

## 〈研究発表〉

### 浄水場における監視点検データを用いた運転支援および設備診断

横井 浩人<sup>1)</sup>, 栗栖 宏充<sup>2)</sup>, 中村 信幸<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (株)日立製作所 水・環境ビジネスユニット  
(〒101-0021 東京都千代田区外神田1-5-1 秋葉原ファーストビル E-mail: hiroto.yokoi.vb@hitachi.com)

<sup>2)</sup> (株)日立製作所 水・環境ビジネスユニット  
(〒101-0021 東京都千代田区外神田1-5-1 秋葉原ファーストビル E-mail: hiromitsu.kurusu.uq@hitachi.com)

<sup>3)</sup> (株)日立製作所 社会ビジネスユニット  
(〒319-1293 茨城県日立市大みか町5-2-1 E-mail: nobuyuki.nakamura.wt@hitachi.com)

#### 概要

水道事業では技術継承や料金収入の減少などさまざまな経営課題がある。これらを解決する手段の一つとして、監視データや点検データを活用する支援システムを構築した。本報では支援システムの機能のうち、ART (Adaptive Resonance Theory, 適応共鳴理論) 手法を用いて重要機器である取水ポンプと配水ポンプを対象に診断を実施した。保守作業、配水量の変化や水質悪化に伴うポンプ運用の変更に対して、ARTのパラメーターである警戒係数 $\rho$ を調整し、状態変化の検出ができることを確認できた。

キーワード：データ活用、診断、ART、適応共鳴理論、ポンプ

原稿受付 2022.7.12

EICA: 27(2・3) 90-93

## 1. はじめに

### 1.1 水道施設の維持管理に係る課題

日本の水道事業では、将来の人口や料金収入の減少、更新を迎える施設・設備の増加、ベテラン職員の退職に伴う技術継承などの経営課題を抱えている。これら課題の解決に貢献すべく、包括維持管理をはじめとする官民連携の取り組みを強化するとともに、ICT (Information & Communication Technology) を活かした「O&M (Operation & Maintenance) 支援デジタルソリューション」を通じた効率化を図っている。茨城県企業局那珂川浄水場の運転管理等業務委託のなか

で、データ活用システムを構築し利用を開始した<sup>1)</sup>。

### 1.2 課題解決のためのソリューション

データ活用においては、運転支援の高度化や保守・保全コスト縮減に寄与することを目的に以下の機能を準備した。まず、保全業務と運転管理業務に関わるデータを収集・蓄積し、活用にあわせて一元的に管理する「台帳管理機能」、「データ見える化機能」。保全については、いわゆる状態保全の実現をめざし、「アセットマネジメント」、「異常兆候予知」の計画支援機能である。さらに、運転管理については、「塩水遡上対策」、「薬品注入支援」、「KPI (Key Performance

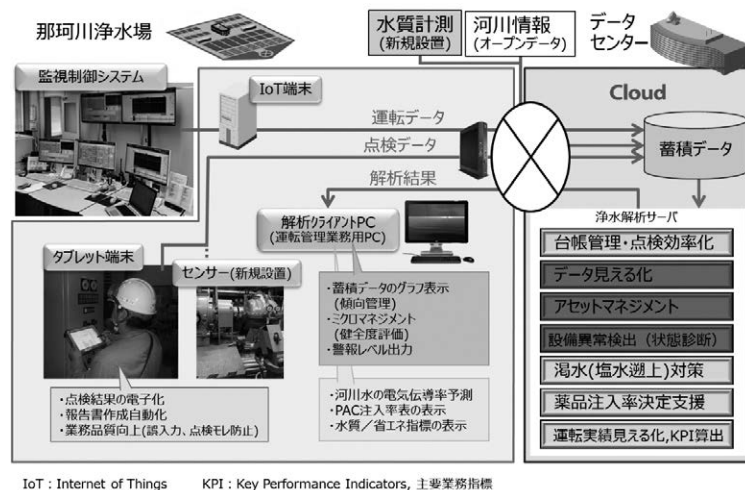


Fig. 1 Operation support system that utilizes monitoring data and inspection data in cloud system.

Indicator) 算出」の3つの支援機能を有している。

Fig. 1にデータ活用システムの構成を示す。運転データは監視システムや追設するセンサーから、点検データなどはタブレット端末から、さらに、河川情報などの公開情報もそれぞれ収集され、データセンターに蓄積される。前述した各機能もセンター内であって、その結果を現場側で表示、活用する、いわゆるクラウド型のシステムである。

ICTの進展は、情報の「蓄積」や「処理」だけでなく、「収集」コストも低減させ、産業のあらゆる分野でデータ活用の機会を広げる原動力となっている。浄水場の運転維持管理の分野で具体的に言えば、タブレット端末の普及によって日々の点検や定期的な整備など保全業務に携わる人間が発生させる情報もまた即時電子データとして取り込み蓄積すること、そしてセンサーの高性能・低コスト化によって運転管理に必要なプロセスのセンシングがきめ細かくとれるようになってきたことが挙げられる。

ICTを活かした運転管理業務支援として、蓄積データとAI(Artificial Intelligence)を用いて、重要機器の状態変化の早期検知、大規模な不具合の未然防止、および、CBM(Condition Based Maintenance)をめざした診断技術を開発した。本報では、データ活用システムでの監視データ、点検データ、追加センシング(振動)データを入力としてAIの一種であるART(Adaptive Resonance Theory)分析により、重要機器である配水ポンプと取水ポンプの診断を行った事例について報告する。

## 2. 方法

### 2.1 ART分析

ARTは、安定性と可塑性を保ちながら適応的にカテゴリーを形成する追加学習型の自己組織化ニューラルネットワークである。ARTを用いることにより、事前にカテゴリー数や不具合の知識を必要としない、すなわち、教師データなしでのカテゴリー分類も可能となる。

ARTによる学習と診断では、例えば学習期間(正常)のX1, X2をカテゴリーに分類した後、診断期間に正常、または、正常な状態からの状態変化に分類していく。X1, X2のデータセットが、学習データにない組み合わせ(X1, X2がともに高い)の時には正常カテゴリーからの乖離があると判断することができる。ARTの適用例としては化学プラントや発電プラントでの異常診断<sup>2,3)</sup>もある。

また、ARTでは警戒係数 $\rho$ を変数として設定する。 $\rho$ の値が大きいかほどカテゴリー数が増加、言い換えると、1つのカテゴリーの半径が小さくなるという特性

がある。カテゴリー数は、入力項目数やそのばらつき程度はもちろん、 $\rho$ によって影響を受ける。そのため、本報では配水ポンプに適用した際に $\rho$ の値を変化させ、状態変化を検知する上でカテゴリー数がどの程度変化することが適当であるか検討した。

実際に診断する際は、カテゴリー数の増加が一つの指標となる。しかし、複数の機器に対して長期間、継続的にデータ収集と診断を実施する場合、カテゴリー数の追跡が難しくなることも考えられた。そこで、本報では、学習データから生成されたカテゴリーから外れる確率を用いてユーザーに状態変化の程度を相対的に示す「警報レベル」を定義し導入した。警報レベルは0~20の値とし、所定の値を超えた場合に何らかの対応を行うトリガーとして用いることができる。

### 2.2 振動計測と評価指標

加速度センサーによる計測は情報量が多く、回転機の代表的な不具合発生部位である軸受などの監視には有効とされている。そこで、配水ポンプへ加速度センサーと温度センサーをIoT機器として新規に設置した。加速度センサーは村田製作所製の速度版振動センサーユニット(LBAC0ZZ1TF)を用いた。計測周波数は、加速度が10~10,000 Hz、速度が10~1,000 Hz、検知方向は(センサー設置面に対して)z方向で、バッテリーで駆動する。計測データは無線にてGW(Gateway)へ送信後、PCに取り込むことができる。今回、センサーをポンプ軸受部にマグネットで設置し、ポンプの軸に垂直・水平方向の振動を10分毎に記録した。設置状況をPhoto. 1に示す。

振動の監視とART分析への入力には、加速度と速度の実効値をそれぞれ用いた。実効値は時間信号の平均的な大きさ(強度)を表す量で、周期信号 $x(t)$ の周期を $T$ とすると、式1で定義される。

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$ : 周期 $T$ の信号、 $T$ : 周期である。



那珂配水ポンプ2号(軸受部)

Photo. 1 Vibration sensor on the distribution pump in the Nakagawa water purification plant.

## 2.3 診断の対象機器と評価方法

今回の ART 手法の検討では以下の 2 種類の条件でデータを分析した。

### (1) 監視データを用いた診断 (ケース 1)

ケース 1 では、監視データと振動データを用いてカテゴリ分けを実施した。対象機器は、那珂川浄水場配水ポンプ 2 号機 (横軸両吸込渦巻きポンプ, 280 kW) とした。具体的な計測項目として、電動機電流 [A], ポンプ回転数 [rpm], 加速度実効値 [ $m/s^2$ ], 速度実効値 [mm/s], 軸受部温度 [ $^{\circ}C$ ], および、配水ポンプ室室温 [ $^{\circ}C$ ] とし、2021 年 12 月 11 日～2022 年 3 月 17 日のデータを対象とした。

この期間に取得できたデータに対し  $\rho = 0.99700 \sim 0.99995$  の範囲で 6 段階に設定し、それぞれカテゴリ分けした。状態変化を検出する上で代表的なポンプの監視計測データを用いる場合に  $\rho$  はどのように設定すべきかを検討した。また、期間内に不具合はなかったが、保守作業として軸受部のグリスアップを実施しており、これが振動や ART 分析でどのように現れるかを確認した。

### (2) 点検データを用いた診断 (ケース 2)

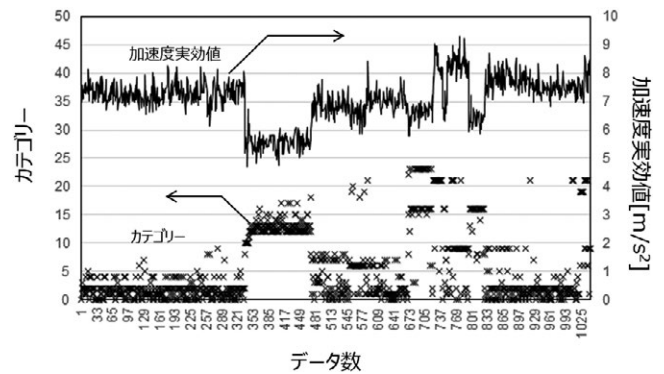
ケース 2 では、過去の点検データのみを用いて警報レベルを算出した。対象機器は、那珂川浄水場取水ポンプ 3 号機 (縦軸斜流ポンプ, 90 kW) とした。診断に用いる点検項目は、取水ポンプ吐出圧力 [MPa], 電動機電流 [A], 取水ポンプ軸受温度 [ $^{\circ}C$ ], および、取水ポンプ場室温 [ $^{\circ}C$ ] とした。学習データを 2013 年 4 月～2018 年 5 月、診断データを 2018 年 12 月～2019 年 6 月の期間とし、警報レベルをそれぞれ算出した。本報執筆時までの期間に対象機器に不具合は生じていないが、上記の診断期間には原水水質の悪化に伴う取水制限が行われており、状態変化の検出可否を確認した。

## 3. 結果と考察

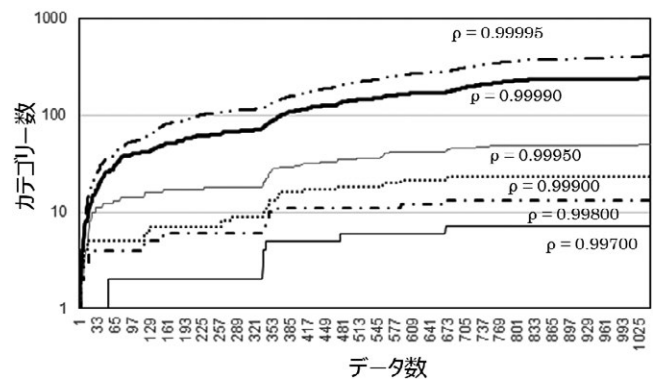
### 3.1 監視データを用いた診断条件の比較 (ケース 1)

**Fig. 2** に配水ポンプに設置した振動計で得られた加速度実効値のトレンドを示す。ポンプは間欠的に運転をしているため **Fig. 2** の横軸はデータ数 (n) として示した。n=340 までの加速度実効値は  $7.3 m/s^2$  程度で安定に推移したが、グリスアップした後の振動は不連続に減少し、計測期間で最小レベルの  $5.5 m/s^2$  程度に至った。その後は運転条件の変更によって変化するが、 $6 \sim 9 m/s^2$  となった。

回転機器の軸受部でグリスが減少した状態でグリスを補充すると振動の速度や加速度が小さくなることは藤来<sup>4)</sup>によっても報告されている。振動の変化の程度は回転機や軸受部の構造により異なるが、藤来の例



**Fig. 2** RMS acceleration value measured on the distribution pump in the Nakagawa purification plant and categories classified by ART.



**Fig. 3** Dependence of warning coefficient  $\rho$  on total category number classified for the distribution pump using ART.

ではグリス注入後の加速度実効値は補充前から 66% 減少した。本報の計測での減少幅は 25% 程度であったが、軸受部の状態が改善されて振動が小さくなることを今回使用した振動計でも検知できた。

このポンプは可変速のタイプであるため、制御の設定値変更だけでなく、水需要の変化に伴う送水圧や流量の変動に対して運転条件が変わり、振動の値にも影響する。運転条件も考慮するため、振動 (加速度実効値, 速度実効値), 運転条件 (電流値, 回転数), 温度 ( $\Delta T =$  振動計測地点での温度 - 室温) の 5 項目を用いた ART によって診断を試みた。**Fig. 3** に配水ポンプの ART 分析によって得られたカテゴリ数のトレンドを示す。縦軸は各データセットから得られるカテゴリの値を示すのではなく、その時点までのカテゴリの最大値を示している。警戒係数  $\rho$  を 0.99700, 0.99800, 0.99900, 0.99950, 0.99990, 0.99995 の 5 種類に変化させてそれぞれ計算した結果、いずれの  $\rho$  に対してもカテゴリ数は初期に大きく増加した後、緩やかな曲線に変わりに、n=1,000 の時点では収束する傾向が見られた。 $\rho$  が大きくなるにしたがってカテゴリ数は大きくなり、 $\rho = 0.999700$  では 7 カテゴリ、 $\rho = 0.99995$  では 412 カテゴリとなった。

$\rho$  の値は診断の感度に影響するため重要な設定項目である。今回、上述のグリスアップ時の状態変化を検



知できることを選定基準の一つとした。結果、Fig. 3ではいずれの $\rho$ でも変化が読み取れることが分かった。ただし、 $\rho$ が大きい(0.99995)条件は、データ数に対するカテゴリー数の比率が大きい、すなわち、データセットごとにカテゴリーが細分化されて生成される傾向にあり、状態変化として明確に判断するのが難しくなった。また、 $\rho$ が小さい(0.99700)条件では全カテゴリー数が少なく、数カテゴリーの差が有意な違いかどうかを判断するのが難しいと考えられた。そのため、今回の診断対象と入力項目の場合、 $\rho = 0.99800 \sim 0.99995$ を適切な範囲とした。

Fig. 2に $\rho = 0.99900$ でART分析したカテゴリー(各データセットに対して得られたカテゴリーの値)の経時変化を示す。n=340までのカテゴリーは5程度で推移しているが、グリスアップ後にカテゴリー数が10を超えた。その後、5以下のカテゴリーの割合が多いものの6から25の間に分散する傾向が見られた。このことから、運転条件とその結果として得られる値(振動や温度)から指標化するART分析は、単一の計測項目による診断と比べ、高い感度で判断しやすい形式で状態変化を示すことができるものといえる。

### 3.2 点検データを用いた診断(ケース2)

Fig. 4に、取水ポンプの毎日点検の結果から算出した警報レベルの推移を示す。警報レベルの算出においては2013年4月～2018年5月の点検結果を学習データとしており、学習データに近い状態にあるときの警報レベルはおおむね5より小さい値となる。診断期間の初期(2018年12月)は警報レベルが0から3程度であったが、その後、最大値の20まで増加する時期も見られ、2019年5月後半には再び警報レベルが0まで低下した。この期間に水源としている河川で塩水遡上が発生し、取水は通常とは異なる運用となっていた。具体的には、塩水濃度(電気伝導率)が一定以上高い期間は取水を停止し、濃度が低い期間に沈砂調整池の水位が十分高くなるように取水ポンプの負荷を増

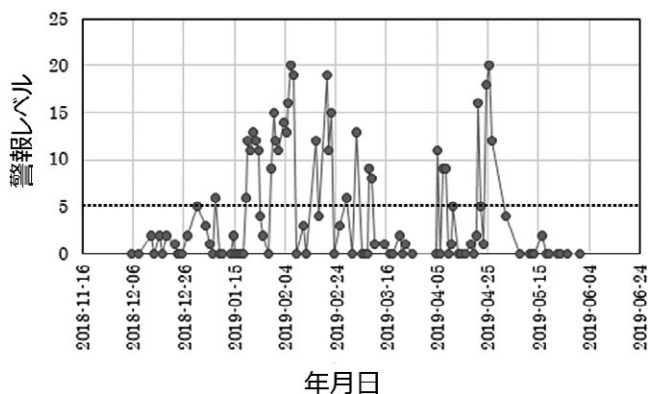


Fig. 4 Alert level calculated by ART for the intake pump in the Nakagawa purification plant within the period of high electrical conductivity.

大させた。このような取水ポンプの運用ではポンプ吐出圧力 [MPa] や電動機電流 [A] が通常より高いため、新規なデータの組み合わせとなり、結果としてこれまでにない状態に変化したとARTが判断し警報レベルが高くなったものと考えられる。

前節では計測頻度が高い監視データを使ってART診断したが、本節の例では頻度が1回/日の点検データを用いても過去の運転条件との違いを示すことができた。このように、ARTは新たにセンサーを追加しても、またはすでに監視や点検が行われているデータを使っても、一段階詳細な診断を開始することができるため、運転支援や保守・保全業務での活用が有効であると考えられる。

## 4. おわりに

水道事業におけるさまざまな経営課題の解決に貢献することを目的として、運転管理業務と保全業務のデータを活用する支援システムを構築した。本報では支援システムの機能のうち、各種データとART手法を用いて重要機器である取水ポンプと配水ポンプを対象に診断を実施した。診断期間中には機器の不具合は発生しておらず診断性能そのものを評価するには至らなかったが、保守作業(グリスアップ)、配水量の変化や水質悪化に伴うポンプ運用の変更に対して、パラメーターを調整し、状態変化の検出ができることを確認できた。状態変化の早期検知は、大規模な不具合の未然防止、CBMの実現、および、保全コスト低減への貢献が期待できるため、引き続き、診断精度の向上に向け、データ取得とART分析を継続していく。

## 謝辞

本研究の実施にあたり多大なご協力を頂いた茨城県企業局の関係各位に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 横井浩人, 黒津健之, 栗栖宏充, 中村信幸, 石井隆智, 横須賀圭佑: 運用効率化と安定供給に寄与するICT応用運転維持管理(V), 全国水道総会(水道研究発表会)予稿集, pp.570-571 (2021)
- 2) 堀嘉成: 適応共鳴理論を利用したプラントの監視・診断方法に関する研究, 京都大学博士論文, 2019-03-25 (2019), <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/242538> (2022/6/30閲覧)
- 3) 関合孝朗, 川野徹, 村上正博: 発電プラントの故障予兆診断システム, 日本機械学会誌, 118 (1163), pp.624-627 (2015)
- 4) 藤来洗裕, 菅沼和明, 山崎良雄: 回転機器グリス補給周期及び振動測定の考察, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, Nagaoka, Japan, pp.817-818 (2018)