

調査結果の考察

今回の3船の油水分離器は、いずれもIMO(国際海事機関)が定めた性能試験基準(A・393(X))に基づいた性能試験を経て、15ppm以下に処理できる分離機能を持つ装置として型式承認された機種である。しかし今回実測された実働性能はいずれの場合も予期に反して必ずしも満足されるものではなかった。この結果に関連する事項について若干の考察を加える。

① 供試油水分離器の分離機構

今回の供試油水分離器は現在世界各国の船舶で機関室ビルジ用として一般的に供用されているものと機構の面では特に変わるものではない。この種の分離器の機構とその油水分離機能を述べる。

分離器本体内部は一連の平行板群(傾斜型または水平型の多層平行板)による粗分離部と、化学繊維組織等を用いたコアレッサーと称せられる精分離部(粗粒化部)から構成されている。ビルジポンプから送入された含油水(ビルジ)はまず粗分離機構の多層平行板へ流入するが、平行板は整流板として作用して分離器内の分散を全体に均等化するとともに、油粒が水と油の比重差に基づいて浮上し、油分がより密集した場所に到達し最後には連続した油相に行き着くまでの移行距離を短縮し、そして最終的に凝集の可能性の最も高い油粒の高密集場所や連続油層場所がある分離器内の領域を増やすことである。次に、粗分離部で分離されなかった油粒を含む被処理油は精分離機構部としてのコアレッサーを通過するが、繊維組織表面に油粒が衝突した場合、接合力の方が引き離す方向に油粒に働く粘性抵抗力より大きければ、そこに付着する。別の油粒が既に繊維組織に付着した油滴に衝突すると、造塊(coalesce)が生ずる。このような衝突が繰返されると、油滴は成長を続けることとなる。最終的には、油滴が重力作用で分離するまでに大きく成長して、浮力+粘性抵抗が付着力を上回れば、油粒は繊維組織を通過して分離されると考えられる。

このような効果のあるコアレッサーを多用するときは、A・393(X)の試験条件のもとでは極めて効果的な油水分離性能が期待できるので、昨今の船用油水分離器のほとんどの機種にこの機構が組み込まれている。

② コアレッサー方式の油水分離機能が阻害される要件

油粒径が微細な場合

油粒が数 μm 程度と著しく微細な場合には、コアレッ

サーがこの微細油粒を捕捉吸着することが困難になってくる。すなわち、油粒がコアレッサーの微細な空隙をそのまま通過するので、油水分離機能が阻害される。

界面活性剤等がビルジに混入して油粒が乳化作用を受けて極端に微細化するような場合がこれに該当する。そこで今回の試験船の機関室ビルジを分析して界面活性剤の混入の有無を調べたが、その結果は既述のごとく、特記すべき界面活性剤の存在は認められなかった。一方、今回の試験船の各船油水分離器入口側で採取した試料に含まれる油粒径分布を実測すると図・22のようになり、いずれも30 μm あるいはそれを下回る微細粒の占める割合の多いことが示された。機関室ビルジに特段の界面活性剤が存在しないにも拘わらず、微細な油粒が多量に存在するという事は、機関室ビルジの本来的な様相と言えよう。なお、比較のためにA・393(X)試験基準の油水分離器性能試験で要求される試験用含油水の供給条件(供給油は片吸込み、単段で回転速度1,000rpm以上の渦巻ポンプで攪拌される)で得られた含油水中の油粒分布²⁾の傾向を図中に表した。

含油水にSSが混入する場合

含油水中に大量のSSが混入すると油水分離器主要部のコアレッサーが油粒を捕捉し、造塊する機能が低

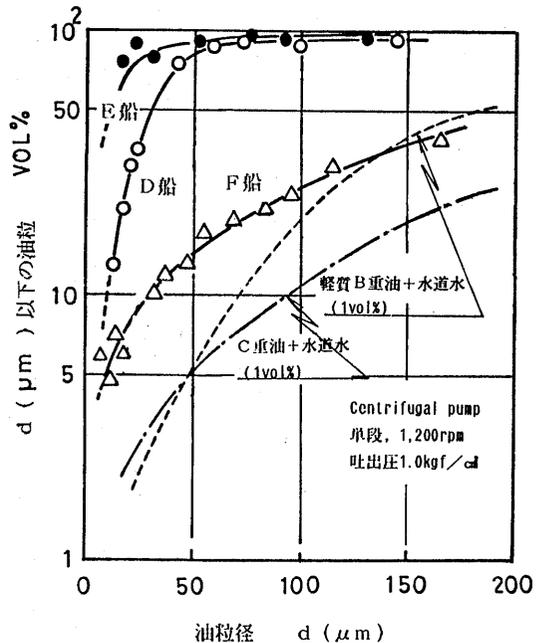


図.22 油水分離器入口側における油粒径分布

下して油水分離の性能が悪化する。これを実証する試験結果は後述するが、この試験の際の顕微鏡観察によれば、油粒とSSとが結合したものは、コアレッサーの繊維組織に付着することなく、その間隙を容易に通過する傾向のあることが確認された。

今回の試験船の油水分離器の入口側及び出口側で採取した試料中のSSの量の実測値は図・18～図・20に示される。それぞれの試料中には相当多量のSSの混入が認められるが、特に入口側と出口側とでSS量が殆んど差を生じていないことが注目される。これは、SSは油水分離器のコアレッサーでも捕捉されることなく、そのまま通過したと解されるが、これらSSには微細な油粒が付着しており、これ等もコアレッサーをSSと供に通過すると考えられるので、これが油水分離機能低下のメカニズムの一つであると推定される。

以上から、機関室ビルジ中に大量に混入していることの多いSSの存在が、油水分離器の実働性能を低下させていると言えよう。

機関室ビルジ処理用油水分離装置に関する 後期実船調査のまとめ

今回の3隻の実船調査の結果、機関室ビルジの油水分離はIMOの国際性能試験基準A・393 (X) に適合した油水分離器であっても、その分離基準値の達成は容易ではないことが示された。本報告3・1・1で一例を示したように、従前の国際性能試験基準A・233 (VII) に適合した油水分離器の実船調査結果からも全く同様な事項が指摘される。

これは実船機関室ビルジにSS及び微細油粒を多く含むことがその主要因と考えられる。また近年の高粘性燃料油等は、ビルジ管系や分離器本体の内部汚損を助長し、さらにSSの要素とともにコアレッサー閉塞（目詰まり）の原因となる。このような本質をもつ機関室ビルジを常時100 ppmあるいは15 ppmを下回る油分濃度まで処理可能な船用油水分離器の開発は実際には技術的にも相当困難である。そのため、基本的には油水分離という問題を一つのシステムとして捉え、処理フローの中で可能な限り油水分離器の負担を軽減する運用方を構築することが課題であろう。

3.2 現行船用油水分離器の分離機能を阻害する要因に関する研究

3.2.1 研究目的

国際条約の規制のもとに船舶に設置された油水分離器が、その実働性能の面で必ずしも所期の性能が発揮

されていないことが知られている。³⁾この事実に対して国際海事機関 (IMO) では全世界の船舶に対して実施したアンケート調査の解析結果に基づき分離器不調の原因の推定を試みるとともに、当面の対応策を各国へ提示した。しかしながら、よりの確かな原因の究明や対応策を見出すためには、設定条件を吟味した調査試験等を根拠にして検討を加えることが必要と思われる。これに関連して、油水分離器の実働性能が低下する原因を究明し、これを基に現状でより有効な分離効果を得るための対策を確立するとともに、油水分離器の現行性能試験基準をより適切かつ合理的なものへ改訂するための指針を得ることを目的として、以下の研究を進めた。

3.2.2 研究方法

フィルター状コアレッサーの繊維組織に対する 油水分離の挙動調査

現行油水分離器の重力分離機構において、フィルター状コアレッサー（化学繊維材の不織布を積層したものは、多層平行板あるいは細管等による粗分離に続く精分離機構として分離性能を左右する重要な部分である。この部における油水分離の実態、つまり繊維組織における微細油粒の造塊（粗粒化）及び剥離、放出現象を基本的な理念とし、ビルジ水への混入物質が油のみの場合と、これにSS等の油以外の異物が混入した場合の現象を調べるために、顕微鏡による観察を行った。実験にはSSを想定した混入物としてJIS Z 8901に定められた試験用ダスト11種及び7種を用いた。これ等は関東ローム粉であり、中位径 D_p50 は、前者で1.6～2.3 μm 、後者で27～31 μm である。

注)：ある粒径 $D_p\mu\text{m}$ 以上(以下)の質量が全ダスト質量の50%をしめるときの粒径を中位径と呼び、これを D_p50 と表す。

観察はあくまでも基本的な条件に限定し、ポリプロピレン不織布から2本の繊維（径30 μm 程度）を取りだしてこれを顕微鏡視野内の小規模流路の流れに対してある角度でセットし、観察用試料の流速6～10 cm/secの条件のもとで一連の観察実験を行い、ビデオで記録した。

含油水に懸濁性固形物 (SS) を含む場合の現行 油水分離器の分離機能

水と油の比重差に依存する現行船用油水分離器の実働性能に関して筆者らは長期間にわたって調査を続け

てきたが、本報告でも述べた調査例のごとく、規制値を常時保持する成果は得られていない。この理由として実船機関室ビルジの複雑な性状が挙げられるが、今回筆者らは過去のデータに基づき、ビルジに混入する油以外の混入物のうちのSSに特に注目し、調査内容をSS主体に絞ってSS混入条件が重力方式分離器の機能に及ぼす影響を実験的に研究した。

供試油水分離器等

SS混入が分離機能に及ぼす影響を調査する供試体としては、要素解析を単純化するため、現行分離器の機能構造を代表できる分離器モデル⁴⁾を使用する方策も考えられるが、一方、分離性能をより実際に評価するため、実機分離器を供試体とする方法も有効である。本研究では後者に拠ることとし、供試油水分離器はIMOの国際的性能試験基準A・393 (X) に準拠した性能試験基準 (運輸省通達、船査第 538 号) に適合し、我が国の型式承認を取得した 15 ppm用油水分離器の中から、表・12 に示す最新の型を選んだ。

分離器本体は円筒状の一筒構造で、内部は ①重力分離室 ②ワイヤーメッシュコアレスサー ③油水分離膜カートリッジ からなる。③にはポリエステル繊維の集合体 (不織布) の粗粒化膜を使用しており、ここで①及び②で捕捉できなかった微細油粒をプリーツ状に整形した分離膜によって造塊・分離させる。図・23 は構造の概念図を、写真・2 は粗粒化膜カートリッジを示す。試験中の油分濃度、SS含有量、粒径分布測定用試料は、分離器入口部、分離器中間部 (②の下流側) 及び分離器出口部 (③の出口) からそれぞれ定期的に採取した。

試験装置及び試験方法

試験装置の概要を図・24 に示す。装置は実船機関室ビルジ中の微細な油粒及び懸濁固形物の要素を勘案し、

表.12 供試油水分離器

種別	第一種油水分離器 (15 ppm用)	1筒構成
定格能力 (m^3/hr)	0.15 (最大)	
分離機構	粗分離部: 重力分離室および ワイヤーメッシュコアレスサー 精分離部: 油水分離膜カートリッジ (粗粒化用)	

強度の油水攪拌装置ならびに含油水中への油以外の物質の混入装置を設けた。すなわち、分離器入口における含油水中の粒度分布は、重力分離機構の分離機能限界に近い 10 μm 付近に分布の最高値を与えることを目標として、流路組込み型の機械的攪拌装置 (ホモミ

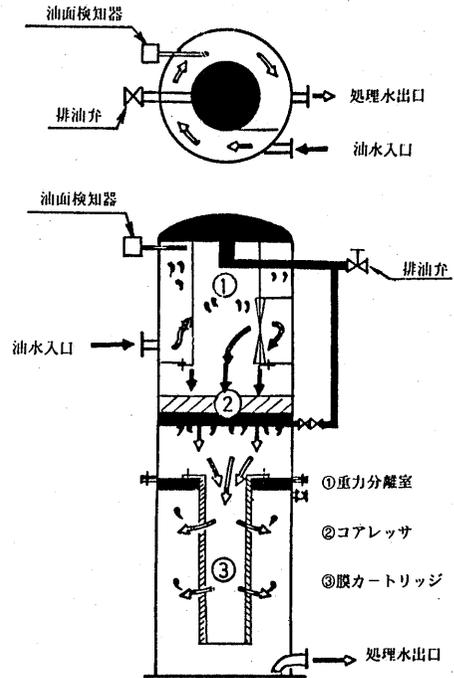
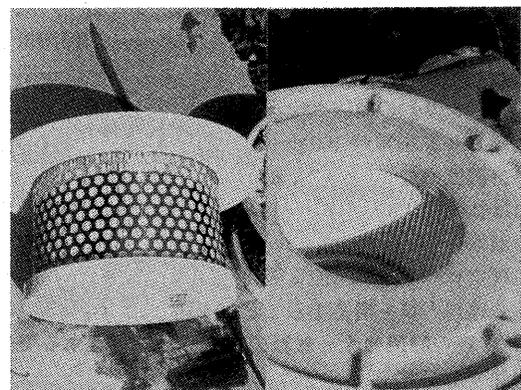
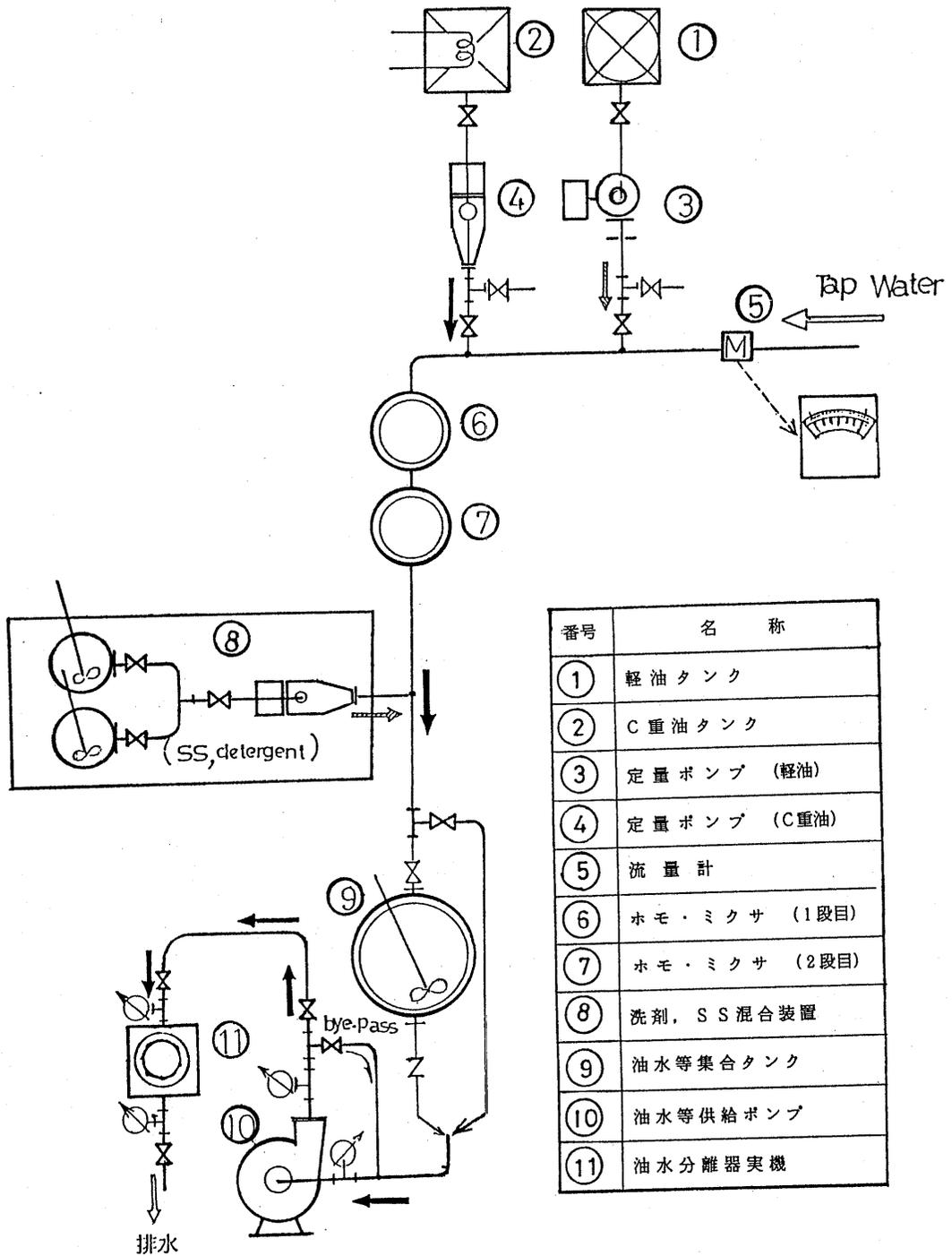


図.23 供試油水分離器



カートリッジ カートリッジ内部 (プリーツ状の粗粒化膜)

写真.2 油水分離用膜カートリッジ



番号	名称
①	軽油タンク
②	C重油タンク
③	定量ポンプ (軽油)
④	定量ポンプ (C重油)
⑤	流量計
⑥	ホモ・ミクサ (1段目)
⑦	ホモ・ミクサ (2段目)
⑧	洗剤, SS混合装置
⑨	油水等集合タンク
⑩	油水等供給ポンプ
⑪	油水分離器実機

図.24 試験装置の概要

表.13 供試ダスト類

項目 種類	性状	粒度	科学組成 (wt %)	密度
JIS 8種	関東ローム (微粒)	中粒径 6.6~8.6 μm	SiO ₂ 34~40 Fe ₂ O ₃ 17~23 Al ₂ O ₃ 26~32 その他	2.9~3.1 g/cm ³
JIS 11種	関東ローム (超微粒)	中粒径 1.6~2.3 μm	炭素	1.7~1.9 g/cm ³
JIS 12種	カーボンブラック	粒径 0.03~0.2 μm		

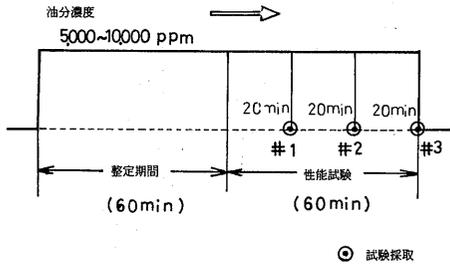


図.25 性能試験実施パターン

クサー) 2台と小型渦流ポンプ(カスケードポンプ)を用いるとともに、混入物としてSSまたは洗剤を定量ポンプを用いて油水中に送入した。(本報告では洗剤については省略する)

試験に用いた油種は軽油(比重 0.836/15°C, 動粘度 3 cSt/37.8°C)であり、水種はすべて常温の水道水とした。SSの種類としてJIS Z 8901に定められた試験用ダストのうち、8種, 11種の関東ローム粉及び同12種のカーボンブラックを選んだ。表・13はこれらの性状を表す。なお、一連の性能試験実施パターンは図・25の通りで2時間で終了するが、油水分離エレメントの目詰まりの実態を調べるためひき続き同一入口条件のもとで試験を4時間過ぎまで実施した。

なお、膜カートリッジはSSの種類の変更のたびに新しく交換するとともに、分離器内部に前回試験の影響が残らぬよう、次回試験にそなえた整備を行った。

3.2.3 研究結果及び検討

フィルター状コアレスサの繊維組織に対する油水の挙動

2本のポリプロピレン繊維素のみに関する付着、粗粒化等の観察に基づいた考察のため、これから得られた知見はあくまでも基礎的内容にとどまるが、実験室的に調合した油水中の微細油粒のほか、実船から採取した機関室ビルジ中のSS分、ゴミ、及び微生物等の挙動例を確かめることができた。試験用ダストを混入し

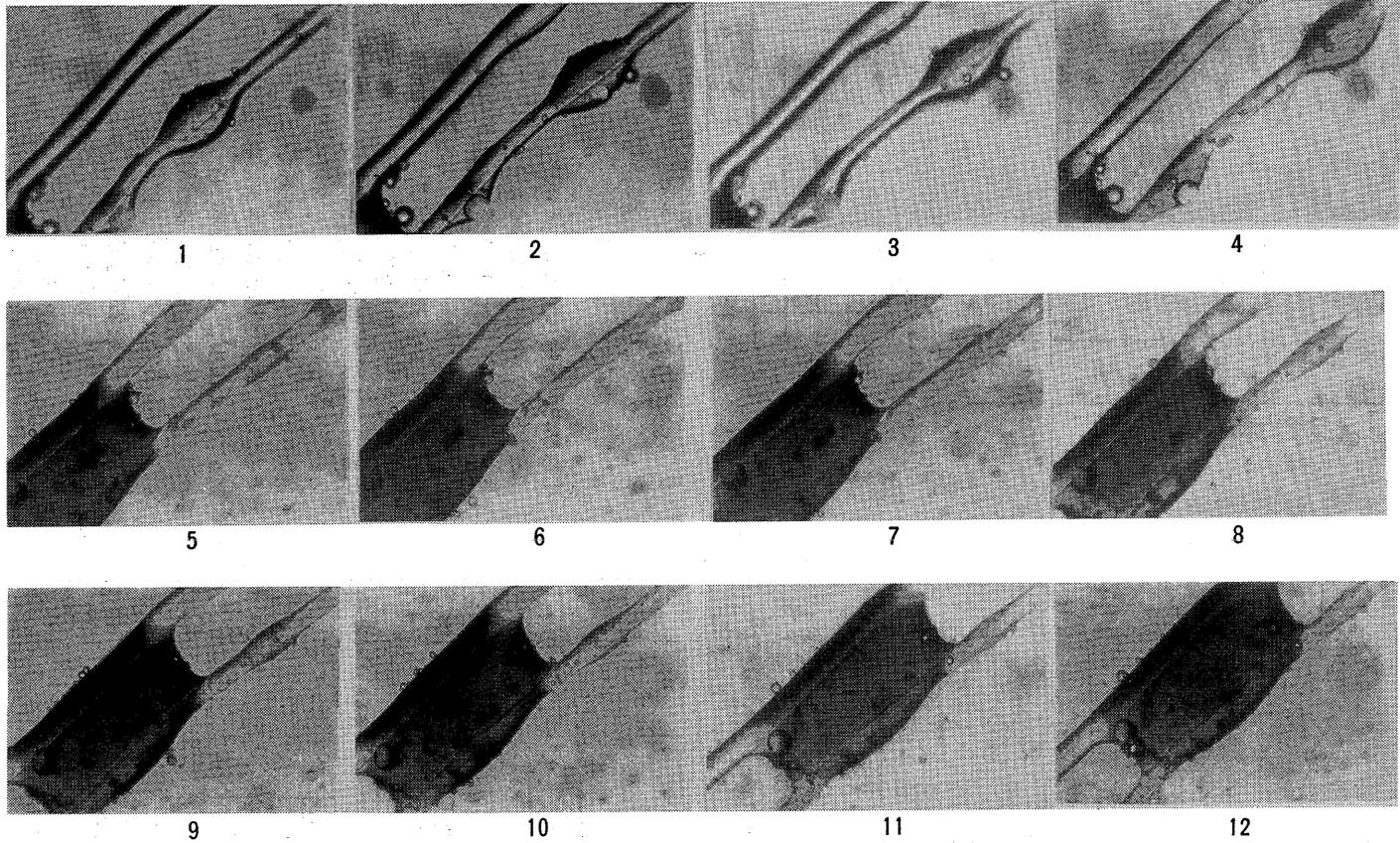
た油水の試験時の観察の一例を写真・3に示す。

これより、繊維表面で粗粒化現象の進んだ油の塊の挙動は確かめられたが、SSを模擬したダストの挙動については明確でなかった。顕微鏡視野の試料の流速を低くすると、実船ビルジにはSS、繊維状ゴミ等、多量の混入物があり、そのほかに微生物の存在が確認された。また、流速を上げた時、粗粒化した100~150 μmの油塊及び数μmの微細なSSらしきものが繊維素の表面上を下流側へ移動する現象を明確に観察することができた。実船ビルジの場合、ビルジウエルまたはビルジタンク等におけるビルジの貯留状態によって、ビルジ水中に微生物が繁殖する可能性があることがわかった。

実用されている不織布フィルターは公称の目の細さが今回観察した場合に比べて格段に小さいので(4 μm前後)、その粗粒化作用は十分効果的に進行していることが推定できる。今回の知見は実機分離器のフィルター状コアレスサの油水分離に関する動的現象の極く一端を示すに過ぎないが、観察した範囲において、総じて実験室的なJIS粉体等の模擬SSが繊維に対して示す付着性は低いようである。また今回の実船機関室ビルジの場合、10 μmを下回るSSらしき混入物が多かったが、これらが化学繊維に対して示す親和性はJIS試験用ダストの場合と特に変わるものでなかった。

懸濁性固形物が現行油水分離器の分離性能に及ぼす影響

前記の入口条件ならびに水温 20~26°C, pH 7.0 付近に対し、懸濁物質の種類を変えた場合の分離器出口における油分濃度と分離器精分離エレメントとしての膜通過抵抗の経時変化を図・26~図・28に示した。図中、白丸と点線はSSブランク試験を、黒丸と実線はSS混入試験を表す。図・26はJIS 8種試験ダストを混入した場合である。これより明らかなように、水道水と軽油のみの含油水では入口油分濃度の平均2.300 ppmに対して出口では10 ppmを下回る値であるがこれに約60 ppm相当の試験ダストが混入すると、入口油分濃度の平均3.000 ppmに対し出口油分濃度は平均14 ppmまでに高まり、また分離膜通過抵抗は油水のみの時に比べ2時間後には2倍となり、以後も経時的に増加して5時間後に0.5 kgf/cm² 近くに達した。粗粒化膜の公称孔径は4 μmとされ、また試験用ダストの粒径分布⁹⁾によれば、JIS 8種ダストの4 μmを上回る積算フルイ上[%]は65 vol %であることから、混入ダストのうちの相当分は膜を通過し得ず、時間とと



実験条件：フィルター繊維2本を流路に斜めにセットし、JIS 7種試験ダスト250ppm (wt%)
 および軽油1,000 ppm (vol%) の油水を画面左から右へ20 sec/20 mlで流路断面
 3.3 mm×1.1 mmのところを流す。
撮影条件：倍率100倍，ほぼ15 sec間隔でストロボ撮影。

写真. 3 顕微鏡による繊維組織に対する油水等の挙動観察例

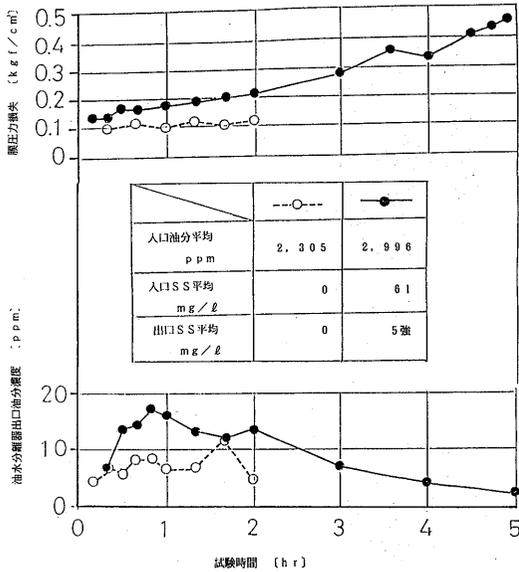


図.26 SS混入時の油水分離性能
(JIS 8種 (関東ローム粉, 微粒))

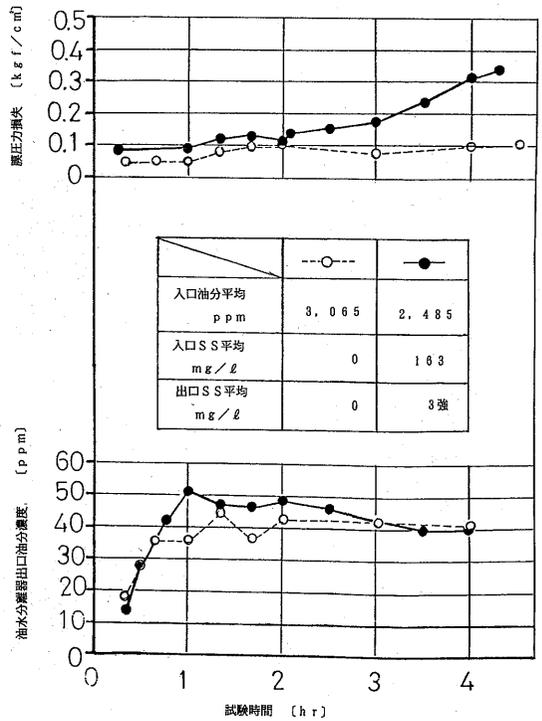


図.28 SS混入時の油水分離性能
(JIS 12種 (カーボンブラック))

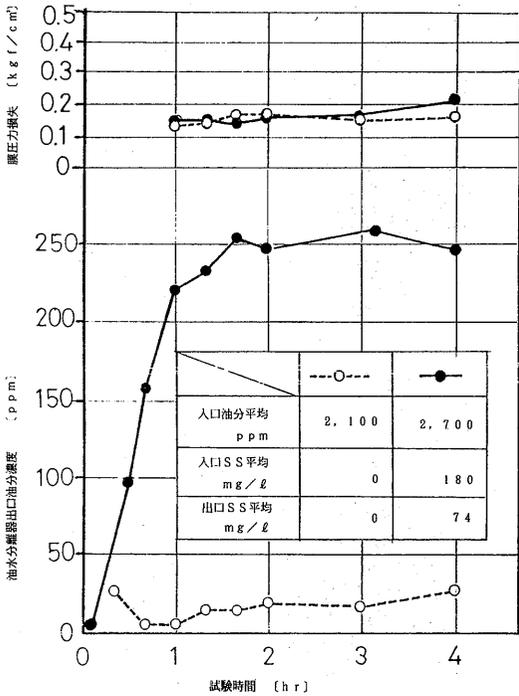


図.27 SS混入時の油水分離性能
(JIS 11種 (関東ローム粉, 超微粒))

もに膜内に蓄積して次第にその流路を狭め、通過抵抗(圧力損失)が増加したと考えられる。

2時間目以降の出口油分濃度は試験の範囲では経時的に減少している。この関連事項として、ダストの蓄積によって膜の見掛け上の孔径が公称の孔径よりも小さくなったこと、通過油水量の低下によって被処理液の膜通過速度が20%程度低くなったことが挙げられるが、これはあたかも、“ケーキろ過”現象における“ろ液”の清澄ろ過メカニズム⁶⁾にあてはまる過渡現象とも推察できる。この状態をさらに継続すれば、膜の空隙が次第に減少して膜の閉塞に近づくが、圧力損失 Δp の急速な増加により、分離器の入口圧(ビルジポンプの吐出圧)が過大に上昇し、以後の分離器の運転は不可能となる。図・27はJIS 11種試験ダストを混入した時の分離性能で、前図の場合に比べ顕著な差を生じている。すなわち、ダスト混入のない場合は分離器入口油分濃度の平均2,100 ppmに対し分離器出口油分濃度は平均20 ppmであるが、入口油分濃度平均2,700 ppmで200 ppm弱相当のダスト混入により、2時間目以降

の出口油分は概ね 250 ppmまで上昇し、混入のない場合に比べ 10 倍強を示している。

JIS 11 種試験ダストの粒径分布は、4 μm を下回る積算フルイ下[%]は 80 vol%に及び、単純に大きさのみからすると 8 割近くのダストが分離膜を通り抜けることとなり、しかも、ダスト表面に付着しこれに連行された油分の粗粒化作用が妨げられることから、出口における油分濃度が高い値となったと推定される。なお、図からも明らかな如く、ダスト混入の有無による膜の通過抵抗は特記する差を生じていない。

図・28 は JIS 12 種試験ダスト混入の場合で、4 時間の試験を通じ、総じて分離器出口油分濃度はダスト混入によって大差を生じていない。試験ダストの混入量は分離器入口で平均 200 ppm弱相当であるが、出口平均で僅か 3 ppm相当程度まで減少し、混入した殆ど全てのカーボンブラックが分離器内部に残留していることが分る。これはカーボンブラックが保有する強い吸着力が原因と考えられ、油分を吸着したカーボンブラックがワイヤメッシュコアレス及び粗粒化膜繊維に蓄積するためと推察される。膜の通過抵抗は、試験開始 1 時間後から漸増傾向が続いたため、標準とした排水圧 0.7 kgf/cm²を保持することができず、4 時間後には排水圧が 0.4 kgf/cm²を下回って、この時点での処理油水量は定格の約 2 割減となった。実船では主機の排気エコノマイザや過給機等の掃除により、未燃カーボンを含んだ大量の洗浄廃水が機関室内に発生することがある。この種のカーボンが今回のカーボンブラックのように表面活性の強い性質を持つか否かについては明らかでないが、一般に未燃炭素(スス)の付着性は強く、これがビルジ水中に多く混入すれば油水分離器精分離フィルタの目詰まり現象が促進され、分離器の運転に重大な支障をきたすので、この種洗浄水の適正な管理が望まれる。

3.2.4 まとめ

以上、実船ビルジ中の SS を想定し、粒度、物性の異なる 3 種の JIS 試験用ダストが現行の船用油水分離器の実働性能に及ぼす影響に関する知見を得た。しかしながら、本報告の内容はあくまでも限定された被処理油水等の入口条件と分離器構造のもとで得られた結果であって、その傾向の一部を示したものに過ぎない。同一分離器においても、分離エレメントの保守・整備状況によって実働性能は必ずしも一様とは限らず、まして機構上の運用や捕捉油粒に対する設計の相違等によって当然実働性能は変化する。

既述のごとく、本研究では入口の粒径分布のピークを 8~10 μm に設定する苛酷な攪拌条件のもとで実施したが、これは IMO の A・393 (X) 試験基準を明らかに上回る微細な油粒条件を生じるものであり、前記の性能実態は現行船用油水分離器の分離機能阻害要因の一端を示すものと思われる。

筆者らの行った油水分離器の実船試験において、SS 含有量が分離器入口側で 100~200 ppm 相当のものが出口側においてもそれに近い値を示した例もいくつか経験したが、現在 IMO で検討中の A・393 (X) 試験基準の内容見直しとして、洗剤とともに SS の要素も考慮事項として検討を加えることが、機関室ビルジ用油水分離器の実効の向上のために必須の要件と言えよう。

3.3 分析方法

本研究全般における分析の概要は次のとおりである。

3.3.1 油分濃度

各試験で採取した油水試料に四塩化炭素 (carbon tetrachloride) を加え、これを十分振とうして油水試料中の油分を四塩化炭素に抽出し、その含有量を赤外線分光光度計 (島津製 IR-440) を用いて波長 3.4 μm 付近の赤外線吸収スペクトルを測定し、得られた透過率 (%) を示す試料油の濃度 (ppm) に換算して油分濃度を求めた。

本分析法は JISK 0102 n-ヘキサン抽出物質の項に油分計測の参考として示されており、また IMO の油水分離装置の国際性能試験基準 A・393 (X) に油分濃度の測定方法として指定されている。

3.3.2 懸濁物質 (SS)

JISK 0102 懸濁物質に準拠し、ミリポア・グラスファイバフィルタ (全量計測用デプスフィルタ) を使用して試料油水を吸引・ろ過し、当該フィルタ上残留物中の溶剤不溶分 (n-ヘキサン不溶分等) を秤量し、SS 量 (mg/l) を算出した。

3.3.3 油粒径分布

a. 実船油水 (ビルジ) 試料については油粒径試験筒 (Flotation tube) を用い、ここへそれぞれの測定油水試料を封入して、ストークスの浮上則が油粒に適用できることを前提として数百 μm から 10 μm 程度までのストークス粒径を測定し、これを基にそれぞれの油粒分布曲線を作成した。

また、顕微鏡観察により微細な油粒の存在確認等も行った。

b. 実験室の研究で得られた油水試料については、一部 HIAC 自動微粒子計の使用も含め、主に Coulter

Counter TA-II型自動粒子測定器を使用し、2~40 μmの範囲を10区分以上に分割した粒子群の各区ごとの微分体積比率を求めるとともに、累積分布曲線を得た。

3.3.4 その他の分析

本報告中の実船機関室ビルジ中に存在した界面活性剤の定性・定量分析、SS等の有機分析、及びビルジ中のプランクトンの動静解析等については、それぞれ専門機関へ分析を委託した。

4. 油凝集技法による油水分離技術の概要

4.1 研究の経過

現行船用油水分離器が実船上で本来の分離機能を発揮できない事例が広く認識され、国際的にも機関室ビルジの安定処理のための対策の確立が強く要望されている。筆者らは昭和40年代後半から最近までの間に逐次実施した実船調査による機関室ビルジの性状、ビルジ配管系の諸問題及び機関室用油水分離器の分離機構等を基として、現行船油水分離器の分離機能限界等を総合的に検討し、船用油水分離器の実働性能向上の見地から、現行の重力方式（油水分間の比重差に基づく方式）と作動原理の異なる新分離技術の開発とその実用性能の評価を試みた。すなわち、油凝集剤を使用してフロックを密閉構造のタンク内で生成し、油粒及び油以外の混入物をフロックと結合させた上で空気泡により速やかに当該フロックのタンク内での浮上・分離を図る方式（以後、本方式を油凝集技法という）によった分離方式を極力コンパクト化した船用油水分離装置の開発に資する技術研究を行った。

陸上の大規模水処理施設にみられる薬剤処理法は大気圧のもとで行われるが（フロックの生成、浮上がない処理槽は大気開放されている）、これを船舶用に適用するためには本技法システムの中核をなす静置浮上分離槽は密閉構造であることを要するが、現在までにこの種の油水分離システムが船用として実用された例は見当たらず、未解決な技術問題が残されている。

油凝集技法による分離システムの研究を推進し、その実用化を図る上で解明を要した主な点は次のとおりであった。

- a. 使用の簡便な油凝集剤の選択
- b. 含油水（ビルジ）、油凝集剤および加圧水相互間の効果的攪拌手法
- c. 密閉式静置浮上分離槽内における空気発生条件の把握……タンク内圧力上昇時における発

生空気泡の大きさと発生空気絶対量

- d. フロックと水面との界面検知技術
- e. フロックの分離器外への自動排出方法

このため、油凝集技法のシステム研究用として作製した調査用試験装置を用いて、密閉型静置浮上槽をはじめ、分離システムを構成する各ラインの作動特性把握に関する基礎的調査を実施した。以上から得られた知見に基づいて、現行重力方式油水分離機構（多層平行板とフィルターの併用が主流）と油凝集技法システムからなる船用油水分離器実機模型（油処理量500 l/hr）を試作し、軽油、B重油のほか、実船から入手した機関室廃油試料を基油とした調合油と水道水からなる機関室模擬ビルジを用いた試験を行って総合的な評価を加え、油凝集技法の油水分離上の有効性を実証した。

4.2 油凝集技法のシステム研究用試験装置

4.2.1 供試の油凝集剤

近年A社により開発されたアミノ酸誘導体を基剤としたものを選び、基剤の2 vol %水溶液を油凝集剤として使用した。本剤による油水分離過程は図・29に示すように考えられ、2価のイオンを持つ海水を含む機関室ビルジに所定量の本剤を混入攪拌することにより油水分離を行う。また、船用装置としての操作の簡便性を考慮し、単一液の油凝集剤で機能するという特徴を有する。

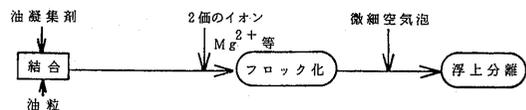


図.29 油凝集技法による油水分離過程

4.2.2 油凝集技法基礎システムの研究

油凝集技法による試験装置の構成

基本的な構成は図・30に示すように、試料油水分離ライン、油凝集剤ライン、および加圧水ライン（加圧下で空気を水中に溶解させ、減圧時に微細空気泡を発生させる）からなり、これらを適正な攪拌混合部で合流さ

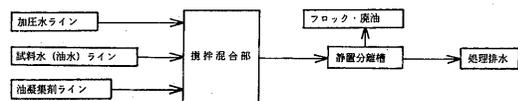


図.30 油凝集技法における油水分離器基本構成

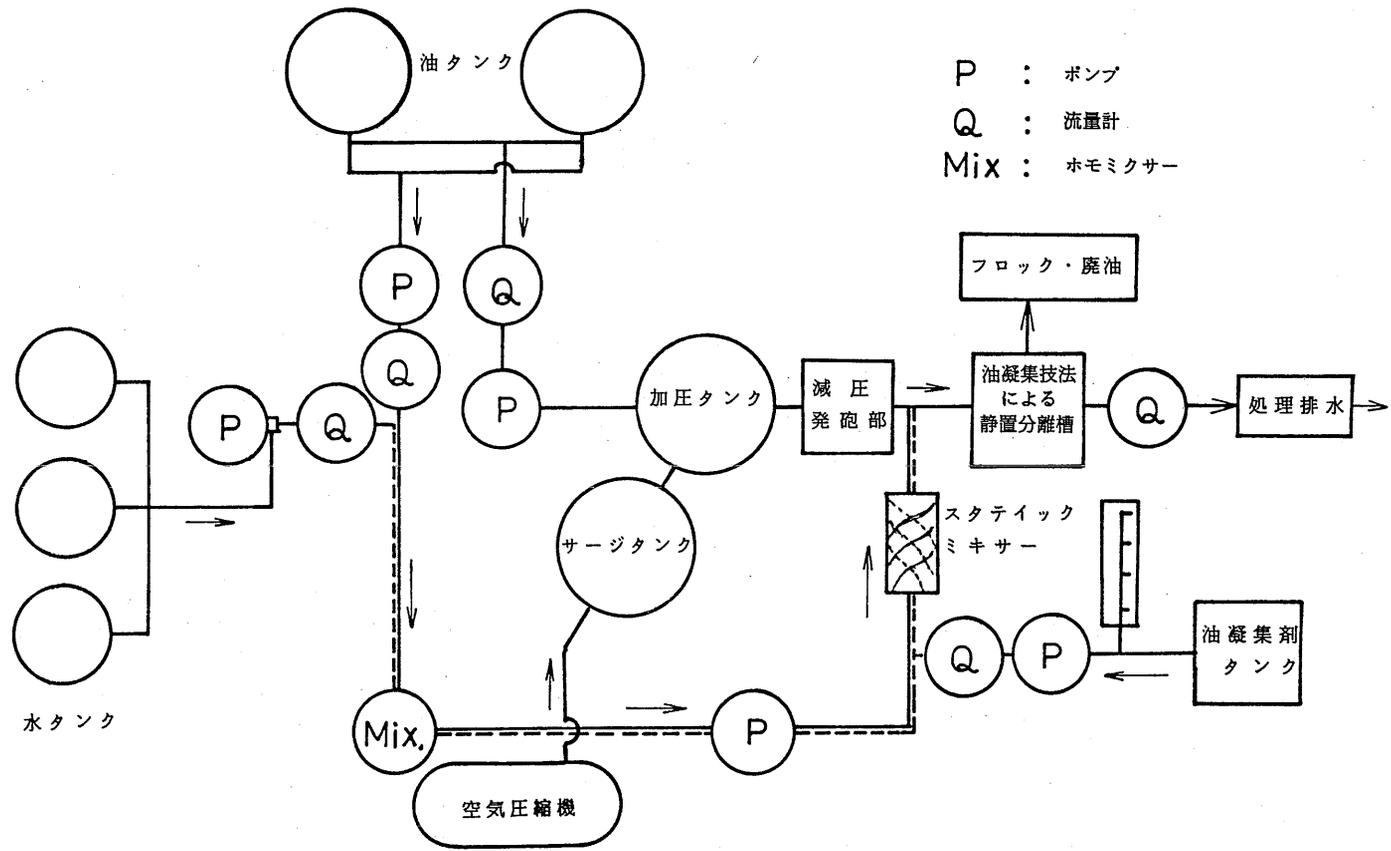


図.31 油凝集技法システムによる試作試験装置

せ、油凝集剤と結合した油粒を微細な空気泡により密閉型静置浮上槽上部へ浮上分離させるものである。

油水分離装置の基本的な配置図を図・31に示す。ここで加圧水ラインは水タンクから流量計、ポンプを経て加圧タンク、減圧発泡部に至るラインである。試料油水ラインは水タンクからポンプ、流量計を通り、油ラインと合流した後にライン組み込み型の攪拌機（ホモミキサ）で攪拌作用を受け、微細な油粒分布の試料油水を作る。この試料油水は更にポンプを経て 1 kgf/cm^2 程度に加圧され、静置分離槽に送入される。（本試作分離装置の作動は密閉型静置分離槽内圧力が 1 kgf/cm^2 程度を標準とした）

油凝集剤ラインはタンクよりポンプ、流量計を通り供給されるラインである。図では油水と油凝集剤とが合流し、流路に組み込まれたスタティックミキサにより流体的な攪拌を行う。その後、加圧水の減圧により発生した微細な空気泡と合流し密閉型静置分離槽内で浮上分離する。分離した油分を含むフロックは槽の上部から排出され、処理水は槽下部から排出される。

各ラインり流量は、加圧水ライン 200 l/hr 、油水ライン 300 l/hr 、油凝集剤ライン 1 l/hr を標準とした。

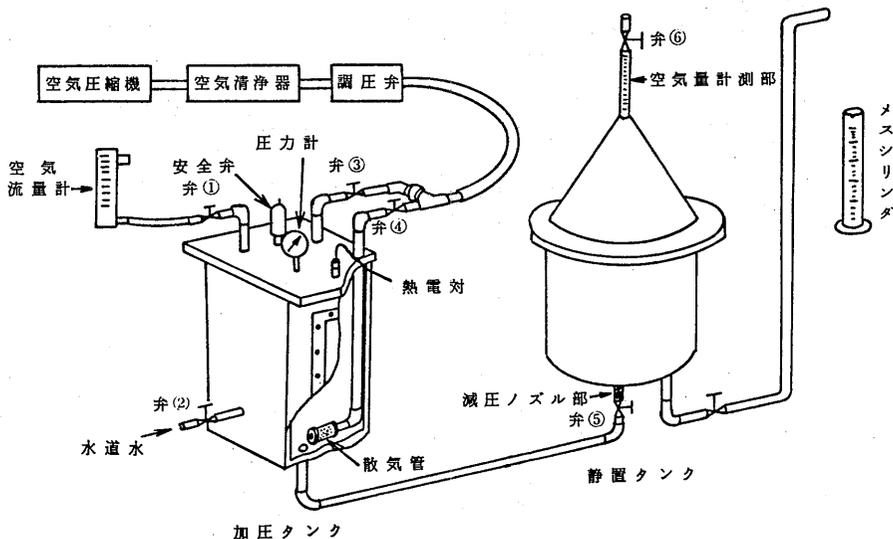
加圧タンクでの空気の溶解速度

加圧タンクでの空気の水の中への溶解速度に関する基礎的な現象を把握するため、図・32に示すような試験装置を作製した。装置の動作は、加圧タンク弁①を開

いた状態でタンクの中に弁より 9 l の水を入れ、弁①、②を閉じる。所定の圧力の圧縮空気を弁③を開いて加圧タンク内に入れ、内部の圧力を一定にした後、弁③を閉じ弁④を開く。その後弁①の開度を設定し排出される空気量を調節する。このとき空気は加圧タンク下部の散気管から水中に吹き込まれ、その一部が水に吸収される。この状態のまま一定時間経過後に、弁①、④を閉じ、弁③及び静置タンク下方の入口弁⑤を開けることにより一定圧力の加圧水が減圧ノズル部を通り静置タンクに入るが、減圧ノズル部を通過する際、過飽和に溶解した空気が微細な空気泡になり、静置タンク内で浮上分離する。水はタンク下部より排出される。このときの流量をメスシリンダーとストップウォッチにより計測した。発生した空気量は、あらかじめ検定した静置タンク上部の空気量計測部で測定した。

攪拌混合部の検討

加圧水、試料油水及び油凝集剤を効果的に攪拌・混合するための流路の組み合わせとして、図・33 (a)、(b) 及び (c) に示す3方式について検討した。(a) は試料油水と油凝集剤が合流した直後にスタティックミキサーで攪拌し、その後加圧・減圧により発泡した空気泡を含む水と合流する方式である。(b) は試料油水が加圧水の減圧ノズル直後に付けられたアクリル管から出口より手前で加圧水と同じラインに合流し、加圧水がアクリル管から出るときの流れの乱れで混合し



図・32 空気の溶解速度に関する試験装置

てから油凝集剤と合流し、その直後にスタティックミキサーで攪拌されて静置分離槽に入る。(c)は、油水に油凝集剤を添加した直後に前段のスタティックミキサーで攪拌を行い、加圧・減圧により発生した空気泡を含む水と合流した後に後段のスタティックミキサーで攪拌をおこなって静置分離槽へ入るものである。

減圧部における空気泡の発生状況の検討

油凝集技法に基づく油水分離を効果的に行う必要条件の一つに、本技法システムの減圧部で発生する空気泡の大きさ及び発生量の問題を挙げることができる。すなわち、密閉構造の静置分離槽内部において数十

μm 程度の空気泡が量的にも十分得られなければならない。

写真・4・1～4・4は加圧タンクの内圧 6 kgf/cm^2 、減圧ノズル径 1.6ϕ 、ノズル長 2 mm に内径 4ϕ 、長さ 10 cm の整流用アクリル管を付けたものから発生した空気泡を、密閉型静置浮上槽内圧を変えて観察したときの顕微鏡写真である。

静置浮上槽中央部に発生した空気泡が観察窓の近くまで浮遊してきたものについて、ストロボで撮影した。

図・34はこれらの観察結果を基に、空気泡の大きさと個数について整理したもので、横軸に気泡径を、縦軸に各内圧における相対個数分布を表した。静置浮上

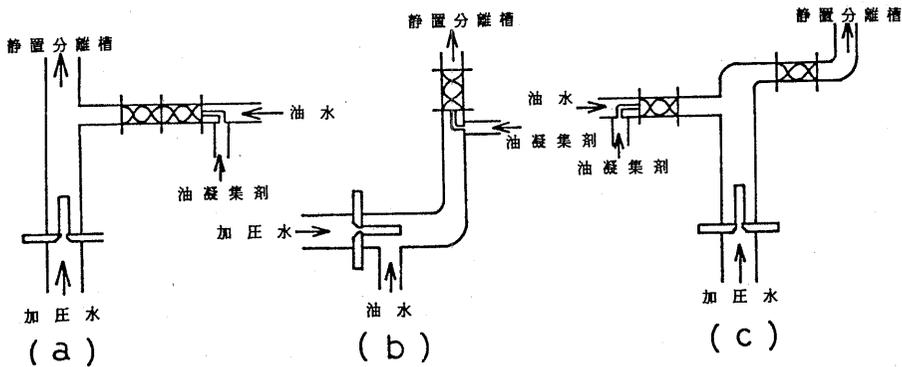
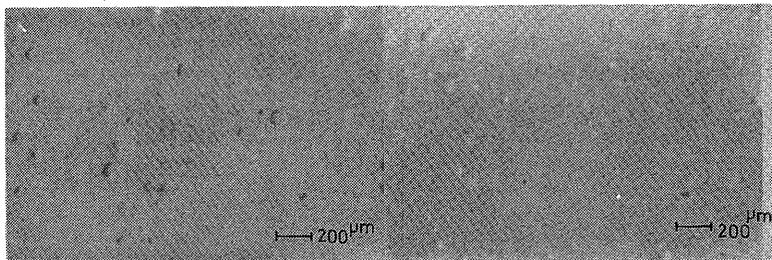
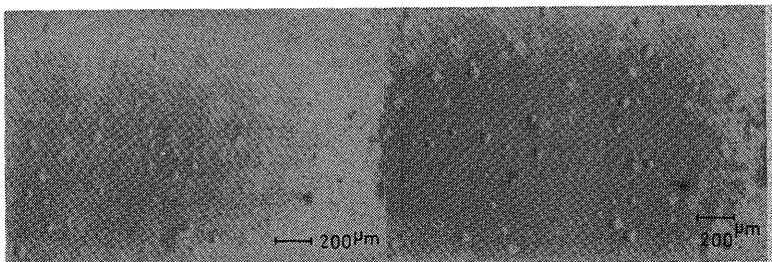


図.33 攪拌混合部



4.1 $p=0.5\text{ kgf/cm}^2$

4.2 $p=1.0\text{ kgf/cm}^2$



4.3 $p=1.5\text{ kgf/cm}^2$

4.4 $p=2.0\text{ kgf/cm}^2$

写真.4 密閉型静置分離槽内に発生する空気泡

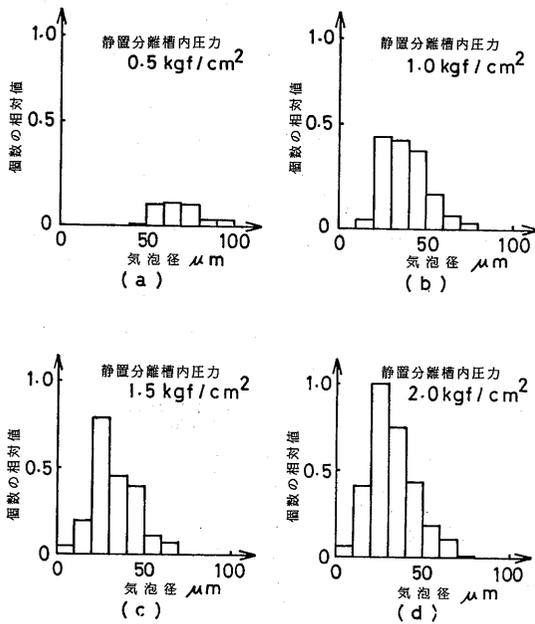


図.34 密閉型静置浮上槽内に発生した空気泡

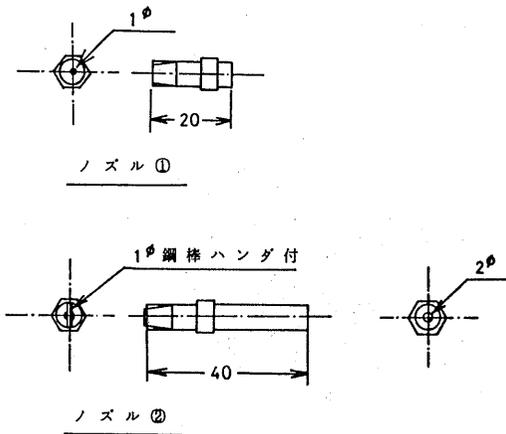


図.35 減圧部ノズルの形状

槽の圧力が低い場合は発生する空気泡径が比較的大きく、槽中心部で発生した空気泡が観察窓付近へ浮遊してくる機会が少ないため、確認できた個数は少なかった。槽内圧が上昇すると空気泡は小さくなり、20~30 μm径の空気泡が数多く観察された。

以上のごとく、減圧部での発泡現象に関する定性的な傾向を実験的に把握したが、これに引続いて図・35

に示すような2種類の減圧ノズルを作製してその発泡状況を調べた。

ノズル①は内径1φで長さ20mm

ノズル②は内径2φで長さ40mm

で、ノズル②の場合は流量調整のため1φの鋼棒をハンダ付けしたものである。これら2種類のノズルについて図・32に示した試験装置を用いて発生空気量と発泡に関する定性・定量的観察を行った結果、ノズル②の方が発泡状況を与えることがわかったので、以後の試験にはノズル②と同形式のノズルを使用することとした。

その他の研究項目

油凝集技法としての基礎システムに関連し、次の項目が油水分離性能に及ぼす影響等を調査した。

- a. 加圧水量の変更
- b. 油凝集剤とし微細油粒の混合・攪拌のための前段及び後段スタティックミキサーの効果的組み合わせの実験的検討
- c. 油凝集剤添加量の変更
- d. 静置分離槽内圧の変更
- e. 界面活性剤(非イオン系)及び懸濁性固形物(SS)の存在が油水分離機能に及ぼす影響
- f. 密閉型静置分離槽内におけるフロックと水との界面検知およびフロックの分離器外への自動排出技術
- g. 油凝集技法による油水分離システムの総合的機能

これらのうち、b及びfについては概ね以下のごとくである。

b関連： 水道水中に8~10 μmの油粒が分布のピーク値を示すような試料油水と油凝集剤の接触効果を上げるための第一次攪拌、これにつづいてMg²⁺等の2価のイオンを含む加圧水を加えて効果的なフロック化を進めるための第二次攪拌(いずれもスタティックミキサーによる)は、本油水分離システム機能に関連する最も重要な要素である。

これらの組み合わせ効果に関する実験的検討の結果、第一次攪拌は油と油凝集剤の接触を良好にする見地から激しく行い、第二次攪拌は生成するフロックを極端に微細化させない見地から緩やかに行うことが、微細な油粒等のフロックへの捕捉上有効であることを明らかにした。従って、一次スタティックミキサーは二次

スタティックミキサーに比べ径が細く(流速大)、かつエレメント数の多いものを採用した。

〔関連〕 実船機関室ビルジの性状調査結果等を基に、ノニオン系の界面活性剤及びJIS試験用ダスト11種(粒度分布範囲1~8 μm 、関東ローム超微粒、主成分 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3)を混入した油水(水道水+軽油)に対する油水分離性能を調べた。当該油水はコールターカウンタの計測によれば、5 μm を下回る粒子(油粒及びSS)が全体の90 vol %を占め、粒子区分的には2.5~3.2 μm 及び3.2~4.0 μm の粒子がそれぞれ全体の25 vol %を占めるような分布特性を持ち、現行の重力式分離機構では対処困難な油水である。

このような性状の油水の本分離システム入口側油分濃度350 ppmに対して6時間の連続試験を通じてほぼ安定して30 ppmの出口側油分濃度を確認した。また同時に計測したSSについては、入口では170 mg/lに対して出口側のSS含有量は40~55 mg/lとなり、SSの約70%は捕捉されていることが確認された。

4.3 油凝集技法による試作実機模型を用いた油水分離性能の研究

4.3.1 試作実機模型の概要

実機模型の概念を図・36に、その外観を写真・5に示した。

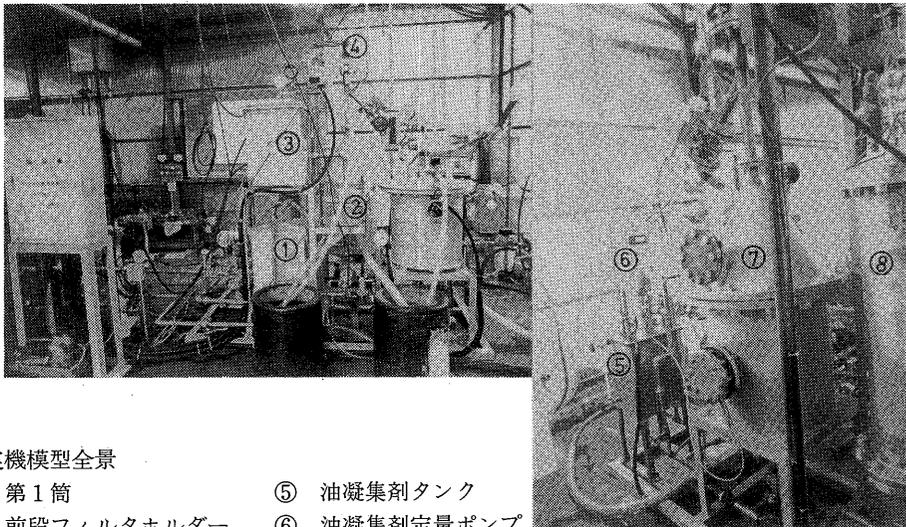
図中各要素のうち、油水分離器としての主要な働きを

なすものは、第1筒、前段フィルタホルダ、第2筒、スタティックミキサ、第3筒(静置浮上槽)、後段フィルタホルダおよび第4筒である。これ等の各要素を組み合わせた油水分離器としての定格能力は500 l/hrとした。また、前記各要素の主要寸法は表・14のとおりである。

装置の自動運転のため、装置内に油水界面計、圧力スイッチ、電磁弁等を取り付け、タイマーとリレー回路を備えた制御ボックスにより運転を行う。定常運転中は第1筒と第2筒内の油水界面の制御はそれぞれの筒内に設けられた上位、下位の静電容量式界面計により電磁弁の開閉制御を行うが、第3筒の場合、フロックの存在のために界面の直接的な検知の困難なことが一連の予備実験から予知されたので、連通管により第3筒内の水位の制御を行った。第4筒については流入してくるフロックの総量は少なく、下限界のみを検知した。

装置の油水分離に対する基本的な動作は次の通りである。

ビルジポンプにより第1筒に送られた微細な油粒を含む油水は第2筒に達するまでの間に多層平行板による粗分離効果及びフィルタ状コアレッサによる精分離効果を受ける。この段階までの分離作用は現行の重力分離機構によるものであり、一般的には10~20 μm を



実機模型全景

- | | |
|--------------|-------------------|
| ① 第1筒 | ⑤ 油凝集剤タンク |
| ② 前段フィルタホルダー | ⑥ 油凝集剤定量ポンプ |
| ③ 第2筒 | ⑦ 第3筒(密閉型静置浮上タンク) |
| ④ フロック自動排出装置 | ⑧ 加圧タンク |

写真・5 油凝集技法による試作実機装置の外観

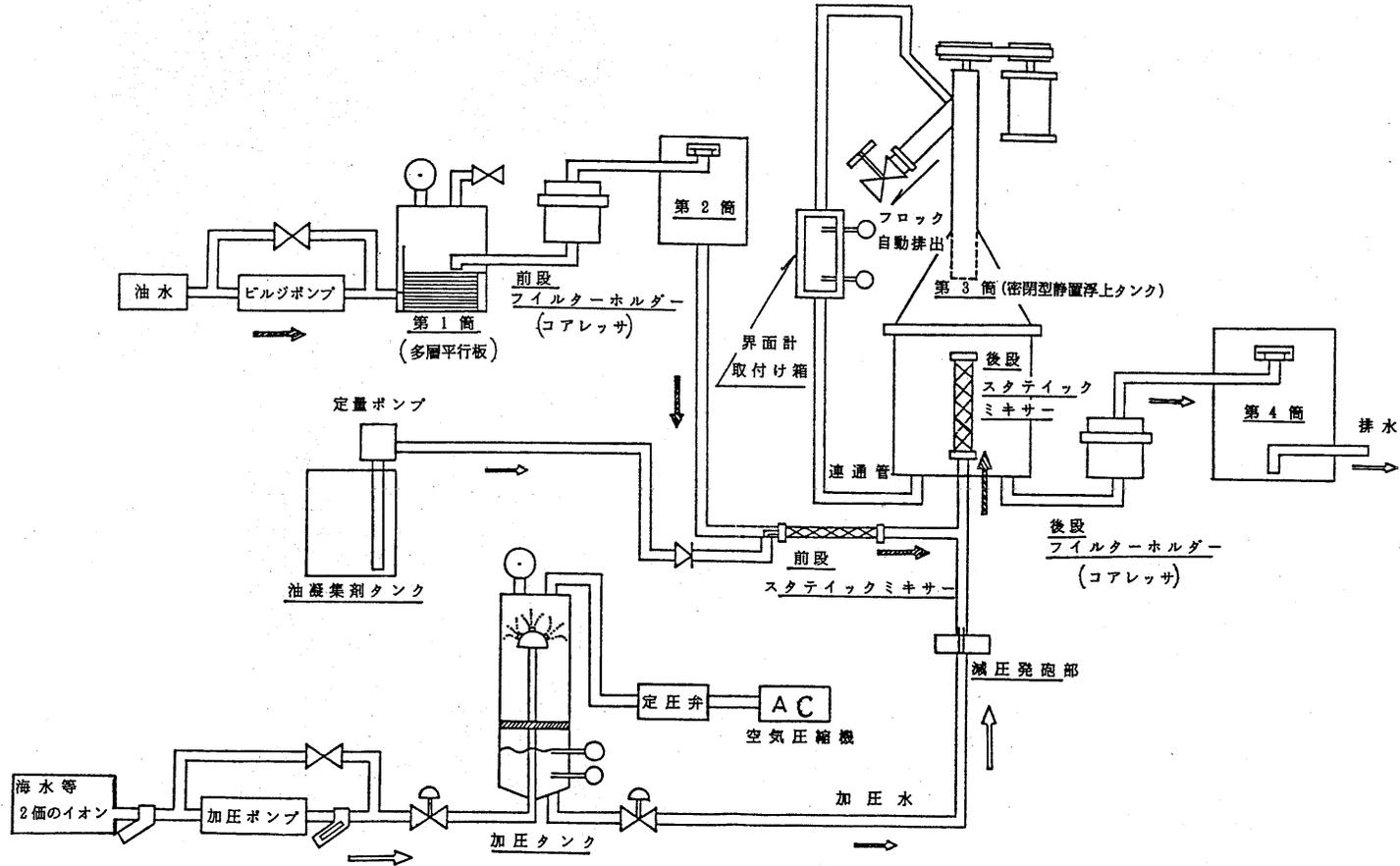


図. 36 油凝集技法による試作油水分離装置実機模型概念図

表.14 油凝集技法による実機模型主要寸法等

構成部	寸法等
第1筒	35×35×50cm
フィルタホルダ (前段)	20cmφ×20cm (フィルタ部長さ10cm)
第2筒	35×35×50cm
スタティックミキサ (前段)	1/2インチ×18エレメント
スタティックミキサ (後段)	1インチ×6エレメント
第3筒	内径45cm, 高さ50cmで上部に60°の傾きの円錐状天蓋と, フロック排出のためのコイルフィーダ, 第3筒内水位制御用連通管を備える。
フィルタホルダ (後段)	20cmφ×20cm (フィルタ長さ10cm)
第4筒	45cmφ×50cm

上回る油粒等については効果的な処理が行われている。

しかしながら、上記段階までに捕捉できなかった油粒等に対して、油凝集剤を微量定量ポンプで供給し、油凝集剤と油粒の結合促進のための攪拌を前段スタティックミキサで行う。次にこの油凝集剤を含む油水と加圧水(5 kgf/cm²程度の加圧下で空気を溶解し、減圧により10 μm程度の微細空気泡を発生する)を合流させ第3筒内の後段スタティックミキサで攪拌を行う。

この時油水ライン中の油凝集剤がフロックを形成するために必要な2価のイオン(MgCl₂)を加圧水中に添加(実船では海水を加圧水として使用することでこの問題を特に考慮する必要はない)しておく。ここで油凝集剤はフロックを形成し、気泡と結合してそのほとんどが第3筒内で浮上分離する。

分離しきれない一部のフロックは第3筒から流出して後段のフィルタエレメントに捕捉される。

4.3.2 試験方法

① 供試油水

油水分離の試験には表・15のごとく軽油, B重油及び実船から入手した機関室廃油に軽油と界面活性剤を混合した調合油を使用した。このうち、軽油, B重油を使用した試験は流路組み込み攪拌機(ホモミキサ)の回転速度を8,000 rpmまで上げた強度の機械的攪拌に

表.15 供試油の性状

油種	比重(15/4°C)	動粘度
軽油	0.836	4.7/37.8°C
B軽油	0.917	45/50°C
* 実船機関室 混合廃油	約1.116/70°C	20.000以上 60°C

* 機関室内の油タンク、油清浄機等で生じた各種スラッジの混合した状態の高粘度性廃油、灰分18.67wt%

より供試油と水道水からなる油水中の油を微細化し、ビルジポンプ(1軸ねじ式)で実機模型に入口油水として供給した。この時の入口油分濃度は5,000~10,000 ppmを目標値とした。

実船廃油の場合は極めて高粘度のため微細化することが困難であったが、敢えてこれを促進する見地からこれに200vol%の軽油と界面活性剤入り洗剤10vol%を加えて混合した調合油を模擬ビルジ作成の基油として使用した。すなわち、工業用の卓上ミキサで水道水と当該基油を十分攪拌・混合し、これを水道水で希釈する方法を反復実施することで最終的に試料油水貯蔵タンク内に2m³の模擬ビルジ水を準備した。

試験に際しては試料油水貯蔵タンクから試料油水の流路へ供給し、さらに軽油等の試験の場合と同一条件でホモミキサ、ビルジポンプ(カスケードポンプ)を経て実機模型に供給した。この時の入口油分濃度は約8,000ppmであったが、今回模擬ビルジとした試料油水は軽質油と界面活性剤の存在のために、数μmの微細油粒と、実船廃油に基づく数十μmから数mmの径の油滴の分布から構成されていた。

② 計測項目

試験中、実機模型装置の各部圧力、流量、温度等の変化を記録し、また一定時間毎に装置入口、第1筒出口、第2筒出口、第3筒出口及び排水から試料を採取して油分濃度及び油粒分布を求めた。また、油水中のSS計測は全量捕集型のミリポアフィルタを使用し、真空吸引でフィルタ上に残った残渣の四塩化炭素不溶分を測定してこれをSSとした。

4.3.3 界面計の検討

試作実機模型は実験室的には各検知器と連動したりレー回路によって装置の自動運転が可能となった。しかし、第3筒連通管内で使用した検出部の被覆されていない静電容量式の界面計は、フロックがある程度以上管内に流入すると誤動作を起こすことが観察された。第3筒内で発生したフロックが検出器の周りに存在しても、水位を安定して検出できる界面計の検討を、一般に市販されている以下の検出器についてそれぞれの検出器を第3筒に取付けて応答性の調査を行うとともに、独自にフォトカプラを用いた検出器を試作してその基本的な動作を調べた。

①一般に市販されている界面計の応答

超音波式界面計：界面検出部は一定の間隔で発信器と受信器を備えた電極部で構成され、さらに信号の変換部が一体となった界面計を使用した。この界面計を装置に取付けて運転を行ったところ、微細空気泡のために検出部が水中にあるにもかかわらず空気中にあるときと同じ信号を出し、誤動作することが分った。

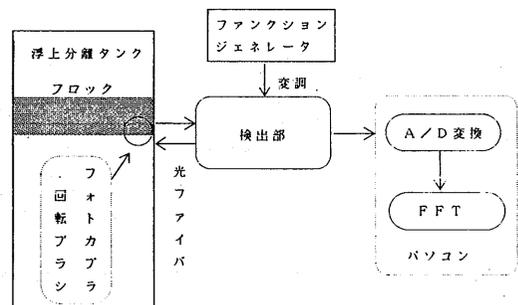
振動式界面計：検出計動作原理は水晶発振回路によって一定の周波数で振動している検出プローブが被測定物によって拘束されると、検出部の振幅が減少して電圧信号も変化して出力レーが作動するものである。この界面計について動作試験を行ったところ、検出部に僅かなフロックが付着しても誤動作することが分った。

音叉式界面計：一種の振動式界面計で、界面検出部に音叉型振動子を使用している。感度調節により相当量のフロックが付着しても水と空気の界面検知が可能のように思われる。しかし、フロックが付着した一部の試験で逆の動作を示す現象も見られ、実用のためには更に調査を要する。

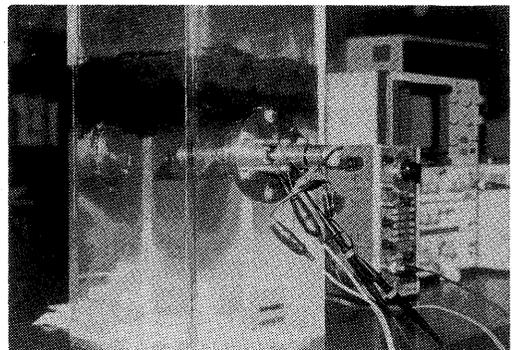
静電容量式界面計(検出部被覆型)：コンデンサーの静電容量が電極間の物質の誘電率によって変化することを利用したものである。検出部が被覆されているものと、被覆されていないものが一般に市販されている。このうち、後者は僅かなフロックの付着で誤動作を起こすが、前者の場合はその表面に相当量のフロックが付着しても感度調整により実用的な検知が可能であると思われた。以上、市販の界面検知器を使用してフロックの存在する第3筒内での界面検知の可能性に関する検討結果、フロックが存在しても水と空気の界面の検出は可能であることが分った。

②フォトカプラによる試作界面検知器の応答

今回試作したフォトカプラによる界面検知の概念図を図・37に示す。検出器の作動原理は、界面の検知部に発光・受光部を置きフロックが存在する時と、存在しない時の光の透過率差を検知するものである。発光を一定の周波数(10Hz)で変調して、受光部からの信号をFFTにかけることによって、検知部がフロックの中にあるか否かを判定した。検知部にフロック等が多く付着することから、回転ブラシによってその表面の光透過性を保ちながら検出する機構とした。実験の初期には発光・受光部を直接検知部に使用したが、部品等の劣化による保守作業をタンク外で行うことが可能なように、フォトカプラの発光・受光部はタンク外に置き、検出部とは光ファイバーで結ぶこととした。検出器をアクリル製タンクに取付け動作試験を行った時の様子を写真・6に示す。また、動作試験時の検出信号を図・38に示す。図中(A)は検出器がフロックの中にある時の信号で、(B)は検出器が水中にある時の信号である。図・39にFFT処理した各々の信号を示す。サンプルレイトは5msで、分解能は0.2Hzである。



図・37 フォトカプラによる界面検知装置の概念図



(第3筒頂部)

写真・6 フォトカプラによる試作界面検知器

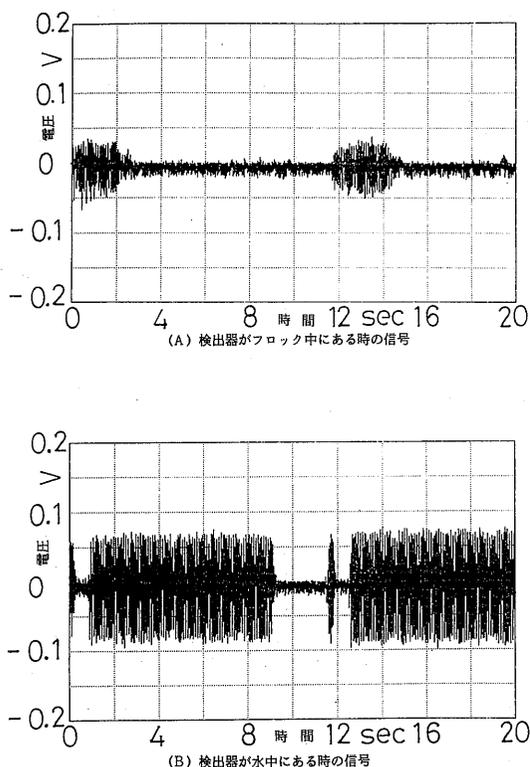


図.38 フォトカプラによる界面検知信号例

る。横軸は周波数で縦軸はスペクトル強度の対数プロットである。10Hzの部分にピークが存在するが、そのピークの高さは検出部がフロックの中にあるかどうかで約5倍の違いがあるので、適当なレベルにしきい値(threshold)を設定すれば界面の判定は可能であることが分る。

4.3.4 試験結果及び考察

油凝集技法による試作実機模型を用いた試験概要を一括して表・16に示す。本試験の供試油水の入口条件は強度の機械的攪拌により軽油では $10\mu\text{m}$ 付近に粒径分布のピークを示すような微細なものである。実機模型の分離性能把握のため、油凝集剤添加量を定格油水量 500 l/hr に対し $0.2\sim 0.4\text{ vol}\%$ とし、油水性状、排水圧、加圧水の性状(海水と調合水)等の諸要素を変更してそれぞれ8時間連続の一連の試験を実施し(試験5, 6及び7は10時間)、2時間毎に分析試料を採取した。試験中の各筒内圧、油分濃度は表・16に示す通りである。以下、各試験結果を述べる。

重力分離機構部分の分離性能(試験1)

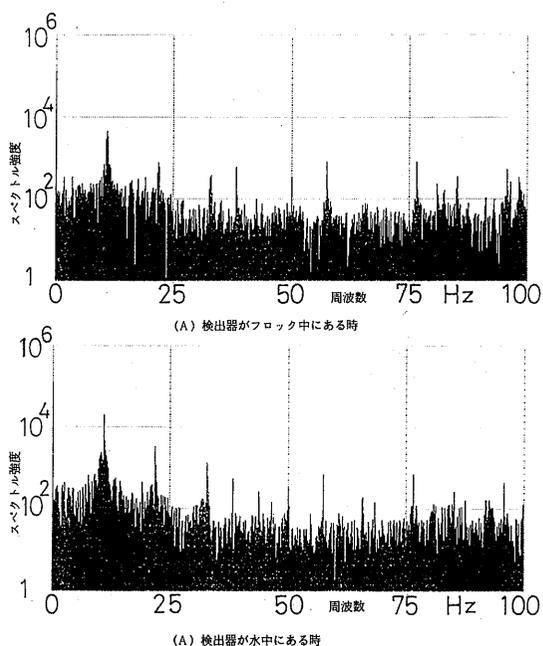


図.39 フォトカプラによる界面検知信号例
(FFT処理後)

一連の試験の始めに、実機模型の平行板とフィルタのみによる油水分離性能を調べた。先ず装置内の前段と後段のフィルタホルダ内に $200\text{mm}\phi$ のポリプロピレン製不織布23枚(厚さ 5 mm/枚)をそれぞれ充填して連続8時間の定常運転を行った。この場合の各試料採取位置での油分濃度を図・40に、また油粒分布(微分体積分布)を図・41に示す。入口油粒径分布のピークは $10\mu\text{m}$ 前後にあり、各フィルタエレメントにおける油水分離効果の傾向は油粒分布のパタンから知る事ができる。油分濃度は実測した値を示しているため第2筒出口と第3筒出口間で 100 ppm 強の違いが見られるが、第3筒には油水と加圧水とが流入しているので、加圧水による希釈効果を考えると、第3筒での油水分離は実質的には殆んど行われていないことが分る。

以後の油分濃度の表示においても各試料採取位置での実測濃度を示し、加圧水による希釈の影響は考慮していない。

実機模型で平行板及びフィルタ状コアレスサを使用

表.16 試作実機模型による油水分離性能試験概要

試験番号 及び 経過時間	調査内容	供試 油水	油戻薬剤 添加量 (ℓ/hr)	加圧水 種類	筒内圧力(kgf/cm ²)				処理 排水量 (1/hr)	フィルターホルダー 充填 コアレッサ		温度(C°)		平均油分濃度(ppm)			
					1 筒	2 筒	3 筒	4 筒		前 段	後 段	室温	排水	装置 入口	2 筒 出口	3 筒 出口	排水
* hr 1-2 4 6 8	平行板とフィルター による油水分離性能	軽油 + 水道水	0	↑	1.0 0.95 0.97 1.0	0.88 0.85 0.86 0.88	0.70 0.70 0.72 0.71	0.65 0.63 0.63 0.65	701 662 665 709	ポリプロピレン 繊維 不織布	同 左	17 17 17 16	15 15 15 15	6.568 7.620 6.910 7.355	337 338 355 371	219 225 233 228	62 57 51 52
2-2 4 6 8	後段フィルターエレ メント不使用時の 油水分離性能	軽油 + 水道水	約 1	天然 海水	0.96 0.96 0.95 1.0	0.86 0.82 0.83 0.86	0.67 0.65 0.67 0.68	0.63 0.62 0.61 0.64	717 709 721 743	ポリプロピレン 繊維 不織布	同 左	18 16 15 15	13 13 13 13	6.663 6.263 6.025 5.139	654 729 515 417	51 49 34 34	47 42 34 30
3-2 4 6 8	後段フィルターエレ メントにSUS製 コアレッサ使用時の 油水分離性能	軽油 + 水道水	約 1	↑	1.0 1.0 1.0 1.1	0.87 0.86 0.88 0.96	0.69 0.68 0.69 0.70	0.62 0.59 0.61 0.63	723 720 708 742	ポリプロピレン 繊維 不織布	SUS製 エレメント	14 14 12 13	10 10 10 11	6.451 7.605 6.674 7.101	493 448 383 287	34 37 30 45	10 14 14 13
4-2 4 6 8	加圧水に人工海水使 用時の油水分離性能	軽油 + 水道水	約 1	↑	1.1 1.1 1.1 1.1	0.98 0.95 0.98 0.98	0.73 0.73 0.73 0.76	0.64 0.65 0.64 0.65	753 758 753 752	ポリプロピレン 繊維 不織布	SUS製 エレメント	17 17 16 12	10 10 10 10	16.325 14.591 14.083 11.850	397 350 322 269	60 72 39 32	9 14 14 13
5-2 4 6 8 10	排水圧変更時の 油水分離性能	軽油 + 水道水	約 1	↑	1.83 1.90 1.80 1.84 1.36	1.68 1.73 1.62 1.69 1.21	1.39 1.40 1.35 1.36 1.10	1.21 1.19 1.11 1.10 0.90	741 729 721 720 790	ポリプロピレン 繊維 不織布	SUS製 エレメント	16 16 16 15 15	15 15 15 14 14	6.823 6.423 6.047 5.957 5.770	326 340 287 421 306	57 61 55 63 28	15 16 18 24 8
6-2 4 6 8 10	油戻薬剤添加量及び 排水圧変更時の 油水分離性能	軽油 + 水道水	1.2~1.4 1.2~1.4 1.8~1.9 1.8~1.9 0.97	調合水 (2個の イオン)	1.77 1.88 1.85 1.75 1.73	1.61 1.72 1.70 1.60 1.58	1.26 1.28 1.20 1.10 1.09	1.0 1.0 0.94 0.85 0.84	731 735 735 744 747	ポリプロピレン 繊維 不織布	SUS製 エレメント	14 15 15 13 12	12 12 12 12 12	6.092 5.915 6.228 5.742 5.868	355 278 279 406 307	53 45 32 17 37	22 22 13 9 14
7-2 4 6 8 10	前段フィルタホルダ にSUS製コアレッ サ使用時の油水分離 性能	軽油 + 水道水	0.85 0.85 1.65 1.65 1.25	↑	1.25 1.24 1.30 1.25 1.22	1.16 1.15 1.20 1.15 1.14	0.98 0.99 1.02 1.00 0.99	0.81 0.82 0.86 0.83 0.83	740 725 758 736 735	SUS製 エレメント	SUS製 エレメント	19 21 21 16 14	11 12 12 11 11	6.028 5.888 5.943 5.873 5.845	4.345 4.563 4.350 4.444 4.479	180 160 70 112 99	84 69 37 41 49
8-2 4 6 8	B重油に対する 油水分離性能	B軽油 + 水道水	約 1	↑	1.41 1.42 1.45 1.53	1.16 1.18 1.23 1.25	0.95 0.91 0.93 0.92	0.80 0.79 0.79 0.79	757 761 751 739	ポリプロピレン 繊維 不織布	SUS製 エレメント	22 21 21 18	13 14 14 14	5.524 5.420 5.729 5.716	252 235 229 208	11 9 8 7	6 6 6 5
9-2 4 6 8	実船機関室廃油を用 いた模擬ビルジの 油水分離性能	模 擬 ビルジ	約 1.5	↑	1.43 1.54 1.82 1.90	1.20 1.21 1.32 1.33	0.88 0.87 0.83 0.90	0.72 0.73 0.70 0.74	735 732 735 714	ポリプロピレン 繊維 不織布	SUS製 エレメント	13 13 13 14	11 11 11 11	671 301 198 139	81 45 37 40	22 21 19 19	16 16 15 14
10-2 4 6 8	同 上	模 擬 ビルジ	約 1.4	↓	1.39 1.45 1.80 1.92	1.28 1.34 1.70 1.80	0.80 0.82 0.80 0.81	0.62 0.65 0.62 0.64	748 756 736 761	SUS製 エレメント	SUS製 エレメント	20 20 18 16	15 16 16 15	948 1.082 570 374	525 442 341 259	59 49 47 45	35 34 31 29

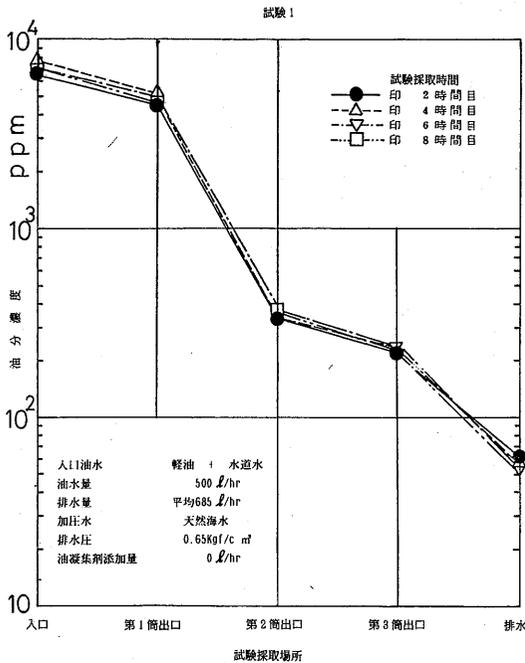


図.40 平行板とフィルターのみによる油水分離性能 (油凝集剤無添加)

した場合の分離性能は10 μ m付近に油粒径分布のピークを持つ6,600~7,600ppmの油水分濃度に対し、排水油分濃度は50~60ppmが得られた。試験期間を通じてフィルタの目詰まり現象は認められなかった。このように、水中に分散する油粒の微細化度がかなり進んだ油水に対しても、油以外の混入物が無い限り、フィルタ状コアレスサを含む現行重力分離機構の実効は相当高いことが明らかである。

なお、図・41 () 内の値は、累積分布曲線から求めた平均粒径 (50%粒径, D_p50 で表す) であり、この場合の値は入口で約10 μ m、排水で約4 μ mである。なお、図・43、図・45及び図・50の () 内の値も同様に D_p50 を示す。

後段フィルタエレメント不使用時の分離性能(試験2)

試験2以降は全て油凝集剤を添加した試験である。前段及び後段フィルタ状コアレスサを試験1そのままの充填状態で試験を開始したが、第3筒から少量ながらも流出するフロックの蓄積の影響で後段コアレスサの目詰まりを生じ、試験開始約1時間後に第1筒内圧

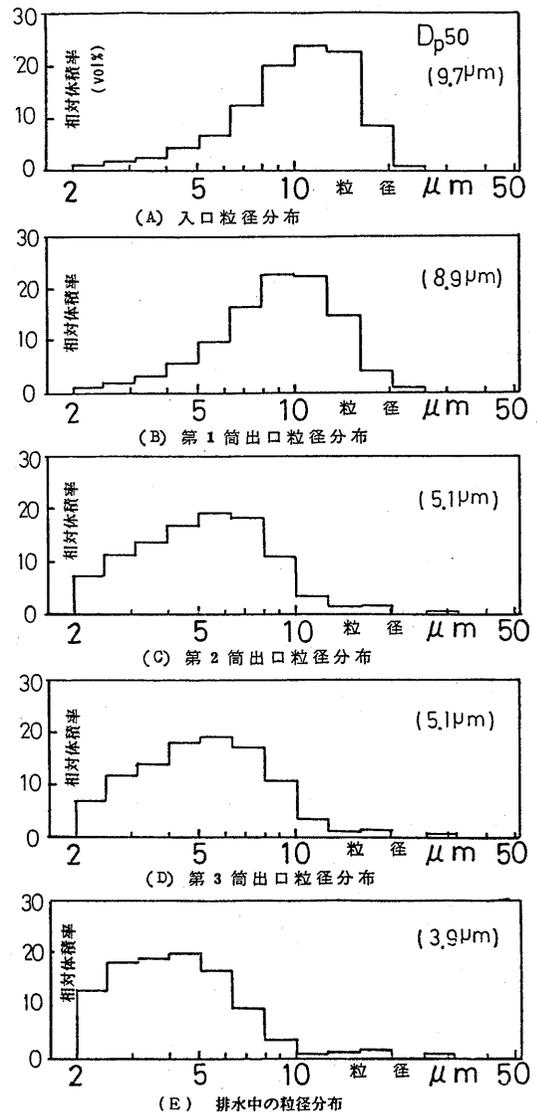


図.41 平行板とフィルターのみによる油水分離試験時の粒径分布

が2 kgf/cm²を超えて試験継続が不可能となった。(本実機模型の自動運転システムは第1筒内圧上限を2.0 kgf/cm²に設定している) そのため、後段コアレスサを空の状態として試験を行ったが、この場合の油分濃度を図・42に、油粒径分布を図・43に示した。

図・42より前段コアレスサ部 (第1筒出口~第2筒出口) 及び油凝集技法部 (第2筒出口~第3筒出口)

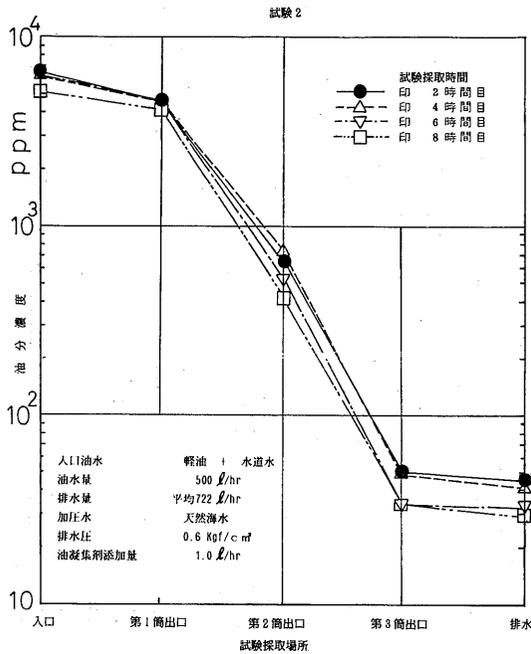


図.42 後段フィルターエレメント不使用時の油水分離性能

における油分濃度の低下の状態が分る。

入口油分濃度5,100~6,700ppmに対して、排水中には微細なフロクの流出があった。

後段フィルタエレメントにSUS製コアレッサを使用した時の分離性能 (試験3)

第3筒から流出するフロクの量を減少させる目的で、後段のフィルタホルダ内に目の粗いエレメントとして家庭用のSUS製キリコ状たわし (以下SUS製エレメントと呼ぶ) を充填して、前回と同一条件下で行った試験結果、排水油分濃度10~14ppmが得られた。なお、後段のSUS製エレメントの目詰まり現象は試験時間を通じて殆ど無視できる程度であった。

加圧水を調合水とした時の分離性能 (試験4)

試験3までは加圧水として天然海水を使用した。これを調合水 (水道水中にMgCl₂1,000ppmを溶解し、2価のイオンを付与したもの) に変更した。本試験の入口油分濃度は12,000~16,000ppmと高かったが、第2筒出口までの間に400ppmを下回る値までに処理され、排水中の油分濃度は9~14ppmを示した。加圧水に調合水を使用することで実機模型の分離性能が天然海水に比べ低下しないことを確認し、以後の試験は全

(372)

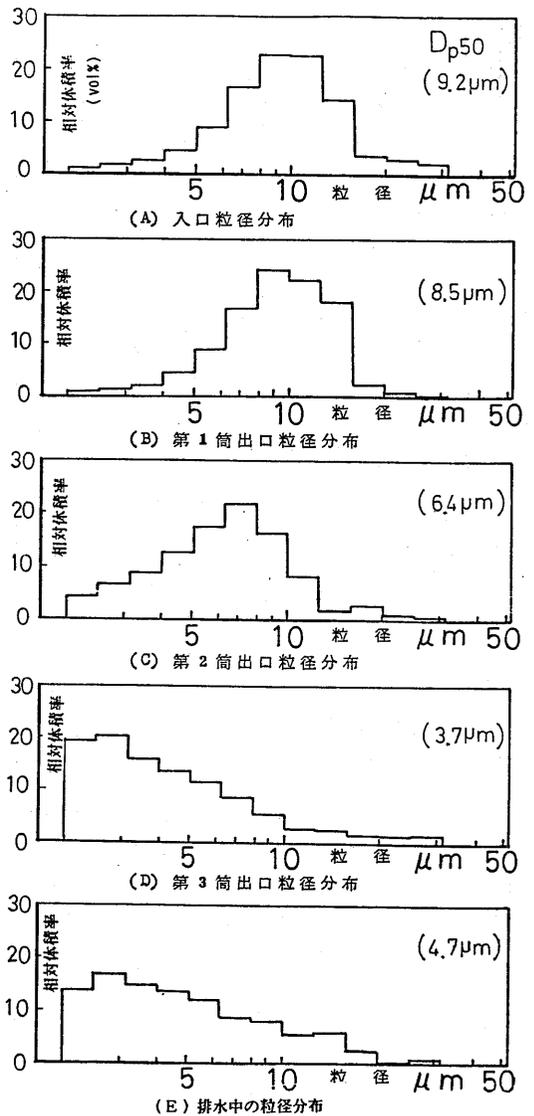


図.43 後段フィルターエレメント不使用時の粒径分布

て調合水を使用した。

排水圧変更 (上昇) 時の分離性能 (試験5)

静置浮上槽内圧が上昇した場合の実機模型の分離性能を調べるため、排水圧を0.7kgf/cm²から1.2kgf/cm²に変えた場合の試験結果を図・44に、また油粒径分布を図・45に示した。連続8時間の試験終了後、排水圧を0.7kgf/cm²に下げて2時間の試験を行って得ら

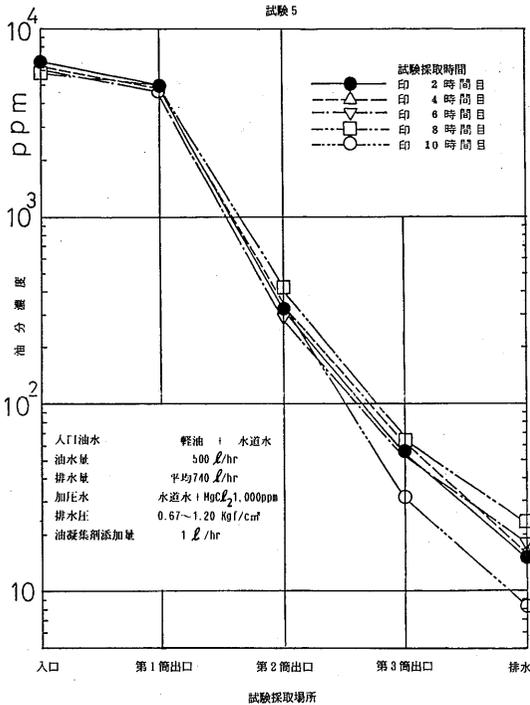


図.44 排水圧力変更時の油水分離性能

れた結果も図・49に併せて表した。これより、排水圧の上昇によって、フロクの浮上分離効果が低下し、排水油分濃度が排水圧0.7kgf/cm²の場合に比べ上昇することが確かめられた。我が国現行の性能試験基準によると、分離器の定格能力(定格処理量)1.0m³/hr以上では排水圧を1.3kgf/cm²以上に、1.0m³/hr以下では0.7kgf/cm²に保持する必要があるため、本試験の排水圧のもとで分離性能の実効を向上させなければならない。

油凝集剤添加量変更時の分離性能(試験6)

油凝集剤の添加量を供給油水量に対し0.2~0.4vol%, すなわち、1.0~2.0 l/hrの範囲内で3段階に変えて油水分離性能に及ぼす影響を調べた結果を図・46に示す。ただし、油凝集剤添加量の増加につれ、前段のスタティックミキサ部分の流路抵抗のためと思われる器圧内の上昇を生じたため、6時間目の試料採取後、排水圧を1.0kgf/cm²から0.85kgf/cm²に下げて試験を行った。このように試験の後半で器圧内を変えたため、油凝集剤添加量と分離性能の関係は明らかに判別できないが、一連の試験で標準とした1.0 l/hrよりは量的に多い方が効果的であるという傾向のあることが

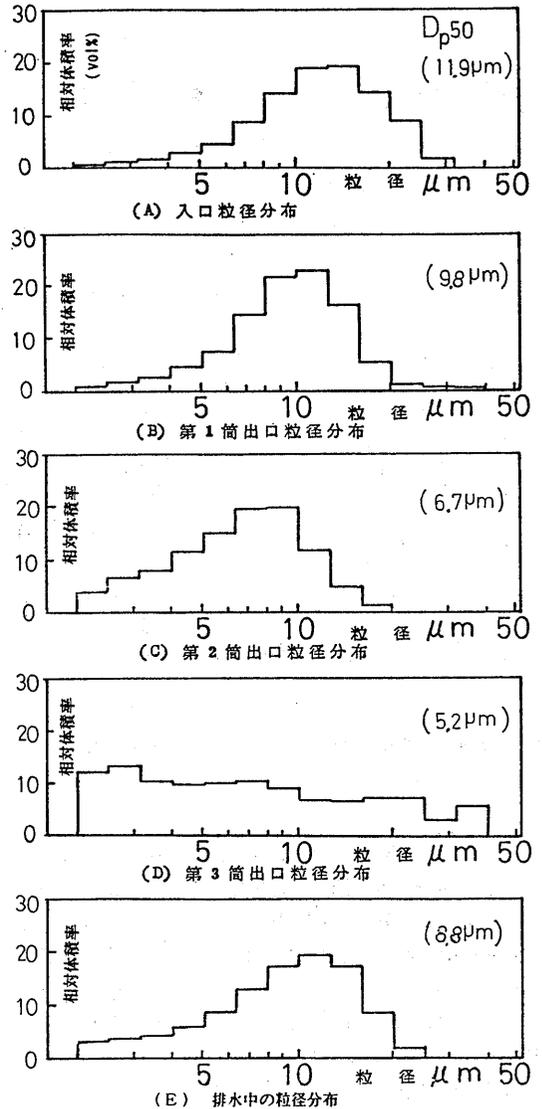


図.45 排水圧力変更時の粒径分布

分る。ただ、この場合の油分濃度の差は数ppm程度に止まっている。

前段と後段フィルタエレメントにSUS製コアレスを使用した時の分離性能(試験7)

前段フィルタエレメントを積層化学繊維(フィルタ状コアレス)からSUS製のキリコ状のコアレッサに交換した試験結果を図・47に示す。

SUS製充填物の目が粗いため、第2筒までの油水分離効果が低く、油凝集剤と合流時の油分濃度が4,000

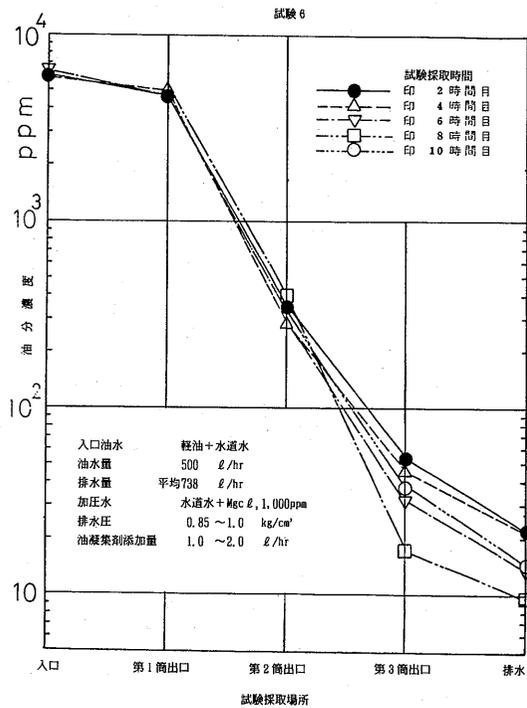


図.46 油凝集剤添加量変更時の油水分離性能

ppm強と高い。排水圧は約0.83kgf/cm²であり、油凝集剤の添加量を試験開始4時間後まで1.0 l/hr弱、8時間後まで1.7 l/hr、10時間後まで1.3 l/hr供給した。4,500ppm程度の第2筒出口油水に対して油凝集剤を1.7 l/hr添加した時に排水中の油分濃度は約40ppm（第3筒出口は約100ppm）であった。本試験における排出フロックは多量の油分を含んでおり、フロックと軽油分に分離することが観察された。

試験6までは、第3筒入口油水の油分濃度値は数百ppm程度であったが（但し、平均油粒径5μm付近）、本試験では4,000ppmを上回る相当高濃度油（平均油粒径13μm程度）であって、ここに得られた結果は本来の油凝集技法による油水分離効果の一例を示したものと考える。今、ある油水分離機構における油捕捉率を次のように定義する。

$$\eta = \frac{C_1 - C_0}{C_1} \quad (E)$$

但し、 η …油捕捉率

(374)

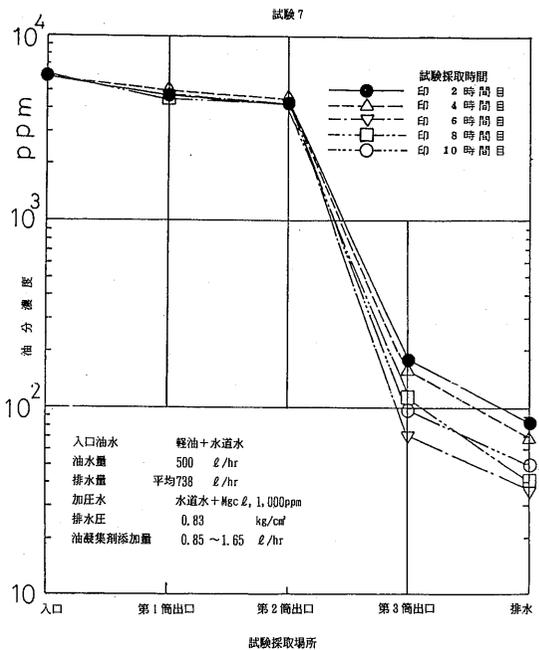


図.47 前段フィルターホルダにSUS製コアレッサ使用時の油水分離性能

C_1 …ある油水分離機構の入口油分濃度(ppm)

C_0 …同一油水分離機構の出口油分濃度(ppm)

本試験結果を(E)式によって求めると、

重力分離機構部での油除去率: 平均 約25%

油凝集技法機構部(第3筒単独)

での油除去率 : 平均 約97%

が得られる。

試験6までにおいては第2筒までに分離される油分が多く、大部分は第2筒から排出されたが、本試験では排出フロック中に多量の油分を含有するために、排出されたフロックの総量は前回までに比べ約2倍の量となった。

B重油の分離性能(試験8)

軽油と同一攪拌条件を与えてもB重油の場合は微細化度が低く、入口側での粒径が大きいために、油水分離が軽油に比べて、より効果的に進行していることが分る。油粒径分布の測定によれば平均粒径の値は入口: 29μm, 第1筒出口: 22μm, 第2筒出口: 19μm, 第3筒出口: 7μm, 第4筒出口: 6.5μmを示した。

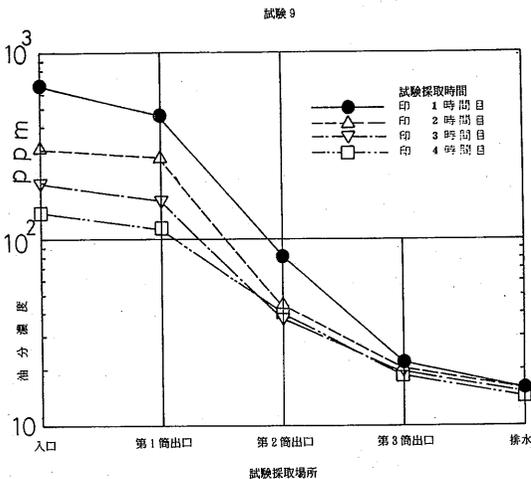
油分濃度は入口6,000ppm弱の油水が、第3筒出口で10ppm弱に処理されている。

実船機関室廃油を含む模擬ビルジの分離性能 その1 (試験9)

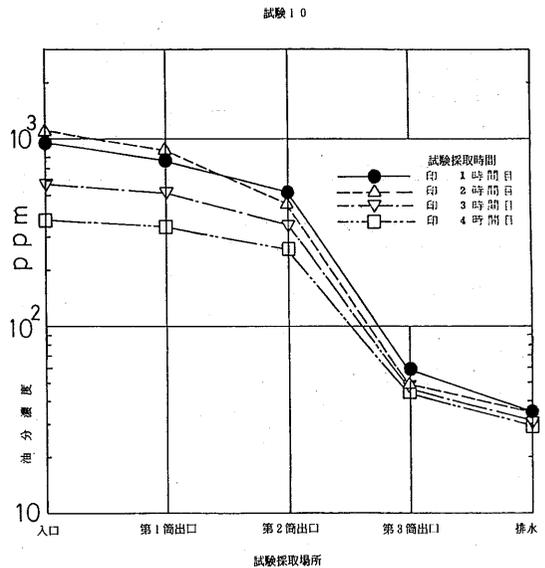
図・48に模擬ビルジの試験結果を示す。試験は前段のフィルタエレメントにポリプロピレン不織布を、後段にSUS製コアレスサを使用した。2m³のビルジタンク内の模擬ビルジを供給した際の入口油分濃度が経時的に減少したが、この原因は、機関室廃油の比重と粘度の影響により、模擬ビルジ中の油分等の分散性が若干不均一となり、経時的な供給差を生じたことと、試験終了間際にタンク内回流用の攪拌を停止したことで試料中の一部の油分が浮上したためである。試験中、経時的に前段フィルタエレメントの目詰まり現象による器内圧の上昇が観察された。これは実船機関室廃油に混入しているSS等きょう雑物に起因するものであって、実質的に8時間の運転により本実機模型の自動運転システムとしての第1筒器内圧上限(2.0kgf/cm²)に近い1.9kgf/cm²まで圧力上昇を見たことは、実船機関室ビルジの処理に関連して十分認識を要する特性である。

実船機関室廃油を含む模擬ビルジの分離性能 その2 (試験10)

試験9では機関室廃油中に存在するSS分の影響により、試験時間の経過とともにフィルタの目詰まり現象による器内圧の上昇が観察された。



図・48 実船機関室廃油を用いた模擬ビルジ水の油水分離性能 (その1)



図・49 実船機関室廃油を用いた模擬ビルジ水の油水分離性能 (その2)

このため、目詰まり現象の生じ難いSUS製の充填物を前段フィルタホルダ内にセットした場合の油凝集技法の実効を調べた結果を図・49に、またSS濃度状況を図・51に示した。入口油分濃度370~1,080ppmに対して第3筒排水及び処理排水中の油分濃度は45~60ppm及び30~35ppmである、現行の国際的規制値15ppm以下を保持するには至らなかった。

図・50に示すように、第3筒及び第4筒排水中には2μmを下回る極端に微細な油粒等の粒子が大きな比率を占めており、数μm程度の油粒等の捕捉処理を、より効果的に実現することこそ15ppmを常時確保する決め手と考える。

4.4 まとめ

本研究は3年計画で実施されたが、2年目までの間に密閉式静置浮上槽を中心とした油凝集技法の単独油水分離システムに関する基礎的作動試験、自動運転機能、油水分離性能及び船用への適応性等に関する知見を得た。また、国内のメーカ数社について現行船用油水分離器の分離機構を調査するとともに、実船機関室ビルジを採取してその性状に関するデータを蓄積した。

研究終了年度では、これら知見を基に小容量の油水分離装置実機模型を試作して総合的な実働試験を行い、船用の実用システムとしての適応性の評価を行った。

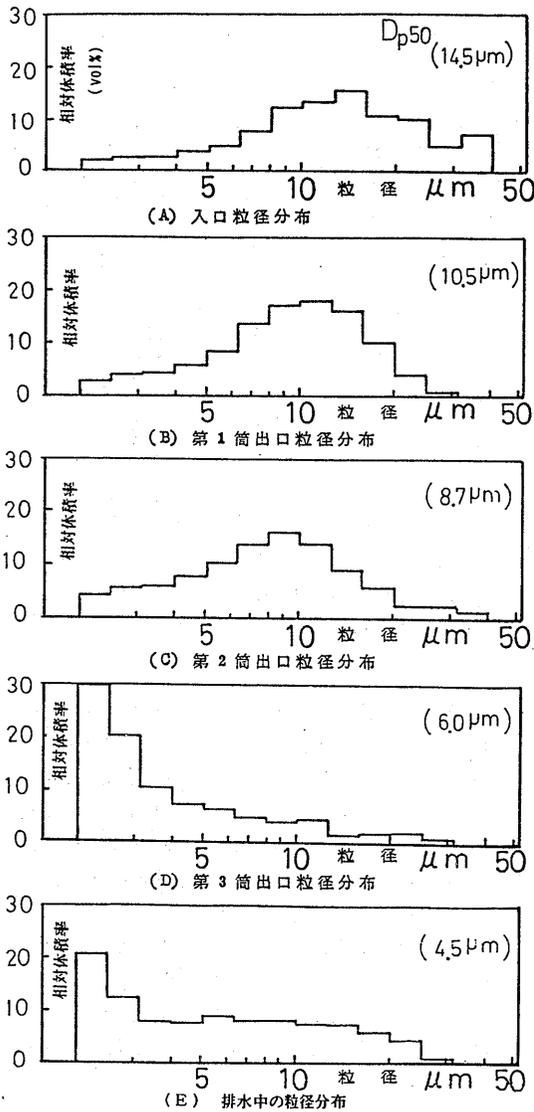


図.50 模擬ビルジ水を用いた試験 (その2) における粒径分布

終了年度を主体とした研究成果は次のとおりである。

1) 平行板とフィルタ状コアレッサからなる現行の油水分離機構と併用した船用油水分離システムの実機模型を設計・試作した。(定格能力500 l/hr, 加圧水を含む総排水量約700 l/hr, 実機模型の全体装置は1,250 mm×2,000mmの台板上にコンパクトに配置されている)

(376)

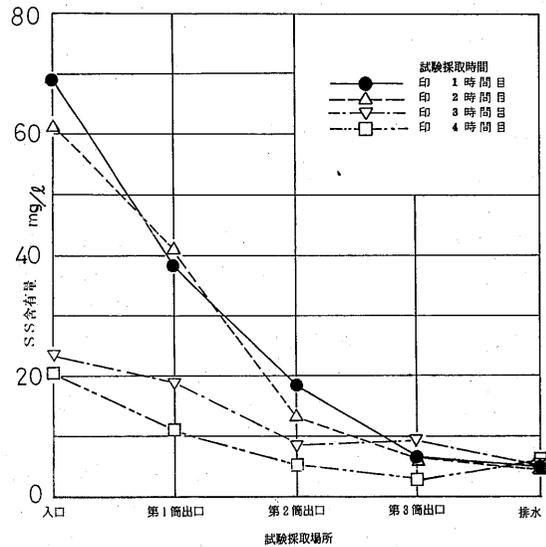


図.51 模擬ビルジ水を用いた試験 (その2) におけるSS含有量

2) 本実機模型の分離性能把握のため、アミノ酸誘導体からなる単一液の油凝集剤を定格油水分離能力に対して0.2~0.4vol%の範囲で添加し、油水性状(軽油, B重油及び実船廃油を基油とした調合油と水道水からなる油水試料), 排水圧, 加圧水性状(天然海水, 2価のイオンを付加した水道水)等の諸要素を変更してそれぞれ8時間連続の一連の試験を実施した(一部の試験は10時間まで延長, または試料油水の都合上4時間連続にとどめた)。

試験中、コールターカウンタ(自動微粒子計測器)により試料油水の実機模型各部における粒径分布を定期的に測定し、入口油水から重力分離機構, 油凝集・浮上分離機構を経て排水されるまでの各流路における粒径分布の変化と油水分離効果の実態の関連を求めた。

3) 以上の結果を総合的に検討し、実機模型の油水分離効果を一連の試験条件に応じて把握するとともに、重力分離方式のみでは対処の困難な微細油粒と固形きょう雑物を含む油水に対する油水分離の有効性を確認した。すなわち、油凝集剤の添加量が油水分離処理量の0.2~0.4vol%, 排水圧0.8kgf/cm²程度においては、10μm付近に分布のピークを持つような微細油粒からなる油水試料(油分濃度約7,000ppm)に対しても本実機模型の全体システムは油水分離上有効であり、処理排水中の油分濃度を15ppm付近に保つことができ

る。

また、20～40 μ mの固形きょう雑物分と、界面活性剤を含むビルジ水に対してはその含有量によっては常時15ppmを保持することは困難であるが、現行の分離機構に多用されているフィルタ状コアレスサの適正な整備・運用とあいまってこの種ビルジ水の油水分離の実効を挙げることができる。

4) 本分離システムが長時間の自動運転を行うには静置浮上槽内の液面検知（フロックと水との界面）が要件となるため、市販の数種のセンサーのほか、フォトカプラによる試作界面検知器について調査を行い、それぞれの応答性に関する知見を得た。

5. あとがき

昭和58年10月にMARPOL73/78条約が批准され、これに関連した国内法の施行によってビルジ等排出防止機器（船用油水分離器）に対して従来に比べ、より厳しい機能が要求されることとなった。

一方、近年の機関室ビルジの汚損の進行によると思われる船用油水分離器の機能劣化に対処するための保守作業及び機関室ビルジ処理に要する手間の増加は乗組員の減少態勢と逆行し、他の船内作業にまでも波及するような深刻な問題となっている。本報告の昭和50年代の調査の一例からしても機関室ビルジ性状の共通性として指摘できる油以外の混入物の存在が、油水分離器の機能を阻害することは明らかであり、筆者らはこのうちで特に懸濁性固形物（SS）の影響に関して注目してきた。

船用油水分離器排水中の油分濃度を15ppm以下に担保するために、現在フィルタ状コアレスサが精分離エレメントとして多用されているが、当該コアレスサは微細油粒に対する優れた捕捉機能を示す一方でSSによる目詰まり現象を生ずる傾向は避け難く、殊に近年の重質化の進んだ船用燃料油の船内処理から生ずる廃油の量および質の問題がSSの問題をますますクローズアップさせてきている。

今回、船用の機関室ビルジの油水分離技術に関して、現行の重力分離方式の機能限界を克服するために新しい技術として化学的処理と気泡会合浮上分離に基づいた技法の適用を試みた。本技法は目詰まりを生じない分離システムであり、その点機関室ビルジ用に適するがこれを船用装置に適合させるためには構造的に含油フロックを浮上させる静置分離槽は「密閉型」とする必要がある、この点が最も大きな技術的解決を要する

問題であった。

本研究では最初の2年間の基礎研究を経て所期の機能を具備した密閉型静置浮上分離槽を中心とした実機模型を作製した。当該実機模型の全体装置は現行の油水分離機構との複合システム（現行機構の後段システム）とし、油水条件、排水圧条件、油凝集剤添加量等を変更した一連の試験の実施により、船用としての適合性を総合的に評価した。その結果、一応所期の目的は達成したと思われるが、排水圧1.5kgf/cm²付近における空気量の確保等、若干の改善を図るべき点も残されており、今後の機関室ビルジの安定処理に向かって、より充実したシステムの一部としての装置開発に資する研究の発展が急務とされる。

なお、本研究のうち、3.1.1及び4.は環境庁 公害防止等試験研究費により、また、3.1.2及び3.2の一部は（社）日本造船研究協会 RR76部会との共同研究により実施した。

6. 謝 辞

本研究を実施するにあたり、機関室ビルジ処理用油水分離装置に関する実船調査関係では、日本郵船（株）、国鉄（当時）、日本沿海フェリー（株）、近海郵船（株）、日本カーフェリー（株）および運輸省航海訓練所の海務部・工務部および実船乗組員の方々から、最近の機関室廃油試料等の入手関係では大阪商船三井船舶（株）の方々から、油凝集剤関係では味の素（株）中央研究所の方々から、プランクトンの解析には農林水産省東海区水産研究所の木立技官からそれぞれ御協力いただきました。また加圧タンクでの空気の溶解速度に関する理論および実験について東京大学工学部化学工学科（当時）上山先生の御指導を、微細気泡を発生させるための減圧ノズルについては、岡山大学工学部工業化学科高橋、宮原両先生より助言をいただきました。

また実船から採取した試料分析及びフォトカプラによる試作界面計については、当所機関性能部（当時）加藤 寛技官および沼野正義技官の協力を得ました。

記して以上の皆様様に深甚な感謝の意を表します。

〔付録〕 吸収に関する理論

水中へ空気成分が吸収される速度は、加圧タンクの設計の上で重要な因子となる。ガス吸収の速度は図・Iに示すように気液界面の両側にそれぞれガス境膜及び液境膜が存在し、物質移動の抵抗はすべてこの両境膜に集中されていると仮定する二重境膜を考えると、以下のように表すことができる。

P_{AG} : ガス本体におけるA成分分圧 [atm]

P_{Ai} : 気液界面におけるA成分分圧 [atm]

C_{Ai} : 気液界面におけるA成分濃度 [kg-mol/m³]

C_{AL} : 液本体におけるA成分濃度 [kg-mol/m³]

ただし、 P_{Ai} と C_{Ai} は平衡関係にあり、Henryの法則が成り立つものとする。

$$P_{Ai} = H \cdot C_{Ai}$$

H : ヘンリー一定数 [atm · m³/kg-mol]

このときの界面単位面積、単位時間あたりの物質移動速度は次式で示される。

$$N_A = -k_G (P_{Ai} - P_{AG}) = k_L (C_{Ai} - C_{AL}) = -K_G (H \cdot C_{AL} - P_{AG}) = K_L (P_{AG}/H - C_{AL})$$

ここで

k_G : ガス側境膜物質移動係数 [kg-mol/m²·hr · atm]

k_L : 液側 境膜物質移動係数 [m/hr]

K_G : ガス境膜基準総括物質移動係数 [kg-mol/m²·hr · atm]

K_L : 液境膜基準総括物質移動係数 [m/hr]

N_A : 界面単位面積、単位時間あたりのA成分の移動速度

[kg-mol/m²·hr]

いま、気泡の容器に対する上昇速度をv、液の深さをL、液の全容積をV、単位時間あたりに通過する気泡個数をnとすると、A成分ガスによる液側濃度の変化式と

して、次の基礎式を得る。

$$\frac{d}{dt} (V \cdot C_{AL}) = n\pi d^2 \frac{L}{V} K_L \left(\frac{P_{AG}}{H} - C_{AL} \right)$$

容器内で水は循環しているので濃度は一定と考えられるが、気泡は直線的に上昇しているので P_{AG} は平均値を用いなければならない。そのためには P_{AG} の高さ方向の変化を知る必要がある。気相のモル密度を ρ_G 、全圧をPとすると気泡側の濃度変化として次式を得る。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\pi d^3 P_{AG} \rho_G}{6p} \right) = -\pi d^2 K_L \left(\frac{P_{AG}}{H} - C_{AL} \right)$$

以上の式を変形し、時刻t = 0での空気中のA成分ガスの体積分率を P_{AGO} とおき、液本体におけるA成分の初期濃度を C_{ALO} とすると、水に吸収されるガス成分の濃度変化を代表する式として次式が求められる。

$$C_{AL} = \left(C_{ALO} - \frac{P_{AGO}}{H} \right) e^{n\pi d^3 \frac{P_G H}{6p} \left(e^{-\frac{6PK_L L}{dp_0 H v} - 1} \right) \frac{1}{V} t} + \frac{P_{AGO}}{H}$$

空気 の 溶解速度に関する実験結果

加圧タンク内圧力が3および5 kgf/cm²のときに、空気 の 吹込み時間を変えた場合の測定結果を図・IIに示す。吹込み空気量は図・32のごとく出口で計測し10 ml/minで所定の時間吹込みを行った。この条件のもとでは、20分程度の空気吹込み時間で飽和値に近づいている。

図・IIIに示す結果はガス成分の濃度を与える式を用いて酸素と窒素についてその吸収量を計算し、これを体積に換算した値および飽和溶解量に対する割合を表わした。

計算に際しては、気泡径は今回の実験で計測が困難であった2 mmとし、タンクに対する気泡の上昇速度は0.3m/sとした。

計算値は図・IIに示した傾向をよく表わしていると思われる。

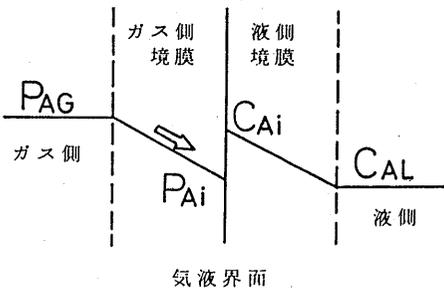
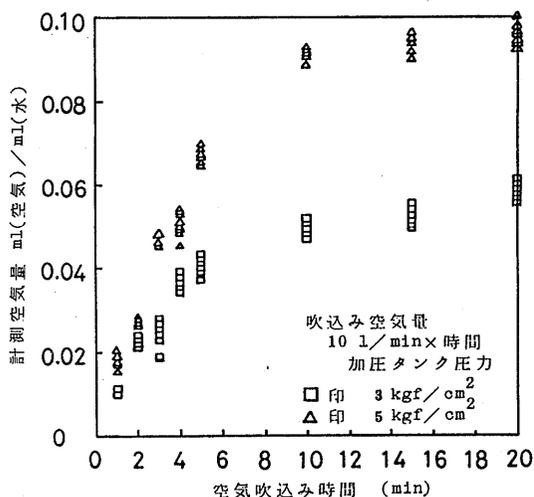


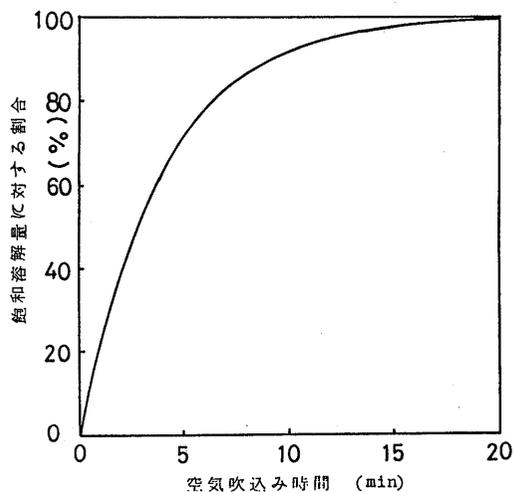
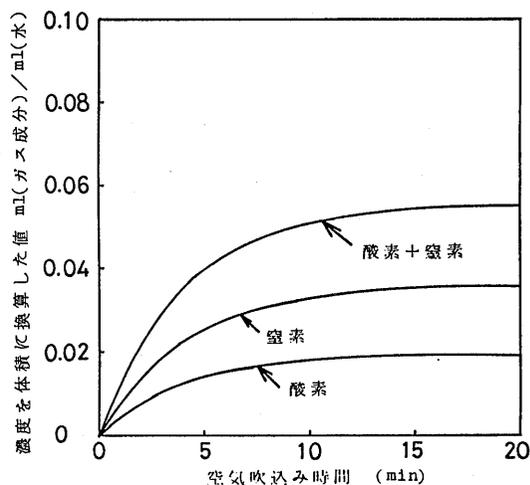
図 I 二重境膜



図II 空気の溶解速度に関する実験結果

参考文献

- 1) 73/78 MARPOL条約に関する決議A・393 (X)に基づく油水分離装置性能試験基準, 運輸省通達 船査第538号, (昭和58年8月25日)
- 2) 植田, 渡辺, 油水分離器の性能試験に関する研究, 環境保全研究成果集 (昭和48年度) 環境庁編, pp59-1 ~ 59-12
- 3) たとえば
IMO MEPC 22/9 (oct.1985)
IMO MEPC 27/INF.3“Oil contents of oily bilge-water discharges from ships” (Feb.3, 1989)
IMO MEPC 29/INF.10“Oil contents of oily bilge-water discharges from ships” (Jan.23, 1990)
- 4) 海洋汚染防止に関する調査研究, 国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書,
第7基準研究部会第6分科会 (RR 76)
(社) 日本造船研究協会 (昭和63年3月)
- 5) (社) 日本粉体工業技術協会 試験用ダスト資料
- 6) 白戸・杉本: 第7章、厚いろ材の閉塞, 第9章、



図III 空気の溶解速度に関する計算結果
(加圧タンク内圧 3 kgf/cm²)

ろ過の動的メカニズム (新版ろ過のメカニズム, 地人書館, 第3版、昭和60年)
7) 波江・長内: 油分の水中分散性、浮上速度に及ぼす固体浮遊物の影響,
船舶技術研究所報告, 第13巻第5号 (昭和51年9月)