機械の運用方法を最適化する研究である。搬送機械や搬送指示、倉庫に保管されている荷物の情報をリアルタイムで取得し、効率的に荷物を運搬するための荷物の搬送順序を考えるものである。こちらは既設工場を模した小規模な自動倉庫を対象に机上実験を行った。詳細は私たちが書いた論文［4］を参照してほしい。この手法を使うことで、荷物の搬送にかかる時間を簡単なルールベースの手法と比較して、6～10%ほど短縮することに成功した。現在、我々はこの論文を発展させ、実際の工場が操業中に最適化することを前提とした新たな手法に関して研究を行っている。こちらの手法も夜間棚替えと同じく、実証実験を行っていく予定である。

これらのアプローチはどちらも「アプリケーションドリブン」なものである。「自動倉庫におけるモビリティを最適化する」というアプリケーションをベースに考えられた研究であるためである。上野テクノセンターでは、自動倉庫以外に生産に必要な機械やシステムから多様なデータを取得している。これらを活用した「データドリブン」なアプローチも現在検討中である。

5. みんなで創るスマート工場

ここまで、CPS を活用したスマート工場について述べてきた。「アプリケーションドリブン」と「データドリブン」というアプローチのもと研究、開発を続けているが、非常に重要な考え方が

もう一つ存在する。それは「最新技術（AI 等）と人間の共進化を探るためのプラットホームの構築」である。AI ははじめに述べたとおり、目覚ましいスピードで進化・発展を続けている。スマート工場はそれらの AI をスムーズに取り入れ、実際の現場で活用していくことが重要である。つまり、スマート工場とは、一度工場に CPS を導入すれば完成するものではなく、進化し続ける人類の叡智を取り込み続けることで、人とともに進化していく存在でなければならない。

また、AIの積極的な導入により、製品の異常検査といった過度に緊張を強いられる作業や単純作業の繰り返しといった仕事を軽減することが可能になる。そして CPS との連携により、作業員一人一人がそれぞれ得意な技能を伸ばし、工場ひいては所属する企業へさらに大きな貢献が可能になる。さらには、スマート工場に関わる人々の当事者意識を芽生えさせ、さまざまな視点からの生産活動を実現することで、スマート工場のさらなる発展が期待できる。

スマート工場では、CPS の実現のために実に多種多様な人材が関わることになる。工場の現場で働いている方々はもちろん、工場の生産を考える人、データ分析を行う部隊、時には我々のような大学関係者や他企業に所属する人など枚挙にいとまがない。そして、組織や役割を超えてみんなで創り上げていくものが本来のスマート工場であると考えている。

引用文献

[1] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi, ”You only look once: Unified, real-time object detection,” Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.

[2] K. Fujisawa, ”サイバーフィジカルシステムにおけるモビリティ最適化エンジンの開発,” *パナソニック技報,* vol. 65, no. 1, pp. 4-8, 2019.

[3] A. Bewley, Z. Ge, L. Ott, F. Ramos and B. Upcroft, ”Simple online and realtime tracking,” 2016 IEEE international conference on image processing (ICIP), 2016.

[4] H. Ishikura, N. Tateiwa, S. Egi, I. Oe, N. Hata, T. Mitsutake, K. Yamamura, M. Fujii and K. Fujisawa, ”Scheduling system for automated storage and retrieval system with multiple machines using a time-expanded network,” Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 2024.

著者プロフィール

石倉　弘貴（いしくら　ひろき）氏
2024年3月、九州大学大学院数理学府博士課程修了、数理学博士。
2024年4月より、東京工業大学科学技術創成研究院デジタルツイン研究ユニット特任助教。
2024年10月より、東京工業大学の合併に伴い東京科学大学総合研究院デジタルツイン研究ユニット特任助教。
九州大学理学部数学科に在学中より、藤澤研究室（PI：藤澤克樹教授）に在籍しロート製薬株式会社をはじめとする様々な企業との共同研究に従事。専門は数理最適化。

藤澤　克樹（ふじさわ　かつき）氏
1998年東京工業大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程修了、理学博士。
京都大学大学院工学研究科建築学専攻助手、東京電機大学理工学部数理科学科助教授、中央大学理工学部経営システム工学科准教授、教授さらに九州大学マス・フォア・インダストリ研究所教授を経て、
2023年12月より東京工業大学科学技術創成研究院デジタルツイン研究ユニット教授（ユニット長を兼務）、情報理工学院（数理・計算科学系）教授を兼任。
2024年10月より東京工業大学の合併に伴い、東京科学大学総合研究院デジタルツイン研究ユニット教授（ユニット長を兼務）と同情報理工学院（数理・計算科学系）教授に就任。
この間、産総研・東工大 実社会ビッグデータ活用オープンイノベーションラボラトリ ラボ長、産業技術総合研究所 人工知能研究センター クロスアポイントメントフェロー、産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター クロスアポイントメントフェローを兼務。専門はグラフ理論、数理最適化、高性能計算。また企業との共同研究による産学連携を活発に行っている。

（2024年11月16日原稿受領：SIC ニュースレターVul.6.12に掲載）

Ⅲ技術紹介
技術紹介1　工場施設の防災・減災のための地震対策
―シミュレーションによる問題解決の提案―

株式会社構造計画研究所
解析グループ　専門役員　梁川幸盛氏
エンジニアリング営業1部　担当部長　古川欽也氏

1. はじめに

2024年度版ものづくり白書によると、我が国の製造業においては、国内他産業への波及・乗数効果や地政学リスクの備えの観点から国内投資の重要性が高まっている。一方、グローバルビジネス展開を急拡大した結果、収益の過半を海外市場で稼ぐ構造になっているものの、グローバル経営の仕組みが未整備のため利益率が低迷していると評している。この低迷を打破するためには“CX（コーポレート・トランスフォーメーション）による経営・組織の仕組み化”と“DX（デジタル・トランスフォーメーション）による製造機能の全体最適化、ビジネスモデルの変革が必要”と提言しているものの、製造業においては、どのようにビジネスモデルを変革しようとも、破壊的な技術革新を起こそうとしても、付加価値の源泉は“工場”であり、そこで働く“人”であると言える。また、製造現場の業務プロセスを熟知した上でデジタル実装の重要性が指摘されているが、現在使用されている工場は長年にわたり業務プロセスの改善に努めてこられた“知”と“汗”の結晶であるということは疑いもない事実であり、建物や設備を大事に使い、業務プロセスにおいてムリ・ムダ・ムラを無くすためあくなきカイゼンを続けてこられたことが、現在の競争力につながっていると考える。

その付加価値の源泉である国内工場は、常に頻発する地震や洪水などの自然災害を受けるリスクにさらされている。高度経済成長期に竣工した工場も数多く、これらのリスク対策はBCP（事業継続）の最優先事項の一つとなっている。

構造計画研究所は1956年に服部正（まこと）（1926年－1983年）が構造設計事務所として創業した。創業間もなく服部正は単身渡米し、構造設計業務においてコンピューターの重要性を認識し、「地震国日本の構造計算業務をコンピューターで一変させてみせる」といった熱い思いのもと1961年に当時大卒初任給が1万2千円の時代に月額リース60万円の最新鋭機器IBM1620を導入した。コンピュータ導入後は多様な分野の技術者をそろえ、社会で起こる様々な課題を IT を利用して解決していくことを目指した。

現在は多様な人才のもと、エンジニアリングコンサルティングおよびプロダクツサービスを柱にビジネスを展開している。（https://www.kke.co.jp/）

筆者らは、創業者の思いを受け継ぐかたちで、地震動・建屋の解析技術と補強設計の活用による工場の地震対策に取り組んでいる。

2. 耐震基準の考え方

日本の耐震基準は、1981年の新耐震設計法の施行を区切りとして、1981年以前を旧耐震基準、以降を新耐震基準と区別している。旧耐震基準では、震度5程度の中規模地震に対して倒壊しない耐震性能であるのに対して、新耐震基準では、震度6～7の大規模地震があ

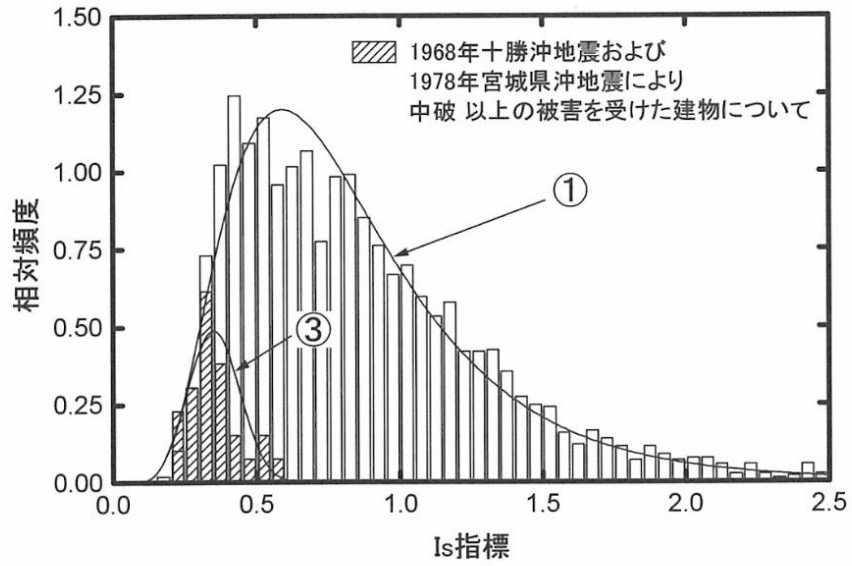
っても倒壊しない耐震性能を目標としている。
　1995年1月に発生した阪神淡路大震災で旧耐震基準の建物の被害が顕著だったため、同年12月に施行された耐震改修促進法では、耐震性能が劣る旧耐震基準の建物に対して構造耐震指標 Is 値を用いた補強を要請している。

Is 値(構造耐震指標)＝Eo×Sd×T
Eo＝C(建物の強度を表す指標)×F(建物の靱性を表す指標)
Sd:形状指標(平面・立面形状の非整形性を考慮する指標)
T :経年指標(経年劣化を考慮する指標)

　Is 値の主体となる強度と靭性の積という考え方は、1980 年代までの耐震構造に関する研究成果の集大成で優れた考え方であり、この考え方を採用した耐震改修促進法では、以下の判定値を採用している。

地震の震動および衝撃に対して
(1) Is値＜0.3またはq＜0.5の場合 ：倒壊または崩壊する危険性が高い。
(2) (1)および(3)以外の場合 ：倒壊または崩壊する危険性がある。
(3) Is値≧0.6の場合 ：倒壊または崩壊する危険性が低い。

　Is 値による指標は、地震被害の調査を行い、その結果から統計的に決めた指標である。その根拠となっているのは図1のグラフである。このグラフは横軸が Is 値で、縦軸は建物相対頻度である。被害を受けた建物はグラフの斜線部にあたる。Is 値が大きい建物は被害が無く、小さい方に被害が集中している。 Is 値が“0.6”を超えたものの中には大きな被害を受けているものは無い。ところで、このグラフの被害のサンプルは1968年十勝沖地震や1978年の宮城県沖地震での被害を元にしている。したがって限定的な地震に対する被害であり、全ての地震に対して絶対安全とは言い切れない。あくまでも過去の地震被害の例から考えて、統計的に倒壊の危険性は少ないだろう数値である。更に問題なのが、この被害のサンプルは鉄筋鉄筋コンクリート造(RC 造)の建物に関する数値であるという点である。工場やプラントなど様々な形状の機能に即した建物に多い構造形式である鉄骨造(S 造)に関係する数値ではないため、Is 値の指標も S 造になると解釈が難しいということになってくる。



注) 曲線①は被害地震を未経験の建物群についての *Is* 値分布を対数正規曲線で近似したものを、曲線③は 1968 年・十勝沖地震および 1978 年・宮城県沖地震で中破以上の被害を受けた建物群の *Is* 値分布を信頼性理論により推定したものを、それぞれ表わす.

図1 地震被害を受けた鉄筋コンクリート造建物のIs値(2次診断)分布

出典:「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・耐震改修設計指針・同解説(国土交通省・日本建築防災協会)」

この Is 値を採用した補強では、作業内容のマニュアル化が行われており、誰がやっても比較的簡単に補強量が算出でき、かつ一定の精度が保てる。また一般の方にとって成果を把握しやすいというメリットがある。反面、耐震改修促進法で定められた工法しか評価できず、オイルダンパーのような減衰部材の評価ができないことや、地震と被害の対応関係が推定できず、結果として建物被害が推定できないために、避難や復旧の計画が立てづらいなどのデメリットも指摘されている。

3. 旧耐震基準の大型鉄骨建屋の地震対策

旧耐震基準の大型鉄骨建屋の代表として工場のような生産施設を考える。

工場を耐震改修促進法に基づき耐震診断を実施し、Is 値=0.6 以上とした補強(在来補強と呼ぶ)を実施しようとする場合、費用・期間の面で非現実的となるケースが多く発生する。理由は、在来補強では建物の全構面に補強を行う場合が多く、配管や電気ケーブルなどの設備と干渉し、大規模な設備のかわし工事が発生することによる。また対象建屋が工場のような生産施設の場合、稼働を長期に止めることはできないため、土日やお盆や年末年始などの長期休暇に合わせた補強工事となり、補強のための足場の敷設撤去を繰り返し、長期間の工事となり、莫大な期間と施工費用となる。さらに問題なのは、莫大な期間と施工費用をかけて補強できたとして、補強効果が上がらない場合があることである。

図2は、加速度応答スペクトル図と呼ばれる。縦軸は地震による最大応答加速度（建物を揺らす力＝地震力）を、横軸は建物の周期を示す。折れ線グラフの一本一本は、それぞれが過去に発生した地震であり、地震により建物にかかる地震力が異なっていることが分かる。このグラフを見ると、同じ地震でも、建物の周期が異なれば建物に加わる地震力が異なるということも分かる。建物の周期が短い領域では地震力が小さく、0.1～ 1.0 秒くらいの間は地震力が大きい。例えば建物の周期が 1.0 秒より長くなると、受ける地震力は急激に小さくなる。周期が短い建物は固い建物である。逆に長い周期をもった建物は、具体的には超高層や免震建物などであるが、小さな地震力で済んでいるということになる。したがってこれらの建物は受ける地震力が小さい領域を狙って、地震に対して有利な建物を設計している。

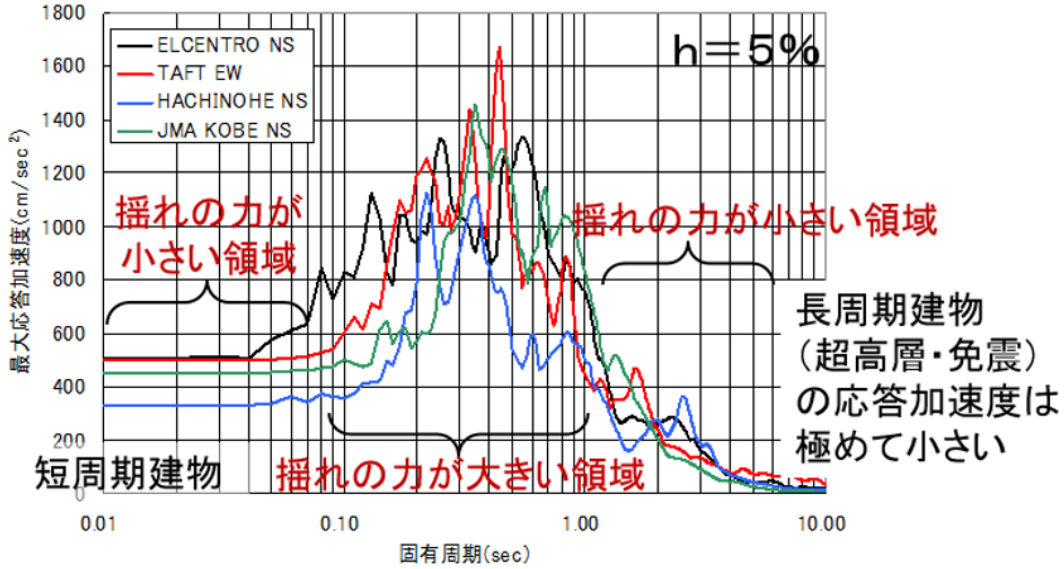


図2　加速度応答スペクトル図

低い耐震性能が社会的に許されない校舎や防災拠点となる庁舎の固有周期は、一般に0.4～1.0 秒付近に分布するため、在来補強によって短周期化しても、地震力が極端に大きくなることはない。しかし、工場施設に在来補強を行うと、建物は固くなり短周期側になる。図3のグラフのように結果として大きな地震力を受けるという問題が発生してしまう。この問題は在来補強では避けられない問題で、期間と施工費用をかけて補強できたとしても、補強効果が相殺されてしまう可能性が高く、補強の効率が悪い。

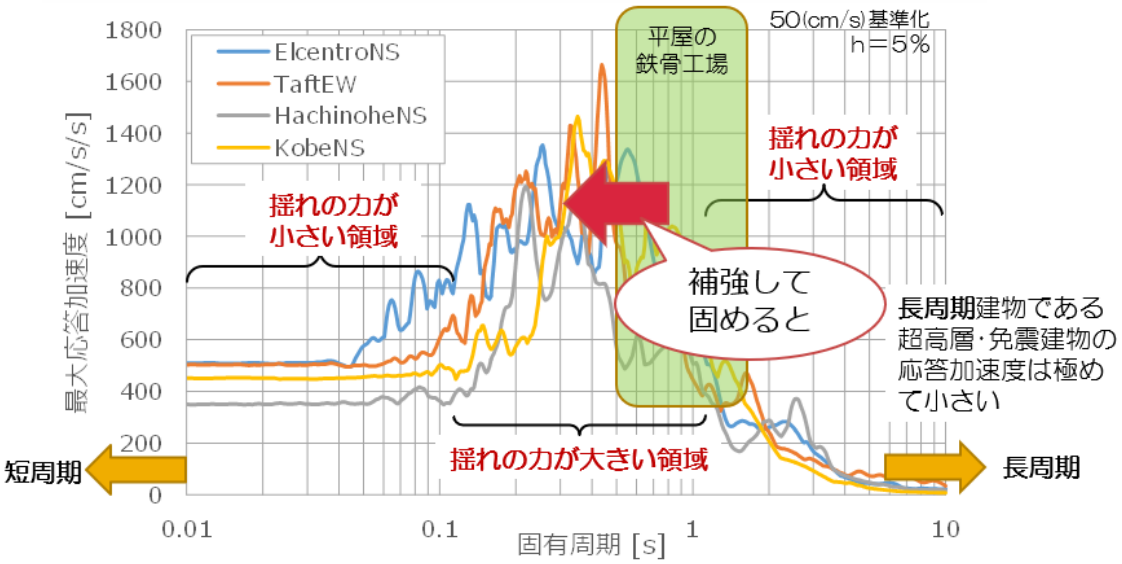


図3　建物補強と地震力の関係

4. シミュレーションによる問題解決の提案

ここからは、Is 値にまつわる問題をシミュレーション技術によって解決する話である。新耐震設計法の施行から43年以上、耐震改修促進法からも29年以上経過している。法律のベースとなる技術が確立してからを考えると40～50年程度は経過しており、当然、その間に様々な新しい技術が考案され使用されるようになった（図4）。これらの技術は主に重要構造物である原子力発電所や超高層ビルの設計で始まったやり方であるが、コンピューターの計算速度の増大に伴い、徐々に一般の建物にも適用できる時代になった。

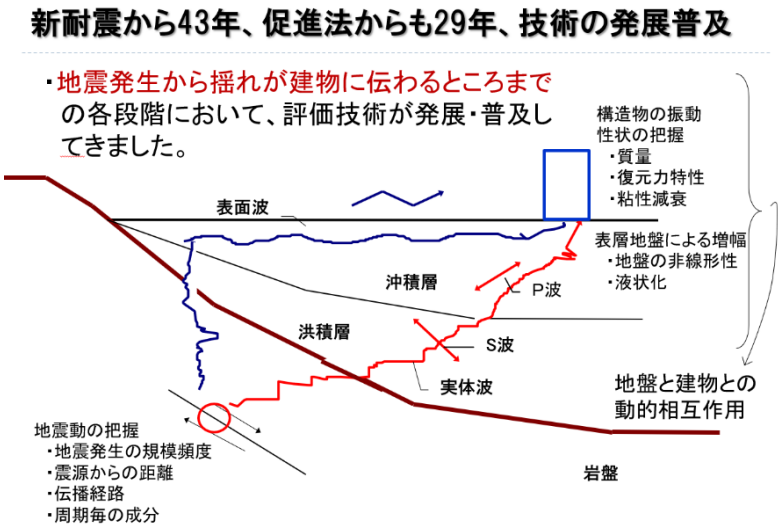


図4　地震波の伝播と評価技術

筆者らは、これらの技術が重要建築物や超高層建物だけではなく、工場のように規模が大きいのに確立した工法がないというような建物に関しても適用できると考えている。

例として、図5ような典型的な三角屋根の鉄骨工場をシミュレーション手法で補強案を検討する。検討建物は、大型工場で築40年以上も経ったような三角屋根の鉄骨構造の建物であり、1 スパンの柱間は15m程度あり、高さが8m、大きな機械を製造する工場である。実際はもっと何スパンもあるが、分かりやすいようにモデルのスパンを短くする。このような建物は、新耐震設計法の施行以前の建物であり、耐震診断しても「NG」となる。現場では設備などの釣り荷重があり、建物の中身は非常に複雑になっているが、主体構造はシンプルなトラス構造である。

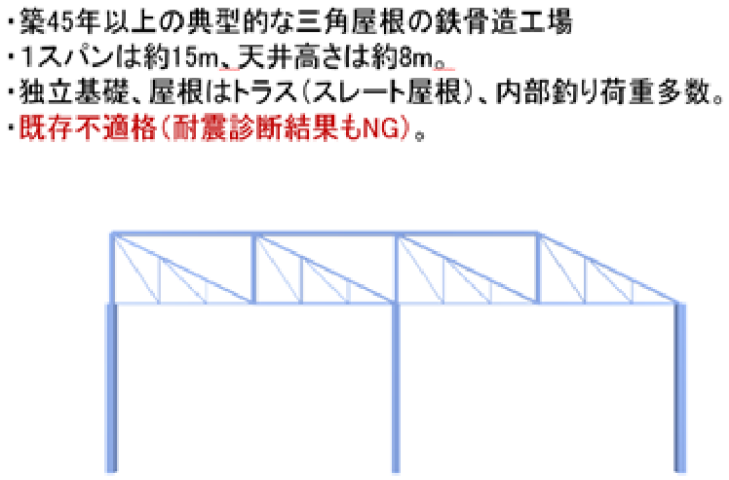


図5　工場モデルの概要

このような建物では、まず固有値解析という技術を使って、もっとも揺れやすい周期と揺れ方を調べる。絵にすると、図6のようになる。固有周期とは振動が行って返って何秒かかるかという時間である。この建物は1秒くらいの固有周期の建物になっている。分かりやすく言うと、物は引っ張って放すとブラブラと揺れるが、その揺れ方が固有モードで、これを計算で求めている。これが最も揺れやすい周期と揺れ方であるから、地震の影響を受ける周期となる。

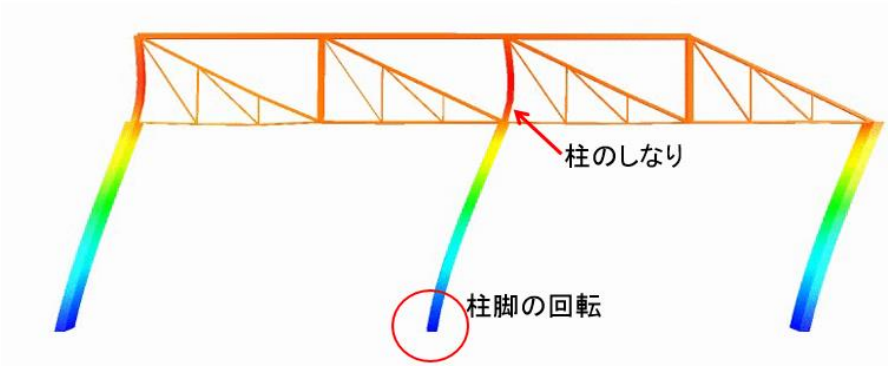


図 6　工場の固有値解析結果

固有周期の計算で分かることは、この建物の周期が何秒なのか、つまり、これが先述の加速度応答スペクトル図のどの辺に相当するのかが分かってくる。

加速度応答スペクトル図の横軸が周期になるから、1秒だったらこの辺かということで、この富士山の形の中腹付近にいるということがわかる。また、どの部材が大きく変形するのかわかってくる。この事例だと、柱脚がまず回転しているという事と、この辺の柱がかなり大きく変形するというのが分かってくる。

次に行うのが時刻歴応答解析となる。地震波を入力した時に建物がどうなるか？　この場合は、これは赤い部分が傷んで周期が伸びて、フラフラの状態になっていく。時刻歴応答解析では、こういう動きと変形量と損傷個所を知ることができる（図7）。通常は損傷の大きい赤い部分を補強するというのが自然な考えになるが、それ以外にも様々なアイデアがある。

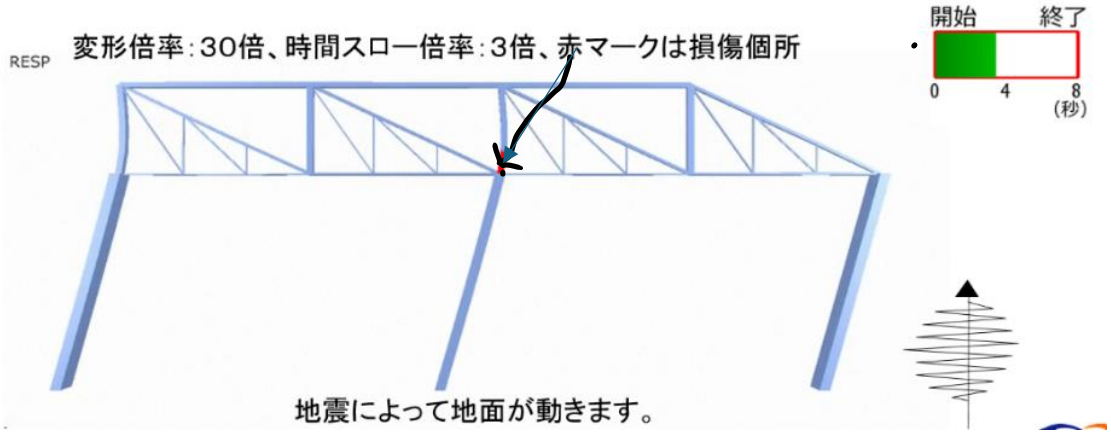


図7　時刻歴振動解析結果

時刻歴応答解析では共振現象を調べることができる。入力した地震動に対して、どれくらい大きな応答が出るのかが分かる。それと同時に考慮できるものとしては、接合部の破断や座屈、ブレースの部材の降伏である。また鉄は引っ張ると、ある応力を超えると弾性変形から永久変形が残るような領域（降伏）に入るので、大きな力がかかった時の材料の特性を考慮した解析が必要となる。普通の鉄の弾性状態とは小さな力がかかった時の力と変形の関係であり、力を戻せば形状も元に戻るが、永久変形が残るような状況（材料の塑性化）まで追跡できるというのが、この時刻歴応答解析の特長である。

一般的に Is 値を上げるための補強計画を立てると、図8のように柱間にブレースを設置するのがオーソドックスな提案となる。横に変形するのだったら抑えていこう。こういう突っ張りを入れればいいだろうという思想である。単純明快であるが問題点として、ブレースを設置した個所は人も荷物も通れなくなる。また工場の場合は生産ラインや、経路には様々な配管や機械が置いてあるので、この案は現実的ではない。ここからブレースの設置個所の検討が始まるが、結局行き詰まることが多い。もともと補強箇所にラインが通っていたり機械があったり、移動するのが困難であったり、そもそも移動できないなど、仮に設置できたとしても工場を止めて工事する必要がある、また工場を止めている期間の事業の負担を考えると、結果的に高価になる。設計は単純で、材料としても安いが、トータルの費用を考えると非常に大きくなる。

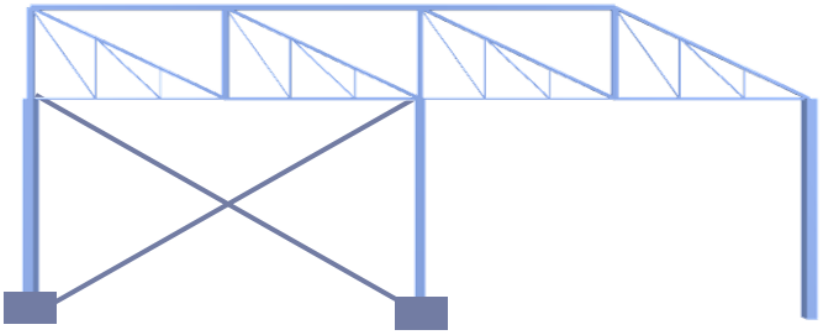


図8　ブレース設置による補強例

もう一つよく出てくる案が門形ラーメンでの補強案である（図9）。門形の架構を柱間に組み込むもので、これも　考えとしては明快である。しかし、これも実は邪魔にはなる。工場の柱の際には電気や水等の配管がり、機械の寸法がギリギリで収まっていたりすると設置できない。またブレースと同様に施工する際は、工場を止める必要がある。

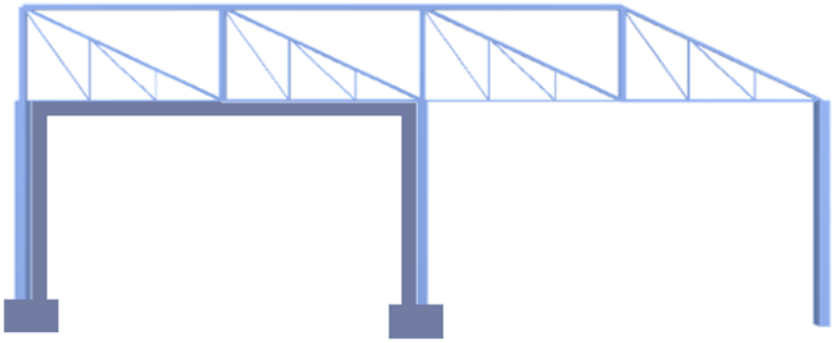


図9　門型ラーメンによる補強例

このようにいろいろ考えていくと Is 値を上げる補強計画は結構高価になる、というのがよくあるパターンである。耐震改修促進法に従って提案した内容なのに大きな費用が掛かる。補強案を受け取る側からすると何カ月も工場を止めることは難しく、ほとんど補強実施が不可能となる。

時刻歴応答解析では、Is 値（耐力×靭性）を上げる静的な補強方法のほかに、建物の揺れを利用して地震のエネルギーを吸収するという動的な補強方法も発想することができる。例えば、外付け制震工法と呼ぶやり方である。外側にフレームを立ててオイルダンパーで受けることによって揺れを抑えることがでる（図10）。

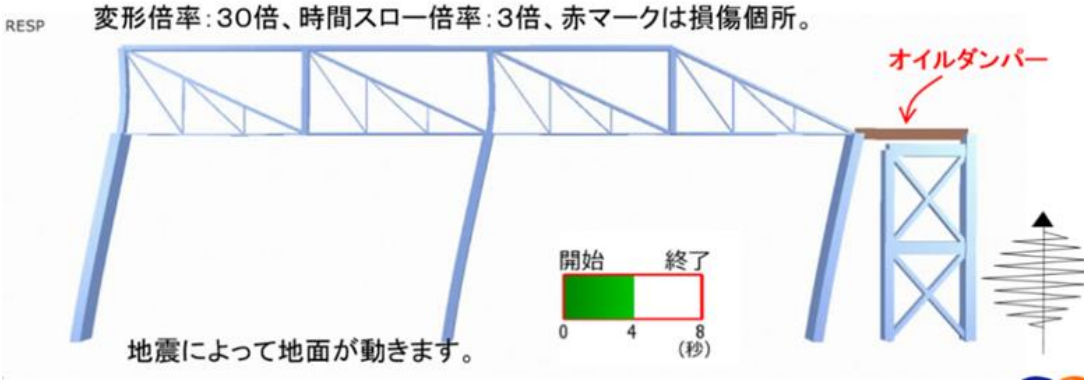
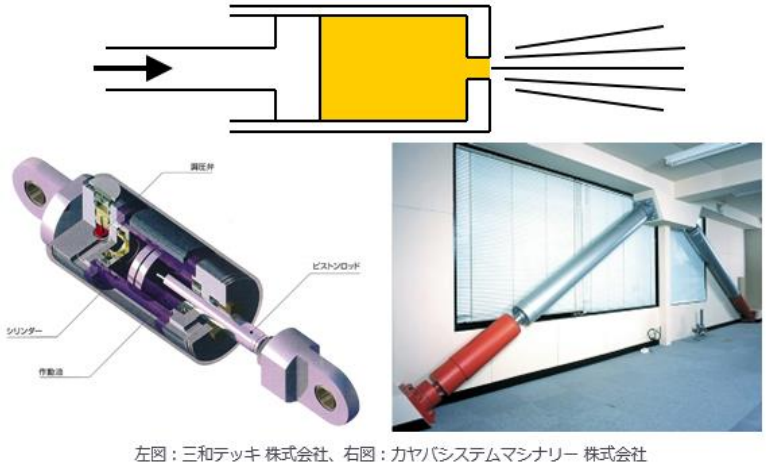


図 10　オイルダンパーによる制震補強例

オイルダンパーとは、図11のように水鉄砲的な形状で、ピストンで圧力によりオイルが吹き出し、運動エネルギーになってエネルギーを消費していく仕組みである。最終的にはオイルの温度が上がることによって地震力のエネルギーを温度のエネルギーに変え、効率良くエネルギーを吸収することができる。

エネルギー吸収の状況を、図12のように表現すると、エネルギー吸収というのは変形と力を掛けたものであるから、グラフの面積と同等と考えることができる。このオイルダンパーの動作履歴を、横軸が変形で縦軸が抵抗力という形で描くと、うずまき状の形（桃色部分）になり、エネルギー吸収量を把握することができる。これはダンパーが引っ張ったり押し込まれたりしながらエネルギー吸収していくことを示す。地震による建物の揺れのエネルギー吸収をオイルダンパーに任せることができ、建物がエネルギー吸収しなくていいといえる。建物がエネルギー吸収するということは、建物が壊れることになる。例えば柱が壊れたり、壁が壊れたりすることでエネルギー吸収するが、それをオイルダンパーに任せることができることになる。オイルダンパーによって変形が抑えられるので部材の損傷も少なくて済む。また工場の内部の施工が少なく、工場は基本的に稼働したまま工事ができる。やはり工場を止めなくていいというメリットが一番大きく、補強のトータルコストも抑えることができる。顧客からも期間や費用の負担が少ないということが決め手になって、多く採用されている。

ただ、この工法は全ての建物に適応できる訳ではない。例えば、工場の外部にオイルダンパーを設置するための十分な敷地が必要であるし、接合部にフレームを作るだけの余裕が必要である。実際は建物ごとに地盤や想定地震などを考慮して個別に提案している。



左図：三和テッキ 株式会社、右図：カヤバシステムマシナリー 株式会社

図 11　オイルダンパーの構造

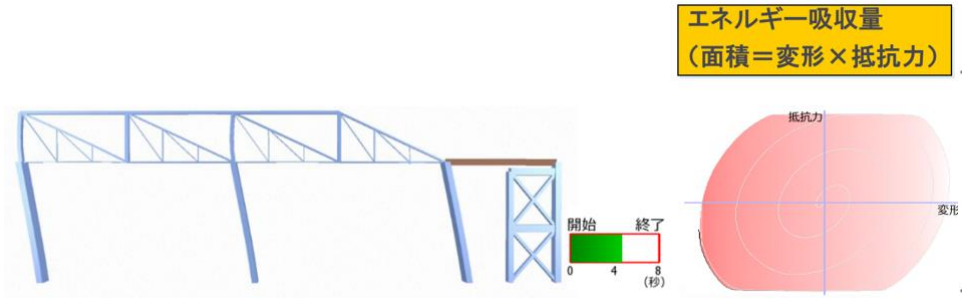


図 12　オイルダンパーによる地震エネルギーの吸収

シミュレーション技術の採用によって、実現できたことを以下に示す。

・今後の共用期間を考慮した納得性の高い地震動の設定（最大被害だけを想定しない）
・地震動毎の損傷程度・損傷部位の推定（地震ごとに建物の弱点を捉える）
・補強工事の難易度が高い領域や干渉部材を回避した現実的な施工プランの提案

しかし、新耐震設計法で採用されているとはいえ時刻歴応答解析法を用いることは、耐震改修促進法が要請する構造耐震指標 Is 値を用いた補強ではないために、施主の社内説明・株主あるいは取引先への説明などで支障が出る可能性がある。このような問題については、公的な建築性能評価機関による技術審査だけでなく、実績ある大学教授による個別の評価など、様々な解決策がある。

5. 地震対策の進め方

近年、企業のサステナビリティや ESG 投資（TCFD）への関心が著しく高まっており、その一環として企業の防災や事業継続計画（BCP）に対する投資においても戦略的なアプローチが求められている。防災対策などの投資内容も、品質（Q）、コスト（C）、納期（D）といった視点から評価され、経営陣や社員を含むステークホルダーとの合意形成が不可欠である。製造業の工場の地震対策には、生産に関わる関係者も多く、設計、施工だけはなく設備の移設などを考えると、多大な時間と費用が掛かる。地震対策は大きな投資であり、投資計画を経営者など意思決定層へ説明するには、まず工場施設のあるべき姿を明確にして、想定すべき地震シナリオにおいて現状ではどのような被害状況になるかを評価し、そのギャップを定量的に分析した上で、ギャップを解消するための対策の必要性と、その効果についても定量的に示す必要がある。

筆者らは、現在のリスクを正しく評価し、受け入れ可能な被害レベルについて合意形成し、必要な対策を確実に実施し、その効果をモニタリングによって検証し、より良い対策を施していくという循環を提案する（図13）。

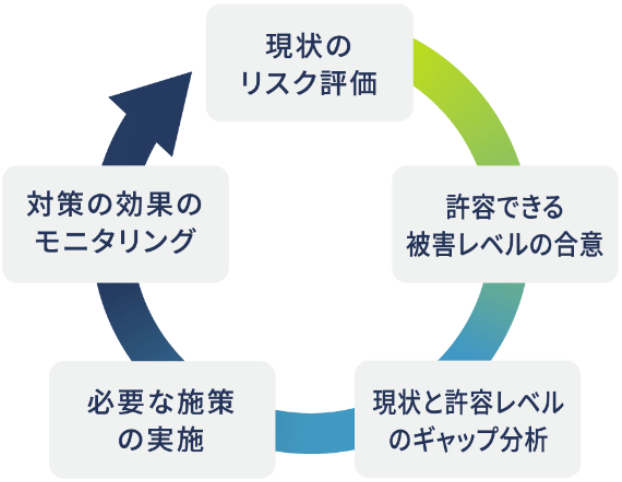


図13　地震対策の進め方

6. まとめ

Is 値に関する利点と問題点を示した。耐震補強の目標である Is 値（=0.6）は、1968年の十勝沖地震、1978年の宮城沖地震における鉄筋コンクリート造建物の被害統計値を元にした指標であり、工場を Is 値指標で耐震補強をする場合、ほとんどの工場は鉄骨造であり、発生する地震も様々であることから、その効果やコストの面で、必ずしもベストとならないケースがある。

新耐震設計法の施行から43年以上が経過し、表層地盤の影響も考慮して建物の振動挙動を把握するシミュレーションの技術も普及している。また阪神淡路大震災以降、国の機関により主要活断層や海溝型地震の場所、規模及び発生確率に関する調査研究が進んでいる。筆者らは、超高層建築の設計でも用いる弾塑性時刻歴振動解析を用いて工場施設の地

震対策を取り組んでおり、その効果やコストにおいて非常に良い結果につながった。

通常は「耐震補強を実施する＝安全、耐震補強を実施しない＝危険」というような認識を持ちがちである。しかしシミュレーション技術を用いる設計では、安全性とコストのバランスから設計目標をどこに置くのかを、力学的な根拠を明確にして決める必要がある（図14のブルーのゾーン）。

今後発生する地震に対して、ある程度の被害の発生を想定し、どこまでの被害を許容するのかという考え方も必要である。そしてシミュレーションによる定量的な被害想定は、地震対策の費用対効果の議論に有用であり、関係者の合意形成を促進につながる。

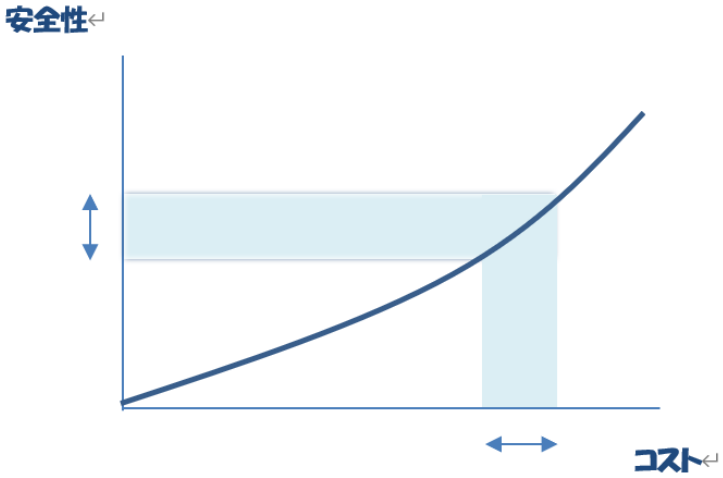


図14　安全性とコスト

これまでの筆者らの取組みが、国難ともいわれる南海トラフ地震が発生したとしても、付加価値の源泉である工場の被害を最小限に抑え、日本のものづくりの継続的な成長の一助になればと願っている。

（2024年8月16日原稿受領：SIC ニュースレターVol.6.9に掲載）

技術紹介2　激甚化する豪雨災害に備える：
システム化で実現する新しい防災

株式会社構造計画研究所
気象防災ビジネス室　　瀧川　宏樹氏
同　　室長　奥野　峻也氏
エンジニアリング営業 2 部　室長　山口　裕美子氏

1. 激甚化する豪雨災害

近年、全国各地で豪雨災害が頻発しており、気候変動を背景に今後も被害の激甚化・頻発化が予想されます。自治体や企業においては、想定する災害に対する十分なハード対策（事前フェーズ）と、ハード対策だけでは対応しきれない未経験規模の災害に対して適切な対応を取るためのソフト対策（運用フェーズ）を重ねて講じることが急務となっています（図 1）。

図 1　災害対策のタイムライン

2. 事前フェーズ：対策効果を最大化するためのシミュレーション検討

災害が発生する以前、すなわち事前フェーズではシミュレーションを活用したリスク評価や被害想定、補強対策の効果検証が重要です。シミュレーションによるリスク評価では、対象となる地点の地形情報などを取り込み、起こりうる最大の条件を設定することで被害状況を再現でき、どれくらいの想定規模に対してどれくらいの対策を取るべきなのか判断の基準を定量化できます。また、対策前後の被害低減率などを算出し対策による効果を事前に評価することで、経済的で効果的な対策を打つことができます。

3. 台風時の洪水・高潮シミュレーション事例

①　洪水シミュレーション事例

日本では過去にいくつもの洪水が発生していますが、洪水はその発生メカニズムにより「外水氾濫」と「内水氾濫」に大別されます。

「外水氾濫」は、台風や集中豪雨により、河川の水が堤防から溢れたり、堤防が決壊したりすることにより生じる洪水を指します。外水氾濫は大量の水が一気に押し寄せることとなるため、短時間で甚大な被害をもたらします。

「内水氾濫」は、市街地などで降った雨が排水路や下水管の雨水処理能力を超えた場合に、川に排出できなかった水が、市街地内で溢れてしまう浸水害の事を指します。都市部ではコンクリートで道路が覆われている事から、雨水が地面に浸透しにくい構造になっており、内水氾濫が起きやすい傾向にあると言えます。

洪水の発生しやすさ、発災した際の想定される浸水深は地形情報や降雨強度の想定からシミュレーションにより求めることができます(図 2)。

これらは、想定される被害レベルに応じて、施設の耐水化、止水版や土のうなどの事前準備、電気設備の上階退避などの対策を講じることが被害を抑えるために重要となります。

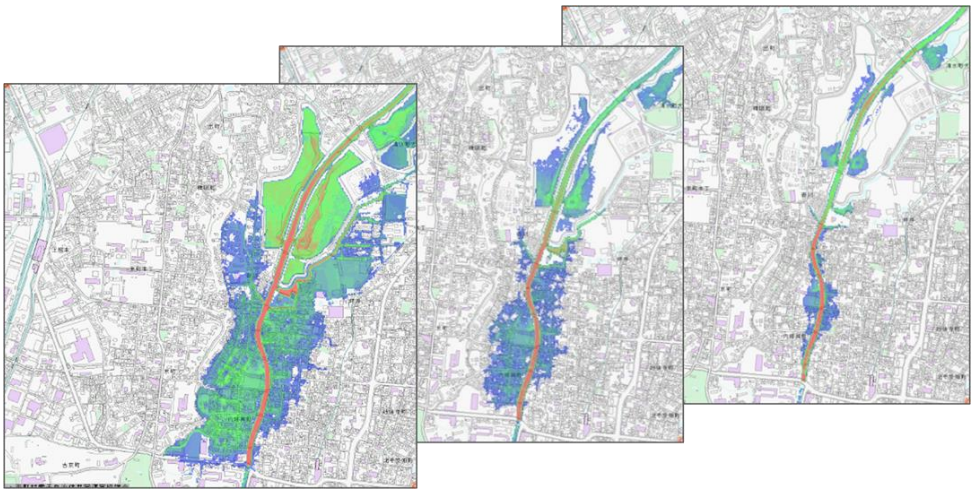


図 2　街区での外水氾濫

② 高潮シミュレーション事例

また、台風や気圧の影響により、沿岸部では高潮被害が発生します。高潮は気圧と風の影響で潮位偏差が生じる現象で発生メカニズムは主に次の3点が挙げられます。

- ✓ 吸い上げ効果:気圧の低下に伴い海水が引き寄せられる現象
- ✓ 吹き寄せ効果:風が岸に向かって吹き続ける事で発生する現象
- ✓ ウェーブセットアップ:波が砕ける事に伴い海水が岸側に押し寄せられる現象

日本でこれまで観測された最大潮位は、3.45m(名古屋港)であり、今後、台風の大型化に伴い益々高くなると思われています。高潮の被害としては、人的被害、家屋被害、ライフラインの被害等様々なものが挙げられますが、こういった被害を未然に防ぐため、「高潮浸水想定区域図」が公開されています。高潮浸水想定区域図では、各都道府県において想定し得る最大規模の台風が発生した場合の浸水深等が公開されていますが、このような図の作成にはシミュレーションの技術が使われています。

高潮浸水想定区域図の作成にあたっては、国が作成した「高潮浸水想定区域図作成の手引」を元に作成されています。手引に準拠した高潮シミュレーションをもとに、敷地や建物状況に合わせた精緻な被害予測や避難計画の検討も可能です(図 3)。

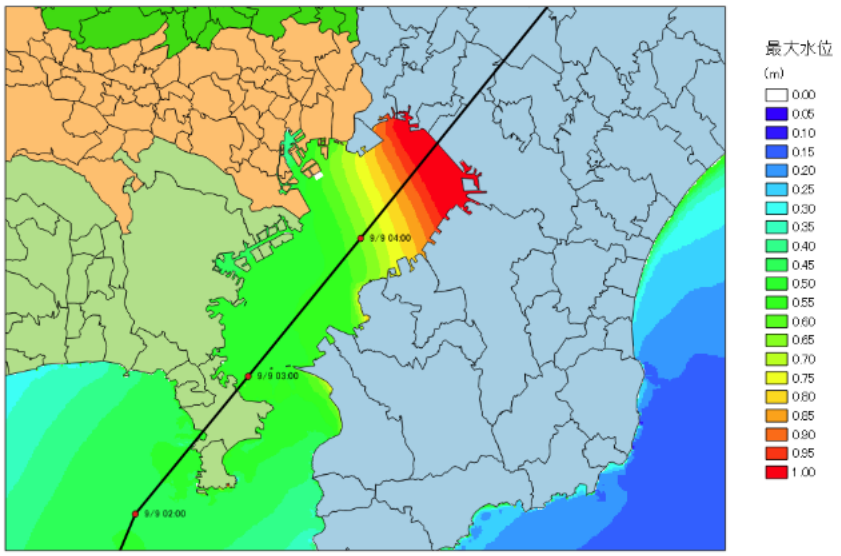


図 3　高潮シミュレーション事例

4. 運用フェーズ：充実する公的情報と課題

豪雨や洪水に関する公的情報は近年大幅に拡充されています。災害発生前の事前情報として、ハザードマップや多段階の浸水想定図等が整備され、企業や住民の防災意識向上に寄与しています。また、洪水は進行型の災害であるため、発災が予見される場合には「キキクル」や「川の防災情報」等の気象・河川情報システムを通じて、リアルタイムに状況を把握できます。

これらの公的情報は主に地図形式で提供されており、広域の状況把握に適しているという利点があります。しかしながら、洪水予報河川等の一部を除き、定量的な予測が難しいという課題も存在します。そのため、止水版の設置や従業員の避難等の具体的な防災対応のタイミング判断には必ずしも十分とは言えず、より精緻な予測情報の必要性が指摘されています（図 4）。

図 4　水防現場の声

5. 洪水予測システムの重要性

進行型災害である洪水は、予兆から発災までに時間差（リードタイム）が存在します。このリードタイムを活用し適切な行動を取ることで、被害軽減が可能です。そのため、ピンポイントかつ高精度な洪水予測が防災対策の要となります。気象・河川情報を通じて、止水板設置等の対策準備を進め、対策実施判断の決め手として精緻な洪水予測を活用することが効果的です（図 5）。

図 5　洪水予測システムの活用イメージ

従来の洪水予測は公共機関のみが実施していて、一部の大河川かつ洪水発生時のみ公開されるものでした。しかし、令和5年の気象業務法改正により民間企業の洪水予報が許可され、洪水予測技術の高度化が進められています。この法律改正により、利用者の事情に応じたきめ細かな情報の利用が可能になりました。例えば、より長期の予測情報により翌日の対応の見通しを立てたり、中小河川での予測を実施したりすることで、より安全な避難行動を実現できます。

6. 構造計画研究所の取り組み事例「RiverCast」

洪水予測システムの一例として、構造計画研究所が提供するリアルタイム洪水予測システム「RiverCast」(リバーキャスト)があります。東京大学と共同開発した予測手法[1],[2]を用いて、15時間までの河川水位を定量的・確率的に予測します。水位、流域全体の雨量、ダム放流量、潮位などの多様な蓄積データを活用し、未経験規模の洪水にも対応可能な高精度予測を実現しています。従来の流域全体の水の流れを再現する計算手法では、地形の測量などが必要で、洪水予測の開始に多大な時間と費用を要しました。しかし、RiverCast はデータのみを用いて予測を行うため、測量などは不要です。

RiverCast はクラウドシステムであり、ブラウザからログインをすれば簡単に使用できます。常に最新のデータに基づいた予測を示すため、有事の際にはモニター等に投影したり、遠隔地の関係者間で情報共有したりしながら水害対応の臨むことが可能です。また、タブレットやスマートフォンからでもアクセスできるので、屋外で作業をする方でも簡単に閲覧できます(図 6)。

図 6　RiverCast のイメージ

予測可能な河川の種類は幅広く、大河川から中小河川、都市の水路まで適用実績があります。また、ダムの影響を強く受ける中間山地や、潮位の影響を強く受ける河口付近にも対応しています。全国の自治体に導入が進み、地域防災計画における情報収集ツールとして採用(山形県鶴岡市)、既存の防災システムとの連携(福島県福島市)、準用河川に設置された市独自水位計での導入(静岡県藤枝市)等の実績があります。また、河川工事や橋梁工事・ダム工事の現場、地質調査や流量計測などの調査現場、調整池を管理する企業、インフラ関連企業等などに導入が進んでいます(図 7)。

鹿島建設様	清水建設様	大林組様	西松建設様
大本組様	西武建設様	横河NS エンジニアリング様	前田建設工業様
福島県福島市様	山形県鶴岡市様	熊本県大津町様	静岡県藤枝市様
国土交通省 徳島河川国道事務所様	NTT西日本様	応用地質様	基礎地盤コンサルタンツ様

図 7　導入団体の例

7. 令和6年(2024年)台風第10号の予測事例

高精度な河川水位予測を用いれば、水害対策の見逃し防止や空振りを低減させるだけでなく、対策実施のためのリードタイムを確保でき被害を最小化できます。本章では、RiverCast の予測精度について実例を交えてご紹介します。ここでは、大分県「竹中」(筑後川水系玖珠川)で、RiverCast による台風第10号の予測検証を行った結果を紹介いたします(図 8)。

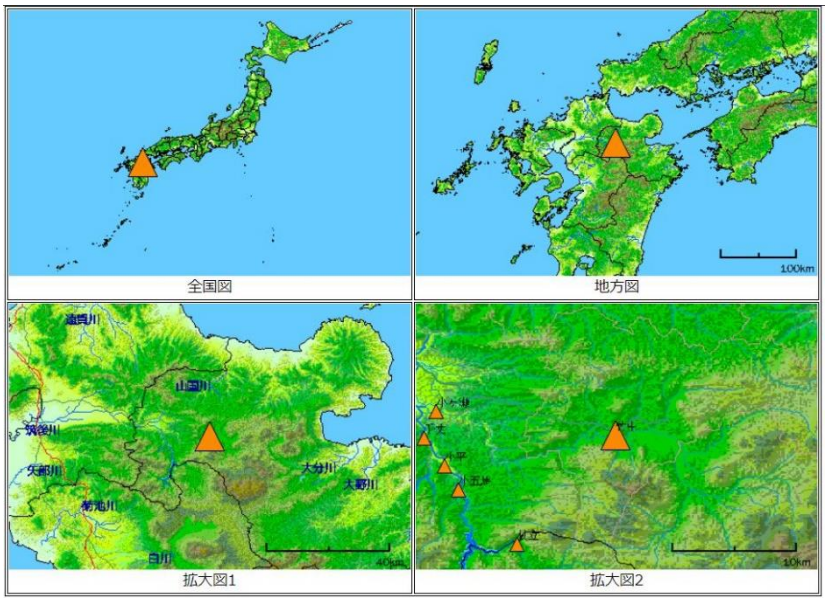


図 8　竹中地点の位置 「国土交通省 水文水質データベース」より

①　水位変動の概要

竹中地点の予測モデルを過去の水位・雨量データを学習して構築しています。この検証では、台風第10号による水位上昇を RiverCast がどのように予測したのかを整理しています。台風第10号は8月29日に九州に上陸し、西日本を中心に全国に大雨をもたらしました。今回検証する期間は8月28日夜～8月30日朝とし、その期間における最大水位は3.76m を観測しました(図　9)。堤防天端高を超える大きな水位上昇です(図 10)。

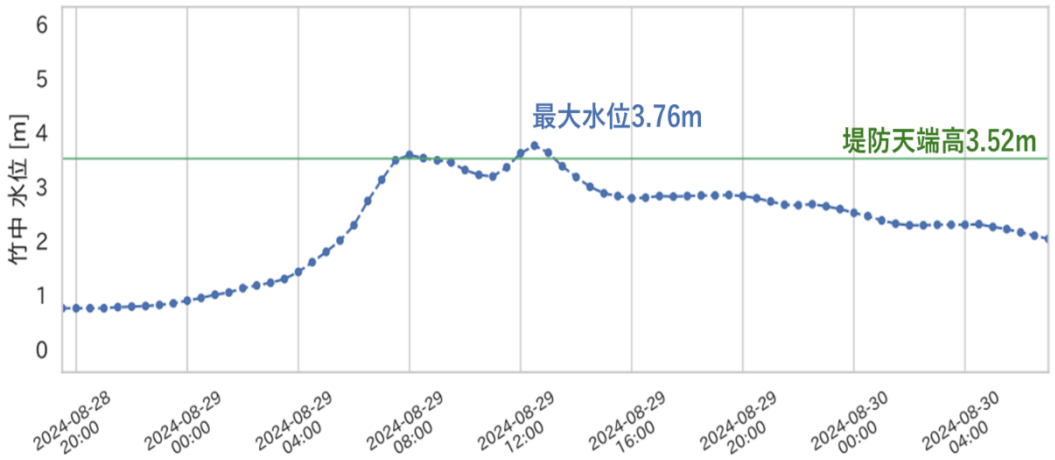


図 9　検証期間における水位変動

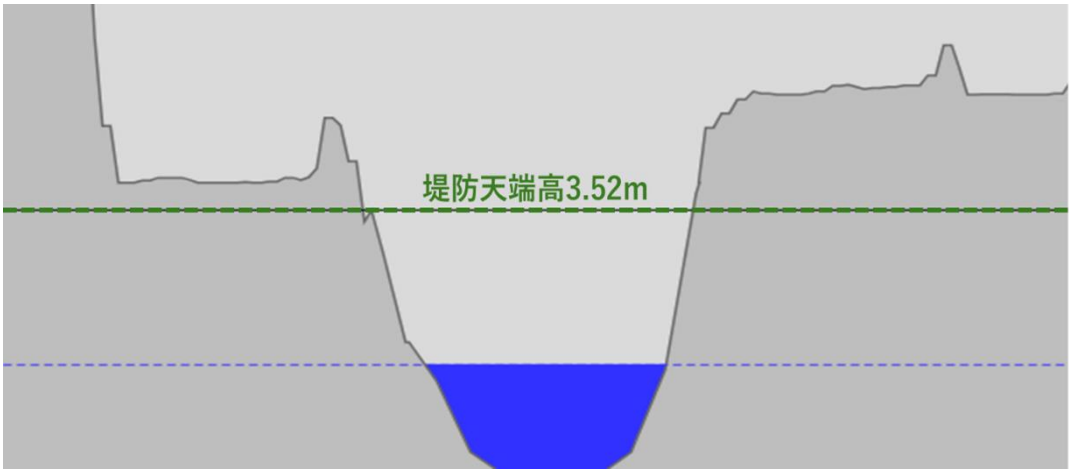


図 10　竹中地点の河川断面図

「国土交通省　川の水位情報」より加工して作成

② 水位予測結果の概要

予測結果の概要について図を交えて解説します。予測結果図は点と線が重なるほどよい結果であることを示しています（図 11）。

水位予測は天気予報の誤差の影響を強く受けます。まずは予報雨量を観測雨量で置き換え、予測モデルの性能を確認します。堤防天端高3.52m（緑線）を超えることを精度良く予測できていて、高精度な水位予測モデルであることを示しています（図 12）。

続いて、当時の予報雨量データを入力した予測結果です。RiverCast ユーザーがリアルタイムに閲覧する予測結果に相当します。予報雨量の誤差の影響を受けピーク付近に過大評価があるものの、水位上昇を高精度に予測できています。当時の雨量は、15時間累積で最大200mm も過大に予報されており、その影響を反映しています（ 図 13）。

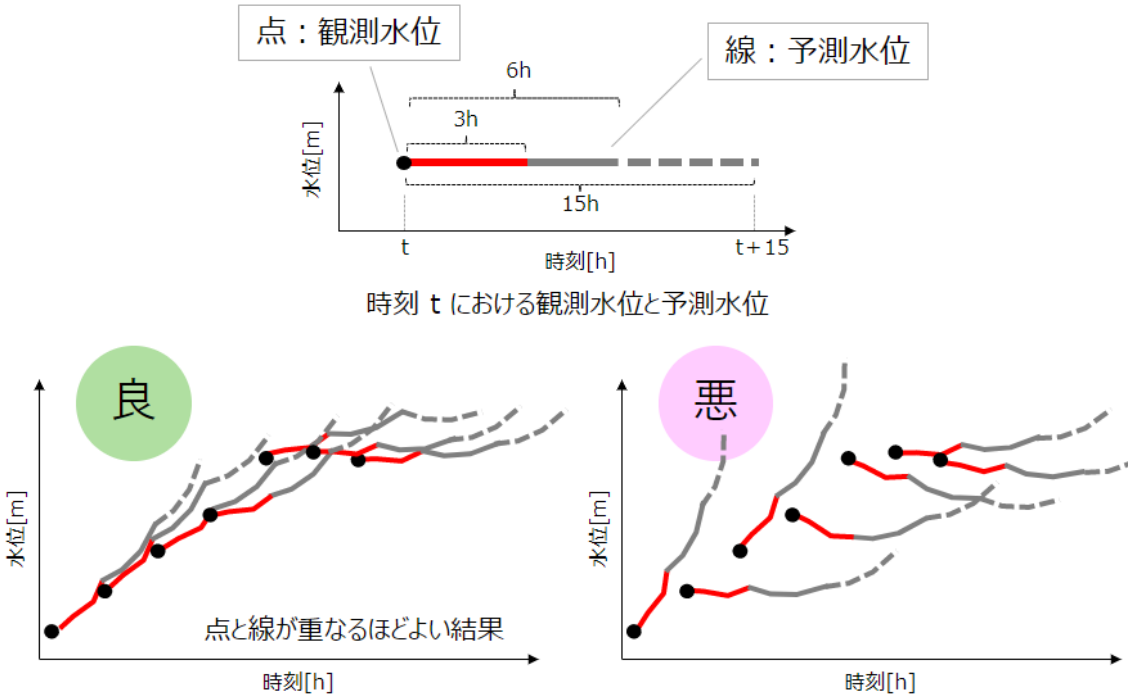


図 11　予測結果図の見方

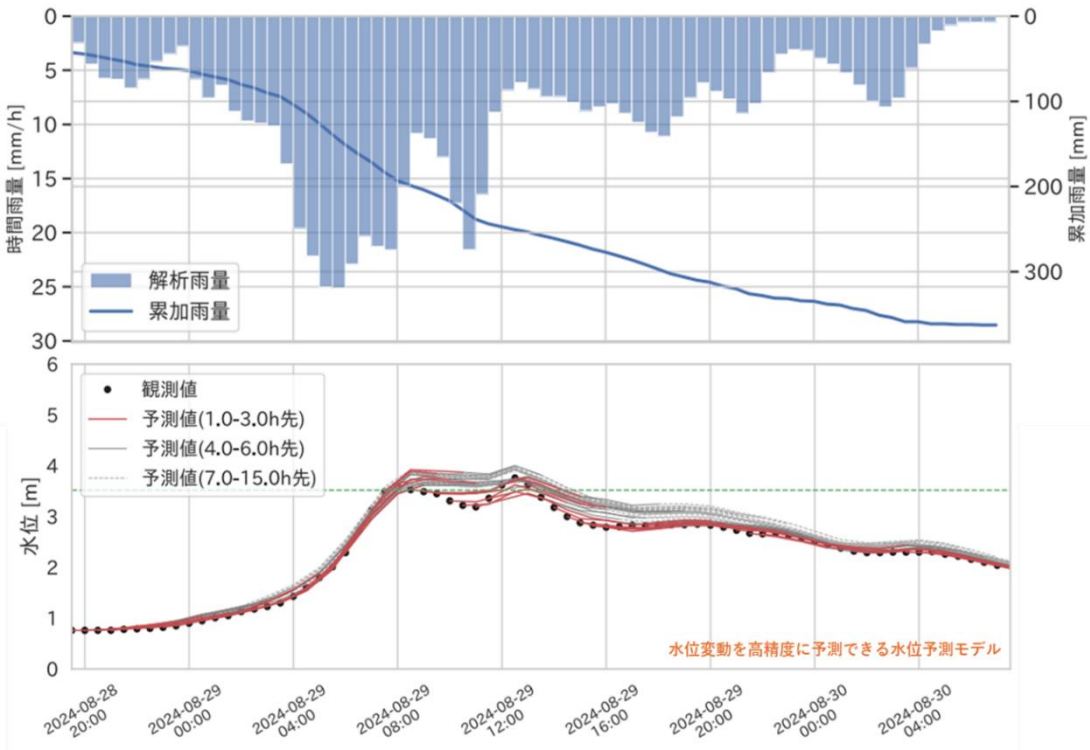


図 12　観測雨量図および予報雨量を観測雨量で置き換えた場合の予測結果図

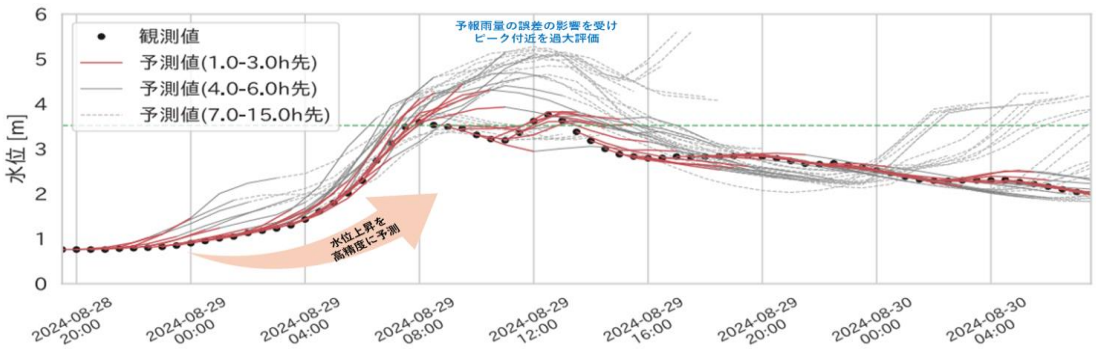


図 13　実際の予測結果図

③　雨量誤差の影響を考慮した確率的な予測

RiverCast は、過去の予報雨量と実績雨量（解析雨量）の関係から、雨量誤差の傾向を加味した予測（予測幅・超過確率）も提供しています。8月29日3:00では過大な予報雨量に起因し水位も過大に予測（赤実線）してしまっていますが、予測幅（90％信頼区間）では観測値を捉えることができています（図14）。

あらかじめ複数の基準水位を設定しておけば、それぞれの水位に対する超過確率が計算されるため、降水確率のように水位の超過確率を利用できます。

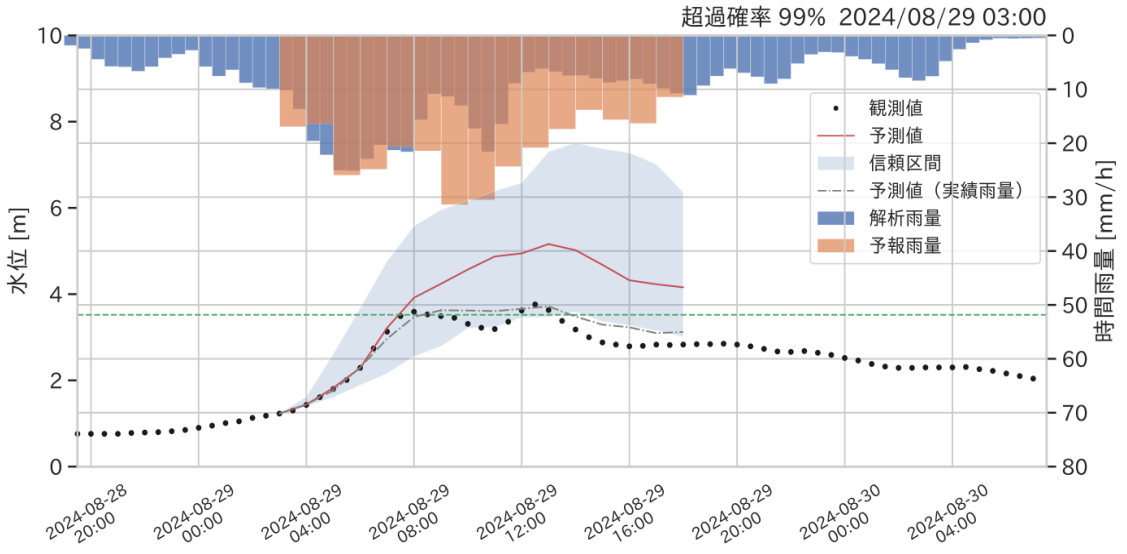


図 14　8月29日3:00の解析雨量/予報雨量・観測水位/予測水位図

8. まとめ

近年、全国各地で豪雨災害が頻発しており、気候変動を背景に今後も被害の激甚化・頻発化が予想されます。自治体や企業においては、想定する災害に対する十分なハード対策（事前フェーズ）と、ハード対策だけでは対応しきれない未経験規模の災害に対して適切な対応を取るためのソフト対策（運用フェーズ）を重ねて講じることが急務となっています。

事前フェーズでは、シミュレーションを活用したリスク評価や被害想定、補強対策の効果検証が重要です。運用フェーズでは、「キキクル」や「川の防災情報」等の気象・河川情報システムを通じて、リアルタイムに状況を把握できます。これらの公的情報は主に地図形式で提供されており、広域の状況把握に適していますが、止水板の設置や従業員の避難等の具体的な水害対応のタイミング判断には必ずしも十分とは言えません。そのため、より精緻な予測情報の必要性が指摘されています。

民間企業による洪水予報が可能になったことで、洪水予測技術の高度化が進められています。例えば、リアルタイム洪水予測システム「RiverCast」は、15時間先までの河川水位を定量的・確率的に予測し、水害対策の見逃し防止や空振りの低減、対策実施のためのリードタイム確保に貢献しています。このような高精度な河川水位予測を用いることは、水害対策の効果を最大化し、被害を最小限に抑えることが可能となり、河川防災のシステム化として有力な手段になることを期待します。

参考文献

[1] 東京大学生産技術研究所プレスリリース：2020. 01. 21
https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3225/

[2] 東京大学国際高等研究所ニューロインテリジェンス国際研究機構（IRCN）プレスリリース：2021. 03. 12https://ircn.jp/pressrelease/20210312-kazuyukiaihara

（原稿受領2024年10月4日：SIC ニュースレターVol.6.11 に掲載）

Ⅳ SIC役員一覧（2024年度）

理事・監事

代表理事・センター長	浦川 伸一	損害保険ジャパン株式会社 顧問
理事・副センター長	木村 英紀	東京大学名誉教授　大阪大学名誉教授
理事・実行委員長	松本 隆明	元・独立行政法人情報処理推進機構 顧問
理事	青山 和浩	東京大学大学院工学系研究科人工物工学センター 教授
理事	遠藤 薫	学習院大学 名誉教授
理事	岡本 浩	東京電力パワーグリッド株式会社 取締役 副社長執行役員
理事	久間 和生	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 理事長
理事	齊藤 裕	独立行政法人情報処理推進機構 理事長　DADC センター長
理事	島田 太郎	株式会社東芝 代表取締役　社長執行役員 CEO
理事	島津 めぐみ	富士通株式会社 執行役員副社長 COO
理事	服部 正太	株式会社構造計画研究所ホールディングス 取締役 代表執行役
理事	人見 光夫	マツダ株式会社 シニアフェロー イノベーション
理事	舩生 幸宏	横河電機株式会社 常務執行役員（CIO）
理事	水落 隆司	三菱電機株式会社 執行役員 開発本部
監事	舩橋 誠壽	元・特定非営利活動法人横断型基幹科学技術研究団体連合 理事

顧問

定款第35条にもとづき、下記の方が顧問に委嘱され、SIC の事業運営に関してセンター長への助言を行います。

顧問	立松 博史	株式会社野村総合研究所 顧問

Ⅴ SIC会員一覧（2024年度）

正会員

SCSK株式会社
株式会社NTTドコモ
株式会社構造計画研究所
株式会社テクノバ
株式会社ニューチャーネットワークス
株式会社日立国際電気
株式会社日立システムズ
NTTコムウエア株式会社
株式会社クエスト
株式会社JSOL
株式会社東芝
株式会社野村総合研究所
株式会社日立産業制御ソリューションズ
株式会社日立製作所　研究開発グループ
社会システムイノベーションセンタ
損害保険ジャパン株式会社
東京電力パワーグリッド株式会社
日本郵船グループ株式会社MTI
富士通株式会社
三菱電機株式会社
ロジスティード株式会社（旧日立物流株式会社）
東京ガス株式会社
日鉄ソリューションズ株式会社
ファナック株式会社
マツダ株式会社
横河電機株式会社

準会員

電脳バンク株式会社（準1）
三菱重工業株式会社
デジタルイノベーション本部（準2）

（準1）インキュベーション会員、（準2）人財育成限定会員
（2024年12月末日現在：五十音順）

SICニュースレター「論説・寄稿」集（第5巻）（2024年度掲載分）

発行者 ： 一般社団法人システムイノベーションセンター（SIC）
代表理事・センター長 浦川伸一
2025年1月14日発行 非売品
編集者 ： SIC実行委員 中野一夫（構造計画研究所）
事務局 ： 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-12-7 ストーク新宿 B-19 号
URL: https://sysic.org E-mail：office@sysic.org Tel.Fax：03-5381-3567