

数値流体解析と活性汚泥モデルシミュレーションを用いた オキシデーション・ディッチ内溶存酸素濃度分布の基礎的な評価

Fundamental analysis of concentration of dissolved oxygen in OD with ASM based on CFD

○豊岡 和宏¹, 佐藤 茂雄¹, 土屋 玄², 谷口 文武³, 古米 弘明⁴

¹ (株)明電舎, ² (財)下水道新技術推進機構, ³ 日本理水設計(株), ⁴ 東京大学

○Kazuhiro TOYOOKA¹, Shigeo SATO¹, Gen TSUCHIYA², Fumitake TANIGUCHI³, Hiroaki FURUMAI⁴

¹ Meidensha Corporation, ² Japan institute of Wastewater Engineering Technology,

³ Nihon Risui Sekkei Corporation, ⁴ The University of Tokyo

Abstract

Oxidation Ditch (OD) process has been applied to small-sized wastewater treatment plants (WWTPs) in Japan. This process has an advantage of stable treatment performance under easy operation condition. In addition, it is possible to achieve nutrient removal by introducing anaerobic and aerobic zones, although it is not so easy to control dissolved oxygen conditions properly. The IWA Activated Sludge Models (ASMs) have been utilized to design and operate WWTP positively. When the models are applied to an OD process, hydraulic and mixing condition is empirically expressed by the tanks-in-series model. However, it can not consider the spatial distribution of back-flow, short-cut flow and dead-space in the process appropriately. Computational Fluid Dynamics (CFD) software has become a powerful tool to investigate spatial flow and mixing regimes in water treatment processes. We analyzed the effect of the introduced baffle on flow conditions in an OD process with an assistance of CFD calculation, and then we discussed spatial distributions of sludge and dissolved oxygen concentrations through several CFD simulations incorporating IWA ASM1.

Key Words : Activated Sludge Model, Computational Fluid Dynamics, DO, Oxidation Ditch

1 はじめに

活性汚泥モデル(以後ASMと記す)は活性汚泥中の微生物反応を数式化したもので、多くの研究がなされており今後下水処理施設の設計や運転管理等への活用が期待されている。またヨーロッパでは下水処理施設の標準的な設計ツールとして、主にコンサルタント業務において一般的に用いられている国もある。

一方、下水処理の一手法であるOD(オキシデーション・ディッチ)法は、設備が簡易でメンテナンスも比較的容易な上に、窒素・りん除去など高度処理にも対応が可能とされており、処理水量や人口が少ない比較的小規模な下水処理場に採用実績が多い。しかし高度処理を行う際は安定した硝化・脱窒反応やりんの放出・取り込みのため溶存酸素(以後と記す)濃度管理を行い、適切な無酸素・好気ゾーンを維持することが重要であり、運転管理が複雑化することも考えられる。そこで、ASMをODに適用することにより効率的で安定した水処理が行えるような施設設計や運転管理を行うことが期待される。ODは連続した単一の無終端水路であるため、水理モデルの構築の際には複数の完全混合槽の連結モデルを用いることが一般的だが、OD内流れのバック混合やショートカット、デッドスペース等を考慮するのが困難なことも予想される。

また、コンピュータ処理速度の向上によりパソコンレベルでも十分にCFD(Computational Fluid Dynamics = 数値流体力学)シミュレーションが可能となってきており、下水処理分野でも施設や装置の設計、解析などに利用され始めている⁽¹⁾。本報告ではASMとCFDを組み合わせてODの流れの場とDO濃度分布について基礎的なCFD(数値流体解析)解析を行い、整流板の影響について検討を行った結果を報告する。

2 解析条件

2.1. CFD解析条件

解析したODは水路幅4m、水深2.5m、中心の水路長約120mの馬蹄形水路で、ディッチ外側のコーナー部に縦軸型ローター2台、ディッチ内側のコーナー部に整流板を有す構造とした。ローターによる流れの場の解析は実施せず、ローター直後の直線水路断面に均一な流速とDOを与えるものとした(Fig. 1-1参照)。またODは循環水路であるの

で循環して定常に達した後の解析を行うべきであるが、今回は簡易化のため馬蹄形のディッチはローター設置位置を基準に内側と外側の2つのU字型ディッチに分け (Fig.1-2 参照), 外側ディッチの inlet から原水が断面均一の濃度で流速 0.3m/s で流入し, outlet の S_0 を除く水質平均値を内側ディッチ inlet の境界条件とした。OD 内の汚泥濃度初期値は約 3,000mgTSS/L となるようにディッチ内混合液の画分を設定した。この際, 固形物の X_{TSS} と COD_{Cr} 換算値の変換係数は IWA テクニカルレポート⁽²⁾ 掲載値を用いた。ノード及びエレメントの概数は外側がそれぞれ 6,300, 30,000 で内側が 6,700, 32,000 であった。メッシュ作成に当たって, 外側より内側の方が容積は小さいが整流板が存在することとコーナーの曲率半径が外側に比べて小さいことを考慮し, これらの部分はより小さいメッシュを作成した。流体は水と汚泥の混相流で汚泥の比重を 1.003 とし, 抗力計算は粒子径が十分小さいとして Schiller Naumann モデルを用いた⁽³⁾。DO は各 inlet で 1mg/L とした。ディッチの底と壁の境界条件は, 水は No Slip でその他は Free slip, 上部は正確には自由界面にするべき所ではあるが, ローター付近以外は水位変動せず水面における物質移動もないと仮定して Free Slip とした。乱流モデルは壁面の影響を考慮して当初は SST (Shear stress transport-せん断応力移送) モデルを用いたが, 壁面の影響が小さいことと計算負荷が大きいことから最終的に $k-\epsilon$ モデルを用いた。解析ソルバーは CFD ソフトの一つである CFX5.7 を用いた。

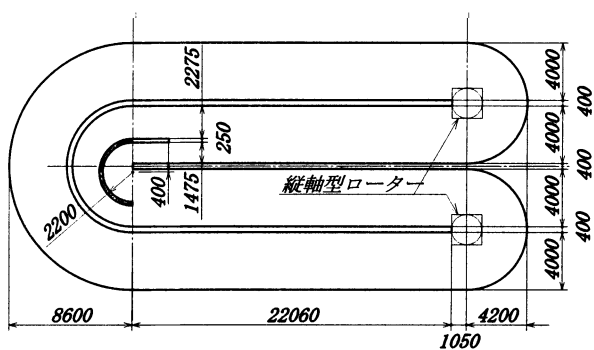


Fig.1-1 解析した OD

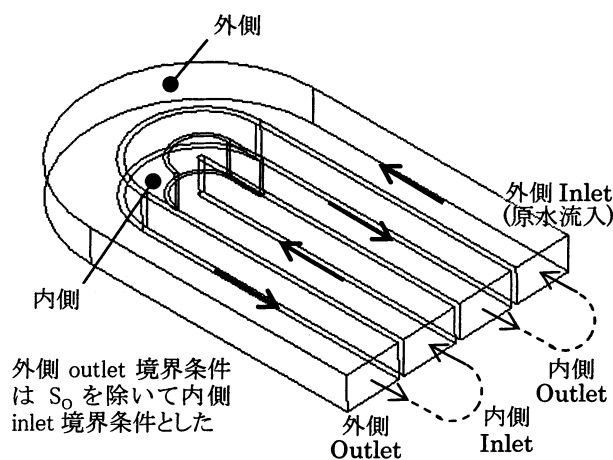


Fig.1-2 OD 簡易モデル

Tab.1 使用した ASM

Process	S_s 易分解性 有機物	X_s 遅分解性 有機物	X_{BH} 従属栄養 細菌	S_0 溶存酸素	process rate[mg/L/day]
Aerobic growth of heterotrophs	$-1/Y_H$		1	$-(1 - Y_H)/Y_H$	$\mu_H \cdot \{S_s/(K_s+S_s)\} \cdot \{S_0/(K_{O,H}+S_0)\} \cdot X_{BH}$
Decay of entrapped organics		$1-f_p$	-1		$b_H \cdot X_{BH}$
Hydrolysis of entrapped organics	1	-1			$k_H \cdot [(X_s/X_{BH})/(K_x+(X_s/X_{BH}))] \cdot \{S_0/(K_{O,H}+S_0)\} \cdot X_{BH}$

2.2. ASM

Tab.1 に使用した ASM を示す。簡易化のため窒素に係わる反応式及び分画項目を除いた簡易モデルとした。またアルカリ度は十分高い状態を想定して定式化した。Tab.2 に流入水及びディッチ内混合液の有機物の分画値を示す。流入量は HRT が設計指針中央値の 36h となるように $26.3[m^3/h]$ とし, ディッチ混合液断面流量 ($4W[m] \times 2.5D[m] \times 0.3[m/s] = 3[m^3/s] = 10,800[m^3/h]$) との流量比で混合して希釈されるとした。ASM の各パラメータは IWA テクニカルレポート掲載値を用いた。

Tab.2 流入水及びディッチ混合液画分

画分	流入水	ディッチ混合液
S_s	50	50
X_s	100	100
X_{BH}	40	1,500
X_p	0	0
X_l	20	20

単位は[mgCOD/L]

3 解析結果と考察

3.1 流速分布

Fig. 2 にそれぞれ外側と内側のディッチ及び整流板なし内側ディッチの中央水位での水平面における流速分布を示す。予想に反して外側は外部より内部の流速が明確に速く内側に関しても同様な傾向が見られた。また OD 内に水のみを流した場合の流速分布解析でも同様の結果が得られ、さらに現場のある OD において実際に測定された流速分布を確認したところ同様に内部の方が流速が速いとの結果であったことから、流速の計算結果については妥当であると考えた。また整流板無しの場合、ターン後は内壁付近の流速が外部と比べて小さくほとんどゼロの部分もあるという結果となった。これらの結果は、内側ディッチは外側ディッチに比べてコーナー半径が小さく小回りであることでよどみが形成されやすいことや、整流板の設置が流速を均一化することに貢献していることを示している。

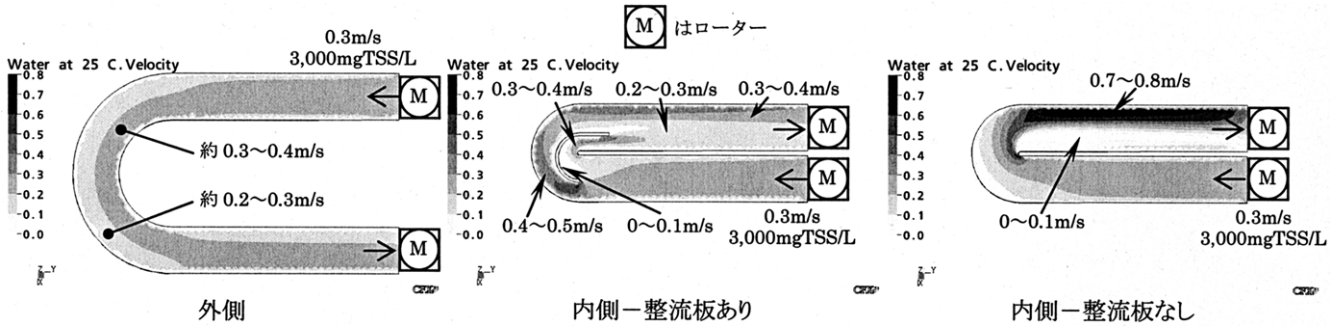


Fig.2 流速分布-水平面(深さ方向中間位置)

3.2 汚泥濃度分布

Fig. 3, 4 にそれぞれ外側と内側ディッチの中央水位での水平面及び水路方向垂直面における汚泥濃度分布を示す。垂直面は、外側は水路中央、内側は整流板ありが整流板と内・外壁中央を通り直線部では水路に平行な面、整流板無しは水路に平行で水路幅を三等分した位置とした (Fig. 5 参照)。外側はターン後 Outlet 付近で内部と外部の濃度差が大きいですがそれ以外は濃度差は小さく、内側は整流板ありの場合はほぼ均一であったのに対して、整流板無しの場合はターン直後内部で濃度が極端に低くなるという結果となった。また垂直面は、外側は水路長が長いいためかターン後に上部と底部の濃度差が大きく、内側は整流板ありの場合は小さいものの、整流板無しはターン後内部で濃度差が大きい。特に内側の場合、ターン直後整流板終端付近では汚泥の濃度差は約 1,200mg/L であるのに対して、整流板無しの場合濃度差は約 1,800mg/L と高い結果となった (Fig. 6 参照)。これらのことから、整流板が汚泥濃度の均一化に一定の貢献をしていることが推測される。

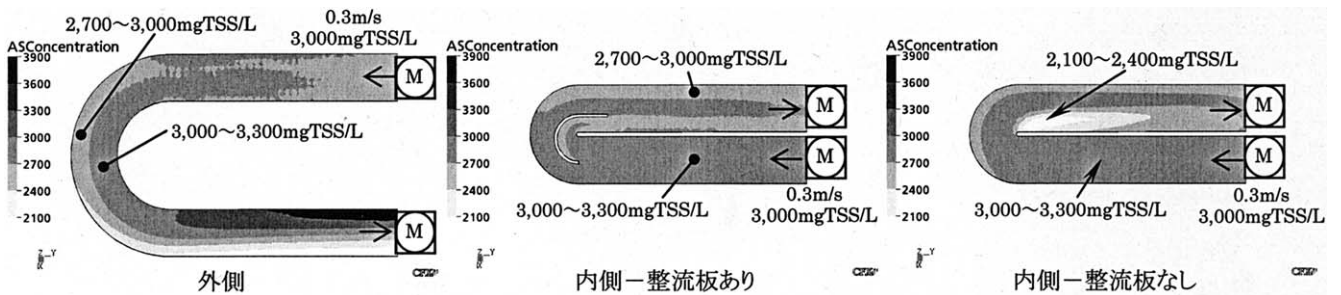


Fig.3 汚泥濃度分布-水平面(深さ方向中間位置)

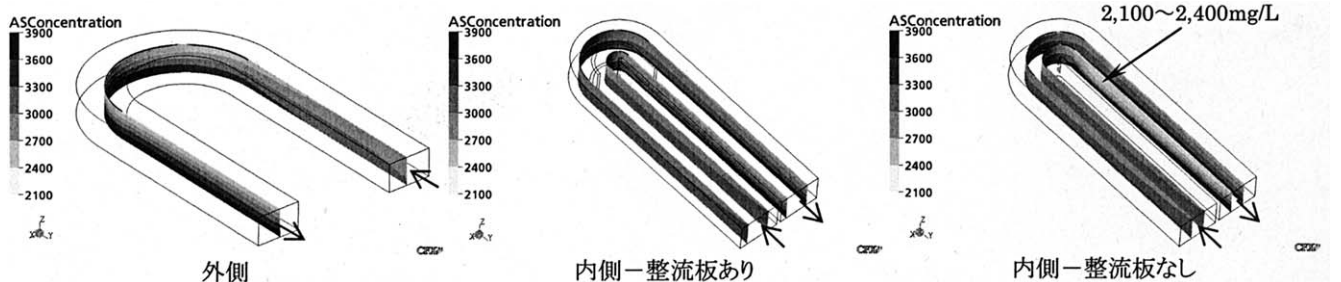


Fig.4 汚泥濃度分布-垂直面(断面位置は Fig.5 参照)

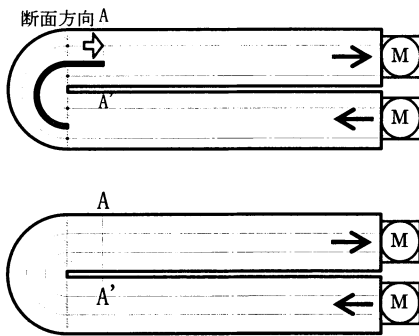


Fig.5 断面位置
(一点鎖線が Fig.4「内側」の断面)

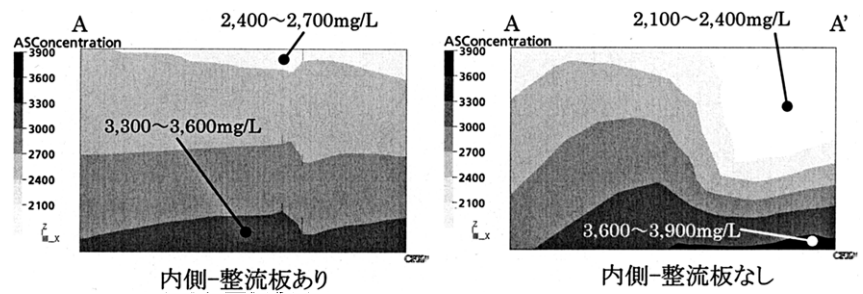


Fig.6 汚泥濃度分布 (A-A'断面, 流れは紙面表から裏)

3.3 DO 濃度分布

Fig. 7 に外側と内側ディッチの中央水位面における DO 濃度分布 (各 inlet で $DO_{inlet} = 1\text{mg/L}$) を示す。外側はコーナー出口付近内部で $0.6 \sim 0.8\text{mg/L}$ であるのに対して外部は $0.4 \sim 0.6\text{mg/L}$ と内部より低い結果となった。また内側に関しては整流板ありは全水路を通して水路断面においてほぼ一様であるのに対して、整流板無しはコーナー折り返し後の水路内部では $0 \sim 0.2\text{mg/L}$ と低 DO 濃度の領域が形成される結果となった。前述のように、整流板の設置により流速や汚泥濃度がディッチ内で均一化されることと関連して、DO 濃度分布の均一化も図れる可能性が示唆された。

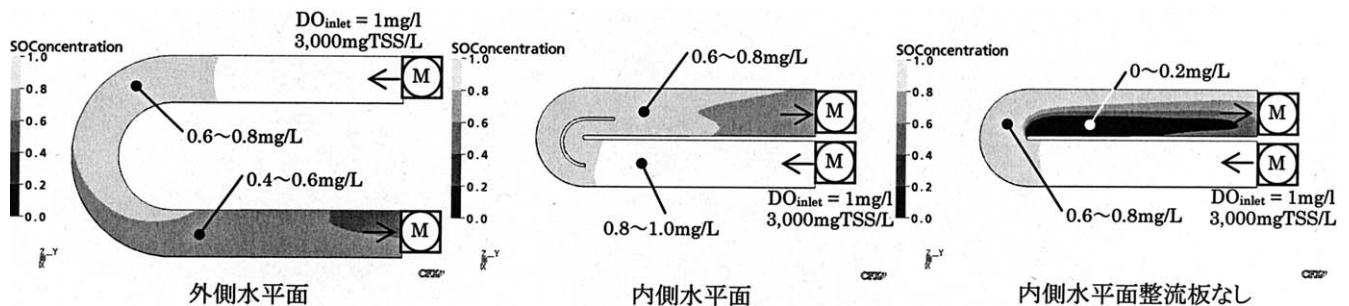


Fig.7 DO 濃度分布 (深さ方向中間位置)

4 まとめ

CFD 用いて OD 内の流速や汚泥濃度分布、そして整流板のそれらに及ぼす影響について検討を行った。さらに、ASM1 を基礎として窒素に係わる反応を除いた簡易な ASM を組み込むことで、汚泥濃度分布を考慮した DO 濃度の空間分布について基礎的な解析を行った。その結果、流速分布や汚泥濃度分布、DO 濃度分布への整流板設置の効果が確認できた。また CFD と ASM を組み合わせて、DO 濃度分布を解析できる可能性が示唆された。今回はディッチを循環水路としていないこと、汚泥の粒子径と密度を均一としていること、ASM パラメータや流入・汚泥分画値については文献値や想定値を用いていることなど、解析レベルに限界があるため、詳細な検討は今後の課題としたい。

【謝辞】本研究は、SW-CFD 研究会における活動の一環として実施されたものである。また解析作業の実施に当たっては、SW-CFD 研究会の方々にご協力を頂いた。文末ではあるが、各関係の方々に感謝の意を表する次第である。

【参考文献】

- (1) 功刀ら, 水中プロペラ式オキシレーションディッチの酸素移動に関する研究, 第 39 回下水道研究発表会講演集 (2002), p. 713-715
- (2) IWA Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment (ed.) (2000) Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3, Science and Technical Report No 9, IWA Publishing.
- (3) CFX manual, Solver models-Multiphase Modeling(2003), CFX