

# オゾン UFB を用いた余剰汚泥処理におけるオゾン処理条件の影響

The effect of ozone treatment condition to reduce sludge volume using ozone in ultrafine bubbles

○橋本くるみ\*、中井智司\*\*、西嶋渉\*、友村圭祐\*\*\*

\*：広島大学環境安全センター、\*\*：広島大学大学院工学研究科、\*\*\*：西日本高速道路株式会社

## 論文要旨

余剰汚泥のオゾンUFB処理において同じオゾン消費量であっても、オゾン濃度やオゾン流量、処理時間、汚泥濃度などが処理効率に影響を与える。本研究では、オゾン濃度やガス流量を変えた時の処理効率への影響について評価することを目的とした。同じオゾン消費量であれば、汚泥濃度が高く、オゾン濃度が高い方が細菌の死滅率が高かった。また、ガス流量を上げると生成UFB個数が増加したが、オゾンを1,500 mL/minで供給した時には750、1,000 mL/minで供給した時よりも細菌の死滅率が低かった。The purpose of this study was to evaluate the effect of different ozone concentrations and gas flow rates on the treatment efficiency. For the same ozone consumption, the higher the sludge concentration and the higher the ozone concentration, the higher the death ratio of bacteria was. The number of UFBs increased with increasing gas flow rate, but the death ratio of bacteria was lower when ozone was supplied at 1,500 mL/min than when it was supplied at 750 and 1,000 mL/min.

キーワード：酸化処理、汚泥減容化、余剰汚泥

## 1. はじめに

下水などの有機性排水の処理に用いられる活性汚泥法において、現在、産業廃棄物として年間約 7500 万トンもの余剰汚泥が発生している。余剰汚泥減容化手法として、オゾンにより汚泥の再基質化（易生分解化）を促進した後に生物処理を行う手法（Yasui and Shibata, 1994）が実用化されている。我々の研究グループはこれまでにウルトラファインバブル（UFB）化したオゾンにより汚泥を処理することで従来の散気管によるオゾン処理と比較して必要オゾン量が 33~60%と少ないことを報告した（Hashimoto et al., 2021a, 2021b）。UFB は直径 1  $\mu\text{m}$  以下の気泡として定義され（International Organization for Standardization, 2017）、通常の散気管で生成されるミリサイズの気泡（ミリバブル）と比較し、高い比表面積および高い気泡密度、高い内圧を持ち、液相中での上昇速度も遅いため水中での気泡の滞留時間が長いという特徴がある。

汚泥のオゾン処理においてオゾン供給量  $D_{O_3}$  はオゾン濃度  $C_{O_3}$ 、ガス流量  $Q$ 、処理時間  $T$ 、汚泥濃度  $C_{AS}$ 、汚泥量  $V_{AS}$  としたとき、

$$D_{O_3} = \frac{C_{O_3} \times Q \times T}{C_{AS} \times V_{AS}}$$

と表される。

以前に、汚泥の易生分解化の指標として活性汚泥細菌の死滅率を用い、異なる濃度の汚泥をオゾン UFB で処理した時、汚泥濃度が高いほど活性汚泥中の細菌の死滅率が高いことを報告した（橋本ら、2018）。この時、オゾン濃度は一定とし、汚泥濃度によって処理時間を調整しオゾン供給量をそろえて系列間の活性汚泥細菌の死滅率の違いを比較した。汚泥濃度が高いことでオゾンと汚泥の接触効率が高いことも処理効率向上の原因と考えられたが、汚泥濃度が高いほど処理時間が長く、すなわち UFB 発生装置内を汚泥が通過する回数が高濃度の汚泥のほうが高かったため、オゾンガスと装置内で激しく混合される回数が多かったことやせん断力によるフロックの微細化なども影響していた可能性がある。同じオゾン供給量であっても処理時間をそろえてオゾン濃度を汚泥濃度に応じて調整した場合は装置内の循環の影響を排除できるが、一方で、汚泥濃度が薄いものは供給オゾン濃度が低いため、汚泥内の溶存有機物による無効消費の影響により死滅率が低下する恐れもある。よって、同じオゾン供給量でも供給するオゾンの濃度や流量によってオゾン処理効率は変化することが想定されるため、処理時間をそろえ、オゾン濃度やオゾン流量を変えてオゾン UFB 処理を行った時の死滅率の違いについて検討した。

## 2. 実験方法

### 2. 1 汚泥のオゾン UFB 処理

東広島浄化センターの活性汚泥を目開き 1 mm のステンレスふるいに通し、採取した。濃縮汚泥はフィルターバッグ（孔径 5  $\mu\text{m}$ ）で濃縮を行った。65 L 容のステンレスバケツ内に 20 L の汚泥を入れ、UFB 発生装置（Buvitas HYK-25, Ligaric）にて、表 1、表 2 の通り、汚泥濃度に応じたオゾン濃度やオゾンガス流量にてオゾン UFB 処理を行った。UFB 装置内への汚泥循環速度は 38 L/min であった。水温は冷却装置を用いて 22~25°C に維持した。オゾン UFB 処理に伴って発生するスカムはハンドポンプやプラスチックシリンジを用いて吸引・吐出を繰り返し消泡し、均一化した。経時的にオゾン UFB 処理を行った汚泥を採取して死滅率測定に供した。また、今回の試験は開放系で行ったが、予備試験で密閉リアクターを用いてオゾン UFB 処理中のオフガス中のオゾン濃度を測定した際にオゾンは不検出であったため、供給したオゾンは全て汚泥中で消費されたものとした。活性汚泥中の細菌の死滅率は既報(Hashimoto et al., 2021a)に従い、細菌生存率アッセイキット (Live/dead *BacLight* Bacterial viability

表 1 汚泥のオゾンUFB処理におけるオゾン濃度と汚泥濃度の影響

系列	1	2
オゾン濃度 [mg/L]	24	95
ガス流量 [mL/min]	750	750
汚泥量 [L]	20	20
汚泥初濃度 [mg/L]	1,800	7,500

表 2 オゾンUFB処理におけるガス流量とオゾン濃度の影響

系列	1	2	3
オゾン濃度 [g/m <sup>3</sup> ]	60	90	120
ガス流量 [mL/min]	1500	1000	750
汚泥量 [L]	20	20	20
汚泥初濃度 [mg/L]	2250	2250	2250

kit L13152, Thermofisher scientific Co., Ltd) を用いて染色した汚泥を、蛍光顕微鏡にて観察し、細菌の総面積に対する死細菌の面積より算出した。

## 2. 2 オゾンガスの流量による UFB 個数密度の違い

ガスの供給量を変えた時の UFB の個数密度の測定は、ステンレスタンク内に水道水 40 L を入れ、UFB 発生装置 (Buvitas HYK-32D, Ligaric) を用いて空気を 100、750、1,000 mL/min のいずれかの流量で供給して UFB 水を作成した。個数密度は Nanosight ns500 (Malvern Panalytical) により測定した。Nanosight では UFB とコンタミの明確な区別が難しいため、UFB 作成に用いる水を装置に通したものを Blank として、UFB 水の測定値から差し引いた。

## 3. 結果および考察

### 3. 1 オゾン濃度および汚泥濃度の影響

汚泥濃度に応じてオゾン濃度を調整した場合、オゾン濃度と汚泥濃度がともに高い場合のほうが低い場合よりも活性汚泥細菌の死滅率の立ち上がりが早く、全体に高い死滅率を示した (図 1)。汚泥濃度が高い方がオゾンUFBと汚泥フロックの接触効率が高く、オゾン濃度が高い方が、溶存有機物等に無効消費されるオゾンが少ないものと示唆された。

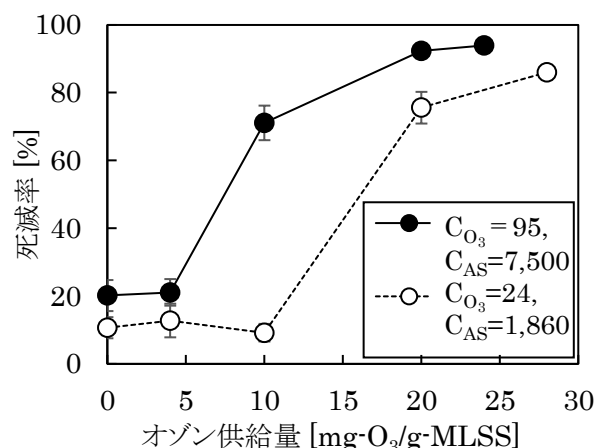


図 1 オゾン濃度および汚泥濃度を変えた時の活性汚泥細菌の死滅率、 $C_{O_3}$ : オゾンガス濃度 [g/Nm<sup>3</sup>]、 $C_{AS}$ : MLSS 濃度 [mg/L]

### 3. 2 オゾンガス流量およびオゾン濃度の影響

本研究で用いた UFB 発生装置へ供給するガス流量はメーカー推奨値で 750 mL/min であるが、様々な流量で UFB 発生装置に空気を供給して UFB を作成した時の UFB 発生個数を測定したところ、図 2 に示すとおり、ガス流量を大きくするほど発生する UFB 個数密度が大きくなる傾向にあり、750 mL/min と比較して 1,500 mL/min では 2.6 倍に相当する  $7.5 \times 10^8$  個/mL の UFB が発生していた。UFB の個数密度が高いほど汚泥との接触効率が高まり活性汚泥の殺菌性が高まることも期待された。

よって、流量が増加するにしたがって同じオゾン供給量での死滅率が高くなっていくものと想定していたが、実際には、UFB の個数密度が最も高いはずの 1,500 mL/min においては 3 つの中で最も死滅率が低かった (図 3)。750 mL/min と 1,000 mL/min の死滅率の上下ははっきりしないが、複数回行った試験で、1,500 mL/min は常に最も低い死滅率を示し、実験のミスや偶然によるものではないことが確認されている。UFB の個数密度が多くても、内包されるオゾン濃度が薄く、UFB から溶出するオゾン濃度も薄いため、汚泥フロックを取り巻く溶存有機物や高分子物質などに容易に消費されてしまい、殺菌に使われるオゾン量が少ないためと考えられる。

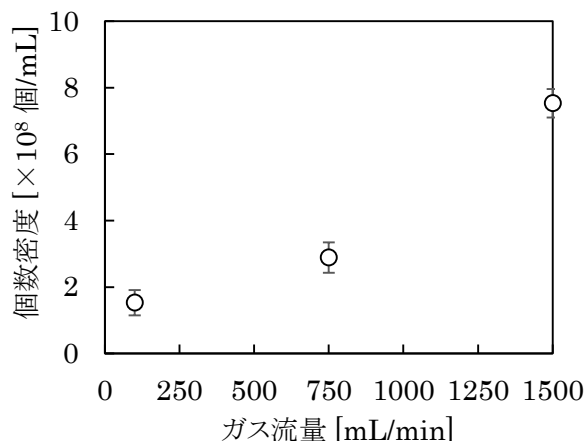


図 2 UFB 発生装置への供給ガス量による UFB 生成量の変化

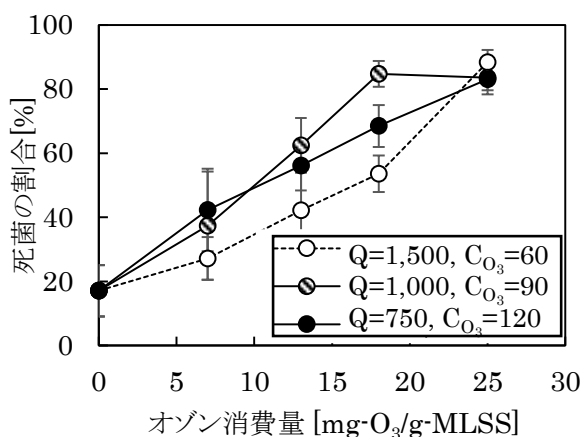


図 3 ガス流量およびオゾン濃度を変えた時の活性汚泥細菌の死滅率、Q: オゾンガス流量 [mL/min]、C<sub>O<sub>3</sub></sub>: オゾンガス濃度 [g/Nm<sup>3</sup>]

#### 4. まとめ

余剰汚泥のオゾンUFB処理において、オゾン濃度やオゾン供給量の影響について評価した。汚泥濃度に応じてオゾン濃度を変えた場合には、同じオゾン消費量であっても、汚泥濃度、オゾン濃度ともに高い方が活性汚泥細菌の死滅効率が低いことが明らかとなった。また、UFB発生装置に供給するガス流量を上げると発生するUFB量が増加したが、流量が高いほど低いオゾン濃度で処理したため、同オゾン消費量で比較すると流量の高い1,500 mL/minではUFBが含有するオゾン濃度が低く、溶存有機物により無効消費されるオゾン量が大きくなった可能性がある。効率の良い処理のためには高いオゾン濃度でUFB発生装置の適正流量にて処理することが重要であることが確認された。

#### 参考文献

- 1) Hashimoto, K., Kubota, N., Okuda, T., Nakai, S., Nishijima, W., Motoshige, H., 2021a. Reduction of ozone dosage by using ozone in ultrafine bubbles to reduce sludge volume. *Chemosphere* 274, 129922. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129922>
- 2) Hashimoto, K., Nakai, S., Motoshige, H., Nishijima, W., 2021b. Sludge reduction in a full-scale wastewater treatment plant using ultra-fine-and micro-bubble ozonation. *Ozone Sci. Eng.* 43, 127–135. <https://doi.org/10.1080/01919512.2020.1863742>
- 3) International Organization for Standardization, 2017. ISO 20480-1:2017-Fine bubble technology - General principles for usage and measurement of fine bubbles - Part 1: Terminology.
- 4) Yasui, H., Shibata, M., 1994. An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process. *Water Sci. Technol.* 30, 11–20.
- 5) 橋本くるみ, 大野正貴, 西嶋渉, 志田裕昭, 久保田成美, 圓島徹, 中井智司, 2018. オゾンウルトラファインバブル (ナノバブル) を用いた余剰汚泥削減プロセスにおける繊維および余剰汚泥の削減効果, in: 第52回水環境学会年会講演要旨集.