

真空吸引式油回収装置の研究

STUDY ON VACUUM SUCTION ONBOARD OIL RECOVERY SYSTEM

藤田勇¹・吉江宗生²・佐藤栄治³・水谷雅裕⁴・佐野正佳⁵・不動雅之⁶

Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Eiji SATO, Masahiro MIZUTANI,
Masayoshi SANO and Masayuki Fudo

¹会員 工博 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²会員 工修 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³非会員 工学 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴会員 工学 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017高松市番町1-6-1)

⁵会員 工準学 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017高松市番町1-6-1)

⁶ 会員 工修 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017高松市番町1-6-1)

A vacuum suction oil skimming system is investigated. Several types of suction inlets are experimentally studied with small-sized models. Their suction performances are measured in terms of liquid suction rates, oil and water fraction, pressure gradient and liquid hold-up in a vertical suction pipe in various simulated conditions. In the experiments, W/O emulsified heavy oil, whose viscosity is about 300,000mPa·s, is used. The results show that the vacuum suction is a potentially suitable measure for skimming spilled oil from sea surface since it has even better performance on a wavy sea surface than on a calm surface. A large-sized oil suction experiment is also conducted and its results are compared to those of the small-sized experiments to discuss the scale effects. The comparison provides a basic design strategy for a real-sized onboard oil recovery system which an oil recovery vessel will be equipped with.

Key Words : Oil recovery, Emulsified oil, Vacuum suction

1. 導言

流出油による汚染から海洋ならびに沿岸の自然環境を守るためには、流出事故の発生を未然に防ぐことが第一である。しかしながら平成9年に発生した「ナホトカ号」事故や平成14年度にスペイン沖で発生した「プレステージ号」事故など大規模なものに加えて、小規模の流出事故は毎年発生しており、事故発生件数をゼロにすることは不可能である。従って万が一事故が発生した際に、環境に対する負荷を最小限に留める効果的かつ効率的な流出油除去並びに環境修復手法を持つことが危機管理上重要なことである。

海上において油流出事故が発生した場合、海岸線への流出油の漂着を防ぐことが重要である。そのため洋上における流出油の処理が求められる。対処法としては、船舶による回収処理、分散剤等化学薬品による拡散処理、あるいは現場焼却などの手法がある¹⁾。これらの内、分散剤による処理は比較的軽質油に対しては効果があるが、環境温度が低い場合や、重質成分が多くエマルジョンを形成した流出油に対する効果は制限される。現場焼却は安全性や大気汚染といった二次的な問題が懸念される。そのため回収による汚染除去は流出油対策として重要な地位を

占めるものである。

こうした流出油回収用の資機材には多くの種類がある²⁾が、回収性能は流出油の性状や海象条件に大きく依存している。原油産出現場など、流出油が特定種に限られるところでは、それに特化した回収機材を用意しておけば良いが、わが国のように流出の可能性が多種多様な油である状況では、低粘度から高粘度に渡る広い粘度範囲の流出油に対応できる資機材である必要がある。特に海面清掃船などにおいては、事故発生の報から緊急出動に至るまでの時間が短く、資機材の積替えに要する時間が限られる。さらに、流出油は風化によりその性状を常に変化させるため、粘度等が現場において初めて判ることがあるなど、事前予測が難しい。そのため緊急出動を要する海面清掃油回収船に装備される油回収資機材は広い粘度範囲に対応できるものでなければならない。

著者等は、ナホトカ号事故の際には、強力吸引車による流出油の吸引除去が成果をあげたという報告³⁾に着目し、これを海面清掃船の油回収機器に応用することを検討してきた。強力吸引車は大排気量の真空ブローにより吸引管内部に秒速数十メートルの空気を発生させ、液体やスラリー、或いは粉体などを吸引搬送するものである。著者等は昨年度の海洋開発シンポジウムにおいて高粘度の液体を吸引搬送

する場合の管内流動特性など不明であった点を水平管における実験から明らかにした⁴⁾。エマルジョン化油といった数十万 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ を超える高粘度の液体でも水などの低粘度流体と同時に吸引することで壁面潤滑され、管路閉塞を起すことなく真空吸引が可能であるというのが主な結論であった。

こうした真空吸引装置を実船に搭載し、高粘度の流出浮遊油を海上で除去することを考えた場合、波浪や船速等の環境条件と吸引口の形状がその性能に大きな影響を及ぼすことが考えられる。また吸引管内の高粘度油と水および空気の混相流は吸引口の形状や運転条件等によって変化することが予想される。装置を設計する上では、吸引口の特性を把握するとともに、吸引管内部の管摩擦損失や液ホールドアップを予測し、コントロールする必要がある。

そのような考えから、各種吸引口小型模型を試作し吸引特性を計測することで、海上浮遊油の吸引に適した吸引口形状について検討した。また、垂直吸引管内気液混相流の圧力損失および液ホールドアップを計測し、Lockhart-Martinelli式による予測値と比較した。更に寸法による相似則を確認するために想定している実機にほぼ近いスケールの油水吸引実験を行った。以下でその詳細を述べる。

2. 実験

(1) 模型実験

船舶搭載型の真空吸引流出油回収装置に適した吸引口形状を探す目的で、図-1に示す実験系を構成し、各種吸引口小型模型の吸引特性を計測した。空気吸引用のルーツブロアは18.9kWの電動機により $8.2\text{m}^3/\text{min}$ (-75kPa)の吸引能力を持つものを用いた。長さ2700mm、幅900mm、深さ600mmの水槽に水を張り、其の上にムース化C重油(粘度約 $300,000\text{mPa}\cdot\text{s}$)の油層を形成した。プランジャー式の造波装置により波高約13cm、周期2.3secの波を発生させるとともに、ポンプにより水槽内の水を循環させ、水面流速で $0.23\text{m}/\text{sec}$ の水流を発生させた。発泡スチレン製の浮きで構成された浮体に吸引口を装着した。波による動揺への追従性を持たせるため、図中記号5で示す部分にスイベル継ぎ手を入れ、回転の自由度を与えた。浮体を構成する浮きの個数については2個、3個及び4個の場合について実験した。浮き自体の形状も円柱形と流線型の2通りについて実験した。垂直吸引管は内径40mm、長さ4mとした。管内圧力分布に関しては12で示す部分2箇所に差圧変換器を設け吸引管1mで発生する圧力損失を計測

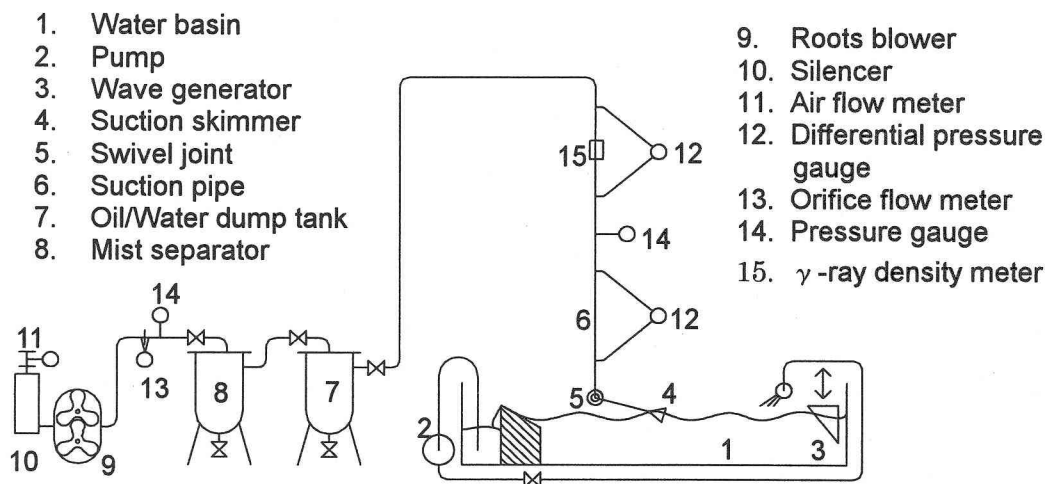
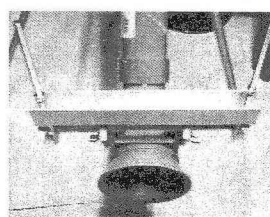
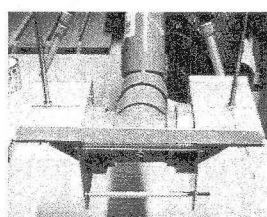


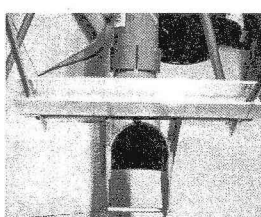
図-1 実験計測系



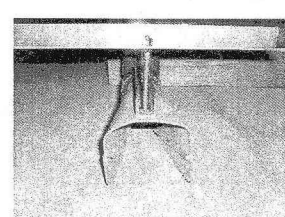
(1)ベルマウス(Bell)



(2)両口(Twin)



(3)馬蹄(U)



(4)馬蹄先広(Wide U)

図-2. 吸引口模型

するとともに、吸引管中央に圧力変換器を設け、管内ゲージ圧を測定した。また15で示す部分にγ線式密度計を装着し、管内の液ホールドアップを計測した。油水の吸引量は一定時間に7のタンクに溜まった油水の重量を測定することから計算した。11と13の部分にはオリフィス式の流量計を設け空気流量を計測した。試験では図-2に示す4種類の吸引口および改良型吸引口に関して吸引実験を行った。図-3に外観と実験の様子を示す。

(2) 実機スケール実験

模型実験に対して、予想される船舶搭載システムの寸法が大きく異なることから、相似則等の検証のために、実機に近いサイズの油水吸引実験を行った。実験系の概要を図-4に示す。実験には強力吸引車を用いた。吸引空気量は $40\text{m}^3/\text{min}$ (-13kPa) で 57kW の出力のものである。吸引管には150Aのフレキシブルホースを用いた。波と流れの無い状況で、吸引口の没水深さをパラメータとして油水吸引量、圧力損失、空気流量等を測定した。吸引口には単に塩ビパイプ(150A)の端面を切り落としたものを使用した。図-5に外観と吸引状況を示す。実験では粘度 $20\sim 30\text{万 mPa}\cdot\text{s}$ のエマルジョン化油を用い、油膜の厚さは 150mm 程度とした。

3. 実験結果と考察

(1) 模型実験

一次試作として、図-2に示す4種類の吸引口模型における吸引性能試験を行った。試験は水吸引により行い、初期状態で吸引口の正面開口面積の約半分が水没する様に位置を設定した。結果の一例を図-6に示す。ベルマウス、両口、馬蹄、馬蹄先広の順に吸引量が増加した。またいずれの吸引口においても静水中に比べて波や流れがある場合の方が、多くの水を吸引できることが判明した。特に波がある場合、スイベル継ぎ手により回転の自由度が与えられているため、吸引口は水面を捕捉はするが、波の運動に対して遅れが生じ、吸引口が間欠的に水面下に沈み込む運動が観察された。その際に多量の水が吸引される様であった。通常の堰式や渦流式のスキマーでは波があると、反射波の発生によって水面上の油がスキマー内部に取り込まれなくなるなど、回収動作に対して悪影響を及ぼす場合が多いのに対し、真空吸引式では、波があった方が性能が良く、その点好対照をなす。真空吸引式のこうした特長は、波の位相速度よりも高速で吸引を行うことで反射波の発生が抑制されることと、波が吸引口に対して流塊を押し込む効果によって起きているものと想像される。浮体の数と配置に関しては、4フロートタイプと2フロートタイプを比較したが、両者に大きな違いはなかった。

一次試作の結果から図-3に示す改良型吸引口を二

次試作し、詳細な吸引特性を測定した。改良型吸引口は馬蹄先広をベースにしている。馬蹄先広型では油水総量としての吸引量は大きいものの、油膜の下の水を多く吸引するため油水比が低くなる傾向が観察された。その為改良型では底板を設けることで下層の水の吸引を制限し、油水比の向上を図っている。吸引口の正面開口は 90mm (縦) $\times 125\text{mm}$ (横)である。

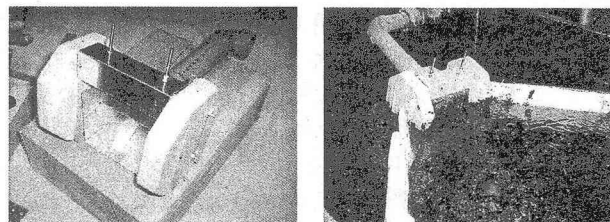


図-3 改良型吸引口

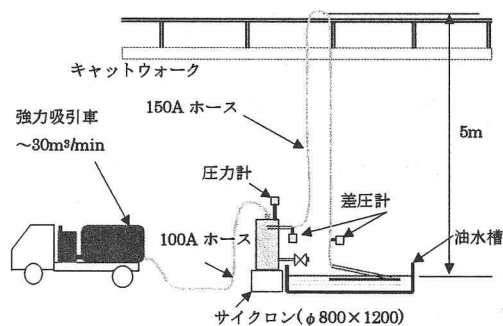


図-4 実機スケール実験系

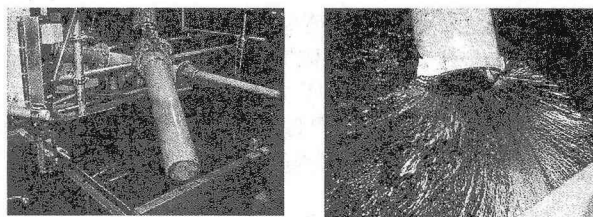


図-5 実機スケール実験吸引口及び吸引概況

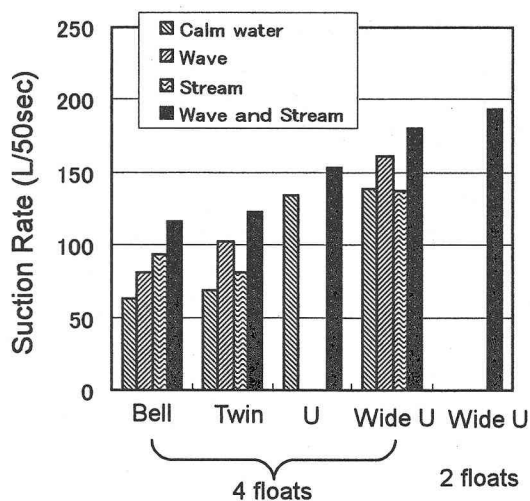


図-6 吸引口性能試験結果

結果を図-7~11に示す。図-7は単位時間当たりの吸引油水の量を示したもので横軸は吸引口の没水深さである。図-8は空気流量の変化で標準状態空気に換算した体積流量である。図-9は吸引油水と空気の重量比で、図-10は管内部の液ホールドアップ、即ち液成分による管断面の閉塞割合の変化である。図-11は油水吸引時の圧力損失特性を表したものである。水面に形成した油膜の厚さはおよそ6cm程度であり、油水比は30~60%の範囲で変化していた。一連の図から判るように吸引油水の量は吸引口と水面の位置関係により変化し、どの程度水面下に差し込むかによって吸引油水流量を制御することが可能である。しかし多くの吸引油水量の増加に伴って吸引口部および吸引管内部で発生する圧力損失が増大するため、トレードオフを考え、適当な条件で動作させることが必要である。吸引をルーツ式プロアで行うことを想定した場合、発生可能な負圧は単段で-60kPa、2段シリーズ接続で-90kPaが一般的である。仮に-70kPaで運転することを想定すると、図-11より吸引口位置が50mmとなり、この時の油水吸引量は約3000kg/hr、空気流量は2.0m³/min（標準状態）、油水空気比20、液ホールドアップ0.1~0.15程度であることが判る。図-11で ΔP_s で示した圧力が吸引口部分で発生する圧力損失を代表しており、 ΔP_f が管内流動における圧力損失であると解釈できる。装置の大きさが異なる場合、 ΔP_s は同程度になることが予想される一方、 ΔP_f は寸法に依存して変化するものと考えられるため、相似則等を適用して設計を行う必要がある。

図-12及び図-13は垂直管内気液混相流の圧力損失及び液ホールドアップに関する実験値と相関式による値の比較である。圧力損失の相関式としてはLockhart-Martinelliの式⁵⁾（以下LM式）を用いており、ホールドアップ f_l の理論値は、

$$f_l = \left(1 + \frac{21}{X} + \frac{1}{X^2} \right)^{-0.5}$$

より算出した。ここでXはLockhart-Martinelliのパラメータで、液相と気相が単独で流れた場合の摩擦損失の比の1/2乗で定義される。本実験では液相を構成する成分が水とエマルジョン化油の二成分であり、混合状態における液相の粘度が不明であるため、LM式において液相粘度として1.0, 10.0, 100.0mPa.sの三通りについて計算している。図-12からわかるように実験値は液相粘度を1.0mPa.sと仮定した場合の理論線が一番近く、ホールドアップに関しても液粘度として1.0mPa.sを仮定した理論線との相関が一番よい。このことより高粘度のエマルジョン化油であっても水と同時に吸引することで潤滑され、実質的には水と同程度の流動性を有するものとして扱えることがわかる。

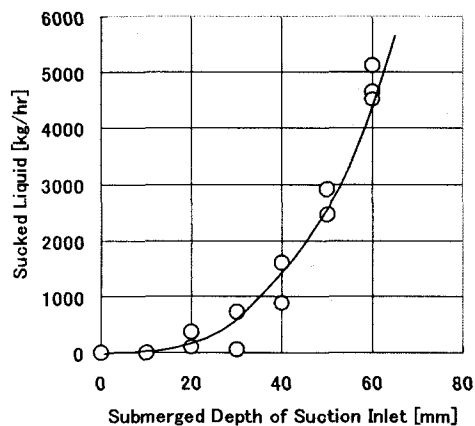


図-7 吸引油水量の変化

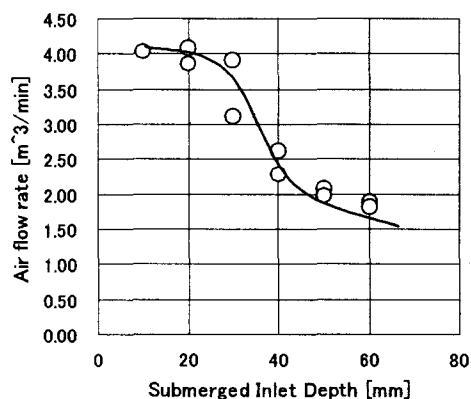


図-8 空気流量の変化

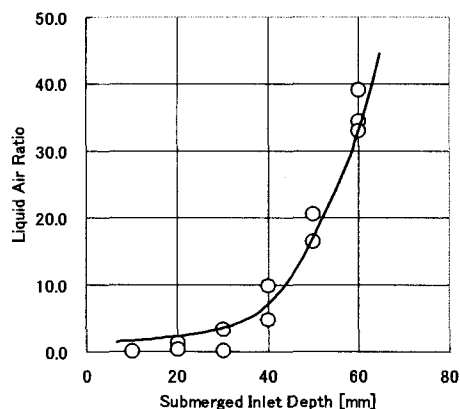


図-9 油水/空気比の変化

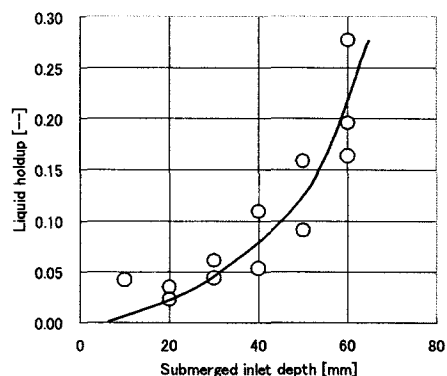


図-10 液ホールドアップの変化

(2) 実機スケール実験

実機スケールの油水吸引実験結果を図-14~16に示す。模型実験の時と同様、図-14から吸引口の水没深さを大きくすることで吸引量が増加することが判る。吸引対象が水の場合と高粘度油の場合で吸引量に大きな違いは見られなかった。図-15に示す様に液/気比は、吸引量が多いときに、水と油水の場合で多少の違いが見られたが、吸引量が比較的小さい場合には余り変わらない結果となった。図-16は管内摩擦

圧力損失に関する実験結果と理論値の比較である。実機スケールでの実験値はLM式で液相粘度を10mPa.sと仮定した場合の理論値と良い相関が見られる。図のデータは水吸引と油水吸引の両方を含んでおり、両者の摩擦損失値に大きな傾向の違いは見られなかった。実機スケールにおいても、水面上の油を吸引する時に油膜の下の水を同時に吸引するため、模型実験の時と同様、水により壁面潤滑が行われたと考えられる。本実験において吸引液体中の油

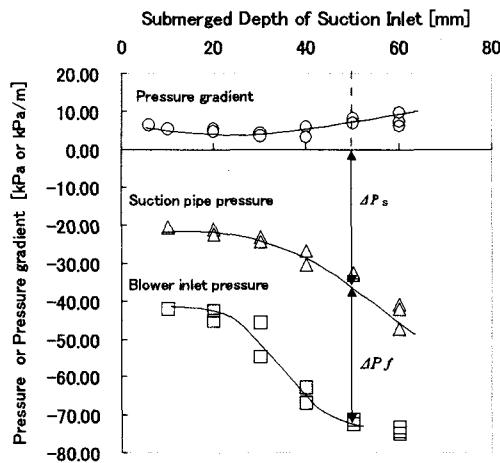


図-11 吸引時の圧力及び圧力損失

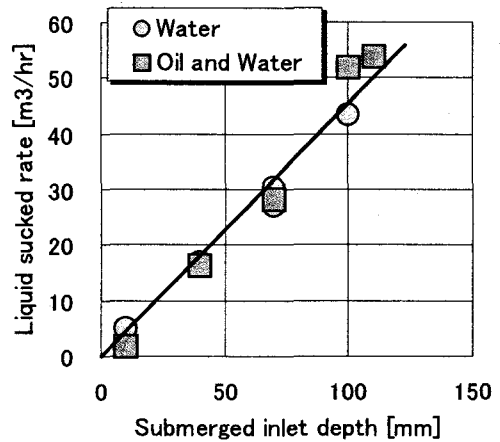


図-14 実機スケール油水吸引量

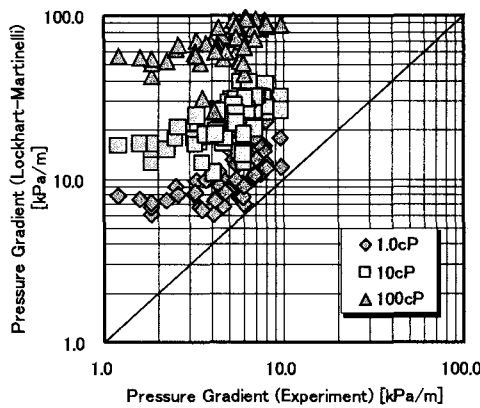


図-12 油水吸引時の垂直管内圧力損失

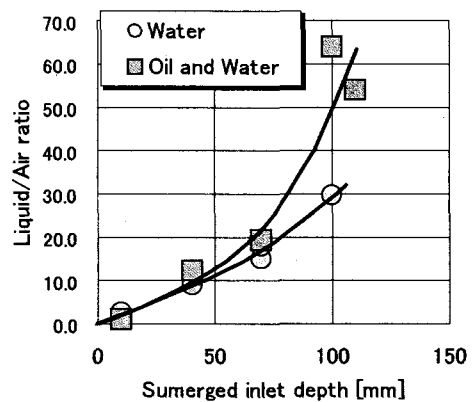


図-15 実機スケール 油水/空気比

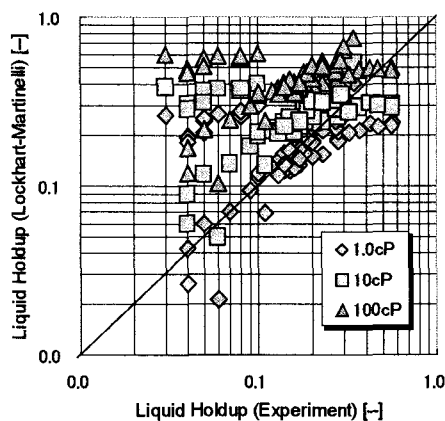


図-13 垂直管内液ホールドアップ

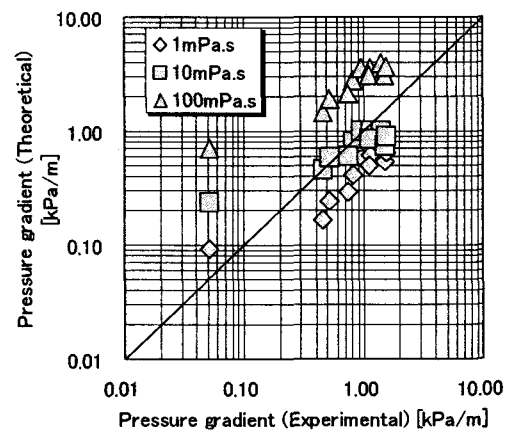


図-16 実機スケール吸引管内摩擦損失

分濃度は12%~50%程度の範囲で変化していた。この程度の含油率ではエマルジョン化油の粘度は管内摩擦損失に寄与しないと言える。従って、空気-水系の気液二相流に関するLockhart-Martinelli式等の理論式あるいは相関式が適用可能である。LM式の場合に単相流の摩擦損失としてBlasius式を使用するならば、見かけの流速が液相、気相共に同じ場合、管摩擦損失は管径の-1.25乗に比例することになる。

(3) 船舶搭載機の試設計

実機のイメージを図-17に示す。この図で装置は油回収実海域再現水槽⁶⁾に設置されているが、実際の双胴型の海面清掃船に搭載される場合は、双胴間に設置されることになる。一般的な海面清掃船においては30m³/hr程度の油水回収能力が求められるのが通例である⁷⁾。この能力を実現する装置の仕様の例を表1に示す。模型実験の条件を左側、それに対応する実機の条件を右側に記す。本試設計では実機において15kPaの吸引圧力の余裕をみて約-70kPaの吸引圧において25kg/min(標準状態)の空気が必要であることが分かった。このような空気流の発生させるための熱力学的な仕事は、可逆断熱変化を仮定した場合約47kW程度であり、これを Roots 式ブロアにより実現させるためには、水封2段圧縮式で90kW程度の原動機が必要となる。

4. 結言

主な結論を以下に記す。

- I. 真空吸引式油回収装置に適した吸引口について検討を行い、吸引に適した形状を明らかにした。
- II. 垂直吸引管内の水/高粘度油/空気の混相流の圧

力損失特性を計測し、水潤滑の効果を明らかにした。

- III. 実寸サイズの実験との比較を行い、相似則の検討を行うとともに、実機の予想性能、運転条件等の設計指針を得た。

謝辞：本研究を進める上で、(社)日本作業船協会、辰口雅光氏に多大なご協力を頂いた。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 例えば, Merv Fingas : The Basics of OIL SPILL CLEANUP Second Edition, Chapter 7,9 and 10, Lewis Publishers,2001.
- 2) 例えば, World catalog of oil spill response products -seventh edition, Chapter 2,1999
- 3) 海上災害防止センター編：流出油事故対応防除マニュアル, pp.32-35,2000.
- 4) 藤田他:高粘度液体の管内空気輸送における圧力損失特性 ,pp.821-826, 海洋開発論文集,Vol.19,2003.
- 5) Lockhart,R.W. and Martinelli,R.C., Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two component flow in pipes, pp.39-48, Chem. Eng. Prog., 45(1949) .
- 6) 吉江:環境とエネルギー(12)-世界レベルの技術を育てる油回収実海域再現水槽, pp.50-55,作業船, No.272, 2004.
- 7) 運輸省港湾局監修:現有作業船一覧,pp.58-59,(社)日本作業船協会,1999.

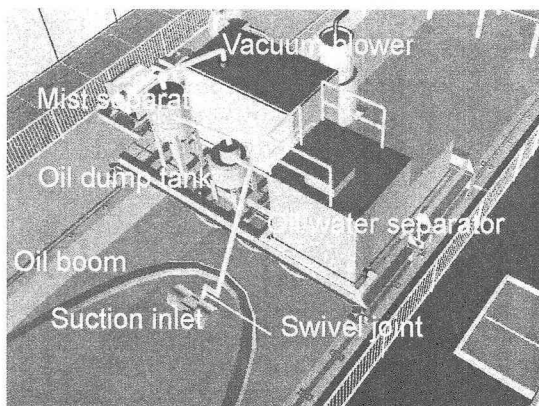


図-17 真空吸引式油回収装置イメージ

表-1 真空吸引式油回収装置の想定仕様

項目	模型	実機
吸引管	40A	125A
寸法比	1	3.125
油水/空気比	20	20
管内閉塞率	0.1~0.2	0.1~0.2
吸引油水	3000kg/hr	30000kg/hr
空気流量	2m ³ /min (標準状態)	25kg/min
吸引口圧力損失	40kPa	40kPa
垂直吸引管 ヘッド	8.0kPa	8.0kPa
管摩擦損失	27kPa	6.5kPa
圧力マージン	0kPa	15kPa
ブロア吸引圧	-75kPa	-69.5kPa