

三菱電機技報

7

2026
Vol.100 No.7

持続可能な社会を支えるインフラソリューション
— 運用・保守の自動化 —

No.7

特集 持続可能な社会を支えるインフラソリューション—運用・保守の自動化—

Infrastructure Solutions for a Sustainable Society —Automation of Operation and Maintenance—

特集論文

鉄道車両保守の共創プラットフォーム

“WHIZ CONDUCTOR”の構築 1-01
広田紗奈美・竹内智晴“WHIZ CONDUCTOR”: Co-creation Platform for Railway Maintenance
Sanami Hirota, Tomoharu Takeuchi前方監視システム 2-01
稲葉行俊・稲田雅詞Forward Monitoring System
Yukitoshi Inaba, Masanori InataMDMDによる鉄道インフラ維持管理のDX推進 3-01
磯崎 新・森 勇二・金澤哲夫Promoting DX in Railway Infrastructure Maintenance and Management through MDMD
Arata Isozaki, Yuji Mori, Tetsuo Kanazawa鉄道での自動指令システム 4-01
橋本 諭・國澤昌史・浦久保貴史Autonomous Railway Operation Control System
Satoshi Hashimoto, Masashi Kunizawa, Takashi UrakuboAI技術を活用した“ダム流入量予測システム” 5-01
森本恭平・清田峻吾・浅見拓哉AI-Powered Dam Inflow Prediction System
Kyohei Morimoto, Shungo Kiyota, Takuya Asamiカメラ活用によるメーター読み取り省人化DX 6-01
檜垣宏策・山足光義・西濱 令・中尾堯理・和田知也Camera-Based DX for Labor-Saving Meter Reading
Kousaku Higaki, Mitsuyoshi Yamatari, Rei Nishihama, Takamasa Nakao, Tomoya Wada保守業務省力化に向けた受配電設備の音診断技術 7-01
甲斐孝幸・江戸貴広・小林武尊・山口信一・ウィシャーン ゴードン・ルルー ジョナトAcoustic-Based Diagnostic Technology for Labor-Saving Maintenance of Power Distribution Equipment
Takayuki Kai, Takahiro Edo, Takeru Kobayashi, Shinichi Yamaguchi, Gordon Wichern, Jonathan Le Roux実運用環境に対応した深層学習による
電力機器部分放電診断技術 8-01
松山幸太郎・大竹泰智・ソン ホンボ・ラグナサン アーヴィンドDeep Learning-Based Partial Discharge Diagnosis for Power Equipment toward Practical Application
Kotaro Matsuyama, Yasutomo Otake, Hongbo Sun, Arvind Raghunathan受配電設備向けスマート保安システム 9-01
小須田貴之Smart Protection and Monitoring Service for Power Distribution Systems
Takayuki Kosuda高圧気中絶縁スイッチギヤ“MS”への
スマート保安システム搭載 10-01
パク オソン・濱田達哉・陳 能・佐方直都Smart Maintenance Functions for High-Voltage Air-Insulated Switchgear “MS”
Ohseong Park, Tatsuya Hamada, No Chin, Naoto Sagata発電事業者向けアセットマネジメントシステムでの
太陽光発電設備の異常検出と原因推定 11-01
加藤 慶・佐子朋生・井手太一Anomaly Detection and Cause Estimation of PV Equipment in Asset Management Systems for Power Generation Companies
Kei Kato, Tomo Sako, Taichi Ide

一般論文

新型宇宙ステーション補給機(HTV-X) 1号機

の運用と今後の展望 12-01
鶴川晋一・佐々木 洸・鈴木雅晴On-orbit Operation of HTV-X1 and Future Prospects
Shinichi Ukawa, Ko Sasaki, Masaharu Suzuki

技術紹介

宇宙状況把握センサーシステム 13-01
松岡 暉・眞庭知成・木邊厚視Space Situational Awareness Sensor System
Hikari Matsuoka, Kazuaki Maniwa, Atsushi Kibe次世代の電磁シールド監視システム 14-01
中村孝大・高嶋佑介・中口卓弥Next-Generation Electromagnetic Shield Monitoring System
Takahiro Nakamura, Yusuke Takashima, Takuya Nakaguchi

執筆者の所属は執筆時のものです。

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標です。

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

三菱電機技報ではこのビジネスエリアを中心に特集を紹介しています。

今回の特集ではインフラ領域の“持続可能な社会を支えるインフラソリューション — 運用・保守の自動化 —”をご紹介します。

鉄道車両保守の共創プラットフォーム “WHIZ CONDUCTOR”の構築

“WHIZ CONDUCTOR” : Co-creation Platform for Railway Maintenance

*モビリティインフラシステム事業部

要 旨

三菱電機では、鉄道車両保守での鉄道事業者及びメーカーの業務効率化・高度化を支援する新規ソリューション“WHIZ CONDUCTOR”の構築を進めている。車両保守業務でのデジタル技術活用の効果を最大化するためには、企業や現場の垣根を超えてデータ・知見を共有し、鉄道業界全体で保守力を向上させていくことが不可欠である。

このソリューションは、鉄道事業者やメーカーが車両・搭載機器のライフサイクルデータをシームレスに共有・活用できる“共創プラットフォーム”として機能する。このプラットフォームを基盤とした共創活動を活性化させることで、持続可能な鉄道ビジネスの姿を具現化し、鉄道業界全体のサステナビリティ向上に貢献する。

1. ま え が き

鉄道業界では、労働人口の減少や経営のスリム化などの課題を背景に、運転管理や保守・点検といったO&M(Operation & Maintenance)領域での業務のデジタル化、効率化、及び高度化へのニーズが切実なものになっている。特に車両保守分野では、故障発生時の初動対応、メーカーへの修理依頼、定期点検、予防保全計画の立案など、依然として人手や経験に依存した業務が多く残っている。蓄積された膨大なデータをいかに価値に変換し、これらの課題を解決するかが問われている。

当社は2019年から、IoT(Internet of Things)技術を活用して車両のライフサイクル全般の効率向上に貢献する鉄道LMS(Lifecycle Management Solution)を提供し、データに基づいた車両状態の監視によって、保守業務の効率化を支援してきた⁽¹⁾。

一方、当社内でも、修理対応の迅速化や効果的な予防保全提案で、更なる高度化の余地がある。企業間や組織間での“データの分断”は、正確な機器状態の把握を困難にし、多大な問合せ工数やデータ整理の無駄を発生させている。この情報の非対称性を解消し、業務の質を根本から高めていくことが、次世代の保守体制を築く鍵になる。

2. 鉄道車両保守での業務変革の方向性

この章では、鉄道車両保守での業務変革の方向性について述べる。

2.1 鉄道LMS事業の歩みと見えてきた課題

従来の鉄道LMS事業では、IoT技術によって稼働中の車両からデータを収集・蓄積し、列車統合管理システムやリモートモニタリングシステムを通じて、運用保守業務の効率化に貢献してきた。

しかし、これまでの取組みは既存業務の延長線上にある“積み上げ型”のデジタル化にとどまっていた。保守業務全体を俯瞰(ふかん)すると、事業者とメーカー間の調整領域に多くの非効率性が潜んでおり、デジタル活用の効果を最大化しきれていないという課題が浮き彫りになった。

2.2 業務プロセス変革のアプローチ

2.1節で述べた課題を解決し、デジタル活用の効果を最大化するためには、既存業務の延長線上にある改善にとどまらず、鉄道事業者とメーカーが一体となった抜本的な業務改革が必要である。

次に、その実現に向けた具体的なアプローチを述べる。

(1) バックキャストイングによる業務プロセスの再設計

従来のシステム開発は、現状の課題解決を積み上げる手法が主流であった。しかし、このプロジェクトでは、鉄道業界全体でデータがシームレスに循環する“あるべき姿”を先に定義し、そこから逆算して業務プロセスを再設計するバックキャスト手法を採用した。これによって、局所最適に陥ることなく、ゼロベースでのプロセス改革を目指している。

(2) 判断業務を高度化するツールの活用

安全の根幹に関わる業務では、人間の介在が不可欠である。したがって、デジタル技術やAI技術を、“人間からシステムへの置き換え”としてではなく、“人間の判断の質とスピードを最大化するための道具”として位置付ける。

(3) 鉄道事業者・メーカー間のデータ連携による全体最適

車両保守の作業効率化は情報のデジタル化の度合いに依存するため、個社別の改善にとどまらず、鉄道事業者とメーカー間のデータ共有を前提とした業務プロセスの再設計を業界横断で推進することが全体最適化に寄与する⁽²⁾。

(4) 段階的な業務変革の推進とサステナビリティへの貢献

変革の実現に向けて、故障問合せや修理進捗管理といった鉄道事業者とメーカーとの“接点業務”のデジタル化から着手する。鉄道事業者・メーカー双方に直接的なメリットのある仕組みを起点に共創活動を広げて、鉄道業界全体の持続可能性を支える基盤を創り上げる⁽²⁾。

3. 車両保守ソリューションWHIZ CONDUCTORの構築

この章では、車両保守ソリューションWHIZ CONDUCTORの構築について述べる。

3.1 ライフサイクルデータを基盤とした共創のコンセプト

WHIZ CONDUCTOR⁽³⁾は、車両機器のライフサイクルデータを蓄積・活用し、保守業務のデジタル化を加速させて、車両保守の効率化を提供するソリューションである。鉄道事業者とメーカーが共通のデータ基盤上で情報を共有し、相互に知見を補完しあう“共創プラットフォーム”としての機能を備えている。

最大の特徴は、鉄道事業者が持つ稼働・保守情報と、メーカーが持つ設計・製造及び修理情報をライフサイクルデータとして管理するライフサイクルデータベースを活用し、機器の設計・製造から廃棄に至るまでのトレーサビリティを確立することにある。この共通言語としてのデータを活用することで、鉄道事業者とメーカー双方が業務の質を向上させて、相互にメリットを享受できる環境を提供する(図1)。

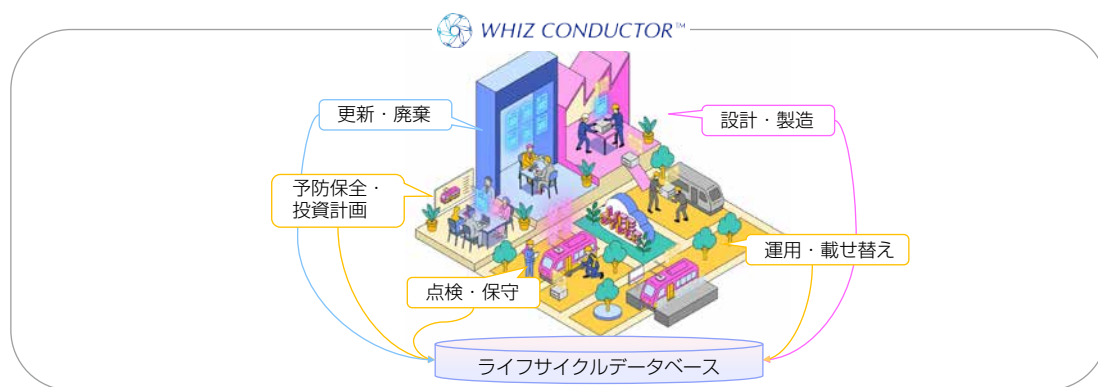


図1-WHIZ CONDUCTORのコンセプト(概念図)

3.2 具体的な取組みと提供価値

この節では、具体的な取組みと提供価値について述べる。

3.2.1 ライフサイクルデータベースの構築と機器管理業務の高度化

従来、個別に管理されていた在庫情報や故障修理履歴などをシステム連携によって統合し、製造番号をキーとした一元管理を実現する。また、製造番号情報を記録した二次元コードを活用することで、鉄道事業者とメーカー双方の現場での入力ミスの抑制と作業負担の低減を両立し、データ精度の向上を図る。これによって、関係者間での同一データに基づく迅速な意思決定を可能とする(図2)。

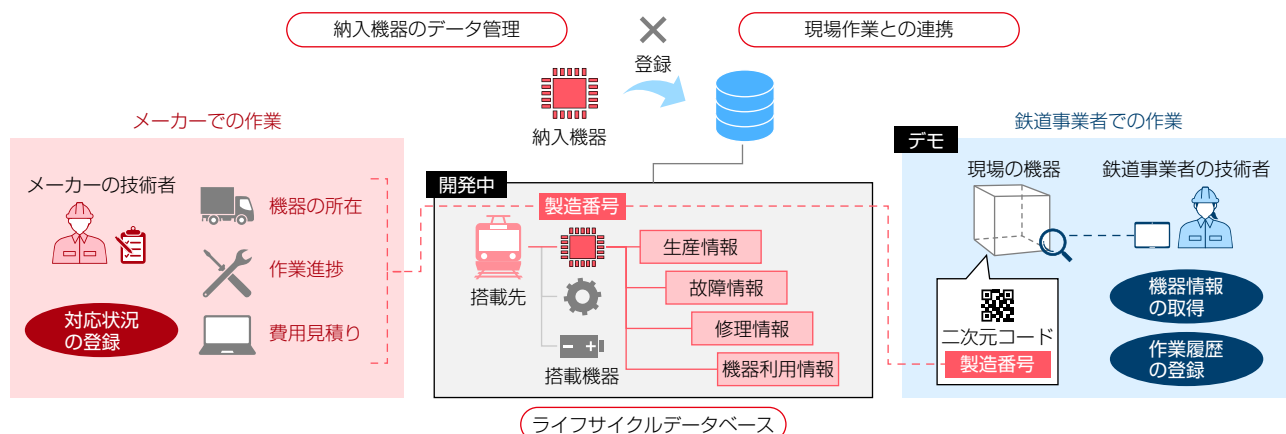


図2-ライフサイクルデータベースの構築とその活用

3.2.2 故障時対応・修理業務の刷新

故障発生時の迅速な復旧を支援するため、故障原因推定を支援するためのトラブルシューティングツール及び故障問合せや修理進捗管理といった鉄道事業者とメーカーとの“接点業務”を見える化するための保守情報管理システムを開発している(図3)。

特に、生成AIを活用して蓄積されたデータからノウハウを抽出し、“集合知”として活用する技術を実装中である。これによって、作業者の経験値に依存せず、可能性のある故障原因や推奨処置を即座に提示することを目指す。また、システム上での故障問合せや修理進捗管理を実現することで、従来のアナログな情報伝達から脱却し、鉄道事業者とメーカーの間のシームレスなデータ連携による業務効率化を推進する。

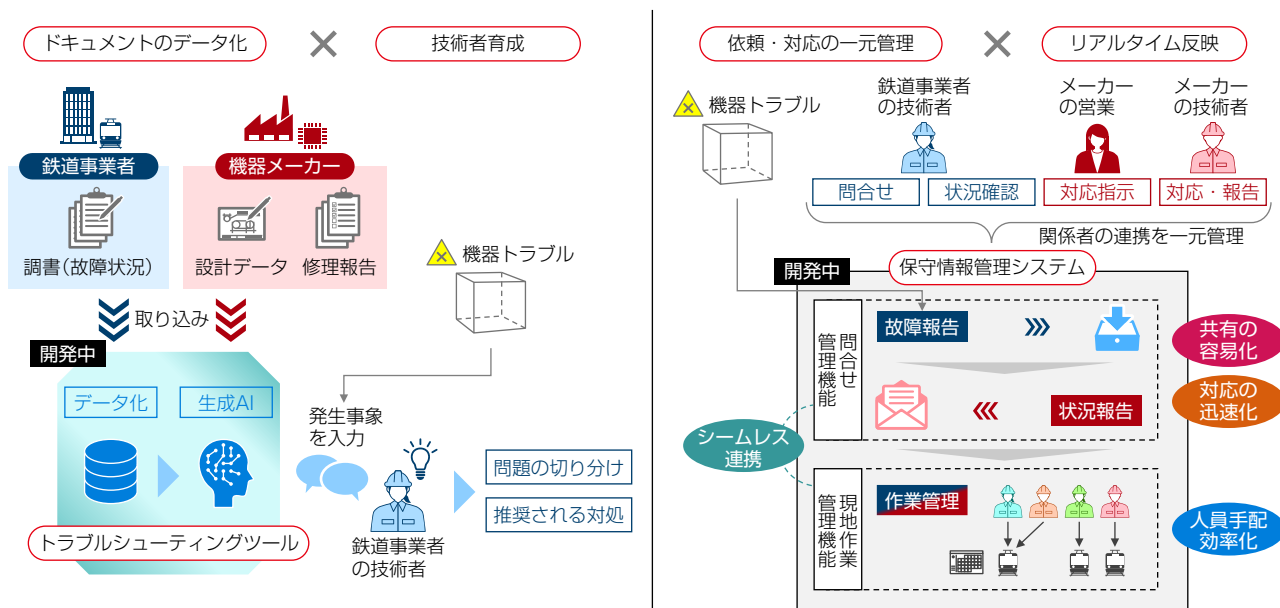


図3-トラブルシューティングツールと保守情報管理システム

3.2.3 予防保全計画・投資計画の最適化

ライフサイクルデータベースに集約・蓄積されたデータをダッシュボードで可視化し、故障傾向の分析を容易にすることで、データに基づいた予防保全計画の立案を支援する。さらに、アセットマネジメントシステムの開発によって、故障確率と経営リスク(コスト)を考慮した投資シミュレーションを可能にする。これによって、事業者は経営方針に沿った最適な投資判断ができて、メーカーは更にプロアクティブな提案が可能になる(図4)。

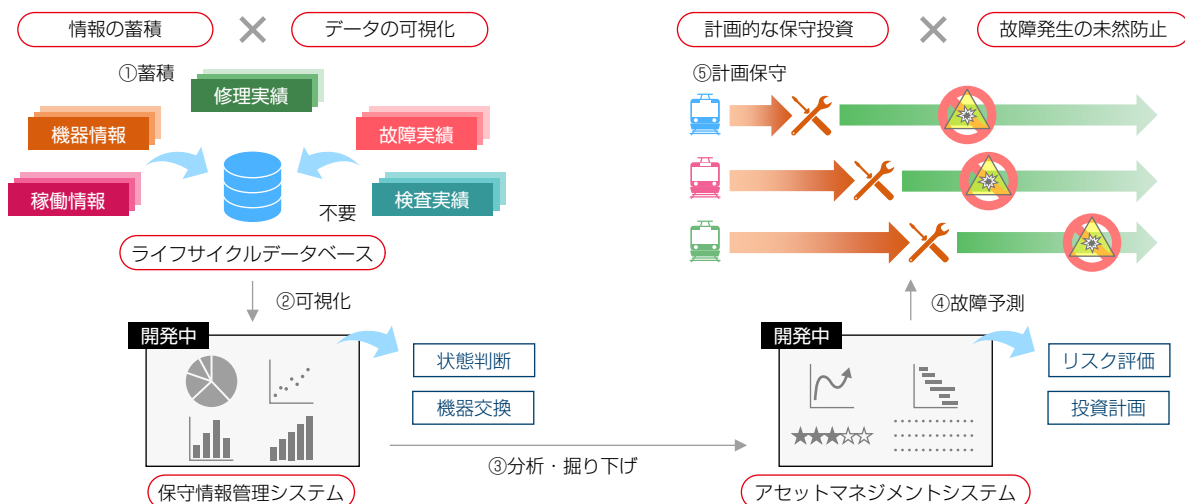


図4-ライフサイクルデータを可視化したダッシュボードとアセットマネジメントシステム

4. 今後の展望

この章では、今後の展望を述べる。

4.1 共創プラットフォームの拡大

鉄道車両は複数メーカーの機器から成る複合体であり、デジタル活用の効率を最大化するには、特定の企業に限定されないオープンなデータ連携が不可欠である。WHIZ CONDUCTORを、特定の企業に依存しない“共創の場”として発展させて、業界全体の保守能力向上と標準化の推進に資する(図5)。

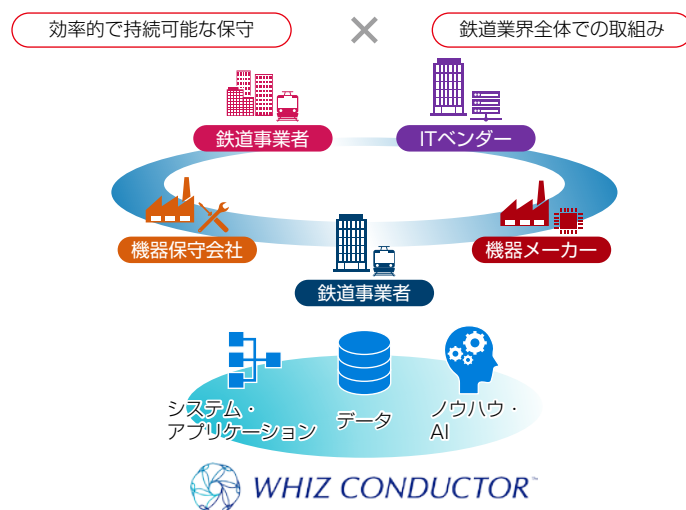


図5-共創の場としてのWHIZ CONDUCTOR

4.2 当社デジタル基盤Serendieとの連携

当社が構築したデジタル基盤Serendie⁽⁴⁾のアセットも活用し、鉄道に関わる全てのステークホルダーにメリットがあるエコシステムへと昇華させていく。個別の企業利益の追求にとどまらず、鉄道業界全体の業務最適化及び価値向上に寄与する広範な取組みとして展開を図る。

5. む す び

鉄道業界での業務変革は、従来の“積み上げ型”のデジタル化を脱して、事業継続を担保するための抜本的なプロセス改革の実装フェーズへと移行している。当社はWHIZ CONDUCTORを通じて、鉄道事業者とメーカー間の調整領域に潜む非効率を解消し、企業間の垣根を超えたデータ共有と共創の文化を醸成していく。鉄道に関わる全てのステークホルダーとの強固な連携によって、デジタル活用の効果を最大化し、次世代の車両保守の姿を具現化することで、業界全体の持続可能な発展に貢献する。

参 考 文 献

- (1) 弘重健司，ほか：交通事業のサステナビリティに貢献する“鉄道LMS on INFOPRISM”，三菱電機技報，**97**，No.9，3-01～3-07（2023）
- (2) 成松延佳：鉄道車両機器メンテナンス業務のDXを目指した共創活動，日本鉄道車両機械技術協会誌「R&m」，**33**，No.7（2025）
- (3) 三菱電機：三菱電機 | モビリティインフラシステム | ソリューション | メンテナンス | WHIZ CONDUCTOR
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/traffic/solutions/maintenance/whizconductor/>
- (4) 三菱電機：Serendie セレンディ
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/serendie/>



前方監視システム

Forward Monitoring System

*伊丹製作所

要 旨

近年、労働者人口の減少によって、物流や鉄道をはじめとする交通機関の運転手不足が社会的課題になっている中、安心・安全な自動運転の実現に向けた技術開発が進んでいる。鉄道車両は自動車に比べて質量が大きく、最大制動距離が600mに達する場合がある。このため、従来の自動車向けセンサー(LiDAR(Light Detection And Ranging)、ミリ波レーダー等)では検知距離が不足し、前方監視の実用化が困難であった。

今回、最大600m先の人物及び障害物を検知可能な長距離LiDARと可視カメラを統合した前方監視システムを開発した。このシステムは、鉄道車両の自動運転のほか、鉄道の沿線・高速道路での障害物検知などへの活用が期待できる。

1. ま え が き⁽¹⁾

本稿で扱う前方監視システムは、車両進行方向の人物・車両・その他障害物を早期に検知し、危険予測・速度制御・緊急制動などを支援する。その要件は鉄道や道路などの運用環境、最高運行速度、制動距離、気象条件に依存する。特に鉄道車両では制動距離が最大で600mに達するため、長距離検出能力及び高い信頼性が求められる。

この開発では、最大600m先の人物・障害物を検知可能な長距離LiDARと可視カメラを併用し、ガルバノ走査等による視野角の可変化を導入することで、長距離での高精度検出と実運用性の両立を図った。

2. 前方監視システム

このシステムは、近距離・長距離カメラと長距離LiDARの検出スコアを時間同期して統合し、各センサーの特性を活用するフュージョン処理によって検出精度と耐環境性を向上させている。

2.1 システム構成

このシステムでは、長距離LiDARの点群を基にLiDAR制御部で物体検出を行い、検出位置・サイズ・信頼度を前方監視制御装置のフュージョン処理部へ送信する。近距離カメラ及び長距離カメラも同様に、それぞれの検出結果(検出位置・サイズ・信頼度)をフュージョン処理部へ送信する。センサーフュージョン部は、各センサーの検出特性を考慮して全検出結果を統合的に評価し、確定した認知結果を認知インターフェースを介してATO(Automatic Train Operation)等の上位装置へ通知する(図1)。

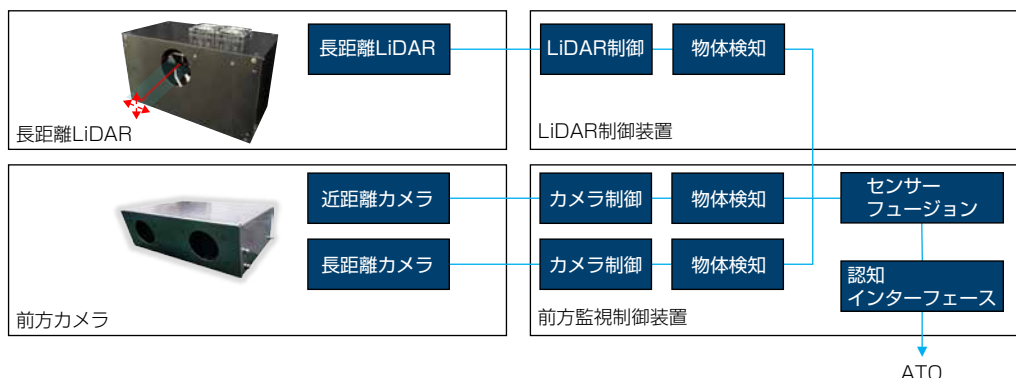


図1-システム構成

2.2 長距離LiDAR⁽¹⁾

この装置は、ガルバノスキャナーによってレーザー光を走査することで、検知範囲及び対象物のサイズに応じて水平・垂直の視野角を柔軟に調整できる。走査軌跡はラスタースキャンや正葉曲線など複数方式に切替え可能であり、これによって単位面積当たりの点群密度を向上させることで、遠距離でも高精度な検出を実現するLiDARシステムである(図2)。



図2-長距離LiDAR

2.2.1 ラスタースキャン

ラスタースキャンは、レーザー光を水平方向にライン走査し、垂直方向を一定ステップで移動させて視野を格子状に覆う走査法である。照射角のサンプリング間隔はほぼ一定であるが、面単位当たりの点群密度は距離に応じて減少する。図3のサンプルでは、フレームレートは2fps(frames per second)、600m先での点間距離(空間分解能)は水平方向で約35cm、垂直方向で約50cmになっている。この方式は、鉄道車両等の移動体に搭載して走査を行う用途だけでなく、沿線の定点監視のような固定設置型観測にも適している。

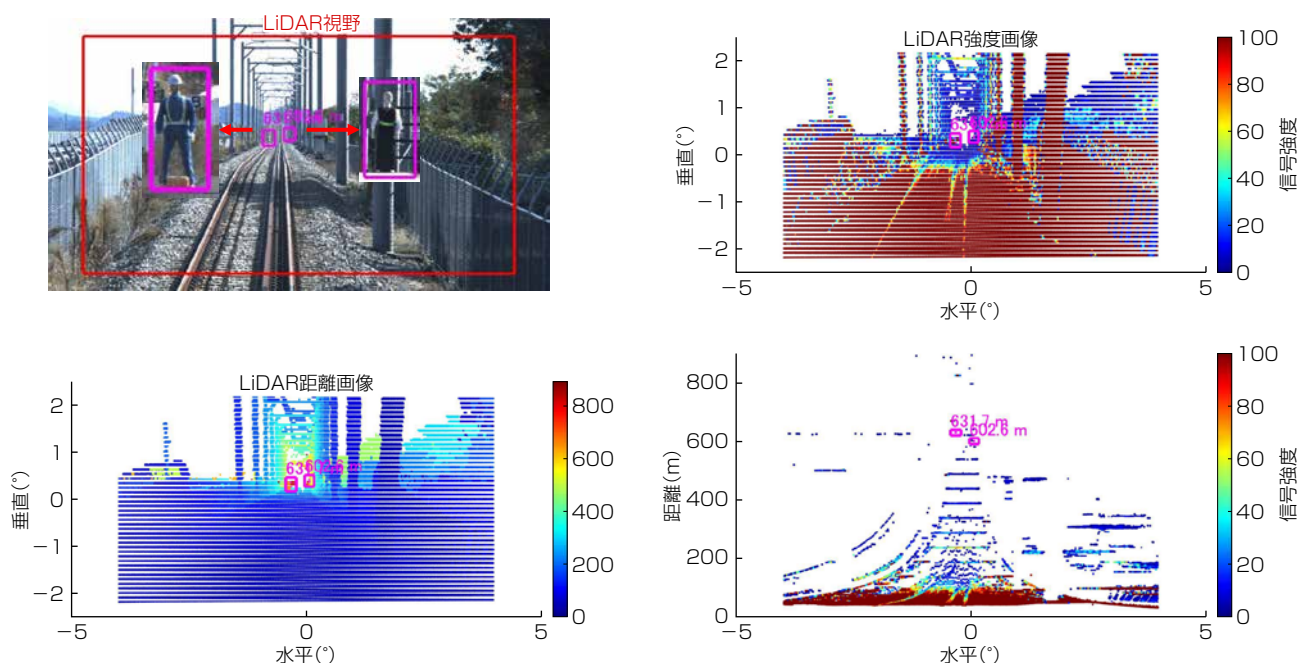


図3-ラスタースキャン

2.2.2 正葉曲線スキャン

正葉曲線スキャンは、水平・垂直の二軸をそれぞれ異なる周波数で連続駆動し、レーザー光が正葉曲線状の軌跡を描いて視野を覆う走査法である。図4のサンプルでは、軌跡設計によって必ず中心点を通過させることで中心領域の検出性能

を向上させており、視野中心の10%相当領域では実効観測頻度が10fps以上に達する。これによって、600m先での空間分解能は50cm以下になっている。この方式は、中心領域の検出性能の点で、鉄道車両等の移動体に搭載して走査を行う用途に特に適している。

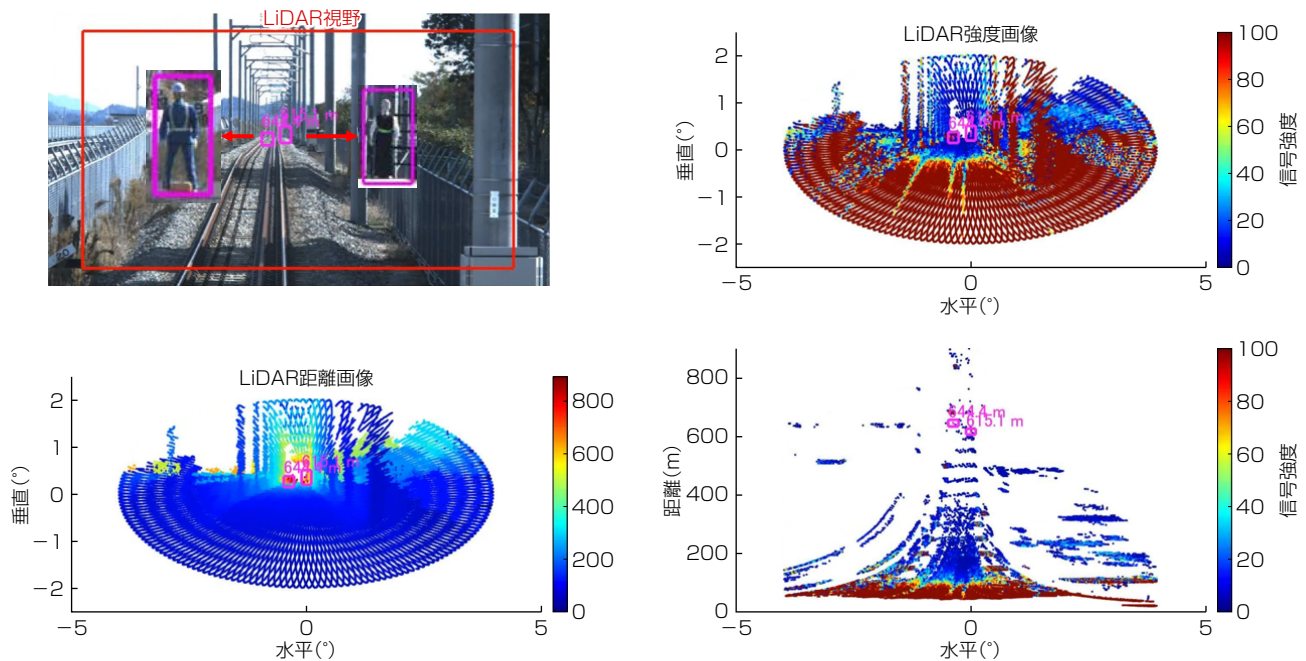


図4-正葉曲線スキャン

3. 可視カメラシステム

可視カメラシステムは2台のカメラを用いる。両者をステレオ構成とはせず、近距離用と長距離用の異なるレンズを組み合わせることで、奥行き方向にわたって広範囲かつ高精細に物体検出が可能な構成としている(図5)。検出結果は、広範囲をカバーする近距離カメラの検出を基軸として、長距離カメラの検出をフュージョンして統合する(図6)。日中はおおむね300mまで、夜間は前照灯の光が届く範囲である約100mまで、検出が可能である。

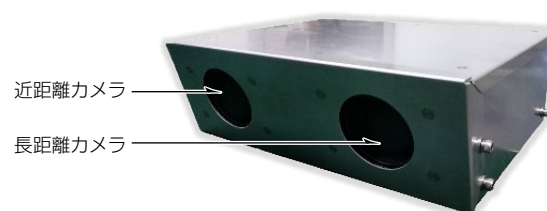


図5-可視カメラシステム



図6-可視カメラのフュージョン結果

4. 物体検出方式

可視カメラによる物体検出は、カメラ映像から線路領域をセグメンテーションで抽出、その線路領域を基に画像上で建築限界の内外領域(図7)を設定し、建築限界外にある物体だけを検出する。

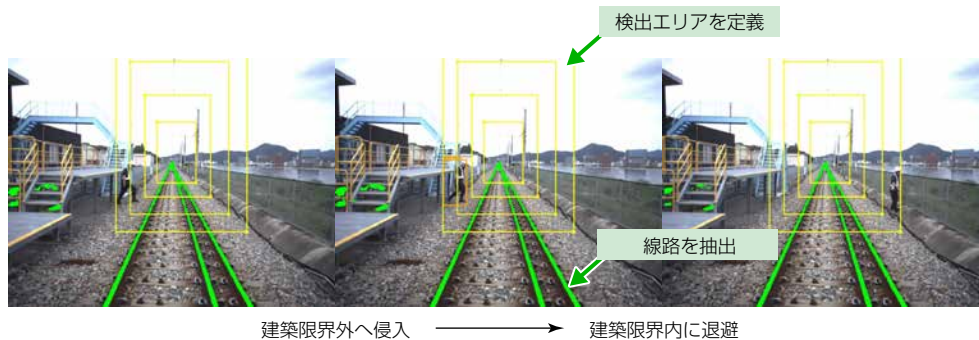


図7-物体検出AI(可視カメラ)

長距離LiDARによる物体検出は、点群をグラフ構造に変換することで点間の距離・角度・相対位置などの関係を明示的に表現し、グラフニューラルネットワーク(GNN)を活用して点群から物体を識別する独自の物体検出AIを開発した(図8)。物体の種類や多角度からの形状変化を学習させることで、点群だけでは識別が難しい人・車・自転車等を高速かつ高精度に分類できる。

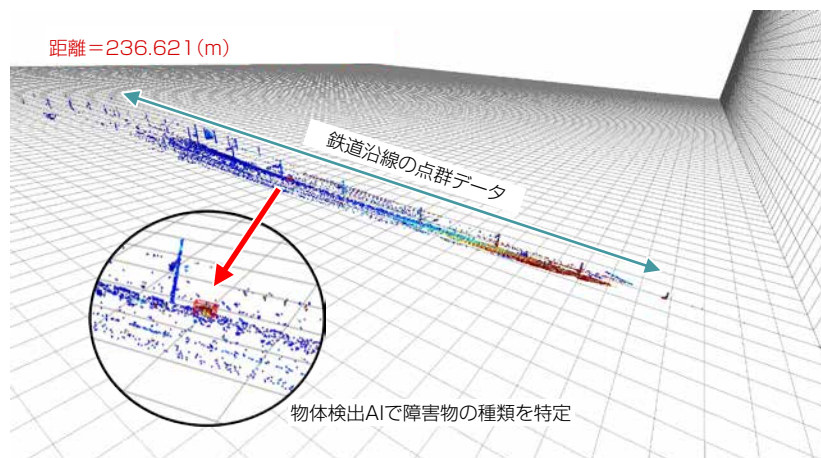


図8-物体検出AI(長距離LiDAR)

5. む す び

今回開発した前方監視システムの技術は遠距離での高精度検出を特長として、高速道路での障害物検知など多様な用途への適用拡大が期待される。この技術の普及によって、鉄道車両の自動運転化の促進や、鉄道沿線・高速道路での安全確認作業の効率化に貢献していく。

参考文献

- (1) 最大検知距離900mに対応した多用途向け長距離LiDAR, 三菱電機技報, 100, No.2, 2-1-01 (2026)

MDMDによる 鉄道インフラ維持管理のDX推進

磯崎 新*
Arata Isozaki
森 勇二*
Yuji Mori
金澤哲夫*
Tetsuo Kanazawa

Promoting DX in Railway Infrastructure Maintenance and Management through MDMD

*神戸製作所

要 旨

日本の鉄道インフラは、老朽化に伴うインフラ維持管理コストの増大に加えて、少子高齢化による労働人口の減少という複合的な問題に直面しており、インフラ維持管理の効率化の手段として、DX(Digital Transformation)の活用を推進している。MDMD(Mitsubishi Multi-dimensional Data Management for Diagnosis：三菱多次元施設・設備管理システム)は、当社が開発したMMSD(Mitsubishi Mobile Monitoring System for Diagnosis：三菱インフラモニタリングシステム)が提供する高精度・高密度な三次元点群データや高精細画像を基軸とし、鉄道インフラの“デジタルツイン”を実現するソリューションである。デジタルツインによって、正確な位置情報の共有、設備間の距離計測、経年変化の見える化や解析結果の管理を行うことで、現地作業や設計業務のDXを推進し、安全性向上と業務効率化を両立する持続可能なインフラ維持管理の実現に貢献する。

1. ま え が き

近年、日本社会は少子高齢化による労働人口の減少、デジタル技術の急速な発展という大きな変革期を迎えている。これらを踏まえて、国としてデジタル技術を活用したDXを強力に推進している。デジタル庁では“デジタル原則”を策定し、アナログ規制の見直しやデジタル技術の適用を促している。また、国土交通省でも、デジタルツイン、BIM(Building Information Modeling)／CIM(Construction Information Modeling)の活用による建設生産システム全体の生産性向上を目指す“i-Construction”を推進している。

このような国のDX推進の潮流は、日本の社会経済活動を支える鉄道インフラでも重要なテーマになっている。鉄道インフラの安全・安定輸送を維持することは、持続可能な社会の実現に向けて不可欠であり、DXによる業務形態の変革が期待されている。

当社は、MMSDで取得した高精度・高密度な三次元点群データ及び高精細画像データを基軸とし、鉄道インフラのデジタルツインを実現し、デジタルツイン上のデータを管理・活用するためのソリューションとしてMDMDを提供している。

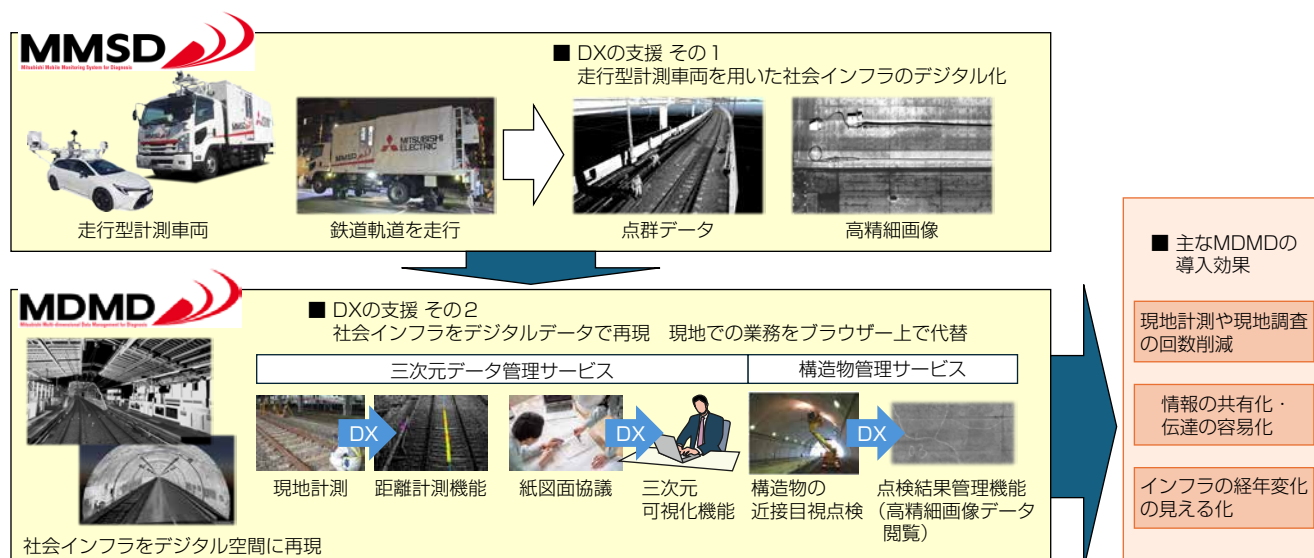


図1-鉄道インフラのDX推進でのMDMDの役割

る。MDMDは、Webブラウザからいつでも詳細に確認・計測可能なため、現地計測作業の削減等の既存業務の効率化にとどまらず、ドローンやスマートフォンで計測したデータ等、多様なデータとの連携を通じて新たな業務への活用も期待されるソリューションである(図1)。

本稿では、MDMDの特長や機能、効果について述べる。

2. 鉄道インフラ維持管理での課題

この章では、鉄道インフラ維持管理での課題について述べる。

2.1 鉄道インフラの老朽化と維持管理コスト増大の課題

橋梁(きょうりょう)、トンネル、軌道構造物等の鉄道インフラは、建設後50年を経過する施設の割合が増加しており、老朽化への対応が急務になっている。これに伴う修繕費や点検費等の増大は、鉄道事業者の経営を圧迫する大きな要因になっており、限られたリソースの中で広範囲なインフラの健全性をいかに維持していくかが課題になっている。また、鉄道インフラの維持管理業務の多くは、目視や手作業に大きく依存しているのに加えて、最終列車から始発列車までの夜間、又は日中の列車間合いといった極めて短い時間に軌道内で作業する必要がある。このような制約条件下で効率的かつ安全に業務を遂行するには、熟練技術者による高度な技能が要求される。しかし、熟練技術者は高齢化で減少が進む一方、若手技術者も不足しており、熟練技術者の高度な技能やノウハウの継承が課題になっている。

2.2 デジタルデータ活用の現状と課題

近年、鉄道インフラ維持管理でも、デジタルデータの活用・普及が進んでおり、閲覧・解析するためのツールが多々提供されている。しかし、現状では設備ごとに管理部署が異なることでデータフォーマットの不統一やシステムの分断が起こっており、情報の統合的な活用が十分になされていない側面がある。さらに、“軌道中心やレール位置を基準とした計測”や“建築限界との干渉チェック”といった鉄道特有の要件を満たすことが難しく、実務への適用には依然として問題が残されている。このような背景から、鉄道インフラ維持管理の特性に最適化されたデータ管理・共通プラットフォームの構築が課題になっている。

3. MDMDの特長

MDMDは、MMSDで取得した三次元点群データや高精細画像をWebブラウザ上で閲覧・活用できるプラットフォームである(図2)。特長としては、主にWebブラウザを用いた容易な利用、鉄道実務に特化した解析アルゴリズムの提供、サブスクリプション提供による初期投資抑制である。

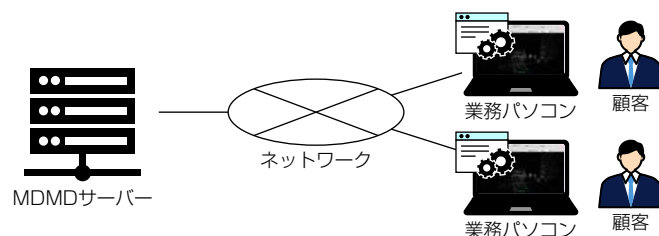


図2-MDMD使用環境

また、MMSDで取得した高精度な位置情報を持った三次元点群データや高精細画像を活用し、Webブラウザ上での高精度な距離計測や、建築限界解析結果の重畳表示、信号機や地上子等の設備位置情報の管理といった高度な機能群を提供する。これによって、従来は現地での目視や手計測に頼っていた業務をデジタル空間へ移行し、作業の安全性向上と効率化を両立する。

4. MDMDの主な機能

この章では、MDMDの主な機能を述べる。

4.1 三次元点群ビューア

MDMDの三次元点群ビューアは、当社独自技術で高精度な位置情報を付加した三次元点群データをシームレスに表示し、高精度の距離計測機能や建築限界解析結果表示機能、ウォークスルー機能、設備位置情報管理機能を提供する。

4.1.1 軌道中心を基準とした距離計測機能

“軌道中心距離”は正確な列車走行距離を把握するために重要な計測距離であるが、現場では軌道中心線を直接計測することが難しく、鉄道事業者によっては現地で比較的容易に計測できる左右レールの距離を設計上の代替距離に採用している。MDMDは現場で計測することが困難な軌道中心距離を高精度に計測できるほか、左右レール距離についても同時に計測できる。また、駅構内には複数の列車走行ルートが存在するが、MDMDでは任意の列車走行ルートを選択できるため、任意の列車走行ルートに対する軌道中心距離を計測できる(図3)。

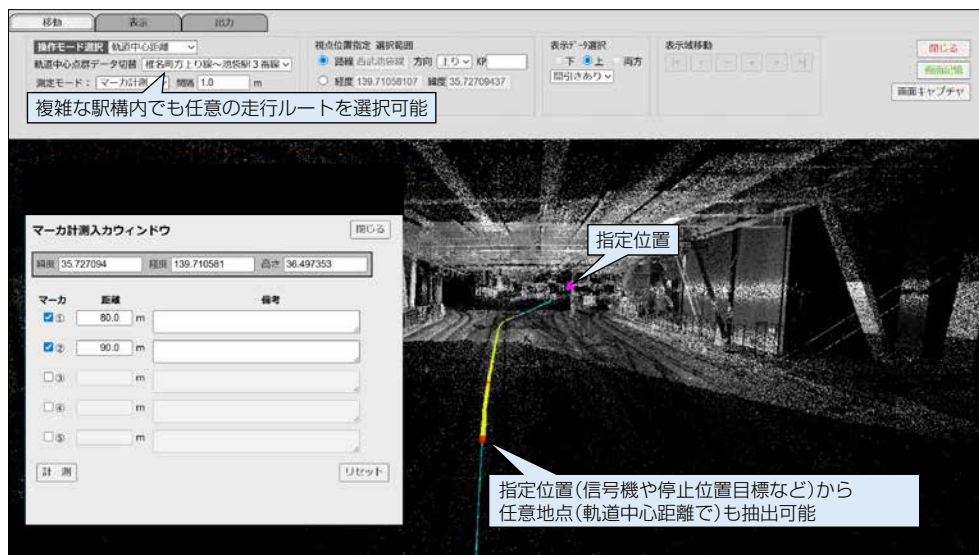


図3-MDMDの三次元点群ビューアと軌道中心距離計測の一例

4.1.2 建築限界枠及び建築限界解析結果の表示と重畳機能

MDMDは、ビューア上で建築限界枠を重畳表示させて、さらに建築限界枠を移動させることができる。建築限界枠は、曲線半径やカント、スラックによる拡大限界のほか、ホーム部やトンネル部等の場所にに応じて設定できる。また、建築限界解析結果をビューアに表示し、支障箇所や近接箇所に応じて着色表示できるため、支障の危険がある箇所を直感的に把握できる(図4)。

4.1.3 ウォークスルー機能

MDMDでは、指定した目線位置(高さ)で三次元点群データを移動させながら閲覧できる。具体的には、運転手目線や作業員目線等に合わせて目線位置を設定し、その目線のまま移動できる(図5)。これによって、運転手目線での信号機や特殊信号発光機の見通し確認や、作業員目線でのレールボンドや地上子等の沿線設備の概況確認が、Webブラウザ上で可能になるため、現地での確認作業を削減できる。

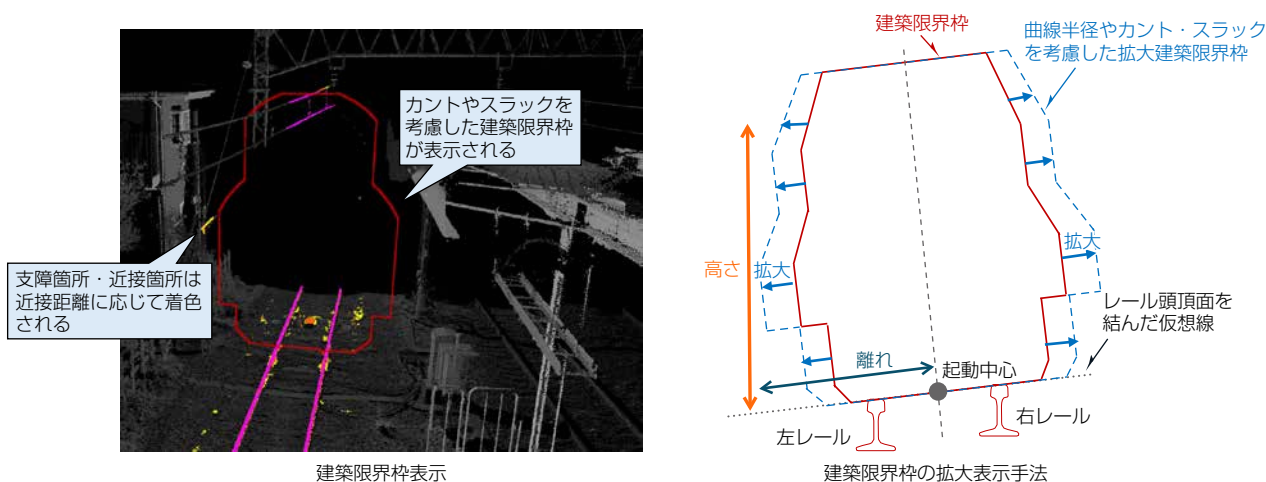


図4-MDMDによる建築限界枠表示(左)と、建築限界枠の拡大表示手法(右)

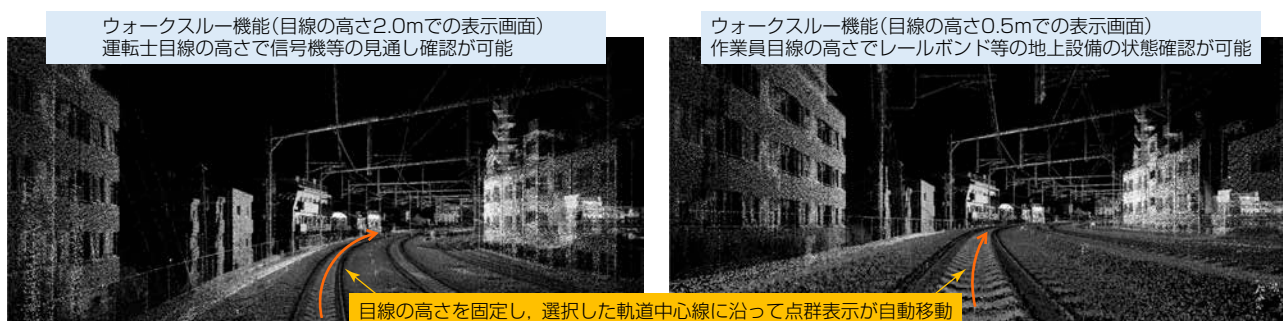


図5-MDMDによるウォークスルー機能

4.1.4 高精度な絶対位置情報による設備情報管理機能

MDMDは高精度な位置情報を持った三次元点群データを管理しており、位置情報に紐(ひも)付いた設備情報を登録・検索・削除できる。従来のキロ程による設備位置管理では、距離標等からの線路距離を基準に設備位置を管理しているが、線路線形の改良工事や、線路の曲線、勾配等の情報が反映されておらず、“設備の正確な位置”を反映できていない状況であった。MDMDでは設備に“高精度な絶対位置情報”と“キロ程による相対的な位置情報”を同時に付与して登録できるため、既存のキロ程による相対的な位置はそのままに、絶対位置情報による設備情報を管理できる。これによって、線路線形の改良工事等で距離標が変更された場合でも、絶対位置情報をキーとして過去の情報を正確に引き継ぐことができ、情報の連続性を担保した高度なアセットマネジメントが可能になる。

4.1.5 データ出力機能

MDMDは主に次の二つのデータ出力機能があり、MDMDの高精度データを、外部アプリケーションでも活用できる。

(1) 断面図出力

ホームの断面図や、法面の断面図など、任意の箇所や軌道に沿った断面図をDXF(Drawing eXchange Format)形式で出力することで、CADへ断面図を取り込んで、ホーム設備の設置検討や、法面の変状管理等に活用できる。

(2) 三次元点群データ出力：MDMDで表示される三次元点群データをLAS形式で出力できる機能

MDMDで表示される三次元点群データをLAS(Laser Scan)形式で出力することで、BIM/CIMモデルの背景データとして活用できる。

4.2 トンネル管理機能

トンネル点検は定期的実施されているが、主に目視主体であったため過去のデータと比較・分析が困難で、また、点検員の経験や技量によって判断に差が出るなどの問題があった。MDMDのトンネル管理機能(図6)では、MMSDで取得

した高精度・高密度な三次元点群データ及び高精細画像データを時系列で管理できるため、過去のデータとの差分が容易に分析できる。また、三次元点群データと高精細画像データをAIで解析し、ひびや変状などの点検結果を定量的に可視化できるため、熟練技術者の高度な技能やノウハウによる技量差を吸収し、客観的に判断することが可能である。



図6-MDMDによる構造物管理機能の画面

5. MDMDの今後の展望

MDMDのデータ利活用範囲の更なる拡大のため、次に示すような多様なデータ連携について強化していき、データ統合管理を更に強化する。

- (1) 多様な計測データ(例：ドローンや地上・可搬型レーザースキャナーで取得したデータ等)の取り込み・自動重畳
- (2) 他のデータ管理システムからのデータの取り込み
- (3) 外部の様々なアプリケーションやプラットフォーム等へのデータ提供

MDMDは既に複数の鉄道事業者にも活用されており、その運用を通じて得られるフィードバックは、今後の機能強化の重要な源泉になっている。地図データと三次元点群データの連携表示や、点群計測操作の改善等のユーザーからの具体的な要望に基づいて、逐次機能改善や新機能の開発を進めていく。

6. む す び

当社はMDMDを通じて、鉄道インフラ維持管理のDXの推進、さらには高精度なデジタルツインを基盤とした効率的な維持管理体制の確立を支援し、安全で持続可能な鉄道インフラの実現に貢献する。当社が長年培ってきた技術・知見と、利用している鉄道事業者からのフィードバックを取り込んで、鉄道インフラDXのリーディングカンパニーとして、今後も鉄道事業のDXに貢献していく。

鉄道での自動指令システム

Autonomous Railway Operation Control System

*神戸製作所

要 旨

三菱電機は、少子高齢化や自動運転拡大に伴って変化する鉄道指令業務の効率化を実現する自動指令システムを開発した。このシステムは、列車運行シミュレーションに基づいて遅延発生時に運転整理案を自動生成し、さらに車両・乗務員運用の変更案作成や気象に基づく規制自動発令を統合的に行うことで、少人数体制でも安全かつ効率的な運行管理を実現することを目指す。将来的には輸送指令、電力指令、信号通信指令などの各指令エージェントへと機能を拡張し、これらを協調制御する総合指令AIオーケストレーターを導入によって横断的な統合指令システムへの展開を目指していく。

1. ま え が き

少子高齢化に伴う労働力人口の減少は、鉄道分野でも指令員や現業職員などの人員確保・世代交代を困難にし、安全性・安定輸送・サービス水準の維持に重大なリスクをもたらしている。それに加えて、自動運転の適用範囲が拡大することで車上業務は省力化される一方、遠隔監視や例外対応など指令側に求められる役割が高度化し、指令業務の負荷構造が変化すると考えられる。こうした社会的制約と自動運転の進展に対応する技術的解決策として自動指令システムの開発を行っている。この自動指令システムは、指令員の業務の中でも業務負荷の高い遅延回復(運転整理)の効率化を図るため、熟練指令員の判断をデータ化して学習させることによって、異常時の対応の自動化を実現していくものである(図1)。具体的には、列車運行シミュレーションによって、遅延の発生等を予測し問題点が検出された場合には、その対策案として運転整理の提案を実施する。同様に、車両運用や乗務員運用に変更が必要な問題が発生する場合には、それぞれ対策案を自動的に提案する。

本稿では当該システムの主要機能と、今後の展望について述べる。

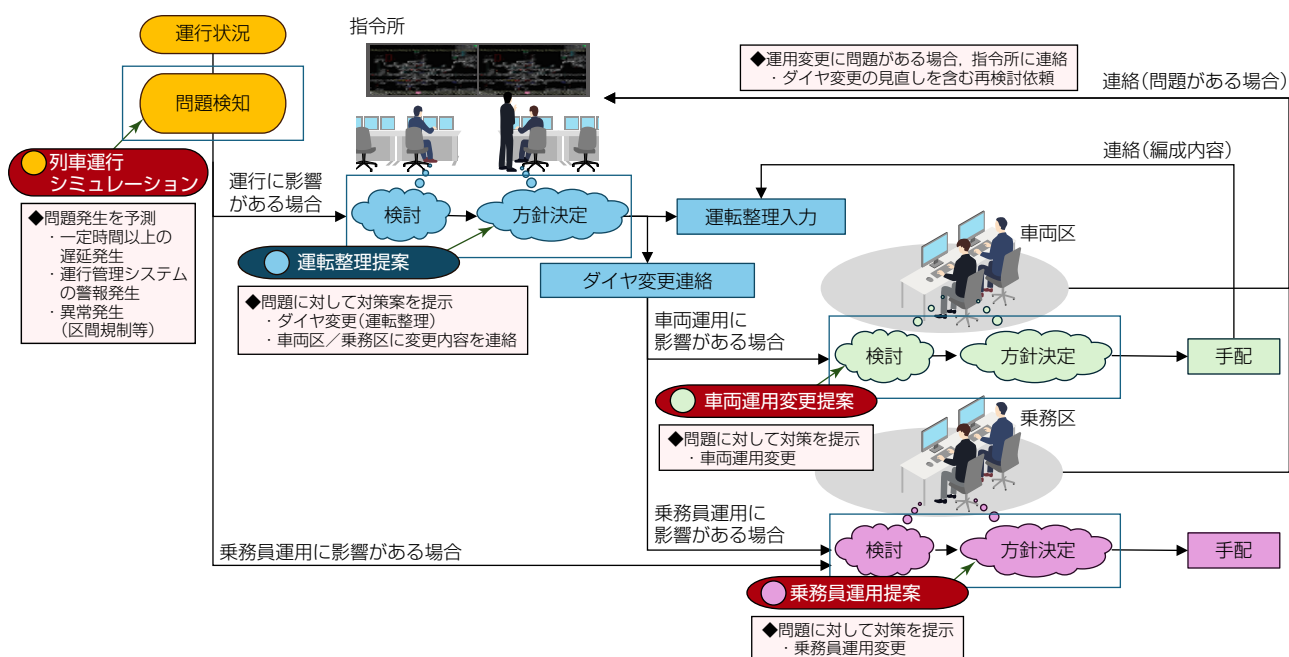


図1-自動指令システムの概念

2. 自動指令システムの概要

この章では、自動指令システムの概要を述べる。

2.1 システムの基本構成

運転整理の自動的な提案を実現するため、統合シミュレーション機能や各種提案機能を具備した予測サーバーを導入する。予測サーバーは、既存の運行管理システムや輸送計画システムなどと接続を行い、ダイヤ情報などの計画データや列車の運行状況などのリアルタイム情報を把握する。既存のシステムから得た情報を基に、シミュレーションを実行して将来的に発生する可能性のある遅延や列車間の競合などの問題を検知し、それらの問題を解消する変更案を生成する。

2.2 システムの機能

この節では、システムの機能について述べる。

(1) 統合シミュレーション機能

実施ダイヤを基に、現在時刻以降の列車運行を到着・発車単位で予測し、予測ダイヤを作成する。予測ダイヤに基づいて車両・乗務員の移動も推定し、“何もしなければ生じる異常”（列車間の競合、車両不足、乗務員拘束時間超過等）を検出して指令員にアラートを通知する（図2）。

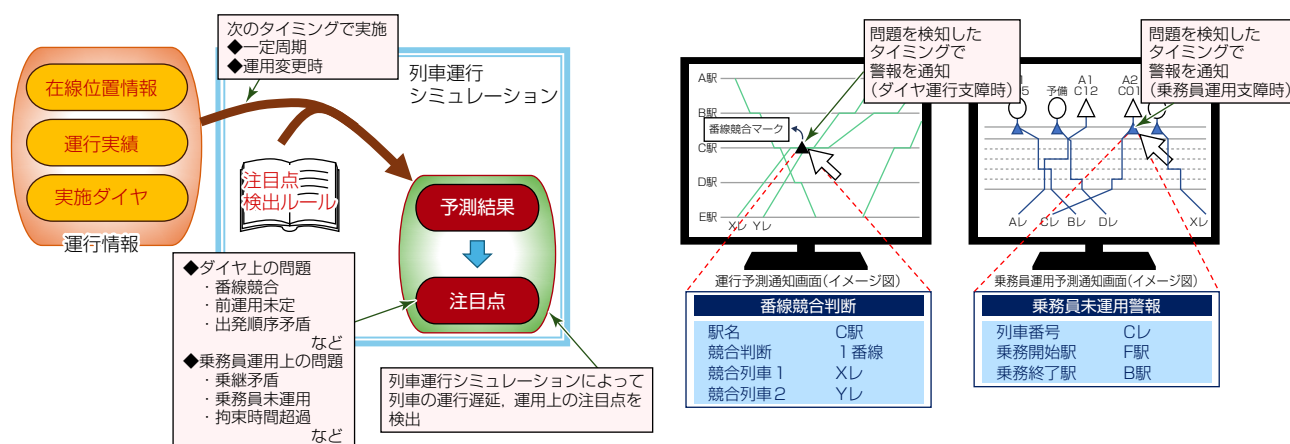


図2-統合シミュレーターの概要

(2) 運転整理提案機能

シミュレーションの結果によって一定時間以上の遅延の発生や、列車間の競合の発生が予測される場合には、システムは自動的に運転整理提案を実施する（図3）。これまで運転整理の自動化には多様な試みがなされてきた。しかし日本では定時性が高く運転整理事例が稀（まれ）なため、訓練用システムでシナリオに沿ってダイヤ乱れを模擬的に発生させて、その際の運転整理データを収集・蓄積する作業が必要であり、多大な労力を要するため実運用導入の大きな制約になっていた。また事業者ごとの運用慣行や路線特性を反映した自動提案機能の構築には更に多くの時間と労力を必要としていた。そこで、訓練用データを整備するのではなく、各事業者が蓄積した過去の運転整理履歴を個別学習データとして直接活用する方式とし、教師付き機械学習を採用した。これは鉄道事業者ごとの運転整理方針や慣行を反映した提案を効率的に生成することを目的としたものである。訓練用データを新たに整備しないことによって教師付きデータが不足する可能性があるため、後に述べるルールベースを併用することで解決を図っている。開発には学習処理（推論モデル作成）と提案処理（リアルタイム処理）を明確に分離したモデルを採用した。学習処理では、運行管理システムのダイヤデータと過去の運転整理実績から問題発生時刻、遅延発生状況、列車種別、編成情報、接続関係等の特徴量群を作成し、指令員が採用した運転整理（運休・折り返し・順序変更等）及びそのパラメーターをラベルとして学習を行う。学習に際して、事例が稀なことによってサンプル数に偏りがある不均衡状態の場合、予測精度に悪影響を与えるため、前処理で遅延が微小な事例を除外する、アンダーサンプリングやクラス重み付けを併用して学習バイアスを軽減する対策を行った。

提案処理では、先に述べた学習処理によって得られた結果を使って推論を実施する。しかしながら、学習データに含まれない事象では、運転整理案を提示できないケースが生じるおそれがあるため、あらかじめ設定したルールによって提案を実施するルールベース方式を併用することとした。これによって、学習時に発生していない事象への対応力を高めることを可能とする。また、この機能によって得られた提案結果は、鉄道ダイヤグラム画面(スジ画面)上に反映し、当該運転整理を実施した場合の影響を視覚的に知ることができるようにした。これによって提案の採用可否の効率的な判断を支援している。この機能は某大手鉄道運行管理システム向けに機能追加として開発中で、2028年度に実装予定になっている。

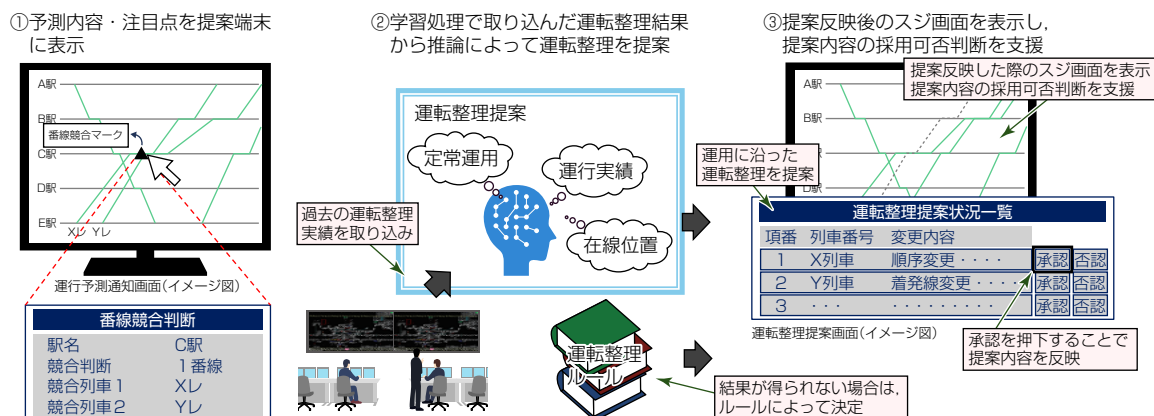


図3-運転整理提案イメージ

(3) 車両運用変更案生成機能

運転整理によって時刻変更や走行順序変更を行った際、折り返し列車など車両の運用変更が必要になる場合があるため、運転整理提案と連携する車両運用変更案の生成機能を開発している(図4)。車両の運用を変更する場合には、車両検査周期、編成互換性、車両基地への出入庫条件等の様々な制約を考慮する必要があるが、制約条件はルール化されており、車両検査周期は絶対に遵守しなければならないといった特性がある。そのため運転整理提案とは異なって、車両運用変更提案では機械学習などのAIベースではなく、ルールベースの機能として開発を行っている。具体的には、車両運用が割り当てられていない列車に対して予備編成を充当するといった提案を行うなど様々な提案機能を持たせる。

この機能によって、検査が間近に迫っている車両を、検査予定の車庫以外へ入庫してしまうなどといった事象を防ぐことが可能になる。また、計画と異なる運用を行った車両を、運行への影響を抑えつつ、計画運用にいち早く戻す操作を効率的に行うことが可能になり、車両指令員の負荷が軽減される。この機能は某大手鉄道向けに車両運用変更提案システムとして開発中で、2027年度に実装予定になっている。

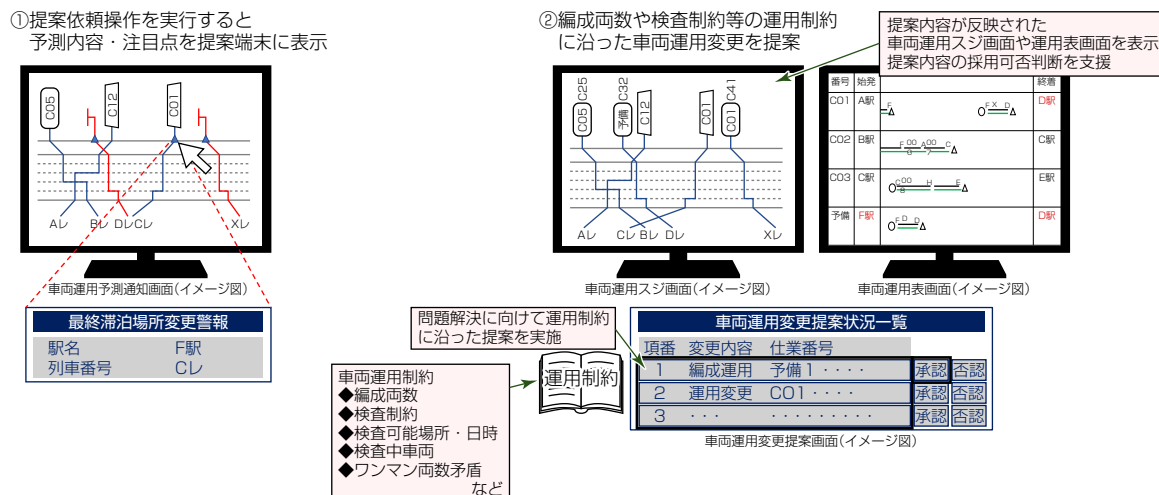


図4-車両運用変更案生成

(4) 乗務員運用変更案生成機能

車両運用と同様に、乗務員運用の変更提案作成機能についても現在開発を行っている(図5)。乗務員の運用変更についても、乗務員の勤務時間、休憩・勤務間隔、運転資格などの制約条件を満たす必要があるが、それだけではなく、乗務間に別列車に便乗して移動するケースを考慮する必要があるため、車両運用より更に複雑度が増していく。勤務時間や連続運転時間など遵守すべきルールが厳密に定められていることを考慮し、制約条件を必ず守れるようにルールベースで開発を行っている。

具体的には、乗務員が割り当てられていない列車に対して、待機している乗務員を充当する機能を開発していく。

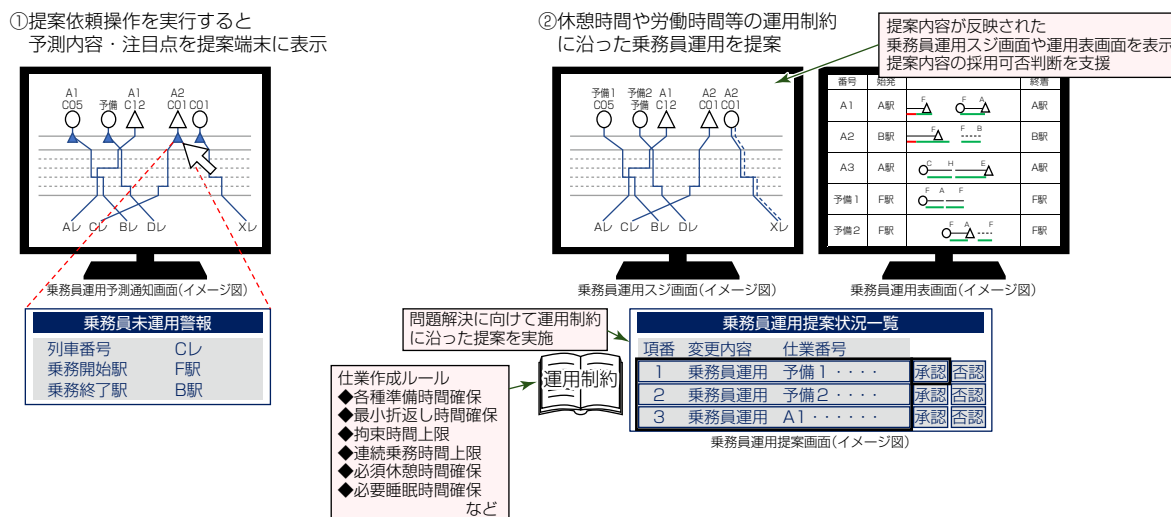


図5-乗務員運用変更提案

(5) 規制自動発令

雨量や風速、レール温度などの気象観測データをリアルタイムに取得し、運転規制の自動発令を行う機能についても開発を行っている(図6)。この機能では、降雨予測分布を利用して降雨実績などの気象実績データとの相関関係から雨規制の発令見込み時間と規制解除見込み時間を予測して、計画運休ダイヤと運転再開ダイヤを自動作成し提案する機能を具備する。集中豪雨など急速に変化する気象事象に対して、あらかじめ対応を計画することが可能になり、指令員の負荷軽減に加えて、乗客への早期の情報提供によって利便性の向上や乗客の安全確保に寄与する。

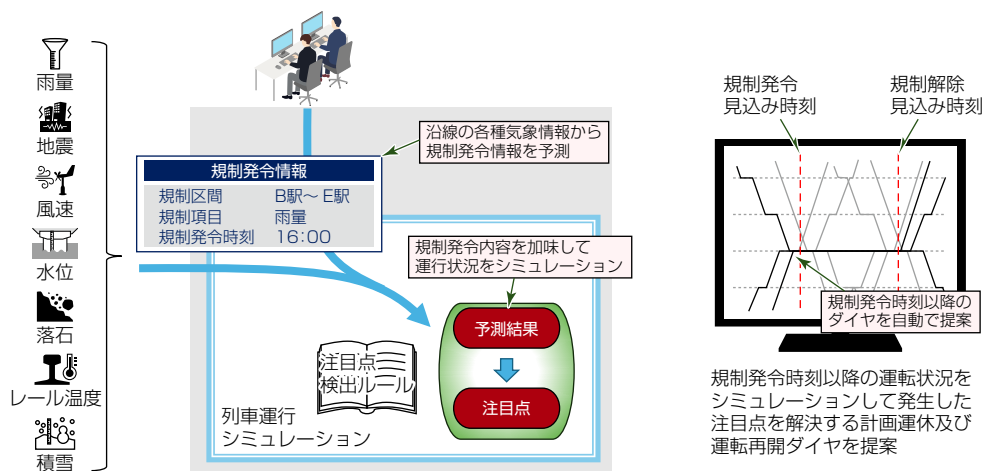


図6-規制自動発令のシミュレーション

3. 総合指令AIオーケストレーターへの発展

鉄道運行は、運行制御を担う輸送指令のほか、電力制御を担う電力指令、旅客への情報提供を担う旅客指令、信号・通信設備の状態監視を担う信号通信指令など、複数の指令業務の連携によって成り立っている。現在は各指令システムが個別最適を指向して独立的に配備されているため、横断的かつ複合的な判断を迅速に行うことが困難である。

今後、自動指令システムを中核とするAIエージェント群を拡張し、輸送指令エージェントや電力指令エージェント(電力系統事故時の原因特定や復旧手順の自動提案等)などを開発する。各指令業務を分析、データ化し、暗黙知を含む指令運用データを学習させることで業務ごとに最適化されたAIを構築するものである。さらに、これらのエージェントを協調制御(オーケストレーション)する総合指令AIオーケストレーターによって列車運行に関わる全指令を統合管制し、横断的かつ複合的な課題に対する統合的な解決を図るシステムへと発展させていく(図7)。

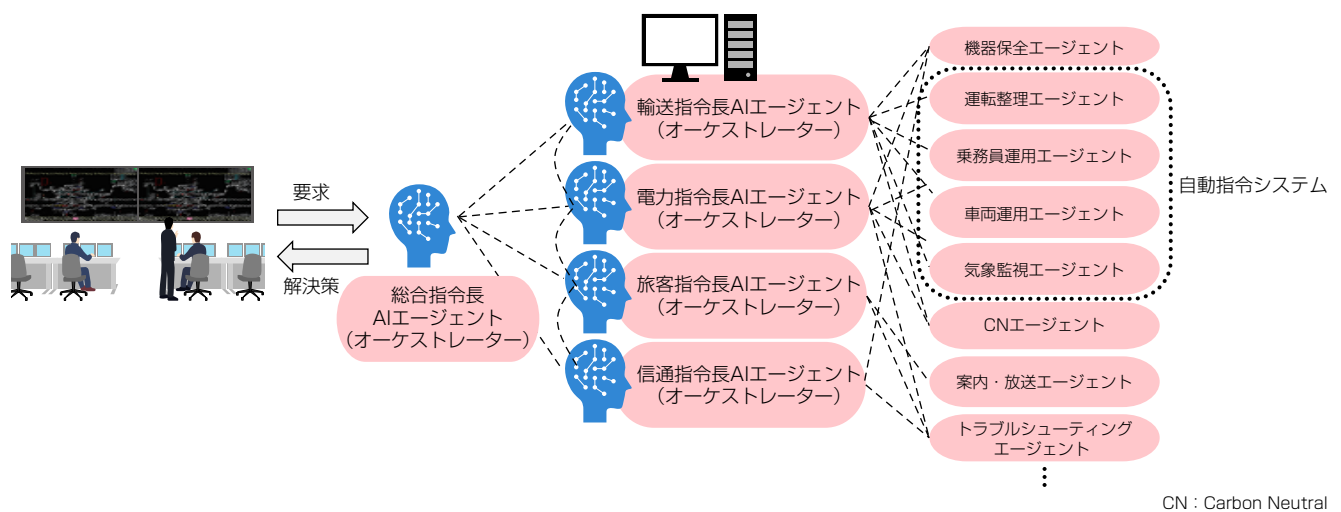


図7-総合指令オーケストレーターによる統合管制

CN : Carbon Neutral

4. む す び

少子高齢化が進展する社会で安定輸送を継続するには、指令業務の省力化が喫緊の課題である。本稿では、その解決手段として自動指令システムを提示した。このシステムは自動運転など今後想定される業務の複雑化に対応し、効率的かつ安定的な運行管理を実現することで、持続可能な輸送サービスの確保という社会的課題の解決に貢献していく。

AI技術を活用した “ダム流入量予測システム”

AI - Powered Dam Inflow Prediction System

*神戸製作所

要 旨

昨今の大雨洪水による激甚災害の増加を受けて、国土交通省の流域治水プロジェクト等、流域全体の被害軽減が急務である。この流域管理にはダム・河川管理者の熟練のノウハウが不可欠だが、災害時の判断の難しさや管理者の人手不足等の問題は深刻な課題になっている。三菱電機はこれらの課題に対して、高度な数値解析技術を用いて運用の高度化を実現する“ダム流入量予測システム”を開発し、運用の中で更なる精度改善に取り組んでいる。このシステムは過去のダム・河川データから数値最適化技術によってモデルパラメーターを自動調整し、熟練経験に頼らず流入量の高精度かつ長時間予測を可能とする。このシステムを活用することで早期放流判断を支援し、意思決定高度化と人的ミス低減、及び防災力向上に寄与する。

1. ま え が き

近年の気候変動によって、台風・線状降水帯等による記録的豪雨が頻発し、甚大な水害が全国各地で発生している。このような状況を受けて、国土交通省は“流域治水プロジェクト”を立ち上げて、河川流域に関わる複数の組織が協力して流域全体の状況を総合的に管理・運用し、水害を軽減させる取組みを推進している。

流域治水で、ダムは洪水調節機能を担う重要な治水施設であり、適切な放流操作によって下流域の洪水被害を軽減する役割を果たしている。ダムの効果的な洪水調節には、雨量や支川からの流入を考慮した精度の高い流入量予測が不可欠で

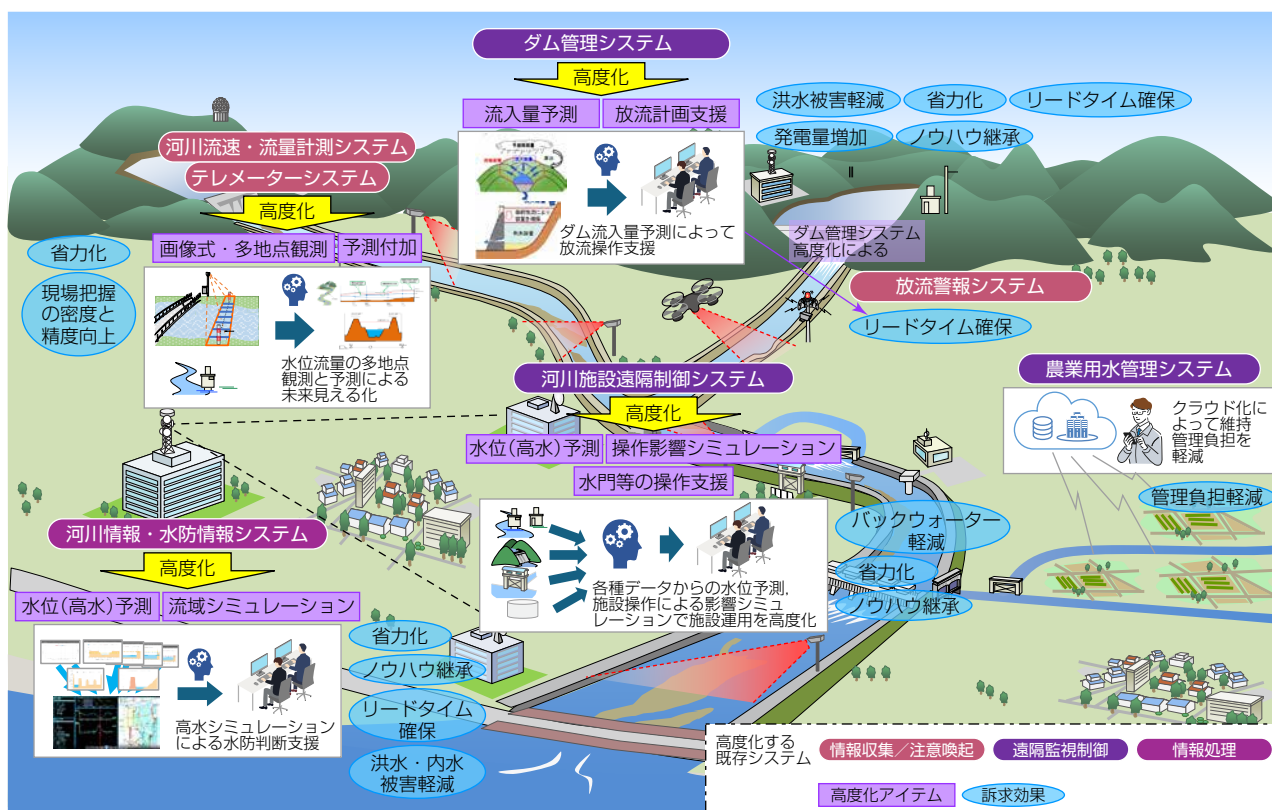


図1-流域全体の運用高度化構想

あるが、流域固有の特性やダム管理者として熟練されたノウハウが必要であり、災害時の状況判断の難しさや管理者の人手不足等の問題が深刻化している。一方、防災・減災分野では、IoT(Internet of Things)・AI技術の活用による高度化が急速に進展しており、AI技術を活用した予測機能や運用支援機能の構築によってダム運営が高度化されることへの期待が高まっている(図1)。

そこで当社は、ダム管理システムの高度化を目的として、AI技術を活用してダムへの流入量を高精度で予測し、放流計画支援や洪水被害軽減、省力化、リードタイム確保を実現する“ダムでのAI流入量予測システム”の開発に取り組んでいる。このシステムは、雨量データ、河川水位データ等の複合的な情報を基に、機械学習アルゴリズムによってダム流入量を予測し、最適な放流操作の判断を支援するものである。

本稿では、開発したAI流入量予測システムの概要について述べる。

2. ダム管理者による洪水調節操作の現状と課題

近年、線状降水帯や台風による豪雨が頻発し、それに伴う河川災害が頻繁に発生している。洪水時に河川の氾濫等を防ぐためには、河川のピーク流量を低下させることが重要である。豪雨が予想される場合には、ダムに貯水する(ダムからの放流量をダムへの流入量よりも小さくする)ことによって、下流域の流量を低減させることが必要である。当然、ダムの貯水量には限りがあるため、将来のダムへの流入量を予測しながらダムの放流計画を策定することが重要である。ダムの放流操作を支援する技術として、ダム集水域の雨量を入力し、物理的・数理的なモデルに基づいて将来のダム流入量を推定するダム流入量予測技術がある⁽¹⁾。しかしながら、現在のダム管理では、次に述べる課題が顕在化している。

2.1 流入量予測での専門性依存の課題

ダムの効果的な洪水調節には、雨量や支川からの流入を考慮した精度の高い流入量予測が不可欠である。しかしながら、高精度な流入量予測の実現には、流域固有の特性を踏まえた予測モデルの調整や、気象・水文条件を総合的に判断する熟練されたノウハウが必要になる。特に、災害時の急激な気象変化や複雑な流域特性を考慮した状況判断は高度な専門性を要するため、ベテラン管理者への依存度が高い状況にある。一方、管理者の高齢化・人手不足が進行しており、災害時の迅速かつ適切な状況判断を支援するシステムの構築が急務になっている。

2.2 従来の流入量予測手法での課題

ダム流入量予測には、古くから貯留関数法などの流出モデル⁽²⁾⁽³⁾がよく用いられるが、モデルの構築には専門的な知識と人手による調整作業が必要であるため、ダム管理者は河川コンサルタント等に依頼してモデルの構築を行っていた。これには多くの時間とコストがかかるため、河川の専門家の知見を必要としない簡便な予測モデルが求められている。

先に述べた手法以外のダム流入量予測技術には、ニューラルネットワークなどを用いたデータドリブンな手法が存在する⁽¹⁾。これらは、流出モデルの問題であった河川の専門知識をあまり必要としないメリットがある一方、予測モデルの構築には多くのデータを必要とする課題がある。

このため、少ないデータで自動構築可能で、運用フェーズでもモデルミスマッチを補償可能な予測システムの構築が求められている。

3. AI技術を活用したダム流入量予測システム

当社は、これらの課題を解決するため、AI技術を活用したダム流入量予測システムの開発に取り組んでいる。このシステムは、過去の実績データを活用した予測モデル構築とデータ同化技術を活用した運用時のリアルタイム補正を実現している。また、事前環境調査が不要であるため、従来のモデル構築手法と比較して、システム導入コストを大幅に削減可能とした。

3.1 AI技術を活用したダム流入量予測システムの概要

図2にダム流入量予測システムの基本構成図を示す。このシステムは、雨量データを流入量予測モデルに入力し、ダムへの予測流入量を出力するものである。

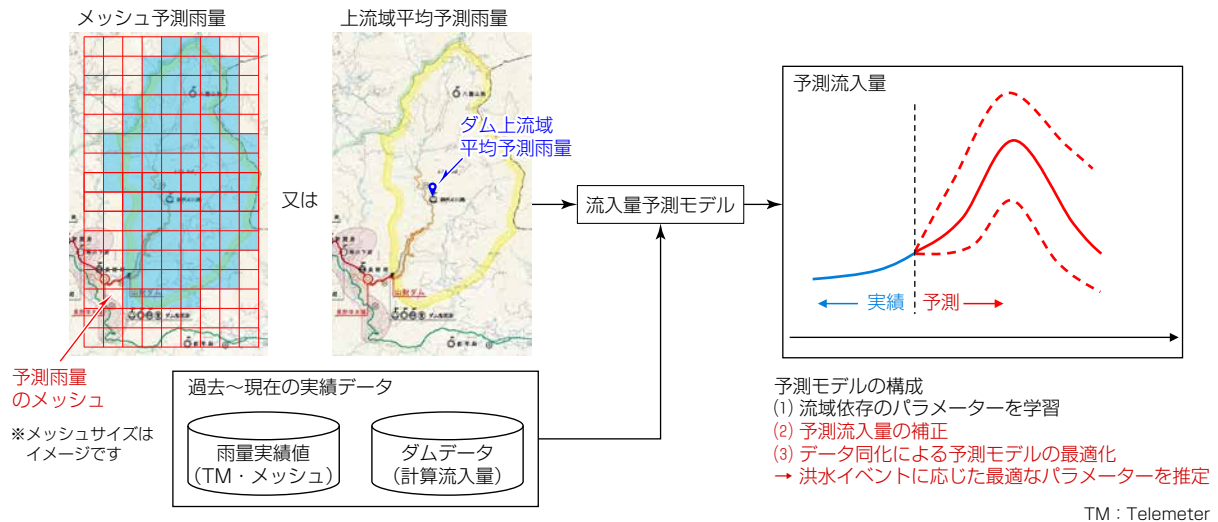


図2-ダム流入量予測システムの構成図

ダム集水域に降った雨は土壌への浸透や河川を流下し、一定時間の遅延を伴ってダム貯水池に流入する。この降雨流出過程を数値的に再現するため、このシステムでは有効雨量の算出が不要な流出モデルを採用⁽¹⁾している。

従来多くのダムで利用されている貯留関数法⁽²⁾⁽³⁾は、有効雨量の算出という前処理が必要であり、直接流出成分と基底流出成分の分離作業など専門的で自動化が困難な作業を要する。一方、このシステムで採用した流出モデルは、これらの前処理作業が不要であるため、モデルの構築及び運用が比較的容易である。

さらに、このシステムでは機械学習アルゴリズムを活用し、過去の実績データからモデルパラメーターを自動最適化することで、専門的な調整作業を不要とした高精度な予測を実現した。運用時にはデータ同化技術によって、リアルタイムの観測データでモデルを継続的に補正し、長期間にわたって高精度を維持している。

3.2 流入量予測モデルの構築

この節では、過去の実績データを用いた、流入量予測モデル⁽¹⁾の構築方法及び構築結果について述べる。

図3に流入量予測モデルの構築手順を示す。モデル構築は、①出水イベントの抽出、②各出水イベントに対するパラメーター最適化、③予測モデルのパラメーター算出の3ステップから成る。

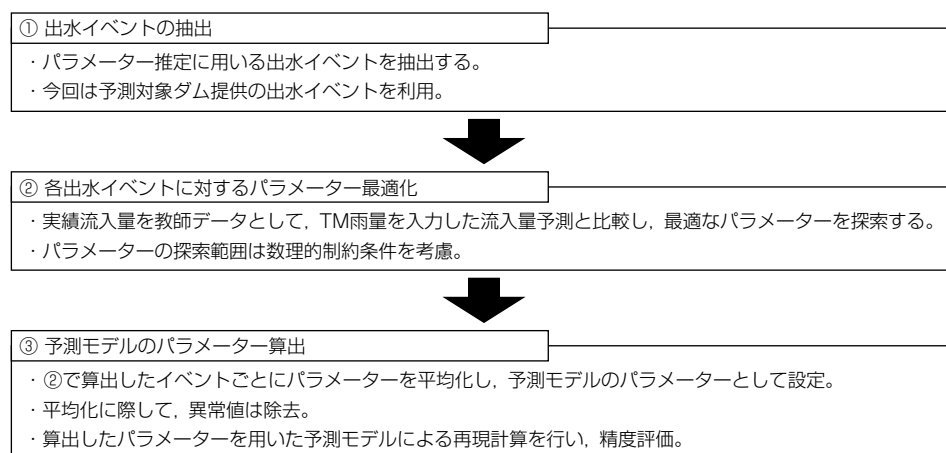


図3-流入量予測モデルの構築手順

3.2.1 ①出水イベントの抽出

予測対象ダム集水域での洪水調節を実施した出水イベントを対象に、出水イベントごとにピーク流量、ピーク比流量（流量を流域面積で除算し正規化した値）、及び流出率（対象期間の全流入量を全流域平均雨量で割った値）を抽出する。

3.2.2 ②各出水イベントに対するパラメーター最適化

過去のダム流入量観測値を真値とし、雨量計観測値を入力とする流入量予測モデルの予測値と比較することによって、パラメーター同定を行う。抽出した出水イベントごとに最適化計算を実施し、各出水イベントの最適パラメーターを算出する。

3.2.3 ③予測モデルのパラメーター算出

実際の予測では流入量の真値が入手できないため、事前に予測モデルのパラメーターを一意に決定する必要がある。そこで、3.2.2項で各出水イベントに対して算出したパラメーターを平均化し、予測モデルのパラメーターを決定する。その際、パラメーター最適化時に再現性が低かったイベントのパラメーターは平均化処理から除外する。

3.3 データ同化技術

このシステムでは、予測精度の向上と長期間の安定した運用を実現するため、データ同化技術を採用している⁽¹⁾。データ同化とは、観測データと数値モデルの予測値を統計的に融合することで、モデルの状態やパラメーターをリアルタイムで最適化する技術である。従来の流出モデルでは、一度設定したパラメーターは固定されており、気象条件の変化や流域特性の経年変化に対応できないという課題があった。特に、異常気象や想定外の降雨パターンが発生した場合、モデル予測と実際の流入量との間に大きな乖離(かいり)が生じることがある。

このシステムのデータ同化では、ダムの実績流入量データと予測モデルの出力値を継続的に比較し、両者の差異を統計的手法によって解析する。この解析結果を基に、モデルパラメーターを自動的に補正することで、予測精度の劣化を防いで、常に最適な予測性能を維持している。

このデータ同化技術によって、このシステムは初期構築時の限られたデータから作成したモデルであっても、運用開始後に蓄積される実績データを活用して予測性能を向上させ続けることを可能とした。これによって、長期間にわたって高精度な予測を維持し、ダム管理の効率化と安全性向上に貢献している。

4. 流入量予測モデルによる予測精度フィールド検証

この章では、3.2節で構築した流入量予測モデルを用いて、実ダムでの予測精度の検証を行った。検証に当たっては、3.3節で述べた“データ同化を用いた予測”と、比較対象として“データ同化なしの予測”(雨量データだけを入力)の2パターンで検証を行い、その有効性を評価した。

2018年9月30日の出水イベント(図4、図5、図6、図7、図8)での検証では、青線(流入量)が流入量観測値、赤線(計算流入量_データ同化)がデータ同化技術を適用した予測結果、緑点線(計算流入量)がデータ同化技術適用なしの予測結果である。また、赤縦点線は予測開始時刻(データ同化終了時刻)を示す。図4は2018年9月30日4時に予測した結果

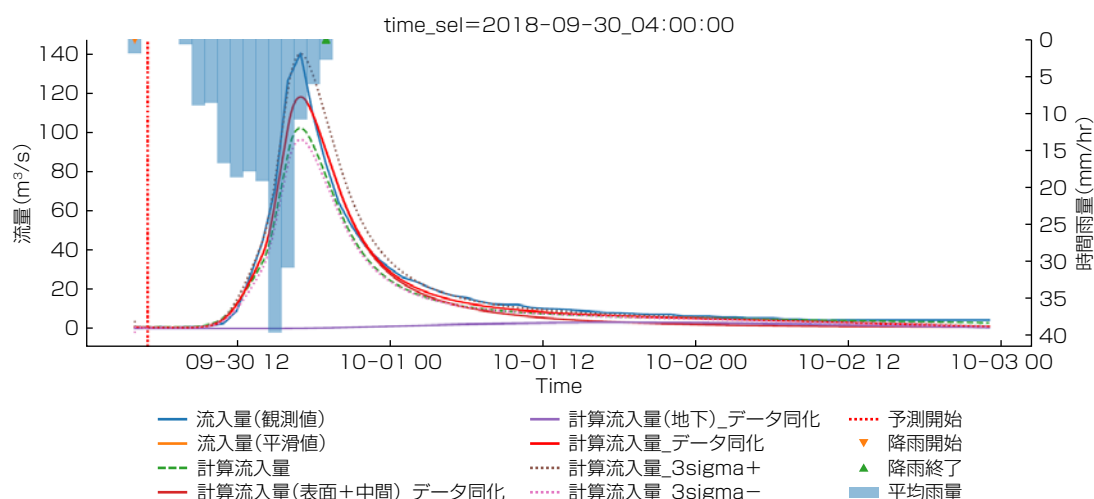


図4-フィールド検証(2018年9月30日午前4時00分, $t_{\text{offset}} = -12\text{hr}$)

(ピーク流量になる12時間前)である。図5以降は、図4の時刻から3時間経過ごとに予測した結果を示しており、予測開始時刻から時刻が進む(観測データが蓄積される)につれて、予測結果の精度が向上する(流入量観測値に近づく)ことを確認した。

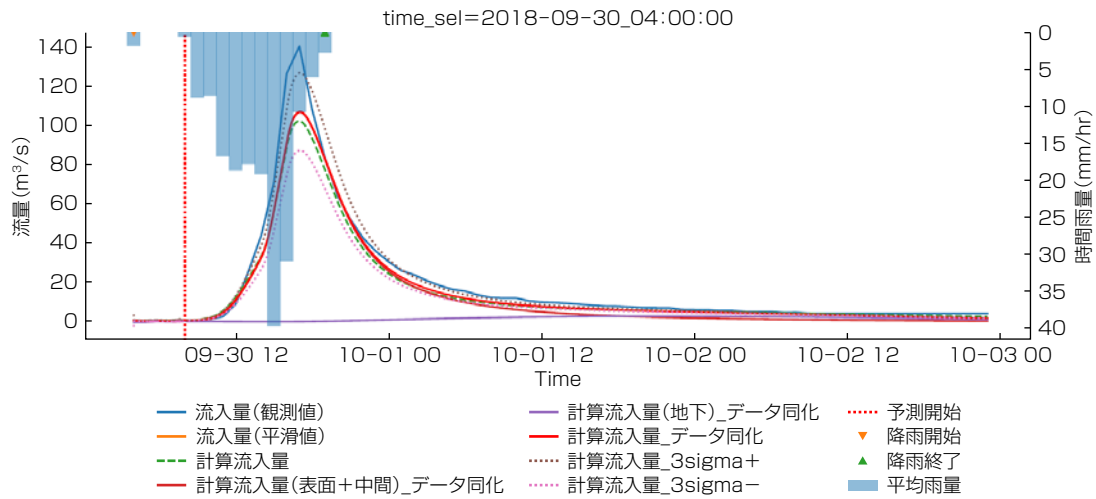


図5-フィールド検証(2018年9月30日午前4時00分, $t_{\text{offset}} = -9 \text{ hr}$)

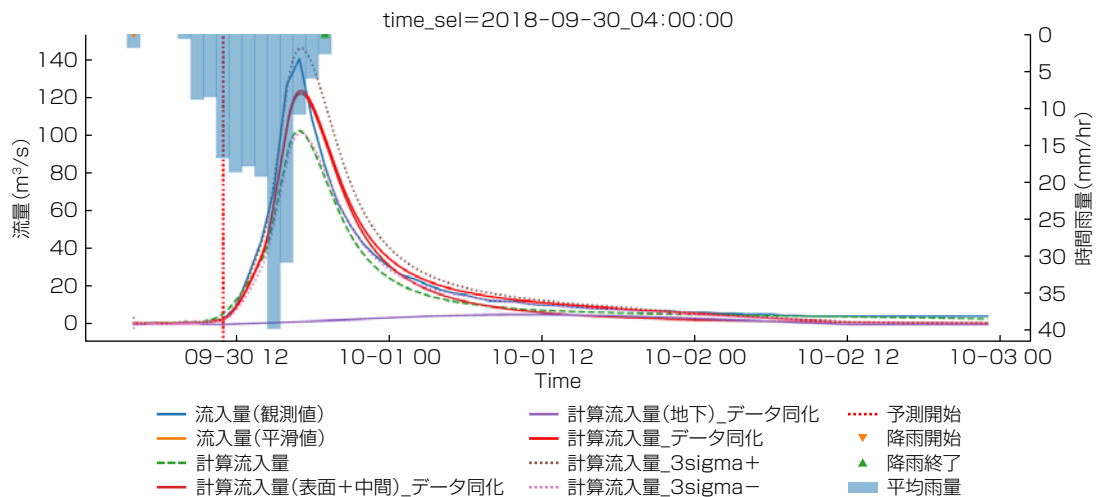


図6-フィールド検証(2018年9月30日午前4時00分, $t_{\text{offset}} = -6 \text{ hr}$)

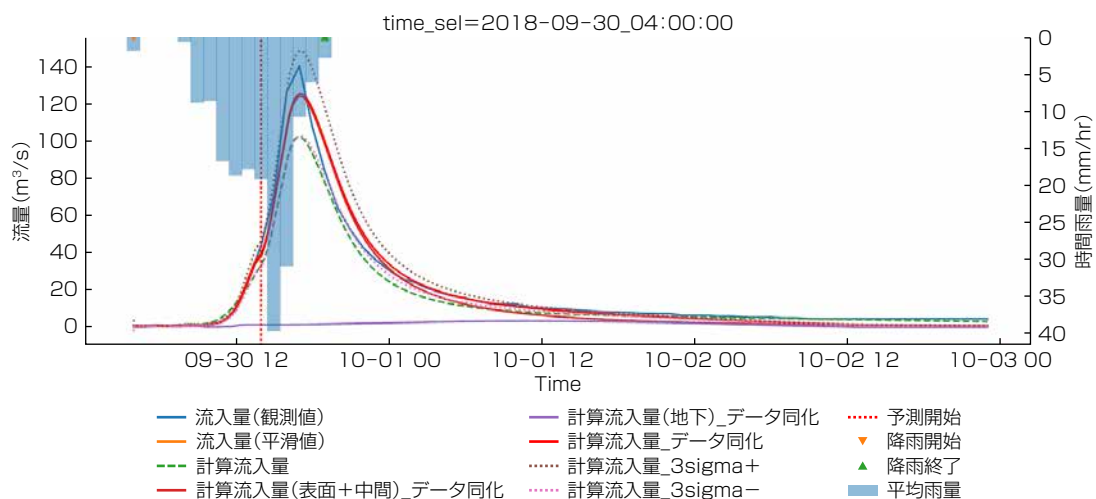


図7-フィールド検証(2018年9月30日午前4時00分, $t_{\text{offset}} = -3 \text{ hr}$)

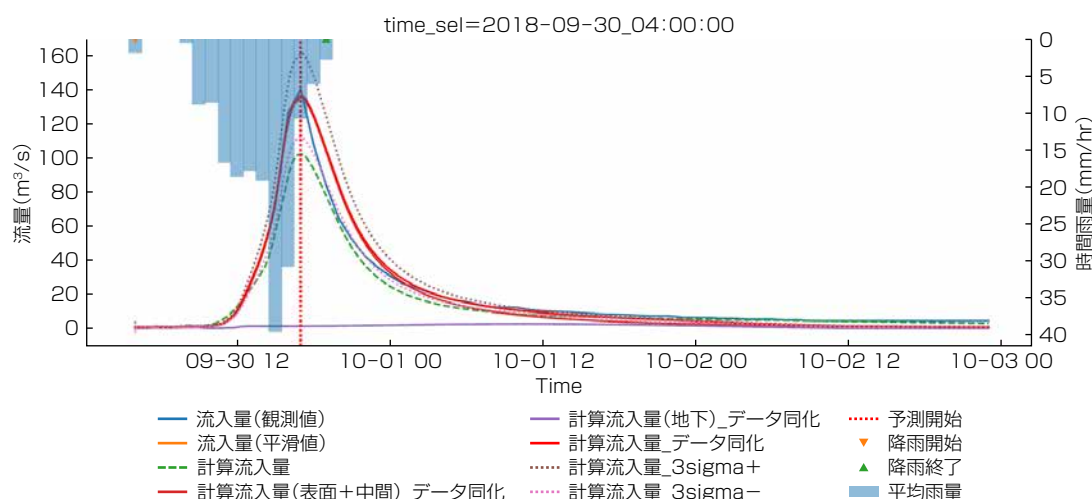


図8-フィールド検証(2018年9月30日午前4時00分, $t_{\text{offset}}=0$ hr)

これらの結果から、このシステムに実装したデータ同化技術が良好に機能し、降雨に伴う複雑な水文現象に対しても、リアルタイムに予測を補正し、おおむね高精度な予測を実現できることが示された。特にデータ同化技術の活用は、熟練者の経験に頼らずに予測精度を維持・向上させる有効な手段である。これによって、ダム管理者が客観的なデータに基づいて迅速かつ的確な放流判断を行えるよう支援し、流域全体の防災・減災に寄与していく。

5. む す び

近年の豪雨激甚化と管理者不足に対して、熟練者の経験に依存せず高精度な予測を行うダム流入量予測システムの開発を進めている。このシステムは、データから水文現象を学習する予測モデルとデータ同化技術を融合し、複雑な前処理を不要としつつ、少ないデータでの構築を可能とした。また、実ダム検証の結果、データ同化によるリアルタイム補正が機能し、観測データに追従することで予測精度の向上に寄与できることを確認した。

このシステムは、客観的データに基づく迅速な放流判断を支援し、人的リスクの低減に寄与する。今後はアルゴリズムの改善と他機場への展開を進めて、このシステムをダム運用の高度化を支えるソリューションとして広く提供することで、河川管理DXを推進し、流域全体の防災・減災に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 赤間 慶, ほか: 2 段タンクモデルとデータ同化を用いたダム流入量予測技術, 三菱電機情報技術総合研究所研究報告, SVRR240814 (2025)
- (2) 谷口陽子, ほか: 長期水循環に基づく流域の湿潤状態を考慮した洪水流出解析の研究, 土木学会論文集B1(水工学), 72, No.4, I_163~I_168, DOI: 10.2208/jscejhe.72.I_163. (2016)
- (3) 財北海道河川防災研究センター・研究所: 実践流出解析ゼミ 講義テキスト編 (2006)
<https://www.ric.or.jp/gyoumu/data/pdf/text.pdf>
- (4) 若手技術者水文学研究会: Pythonによる現場のための水文学, (株)リブテック (2022)
https://www.rivtec.co.jp/sys/wp-content/themes/rivtec/images/technical-report/2207_python.pdf

カメラ活用による メーター読み取り省人化DX

檜垣宏策*
Kousaku Higaki
山足光義*
Mitsuyoshi Yamatari
西濱 令*
Rei Nishihama

中尾亮理*
Takamasa Nakao
和田知也*
Tomoya Wada

*三菱電機デジタルイノベーション(株)

Camera-Based DX for Labor-Saving Meter Reading

要 旨

製造DX(Digital Transformation)の起点になるのは、設備の安定稼働・品質保証に直結する計測データを正確に継続収集できる環境を作ることである。ところが旧設備では、メーター値が表示されていても自動抽出が難しく、追加計測器や設備更新はコスト面で障壁になりやすい。“kizkia-Meter”は、アナログ／7セグメント表示器等をカメラで撮影し、エッジパソコン上のAIと独自アルゴリズムによってリアルタイムでデジタル化する。散在するメーターをダッシュボードで一画面に集約し、複数メーターのリアルタイム確認や画像付き履歴のエクスポートを可能にすることで、点検・監査のエビデンス確保にも寄与する。さらにPLC(設備制御用コントローラー)連携やHTTP(Hyper Text Transfer Protocol) API(Application Programming Interface)／CSV(Comma Separated Values)出力によって既存システムへの取り込みを支援し、巡回・張り付き作業の削減、異常の早期把握、予知保全・生産性向上に貢献する。これによって、旧設備でも手軽に計測データの継続収集と活用を実現し、製造DXの推進に貢献していく。

1. ま え が き

近年、製造現場では、設備の安定稼働・品質保証の高度化、人手不足への対応を背景に、データに基づく保全・改善活動が求められている。予知保全には、稼働実績や品質に関わる計測値を継続的に収集し、時系列で把握できることが前提になる。一方、製造DXでは、既存資産を生かしたデータ収集・利活用が鍵になるものの、老朽化・複雑化・ブラックボックス化した既存システムがデータ活用の阻害要因になり得ることは、経済産業省のDX関連資料でも課題として整理されている⁽¹⁾。

最新設備ではPLCや各種センサーからデジタルデータを収集できる一方、旧設備では計器表示を巡回して目視し、紙や表計算ソフトウェアへ記録・転記する運用が依然として多い。その結果、工数の増大や記録ミス、分析の遅れが生じる。読み取り頻度も1日1回などに限定されやすく、短時間で変動する値や一過性の異常を捉えにくい。さらに同時刻でのデータの突き合わせが難しく、設備状態の相関把握や原因切り分けにも時間を要するため、データ活用の高度化に踏み出しにくい。また、製造業のデータ活用ではセキュリティーや情報管理が導入制約になることがある。計測データは機密情報になり得る上、画像データの外部送信が厳格に制限される場合もある。このため、データを現場内(ローカル)で処理・保管し、必要範囲に限定して連携するアプローチが現実的である。

そこで、既存計器を更新せずにカメラで読み取りを行い、現場近傍のエッジでデジタル化する方式が、データ化の課題に対する解決策として注目されている。ローカルでデジタル化することで外部への流出リスクを抑えつつ運用できて、画像を併せて保存すれば監査・品質記録のエビデンスとしても活用しやすい。取得値をPLCや既存システムへ連携すれば、他センサー情報と統合した解析にも展開できる(図1)。

ただし現場では、照明変動や表示状態の変化に加えて、設備振動・カメラの画角ずれが精度低下の要因になり、誤読み取りや読み取り不能を招き得る。したがって、安定運用には様々な実環境での誤読み取りの抑制技術が不可欠である。

本稿では、kizkia-Meterの技術／製品概要に加えて、読み取りを安定化する補正処理の考え方を述べる。

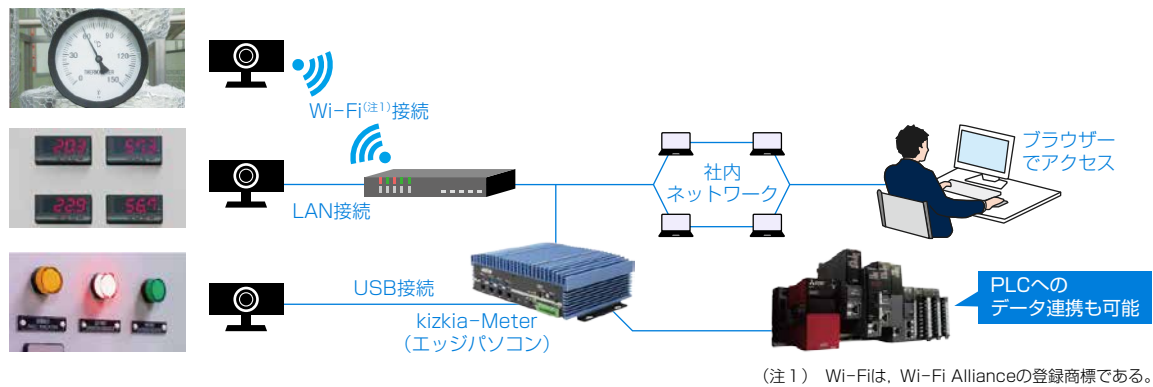


図1 - kizkia-Meter構成のイメージ

2. kizkia-Meter

kizkia-Meterは、工場での各種メーターの読み取り作業(目視・記録・転記)の省力化と、DXの導入が困難な旧設備の計測データのデジタル化を推進する製品である。カメラとAIを搭載したエッジパソコンを設置し、人手による目視確認に相当する読み取りを代替する。画像の取り込みから数値化・保存までを現場近傍で完結できるため、クラウド送信を前提としない運用が可能になっている⁽²⁾。人手で行っていた場合は1日1回など読み取り回数に制限が生じやすいが、自動読み取りによって、例えば1時間に1回といった高頻度化が可能になり、従来把握できなかったメーター値の細かな動きも確認できる。また、複数メーターをリアルタイムで確認できるため、設備状態の相関把握や原因切り分けの迅速化にもつながる。センサーデバイスのデジタル化が進む一方、旧設備では人手による目視確認が残りやすい。カメラによる目視作業の代替はその隙間をカバーする有効な手段として期待される。

2.1 kizkia-Meterの特長

この節ではkizkia-Meterが備える特長を述べる。なお、実用的な精度を実現する技術については3章で述べる。

この製品の大きな特長の一つ目はダッシュボード機能である。kizkia-Meterはエッジパソコン上のWebアプリケーションとして機能を提供し、ブラウザ搭載のノートパソコン等からエッジパソコンへアクセスして利用できる。現場での設定・監視・履歴確認を同一の画面体系で行えるため、運用手順を統一しやすい。

ダッシュボードでは、離れた場所に散在するメーターを一画面に同時表示し(図2)、物理的に移動せずに同時刻の値を確認できる。表示対象は目的別(設備別・ライン別・点検別等)にあらかじめグルーピングできて、グループ選択によって登録メーターを一括表示できるため、例えば始業点検で設備の状態を短時間で確認する作業を省力化できる。読み取り値

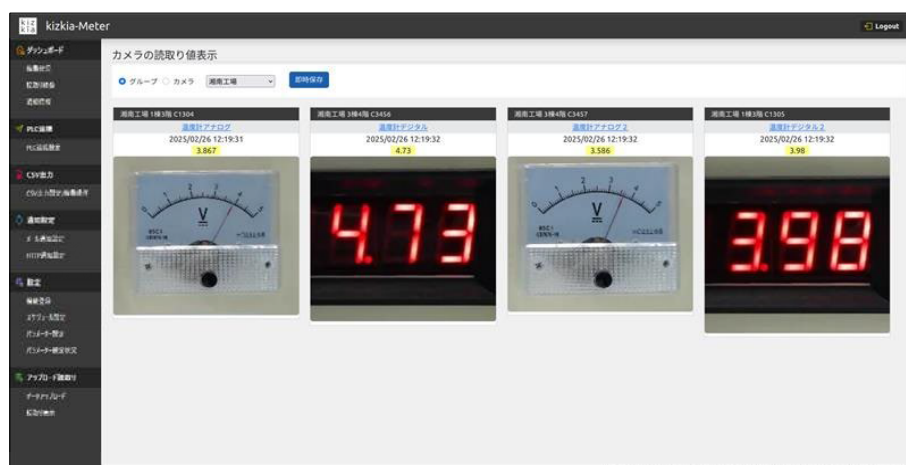


図2 - kizkia-Meterのダッシュボード画面

は画像と共に一定期間保存され、エクスポートも可能なため、値の正しさを画像で確認できて、監査・品質記録に向けたエビデンスとしても活用できる。それに加えて、複数メーターを同一時刻で俯瞰(ふかん)できるため、関連する指標の突き合わせや異常兆候の見落とし抑止にも有効である。

二つ目の特長はPLC連携である。新しい機器やセンサーの情報はデジタルデータとして取り込みが可能で、通常はPLCを介して収集される。kizkia-MeterとPLCをLANで接続し、カメラで読み取りした値を最短1秒間隔でPLCへ送信することで、他センサー情報と合わせたデータ集約・解析を実現することが可能である。PLC経由で上位の制御・監視ロジックへデータを容易に取り込みやすい点も利点である。PLCへ出力するメーター値は、グループ機能を活用しており、PLC送信用のグループへ送信したいメーターを登録するだけで、複数のカメラのメーター値を送信可能である。

三つ目の特長はAPI機能である。HTTP通信ベースのAPIを標準搭載し、読み取り値や画像を外部システムからオンデマンドで取得できる。それに加えてCSV出力等も備えて、スケジュール機能と連動して、日次でNAS(Network Access Server)やファイルサーバーへ定期出力することも可能である。これらによって、既存の監視・帳票・解析基盤と連携した幅広い活用を実現する。

これらのkizkia-Meterの特長によって、既存設備を大きく改修せず、容易に点検・記録からデータ連携までを段階的に自動化及び拡張を実現する。

3. kizkia-Meterの現場適用に向けた技術的な取組み

現場環境でのメーター読み取りでは、照明変動・反射・表示切り替わりに加えて、設備振動や設置誤差など複合的な要因が精度低下を招く。さらに、kizkia-Meterは導入先の要件に応じて使用するカメラを自由に選択できる設計としているため、特定カメラの機能や画質特性に依存した対策ではなく、カメラに依存しない誤読み取り抑制が必要になる。

この章では、こうした現場特有の変動要因に対する誤読み取り抑制技術として、照明変動・表示切り替わり、振動・カメラ画角ずれの補正を目的として実装した技術的な取組みについて述べる。

3.1 照明変動・表示切り替わりに対する誤読み取り抑制

アナログメーター及び7セグメントメーターの読み取りでは、照明変動・反射・表示切り替わり時の一時欠落によって、ノイズや誤認識が生じやすいという課題がある。そこでこのシステムでは、環境変動に強い読み取りを実現するため、メーター種別の特性に合わせて誤読み取り抑制を設計し、読み取り結果の安定化を図っている。

アナログメーターの読み取りでは、目盛り位置と針色を事前に設定し、針位置と目盛りの対応から指示値を算出する。針色は設定画面で指定した座標から取得し、HSV(Hue, Saturation, Value)色空間に変換して扱う。HSVは色相・彩度・明度を分離できるため、照明変動や反射の影響を制御しやすい。さらにこのシステムでは、H/S/V個別に許容範囲を設定できるようにして、照明変動や反射の影響を抑えて針に近い色領域を適切に抽出できるようにしている。図3(a)では、針色の抽出イメージとしてHSV各成分の分布(ヒストグラム)と、抽出対象になる色領域の関係を併記している。これによって、反射や背景色、目盛り線などの不要成分を抑えつつ針だけを安定して抽出できて、針位置検出のばらつきを低減し、安定した読み取りを実現している。

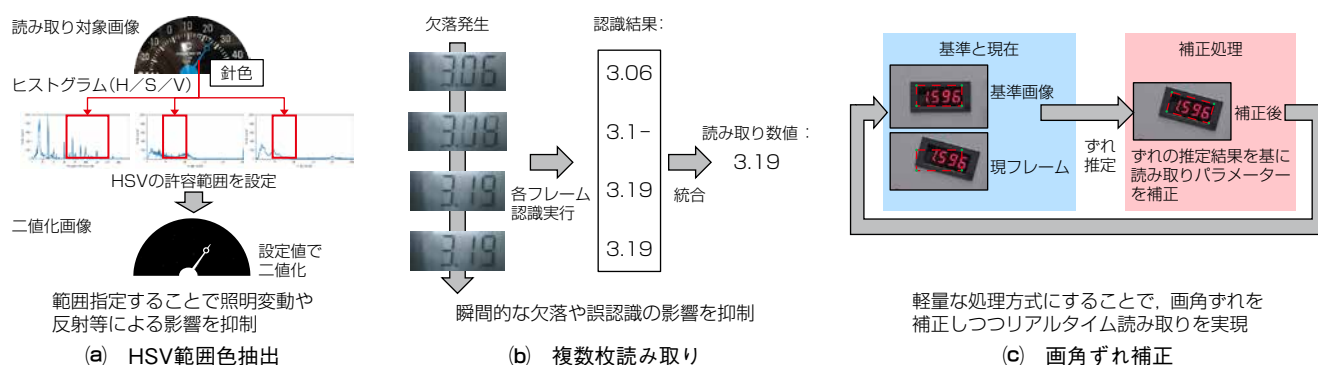


図3-誤読み取り抑制方式

一方、7セグメントメーターは表示切り替わりの瞬間に数字表示の全消失や桁欠落が起きるため、単一フレームでは誤読み取りが生じやすい。このシステムでは、図3(b)のように複数フレームを用いた桁単位の認識と結果統合によって、瞬間的な欠落や誤認識の影響を低減する。具体的には複数フレームの認識結果を統合し、最頻値などの代表値を採用することで外れ値を抑制する。これによって表示が不安定な状況でも読み取りを安定化し、高精度なメーター読み取りを可能としている。

3.2 振動・カメラ画角ずれに対する誤読み取り抑制

固定設置カメラであっても、設置後のわずかなカメラずれや設備の微振動、ズーム／焦点の再調整等によって、画像上のメーター位置は徐々に変動し得る。この変動によって、読み取りに用いる領域(例：7セグメント表示部)と実際の表示位置の対応が崩れて、誤読み取りや読み取りエラーの要因になる。

そこでkizkia-Meterでは、図3(c)のように基準になる背景画像と現フレームの対応からホモグラフィー行列(平面対応を表す射影変換行列)を推定し、その行列で読み取りパラメーターを補正することで、画角ずれの影響を吸収しつつ読み取りの安定性を確保する。運用上は、初期設定時に基準画像を保持し、基準画像上で読み取り対象領域を代表点(四隅など)として登録する。読み取り時には、基準画像と現フレームの特徴対応に基づいてホモグラフィー行列Hを推定し、見かけの移動・回転・スケール変化が許容範囲内かを評価する。変動が軽微な場合は補正を適用して読み取りを継続し、変動が大きい場合は誤補正のリスクが高いため補正せず、“画角ずれによる読み取りエラー”として異常側に倒して通知や読み取り抑制の判断に利用できるようにしている。この方式では、処理が重くなりやすい手法の適用は避けて、必要な情報に絞って補正・判定を行うことで計算コストを抑制する。これによってリアルタイム読み取りを維持しつつ、ソフトウェアだけで補正を完結させて、カメラに依存しない補正を実現する。また“大きなずれは補正しない”という設計によって、運用面でもカメラ画角の変化として原因切り分けをしやすい。なお、単色背景や強い反射、モーションブレ等では推定が不安定になり得るため、設置環境・照明・撮影条件の確認も重要になる。

4. む す び

製造DXの起点になる計測データの正確な継続収集を旧設備でも実現する手段として、kizkia-Meterを述べた。目視読み取り・転記をカメラ×エッジAIで現場内リアルタイムに数値化し、ダッシュボード集約や画像付き履歴の保存／エクスポートによって、点検省力化に加えて点検・監査のエビデンス確保や原因切り分けの迅速化に寄与することを示した。さらに、PLC連携(最短1秒)やHTTP API／CSV出力を介して既存の稼働・品質データと統合し、異常の早期把握から傾向監視・統計解析、予知保全・工程改善へ段階的に取り組める点を述べた。

また、現場適用の鍵となる誤読み取り抑制として、照明変動・反射・表示切り替わり・振動や画角ずれなどに対する安定化の考え方を整理し、自動読み取り+PLC連携による同時刻収集によって、張り付き作業の削減、転記ミス抑止、突き合わせ容易化に効果的であることを示した。

今後は対応メーター種別を拡充しつつ、MES(Manufacturing Execution System)連携や帳票システム連携を強化して点検記録・稼働実績・品質データと一体で扱える環境を整備する。それに加えて、蓄積データに対する生成AI活用を含む分析機能を検討し、予兆検知や要因整理、現場記録との突き合わせによる原因提示を通じて、予知保全・生産性向上へつなげていく。これらの取組みによって、人手不足が深刻化する製造現場でも、旧設備を含む既存資産を有効利用しながらデータ活用を定着させて、安定稼働・品質保証の高度化を通じて製造DXの推進に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：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～(2018)
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/dx/20180907_03.pdf
- (2) 工場向け巡回点検ソリューション“kizkia-Meter”，三菱電機技報，98，No.1，3-2-01(2024)

保守業務省力化に向けた 受配電設備の音診断技術

*Acoustic - Based Diagnostic Technology for Labor - Saving
Maintenance of Power Distribution Equipment*

甲斐孝幸*
Takayuki Kai
江戸貴広*
Takahiro Edo
小林武尊*
Takeru Kobayashi

山口信一†
Shinichi Yamaguchi
ウィシャーン ゴードン‡
Gordon Wichern
ルルー ジョナトン‡
Jonathan Le Roux

*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所

†同研究所(博士(工学))

‡Mitsubishi Electric Research Laboratories (Ph.D.)

要 旨

工場や施設の稼働に不可欠な電力設備には安全性、信頼性が求められるが、近年の保守人材の減少によって、持続的な運用が難しくなることが懸念されており、保守業務を省力化するスマート保安の実現が急務である。特に、電力設備の安全性を確保するために必要な遮断器では、機器の信頼性を保ちつつ、点検時間を短縮可能な診断技術が求められている。三菱電機は、遮断器の開閉時の動作音を解析し、点検時間の短縮や、異常兆候の早期検出を期待できる遮断器の動作音診断技術を提案した。

1. ま え が き

近年、保安人材の不足といった課題を背景に、経済産業省は、IoT(Internet of Things)やAI等の新技術を活用して設備の状態を的確に把握し、安全性と効率性の両立を図る“スマート保安”を推進している⁽¹⁾。三菱電機でも受配電設備の常時遠隔監視を行い、異常兆候検知や余寿命診断を実現するスマート保安の取組みを進めており⁽²⁾、受配電設備向けスマート保安サービスの提供を2025年4月から開始している。

受電設備で、真空遮断器は電力供給の信頼性を支える重要な機器である(図1)。真空遮断器が故障した場合、停電や事故の波及によって工場や施設の運転停止を引き起こして、大きな損害をもたらすおそれがある。このため、従来、点検やメンテナンスを通じて、その健全性を維持してきた。真空遮断器の故障要因の中でも、操作装置に起因するものは一定の割合を占めることが知られており、操作装置の点検やメンテナンスには相応の労力を要する。そのため、真空遮断器の操作装置に対しても、スマート保安化が求められている。操作装置内部の操作機構は複数の機構部品が連動して動作する複雑な構造であるため、内部の動作状態を直接観測することは容易ではない。従来、このような状態確認には、接点信号、内部のアクチュエーターの駆動電流、機構部品の変位など複数のセンサーを用いた確認が行われてきた。しかし、これらをそのままスマート保安での状態監視に適用しようとすると、センサーの設置コストや、真空遮断器が搭載されている盤内スペースの制約といった課題があり、既設設備への適用は困難であった。

本稿では、これらの課題解決のため、真空遮断器の動作時に発生する音響信号だけを用いて、真空遮断器の動作を担う操作装置の特性を診断する技術について述べる。音響信号は、操作装置内部の機構部品の動作を非接触で一括して取得可能であるため、既設設備にも適用しやすいという利点を持つ。動作時に取得した音響信号から、操作装置内部の機構部品の動作の代表的なイベントを検出し、その検出時間の変化に着目することで、操作装置の状態変化を評価できる。



図1-受配電設備及び真空遮断器

2. 真空遮断器用操作装置

真空遮断器の操作装置内の機構は、図2に示すように、ばね操作機構及び電磁操作機構の2種類がある。電磁操作機構は、電磁アクチュエーターによって真空接点を直接開閉するシンプルな構造であるため、駆動電流を用いた診断技術を既に開発している⁽³⁾。一方、ばね操作機構は、投入及び開極動作の過程で、電磁石、ラッチ機構、ばね、リンク機構といった複数の機構部品が順次動作する方式である。ばね操作機構は電磁操作機構に比べて小容量の電源で動作可能であることから、真空遮断器で広く採用されている。

ばね操作機構は経年劣化に伴う機構部品の潤滑状態の変化などによって、各機構部品の動作タイミングが変化すると考えられる。特に、機構動作のトリガーとなるラッチ解除に関与する機構の損耗や、潤滑剤の劣化、異物の混入などは、動作遅延や動作不能といった重大なトラブルにつながる可能性がある。しかし、こうしたばね操作機構での各部品の動作状態を詳細に把握するためには、部品ごとにセンサーを設置する必要がある、実用上の課題になっていた。これらの課題を踏まえて、ばね操作機構の複雑な動作を、少数センサーで把握可能な音響信号に着目した。

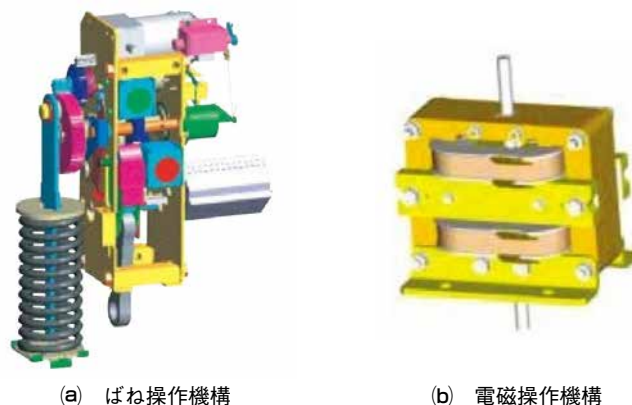


図2-真空遮断器の操作機構の種類

3. 音響信号による動作イベント検出方法

この章では、音響信号による動作イベント検出方法について述べる。

3.1 動作イベント検出の基本原則

ばね操作機構では、機構部品が順次動作する過程で、部品同士の接触や衝突が複数回発生する。この際に生じる音響信号の変化を検出することで、機構動作の状態を知ることができると考えた。音響センサーは非接触で設置可能であり、設置自由度が高いため、既設設備にも容易に適用可能である点に着目した。

遮断器動作時に取得される音響信号は、各機構部品間で発生する複数の接触音が短時間に連続して生じる非定常信号である。このような信号では、短時間のうちに含まれる周波数成分が大きく変化する。そこで、この手法では、音響信号に短時間フーリエ変換(STFT)を行い、スペクトルの時間変化が急峻(きゅうしゅん)な時刻を検出することで、機構内部での各動作イベントを抽出する手法を用いた。式(1)に示す特徴量 $SF(t)$ を用いて、各動作イベントの検出に用いる特徴量波形を生成する。

$$SF(t) = \sum_{f=0}^L K_f H(X_{t,f} - X_{t-1,f}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $X_{t,f}$ は時刻 t での周波数 f のスペクトルを表す。 L は周波数成分のデータ長である。 $H(x)$ は式(2)に示す関数であり、 K_f は重み付け用のテーブルである。

$$H(x) = \frac{x + |x|}{2} \dots\dots\dots (2)$$

この手法で用いる特徴量 $SF(t)$ は、短時間フーリエ変換の結果に基づいて、隣接する時間ステップ間でのスペクトル強度の時間変化を周波数方向に積算した量である。このため、機構部品同士の衝突などで、新しい周波数成分が発生した場合には、その発生タイミングが強調される。とりわけ、機構部品同士の衝突音は、短時間で音圧が立ち上がる特徴を持つことから、この特徴量を用いることで、各動作イベントを明確に抽出できる。 $H(x)$ はスペクトルの時間変化に対して、音の立ち上がりを強調する関数である。スペクトルの時間変化が正の場合はそのまま出力し、負(減衰)になる場合には、0を出力する。これによって、残響などの減衰成分の影響を低減することが可能になる。また、重み付け関数 K_f は狙いとする動作イベントを更に強く強調するためのテーブルであり、動作イベントごとに事前に設定している。特に動作イベントごとに特有の周波数成分を特定し、その周波数成分の変化が強調されるよう工夫している。

3.2 動作イベント検出の流れと例

図3に、ここまで述べた音響信号によるばね操作機構の動作イベント検出の一連の流れと、その結果例を示す。遮断器の動作によって発生した音響信号に対して、短時間フーリエ変換を適用した。式(1)に示した特徴量を算出した後、特徴量波形に対してピーク検出を行うことで動作イベントを抽出している。図3内に示した特徴量波形は、一つの動作イベントを検出するための特徴量波形の一例である。実際には動作イベントごとに対応する特徴量波形をそれぞれ生成し、それらに基づいて各動作イベントを検出している。

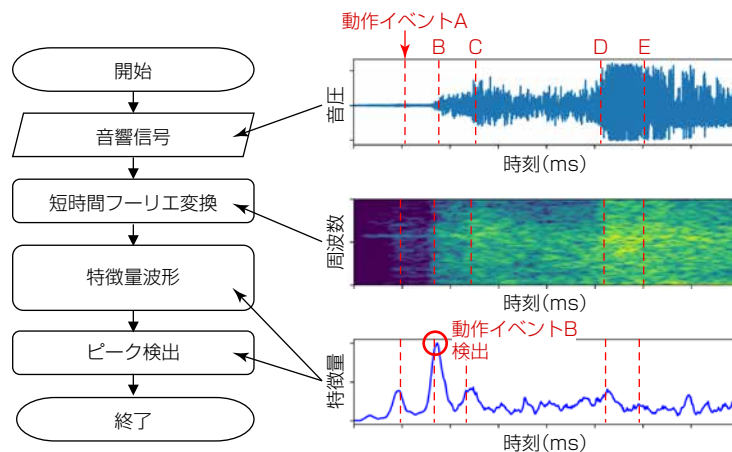


図3-動作イベント検出の流れと例

4. 評価結果

実際に、遮断器の投入動作時の動作イベントについて、音響信号に対して提案手法を適用して得られた検出結果と、各種センサーから取得した参照信号に基づく検出結果との比較を行った。参照信号は、駆動電流、操作機構の変位、主接点信号などから構成されて、しきい値判定又は変化率が最大点になる時間の検出アルゴリズムを作成し、動作イベントA～Eの発生時刻を決定した。ここで、参照信号に基づく検出結果にも僅かに誤差が含まれるが、各動作イベントの検出で社内での実績があり、それぞれに適したセンサーを選定しているため、参照信号を基準に音響信号の検出精度を評価した。試験は、ばね操作機構を搭載した三菱電機製真空遮断器を対象に多数回の開閉を行いながら、各センサーの信号を同時に計測した。

図4に示す散布図は、縦軸が音響信号からの検出時刻、横軸が参照信号からの検出時刻を示している。各プロットは操作機構内で生じる動作イベントA～Eに対応している。プロットが直線近傍に分布しており、音響信号からの検出結果は、参照信号とmsオーダーで一致していることが確認できた。

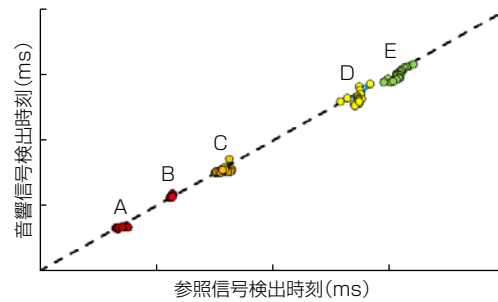


図4-動作音信号からの動作イベント検出結果と参照信号との比較

5. む す び

真空遮断器の操作装置が発する音響信号に着目し、内部機構の動作イベントを音響信号だけから検出する診断技術を述べた。提案手法を用いた解析によって、複数の動作イベントをmsオーダーの精度で抽出できることを確認した。提案手法は、非接触で設置可能な音響センサーだけで構成できて、既設設備にも適用しやすい。真空遮断器のスマート保安やCBM(Condition Based Maintenance)の実現に向けた、状態監視手段の一つとして有効である。

今後は、実フィールドでのノイズや設置条件による影響について検証を進めて、他機種・他製品への横展開も含めて活用範囲を拡大する。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：電気主任技術者制度について（2023）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/hoan_seido/pdf/014_01_00.pdf
- (2) 小鶴 進：受配電設備向けスマート保安実現への取組み，三菱電機技報，**98**，No.6，4-01～4-04（2024）
- (3) 矢野知孝，ほか：電磁操作方式真空遮断器の機構CBM機能の開発，電気学会論文誌B，**136**，No.2，192～197（2016）

実運用環境に対応した深層学習による電力機器部分放電診断技術

Deep Learning – Based Partial Discharge Diagnosis for Power Equipment toward Practical Application

松山幸太郎*
Kotaro Matsuyama
大竹泰智†
Yasutomo Otake
ソン ホンボ‡
Hongbo Sun

ラグナサンアーヴィンド‡
Arvind Raghunathan

*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所

†同研究所(博士(工学))

‡Mitsubishi Electric Research Laboratories (Ph.D.)

要 旨

電力機器で、絶縁劣化が進むと事故・停電につながるため、劣化初期段階で発生する部分放電を検出し発生要因を推定することは安定運用に向けて重要である。近年、機械学習を用いた部分放電診断の有効性が述べられているが、実運用では複数の放電源の混在やノイズ環境に起因する診断精度の低下が課題になっている。これらの課題に対して、深層学習による信号分離モデルであるConv-TasNetを部分放電信号へ適用した複数の放電源の分離手法と、転移学習の一手法である敵対的ドメイン適応を用いたノイズ環境下での診断手法を開発した。

1. ま え が き

高い電気ストレスに曝(さら)される電力機器では、長期的劣化によって絶縁性能が低下し、絶縁破壊に至るリスクがある。その予兆現象である部分放電を検出することは、保守運用に重要である。また、部分放電の発生頻度や強度分布から、部分放電の発生要因の推定が可能であり、近年では、機械学習を用いることで高精度な自動推定が可能になってきている。

この際、運用中の実機の異常データを十分に収集することは困難であるため、教師データに実験室環境で取得したデータを用いて学習モデルが構築される。しかし、実運用時の観測データには、複数の部分放電源から生じる信号や周辺機器からのノイズが混在する。その結果、実験室環境で取得したデータとの間に分布差が生じ、診断精度が低下することが課題となる。

本稿では、これらの課題に対応するため、深層学習手法を活用した診断手法を開発し、その検証結果について述べる。

2. 基本的な機械学習による部分放電診断手法

この章では基本的な機械学習による部分放電診断の構築手法として、学習データの取得、データ前処理、特徴量生成、及び機械学習モデルの構築について述べる。

2.1 学習データの取得

実機器の部分放電データを十分に収集することは困難なため、模擬欠陥を用いて、部分放電データを取得した。模擬欠陥の一覧を表1に示す。これらは電力機器での過去の事故事例⁽¹⁾等を参考に、発生し得る部分放電発生要因を整理し10種類を選定した。さらに、診断対象機器に適用の絶縁媒体5種との組合せを踏まえて、合計36種類の模擬欠陥を対象とし

表1-模擬欠陥の一覧

No.	電極名	実機での放電発生要因	モデル図	No.	電極名	実機での放電発生要因	モデル図
a	浮き電極	高電圧部付近のボルトのゆるみ		h	沿面垂直型	絶縁物表面への導電性異物の付着	
b	針-平板	導体表面への導電性異物の付着		i	自由異物	導電性異物の混入	
c	針-絶縁物	導体表面への導電性異物の付着		j	汚損沿面	絶縁物表面の汚損劣化	
f	沿面平行型 導体付着異物	絶縁物表面への導電性異物の付着		e, o	ボイド	成型時のボイド混入	
g	沿面平行型 浮遊異物	導体表面への導電性異物の付着		m	トリー	固体絶縁物のクラック	

た⁽²⁾。これらの模擬欠陥に交流高電圧を印加し、IEC 60270に基づく部分放電測定法によって、交流電圧1周期分の部分放電信号を取得した。

2.2 データ前処理及び特徴量生成

取得した部分放電信号に対して機械学習に適した入力データを生成するため、データ前処理及び特徴量生成を行った。データ処理の概要を図1に示す。まず、取得した信号にWavelet変換を適用し、Wavelet係数に対するしきい値処理によってノイズ成分を低減した。その後、交流電圧100周期分の部分放電信号を基に、交流電圧位相に対する放電の発生位置及び強度分布を表すPRPD(Phase Resolved Partial Discharge)パターンを作成した。

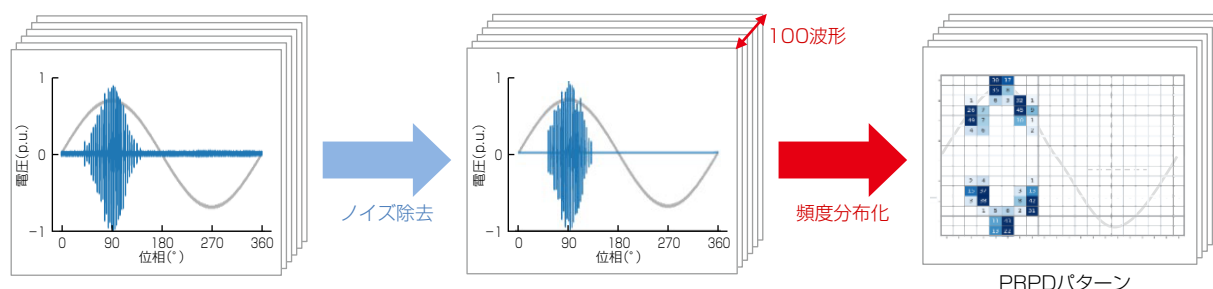


図1-データ前処理及び特徴量抽出

2.3 基本診断モデル

生成したPRPDパターンを入力データとして、部分放電発生要因を分類する機械学習モデルを構築した。その構成を図2に示す。分類器は画像認識分野で広く用いられている畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network: CNN)を用いた。CNNは、畳み込み層及びプーリング層によって特徴量抽出を行い、その後フラット化及び全結合層を経ることで、部分放電発生要因を推定する。

取得データを8:2の比率で教師データと評価データに分けて、教師データを基にモデルを学習後、評価用データを用いて分類性能の評価を行った。その結果、正答率100%と高い精度が得られて、モデルの有効性を確認した⁽²⁾。

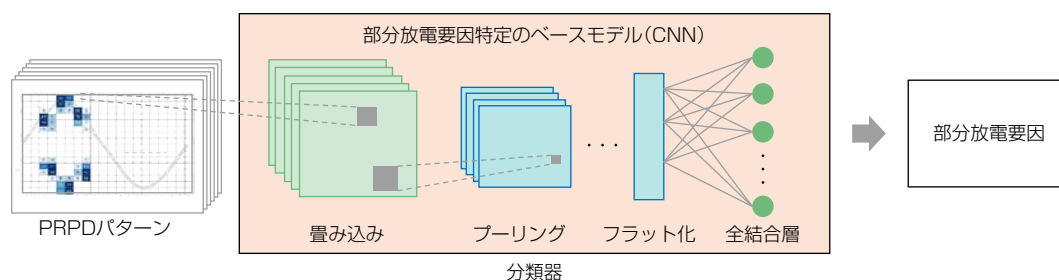


図2-CNNによる部分放電診断モデル

3. 実適用での課題を踏まえた診断モデル改良

実際の電力機器での部分放電診断では、実験室環境とは異なる様々な条件による課題がある。複数の放電源が同時に存在する場合の信号の重畳や、周辺機器からの電磁ノイズの混入によって、実験室環境で取得したデータとは異なるデータ分布になり、診断精度の低下が生じる。これらの課題への対策として、複数放電源が存在する場合の信号分離手法の適用、及びノイズ環境に対する適応性を高めるための転移学習手法を構築した。

3.1 複数部分放電源の信号分離

電力設備は、多くの異なる部品から構成されており、それぞれが異なる劣化過程をたどる。そのため、運用過程で複数の箇所から放電が発生している場合があり、それぞれの部分放電信号が重畳して観測される。単一放電を想定した診断モデルでは各放電源の特徴を正確に抽出することが難しく、診断精度を得ることが困難になる。そこで、複数の放電信号が重畳した信号から、信号分離によってそれぞれの信号を取り出すモデルを組み込んだ。音声処理分野で実績のある深層学習ベースの信号分離手法であるConv-TasNetを適用した⁽³⁾。図3に複数放電源を想定した部分放電診断の処理フローを示す。入力された重畳信号をConv-TasNetによって分離し、各放電源に対応する部分放電信号を出力する。分離された信号からPRPDパターンを生成し、ベースモデル(CNN)へ入力することで部分放電要因の推定を行う。

検証では、実験室環境で取得した異なる部分放電要因の信号を重ね合わせることで、複数放電源の混合信号を模擬的に生成した。この混合信号を分離モデルへ入力し、分離された信号について部分放電特性の再現性を評価した。その結果、分離後の信号は各放電源の特徴を良好に再現しており、さらに分離された信号から生成したPRPDパターンをベースモデル(CNN)へ入力した。分離モデルを用いずに混合信号をベースモデルに入力した場合の診断精度は0%であり、完全に異なる部分放電要因と誤診断していた。一方、信号分離モデルを用いた際の診断精度は99%になっており、各部分放電要因を適切に診断できることを確認した。

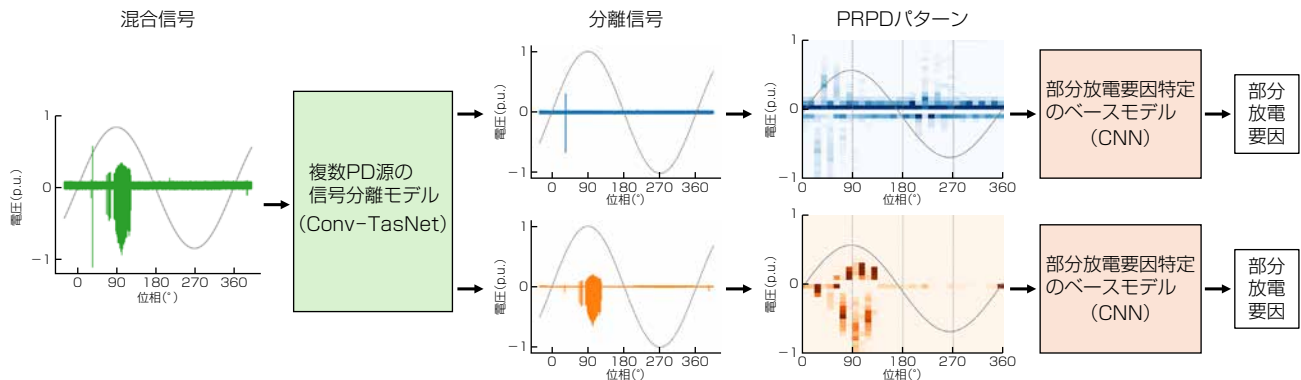


図3-複数放電源を想定した部分放電診断の処理フロー

3.2 転移学習によるノイズ環境への適応

実運用時は据付け環境に応じた多様なノイズが混入し、診断精度に悪影響を及ぼす。これに対して、実験室環境で取得した多量のデータを生かしつつ、少量の現地データを用いて転移学習を施すことによって、低コストで環境に応じた高精度な診断モデルが構築できる。環境が異なっても特徴量は共通である一方、データ分布に差が生じることを踏まえて、転移学習手法の中から敵対的ドメイン適応(Domain-Adversarial Neural Network: DANN)アルゴリズムを導入した⁽⁴⁾。図4にアルゴリズムの構成を示す。特徴量抽出器、パターン分類器及びドメイン識別器から構成される。

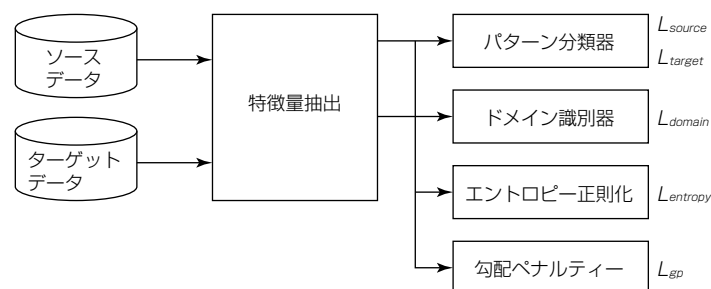


図4-敵対的ドメイン適応アルゴリズムの構成

また、分類損失 L_{source} , L_{target} , ドメイン損失 L_{domain} , エントロピー正則化項 $L_{entropy}$ 及び勾配ペナルティ項 L_{gb} の総和を損失関数 L_{total} として式(1)に示す。 α , β , γ はハイパーパラメーターであり、学習過程で最適化した。

$$L_{total} = L_{source} + \alpha L_{target} + \beta L_{entropy} + L_{domain} + \gamma L_{gb} \quad \dots\dots\dots (1)$$

この損失関数 L_{total} が最小になるように最適化することで、ドメイン間の分布差を低減し、転移先データに対する診断精度を向上させるよう学習できる。実験室で取得したデータを転移元データ、実機で取得されたノイズを含むデータを転移先データとして用いて、有効性を検証した。この際、実運用を想定し転移先データの不足を模擬して、データ数を段階的に削減した条件でそれぞれDANNを学習し評価した。

学習前後の特徴抽出器の出力を、t-SNEを用いて二次元平面に投影した結果を図5に示す。学習前では、ソースドメイン(橙(だいだい)色)とターゲットドメイン(紫色)のクラスターが明確に分離しているが、学習後ではソースとターゲットのクラスターが混在しており、ドメイン間の分布差を低減できていることから、転移学習の効果が確認できる。また、DANNとベースモデルであるCNNとの精度の比較結果を図6に示す。ベースモデルCNNと比較して、DANNはデータ数が少ない条件でも高い分類性能が得られ、その有効性を実証した。

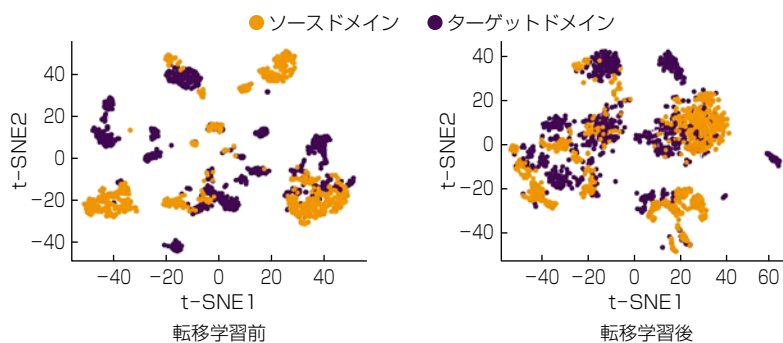


図5-t-SNEによるDANNのドメイン不変特徴抽出の確認

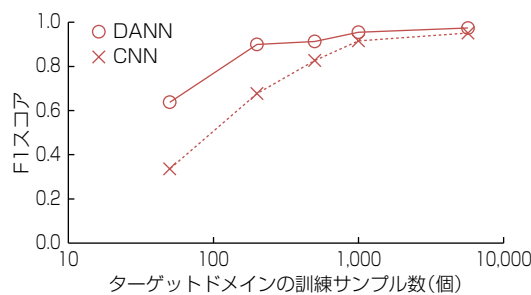


図6-DANNとCNNのF1スコアの比較

4. む す び

電力機器での部分放電診断の実機適用を目的として、深層学習を用いた信号分離とドメイン適応モデルの適用について述べた。複数の放電源が存在する場合や、現地ノイズが混入する場合にも、高精度な診断を実現する診断モデルを構築した。今後は、実際の電力設備での実証データを用いた検証を通じてこの手法の有効性を更に確立するとともに、多様な放電形態及び運用環境への適用範囲の拡大を図って、現場展開可能な実用的診断システムの実現を目指す。

参 考 文 献

- (1) 電気協同研究会：密閉型変電設備の劣化保全技術高度化，電気協同研究，**61**，No.3 (2005)
- (2) Matsuyama, K., et al. : Classification of Insulation Defect Type in Power Apparatus Based on Partial Discharge Signals by CNN, 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 524~528 (2022)
- (3) Matsuyama, K., et al. : Separation and Recognition of Partial Discharge Signals from Multiple Sources Using Encoder-Decoder based Neural Network, 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD), 1~4 (2024)
- (4) 大竹泰智，ほか：敵対的ドメイン適応によるノイズ環境下の部分放電診断精度向上，2025年電気学会B部門大会，10-5-334 (2025)

受配電設備向け スマート保安システム

Smart Protection and Monitoring Service for Power Distribution
Systems

*受配電システム製作所

要 旨

受配電設備は更新期を迎え保全負荷が増す一方、熟練技術者の退職によって経験知の継承が課題になっていることなどを背景に、近年、周期保全(Time Based Maintenance：TBM)から状態監視保全(Condition Based Maintenance：CBM)への移行が求められている。

そこで、三菱電機では設計知見とデジタル技術を統合した受配電設備向けスマート保安システムを開発した。このシステムは既設盤にセンサーを後付けし、環境・部分放電・絶縁などのデータを統合して設備状態を可視化し、点検の代替を目指す。電気主任技術者不足や老朽設備増加を背景に、遠隔監視・異常兆候検出・余寿命診断を中核機能としてCBM化を支援する。今後は、特高変圧器・非常用発電機など適用範囲を拡大し、設備横断の最適化と受配電設備向けスマート保安システムの社会実装を加速する。

1. ま え が き

日本の電力インフラを支える受配電設備は、高度経済成長期以降に導入された膨大な資産が更新期を迎えており、保全業務の負荷は年々増大している。

一方、保全現場を長年支えてきた熟練技術者の退職に伴って、五感や経験に基づく診断知見の継承が喫緊の課題になっている。これまで、受配電設備の保守は、一定期間ごとに停電を伴う点検を行うTBMが主流であった。しかし、近年のデジタル技術の進展によって、設備の状態をリアルタイムに把握し、必要なときに必要なメンテナンスを行うCBMへの移行が強く求められている。

当社は、こうした背景の下、長年培った受配電機器の設計知見と最新のデジタル技術を統合した受配電設備向けスマート保安システムの提供を開始した。

2. システムの構成と特徴

次に、受配電設備向けスマート保安システムの概要を述べる。

2.1 開発背景と課題認識

電気主任技術者の不足は2030年に約1,000人に達する予測が示されている⁽¹⁾。それに加えて、1980～1990年代に導入された設備の更新超過による突発故障リスクが顕在化している。これらを踏まえて、遠隔常時監視による点検の省力化と予兆把握、さらに余寿命診断に基づく計画保全が求められている。独立行政法人 製品評価技術基盤機構(NITE)が継続的に実施する調査・KPI(Key Performance Indicator：重要業績評価指標)フォローアップでも、電気設備別にスマート保安技術の導入率向上が要請されており、現場導入の妥当性・経済性を裏付ける事例の蓄積が重要である⁽²⁾。

2.2 システムの全体像

このシステムは、受配電設備の保安レベル向上と維持管理業務の効率化を同時に実現することを目的とし、次の3点を主要機能として構成する。

(1) 遠隔常時監視(可視化)

設備内部・周辺環境の状態を複合的に計測し、SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)^(注1)画面上でトレンドデータを表示する。

(2) 異常兆候の抽出・通知

温湿度・塵埃(じんあい)・部分放電等の複数センサーデータから、劣化や環境変動に起因する異常兆候を自動抽出・通知する。

(3) 余寿命診断(MT(Mahalanobis-Taguchi)法等)

特徴量群の多変量解析によって定量的な劣化指標を算出し、予防保全・計画保全に活用可能とする(現在開発中)。

これらの機能を一体的に適用することで、従来の巡回中心の点検体系から、データ駆動型のCBMへの移行を支援する。

(注1) センサー等から得られたデータを収集し、設備を監視・制御する技術。

2.3 システムの構成

このシステムは、既設盤を対象として監視パソコンにセンサーデータを集約し、配電盤内の環境データ(温湿度, 塵埃など), 部分放電, 電気室内(盤外)の活線絶縁診断装置のデータを統合することで電気設備の状態を可視化し, 点検を代替することを目的とした(図1)。

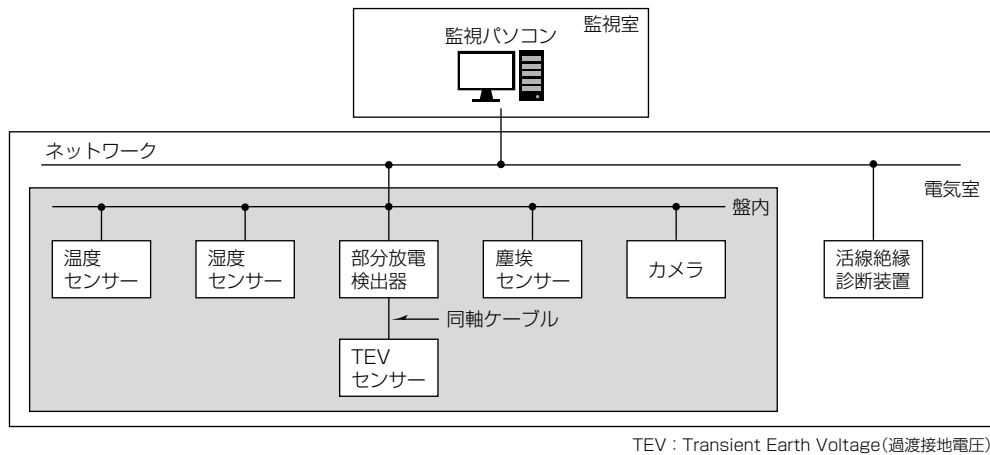


図1-システムの構成

このシステムは、センサー類等の“データ取得層”, 監視パソコン上の“収集・解析層”及び“ユーザーインターフェース層”から成る三層アーキテクチャーで構成される。

2.4 データ取得

既設の高圧配電盤内に対して、次のセンサー類を後付け設置することで、設備の状態を計測する。

- ・カメラ : 盤内雰囲気, 異物等確認
- ・温湿度センサー : 盤内外の環境指標計測
- ・塵埃センサー : 盤内浮遊粒子量の監視
- ・TEVセンサー : 盤内の部分放電監視

取付けはマグネット式を採用し、機器電源は原則AC100V, センサーは電池駆動とすることで配線工事を最小限に抑えて、既設盤への施工性を確保した。取得したデータ(カメラによって撮影した盤内動画及び温湿度センサーから取得したデータ)の一例を図2に示す。

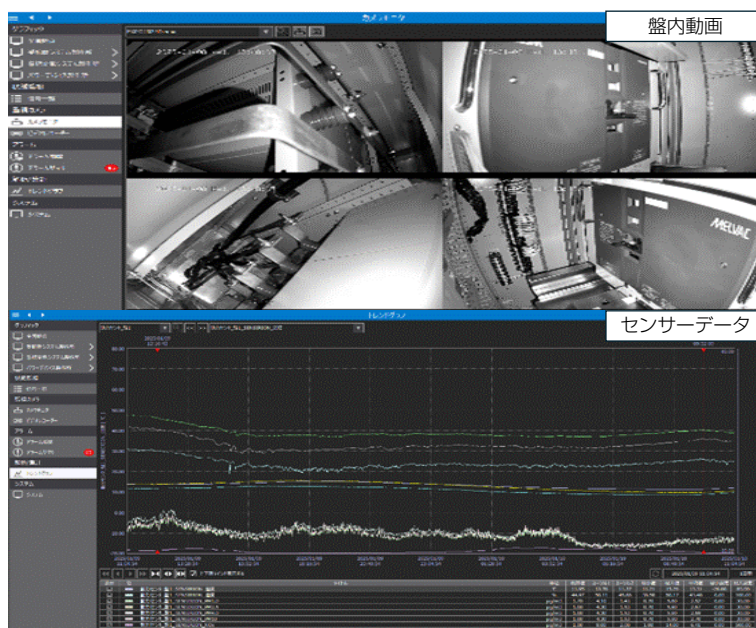


図2-取得したデータの一例

3. 社内実証の概要と効果

当社受配電システム製作所(香川県丸亀市)で、当社製高圧配電盤にセンサー類を後付け設置し、遠隔常時監視の有効性及び異常兆候検出性能を検証した。

3.1 遠隔常時監視の有効性の検証

社内実証で得られたデータを分析した結果、当社製高圧盤の盤内環境(温湿度)には相関が認められた。図3左に示すように外気温度が変化しても盤内温度は常に高い傾向があり、図3右のように外気湿度に比べて盤内湿度が常に低い状態に保たれていることが分かった。これによって、潮解(物質が空気中の水分に溶ける現象)が起こりにくくなり、盤内で腐食等の劣化が進みにくいことが示唆された。今後、長期的なデータ取得を継続し、この推定の確認と遠隔常時監視の有効性を検証していく。

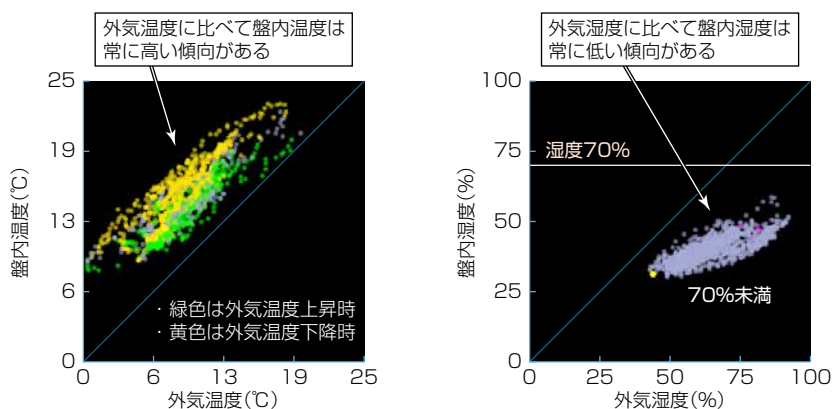


図3-盤内環境(温湿度)の比較

3.2 異常兆候検出性能の検証

取得したデータ分析結果から、3.1節で述べた多くの盤の傾向と異なって、図4に示すような外気湿度に対して盤内湿度が異様に高い盤があることが確認された。その盤の外観を調査した結果、外部から盤内への水分侵入の可能性が推定された。実際に盤内を確認した結果、盤内に結露の発生を確認できた。結露の発生は潮解による盤の劣化を招くおそれがあることから、外気及び盤内湿度を常時モニタリングすることで結露発生(水分侵入)の有無を監視できて、遠隔から異常兆候の検出ができることが分かった。

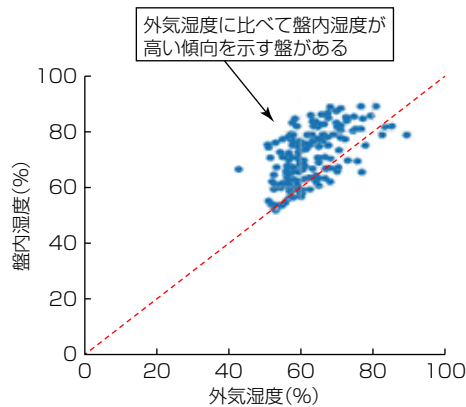


図4-盤内と外気湿度との相関

4. 受配電設備向けスマート保安システムの適用拡大と将来展望

2025年に提供を開始した受配電設備向けスマート保安システムは既設盤を対象としているが、新設向けに同システムを内蔵した高圧気中絶縁スイッチギヤ(MS形)も並行して開発を進めて、2026年度から順次、製品化している。

今後は、2026年に特高変圧器、2027年に非常用発電機を対象にした受配電設備向けスマート保安システムの適用に向けて、当社受配電システム製作所で実証試験を実施し、効果を検証する。その後、実証試験で得られた検証結果を踏まえて、順次システム化を進める計画である。さらに、AIを用いた異常兆候検知や予知保全・余寿命推定機能を段階的に導入し、保安品質の定量的向上と運用効率の最大化を目指す。

5. む す び

受配電設備向けスマート保安システムの内容、アーキテクチャー、実装技術、社内実証の成果について述べた。

今後は、このシステムの適用対象設備の拡大、遠隔にある拠点間を横断する運用の最適化、エネルギーとファシリティーの統合システムへの適用と最適化へ展開し、安心・安全と経済合理性の両立に資する受配電設備向けスマート保安システムの社会実装を加速する。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：電気主任技術者制度について(2023)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/hoan_seido/pdf/013_01_00.pdf
- (2) (株)リベルタス・コンサルティング：令和6年度電気保安のスマート化推進に関する業界別推進状況の把握調査・分析業務報告書(2025)
<https://www.nite.go.jp/data/000160719.pdf>

高圧気中絶縁スイッチギヤ“MS”へのスマート保安システム搭載

パク オソン* 佐方直都*
Ohseong Park Naoto Sagata
濱田達哉*
Tatsuya Hamada
陳 能*
No Chin

*受配電システム製作所

Smart Maintenance Functions for High-Voltage Air-Insulated Switchgear “MS”

要 旨

電気設備の保安現場では、従事者の高齢化や少子化に伴う人材不足に加えて、再生可能エネルギー設備の急増による保守点検負荷の増大が課題になっている⁽¹⁾。こうした背景から、IoT(Internet of Things)技術、AI技術、及び各種環境センサーを組み合わせ、電気設備の異常兆候を遠隔監視で検知し、点検・保守時期を予測することで保守点検業務を効率化する“スマート保安サービス”の普及が加速している⁽²⁾。三菱電機は、当社製の高圧気中絶縁スイッチギヤにこれらのスマート保安用機器・センサー類を実装するに当たって、スイッチギヤ本来の性能を維持しつつ、安全かつ容易な機器の脱着を可能にするハードウェア構造を開発した。

1. ま え が き

近年、故障リスクのある電気設備を自動・遠隔監視、異常兆候検出し、事前に保守点検することを目的としたIoT/AI技術を活用したスマート保安サービスが活性化している。日本では、少子化問題や従来電気設備保安従事者の高齢化の問題に加えて、再生可能エネルギー設備の増加による深刻な人員不足が予測されるほか、経済成長期の1980～1990年代に導入された電気設備が更新周期を迎えることから、スマート保安の需要が高まっている。これを受けて、経済産業省ではスマート保安の導入を推進しており、市場競争の激化も予想される。

このような状況下で、当社もスマート保安サービスの提供を開始した。このサービスをスイッチギヤに実装する際、設備の信頼性とメンテナンス性を損なうことなく、センサー類を安全かつ容易に脱着できるハードウェアの設計が極めて重要な要素になる。

本稿では、先行論文⁽³⁾で詳述されたスマート保安システムの概要を前提とし、当社製高圧気中絶縁スイッチギヤ“MS”へのスマート保安機能の搭載手法に関して、次の項目を主題として述べる。

- (1) スイッチギヤへの搭載の基本的な考え方・制約条件及びユニット化による“開発構想”
- (2) 構想を具現化するための“ハードウェアシステム構成及び詳細構造”
- (3) スイッチギヤ本来の性能を阻害しないことを検証した“評価試験結果”

2. 開 発 構 想

この章では、開発構想について述べる。

2.1 基本的な考え方

MSの定格仕様を表1に、標準配列及び標準配列のうちの一つの盤(屋内仕様)の外観を図1に示す。

MSへのスマート保安機能搭載に当たっては、次の3点を基本方針として構造検討を行った。

(1) 基本性能維持

当該システムの主な監視対象は、開閉器室前面と主回路室である。スマート保安システム(通信・演算機器、センサー類)の搭載が、MSの基本性能(絶縁性能、保護等級、電路形成、メンテナンス性等)に悪影響を及ぼさない配置とする。具体的には、スマート保安システムとMS本体(以下、両者を合わせて“ハードウェアシステム”という。)を物理的・機能的に分離することで、MS内の構造や外形への影響を最小限に抑える。

(2) 保守作業安全性確保

スマート保安の主な目的は保守・点検作業の省力化であることから、センサー配置は原則として無停電交換が可能な構造とする。運用中の主回路充電部近傍での作業でも、作業者の接触リスクを排除し、安全な作業環境を確保する。

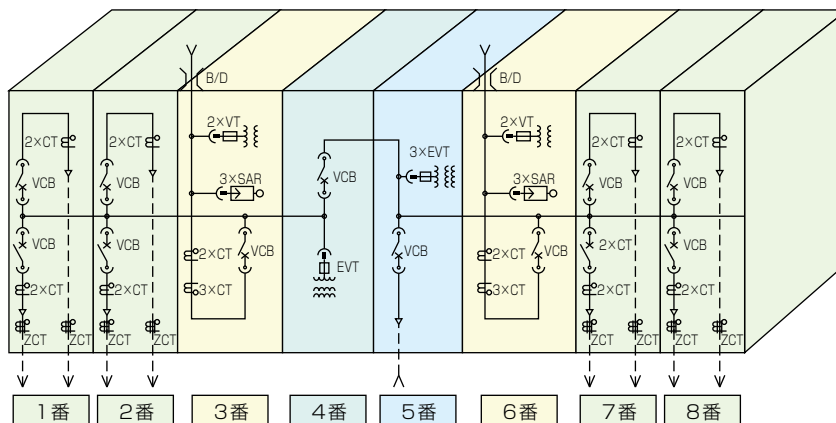
(3) 汎用性・拡張性確保

スマート保安システムの後付けや機能拡張などが簡単に行えるよう、モジュール構造を持ったハードウェアシステムを適用する。

表 1-MSの定格仕様

準拠規格	JIS C 62271-200(2021) LSC1, LSC1-PI	
定格電圧 (kV)	3.6(3.3)	7.2(6.6)
定格母線電流 (A)	400, 600, 1,200, 1,600, 2,000, 2,500, 3,000	
定格周波数 (Hz)	50/60	
主回路商用周波耐電圧・1分間 (kV, rms)	16(10)	22(16)
制御回路商用周波耐電圧・1分間 (kV, rms)	2	
雷インパルス耐電圧 (kV : peak)	45(30)	60(45)
定格短時間耐電流 (kA)	8 / 12.5 / 20 / 25 / 31.5 / 40	
定格短時間耐電流時間 (秒)	1 (0.5)	
定格操作電圧	DC100/110V	
保護等級 (外被)	IP2X ^(注1) (屋内)	

(注1) 防塵等級 2 (指先など直径12.5mmの外來固形物まで保護)、防水等級なし



CT : Current Transformer, VT : Voltage Transformer, VCB : Vacuum Circuit Breaker, SAR : Surge Arrester, EVT : Earthing Voltage Transformer, ZCT : Zero-Phase Current Transformer, B/D : Bus Duct

図 1-MSの標準配列 (左) と標準配列のうちの一つの盤 (屋内仕様) の外観 (右)

2.2 制 約 事 項

次に2.1節の基本方針を実現する上での制約事項を整理する。

(1) 基本性能への制約

図1の標準配列に示すとおり、MSは各部の役割に応じて収納機器や内部配置が異なる。また、案件ごとの個別仕様に基いて設計されるため、内部構造を一義的に決定することが困難である。したがって、内部構成の変化による影響を最小限にとどめるため、スマート保安機能は、機器配置の制約が少ない天井部への取付けを基本とする。

(2) 保守作業安全性の制約

主回路室へのセンサー設置は必要最小限とし、設置が必要な場合は主回路充電部からの絶縁隔離を確実に確保した上で、安全な脱着が可能な構造とする。

(3) 汎用性・拡張性の制約

天井部への搭載が困難な特殊案件については、開閉器室前面への個別設計対応を行う。

(1) CM-BOX

データ通信機器の収納を主目的とし、MSの外部センサーや演算機器といったセンサー制御機器も収容する。多様な機器構成・パターンに対応できるように、図5に示す可変式棚構造を採用した。この構造の適用によって、将来的なデバイスのアップデートへの柔軟な対応も可能とした。また、スイッチギヤ外部配線穴の保護構造を適用し、表1の定格仕様にある保護等級(IP2X)を満足した。さらに、2.1節(1)のとおり、ハードウェアシステム(スイッチギヤの物理的・機能的なシステム)を物理的・機能的に分離させることで、スイッチギヤの内部構造や外形への影響を必要最小限に抑えた。

(2) CAM-BOX

主回路室内の限られたスペースに配置するが、配置スペースの制約を受けにくくすることと、センサー故障時の交換の際に電気設備の運用計画に影響しないように、図6のような無停電交換が可能な構造を考案した。具体的には、裏面扉に小扉を設けて、扉が閉まった状態で小扉だけが開閉できる構造とした。また、カメラ周辺を透明な絶縁物で囲って、安全な脱着を可能にした。さらに、カメラ交換時の設置位置のずれによる光軸ずれが生じないように、スライド式のガイド構造を設けた。

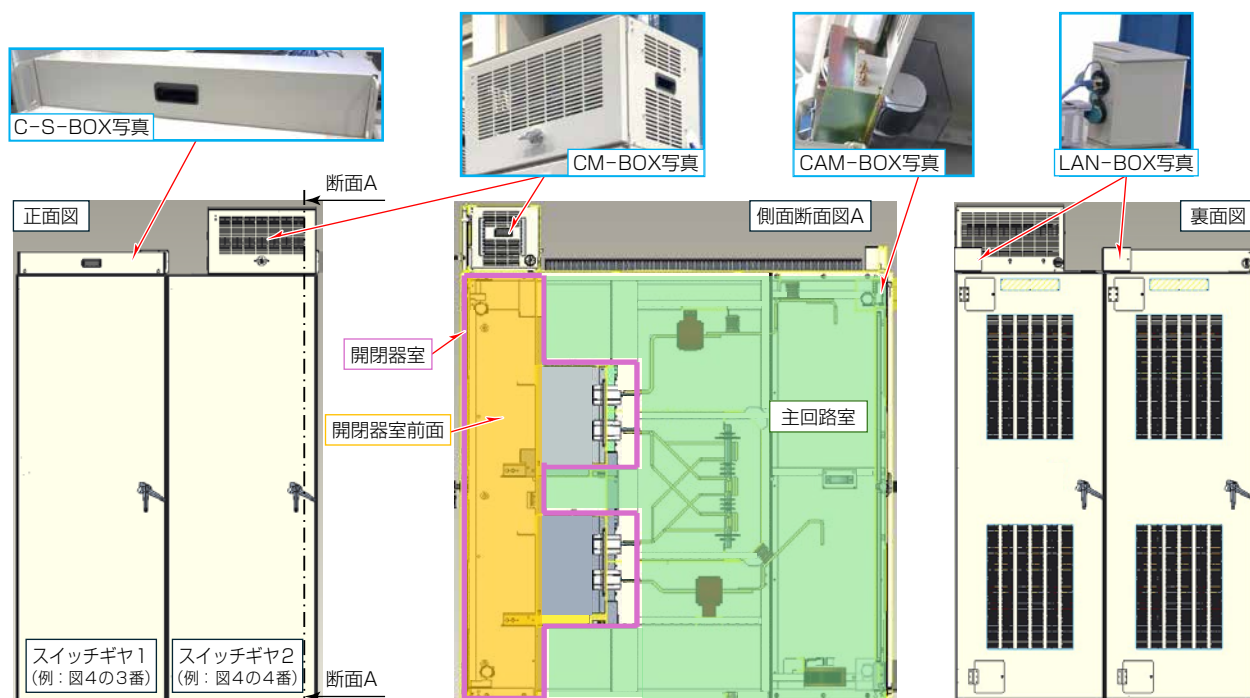
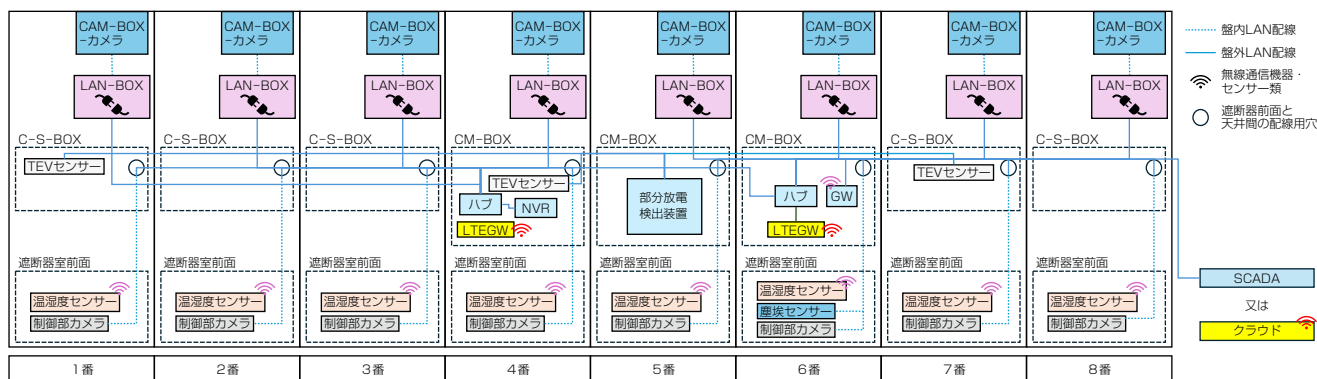


図3-センサー類・各モジュール配置のイメージ(3Dモデルと実写真)



NVR : Network Video Recorder

図4-MSの標準配列でのハードウェアシステム構成

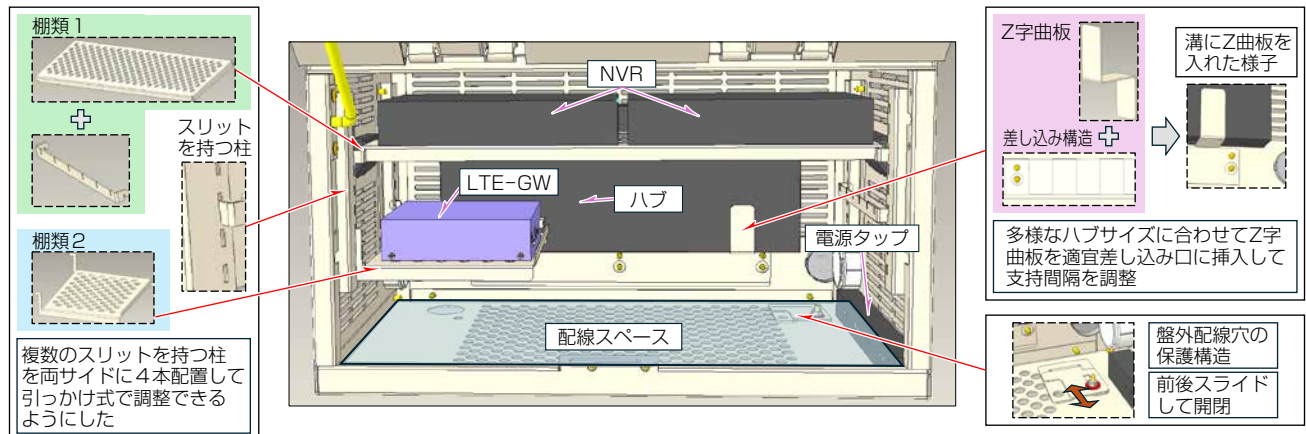


図5 - CM-BOX内にスマート保安用機器を収納した様子と詳細構造(3Dモデル)

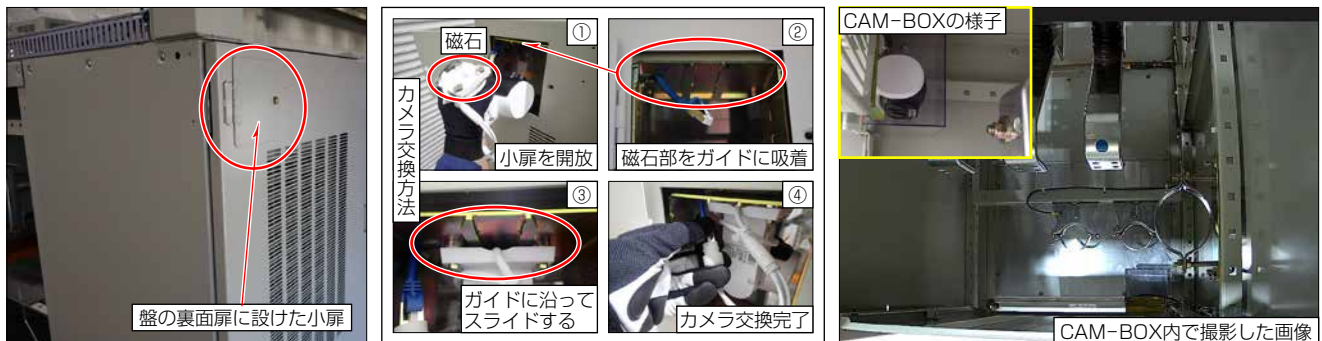


図6 - CAM-BOXの詳細構造

3.3 重要なモジュール(CM-BOX, CAM-BOX)の評価試験結果

このハードウェアシステム構成で、唯一主回路室に配置するCAM-BOXは、カメラ交換作業の際、人が触ることが想定されるため、その状況を模擬した上で、CM-BOXとCAM-BOXに対して、次の2項目に関する評価試験を行った。

試験の様子を図7に、試験結果を次に示す。

(1) 保護等級確認試験(IP2X)

テストフィンガー(試験用指)及び銅球を用いた試験によって、MSの外部・内部の双方でIP2X相当の保護性能を持つことを確認した。特にスイッチギヤ内部構造については、運用(通電)中のカメラ交換作業を想定し、作業者が誤って主回路充電部に接触しない防護構造であることを検証した。

(2) 絶縁性能確認試験

主回路充電部に対する十分な絶縁距離を確保し、閃(せん)絡しないことを確認した。



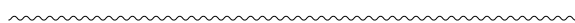
図7 - 評価試験の様子

4. む す び

この開発によって、本来の性能を損なうことなくMSにスマート保安機能を搭載する手法を確立した。ユニット化による柔軟な配置設計と、IP2X及び絶縁性能の確保によって、MSをはじめ既設のスイッチギヤを含む幅広い運用環境への適用の可能性に目途を得た。今後は、この構造をベースとして適用機種の種類を拡大していく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：電気主任技術者制度について（2023）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/hoan_seido/pdf/014_01_00.pdf
- (2) 一般社団法人 日本電機工業会：高低圧電気機器保守点検のすすめ（2024）
https://www.jema-net.or.jp/randb-archives/DS5223_202411.pdf
- (3) 小鶴 進：受配電設備向けスマート保安実現への取り組み，三菱電機技報，**98**，No.6，4-01～4-04（2024）



発電事業者向けアセットマネジメントシステムでの 太陽光発電設備の異常検出と原因推定

Anomaly Detection and Cause Estimation of PV Equipment in Asset Management Systems for Power Generation Companies

*電力システム製作所

要 旨

三菱電機は国内の主要な電力流通事業向けにアセットマネジメントシステムを提供してきた⁽¹⁾。2050年カーボンニュートラル達成に向けて再生可能エネルギー（以下“再エネ”という。）の需要は今後も更に増していくことを鑑みて、当社はアセットマネジメントシステムの発電事業者への製品展開を図っている。アセットマネジメントの基本概念（現状分析・将来予測・計画立案）を念頭に、当社独自の波形解析技術を活用して太陽光発電(PV)設備の現状分析技術（異常検出・原因推定）を開発した。異常の原因を推定できることで異常内容に応じた最適な対処方法を立案できるため、過剰な保守費用の抑制及び保有資産の価値最大化を図れるようになる。今後は現状分析技術に加えて将来予測技術を確立し、再エネ設備の効率的な普及・運用に貢献していく。

1. ま え が き

アセットマネジメントシステムとは、各組織が自社の事業を支える設備・人員などの事業資産（アセット）に対して最適な投資計画の立案・運用・保守（マネジメント）を行う活動を支援するためのシステムである。当社がこのアセットマネジメントシステムを電力流通分野で開発・提供してきた経緯を述べる。

電力流通分野では、高度経済成長期に国内で多くの電力インフラ（送電線・変圧器・電柱・電線など）が構築された。各設備インフラは高経年化し、修繕・更新・再編成など必要な処置を施して、社会インフラとしての機能を維持していく必要がある。しかし、電力流通インフラ設備は数が膨大であり、戦略的な視点（いつ、何を、どのように）で対処方法を計画していく必要がある。

一方、発電分野のうち特に再エネ発電分野のPVでも、電力流通分野と同様にアセットマネジメントのニーズが高まることが予想される。背景として、PVは2012年にFIT制度（Feed In Tariff：固定価格買取制度）^(注1)が始まって、それに伴って多くのPV設備が構築された。このFIT制度が終わりに近づいて、PV事業を手放して、更に多くのPV設備を束ね

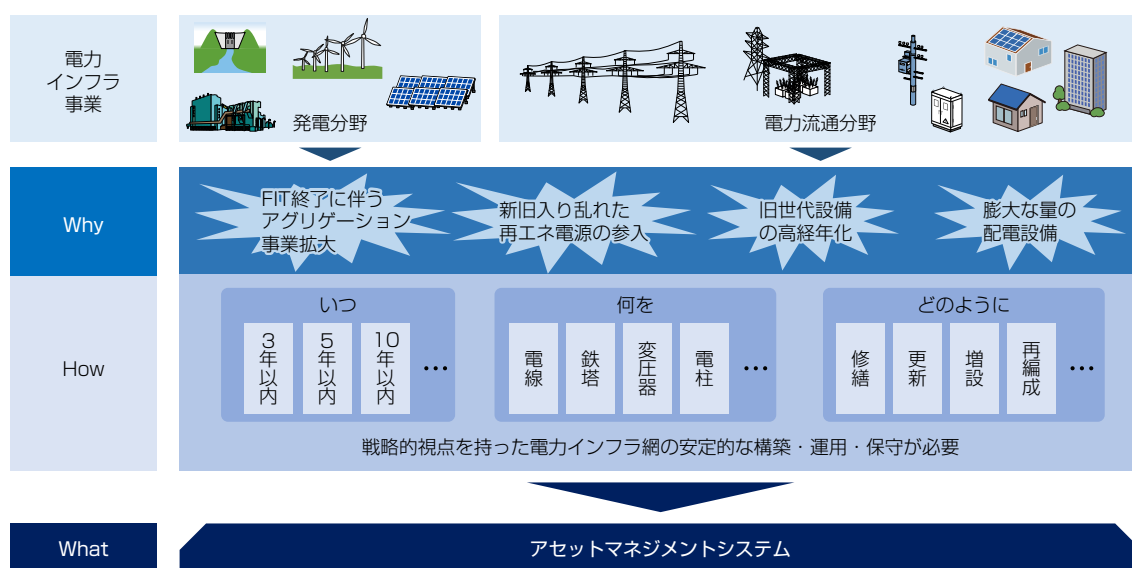


図1-電力インフラ事業でのアセットマネジメントシステムの必要性

る事業者(再エネアグリゲーター)に発電設備の委譲が進められている。各アグリゲーション事業者は新旧入り乱れたPV設備を抱えることになり、適切な運用・保守の計画立案の必要性が高まっていくと予想される。

このような背景を踏まえて、当社としては電力流通分野で培ったノウハウと社内保有の分析技術(波形解析技術)を活用し、発電分野でのアセットマネジメントシステムの開発・検証を進めている(図1)。

本稿では電力流通分野で提供してきたアセットマネジメントシステムの概要と、発電分野のうち特に再エネ発電分野でのアセットマネジメントシステムの取組み内容について述べる。

(注1) 10/20年間、固定価格で再エネ電力を買い取ることが保証される制度。

2. アセットマネジメントシステム

ビジネス領域で用いるアセットという用語は、各ビジネス組織が自社の事業を支える設備・人員などの事業資産を指している。この事業資産(アセット)の最適な投資計画の立案・運用・保守を行う活動を支えるのが、アセットマネジメントシステムである。

電力流通分野では、各発電所で作られた電気を各利用者(需要家)に対して届けるための送電・変電・配電といった電力網を支える各種インフラ設備(送電線・変圧器・電柱・電線など)があり、これを電力流通分野のアセットと呼ぶ。当社はこの電力流通分野でアセットマネジメントシステムの開発・提供・普及に貢献してきた。

当社の取組み内容を述べる上で、まずアセットマネジメントシステムの概要を次に述べる。

2.1 電力流通分野でアセットマネジメントが必要になった背景

高度経済成長期(1955~1972年頃)に、全国的な経済成長を支えるため多くの電力インフラ設備が構築された。現在、それら大量の電力インフラ設備は高経年を迎えているため、修繕・更新・再編成など必要な処置を計画的に施して、社会インフラとしての機能を維持していく必要がある。

しかし、電力インフラ設備は数が膨大であり、それらを維持するための対処リソース(技術・材料・人員・予算)が限られているため、単に古い順に対処していくなど安易な方針を打ち出すことではインフラ設備の安定稼働を保障することが難しい。そのため、限られたリソースの中で戦略的な視点(いつ、何を、どのように)から優先度を決めて、インフラ設備の維持計画をいかに推進していくかが重要になっている。

2.2 アセットマネジメントの内容

インフラ設備への対処方法の優先度を決めるために、まず、インフラ設備に対するアセスメントが必要になる。アセスメントとは、一般的に“客観的な情報収集や分析に基づいて、対象を評価・査定すること”を意味するが、電力流通分野では、経年、重要性・緊急性、設備の種類・特徴などによって、各設備の資産価値を定量化していくことを指す。

次に、マネジメントのポリシーを設定する。マネジメントのポリシーとは、リスク最小化・リソース配分の平準化・コストミニマムなど、資産価値と対処リソースを踏まえてどのように対処を推進していくことが効果的か、計画立案の指針になる対処戦略のことである。このマネジメントのポリシーに従って対処計画素案を作成し、その後、リソースの制限・規制当局から指定される対処目標(時期と物量)などを念頭に、計画の最適化(対処時期、内容の再編成)によって、最終目標を達成しつつ、制限されたリソースで無理のない計画を立てることができる。

一旦計画を立案した後は、立てた計画に従って対処を進めつつも、途中で発生し得る様々なイベント(法制度の変更、自然災害の発生、社会的・経済的な事象の発生)を受けて、適宜、対処計画の見直し(対処時期・内容の再編成や投入リソース制約の見直し、緊急対応の要否など)を行い、長期にわたって安定的で無理のない計画遂行を進めていくことが重要である。

2.3 アセットマネジメントでの当社の取組み

当社は2.2節で述べたアセットマネジメントフローを推進・支援するためのアセットマネジメントシステムを開発し、国内の主要電力流通事業向けにアセットマネジメントシステムを提供してきた(図2)。

提供しているシステムの機能の概要を次に述べる。

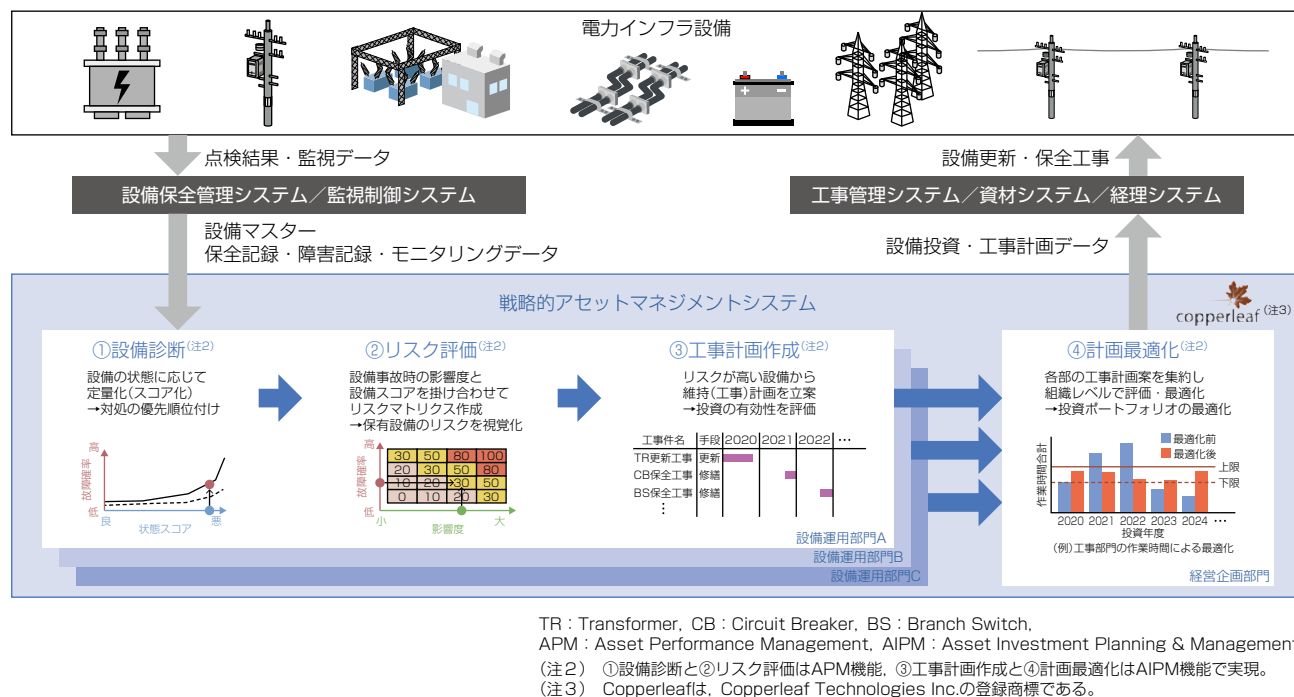


図2-当社の電力流通事業向けアセットマネジメントシステムの概要

(1) 現状分析

各インフラ事業者が抱えるアセットの情報を、設備管理システムとのデータ連携によって情報を入手し、各アセットの固有情報（経年、メーカー、設置環境、運用情報など）を基にアセスメント（リスク量や影響度合いの計算）を実施する。

(2) 将来予測

アセスメントの結果、どのようなリスクボリュームが変化していくかを将来予測する。

(3) 計画立案

将来予測の結果と、各事業者が定めるポリシー、各種制約（リソース、レギュレーション、コスト）に従って、最適な計画を提案・提供する。

(4) 実績反映と計画棚卸し

各年次に実施した対処活動の実績を踏まえて、アセスメントへのフィードバック及び最適化された計画との齟齬（そご）の確認、再調整などを実施する。

3. 再エネ発電分野のPVでのアセットマネジメントへの取組み

この章では、再エネ発電分野のPVでのアセットマネジメントへの取組みを述べる。

3.1 再エネ発電分野のPVでのアセットマネジメントの必要性の背景

2050年カーボンニュートラル達成に向けて再エネ需要の高まりは継続し、今後もますますPV設備は増えていくことが予想される。一方、FIT制度が終わりを迎えて、事業者の撤退（再エネアグリゲーターへの委譲）が進んで高経年の発電設備が増えることも同時に予想される。アグリゲーション事業の普及によって、各事業者は新旧入り乱れたPV設備を抱えることになり、適切な対処の必要性が高まっていくと予想される。

3.2 再エネ発電分野のPVに対する当社の取組み状況及び課題

そのような状況を鑑みて、当社は電力流通分野で培ったノウハウを活用し、再エネ発電分野のPVでのアセットマネジメントシステムの開発・検証を進めている。しかし、PV設備にアセットマネジメントのスキームを取り込むことで、次のような課題がある。

(1) PVの発電量は機器そのものの性能より外部の影響を受けやすい

PVは、文字どおり太陽光の変動によって発電量が変化するため、日射量がアセスメントでの重要なパラメーターになる。PVの発電量は、日射量にある程度の相関で比例しており、一般的には発電効率(発電量÷日射量)を使用して、運用中の監視や問題点の検出(アセスメント)を行う。

一方、PVは、設置環境に応じて、次のような外部の影響を受けやすいという特性がある。

- ・自然物：樹木・雑草類の影、動物などによる獣害(ネズミがケーブルをかじる、野鳥がパネルに糞(ふん)をするなど)
- ・人工物：周辺建造物の影、設備から飛来するほこり・油、車両の排気ガスによるパネルの汚れ
- ・気象現象：天候(雨、風、雪)による日射量の低下
- ・災害類：悪天候(大雨、強風、大雪など)に伴う災害(土砂崩れ、飛来物、積雪など)や人災(ケーブル盗難など)

(2) 発電量の変化と影響要因との因果関係の判断材料が乏しい

先に述べたとおり、PVは外部環境からの影響を大きく受けることから、次のように運用上の判断が難しい。

- ・発電効率低下が単純に経年劣化によるものなのか、外部の影響によるものなのか、自然現象なのか、人為的なものか
- ・その影響は放っておいて良いのか、対応を急ぐのか

これらのように、PVアセットの適切な運用・保守をする上で、単純に発電効率を監視・アセスメントしていても、その適切な対処方法を判断するための情報としては乏しいと言える。

3.3 課題に対する解決策

当社は、3.2節で述べたとおり、PVアセットのアセスメントの難しさを鑑みて、独自の波形解析技術を活用してPV設備のアセスメント技術として現状分析(異常検出・原因推定)を行う技術を開発した(特許出願中)(図3)。その内容を次に述べる。

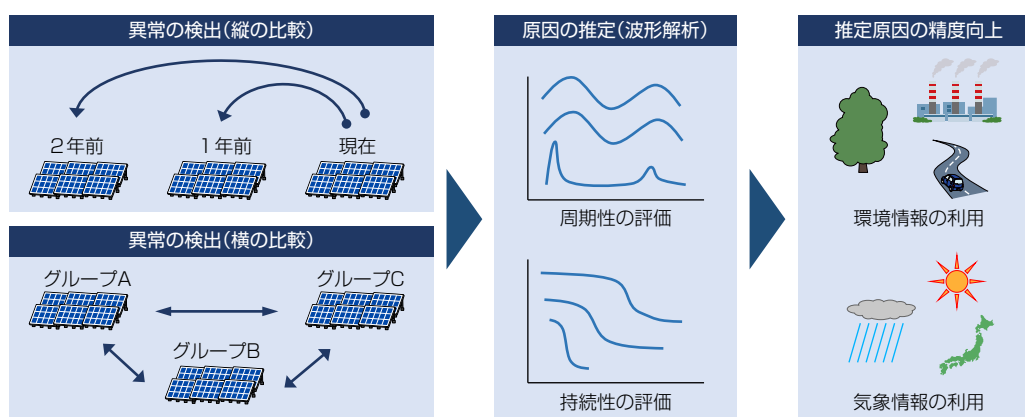


図3-PV設備でのアセスメント方法の開発内容

(1) 発電効率の比較による異常検出(縦比較, 横比較)

PV設備が外部の影響を受けやすいことを逆手に取って、外部環境の変化の有無(時間的変化、地形的変化)を参考にして、異常の有無を検知するアプローチを採用している。使用するパラメーターは発電効率であるが、その発電効率の変化を次の観点から比較し、異常が発生している対象(いつ、どこで)を判断する。

- ・縦比較(時間的変化を利用)：過去の同じ時期・時刻の発電効率と現在の発電効率を比較する手法
 - ・横比較(地形的変化を利用)：太陽光パネルを一定の単位でグルーピングし、グループ間での発電効率を比較する手法
- これらの二つの比較手法を組み合わせると、発電効率の差異から異常の有無を検出することが可能である。

(2) 発電効率の変化を“波”として捉えて、その波形によって異常原因を推定

発電効率の差異を主に“周期性”・“持続性”の観点から評価する。周期性の例として、樹木・雑草類・周辺建造物による影が発電効率の低下をもたらす場合、その変化は特定の時間帯に起きるなどの特性がある。持続性の例として、雨・雪などの天候による発電効率の低下は数日後には自然回復するが、土砂崩れ・強風などの災害類がもたらすパネル変形による発電効率の低下は自然回復しないという特性がある。

(3) 環境情報・気象情報による推定原因の精度向上

発電効率の波の特徴に加えて、環境情報(森林がある、生活道路がある、動植物が多い、川・湖・海などが近いなど)や気象情報(天気、雨量、風速など)を加味して異常波形の発生要因を分析し、高い精度で異常原因を推定し、これをシステム利用者に提示して適切な判断を促すことができる。

これらの技術(異常検出・原因推定)によって、PVの運用・保守での対処方法の決定過程で、次の判断材料を提供することが可能である。

- ・自然回復見込みの要因で異常が発生：現地調査は不要。リモートで発電効率の変化を監視する対応を取る。
- ・対処介入が必要な要因で異常が発生：現状の発電量と目標値の整合を踏まえつつ、現地調査や対処の計画を進める。

4. 今後の展望

今回の現状分析技術の開発に活用した波形解析技術は、次のような将来予測のシーンでも活用が期待できる。

- ・何も対処しない場合、どのように発電効率に変化(低下)していくと予測されるのか。その場合でも、PV設備の投資回収は可能なのか。
- ・発電量目標値を踏まえつつ、いつ対処(発電量回復)するのが費用対効果を最大化できるのか。

今後、この将来予測技術の開発・検証を進めて、さらには計画立案技術へと実装範囲を広げていくことで、PV向けアセットマネジメントシステムが提供できるようになると考えている。

5. む す び

当社はアセットマネジメントシステムの開発・提供によって電力流通分野での安定的な電力インフラ網の維持に貢献してきた。今後もアセットマネジメントシステムを通じて、発電分野のうち特に再エネ発電分野の発展・安定供給に貢献していくとともに、再エネ普及による持続可能な社会の実現に向けて寄与していく。



新型宇宙ステーション補給機(HTV-X) 1号機の運用と今後の展望

On-orbit Operation of HTV-X1 and Future Prospects

*鎌倉製作所

要 旨

新型宇宙ステーション補給機(HTV-X)は国際宇宙ステーション(ISS)への物資補給機であり、宇宙ステーション補給機(HTV)の後継機として開発した。主ミッションである輸送能力の大幅な向上に加えて、物資補給後の軌道上実証プラットフォームとしての活用も可能になっている。三菱電機は、宇宙空間を飛行するために必要な全機能を集約した“サービスモジュール”の開発を担当した。HTV-X 1号機は2025年10月に打ち上げられて、ISSへの物資補給に成功した。現在、2号機以降の開発も進めている。また、HTV-Xを活用し、ポストISSとして民間宇宙ステーションへの物資補給や、月周回有人拠点(Gateway)への物資補給機への発展も検討している。

1. ま え が き

HTVは2009年から2020年にかけて9機を打ち上げて、ISSへの物資補給を行った。HTV-XはHTVの後継機として2017年から開発に着手した。HTVの技術を継承しつつ、輸送能力の大幅な向上や運用性の向上を実現した。また、HTV-Xは物資補給後も軌道上に最長1.5年飛行継続し、将来に向けた開発機器などの軌道上実証を行う“軌道上実証プラットフォーム”としての活用も可能になっている。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)の下、当社はサービスモジュールの開発、製造・試験を担当した。HTV-X 1号機は2025年10月に種子島宇宙センターからH3ロケット7号機で打ち上げられて、ISSへの物資補給に成功した。

本稿では、HTV-X開発の概要、1号機の軌道上運用結果、今後の展望について述べる。

2. HTV-Xサービスモジュールの開発概要

この章では、HTV-Xの概要、及びサービスモジュールの開発概要を述べる。

2.1 HTV-Xの概要

HTV-Xの構成概要を図1に示す。

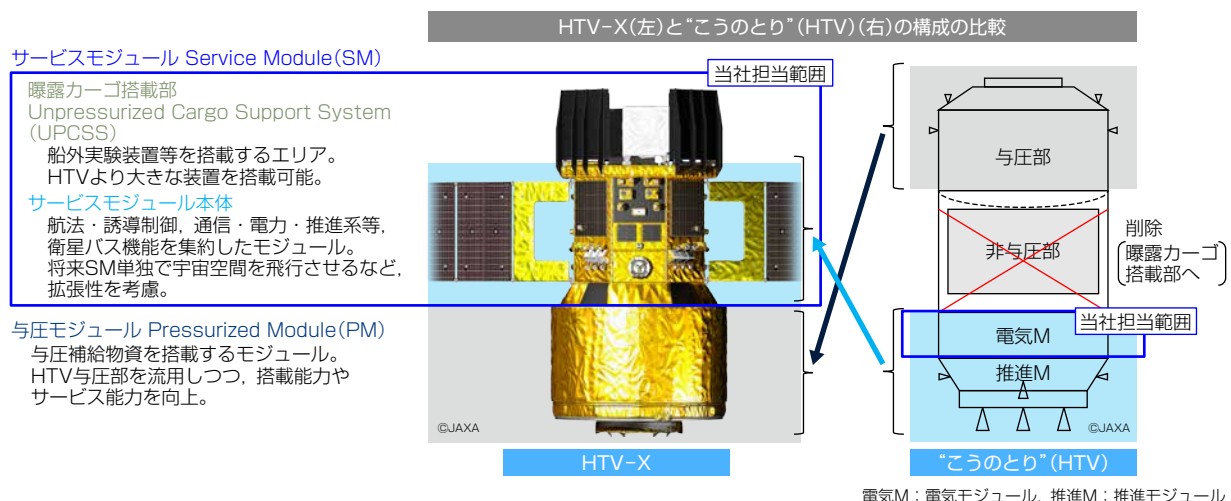


図1 - HTV-Xの構成概要

HTV-Xはサービスモジュールと与圧モジュールから構成される。サービスモジュールの本体部分には航法・誘導制御、通信・電力・推進系等、宇宙空間を飛行するために必要な機能を集約している。サービスモジュールの上段にある“曝露(ばくろ)カーゴ搭載部”は船外実験装置等、宇宙空間に曝露させた状態で使用する機器を搭載可能なエリアである。与圧モジュールは与圧補給物資を搭載するモジュールであり、三菱重工業㈱が担当している。

2.2 サービスモジュールの概要

サービスモジュールの外観を図2に示す。次節以降に、サービスモジュールの開発内容について述べる。

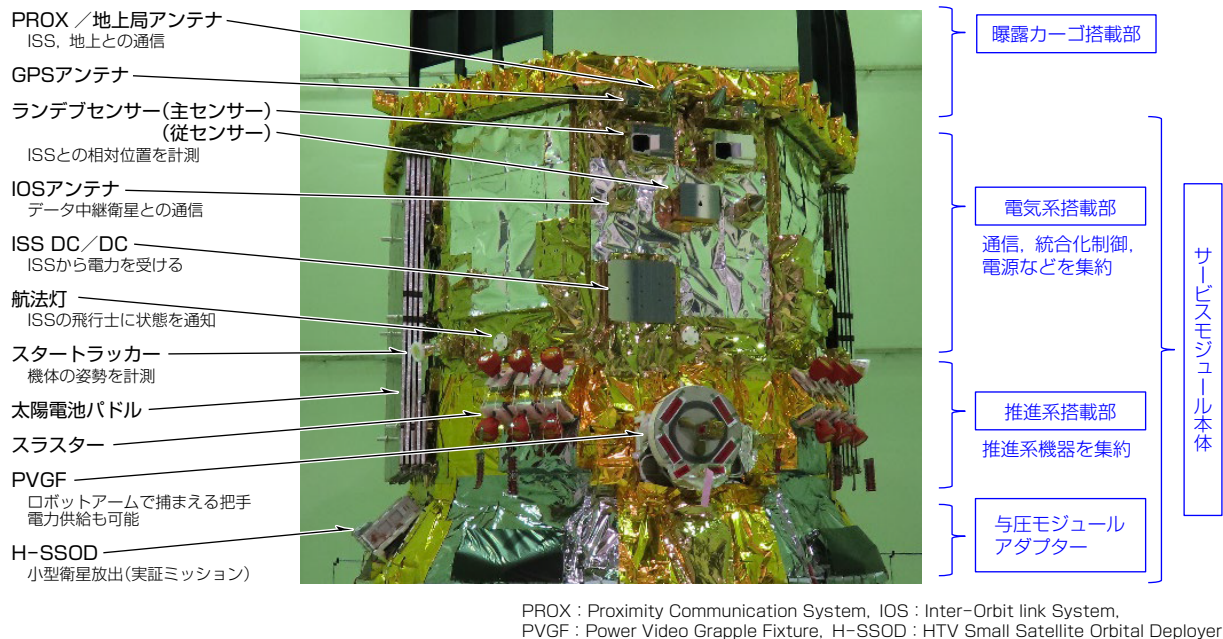


図2-HTV-X1号機サービスモジュールの外観

2.2.1 サービスモジュールへの衛星バス機能集約

サービスモジュールの構体は、図2に示すように、大きく四つのサブモジュールから構成される。“電気系搭載部”には航法・誘導制御、通信、電力などの機器が集約されている。HTVではモジュールを跨(また)いで配置されていた推進系機能を“推進系搭載部”に集約することで、射場での配管接続を不要とするなど、作業効率化を実現した。“曝露カーゴ搭載部”を機体上部に配置することで、ロケットのフェアリング内の空間も最大限に活用し、大型の曝露カーゴや技術実証ミッションを搭載可能とした。将来のモジュール単独利用の拡張性を考慮し、与圧モジュールとサービスモジュールとの間のインターフェースを最小化した。

2.2.2 HTV実績と人工衛星技術の活用

HTV-XではHTVの開発実績をベースとしながら、人工衛星で実績を持つ当社機器を活用し、機能・性能向上を実現した。例として、HTVではボディーマウント型の太陽電池パネルによる電力供給であったが、HTV-Xでは展開型の太陽電池パドルを採用することで、約30%の発電量を向上させた。これによって、カーゴや技術実証ミッション機器への電力供給を可能としながら、一次電池を非搭載とし質量を低減した。展開型太陽電池パドルは当社の人工衛星で実績のある展開構造を最大限活用しながら、ISS要求に対応した改良を反映した。また、HTVでは“航法誘導制御”“データ処理”“システム管理”の複数計算機による分散処理システムであったが、HTV-Xではフライトコンピューター(FC)に機能統合し、機器間インターフェースを簡素化した。統合化制御系の計算機は当社人工衛星で使用している計算機をベースとしながら、3台のFCによる多数決処理等を導入することで、ISS安全要求である2Fail Safe(二つの故障が発生してもISSの安全を確保)を実現する機器構成とした。

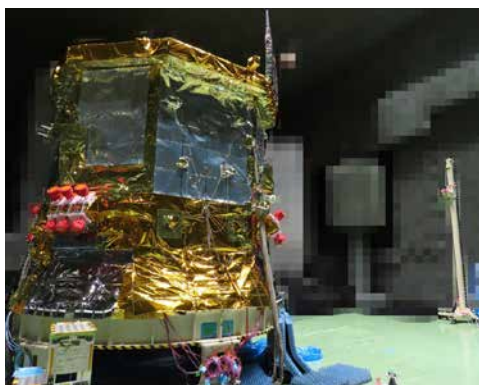
一方、有人安全やISSインターフェース等についてはHTV実績を踏まえた設計を踏襲している。例として、ISSに接近するランデブー誘導制御方式はHTV実績を継承しながら、運用シーケンスを簡略化した。

2.2.3 軌道上実証プラットフォームとしての付加価値向上

HTV-Xは物資補給後も軌道上に最長1.5年飛行継続し、将来に向けた開発機器などの軌道上実証を行う“軌道上実証プラットフォーム”としての活用も可能になっている。サービスモジュールとしては、実証ミッション機器の搭載性の確保(大型ミッション機器も搭載可能)、実証機器への電力やテレメトリー・コマンド等のリソース提供、実証期間中の地上局通信機能の追加、軌道維持機能(自律軌道制御)追加など、技術実証を支援する機能を具備している。

2.3 サービスモジュールの製造・試験

サービスモジュールは2022年2月に詳細設計を完了した。1号機の製造・試験を進めて、2024年12月に開発試験を完了した。開発試験の中では、電磁適合性試験、熱真空試験、音響試験などを実施し、打上げや軌道上環境での動作を検証した(図3)。2025年2月に種子島宇宙センターへ輸送し、カーゴや実証ミッション機器の搭載、サービスモジュールと与圧モジュールの全機結合、結合後の全機機能試験を実施して、2025年10月26日にH3ロケット7号機で打ち上げられた。



電磁適合性試験



熱真空試験

図3-HTV-X1号機サービスモジュールの開発試験

3. HTV-X1号機の軌道上運用

HTV-X1号機は2025年10月26日に打上げ後、太陽電池パドルを展開し、三軸姿勢を確立した。その後、“ランデブーフェーズ”として、GPS(Global Positioning System)絶対航法／差分航法を用いて複数回のマヌーバを実施しながらISSとの高度差及び位相差を調整し、10月29日にはISSと直接通信が可能な領域(近傍域通信領域)に到達した。ISSとの近傍通信を確立後、“ISS統合運用フェーズ”として、ISSのGPS情報と、HTV-XのGPS情報を用いたGPS相対航法(RGPS)を使用し、ISSの下方約500mまで到達させた。LIDAR(LIght Detection And Ranging)を使用した航法に切り替えて、ISSへ徐々に接近し、ISSの下方約10m付近に設定されたキャプチャポイントでISSと相対的に停止させた(図4)。ISSの宇宙飛行士がロボットアームでHTV-X1号機のキャプチャに成功した(図5)。HTV-X1号機の相対位置・姿勢は非常に安定しており、スムーズなキャプチャであり、また、キャプチャ時刻は10月30日0時58分と予定どおりの時刻にISSに到達した。その後、ロボットアームを用いてISSへ結合された。

HTV-X1号機はISSへの物資搬入の後、2026年3月6日にISSから離脱し、技術実証ミッション運用を開始した。HTV-X1号機は超小型衛星放出H-SSOD、軌道上姿勢運動推定実験Mt. FUJI、展開型軽量平面アンテナ軌道上実証DELIGHTの三つの技術実証ミッションを搭載しており、これらの軌道上実証を行った。その後、2026年5月26日に3回の軌道離脱マヌーバを実施して高度を降下させることで、大気圏へ再突入させ、ミッションを完了した。

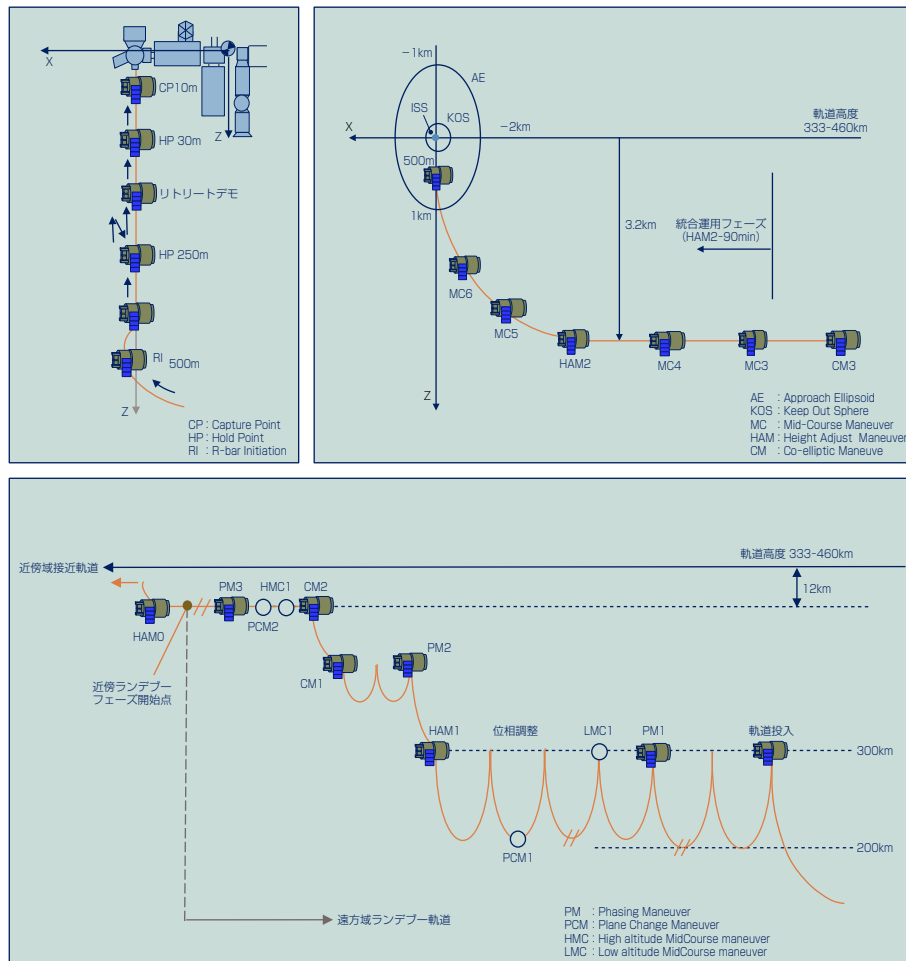


図4-HTV-Xの飛行シーケンス



図5-ISSから撮影されたHTV-X 1号機

4. 今後の展望

この章では、HTV-X後続号機の開発状況、及び今後の展望について述べる。

4.1 HTV-X後続号機の開発状況

HTV-X 2号機はサービスモジュールの試験を完了し、種子島宇宙センターへ輸送済みである。今後、与圧モジュールとの結合・試験を進める計画である。

HTV-X 3号機では自動ドッキング実証を計画している。HTV及びHTV-XではISSのロボットアームで宇宙飛行士がキャプチャして結合する“キャプチャ・バーシング”方式を採用しているが、自動ドッキング実証では、ISSへの結合まで自動で実施する。自動ドッキングでは、HTV-X側のドッキング機構とISS側のドッキングポートが所定の相対位置・相対速度でコンタクトさせるための6自由度の航法誘導制御が必要になる。当社では自動ドッキングの航法誘導制御を担当しており、搭載ソフトウェアや相対航法センサーの開発を進めている。

さらに、HTV-X 4号機及び5号機的设计も開始している。

4.2 商業宇宙ステーション(ポストISS)、国際宇宙探査等への発展

ISS退役後のポストISSでは、米国商業宇宙ステーション(CSS)の開発・運営が計画されている。(株)日本低軌道社を中心に、HTV-Xを活用した、CSSに接続する“日本モジュール”，及びCSSへの物資補給機“HTV-XC”(HTV-X for Commercial)の開発を開始している。また、Gatewayへの物資補給を、HTV-X発展型で対応する構想についてJAXAを中心に検討している。さらには、宇宙空間での様々な物資輸送サービスを担う軌道間輸送機(Orbital Transfer Vehicle：OTV)の検討に着手している(図6)。



図6-OTVのイメージ

5. む す び

HTV-Xサービスモジュールの開発、1号機によるISSへの物資補給及び技術実証ミッションを完遂した。2号機以降の製造・試験も着実に進めるとともに、HTV/HTV-X開発で培ったRPOD(Rendezvous, Proximity Operations and Docking)技術を基に、CSSやGatewayへの物資補給、軌道間輸送機などの開発に積極的に参画し、民間による地球低軌道でのビジネス創出、人類の活動領域の拡大へ貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 堀田成紀：新型宇宙ステーション補給機“HTV-X”サービスモジュール，三菱電機技報，93，No.2，149～153（2019）
- (2) 松本達也，ほか：宇宙ステーション補給機(HTV)量産機の成果とHTV後継機開発による将来宇宙機構想の構築，三菱電機技報，95，No.2，109～112（2021）



宇宙状況把握センサーシステム

Space Situational Awareness Sensor System

松岡 暉*
Hikari Matsuoka

眞庭知成*
Kazuaki Maniwa

木邊厚視*
Atsushi Kibe

*電子通信システム製作所

現在、人工衛星は安全保障分野でも重要な役割を果たしており、各国は宇宙空間を軍事作戦の基盤として利用している。その中でも静止軌道は、カバレッジによる便益と衛星自体の価値から最も重要な軌道であり、防衛、民需合わせて500機以上の衛星が運用されている。一方、各国の衛星攻撃兵器(ASAT)関連技術の進展及びデブリ増加に伴って危険性が増大しており、宇宙状況把握(SSA)の需要が世界中で高まっている。

これらを踏まえて、防衛省の宇宙開発利用に関する各種取組みの一つとして整備されることになったのが、宇宙状況把握センサーシステムである(図1)。2024年に納入完了し、現在運用中である。

このシステムは、SSAレーダー、標定・校正装置及びセンサー統制装置の三つのサブシステムによって構成される。当社がこれまで培った、警戒管制レーダーでのレーダー信号処理技術、衛星管制でのアンテナ技術及び管制システム技術、光学観測設備開発技術を結集し、設計・製造を行った。主に軌道情報に基づいて、監視対象及びその周辺を観測している。

SSAレーダーは六つの空中線装置を持って、標定・校正装置との協調運用によって必要な精度を満足する静止軌道帯(高度36,000km)の観測を行っている。



図1-宇宙状況把握センサーシステム



次世代の電磁シールド監視システム

Next-Generation Electromagnetic Shield Monitoring System

中村孝大*
Takahiro Nakamura

高嶋佑介*
Yusuke Takashima

中口卓弥*
Takuya Nakaguchi

*電子通信システム製作所

近年のIT技術の発展によって、ビジネスでの電子化が進んで、情報機器を用いた重要情報の取扱いが一般的になっている。一方、電磁波盗聴や電磁パルス攻撃などの脅威が常に存在するため、電磁シールド施設による対策が不可欠である。しかし、電磁波は目視で確認できず、シールド施設の劣化状況をリアルタイムで把握することは困難である。

そこで当社では、電磁波漏洩(ろうえい)状況をリアルタイムで監視するシステム(シールド監視システム)を提案し、安心・安全な施設運用を実現している(図1)⁽¹⁾。

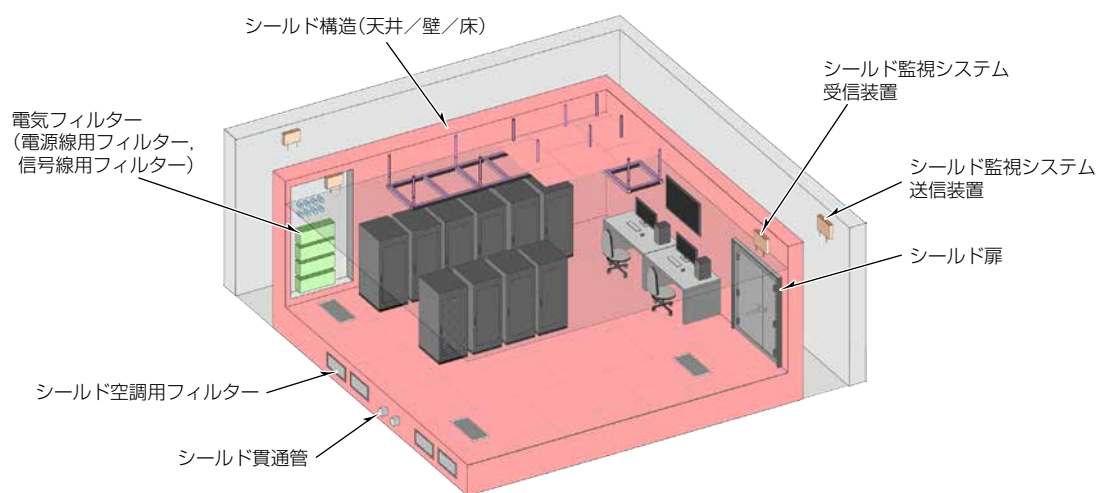


図1-電磁シールド施設例

従来のシールド監視システムは、大規模なフルスクラッチ開発によって改修時の影響範囲特定に時間を要し、顧客要望への迅速な対応が困難であった。また、監視対象施設の区画数に応じて専用ソフトウェアを作成しており、メンテナンス性が低下していた。さらに、長期使用ソフトウェアの流用によって画面デザインが現行標準から乖離(かいり)し、直感的ではない操作になっていた。これによって現場業務の生産性低下と運用コストの増加を招いていた。

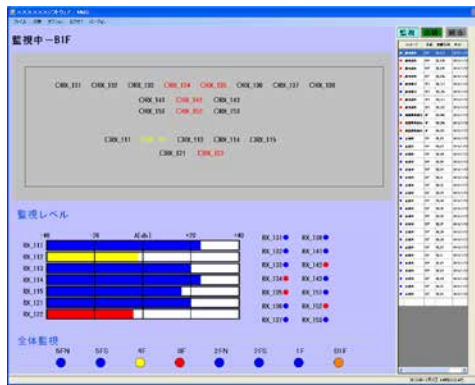
それらの解決手段として、GENESIS64プラットフォームを採用した。選定理由は、直感的なGUI(Graphical User Interface)エディターによって、現場作業者に分かりやすい画面レイアウトの作成が容易であるためである⁽²⁾。豊富なUI(User Interface)コンポーネントを活用して、モダンで直感的なインターフェースの構築が可能である。ドラッグ&ドロップ操作によるノーコードで開発できて、迅速に顧客要望を実現することが可能になった。

GENESIS64の採用に当たって、画面表示部分と内部処理部分を分離するようにアーキテクチャーを見直した。これによって、内部処理に影響せず画面改修が可能になり、顧客要望への迅速な対応を可能とした。さらに、監視対象施設ごとの区画数を設定ファイルで柔軟に変更可能なアーキテクチャーとすることで、設置システム間で共通適用できる汎用性を確保し、メンテナンス性を向上させた。

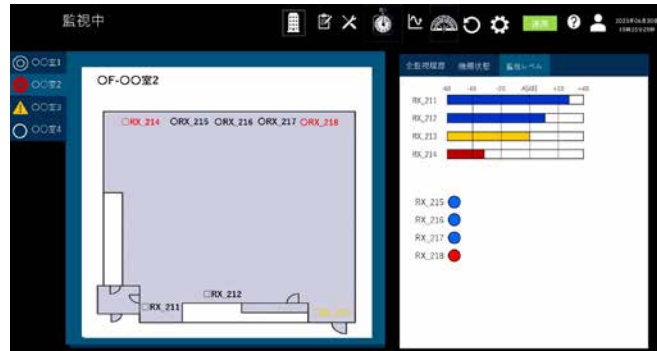
また、現場保守員へのヒアリング調査によって運用課題を収集し、画面遷移時のクリック数を半減させることで、エンドユーザーの作業効率改善と運用負荷軽減を実現している(図2)。

この開発では、GENESIS64プラットフォームの採用とシステムアーキテクチャーの見直しによって、従来のシールド監視システムが抱えていた保守性と操作性の課題を解決した。

画面と内部処理の分離、及び設定ファイルによる区画数変更の汎用化は、顧客要望への迅速な対応とメンテナンス性の大幅な向上を実現した。また、現場ヒアリングに基づくUI/UX(User eXperience)の刷新によって、運用者の作業効率改善にも寄与している。



採用前



採用後

図2-GENESIS64プラットフォーム採用前後のシールド監視画面

今後は新変調方式による高感度化によって、広大・高性能な施設への導入拡大が計画されている。こうした将来の監視需要に応えるため、柔軟なマンマシンインターフェースの構築を目指す。

参考文献

- (1) 窪田正博, ほか: 電磁シールドシステム“ペルセウス・シールド”, 三菱電機技報, 93, No.2, 133~136 (2019)
- (2) 三菱電機: 見える化ソフトウェア SCADAソフトウェアGENESIS64™
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/software/visualisation/genesis64/index.html>

~~~~~

三菱電機株式会社