

し尿処理施設における膜分離技術の安全性評価

～「膜のつまり」診断エキスパートシステムの開発～

国立公衆衛生院 真柄泰基、田中 勝、古市 徹

京都大学工学部 ○藤原健史

1. はじめに

高負荷脱窒素処理方式は、プロセス用水以外の希釈水を使わず、高濃度のまま生物処理で有機分を分解し、同時に窒素除去を行う処理方式である。この処理方式では、硝化・脱窒素処理プロセスの活性汚泥濃度を高く維持しておく必要がある等の理由から、固液分離プロセスに限外濾過膜（UF膜）が利用され始めた。本報告では、その膜分離装置の安全性を評価するために「膜のつまり」の問題をとりあげた。まず、「膜のつまり」について膜分離装置の各メーカーに対してアンケート調査を行った。そして、収集した知識からデータベースを構築し、つまり発生構造の明確化、つまり度合の定量化を図るエキスパートシステムを開発した。

2. 膜分離装置の特徴と安全性についての調査

UF膜は、分画分子量より大きい懸濁物質、し尿の未分解物、生物の代謝に基づくコロイド性物質、そして水溶性の高分子量物質などを通さないため、常に安定した処理水質が得られる。同時に、系内の活性汚泥が濃縮されるため、生物反応槽の運転MLSS濃度を高く設定できる。また、UF膜は大腸菌などの微生物を通さないことから、公衆衛生の観点からも高く評価される。しかし、これらの特徴は膜が正常に機能しているときのものである。膜の機能がどのような時に損なわれ、どのような事故に結び付いてゆくのかを評価しておくことは、膜分離装置を安全に利用する上で重要である。そこで、筆者らは膜分離装置の安全性を評価するため、「膜のつまり」の調査を行った。ここでの「膜のつまり」とは、長時間膜分離装置を運転するとき、膜内部あるいは表面に有機物や無機物が付着することにより、膜の透過フラックスが低下することを意味する。調査は、膜分離装置の開発を行っているメーカー9社に対するアンケート形式で行った。「膜のつまり」（頂上事象）に関連する事象を全て列挙し（表1）、これらの事象と頂上事象の関係について、考えるところを記述していただいた。

3. オブジェクト指向の知識ベースの作成

アンケートの回答をオブジェクト指向プログラミングの考え方を利用して、データベース化した。オブジェクト指向型プログラミングは、従来の手続き型のプログラムと異なり、データとプログラムを宣言的に記述することが特徴である。データとそのデータを処理するプログラム群（メソッド）から構成される「オブジェクト」が、プログラムの基本単位となっている。メソッドは、オブジェクトがメッセージを受け取ったときに実行される。¹⁾

アンケートの回答を調べると、各事象の持つ値（以後、事象値とよぶ）は、次の3つのタイプで表現される。すなわち、①事象値そのもの（例えば、水温など）、②事象値を決める計算式（定義式や実験式、例えば、BOD-SS負荷率など）、③事象に関するルール（経験に基づいたif-then型のルール）、である。そこで、これらの3つの表現をオブジェクト中のデータのタイプとした。事象値は上述した①②③のいずれかの表現を評価した値となるが、評価された事象値の確信度は一般的に①②③の順で低くなる。知識ベースは確信度を上げるために更新してゆ

表1 「膜のつまり」に関連すると考えられる事象

<し尿性状> し尿の性状 <前処理> スクリーン 凝集剤 し液発生量 <反応槽> プロセス用水量 投入方法 反応槽容量 MLSS濃度 MLSS負荷 T-N負荷 循環液量 返送汚泥量 アルカリ度 pH 水温 空気量 メタノール アルカリ剤 消泡剤 余剰汚泥発生量 汚泥配合 生物相 <ストレナ> ストレナ	<膜分離> 膜素材 膜分画分子量 操作圧 操作速度 モジュール形状 モジュール長さ モジュール配列 休止・再開の方法（短時間） 休止・再開の方法（長時間） 水温 粘性 固形物濃度 固形物分布 コロイド分布 コロイド荷電 組織性物質 ケキ潤特性 膜洗浄方法 洗浄時間 洗浄間隔 膜閉塞物質 無機物 有機物 蛋白 <汚泥処理> 汚泥調整方法 汚泥脱水方法
--	--

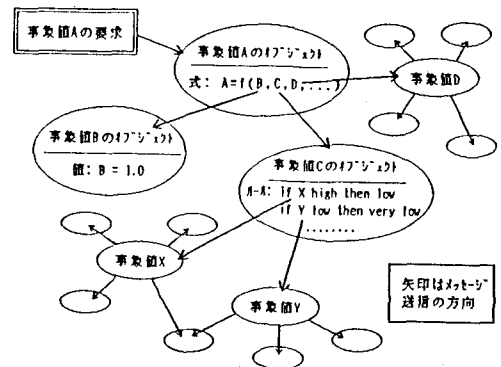


図1 知識ベースにおけるオブジェクト結合関係の概念図

くから、事象の持つ表現のタイプを気にしてプログラミングすることは望ましくない。そこで、オブジェクトがメッセージを受け取ると①②③の優先順位で評価し、結果を事象値として返すようにメソッドをプログラムした。本システムでは、後述するFT(Fault Tree)を自動的に生成するメソッド、ファジィ推論を行うメソッドを定義している。

事象の表現中には、他の事象値が参照されていることがある。そのとき、オブジェクトは他の事象のオブジェクトに値を返すメッセージを自動的に送り、必要な事象値を得ることができるようにしている。このメッセージのやり取りの様子を、図1に示す。

4. FTAによる「膜のつまり」の発生構造解析

FTA(Fault Tree Analysis)は信頼性解析の代表的な手法である²⁾。まず頂上事象として最終結果を頂上に置き、その発生の直接的原因や条件となる事象を下に書き並べる。そして、ANDゲートやORゲートを用いて、それらの事象と頂上事象を結び付ける。次に、原因や条件となった個々の事象についても、同様の操作により、さらにその原因・条件となる事象とを結び付ける。このように、段階的に事象発生の原因を掘り下げてゆくことによって、最終的にそれ以上掘り下げることができない末端事象に到達し、FTの枝が終了する。このFTAを利用すると、問題となる事象がどのような条件のとき、どのような経過を経て発生するのかを広い視野で眺めることができる。

「膜のつまり」の発生構造を解析する目的から、自動的にFTを描く機能を知識ベースに組み込んだ。FT作成機能は、事象のオブジェクト中に書き込まれた表現(値、式、ルール)を調べ、まず、表現中に表れた個々の他事象にメッセージを送ってそれぞれのFTを作成させ、次に、それらのFTを表現の内容に従ってANDやORで結合する。収集した知識の中には、各社の処理システムに固有な知識があることから、自動作成されたFTを学識経験者に評価してもらい、知識ベースの修正を繰り返すことにより、エンジニアや研究者の同システムに対する広く一般的、基本的な概念を抽出することに努めた。その結果、し尿処理施設全般に関するオブジェクトは、全部で50にまとめられた。「膜のつまり」を頂上事象として描いたFTの一部を図2に示す。得られたFTを踏まえ、アンケートの結果を簡単にまとめると、「膜のつまり」は膜内部の汚染、膜表面に形成されるケーキ層、膜の閉塞の3つに分類でき、それらは大型固形物(砂、種子、金属片など)、細粗繊維、微生物代謝によるコロイド状物質、気泡または消泡剤、スケール成分などが関与している。また、膜の洗浄や装置停止時の適切な処置(水置換や薬品置換)によってつまりの度合いが変わる。水洗浄により透過フラックスはある程度回復し、次亜塩素酸等の洗浄液を行うことによって透過フラックスは初期フラックス近くまで回復する。現在まで(約2年)の運転実績において膜交換の必要は無かったが、つ

<< 図の読み方 >>

(1)結合の種類について

--- は、OR結合を表す。 --- は、AND結合を表す。

(2)断接点の解釈について

例、
「膜内の汚染度」 --- 事象
「(規則01) 汚、高い」 --- 規則01の内容
以下の条件が満たされる時、
事象「膜内の汚染度」の値は「高い」。
---「[高い]」「膜実材によるつまり度」
---その条件とは、「膜実材によるつまり度」が高い。

111111: 事象木構造例 111111

```
「膜内の汚染度」1
--「[RO1]: 高い」
--「[高い]」「膜実材によるつまり度」2
--「[RO1]: 高い」
--「[小さい]」「膜の分離分子質量」3 <入力>
--「[RO2]: 低い」
--「[多量]」「膜の分離分子質量」 事象(3)に同じ
--「[RO3]: 高い」
--「[大きい]」「膜の分離分子質量」 事象(3)に同じ
--「[RO4]: 高い」
--「[低い]」「膜の排水度」4 <入力>
--「[RO5]: 高い」
--「[高い]」「膜のよれやすさ」5 <入力>
--「[RO2]: 高い」
--「[高い]」「膜の耐圧性によるつまり度」6
--「[RO1]: 高い」
--「[大きい]」「膜の排水の性状変化度」7 <入力>
--「[RO2]: 高い」
--「[多い]」「膜の排水中のCODクロロイド成分量」8 <入力>
--「[RO3]: 高い」
--「[多い]」「膜の排水中のスケール量」9 <入力>
--「[RO4]: 高い」
--「[多い]」「膜の排水中の難溶性有機物量」10 <入力>
--「[RO5]: 高い」
--「[多い]」「膜の排水中の消泡剤量」11 <入力>
--「[RO6]: 高い」
--「[多い]」「膜の排水中の微小泡量」12 <入力>
--「[RO7]: 高い」
--「[多い]」「膜の排水中の油の混入量」13 <入力>
--「[RO3]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水処理条件によるつまり度」14
--「[RO1]: 高い」
--「[長い]」「膜の排水処理時間」15 <入力>
--「[RO2]: 高い」
--「[大きい]」「膜の排水処理FLUX量」16 <入力>
--「[RO3]: 高い」
--「[長い]」「膜の排水処理の排水速度」17 <入力>
--「[RO4]: 高い」
--「[大きい]」「膜の排水処理の排水圧力」18 <入力>
--「[RO4]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水処理による汚染度」19
--「[RO1]: 高い」
--「[低い]」「膜の排水処理率」20
--「[RO1]: 低い」
--「[高い]」「膜の排水度」21
--「[RO1]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水度」22 関数A/(A+B)
--「[関数 A]」「膜の排水度」23 <入力>
--「[関数 B]」「膜の排水度」24 <入力>
--「[RO2]: 高い」
--「[あり]」「膜の曲がりやすさ」25 <入力>
--「[RO3]: 高い」
--「[高い]」「膜の出し入れ頻度」26 <入力>
--「[RO4]: 高い」
--「[低い]」「膜の初期性能」27 <入力>
--「[RO2]: 低い」
--「[長い]」「膜の排水処理時間」28 <入力>
--「[RO3]: 低い」
--「[長い]」「膜の排水処理時間」29 <入力>
--「[RO4]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水レベル」30
--「[RO1]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水レベル」31 <入力>
--「[RO2]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水レベル」32 <入力>
--「[RO3]: 低い」
--「[高い]」「膜の排水レベル」33 <入力>
--「[RO2]: 低い」
--「[低い]」「膜の排水処理時の排水速度」34
--「[RO1]: 低い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」35 <入力>
--「[RO2]: 低い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」36 <入力>
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」37 <入力>
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」 事象(36)に同じ
--「[RO3]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」38 <入力>
--「[RO2]: 低い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」39
--「[RO1]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」40 <入力>
--「[RO2]: 低い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」41 <入力>
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」 事象(40)に同じ
--「[RO3]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」 事象(38)に同じ
--「[RO4]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」42 <入力>
--「[RO5]: 高い」
--「[高い]」「膜の排水処理時の排水速度」43 <入力>
```

図2 「膜内の汚染度」を頂上事象としたFTAの結果

5. ファジィ推論による「膜のつまり」度合の定量化

メンバーシップ関数は、対象とするプラントの構造や処理方式に依存するため、特定の実施設に限定して改めてヒアリングを行い、図2のF Tにある「高い」「低い」等の感覚的表現のメンバーシップ関数を作成した。そして、ファジィ推論機能を知識ベースに組み込んだ。

6. おわりに

参考文献

- 1) 石塚圭樹、「オブジェクト指向プログラミング」、アスキー出版、1988
- 2) 塩見 弘、島岡 淳、石山敬幸、「FMEA, FTAの活用」、日科技連、1988
- 3) 本田中二、大里有生、「ファジィ工学入門」、海文堂、1989

a32

「標準入浴の平均洗浄圧力」はどれに相当しますか？
○の納目：2.0(min) (---) 3.0(max)
入力項目：数値、特価関数(約 範囲以上以下)、オプション(左 右 幅 倍率 関数型)
入力項目：形容詞句(非常に良い 良い ふつう 短い 非常に短い わからない)
? (約 2.6)

「標準入浴の平均洗浄圧力」のメンバーシップ関数
● リターンキーを押して下さい ●

「標準電量運転条件によるつまり度」のメンバーシップ関数
● リターンキーを押して下さい ●

「標準洗濯の定期水洗浄時間」について...
定義：前回水洗浄してから現在までの時間。
単位：hour

「標準洗濯の定期水洗浄時間」はどれに相当しますか？
○の納目：1.0(min) (---) 15.0(max)
入力項目：数値、特価関数(約 範囲以上以下)、オプション(左 右 幅 倍率 関数型)
入力項目：形容詞句(非常に良い 良い ふつう 短い 非常に短い わからない)
? (約 10.0)

「標準洗濯の定期水洗浄時間」のメンバーシップ関数
● リターンキーを押して下さい ●

「標準洗濯の次要標準水洗浄時間」について...
定義：前回次要標準洗浄してから現在までの時間。
単位：month

「標準洗濯の次要標準水洗浄時間」はどれに相当しますか？
○の納目：0.0(min) (---) 6.0(max)
入力項目：数値、特価関数(約 範囲以上以下)、オプション(左 右 幅 倍率 関数型)
入力項目：形容詞句(非常に良い 良い ふつう 短い 非常に短い わからない)
? (約 4.5)

「標準洗濯の次要標準水洗浄時間」のメンバーシップ関数
● リターンキーを押して下さい ●

「標準洗濯の次要標準水洗浄時間」について...
定義：前回の次要標準洗浄でけた時間。
単位：hour

「標準洗濯の次要標準水洗浄時間」はどれに相当しますか？
○の納目：2.0(min) (---) 20.0(max)
入力項目：数値、特価関数(約 範囲以上以下)、オプション(左 右 幅 倍率 関数型)
入力項目：形容詞句(非常に良い 良い ふつう 短い 非常に短い わからない)
? (約 15)

「標準洗濯の次要標準水洗浄時間」のメンバーシップ関数
● リターンキーを押して下さい ●

「標準洗浄室」による「汚染度」のメンバーシップ関数
● リターンキーを押して下さい ●

「洗室内の汚染度」のメンバーシップ関数
● リターンキーを押して下さい ●

【おしえて】 平アルミ加工品と樹脂製品を区別する方法

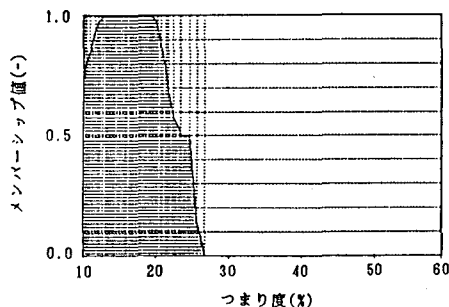


図3 ファジィ推論による「膜内の汚染度」の計算例