

〈研究発表〉

水処理装置の状況判断のための追加データ取得の優先順位付け方法

小塚 泉¹⁾, 山本 愛美²⁾, 大月 孝之³⁾

¹⁾ 栗田工業(株) デジタル戦略本部 DX 開発部 AI チーム
(〒196-0005 東京都昭島市代官山1丁目4番1号 E-mail:i.kozuka32@kurita-water.com)

²⁾ 栗田工業(株) 電子産業事業部 デジタル産業技術部技術一課
(〒164-0001 東京都中野区中野4丁目10-1 中野セントラルパークイースト
E-mail:m.yamamoto95@kurita-water.com)

³⁾ 栗田工業(株) デジタル戦略本部 DX 開発部 AI チーム
(〒196-0005 東京都昭島市代官山1丁目4番1号 E-mail:t.ootsuki32@kurita-water.com)

概要

水処理設備において流量計や pH 計などのオンライン計器の設置は必要最小限に抑えられており、正確な装置稼働状況診断にはサンプリング水の分析や現場設備の目視確認等を追加で行う必要がある。運転管理員はこれら追加取得する指標情報を診断の目的に応じて優先順位付けすることで効率的に現場状況を把握している。本発表では水処理設備の運転管理知識をベイジアンネットワークを利用した因果関係モデルとして表現し、診断目的に応じた追加指標情報の候補を優先付けする方法について報告する。

キーワード：運転管理、現場状況診断、ベイジアンネットワーク、指標優先順位付け

原稿受付 2024.7.1

EICA: 29(2・3) 174-177

1. 背景

高齢化に伴う現場経験豊富な技術者の引退や労働人口減少による人材確保の難しさから、設備規模に対する運転管理員一人当たりにかかる業務負荷が増えている。その為、設備の安定稼働や運転最適化に十分な時間を充てるのが難しくなっている。こうした背景から設備運転の高度化による業務負荷低減が求められており、AI や IoT 技術を用いた設備状況監視に関する取り組みが行われている¹⁾。

原子力プラントを対象にベイジアンネットワーク技術を用いてオンライン計器情報による設備状況監視を自動化した事例²⁾もあるが、水処理プラントにおいては設備状況を表す為のオンライン計器（圧力計・pH 計等）は必要最低限に抑えられており、それら計器のみで水処理状況を詳細に把握することは困難である。その為、より正確な状況把握にはサンプリングした水の特殊分析や現場での目視確認・判断等を行う必要がある。実現場では、技術者はこれら指標の追加取得の優先順位付けも診断の目的に応じて行い、効率的な設備状況把握を行っている。つまり、水処理プラントにおいて IT システムにより設備状況監視を効率化するには追加取得すべき指標の優先順位付けを自動化する仕組みが必要である。本稿では、ベイジアンネットワークを用いた設備状況監視向けシステムの実装事例と診断目的に応じた指標情報の取得順位を優先付けす

る方法について検証した結果を報告する。

2. ベイジアンネットワーク技術を用いた水処理設備状況診断システムの概要

2.1 因果関係モデルへの水処理知識実装

ベイジアンネットワークは確率変数をノード、ノード間の関係性を矢印で示した有向非循環グラフである。開発したシステムでは水処理設備におけるトラブル事象と状況判断に必要な観察指標、確率変数間の論理的関係性を表現する論理ノードを確率変数として記述した。ベイジアンネットワークは条件付確率群のネットワーク表現である。その為、必ずしも因果関係に沿わなくとも対象事象群の確率分布のモデル化が可能であるが、今回条件付確率の表現を因果関係に厳密に従って事象間の矢印を記述した。これによりモデル内の事象の根本原因探索といった機能が実装可能となる³⁾（以下、ベイジアンネットワークモデルは因果関係モデルと称する）。観察指標は事象との論理的な関係性を考慮して、観察情報は装置で発生した事象が原因となって発現すると考えモデル化した。モデル記述の際に対象事象を“発生することで設備への影響度の高い事象（以下、重要シチュエーション）”と“重要シチュエーションを発生させる根本的な原因となる事象（以下、根本原因シチュエーション）”とその他シチュエーション（以下、中間シチュエーション）に分けた。

Table 1 Threshold and Measured Value for Observation

	Unit	Threshold					Measured Value
		LL	L	D	H	HH	
フラックス*	m/d	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	25
水温*	℃	-35~-15	-15~5	5~25	25~45	45~65	20
分散剤添加有無*	-	0.0~0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	1.2~1.6	1.6~2.0	1.0
差圧*	MPa	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	0.6
給水 TOC	mg/L	0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	-
給水シリカ濃度	mg/L	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	-

確率変数は状態の離散化を行った上で、頻度分布により確率分布を表現した。離散化は LL, L, D, H, HH の5段階の状態変数で表現した。事象を表現する場合、LL は設計想定と比較して発生している可能性は非常に低い、L は発生している可能性は低い、D は設計想定レベルの発生、H は設計想定に対して発生している可能性が高い、HH は発生している可能が非常に高いといった工学的意味合いをもたせた。発生する状態の期待値等を数値表現する場合には、LL~HH の5状態を0~2の数値区間にマッピングした。指標の状態を表現する場合は、LL は非常に低い値、L は低い値、D は設計想定値、H は高い値、HH は非常に高い値といった工学的意味合いを持たせた。それぞれの指標ノードには連続計測値を状態変数に変換するために閾値を与えた⁴⁾。

因果関係モデルの確率分布の計算では変数消去アルゴリズムを採用することでグラフ内の各事象の確率計算で繰り返し発生する計算を可能な限り省略し計算速度の高速化を図った⁵⁾。Table 1 に本稿の計算に用いた与条件を示す。表中の※はオンライン計器を意味する。Fig. 1 に本稿で実際に行った計算処理フローを示す。



Fig. 1 situation inference workflow

2.2 追加データ取得候補の優先順位付け方法

特定の事象に対する未観察な指標の関係性を開発したシステムでは相互情報量 (以下、MI: Mutual Information) を用いて算出した。MI とは、2つの確率変数間において、どちらか一方の情報を得た時に、もう一方の平均情報量がどの程度減少するかを示す指標であり、MI が大きいほど両者の関係性が強いことを表している。ある事象変数 B の状態が観察された時の A と B の MI, $I(A;B)$ は下記の通りである。

$$I(A;B) = H(A) - H(A|B)$$

$$H(A) = -\sum_{i=1}^n p(a_i) \log_2 p(a_i)$$

$$H(A|B) = -\sum_{i=1}^n p(a_i|b_i) \log_2 p(a_i|b_i) = \frac{p(a_i, b_i)}{p(b_i)}$$

ここで、 $H(A)$ はある事象変数 A の平均情報量、 $H(A|B)$ は事象 B が観察された時の条件付平均情報量、 n は状態変数の数、 a_i は A の各状態の発生確率、

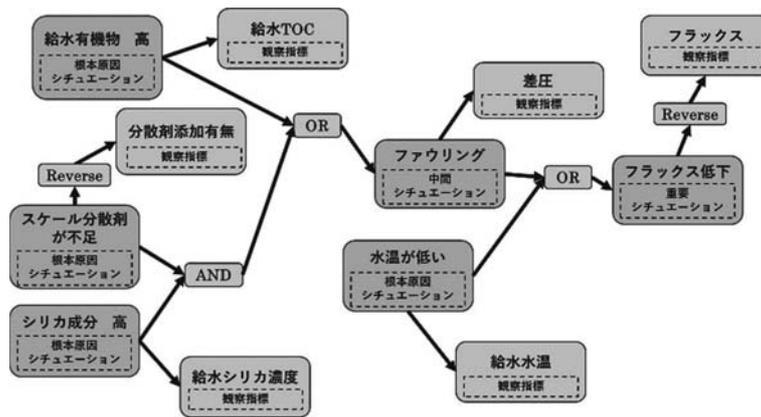
$p(a_i|b_i)$ は状態 b_i である事を知った時に状態 a_i である条件付き確率、 $p(a_i, b_i)$ は状態 a_i と状態 b_i が同時に起こる確率を意味する。

本稿では事後確率計算結果から発生確率が高いとされた重要シチュエーションの事後確率分布を上記の式の A に、未観察な指標群の事後確率分布を B に代入することで MI を算出し、重要シチュエーションの発生原因特定の観点から有用な追加確認すべき指標群を MI の降順に優先順位付けした。

3. 水処理設備の状況診断結果

3.1 オンライン計測値による状況診断

Fig. 2 に上記の方法で作成した因果関係モデルのグラフ表現を示す。単純化した RO 膜のトラブルに関する因果関係モデルとなっている。観察情報を与えた後のモデル内の事後確率分布を Table 2 に示す。表中の Mean は先述した状態変数にマッピングした値と確率に基づき期待値を計算したものであり、Dev は標準偏差、つまり状態の曖昧さを意味する。同表より



(LL,L,D,H,HH states are mapped to 0.0-2.0 value range and Mean and Dev are calculated as expectation and deviation)

Fig. 2 Causal Model Overview for the simplified RO membrane process trouble

Table 2 Posterior probability distribution of the causal model

シチュエーション名	シチュエーション種別	Mean	Dev
フラックス低下	重要シチュエーション	1.513	0.105
ファウリング	中間シチュエーション	1.360	0.076
給水有機物 高	根本原因シチュエーション	1.199	0.128
シリカ成分 高	根本原因シチュエーション	1.032	0.156
水温が低い	根本原因シチュエーション	0.933	0.133
スケール分散剤不足	根本原因シチュエーション	0.922	0.110

“フラックス低下”の発生確率が高く設備運転に重要な影響を与える状況が発生していることが分かる。また、中間シチュエーションである“ファウリング”も発生確率が高いと診断されている。ファウリングを引き起こす原因として①“給水有機物高”②“シリカ成分高”③“スケール分散剤が不足”が挙げられるが、①と②の直接的な観察指標は未観察であり“フラックス低下”および“ファウリング”を引き起こした根本的な原因を明確に判別するには、“給水 TOC”や“給水シリカ濃度”の観察情報が必要である。

3.2 未観察指標の優先順位付け自動化

本事例では“フラックス低下”の発生とシリカ分散剤が設計想定通りに注入されていることがわかった場合、根本原因特定のために“給水 TOC”、“給水シリカ濃度”の未観察指標の内、どの指標を観察すべきかを判定する。このために、重要シチュエーション“フラックス低下”と“給水 TOC”または“給水シリカ濃度”の関係性を MI で評価する。重要シチュエーションである“フラックス低下”と未観察な指標群との MI 計算結果を MI 値でソートングして Table 3 に示す。“給水 TOC”の MI 値を“給水シリカ濃度”と比較すると 2 オーダー大きいことから、“フラックス低下”との関係性が高く、“給水 TOC”を計測することが根本原因特定により有効であることを示している。実務における現場判断では、シリカ分散剤が入っておりシリカによる閉塞が起りにくい状況下で、フラックスが低下しているという現場状況を確認した

Table 3 Prioritized additional information for “Flux Decrease”

	指標名	MI 値
優先順位 1 位	給水 TOC	6.55e ⁻³
優先順位 2 位	給水シリカ濃度	4.61e ⁻⁵

場合、まず現場技術者は“給水有機物高”を疑い、“給水 TOC”を分析することで想定した因果関係の真偽を判定する。つまり、本システムが行ったような優先順位付けは、現場技術者の状況判断を IT 化したことになる。

4. ま と め

水処理設備においても事象の発生確率を指標情報から算出することができた。

現場技術者の理解に基づく因果関係モデルを作成し計測情報を与えることで、IT システムによる現場状況の自動診断が可能となった。

特定の事象と未観察情報との間にある関係メトリクスである MI を用いて、追加情報取得の優先順位付けが可能となった。これにより、重要なトラブル事象の原因を特定するために有効な追加取得すべき指標の選択に利用できることを示した。

今回、比較的簡素な設備規模のモデルでの検証を行った。しかし、実務適用には設備同士の有機的な関係性を表現した拠点規模での状況診断を行う必要があり、モデルサイズが巨大になることが想定される。モデルサイズに比例して MI 計算量は増加することが想像されるので、計算負荷低減策を具体的に検討する必要がある。

参 考 文 献

1) 特開 2017-62729 (P2017-62729A)
 2) 特開 2022-115643 (P2022-115643A)
 3) Chang, Y & Heejin, L & Tsai-C, L (2011) Most Relevant Ex-

-
- planation in Bayesian Networks
- 4) Halpern, J. Y., & Pearl, J. (2005), Causes and Explanations: A Structural-Model Approach, Part II: Explanations, The British Journal for the Philosophy of Science, 56(4), 889-911.
- 5) DaphneK & Nir, F PROBABILISTIC GRAPHICAL MODELS pp. 288-343