



## SICニュースレター「論説・寄稿」集（第3巻）

（2022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）の広報誌「SIC ニュースレター」（月刊：web 発行）に掲載された2022年度（2022年1月～12月）の記事を、2022年3月開催のSIC 定時社員総会後に二代目代表理事・センター長に就任された浦川伸一氏の「就任の挨拶」を巻頭に、SIC 会員からの「論説」6編、非会員からの「寄稿」4編、木村英紀 SIC 理事・副センター長の「コラム」（3篇）を掲載時の内容を改変することなく集約したものです。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」のアーカイブに関しては、SIC のホームページ <https://sysic.org/> に公開しています。

2023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) 2023.1

---

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

I SIC センター長就任にあたって SIC 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)	
II 論説(SIC 会員)	
論説1 東京都立産業科学技術大学院大学のリカレント教育の取り組み……3 東京都立産業技術大学院大学 学長 川田誠一(SIC 学術協議会会員)	
論説2 三菱電機のシステムイノベーションへの取り組み ……11 三菱電機株式会社 執行役員 ビジネスイノベーション本部 副本部長 水落隆司(SIC 理事)	
論説3 持続可能な社会とデジタルトランスフォーメーション ……16 NTTコミュニケーションズ株式会社 理事 ビジネスソリューション本部 ソリューションサービス部 スマートエンジニアリング部門長 赤堀英明(SIC 理事)	
論説4 産業構造変革とシステムズ・アプローチ ……21 ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会 産業IoTアドバイザー 水上 潔(SIC 実行委員)	
論説5 DX の着想の源「オペレーションズ・マネジメント(=OM)と経営工学」29 株式会社野村総合研究所 産業ITイノベーション事業本部 兼 未来創発センター シニアチーフストラテジスト 藤野直明(SIC 実行委員)	
論説6 サステナブルで安全・安心・快適な社会の実現に向けた デジタルイノベーション ……34 三菱重工業株式会社 シニアフェロー デジタルイノベーション本部長 高浦勝寿(SIC 正会員)	

### III 寄稿(非会員)

- 寄稿1 サイバー・フィジカル連携による新価値創造 .....40  
サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合 常務理事  
高山光弘氏
- 寄稿2 カーボンニュートラル社会への民生部門の課題 .....45  
大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授  
下田吉之氏
- 寄稿3 日本郵船におけるデジタルイゼーションの取り組み .....50  
株式会社 MTI (日本郵船グループ) 取締役 船舶物流技術部門長  
安藤英幸氏
- 寄稿4 指数関数的時代の企業戦略 .....59  
公益社団法人 日本オペレーションズ・リサーチ学会 会長  
東京ガス株式会社 社友 山上 伸氏

### IV コラム (SIC 理事・副センター長 木村英紀(東京大学・大阪大学名誉教授))

- コラム1 システムと人間 .....67
- コラム2 「ソサイエティ5.0」と「デジタル社会」 .....71
- コラム3 A Nation at Risk : 危機に立つ国家 .....74

### V SIC 正会員一覧(2022年度)

## I SICセンター長 就任にあたって

SIC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）

システムイノベーションセンター（SIC）齊藤裕初代センター長から引き継ぎ、二代目センター長を拝命いたしました。

誠に身の引き締まる思いであります。今後、本センターが、初心を貫き、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り組ませていただきます。



Society5.0を実現するため、官民学が連携し、日本の強みを見出し、より豊かで実りある生活を実現するため、システムの力を存分に活用することが期待されています。

その中核技術の一つであるインターネット技術は、1990年代から大きく進化し、目まぐるしい勢いで社会インフラとなりました。この新たなシステム基盤は、デファクトスタンダードを獲得した技術が世界を席卷し、技術のみならず、資本主義経済そのものの基盤をも司ってきました。

マーケットに受け入れられた新技術や新ビジネスモデルが新たな経済を牽引していくことに異論の余地はありませんが、信頼できるインターネット技術、安全で安心なシステム環境を確保する基盤は、デファクトスタンダードだけに頼っていても実現できるものではないことが次第に課題となってきました。

また、System of Systems (SoS) と呼ばれる、複雑なシステム環境が日常化し、安定的なシステム運用を阻害しかねない状況も日増しに課題になっていると思います。

オープンシステム、オープンイノベーションをこれまで以上に加速させるためには、標準化に加え、一定の牽制機能も必要、との論調も高まり、内閣官房はTrusted Web 推進協議会を立ち上げ、日本発の信頼できる Web 技術の世界標準の確立に動き出しています。

また、人工知能技術がディープラーニングの進展により急発展していますが、企業などの情報システムへの有機的な組み込みには至っていません。人工知能を正確に理解

し、情報システムに組み込める技術者が極めて限定的であることがボトルネックになっており、産官学での人材育成が急務であることに議論の余地はありません。

加えて、データ共有については、2019年に政府がDFFT（Data Free Flow with Trust：信頼性のある自由なデータ流通）を提唱し、国を跨ったデータ流通環境の推進を打ち出しました。これも国や企業などの警戒心、データ流通のための標準、セキュアなデータ流通に必要な技術の未成熟など、複数の理由で、なかなか進展していませんが、EUではGAIA-X（欧州統合データ基盤プロジェクト）が進み出し、日本でもDSA（データ社会推進協議会）が立ち上がって、官民学連携による推進が加速しつつあります。

このように、本センター設立からの3年を顧みても、システムを取り巻く環境は、急速に動きつつあります。

本センターでは、政府や経済団体など、様々な機関での動きを察知し、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の「ハブ役」になりたいと考えています。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推進いたします。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。

2022年4月吉日

一般社団法人 システムイノベーションセンター 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 取締役 専務執行役員 【CIO】)

## II 論説(SIC会員)

### 論説1 東京都立産業技術大学院大学のリカレント教育の取組

東京都立産業技術大学院大学 学長 川田誠一(SIC学術協議会会員)

#### 1. はじめに

東京都立産業技術大学院大学 (Advanced Institute of Industrial Technology : AIIT)は、2006年4月に公立大学法人首都大学東京により「産業技術大学院大学」の名称で設置された。設置法人名が東京都公立大学法人に変更されるに伴い、2020年4月に校名を現在の東京都立産業技術大学院大学に変更した。専門職修士課程のみの1専攻3コースで構成される学部を持たない専門職大学院大学である。この分野の専門職大学院には通常の工学研究科の教員の1.5倍の教員を配置しなければならない。その内訳はおよそ専任の研究者教員を1とするとおよそ0.5が専任の実務家教員となる。このように専門職大学院と通常の大学院との違いについてあまり知られていないことも多い。本稿では、主として社会人を対象とした産業技術分野の大学院である本学の特色について説明し、今まで大学院に行く必要がなかった人たちを対象とした大学院をどのように企画し運営してきたか、特徴的な仕組みなどを中心に説明したい。

#### 2. 開学時の背景と設置に対する考え方

本学が設立される1年前の2005年4月に公立大学法人首都大学東京が運営する首都大学東京(現在の東京都立大学)が開学した。それまで東京都が設置していた旧東京都立大学、旧東京都立科学技術大学、旧東京都立保健科学大学、旧東京都立短期大学の4校が廃止され、統廃合により新しい大学として首都大学東京が開学したのである。一方、東京都立産業技術大学院大学は大学院設置に必要な多くの教員を新たに採用して大学が設計された設置された。そして、開学時から産業技術分野の専門職大学院としての特色を最大限発揮することに努めてきたのである。また、令和元年度の国立大学法人法改正までは国立大学法人は一法人一大学という制約があった。公立大学法人には当初からこの制約がなく、東京都公立大学法人は東京都立大学、東京都立産業技術大学院大学、東京都立産業技術高専の2大学1高専を運営している。

さて本学の開学時には、本学産業技術研究科に設置した情報アーキテクチャ専攻という一専攻だけでスタートした。この専攻を修了すると情報システム学修士(専門職)という専門職学位が授与される。これは当時の産業界が情報人材の不足を声高に叫ん

でいたことに呼応するものであった。

本学開学の1年前の2005年6月に経団連が政策提言として『産学官連携による高度な情報通信人材の育成強化に向けて』という意見書を出している。この意見書によると『企業が新卒者に求める理想と現実のギャップ』という項目で日本の大学教育では企業で必要とされる情報教育がなされておらず企業内での教育で何とかしているとのことが論じられていた。極めて辛らつに日本の大学の情報教育が役に立たないと言い切っていたのである。図1は、当時の経団連の調査によるものであり、海外の大学と比較して日本の大学の情報工学のカリキュラムが企業ニーズからかけ離れていることを示している。

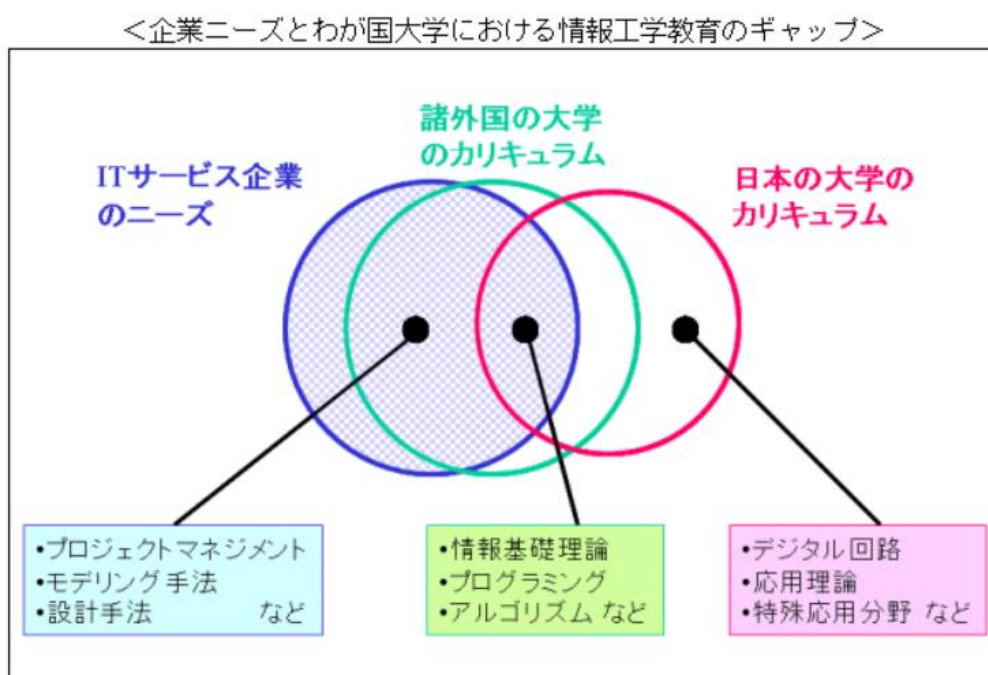


図1 企業ニーズとわが国の大学における情報工学教育のギャップ  
経団連ホームページ [1] から

このような当時の産業界の大学教育に対する批判についても相当な問題意識を持って本学は開学した。例えば本学は専門職大学院として設計されているので教員の3割程度以上は実務家教員でなければならない。このことはプロジェクトマネジメント、エンタープライズモデリング、システム開発の実務家を教員として産業界から広く求めることができることを意味する。研究成果ではなく数百人のシステム開発者を統括した部長級の人材や国際的なITベンダー企業で多国間のプロジェクトをプロフェッショナルな技法を駆使してマネジメントしてきたマネージャーを専任教員として採用できることを意味するのである。また、産業界では多くのIT技術者を社内で育てて

きたが、その半数近くが文系出身者であることも知られていた。ロジカルな思考ができれば自然科学の知識がそれほどなくとも IT 業務の遂行は可能である。また、客先が官公庁や金融、一般企業であることが多いが、その事務的な業務を IT 化するとすれば、下手に理系出身者が顧客企業に出かけて事務作業のフローなどについてモデル化するよりも文系出身者のほうがより顧客のニーズを理解して業務を遂行できることが知られていた。このような社員は大学で体系的に情報教育を受けてはいない。本学としてはこのような人たちこそ本学を選んでくれるのではないかと考えていた。実際初年度の入学生の中でかなりの数の学生が文系出身者の IT エンジニアやプロジェクトマネジャーであった。その入学式では、入学生の顔ぶれを見て大学院の新しい顧客を開拓したことが実感できた。

開学後の3年目には創造技術専攻をスタートさせた。この専攻設置にあたり問題意識としたのは、当時アップルなど海外の企業が日本企業の製品を脅かしてきたことなどであった。最高の技術力で設計し製造した製品が海外の製品に売り上げで負けるようになったのは一つにはデザインの差であり、一つにはサービス設計の差であった。当時もアップルの製品のデザインは洗練されていた。また音楽をダウンロードすることで楽しむ仕組みなど新しいサービス設計で顧客の潜在的欲求に迫る製品を開発し提供した。最近になって CD を買うのはオタクであって、音楽はストリーミングで聴くのが日常化しているが、当時我々が考えたことは、このような製品を設計するにはデザインとエンジニアリングを融合した教育が必要であるということであった。このような問題意識から開学後ただちに創造技術専攻の骨格となるカリキュラムを構築し、設置を申請し、2008年4月から学生の募集を開始した。その後、本学在学中や修了後に起業、創業する人たちが少なからず存在することから起業・創業・事業承継を視野に入れた新しい学位プログラムの必要性を感じた。このことから新しい学位プログラムを設計し、2020年4月に研究科を再編し現在の1専攻3コースの体制として今年3月に新研究科の最初の学生を送り出すところまでに至った。

本稿では、このような本学の現状について説明する。

### 3. 現在の産業技術研究科の構成

本学の産業技術研究科には産業技術専攻の一専攻だけを設置している。この専攻には3コースからなる三つの学位プログラムがある。起業・創業、企業内新規事業、事業承継等を通して未来の価値づくりを担う事業イノベーターを育成する「事業設計工学コース」、情報システムの開発の現場で活躍できる情報システム開発のための各種の IT 高度専門職技術者である情報アーキテクトを育成する「情報アーキテクチャコース」、デザインとエンジニアリングの融合によるイノベーションデザイン能力を身につけ、新たな製品やサービスをプロデュースできる人材を育成する「創造技術コース」の3コースで

ある。各コースを修了すると、それぞれ「事業設計工学修士」、「情報システム学修士」、「創造技術修士」の専門職学位が取得できる。

各コースの履修の流れの概要を図2から図4に示す。

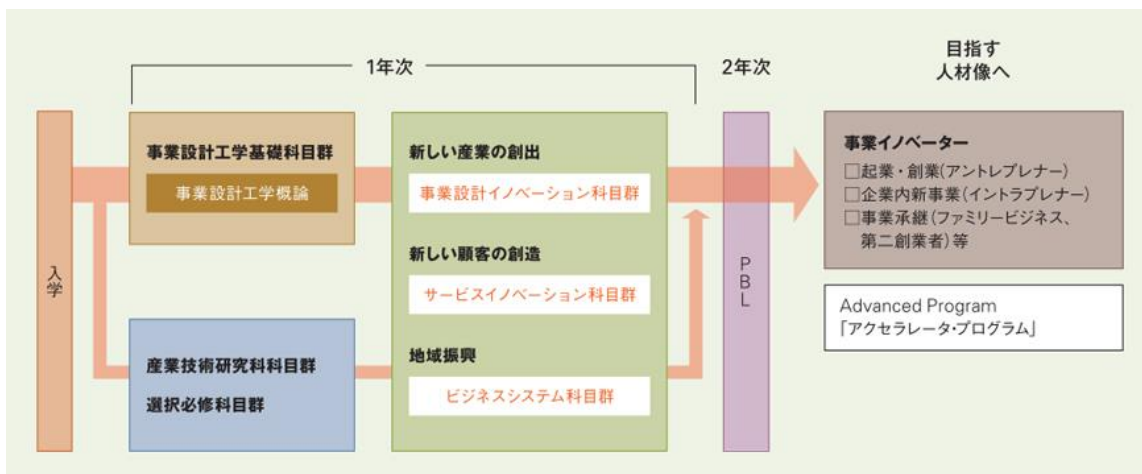


図2 事業設計工学コースの履修の流れ

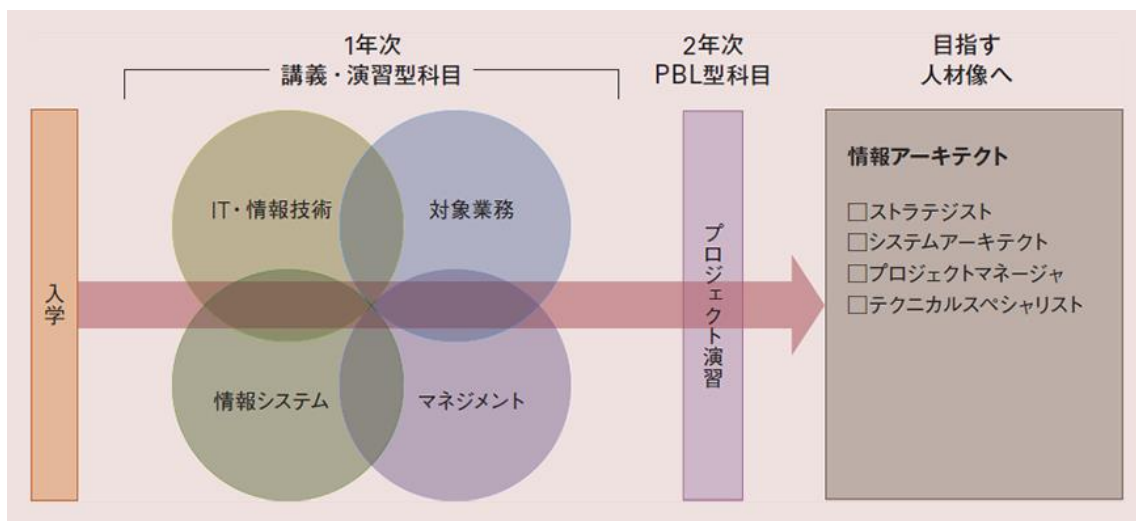


図3 情報アーキテクチャコースの履修の流れ

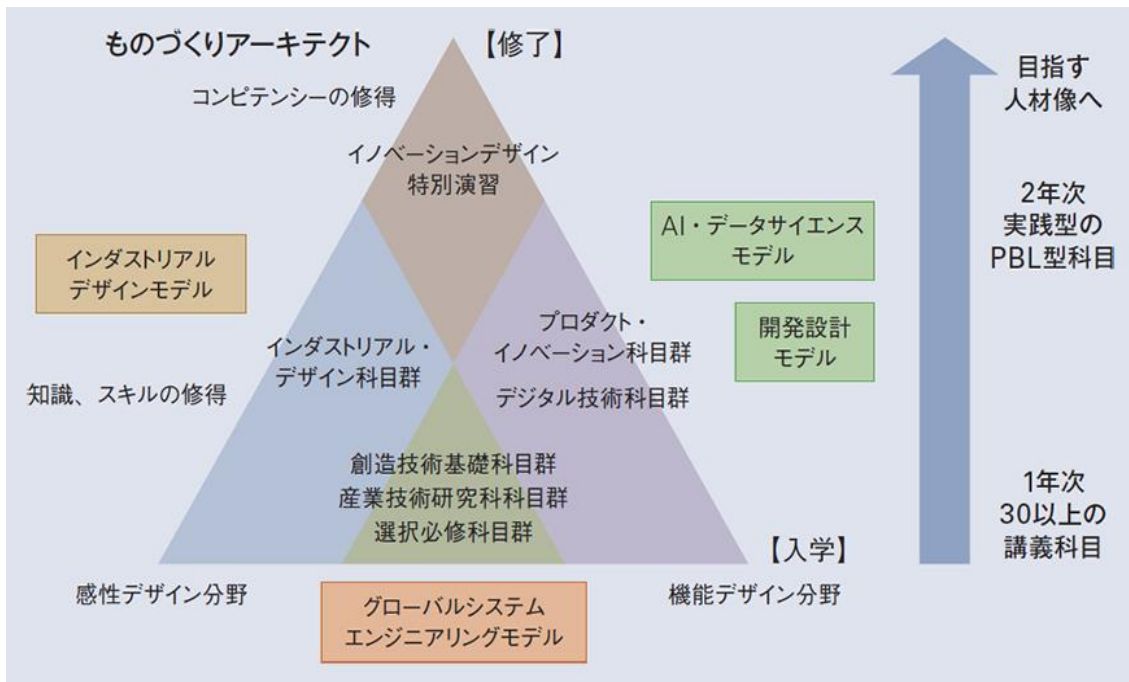


図4 創造技術コースの履修の流れ

学生の年齢構成の一例として令和3年4月入学者のデータを図5に示す。これを見ると情報アーキテクチャコースに入学するには情報分野におけるある程度の実務経験が必要であり、大学学部新卒者には入学が困難であることがわかる。創造技術コースについては大学学部新卒者から50歳代以上まで幅広く学生が入学している。事業設計工学コースについては20代後半以上で起業・創業を目指す学生が入学していることがわかる。このように本学はそれぞれのコースの適正に合わせた社会人のリカレント教育を推進している。

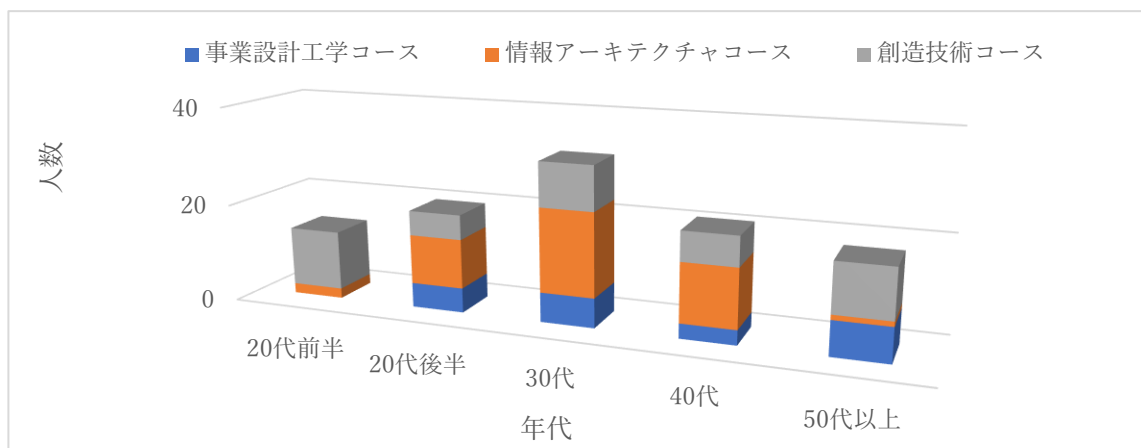


図5 令和3年4月入学者の年齢構成

## 4. 社会人を対象とした仕組みの導入

開学以来、社会人が学びやすい仕組みの構築に努めてきた。順不同ではあるが、社会人に配慮したユニークな取り組みについて説明する。

### 4.1 運営諮問会議

本学では、産業界のニーズを把握し、教育内容に反映させること、また産業界と連携し効果的な教育研究を実践するために、本学が人材育成を行う産業分野の専門家、企業の経営者等の学外委員を中心メンバーとする運営諮問会議を設置している。本会議では、産業界から見た本学教育カリキュラムの妥当性、卒業生のキャリアパス、教員の研修、PBLテーマの共同開発など本学の教育運営体制に関する広範な課題について提言を頂いてきた。

また、本学に付置されているオープンインスティテュートを活用した、共同研究、地域自治体との連携による社会貢献活動などへもアイデアの提供や産業界と連携した活動の可能性について議論頂いてきた。本学では、これらの提言を基に、産業界のニーズにもあった教育研究を実現し、これらの提言を大学の運営に活かしてきた。

### 4.2 AIIT 単位バンク制度

社会人が正規学生として入学する際不安に感じるのが、学位取得に費やす時間である。そこで入学前に科目等履修生として受講したい科目から履修することで正規学生として学びを開始することのハードルを下げることができる。本学では科目等履修生のための特別入試も設けているが、入学後には科目等履修生として取得した単位の認定とそれに費やした費用を授業料から差し引くことを制度化している。これを AIIT 単位バンク制度という。

### 4.3 社会人に配慮した時間割

会社を退職することなく大学院に入学できるよう平日午後6時30分からの2コマと土曜日に実施している6コマの授業を受講することで修了に必要な単位を取得できるように時間割を構築している。

### 4.4 クォータ制（4学期制）の導入

社会人がある期間に集中して単位を取得できるように2カ月で科目を履修できる4学期制を導入している。

### 4.5 秋葉原サテライトキャンパスにおけるリアルタイム双方向授業

開学以来品川シーサイドキャンパスの学生と同時刻に実時間双方向の授業を秋葉原のサテライトキャンパスで受講できるようにしてきた。この経験からコロナ禍の中 Zoom や Meet を使った遠隔授業を円滑に実施できた。

### 4.6 原則すべての講義をネット配信する講義支援システム

開学以来、原則すべての授業を録画し2日後までに配信してきた。また講義支援システムと援用することで学生間のディスカッションや資料の配信、レポートの受付などの仕組みを構築してきたので、急な残業や出張で正規の時間に授業に出席できなかった学生も時間差で授業を受講できるようにしてきた。このことから、コロナ禍の中、オンデマンド授業による緊急対応が必要であったが、今まで構築してきた教育システムを活用して円滑に授業を実施することができた。

#### 4.7 長期履修制度の積極的活用

大学設置基準では「学生が、職業を有している等の事情により、修業年限を超えて一定の期間にわたり計画的に教育課程を履修し卒業することを希望する旨を申し出たときは、その計画的な履修を認めることができる。」とされている。本学ではこの制度を社会人学生の利便性を考慮して積極的に活用してきた。

#### 4.8 AIIT Knowledge Home Port 制度（終了後10年間のネット配信）

本学で学位取得後10年間はネット配信している授業を視聴できるようにしており、最新の学びを支援してきた。

#### 4.9 学生会の創設

開学時に過半数代表権を持った学生会の設立を支援し、学生の大学に対する意見を取り入れてきた。

#### 4.10 既修得単位の再履修制度

自分のお金と時間を使って学んでいる社会人学生にとって単に単位が取得できる、学位を取得できるだけでは満足できないという意見もあり、高い評価を獲得して単位を取得したい学生に在学中に再履修して再チャレンジできる仕組みを導入した。再履修後に成績が下がるリスクや、学修時間を増やす必要もあるが学生の要望に対して柔軟に応えてきた。

#### 4.11 社長会の創設

学生の中には経営者や個人事業主、在学中に創業する学生もいることから、そのような学生の連携を視野に入れた社長会を設置している。

#### 4.12 国際的な取り組み APEN (Asia Professional Education Network)

本学が開発したPBL型教育プログラムをアジア地域へ拡大し、高度専門職人材を育成することを目的とし、平成23年6月、アジアの有力大学であるベトナム国家大学（ベトナム）、上海交通大学（中国）、浦項（ポハン）工科大学校（韓国）と連携協定を締結し、グローバルに活躍する高度専門職人材の育成を目的とするアジア高度専門職人材育成ネットワーク「APEN (Asia Professional Education Network)」を立ち上げた。事務局は日本の東京都立産業技術大学院大学が務めており、現在まで本学学長が会長に就任

してきた。

2011年10月3日にカンボジア（カンボジア工科大学）及びインドネシア（バンドン工科大学）、2011年10月6日にタイ（タマサート大学）、2011年11月28日にマレーシア（マレーシア工科大学）、2011年12月1日にラオス（ラオス国立大学）、2012年5月24日にフィリピン（デラサール大学）、2013年3月2日にブルネイ（ブルネイ・ダルサラーム大学）、2013年3月28日にミャンマー（ヤンゴン工科大学）、2014年7月16日にインド（グジャラート工科大学）が加盟し、2021年4月1日現在の加盟国は13か国、加盟団体は上記13理事大学を含め33団体である。小規模な大学が海外の大学と連携するにあたって、一大学対一大学では困難な連携であっても本ネットワークを活用して幅広い連携を可能にしてきた。

## 5 おわりに

22歳から72歳までの学生が学ぶ本学はまさに社会の多様性の縮図がそのまま教室で見られる。終身雇用を当たり前のこととして働いてきた人たちが自身のキャリアについて再認識し学び直しを決断して入学する人も多い。少子高齢化のなかで高校卒業生を主たるマーケットとしてきた従来の大学とは異なり、本学を目指す学生は今後もその数を増やしていくものと考えている。今の日本のキャリア課題を教育で解決しようとする本学の活動の重要性を再認識しより良い大学院教育の提供に努めていきたい。

### 参考文献

- [1] (社)日本経済団体連合会：意見書、産学官連携による高度な情報通信人材の育成強化に向けて、2005年6月21日

<https://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2005/039/index.html>

（2022年1月23日原稿受領：SIC ニュースレターVol.4.2に掲載）

## 論説2 三菱電機のシステムイノベーションへの取り組み

三菱電機株式会社 執行役員 ビジネスイノベーション本部 副本部長  
水落隆司(SIC理事)

### 1. はじめに

世界中の企業がシステムイノベーションに向かっている。デジタルの力によって社会課題が解決され、最適なソリューションとして提供されるためには、それを単なる機能的価値に留めず、人々を魅了し Narrative として共感を得る意味的価値[1]として実現されなければならない。本稿では、この考えに基づいて進めている三菱電機のシステムイノベーションと、それを可能にする ClariSense について紹介する。

### 2. システムイノベーションを推進するための「事業 DX」と「業務 DX」

三菱電機では、システムイノベーションを「事業 DX」と「業務 DX」の2つの概念で捉え、それらを一対で推進している[2]。事業 DX は、デジタル技術によって従来のモノ売り中心の事業モデルを変革し、社会やお客様にとって意味的価値を持つ統合ソリューションとして提供するものである。業務 DX は、デジタル技術とデータ活用によって業務プロセスを刷新し、生産性の向上を目指すものである。

事業 DX と業務 DX は、相互にプラスに作用しあう関係でなければならない。このことは、サプライチェーンマネジメント(SCM)とエンジニアリングチェーンマネジメント(ECM)の関係で説明できる。従来の人手に頼る時代には、SCM と ECM が相互作用することは少なく、組織の細分化や工程の部分最適化に陥りがちであった。デジタル技術により、物理現象がサイバー空間に再現されるようになると、SCM の各工程のデータと ECM のプロセスが有機的に結合することになり、属人化することなく組織間の連携が促進され、プロセスの全体最適が図られる。これにより、単なる効率化に留まることなく不確実性を増す環境変化への対応力が増す。

### 3. 社会に新しい価値を提供する ClariSense

お客様やパートナーのシステムと、当社の機器・システムとを柔軟につなぎ、様々なデータを連携・活用する統合ソリューションにより社会に新しい価値を創出するデジタルエンジニアリングの総称を、ClariSense と名付けた[3]。

それぞれの事業分野によって求められる特性や要求が異なるため、単一の IT/IoT プラットフォームで全てに対応するのは必ずしも得策ではないため、当社では事業分野ごと

に最適化したプラットフォームを複数整備している。システムイノベーションに必要な事は、社内外に分散配置されたさまざまなシステムが柔軟につながり、必要な機能・データをシステム間で自由に活用できるオープン性である。そのアーキテクチャと設計思想を ClariSense に定めた。ソフトウェア実装した先進デジタル技術の可搬性が、オープン性と効率化のキーとなる。あるシステム向けに開発した技術をソフトウェア部品化したソリューションライブラリとして登録し、他のシステムにも組み込めることも狙っている。

ClariSense が他にない価値を発揮するための重要なエンジンが、AI 技術の Maisart である[4]。機器や運用の知見と先進アルゴリズムにより、演算量削減と高精度化を実現する最新のデータドリブン型 AI 技術が、単なる IT/IoT プラットフォームではないシステム優位性を生み出し、実際の現場への適用を促進する。

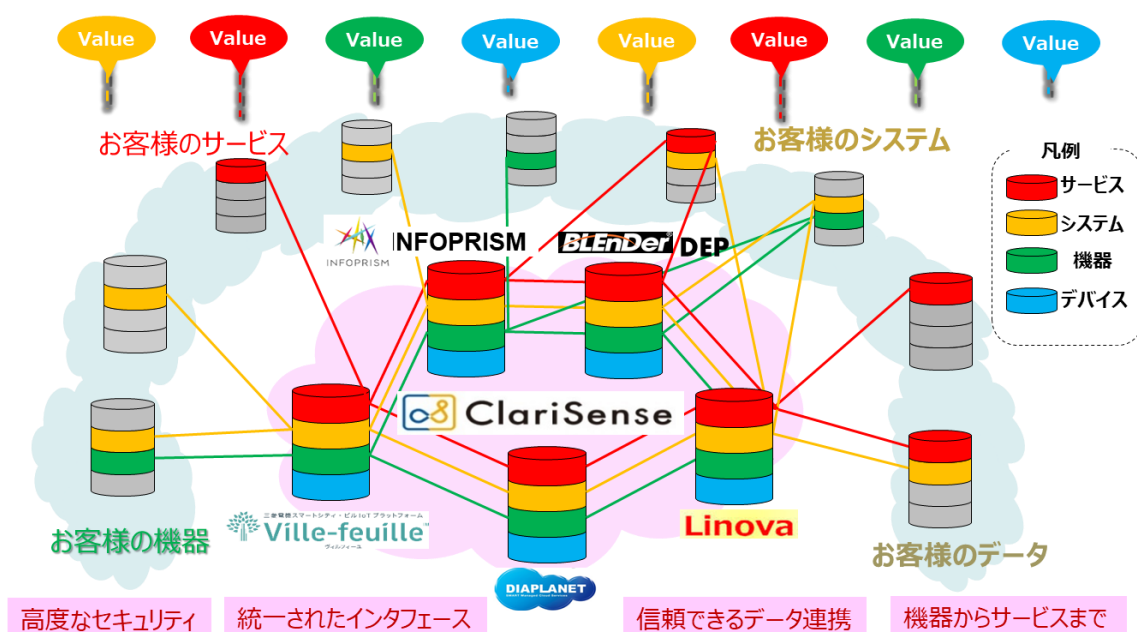


図 1. ClariSense の全体像

ClariSense は、機器・運用の知見やセキュリティなどの技術資産を、IoT システム統一設計ガイドラインとソリューションライブラリとして蓄積し、一元的に整備・拡充することで、事業の垣根を越えて活用することを目指している。

IoT システム統一設計ガイドラインは、システムを設計する上で指針となる設計ガイドを編纂しており、アーキテクチャ定義書、IoT システム設計ガイド、API 設計ガイド、マイクロサービス設計ガイドから構成される。このうち、IoT システム設計ガイドは、非機能要件を含むデータ管理・データ連携・性能・可用性・セキュリティ・サービス運用を記述している。また、各種ガイドは、具体事例から得られたグッドプラクティス、設計の勘所をまとめたチェックリストを記載している。

ソリューションライブラリは、強みとする機器・運用の知見を活かした AI やセキュリティなどの技術資産を製品適用したソフトウェア群と、IoT の基盤になる OSS・パブリッククラウドが提供するマネージドサービス、およびその実行に必要な周辺ソフトウェアや開発環境を定義している。ソリューションライブラリの流通には、System of Systems の形態で複数事業間でシステム連携/データ連携するケースと、特定の事業の機能の一部を部品化して、他の事業に提供するケースがある。前者は既存のモノリスアーキテクチャの技術資産を活用することを志向しており、後者はマイクロサービスアーキテクチャによる技術資産の再利用を志向している。

IoT システム統一設計ガイドラインとソリューションライブラリは、社内のすべてのソフトウェア開発者がアクセス可能なように社内ポータルサイトに登録されている。

### 3. システムイノベーションを推進する 3つのミッション

ClariSense をベースとしたシステムイノベーションが持続的に機能し発展するために、DX プロジェクト、DX OAM、DX エンジンの 3つのミッションを定めている。

【DX プロジェクト】 システムイノベーションを実現するためには、入口で議論を重ねるのではなく、これこそが意味的価値を持つ DX、という事業を、失敗を恐れずファーストペンギンとしてやってみせることが肝要である。このミッションを DX プロジェクトと名付けた。事業本部それぞれが持つ既存のプラットフォームの相互連携を中心とするシステムや、社外の最先端の IT システムとの連携を中心とする、自由度と新規性の高いテーマを対象とする。システム間は、アプリケーション層の Web API で連携することとし、実績を積んだ後には、データコネクタでデータベースあるいはデータレイクをつなぎ、業界標準に準拠する形で社内外とデータ連携するシステムの数を増やしていく。

【DX OAM】 システムイノベーションには、複数の事業部を横断したソフトウェアの運用・管理・保守体制、費用回収の仕組みの構築が重要である。社内には、事業部ごとに定めた規程に基づいて独自に開発したシステムが多く、それらを横断的に扱うことは容易ではない。この解決を目指す、運用・管理・保守 (OAM) に特化したミッションを DX OAM と名付けた。事業間の API 連携を一元的に運用・管理し、是正・予防・適用保守を行う体制を構築する。事業主体あるいは OAM を利用する事業部から費用を回収し、持続的に OAM が回る仕組みも構築する。既存のシステムの変更費用をどちらの事業部が負担するのか、万が一不具合が発生した時、原因元の切り分けをどう分担するのか、あるいは異なるクラウドを使用している場合、変更点管理が複雑になるなど乗り越えるべき課題は多い。しかしながら、DX OAM のメリットはデメリットをはるかに上回る。例えばプラットフォームが異なる場合でも、予防保守・完全化保守を類似のスキルで対応でき、人材を効率的に活用することができる。セキュリティなどの共通基盤を、異なるシステ

ム間で共有することもできる。また、連携する IoT 基盤が同じクラウドを使用している場合でも、リソースを効率化することができる。

【DX エンジン】 システムイノベーションを推進するための技術環境を整備するミッションを DX エンジンと名付けた。ClariSense のアーキテクチャ定義、設計ガイドラインの作成、ソリューションライブラリの登録を行う。その際、各種 IaaS や PaaS、オンプレミス・エッジ環境での動作検証を厳格に行うことが重要である。ソフトウェアの生成・検証、ソフトウェア品質保証、アジャイル開発の共通的な考え方を統一するものであって、必ずしもソフトウェアの共通利用のみを志向するものではない。

#### 4. モノリスとマイクロサービスの利点を取り入れるハイブリッドアーキテクチャ

当社が取り組んでいる事業をシステムの構築形態と更新周期で俯瞰すると、総じて社会基盤を支える事業は受注型が多く、システムの更新周期も比較的長い。入念な要件定義に基づき数百~千人をかけてウォーターフォール型でソフトウェア開発する、いわゆるモノリスアーキテクチャで作られる。一方、消費材やサービス要素が多い事業は提案型が多く、システムの更新周期が短い。従来、当社はこれらシステムもモノリスアーキテクチャで構築することが多かった。

モノリスは大きな単一の機能によりトランザクション処理などを高い信頼性で効率的に行うのに向いているが、機能追加や変更などの拡張は影響が多岐に渡り困難な場合も多い。一方、独立した複数の機能を疎結合するマイクロサービスアーキテクチャは個々の機能変更や追加が容易である。そこで、従来の受注型事業は引き続きモノリスアーキテクチャの利点を生かしながら、マイクロサービスアーキテクチャも活用したハイブリッド型に向かっていく。一方、システムイノベーションの視点から、提案型事業は頻繁な機能追加と修正を繰り返すマイクロサービスアーキテクチャで顧客価値の向上に資するよう進化していく。

お客様の様々な要件に応じるため、エンタープライズ系ソフトウェアが動作するインフラをクラウドに統一することはせず、オンプレミスとクラウドを混在させる。そこへのソリューションライブラリの実装において、マイクロサービスアーキテクチャを採用するとともに、コンテナ化による仮想化技術を活用したインフラに依存しない可搬性を実現する。加えて、ソリューションライブラリをアプリケーション開発・実行環境に展開する際、IaC (Infrastructure as Code) を活用し、手作業を減らすことで更なる開発効率化を図る。

## 5. 機能的価値に加え意味的価値を

日本のイノベーション力が諸外国に比べ低下しているとの指摘が続いている。決して技術力が低いわけではないのに、と首をかしげる企業も多い。日本企業は、「機能的価値」[1]、すなわち機能や性能で差別化することには長けていたが、そこに過度に固執しすぎていたのではないだろうか。もはや誰も使わない機能をさらに追加したり、オーバースペックの性能向上に終始してはいなかったか。既に世界は便利なモノであふれている。Y世代、Z世代の行動をみると、モノが欲しいのではなく、体験やつながりが彼らを動かしていることがよくわかる。「機能や性能が優れているから〇社の製品・サービスを買う」という行動は今後も続く。しかしそれよりも、「〇社の製品・サービスは、自分に感動や共感を与えてくれるから買う」という行動が勝りつつあるのだ。そこには人々を魅了し Narrative として共感を得るという「意味的価値」[1]がある。つまり、競争軸が「機能的価値」から「意味的価値」に移ってきているのである。

システムイノベーションが次に目指すところは、単なる機能や性能向上だけではない、意味的価値を伴うものでなければならない。人々の共感を呼び、世界をより良い方向に突き動かしていく「意味」、それは一つに定義できるものではなく、多様性に満ちたものであるはずだ。各社がパーパス経営を重視し始めたことも、世界がカーボンニュートラルに本気になったことも、機能的価値だけではない意味的価値に向かおうとしていることを表しているのではないだろうか。

## 6. おわりに

三菱電機のシステムイノベーションについて述べた。デジタル技術を駆使して、モノ売りや単なる機能的価値に留まりがちであった従来の事業モデルを、社会やお客様に最適なソリューションとして意味的価値まで付加して提供し、収益力を持続・向上させることを目指していく。システムイノベーションセンターに参加の皆様と共に価値を創出していきたい。

### 参考文献

- [1] 延岡健太郎，“意味的価値の創造：コモディティ化を回避するものづくり”，国民経済雑誌，194(6)，2006.
- [2] 水落隆司，“三菱電機の事業 DX，”三菱電機技報，vol. 96，no.2，2022.
- [3] 御宿哲也，久野信幸，“三菱電機の事業 DX を支える統合 IoT ClariSense，”三菱電機技報，vol. 96，no.2，2022.
- [4] 澤田友哉，渡邊圭輔，“DX 拡大による顧客価値創出と AI 技術“Maisart”の適用，”三菱電機技報，vol. 96，no.2，2022.

(2022年4月15日原稿受領:SIC ニュースレターVol.4.5に掲載)

### 論説3 持続可能な社会とデジタルトランスフォーメーション

NTTコミュニケーションズ株式会社 理事 ビジネスソリューション本部  
ソリューションサービス部 スマートエンジニアリング部門長 赤堀英明(SIC理事)

#### 【企業課題とデジタルトランスフォーメーションの必要性】

ご存じの方も多いと存じますが、「デジタルトランスフォーメーション、以下 DX」という言葉は経済産業省が2018年に発行した「DX 推進ガイドライン」にて定義されました。

「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること」と定義づけられています。

日本においては、「個人」ではなく「ビジネス」の文脈で実行されるデジタル化のことを指すものと言えます。

「2025年の崖」で語られるように、多くの国内企業がこのまま DX に着手せず放置していくと、IT 人材不足やシステム運用コストの肥大化を招き、国単位で年間最大12兆円の損失を生むと言われております。

また製造業の現状・課題・取るべき対策を経済産業省が取りまとめた「ものづくり白書」においても、コロナ等の影響を受けた現代の”不確実性が高まる世界”に向けた方策としてデジタルトランスフォーメーションによるデジタル化が必須であると述べられており、国・政府が至上命題として DX 推進に取り組んでいる状況です。

不確実性が高まる世界では、前例のない問題や課題を予知・予測しながら、ビジネスモデルの変革や新たな価値創出を実行していく必要があります。これを実現するのが、データに基づいて起こりうる未来を見据える仮説検証型アプローチです。具体的には、データ・情報・知見を収集し、それらをインプットに戦略仮説を立てます。仮説に基づいて環境分析および仮説の実行を行い、データに基づいた効果検証を行います。検証結果として仮説に修正すべき点があれば仮説見直しを行い、再度実行・検証のサイクルを回していく。というアプローチです。

仮説検証を高度化するためには、素早く鮮度の高いデータ・情報を収集し、過不足のない分析・検証が行われる必要があります。これを実現とするのが AI や IoT などのデジタル技術になります。デジタル技術を最大限活用した仮説検証型アプローチが、確度の高い仮説を基にした施策立案、経営判断を可能とします。

## 【社会課題とデジタルトランスフォーメーション】

温室効果ガス排出量の増加に伴う地球温暖化、新型コロナウイルスによるパンデミックやウクライナ危機によるグローバルサプライチェーンの分断など、環境課題や社会課題への意識は高まりを見せています。また2015年に国連サミットで採択されたSDGsでは、経済・環境・社会にも対応し、先進国も含めた世界共通の目標となっています。SDGsでは、企業の役割を重視し、企業による目標達成が期待されています。

しかしグローバルに広がるビジネス環境での社会課題の解決を考えると、企業によるDXだけでは達成が難しく、業界全体、社会全体でのDXが必要となってきます。

例えば、長期的な持続可能性(ESG)の視点で企業への投融資を行う機関投資家は、各企業の内部だけでなく、その取引先企業を含むサプライチェーン全体におけるCO<sub>2</sub>や廃棄物の排出量の把握と情報開示を求めるようになってきました。日本政府も、脱炭素化を進める企業を選別して投融資を行うトランジション・ファイナンスを拡大させるため、企業の環境負荷を算定・開示する方法の共通化・制度化を検討しています。

そうした中、企業各社は、自社の事業活動だけでなく、原材料の採取や輸送など自社より上流の工程と、製品の使用や廃棄など自社より下流の工程を含む、バリューチェーン全体における環境負荷の状況を正確に把握し、それを投資家や顧客や規制当局に報告する必要に迫られています。

製造業では、自社が調達する原材料や部品を生産するサプライヤーと、それらを輸送する運輸事業者から、発注する物品それぞれの供給に要したCO<sub>2</sub>排出量などのデータを収集することになります。



図1 企業が環境負荷を把握する範囲 出所：環境省

世界中に数多く散在するサプライヤーの全てから環境負荷データを収集し、調達した物品の製造や物流に要したCO<sub>2</sub>や廃棄物の排出量を正確に算定するのは困難です。それら企業間でデータを共有する情報システムを各社が自力で開発すると多大なコストと時間がかかります。また、製品の使用や廃棄など下流工程のバリューチェーンは、異業種の企業・団体が構成されるため、業界別のシステムでは対応できません。さらに、セ

セキュリティ対策レベルが不明な他社と接続してデータを送受信すればセキュリティリスクも大きくなります。

データに基づいた仮説検証アプローチを社会課題に適用するためには、まず業界や国境を越えて結ばれているグローバルサプライチェーン企業間でデータを流通／共有できる仕組み（プラットフォーム）が必要となります。このプラットフォームは参加者間で安心安全にデータを共有できるだけでなく各国の法令への準拠にも対応が必要となり、社会インフラとして整備することが求められるようになっていきます。

### 【欧州のデジタルデータ基盤 Gaia-X】

そのような時代の要請に応える社会インフラになり得るプラットフォームとして欧州 Gaia-X が注目されています。

欧州委員会は、ビッグデータ・IoT・AI を活用する第四次産業革命を実現しデータエコノミーを形成するために、欧州データ戦略を策定し、①可用性、②不均衡の是正、③相互運用性、④ガバナンス、⑤インフラと技術、⑥個人の権利強化、⑦スキルとリテラシー、⑧セキュリティというデジタルデータに係わる8つの課題の達成を目標として掲げています。そうした要件を満たすプラットフォームを、中小企業も利用できる次世代の新たな社会インフラとして整備しようとしています。

その欧州データ戦略の具現化するため、2019年10月にドイツ政府とフランス政府がデジタルインフラ整備構想 Gaia-X プロジェクトを発表し、そのための技術とルールとビジネスモデルを策定する非営利団体 Gaia-X AISBL が2021年2月に設立されました。欧州のルールでデータ提供者の権利（データ主権）を守るデータプラットフォームを構築するため、現在ポリシールールや技術アーキテクチャを検討しています。

Gaia-X AISBL には、当社を含めて欧州内外から350を超える企業・団体が加盟し、製造・エネルギー・建設・住宅・医療・IT・交通・金融・農業・スマートシティなどあらゆる分野のユースケースを具体化し、Gaia-X の Web サイト <https://gaia-x.eu/use-cases> には70以上のユースケースが公開されています。その中には、各企業の脱炭素・資源循環などの取り組み状況を示すデータを集めて事業リスクと持続可能性をAIで判定し投資家に開示するサステナブル・ファイナンスのユースケースもあります。

この Gaia-X プロジェクトには、官民から多額の資金が投入される見込みで、Gaia-X AISBL 参加企業、ドイツ政府、欧州委員会、そのほか民間企業から、2027年までに総額100億ユーロ（1兆円以上）の資金が投資されると言われています。

Gaia-X の技術アーキテクチャは図2のような要素で構成されます。下位レイヤのネットワークやデータセンターなどの通信インフラと上位レイヤのデータエコシステムをつなぐフェデレーションサービスとして、データ送受信を行う IDS コネクタ群、それ

らを管理しデータアクセス権限を付与する認証機能、データの所在や提供者を管理して検索を可能とするカタログ、データ利用履歴を管理し課金も行えるデータ取引機能、システムが Gaia-X のルールや技術仕様に準拠して構築運用されているかどうかを第三者が審査する認証スキームが一体的に提供されます。

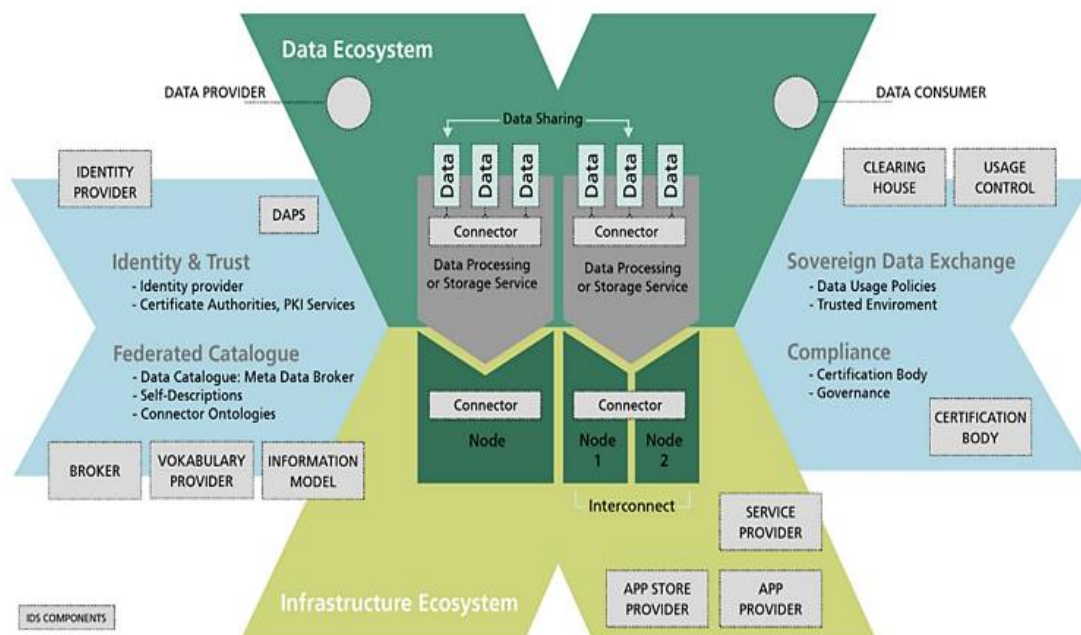


図2 Gaia-Xの技術アーキテクチャ 出所: Gaia-X and IDS, Position Paper, Version 1.0

データを送受信するIDSコネクタは任意のコンピューター（エッジ、サーバー、クラウド）に配備でき、秘匿性の高い情報は、データ受信相手のIDSコネクタ内に隠蔽して保管し処理させることも可能な設計になっています。

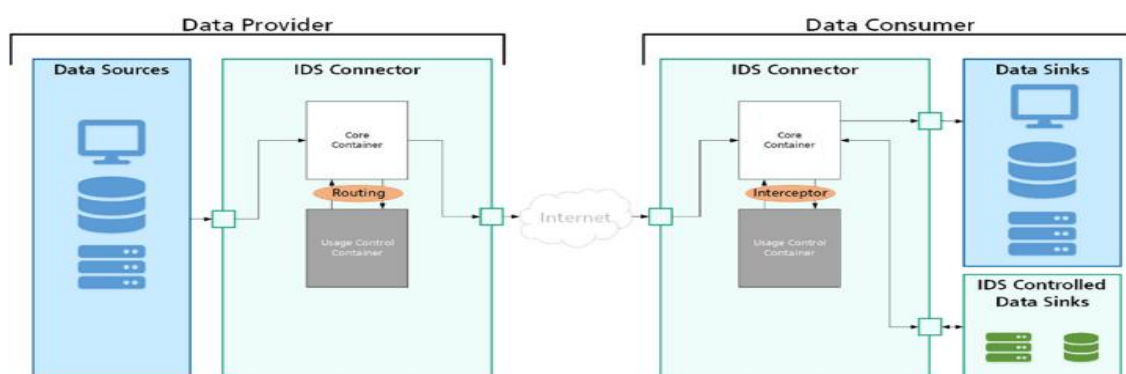


図3 IDSコネクタの構造 出所: Gaia-X and IDS, Position Paper, Version 1.0

これらの機能により、サプライチェーンを構成する取引先企業どうしが、サイバー空間上に仮想的な自分たち専用のセキュアな情報共有空間（データスペース）を創ることができ、特定のデータを特定の相手と期限を決めて安全確実に共有できるようになります。

#### 【Gaia-X に対応する意義】

すでに、この Gaia-X 準拠のデータスペースを構築運用する団体が複数設立され、2022年の春から順次運用が開始される予定です。オランダ企業3千社をつなぐ Smart Connected Supplier Network (SCSN)や、ドイツ自動車産業1千社をつなぐ Catena-X、ドイツの MaaS 関連企業をつなぐ Mobility Dataspace などです。

これらの団体は、欧州だけでなく日本や中国など欧州域外のサプライヤーとも相互接続して、受発注情報や設計データ、製造実績データなどをオンラインでセキュアに共有することを想定しているため、日本企業にもそのためのシステム環境が必要になると想定されます。

もし、SCSN や Catena-X や Mobility Dataspace などの Gaia-X 準拠システムとつながる環境を準備できないと、欧州の取引先と重要な情報をオンラインで共有することが困難になる恐れもあります。欧州域外の拠点も含めてそれらデータスペースと相互接続できるように、技術仕様や契約条件を理解し、システム開発や体制整備を進めておくことが望まれます。

現在 Gaia-X は欧州独自の規格ですが、グローバルなサプライチェーンを考えると、Gaia-X が企業間データ共有の事実上の標準となる可能性もあるため、今後の動向が注目されています。

国や企業の壁を越えてデータの流通/共有を実現することが社会問題への DX 成功のポイントだと考えられます。

(2022年6月26日原稿受領：SIC ニュースレターVol.4.7に掲載)

## 論説4 産業構造変革とシステムズ・アプローチ

—ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会における産業IoTロードマップ検討—

ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会 産業IoTアドバイザー

水上 潔(SIC実行委員)

ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会(RRI)\*<sup>1</sup>では、第4次産業革命やSociety5.0、DX等で示される産業構造の大転換期にある現在において、日本製造業の変革というテーマに対し、システムズ・アプローチを適用した産業IoTロードマップの検討を行っている。これを通して得た知見を報告する。

### 1. 国内外の動向

第4次産業革命が日本のメディアでも取り上げられてきた2015年、内閣府の方針に沿って、製造ビジネス変革を推進する組織としてRRIが発足した。2016年には行政における日独連携に呼応して、独のIndutrie4.0の推進イニシアティブと連携協力していくことが決まり今日に至る。この間、独と欧州は欧州クラウド構想GAIA-Xなるデータ連携インフラを試行するまでに至り、自動車・農業・生産・サプライヤネットワーク・モビリティ・クラウドインフラなど多様な領域でLight House Projectが動き出している。加えて、そのデータ連携の基盤技術であるInternational Data Space (IDS)において、サプライチェーン・製造・エネルギー・モビリティ・自動車・スマートシティ他の分野で約60のプロジェクトが数百の企業のエコシステムとして始動している。これらの取組みは、一つのデータ連携構造をあらゆる産業・様々な視点・複数のシステム階層において試行しながら、未来の具体的姿を模索するという「未来を創る、産み出す活動」と捉えることができる。彼らは第4次産業革命に向けた変革の歩みを着実に進めていると言える。

日本では2016年に科学技術基本計画において、次世代社会の姿としてSociety5.0\*<sup>2</sup>—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(Society)—、2017年に産業のあり方のビジョンとしてConnected Industries\*<sup>3</sup>が打ち出され、さらに、DX具現化のためのアーキテクチャー検討を担うデジタル・アーキテクチャー・デザイン・センター\*<sup>4</sup>、データ連携に係る既存の取組が協調した連邦型の分野を横断するデータ連携をめざすプラットフォーム DATA-EX を推進するデータ社会推進協議会\*<sup>5</sup>など様々な動きが始まっている。

これら国内外の活動を受けRRIでは、どのような未来(産業構造)をどのように創って

いくべきかを示す産業 IoT ロードマップを、システムズ・アプローチを適用し検討している。

\*<sup>1</sup> ロボット革命イニシアティブ (jmfrii.gr.jp) <https://www.jmfrii.gr.jp/>

\*<sup>2</sup> Society5.0-科学技術政策- 内閣府 (cao.go.jp)  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/)

\*<sup>3</sup> Connected Industries (METI/経済産業省)  
[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/connected\\_industries/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/connected_industries/index.html)

\*<sup>4</sup> デジタルアーキテクチャ・デザインセンター (ipa.go.jp)  
<https://www.ipa.go.jp/dadc/index.html>

\*<sup>5</sup> 一般社団法人データ社会推進協議会 | Data Society Alliance(DSA) (data-society-alliance.org) <https://data-society-alliance.org/>

## 2. 産業構造変革 未来社会を設計・開発することの必要性

何故、未来社会の設計・開発が必要なのか。その理由の一つとして、技術がパラダイム・シフト\*<sup>6</sup>を伴う社会変革・産業革命を引き起こす考え方が挙げられる。第1次産業革命は蒸気機関の誕生が注目されるが、織物製造などの分野における家内制手工業から工場制機械工業への移行の影響が社会構造の変化に及んだ点も無視できない。英国ではこの変化に追従できない人々が暴動を起こすなど社会不安が増大し、経済が長期に低迷している。また、工場勤務を目的とした地方農業従事者等の都会への急激な人の移動が都市環境の悪化を招いた。技術は時にこうした負の部分を作り出す。第4次産業革命においても同様の事態が想定され、例えば AI 技術によりもたらされるシンギュラリティによって、様々な産業分野において人が職を失う可能性が示唆されている。負の部分が事前に想定されるのであれば、それをできるだけ回避するように設計が必要だ。

第4次産業革命の無視できない点として、AI を含む情報技術、バイオ、ナノ、量子・・・などに代表されるイノベーションの加速化も挙げられる\*<sup>7</sup>。過去の産業革命においては、第1次での機械化、第2次での電気・電動化（他に化学、物理、フォード生産方式、etc）、第3次での情報化や電子化（経営、複雑系、システム、脳、etc）のイノベーションがあったが、特に近年はインターネットにより科学技術の進化速度が加速化している。技術進化に追従することが困難な人々の存在に注視しておく必要があり、イノベーションが人々の生活をより豊かにするような設計が必要だ。

更に、最近時における温暖化・気候変動対応のための GX、カーボンニュートラル、循環経済、ESG 投資などに対する注目度が高くなり、正に Society5.0 で示している社会課

題への対応がより重要になってきており、これら社会課題が解決されるような設計が必要だ。

\*<sup>6</sup> トーマス・クーンは『科学革命の構造(The structure of scientific revolutions)』においてパラダイムの概念を示し、一般に言うパラダイム・シフトの概念に解釈が拡張されて今日に至る。

\*<sup>7</sup> 世界経済フォーラム クラウス・シュワブ著『第四次産業革命』など

### 3. システムズ・アプローチによるロードマップ検討

#### 3.1. システムズ・アプローチ

まず、システムズ・アプローチについて簡単に触れておく。INCOSEのSEBoK\*<sup>8</sup>では、システムの「思考」アプローチを指すとしており、対象システムを含むシステムを全体的に捉えて検討することを意味している。

その1つの例として、国際標準化におけるシステムズ・アプローチを示す(図1)。関心領域であるシステムのスコープを決めて、影響を受ける利害関係者を特定し、アーキテクチャーを考え、その構造でのユースケースを分析し、メタのモデリングを行い、インタフェースなどの関連する基準を確認し、求める要件に対してのギャップを特定するプロセスを指す。



図1 システムズ・アプローチ IEC 資料

#### 3.2. これまでの活動

未来(多くの人にとって望ましい未来)の予測は簡単ではなく、唯一の正解があるわけでもない。その内容は検討する側の知識量や思考特性などに依存する。また現在の課題認識にも影響され、未来はそれが解決された状態が反映される。加えて、個人の知識量には限界があり、かつ認知バイアスもある(同じ対象でも、その認識は個々で異なる)。産業IoTロードマップ検討は、これらを前提としている。

この前提で機械・電気系技術者の知識や思考特性を見たとき、情報技術の視点で現状を捉え未来を想像することが弱い傾向が見て取れた。よって2018年に下記テーマで国際および日本の動向を学び、日本は他国と異なる方向にIT化を進めていたことが認識できた。

- PLM、MBSE (Model Based Systems Engineering)
- オントロジー、オブジェクト化、情報プロファイル
- ERP (Enterprise Resource Planning)
- BPR (Business Process Reengineering)、BPM (Business Process Management)、BA (Business Architecture)
- Supply Chain Management
- Business Ecosystem

上記知識獲得に加え、2019年にはシステムズ・アプローチを実践的にワークショップ形式で学び、以下の手法を獲得した。(但し、後半でコロナ禍の影響により中断)

- 認知バイアス、メタ認知、多様性の意義
- 20程度のフレームワークを適宜活用した思考の可視化、発散と収束、抽象度管理
- 7 Samurai<sup>\*9</sup> –Dealing with the Complexity of 7 Interrelated Systems

ロードマップ検討に必要な知識と手法を得て、2020年は30年後の創りたい社会を議論した。但し、個々の認知バイアスの影響を軽減させる目的で採用する多様性を取り入れた対面形式によるワークショップの実施が困難となったため、ITツールを利用したオンライン形式とした。その結果、オンライン化に伴う制約(会議時間長さやアフォーダンスの不足など)が思考を妨げたこと等が原因で、議論は相当な困難さを伴った。しかしながら、個人と社会との関係性、教育・学習のあり方、パラダイム・シフトの捉え方など、議論を通し描いた世界へ展開する重要な視点が得られた。また、望ましい世界を議論し行きついた結果が監視社会となった経験も得た。これは教訓として、日常において当たり前として享受している人間尊重、自由主義、資本主義、民主主義などの暗黙を意識し議論する必要性が認識できたと考えている。データ連携においてもセキュリティとプライバシー以外に重要な観点が存在する点からも想像できるように、未来の検討には社会学、法学、政治学、経済学、経営学、技術=理工学、倫理学、哲学、人文科学の幅広い知識が必要となる。特に、多分野・多領域にまたがる知識・関心事を統合し一つのシステムに形作る工学的アプローチ及び手法であるシステムズ・エンジニアリングは重要である。RRIは小さな試みではあるが、エンジニアリングとしては重要な試行である。

### 3.3. ロードマップ検討

2021年度では将来像として、GAIA-X や IDS のプロジェクト、SKYWISE\*<sup>10</sup> 他から推定した「ものづくり×インフラ×サービス」という仕組みを持つ産業構造を実現するためのロードマップの検討に着手した。

イノベーションは人工物によりもたらされ、多くの人工物は製造業から作り出される。つまり人工物は全産業に影響を及ぼし、多くの仕組みの運用に寄与する。加えて、CPS化により運用も含めた人工物に関するデータが活用できると、運用の可視化によって予測が可能となり、更なる効率化・高付加価値化が実現され得る。これを実現する仕組みが「ものづくり×インフラ×サービス（製造 aaS システム）」である。

ところでロードマップ検討自体をシステムとして捉えると、様々な仕組みを内包する現在社会と、次世代産業構造としての製造 aaS システムも仕組みに含む将来社会との間には多くのパラダイム・シフトやギャップが想定され、このパラダイム・シフト及びギャップからロードマップの施策（=コンテンツ）が生まれる（図2）。一方ロードマップ自身はロードマップの枠組みを持つシステムであり、その枠組みで施策が産み出され、現在社会におけるステークホルダーへの働きかけを通じ、施策が機能する。よって下記を整理した上で、施策を検討することが肝要であり、これをオンラインワークショップ形式で進めた

- 製造 aaS システムによる次世代産業構造
- 産業のパラダイム・シフト
- ロードマップシステム

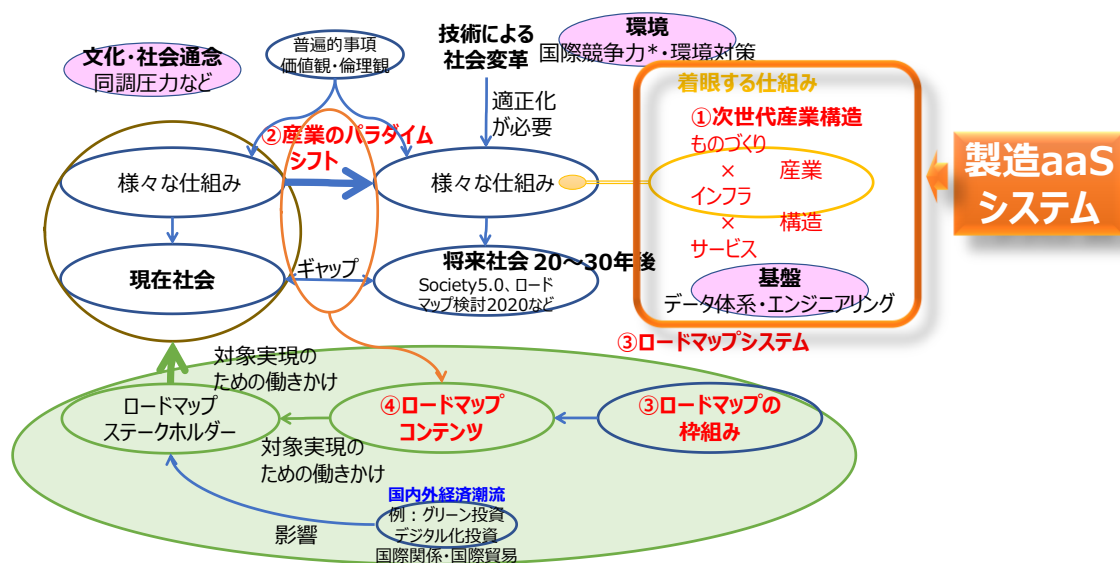


図2 ロードマップ検討の全体構造

\*<sup>8</sup> [https://www.sebokwiki.org/wiki/Overview\\_of\\_the\\_Systems\\_Approach](https://www.sebokwiki.org/wiki/Overview_of_the_Systems_Approach)

\*<sup>9</sup> Martin, J., The Seven Samurai of Systems Engineering, INCOSE International Conference, 2004

\*<sup>10</sup> [Skywise | Enhance | Services | Airbus Aircraft](#)

#### 4. 活動から得られた事

- 製造 aaS システムを含む産業構造は、“プロダクト”と“プロダクション”の相互に関連する異なるシステムにおける各ライフサイクル上のデータ連携が漠然としており、この解明が必要である。これには多くの関係者と、将来像や現状から考えたメリット・デメリットを共有・議論する必要がある。
- パラダイム・シフトは一つのパラダイムが単独でシフトするのではなく、様々なパラダイムが相互に干渉し合いながら進むダイナミックなものであり、一部は既に現象として表出している。その構造は一義的でなく、唯一の正解がないことから、仮説設定と検証の繰り返しが必要となる。
- これまでのロードマップは、狭い分野でゴールを明確にしたバックキャストでの検討によるものだった。今回は、社会を含め直接コントロールできない対象へ間接的に影響を与える要素を含んでいる。
- 以上を前提に、施策案を思いつくまま出し、7Samurai に着想を得た7つのシステム(図3)で整理することとした。
- 施策検討においては、思うような発想ができない課題が判明した。

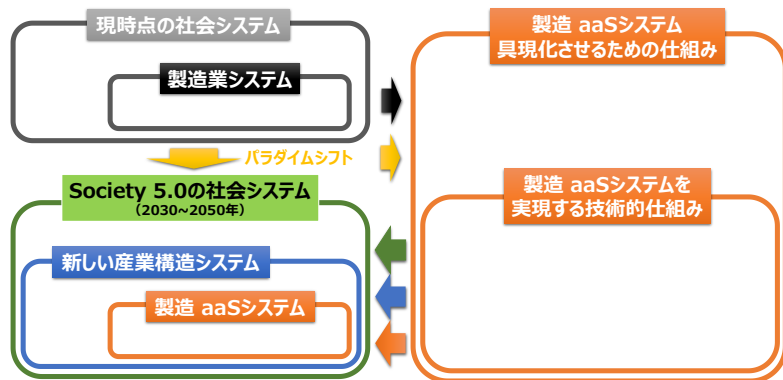


図3 7つのシステム

例えば課題として脱炭素に着目すると、

二酸化炭素量の測定など課題解決に寄与する施策は出るものの、製造 aaS システム自体が脱炭素に貢献する施策が出ない。これは、XaaS システムが存在する外面と製造 aaS システム自身の内面の区別(図4)、及び特定課題の具体的な施策と様々な XaaS システムに共通する施策を結び付ける抽象レベルの区別(図5)の難しさを克

服する必要があることを意味する。

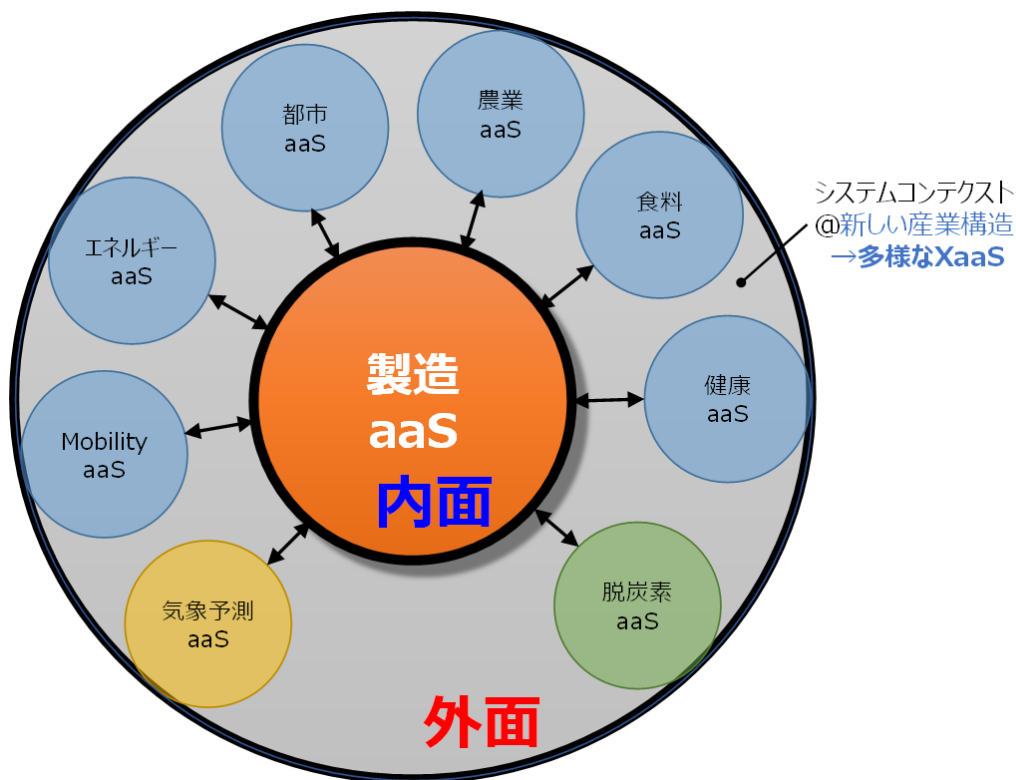


図4 内面と外面

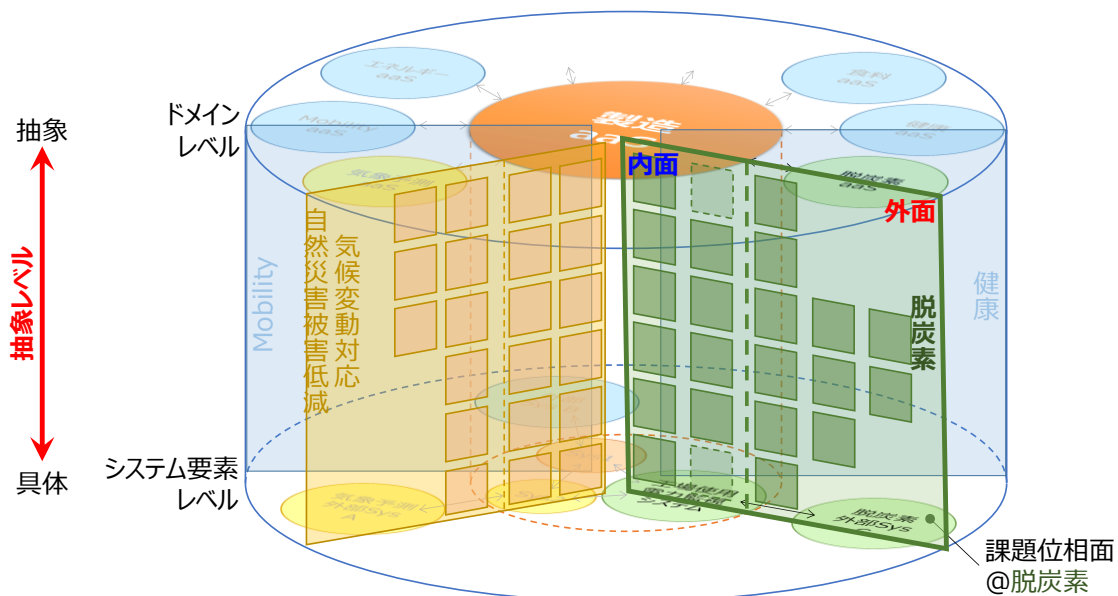


図5 抽象度

以上、ロードマップ検討は施策を生み出す思考の前提や過程を整理しながら進めてきた。これらは、施策が生み出された根拠であり、施策を実施していく段階で新たな課題や環境変化があった場合の再検討ポイントを導き出す拠り所になる。また施策に不備があっ

た場合の要因分析が可能になる。こうしたシステムズ・アプローチは、米中摩擦、コロナ禍、ウクライナ問題など環境が目まぐるしく変化する現在だからこそ、しっかりと取り組むべきことと認識する。本活動では既に過去の取組みを3冊のレポート<sup>\*11</sup>として出している。昨年度の活動も近日公開する予定であり、これらを通じて理解を深めていただけると幸いである。

最後にロードマップ検討はRRI並びにSICの方々のご協力が進められており、これら成果に関して関係者の尽力に感謝申し上げます。

<sup>\*11</sup> ロボット革命イニシアティブ|WG1「産業IoTロードマップ調査研究委員会」活動報告書のリリース (jmfrrr.gr.jp)

<https://www.jmfrrr.gr.jp/document/library/2473.html>

(2022年7月4日原稿受領：SIC ニュースレターVol.4.8に掲載)

## 論説5 DXの着想の源「オペレーションズ・マネジメント(=OM)と経営工学」 ～企業マネジメントへの制御モデルの応用～

株式会社野村総合研究所 産業ITイノベーション事業本部 兼 未来創発センター  
シニアチーフストラテジスト 藤野直明(SIC実行委員)

(日本経営工学会 副会長/日本オペレーションズ・リサーチ学会フェロー)

### 1. 「DX について考えるヒントとなる知識体系は何だろうか？」

筆者はこう尋ねられたら、AI や量子コンピュータ、データサイエンス、センサー技術などではなく、まずオペレーションズ・マネジメント（以下、OM）<sup>(注1)</sup> や経営工学（Industrial & Systems Engineering）を挙げたい。というのも、日本企業がDXに苦手意識をもっている理由の1つは「現場のノウハウとして語られることが多いOMや経営工学について日本の社会人実務家が学ぶ機会が乏しいこと」だと考えているからである。OMは欧米のビジネススクールを中心として、この20数年ほどで、急成長してきた学問分野である。本格的なOM研究の契機となったのは、実はトヨタ自動車のNUMMI設立による米国カリフォルニア進出であり、今でも日本企業のOMは世界から注目され研究対象となっている。本稿ではこのOMを紹介したい。

### 2. OMはSCM（サプライチェーンマネジメント）から始まった

OMという研究分野はSCMの自然な拡張であり、経営実務に直結するテーマを扱いつつ、ビジネスモデルやDXまでその研究範囲を広げ、発展してきた。日本では、“SCM”は「在庫管理や需要予測等のソフトウェアソリューションの呼称」とよく誤解されているが、OMではSCMは「伝統的な経営モデルに対するアンチテーゼとして提唱された経営システム的设计思想」と考えられている。解説しよう。ここで言う伝統的な経営モデルは会計モデルに基づくものだ。会計モデルは、年間の期間損益の視座から企業や事業を評価するモデルである。このモデルを応用し、視座を部分組織までブレイクダウンして適用し、その単純な総和として企業活動を捉え、経営管理を行うのが伝統的な経営モデルであった。“要素還元主義的”なこのモデルでも、経営環境の不確実性が小さい大量生産大量消費時代には比較的正しく機能していた。ところが90年代に「会計モデルを単純にブレイクダウンし経営に應用、業務設計や組織の業績評価システムの設計を行うと誤った意思決定を招く危険性が高い」という問題提起がハーバード・ビジネス・スクールのロバート・キャプラン名誉教授からなされたのである。<sup>(注2)</sup>

いわく、「組織は生命体のような1つの有機的なシステムであり、要素還元主義的に機能組織に区分し、個別に期間損益の評価を行って動機づけることは、経営環境変化への経営システムの機敏な適応力という視点からはマイナスの効果をもたらすことが多い」。つまり、企業を外からみて評価するための会計モデルを、企業内部の機能組織の評価や業務プロセス設計に単純に活用することは間違いだということである。当時、BPR

(Business Process Re-engineering) という言葉がかなり話題になったので覚えていらっしゃる方も多いと思う。「誤った業績指標で一所懸命に頑張れば頑張るほど、経営全体としてはおかしな結果をもたらす」と当時も指摘されていた。

### 3. 経営管理における要素還元主義の限界が露呈した

ロバート・キャプラン教授の指摘の通り、企業組織は分解不能で一体的に機能する極めて複雑な多変数関数と捉えるべきである。変数分離ができない多変数関数を、単純な変数分離型の関数として扱うと大きな誤りを招くことは、高校数学の常識でもある。経営システム的设计思想において「要素還元主義の限界が露呈した」といったらわかりやすいだろうか。

例えば、いくら物流部に目標となる KPI として倉庫費用の管理責任を負わせたとしても、販売計画の精度や生産数量の機敏な調整やコントロールができなければ、物流部は打つ手が無く、責任を果たせない。責任を負わせても意味が無いことは明らかである。この指摘に対する解答として SCM というアイデアが創出された。業務プロセスを再設計し、変革するためには、サプライチェーン全体を俯瞰的に捉え、組織の全体最適を考慮した上で、組織の再設計、業務再設計、業績評価システムの再設計を行い、IT やデジタル技術の活用を行う必要があるという考え方である。

### 4. 企業の業務モデルは「動的な制御モデル」として設計すべき

SCM の概念の登場により、経営環境の変化への機敏な適応のためには、企業モデルや産業モデルを、組織全体を動的な制御モデルとして設計すべきであるという新しいパラダイムが提示されたわけである<sup>(注3)</sup>。

経営環境の変化スピードは当時と比較し、さらに加速している。このため「動的な制御モデルとしての企業オペレーションモデル、産業オペレーションモデル」の重要性はますます高まってきているといえよう。SCM についても、単なる「需要予測モデル」や「在庫管理モデル」などの要素技術にとどまらず、機能別組織業務の連携手法、企業間業務の連携手法の研究により、経営環境の変化に機敏に適応するための“経営システム、産業システムの設計方法”が研究されてきた<sup>(注4)</sup>。

この SCM という概念によるパラダイムシフトをさらに拡大し、研究開発や、ビジネスモデルまでカバーすることになってきた研究分野が、OM である。金融取引分野以外への金融工学の応用、いわゆるリアルオプションも OM の範囲であるということ OM の範囲の広さがご理解いただけるだろうか。

### 5. 現代 OM 研究、発展の契機はトヨタ自動車の北米進出

現代 OM<sup>(注1)</sup> 研究の発展契機はトヨタ自動車の NUMMI 設立による米国カリフォルニア進出であった。トヨタ自動車は米国メーカーの工場と作業員を活用して、歩留まり率や品質管理能力だけでなく、圧倒的な ROIC (投下資本利益率) パフォーマンスの差を見つけたのである。

これに脅威を抱き、即行動したのが、米国ビジネススクールの教授陣であった。NUMMI は徹底的に分析され、大統領報告されたほか、学問体系としての OM が創造され、MBA 科目として OM や POMS (Production&Operations Management) が本格的にビジネススクールの科目に組み込まれた。現在、その教育を受けた博士号取得者が米国で POMS 学会員 1 万人、欧州 EuroMA 学会で 5 0 0 0 人を誇る研究者グループとなっている。これが DX 推進に大きく貢献していると筆者は考えている。

日本が欧米に学ぶべきは、この「学术界の学習能力、研究能力がもたらすダイナミズム」ではないだろうか。1980年代の成功体験だけから「ものづくり大国日本」と自画自賛し、21世紀の今でも満足しているとしたら、少しナイーブだと言われても仕方が無いだろう。

## 6. 「OM」の先進的なモデルは日本企業の現場の知恵

OM 研究はトヨタ自動車から本格化したのが、その後いくつかの日本企業のケースが調査され、わかりやすい形でケースとしてモデル化されていった。OM 研究にはトヨタ自動車以外の日本企業も登場する。下記はその一例である。

### <例 1>CPFR :

米国流通業発の流通コラボレーション業務、CPFR のアイデアの源は TPS (トヨタプロダクションシステム) である。筆者はウォルマートの元 CIO ランディ・モット氏から直接確かめる機会を得た。

### <例 2>ZARA モデル :

ZARA の生産 OM 担当役員は、ZARA の急成長の背景には、TPS をモデルとした巨大な計画ローリングシステムと CKD (コンプリートノックダウン方式) のアイデアの採用があったことを誇っていた。

### <例 3>製造業のサービタイゼーション戦略 :

独インダストリ 4.0 よりもかなり以前に「製造業のサービタイゼーション」の概念を提唱したペンシルバニア大学ウォートン校のモリス・コーエン教授は、KOMATSU の南米の鉱山との契約のケースを基礎に「製造業のサービタイゼーション」というコンセプトを提唱。これが前述したピーター・ウェイル氏により提唱されたデジタルビジネスモデルの戦略目標である「エコシステムドライバーの概念」へ引き継がれていった。

### <例 4>S&OP :

日本でもようやく常識となってきた S&OP (Sales&Operations Planning) も、提唱者の元 Oliver Wight 社のトム・ワラス氏、ボブ・ストゥール氏に尋ねると「TPS がモデルであることは言うまでもない」とのことである。

### <例 5>トリプル A (Agile, Adaptive, and Aligned) の SCM :

スタンフォード大学大学院ビジネススクールでグローバル SCM フォーラムを主宰しているハウ・リー教授、セジョン・ワン教授はセブンイレブンジャパン (以下 SEJ) の研究で有名であり、SEJ の SCM はトリプル A の SCM として米国の OM 学会で絶賛された。この論文はハーバードビジネスレビューでも大きな話題になり、今でも米国 T

OP スクールで10位以内に入る OM 領域でのケーススタディーとなっている。尚、当該ケーススタディーの作成には筆者や野村総合研究所の研究員が協力した。

## 7. 期待される「日本での OM 研究の推進・強化と経営層 CDO 向けの学習機会の提供」

トヨタ自動車の北米進出の結果、世界中で新しい学問領域として台頭してきた OM であるが、実は残念ながら日本での学習機会は乏しい。例えば、日本では、1990年代のデルモデルは単に受注生産モデルとして解説され、多くの実務家が「理解したつもり」のまま、ブームが去ってしまった。デルモデルの本質が、調達領域での時系列の多段階調達ポートフォリオだということは、ついに理解されなかったのではないだろうか。わかりやすいスローガンや、わかった気になる事例分析だけでは、現実を正しく理解したことにはならない。応用が利かないのだ。

OM は欧米や日本以外のアジアのビジネススクールでは主要科目である。一方、日本では、そもそもビジネススクールが少ないというハンディがあり、さらに日本のビジネススクールでは、OM のウェイトが低く、この領域をカバーしていないスクールも多いように見える。実は OM とほぼ同じ領域の研究・教育を期待されているのは「経営工学」という学科である。工学の経営への応用を担う唯一の国家資格である技術士は「技術士（経営工部門）」である。ところが、公益社団法人日本経営工学会は、2000年には約3000名だった会員数が、現在約800名にまで減少。大学への交付金が減額される中で文理融合領域は常に少数派となり存在は危うい。事実、経営工学科や管理工学科などの学科そのものが減少してきている。「経営学があるから経営工学はなくともよいのではないか」と教授会で議論になるそうである。危機的状況と言ってよいだろう。工学部系の他学科でも経営工学を学ぶ機会は乏しく、文系の経営学部ではなおさらであろう。筆者は、文理を問わず OM や経営工学を学ばせてみるのが効果的と考えるがいかがだろうか。

日本での OM や経営工学の研究者の質は高く、海外のビジネススクールで大活躍して帰国した研究者の方々も多数存在する。実はデルモデルの設計・開発には日本人の研究者が深く関わっている。このことは OM 研究者の間では常識である。しかしながら、このままでは優秀な OM 学者が帰国しても、受け入れてくれる大学が見つからない危険性すらある。さらに世界の研究者の研究成果に対するアンテナ機能すら、日本には乏しくなるのではないかと危惧する次第である。

先日、「博士課程の28%が非正規雇用 就職支援を要請 高度人材活用進まず」（日経新聞；2022/05/12）という文部科学省の調査が報告された。筆者は、高度人材活用が進まない理由は、単に「博士課程人材の量や質の充実が必要」というよりも、研究分野による需給のミスマッチが問題の要因ではないかと考えている。

日本の DX 推進には圧倒的に OM の人材が足りない。データサイエンティストや AI 人材よりも、こうした要素技術をどのようにビジネスに活用していくかという OM 人材が重要なのである。当局には、OM の博士課程人材育成と社会人への学習機会提供について、ぜひご一考いただけると幸いである。特に、欧米のビジネススクールに存在する2週間

程度の合宿形式の短期集中プログラムを組成・提供していただきたい。経営層や CDO を対象とした「DX のための OM 教育プログラム」である。日本の DX を加速しつつ、同時に OM や経営工学の実務での有効性を日本の実務家へアピールするよい機会となるのではないだろうか。

注1 「オペレーションズ・マネジメント」とは、オペレーションを機能別、部門別単位で考えるのではなく、企業全体の視点から捉え、業務連鎖（機能や部門を超えた業務のつながりや 連携、流れ）の観点で一気通貫のオペレーションを追求する考え方です。

（一般社団法人中部産業連盟：

[https://www.chusanren.or.jp/operations\\_mgt/index.html](https://www.chusanren.or.jp/operations_mgt/index.html)）

注2 「管理会計の盛衰」（鳥居宏史訳、白桃書房、2002 年）

注3 「サプライチェーン経営入門」（藤野直明著、日本経済新聞社、1999）

注4 「サプライチェーンマネジメント 分析と設計手法」（藤野・姫野，経営情報学会誌、招待論文、2001）

（2022年9月24日原稿受領：SIC ニュースレターVol.4.10 に掲載）

## 論説6 サステナブルで安全・安心・快適な社会の実現に向けた デジタルイノベーション

三菱重工業株式会社 シニアフェロー デジタルイノベーション本部長

高浦勝寿(SIC正会員)

### 1. はじめに

現代におけるシステムイノベーションは、デジタル化されたデータとデジタル技術と切り離して考えることはできない。デジタル化されたデータがシステムをつなぐことにより、より大きなシステムが構成され、このシステムに対して最新の ICT に加えて、システムイノベーションの知の基盤である「最適化」、「モデリング」、「学習」、「ネットワーク」、「状態推定と予測」、「制御」を適用することで、従来では解決が困難であった社会課題や、多様な社会ニーズに応えることを狙いとしている。

三菱重工グループでは、サステナブルで安全・安心・快適な社会の実現に向けて、エナジートランジションによる“脱炭素化”、“水素エコシステムと CO2 エコシステムの実現”と、社会インフラのスマート化による“省エネ・省人化・脱炭素化”の両面でカーボンニュートラルを推進している。また、確かなモノづくりの技術で社会課題を解決し世界とともに持続的に成長するために、社会的課題のうち優先して対応すべき重要課題（マテリアリティ）を特定し、脱炭素社会に向けたエネルギー課題の解決、AI・デジタル化による社会の変革、安全・安心な社会の構築について目標を定めて取り組んでいる。

これまでも、当社が提供する機械システムに通信ネットワーク技術、情報処理技術などの ICT を組み合わせた製品の提供、高度な ICT ソリューションの新規発掘とサービス提供を行ってきたが、さらに、社会の多様なニーズに迅速に応える為、安全・安心な社会システムの知能化を目指した三菱重工グループの取り組みと、それを可能にする  $\Sigma$ SynX について紹介する。



図1：三菱重工グループの強みを生かしたデジタルイノベーション

## 2. 要素を“かしこく・つなぐ” ΣSynX

当社グループは自社が提供する個別機械システムの智能化・自律化にとどまらず、社会を取り巻く機械システム同士の協調、さらには智能化・自律化を通じて社会システムを“かしこく・つなぐ”ことで、安全・安心な社会基盤の構築を目指している。

これまで長きにわたりプラントのデジタル運転制御（DIASYS Netmation®）、プラントの遠隔監視自動運転（TOMONI™）など各種デジタル技術を提供してきた実績がある。これに加えて、長年の研究開発と実地検証に基づくモデル&シミュレーション技術、豊富な運転実績に基づくオペレーション&メンテナンスを通じたデータ収集とアナリティクス技術、多様な製品システムに適用してきた制御技術とAI（人工知能）技術を蓄積している。さらに、社会インフラ製品や防衛製品等で培ってきたセキュリティ技術を組み合わせることで、安全かつ確実なソリューションの提供を可能にした。

このような背景のもと近年は、個々の製品にとどまらず製品同士をまとめた製品群の全体最適な運用を可能とするテクノロジーの整備を進めており、その全体像を「ΣSynX（シグマシンクス）」（注1）と定めた。ΣSynXは、「Σ=総和」「Syn=同調・協調」「X=未来」をそれぞれ表した、当社グループの製品全体を自律化・智能化するソリューションコンセプトである。ΣSynXのコンセプトのもと、製品群とデジタル技術の“かしこく・つなぐ”を一層加速し、システムとして新たな価値の提供と、安全・安心な社会システムの智能化を目指している。

### 3. 標準化/共通化によるデジタルアセットの利活用

当社グループは、複雑な機械群の精緻な制御技術をコアコンピタンスの1つとし、多様な事業毎に多大な開発努力を費やしてきた。これに加え、先行きが不透明で、将来の予測が困難な現代においては、社会ニーズの変化に即応し、サービス拡大・顧客とのインターフェース強化、ネットワーク化された複合サービス/ソフトウェアの提供を進めている。

限られたリソースで高品質なサービスを早く実現し、顧客価値を持続的に創出していくために、社内外のツール・技術を機能分解・固変分離したうえで標準化/共通化し、多様な事業で使いまわすことで、多様な事業を抱えていることの強みを強化する。そしてこれを実現するために、デジタルイノベーションのエコシステムを再構築している。このことを後押しする技術的な背景として、IT システムで普及が進んでいる仮想化技術の制御装置への適用や、組込みシステム向けのミドルウェア Robot Operating System (ROS) や ROS2 の活用が挙げられる。従来の制御システムでは、制御装置のハードウェアとソフトウェアが1対1の関係になっており、同様の機能を実現する場合でも制御装置のハードウェアが異なると、ハードウェアに係わるソフトウェアを大幅に書き直す必要があった。一方、仮想化技術やミドルウェアを適用することで、ハードウェアの違いをハイパーバイザーやミドルウェアが吸収し、ソフトウェアの再利用が容易になっている。このことからソフトウェア開発にモジュラーデザインの考え方を採用し、デジタルアセットとして整備して、多様な事業で利活用することが可能になった。

### 4. デジタルイノベーションのための基盤技術の強化

2022年7月、木村英紀 SIC 副センター長から当社技術者に向けて「現代システム科学とは何か」と題した講演をして頂いた。この講演にて、「最適化」、「モデリング」、「学習」、「ネットワーク」、「状態推定と予測」、「制御」の6分野から構成される現代システム科学が、システムイノベーションの知の基盤であるという話を伺った。当社では、こられる分野を技術のまとまりと捉えた制御テクノロジーユニット（注2）として、基盤技術の強化、製品・サービスでの実用化のための研究開発の推進と、人材育成に取り組んでいる。また、当社では、セーフティクリティカルかつ大規模な製品が多い当社の特徴に起因し、先の6分野にソフトウェアの検証技術を加えている。ソフトウェア検証の分野では、ソフトウェアの妥当性を網羅的に検証するに留まらず、自動検証技術を応用した制御パラメータ最適化技術[1]、深層学習モデルの予測結果の確からしさの評価技術[2]など新しい技術の取り組みも始めている。

## 5. 事例1：カーボンニュートラル社会実現に向けたCO<sub>2</sub>回収技術の適用拡大

当社グループは、独自の吸収液を用いたCO<sub>2</sub>回収技術を有しており、2016年に世界最大規模のCO<sub>2</sub>回収プラント（約5000t/日）を米国テキサス州に建設している。しかし、これまでの実績は石炭火力発電の排ガスや化学プラント内の排ガスへの適用に留まっている。近年のCO<sub>2</sub>排出抑制の社会的ニーズに対応するため、ガスタービン・コンバインドサイクル（GTCC）発電設備など、各種産業セクタの排ガスに対しても、この技術を適用すべく検討に着手している。

電力需要と再生可能エネルギーの変動に対応するために、近年はGTCC発電設備に対して起動・停止と負荷調整を迅速に行うことが求められる。GTCC発電設備の起動・停止・負荷変化時など過渡条件では、CO<sub>2</sub>回収装置のCO<sub>2</sub>回収率を高いレベルで維持することが難しい。この課題に対して、従来は個別に開発を進めてきたGTCC発電設備のモデリング技術とCO<sub>2</sub>回収装置のモデリング技術を“つなぎ”、過渡条件での評価が可能なGTCC-CO<sub>2</sub>回収装置統合プロセス評価手法を構築した。また、プラント運転制御技術により、GTCC発電設備とCO<sub>2</sub>回収プラントを“かしこく”運用するための各種検討に適用している[3]。

## 6. 事例2：倉庫物流の知能化・自動化プロジェクト

2022年8月31日に当社グループは、AGF（Automated Guided Forklift：無人フォークリフト）、AGV（Automated Guided Vehicle：無人搬送車）、パレタイザー（注3）が連携する自動ピッキングソリューションのシステム開発を完了し、倉庫物流向けに提供を開始することを発表した。

自動ピッキングソリューションでは、これまで作業者が考えながら効率的に行っていたピッキング作業を、「ΣSynX」によって自動化・知能化した（図2）。独自開発の最適化エンジン、群制御技術[4]、人機協調技術[5]、自己位置推定技術[6]、統合制御システムによって、複数のAGF、AGV、パレタイザーを効率的に連携させて搬送・ピッキング回数を削減し、ピッキング工程の最適化とスループット（処理能力）向上を実現している。多数の作業者が従事するピッキング作業の自動化・知能化を通じ、昨今の物流オペレーターの人手不足、重量物ピッキングといった重労働からの解放、ヒューマンエラーの削減で社会への貢献を目指している。

ΣSynXによる倉庫物流の知能化・自動化で物流業界のさまざまな課題に対する最適なソリューションを提供するとともに、開発した自動化・知能化の技術はデジタルアセットの横断活用コンセプトのもと他事業への展開を進めている。

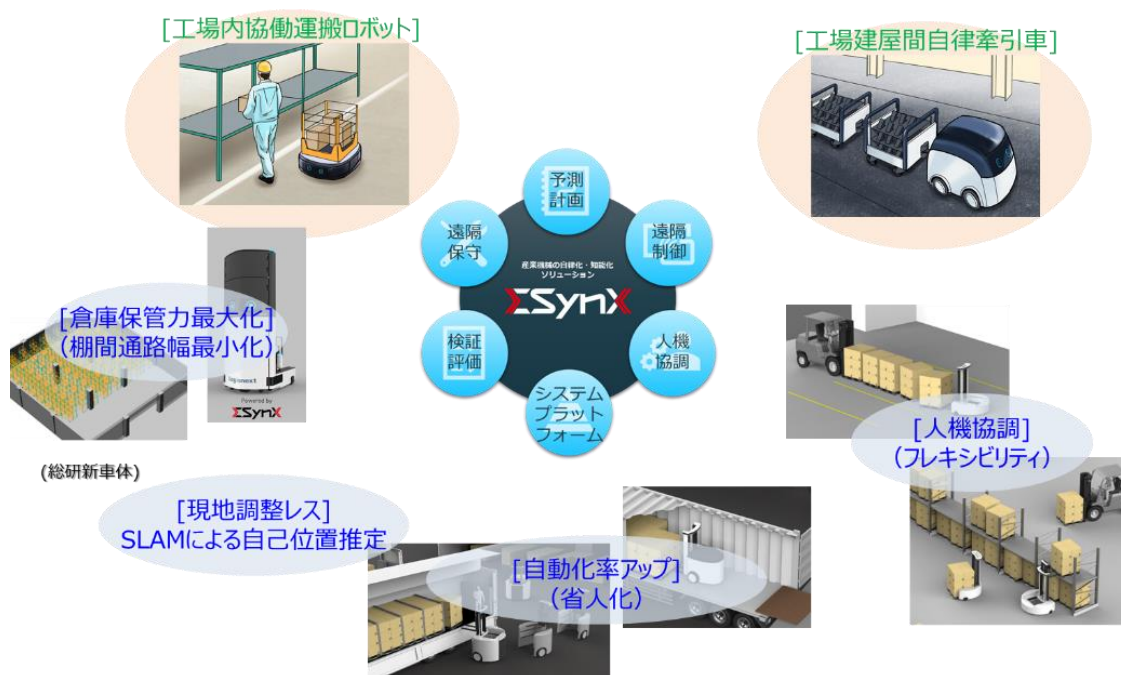


図2：ΣSynXによる倉庫物流の智能化・自動化

## 7. おわりに

本稿では当社グループが進めるデジタルイノベーション（デジタル技術を活用したシステムイノベーション）、要素を“かしこく・つなぐ” ΣSynXのコンセプト、標準化/共通化によるデジタルアセットの横断活用、デジタルイノベーションのための基盤技術の強化などの取り組みに加え、サステナブルで安全・安心・快適な社会の実現に向けた具体的な事例としてCO2回収装置の適用拡大と倉庫物流の智能化・自動化プロジェクトを紹介した。これからも、常に社会が求めるものを提供し、社会課題の解決に貢献し続けていく。

注1：ΣSynXは、さまざまな機械システムを同調・協調させる当社の標準プラットフォームであり、機械システムの智能化により最適運用を実現するデジタル・テクノロジーを集約したものです。

注2：約50存在するテクノロジーユニットの1つである。

注3：製品を自動で整列させてパレット上に積み付ける装置です。

- [1] Sato S. et al., Hybrid System Falsification for Multiple-Constraint Parameter Synthesis: A Gas Turbine Case Study, Proc. Formal Methods. FM2021 (2021) p.313-329
- [2] 山科ほか, 深層学習における予測結果の確からしき評価技術, 三菱重工技報, 第58巻, 第1号 (2021)
- [3] 三菱重工プレスリリース, スコットランドの発電所向け、GTCC 発電設備・CO2 回収プラントに関する基本設計を受注, 2022年8月
- [4] 藤島ほか, 複数の無人ビークル協調作業のための群知能技術の開発, 三菱重工技報, 第58巻, 第1号 (2021)
- [5] 木内ほか, 人-機械協調による無人車両の精密ナビゲーション技術, 三菱重工技報, 第59巻, 第3号 (2022)
- [6] 北島ほか, 産業用無人ビークル誘導のためのセンサ融合によるロバスト自己位置推定, 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2020)

(2022年10月27日原稿受領: SIC ニュースレターVol.4.11 に掲載)

### Ⅲ 寄稿(非会員)

#### 寄稿1 サイバー・フィジカル連携による新価値創造

サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合 常務理事 高山光弘氏

##### 1. サイバー・フィジカル・エンジニアリングの概要

ドイツで Industrie4.0 が SAP の元社長であるガーマン氏によって 2013 年に提案された。わが国ではこれに対応すべく Society5.0 をスタートしたのが 2016 年である。もとより欧州は 18 世紀に始まった Industrie1.0 を皮切りに産業革命をリードしてきており、今回の Industrie4.0 はデジタル化による産業構造、社会構造の変革をターゲットにしていると考えられる。これまで実物で取引されていた事象がデジタル化されることで、個々の事象間の関係性を見え易くすることができる。これにより、それぞれの事象の関係性を分析することで、現状の課題を明確化し、解決に向けての手法から事象間の関係性を再定義することが可能となる。これはこれまでよりも広い範囲でのシステム化を意味しており、より効率的なプロセス形成と新しい価値を生み出すことに繋がる。

この変革のコアはネットワーク化にあり、より広範囲に拡張可能な仕組みを築くことが効果の最大化につながり、オープン&クローズを意識したうえでの協調性が重要視されることになる。Industrie4.0 の中で語られる CPS/IoT などの達成すべき姿は世界共通の価値であり、ゴールの大まかなベクトルそのものは日本においても評価されるが、日本企業としての価値を活かしたデジタル化を目指すものでなければならず、日本の競争力を活かさないデジタル化は日本の産業の将来を危うくするものになる。デジタルの本質は拡張性と再現性であり、万人にとって有効なデジタル化はデファクトを握ることができ、その逆の場合は淘汰される。日本産業にとって有効なデジタル化を提案し、これを世界に認めさせることが重要となる。

これまでのデジタル化は狭い領域内でのデジタル化をゴールとして設定していることが多い。例えば、企業内でのデジタル化は検討されているものの、ゴールを業界全体、社会全体として広いシステムを考えることは難しいのが実情である。現状の日本の自動車産業では厳しい競争に勝ち抜くために、垂直統合型のグループ内関係ができており、情報連携は業界全体に比べて非常に強固であるが、閉鎖的である。この閉鎖的な体質での効率の追求には落とし穴がある。経済そのものは流動的であり、各企業はフレキシブルに対応することが求められるが、閉鎖的体質はこれに対応する柔軟性に欠ける傾向がある。

この流動的な経済の変化に対応するとともに、企業内の効率向上を両立させるゴール設定をすることが、長期的に安定した企業活動を実現することに繋がる。デジタル化はこのゴールに対するカギであり、企業内だけではなく外部と連携可能な情報基盤として企業内で利用度を上げ、流動的な経済に対応できる拡張性の高い基盤の考え方が重要である。

現在の製造業においては企画、開発、生産、販売と大きく4つのプロセスが存在するが、これらは前半プロセス（企画、開発）にはモノ（実物）がなく、後半プロセス（生産、販売）にはモノがある。このため、前半はデジタル化に対して積極的であり、逆に後半はデジタル化に対して消極的である。この2つの差を埋めるために前半プロセス側からのCAE予測と後半プロセス側の計測を行い、これらを連携させることが重要であり、これがサイバー・フィジカル・エンジニアリングとして実世界とデジタル予測を繋ぐ技術と言える。CAEが計算する結果は実世界のパラメータから寄与の大きいものを抽出した物理モデルを構築するやり方になっており、実世界を表現しきれていない。

一方で実物にも課題があり、製造過程でのバラつきから図面通りでない場合があり、また計測条件（環境条件）もすべての条件を管理しきれておらず、不完全な情報となっているケースが多く見られる。つまり2つを繋げるためには同一条件でデータを管理することが必要であり、デジタル化展開の基本を整理することである。

CAEはそれそのものがデジタル情報であり、データのフォーマットに関する制約は少ないといえるが、実物をデジタル情報化する計測側には様々な制約がある。サイバー・フィジカル・エンジニアリングを進める視点からすると、X線CTによる計測手法は内部構造の高精度なデータ化が可能であり、しかも非破壊で計測できることが大きなメリットである。構造物の内部をデータ化するには破壊検査というやり方もあるが、このやり方は再現性がなく、また破壊の際に応力開放が発生するため、計測データの信頼度に課題がある。X線CTは、課題がないわけではないが、モノづくりにおいては内部構造（情報）を取得することが重要な要素であり、これを実現する手法として注目されている。

また今回のサイバー・フィジカル・エンジニアリングとして重要視しているのはプロダクト全体のデータ化を行う点である。上述したように破壊検査でデータ化することは可能であるが、破壊前、破壊後を比較するプロセスは非常に手間のかかる仕事であり、応力開放による影響は精度的に課題である。一方X線CTの場合、非破壊でプロダクト全体を計測することが可能であり、この技術をベースとして、プロダクト全体をそのままデジタルデータ化することは、完成品として製造工程情報を含んだデータ化が可能である。これは企業活動の下流の重要項目であり、これにより企業活動の上流部分との連携を進めることができるようになる。Industrie4.0で象徴的に生産ラインのデジタル化としてスマートファクトリなどの目標を掲げているが、製造工程は製品の品質を左右

する重要な工程であり、製造工程情報をデジタル化したモデルが、モノづくりのデジタル化において大きな意味を持つ領域だと位置付けているのではないかと思われる。

上述のようにサイバー・フィジカル・エンジニアリングは現物とデジタルデータを高精度に繋ぐ技術であり、これにより高度なデジタルツインを構築することが可能となる。ここで定義するデジタルツインとはデジタルモデルが実物モデルで起こりうる事象を高精度に予測でき、実物化のプロセス損失を最小化（手戻り削減）できるものである。具体的には将来検討において試行実験を高精度に行うとか、生産工程におけるバラつき影響による外乱を最小限に抑えるなどの効果が期待できる。また高精度なデジタルツインモデルは外部との連携にも拡張が可能であり、一企業の中の情報連携だけではなく、企業間の連携により、より広い範囲でのシステム化が可能であり、これにより新しい価値創造を促すことが期待できる。

## 2. 技術研究組合【参考1】の設立にあたって

### 2. 1 X線CT装置との連携と先行検討

サイバー・フィジカル・エンジニアリングを推進するにあたり、X線CT装置の果たす役割が大きいことは前にも述べた通りである。現在、日本には超大型X線CT装置は存在しないが、ドイツ、フラウンホフエーザRTは2013年にこれを導入しており、2016年にはこれを使って、自動車一台分のデータ撮像を行い、リバースCADモデルを構築・販売する企業も出現している。この背景から日本としてドイツを凌ぐX線CT装置を構想する機運が高まり、2018年に東京大学精密機械工学科鈴木宏正教授が委員長となり、導入に向けて装置仕様の検討を開始した。その後2年間、デジタルデータの活用やAdditive Manufacturing（3Dプリンター）での事例・課題について大学、産業界を交えた活動を継続し、2021年に経済産業省よりサイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合（CPE）【参考2】の設立が許可されるに至った。設立にあたっては、超大型X線CT装置の活用度を最大化するための、データ活用のシナリオの整備が先行することが必要であり、これによって活用が裏付けられた設備仕様提案に繋げる考えである。

CPEには現時点では超大型X線CT装置は保有していない。その装置の導入に先立って、X線CT装置を利用しない手法でのモデル構築による成果の利用価値を最大化する手法を検討する。この検討により得られる知見から装置仕様としての必要要件を検討し、これを導入仕様検討に反映することで、社会実装を見込んだX線CT装置を提案する。加えて、このモデル構築フローは実物の測定からリバースCADデータ作成、CAEモデル構築・解析実行およびその結果からのフィードバックまで一連のプロセスを実行する。このフィードバックは最終利用目的の効果を最大化するために、計測装置、モデル化手

法を改善することを期待するものであり、計測データと CAE 活用が直結した高効率なデータ環境を構築する。さらにこのデータ環境をベースに多様な CAE に拡張することで、データ環境そのものの価値を向上させ、より多くの多様なニーズに対応できるようにすることで、多くのユーザーを獲得し、“情報プラットフォーム”の形成を目指す。図1には将来的にX線CT装置が導入された後に形成されるモデル構築プロセスを示したが、このプロセスを繰り返し実行し、利用用途を拡張することで情報プラットフォームを強固にすると考える。

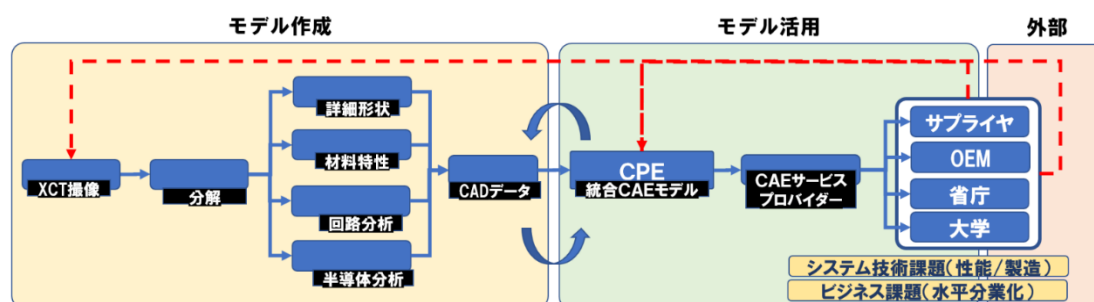


図1：モデル構築プロセスによる情報プラットフォームの形成

## 2. 2 令和3年度事業内容

令和3年度は経済産業省からの委託事業として中国電気自動車のリバースエンジニアリングに取り組んでいる。対象は中国で TESLA キラーと言われる NIO の量産モデル EC6 (ES8) である。この車両を光学スキャナ、X線CTなどを利用した計測により、3Dデータの構築に取り組む。前述のように現時点では日本には超大型 X線CT装置はないため、光学スキャナを基本に計測を実施する。一部、内部構造を非破壊でデータ化する必要がある部品には中型 X線CTを用いる。材料特性は試験片による計測を破壊検査として実施、電気回路についても回路図を作成し、システムモデルによる車両特性評価を行う。また半導体についても一部ではあるが分析を行う。ここからリバース CADモデル構築、CAEを展開する。機械的特性、電気的特性のCAEを実施し、機電融合の評価が可能なデータ体系を構築する。実施したCAE結果から計測手法、計測装置やモデル化手法へのフィードバックを実行し、上述の“情報プラットフォーム”のスパイラルアップを目指す。

## 2. 3 推進体制

CPEは2021年9月16日に以下の11社の参加で発足した。

(株)アーク、AZAPA(株)、(株)アルゴグラフィクス、インテグレーションテクノロジー(株)、(株)エフテック、(株)構造計画研究所、(株)ジーテクト、(株)先端力学シミュレーション研究所、

(株)ニコンソリューションズ、(株)フィアロコーポレーション、三井 E&S システム技研(株)  
(五十音順)

これらの参加企業で一連のプロセスを役割分担し、高効率なデータ活用の仕組みづくりを目指し、現業のプロセス効率向上に役立つ技術を構築する。また経済産業省からの委託事業で培った CPE によって、これまでの事業構造にはない新しい価値創造可能な研究を検討する。特に開発と製造の詳細をデジタル化することにより、モノづくりの事業構造変革を可能とする。例えば製造業を開発事業と製造事業に分離し、これを連携するなどを容易にし、多様性に富んだ新たな事業形態を生み出すことに繋げたい。この取り組みは現時点では自動車をターゲットとしているが、今回の取り組みで得られる技術は自動車に限らず、製造業全般に共通する課題であり、様々な業種への展開も可能である。

【参考 1】 [https://www.meti.go.jp/policy/tech\\_promotion/kenkyuu/001.html](https://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/001.html)

【参考 2】 <https://cpe.or.jp/>

### 3. まとめ

CPE は実物情報のデジタル化を利活用の観点から検討し、多様性に富んだニーズに応えられるデジタルツイン構築する技術を展開し、モノづくりをはじめ、社会全般のデジタル化貢献を目指したい。デジタル化社会の実現は世界レベルでの競争や連携の基本となるため、インフラとして整備し、一部の大手企業のデジタル化だけではなく、中小企業のデジタル化も含め、業界全体、社会全体で対応することが重要である。広範囲のデジタルツイン形成は各種事業形態の在り方を根本から変革するポテンシャルを持っており、100年に一度といわれる変革に対して、CPEはこのデジタル化技術により、日本経済に貢献しつつ、世界と共存するデジタル化を考えていきたい。

#### 著者プロフィール

高山 光弘 (たかやま みつひろ) 氏

1989年 名古屋大学応用物理学科卒業、

1991年 名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻修了

1991年 本田技術研究所入社

2021年 本田技研工業退社、(途中、本田技研工業に社内統合)

2021年 サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合 (CPE) 常務理事  
就任、現在に至る

(2022年2月20日原稿受領:SIC ニュースレターVol.4.3に掲載)

## 寄稿2 カーボンニュートラル社会への民生部門の課題

大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授 下田吉之氏

### カーボンニュートラルへの引き返せない道

良く「潮目が変わった」と言われるように、2015年にパリで開催されたCOP21において、「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」という目標が掲げられたことが、その後の世界のカーボンニュートラルへの動きを加速することになった。それまで、IPCCの報告書では、いわゆる2℃シナリオ（2050年頃に世界の温室効果ガスの排出量を半減）はあったものの、1.5℃を達成するシナリオは存在しないとされていた。パリ会議を受けてIPCCは世界中の研究者に1.5℃シナリオの提案を要請し、2018年に発表された1.5℃特別報告書において、2050年に概ね温室効果ガスの正味排出量がゼロとなる、いわゆる2050年カーボンニュートラルシナリオが発表された。

この1.5℃特別報告書のSPM(<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>)に興味深いグラフが掲載されている。地球の平均気温が産業革命以来どれくらい上昇してきたかを、毎年の変動を平滑化した曲線で描いたものであるが、これによれば産業革命以来0.5℃上昇に到達したのが1980年代中頃、1℃上昇に到達したのが2010年代中頃となっており、予測では2040年頃に1.5℃に到達するとされている。そして世界が1℃上昇に到達した2016年頃から、世界の平均気温は観測史上最高を何度も更新するようになり、日本での大型台風や豪雨被害、世界での大規模な森林火災や熱帯低気圧など大規模な気象災害が頻発するようになった。これは多額の損害保険の支払いを通じて世界の金融システムを刺激することにもなり、ヨーロッパを中心として2050年カーボンニュートラルを宣言する国が相次いだ。

一方で、日本では2015年頃よりパリ会議へ提出する約束草案の策定のため、部門毎に温室効果削減対策のリストアップとその削減効果の推計の作業が各省庁でおこなわれ、その合計として2030年に2013年比26%の削減を目標とする地球温暖化対策計画が2016年に策定された。そこでは長期目標を「2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す」とされ、これは上記の2℃シナリオで先進国が目指すべき水準とされていた削減目標に相当する。その後この2050年目標について環境省・経済産業省の審議会で議論がおこなわれ、2019年には「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」としてとりまとめられたが、「2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減という長期的目標を掲げており、その実現に向けて、大胆に施策に取り組む。」とされていて、この目標の達成を絶対のものとはしていなかったことがう

かがえる。しかし上記のようにこの時点でヨーロッパは1.5℃目標に照準を合わせており、また2020年におこなわれたアメリカ大統領選挙においてバイデン候補が当選すればヨーロッパと歩調を合わせることは明らかであったため、日本においても2020年10月に当時の菅義偉首相により2050年カーボンニュートラル、2021年4月には2030年目標を2013年度比46%削減とすることが定められ、同年10月に「地球温暖化対策計画」と「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が改定された。このように我が国で2015年から2019年にかけて論じられていたのは、実現可能性を重視した「努力すれば達成できる目標」であるのに対し、2020年以降の政策は温暖化による影響を抑えるための制約から導かれた「達成しなければならない目標」へ転換していることが大きな違いである。

### 日本は何で貢献するのか？

上記の世界的な流れの中で、我が国がこれから2050年のカーボンニュートラルを目指していく上では、2つの重要な課題がある。一つは「カーボンニュートラルを如何にして達成するか？」であり、もう一つは「カーボンニュートラルの世界で日本はどの分野で貢献するのか？」である。現在我が国が世界をリードしている産業分野には化石燃料の使用を前提としたものが多く、これらを脱炭素型産業に転換していくことが必要である。国の計画においても、「環境と経済の好循環」、「世界は脱炭素の大競争」、「労働力の公正な移行」等の言葉が並んでいる。近年カーボンニュートラルに関する多くの書籍が出版されているが、エネルギー政策を専門とする著者と、環境政策・経済政策を専門とする著者による2冊の異なる書籍(竹内純子、2021)(小林光・岩田一政他、2021)が、同じ手法で始まっているのは興味深い。すなわち、カーボンニュートラルの中で経済的に失敗した2050年の日本と成功した日本の両方の姿を物語として語り、カーボンニュートラルへの産業の転換に失敗すれば、我が国の経済状況が相当に悪化することを警告している。後者の書籍では特にDXが両者の分かれ道であることを強調している。

現状を見れば、我が国の再生可能エネルギー産業は、地熱発電などでまだ優位にあるものの、過去に世界をリードしていた太陽光発電や風力発電では国内産業が落ち込んだ状態にあり、また、日本が得意とする高効率・低環境排出の化石燃料起源火力発電技術は石炭火力自体の使用を禁止する世界的な動きにより大幅な伸びが期待できない。こう考えると、我が国の今後の「勝ち筋」はエネルギーの供給側よりは需要側にあるのではないかと思えてくる。

冒頭に述べた IPCC の1.5℃報告書では、世界中の研究者から提示された2050年カーボンニュートラルのシナリオを4つの類型に分けているが、うち3つはその達成のために BECCS (バイオエネルギーを利用し、発生したCO<sub>2</sub>を地中貯留する) などネガティブエミッション技術を利用するものであり、そのための耕作地の確保や技術開発など

に課題がある。それに対して残りの一つは低エネルギー需要シナリオと呼ばれ、エネルギー需要の大幅な削減を中心にカーボンニュートラルを達成するものである。その代表的なものが Grubler による LED シナリオ(Grubler et. al, 2018)である。このシナリオでは、Quality of Life の充実、都市化、革新的なエネルギーサービス、最終需要家の役割の変容、情報革新の5つのドライバーによって社会の大きな変化がもたらされ、更に情報化、シェアリングエコノミー、電化によってエネルギー消費の大幅な削減が実現するとしている。上で挙げた5つのドライバーのうち、少なくとも革新的エネルギーサービスと最終需要家の役割の変容以外の3つの項目は、エネルギーの脱炭素化とは関係なく社会の発展に伴い進展していくものと考えられるが、このシナリオではそれが結果的にエネルギー消費の削減に繋がるとしているところがポイントである。例えば、スマートフォンは電話だけでなく、従来目覚まし時計、ラジオ、カメラ、音楽プレーヤー、タブレット型コンピューター等別々の機器として存在したものを一つにまとめており(機能統合)、それによって稼働時・待機時の消費電力、製品製造のためのエネルギーを大きく節約している。これはスマートフォンのサービスを向上させようとしたデザインの賜物であり、元来省エネルギーを目的としたものではない。同様に、テレワーク(交通エネルギーやオフィス床面積の削減)やテレショッピング(店舗床面積の削減)もデジタル化に伴う行動の変化が結果としてエネルギー消費の削減に繋がる可能性を有する。

### まちづくりこそ勝ち筋？

上記のような大幅な省エネルギーをこれからの世界の温室効果ガス削減における鍵と考えると、日本の得意とするのは、とりわけアジアの民生部門に関する省エネルギーではないだろうか。現在、日本の温室効果ガス排出量の部門別内訳を見ると、産業部門の構造転換や製造現場の海外移転による減少もあり、民生部門は全体の1/3で産業分野とほぼ等しくなった。したがって民生部門で大胆な対策をとることは日本の温室効果ガス削減対策としても重要である。また、電気自動車が増えてくるとその充電需要の大きな部分は住宅・建築を介して給電されるので、民生部門と不可分になってくることから、この分野のエネルギーシステムをどのように創りあげるのかは大きな課題となってくる。すなわち国内における実践・実証を通じた「アジアの脱炭素まちづくり」が、日本が世界に貢献できる分野ではないかと考える。特にアジアに位置する日本は「冷やす技術」が優れており、これから冷房が爆発的に普及する南・東南アジアにおいて優位にある。都市を構成する住宅・建築だけでなく、家電・設備・自家用自動車、更には各種供給処理施設をパッケージにして先進的な脱炭素のシステムを作り上げ、国内においてその高い環境性能を実証することで、各構成要素を世界に普及させようとするものである。技術的な鍵はデジタル化であろう。これからの脱炭素都市は上記の各種ハードだけ

でなく、これらを統合して最適化し、住民に安全で快適な生活を提供しつつ、電力ネットワークなど広域のインフラストラクチャーとも協調するための情報システムが必要となる。この分野で日本の産業は必ずしも優位ではないが、日本の優れたハードウェアのみが持ち得る機能との統合で活路が見いだせるのではないかと思う。

当然、このような都市システムを建設することには高いコストが伴う。しかしながら、エネルギーコストの上昇を製品価格に反映せざるを得ない産業部門とは異なり、低所得層への配慮さえ成されれば、家計は脱炭素の目的のためにある程度のエネルギーコスト負担増を許容する可能性がある。ここで大事なのは一般の市民が脱炭素のムーブメントを自分事とし、全員で推進していく機運の醸成であろう。日本では1960年代、「三種の神器」のキャッチフレーズで家電製品の急速な普及（国民一人あたり所得がヨーロッパ諸国より低いにもかかわらず、冷蔵庫や洗濯機の普及率で遙かに上回る）を成し遂げた実績がある。（橘川武郎、2004）そのためには脱炭素技術のブランディング、性能だけでなくデザインなど魅力づくりに配慮した脱炭素のまちづくりが重要と考えている。それによって我が国における民生部門の脱炭素化を早期に達成し、関連する技術を蓄積することで、アジアをはじめとした世界のカーボンニュートラルへの貢献と日本の産業の成長という成功シナリオを描くことが重要である。

## 次世代の育成が急務

最後に、日本の特に重要な課題として、次世代の人材育成を挙げておきたい。現在の20代が2050年には50代となるので、この年代層を中心とした若手の活躍が2050年までのカーボンニュートラルへの鍵を握ると考えている。不確実な温暖化の進行に対して重要な判断がおこなえるリーダー、カーボンニュートラルを通じて新たな企業価値を創出する人材、技術のイノベーションを担い、基礎研究から社会実装までの研究開発を担える人材、消費者・生活者として社会経済システム・ライフスタイルのイノベーションを牽引し、脱炭素社会の技術の普及を担う市民など、社会の各層においてカーボンニュートラルへの意識の高い人材が必要であり、教育を通じたその育成が急務である。

## 参考文献

竹内純子「エネルギー産業 2030 への戦略」日本経済出版、2021

小林光・岩田一政他「カーボンニュートラルの経済学」日本経済出版、2021

Grubler et. al: A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and

sustainable development goals without negative emission technologies, Nature Energy (2018) 3(6) 515-527

橘川武郎「日本電力業発展のダイナミズム」名古屋大学出版会、2004

#### 著者プロフィール

下田 吉之（しもだ よしゆき）氏

大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授。工博。

大阪大学大学院博士課程修了。大阪大学工学部助手、大阪大学先端科学技術共同研究センター助教授などを経て、現在大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻教授。

大阪大学総長補佐（サステイナブルキャンパスオフィス環境エネルギー管理部門長）を兼務。中央環境審議会臨時委員（地球環境部会）、日本学術会議連携会員、エネルギー・資源学会副会長を務める。

主な著書『都市エネルギーシステム入門』学芸出版社（2014年9月）

（2022年5月27日原稿受領:SIC ニュースレターVol.4.6 に掲載）

### 寄稿3 日本郵船におけるデジタルイゼーションの取り組み

株式会社 MTI（日本郵船グループ）取締役 船舶物流技術部門長 安藤英幸氏

はじめに

筆者の所属する株式会社 MTI(以下、MTI)は、日本郵船の研究開発子会社で、日本郵船が運航する700隻規模の船隊の運航における環境負荷低減や安全運航に関する研究開発に取り組んでいる。今回、SIC 個人会員で日本郵船・執行役員、イノベーション推進、DXを担当する鈴木英樹氏よりご指名頂いたので、僭越ながら、日本郵船のデジタルイゼーション活動に早くから関わって来た筆者が筆を取らせて頂く。

簡単に筆者の自己紹介をさせて頂くと、東京大学工学部で学部・大学院修士を1998年に卒業、半年間、東大の연구원として勤務した後、大手造船所に就職、主には米国で設計 CAD システム開発プロジェクトに従事した後、東京大学に戻り、新領域創成科学研究科の助手、助教授を務めさせて頂き、その後、現在の日本郵船グループの MTI に2005年に移った。学生時代から今まで、様々な形でシステムに関わる研究や開発に携わってきた。

本稿の執筆にあたり、これまでの『SIC ニュースレター「論説」集』を編集担当の構造計画研究所中野一夫氏に送って頂き、非常に興味深く拝見した。特に、SIC 副センター長の木村英紀先生による論説「システムイノベーションとは何か？」における「価値層」と「科学技術層」の間の「システム層」によるシステムイノベーションの構造と、「システム層」内部の活動として、リファレンスアーキテクチャやデータ標準化を位置づけ、またそれらへの取り組みを通してシステムインテグレーションを加速するというご説明は、システムイノベーションの本質が良く表現されており、大変感銘を受けた[1]。筆者も、僭越ながら、木村先生のおっしゃる「システム層」の専門家として、海事分野の「システムイノベーション」に取り組んできたということだと思った。

また、特別企画対談の齊藤裕 SIC 初代センター長と木村先生の対談「新しい山に登ろう！」において、サイバーとフィジカルが融合するサイバーフィジカルシステム (CPS) で、日本社会の特徴である共生・共助の特徴を活かし、「新しい山」を作るべきであるという点についても、大いに共感を覚えた[2]。筆者も、1990年代後半の大学院の学生時代から、Google や Amazon、Microsoft 他の技術の発展に触れ、日本の製造業や産業が、インターネットの時代に、情報検索、情報フィルタリング、クラウド、機械学習など、コンピュータサイエンスや人工知能から生まれた新しい技術を取り入れながら、一方で日本の良さを活かしながらどのように発展出来るのだろうか? と思いながら取

り組んできた中で、筆者の場合には、海事の産業競争力をどのように強化するかと言うコンテクストになるが、多くの共通点があると感じた。

本稿では、日本郵船におけるデジタルイノベーションの取り組みと題して、SICにおけるシステムイノベーションの視点とも通じ、読者の皆さまにも関心を持って頂けるであろうと筆者が感じる、幾つかのポイントを紹介させて頂ければと思う。

## ドメインとシステムの専門家の協業

筆者が日本郵船の活動を始める前、大学に勤務していた頃の話から先ずスタートするが、大学での研究活動で参考にした論文の一つに、1999年のIEEEのIntelligent Systems誌のData Mining特集の中に、カナダ航空の航空機の保守を題材として、航空機上のコンピュータが収集するセンサーデータと、陸での保守作業の部品交換の報告書のデータを使って、次の部品交換時期を予測する際に、複数の機械学習手法の有効性を比較評価する内容のものがあった[3]。

当時、データマイニングの研究に取り組んでいた筆者は、船舶でもこうした取り組みを行いたいと思い、当時、既に東大を退官され、日本郵船グループの日本海洋科学で顧問をされていた故小山健夫先生にお願いして、日本郵船の機関長の方をご紹介頂き、公開されている故障報告書を日本機関士協会にお願いして電子データを提供頂き、そこから機関故障の知識として、機関故障のFault Tree(故障木)を抽出するというデータマイニングの研究に取り組んだ。出来上がった故障木を、取り組んだ修士の学生と一緒に日本郵船の大機関長の方々にプレゼンすると、「なるほど。素人にしてはよく頑張った」とお褒めの言葉を頂いたが、やはり様々な機械学習や自然言語処理の手法を駆使しても、機関のドメイン知識のない我々の分析では、プロの仕事に役立つような知識の抽出と言うわけには到底いかなかった[4]。

一方で、後から教えて頂いたのだが、我々の提示したデータマイニングと言う考え方は大いに参考になったと言うことで、日本郵船では独自に機関長らが「エンジンエッセンシャル」と言うトラブル防止マニュアルを作り、それまでに起こった事故データを整理し、修理金額の大きかった順に並べて、損害額の高い事故について重点的に原因分析と対策マニュアルを作り、運用することで、それ以降の重大事故の被害総額を削減することに成功し、効果があったと言うのだ。そこでは、我々が示した、データマイニングの過程で、データをドリルダウンする際に、説明変数として損害金額を取り、キーとなる従属変数やその分岐点を見つけるという作業を繰り返して、分析を進めた考え方やプロセスがヒントになったと言うのだ。

この例では、我々「システム層」の専門家とドメインの専門家の連携はまだ緩やかであったが、それによって価値が産まれた事例だったように思う。その後、ドメインとシ

システムの専門家の連携が深まることによって新しい価値が産まれる多くの事例を目の当たりにしてきたが、そうしてドメインとシステムの専門家の連携を進めること、その価値に気づき、それが広がったことが、今に繋がる日本郵船のデジタルイゼーション、DXの取り組みの本質と言えるのではないかと思う。

## データ収集、分析、価値

これも筆者が大学勤務の2002年の頃だが、日本造船工業会で「実海域性能」が重大テーマとなっていた。船舶と言うのは、波や風が穏やかな状態での、スピード、燃費の性能を試運転時の浅い喫水で確認するのが基本なのだが、実際の船の運航は、貨物を満載にして、波や風がある中で走るので、船会社の経済からすると、実運航条件での性能（実海域性能）が重要と言うことで、日本の造船所も船型開発には自信があるので、そこを日本造船の売りにしようと言うことで業界を挙げたテーマになっていた。

当時の船はまだ、実海域性能のデータ収集を行える仕様にはなっていなかった。そこで、実海域性能のデータを収集したい訳なのだが、それだけでは開発予算が取れないので、船舶向けの燃費計を作ると言う企画書を2006年に書いて、日本郵船の役員会で説明したところ、「面白いから、是非、やってみろ」、と言うことになり、早速プロジェクト化してメーカーと協力して開発して、5隻の船に搭載した。狙い通りのモノは出来たのだが、現場の船長からはあまり評判が良くない。これはちょっとダメかなと思っていたところに、コンテナ船部門と当時、全社の燃料節約活動を推進していたリーダーから、燃費計と船の航海レポートのシステムを組み合わせ、詳細データを陸で把握したいと言う話が2007年末に来て、早速プロジェクト化して3カ月程で製作して、SIMS(Ship Information Management System)と言う名前を付けて、北米、日本、中国の航路に就航する太平洋航路の6隻の同型船に2008年春から搭載した。すると今までに見たことの無い細かな性能データがタイムリーに陸で得られるようになり、同型船比較で減速運航のためにターボチャージャーカットした効果も把握できたことから海務オペレーションのトップの機関長も納得され、搭載を更に進めようと言う流れが出来た。

こうして取得できるようになった実海域のデータを、コンテナ船事業のオペレーションの採算性に責任を持つ部隊の価値に繋げるにはどうしたら良いだろうか、と言うことで試行錯誤を始めた。はじめは、データマイニングソフトを使って、様々なビジュアライゼーションをしながら意見を聞く作業を繰り返して、最終的には、航海毎のトータルの燃料消費量を、船のベースの燃料消費量（これは天気が良く、一定のスピードで、計画スピードで走った時に発生する燃費）、実際の天候下で波風の影響により追加で発生した燃費、計画スピードと実際の平均スピードの差により増減した燃費、速力配分の良し悪しにより増加する燃費と言った具合に、内訳を出すような形に分析することになった。ここでは主には造船工学の知見で解析アルゴリズムを作った。これにより、船の船

長機関長、陸のオペレーター、ウェザールーティングサービス会社、船のハード性能を預かる技術部隊、など、それぞれ部署ごとに責任を持つ燃料消費量を明確にして、マネージ、組織としての改善活動を検討出来る格好にして、その後数年間、解析サービスを提供した。

その後、2012年頃からは、IBIS プロジェクトと言う名称をつけて、更に組織をあげての燃費削減の取り組みがコンテナ船部隊で始まり、配船の最適化や船陸情報共有によるムダの削除、コンテナ全船型の模型試験による最適トリム（船の前後姿勢）チャートの作成や、更にその先に、2年目にはプロペラ換装や船首形状の改良などハード改造も含めて総合的に取り組み、年間100億円規模のコスト削減に繋がった。

データマイニングや機械学習などの意味で高度な技術を開発したと言うわけではないが、船のIoT データが重要な役割を果たし、造船工学の知見も活かして新たなデータマイニングの方法を創出し、オペレーションの現場をはじめ様々な人々とのコラボレーションや組織的な取り組みによって、結果、大きな価値に繋がった。

コンテナ船でのこの事例は、筆者の日本郵船でのこれまでの取り組みの中でも、特に大きな成功体験で、この時には、事業部やオペレーション部隊、経営層もベクトルが合い、体系的なアプローチも上手く役割を果たして、データやデータ解析と言った技術も活きた。こういう機会がいつ訪れても対応出来るように、また、こういう機会をこちらから起こすように、我々システムの専門家は腕を磨き、情報を集め、日常的なプロジェクトでの連携も進めて、信頼のネットワークを構築しているのだろうと思う。

## データ収集、標準化

実海域性能を収集するために構築した SIMS は、2012年頃には第二世代の SIMS2 の搭載を開始し、機関関係のセンサーやアラームデータなど船上システムが収集している全てのデータを陸で閲覧できるようになり、船舶 IoT データ収集プラットフォームと呼ぶようになった。当時、船舶データへの関心が高まり、将来的に、船会社、造船所、船用メーカーなどがそれぞれ同じようなデータ収集装置を搭載することが懸念されたので、日本船用工業会に、2012年末に立ち上がったスマートナビゲーションシステム研究会(スマナビ研)で船用メーカーと議論を進め、同じようなデータを集め、限られた衛星通信の帯域を共有する船のデータ収集は、競争領域ではなく業界の協調領域であると位置づけ、船舶 IoT に業界で取り組むこととした。その後、2018年に ISO19847(データ収集装置のシステム仕様)、19848(データモデルとデータ名称)が ISO 国際規格に制定された。スマナビ研では、更に、船内機器間ネットワーク(ISO16425)、船陸非同期ファイル通信規格(ISO23807)の取り組みも追加し、船舶 IoT の規格は国際的にも、日本がグリップしながら進める格好となり、国際的にもこれら規格の認知が進み、

複数の準拠製品や規格に基づく承認を行う船級も出て、実際に使われる国際規格に育ってきている。

日本郵船でも、2022年からはデータ収集の頻度を上げ、ISO19847, 19848 に準拠した SIMS3 の搭載を開始し、船陸通信には ISO23807 に準拠した船陸データ共有インフラ（ノルウェー企業 Dualog との協業）の導入を合わせて開始している。

また、業界での船のデータ共有をする場として、ShipDC を船級協会の ClassNK が2017年に立ち上げ、そこに業界各社が集うデータ共有のエコシステム IoS-0P が日本郵船、商船三井、川崎汽船の大手船会社の呼びかけで立ち上がり、海事業界として船から収集するデータの共有、活用が進むよう取り組みがはじまった。こちらは今後、①造船や船用メーカーが必要とする技術データの活用、②船からの CO2 排出データを荷主や社会と共有、また、③船のデータを水産業など他業界との共有、と言った、海事産業のデータ共有プラットフォームとして進めて行くことが期待される。

日本郵船は2019年に『日経コンピュータ』主宰の「IT Japan Award」でグランプリを頂いた。ここで評価されたのが、船舶 IoT の取り組みで、海務グループに設置されたビッグデータチームをリードする腕利き機関長が MTI のシステムの専門家と連携してリードする、SIMS で収集する機関データからの異常検知の取り組みが評価され、受賞に繋がった。この取り組みでは、マニラに Remote Diagnostics Center(RDC)を構築し、そこで機関のドメイン知識を持つフィリピン人の船員が、MTI のシステムの専門家が開発を取りまとめる AI による自動監視技術やデータ品質管理システム(DQMS)を活用しながら、24時間365日の監視で船の機関オペレーションを助ける運用を、“Expert-in-the-Loop” というコンセプトの下進めている。

まだまだ改善すべき課題は多いが、船舶 IoT に関するシステム仕様、データ名称、業界でのデータ共有のフレームワーク、エコシステムの構築は業界を上げて進んで来ており、こうした方向を、今後の脱炭素や国内の海事業界の人手不足、洋上風力などの社会課題へのチャレンジの中でも是非、競争力の基盤として活用を進めたい。

## 複雑システムの安全性とシステムインテグレーション

船舶 IoT の取り組みを2010年代に進めて来た一方で、欧州側では2013年頃から、自動運航船の構想が持ち上がり、元々、石油リグなど海洋分野で高度システムの技術力で実績があるノルウェーをはじめ北欧の大手 OEM が一斉にプロジェクトに着手し、2021年末に無人運航船を実現するプロジェクトが発表された。

我々も、2016年からの国交省の研究開発助成プロジェクトで、航海計器メーカーと連携した取り組みを開始した。始めた当初は、航海士の見張り業務の支援など、実務的な身近なところから着手した。やがて、この問題は高度で複雑なシステム、システム

オブシステムズのシステムインテグレーションに本質があり、そうした複雑なシステムの、設計、開発、搭載、試験、運用のライフサイクルを通してどのように安全性を作りこんでいくかのシステムインテグレーションの方法論が必須だと言うことが分かって来た。その意味において、船舶や海洋構造物を定点保持する DPS(Dynamic Positioning System)で市場を独占する欧州 OEM が、その延長としてこの自動運航船のマーケットを捉えている様子もわかり、既に海洋分野で知見を培ってきた欧州勢に対して、我々は劣勢な状況にあることも良くわかった。

一方で、こうした複雑なシステムの構築で使われている方法論は、宇宙航空分野や自動車産業で利用が進む、システムズエンジニアリングがベースで、2017年には、シミュレーションを活用した試験方法無しには、自律操船機能の開発は難しいということも分かった。

そこで、2018年からの遠隔操船の実証事業ではじめてノルウェーの DPS 認証に使われる試験用シミュレーターを導入した。また、ノルウェー船級との協業を実施して、現地に数名で長期出張を重ね、彼らが意図する自律船システムの設計、開発、認証プロセスを学んだ。その後、2020年2月から日本財団による完全自律船の開発と実証を目指した大型プロジェクト MEGURI2040 が開始されることになり、我々は、DFFAS(Designing the Future of Full Autonomous Ship)コンソーシアム(コンソーシアムメンバー30社、業務委託先も含めると60社強で構成)を組成し、総額で60億円規模のプロジェクト計画が採択され、ここで本格的に V-プロセスで自律船の開発に着手した。

コロナ禍の2年間ではあったが、段階的にコンセプト、機能要求、設計、リスク評価、開発、単体テスト、結合テストと進め、昨年2021年6月～8月には船に搭載する全体システムを幕張の陸上支援センターに集め、船に接続する代わりに、テスト用シミュレーターに接続し、バーチャル環境でのシステム検証を重ね、それまでの設計、リスク評価、単体テストで洗い出せなかった30程度の全体システムの課題を洗い出して修正し、予定している東京湾と伊勢湾の間の航海を8回、仮想環境で実施し、陸上で出来ることは全て実施したと言う状態になった。その後、11月に対象船である内航コンテナ船「すぎく」にシステムを搭載し、洋上調整を行い、更に計測した実船データを使ってシミュレーションモデル(デジタルツイン)のキャリブレーションを行って、制御システムのチューニングを行い、フィジカル、バーチャル両面を組み合わせて調整を完了した。

最終的に、2022年2月26日から3月1日にかけて、東京湾と伊勢湾の片道約390km、約20時間の航海を往復し、平均で98.5%の自律航行を達成することができた。世界に先駆けて、輻輳域での自律操船機能の実証航海を成功させ、国内外のメディアでも大きく取り上げられた。[5]

今回、DFFAS プロジェクトで自動操船システムの開発と実証と同時に目指したことは、自動運航船とは何かを定義し、そのアーキテクチャを定め、オープンに共有し、Model-Based Systems Engineering(MBSE)や Model-Based Development(MBD)と言った新しいエンジニアリング手法、プロセスを導入し、海事業界として共有すべき自動運航船のVプロセスを構築することであった。こうした経験を何ラウンドか重ねることが出来れば、日本の海事業界は、個社の大手 OEM が強い欧州とは違い、団体戦で連携しながら、こうした複雑なシステムを設計、構築、建造、運用できる筈で、更にコンピュータと再現性の高いシミュレーションのパワーを活用して、その生産性を圧倒的に向上させることが、今後の海事業界の競争力に繋がると言うことが進むべき方向だと言うことを、海事業界として学ぶことができたと考えている。

再現性の高いシミュレーションの実現のために、国内外の科学技術層の専門家、一線級の船体操縦運動の専門家の協力を得て、シミュレーションプラットフォームはノルウェー企業の協力も得て、水槽試験や船のモデル化に取り組み、2019年から MTI の技術アドバイザーを務めて頂いているカーネギーメロン大学の金出武雄先生にもご指導頂きながら、MIL(Model-in-the-Loop)や HIL(Hardware-in-the-Loop)と言ったシミュレーションベース開発の経験を DFFAS の中で一気に積むことができ、こうした手法を取る上でのアカデミックとの繋がりが非常に重要であることも再認識させられた。

DFFAS プロジェクトの成功の後、現在、次のフェーズに向けた準備を進めており、今後は、自動運航船のアーキテクチャを構成する規格作りと、構築したVプロセスのブラッシュアップを進め、社会実装を目指して、法律や規則、保険など、更に多くの関係者を協業の輪の中に巻き込んで、それぞれの専門性を尊重しながら、連携して取り組みを進めて行く必要がある。

## おわりに

本稿では、日本郵船でのデジタルライゼーションの取り組みとして、筆者の経験から、システムイノベーションと関連する話題を紹介させて頂いた。海事産業においても、「新しい山」を CPS の活用により、日本の社会の共生・共助の良さを活かして構築していくべきと思っており、是非、他産業での best practice から学びながら、また、海事産業の取り組みも発信しながら、取り組んでいきたい。2022年10月からは、東京大学大学院の新領域創成科学研究科に、MTI を含む民間の7社で「海事デジタルエンジニアリング」社会連携講座を構築し[6]、脱炭素や自動運航など具体的な取り組みを通して、海事産業の MBD や MBSE の導入と人材育成を進めていく予定としている。是非 SIC の活動とも連携させて頂きたいと考えている。

尚、日本郵船のデジタルライゼーションの取り組みのうち、本稿はMTI 目線での紹介となったが、日本郵船デジタルアカデミーやデータサイエンティストの育成、AI の活用など日本郵船の仲間で協力してデジタルライゼーションの取り組みを広く進め、すそ野が広がっており、それらは最近公開された日経クロステックの特集に記事化されており、参考にして頂ければ幸いである。[7]

#### 参考文献

- [1] 木村, ‘システムイノベーションとは何か?’, SIC ニュースレター「論説」集(2019年度, 2020年度掲載分), p.3-16
- [2] 木村, ‘新しい山に登ろう! 齊藤裕 SIC 代表理事・センター長に聞く’, SIC ニュースレター「論説」集(2021年度掲載分), p.1-15
- [3] Sylvain Letourneau and et.al, ‘Data Mining to Predict Aircraft Component Replacement’, IEEE Intelligent Systems, Nov/Dec 1999, p.59-66
- [4] 安藤, 大和, 堀, 増田, 白山, ‘テキストマイニングを用いた故障報告書分析手法の研究’, 日本造船学会論文集, 2002, 192号, p.475-483
- [5] 日本郵船プレスリリース 無人運航船の実運用を模擬した実証実験を実施  
[https://www.nyk.com/news/2022/20220303\\_02.html](https://www.nyk.com/news/2022/20220303_02.html)
- [6] 海事デジタルエンジニアリング社会連携講座 プレスリリース  
<https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/9621.html>
- [7] 日本郵船のDcXと新たな挑戦, 日経XTech Special  
<https://special.nikkeibp.co.jp/atclh/NXT/21/intel2021/nyk0715/>

#### 筆者プロフィール

安藤英幸 (あんどう ひでゆき) 氏

1971年8月生まれ

#### 学歴

1995年3月 東京大学工学部船舶海洋工学科卒業 小山・大和研究室

1997年3月 東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻 修士課程修了  
馬場・久保田研究室 (人工物工学研究センター)

(1996年10月～1997年6月 Stanford 大学機械工学科  
ME210 (現在はME310) にリモートデザイナーとして参加)

2003年7月 東京大学大学院工学系研究科論文博士 博士(工学)

#### 主な職歴

1997年10月 日立造船株式会社入社 技師

(1998年8月～2000年4月、米国バージニア州でCAD開発)

2000年5月 東京大学大学院新領域創成科学研究科 助手

2003年8月 東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教授

2005年10月 株式会社MTI 入社

2016年4月 日本郵船株式会社に転籍 (株式会社MTI に出向)

2020年6月 株式会社MTI 取締役 現在に至る

(2022年8月29日原稿受領:SIC ニュースレターVol.4.9に掲載)



装置から、ナチスの暗号「エニグマ」を解読したりレー式計算機「ロビンソン」、アイゼンハワー大統領の当選を予測した CBS の真空管式、初のロケット打ち上げに使われたトランジスター式、そして今の IC ベースの PC に至るまで、130年にわたって演算速度は綺麗に Exponential に加速してきた。

カーツワイルが言わんとしていることは、一つの ExTech の有用性が終わりを迎えるたびに、それに代わるものが出てくるということだ。IC も同じで、いま半ダースほどの後継技術が検討されているが、本命は何と言っても量子コンピューターだ。

### (3) ExTech 成長ステージ：6つのD

ExTech の成長ステージをダイヤモンド[4]は、6D のフレームワークと呼んでいる。Digitized (デジタル化)、Deceptive (懐疑的)、Disruptive (破壊的)、Dematerialized (非物質化)、Demonetized (非収益化)、Democratized (大衆化) である。

デジタル化：技術はデジタル化されることで情報を基盤とする環境に移行し、Exponential な進化が可能となる。

懐疑的：誕生したばかりの技術のパフォーマンスは非常に小さい。たとえ一定期間で性能が倍になるとしても、最初はなかなか既存の技術に対抗できない。そのため多くの人が初期の段階で ExTech に対して懐疑的になる。

1975年にコダック社で発明されたデジカメの画素数は0.01Mピクセル、100×100の解像度で、今でいえばほぼモザイクである。しかも写真([5]より)のように大きくて、メモリーに書き込むのに23秒もかかり、その間静止しなければいけなかった。3年後に0.02M、6年後に0.04M、10年後に漸く0.08Mに画素数は微増したが、つまりはずっとほぼゼロに近かった。これを見ていたコダックの経営陣は、デジカメに失望して銀塩フィルムにこだわった。



破壊的：発明から15年後の1990年に初めて商用機が発売されるや、あっという間に画素数は増え、今では100Mを超える。その結果コダックは2012年に倒産した。ExTechはその存在感を示し始めた時には、すでに手が付けられない速度になり、既存の技術・ビジネスを手あたり次第に破壊する。

非物質化：ExTechは既存のものやサービスそのものを消し去る。スマホは電話・ビデオ・デジカメ・CD・GPSなどのモノや新聞・雑誌・書籍などのコンテンツをポケットの中に入れてしまった。

非収益化：非物質化されることで限界コストがゼロになる。かつて写真は高価だったが今はタダで撮れる。長距離電話も Skype がタダにしてしまった。多くのものが無料になっている。

大衆化： ExTech がスケールするステージ。かつて自動車電話はお金持ちのものだったが、今ではスマホが普及していない地域を見つけることすら難しい。

#### (4) ExTech の 10 の代表例

多くの技術は情報を基盤とする環境に移行したおかげで Exponential な成長を始めている。ダイヤモンド[4]は以下の 10 の技術を解説しているが、詳細な説明は紙面の関係上割愛する。

- ・量子コンピューター
- ・AI
- ・ネットワーク・センサー
- ・ロボット
- ・仮想現実 (VR)
- ・拡張現実 (AR)
- ・3D プリンティング
- ・ブロックチェーン
- ・材料科学とナノテクノロジー
- ・バイオテクノロジー

#### (5) 加速を推進する 7 つの力

ダイヤモンド[4]によれば、ExTech の進化の加速は 3 つの増幅要因が重なった結果とみることができる。一つ目は計算能力の Exponential な成長だ。(4) で取り上げた技術はすべてその恩恵を受けている。二つ目が加速する技術同士のコンバージェンスだ。変化の波が重なり合い、目の前のすべてを飲み込んでいく。たとえば、AI とロボットが融合することで、数億人の雇用が失われる。

そして最後の要因が次の「7 つの推進力」の存在である。簡単に一つずつ見ていく。

推進力 1 = 時間の節約：電気や水道、家電製品の普及により家事労働時間は米国において 1900 年に週 58 時間だったものが今は 1.5 時間に短縮された。馬車で 1 週間かかった移動が、鉄道で 1 日に、飛行機で 1 時間に、さらにハイパーループでもう一桁下がる。結果として、我々がイノベーションに費やすことができる時間がどんどん増える。

推進力 2 = 潤沢な資金：技術の進化により生活が豊かになり、イノベーションに向けられる資金もうなぎのぼりだ。デジタルテクノロジーは ICO やクラウドファンディング、ソブリン・ウェルス・ファンドなど新しい資金調達方法も生み出した。

推進力 3 = 非収益化により、あらゆるもののコストが破壊的に下がる。1 億円でできる研究の範囲が 100 倍に広がるとどうなるだろう。ポケットのスマホはかつて

のスーパーコンピューター以上の能力を持ち、しかも1万分の1以下のコストで手に入る。センサー然り、通信然り、かつては国立の研究所でしか使えなかったツールが今はだれでも利用できる。

推進力4 = 「天才」発掘のしやすさ：天才の名に値するのは全人口の1%、つまり世界には7000万人以上の天才がいることになるが、人種や性別、階級、文化などにより多くが世に出ないまま一生を終えていた。しかし、今ほぼ世界の全人口がネットでつながるハイパーコネクティッドの時代を迎え、多くの圧倒的天才が世に出てくるのが期待される。

推進力5 = 潤沢なコミュニケーション：コミュニケーションはイノベーションの最大の推進力の一つである。1980年代に日本で発明された3D印刷の技術は、長い間印刷できるものと言えば樹脂だけで見た目も悪く、全く期待はずれ。ところが2009年に3D印刷の特許が切れると、愛好家のコミュニティがインターネットで盛んに情報を交換しだし、今では元素周期表のほとんどのものを制覇している。スペースXのロケットエンジンも3D印刷で、鋳物よりも軽量かつ強靱である。火星移住も視野に入った。

推進力6 = 新たなビジネスモデル：伝統的にイノベーションと言えば画期的な技術の発見、あるいは製品・サービスの創造を意味していた。しかし、今日最も強力なイノベーションの推進力は、「ビジネスモデル」だ。

20世紀は大体10年に一度程度大きなビジネス改革が起きたが、1990年代のインターネットの登場で、ビジネスモデルは劇的な進化の時代を迎えた。具体的には、クラウドエコノミーやフリー&データエコノミー、さらにはスマートネスエコノミーなど現時点で7つのビジネスモデルが見えている。過去数十年のビジネスモデルの変化とは比較にならない変化が、これから起きようとしている。

推進力7 = 寿命の延長：アインシュタインやスティーブ・ジョブズのような天才があと30年長く生きていたら、どんな業績を残していただろう。多くの天才たちが、人生で最も脂がのっている時期にあの世に召されてしまうというのは残念なことだ。しかし、いいニュースもある。それは寿命が100年まで伸びるときがそこまで来ているということである。

#### (6) ExTech の真の破壊力 = 複数技術の融合：大きく変わる社会生活と既存基盤の破壊

これまで見て来たように ExTech の進化はさらに加速するが、真の破壊力を発揮するのは複数の ExTech が融合したときである。その一例を紹介する。

(3) では10の ExTech を紹介したが、その中のいくつかは、さらに再エネとバッテリーという二つの ExTech が加わることで、輸送分野に大きな破壊が生まれる。

CASE とは、Connected (インターネットにつながる)、Autonomous (自動運転)、Shared

(シェア)、Electrified (電化) の頭文字である。Shared は Uber や Lyft などのライドシェアサービスにより現実のものとなった。タクシーより安くて便利ではあるが、未だ自家用車に比べると割高である。そこに電気自動車 (EV) と自動運転が融合することで、破壊が起きる。ライドシェアのコストの半分は運転手の人件費で、自動運転ではそれが無くなる。さらに現時点では EV の車体価格はガソリン車などの内燃機関 (ICE) よりも高いが、燃費やメンテナンスさらには保険なども加えたトータルのコストでは、ICE よりもすでに安い。これが 2030 年には EV は車体価格においても ICE の半分になると予想される。

これにより実現するビジネスモデルが EV ロボットタクシー (TaaS: Transportation as a Service) である。すでに Google はアリゾナで 4 年前から TaaS の商用運転を開始している。百度 (Baidu) も上海・北京・成都など 5 都市でサービスを始めており、2025 年までに 65 都市で、2030 年には 100 都市で展開すると発表している。現時点で ICE の自家用車のコストは 1 マイル \$ 0.80 程度であるが、TaaS は \$ 0.35。ICE の自家用車を廃車にして TaaS に乗り換える方が合理的であるということである。イーロン・マスク氏は TaaS を \$ 0.18 で提供すると公言しており、これは JR の近郊料金よりかなり割安である。

TaaS は、ドア to ドアのライドサービスを電車よりも安価に提供してくれる。もちろん乗車中は好きなことをやっていて構わない。自家用車が無くなるのが目前まで来ているわけである。

これによる社会への影響は甚大だ。車を所有しなくなるので、全米では年間 \$ 1 兆の家計支出が減り可処分所得が増える。運転に費やしていた時間を別の作業に向けることで、さらに \$ 1 兆の付加価値を生む。これは合計で年間 GDP の 10% にも相当する。

80% の省エネ、90% の CO2 削減が実現し、駐車場に充てられていた土地は都市部の 18% に相当するが、これがフリーになる。大気汚染も解消し年間 600 万人の命が救われる。自動運転はいずれ無事故を実現し、交通事故死者 120 万人と、2 千万~4 千万ともいわれる負傷者もいなくなる。

しかし、いいことばかりではない。交通事故関連のビジネスが GDP 全体に占める割合は 3% もあり、これがほぼ消滅する。ドライバーもほぼ全員、労働人口の 1% の相当する人々が失業する。さらに、自動車の販売台数も 70% 減る。これは GDP の 2% に当たる。売れる車もすべて EV になるので、ICE に傾注してきた日本は大打撃を受ける。

そのほかにも複数の ExTech の融合により、多くの社会生活が様変わりする。例えば、ショッピング、広告、エンターテインメント、教育、医療、寿命の延長、保険、金融、不動産、そして食糧など、ほとんどすべての生活の側面で既存の基盤が破壊される。

## 2. 21 世紀に飛躍する企業

### (1) Ex0: Exponential Organizations (飛躍型企業)

スーパーエンゼル投資家として有名な David Rose のことばに「20 世紀に成功するよ

うに設計された企業は、21世紀には破滅する運命にある」[6]というのがある。20世紀に成功した大企業の特徴は直線的思考で、トップダウンでピラミッド型の組織、金銭的な結果に基づく判断、直進的で順次的なアプローチ、オープンイノベーションは苦手、過去の経験に基づく戦略策定、大量の従業員などが共通の特徴である。

S&P500企業の平均寿命は1920年に67年だったものが、今は15年に短縮している。それに対して、ExTechに基づく新しい組織運営の方法を駆使し、競合他社に比べて少なくとも10倍以上の価値や影響を生み出せる企業が出現している。Airbnb、Github、Quirky、Google Ventures、Teslaなどがそれにあたる。Salim Ismail[7]はこれを Exponential Organizations (Ex0) と名付けて、その特徴を分析しているのでご紹介する。

## (2) Ex0 と 20 世紀型企業の違い：MTP と SCALE

MTPとはMassive Transformative Purposeの略で、野心的改革目標という組織のいわば大志といえるものである。MTPの例としては、Google：世界中の情報を整理する、TED：価値あるアイデアを広める、XPrize財団：人類に有益なExTechを実現する、シンギュラリティ大学：10億人の人々に良い影響を与える、など、ミッションステートメントとは異なる次元の大きな夢である。

21世紀に飛躍するEx0は、すべてこのMTPを持っている。地球規模の変革もあれば、業界の一新を狙ったものまで、重要なことは根本的な変化を目指す点だ。

さらに、20世紀型企业とEx0を明確に区別する外的環境：SCALEについて解説する。SCALEとは、Staff-on-demand、Community&Crowd、Algorithms、Leveraged-assets、Engagementの頭文字をとった造語で、一つずつ簡単に説明する。

Staff-on-demand：身につけたスキルの「半減期」が30年というのは今は昔、現在では5年以下と言われている。如何に自社の社員が優秀でも、彼らのスキルはあっという間に陳腐化する。社外にいる人材のオンデマンド型の調達には、Ex0が柔軟性と機能性を保つためには不可欠である。

Community&Crowd：潤沢なコミュニケーションが3D印刷の技術革新を飛躍的に進めたことは前述したが、コミュニティは人材のオンデマンド調達以上に強力なパワーを提供してくれる。一例をあげると、Chris Andersonが始めたDIYDronesというコミュニティには5万人以上のメンバーが参加していて、米軍の無人爆撃機「Predator」によく似たドローンを開発して98%の機能をカバーしている。違いは本物が一機\$400万かかるのに対し、DIYDronesはたったの\$300である。クラウドは、コミュニティのさらに外側にいる、より希薄な関係の集団ではあるが、その大きさはコミュニティの比ではない。クラウドファンディングを見ればわかるように、大衆の力は強い。ただし、オンデマンドの人材調達が管理型であるのに対し、クラウドは完全にプル型で、如何にクラウドを形成するかが難問となるが、Ex0は後述するEngagementの手法を巧みに使っている。

Algorithms：AIが実用に足るレベルにまで進化して、アルゴリズムはEx0の重要な差

別化要素になっている。20世紀型の企業はトップの勘と経験に基づいて意思決定するが、Ex0はアルゴリズムを駆使して、定量的で客観的な意思決定をするだけにとどまらず、人が陥りやすいアンカリングや可用性バイアスなど複数の罠を巧みに避ける。

Leveraged Assets： オンデマンド人材調達の資産バージョン。2006年のAWSによるIT資源のオンデマンド化は、Ex0の大きな転換点となった。シリコンバレーの「テクノショップ」もこの流れの一つである。Uberは世界最大のライドサービス事業者であるが、一台も車を所有していない。何かを手放すことは、未来を手にかかるともいえる。

Engagement： オンデマンド人材調達、コミュニティ、さらにはクラウドを引き付けるには人々の協調的な行動を引き出す、深いつながりを持った関係性の構築＝エンゲージメントが重要になる。Ex0が外部の人々を活用できるかどうかはエンゲージメントを築けるかどうかにかかっていると看做しても過言ではない。

くじ、クイズ、クーポン、マイレージプログラムなど、消費者の積極的な参加を促す手法は古くから採用されているが、ここ数年、これらの手法でも情報化が進み、デジタルの評価システム、ゲーム、インセンティブなどからなる正のフィードバックループを生み出している。

特に、ミレニアル世代にとってゲームは日常生活そのものであり、ゲーミフィケーションを駆使したエンゲージメントはこれからの必需品だ。懸賞付きコンテストも有用な手段である。Google傘下のデータ解析コンテストプラットフォーム“Kaggle”では常時2桁のコンテストが開催されていて、多くのチームが名誉をかけて競っている。

### (3) 学会のあるべき姿

Ex0の外的環境からも明らかのように、これからは組織の外部の人々といかに深い関係性を築けるかが重要になる。その意味で一般社団法人であるSICや筆者が会長を務める公益社団法人日本OR学会はコミュニティを提供する場として、今後社会の重要な役割を担っていく必要がある。

さらには、専門人材を育成してオンデマンド型の人材供給が可能になることも望まれる。従来この機能は大学が担ってきたものであるが、スキルの陳腐化が激しい現代において大学教育のコンテンツが現実に追いついていけないリスクが大きい。学会は、個々の大学の枠を超えて、広く社会の要請にこたえるようなコミュニティを目指すべきである。現在20世紀型企業の間では、社員のリスクリングが重要であると言われているが、新しいスキルを身につけても5年で陳腐化しては意味がない。リスクリングは、パイソンのようなプログラミング言語を習得したり、データ解析のための統計学を学んだりすることではなく、学会のようなコミュニティにアプローチして外部の優秀な人材との関係性を築く人間力の構築に向けた方が遥かに成果が期待できる

サンマイクロシステムズの創設者のひとりであるBill Joyは「世界で最も優秀な人々はあなたのためには働いていない」[8]と言っている。けだし名言であるが、ここにはヒントがある。要は社外には優秀な人材が山ほどいるということで、これをコミュニテ

ィとして組織できればその存在価値は絶大と言える。

ExTechの時代はまさにコミュニティの時代であり、学会が目指すべき方向と言えよう。

#### 参考文献

- [1]Ray Kurzweil:The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology, Viking (2005)
- [2][https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Moore's\\_Law\\_over\\_120\\_Years.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Moore's_Law_over_120_Years.png)
- [3]Ray Kurzweil: <https://www.kurzweilai.net/the-law-of-accelerating-returns> (2001)
- [4]Peter Diamandis &Steven Kotler: The Future is faster than you think, Simon &Schuster (2020)
- [5][https://www.blogoteca.eu/steven-sasson-inventatorul-aparatului-foto-digital-1975/\(2017\)](https://www.blogoteca.eu/steven-sasson-inventatorul-aparatului-foto-digital-1975/(2017))
- [6]David S.Rose:angel investing,Wiley (2014)
- [7]Salim Ismail, Michale S, Malone & Yuri van Geest: Exponential Organizations, Diversion Books; Illustrated edition (2014)
- [8][https://en.wikipedia.org/wiki/Joy%27s\\_law\\_\(management\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Joy%27s_law_(management))

#### 著者プロフィール

山上 伸 (やまがみ しん) 氏

1979年東京大学工学部計数工学科卒業、東京ガス株式会社入社

1990年Cornell大学 Ph.D. (OR&IE)

2014年4月東京ガス株式会社・常務執行役員、エネルギー生産本部長

2016年4月同社・常務執行役員、IT本部長、基盤技術部・環境部担当

2017年4月同社・常務執行役員、IT本部長、技術本部長

2022年4月より現職

(2022年11月3日原稿受領:SIC ニュースレターVol.4.12 に掲載)

### Ⅲ コラム

#### コラム1 システムと人間

SIC理事・副センター長 木村英紀(東京大学・大阪大学名誉教授)

##### 1. 「モノを要素とするシステム」と「ヒトを要素とするシステム」

システムは実に多様な存在でありその定義は幾通りもあるが、私たちが対象とするシステムは最低限次の二つの条件を備えている。

- (1) 目的がはっきりしている。
- (2) 複数の機能要素が目的達成のために協力している。

さて、システムについて何か考えをめぐらす場合、その手掛かりとなるのはシステムにはどんな種類があるだろうか？という問いかけではなかろうか。大きなシステムと小さなシステム、人為的に作られたシステムと自然発生的に作られたシステム、ソフトウェアのシステムとハードウェアのシステムなどシステムの分類の仕方も幾通りもある。その中で筆者が今一番重要と考えているのが「モノを要素とするシステム」と「ヒトを要素とするシステム」の分類である。前者の典型例は工業製品であり、それを作る産業機械である。後者の典型例は企業や各種団体、プロジェクトチームなどである。

SIC ではこれまでどちらかと言えばモノを要素とするシステムへの関心が高かった。規格化、標準化、共通化、統合化、モジュール化、オープン化、などでの遅れが日本の産業競争力の劣化を招いているという認識がその背景にあった。しかし最近ではSICの正会員企業の問題意識が変わってきた。例えばサプライチェーンのシステム化にはかなりの興味が集まり、現在これをテーマとする二つの分科会が活動中である。サプライチェーンはシステムとしてみればその要素はむしろモノよりもヒトである。また、データ駆動による商行為の効率化を目指す分科会も活動しているが、これもシステムとしてみれば要素はヒトである。この傾向は、「供給サイドから消費サイドへ」「性能向上から価値創出へ」という、すでにかかなり前から起こっている産業界全体の地殻変動を反映したものに他ならない。そこで浮かび上がってくるのは「ヒトを要素とするシステム」の重要性である。

読者の皆様がすぐに想像されるように、ヒトを要素とするシステムはモノを要素とするシステムよりはるかに取扱いが難しい。難しいがゆえにこれまで本格的に議論してこなかったとも言える。しかし、産業界の未来にそびえる「新しい山」を登って行くには、「ヒトを要素とするシステム」に正面から取り組むことが必要であろう。本稿ではその皮切りに、システムという共通性から、モノを要素とするシステムについて得た知見をヒトを要素とするシステムの構築、運用、進化にも適用できないかについて少し考えてみたい。

## 2. システムと組織

「モノを要素とするシステム」と「ヒトを要素とするシステム」の違いは、要するにもとの人の違いに還元される。ものと人との関係は古今東西、哲学の大きな課題であるが、システムの要素として考えてみると様々の興味深いテーマが浮かび上がってくる。

まずモノはその機能が限定されており変わらないが、ヒトは自らの価値観に従って考え行動する生活者として、その活動形態は無限に多様である。一人の人間についてその「機能」を表現することは不可能である。ヒトは日々の生活のなかで環境から様々の影響を受けており、それによってその行動形態は常に変容し、それを外部から予測することは難しい。モノはその機能のレベルがあらかじめわかっているが、ヒトはその能力は個人差があるだけでなく同じ個人でも気分やモチベーションによってその能力のレベルは大きく変動する。このような大きな違いのため、ヒトを要素とするシステムは「システム」としてよりは「組織」という名で取り扱われてきた。英語では“organization”である。参考までに「組織」の定義をいくつか拾ってみよう。

- ・ 目的を達成するために、分化した役割を持つ個人や下位集団から構成される集団（広辞苑）
- ・ 特定の役割・機能をもつ人々が集まって、秩序ある集団を構成すること（明鏡国語辞典）
- ・ 一人の力では実現できない困難な目標を達成しようとするときに生じる複数の人間の協同（経営学用語辞典）

語感は多少異なるが、いずれも冒頭述べた上記のシステムの要件（1）（2）とほぼ相同と言ってよい。従って組織を「ヒトを要素として持つシステム」と考えてもよいことが分かる。

それでは組織についての議論はこれまでどのように行われてきたのであろうか？

日本には「組織学会」が1959年に誕生している。すでに60年以上の歴史を持っており、「組織科学」という雑誌を年二回発行している。かなり広いテーマを扱っているようであるが、テーマは経営にかかわるものが多い。会長や理事なども経営学者が多いようである。海外では「Organization Science」という学術誌がInformsという団体からオンラインで随時発行されている。InformsはORをベースとした経営学を主な領域とした研究者や実務家の団体であるが、データ科学や社会ネットワークなども対象に広げつつあり、日本の「組織科学」よりかなり広い領域を守備範囲としているようである。筆者はどちらにも関係していないので詳細を述べることは出来ないが、「組織科学」という領域が学の世界で一定の市民権を得ていることは確かである。また、そこでの議論が組織を「ヒトを要素とするシステム」として扱ってこなかったも確かのようなのである。今後はシステムとしてみた組織の研究が行われることを望みたい

生物学や医学では特定の機能を持つ細胞の集団をtissueとよぶが、日本ではこれを「組織」と訳している。このことが日本では組織をシステムと同一視しにくい要因となっている。組織をシステムと見做すことによって何が選ら得るかを次節で述べる。

### 3. ヒトを要素として持つシステムの構築と運用

第一に心がけなければならないことは、設計者が自由に出来るモノと同じようにヒトを部品として取り扱ってはならないということである。すでに述べたようにヒトは様々な価値観を持ち多様な環境の下に生きている自律的な生活者である。そのことを尊重し、個人の生活の中にシステムにおける活動を、整合性をもって位置づけられるようにしなければならない。そうすることによってはじめて個人の持つ創意工夫が発揮され、高いレベルのシステム構築と運用が実現する。生活のすべてをシステムの目的達成に従属させる精神主義はかえってシステムの活性奪う。戦前の日本の軍隊が犯した誤りである。システムが大きくなると分業や階層化が生まれる。ヒトを要素とするシステムではモノを要素とするシステムに比べ、部分システムがある程度自律的に動くことは避けられないし、高いレベルの活動を生み出すには必要なことでもある。各部分システムは、システム全体の目的と整合するそれぞれの目的をもって活動することが、システムの活性化を促す。各部分システムに整合性のある目標目的を与えることは、ヒトを要素とするシステムにとって非常に重要なことであり、それは簡単なことではない。各部分システムの目標は、他の部分システムの目標と連動することが望ましい。つまり部分システムAの目標達成は部分システムBの目標達成を促すように、つまり部分システム間の協調が自然に促進されるように設定されることが望ましい。各部分システムに KPI を設定することが一つの手法として喧伝されているが、それらの KPI の間に矛盾がないかどうか、例えば部門Cの KPI が達成されると部門Dの KPI は劣化するようなことがあってはならない。

要素がモノかヒトかでシステムを分けたが、実際はモノとヒトの両方を要素として持つシステムが多い。例えば軍隊はその典型例である。作戦システムや命令システムを重視すれば要素として「ヒト」が中心になるが、兵器の運用を重視すれば「モノ」が前面に出てくるシステムとなる。工業製品はモノが要素であるがそれを作るプロセスではヒトのシステムが重視される。インフラも、同じ意味で機能が問題になるときはモノ、運用が問題になるときはヒトが前面に出てくる。その場合モノを中心に考えるかヒトを中心に考えるかが問題となるが、多くの場合はヒトを中心とすべきであろう。ヒトの持つ様々のネガティブな問題、例えば怠惰、保守性、不注意、不確かさ、不正確さなどヒトのモノに比した欠点は多くあるが、それを受け入れつつモノを要素とするシステムの確実さ、効率性、拡張可能性で補強し、ヒトとモノとの共存共生を図る必要がある。

筆者は、「卓越したシステム」の要件として次の9項目を挙げた[1]。

- ① 想定された機能を円滑に効率よく達成している
- ② ユーザーを含めた最大多数の関係者が満足している
- ③ 構造が簡単で明確に説明できる
- ④ 他のシステムと共存共栄し、必要に応じて結合も可能である
- ⑤ 故障が少なく信頼性が大きい
- ⑥ セキュリティが強固である

- ⑦ 保守が簡単である
- ⑧ 機能や規模の拡張可能性が高い
- ⑨ 構築や運用のコストが低い

主としてモノを要素とするシステムを対象としているが、ヒトを要素とするシステムの卓越性にも通じる項目が多い。

読者の皆様は職場で人間関係に悩むことが多いと思う。集団のリーダーになるとその悩みはさらに深まるはずである。ちなみに「リーダーシップ」は社内研修の最重点テーマのひとつだそうである。もしリーダーシップに自信がなくなった時は、自分の集団がシステムとなっているかどうか、を自問されることをお勧めする。システムの視点から視ることによって何か解決の糸口が見えてくるのではないかと思う。

#### 参考文献

- [1] 木村 「現代システム科学概論」 p.21, 東大出版会 2021

(2022年1月5日原稿受領:SIC ニュースレターVol.4.1に掲載)

## コラム2 「ソサイエティ5.0」と「デジタル社会」

SIC理事・副センター長 木村英紀(東京大学・大阪大学名誉教授)

### 科学技術基本計画

「ソサイエティ5.0」は、2016年に策定された内閣府の「第5期科学技術基本計画」(現在は「科学技術・イノベーション基本計画」、以下「計画」)で日本の未来社会をイメージするコンセプトとして提案されました。「5.0」は「狩猟」「農耕」「工業」「情報」の4つの先立つ社会に続く5番目の未来社会を表現しものです。

SICではこのコンセプトについて詳しく議論したことはありませんが、暗黙のうちにこれを「システム化」の上位の指導理念として受け入れてきました。齊藤裕初代SICセンター長の強調されている「新しい山」も、ソサイエティ5.0を産業界へ写像したものと理解できます。このたびSICでは新しい戦略提言を発信することになりましたが、その提言も最終的には「ソサイエティ5.0」の実現を目指すものとなるはずですが、このコラムでは、ソサイエティ5.0について会員の皆様の理解を深めて頂くことを目指すとともに、関連するひとつの疑問を提示したいと思います。まずソサイエティ5.0が策定された「計画」について少しだけ説明します。

1995年に政府は「科学技術基本法」(現在は「科学技術・イノベーション基本法」)を制定しました。そこで「科学技術立国」が宣言され、科学技術の振興は重要な「国是」の一つとなり、科学技術に関する国の予算は急増しました。基本法に従って内閣府の「科学技術会議」(現在は「総合科学技術イノベーション会議」、以下CSTI)が「科学技術基本計画」を5年に一度策定することになりました。CSTIは総理大臣を議長とする主要閣僚と民間の有識者からなる会議体で、国の科学技術政策の司令塔と位置付けられています。したがって、「計画」は国の最も重要な定期発行の戦略文書の一つといえるでしょう。また、「計画」に沿って各年次の政策実施計画が「科学技術総合戦略」として毎年策定されています。ちなみにSICの現理事の久間和生氏も常勤議員を務めておられました。

筆者が科学技術振興機構(JST)の研究開発戦略センターに在職して科学技術政策の末端にかかわりはじめたころ(2009年)は第3期の末期にあっており、第3期に実施された4分野(ナノテク、環境、IT、バイオ)の重点化の功罪が論じられていました。続く第4期では科学技術の特定分野にこだわるよりも分野を超えた社会課題の解決を重視すべきであるという意見が強まり、「計画」の方向性が科学技術から社会へ大きくシフトしました。この方向は私が担当していた「システム科学」の目標と整合するものであり、大賛成でした。私がJSTを辞任したとき(2015年)は次の年から始まる第5期の「計画」の方向性が議論されていましたが、文科省や内閣府では「超スマート社会」を主軸とすることが固まりかけ根回しも進んでいたようです。「社会」へのベクトルがさらに強まるとともに、私たちがアピールしていたシステムの重要性にもそれなりに理解が広がったと思います。ふたを開けてみると第5期の「計画」では確かに「超ス

「スマート社会」という言葉が随所に使われています。しかしソサイエティ5.0という言葉はほとんど出てきていません。冒頭の「概要」にも現れずようやく10ページ目に超スマート社会の別名としてカッコつきで「ソサイエティ5.0」と書かれているだけです。このような新語を使うことに、慣行順守を旨とするお役人には抵抗があったのでしょうか？

第5期の「計画」ではシステムの重要性が随所で説かれています。一か所引用します。超スマート社会の実現には、様々な「もの」がネットワークを通してつながり、それらが高度にシステム化されるとともに、複数のシステムを連携協調させることが必要である。それにより多種多様なデータを収集・解析し、連携協調したシステム間で横断的に活用できるようになることで、新しい価値やサービスが次々に生まれてくる。(11ページ)

不十分な点もありますが、SICの主張そのものと言ってもよいくらいです。つまり「総論」としてはシステム化の重要性はすでに7年前にある程度理解されていたのです。しかし、「各論」としてそれが社会に行きわたっていないことは明らかで、そのことがSICの存在理由でもあります。「総論」をアピールすることはまだまだ必要ですが、それだけで済む時代ではなくなったことは上の一文からも明らかと思います。

「総論」だけで済まないことは内閣府もわかっていたと見えて、「各論」にあたる具体的なシステムの構築を第4期の最終年度である2015年度の科学技術総合戦略に提案し、5期に引き継いでいます。そのリストを参考までに書いておきます

- ・ エネルギーバリューチェーンの最適化
- ・ 地球環境情報プラットフォームシステム
- ・ 効率的かつ効果的なインフラ維持管理・更新を実現するシステム
- ・ 自然災害に対する強靱な社会を実現するシステム
- ・ 高度道路交通システム
- ・ 新たなものづくりシステム
- ・ 統合型材料開発システム（マテリアルズインテグレーションシステム）
- ・ 地域包括ケアシステムの推進
- ・ おもてなしシステム
- ・ スマート・フードチェーンシステム
- ・ スマート農業生産システム

しかし私たちから見るとこれらも「総論」の域を出ていません。SICの今回の提言ではさらにもう一步踏み込んだ具体的なシステムの構築を提案したいと思っています。

昨年からはまった第6期の「計画」ではソサイエティ5.0は固有名詞から普通名詞に格上げされ、堂々と大手を振って頻繁に使われています。むしろそれ一色と言ってもよいくらいです。「計画」の主な内容である第二章のタイトルは「ソサイエティ5.0の実現に向けたイノベーション政策」となっています。5年間でこの言葉がある程度人口に膾

炙し、内閣府も自信を持ったのでしょうか。あらためてソサイエティ5.0とは何かと問うと、第5期の「計画」では以下のように定義しています。

「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により、経済発展と社会的課題の解決が両立する人間中心の社会」

システムが主役として位置づけられていることにご注目下さい。

## e-ジャパン構想

終わりに疑問を一つ提示しておきます。日本のシステム化を考えていくうえで重要なもうひとつの政策の流れがあります。それは1995年の「科学技術創造立国」宣言に少し遅れて華々しく打ち上げられた「e-ジャパン」構想です。「科学技術基本計画」は内閣府の主管ですがこちらは内閣官房です。総合科学技術・イノベーション会議に対応する組織は「IT戦略本部」ですが、それはデジタル庁の発足に伴って廃止されたので、デジタル庁はこの流れの行き着いた先ともいえるでしょう。

この二つの流れの出自は異なります。前者は科学技術の戦略で産業界や学会を含む一般社会が対象ですが、後者はITに特化し公共が対象です。しかし出発以来30年近くの月日を経て両者の軌道は限りなく近づいたと言ってよいでしょう。どちらも日本の未来社会を指し、ITを基盤技術とする政策展開を展望しています。「e-ジャパン」も公共だけでなくインフラや農業、医療や福祉などを「準公共」として視野に収めていますので、そのスコープは「計画」とほとんど同じになるくらい広がっています。最大の違いは何かと言えば、目標に置いている未来社会を前者は「ソサイエティ5.0」とよび、後者は「デジタル社会」と呼んでいることです。冗談で言っているのではなく本気です。ここ数年で発出されたe-ジャパン関連の戦略文書は山ほどあります。例えば「世界最先端デジタル国家創造宣言」（2020年7月）という威勢の良いタイトルの文書もあります。また関連して制定された法律もいくつかあります。そのかなりの部分を調べてみました。「デジタル社会」はいやというほど連発されていますが、ソサイエティ5.0への言及は見当たりませんでした。一方、第6期基本計画の中ではデジタル庁の発足が簡単に言及されていますが、そこで担うべき業務がソサイエティ5.0の実現のために位置づけられていません。この2つのコンセプトは同じなのでしょうか？それとも違うのでしょうか？違ふとすればどこがどう違うのでしょうか？私には具体的な施策のレベルでみる限り両者に大きな差はないと思えます。もし目標とする未来社会の呼称が統一されれば、両者を一つの文書として統合するか、あるいは両者で分担を調整して互いに引用し合う双頭の文書とすれば、はるかにインパクトのある戦略文書になると思いません。縦割りの霞が関では無理なことでしょうか？

(2022年7月31日原稿受領：SIC ニュースレターVol.4.8に掲載)

### コラム3 A Nation at Risk : 危機に立つ国家

SIC理事・副センター長 木村英紀(東京大学・大阪大学名誉教授)

#### 背景

1970年代末から80年代にかけてアメリカの製造業は国際競争力の低下が著しく、それが重大な政治問題に発展したことはよく知られています。当時技術力でアメリカ市場を席捲したトヨタやソニーの姿は、4半世紀前のスプートニクの再来として恐れられていました[1]。そして1980年代はアメリカの製造業がその再生のためにさまざまな努力を行った時期です。日本の製造業の強さの解明とそれにもとづく日本型生産システムの導入、ITを基盤とした「リエンジニアリング」の推進、オフショアリングの採用、労使問題の解決、そしてプラザ合意を頂点とする外交努力などを通じてこの課題の解決が図られました。その結果、アメリカの産業構造は大きく変化し1990年代のアメリカ製造業の活性化と、長期にわたる好景気がもたらされたことはすでによく知られています。逆に日本はプラザ合意がもたらした円高を契機とした不況に見舞われ、その後長く続く産業の低迷、国際競争力の低下と成長の鈍化に落ち込みました。以来、時に応じてさまざまな努力がなされてきましたが、本格的な回復には至らないままに現在に至っています。アメリカが達成できて日本ができない理由はどこにあるのでしょうか？ 大変切実な問題です。この問題を正面から議論するのは現在SICが作成を目指している「戦略提言」に譲るとして、このコラムではこの問題を考えるうえで示唆に富む当時アメリカで出されたある報告書を紹介したいと思います。そのタイトルは表題の通りです。

この報告書は製造業に直接かかわるものではなく、アメリカにおける主として中等教育の改善の必要性を訴えるものです。作成したのは「教育の卓越性に関する国家委員会」(The National Commission on Excellence of Education, NCEE)です。提出先は教育長官 (Secretary of Education) および国民全体 (the Nation) です。つまり全国民に注意を喚起するものとなっていることがこの報告書の大きな特徴です。NCEEは、大学の学長や教授、有名研究所の所長や州の教育委員長、高校の校長や教師など教育界の雑多な業種から選ばれた18名の民間人から成り、委員長はカリフォルニア大学の副学長であるD. G. Gardner氏です。1981年4月に発足し、1983年8月に報告書を発表しました。この報告書に述べられた当時のアメリカの中等教育の惨状は多くの人々にショックを与えました。このままではアメリカの未来が危ないとの警告は、その内容が豊富な実データに支えられているだけに強い説得力をもち、そのインパクトは全米に広がりました。そこにみなぎる危機感は、不振に喘ぐ製造業の回復に向けた努力を強く下支えしたに違いありません。その前文の一部を以下に引用します。

We report to American people that while we can take justifiable pride in what our schools and colleges have historically accomplished and contributed to the United States and well-being of its people, the educational foundations

of our society are presently being eroded by a rising tide of mediocrity that threatens of our very future as a Nation and people.

この文章の筆者による下線部分、すなわち「高まる凡庸の潮に蝕まれる」との表現は実に的確に当時の状況を言い当てたものです。ちなみに mediocrity の形容詞 mediocre は研究者のコミュニティではよく使われる言葉で、この言葉で研究者や研究論文を形容するとかなり辛辣な評価となります。さて、以下ではこの報告書の概要を見てみましょう。

## 内容

報告書は危機の兆候 (indicators of the Risks) としてすでに知られている13項目を挙げています。そのなかには

次のようなものがあります。

- ・アメリカには日常の読み書きや文章の理解の出来ない「機能的文盲」が2300万人いる。
- ・アメリカ高校生のもっとも標準化されたテストの平均点は26年前より低い。
- ・大学入学統一試験 (SAT) の平均点は1963年から80年まで単調に減少し、その差はたとえば数学では50点ある。
- ・17歳人口の40%は文章にもとづく推論が出来ない。80%は説得力をもつエッセイが書けない。70%は数ステップの数学の問題が解けない。
- ・企業や軍のトップは、新規の採用者に読み書きや基本的な計算の仕方を教えるための補修に多くの経費を投ぜざるを得ないことを嘆いている。

これらの事実は個々の事実としてはすでに当時知られていました。ただこうして事実を13項目並べてみると確かに迫力があります。アメリカが世界のリーダーであると信じていた人々にとっては驚きでもあり、また大いにプライドが傷つけられたでしょう。また科学技術の進歩が加速していることを考えると、このままでは国の将来が危ういとの危機感が生まれたのも理解できます。

報告書はさらに現状の分析を深めていきます。中等教育の現状を「教育内容」、「滞校時間」、「学校の質」、「教員の資格」の四つの側面から問題点を洗い出します。

「教育内容」については、学習レベルがいかに引き下げられてきたかを数値で示しています。特に職業訓練や総合教科、補修教科などの一般的な教科が大幅に増え、その結果普通教科が減らされていることに警鐘を鳴らしています。1962年には前者は全体の12%にすぎなかったのに1979年には42%に膨れ上がったとのことです。その結果、高校の初等代数を修了できた生徒はわずか31%。初等フランス語は13%、初等微積分に至ってはわずか6%しか修了できていません。この状況を報告書は「カフェスタイルの食事」と呼んでいます。つまり、前菜とデザートが主食と取り違えられている、というのです。大変うまい比喻です。

「滞校時間」については、イギリスなどの先進国では年間220日、一日8時間ですが

アメリカではそれらがそれぞれ180日、6時間ですので大きな差があります。

「教師の資格」については、生徒を十分教えられる資格と力量を持った先生で充足している学校は1/3程度ではないかと推定しています。その原因は教師の給与が安すぎる（年収16,000\$程度）にあると指摘しています。

これらはNCEE自身がヒヤリングを含めた調査活動で独自に確認したものです。他にも多くのマイナス事例が挙げられており、読んでいて気が滅入りますので、このくらいにしておきます。興味ある方は直接報告書をおよみください。本文は16ページほどですからそれほどの手間ではありません。ちなみに、NCEEは16カ月の会期期間で、泊まり込みの全体会議を8回、識者のヒヤリング6回、パネル討論会2回、シンポジウムを1回開催しています。

### 報告書のフォロー

この報告書は結論として「何をすべき」という方針を提示しているわけではありません。現状の課題を客観的に提示し、あとは読者の考えに任せるというスタンスです。日本の戦略文書にありがちの主語のない「べき論」を並べることはしていません。KPIのような数値目標は一切出していません。その背景には、アメリカの教育制度は州の独自性が尊重されていることが挙げられます。日本の当時の文部省にあたる教育省（Department of Education）が出来たのはこの報告書の議論が始まるわずか2年前です。にもかかわらずこの報告書はアメリカの社会に大きな影響を与えました。教育現場の衰退はアメリカ人の危機感を揺さぶり、心に響くスローガンとなりました。報告書の冊子は3500万部売れたそうです[3]。アメリカの製造業の危機を訴えた [1]はアメリカ人の心の中で「報告書」と共振したに違いありません。「どの子ども置き去りにしない法（NCLB法）」が制定され、普通科目の強化が叫ばれ、生徒の学習意欲を増し、その能力を評価するために様々の標準テストが作られました。このことの功罪についてはさまざまの議論があるようです[2]。報告書の発表後10年たった1993年には「*A Nation Still at Risk*」と題するフォローアップの報告書がいくつか出されました。1983年の危機的な状態はまだ続いている、との警告です。さらに20年後の2003年にも、また30年後の2013年にも同じタイトルの報告書が出されています。その意味では実に息の長い報告書と言えるでしょう。来年2023年は40周年なので、おそらく同じタイトルの報告書が出るのではないのでしょうか？ これらのフォローアップの内容を筆者は詳しくフォローしていませんが、原報告書の意義については一様に高く評価しています。瞥見したところでは、SATの成績などはそれほど上昇していませんが、移民が激増したという状況変化を踏まえると学力向上は達成されているとの評価が主軸になっているようです。実は日本の教育政策はこの報告書と異なる道を歩み始めました。1984年に設立された「臨時教育審議会（臨教審）」の答申は、少し極端な表現ですが、「報告書」が挙げた危機の兆候をむしろ助長するような改革が求められました。「報告書」が揶揄した「カフェの食事」がむしろ推奨されているのです。日本はその後「ゆとり教育」が標語となり、学力の崩壊が進行しました[3]。

筆者は教育問題には素人ですので、誤った認識いや過剰な単純化があるかも知れませ

んが、アメリカ産業が立ち直りを成し遂げ、一方日本ではそれがまだ果たされていないというギャップの原因はこの辺りにもあるような気がします。関連して私がアメリカで経験したある出来事について記しておきます。1990年代の半ば頃と思いますが、アメリカのある地方都市で私の専門分野の国際会議が行われました。2000人近い研究者が集まる私の分野ではメジャーな会議です。招待講演が行われる直前に、会場の後方に準備された席に若者がぞろぞろと入場し着席したのです。50人くらいはいたと思います。どう見ても研究者とは思えませんでした。全員真剣に聞いておりメモを取る者もいたようです。講演が終わった後、会議の担当者に聞いてみたところ、近所の高校生で学会の見学会に応募した生徒達とのことでした。理系教育向上の一環としてNSF(国家科学基金)が提供した補助金による学力向上プロジェクトに参加した高校の先生が企画したとのことでした。高名な研究者によるレベルの高い1時間の講演をあれだけの数の高校生が静聴したことにアメリカの底力を感じました。

### 「進歩思想」は時代遅れか？

「A Nation at Risk」の背景にあるものは「人類は進歩し続けるし、そうあらねばならない」という進歩思想です。すべての人間は昨日より今日は賢くなっていなければならない、というのは教育の普遍的な理想と思います。能力レベルが退化し文盲が増えることはこの進歩思想が受け入れがたい事です。しかし、このような進歩思想はとうの昔に教育論の表舞台から姿を消しています。特に最近の日本では、「個性の尊重」、「創造性の涵養」が教育の支配的なキーワードとなっています。最近では「学ぶことと教えることは分離してはならない。教師と学生は互に役割を交代していくことが真の学びである」という極端な考えも登場しています。急速に進歩しつつある現代の科学技術によって人類のもつ知の総量はますます増えつつあります。「個性」、「創造性」は勿論大切な要因ですが、それとならんで「日々賢くなる」ことを目指す進歩思想による教育も大切なのではないのでしょうか？

「A Nation at Risk」が30年以上も人々の関心を引き続けているのは、忘れられた進歩思想をあらためて教育の普遍的な理念として思い出させてくれるものだったからではないのでしょうか？ SICが提言を準備するにあたってこの報告書の精神に学びたいと思います。

### 参考文献

- [1] J. A. Young: Global Competition---The New Reality, Results of the President's Commission on Global Competitiveness, 1985.
- [2] 末藤：アメリカにおける学力向上を目指した教育政策の課題、東京未来大学紀要、第5号、41-50, 2012
- [3] 岡部ほか：分数の出来ない大学生—21世紀の日本が危ない、光文社、1999  
(2022年8月23日原稿受領:SIC ニュースレターVol.4.9に掲載)

## V SIC正会員一覧(2022年度)

SCSK株式会社	NTTコミュニケーションズ株式会社
NTTコムウェア株式会社	KDDI株式会社
株式会社NTTドコモ	株式会社クエスト
株式会社構造計画研究所	株式会社JSOL
株式会社テクノバ	株式会社デンソー
株式会社東芝	株式会社ニューチャーネットワークス
株式会社野村総合研究所	株式会社日立国際電気
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
株式会社日立システムズ	株式会社日立物流
株式会社三菱UFJ銀行	株式会社三井住友銀行
損害保険ジャパン株式会社	東京ガス株式会社
トヨタ・リサーチ・インスティテュート	日鉄ソリューションズ株式会社
日本郵船株式会社	ファナック株式会社
富士通株式会社	マツダ株式会社
三菱重工業株式会社	三菱電機株式会社
ICTソリューション本部	
横河電機株式会社	

2022年12月末日現在(五十音順)

### SIC ニュースレター「論説」集(第3巻)(2022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  
2023年1月23日発行 非売品

編集者： SIC実行委員 中野一夫(株式会社構造計画研究所)

事務局： 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-12-7 ストック新宿 B-19号  
URL: <https://sysic.org> E-mail: [office@sysic.org](mailto:office@sysic.org) Tel.Fax: 03-5381-3567

---