

真空吸引式流出油回収装置の開発

—大型実験水槽における試験

DEVELOPMENT OF ONBOARD VACUUM SUCTION OIL RECOVERY SYSTEM
—PERFORMANCE TEST IN LARGE SCALE TEST TANK

藤田勇¹・吉江宗生²・野田徹³・細谷重勝³・立脇和則³

Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Iwao NODA, Shigekatsu HOSOTANI and Kazunori TATEWAKI

¹正会員 博士(工学) (独)港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

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

³学士 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)

An onboard vacuum suction oil recovery system has been developed. The system employs a high-power vacuum blower to suck and transfer oil slicks from the sea surface together with large amount of water and air in the gas-liquid multiphase form. This paper mainly presents the performance test results with a large-size model in the Simulation Tank for Oil Recovery in Maritime Situations (STORMS) in PARI. The tests covered various aspects including oil recovery performance such as sensitivity to sea condition or emulsification as well as design issues such as power required for driving blowers, how to cool the blower or how to control the suction rate, etc. Throughout the whole tests, the system generally worked well. The test results have been applied to the oil skimming system mounted on *ISHIZUCH*--an oil recovery vessel owned and operated by MLIT, which has been fully refitted and has come back in service this spring.

Key Words : oil spill response, vacuum suction, oil recovery vessel, multiphase flow

1. 導言

海上流出油の回収除去をより効率的に行う為には、広い粘度範囲に対応できる油回収装置が求められる。強力吸引車に見られる様に、多量の空気との混相流による吸引方式を採用することで、吸引と吸引管内の流動性の制御を行うことが可能となる^{1,2)}。本研究では油回収船の装備として本方式を用いることの可能性に関して実験的な検討を行う。著者等はこれまで小型模型を用いた検討を行ってきたが^{3,4,5)}、それらの結果を踏まえ、今回の研究は大型の模型を用いて実海域を模擬した実験水槽における実証的試験を行い、実用化への可能性を確認するとともに、実機設計上必要とされる動作条件あるいは制御方法等を明らかにする。更に、本研究で得られた成果を受けて、国土交通省四国地方整備局が運用している実際の海面清掃兼油回収船「いしづち」に真空吸引式油回収装置が装備された。本船装備の概要についても併せて報告する。

2. 原理

流出油を真空吸引により回収除去する装置は大きく分けて二種類に分類することができる。一つはチューブポ

ンプやモーノポンプ等容積型のポンプ、あるいは真空ポンプで減圧した容器を用いて液単相を吸引するタイプのものであり、他者は、高速の空気流を用いて気液混相流状態で吸引搬送するものである。図-1により動作の違いを説明する。図は垂直管内の気液二相流の流動様式を示したものである。横軸が見かけの空気流速、縦軸が見かけの水流速であり、両者の組み合わせによりどのような流動パターンが観察されるかを示している。前者の液単相吸引式は図では縦軸部分に相当し、後者の気液混相吸引は図で例えば斜線部に相当する。本研究が対象にしているのは後者の吸引方法である。単相吸引式は管内部を液が満たした状態で輸送するため、制御できるパラメータも少なく、一般的に油の粘度や揚程、ゴミの大きさ等の要素に影響を受けやすい。低温下でのエマルジョン化油回収など条件が厳しい場合、時として揚程と管内摩擦損失が大気圧を上回ることがある。このような場合には液単相吸引では吸引力が不足してうまく働かないことになる。一方混相流吸引式においては、海面流出油は多量の空気とともに管内に吸引搬送される。空気流速が20m/secあるいはそれを上回るような条件では管内流はスラグ流から環状流となり、ホールドアップを0.2あるいはそれ以下にできるため、必要とされる吸引力を小さ

く抑えるができる。また、吸引口部の高速空気流は、気液界面において大きな剪断力を液相に与えるため、浮遊油を吸引する効果があるなど、単相吸引では得にくい強力な回収能力が期待できる。このように単相吸引と混相吸引では大きな違いがあるため、欧米では前者を“Vacuum suction”, 後者を“Air conveyer”と称して区別する向きもある⁶⁾。混相流吸引式の油回収現場への応用はこれまでのところ、強力吸引車を用いた海岸線における油回収に限定されていた。今回の研究では実際の油回収船の装備として展開するものであり、日本においては、また世界においても著者等の知るところでは初めての試みである。

著者等がこれまで行ってきた小型模型による研究によ

ると^{3,4,5)}真空吸引により高粘度浮遊油の回収が可能であること、波浪状況下の方が平水中より回収性能が優れること、また相似則と関連して吸引管内の気液混相流の流動はLockhart-Martinelliに代表される理論式で概ね表現し得ることなどが分かっている。しかしながら実際に大型の実用機を設計制作する上では、実機寸法に近いサイズの模型による動作並びに性能の確認は強く望まれるところである。更に実用化に際しては、装置の構成上の問題や吸引量の制御の問題等を解決しておく必要がある。大型水槽実験ではこのような実用化する上での諸問題の解決に力点を置き、単なる解の存在証明ではなく、実用機としての現実的な解を構成するものである。

3. 大型水槽実験

実船システムの設計に先立って油回収実海域再現水槽 (STORMS : Simulation Tank for Oil Recovery in Maritime Situations)において一連の大型模型実験を実施した。当水槽は2004年に港湾空港技術研究所に整備されたもので、大型模型あるいは実機の試験を行うことのできる国内唯一の塩水油回収用の試験水槽である。寸法は長30m×幅6m×深2.5mであり、潮流(2knots)、波浪(波高50cm)及び水温(5℃)を再現することができる。

実験装置の概要を図-2に示す。実機の吸引管代表直径を125Aと想定し、模型の代表直径は80Aとした。縮尺比は0.64である。空気流の発生は18.5kWと7.5kWのルーツブローアを2台並列接続し最大で15kg/minの空気を吸引できるものとした。用いたブローアは乾式のものであるが、実船で用いる湿式ブローアの冷却性能を評価するために水インジェクションを行える様に冷却水回路を設けた。油吸引口部は過去の研究²⁾において比較的良い性能が得られるとともに形状がシンプルな矩形断面ラップ状とし

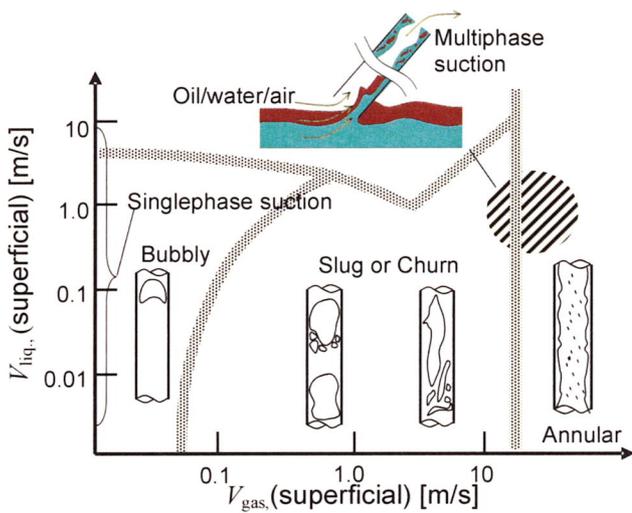


図-1 垂直管内気液混相流の流動様式 (液単相吸引と混相流吸引の違い)

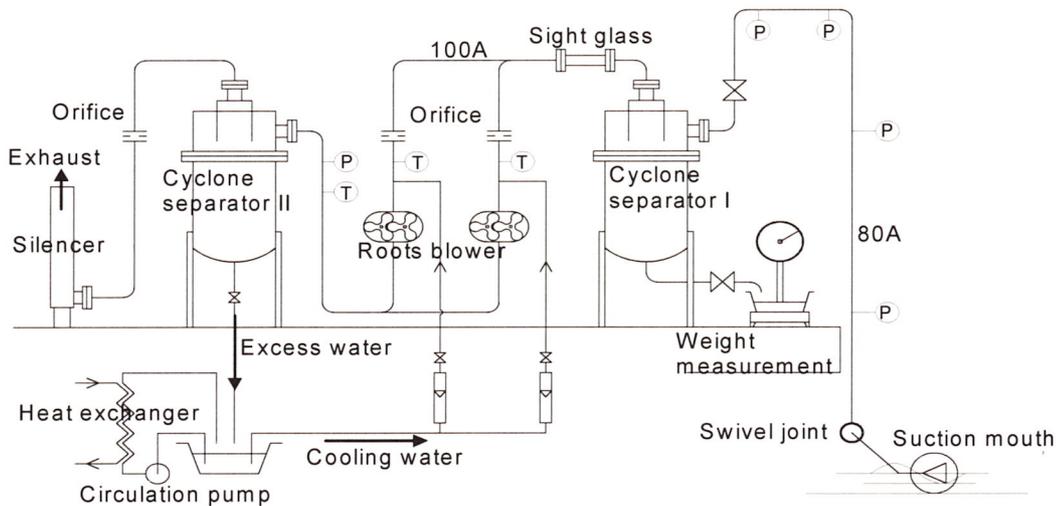


図-2 実験装置の概要

た。終端開口を230(W)×192(H)とし、図-3に示す様に、両側に浮き、更に吸引管途中にスイベル継ぎ手を備えることで海面動揺追従能力を持たせた。更に今回は吸引量調整用に二次空気取り入れ口を設けた。これは二次空気取り入れ口の開口を調整することで、吸引流量の制御を行う為である。実験では油粘度・波高・航行速度等の使用環境をパラメトリックに変化させ、その際の油水吸引量を初めとし、各部の圧力温度等を計測し、結果を整理・分析した。供試油としてはA重油ならびにエマルジョン化したC重油(約300,000mPas)を用いた。波高は実機想定50cmとし、実験では縮尺を考慮し32cmとした。

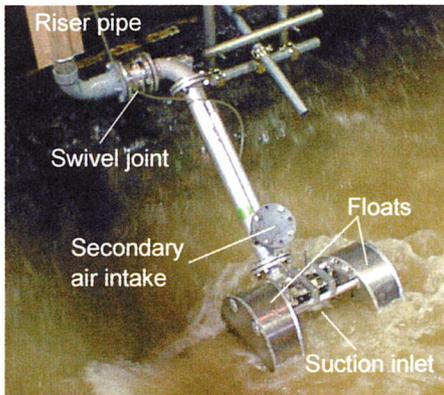


図-3 実験模型吸引口部の構成

4. 実験結果と考察

(1) 油水吸引特性

これまでの小型模型実験より吸引特性に関しては図-1の斜線領域で運転が望ましく、管内流動特性に関してはLockhart-Martinelli式などが使え、異なるサイズの装置の性能予測が可能であることが分かっている。一方実機においては、負圧空気流により吸引回収された油は気液分離された後に、自由水を分離するために油水分離器に送られる。油水分離器にも能力の限界があり、それを越える吸引は避けなければならない。その為には吸引量を制限あるいは制御する必要がある。

吸引量制御に関連した実験結果を図-4に示す。図は吸引口の平均水没割合と油水吸引量の関係を示している。両者には正の相関が認められるが、それ以外でも波や流れの有無により吸引量は大きく変動することが分かる。小型模型実験では平水中に比べて波浪中の方が多量の吸引量が得られたが、大型実験においても同様の結果となった。一般的に装置は大型化するにつれ動揺の固有振動数が小さくなる傾向にあるが、大型化に伴う波浪への追従性の悪化が吸引特性に悪影響を与えているとは図からは見て取ることはできない。基本的に耐波浪性に優れると言っても良いと考える。しかし船速、波浪条件により吸引量が大きく変化することには前述のように制御の観点で問題もある。強力吸引車の場合には一般的にオペレータが吸引口部を直接手動操作することで適当な吸引状態を保持するが、本装置の場合には、海上作業とな

り危険が伴うためオペレータによる操作は難しく、吸引量を自動的に制御する必要がある。油水吸引実験の結果を吸引圧力と油水吸引量の関係として整理したものを図-5に示す。図中の△は水を吸引した場合であり、他のシンボルは水面上の油を吸引した場合である。本図は、被吸引流体の種類、喫水位置、波浪の有無、二次空気取り入れ量等に関して複数の実験条件を含んでいるが、吸引量は吸引圧力との相関が強く、両者の関係がほぼ一つの曲線で表されることが分かる。このことは実際の装置の制御において重要である。つまりブローアの吸引圧力を測定することで吸引量が推定できる、逆に言えば、ブローア吸引圧力を一定値に保つことで吸引量の制御が可能であることを示している。具体的な吸引圧の制御方法としては、ブローアの回転数をインバータ制御等により行う方法も考えられるが、後述するように実機では90kWの電動機を用いるため、これに対応できるインバータは相当大がかりなものになってしまう。そこで、本研究では二次空気取り入れによる吸引圧(量)の制御に着目した。図-3のSecondary air intakeの部分の開口割合を変化させて吸引実験を行った。図-6に二次空気取入口の開口と吸引量の関係を示す。図から分かるように開口を変えることで広い範囲で吸引量の調整が可能であることがわかる。

装置寸法と回収油水量の関係であるが、油水/空気比が20前後の運転条件において、40Aを用いた小型模型実験では3m³/hr、今回の80Aによる大型実験では、約12m³/hrが得られた。寸法比の自乗(管断面積)に比例すると外挿すると、想定実機(125A)においては30m³/hrが得られることになる。

次に吸引管内の摩擦損失を図-7に示す。横軸は実測値、縦軸はLockhart-Martinelli(以下LM式)⁷⁾による理論値で液粘度を水同等とした場合である。図中の□が水を吸引した場合でそれ以外のシンボルが油を吸引した場合である。油水吸引においては水吸引あるいは理論値と比較して大きな値が見て取れるが、本来油の粘度から想定される摩擦損失と比べれば遙かに小さい。高粘度油であっても水と共に吸引することで、管路閉塞することなく円滑な吸引搬送が可能であることを示している。これはこれまでの小型模型実験と同様の結果である。すなわち吸引管内の流動に関する寸法効果はLM式等によって記述できると言っても良い。

実験における動作点を流動様式線図上にプロットしたものが図-8である。スラグ流から環状流への遷移領域において動作していることが分かる。吸引安定性と効率を考慮して実機においても同じような領域での動作が妥当であると考える。実機における想定される動作点を図-9に示す。図にはLockhart-Martinelliより計算した液ホールドアップと管摩擦損失を示した。想定実機としては30m³/hr程度の吸引量が求められるが、それは図中の水平破線に相当し、動作範囲は斜線領域となる。このときの液ホールドアップは0.2程度と予想される。これも概ね小型模型における実験からの予想と同様の結果である。

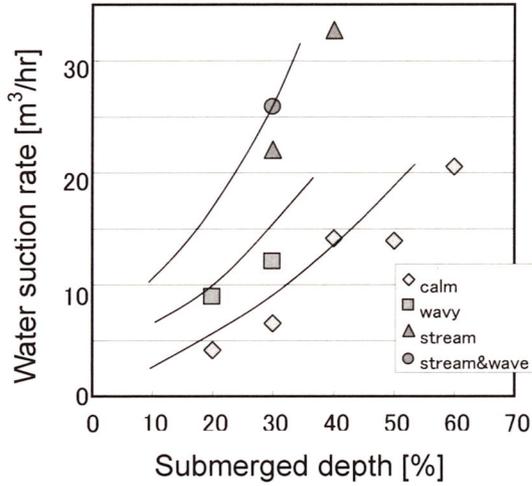


図-4 吸引口喫水と吸引量

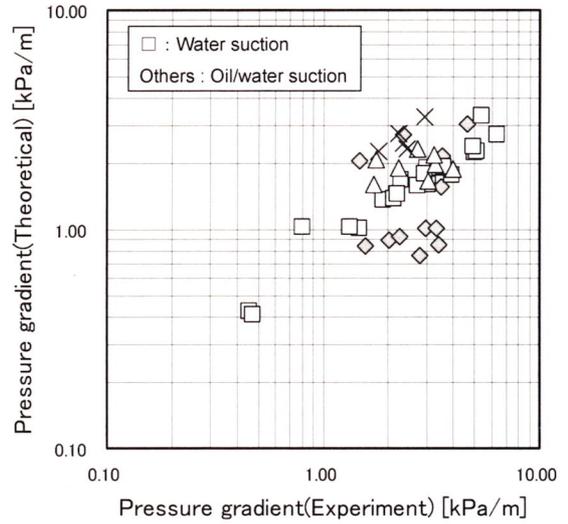


図-7 吸引管内管摩擦損失

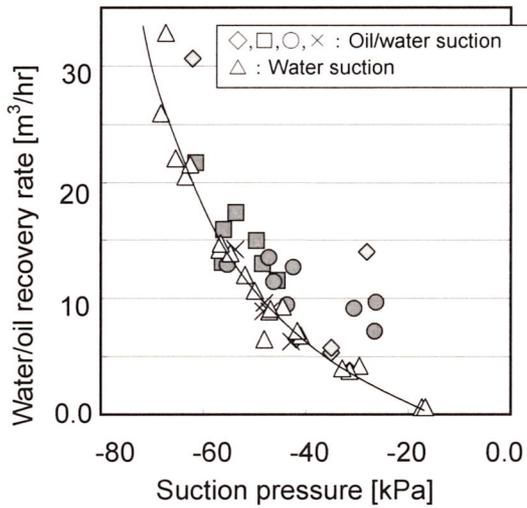


図-5 油水吸引量

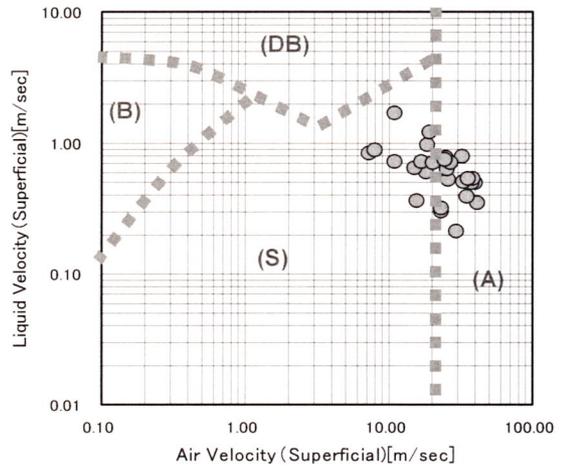


図-8 大型吸引試験における動作点

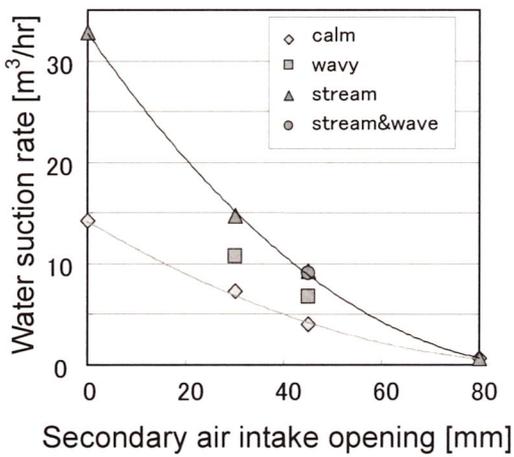


図-6 二次空気取り入れによる吸引量制御

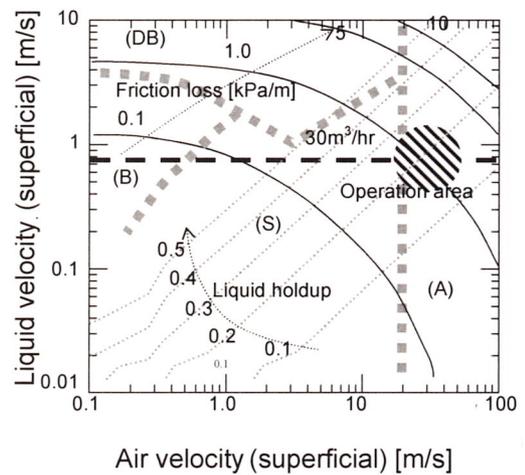


図-9 実機における想定動作点(125A)

(2) 注水冷却の効果

ここでは陸上機にはない船用機特有の問題について触れる。本装置では-60kPa程度の比較的高い真空度において長時間の運転が求められる。ルーツブロア単段で得られる真空度は通常-40kPa程度までであり、それ以上の真空度の場合は複数のブロアをカスケードに繋いだ多段運転が必要になる。ブロア内部において空気は断熱圧縮されるため、排気は高温になる。単段運転の場合はそのまま大気中に排気されるので問題とはならないが、多段接続の場合は初段の排気が後段の吸気となるため、空気の冷却が必要となる。ルーツ式真空ブロアの場合には通常注水冷却方式がとられる。これは各段吸気側に水を注水し、ブロア内部で蒸発させ、その蒸発潜熱により空気の圧縮に伴って発生する熱を除去する方法である。陸上用用途の機器では比較的真水の確保が容易であるため、その消費量はさして問題とはならないが、船舶用の機器として用いる場合には真水の消費量にはおのずと制限がかかる。本装置の開発においても同様であり、注水冷却を行った場合の水消費量を事前に把握する必要があった。その為にルーツブロア内部での空気圧縮に関する熱力学的過程、すなわちポリトロープ指数を測定した。乾式運転した場合と注水湿式運転をした場合で圧縮過程前後の空気圧力と温度を測定し指数を算出した。図-10に結果を示す。乾式運転時で $n=1.6$ 、湿式運転時で $n=1.13$ が得られた。実機運転条件を $P_1=75\text{kPa}$ 、 $P_2=0\text{kPa}$ 、 $T_1=20^\circ\text{C}$ 、 $\dot{m}=25\text{kg/min}$ と仮定すると、空気1kg当たりの必要冷却量は

$$\begin{aligned} \Delta H &= C_p (T_2|_{n=1.6} - T_2|_{n=1.13}) \\ &= C_p T_1 \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1.6-1}{1.6}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1.13-1}{1.13}} \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

より計算して150.224kJ/kgとなる。これに空気流量をかけて水の蒸発潜熱で割ると、単位時間当たり93.8kg/hrの

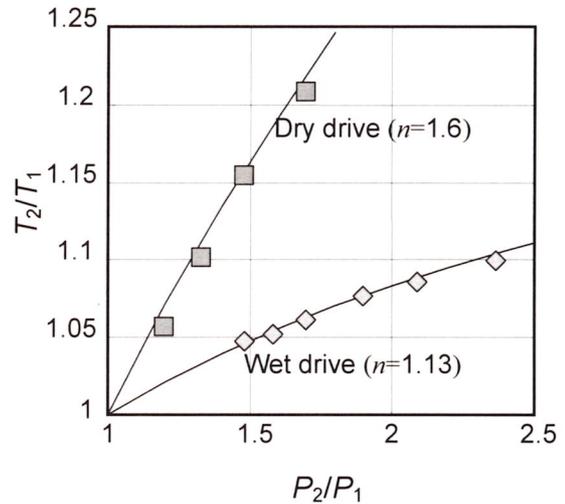


図-10 ルーツブロアによる空気圧縮過程 (注水冷却の効果, ポリトロープ指数)



図-11 「いしづち」外観

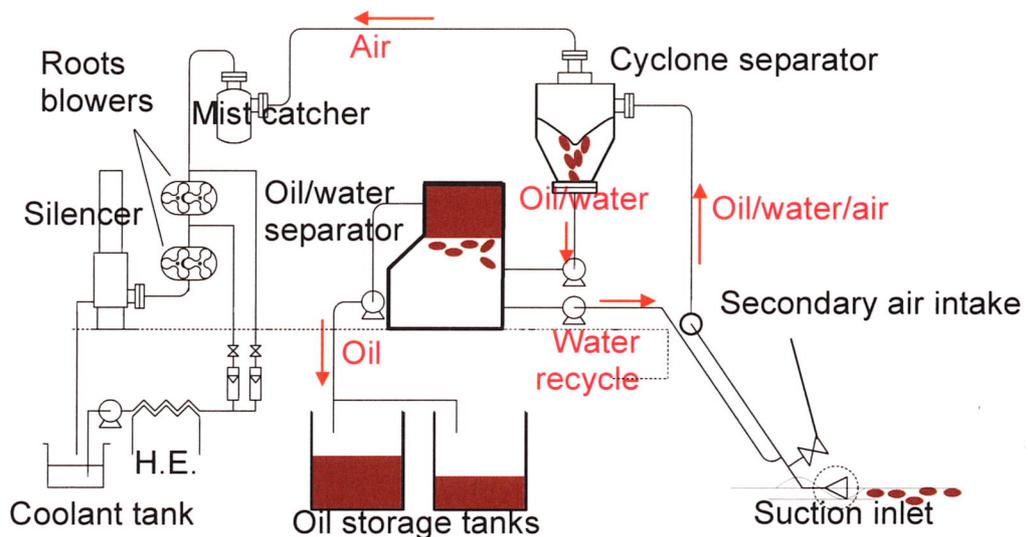


図-12 「いしづち」油回収機システム概要

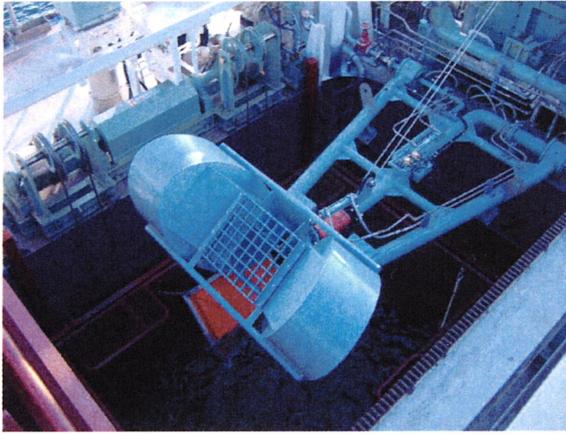


図-13 「いしづち」油回収機吸引口部

水が蒸発して失われると試算できる。この程度の水であれば、比較的小型の船舶でも十分に賄える水量である。実際には更に多くの水を循環させる必要があるが、未蒸発分を回収再利用することで、冷却水消費量を抑えることができる。

5. 実船への実装

一連の研究成果は真空吸引式船舶搭載型油回収装置の実現へと繋がった。「いしづち」は190GTの双胴型の船であり、通常時は海面清掃を行い、油流出事故の際には油回収を行う多機能船である。2004～2005年度にわたり全面的な改修工事が行われ、船体の補修並びに各部艤装の刷新が行われた。その際油回収装置に関しては、旧式の渦流型油回収装置に替わり、真空吸引式の油回収装置に換装が行われ、対応できる流出油の粘度範囲等の拡大を初めとする能力増強が図られた。リニューアルされた船の外観を図-11に示すとともに油回収装置の概要を図-12に示す。90kWの電動機により運転される二台のルーツブローア（カスケード接続）は-70kPaにおいて70m³/minの風量を発生することができる。ブローアの冷却には注水方式を採用している。未蒸発分の水はサイレンサ内で分離回収され、海水との熱交換の後、冷却水として再利用される。吸引管代表直径は125Aであり、管内空気流速は最低でも30m/sec以上を確保できるものとなっている。公称油水回収能力は30m³/hrであるが、これはむしろ油水分離器の能力によるものであり、吸引容量はこれに合わせて二次空気量の調整等により制御される。水面から油水を吸引するスキマーの部分は図-13に示すように双胴中央部分の水面にウインチで垂下され、吸引口両脇の浮きと配管途中に設けられたスィベル継手の組み合わせにより吸引口部が回転の自由度を持つことで、波への追従が可能な構造になっている。油とともに吸引される自由水は重力式油水素分離装置において油と分離され、船外放出あるいは、吸引管内潤滑用水としてリサイクルされる。回収油は回収油槽に貯められるが、その容量は2個の油槽合わせて23m³であり、これは改修前と比較し

て10m³程度の増槽となっている。「いしづち」は今春改修工事を終え、現場に復帰している。今後油流出事故の際などには、その優れた性能を生かして、効率的な流出油回収を行うことで、海洋環境の保護に貢献することが期待される。

6. 結言

空気流を用いた吸引式海上流出油回収装置の大型模型による実証試験を大型実験水槽に於いて実施した。

- i) 基本的な吸引特性はこれまでの小型模型による実験から予測された通りで、大型模型においても本方式が高粘度流出油の回収除去に適した方式であることを確認した。
 - ii) 吸引油水量は吸引圧力と強い相関があり、実機の回収油水量の制御は二次空気取り入れ量の調整により可能である。
 - iii) 負圧空気流を発生させる方法として湿式ルーツブローア採用した。未蒸発分を回収再利用することで水消費量は船用機として妥当な量に抑えることができる。
 - iv) これらの結果をもとに実機が設計制作され、今春油回収船「いしづち」に搭載された。
- を記してまとめとする。

謝辞

本研究を行う上で多くの方にお世話になった。実験面では(社)作業船協会の辰口氏に、また実船への搭載面では三井造船鉄構工事(株)の平野氏に特にご尽力いただいた。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 海上防災事業者協会：強力吸引車等の油回収システムについて, pp.24-59, 海上防災, No.100,1999.
- 3) 藤田勇, 吉江宗生, 佐藤栄治, 水谷雅裕, 佐野正佳, 不動雅之：真空吸引式油回収装置の研究, pp.1247-1252, 海洋開発論文集, Vol.20, 2004.
- 4) 藤田勇, 吉江宗生, 佐藤栄治, 水谷雅裕, 佐野正佳: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) I.Fujita, M.Yoshie, M.Mizutani, M.Sano, M.Fudo and M.Tatsuguchi, "An onboard vacuum suction spilled oil recovery system.", *Oceans '04/Techno-Ocean '04*, 2004.
- 6) Robert Schulze, *Oil Spill Response Performance Review of Skimmers*, ISBN 0-8031-2078-8.
- 7) 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.