

高効率散気装置 JFE ファインバブラー

High Efficiency Air Diffuser for Wastewater Treatment

辻 猛志 TSUJI Takeshi JFE エンジニアリング 技術研究所 環境技術研究部 主任研究員・工博
坂井 至 SAKAI Itaru JFE エンジニアリング 技術研究所 環境技術研究部 主任研究員
大橋 一聡 OHASHI Kazutoshi JFE エンジニアリング 都市環境本部 アクアシステム事業部 装置技術室長

要旨

JFE エンジニアリング独自の散気孔構造を有するメタルスリット散気装置 (JFE ファインバブラー) を考案し、その基本性能について検討した。本装置の初期性能は、湿式通気抵抗は 200 mm-aq 以下、酸素移動効率は 30% 以上であり、従来の散気装置に比べて優れた散気性能を有していることから、省エネルギー化への貢献が期待できるものであった。また、本装置を実下水中で使用した際に初期性能を長期間維持するための方策について単板での検討の結果、日常的な水ブローを実施することによって年間の通気抵抗上昇量を抑制できること、さらには長期運転によって散気装置の通気抵抗が上昇した場合においても薬剤洗浄によって散気性能を完全回復できることを確認した。

Abstract:

Performances of a metallic air diffuser with original slit orifice (JFE FINEBUBBLER) were investigated. Oxygen transfer efficiency was higher than 30% by the air diffuser with pressure loss of below 200 mm-aq. This device could contribute the reduction of energy consumption compared with conventional apparatused. In addition, the following two methods against blockage problems were confirmed to be effective to maintain the initial performance of the air diffuser when applied for real sewage aeration; (1) application of daily water-blow system to suppress increase of annual pressure-loss; (2) application of chemical washing treatment to recover performances completely to its initial level in case of a long-term increase of pressure-loss at the diffuser.

1. はじめに

下水処理のメインプロセスである生物処理槽に空気を供給するためのブロウ動力は、下水処理場全体の消費電力の 30～60% を占めており、高効率な散気装置の導入によるブロウ動力を低減することは、省エネルギーおよび CO₂ 排出削減の面から重要な意義を有する。

そこで、JFE エンジニアリングは、ブロウ動力の低減に資する独自の散気孔構造を有する金属 (SUS316L) 製のメタルスリット散気装置 (商品名: JFE ファインバブラー) を考案・開発した。本散気装置は低送風動力で非常に優れた酸素移動性能を発揮すること¹⁾、および実下水中で使用する際に送風動力の上昇に繋がる散気孔の閉塞を解除するための水ブローシステム²⁾を備えていることを特長とするものである。

本稿ではまず、独自の散気孔構造をデザインするに至った基本コンセプトと実験的検討で得られた知見について紹

介する。ついで、実用段階で課題となる散気孔での閉塞現象を効果的に回避・解除するための方法を実下水に適用した際の試験結果について報告する。さらに、本システムを実施に適用した際の構成例を示す。

2. メタルスリット散気装置

2.1 高性能化に対する基本的な考え方

ブロウの消費電力量を削減するための散気装置が備えるべき基本性能としては、(1) 高い酸素移動性能を有すること、(2) 散気に要する通気抵抗が低いこと (低圧損であること) の 2 点に集約される。酸素移動性能を向上させるためには気液界面の接触面積を高めればよいので、微細な気泡の生成と水中での気泡合一現象の抑制について工夫した。一方、低圧損を実現するためには散気板と気泡の接触抵抗 (乾式抵抗) を極小化すればよいので、散気板の薄膜化を図るとともに、発泡時の抵抗を低減可能な散気孔形状について工夫した。

Upward force $F_u = V_B \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot g$ V_B : Bubble volume
 Downward force $F_D = L\sigma$ L : Contacting length, σ : Surface tension

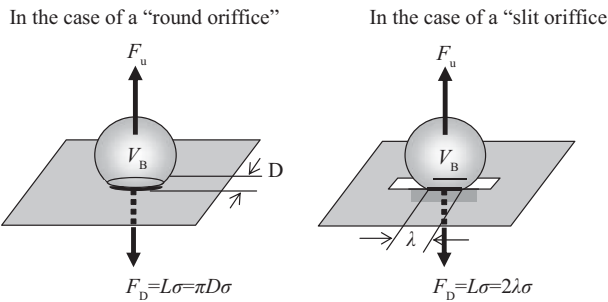


図1 静的な気泡生成モデル

Fig. 1 Static force balance model for bubble formation

2.2 メタルスリット散気装置の特長

(1) 微細気泡の生成

図1に静的な気泡生成モデル³⁾の模式図を示す。散気孔上面で生成した気泡は、上向きの力（浮力） F_u と下向きの力（表面張力） F_D とがバランスするまで成長を続け、 $F_u > F_D$ となった時点で散気孔から離脱する。ここで、気泡体積 V_B を小さくするためには、接触長さ L あるいは表面張力 σ をできる限り小さくすればよい。そこで、孔形状としては丸孔に比べて L を小さくできるスリット孔を採用することにした。また、散気板の材質には疎水性の樹脂やゴムよりも σ が小さい親水性の金属（SUS316L）を用いることにした。これにより気泡の成長が抑制され、スリット孔からの離脱が促進されて1 mm以下の微細気泡の生成が実現できる。

(2) 水中での気泡合一の抑制

水平方向の気泡間距離は、少なくとも気泡が散気孔を離脱する時点においては、スリット孔の配置（間隔）で規定される。そこで、スリット孔を適正な間隔で配置することで水中での気泡合一の抑制を図った。

(3) 通気抵抗の低減

孔形状をスリット状にすることで、気泡と孔内壁の接触長さ L を丸孔よりも短くし（表面張力を少なくし）、発泡により生じる抵抗を低減した。

2.3 実験装置および実験方法

メタルスリット散気装置の外観とスリット部分を写真1と2に、また概略仕様を表1に示す。散気板は、SUS316L製の板（外寸 $250 \text{ mm}^W \times 250 \text{ mm}^L \times 0.3 \text{ mm}^t$ ）にスリット孔を備えたものである。散気装置の性能評価に用いた気泡塔の本体は内寸 $0.5 \text{ m}^W \times 0.5 \text{ m}^L$ 角、最大有効水深4 mのポリ塩化ビニル製カラムである。

酸素移動効率の測定は、気泡塔内の所定水位まで清水を満たした後、表1に示す通気量で散気装置への空気供給を行い、日本下水道協会が定める非定常法⁴⁾に準じて行った。

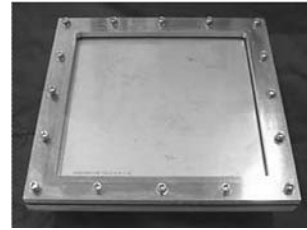


写真1 メタルスリット散気装置の外観
 Photo 1 Appearance of metal-slit air diffuser

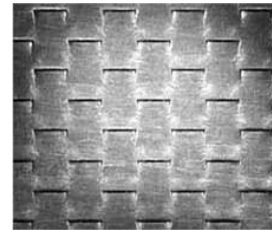


写真2 スリット部分の拡大
 Photo 2 Enlarged portion of the slit

表1 メタルスリット散気装置の概略仕様
 Table 1 Specification of metal-slit air diffuser

Material	SUS316L
Media of diffuser	$250 \text{ mm}^W \times 250 \text{ mm}^L \times 0.3 \text{ mm}^t$
Effective surface of diffuser	$225 \text{ mm}^W \times 225 \text{ mm}^L$
Slit width	0.08 mm, 0.10 mm
Air flow rate	$20\text{--}50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

気泡塔内の水位を2 m～4 mの間で変化させて散気深度 H と $K_{La} \cdot V$ (K_{La} : 総括物質移動容量係数, V : 反応タンク容積)との関係を実験的に求め、Eckenfelderの関係式⁵⁾を用いて整理したところ、 $K_{La} \cdot V$ が散気深度の0.7乗に比例することが確認できた。そこで、酸素移動効率の水深補正は(1)式を用いて行った。

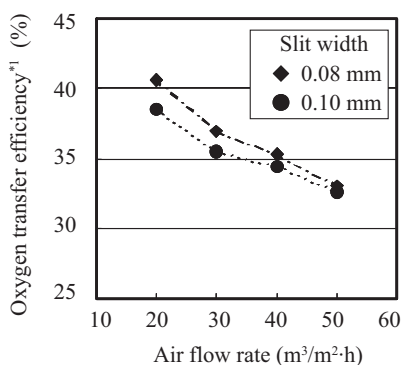
$$K_{La} \cdot V = F'' \cdot H^{0.7} \dots \dots \dots (1)$$

(ただし、 F'' : 比例定数, H : 散気深度)

2.4 実験結果および考察

図2にスリット幅0.08 mmおよび0.10 mmの散気板を用いて得られた単位散気面積当たりの通気量と酸素移動効率との関係を示す。ここで、酸素移動効率は、散気深度4 mでの実験結果から(1)式を用いて散気深度5 mに換算した値で示した。いずれのスリット幅についても、今回の実験風量範囲内において通常の散気装置よりも高い30%を超える酸素移動効率を得られることが分かった。

図3に単位散気面積当たりの通気量と湿式通気抵抗との関係を示す。同図が示すように、通気量の変化が湿式通気抵抗に及ぼす影響はごくわずかであった。また、今回の実験風量範囲内においては、散気板単身の湿式通気抵抗はス



*1 Values of oxygen transfer efficiency are equivalent to water depth of 5 m values in tap water.

図2 通気量と酸素移動効率の関係

Fig. 2 Relationship between air flow-rate and oxygen transfer efficiency

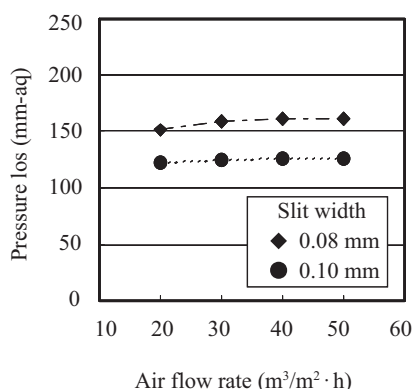


図3 通気量と湿式通気抵抗との関係

Fig. 3 Relationship between air flow-rate and pressure loss of diffuser

リット幅の違いによらず、いずれの場合も 200 mm-aq 以下であって従来の散気装置に比べて小さい値であった。

3. 閉塞解除

3.1 閉塞解除方法

(1) 散気性能維持のための機能

散気孔内は空気と水の接触部であり微生物が増殖しやすい環境にある。一部の散気孔内に微生物が付着・増殖して供給空気の流路を遮断すると、残りの未閉塞の散気孔を通過する空気流量（単位散気孔当たりの空気流速）が増加し、生成気泡の径が大きくなる。このため、従来の散気装置では酸素移動効率が経年的に低下して、より多くの空気を反応タンクへ供給する必要があった。

そこで、初期の散気性能を維持するために備えるべき機能として、(1) 日常的な簡易ブロー（水ブロー）による閉塞抑制機能と (2) 長期使用後のメンテナンスとして薬液洗浄による散気性能の完全回復機能の2点をメ

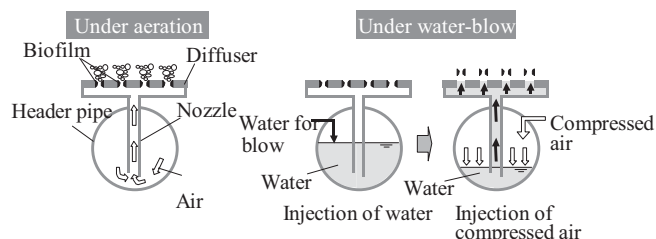


図4 水ブローシステムの概要

Fig. 4 Schematic diagram of water-blow system

タルスリット散気装置に付与させることにした。(1)の簡易ブローは1回/日～1回/週の頻度で定期的に水ブローすることで、散気孔内に付着する生物膜の成長を抑制することを目的とする。(2)の薬液洗浄は1回/年～1回/数年の頻度で実施することにより、長期の使用により簡易ブローで抑制しきれなかった生物膜を薬液で分解・除去し、散気性能を完全回復させることを目的とする。

(2) 水ブローシステム

図4に水ブローシステムの概要を示す。従来の散気装置との構造上の違いは、メタルスリット散気装置の下部にブロー水を供給するための揚水ノズルを備えている点にある。通常散気時には、ヘッダ管内の空気は揚水ノズルを通じて散気装置内に供給される。簡易ブローを実施する際には、散気をいったん停止してブロー水を注入し、ヘッダ管内に所定量（3～4l/個）のブロー水を貯留する。ついでヘッダ管内に空気を圧送してブロー水を散気装置内へ瞬時に押し出し、散気孔内に強い水流を供給することで孔内に付着した生物膜を剥離する。

3.2 実験装置および実験方法

(1) 水ブロー実験

表2にスリット幅0.10mmの散気板（他仕様は表1と同様）を用いて行った水ブローによる閉塞解除実験の条件を、図5に実験装置の概略フローを示す。

本実験装置を農業集落排水処理用オキシゲーションディッチ槽内（散気水深1000mm）に設置し、単位散気面積あたり30 m³/m²・hの通気量で連続運転した。水ブローの操作（バブルの切替え、注水など）はすべて手動で行い、ブローの頻度は1～2回/日とした。簡易ブローは、(1) ブロウ停止後、空気供給ライン内を大気開放し、(2) 注水口から0.5lのブロー水を注入して、(3) 注水口を閉鎖後、ブロウを再稼働させブロー水を散気孔から一気に押し出す手順で行った。ブロー水には清水（微生物の繁殖抑制のため少量の次亜塩素酸ナトリウムを添加）を用いた。散気装置の湿式通気抵抗をマノメータによって計測し、湿式通気抵抗の上昇量から水ブローの効果を調査した。

表 2 水ブローによる閉塞解除実験条件

Table 2 Experimental conditions for blockage brake by water-blow system

Diffuser depth	1 000 mm
Air flow rate	30 m ³ /m ² · h
Frequency of water -blow	1-2 times/day
Water for blow	Tap water (Containing small amount of sodium hypochlorite)

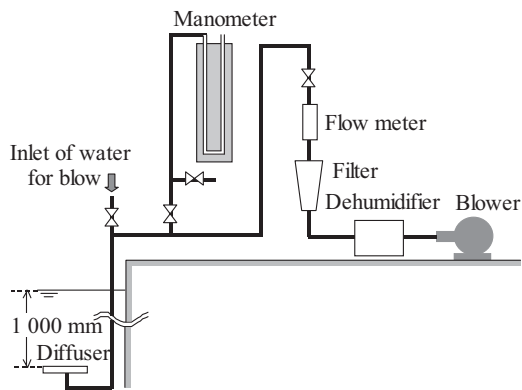


図 5 実験装置の概略フロー

Fig. 5 Schematic flow diagram of experimental equipment

(2) 薬液洗浄実験

散気性能の完全回復を目的に、湿式通気抵抗が増加した散気板を用いてオンサイトでの薬液洗浄実験を実施した。NaOH を主成分とする薬液を系内（配管および散気装置）が負圧にならない程度の極小流量で供給し、薬液を散気孔から染み出させた。洗浄の効果は薬液洗浄前後の散気板の湿式通気抵抗を測定することで評価した。

3.3 実験結果および考察

図 6 に所定頻度で水ブローを実施した際の連続散気運転の経過に伴う通気抵抗上昇量の変化を示す。

運転開始 360 日後の通気抵抗上昇量は 100 mm-aq 程度であり、定期的な水ブローを実施することによって通気抵抗の上昇が抑制できることを確認した。

なお、経過日数 300 日～350 日にかけて通気抵抗上昇量が高値（200～500 mm-aq）を示したため、散気装置を引上

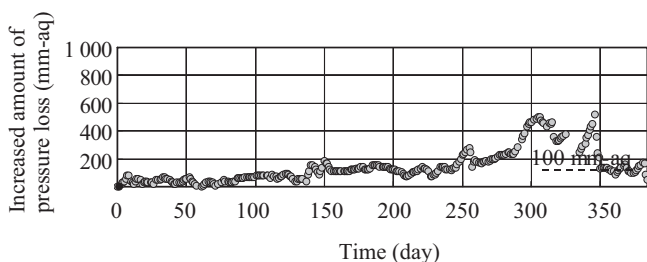


図 6 通気抵抗上昇量の経日変化

Fig. 6 Change of increased amount of pressure loss

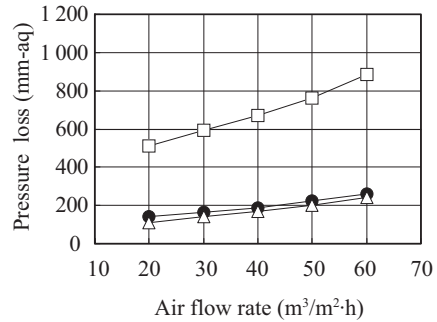


図 7 通気量と湿式通気抵抗との関係

Fig. 7 Relationship between air flow rate and pressure loss of diffuser

げて調査したところ、ケーシング内部にダストが堆積して流路の一部を遮断している状況が観察された。そこで、散気板には触れずに、ケーシング内の堆積ダストのみを取り除いて再設置したところ通気抵抗は回復した。堆積ダストを採取して顕微鏡で観察したところ、ブロー水注水口上部に付着したダストとほぼ同様の粒径と外観であったことから、堆積ダストは実験装置周辺の大気中に浮遊するダストがブロー水注入口に付着し、水ブローを行うたびにブロー水に混入してケーシング内部に蓄積したものであると考えられた。そこでブロー水注入口上部にダスト付着防止用のカバーを装着したところ、装着後（経過日数 350 日以降）の通気抵抗上昇量は低い値で安定推移した。図 7 にオンサイト薬液洗浄実験で得られた通気量と湿式通気抵抗の関係を示す。本実験に使用した散気板は水ブローを実施せずに長期連続散気運転を行うことで人為的に散気孔を閉塞させたものではあるが、湿式通気抵抗は未使用の散気板の湿式通気抵抗とほぼ同等の値を示し、薬液洗浄によって湿式通気抵抗が完全回復できることを確認できた。

4. 装置構成例

図 8 にメタルスリット散気装置を実施に適用する場合の装置構成例を示す。曝気槽の各ライザー管にブロー水（ろ過水）を注水するための電動ボール弁および圧縮空気を注入するための電磁弁を備えており、これらの弁類は専用の

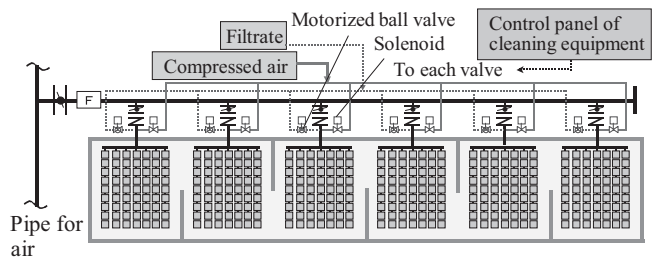


図 8 装置構成例

Fig. 8 Example of system configuration

制御装置で自動制御される。圧縮空気は散気装置内に瞬時に流入し、確実にブローを行う装置構成となっている。

5. おわりに

独自の散気孔構造を有するメタルスリット散気装置 (JFE ファインバブラー) の基本性能を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 本散気装置の初期性能は、従来の散気装置と比較して酸素移動効率が高く、また通気抵抗も小さいことから、省エネルギー化に貢献可能であることを確認した。
- (2) 本散気装置を実下水中で使用する場合に、初期性能を長期間維持する方策として、(1) 日常的な水ブローが有効であり通気抵抗の上昇が抑制できること、(2) 長期運転で散気装置の通気抵抗が上昇しても薬液洗浄を行うことで性能を完全に回復できることを単板で確認した。

現在、本散気装置を複数個装着した散気ブロックを実下水処理場に設置し、その稼働状況を確認しているところ

ある。

参考文献

- 1) 辻猛志ほか. 高効率型散気装置の基本性能. 第45回下水道研究発表会講演集. 2008, p. 578-580.
- 2) 坂井至ほか. 高効率型散気装置の性能維持. 第46回下水道研究発表会講演集. 2009, p. 661-663.
- 3) Burgers, J. M. Verh. Akad. Wet. Amst. 1941, vol. 44, p. 1045; 1942, vol. 45, p. 9.
- 4) 下水試験方法上巻. 日本下水道協会. 1997.
- 5) Eckenfelder, W. W; O'connor, JR&D. Biological Waste Treatment. PERGAMON PRESS. 1961.



辻 猛志



坂井 至



大橋 一聡