

# 三菱電機技報

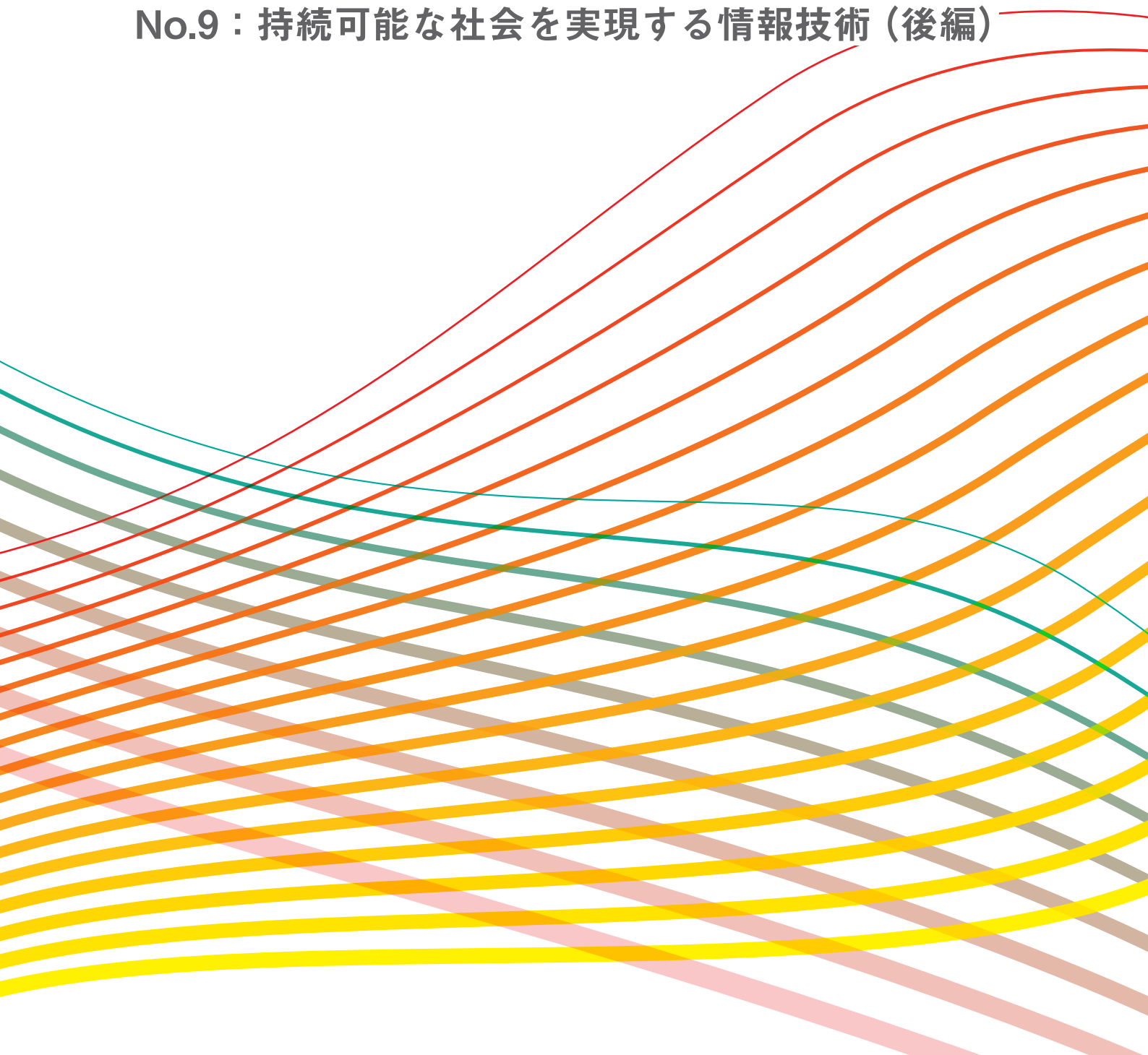
8-9

2022

Vol.96 No.8-9

No.8 : 持続可能な社会を実現する情報技術(前編)

No.9 : 持続可能な社会を実現する情報技術(後編)



---

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネスプラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集では全エリアを支える基盤となる“持続可能な社会を実現する情報技術(前編・後編)”(8・9月号)をご紹介します。

## No.8

特 集	持続可能な社会を実現する情報技術(前編)	Information Technologies for Realizing Sustainable Society
巻 頭 言		
情報処理技術による変革が持続可能な社会を実現する…… 4	Innovation by IT Shall Realize Sustainable Societies	Tetsuo Nakakawaji
中川路哲男		
巻頭論文		
持続可能な社会を実現する情報技術…………… 5	Information Technologies for Realizing Sustainable Society	Akira Ishihara
石原 鑑		
開発からサービスまでのDX …………… 10	Digital Transformation Piercing from Developments to Services	Noriyuki Minegishi
峯岸孝行		
システム設計でのモデルを活用した設計すり合わせ技術 … 14	Model Based Design Adjustment Technique for System Design	Yasuhiro Omori, Masakatsu Toyama, Masazumi Okada
大森康宏・外山正勝・岡田正純		
センサ攻撃耐性評価フレームワーク…………… 18	Evaluation Framework for Sensor Attack Resistance	Koichi Shimizu, Daisuke Suzuki, Ryo Muramatsu, Hisashi Mori
清水孝一・鈴木大輔・村松 竜・毛利寿志		
デジタルツインの鍵になる推定技術…………… 22	Estimation: Key Technology for Digital Twins	Scott A. Bortoff, Christopher R. Laughman
スコット ポートフ・クリストファー ラフマン		
デジタルツインを活用した装置診断技術…………… 26	Digital Twin Approach to Diagnostics in Equipment Maintenance	Yusuke Kaneki, Takashi Kikuzawa, Hitomi Yoshimura, Nobuyuki Miyake, Junji Otani
金木佑介・菊澤隆司・吉村仁美・三宅信之・大谷順司		

## No.9

特 集	持続可能な社会を実現する情報技術(後編)	Information Technologies for Realizing Sustainable Society
統合IoT“ClariSense”設計ガイド…………… 30	Introduction of Internet of Things Suite “ClariSense” Design Guides	Yohei Matsuura
松浦陽平		
ブロックチェーン技術を活用したデータ共有管理技術………… 34	Data Sharing and Management Technology for Multi-Stakeholders based on Block-Chain	Masafumi Yamada, Mitsuhiro Matsumoto, Hiroshi Yokochi, Satoshi Kaede
山田将史・松本光弘・横地 洋・楓 仁志		
システム連携を加速する		
大規模最適化問題の高速求解技術…………… 38	Fast Algorithm for Large-Scale Optimization Problems Accelerating System Collaboration	Hideya Shibata
柴田秀哉		
環境配慮型生産改善フレームワーク…………… 42	Production Improvement Framework for Reducing Environmental Load while Maintaining Productivity	Takaomi Sato, Shuhei Kawaguchi, Kento Kikuchi
佐藤隆臣・川口嵩平・菊地健斗		
省人化・非対面ソリューションを実現する		
多用途移動ロボットシステム…………… 46	Versatile Mobile Robot System Realizing Contactless and Manpower Saving Solutions	Kengo Akaho, Susumu Zeniya, Shunsuke Miyaoka
赤穂賢吾・銭谷 享・宮岡俊輔		
耐量子計算機暗号		
—量子コンピュータによる解読にも耐え得る次世代暗号— … 50	Post-Quantum Cryptography —Next Generation Encryption Technology Resistant to Quantum Computing—	Yutaka Kawai, Ryo Hiromasa, Yusuke Aikawa
川合 豊・廣政 良・相川勇輔		
LSI開発の下流工程での		
性能・回路規模・消費電力改善技術…………… 54	Design Technology for Improving Performance, Circuit Scale, and Power Consumption in the Backend Phase of LSI Development	Susumu Hirano, Yoshihiro Ogawa
平野 進・小川吉大		

# 巻頭言

## 情報処理技術による変革が 持続可能な社会を実現する

Innovation by IT Shall Realize Sustainable Societies

中川路哲男 Tetsuo Nakakawaji

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 理事  
Vice President, The National Agriculture and Food Research Organization (NARO)



近年の情報技術の進展は目覚ましく、我々の社会や生活を大きく変えた。様々な情報がデジタルデータとして蓄積され、インターネットは広く普及し、いつでもどこからでも様々な情報にアクセスすることが可能になった。この流れをもう少しミクロに観察してみると、IT化からDX (Digital Transformation)へと進化しつつあることが分かる。

IT化というのは、今まで暗黙知として埋もれていた情報を形式知としてデジタル情報にして、データベースに格納し、ネットワーク経由で交換することで、システム全体を効率化することである。製造業では、資材の調達や、加工・組立といった生産、そして在庫管理・売上管理などの業務を可視化・効率化でき、安定した品質で安価に大量に製品を生産・出荷・販売することが可能になった。

IT化では、業務は効率化されるが、基本的にその流れは変わらないため、その効果は限定的である。また、大量生産・大量消費を促進するという側面もあった。これに対して、需要の多様化や環境問題を背景に、マスカスタマイゼーションやサブスクリプションという概念が登場した。これを支える情報技術がいわゆるDXである。消費者のニーズ分析やバリューチェーンまで、情報技術をフルに活用することによって、既存の価値観や枠組みを根底から覆すような革新的なイノベーションをもたらすという意味で、Transformation(変革)という用語になっている。

持続可能な社会の実現には、IT化だけでなくDXの領域にまで踏み込んで情報技術を活用することが期待されている。というのも、持続可能な社会を実現することは容易ではなく、改善や節約といった従来の延長レベルでは到達できないからである。あらゆるデータを徹底的に活用して、サイバー空間で最適化を行い、資源の再利用を促して、多様な需要に対応する、これによって初めて持続可能な社会の実現が可能になる。例えば、デジタルツインという技術では、情報をサイバー空間に集約して、物理空間での事象を再現・模擬することによって、物理空間でのシステムを最適に構築・制御することが可能になる。

一例として、農業・食品の分野では、筆者の所属する国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構)で、情報技術をフル活用した“農業・食品分野における Society 5.0”の実現に取り組んでいる。この取り組みは、センサで水量や温度情報を取得して分析し、栽培を最適化するといった単なるIT化にとどまらない。遺伝子やゲノムなどの作物の情報、土壌や気象といった環境情報、病害虫に関する情報などを集約・統合し、AIスパコンを用いて横断的に解析し、サイバー空間で模擬・最適化することによって、気候変動や病気に強い作物のデザインや、健康と美味しさを両立させた食品のデザインといったイノベーションに挑戦している。

このような取り組みを、エネルギー・交通・防災減災・医療・教育・製造といったあらゆる分野で行っていく必要がある。要になるのはビッグデータである。ここで言うビッグには、量という側面と、種類という側面があり、多種多様のデータを大量に集めて、それらを横断的に統合・分析・連携させることによって、イノベーションが生まれる。

持続可能な社会を情報技術によるイノベーションで実現するためには、組織やビジネスそのものを情報技術と融合することも重要である。情報は目に見えないため、コスト意識が働きにくい一面もある。企業や産業界でも、情報の収集・統合・管理・活用に対する組織や収益構造を変革して、経済発展と社会課題解決を両立させる必要がある。ビジネスとして価値を生む構造にしないと、社会以前に企業の取り組み自体が持続できなくなるからである。

情報技術は活用すればするほど価値を生む。ハードウェアとソフトウェアの区別なく情報処理機能を実装し、オープンイノベーションによって多様なプレーヤーと連携し、アジャイルにイノベーションを起こして価値を追求していくことが重要である。セキュリティ、プライバシー、デジタルデバイドといった情報社会が生む負の側面への対応も必要になろう。

# 持続可能な社会を実現する情報技術

Information Technologies for Realizing Sustainable Society

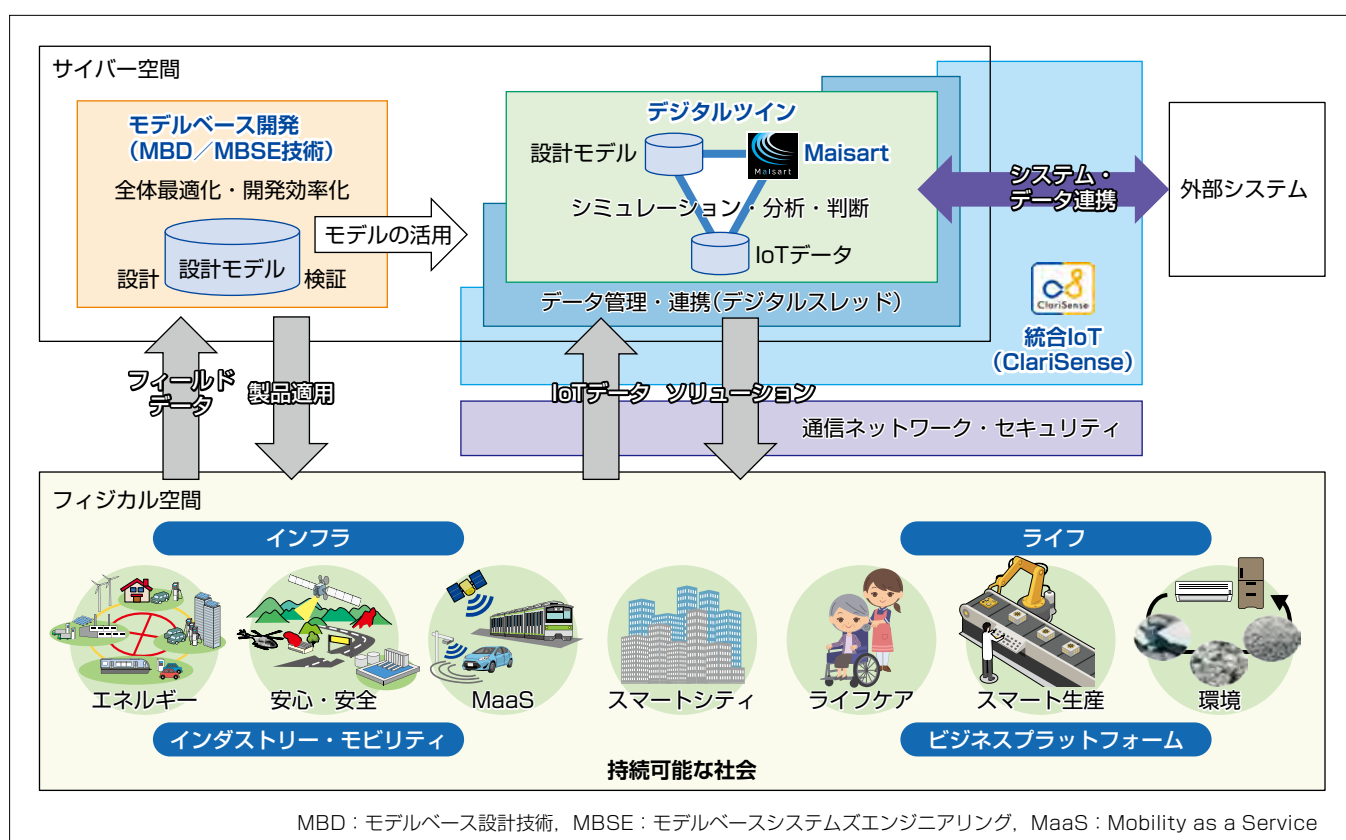


石原 鑑\*  
Akira Ishihara

## 要 旨

三菱電機の事業DX(Digital Transformation)はデジタルの力によって事業モデルを変革し、顧客や社会に最適なソリューションを提供し、持続可能な社会の実現に貢献する。ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの各分野で持続可能な社会を実現するソリューションを提供していく。当社の事業DXを支える情報技術の開発では、三つの先進的デジタル技術である、統合IoT(Internet of Things)“ClariSense(クラリセンス)”, AI技術“Maisart(マイサート)”, 機器・システムの設計・運用をデジタル化する“モデルベース開発・デジタルツイン技術”, これらの開発を事業とのシナジーを意識しながら追求していく。シナジーの結果として、高度なIoTソリューションや、サ

イバーとフィジカルをつなぐサイバーフィジカルシステムを実現する。さらにClariSenseの設計思想に従って、社内外のシステムを連携させ、各システムが自律的に進化するSystem of Systemsを実現することで、顧客の、そして社会の価値を永続的に向上させる。情報技術がもたらす未来は、効率化や利便性向上といったメリットを産業・社会へもたらすことが期待される。一方で、収集される情報範囲の拡大、制御される実世界のモノの範囲の拡大などによって、情報の真正性の確保やサイバー攻撃対策などの新たな課題が発生している。これらの課題解決に資する、基盤技術の開発にも引き続き取り組んでいく。



## 事業DXを実現する当社の先進的デジタル技術

統合IoT“ClariSense”でIoTデータを収集し、モデルベース開発技術によって作成した設計モデル、機器やシステムのシミュレータを組み合わせ、デジタルツインを構成する。AI技術“Maisart”がシミュレーション結果に基づいて分析、判断し、機器の最適制御や故障予兆検知などの顧客価値を創出する。ClariSenseのデータ連携技術によって企業の枠を越えてシステム連携し、持続可能な社会の実現に向けたシステムを実現する。



## 1. ま え が き

2004年にエリック・ストルターマン教授によって提唱されたDXは、“デジタル技術によって現実社会の対象物がシステムやネットワークに部品として組み込まれて相互作用を引き起こし、人々の生活があらゆる面でより良い方向に変化する審美的体験”という概念である<sup>(1)</sup>。従来の“デジタル化”が、ものづくりや業務のプロセスの電子化/IT化を通じて効率化を目指すものとすれば、DXは企業の枠組みを越えてビジネスに関わる全ての事象に変革をもたらし、社会全体を最適化していくものである。SDGs(Sustainable Development Goals)など持続可能な社会を実現するためにDXは大きな要因であり、DXの推進に情報技術は不可欠である。

本稿では、DXを支える情報技術に対する当社の取組みを俯瞰(ふかん)する。DXがもたらす持続可能な社会としてライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの当社の取組み事例を示す。各事例は、当社が全社的視点・中長期的視点での事業戦略を構築・推進するために配置しているビジネスエリアの考え方に従って、インフラ、インダストリー・モビリティ、ライフの順に述べる。次に当社でのDXを支える情報技術に対する取組みを述べる。

## 2. 事業DXがもたらす持続可能な社会

### 2.1 インフラ

当社では、社会・電力インフラ設備の運用・保全業務の効率向上に貢献するIoTプラットフォーム“INFOPRISM”を用いて、様々な社会インフラ事業のニーズに応じたソリューションを提供している。電力インフラ向けには、INFOPRISMによる運用・保全業務に加えて、世界的な電力事業の進展と変動に対応するため“電力取引”と“電力制御”を総合的に扱う電力市場向けパッケージ型ソフトウェア製品“BLEnDer”シリーズを2003年から販売し、いち早く電力事業でのDXに取り組んでいる。最近では、脱炭素・カーボンニュートラル社会の実現に向けて、再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)や蓄電池のシステム監視制御・需給調整の開発を行っている。“BLEnDer DEP(Digital Energy Platform)”パッケージでは、小規模であるが無数に導入される多種多様な分散電源の有効活用を実現するため分散電源の統合監視・制御を行う<sup>(2)</sup>。また、現在開発を進める“マルチリージョンEMS(Energy Management System)”では、地域、天候、時間帯によって発電量が大きく変わる再エネを持続的かつ安定的に供給するために、

企業の各拠点の再エネを含む分散型電源・蓄電池・需要家機器を制御し、再エネ電力を複数の拠点間で融通し合うことで脱炭素目標の達成と経済的な需給運用の実現を両立することを目指している。今後、来る脱炭素・カーボンニュートラル時代に向けて、“INFOPRISM”“BLEnDer”を始めとして、他事業分野のIoTシステムを連携させてDXを加速していく。

### 2.2 インダストリー・モビリティ

インダストリーについて、当社では2003年から生産現場向けに、現場起点でデジタル技術を活用するFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を提供している。e-F@ctoryによって生産現場のデジタル化をいち早く実現しており、近年ではDX実現に向けた研究開発を進めている。一例として、切削加工、レーザ加工、放電加工などの様々な工作機械に搭載されている当社の数値制御装置(CNC)向けに開発を進めている工作機械デジタルツインがある<sup>(3)</sup>。工作機械デジタルツインは、現実の工作機械から収集したデータを用いてシミュレーションモデルを更新する仕組みと、加工シミュレーションの結果を現実の生産に反映する仕組みとを持つ。工作機械デジタルツインを活用することで、設備設計から加工、保守など、エンジニアリングチェーン上の様々なフェーズで、複数の企業が連携して最適な生産活動を実現できる。最適な加工による加工時の使用電力量・廃棄物量の削減や、リモート保守によるダウンタイム削減やメンテナンス担当者出張回数抑制などを通して、持続可能な社会の実現に貢献する。また、環境負荷低減に向けて、再エネ活用や製品ライフサイクル視点での取組みなどが注目されている。当社の、生産性と環境負荷を等価に扱い最適化する生産管理構想“Environment and Energy Just In Time”に基づく生産・設備オペレーションの最適化は、現場知見と情報技術の活用によって日々のオペレーションを最適化し、生産性を落とさずに環境負荷を低減する取組みである。この取組みを工場単位の最適化から工場群管理の視点での最適化に発展させることで、持続可能な社会の実現につなげる。

モビリティについては、センサの高性能化や通信インフラの整備によって自動車の自動運転制御や鉄道のATO(Automatic Train Operation)による自動走行など、その高度化が進んでいる。この節では当社の取組みの中から鉄道事業を中心に述べる。当社では鉄道車載機器から地上設備まで鉄道システム全般に幅広く製品やシステムを提供し、鉄道の安全・安定輸送に貢献してきた。これまで培った技術を基に次世代鉄道輸送システムの実現に向けた統合ソリューションに取り組んでいる。その中で、持続可能な安定輸送を支える車両メンテナンスのDXの取組みとして、“鉄道LMS

(Lifecycle Management Solution) on INFOPRISM”を提供している<sup>(4)</sup>。そこでは、鉄道車両に搭載された様々な機器の稼働データがTCMS(Train Control and Management System)によって列車上で集積され、地上と列車間の無線を通じてリアルタイムにクラウド上に送信・蓄積される。こうして収集された稼働データや列車や機器の保守データなどを基に最新のAI技術などを駆使した故障の予兆検出や検査の省力化に資する技術の向上に努めている。

## 2.3 ライフ

当社は、IoT家電とそのデータを活用することで、最適環境IEQ(Indoor Environmental Quality)、安心・見守り、生活支援といった領域で、快適で豊かな暮らしを支えるライフソリューションの実現を目指している。2019年に、グローバルIoT共通プラットフォーム“Linova”を稼働させ、インターネットを介して当社IoT家電のデータを収集・管理する基盤を構築した。2020年に、家電統合アプリケーション“MyMU”をリリースし、Linovaが管理する家電を横断的に制御する仕組みを顧客に提供した。ライフソリューションとして、例えば“あったかリンク”では、給湯器と浴室暖房機を連動して制御できる。給湯器の湯はりに合わせて脱衣室や浴室の暖房を開始することで、居室との寒暖差を小さくし、ヒートショックによる身体負担を軽減するなど、安心して快適な温度環境を提供する。そのほか、冷蔵庫の扉の開閉回数から、離れて暮らす家族の生活状況を確認する、炊飯器の炊飯履歴から、米の消費傾向を分析して残量不足を予測し自動発注するといった例がある<sup>(5)</sup>。このように、IoT機器の状態や操作の履歴などのデータを個人が特定できないような形で分析し活用することで、顧客のライフスタイルに応じた価値を提供する。また、顧客の利用だけでなく、製品の企画、製造、運用、廃棄、再利用までの製品ライフサイクル全体を通してデータを活用していくことで、適時適切な保守や、買い替えタイミングでのリプレースの提案といった新たな価値の創出も可能になる。

## 3. 事業DXを支える情報技術の取組み

当社は、統合IoT“ClariSense”、AI技術“Maisart”<sup>(6)</sup>、“モデルベース開発・デジタルツイン技術”、これら三つの先進的デジタル技術とそれらを支えるセキュリティ、ネットワーク制御等の基盤技術の開発を両面で推進している。ClariSenseで機器からデータを“賢く”収集・蓄積する。現場から収集したデータ、モデルベース開発技術によって製品設計時に作成した設計モデル、機器やシステムのシミュレータを組み合わせでデジタルツインを構成する。Maisartが現場から収集したデータやシ

ミュレーション結果に基づいて、分析、判断し、機器の最適制御や故障予兆検知などの顧客価値を創出する。こうして実現されたデジタルツインシステムは、ClariSenseのシステム・データ連携技術によって、企業の枠を越えて垂直・水平に連携し、System of Systemsを形成し、個々のシステムが自律的に進化を続けることで、持続可能な社会の実現に向けた終わらないシステム進化のものがたり(ナラティブ)を形成していく。

この章では、統合IoT“ClariSense”“モデルベース開発・デジタルツイン技術”、データ管理・連携(流通)技術、セキュリティ技術、通信ネットワーク技術について述べる。

### 3.1 統合IoT“ClariSense”

統合IoT“ClariSense”は、当社が強みとする機器に対する知見やセキュリティ、ネットワーク設計などの技術資産を、IoTシステム構築の手助けになる設計ガイドやツールなどに統合・共有することで、IoTシステムの開発効率化を目指す取組みである。ClariSense設計ガイドは、IoTシステム設計ガイド、マイクロサービス設計ガイド、DevOps<sup>(注1)</sup>構築ガイド、API(Application Programming Interface)設計ガイド、ネットワーク設計ガイドなどから成り、各事業での活用が進んでいる。これら設計ガイドによって、当社IoTシステムのアーキテクチャをそろえて、各事業に最適なIoTシステムを創出している(図1)。

IoTシステムの設計では、マイクロサービス導入がポイントになる。システム利用者からはビジネス変化への追従要求、開発者からはシステムを構成するサービスの再利用性要求がある中、マイクロサービスの導入は有効な解決策の一つである。一方、マイクロサービスを適切に導入するには、設計上の留意点を正しく理解する必要がある。

当社では、新規システム開発と、モノリシックなシステムからの移行開発の二つの開発パターンに対して、ビジネスケーパビリティに基づいたマイクロサービスへの分割の粒度の考え方や、ISO/IEC(International Electrotechnical Commission) 9126の品質特性に基づいた親和性の考え方

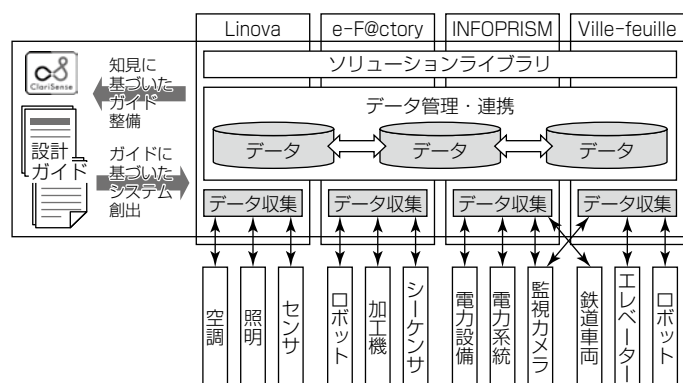


図1. IoTシステムとClariSense設計ガイド

をまとめた設計ガイドラインを整備している。例えば、品質特性のうち性能効率性では、マイクロサービスを独立したコンテナとしてそれぞれの実行環境上で動作させることが可能になるため、マイクロサービスと親和性が高いと言える。

現在、設計ガイドラインを活用しつつ、インフラ、インダストリー・モビリティ、ライフ、ビジネスプラットフォームの各ビジネスエリアで、マイクロサービスへの移行に取り組んでいる。また、コンテナ化を進めることによって、クラウドやエッジといった実行環境への依存性を排除した基盤整備にも取り組んでいる。

(注1) 開発担当者と運用担当者が連携して協力する開発手法を指す造語。

### 3.2 モデルベース開発・デジタルツイン技術

MBD(Model Based Development)は設計効率化が目的とされている。MBDの代表例として挙げられている自動車事業では設計期間が1/3になったとされており、欧州メーカーが匠(たくみ)の技を持った日本のメーカーレベルの車体を短期間で実現している<sup>(7)</sup>。また、ミッションクリティカルな航空宇宙分野では、要求・要件、機能を漏れなく洗い出し、要求・機能モデルを複数のエンジニアが共有し、全体最適を実現するMBSEが発展している。

当社は、モデルベース設計(いわゆるMBD)と、システムズエンジニアリングを加速するMBSEを包含する広い範囲を“モデルベース開発”と定義している。製品のライフサイクルを鑑みて、製品構想からの設計／開発過程をロジカルに形式知化することでシステム全体最適化と開発効率化を実現し、製品のライフサイクルを通じて顧客に継続的な価値向上を提供する。

さらに、製品開発時に作成したモデルを活用し、社会課題を解決するソリューションを実現するデジタルツインを構築する。製品モデルに加えて、当社の持つドメイン、機器、物理の知見を豊富に盛り込んだモデルに基づくシミュレーションに、IoTデータを入力することで精度の高い現場環境を再現する。現場環境をモデルで再現させるには、製品モデルと市場に出荷された現物とを、ライフサイクル全般にわたって結び付けて、IoTデータと関連付けて管理する必要がある。これを可能にするのが3.3節で述べるデータ管理・連携(流通)技術であり、ClariSenseのガイドに従ったIoTシステムによって“賢く”データ収集するとともに現物とデータを結び付けて、サイバーフィジカルシステムを実現するキー技術になっている。

### 3.3 データ管理・連携(流通)技術

System of Systemsでは、他者と新しい価値を

共創することが重要である。DXによる新たな価値創出の一つの鍵はデータであり、様々な場所で生み出されるデータの管理と活用の技術が重要な要素になる。2.2節で述べた当社事例“鉄道LMS on INFOPRISM”を支えるデータ管理・連携技術の開発事例を述べる。データ管理技術の取組みである“デジタルスレッド技術”は、機器の誕生から運用、廃棄までに生まれる情報(設計、製造、運用来歴、稼働データ等)を結び付けて管理・活用する技術である(図2)。この技術は、機器来歴の各種データの真実性保持と同時に、各データを組み合わせた活用を可能にし、アセット管理の高度化に寄与する。

製造業では、サプライチェーンでの品質向上やカーボンニュートラルへの取組みとしてデータトレーサビリティのニーズが高まっている。これら取組みは、サプライチェーン上の複数ステークホルダーの協調によって実現される。当社では、複数ステークホルダー間での信頼の置ける情報共有基盤の技術開発を行っている。この情報共有基盤は、複数ステークホルダー間で、製品流通情報と製品関連情報(炭素排出量など)を、その正当性を担保しながら共有管理し、ステークホルダーのアクセスレベルに応じたデータアクセス制御が可能である。現在、異業種間データ共有やデータ流通の観点でのルールや仕組み作りが国内外で進んでいる。当社でも、MaaSなど複数の移動事業者でのデータ相互利用や業種間データ共有促進に向けたデータ流通管理技術の開発を進めていく。

### 3.4 セキュリティ技術

機器がインターネットとつながることで、サイバー攻撃を受けるリスクが格段に高まる。設計から運用まで全体俯瞰的なセキュリティ対策が必要になる。当社では、設計・実装・試験の各フェーズで実施すべきセキュリティ対策の取組みをClariSense設計ガイドとしてまとめて、指針を示しつつ、各フェーズで必要な要素技術を開発している。

設計に向けては、セキュリティ脅威を網羅的に洗い出す

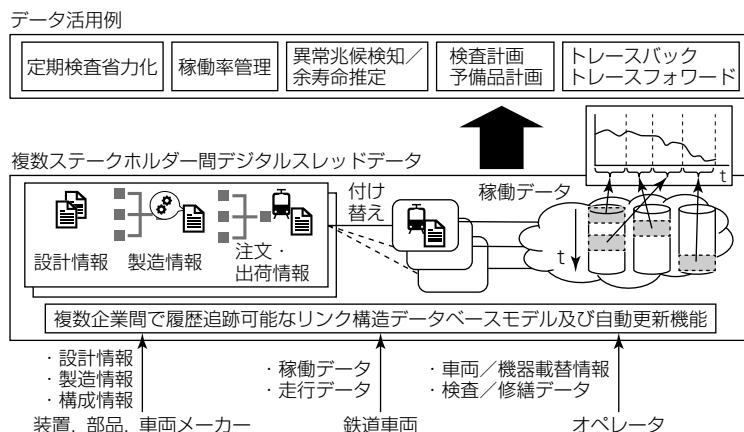


図2. デジタルスレッド技術の概要



ことで、必要なセキュリティ要件を漏れなく抽出できるセキュリティ分析技術を開発している。実装・試験に向けては、量子コンピュータでも解けない暗号アルゴリズム、安全な鍵管理やデータ保護を実現する耐タンパ技術、センサの誤動作を誘発する攻撃に対するセンサ攻撃対策技術などを開発している。また、クラウドサービス活用時のセキュリティ実装ガイドの作成、コード静的解析・脆弱(ぜいじゃく)性診断・ファジングなどによる出荷前での脆弱性検出のための技術も開発している。

また運用時に必要なサイバー攻撃監視として、システムログから攻撃を検出するログ監視技術を開発している。既知の攻撃についてはパターンマッチングで精度高く攻撃を検出し、未知の攻撃については正常時と異なる振る舞いからAIを活用して検出する。制御システム向けには、通信パターンから攻撃を検知する許可リスト型ネットワーク監視技術も開発している。さらに、攻撃の疑いが発見されたときに、AIを活用して人による解析作業を省力化する技術も開発している。最近では、当社機器が接続された模擬システム(ハニーポット)を公開し、攻撃者にアタックさせることで攻撃トレンドを把握する取組みも行っている。これらの活動によって、サイバー攻撃への対処能力の向上や、セキュリティ設計の品質向上も図ろうとしている。セキュリティに関する取組みの全体像を図3に示す。

### 3.5 通信ネットワーク技術

鉄道、自動車、工場等では、多くの機器同士が連携するため、ネットワークのリアルタイム性、高信頼性、最適化が必要である。当社は、これまでTSN(Time Sensitive Networking)技術を活用し、制御・情報通信の混在下で、リアルタイム性を担保するCC-Link IE TSN、ネットワーク障害の高速検知・経路切替え・障害迂回(うかい)を実現するEthernet<sup>(注2)</sup>スイッチ技術、最適なパラメータを機器仕様やネットワーク構成に基づいて自動算出するネットワーク設定最適化技術等を開発し、様々な産業分野へ適用してきた。

今後、産業用IoTプラットフォームのネットワークレイ

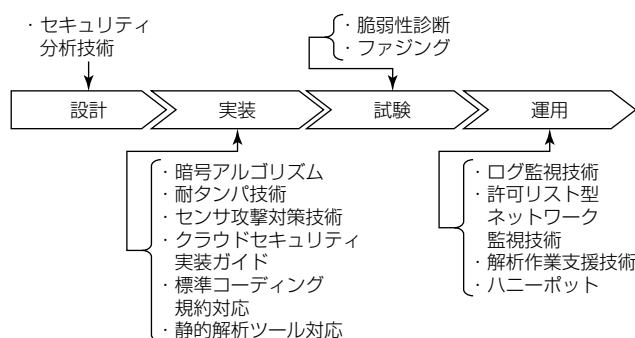


図3. セキュリティに関する取組みの全体像

ヤでは、クラウド技術、仮想化技術、ネットワーク・スライシング技術等によって、ネットワークの迅速・柔軟な拡張、リソースの共有、最適化等が期待される。当社も、物理ネットワークを性能要件の異なる論理ネットワーク(スライス)に分割/統合し、多様なアプリケーションを効率的に収容するネットワーク仮想化技術、伝送遅延時間の要求に応じて、ネットワーク構築時に最適な通信リソースを迅速に割り当てるSDN(Software Defined Network)コントローラ技術等を開発してきた。これらの仮想化技術は、汎用物理サーバで実現されていたVNF(Virtual Network Function)から、安価な導入コスト、迅速なネットワーク機能変更、運用管理の自動化等を実現するために、マイクロサービスなどCNF(Cloud Native Function)の活用に進展する。これによって、ネットワークの設備と機能が分離され、柔軟なサービスの設計、ネットワークを基盤としたビジネス、新サービス等の価値創造に期待が高まる。

(注2) Ethernetは、富士フイルムビジネスイノベーション(株)の登録商標である。

## 4. む す び

事業DXで実現する持続可能な社会の例と、それを支える情報技術に対する当社の取組みを述べた。技術の社会実装を支える標準化に向けて、ISO/IEC、IIC(Industrial Internet Consortium)、DTC(Digital Twin Consortium)、DSA(Data Society Alliance)、GAIA-X(欧州統合データ基盤プロジェクト)等複数団体が活動しており、標準化の取組みも進めていく。DXの概念を示したエリック・ストルターマン教授は、DX推進に当たって、DXがもたらす社会が真の意味でのGood lifeをもたらすよう、情報技術の研究者は審美的な観点を意識しながら、技術開発に取り組まなければならないとした。我々の技術開発も、常にそれが人々の日々の生活に与える影響を意識しながら推進していく。

## 参 考 文 献

- (1) Stolterman, E., et al.: Information Technology and the Good Life, Information Systems Research, 687~692, Kluwer Academic Publishers (2004)
- (2) 石崎 啓, ほか: 脱炭素社会の実現を支える分散電源向けIoTプラットフォーム“BLEnDer DEP”, 三菱電機技報, **95**, No.11, 669~672 (2021)
- (3) 藤田智哉, ほか: FA-IT統合ソリューションによる工作機械デジタルツインの実現, 日本機械学会誌, Vol.124, 22~25 (2021)
- (4) 吉本剛生, ほか: 車両メンテナンスの効率化と安定運行に貢献する“鉄道LMS on INFOPRISM”, 三菱電機技報, **94**, No.12, 669~673 (2020)
- (5) 平國 悟, ほか: 快適で豊かな暮らしを支えるライフソリューションの最新技術, 三菱電機技報, **95**, No.9, 552~555 (2021)
- (6) 三嶋英俊: 三菱電機でのAI技術の現状と今後の展望, 三菱電機技報, **94**, No.6, 318~323 (2020)
- (7) モデルベース開発の日本普及課題, (株)フォーイン (2020)

# 開発からサービスまでのDX

Digital Transformation Piercing from Developments to Services

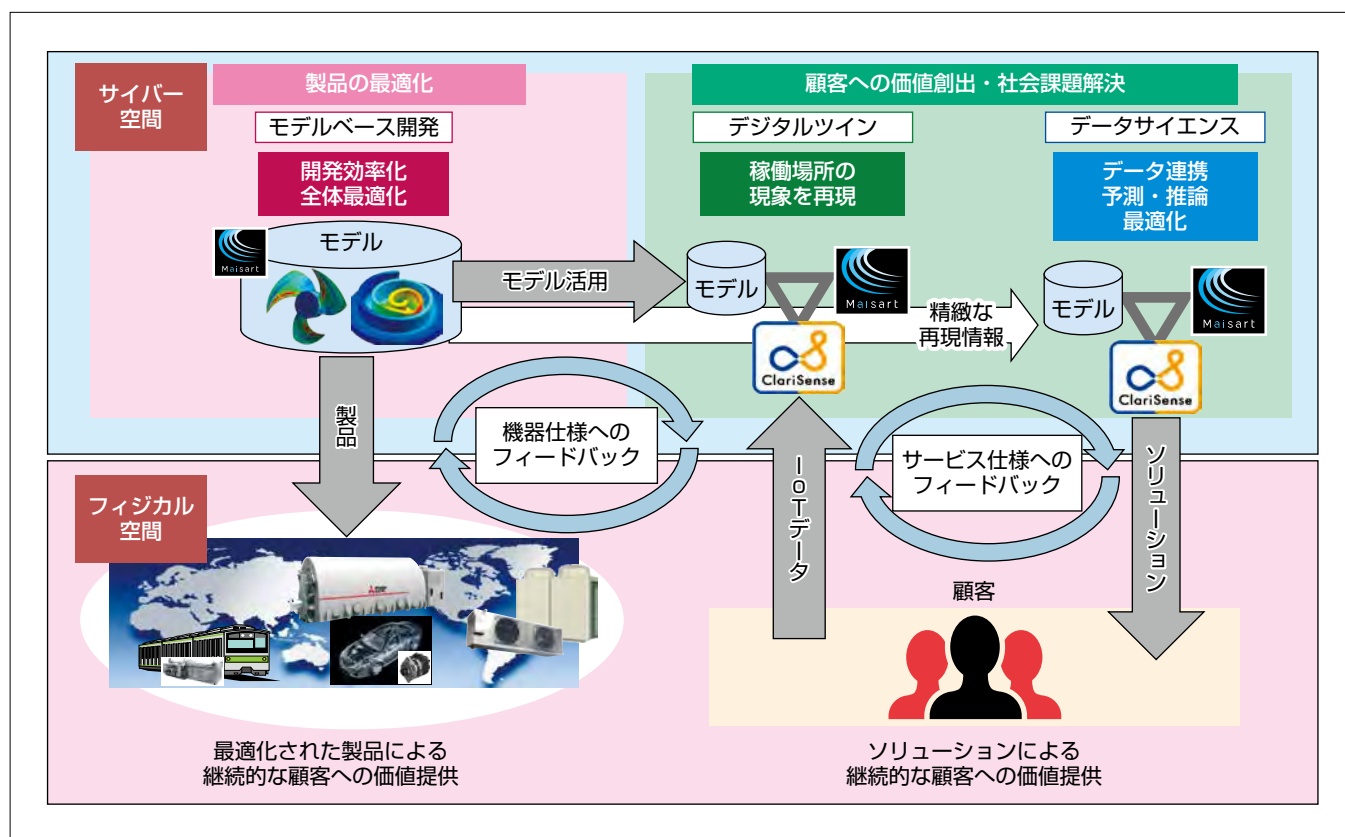
## 要 旨

DX(Digital Transformation)は“デジタル技術で人々の生活をあらゆる面でより良い方向に変化させる”ことであり、三菱電機のDXは持続可能な社会を実現するものである。近年DXが脚光を浴びるとともにモデルベース開発やデジタルツインというキーワードを目にする。当社のモデルベース開発は、モデルベース設計(MBD: Model Based Design)とMBSE(Model Based Systems Engineering)を包含したものである。また、当社製品の開発過程で作成されたモデルを活用し、IoT(Internet of Things)データと連携することで、当社の知見をもって稼働状況を精緻に再現するのが当社のデジタルツインである。

MBSEによる要求・機能分析、モデルベース設計による論理設計と詳細設計、抽象度の高いモデルから詳細に至

るまで一貫したモデルベース開発によって、全体最適化された機器やシステムといった製品群で顧客に価値を提供する。

デジタルツインでは、モデルベース開発のモデル活用、統合IoT“ClariSense(クラリセンス)”による現象再現に必要なIoTデータの加工と供給、当社の最新AI技術“Maisart(マイサート)”<sup>(1)</sup>による直接センシングできない現象の推定によって、当社の知見による精緻な稼働場所の現象を再現する。さらに、データ連携、予測・推論、最適化を実現し、ソリューションとして顧客に価値を届ける。デジタルツインで得た気づきをサービスと製品の両方にフィードバックし、顧客への継続的な価値提供と社会課題の解決を実現する。



## 開発からサービスまでのDX

モデルベース開発で開発効率化を実現するとともに全体最適化された製品を顧客に“価値”として使用してもらう。作成されたモデルはIoTデータと連携し、ClariSenseのデータ連携、Maisartの予測・推論で精緻な稼働環境を再現する。デジタルツインで得た気づきをサービスと製品の両方にフィードバックし、顧客への継続的な価値提供と社会課題の解決を実現する。

## 1. ま え が き

DXは“デジタル技術によって人々の生活をあらゆる面でより良い方向に変化させる”と2004年にエリック・ストルターマン教授によって提唱された。当社のDXは、顧客や社会に最適なソリューションを提供し、持続可能な社会の実現に貢献するものである。近年DXが脚光を浴びて、その議論が進むとともに、“モデルベース開発”“デジタルツイン”といったキーワードを目にするようになった。どちらもDXの手段として、時には“開発のDXはモデルベース開発”のようにDXそのものとして紹介されている。しかし“モデルベース開発”も“デジタルツイン”も概念であり、様々な解釈がある。

当社では、事業DX実現にモデルベース開発とデジタルツインは深く関わると考えて、各々を当社なりに定義し、連携させることで開発からサービスまでのDXを実現する技術コンセプトを明確にした。

本稿では、当社のモデルベース開発とデジタルツインの定義、双方が連携してDXを実現することについて述べる。

## 2. モデルベース開発

設計をサイバー上で行うモデルベース開発の効果として開発工数の削減がよく知られている<sup>(2)</sup>。従来、経験と試作・評価に基づいて製品(主に機器)開発していたものを、モデルを活用してデジタル的にすり合わせる開発にすることで手戻りを削減するものである。その多くは3Dモデルによるもの、又は一つの物理現象を論理モデル(1Dモデル)で解析するものである。

しかし当社では、要求・機能分析から詳細設計に至るまでをモデルベース開発と位置付けて、機器だけでなくシステムも包含した全体最適化を実現することをモデルベース開発と定義している。

### 2.1 モデルベース開発のスコープ

当社は、要求・機能分析と機能設計とを行うMBSEと論理設計、詳細設計を行うMBD全体をモデルベース開発のスコープとした(図1)。

製品開発の原点は製品に求められるもの(要求)である。開発対象になる製品のライフサイクルとステークホルダーを想定して要求を分析する。要求は、製品の動作や性能などに関わるものだけでなく、コスト、品質といったものも定義する。

続いて、要求を実現する機能を漏れなく抽出し、機能を実現する構成要素を割り当てる。機能と構成要素をツリー

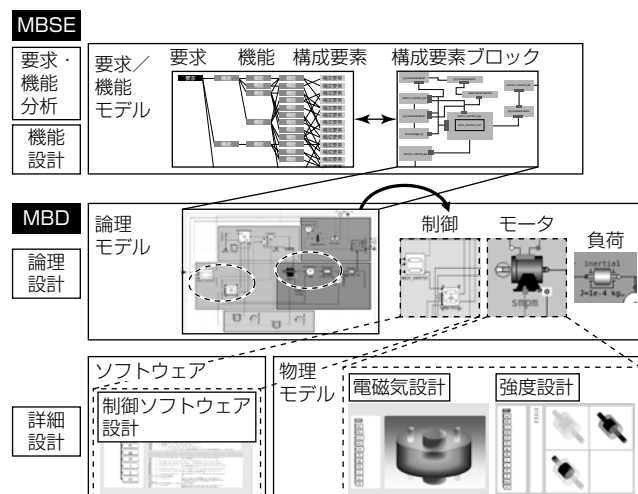


図1. 当社のモデルベース開発スコープ

図、ブロック図、直交表など幾つかの手段によって表現して抜け漏れを防止する。

これらが要求・機能分析と機能設計プロセスであり、MBSEの手法を用いて実施する。このプロセスで作成された“要求/機能モデル”は、後の論理設計以降で個別要素設計エンジニアたちと、個別要素を組み合わせたシステムの設計を行うエンジニアの間で共有され、個別要素設計での課題が発生したときの解決に活用する。

構成要素が決まると論理設計に進む。論理設計では物理現象などを抽象化した1Dモデルを始めとする“論理モデル”を用いて設計を行う。1Dモデルとは関係する物理現象を数式などで表したものを指す。詳細設計では、数式などで表現した論理モデルを形あるものに具現化し、物理的な要求を満足させる。論理設計と詳細設計をMBDと定義する。

要求・機能分析と機能設計、論理設計、詳細設計、各々のプロセスで設計結果の検証作業を行うこと、また、プロセスの中で異なる機能や異なる物理要素にまたがる整合性の検証を行うことで、試作後の試験結果から要求や機能を考え直すという大きな手戻りをなくす。製品のライフサイクルを踏まえた要求から、段階的に抽象度を落としながら検証し、下流工程での課題解決も影響範囲を俯瞰(ふかん)して行うことで、試作前のモデルによるすり合わせの範囲を超えた開発効率化を実現する。MBSEとモデルベース設計を合わせた範囲が当社の“モデルベース開発”のスコープである。

### 2.2 モデルベース開発による全体最適化

MBSEとMBDを含めた当社のモデルベース開発では、開発効率化だけでなく全体最適化も実現する(図2)。

従来のMBDでは、個別要素設計エンジニアは自身の担当部分の要求仕様を上位の仕様書から読み解いて定義し、自身の担当分野の要求だけ満足するよう設計を進める。こ





図2. モデルベース開発による全体最適化

のため、自分の担当業務に閉じこもってしまい周りが見えなくなる。結果、複数の要素設計を組み合わせた試験・評価で対象製品の要求が達成されなかったり、他の要素との整合が取れていなかったりという事態が発生する可能性がある。

一方、当社のモデルベース開発では、まずMBSEで作成したモデルで担当の個別要素設計と他の要素との関係を俯瞰的に理解する。その後1Dモデルによって論理設計し、他の要素と組み合わせた上位階層で検証を行うことで、自分の担当分だけでない上位階層の要求が満たされるかを確認できる。さらには、論理設計や詳細設計で自身の担当分の要求達成が困難であった場合、要求／機能モデルに立ち返って、上位階層の担当者、他の要素設計担当者と議論・調整することで対象物の要求を最適解で実現する。要素設計者が常に全体を俯瞰して見られることで全体最適化が実現できる。

### 2.3 システムから要素技術までのモデルベース開発

これまで述べた、要求・機能分析から詳細設計に至るまでのプロセスは、機器だけを対象にしたものではない。システム(より上位ではSoS(System of Systems))から部品・ソフトウェアなどの要素技術に至るまで、段階を経て実施する(図3)。

図1、図2では対象を機器として述べた。しかし、顧客

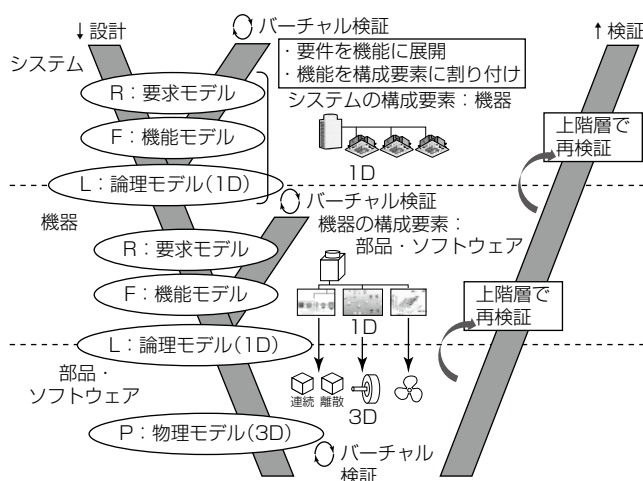


図3. システムから部品・ソフトウェアまでのモデルベース開発

に届ける価値は機器と機器が連携した“システム”，又はシステムとシステムが連携したSoSが源泉になる。図3ではシステムから部品・ソフトウェアに至るまでモデルベース開発を適用する様子を示している。まずシステムで要求・機能分析から論理設計までを行い、システムを構成する機器を定義する。次に機器の要求・機能分析から論理設計までを行い、部品・ソフトウェアの詳細設計に至る。部品・ソフトウェアの設計結果は機器で、機器の設計結果はシステムで検証する。このように、顧客の要求を起点に、システム、機器、そして最終的に要素である部品・ソフトウェアを考えて、顧客の環境を想定して検証することで、継続した価値を確実に提供できる。

## 3. デジタルツイン

デジタルツインは、機器やシステムをデジタル的に表現したものと定義されており、デジタルツインそのものだけでは価値を生み出さない。

当社はデジタルツインを“稼働場所の現象の見えない状況を、離れた場所で再現する手段”と定義する。手段であるので、目的、すなわち“価値”の明確化が必要であり、価値を実現するデジタルツインを構築する。価値には次のようなものが考えられる。

- (1) 運用・保守最適化などサービスの実現
- (2) 計画どおりのものづくり・施工の実現
- (3) 開発段階の試験で発生している現象の確認

また、稼働場所の見えない現象を精緻に再現するため、2章で述べたモデルベース開発で得られた当社製品のモデルを活用し、さらに当社製品以外に必要なモデルも当社の豊富なドメイン知識を活用し、デジタルツインを構成する。

保守最適化はデジタルツインの代表例としてよく知られている<sup>(3)</sup>。また製造業<sup>(4)</sup>、建築業<sup>(5)</sup>で計画どおりにものづくり・施工を実現させ、さらには試作品を試験で確認する<sup>(6)</sup>手段としてのデジタルツインがある。

この章ではユースケースとして定温倉庫の業務最適化を目的としたデジタルツインについて述べる。

### 3.1 定温倉庫の業務最適化

定温倉庫の業務最適化向けデジタルツインを構築するに当たって、価値、手段、提供するサービスを考える(図4)。

- (1) 顧客の価値(目的)

想定する顧客は、定温倉庫のオーナーである。オーナーが利益を得るには、①倉庫空間を最大限に利用すること、②商品品質を確保すること(商品に適した温度管理ができること)、③運用エネルギーコストを削減することが必要であると想定した。



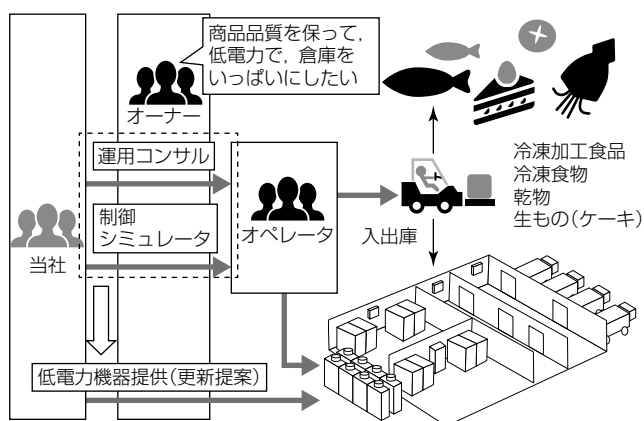


図4. 定温倉庫の業務最適化

## (2) 顧客の価値を達成する手段

(1)の価値(目的)を達成するには、①商品配置の最適化(温度調節効率が良く、かつ空間を最大利用できる配置)、②冷凍機の最適制御(商品の品質を落とさず、かつ冷やしすぎない制御)、③低消費電力の冷凍機の提供が手段として考えられる。

## (3) 機器以外に提供が必要なサービス

顧客に価値を届けるには、機器以外に、業務最適化のコンサルタントサービス、又は業務最適化のためのプログラム(制御シミュレータ)を提供する必要がある。

## 3.2 定温倉庫の業務最適化を実現するデジタルツイン

3.1節で述べた定温倉庫の業務最適化を実現するため、デジタルツインを構築した(図5)。

モデルベース開発で作成されたモデルとIoTデータを連携させることで、価値の手段であるデジタルツインを実現している。

顧客の価値の中心である倉庫のモデルは、壁モデル、気流モデル、商品モデルから構成した。価値を考えると、倉庫内の商品の温度が関心事である。この商品の温度が“稼働場所の現象の見えない状況”であり、再現するために必要な構成要素として、モデルベース開発のプロセスを経て

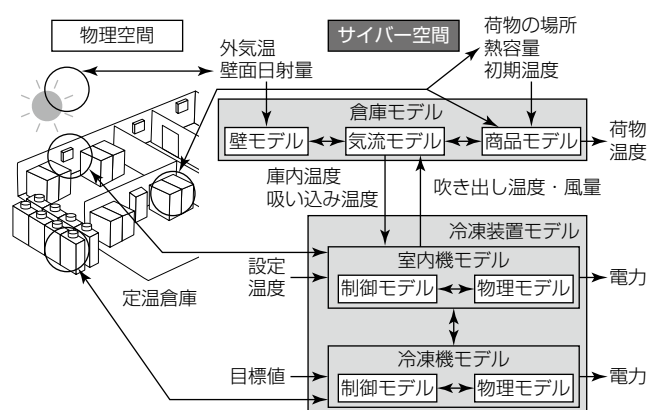


図5. 定温倉庫業務最適化向けデジタルツイン

モデルが導出された。倉庫内部の温度は、外気温と壁面日射量から壁モデルを用いて内壁温度を導出し、気流モデルで商品の温度変化を推定している。

当社が提供する“商品品質の確保とエネルギーコスト最小化の両立”を実現する主体は機器とその制御である。冷凍設備の室内機・冷凍機モデル(制御モデルと物理モデル)は、設計過程で作成されたモデルを活用している。

このように構成されたモデルと、IoTデータを連携させて高精度に倉庫の状況を再現する。ある時点での天候や温度、商品の状態(商品の熱容量、配置場所、搬入時期の温度)を倉庫モデルに、機器のセンサデータや設定値を機器モデルに入力する。この初期状態から商品の品質を損なわず、かつ電力消費を極力抑える制御を行った結果の電力を出力として得る。モデルにセンサデータを入力した時点の倉庫状態を再現し、それ以降の最適制御に基づく将来の状態を予測する。

精緻な内部状態の推定と将来状態の予測、さらには将来状態に基づく最適化には、Maisartの最新AI技術が用いられる。また、IoTデータの収集と、データに含まれるノイズ除去やデータ補正・連携といったデータ加工、モデルとの接続、モデルを流用する場合のライブラリ化は、ClariSense上で行われる。

## 4. む す び

デジタル的なすり合わせによる開発効率化にとどまらず、システムや機器を全体最適化する、当社のモデルベース開発について述べた。また、開発過程で作成されたモデルとIoTデータを基にした推定・予測などの処理によって“稼働場所の現象の見えない状況を再現する”当社デジタルツインについても述べて、具体例として定温倉庫のデジタルツインを示した。モデルベース開発とデジタルツインは、どちらも、顧客の価値を起点とした、開発からサービスまでのDXである。当社のDXによって、顧客に価値を、製品(機器・システム)を通して継続的に届けていく。

## 参 考 文 献

- (1) 三嶋英俊：三菱電機でのAI技術の現状と今後の展望、三菱電機技報, 94, No.6, 318~323 (2020)
- (2) モデルベース開発の日本普及課題, (株)フォーイン (2020)
- (3) GE Reports: 未来の航空を支えるのは“データ”に <https://www.gereports.jp/airline-of-the-future/>
- (4) SIEMENS: デジタルツイン <https://new.siemens.com/jp/ja/company/stories/research-technologies/digitaltwin/digital-twin.html>
- (5) Gateway: 建設生産プロセスにデジタルトランスフォーメーションを <https://gateway.smartconstruction.com/>
- (6) Ansys: Creating a Digital TWIN for a Pump <https://www.ansys.com/content/dam/product/systems-embedded-and-integrated/twin-builder/creating-a-digital-twin-for-a-pump-aa-v11-il.pdf>

# システム設計でのモデルを活用した設計すり合わせ技術

大森康宏\*

Yasuhiro Omori

外山正勝\*

Masakatsu Toyama

岡田正純\*

Masazumi Okada

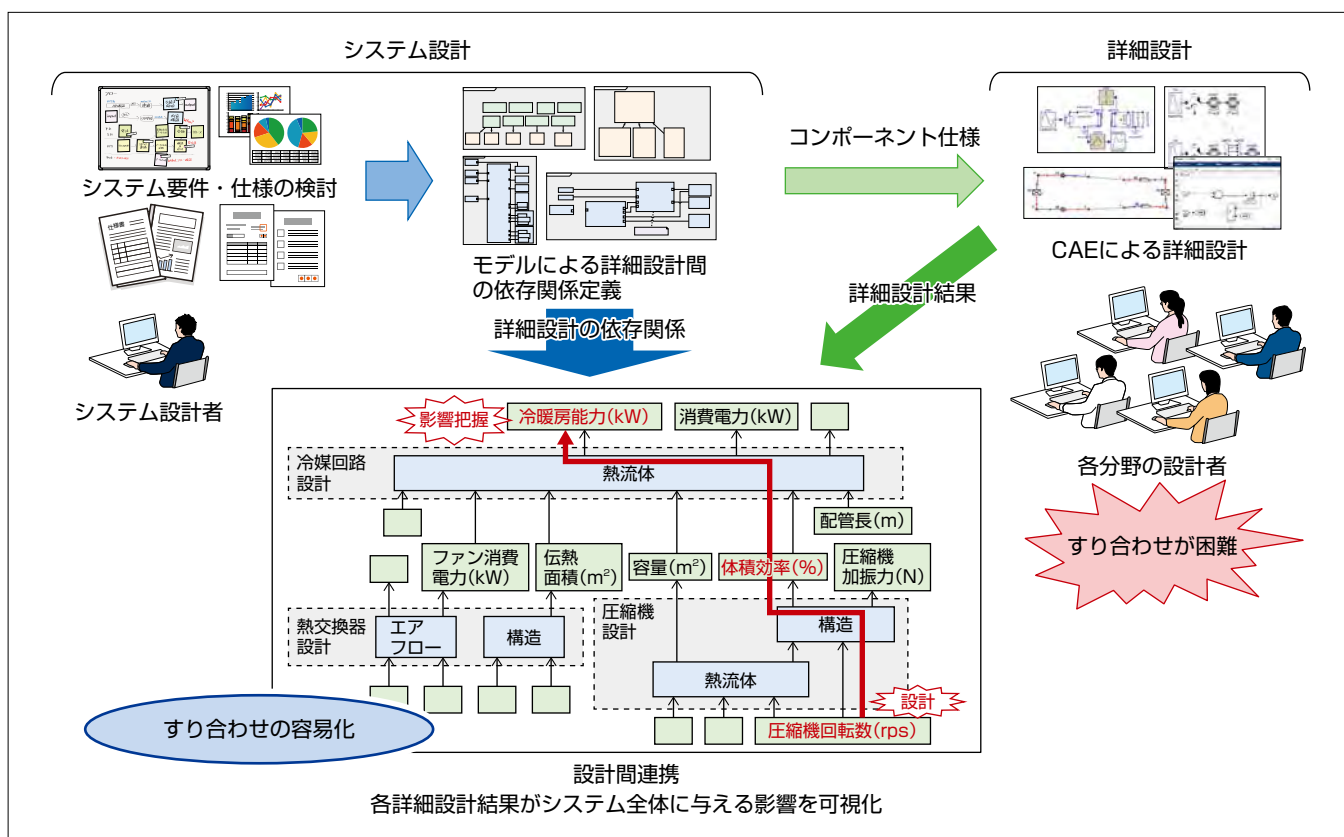
Model Based Design Adjustment Technique for System Design

## 要 旨

製品開発の上流に当たるシステム設計では、システムの実現に必要な機能・非機能の要件を検討し、システムを構成するコンポーネントの仕様を定義する。定義した仕様に従って、各コンポーネントに対して、機械、構造、電気、電子、ソフトウェアなどの各詳細設計を進める。各詳細設計は並行して進められ、仕様を満たすためにそれぞれの詳細な設計内容のすり合わせが行われる。すり合わせを行う相手や内容は、設計者間の暗黙知になっていることが多い。一方で製品は複雑化しており、各設計がシステム全体に与える影響を把握することが難しく、システム要件実現の困難さが増している。そのため、設計者の暗黙知に頼らず、開発の中で広く各設計結果がシステム全体に与える影

響を把握しながら開発を進める仕組みが必要になる。

そのための手段として、システム設計をモデル化することでシステム全体を俯瞰(ふかん)しながら開発を進めるMBSE(Model Based Systems Engineering)を用いて、設計間連携する技術を開発している。設計間連携技術では、MBSEで使用するシステムモデルで、詳細設計間の依存関係を抽出できるようにモデルを構築することによって、詳細設計で使用する1D/3D-CAEモデルでの設計結果とシステムモデルが連携できる仕組みを提供する。この仕組みで、各詳細設計の結果がシステム全体に与える影響の見極めが容易化でき、開発者はシステム要件の実現可否を確認しながら設計を進めることができる。



## モデルを活用した設計すり合わせ容易化の仕組み

設計間のすり合わせを容易化するため、システム設計情報をデータベース化するシステムモデルの構築方式と、詳細設計を行うための1D/3D-CAEのモデルとシステムモデルの連携方式によって、設計結果の影響を定量的に見積もることを可能にする。

## 1. ま え が き

大規模・複雑なシステムを開発するための体系的な手法としてシステムズエンジニアリングがある。システムに対する目的・背景から要求を明確化し複数の専門分野を統合しながら設計を進める開発手法になる<sup>(1)</sup>。このシステムズエンジニアリングを、モデルを活用して実施するMBSEがある<sup>(2)</sup>。

MBSEでのシステム・機器の開発でも、システムの要件を実現するために、詳細設計ですり合わせを行うことが必要になる。すり合わせは、1D/3D-CAEモデルやノウハウをExcel<sup>(注1)</sup>上で形式知化した計算式などを活用した詳細設計の結果を用いて行うケースが多い。

本稿では、システム設計でのすり合わせを容易化することを目的として、MBSEによるシステムモデルを構築する際に、機械、構造、電気、電子、ソフトウェアなどの分野の異なる設計間の依存関係を規定するモデリング方式と、各設計で使用する1D/3D-CAEモデルの詳細設計結果とシステムモデルを連携する方式を定義し、定義した方式によって各設計結果がシステム全体に与える影響分析が可能になることの実現性を確認した結果について述べる。

(注1) Excelは、Microsoft Corp.の登録商標である。

## 2. 方式設計

### 2.1 方式概要

システムズエンジニアリングは、設計対象のシステムのライフサイクル全般(開発・製造・運搬・設置・運用・保守・廃棄など)を見渡して、周辺のシステム・ステークホルダー・環境条件などとの相互作用から役割を明確化し、対象システムの詳細な設計を進めていく手法である<sup>(2)</sup>。これによって、システムが実現すべき役割の検討漏れが少なくなり、後工程からの手戻りを低減することが可能になる。

システムズエンジニアリングの実施では、扱う情報量が膨大になるため、設計はドキュメント形式で人手による管理を進めるのではなく、デジタルデータとして管理できる形式で実施し、必要な情報の検索や整合性を計算機で実施できるよう、設計情報をデータベース化する。このシステム設計情報のデータベースがMBSEでのシステムモデルであり、データベースから設計を進めるために必要な情報を抽出し、設計判断に必要な形式を生成することで、効率的・効果的に開発を進めることがMBSEになる<sup>(2)</sup>。

システムモデルは、SysML<sup>(3)(注2)</sup>などの記法による各

種ダイアグラム(ブロック定義図、要求図、パラメトリック図等)をMBSEツール上で活用し、設計情報の間に関連性を持たせることで作成できる(図1)。

開発の中で使用するモデルとしてはシステムモデルのほかにも、詳細設計で使用する1D/3D-CAEによる詳細設計モデルがある。このモデルは設計分野(機械、構造、電気、電子、ソフトウェアなど)ごとに最適化を行うためのシミュレーションモデルであり、詳細設計のモデルを使った設計結果をすり合わせることで、システム要件を実現する仕様を導出する。詳細設計間のすり合わせでは、他の設計に影響を与える依存関係のある設計要素の調整を行うが、各設計者の暗黙知に基づくため、時間がかかることや、検討漏れが発生する。

そのため、システム全体設計の情報が保持されているシステムモデルから詳細設計間の依存関係を抽出し、詳細設計モデルの結果を連携させる仕組みを構築する。これによって、図2に示すように、詳細設計の結果がシステム全体に与える影響が可視化され、すり合わせが容易になる。

この仕組みを実現するために、設計間の依存関係を規定できるシステムモデル構築方式と、システムモデルから依存関係を抽出する方式、依存関係の情報を詳細設計モデルに渡すことでその影響を計算する連携方式を定義する。

(注2) SysMLは、Object Management Group, Inc.の登録商標である。

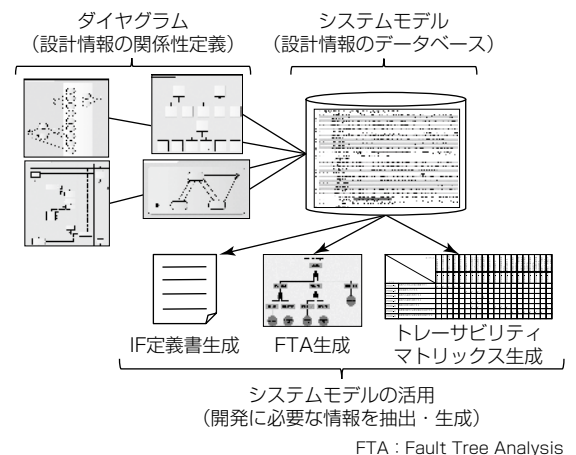


図1. MBSEでのシステムモデルとその活用<sup>(2)</sup>

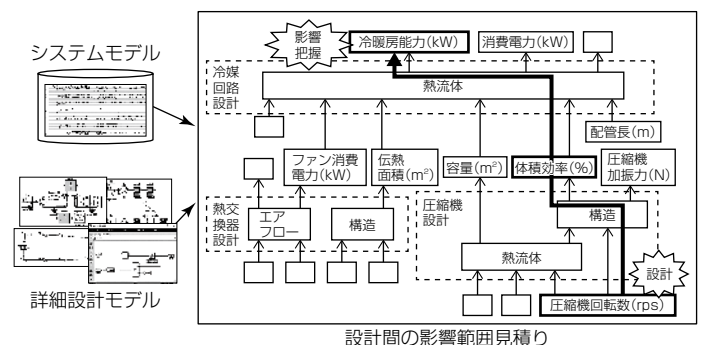


図2. システムモデルを活用したすり合わせ容易化方式の概要



## 2.2 システムモデルの定義

各設計分野での設計要素(制御周期、部品定格、消費電力など)の中には、他の設計に対して影響を与えるものがある。例えば空調機器では、消費電力低減のためにファン回転数を下げるように制御周期を変更した際の放熱性の変化によって冷媒回路の設計での冷暖房能力の性能値にも変化が生じるという影響事象の伝播(でんぱ)が考えられる。

このような、設計間をまたいだ影響の伝播をシステムモデルから抽出できるようにするため、2.1節で述べたダイアグラムを使用して設計情報の関係性を定義する。

この方式では、各種設計の設計要素と目標性能の依存関係をSysMLのブロック定義図とパラメトリック図を用いて定義する。またシステム要件になる性能目標はSysMLの要求図で定義する。要求図、ブロック定義図、パラメトリック図の関連性について、空調機器を想定した例を図3に示す。本稿では、MBSEツールはSparx Systems社のEnterprise Architectを使用した。

## 2.3 システムモデルの解析

2.2節で示したシステムモデルは、SysMLのダイアグラムとして表現されているが、2.1節で述べたとおり、実体としては設計情報のデータベースになる。図3で示したダイアグラムは、SysMLなどの記法を使って作成され、かつ必要な情報が複数のダイアグラムに分散されている。ダイアグラムの状態で開発に活用しようとした場合、開発者全員が記法に習熟してダイアグラムを齟齬(そご)なく理解できることが前提になって、その上で必要な情報を多数のダイアグラムから探し出すことになる。そのため、ダイアグラムの状態では開発の中で広く関係者が活用することが難しくなる。

多くのMBSEツールでは、ダイアグラム上で定義さ

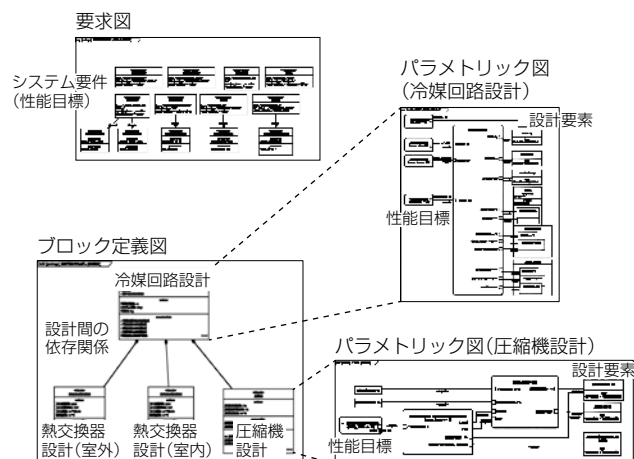


図3. システムモデルの定義方式

れる各要素の詳細や、関連する要素との関係の情報は、XML(eXtensible Markup Language)の形式で保持されている。このXMLで表現されたダイアグラムの内容から必要な情報を取り出す仕組みを構築することで、開発の中で広くシステムモデルを活用することが可能になる。

ここで、XMLから必要な情報を抽出可能にするには、複数のダイアグラム間で定義される情報同士に、関連性を定義することが必要になる。空調機器の例で考えると、情報同士に関連性が定義されていない場合、要求図で定義した目標になる冷房能力が、パラメトリック図上で定義した冷媒回路設計の性能の目標値になることを、計算機上で辿(たど)ることができない。計算機上で辿れるようなシステムモデルの要件として、ダイアグラムの中で情報の関連性を付けることが必須になる。

図4では、図3で示したダイアグラムの情報間に関連性を定義し、それをXML上で見て情報の関係性が辿れることを示している。要求図で定義した性能目標はパラメトリック図の性能目標として使われ、パラメトリック図では各設計要素と性能目標が関連付いている。また、あるパラメトリック図で示した性能目標が、別のパラメトリック図では設計要素として関連付いている。この関係はXMLの構造で見ると、各情報には一意にIDが設定され、また関連する情報のIDが定義されている。そのため、IDを参照して関連する情報をたどることが可能であり、ある設計の設計要素が、別の設計の性能目標に関連していることを抽出できる。このように、ダイアグラムの情報間に関連性を付けることで、XMLの構造から計算機の処理として所望の情報を抽出することが可能になる。

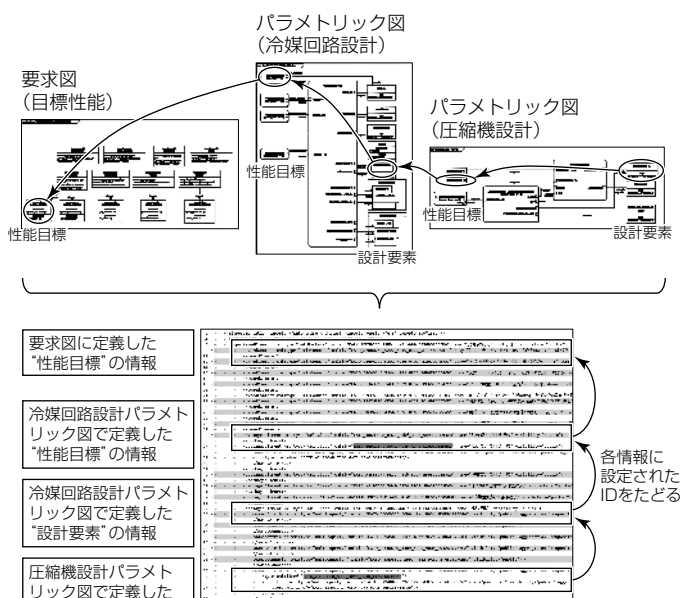


図4. システムモデルの解析



## 2.4 詳細設計モデルとの連携方式

2.3節で示した方式によって、設計の影響範囲はシステムモデルからとることが可能になる。一方で、影響を定量的に見積もるためには、詳細設計のシミュレーションモデルとの連携が必要になる。

詳細設計のシミュレーションモデルとの連携方式としては、MBSEツールとシミュレーションツールを連携させる方式<sup>(4)</sup>、詳細設計用のモデル実行結果を近似式化し設計値を近似式に与えて結果をシステムモデルに返す方式の二つがある。

本稿では後者の方式で連携方式を定義した。この方式は、近似式を作るための手間が大きく、またシミュレーションツールとの連携する方式よりも精度は低くなる。しかし、当社製品は多岐にわたり、事業ドメインごとで使用するシミュレーションのツールが異なることや、独自の社内ツール・Excel計算式なども多く活用されていることから、様々なツールと連携しやすいこの方式にした。この方式によるシステムモデルと詳細設計モデルの連携方式を図5に示す。

図4で示したように、システムモデルのXMLから、設計要素と設計要素に関連する性能値を抽出する。その際、設計要素と性能値の関係の近似式から、設計要素の値が決まった際の性能値の定量的な影響を算出する。影響を算出した性能値が他の設計の設計要素になっている場合、XMLから更に影響のある性能値を抽出し、近似式から影響の大きさを算出する。これを繰り返すことで、ある設計要素の値が決まった際に、伝播する影響範囲と大きさを表すことが可能になる。

この方式が実際の開発の中で広く活用されるためには、システムモデルから抽出された情報を各設計担当者が把握しやすい形式にする必要がある。形式の検討に当たっては、

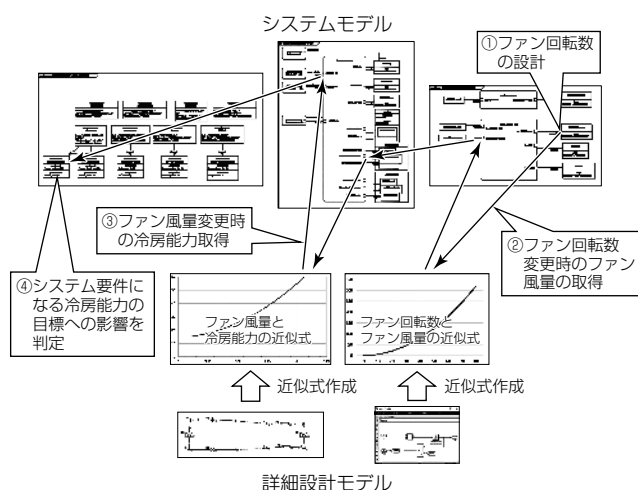


図5. システムモデルと詳細設計モデルの連携方式

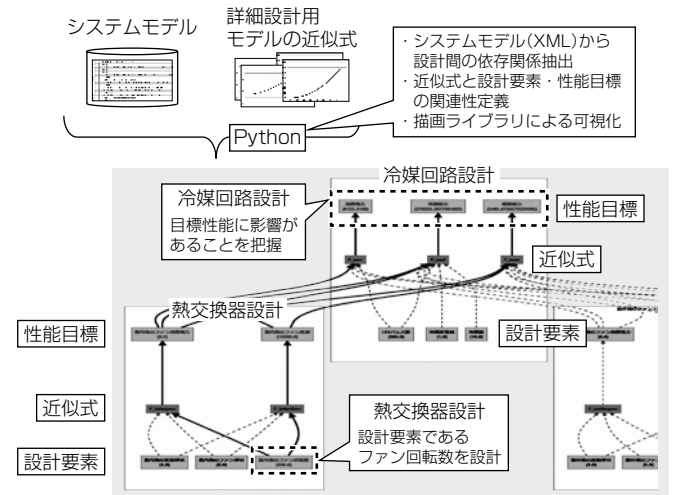


図6. 試作した設計間の影響分析

特別な記法を理解せずに使用できること、システム全体の設計の関係性が俯瞰できること、変更点の影響範囲が分かりやすいことを目的にした。

この目的を満たせるよう、この方式の試作をXMLの解析と描画ライブラリがそろっているPython<sup>(注3)</sup>を用いて作成した。試作の結果を図6に示す。各設計の結果をGUI (Graphical User Interface)操作で設計要素に入力することで、全体設計への影響範囲が強調した線で示され、かつ影響の大きさを定量的に示せることを確認した。

この試作は、設計結果の影響を自然言語とブロック線図によって直感的に理解できる形式になっており、開発関係者全体が各自の設計内容の影響を把握でき、システム設計のすり合わせが容易に実施可能になると考える。

(注3) Pythonは、Python Software Foundationの登録商標である。

## 3. む す び

設計間の関係性を定義したシステムモデルと詳細設計モデルを連携することで、設計分野をまたいだ影響分析を開発関係者が誰でも容易に実施できる方式を設計し、試作によって開発で活用可能な見込みを確認した。

今後は実際の開発で、設計分野間のすり合わせに課題がある事例にこの方式を適用し、開発を効率化できることを示していく。

## 参 考 文 献

- (1) INCOSE Systems Engineering Handbook, A Guide for System Life Cycle Process and Activities 4th Edition, International Council on Systems Engineering (2015)
- (2) 石橋金徳：Model-Basedシステムズエンジニアリング(MBSE)を取り巻く「誤解」と開発現場の「期待」について、Ansys Executive Forum (2021)
- (3) 西村秀和：システムズモデリング言語SysML, 東京電機大学出版局 (2012)
- (4) サイバネットシステム(株)：MBSEから始まるMBD-CAEソリューション, 人とくるまのテクノロジー展 (2019)

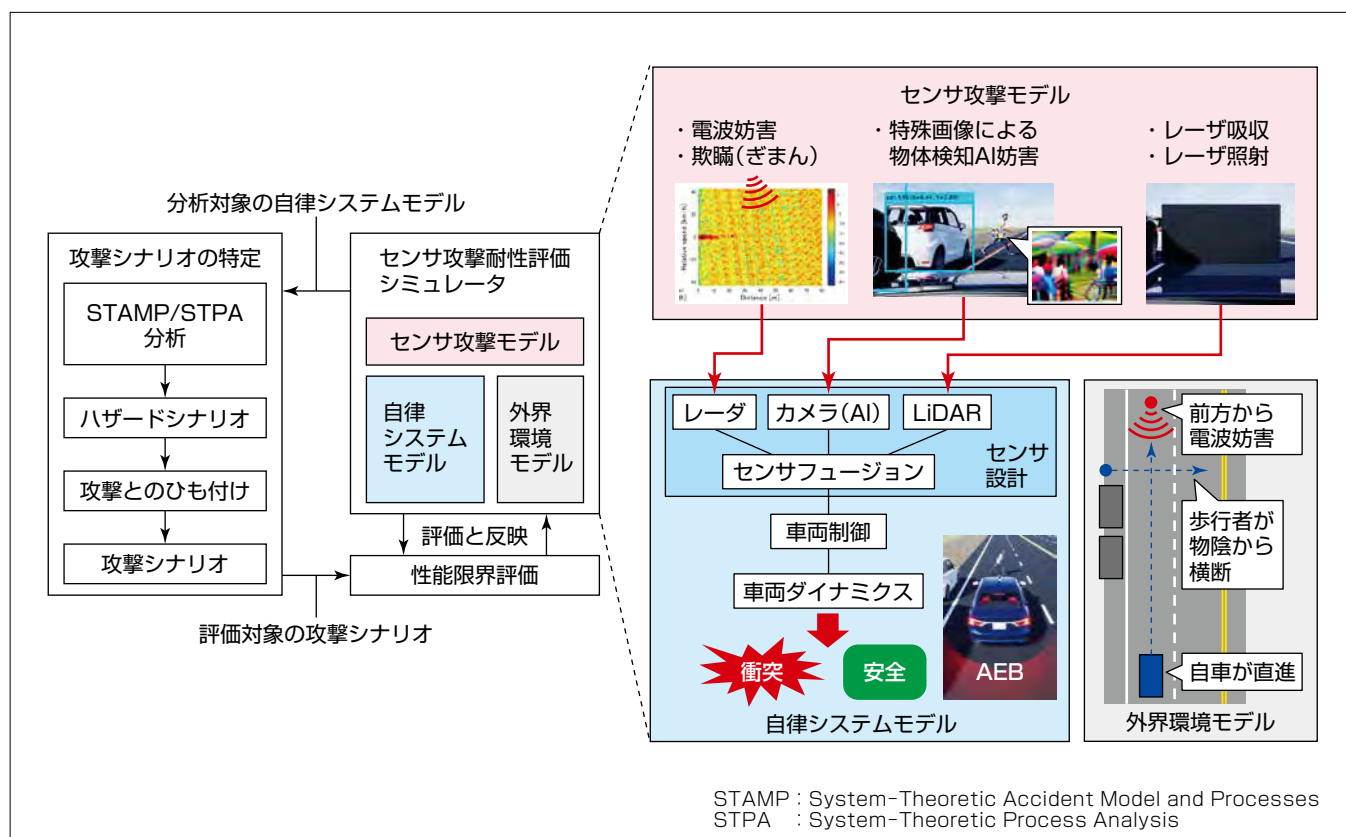
# センサ攻撃耐性評価フレームワーク

Evaluation Framework for Sensor Attack Resistance

## 要 旨

自動運転車を始めとする自律システムは、様々なセンサによって周囲の状況を把握し、それに基づいてシステムを制御している。そのため、センサへの攻撃は安全性に深刻な影響を及ぼす。自動車の安全性に関連する国際規格のISO 21448ではセンサの性能限界を考慮した自動車の安全性を対象にしているが、セキュリティの観点が含まれていない。また、ISO/SAE(Society of Automotive Engineers) 21434では車載システムの開発プロセスでのセキュリティを対象にしているが、センサ攻撃のような特定の脅威は対象ではない。したがって、センサ攻撃に対する自動運転システムの安全性を評価する仕組みが必要である。実車での評価が安全性の観点で難しいことや、設計に反映させるために開発の早期段階での評価が必要なことから、STAMP/

STPA分析に基づくセンサ攻撃シナリオの特定と、自律システムに対するセンサ攻撃の影響のシミュレーション評価を組み合わせたフレームワークが有効である。具体例としてレーダ、カメラ、LiDAR(Light Detection And Ranging)を用いたAEB(Autonomous Emergency Braking: 衝突被害軽減ブレーキ)搭載車に対するシミュレータのプロトタイプを開発した。日本と欧州のNCAP(New Car Assessment Programme: 新車アセスメントプログラム)で規定されているAEB試験の走行シナリオを網羅し、走行車に対する様々なセンサ攻撃の影響を評価できるものである。これによって、攻撃耐性を考慮したセンサの性能要件の早期決定を可能にする。



## センサ攻撃耐性評価フレームワークの概要

評価フレームワークは、STAMP/STPA分析に基づく攻撃シナリオの特定と、センサ攻撃耐性評価シミュレータによる評価から成る。対象の自律システムに対する攻撃シナリオを網羅的に特定し、センサ設計と攻撃のパラメータを変化させてシミュレーション評価を行うことによって、センサ攻撃に対するセンサの性能限界を評価できる。これによって、センサ設計者はセンサ攻撃耐性に必要になるセンサ設計パラメータを把握し、センサの設計に反映することが可能になる。

## 1. ま え が き

自動運転車などの自律システムは様々なセンサを用いて周囲の環境を把握し、それに基づいてシステムを制御している。本稿で述べるAEB搭載車では、レーダ、カメラ、LiDARを用いて前方の物体を検出して位置と速度を測定し、必要に応じてドライバーに警告を発したり自動的にブレーキをかけたりする。一方、センサに対する攻撃についてこれまでに数多くの報告がされており、センサ単体だけでなく、センサを利用する自律システムに影響を及ぼす例も知られている。したがって、センサ攻撃に対する自律システムの安全性を担保することが不可欠である。

自動運転車の場合、安全性の検証に必要とされる何百億km<sup>(1)</sup>もの距離の走行テストを実世界で行うことは現実的ではないため、様々な走行シナリオを想定したシミュレーションによる評価が一般的である。しかし、無数のシナリオの中から評価すべきシナリオを絞り込むことが課題とされている。さらに、センサ攻撃の影響をシステムレベルで評価可能なシミュレータについてあまり報告されていない。

本稿では、STAMP/STPA分析<sup>(2)</sup>に基づく手法で評価すべきセンサ攻撃シナリオを網羅的に特定し、センサ攻撃の自律システムへの影響をシミュレーションで評価するフレームワークを提案する。また、シミュレータのプロトタイプを開発し評価を行った結果を述べる。

## 2. SOTIFに基づく評価フレームワーク

自動車の安全に関する国際規格として、機能安全規格ISO 26262<sup>(3)</sup>とSOTIF(Safety Of The Intended Functionality)規格ISO 21448<sup>(4)</sup>がある。機能安全は、故障等の不具合によって引き起こされるリスクがない状態を目指すものである。SOTIFは、意図した機能や性能の限界によるリスクがない状態を目指すもので、機能安全を補う比較的新しい安全性概念である。ISO 21448は、自動運転等の高度な機能がよりどころとしているセンサを意識している点が特徴であるが、セキュリティの観点は含まれていない。自動車のセキュリティに関する国際規格としてはISO/SAE 21434<sup>(5)</sup>があるが、開発プロセスでのセキュリティリスク管理が主眼であり、センサ攻撃等の特定の脅威は扱われていない。

ISO 21448では、システムの仕様を入力として、怪我(けが)などの損害につながる仕様の不備や性能限界を特定・評価することによって、仕様を修正しSOTIFを改善していくプロセスが規定されている。センサを組み込んだ自律システムがセンサ攻撃に対してどこまで耐え得るかを

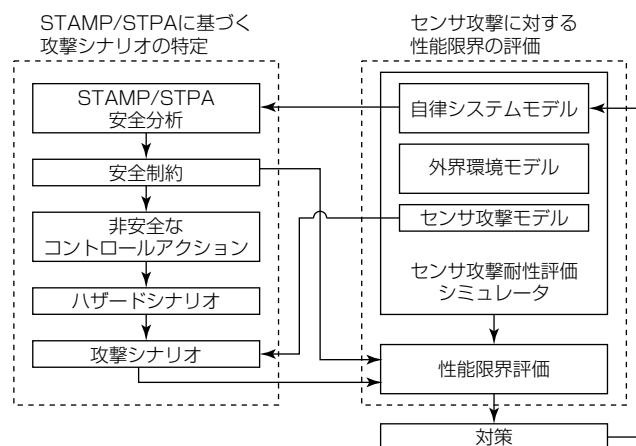


図1. センサ攻撃耐性評価フレームワーク

評価し、評価結果をセンサの設計に反映する目的に適したプロセスである。そこで本稿はSOTIFの改善プロセスに基づくセンサ攻撃耐性評価フレームワークを提案する(図1)。STAMP/STPA分析で損害につながるシナリオを特定し、その結果をセンサ攻撃とひと付けする方法で、性能限界の評価で考慮すべきセンサ攻撃シナリオを網羅的に特定する。性能限界の評価には、自律システムにセンサ攻撃と外界環境を組み込んだセンサ攻撃耐性評価シミュレータを用いて、各攻撃シナリオ下でのセンサ攻撃に対する性能限界を評価する。それぞれの詳細は3章と4章で述べる。

## 3. STAMP/STPA分析に基づく攻撃シナリオの特定

怪我や経済的損失など、防ぐべき損害はシステムによって様々であり、本稿ではアクシデントと呼ぶ。また、アクシデントが潜在するシステムの状態をハザードと呼ぶ。システムがハザードに陥るハザードシナリオを特定するための手法としてFTA(Fault Tree Analysis)、FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)、STAMP/STPA等が知られている。FTAとFMEAでは主にコンポーネントの故障に起因するハザードに焦点を当てているのに対して、STAMP/STPAでは、たとえ故障がなくてもコンポーネント間の意図しない作用でハザードが発生し得るとの観点で分析する。本稿では、故障ではなくセンサ情報に基づくAEB制御と車両の相互作用が主眼であるためSTAMP/STPAを採用する。

AEB搭載車に対する攻撃シナリオ特定の流れと結果の一部を図2に示す。まず、システムが安全を実現する大まかな構造として、アクシデントとハザード及びハザードを制御するための安全制約を定義する。図2の最上段に定義の一例を示す。また、安全制約の実現に関係するコンポーネント(サブシステムや機器)と、コンポーネント間の相互作用(コントロールアクションやフィードバックデータ)を

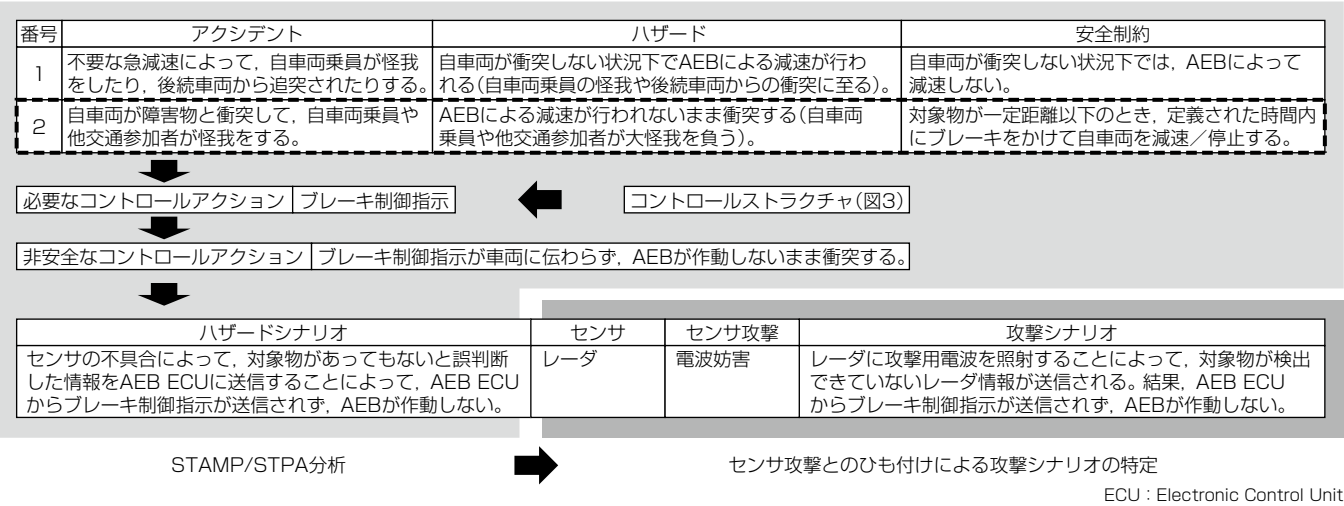


図2. AEB搭載車に対する攻撃シナリオ特定の流れと結果の一部

分析し、図3のようにコントロールストラクチャとしてまとめる。次に、コントロールストラクチャから、安全制約の実行に必要なコントロールアクションを識別し、ハザードにつながる非安全なコントロールアクションを特定する。そして、各非安全なコントロールアクションに対してハザードにつながるハザードシナリオを特定する。

最後に、ハザードシナリオでのセンサの不具合を、その原因になるセンサ攻撃と結び付けることによって、センサ攻撃シナリオを特定する。センサ攻撃については、攻撃の目的を物体検出の妨害と欺瞞の2種類に分類し、レーダ、カメラ、LiDARのそれぞれに対して現在知られている攻撃を網羅している(表1)。

図2の分析結果では、安全制約“対象物が一定距離以下のとき、定義された時間内にブレーキをかけて自車両を

減速／停止する”の実行に必要なコントロールアクションとして“ブレーキ制御指示”を識別し、ハザードにつながる非安全なコントロールアクション“ブレーキ制御指示が車両に伝わらず、AEBが作動しないまま衝突する”を特定し、対応するハザードシナリオと攻撃シナリオを特定している。

4. センサ攻撃に対する性能限界の評価

4.1 センサ攻撃耐性評価シミュレータ

センサ攻撃耐性評価シミュレータの構成を図4に示す。本稿のプロトタイプは、モデルベース設計で広く利用されているMathWorks社のMATLAB/Simulink(注2)をプラットフォームとして、外界環境に関わるモデルをEpic Games社のUnreal Engine(注3)で実装した。自律システムを構成するプラント、コントローラ、状態計測、認知・判断、センサについてはそれぞれのドメインで開発されるモデルを利用することを想定しており、今回はMathWorks

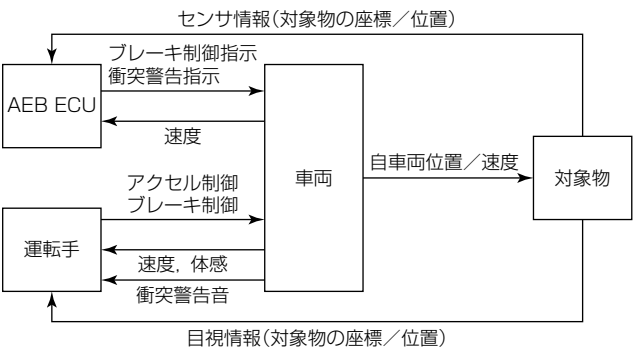


図3. AEB搭載車のコントロールストラクチャ

表1. サポートしているセンサ攻撃

センサ	妨害	欺瞞
レーダ	電波妨害	距離欺瞞 速度欺瞞 なりすまし攻撃
カメラ	パッチによる個体検出妨害 パッチによる全体検出妨害 路面標示改変(注1)	投影による歩行者・車の誤検出(注1)
LiDAR	照射攻撃 吸収攻撃	なりすまし攻撃

(注1) シミュレータでは未サポート

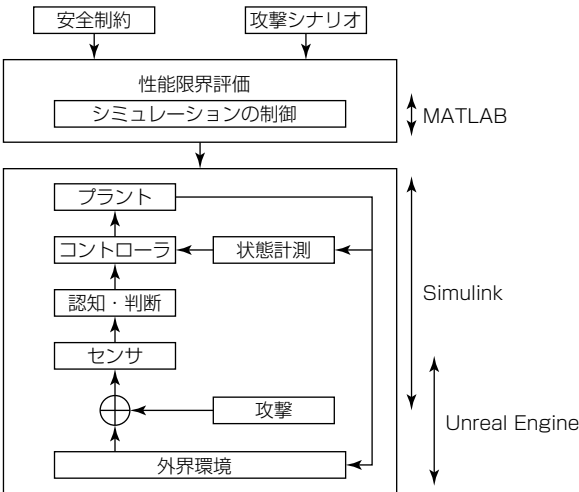


図4. センサ攻撃耐性評価シミュレータ



社が提供するサンプルモデルを組み合わせ、レーダ、カメラ、LiDARに基づくAEB搭載車のモデルを作成した。外界環境モデルでは、日本と欧州のNCAPで規定されているAEB試験の走行シナリオを網羅し、STAMP/STPA分析で特定される網羅的な攻撃シナリオとの組合せによって、走行中の車に対する様々なセンサ攻撃の影響を評価可能にする。攻撃モデルは三菱電機独自のものであり、サポートするセンサ攻撃は表1に示したとおりである。

(注2) MATLAB, Simulinkは、The MathWorks, Inc.の登録商標である。

(注3) Unreal Engineは、Epic Games, Inc.の登録商標である。

## 4.2 シミュレーション評価の例

センサによる物体検出で、誤検出を排除するための処理であるM-out-of-Nアルゴリズムについて、センサ攻撃耐性を評価する例を示す。M-out-of-Nアルゴリズムは、連続するN回の検出結果のうち少なくともM回以上同じ物体を検出した場合に検出を確定させる。定性的にはMを大きくしてNに近付けるほど検出結果の確度は高くなるが、ノイズの影響を受けやすくなる。(M, N)はシステムが満たすべき性能要件によって決定される設計パラメータと考えられるため、センサ攻撃に対するシステムの安全性も考慮する必要がある。

走行シナリオの例として日本のNCAPのCPNO(Car-to-Pedestrian Nearside Obstructed)を用いて、図2で特定したレーダに対する電波妨害の攻撃シナリオを重ね合わせる(図5)。攻撃者の設定として、位置は自車両の前方に固定し、信号強度と初期位置を変化させて、システムの安全性を評価する。この評価を、異なる(M, N)に対して行い結果を比較する。(M, N)=(2, 2)と(9, 12)に対して評価した結果を図6に示す。まず、攻撃者が自車両に近いほど、また攻撃者の信号強度が強いほど衝突しやすくなるという妥当な結果が得られることを確認できる。次に、センサの設計パラメータに関して、(M, N)=(2, 2)の方が安全性は高いが、ブレーキが早すぎる、つまり、歩行者との衝突のおそれがないタイミングでブレーキがかけられて

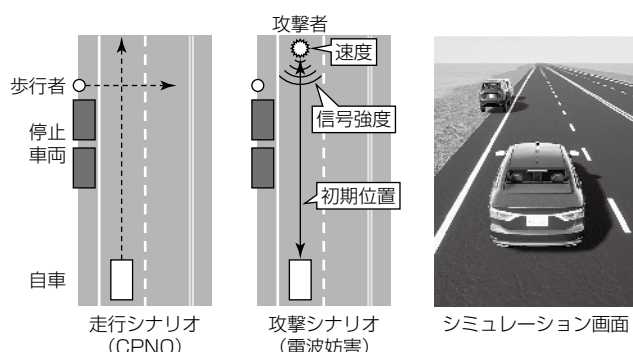


図5. CPNOシナリオでの電波妨害の例

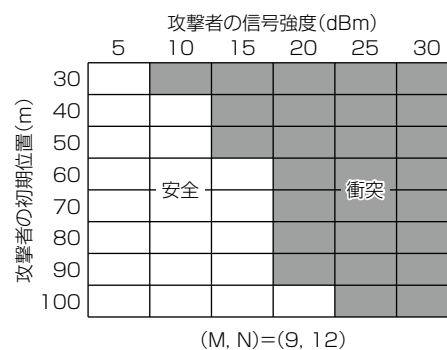
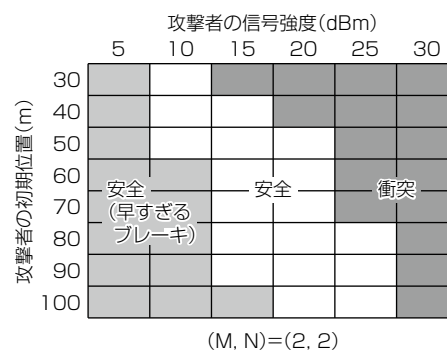


図6. 攻撃パラメータを変化させた場合の評価例

いるケースを確認できる。これは、図2に示したもう一つの安全制約“自車両が衝突しない状況下では、AEBによって減速しない”を考慮する必要があることを示している。

## 5. むすび

本稿では、自律システムのセンサ攻撃耐性を評価するためのフレームワークを提案し、レーダ、カメラ、LiDARに基づくAEB搭載車を例として、STAMP/STPA分析に基づくセンサ攻撃シナリオの特定と、シミュレータのプロトタイプによる評価の例を示した。自律システムが複雑化する中、今後は異なるシミュレータ間の相互接続が重要と考えられる。そこで、開発したセンサ攻撃モデルを他のシミュレータでも利用可能にするため、FMU(Functional Mock-up Unit)等の手法を用いたモジュール化を検討していく。

この研究の成果は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP16007)の結果得られたものである。

## 参考文献

- (1) Nidhi, K., Paddock, S.M.: Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability?. RAND Corporation (2016)
- (2) Nancy, L., John, T.: STPA HANDBOOK (2018)
- (3) ISO. Road vehicles-Functional safety. Standard ISO 26262:2018 (2018)
- (4) ISO. Road vehicles-Safety of the intended functionality. Standard ISO/FDIS 21448:2022 (2022)
- (5) ISO. Road vehicles-Cybersecurity engineering. Standard ISO/SAE 21434:2021(E) (2021)

# デジタルツインの鍵になる推定技術

Estimation: Key Technology for Digital Twins

スコット・ボートフ\*

Scott A. Bortoff

クリストファー・ラフマン\*

Christopher R. Laughman

## 要 旨

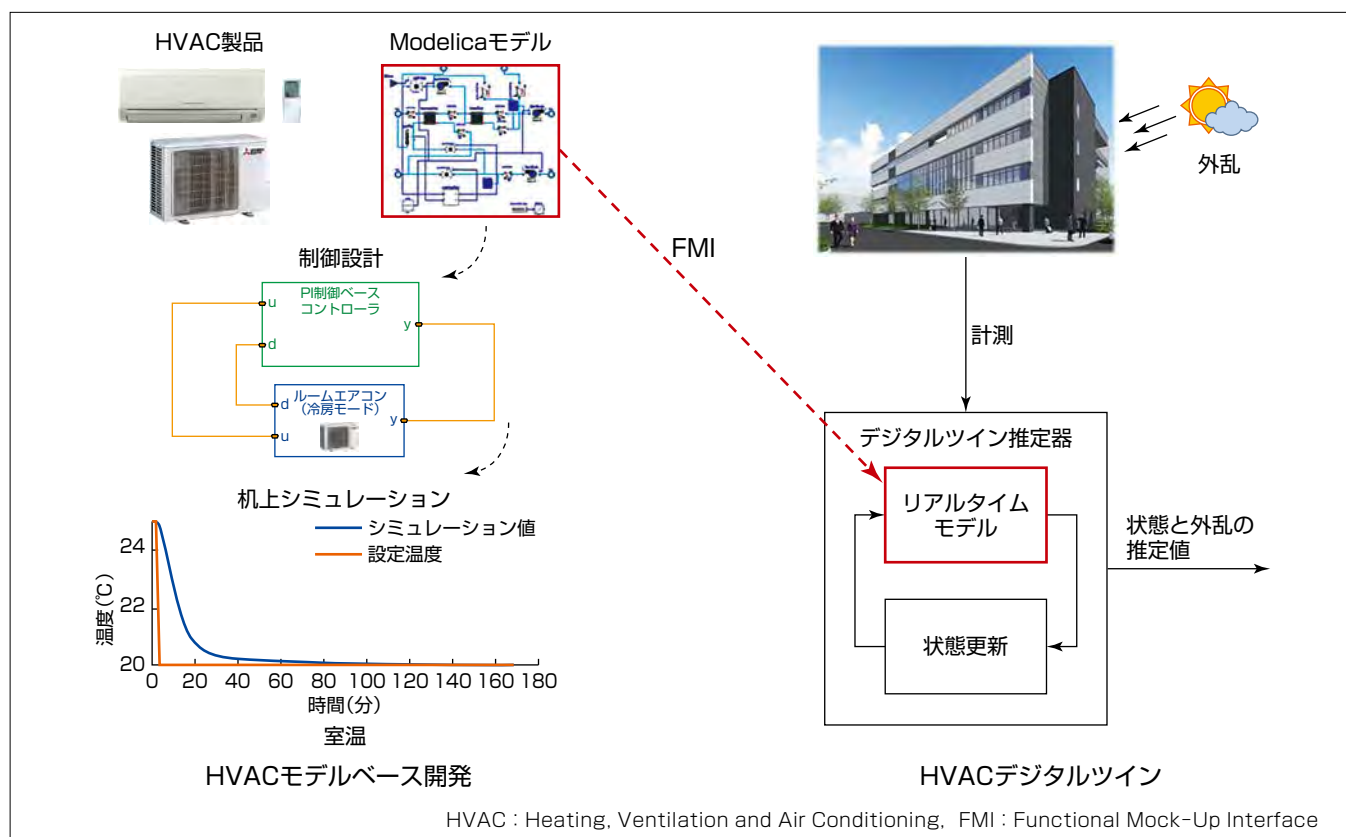
デジタルツインは、物理的なモノやプロセスにリアルタイムで対応する、デジタル側のコンピュータモデルのセットである。このモデルセットは、モノやプロセスの製品ライフサイクルを通じて、継続的に進化していく。製品を開発する際に使用したシミュレーションモデルは、製品運用時にはデジタルツインとして、リアルタイムで行う計測と組み合わせて再利用される。このようにモデルと実際の計測を組み合わせ、運用時にリアルタイムで利用することで、直接計測するのが困難な場合や高コストの場合に、仮想的なセンシング、診断、モデル予測制御といったことが可能になる。このような利点を得るには、製品開発時には既知と仮定した境界条件や外乱を、運用時の状況に合わせて扱えるように、モデルを修正しなければならない。さら

に、推定アルゴリズムを使用して、製品の物理的条件や外気温のような環境条件を拘束条件として考慮した上で、運用時のリアルタイムデータを推定できるようにモデルを修正していく必要がある。また、ツールソフトウェアが、モデルに基づく推定をサポートしている必要もある。

ビルHVACシステム向けのデジタルツイン構成では、この推定技術が鍵になると言える。また、Modelica<sup>(注1)</sup>とそれに関連するFMI<sup>(注1)</sup>標準、Julia<sup>(注2)</sup>言語といった次世代モデリングとシミュレーション技術は、製品開発時に作成したモデルを運用時に再利用可能にするための有望な技術プラットフォームである。

(注1) Modelica, FMIは、The Modelica Associationの登録商標である。

(注2) Juliaは、Julia Computing, Inc.の登録商標である。



## HVAC向けのデジタルツイン

HVAC製品のモデルベース設計では、シミュレーションモデルを使用して制御システムの設計を行い、決定した設計内容を検証する。このときに使用したモデルは、モデルベース状態推定アルゴリズムを実装しているModelicaやFMIなどを利用することで、デジタルツインの一部として運用時に再利用できる。

## 1. Introduction

A digital twin is a set of computer models that serve as a real-time digital counterpart of a physical object or process. The term was coined in the early 2000s in the context of Product Lifecycle Management (PLM)<sup>(1)</sup> to describe a set of computer representations of a product as it evolves through its lifecycle, from design to manufacture, then to operation, and finally to disposal. The digital twin was envisioned as an electronic repository of all aspects of design, such as 3-D CAD drawings and engineering models, in addition to operational descriptions such as bills of process. It is maintained throughout the product lifecycle via a real-time data stream of measurements obtained from the physical object. It is used to monitor and predict the behavior of the product in operation in its physical environment for diagnostic purposes, or in interrogative use cases in which past or future scenarios are analyzed to improve product design or operation.

Here we consider digital twins of building Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems, and define the digital twin narrowly to be a physics-based simulation model that is combined with measurements and used in real-time operation. It may provide a range of benefits, such as the following:

- Virtual Sensing: Heat flow through a heat exchanger, which is expensive to measure directly, may be estimated using a model and a limited set of sensor measurements. If sufficiently accurate, it may serve as a utility-grade meter for billing purposes.
- Diagnostics: The amount and location of the refrigerant charge inside HVAC equipment, which is difficult to measure directly, may be estimated and used to identify costly refrigerant leaks.
- Model Predictive Control: The digital twin model may be integrated into a product-level or building-level model predictive control (MPC), which can command actuator values that optimize a cost function, such as energy use.

For each of these use cases, a simulation model of the HVAC equipment, and possibly the building, is combined with real-time measurements to estimate a quantity of interest that is unavailable or difficult to measure directly. Such simulation models are used in product development, and may be reused for this purpose. However, their use during the equipment operation phase differs from their use in product development, and the simulation model must be modified accordingly. The purpose of this article is to describe

these modifications and introduce next-generation modeling and simulation technologies that facilitate them.

## 2. HVAC Models in Product Development

HVAC equipment often uses vapor compression cycles to move heat among a set of heat exchangers located throughout a building to provide thermal comfort and ventilation. The relevant physical processes include heat transfer, thermodynamics, and fluid mechanics. Mathematically, these processes are modeled with a set of differential and algebraic equations (DAEs),

$$\dot{x}(t) = f_c(x(t), d(t), u(t), \theta) \quad \dots\dots\dots (1a)$$

$$y(t) = h(x(t)) \quad \dots\dots\dots (1b)$$

Here,  $x(t)$  is an  $n$ -dimensional vector of states,  $\dot{x}(t)$  denotes its time derivative, and  $y(t)$  is a set of time-varying measurements. The states include quantities such as refrigerant pressures and heat exchanger (HEX) wall metal temperatures at discrete spatial locations, as well as building construction temperatures, air temperatures, and humidities. The term  $f_c$  is a nonlinear function of the states  $x(t)$ , time-varying boundary conditions or disturbances  $d(t)$  that are typically not measured, control actuators  $u(t)$  such as compressor speeds, and a vector of parameters  $\theta$  that are typically calibrated for the specific problem of interest. The term  $h$  is a nonlinear function that defines the measurements  $y(t)$ .

In practice, models are constructed using CAE tools such as the computer language *Modelica*. This tool automates model assembly using compiler technology to produce numerically efficient simulation code. During product development, such models are used to validate design decisions and in methods of model-based design of the control system.

In these use cases, values for  $x(t_0)$ ,  $\theta$ , and  $d(t)$  are given. For example, the weather acts as a disturbance on a building HVAC simulation. It can be provided in the form of typical meteorological year data, which is available open-source for many worldwide locations. Similarly, the initial condition is assumed, values of  $\theta$  are obtained from laboratory or catalog data, and values of  $u(t)$  are computed by the controller.

## 3. HVAC Models in Real-Time Operation

The following issues must be addressed to reuse a simulation model in a digital twin that was intended for product development:

- The state  $x(t)$  and the disturbance  $d(t)$  must be estimated.
- Values for elements of the parameter vector  $\theta$  must be calibrated.
- Constraints associated with the model (1) must be enforced.
- Real-time measurements  $y(t)$  and system inputs  $u(t)$  need to be incorporated.

Furthermore, the tools used to represent and simulate the model must support these needs.

### 3.1 Conventional State Estimation

Disturbances or boundary conditions are conventionally estimated by modeling them as a Laplace-transformable signal, augmenting the physics-based model with the signal model, and estimating the full state. Because  $d(t)$  typically varies slowly, it may be represented as an unknown constant  $d=x_2$  and augmented to (1) as

$$\dot{x}_1 = 0 \quad (2a)$$

$$\dot{x}_2 = f_c(x_1, x_2, u, \theta) \quad (2b)$$

$$y = h(x_2) \quad (2c)$$

where  $x(t)=[x_1(t) \ x_2(t)]^T$  is redefined.

The extended Kalman filter (EKF) is the most conventional method for estimation of  $x(t)$ . All variations of the EKF share the same general structure. Numerically integrating (2) gives the discrete-time augmented model

$$x_{k+1} = f(x_{1k}, x_{2k}, u_k, \theta) \quad (3a)$$

$$y_k = h(x_{1k}), \quad (3b)$$

from which the EKF is realized as the set of prediction equations

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{1k-1|k-1}, u_k, \hat{x}_{2k-1|k-1}, \theta) \quad (4a)$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k, \quad (4b)$$

together with the set of correction or update equations,

$$\hat{y}_k = y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) \quad (5a)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (5b)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (5c)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \hat{y}_k \quad (5d)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (5e)$$

which are solved iteratively, where

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k-1|k-1}, u_k} \quad \text{and} \quad H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k|k-1}} \quad (6)$$

The EKF is the heart of the digital twin, as it combines model predictions with measurement feedback to estimate unmeasured states and boundary conditions, and predicts future behavior. However, it can perform poorly for two reasons. First, the state update (5d) can produce non-physical values for states, such as relative humidity values above 100%. When these are

substituted into the prediction model (4a), the model may fail because  $f$  was not defined for these non-physical conditions. Second, the Jacobians (6) need to be evaluated accurately. An inaccurate numerical approximation may cause the EKF to diverge. This occurs because (1) is numerically stiff, and the Jacobian can be ill conditioned. Therefore, constraints on the states must be explicitly enforced when the state is updated, and symbolic expressions for the Jacobians are needed. Even then, the EKF may diverge and alternative algorithms such as the constrained ensemble Kalman filter (EnKF)<sup>(2)</sup> and optimization-based constrained estimators<sup>(3)</sup> should be considered.

### 3.2 Constrained EKF

The standard EKF state update (5d) is the solution to

$$\hat{x}_{k|k} = \arg \min_x J_k(x), \quad (7)$$

where

$$J_k(x) = \|x - \hat{x}_{k|k-1}\|_{P_{k|k-1}^{-1}}^2 + \|y_k - H_k x\|_{R_k^{-1}}^2 \quad (8)$$

If the constraints on the state can be represented as  $Ax \in \mathcal{A}$  for some matrix  $A$  and convex set  $\mathcal{A}$ , then (5d) may be computed instead by numerically solving

$$\hat{x}_{k|k} = \arg \min_x J_k(x) \quad \text{subject to} \quad Ax \in \mathcal{A}. \quad (9)$$

This enforces the constraint on the mean  $\hat{x}_k$  and ensures that the forward simulation model will compute  $\hat{x}_{k+1|k}$  in (4). As this method does not enforce a constraint on  $P_{k|k-1}$ , probability density function (PDF) truncation methods may be used for this purpose. These methods first compute the standard state update (5d), and if  $\hat{x}_{k|k} \notin \mathcal{A}$ , then PDF truncation is performed, and  $\hat{x}_{k|k}$  and  $P_{k|k}$  are corrected to satisfy the constraints. For systems with hundreds of states, this is an effective way to realize a building HVAC digital twin<sup>(4)</sup>.

For larger systems, the constrained EKF is numerically expensive. The constrained ensemble Kalman filter is an alternative for such cases. A conventional ensemble Kalman filter simulates an ensemble of initial conditions and computes the covariance numerically. State constraints can be enforced by solving a numerical optimization similar to (9). This does not require any Jacobian calculation, and the covariance propagation does not require a matrix inversion, making it suitable to large scale digital twin applications.

## 4. Tools for HVAC Digital Twins

*Modelica*<sup>1</sup> is a computer language for modeling multiphysical, heterogeneous systems such as HVAC systems in buildings. It is equation-based so that mathematical equations may be transcribed naturally into



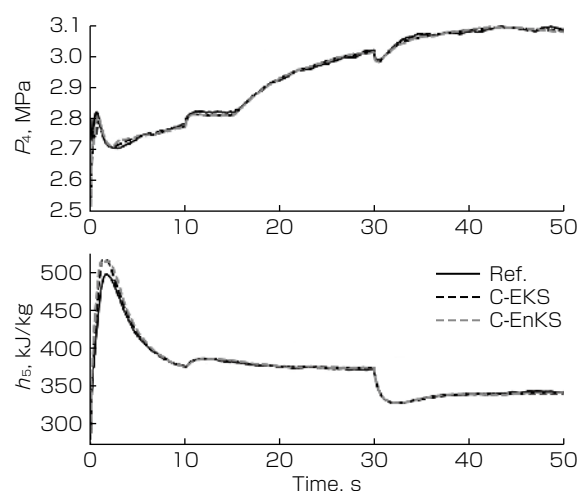
the language. It is also object-oriented for organization, so that large models of complex, hierarchical systems may be composed from libraries of components. This composability allows the structure of the model to mimic the structure of the physical system. Together, these characteristics enable reuse of the Modelica model in its operational phase as a digital twin.

A key technology is the Functional Mockup Interface (FMI)<sup>2</sup>, which is a standard for sharing and simulating Modelica models. A Modelica model is compiled into a Functional Mockup Unit (FMU), which is a software package that allows the simulation to be executed on a variety of platforms, such as in Python<sup>3</sup> or MATLAB<sup>4</sup>. An FMU allows for two operations that enable realization of constrained estimators. First, the state may be reset, enabling the state update (4a) and (5d) or (9). Second, Jacobians (6) may be computed, although the standard allows for these to be computed numerically. This means a constrained estimator can be realized in Python or MATLAB in a few lines of code.

However, Modelica and FMI do have limitations. There is no gradient operator in the Modelica specification, so it is not possible to compute a symbolic Jacobian. Moreover, as an FMU is an executable, the symbolic aspects of the original model are compiled away.

The more recently developed project ModelingToolkit.jl, written in the Julia language, is a modeling package built on a symbolic computational algebra framework. It has a number of features that make it particularly appropriate for implementing HVAC digital twins. Like Modelica, it is equation-based and object-oriented, allowing users to construct large, acausal system models from component models. Julia and ModelingToolkit also allow for more symbolic analyses, such as automatic differentiation. This means that a Jacobian may be computed symbolically, ensuring that it is highly accurate when it is evaluated.

We recently developed constrained estimators using ModelingToolkit.jl for a small model of an R32-based vapor-compression cycle with 278 equations. Measurements included the compressor suction and discharge pressures and wall temperatures at the inlet and outlet of each HEX. Smoothing versions of the constrained EKF and EnKF operated on these measurements to generate estimates of two unobserved variables: the pressure at the condenser outlet and the specific enthalpy at the LEV inlet, as shown in **Figure 1**. The estimates track the unobserved variables closely, with a mean percentage error of less than 1% (4).



**Figure 1: Unobserved and estimated condenser outlet pressure and LEV inlet specific enthalpy for prototype vapor-compression cycle written in ModelingToolkit.jl.**

1 <https://modelica.org>

2 <https://fmi-standard.org>.

3 Python is a registered trademark of the Python Software Foundation.

4 MATLAB is a registered trademarks of The MathWorks, Inc.

## 5. Conclusion

Simulation models used for product development can be reused as a “digital twin” in product operation, but often require modification for this purpose. For an HVAC digital twin, an estimator must be designed and realized in real-time software to combine model predictions and measurements. Some estimators require analytic representations of modeling artifacts, such as Jacobians. Advanced CAE modeling tools, such as Modelica and Julia, support these operations, and should be adopted broadly since their use not only supports model-based design in product development, but also can be extended to development of digital twins.

## References

- (1) Grieves, M., “Origins of the Digital Twin Concept,” ResearchGate, August 2016.
- (2) Deshpande, V., Laughman, C.R., Ma, Y., Rackauckas, C., “Constrained smoothers for state estimation of vapor compression cycles,” 2022 American Control Conference, June 2022.
- (3) Goodwin, G.C., Seron, M.M., De Dona, J.A., “Constrained Control and Estimation: An Optimization Approach,” Springer, 2005.
- (4) Bortoff, S.A., et al., “An extended Luenberger observer for HVAC application using FMI”, 13th Int. Modelica Conf., 2019.

# デジタルツインを活用した装置診断技術

Digital Twin Approach to Diagnostics in Equipment Maintenance

金木佑介\*  
Yusuke Kaneki  
菊澤隆司\*  
Takashi Kikuzawa  
吉村仁美\*  
Hitomi Yoshimura

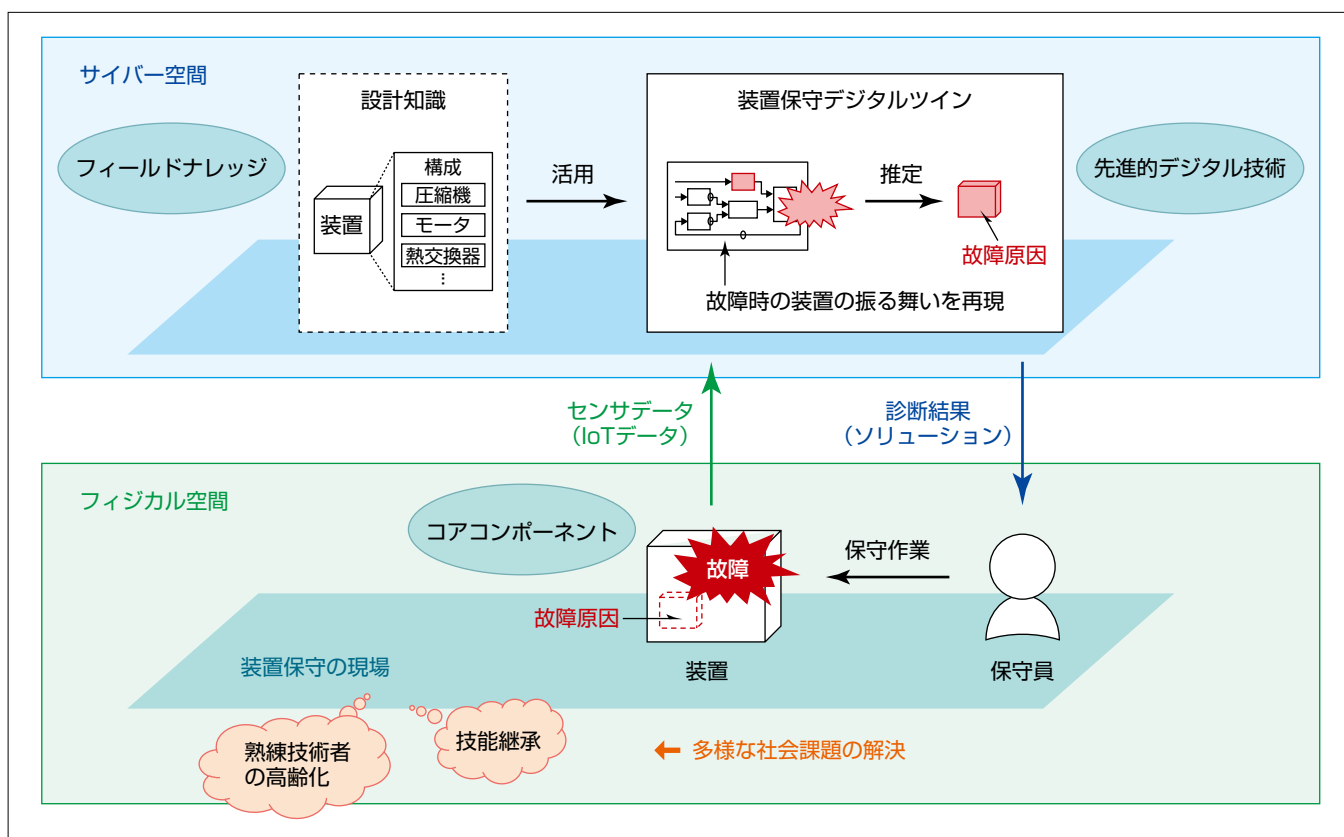
三宅信之\*  
Nobuyuki Miyake  
大谷順司\*  
Junji Otani

## 要 旨

多様化する社会課題の解決を目指して、三菱電機の強いコアコンポーネントに、設計知識や運用ノウハウなどの豊富なフィールドナレッジと、IoT(Internet of Things)やAI、デジタルツインなどの先進的デジタル技術を掛け合わせた、統合ソリューションの提供を進めている。

近年、少子高齢化や生産年齢人口の減少といった社会課題が製造業界へ大きな影響を与えている。特に、装置の故障原因を調査するような保守業務では、高度な技術と経験やノウハウが要求される一方で、熟練技術者の勘や経験といった暗黙知に大きく依存しており、熟練者の高齢化とそれに伴う若手への技能継承が大きな課題になっている。

そこで、デジタルツインを活用した装置診断技術を開発した。この技術は、当社が持つ装置の設計知識を活用して故障時の装置の振る舞いをデジタルツインで再現し、故障原因と振る舞いとの関係をモデル化する。そして、実際に故障した装置の振る舞いをセンサデータとして取得し、モデルと比較することで故障原因を推定する。また、この技術を適用し、装置から故障時のセンサデータをクラウドへ収集し、保守員へ故障原因と対処法を提示するプロトタイプシステムを構築した。この技術によって、熟練者のノウハウを形式知化し、診断業務の均質化と効率化を実現するとともに、技能継承といった社会課題の解決に貢献する。



## デジタルツインを活用した装置診断技術

当社が持つフィールドナレッジ(装置の設計知識)を活用して、故障時の装置の振る舞いをデジタルツインで再現し、故障原因と振る舞いとの関係をモデル化する。故障時の装置のセンサデータとモデルから故障原因を推定し、保守員へ診断結果として提供する。保守員が診断結果を見ながら保守作業を行うことで、作業の均質化と効率化を実現する。それによって、熟練技術者の高齢化やそれに伴う技能継承といった社会課題解決に貢献する。

## 1. ま え が き

当社は、多様化する社会課題の解決に向けて、100年培ってきた経営基盤の強化と事業モデルの変革によって、グループ内外の力を結集した統合ソリューションの提供を進めている。当社の強いコンポーネントに、豊富なフィールドナレッジと先進的デジタル技術を掛け合わせることで価値を創出し、活力とゆとりのある社会の実現を目指す。

本稿では、統合ソリューションを支える技術開発の事例として、デジタルツインを活用した装置診断技術について述べる。この技術は、当社が持つ装置の設計知識や運用ノウハウなどのフィールドナレッジをIoTとデジタルツインで形式知化し、装置保守業務での故障原因の診断作業の均質化と効率化を実現する。それによって、顧客のダウンタイムを削減し、そして、少子高齢化や生産年齢人口の減少といった社会課題の解決に貢献する。

## 2. 製造業を取り巻く社会課題

総務省の情報通信白書<sup>(1)</sup>によれば、日本は、少子高齢化によって生産年齢人口が減少することが推計されている。総人口に対する生産年齢人口の割合は、2020年の59.1%から2040年には53.9%に減少すると言われており、日本の経済や社会に大きな影響を与える社会課題になっている。また、国際連合経済社会局の世界人口推計を見ると、世界的にも生産年齢人口は減少傾向にあり、欧州や北米、東・東南アジア地域で日本と同様の課題を抱えることになる。

このような中、製造業界でも人材不足と高齢化が大きな影響を与えている。特に、装置の点検や故障した装置の診断、修理を行う保守業務では、高度な技術と知識が必要とされる一方、熟練技術者の暗黙的な勘や経験に大きく依存しており、熟練技術者の高齢化に伴う若手技術者への技能継承が深刻な問題になっている。

## 3. 装置保守現場の課題

装置保守の現場では、装置の故障が発生した後に保守員が現場へ向かって、装置で発生している外部や内部の現象をセンサデータなどを見ながら診断し、故障原因を特定する。診断作業は、サービスマニュアルなどを用いて行うが、顧客ごとの設置環境や装置の状態なども考慮して行われることから、保守員の設計知識や経験、勘が作業品質に大きく影響する。そのため、保守員の教育や技術伝承を強化しているものの、グローバルでのサービス展開を考えると、距離や言葉、慣習などの違いも含めて様々な課題があ

る。今後、製造業の人材確保が難しくなってくる中で、さらにグローバル市場でも、均質な作業品質を保っていくためには、AIやIoT、デジタルツインなどの先進的デジタル技術を活用した新たな取組みが必要である。

## 4. 装置保守現場に対するデジタルツイン活用

デジタルツインは、文字どおり現実世界の双子をデジタル空間上に作る概念である。デジタルツインは、あらゆる業界で注目を集めているが、特にその効果を期待されている業界の一つが製造業である。昨今、IoT化が進んで、装置や製造ラインから収集したデータをクラウド上で分析し活用する取組みが発展してきた。このように装置からリアルタイムに収集した装置の状態を、装置の振る舞いを再現するモデルへ入力することで、デジタル空間上に現実世界とほぼ同様の装置とその状態を再現する。それを用いて装置保守業務の品質向上や作業効率改善、試作費用削減、アフターサービス向上などを図ることができる。例えば、装置保守業務では、装置や製造ラインに何らかの異常が発生した場合に、デジタル空間上にある装置や製造ラインの状態を分析して、リアルタイムに異常の原因を特定する。ここで、従来のデータ分析と異なるのは、装置の内部状態が再現されている点である。装置のデジタルツインでは、設計知識を用いて装置のモデルを作って、そこに現実世界の状態を反映している。そのため、異常がなぜ起きたのかを設計知識を用いて詳細に分析し説明できる。このように、装置のデジタルツインでは、装置の設計知識を用いてモデルを構築することが重要であり、モノづくり企業の強みを生かしたソリューションを構築できる。そこで、デジタルツインを装置保守現場へ適用する技術開発に取り組んでいる。

## 5. デジタルツインを活用した装置診断技術

### 5.1 装置診断技術の概要

装置保守現場の課題を解決するため、デジタルツインを活用した装置診断技術を開発した。装置診断技術は、故障時の装置から装置の状態を表すセンサデータを収集し、そのセンサデータから故障原因を推定する技術である。それによって、保守作業の品質を均質化するとともに作業自体の効率化を図る。センサデータとは、装置の内外に取り付けられたセンサが取得する値であり、装置の制御や保守などのために利用される。例えば、センサデータには、温度や電流値、振動、圧力など、装置によって様々なものがある。この技術では、特に装置の外から取得できるセンサデータを用いて故障原因を推定する。

この技術は、装置状態モデルと装置診断機能で構成する(図1)。装置の故障状態をデジタルツインで再現した装置状態モデルと実際のセンサデータを用いて、装置診断機能が故障の原因候補とその可能性を算出する。保守員は、装置診断機能が算出した原因候補を受け取って、可能性の高い原因から装置の保守サービスを開始する。これによって、装置診断機能が設計知識に基づいて診断を補助し、保守員の作業品質を均質化する。さらに、実環境にある装置のセンサデータをクラウドで常に収集し蓄積することで、故障発生時にクラウド上のデータを用いて瞬時に診断を行うことができる。保守員が現場に駆け付けたときには、既に診断結果が出ており、それを手元のパソコンやタブレットで参照しながら、速やかに診断作業を行うことができる。

## 5.2 装置状態モデル

装置状態モデルは、故障原因とその故障が発生しているときの装置の振る舞いを表すセンサデータとの関係を保持したモデルである(図2)。物理量伝搬モデル、センサ値相関モデル、状態分析モデルの三つのモデルから構成される。

物理量伝搬モデルは、装置を動かすエネルギーなどの物理量が機器の構成要素間を伝搬する様子を計算式で表すものである。このモデルを使って、装置の正常時と故障発生時の装置の振る舞いをシミュレーションし、その際に装置

のセンサデータがどのように振る舞うのかを取得する。

センサ値相関モデルは、物理量伝搬モデルによるシミュレーションから得られたセンサデータの振る舞い、つまり値が変化するパターンと故障との関係を保持したものである。ある故障が発生したときに、その故障を特徴付けるセンサデータの値がどのようなパターンを見せるのか、そういった知識を形式知化するモデルである。

状態分析モデルは、装置に故障が生じた際に現れる症状やエラーコードと故障の関係を表すものである。あるエラーコードが発生した場合に、どのような故障原因が考えられるか、その知識を形式知化するモデルである。

## 5.3 装置診断機能

装置診断機能は、装置状態モデルと装置のセンサデータから故障原因を推定する仕組みである(図3)。この機能は、故障した装置から取得したエラーコードと故障前後のセンサデータを入力して、誤診断抑制機能とセンサ値パターン判定機能によって故障原因を推定する。

誤診断抑制機能は、故障時のエラーコードと装置状態モデルに含まれる状態分析モデルを用いて、エラーコードの発生原因になり得る故障原因を幾つか特定する。例えば、エラーコードがE001の場合、故障A、故障Cを故障原因の候補として抽出し、センサ値パターン判定機能に渡す。このように、誤診断抑制機能は、状態分析モデルを用いて、エラーコードから故障原因を絞り込むことで、センサ値パターン判定機能の精度を向上させる。一方で、故障の状況によっては、エラーコードが発生しない場合も存在する。その場合は、誤診断抑制機能は動作せず、センサ値パターン判定機能だけで推定する。

センサ値パターン判定機能は、誤診断抑制機能から渡された故障原因候補とセンサデータを入力してセンサ値相関

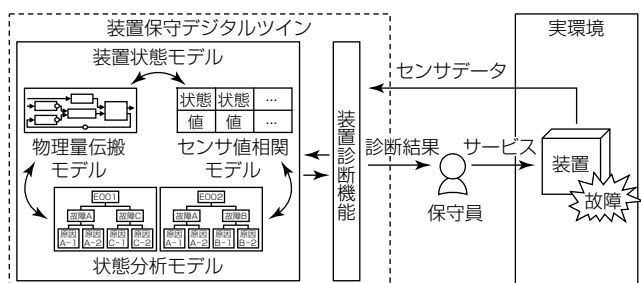


図1. 装置診断技術の概要

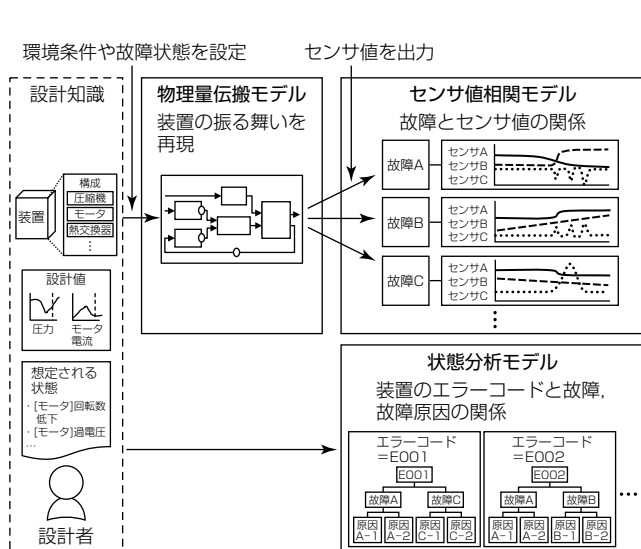


図2. 装置状態モデルの仕組み

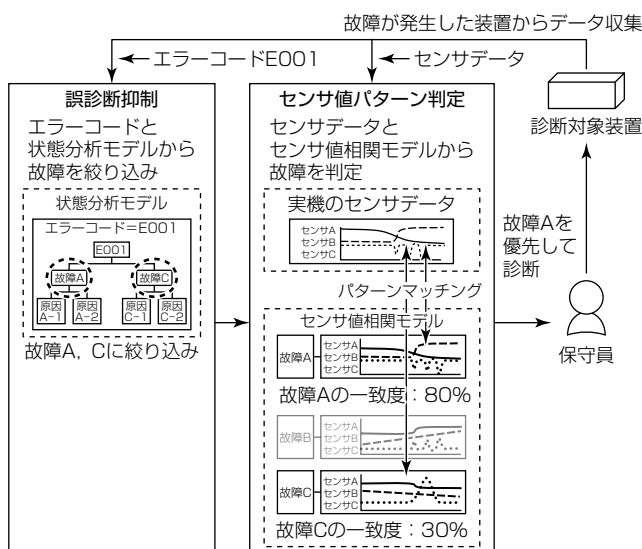


図3. 装置診断機能の仕組み



モデルから故障原因を推定する。故障原因候補に基づいてセンサ値相関モデルから故障原因候補ごとに故障時のセンサデータのパターンを取得する。センサ値相関モデルから得たパターンと故障した装置のセンサデータのパターンを比較し類似度を算出する。類似度の高い故障原因から調査することで、診断作業を効率化する。

## 6. 装置診断プロトタイプシステム

### 6.1 装置診断プロトタイプシステムの概要

このシステムは、装置からセンサデータをクラウドへ収集し、保守員へ故障原因と対処法を提示するクラウドベースのプロトタイプシステムである。

### 6.2 クラウドの構成

このシステムは、モデル管理基盤、サービス提供基盤、データ収集基盤で構成する(図4)。それぞれの基盤は別のクラウドシステムとして構築し、グローバル展開を意識して国をまたいで配置されることを前提に設計している。モデル管理基盤は、装置状態モデルを管理するクラウドシステムである。サービス提供基盤は、保守員へ装置診断機能を提供するクラウドシステムである。データ収集基盤は、実際に稼働する装置からセンサデータを常時収集し蓄積するクラウドシステムである。データ収集基盤とサービス提供基盤を分離することで、サービス提供基盤が既存のデータレイクや新規のデータ収集基盤と容易に接続できるようにしている。モデル管理基盤はモデルを作成する日本に配置し、モデルへのアクセス制限や各国への輸出管理などの制御を可能にする。サービス提供基盤とデータ収集基盤は、GDPR(General Data Protection Regulation)など各国のデータ保護法の中で整備されつつあるデータの越境規制を考慮し、サービス提供国に配置する。

### 6.3 クラウドサービスの構成

このシステムは、AWS<sup>(注1)</sup>上のクラウドサービスとして構築した(図5)。モデル管理基盤、サービス提供基盤、データ収集基盤をそれぞれVPC(Virtual Private Cloud)で構成し、各基盤の間はAPI(Application Programming Interface) Gatewayを置き分離した。装置診断機能や診

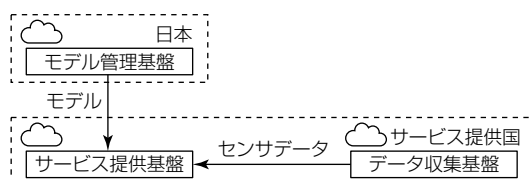


図4. クラウドの構成

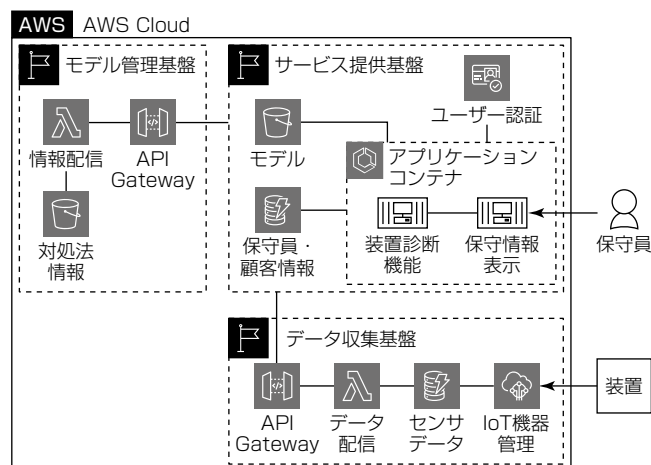


図5. クラウドサービスの構成

断結果を保守員に表示する保守情報表示機能は、アプリケーションコンテナとして構成し、サービス提供国に応じて容易に移行できる構成にした。保守情報表示機能は、保守員手元のパソコンやタブレットなど様々な端末からアクセスできるようブラウザベースのアプリケーションにした。

(注1) AWSは、Amazon Technologies, Inc.の登録商標である。

### 6.4 プロトタイプシステムの構築

情報技術総合研究所内の当社製装置を対象にプロトタイプシステムを構築した。対象装置からセンサデータを取得し、AWSへ定期的にデータを蓄積した。装置に故障を発生させる仕組みを取り付けて、特定の故障を発生させて装置診断を行ったところ、実際のセンサデータとセンサ値相関モデルのパターンから故障原因を推定できることを確認した。

## 7. む す び

統合ソリューションを支える技術開発の事例として、デジタルツインを活用した装置診断技術について述べた。この技術は、装置の設計知識や故障診断のノウハウといったフィールドナレッジを装置状態モデルとして形式知化し、故障時の装置の振る舞いをデジタルツインで再現する。そして、IoTで装置から故障時のセンサデータを収集し、装置状態モデルとセンサデータから故障原因を推定する。フィールドナレッジを形式知化する取組みであり、熟練者の高齢化に伴う技能継承といった業界や社会の課題解決にも貢献できると考えている。

今後も、当社の強みを生かした統合ソリューションを実現するための技術開発を進めて、活力とゆとりのある社会の実現を目指す。

### 参考文献

- (1) 総務省：情報通信白書令和3年版(2021)  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/index.html>