

<ノート>

下水膜処理へのシミュレーション適用

大石 亮¹, 豊岡和宏¹

㈱明電舎 (〒141-8565 品川区大崎 2-1-14 E-mail: ooishi-a@mb.meidensha.co.jp)¹

概要

下水の MBR(Membrane BioReactor) 処理の運転管理手法の確立を目指して CFD(Computational Fluid Dynamics)シミュレーションによる流れの解析と、ASM(IWA Activated Sludge Model)シミュレーションによる解析を実施した。

CFD シミュレーションにより MBR プラントの反応槽内の流れの場を解析することで、槽内の不均質な流速やそれに伴う水質の分布を予測できた。ASM シミュレーションでは、汚泥濃度の変更時の活性汚泥中の微生物の量と処理水質の変動の予測と、また安定な処理が維持できる運転操作条件の把握ができた。

キーワード: MBR, CFD, ASM, シミュレーション

1. はじめに

1.1 背景と目的

国内の下水道では、窒素やりんを除去するための高度処理に対応した設備の新設や改造が増えつつある。その傾向から、個々の処理場の状況に応じた効率的な維持管理や施設の有効活用に繋がる運転への要求も高まっており、合理的できめ細かい運転管理方法を決定するための支援ツールが求められている。

一方、膜処理技術の下水道への利用も進みつつあり、国内初の下水用 MBR(Membrane BioReactor)施設が 2005 年には稼働を開始している。膜分離活性汚泥法は汚泥の固液分離に重力沈降を利用する従来の最終沈殿池に替えて、10 μ m 程度以下の孔径を持つ膜を透過させるものである。MBR でも、溶解性基質の除去を行うのは従来の活性汚泥法と同じく活性汚泥であるが、固液分離の容易さから MLSS (浮遊固形物濃度)濃度を 10,000mg/L 程度で維持する運転が可能のため、反応槽の省スペース化も図れる。また膜により処理水への固形物流出がほぼ遮断されるので、処理水質の向上や汚泥管理のしやすさなどの利点もある。

我々は下水処理場に硝化槽・脱窒槽を備えた膜分離活性汚泥処理プラントを設置し、実地検証を行っている。処理水質も良好で、排水基準を大きく下回る結果を得ており、現在もシステムの管理法やメンテナンス法の確立、ランニングコストの削減等に取り組んでいる。

MBR プラントの運転では、ファウリング(膜の目詰まりによる流速低下)による効率低下を避けるための洗浄方法や周期の検討が必要となるが、その一方で、従来手法より高い MLSS 濃度での運転管理の操作量を適正化することも維持管理において必要になる。MBR に関してはファウリングの挙動やモデル化等の報告事例が近年増えているが、本報では、

ファウリングなど膜処理固有の問題以外の、従来の活性汚泥法と同様な運転操作条件である曝気調整や流量調整などの適切な調整を目的とした評価をシミュレーションにて行った。今回はそのための支援ツールとして CFD(Computational Fluid Dynamics)シミュレーションと ASM(IWA Activated Sludge Model、活性汚泥モデル)シミュレーションの活用を試みた。CFD による検討では、プラントの槽の形状固有の混合特性の把握を目的としたシミュレーションを行った。ASM シミュレーションでは、プラントの安定運転条件探索の支援として、汚泥中の生物濃度を安定させる条件や、硝化液循環量や DO 設定値などの適切な運転操作量の程度を検討した。本報ではこれらシミュレーションの活用について報告する。

1.2 シミュレーション技術

(1) CFD シミュレーション

CFD シミュレーションは、解析領域を小さなメッシュに分割し、流体の挙動や濃度などの物理量を解析する手法である。近年、自動車業界や石油・化学・原子力プラント、航空・宇宙産業などでは設計レベルで利用されている。水処理関連でも各種の適用例について報告されており、当社でもオキシデーション・ディッチ内三次元水質分布解析¹⁾などを行っている。

CFD ソルバー(解析エンジン)を動作させるためのコンピュータの計算能力は、メッシュの数、非定常現象の解析対象時間や適正な解を得るために用意された時間などにより異なる。中・大規模の解析の場合は、比較的高速なパソコンを複数用いた並列計算が有効である。

(2) ASM シミュレーション

排水処理分野におけるシミュレーションでは、活性汚泥に

3.3 結果

Fig.3 に反応槽内の流れの様子を示す流線図と中心部垂直断面における流速分布を示す。流線は反応槽下部4分の1の領域では比較的密度が高く大・小の渦も形成されており流速も 0.3 m/s 以上あるが、上部 4 分の 3 の領域では流入口を除いて密度が粗で流速もほぼ 0.1 m/s 以下であった。これは、攪拌機の近傍では流速が高く攪拌も良好であるが、上部では流れがほとんどないか非常に弱いことを表している。

Fig.4 に反応槽内の中心部垂直断面における PO₄-P 濃度分布を示す。反応槽の上部と底部で 1mgP/L の差がある結果となった。これは、硝化液が反応槽底部側面から流入する構造となっているため反応槽底部では硝酸によるりんの吐き出しに対する障害があることと、上部に至るまでには脱窒反応の進行により硝酸濃度が低下しりんの吐き出し速度が大きくなるためと考えられる。

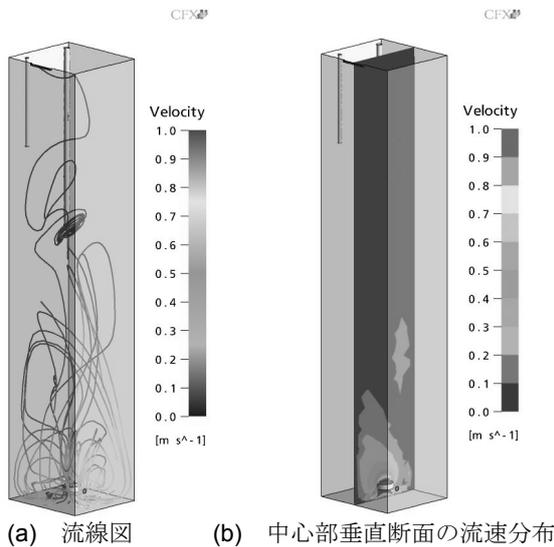
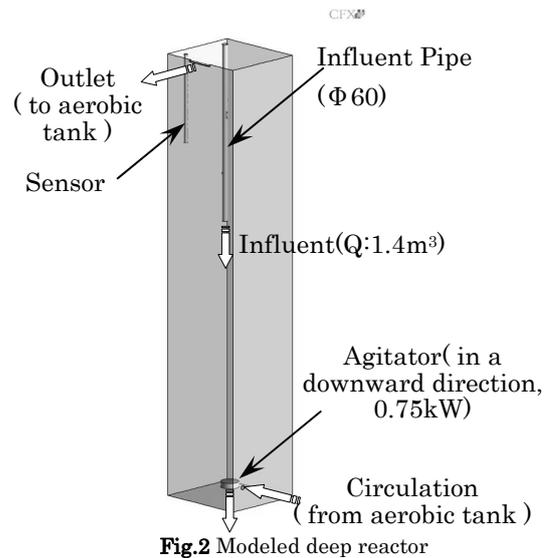


Fig.3 Velocity distribution in deep reactor

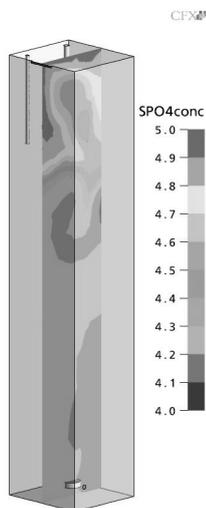


Fig.4 PO₄-P concentration distribution in deep reactor

4. ASM シミュレーション

4.1 シミュレーション検討の目的

MBR プラントの運転管理でも、活性汚泥による基質除去については従来の活性汚泥法と同様の手法で運転管理が求められるが、監視指標の数値が大きく異なるところがある。特に、滞留時間(HRT)が抑えられる代わりに、MLSS 濃度が通常で 10,000mg/L 前後と高い特徴がある。

また膜の維持管理周期によってはファウリング対策などで MLSS 濃度を上げ下げする運転が必要となる可能性もある。従来の活性汚泥法では MLSS 濃度の実用範囲はせいぜい 1,000~3,000mg/L で、また通常はなるべく濃度を保つように運転を行うが、MBR での MLSS 濃度の実用的な上下幅は、それと比べると大きくとられるものと考えられる。

この特性が運転管理上でどのような影響を持つかを予測する目的で、汚泥中の生物濃度の安定について、活性汚泥モデル ASM を使ったシミュレーション検討を行った。また、処理水質については窒素濃度とりん濃度に特に着目して、これら除去する高度処理運転の運転条件の探索をケーススタディとして行った。

4.2 シミュレーション対象と条件

汚泥の生物量変化の把握と曝気調整や流量調整などの評価検討のため、ASM シミュレーションを実施した。この解析では前述の CFD シミュレーションと異なり、流れの場は簡略化して、完全混合槽の反応槽列として扱った。

ASM では完全混合槽内の物質濃度、特に DO(溶存酸素)濃度が好気性生物と嫌気性生物の反応速度にともに大きな影響を及ぼす。そのため、前述の CFD シミュレーションの結果では、脱窒槽前半の硝化槽からの DO の持ち込みがある部分と、後半のすでに DO が消費され尽くした部分とでは異なる挙動を示していた。

したがって、脱窒槽を一樣な完全混合槽とみなすよりも、

濃度分布を持たせるように仮想的に分割する、すなわち完全混合槽の槽列として扱うことがここではより適当な近似であると判断できる。実機のトレーサー試験結果でも同様に押し出し流れる特性がみられたこともあり、脱窒槽を単一の完全混合槽として扱うより、少なくとも 2 槽以上の押し出し流れ構造として扱う方が適切といえる。本検討では、持ち込み DO が既に消費された脱窒槽後半をまず表現する目的で、脱窒槽を 2 等分してそれぞれ完全混合槽と見なす近似を行った。

計算には明電舎製 ASM シミュレーションソフトウェア SIMWATER®を使用した。活性汚泥モデルには窒素、りん除去工程を表現する ASM2d を採用した。そのパラメータは IWA 推奨値を用いた。ただし高濃度で馴養された汚泥にその値を適用することの是非は本検討では確認していない。

シミュレーション上でのプラント諸元と運転の基準値は次の Table.2 の通り。

Table.2 specifications of plant as simulation input

反応槽数	3 槽(2 槽とみなす嫌気槽+好気槽)
容積	嫌気槽 2.25m ³ ×2, 好気槽 4.5m ³
汚泥引き抜き量	X _{TSS} 濃度 10,000mg/L 程度で調整
反応槽水温	25°C
循環水量	3.2m ³ /h
散気流量	DO 一定制御に従う; DO 設定値 1.5mg/L を基準
流入水量	1.4m ³ /h

汚泥引き抜き周期は実態に即し 1 日 4 回の 6 時間おきとした。流入水質は 2 時間おき 24 時間分の実測値を基に ASM 物質指標に日内の変動を与えた。COD のうち非溶解性成分の一部など測定できない成分については、COD 濃度中の他成分を差し引いた量から比率を推定した。流入水量については、実際には反応槽内の水位を保つ制御により 1 分程度の周期で間欠的に流入するのだが、シミュレーションでは単純化のため、常に一定水量が流入するものとみなした。

4.3 検討内容と結果

(1) 汚泥濃度の検討

汚泥濃度を変化させる運転をした場合に、どの程度の日数で汚泥の生物処理能が安定するかを調べるために、生物量の変化をシミュレーションで推定した。ここでは ASM2d の汚泥濃度指標 X_{TSS} を MLSS 濃度の指標として扱った。ASM2d で扱われる生物濃度指標は従属栄養生物 X_H、硝化細菌 X_{AUT}、りん蓄積生物 X_{PAO} の 3 つである。

X_{TSS} が 8,000mg/L で安定して運転中に汚泥引き抜きを停止し、増殖して 10,000mg/L になったところで適正量の引き抜きを開始する運転を行い、その際どの程度の経過時間

で汚泥の生物量と水質が安定するかを調べた。

汚泥の引き抜きを停止して、汚泥濃度が 5 日で目標値に到達したので、汚泥引き抜きを再開した。操作条件は、別途確認した汚泥引き抜き量と X_{TSS} の関係から、0.168m³/日を引き抜き、SRT22.6 日相当とした。

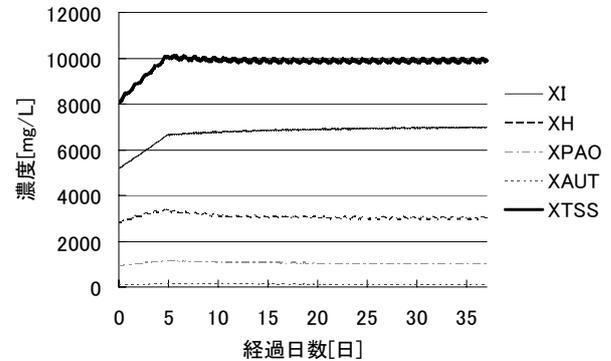


Fig.5 Fluctuations of particle components of activated sludge

その結果を Fig.5 のグラフに示す。運転切り替え直後は X_H, X_{AUT}, X_{PAO} の 3 つの生物量すべてが若干低下し、その一方で不活性有機物 X_I が蓄積したところで安定に向けて収束した傾向となった。

また、汚泥の生物相、ここでは生物量の各濃度が安定するまでには数日かかった。切り替え直後の X_{TSS} は安定に至った濃度の 1%未満増に過ぎないが、X_H, X_{AUT}, X_{PAO} の 3 つの生物量は 10%高かった。それから 5%高まで下がるまでに X_H は 3 日、X_{AUT}, X_{PAO} は 6 日かかった。

末端の好気槽の水質の変化のうち、アンモニア性窒素 NH₄-N、りん酸態りん PO₄-P の変化を Fig.6 に示した。NH₄-N の変化は硝化細菌 X_{AUT} の増減傾向を反転させたものになっており、生物量による硝化能の上下動が表れている。PO₄-P についてはこれとは異なり、りん除去サイクルの影響から PO₄-P 濃度が上昇したところで安定するまでには、汚泥濃度が目標に達してからさらに 10 日程度を要している様子がみられた。このことから、汚泥濃度を変更してから数日程度は生物相が変化し、運転時には 10 日程度の馴養期間を見込む必要があることが示唆された。

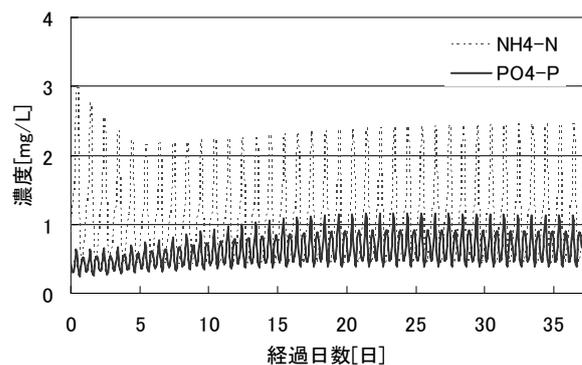


Fig.6 Fluctuations of S_{PO4}

(2) 循環水量の検討

嫌気好気法では、循環水量は特に窒素除去に影響を与える。本検討対象プラントの適正な循環水量を探索する目的で、循環水量を 0.8, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4m³/h のそれぞれ定量として、5 通りのシミュレーションを実施し、NH₄-N、硝酸性窒素 NO_x-N、PO₄-P を比較した。

シミュレーション結果の平均好気槽水質を Fig.7 にグラフ化した。対象は好気槽の溶解性成分だが、これらは放流水質すなわち膜処理後の水質と同等とみなした。

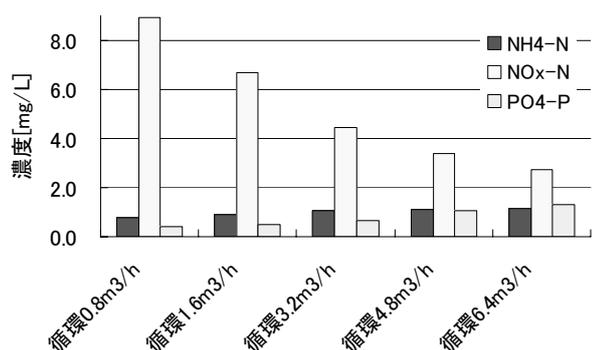


Fig.7 NH₄-N, NO_x-N, PO₄-P with varied internal recycle

シミュレーションでみられた傾向として、循環水量を上げるに従い、好気槽の NO_x-N が減少した。なお他の槽の濃度については、すべての事例で共通して NO_x-N が嫌気 1 槽で微少値、嫌気 2 槽では 0 になっていたの、いずれの場合も脱窒が十分に進行しているといえる。好気槽での PO₄-P 濃度は循環水量が低い方が抑えられており、りん除去率が高い。なお、嫌気槽でのりん放出量は、循環水量が高い条件下のほうが抑えられる傾向にあったのだが、これは循環水による基質の希釈の効果が考えられる。

(3) DO 制御指示値の検討

循環式硝化脱窒法では、DO 一定制御の指示値が高いと有機物除去や硝化に有利な反面、循環経路での DO 持ち込みなどから脱窒やりん除去に悪影響も与える。本検討の対象プラントでの適当な DO 指示値を探索する目的で、DO 一定制御の DO 指示値を振ったシミュレーションを行った。DO 基準値として、0.5, 1.0, 1.5, 2.0mg/L の 4 通りを実施した。シミュレーション結果の平均好気槽水質を Fig.8 にグラフ化した。

シミュレーションの結果、次の傾向がみられた。DO 設定値が高いほど、NH₄-N 濃度が低く、NO_x-N 濃度が高い。DO が 1 を切ると硝化が低下し、NH₄-N の残存量が大きくなる。一方、DO 設定値が高いほど、脱りん性能が低く PO₄-P 濃度が低い。これはりん蓄積細菌 X_{PAO} の存在量が少なくな

るためである。

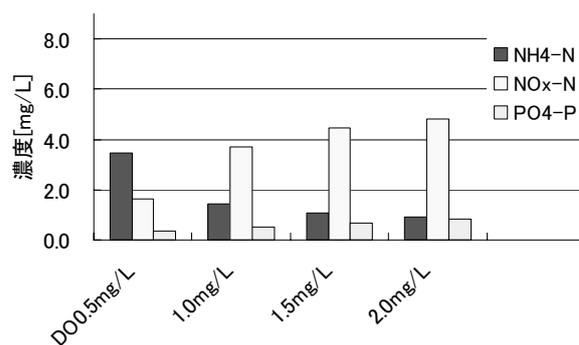


Fig.8 NH₄-N, NO_x-N, PO₄-P with varied DO set values

5. シミュレーションの利用について

5.1 まとめ

CFD シミュレーションにより MBR プラントの反応槽内の流れの場を解析することで、流速の分布やそれに伴う水質の分布を予測できた。特に、上下に長い形状の反応槽であることから、底部付近の攪拌機の近傍では流速が高く攪拌も良好であるが、上部では流れが非常に弱いことが推定できた。またこの影響から水質についても反応槽内上下方向で分布があることが推定された。

ASM シミュレーションでは、活性汚泥中の微生物の量と活性を推定しつつ、運転状態の変更が処理水質にどのような影響を与えるかを予測できた。汚泥濃度調整時、生物量の安定とそれに続く水質の安定には 10 日程度かかることが示唆された。また窒素・りん除去が十分維持できる運転操作条件を探索できた。

5.2 MBR 運転の支援に向けて

下水の MBR 処理の運転手法の確立を目指して CFD シミュレーションによる流れの解析を行い、ASM シミュレーションによる解析を実施した。狭い敷地面積での活用が増えると思われる MBR プラントでは、反応槽の十分な混合状態を保つための流れの状態の均一性などの重要性が増すと考えられる。そのためのツールとして、今回適用した CFD シミュレーションは、反応槽内の局所的な流速の変化や、それによる活性汚泥処理の水質分布などを可視化することで、プラントの状態予測や把握に有効といえる。さらなる応用としては、膜モジュールの周辺流速解析による膜の汚れ対策や、活性汚泥の濃度分布解析による不均一性の解消などが考えられ、適切な運転管理を行う上で有効と考えられる。

また MBR では従来法より高い汚泥濃度で運用されるが、りん蓄積生物量の確保など、高濃度条件下での生物量・生物活性の維持や適切な運転指標の探索ツールとして、ASM シミュレーションによる水質予測が有効と考えられる。

MBR はまだ従来の活性汚泥法と比べ実用例が少ない方

式であるだけに、従来法と同様かそれ以上に、曝気調整や流量調整などの検討へのシミュレーション技術の利用は有効だと考える。

6. おわりに

膜分離活性汚泥処理法の運転管理手法の確立を目指し、プラント実験の支援ツールとして CFD シミュレーションと ASM シミュレーションを活用を試みた。

今後はこれらの手法を発展させ、プラントの設計段階や、実現場での運転管理の節目でシミュレーションツールを活用する方法論を確立したい。

[参考文献]

- 1)豊岡和宏, 古米弘明, 土屋玄, 谷口文武, 山田文隆, 佐藤茂雄, 川口容芳:「下水処理シミュレーションへの流体解析手法の適用」, 平成17年度電気学会産業応用部門大会講演論文集 CD-ROM, II (2005年), 77-82
- 2)IWA Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment (ed.): “Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3”, Scientific and Technical Report No 9, IWA Publishing. (2000) 味埜俊(監訳):「活性汚泥モデル ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3」, 環境新聞社(2005年)
- 3)大石亮, 後藤浩之, 豊岡和宏, 出口達也, 糸川浩紀, 村上孝雄:「実下水処理場を対象とした ASM2d のキャリブレーションと検証」, 環境システム計測制御学会誌, 第9巻第2号(2004年), 7-10

※ANSYS CFX は, ANSYS Inc.の登録商標である。

(受付 2007. 4.27)

(受理 2007. 7.24)

An Application of Simulations to Membrane Bioreactor Wastewater Treatment

Akira Ooishi, Kazuhiro Toyooka

Meidensha Corporation

Abstract

To establish the operating method of the membrane bioreactor (MBR) wastewater treatment plant, analysis of the flow with the computational fluid dynamics (CFD) simulation and the analysis of the activated sludge process with the IWA activated sludge model (ASM) simulation were conducted.

Uneven distribution caused by the uneven flux in the reactor was estimated by analyzing the shape of the reactor by CFD simulation.

As support to find the proper conditions to operate the plant, ASM simulation estimated the water quality change caused by the biomass concentration change. Appropriate control set point for DO and nitrified liquor circulation flow rate were also analyzed.

KeyWords:

MBR, CFD, ASM, simulation