

## 〈特集〉

## CFD を用いた排水処理装置内の流れの検討

## Study of Flow Pattern in Wastewater Treatment Unit Processes using CFD Analysis

寺嶋光春\*, ゴエルラジブ, 安井英斉, 岩崎 守

栗田工業株式会社

Mitsuharu Terashima\*, Rajeev Goel, Hidenari Yasui and Mamoru Iwasaki  
Kurita Water Industries Ltd.

## Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD) was applied to analytically study the hydraulic properties of three of the important wastewater treatment processes of (1) activated sludge aeration tank, (2) secondary settling tank, and (3) anaerobic digestion tank. A two-phase hydrodynamic model was applied to aeration tank equipped with air diffusers arranged in various complex patterns. This model could provide estimation of the gas hold up in the tank, which was further used to calculate the volumetric oxygen transfer coefficient ( $K_La$ ) in aeration tank. A hydrodynamic model of settling tank including the physical phenomenon of density flow and solid settling was experimentally verified and was applied to study the effect of feed-well configuration on sludge blanket height. The simulation results suggest that the sludge blanket height depend significantly on the depth of feed-well. A hydrodynamic model with Non-Newtonian viscosity was used to study the mixing property of anaerobic digestion tank with a draft tube and a screw. The model based exit time distribution curve of tracer was found to be in good agreement to the experimental curve. Based on these studies, CFD is considered to be an effective method for hydraulic optimization of configuration and operation conditions of reactors in wastewater treatment processes.

**Key Words** : computational fluid dynamics (CFD), Hydrodynamics, aeration tanks, clarifiers, anabolic digestion

## 1. はじめに

近年、コンピュータ技術の進歩とともに、計算精度、操作性共に向上したCFD(Computational Fluid Dynamics)技術を使った手法が検討され、様々な分野で成果をあげている。水処理の分野においても、設計にCFDを適用した例がいくつか報告されている<sup>1)3)</sup>。

本方法によると、開発段階において、モデル化や物性値の測定、実測結果を使ったモデルキャリブレーションなど多くの開発要素が必要になるものの、モデル構築後は、対象とする溶液物性、槽形状および操作条件が多少変化した場合にも、比較的容易にその影響の把握や改善の検討が可能であり、開発の効率化が可能となる。

本報告では、下水処理プロセスの中で、処理性能を決める特に重要な要素プロセスとして、曝気槽、沈殿池及び嫌気消化槽を取り上げ、CFDモデル化方法とその解析結果について紹介する。

下水処理場に流入した汚濁物質は、曝気槽中の微生物によって分解・浄化される。曝気槽には、混合液中に酸素を溶解させて、汚濁物質の好氣的微生物分解を進める機能がある。酸素溶解性能の表現には、 $K_La$ (総括物質移動容量係数)が代表的に用いられる。典型的な旋回流の曝気槽に対して、以前から $K_La$ の予測モデルが報告されている<sup>4)</sup>が、複雑に散気装置が配置された曝気槽においてはその適用が困難である。一方、CFD手法によればこれが可能である。本稿の活性汚泥曝気槽の解析ではCFDを利用した $K_La$ の予測モデルを示した。

曝気槽で汚濁物質を分解した活性汚泥混合液は沈殿池で固液分離され、上澄水は消毒等された後放流される。

\* 〒329-0105 栃木県下都賀郡野木町川田五丁目1-1  
TEL: 0280-54-1577 FAX: 0280-57-2633  
E-mail: mitsuharu.terashima@kurita.co.jp

濃縮汚泥は一部が余剰汚泥として引き抜かれ、残りは返送汚泥として曝気槽に導入される。汚泥の沈降分離及び濃縮には汚泥の性状のみならず、フィードウエルからの密度流も影響を与える<sup>5)</sup>。沈降分離した活性汚泥は十分に濃縮されないと、汚泥界面が上昇し、処理水に悪影響を与えることから、活性汚泥沈殿池の解析では CFD を使い、濃縮に及ぼすフィードウエル構造の影響を検討した。

最初沈殿池で除去された夾雑物と余剰汚泥は嫌気消化槽に投入され、滞留時間 30 日程度という長い時間をかけてゆっくりと減量される。槽内に速度の遅い領域があると、減量の効率が低くなるため、効率的に処理するには投入した汚泥を槽全体に均一混合することが重要である。嫌気消化槽の解析では、CFD を用いたモデルで、汚泥の混合現象をよく再現できることを示した。

## 2. 解析モデル

流動の状態を解析するための基本式は、連続の式と運動量輸送方程式である。

曝気槽の解析においては液体と気泡、沈殿池の解析においては液体と汚泥固形物の 2 相を考慮した。それぞれの相に対して、ボリュームフラクション（容積比）を考慮した連続の式と運動量輸送方程式を解き、運動量輸送方程式では重力の影響と相間の運動量の移動を考慮する。嫌気消化槽の解析においては、消化汚泥の非ニュートン性を考慮し解析を行った。

曝気槽及び沈殿池の解析では、構造の対象性から、2 次元の平断面を解析構造とし、ヘキサメッシュを採用した。嫌気消化槽の解析では、3 次元の解析構造とし、テトラメッシュを採用した。

メッシュ作成及び解析には汎用熱流体解析プログラム CFX4 及び CFX5 (ANSYS 社) を用いた。

## 3. 水処理装置の解析

### 3.1 活性汚泥曝気槽の解析

片側に散気装置の設置された典型的な旋回流式曝気槽の  $K_{La}$  を予測するモデルとして、Higbie の浸透理論に補正係数を考慮した式<sup>6)</sup> を使い、気泡存在部におけるガスホールドアップをモデル化することで局所的な総括物質移動容量係数 ( $k_{La}$ ) を求め、これを体積平均することで  $K_{La}$  を決定するモデルが報告されている<sup>4)</sup>。この  $K_{La}$  計

算モデルを気液混相流の流動を解析する CFD モデルと組み合わせ、局所的な気泡存在比から、槽全体の  $K_{La}$  を計算するモデルを構築した<sup>7)</sup>。

まず、片側にキャップデフューザー式散気装置を設置した標準的な曝気槽について解析を行った。次に、この曝気槽について、エアレーション能力を増強するために、既設散気装置の向かい側に微細気泡を発生するフレキシブルチューブ型の散気装置を増設した曝気槽の酸素溶解効率を解析した。解析構造を Fig. 1 に示す。

右側散気装置から発生する気泡径を 3.5mm として、単独曝気によって旋回流を形成させた場合には、 $K_{La}$  計算値は  $7.2\text{hr}^{-1}$  となった。様々な手法を用いた実測値は、 $7.0 \sim 7.4\text{hr}^{-1}$  となり、解析結果は実測にほぼ等しい値となった。また、左側の散気装置から発生する気泡の気泡径を 2.5 mm に設定し、両側曝気としたときには、 $K_{La}$  計算値は  $17.0\text{hr}^{-1}$  となり実測値 ( $17.2\text{hr}^{-1}$ ) とほぼ一致した。上記の気泡径を設定したとき、 $K_{La}$  計算値は単独曝気の場合のみならず、両側から曝気することによって複雑な流れを形成させた場合でも実測値とよく整合した。

一般的な曝気では、気泡径は塩類濃度などの曝気槽混合液の性状などによっても変化するが、主に散気装置の種類が支配因子であり、細かな孔を有する多孔管（板）では、微細気泡（3～4mm）が、特に細かい気泡を生成する散気装置では 3mm 以下の気泡が発生するといわれている<sup>8)</sup>。本解析で設定した気泡径は報告されている値に矛盾しない値である。

片側の散気装置だけを使って旋回流をつくった場合の混合液の液流速を Fig. 2 に示す。混合液と気泡は旋回流に沿って、液表面中央部に向かって斜め上方向に流れる傾向がみられる。これに対して、散気装置を増設し、両側の散気装置を使って曝気した場合 (Fig. 3) には、そ

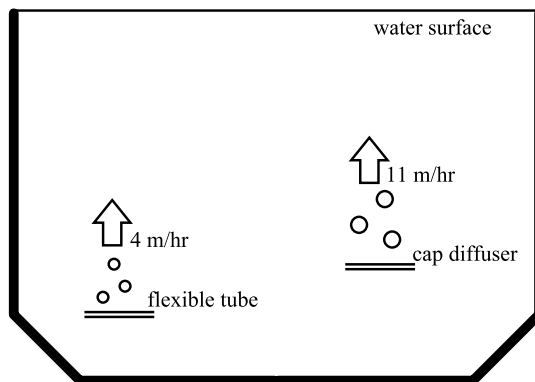


Fig. 1 曝気槽の形状と散気条件（散気量はタンク平面基準のガス空塔速度で表示した）。

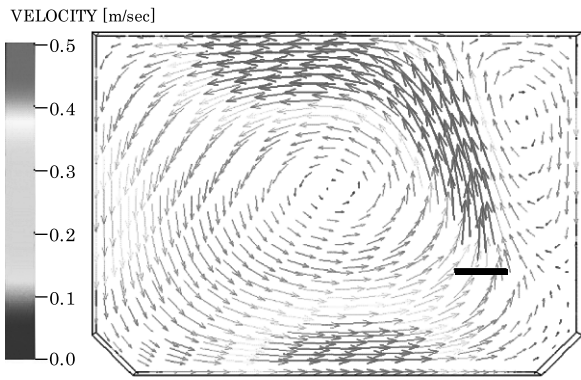


Fig.2 片側に散気装置を配置した曝気槽の液流速の解析結果.

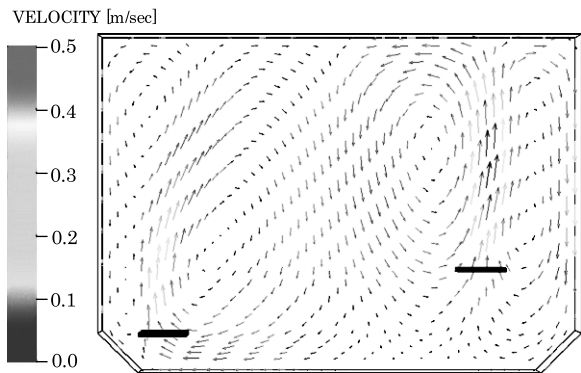


Fig.3 両側の散気装置で曝気した場合の液流速の解析結果.

それぞれの散気装置を起点とする2つの旋回流が形成され、混合液は両散気装置からほぼ垂直に上昇する。

このときのガスホールドアップ（気泡の存在割合）の分布を Fig. 4 に示す。片側の散気装置のみを用いて曝気をした場合には、気泡は散気装置の近傍で最も存在割合が高く、曝気槽の上に向かって扇形に拡がる。これに対して、両側の散気装置を使って曝気した場合には、気泡はより複雑に運動し、混合液の上昇流速に沿ってほぼ垂直に上昇した後、下向きに旋回する混合液によって曝気槽の中心付近まで引き込まれる。中心に引き込まれた気泡は、主に左側の散気装置に由来するものである。

両側の散気装置を使って曝気した場合には、旋回流の形成領域が限定されるため、片側だけの曝気の場合に比べて液旋回流が小さくなった。このため、既設である右側の散気装置に起因するガスホールドアップが大きくなり、右側散気装置由来の  $K_La$  も増加した。

このように、CFD を使えば、散気装置が複数設置され複雑な流れが生じる曝気槽についても、気泡の挙動を把握することができ、槽全体の酸素溶解を検討することができる。

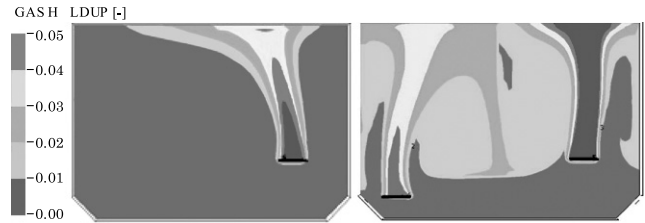


Fig.4 ガスホールドアップ分布（左：片側だけで曝気した場合，右：両側の散気装置で曝気した場合）.

### 3.2 活性汚泥沈殿池の解析

活性汚泥沈殿池における固液分離は活性汚泥の性状と密度流等の沈殿池内の流れ状態の影響を受けることが良く知られている。そこで、固体の沈降速度として、実測により求めた活性汚泥の沈降・濃縮の速度を与える式をCFDの基本モデルに組み入れ、沈殿池内の流動状態と汚泥濃度分布を解析した<sup>9)</sup>。

Fig. 5 に解析構造を示す実規模の沈殿池において、深さ方向の汚泥濃度分布について解析結果と実測結果を比較した。次に、活性汚泥性状はそのまま、フィードウエル深さ ( $H_F$ ) を変化させたときのCFD解析を行い、フィードウエル形状の違いによる濃縮性の違いを検討した。

深さ方向の汚泥濃度分布の解析結果を Fig. 6 に示す。深さ約 1.0 ~ 1.5m で、急激に固形物濃度が増大しており、ここに、汚泥界面が形成されていることがわかる。底部付近では汚泥は  $4 \text{ kg/m}^3$  まで濃縮されている。測定結果も同様な汚泥濃度分布となっている。解析結果は測定結果とよく一致し、本モデルにより沈殿池内の汚泥の動きを精度良く解析できることが確認された。

次に、現構造（フィードウエルの深さ ( $H_F$ ) = 1.39m）とフィードウエルをより深くした  $H_F$  = 1.89m の場合について

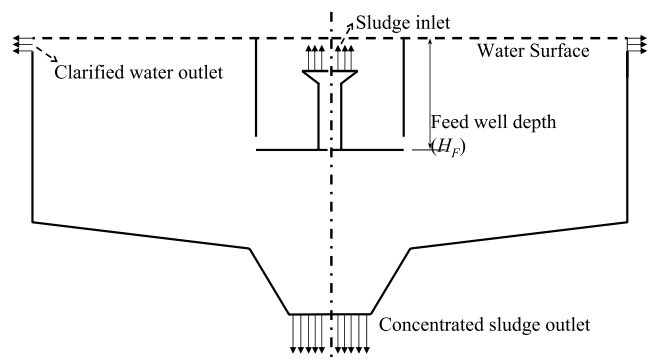


Fig.5 活性汚泥沈殿池の解析構造 ( $H_F$  = 1.39m).

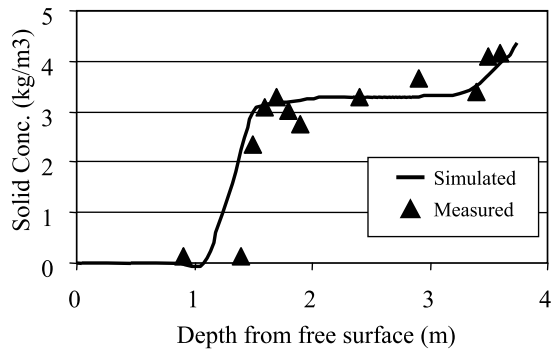


Fig. 6 活性汚泥沈殿地の濃度分布.

て、沈殿池内の汚泥濃度分布の解析結果を Fig. 7 に示す。

汚泥界面はフィードウエル下端の僅か下側の位置に形成され、フィードウエルが浅い場合に比べ、フィードウエルが深い場合には、汚泥界面の高さが低くなった。

フィードウエルから吐出される活性汚泥混合液は密度が沈殿池上澄水よりも高いため、その流動は重力の影響を受ける。汚泥界面がフィードウエルの出口よりも下方にあるときには、斜め下向きに吐出した混合液は、汚泥界面に衝突し、沈殿池の底に濃縮した汚泥の一部をかき乱すために、汚泥界面は上昇し、フィードウエルの下端の位置付近で安定すると考えられる。

フィードウエル出口が浅い場合には汚泥界面が高くなり処理水への汚泥フロク流出が増大し、逆に、フィードウエル出口が深すぎる場合には、汚泥の濃縮が不十分となり、汚泥界面が上昇して処理水が悪化することを、本モデルで確認している。

このように、CFD を活用することにより、沈殿池内の汚泥濃度分布を予測し、フィードウエル構造の最適化を検討することができる。

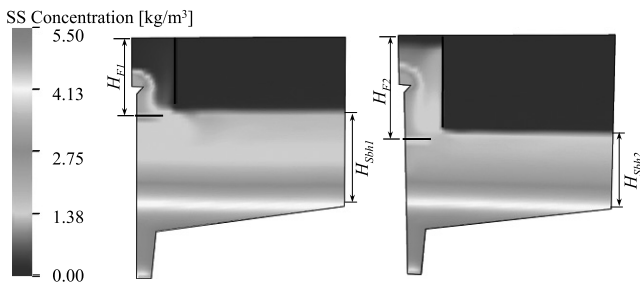


Fig. 7 活性汚泥沈殿地の解析結果 (左:  $H_F=1.39\text{m}$ , 右:  $H_F=1.89\text{m}$ ).

### 3.3 嫌気消化槽の解析

ドラフトチューブ式の機械攪拌装置が設置してある嫌気消化槽を対象とし、汚泥を投入する入り口から汚泥とともに投入されたトレーサーが槽全体に広がり、槽底部にある出口から排出される様子を解析し、実験で求めた結果と比較した。解析構造及び 3 次元メッシュ構造を Fig. 8 に示す。

濃縮した汚泥は非ニュートン性を示し、その濃度や組成などにより粘性が異なる<sup>10)</sup> ために、実測によって求めた剪断速度と剪断応力の関係式を、CFD のモデルの基本式に組み入れ、解析を行った。

吐出される汚泥流量を表す指標として、液循環回数 ( $N(1/d)$ ) を定義する。ここで、 $Q$ : 吐出流量 ( $\text{m}^3/d$ )、 $V$ : 槽容量 ( $\text{m}^3$ ) である。

$$N = \frac{Q}{V}$$

吐出流量(液循環回数)を変化させたときのトレーサー応答の解析結果を Fig. 9 に示す。解析では、トレーサーは投入直後に高濃度で検出され、その後、増減を繰り返しながら、一定の濃度に近づく結果が得られる。吐出量を増やし循環回数を大きくした解析では、一定濃度に到着する時間も短くなった。

循環回数を 13 回  $[1/d]$  と設定したトレーサー応答の実測値と解析結果を Fig. 10 に示す。トレーサー応答の解析結果は実測値とよく一致しており、適切な吐出流量を設定すれば、CFD を使用した本モデルは嫌気消化槽における実際の混合状態を良く再現するものと考えられる。また、この条件では、2 時間から 3 時間程度の攪拌

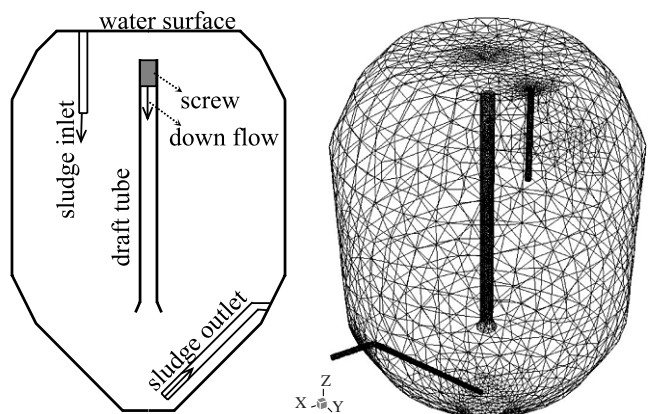


Fig. 8 嫌気消化槽の解析構造 (左) 及び 3 次元メッシュ構造 (右).

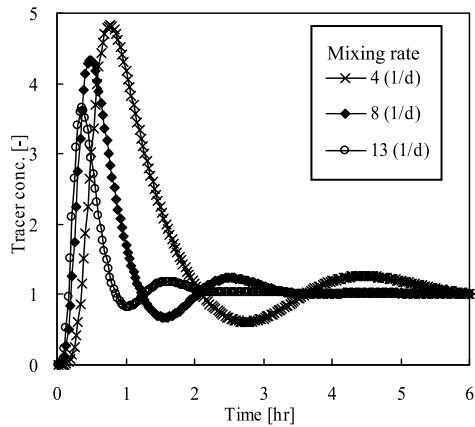


Fig. 9 トレーサー応答の解析結果.

時間があれば混合がほぼ済むことがわかり、槽内を均一に混合するという意味において、それ以上長時間の混合は必要ないことがわかる。

嫌気消化槽内の流速分布を Fig. 11 に示す。槽中央で流速が速く、槽壁付近で流速が遅くなっている。このため、吐出流量を低く運転する場合や汚泥粘度が高い場合には槽壁近くの流速がさらに遅くなり、混合が不十分になる可能性がある。

このように、CFD を使えば、適切な攪拌強度や攪拌時間を検討することが可能であると考えられる。

#### 4. まとめ

下水処理プロセスの中で、処理性能を支配する重要な

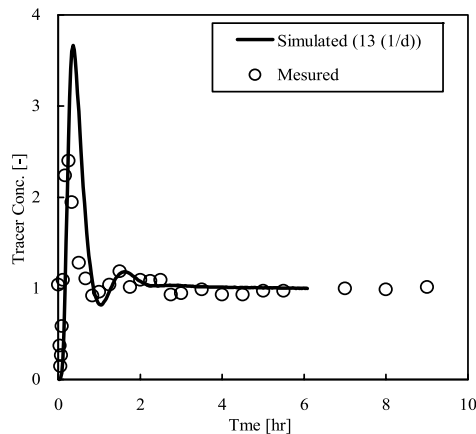


Fig. 10 トレーサー応答の解析結果と実測値.

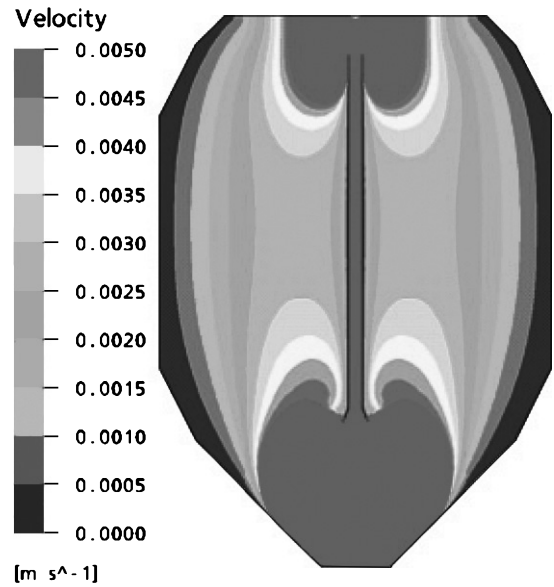


Fig. 11 嫌気消化槽内の流速分布解析結果.

要素プロセスとして、曝気槽、沈殿池及び嫌気消化槽を取り上げ、CFD 手法を用いた流動解析を行った。

曝気槽の解析では、散気装置が複数設置され複雑な流れが生じる曝気槽についても、気泡の挙動を把握することができ、槽全体の酸素溶解を検討できることを示した。

沈殿池の解析では、汚泥濃度分布の実測値が解析値とよく一致することを示し、フィードウエル構造によって変わる汚泥界面高さの最適化を検討することができることを示した。

嫌気消化槽の解析では、混合状態を示すトレーサーの解析が実験結果とよく一致することを示し、混合条件の最適化について検討できる可能性があることを示した。

これらの結果から、CFD は排水処理装置の構造や運転条件を最適化するのに有用な方法であると考えられる。

#### 5. 謝辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究として実施したものである。ここに記して、謝意を表します。

#### [参考文献]

- 1) Kamimura, M., Furukawa, S., and Hirotsuji, J.: Development of a simulator for ozone/UV reactor based on CFD analysis,

- Wat. Sci. Tech.*, **46**(11–12), 13–19 (2002)
- 2) Anastasios I. Stamou: Verification and application of mathematical model for the assessment of the effect of guiding walls on the hydraulic efficiency of chlorination tanks, *Journal of Hydroinformatics*, **4**, 245–254 (2002)
  - 3) Craig, K., De Traversay, C., Browen, B., Essemiani, K., Leveq, C., and Naylor, R.: Hydraulic study and optimization of water treatment processes using numerical simulation, *Wat. Sci. Tech. Wat. Sup.*, **2**(5–6), 135–142 (2000)
  - 4) Fujie, K., Urano, K., Kubota, H., and Ksakura, T.: Hydrodynamics and Oxygen Transfer Characteristics in Activated Sludge Aeration Tanks, *Wat. Sci. Tech.*, **26**(3–4), 791–800 (1992)
  - 5) Deventier, B. A., and Larock, B. E.: Modeling sedimentation induced density currents in sedimentation basins, *J. Hydraul. Engng.*, ASCE **113**(1), 80–94 (1987)
  - 6) Sekizawa, T., Fujie, K., Kubota, H., Kasakura, T., and Mizuno, A.: Air Diffuser Performance in Activated Sludge Aeration Tanks, *J. Water Pollution Control Fed.*, **57**(1), 53–59 (1985)
  - 7) 寺嶋光春, 安井英斉, ラジブゴエル, 久保田宏: “ハイドロダイナミクスモデルによる曝気槽の酸素溶解性能の把握” 環境工学研究論文集, **40**, 29–37 (2003)
  - 8) 久保田宏, 藤江幸一, 関沢恒男, 市川郁夫, 笠倉忠夫: “活性汚泥法における微細気泡と全面ばっ気による性能向上と省エネルギー”, 環境研究, (75), 43–51 (1989)
  - 9) Goel, R., Terashima, M., Yasui, H.: Application of CFD to Study the Effects of Feed-well Configuration on Suspended Solid Concentration Profile in Settling Tank, *Hydroinformatics*, (eds) Liong, Phoon and Babovic, World Scientific Publishing Company, ISBN: 981-238-787-0 (2004)
  - 10) Murakami, H., Katayama, H., and Matsuura, H.: Pipe Friction Head Loss in Transportation of High-Concentration Sludge for Centralized Solid Treatment. *Water Environment Research*, **73**(5), p. 558–556 (2001)