

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2021
Vol.94 No.

3

特集 富士電機のDX (デジタルトランスフォーメーション)



特集 富士電機の DX（デジタルトランスフォーメーション）

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デジタルトランスフォーメーション（DX）は、今後の企業経営に必須とされています。

富士電機では、IoT や AI を活用したソリューションやそのための IoT 関連技術や AI 技術、シミュレーション技術の取組みを強化しています。

本特集では、富士電機の DX を推進するそれらのソリューションや技術について紹介します。

表紙写真

富士電機の DX の取組みとして、デジタルツイン構築と高効率生産ライン構築への適用、アナリティクス・AI と FA への適用、研究開発への高度なシミュレーション技術の適用（SiC-MOS 界面の分子シミュレーション）を表現している。



目 次

特集 富士電機の DX（デジタルトランスフォーメーション）

〔特集に寄せて〕 DX は気づきから始まる 森川 博之	129 (3)
--------------------------------	---------

〔現状と展望〕 富士電機の DX（デジタルトランスフォーメーション） の現状と展望 瀬谷 彰利 ・ 安川 和行 ・ 引地 正則	130 (4)
---	---------

DX ソリューション

リアルタイムで不良品検出を実現する AI を適用した 機械装置向け診断ソリューション 湯尾 幸輝 ・ 島村 明夫 ・ 宗像 昌朗	141 (15)
--	----------

AI 技術適用により蒸気利用設備の CO ₂ 排出量削減に 貢献する熱 EMS ソリューション 山口 貴久 ・ 竜田 尚登	146 (20)
--	----------

オペレーション業務の効率化に貢献する IoT・AI を 活用した自動販売機運用サービス 片山 修吾 ・ 後閑 武 ・ 起 賢一	151 (25)
---	----------

制御システムのライフサイクルフルサポートに貢献する IoT を活用した遠隔監視診断システム 原口 隆	157 (31)
--	----------

IoT を活用した現場業務の全体最適を支援する O&M ソリューション 喜多村 卓 ・ 山田 隆雄	162 (36)
--	----------

DX を支える技術

富士電機のアナリティクス・AI 浅野 貴正 ・ 渡辺 拓也 ・ 白木 崇志	168 (42)
--	----------

設備保全の技術伝承・情報共有を推進するためのテキスト認識技術 真鍋 章 ・ 谷本 恒野 ・ 浅野 貴正	174 (48)
--	----------

富士電機のサイバーセキュリティの取り組み 梅崎 一也 ・ 吉田 聡	179 (53)
--------------------------------------	----------

拡張現実を用いた保守支援技術 城戸 武志 ・ 大秋 大輔	184 (58)
---------------------------------	----------

パワーエレクトロニクス機器のモデルベースシステムズエンジニアリング 吉田 収志	189 (63)
--	----------

デジタルツールの活用による生産ライン構築プロセスの変革 瀬田 学	194 (68)
-------------------------------------	----------

シミュレーションによる騒音推定技術 金子 公寿 ・ 大野 和彦 ・ 山本 勉	199 (73)
---	----------

分子レベル計算を活用した SiC-MOSFET の界面解析シミュレーション 広瀬 隆之	204 (78)
--	----------

ウイルス不活化技術のための UV 空間照射光量と気流の連成解析 —— シミュレーションを活用した開発プロセスの変革 —— 松本 伸 ・ 浅田 規 ・ 大栗 延章	209 (83)
--	----------

解 説

BERT 半教師あり学習	214 (88)
--------------	----------

新製品紹介論文

「MONITOUCH X1 シリーズ」	215 (89)
---------------------	----------

略語・商標	218 (92)
-------	----------

Contents

Fuji Electric's Digital Transformation (DX)

[Preface] From Awareness to DX MORIKAWA, Hiroyuki	129 (3)
---	---------

Fuji Electric's Digital Transformation (DX): Current Status and Future Outlook SEYA, Akitoshi YASUKAWA, Kazuyuki HIKICHI, Masanori	130 (4)
--	---------

DX Solutions

Diagnostic Solution for Machinery and Equipment That Uses AI for Real-Time Detection of Defective Products YUO, Yukiteru SHIMAMURA, Akio MUNAKATA, Masaaki	141 (15)
--	----------

AI-Based Thermal EMS Solution that Contributes to the Reduction of CO₂ Emissions from Steam Powered Facilities YAMAGUCHI, Takahisa TATTA, Naoto	146 (20)
--	----------

Vending Machine Operation Service Using IoT and AI to Increase Operational Efficiency KATAYAMA, Shugo GOKAN, Takeshi OKOSHI, Kenichi	151 (25)
--	----------

Remote Monitoring and Diagnostic System Utilizing IoT That Contributes to Full Life Cycle Support of Control Systems HARAGUCHI, Takashi	157 (31)
---	----------

O&M Solution That Supports the Total Optimization of Field Operations Using IoT KITAMURA, Takashi YAMADA, Takao	162 (36)
---	----------

Technologies that support DX

Fuji Electric's Analytics and AI ASANO, Takamasa WATANABE, Takuya SHIRAKI, Takashi	168 (42)
--	----------

Text Recognition Technologies to Facilitate Technology Transfer and Information Sharing in Equipment Maintenance MANABE, Akira TANIMOTO, Koya ASANO, Takamasa	174 (48)
---	----------

Strengthening Cybersecurity of Fuji Electric UMEZAKI, Kazuya YOSHIDA, Satoshi	179 (53)
---	----------

Maintenance Support Utilizing Augmented Reality KIDO, Takeshi OAKI, Daisuke	184 (58)
---	----------

Model Based Systems Engineering for Power Electronics Equipment YOSHIDA, Atsushi	189 (63)
--	----------

Digital Transformation of Production Line Construction Processes by Utilizing Digital Tools SHIBUTA, Manabu	194 (68)
---	----------

Simulation Technology for Acoustic Noise Prediction KANEKO, Kimihisa ONO, Kazuhiko YAMAMOTO, Tsutomu	199 (73)
--	----------

Analytical Simulation Using Molecular-Level Calculation for SiC-MOSFET Interfaces HIROSE, Takayuki	204 (78)
--	----------

Interaction Analysis of Spatial UV Illumination Intensity and Airflow for Virus Inactivation Technology:Development Process Transformation Using Simulation MATSUMOTO, Noboru ASADA, Tadashi OGURI, Nobuaki	209 (83)
---	----------

Supplemental Explanation

Bidirectional Encoder Representations from Transformers Semi-Supervised Learning	214 (88)
---	----------

New Products

"MONITOUCH X1 Series"	215 (89)
------------------------------	----------

Abbreviations and Trademarks	218 (92)
-------------------------------------	----------

特集に寄せて

DX は気づきから始まる

From Awareness to DX

森川 博之 MORIKAWA, Hiroyuki

東京大学大学院工学系研究科 教授 博士 (工学)



デジタルが隅々にまで入り込むことで、あらゆる事業領域の変革が促され、産業構造、経済構造、社会構造までもが大きく変わっていくことになる。現在の世の中のあり方は過渡的なものであり、デジタルで新しいビジネスの余地が必ず生まれるというマインドでもって、新しい産業や社会制度の確立を目指していかなければいけない。

悩ましいのは、どのように変わっていくかを予測できないことである。

例えば、洗濯機の登場で、家事労働の負担が大幅に減ることは明らかだったが、洗濯機が社会に与えた影響はこれにとどまらなかった。衛生観念が大きく変わったことで、毎日洗濯するようになって、衣類市場が一気に増大したことも、社会にきわめて大きな影響を与えた。今から振り返れば当たり前のことであるが、“洗濯機で衛生観念が変わる・衣類の需要が増える”ことを洗濯機の登場前から認識していた人は誰もいなかったろう。

英国のフィンテック（金融と情報技術を結び付けたビジネス）ベンチャーのタンデムという企業が“銀行の窓口サービスを考えるために”作成した面白いビデオがある。パブが銀行の窓口のようだったらどうなるかを示したビデオだ。客がビールを注文しようとする、「番号札をお取りください」と言われるところから始まる。自分の番号がきてカウンターに行ったら、「担当者と呼んできます」と言われ、待ち時間にアンケートの記入を求められ、最後の支払い時にはビール代金に加えて手数料までとられるというビデオだ。

パブも銀行の窓口も客にサービスすることは同じであるのに、サービスの仕方がまったく異なる。言われてみれば当たり前のことであるが、日常生活の中でこの違いに気づくことはない。

経営学者のピーター・ドラッカーの言葉に、「イノベーションに対する最高の賛辞は、“なぜ自分は思いつかなかった”である」というものがある。言われてみれば当たり前であることに、人間はなかなか気づかない。

いまだ満たされていない隠れたニーズに気づくことが DX の起点だ。隠れたニーズに気づくことは容易ではない

と認識しながら、社内外の現場に出向き、顧客に深く入り込み、デジタル化すべきプロセスを見出す努力をし続けるしかない。

少なくとも、デジタルの技術面の特徴にこだわって“プロダクトアウト（作り手優先）”となってはいけない。身近なところにもデジタルが有効となるフィールドはあるはずだ。現場に出向き、顧客を深く観察しながら、これらを見出す活動を積極的に行うことが欠かせない。

カスタマーサクセスとは、顧客（カスタマー）視点の事業開発のことである。社外であっても、社内であっても、デジタルを使う現場の人達全てがカスタマーとなる。カスタマーサクセスを実現するためには、“共感”と“利他”が必要だ。現場に深く共感し、現場の隠れたニーズを利他の心でもって引き出す。このような人材が、デジタルにおいても必要となる。現場とテクノロジーをつなぐ人材と言っても良い。必ずしもテクノロジーに精通している必要はない。つなぐことで価値を創出することのできる人材をきちんと評価することでデジタルが花開く。

そして、カスタマーサクセスにつながる気づきを得るために必要となるのが多様性だ。いろいろなバックグラウンドの人達が集まることで、“気づき”が得やすくなる。多様性はイノベーションに不可欠の要素だと言われ続けているが、今のような不確実な世の中においてこそ、より重要性が高まる。多様性を確保しながら、カスタマーサクセスの視点でもってデジタル化すべきプロセスに気づいたものが、ビジネスの勝者となる。

デジタルは経済の構造を過酷なまでに変えていく。COVID-19 で今まで当然と考えていた土台が崩れ落ち、テレワーク、オンライン講義、遠隔診療などいろいろな試みがなされている。未来を先取りしたデジタル社会の壮大な実験が始まり、デジタルシフトが加速している。

後戻りすることなく、デジタルシフトを加速し、社会や産業や経済の仕組みそのものの再定義を進めていかなければいけない。COVID-19 で得られた“気づき”をも大切にしながらデジタルの土俵に上がって、将来を深く洞察し、新しい社会や事業の構築につなげていきたい。

富士電機の DX (デジタルトランスフォーメーション) の現状と展望

Fuji Electric's Digital Transformation (DX): Current Status and Future Outlook

瀬谷 彰利 SEYA, Akitoshi

安川 和行 YASUKAWA, Kazuyuki

引地 正則 HIKICHI, Masanori

① まえがき

近年、社会のデジタル化が進んでおり、社会全体が DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) 化という不可逆的な変化に直面している。DX の定義は種々提案されているが、経済産業省は“デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン (DX ガイドライン)⁽¹⁾”の中で、“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”と定義しており、現状からの改善や変化ではなく、根本からの変革であることを強調している。

富士電機は、電力・交通などの社会基盤、製鉄や化学、自動車製造、電気・電子などの産業用設備やシステム、そしてビルや店舗、自動販売機 (自販機)、車載機器などの民生分野において事業を展開している。富士電機の注力領域の一つが製造業における OT (Operational Technology) 領域であり、近年の IoT (Internet of Things) の広がりとともにデータとデジタル技術の活用が進んでおり、IT (Information Technology) との融合による新たな価値の創出が期待されている。

本特集においては、富士電機の DX に対応した IoT システムを利用したソリューションと、その関連技術を紹介する。

本稿においては、製造業を中心に、DX 化に対する各国および日本の状況と課題、ならびに富士電機の取り組みについて述べる。

② 製造業における各国の DX 化の状況

製造業におけるデジタル化の流れは、2011 年にドイツで開催されたハノーバーメッセにおいて、ドイツから Industrie4.0 (I4.0) の構想が第 4 次産業革命として発表されたことを契機に、各国に広がり拡大して

きた。その流れは、“DX 化”というより大きな社会全体の潮流として世界を動かす状況になっている。

2.1 ドイツ⁽²⁾

I4.0 の発表から、2021 年で 10 年目の節目を迎えた。当初は要素技術やリファレンスアーキテクチャモデル、各種プラットフォーム構想などのコンセプトの紹介から始まったが、この間着実に進展してきた。

現実世界の生産現場をアセット (フィールド機器、設備、ソフトウェア、ドキュメントなど) の集合と捉え、それを仮想世界でオブジェクト指向的に構成して管理するアセット管理シェル (AAS: Asset Administration Shell) は、オープンソースとして提供されている。⁽³⁾

データ共有化のプラットフォームとしての IDS (International Data Spaces) 構想⁽⁴⁾に関しては、2020 年に欧州統合データ基盤プロジェクト (GAIA-X)⁽⁵⁾ を立ち上げ、実証試験が開始されており、エコシステムの構築環境の整備が進んでいる。

データ交換や通信に関する国際標準規格 OPC UA による、各設備の情報モデル (データ構造と意味) の標準化作業は、対象を拡大しながら継続的に実施されている。

2020 年には、AAS の整備や I4.0 としての主にデジタルツイン (Digital Twin: 3.1 節参照) への対応を議論する業界団体として IDTA (Industrial Digital Twin Association) が設立された。産業のデジタル化を目指して全方位で取り組みが進んでいる。

2.2 米 国

オバマ政権下で、高度な技術を要する製造産業で米国のリーダーシップを確保するために、Advanced Manufacturing 政策⁽⁶⁾ が開始され、そのための全国的なネットワークとして Manufacturing USA が開始された。先端研究から応用への橋渡しとして、現在は 16 の製造技術の革新研究所が設立され、活動している。要素技術をシステムとして使い、製造現場を設計運用していくシステムズエンジニアリングへの投資も

行っており、NIST（米国国立標準技術研究所）では年間 1,000 万ドル規模の研究・開発が継続的に行われている。

また、2014 年に民間企業が主体となって設立された IIC（Industry IoT Consortium）⁽⁷⁾ は、テストベッドを通じて、IIoT（Industrial Internet of Things）を実現するための共通技術基盤の特定とその実用性検証を推進してきた。リファレンスアーキテクチャやセキュリティフレームワークなども代表的な成果物となっている。2019 年以降は、IIoT の実現を加速するために、幅広い業界分野での IIoT ソリューション導入の成功事例に示す活動を推進している。

2.3 中国

2015 年に、自国の製造業を発展させるため“中国製造 2025（Made in China 2025）”⁽⁸⁾ を提唱した。目標としては、2025 年までの製造強国入り、2049 年までの製造強国のリーダーの地位を確立することを掲げている。

2020 年には、“新型基礎設施建設（新基建）”⁽⁹⁾ を打ち出し、産業のデジタル化を支える新型インフラ建設を宣言し、対象として 3 分野を指定している。第一が、5G（第 5 世代移動通信システム）を代表とする通信ネットワーク、AI（Artificial Intelligence）などの新技術、ならびにコンピュータインフラを包括する“情報インフラ”、第二が、既存のインフラにデジタルを融合させた“融合インフラ”、第三が、研究開発や科学教育などを支えるための“イノベーションインフラ”である。

現在、中国は 5G、AI、量子技術などで世界のリーダー的存在になりつつあるが、巨額の国費投入による産業育成策は米中対立の一因にもなっており、今後の動向には不透明感も漂っている。

2.4 日本

ドイツの動きに触発される形で、2015 年には、ロボット革命イニシアティブ協議会（現ロボット革命・産業 IoT イニシアティブ協議会：RRI）、一般社団法人 インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ（IVI）、スマート IoT 推進フォーラムなど各種団体を設立し、取り組んできた。その後、2017 年には経済産業省が、目指すべき産業の在り方として“Connected Industries”を提唱し、日本は現場のリアルデータの活用を強みとしてデジタル変革を進める方向性を示した。2018 年の DX レポート⁽¹⁰⁾、2020 年の DX レポート 2⁽¹¹⁾では、日本の IT システムの現状を分析し、その将来に警鐘を鳴らし、取り組み強化を訴えてきた。

しかし、現時点でも、欧米、中国などと比較して、

日本の DX 化の遅れが指摘されており、今後の加速化が必要となっている。

2.5 DX 推進に関する日本の課題

“2020 年版ものづくり白書”⁽¹²⁾では、DX 推進のための企業変革力（ダイナミック・ケイパビリティ）の強化とそのため設計力の強化が課題として挙げられた。また、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）によるパンデミックの発生は、グローバルのサプライチェーンの脆弱（ぜいじゃく）性を顕在化させた。そのため、“2021 年版ものづくり白書”⁽¹³⁾では、レジリエンス〔サプライチェーンの強靱（きょうじん）化〕と日本が積極的対応を宣言したグリーン（カーボンニュートラルへの対応）が課題として示されている。

日本の製造現場では、デジタル化の前提条件となる現場データの一元管理にも課題が多い。I4.0 では、設備（機械）同士のコミュニケーションの実現を目指し、データの意味も含めたデータ交換の実現にも取り組んでいる。日本では、これらへの対応の加速が課題である。

[3] 富士電機の DX に対する取り組み

3.1 富士電機の DX への取り組み

富士電機は以前から、計測機器、駆動デバイス、PLC（Programmable Logic Controller）などのフィールドデバイスをキーコンポーネントとして、OT 領域で顧客に各種ソリューションを提供してきた。富士電機の取組みの特徴は、フィールドデバイスからクラウドシステム、サービスまでの垂直統合システムの提供にある。

富士電機では、自社向けと顧客向けの両 DX を推進している。社内では、セキュリティ強化や製品開発、設備や生産ライン設計などへの適用を進めている。顧客向けには、OT 領域で、“Small, Quick Start & Spiral-up”をコンセプトとした IoT システムを中核として位置付け、取り組んできた⁽¹⁴⁾。そして、セキュリティを担保しながらエッジデバイスとクラウドを連携させ、IoT システムに最適制御やエンジニアリングを組み合わせたシステムソリューション群を「Promizer」として展開してきた。DX 化の進展に合わせ、Promizer もアナリティクス・AI の活用へと大きく進化してきている。

また、デジタルツインへの取組みも進めている。デジタルツインとは、“現実世界（フィジカル空間）上のものや動作環境の状態を収集し、仮想世界（サイバー空間）上の動作モデルに入力し、現実世界を再現する技術概念”のことをいい、“デジタル空間上の双子”を意味する。これは、現実世界のある環境の将来

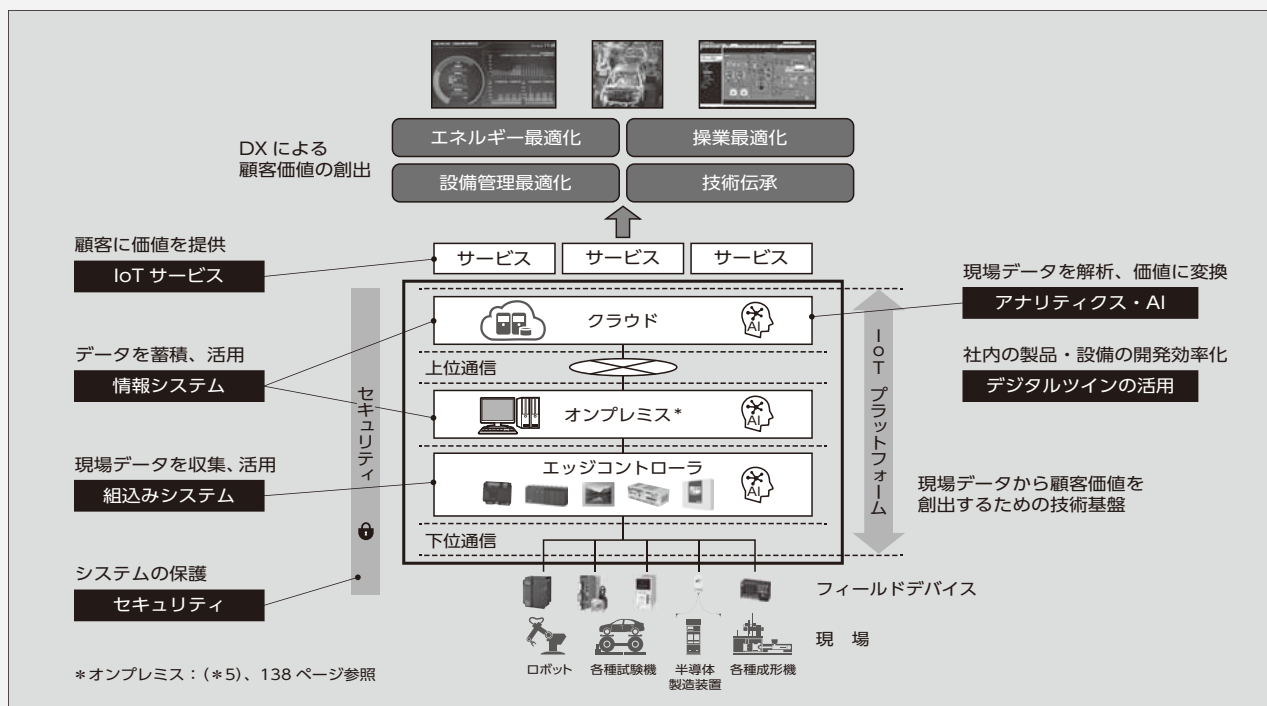


図 1 富士電機の DX への取組みの全体像

の挙動を、仮想世界の中の双子のモデルを使って予測するシミュレーション技術でもある。現在は、社内の製品・設備開発の効率化とリードタイムの短縮を目指して取り組んでいる。

図 1 に富士電機の DX への取組みの全体像を示す。

3.2 DX ソリューション

(1) 運用ソリューション

これまでのモーションシステムでは、生産性の向上のため高速化に主眼が置かれていたが、近年ではエンドユーザーからの製造物の品質を高めたいという要望

が高まり、加工機械における不良品検出率の向上が求められている。

この要望に応えるため、不良品検出精度の高い診断を可能とする診断ソリューションを開発した。これは、サーボシステム、PLC およびプログラマブル表示器などから構成されたモーションシステムに、AI を適用したコントローラの機能モジュールである“診断モジュール”を追加するだけで実現することができる。診断モジュール機能構成を図 2 に示す。

診断機能には、多変量統計的プロセス管理（MSPC：Multivariate Statistical Process Control）技術を

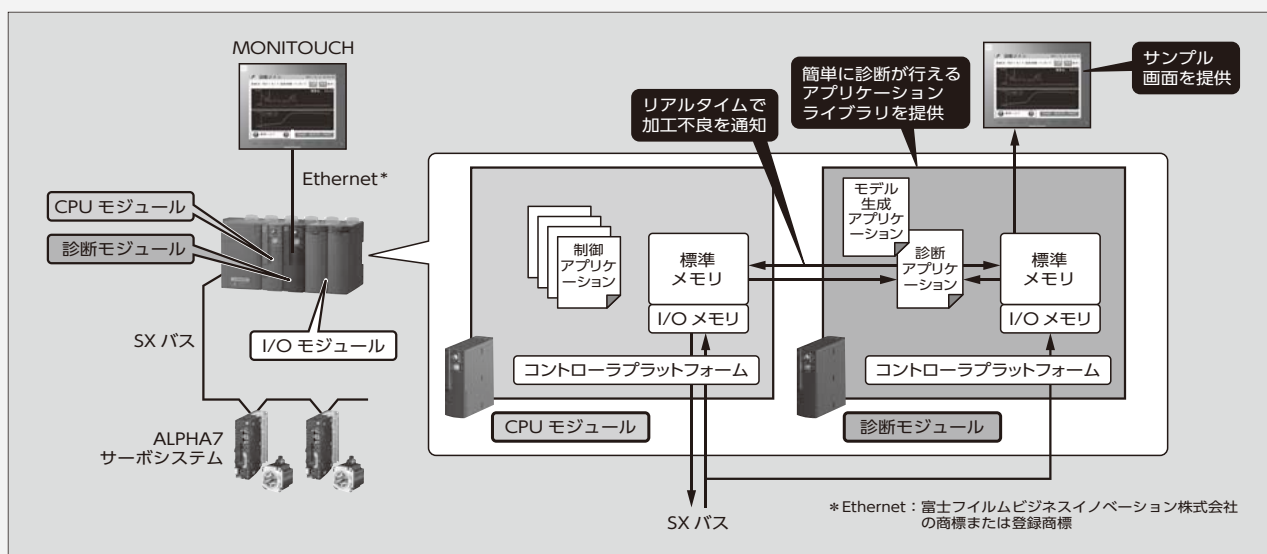


図 2 診断モジュール機能構成

採用しており、関連機能を含む 10 種類のシステムファンクションブロック（SFB：System Function Block）として実装している。ユーザーはこれらの SFB を組み合わせて、診断アプリケーションを構築することができる。これにより、センサなどの外部機器極小化や、人を介したチェック工程削減を実現しながら、今まで検出困難であった異常の予兆検知や、不良品の検出精度向上が可能となる（“リアルタイムで不良品検出を実現する AI を適用した機械向け診断ソリューション”、141 ページ参照）。

産業分野の CO₂ 排出量削減のためには、主な発生源である化石燃料消費を抑えることが必要不可欠である。化石燃料の中でも、都市ガスや A 重油は、その大

部分が生産設備で使用する蒸気を生成するために消費されている。

蒸気利用設備の省エネルギー（省エネ）へのアプローチとして、排熱量を低減させるには、蒸気利用量と排熱量の関係である熱収支の定量的把握が必要となる。そのためには、対象設備に関する深い知識と熱エネルギーの分析スキルが必要であった。その解決のため、蒸気利用設備の熱収支を自動計算し、定量化できる熱収支分析システムを開発した。システム構成を図 3 に示す。

本システムは、富士電機が保有する AI 技術によって、熱収支の変動や差異が発生した場合に、“いつもと違う熱収支状態”の検知と、その要因候補の推定ができる。これにより、従来は困難であった要因分析が容易に行え、運用改善による省エネや異常予知による故障回避、異常発生時の原因調査が実現できる。（“AI 技術適用により蒸気利用設備の CO₂ 排出量削減に貢献する熱 EMS ソリューション”、146 ページ参照）。

スーパーマーケット、コンビニエンスストアなど販売チャネルの拡大により、自販機の 1 台当たりの売上拡大が困難になりつつある。そのため、顧客のオペレーション業務を効率化する、IoT・AI を活用した自販機運用サービスを開発した。自販機運用サービスのシステム構成を図 4 に示す。サービス内容は、次に示す 3 項目であり、クラウド利用によるオンラインでのデータ活用が特徴である。

- 自販機の状態をリアルタイムに参照できるサービス
- オペレーション業務の効率化を支援するサービス
- 外部データや AI の活用により、分析・効率化の効

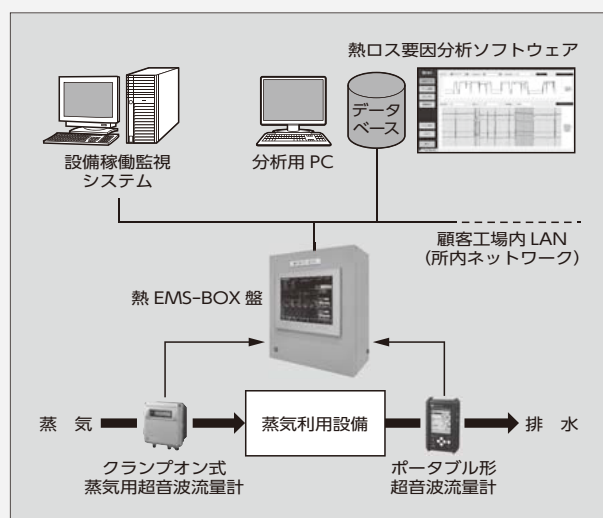


図 3 熱収支分析システムのシステム構成

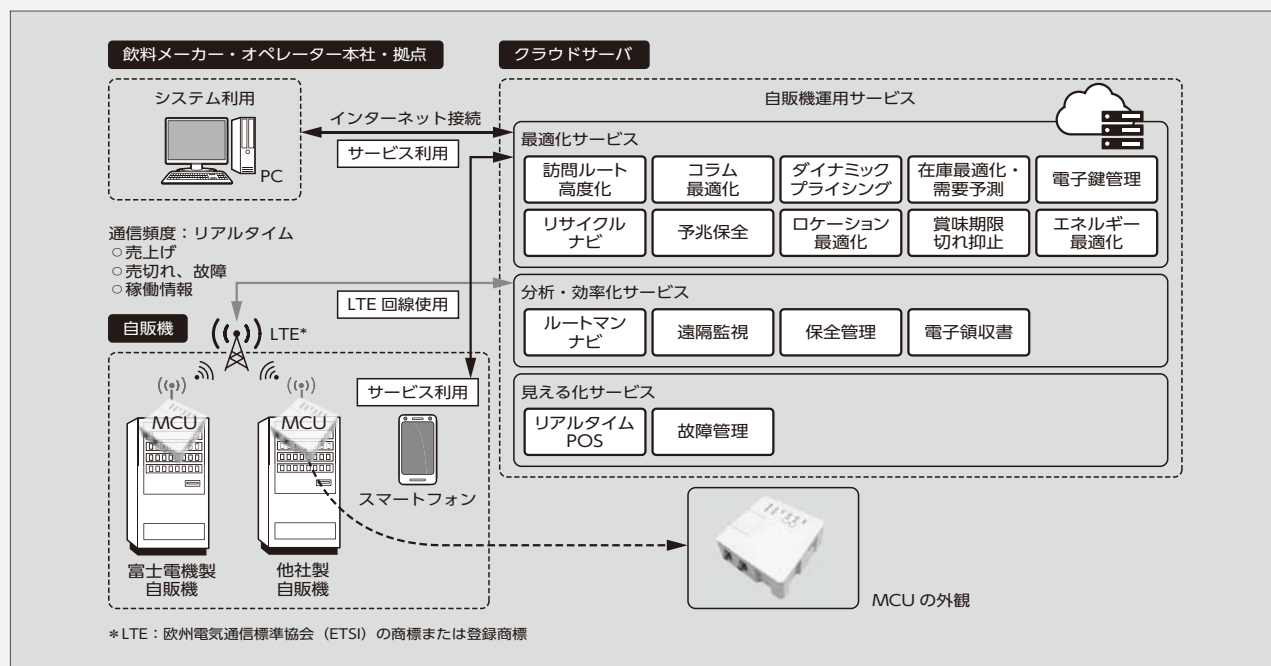


図 4 自販機運用サービスのシステム構成

果を最大化するサービス

これらにより、オペレーション業務の時間削減を実現でき、実証実験では 34% 削減が確認できた（“オペレーション業務の効率化に貢献する IoT・AI を活用した自動販売機運用サービス”、151 ページ参照）。

(2) 保守ソリューション

生産設備の設備保全は、安定操作を目指す上で重要であり、従来の事後保全・予防保全だけでなく予知保全への対応が求められている。遠隔監視診断システムは、これに応えるために、プロセス制御の中核システムである分散型制御システム「MICREX-VieW XX（ダブルエックス）」を対象として、診断機能による劣化の早期発見、点検の最適化、余寿命予測機能（開発中）による延命化・部分更新というライフサイクルフルサポートを提供するものである。本ソリューションにより、突発障害発生の未然防止や障害発生時の復旧時間短縮、保守コスト削減が実現できる（“制御システムのライフサイクルフルサポートに貢献する IoT を活用した遠隔監視診断システム”、157 ページ参照）。

製造業においては生産効率を上げるため、運転管理システムや保全管理システムなどが導入されているが、そのシステム内に蓄積されたデータは、システム用途以外に活用されていないことが多い。システムの中に埋もれたデータを有効活用し、現場の業務改善を進めていくことが必要である。

この課題に対し富士電機は、ISO 18435（O&M 統合モデル）に基づいた運転と保全情報の相互利用モデルを実現する“O&M プラットフォーム”を開発した。O&M プラットフォームは、運転と保全情報の相互利

用モデルを適用した O&M 統合モデルに準拠している。

図 5 に O&M 統合モデルの全体像を示す。

プラントや工場の現場における課題（安定稼働、業務効率化、ノウハウ継承）に対して、分析管理においてデータを分析・評価した結果を運転計画や保全計画にフィードバックし、改善を継続的に行うことで解決を図る。設備の運転情報と保全情報とを合わせた設備保全の最適化により安定稼働や保全コスト削減を実現する（“IoT を活用した現場業務の全体最適を支援する O&M ソリューション”、162 ページ参照）。

3.3 DX を支える技術

(1) アナリティクス・AI 技術

富士電機のアナリティクス・AI とは、認識・診断・予測・最適化を行うための、統計解析・機械学習技術の総称である。富士電機のアナリティクス・AI の全体像を図 6 に示す。

認識では、ディープラーニング（DL）^{（*2）} 技術の産業分野への適用において、学習データの不足に対応する前処理技術、少量の正常データのみの学習による異常検知技術、AI 判断の可視化技術などの要素技術を開発してきた。

診断では、診断性能の向上と診断時間の短縮化のための取組みを行っている。製造工程では異常データの発生が少ないため、正常データだけで診断モデルが構築できる教師なし学習を対象に、各種アルゴリズムを評価した。この結果を、診断対象に合わせた適切な手法の選択に生かしていく。

予測では、予測モデルへの入力変数の選択が精度に

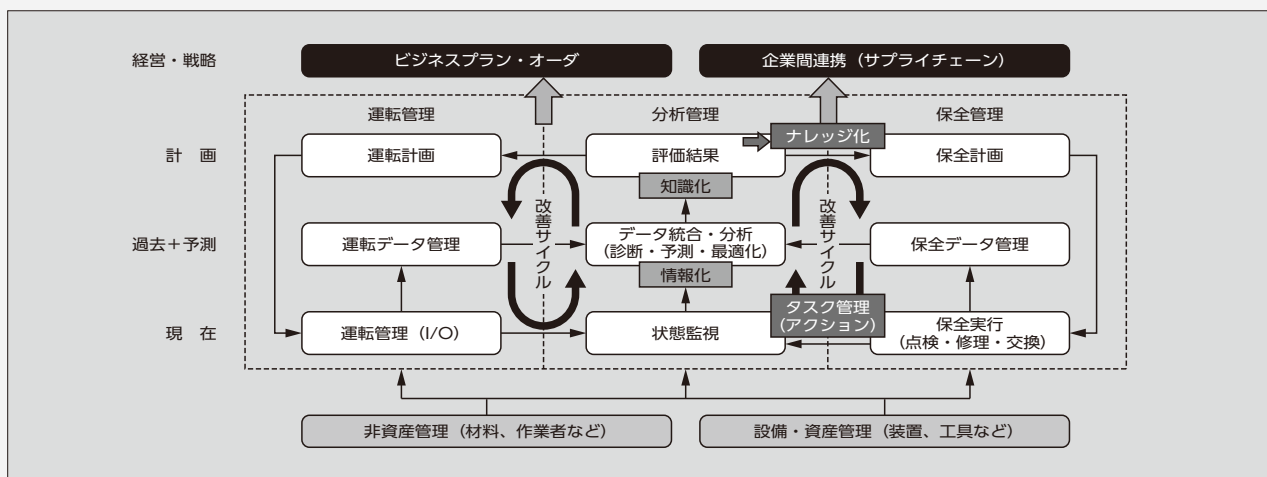


図 5 O&M 統合モデルの全体像

（*1）最適化

例えばコストや CO₂ 排出量を数式で表して、ある制約条件を満たした上で、その中から最適解を効率的に導き出す計算技術である。

（*2）ディープラーニング（DL）

DL は、Deep Learning の略である。ディープラーニングとは、人の脳神経を模倣したニューラルネットワークを多層化して計算機で学習する方法である。主

に、画像認識、言語認識、予測などに応用される AI のアルゴリズムの一つである。

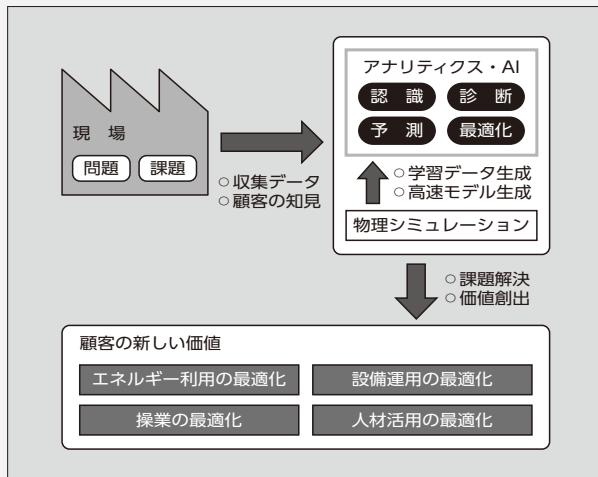


図6 富士電機のアナリティクス・AIの全体像

影響し重要であるが、その選択の効率化のために汎用的な変数選択法であるフィルタ法、およびラッパ法に着目して取り組んでいる。この変数選択技術をプラントの予測支援などの実製品への適用を目指すとともに、異常診断の学習ツールにも適用していく。

最適化では、最適化計算の入力データに不整合があると、計算が異常終了する。このエラー原因究明の効率化のために、異常終了時に自動で不整合発生箇所を特定してデータ修正箇所を特定できるようにした。本データ不整合検出技術の適用により専門知識が不要となり、エンジニアリング時のデータ解析作業の短縮を実現できる（“富士電機のアナリティクス・AI”、168ページ参照）。

熟練作業者の高齢化に伴い、ノウハウの技術伝承・情報共有が困難という課題がある。その解決のために、設備保全情報を対象に、熟練作業者が作成したテキストデータを基にAIによる認識技術を適用し、文書の分類、要約、集約に取り組んでいる。

テキストデータを対象とする場合では、曖昧性、自然言語であるための扱いにくさなどが認識精度向上の妨げとなっている。しかも、蓄積しているテキストデータが少ないということも課題である。その対応として文書分類では、テキスト認識と分野は異なるが、画像認識において効果があるデータ拡張技術を適用することで精度向上を実現した。文書要約では、質問応答形式にカテゴリ情報を付加して性能向上を実現した。今後は、これらの成果を設備保全管理システムやコールセンターなどの業務効率化への適用を進める（“設備保全の技術伝承・情報共有を推進するためのテキスト認識技術”、174ページ参照）。

(2) セキュリティ技術

デジタル技術の急速な利用拡大は、サイバー攻撃の脅威の増大も引き起こしており、富士電機では、対象範囲を従来の社内の情報（IT）システムから拡大し、

工場などの製造（OT）システムや製品・サービスとその開発プロセスのセキュリティを強化する取組みを進めている（図7）。

そのために、侵入されることを前提とし、新たな攻撃方法への防御を強化しつつ、侵入後の早期検知、対応の即応化、事業復旧の強化を図る方針とした。

工場の製造装置は、IoT化、製造のデジタル化に伴う、製造系ネットワークと情報系ネットワーク間の通信の必要性が増したことで、情報システムと同様のサイバー攻撃を受ける可能性が高まり、その対策が必要になってきた。

製造現場に対しては、セキュリティの必要性と行うべき対策の理解を図るとともに、IT部門が製造系の対策に関与する体制にした。

製品・サービスのセキュリティ確保のためには、製品ライフサイクル（企画段階から開発、製造、試験、運用、破棄）の各段階で適切な対策を行うことが必要である。そこで、製品・サービスのDR（デザインレビュー）の各ステップで実施すべきセキュリティ対策のガイドラインや、確認のためのチェックリストを社内基準として策定した。

製品・サービスのセキュリティ向上のためには、防御に加えて、侵入などを前提とした検知、対応、復旧のための技術開発を進め、開発の各段階で必要なセキュリティ対策の技術的な手段の整備を進めている（“富士電機のサイバーセキュリティの取組み”、179ページ参照）。

(3) AR技術

アフターサービスの分野では、保守・メンテナンス業務の効率化と技能伝承が重要課題となっている。富士電機では、拡張現実（AR：Augmented Reality）に注目し、これを応用した保守支援技術を開発した。

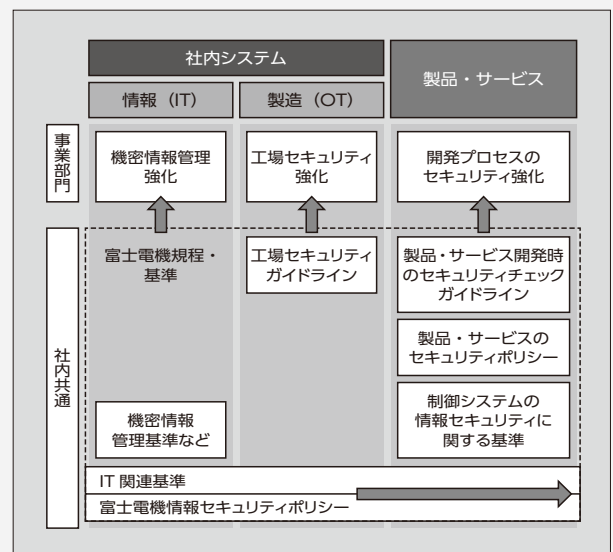


図7 富士電機のセキュリティ強化の取組み

特徴としては、自己位置推定・環境地図作成技術（SLAM：Simultaneous Localization and Mapping）による現場の空間や設備の三次元座標の認識、現場の空間や設備に対して作業の進捗状況や現場の気付きなどの情報の保存と復元、システムとの非接触操作機能、スタンドアローンでの実行機能などがある。これら機能により、遠隔地の支援者と現場作業者との円滑な意思疎通を基にした作業指示を受けながら、両手を使っての現場作業が可能となる。また、保守支援技術を適用することで、現場にいる作業者が、外部の支援を受けることなく作業を完結できるようにした（“拡張現実を用いた保守支援技術”、184 ページ参照）。

(4) デジタルツイン技術

多様化する顧客要求により設計開発は複雑化し、開発期間は短縮化している。この要求に応えるため、モデルベース開発およびモデルベースシステムズエンジニアリングの導入・適用が始まっている。今回実施したモデルベースシステムズエンジニアリングによる開発工程を図 8 に示す。

富士電機においても、鉄道車両用ドアシステムにモデルベース開発を適用し、制御ソフトウェアやモータ、電気回路、機構部品をモデル化してシステムを構築し、システムシミュレーションを行って設計の妥当性検証に活用できることを確認した。このようなモデルベース開発により、設計条件の最適化がシミュレーションで可能となり、制御も含めた効率的な協調設計や、さまざまな条件での評価が実機なしで可能であり、評価試験の短縮を図ることができる（“パワーエレクトロニクス機器のモデルベースシステムズエンジニアリング”、189 ページ参照）。

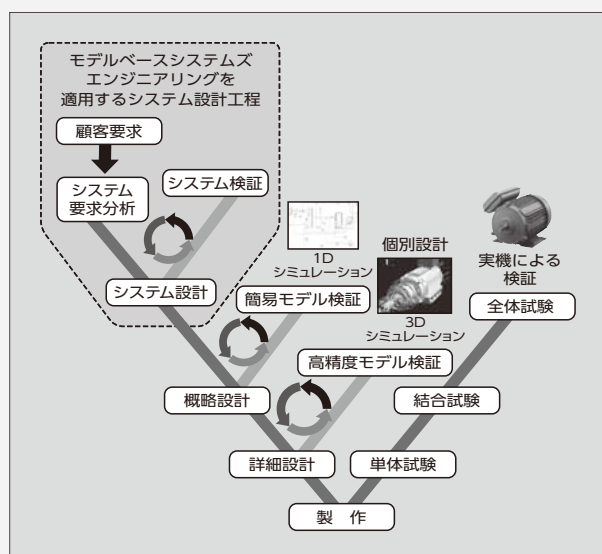


図 8 モデルベースシステムズエンジニアリングによる開発工程

富士電機の生産システムは、顧客ニーズの多様化やグローバル化の進展などに対応するため、必要なものを、必要な時に、必要なだけ供給する JIT（Just-In-Time）の思想に基づき、“自律同期化生産”を目指している。そのための先進的な技術基盤を適用した生産システムを富士電機生産方式（FePS：Fuji Electric Production System）として体系化し構築に取り組んでいる。富士電機の生産革新のあゆみと目指す姿を図 9 に示す。

富士電機は FePS を基に、SCM（Supply Chain Management）と PLM（Product Lifecycle Management）の 2 方面からの改革活動を軸に IoT 化も加え、デジタル改革活動に取り組んでいる。活動の軸となる SCM と PLM において重要なのは、情報をデジタル化し、つなげることである。

SCM については、生産ラインや設備にセンシング技術や AI などを活用した診断解析、予知、フィードバック制御などの高度な自動化やデジタル化を推進し、つながる化による自律した流れ作りに取り組んでいる。

PLM は、未デジタル化部分が残し、つなげるまでに至っていない工程も多い。そこで、生産準備において、デジタルツールを活用してプロセスの変革を進め、生産ライン構築のリードタイム短縮と信頼性を高めてきた。

ものづくりでは、製品の開発に合わせて、製造の工程設計や生産ライン設計などの生産準備が必要である。ここでは、誰でも短期間で高効率の生産ラインを構築できるプロセスへと変革するために、CPS（Cyber Physical System）を活用して、製品開発から生産までの高効率なライン構築の検討や生産準備期間の短縮に取り組んでいる（“デジタルツールの活用による生産ライン構築プロセスの変革”、194 ページ参照）。

(5) シミュレーション技術

近年は、HPC（High Performance Computing）

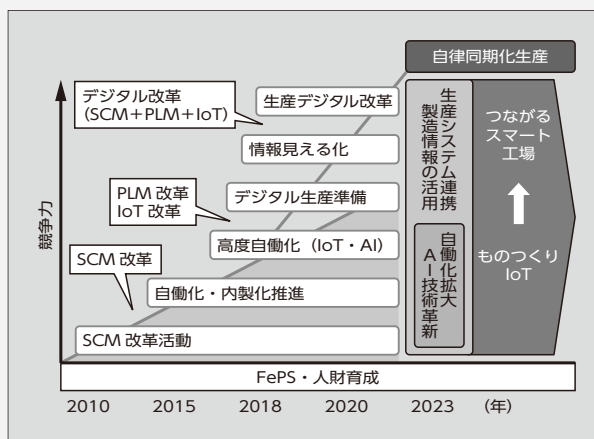


図 9 富士電機の生産革新のあゆみと目指す姿

と呼ばれる複数の CPU を利用した並列計算により計算時間の短縮が図られてきており、製品の開発設計プロセスに変革をもたらしている。

昨今、環境負荷に考慮した製品が求められ、低騒音化製品の市場要求も高まっているが、騒音のメカニズムは複雑で膨大な計算が必要なため、フロントローディング^(※3)が十分には行われてこなかった。富士電機では、HPC も活用し、シミュレーションによるフロントローディングを実現するための技術開発として、製品の低騒音化のための騒音推定に取り組んでいる。

シミュレーションによる流体騒音および熱の基本特性、ならびに推定精度を検証するため、模擬モータ構造を使って実機評価した。シミュレーションは、非定常圧縮流れを考慮し、乱流の再現には LES (Large Eddy Simulation) を用いた。その結果、設計段階での検討に十分な精度が得られていることが分かった。

今後も、製品の開発期間短縮を目的に、HPC とシミュレーションを活用した開発・設計プロセスの変革を目指していく（“シミュレーションによる騒音推定技術”、199 ページ参照）。

材料分野でも、分子レベル計算（分子シミュレーション）技術や機械学習を活用したマテリアルズインフォマティクスといった計算機を活用したデジタル技術がますます重要になってきている。分子レベル計算の技術開発の方向性と適用製品例を図 10 に示す。

富士電機では、パワー半導体のさらなる低損失化を実現する SiC（炭化けい素）パワー半導体の開発に注力している。その性能や信頼性に大きな影響を与える電荷トラップの発生原因を明らかにし、それに基づいた改善がポイントとなる。

このメカニズム解明のために、MOS 界面の原子レベルでの分析・解析に取り組んでおり、動的化学反応計算に基づく分子レベルシミュレーションを行っている。

このシミュレーションにより、直接見ることができない現象をモデル化でき、改善案検討に貢献できている（“分子レベル計算を活用した SiC-MOSFET の界面解析シミュレーション”、204 ページ参照）。

COVID-19 をはじめとした感染症の対策が急がれており、省エネのために換気量を増加させない高性能な空気清浄機の迅速な開発が求められている。

富士電機は、電気集じんにより空間から瞬時にウイルスを除去し、除去されずに通過したウイルスに対して波長 100 ～ 280 nm の紫外線（UV-C：Ultraviolet C）を照射することによりウイルスを不活

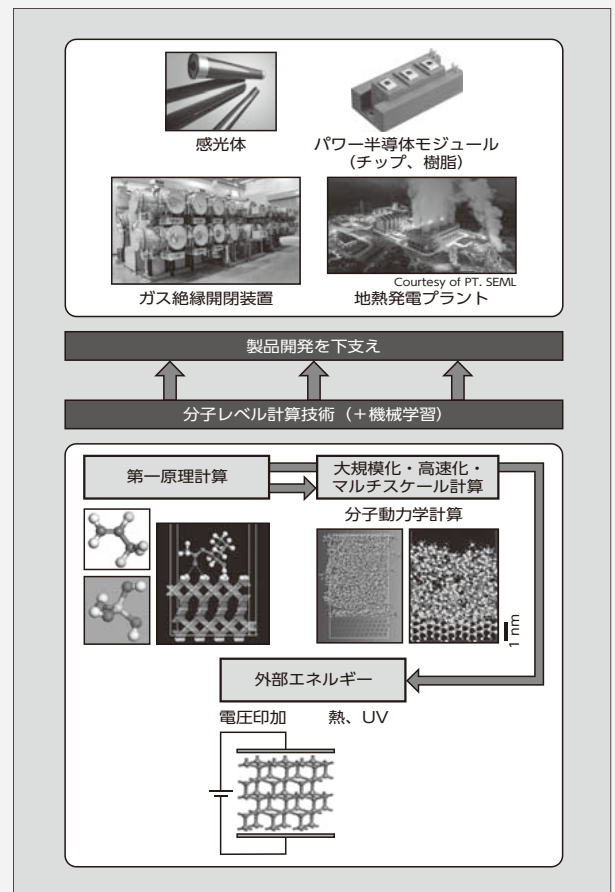


図 10 分子レベル計算の技術開発方向性と適用製品例

化するハイブリッドな手法を開発している。

ウイルスの不活化は、ウイルスの UV-C 積算受光量が設計のポイントとなる。そのためには、光学解析を用いたあらゆる位置における空間照射光量データの算出と、流体解析上での粒子の軌跡に沿った照度の積算が必要となる。その効果確認のために、UV の空間照射光量と気流の連成解析によるシミュレーション技術を開発した。この技術により、電気集じんによるウイルスの捕捉効果と UV-C の照射によるウイルスの不活化効果を考慮した検討や設計が可能となり、同時に通過空気清浄化率がシミュレーションできるようになる。また、必要な換気量も算出でき、換気量削減に貢献できる（“ウイルス不活化技術のための UV 空間照射光量と気流の連成解析——シミュレーションを活用した開発プロセスの変革——”、209 ページ参照）。

(※3) フロントローディング

製品開発プロセスの初期工程である仕様検討や機能設

計において、シミュレーションの活用などの負荷を減らすことで、後工程の試作や試験での問題を減らし、手戻りを少なくする方法である。

4 今後の展望

4.1 製造業における DX 化の展望

工場内では、情報モデルの適用拡大、生産現場での設備のモジュール化によるダイナミックで自律的なライン変更を目指した取組みや、超高速、大容量、低遅延、多接続の特徴を持つローカル 5G の検証などが始まっており、今後さらに IoT システムの広がりとともにデジタルツイン環境の高度化と活用が進むことが想定される。

デジタルツインと一般的なシミュレーションとの本質的な違いは、仮想世界で、現実世界のオンラインデータを扱えることにある。デジタルツインは、製品開発・設計、生産ライン設計、運用など製品ライフサイクル全体に適用され、オフラインデータの活用からオンラインデータの活用へと進展していく。そして、シミュレーションでの予測結果をオンラインで現実世界にフィードバックすることによる新たな価値の創出が期待されている。

企業間では、取引きの柔軟性向上と自動化範囲の拡大のために、グローバルでデータ連携基盤の整備とエコシステムの構築が進む可能性が高い。そして、生

産と調達の柔軟性が増し、サプライチェーンのレジリエント化が実現され、突発事象発生時にも製品供給の安定性が確保できるようになる。さらにその先では、サーキュラーエコノミー^(※4)の実現基盤へと成長していくことが想定される。

4.2 富士電機の DX への取組みの将来像

富士電機は、DX による顧客価値向上を目指し、製造現場で高速に変化する事象に対する AI の適用拡大、顧客データ保護の強化、既存システムの DX 容易化、製造データの利活用拡大や他社との連携促進、そして製品やシステムのライフサイクル全体でのサポート機能の強化に取り組んでいく。

その実現のために、富士電機は、図 11 に示するような DX への取組みを行う。

エッジ環境では、クラウド処理ではデータ遅延により実現が難しかった高速事象に対する AI の適用拡大のために、エッジでの AI の推論処理によりリアルタイム応答性を高め、さらには学習機能の取込みも目指す。

クラウド環境では、顧客データ保護と既存システムとの連携容易性の面から要望の多いオンプレミスと利便性の高いパブリッククラウドとのハイブリッドクラウド環境を充実させる。

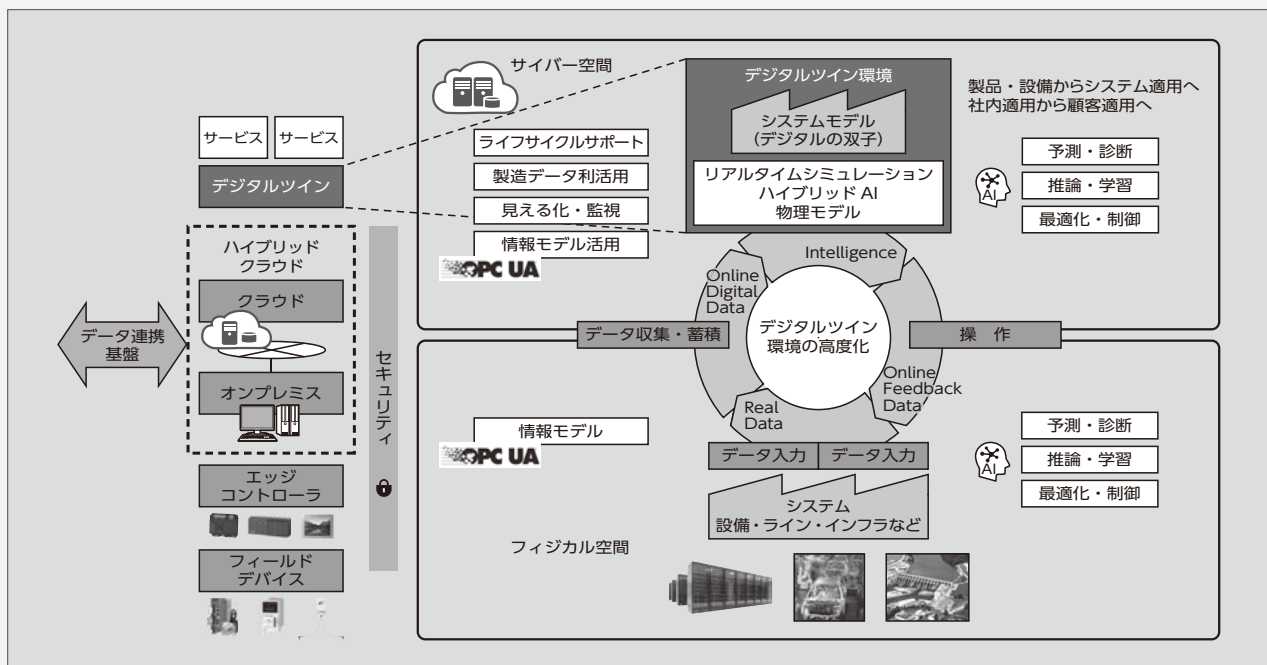


図 11 富士電機の DX への取組みの将来像

(※4) サーキュラーエコノミー

資源や原材料の効率的な利用を促進し、廃棄物の発生を最小限にする循環型経済システムである。

(※5) オンプレミス

サーバやソフトウェアなどの情報システムを使用者（通常は企業）が管理する設備内に設置・導入し、運

用することをいう。

製造データ利活用への対応として、今後日本でも利用の増加が見込まれる OPC UA の情報モデルのサポートを強化し、企業間でのエコシステム構築に必須となるデータ連携基盤への対応も進めていく。

デジタルツイン環境の活用により、故障診断や異常予測の精度向上、使用環境の変化への迅速な対応、人と機械（ロボット）群の高度な協調制御の実現など従来困難だった課題の解決を目指す。その適用範囲は、社内の製品や設備の開発・設計から顧客システムへと拡大させて、納入製品やシステムのライフサイクル全体で、新たな顧客価値の創出を目指す。

このようなソリューションや取組みを支える技術も強化する。シミュレーションに関しては、低次元化モデルによるリアルタイムでの複雑現象の再現・予測と最適化設計技術の高度化を目指し、AI 技術に関しては、物理学と機械学習を組み合わせたハイブリッド AI に取り組み、トレーニングデータの合成やリアルタイムストリーミングデータへの適用を目指す。

5 あとがき

富士電機のDX（デジタルトランスフォーメーション）の現状と展望について述べた。

富士電機は、“エネルギー・環境技術の革新により、安全・安心で持続可能な社会の実現”を目指して事業展開を進めてきた。今後も、DX化を進め、デジタル技術の活用で既存産業からデジタル産業へのビジネス変革に挑戦し、さらなる顧客価値の向上を目指していく所存である。

参考文献

- (1) デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン（DX推進ガイドライン）Ver.1.0. 経済産業省. 2018-12. <https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181212004/20181212004-1.pdf>, (参照 2021-09-08).
- (2) ハノーバメッセ 2021を読み解く～転換期を迎える産業エコシステム～. ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会. 2021-07. <https://www.jmfri.gr.jp/document/library/2108.html>, (参照 2021-09-08).
- (3) Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0. An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper. 8th September 2020.
- (4) IDS Reference-Architecture-Model Version 3.0 April 2019. INTERNATIONAL DATA SPACES ASSOCIATION.
- (5) Project GAIA-X : A Federated Data Infrastructure

as the Cradle of a Vibrant European Ecosystem. October 2019 Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMW).

- (6) 米国のAdvanced Manufacturing の取り組みに関する調査報告. ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会. 2020-05. <https://www.jmfri.gr.jp/document/library/1437.html>, (参照 2021-09-08).
- (7) インダストリアル・インターネット・コンソーシアム (IIC) の活動状況. JETRO調査レポート. 2021-03. <https://www.jetro.go.jp/world/reports/2021/02/ed2b5f3d1764dc9d.html>, (参照 2021-09-08).
- (8) 第23回 産業構造審議会総会 参考資料：中国における第四次産業革命の動向について. 経済産業省. 2018-08. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sokai/pdf/023_s01_01.pdf, (参照 2021-09-08).
- (9) 「新基建」とは何か? アフターコロナに向けた中国の動きを解説. ビジネス+IT. <https://www.sbbi.jp/article/cont1/52948>, (参照 2021-09-08).
- (10) DXレポート～ITシステム「2025年の崖」の克服とDXの本格的な展開～. 経済産業省. 2018-09.
- (11) DXレポート2 中間取りまとめ（概要）. 経済産業省. 2020-12. <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201228004/20201228004-3.pdf>, (参照 2021-09-08).
- (12) 2020年版ものづくり白書. 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省. 2020-05. https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2020/honbun_pdf/index.html, (参照 2021-09-08).
- (13) 2021年版ものづくり白書. 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省. 2021-05. <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2021/index.html>, (参照 2021-09-08).
- (14) 保川幸雄ほか. IoTから始まる新しい価値創出ソリューションの現状と展望. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.124-129.



瀬谷 彰利

燃料電池や材料技術の研究開発、全社の研究開発マネージメントに従事。富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所長を経て、現在、技術開発本部デジタルイノベーション研究所長。



安川 和行

IoT プラットフォーム構築、IoT 活用ビジネス開拓に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 IoT ソリューションセンター長。



引地 正則

計測・情報制御システムの企画・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所主幹。計測自動制御学会会員。



リアルタイムで不良品検出を実現する AI を適用した機械装置向け診断ソリューション

Diagnostic Solution for Machinery and Equipment That Uses AI for Real-Time Detection of Defective Products

湯尾 幸輝 YUO, Yukiteru

島村 明夫 SHIMAMURA, Akio

宗像 昌朗 MUNAKATA, Masaaki

近年、エンドユーザーの品質への要求の高まりにより、機械装置における不良品検出技術の向上が求められている。富士電機は、モーションシステムに組み込んで、加工作業中に不良品の検出を可能とする診断ソリューションを開発した。診断機能は「MICREX-SX」の機能モジュールとして提供され、機械装置の制御アプリケーションと連動し、リアルタイムで不良品を検出できる。また、富士電機のサーボシステム「ALPHA7」のサーボアンプの負荷トルクモニタ機能を使用することで、外部センサを追加することなく高精度な不良品検出が実現できる。

The recent increasing demand for quality from end users has necessitated improving the technology for detecting defective products in machinery and equipment. Fuji Electric has developed a diagnostic solution that can be incorporated into motion systems to detect defective products during machining operations. The diagnostic functionality is provided as a module of the “MICREX-SX” and can detect defective products in real time by interfacing with the control application of the machinery and equipment. In addition, it can detect defective products with high accuracy using the load torque monitoring function of the servo amplifier of the Fuji Electric’s “ALPHA7” servo system without adding external sensors.

① まえがき

モーションシステムは、金属加工機械や包装機械、半導体製造装置など、さまざまな機械装置で使用されている。

これまでのモーションシステムでは、生産性の向上のため高速化に主眼が置かれていたが、近年では生産性だけでなく製造物の品質を高くしたいという要求もあり、機械装置の稼働中にリアルタイムで不良品を検出し、後段の製造工程への影響を防ぐことが求められている。

この要求に応えるため富士電機は、DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）の中核技術である IoT（Internet of Things）や AI（Artificial Intelligence）を適用した機械装置向け診断ソリューションを提供している。本稿では、この診断ソリューションについて述べる。

② 機械装置における不良品検出の課題

エンドユーザーにおいては、不良品の流出が発生すると、商品回収に莫大なコストがかかるだけでなく、企業イメージの低下が会社全体の売上減少につながる可能性がある。そのため、エンドユーザーから機械装置メーカーに対して、生産性を損なうことなくリアルタイムで製品の品質を検知し、不良品の流出を防止する仕組みを機械装置に組み込んで欲しい、という要求が増えている。

例えば、食品包装機では包装フィルムの圧着不良、ハーネス加工機では電線の圧着不良などがリアルタイムに検知したい不良の例として挙げられる。機械装置メーカーでは、さまざまなセンサを搭載し不良品の検出精度の向上を図る一方で、そのためにかかるコストの上昇が利益を圧迫しており、コスト低減と不良品検出精度の維持・向上の両立が

課題である。

この要求に応えるため、富士電機は自社製コントローラに、AI を適用した“診断モジュール”とそれを活用するためのアプリケーションライブラリを組み合わせた診断ソリューションを開発した。

③ 診断モジュールによる異常の検出

図1に「MICREX-SX」の外観を示す。診断モジュールは、「MICREX-SX シリーズ」における機能モジュールで、入力モジュールのデータやサーボアンプからの応答データ、制御アプリケーションの演算データなどを基に、アナリティクス・AI である多変量統計的プロセス管理（MSPC：Multivariate Statistical Process Control）技術を適用し、診断を行うものである。

3.1 MSPC

MSPC とは、多変量のプロセスデータ（パラメータ）



図1 「MICREX-SX」

間の相関関係を表す空間において、正常な状態である範囲（診断モデル）を設定し、観測されたパラメータのセットが診断モデルの範囲を逸脱した場合、異常とする診断手法である。図2に示すように、診断モデルのパラメータ間の相関からのずれを Q 統計量、平均値からのずれを T^2 統計量とし、この2種類の評価値に基づき異常の検出を行う。この手法を用いることで、個々のパラメータの上下限值による診断では見逃されてしまう異常についても検出が可能となる。

3.2 診断モジュール

診断モジュールは、MICREX-SX の CPU モジュールと同様のコントローラプラットフォームを採用している。富士電機は、CPU モジュール上で制御機能として、診断モジュール上で診断機能として動作するシステムファンクションブロック（SFB：System Function Block）をユーザーに提供し、ユーザーはその SFB を組み合わせてアプ

リケーションを作成する。

CPU モジュールでは、制御機能をユーザーの作成した制御アプリケーションが活用し、システムを制御する。一方、診断モジュールでは、診断機能およびモデル生成機能をユーザーの作成した診断アプリケーションで活用して診断を実施する（図3）。診断およびモデル生成の入力パラメータとして、SX バスにつながる I/O モジュールからの入力やサーボアンプへの指令値に対する負荷トルクや帰還速度の実測値が利用可能である。診断機能は、表1に示す10種類のSFBとして診断モジュールに実装され、ユーザーはこれらのSFBを組み合わせ、診断アプリケーションを構築する。

診断モジュール上で動作する診断アプリケーションは、^(注1)演算に使用するために、同じベースボード上にあるCPUモジュールと診断モジュールの標準メモリの両方にアクセスできる。また、CPUモジュール上で動作するシーケン

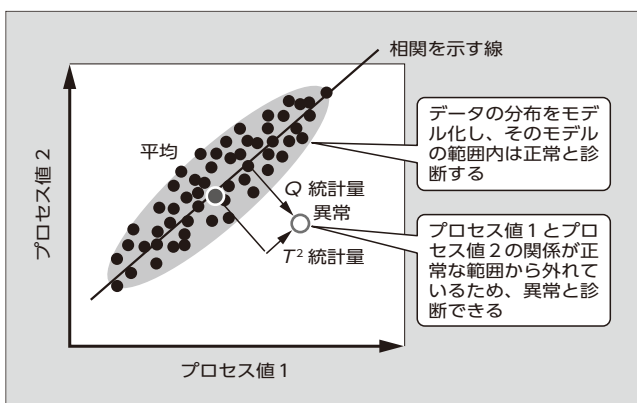


図2 MSPCによる診断

表1 診断モジュール SFB 一覧

分類	名称	機能概要
共通	MSPC_INIT	使用メモリの初期化
モデル生成	MSPC_MODEL_STACK	モデル生成用データ収集
	MSPC_MODEL_CREATE	モデルの生成
	MSPC_MODEL_UPDATE	診断モデルの更新
	MSPC_MODEL_READ	モデル読み込み（SDカード）
診断	MSPC_DATA_STACK	診断パラメータ収集
	MSPC_PREPROCESS	収集パラメータ前処理
	MSPC_ANALYSIS	MSPC診断処理
	MSPC_EVALUATION	MSPC診断結果判定
	MSPC_OUTPUT	MSPC診断結果出力

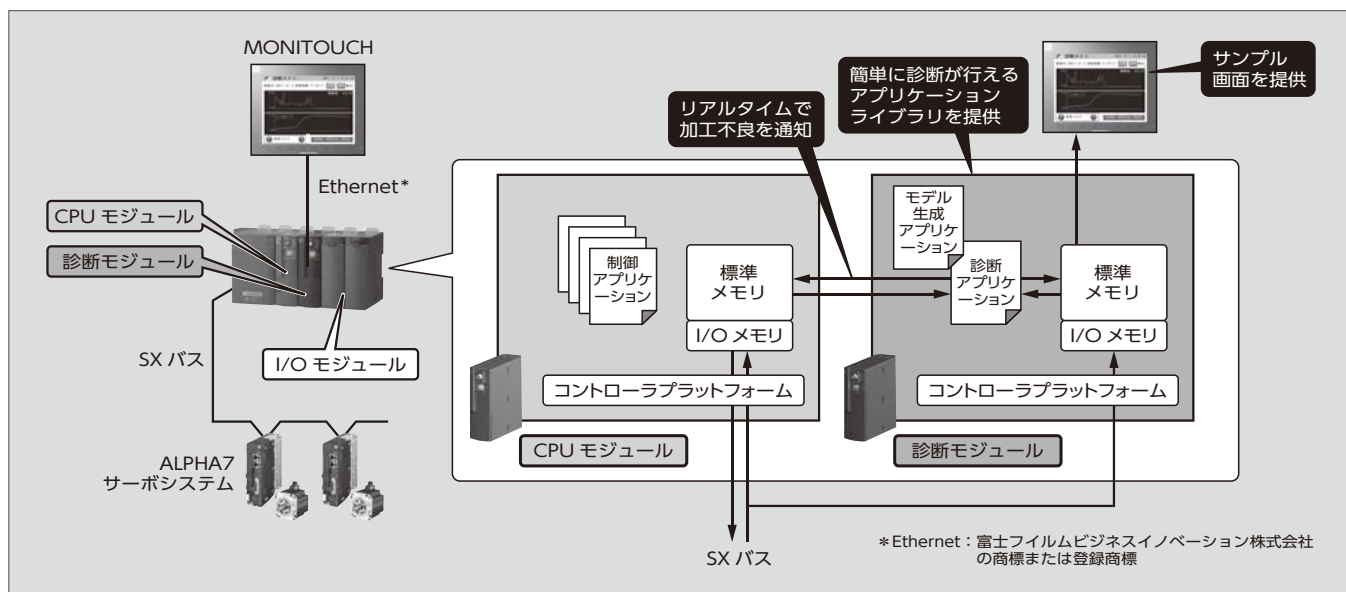


図3 モジュールの構成

〈注1〉ベースボード：電源モジュール、CPUモジュール、I/Oモジュールを実装するボード

ス制御アプリケーションは、診断モジュール内の標準メモリにもアクセスでき、診断結果をリアルタイムで参照できる。シーケンス制御アプリケーションは、診断結果の正常・異常を参照し、リアルタイムで不良品を排出するなどの処理を実行できる。

また、診断モジュールの前面に備えている Ethernet^{〔注2〕}ポートに接続した富士電機のプログラマブル表示器である「MONITOUCH」を使って、診断結果をモニタすることもできる。

診断用 SFB を利用した診断アプリケーション構築の自由度の高さは、さまざまな機械装置に最適な診断アプリケーションを構築できる反面、診断機能に不慣れなユーザーにとっては導入の難易度が高いことも想定される。そこで、標準的な診断アプリケーションをライブラリとして準備するとともに、この診断アプリケーションを操作するための MONITOUCH の操作画面のサンプルも用意し、これらをカスタマイズすることで簡単に診断アプリケーションが構築できるように工夫している。

3.3 診断機能の仕組み

3.2 節で述べたとおり、診断モジュールにはモデル生成機能と診断機能がある。

モデル生成機能とは、診断で用いるために、機械装置が正常に運転している状態を表す診断モデルを作成する機能である。

診断機能とは、モデル生成機能で作成した診断モデルと実際の製造時のパラメータを比較して良品の判定を行う機能である。図 4 に示すように、診断の対象となる機械装置の一連の処理周期をサイクルで表す。診断機能の入力となるパラメータを取り込むタイミングをサンプリングポイントと呼び、サンプリングポイントの間隔をサンプリング周期という。

診断機能では、次に示すようにパラメータ収集、診断処

理、結果判定の順でそのサイクルの加工の正常・異常を判定する。

(1) パラメータ収集

- ・診断パラメータ収集 SFB で 1 サイクルの中のサンプリング周期ごとにパラメータの値を収集する。
- ・パラメータ前処理 SFB で収集したパラメータを加工する。

(2) 診断処理

MSPC 診断処理 SFB で加工したパラメータを診断する。

(3) 結果判定

MSPC 診断結果判定 SFB に診断モデルとの差異を表す Q 統計量と T^2 統計量のしきい値をあらかじめ入力し、そのサイクルの加工の正常・異常を判定する。

表 2 に診断モジュールの診断機能の仕様を示す。この診断性能および診断周期を実現したことにより、機械装置での加工中に不良品の検出が可能となる。

④ 診断モジュールを用いたシステム

4.1 サーボシステム「ALPHA7」を用いたモーションシステムの構成

診断モジュールは、負荷トルクモニタ機能を実装した富士電機のサーボシステム「ALPHA7」^{〔2〕}を組み合わせると、診断精度の向上が実現できる（図 3）。

表 2 診断モジュールの診断機能の仕様

項 目	仕 様
パラメータ数	2 ～ 5点
サンプリング数	11 ～ 200点
サンプリング周期	最速2 ms
診断周期（サイクル）	最速200 ms
診断性能（1回の診断時間）	70 ms以内

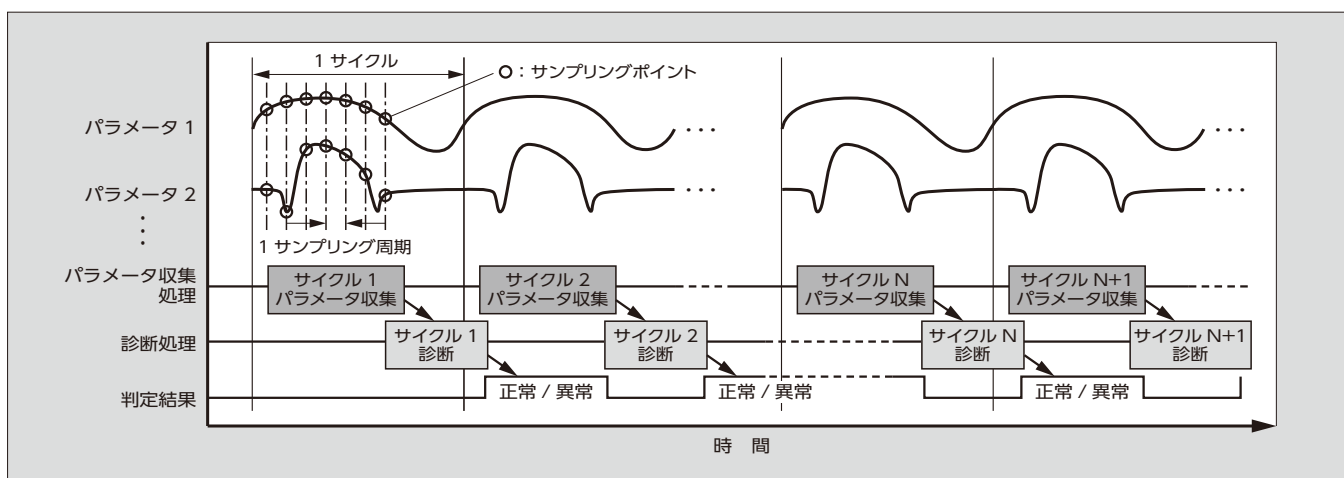


図 4 診断機能のタイムチャート

〔注2〕 Ethernet：富士フイルムビジネスイノベーション株式会社の商標または登録商標

ALPHA7 に新たに搭載した負荷トルクモニタ機能では、サーボアンプからフィードバックされたモータトルクから、加減速トルクや重力トルクおよび摩擦力などを除いた負荷のトルクだけを抽出し、モニタすることができる。

この負荷トルクや帰還速度を診断モジュールの入力データの一つとして活用することで、例えば、想定以上の負荷がかかっている、あるいは必要な負荷が得られていない、などの機械装置の異常動作が検出できる。

MICREX-SX と ALPHA7 を使用している機械装置であれば、不良検出のためのセンサがなくても、診断モジュールをシステムに追加することで診断機能が使えるので、不良品の検出が可能になる。

4.2 診断モジュールの適用事例

食品業界では、不良品の流出は即時に消費者にマイナスイメージを与えることにつながり、商品の売上に多大な影響を及ぼすだけでなく、場合によっては消費者に健康被害を及ぼしかねない。

消費者の元に安全に商品を届ける上で重要な機械装置の一つに、食品包装機がある。この装置には、さまざまな種類があり、例えば図5に示す横ピロー包装機では、ロールに巻かれた包装用フィルムを送り出してフィルムを筒状にし、ベルトコンベヤを流れる商品を包み込み、フィルムの背中合わせの部分で熱圧着し、さらに商品の前後のフィルム部分をカッタシーラー機構によって熱圧着したのち切断して商品を包装する。

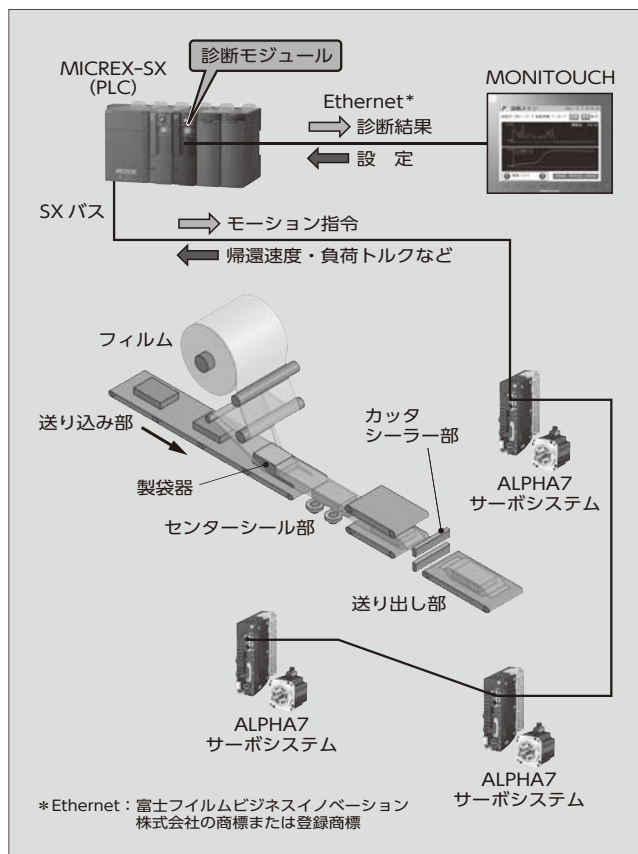


図5 食品包装機の診断ソリューションシステム構成

このような食品包装機では、シール時のフィルムの厚さを近接センサを使って測定して不良を検知、別工程で赤外線センサを使って異物混入の有無を確認するなどの検査を行っている。

食品包装における不良の多くは、図6に示すように包装フィルムをシールする際のフィルムのしわや食品くずのかみ込みによるシール不良であり、これを精度よく検出したという要求が強い。この要求に応えるため、図5に示す構成の診断ソリューションシステムを開発した。

食品包装機のカッタシーラー部をはじめとしたさまざまな機構部は、PLC (Programmable Logic Controller) がモーション制御するサーボシステムによって動作する。このサーボシステムから得られる負荷トルクなどのデータを使って、診断モジュールはシール不良を検知できる。

図7は、包装フィルムのしわや食品くずの混入を想定し、厚さ 70 μm の紙をかみ込ませた模擬試験の結果である。診断モデルを、プロファイル+2 σ とプロファイル-2 σ で示す。負荷トルクの計測データが上昇する領域がフィルムの圧着に相当し、負荷トルクの立ち上がりタイミングがわずかに診断モデルより早い。このわずかな違いは Q 統計量の急激な増加として現れ、圧着不良を検知でき、従来よりも検出精度が向上した。

食品包装機に診断ソリューションを適用することにより、今まで検出できなかった異常や機械の故障の予兆を検知し、不良品の検出精度を向上することや、センサなどの外部機

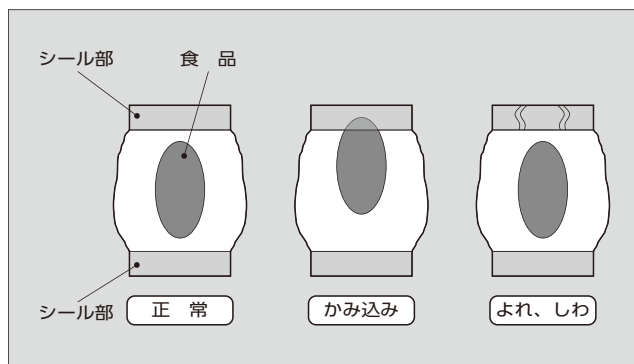


図6 食品包装における不良例

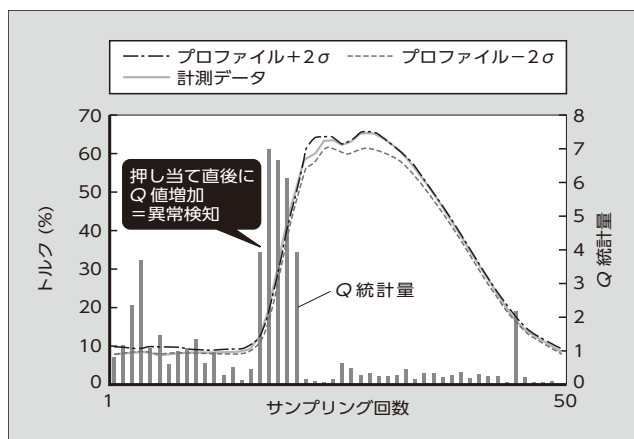


図7 シール不良検知の模擬試験結果（負荷トルク）

器の極小化、人を介在したチェック工程の削減によるトータルコストの低減が可能となり、機械装置の付加価値の向上ができた。このように、リアルタイムで不良を検知することで、後段の製造工程への悪影響や不良品の流出を防ぐことができる。

5 あとがき

リアルタイムで不良品検出を実現する AI を適用した機械装置向け診断ソリューションについて述べた。

機械装置向けのシーケンス制御を行う CPU モジュールとは別に診断モジュールをコントローラシステムに組み込み、負荷トルクモニタ機能を持つサーボシステム「ALPHA7」と組み合わせることにより、より高い不良品検出を可能とする機械装置の実現に貢献している。

今後は、MSPC による診断機能を適用するモジュールを拡充し、富士電機の DX の中核である IoT システムの適用拡大を進めることにより、ユーザーの製品品質向上や業務効率改善に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 松本充弘ほか、工場ですぐ使えるタッチオペレーションの

現場型診断装置「SignAiEdge（サインアイエッジ）」、富士電機技報. 2020, vol.93, no.1, p.30-33.

(2) 山下智史ほか、サーボシステム「ALPHA7シリーズ」の新機能と適用例、富士電機技報. 2021, vol.94, no.1, p.51-56.



湯尾 幸輝

プログラマブルコントローラの開発業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部開発統括部計測・制御開発センターコントローラ開発部マネージャー。



島村 明夫

プログラマブルコントローラの企画・マーケティングに従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部ファクトリーオートメーション事業部制御機器部主査。



宗像 昌朗

制御ネットワークの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部開発統括部計測・制御開発センターコントローラ開発部主任。



AI 技術適用により蒸気利用設備の CO₂ 排出量削減に貢献する熱 EMS ソリューション

AI-Based Thermal EMS Solution that Contributes to the Reduction of CO₂ Emissions from Steam Powered Facilities

山口 貴久 YAMAGUCHI, Takahisa

竜田 尚登 TATTA, Naoto

近年、CO₂ 排出量削減の社会的要求が強まり、工場における熱エネルギーの省エネルギー（省エネ）が必須となっている。富士電機では、工場の熱エネルギーを対象とした熱 EMS（エネルギーマネジメントシステム）ソリューションを推進しており、蒸気利用設備の熱収支を定量的に把握可能な熱収支分析システムを開発した。本システムでは設備の熱効率を常時監視し、熱効率が悪化した場合には AI 技術を応用した分析によりその要因を絞り込むことができる。これにより、人による管理では気付かないムダな熱消費を抑制できる。また、データ活用による省エネ設備導入により大幅な CO₂ 排出量削減につながる。

In recent years, thermal energy saving in factories has become necessary due to the increasing social demand to reduce CO₂ emissions. Fuji Electric has been promoting thermal energy management system (EMS) solutions for factories and has developed a heat balance analysis system that can quantitatively grasp the heat balance of steam-powered facilities. This analysis system constantly monitors the thermal efficiency of facilities, and if it detects deterioration in thermal efficiency, it can narrow down the causes using AI analysis. This enables it to reduce thermal waste that would otherwise go unnoticed by manual management. The introduction of energy saving facilities, based on such data utilization, help reduce CO₂ emissions significantly.

1 まえがき

近年の環境意識の高まりの中で、国内の大手製造業では、2030 年度に向けて CO₂ 排出量の大幅な削減目標を掲げている。

国内のエネルギー起源の CO₂ 排出量の約 27%（2019 年度時点⁽¹⁾）は、産業部門における非電力起源の CO₂ である。その主な発生源である化石燃料消費を抑えることが必要不可欠である。

例えば、工場で消費される主な化石燃料である都市ガスや A 重油は、その大部分が生産設備で使用する蒸気を生成するために消費されている。したがって、生産設備ごとの使用量や熱効率（エネルギー原単位）を定量的に把握することにより、蒸気使用量を削減して省エネルギー（省エネ）が進展することが期待されている。

富士電機は、工場の電力を主体とした EMS（エネルギーマネジメントシステム：Energy Management System）を推進してきた。それに加えて、工場では電力に比べて省エネが進んでいない熱エネルギーにも対象を広げた熱 EMS ソリューションを現在推進している。

IoT（Internet of Things）や AI（Artificial Intelligence）技術を適用した富士電機の DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）製品である熱収支分析システムを中心に、熱 EMS ソリューションについて述べる。

2 蒸気利用設備の省エネルギーに向けた従来の検討手法と課題

工場の洗浄設備や殺菌設備、乾燥設備などの蒸気を利用する設備において、図 1 に示す設備に入る蒸気熱量（設備

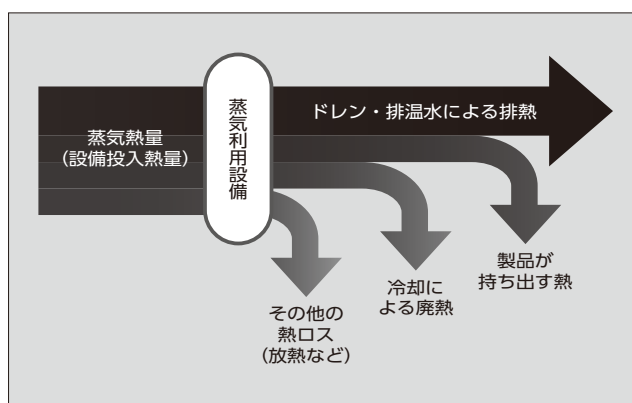


図 1 蒸気利用設備の熱収支関係

投入熱量）と、設備から出る排熱量の合計とが等しくなるという熱収支が成り立つ。しかし、同じ構造や仕様の設備であっても、設備に入る熱量（＝設備から出る熱量）は、設備の状態や運転状態、生産の状態などのさまざまな要因によって変動する。

蒸気利用設備を省エネ化するために、単純に蒸気熱量を絞ってしまうと必要量が供給できなくなり、製品の品質に問題が発生してしまうことがある。そのため、正常な生産で生じる排熱量を低減させる施策によって当該設備の蒸気利用量を低減させる、あるいは排熱を回収し、他の生産工程で再利用することで工場全体としての蒸気利用量を低減する、などの方法が必要になる。

排熱量を低減させる施策の例を次に示す。

- (a) 設備のメンテナンスによる熱効率改善
- (b) 設備の部分更新や改造による熱効率改善
- (c) 設備管理者による設備の運用方式の改善によるムダな熱消費の抑制
- (d) 設備の自動制御プログラムの改造によるムダな熱消

費の防止

(e) 排熱の回収と有効利用

これらの施策を行うためには、蒸気利用量だけではなく、排熱量なども含めた熱収支を定量的に把握することが重要である。しかし、従来は蒸気利用設備単体の蒸気流量や排水流量などは計測していない場合が多く、また、対象設備を熟知した上で熱エネルギーの分析スキルが必要であることから、熱収支の定量的な把握が容易には実施できないという問題があった。

③ 熱収支分析システム

富士電機は、②章で述べた課題を解決するため、蒸気利用設備の熱収支を自動計算し、定量化できる熱収支分析システムを開発した。熱収支分析システムのシステム構成を次に示す（図2）。

(1) 熱 EMS-BOX 盤

現場の蒸気利用設備の近くに設置し、盤に取り付けた「MONITOUCH V9」を使ってデータを収集し、盤内の PLC（Programmable Logic Controller）を使って熱収支を計算する。また、熱 EMS-BOX 盤画面に各種の表示を行う。

(2) 熱ロス要因分析ソフトウェア

顧客の監視室や事務所などに設置した PC にインストールし、熱 EMS-BOX 盤にて収集・計算したデータを蓄積し、省エネのための各種分析を行う。

(3) クランプオン式蒸気用超音波流量計

配管を加工することなく、その周囲に取り付けて、蒸気利用設備入口における蒸気流量を計測する。

(4) ポータブル形超音波流量計

蒸気利用設備出口における排水の流量を計測する。

3.1 データ収集とリアルタイム熱収支計算

熱 EMS-BOX 盤では、盤に取り付けた MONITOUCH

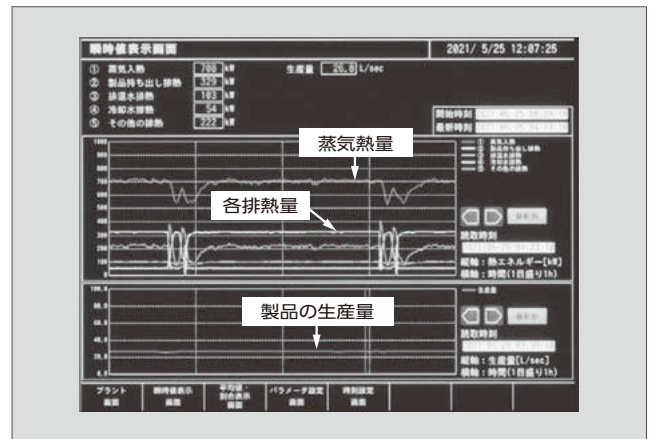


図3 リアルタイム熱収支トレンドグラフ画面

V9 を使って、顧客の蒸気利用設備およびそれと関連する上流と下流の工程設備の稼働監視システムから運転データや生産データを収集する。なお、MONITOUCH V9 は多数のメーカーの PLC との通信に標準で対応しているので、顧客システムからリアルタイムで運転データや生産データを容易に収集できる。

蒸気利用設備の熱収支計算に必要なデータが不足する場合には、新たに計測器を設置して熱 EMS-BOX 盤内の PLC にデータを取り込む。設備入口の蒸気流量や設備から出る排水流量は、計測されていない場合が多い。このような場合は、富士電機のクランプオン式蒸気用超音波流量計やポータブル形超音波流量計を使用することにより、顧客の配管に加工を施すことなく計測できる。

収集したデータを用いて、熱 EMS-BOX 盤にてリアルタイム熱収支計算を行う。熱 EMS-BOX 盤内の熱収支演算プログラムは、蒸気や水の熱力学データをテーブルで保有している。蒸気や水の温度計測値に対応した比エンタルピーや密度などの値をテーブルから読み出し、熱収支を計算する。熱収支は 1 分間隔で計算し、熱 EMS-BOX 盤の画面にトレンドグラフとして表示する（図3）。

3.2 “いつもの熱収支状態”（熱効率正常状態）を過去データから自動抽出

熱エネルギーの使用実態の把握には、“いつもの熱収支状態”（熱収支が正常運転時の状態にあること）を把握しておくことが重要である。

熱 EMS-BOX 盤が計算した熱収支は、他の収集データとともに、熱ロス要因分析ソフトウェアをインストールした PC の専用のデータベースに取り込まれる。熱収支は生産する製品の種類や運転中、停止中、待機中などの設備の運転条件によって変化するため、これらの条件に応じて、このデータベースからいつもの熱収支状態を抽出する必要がある。

いつもの熱収支状態を抽出するには、いつもの熱収支状態抽出画面にて、製品の品種、運転モードおよび期間を指定する（図4）。例えば、製品 A、運転中、昨年の夏季 7～9 月のように指定し、抽出する（図5）。対象期間を指

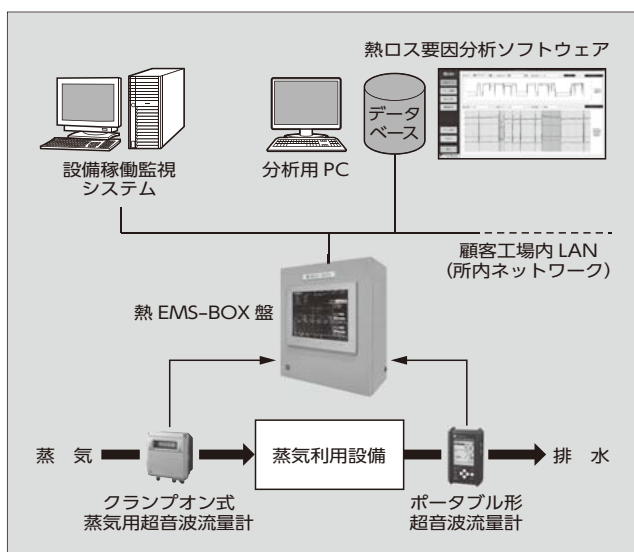


図2 熱収支分析システムのシステム構成

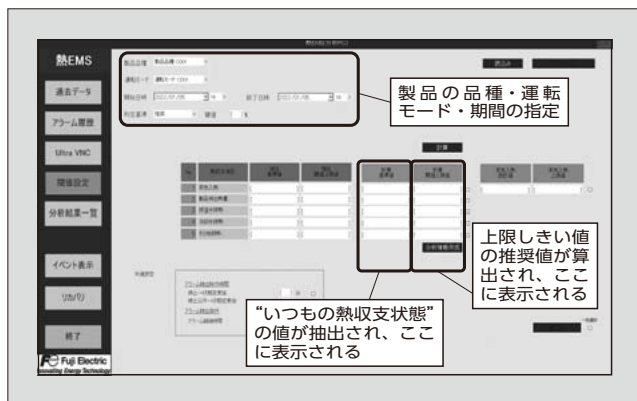


図4 “いつもの熱収支状態” および上限しきい値抽出画面

製品 A 夏季 7月～9月		
1	蒸気入熱	〇〇 kw
2	製品持出し熱	〇〇 kw
3	排水排熱	〇〇 kw
4	冷却排熱	〇〇 kw
5	その他排熱	〇〇 kw

図5 “いつもの熱収支状態” 抽出イメージ

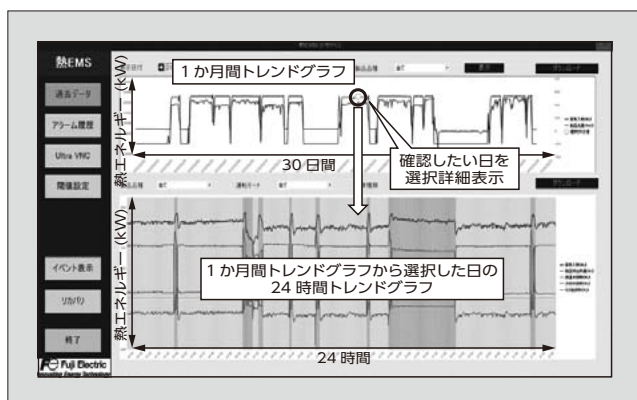


図6 過去データ検索画面

定する際には、過去データ検索画面で過去の熱収支トレンドグラフを検索し、表示する（図6）。この過去データ検索結果を参考に指定する期間を決定する。

いつもの熱収支状態抽出画面で設定した条件に合致するデータの中央値を、いつもの熱収支状態として抽出する。これにより、熱エネルギー効率の季節ごとの変動の把握や、1年前の同時期との比較などが可能である。

このいつもの熱収支状態の抽出機能により蒸気利用設備の現状の熱収支を定量的に把握できるため、2章で述べたような具体的省エネ対策の立案と対策の投資対効果の試算が可能となる。

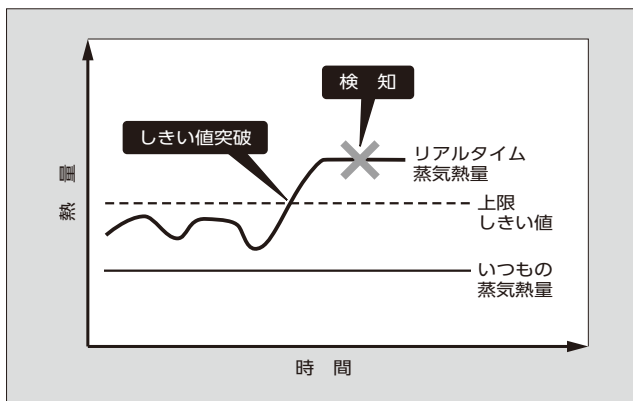


図7 熱蒸気量の計測による“いつもと違う熱収支状態”の検知

3.3 “いつもと違う熱収支状態”（熱効率悪化状態）を検知

いつもの熱収支状態の熱収支を熱 EMS-BOX 盤に転送し、熱 EMS-BOX 盤にて算出されるリアルタイムの熱収支と比較することにより、“いつもと違う熱収支状態”（熱効率悪化状態）を検知することができる。

図4に示すように、いつもと違う熱収支状態を検知するために必要となる上限しきい値の推奨値は、熱ロス要因分析ソフトウェアにより、3.2節で述べたいつもの熱収支状態の抽出と同時に自動算出される。その算出された推奨値、もしくは推奨値を参考にユーザーがカスタマイズした値を設定し、いつもの熱収支状態のデータとともに熱 EMS-BOX 盤に転送される。

リアルタイム熱収支計算によって求めた蒸気熱量および各排熱量のいずれかが上限しきい値を超過し、その状態が、ユーザーが設定した期間を越えて継続すると、いつもと違う熱収支状態に遷移したと判定する（図7）。いつもと違うと判定された状態の熱収支の計算結果や全収集データにフラグを付加してデータベースに取り込む。

3.4 AI 技術による熱収支の変動・差異の要因分析

熱ロス要因分析ソフトウェアでは、富士電機の AI 技術を応用し開発した、エネルギー効率の悪化要因を自動で診断するアナリティクスエンジンを使用し、3.3節で述べたいつもと違う熱収支状態、すなわち熱効率が悪化した状態に移行した要因を分析する。

熱ロス要因分析ソフトウェアは、分析対象とする蒸気利用設備のデータや、熱 EMS-BOX 盤にて収集した上流や下流の工程の関連する設備などの全てのデータを熱収支に影響を与える関連変数として扱う。

要因分析を行うために、熱効率正常状態のデータと熱効率悪化状態のデータとの差異を生じさせる因子を抽出する。そのために、図8に示すように、熱エネルギー効率正常または熱エネルギー効率悪化のラベルを付与したデータ群をアナリティクスエンジンに入力する。正常ラベルは3.2節で述べた熱効率正常状態のデータ群、悪化ラベルは3.3節で述べた熱効率悪化状態のデータ群に付与する。アナリティクスエンジンはラベル付きデータを教師データとして

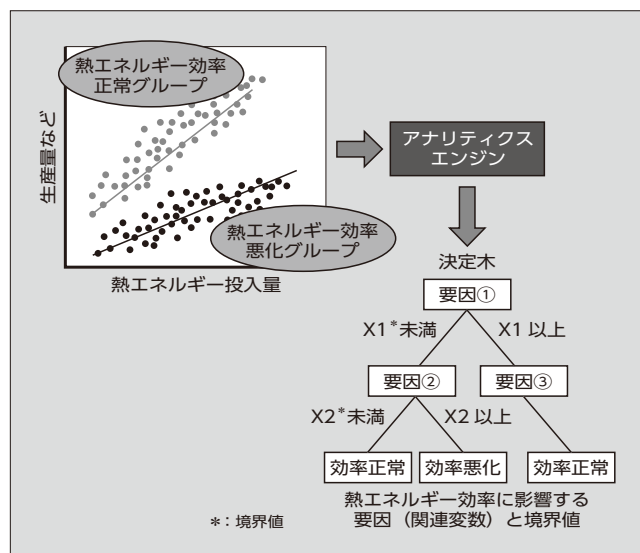


図8 AI 技術による熱効率悪化要因の関連データ抽出

学習し、ラベルを予測するモデルを自動生成する。この予測モデルから予測因子を抽出することで、各ラベルへの関連強度が大きい関連変数が分かる。また、決定木によりラベル予測の境界値も抽出できるので、どの関連変数がどの値となった場合に、熱効率に影響するのかを分析することができる。

さらに、関連強度が大きい順に関連変数を抽出する機能を設けることにより、従来人手による分析では実施困難であった熱効率悪化要因の絞り込みを自動で実施可能とした。

このようにして絞り込んだ関連変数が、それぞれ設備のどの場所で計測されたものであるか確認するなどの検討により熱効率悪化の真因を特定し、対策を講じることでムダな熱消費を抑制し蒸気利用量を削減できる。

④ AI 技術による熱収支変動要因分析機能の応用例

3.4 節で述べた AI 技術による熱収支の変動・差異の要因分析機能について、応用例と効果について述べる。

(1) 生産ロットごとの熱エネルギー原単位のばらつき要因の分析

単位生産量当たりのエネルギー消費量であるエネルギー原単位は、生産日や生産ロットによってばらつきが発生することがある。その要因は設備の運用方法の違いによることが多い。熱エネルギー原単位が多い生産ロットは、少ない生産ロットに比べて排熱が大きく熱収支に差異が生じる。その差異に関連が強い変数を関連強度順に抽出することにより、熱エネルギー原単位を悪化させる要因を把握し、省エネになるように設備の運用の改善に結び付ける。

熱エネルギー原単位を悪化させる要因が、対象とする設備の上流工程や下流工程の他の関連設備の運用状態の影響によるものである場合もある。熱ロス要因分析ソフトウェアには、関連する他設備の運転データもデータベースに取り込んで、他設備も含めた AI 分析が可能である。関連強度が大きいものに他設備のデータが多く含まれる場合は、

他設備の運用が要因である可能性が高い。

同様の AI 分析エンジンを搭載した最新の EMS パッケージソフトウェアである「Main GATE/PPA with DD」を導入した工場では、エネルギー原単位悪化の要因分析から、実際に運用改善による省エネの実績を挙げている⁽²⁾。

(2) 熱収支の変動要因分析による故障リスク回避

いつもの熱収支状態を基準にして設定したしきい値を超える変動があり、排熱が悪化した場合に、その要因を分析し対策することによりムダな熱消費を抑制できる。

いつもと違う熱収支状態に短期間で遷移した場合には、少量の蒸気漏れや水漏れや制御機器（スチームトラップ、バルブなど）に軽微な故障のように何らかの問題が発生している可能性が高い。これらを放置すると生産や品質に影響する異常に発展することがある。熱収支変動の分析から早期に発見し、対策することにより、設備全体の故障停止リスク回避につながる。

(3) 熱収支の経時変化の分析

設備の定期点検直後などの熱エネルギー効率が最も良いと考えられる期間の熱収支を基準に熱収支を監視することにより、蒸気利用量や排熱の経時的な増加などの長期的な熱収支の悪化を捉えることも可能である。

長期的な熱収支の変化を分析し、変化への関連が強い変数を関連強度順に抽出することにより、例えば、内部に汚れが蓄積して経時劣化が大きいと推定される熱交換器や配管系統を抽出することができる。経時劣化が大きい機器や配管が判明した場合には、早期にメンテナンスを行ってムダな熱消費の抑制や故障リスクの回避にもつながる。

(4) 設備異常発生時の真因調査への応用

蒸気を使用する生産設備は、複数の熱交換器や制御機器、多くの配管などで構成された複雑な構造である場合が多い。この設備から発生された異常アラームに対して発生原因を早期に明確化する必要があるが、そのためには、多くの人員を動員し、現地調査やデータ分析を行うなど、多くの工数が掛かる。

設備異常の発生前後で熱収支に差異が発生していれば、要因分析によって差異への関連が強い変数を関連強度順に抽出して、設備内部の異常の範囲や原因候補となる機器がある程度絞り込むことができる。

⑤ 熱 EMS ソリューションとしての展開

熱収支分析システムにより得られたデータベースやエネルギー分析結果を用いることにより、大幅な省エネおよび CO₂ 排出量の削減を達成できる設備の導入につなげることができる。

富士電機の蒸気発生ヒートポンプのような排熱回収型ヒートポンプや熱交換器などを用いた排熱回収利用システムを構築する場合、熱収支分析システムを活用することにより、導入に先立って精度の高い投資対効果を計算することができる。

また、データの蓄積と省エネに向けた分析を継続するこ

とにより、蒸気利用設備やそれと連携する排熱利用設備の運用と制御の最適化や自動化にもつながる。

このような取組みを工場全体に拡張することにより、エネルギー供給設備・生産設備および排熱利用などの省エネを目的とした設備が連携したトータルでの省エネソリューションに発展させることも可能である。

⑥ あとがき

AI 技術適用により蒸気利用設備の CO₂ 排出量削減に貢献する熱 EMS ソリューションについて述べた。

工場における生産設備のエネルギー効率改善は、これまではその多くを人手に頼ってきたが、IoT 技術や AI 技術を活用した DX により、自動化および効率化を行うことができる余地が大きい。

産業分野における CO₂ 排出量削減のニーズは国内だけでなく海外においても非常に高まってきている。今後も、CO₂ 排出量の削減に貢献する技術開発や製品開発に取り組み、富士電機の DX の推進に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. 経済産業省. 2021-06.
- (2) 竜田尚登ほか. 国際規格に準拠したエネルギー運用効率の改善—アナリティクス・AIを活用したEMSアドオン機能—. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.130-134.



山口 貴久

データセンター用空調システムや産業用ヒートポンプの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部情報ソリューション事業部情報制御システム第一部主任。



竜田 尚登

製造管理・エネルギー管理・監視制御システムの企画・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部情報ソリューション事業部情報制御システム第一部主査。エネルギー管理士。



オペレーション業務の効率化に貢献する IoT・AI を活用した自動販売機運用サービス

Vending Machine Operation Service Using IoT and AI to Increase Operational Efficiency

片山 修吾 KATAYAMA, Shugo

後閑 武 GOKAN, Takeshi

起 賢一 OKOSHI, Kenichi

自動販売機（自販機）を運営している自販機オペレーターの業界は、人手不足や自販機の設置場所の飽和により、オペレーション業務の効率化および 1 台当たりの売上げ（パーマシン）向上が求められている。今回、オペレーション業務の効率化を実現するためにデータ収集機能、データ閲覧機能、作業支援機能およびデータ配信機能を備えた自販機運用サービスを開発した。これにより、自販機オペレーターへの見える化、分析・効率化、最適化の 3 サービスを提供し、オペレーション業務の効率化、パーマシン向上、設備コスト低減に貢献する。実証実験によりオペレーション業務の効率化を検証できた。

Vending machine operator business is being required to operate more efficiently and to increase sales per machine to offset shortages in manpower and saturation of vending machine locations. To improve operation efficiency, Fuji Electric has developed a vending machine operation service that provides data collection, data viewing, operation support, and data distribution. Using these features, we provide vending machine operators with visualization, analysis and efficiency, and optimization services, contributing to improving efficient operations, increasing sales per machine, and reducing equipment costs. We have substantiated the improved efficiency of operational tasks through demonstration experiments.

1 まえがき

スーパーマーケットやコンビニエンスストアなどの販売チャネルの拡大により、自動販売機（自販機）の 1 台当たりの売上げ（パーマシン）を増やすことが課題となっている。

今回、自販機オペレーター^{（注 1）}のオペレーション業務を効率化するため、IoT（Internet of Things）や AI（Artificial Intelligence）を活用した次の機能を持った自販機運用サービスを開発したので、その内容について述べる。

- 自販機の稼働状態の見える化機能
- 稼働状態に基づく訪問計画最適化機能
- オペレーション業務の最適化提案機能

2 オペレーション業務の現状と課題

自販機オペレーター^{（注 2）}のオペレーション業務では、ルートマンの能力に依存するところが大きく、新しい人材が入っても即戦力とはならないため、特定のルートマンに業務が集中し、長時間労働の解消が課題となっている。

このような背景を踏まえ、富士電機は、新しい機能やデザインを盛り込んだ自販機を顧客に提供していくことに加え、IoT・AI を活用したオペレーション業務の効率化を支援するシステムをセットにした商材を提供していくこ

〈注 1〉自販機オペレーター：自販機を使って飲料などの商品を販売する業者である。自販機の設置・撤去、商品の入替え、売上金回収などの運用を行う。

〈注 2〉ルートマン：自販機の商品補充や入替えなどを実施する担当者という。

とで、顧客の DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）を推進することが自販機メーカーとしての責務であると考えている。

2.1 オペレーション業務の現状分析

図 1 に一般的な自販機のオペレーション業務を示す。自販機のオペレーション業務は、ルートマンが自販機を訪問し、ハンディターミナルの操作により売上げ情報の収集や、自販機への設定作業をオフラインで行ったのち商品の補充などを行うのが一般的である。運用の手順を次に示す。

- (1) 倉庫からその日に補充する商品を払い出し、配送車に積載して自販機に向かう。
- (2) 近くの駐車場に配送車を止めて自販機まで移動し、ハンディターミナルで前回訪問時以降の売上げ情報を収集する。
- (3) 配送車に戻り、収集した売上げ情報から補充に必要な商品を配送車からピッキングする。

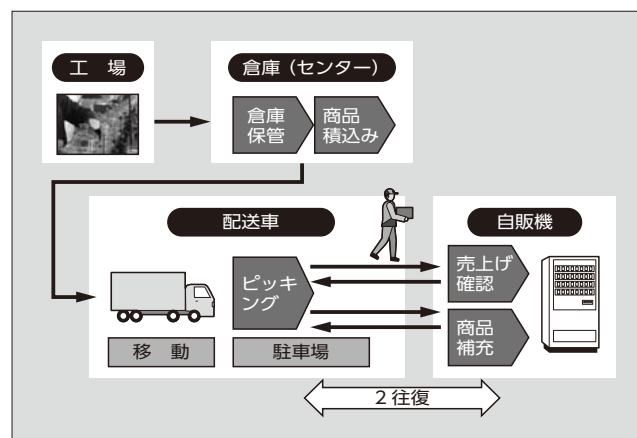


図 1 一般的な自販機のオペレーション業務

- (4) 自販機に移動し、ピッキングした商品を補充する。
 (5) 商品の入替えがある場合はコラムなどの設定を変更した後、清掃などの環境整備を行う。

また、これらのオペレーション業務だけではなく、ルートマンは自販機から収集した売上げ情報や、ロケーションの特性を考慮し、次の訪問計画の立案作業も行っている。

2.2 オペレーション業務における課題

(1) オペレーション業務の効率化

オペレーション業務における作業を計測・分析した結果の一例を図2に示す。

2.1節で述べたように、今までの一般的なオフライン運用では、自販機を訪問して初めて売上げ情報が確認できる。そのため、ルートマンは自販機と商品を積載した配送車の間を、自販機の売上げ情報の収集と補充作業のために2往復する。この移動時間は業務全体の15%を占めている。補充する商品のピッキング作業も、売上げ情報を収集した後に車で行うしかなく、作業時間は業務全体の22%を占めている。

新商品への入替えなどで生じるコラムの変更作業では、商品コード、売価設定などを自販機のキーボードを使って手作業で変更しており、作業時間が業務全体の21%を占めている。作業時間を短縮するためには、4～5桁の商品コードを記憶しておく必要があるなど、操作に熟練が必要となる作業であることが課題となっている。

このように、売上げ情報がリアルタイムに確認できないことによって生じる移動時間や現地作業、さらには非効率的な手作業がオペレーション業務の非効率を招いている。高層ビルや大規模施設などでは、駐車場と自販機の設置場所が離れている場合が多く、場所によっては有料の駐車場を使用することもあるため、移動時間や作業時間の短縮が強く望まれている。

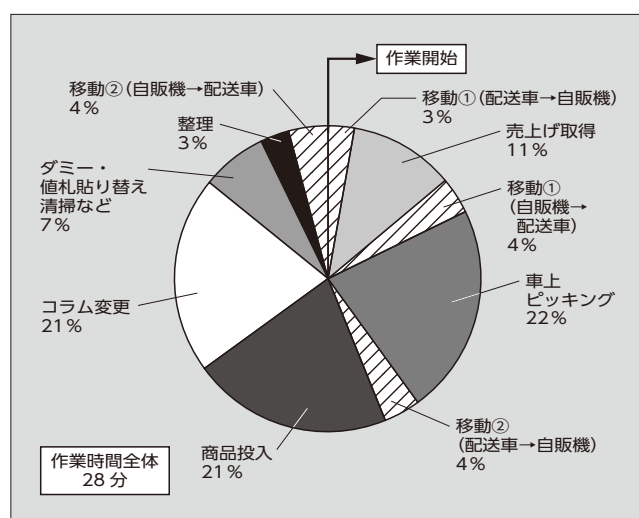


図2 オペレーション業務の作業別構成比

〔注3〕コラム：自販機内の商品を入れる棚

また、各ルートマンは複数台の自販機を担当している。自らの経験から各自販機の販売状況に応じて訪問頻度を決定し、その日に効率よく自販機を訪問できるように訪問計画を立案している。しかし、自販機を訪問して初めて売上げ本数が確認できるため、ベテランのルートマンであっても、想定より実際の販売数が少なく商品補充が不要な自販機を訪問してしまうこともある。不要な訪問は訪問コストを増大させるため、自販機を訪問しなくても売上げ情報が取得でき、最適な訪問計画を立案できることが望まれている。

(2) パーマシン向上

パーマシンを向上させるためには、設置場所の特性や季節に応じて最適な商品に変更する必要があるが、商品の変更判断やコラムの変更作業はルートマンのノウハウやスキルに依存するところが多い。経験が浅いルートマンは余剰在庫を恐れてコラムの変更時期が遅れ、売上げ低下につながってしまうこともある。ベテランのルートマンのノウハウの共有や、コラムの変更作業の最適時期での実施が課題となっている。

また、商品の売切れや自販機の故障がリアルタイムに把握できないため、販売停止状態が継続して販売機会を逃してしまうこともパーマシンの向上につながらない要因の一つとなっている。

(3) 設備コストの低減

自販機利用者の利便性を向上させるために、電子マネーやスマートフォンを使ったポイントサービス、デジタルサイネージなどに対応するケースが増えている。そのため、用途ごとに通信端末を取り付ける必要があり、設備コストや通信コストの低減が課題となっている。

③ 課題を解決する新サービス

3.1 自販機運用サービスのシステム構成

②章で述べたオペレーション業務の効率化やパーマシンの向上などの課題を解決する“自販機運用サービス”を、自販機オペレーターに提供を開始した。図3に自販機運用サービスのシステム構成を示す。クラウドサーバ、自販機、自販機に搭載した富士電機製の通信端末(MCU: Multi Communication Unit⁽¹⁾)、システム管理用PCなどで構成されている。

本システムは、自販機の売上げ情報、商品売切れ情報、自販機故障情報および稼働情報をMCU経由でリアルタイムにクラウドサーバに集約する“データ収集機能”、クラウドサーバに集約された自販機の各種データを、事務所に設置しているPCや、スマートフォン、タブレットなどを使ってルートマンが閲覧できる“データ閲覧機能”、各種データに基づきオペレーション業務の支援サービスを提供する“作業支援機能”、および自販機側の各種設定を行う“データ配信機能”を持っている。

富士電機のMCUは他社製自販機に搭載して情報を取得できるため、より多くの顧客に本サービスを導入してもら

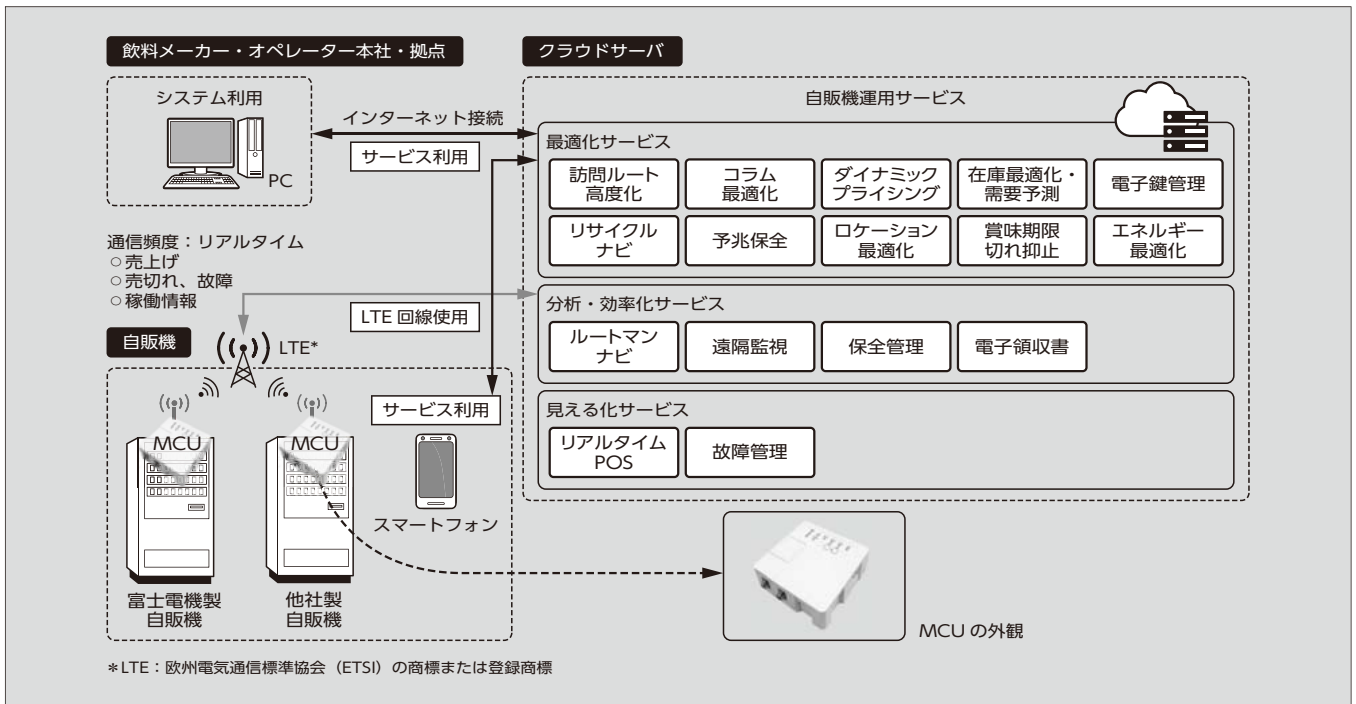


図3 自販機運用サービスのシステム構成

うことが可能である。

3.2 自販機オペレーターへの提供サービス

自販機運用サービスが提供しているサービス、および開発中のサービスを表1に示す。提供するサービスは次に示すように大きく三つに分類される。

(1) 見える化サービス

自販機の状態が変化するたびにサーバに送信される販売データ、故障データ、売切れデータおよびつり銭データをリアルタイムに参照できる。これらのデータを活用して、商品ごとの売上げ状況が確認できるリアルタイムPOSと、故障状況、売切れ状況、つり銭状況などが確認できる故障管理などを提供している。

(2) 分析・効率化サービス

オペレーション業務の効率化を支援する。リアルタイムに収集した売上げ情報や売切れなどの自販機状況の情報を基に、効率的な訪問計画を提案するルートマンナビや、クラウドサーバより自販機への各種設定作業を行う遠隔設定などを提供している。

(3) 最適化サービス

外部データやAIの活用により、分析・効率化サービスの効果を最大化する。

各自販機より収集する販売状況に加え、各ロケーションの訪問可能時間帯、渋滞情報などの外部データからAIを活用して、最適な訪問ルートや訪問順番を提案する訪問ルート高度化、売上げを最大化するためのお勧め商品や商品配置を提案するコラム最適化、ダイナミックプライシングなどを提供し、経験の浅いルートマンが担当しても、業務の効率化、および売上げの最大化が可能となる。

表1 自販機運用サービス一覧

サービス名		サービス概要
見える化	リアルタイムPOS	売上げデータの見える化（自販機ごと、ロケーション別、商品別、業種別の検索など）
	故障管理	故障履歴管理、作業実績管理
分析・効率化	ルートマンナビ	訪問計画支援、管理（売切れ、つり銭切れ、故障、在庫を加味）倉庫ピッキング作業管理
	遠隔設定	ファームウェア更新、設定データ更新（コラム変更）
	保全管理	設置、撤去、移設の作業計画と作業実績、故障履歴から保守作業の計画と作業実績を管理
	電子領収書	電子領収書の発行（PDF形式などでスマートフォンに送信）
最適化	訪問ルート高度化	売上げに加え、マップデータや渋滞情報などの外部データ連携により、最適な訪問順序の提案
	コラム最適化	コラムパターンの提案（業務効率、売上げ向上）
	ダイナミックプライシング	商品の価格をリアルタイムに変更
	在庫最適化・需要予測	自販機ごとの売上げ、在庫データから、需要予測、最適在庫計画、補充の適正化
	電子鍵管理	鍵使用権スケジュール管理、履歴管理
	リサイクルナビ	ごみ容量の見える化（訪問計画と連動）
	予兆保全	部品の稼働回数の見える化、部品の故障予測、部品交換、商品配置の推奨
	ロケーション最適化	設置先販売シミュレーション機能
	賞味期限切れ抑止	商品の賞味期限・加温劣化の管理
	エネルギー最適化	電力使用量の平準化制御

3.3 サービス適用によるオペレーション業務の改善

自販機運用サービスの導入により、2章で示したオペレーション業務の課題を解決することが可能になり、業務

効率が大きく改善する。自販機運用サービスの導入前後の業務フローの比較を図4に示す。

(1) オペレーション業務の効率化

リアルタイムPOS（Point of Sales）によって、ルートマンは自販機の前まで行かなくても、前回訪問時点からの販売数を事前に確認することが可能である。導入前は、自

販機の売上げ情報収集と補充作業のために自販機と配送車の間を2往復していたが、リアルタイムPOSの導入後は、オペレーションが1往復で完了し、移動時間が大幅に削減できる。

さらに、補充する商品のピッキング作業を、営業所の倉庫で事前に済ますこともできる。ルートマン以外の担当者がピッキング作業を行うことができるため、現地での作業時間を削減できるだけでなく、業務集約による効率化や、分業による労働環境の改善につながる。

また、リアルタイムPOSに、ルートマンナビと訪問ルート高度化を組み合わせることにより、売上げ情報、売切れ情報、自販機故障情報を考慮して、複数の自販機を最短時間で訪問することが可能である。

図5に、今回開発したルートマンナビの指示画面の一例を示す。専用のスマートフォン対応アプリケーションを使用することで、ルートマンは最適訪問ルートと、対象自販機での作業内容を確認できる。事前に収集した販売情報に基づいて立案した訪問計画であるため、販売数が少なく商品補充が不要な自販機を誤って訪問してしまうことも回避できる。

このように、自販機運用サービスを活用することで、オペレーション業務を効率化できる。

(2) パーマシン向上

パーマシンの向上のため、当該自販機の販売傾向を分析して、コラム最適化データ（お勧め商品や商品配置を表すデータ）を自動的に出力するコラム最適化を提供している。経験が浅いルートマンでもコラム最適化データに従って最適な商品変更とコラム変更を行うことにより、パーマシンを向上させることができる。

遠隔設定は、訪問前にクラウドサーバから自販機にコラム設定に必要な商品コードや売価設定などのデータを配信することで、現場で手入力していた複雑な設定作業を自動化でき、適切なタイミングと頻度でコラムの変更作業を支援する。

また、故障管理とルートマンナビの活用により、故障している自販機や売切れが発生している自販機を優先的に抽出し、当日の訪問計画に自動的に組み込む。その結果、販

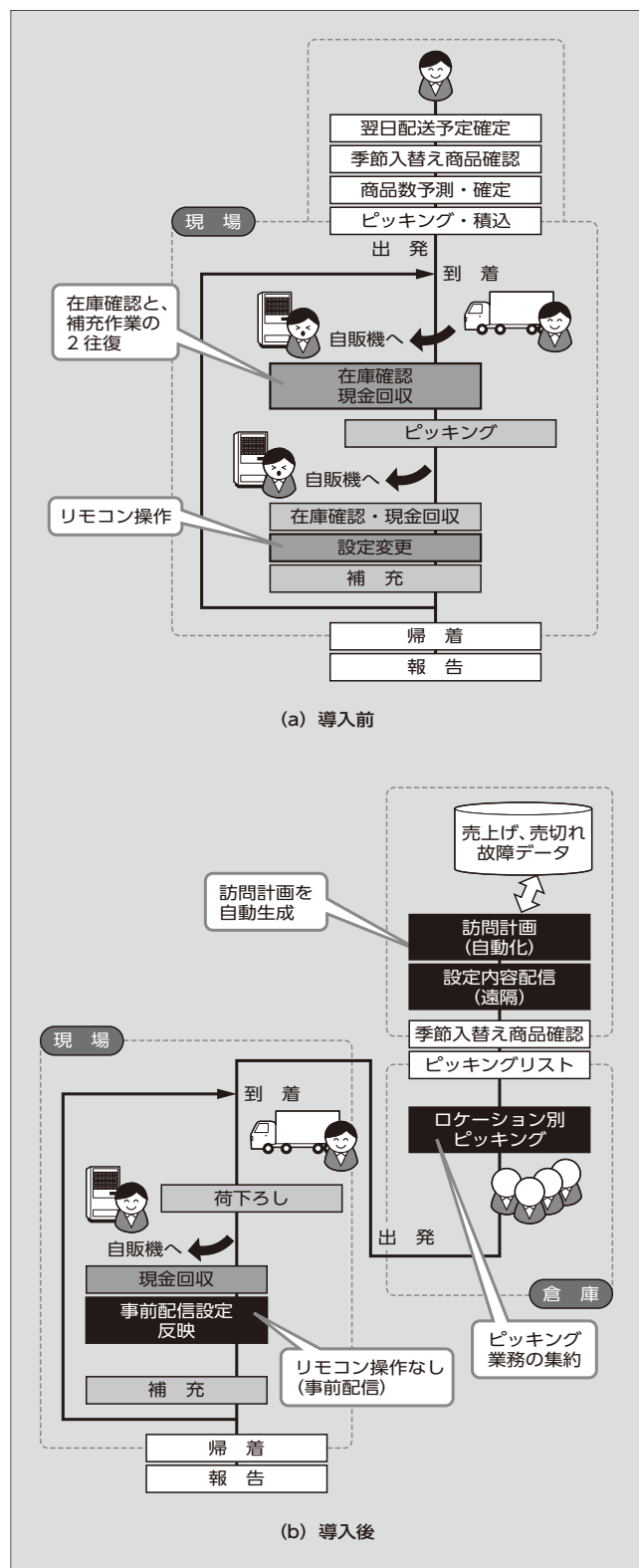


図4 自販機運用サービスの導入前後におけるオペレーション業務フローの比較

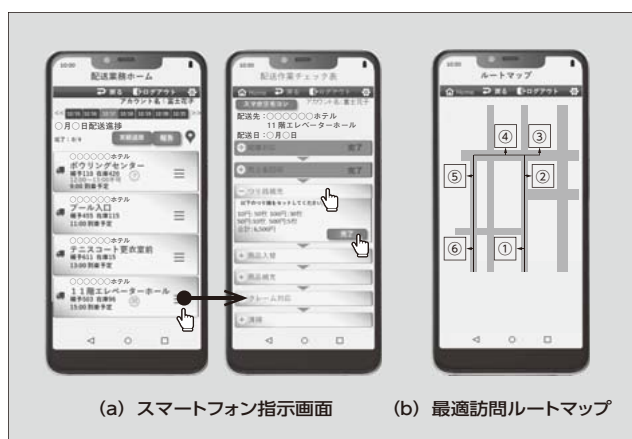


図5 ルートマンナビでの訪問計画の指示画面

売ロスを低減し、パーマシンの向上につなげることが可能である。

(3) 設備コストの低減

電子マネーやスマートフォンを使ったポイントサービスなどのシステムを追加しようとすると、通信端末などのコストが増大する。富士電機の MCU は、1 台で複数のサーバに接続できるので、システムごとに必要であった通信端末が 1 台で済む。これにより、設備コストや通信コストを軽減させ、売上げを増やすための各種サービスの追加が容易になる。

3.4 今後の自販機運用サービスの展開

自販機運用サービスは、オペレーション業務を効率化する。加えて、クラウドサーバから自販機への配信機能を活用して、自販機や MCU のソフトウェアの更新や、新たなサービスの追加ができる拡張性の高いシステムとなっている。

また、さらなる業務効率向上のために、近年では、自販機ごとに固定のルートマンを割り当てるオペレーションではなく、複数のルートマンを動的に割り付けてオペレーションを行うチーム制への移行が望まれている。自販機運用サービスでは、チーム制に対応するための電子鍵管理の準備を進めている。このサービスを利用すると、急なルートマンの変更や交替があった場合でも鍵の受け渡しが不要になり、クラウドサーバでルートマンへの対象自販機に対する開錠の権限付与や、訪問時間帯を設定することが可能である。また、自販機操作履歴をクラウドサーバで確認可能となるので、高いセキュリティ性も確保できる。

4 実証実験結果と考察

自販機運用サービスの利用によるオペレーション業務の改善効果の検証として、実際の顧客の自販機を活用し、表 2 の内容にて実証実験を行った。

150 台の自販機に MCU を取り付け、実証実験を開始した。今回の実験では、前回の訪問以降の商品販売が 100 本未満の場合は、商品を補充する必要がないため、“訪問しない”と定義（設定）した。

図 6 に、サービスの導入の有無による自販機 1 台当たりの作業時間の比較を示す。自販機運用サービスを導入し

表 2 業務効率化の実証実験項目

項 目	内 容
対象台数	150 台
ルートマン	1 人
検証期間	3 か月
使用サービス	ルートマンナビ、リアルタイム POS
検証項目	1 日当たりの訪問自販機の台数
	自販機 1 台当たりの作業時間
	1 日の全体作業時間

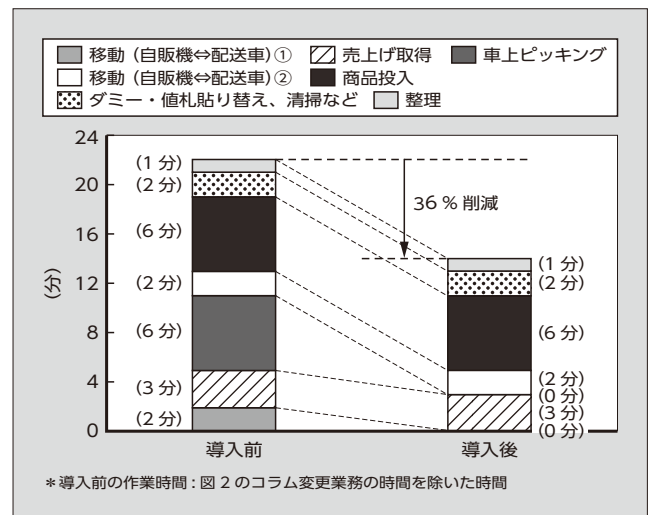


図 6 自販機 1 台当たりの作業時間

表 3 1 日当たりのオペレーション時間

項 目	導入前	導入後	削減効果
①訪問自販機数(台)	18	16	11%
②自販機での作業時間*1(分)	22	14	36%
③全体所要時間*2(分)	566	374	34%

(自販機の設置場所間の移動時間：10分)
 *1 作業時間：図 6 に記載した時間の合計値
 *2 所要時間：①×②+10×(①-1) で算出した値

た場合は、倉庫で事前ピックアップを行うことができる。その結果、自販機の販売数を確認するための移動時間“移動（自販機⇄配送車）①”と“車上ピックアップ”の時間が不要になり、全体の作業時間が短縮できることが分かる。特に、2.2 節に記載の高層ビルや大規模施設などの配送車と自販機の設置場所が離れているロケーションでは、本サービスの導入による効果は一層大きくなる。

表 3 に導入の有無によるルートマン 1 人の 1 日当たりのオペレーション時間を示す。なお、自販機間の移動に要する時間は 10 分として算出している。導入前は商品販売が 100 本未満のため商品の補充が必要なかった自販機も訪問してしまうケースがあったが、不要な訪問がなくなり、訪問する自販機数自体が減った。さらに、図 6 で示したように 1 台当たりの作業時間も 36% 削減できており、表 3 の③に示すように、オペレーション時間の 34% が削減できることが分かった。

実証実験に協力していただいた顧客からは、自販機での作業時間が短縮されたことと、補充する必要のない自販機を訪問しなくてもよくなったことについて、高い評価を頂いた。今後、コラム最適化、遠隔設定などを適用した実証実験を計画している。これらのサービスにより、さらなる効率化に加え、パーマシン向上も期待できる。

5 あとがき

オペレーション業務の効率化に貢献する IoT・AI を活用した自動販売機（自販機）運用サービスについて述べた。

今回の取組みで自販機オペレーターの日常業務を合理化できることを実証した。実証実験から明らかになった課題などの改善対応を実施し、お客さまがより使いやすいシステムに仕上げていく予定である。

また、複数のルートマンを割り付けたチーム制に対応するための電子鍵管理や AI を使用した最適化制御などのサービスを早期にリリースすることにより富士電機の DX 推進に貢献するとともに、自販機を運営している自販機オペレーターの業界の業績向上に貢献する所存である。

参考文献

- (1) ペレラ マドゥラほか. ICTソリューションによる自動販売機の業務プロセスの改善. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.1, p.17-20.



後閑 武

自販機および運用サービスの商品企画に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部事業統括部自販機センター自販機技術部担当課長。



起 賢一

自販機および運用サービスの商品企画に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部事業統括部自販機センター自販機技術部主任。



片山 修吾

自販機の運用サービスの開発に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部三重工場制御開発設計部担当課長。



制御システムのライフサイクルフルサポートに貢献する IoT を活用した遠隔監視診断システム

Remote Monitoring and Diagnostic System Utilizing IoT That Contributes to Full Life Cycle Support of Control Systems

原口 隆 HARAGUCHI, Takashi

近年は、現場の熟練運転員・保守員の高齢化や要員確保の問題などから、生産設備の安定稼働や保全業務の負荷低減がより大きな課題となりつつある。富士電機は顧客の設備のライフサイクル全体の最適化に貢献すべく、IoT や AI などを用いたデータ活用に基づく、操業支援ソリューションの開発・展開を推進している。このたび、DX 推進の一環として遠隔監視診断システムを開発した。従来の RAS 収集・解析機能を高度化し、O&M プラットフォームと連携したシステムである。これにより、設備稼働率の向上や保守コストの低減を図ることができる。

In recent years, it has become increasingly important to ensure the stable operation of production facilities and to reduce the burden of maintenance work, due to the aging of skilled operators and maintenance personnel and the problems associated with securing personnel. Fuji Electric is contributing to the optimization of the entire life cycle of its customers' facilities by developing and providing operation support solutions based on data processed by IoT, AI. As part of our efforts to promote DX, we have developed a remote monitoring and diagnostic system. With enhanced conventional RAS collection and analysis systems, it links to our O&M platform, improving equipment availability and reducing maintenance costs.

1 まえがき

生産設備の保全は、安定操業を実現する上で重要な要素の一つである。設備事故は、企業イメージの低下と社会的責任の不履行、経営責任などの経営リスクだけでなくお客さまの安全にも関わるため、メーカーはお客さまと共に設備保全技術の向上を図り、安全・安心な操業維持に取り組んでいる。

また、近年は、現場の熟練運転員や保守員の高齢化が進んでいることや、要員確保が困難になっていることにより、設備の安定稼働や保全業務の負荷低減がより大きな課題となりつつある。

富士電機は、お客さまの設備のライフサイクル全体の最適化に貢献するために、DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）推進の一環として、IoT（Internet of Things）や AI（Artificial Intelligence）などを活用したデータ活用に基づく、運転支援や保全支援から構成される操業支援ソリューションを開発し、展開を推進している。

本稿では、保全支援ソリューションの一アイテムとして、IoT を活用した遠隔監視診断システムについて述べる。

2 従来技術・サービス

2.1 分散型制御システムの概要

富士電機は、顧客の設備に分散型制御システム（DCS：Distributed Control System）を多数納入している。

DCS は、各種の機器とネットワークから構成され、鉄鋼、セメント、清掃工場など各プラントの運転制御を行う重要な装置である。

富士電機が提供する監視制御システム「MICREX-View

XX（ダブルエックス）」は、次の機器で構成される。基本構成を図1に示す。

- (1) データベースステーション「XDS-3000」
プラントや各種プロセスのデータを一元管理する。
- (2) オペレータステーション「XOS-3000」
プラントの状態監視と操作や、データベースステーションで管理するトレンド、警報・運転履歴、帳票（日報・月報）の表示を行う。視認性よく情報を集約し、オペレーターが安全に操業するためにサポートする。
- (3) コントロールステーション「XCS-3000」
各種現場機器からのデータ収集と、制御演算を行う。
- (4) エンジニアリングステーション「XES-3000」
画面やコントロールステーションのエンジニアリングやメンテナンスを行う。

2.2 DCS の故障解析情報

DCS の故障解析情報である RAS（Reliability, Availability and Serviceability）は、図2に示すよう

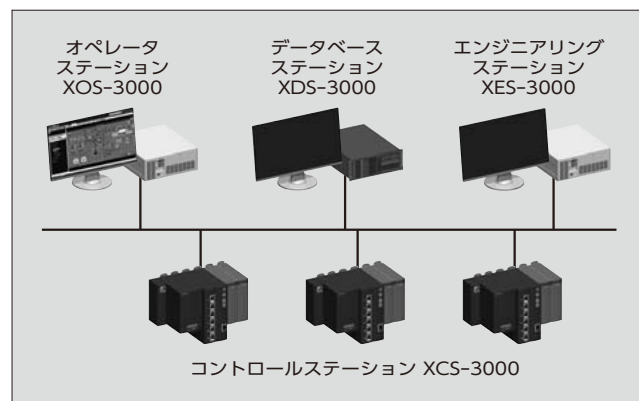


図1 「MICREX-View XX」の基本構成

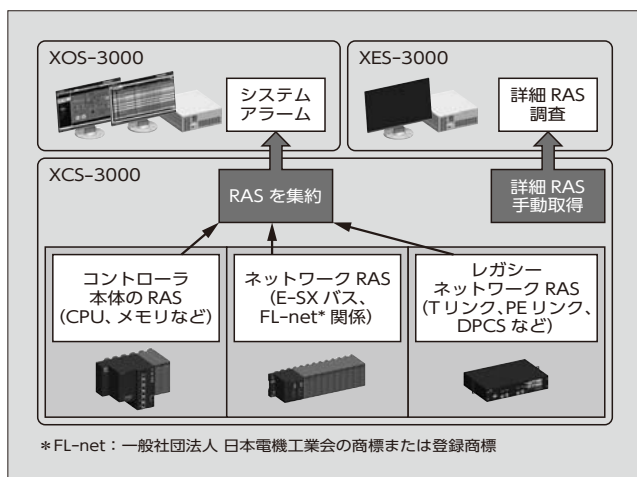


図2 RASの構成

に、コントロールステーションの運転状態や故障状態などの“コントローラ本体のRAS”、I/O 機器の運転状態や故障状態などの“ネットワークRAS”、ネットワークアダプタの運転状態や故障状態などの“レガシーネットワークRAS”から構成されている。

プラントを操業するオペレーターは、監視操作を行うXOS-3000のシステムコンディション画面でRASの情報を確認できる。この情報は、運転状態の変化をリアルタイムで把握するため、一定周期で情報を自動で取得したRAS（集約RAS）で表示される。これにより、運転状態の変化があればすぐに対応できる。

より詳細なRAS（詳細RAS）の情報を参照したい場合は、エンジニアリングを行うXES-3000を使って手動で取得する。

2.3 DCSの保守サービス

富士電機は、2.2節で説明したRASを活用し、次の保守サービスを提供してきた。図3に富士電機が提供する保守サービスを示す。従来のサポートは次に示すとおりである。

(1) 事後保全と予防保全

設備や機器が故障した際に、敏速に修理や部品交換を行う事後保全（事故発生基準）、および決められた計画に基づき保全を行う予防保全（時間基準）

(2) 緊急時のコールセンター機能

24時間365日のコール受付対応

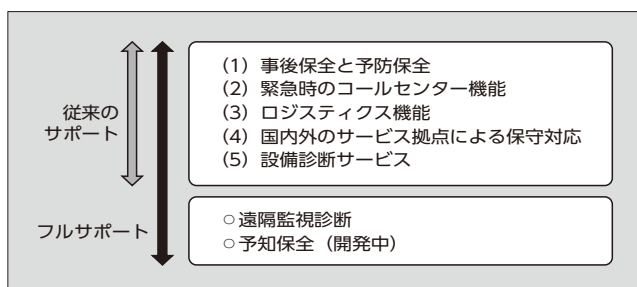


図3 設備の保守サービス

(3) ロジスティクス機能

緊急保守用部品ストックと供給支援の対応

(4) 充実した国内外のサービス拠点による保守対応

最寄りの拠点技術者の派遣

(5) 設備診断サービス

環境診断などの設備診断サービスの提供

3 制御システムの保守サービスにおける課題

制御システムのライフサイクルにおいて、顧客からは、“設備の稼働率を上げるため、故障した場合でもより早く復旧したい”“劣化による突発的な故障による設備停止を防止したい”“耐用年数に達したら更新するのではなく寿命まで使い切りたい”といった要望が多い。

これらの要望を実現するためには、次に示す二つの課題がある。

(1) 遠隔監視診断システムの構築

富士電機の技術者による対応を迅速化するため、現場から離れた場所でも故障情報を入手、事前手配・準備を可能にするシステムの構築が必要である。

(2) 予知保全技術の開発

これまで熟練技術者の知見やノウハウに頼っていた故障解析を、正常状態を含めて収集した情報に基づいて自動で解析することにより、予防保全（時間基準）から予知保全（状態基準）への移行が可能になる。

富士電機は、これらの課題を解決した保守サービス（フルサポート）を提供する。新たに追加したサービスについて4章以降に述べる。

4 IoTを活用した遠隔監視診断システム

遠隔監視診断を可能にするため、従来のRAS収集・解析機能をIoTを活用して高度化し、O&Mプラットフォーム^(注1)と連携したシステムを開発した。

4.1 遠隔監視診断システムの概要

開発した遠隔監視診断システムは、これまでのRAS収集・解析を改良したものである。

遠隔監視診断システムは、オンプレミス環境^(注2)に組み込まれ、収集機能、解析機能、表示機能、およびO&Mプラットフォーム連携機能を持っている。

〈注1〉O&Mプラットフォーム：ISO 18435（O&M統合モデル）で定義された運転管理業務、保全管理業務、分析管理業務を支援する機能があり、現場（フィールド）からデータを収集し、オンプレミス、クラウドで新しい価値を創出するO&Mソリューションを実現するための基盤システムである。

〈注2〉オンプレミス：サーバやソフトウェアなどの情報システムを使用者（通常は企業）が管理する設備内に設置・導入し、運用することをいう。

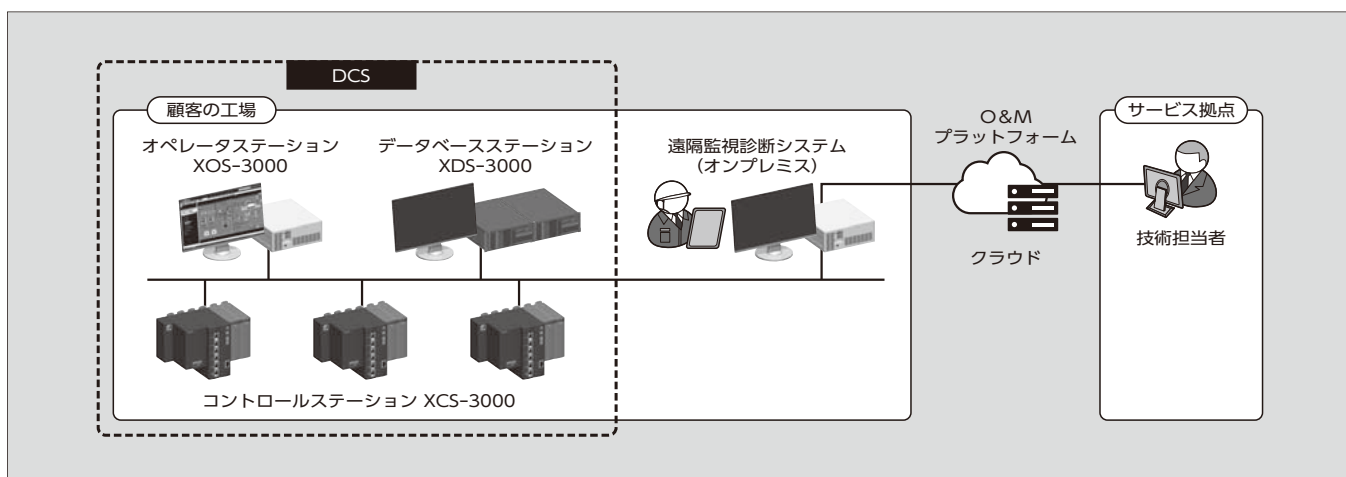


図4 遠隔監視診断システムの構成

遠隔監視診断システムの構成を図4に示す。ここで“遠隔”とは、技術担当者が現場で立ち合いをしていない状態を示す。

遠隔監視診断システムはO&Mプラットフォームと連携し、全国のサービス拠点の技術者が遠隔でサポートする。

4.2 遠隔監視診断システムの機能

(1) 収集機能

(a) RAS 自動収集

従来、自動収集の対象が、集約RASだけであったが、詳細RASも周期的および異常発生時に自動収集できるようにした。また、任意の時刻を指定して、XDS-3000とXOS-3000のログファイルやダンプファイルを一括収集する。

(b) ネットワークデータ収集

制御LANに接続されたXCS-3000のネットワーク情報（送受信カウンタ、各種状態など）を周期的に自動収集する。

(2) 解析機能

(a) RAS 簡易診断

RAS自動収集機能を使って収集したXCS-3000のバイナリデータ形式のRAS情報を自動解析し、故障などの要因候補を遠隔監視診断システムで絞り込む。あらかじめ分類した故障要因のどれに当たるかを自動照合するとともに、RAS情報をテキストデータに自動変換する。同時に、抽出される複数の故障要因の組合せから対処方法を自動的に決定し、簡易報告書として出力する。従来は手動で情報を解析していたため、時間がかかったが、本機能により簡易でも短時間で現場の情報が得られ、速やかに現状把握ができる。

(b) ネットワーク簡易解析

ネットワークデータ収集機能は収集した情報から制御LANにおいて故障が発生している箇所をパターン解析し、故障箇所を推定する。なお、この機能は汎用性が高く、機能が限定されるアンマネージドスイッチで構成されている制御システムにおいても有効である。

(3) 表示機能

(a) システムコンディション表示

図5にシステムコンディション画面を示す。制御LANに接続される各制御装置の稼働状態を、色別に表示する。異常が発生した過去の日時を選択すると、収集したRASの情報からその時の装置状態を再現し、原因解明を支援する。

(b) ネットワークカウンタ表示

ネットワークデータ収集機能は、収集した各XCS-

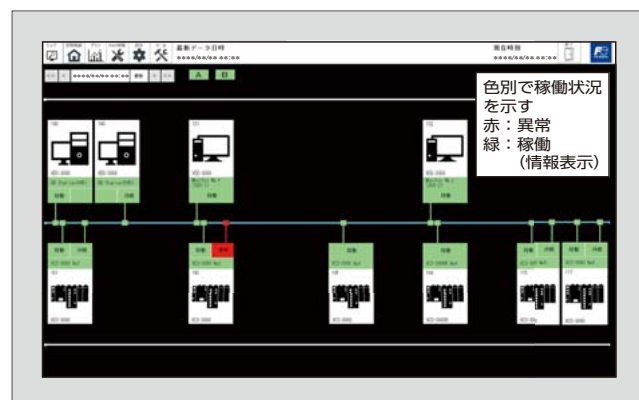


図5 システムコンディション画面

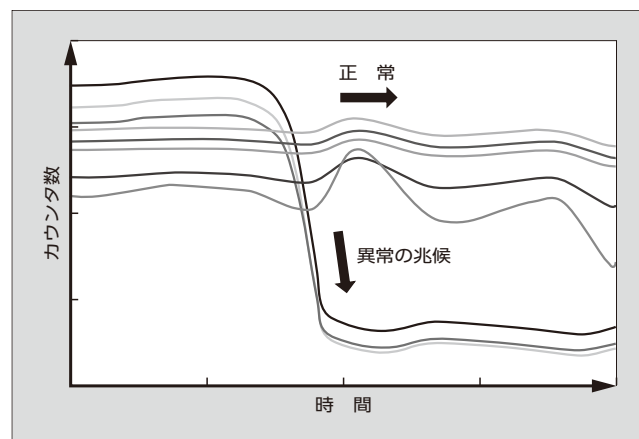
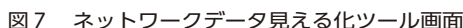


図6 ネットワークカウンタの表示例

(c) 見える化ツールを使ったネットワークデータの表示
ネットワーク上に伝送されるパケットのプロトコルを解析し、トークン遅延、メッセージ異常などのネットワークの異常を表示する(図7)。従来のデータは数字の羅列で、手動で解析していたが、見える化ツールに



遠隔監視診断システムは、収集した各種 RAS 情報とその情報を基に解析した診断結果などを定周期送信データとして、クラウドに送付する。従来はオンプレミスで収集していたが、O&M プラットフォームと連携することで、クラウドでデータを共有できる。これらは O&M プラットフォームの Web 画面で閲覧できる。また、故障発生時には、あらかじめ指定した宛先に O&M プラットフォームからメールを送信し、サービス拠点のカスタマーエンジニア（CE）がメールを受けとる。CE は、必要に応じて遠隔監視診断システムから O&M プラットフォーム経由で、故障発生時の詳細 RAS（時刻指定送信データ）を取得して、緊急保守や制御システムの管理および保全計画などのリモート支援を行う。

遠隔監視診断システムを導入すると、サービス拠点でメールを受け付けた後、O&M プラットフォーム連携機能を活用することで遠隔から調査が可能で、CE の現地への派遣と代替部品の手配を並行して行うことができる。これにより、図 9 に示すように、導入前と比較して障害発生から復旧完了までに要するダウンタイムを、約 20 % 短縮できるようになった。このシステムにより、設備の稼働率を向上できる。

前述した遠隔監視診断システムのほかに、部品の寿命と使用条件から各種機器や設備の交換時期を算出する“制御システム部品寿命予測”や、ネットワーク上で伝送障害を引き起こす兆候（ノイズ、断線、コネクタ異常など）を捉える“ネットワーク予知保全”もライフサイクルフルサポートとして将来実装予定である。



例えば、ネットワークの突発的な障害に対する予知保全は、障害発生を未然に防ぐだけでなく、無用な点検作業の抑制にもつながる。また、部品寿命予測は、予備品在庫を適正化できる。さらには、これら機能を活用する保全計画機能は、点検作業を最適化でき、保守コストは 10 ～ 20 % 削減できる見込みである。

7 あとがき

制御システムのライフサイクルフルサポートに貢献する IoT を活用した遠隔監視診断システムについて述べた。

今後は、富士電機の DX 推進の一環として、予知保全を含む遠隔監視診断システムの機能を拡張することにより、従来の事故発生基準・時間基準から、より高度な状態基準

の保守サービスを提供することで、お客さまの設備の安定操業に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 福島宗次. 設備保全の最適化を支援する「設備管理まるごとサービス」. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.3, p.161-165.



原口 隆

鉄鋼分野の計測制御エンジニアリング業務に従事。
現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー
事業本部プロセスオートメーション事業部技術第
一部。



IoT を活用した現場業務の全体最適を支援する O&M ソリューション

O&M Solution That Supports the Total Optimization of Field Operations Using IoT

喜多村 卓 KITAMURA, Takashi

山田 隆雄 YAMADA, Takao

近年、現場のさまざまなシステムの中に埋もれたデータを、IoT 技術や AI 技術を導入していかに有効活用し、業務改善を進めていくかが求められている。富士電機は、運転管理や保全管理で蓄積されたデータを統合・連携することでデータの効果的な活用を目的とした O&M プラットフォームと、それを活用する O&M ソリューションを開発した。O&M プラットフォームは、ISO 18435 に基づいた運転と保全情報の相互利用モデルを適用している。O&M ソリューションにより、設備保全の最適化や障害復旧時間の短縮などが可能である。

In recent years, there has been a need to improve operations by effectively utilizing the data stored in various systems in the field through the introduction of IoT and AI technologies. To effectively use data by integrating and linking data collected in operation and maintenance management, Fuji Electric has developed an O&M solution, which uses O&M platform. The O&M platform is built based on ISO 18435 model, which is for interactive use of operation and maintenance information. The O&M solution helps optimize equipment maintenance and shorten the time required for disaster recovery.

① まえがき

2015 年頃から欧米を中心に“Industrie4.0”や“スマートマニュファクチャリング”という概念が広まり、日本においても“第 4 次産業革命”や“Society 5.0”など、これまでにはなかった新たな価値をもたらす社会の実現を模索し始めた。製造業においても IoT (Internet of Things) 技術や AI (Artificial Intelligence) 技術を導入し、ものづくりだけでなくサービスを含め、さらなる進化への動きが大きくなっている。

生産効率を上げるため、運転管理システムや保全管理システムなど、さまざまなシステムが導入されている。しかし、システム内に蓄積されたデータの活用は、ほとんどがそのシステム内での利用に留まっているのが現状である。さらなる生産効率の向上のためには、システムの中に埋もれたデータを有効活用し、現場の業務改善を進めていくことが必要である。

さらに、2020 年初頭からの新型コロナウイルス感染症の世界的な流行により、製造業を取り巻く環境は急激に変化し、ものの流れやものづくりにおける IT 技術を使った変革〔DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation)〕は最優先の事項となっている。

富士電機の DX の核となる IoT システムとして、運転 (Operation) 管理や保全 (Maintenance) 管理で蓄積されたデータを統合・連携することで、データを効果的に活用する O&M プラットフォームと、そのプラットフォームを活用する O&M ソリューションを開発したのでここに述べる。

② 現場の運転・保全業務における課題

製造現場では、生産設備の安定的な稼働や設備保全費の低減、高経年設備への対応、さらにはトラブルの未然防止などさまざまな設備管理上の課題を抱えている。さらに、保全担当者の高齢化と長期的な人材不足も一層深刻化するという課題もある。このような課題を解決するためには、IoT や AI などの最新技術の活用により次に示すようなスマート化の推進が必要である。

(1) 設備診断技術の活用

劣化や故障などを未然に予測する設備診断技術を活用することで突発故障を防止し、設備稼働率の最適化を図る。

(2) 生産性向上に向けたデータ活用

生産現場で収集されるデータを活用することにより、生産のダウンタイムの短縮や製造設備の効率的稼働、製品の品質向上による生産性向上を図る。

(3) 業務データのデジタル化と保守業務の自動化

作業記録や報告書などの業務データをデジタル化し、分析・評価することにより、現場作業や管理の効率化を図る。また、ガイダンスによる作業支援、一連の作業指示などの管理業務の支援など現場の運営および保守業務の自動化を図り、ミス・モレを防止する。

(4) 蓄積された知見などの活用

デジタル化されたデータの分析・評価の結果を知見として蓄積・活用することにより、熟練技術者のノウハウ継承を図る。

さらに製造現場においては、運転データと保全データの連携による生産効率向上を図ることが大きな流れになってきている。保守部門では設備の安全性と信頼性を重視するのに対して、生産部門では効率的で安定した生産を重視する。両部門は、おのおのが重視する項目を改善するため

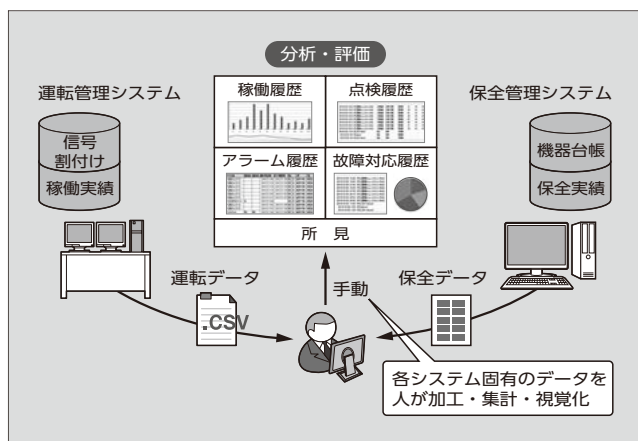


図1 現状の運転管理システムと保安全管理システムの手動によるデータ連携

に、おのこの裁量に基づき IT 化などを進める傾向にある。しかし、実際には設備停止を伴うメンテナンスが保守部門で計画されていても、生産部門の生産計画上の制約から設備停止が行えず、メンテナンスを先延ばしにし、その結果、設備故障によって生産が停止する事態となることもある。そのため、企業の競争力を強化するためには、生産設備の運転とメンテナンスを統合的に計画・管理するシステムが必要である。図1に示すように、従来多くの現場では、フォーマットや管理体系が異なる運転管理システムと保安全管理システムのデータを合わせて分析するためには、データの補正や整合などの加工が人手を介した作業となり多大な労力を必要としていた。

この課題に対し富士電機は、ISO 18435 (O&M 統合モデル) に基づいた運転と保全情報の相互利用モデルを実現する O&M プラットフォームを開発した。

③ O&M プラットフォームの概要

3.1 IoT システムにおける O&M プラットフォームの位置付け

O&M プラットフォームは、図2に示すように IoT シス

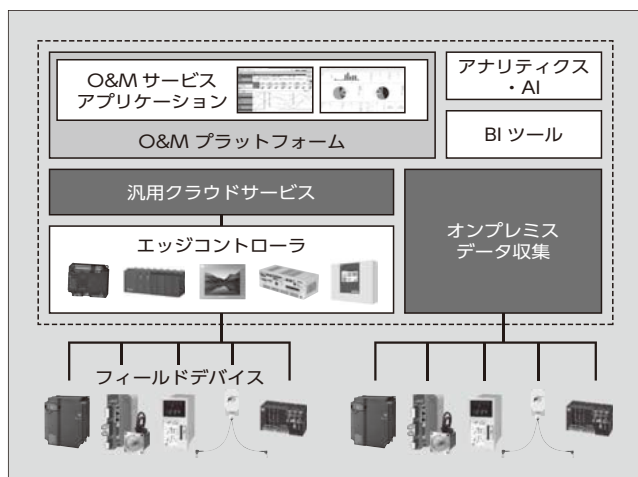


図2 IoT システムにおける O&M プラットフォームの位置付け

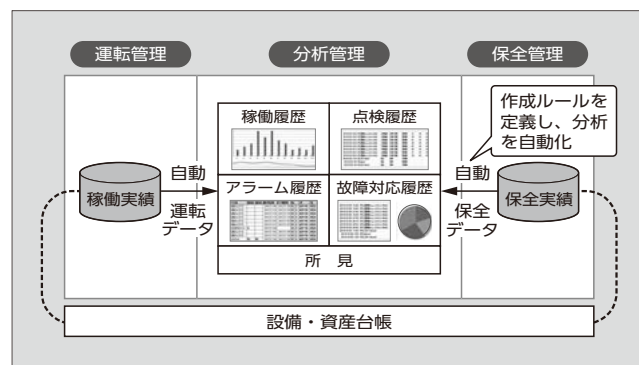


図3 O&Mプラットフォームによる運転データと保全データの連携

テムの要素として位置付けられ、フィールドデバイスからデータを収集するエッジコントローラ、汎用クラウドサービスおよび収集したデータを分析および解析するビジネスインテリジェンスツール (BI ツール) やアナリティクス・AI と連携する。さらに、この O&M プラットフォームでは、図3に示すように運転データと保全データを統合して管理できるようにするため、運転管理と保安全管理で使用する設備・資産台帳を統一した。これにより、運転データと保全データを連携したデータとして一つのシステム上で、自動収集して分析管理ができるようになった。この連携を通して O&M プラットフォームは、運転データおよび保全データを活用するさまざまな O&M サービスアプリケーションを実行し、O&M ソリューションを実現する。

また、O&M プラットフォームは、クラウド環境とオンプレミス^(注)環境の両形態で提供可能であり、顧客のセキュリティ要件やデータ量などの制約に柔軟に対応できる。

3.2 O&M 統合モデルへの準拠

O&M プラットフォームは、ISO 18435 に基づいた運転と保全情報の相互利用モデルを適用した機能を備えている。

図4に O&M 統合モデルの全体像を示す。左が運転管理、右が保安全管理、そして中央が両者を統合する分析管理である。製造現場の課題 (安定稼働、業務効率化、ノウハウ継承) に対して、分析管理においてデータを分析した結果を運転計画や保全計画にフィードバックし、改善を継続的に行うサイクルを回すことで解決を図る。例えば、設備の稼働状態、環境負荷と保全履歴の相関などから分析を行う。この分析結果を基に、保全計画や運転計画の見直しや修正、設備の運用・管理を最適化する。

(1) 運転管理機能

運転管理機能は、図5に示すように現場の生産設備の運転や環境、品質などの稼働データをエッジコントローラ経由で収集し、蓄積したデータの管理や見える化を行う。

〈注〉 オンプレミス：サーバやソフトウェアなどの情報システムを使用者 (通常は企業) が管理する設備内に設置・導入し、運用することをいう。

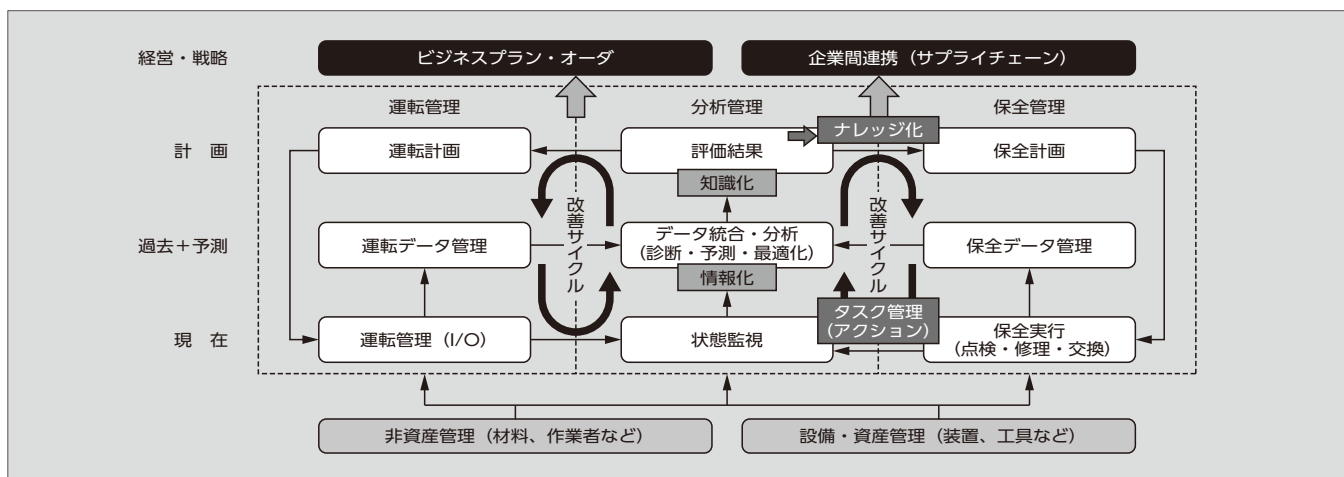


図4 O&M 統合モデルの全体像

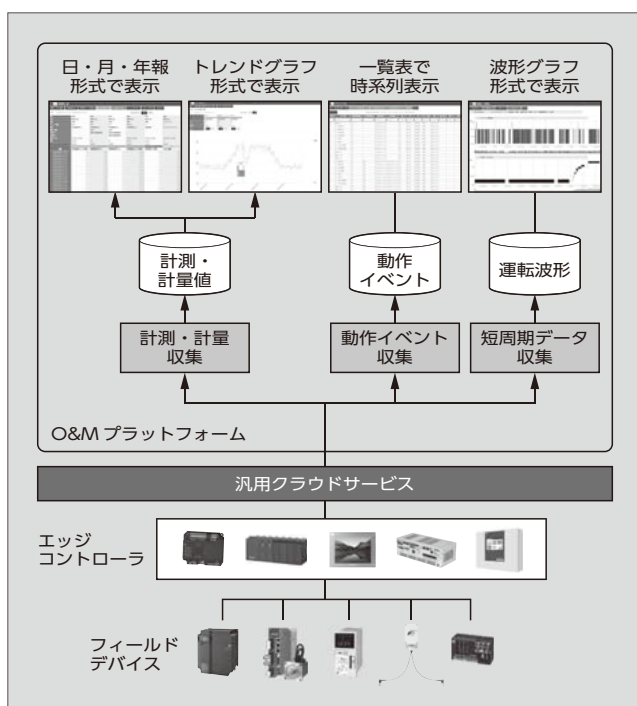


図5 運転管理機能の概要

(a) 計測・計量値

集計処理をした上で、日・月・年報形式の時系列表やトレンドグラフで表示できる。

(b) 動作イベント

時系列形式で表示され、過去から現在までの現場状態が確認できる。

(c) 運転波形

秒単位以下の短周期で収集されるデータは、ファイルとして O&M プラットフォームにアップロードし、波形グラフにして表示することができる。

その他、音声や画像、データなどが格納されたファイルも O&M プラットフォームにアップロードし、遠隔の Web 端末でダウンロードすることが可能である。

(2) 保全管理機能

保全管理機能は、図6に示すように設備の保全管理に関

わる業務を支援する。

定期点検などの計画作業とその作業実績、故障対応などの非計画作業とその対応実績（原因、要因、措置対策）のデータを管理する。これらのデータに基づき、点検などの計画作業の周期調整、作業項目の見直し（管理項目の追加・変更・削除、しきい値など）など保全計画を調整・管理できる。後述の分析管理の状態監視機能にて検知したアラート情報に基づき、修理や点検の業務指示が自動発行されるため、迅速な保全作業が可能となる。

(3) 分析管理機能

分析管理機能は、図7に示すように運転管理データや保全管理データを統合・活用して現場の課題解決を支援する。

(a) 状態監視

イベントや数値が監視条件の設定範囲を逸脱すると、メール通知や保全作業の指示を要求するなど、対策アクションのトリガーを出す。

(b) データ統合分析

運転管理データと保全管理データを統合したデータから、分析に必要な情報をモデル化し、BI ツールを活用して技術的分析〔傾向・差異、相関、俯瞰（ふかん）など〕を実施する。この技術的分析により、設備の劣化予測や劣化部位の判定などを行い、最適な点検周期を提案できる。さらに、故障時の原因分析などに利用することで改善ポイントを見つけ出すことができる。

(c) 定型帳票

統合したデータを使って、帳票や報告書を作成することができる。

(4) 改善サイクル支援機能

現場には、生産・設備稼働情報および保全計画や設備点検結果、さらに分析管理機能での分析結果の報告書など、業務ノウハウとなるさまざまな技術文書や管理データが存在している。改善サイクル支援機能は、図8に示すようにそれらの情報をつないで活用できる形にし、現場を改善するためメンバー間で情報を共有し、アクションの推進を支援する。

(a) ナレッジ化機能

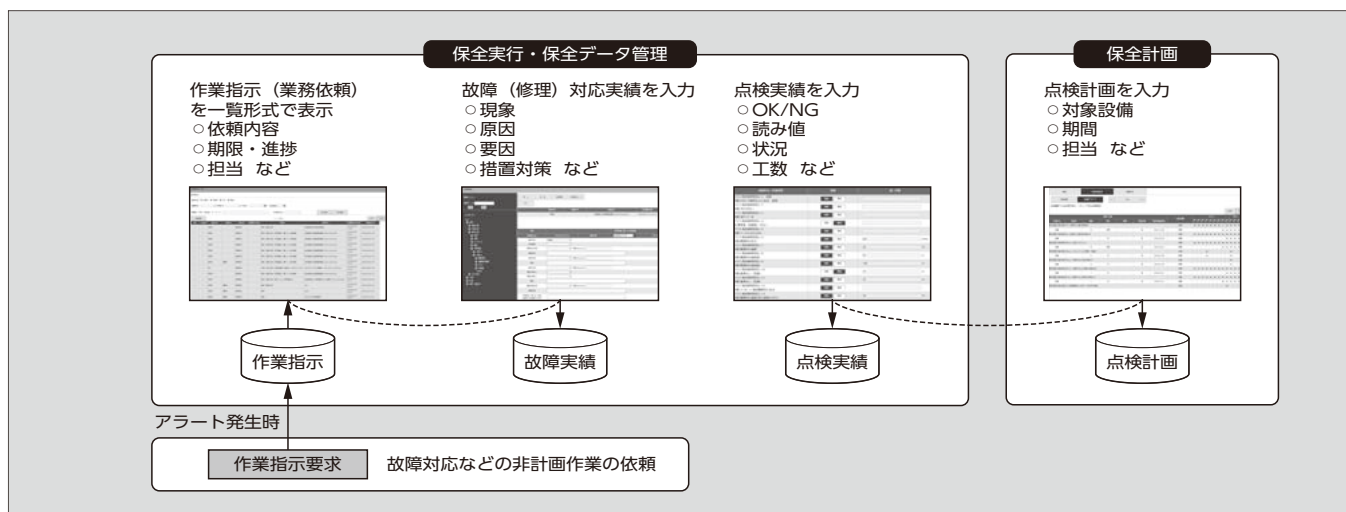


図6 保安全管理機能の概要

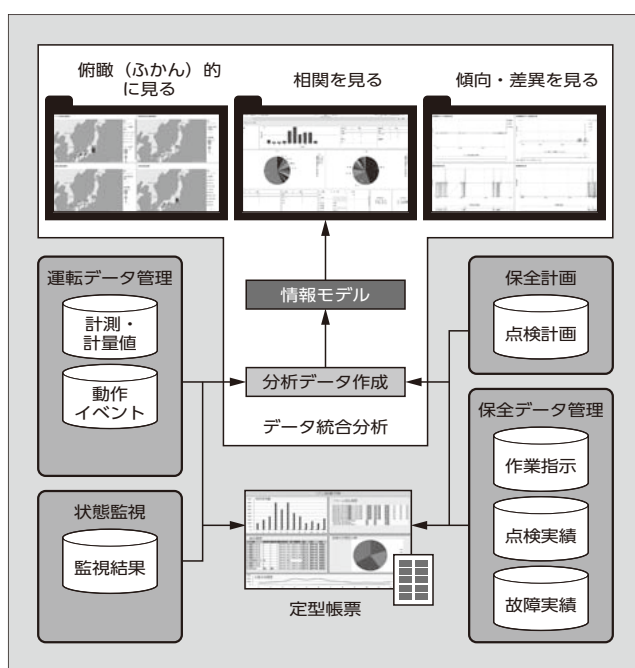


図7 分析管理機能の概要

現場に存在する報告書、帳票、調査表、作業指示書といった文書ファイルを O&M プラットフォームに登録すると、自動的に検索キーを生成し、関連するアラーム情報や計測値、設備情報などとリンクした形でナレッジ情報を登録することができます。登録された文書ファイルを有効活用できるようにするため、必要な情報が効率的に見つけられる全文検索機能を持っている。例えば、トラブル発生時のアラーム情報を基に過去の同じようなトラブルの調査報告書や対応指示書を検索する。次に、関連した製品や部品の仕様、対応手順などの保全情報がひも付いた検索結果の情報を活用して対策の迅速化や、同一部品を使った他の設備をリストアップし、対策を横展開することによる予防保全なども可能になる。

(b) タスク管理機能

故障や異常などのアラートが発生すると、対応のため一連のタスクを実行する。併せて、その要因を分析し改善サイクルを回してさらなる改善につなげることが重要である。

O&M プラットフォームは、改善サイクルを回すためのタスク管理機能を持っている。故障や異常などの対応を開始するとタスクが起票される。このタスクには、

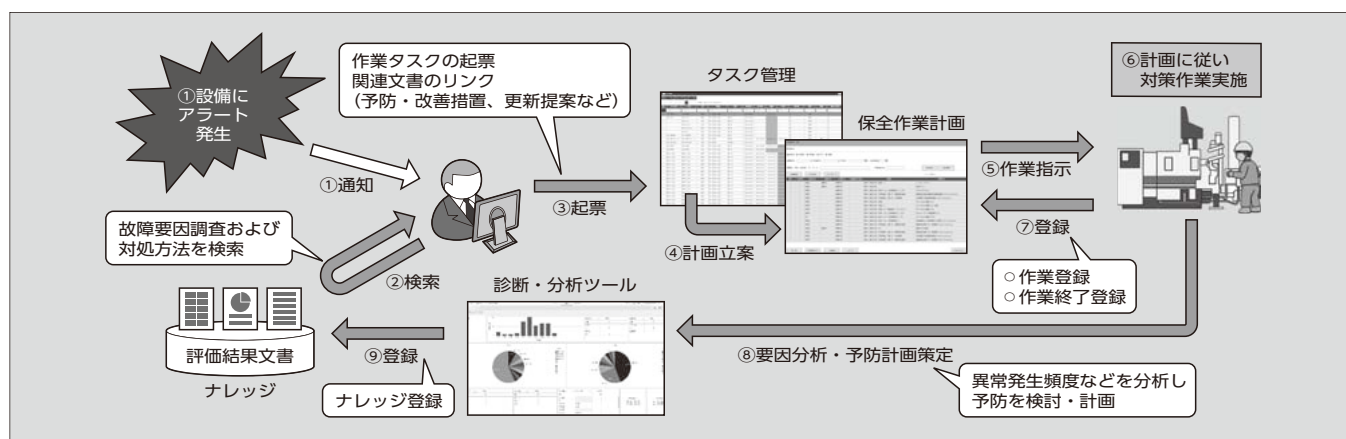


図8 改善サイクル支援機能の概要

O&M プラットフォームで保存している関連する運転管理の情報や保安全管理の情報、ナレッジ化された文書がリンクされるため、管理者や対策担当者間で関連する情報を共有しながら効率的にタスクを進められるようになっている。さらに、タスクの進捗状況も共有できるため、先に対応したメンバーとの情報共有や、対策結果の評価も適時行うことができ、効率的にタスクが進められる。

タスクを進める中で、新たに作成されたドキュメントを新しいナレッジとして登録すると、将来何らかの故障や異常が発生した場合にそのナレッジがひも付けられるので、改善サイクルを回すことができる。

④ O&M プラットフォームの適用ソリューション事例

富士電機は、O&M プラットフォームを適用した O&M ソリューションとして、工場のボイラや焼却炉の煙突などに設置されているガス分析計の計測データを使って異常診断を行うガス分析装置遠隔監視サービス、電動回転機の振動データやインバータの状態データから診断を行い、異常発生前に異常の予兆を検出するドライブシステム異常予兆診断システムを展開している。また、船舶に取り付けられたスクラバの計測データを衛星回線でクラウドに収集し、異常検知時にその推定要因と対処方法が記載された対処ガイドを船員に通知する船舶 IoT システムなど多数のシステムを展開している。

このほか、2021 年 5 月にリリースした保全ソリューションサービス「まるごとスマート保安サービス⁽¹⁾」は、図 9 に示すように、O&M プラットフォームの運転管理機能、保安全管理機能および分析管理機能を活用し、生産現場で稼働するさまざまな設備の保全業務のスマート化を支援する。

運転管理機能では、フィールドデバイスによるオンライン収集データ以外にも、富士電機の回転機故障予兆監視システム「Wiserot」のデータや、従来収集が難しかったア

ナログメータの計測値をカメラで自動的に読み取ったデータも活用できる。

このまるとスマート保安サービスを導入すると次のような効果が期待できる。

(1) 設備保全の最適化

設備劣化の進行度は、設備の設置環境や運転負荷状態に依存する。機械設備では動作時間や繰返し応力などの累積に伴う劣化を原因とする故障が多い。そのため、設備保全は納入時に立てられた保全計画をそのまま実行するのではなく、設備の故障履歴や点検結果、設置環境、運転負荷状態を加味して見直す必要がある。まるとスマート保安サービスは、O&M プラットフォームの機能により、これらのデータを一元管理し、統合して分析することができるので、点検や更新時期などを容易に管理することができる。

運転管理機能は、設備の稼働時間や運転回数および測定値の傾向などの運転データを収集する。保安全管理機能は、故障間隔や点検周期の保全データを蓄積する。これらの運転データと保全データの相関関係を分析・評価し、適切な点検周期や部品交換時期を割り出す（図 10）。これにより、点検項目の最適化ができ巡回点検時の負荷を削減する。さらに、従来の時間基準保全（TBM：Time-Based Maintenance）から、点検周期を最適化した状態基準保全（CBM：Condition-Based Maintenance）が実現できる。結果として、設備の安定稼働を保ちつつ、保全コストの削減を図ることができる。

(2) 障害復旧時間の短縮

稼働中の設備について障害や異常兆候などを検知すると、異常通知メールが関係者に送信される。富士電機のサービス技術者がメールを受け取ると、即座に O&M サービスアプリケーションから詳細な状況を把握し、蓄積されている故障対応履歴（故障内容、原因、対応状況）などのノウハウを活用し、故障部と原因を特定して対応できるので、障害から復旧するまでの時間が短縮できる（図 11）。

さらに、故障対応記録を登録することで、保全に関する

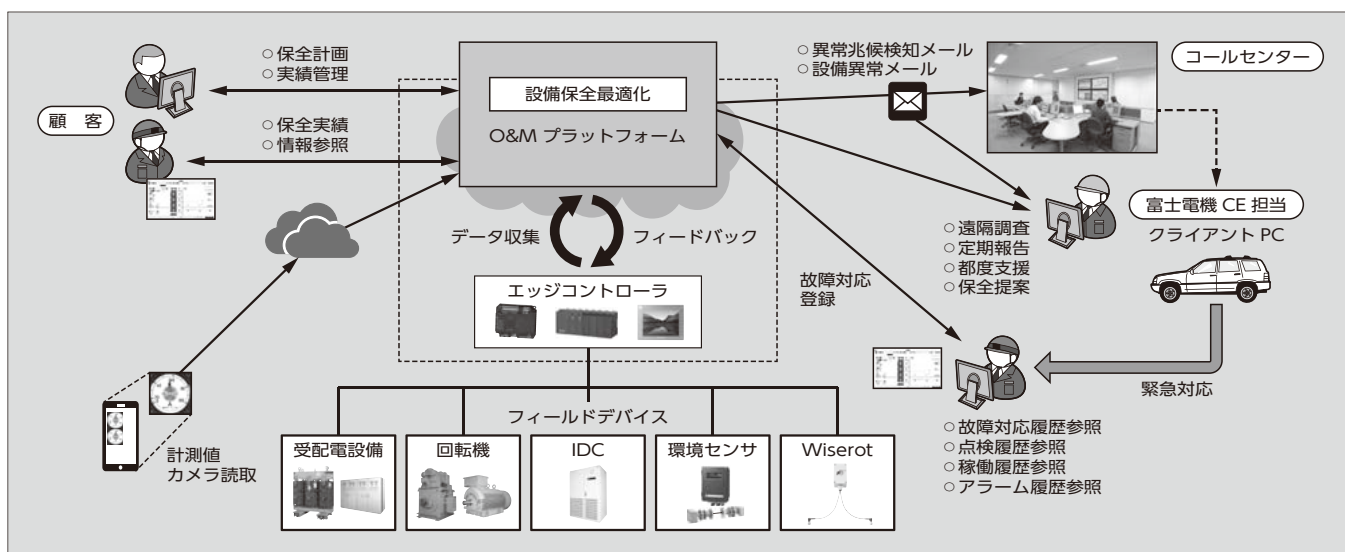


図 9 「まるごとスマート保安サービス」

ノウハウの蓄積が進み、将来の障害復旧対応に活用される。

5 あとがき

IoT を活用した現場業務の全体最適を支援する O&M ソリューションについて述べた。

富士電機の DX として顧客価値を創出する O&M プラットフォームを、今後もさまざまな業種の運転・生産・保全改善ソリューションサービスとして拡大して提供していく所存である。

参考文献

- (1) 福島宗次. 設備保全の最適化を支援する「設備管理まろごとサービス」. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.3, p.161-165.



喜多村 卓

公共分野向けおよび IoT システムの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部情報ソリューション事業部情報制御システム第二部課長。



山田 隆雄

IoT システム関連開発の企画に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 IoT ソリューションセンター IoT 推進部 主席。計測自動制御学会会員。

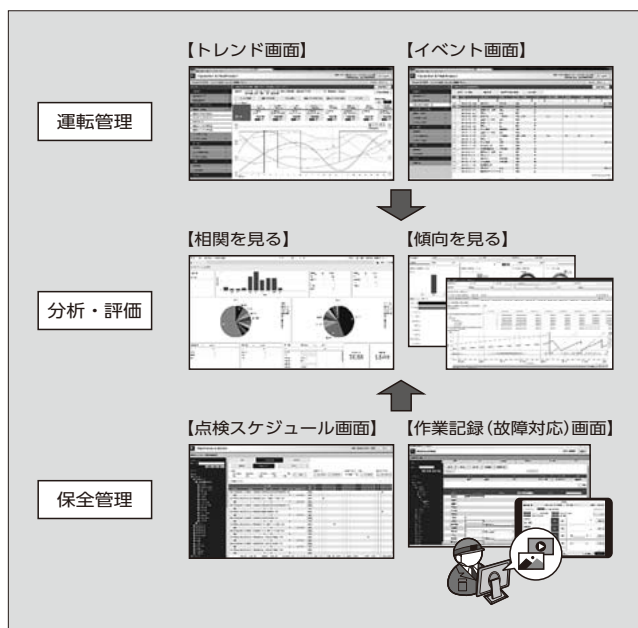


図 10 「まろごとスマート保安サービス」の分析・評価

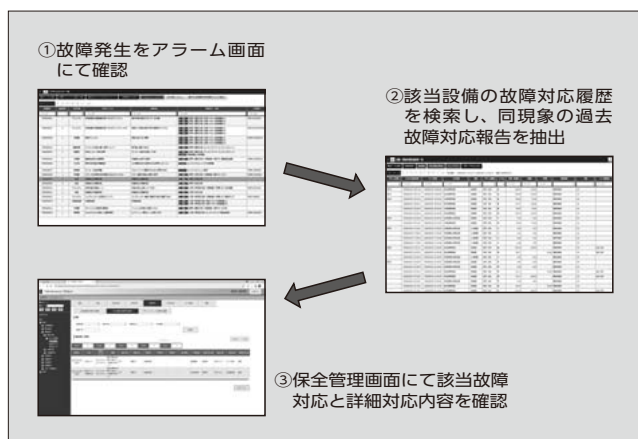


図 11 過去の故障対応履歴の活用

富士電機のアナリティクス・AI

Fuji Electric's Analytics and AI

浅野 貴正 ASANO, Takamasa

渡辺 拓也 WATANABE, Takuya

白木 崇志 SHIRAKI, Takashi

近年、企業の DX への取組みが加速している。DX 推進に必要なデジタル技術の中で、AI はその中核を担う技術である。富士電機のアナリティクス・AI は、認識・診断・予測・最適化を行う統計解析・機械学習技術の総称であり、富士電機はその要素技術開発に取り組んでいる。認識技術としてはディープラーニング技術を用いた画像認識 AI を適用し、診断技術としては教師なし学習の代表的な 5 種類のアルゴリズムを評価し、予測技術としてはフィルタ法やラッパー法に着目した。最適化技術としては、複数設備の状態を同時にチェックするデータ不整合検出技術を開発した。

In recent years, companies have been accelerating their efforts to promote DX. AI is one of the core digital technologies needed to promote DX. Fuji Electric has developed the basic technologies of Analytics and AI, which is a collective term for statistical analysis and machine learning technologies used for recognition, diagnosis, prediction, and optimization. For recognition technology, we developed image recognition AI using deep learning; for diagnosis technology, we evaluated five typical algorithms of unsupervised learning; for prediction technology, we focused on filter and wrapper methods; for optimization technology, we have developed a data inconsistency detection technology that checks multiple equipment statuses simultaneously.

① まえがき

企業の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、製品やサービスに対して競争上の優位性を持たせる DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）は、企業経営に必須となっている。また、近年の IoT（Internet of Things）技術の普及により、多種多様で大量のデータが容易に収集できるようになっている。さらに、AI（Artificial Intelligence）技術の発展により、大量データを利活用した新しい顧客価値の創出や社会課題の解決の期待が高まっている。企業の DX 推進に必要なデジタル技術の中で、AI はその中核を担う技術である。これまで、富士電機では、アナリティクス・AI の開発を通じて、産業プラントや社会インフラ分野におけるさまざまな課題を解決してきた。

具体的に述べると、FA（Factory Automation）分野では、製造設備の保全管理や製造品質管理の高度化の要求に応え、独自の異常診断技術として、バッチプロセス向け MSPC（Multivariate Statistical Process Control：多変量統計的プロセス管理）を開発し、設備の予防保全や不良品率の低減に貢献してきた。時々刻々と変化するエネルギー需給の分野では、高精度予測の要求に応え、ニューラルネットワークや JIT（Just-In-Time）予測を独自に改良し、将来のエネルギー需要の予測に適用している。さらに、数理計画法やメタヒューリスティクスの最適化技術と組み合わせ、プラント機器の運用計画を自動的に立案し、燃料コストと CO₂ の削減に貢献している。また、AI のブラックボックス問題に対して“説明できる AI”の開発を行ってきた。ニューラルネットワーク構造を工夫して入出力の相関関係を可視化する独自の構造化ディープラーニング^{（注1）}（DL）技術を開発し、これまで AI の適用が難しかった

安全性・信頼性が必要な分野への適用拡大を目指している。

② アナリティクス・AI の全体像

富士電機のアナリティクス・AI とは、認識・診断・予測・最適化を行うための、統計解析・機械学習技術の総称である（図1）。アナリティクス・AI では、現場の状況を認識し、事象の発生原因を診断する。そして、将来の状態

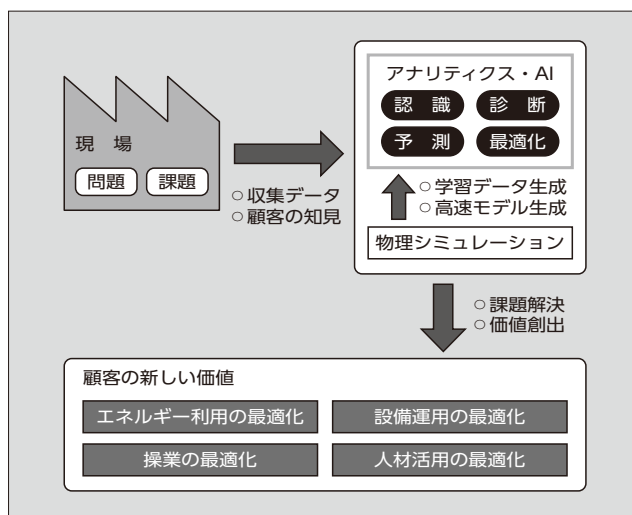


図1 富士電機のアナリティクス・AI の全体像

〈注1〉ディープラーニング（DL）：DL は、Deep Learning の略である。ディープラーニングとは、人の脳神経を模倣したニューラルネットワークを多層化して計算機で学習する方法である。主に、画像認識、言語認識、予測などに応用される AI のアルゴリズムの一つである。

を予測した上で最適化を行い、顧客の新しい価値を創出する。

2.1 認識技術

認識では、文章や画像データなどに対して、独自の前処理技術と最新の DL 技術を適用し、設備保全の省力化（“設備保全の技術伝承・情報共有を推進するためのテキスト認識技術”、174 ページ参照）や、製品外観検査の自動化などを実現する。

2.2 診断技術

診断では、製造プロセスデータなどに対して、その特性が正規分布に従う対象には、適用実績の豊富な MSPC を、より複雑な特性を持つ対象には、新しい機械学習手法を適用し、製造プロセスの異常の予兆検知や原因診断などを実現する⁽¹⁾。

2.3 予測技術

予測では、プラント運用データなどに対して、データが豊富な対象には、複雑なモデル化ができる構造化 DL を、少ない対象には、少量データでもモデル化ができる JIT 予測を適用し、将来のプラント状態を予測することで運転操作の支援を実現する⁽¹⁾。

2.4 最適化技術

最適化では、発電機やボイラなどのプラント機器の数が比較的小さい場合や計画期間が短い場合には数理計画法を、機器数が多い場合や計画期間が長い場合にはメタヒューリスティクスを適用し、人間の運用よりも効率的なプラントの運転を実現する⁽¹⁾。

また、富士電機のシミュレーション技術とアナリティクス・AI を融合し、デジタルツインの実現に向けたモデル構築技術として、シミュレーション応用技術を開発している。

3 アナリティクス・AI の紹介

3.1 認識技術

近年の AI 技術の急速な進歩により、従来のルールベース手法では代替が困難であった人による高度な作業の自動化に、DL 技術をはじめとした AI 技術の適用が始まっている。

富士電機では DL 技術を産業分野に適用するため、学習データの不足に対応した前処理技術、少量の正常データだけを使った学習による異常検知技術、AI 判断の可視化技術などの要素技術を開発してきた。次に、DL 技術を用いた画像認識 AI の適用事例として、社内工場における半導体ウェーハ（ウェーハ）の外観検査の自動化について述べる。

(1) ウェーハの外観検査の目的と課題

富士電機は、さまざまなパワー半導体製品を製造している。これらの製品はウェーハから、酸化工程、パターン形成工程、配線形成工程、チップ化工程、実装・封止工程などを経て製造される。各工程において、種々の不良が発生するため、工程間で外観検査を行い、不良箇所を検出するため画像を撮影している。その画像を異常モードごとに分類・計数し、各異常モードの発生件数の傾向から、異常の原因となった工程を特定し、プロセスの改善に役立てている（図 2）。従来は、撮影した画像を現場の技術者が目視で分類していたため、分類作業に多くの時間を要していた。また、技術者によって分類の基準が異なるため属人性が高いという課題があった。そこで、撮影画像の分類に画像認識 AI を適用することで、分類・計数作業の省力化とスループットの向上、属人性の排除を図った。

(2) 分類結果の可視化

撮影画像を必要に応じてホワイトバランス補正、明るさの正規化、データ拡張などの前処理をした後、画像認識 AI で異常モードごとに分類し、その結果を可視化する。図 3 に分類結果の可視化例を示す。図 3 (a) は各ロットについてウェーハごとの異常が見つかった撮影画像の枚数をプロットしたグラフであり、どのロットでウェーハに異常が多く発生しているか確認することができる。図 3 (b) は各異

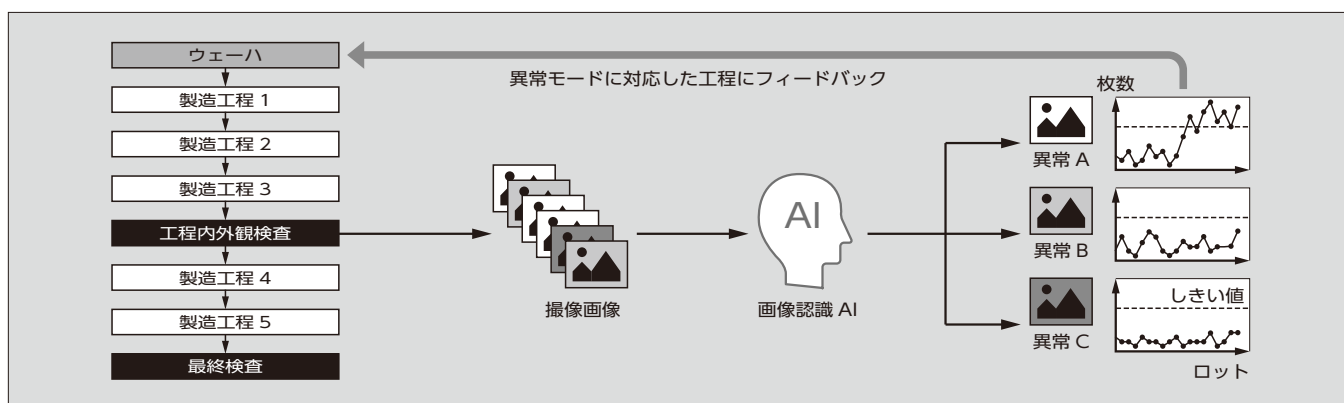


図2 ウェーハの外観検査への画像認識 AI の適用

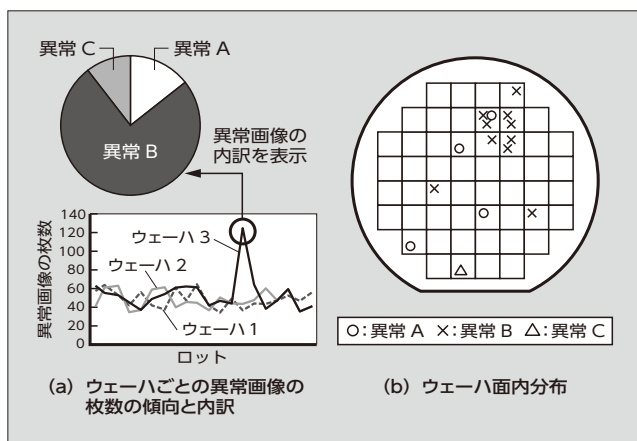


図3 画像認識AIによる分類結果の可視化例

常がウェーハ面内のどの位置で発生しているか可視化した例であり、面内で均一に発生しているのか、特定の箇所に集中して発生しているのかを確認できる。このように、さまざまな角度から異常の発生傾向を解析し、改善が必要な製造プロセスを特定することが可能となる。

今後は、本システムの運用を通して、アナリティクス・AIの課題の一つであるコンセプトドリフト^(注2)の検知・対策技術の開発を行う予定である。

3.2 診断技術

AI技術を製造工程の異常診断に適用することによって、品質向上や歩留まり改善に貢献している。富士電機では化学プロセス分野で実績のあるMSPCで多くの経験がある⁽³⁾⁽⁴⁾。また、複雑な特性を持つ対象でも精度よく診断する機械学習や、診断根拠を説明する機能を開発してきた⁽¹⁾。

複雑な特性に対する診断は、さまざまな適用対象に対しての性能評価に基づいて、適切な手法を選択する必要がある。実際の製造工程では異常発生がそれほど多くないため、富士電機では、学習時に異常データが不要な教師なし学習に注力し、さまざまな手法を試行している。

本節では、次に示す教師なし学習の代表的な5種類のアルゴリズムを評価した結果について述べる。

- OCSVM (One Class Support Vector Machine) : カーネルと呼ばれる非線形関数を用いて診断
- IF (Isolation Forest) : 決定木と呼ばれる if-then ルールをベースにした診断
- LOF (Local Outlier Factor) : 正常データからの距離で診断
- iNEE (Isolation using nearest neighbor ensembles) : IF と LOF を融合した診断
- EnsKnn (Ensemble K-Nearest Neighbor Algorithm) : 複数の類似データから診断

〈注2〉コンセプトドリフト：AIモデルが推論しようとしている対象の統計的特性が、さまざまな原因で時間の経過とともに変化するをいう。

今回、ベンチマークデータとして、10セットの実データを用意した。主として製造工程で計測される電力、温度、圧力などからなる時系列データである。正常期間のデータを学習して診断モデルを構築し、検証対象期間のデータの正常・異常が診断できるかどうかを検証した。図4は、機械学習手法の違いによるF1スコアと呼ばれる診断性能の比較である。F1スコアは適合率（正と判断した中で正しい判断をした率）と再現率（実際に正の中で正しい判断をした率）の調和平均で、1に近いほど診断性能が高い。診断性能が最良の手法は、例えば図4の結果ではデータセットD01に対してはLOFが、データセットD02に対してはEnsKnnであり、データセットごとに最良な手法が異なる。図5は、機械学習手法ごとの診断時間を比較したグラフである。LOFやEnsKnnは、診断性能は高いが診断時間が長い。

今回の結果から、データセットごとに最良の手法が異なること、手法により診断時間が異なることを確認できた。F1スコアや診断時間を使えば、診断対象の要求仕様に合わせて適切な手法が選択できる。また、これら手法をデータサイエンティスト以外のエンジニアでも簡単に扱えるようにツール化していく予定である。

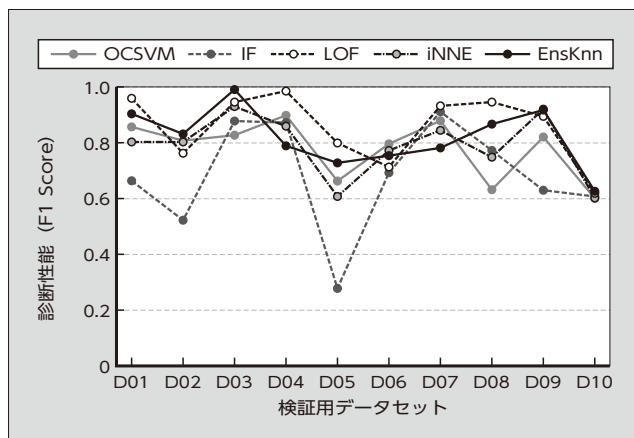


図4 機械学習手法による診断性能の比較

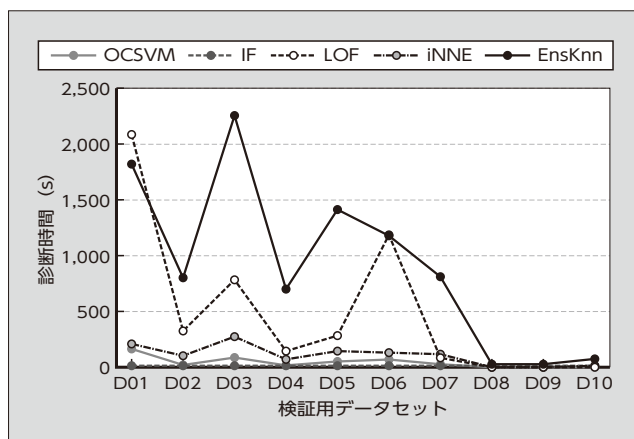


図5 機械学習手法による診断時間の比較

3.3 予測技術

富士電機では、プラントの運転操作を支援するため、エネルギー需要や品質を予測する技術を開発している。学習データが少ない場合でも予測できるJIT予測や、予測結果が説明できる構造化DLなど、特徴ある予測モデルを開発してきている。予測モデル自体の開発の他に、どの入力変数を選択するのも精度の良い予測モデルの生成には重要である。通常、入力変数の選択では、データサイエンティストが予測対象に関する知識を得ながら試行錯誤を繰り返すため、検討に数日から数か月単位で時間を要するという問題があった。そこで、例えばJIT予測に関しては、この試行錯誤を減らすため、変数重要度を用いた独自の変数選択法を開発してきている。

さらに、さまざまな機械学習に適用できる汎用的な変数選択法であるフィルタ法、およびラッパー法に着目した（図6）。フィルタ法は、変数ごとに計った重要度が一定値以上であれば入力変数として採用する。ラッパー法は、予測誤差の変化から最も予測精度が高い入力変数の組合せを探す。

それぞれの方法の有効性を検証するため、ベンチマークデータとして、製造工程の数時間先の温度を予測する問題を用意した。入力変数の候補は、計測された全429種類のデータである。予測手法は、多くの入力変数を取り扱うことが容易なPLS（Partial Least Squares）回帰を用いた。

表1に予測結果を示す。フィルタ法とラッパー法のいずれも、変数選択をしない方法と比較し、少ない入力変数で平均誤差を小さくすることができた。さらにラッパー法はフィルタ法よりも平均誤差が小さかった。

今後は、この変数選択技術をプラントの予測支援などの実製品への適用を目指すとともに、異常診断の学習ツール

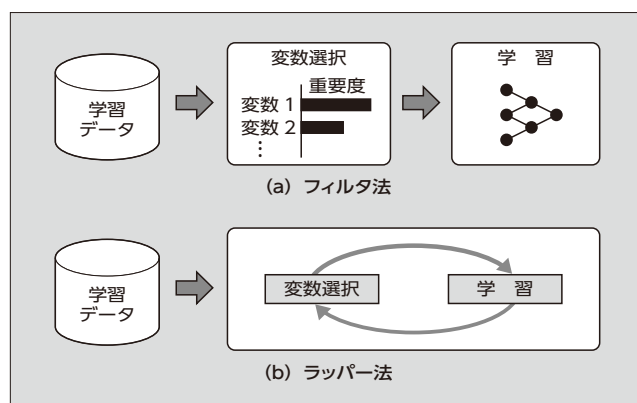


図6 フィルタ法とラッパー法の概念図

表1 変数選択法による予測誤差の変化

	入力変数の数	平均の予測誤差
変数選択なし	429	4.4%
フィルタ法	23	3.7%
ラッパー法	61	3.1%

にも適用する予定である。

3.4 最適化技術

これまで、EMS（Energy Management System）に適用してきた最適化技術では、工場やビルのユーティリティ設備をプラントモデルとして作成し、燃料コストやCO₂が最小となる最適な設備運用（最適な組合せ）を求める。求めた最適解を基に、オペレーターへのガイダンス提示やユーティリティ設備の自動制御を行っている。

プラントの最適運用を求めるためには、まずプラントモデルを混合整数計画問題として定式化する。これとともに、予測機能による需要予測やオペレーターによる運転計画、設備特性などさまざまな入力条件や制約条件を与える。この条件を満たした上で数理計画法により最適解を求める。また、大規模な電力系統や数式化できないモデルを含む電力系統の場合、PSO（Particle Swarm Optimization）などのメタヒューリスティクスを適用し、最適解を求めている。

最適化計算の際に、入力条件に矛盾があったり、設定を忘れたりすると制約条件に違反することになり、計算が異常終了してしまう。あるいは、計算自体は問題なく終了しても省エネルギー（省エネ）効果が過大に算出されるなど、計算結果が異常となることもある。このような場合、システムエンジニアが全ての入力条件を精査し、エラー発生箇所を突き止める必要がある。また、エラーは1か所とは限らないため、繰り返しチェックを行う必要があり、エンジニアリングの工数が増えてしまうという問題があった（図7）。

そこで、計算の異常終了や計算結果に異常があった際に、不整合なデータを自動で特定してデータの修正箇所を示すことで、この問題を解決している（図8）。さらに、どの制約条件により解なしとなったのかを特定して、異常終了の原因を把握できるようにするため、次に示すような工夫を行っている。

(1) 設備個別の制約チェック

燃料の投入量の上下限、出力の上下限などのさまざまな制約条件がある設備の最適化において、上下限を超える運

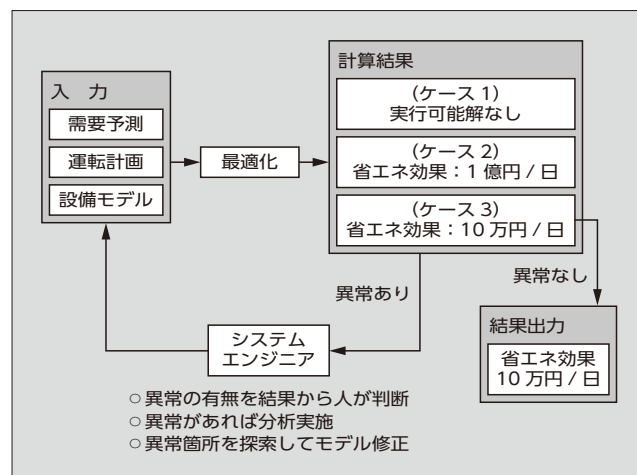


図7 従来のエンジニアリング

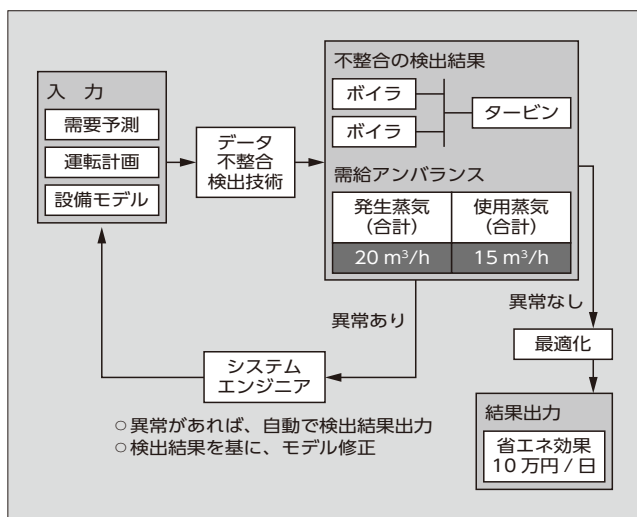


図8 データ不整合検出技術を適用したエンジニアリング

用計画の設定や、上限と下限を入れ替えた間違っただけの設定などの計算ができない設定になっていると異常終了となる。異常終了時には、制約条件の有効と無効を切り替えて再計算し、計算が可能となったときに無効とした制約条件が異常となっている原因であると判断する。

(2) 設備間の制約チェック

複数の設備間で制約違反があった場合、前述した設備ごとの制約条件のチェックでは判断ができないことがある。例えば、図9に示すように、設備Aと設備Bの出力が設備Cの入力となるエネルギーの需要と供給の関係（需給制約）があるとする。例えば、停止指示を設備Aと設備Bに、出力指示を設備Cに与えた場合、設備Aや設備B、設備Cを個別にチェックしてもそれぞれの設備計画に制約違反はないが、プラント全体では制約違反となるため異常終了となる。このように一見正常に見えても、設備を組み合わせたエネルギーネットワークモデルとした際に異常となるような場合、通常の数値チェックだけでは異常検知は困難である。そこで、エネルギーネットワークモデルを解析して需給制約の有効や無効を切り替えることにより異常となっている需給制約を検索し、さらに複数設備の状

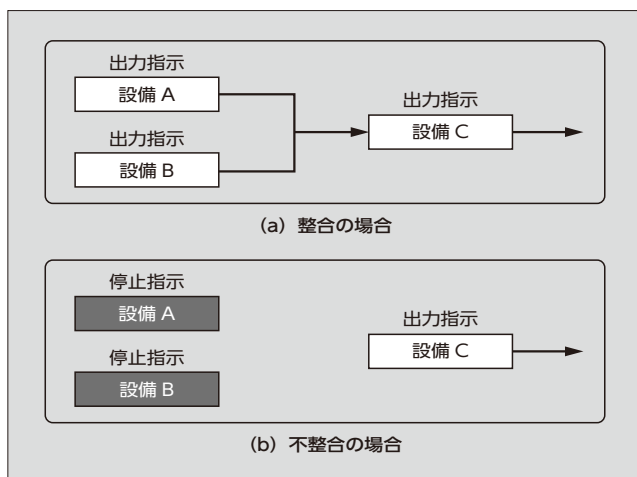


図9 設備間制約における整合・不整合の例

態を同時にチェックするデータ不整合検出技術を開発して活用している。

従来、設備の入替えや構成の変更などを行う際にシミュレーションを行うと異常終了となった原因を見つけ出すにはエネルギーネットワークモデルや最適化技術を熟知している必要があった。しかし、本データ不整合検出技術によって、専門知識がなくてもエンジニアリング時のデータ解析作業の短縮、およびユーザーによるメンテナンスの支援が可能となる。

3.5 デジタルツインを実現するためのシミュレーション技術

デジタルツインとは、現実の設備や製品の機能や動作をデジタル空間上に再現し、リアル空間上の稼働データとリアルタイムに連携する技術のことである。デジタルツインを用いることで、設備や製品の現在や将来の稼働状態をリアルタイムで把握することができ、設備の予防保全によるメンテナンスコストの低減や、最適な運転状態を維持することによる省エネなどの顧客価値の創出が可能となる。

富士電機では、構造設計を中心としたシミュレーション技術を開発してきた。デジタル端末上で行うさまざまな制御条件や環境条件での物理的動作のシミュレーションにアナリティクス・AIを融合することで、これまでの製品設計だけでなく、試験や保守を含めた製品ライフサイクルの効率化、さらにはデジタルツインの実現への応用も期待できる。

本節では、そのデジタルツインの実現を見据えた技術として、シミュレーションの精度向上のためのパラメータ同定技術や、従来シミュレーションのリアルタイム化、すなわち高速化を可能にする代理モデル変換技術などのシミュレーション技術について述べる。

(1) パラメータ同定技術

シミュレーションには、設計情報により、値が自明なパラメータ群（寸法など）と、値が不明なパラメータ群（劣化状態など）がある。特に値が不明なパラメータ群は、実現象をシミュレーションする上で、精度低下の一つの要因となっていた。

そこで、AI技術の一つである最適化技術を適用し、これらのパラメータ群を最適値に同定する技術を開発した。シミュレーションの出力結果と実システムの収集データとの誤差が最小となるようパラメータ群を同定することで、シミュレーションの精度が向上した。

(2) 代理モデル変換技術

シミュレーションでは、膨大な量の計算を実行するので長い時間がかかることがある。その場合、試験や保守への応用に必要な安定的なリアルタイム性能〔常に定められた時間内（おおむね5s以内）で計算が終了する性能〕を満足することはできなかった。

そこで、機械学習技術と最適化技術を適用し、通常のシミュレーションよりも短時間で計算が終了する代理モデルに変換する技術を開発した。

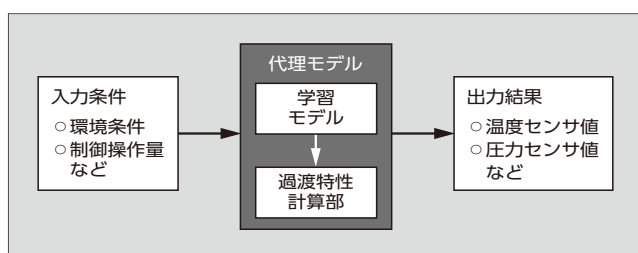


図 10 代理モデルの構成

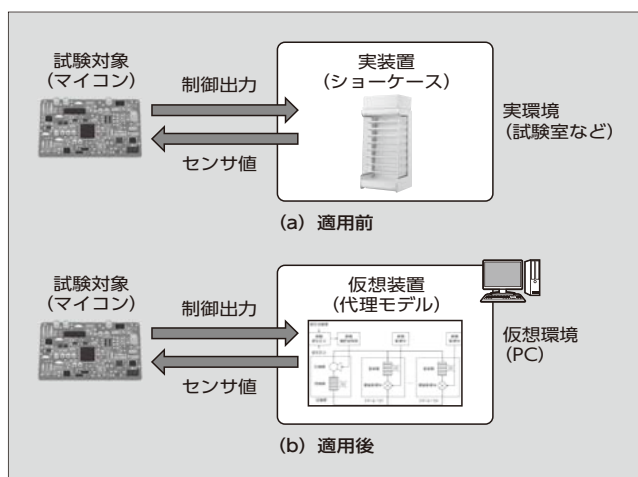


図 11 ショーケース用 HILS の構成

図 10 に上述した代理モデルの構成を示す。代理モデルは、定常特性を表す学習モデルと過渡特性を表す計算部より構成される。学習モデルは、シミュレーションの入力パラメータ（環境条件や制御操作量など）を多条件で動かして出力結果（温度センサ値など）を得て学習データを作った後、ディープラーニングなどの機械学習を使って生成する。過渡特性計算部は、時定数などのパラメータを持つ方程式である。最適化技術によってモデルの出力と実際のデータの誤差が最小となるように、それらのパラメータの最適値を決定する。

この代理モデルにより、計算時間が不安定で低速なシミュレーション（計算時間：10s～5min）を高速化（計算時間：1s 以内）することができた。

続いて、本技術の適用事例として、ショーケース用のコントローラの動作を実装置のショーケースなしで効率的に検証することを目的とした HILS の構成例を示す。

図 11 にショーケース用 HILS の構成を示す。ショーケース庫内の温度などの各所のセンサ値を予測する代理モデルを生成して仮想装置として PC 上に組み込む。その PC と制御マイコンとを接続することで制御マイコンの検証ができるようにした。環境試験室の構築や試験条件の切り替えの際に大きな費用や作業工数が掛かっていた実装置と実環

境を用いた試験が不要になっただけでなく、夏季や冬季などの季節条件や、さまざまな動作条件や故障条件の全てを再現できるようになった。これにより、今後のいっそうの省エネ性能を持つショーケースや、環境に配慮した冷媒を使ったショーケースの早期開発が可能となる。

④ あとがき

本稿では、富士電機の DX の中核となるアナリティクス・AI について述べた。

アナリティクス・AI の適用拡大のためには、構想・PoC（Proof of Concept：概念実証）・実装・運用といった AI 開発の各プロセスにおける要素技術の拡充が必要である。

今後も、アナリティクス・AI の要素技術の開発の加速やデジタルツインの実現によって新しい顧客価値の創出や社会課題の解決に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 飯坂達也ほか. 価値創出のコアとなるアナリティクス・AI. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.169-174.
- (2) 石河範明. “富士電機における画像認識AIの適用事例”. 電気学会D部門大会. 2021, S7-5.
- (3) 飯坂達也ほか. “多変量統計的プロセス管理技術を用いた火力発電プラントの異常検知”. 電気学会B部門大会. 2010, 353.
- (4) 村上賢哉ほか. “バッチプロセス向けMSPCにおける新しい異常判定方式”. 電気学会C部門大会. 2017, GS7-3.
- (5) 石橋直人ほか. デマンドレスポンスを考慮した需要予測へのJITモデリングの適用. 電気学会論文誌B（電力・エネルギー部門誌）. 2014, vol.134, no.1, p.24-31.



浅野 貴正

センシング技術、画像処理・画像認識技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター AI 研究部マネージャー。電気学会会員、人工知能学会会員。



渡辺 拓也

数値アルゴリズムを利用したエネルギーマネジメントに関する研究開発に従事。現在、富士電機技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター AI 研究部主任。電気学会会員。



白木 崇志

シミュレーションと AI の応用技術の研究開発に従事。現在、富士電機技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター AI 研究部主任。

〈注 3〉 HILS：Hardware in the Loop Simulation の略である。制御対象の挙動を PC 中に再現する検証用シミュレータのことである。

設備保全の技術伝承・情報共有を推進するための テキスト認識技術

Text Recognition Technologies to Facilitate Technology Transfer and Information Sharing in
Equipment Maintenance

真鍋 章 MANABE, Akira

谷本 恒野 TANIMOTO, Koya

浅野 貴正 ASANO, Takamasa

近年、産業分野においても高齢化が進み、熟練作業者のノウハウの技術伝承・情報共有が課題となっている。富士電機では、課題解決に寄与する技術の一つであるテキスト認識技術において、主に文書分類、文書要約、文書集約の各種応用技術の研究・開発に取り組んでいる。汎用的な大量データで事前学習された BERT モデルを用いることで、適用したい分野のデータが少量しかない場合でも、従来技術に比べて大幅な認識精度向上を実現した。特に、文書分類ではデータ拡張技術の適用評価も行い、さらなる認識精度向上の効果も確認している。

The aging of the industrial workforce has been creating challenges in the technology transfer and information sharing of experienced workers. As a way of solving these challenges, Fuji Electric has been working on research and development of various text recognition technologies mainly involving document classification, document summarization, and document aggregation techniques. We have achieved a significant improvement in recognition accuracy compared with conventional techniques, even when there is only a small amount of data available in the field of interest, by using a BERT model that has been pre-trained on general-purpose, large volume data. In particular, we have also evaluated the application of data augmentation techniques in document classification and have confirmed the effect of further improving recognition accuracy.

1 まえがき

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、製品やサービスにおいて競争上の優位性を持たせる DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) は、企業経営に必須となっている。富士電機においても産業分野におけるさまざまな課題に対し、DX の一環として、富士電機のアナリティクス・AI の開発に長らく取り組んできている。アナリティクス・AI の取組みの一つとして、高齢化に伴うノウハウの技術伝承・情報共有が困難という課題を解決するため、熟練作業員などからの情報を基に作成した文書を対象にした AI による認識技術を開発している。

本稿では、設備保全の技術伝承・情報共有を推進するための AI によるテキスト認識技術について述べる。

2 富士電機が提供するシステム

テキスト認識技術を採用した設備保全管理システムの全体像を図 1 に示す。

設備保全管理システムは、経験が豊富な熟練作業員が記録した設備メンテナンス、監視制御などに関する個人のノウハウを、保全担当者に効率的に伝承・共有するためのシステムである。

ここで、熟練作業員が記録したノウハウは、さまざまなフォーマットを想定している。例えば、手書きデータについては AI-OCR などの技術により読み取りを行い、テキ

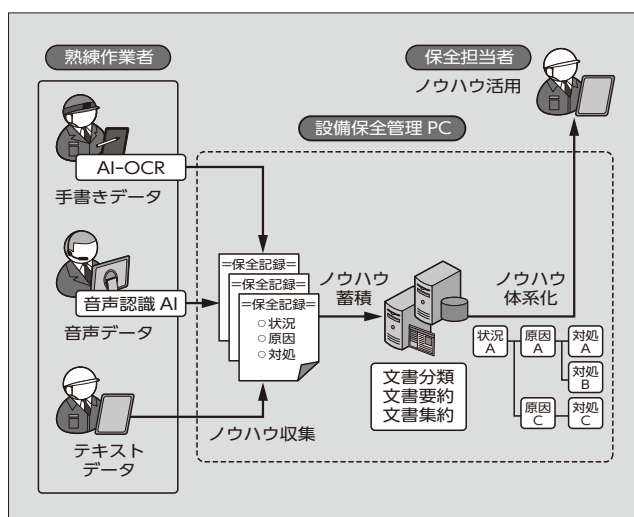


図 1 設備保全管理システムの全体像

ストデータ化する。また、音声データについては音声認識 AI などの技術により、同じくテキストデータ化する。

テキストデータ化されたノウハウは、設備保全管理 PC に蓄積され、文書分類、文書要約、文書集約などの各種テキスト認識技術により整理・体系化される。

保全担当者は、整理・体系化されたノウハウを活用することで、例えば異常箇所の特定制と対処が従来よりも迅速になるなど、作業効率向上につながる。

3 富士電機のテキスト認識技術への取組み

3.1 富士電機の取り組むタスク

テキスト認識技術とは、人間が日常的に使っている自然言語をコンピュータに処理させる一連の技術である。テキスト認識技術が対象とするタスクの明確な定義は存在しな

〈注 1〉富士電機のアナリティクス・AI：認識・診断・予測・最適化を行うための統計、機械学習、人工知能技術の総称である。

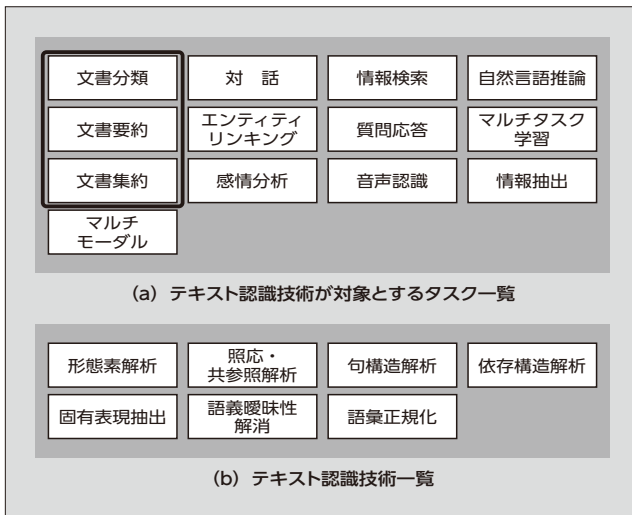


図2 テキスト認識技術が対象とするタスク一覧

いが、一般的なタスクとその区分について図2に示す。

テキスト認識技術は、基礎技術を基にした各種応用技術によって個々の具体的なタスク（課題、問題）を解決するものである。中でも、富士電機では、テキスト認識技術を産業分野の技術伝承や情報共有を容易にするための技術として、主に文書分類、文書要約、文書集約の三つのタスクを対象にして応用技術の研究開発に取り組んでいる。

この三つのタスクの流れ図を図3に示す。ランダムに受け取ったテキストデータを分類して要約し、要約したテキストデータを体系化（文書集約）する。各タスクの効果は次に示すとおりである。

(a) 文書分類：情報整理により、知識共有を促進する。

(b) 文書要約：要点抽出により、視認性を向上させる。

(c) 文書集約：情報体系化により、検索性を向上させる。

各アルゴリズムはAPI（Application Programming Interface）化しており、テキスト認識技術の文書分類、文書要約、文書集約の各アルゴリズムの詳細な仕組みを理解しなくても、製品への適用が簡単に行えるようにした。

3.2 産業分野への適用における課題

テキスト認識技術を産業分野に適用しようとする場合には、次に示す課題がある。

(a) 蓄積している情報が紙データや顧客からのクレームなどの音声データなどであるため、テキスト認識技術を適用する前のデータ加工

(b) 蓄積しているテキストデータが少量しかない場合があるため、少量データを活用する手法の開発

近年、課題(a)に関しては、光学文字認識（OCR：Optical Character Recognition）技術や音声認識技術の精度が顧客の満足するレベルになってきている。課題(b)に関しても、従来利用されていた、時系列を考慮することができるという特長を生かしたLSTM（Long Short-Term Memory）に代わり、BERT^{（注2）}の登場により少量データであっても、良い精度が得られる可能性が高まってきている。

3.3 富士電機における文書分類の精度向上の手法

富士電機が対象とする産業分野、特に保全業務において記録されるテキストデータは、3.2節で述べたBERTで必要とされる量よりもさらに少ない場合が多く、さらなる文書分類の精度向上への取り組みが必要だった。

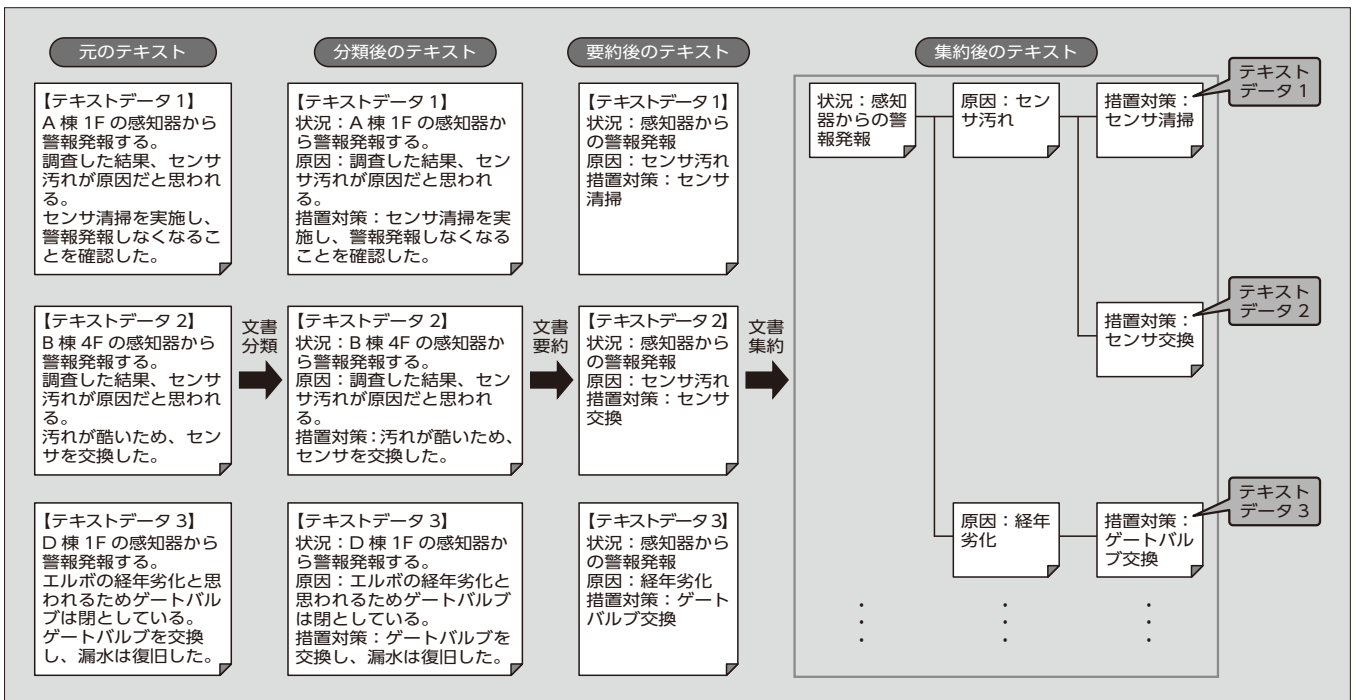


図3 文書分類、文書要約、文書集約の流れ図

〈注2〉BERT：214ページ「解説1」を参照のこと

この課題を解決するため、画像データを対象に精度向上に効果があると報告されているデータ拡張技術のテキスト認識技術への適用を検討し、TMix と MixText の 2 種類の手法を採用した。

TMix は、ディープラーニング (DL)^(注 3) のような多層モデルに対し、入力となるテキストデータの隠れ状態ベクトルを線形補間して拡張する手法である。文書分類結果の教師データ (ラベル) についても、同様に線形補間を用いて計算している (図 4)。このデータ拡張手法は、追加のデータを必要としないので、保全業務で記録されるテキストデータの分類への適用が比較的容易であり、実用的である。

MixText は、TMix によるデータ拡張と、正解なしデータを組み合わせた半教師あり学習の手法である。

この二つの手法の評価結果については 4 章で述べる。

3.4 富士電機における文書要約の精度向上の手法

文書要約は、原文に含まれる文を選択して要約を生成する抽出型要約と、原文に含まれない単語も使用し、自然な表現で要約を生成する抽象型要約の 2 通りがある。

今回、汎用的な大量データで事前学習した BERT モデルを用いて、質問応答形式のデータでファインチューニングを行うことで文章抽出モデルを作成する抽出型要約である BERT-QA 手法を適用した (図 5)。

また、質問応答形式のデータを使ってファインチューニングを行うときに、対象となる文章の種類を理解させるためにカテゴリ情報である“状況”“原因”“措置対策”を質問として入力した。文章の種類であるカテゴリ情報を入力することで、複数種類によるマルチタスク学習の性能向上が期待できる。この結果についても 4 章で述べる。

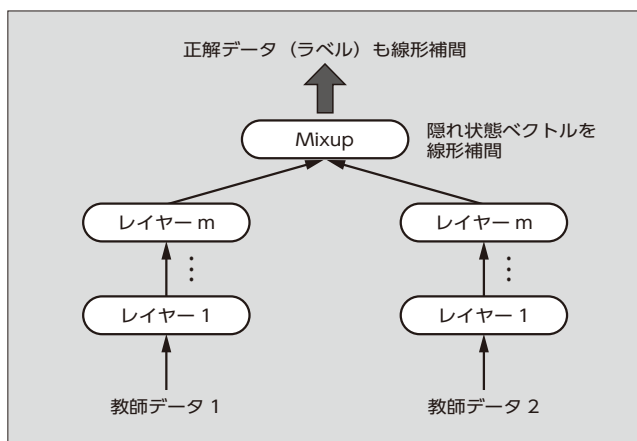


図 4 TMix の概要図

〔注 3〕ディープラーニング (DL) : DL は、Deep Learning の略である。ディープラーニングとは、人の脳神経を模倣したニューラルネットワークを多層化して計算機で学習する方法である。主に、画像認識、言語認識、予測などに応用される AI のアルゴリズムの一つである。

〔注 4〕半教師あり学習 : 214 ページ「解説 2」を参照のこと

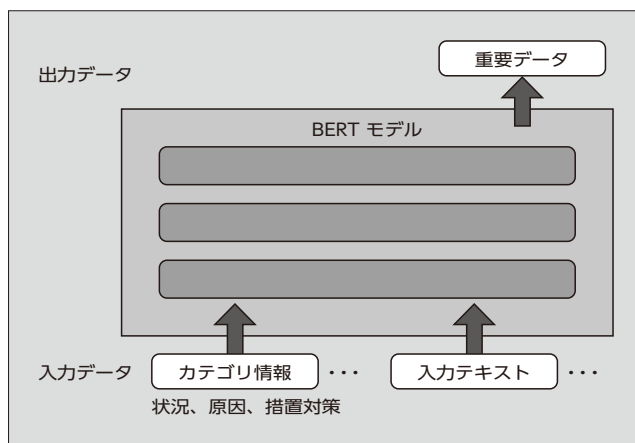


図 5 BERT-QA の概要図

3.5 富士電機における文書集約の精度向上の手法

文書集約は、BERT を使用して状況、原因、措置対策の階層ごとに文の類似度から集約する手法を適用しており、現在評価を進めている。

4 テキスト認識技術などの精度評価結果

4.1 機械学習の精度評価指標

テキスト認識などの機械学習の精度評価に広く利用される指標を次に示す (図 6)。

(1) 適合率

正と予測したデータのうち、実際に正であるものの割合

	実際に正	実際に負
予測で正	TP (True Positive)	FP (False Positive)
予測で負	FN (False Negative)	TN (True Negative)

$$\text{適合率} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$$

$$\text{再現率} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$$

$$\text{F1 値} = 2 [(\text{適合率} \times \text{再現率}) / (\text{適合率} + \text{再現率})]$$

$$\text{F2 値} = 5 [(\text{適合率} \times \text{再現率}) / (4 \times \text{適合率} + \text{再現率})]$$

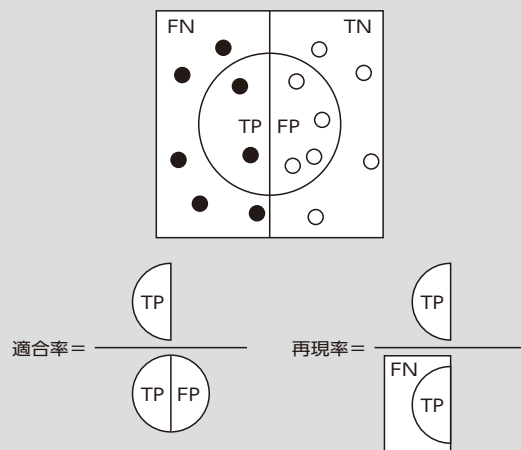


図 6 テキスト認識技術の認識精度計算方法

表1 文書分類の精度 (F1 値) 評価結果

単位 (%)

手 法	カテゴリー					比 較
	状 況	原 因	措置対策	その他	平 均	
BERT	66.0	67.1	59.1	78.8	67.7	—
TMix	65.1	71.7	69.9	81.9	72.1	4.4
MixText	68.7	74.0	72.2	82.9	74.4	6.7

* 文書分類の結果が教師データと同じ場合100%となる。国内の先進的なレベルと比較し遜色のない精度を実現した。

表2 文書要約の精度 (F2 値) 評価結果

単位 (%)

手 法	適合率	再現率	F2値
LSTM	33.1	27.0	28.0
BERT-QA	46.0 (+12.9)	57.0 (+30.0)	54.4 (+26.4)

* 文書要約の結果が教師データと同じ場合100%となる。国内の先進的なレベルと比較し遜色のない精度を実現した。

である。

(2) 再現率

実際に正であるもののうち、正であると予測されたものの割合である。

(3) F1 値

再現率と適合率の調和平均である。特に、F2 値とした場合は再現率を重視した調和平均となる。

4.2 文書分類の精度評価結果

富士電機で保有する保全業務で記録されたテキストデータに対して、BERT をベース技術とし、TMix および MixText を用いて文書分類精度を評価した結果を表1に示す。文書分類においては、適合率と再現率の双方を同程度重要視するため、評価指標として F1 値を採用した。

その結果、BERT と比較して、TMix を用いた場合に分類精度が向上していることを確認した。また、文書分類の対象とはドメインが異なる分野の正解データを用意し、TMix を基にした半教師あり学習である MixText を行うことで TMix と比較し、さらなる認識精度向上が実現可能であることも確認した。

4.3 文書要約の精度評価結果

文書分類と同様に富士電機社内で保有する保全業務で記録したテキストデータに対して、LSTM をベース技術とした BERT-QA を用いて、文書の要約精度を評価した結果を表2に示す。なお、文書要約においては重要箇所を漏れなく抽出する必要があるため、評価指標として F2 値を採用した。評価結果として、LSTM を用いた既存手法に比べて要約精度が大幅に向上することを確認した。

5 テキスト認識技術の使用事例

5.1 設備保全管理システム

設備保全の現場の多くは日々の定型業務に追われてしまい、稼働率改善などの付加価値業務になかなか携われない

というのが実情である。そこで、定型業務を効率化するため、設備データや作業データ、障害対応データなどのさまざまなテキストデータを一元管理する設備保全管理システムの導入が進んでいる。

このような状況の下、設備保全管理システムにテキスト認識技術を導入することによって、次のような効果が期待でき、ノウハウに関わる技術伝承や情報共有が推進できる(図1)。

(1) 音声認識

ウェアラブルデバイスを用いてハンズフリーで障害対応データを音声で保存することで、熟練作業者の入力作業時間が削減できる。

(2) 文書分類、文書要約、文書集約

システム導入前に記録された障害対応データの整理や体系化作業が省力化できる。

5.2 コールセンター

コールセンターで広く使われている業務支援システムにおいても、テキスト認識技術を導入することで、次に示す効果が期待でき、オペレーターや専門担当者の負荷を軽減した上で顧客満足度が向上する(図7)。

(1) 音声認識

顧客とオペレーターの対応内容がリアルタイムにテキストデータで保存されるため、オペレーターによる対応内容の入力作業の時間が削減できる。

(2) 文書分類、文書要約

- ・顧客とオペレーターの対応内容が整理された状態で、オペレーターから専門担当者に円滑に引き継げる。
- ・顧客と専門担当者の対応内容をノウハウとして蓄積する場合、既に整理された結果を参考にデータが作成できるため、専門担当者の負担が軽減できる。

(3) 文書集約

半自動で FAQ を作成するため、FAQ の作成・更新時間が削減できる。

(4) 対話(チャットボット)

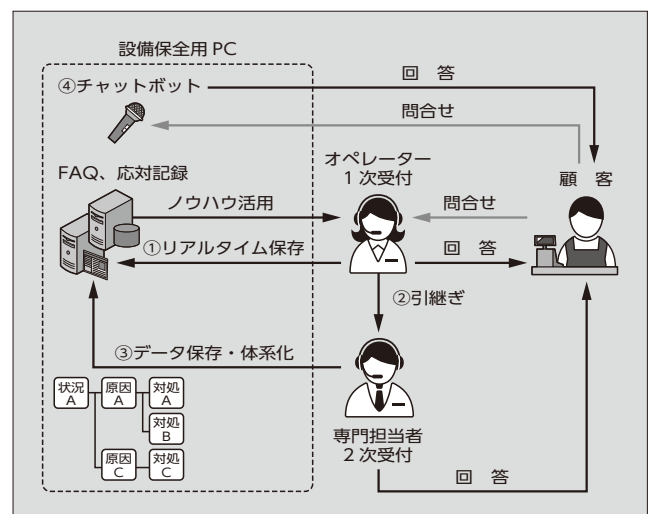


図7 コールセンターでの使用事例

顧客が期待する回答に容易にたどり着けるため、顧客満足度の向上につながる。

⑥ あとがき

本稿では、富士電機の DX の一つとして産業分野の設備保全の技術伝承・情報共有を推進するためのテキスト認識技術について述べた。

テキスト認識技術の適用拡大のためには、継続的な認識精度向上が必要であり、本年度は、文書集約に BERT を適用し精度向上を図っていく予定である。

今後もオープンイノベーションなどを活用し、外部の知識や技術を積極的に活用することで、技術進歩の早い本分野の最新技術を取り込み、顧客満足度の向上を目指す所存である。

なお、本研究は東京都立大学の小町准教授との共同研究の成果を活用しており、ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 山下郁海ほか. “隠れ層補間によるデータ拡張を用いた障害レポート分類”. 言語処理学会第27回年次大会. 2021-3, p.1794-1798.

- (2) 本間広樹ほか. “BERTモデルを用いた障害レポートに対する重要箇所抽出”. 言語処理学会第27回年次大会. 2021-3, p.189-193.



真鍋 章

AI 技術の産業応用に関する研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター AI 研究部主任。



谷本 恒野

AI 技術の産業応用に関する研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター AI 研究部。



浅野 貴正

センシング技術、画像処理・画像認識技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター AI 研究部マネージャー。電気学会会員、人工知能学会会員。



富士電機のサイバーセキュリティの取組み

Strengthening Cybersecurity of Fuji Electric

梅崎 一也 UMEZAKI, Kazuya

吉田 聡 YOSHIDA, Satoshi

富士電機は、IoT やデジタル技術を活用した製品・サービスの提供を通じて顧客の DX 推進に資することを目指しているが、そのためには製品・サービスがセキュアであることが前提条件として重要である。そこで、ベンダとしてのセキュリティ強化のために、セキュリティポリシーの見直し、体制整備による新たな攻撃への防御および検知対応能力の向上、ならびに開発プロセスや工場の製造環境のセキュリティ対策を行っている。さらに、製品・サービス自体のセキュリティを強化するための技術開発を進めている。

Fuji Electric aims to contribute to the promotion of customer's DX by offering products and services that use IoT and digital technologies. To achieve this goal, it is the foremost importance to ensure that our products and services are secure. To strengthen our security as a vendor, we have revised our security policy and reinforced the defense system to improve our ability to defend against and detect new attacks, as well as took security measures for our development processes and factory manufacturing systems. In addition, we are developing technologies that enhance the security of our products and services themselves.

① まえがき

2010 年頃から、IoT (Internet of Things) や AI (Artificial Intelligence)、クラウドサービスなどのデジタル技術の活用が拡大し、お客さま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動きが強まっている⁽¹⁾。2019 年末に始まったコロナ禍は、外出制限によりリモートワークが推奨される“ニューノーマル”⁽²⁾の環境下で、デジタル技術の活用を加速させている。

一方、デジタル技術の急速な利用拡大は、サイバー攻撃の急増などによるサイバーセキュリティリスクの増大も引き起こしている。

このため、DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) を推進していくためには、サイバーセキュリティの対策強化も併せて実施することが必須である。

本稿では、デジタル化の進展に伴うサイバーセキュリティリスクおよび国内外での対策の動向、およびそれらを踏まえた富士電機のサイバーセキュリティの取組みについて述べる。

② サイバーセキュリティの動向

2.1 サイバー攻撃の動向⁽³⁾⁽⁴⁾

近年は、大学や企業などの組織を狙ったランサムウェアの攻撃が増加している。例えば、メールに不正なファイルを添付したり、改ざんした Web サイトに誘導したり、OS の脆弱 (ぜいじゃく) 性などを突いたりするなどの手法を用いてウイルスに感染させる。このウイルスを使って

PC やサーバのファイルを暗号化して使用不能にし、復旧と引換えに、あるいは情報を公開すると脅迫して金銭を要求する攻撃である。工場の生産システムや石油パイプラインが停止するなど大きな被害も報告されている。

また、情報漏えいにおいては、広がるサプライチェーンを悪用し、セキュリティ対策が甘い組織 (委託先、国外子会社など) が攻撃の足掛かりとして狙われるケースが増えている。このため、自組織のセキュリティ対策だけでなく、調達先や業務委託先、関連会社も含めたサプライチェーン全体でのセキュリティ対策が必要となる。

コロナ禍でリモートワークが増加した結果、VPN (Virtual Private Network) やクラウド、Web 会議などの利用が急速に拡大し、それを狙った攻撃も増加している。

2.2 セキュリティ対策の動向

このようなサイバー攻撃の状況を踏まえて、国や標準化団体などによってサイバーセキュリティ対策に関する規制や標準、ガイドラインなどの策定がなされている。

サイバーセキュリティ対策は、組織レベルの戦略的なリスクマネジメントと、情報システムのセキュリティ脅威に対するシステムレベルのリスクマネジメントとに分けられる (図 1)。

組織レベルでは、従来の ISMS (Information Security Management System: 情報セキュリティマネジメントシステム) よりもサイバー攻撃対策を重視した新しいフレームワークとして、NIST (米国国立標準技術研究所) の CSF (Cyber Security Framework: サイバーセキュリティフレームワーク) の利用が進んでいる。

CSF は、組織が実施すべきセキュリティ対策を五つの機能 (特定、防御、検知、対応、復旧) に分けて参考情報とともに列挙している。守るべき情報資産とそのリスクを

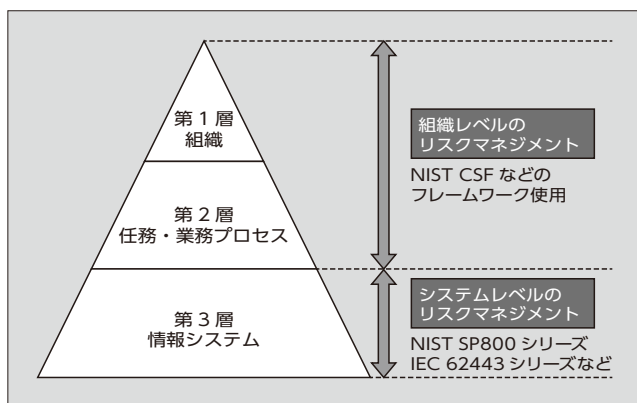


図1 サイバーセキュリティ対策としてのリスクマネジメントアプローチ⁽⁵⁾

特定し、ビジネス上の要求やリスク許容度などを踏まえてセキュリティ対策（防御、検知、対応、復旧）目標を設定し、計画的に改善していくことで、組織が適切にセキュリティリスクを管理できるようにする狙いがある。CSFの特徴として次が挙げられる。

(1) 防御重視から検知・対応・復旧重視へ

サイバー攻撃の手法が高度化しており、完全に防御することは不可能という前提で、いかに早く検知して被害を最小化して復旧するかを重視している。

(2) サプライチェーンリスクマネジメント

サプライチェーン上での低品質な製造・開発により、潜在的に有害な機能を含む可能性がある製品・サービスを識別し、評価し、抑制することを目的とする。

システムレベルでは、情報システム向けに NIST の SP800 シリーズの整備が進められている。サプライチェーンにおける情報漏えいへの対策としては、NIST SP800-171（連邦政府組織と取引する企業が取るべき対策基準を示すガイドライン）⁽⁷⁾ が発行された。制御システムでは、IEC 62443 などの標準規格の適用が進むとみられている。

自動車や鉄道、船舶などの交通系、電力や石油化学など、ドメインごとにガイドライン作成の動きがある。IoT 機器に対しては、各国で具体的なセキュリティ対策を要求する規制やガイドラインが策定されている。さらに、これらの規制や標準、ガイドラインなどへの準拠を法規制で要求したり、認証の仕組みを構築したりする動きがある。また、製品やシステム自体のセキュリティだけでなく、ベンダの開発プロセスや製造プロセスに対する要求もある。

ベンダは、これらの規制や標準、ガイドラインに準拠し、組織としてのセキュリティ対策に加えて、開発や製造環境のセキュリティ確保、製品・サービスの適切なセキュリティ対策を求められるようになってきている。

③ 富士電機の取組み

②章で述べたようにベンダへのセキュリティ対応要求が強まっている状況を踏まえ、富士電機では、従来の社内の情報（IT：Information Technology）システムに加えて、

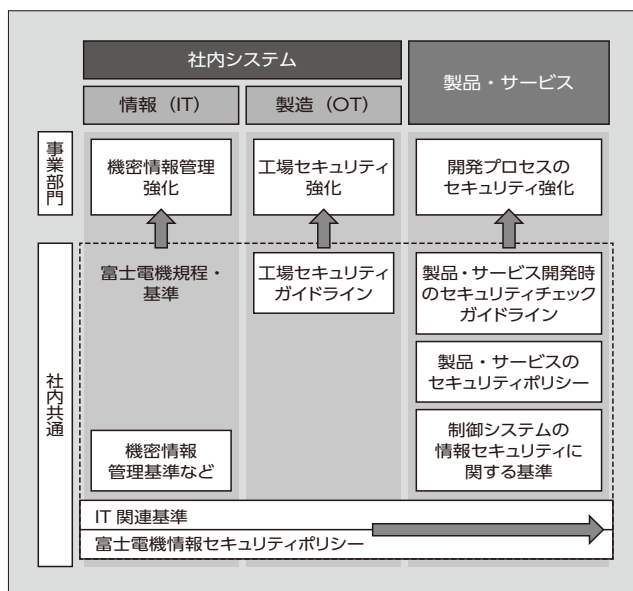


図2 富士電機のセキュリティ強化の取組み

工場などの製造（OT：Operational Technology）システム、製品・サービスのセキュリティを強化する取組みを進めている（図2）。製品・サービスについては、開発プロセスのセキュリティ強化に加えて、製品自体のセキュリティ強化のための技術開発も進めている。

3.1 組織の取組み

(1) 情報セキュリティポリシーの強化

富士電機は、サイバー攻撃の高度化、巧妙化に伴い、2019年に新IT中期計画を策定し、サイバーセキュリティの強化を重点施策の一つとした。

従来の防御を主体としたセキュリティ対策では、最新の攻撃を完全に防ぐことは難しいことから、侵入されることを前提とし、新たな攻撃方法への防御を強化しつつ、侵入後の早期検知、対応の即応化、事業復旧の強化を図ることに方針を改めることとした。

そのために、情報セキュリティポリシーおよび関連する規程基準を NIST CSF と NIST SP800-171 の要求事項に準拠した見直しを行い、次のような強化を行っている。

(a) 特定・防御の強化

- ①機密情報の管理方法の見直しとその管理の徹底
- ②クラウドサービスや情報システムのセキュリティ評価、脆弱性対策、運用管理、監視の徹底
- ③システムやクライアントデバイスの防御、監視機能を強化し、ゼロトラストセキュリティへの対応

(b) 検知

- ①ネットワーク、システム、サーバ、デバイスにおける未知の攻撃や異常挙動の監視機能強化
- ②SOC（Security Operation Center）による監視オペレーション強化

(c) 対応

- ①緊急事態発生時の初期対応の即応化のため、経営層を含めた危機管理体制のサイバーインシデント対応

整備

②Fe-CSIRT（富士電機サイバーセキュリティ対応チーム）、および情報セキュリティマネジメント体制によるサイバーインシデント対応の強化

③初動対応に備えたフォレンジック（サイバー攻撃などのセキュリティ事件・事故発生時に原因究明などのためコンピュータに残された証拠を調査すること）などの技術支援や法務、広報などの対応支援を委託するため、外部専門事業者との体制整備

④サイバーリスク、脅威情報の収集の自動化、システム管理者、利用者への注意喚起の徹底

(d) 復旧・事業継続

①IT-事業継続マネジメント（BCM：Business Continuity Management）を、従来の自然災害想定のものに加え、サイバー攻撃を想定した復旧計画、手順の整備

②復旧計画の実効性を高めるための対応訓練の実施

(2) 製造セキュリティの強化

富士電機の工場では、従来、インターネットや社内的情報ネットワークからは隔離した製造系ネットワークを使って製造装置を運用していた。そのため、サイバーセキュリティリスクは小さく、例えば、USBメモリや保守用PCを介した間接的マルウェア感染の可能性の低減など、情報システムとの接点となるデータの授受の機会を注意することで保護ができていた。

しかし、近年、工場のIoT化、製造のデジタル化が進み、製造系ネットワークと情報系ネットワーク間の通信の必要性が増したことで、情報システムと同様のサイバー攻撃を受ける可能性が高まり、その対策が必要になっている。ただし、従来、サイバーセキュリティリスクが低かった製造現場では、サイバーセキュリティの認識は高くなく、セキュリティ技術者も不足していた。

そこで、セキュリティと実施すべき対策の必要性の理

解を図るとともに、IT部門が製造系の対策に関与する体制を敷いた。

ソフトウェアの修正プログラムやマルウェア対策ソフトウェアを適用するために、稼働中の製造装置をわざわざ停止することは難しく、稼働したまま適用すると動作に異常をきたす恐れがある。そのため、技術的な対策は情報システムとは異なる方法で行う必要がある。ただし、可能な限り情報システムと同様の対策を講じつつ、用途や通信も限られる制御装置では、サイバーセキュリティリスクとなるソフトウェアの動作や通信を最小化するなどの制限を行い、サイバー攻撃のリスクを低減する防御対策を行っている。

また、技術的な対策以外では、基本的に情報システムと同様の対策が多い。セキュリティ体制などの組織的対策、工場への入退場や工場内のセキュリティ区画などの物理的対策やその教育・周知は、従来の情報セキュリティ活動の枠組みを徹底して対応する。また、サイバー攻撃の検知や対応は、情報システムで行っている対策を拡大し、水平展開することで強化している。

復旧に関しては、工場のBCMの枠組みに、IT-BCMのサイバー攻撃想定を組み込むようにしている。

(3) 製品・サービスのセキュリティ対策

IoTの導入などによるセキュリティリスク増大に対応するため、富士電機のIoTの製品・サービスを対象にしたセキュリティポリシーを2018年4月に社内基準として発行し、セキュリティ対策の強化を進めてきた。2021年6月にはCSFやIoT関連ガイドラインなどで強化されたセキュリティ要求を反映した改定版を発行した。

製品・サービスのセキュリティを確保するためには、製品ライフサイクル（企画段階から開発、製造、試験、運用、破棄）の各段階でセキュリティ対策を確実に実施することが必要である。そこで、製品・サービスの各開発・ステップで実施すべきセキュリティ対策や、DR（デザインレビュー）で確認すべきセキュリティのレビュー項目を定

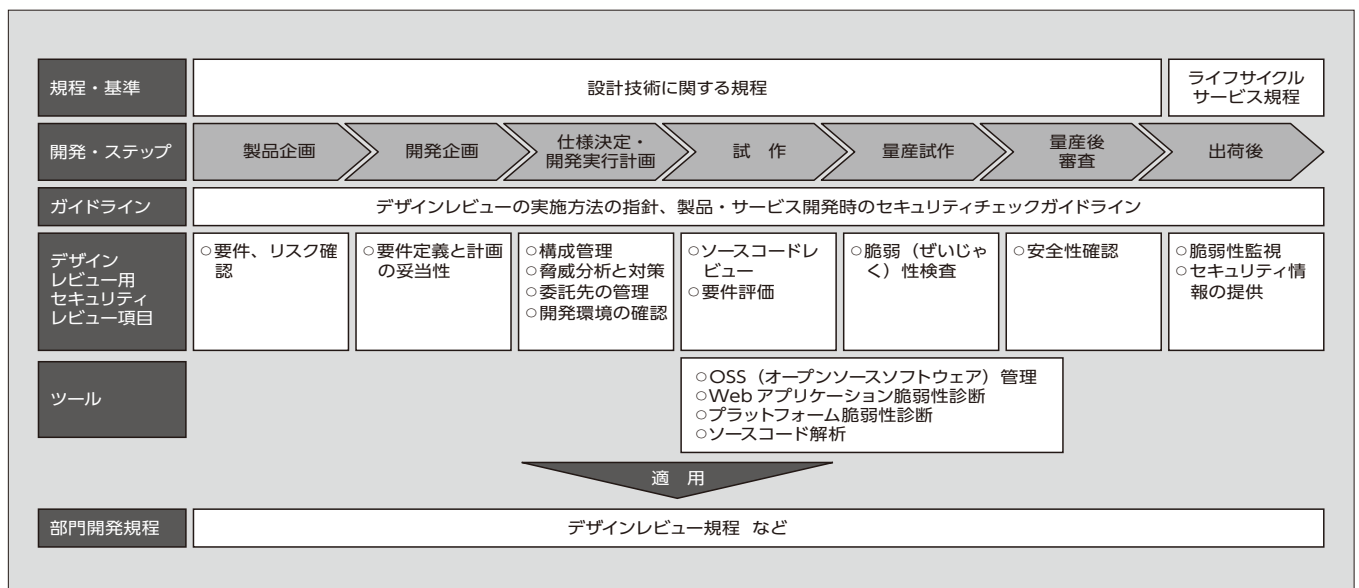


図3 製品・サービスのデザインレビューにおけるセキュリティ対策

めたガイドラインを社内基準として策定した（図3）。

この社内基準では、製品企画段階で調達要件ならびに順守すべき法令やリスクなどを確認し、開発企画段階でそれらを踏まえた要件定義および開発計画の妥当性を確認することによって、対策すべきセキュリティ要件を漏れなく適切に特定することを求めている。また、仕様決定・開発実行計画段階以降では、セキュリティ要件を充足するための取組みとして、脅威分析を踏まえたセキュリティ対策の具体化や、設計・実装における脆弱性の作り込み防止、開発環境のセキュリティ確保などを求めている。サプライチェーンセキュリティ対策として、委託先の管理のほか、製品出荷後における脆弱性監視やセキュリティ情報提供のための体制やプロセスの整備を求めている。

これを各事業部門や工場の DR プロセスに反映することによって、全ての富士電機製品・サービスのセキュリティ対策の強化を図っている。

3.2 セキュリティ技術開発

製品・サービスのセキュリティを向上させるための技術開発の一部を表1に示す。防御のための技術に加えて、サイバー攻撃による侵入などを前提とした検知や対応、復旧のための技術開発を進めている。さらに、製品・サービス開発の各段階で必要なセキュリティ対策の技術的な手段の整備を進めている。

(1) セキュア実行環境

インターネットなどの外部環境に接続される機器には、不正アクセスによる遠隔操作やウイルスによる情報漏えいなどのセキュリティ事故の危険がある。

そこで、セキュアブート（起動時ソフトウェア検証）や実行時データ保護を実現する技術を開発した。セキュリティ機能を内蔵したマイコンを活用しつつ、製品仕様上の制約に対応できるようにメモリ使用量の削減や処理時間の短縮を実現している⁽⁹⁾。

(2) 利用者認証・認可

Web サーバへの不正ログインによる情報漏えいなどの

被害が増加している。

そこで、既存 Web サーバ（ID・パスワードによるユーザ認証）の多要素認証対応を可能とする技術開発を進めている。既存の Web サイトに大きな変更を加えずにクライアント証明書などによる認証を追加できるようになる。

(3) ログ監視

不正アクセスを行って情報を窃取（せっしゅ）するサイバー攻撃は高度化しており、発見までに時間がかかることが多いとされている。このため、サイバー攻撃の被害や兆候を早期に検知するための取組みが重要である。そこで、IoT システムなどの各種ログを集約管理して効率的に監視・分析する仕組みを開発している。

この仕組みを用いて、アクセスログや操作ログなどを集約・分析することによって、認証失敗などサイバー攻撃の可能性がある事象を早期に検知できるようになる。

(4) セキュアコーディング

製品のソフトウェアに脆弱性があると、サイバー攻撃により被害を受ける可能性が高まる。このため、ソフトウェア開発時に脆弱性を作り込まないようにすることが必要である。

そこで、CERT C のセキュアコーディングルールの適用計画、診断ツールによるソースコードのルール適合性チェック、準拠報告書の作成などの適用手順や文書テンプレートを作成した。C 言語によるファームウェア開発を対象として適用していくとともに、その他のプログラミング言語でも同様の取組みを進めていく。

(5) Web サーバ脆弱性検証

Web サーバの脆弱性を突いた不正アクセスによる情報漏えいなどの被害が増加している。

そこで、Web アプリケーションやプラットフォームの脆弱性診断を行うための標準的なツールの評価、選定を実施している。

4 あとがき

富士電機のサイバーセキュリティの取組みについて述べた。近年、サイバー攻撃は高度化、巧妙化しており、デジタル化の利用拡大によってセキュリティ脅威も増加している。富士電機では情報セキュリティポリシーを改定し、情報だけでなく工場のセキュリティ対策強化を図っている。さらに、よりセキュアな製品・サービスの提供のために、製品・サービスを対象としたセキュリティポリシーを策定し、開発段階からセキュリティ対策を行うための体制、プロセスを整備するとともに、セキュリティ技術開発に取り組んでいる。

サイバー攻撃は日々進化しているため、セキュリティ対策は継続的な取組みが不可欠である。今後も引き続き、富士電機およびその製品・サービスのセキュリティ向上の取組みを通じて、お客さまの DX 推進に貢献していく所存である。

表1 製品セキュリティ技術開発

技 術	説 明	防御	検知	対応	復旧
セキュア実行環境	セキュアブート、実行時データ保護	○	—	—	—
利用者認証・認可	Webサーバなどでの多要素認証	○	—	—	—
ログ監視	機器やシステムへのサイバー攻撃の兆候や被害の検知、分析	—	○	○	—
セキュアコーディング	ソフトウェア開発時の脆弱（ぜいじゃく）性作り込み防止	○	—	—	—
Webサーバ脆弱性検証	Webアプリケーションやプラットフォームの脆弱性検出	—	○	○	—
OSS（オープンソースソフトウェア）管理	ソフトウェアが依存するOSSの脆弱性やライセンス問題の検出	—	○	○	—
インシデント管理	インシデントの検知、影響分析や復旧の省力化や自動化	—	○	○	○

参考文献

- (1) デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン (DX推進ガイドライン) Ver.1.0. 経済産業省. 2018-12. <https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181212004/20181212004-1.pdf>, (参照 2021-07-28).
- (2) 次期サイバーセキュリティ戦略 (案). 内閣サイバーセキュリティセンター. 2021-07. <https://www.nisc.go.jp/active/kihon/pdf/shiryou01-2.pdf>, (参照 2021-07-28).
- (3) 情報セキュリティ 10大脅威 2021. 情報処理推進機構. 2021-03. <https://www.ipa.go.jp/security/vuln/10threats2021.html>, (参照 2021-07-28).
- (4) 最近のサイバー攻撃の状況を踏まえた経営者への注意喚起. 経済産業省. 2020-12. <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201218008/20201218008-2.pdf>, (参照 2021-07-28).
- (5) Risk Management Framework for Information Systems and Organizations : A System Life Cycle Approach for Security and Privacy, Revision 2, NIST, SP800-37, 2018-12. <https://www.nist.gov/publications/risk-management-framework-information-systems-and-organizations-system-life-cycle>, (参照 2021-07-28).
- (6) Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity, Version 1.1, NIST, 2018-04. nvlpubs.nist.gov/nistpubs/cswp/nist.cswp.04162018.pdf, (参照 2021-07-28).
- (7) Protecting Controlled Unclassified Information in Nonfederal Systems and Organization, Revision 2, NIST, SP800-171, 2020-02. <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-171/rev-2/final>, (参照 2021-07-28).
- (8) 梅崎一也. IoTシステムのセキュリティ. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.175-178.
- (9) 高務健二ほか. セキュリティ技術の事業への貢献における課題解決の取り組み. 情報処理学会. 第83回全国大会. 2021-03. https://www.ipsj.or.jp/event/taikai/83/ipsj_web2021/data/pdf/4D-03.html, (参照 2021-07-28).



梅崎 一也

IoTシステムなどに関するセキュリティ技術開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 IoT ソリューションセンター主査。



吉田 聡

社内情報システムの企画、構築に従事。現在、富士電機株式会社経営企画本部 IT 戦略室 IT コンプライアンス部。



拡張現実を用いた保守支援技術

Maintenance Support Utilizing Augmented Reality

城戸 武志 KIDO, Takeshi

大秋 大輔 OAKI, Daisuke

近年、アフターサービスの分野では、保守・メンテナンス業務の効率化と技能伝承が重要課題となっている。富士電機では、この課題を解決するために、拡張現実（AR）を用いた保守支援技術を開発した。本技術は、作業内容を簡潔明瞭にするために、現場で蓄積したノウハウを形式知化し、作業内容を表す CG を設備に重ねて表示する重畳伝達機能を持つ。また、複数の人が作業状態を共有する空間共有機能、遠隔地から現場に対してリモートで作業を支援する機能などを持つ。保守支援技術を適用することで、顧客の業務を効率化し、製品を安心して使用できるサービスを提供する。

Today's after-sales service field has been faced with the challenge of improving the efficiency and transferring the skills for maintenance operations. To address this challenge, Fuji Electric has developed a maintenance support technology that utilizes augmented reality (AR). This technology includes a superimposed communication function that displays the computer graphics for work instructions onto the target equipment by converting accumulated expertise in the field to explicit form to present work instructions concisely and clearly. It also has a spatial sharing function that allows multiple people to share work statuses and a remote support function for on-site workers. We will provide maintenance support services that allow customers to streamline their operations and reliably use our products.

① まえがき

日本の産業界、特に製造業では設備投資の抑制傾向が続き、工場設備の老朽化が進んでいる。そのため設備の保守・メンテナンス業務の重要性が増している。保守・メンテナンスの現場では生産年齢人口の減少による働き手不足や、熟練作業者の高齢化と退職に伴う技術力低下が進んでおり、作業負担が高まり続けている。

このような中、工場の安定操業や製品の品質維持を実現するためには、次に示すことが大きなポイントであり、保守・メンテナンス業務の効率化と現場作業者の技能伝承が重要課題となっている。

- 既存設備を可能な限り長期間使用する。
- 既存設備の保守・メンテナンス業務を、可能な限り人手をかけずに行う。

富士電機では、これらの課題を解決するために、保守・メンテナンス業務の DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）、すなわちデジタル技術の適用による業務革新を狙い、現場作業を効率化するための保守支援技術を開発した。特に、現場作業者に対し、作業に必要なノウハウあるいは作業手順といった情報をリアルタイムで通知するための実現手段として、拡張現実（AR：Augmented Reality）を適用した。

本稿では、拡張現実の概要に加え、富士電機の保守支援技術の特徴と適用例について述べる。

② 拡張現実の概要と産業利用

拡張現実とは、人が知覚する現実世界をコンピュータにより拡張する技術と定義される。2016 年に登場し大ヒットしたモバイルゲーム“Pokémon GO”^(注)に用いられたこ

とで、拡張現実とは広く知られるようになった。スマートフォンやタブレットの画面上に、そのカメラで撮影した現実の風景と、CG（Computer Graphics）の物体を合成して表示することで、その物体があたかもその場に存在するかのように見せるものである（図 1）。

近年は、HMD（Head Mounted Display）、つまり頭に装着するゴーグルタイプの端末を活用した技術が向上している。特に、ホログラフィなどの映像技術を用いることで、CG を立体的に表示することが可能となった。この進歩により、エンターテインメント業界に加え、医療や建設業、製造業などの産業で利用が加速している。

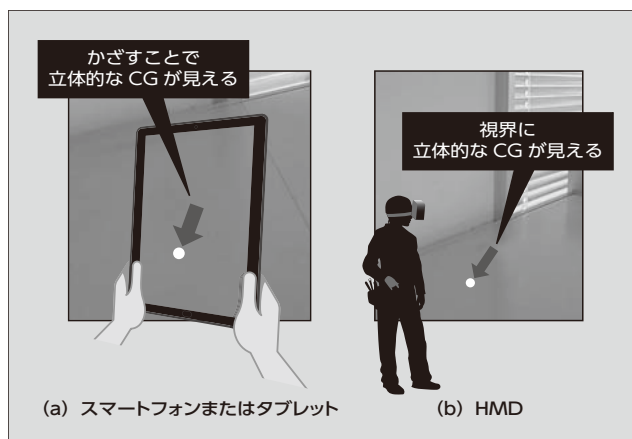


図 1 拡張現実の見え方

〈注〉 Pokémon：任天堂株式会社・株式会社クリーチャーズ・株式会社ゲームフリークの商標または登録商標

③ 富士電機の保守支援技術の特徴

保守・メンテナンス業務は、日常的な設備点検や消耗部品交換などの定期点検、故障・トラブル対応など、作業内容により実施頻度と難易度が大きく異なる。特に、定期点検や故障・トラブル対応は専門知識を要することが多いため、熟練作業者に作業負荷が集中しやすい。

そこで本技術では、非熟練作業者であってもさまざまな保守・メンテナンス業務を行うことができるようにするため、作業現場や作業内容に合わせて、適切なコンテンツ（作業手順、ノウハウなど）を現場で使用する端末に表示できるようにした（図2）。この端末には、作業者が作業中に両手を自由に使えるようにするために、HMDを採用している。

本技術の特徴は、保守・メンテナンス業務の対象機器や設置環境、作業プロセスを考慮したことであり、これにより、非熟練作業者でも効率的に作業できるようにしている。例えば、作業内容を分かりやすく作業者に伝えることで、短時間で正確に作業を進めることができるようにする。富士電機では、本技術への要求を整理し、拡張現実およびHMDの基本機能の活用や、付加機能の開発によってシステムを実現した。本技術への要求とそれに対応して開発し

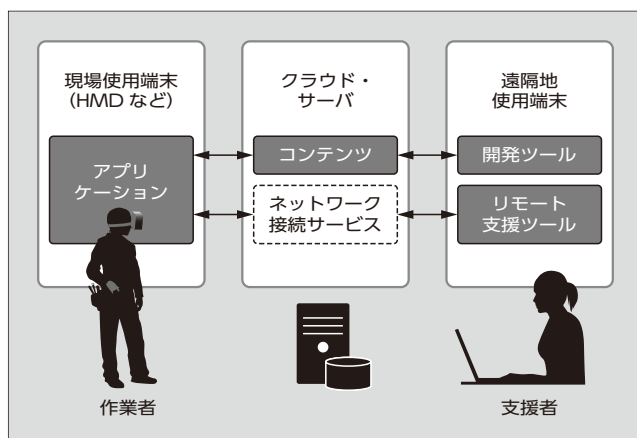


図2 システム構成

た機能を表1に示す。また、各機能の内容を次に述べる。

3.1 重畳伝達機能（基本機能）

作業者が円滑に作業を進められるように、対象設備の該当箇所に作業箇所および作業手順を図式化したCGを、正確に重畳（重ねて表示）する重畳伝達機能を開発した。このCGはHMDの向きが変わっても、設備の該当箇所に重畳し続けることができ、作業者が行うべき“押す、引く、回す”などの身体動作をアニメーション（動画）で表示することもできる（図3）。

表示するコンテンツを適切かつ正確に重畳するためには、対象となる設備を特定して表示内容を決定し、さらに設備の形状を把握して重畳する位置を調整しなければならない。特に現場では、制御盤のように似た外観の設備が並ぶことが多く、外観だけでは特定がしにくい。そこで設備ごとに異なる形状・模様が印刷されたマーカシールを貼り付け、それを認識することで対象設備を特定し、HMDの汎用フレームワークが持つ三次元空間認識機能を組み合わせることで、重畳する位置を調整できるようにした。

3.2 非接触操作機能（基本機能）

表示するコンテンツは、HMDの物理的なスイッチ操作で、容易に切り替えることができる。しかし、HMDは水や油などの汚れに弱く、作業によって汚れた手で操作する



図3 身体動作の重畳イメージ

表1 開発した機能

要求内容	要求に対応した機能		
	種 類	名 称	概 要
作業内容を簡潔明瞭・直感的に表示できること	基本機能	重畳伝達機能	作業内容を表すCGを、正確に設備に重畳（重ねて表示）する
HMDは装着時を除き手で触らず、操作できること		非接触操作機能	作業者のジェスチャーを検知し、HMDを非接触で操作する
作業状態を可視化し、複数の人と共有できること	付加機能	空間共有機能	作業状態を仮想空間上の作業現場に保存・復元し、複数の人が情報を共有する
設備の稼働データを活用できること		IoTモニタリング機能	設備の稼働状態を、ネットワークを介して取得し、拡張現実で表示する
遠隔地からリモートで作業を支援できること		リモート接続機能	現場と遠隔地をネットワークで接続し、遠隔地からリモートで作業を支援する
ネットワークに接続できなくても、作業を現場で完結できること		スタンドアロン実行機能	HMDの外部にあるサーバに常時接続することなく、HMD単体でアプリケーションを実行する

と故障する恐れがある。また、HMD の操作のために手を洗ったり、グローブを外したりすることは、作業効率の低下に繋がる。そこで、HMD に直接触れずに操作する非接触操作機能を開発した。

非接触での操作には、音声認識技術が広く用いられている。しかし、保守・メンテナンス業務の現場では機械音などの大きな騒音がある場合が多く、十分な音声認識精度が得られない可能性がある。そこで HMD の汎用フレームワークが持つ三次元空間認識機能、特に手指状態を取得するセンシング機能を活用し、作業者の指先の動き、すなわちジェスチャーを検知することで HMD の物理的なスイッチ操作を代替するようにした。具体的にはスイッチなどを表す CG を重畳し、作業者がその CG を操作するジェスチャーを検知する。重畳する CG を増やすことで、さまざまな操作バリエーションを作ることができる。

3.3 空間共有機能（付加機能）

点検時に発見した不具合を後で復旧する場合や、長時間に及ぶ作業において複数の作業者が交代しながら作業を進める場合、作業仲間間で現場の状況や作業の状況などの情報を引継ぐ必要がある。そこで、このような引継ぎに必要な情報を作業者が新たなコンテンツとしてその場で作成・重畳し、別の作業者が作成したコンテンツを確認する空間共有機能を開発した。

図 4 に示すように、ある作業者が作業の気付きや進捗などを本システムのコンテンツとして作成し、重畳する位置を定めて、クラウド・サーバ上に情報を蓄積する。次に別の作業者が本システムを通じて対象設備を確認する際、このコンテンツを合わせて確認することで、引継ぎ業務の効率化や、引継ぎに伴う作業の誤認と手戻りを防止することができる。

3.4 IoT モニタリング機能（付加機能）

設備の稼働情報、例えば電圧・電流値、温度、異常ステータスなどは、設備に備わるメータや表示器などを目視で確認できる場合もあるが、さまざまな場所にあるため確認に手間がかかる。そこで、確認の手間を軽減するため、

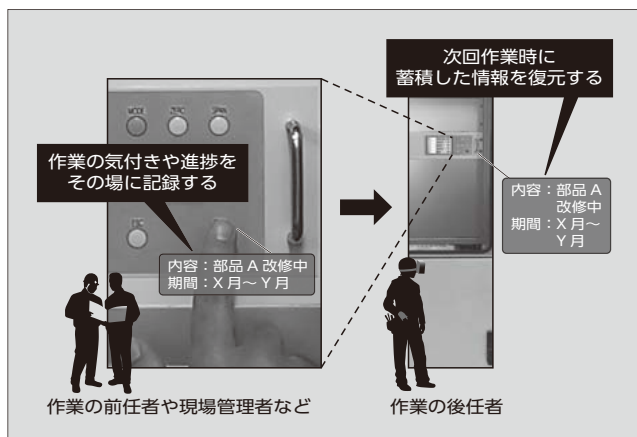


図 4 空間共有のイメージ

富士電機のエッジデバイスや IoT（Internet of Things）プラットフォームと組み合わせて、これらの情報を設備の該当箇所に一括してリアルタイムに表示する IoT モニタリング機能を開発した。

作業手順などの静的コンテンツは、あらかじめ作成し、用意することができる。一方、リアルタイムに変化する稼働情報などの動的コンテンツは、対象設備にエッジデバイスを接続してデータを適宜受信しながら表示する必要がある。そこで、エッジデバイスから直接データを受信するか、あるいは IoT プラットフォームを介してクラウド・サーバからデータを受信して表示するようにした。IoT プラットフォームを介する場合は、収集した稼働情報を、AI（Artificial Intelligence）などを用いて分析することができる。例えば、ある収集データが通常と異なる傾向を示した場合に、注意喚起を促すような CG を重畳することができる。

3.5 リモート接続機能（付加機能）

保守・メンテナンス業務の中には、熟練作業による作業や直接の支援・指導を必要とするものが少なくない。従来は熟練作業者が都度現場に出向いて作業していたが、最近ではビデオ通話機能や Web 会議システムを利用し、リモートで現場作業員に対して支援・指導を行うケースが増えている。リモートでの作業支援を効率化するために、拡張現実を活用したリモート接続機能を開発した。

リモートの作業支援では、支援者（熟練作業員、オペレーターなど）が、現場で撮影した動画を確認しながら、現場作業員に対して口頭で指示を与える場合、“ここ”“そこ”“あれ”などのいわゆる“こそあど（指示語）”が伝わりにくい。特に、複雑な作業や不慣れな作業、または母国語が異なる作業員に対して指示する場合などはその傾向が顕著である。

そこで、図 2 に示すリモート支援ツールを用い、作業員が装着する HMD に、支援者が“こそあど”を表す矢印などの CG を重畳することで、熟練作業員が現場作業員に対して、作業箇所を直接指示できるようにした。

3.6 スタンドアロン実行機能（付加機能）

作業現場のネットワークは不安定なことが多い。そのため図 2 に示すシステム構成において、現場の HMD がクラウド・サーバに接続できず、作業に必要な情報をリアルタイムに取得できない場合がある。

そこで、ネットワークに常時接続することなく、HMD 単体でアプリケーションを実行する機能を開発した。

クラウド・サーバにある現場作業に必要なコンテンツを、あらかじめ HMD にダウンロードできるようにするとともに、現場でコンテンツを作成した際は、作業終了後オンラインとなった際に、HMD とクラウド・サーバとでデータを同期するようにした。

4 拡張現実を用いた保守支援技術の適用例

(1) 現地試験における適用例

製品を現地に設置した際、そこで正しく動作することを確認する現地試験が必要となる。従来は熟練作業者が現場に出向いて現地試験を行っていた。しかし、新型コロナウイルス感染症の影響で、国内外の移動が制限されたため、富士電機では Web 会議システムを利用し、リモートで現場作業者に指示を出し現地試験を実施するようにしたが、次に示す問題があった。

- 現場作業者は両手を使って作業するため、作業の様子を撮影し、映像を支援元に送信するスタッフ（撮影者）が必要である。
- 作業には作業者と熟練作業者、撮影者の 3 名の連携が必要であり、十分な意思疎通に時間を要す。

これらに対し、保守支援技術を適用することで、現場作業者に対して、作業内容を直接かつ分かりやすく指示できるようにした。

図 5 に示すように、矢印などの付加情報を用いて、言語化しにくい作業指示を現場の空間や設備にリアルタイムに重畳し、可視化することで、熟練作業者と作業者の間の意思疎通を円滑に行うことができる。同時に、現場作業者は、HMD を装着すると作業指示を受けながら両手を使って作業ができるため、効率的に現場作業を行うことができる。

また、熟練作業者は支援者として現場に出向く必要がなくなり、熟練作業者の移動時間を別の現場の指導に割り当てることで、非熟練作業者の技能向上機会が拡大するので、現場の技能伝承を促進できる。

(2) 定期保守と突発業務における適用例

保守・メンテナンス業務の対象となる設備は、さまざまな条件の場所や環境に設置され、その運用もさまざまであるため、次に示すような問題があった。



図 6 定期保守と突発業務への適用例

- 作業者が所定の期間で入れ替わる場合、作業の習熟と引継ぎが難しい。
- へき地や国外の設備では、熟練作業者が容易に現場に出向くことができない、または移動に時間がかかり処置が遅れる。
- 密閉空間や、遮蔽（しゃへい）物がある環境に設備が設置される場合には、ネットワークに安定して接続できない。

これらに対し、保守支援技術を適用することで、現場作業者が、外部の支援を受けることなく作業を完結できるようにした。

現場で蓄積された暗黙知である熟練作業者のノウハウを形式知化し、図 6 に示すように、作業内容を表す CG を設備に重畳することで、遠隔地に熟練作業者がいなくても現場作業を支援できる。定期保守の際は、マニュアルが電子化済みであるため、マニュアルを探す時間や理解する時間が削減でき、効率的に現場作業を行うことができる。さらに、作業者の習熟度が低くても、事前にマニュアルを用いたトレーニングが必要でないため、現場作業者の交代や引継ぎを容易に行うことができる。

また、突発業務の際は、現場の作業者が初期対応を行うことで、熟練作業者を現地に派遣する場合に比べ、設備の復旧時間を大幅に短縮できる。

5 あとがき

拡張現実を用いた保守支援技術について述べた。拡張現実を用いて、さまざまな現場の実空間と仮想空間を融合することで、富士電機の DX に貢献するとともに、お客さまの業務効率化と技能伝承の促進に資するサービスを提供することができる。

拡張現実技術の進歩が早く、民生分野だけでなく産業分野においても、応用範囲が広がっていくと考えられる。

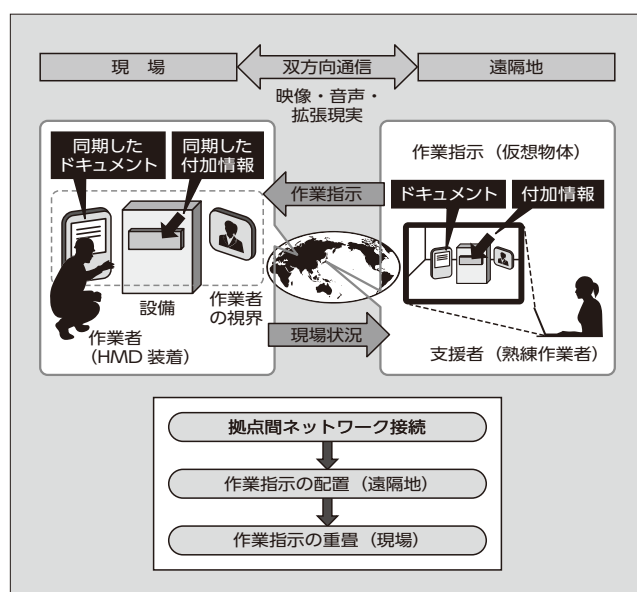


図 5 現地試験への適用例

富士電機は、今後とも、技術の進歩にいち早く対応し、お客さまに安心して製品を使用していただけるよう、保守支援技術の拡充に取り組んでいく所存である。



大秋 大輔

組込システムの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター組込システム研究部主査。



城戸 武志

組込システムの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンター組込システム研究部主任。



パワーエレクトロニクス機器のモデルベースシステムズエンジニアリング

Model Based Systems Engineering for Power Electronics Equipment

吉田 収志 YOSHIDA, Atsushi

近年のデジタル化の進展は目覚ましく、工場のスマート化が進展する中で、製品のタイムリーな市場投入には開発期間の短縮が求められる。富士電機では、DX への取組みの一つとしてデジタル化と開発プロセスの革新に取り組んでいる。パワーエレクトロニクス機器の開発プロセスに、モデルベースシステムズエンジニアリングを導入し、機構、電気回路、制御ソフトウェアを含む鉄道車両用ドアシステムを例にシステムシミュレーション環境を構築し、開発の早期におけるシステムの妥当性検証に活用できることを確認した。手戻り防止、開発期間短縮、信頼性向上が期待できる。

The recent rapid progress of digitalization has led to the development of smart factories, where shorter development times are required to launch products in a timely manner. Fuji Electric is working on digitization and development process innovation as one of its initiatives for DX. We have applied model based systems engineering to the development process of power electronics equipment and confirmed that this enhanced process can be used to validate the system in the early stages of development by building a system simulation environment for, as a verification example, a door system used in railcars, which includes mechanisms, electrical circuits, and control software. As a result, it is expected to prevent rework, shorten development time, and improve reliability.

① まえがき

近年のデジタル化の進展は目覚ましく、Industrie 4.0 がドイツで提唱されたことを契機に、工場のスマート化が進展している。日本においても Society 5.0 が打ち出され、世界で IoT (Internet of Things) 化や DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) への取組みが加速している。一方、お客さまの要求が多様化する中、製品のバリエーションは増加し、開発工数も増加する傾向にある。このような状況の下で、製品を限られた期間でタイムリーに市場投入するには、開発期間の短縮が必要である。この要求に応えるためには、モデルベース開発 (MBD: Model Based Development) と、それを活用したモデルベースシステムズエンジニアリング (MBSE: Model Based Systems Engineering) ⁽¹⁾ がその解決策として有効であり、産業界において適用が進んでいる。

富士電機では、DX への取組みの一つとしてデジタル化と開発プロセスの革新に取り組んでいる。これまでも、フロントローディング設計やコンカレント設計などの設計プロセス改革や、CAE (Computer Aided Engineering) ⁽²⁾⁽³⁾ 技術の高度化、適用範囲の拡大など、研究開発の生産性向上に向けて継続して取り組んできた。

さらなる進化のために、モデルベースシステムズエンジニアリングの導入を目指し、機構、電気回路、制御ソフトウェアを含む鉄道車両用ドアシステムを例にモデルベース開発を適用し、さらにシステムズエンジニアリングを実現するシステムシミュレーション環境を構築してその有効性を検証したので、その内容について述べる。

② モデルベース開発とシステムズエンジニアリング

2.1 モデルベース開発

モデルベース開発とは、電気回路や機構のシミュレーション環境において、再利用できるようにパーツ単位でモデルを多数用意しておき、これらのパーツを組み合わせて効率的に製品の事前検証を行う開発を指す。

機構部は機構モデル、電気回路は電気回路モデル、制御ソフトウェアは制御ソフトウェアモデルをそれぞれ構築した。これらを組み合わせてシステムモデルとし、連携もしくは連成シミュレーションを行う開発環境を構築した。それぞれのパーツモデルを使用したシステムモデルのイメージ図を図 1 に示す。

2.2 システムズエンジニアリング

システムズエンジニアリングは、まず開発サイクルの初

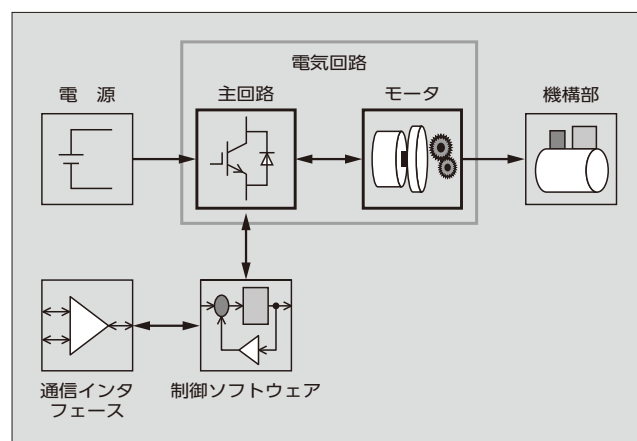


図 1 パーツモデルによるシステムモデルのイメージ図

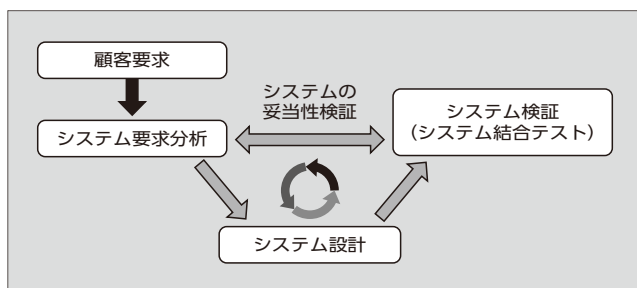


図2 システムズエンジニアリングの概要

期の段階で、顧客要求を明確化して機能要求に読み替え、その上で複数の分野にまたがる機能要求を全て考慮しながら、システム全体に問題がないかその妥当性を確認するエンジニアリングを指す（図2）。

③ 開発工程における課題

従来の開発工程を図3(a)に示す。パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器においては、機構設計を含むハードウェアの設計、電気回路設計および制御ソフトウェア設計が必要なケースが多い。機構設計を含むハードウェア設計は、部分試作と検証を複数回繰り返しながら設計を進めることが多く、開発期間が長期化することが多かった。電気回路設計や制御ソフトウェア設計は、ハードウェア設計と並行して開発を進めるが、ハードウェアの設計変更があると手戻りが生じるため、長期化することが多くあった。これらの問題を解決し開発期間を短縮するために、モデルベース開発およびシステムズエンジニアリングの適用により上流工程で妥当性検証することが有効である。

さらに、システム設計時に行う最初の要件定義やシステム検討が不十分であると、ハードウェア設計と制御ソフトウェア設計の後、それぞれ単体での検証では問題がなくても下流工程での結合試験や実機を使用した評価試験で不具

合が発生し、その対策のために大きな手戻りが発生することとなる。従来品をベース仕様として設計変更し、バリエーション開発を行う場合にも、設計変更の影響範囲を見極められず、手戻りが発生し、結果的に開発期間が長期化することがある。開発期間の短縮化という課題に対しては、システムズエンジニアリングを使ってシステム設計時にシステム全体での整合や協調が取れているかを検証することが有効である。

④ 富士電機が目指すモデルベースシステムズエンジニアリング

③章で述べたようにパワエレ機器の多くは、開発する上で機構設計や電気回路設計、制御ソフトウェア設計のそれぞれが必要である。これらを協調設計し、システムの妥当性を検証した上で、それぞれの詳細設計を行えば、図3(b)のように開発の下流工程で発生していた不具合対策のための工数や手戻りをなくすることができ、結合試験や評価試験の期間の長期化を防ぐことができる。

図4に、今回実施したモデルベースシステムズエンジニアリングによる開発工程を示す。開発の上流で、顧客要求を基に要求分析し、要件定義、システム設計を行い、モデルを利用してシステム検証する。こうして決定したシステム仕様から、システムの概略設計および検証を行い、概略仕様を確定してさらにソフトウェア、ハードウェアの詳細設計および検証を行う。これらの検証を、モデルベース開発ではモデルを使って実行する。

モデルベースシステムズエンジニアリングを採用することにより、信頼性の高いシステム設計を実現し、フロントローディング設計によって開発の早期に設計の妥当性検証することで、開発期間を短縮する。バリエーション開発では、仕様変更による影響範囲を見極め、必要な設計変更と検証を行い、開発効率を上げる。

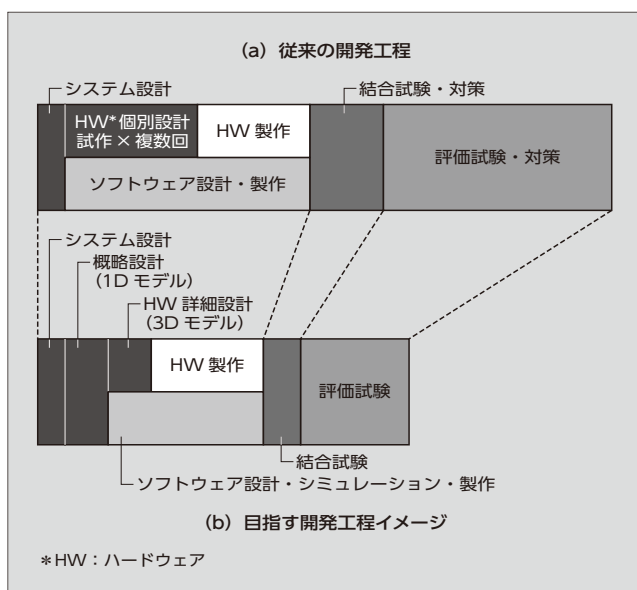


図3 従来の開発工程と目指すもの

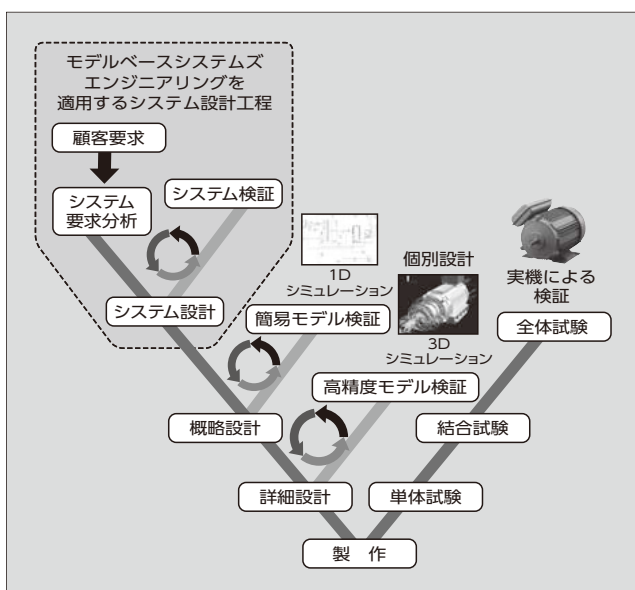


図4 モデルベースシステムズエンジニアリングによる開発工程

⑤ モデルベースシステムズエンジニアリングによる妥当性検証

富士電機が提供する鉄道車両用ドアシステム（図5）は、ドアをモータにより開閉制御するシステムで、国内外で多くの採用実績があり、標準仕様を基に顧客要求に合わせたバリエーション開発を行っている。これを例としてモデルベースシステムズエンジニアリングの手法に則ったシステム設計およびシステムシミュレーションによる妥当性検証の結果について述べる。

顧客要求を分析して機能要求に読み替え、システム仕様を決定し、ドアシステムの妥当性を検証した。検証のために図6に示すシステムモデルを構築した。MATLABおよびSimulink^(注2)を用い、機構部を1Dモデル化してシステムシミュレーションを行った。

(1) 鉄道車両用ドアの開閉動作

ドアシステムには、鉄道の定時運行を確保するために、開動作や閉動作は所定の時間に収まることが要求される。さらに、人の手や身体が挟まった際の衝撃や押付け力が大き過ぎるとけがなどを招く危険性があるので、開閉速度は所定の速度以下であることなどの鉄道車両の安全性確保の

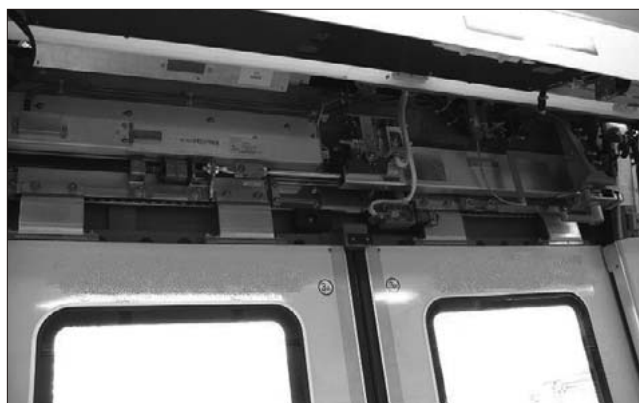


図5 鉄道車両用ドアシステム

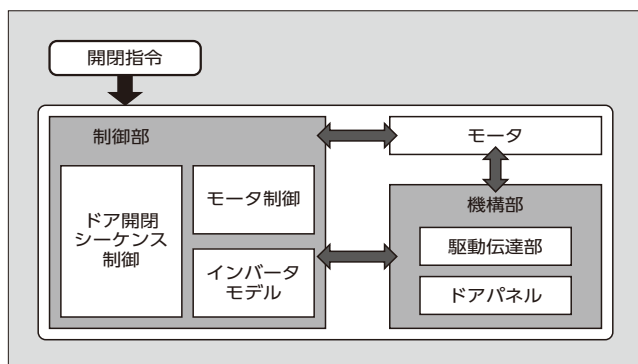


図6 ドアシステムモデル

視点からの要求もある。開閉動作における速度パターンとドアのサイズや質量に問題はないか、それらの相関関係に問題はないかなど、制御ソフトウェア、電気回路、モータおよび機構部を、それぞれの要求仕様や機能仕様を満たすように協調設計を行うことが重要となる。

(2) ドアシステムの協調設計

協調設計の例として、ドア部分の最大荷重と開閉時間のトレードオフの改善を取り上げる。

ドアの静止時につり具で構成する複数のローラには、掛かるドアパネルの質量に相当する荷重が分散している。一方、開閉時にはドアパネルの動きに伴い、つり具とドアパネルの重心との位置関係によりモーメントが発生し、特定のローラに加速度に応じた大きな動荷重が発生する。そのため、開閉時間を短くしようとして加速度を大きくすると動荷重が大きくなってしまふ。適切な加速度や最大速度を決定し、開閉動作時における最大動荷重が設計目標値以下となること、および開閉時間が顧客要求を満たすことをシステムシミュレーションで検証した。

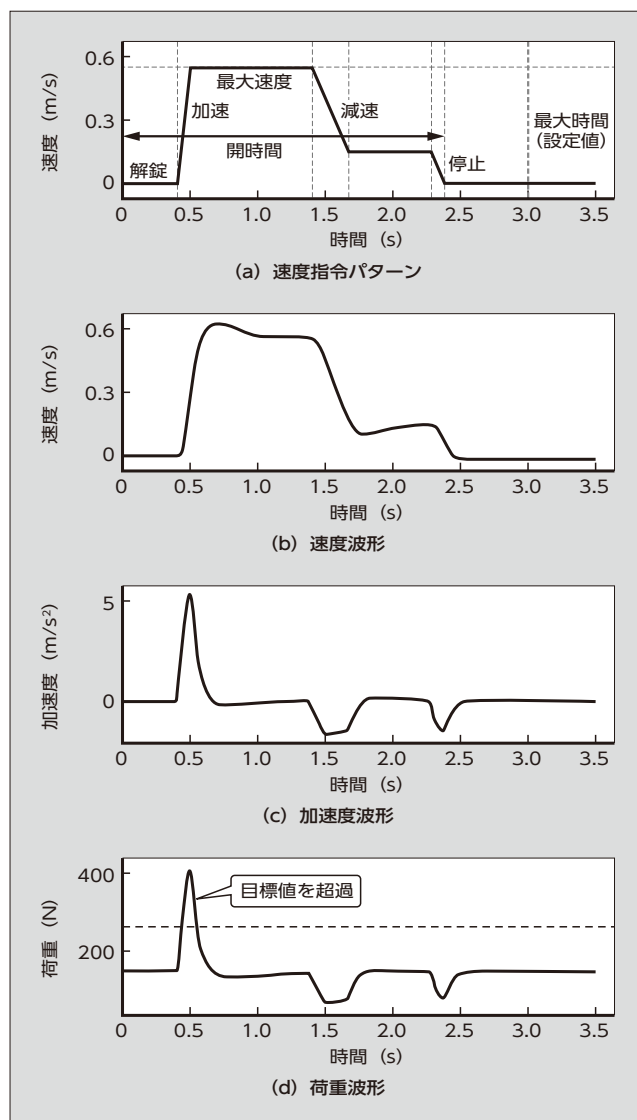


図7 初期設計時の速度指令パターンとシミュレーション波形

〈注1〉 MATLAB：The MathWorks, Inc. の商標または登録商標

〈注2〉 Simulink：The MathWorks, Inc. の商標または登録商標

(3) 速度指令パターンの設計と動作結果

従来の基本仕様を基に決定した初期設計時の速度パターンとシミュレーション波形を図7(a)~(d)に示す。この時、最大開扉時間は3sに設定した。

図7(a)に示す初期設計時の速度指令パターンは、最大速度に短時間で到達して最大速度のまま一定時間進んだ後、減速動作に入りいったん速度を緩めた後で停止動作に移行し、最大開扉時間3sに対し比較的短い約2.5sで停止する。この速度指令パターンに対し、ドアの応答した速度は図7(b)のように変化し、これに伴う加速度の変化を図7(c)に示す。その結果、最大動荷重は図7(d)に示すように、設計目標値を超えている。したがって、この速度指令パターンでは、開扉時間は機能要求を満たすものの、最大荷重は機能要求を満たさないで、この速度指令パターンは不採用となる。

(4) 速度指令パターンの設計変更と動作結果

動荷重を低減するには、ドアパネルの質量を低減する、あるいは加速度を低減する必要がある。しかし、ドアパネルを含む機構部の設計変更で対応しようとすると、各部の

設計変更および検証の工数が大きくなるなど影響範囲は大きい。そこで、機構部は変更せずに最大荷重および開扉時間の機能要求を満たす速度指令パターンを検討した。

開扉時間が機能要求を満たす範囲内で、最大速度や加速時間を決定し、動作時の荷重が機能要求を満たすように設計変更した。その具体的な例を図8(a)~(d)に示す。

図8(a)のように開閉には目標時間を有効に使って最大速度および加速度を低減した速度指令パターンに変更した。これにより、図8(b)にあるように実際の速度変化は緩やかになり、図8(c)のように最大加速度を減少させた。その結果、図8(d)のように最大加速度時の最大動荷重は、設計目標値以下となり、最大荷重と開扉時間の両方の機能要求を満たした。

このように、モデルベースシステムズエンジニアリングおよびモデルベース開発により、開発の上流工程においてシミュレーションを活用し、影響範囲の見極め、最適条件の決定、ならびに効率的な協調設計を行うことができる。また、さまざまな条件の評価が実機なしで可能であり、評価試験の短縮と信頼性の向上を図ることができる。

6 あとがき

富士電機のDXの取組みの一つとして、デジタル化と開発プロセスの改革を推進している。本稿では、パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器のモデルベースシステムズエンジニアリングについて述べた。

今後は、鉄道車両用ドアシステムのほかに、ドライブシステムなど実際のパワエレ機器の開発設計や顧客要求に応じたバリエーション開発に適用し、開発期間短縮、信頼性向上に貢献する。

さらに、開発したシステムモデルは、実車両でのデータのフィードバック、解析シミュレーションの高度化および高精度化を重ね、デジタルツインとして運転の最適化やメンテナンス効率の最適化などアフターサービスでの活用も実現していく所存である。

参考文献

- (1) モデルベースシステムズエンジニアリング導入の手引き。独立行政法人 情報処理推進機構, 2013-8. <https://www.ipa.go.jp/files/000033609.pdf>, (参照 2021-07-07).
- (2) 玉手道雄ほか. シミュレーションによるパワーエレクトロニクス機器のEMCフロントローディング設計. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.165-169.
- (3) 滝沢聡毅, 徳田寛和. パワーエレクトロニクス装置設計の高度化技術. 富士時報. 2007, vol.80, no.2, p.106-109.
- (4) 渡邊雅英ほか. 製品開発を支えるシミュレーション技術の現状と展望. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.4-10.
- (5) システムズエンジニアリングハンドブック第4版. 慶應義塾大学出版会. 2019.
- (6) 辻村勲ほか. 輸送品質向上を目指したJR東日本E235系車両（山手線）向けドアシステム. 富士電機技報. 2018, vol.91,

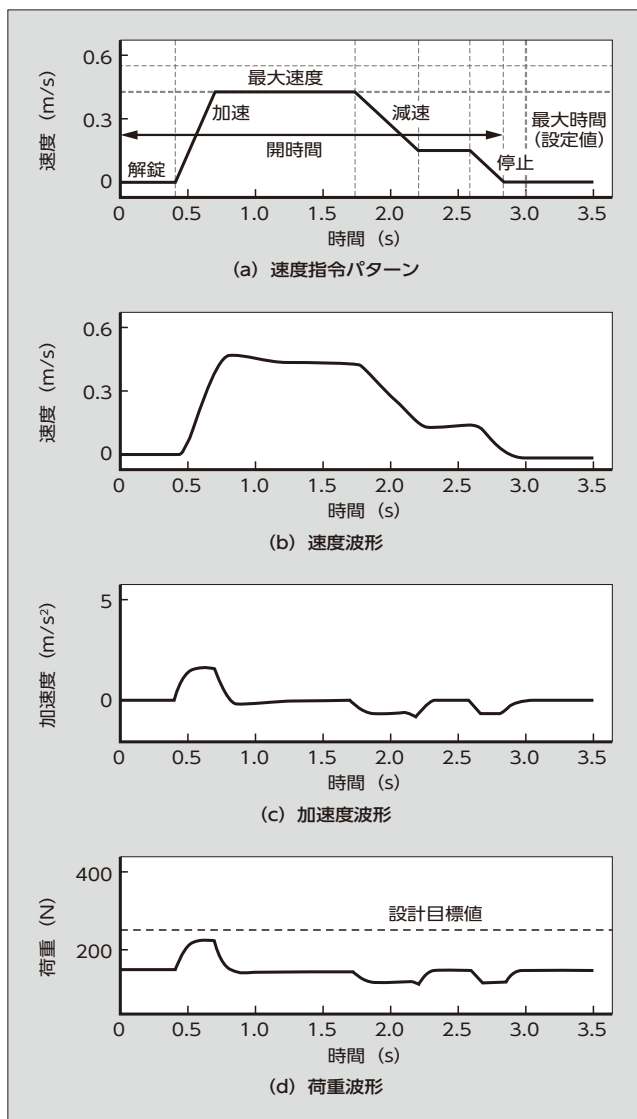


図8 調整後の速度指令パターンとシミュレーション波形

no.1, p.55-59.



吉田 収志

パワーエレクトロニクス製品の研究開発に従事。
現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイ
ノベーション研究所デジタルプラットフォームセ
ンター主席。電気学会会員。



デジタルツールの活用による 生産ライン構築プロセスの変革

Digital Transformation of Production Line Construction Processes by Utilizing Digital Tools

澁田 学 SHIBUTA, Manabu

現在、社会環境の変化により顧客ニーズに細やかに対応できるものづくりの実現が求められている。富士電機はニーズの多様性やグローバル化の進展に対応するため、JIT（Just-In-Time）の思想に基づき自律したものづくりを行う“自律同期化生産”の実現を目指している。デジタルデータの活用による生産ライン構築プロセスの変革や、自動化設備のデジタル検証によりライン構築の生産準備期間の短縮を実現することで、顧客の要望に応える富士電機のものづくりに貢献している。

Today's customization and mass production are both required to respond to customer needs, which vary according to changes in the social environment. To respond to the diversification of needs and the progress of globalization, Fuji Electric aim to achieve “autonomously synchronized production” on the basis of the concept of Just in Time (JIT). We have reduced the start-up time for production lines through the transformation of production line construction processes using digital data and the verification of automation equipment applying digital technology, contributing to Fuji Electric's Manufacturing that meets customer requirements.

① まえがき

富士電機は創業から長年にわたり、エネルギー・環境事業を通して、半導体やコンポーネントからプラントのように幅広い分野の大小さまざまな製品を国内外で提供している。その中で富士電機は、お客さまの要望に応えるため、ものづくりにおいて、時代ごとに常に新たな挑戦と取り組みによって生産技術を築き上げてきている。

本稿では、富士電機が目指すものづくりを実現するために取り組んでいる DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）について具体例を挙げて述べる。

② 富士電機が目指すものづくりと課題

現在、グローバル化やデジタル化の急速な進展によって社会を取り巻く環境は劇的に変化してきている。ものづくりにおいては、個々の顧客のニーズに対応しながら大量生産並みの生産性も同時に実現するマスカスタマイゼーションなどが求められている。このような中、富士電機の製品型式は 45 万点を超えており、さらなる製品機能の多様化、ならびに市場投入までの期間短縮が求められている。

2.1 富士電機が目指すものづくり

富士電機は、ニーズの多様化やグローバル化に対応するため、必要なものを、必要な時に、必要な量だけ提供する JIT（Just-In-Time）の思想に基づき、“自律同期化生産”を目指している。

自律同期化生産とは、最後工程である顧客への販売を起点に、その前工程である生産や調達などサプライチェーンの各工程が販売で引き取られた数に同期してものづくり全

体が自律的に流れる仕組みを作り、作業の標準化とものの流れの平準化で顧客のニーズに限りなく同期化し、自律したものづくりを行うことである。

富士電機は自律同期化生産を実現するため、時代の流れを捉えた先進的な技術基盤を適用した生産システムを富士電機生産方式（FePS：Fuji Electric Production System）として体系化し、バリューチェーン全てにおける生産革新に取り組んでいる。

この実現に向けた大きなポイントは次の 3 点である。

(1) グローバルな生産体制の構築

富士電機は地産地消の考えを基に、グローバルに生産拠点を置いている。各拠点でのさまざまなリスクに対し BCP（Business Continuity Plan）も含め、顧客のニーズに対応できるようにするため、グローバルな生産体制の構築を実現する。

(2) 自律したものづくり

人、設備、システムから得られる生産や品質、設備稼働の情報などを連携し同期することで、自律的に維持・向上できるものづくりの仕組みを構築して、異常や不良のない高品質な製品を作り出す自律したものづくりを実現する。

(3) 顧客への限りない同期化

顧客との強固な信頼関係を構築するため、製品開発、品質、コスト、納期などを同期する。

2.2 現在までの取り組みと課題

富士電機は FePS を基に、2.1 節で述べた三つのポイントに対してバリューチェーンを構築する SCM（Supply Chain Management）と PLM（Product Lifecycle Management）における改革活動を軸に IoT（Internet of Things）化も加え、デジタル改革活動を行っている（図 1）。

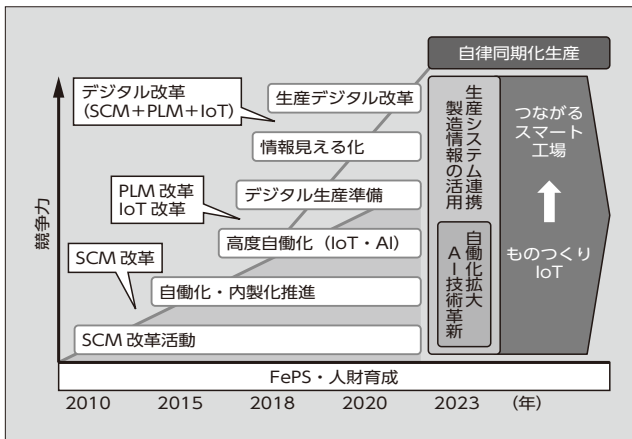


図1 富士電機の生産革新のあゆみと目指す姿

この活動では、ものと情報の流れをデジタル化した“つながるスマート工場”によってQCD（Quality, Cost, Delivery）の最適化を推進し、国外の生産拠点も含め全てデジタル情報でつなげてグローバルな生産体制を整えることを目指している。

2009年度から、SCM活動を調達から販売までの全ての部門が参画して進めている。この活動では、全ての工程でものと情報が淀みなく流れるように工程間をつないだ流れを作り、その流れを自律的に管理・制御できるようにデジタル技術を用いて高度化して、JITを実現することと、内製化や自動化を推進し、国内外の外部環境の変化などの外因の影響を受けにくい強いものづくりへの変革を図ることを柱として取り組んできている。近年では、生産ラインや設備にてセンシング技術やAI（Artificial Intelligence）などを活用した診断解析、予知、フィードバック制御などの技術革新による高度な自動化やデジタル化による自律したものづくりに取り組んでいる。

PLM活動では、図2に示すように、商品企画から、製品設計、工程設計やライン構築などの生産準備、そして生産につながるエンジニアリングチェーンに、販売後のサービスに至るまでのライフサイクル全体をマネジメントし、顧客に提供する価値の最大化を図るため顧客との限りない同期化を図る。

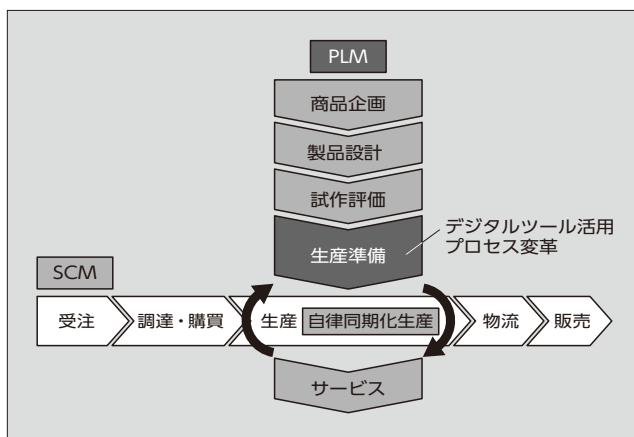


図2 SCMとPLMの取組み

PLM活動の中で、製品や生産設備などの設計の3D化という点においてデジタル化は進めてきたものの、生産準備工程における未デジタル化の部分が残るなど、つながる化に至っていない工程も多い。

そこで、生産準備の各ステップでデジタルツールを活用し、デジタル情報を次のステップに伝えることで、高品質なものづくりのための生産ラインを短期間で構築する仕組みを作った。

③ 生産ラインの構築プロセスの変革

ものづくりでは、製品の開発に合わせて、生産工程を構築するための工程設計や生産ライン設計などの生産準備が必要である。従来、生産準備におけるプロセスのこれらの各ステップを製品開発が完了した後に、生産技術者が要求される目標に対し、机上で何度も繰り返し検討してきた。だが、このような方法では、ニーズが多様化し対象品種が増えることなどによる負荷増に対応しきれない。そこで、ノウハウを属人化せず共有化し、生産ラインを誰でも短期間に構築できるように変革する必要がある。

この課題を解決するため、デジタルツールを用いてデジタル仮想空間上に効率的に生産できる仕組みを構築し、仮想空間と実空間を繋ぐCPS（Cyber Physical System）を活用して、高効率なラインを構築するための生産準備期間を短縮できるようにした（図3）。

3.1 製品設計の情報の活用による工程設計の高度化・効率化

生産準備における工程設計では、製品設計の情報に基づき、製造が可能であることや容易であることを検証しながら、製造方法、人員・工数、設備・治工具などを設定する。さらに、人やもの、設備の動きを想定し、より効率的な生産ラインを構築する。この生産ラインの構築は、製品のQCDを左右する極めて重要なものである。この工程設計における製造容易性検証とライン設計の事例を次に述べる。

(1) 製造容易性検証と帳票作成

ものづくりでは、品質を満足する最適な製造方法を考慮して作成したQC工程図や作業標準書などの帳票類を使

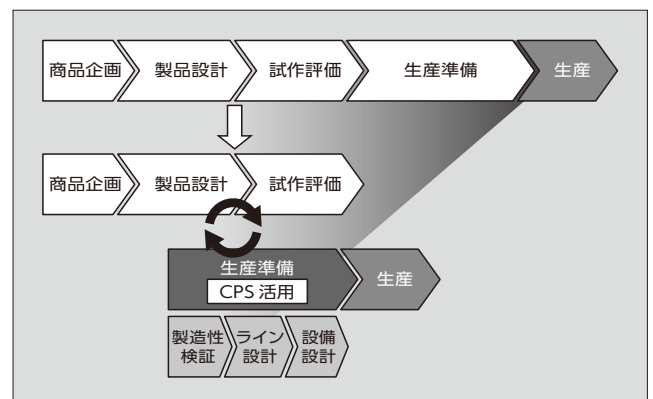


図3 CPS活用による生産ライン構築プロセスの変革

用して、製品の QCD の最適化を行う必要がある。同じシリーズ製品でも仕様に微小な差異があれば工数や要求品質が異なるので、それぞれの製品に合わせて帳票類を作成する必要がある。また、設計を変更するたびに版数管理などの付随作業が発生するため、多大な時間がかかるという問題があった。

この問題解決について、配線作業の省工数化を実現する受配電機器「F-QuiQ シリーズ」の製品開発を実例として取り上げる。

この F-QuiQ シリーズをユーザーに採用していただくために、制御盤への搭載時に省工数の効果を最大化するため、複数機種の商品ぞろえが必要であり、主要 6 機種を同時に発売した。そのためには、この 6 機種の製造容易性の検証と帳票作成を同時に行う必要があった。

そこで、コンカレントエンジニアリングによって生産準備の着手を早期化した。製品開発中に、図番や部品名称といった基本情報や、質量などの各種情報を入力した 3D-CAD データを基に CPS 上で製造容易性を検証することによって、最適な製造手順の抽出と、構築した生産工程を確認するための試作回数を半減した。併せて、デジタルツールを用いて 3D-CAD データを基に帳票類を半自動で作成できる環境を整えることで、生産準備期間を半減した。

製造容易性の検証では、CPS 上で部品の組立順序や方法を入れ替えたいいくつかの案を検討した。FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)を生産工程の構築に適用し、FMEA から抽出したリスクが実際の製品品質に影響を及ぼさないようにするために、注意点を 3D-CAD の設計データに追加した。また、実績に基づいて作成した作業工数テーブルを基に製品質量なども踏まえて組立工数を試算し、必要な治工具も設定した。これにより、現実と同等の生産工程の検証をデジタル上で試作なしで行った。検証時に判明した製造が難しい点は製造容易性の向上のため、即時フィードバックして生産工程の改善につなげた。

帳票の作成では、富士電機内で規定している工程 FMEA、QC 工程図、組立手順書などの各種フォーマットに、製造容易性検証時に入力したデータや、その際の組立状態の画像を自動で転記する仕組みを構築した(図 4)。

また、帳票は実績に基づいて作成した作業工数テーブルを活用しているため、シリーズ品の帳票を作成する時には、差異部分の工数を自動計算し、設計データにひもづき帳票類が自動作成されるため、版数管理も容易である。

(2) 生産ライン設計

生産ラインの構築では、各工程の作業に加えて、ラインへの部品の供給、作業者の動線、作業者と機械の組合せなどさまざまな重なり合う要因を網羅して事前検討する必要がある。その検討と実際にライン構築した際の一致の度合いは生産技術者の能力に依存することも多かった。

生産ライン設計の実例として、顧客の短納期の要求を満足するために、回転機の生産を中国から国内生産に切り替えた事例について述べる。

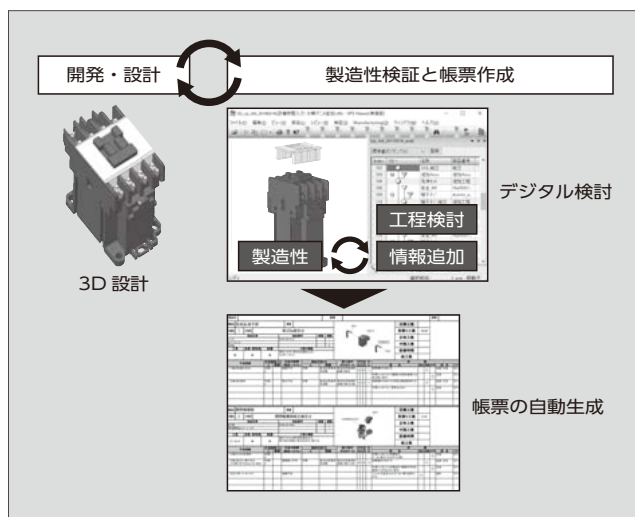


図 4 製造容易性検証と帳票作成の効率化

生産の切替えにおいて、顧客が要求する納期を満足し、中国での製造と同等以下のコストで 60 機種以上が生産可能な組立ラインを構築することが課題であった。日本国内に移管することで製造コストが増加することを防ぐため、人手に依存していた作業を極力自動化することが必須であった。そのため、目標の製造コストを満足するラインが構築できることを事前検討で確認することが重要となる。

富士電機は、CPS 上で、人やもの、設備の動きをシミュレーションするラインレイアウト設計ツールを活用して、効率的な生産ラインを設計している。3.1 節(1)で述べた製造容易性検証で使用した情報を活用してタクトタイムやラインの能力、工数をシミュレーションする。さらには作業者の動作シミュレーションによって、主作業に加えて付随作業や作業しにくい工程、ならびに製品品質に関わる工程の事前検証と課題のつぶし込みを行った(図 5)。その結果を踏まえて、回転軸の高精度嵌合(かんごう)や組立時の微調整などの設備を新規に開発して自動化を実現した。これにより、目標製造コストや要求納期を満足する生産ラインを構築した。

現在は、順次国内生産の対象となる型式を増やして、顧客の要望に同期できるように改善を継続している。

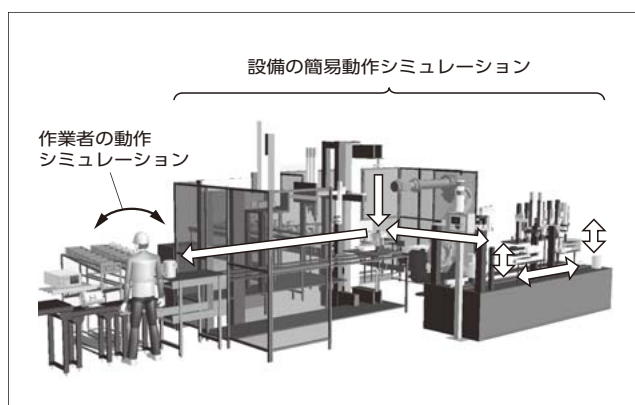


図 5 生産ライン設計の高度化

3.2 自動化設備のデジタル検証

生産準備において、新規の設備開発が必要となる場合、従来は機械設計や電気設計などのハードウェア設計と、動作制御プログラムなどのソフトウェア設計などを行った後、実際の設備を使って動作などのデバッグや評価を複数回行っていた。そのため、手戻りが発生する場合もあり、相応の期間が必要であった。

手戻りを削減し、開発期間を短縮した実例として、人の指先の繊細な感覚が必要で自動化が困難だった配線用遮断器の外装箱への梱包作業の自動化について述べる。

(1) 自動化の課題

輸送中の外部衝撃から製品を守るため、製品が1個入った個装箱を製函した段ボール箱の中に最大10個を投入し、ガムテープで封函し、注文の内容を記載した外装ラベルを張り付けるといった作業を行っていた。この作業では箱の成形やテープ貼付など人の指先の感覚などに依存する部分が多い。そのため、作業によって工数や出来栄にばらつきも多く、ものの流れが平準化しづらく自律同期化生産におけるネック工程であった。

このような作業を自動化するために、解決しなくてはならない困難を伴うさまざまな問題がある。

例えば設備製作の段階におけるハードウェアの開発では、設計時に複雑な機構や垂直多関節ロボットを活用しようとするが機械装置が複雑化してしまうという問題があった。また、ソフトウェアの開発では、複雑な機構や垂直多関節ロボットを組み合わせることでソフトウェア設計とデバッグ作業が複雑化してしまうという問題や、実際の設備を使ったデバッグの着手は実際の設備が組み上がるまで待つ必要があるという問題があった。さらに、ロボット教示に至っては完成した設備を干渉で破壊しないように気を付けながら低速で慎重に行わなければならない、生産ラインの完成までに時間を要する開発工程が多々あった。

実際の運用においても、形状が安定しない段ボールやテープを扱う際に不具合が発生することが想定される。さらに、うまく組立ができないなどの設備的なエラーは、稀にしか発生しないこともあり、エラー発生要因の究明が難しく、対策に時間がかかる場合もある。真の原因を早期に究明し根本対策の迅速な対応が求められる。

(2) 設備開発とデジタル検証

手戻りを削減し、設備の設計品質を向上させ、設備の開発期間を短縮するため、機械設計段階の3D-CADデータを活用し、実機と同様の試作・評価を行うことができるCPS環境をコンピュータ上に構築した。

機械設計段階では、3.1節(1)や(2)で得られた結果に従って、機械設計者が検討して、従来と同様に3D-CADを使って設計し、設備を構成する機能ごとのユニットの複雑な配置の組合せによる干渉や、ユニット内の機器駆動時の干渉の回避を確認する。今回はさらに設備の各駆動部の動作を設定し、シミュレーション上で連続動作させ動作を検証した。これにより、十分に仕様を満足した設計であるか

を実機製作前に検証して、手戻りを減らすことができた。

また、設備全体の動作が分かることで、実機の組立と配線後の対応が多かったソフトウェア設計者も機械設計時に機械設計者が想定した動作フローの共有が可能となり、ソフトウェア設計も早期に着手できた。

ソフトウェア設計段階では、設備を制御するPLC（Programmable Logic Controller）で作成した動作シーケンスをデバッグする際に、設計者はCPS上で駆動部やセンサの信号をやりとりしながら、実機と同様のデバッグを行うことができるようになった。さらに、いじわる試験と呼ばれる通常と異なる動作を従来は人手を使って何通りも試しても問題が発生しないことを確認していたが、CPS上で総当たりの検証が可能になった。ロボット制御においても、設備モデルと組み合わせることで、CPS上のシミュレーションなので機構部同士の干渉を気にせず動作を高速で確認できるため、短時間での検証が可能になった（図6）。

これにより、設備への製品供給時の実際のタイミングのばらつきを考慮して、要求されるタクトタイムに収まるかどうかの検証が可能となった。実際のラインが完成したのち、設備の微調整だけですぐに運用ができ、稼働開始までの期間を短縮できるようになった。

また、このCPSを活用すれば、数台のロボットを連携した製造ラインを構築する場合においても、ロボット同士あるいは人との干渉の有無を事前に検証して、安全性を担保した上で、実機の検証を行うことができる。

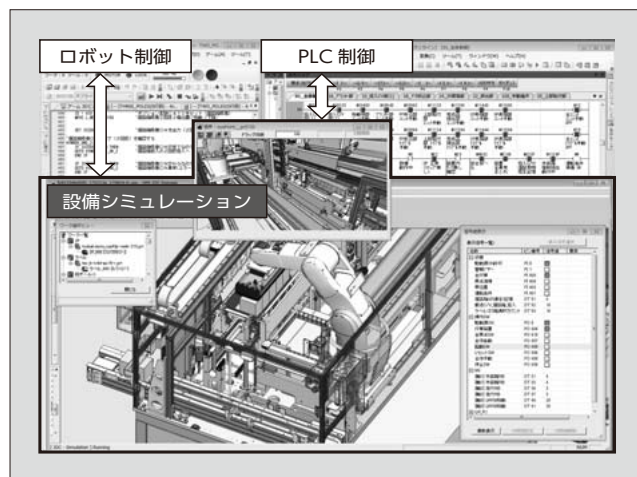


図6 シミュレーションによる実機レス検証



図7 実機挙動のデジタル検証

(3) 設備稼働中のデジタル検証

量産を開始した後の稼働中に不具合が発生した時に迅速に根本的な対応をするため、図7に示すように、設備稼働のログを取得しデジタル検証を行う仕組みを構築した。

設備でトラブルが発生するとログを出力する機能を設け、そのログをCPS上で再生することで、トラブルの原因を即座に解明できるようになった。また、Webカメラを使って動画を記録しているので、段ボールの切れ端をセンサが不具合として誤検出するような設備動作に関係ない原因のトラブルも明確に区別できるようになった。このような場合、従来のようにソフトウェア担当者がトラブル発生後に出張対応する必要がなくなった。また、このCPSを使って実機挙動を再現することで、遠隔地からでも原因の究明と対応が可能になり、設備停止による損失を最小化できるようになった。

これにより、国内拠点だけでなく、国外拠点での設備の量産稼働中の動作評価やソフトウェアの改良が場所を問わず行うことができ、グローバルで顧客が要求するQCDに応え、BCPが可能になった。

4 あとがき

デジタルツールの活用による生産ライン構築プロセスの変革について述べた。またこれ以外にも、溶接などの熟練技術のデジタル化による技能伝承や自動化、それらを組み合わせた技術力強化にも取り組んでおり、富士電機のものづくりに貢献している。

引き続き、DXを通じてものづくりプロセスの変革を加速し、関連部門と連携を密にとり、生産技術力のさらなる強化を図ることで、お客さまのニーズや社会課題などに即座かつ柔軟に対応できる自律同期化生産をグローバルにおいて実現する所存である。



澁田 学

生産技術・製造技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社生産・調達本部生産技術センター設備技術部主任。



シミュレーションによる騒音推定技術

Simulation Technology for Acoustic Noise Prediction

金子 公寿 KANEKO, Kimihisa

大野 和彦 ONO, Kazuhiko

山本 勉 YAMAMOTO, Tsutomu

製品開発では、設計の初期段階でシミュレーションを活用して十分な検討を行うフロントローディングが有効であるが、低騒音化が求められる製品では、膨大な計算が必要なため十分には行われてこなかった。一方、近年では並列計算が可能な計算機や、ソフトウェアを使ったハイパフォーマンスコンピューティングにより、計算時間が短縮され、製品の開発設計プロセスに変革をもたらしている。今回、騒音推定におけるフロントローディングを行う上で必要なシミュレーション技術を開発し、構造の最適化によりトレードオフ関係にある流体騒音と温度上昇の低減効果が得られることを確認した。

In product development, it is effective to implement front loading, which proactively uses simulation to verify the design in early stages. However, this method has rarely been used for products required to be low noise because of the huge amount of calculations required. On the other hand, computers capable of parallel computing and software-based high performance computing have reduced computation times in recent years, transforming the product development and design process. In this respect, we have recently developed a simulation technology for front loading to estimate acoustic noise. We have thereby confirmed that optimal structures can reduce both aeroacoustics and temperature rise, which are in a trade-off relationship.

① まえがき

企業のビジネス環境の激しい変化に対応し、デジタル技術を活用して、製品やサービスに対して競争上の優位性をもたらす DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) が、今後の企業経営に必須となってきている。このような中、富士電機では開発・設計プロセスへのシミュレーション技術の強化を図ってきた。特に製品開発における試作プロセスは、開発期間のボトルネックになる要素が多い。このため、設計の初期段階でシミュレーションを活用して十分な検討を行うフロントローディング^(注1)が、このボトルネック解消には有効となる。しかし、低騒音化した製品への市場要求が高まっているが、騒音のメカニズムは複雑で、膨大な計算が必要となるため、フロントローディングが十分には行われてこなかった。

一方で近年は、複数の CPU を利用した並列計算を可能とする計算機やソフトウェアを使った HPC (ハイパフォーマンスコンピューティング: High Performance Computing) により計算時間の短縮が図られ、計算速度は 5 年で 10 ~ 100 倍速くなっている⁽¹⁾。これにより、数か月かかった計算が数日でできるようになり、HPC は製品の開発設計プロセスに変革をもたらしている⁽²⁾。

本稿では、製品の低騒音化を実現するための騒音推定を一例として取り上げて、フロントローディングを行う上で必要な、シミュレーションや HPC の活用に関わる技術開

発について述べる。

② 騒音発生原理

騒音推定では、図 1 に示すように音源から騒音観測点までの空間における音の伝播を考える必要がある。なお、ここで音源とは音の発生源である。また、音響とは音源から騒音観測点までの音の伝わる現象のことである。騒音源には、大きく分けて振動騒音源と流体騒音源がある。振動騒音源は、構造物の内外で生じた加振力が構造物の振動を起こし、音源となる。代表的なものとして、回転体の偏心による遠心力の変動、電磁気および磁歪 (じわい) の変動などが挙げられる [図 2 (a)]。一方、流体騒音源では、流れの乱れにより発生する流体空間中の密度変化が音源となる。代表的なものとして、冷却ファンからの騒音がある [図 2 (b)]。

騒音推定に対して、設計では騒音の原理に基づいた簡易計算式に加え、これまでに開発した製品における騒音値を基に重回帰分析などを用いている例がある。この手法では、

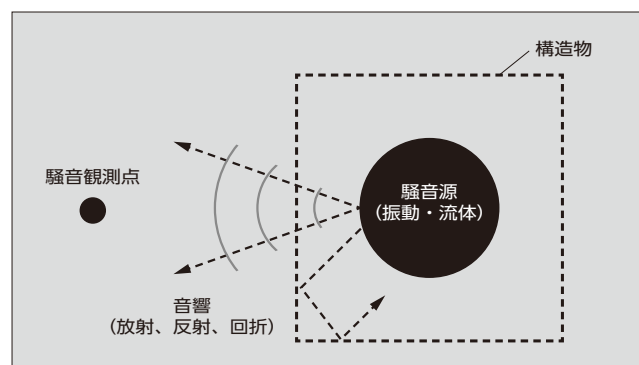


図 1 騒音推定に必要な技術範囲

〈注 1〉フロントローディング：製品開発プロセスの初期工程である仕様検討や機能設計において、シミュレーションの活用などの負荷をかけることで、後工程の試作や試験での問題を減らし、手戻りを少なくする方法である。

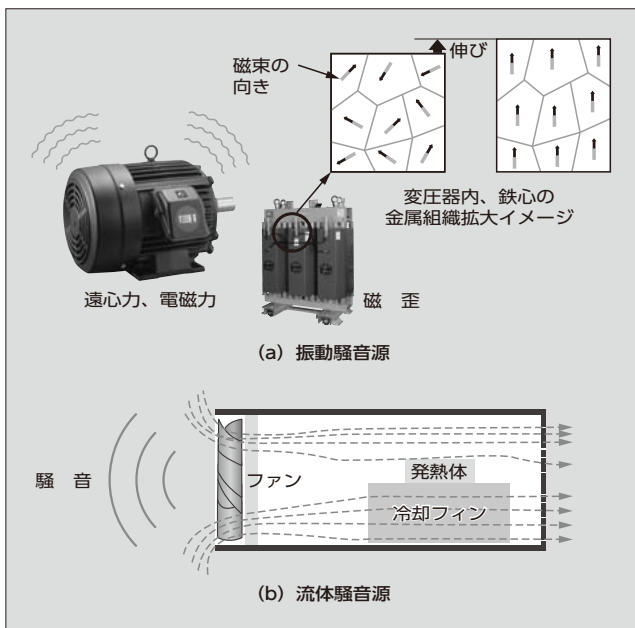


図2 騒音源の例

表1 製品と騒音源の種類

製 品	主な騒音源	
	振 動	流 体
インバータ	リアクトル	冷却用ファン
モータ	鉄心・コイル	冷却用ファン
受変電設備	鉄心・コイル	冷却用ファン
電磁接触器	接 点	—
タービン周辺機器	回転子	タービンプレード、ラビリンスシール部
燃料電池	—	冷却用ファン
自動販売機	圧縮機	冷却ユニットファン

短時間で計算できるメリットがある一方、設計変更などを含め新構造検討の際には、新たな設計変数の追加や設計変数値の範囲が変更されたりするなど、これまでと異なる重回帰式が必要となり、推定精度に問題が生じる。加えて、騒音に関する物理モデルが考慮されていない部分に関しては、設計空間内であっても、適切な推定値が得られにくい問題もある。例えば、構造の固有周波数と外力の周波数が近い値であると共振によって騒音が増加する場合や、ファンの回転速度が原因で流れに生じた周期的な圧力変動と音とに共振が生じて騒音が増加する場合などが挙げられる。

さらに、具体的な構造を設計する詳細検討段階では物理モデルに基づく検討が必要となる。また、表1に示すように、富士電機の代表的な製品における主な騒音源は製品ごとに異なるため、おのこの現象に応じた騒音推定技術の構築が必要となる。

③ シミュレーション技術構築のための検証

3.1 パワエレ機器の製品設計の騒音における課題

パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器では、電気部

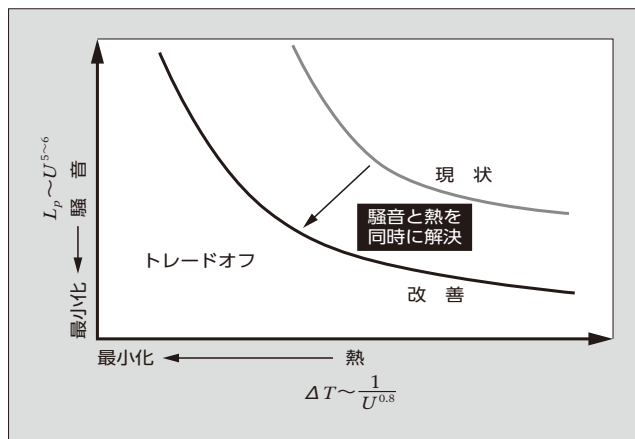


図3 製品設計における流体騒音と温度の関係

品が、電氣的損失により発熱するので、空気冷却する際にファンを利用することが多い。このファンは、流体騒音源および振動騒音源となる。装置の小型化に伴い、ファン径も小さくなり、冷却風量を確保するため高速回転で使用すると、流体騒音が支配的となる。一方、騒音と熱には図3に示すようにトレードオフの関係がある。騒音（ここでは音圧レベル^{〈注2〉} L_p ）は一般に速度 U の5～6乗に比例し、乱流熱伝達率 h を想定した温度上昇 ΔT は U の約0.8乗に反比例する。このため、騒音を下げる目的で、単純にファンの回転速度だけで下げようとする風量が減少し、部品の温度が上昇する結果となってしまう。このことから、製品設計において、トレードオフ関係にある流体騒音と熱を同時に解決していく必要がある。

3.2 シミュレーション手法

シミュレーションによる騒音と熱の推定に加え、現状に比べてさらに良い構造を探索するため、遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化を行った。

騒音推定には二つの手法を用いた。一つは計算時間の短縮が見込める乱流の運動をモデル化したRANS（Reynolds Averaged Navier-Stokes）を非圧縮性定常解析にて求める簡易騒音推定モデルとした。このモデルは、定常解析で得られる壁面に作用するせん断応力と音源となる圧力時間変動との相関を利用したものである。短時間で推定できる一方、絶対値の確保が困難なため、相对比较として多目的最適化と併用した。もう一つは、RANSよりも高精度な騒音推定が期待できる方法で、乱流の大きな渦構造は直接解き、小さい渦構造はモデル化するLES

〈注2〉音圧レベル：基準音圧に対する相対値のことをいう。次の式で定義される。

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}$$

L_p ：音圧レベル（dB）

p ：音圧実効値（Pa）

p_0 ：基準音圧（ 20×10^{-6} Pa）

(Large Eddy Simulation) を圧縮性非定常解析にて求める高精度騒音推定モデルを用いた。高精度騒音推定モデルは、長時間の計算が必要というデメリットが生じる。そこで、多目的最適化にて抽出した構造に対し、騒音の定量推定に用いる。加えて、大規模な並列計算が可能な HPC を利用することにより、計算時間の短縮を図り、このデメリットを解消した。

熱の推定には、発熱による固体内部の熱伝導および空気の対流の影響を考慮し、騒音の簡易推定と同時に解析した。

3.3 シミュレーション手法の検証

(1) 構造検討

シミュレーションの推定精度を検証するため、パワエレ機器の中で低騒音化のニーズが高いモータを対象とした。評価に使用した模擬モータは、図 4 に示す構造をしている。模擬モータのフレーム外部に取り付けたファン駆動用モータを使ってファンを回転させ、ファンカバーの外部から吸気した冷却風は、放熱フィン間を通過して、フレームカバー外に排気される。また、モータの発熱を模擬するため、フレーム内部にヒータを設けた。

模擬モータでは従来の製品に近い構造を初期構造とし、騒音と熱に影響する五つの設計変数（翼形状やフィン形状）を抽出し、騒音と熱の最小化を目的関数とする多目的最適化を行い、構造を検討した。ここでの騒音は簡易騒音推定値とし、熱はヒートシンクの表面温度上昇とした。その結果を図 5 に示す。おのおのの目的関数の値が最小となるパレート解が確認できる。製品設計では目標設定した性能やコストなどの複数の要因を総合的に評価した上で、設計者が設計変数値を決めることになる。本検討では、温度上昇は初期構造温度と同レベルとしつつ、騒音を最小化することに着目して設計変数値を抽出し、最適構造を決定した。

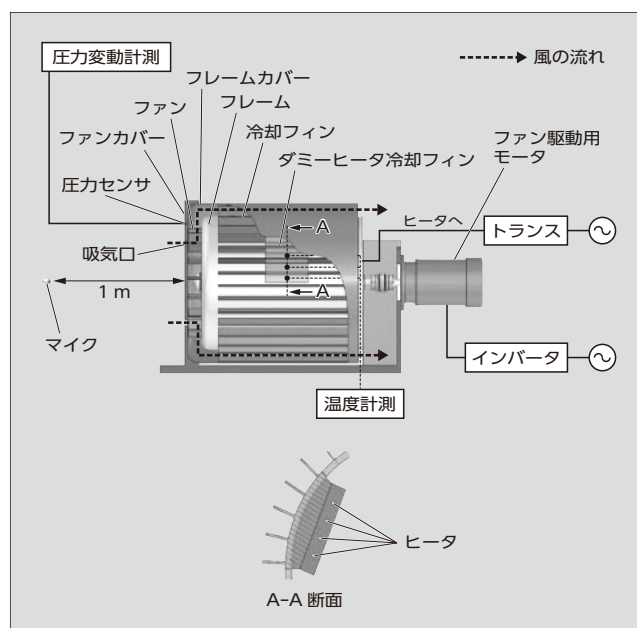


図 4 模擬モータの構造

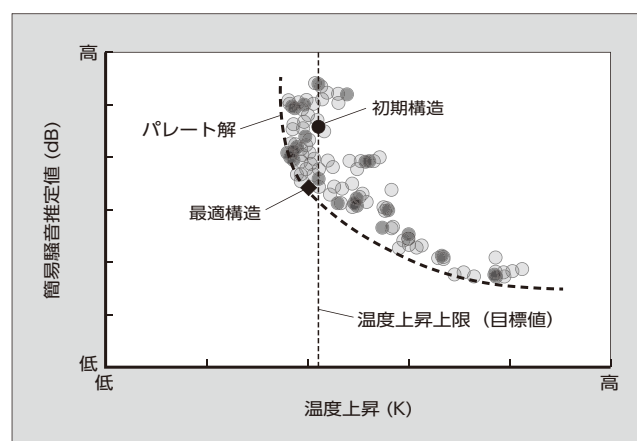


図 5 多目的最適化による検討結果

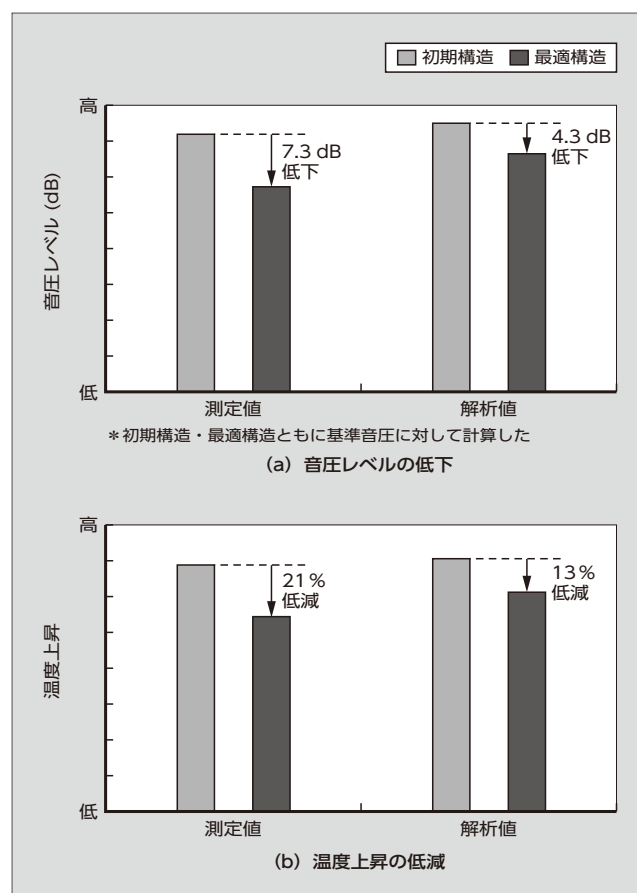


図 6 多目的最適化実施前後の騒音と熱

最適構造の主な特徴は、初期構造と比べて翼弦長を短くし、風量減少に伴う乱流を抑制することで騒音低減を狙うとともに、放熱フィンの熱通過断面積と表面積を増やすことで温度上昇の低減を狙ったものである。

(2) 検証結果

代表回転数における騒音と熱の関係を図 6 に示す。騒音に関しては、高精度騒音推定モデルにて計算した結果である。検証機において最適構造の騒音および温度上昇は、初期構造に対して低減しており、多目的最適化検討の効果が得られている。本シミュレーションは、実測と比較して絶対値においても設計検討に必要な精度が得られている。加

えて、構造変更に伴う音圧レベルや温度上昇の変化量においても十分な精度を確保できていることを確認した。

本検討でのシミュレーション精度および多目的最適化前後の構造による騒音の違いを明らかにするため、渦の運動量変化が起因して流体中の音を発生させることから乱流の渦構造に着目した。乱流の渦構造の可視化結果を図7に示す。最適構造は、初期構造と比較してファンとファンカバーの隙間部分やフレーム表面近傍において渦が少ないことが確認できる。加えてファンにより発生する流れの乱れを解析でも再現できているかを確認するため、ファン下流領域での壁面に作用する圧力変動の測定も行った。初期構造および最適構造での圧力変動スペクトル密度を図8に示す。シミュレーションで求めた圧力変動スペクトル密度は、実測とよく一致しており、最適構造では圧力変動も小さくなっている。この圧力変動スペクトル密度には二つの特

徴がある。一つ目の特徴は、翼通過周波数（BPF：Blade Passing Frequency）で圧力のピークを持つ。BPFは回転周波数×翼枚数であり、この周波数を基本としてその整数倍の周波数でピークが生じる。もう一つの特徴は、圧力の減衰傾向である。乱流の特徴となる慣性小領域で、乱流の流れ場によらない普遍性のあるスペクトルの減衰傾向（慣性小領域の $-7/3$ 乗則、図8中の点線）が知られている⁽⁴⁾。本検証において、約2kHzまでの乱流現象のシミュレーションによる再現ができることを確認した。

4 あとがき

競争優位を実現するDXの一環として、市場要求に応じたタイムリーな製品開発要求に対応すべく、製品の開発期間の短縮を目的にシミュレーションを活用した開発・設計プロセスの変革を目指している。

本稿では、シミュレーションによる騒音推定技術について述べた。今後はシミュレーションを活用したフロントローディングはさらに進展することが予想される。また、HPCの活用によりシミュレーションの適用領域が拡大しており、メカニズム解明や推定精度向上を中心とした利用、製品性能の改善や品質向上に向けた利用などが予想される⁽⁵⁾。

今後とも製品開発に貢献すべく、ニーズにマッチしたシミュレーション技術開発を行っていく所存である。

本研究の一部は、HPCIシステム利用研究課題（課題番号：hp200233）を通じて、スーパーコンピュータ“富岳”^(注3)の計算資源の提供を受け実施した。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) “Performance Development”. TOP500. <https://www.top500.org/statistics/perfdevel/>. (参照2021-07-15).
- (2) 文部科学省.「富岳」成果創出加速プログラム.「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発. 第1回「富岳」流体予測革新プロジェクトシンポジウム. 2021-3-10.
- (3) Kaneko, K.; Yamamoto, T. “Predicting Cooling Fan Noise of Electric Motor Using Compressible Large Eddy Simulation”. ASME Conference Proceedings. AJKFluids2019. 2019.
- (4) 辻義之. “乱流の普遍則とその解明を支える実験技術”. ながれ. 日本流体力学会誌. 2018, vol.37, no.3, p.245-254.
- (5) 金子公寿. “「富岳」による構造最適設計に向けた試行計

〈注3〉スーパーコンピュータ“富岳”：スーパーコンピュータ“京”の後継機として国立研究開発法人 理化学研究所に設置された計算機である。2020年6月から2021年6月にかけてスパコンランキング4部門で1位を3期連続で獲得するなど、世界トップの性能を持つ。2021年3月9日に本格運用を開始した。

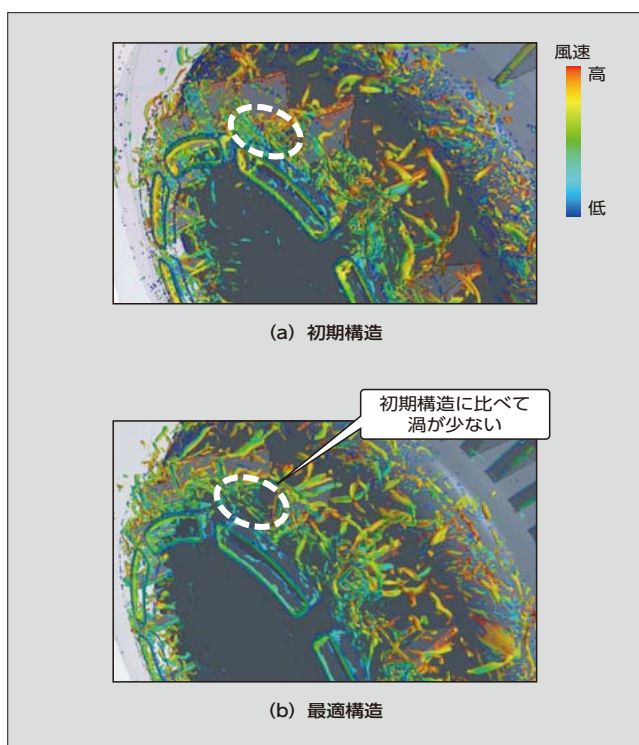


図7 乱流の渦構造の可視化結果

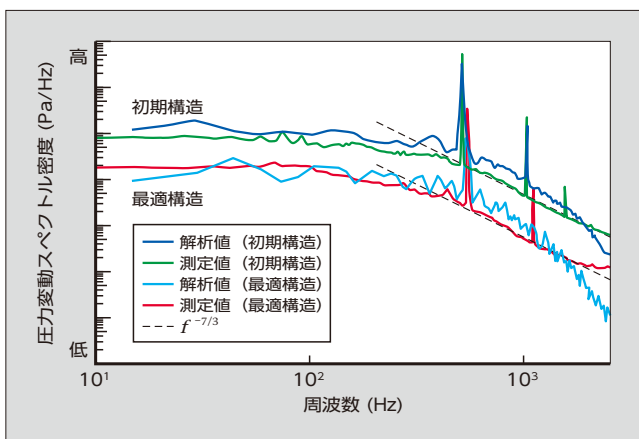


図8 ファンの下流の壁面に作用する圧力変動スペクトル

算”。HPCIシステム利用研究課題 利用報告書. 一般財団法人
高度情報科学技術研究機構. [http://www.hpci-office.jp/
output/hp200233/outcome.pdf](http://www.hpci-office.jp/output/hp200233/outcome.pdf) (参照2021-07-09).



金子 公寿

パワエレ機器関連の熱・流体解析技術評価に従事。
現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノ
ベーション研究所デジタルプラットフォームセン
ターデジタルエンジニアリング部主査。技術士
(機械部門)。日本機械学会会員、日本技術士会会員。



大野 和彦

重電機器関連の強度・振動解析技術に従事。現在、
富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベ
ーション研究所デジタルプラットフォームセン
ターデジタルエンジニアリング部主査。日本振動技術
協会会員。



山本 勉

シミュレーション技術の研究開発に従事。現在、
富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベ
ーション研究所デジタルプラットフォームセン
ターデジタルエンジニアリング部長。日本機械学会
会員、日本伝熱学会会員。



分子レベル計算を活用した SiC-MOSFET の 界面解析シミュレーション

Analytical Simulation Using Molecular-Level Calculation for SiC-MOSFET Interfaces

広瀬 隆之 HIROSE, Takayuki

分子レベル計算（分子シミュレーション）技術を活用し、パワー半導体分野や、地熱発電プラントなどの発電分野、ならびにガス絶縁開閉装置などのパワーエレクトロニクス機器の信頼性向上を目指した研究開発を行っている。SiC パワー半導体デバイスを題材とした分子レベル計算では、SiC/SiO₂ 界面の分析構造解析や、特性改善要因となる Si₃N 構造生成メカニズムを明らかにした。このようなデジタル技術を活用した DX により、性能向上のメカニズム解析や製造プロセス条件の事前探索を行い、製品開発のスピードアップと製品の性能向上や信頼性向上に貢献する。

Fuji Electric uses molecular-level calculation (simulation at a molecular level) technology for research and development to improve the reliability of power semiconductors, power electronics equipment used in power generation field, such as geothermal power generation, and gas-insulated switchgear. The molecular-level calculation of SiC power semiconductor devices have clarified the structure of SiC/SiO₂ interfaces and the formation mechanism of Si₃N structure, which is an improvement factor of characteristics. By employing our DX that involves these digital technologies, we will speed up product development and improve product performance and reliability by analyzing performance improvement mechanisms and searching for manufacturing process conditions in advance.

1 まえがき

デジタル技術を活用して製品開発の競争上の優位性を確立する DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）は、材料分野においても行われるべきである。材料設計や材料探索には、第一原理計算をはじめとした分子レベル計算（分子シミュレーション）技術や、機械学習を活用したマテリアルズインフォマティクスといった計算機を活用したデジタル技術がますます重要になってきている。特に、材料の分子レベルの構造やその挙動を直接目にすることは不可能であるので、分子レベル計算技術を活用することで何が起きているのかを可視化し、どうすればよいかの改善点を見出すヒントを得ることが可能となる。

図 1 に示すように、製品の特性を改善する上でデジタル技術を活用するためには、リアルな製品に対する実験や分析からメカニズムや改善方向の仮説を立案し、モデル化によって検証を進めることになる。

このような計算科学技術（分子レベル計算）は図 2 に示

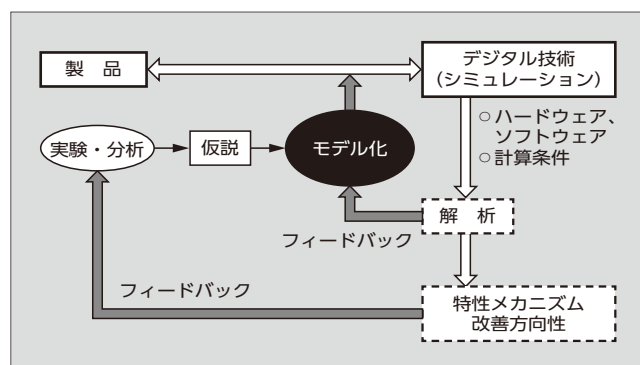


図 1 計算科学技術の活用方法

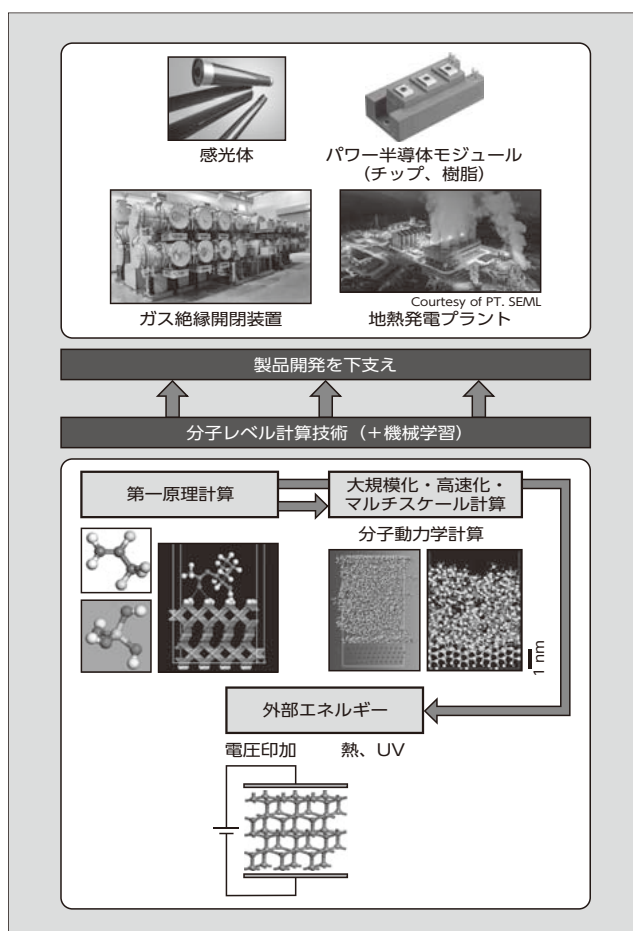


図 2 分子レベル計算の技術開発方向性と適用製品例

すように、非常にミクロな現象を扱う第一原理計算をベースにして現実を模擬できるようにするための大規模化や高速化計算の技術開発、ならびに駆動時の挙動や劣化を考慮した解析を可能にするための外部エネルギー（特に電圧）

印加計算の技術開発を行っている。さらに、機械学習を取り入れた解析手法の検討も進めている。

富士電機ではこれらの技術を活用し、パワー半導体分野や地熱発電プラントといった発電分野、ガス絶縁開閉装置などのパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器分野のさまざまな製品の信頼性向上を目指して研究開発を行っている。

本稿では、パワー半導体のいっそうの低損失化を実現する SiC（炭化けい素）パワー半導体デバイスを題材として分子レベル計算による解析について述べる。

2 SiC パワー半導体デバイスについて

2.1 背景

富士電機は、無停電電源装置（UPS）や各種電動力応用機器、交通・流通インフラ向けに数多くのパワエレ機器を製品化している。低炭素社会を実現するために、パワエレ機器の低損失化の必要性が近年高まっている。パワエレ機器を飛躍的に低損失化するためにはパワー半導体デバイスや回路、制御などの技術革新による電源装置の高効率化が重要である。

パワー半導体デバイスの材料は、現在主流の Si（シリコン）に代わる次世代半導体として、SiC や GaN（窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップ半導体が注目され、これらを使用したパワー半導体デバイスの研究・開発が活発に行われている。

富士電機は、SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を低損失化する開発を行っている。低損失化のためにはオン抵抗を低減しなければならず、電気特性の一つである移動度^{（注1）}の向上が必要になる。他に重要な特性として、しきい値電圧^{（注2）}の大きさやその安定性といった信頼性に関わる特性もある。

移動度やしきい値電圧といった電気特性の支配要因として、SiC とゲート酸化膜（SiO₂）の界面や酸化膜中の原子レベルの乱れ、SiC や SiO₂ の化学量論的組成から外れた化学状態に起因する電荷トラップの存在が考えられる。したがって、移動度の向上やしきい値電圧の安定化のためには、この電荷トラップの実体を明らかにし、それに基づいた改善が重要となる。

2.2 SiC パワー半導体のデバイス構造と特性

SiC-MOSFET のデバイス構造断面図（トレンチゲート）の概略を図 3 に示す。MOSFET では、ゲート電極に電圧を印加してゲート電極と SiC 基板の界面近くの p 層に反転層を形成し、ソースとドレイン間に電圧を印加することでチャンネルに電子が流れる。

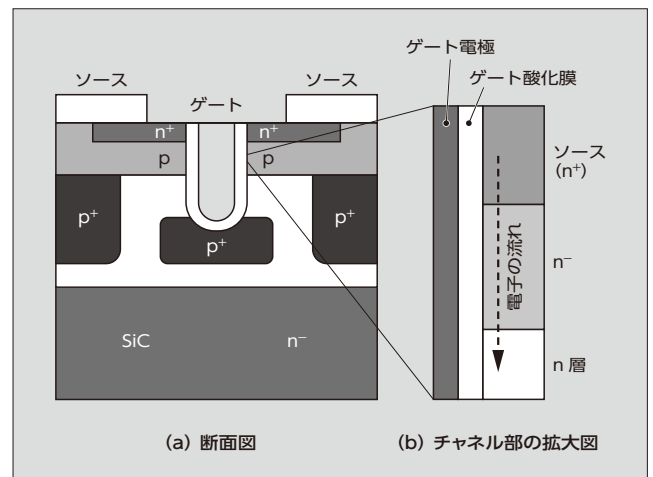


図 3 SiC トレンチゲート MOSFET のデバイス構造断面図

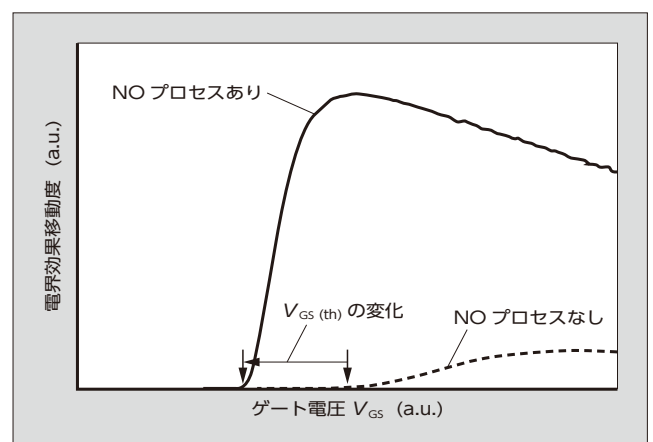


図 4 SiC-MOSFET の移動度特性の例

SiC-MOSFET の移動度特性の例を図 4 に示す。横軸はゲート電圧 V_{GS} である。ここではゲート酸化膜形成プロセスにおける酸化膜形成後の NO（酸窒化）アニールの有無を比較した。両者で移動度やしきい値電圧 $V_{GS(th)}$ が大きく異なっている。この違いは、前述したように SiO₂ 界面の原子レベルの乱れなどに起因する電荷トラップの存在によるものと考えられる。さらに、この電荷トラップによる固定電荷などの影響で移動度の低下や $V_{GS(th)}$ の変動が起こると考えられる。したがって、低オン抵抗化や $V_{GS(th)}$ 変動の抑制による信頼性向上には、原子レベルでの乱れの低減が重要となる。

原子レベルの乱れの指標として、界面準位密度がある。例えば、Dhar らや、Chung ら、Jamet らによって、界面への窒素導入によって界面準位密度が低減することが報告されているなど^{(1)~(3)}、製造プロセスによって界面特性が異なる。

2.3 MOS 界面の分析構造解析

このような原子レベルの乱れに起因すると考えられる界面準位密度を低減するためには、その界面準位の化学状態や分子レベル構造・配列の実体を明らかにする必要がある。そのために、富士電機では SiC/SiO₂ 界面（MOS 界

〈注 1〉 移動度：固体の物質中の電子の動きやすさを示す量

〈注 2〉 しきい値電圧：MOSFET をオン状態にするために必要なゲートソース間電圧

面)の原子レベルでの分析・解析に取り組んでいる。例えば、 SiO_2 界面の様子を透過電子顕微鏡で観察したり、界面における Si 原子などの化学結合状態を評価するために放射光施設を利用した X 線光電子分光法 (XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy) による評価を行っている⁽⁴⁾。

富士電機は、この窒化 MOS 界面に対して XPS を行ったところ、図 5 に示すように、界面の SiC の炭素が窒素に置換している Si_3N 構造になっていると推測した。この結果から、 SiO_2 との結合を作っていない界面の SiC 中の炭素のうち未結合手 (DB: Dangling Bond) を有する炭素が窒素に置き換わることで、特性が向上したものと推測した⁽⁵⁾。

このような窒素が置換した構造は SiC 結晶の面方位によって異なっていると考えられるが、どの面方位であっても Si_3N 構造の形成は、炭素が排出されてそこに窒素が置換されるようなメカニズムが起きていると考えられる。

一方で、MOS 界面近傍には余剰炭素による欠陥が存在し、それが特性劣化を引き起こす原因になっていると考えられている。さらには、 Si_3N 以外の窒素の結合において欠陥構造の存在が XPS 分析から示唆されている。このように NO アニールによって特性は向上するものの、さらなる特性向上には MOS 界面をさらに改善することが必要である。

従来、特性改善のためには実験と分析や静的な分子レベル計算^(注3)を繰り返し、特性変化との相関を解析し、改善の方向性を推定していた。しかし、この従来手法では大多数の分子レベルの構造が分かっても MOS 界面のどの欠陥種が変化しているのか分からず、プロセス条件の改善の方向性の確度は低いままである。そのため、PDCA (Plan, Do, Check, Action) サイクルを何回も回すことになり時間がかかるという問題があった。

窒素置換や炭素排出による余剰炭素生成のメカニズムが動的な化学反応計算^(注4)から分かれば、その過程で起こる反応副生成物の化学種 (化学状態) も分かり、なくすべき欠陥種が明らかになる。このような動的化学反応を計算機上でシミュレーション (酸化反応シミュレーション) ができれば、実験前に事前確認が可能となる。その結果、仮説検証の PDCA サイクルをシミュレーションで回せるように

なり、効率的に開発できるようになる。

③ 分子レベル計算による解析

窒素置換や炭素排出のメカニズムを調べるため、図 6 に示すようなフローで SiC の欠陥解析に分子レベル計算を活用した。

3.1 計算モデル、計算条件

計算モデルの作成において、図 7 (a)に示した $(1\bar{1}00)$ の最表面モデルを用いた。その原子配列は HAADF STEM (高角散乱環状暗視野走査透過型電子顕微鏡) による分析結果から決定した。この SiC 表面モデルに α -石英の結晶

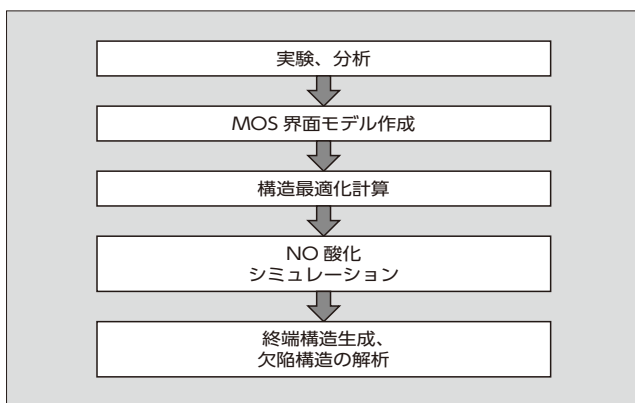


図6 SiCの欠陥解析における分子レベル計算の活用フロー

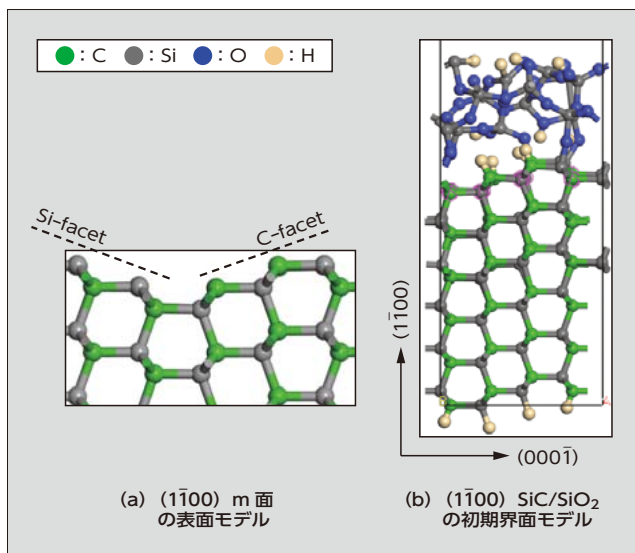


図7 計算モデル

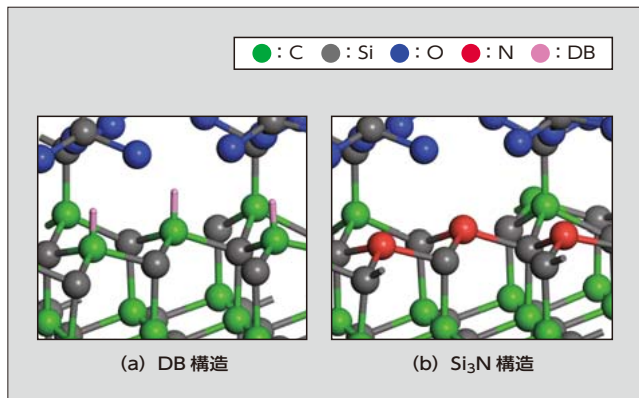


図5 SiC/SiO₂ 界面の DB 構造と Si_3N 構造のモデル図

〈注3〉 静的な分子レベル計算: 分子の熱振動を取り入れた分子レベル構造の時間的な変化を考慮しない計算のことである。

〈注4〉 動的な化学反応計算: 結合した原子同士の熱振動を取り入れた分子レベル構造の時間的な変化を考慮した計算のことである。そのため、静的な計算では出てこない分子レベル構造が生成されることが期待される。

モデルを配置し、SiC 表面の Si と SiO₂ の酸素を結合させて界面構造モデルを作成した。その際、SiC 表面の炭素と α -石英の結晶モデル下面の未結合手（ダングリングボンド）は水素で終端した構造とした。また、SiC 底面と α -石英の結晶モデル上面の未結合手も水素終端した。この界面構造モデルに対して、DFTB（Density Functional based Tight Binding）を用いた分子動力学計算（ソルバ：Materials Studio/DFTB+）によって、1573 K、5 ps の緩和計算で初期界面モデルを作り〔図 7 (b)、原子数 217 個〕、その後、NO 酸化時の界面構造の変化を追跡する計算を 1573 K で実施した。

NO 酸化を模擬するため、NO を反応相手（Target Atoms）の上部（4.0 Å 以内）に 1.0 ps ごとにランダムに配置した。Target Atoms は反応の進行とともに下層に移動させ、界面での酸化の進行を表現した。

3.2 分子レベル計算の結果と解析

(1) 窒化終端構造の形成シミュレーション

NO 酸化シミュレーションで得られたモデルを図 8 に示す。XPS 分析で主要ピークとして観測された Si₃N 終端構造がこの計算機シミュレーションでも得られることが分かった。60 ps 付近まで Si₃N は増加傾向を示し、その後飽和傾向を示した。飽和した Si₃N の面密度は平均で $1.4 \sim 2.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ であり、実験と同じオーダーであった。

飽和する傾向が見られたのは、Si₃N 生成（界面終端）反応と酸化による Si₃N の分解反応が平衡状態になったものと考えられる。

(2) Si₃N 構造生成メカニズムの考察

今回の動的化学反応計算（分子動力学計算）から原子挙動を解析すると、Si₃N 構造が生成する機構が分かってきた。Si₃N 構造が生成するときの挙動を図 9 に示す。

NO ガス分子が酸化膜側から SiC 基板表面の C 上に到着し〔図 9 (a)〕、Si-C 結合の間に N が浸入する〔図 9 (b)〕。その後、N が C を横から上に押上げることで C が酸化膜側に移動し〔図 9 (c)〕、Si₃N 構造が生成した〔図 9 (d)〕。SiC 表面から排出した C は酸化膜側に移動した。

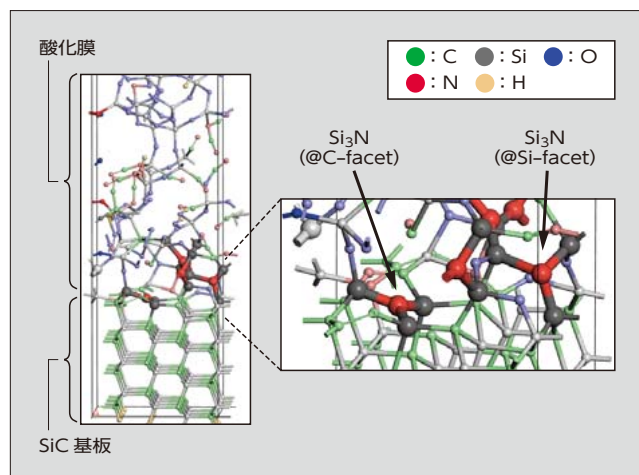


図 8 NO 酸化シミュレーション後のモデルと生成した Si₃N 構造

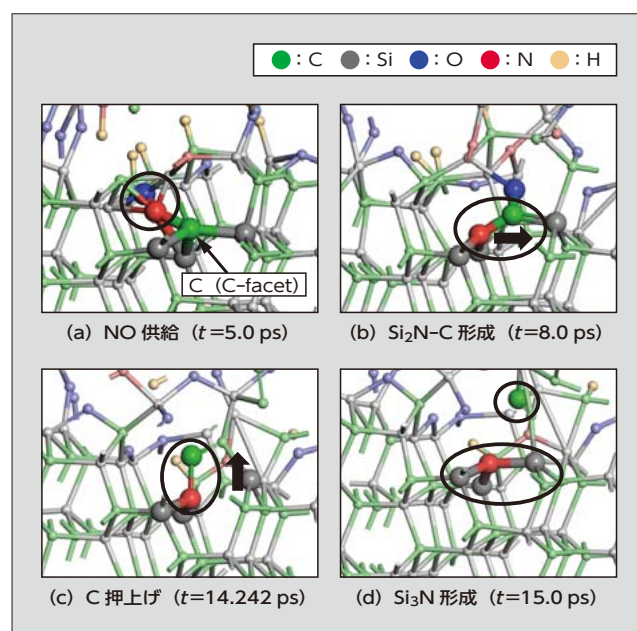


図 9 Si₃N 生成メカニズム

今回の動的化学反応計算で生成した全 Si₃N の 7 割が前述のような機構で N が C を下または横から押し出すことによって Si₃N 構造が生成することが分かった。

(3) 炭素排出メカニズムの考察

次に、C がどのように排出されるかを解析した。図 10 に動的化学反応計算の結果を示す。SiC 基板表面の C に結合した CO に NO ガスが反応するスナップショットを図 10 (a)に示す。NO ガスの N が C と置換し、C は CO ガスとなって SiC 表面から脱離した〔図 10 (b)〕。その後、置換した N によって Si₃N が生成した〔図 10 (c)〕。このシミュレーションのように、Si₃N 生成と同時に CO が脱離することはなく、SiC と CO や CN の複合体に NO ガス

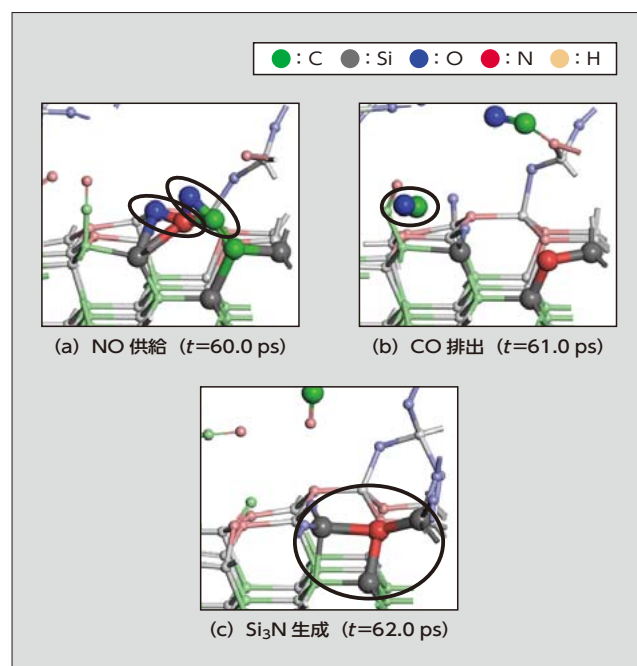


図 10 CO 脱離メカニズム

が反応することで CO が直接または $\text{CN} + \text{NO} \rightarrow \text{CO} + \text{N}_2$ と反応することによって脱離することが明らかとなった。つまり、C はガス状で脱離する前には別の形態で MOS 界面に存在していることが示唆され、それがトラップ源になっている可能性がある。このように、分子レベル計算を活用して直接見ることができない現象をモデル化することによって反応ガスの作用を理解することができるので、特定の欠陥にターゲットを絞って効果の大きい反応ガス種の探索が可能になると考えている。

3.3 今後の課題

今回の動的化学反応計算から NO アニールによる Si_3N 終端構造の生成メカニズムが明らかになった。しかし、N による欠陥や排出された C に起因する欠陥が存在すると考えられる。したがって、それらの欠陥の起源を明らかにし、欠陥生成を抑制するか、あるいは生成した欠陥を減少させるためのプロセス条件検討が必要になる。特に、MOS 界面から離れた酸化膜側の欠陥生成も含めたシミュレーション（計算機内でのプロセスシミュレーション）を行うためには、大規模分子レベル計算が必要になる。この計算技術開発によって、SiC の課題である MOS 界面と酸化膜中の残留欠陥の抑制や生成欠陥消失のプロセス条件の探索を行うことができるようにすることが今後の課題である。

4 あとがき

分子レベル計算を活用した SiC-MOSFET の界面解析シミュレーションについて述べた。分子レベル計算は SiC 以外に、パワー半導体で適用されるパッケージ樹脂材料や、発電分野、パワー機器に使われる材料に関する研究開発にも活用している。このように計算機シミュレーションを活用することで、製品性能の向上のメカニズム解析や製造プロセス条件の事前探索で実験試作回数を低減し、製品開発のスピードアップと製品の性能向上や信頼性向上に貢献

し、製品開発に計算機シミュレーションを活用する技術を確認することで、富士電機の DX に貢献する所存である。

本研究を行うに当たり、ご助言を頂いた名古屋大学未来材料・システム研究所の白石賢二教授、洗平昌晃助教、長川健太特任助教に謝意を表する。

参考文献

- (1) Dhar, S. et al. "Interface trap passivation for $\text{SiO}_2/(000\bar{1})$ C-terminated 4H-SiC". Journal of Applied Physics. 2005, vol.98, no.1.
- (2) Chung, G. Y. et al. "Improved inversion channel mobility for 4H-SiC MOSFETs following high temperature anneals in nitric oxide", IEEE Electron Device Lett. 2001, vol.22, no.4, p.176-178.
- (3) Jamet, P. et al. "Effects of nitridation in gate oxides grown on 4H-SiC", Journal of Applied Physics. 2001, vol.90, no.10.
- (4) 森大輔ほか. "SiC/SiO₂界面における窒素化学状態の結晶面方位依存性", 電子情報通信学会技術研究報告. 2015, vol.115, no.108, p.21-26.
- (5) 広瀬隆之ほか. シミュレーションを活用したSiCデバイスの原子レベルの解析. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p. 21-25.
- (6) Mori, D. et al. "Local structure of nitrogen passivating SiO_2/SiC ($1\bar{1}00$) interface", International Conference on Silicon Carbide and Related Materials. 2017, WE. BP.9.



広瀬 隆之

デバイス開発や、第一原理計算を用いた樹脂や SiC デバイスなどの解析に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所材料基礎技術研究センター先端材料技術研究部マネージャー。応用物理学会会員、日本地熱学会会員。

~~~~~



# ウイルス不活化技術のための UV 空間照射光量と気流の連成解析 — シミュレーションを活用した開発プロセスの変革 —

Interaction Analysis of Spatial UV Illumination Intensity and Airflow for Virus Inactivation Technology: Development Process Transformation Using Simulation

松本 伸 MATSUMOTO, Noboru

浅田 規 ASADA, Tadashi

大栗 延章 OGURI, Nobuaki

近年、感染症対策のため、換気的重要性が再認識されているが、換気量の増加により、夏季や冬季における空調機器の消費エネルギーが増大する問題が生じている。そこで最近では紫外線が新たなウイルスの不活化手法として注目されている。紫外線を用いた微細なウイルスの不活化効果の検証は時間を要するだけでなく、安全性への配慮も必要である。今回、迅速かつ安全に、ウイルス不活化の性能評価のための UV 空間照射光量と気流の連成解析技術を DX の取組みの一つとして構築した。

Recently infectious disease prevention measures have reminded us of the importance of ventilation with outdoor air. However, the increased amount of ventilation causes the more energy consumption of air conditioning systems in the summer and winter. Ultraviolet light has attracted attention as a new countermeasure to inactivate virus. However, the verification of the inactivation effect of ultraviolet light on microscopic viruses requires not only a lot of time but also to safety consideration. As one of the approaches to DX, we have fast and safely built the interaction analysis of spatial UV illumination intensity and airflow to evaluate the performance of virus inactivation.

## 1 まえがき

富士電機の DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) の取組みとして、多様化するお客さまのニーズに迅速に対応するため、製品開発初期のアイデア段階における構想検討や効果検証でシミュレーションの活用を推進している。

富士電機は、喫緊の課題である新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 対策に貢献するため、ウイルスを不活化する空気清浄機を開発している。この機器の開発において、高精度シミュレーションを積極的に活用してプロトタイプによる検証を必要最小限に留めることにより、製品開発プロセスの短縮と製品仕様の決定を行っている。

本稿では、この開発プロセスで活用するために開発した UV 空間照射光量と気流の連成解析技術について述べる。

## 2 COVID-19 をめぐる感染予防とその方法

近年、COVID-19 をはじめとした感染症の対策のため、換気的重要性が再認識されている。CDC (アメリカ疫病予防管理センター) による感染予防に関するガイドライン<sup>(1)</sup>によれば、感染病棟 (既存施設) は換気回数 6 回/時間 (新築施設: 12 回/時間) が推奨されている。また、一般的な店舗や飲食店をはじめとする施設において、CO<sub>2</sub> 濃度を基準とした法定換気量以上の大幅な換気が求められるようになった。しかし、換気量の増加により、夏季や冬季における空調機器の消費エネルギーが増大する問題が生じている。その対策には、換気による室内の空気の入替えではなく、空気清浄機により空気を清浄化することが有効である。浮遊ウイルスを含む空気を清浄化する方法は、大きく二つに分類される。一つはフィルタリングによる浮遊ウ

イルスの除去<sup>(2)</sup>であり、もう一つは物理的または化学的作用によるウイルスの不活化 (ウイルスが増殖できない状態) である。

浮遊ウイルスの除去には、HEPA フィルタ (High Efficiency Particulate Air Filter) や電気集じん機が使用されている。また、浮遊ウイルスの不活化の手法は、過酸化水素や二酸化塩素の噴霧、オゾンの拡散などが挙げられる。しかし、これらの浮遊ウイルス不活化の手法は人体への悪影響を避けるため濃度や使用条件に制限があり、世界保健機関 (WHO) は推奨していない。そこで、最近では殺菌用途で使用され、人体に悪影響を及ぼす物質が残留しない波長 100 ~ 280 nm<sup>(4)</sup>の紫外線 (UV-C: Ultraviolet C) が新たなウイルスの不活化手法として注目されている。図 1 に示すように、菌やウイルスに対して、共通して波長 260 ~ 270 nm 領域で不活化効果が高いことが分かる。すなわち、この波長領域の光源の使用が、UV-C による最適な不活化手法と言える。なお、図 1 では最大値を 1 と

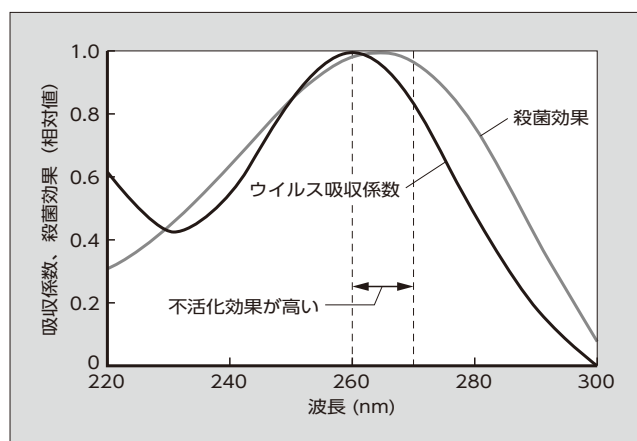


図 1 ウイルスの紫外線吸収係数と殺菌効果<sup>(5)(6)</sup>

して基準化している。

### ③ COVID-19 ウイルスの不活化の解析評価上の問題

開発に際し、電気集じんによるウイルスの除去の効果は、一般的なフィルタリングの性能評価で確認できる。その一方、UV-C による浮遊ウイルスの不活化の評価は、空気をサンプリングしてウイルスを培養する必要がある。しかし、ウイルスは単体では増殖しないので感染した細胞の観察や PCR 法による DNA を増殖させて観察するなど、時間を要するだけでなく、安全性への配慮も必要である。ところが、UV-C によるウイルス不活化の性能評価を DX 化して行うことは、迅速かつ安全な方法である。

ウイルスの不活化は、ウイルス粒子における UV-C の積算受光量が不活化に十分な量を超えたかどうかで判定できる。すなわち、周囲の空間から空気清浄機内に吸引された微細なウイルス粒子が装置内を移動し、再び周囲の空間に放出されるまでに受けた UV-C の総受光量が重要である。

壁面などに付着したウイルスに UV を照射して不活化する場合、汎用の光学解析ソフトウェアを利用して比較的容易に効果を推定することができる。図 2 に示すように、対象面への照射光量は、光源から発射されたある出力の光線が対象面に到達する光線数と出力の積で算出できる。しかし、空間をランダムに浮遊する微細なウイルスの場合、受光量は位置によって変化すると同時に、UV を全方向から受けるため受光量を単純に算出できない。

その一方、汎用の流体解析ソフトウェアは、乱流によりランダムに動き回る微粒子（仮想粒子を含む）を追跡して流跡を計算できる。流体解析ソフトウェアの中で、輻射（ふくしゃ）（放射）の原理を利用して対象物への照射光量の解析機能を持つものもあるが、光学解析ソフトウェアと同様に対象面の解析しかできない。また、光学解析ソフトウェアに比べて計算時間が長く精度も劣るため、照射光量の解析自体に適していない。

これにより、現時点では単一の汎用ソフトウェアでは浮遊ウイルスの不活化効果を解析できない。

### ④ 浮遊ウイルスの不活化検証のための課題

ランダムに浮遊するウイルスの不活化検証のためには、個々のウイルス粒子が移動する流跡に沿って、空間の位置（座標）によって変化する全方位からの UV 照射光量を積算（積算受光量）する必要がある。

その実現のためには、連成解析によって次の二つの課題を解決する必要がある。

- (a) 光学解析における、解析空間のあらゆる位置における空間照射光量データの算出（空間を微小立方体に分割し、おのおのの 6 面への照射光量の和を求める）
- (b) 空間照射光量データの流体解析空間への割り付け、および粒子の軌跡に沿った受光量の積算

### ⑤ UV 空間照射光量と気流の連成解析手法の概要

図 3 に示すウイルスを不活化するための空気清浄機の原理試作機を例に、今回の連成解析について述べる。

図 4 に UV 空間照射光量と気流の連成解析手法の概略のフローを示す。本連成解析では、照射光量の解析には汎用照明解析ソフトウェア LIGHTTOOLS<sup>〔注 1〕</sup>を使用し、気流解析には汎用熱流体解析ソフトウェア Ansys Fluent<sup>〔注 2〕</sup>を使用した。次に、図 4 の STEP1 から STEP5 について連成解析の手順を述べる。

#### (1) STEP1

照明解析ソフトウェアで所望の形状データを作成し、光源情報や物性値などの条件設定を行う。

#### (2) STEP2

面データから空間照射光量データを抽出するため、3 軸方向（幅、奥行き、高さ）に等間隔に多数の立方体を形成

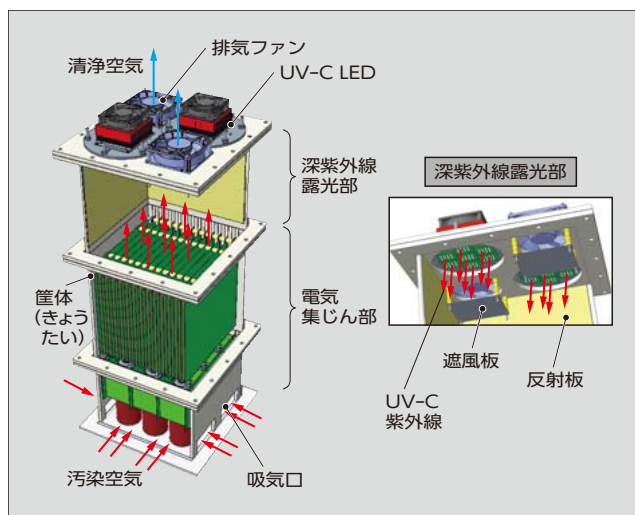


図 3 原理試作機の構成 (UV-C LED を対角配置)

〔注 1〕 LIGHTTOOLS : Synopsys, Inc. の商標または登録商標

〔注 2〕 Ansys Fluent : ANSYS, Inc. の商標または登録商標

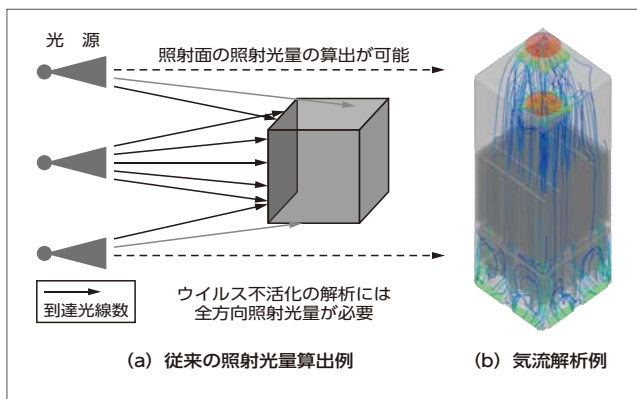


図 2 従来の照射光量算出例と気流解析例

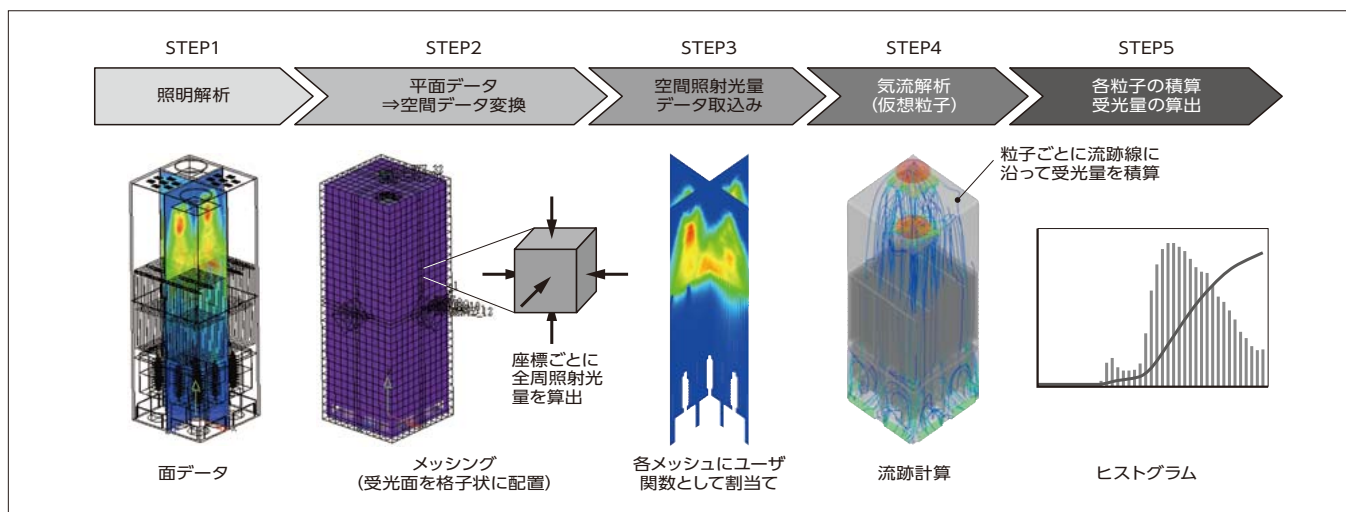


図4 UV 空間照射光量と気流の連成解析の流れ

するように受光面を作成する。微粒子のウイルスは、装置壁面の反射光などにより全周方向から受光するため、各立方体の6面の照射光量の総和を取る。

### (3) STEP3

流体解析ソフトウェア側では、照明解析と同一の形状モデルでメッシングを行い、吸気や排気などの基本的な境界条件を設定する。そして、照明解析で抽出した空間照射光量データをユーザ関数として流体解析用メッシュに配置する。

### (4) STEP4

吸気口から仮想粒子を発生させて、装置内部の気流解析を行う。今回、仮想粒子の乱流拡散（ランダム性）を考慮した擬似非定常計算を採用し、計算負荷を極力抑制した。

### (5) STEP5

おのおのの仮想粒子の照射光量を吸気口から排気口までの流跡に沿って時間で積分し、積算受光量を算出する。算出した積算受光量からヒストグラムを作成することで、どれくらいの割合の粒子（ウイルス）が不活化に必要な光量を受けているか判断できる。

上述した UV 空間照射光量と気流の連成解析により、空間に浮遊するウイルスを不活化するための空気清浄機の構成検討を短期間で完了できるようになった。

## 6 連成解析結果と実測結果

原理試作機〔LED (Light Emitting Diode) を対角に配置〕において、紫外線 LED の条件を変えた場合の連成解析による不活化効果を図5に示す。狭角配光の LED と比較し、広角配光の LED を使って均一に照射することや LED を高出力とすることによって積算受光量のヒストグラムのピークは高い値になり、不活化効果は向上する。例えば、インフルエンザウイルスの場合、 $6.6 \text{ mJ/cm}^2$ <sup>(3)</sup> (COVID-19 のウイルスの場合  $5.1 \text{ mJ/cm}^2$ )<sup>(7)</sup> を超える積算受光量があれば不活化される。このように、全粒子のうち何 % が不活化されるかを解析上で検証することができ

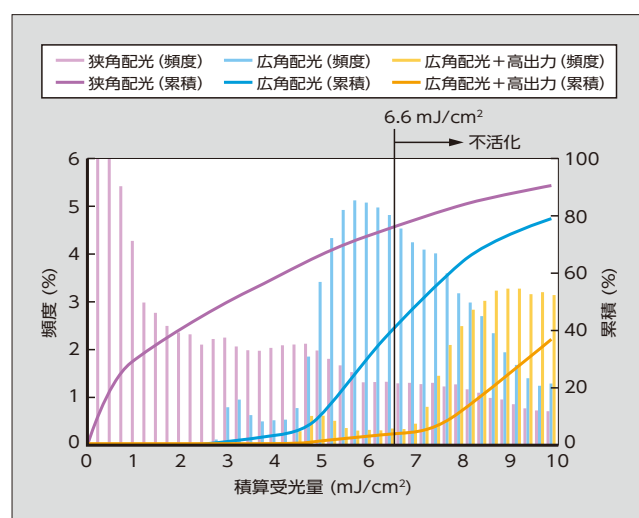


図5 積算受光量の解析例

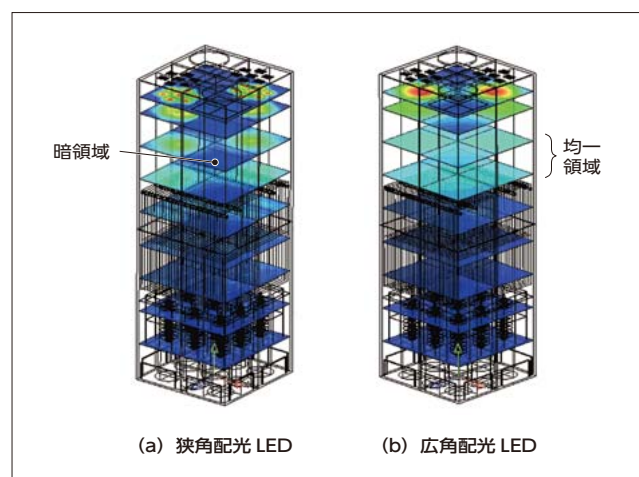


図6 各測定位置における実測と解析の照射光量の比較

る。また、図6に示す照射光量の解析結果から、空間照射光量分布の定性的な良否を判断できるため、開発の初期は照射光量解析だけを使った検討も有用である。

次に、露光部の最遠断面（電気集じん部との境界面）に



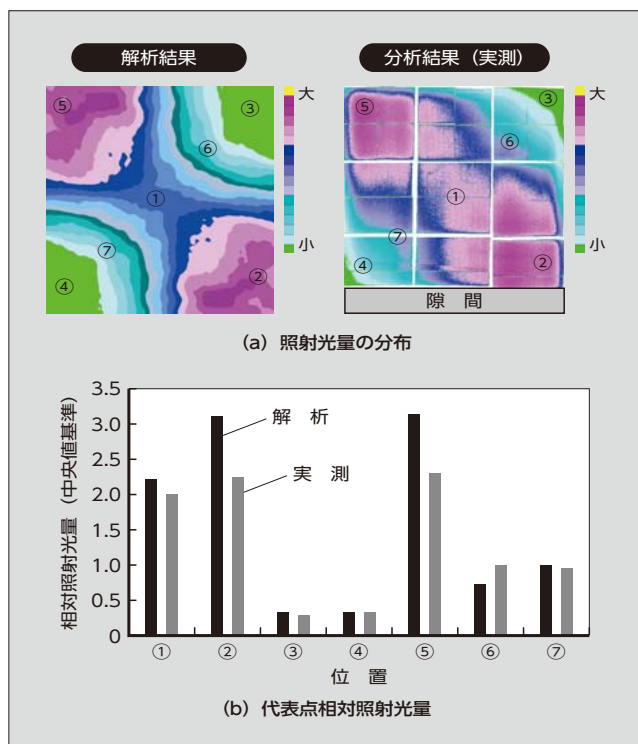


図7 露光部最遠断面の実測と解析の照射光量の比較

おける解析と実測の照射光量分布の比較を図7(a)に示す。実測では、富士フィルム製のUVシートを用いて測定した積算受光量を露光時間で除して照射光量を算出した。このUVシートの感度は波長に依存性があるが、感度補正は加えていない。図7(a)より、照射光量分布は定性的な一致が見られ、全体的によく再現できている。ただし、中央域①の値は解析値の方がくぼんだ分布となった。傾向の詳細比較のため、代表点の照射光量の中央値を1とした相対照射光量を図7(b)に示す。図より、中央域①が小さいのではなく、高照射光量域②、⑤がより大きいことを示している。これは、解析条件（特にLED出力分布）が理想条件（LED中央出力が高い）を使用した影響と考えられる。現時点では使用するLEDが未決定であり、汎用的な手法を構築することを目的としたので、LEDの光量分布は一般的に使用されるランバート配光としている。実際の設計時には、LEDの固有特性（光出力、配光）を使用することによって差が軽減できる。

## 7 製品開発への適用

開発したUV空間照射光量と気流の連成解析は、さまざまな活用方法がある。空気清浄機を例にとると、電気集じんによるウイルスの捕捉効果とUV-Cの露光によるウイルスの不活化効果を考慮した検討や設計が可能となる。従来、平均風速とある特定の断面の平均照射光量から不活化効果を推定していたが、積算受光量で精度よく試算できるため、試作回数を低減し開発期間を短縮できる。空気清浄機の通過空气の清浄化率がシミュレーションできるようになると必要な換気量も算出でき、換気量の削減に貢献で

きる。例えば、空気清浄機は室内空気を直接清浄化するため、換気による空気清浄（換気回数6回/時間）と比べて空調機器の省エネルギーが年間40%程度可能である。さらに、部屋全体を空気清浄していたものを、感染症患者や疑いのある人と接する機会が多い医療従事者の近傍に直接高清浄空気を供給し、医療従事者への感染を抑制し安全・安心を提供することもできる。

シミュレーションのさらなる活用として、実際の設置環境や顧客ニーズに合わせて、最適な製品構成や室内における設置位置などの検討が考えられる。例えば、異なる2種類の空気清浄機のイメージを図8に示す。病室や会議室などの比較的狭い空間に手軽に置いて空気清浄したい場合は、原理試作機と同様な自立式が適していることがシミュレーションで明らかになっている。その一方、商業施設など売り場面積や居住空間を広く確保したい場合は、壁面に設置可能な薄型（省スペース）のモジュール式が適していることが分かった。

現状の試作機は自立式で設計、試作を進めている。なお、本製品開発、実証の一部は、環境省“革新的な省CO<sub>2</sub>型感染症対策技術等の実用化加速のための実証事業”により実施しており、今後は大腸菌ファージなどを用いた空気清浄性能評価およびフィールド実証などについても実施する予定である。

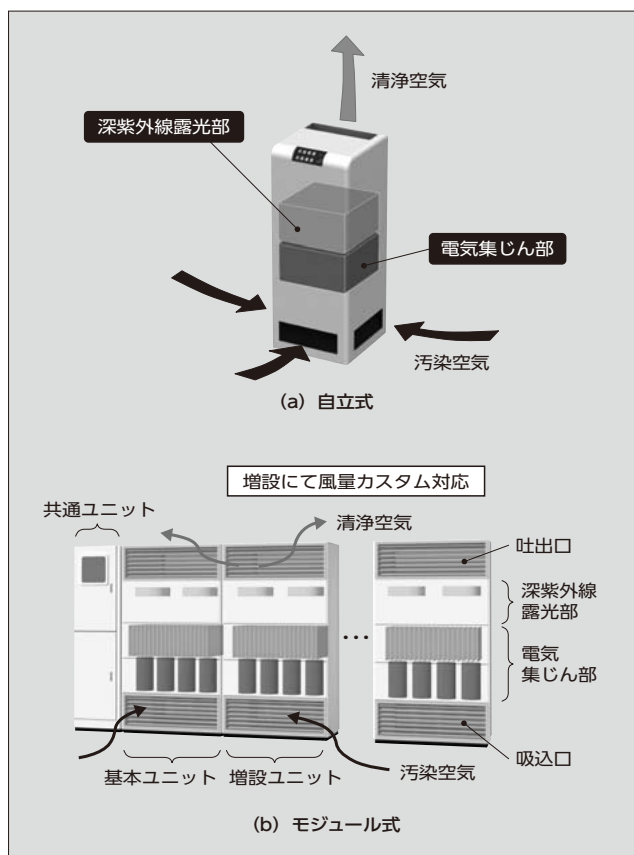


図8 空気清浄機の製品化イメージ



## ⑧ あとがき

ウイルス不活化技術のための UV 空間照射光量と気流の連成解析について述べた。

富士電機の DX の取組みの一つであるシミュレーションの活用は、製品開発前の技術検証やさまざまなお客さまのニーズへの迅速な対応に貢献している。

今後もシミュレーションをさらに活用して富士電機の DX を推進し、性能が十分に検証された安心して使える製品・サービスを提供していく所存である。

## 参考文献

- (1) CDC (2003). Guidelines for environmental infection control in health-care facilities. Morbidity and Mortality Weekly Report, 52 (RR-10).
- (2) 南野脩ほか. “小型空気清浄器の性能評価とその応用に関する研究”. 空気調和・衛生工学論文集, no.69, 1998.
- (3) Kaufman, J.E. IES Lighting Handbook 5th Ed. 1972.
- (4) CIE S 017 : 2020 International Lighting Vocabulary, 2nd.
- (5) M. Luckiesh, “Applications of Germicidal”, Erythema, and Infrared Energy. p.115, 1946.
- (6) 柴山祥枝. “核酸 (DNA・RNA) の定量法”. ぶんせき.

no.7, p.268-274, 2018.

- (7) Shimada, H. et al. “Efficacy of 265-nm ultraviolet light in inactivating infectious SARS-CoV-2”. Journal of Photochemistry and Photobiology 7 (2021) 1000050.



## 松本 伸

店舗省エネルギーシステム技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部主査。日本機械学会会員。



## 浅田 規

店舗省エネルギーシステム技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部長。日本食品工学会会員。



## 大栗 延章

光化学を用いた殺菌洗浄技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部主査。



## 解説 1 BERT

p.175

Bidirectional Encoder Representations from Transformers

BERT とは、事前学習モデルである。図 1 に示すように、汎用的な大量データで事前学習した BERT モデルをファインチューニングすることで、少量データでもモデル利用が可能になり、認識精度が大幅に向上した。

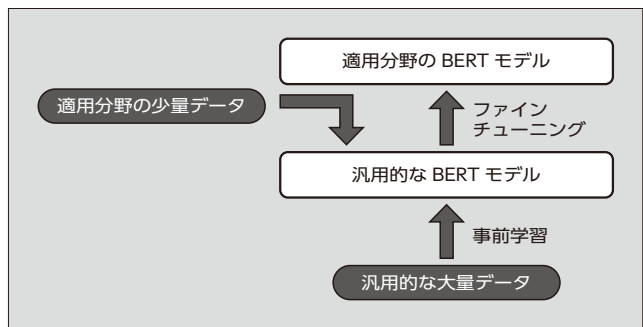


図 1 BERT モデルのファインチューニング

## 解説 2 半教師あり学習

p.176

Semi-Supervised Learning

“半教師あり学習”は、学習に教師データ（ラベル）を与えた状態で学習させる“教師あり学習”と、教師データ（ラベル）を与えない“教師なし学習”を組み合わせる学習手法のことである。一般的に半教師あり学習は、少量の教師データしかなくても、通常の教師あり学習よりも精度を高められることが知られている。

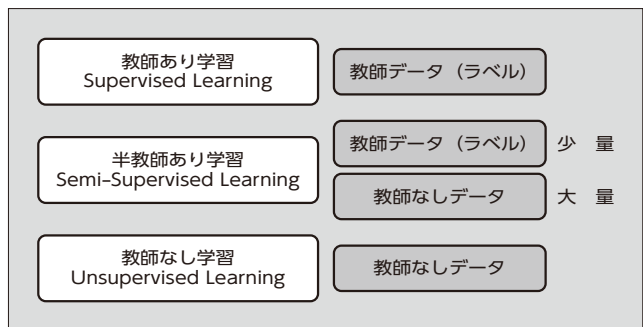


図 2 半教師あり学習

~~~~~

「MONITOUCH X1 シリーズ」

“MONITOUCH X1 Series”

松本 充弘* MATSUMOTO, Mitsuhiko

佐藤 好邦* SATO, Yoshikuni

富士電機の HMI（Human Machine Interface）製品である「MONITOUCH V9 シリーズ」（V9 シリーズ）は、多くのお客さまに導入していただいております。主に FA システムの現場で、PLC（Programmable Logic Controller）やセンサなどのさまざまなデバイスと接続して使われてきた。HMI 市場は成熟期に入り、製品のコモディティ化が進んでいる。

このような中、富士電機は付加価値が高い HMI をお客さまに届けるため、V9 シリーズが担ってきた生産現場の HMI としての利用はもちろんのこと、現場のデータを可視化し、さらに MES（Manufacturing Execution System）や ERP（Enterprise Resources Planning）、オフィスなどの IT システムと連携するハブとなる装置である、Windows 10 IoT Enterprise^{（注 1）} を搭載した「MONITOUCH X1 シリーズ」を開発した。

1 製品コンセプト

(1) IT システムとの融合・連携

MONITOUCH X1 シリーズは、今までの MONITOUCH が培ってきた豊富な接続機器通信プロトコルを利用し、FA の現場データと IT システムのシームレスな連携を可能にする。

Windows 10 IoT Enterprise を搭載しているので、単なる HMI 専用機ではなく、エッジアプリケーションなどのユーザアプリケーションが使用できる。さらにデータベースやクラウドなどの IT システムと接続することにより、FA 現場のスマート化に貢献する（図 1）。

(2) 視認性・操作性向上

ベクター方式のレンダリング（画面描画）を採用し、描画視認性が向上している。高速 CPU を搭載したので高い処理速度により、ストレスのない操作を実現している。

〈注 1〉 Windows 10 IoT Enterprise : Microsoft Corporation の商標または登録商標

* 富士電機株式会社パワエレシシステム インダストリー事業本部オートメーション事業部システム営業技術部

* 富士電機株式会社パワエレシシステム インダストリー事業本部開発統括部 HMI 開発部

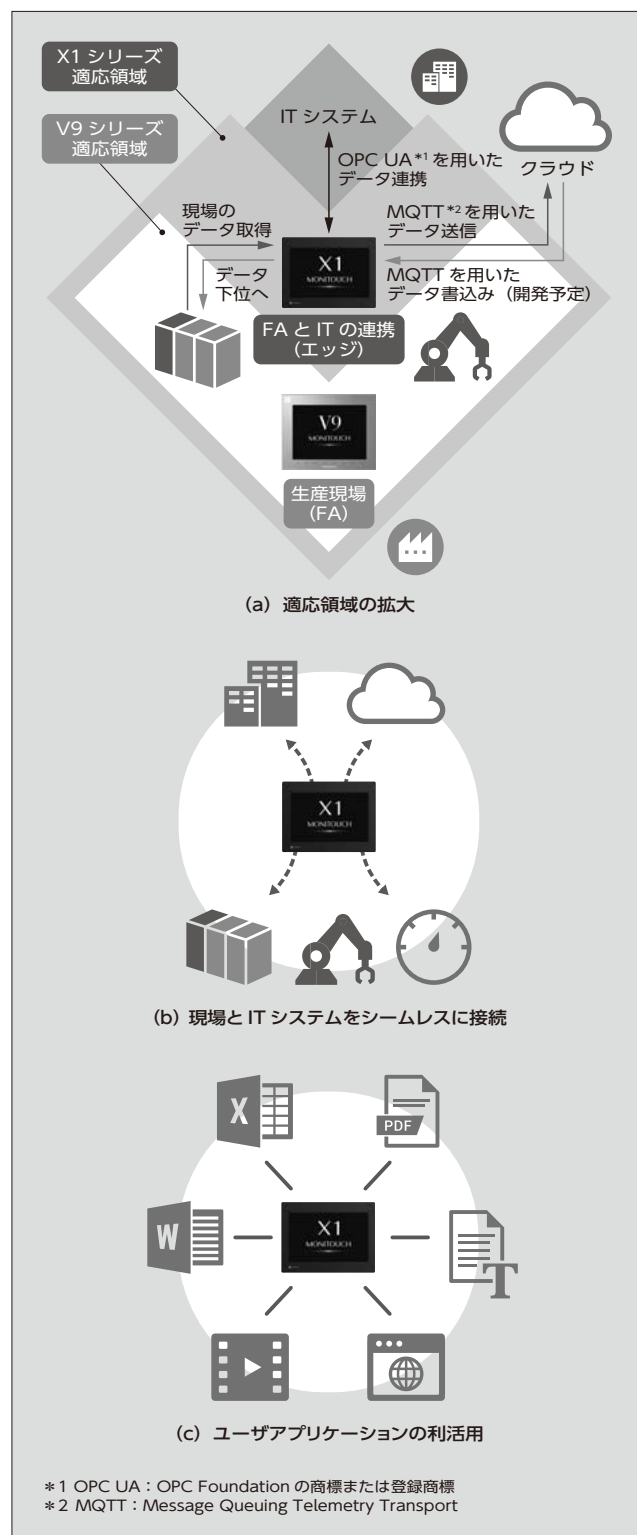


図 1 「MONITOUCH X1 シリーズ」の位置付け

(3) 新規性・拡張性

(注2)

Windowsを搭載したので、統合 HMI アプリケーションにより、HMI・エッジ機器として、これまでにない汎用性と拡張性を提供する。スマートフォンやタブレットなどのデバイスとの連携により、MONITOUCH X1 本体の操作をサポートすることができる。

(4) 互換性

従来の V9 シリーズの画面データを資産として活用できる。

② 「MONITOUCH X1 シリーズ」の概要

2.1 仕様

MONITOUCH X1 シリーズを図2に、主な仕様を表1に示す。



図2 「MONITOUCH X1 シリーズ」

表1 製品仕様

型 式	X1121iSD	X1121iSRD	X1151iSD	X1151iSRD
画 面	12.1 inch		15.6 inch	
解像度	1,280×800 (WXGA)		1,920×1,080 (FHD)	
電 源	DC 24 V			
タッチパネル	PCAP (静電容量式)			
プロセッサ	Intel Atom ^{*1} x5-E3940			
OS	Windows 10 IoT Enterprise 2019 LTSC ^{*2}			
Ethernet ^{*3}	10/100/1,000Mbps/s×2			
USB	3.0 (A)×2、2.0 (A)×2			
映像出力	HDMI×1			
保護等級	IP66			
無線LAN (WLAN)	—	1×WLAN IEEE 802.11 ac/a/b/g/n	—	1×WLAN IEEE 802.11 ac/a/b/g/n
Bluetooth ^{*4}	—	1×Bluetooth	—	1×Bluetooth

*1 Intel Atom : Intel Corporation またはその子会社の商標または登録商標

*2 Windows 10 IoT Enterprise 2019 LTSC : Microsoft Corporationの商標または登録商標

*3 Ethernet : 富士フイルムビジネスイノベーション株式会社の商標または登録商標

*4 Bluetooth : Bluetooth SIG, Incの商標または登録商標

2.2 特徴

MONITOUCH X1 シリーズは、Windows を搭載することで、製造現場で Windows アプリケーションやユーザアプリケーションを思いのままに使用できる。現場にある機器のエンジニアリングツールをインストールしておけば、わざわざ現場に PC を持ち込むことなく MONITOUCH X1 シリーズでプログラムの編集やモニタが行うことができる。現場の PC が不要になり、PC の管理とスペースの削減に貢献する。

2.3 OPC UA (OLE for Process Control Unified Architecture) サーバ機能とクライアント機能の搭載

Industrie 4.0 など、欧州をはじめとしたグローバル市場における産業用ネットワークとして注目される OPC UA サーバ機能とクライアント機能の両方を搭載している(図3)。OPC UA クライアント機能により、OPC UA に対応した多くのメーカーの PLC やデバイスと容易に接続できる。また、OPC UA サーバ機能により、現場の機器が OPC UA に未対応であっても、MONITOUCH X1 シリーズが OPC UA ゲートウェイとして機能し、上位システムと現場データの受渡しが可能になる。

2.4 MQTT によるクラウド接続機能

近年、産業分野でもクラウドシステムの活用が増加し、大手のクラウドプラットフォームが広く普及している。MONITOUCH X1 シリーズは、クラウドシステムとの通信プロトコルとしてデファクトスタンダードである MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

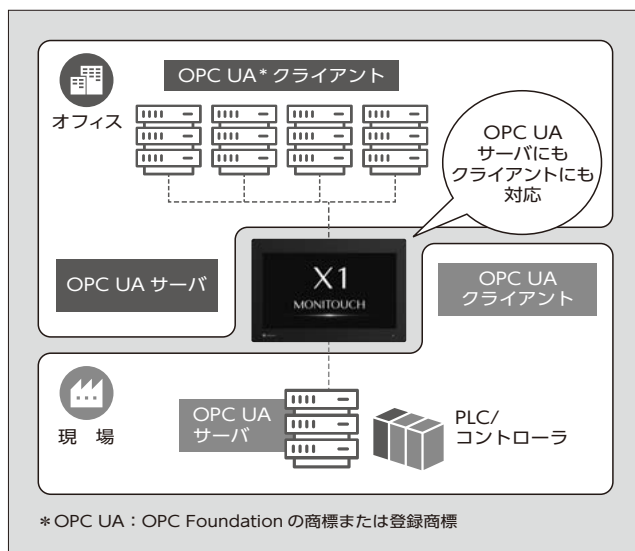


図3 OPC UA サーバ、クライアント

〈注2〉 Windows : Microsoft Corporation の商標または登録商標

〈注3〉 OPC UA : OPC Foundation の商標または登録商標

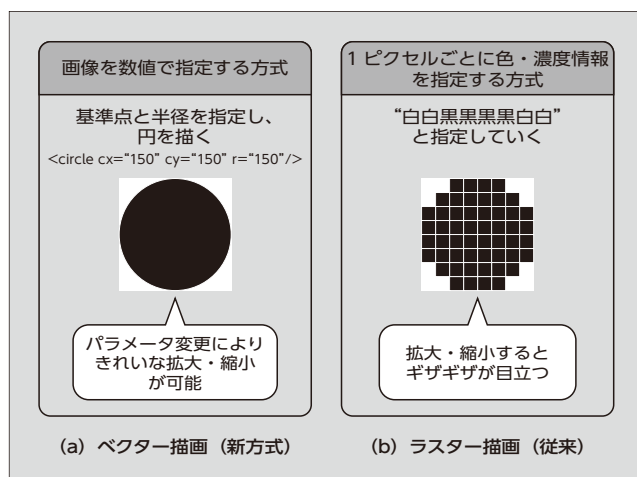


図4 ベクター描画

を搭載し、クラウドプラットフォームである Microsoft Azure^(注4)などとの連携機能を提供する。ユーザーは、簡単な設定により、MONITOUCH X1 シリーズで集めたデータを Azure IoT Hub に送信し、Microsoft Azure が持つ BI（ビジネスインテリジェンス）機能を活用し、可視化や分析、AI・機械学習を行うことができる。

2.5 ベクター描画

MONITOUCH X1 シリーズは、新規開発したベクター方式のレンダリング（画面描画）エンジンを搭載している。図4に示すように、従来の V9 シリーズはグラフィックや文字を点で描画するラスター方式を使用していたため画像にギザギザが残る。一方、MONITOUCH X1 シリーズは、ベクター方式を使用するのでギザギザがなく、高品質な表示を維持したまま画面の拡大や縮小が可能である。

3 適用事例

MONITOUCH X1 シリーズは、装置の HMI でありながら Windows を搭載しているので、さまざまなアプリケーションが活用できる。今までは、収集したデータの Excel^(注5)による編集や、複合機での印刷、上位サーバとの受

〈注4〉 Microsoft Azure：Microsoft Corporation の商標または登録商標

〈注5〉 Excel：Microsoft Corporation の商標または登録商標

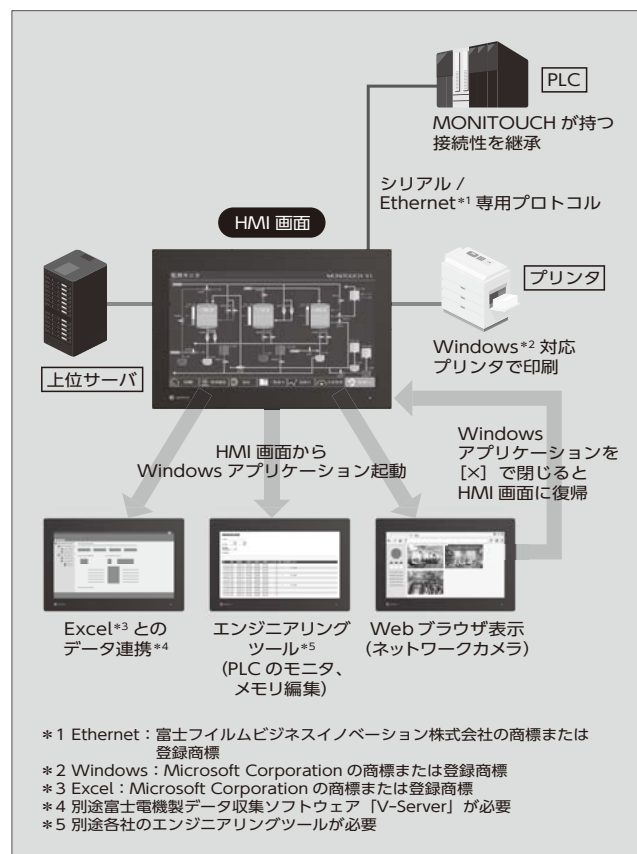


図5 「MONITOUCH X1 シリーズ」の適用事例

渡しなどに PC が必要であった。これを、MONITOUCH X1 シリーズ単独で行うことができる（図5）。

また、汎用 PC と違って優れた耐環境性能（IP66）を持っているため、劣悪な環境下においても安定した運用が可能な高機能 HMI として、さまざまな製造現場で活用できる。

発売時期

2020 年 10 月（世界同時発売）

お問い合わせ先

富士電機株式会社
 パワエレシステム インダストリー事業本部オートメーション事業部システム営業技術部
 電話（03）5435-7066

略語（本号で使った主な略語）

AAS	Asset Administration Shell	アセット管理シェル
AI	Artificial Intelligence	人工知能
API	Application Programming Interface	
AR	Augmented Reality	拡張現実
BCM	Business Continuity Management	
BCP	Business Continuity Plan	事業継続計画
BERT	Bidirectional Encoder Representations from Transformers	
BPF	Blade Passing Frequency	翼通過周波数
CAE	Computer Aided Engineering	
CBM	Condition-Based Maintenance	状態基準保全
CG	Computer Graphics	
CPS	Cyber Physical System	
CSF	Cyber Security Framework	サイバーセキュリティフレームワーク
DB	Dangling Bond	未結合手
DCS	Distributed Control System	分散型制御システム
DFTB	Density Functional based Tight Binding	
DL	Deep Learning	ディープラーニング
DX	Digital Transformation	デジタルトランスフォーメーション
EMS	Energy Management System	エネルギーマネジメントシステム
EnsKnn	Ensemble K-Nearest Neighbor Algorithm	
ERP	Enterprise Resources Planning	
FA	Factory Automation	
FAQ	Frequently Asked Questions	
FePS	Fuji Electric Production System	富士電機生産方式
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis	故障モード影響解析
HEPA フィルタ	High Efficiency Particulate Air Filter	
HILS	Hardware in the Loop Simulation	
HMD	Head Mounted Display	
HMI	Human Machine Interface	
HPC	High Performance Computing	
IDS	International Data Spaces	
IF	Isolation Forest	
IIoT	Industrial Internet of Things	
iNEE	Isolation using nearest neighbor ensembles	
IoT	Internet of Things	
ISMS	Information Security Management System	情報セキュリティマネジメントシステム
IT	Information Technology	
JIT	Just-In-Time	
LED	Light Emitting Diode	発光ダイオード
LES	Large Eddy Simulation	
LOF	Local Outlier Factor	
LSTM	Long Short Term Memory	
MBD	Model Based Development	モデルベース開発
MBSE	Model Based Systems Engineering	モデルベースシステムズエンジニアリング
MCU	Multi Communication Unit	
MES	Manufacturing Execution System	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	
MSPC	Multivariate Statistical Process Control	多変量統計のプロセス管理
OCR	Optical Character Recognition	
OCSVM	One Class Support Vector Machine	
OSS	Open Source Software	オープンソースソフトウェア
OT	Operational Technology	
PLC	Programmable Logic Controller	プログラマブルコントローラ
PLM	Product Lifecycle Management	
PLS	Partial Least Squares	

PoC	Proof of Concept	概念実証
POS	Point of Sales	
PSO	Particle Swarm Optimization	
QCD	Quality, Cost, Delivery	
RAS	Reliability, Availability and Serviceability	
SCM	Supply Chain Management	
SFB	System Function Block	
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	自己位置推定・環境地図作成技術
SOC	Security Operation Center	
TBM	Time-Based Maintenance	時間基準保全
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置
UV-C	Ultraviolet C	
VPN	Virtual Private Network	
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	X線光電子分光法

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

Ansys Fluent	ANSYS, Inc. の商標または登録商標
Bluetooth	Bluetooth SIG, Inc. の商標または登録商標
Ethernet	富士フイルムビジネスソリューション株式会社の商標または登録商標
Excel	Microsoft Corporation の商標または登録商標
FL-net	一般社団法人 日本電機工業会の商標または登録商標
Intel Atom	Intel Corporation またはその子会社の商標または登録商標
LIGHTTOOLS	Synopsys, Inc. の商標または登録商標
LTE	欧州電気通信標準協会（ETSI）の商標または登録商標
MATLAB	The MathWorks, Inc. の商標または登録商標
Microsoft Azure	Microsoft Corporation の商標または登録商標
OPC UA	OPC Foundation の商標または登録商標
Pokémon	任天堂株式会社・株式会社クリーチャーズ・株式会社ゲームフリークの商標または登録商標
Simulink	The MathWorks, Inc. の商標または登録商標
Windows	Microsoft Corporation の商標または登録商標
Windows 10 IoT Enterprise	Microsoft Corporation の商標または登録商標
Windows 10 IoT Enterprise 2019 LTSC	Microsoft Corporation の商標または登録商標
富岳	国立研究開発法人 理化学研究所の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。

訂正：富士電機技報. vol.93, no.2, p.135、一般社団法人 日本鉄道車輛工業会、左側 22 行目

(正)	(誤)
●鉄道車両工業功労者表賞	●鉄道車両工業精励者表賞
富士電機株式会社	井上 亮一
●鉄道車両工業精励者表賞	富士電機株式会社
大澤 千春、井上 亮一	橋井 眞
富士電機株式会社	大澤 千春、橋井 眞

訂正：富士電機技報. vol.93, no.4, p.218、参考文献左側 1 行目

(正)	(誤)
(1) 郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術.	(1) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用 IPM のパッケージ技術.

訂正：富士電機技報. vol.93, no.4, p.264、参考文献右側 6 行目

(正)	(誤)
p.244-248	p.214-218

右側 7 行目

(正)	(誤)
(7) 辻崇ほか. 1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET.	(7) 辻崇ほか. 1.2 kV SiC トレンチ型 MOSFET.

右側 15 行目

(正)	(誤)
2019, vol.92, no.4, p.224-228.	2019, vol.92, no.4 ,p.229-233.

フッター

(正)	(誤)
(2021 年 4 月 9 日 Web 公開)	(2021 年 3 月 26 日 Web 公開)

略語・商標



Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。

F 富士電機



主要事業内容

パワエレ エネルギー

確かな技術で電力インフラを支え、エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

エネルギーマネジメント

エネルギーマネジメントシステム（EMS）、電力流通、スマートメータ、変電

施設・電源システム

データセンター、無停電電源装置（UPS）、配電盤

器 具

受配電・制御機器

パワエレ インダストリー

パワーエレクトロニクス応用製品に計測機器、IoT を組み合わせ、工場の自動化や見える化により生産性の向上と省エネを実現します。

オートメーション

インバータ、モータ、FA コンポーネント、計測機器、FA システム、駆動制御システム、計測制御システム、工業電熱

社会ソリューション

鉄道車両電機品、EV システム、放射線管理システム、船舶用排ガス浄化システム

情報ソリューション

情報制御システム

半導体

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。

産 業

IGBT モジュール、SiC モジュール、MOSFET、ダイオード、電源制御 IC、感光体

電 装

IGBT モジュール、圧力センサ、パワー IC、イグナイタ

発電プラント

高度なプラントエンジニアリング力で、設計・製作から現地据付・試運転・アフターサービスまで一貫して提供します。

再生可能・新エネルギー

地熱発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池

火力発電・原子力関連設備

食品流通

自動化・省エネを食の安全・安心とともに提供します。

自販機

飲料・食品自動販売機

店舗流通

店舗設備機器、金銭機器、エネルギー管理システム

*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記 URL で利用できます。

富士電機技報（和文）

https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW（英文）

<https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

富士電機技術期刊（中文）

<http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html>



次号予定

富士電機技報 第94巻 第4号

特集 自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献する
パワー半導体

富士電機技報企画会議

幹 事	中山 和哉				
企画メンバー	斎藤 哲哉	桑山 仁平	眞下 真弓	前田政一郎	
	渡部 雅教	熊谷 明恭	片桐 源一	出野 裕	
	岡本 泰道				
特 集 委 員	瀬谷 彰利	安川 和行	勝野 徹	塩川 国夫	
	鳥羽 章夫	空本 高寧			
事 務 局	荻野 慎次	堀口 道子			
編 集 室	藤木 徹	木村 基	小野寺拓也	小野 直樹	
	高橋 徹				

富士電機技報 第94巻 第3号

令和3年9月20日 印刷 令和3年9月30日 発行

編集兼発行人 近藤 史郎

発 行 所 富士電機株式会社 技術開発本部
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号
（ゲートシティ大崎イーストタワー）

編 集・印 刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内
「富士電機技報」編集室
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地
電話（042）585-6965
FAX（042）585-6539

発 売 元 株式会社オーム社
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地
電話（03）3233-0641
振替口座 東京 6-20018

*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。

© 2021 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

エネルギー・環境事業で、
持続可能な社会の実現に貢献します。



Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。



Courtesy of PT SEMI
耐食・材料・熱水利用技術
地熱発電プラント



デバイス技術
パワー半導体



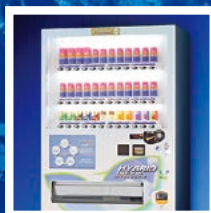
パワーエレクトロニクス技術
メガソーラー向けPCS
(パワーコンディショナ)



パワーエレクトロニクス技術
インバータ



パワーエレクトロニクス技術
UPS(無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術
ハイブリッドヒートポンプ式
自動販売機

F 富士電機

本誌は、環境に配慮した FSC® 認証紙および
植物油インキを使用しています。また、ユニ
バーサルデザイン(UD)の考えに基づいた
見やすいデザインの文字を採用しています。

