

気液二相旋回噴流下での均一混合時間と オゾンを用いた汚泥処理技術

設楽 守良*・井口 学*²・玉森 匠*³

Mixing Time of Cylindrical Bath Agitated by Swirl Motion of Gas-liquid Two-phase Jet
and Sludge Treatment Using Ozone

Moriyoshi SHITARA, Manabu IGUCHI and Taku TAMAMORI

Synopsis : Sludge treatment using a gas-liquid two-phase swirling jet and ozone was proposed. The swirl motion of a gas-liquid two-phase jet appeared in a cylindrical bath under certain injecting conditions, and the bath was strongly agitated in the presence of the swirl motion. The swirling jet brought a very excellent effect on the ozone reaction with sludge. The intensity of agitation was quantitatively evaluated by means of mixing time. An empirical equation was derived for the mixing time. Sludge was decomposed by this method and, as a result, BOD₅ and SS in the sludge were significantly decreased.

Key words : sludge treatment, gas-liquid two-phase jet, ozone, swirl motion, agitation, mixing time

1. 緒言

下水処理施設等から発生する汚泥量は、年々増加の一途をたどっている。汚泥の処分法としては、脱水、焼却、溶融等による減量化や、建設資材化等によるリサイクルが行われているが、多くは埋め立て処分によって処理されているのが実状である。その結果、日本全国で埋立処分場の容量が逼迫、さらには新規の埋立処分場建設が、困難となっている状況から、低コストかつ高効率な汚泥減量化技術が待望されており、現在さまざまな技術開発が行われている¹⁻¹¹⁾。

このような背景のもと、筆者らは、気液二相旋回噴流により、反応槽内攪拌効率の一層の向上が期待でき、槽内の均一分散と、被処理物と反応性ガスとの接触効率の増大が見込まれることから、気液二相旋回噴流の汚泥処理プロセスへの適用について調査を開始した。

円筒容器内に、水を吹き込むノズルから空気を同時に吹き込むと、水と空気の気液二相旋回噴流が発生し、浴内が激しく攪拌される。この旋回噴流を利用した新規プロセスは、プロペラ等の機械的攪拌装置を用いることなしに、旋回現象により強い攪拌力が得られることから、汚水処理におけるエアレーション効率の向上や、オゾン酸化促進、その他攪拌混合を必要とする様々な工業プロセスに適用可能であると考えられ、既に難分解性有機性廃水処理においては、その有効性が確認されている¹²⁾。

反応槽内の反応速度に影響を及ぼす因子として、攪拌混合効率があるが、混合効率の研究の多くは均一混合時間に基づいて行われており¹³⁾、旋回気泡噴流及び旋回液体噴流における均一混合時間については報告されているが¹⁴⁻¹⁸⁾、気液二相旋回噴流の均一混合時間については、まだ明らかにされていない。

筆者らは、これまで、このような円筒容器内における気液二相旋回噴流の旋回発生条件及び基本特性である周期、振幅、旋回開始時間について報告している^{19,20)}。本研究では、水と空気の気液二相噴流によるモデル実験により、均一混合時間 T_m について調査を行い、さらに、気液二相旋回噴流と、反応性ガスとしてオゾンを用いたプロセスにより汚泥処理を行い、従来のオゾン曝気プロセスと比較して、気液二相旋回噴流を用いた汚泥処理プロセスの有効性について検討した。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。まずモデル実験について述べる。透明アクリル樹脂製の円筒容器を使用し、容器内径 D は、130, 200, 309 mm、高さはそれぞれ 400, 500, 700 mm の 3 種類とした。空気の吹き込みは円筒容器底部中心に設置した水を吹き込むノズル内に、中心軸上に挿入した外径 3 mm、内径 $d_{n\text{en}g} = 2$ mm のノズルにより行った。このとき水を吹き込むノズルの内径 $d_{n\text{en}}$ は 13 mm である。

平成 16 年 4 月 26 日受付 平成 16 年 7 月 26 日受理 (Received on Apr. 26, 2004, Accepted on July 26, 2004)

* (株) ヒューエンス、現 北海道大学大学院生 (Huens Co., Ltd., now Graduate Student, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

* 2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

* 3 (株) ヒューエンス (Huens Co., Ltd.)

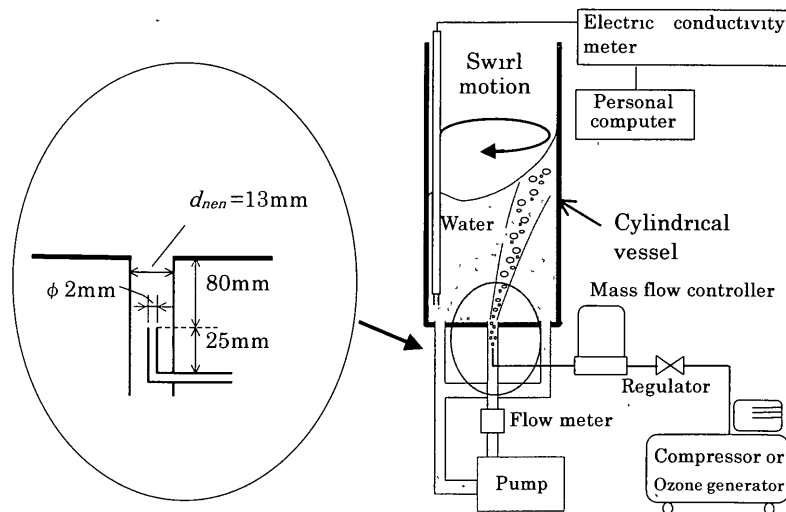


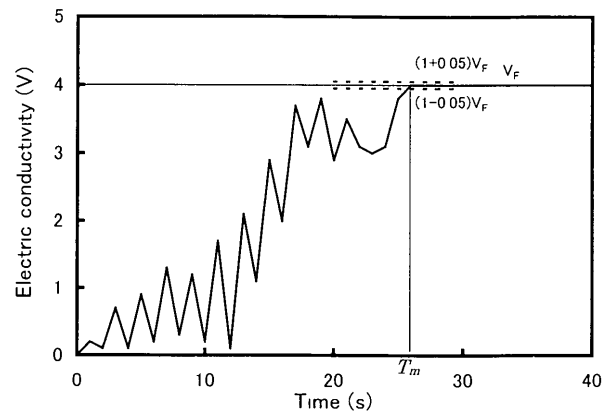
Fig. 1. Schematics of experimental apparatus

吹き込む空気はコンプレッサーからの圧縮空気を使用し、マスフローコントローラにより空気流量 Q_g を $0 \sim 500 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲に設定した。吹き込む水の流量 Q_L はポンプ吐出流量のインバーター制御により、 $0 \sim 500 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲に設定した。この装置において、水と空気を同時に吹き込むと、ノズル出口での噴流は気液二相噴流となる。ノズルから吹き込まれた水は、円筒容器底部の内径 13 mm の 4 箇所のドレインからポンプに吸い込まれ、再びノズルから吹き込まれて装置内を循環している。

本実験では水流量 Q_L 、空気流量 Q_g 、浴深 H_L を変化させて、気液二相噴流の旋回発生領域における均一混合時間 T_m を測定した。また、旋回現象には、浅水波型と深水波型の 2 種類が存在するが^{21,22)}、今回の実験では深水波型の旋回を対象とした。

円筒容器の所定の浴深 H_L までイオン交換水を満たし、浴内の旋回噴流が定常状態に達した後、トレーサーとして濃度 1 mol/L の KCl 水溶液を、イオン交換水に対して 1000 : 1 の割合で浴表面から投入した。電気伝導度計のプローブは、円筒容器側壁から 10 mm、浴底から 20 mm の位置に設置した。電気伝導度計の経時的変化については、出力電圧をパーソナルコンピュータに取り込み記録を行った。これを Fig 2 に示す。トレーサー投入直後から電気伝導度の最終値の 95~105% の範囲内に至るまでの時間を均一混合時間 T_m と定義した。測定は同一条件について 3 回行い、その平均値を均一混合時間の測定値とした。

次に汚泥処理試験について述べる。容器内径 D が 380 mm、高さが 1000 mm の透明アクリル樹脂製の円筒容器を使用した。浴深 $H_L = 350 \text{ mm}$ まで中札内下水浄化センターの余剰汚泥を満たした。よってアスペクト比 H_L/D は 0.92 である。SS (浮遊物質) が沈降しないように攪拌して浴内を均一にした後、処理前の原液として汚泥 500 mL をサンプリングした。ポンプ稼動後、円筒容器に汚泥を

Fig. 2. Definition of mixing time, T_m .

吹き込むノズル内に、同軸上に挿入した外径 3 mm、内径 $d_{neng} = 2 \text{ mm}$ のノズルにより、オゾン化空気の吹き込みを行った。よってノズル出口では汚泥とオゾン化空気の気液二相噴流となっている。オゾン化空気はオゾン発生装置によって製造し、オゾン濃度は 120 g/Nm^3 とした。投入オゾン濃度及び未利用オゾン濃度は、オゾン濃度分析計を用いて測定を行った。液体流量 Q_L は $1670 \text{ cm}^3/\text{s}$ に設定した。円筒容器底部のドレインから所定の時間ごとに処理液 500 mL をサンプリングし、SS、 BOD_5 の分析を行った。分析方法は、SS については、昭和 46 年環境庁告示第 59 号付表 8 の過重量法、 BOD_5 については、JIS K0102-21 および JIS K0102-32.3 隔膜電極法によった。また比較試験として、オゾン濃度を同一にして、多孔板を用いてオゾンを投入する方式 (以下、オゾンエアレーションという) についても調査を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 気液二相旋回噴流の均一混合時間 T_m

円筒容器底部中心のノズルから、水と空気を同時に吹き

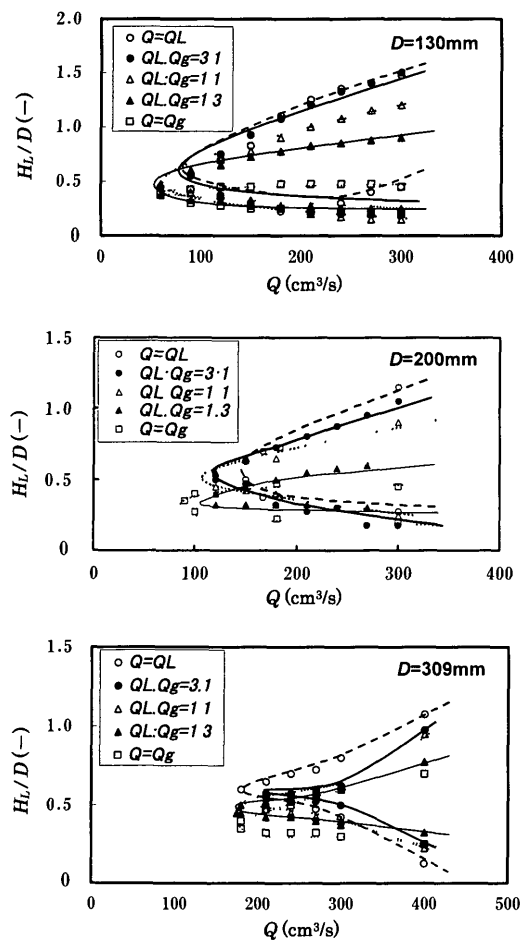
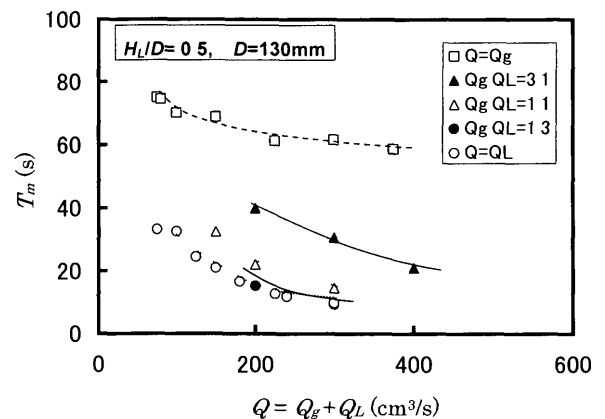
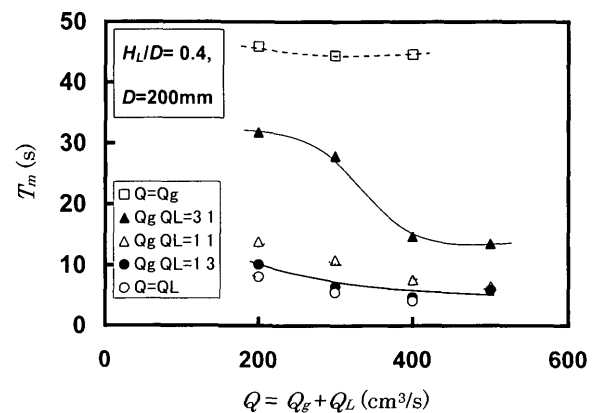
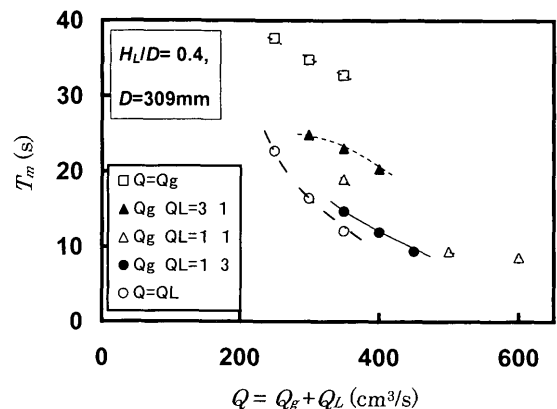


Fig. 3 Generation region of the swirl motion of jet.

込むと、ノズル出口での噴流は気液二相噴流となり、ある浴深 H_L のとき、旋回が起こり始め、さらに浴深 H_L が大きくなると旋回が止まる。すなわち、あるアスペクト比 H_L/D の範囲内で旋回現象が発生する。気液二相噴流の旋回発生領域については前報で詳しく述べた¹⁹⁾。その旋回発生領域内での均一混合時間 T_m を調べた。旋回発生条件はどの容器径においても、旋回が起こり始めるアスペクト比 H_L/D については、水噴流、気液二相噴流、気泡噴流のどの場合でも、あまり変わらないが、旋回が止まるアスペクト比 H_L/D については、総流量 Q に占める水流量 Q_L の割合が大きくなるにつれて大きくなるということがわかっている。各容器径における旋回発生条件のグラフより、水噴流、気液二相噴流($Q_L:Q_g=3:1$, $Q_L:Q_g=1:1$, $Q_L:Q_g=1:3$)、気泡噴流のどの場合においても旋回現象が発生するアスペクト比 H_L/D を選定し、均一混合時間 T_m の測定を行った。

Fig. 3に容器内径 D が130, 200, 309 mmの各場合における、水噴流、気液二相噴流、気泡噴流の旋回発生条件を再録した¹⁹⁾。なお、旋回の波の型には前述のように、浅水波型、深水波型の2種類存在するが、このグラフは深水波型を対象としたものである。

Fig. 4~6に、気泡噴流、気液二相噴流、水噴流の3つの系における、均一混合時間 T_m の測定結果を示す。容器内

Fig. 4. Mixing time with the swirl motion of jet ($D=130$ mm)Fig. 5 Mixing time with the swirl motion of jet ($D=200$ mm)Fig. 6. Mixing time with the swirl motion of jet ($D=309$ mm).

径 D は130, 200, 309 mmの3種類である。横軸 Q は、ノズル出口における空気と水の総流量を表しており、気液二相噴流の場合は、 $Q=Q_L+Q_g$ である。

実験結果より、気液二相噴流、水噴流の場合は、総流量 Q に占める水流量 Q_L の割合が大きくなるにつれて、均一混合時間 T_m は小さくなるということがわかる。気泡噴流の場合、配管部液体の流動は、気泡の上昇に伴って生ずるエアリフト効果により起きるが、その流量は極めて小さいため、それが律速となっている。これはTable 1に示すと

Table 1. Volume in bath and pipe.

	Aspect ratio H_L/D	Volume in bath (cm^3)	Volume in pipe (cm^3)
$D=130\text{mm}$	0.5	862	1,265
$D=200\text{mm}$	0.4	2,512	1,750
$D=309\text{mm}$	0.4	9,264	2,085

おり、液全体の体積に対する配管部の体積の割合が比較的大きいので、配管部における循環量が均一混合時間 T_m に大きく影響しているためである。

3.2 気液二相旋回噴流の均一混合時間 T_m の予測

任意の流量割合の気液二相旋回噴流における均一混合時間 T_m を予測することは、旋回噴流とオゾンを用いた汚泥処理プロセスにおける反応制御の観点から、極めて重要である。そこで、均一混合時間 T_m の予測に関して以下に考察した。

内挿する関数として式(1)を用いて、気泡噴流と水噴流の均一混合時間から、気液二相旋回噴流の均一混合時間の予測を試みた。

$$1/T_{mgL} = 1/T_{mg} + 1/T_{mL} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_{mgL} は気液二相旋回噴流の均一混合時間、 T_{mg} は気泡噴流の均一混合時間、 T_{mL} は水噴流の均一混合時間を表している。 T_{mg} および T_{mL} には本研究で求めた実験値を用いた。

Fig 7~9 は、気液二相旋回噴流の均一混合時間 T_m の測定結果を計算結果と比較している。容器内径 D が 130, 200, 309 mm の各場合における、気液二相噴流のどの流量比においても、実験値と計算値はほぼ一致しており、本計算法の妥当性が示された。すなわち、気泡噴流と水噴流の均一混合時間が分れば、任意の割合の気液二相旋回噴流の均一混合時間を予測できる。

3.3 気液二相旋回噴流とオゾンによる汚泥処理

日本全国の下水处理場の処理方式は、ほとんどが活性汚泥法によるものである。流入原水の汚濁負荷量に対し、活性生物（活性汚泥）の絶対量を確保し、汚水処理を行うものであるが、活性生物の増殖に伴い、余剰汚泥として定期的に処理系外に搬出し、処理しなければならない。よってさまざまな汚泥減量化技術の開発が行われているのは、前述したとおりであるが、その汚泥減量化技術の一方法として、オゾンによる処理技術が実用化されている^{4,11)}。オゾンは強力に有機性物質の酸化分解を促進するため、汚泥分解に極めて有効な方法であるが、オゾン投入方法については、多孔板からのオゾンエアレーションが主流であり、反応の効率化においてまだまだ改良すべき余地がある。

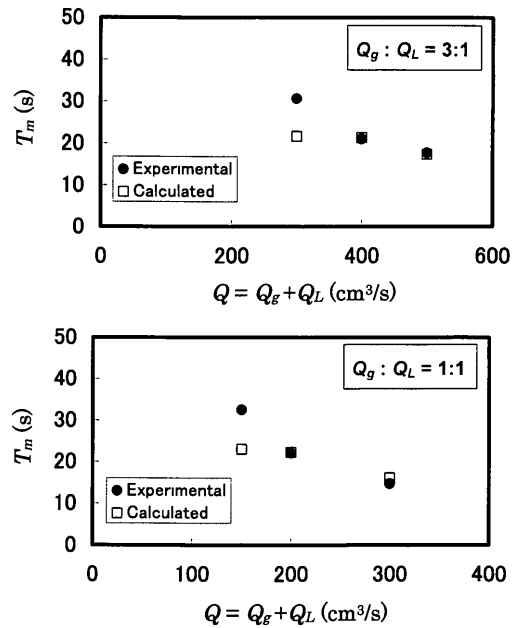


Fig 7 Comparison between experimental and calculated mixing time in the presence of swirl motion ($D=130\text{ mm}$, $H_L/D=0.5$).

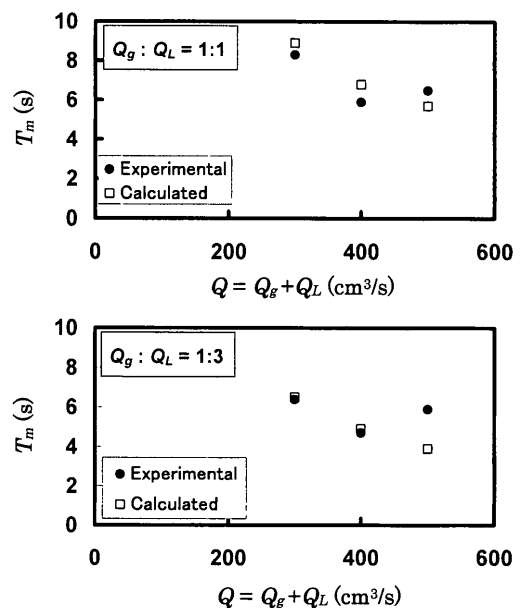


Fig 8 Comparison between experimental and calculated mixing time in the presence of swirl motion ($D=200\text{ mm}$, $H_L/D=0.4$).

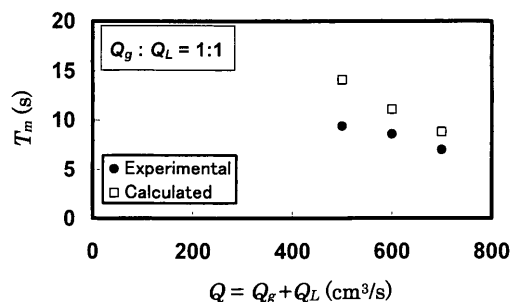


Fig 9. Comparison between experimental and calculated mixing time in the presence of swirl motion ($D=309\text{ mm}$, $H_L/D=0.4$).

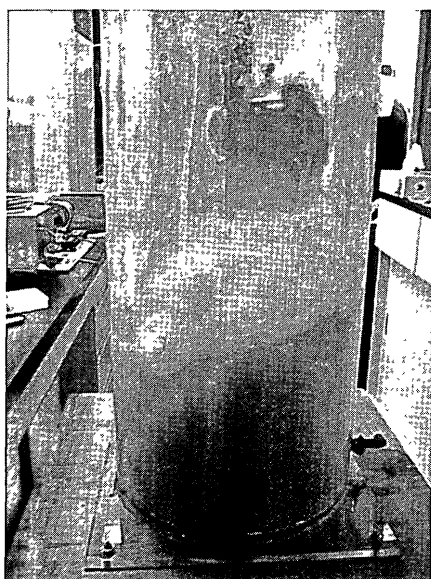


Fig. 10 Photograph of sludge being treated by ozone injection with swirl motion

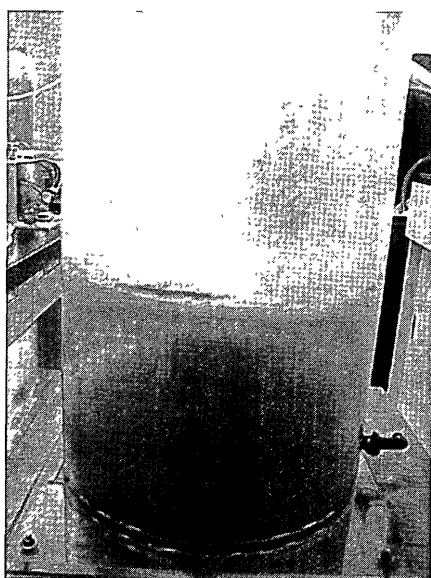


Fig. 11 Photograph of sludge being treated by ozone aeration.

汚泥分解におけるオゾン反応の高効率化の鍵は、オゾン気泡を微細化し気液界面積を大きくすること、均一に分散させること、反応槽内におけるオゾンの滞留時間を長くし、反応を可能な限り進行させること等であると考えられる。これらを実現する有効な方法として、筆者らは気液二相旋回噴流によるプロセスを検討した。曝気槽から引き抜かれる余剰汚泥は通常、水分率99~99.5%程度であり、液体の流動性の点からも本プロセスの適用に問題はない。

Fig.10, 11に、気液二相旋回噴流とオゾンによる汚泥処理及びオゾンエアレーションによる汚泥処理の試験状況を示す。Fig.10の写真からわかるとおり、気液二相旋回噴流とオゾンによる汚泥処理においては、反応槽内汚泥の旋回現象が発現し、槽内が激しく攪拌されている。なお、この

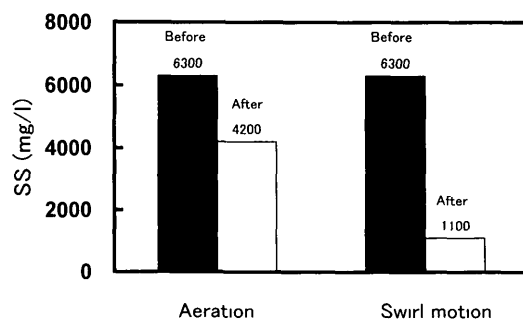


Fig. 12 Change in SS of sludge after treatment by the two methods (treatment time=24 h).

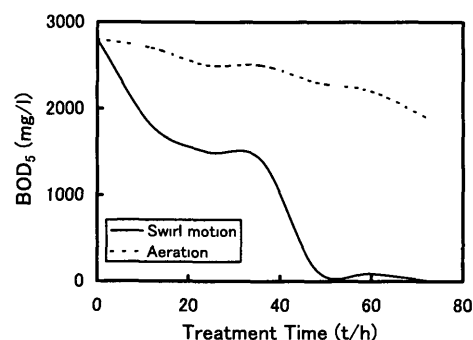


Fig. 13. Change in BOD₅ of sludge after treatment by the two methods

場合の均一混合時間は、水噴流の均一混合時間を導出する式により求めた計算値がそのまま適用できるとすれば、10秒のオーダーである。動粘度が水の10倍までの液体については、水噴流の均一混合時間を導出する式が適用できることがわかっており¹⁸⁾、今回の処理試験に供した汚泥についても適用できると考えられる。一方、Fig 11のオゾンエアレーションによる汚泥処理においては、液面が少し盛り上がっている程度で、槽内攪拌があまり行われていない。

Fig.12, 13に各処理プロセスにおける、SS (浮遊物質)、BOD₅の変化について示す。試験結果より、気液二相旋回噴流による処理は、SSの分解率において82.5%であったのに対し、オゾンエアレーションの場合は33.3%、BOD₅の除去率についても、72時間処理液で、前者が99.6%、後者が32.1%であり、著しく差が見られた。これは、気液二相旋回噴流により槽内の攪拌が激しく行われた結果、汚泥が槽内に均一に分散しオゾンとの接触効率が高まったこと、旋回流によりオゾン気泡が微細化したこと、オゾンの槽内滞留時間が長くなったこと等の理由によるものと考えられる。

Fig.14, 15に、反応に使われなかった未利用オゾン濃度のモニタリング結果について示す。気液二相旋回噴流による処理の場合、オゾン投入後3.5時間までわずかに未利用オゾンがあったものの、そのあと17.5時間後までは、ほとんど未利用オゾンが出ない状況が続き、その後は反応の進行とともに少しずつ増加していった。それに対し、オゾン

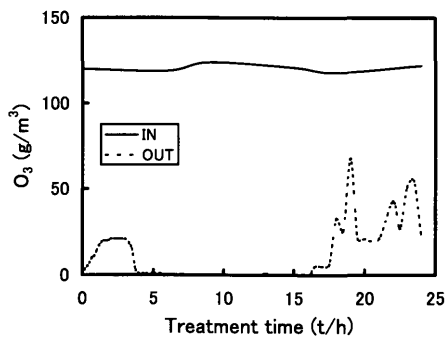


Fig. 14 Change in ozone concentration (ozone injection with swirl motion)

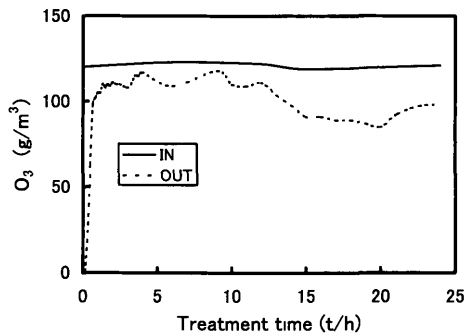


Fig. 15. Change in ozone concentration (ozone aeration)

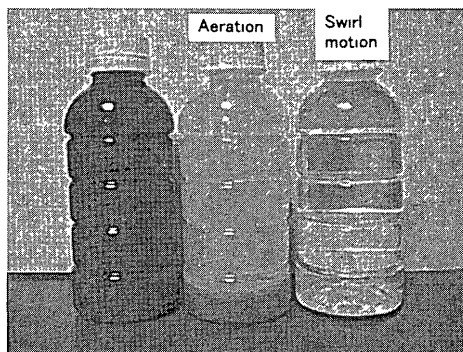


Fig. 16 Photograph of sludge after treatment by the two methods

エアレーションの場合は、オゾン投入の40分後には未利用オゾン濃度が、投入オゾン濃度の82.5%に達し、その後やや改善されたものの、かなりの割合のオゾンが最後まで未利用のままであった。本試験でのアスペクト比 H_L/D は0.92であり、オゾンエアレーションの欠点が出やすいと考えられ、実際、実機のオゾンエアレーションシステムの場合、このデメリットを補うために、反応槽の高さを大きくとることが行われる。しかしながら槽内攪拌の有無がオゾン反応効率に大きく影響を及ぼしていることは否めないであろう。

Fig.16は、汚泥処理前後の写真である。オゾンエアレーションの場合は未分解の汚泥が底部に堆積しているが、気液二相旋回噴流による処理の場合は、底部への堆積物もほとんどなく、液も透明になった。

4. 結言

(1) 気液二相旋回噴流の均一混合時間について調査した。その結果、気泡噴流と水噴流の均一混合時間から、式(1)を用いて、任意の流量割合の気液二相旋回噴流の均一混合時間を予測できることがわかった。

(2) 気液二相旋回噴流とオゾンを用いた汚泥処理については、オゾンエアレーションによる汚泥処理と比較して、反応槽内が激しく攪拌されるため、汚泥分解が著しく促進されることがわかった。

記号

D	: 容器内径 (mm)
d_{pen}	: 水用ノズル内径 (mm)
d_{meng}	: ガス用ノズル内径 (mm)
Q	: 水と空気の総流量 [cm^3/s]
Q_L	: 水流量 [cm^3/s]
Q_g	: 空気流量 [cm^3/s]
H_L	: 浴深 [mm]
T_m	: 均一混合時間 [s]
T_{mgL}	: 気液二相旋回噴流の均一混合時間 [s]
T_{mg}	: 気泡噴流の均一混合時間 [s]
T_{mL}	: 水噴流の均一混合時間 [s]
BOD_5	: 生物化学的酸素要求量 [mg/L]
SS	: 浮遊物質濃度 [mg/L]

文献

- 1) 環境管理計画, 横浜市, 横浜, (1998)
- 2) 環境技術8月号, 環境技術学会, 大阪, (1999)
- 3) 最新高度水処理技術, エヌティーエス, 東京, (1999)
- 4) 汚泥の減量化と発生防止技術, エヌティーエス, 東京, (2000)
- 5) 新下水道技術5箇年計画, 国土交通省 都市・地域整備局 下水道部, 東京, (2000)
- 6) 土木技術, 土木技術社, 東京, (2000)
- 7) 農村ゼロ・エミッション技術ガイドブック, 社団法人農業土木事業協会, 東京, (2001)
- 8) 食品工場排水の最適処理ハンドブック, サイエンスフォーラム, 東京, (2002)
- 9) 平成14年度水処理における汚泥の減量・有効利用技術及びシステムに関する調査研究報告書, 財団法人機械システム振興協会, 東京, (2003)
- 10) 資源環境対策, 環境コミュニケーションズ, 東京, (2003)
- 11) 環境浄化技術2003 8月号, 日本工業出版, 東京, (2003)
- 12) M Shitara, M Iguchi, K Takano, T Tamamori, H Shitara and T Maruyama *Mater Trans, JIM*, **44** (2003), 2456
- 13) Y Sasaki, M Iguchi and S Yokoya *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 34
- 14) Y Takatsuka and M Iguchi *J Mater Process Manuf Sci*, **8** (2000), 265
- 15) Y Takatsuka and M Iguchi *ISIJ Int*, **41** (2001), 124
- 16) K Abe and M Iguchi *ISIJ Int*, **42** (2002), 581
- 17) Y Takatsuka and M Iguchi *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 815
- 18) J Yoshida, D Iguchi and M Iguchi *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 371
- 19) M Shitara, M Iguchi, T Tamamori, J Yoshida and D Iguchi *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 345
- 20) M Shitara, M Iguchi, T Tamamori and K Takano *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 351
- 21) M Iguchi, S Hosohara, T Koga, R Yamaguchi and Z Morita *ISIJ Int*, **33** (1993), 1037
- 22) J Yoshida, D Iguchi, M Shitara and M Iguchi *ISIJ Int*, **43** (2003), 1890