



家庭から宇宙まで、エコチェンジ 

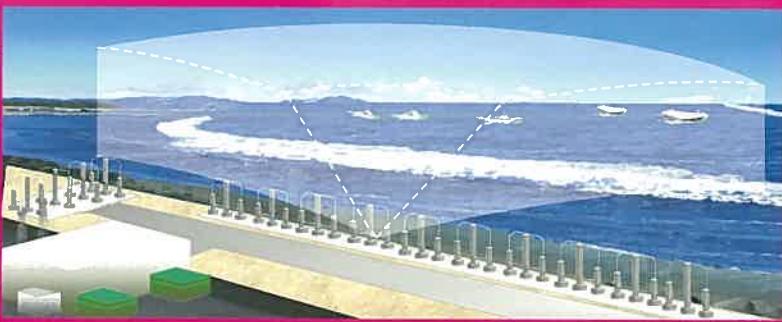
# 三菱電機技報

7

2019

Vol.93 No.7

## 社会の持続的発展に貢献する社会インフラシステム



### 目 次

特集「社会の持続的発展に貢献する社会インフラシステム」	Social infrastructure Systems Contributing to Sustainable Development of Society
安全へのレジリエンスアプローチ…………… <b>卷頭言</b> 1	Resilience Approach to Safety Yoshio Nakatani
社会の持続的発展に貢献する社会インフラシステム …… <b>卷頭論文</b> 2	Social infrastructure Systems Contributing to Sustainable Development of Society Hideki Fukushima
社会・電力インフラIoTプラットフォーム“INFOPRISM” … 7 廣岡俊彦	IoT Platform “INFOPRISM” for Social Infrastructure and Energy Systems Toshihiko Hirooka
AIを活用した画像式河川水位計測装置 ……………… 11 前原秀明・口 優裕・鈴木利久・土田英滋・平 謙二	AI Digital Water Gauge Using Video Camera Image Hideaki Maehara, Michihiro Kuchi, Toshihisa Suzuki, Eiji Ueda, Kenji Taira
道路設備の故障予兆把握手法…………… 15 坪井貞也・藤野友也	Fault Prognosis Technique for Road Facilities Shinya Tsuboi, Tomoya Fujino
流入・流出水質データを活用した 下水処理場向け曝気風量制御…………… 19 橋爪弘二・吉田 航・今村英二・野田清治・古川誠司	Aeration Control for Sewage Treatment Plant Using Inflow and Outflow Water Quality Data Koji Hashizume, Wataru Yoshida, Eiji Imamura, Seiji Noda, Seiji Furukawa
社会インフラ維持管理サービス…………… 23 梅山 聰・佐久島 拓	Maintenance Service for Social Infrastructure Satoshi Umeyama, Taku Sakushima
河川堤防の地形状況監視システム…………… 27 早瀬高士・金子昇治・溝口博三	Terrain Deformation Monitoring System for River Embankment Takashi Hayase, Shoji Kaneko, Hiromi Mizoguchi
空港CDM ……………… 31 中村尚広・吉田知輝	Airport Collaborative Decision Making Naohiro Nakamura, Tomoki Yoshida
EV・PV連携エネルギー管理システム…………… 35 岩田敏彦	Cooperative Energy Management System Utilizing EV and PV Toshihiko Iwata
オゾン水で膜を洗浄する膜分離バイオリアクタの 膜面曝気風量最適化…………… 39 安永 望・後藤伸介・今村英二・林 佳史	Optimization of Membrane Scouring in Membrane Bioreactor with Cleaning Membranes by Ozonated Water Nozomu Yasunaga, Shinsuke Goto, Eiji Imamura, Yoshifumi Hayashi
海洋レーダを用いたデータ同化による津波予測技術…………… 43 山田哲太郎・小柳智之・有岡俊彦・石川博章・亀田洋志	Tsunami Prediction Technology by Data Assimilation Using Ocean Surface Radar Tetsutaro Yamada, Tomoyuki Koyanagi, Toshihiko Arioka, Hiroaki Ishikawa, Hiroshi Kameda
Cバンド気象レーダ向け新リッジ構造の 樹脂成形導波管スロットアレーランテナ…………… 47 柿元生也・中本成洋・小柳智之	Injection-molded-resin Slotted Waveguide Array Antenna with Novel Ridge Structure for C-band Weather Radar Ikuya Kakimoto, Narihiro Nakamoto, Tomoyuki Koyanagi
気象予報向けレーダ・ライダ…………… 51 中溝尚道・今城勝治・廣澤賢一・柿元生也・柳澤隆行	Radar and Lidar for Weather Forecasting Takamichi Nakamizo, Masaharu Imaki, Kenichi Hirosawa, Ikuya Kakimoto, Takayuki Yanagisawa
豆知識…………… 55	
特許と新案	
「設備維持管理システムおよび設備情報提供方法」…………… 56	

### 表紙：社会の持続的発展に貢献する社会インフラシステム

三菱電機の社会環境事業では、上下水道、道路、河川、空港や防災などの公共システムとビル、データセンター、競技場などの電源、映像システムや大規模太陽光発電システムなどの民間施設に関連するシステムを提供し、社会の持続的発展に貢献している。

①は道路・鉄道・トンネルの高精度な計測・解析を可能とした“三菱インフラモニタリングシステムⅡ(MMSDRⅡ)”の車両である。2015年のI期車両に続き、2017年11月Ⅱ期車両を投入した。昼夜を問わず、交通規制を行わずに道路や線路上を走行しながら計測を行い、社会インフラ点検業務の負荷を軽減する。貨物車を軌陸車に改造し、I期車両と同じ高密度レーザ、GPS(Global Positioning System)、IMU (Inertial Measurement Unit)に加えて8Kのラインカメラと鉄道線路の走行装置を備えている。

②は津波監視用海洋レーダの設置イメージである。大地震の発生による津波の到来に對して精度良く到来を予測することは、効率の良い避難行動や対応を行うために重要である。当社では従来の海洋レーダを改良し、津波シミュレーションと海洋レーダの表層流速を同化させた津波監視支援技術を開発した。このシステムによって、海洋レーダで計測される表層流速から高精度かつリアルタイムに津波の流速と津波高を予測できる。



①



②

## 巻/頭/言

## 安全へのレジリエンスアプローチ

Resilience Approach to Safety

仲谷善雄

Yoshio Nakatani



およそ人が集まって住む現代都市であれば、電気、ガス、水道、下水道、鉄道、道路、通信網などの、いわゆる社会インフラが整備され、運用されている。大規模なシステムであり、安定的な運用が求められるため、情報システムによる高度な監視制御が行われている。これらの運用は、通常時の運用と緊急時の運用に分けられる。ここでは、三菱電機が重視する“持続可能性”と“安心・安全・快適性”的方に深く関わる緊急時の運用を議論の対象にしたい。

社会インフラシステムのような複雑なシステムについては、米国エール大学のチャールス・ペローナ名誉教授が“ノーマルアクシデント”という問題を提起している。これは、構成要素数が膨大(complex)で、要素間が緊密に関連(tightly coupling)している社会インフラシステムでは、システム事故は通常の稼働の範囲内で起こり、避けられないという指摘である。システムは常に内外の諸要素によって攪乱(かくらん)されるため、不安定となり、小さな不具合の組合せがシステム全体の破滅的な事故に発展する可能性が大きく、設計者でさえ予測できない結果をもたらすことがある。そこで、攪乱要素に対抗してシステムの安定化を図り、安全を確保したいわけだが、ここで二つのアプローチがある。一つは“ロバストネスアプローチ”で、強固な予防策を講じて、できる限り攪乱要素を排除しようとする考え方。もう一つは“レジリエンスアプローチ”で、排除が困難な攪乱要素による影響を局所にとどめ、仮に安定が損なわれても、迅速に元の状態に回復させるという考え方である。ロバストネスは耐震設計、レジリエンスは免震設計と言えば分かりやすいだろうか。

従来の安全対策はロバストネスアプローチであり、安定を重視し、エラー、事故、故障などのシステムにとっての攪乱要素を可能な限り排除しようとしてきた。例えば、“事故ゼロ”のスローガンの下に、エラー、事故、故障が生起しない日数などを指標にした組織的な取組みを推進してきた。もちろん、このような取組みは重要だが、これだけだと、システム設計論的に見れば、マイナス要因がゼロの時期が継続するとフィードバックされるものがなくなり、評価できない状態が続く。すなわち、100点の状態が続くために、改善のきっかけがなく、現状維持が目標となる。こ

の場合、安全が、高みに到達するための目標となることが難しい。

一方のレジリエンスアプローチは、組織やシステムには達成したい業務・機能上の目的があり、その達成こそが最重要だと考える。例えエラーを犯しても、適切に対応することで迅速にリカバーし、正常なオペレーションに戻れば問題はない、このようなリカバリー能力こそが重要だと考える。エラーを犯すことは、それだけでは“失敗”ではなく、リカバーできた場合にはむしろ“成功”なのだと考える。ここで安全とは、組織やシステムが目的の達成を目指す活動の中で、変動する状況下でどのように成功するかの能力のことである。別の観点からは、ロバストネスアプローチに基づくフェイルセーフの場合、事前の仕組みとして安全装置を組み込んでおく。一方、レジリエンスアプローチでは、攪乱要素の影響やシステム構成要素間の関連性に必ず不確実な要素が存在すると考えるので、完全なフェイルセーフはあり得ず、現場での臨機応変な対応力を重視する。繰り返すが、ロバストネスアプローチによる攪乱要素の最小化の取組みは前提であり、その上で、ロバストネスアプローチの限界を認めて、人による柔軟な対応で補うということである。システムへの要求事項の観点からは、人によるレジリエンス行動を可能にする、又は支援するシステム機能が必要だということになる。

レジリエンス行動では、①攪乱の予知・予見、②攪乱の発生を見逃さないための注意、③攪乱の回避又は影響からの迅速な復旧、④過去の経験からの学習の四つが重要とされる。したがってこれらの行動を支援する機能が求められる。レジリエンスアプローチでは特に、予知・予見に基づくプロアクティブな行動が重視されるため、今何が起きているのか、今後何が起こる可能性があるのか、そのときにどのような回避行動が可能なのかに関する情報を、状況の変化に応じて常に更新しながら、提供する必要がある。そのためには、必要なリソースの管理、予防的対応策のリストアップや過去事例の蓄積、予知・予見を支援するための様々なセンサ情報の提供などが重要なシステム機能になる。安全の高度化に向け、更なる取組みが求められる。

## 卷頭論文

社会の持続的発展に貢献する  
社会インフラシステム

福嶋秀樹\*

Social infrastructure Systems Contributing to Sustainable Development of Society

Hideki Fukushima

## 要 旨

エネルギー制約、少子高齢化、地域の疲弊、自然災害など国内外の課題が増大、複雑化していく中で、2015年の国連サミットで“持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)”が採択された。“持続可能性”と“安心・安全・快適性”が両立する豊かな社会の実現に向けて、社会インフラシステムには維持管理や災害対策に対する高度な機能が求められてきている。

一方、“第4次産業革命”とも呼ぶべき“IoT(Internet of Things)”“ビッグデータ”“AI(Artificial Intelligence)”“ロボット”等による技術革新が、従来にないスピードとイン

パクトで進行している。これらの技術の応用による社会インフラの維持管理の高度化や新たな価値創出が期待されており、三菱電機も上下水道、道路、河川、空港、防災などの社会インフラシステムに対してこれら最新技術を適用すべく取り組んできた。

この特集号では、社会インフラシステムの最新技術を、“AI技術利用”“省エネルギーと安心・安全”“センシング技術”の切り口で述べる。当社は、最新技術の研究開発やそれらを活用した製品化を更に加速し、持続可能な社会と安心・安全・快適が両立する豊かな社会の実現に貢献していく。



## 当社社会環境事業関連の社会インフラシステム及び設備・装置

当社の社会環境事業では、上下水道、道路、河川、空港や防災などの公共システムとビル、データセンター、競技場などの電源、映像システムや大規模太陽光発電システムなどの民間施設に関連するシステムを提供している。この図は、社会環境事業に関連する社会インフラシステム及び設備・装置を示しており、四角枠はこの特集号で紹介しているシステムや技術である。

## 1. まえがき

近年、エネルギー制約、少子高齢化、地域の疲弊、自然災害など国内外の課題が増大、複雑化しており、2015年の国連サミットでは持続可能な世界を実現するための17のゴールSDGsが採択された。一方、情報通信技術(Information and Communication Technology: ICT)の急激な進化によって、社会・経済の構造が日々大きく変化する状況が生まれてきている。それによって既存の枠組みにとらわれない市場が生まれ、知識・価値の創造プロセス変化がもたらせつつある<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>。

社会インフラでは、“安全な水”“クリーンで安定したエネルギー供給”“産業と技術革新の基盤”“持続可能な都市作り”“気象変動への対策”などの社会的解決が必要となってきている。当社が提供する社会インフラシステムも“IoT、AI等の共通基盤技術”“当社が持つ産業コア技術”と“関連データ(ビッグデータ)”を組み合わせることで変革を続けている。

本稿では、当社の社会インフラシステムの中で社会的課題の解決に寄与する代表的な例を述べる。

## 2. 社会インフラシステムに対する当社の取組み

当社の社会環境事業での社会インフラシステムは、上下水道、道路、河川、空港や防災などの公共システムと、ビル、データセンター、競技場などの電源、映像システムや大規模太陽光発電システムなどの民間施設に関連するシステムを提供している。この章では、これらの各システムを取り巻く社会環境の変化と当社の取組みについて述べる。

### 2.1 サービス基盤IoT共通プラットフォーム“INFOPRISM”

当社は、IoT・クラウド技術を活用して社会インフラシステムの効率的な運用・保守を実現する各種ソリューションの開発に取り組んでおり、その中で、ソリューションに共通する機能を集約したIoTプラットフォーム“INFOPRISM”を開発した(図1)。

INFOPRISMは、社会・電力インフラ分野で質の高い様々なソリューションをタイムリーに、短期間で提供するために、IoTソリューションの共通的な機能をまとめたものである。INFOPRISMは、現場側に設置するハードウェアとクラウド上で動作するソフトウェア群で構成され、次のような特長を持つ様々な機能を備えている。

- (1) 現場に設置された様々なインフラ設備からの“データ収集・蓄積・可視化”を実現

- (2) 設備運用計画最適化を支援する“AI(機械学習)によるデータ分析”
- (3) 安心・安全にIoTソリューションを利用可能とする“高度なセキュリティ”

当社は上下水道、道路、交通(鉄道)、電力等分野にINFOPRISMを適用し、設備の運用・保全業務の効率化・高度化を推進していく。

### 2.2 AI技術利用

AIとは、人間の脳が行っている知的作業(思考や推測、記憶など)を、コンピュータなどの機械によって代替する技術である。社会インフラシステムでは、長年蓄積された監視データ・制御データ・点検データを持っており、これらの膨大な量のデータ“ビッグデータ”とAIを組み合わせることで、今まで人間の頭脳では処理できなかった新しい知見を得て、より的確な提案・制御を行うことができる。

次にAI技術を利用した当社社会インフラシステムについて述べる。

#### 2.2.1 画像式河川水位計測装置

近年、記録的な大雨や集中豪雨による甚大な水災害が頻発しており、治水・災害対策を強化して被害を最小限に抑える上で、より多地点での河川水位把握が重要になっている。

当社は、現場設置が容易で幅広く観測点を増やすことができ、さらに洪水にも強い非接触型の画像式AI水位計測装置を新たに開発した。この装置は、大量の河川映像データによって“水面”を学習させたディープニューラルネットワーク(DNN)を備え、映像中の水域と非水域を分離する。その結果に基づいて河川映像中の水際位置を特定し、あらかじめ計測した河川シーンの三次元データを参照することで水位高を算定する。DNNを用いることによって、従来は実現困難であった水位標の非設置箇所での水位高の算定を可能にした点が特長である。

計測装置はフルHD(High Definition)解像度のビデオカメラ(検知センサ)と画像処理ユニットで構成しており、計



図1. INFOPRISM

測定単位1cm、2分間で30フレームの入力映像について水位計測処理が可能である。国土交通省の定める河川砂防技術基準を満たす基盤・汎用観測に使用できる。

## 2.2.2 道路設備の故障予兆把握技術

道路インフラでは、橋梁(きょうりょう)やトンネルなどの維持管理コスト増大の影響を受け、電気通信設備の維持管理コスト効率化が求められている。また働き方改革や熟練技術者の高齢化、人員不足の観点からも設備運用や設備保全業務の高効率化が求められている。

これらの課題を解決する手段として、設備異常や故障発生の予兆を事前に把握することで、故障発生前に調査や体制確保等の対策を講じ、システム停止時間の最小化が期待できる。また、突発的な対応や予定外作業による業務効率の悪化・コスト増の抑止が期待できる。

当社の道路設備の故障予兆把握システムは、既存の広域監視制御システムで収集する電気通信設備の計測データを活用し、故障予兆の把握を行う。

長期間の計測履歴データに当社独自の高速特異値分解技術“DynamicSVD(Dynamic Singular Value Decomposition)”を適用し、計測データに基づく特異指標値を“異常兆候”候補として抽出する。DynamicSVDによって算出した特異指標値をAI(機械学習)によって評価し、日ごとの計測データが異常兆候を示すか否かを判定する。

## 2.2.3 最適曝気風量制御技術

下水処理場は水環境保全のために大きな役割を果たしているが、汚濁物質を除去する反応槽での生物処理に多量のエネルギーを使用している。水質とエネルギーにはトレードオフの関係があるため、水質改善と省エネルギー化を両立させるための対策が必要となる。

当社では、従来開発してきた反応槽内のアンモニア濃度による制御に、反応槽流入部で計測したアンモニア濃度による制御を加えた曝気風量制御技術を開発中である。この制御技術は、流入負荷の変動に応じた風量制御を反応槽前段のフィードフォワード制御(FF制御)で行い、槽内のアンモニア濃度によるフィードバック制御(FB制御)を反応槽後段で行う技術である。FF制御と組み合わせたことで流入負荷の変動に素早く対応し、反応槽アンモニア濃度を目標値に適正に制御できる。

シミュレーションの結果、周期的に変動する流入負荷変動に対して追従でき、一般的な溶存酸素(DO)制御と比べて約15%の風量削減効果が得られることを確認した。

## 2.3 省エネルギーと安心・安全

東日本大震災を契機に、再生可能エネルギーの導入は進んでいるものの、環境負荷の更なる軽減が課題である。また、あらゆる世代の国民が住み慣れた地域で安心・安全な生活を送ることができる社会基盤の実現に向け、ICTなどを駆使したコンパクトで機能的な街作り、災害を最小限に

抑えて災害を未然に防ぐ社会システムの構築が求められている。

また、2020年の東京オリンピック・パラリンピックを見据えた観光客誘致政策の強化などを通じて訪日観光需要は一層拡大し、旅客機の発着便数は大幅な増加が見込まれており、これまでにも増して航空安全の確保が求められている。

安心・安全を確保しつつ、一歩先の快適性を追求し、全ての国民が心豊かに質の高い生活を送る社会の実現に向けた当社の取組みを次に述べる。

## 2.3.1 社会インフラ維持管理サービス

2012年の篠子トンネル天井板崩落事故を受け、2014年には道路法施行規則改正によって5年ごとにトンネルや橋などインフラ構造物の近接目視点検が義務化された。国土交通省は、インフラの老朽化に伴う点検作業にインフラ点検ロボット技術の開発・導入を加速する動きを見せており、2019年2月には近接目視を補完・代替・充実する技術の活用を認める形でトンネルや橋梁の点検要領を改定した。

当社は、インフラ構造物管理事業者が現在実施している近接目視点検と同等以上の精度を実現することを目的に計測車両(図2)を開発し、鉄道と道路分野からサービスを開始した。計測車両は、高密度レーザと高解像度カメラを搭載しており、インフラ構造物を交通規制なく計測可能である。計測データを独自開発したソフトウェアで解析することによって、トンネル変状展開図作成支援サービスを始め、鉄道分野では建築限界計測や設備位置計測サービス、道路分野ではトンネル内のボルト取付け状態等の設備の現況を把握する点検支援サービスを提供している。

今後は、時間軸で計測データを管理し、インフラ構造物の経年変化を把握するサービスや、リスク判定を含む効率的な維持管理計画を支援するサービスの提供を予定している。

## 2.3.2 地形状況監視システム

近年、異常豪雨による激甚な土砂災害が多発しており、被害を受けやすい河川や砂防の管理者は、防災と減災を目的として危険箇所の現況を迅速かつ的確に把握し、避難情報等を早期に住民へ提供することが求められている。



図2. 計測車両

従来、管理者がCCTV(Closed-Circuit TeleVision)カメラ映像を用いて監視し、危険箇所の決壊や崩落を検知しているが、映像だけでは地形状況を定量的に把握することが難しい。また、定量的な把握には災害現場で現地測量を行う必要があるが、二次災害の危険性が伴うとともに、現況の把握までにデータ解析を含め数日の期間を要する。

今回、3D(3Dimensions:三次元)レーザスキャナ一体型カメラを用いて自動的に現地測量を行い、地形状況の変化(地形変状)を遠隔から安全かつ迅速に定量把握することが可能な“地形状況監視システム”を開発した。

### 2.3.3 空港CDM

近年、増加傾向にある航空交通量に対応するため、各空港での総合的な空港運用能力の改善を目的として、空港CDMの導入が進んでいる。空港CDMとは、空港でのステークホルダー間の協調的意意思決定を実現するためのシステムである。空港運用に係るステークホルダーには、航空管制、航空交通管理センター、航空機運航者、空港業務等があり、このほかにも様々な機関が存在する。その全てのステークホルダーが常に閲覧できる共有画面を提供し、空港関連システムから収集・蓄積した情報を適切な形で表示することで、最新状況を共有した上で最適な意思決定を可能にする。

当社では、日本初の空港CDMとして、新千歳空港CDMの開発を行った。新千歳空港CDMは、降雪時の空港運用を踏まえ、飛行場面の状態や除雪作業の状況を共有する機能や、航空機の運航状況を表示する機能を備えている。2018年12月に運用を開始しており、評価運用の期間を含め、大雪等の悪天候時の対応に活用されている。

### 2.3.4 EV・PV連携エネルギー管理システム

世界的な環境意識の高まりから、電気自動車(EV)が注目を集めている。EVはモビリティとしての利用に加え、移動可能な蓄電池としての活用も可能であるため、利用者に様々な便益を提供するポテンシャルを備えている。

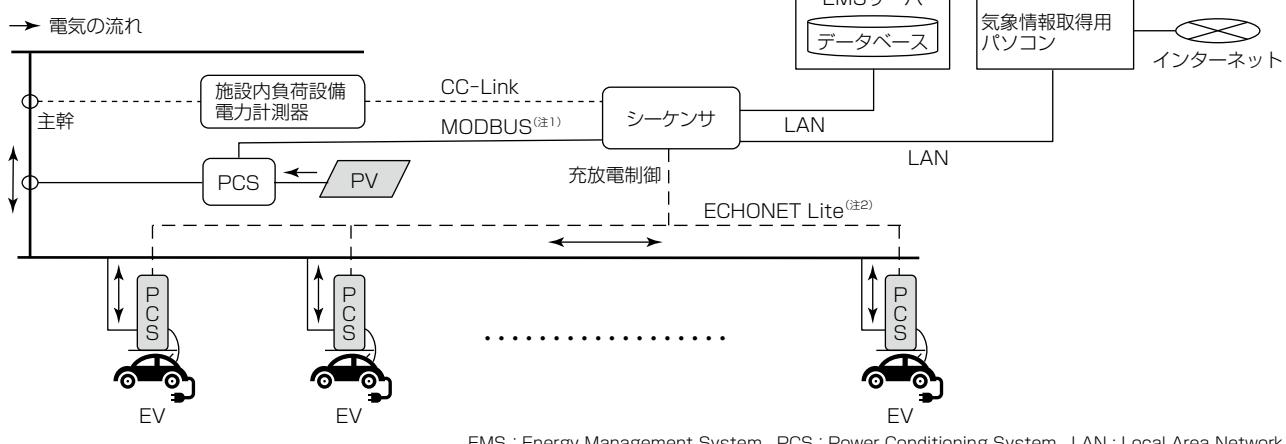


図3. EV・PV連携エネルギー管理システム

当社は、建物に設置した太陽光発電(PV)等の分散電源とEVを組み合わせ、最適な充放電制御を行う“EV・PV連携エネルギー管理システム”を開発した。

従来から、定置型蓄電池を利用したピークカットによる契約電力の削減や、日中と夜間の電気料金差を利用した従量料金の削減を行うシステムはあったが、このシステムは、EVを蓄電池と見立て、駐車している時間帯に有効活用し、PV等の分散電源の発電予測に基づき、EVの充放電スケジュールや電力負荷設備の運用を最適化することで、建物の電力コスト削減に貢献するシステムである(図3)。

### 2.3.5 EcoMBR

水質規制の強化や再生水の需要増大によって、従来の標準活性汚泥法から処理水質が良好な膜分離バイオリアクタ(Membrane BioReactor: MBR)の下水・工業排水処理への適用が世界的に拡がっている。当社のEcoMBRは、ろ過膜の洗浄でNaClO(次亜塩素酸ナトリウム)水の代わりにオゾン水(洗浄力の大きいオゾンガスを溶解させた水)を用いることで、従来のMBRよりも膜ろ過速度を2倍以上に高め、ろ過膜の本数を低減して膜面洗浄用の曝気風量を削減する省エネルギー型水処理装置である。

MBRでは、下水・工業排水の流入負荷変動や生物処理の運転条件変更等で活性汚泥の性状が変化することによって、ろ過膜の目詰まりのしやすさ、すなわち膜ろ過性能も変化する。膜面に付着する活性汚泥を剥離するために常時行う膜面曝気の消費エネルギーが大きいことから、膜ろ過性能を最適化してMBRを省エネルギーかつ安定して運転するために、活性汚泥の性状に応じて最適な膜面曝気風量で供給することも重要である。

当社は、バイオリアクタ内での活性汚泥性状に応じて膜面曝気風量を最適化する技術を開発中で、実排水を用いた実証試験では膜面曝気風量を11%削減できることを検証した。この技術を当社のEcoMBRに導入し、持続可能な水環境保全に貢献していく。

## 2.4 センシング技術

### 2.4.1 海洋レーダ津波予測技術

近年、日本の沿岸部では、大地震の発生による津波襲来が懸念されている。津波が沿岸に到達する前に、可能な限り早く精度良く到来を予測することは、避難等の対応を適切に行うために重要である。そのため、津波の沖合での正確な波高値や流速値をリアルタイムで知ることが課題となっている。従来、津波の波高値の計測手段として、沖合に設置されたGPS(Global Positioning System)ブイ等を用いる方法がある。しかし、GPSブイは設置位置(点)での計測しかできないため、広範囲にわたり多数設置する必要がある。

海洋レーダは陸上から広い範囲の海の状況を時間・空間的に高い日常の沿岸環境監視での有用性が検証されてきた。海洋レーダによって計測できるのは表層流速の視線方向成分だけであり、津波を予測するためには波高情報が必要とされていた。

当社は、レーダで観測された流速を基に津波シミュレーションによる数値計算を実施し、津波シミュレーションの予測値と海洋レーダの観測値をデータ同化させることで、高精度に津波の流速と波高を推定する津波データ同化方式を開発した。

### 2.4.2 Cバンドフェーズドアレー気象レーダ

近年ゲリラ豪雨などの直前予測への対応として注目を集めるXバンドフェーズドアレー気象レーダは、DBF(デジタルビームフォーミング)技術の適用によって観測周期を従来の1/10程度まで短縮できるものだが、現状の観測精度は、従来の気象予報のために使用されているCバンド気象レーダと同等以上の精度を必ずしも得られるわけではなく、装置が高価格であることもあり、現業配備には至っていない。

そこで当社は、現業のCバンド気象レーダへのフェーズドアレー方式の適用を見据え、十分な観測精度が得られかつ低価格なフェーズドアレーレーダを実現するための、独自のリッジ構造を持った樹脂成形導波管スロットアレーアンテナを2016年度から2018年度にかけて開発した(図4)。



図4. Cバンドフェーズドアレー気象レーダ

気象レーダにフェーズドアレー方式を適用するには、二重偏波観測を高精度で行うためのアンテナのハードウェア性能が最も重要である。樹脂化によるコストと質量を抑制するだけでなく、その成形の容易性を生かして、アンテナの効率、サイドローブレベル、交差偏波比といった気象観測に重要なアンテナ性能を確保とともに、コストと質量を抑制した。樹脂成形技術の適用によって柔軟な内部構造設計や量産が容易になり、このアンテナの設計・製造技術は広くインフラ・通信分野のアンテナにも適用できる。

### 2.4.3 気象レーダ・ライダ

気象レーダは、パルス状の電波をアンテナから照射して降水粒子や雲・霧の粒子の後方散乱波を受信することで、その位置と移動速度・強度を測定する装置である。気象ライダは、光波をスキャナから照射して大気中のエアロゾルを観測し、大気の風向・風速や乱気流を観測する装置である。

当社は、気象レーダの開発・製品化を1955年から、ライダには2015年から取り組んでおり、現在、50MHz～200THzの広範囲な周波数帯域のレーダ・ライダの製品群を持ち、日本及び海外の気象観測・予報業務及び研究に貢献している。現在は、気象予報の更なる精度向上に貢献するため、新型気象レーダ及び水蒸気ライダを開発に取り込んでいる。

新型気象レーダは信号処理の高度化によって受信データの品質を向上し、より正確な降雨データは予報計算の初期値として使用することで、予報精度の向上に貢献する。

水蒸気ライダは、風計測ライダに送信光の波長を水蒸気の吸収線に一致させる波長安定回路を付加して、水蒸気の吸収量から大気中の水蒸気量を計測するようにしたもので、水蒸気量の鉛直プロファイルを計測できる。この装置で、雲になる前の水蒸気の動きを捉えることで、これまで早期予測が困難であったゲリラ豪雨の予測に貢献する。

## 3. むすび

社会インフラでは、“安全な水”“クリーンで安定したエネルギー供給”“産業と技術革新の基盤”“持続可能な都市作り”“気象変動への対策”などの解決が求められており、社会インフラを運用・管理するシステムへの期待は今後ますます高まっていく。

社会の持続的な発展と安心・安全・快適が両立する豊かな社会の実現に向けて、最新技術を活用した研究開発や製品化を更に加速し、様々なソリューションを提供していく。

## 参考文献

- (1) 内閣府：第5期科学技術基本計画（2016）
- (2) 経済産業省：新産業構造ビジョン（2016）
- (3) 総務省：2018年度版情報通信白書（2018）
- (4) 外務省：SDGsについて（2019）

# 社会・電力インフラIoTプラットフォーム “INFOPRISM”

廣岡俊彦\*

IoT Platform "INFOPRISM" for Social Infrastructure and Energy Systems

Toshihiko Hirooka

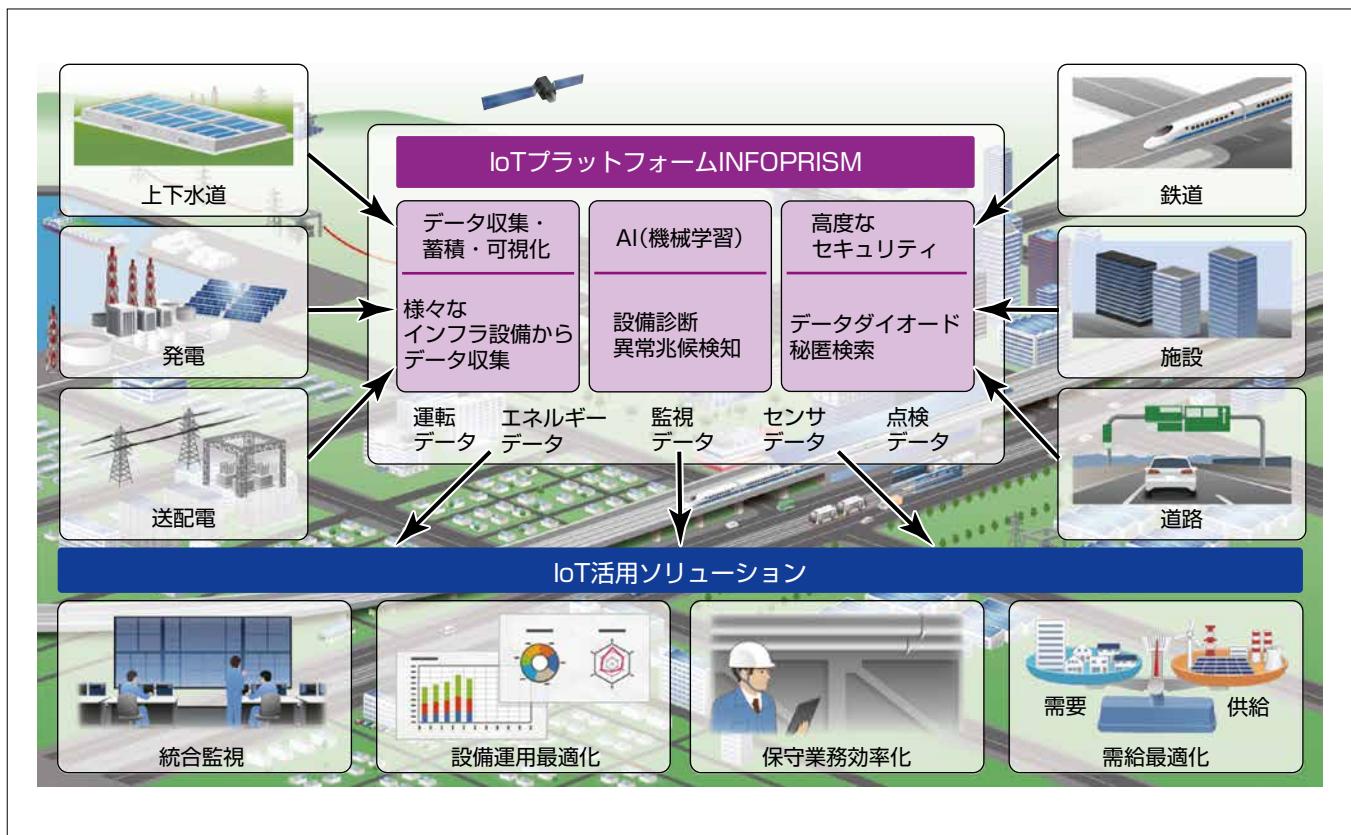
## 要旨

近年、労働人口減少や老朽化設備増加に伴い、社会・電力インフラシステムは、①運用・保守人員の減少、②設備老朽化による設備点検・更新等の保守作業負荷増大、③運用でのエネルギーコスト増という課題があり、運用・保守業務効率化のニーズが高まっている。

三菱電機は、これら社会・電力インフラシステムに対する課題や、働き方改革による業務の更なる効率化の要望に対し、社会・電力インフラ設備の運用・保守業務の効率向上に貢献するIoT(Internet of Things)ソリューションを実現するための、IoTプラットフォーム“INFOPRISM”を

開発した。

INFOPRISMは、IoT、クラウド、AI(Artificial Intelligence)、アナリティクスといった技術を活用し、①データ収集・蓄積・可視化、②AI(機械学習)、③高度なセキュリティの特長を持つ、様々な機能を備えている。INFOPRISMによって、社会・電力インフラ分野で質の高い様々な各種IoTソリューションをタイムリーに、短期間で提供することで、社会・電力インフラ設備の運用・保守業務の効率向上に貢献していく。



## 社会・電力インフラ向けIoTプラットフォーム“INFOPRISM”的活用イメージ

INFOPRISMは、①データ収集・蓄積・可視化、②AI(機械学習)、③高度なセキュリティを特長とした、IoT・クラウド技術による各種サービスを提供するための様々な機能を持つ共通プラットフォームである。また、上下水道、電力(発電、送配電)、鉄道、施設(ビルなど)、道路などで使われる社会・電力インフラシステムの課題解決のため、統合監視、設備運用最適化、保守業務効率化、需給最適化といったIoTを活用したソリューションの提供を計画している。

## 1. まえがき

近年、労働人口減少や老朽化設備増加に伴い、社会・電力インフラシステムの運用・保守業務効率化ニーズが高まっている。一方、IoT・クラウド技術の進展に伴い、社会・電力インフラの監視・運転等のデータ活用が注目されている。

当社は、IoT・クラウド技術を活用して社会・電力インフラシステムの効率的な運用・保守を実現する各種IoTソリューションの開発に取り組んでおり、その中で、IoTソリューションに共通する機能を集約したIoTプラットフォーム“INFOPRISM”を開発した。

本稿では、INFOPRISMが提供する機能の特長とINFOPRISMを活用したIoTソリューションについて述べる。

## 2. 社会・電力インフラ向けIoTプラットフォーム“INFOPRISM”

INFOPRISMは、社会・電力インフラ分野で質の高い様々なIoTソリューションをタイムリーに、短期間で提供するために、IoTソリューションの共通的な機能をまとめたものである。INFOPRISMは、現場側に設置するハードウェアとクラウド上で動作するソフトウェア群で構成し、次のような特長を持つ。

- (1) 現場に設置された様々なインフラ設備からの“データ収集・蓄積・可視化”
- (2) 設備運用計画最適化を支援する“AIによるデータ分析”
- (3) 安心・安全にIoTソリューションを利用可能とする“高度なセキュリティ”

### 2.1 データ収集・蓄積・可視化

INFOPRISMは、様々なインフラ設備のデータをクラウドで可視化するために、①ゲートウェイ機能、②データ収集機能、③データ蓄積機能、④データ可視化機能を提供する。

#### 2.1.1 ゲートウェイ機能

ゲートウェイ機能は、様々な現場に設置されたインフラ設備から、クラウドへデータ送信する機能を提供する。ゲートウェイ機能は、当社のIoTシステム対応通信ゲートウェイ装置(以下“IoT GW”という。)で実現する。IoT GWは、次のような特長を持つ。

- (1) 防塵(ほうじん)・防水等に対応した耐環境性能
- (2) 産業用機器と同等の動作温度(-10~55°C)を保証
- (3) 有線だけでなく、3G, LTE(Long Term Evolution), 無線LANといった各種無線通信
- (4) 産業用のPLC(プログラマブル ロジック コントローラ)向け通信プロトコル“MODBUS”<sup>(注1)</sup>やビル設備の監視/制御用通信プロトコル規格“BACnet”<sup>(注2)</sup>など、分野ごとの様々な産業用通信規格に対応

IoT GWとクラウドの間で大量データでの通信性能を確保するため、データを圧縮して送信する。また、IoT GW内にデータを蓄積する仕組みを持っており、インターネット回線切断などによってクラウドへデータ送信できなかつた場合でも、接続復帰後に再送処理を行う(図1)。

(注1) MODBUSは、Schneider Electric USA, Inc.の登録商標である。

(注2) BACnetは、ASHRAEの登録商標である。

### 2.1.2 データ収集機能

IoT GWから送信されたデータをクラウドで受信する機能を提供する(図2)。データ収集機能は、データ通信の信頼性を確保するために、IoT GWからの一定回数のデータ再送処理に対応している。また、稼働状態のIoT GWを1台追加設置し、予備機として認識することで、冗長化構成を構築できる。

### 2.1.3 データ蓄積機能

収集したデータをデータベースに蓄積する機能とデータベースへのアクセスを共通化するインターフェース(以下“DBアクセスI/F”という。)を提供する(図3)。

データ蓄積では、データ収集機能から受信した設備データを非構造化データに対応したデータベースへ格納する処理を行う。データベースに格納する前には、データの正当性確保と蓄積量増加に伴う管理コスト増とデータ検索性能低下を防ぐため、以下の処理を行う。

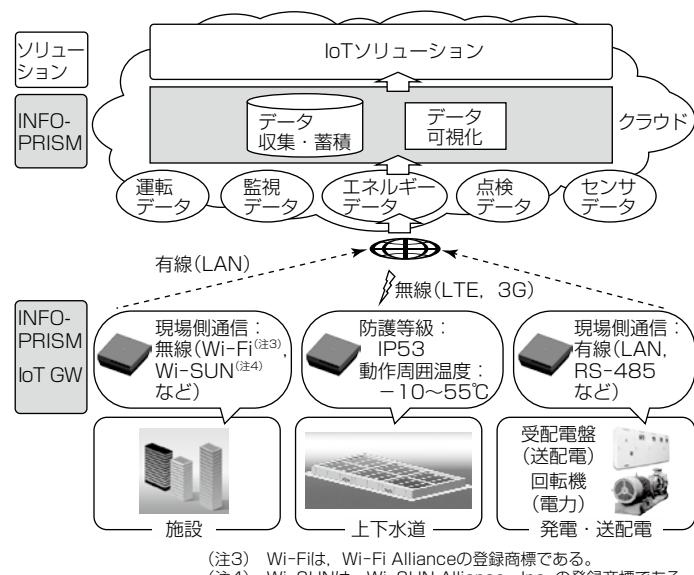


図1. ゲートウェイ機能を使ったデータ送信のイメージ

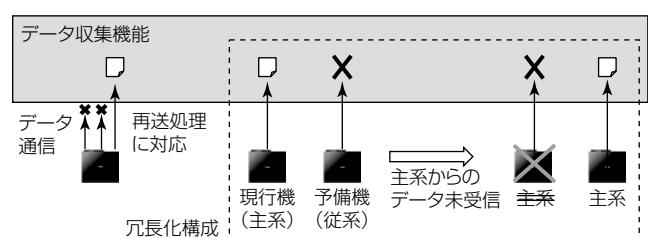


図2. データ収集機能のイメージ

- (1) データ構造に誤りがないかをチェック
- (2) 登録対象データのデータサイズ、及びデータベース上に蓄積されたデータ量の合計値がデータベース蓄積量の上限値を超える場合、上限値に収まるように最古の蓄積データから削除

IoTサービスがデータベースに対してデータ操作したい場合には、DBアクセスI/Fを利用する。DBアクセスI/Fは、“データ取得”“データ登録”“データ集計”的三つの操作を提供する。“データ取得”では、時刻範囲(開始時刻、終了時刻)を指定し、時系列データとして取得できる。さらに、“データ集計”を使用すれば、指定した期間内の蓄積データの集計値(データ数、合計値、最小値、最大値、平均値)を取得できる。

#### 2.1.4 データ可視化機能

データベースに蓄積された膨大なデータから必要なデータをピックアップし、容易に表やグラフで可視化するための機能を提供する。必要データのピックアップは、データ蓄積機能のDBアクセスI/Fを使用し、可視化したい範囲のデータを時系列で取得する。ピックアップした時系列データに対し、データの属性情報をあらかじめ用意した表やグラフのテンプレートの軸として自由に設定することで、指定したデータを可視化表示できる。グラフは、棒グラフや折れ線グラフだけでなく、散布図やレーダチャートなど、多種用意しており、多角的に可視化表示できる(図4)。

#### 2.2 AIによるデータ分析

INFOPRISMは、現場から収集・蓄積した膨大な設備データをAI(機械学習)技術を活用して分析する機能(以下“データ分析機能”という。)を持つ。データ分析機能を活用することで、現場設備の状態診断や異常兆候検知など、点検業務効率化や設備運用・保守計画を最適化できる。

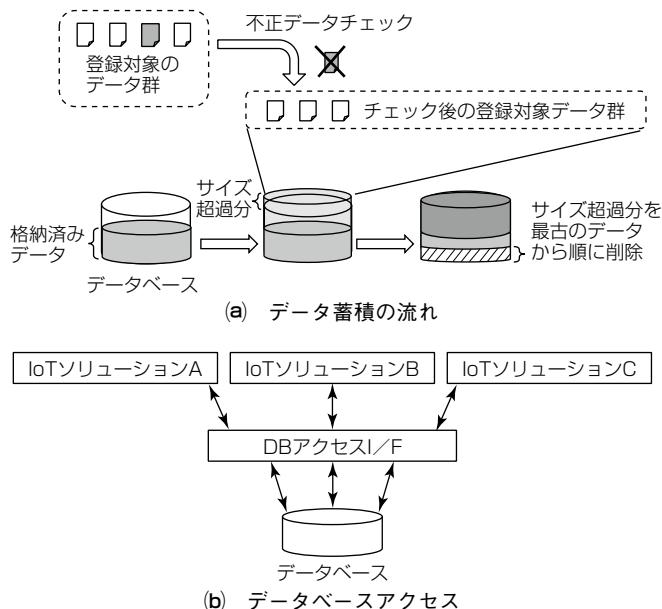


図3. データ蓄積の流れとデータベースアクセスのイメージ

AIによるデータ分析は、次のフローで行う。

#### (1) データクレンジング

収集したデータから、データ分析基準に合わないデータや揺らぎデータを均質化することでデータ品質を高めるための事前加工

#### (2) モデリング

分析・評価する際に使用する分析アルゴリズムやデータの種類、範囲などを定義

#### (3) 分析評価・運用

##### (1), (2)を用いたデータ分析と結果のフィードバック

データ分析機能は、(1)から(3)のフローを実現する部分を分析基盤として整備しており、分析対象の設備や利用シーンなどに応じて分析アルゴリズムを自由に差し替えることができる。分析アルゴリズムとして“重回帰分析”“ロジスティック回帰分析”“クラスタ分析”など、一般に広く使われるアルゴリズムのほか、当社AI技術である“Maisart (Mitsubishi Electric's AI creates the State-of-the-ART in technology)”を活用でき、分析アルゴリズムを組み合わせることで高度なデータ分析が可能である。

#### 2.3 高度なセキュリティ

INFOPRISMは、安心・安全にIoTソリューションを利用できるようにするため、社会・電力インフラへのサイバー攻撃抑止や暗号化通信などの様々な高度セキュリティ機能を具備している(図5)。

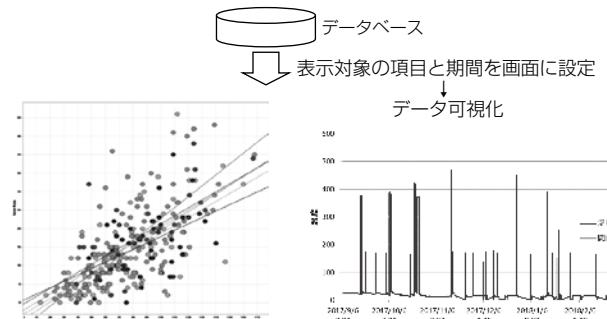


図4. データ可視化例

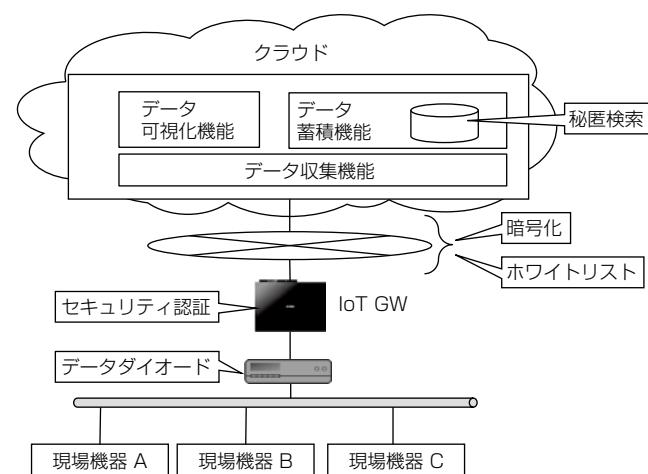


図5. セキュリティ対策箇所とセキュリティ機能

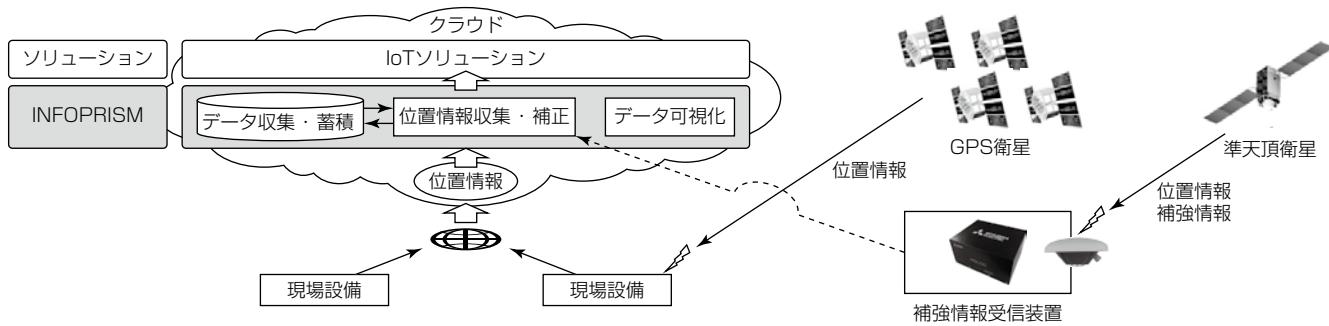


図6. 位置情報収集・補正機能の動作イメージ

## (1) データダイオード

物理的にインターネットからの通信を遮断し、現場側の機器や社会・電力インフラシステムに対する不正侵入などのサイバー攻撃を防ぐ。

## (2) EDSA認証FSAレベル1相当のセキュリティ機能

産業用制御機器のセキュリティ認証制度であるEDSA(Embedded Device Security Assurance)認証の機能要件として定義されるFSA(Functional Security Assessment)レベル1相当の機能を具備しており、IoT GW自身への攻撃を防ぐ。

## (3) ホワイトリストによる特定機器とのデータ通信

IoT GWの機器固有情報やIP(Internet Protocol)アドレスなどをリスト化したもの(ホワイトリスト)と通信時に照合することで、信頼できない機器からの通信を遮断し、なりすましによる不正データの混入を防ぐ。

## (4) データ暗号化とデータ通信路暗号化

IoT GWとクラウドとの間のインターネット通信では、データ暗号化と、SSL(Secure Socket Layer)/TLS(Transport Layer Security)による暗号化通信によって、第三者からのデータ盗聴とデータ改ざんを防ぐ。

## (5) 秘匿検索

データを暗号化したままクラウド上のデータベースに保管し、復号せずに欲しい情報を検索することで、データ盗聴を防ぐ。

## 2.4 その他機能

“データ収集・蓄積・可視化”“データ分析”“高度なセキュリティ”以外のIoTソリューションの提供につながる機能として、“位置情報収集・補正”機能について述べる。

## 2.4.1 位置情報収集・補正

可搬式の現場設備やGPS(Global Positioning System)センサによって測量や地形変状を捉るために、僅かな位置情報の変化や正確な位置情報が必要な場合で、センチメータ級の誤差に収まる高精度の位置情報を計算する機能である。位置情報収集・補正機能は、みちびき(準天頂衛星システム)によるセンチメータ級測位補強サービス(Centi-meter Level Augmentation Service : CLAS)<sup>(1)</sup>を活用した位置情報の補正処理をクラウド上で行うため、位

表1. 提供を計画しているIoTソリューション

名称	概要
遠隔監視・広域運用	遠隔から複数システムを統合監視・運用し、運用を省人化
保守業務効率化	カメラやマイクなどの活用による点検作業の省人化、劣化状況判定。設備の状態把握による点検・更新作業の効率化
位置情報連携	インフラ設備や移動体設備などからの位置情報を活用した設備管理や状態計測を行い、防災業務などの運用効率化

置情報が得られるセンサや設備であれば、測量用の高価なものではなく、位置情報が測位できる安価なセンサや設備でも高精度な位置情報を計算できる。

現場設備から収集した位置情報を、次のフローで補正し、高精度化を行う(図6)。

- (1) 現場設備から位置情報を定周期にクラウド上に収集
- (2) GPS衛星の位置を計算するために必要な軌道情報等が含まれた“航法データ”，センチメータ級に補強するための“測位補強情報”を準天頂衛星から受信
- (3) 過去数時間分の航法データと測位補強情報を用いて、CLASを用いて現場設備の位置情報を計算して補正
- (4) (3)の結果に対し、実測ノイズを平滑化によって除去

## 3. INFOPRISMを活用したIoTソリューションの今後

当社では、社会・電力インフラシステムが抱える課題を解決するIoTソリューションの開発にも取り組んでおり、今後、提供していく計画である(表1)。

## 4. むすび

少子高齢化による労働人口の減少に伴う社会・電力インフラでの熟練運転員・技術者の減少や、働き方改革による業務の更なる効率化の要望に対し、社会・電力インフラ設備の運用・保守業務の効率向上に貢献するIoTプラットフォーム“INFOPRISM”について述べた。今後、INFOPRISMを活用した様々なIoTソリューションの提供によって、社会に貢献していく。

## 参考文献

- (1) 内閣府：センチメータ級測位補強サービス  
<http://qzss.go.jp/technical/system/l6.html>

# AIを活用した画像式河川水位計測装置

前原秀明\* 上田英滋\*\*\*  
口倫裕\*\* 平謙二†  
鈴木利久\*\*

AI Digital Water Gauge Using Video Camera Image

Hideaki Maehara, Michihiro Kuchi, Toshihisa Suzuki, Eiji Ueda, Kenji Taira

## 要旨

近年、集中豪雨の頻発・激甚化が懸念される中、水災害に対して河川堤防整備などのハードウェア面の対策に加え、早期避難の実現に向けた正確で即時性に優れた河川水位情報の提供といった、ソフトウェア面の対策も求められている。水位観測に関しては、災害に強く設置の容易な非接触型の水位計測によって観測地点数を増やすことが期待されている。

三菱電機と三菱電機エンジニアリング(株)(MEE)は、これまでに水位標を被写体とした画像相関法による画像式水位計測装置を開発・納入している。今回、水位標の非設置箇所でも水位観測を可能にして観測の多地点化を促進することを目的として、三菱電機のAI(Artificial Intelligence)技術“Maisart”を活用した画像式河川水位計測装置“フィールドエッジ”を開発した。この装置は、河川映像を

用いて“水面”を学習させたディープニューラルネットワーク(DNN)を備え、DNNの機能によって映像中の水域と非水域を分離することで水際位置を特定し、あらかじめ計測した河川構造物の三次元情報を参照して水位高を算定する。水面の画像特徴から直接的に映像中の水際を特定できるようにしたことによって、次のような特長を持った水位標を必要としない水位計測を実現した。

- (1) 水位計測単位 1 cm(画像分解能 6 ピクセル/cm以上)
- (2) 入力情報として、夜間等の低照度環境で取得される低フレームレート動画～静止画までを処理可能
- (3) 水位計として自立動作可能なエッジ型AI処理
- (4) 水位だけなくリアルタイム画像との組合せによる情報提供が可能



## 画像式河川水位計測装置“フィールドエッジ”的構成

この装置は検知センサと画像処理ユニットで構成している。検知センサはフルHD(High Definition)解像度の映像データを取得し、シーン内の指定領域の照度に応じて感度を最適設定するエリア測光機能を搭載している。多地点型検知センサは、プログラム化された旋回・合焦動作による複数箇所の巡回計測、水位上昇に追従するワイドレンジ計測等を可能にする。画像処理ユニットは、大量の河川映像から“水面”を学習したDNNを内蔵し、安定した河川水位計測を実現する。この装置は、“2018 R&D 100 Awards”を受賞した。

\*三菱電機(株) 情報技術総合研究所(工博) \*\*同社 同研究所 \*\*\*同社 神戸製作所

†三菱電機エンジニアリング(株)

## 1. まえがき

近年、記録的大雨や集中豪雨による甚大な水災害が頻発しており、治水・災害対策を強化して被害を最小限に抑える上で、より多地点での河川水位の把握が重要になっていく。しかしながら、従来の水位観測では、フロート式や水圧式等の水に接触して計測する接触型の方式が多く用いられてきたが、洪水時に破損したり、一定の水位を超えると計測できなかったりする等の課題があった。

そこで、三菱電機とMEEは、非接触型の画像式河川水位計測装置として、水位標を被写体とし画像相関法によって水位計測を行うWDIC(Water-level Digital Image Correlation)方式の装置を開発・納入している。今回、さらに、水位標の非設置箇所でも水位計測を可能にするために、橋脚や堤防等の河川構造物を被写体とし、三菱電機のAI技術“Maisart”を活用して映像中の水域と非水域を識別し、水際位置を特定して水位計測を行う<sup>(1)</sup> WDL(Water-level Deep Learning)方式の画像式河川水位計測装置を開発した。

本稿では、この装置“フィールドエッジ”のWDL方式の機能と特長、DNNを用いた水位計測方法について述べる。

## 2. AIを活用した画像式河川水位計測装置

### 2.1 機能

画像式河川水位計測装置は、検知センサと画像処理ユニットで構成している。この装置が提供する機能は、河川水位の計測と記録及び水位データの外部出力である。図1に装置構成と機能及び水位計測処理の流れを示す。

#### (1) HD撮像機能(高精細フルHD、高感度)

検知センサは、図2に示すように、橋梁(きょうりょう)



図1. 装置構成と機能及び水位計測処理の流れ



図2. 検知センサの設置と画角設定の例

近くの堤防上の支柱等に設置し、河川に喫水する箇所を持つ橋脚等の河川構造物が視野に入るよう画角設定を行う。この喫水箇所のある河川構造物を含むシーンを撮像し、映像データを画像処理ユニットに伝送する。

また、検知センサは、高精細フルHD及び高感度(最低被写体照度0.03 lx)を採用し、夜間での計測を実現している。

#### (2) AI水位計測処理機能

画像処理ユニットは、WDL方式によるDNNを実装したAI水位計測処理で、まず、画像内の水域と非水域を分離し、次に、この境界を水際として位置を特定する。この位置を基に、あらかじめ別途三次元レーザ計測ユニットによって計測した河川構造物の三次元計測情報(図3)を参照して水位高を算出する。

#### (3) 水位データ記録・出力機能

水位データとして、時刻と算出した水位高を統計処理した水位値、及び当該時刻の画像を画像処理ユニット内蔵の記憶媒体に保存する。また、上位装置や監視モニタ等に向けて水位データを外部出力する。

### 2.2 特長

映像を用いた水位計測では、天候や日照変化、河川の流況等、多様な環境・条件で頑強な画像解析を行う必要がある。特に水位標等の被写体がない場合、従来技術では、その性能が限定的であったため普及が進んでいなかった。

この装置は、DNNを利用することでこの問題を解決した。DNNに対して“水とは何か(水面は検知センサでどのように撮像されるか)”を、多様な屋外環境で取得した映像に基づいて学習させ、任意の対象画像で水域と非水域に高精度で分離することを可能にした。この高い識別能力を利用して、多様な屋外環境下で安定した水位計測を提供できる。この装置の主要な特長を、次に挙げる。

- (1) AI水位計測技術によって、非接触での河川構造物を被写体とした安定した連続観測、画像上での空間分解能6ピクセル/cm以上で水位計測単位1cmを実現
- (2) 高感度フルHDセンサによって、昼夜を問わず高精細な画像を取得して目視と同等の水位計測を実現
- (3) 水位計として自立して動作可能な現場端末側でのリアルタイムによるエッジ型AI処理を実現

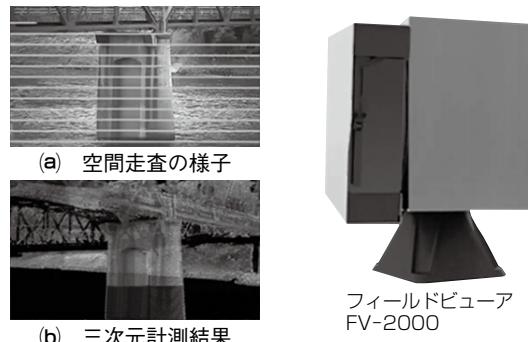


図3. 三次元レーザ計測ユニットによる計測

(4) 現場状況を水位と画像でリアルタイム監視が可能、画像を含む水位データ(水位、画像)の記録で状況検証を支援、現場画像を合わせた情報提供にも活用可能

### 3. DNNに基づく水位計測方法

#### 3.1 水際の特定

DNNに水位観測地点の河川構造物の外見変化とともに、水域の流れや反射などの特徴を教師データとして学習させ、水域と非水域を識別させることによって、従来方式の課題を克服でき、水際の位置を特定することが可能であると考えた。水位計測に用いるDNNは、画像の小領域が水域(河川水面)か、非水域(河川水面以外)かを判定する分類型DNNと、水際が存在する画像の小領域で、上部から何ピクセル目が水際かを判定する回帰型DNNの2種類を使用して、2段階によってピクセル単位で水際位置を特定する。

図4に基づいて具体的な実装について述べる。映像中で水位計測箇所を決め、あらかじめ検知センサから取得したフレーム画像から当該計測箇所を含む四辺形領域を観測枠として設定する。観測枠のサイズは、次のDNNへ入力するブロック画像の分割サイズに合わせて、縦64ピクセル×横64ピクセルサイズに正規化している。

第1段階(図4①)は、隣同士のブロックが32ピクセルのオーバーラップを持つよう観測枠の上部から64ピクセル×64ピクセルのブロックを取り出して19個のブロックに分割し、分類型DNNを用いて上部ブロックから順に水域・非水域の判定を行い、判定が非水域から水域に変化した箇所のブロックを切り出す。ブロック間に32ピクセルのオーバーラップを持たせることによって、上部から25～75%の間に水際が存在するブロックを選択できる。

第2段階(図4②)は、この選択したブロックを回帰型DNNに入力することで、ブロック上部からのピクセル数として水際位置を特定する。第1段階で選択したブロック

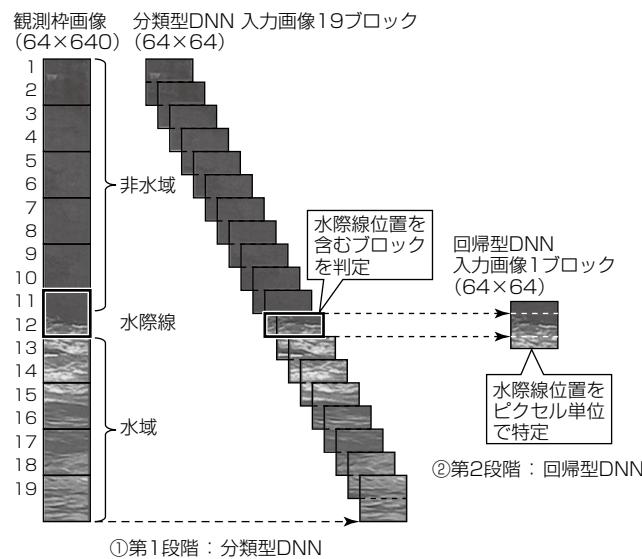


図4. 水際位置の特定方法

位置と第2段階で特定した水際位置のピクセル数を用いて、あらかじめ設定した三次元情報に基づく観測枠の座標に逆変換することで、映像中の水際位置の座標が得られる。

#### 3.2 水際特定用DNNの構造

図5は、分類型DNNの構造であり、3段階の畳み込みを行うResNet<sup>(2)</sup>を採用した。ResNetは各段階で、層の入力から出力へ結ぶルートを用意することで、畳み込みを行う前と後の情報の残差を学習させる仕組みによって、各層で高効率の学習が実現できるネットワークである。回帰型DNNの構造もおおむね同様である。

#### 3.3 水際特定用分類型DNNの学習

分類型DNNの学習の例について述べる。図6は学習に使用した教師データの例である。実際の河川を検知センサで撮像した映像から取り出されたフレーム画像を小画像に分割し、人手によって水域・非水域のラベル付け、及び水

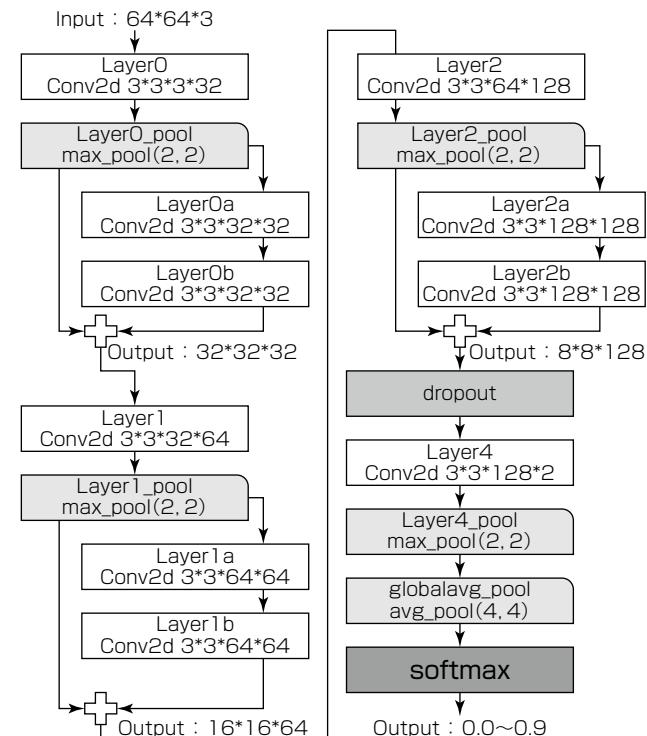


図5. 水際位置を特定するDNNの基本構造

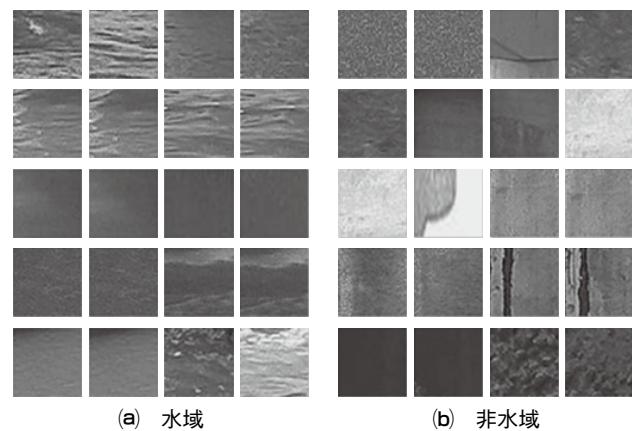


図6. 分類型DNN用教師データの例

表1. 分類型DNNの教師データ仕様

河川	球磨川, 遠賀川, 信濃川, 鋸路川, 広瀬川, 那珂川, 阿武隈川, 七瀬川
フレーム画像枚数	711枚
画像サイズ	縦64ピクセル×横64ピクセル
教師データ数	13,986枚

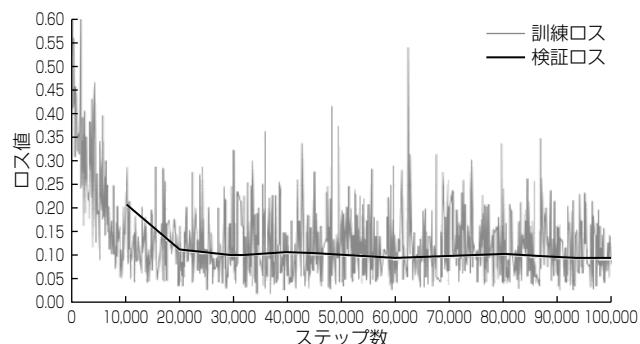


図7. 分類型DNNのロス値の推移

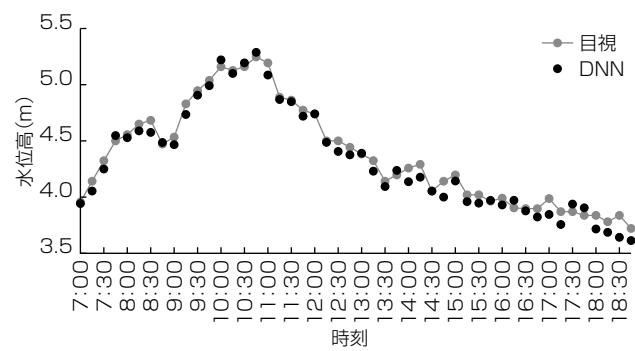


図8. 水位計測結果

際位置の指定を行ったものを用いた。この教師データの仕様を表1に、学習の進み具合を示すロス関数の出力結果を図7に示す。縦軸はロス値、横軸は学習回数を示すステップ数である。教師データをランダムに学習用データと検証用データに7:3で振り分け、訓練ロスは、学習した学習用データのロス値であり、検証ロスは、学習をしていない検証用データのロス値である。訓練ロスと検証ロスの収束する傾向や値は一致しており、30,000ステップ程度で減少が停止していることから、学習は妥当に推移したと考えてよい。

### 3.4 水位計測実験

球磨川の河岸に仮設のCCTV(Closed Circuit TeleVision)カメラで撮影した増水期間を含む映像(2015年8月25日7:00~18:45)から、15分間隔で取り出した計48枚のフレーム画像を対象に、DNNを用いた水位計測評価を行った。

フレーム画像での水際位置の画像座標から水位高への換算は、観測枠の下端を0.0m・上端を9.0mと定めた上で線形補間を用いて算出した。計測精度の評価のため、目視によって取得した水際の画像座標に基づく水位高との比較を行った結果を図8に示す。目視による水位高を真値とした場合の水位計測のRMSE(二乗平均平方根誤差)は、7.6cmの精度であった。評価に使用した映像の空間分解能は1cm =

0.8ピクセルであったので、1cm当たり6ピクセル以上の空間分解能の映像を使用すれば、国土交通省が求める“水位の最小読み取り単位1/100m”<sup>(3)</sup>を満足する水位計測が可能になる。

## 4. むすび

AI技術を活用した画像式河川水位計測装置(WDL方式)の実現によって、水位標が設置されていない箇所でも橋脚や堤防等の構造物を被写体とした非接触型の画像式河川水位計測を可能にした。これによって、水位把握の多地点化に対して、容易かつ幅広く観測点を増やせることで、より木目細かな洪水対策に寄与できるものと考える。

また、河川水位の観測方法を定める水文観測業務規程細則<sup>(4)</sup>では、水位標観測で目視に加えて画像解析による観測方法が追加された(H29.3.31改定)。当社の画像式河川水位計測装置では、水位標を被写体として画像解析を行い水位算出するWDIC方式の選択も可能にしている。これを利用することで、水位標観測を現地に入らず機械的に行うことによって、常時観測の実現や観測員の安全確保・負担軽減等が期待される。

水防法の一部改正(H27.5, H29.6)では、近年の浸水被害の多発を受け、洪水対策、内水氾濫対策の推進が強化された。また、河川水位に加え、下水道や海岸の水位によって浸水被害の危険を周知する制度も新設されている。画像式河川水位計測装置は、適切な被写体の設定やシステム構築によって、下水開渠(かいきょ)や海岸堤防等での水位計測ニーズや現場画像と合わせて臨場感のある情報提供を行うニーズ等にも応えることができる。

当社は、画像式河川水位計測装置に加えて、レーダ雨量計測、水位・雨量等のテレメータ、ダム・堰(せき)制御、CCTV映像監視等のシステム構築・製品提供、河川の縦断水位把握や三次元状況把握の技術開発にも取り組んでいく。さらに、現場状況把握やデータ解析、及び運用支援向けAI技術も開発中である。今後、これらの製品・技術を組み合わせることで、最適管理・運用を可能にする総合河川管理システムの実現を目指すとともに、社会実装によって水災害に強い国土づくりに貢献していく。

## 参考文献

- (1) 前原秀明, ほか: デープラーニングに基づくCCTVカメラ映像からの水位計測方法, 写真測量とリモートセンシング, 58, No.1, 28~33 (2019)
- (2) He, K., et al.: Deep Residual Learning for ImageRecognition, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2016)
- (3) 国土交通省: 河川砂防技術基準 調査編 (2014)
- (4) 国土交通省: 水文観測業務規程細則 (2017)

# 道路設備の故障予兆把握手法

坪井真也\*  
藤野友也\*\*

Fault Prognosis Technique for Road Facilities

Shinya Tsuboi, Tomoya Fujino

## 要旨

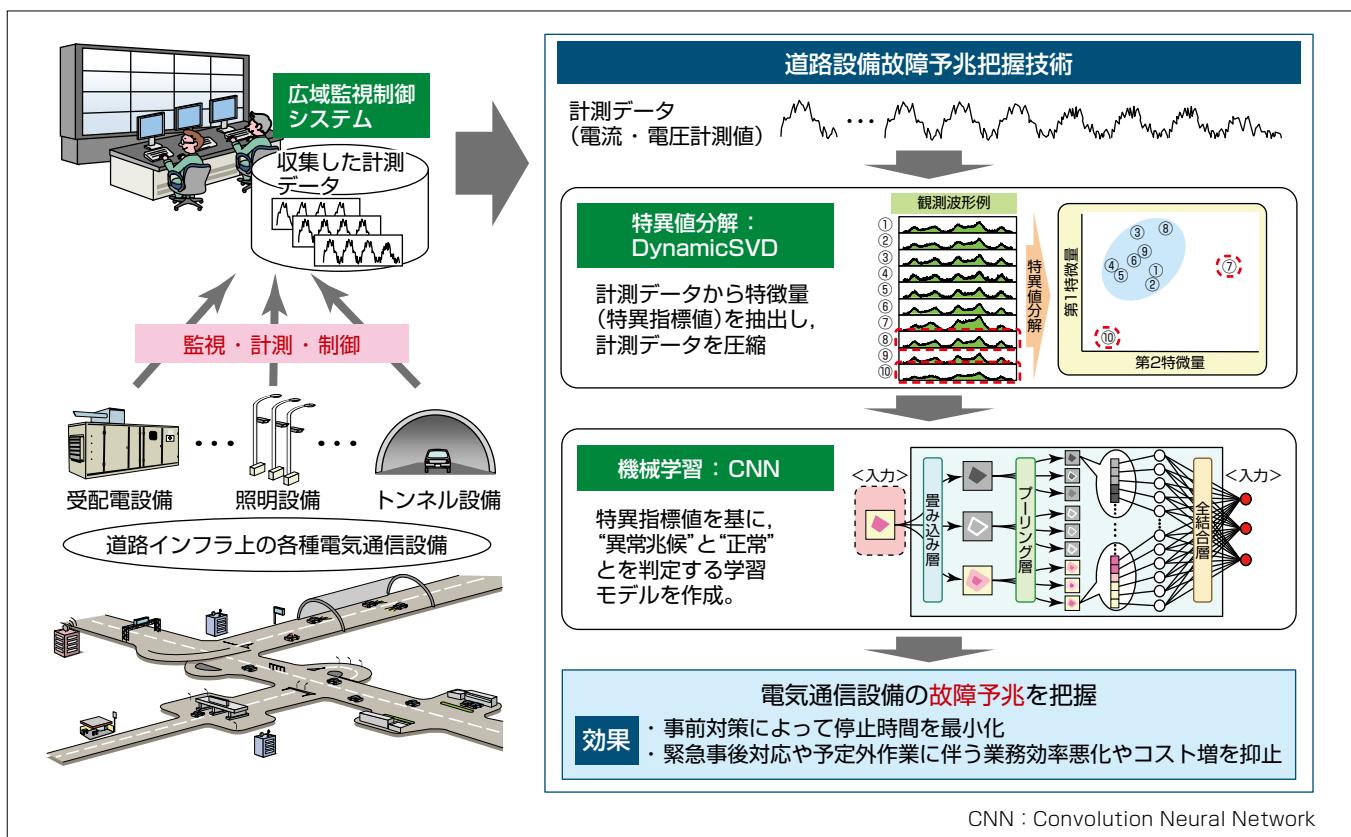
道路インフラでは、円滑な道路交通の提供や安心・安全の確保を目的として、道路照明、情報板を始めとする情報提供設備、トンネル防災のための換気設備や非常用設備、それら設備に電力供給するための受配電設備等の電気通信設備が整備されている。電気通信設備は24時間365日安定した運用が求められる設備であり、システム停止による社会的影響は大きい。よって設備障害が発生した際には迅速に対応し、システム停止時間を最小化する必要がある。

一方で、働き方改革や熟練技術者の高齢化、人員不足の観点から設備運用や設備保全業務の高効率化も求められている。

三菱電機ではこれらの課題を解決する技術として“道路設備故障予兆把握技術”の開発に取り組んでいる。道路設

備故障予兆把握技術によって電気通信設備の故障予兆を事前に把握することで、故障発生前の調査・体制確保等の対策によるシステム停止時間最小化や、突発対応や予定外作業に伴う業務効率悪化・コスト増の抑止が期待できる。

道路設備故障予兆把握技術では、維持管理コスト効率化の観点から、故障予兆把握に特化した専用のセンサを新たに導入するのではなく、既存の広域監視制御システムの計測データを活用した手法を目指している。またデータ解析技術として、当社独自の高速の特異値分解技術であるDynamicSVD(Dynamic Singular Value Decomposition)や、機械学習技術を用いることで、計測データが異常兆候を示すか否かを判定する。



## 道路設備の故障予兆把握手法のイメージと適用効果

広域監視制御システムで収集する計測データを活用し、道路上の電気通信設備の故障予兆を把握する手法の開発に取り組んでいる。電気通信設備の故障予兆を事前に把握することで、故障発生前に調査や体制確保等の対策を講じることができ、重要設備である道路上の電気通信設備についてシステム停止時間の最小化が期待できる。また、突発的な対応や予定外作業による業務効率悪化・コスト増の抑止が期待できる。

## 1. まえがき

道路での電気通信設備には道路照明、情報板を始めとする情報提供設備、トンネル防災のための換気設備や非常用設備、それら設備に電力供給するための受配電設備等様々な設備があり、これらの設備がインターチェンジやトンネル、路側等に多数整備されている。道路設備故障予兆把握技術は、これら道路での電気通信設備の故障予兆を事前に把握するための技術である。

設備の故障予兆を把握するためには、対象設備の稼働状況や周囲環境等を詳細にセンシングすることが有効であるが、道路上の多数の電気通信設備に対し、故障予兆把握に特化した新たなセンサを取り付けることは、維持管理コスト効率化の観点から望ましくない。よって道路設備の故障予兆把握手法では既存の計測データやシステムを活用した手法を目指す。

道路設備故障予兆把握技術の実現に向け、電気通信設備のうち、道路照明等の各設備に電力を供給する受配電設備の故障と計測データに着目し実現手法の検討を行った。本稿では検討した実現手法について述べた後、この手法を構成する要素技術、また実運用データによる検証結果について述べる。

## 2. 道路設備の故障予兆把握手法

### 2.1 広域監視制御システムの計測データの活用

今回の手法では既存の広域監視制御システムで収集する計測データを活用し、故障予兆の把握を行った。

広域監視制御システムは、道路を始めとするインフラ上に多数かつ広域に配置された設備の運転状態等を、遠隔からリアルタイムに監視・計測・制御することで、インフラの安定した運用を支援するシステムである(図1)。当社で

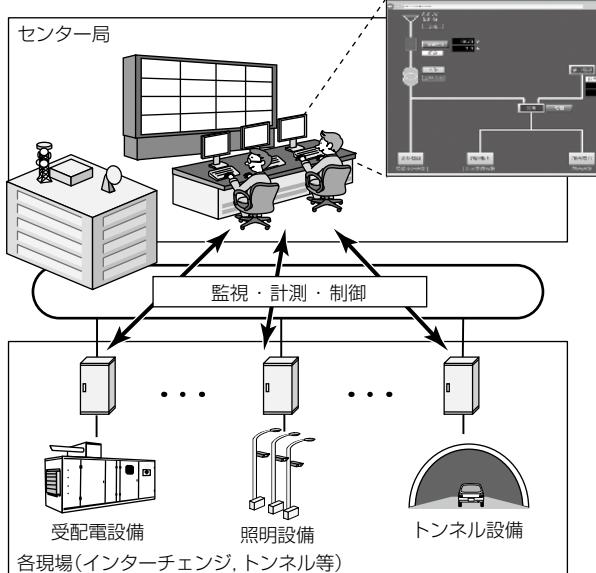


図1. 広域監視制御システムのイメージ

は道路や河川分野を中心に同システムを開発・製品化している。

この手法では、広域監視制御システムで収集する計測データの中から、受配電設備の変圧器二次側の電流・電圧値(1分周期)を抽出し解析を行い、故障信号として各設備向け回路の配線保護用遮断器(Molded Case Circuit Breaker : MCCB)トリップ発生の予兆を判定した(図2)。

また、解析精度を確保するため、対象設備の保守作業時や改造作業時等、通常運用時と異なる期間の計測データを解析対象から除外した。通常運用時か否かの判断にも広域監視制御システムで収集する設備の運転状態等の監視データを活用した。

### 2.2 機械学習による長期間の計測データの評価

故障予兆把握の手法として、設備の故障発生のメカニズムが明らかであり、異常時の計測データの変動パターンがあらかじめ明らかな場合は、異常パターンとの比較によって故障予兆を判定する手法が考えられる。しかし、道路での多種多様な電気通信設備に対して異常パターンをあらかじめ定義することは困難であることから、今回の手法では広域監視制御システムの長期間の計測履歴データを評価して正常／異常兆候を判定した(図3)。

評価には画像認識等の分野で活用が進んでいる機械学習を適用した。故障発生前の一定期間の計測データに基づく特異指標値を故障発生の“異常兆候”候補として、故障発生日とも異常兆候候補とも重複しない一定期間の計測データに基づく特異指標値を“正常”候補として機械学習によって学習させ、“正常”と“異常兆候”を判定した。特異指標値の抽出については3.1節で述べる。

### 2.3 解析対象データの特徴量抽出・圧縮による処理の高速化

長期間の1分周期データを解析する場合、解析対象の

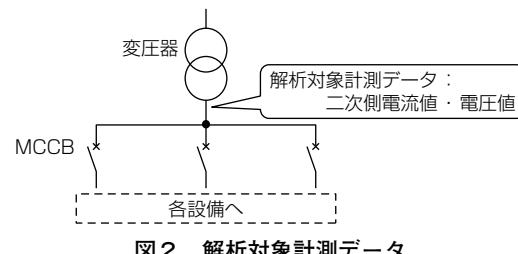


図2. 解析対象計測データ

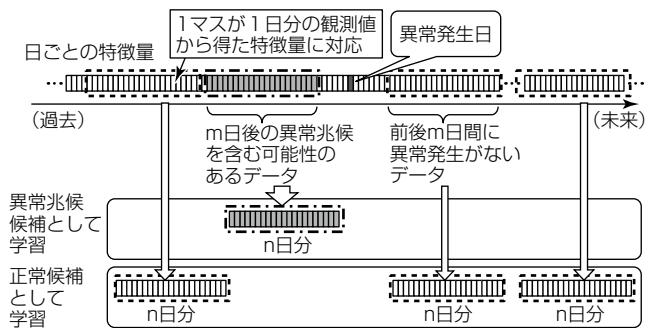


図3. 学習データ抽出の考え方

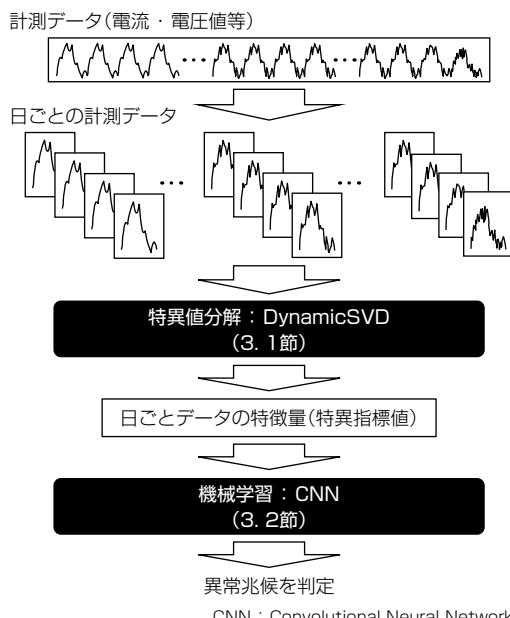


図4. 故障予兆把握の処理フロー

データ量が多量(1計測点でも約50万点/年)になり、処理の高速化が課題になる。

よって今回の手法では、計測データをそのまま処理するのではなく、圧縮してから処理を行うことで、処理の高速化を図った。具体的には、特異値分解(Singular Value Decomposition: SVD)技術によって、計測データから特微量として特異指標値を抽出し、抽出した特異指標値を機械学習によって解析して評価を行った。これによって解析対象である計測データを、特微量を損なうことなく圧縮することが可能になる。

特異値分解技術としては当社独自の高速の特異値分解技術である“DynamicSVD”を適用した。DynamicSVDによって日ごとの計測データから抽出した特異指標値を機械学習によって評価し、計測データの変動パターンが正常であるか異常兆候であるかを判定した(図4)。

今回の手法の要素技術である特異値分解技術を3.1節で、機械学習技術を3.2節で述べる。

### 3. 道路設備故障予兆把握の要素技術

#### 3.1 特異値分解技術

特異値分解は、複数の指標を持つデータを、より特性を顕著に表す特微量で表現する数学手法である。例えば、小学校の身体測定結果の分析で、“身長”“体重”という2種類の指標を、より効率的に特性・傾向の違いを表現できる“体格”“体型”的2種類の特微量に変換することで、特性・傾向を確認しやすくする(図5)。

特異値分解を適用することで、例えば時系列の計測データのように多数の計測値からなる観測波形に対しても、特微量に変換して評価することが可能である。

日ごとに周期性を持つ観測波形を複数日にわたり特異値

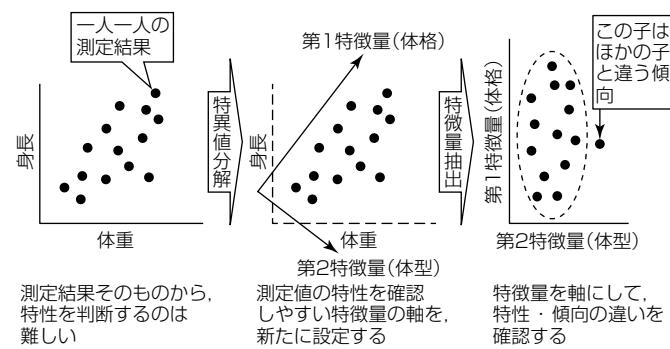


図5. 特異値分解による特微量の表現例

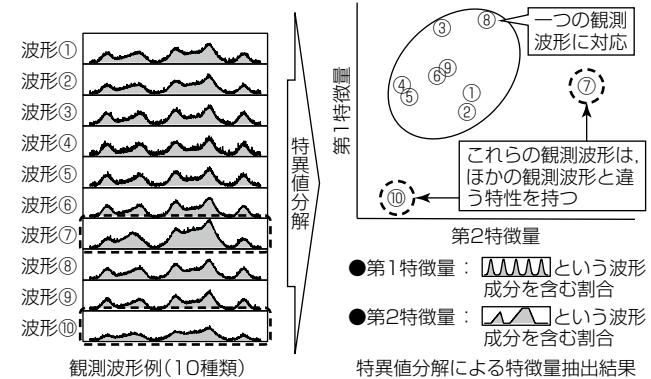


図6. 時系列波形に対する特異値分解による特微量の表現例

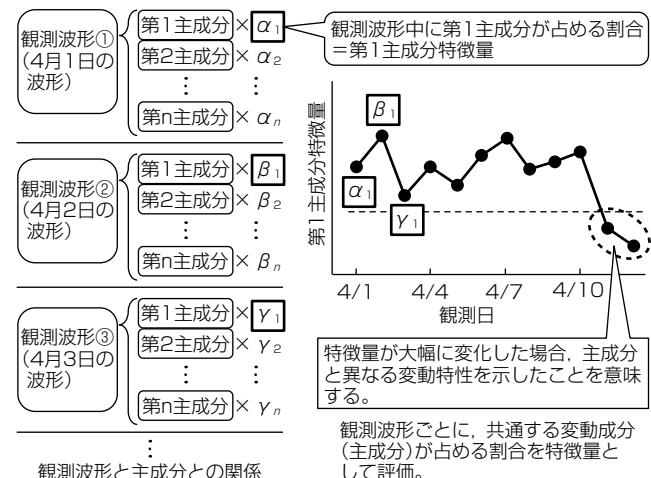


図7. 観測データと主成分に対応する特微量

分解した場合、各観測日の観測波形から、波形データ中の主成分と、波形データ中にその主成分が占める割合を算出することができる(図6)。ここで主成分とは、複数日のデータに共通して含まれる時系列波形の成分のことを指す。

今回の手法では、このようにして得られる主成分に対し、その主成分が占める割合を、日ごとの計測データの特微量として着目し、さらに特微量変動の全体からの外れ度を特異指標値として算出した(図7)。

特異値分解技術には、高速での特異値分解を可能にする当社独自技術であるDynamicSVDを適用した。DynamicSVDはデータの差分だけを逐次的に計算することで、一般的な特異値分解手法(Lanczos法と呼ばれる数学手法)

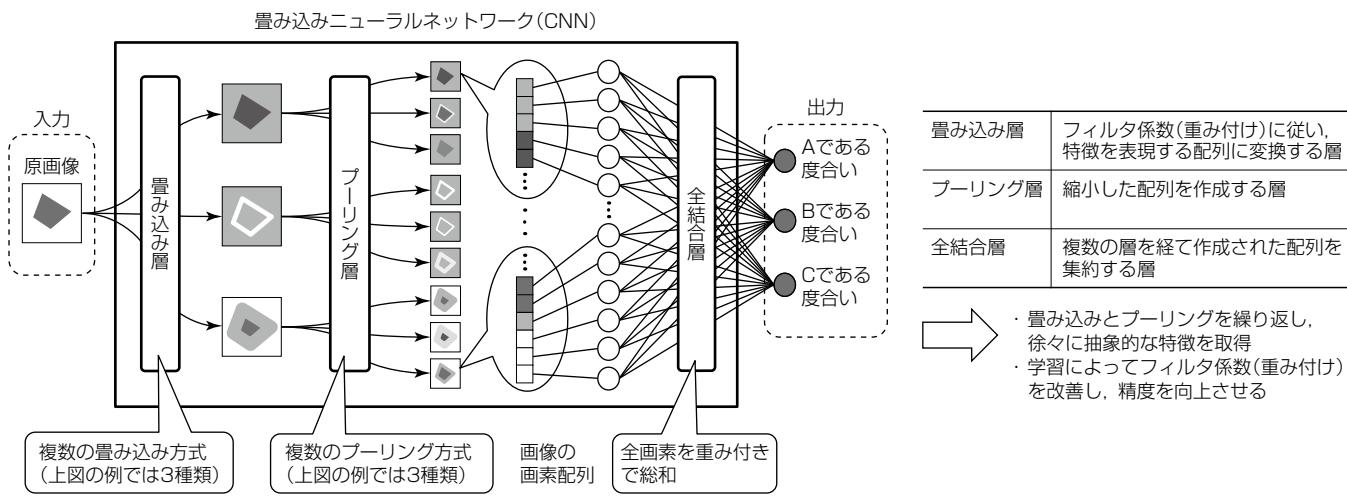


図8. CNNの概念図



図9. CNNへの入力信号のイメージ

に対して100倍高速に特異値分解を可能にする技術であり、特に時系列データのように、逐次的にデータが追加される場合に対して有効な技術である。

### 3.2 機械学習技術

DynamicSVDによって算出した特異指標値を機械学習によって評価し、日ごとの計測データが異常兆候を示すか否かを判定した。機械学習の方式として、今回の手法ではCNN(Convolutional Neural Network: 畳み込みニューラルネットワーク)を用いた。CNNはDNN(Deep Neural Network: ディープニューラルネットワーク)の一種であり、画像認識などによく利用される技術である。

CNNは、入力信号に対し、畳み込みとプーリングを繰り返し、徐々に抽象的な特徴を取得していくアプローチの学習方式である。学習によってフィルタ係数(重み付け)を改善し、識別精度を向上させる(図8)。

今回の手法では、一定期間の特異指標値を、1行が1日分の特異指標値からなる行列(1日分の特異指標値×日数の二次元配列)とし、CNNへの入力信号とした(図9)。

故障発生前の一定期間の特異指標値を故障発生の“異常兆候”候補として、故障発生日とも異常兆候候補とも重複しない一定期間の特異指標値を“正常”候補としてCNNによって学習させ、“正常”と“異常兆候”を判定する学習モデルを作成した。

### 4. 実データでの評価

本稿で述べた手法を道路管理設備での実際の計測データで評価を行った(表1)。

表1. MCCBトリップ発生予兆把握の実データでの評価結果

評価指標	精度	備考
適合率	91%	兆候を検知し、7日後に事象が発生する確率 (誤検知の少なさ)
再現率	80%	事象発生の7日前に兆候を検知した確率 (見逃しの少なさ)

対象の故障としては照明設備向け電力系統のMCCB(Molded Case Circuit Breaker: 配線保護用遮断器)のトリップ発生、計測データとしては同電力系統に対する変圧器の二次側の電流・電圧値とし、約2年分の1分周期データを解析した。また事象発生前の事前調査や作業員の手配、交通規制の準備に要する期間等の実運用への適用を考慮し、最大で7日後の故障予兆を推定することを条件として評価を行った。

結果としては、三相4線式の配電方式の設備で、事象発生の7日前に、適合率・再現率共に80%以上の確率で異常兆候検知が可能であることを確認した。

### 5. むすび

道路での電気通信設備の故障予兆を把握する手法の開発を進めており、既存の広域監視制御システムの計測データで検証し、一定の成果を確認できた。

一方で、広域監視制御システムで収集する計測データの多くは、複数設備を集約する受電箇所の計測データに限定されるケースも多く、設備ごとの運転状況を把握するためには、より設備と対応付く詳細な計測データの取得等、データの充実が課題と言える。

計測データの充実に向けては、昨今導入事例が増えていく電力メータ検針業務自動化を目的としたメータリングシステムのデータの活用や、IoT(Internet of Things)技術や5G(第5世代移動通信システム)技術等の活用による計測データ整備が期待できる。

引き続きこの手法の開発を進め、道路を始めとするインフラ設備運用や保全業務の迅速化・効率化に貢献する。

# 流入・流出水質データを活用した下水処理場向け曝気風量制御

橋爪弘二\* 野田清治\*\*\*  
吉田航\*\* 古川誠司\*\*\*  
今村英二\*\*

Aeration Control for Sewage Treatment Plant Using Inflow and Outflow Water Quality Data

Koji Hashizume, Wataru Yoshida, Eiji Imamura, Seiji Noda, Seiji Furukawa

## 要旨

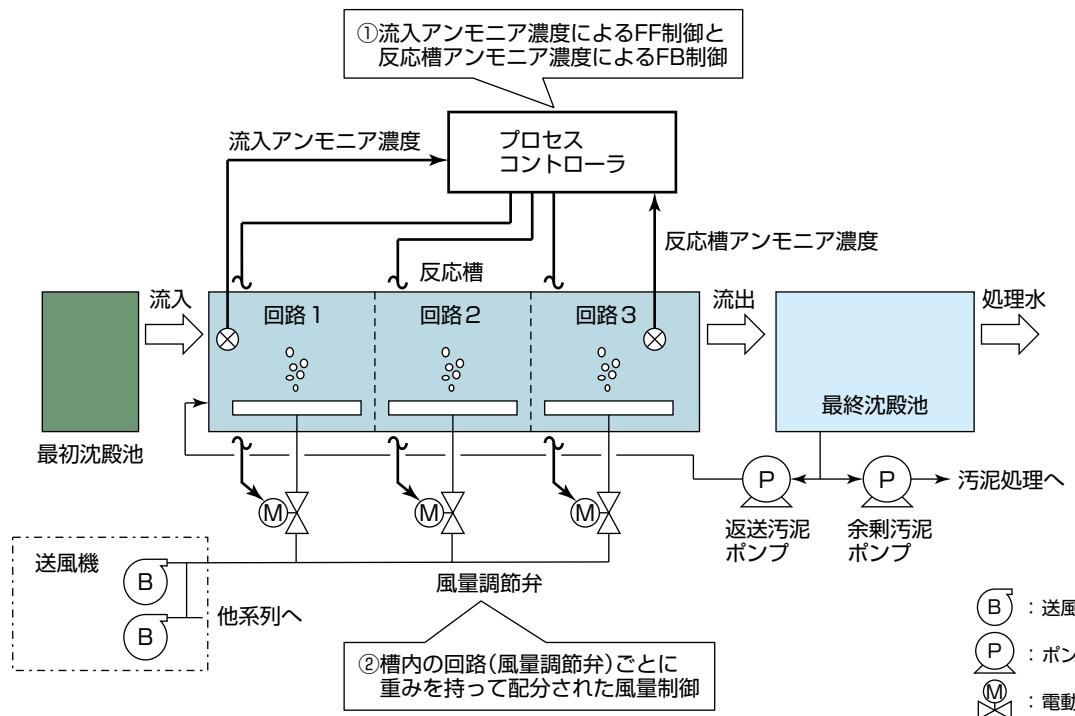
下水処理場は水環境保全のために大きな役割を果たしているが、汚濁物質を除去する反応槽での生物処理に多量のエネルギーを使用している。特に東京湾などの閉鎖性水域では総量規制に対応するため、窒素除去が可能な高度処理の導入が進んでおり、処理水量当たりの消費エネルギーが増加する傾向にある。水質改善と省エネルギー化を両立させるため、二軸管理と呼ばれる手法が近年導入されている。水質とエネルギーにはトレードオフの関係があるため、目標とする処理水質を最小の消費エネルギーで実現する曝気(ばっき)風量制御が求められている。

三菱電機では従来開発してきた反応槽内のアンモニア濃度による制御に、反応槽流入部で計測したアンモニア濃度による制御を加えた曝気風量制御技術を開発中である。こ

の制御技術は、流入負荷の変動に応じた風量制御を反応槽前段のフィードフォワード制御(FF制御)で行い、槽内のアンモニア濃度によるフィードバック制御(FB制御)を反応槽後段で行う技術である。FF制御と組み合わせことで流入負荷の変動に早く対応し、反応槽アンモニア濃度を目標値に追従する制御ができる。

シミュレーション評価によって、周期的に変動する流入負荷変動に対して追従できること、また、放流水質が一定となったことによって、一般的な溶存酸素(DO)制御と比べて約15%の風量削減効果が得られることを確認した。

この技術を適用した曝気風量制御の実用化を行い、放流水質を確保しつつ省エネルギーを実現することで、持続可能な水環境保全に貢献していく。



## 流入・流出水質データを活用した曝気風量制御

下水処理場の反応槽流入部に設置したアンモニア計の計測値によるFF制御と、反応槽内のアンモニア濃度を使ったFB制御を組み合わせて、反応槽内の回路ごとに風量制御を行うことで、流入負荷の変動に安定して追従できる曝気風量制御方式である。

## 1. まえがき

下水処理場は下水管渠(かんきょ)から流入する下水を浄化して河川や海域に放流する施設であり、都市部の水環境保全で重要な役割を果たしている。東京湾などの閉鎖性水域では赤潮や青潮などへの対策として、処理水質を改善し、窒素、りんなどの栄養塩類の放流総量を削減することが求められていることから、生物学的高度処理の導入が進められている。

また、下水道事業は下水の処理に7,391百万kWhという大量のエネルギーを消費しており、これは168万世帯の年間電力使用量に相当する<sup>(1)</sup>。図1に示すとおり、下水道事業の電力消費量は、下水処理場の水処理施設で約半分が消費されており、水処理施設の主要負荷である送風機が使用するエネルギーの削減が求められている。

処理水質と消費エネルギーはトレードオフの関係にあり、処理水質を改善すると消費エネルギーが増加し、水量当たりの原単位が悪化する傾向にある。近年では、処理水質と消費エネルギーを適切に評価するための二軸管理と呼ばれる管理手法が提案されており、目標とする水質に対し、処理水質が安定的に追従する曝気風量制御が求められている。

## 2. 流入・流出水質データを活用した曝気風量制御

### 2.1 下水処理場の生物処理

下水処理場の処理フローを図2に示す。反応槽内では活性汚泥と呼ばれる微生物が下水と混合し、送風機から送られた空気で攪拌(かくはん)されることによって、酸素の多い好気状態で下水中の有機物を分解している。また、反応槽内では活性汚泥がアンモニア性窒素を硝酸に変換する硝化反応も同時に行われており、生物学的高度処理では積極的に硝化反応が行われるように運転条件が設定されている。

### 2.2 従来型の曝気風量制御の課題

#### 2.1節に述べたとおり、反応槽内では有機物の分解反応

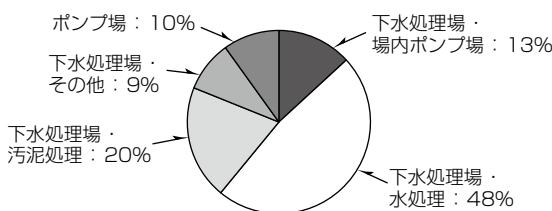


図1. 平成28年度の下水処理場の消費エネルギー

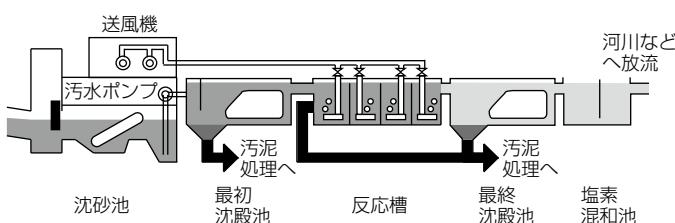


図2. 下水処理場の処理フロー

と硝化反応が同時に行われており、それぞれを効率的に促進させる必要がある。

従来一般的であったDO制御は槽内のDOを一定値に保つことによって有機物の分解を制御するものであるため、硝化反応の進行状況を直接把握していない。また、アンモニア計を反応槽内に設置して、硝化反応の進行状況を直接把握するFB制御を行う技術が開発されているが、硝化反応に多量の酸素が必要であることに加え、有機物の除去に比べて反応速度が遅いことに起因する課題があった。

図3にアンモニア制御の概念図を示す。流入アンモニア濃度の変動と各制御による反応槽末端のアンモニア濃度の変化を示しており、理想的なアンモニア制御は反応槽末端のアンモニア濃度が常に目標値に追従するよう制御するものである。

これに対し、DO制御の場合、流入変動に関わらず槽内のDOを一定にするよう制御するため、必要以上の曝気風量となる時間帯が生じてしまう。また、従来のアンモニア制御では流入アンモニア濃度の変動に対する制御遅れが発生することから、安定性と追従性に課題があった。

### 2.3 開発した曝気風量制御

今回開発した曝気風量制御は、反応槽アンモニア濃度の計測値によるFB制御に加えて、反応槽へ流入する流入アンモニア濃度によるFF制御を組み合わせるとともに、複数設置された風量調節弁を個別に制御することで最適な曝気風量制御を行うものである(図4)。

従来型のアンモニア制御は、式(1)に示すとおり、反応槽アンモニア濃度の計測値と、目標値の差分に応じた比例項

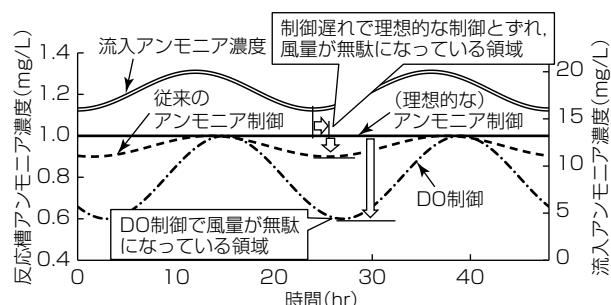


図3. アンモニア制御の概念図

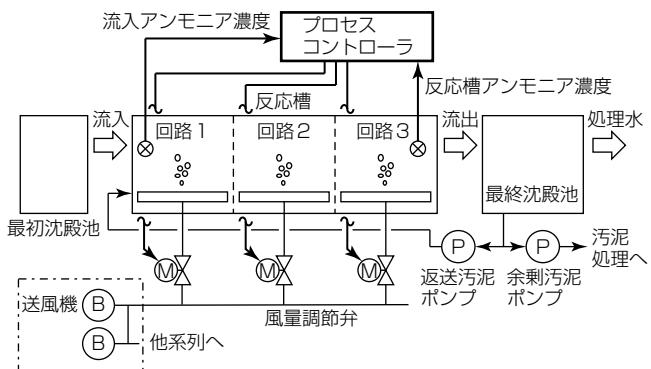


図4. 曝気風量制御

と、差分の積算値による積分項によって曝気風量( $Q$ )を算出するPI(Proportional Integral)型FB制御である。

$$Q = K_p \times ((NH_{4,eff} - NH_{4,target}) + \frac{1}{T_i} \times \sum (NH_{4,eff} - NH_{4,target})) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$K_p$  : フィードバック比例定数

$NH_{4,eff}$  : 反応槽アンモニア濃度

$NH_{4,target}$  : 目標反応槽アンモニア濃度

$T_i$  : 積分時間

今回開発した制御は、式(2)に示すとおり、従来型のPI型FB制御に流入アンモニア濃度に比例するフィードフォワード項を追加するとともに、反応槽内の回路ごとに設置された風量調節弁を個別に制御するよう改良したものである。

$$Q = K_{a,i} \times NH_{4,inf} + K_{p,i} \times ((NH_{4,eff} - NH_{4,target}) + \frac{1}{T_i} \times \sum (NH_{4,eff} - NH_{4,target})) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$K_{a,i}$  : 回路  $i$  の流入アンモニア濃度  
フィードフォワード比例定数

$K_{p,i}$  : 回路  $i$  のフィードバック比例定数  
 $NH_{4,inf}$  : 流入アンモニア濃度

また、反応槽は通常複数の回路に分かれており、活性汚泥と混合した汚水が流入側から流出側に流れつつ生物処理が進行する。比例定数( $K_{a,i}$ ,  $K_{p,i}$ )を反応槽の回路ごとに重みを付けて配分することによって、反応槽前段の回路では主に流入アンモニア濃度の変動に応じて風量を変動させ、負荷変動に対する追従性を向上させることができる。一方、後段の回路は反応槽アンモニア濃度によるFB制御を主体とすることで、目標とするアンモニア濃度に安定的に追従できる制御が可能である。

### 3. シミュレーション評価

反応槽部分の生物処理を模擬できる、国際水協会の活性汚泥モデルNo. 1<sup>(2)</sup>を利用してシミュレーション評価を行った。

#### 3.1 シミュレーションモデルと条件

図5に示す嫌気・好気活性汚泥法を模擬した槽列モデルによってシミュレーション評価を行った。シミュレーション条件を表1に示す。

図6にこのシミュレーションに使用した流入水量と流入アンモニア濃度の時間変化を示す。流入アンモニア濃度の

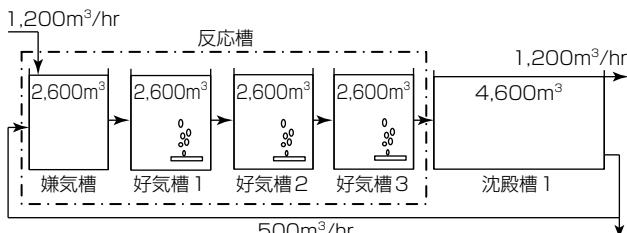


図5. シミュレーションモデル

平均値を24mg-N/Lとし、朝方と夕方に流入ピークとなるよう晴天時の流入負荷を模擬して設定した。

#### 3.2 制御の安定性・負荷変動への応答性の評価

反応槽回路ごとに重みを付けて配分した風量制御の有効性を確認するため、表2に示す制御係数を各回路で一定とした場合と傾斜配分した係数で制御した場合のシミュレーションを行った。なお、反応槽の目標アンモニア濃度( $NH_{4,target}$ )は、反応槽アンモニア濃度が常に0.2mg/Lを超えないようそれぞれ設定している。

図7に反応槽アンモニア濃度(処理水質)の経時変化を示す。図上部の流入アンモニア濃度の変動に対して、どちらの方式も放流水質基準を満たしている。一定係数で制御した場合、流入負荷の変動に遅れて反応槽のアンモニア濃度

表1. シミュレーション条件

項目	設定値
平均処理水量	28,800m <sup>3</sup> /日(1,200m <sup>3</sup> /hr)
反応槽容積	嫌気槽 2,600m <sup>3</sup>
	好気槽1 2,600m <sup>3</sup>
	好気槽2 2,600m <sup>3</sup>
	好気槽3 2,600m <sup>3</sup>
水理学的滞留時間(HRT)	8.7hr
返送汚泥流量	500m <sup>3</sup> /hr(一定流量)
反応槽内MLSS濃度	4,000mg-COD/L

MLSS : Mixed Liquor Suspended Solids  
COD : Chemical Oxygen Demand

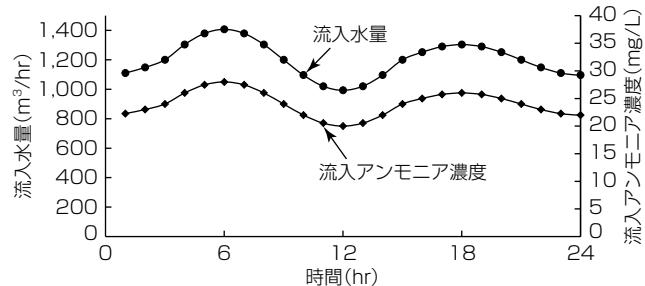


図6. 流入条件

表2. 制御係数

	制御係数設定			$NH_{4,target}$ (mg-N/L)
	好気槽1	好気槽2	好気槽3	
一定係数	$K_a$ (流入項)	a	a	0.175
	$K_p$ (流出項)	p	p	
傾斜係数	$K_a$ (流入項)	1.5a	a	0.190
	$K_p$ (流出項)	0.5p	p	

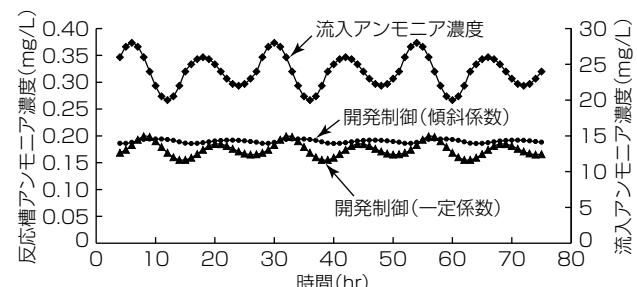


図7. 開発制御方式での処理水質

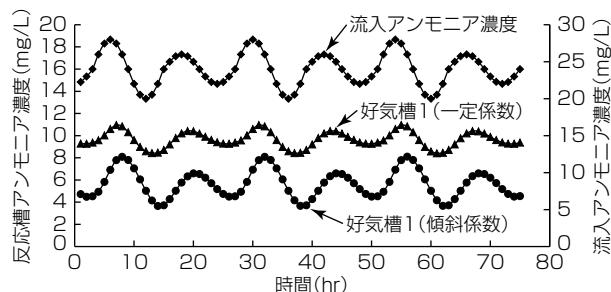


図8. 開発制御方式での好気槽1のアンモニア濃度

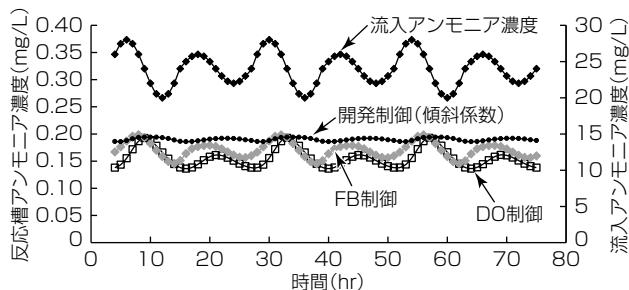


図9. 制御方式による処理水質の比較

度が変動幅0.05mg/L(0.15~0.2mg/L)で変動しているが、傾斜係数で制御した場合、0.02mg/L(0.18~0.2mg/L)と約40%の変動幅で制御できており、放流水質の変動が抑えられ、目標値に追従した制御となっていることが分かる。

図8に反応槽前段の好気槽1のアンモニア濃度の経時変化を示す。傾斜係数とした制御では、流入アンモニア濃度に比例する風量制御を反応槽前段で積極的に行うため、アンモニア濃度も一定係数の場合と比べ低くなっています。負荷の変動に対して流入側に近い回路で処理が進んでいることが分かる。このため、後段のFB制御での目標値への追従性が高く、安定した制御ができている。

次に、従来の制御方式と比較するため、DO制御、FB制御のシミュレーションを行った。なお、DO制御、FB制御はいずれも各好気槽を同一の風量で制御している。

図9に処理水質の経時変化を示す。流入アンモニア濃度の変動に対してDO制御、FB制御共に目標水質の0.2mg/Lから大きく変動していることが分かる。

また、図10に曝気風量の経時変化を拡大したものを示す。今回開発した制御に比べ、従来方式のDO制御、FB制御はどれも流入負荷変動に対して曝気風量の応答が遅れており、おおむね2時間程度ピーク時刻がずれている。特に、従来型のFB制御は、曝気風量の変動が最も大きい結果となっており、負荷変動に適切に追従できていないことが分かる。これに対し、今回開発した制御は、図10の○部で示すとおり、流入変動に対する曝気風量ピーク時刻のズレが小さく、追従性の高い制御であることが分かる。

次に、3日間のシミュレーションによる各制御方式の合計曝気風量とDO制御に対する風量削減率を表3に示す。アンモニア濃度による制御は、どの方式も目標とする放流

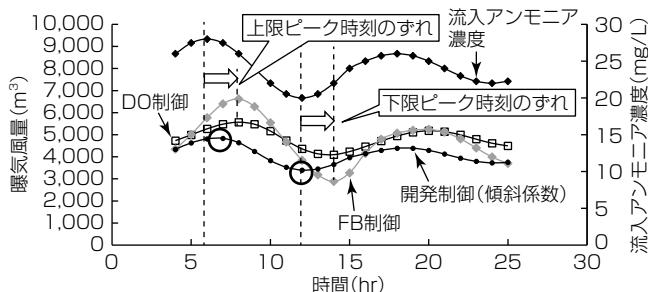


図10. 制御方式による曝気風量の比較

表3. 曝気風量削減率(対DO制御)

制御方式	3日間の合計曝気風量(m³)	送風量削減率(対DO制御)(%)
開発(FF + FB)制御	傾斜係数	2.98×10 <sup>5</sup>
	一定係数	3.28×10 <sup>5</sup>
FB制御		3.40×10 <sup>5</sup>
DO制御		3.52×10 <sup>5</sup>

水質を満たしつつDO制御に対する風量削減効果が得られているが、今回開発したFF制御とFB制御を組み合わせて係数を傾斜配分する制御が最も効果が高い結果になった。

これは、ほかの方式では流入負荷変動に対し、制御の遅れによる過剰な曝気を行う時間帯が生じているが、今回開発した曝気風量制御では、流入負荷の変動に対するFF制御を加えることで、放流水質を目標水質の0.2mg/Lに安定的に追従できるよう制御を行っており、曝気風量の無駄が少ない制御となったためである。

#### 4. む す び

反応槽へ流入するアンモニア濃度に比例する流入FF制御と反応槽出口のアンモニア濃度によるFB制御を組み合わせて、反応槽の回路ごとに制御を行う曝気風量制御を開発した。本稿ではシミュレーション評価によって、従来の制御方式では実現できなかった、流入負荷の変動に対して、目標とする放流水質に安定して追従する制御が実現できることを示した。また、目標とする放流水質に追従することで、過剰な曝気風量を削減する効果が得られることを確認した。

この制御技術を適用した曝気風量制御装置は、今後実プラントでの実証を行い、実運転での制御の安定性、風量削減効果を確認した後、2020年度を目指して製品化することを予定している。放流水質を確保しつつ省エネルギーに寄与する制御技術を下水処理場に適用することで、持続可能な水循環系の構築に貢献していく。

#### 参 考 文 献

- 日本下水道協会：平成28年度版下水道統計、日本下水道協会（2018）
- 味塗 俊：活性汚泥モデルASM1, ASM2, ASM2d, ASM3, 環境新聞社, 21~72 (2005)

# 社会インフラ維持管理サービス

梅山 聰\*  
佐久嶋 拓\*

Maintenance Service for Social Infrastructure

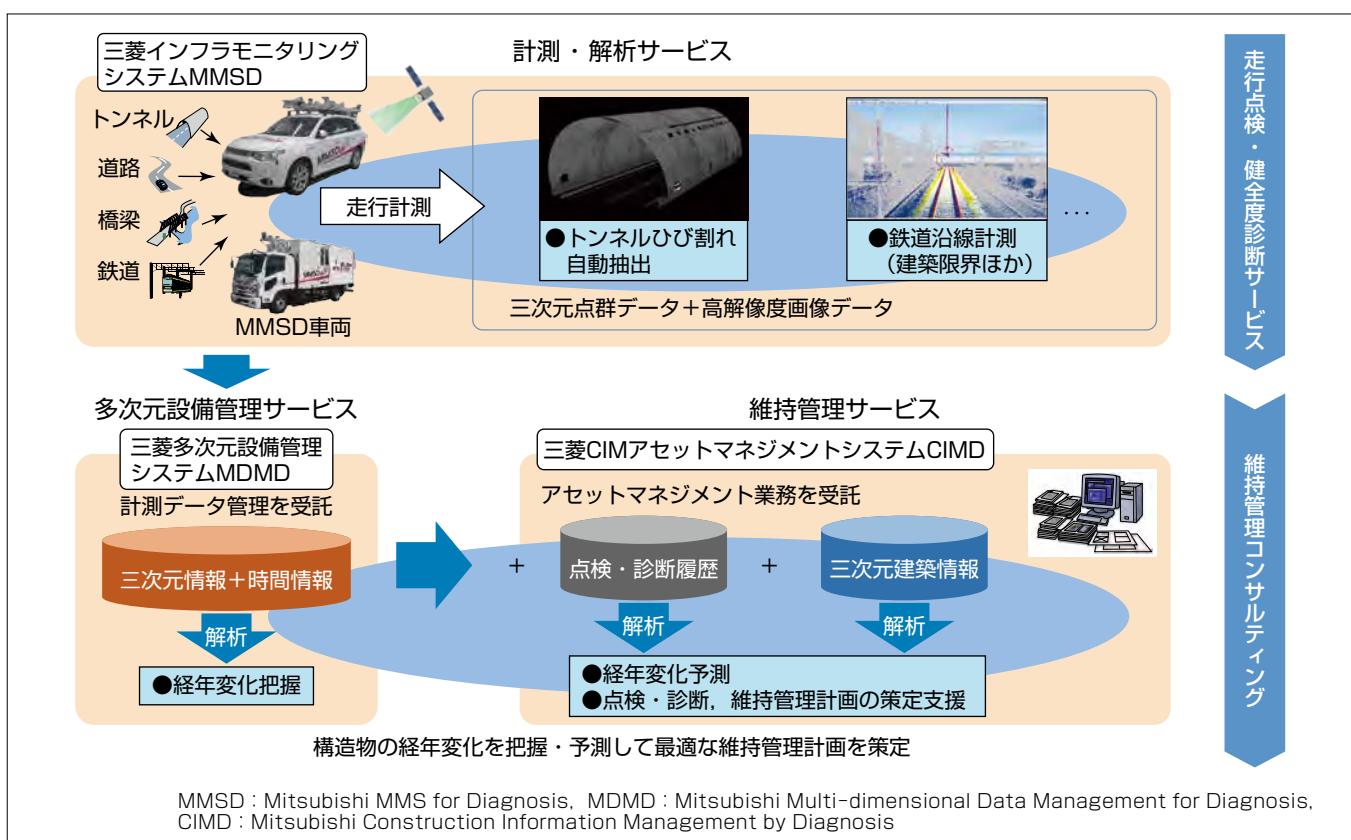
Satoshi Umeyama, Taku Sakushima

## 要旨

2012年の笛子トンネル天井板崩落事故を受け、2013年の道路法改正によってトンネルや橋などインフラ構造物の点検が義務化され、2014年には道路法施行規則改正によって5年に1回の近接目視点検が義務化された。一方で、少子高齢化などによって建設産業の労働力不足、地方自治体では技術者不足の課題が顕在化してきていることから、国土交通省は、インフラ老朽化に伴う点検作業にインフラ点検ロボット技術の開発・導入を加速する動きを見せており、2019年2月に近接目視を補完・代替・充実する技術の活用を認める形でトンネルや橋梁(きょうりょう)の点検要領を改定した。

三菱電機は、これらの社会背景の中で、インフラ構造物管理事業者が現在実施している近接目視点検と同等以上の

精度実現を目的に2世代の計測車両を開発し、鉄道と道路分野からサービスを開始した。これらの計測車両は、高密度レーザと高解像度カメラを搭載しており、インフラ構造物を交通規制なしに計測可能である。計測データを独自開発したソフトウェアで解析することによって、トンネル変状展開図作成支援サービスを始め、鉄道分野では建築限界計測サービス、道路分野ではトンネル内のボルト取付け態等の設備の現況を把握する点検支援サービスを提供している。今後は、時間軸で計測データを管理し、インフラ構造物の経年変化を把握するサービスの開発や、リスク判定を含む効率的な維持管理計画を支援するサービスの開発によって社会インフラ全体の維持管理業務の効率化に貢献していく。



## 当社が考える社会インフラ維持管理サービスのイメージ

三菱インフラモニタリングシステム“MMSD”による計測・解析サービスから三菱多次元設備管理システム“MDMD”による多次元設備管理サービスを活用し、三菱CIMアセットマネジメントシステム“CIMD”による維持管理サービスで全体の維持管理業務支援を目指している。

## 1. まえがき

日本では建設後50年を超過した老朽化インフラが急増している。全国の道路構造物に関してトンネルは約1万か所、橋梁(きょうりょう)は約73万か所存在し、これを高速道路会社、国土交通省、都道府県・政令市等、市町村で管理している<sup>(1)</sup>。限られた予算の中で、計画的かつ効率的に社会インフラの老朽化対策と維持更新を実施することが喫緊の課題となっている。2012年の笛子トンネル天井板崩落事故を受けて、道路法が改正され2014年には5年に1回の近接目視点検が義務化され、またそれに伴い点検要領が改定された<sup>(2)</sup>。現在、2018年に一巡目の目視点検が完了し、2019年度定期点検は二巡目に入る。国交省は、二巡目を節目として、現場で実証されたインフラ点検ロボット技術を適用するガイドライン及び点検支援技術性能カタログを公開し、点検現場でロボット技術を適用していく意向である。当社は、インフラ点検ロボット技術に当たる三菱インフラモニタリングシステムMMSDを開発して、国土交通省が公募した新技術情報提供システム(New Technology Information System: NETIS)テーマ設定型(技術公募)に参画し、MMSDの性能カタログへの掲載を申請済みである。

本稿では点検業務を支援し、現在実施している目視点検と同等以上の精度を実現するために開発した計測車両と計測・解析サービスについて述べる。さらに今後開発予定である時間軸も含めた三次元データの管理するサービスである多次元設備管理サービスと維持管理業務の効率化を支援する維持管理サービスについても述べる。

## 2. 計測・解析サービス

### 2.1 MMSDのI期車両による計測・解析サービス

当社は、1秒間に200回転、100万点を取得できる高密度レーザ及びGPS(Global Positioning System)とIMU(Imertial Measurement Unit)を乗用車に搭載することで、走行しながら対象物の形状を三次元計測するMMSD車両(I期車両)を開発し、2015年10月から三次元データを用いた高精度な計測・解析を可能にしたMMSDによる計測・解析サービスを開始した(図1)。



図1. MMSDのI期車両

走行しながら計測できるため、交通規制が不要となり、短時間で三次元計測が可能になる。高精度な計測によって、構造物や設備の微小な経年変化の把握と、これまで時間を要した鉄道の建築限界(交通の安全を確保するため道路、軌道、鉄道上で障害となる工作物や構造物の設置が許されない空間範囲)への支障状況や地上子(列車の運行を制御するため、線路内に設置された装置)の正確な位置計測が可能になる(図2)。また、GPS衛星電波が受信できないエリアでも三次元計測データを短時間に取得・解析することによって道路軌道、鉄道沿線全体の設備が正確に計測できる。これらによって、これまで目視に頼っていた点検・計測作業の省力化を実現し、作業のばらつきを防止して技術者不足を解決する。

また、高密度レーザを使用することでトンネル内の構造物の変化状況を高精度に識別でき、正確なトンネル覆工面の変状解析、路面の変状解析の作業時間の短縮に貢献する。具体的にはトンネルの形状から外側に変位、内側に変位している箇所をセンター(階調)表示し、トンネル全体の変状状態を把握する(図3)。さらに計測した三次元データから三次元CADデータを生成でき、設計図面としての活用も可能である(図4)。

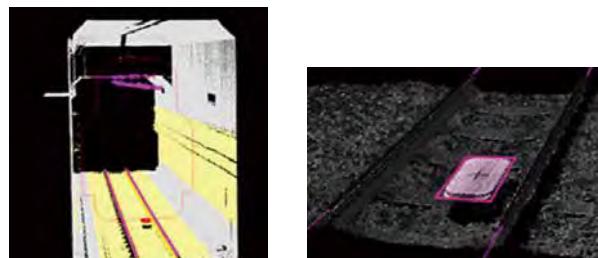


図2. 建築限界解析と地上子の位置計測の一例

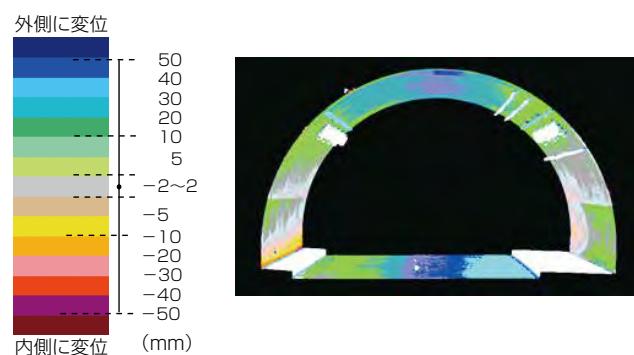


図3. トンネル内センター図の一例

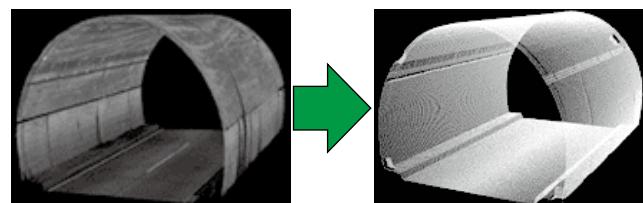


図4. 三次元CAD化イメージ

## 2.2 MMSD II期車両による計測・解析サービス

I期車両に続き、高密度レーザと高解像度ラインカメラを搭載し、道路・鉄道・トンネルの高精度な計測・解析を可能にした三菱インフラモニタリングシステムⅡ“MMSD II”による計測・解析サービスを2017年11月から開始した。MMSDのII期車両は、I期車両と同じく昼夜を問わず、交通規制を行わずに道路や線路上を走行しながら道路・鉄道・トンネルの計測を行い、社会インフラ点検業務の負荷を軽減する。貨物車を軌陸車に改造し、I期車両と同じ高密度レーザ、GPS、IMUに加えて8K高解像度ラインカメラと鉄道線路の走行装置を備えている(図5)。

II期車両でも高密度レーザを搭載していることから、I期車両と同様の計測・解析サービスが可能である。加えて、II期車両では自動焦点機能を搭載した8K高解像度ラインカメラとレーザ照明によって、走行(時速50km以下)しながらトンネル壁面全周を高精細に撮影する。撮影したラインカメラ画像に当社の画像貼り合わせ技術を適用し、画像に実トンネルの三次元座標を付与することで、実形状に基づくトンネル内の画像を二次元に展開することが可能である(図6)。また作成したトンネル内画像からボルト取付け状態、漏水状況やひびなどの確認を近接目視と同等の精度



図5. MMSDのII期車両

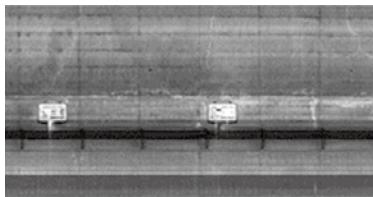


図6. ラインカメラ画像の自動貼り合わせ

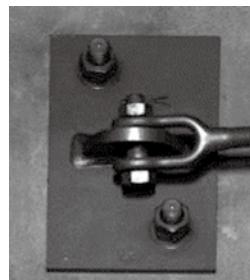


図7. ボルト取付け状態画像

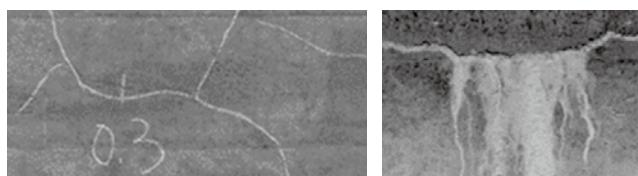
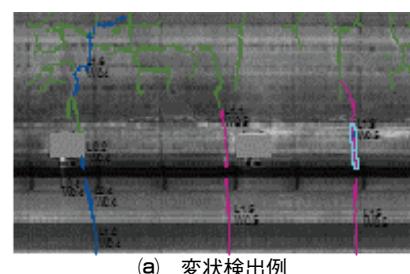


図8. 0.3mmひび画像と遊離石灰・漏水画像

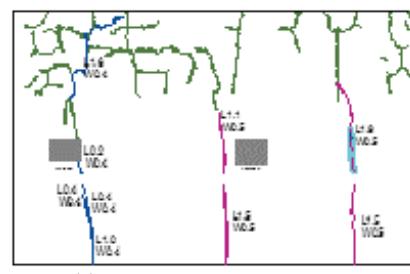
で確認可能である(図7、図8)。

また、解析サービスでは、当社独自の画像解析アルゴリズムによる幅0.3mmのひび検出、高密度レーザを使った三次元データ解析結果とひび解析結果から、ひびに起因するうき・剥離等の変状を検出するソフトウェアの開発を進めている。画像解析アルゴリズムを適用することで検出した結果を変状展開図に反映し、今まで手作業で作成していた点検用、設計時用などの図面の作成時間を削減する(図9)。

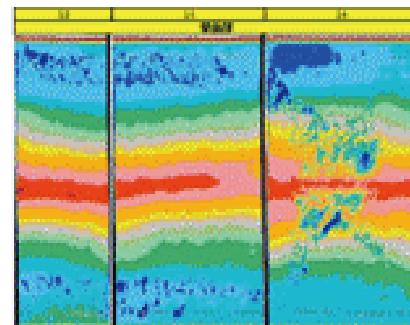
さらに、高密度な三次元点群を取得できる特長を生かして法面(のりめん)の形状解析を行うことも可能である(図10)。



(a) 変状検出例



(b) 変状展開図の自動作成例



(c) トンネル壁面のコンター図の自動作成例

図9. 変状展開図とコンター図の自動作成例

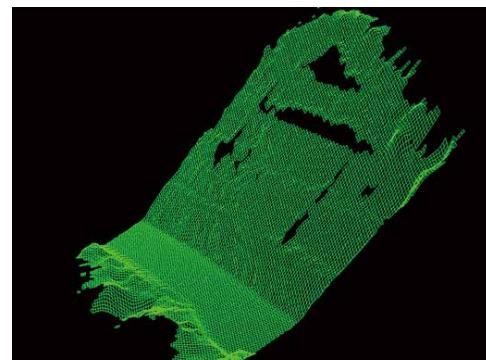


図10. 法面形状解析の例

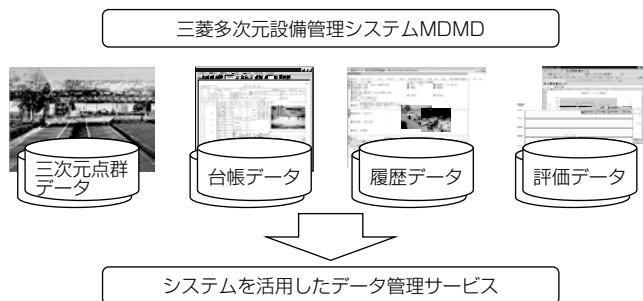


図11. 多次元設備管理サービス



図12. 時系列データ管理機能の画面例

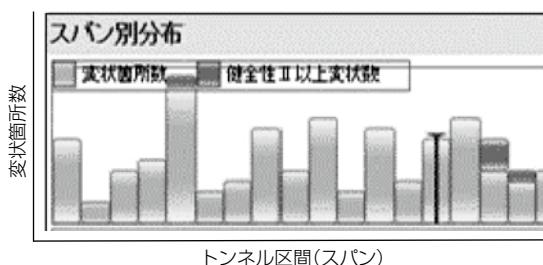


図13. 空間系列データ管理機能の画面例

### 3. 多次元設備管理サービス

当社が今後提供を予定している三菱多次元設備管理システムMDMDによる多次元設備管理サービスでは、MMSDで計測・解析したデータと他の各種データを体系的に保存・管理するサービスを提供する(図11)。このサービスでは、①MMSDで計測・解析したデータ(三次元点群データ), ②施設・設備の諸元データ(台帳データ), ③施設・設備の故障や点検等の履歴に関するデータ(履歴データ), ④施設・設備の状態を数値化したデータ(評価データ)を管理しており、これらのデータを使って次のような機能を提供する。

#### (1) 時系列データ管理機能

対象の施設・設備の複数の時系列のデータを比較表示し、経年による変化を可視化・表示する(図12)。

#### (2) 空間系列データ管理機能

トンネルや橋梁のように規模の大きな構造物や施設は、区間や領域等を所定のサイズで分割して系列管理する。この系列ごとのデータ(例: 変状数や健全度)を比較表示し、空間的な傾向を可視化・表示する(図13)。

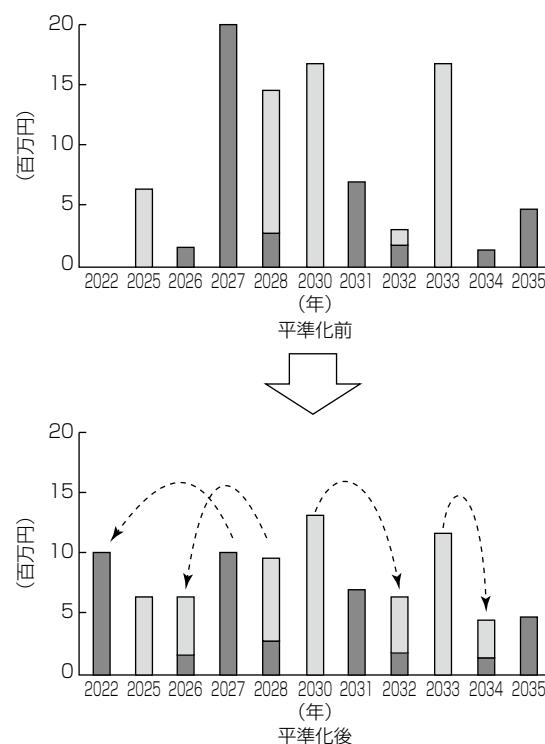


図14. 予算平準化イメージ

### 4. 維持管理サービス

今後提供を予定しているもう一つのサービスである三菱CIMアセットマネジメントシステムCIMDによる維持管理サービスでは、MDMDで管理するデータを活用して、構造物の劣化状況やリスク判定結果を使った推奨更新時期のレポートを作成・提供する。

各施設・設備の更新に係る費用や年度ごとの維持管理予算に関する情報を組み合わせることで、予算に見合った修繕・更新計画の策定を支援するデータの提供を行う(図14)。

### 5. むすび

インフラ構造物の点検業務を支援することを目的に、当社が開発した三菱インフラモニタリングシステムによる計測・解析サービスを中心に述べた。今後三菱多次元設備管理システムと三菱CIMアセットマネジメントシステムの開発を進め、計測・解析サービスに加えて多次元設備管理サービスと維持管理サービスの提供を実現し、社会インフラ全体の維持管理業務の効率化に貢献していく。

### 参考文献

- 国土交通省:道路構造物のメンテナンスの現状  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000497036.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000497036.pdf)
- 国土交通省:(1)調査検討事項①定期点検の見直しについて  
<http://www.mlit.go.jp/common/001265451.pdf>

# 河川堤防の地形状況監視システム

Terrain Deformation Monitoring System for River Embankment

Takashi Hayase, Shoji Kaneko, Hiromi Mizoguchi

## 要旨

近年、異常豪雨による激甚な土砂災害が多発している。被害を受けやすい河川や砂防の管理者は、防災、減災を目的として危険箇所の現況を迅速かつ的確に把握し、避難情報等を早期に住民へ提供することを求められている。

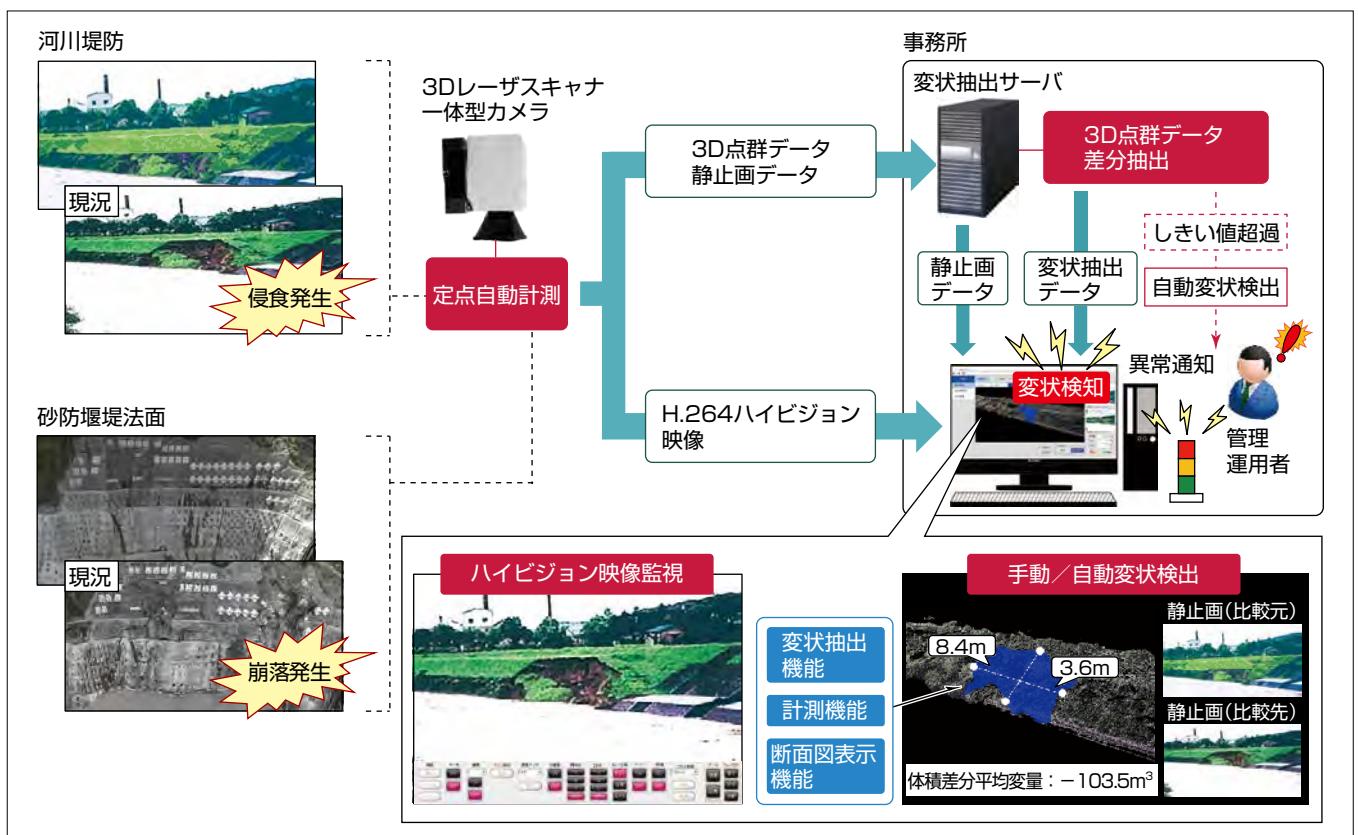
従来、河川堤防や砂防堰堤法面(さぼうえんていのりめん)<sup>(注1)</sup>は、管理者がCCTV(Closed-Circuit TeleVision)カメラ映像を用いて監視し、危険箇所の決壊や崩落を検知している。しかし、それらの要因である侵食や崩れは、映像だけでは確実な検知が難しく、地形を計測し、平常時からの変位の数値化が必要である。また、被災後の復旧工事には現場の定量的把握が必要であるが、人手による現地測量は二次災害の危険が伴うとともに、データ解析を含め数日の期間を要する。

今回、3D(3Dimensions:三次元)レーザスキャナ一体型カメラを用いて自動的に現地測量を行い、地形状況の変化(地形変状)を遠隔から安全かつ迅速に定量把握することが可能な“地形状況監視システム”を開発した。

3Dレーザスキャナ一体型カメラで河川堤防や砂防堰堤法面の3D点群データを自動取得し、時系列での差分抽出を行い、地形変状を把握する。さらに、各種データを視覚的・定量的に表示することで、河川や砂防の管理者が求める現況把握を支援するとともに、住民への早期情報提供に寄与する。

今後は、道路法面崩落による地形変状把握など、様々なフィールドでの適用拡大を図る。

(注1) 土砂災害を未然に防ぐ施設である人工的な斜面



## 地形状況監視システム

3Dレーザスキャナ一体型カメラを用いて、CCTVカメラ映像とともに、河川堤防や砂防堰堤法面の3D点群データを自動的に取得する。取得した3D点群データを事務所の変状抽出サーバ内で差分抽出処理を行い、地形変状を把握する。変状抽出結果と併せて同一画面上に3D点群データ取得範囲の静止画を表示させることで変状箇所の確認を容易にした。また、ハイビジョン映像とともに監視することで危険箇所を的確に把握できる。

## 1. まえがき

近年、異常豪雨による激甚な土砂災害が多発している。国土交通省及び各地方自治体の河川、砂防管理者は、決壊や崩落につながる可能性が高い、河川堤防や砂防堰堤法面の地形変状を早期に捉え、災害の危険性を早期に住民へ伝える手段を必要としている。

一方、国土技術政策総合研究所は、水害への災害対応支援を目的として“CCTVカメラを利用し災害対応を支援するシステムの導入ガイドラインの作成”<sup>(1)</sup>で、CCTVカメラ映像と地形の情報を数値化し、定量的に表現可能な3D点群データを活用した画像計測システム<sup>(注2)</sup>の導入を謳(うた)っている。

本稿では、3D点群データを活用することで、河川堤防や砂防堰堤法面の地形状況を迅速かつ的確に把握し、河川、砂防管理者に対する業務支援及び住民への早期情報提供に寄与する“地形状況監視システム”について述べる。

(注2) CCTVカメラ周辺の3D点群データとCCTVカメラ映像を用いて、被害規模を遠隔で計測するシステム。

## 2. 地形状況監視システム

### 2.1 目的

現状、河川や砂防管理者は、CCTVカメラ映像によって危険箇所の決壊や崩落を視認によって監視しているが、それらの要因である法面の侵食や崩れは、映像だけでは確実な検知が難しく、地形を計測し、平常時からの変位の数値化が必要である。また、被災後の復旧工事には現場の定量的把握が必要であるが、災害現場での現地測量は、作業員が二次災害に遭う危険が伴うとともに、現況を把握するまでにデータ解析を含め数日の期間を要する。

地形変状を安全かつ迅速に定量把握するためには、映像監視とともに現地測量を自動で行い、地形状況を早期に解析し、結果を数値表現する手段が求められる。

三菱電機は、管理者に対する業務支援及び住民への早期情報提供を目的に、3Dレーザスキャナ一体型カメラを用いて自動的に現地測量を行い、遠隔から地形変状を安全かつ迅速に定量把握することが可能な“地形状況監視システム”を開発した。

### 2.2 システム概要と特長

CCTVカメラ映像と3D点群データが取得可能な3Dレーザスキャナ一体型カメラを河川や砂防堰堤に設置し、

河川堤防や砂防堰堤法面の3D点群データを取得する。取得した3D点群データは事務所の変状抽出サーバ内で差分抽出処理を行い、地形変状を把握する。

このシステムの主な特長は次のとおりである。

- 監視対象の3D点群データの変化を体積差分量として算出することによって、地形変状の定量化及び、その可視化が可能(図1特長①)。
- 地形変状の定量的把握を支援するために、3D点群データ上で変状箇所の幅・高さの計測が可能(図1特長②)。
- 手動操作だけでなく、体積差分量がしきい値を超過した場合、災害の危険性があるとして、自動的な異常検出や管理者への通知が可能(図1特長③)。

### 2.3 機能

#### 2.3.1 差分抽出機能

差分抽出機能は、監視対象の3D点群データの時系列変化を差分抽出し、地形変状の“範囲”を特定し、“体積差分量”を求め、その結果を“視覚化”する機能である。“体積差分量の算出”は、4点平均法<sup>(注3)</sup>を用いて実現した。4点平均法によって3D点群データを四角形でメッシュ化し、メッシュごとの直方体の体積を算出する。算出値を比較し、差分抽出量を合計することで、地形変状前後での体積差分量を算出する(図2)。実フィールドでは真値との比較が難しいため、監視対象である土砂等の滑らかな変化を想定した半球状の幾何モデルを用いて精度を評価し、真値に対する誤差0.12%以下を実現した。また、実際の河川堤防に地形変状を模擬した人工物を設置し、3D点群データ取得による評価も行い、その結果、真値に対する誤差8.89%以下を実現した(図3)。

“差分領域の可視化”は、算出した体積差分量に応じて3D点群データを色付け(体積増：赤色、体積減：青色)することで実現し、グラデーション表示で視覚的に地形変状の把握を容易にした。また、監視画面では3D点群データ測定範囲のカメラ静止画を同一画面内に補足表示すること

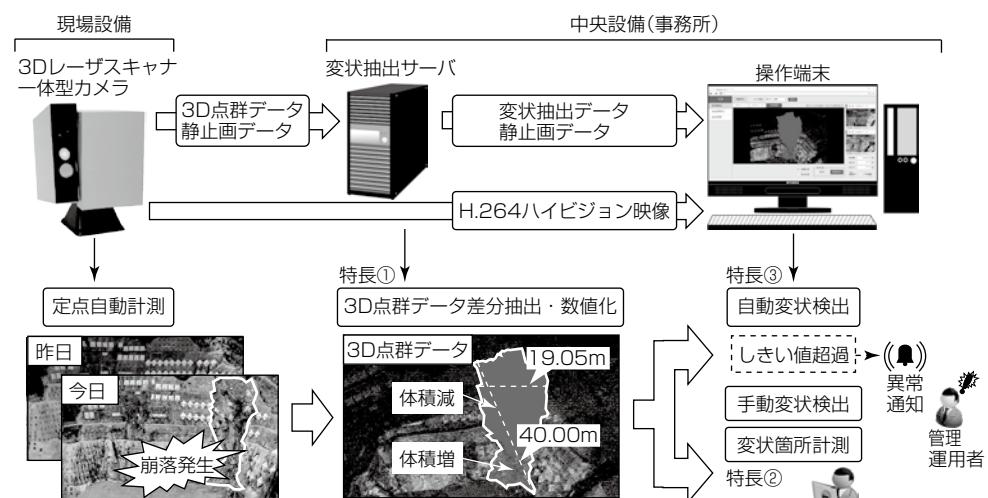


図1. 地形状況監視システム構成図

で、現場と3D点群データを対比し、変状箇所の確認を容易にした(図4)。

(注3) 国土交通省が土量計算の標準としている手法の一つ。

### 2.3.2 計測機能と断面図表示機能

監視対象の映像画面から任意の2点を選択することで、距離計測や断面図表示等を行う機能である(図5)。

計測機能は、地形上の距離や高さといったカメラ映像の視認だけでは把握することが困難な値を数値化する機能である。3D点群データ上で任意選択した2点間の距離、高さ方向の長さを表示することによって、地形変状の大きさの把握を可能にした。

断面図表示機能は、任意選択区間での地形断面を表示することで、地形変状を視覚的に把握する機能である。3D点群データ上で任意の2地点を選択し、2地点の直線上に存在する点の高さ情報を抽出、点間を直線で結ぶことで、断面図の表示を行う。また、同一箇所を時系列で計測した二つの3D点群データ(比較元データと比較先データ)の断面図を重ね合わせて表示することで、地形変状の可視化を可能にした。

### 2.3.3 自動変状検出機能

自動変状検出機能は、自動的に定期周期で3D点群データの計測及び差分抽出を行い、地形変状を早期検出するための機能である。

設定したしきい値以上の体積差分量を検出した場合に自動で管理者に通報する機能を設け、崩落危険領域の早期警戒を可能にした。監視画面から計測箇所、測量開始日時、計測周期、比較元となる3D点群データを設定することで、

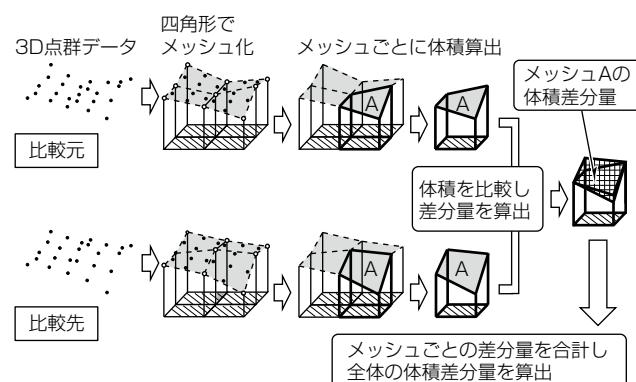


図2. 4点平均法による体積差分量の算出

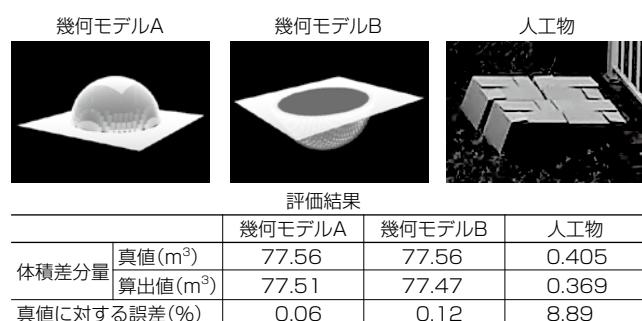


図3. 体積算出精度の評価結果

自動的に差分抽出を行い、体積差分量がしきい値を超過した場合、異常検出を自動通知する(図4)。通知の方法は、監視画面上での“点滅表示”及び警報装置を介した“アラーム通知”で、自動通知用のしきい値は、監視画面上で設定できるため、監視状況に応じた運用が行える。

### 2.4 課題と解決手法

差分抽出を行いたい範囲に草木などがあると、それらの成長と変化も体積差分として抽出し、誤検知してしまう。解決手法として、任意に選択した範囲内の3D点群データだけを差分抽出する機能を設けた。複数範囲を設定可能にすることで、より細かな条件での変状把握を実現した(図6)。



図4. 差分領域の可視化と自動変状検出の自動通知

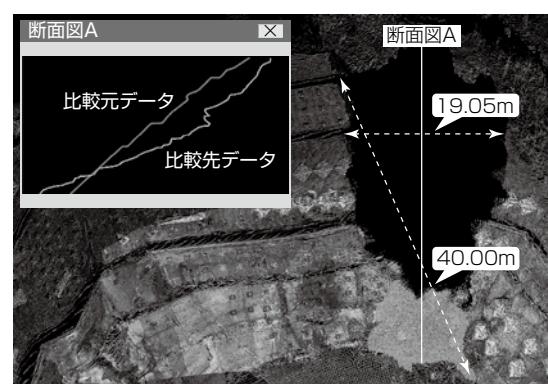


図5. 計測機能と断面図表示機能

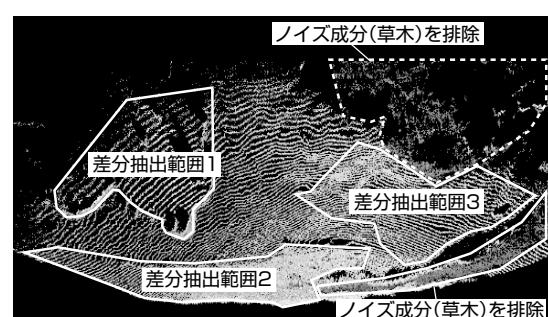


図6. 差分抽出範囲の複数選択

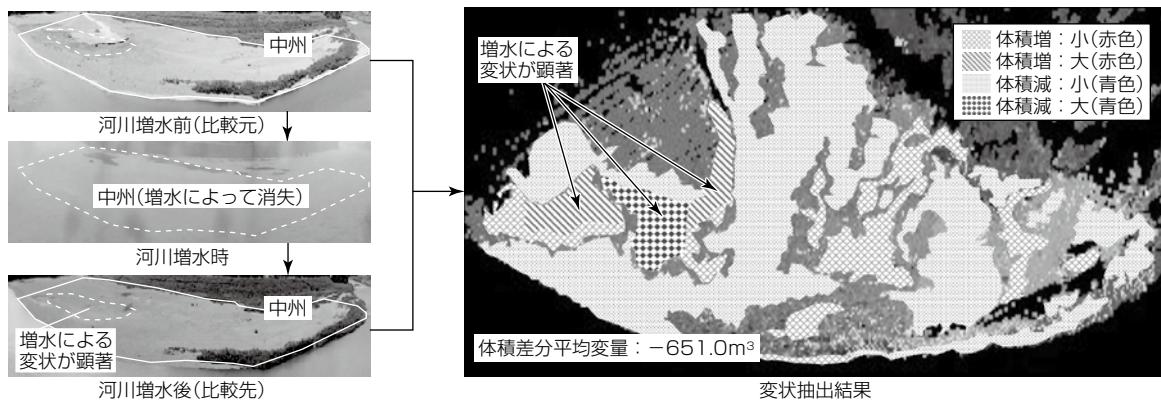


図7. 河川中州での変状抽出結果

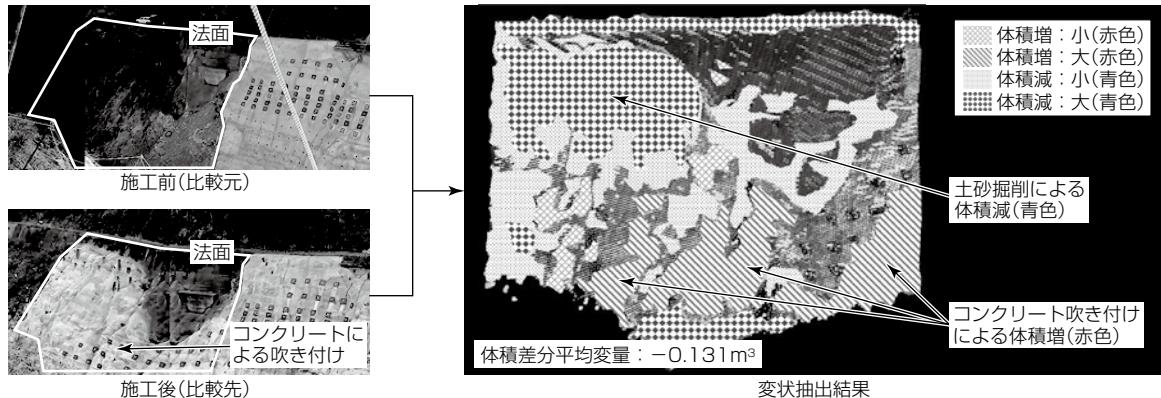


図8. 砂防堰堤法面での変状抽出結果

### 3. 差分抽出機能のフィールド検証

#### 3.1 フィールド検証

洪水予防を目的に適正な状態維持が求められる“河川中州の堆砂状況変化”及び、的確な施工状況把握が求められる“砂防堰堤の建設工事現場での法面の施工状況変化”を対象としたフィールド検証を行った。本来であれば定量的な検証が望ましいが、これらのフィールドでは真値との比較が難しく、また、体積差分(体積増、体積減)が生じた領域の表示だけでも有用性確認として十分であったため、地形変状時に、視認による変状範囲と比較を行った。

#### 3.2 フィールド検証結果

##### 3.2.1 河川中州での変状抽出確認

大雨等による河川増水前後では、中州の堆砂状況が変化する。フィールド検証では、中州の堆砂状況を1地点から計測し、変状抽出を行った。体積差分の領域について、視認による変状範囲と、このシステムによる表示結果を比較し、合致していることが確認できた(図7)。

##### 3.2.2 砂防堰堤法面での変状抽出確認

砂防堰堤の建設工事現場では、コンクリートによる吹き付け施工が行われるため、施工進捗に応じて法面の形状が変化する。検証では、法面状況を2地点から計測し、変状抽出を行った。2地点で計測した3D点群データで変状抽出を行うためには一つの3D点群データに統合を行った上で解析処理する必要がある。

結果は、視認による施工状況に対して、体積差分領域の表示が合致していることが確認できた(図8)。

#### 3.2.3 フィールド検証結果のまとめ

河川中州及び砂防堰堤でのフィールド検証の結果、地形変状時に、体積差分領域の抽出・表示が可能であることが確認できた。

一方、車両など草木以外の“ノイズ”による地形変状の誤検知や、2地点で計測した3D点群データの重ね合わせ精度に伴う誤差などが発生した。これらを補完する機能を追加実装するとともに、フィールドでの定量的検証によって、精度向上、利便性の改善等を行っていく。

## 4. むすび

3D点群データを用いて、河川堤防や砂防堰堤法面の地形変状を検出し、管理者の業務支援及び住民への早期情報提供を可能にする地形状況監視システムについて述べた。

CCTVカメラ映像だけでは行えなかった定量的な現況把握を安全かつ迅速に行うことで、被災時での災害対応の大幅な効率化が期待できる。今後は、道路法面など防災、減災に結び付く様々なフィールドでの適用拡大を図るとともに、更なる精度向上及び機能高度化を目指す。

## 参考文献

- 一般社団法人建設電気技術協会：TESLA建設電気技術，198，14～15（2019）

# 空港CDM

中村尚広\*  
吉田知輝\*

Airport Collaborative Decision Making

Naohiro Nakamura, Tomoki Yoshida

## 要旨

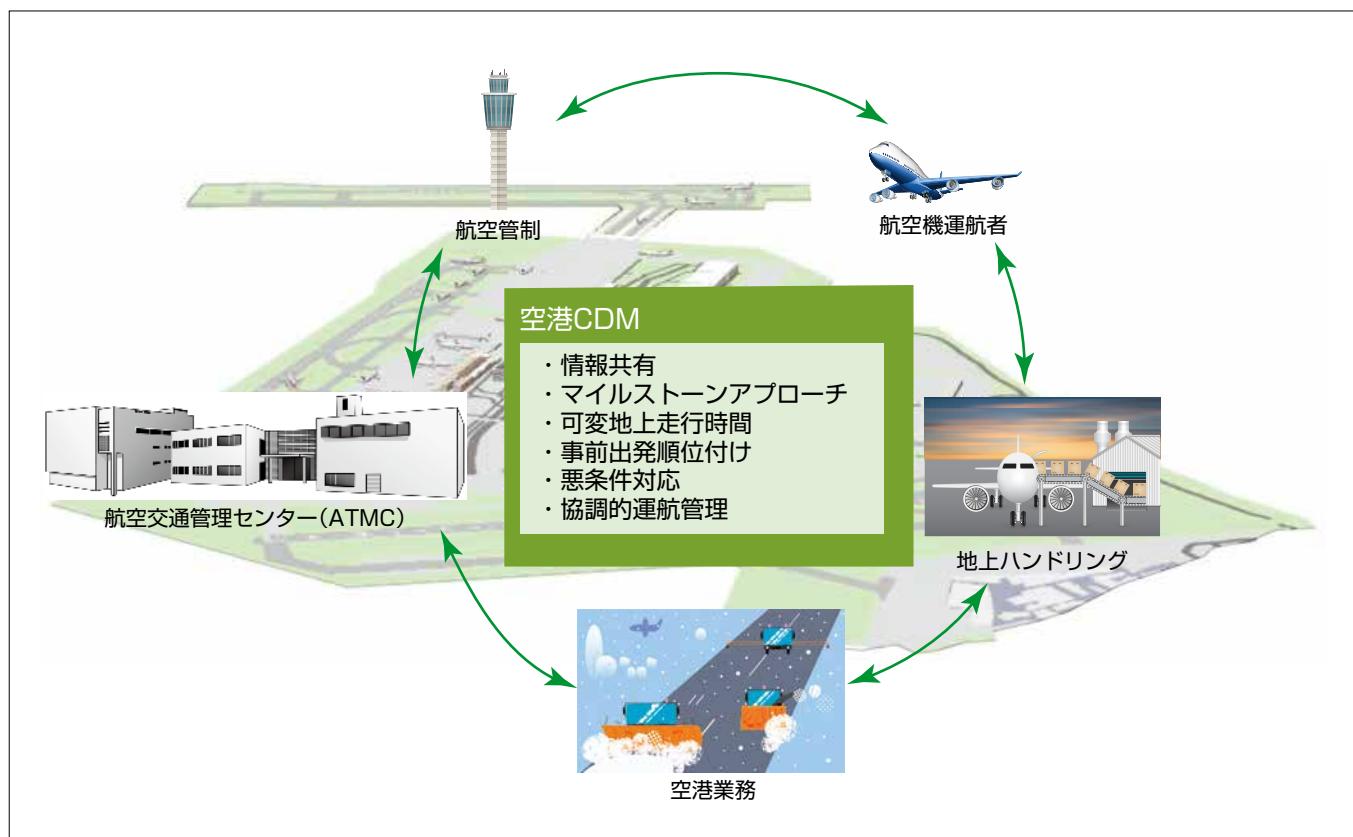
空港CDM(Collaborative Decision Making)とは、空港運用に係るステークホルダー間の協調的・意思決定を実現するためのシステムである。近年、増加傾向にある航空交通量に対応するため、各空港での総合的な空港運用能力の改善を目的として、ICAO(International Civil Aviation Organization:国際民間航空機関)が空港CDMの積極的な導入を促しており、欧州を中心として、米国、中国、東南アジアの各空港で導入が進められている。日本でも、“将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(以下“CARATS”という。)”の活動計画の中で、主要空港を中心として導入することが計画されている。

三菱電機では、日本初の空港CDMとして、新千歳空港CDMの開発及び納入を行った。新千歳空港CDMは、飛行

場面の状態や除雪作業の状況を共有する機能や、航空機の運航状況を表示する機能を備えており、2018年12月の評価運用開始から、大雪等の悪天候時の対応に活用されている。今後の導入が計画されている東京国際空港(以下“羽田空港”という。)及び成田国際空港(以下“成田空港”という。)の空港CDMは現在開発中である。継続的な増加が見込まれる首都圏空域の航空交通流への対応として、滑走路の効率的運用やトーリング<sup>(注1)</sup>情報の管理等による空港運用能力の向上を目的とする。

今後、空港CDMは、蓄積データの解析を通して運用改善の仕組みづくりに寄与し、将来に向けた航空交通インフラの拡充での重要な役割を担うことが期待される。

(注1) 航空機を牽引(けいいん)車によって牽引・移動すること



## 空港CDMによる情報共有

空港CDMでは、航空管制、ATMC、航空機運航者、地上ハンドリング、空港業務等の空港運用に係るステークホルダーが各々に保持する情報を共有し、協調的な意思決定を行うことで、効率的な空港リソースの活用を図る。

## 1. まえがき

近年、増加傾向にある航空交通量に対応するため、各空港での総合的な空港運用能力の改善を目的として、欧州を中心に空港CDMの導入が進んでいる。日本でも、国土交通省主導のCARATSの中で、主要空港に対する導入が計画されている。こうした中で、当社ではこれまでの航空管制事業に携わってきたノウハウを活かし、空港CDMの開発・製造を行っている。

本稿では、現在導入が進んでいる空港を例に挙げて、空港CDMの導入効果について述べるとともに、空港CDMに期待される日本の空港運用の改善に向けた展望について考察する。

## 2. 空港CDM導入の背景

### 2.1 空港CDM

空港CDMとは、空港運用に係るステークホルダー間の協調的意思決定を実現するためのシステムである。空港運用に係るステークホルダーには、航空管制、ATMC、航空機運航者、地上ハンドリング<sup>(注2)</sup>、空港業務等があり、このほかにも様々な機関が存在する。その全てのステークホルダーが常に情報共有できるプラットフォームを提供し、空港関連システムから収集、蓄積した情報を共有することで、空港全体として最新状況を踏まえた迅速な意思決定が可能になる。

(注2) 航空輸送での空港地上支援業務

### 2.2 空港CDMの目的と効果

CARATSのロードマップでは、空港CDMは空港の運用改善の仕組みを構築するものとして計画されており、最大の目的は総合的な空港運用能力の向上である。空港CDMの導入によって、これまで共有されなかった情報をステークホルダー間で共有することで、空港運用の見える化が行われ、空港全体での最適化が図られる。その結果、主な導入効果として次の事項が期待される<sup>(1)</sup>。

- (1) 予測性や定時性の改善
- (2) 地上走行コストの削減
- (3) 空港資源の最適利用と混雑緩和
- (4) 柔軟な事前出発計画
- (5) 駐機場や誘導路の混雑緩和

### 2.3 空港CDMの実施項目

空港CDMの実施項目として、次の6項目がEUROCONTROL(欧州航空航法安全機構)によって定義されている<sup>(1)</sup>。

- (1) 情報共有(Airport CDM Information Sharing)
- (2) ターンアラウンドプロセスのマイルストーンアプローチ(The Milestone Approach for the turn-round process)<sup>(注3)</sup>
- (3) 可変地上走行時間(Variable Taxi Time)

- (4) 事前出発順位付け(Pre-departure Sequencing)
- (5) 悪条件対応(Airport CDM in Adverse Conditions)
- (6) 協調的運航管理(Collaborative Management of Flight Updates)

(注3) 到着から出発までの運航を航空機ごとに時系列で管理すること

## 2.4 諸外国の状況

ICAOが策定する世界航空交通計画のロードマップの中で、空港CDMを活用した総合的な空港運用の管理を施策として示しており、各国に対して積極的な導入を促している。欧州では、EUROCONTROLを中心として空港CDMの導入が進められている。2007年のミュンヘン空港に始まり、2016年1月までに20の欧州空港への導入を完了している<sup>(2)</sup>。また、米国や東南アジア等の各空港でも導入が進められている。

## 2.5 日本での状況

### 2.5.1 現状の課題

日本では、増加する航空交通量への対策の一つとして空港機能の強化が挙げられている。空港機能の強化に当たり、情報共有の観点では、現状の主な連絡手段が電話やメール等であり、各ステークホルダーが持つ情報を集約するプラットフォームがないことが課題として挙げられる。悪条件対応の観点では、降雪等の外的要因によって滑走路閉鎖が発生した際に、正常稼働までの復旧時間の延長が空港機能の低下に著しく影響することが課題である。

### 2.5.2 CDMの導入状況

先に述べた課題への対応として空港CDMの活用が見込まれており、CARATSの活動計画の中で、2023年までに主要空港を中心として導入が計画されている。

空港CDMを導入する上で日本が欧州と異なる点は、欧州の空港CDMが担っている役割の一部を、日本では統合管制情報処理システムと連携して実現するという点にある。当社は、長年にわたり統合管制情報処理システムの一部である航空管制システム(ターミナルレーダ情報処理システム(Automated Radar Terminal System: ARTS)、空港管制処理システム(Traectorized Airport traffic data Processing System: TAPS))に携わっており、日本の航空交通の管理システムに沿った空港CDMの開発を行うことができる。

現時点で導入が進められているのは新千歳空港、羽田空港、成田空港の3空港であり、各空港の特性に沿った開発を行っている。新千歳空港では、主に悪天時の空港運用に活用される一方で、羽田空港及び成田空港では、継続的な増加が予測される首都圏空域の航空交通流への対応として活用が見込まれている。これらのシステムについては3.1節と3.2節で述べる。

### 3. 当社の取組み

#### 3.1 新千歳空港CDM

新千歳空港に日本で初めての空港CDMを納入し、2018年12月から評価運用が開始されている。このシステムは気象情報システム、飛行場面監視装置、旅客案内システム、駐機場管理システムと連携している。その外部システムから受信した情報を基に空港の運用状況や飛行場面での作業進捗の情報を四つのメイン画面に表示する。

ここでは、新千歳空港CDMの四つのメイン画面の仕様と、このシステムの導入効果について述べる。

##### 3.1.1 Airport Operation Status Overview画面

飛行場面の運用状況を表示する画面である(図1)。主に次の機能を持っている。

- (1) 空港平面図上への閉鎖情報とBA(Braking Action)情報<sup>(注4)</sup>の色塗表示機能
- (2) 風向、風速等の気象情報表示機能
- (3) 関係者間のチャット機能
- (4) 告示事項を情報発信するための掲示板機能

一つの画面に飛行場面の状況監視とチャット機能を共存させることで運用状況のモニタを行なながらのタイムリーな情報共有を可能にしている。空港関係者は、この画面を閲覧することで飛行場面全体の運用状況を俯瞰(ふかん)できる。

(注4) 摩擦係数を9段階で表した滑りやすさの指標

##### 3.1.2 Plan & Process Chart画面

飛行場面の作業状況を共有するための画面である(図2)。次の情報を時系列でチャート表示する。

- (1) 気象情報(外部システムから受信)
- (2) 滑走路面情報<sup>(注5)</sup>(外部システムから受信)



図1. Airport Operation Status Overview画面

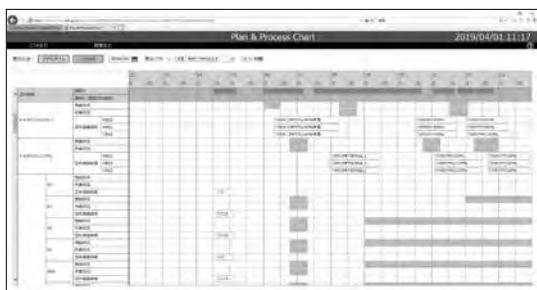


図2. Plan & Process Chart画面

(3) 作業情報(CDM内で情報入力)

(4) 雪氷調査<sup>(注6)</sup>結果情報(CDM内で情報入力)

外部システムから受信した情報と飛行場面で行われる除雪等の作業についてCDMから入力した情報を同じチャート上に表示し、前後12時間の作業計画及び実績を閲覧可能にする。また、履歴参照機能によって各作業プロセスを外的要因と関連付けて振り返ることができ、作業改善に活用される。

(注5) 滑走路の積雪量、地表温度や地中温度など

(注6) 滑走路等の積雪状況や摩擦係数を測定する作業

##### 3.1.3 Airport Operation Status画面

空港の運用状況をグラフ表示する画面である(図3)。次の情報を表示及びファイル出力できる。

- ・空港稼働率(滑走路稼働率)
- ・発着状況情報
- ・遅延率情報
- ・欠航率情報
- ・GTB(Ground Turn Back)<sup>(注7)</sup>件数
- ・地上走行時間<sup>(注8)</sup>情報

図2のPlan & Process Chart画面から入力された滑走路の閉鎖時間やBA情報(ある一定の摩擦係数以下の場合には閉鎖扱いとする)から滑走路稼働率を算出する。また、旅客案内システムや駐機場管理システムから受信した航空機の運航情報を合わせることで遅延率や地上走行時間の算出も可能になった。

(注7) スポットを出発した航空機が、防除雪氷液の有効時間内に離陸できない等の理由で、スポットに戻ること

(注8) 航空機がスポットから滑走路まで地上を移動する時間

##### 3.1.4 Flight Operation Status画面

当日のフライト情報を表示する画面である(図4)。出発便と到着便での次の情報を表示する。

- (1) 航空機運航情報
- (2) 駐機場管理情報
- (3) 防除氷作業<sup>(注9)</sup>情報
- (4) 地上ハンドリング作業情報
- (5) 航空機動向情報

運航情報の基準となるスポットアウト<sup>(注10)</sup>の予定時刻や離陸予定時刻に加え、防除氷作業の状況等のより詳細な運



図3. Airport Operation Status画面

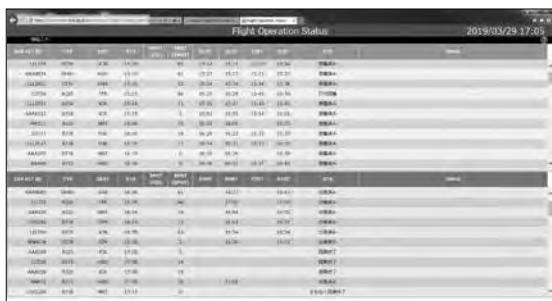


図4. Flight Operation Status画面

航情報を表示する。

(注9) 航空機に積雪がたまらないよう防水液を散布する作業  
(注10) 航空機のドアがクローズされ、スポットから離れること

### 3.1.5 導入による効果

新千歳空港への空港CDMの導入によって、空港CDMの実施項目である“情報共有”と“悪条件対応”による効果が得られた。

情報共有による効果は、判断の早期化である。Plan & Process Chart画面を活用し、除雪作業等の計画や進捗状況を公開することで、航空会社が出発便の運航可否の判断を迅速に行えるようになった。

悪条件対応による効果は、問合せ件数の軽減である。これまで滑走路の閉鎖を伴う事象が発生した際には、空港運用に係るステークホルダーから空港管理者に対して多くの問合せが発生していたが、Airport Operation Status Overview画面を活用することで件数が軽減された。また、問合せが発生した場合でも、同画面のチャット機能を用いることで、情報共有のリアルタイム性が向上した。

これらのはかにも、航空会社の動向や雪氷調査のタイミング等、これまで共有されていなかった情報が開示されるようになったことで、平常時でもより詳細な交通流制御が可能になった。

## 3.2 羽田空港CDMと成田空港CDM

新千歳空港CDMに引き続いだ、羽田空港及び成田空港向けの空港CDMの開発を進めている。首都圏に位置する両空港は発着便数が非常に多く、今後も更なる増加が見込まれる。そのため、新千歳空港と同等の機能に加えて航空管制システムとの連携やトーリング情報の管理を行い、より効率的な滑走路運用の実現を目指している。

両空港のCDM開発では、複数のデータソースを多様なステークホルダーで共有するためのデータ管理に重点をおいたアーキテクチャにしている。具体的には、他空港への展開を踏まえたデータ構造の共通化や、拡張性を持ったデータベース設計、そしてエンドユーザーの操作性を考慮した画面設計の共通化を行っている。

### 3.2.1 航空管制システムとの連携

各航空会社が入力したTOBT(Target Off-Block Time)<sup>(注11)</sup>

をTAPSに送信し、TAPS内で計算されたTSAT(Target Startup Approval Time)<sup>(注12)</sup>を公開する。これによって、空港内に事務所がない航空会社も含めてTASTの確認が可能になり、滑走路の効率的運用を実現できる。

(注11) 出発可能時刻

(注12) スポット出発承認時刻

### 3.2.2 トーリング情報の管理

これまで関係者間で共有されていなかったトーリング情報の管理を行う。航空機の到着、トーリング、出発を一連の情報として管理することでターンアラウンドプロセスの見える化を実現する。

## 3.3 今後の展望

日本での空港CDMの展望は次のとおりである。

- (1) 情報共有及びデータ収集
- (2) データ分析と運用改善(効率化)
- (3) 分析データを用いた予測性の向上
- (4) 空港の総合的な運用能力の向上
- (5) 空港間での連携

これまで述べてきた空港CDMは、(1)のフェーズにある。次のフェーズでは、空港CDMに蓄積されたデータをAI(Artificial Intelligence)等の技術を活用することによって分析し、分析結果から運用改善の仕組みを検討する。将来的には、全ステークホルダーの空港CDMに対する認知度を向上させ、分析結果に基づく運用を継続することで総合的な運用能力の向上(運用の最適化や予測性の向上)へつなげていく。当社としては、情報共有を促進させる業務の自動化・省力化に向けたシステム開発を行うことが今後の継続的な課題となる。

## 4. むすび

日本の空港利用者数は、2020年の東京オリンピック・パラリンピック開催や海外旅行の需要拡大に伴い、更なる増加が見込まれる。その対応策の一つとして空港CDMが各空港へ導入されつつあるが、取り扱う情報量や関係するステークホルダーの数が非常に多いことから、KPI(Key Performance Indicator: 重要業績評価指標)を含めた運用方法の確立には時間を要すると考えられる。将来に向けた航空交通インフラの拡充を進めていくに当たり、空港CDMは重要な役割を担うシステムであると認識しており、当社は空港CDMのシステムベンダーとして、空港の更なる運用能力の向上に向けて尽力していく。

## 参考文献

- (1) Eurocontrol: Airport CDM Implementation THE MANUAL Number 4 (2014)
- (2) Eurocontrol: CDM Impact Assessment Final Report (2016)

# EV・PV連携エネルギー管理システム

岩田敏彦\*

Cooperative Energy Management System Utilizing EV and PV

Toshihiko Iwata

## 要旨

世界的な環境意識の高まりから、電気自動車(Electric Vehicle : EV)が注目を集めている。EVはモビリティとしての利用に加え、移動可能な蓄電池としての活用も可能であるため、利用者に様々な便益を提供するポテンシャルを具備している。

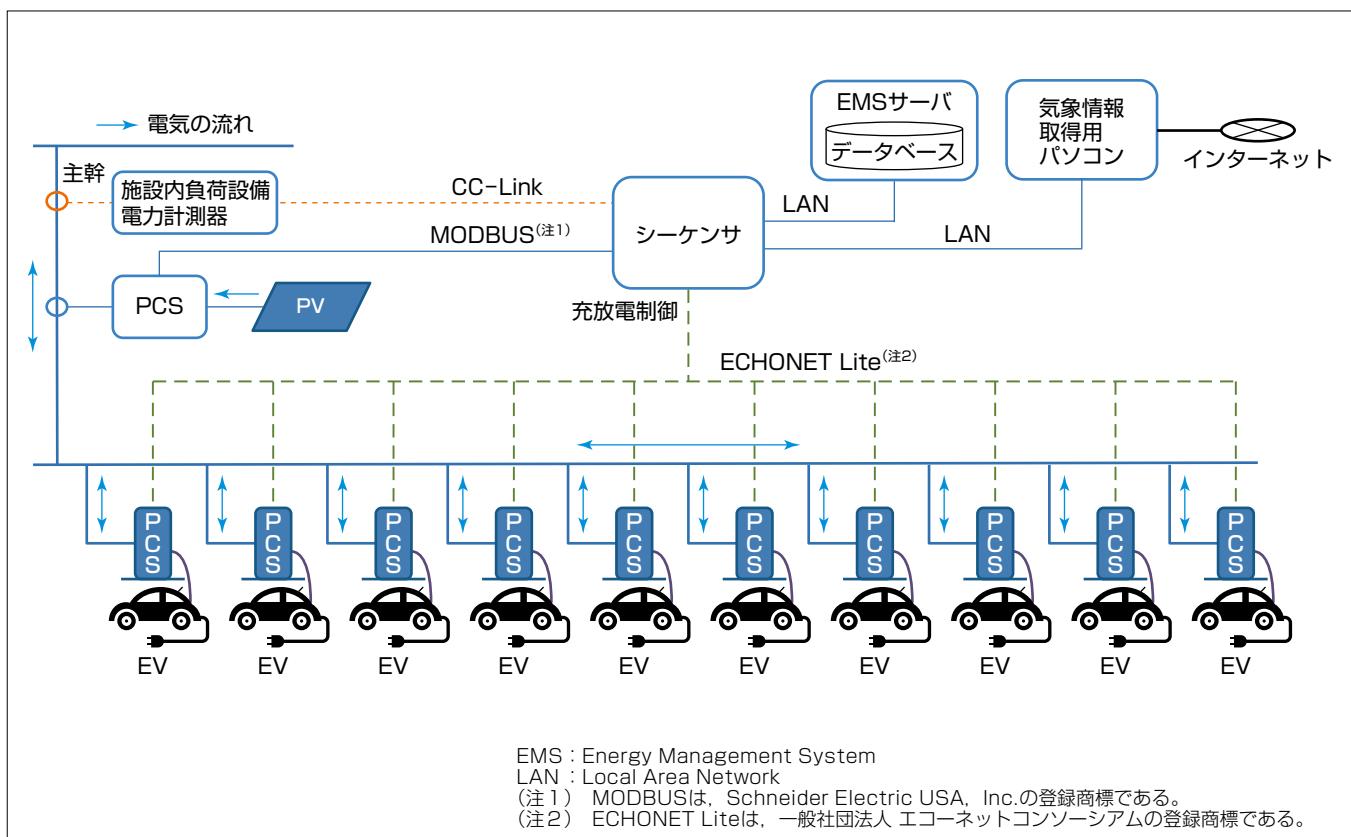
従来も定置型蓄電池を利用したピークカットによる契約電力の削減や、日中と夜間の電気料金差を利用した従量料金の削減を行うシステムはあったが、EVを蓄電池と見立て、駐車している時間帯に有効活用することで、定置型蓄電池の設置費用削減も可能となる。

EV・PV(PhotoVoltaic)連携エネルギー管理システムは、建物に設置した太陽光発電(PV)等の分散電源とEVを組み合わせ、PV等の分散電源の発電予測に基づき、

EVの充放電スケジュールや電力負荷設備の運用を最適化することで、建物の電力コスト削減に貢献するシステムである。

このシステムの特長は次のとおりである。

- (1) 電力負荷設備の使用電力量とPV発電量を予測し、電気料金単価とEVの利用予定から最適なEV充放電スケジュールを策定する。
- (2) 複数台のEVとPCS(Power Conditioning System)の接続・未接続状態を監視し、接続されているEVだけで最適なEV充放電が可能なようにきめ細かなEV充放電スケジュールを策定してピークカット・ピークシフトを実現する。
- (3) 購入電力量、使用電力量、PV発電量、EV充電量を常時監視し、立案した充放電計画と実績のずれを補正する。



## EV・PV連携エネルギー管理システム

駐車している複数台のEVとPVを連携させ、EVが充放電可能なPCSを用いて電力会社からの購入電力量を削減する。

## 1. まえがき

近年、大都市中心に広がる大気汚染対策と気候変動対策等の一つとして、EV普及拡大の機運が世界的に高まっている。日本ではCO<sub>2</sub>削減、再生可能エネルギーの普及拡大、エネルギーの効率的な利用のため、PVを建物内で消費する自家消費やガソリン車からEVへの切替え(EVシフト)を推進している。EVの導入によってPVの余剰電力をEVに充電して建物内で消費する自家消費の促進や、電力需要の少ない時間帯に充電しておいたEVの電力をピーク時間帯に放電して購入電力を削減するピークカットなどが可能となる。

定置型蓄電池を活用する場合、事前に入力されたしきい値を越えた場合に放電を開始するピークカットや、あらかじめ決められた時間帯で充放電を繰り返すピークシフトを行う事例はあるものの、EVはモビリティとして利用することが前提であるため、固定的なスケジュール制御が困難であり、充放電スケジュールを動的に補正して購入電力量を削減する必要がある。

本稿では、当社のスマートコミュニティ基盤を機能拡張し、今後導入の増加が予想されるEVを建物の蓄電池としても利活用し、電力コストやCO<sub>2</sub>削減に貢献する、EV・PV連携エネルギー・マネジメントシステムについて述べる。

## 2. エネルギーマネジメントシステムの基本機能

### 2.1 特長

三菱電機は、上下水道、ビル、空港、鉄道、道路等の社会インフラ事業領域のエネルギー最適化システムとして、分野別機能・基本機能から構成されるスマートコミュニティ基盤を開発した。

基本機能は、“電力需要予測”“PV発電量予測”“電力需給計画”の三つがある。

過去の電力使用実績や気象データ等から予測する電力需要やPV発電量、電力会社の電気料金等のデータを基に、電力コスト又はCO<sub>2</sub>排出量が最小となるようなシミュレーションを行い、エネルギー最適化を図ることができる。

### 2.2 電力需要予測

電力需要予測は、“予想気象データ”と“過去同月日の電力使用実績データ”から、数時間先までの電力需要予測値として求める。休日等の通常の需要と異なる日は特異日とし、あらかじめ設定した値を予測値として使用する(図1)。

### 2.3 PV発電量予測

予想気象データに、出力モデル係数・太陽光発電の定格出力を乗じて、数時間先までのPV発電量予測値を算出する(図2)。

### 2.4 電力需給計画

電力需要予測やPV発電量予測から、契約電力上限値・

蓄電池の上下限SOC(State Of Charge)・充放電効率の運用条件を満足し、選択した運転モード(コスト最小、CO<sub>2</sub>最小)に応じた最適供給計画によって数時間先までの需給計画を策定する(図3)。

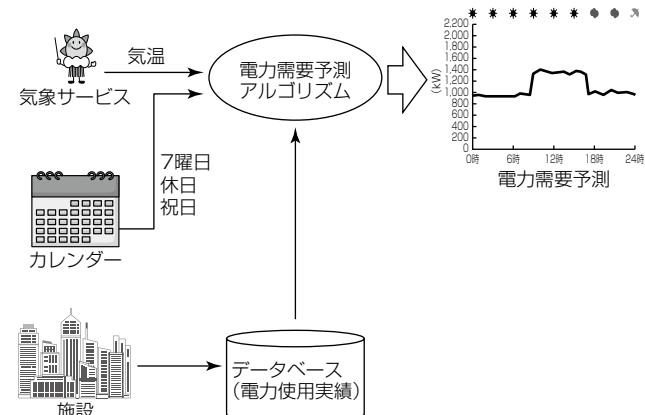


図1. 電力需要予測フロー

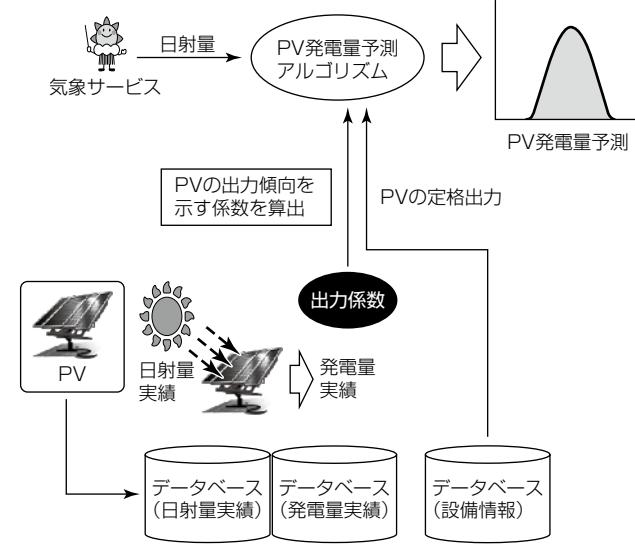


図2. PV発電量予測フロー

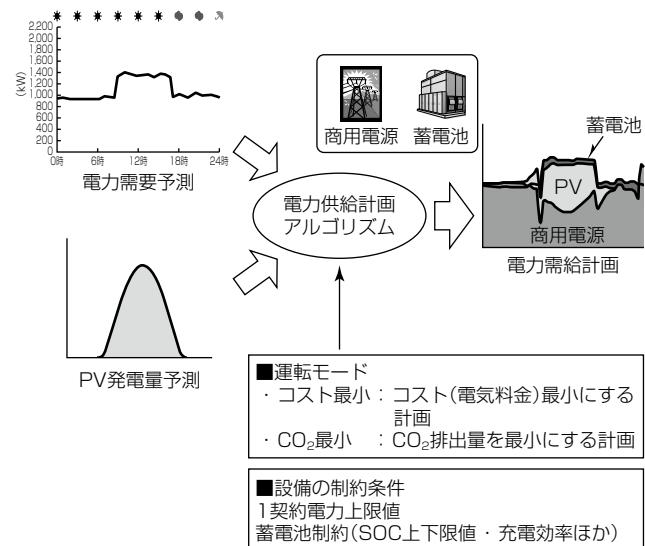


図3. 電力需給計画フロー

### (1) コスト最小

電気料金が最も小さくなるように、電源設備の運用計画を策定する。

### (2) CO<sub>2</sub>最小

電力使用量のCO<sub>2</sub>排出係数から計算されるCO<sub>2</sub>排出量が最も小さくなるように電源設備の運用計画を策定する。

## 3. EV・PV連携エネルギー・マネジメントシステムの特長

### 3.1 特長

先に述べたスマートコミュニティ基盤を用いて、EVのバッテリーを有効活用可能なEV・PV連携エネルギー・マネジメントシステムを開発した。

主な機能は“EV充放電スケジュールの策定”“計画補正”的二つである。この機能によって、EVの利用予定が変わっても、電力コストの増加抑制を実現している。

### 3.2 EV充放電スケジュールの策定

駐車中の複数台EVとPVを連携し、電力需要量とPV発電量を予測して電力コスト最小化を目指した最適化計算によって、ピークカット・ピークシフトを実現する。

契約電力・電気料金単価・EVの使用予定などを入力し、受電電力量・蓄電池の最大最小充放電量などを制約条件として充放電スケジュールを策定する。

従来のEV充放電制御では事前にEVに充電をしておき、使用電力が契約電力を超えないようにしきい値を設定してしきい値を超えたときに放電するため、EVの利用予定が変わった場合、予定していた放電量に達しないこともある。

このシステムでは電力需要量や電気料金単価の変動を考慮し、電気料金単価が高い時間帯に充電したEVの電力を放電するように最適な運用計画やEVの充放電スケジュールを策定する。このシステムの代表的な設定・表示画面を図4、図5、図6、図7に示す。

### 3.3 計画補正

1日数回、24時間先までの充放電計画を策定する“1日計画”，数分周期で数時間先までを補正する“計画補正”，数秒周期で決定する“制御指令”を組み合わせ、電力会社からの購入電力やEVの充電量を監視しながら策定済みの充放電計画からの予測のずれやEVの利用予定のずれを修正して運転計画や充放電スケジュールの精度を改善する(図8)。

従来のEV充放電制御では、EVの接続・未接続状態を監視せず、EVの到着遅れや到着時の充電量不足を想定していないため、ピークカットを達成できず、結果として電力コストの削減が達成できないという課題があった。

このシステムではEVの接続・未接続状態を監視して、接続中のEVだけで電力コストを最小にする最適化をその都度実施して充放電スケジュールを数分周期で補正している。よってきめ細かな充放電スケジュールによって、計画時と異なる状況でも電力コストの増加を抑制できる。



図4. ユーザーが設定するEVの個別予定編集画面



図5. 設定されたスケジュール一覧画面

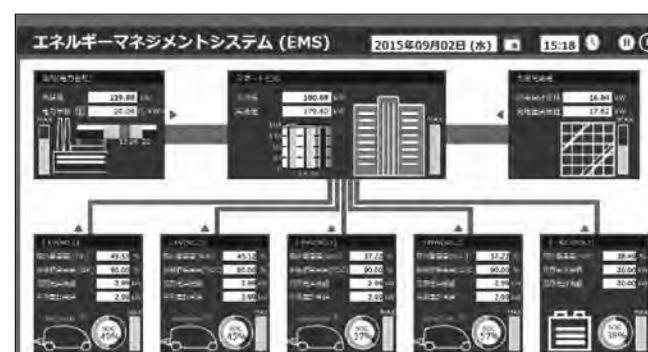


図6. EV, PV, 需要電力等を見る化したエネルギー監視画面

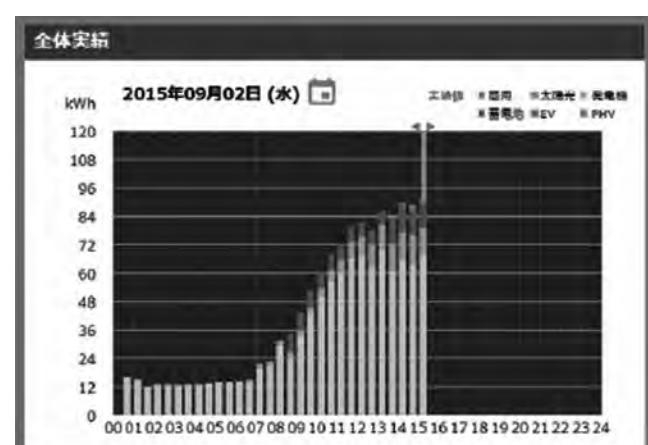


図7. 各電源の割合を表した全体実績画面

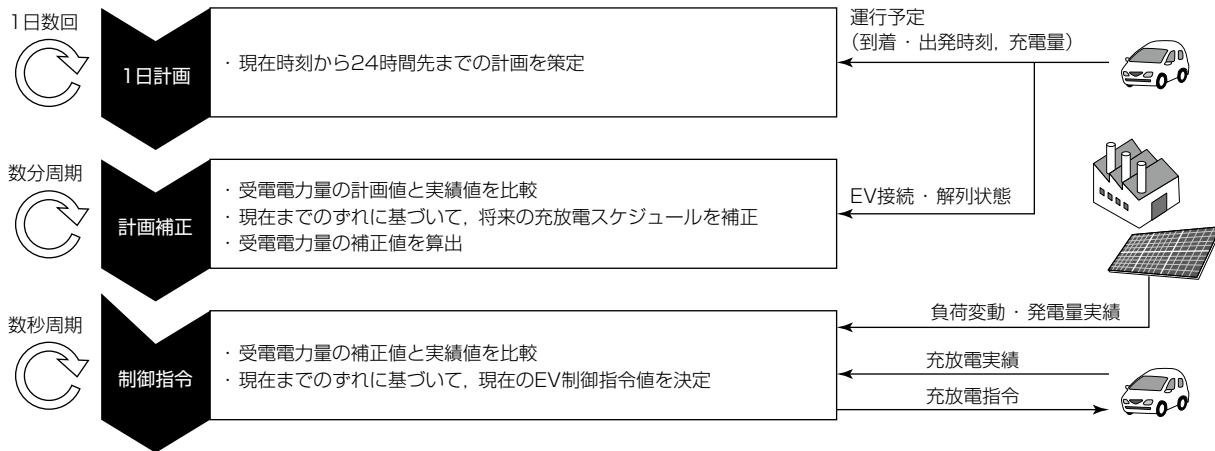


図8. 計画補正方法のイメージ

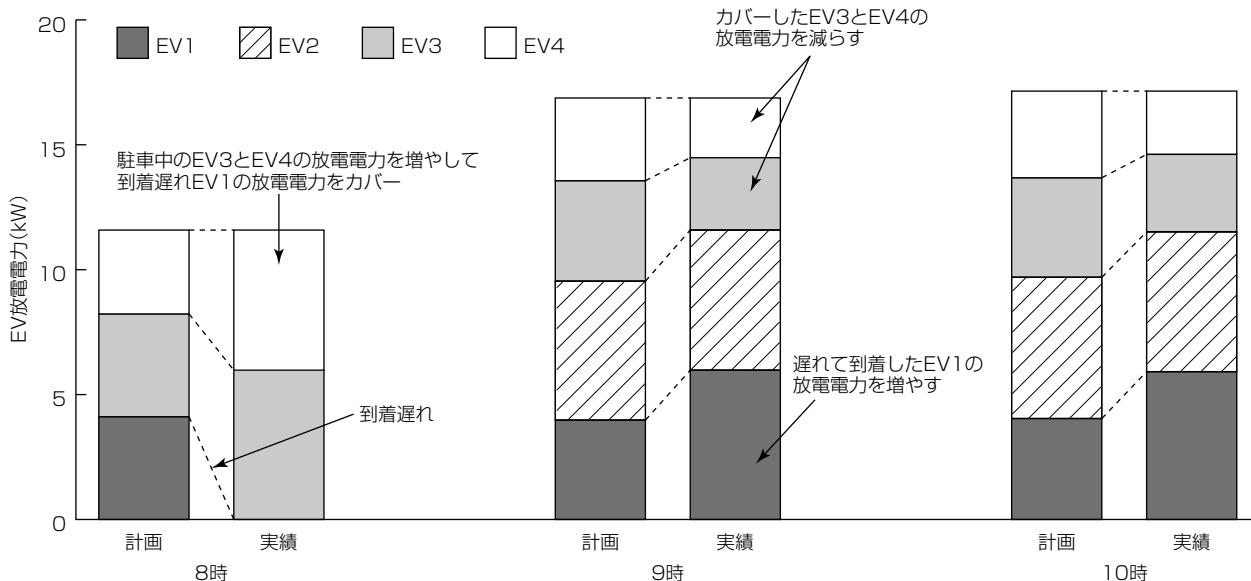


図9. 充放電スケジュールの補正例

### 3.4 充放電スケジュール補正例

図9に充放電スケジュールの補正例を示す。EVは4台駐車できるとし、当初計画からEVの利用予定が変わった場合の充放電量の制御は次のように行う。

- (1) 8時に到着予定のEV1の到着が遅れて9時に到着したとすると、8~9時はEV1から放電ができなくなる。
- (2) 8~12時は電気料金単価が高く、電力会社からの購入電力を増やさないようにするために駐車中のEV3, EV4の8~9時の放電電力を増やす。
- (3) EV1が到着する9時以降は、当初の使用予定どおりに9時に到着したEV2からの放電に加えてEV1の放電電力を増やし、EV3, EV4の放電電力を減らす。

このように、EVの利用予定が変わっても各時間帯でのEVごとの放電量の割合を変えることで電力コストの増加抑制ができる。

### 4. むすび

EV・PV連携エネルギー管理システムの特長について述べた。

このシステムの特長は次のとおりである。

- (1) EV充放電スケジュールの策定
- (2) EVの使用予定変更による計画補正
- (3) 充放電スケジュールの補正

今後、実フィールドでの実証データを基に、電力コストの更なる削減に貢献するシステムの確立を目指していく。

# オゾン水で膜を洗浄する膜分離バイオリアクタの膜面曝気風量最適化

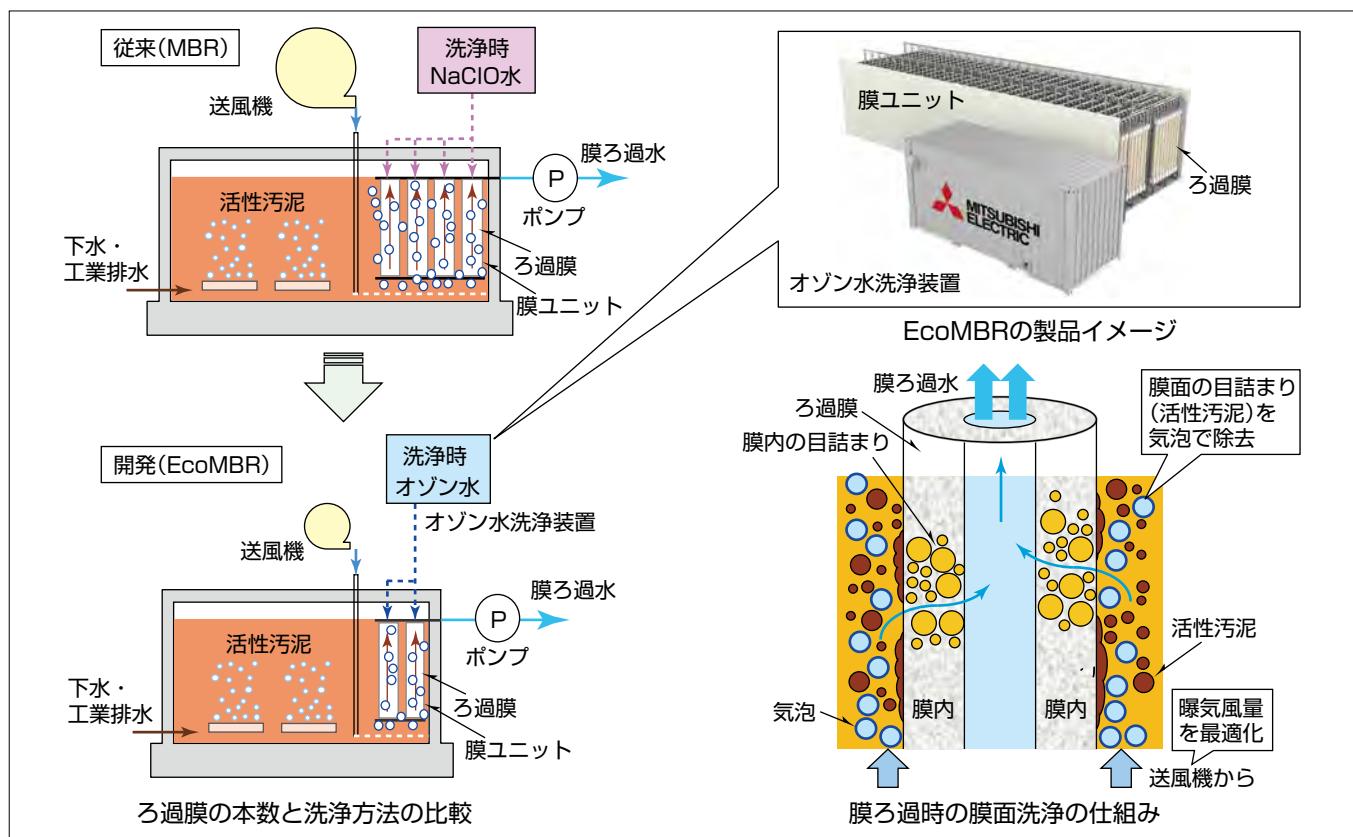
安永 望\* 林 佳史\*\*\*  
後藤伸介\*\*  
今村英二\*\*\*

Optimization of Membrane Scouring in Membrane Bioreactor with Cleaning Membranes by Ozonated Water  
Nozomu Yasunaga, Shinsuke Goto, Eiji Imamura, Yoshifumi Hayashi

## 要 旨

水質規制の強化や再生水の需要増大によって、従来の標準活性汚泥法より処理水質が良好な膜分離バイオリアクタ(Membrane BioReactor: MBR)の下水・工業排水処理への適用が世界的に拡がっている。しかし、MBRは膜面に付着する活性汚泥を剥離するために常時行う膜面曝気(ばっき)の消費エネルギーが大きく、省エネルギー化が課題である。さらに、下水・工業排水の流入負荷変動や生物処理の運転条件変更等で活性汚泥の性状が変化することによって、ろ過膜の目詰まりのしやすさ、すなわち膜ろ過性能も変化する。そのため、膜ろ過性能を最適化してMBRを省エネルギーかつ安定して運転するために、活性汚泥の性状に応じて最適な膜面曝気風量で供給することが重要である。

三菱電機の“EcoMBR”は、NaClO(次亜塩素酸ナトリウム)水の代わりにオゾン水(洗浄力の大きいオゾンガスを溶解させた水)を用いてろ過膜を洗浄することで、従来のMBRよりも2倍以上に膜ろ過速度を高め、ろ過膜の本数を低減して膜面洗浄用の曝気風量を削減する省エネルギー型水処理装置である。さらに、バイオリアクタ内の活性汚泥の性状に応じて膜面曝気風量を最適化するEcoMBRを開発中である。実排水を用いた小規模実験では膜面曝気風量を11%削減できることを検証した。今後はこの制御手法を搭載したEcoMBRを実用化し、豊かな水循環社会の実現に貢献していく。



## EcoMBRの特長

EcoMBRは膜内洗浄剤として洗浄力の大きいオゾン水を使用するため、膜ろ過面積当たりの膜ろ過水の流量を大きくしても目詰まりを解消可能である。これによって、ろ過膜の本数を低減し、膜面の洗浄に必要な膜面曝気風量を削減することで省エネルギー、省スペース、及びメンテナンス性向上を実現する。さらに活性汚泥の性状に応じた膜面曝気風量制御の適用で省エネルギー性をさらに向上させる。

## 1. まえがき

### 1.1 MBRとEcoMBR

膜分離バイオリアクタ(MBR)は、流入水中の有機物を微生物である活性汚泥で除去し、膜ユニットで処理水すなわち膜ろ過水と活性汚泥を分離する水再利用装置である。従来の活性汚泥法と比較すると、膜で活性汚泥と膜ろ過水を分離することから、処理水に浮遊物質が含まれず、再利用に適した処理水が得られる。さらに活性汚泥法では最終沈殿池で時間をかけて活性汚泥を沈降させて処理水と分離するが、MBRではろ過膜で活性汚泥と処理水を分離するため最終沈殿池が不要となり、処理に必要な装置面積を低減できる。これらの利点から、現在は下水・工業排水の再利用処理に広く活用されている。

しかしMBRは膜処理のため、活性汚泥による膜面及び膜内の目詰まり対策が必要である。通常、膜面の目詰まりに対しては膜ユニット下部から送風機で曝気して除去する。そのため膜面は常時曝気されており、その消費電力量はポンプ等の他の機器の消費電力量よりも大きくなる傾向がある。一方、膜内の目詰まりはNaClO水等の洗浄水をろ過時と反対方向に注水することによって除去する。

当社は、NaClO水の代わりにそれよりも酸化力の強いオゾン水でろ過膜を洗浄するEcoMBRを実証実験中である。オゾン水を使用することで従来よりもろ過膜内の洗浄力が高められ、十分に膜内の目詰まりを解消できる。よって、膜1本当たりの膜ろ過水量を増大できるためにろ過膜

の本数が低減し、NaClO水での洗浄に比べて膜面曝気風量を削減したMBRの運転が可能になる<sup>(1)</sup>。

### 1.2 EcoMBRのシステム構成

図1にEcoMBRのシステム構成を示す。EcoMBRは膜ろ過と膜面洗浄及び膜内洗浄を繰り返しながら運転する。次にこのシステムの動作フローについて述べる。

#### (1) 膜ろ過と膜面洗浄

膜ろ過を継続すると、徐々に膜面及び膜内が目詰まりするが、當時、膜面曝気(図1の①)することで膜面の活性汚泥を剥離して目詰まりを抑制できる。一方で活性汚泥中の有機物等が徐々に膜内に蓄積し、目詰まりが進行することによって膜内の目詰まりを示す指標である膜間差圧が上昇する。

#### (2) 膜内洗浄

膜間差圧が所定値に達すると、一旦膜ろ過を停止して、膜内洗浄に切り替える。オゾン水による膜内洗浄では、膜ろ過水の一部をオゾン水タンクに引き込み(図1の③)，オゾンガスをオゾン水タンクに注入して(図1の④)オゾン水を生成する。続いて、膜ろ過とは反対方向からオゾン水を膜装置に注入し(図1の⑤)，オゾン水で膜内の目詰まり物質を酸化させることで膜内を洗浄する。膜内の洗浄完了後、膜ろ過を再開し、これらを繰り返してEcoMBRの運転を継続する。

### 1.3 EcoMBRのユーザーメリット

EcoMBRはオゾン水でろ過膜を洗浄する省エネルギー型MBRであり、そのユーザーメリットは次の3点である<sup>(1)</sup>。

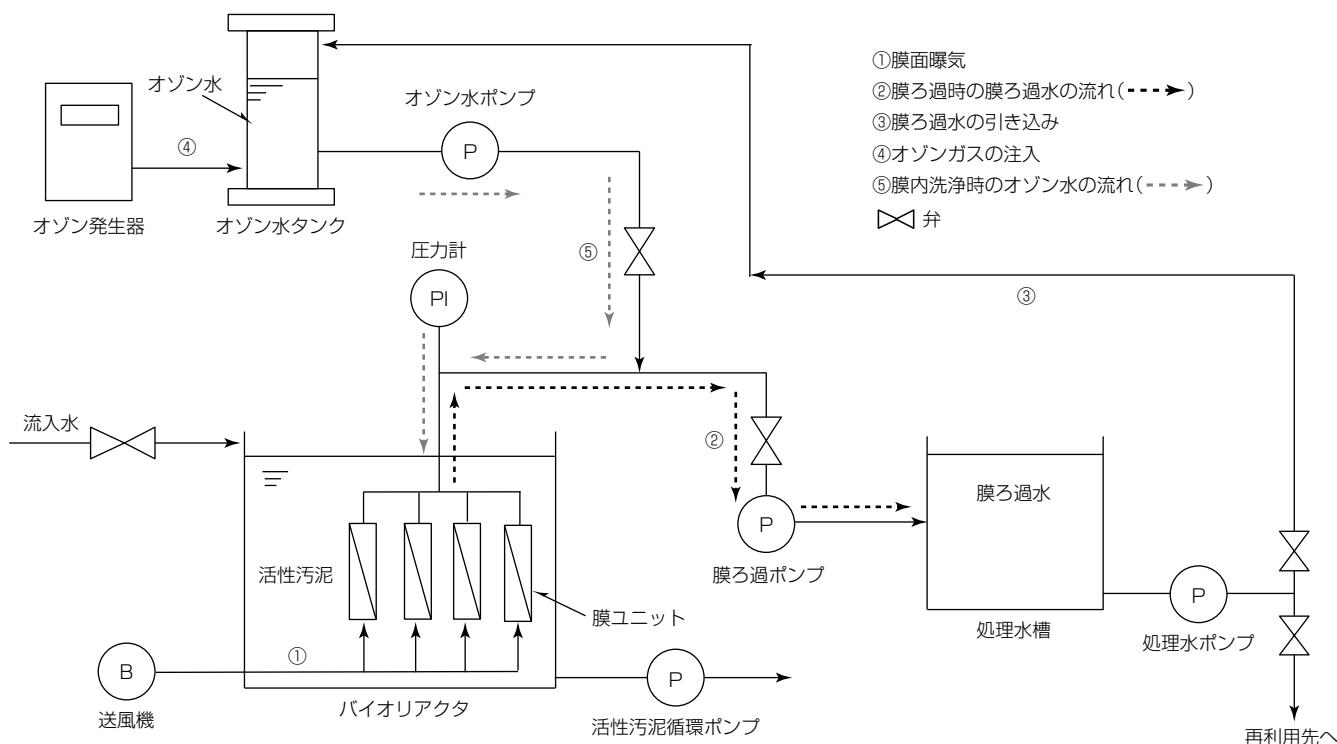


図1. EcoMBRのシステム構成

### (1) 省エネルギー

従来のMBRと比較して膜面曝気風量の削減による送風機電力の低減量が大きいため、オゾン水生成に必要な電力が増加するもののトータルで約25%省エネルギー化できる。

### (2) 省スペース

高い洗浄力を持つオゾン水を使用することで膜1本当たりの膜ろ過水量を増大でき、その結果、膜本数を半分に削減することによって膜ユニットの設置面積を50%低減できる。

### (3) メンテナンス性向上

高い洗浄力を持つオゾン水の使用による膜内洗浄時間短縮や、膜ユニット削減によるろ過膜の定期交換作業時間の削減が期待できる。

## 2. 膜面曝気風量の最適化

### 2.1 負荷変動に対応した膜面曝気風量制御

下水や工業排水の水質と水量は時々刻々と変動する。MBRはバイオリアクタ内の活性汚泥によって処理するため、水質や水量変動によって活性汚泥の性状が変化する。その結果、膜ろ過性能(膜ろ過のしやすさ)の変動は避けられない。したがってMBRを安定して運転するためには、膜ろ過性能の変動に対応して膜面から常に活性汚泥を剥離できる膜面曝気風量を適切に供給する必要がある。

当社はこの課題を解決するため、膜面洗浄用の曝気風量の最適化について検討した。先に述べたとおり、MBRの膜面曝気は常に行う必要があるため、消費電力量が大きい。そのため処理水質の悪化を想定し、過剰な膜面曝気風量で運転した場合、消費電力量が非常に大きくなる。一方、過少な膜面曝気風量で運転した場合、膜面から十分に活性汚泥を剥離できず、膜面が閉塞して膜ろ過を継続できなくなる。したがって、流入水の負荷変動によって変化する活性汚泥の性状に合わせて膜面曝気風量を適切に制御する必要がある。

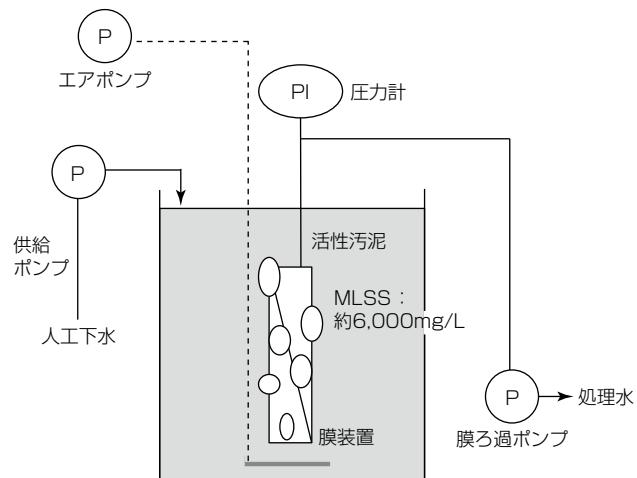
当社は省エネルギー性を更に増大させるため、流入水の負荷変動等による活性汚泥の性状の変化に応じて膜面曝気風量を最適化する制御手法を開発中である。

### 2.2 膜面曝気風量の制御アルゴリズム

膜ろ過時は活性汚泥によって膜面が目詰まりしないよう、常に、膜面曝気を実施している。そこで、膜面曝気風量をパラメータとした場合の膜間差圧の変化を分析し、その結果から膜間差圧の上昇を抑制するために必要な膜面曝気風量を探索する制御アルゴリズムを開発した。

#### (1) 膜面曝気風量と膜間差圧上昇速度の関係

図2に示す試験装置を用いて膜面曝気風量と膜間差圧との関係を調査した。PVDF(ポリフッ化ビニリデン)製の小型中空糸ろ過膜(ろ過面積0.1m<sup>2</sup>)1本を用いて、流束(単位膜面積当たりのろ過流量)1.4m<sup>3</sup>/日で人工下水を流入水



MLSS : Mixed Liquor Suspended Solids(活性汚泥浮遊物質)

図2. 試験装置の模式図

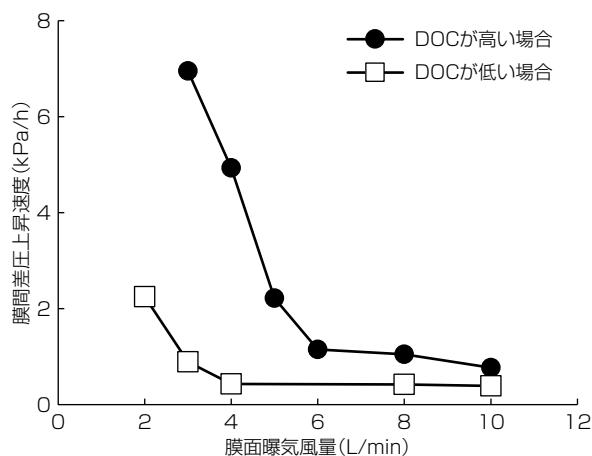


図3. 膜面曝気風量に対する膜間差圧上昇速度の変化

としてMBRを運転しながら膜面曝気風量を変化させて膜間差圧の変動を評価した。活性汚泥の性状の違いによる影響を確認するため、DOC(Dissolved Organic Carbon: 溶解性有機物)低(16mg/L)と高(35mg/L)の2条件で実施した。

膜面曝気風量と膜間差圧上昇速度の関係を図3に示す。膜面曝気風量を増加させると急速に膜間差圧上昇速度が減少し、DOCによらずある膜面曝気風量の値から膜間差圧上昇速度が一定となった。すなわち、膜間差圧上昇速度を低く保つために必要な最小膜面曝気風量が存在することを確認できた。さらに最小膜面曝気風量は、DOCが高い場合は6 L/min、DOCが低い場合は4 L/minとなり、DOCが高い方が最小曝気風量の値が大きかった。これは活性汚泥の性状が悪化、すなわちMBRの水処理性能が低下してDOCが高くなった場合、活性汚泥が膜面から曝気によって剥離しにくくなつたためと推測される。

#### (2) 膜面曝気風量の制御アルゴリズム

(1)の検討結果から、曝気風量を低減すると膜間差圧が急上昇する曝気風量の値が存在することが分かった。これに

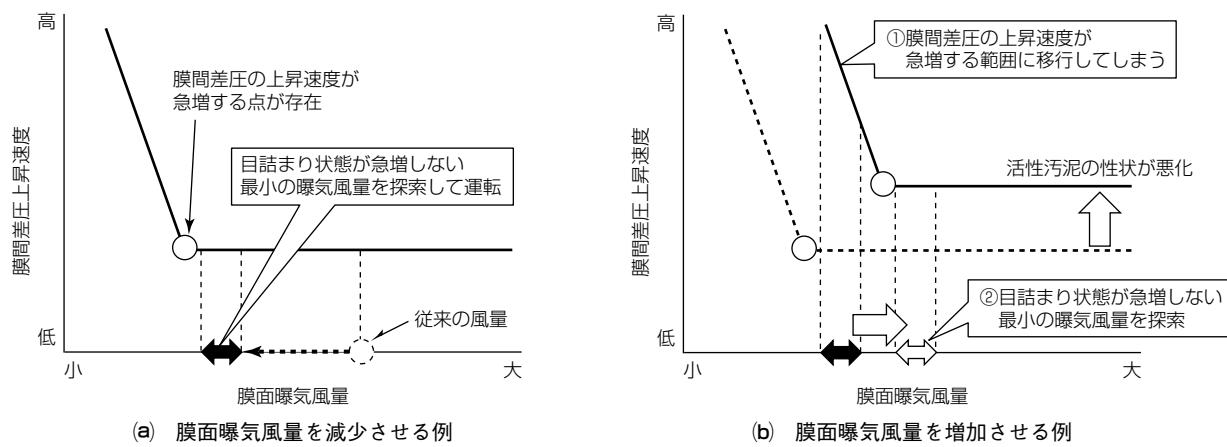


図4. 膜面曝気風量の制御方法

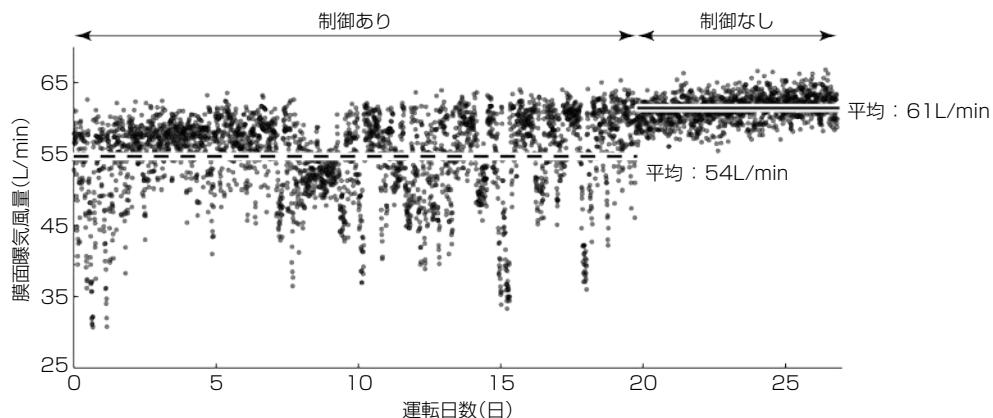


図5. 膜面曝気風量の経日変化

よって膜面曝気風量制御アルゴリズムとして、膜間差圧上昇速度を入力項目として最小膜面曝気風量を決定できると考えられた。

例えば図4(a)に示すように、膜間差圧上昇速度の変化を常時監視しながら現状の膜面曝気風量を逐次的に下げ、膜間差圧上昇速度が急上昇する膜面曝気風量の近傍を見つけることで、それよりも大きい風量を目詰まりしにくい最小の曝気風量として探し出すことができる。

膜間差圧上昇速度を監視していなかった場合、図4(b)に示すように活性汚泥の性状が悪化すると膜面曝気風量が不足する状態になり、膜間差圧上昇速度が急上昇する可能性がある(図4(b)の①)。そうなるとろ過膜が急速に目詰まりして膜ろ過処理を継続できず、MBRが処理不能に陥ってしまう。そこで、この制御アルゴリズムを使用することで目詰まり状態が急増しない最小の曝気風量を探索して運転することが可能になる(図4(b)の②)。

以上の制御アルゴリズムによって、膜間差圧上昇速度を常時監視しつつ、活性汚泥の性状に合わせて必要最小限の膜面曝気風量に制御することで省エネルギーかつ安定してMBRの運転ができる。

## 2.3 膜面曝気風量制御の実排水での検証

液晶ディスプレイ工場の有機排水を流入水としたMBR

の小規模実験で、先に述べた膜面曝気風量制御性能を検証した結果を図5に示す。この実験ではPVDF製の小型中空糸ろ過膜(膜ろ過面積0.5m<sup>2</sup>)5本を用いて、流束0.55m<sup>3</sup>/日で運転した。膜面曝気風量制御の実施有無の両条件で、膜間差圧の上昇傾向が等しくなるようMBRを運転した結果、膜面曝気風量を制御しなかった場合は55~67L/min(平均61L/min)であったのに対し、膜面曝気風量を制御した場合は30~65L/min(平均54L/min)と膜面曝気風量は活性汚泥の性状に追随して変動した。その結果、膜面曝気風量を制御することで、制御しなかった場合と比較して膜面曝気風量を平均値で11%低減できた。

## 3. むすび

流入水の負荷変動等による活性汚泥性状の変動に応じて膜面曝気風量を最適化する制御方法について述べた。今後は、実規模スケールの実証試験を実施してEcoMBRの実用化を目指す。

## 参考文献

- (1) 安永 望, ほか:下水・工業排水処理向け省エネルギー・省スペース型膜分離バイオリアクタ“EcoMBR”, 三菱電機技報, 91, No.9, 508~511 (2017)

# 海洋レーダを用いたデータ同化による津波予測技術

山田哲太郎\* 石川博章\*\*\*  
小柳智之\*\* 亀田洋志\*  
有岡俊彦\*\*

Tsunami Prediction Technology by Data Assimilation Using Ocean Surface Radar

Tetsutaro Yamada, Tomoyuki Koyanagi, Toshihiko Arioka, Hiroaki Ishikawa, Hiroshi Kameda

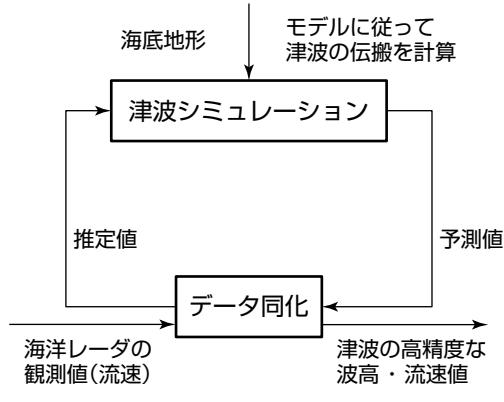
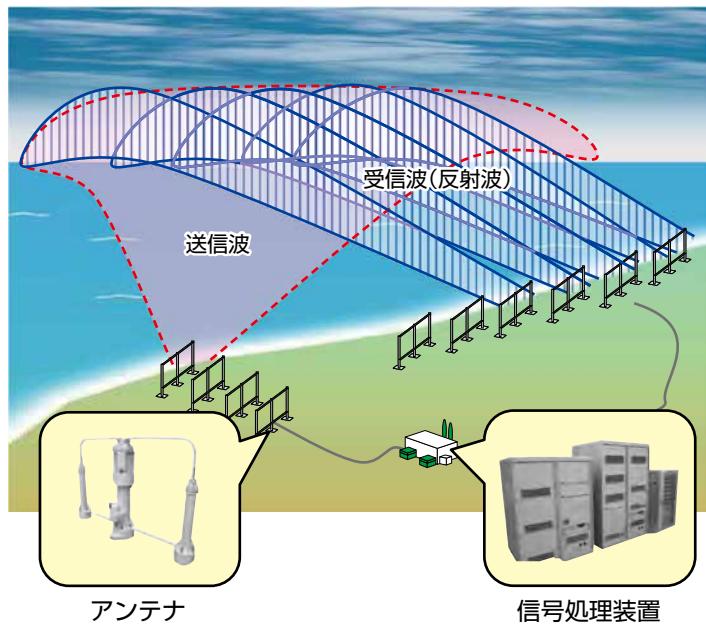
## 要旨

近年、日本の沿岸部では、大地震の発生によって津波が襲来することが懸念されている。津波が沿岸に到達する前に、可能な限り早く精度良く到来を予測することは、効率の良い避難行動や対応を行うために重要である。そのため、津波の沖合での正確な波高値や流速値をリアルタイムで知ることが課題となっている。従来、津波の波高値の観測手段として、沖合に設置された津波観測ブイや海底水圧計を用いる方法がある。しかし、海洋観測ブイは設置位置(点)での観測しかできないため、広範囲にわたり多数設置する必要がある。

一方、海洋レーダは陸上から面的に広範囲の海の状況を高い時間・空間分解能で観測できるため、日常の沿岸環境

監視での有用性が検証されてきた。特に沿岸部から遠い海面を観測することによって、津波が到達するまでの時間を確保できることもメリットの一つである。ただし、海洋レーダが観測するのは視線方向の海表面の流速(表層流速)であり、表層流速から津波に起因する流速成分を抽出する技術について、いまだ十分な開発がなされていなかった。

このような背景の下、三菱電機では従来の海洋レーダを改良し、津波シミュレーションと海洋レーダの表層流速を同化させた津波予測技術を開発した。このシステムによって、海洋レーダで観測される表層流速から津波の波高値や流速値をリアルタイムに予測できる。



## 海洋レーダを用いた津波データ同化方式

津波監視用海洋レーダシステムは、海面に電波を送信して海面で反射した電波を受信するアンテナと、流速成分の算出や解析等を行う信号処理装置で構成される。津波データ同化方式はレーダで観測された流速を基に津波シミュレーションによる数値計算を実施し、観測値と予測値を同化することで高精度に津波の波高値と流速値を推定できる。

## 1. まえがき

近年、日本の沿岸部では、大地震の発生によって津波が襲来することが懸念されている。津波が沿岸に到達する前に、可能な限り早く精度良く到来を予測することは、効率の良い避難行動や対応を行うために重要である。そのため、津波の正確な波高値や流速値をリアルタイムで知ることが課題となっている。海洋レーダは陸上から広い範囲の海の状況を高い時間・空間分解能で観測できるため、日常の沿岸環境監視での有用性が検証されてきた。特に沿岸部から遠い海面を観測することで、津波が到達するまでの時間を確保できる。

海洋レーダは、HF帯(短波帯(3~30MHz))の電波を海面に照射し、散乱された信号を受信することで沿岸から数十km先までの表層流速を観測する装置である。陸上に設置したアンテナから海面に電波を照射すると、電波の波長 $\lambda$ の半分の長さの間隔を持つ波によって反射された電波(反射波)は、位相がそろうことによって強め合う。この現象をブレーグ散乱共鳴という。反射波は受信信号としてアンテナに返ってくる。その受信信号を周波数解析し、得られたドップラースペクトルでの一次散乱ピークの位置からドップラーシフト量を算出して表層流速を求める。なお、1台の海洋レーダでは、海洋レーダに近づく方向又は遠ざかる方向だけ、すなわち、一次元の視線方向の表層流速だけを観測できる。

本稿では、1台の海洋レーダで観測した表層流速から津波の波高値や流速値をリアルタイムで予測する技術について述べる。

## 2. 背 景

1台の海洋レーダによって観測できるのは表層流速の視線方向成分だけであり、直接波高を推定することはできない。沿岸に設置された海洋レーダは沖合の方向に電波を放射し、ブレーグ散乱共鳴現象を利用して、レーダー覆域内のセル(レンジとビームの分解能単位)ごとの流速値を観測できる。しかし、海洋レーダの流速値の観測誤差は大きく、また、電波環境の状況によって多重散乱や干渉波の影響などで流速値を失検出や誤検出するという課題がある。

一方、海洋レーダを用いた津波の観測が試みられている<sup>(1)</sup>。海洋レーダでは流速値を観測することが可能だが、津波の予測をする際には波高を計算する必要があり、海洋レーダの流速値から波高を計算する手法が研究されている。しかし、海洋レーダの流速観測誤差が大きくて予測精度が劣化するという課題がある。本稿では、海洋レーダの観測誤差を考慮した上での津波の観測と予測性能の向上を検討の対象とする。

津波は次の式(1)、式(2)、式(3)で表される浅水方程式に

従って伝搬することが知られている。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{h} \right) + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{h^{\frac{7}{3}}} (M \sqrt{M^2 + N^2}) = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{h} \right) + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{h^{\frac{7}{3}}} (M \sqrt{M^2 + N^2}) = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $x$ 、 $y$ は二次元平面上の座標とし、 $h$ は水深、 $\eta$ は水位(波高)、 $M$ は $x$ 軸方向の流量、 $N$ は $y$ 軸方向の流量、 $t$ は時間、 $g$ は重力加速度、 $n$ はマニング係数である。津波は長波の一種であり、鉛直方向の流速値が一定であると近似できるため、流量と流速は線形の関係で表現される。

海洋レーダによって観測できるのは表層流速の視線方向成分だけであるが、津波を予測するためには津波の波高情報が必要である。これに対して、当社では1台の海洋レーダから得られる一次元の流速情報を浅水長波理論を適用することで津波の波高を予測する方式を検討している<sup>(2)</sup>。津波伝播(でんぱ)解析で用いられる波高分布と流速分布に関する基礎方程式である浅水長波理論を、1台のレーダから得られる視線流速情報だけで解析できる一次元浅水方程式としてモデル化し、この方程式を解くことで波高を推定し、津波を予測する。しかし、浅水方程式の一次元化による近似誤差と海洋レーダの流速の観測誤差の影響で津波予測には課題があった。

本稿では、海洋レーダの観測誤差を考慮して津波の観測性能と予測性能を向上させる方式を検討する。この方式によって1台の海洋レーダで津波予測が可能になり、設置コストを半減できることが期待される。

## 3. 開発方式

2章で述べた課題に対して、海洋レーダを用いた津波データ同化方式(以下“開発方式”という。)を開発した。開発方式はレーダで観測された流速を基に津波シミュレーションによる数値計算を実施し、津波シミュレーションの予測値と海洋レーダの観測値をデータ同化することで、高精度に津波の流速と波高を推定できる。データ同化とは数値シミュレーションと観測値を融合させる統計的推定手法で、観測時刻ごとに観測誤差と予測誤差に応じて観測値を修正することで、過去から現在までの観測情報を最大限に活用しつつ、統計的に最適な予測値を算出できる。ここで、データ同化には、状態推定モデルのカルマンフィルタを用いた。

開発方式は、津波シミュレーションとデータ同化の二つのブロックから構成される。津波シミュレーションでは、図1のようにレーダー覆域を囲む数値計算メッシュ(図の黒

丸)上で水位とX軸, Y軸方向の流量(以下“状態ベクトル”といふ。)を計算する。ここでX軸方向の数値計算メッシュ数をI, Y軸方向の数値計算メッシュ数をJとすると, 状態ベクトルの次元は $I \times J \times 3$ となる。

次の式(4)は現時刻kと次時刻k+1の状態ベクトルの関係を表す予測モデルを示す。

$$X(k+1) = FX(k) + v \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで,  $X$ は状態ベクトル,  $F$ は二次元浅水方程式による津波の伝播を表す表現行列,  $v$ はシステム雑音である。

従来方式ではレーダのビームごとに一次元の浅水方程式に基づく津波の伝播計算を行っていたのに対して, 開発方式ではレーダ覆域の覆う二次元の数値計算メッシュ上で津

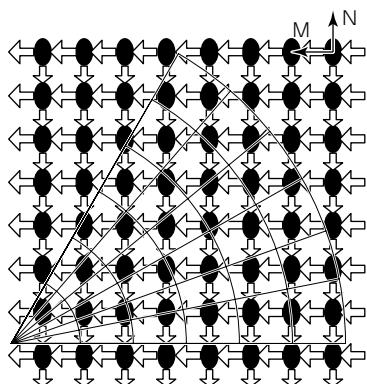


図1. レーダ覆域と数値計算メッシュ

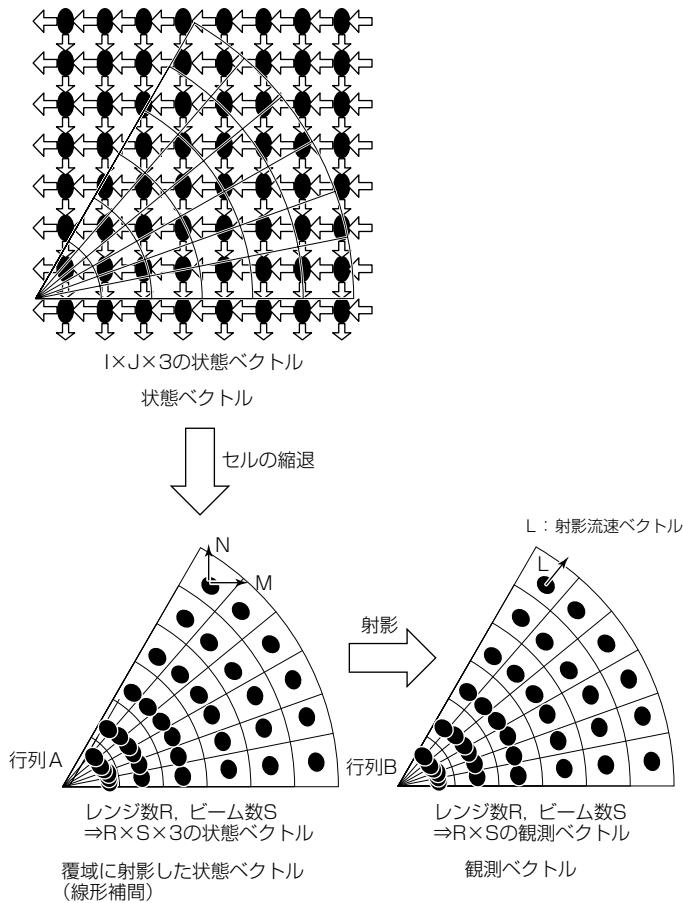


図2. 状態ベクトルと観測ベクトルの関係

波の伝播を計算する。

次の式(5)にレーダの観測過程をモデル化した観測モデルを示す。

$$Z(k) = HX(k) + w \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここで,  $Z$ は観測ベクトル,  $H (= B \times A)$ は観測行列,  $w$ は観測誤差である。

図2に示すように,  $I \times J \times 3$ の状態ベクトルから, レーダの観測点のセル(ここで, レンジ数R, ビーム数Sとする。)を最近傍セルの選択や線形補完によって対応付けを行う行列A( $I \times J \times 3$ 列,  $R \times S \times 3$ 行)と,  $R \times S \times 3$ の覆域内の状態ベクトルから視線方向の流速に射影する行列B( $R \times S \times 3$ 列,  $R \times S$ 行)とする。開発方式では予測モデル(式(4))と観測モデル(式(5))から計算されるカルマンゲインを用いて, 予測と観測の誤差に応じて最適な割合で予測値と観測値を同化させることで, 高精度に津波の状態推定ができる。

#### 4. シミュレーション評価

ここでは開発方式のシミュレーション評価を実施した内容を述べる。シミュレーションシナリオは内閣府発表の南海トラフ巨大地震モデル<sup>(3)</sup>のケース4を初期波源として非線形浅水方程式を用いて津波の伝播を計算し, 海洋レーダによる流速観測を模擬した。表1にシミュレーションの評価条件を示し, 図3に津波の初期波高の様子を示し, 図4にレーダ覆域の様子を示す。海洋レーダの周波数は低周波帯を想定し, 距離50km, 方位120度の覆域内の津波流速を観測間隔40秒で観測できるものとする。また, 流速の観測誤差は潮汐(ちょうせき)等の長周期成分のバイアス成分は事前にフィルタリングされているものとして, 短周期成分を標準偏差0.07m/sの正規乱数を用いて模擬した。

開発方式のシミュレーション結果を図5から図8に示す。図5, 図6は中距離(30km), 遠距離(42km)での現在フ

表1. シミュレーションの評価条件

項目	値	備考
レンジ間隔(m)	1,500	
レンジ数	34	
サンプリング間隔(s)	40	
ビーム数	14	
計算メッシュ数	3,600	60×60
観測雑音(標準偏差)(m/s)	0.07	

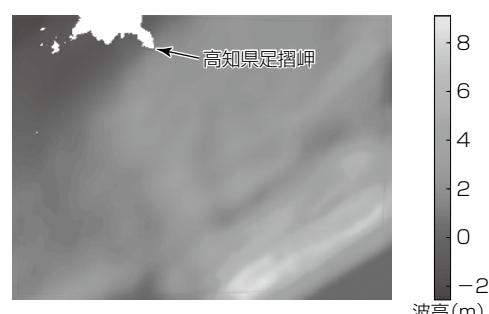


図3. 津波の初期波高の様子

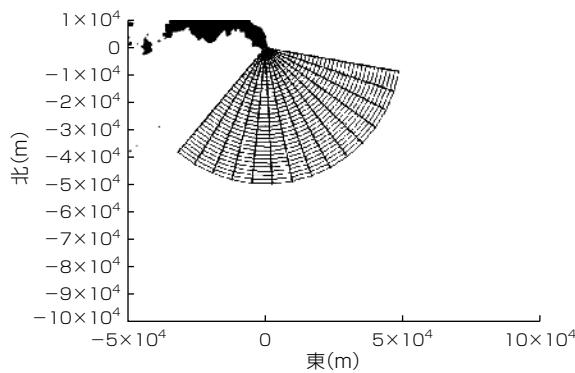


図4. レーダー覆域の様子

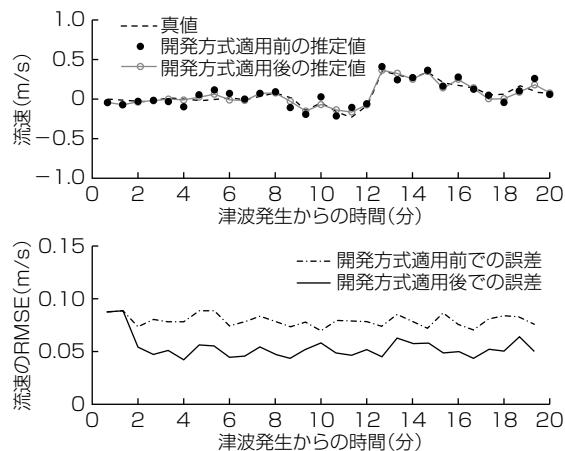


図5. 津波推定結果と推定誤差RMSE(距離30km)

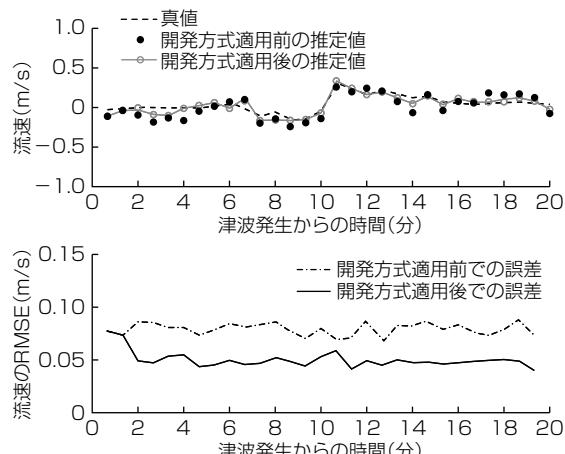


図6. 津波推定結果と推定誤差RMSE(距離42km)

レームでの津波推定結果を示し、上図は津波の推定流速を示し、下図は推定流速の二乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error: RMSE)を示す。流速のRMSEはモンテカルロシミュレーションを100試行行った結果から算出した。図5、図6から、中距離、遠距離でも開発方式を適用することによって、時刻の経過とともに流速の観測誤差を低減できることが分かる。

図7、図8は中距離(30km)、遠距離(42km)での次フレーム(40秒後)の津波予測結果を示し、上図は津波の予測流速を示し、下図は予測流速のRMSEを示す。図7、図8

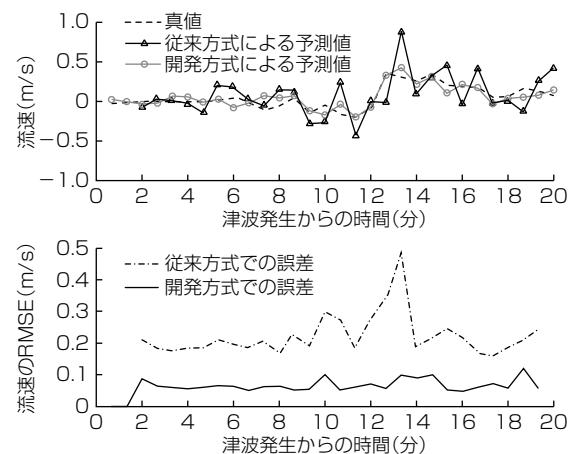


図7. 津波予測結果と予測誤差RMSE(距離30km)

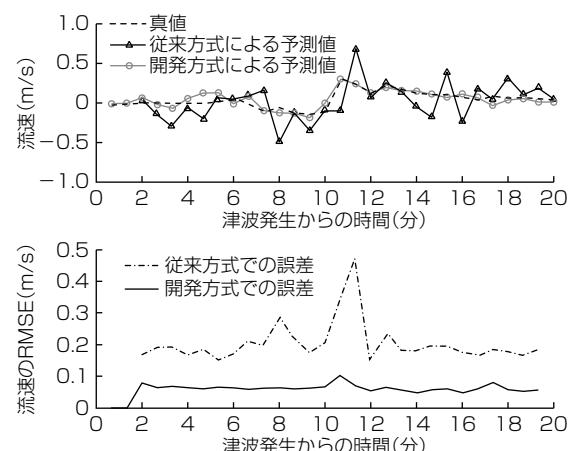


図8. 津波予測結果と予測誤差RMSE(距離42km)

の上図から中距離、遠距離でも従来方式と比較して開発方式の流速予測値のばらつきが小さいことが分かる。また、図7、図8の下図から、開発方式は従来方式と比較して予測のRMSEが小さく、予測誤差を低減できることが分かる。

## 5. むすび

海洋レーダーの観測誤差を抑圧してレーダーの観測領域での波高値と流速値を高精度に予測・推定する津波データ同化方式を述べた。シミュレーション評価の結果、南海トラフの津波シミュレーションに対して開発方式は流速値の推定誤差と予測誤差を低減できることを確認した。

## 参考文献

- (1) Lipa, B., et al.: HF Radar Detection of Tsunamis, Journal of Oceanography, 62, 705~716 (2006)
- (2) 石川博章, ほか: 海洋レーダーを用いた津波到達・波高予測技術, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, 91, 152~155 (2016)
- (3) 内閣府中央防災会議: 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 内閣府中央防災会議  
<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>

# Cバンド気象レーダ向け新リッジ構造の樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ

柿元生也\*  
中本成洋\*\*  
小柳智之\*

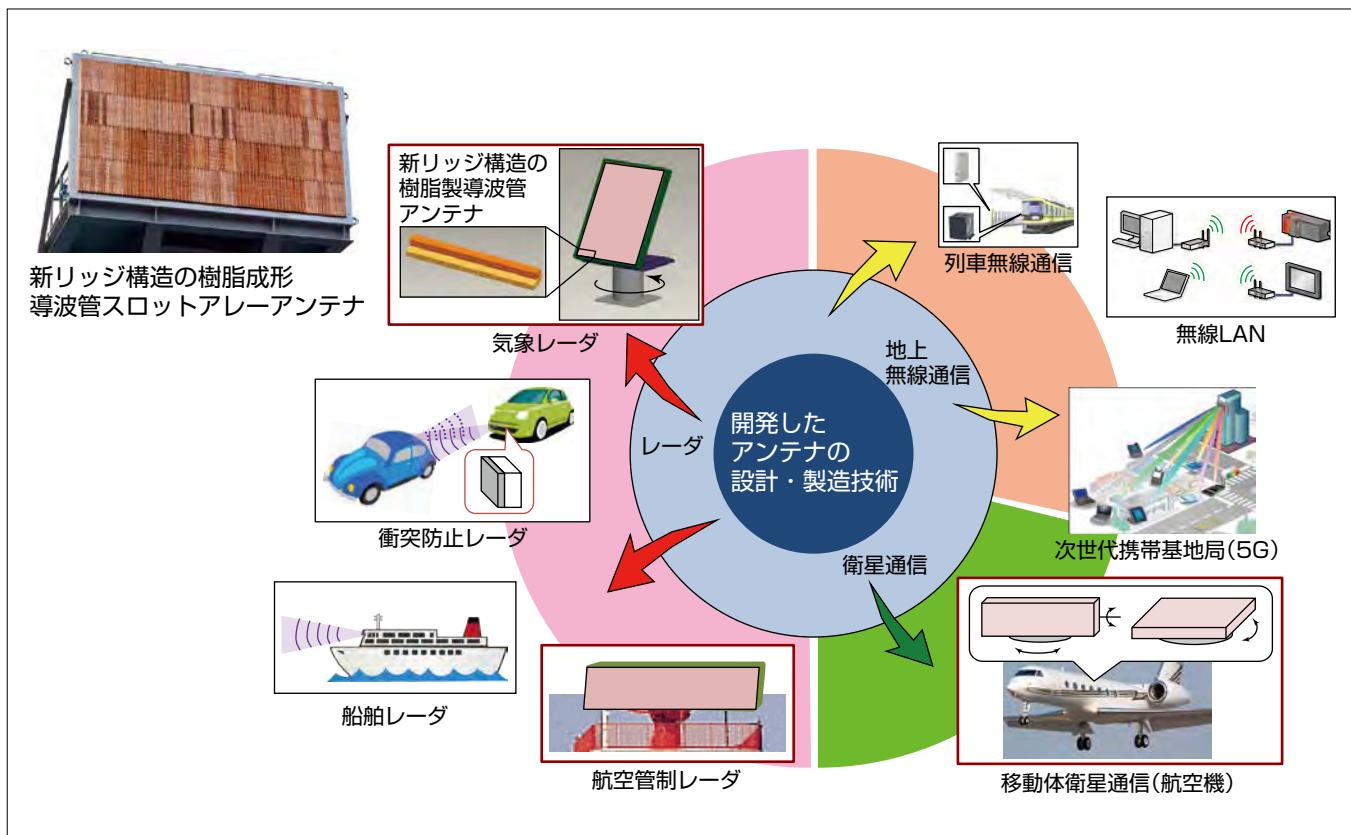
Injection-molded-resin Slotted Waveguide Array Antenna with Novel Ridge Structure for C-band Weather Radar  
Ikuya Kakimoto, Narihiro Nakamoto, Tomoyuki Koyanagi

## 要旨

近年増加する極端気象現象に伴う水害や土砂災害に対応するため、2010年頃から気象レーダの二重偏波化による観測精度向上と、これによる予報精度向上が進んできたが<sup>(1)</sup>、その一方で観測時間を短縮してデータ更新レートを高頻度化し、警報発令までの時間を短縮するためのフェーズドアレー気象レーダの検討や開発評価が行われてきた。総務省や内閣府の予算による単偏波のXバンドフェーズドアレー気象レーダでは他社が先行し、DBF(Digital Beam Forming)技術の適用によって、観測周期を従来の1/10程度まで短縮できる<sup>(2)</sup>。一方で観測精度は、従来のパラボラアンテナを用いた二重偏波Cバンド気象レーダと同等以上の精度を必ずしも得られるわけではなく、装置が高価格である

こともあり、現業配備には至っていない。

三菱電機は現業のCバンド気象レーダのフェーズドアレー化を見据え、十分な観測精度が得られかつ低価格なフェーズドアレーレーダを実現するため、独自のリッジ構造を持った樹脂成形導波管アンテナを2016年度から2018年度にかけて開発した。樹脂化によってコストと質量を抑制するだけでなく、その成形の容易性を生かして、アンテナの効率、サイドローブレベル、交差偏波比といった気象観測に重要なアンテナ性能を確保した。また、樹脂成形技術の適用によって柔軟な内部構造設計や量産が容易になり、このアンテナの設計・製造技術は広くインフラ、通信分野のアンテナにも適用できる。



## 新リッジ構造の樹脂成形導波管スロットアレーアンテナの適用先

当社が開発した新リッジ構造の樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ(ハーフサイズアレーによる評価用アンテナ)の外観と適用先を示す。このアンテナの設計・製造技術は気象レーダのほか、様々な分野のレーダや通信に適用できる。

## 1. まえがき

近年ゲリラ豪雨などの直前予測への対応として注目を集めているXバンドフェーズドアレー気象レーダは、DBF技術の適用によって観測周期を従来の1/10程度まで短縮できるが、現状の単偏波Xバンドフェーズドアレー気象レーダの観測精度は従来のパラボラアンテナを用いた二重偏波Cバンド気象レーダと同等以上の精度を必ずしも得られるわけではなく、装置が高価格であることもあり、現業配備には至っていない。

気象予報のために必要な高精度な気象レーダにフェーズドアレー方式を適用するには、二重偏波観測を高精度で行うためのアンテナのハードウェア性能が最も重要であり、当社は現業のCバンド気象レーダへのフェーズドアレー方式の適用を見据え、十分な観測精度が得られかつ低価格なフェーズドアーレーレーダを実現するため、独自のリッジ構造を持った樹脂成形導波管スロットアレーインテナを開発した。この開発によって、樹脂成形によって導波管内部の複雑な構造でも設計どおりに容易に再現して製造できるようになったため、アンテナ効率、サイドローブレベル、交差偏波比といった気象観測に重要なアンテナ性能を得られるようになった。このアンテナの設計・製造技術はCバンドフェーズドアレー気象レーダに適用するほかに、インフラ、通信分野など他の分野のアンテナにも広く適用できる。

## 2. Cバンド気象レーダに必要なアンテナ性能

### 2.1 観測周期とアンテナの形態

従来のパラボラアンテナのCバンド気象レーダでは、距離最大400km、仰角0°～30°程度の範囲を5分程度の時間をかけて、1本の幅1°程度のビームを三次元的に走査して観測している。急速に発達する積乱雲によるゲリラ豪雨などは30分程度で雲の形成から降水、消滅と変化するため、直前予測を行うためには5分の観測間隔では不十分で、1分程度の観測間隔が求められる。これを実現できるのがフェーズドアーレーレーダで、仰角方向10°程度の送信ビームを送信しながら1°程度の受信ビームを例えれば10本同時に電子的に形成するようにすれば、ビーム走査に要する時間を1/10に短縮できる。DBF<sup>(3)</sup>というこの技術は、数十年前から大規模な特定分野のレーダで用いられてきたが、計算機リソースの進歩によって気象レーダでも実用化できるようになってきた。フェーズドアーレーレーダでは、素子を二次元に配置してビームを方位方向と仰角方向の両方に電子走査できるように構成することもできるが、従来のパラボラアンテナに比べて装置の価格があまりにも高額になるため、方位方向は機械回転とし、仰角方向だけ電子走査する方式を想定している。図1にフェーズドアレー

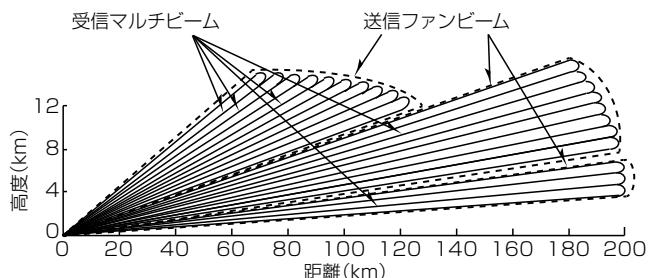


図1. フェーズドアーレーレーダのビーム配置例

表1. 試作アンテナの要求性能

項目	仕様・性能
周波数	C帯(5.25～5.37GHz)
偏波	二重偏波(水平偏波、垂直偏波)
交差偏波比	-35dB以下(アンテナ正面)
サイドローブレベル	-30dB以下
ビーム幅	1.2°以下(方位方向、仰角方向共)
コスト(導波管アンテナ)	金属切削加工時の1/10以下の製品費
耐用年数	15年以上

レーダのビーム配置例を示す。

### 2.2 Cバンド気象レーダに必要な性能要件

航空機などのハードターゲットを対象とするレーダと異なり、雲や雨といったボリュームターゲットを観測対象とする二重偏波気象レーダでは、電力効率のほかにサイドローブレベルと交差偏波比が特に重要である。また、既存のパラボラ型の気象レーダの後継機として既設のタワー上に実装できるようにするために、軽量化、低コスト化を実現する必要がある。この開発では、高いアンテナ性能が期待できる導波管スロットアレーを採用し、アンテナの素材を樹脂に金属めっきを施したものにすることで、軽量化、低コスト化を図った。表1に試作アンテナの要求性能を示す。

## 3. 開発したアンテナの特徴

### 3.1 アレーの配置

概略のシステム設計の結果から、アンテナ開口の構成を図2のように定めた。開口面全体を方位方向16、仰角方向74段のサブアレーに分割し、そのうち24段を送受信モジュールに接続、50段を受信モジュールに接続する。図2(b)は側面図で、仰角15°に法線方向を固定し、覆域を0°～30°とした場合の図である。

表1に示したように、気象レーダでは、地面や建物からの不要な散乱を抑圧するため、-30dB以下の低サイドローブ特性が求められている。開発アンテナでは、方位方向には、アンテナ開口にティラー分布と呼ばれる励振分布を設け、仰角方向にはDBFによるビーム形状制御によってこれを実現する。1段の方位方向の励振分布の制御方法を図3に示す。送受信モジュールからサブアレーへの分配回路で大まかな分布を形成し、各サブアレー内部の構造によって各スロットからの放射量を精密に制御することで、アレー全体で滑らかな励振分布を得るようにした。

### 3.2 樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ

今回開発した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナは、新たに開発した次の二つの独自の技術を使用している。

#### (1) ボス・アイリス構造

樹脂は金属に比べて熱などで変形しやすく、樹脂成形で導波管を製造する場合、複数の成形品を多数のねじで固定するなどの形状を保持する構造が必要になり、アンテナの性能を劣化させる要因になる。今回、成形品を固定するためのねじ取付け部や、形状を保つために内部に施した凹凸のリブ構造に、電気特性を補償する機能を一体化させた独自のボス・アイリス構造を新たに開発した。ボスとはねじ止め穴を作るために必要な小さな円筒形の突起構造、アイリスとは導波管内部に絞りを入れ、電気特性を調整する構造のことである。この構造では一部のボスや内部に施した凸凹のリブ構造が、アイリスの役割を兼ねている。この構造によって実現した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナでは、当社製の金属スロットアレーアンテナと比べ、40%の質量削減と90%のコスト低減を実現した。

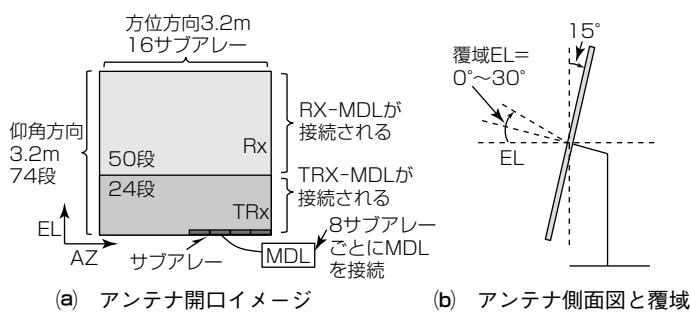


図2. アンテナ開口の構成

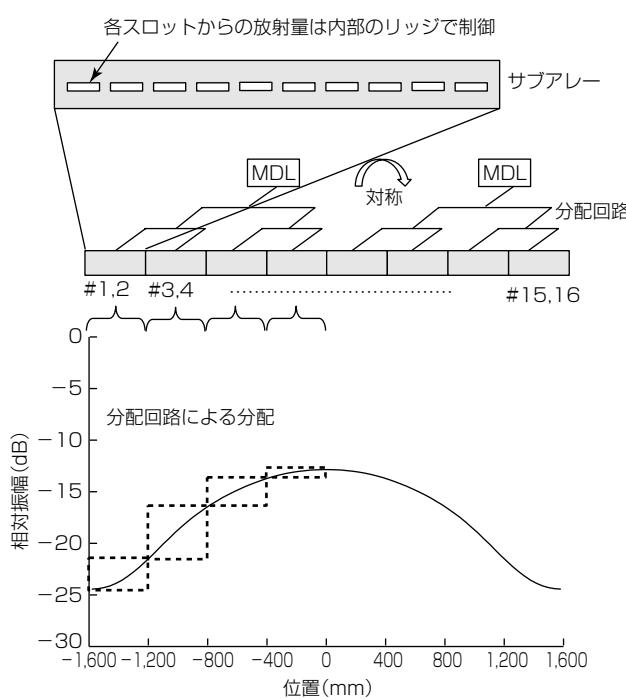


図3. 方位方向の励振分布

#### (2) 新リッジ構造

従来、二重偏波共用の導波管スロットアレーアンテナでは、導波管の小型化のため、その内部にリッジと呼ばれる障壁構造を設けることが多く<sup>(4)</sup>、通常、内部のリッジ構造は工作性の事情から単純な直線状としている。このとき、スロットからの電力放射量はスロットとリッジ間の距離によって決まるため、スロットの配置を直線状からずらして並べ、電力放射量を調整していた<sup>(5)</sup>。しかし、この方法では、細かな電力放射量の調整が困難で、結果としてサイドローブ特性が悪化するため、広島工業大学と共同で図4に示す新リッジ構造を開発し、サイドローブを抑制した。新リッジ構造は、アンテナ内部に設けるリッジを蛇行させた構造で、これによって各スロットからの電力放射量を調整でき、最適なビーム形成が可能になる。その結果、従来比で60%のサイドローブ低減、90%の交差偏波低減、10%の電力効率の向上を実現した。

### 3.3 試作評価結果

図5に開発した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナのアンテナ素子を示す。アンテナ素子は垂直偏波及び水平偏波各々の四つのスロットアンテナから成るサブアレーを横に二つつなげた構造になっている(サブアレーは、アンテナ全体でビーム形成を行う際の位相制御、給電、受信の最小単位)。

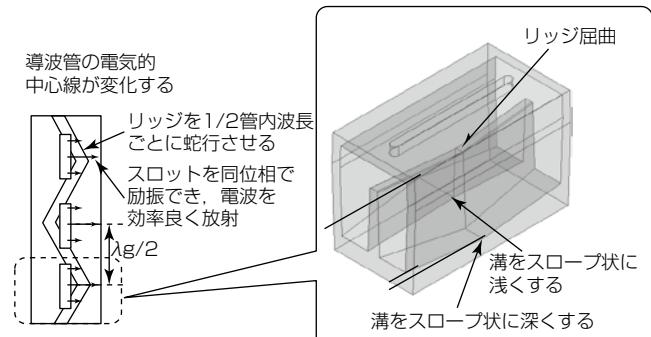


図4. 新リッジ構造

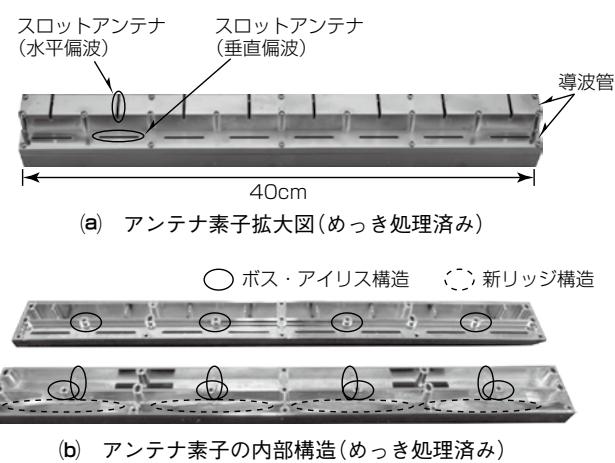


図5. 開発した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ

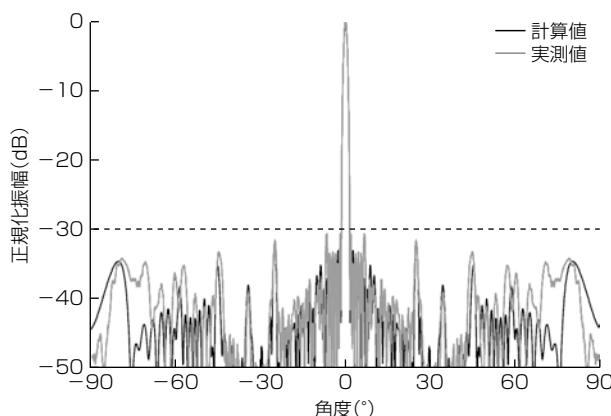


図6. 水平偏波のアレーパターン(主偏波, 水平方向)

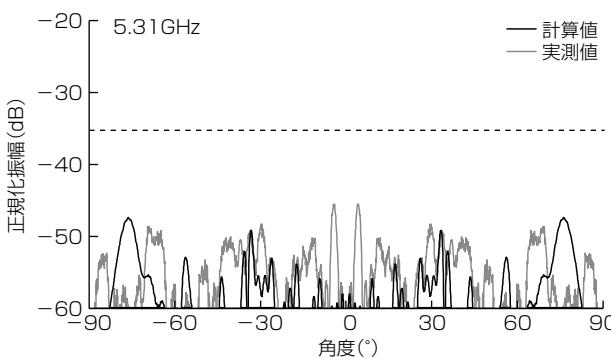


図7. 水平偏波のアレーパターン(交差偏波, 水平方向)

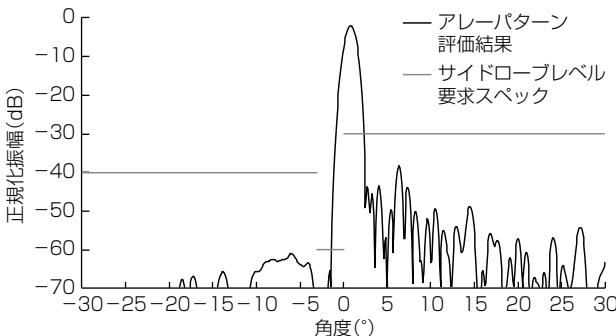


図8. 仰角方向の送受積アレーパターン

設計では、特に、隣接するスロット間の電磁結合、成形品を固定するためのボスによる散乱、及び樹脂成形品の変形の影響を正確に計算に含めることがポイントになり、アレーパターンの計算値と実測値の差異分析や、評価方法を含め様々な新たな知見を蓄積できた。図6に水平偏波のアレーパターン、図7にその交差偏波のアレーパターンの評価結果の一例を示す。主偏波については45°内で設計値と実測値が良く一致しており、目標の-30dBもクリアできている。交差偏波についても全方位で目標の-35dBをクリアしている。

想定しているCバンド気象用フェーズドアレーレーダでは仰角方向はDBFによって地面からの不要信号を抑圧するため仰角-1°方向にはヌルを形成する。図8に実測

を基に計算した仰角方向の送受積アレーパターンを示す。細部は今後調整の必要があるが、ほぼ想定どおりのパターンが得られることが確認できた。

#### 4. む す び

従来の1/10の観測周期を実現するCバンドフェーズドアレーレーダ用に、“樹脂成形導波管スロットアレーランテナ”的開発を行った。樹脂成形とめっきを組み合わせた製造法の採用と独自の構造によって、高性能でありながら、軽量化・低コスト化を実現した。具体的には、業界トップクラスになる、従来比で60%のサイドローブ低減、90%の交差偏波低減、10%の電力効率の向上を実現した<sup>(注1)</sup>。また、現業機への実装を想定し、当社製の金属スロットアレーランテナと比べ、40%の質量削減、90%のコスト低減を実現した。

今後、現業用気象レーダへの適用に向けてシステム開発を行っていく予定であるが、このアンテナは航空管制レーダ、地表観測用レーダ、衛星通信用アンテナなどの幅広い分野に向けた実用化に適用可能である。

なお、この開発は国立研究開発法人科学技術振興機構の研究成果最適展開プログラムシーズ育成タイプ“卓越した電波干渉低減能力を持つ新リッジ構造の樹脂製導波管アンテナの開発”によって行ったものである。

(注1) 2019年1月25日現在、当社調べ。一般のパッチアレーランテナと比較で

#### 参 考 文 献

- (1) 柿元生也, ほか: 高精度に降雨量を推定するマルチパラメータレーダ, 電気学会誌, 133, No.3, 150~152 (2013)
- (2) 水谷文彦, ほか: 豪雨など極端気象の兆候を捉えるフェーズドアレイ気象レーダ, 東芝レビュー, 69, No.12, 15~18 (2014)
- (3) 唐沢好男, ほか: 通信用デジタルビームフォーミングアンテナ—見えてきたインテリジェントアンテナの将来—, 電子情報通信学会誌, 78, No.9, 899~906 (1995)
- (4) Wang, W., et al.: Waveguide slotted antenna array with broadband, dual-polarization and low cross-polarization for X-band SAR applications, IEEE International Radar Conference, 653~656 (2005)
- (5) Kim, D.Y., et al.: A design procedure for slot arrays fed by single-ridge waveguide, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 36, No.11, 1531~1536 (1988)

# 気象予報向けレーダ・ライダ

Radar and Lidar for Weather Forecasting

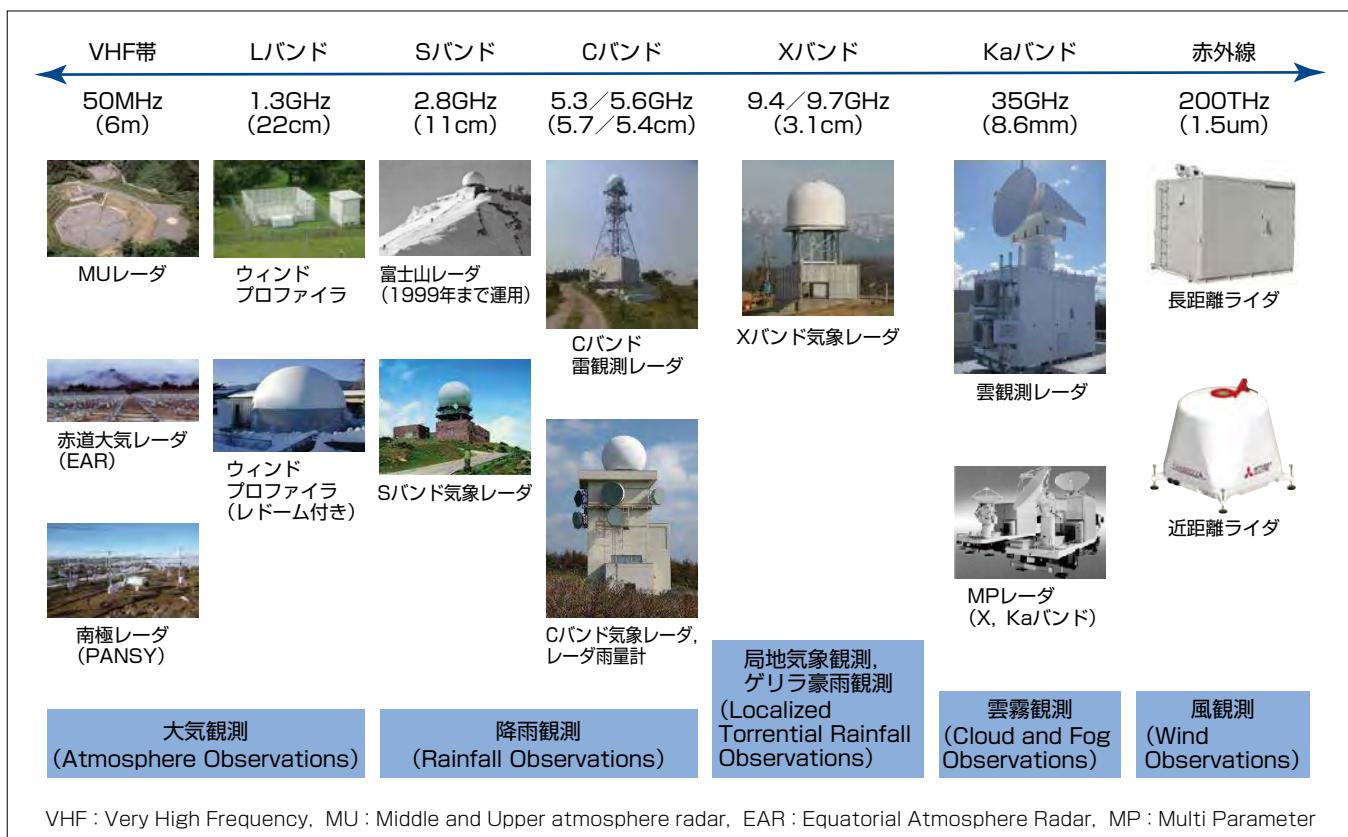
Takamichi Nakamizo, Masaharu Imaki, Kenichi Hirosawa, Ikuya Kakimoto, Takayuki Yanagisawa

中溝尚道\* 柿元生也\*  
今城勝治\*\* 柳澤隆行\*\*\*  
廣澤賢一\*\*

## 要旨

三菱電機は1955年から気象観測用の各種レーダの開発・製造を行っている。レーダの周波数帯域は50MHz～35GHzの広範囲に及び、2015年から200THzの光波レーダであるライダもラインアップに加えている。ラインアップとしてVHF帯(50MHz)の大気観測用のMUレーダ、赤道大気レーダ、南極レーダ(PANSY)、Lバンド(1.3GHz)の風観測用のウインドプロファイラ、Sバンド(2.8GHz)、Cバンド(5.3／5.6GHz)及びXバンド(9.4／9.7GHz)の広域・局地気象観測用気象レーダ、Kaバンド(35GHz)の雲観測レーダ、近距離ライダ、空港気象観測向けの風計測ライダ及び航空機搭載型ライダからなる製品群を持ち、日本及び海外の気象観測・予報業務及び研究に貢献している。

現在、気象予報の更なる精度向上に貢献するために、新型気象レーダ及び水蒸気ライダを開発している。新型気象レーダは信号処理の高度化によって受信データの品質を向上させ、より正確な降雨データを予報計算に初期値として使用することによって、予報精度の向上に貢献することが期待される。水蒸気ライダは、風計測ライダに、送信光の波長を水蒸気の吸収線に一致させる波長安定回路を附加して、水蒸気の吸収量から大気中の水蒸気量を計測するようにしたもので、水蒸気量の鉛直プロファイルを計測できる。この装置によって、雲になる前の水蒸気の動きを捉えることで、これまで早期予測が困難であったゲリラ豪雨の予測に貢献できる。



## 当社の気象観測関連システム

当社の大気レーダ・気象レーダ・ライダの製品ラインアップを示す。

## 1. まえがき

当社はパルス状の電波をアンテナから照射して降水粒子や雲・霧の粒子の後方散乱波を受信することで、その位置と移動速度、強度を測定する気象レーダと、光波をスキャナから照射して大気中のエアロゾルを観測し、大気の風向、風速や乱気流を観測するライダの開発・製造を行っている。

気象レーダは、降雨の兆候を検知してゲリラ豪雨等の突発的な気象現象を予測することに効果を發揮することが期待される。

## 2. 気象予報用途の現業レーダ

この章では、24時間365日安定運用を行い日々の気象予報に必要となる降雨強度・風速等のデータ提供に貢献している現業レーダについて述べる。気象予報用の気象レーダのマイルストーンとして代表的な当社製レーダに、1964年から1999年の期間に運用した富士山レーダが挙げられる。富士山レーダは富士山頂に据え付けられ、半径800kmの範囲を観測することが可能であり、予報だけでなく台風の早期警戒に貢献した。

気象庁は全国に20台のCバンド気象レーダを配備し、全国をくまなく降雨強度の観測を行っている。2000年頃までは送信機にマグネットロンを採用していたが、2006年からクライストロンを採用してドップラー速度の観測も開始し、気象予報に供する情報を拡充した<sup>(1)</sup>。2018年には、送信機に固体素子を採用し、水平・垂直の偏波を同時に送受信することによって高精度な観測を行える二重偏波気象レーダを当社が初めて受注した。2020年から新たな東京レーダとして運用が開始される予定で、更なる観測精度向上が期待される。

また、2000年にはおよそ10km上空までの高層風の風向風速を観測できるウインドプロファイラを実用化し、2001年からWINDAS(Wind profiler Network and Data Acquisition System)として実運用が開始され、気象予報精度向上に大きく貢献している。

## 3. 二重偏波観測による精度向上

この章では先に述べた二重偏波気象レーダについて述べる。気象レーダの近代化で、近年最も代表的なものとして二重偏波観測が挙げられる。国内で二重偏波観測を行っている現業レーダとして、国土交通省のXバンドMPレーダが挙げられる。全39台中、当社製のものが16台導入されている。Xバンドを気象観測に用いることでの課題として、降雨減衰特性が挙げられる。10mm/hrの降雨に対する送信波の減衰量は、Cバンドが0.09dB/km程度であるのに対し、Xバンドは0.65dB/km程度と約7倍であり、影響が無視できない。二重偏波化に伴い観測が可能になる偏波

間位相差( $\phi_{DP}$ )は位相情報のため強度の減衰の影響を受けないため、 $\phi_{DP}$ を採用した降雨強度算出方法を適用することでこの課題を解決し、Xバンドの現業用気象レーダが実用化された。

また二重偏波観測は降雨減衰の影響を受けにくいCバンドレーダにも有効である。先に述べた強度減衰の影響が比較的少ないと加え、二重偏波観測データによって粒子の判別や地形エコー等の非降水エコーの弁別による観測データの品質管理に効果を發揮する。例えば、 $\phi_{DP}$ の空間変動量は小さいほど降水エコーであることを示す特性を持つため、降水エコーの弁別に役立つ。観測データの品質管理は重要な課題の一つであり、特に地形エコーの除去が課題となる。地形エコー除去手法としてエコーのドップラー速度を利用するMTI(Moving Target Indication)が挙げられるが、地形エコー強度が強い場合除去しきれないケースが発生し得る。一方で、ドップラー速度が0m/sに近い降水エコーを大幅に誤って除去し、気象予報に悪影響を与えるケースも発生し得る。

この課題に対して、現在製造中の東京レーダ向けに、二重偏波観測データを用いた新たな品質管理手法を開発した。これまでの単偏波レーダでは単偏波でも得られる観測パラメータ(反射強度、ドップラー速度等)を用いて決定木によって①降水エコー、②地形エコー、及び③エコーなしを判定していたが、降水エコーかつそのドップラー速度が0m/sに近い場合、地形エコーと誤って除去することがあった。この課題を解決するために二重偏波観測データを含めたファジィ論理による品質検定手法を開発した。この手法によって、先に述べた①～③に加え“④地形エコーと降水エコーの重畳”を加えることで降水エコーの弁別能力を向上させ、降水エコーのドップラー速度が0m/sに近い領域でのMTIによる誤除去を改善できる。従来手法との比較を図1に示す。

さらに新機能として特殊位相符号を用いた観測範囲倍化機能を開発した。パルスを送受信するレーダでは、ドップラー速度を計測する風速の強弱範囲は原理上パルス繰り返し周期に反比例し、周期が短いほど範囲を拡大できる。一方で観測範囲(レーダからの距離)は周期に比例するため、風速の強弱範囲と観測範囲はジレンマの関係にある。これを解決する手段として、送信パルスごとの位相を疑似的にランダムにする、ランダム位相変調という技術を用いて、レンジダップラという観測距離を倍化する処理を行っていた。これは、送信時にランダム位相変調を行った上で、観測範囲外から反射されて戻ってくるエコー(以下“二次エコー”という。)が抽出できるように受信時に位相を変換すれば、観測範囲内からの反射信号(以下“一次エコー”という。)が二次エコーの周波数スペクトル軸上で拡散されることを利用している。しかしこの手法では、レンジダップラを行って

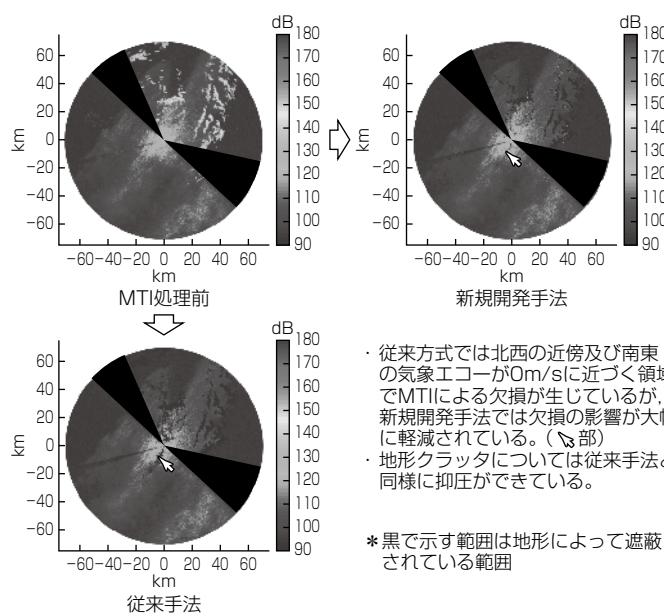


図1. 従来手法と新規開発手法の比較

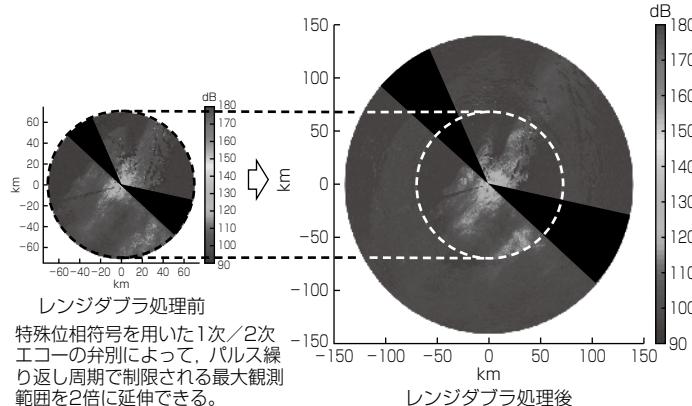


図2. 特殊位相符号を用いたレンジダグラ機能

も一次エコーがノイズとして拡散されるだけで、除去されないため、二次エコーの信号を抽出する上で精度に限界があった。今回、新機能として一次エコーと二次エコーをそれぞれほぼ完全に分離できる特殊な位相符号を用いることで、一次エコーが強い場合でもより正確に二次エコー成分を抽出できる手法を開発した。実際に観測されたエコーを用いて新機能を適用した結果を図2に示す。

この新機能によって、精度の高い広範囲の観測結果を提供することで、更なる気象予報への貢献が期待される。

#### 4. より正確なナウキャストへ

##### 4.1 Kaバンド雲観測レーダによるゲリラ豪雨予測

近年、ゲリラ豪雨による土砂災害や洪水などによる被害が増加している。僅か30分から1時間で無降雨の雲又は水蒸気の状態から豪雨が発生・消滅するケースもあり、1時間先までの降雨予測、いわゆるナウキャストが要請されている。

図3に降雨の生成過程を示す。気象レーダの観測対象は

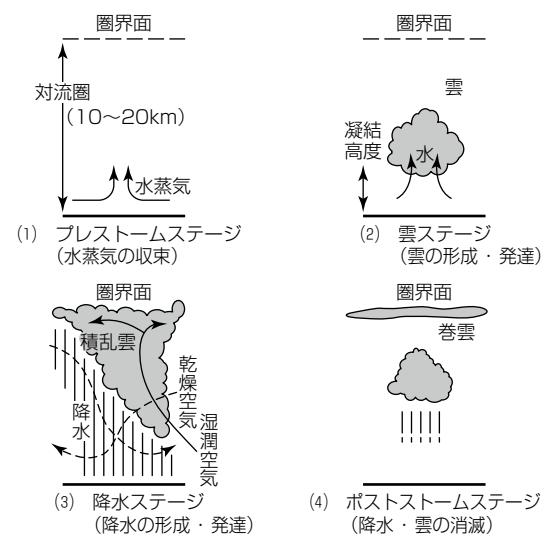


図3. 降雨の生成過程

降雨であるため、(3)の降水ステージで初めて観測できるが、避難等の処置に要する時間を考慮すると、観測時点で手遅れになるケースもあり得る。このような局地的大雨に対応したナウキャストを実現するための手段として、降水の前段階のステージでの観測が挙げられる。微小な雲粒子を観測するためにはC, Xバンドよりも更に高い周波数での観測が必要となる<sup>(2)</sup>。

この課題を解決するため、当社は雲粒子や水晶粒子を観測できるKaバンド(35GHz)の雲観測レーダを開発・製造し、(2)の雲ステージの観測を実現した。図4はゲリラ豪雨のような局地的大雨が発生するメカニズムを捉えるための将来構想図である。積乱雲の発達前ではドップラーライダとマイクロ波放射計、発達段階ではKaバンド雲観測レーダを用いることによって、ゲリラ豪雨等に対応したナウキャストに貢献できると考えている。

#### 4.2 水蒸気ライダ

通常の気象予報では困難な、ゲリラ豪雨予測への要求が高まっている。従来のS, C, Xバンドの気象レーダでは、その波長特性から、雲や雨滴が発生して初めて豪雨の前兆を観測することが可能になる。しかし、ゲリラ豪雨は、雲が発生してから15~30分程度の短時間で豪雨となる場合が多いため、警報発表後に安全に避難する時間の確保が困難であった。積乱雲は、大気中の水蒸気が上昇気流に乗って上空で冷やされ、凝結することで発生する。水蒸気の分布と動き(=風)を計測することによって、約90分から120分前に予報が可能になるとされている<sup>(3)</sup>。そこで、ゲリラ豪雨の早期予報を可能にする風計測ライダを応用した風と水蒸気の高度分布を同時に計測可能なライダの開発を行った。

図5に、開発した水蒸気ライダの構成を示す。HCN(アン化水素)の吸収線に同調した基準光に対し、基準光と種光を合波して発生する周波数差をモニタして、種光の波長を制御する。種光は水蒸気が吸収する波長(ON波長)

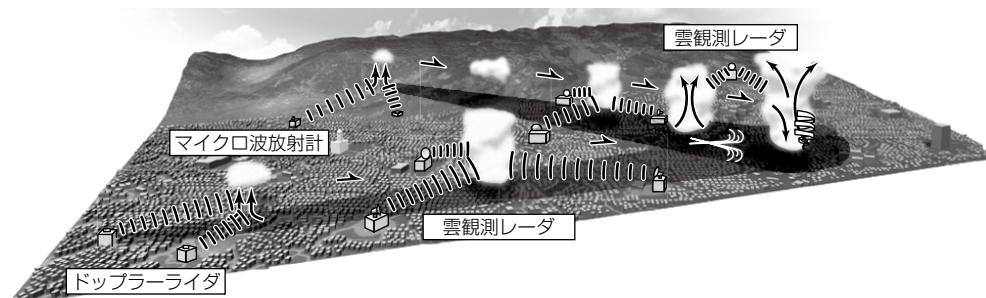


図4. 局地的大雨が発生するメカニズムを捉えるための将来構想

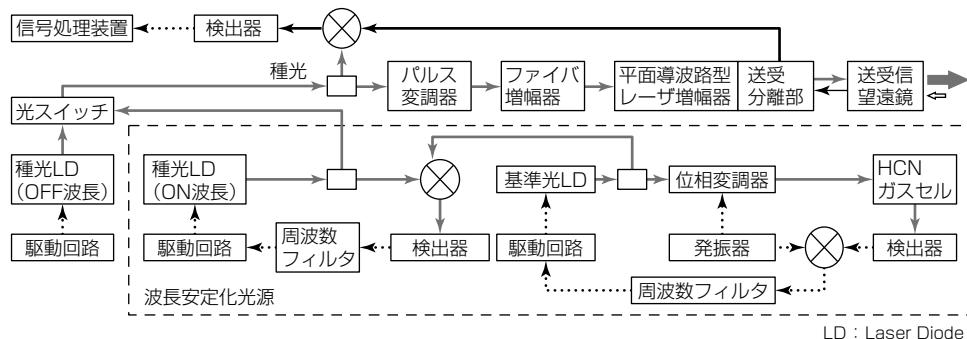


図5. 水蒸気ライダの構成

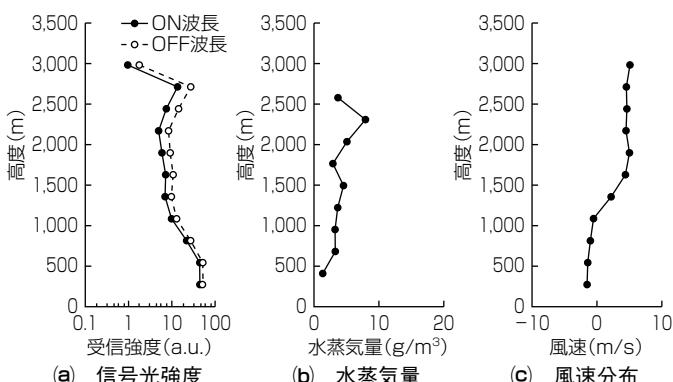


図6. 水蒸気測定結果

と吸収しない波長(OFF波長)に制御し、種光を交互に切り替えて増幅して大気中に照射し、エアロゾルによる散乱光を受信する。受信光には、エアロゾルの移動によるドップラーシフトと、水蒸気の吸収による強度変化が発生する。従来の風計測ライダと同様にドップラーシフトから風速を導出するとともに、ON波長とOFF波長の受信強度の比から水蒸気量を導出する。

この方式では、GPS(Global Positioning System)やUHF(Ultra High Frequency)の電波遅延時間用いた方式<sup>(4)</sup>やマイクロ波放射計<sup>(5)</sup>では計測困難な水蒸気の高度分布を、遠隔からリアルタイムに計測できるという特長がある。また、種光との干渉によるヘテロダイン検出を用いるため、従来の直接検波方式ライダ<sup>(6)</sup>で課題となる背景光の影響を受けず、昼夜問わず高精度観測が可能になる。

ライダ実現にとって技術的に大きな課題となる高出力レーザは、風計測ライダの製品で用いている平面導波

路型高出力レーザ増幅器<sup>(7)</sup>を、水蒸気観測に適した波長1,531nmに利得範囲を拡張することで実現した。この構成では、單一周波数パルスレーザとして世界最高となる出力15.8mJ(繰り返し500Hz)を実現し、水蒸気ライダの高性能化を図った。

図6に水蒸気測定結果を示す。(a)はON波長とOFF波長の信号光強度、(b)は(a)から得られた水蒸気量、(c)はドップラーシフトから得られた風速分布を示している。雲底で制限された最大高度2,500m以下の範囲で、風と水蒸気分布の同時計測を実現した。

## 5. むすび

当社の気象予報向けレーダ・ライダについて、観測・予報精度向上に対する追求の歴史と最新の開発動向について述べた。3章で述べた二重偏波気象レーダは2019年度から運用を開始する予定で、開発の最終段階にある。4.2節に述べた水蒸気ライダについては、早期実用化に向け製品化開発に取り組む必要がある。

## 参考文献

- 石原正仁, ほか: 気象レーダー60年の歩みと将来展望, 気象研究ノート, No.237 (2018)
- 柿元生也, ほか: 雲観測用Kaバンドレーダ, 三菱電機技報, 90, No.2, 139~142 (2016)
- 山口弘誠, ほか: 水蒸気量の鉛直分布のデータ同化による降水予測精度へのインパクト評価, 京都大学防災研究所年報, No.54B (2011)
- Kawamura, S., et al.: Water vapor estimation using digital terrestrial broad casting waves, Radio Science, 52, 367~377 (2017)
- 小司禎教: 水蒸気観測技術の発達とこれから, 天気, 54, 13~18 (2007)
- Browell, E. V. et al.: Water vapor differential absorption lidar development and evaluation, Appl. Opt., 18, 3474~3483 (1979)
- Sakimura, T. et al.: 1.5-μm high average power laser amplifier using an Er, Yb: glass planar waveguide for coherent Doppler LIDAR, Proc. of SPIE, 8526, 852604-1 (2012)



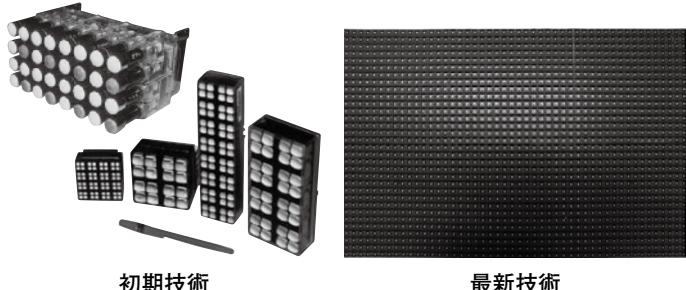
大型映像の高画質を支える基本技術

# 長崎発祥の三菱電機「映像技術」

## 大型映像システムの成り立ち

1979年の第二次オイルショック発生による造船不況を機に産声を上げた当社の屋外大型映像システム“オーロラビジョン”は、当時の家庭用テレビと同じCRT(Cathode Ray Tube)技術を用い、防水化、大型化等の開発を経て生み出された、長崎生まれ長崎育ちの製品である。現在ではデバイスをLEDに代え、競技場や球技場、広場やビルの壁面など、これまで世界各地に延べ2,000セット以上を納入している。各種情報を提供する広報設備として、また樂

しみや興奮、一体感を提供する演出設備として欠かせない社会インフラに成長し、その地位を確立するに至っている。

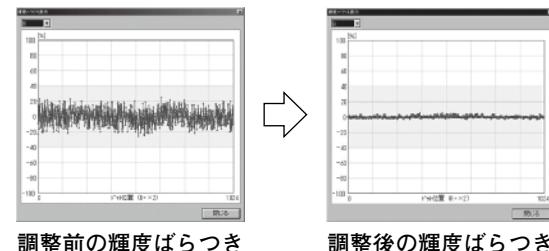


## 高画質を担う基本技術

### 輝度調整

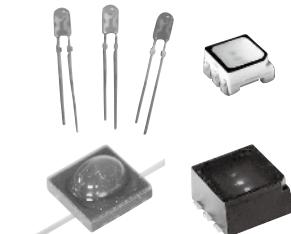
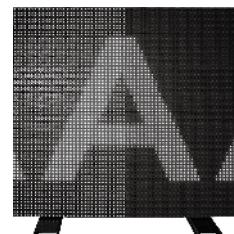
現在主流となる発光素子はLEDである。LEDは通常、 $\pm 20\%$ 程度の輝度のばらつきがあり、大型表示装置にそのまま適用すると、“色むら”や“ざらつき感”が生じる。そこで工場出荷時にLED素子一つ一つの輝度を正確に測定し、明るいLED素子は暗く、暗いLED素子は明るくするよう専用装置による自動補正を行う。表示する際、常にこの補正值と映像データを演算することによって、色むらの

少ない均一な表示を実現している。



### 高コントラスト化

屋外、特に太陽光下での表示装置では、表示面での太陽光の反射によってコントラストが低下し色合いの悪化を招く。対策として、独自のLED素子の採用や、表示ユニット内の素子単位に設けたシェーダー(ひさし)構造を採用することによって、太陽光下でもくっきりと鮮やかな映像が表示可能になる。



(上)従来型 LED (下)当社採用品

### 色度変換

LED各色が持つ固有の色域は、家庭用テレビで見慣れた色範囲と異なる。LEDと表示コンテンツとの間で色再現性にミスマッチが生じ、視聴者は映像のぎらつきなどの不自然さを感じる。これを解消するため当社の処理では、LEDの色域をハイビジョン規格に変換してきた。最近はハイビジョンコンテンツをリアルタイムに解析し、自然な色合いを保つつつLEDの特性を生かして高色域化している。これによって4Kコンテンツの場合でも色域を損なうことなく表現可能である。図は、色再現範囲を独自の高色域色変換によって4Kの色規格(BT.2020)に対応させた例を示す。

当社家庭用テレビで培った技術資産と、船舶ビジネスか

ら受け継いだ耐環境・高信頼性を核に、風雨・太陽光下で美しさを求められる映像システムの技術が培われている。

