



油で覆われた円筒容器内水浴の旋回現象と 汚水処理への応用

設楽 守良*・玉森 匠^{*2}・井口 学^{*3}

Swirl Motion of a Cylindrical Bath Covered with an Oil Layer and Its Application to Wastewater Treatment

Moriyoshi SHITARA, Taku TAMAMORI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Model investigation was carried out to treat wastewater including oil using a swirl motion of a cylindrical wastewater bath. A mixture of air and water was injected through a centered single-hole nozzle into a water bath covered with a top oil layer. An air-water two-phase jet was generated in the bath. The jet swirled around the vertical vessel axis together with the water in the bath under a specific condition. The basic characteristics of the swirl motion such as period, amplitude, starting time, and damping time were experimentally determined in addition to the generation condition of the swirl motion. Treatment of wastewater including oil was successfully achieved using a swirl motion of an ozone-wastewater two-phase jet.

Key words : wastewater treatment; swirl motion; ozone; gas-liquid two-phase jet; oil.

1. 緒言

油分が自然環境中に排出されると、自然界において環境浄化の役割を担う微生物の呼吸を阻害し浄化能を損なわせたり、魚介類に油が付着して被害を及ぼす等、油濁の被害が発生する^{1,2)}。また乳製品、菓子類などの工場等から排出される食品加工排水や飲食店、学校給食センター等から排出される厨房排水は、一般的には下水道に放流されることが多いが、油分が多く含まれ、そのままでは下水道における管路施設や処理施設に悪影響を及ぼす^{3,4)}。このため水質汚濁防止法や下水道法では、油分の量的指標としてノルマルヘキサン(n-Hex)抽出物質含有量を用いて排水基準を定めている。ノルマルヘキサン抽出物質含有量の排水基準は、鉱物油脂類及び動植物油脂類の2種類で設定されており、前者では5mg/L、後者では30mg/Lとなっている^{1,3)}。さらに閉鎖性水域等では、各都道府県が上乗せ基準として、より厳しい排水基準を設定している場合もある¹⁾。

油分を多く含む汚水の浄化処理は、油分が活性微生物の呼吸を阻害するため、そのままでは生物処理が難しく、前処理としてグリストラップ等による自然浮上や加圧浮上等により、油分の分離除去を十分に行った後に、生物膜法や活性汚泥法等の生物処理に供する方法が主流となっている^{5,6)}。しかしながらこれらの方法の中で、グリストラップ等による自然浮上の場合、油分の除去能力に限界があ

るだけでなく、グリストラップで分離された油分を定期的に系外へ除去しないとすぐに油分が流出してしまうという問題があり、また加圧浮上の場合、自然浮上よりは油分の除去能力が高いものの、フロスとして除去された油分の産廃処理費の問題や、より性能を上げるためには凝集剤の添加量を増やさなければならず、そのコスト増の問題が残る等、最良の方法とは言い難く、新たな処理技術が期待されている。

前報では^{7,8)}、気液二相旋回噴流を用いた汚水処理プロセス設計のために必要な基本データの取得を目的として、水と空気的气液二相噴流によるモデル実験を行い、気液二相噴流による単層液体の旋回現象と、旋回開始時間、周期および振幅等の基本特性について調査した。著者は、これらの情報を実際の汚水処理に利用し、気液二相旋回噴流を用いた攪拌法の有効性を実証している。このことから判断すれば、本攪拌法は油含有汚水の処理にも有効であると考えられるが、これまで円筒容器内高粘性液体の気泡噴流の特性すなわちガスホールドアップ、気泡頻度、気泡上昇速度や⁹⁾、気泡噴流の旋回現象などについては報告されているが¹⁰⁻¹⁶⁾、油を含む浴内の気液二相噴流の旋回現象については、明らかにされていない¹⁷⁻¹⁹⁾。

そこで、本研究では、気液二相噴流に誘起される円筒容器内のシリコンオイルと水からなる二層成層液体の、旋回発生条件及び基本特性について調査し、気液二相旋回噴流

平成17年6月3日受付 平成17年8月11日受理 (Received on June 3, 2005; Accepted on Aug. 11, 2005)

* (株) ヒューエンス (現: 北海道大学大学院工学研究科) (Huens Co., Ltd., now Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

*2 (株) ヒューエンス (Huens Co.)

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

を用いたプロセスが、油を含有する汚水の浄化処理に対し適用可能かどうかについて調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 基礎実験

実験装置の概要をFig. 1に示す。浴内の液体はポンプで循環できるようになっている。Table 1に示すように、液体には水（密度 $\rho_L=997\text{ kg/m}^3$ 、動粘度 $\nu_L=0.891\text{ mm}^2/\text{s}$ 、表面張力 $\sigma=72.7\text{ mN/m}$ ）および50 cStのシリコンオイル（密度 $\rho_L=960\text{ kg/m}^3$ 、動粘度 $\nu_L=50\text{ mm}^2/\text{s}$ 、表面張力 $\sigma=20.8\text{ mN/m}$ ）を、吹き込む気体には空気（密度 $\rho_g=1.18\text{ kg/m}^3$ 、動粘度 $\nu_g=15.6\text{ mm}^2/\text{s}$ ）を用いた。容器内径 D が130, 200, 309 mm、容器高さ H がそれぞれ400, 500, 700 mmの3種類の透明アクリル製の円筒容器を用いて、旋回発生条件、旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回周期 T_s 、振幅 A および旋回終了時間 $T_{s,d}$ について調査した。

空気流量 Q_g をマスフローコントローラにより0~400 cm³/sの範囲に設定し、円筒容器底部中心に設置した内径 $d_{\text{nen}}=13\text{ mm}$ の水吹き込み用ノズル内の中心軸上に挿入した外径3 mm、内径 $d_{\text{nen,g}}=2\text{ mm}$ のノズルにより吹き込みを行った。液体流量 Q_L はポンプをインバーター制御し、0~400 cm³/sの範囲に設定した。

円筒容器内にシリコンオイルと水を二層成層状態で入れたときの旋回発生条件の測定では、アスペクト比 H_{L2}/D を0.5と一定にし、気液二相噴流（ $Q_L:Q_g=3:1$, $Q_L:Q_g=1:1$, $Q_L:Q_g=1:3$ ）の各場合において、50 cStのシリコンオイルの浴深 H_{L1} を変化させて実験を行った。例えば容器径

$D=130\text{ mm}$ の場合、水の浴深 H_{L2} は65 mmとなっている。水の部分のアスペクト比を0.5としたのは、このアスペクト比近傍で旋回現象が最も起こりやすく、実用的価値が高いことによる。さらにシリコンオイルのアスペクト比 H_{L1}/D を0.1としたとき、気液二相噴流（ $Q_L:Q_g=3:1$, $Q_L:Q_g=1:1$, $Q_L:Q_g=1:3$ ）の各場合における、旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回周期 T_s 、振幅 A および旋回終了時間 $T_{s,d}$ を測定した。旋回開始時間 $T_{s,s}$ は吹き込みを開始してから旋回現象が現れるまでの時間として目視で求めた。旋回周期 T_s は50周期分の時間を測定して求めた。振幅 A は側壁の最高水位と最低水位の差の1/2と定義して測定した。旋回終了時間 $T_{s,d}$ は吹き込みを止めてから振幅が小さくなって0.5 mmになるまでの時間として求めた。測定は各実験条件について3回行い、その平均値を求めた。

2.2 油含有汚水処理

実験装置の概要はFig. 1と同じである。容器内径 D が380 mm、高さ H が1000 mmの透明アクリル樹脂製の円筒容器を使用した。油が分離しないようにサンプルをよく混合して、浴深 $H_L=400\text{ mm}$ まで投入した。よってアスペクト比 H_L/D は1.05となっている。サンプルは学校給食センターから排出された油含有汚水である。

円筒容器底部中央のノズルから汚水を吹き込むと同時に、汚水を吹き込むノズル内に、同軸上に挿入したノズルにより、オゾンガスの吹き込みを行い、汚水とオゾンガスの気液二相噴流による旋回現象を発生させた。油含有汚水の浄化処理試験において、油含有汚水の性状変化はn-Hex, BOD₅等の測定により調べた。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100 g/Nm³とした。

3. 実験結果および考察

3.1 旋回発生領域

Fig. 2に円筒容器内のシリコンオイルと水の二層成層液体が旋回現象を呈しているときの写真を示す。強い攪拌力によりシリコンオイルの滴が水に混ざっている様子がみとれる。Fig. 3~5に容器内径 D が130, 200, 309 mmにおけ

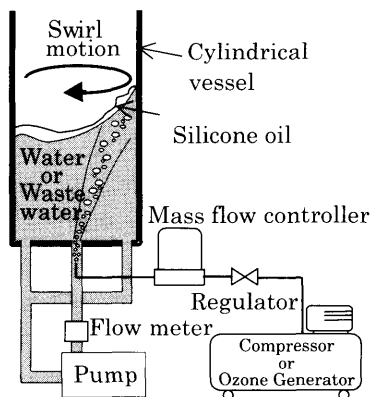


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

Table 1. Physical properties of fluids at 298K.

Fluid	Physical property	Density ρ (kg/m ³)	Kinematic viscosity ν (mm ² /s)	Surface tension σ (mN/m)
Air		1.18	15.6	
Water		997	0.891	72.7
Silicone oil 50cSt		960	50	20.8

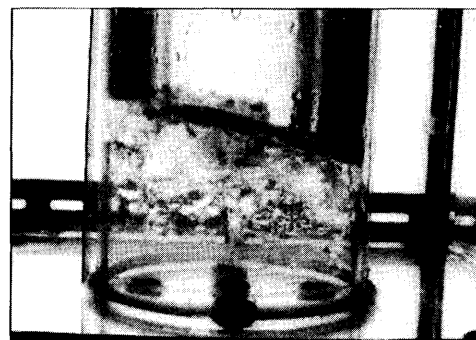
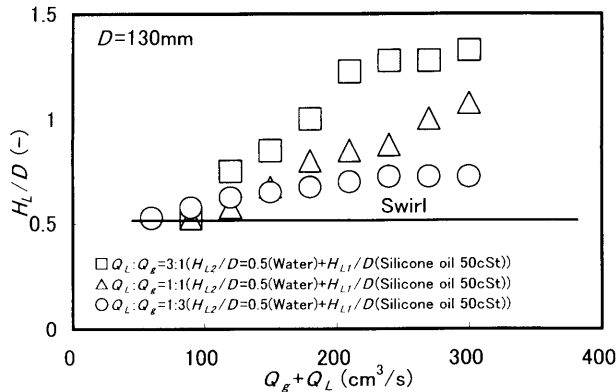
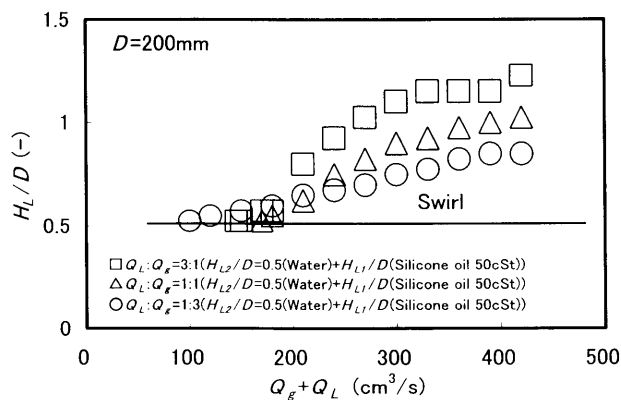
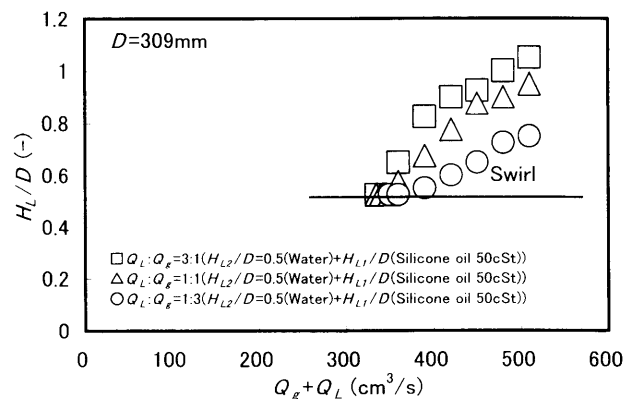


Fig. 2. Photograph of swirl motion of stratified two liquid layers in a cylindrical vessel induced by a gas-liquid two-phase jet.

Fig. 3. Generation region of gas-liquid two-phase swirling jet ($D=130$ mm).Fig. 4. Generation region of gas-liquid two-phase swirling jet ($D=200$ mm).Fig. 5. Generation region of gas-liquid two-phase swirling jet ($D=309$ mm).

る旋回発生領域について調べた実験結果を示す。図中に Swirl と記したように、旋回は $H_{L2}/D=0.5$ を指す実線と各記号で囲まれた領域で生じる。なお、図中の記号の大きさはエラーバーを考慮して描いている。エラーバーを用いて測定値の振れ幅を描いてもよいが、図が煩雑になるので採用しなかった。いずれの図においても旋回発生領域は、総流量 $Q(=Q_g+Q_L)$ に占める液体流量 Q_L の割合が大きくなるにつれて、広がっている。これは、液体流量 Q_L の割合が大きくなると、浴表面を揺する噴流の慣性力が強くなり、

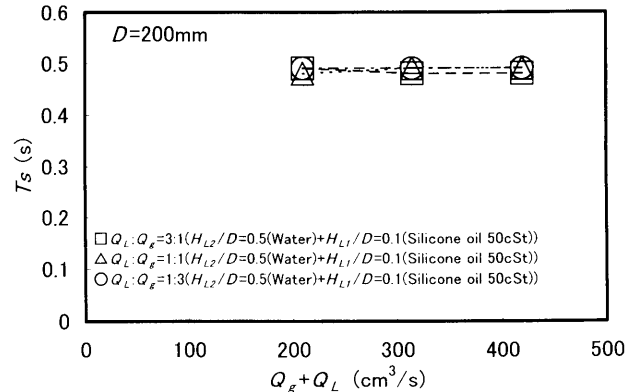
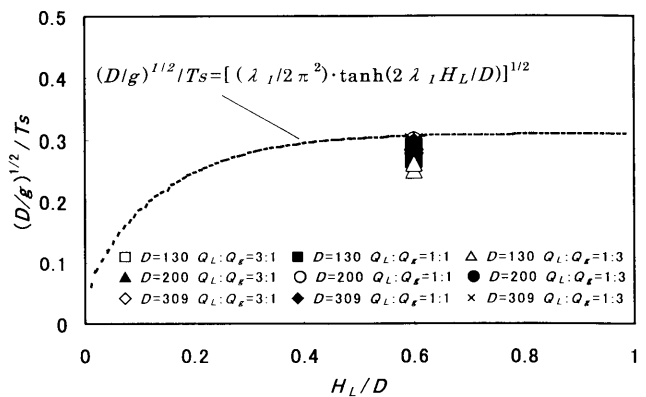
Fig. 6. Period of gas-liquid two-phase swirling jet ($D=200$ mm).

Fig. 7. Comparison of Eq. (1) with measured values of swirl period.

旋回運動を誘起する駆動力が大きくなるためと考えられる。なお、容器径が大きくなると、旋回を起こすために必要な総流量 Q も大きくなっている。

3.2 旋回周期

Fig. 6に3種類の容器の代表例として、容器内径 D が 200 mm における旋回周期 T_s の測定結果を示す。ここでは、液体噴流および3種類の流量比の気液二相噴流で必ず旋回が起こるアスペクト比 $H_L/D=0.6$ ($H_{L1}/D=0.1$, $H_{L2}/D=0.5$) に着目した。旋回周期 T_s は、各流量比においてほとんど変化がなく、総流量 Q による変化も受けないが、容器内径 D が大きくなると長くなっている。また、旋回周期 T_s を容器内径 D と重力加速度 g を用いて無次元化し、整理した結果を Fig. 7に示す。本研究では、基本特性の測定値はアスペクト比 $H_L/D=0.6$ のみに着目して行っているため、Fig. 7において測定値が $H_L/D=0.6$ に集中している点に留意されたい。旋回周期 T_s は式(1)で表される回転スロッシングの基本モードの式にほぼ一致した。

$$(D/g)^{1/2} / T_s = [(\lambda_1/2\pi^2) \cdot \tanh(2\lambda_1 H_L/D)]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\lambda_1 (=1.84)$ はベッセル関数 J_1' の1番目の零点である。回転スロッシングとは、円筒容器を軸方向あるいは半径方向に加振することによって誘起される浴の旋回現象のこと

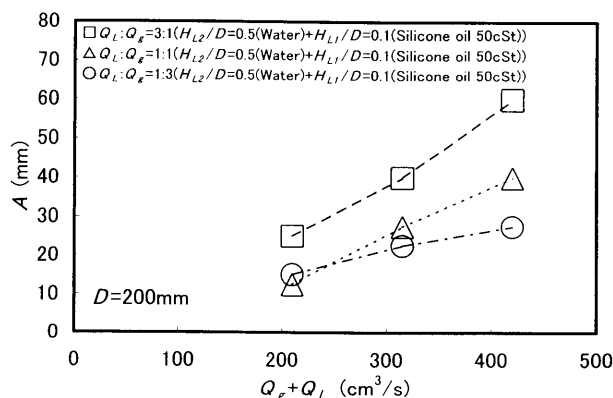


Fig. 8. Amplitude of gas-liquid two-phase swirling jet ($D=200$ mm).

である^{20,21)}。

3.3 振幅

Fig. 8に容器内径 D が200 mmにおける振幅 A の測定結果を示す。振幅 A は、総流量 Q に占める液体流量 Q_L の割合が大きくなるにつれて大きくなり、また総流量 Q が大きくなると振幅 A も大きくなることがわかる。本実験では、簡単のため、気泡噴流に対する旋回運動の振幅に対する実験式を基にして推算式の提案を試みた。そこで、液体流量をいくらのガス流量に換算すればよいのかを評価するために見かけの総流量 Q_{app} を導入した。

$$Q_{app} = kQ_L + Q_g \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで k は換算係数である。本実験で得られた振幅 A をはじめ、後で示す旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回終了時間 $T_{s,d}$ の測定値を用いて最適な k の値を求めると、 $k=2$ が得られた。したがって、本研究では、 Q_{app} を次式で表す。

$$Q_{app} = 2Q_L + Q_g \quad \dots\dots\dots (3)$$

すべての容器について得られた振幅 A の測定値を容器内径 D を用いて無次元化して整理し、Fig. 9に示す。なお、旋回によってシリコンオイルが水に巻き込まれ、やがてエマルジョン化することから、ここではエマルジョンのみかけの動粘度 ν_{app} を以前に提案されているみかけの粘度と平均密度を用いて求めた^{11,12)}。

$$A/D = 0.224[Re^{1/2}(H_L Q_{app} / D^{7/2} g^{1/2})]^{0.30} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Re = (Q_{app}^2 / g)^{2/5} (g/D)^{1/2} / \nu_{app} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\nu_{app} = \mu_{app} / \rho_m \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\mu_{app} = [\mu_w / (1 - \phi)][1 + 1.5\phi\mu_o / (\mu_w + \mu_o)] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_m = (1 - \phi)\rho_w + \phi\rho_o \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで μ_{app} はみかけの粘度^{22,23)}、 μ_w は水の粘度、 μ_o はシリコンオイルの粘度、 ρ_m は平均密度、 ρ_w は水の密度、 ρ_o はシリコンオイルの密度、 ϕ は分散相の体積分率である。ま

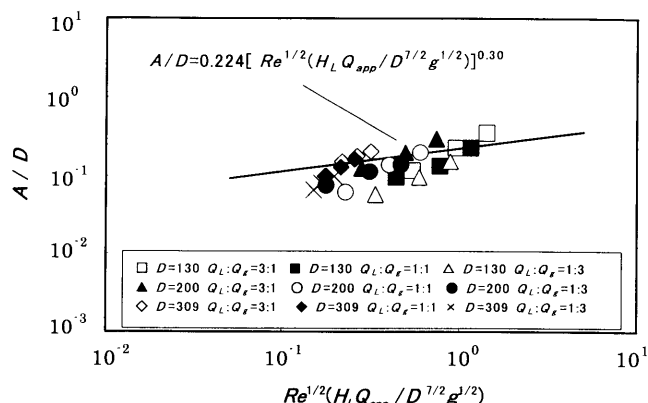


Fig. 9. Comparison of Eq. (4) with measured values of amplitude.

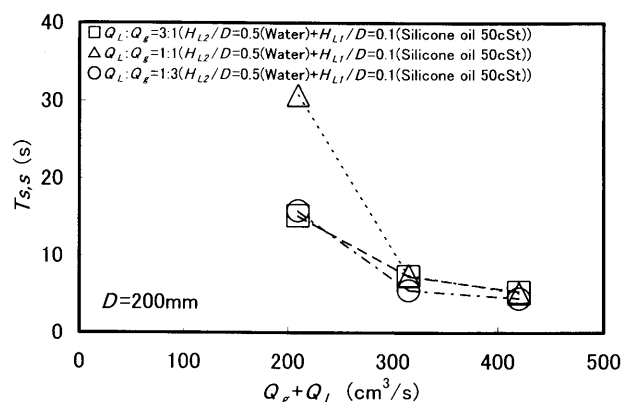


Fig. 10. Starting time of gas-liquid two-phase swirling jet ($D=200$ mm).

た横軸の量は、慣性力と粘性力の比であるレイノルズ数 Re と、波の運動を規定するアスペクト比 H_L/D 、慣性力と浮力の比であるフルード数 Fr の積である。測定値は、以前に水の浴に対して提案した式を基にして導いた式(4)にほぼ一致した。

3.4 旋回開始時間

Fig.10に容器内径 D が200 mmにおける旋回開始時間 $T_{s,s}$ の測定値を示す。旋回開始時間 $T_{s,s}$ はどの流量比の場合とも、総流量 Q が大きくなると短くなった。旋回開始時間 $T_{s,s}$ を容器内径 D と重力加速度 g を用いて無次元化してFig.11に示す。測定値は、水の浴に対する式に Q_{app} と ν_{app} を代入した式(9)に一致した¹¹⁾。

$$T_{s,s}(g/D)^{1/2} = 36.0[Re^{1/2}(H_L Q_{app} / D^{7/2} g^{1/2})]^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

3.5 旋回終了時間

Fig.12に容器内径 D が200 mmにおける旋回終了時間 $T_{s,d}$ の測定値を示す。旋回終了時間 $T_{s,d}$ はいずれの流量比においても、総流量 Q に占める液体流量 Q_L の割合が大きくなるにつれて長くなった。

旋回終了時間 $T_{s,d}$ をみかけの総流量 Q_{app} と容器内径 D を用いて無次元化してFig.13に示す。図中の破線は、前に水の浴に対して提案した式に Q_{app} と ν_{app} を代入した式(10)で

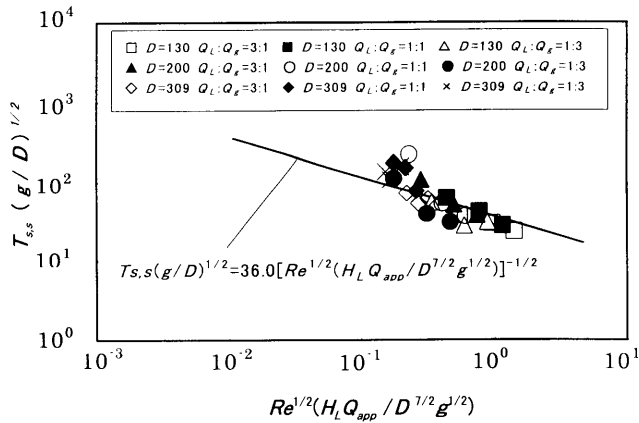


Fig. 11. Comparison of Eq. (9) with measured values of starting time.

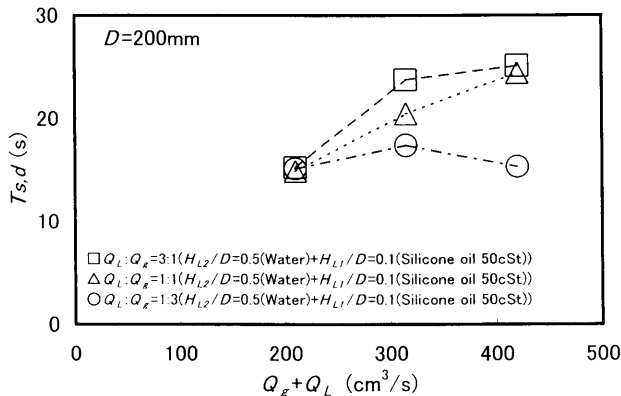


Fig. 12. Damping time of gas-liquid two-phase swirling jet ($D=200$ mm).

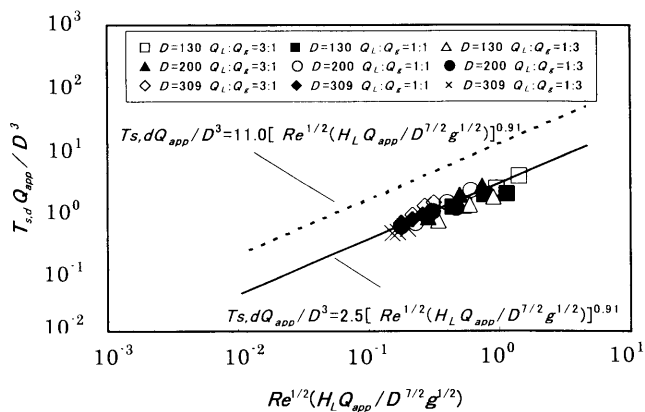


Fig. 13. Comparison of Eq. (11) with measured values of damping time.

ある¹¹⁾。

$$T_{s,d}Q_{app}/D^3 = 11.0[Re^{1/2}(H_LQ_{app}/D^{7/2}g^{1/2})]^{0.91} \dots\dots\dots(10)$$

測定値は式(10)よりもかなり小さい。これは、気液二相噴流の吹き込みを止めるとエマルジョン化した油滴が浴表面に上昇し、旋回を止める力として作用し、水に対する場合よりも旋回終了時間 $T_{s,d}$ が短くなったためと考えられる。そこで式(10)の係数を修正し、新たに次式を提案した。

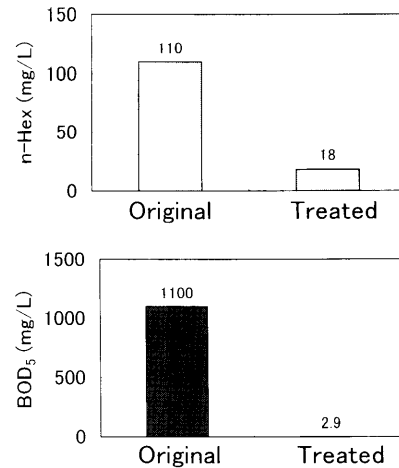


Fig. 14. Values of n-Hex and BOD₅ in wastewater.



Fig. 15. Photograph of wastewater before and after treatment by gas-liquid two-phase swirling jet and ozone (left: original, right: treated).

$$T_{s,d}Q_{app}/D^3 = 2.5[Re^{1/2}(H_LQ_{app}/D^{7/2}g^{1/2})]^{0.91} \dots\dots\dots(11)$$

図中の実線が修正した式(11)であるが、測定値はこの式によく一致している。

3・6 油含有汚水処理実験結果

Fig.14に本油含有汚水処理プロセスにおける、処理前、処理後のノルマルヘキサン抽出物質含有量（動植物油脂類）及びBOD₅の測定結果について示す。処理時間は21時間であった。下水道法では、下水道に対する一律排水基準として、ノルマルヘキサン抽出物質含有量（動植物油脂類）は30mg/L以下、BOD₅は600mg/L以下にすることとなっている。試験結果より、ノルマルヘキサン抽出物質含有量（動植物油脂類）は、処理前の110mg/Lから18mg/Lへと減少し、その除去率が83.6%、BOD₅は処理前の1100mg/Lから処理後は2.9mg/Lへとなり、除去率で99.7%と、ノルマルヘキサン抽出物質含有量（動植物油脂類）、BOD₅ともに良好な処理結果であった。

Fig.15に原液と処理液を比較した写真を示す。原液は時間が経過してもこのままの状態であり、油分が混ざっているため白濁しているが、処理液では透明となった。

4. 結言

(1) 水とシリコンオイルが二層成層状態となっている浴内における旋回発生領域は、総吹き込み流量 Q に占める液体流量 Q_L の割合が大きくなると、浴表面を揺する噴流の慣性力が大きくなるため広がった。

(2) 旋回周期 T_s は、各流量比においてほとんど変化がなく、総流量 Q による変化も受けないが、容器内径 D が大きくなると長くなった。また、周期を無次元化し整理したところ、以前に提案されている回転スロッシングの式(1)で近似できた。

(3) 振幅 A は、各容器内径のどの場合でも、総流量 Q に占める液体流量 Q_L の割合が大きくなるにつれて大きくなり、また総流量 Q が大きくなると大きくなった。振幅 A の測定値は、みかけの総流量 Q_{app} とエマルジョンのみかけの動粘度 ν_{app} を用いると、以前に水の浴に対して提案した式(4)で近似できた。

(4) 旋回開始時間 $T_{s,s}$ は、3種類の流量比のどの場合でも、総流量 Q が大きくなると短くなり、容器内径 D が大きくなると長くなった。旋回開始時間 $T_{s,s}$ の測定値は、以前に水の浴に対して提案した式に Q_{app} と ν_{app} を代入した式(9)で近似できた。

(5) 旋回終了時間 $T_{s,d}$ は、いずれの容器内径の場合でも、総流量 Q に占める液体流量 Q_L の割合が大きくなるにつれて長くなり、容器内径 D が大きくなるとやや長くなった。また、以前に水の浴に対して提案した式に Q_{app} と ν_{app} を代入して修正した式(11)で近似できた。

(6) 油含有汚水は旋回噴流式オゾン酸化法によって効率よく処理できた。すなわち、オゾンを含む気液二相旋回噴流を用いた油含有汚水の浄化処理は、n-Hex抽出物質含有量およびBOD₅の値を著しく減少させ、処理液は透明になった。

記号

A	: 振幅	[mm]
D	: 容器内径	[mm]
d_{nen}	: 水吹き込み用ノズルの内径	[mm]
$d_{nen,g}$	: 空気吹き込み用ノズルの内径	[mm]
H	: 容器高さ	[mm]
H_L	: 浴深	[mm]
H_L/D	: アスペクト比	[-]
Q	: 水と空気の総流量 ($=Q_g+Q_L$)	[cm ³ /s]
Q_{app}	: 水と空気のみかけの総流量 ($=Q_g+2Q_L$)	[cm ³ /s]
Q_L	: 水流量	[cm ³ /s]
Q_g	: 空気流量	[cm ³ /s]

Re	: レイノルズ数	[-]
T_s	: 旋回周期	[s]
$T_{s,d}$	: 旋回終了時間	[s]
$T_{s,s}$	: 旋回開始時間	[s]
ϕ	: 分散相の体積分率	[-]
μ_{app}	: みかけの粘度	[kg/m·s]
μ_w	: 水の粘度	[kg/m·s]
μ_o	: シリコンオイルの粘度	[kg/m·s]
ν_L	: 液体の動粘度	[mm ² /s]
ν_g	: 空気の動粘度	[mm ² /s]
ν_{app}	: みかけの動粘度	[mm ² /s]
ρ_g	: 空気の密度	[kg/m ³]
ρ_L	: 液体の密度	[kg/m ³]
ρ_m	: 平均密度	[kg/m ³]
ρ_w	: 水の密度	[kg/m ³]
ρ_o	: シリコンオイルの密度	[kg/m ³]
σ	: 表面張力	[mN/m]

文 献

- 1) 石井一郎：環境工学，森北出版株式会社，(1992)。
- 2) 平成14年版環境白書，環境省編，(2002)。
- 3) 下水道維持管理指針（前編・後編），社団法人日本下水道協会，(2003)。
- 4) 下水試験方法（上巻・下巻），社団法人日本下水道協会，(1997)。
- 5) 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，(2002)。
- 6) 吉村三三隆，北川幹夫：わかりやすい水処理設計，株式会社工業調査会，(2003)。
- 7) M.Shitara, M.Iguchi, T.Tamamori, J.Yoshida and D.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 345.
- 8) M.Shitara, M.Iguchi, T.Tamamori and K.Takano: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 351.
- 9) M.Iguchi, A.Kawajiri, H.Tomida and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 361.
- 10) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Koga, R.Yamaguchi and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1037.
- 11) M.Iguchi, Y.Itoh and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 189.
- 12) M.Iguchi, Y.Eguchi, A.Kawasaki, S.Kitamura and K.Naito: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 767.
- 13) Y.Kato, K.Nakanishi, T.Nozaki, K.Suzuki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604.
- 14) Y.Xie and F.Oeters: *Steel Res.*, **63** (1992), 227.
- 15) M.P.Schwartz: *Chem. Eng. Sci.*, **45** (1990), 1765.
- 16) G.G.K.Murthy, S.P.Mehrotra and A.Ghosh: *Metall. Trans. B*, **19B** (1988), 839.
- 17) T.Tamamori, M.Iguchi and M.Shitara: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 236.
- 18) M.Iguchi, T.Tamamori, M.Shitara and D.Tguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 241.
- 19) M.Shitara, T.Tamamori and M.Iguchi: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 287.
- 20) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3024.
- 21) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3446.
- 22) Handbook of Chemical Engineering, ed. by Soc. Che. Eng. Jpn., Maruzen, Tokyo, (1988), 905.
- 23) T.Vermeulen, G.M.Williams and G.E.Langlois: *Chem. Eng. Prog.*, **51** (1955), 81F.