

ハイブリッド型膜ろ過システムの流動解析

CFD of Water Purification System by a Collaboration of Biological Treatment and Membrane Filtration



村上吉明*
Yoshiaki Murakami



高田一貴**
Kazutaka Takata
(工学博士)

当社は生物活性炭処理と膜処理のハイブリッド型浄水処理システムを開発してきた。¹⁾ 本システムは、膜処理だけでは除去困難な溶解性物質を多く含む原水に対しとくに有効であり、薬剤の使用が不要であることや省スペース化が図れるなどの特長を有する。

本報では、造水コストの低減を目的として空気の吹込み量低減に向けた検討を流動解析の手法をもちいて実施した。その結果、装置形状を見直すことで同量の空気吹込み量でも底部流速を30%程度増加可能と期待でき、同程度の底部流速を確保するには必要動力を45%程度削減できることがわかった。造水単価低減につながる改善結果がえられたので、概要を報告する。

A water purification system by the collaboration of the biological treatment and membrane filtration has developed so far. This system has high applicability for the raw water having relatively high amount of soluble materials such as iron, manganese, ammonium nitrogen, and natural organic matters, those cannot be processed by a membrane. Also this system has advantage such as no chemical usage and small installation area compared with conventional treatment method. In this report, for further improvement against the energy consumption, minimization of aeration for fluidising the biological activated carbon has been examined by way of an experiment and Computational fluid dynamics using test equipment. The results by the CFD indicate that shape of aeration device shall be improved, and this improvement can lead to the increment of flow velocity about 30% at the bottom of tank so that the aeration energy is expected to be reduced to 45%.

Key Words :

水	道	Drinking water
高	度	Advanced treatment
膜	ろ	Membrane filtration
流	動	Computational fluid dynamics (CFD)
混	相	Multiphase flow

【セールスポイント】

省エネルギーでコンパクトな次世代型浄水処理システムを提供する。

まえがき

水道原水となる地下水や表流水には、溶解性の鉄・マンガン、有機物が多く含まれている。従来、これらの成分の処理には、薬剤添加、曝気による酸化処理をおこなった後に、凝集沈殿、ろ過する方法が広くもちいられてきた。しかし、これらの方法は、溶存物質の除去のために薬剤を投入する機会が多く、真に安全でおいしい水の概念を損なうばかりでなく、薬剤使用に起因する廃棄物（汚泥）発生という短所もある。そこで、当社は前段に生物活性炭処理、後段に膜処理を持ち、薬剤が不要なハイブリッドシステムを開発してきた。¹⁾ 本システムは、前段の生物・活性炭処理により溶解鉄・マンガンなどの溶解性無機物、フミン酸やフルボ酸に代表される天然有機物を無薬注で処理し、さらに後段の膜処理によって懸濁物質を除去することにより処理水をえることができる。

生物・活性炭処理槽では、生物処理槽下部に設置されたドラフトチューブに空気を送り込み、エアリフト方式により生物処理槽内水を流動させ、活性炭を浮遊させている。本システムは、省スペースであり、薬剤が不要であるなど環境負荷の低いシステムとなっているが、さらなる環境負荷低減のためには、エアレーションにおける空気量の低減により運転のエネルギーを減少させることが重要な課題となる。そこで、本検討では、流動の数値解析の手法をもちいて、生物・活性炭槽内の流動を最適化してエアレー

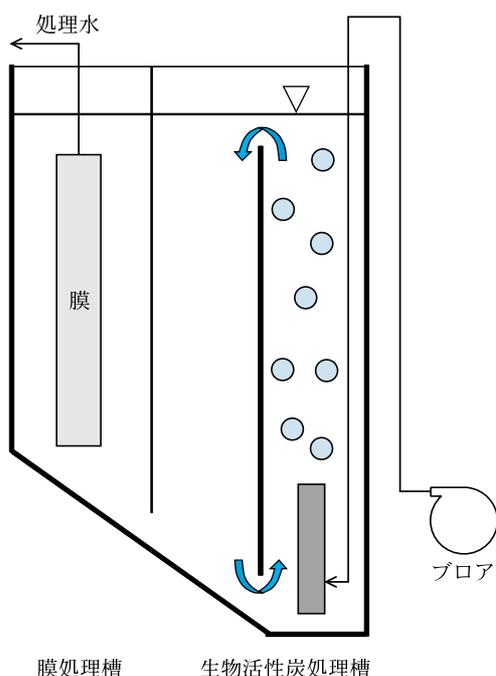


図1 ハイブリッドシステム装置概略図

ション量の最小化を試み、可視化実験装置（以下、実験装置と略称）によりその妥当性を検証した。

1. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図1、外観を写真1にそれぞれ示す。生物・活性炭処理槽には、循環流を形成するためのエアリフト用ドラフトチューブと仕切り版が設けられている。ドラフトチューブから空気を送り込むことで槽内の水が流動し、活性炭を浮遊させることができる。一定時間滞留させた水は膜処理装置を通じてろ過され処理水をえる。

実験では、視認性を向上させるため、模擬活性炭としてPVC系合成樹脂を主成分とするビーズを使用した。ビーズの物性値を表1に示す。このビーズは活性炭と比較してもほぼ同程度の密度を持ち、粒



写真1 実験装置外観（高さ2 m、幅900 mm）

表1 ビーズの物性値

材 質	PVC系合成樹脂	活 性 炭
密 度 (kg/m ³)	1 400	1 300
代表粒径 (mm)	2.3	0.5

径が4倍程度であることから、ビーズを浮遊させることができれば活性炭も浮遊させることができ、模擬粒子として妥当と考えられる。

実験装置では、空気量を10~20 L/minの2段階で変化させ、泡および活性炭の挙動を確認した。挙動の確認には高速度カメラ MEMRECAM fx-6000 (ナック社製) をもちい、ドラフトチューブの出口付近および装置中段部分をそれぞれ毎秒30コマで500コマ撮影した。

2. 流動解析による流動状態の確認

実験装置内の流動を、流動解析によって再現することを試みた。流動解析には FLUENT6.3 (ANSYS社) をもちいた。計算モデルは、形状が変化する気泡を表現するために混相流モデルである VOF モデル、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルをもちいて非定常計算をおこなった。

計算領域を図2、物性条件を表2に示す。今回の検討では、生物・活性炭処理槽のみを計算領域とした。メッシュは1辺3mm程度の6面体メッシュとし、計算負荷低減のために対称境界をもちいて約17万メッシュで計算した。計算の時間間隔は1msとし、装置内の水の循環速度を考えると約7秒で1周

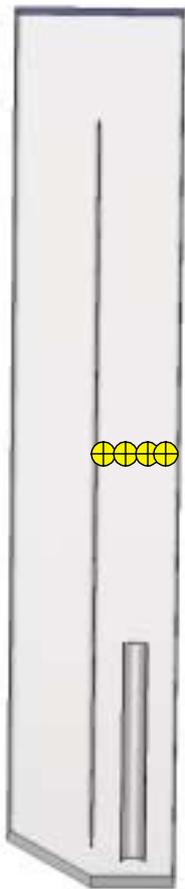


図2 計算領域

以上することから、全体で10秒間計算した。また、図中の丸印で示した点で、計算開始5秒後から10秒後までの5秒間の流速をプロットし計算結果と観察結果とを比較した。さらに、計算後の流れ場に対してビーズを模擬した粒子を流し、実際の粒子の軌跡が再現できるか確認した。粒子軌跡の計算には分散相モデル (DPM モデル) を使用した。

3. 結果および考察

3.1 実験結果と計算結果との比較

(1) 実験結果

10 L/min で散気した時におけるドラフトチューブ上部の状況を写真2、10 L/min および20 L/min で散気したときにおける装置中段部分の状況をそれぞれ写真3、4に示す。白い粒状の物体がビーズで、大きな塊状のものが気泡である。空気流量10 L/min の時は、ドラフトチューブからは1秒間に約3回の割合で直径約40 mm の気泡が上向きに流速約20 cm/s で上昇した。水中で上記のような単一気泡が上昇すると、気泡は開いた笠状の気泡を形成する。²⁾ しかし、本検討では気泡群を内へ吹き込んでいる。水中における空気群の体積比率を α とすると、水の見

表2 物性条件

物性条件	空気	密度 (kg/m ³)	1.225
		粘性係数 (Pa·s)	1.79×10^{-5}
	水	密度 (kg/m ³)	998.2
		粘性係数 (Pa·s)	1.00×10^{-3}
	空気-水	表面張力 (N/m)	7.35×10^{-2}

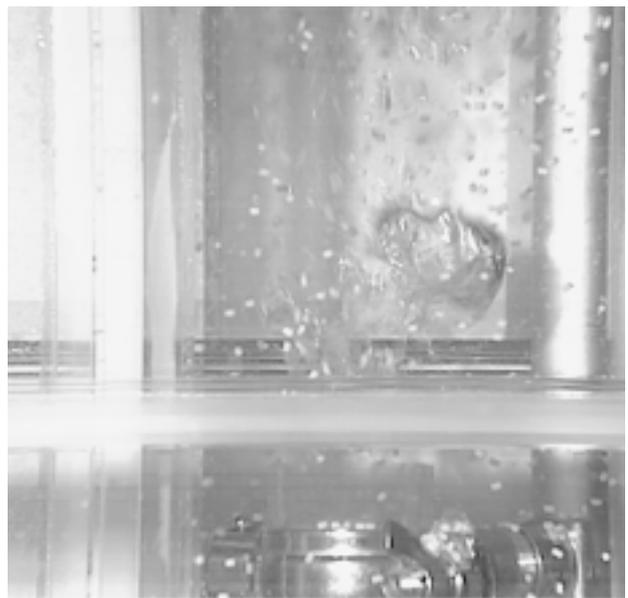


写真2 ドラフトチューブ出口における気泡の様子 (10 L/min)



写真3 装置中段部分における気泡の様子 (10 L/min)

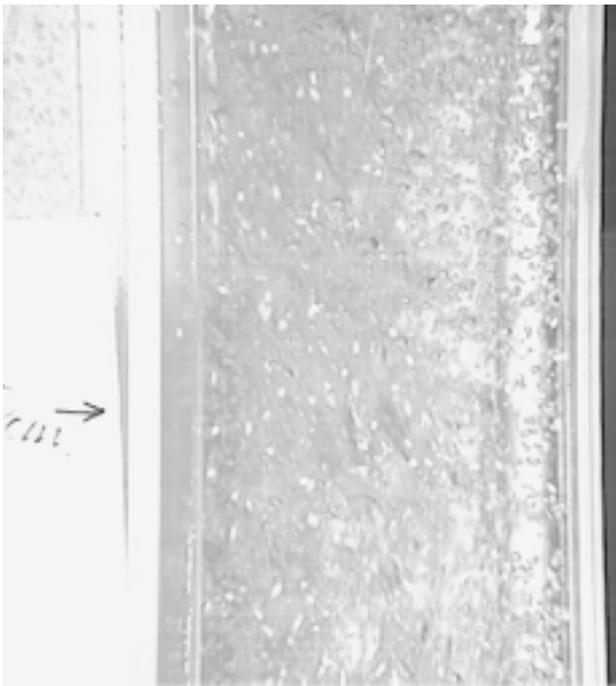


写真4 装置中段部分における気泡の様子 (20 L/min)

かけ粘度は $\frac{1}{(1-\alpha)^{2.5}}$ に比例して増加する。これは、気泡の運動により周囲の水が応力を受けるため、見かけの Re 数は低下する。³⁾ その結果、発生した笠状の気泡は不安定化されて、²⁾ 分裂しやすくなると予測される。そのため、ドラフトチューブを出た気泡は、装置中段では直径30~40 mm程度の粗大気泡と直径2~7 mm程度の多数の気泡群になった。粗大気泡は1秒当たり1.7個の割合で確認され、約

半分の気泡は分裂して小さな気泡になったと考えられる。

空気流量20 L/minの時は、ドラフトチューブ出口では、複数の気泡が完全には切れずにドラフトチューブから出てきた。また、装置中段部分では気泡は分裂しながら上昇し、槽内が小さな気泡群で覆われていたため、1つ1つの気泡の区別は困難であった。ただし、10 L/minの時と20 L/minの時とを比較すると、装置中段部における気泡の上昇速度は同程度であったが、ビーズの数密度は20 L/minの時の方が2.4程度大きかった。

ビーズが多く浮遊するには次のいずれかもしくは両方の条件を満たす必要がある。

- ① 沈降しているビーズを多く浮上させる。
- ② 一度浮上したビーズが沈降しない。

① 沈降しているビーズを多く浮上させる

ドラフトチューブに導入された空気が上昇すると、周囲の水は粘性のために引きずられて上昇する。チューブ内の気泡の上昇速度に変化はなかったから、気泡の形状により水に与える影響が小さいと仮定すれば、水を持上げるエネルギーは気泡の流入速度によって定まると推測される。そのため、流量増加によって底部の圧力が低下し、ビーズがより多く浮上すると考えられる。

② 一度浮上したビーズが沈降しない

気泡が水の流れに追従するかどうかの判断にはストークス数をもちいた。ここで、ストークス数 St は $St = \frac{\Delta\rho r^2 u}{\mu L}$ で表わされる。ただし、 μ は水の粘性係数、 L は代表長さ、 $\Delta\rho$ は水と気泡の密度差、 r は気泡の半径であり、 u は代表速度である。 St が1よりも十分に小さければ気泡は水の流れに追従し、逆に1よりも十分に大きいと水の流れと無関係に運動する。小さな気泡のストークス数は0.008~0.1程度であり、1よりも十分に小さいため、水の流れにほぼ追従すると考えられる。すなわち、上向きの流速に実際に寄与するのは主に粗大気泡と考えられる。

ところが、水中に存在する気泡の体積比率が増加すると、粒子の終端速度は $(1-\alpha)^{4.5}$ に比例して小さくなる。⁶⁾ すなわち、 $\alpha = 0.1$ 程度では、活性炭の沈降速度は気泡が存在しない状態と比較して62%程度まで小さくなるため、より多くの活性炭を浮遊させることができる。そのため、空気の吹込み量増大により、多くのビーズを浮遊させることができ

たと推測される。

以上から、効率的に活性炭を浮遊させるには、粗大気泡と小さな気泡とを混在させ、粗大気泡によって上向き流を形成し、小さな気泡によって沈降速度を低下させることが必要と考えられる。また、底部の圧力を低下させるためには、ドラフトチューブ自体の圧力損失を低下させる必要がある。

(2) 計算結果

計算後の装置断面における流速コンターおよび装置内の気泡の流動挙動をそれぞれ図3、4に示す。装置中段部における流速をビデオ撮影結果とシミュレーション結果とで比較すると、ビデオ撮影結果では0.3~0.4 m/s、一方シミュレーション結果では約0.6 m/sとなった。シミュレーションでは、気泡の分裂を十分に再現できておらず、気泡の上昇速度が大きく評価されたものと推測された。ただし、一部の気泡では、上昇に従って分裂する現象も表現された。分裂後の気泡にはメッシュサイズよりも小さいものも存在するため、今回の計算ではそれら微小気泡は表現できていないが、全体の流れを表現するには粗

大気泡の挙動が支配的であることから、本計算により流動状況は再現できていると考えられる。

さらに、計算でできた流れ場を定常状態として、そこに活性炭を模擬した粒子を置いた時に活性炭が浮遊するかどうか確認した。活性炭を模擬した粒子の軌跡をそれぞれ図5のa、bに示す。活性炭を模擬した粒子の物性を表1に示す。本検討では10個の粒子を水槽の底から5 cmの位置に配置して、その軌跡を確認した。空気の吹込み量を増加させると、活性炭は水槽上部まで速やかに上昇した後、一部は循環し一部は停滞した。循環した活性炭の数自体は変化が見られなかったが、浮遊速度が上昇したため、水槽上部における活性炭の数密度は上昇する傾向を再現できている。現実の系では、気泡の影響によって見かけ上の粘度が上昇するため、水槽上部に停滞する活性炭量はさらに増加する。以上から、活性炭の浮遊状況についても流動解析によって傾向を再現できると考えられる。

そこで、計算結果に基づき、性能改善に向けた運転条件並びに装置形状の検討を実施した。

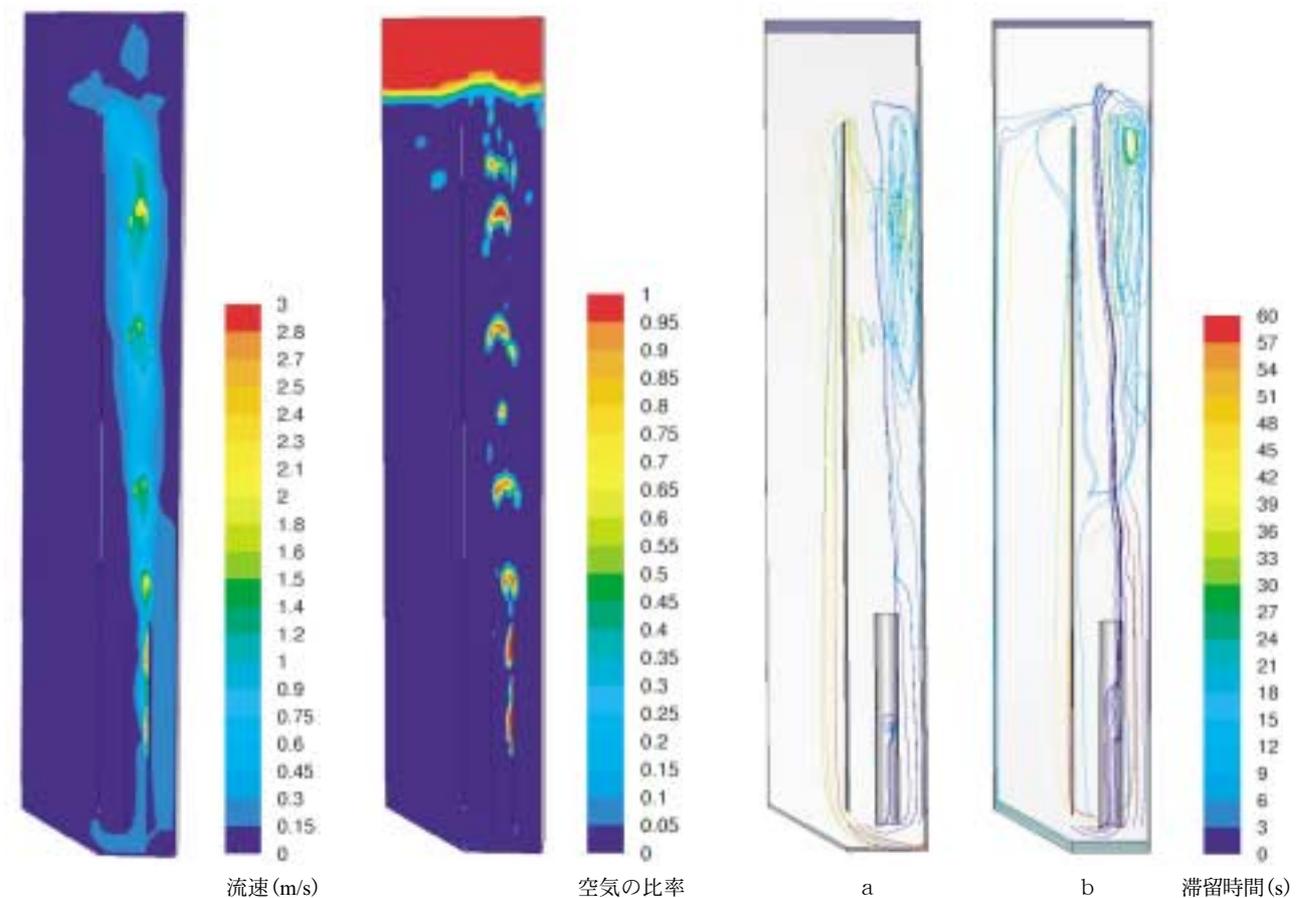


図3 装置断面の流速コンター (10 L/min)

図4 装置断面の気泡の様子 (10 L/min)

図5 模擬粒子の粒子軌跡 (左: 10 L/min, 右: 20 L/min)

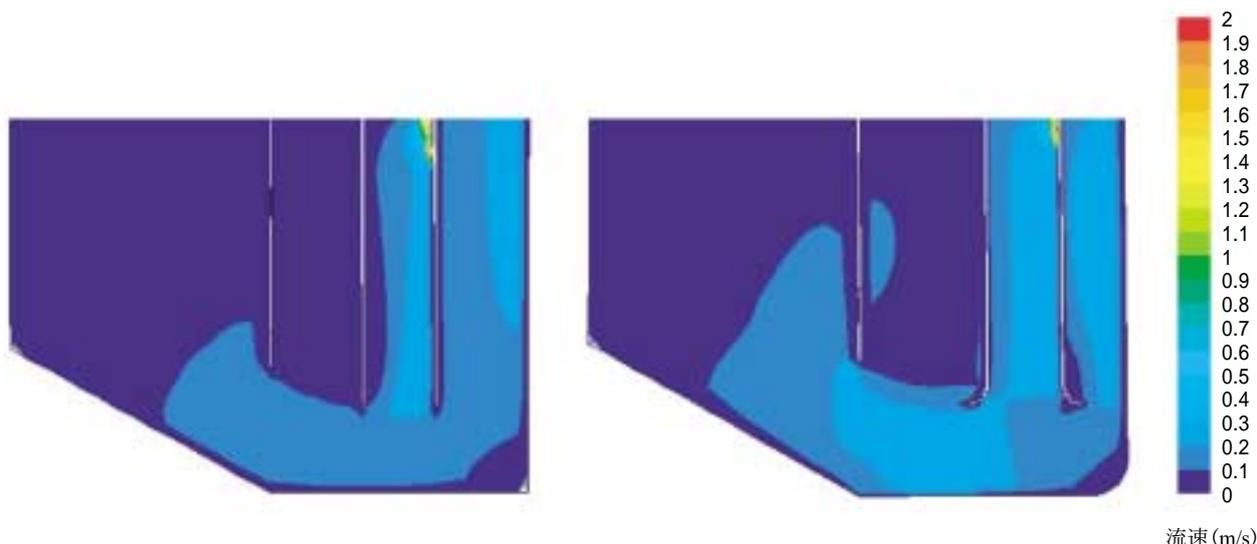


図6 変更前後形状における底部流速コンター

3.2 形状最適化に向けた検討

エアリフトの気泡をより効率的に活用するには、粗大気泡と小さな気泡とが共存する状態を維持することが効果的と考えられる。現状のドラフトチューブ内には粗大気泡と微細気泡とが混在している。水中における気泡形状を考慮すると、チューブ径については現状を維持することが妥当と判断された。

(1) 水槽本体形状

流速はドラフトチューブ内部でもっとも大きくなったが、ドラフトチューブの外側と比較すると、水槽の外側を循環する水の方が流速は大きくなった。これは、下向き流れが再び上向き流れに変化する際、仕切り版によって流路がいったん絞られるため、噴流を形成して、外側の流速が大きくなったと考えられる。外側を循環している水に、より効率的にエネルギーを与えるには、ドラフトチューブは水の流速ができるだけ大きな流路に設置して流れをできるだけ曲げないことが必要と考えられる。

また、装置の隅の部分はよどみ点となるため、圧力損失が上昇し、さらに活性炭が沈降すると予測される。

(2) ドラフトチューブ形状

ドラフトチューブへの出入り時における圧力損失を低下させることで、より効率的にエネルギーを水に与えられると考えられる。現状の形状は流路に急縮小する流路が存在するだけなので、入口付近に剥離流が存在する。また、出口部分でも断面積がジャンプしている。管内において、断面積が A_1 から A_2 に急激に拡大すると、損失係数は $\left[1 - \frac{A_1}{A_2}\right]^2$ に比例する。⁵⁾

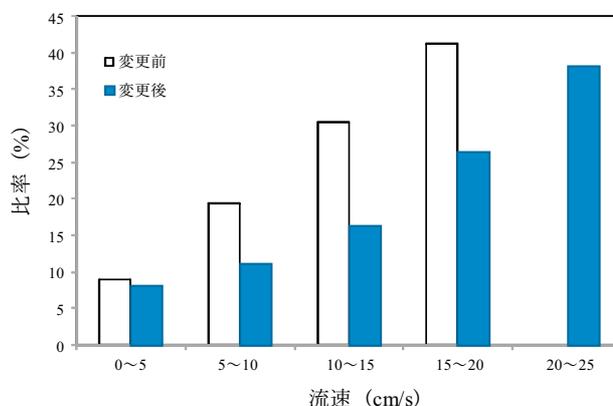


図7 形状変更前後における底部流速の比率の変化

(3) ドラフトチューブ設置位置

流速はドラフトチューブから離れるほど低下する。ドラフトチューブ設置の目的は活性炭を底部に沈降させないことであり、そのためには底部流速を上昇させる必要がある。底部流速の確保にはドラフトチューブの設置位置をできるだけ低く設置することが有効と考えられた。なお、実際には活性炭と生物処理槽内の浮遊生物種の摩擦により生物の壊砕現象が起きるため、過度な流速確保は処理性を悪化させる。そのため、処理水性状と設置位置を確認しながら最適な設置位置を定めた。

装置の撮影結果および計算結果に基づき、ドラフトチューブの形状、寸法、設置位置を上記考えに基づき調整することにより、より効率的に活性炭を浮遊させることが可能かどうか検討した。

形状、寸法、設置位置および変更前後の底部付近における流速コンターおよび形状変更前後における水槽の底から2cmの高さにおける流速（これを底部流速とした）の比率をそれぞれ図6、7に示す。

空気流量は初期形状と同様であるが、底部速度が10 cm/s 以下の領域は10 %低減しており、平均流速は30 %程度上昇した。また、初期形状と同等の底部流速とするのに必要な空気量および必要動力は45 %低減できることが確認された。

なお、今回の検討は小型装置を対象としたものであるが、スケールアップ後の大型装置に対しては、水の容積に対する空気量が低下するため沈降速度が上昇してより多くの活性炭の沈降が予測される懸念事項に対して、的確な指針を与えることが可能になると考えられる。

む す び

流動解析をもちいてハイブリッド型膜ろ過システムの性能向上に向けた検討をおこなった。生物処理槽内は複雑な気固液三相流動状態となっているが、

性能改善に向けた定量化に気液混相流と粒子追跡法による流動解析が有用なツールになりうることが確認された。本手法を活用することにより、初期形状と同等の底部流速とするのに必要な空気量は45 %低減でき、より経済的なシステム構築に可能性を示すことができたと考えられる。

[参考文献]

- 1) 高田一貴ら：神鋼環境ソリューション技報，Vol.4 No.2 (2008)
- 2) H.C. Brinkman: J. Chem. Phys., 20 (1952) 571.
- 3) 拓殖秀樹：化学工学の進歩 16-気泡・液滴・分散工学，化学工学協会編
- 4) 日本機械学会：管路・ダクトの流体抵抗 (1998)
- 5) N.Zuber: Chem. Eng. Sci., 19 (1964) 897.