

# 〈研究発表〉

## オゾンマイクロバブルを用いた下水再生装置の開発

隅倉 みさき<sup>1)</sup>, 日高 政隆<sup>1)</sup>, 村上 孝雄<sup>2)</sup>, 葛西 孝司<sup>2)</sup>

(株)日立製作所 エネルギー・環境システム研究所 (茨城県日立市大みか町 7-2-1, E-mail: misaki.sumikura.mf@hitachi.com)<sup>1)</sup>  
 日本下水道事業団 (埼玉県戸田市下笹目 5141, E-mail: murakamit@jswa.go.jp, Katsusai01@jswa.go.jp)<sup>2)</sup>

### 概要

オゾンマイクロバブルを利用した下水再生装置の水処理性能, 長期運転性能および維持管理性を評価するため, サイト実験を実施した。その結果, 加圧圧力 0.2MPa でオゾン利用率は 99%以上となった。長期運転では, 溶存オゾン濃度一定制御, およびオゾン注入率一定制御により, 再生水の水質基準を達成できた。排オゾン量は注入オゾン量の 0.2%以下となり, 排オゾン処理装置の小型化や触媒交換頻度の低減が可能である。また, マイクロバブルの浮上分離効果により, SS を除去できることを確認した。

キーワード: オゾン, 下水処理水再生利用, マイクロバブル

### 1. はじめに

マイクロバブルは直径約 50  $\mu$ m の微細な気泡であり, 比表面積が大きく, かつ上昇速度が小さいため<sup>1)</sup>, 溶解性や反応性が高く, 従来のミリ径の気泡と比較して水処理効率の向上が期待できる<sup>2)</sup>。オゾン接触方式では, マイクロバブルの溶解効率の高さを利用して, 接触槽の低水深化, およびオゾン必要量と排オゾン量の低減が期待できる。

本研究の目的は, 下水再生装置を対象に, マイクロバブルを利用した水処理技術を開発することである。これまでに, オゾンマイクロバブルの水処理性能を, ラボ実験で評価し<sup>3)</sup>, またマイクロバブルの溶解挙動をモデル化した解析により, 装置性能の予測手法を確立した<sup>4)</sup>。実用化にあたっては, 下水二次処理水を用いた実規模設備により本装置の性能を実証する必要がある。本報では, オゾンマイクロバブルを用いた下水再生装置のサイト実証実験による水処理性能, 長期運転性能, および維持管理性の評価結果について報告する。

### 2. 実験装置および方法

#### 2.1 サイト実証設備

Fig.1 に, 下水処理場に設置したサイト実証設備の処理フローを示す。本設備は, 被処理水を供給する前処理装置と, 接触槽・マイクロバブル発生装置・オゾナイザ・排オゾン処理装置からなる下水再生装置で構成される。接触槽は 6 槽の横流上下迂流式(各槽の流路断面積 400×250 mm)であり, 最適水位と槽数を評価するため, 水位可変機構を設けた。最終沈殿池からの流出水(以下, 下水二次処理水)を砂ろ過処理し, 被処理水とした。被処理水は, 接触槽の上部から流入し, 第1槽でオゾンマイクロバブルを注入された後, 接触槽内を迂流し, 再生水として流出する。マイクロバブル発生装置では, 接触槽から被処理水の一部を取り出し, オゾンガスと混合する。この気液二相流をポンプで加圧し, ノズルで減圧してマイクロバブルを生成する<sup>3)</sup>。マイクロバブル生成効率は 80 %以上である<sup>2)</sup>。

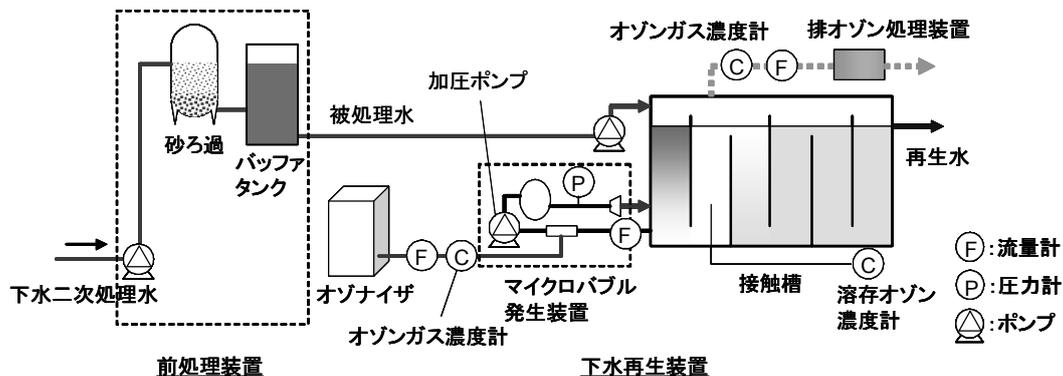


Fig.1 Experimental Setup

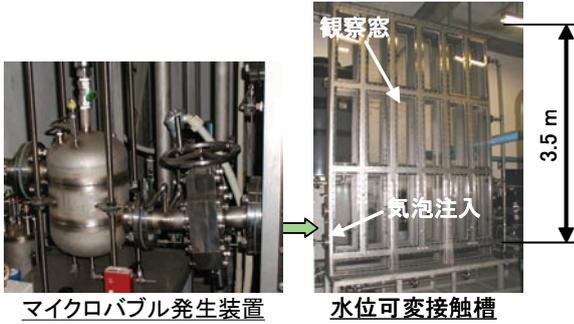


Photo 1 Micro-bubble Generator and Ozone Reactor

Photo 1に、マイクロバブル発生装置、および接触槽の外観を示す。

## 2.2 実験条件と評価方法

### (1) 水処理性能評価

Table 1 に、水処理性能評価の実験条件を示す。大腸菌は 100mL 検水により不検出を確認した。実験では、マイクロバブル発生装置の加圧ポンプの圧力(以下、加圧圧力)に対する大腸菌不活化率と、式(1)で定義されるオゾン利用率  $\lambda_{O_3}$  [%]に基づき、加圧圧力の最適値を求めた。次に、接触槽水位をパラメータとしてオゾン利用率を算出し、最適水位を求めた。

$$\lambda_{O_3} = (C_{O_3in} q_{in} - C_{O_3out} q_{out}) / (C_{O_3in} q_{in}) \dots (1)$$

ここで、 $C_{O_3in}$ ,  $q_{in}$  は供給オゾンの濃度 [mg/L] および流量 [L/min],  $C_{O_3out}$ ,  $q_{out}$  は排オゾンの濃度 [mg/L] および流量 [L/min] である。

Table 1 Experimental Conditions for Validation of Treatment Performance

項目	条件	項目	条件	
被処理水	砂ろ過水*1	オゾンガス供給流量	1.0~1.25 L/min	
処理流量	60 m <sup>3</sup> /d	オゾン注入率	1~5 mg/L	
被処理水 水質	大腸菌数	10~265 個/mL	加圧ポンプ流量	28~32 L/min
	色度	10~17 度	加圧ポンプ圧力	0.2 MPa
	濁度	0.5~1.2 度	接触槽水位	0.6, 1.2, 2.2 m

\*1 原水は下水二次処理水

### (2) 長期運転

長期運転実験は、2007年9月から2008年2月までの間に実施した。Table 2 に各 run 共通の運転条件、Table 3 に各 run ごとの運転条件を示す。各 run では、計測器等のメンテナンス時(運転期間を通じて2~3回程度)を除き、17~52 日間、連続して運転した。run1, 2は溶存オゾン濃度一定制御、run3はオゾン注入率一定制御である。溶存オゾン濃度一定制御では、接触槽第2槽下部の溶存オゾン濃度の測定値が目標値を維持するように、オゾン注入率を自動制御した。

水質については、被処理水と再生水の色度・濁度を連続計測した。また、運転期間の一部の期間を対象に

Table 2 Experimental Conditions for Validation of Treatment Performance

項目	条件	項目	条件
被処理水	砂ろ過水*1	供給オゾンガス濃度	55 ~200 mg/L
処理流量	60 m <sup>3</sup> /d	オゾンガス供給流量	1.2 ~1.6 L/min
接触槽水位	1.2 m	加圧ポンプ流量	29~32.5 L/min
接触時間(気泡有)	16 min	気液比	3.9~4.9 %
スカム除去間隔	2~6 h	加圧ポンプ圧力	0.2 MPa

Table 3 Experimental Conditions for Validation of Treatment Performance

	run1	run2	run3
運転期間	2007/9/11 ~9/27	2007/11/17 ~2008/1/7	2008/1/8 ~1/23
制御方式	溶存オゾン濃度一定		オゾン注入率一定
水温	25.6 °C (24.8~27.0)	17.9 °C (14.9~20.0)	15.6 °C (13.3~17.7)
制御目標*1	0.4 mg/L	0.3~0.5 mg/L	4.0~4.5 mg/L

\*1 溶存オゾン濃度(run1,2), オゾン注入率(run3)

大腸菌数を1日2回の頻度で分析した。

### (3) 維持管理性の確認

マイクロバブルを用いた水処理における維持管理項目として、被処理水中の SS が浮上分離して生じるスカムの蓄積と、被処理水中の夾雑物等によるノズルの閉塞について評価する必要がある。このため、第2・3槽にスカム除去用のホoppaを設置し、2~6 h に1回の間隔で水位を上昇させてスカムをホoppaへ流出させ、系外に排出した。

### (4) SS 除去性能の確認

オゾンマイクロバブル処理では、被処理水中の SS は、浮上分離効果に加え、一部はオゾンの酸化力による有機物の分解効果により除去されると考えられる。それぞれの効果を把握するため、オゾンマイクロバブル(注入率 4.5 および 10 mg/L)処理と、酸素マイクロバブル処理を実施した。注入ガス流量は等量とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 水処理性能の評価

#### (1) 加圧圧力の最適値

Fig.2 に、加圧圧力をパラメータとして、オゾン注入率に対する大腸菌不活化率の分析結果を示す。図中の黒抜きシンボルは、大腸菌不検出を示したデータを表す。図に示すように、大腸菌不活化率はオゾン注入率にともなって増加し、注入率 4.5 mg/L 以上では圧力によらず、大腸菌は検出されなかった。大腸菌不検出を達成するオゾン注入率のばらつきは、被処理水の水質が異なったためと考えられる。

Fig.3 に、加圧圧力をパラメータとして、オゾン利用率の測定結果を示す。オゾン利用率は、オゾン注入率

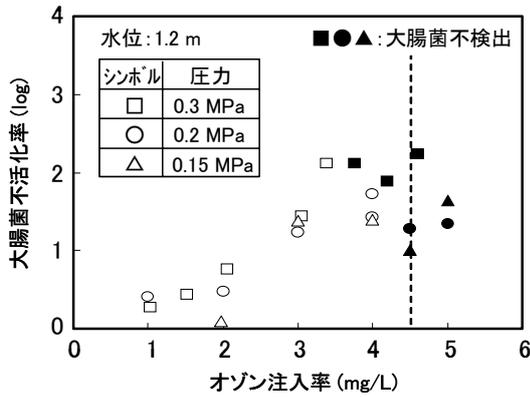


Fig.2 Inactivation Rate of *E. coli* by Ozone Micro-bubble Treatment

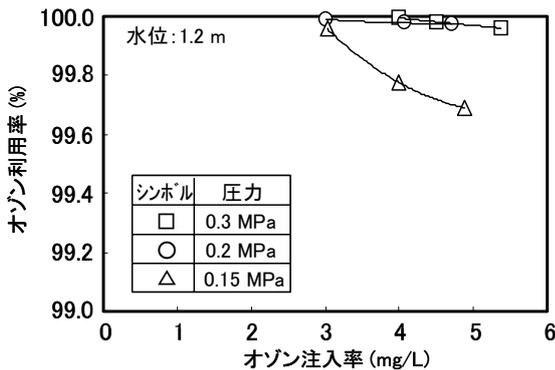


Fig.3 Ozone Utilization Efficiency under Different Pressures

にもなって減少した。加圧圧力 0.15 MPa の条件では他の圧力の場合と比較して有意に低い値を示した。

(2) 接触槽水位の評価

Fig.4 に、前項の評価をもとに設定した大腸菌不検出を達成するオゾン注入条件(注入率 4.5 mg/L)における水位とオゾン利用率の関係を示す。マイクロバブルの特長である高い溶解性と反応性によって、水位 0.6 m 以上の範囲で、高いオゾン利用率が得られた。

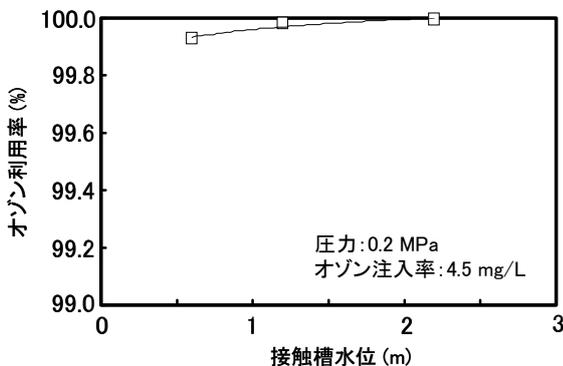


Fig.4 Ozone Utilization Efficiency under Different Water Level

Fig.5 に、接触槽内の流下時間に対する溶存オゾン濃度の測定値を示す。4.5 mg/L 以下のオゾン注入率において、約 10 分の流下で溶存オゾン濃度がほぼ零になった。このマイクロバブルの高い反応性によって、

オゾンマイクロバブルを利用した下水再生装置では、滞留時間を短く設定できる。その結果、接触槽を小型化できるとともに、低水深化も含め自由度の高い槽の設計が可能である。

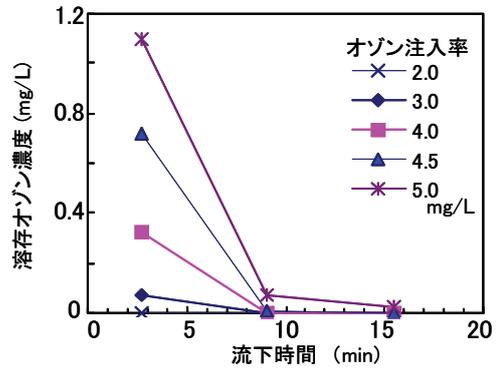


Fig.5 Dissolved Ozone Concentration under Different Ozone Dosages

3.2 長期運転性能の評価

(1) 制御方式の比較

全 run の被処理水と再生水の水質を、Table 4 に示す。いずれの run でも、再生水(親水利用)の水質基準(色度 10 度以下・濁度 2 度以下・大腸菌不検出)を達成した。また、接触槽からの排オゾン濃度は全 run を通じ 250 ppm 以下を示し、排オゾン量は注入オゾン量の 0.2 % 以下であった。このため、排オゾン処理装置の小型化、あるいは触媒交換頻度の低減が期待できる。

溶存オゾン濃度一定制御の典型的な運転結果として、run2 におけるオゾン注入率、溶存オゾン濃度、および被処理水と再生水の色度、濁度を Fig.6 に示す。溶存オゾン濃度の目標値は、大腸菌不活化の予備実験をもとに、0.3~0.5 mg/L に設定した。本方式では、被処理水中のオゾン消費物質の変動に対してオゾン注入率を増減できるため、オゾン使用量の最小化が期待できる。

一方、run3 におけるオゾン注入率一定制御では、オゾン注入率 4.0~4.5 mg/L のいずれの場合でも、溶存オゾン濃度は変動するものの、0.2 mg/L 以上の濃度を維持できた。このように、オゾン注入率一定制御では、目標のオゾン注入率を、被処理水の水質に応じて尤度をもって設定することにより、水質を維持できる。さらに、制御用の溶存オゾン濃度計が不要になり、設備コストの低減やメンテナンスの省力化が期待できる。

(2) 維持管理性の評価

約 5 ヶ月の運転期間を通じて、洗浄を要するレベルのノズルの閉塞は発生しなかった。浮上分離したスカムは、2~6 h に 1 回のスカム除去操作により槽内で蓄積せず排出できることを確認した。

Table 4 Water Quality in Validation of Treatment Performance

項目	run1		run2		run3		再生水基準 (親水利用)	
	被処理水	再生水	被処理水	再生水	被処理水	再生水		
色度	度	19.0 (12.2~23.5)	1.5 (0.4~2.6)	22.1 (19.0~25.8)	1.2 (0.4~2.9)	14.1 (10.0~23.5)	0.7 (0.3~1.5)	< 10
濁度	度	0.58 (0.44~1.52)	0.27 (0.17~0.78)	0.48 (0.37~1.1)	0.25 (0.20~0.55)	0.42 (0.21~2.42)	0.21 (0.11~0.58)	< 2
大腸菌	*1	2868 (708~15625)	不検出 [100mL検水]	1406 (125~5000)	不検出 [100mL検水]	1011 (167~4542)	不検出 [100mL検水]	不検出 [100mL検水]

\*1 被処理水はCFU/100mL。再生水は100mL検水中不検出。

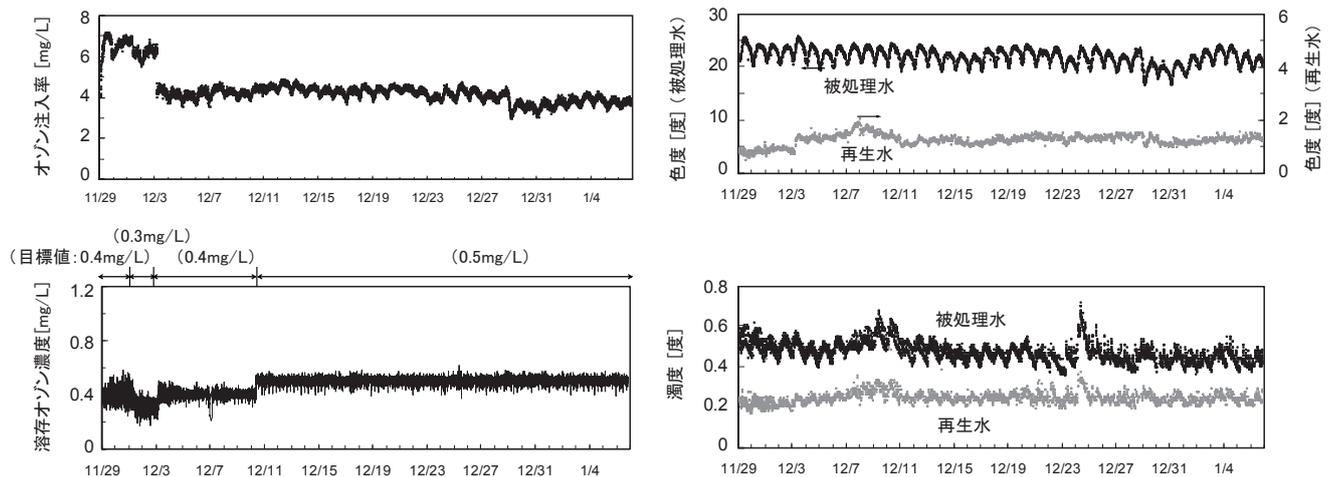
平均値  
(最小~最大)

Fig.6 Ozone Dosage, Dissolved Ozone, Color and Turbidity of Influent (Dissolved Ozone Control)

### 3.3 SS 除去性能の評価

Table 5 に、砂ろ過水と、酸素およびオゾンマイクロバブル処理後の、SSと濁度の分析結果を示す。酸素マイクロバブル処理では SS 除去率は 60 % 以上であり、SS 除去のための砂ろ過工程が不要になる可能性がある。さらにオゾンマイクロバブルでは、SS、濁度ともに除去率が向上した。

Table 5 Removal of Suspended Solid and Turbidity

処理工程	除去対象		SS		濁度	
	mg/L	除去率	mg/L	除去率	度	除去率
下水二次処理水	1.7~2.2	-	0.90~0.98	-		
処理後	砂ろ過	0.5	71%	0.35	-	
	酸素マイクロバブル	0.8	63%	0.54	45%	
	オゾンマイクロバブル	4.5mg/L	0.6	73%	0.43	54%
		10mg/L	0.5	78%	0.43	53%

## 4. 結言

オゾンマイクロバブルを利用した下水再生装置の水処理性能、長期運転性能、および維持管理性を、サイト実証実験によって評価し、以下の結論を得た。

1) 加圧圧力は 0.2 MPa が適切であることが分かった。

- 2) 排オゾン量は注入オゾン量の 0.2 % 以下となり、排オゾン処理装置を小型化可能である。
- 3) 約 10 分で槽内の溶存オゾン濃度はほぼ 0 mg/L となり、接触槽を小型化できる見通しを得た。
- 4) 長期運転では、溶存オゾン濃度一定制御、およびオゾン注入率一定制御の連続運転実験により、再生水(親水利用)の水質基準を達成できた。
- 5) オゾンマイクロバブル処理の浮上分離効果により、SS 除去を目的とした、オゾン処理の前処理である砂ろ過工程が不要となる可能性が示唆された。

### 【参考文献】

- 1) NEDO:有害化学物質リスク削減基盤技術研究開発事業平成 16 年度成果報告書(2005)
- 2) 尾上,松本,他,「オゾンマイクロバブルの水質浄化への応用」,化学工学,71-3, pp. 178-181 (2007)
- 3) Sumikura, M., Murakami, T., et al., Water Science & Technology, Vol. 56. 5, pp 53-61 (2007)
- 4) 日高,葛西,他,第 44 回下水道研究発表会講演集, pp. 751-753 (2007)