

プラント運転の自動化を実現するソリューションと 上下水道統合プラットフォーム TOSWACS

Solutions Utilizing TOSWACS Integrated Platform to Achieve Automation of
Water Supply and Sewerage Plant Operation

横山 雄 YOKOYAMA Suguru 松田 啓明 MATSUDA Hiroaki 松本 隼 MATSUMOTO Jun

国内の上下水道事業は、広域化・共同化による事業の効率化や、革新技術の導入による施設の運用や維持管理などに関わる業務プロセスの効率化が求められている。

東芝グループは、このようなニーズに応えるため、運用時の様々なコストを抑制し、維持管理に必要なオペレーターの少人数化を可能にするプラント運転の自動化に貢献するソリューションを提供している。長年培ってきた上下水道プラントの監視制御技術とICT（情報通信技術）を統合した上下水道統合プラットフォーム TOSWACSを中核として、最新の“最適化技術”、“可視化技術”、及び“診断技術”と組み合わせることで、プラント運転の自動化を実現する。

The need has arisen in recent years for water supply and sewerage businesses in Japan to achieve high efficiency due to the advantages of scale through the promotion of consolidation and cooperation, as well as to improve the efficiency of their business processes for operation and maintenance through the introduction of innovative technologies.

In response to customers' requirements, the Toshiba Group has been supplying solutions that contribute to the automation of water supply and sewerage plant operation. These solutions, applying the TOSWACS integrated platform composed of monitoring and control technologies based on our long accumulation of development experience and information and communication technologies (ICTs), together with the latest technologies for optimization, visualization, and diagnosis, achieve reductions in the number of operators required for operation and maintenance while also reducing various other costs associated with plant operation.

1. まえがき

国内の上下水道事業では、料金収入の減少による財政の悪化や、人口減少による職員確保の難しさが問題となっている。これらの対応策の一つとして、国は広域化や共同化を進めている。一方、ICTの発展は目覚ましく、あらゆる“モノ”がネットワークにつながるIoT（Internet of Things）の普及が始まっている。また、近年では、AIの研究開発が盛んに行われるようになり、一部は既に社会へ普及している。上下水道事業においても、これらの革新技術を導入することで、維持管理コストの縮減や、少人数で施設を運用するなどの業務プロセスの効率化が求められている^{(1), (2)}。

このような背景の下、東芝グループは、最新のICTやAIを取り入れ、広域化に対応していく上下水道統合プラットフォーム TOSWACSを中核として、運用コストを抑制し、少人数での維持管理を実現するプラント運転の自動化に取り組んでいる。

プラントを自動化するにあたっては、制御を担うとともに、維持管理に必要な情報が集まる監視制御システムを有効に

活用することが重要となる。そこで、東芝グループは、長年培ってきた上下水道プラントの監視制御技術と最新のICTを融合させたプラットフォームとして、上下水道統合プラットフォーム TOSWACSをプラント運転の自動化の中核として整備している。

ここでは、東芝グループが考えるプラント運転の自動化とそれを支えるTOSWACS、そして自動化を実現する具体的な技術例について述べる。

2. プラント運転の自動化に貢献するソリューション

2.1 東芝グループが考えるプラント運転の自動化

現在の上下水道プラントは、オペレーターが監視制御システムに制御設定値などをあらかじめ設定し、それに従って自動制御されていることが多い。しかし、安定した水処理を重視するために余裕を持った設定がされている場合や、台風や大雨などの非定常な状況では、オペレーターが頻繁にプラントの状態を監視し、設定値を変更している場合があり、過剰な運用コストの負担や、オペレーターの少人数化への妨げにつながっている。また、プラントに異常があった

場合には、監視制御システムにアラームが発報され、その都度、異常の内容を判断し対応しており、オペレーターによる監視が必須となっている。

これらの課題を解決し、運用コストを抑制しながら、より少人数でのプラントの維持管理を可能にするのが、東芝グループが考えるプラント運転の自動化である。

プラント運転の自動化には、①通常時には最適なコストで運用されていること、②維持管理者が運用状況を即座に理解できること、③異常予兆があるときにはその異常の顕在化が回避されること、の3点が重要である。そこで、東芝グループは、この3点を実現するため、**図1**に示すように、“最適化技術”、“可視化技術”、及び“診断技術”の三つの技術を柱に、プラント運転の自動化を目指している。更に、広域化を見据えて、個別のプラントから複数のプラントを連携した自動化へと拡大していく。プラント運転の自動化の実現により、薬品や電力などの運用コストを抑制するとともに、職員を運転管理業務から解放し、より高度な業務にシフトすることで、プラントの維持管理の少人数化に貢献する。

2.2 プラント運転の自動化を支える三つの技術

2.2.1 最適化技術

最適化とは、処理水質の管理基準値及び必要な処理量を担保した上で、運用に掛かる薬品や電力などのコスト、若しくは環境負荷を最小にすることである。最適化技術とは、既存のセンサーデータだけでなく、画像処理技術などを活用した新たなセンサーデータや、高精度なシミュレーションモデルから得られる将来の予測値などのソフトセンシングデータなど、あらゆるデータをインプット情報として、プラント運転が最適な状態になるように制御設定値を自動で算出する技術である。今までは、制御設定値をオペレーターに示す支援システムはあったが、限定された適用条件や、算出結果の実運用値からの乖離(かいり)の問題などで、実際にその値で制御するまでには至らないことが多かった。これに対して、最新の技術の活用により適用条件の制限を無くし、更に高精度化することで、実際にプラントを制御することを可能にし、安定した水処理とともに、プラントの運用コストの抑制を実現する。

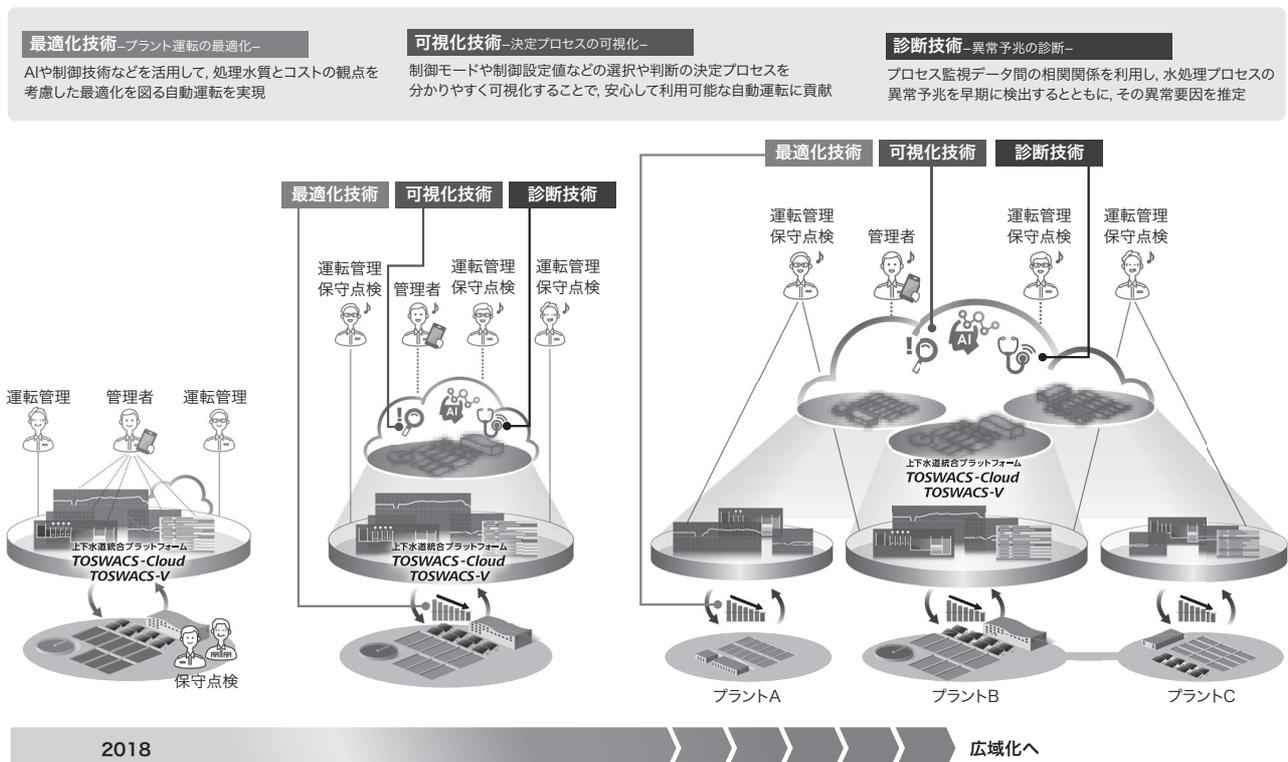


図1. プラント運転自動化のコンセプト

広域化に対応していくため、TOSWACSを中核として、最適化技術、可視化技術、及び診断技術の三つの技術を柱にプラント運転の自動化を実現する。

Concepts of automation of plant operation using TOSWACS

2.2.2 可視化技術

プラントの自動運転を最適化する場合には、最新技術であるAIなどを活用する。AIによるシミュレーションモデルやそれを用いて制御設定値を算出する場合、その導出過程が把握できず、いわゆるブラックボックスとなる。このため、このブラックボックスの可視化により、プラントの維持管理者が、即座に運転状況を理解できるようにすることで、安心してシステムに自動運転を委ねることができると考えている。そこで、東芝グループは、自動運転されているプラントの制御設定値や操作の判断などの決定プロセスを、維持管理者に分かりやすく可視化する技術の開発に取り組んでいる。この可視化技術は、プロセスの理解を促すものとして、職員の技術継承の支援にもつながる。

2.2.3 診断技術

診断技術とは、プラントで蓄積される多くのプロセス監視データから、総合的な傾向を把握してプラントが悪い状態へ移行しそうな異常予兆を、早期に検出する技術である。

異常予兆を早期に検出することで、機器の故障などの異常が顕在化する前に、計画的に保守を行うことができる。これにより、突発的な故障への対応が不要となるため、常にオペレーターが監視制御システムの前で監視する必要がなくなり、より効率的な人員配置が可能となる。また、異常予兆の検出時には、その要因となっている機器に対し、システムが運転の回避などを行うことで、プラントの長期にわたる安定した自動運転に寄与する。

3. ソリューションを実現するプラットフォーム

3.1 上下水道統合プラットフォームTOSWACS

2章で述べたソリューションの実現には、広域化に対応し、AIなどの最新の技術を活用するための高度で複雑な情報処理技術を動作させるプラットフォームが重要となる。TOSWACSでは、図2に示すように、プラント運転の自動化を実現する中で要求される特性の異なる処理に対し、クラウドコンピューティング(以下、クラウドと略記)、フォグコンピューティング(以下、フォグと略記)、エッジコンピューティング(以下、エッジと略記)を組み合わせて、以下のようにエッジ-フォグ-クラウドでの最適機能分担を実現する。

- (1) エッジ リアルタイムデータ処理・高信頼性制御
- (2) フォグ リアルタイムデータ収集・蓄積、リアルタイム演算
- (3) クラウド 大容量データの蓄積・大容量データ演算、広域連携

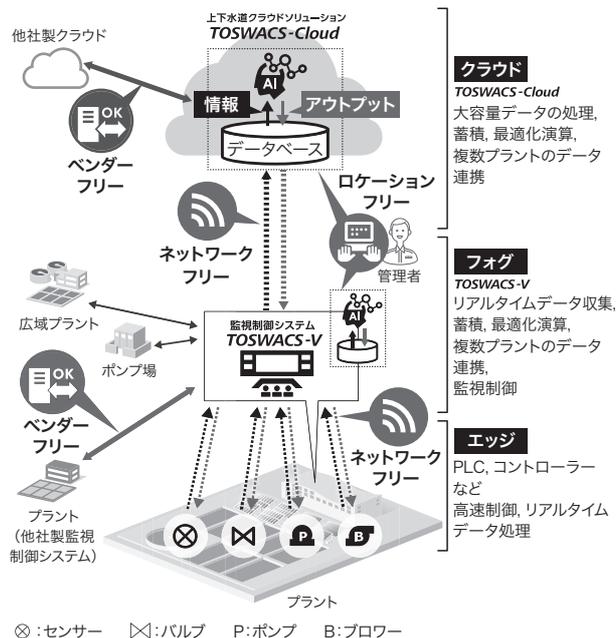


図2. TOSWACSの全体概要

最適な機能分担と広域化に向け、ネットワークフリー、ロケーションフリー、ベンダーフリーの三つの基本コンセプトを軸に、プラント運転の自動化ソリューションを提供する。

Overview of TOSWACS

また、併せて、3.3節で述べる“ロケーションフリー”、“ネットワークフリー”、“ベンダーフリー”の三つのコンセプトを軸に、広域連携による最適化を見据えたプラットフォームとして提供する。

3.2 エッジ-フォグ-クラウドによる最適機能分担

プラント運転の自動化の柱となる最適化技術、可視化技術、診断技術を実現する上では、プラント内の監視制御システムや連携するほかのシステムから得られる膨大な情報やデータを蓄積し、AIに代表される高度で複雑な情報処理技術を動作させることが必要となる。この点においては、クラウドが、その豊富なコンピューターリソースを生かしたソリューションを提供するプラットフォームとして有効に作用する。一方、より高度なソリューションを実現する上では、最適化技術によって得られた最適値を用いた機器の制御と、センサーからのデータ収集に対する高速応答性が必要となる。この場合クラウドでは、高速応答性の実現のために、機器とクラウドの間のネットワーク遅延が許容できないケースも出てくる。そこで、特に高速応答性が必要な処理や比較的単純な制御に対しては、機器の近くに設置したプログラマブルロジックコントローラー (PLC) によって処理を担うエッ

ジを適用する。また、複数機器の協調制御などの高度な演算処理と高速応答性の両立が必要な処理に対しては、プラント内に設置したコンピューターによって処理を担うフォグを適用する。このように、処理の特性に合わせたエッジ-フォグ-クラウドで、最適機能分担を実現する。

3.3 三つのコンセプトを軸とした広域化対応

最適化技術は、個別のプラント最適から、より効率的な運用を実現するために複数のプラントを連携させた広域最適へと拡大することが予想される。TOSWACSではこれに対し、ロケーションフリー、ネットワークフリー、ベンダーフリーの三つのコンセプトでソリューションを提供する。

3.3.1 ロケーションフリー

TOSWACSでは、高度処理を実行するためのフレームワークに、クラウドとフォグの双方で同じフレームワークを採用し、自動化ソリューション用のアプリケーションを、クラウド上でもプラント内のフォグでも動作できるようにする。また、フォグにおいては、3.3.2項で述べるネットワークフリーのコンセプトにより、アプリケーションを動作させる機器の設置場所を限定せず、ローカルのプラント内への設置やWAN (Wide Area Network) で接続された遠方のプラント内への設置などを実現する。これにより、顧客の多様なニーズに対応したソリューションの形態を提供でき、広域連携により接続されたプラントごとに、そのプラントの特性に合わせたソリューションの形態が選択可能となる。例えば、接続機器が多くてより高度な最適化が必要なプラントに対してはクラウドを適用し、低速回線の環境下でクラウドと大量のデータのやり取りが困難なプラントに対してはフォグを適用するというような選択が可能となる。

3.3.2 ネットワークフリー

広域連携による最適化を実現する上では、常に通信環境が整ったシステム・機器だけでなく、通信帯域が狭いなどの多様な環境に配置されたシステム・機器の情報・データを収集する必要がある。TOSWACSでは、高速で安定な通信回線を前提とせず、高速/低速回線や無線/有線などの特定のネットワーク仕様によらない通信アーキテクチャーを実現する。また、通信プロトコルに関しても、専用プロトコルに限定せず、接続するシステム・機器に応じたプロトコルに対応可能とし、3.3.3項で述べるベンダーフリーを実現する。

3.3.3 ベンダーフリー

広域化を進めるにあたり、連携するプラントやシステムが同一のベンダーで提供されているとは限らない。TOSWACSでは、センサーや、機器、PLCなどとの通信インターフェー

スをモジュール化し、接続する機器に対応した通信モジュールを追加することで、特定の機器ベンダーによらないプラットフォームを実現する。これにより、プラントの監視制御システムの提供ベンダーによらない自動化ソリューションの提供を可能とする。

4. ソリューションを実現する具体的な技術例

ここでは、最適化技術、可視化技術、及び診断技術の具体的な技術例を示す。これらは、TOSWACSで実現される。

4.1 高精度な水質予測モデルによる最適化技術

プラント運転の最適化を実現するための手法を、図3に示す。第1段階として、日々の施設運用から得られた大量の蓄積データを解析し、高精度な水質予測モデルを生成し、それらの組み合わせにより実際のプラントを模擬した仮想プラントを構築する。仮想プラントでは、設定予定の操作値や流入水質・水量などの外乱予測値を入力することで、数時間から数日間先まで処理水質の推移を高精度に予測可能であり、実際のプラントに反映する前に安定性の確認やより良い操作値の発見を実現する。第2段階では、この仮想プラント上における最適操作値の発見プロセスを自動化する。様々な操作値の組み合わせを自動的に生成・試行することで、処理水質やコストの面から評価して最適なシナリオを選択し、実際のプラント運用に反映する。

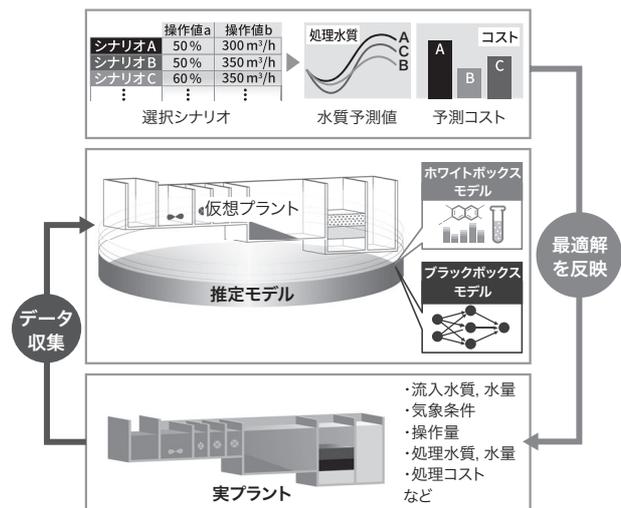


図3. プラント運転最適化の実現手法

ホワイトボックスモデルとブラックボックスモデルの組み合わせで高精度な水質予測モデルを生成し、それを活用して最適な操作値を探索することで、実際のプラント運用に反映する。

Technique for optimization of plant operation

4.1.1 高精度な水質予測モデルの生成手法

第1段階となる仮想プラント構築では、入力した運用操作値に基づく処理水質の予測推移を出力することを目的として、高精度な水質予測モデルを生成する。

水質予測モデルの生成手法は、大別して、静的解析（活性汚泥モデルや、物理化学モデル解析に基づく浄水場ろ過水の残留塩素濃度の推定など）によるホワイトボックスモデル手法と、データドリブン解析（深層学習やランダムフォレストなど）によるブラックボックスモデル手法が存在し、それぞれ異なる優位性を持つ。例えば、前者は、未知の入力データ範囲に対する予測が可能であるが、プラント特性による揺らぎの再現は不得意である。一方、水需要の予測など、人的判断に基づく変動要因が大きく、定量的な説明因子に基づくホワイトボックスモデルが存在しない場合は、後者による推定が有効である。そこで、これらのモデルによる解析結果を組み合わせることで、蓄積データの範囲外となる非定常時にも対応可能で高精度な水質予測モデルを生成する。

高精度な水質予測モデルに基づく仮想プラントを生成することで、オペレーターは、これから設定予定の操作値がプラントにどのような影響を与えるかを、事前に把握できる。

4.1.2 高精度な水質予測モデルによる最適値探索手法

第2段階となる最適値探索では、仮想プラント上で様々な操作値の組み合わせを試行し、最適となる操作値の組み合わせを自動的に選択する。最適値を算出する条件はプラントごとに設定可能で、例えば、全処理水質の濃度が基準値以下となるように、エネルギー原単位を最小化することなどが挙げられる。

最適値の探索手法は、大別して、その都度異なる探索条件下で組み合わせを探索する逐次探索手法と、事前に全探索条件について最適値を計算しておきリアルタイムに参照する事前探索手法が挙げられる。

逐次探索手法では、上下水道プラントにおける操作値と処理水質の関係にある程度の連続性がある点に着目し、初期設定値を変動させて徐々に最適値方向へ勾配を持たせて探索することで、最適解を発見する手法が有効である。

事前探索手法では、重回帰分析やLasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) 法を用いた、定式化による解空間の圧縮が有効である。特に処理プロセスが複雑なプラントでは、強化学習による最適解導出モデル生成が有効であり、仮想プラント上で事前に生成されたモデルをプラント運用に用いることで、最適な操作値の決定を実現する。



図4. 最適操作値の設定画面例

最適化技術により計算された最適な操作値や、その操作値で運用された場合の将来予測値、想定される運用コストなどを、支援情報としてオペレーターへ提示する。

Example of optimal operation value setting display

このようにして計算される最適操作値を、図4に示すように、オペレーターへの支援情報として提示することで、現在の運用設定基準の確認・見直しなどが可能となる。また、自動で実プラント上の操作値に反映させることで、プラント運転の自動化が実現できる。

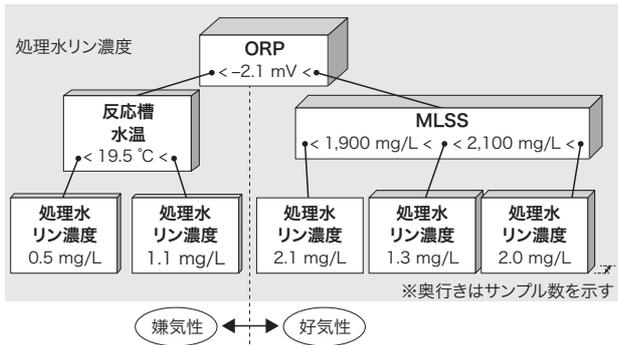
4.2 決定木分析を活用した可視化技術

4.1節で述べた最適化技術に基づく解析結果を、意思決定支援情報として、オペレーターに分かりやすく、かつ安心できるように提示するためには、仮想プラントの可視化及び操作値決定プロセスの可視化が重要である。仮想プラントの可視化においては、最適操作値を含む全操作値に基づく処理水質の予測結果を一覧表示することにより、選択された操作値が最適であることを視認可能とする。一方、操作値決定プロセスの可視化については、決定木分析による体系化技術が適用可能である。決定木分析では、観測対象とする現在の管理値、処理水質などから最適な判断指標と定量的基準を順に選定して示すことで、操作値決定プロセスを体系化する。例えば、図5に示す決定木生成による可視化では、上流ノードから順に定量的な判断指標をたどることで、処理水リン濃度を下げるために操作者が何をすべきかが分かるようになる。

これらの技術により、オペレーターが日常業務で参照するリアルタイムデータ値や画像に加えて、可視化された意思決定支援情報を提供することで、オペレーターの効率的な業務支援を可能とする。

4.3 多変量統計的プロセス管理を応用した診断技術

診断には、システムに蓄積されたプロセス監視データを、



ORP : Oxidation-Reduction Potential (酸化還元電位)
MLSS : Mixed Liquor Suspended Solids (活性汚泥浮遊物質)

図5. 処理水リン濃度の決定木分析結果の可視化例

決定木分析によって操作値決定プロセスを体系化する。上流ノードから順に判断指標をたどることで、オペレーターがどのように運転すべきかが分かる。

Example of visualized results obtained from decision tree analysis of processed water phosphorus densities

多変量統計のプロセス管理 (MSPC) 技術を応用して統計的に処理することにより、水処理プロセスで生じると想定される各種の異常予兆を、自動的に検出する技術が適用可能である。

これは、多数のプロセス監視データの相関関係を考慮して、相関軸からのずれを表す統計量を監視し、異常予兆を早期に検知する。そして、異常検出時には、各プロセスデータが統計量に与える影響度 (統計量寄与量) を求め、寄与量が高いデータを異常要因候補として出力する。これにより、リスクの顕在化や非効率的な運用を事前に回避するための制御設定の変更や機器の運転を行うことで、プラントの継続的な安定運転に寄与する。

5. あとがき

上下水道事業における課題と、それに応えるためのプラント運転の自動化への取り組み、それを支える上下水道統合プラットフォーム TOSWACS について述べた。

東芝グループは、今後も、重要な社会インフラとして位置付けられている上下水道事業に対して、その環境の変化に対応しながら、新たな価値の創造に向けて貢献していく。

文献

- (1) 厚生労働省健康局, 新水道ビジョン, 2013, 54p.
- (2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 日本下水道協会, 下水道政策研究会 報告書 新水道ビジョン ~ 「循環のみち」の持続と進化~, 2014, 108p.



横山 雄 YOKOYAMA Suguru
東芝インフラシステムズ (株)
水・環境システム事業部 水・環境システム技術第二部
電気学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



松田 啓明 MATSUDA Hiroaki
東芝インフラシステムズ (株)
府中事業所 社会インフラシステムソリューション部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



松本 隼 MATSUMOTO Jun
東芝インフラシステムズ (株)
インフラシステム技術開発センター システム制御・ネットワーク
開発部 IEEE 会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.