

# 油分の水中分散性・浮上速度に及ぼす固体浮遊物の影響

波江 貞弘\*・長内 敏雄\*

## Influence of Solid Suspension on Oil-Particle Size Distribution and Separation Velocity in Water

By

Sadahiro NAMIE and Toshio OSANAI

### Abstract

The size distribution and velocity of separation of oil particles in water produced by mechanical disintegration forces are controlling factors for oily water separators. The purpose of the paper is an experimental and analytical estimation of effects of solid suspension on the factors.

An elemental measurement of the terminal velocity of floating small oil particles in water indicates that Stokes' law is effective over a range of 3-300 microns of oil particle size. From another experiment of measuring microphotographically oil particles containing some kinds of solid particles in themselves, such as  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_4$ , it results that these solid particles increase the mean oil particle diameter, at the same time reducing the velocity of separation of the oil particles in water.

Furthermore, in the case of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , the most "effective" amount of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  particles for reducing the velocity of separation of oil is estimated experimentally and analytically to be about 20% of oil contents, and the velocity of separation becomes even as low as one-ninth of that in a case without the particles.

From some examples of oily water on board, it is indicated that the contents of solid suspension is possibly 10-20% of oil contents. Hence, the effects of solid suspension described above should be taken into consideration in order to make advance in a performance of oily water separators.

### 1. ま え が き

船舶から海洋に排出される機関室ビルジ水やタンカーのタンク・クリーニング水など、含油排水中の油分を分離器で除去する際、ゴミ、スラッジなどの固体浮遊物が分離性能に与える影響を調べることは、分離器の高性能化および試験基準の検討に関連して重要な課題である。本報告はこれらの影響のうち、含油排水がポンプ等で機械的に攪拌される際の分散性（油粒径分布）、および重力分離式の分離器で特に重要な因子で

ある油粒浮上速度に及ぼす効果について、小型攪拌装置と静置浮上容器および写真測定によって実験的に考察したものである。

実船における含油排水中の固体浮遊物の量および成分については従来あまりまとまった資料はないが、たとえばタンカーのスロップ・タンクにおけるタンク洗浄水の表層油中に重量%で10~17%の黄色の微細な砂( $\text{SiO}_2$ )が混在しているという報告<sup>1)</sup>、タンク底スラッジについて分析した結果、成分はほとんど鉄分(Fe)であるという報告<sup>2)</sup>、さらにタンク洗浄水中に約280~1400 ppm、スロップタンク水中には約80~110 ppmの不純物が浮遊し、これは油分濃度の2~10倍

\* 機関性能部

原稿受付：昭和51年5月27日

であるとする資料<sup>3)</sup>などがある。一方、機関室ビルジ水についてはビルジ溜りの中間層水において油分濃度が80~110 ppm に対し、 $F_e, S_e$  を主成分とする固体浮遊物が2.5重量%と、油分量に比べてかなり多量(約250倍)の固体分が浮遊しているという報告<sup>2)</sup>がある。さらに、著者も加わって行なった実船実験ではビルジ溜りの中間層水において、不純物濃度が油分濃度の5~20%程度で、ほぼ油分濃度に比例した傾向を持っていた。また、表層油中の不純物は2400 ppm程度であった。以上のように固体浮遊物の量、成分は船の種類、排水の発生状況によって大きく変化するのは当然であるが、いずれの場合にも比較的少量の浮遊物が存在するという点は注目すべきであろう。

### 2. 油粒の浮上速度

固体浮遊物の影響を調べる前に、まず水中における油粒のみの浮上速度について述べる。静止流体中の剛体球の抵抗係数  $C_D$  および重力による浮上(あるいは沈降)終端速度  $u_a$  はよく知られるように、レイノルズ数  $Re = \frac{u_a d}{\nu_l} < 1.0$  の範囲で Stokes 則に従い、次式で表わされる。

$$C_D = 24/Re, \quad u_a = \frac{(\rho_l - \rho_d)}{18\mu} g d^2 \quad (1)$$

ここで、 $(\rho_l - \rho_d)$  は流体および球体の密度差、 $\mu$  は流体の粘性、 $g$  は重力加速度、 $d$  は球体の直径である。レイノルズ数  $Re$  が 1.0 以上になると抵抗係数  $C_D$  は(1)式による値より小さくなる(中間領域)。700 <  $Re$  <  $3 \times 10^5$  ではほぼ一定の値  $C_D = 0.44$  となり、この領域(Newton 則領域)では  $u_a = k \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_d)}{\rho_l} \cdot g \cdot d}$  ( $k$ : 実験定数)となる。以上が層流境界層域であり、 $Re$  数が  $3 \times 10^5$  付近で境界層が乱流に遷移して、抵抗係数は  $C_D = 0.18$  程度に急激に減少する。一方、油粒のような流体球の場合には、 $Re < 1.0$  の範囲でも一般には球内部に循環流が生じ、この内部流に伴う粘性の効果が出てきて、修正係数  $\left(\frac{3\mu_d + 3\mu_l}{3\mu_d + 2\mu_l}\right)$  を(1)式の右辺に掛ける必要がある<sup>4)</sup>。また、 $Re$  数が大きくなるにつれ、形状が変形しはじめ、終端速度は剛体球より一般に大きくなり、 $Re > 200$  になると変形と同時に振動が生じて、逆に抵抗が急激に増加して速度は減少することが知られている<sup>5)</sup>。

以上が浮上(沈降)終端速度の一般論であるが、本報告で対象とする微小油粒の場合は粒径が数百ミクロン以下であり、かつ連続相(水)との比重差も小さいた

め、浮上(沈降)速度、レイノルズ数も小さく、Stokes 則の成立する領域が主要部分となる。また、油の粘性が水に比べて大きな値であるため、上記内部流による修正係数もほとんど 1.0 に等しい値である。

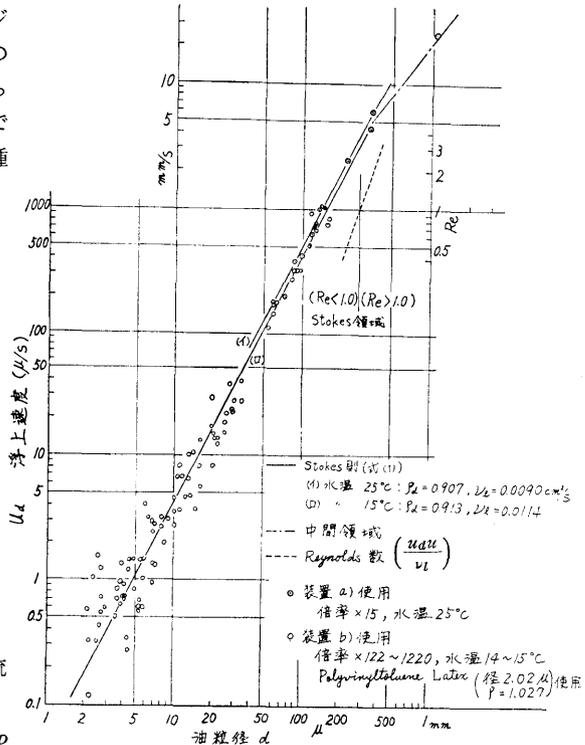


図1 油粒浮上速度

図1は各粒径の油粒に対する浮上速度の実測値と計算値を比較したものであり、図中の実測データの測定方法については【付録1】に詳細に示す。測定に用いた油は軽質B重油(密度  $\rho_d = 0.910 \text{ gr} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$ 、動粘性係数  $\nu_d = 27 \text{ cSt}$ )であり、水は純水( $\rho_l = 0.998 \text{ gr} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$ 、 $\nu_l = 1.007 \text{ cSt}$ ; いずれも  $20^\circ\text{C}$  における値)である。図に示されるとおり、浮上速度の実測値は  $Re < 1.0$  の範囲で(1)式による値によく一致しており、形状の変形、振動の影響も小さくて、ほぼ剛体球と同様に見なしてさしつかえないことがわかる。実験点は少ないが、油粒径が300ミクロン以上で測定値が(1)式による値より小さくなっているのは、Stokes 則領域からはずれ、中間領域に入ったことを示しており、図中に記したレイノルズ数が1.0前後であることからわかる。なお、粒径の小さい範囲で測定点がばらついているのは付録1に述べた写真測定による油粒径、

浮上距離の読み取り誤差が大きくなるためであるが、平均値としてはやはり(1)式による値とほぼ一致している。ただし、3ミクロン以下の油粒については測定方法自体に起因する誤差によるため、(1)式による値より大きくでている。また、上記の考察はすべて単一とみなされる粒子に対して成立するものであり、粒子濃度が大きくなると粒子相互の干渉が生じるため、この影響を別途考慮する必要がある。

### 3. 固体浮遊物の影響

#### 3.1 試料および攪拌方法

次に固体浮遊物が混入する場合について、機械的攪拌による分散性ならびに浮上速度に対する影響を調べた。使用した油は前項と同じ軽質のB重油であり、水に対する界面張力は35.0 dyne/cm (20°C)である。水については予備実験であまり純度が影響しないことを確かめたので、通常の水道水(物性値はほとんど前項と同じ)を用いた。混入する固体浮遊物としては、まえがきの項に述べたことをもとにして、酸化第二鉄( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、亜鉛粉( $\text{Zn}$ )、ケイ砂( $\text{SiO}_2$ )、カオリナイト( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )および水酸化鉄( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ )を用いた。このうち、亜鉛粉は非常に細かい粉体が容易に入手できるため、参考までに加えたものであり、ケイ砂は砂、カオリナイトは粘土の主成分である。各粉体の真比重は表1に示すとおりであり、顕微鏡写真をとった例を写真1に示す。

表1 粉体の真比重<sup>6)</sup>

粉体名	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Zn
真比重	5.1~5.2	2.6~2.7	2.6~2.63	3.40	7.14

本実験に用いた攪拌装置は図2に示すような市販の卓上ミキサーを改良したもので、攪拌中空気泡が混入しないよう密封し、約1lの水の中に粉体を含んだ油を2cc程度注射針で注入した。攪拌入力は180Wであり、攪拌時間は1分間と定めた。実験中、水温は14~15°C程度に一定になるよう調節している。なお、粉体の混入方法としては、油中に予め混合させる場合と、水中に分散させておく場合の両者について検討している。また、粉体の分散性を良好にする目的で、分散剤としてオレイン酸またはヘキサメタリン酸ソーダを規定量(JIS Z 8901)添加した。添加物の影響は別途考慮している。

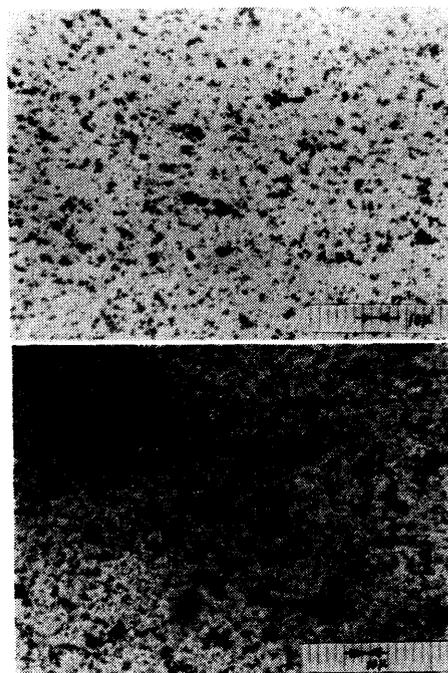


写真1 固体粉末の顕微鏡写真例  
(上: 亜鉛粉, 下: 酸化第二鉄)

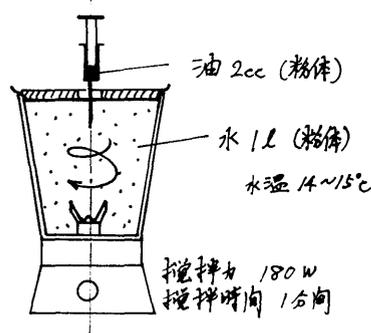


図2 攪拌装置

#### 3.2 写真観察による油粒径分布および粉体付着状況

水中の油粒は図1に示したとおり粒径によって浮上速度の大きさが極端に異なるため、水面に浮上した粒子の粒径は大きい方に偏りやすく、また水表面上では変形して正確な粒径を測定しにくい。そこで本実験では、浮上に要する時間を考慮した深さが20cmのガラスセル(断面は1cm角)を図-3(b)に示すように鉛直になるよう顕微鏡に固定し、試料を容器に入れて後1~2分以内にストロボ透過光により写真撮影し、フィルム上でピントの合った像を選んで粒径分布等を測定した。

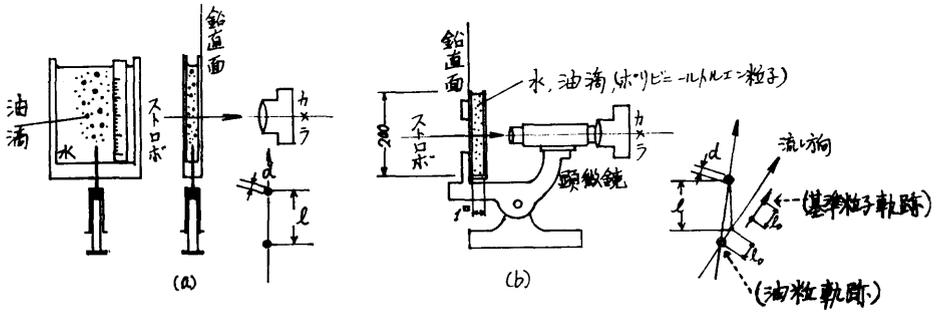
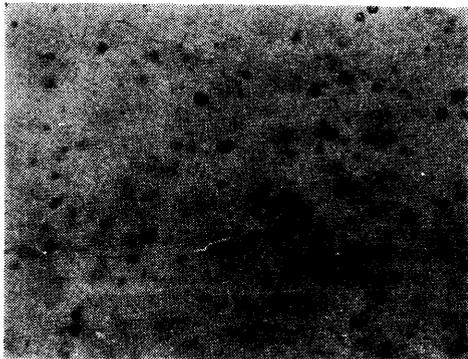


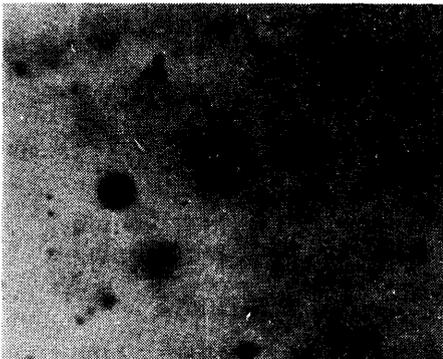
図 3 粒径写真測定装置



a) 油のみ



c)  $Fe_2O_3$  (対油量比: 24%) を水中に混合させた場合



b)  $Fe_2O_3$  (対油量比: 30%) を油中に混合させた場合



写真 2 油粒分布および付着状況例

写真 2 は油粒分布および粉体の付着状況の例を示したものであり、図 4 は上記方法によって求めた油粒径分布である。図中の縦軸は後に述べる静置浮上曲線と対比させる目的で、各粒径以下の径を持つ油粒の合計が全濃度に対して占める割合を示している。また、横軸は写真によって測定される粒径（粉体を含む）である。図中のデータ (2) に「基準粒径分布」として示したように、油だけを前述の攪拌条件で水中に攪拌した場合は写真 2 a) にも示されるように 10 ミクロン前

後の油滴ができるが、油中に粉体を混合すると粒径分布は影響を受け、 $Fe_2O_3$  の場合には  $Fe_2O_3$  を吸着した大きな油粒ができ（写真 2 b）、 $Fe_2O_3$  の対油量重量%の増加とともに粒径分布も図中のデータ (4)~(6) に示されるようにほぼ平行に粒径の大きい方へ移動する。（これを以下、「粒径増大効果」と称することにする。）その際、写真からも明らかのように  $Fe_2O_3$  粉体は油分に完全に包み込まれた形になっており、油滴は外見上ほぼ球形を保っている。一方、水中に  $Fe_2O_3$

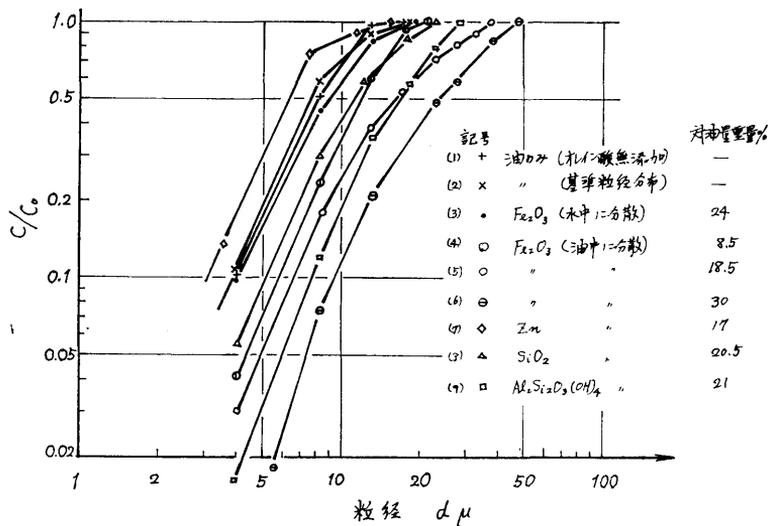


図4 油粒径分布 (写真測定)

粉体を混入する場合は粒径分布はデータ (3) に示すように余り影響を受けないが、写真 2 c) にも見られるように水中に浮遊する  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  粉に複数個の油粒が付着しているのが観察された。

次に、混合量をほぼ一定にして粉体の種類をかえた場合は、図中 (5), (7)~(9) に示されるとおり、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、カオリナイトは「粒径増大効果」が大きい、 $\text{SiO}_2$  の効果はそれほど大きくないことがわかる。さらに特長的なことは Zn 粉の場合には逆に油粒径を小さくするように作用している。写真観察の結果によると  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、カオリナイト、 $\text{SiO}_2$  では粉体が油滴内に包み込まれた形になり、透過光がさざぎられてフィルム上油粒が黒く写るのに対し、Zn では油のみの場合と同様、球形の中央に透過光による明るい部分が観測されたことから考えて、Zn の場合には攪拌時に粉体が油粒からはじきだされ、その際、油粒径を小さくする作用が働くのではないかと考えられる。また、上記「粒径増大効果」の粉体の種類による差も油に対するぬれやすさ等の物性に密接に関連していると考えられ、攪拌の際の油粒の分裂に対する抗力として作用するものと推定されるが本実験の範囲では明確にはできなかった。なお、図中のデータ (1)(2) は前に述べた分散剤添加の影響を示しているが、特に顕著な差は見られなかった。

### 3.3 静置浮上実験

図5は静置浮上実験に用いた容器で、全ガラス製の二重側壁構造をしている。内筒に攪拌直後の試料油水

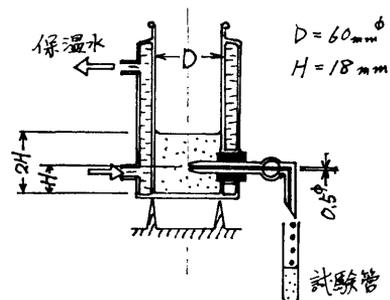


図5 静置浮上容器

を入れ、外側環状部は試料と同温の水道水を流して容器内の温度を一定に保って、試料水内の自然対流による影響をできる限り小さくした。容器内中央部には底面から一定の高さ  $H$  の位置に  $0.5\text{mm}\phi$  の内径を持つサンプルロックが取り付けられており、この位置の試料水を試料注入時からの時間経過につれて採取し、濃度測定することによって静置浮上曲線を求めた。 $H$  の大きさは対象とする粒径の範囲によって適当に選ぶ必要があるが、本実験では  $18\text{mm}$  とした。また、容器内に入れる試料油水の深さは、本実験の場合、付着粉体量によって浮上する粒子と、沈降するものがあるため、後の解析を考慮して  $H$  の2倍に定めた。なお、本実験で使用した油分濃度計は非分散型の赤外線吸収濃度計 (OCMA-100) である。

以上に述べた方法で求めた静置浮上曲線を図6および次の図7に示す。これらの図は静置状態における浮

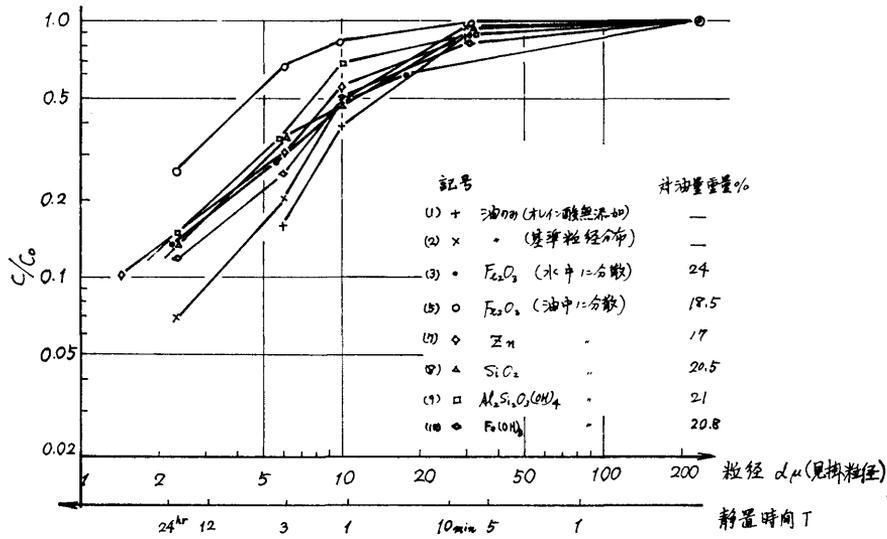


図 6 静置浮上曲線 (粉体の種類の影響)

上 (あるいは沈降) による油分の分離状況を示すと同時に、純粋の油粒の場合には、前項で述べた粒径分布、図 4 に相当している。すなわち、仮定として (1) 静置開始時に容器内の試料中油粒分布は位置的に一樣であり、(2) 各油粒はすべて前項で述べた Stokes 則に従って浮上 (あるいは沈降) し、(3) 容器内の自然対流あるいはブラウン運動による拡散等は無視できる。したがって (4) 時刻  $t=T$  には、浮上速度が  $H/T$  以上の粒径粒子はすべてサンプルロック水位  $H$  以上に浮上しているが、それより粒径の小さい粒子については初期状態とまったく同じ粒径分布をしているものと考え、サンプル試料中の油分濃度の時間変化を測定することにより、各時刻  $T$  に対応する速度  $u_a=H/T$  以下の粒径を持つ油粒の全濃度に対する割合が求められ、図 4 と同様の累積粒径分布が得られる。なお、本実験では 1 回のサンプル量は少なく、試料採取による水位の変化は無視できると考えられる。一方、純粋の油分だけでなく、粉体が付着して浮上速度が小さくなっている油滴についても、図 6 の横軸を静置時間とすれば、静置状態における浮上あるいは沈降による油分の分離状況を知ることができ、同時に、横軸の粒径の意味を、「各粉体付着油滴を、それと同じ浮上速度を有する純粋な油滴とみなした場合の粒径 (見掛けの粒径)」と考えれば、この図と写真観測による実際の粒径分布図 4 とを比較することにより、浮上速度に対する固体浮遊物の影響を調べることができる。

まず、純粋な油のみの場合の曲線 (2) を写真測定による図 4 の「基準粒径分布」曲線 (2) と比較すると、分布曲線の図中の位置 (粒径の絶対値) はオーダー的によく一致していることがわかる。ただ、分布の形状は静置浮上法による場合が相対的になだらかになっており、測定法による差が出ており、したがって、前述の仮定に若干の問題があるようである。また、オレイン酸添加による影響は図 4 の場合と同様それほど大きくはない。

次に、粉体を混入させた場合については、まず Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を水中に分散させると特に粒径の小さい部分で「基準粒径分布」(2) より図中左方に寄り、写真 2 c) にも述べた複数個の油粒が Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉に付着することによると考えられる影響が現われているが、次の油中に混入させる場合に比べるとそれほど効果は大きくない。油中に、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Fe(OH)<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(OH)<sub>4</sub> および Zn 粉を一定重量混合させた場合は、図中、データ (5)、(7)~(10) に示されるように、「見掛けの粒径」がさらに小さい方に移動している。このうち、Zn の効果はそれほど大きくなく、前述の図 4 (7) の結果から考えて、油粒に Zn 粉が付着することによる影響よりむしろ実際の粒径が Zn 粉のために小さくなっていることが効いていると考えられる。SiO<sub>2</sub> の場合もそれほど効果は大きくないが、この場合には Zn と異なり、図 4 (8) で実際の粒径は大きい方に寄っていることから、明らかに粉体の付着による浮上速度の低下と

できないので、別途、たとえば油粒の表面積に比例して浮遊物が付着するモデルを考える方が現実的であろう。

さて、今  $Q_a, Q_s$  を試料水の単位体積中に存在する油および固体粉体の体積量、 $\gamma_i, \gamma_a, \gamma_s$  をそれぞれ水、油、粉体の比重量、生じる油滴の粒径を  $d$  とし、すべての粉体は油粒に付着しており、かつ粉体付着による粒径増加は小さいとして無視すると、固体粉末が付着した油粒の見掛けの比重量  $\gamma'_a$  (油滴重量/油滴体積) は次式で与えられる。

$$\gamma'_a = \left( \gamma_a + \gamma_s \frac{Q_s}{Q_a} \right) / \left( 1 + \frac{Q_s}{Q_a} \right) \quad (2)$$

(2) 式を導く過程は [付録 2] に示すとおりである。さらに、粉体が付着しても粒子は球形を伴っていて、Stokes 則はそのまま適用できるものとする、油粒の浮上あるいは沈降速度  $u'_a$  は (1) 式の  $\gamma_a$  に上述の  $\gamma'_a$  を代入して次式で与えられる。

$$u'_a = \frac{|\gamma_i - \gamma'_a|}{18\nu\gamma_i} g d^2 = \frac{g}{18\nu\gamma_i} \left| \gamma_i - \gamma_a \left( 1 + \frac{\gamma_s Q_s}{\gamma_a Q_a} \right) / \left( 1 + \frac{Q_s}{Q_a} \right) \right| d^2 \quad (3)$$

(1) 式の純粋の油粒のみの場合の浮上速度  $u_a$  と比

較すると、結局粉末が付着したことによる浮上速度の減少率(あるいは増加率)、 $(u'_a/u_a)$  は次のようになる。なお、速度は浮上、沈降を含めてすべて絶対値(正)で示す。

$$u'_a/u_a = \left| \left\{ \gamma_i - \gamma_a \left( 1 + \frac{\gamma_s Q_s}{\gamma_a Q_a} \right) / \left( 1 + \frac{Q_s}{Q_a} \right) \right\} / (\gamma_i - \gamma_a) \right| \quad (4)$$

それぞれの粉体について物性値を代入し、速度比を計算して図示したのが図 8 である。横軸は固体粉末の対油量比、 $(W_s/W_a) = (\gamma_s Q_s / \gamma_a Q_a)$  であり、清水のかわりに海水を用いた場合、比重が 1.0 に近い物体の場合についても参考のため計算値を示している。図から明らかなおとおり、浮上速度の減少効果を表わす  $(u'_a/u_a)$  の値は 1.0 から粉体量の増加とともに減少し、対油量比  $(W_s/W_a)$  のある値で 0 になる。これは油の浮力と粉体の付着による沈降力が釣合って、見掛けの比重が周囲の水と一致し、重力による静置分離が不可能になることを意味する。この状態を仮に「中立点」と称し  $(W_s/W_a)_0$  で表わすことにすると、この「中立点」の位置は粉体および水の比重で定まり、粉体の比重が小さいほど、また清水中より海水中で  $(W_s/W_a)_0$  の値は大きくなる。本実験で用いた、 $Fe_2O_3, SiO_2, Al_2Si_2O_5(OH)_4, Fe(OH)_3$  などでは  $(W_s/W_a)_0 = 0.10 \sim 0.20$ 、す

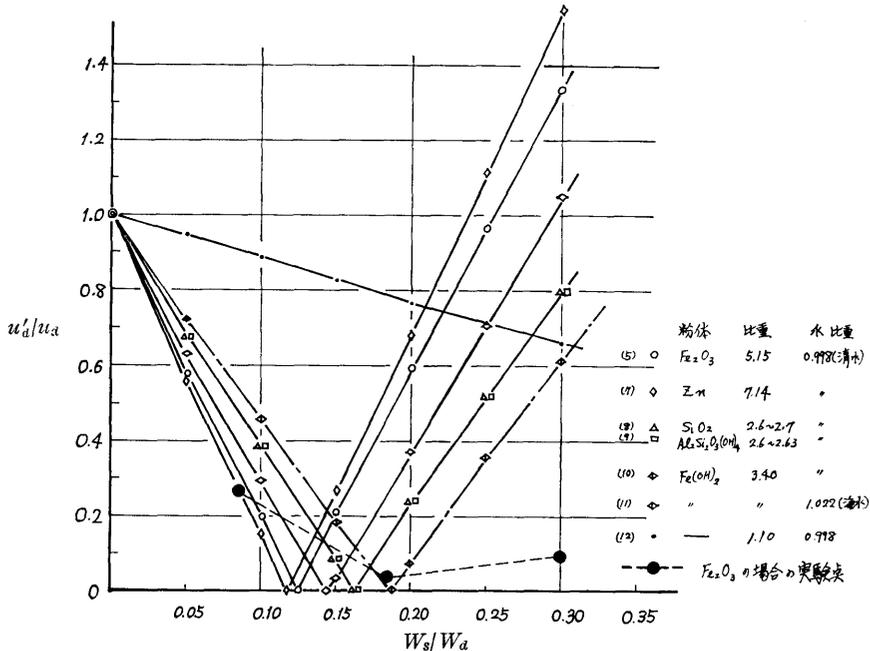


図 8 油粒浮上速度 (浮遊物の影響)

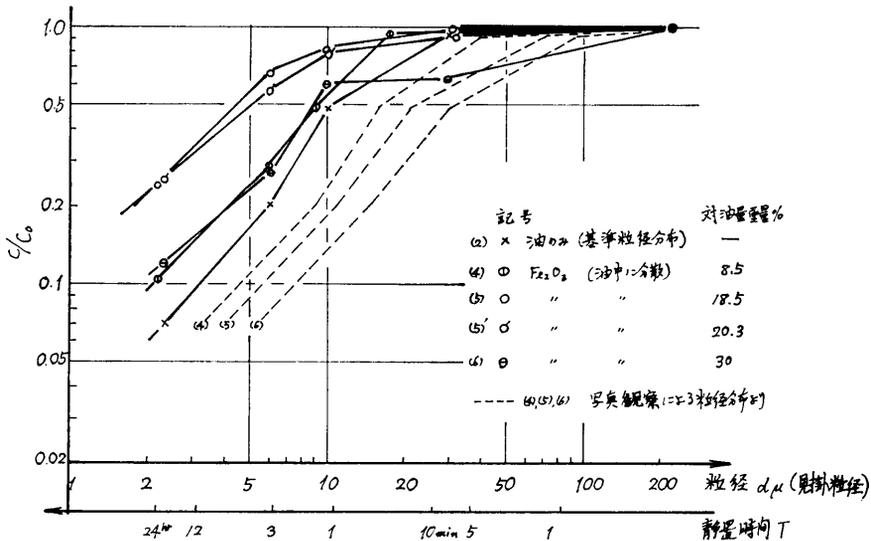


図 7 静置浮上曲線 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 重量%の影響)

考えられる。これが Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Al<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(OH)<sub>4</sub> になると、図 4 (5), (9) に示したように実際の油粒径はさらに大きくなっていると同時に油粒の浮上速度が遅くなって、図 6 中の「見掛けの粒径」がかなり小さい方に寄っている。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は特にこの効果が顕著である。

図 7 はこの Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> について混合重量 % の影響を調べたものであるが、非常に特長なことは、付着による「見掛けの粒径」の減少効果は粉体の対油量重量 % のある値で最大になることである。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合はこの値が 20% 程度の所にあり、「基準粒径分布」に対する「見掛けの粒径」の減少率は最大 1/3 程度である。これは浮上速度になおすと 1/9 程度の減少率、静置時間で 9 倍にまでなっている。なお、目視による状況観察によって、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が 20% より少ない場合には油滴に付着している Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は容器底面に沈降する量より、水面に浮上する量が多く、20% 前後ではほぼ同量になり、20% 以上では沈降する量の方が多くなることにそれぞれ対応していることを確認した。図 7 中に破線で示した曲線は図 4 の粒径分布を比較のため再記したものである。ただ、前述のように図 4 と図 7 では測定法の相違に起因する分布形状の差があるため、図 4 の粒径分布をそのまま記すのではなく、両図面中の「基準粒径分布」をもとにして、それからの横軸方向の移動距離を同等とするよう作図したものである。以下の項では相対対応するこれら二種類の分布曲線 (図

7 の実線および破線分布) の関連について考察を行なう。すなわち、各々の粒子について付着時の浮上速度を測定し、浮遊物の影響を調べる代わりに、図 7 の静置浮上曲線を図 4 の粒径分布を持つ粒子群の粉末付着時浮上特性の総和的結果と見なし、これと、図 4 の分布と同じ粒径分布をもつとした仮定の純粋な油粒群の浮上特性 (図 7 中の破線分布) とを比較することにより、全体的且つ平均的な付着による影響の度合を定量的に検討する。

#### 4. 静置浮上速度の考察 (固体浮遊物の影響)

実際のビルジ水、タンククリーニング水中の浮遊物の混入系路としては、最初水中に混入する場合と、油中に混入する場合とが考えられ、状況によってこの割合が変化すると考えられる。本実験結果によると混入量が同じなら水中に混入する場合より、直接油中に混入する方が浮上速度に与える影響が大きいようであり、本実験では後者に重点を置いた。したがって、ここでは最も単純な浮遊物付着モデルとして浮遊物が各油滴に、その体積に比例して付着しているモデルを想定し、前項までに述べた実測結果を検討することとする。なお、水中混合の例は Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> について一例だけであり、また実際の状況によっては水中混合量が油中に比べて非常に多い場合もあると考えられ、そのような場合には水中浮遊物の影響も一概に無視することが

なわち、固体浮遊物量が油分量の 10~20% の時に相当する。次に  $(W_s/W_a) > (W_s/W_a)_0$  では沈降力が浮力に勝って、 $(u'_s/u_a)$  の値も再び大きくなっていく。なお、図中  $(u'_s/u_a)$  の値は絶対値で表わしているため、「中立点」前後で折れ線になっている。

以上の計算結果と実測値を比較するため、 $Fe_2O_3$  の場合について図中に実験点を示している。ここで、横軸の値は攪拌時の重量%比を用い、縦軸の速度比の値には図 7 において各重量%に対する静置浮上曲線とそれに対応する実際の粒径分布曲線（図中の破線）との横軸方向静置時間の比（平均値）の逆数、すなわち平均浮上速度比を用いている。この結果から、 $Fe_2O_3$  の場合について実験点の傾向は計算結果とかなり似ていることがわかる。ただ、「中立点」の位置が多少ずれしており、また実験では  $u'_s/u_a = 0$  というような極端な値は現われず、全体的になだらかな変化になっているが、これは  $W_s/W_a$  の値に攪拌時の重量%比を用いており、油滴に付着している実際の値と多少ずれがあると考えられること、ならびに粉体が有限の大きさであるため、前記モデルのように油滴の体積に比例して一様均一に分散されることが実現されないことなどによると考えられる。いずれにしても上記の「中立点」付近では浮上速度が前にも述べたように 1/9 程度になり得るという実験結果は注目に値するものである。（注：図 8 では計算値と比較するため固体不純物の混入による「粒径増大効果」も含めて考え、この増大した粒径分布を基準にして  $u'_s/u_a$  の値を求めているので  $u'_s/u_a$  の最小値は 1/20 程度になっている。）

## 5. 結 論

水中の油粒の分散性ならびに浮上速度に及ぼす固体浮遊物の影響を実験的に調べ、以下の結論を得た。

まず、純粋な微小油粒の場合については、(1) 粒径 3 ミクロン~300 ミクロンの範囲でほぼ Stokes 則が成立し、したがって油粒はほぼ剛体球とみなしてさしつかえない。次に、固体不純物が混入した場合について、(2) 油中に  $Fe_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Al_2Si_2O_8(OH)_4$  等を入れると油粒径を増大する効果があり、特に  $Fe_2O_3$ 、 $Al_2Si_2O_8(OH)_4$  はこの効果が大きい。粉体は油に包み込まれた形になり、外観上はほぼ球形を保つ。なお、Zn 粉だけは逆に粒径を小さくするように作用する。(3) 同時に前者の三種類の粉体は、 $Fe_2O_3$ 、 $Al_2Si_2O_8(OH)_4$ 、 $SiO_2$  の順に浮上速度を減少さす。Zn の場合も浮上速度は小さくなるが、この場合は付着効果より

むしろ実際の油粒径が小さくなっているためと考えられる。(4)  $Fe_2O_3$  について混入量を変化させると対油量重量%が 20% 前後で (3) の効果が最大になるが、この現象を浮遊物の油中均一分散モデルによる解析結果と比較すると、効果が最大になる位置（「中立点」）が若干ずれ、全体として解析値の曲線よりなだらかな変化になるが、傾向としてはほぼ一致する。(5) そして  $Fe_2O_3$  の場合、実験結果によると浮上速度は最大 1/9 程度にまで減少することが明らかとなった。

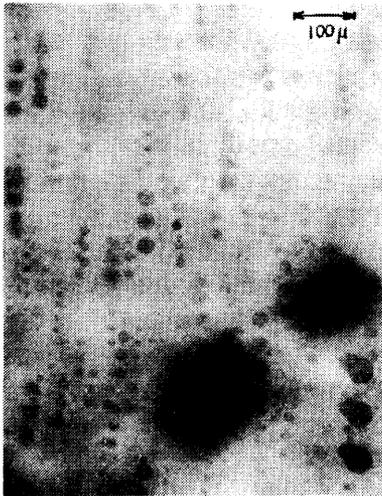
まえがきで述べたように現在の実働油水分離器の入口条件として固体の浮遊物が油分濃度の 10~20% になることは充分可能性があるが、それが  $Fe_2O_3$  のように比較的比重の大きな物質であれば、上述の結果から浮上速度はほぼ 1 桁近く小さくなり、重力静置式の分離性能をかなり悪化させるであろうと想像される。また、本実験の経験から、粉体が付着した油粒は浮上あるいは沈降した後も合体しにくく、動揺に対して再び分散するなどの性質が確認されたが、これも注意を要する点と考えられる。なお、本報告の内容以外にも、ビルジ水中の生物あるいはその残骸等の浮遊物が分離性能に非常に影響するのではないかという指摘、あるいは重力分離式だけでなく、浮力を用いた分離方式における浮遊物の分離性能に対する影響といった問題が提起されており、今後検討すべき課題であると考えられる。

## 〔付録 1〕 油粒浮上速度の計測方法

対象とする粒径範囲が数ミクロン~数百ミクロンで、浮上速度も 0.1 ミクロン/s~10 mm/s と広範囲であるため、粒径によって二種類の方法を用いた。すなわち、約 50 ミクロン以上の油粒については図 3 (a) に示すような両面ガラス製、厚さ 10 mm の容器を鉛直に立て、底面から注射針で油を注入し、生じた各種粒径の油滴をガラス側面を通して一定時間間隔に発光するストロボ光で写真撮影して、粒径および移動距離をフィルム上から読み取った。なお、注入時の乱れの影響をさけるため、撮影は浮上が定常状態になった後行っている。

一方、50 ミクロン以下の油滴については、油水混合物を卓上ミキサーで攪拌して作り、これに基準試料として、ポリビニール・トルエン・ラテックス（比重 1.027、粒径 2.02 ミクロン）を混合させたものを前に述べた図 3 (b) のガラスセルに入れ、やはり顕微鏡写真によって撮影した。この場合、浮上速度が小さ

く、セル内の対流による流体の動きを考慮する必要があるが、この方法としては上記のポリビニール・トルエン粒子の移動距離  $l_0$  および移動方向を流体の動きとみなし、これを基準に図3(b)に示すような図法によって浮上距離  $l$  を求めた。この方法による誤差は、静止水中におけるポリビニール・トルエン粒子の沈降速度が 0.045 ミクロン/s と非常に小さいので、浮上速度が 0.4 ミクロン/s 以上と予想される粒径が 3 ミクロン以上の油滴では実質的に問題にはならない。なお、写真3は浮上速度を求める際の顕微鏡写真の例である。



点状軌跡がポリビニール・トルエン粒子、その他は油粒

写真3 浮上速度測定例  
(顕微鏡写真倍率:  $\times 122$ )  
(ストロボ発光数: 3/秒)

### 〔付録2〕 見掛けの比重量 $\gamma'_d$

#### (1) 体積比例付着モデル (油中均一分散モデル)

粉体は充分微細であり、すべての油粒にその体積に比例して一様に付着しているものとし、比例定数(粉体の種類によると考えられる)を  $k_1$  とする。固体付着による粒径の増加の影響は小さいものとする、粒径が  $d \sim d + \Delta d$  の範囲にある油分の量  $\Delta Q_a$  および総油量  $Q_a$  に付着している固体粉末量  $\Delta Q_s$ ,  $Q_s$  との間には次式が成立する。

$$\Delta Q_s / \Delta Q_a = Q_s / Q_a = k_1 \quad (5)$$

したがって、粉体が付着している粒子の見掛け比重  $\gamma'_d$  は、

(228)

$$\begin{aligned} \gamma'_d &= (\gamma_a \Delta Q_a + \gamma_s \Delta Q_s) / (\Delta Q_a + \Delta Q_s) \\ &= (\gamma_a + \gamma_s Q_s / Q_a) / (1 + Q_s / Q_a) \end{aligned} \quad (6)$$

#### (2) 表面積比例付着モデル

油粒の表面積に比例して付着するものとした場合、比例定数を  $k_2$  とする。今  $d \sim d + \Delta d$  の範囲の、 $\Delta$  体積当たり粒子個数を  $\Delta n = f(d) \Delta d$  とすると、

$$\begin{aligned} \Delta Q_a &= \frac{1}{6} \pi d^3 \cdot f(d) \cdot \Delta d, \\ Q_a &= \int \Delta Q_a = \frac{1}{6} \pi \int f(d) d^3 \Delta d \end{aligned} \quad (7)$$

一方、 $\Delta Q_s$ ,  $Q_s$  は表面積に比例するものとしたので、

$$\begin{aligned} \Delta Q_s &= \frac{1}{2} k_2 \pi d^2 \cdot f(d) \cdot \Delta d, \\ Q_s &= \frac{1}{2} k_2 \pi \int f(d) d^2 \Delta d \end{aligned} \quad (8)$$

したがって、

$$\begin{aligned} \gamma'_d &= (\gamma_a \Delta Q_a + \gamma_s \Delta Q_s) / (\Delta Q_a + \Delta Q_s) \\ &= \left\{ \gamma_a + \gamma_s \frac{Q_s}{Q_a} F(d) \right\} / \left( 1 + \frac{Q_s}{Q_a} F(d) \right) \end{aligned}$$

ここで、 $F(d) = \left( \int f(d) d^3 \Delta d \right) / \left( \int f(d) d^2 \Delta d \right)$  (9)

この場合には、 $\gamma'_d$  の値の中に  $F(d)$  という粒径分布  $f(d)$  および粒径  $d$  を含む関数が入っているため、粒径によって浮上速度の変化率  $u'_d / u_a$  が異なる値をとり、静置浮上曲線を単なる平行移動ではなくて多少複雑になるが粒径分布  $f(d)$  の形が測定できれば上式によって計算可能である。

### 参考文献

- 1) 柴田・ほか, 日本造船学会論文集, No. 219 (昭46-6), pp. 313
- 2) 松本・ほか, 三井造船技報, Vol. 69 (昭和45-1), pp. 50
- 3) 海洋汚染防止用機器に関する調査研究事業報告書, 日本船用機器開発協会, (昭和47-3)
- 4) Rybczynski, W., Bull. of Acad. Crocevie, Ser. A, Vol. 40, (1911)
- 5) 気泡液滴工学, 化学工学協会編, または Van Krevelen, W., Chem. Engrg. Prog., Vol. 46, (1950), pp. 29
- 6) JIS 規格 Z 8901, 試験用粉体, (1969) および理化学辞典, 岩波 (第3版)