

直轄作業船を中心とした 海上流出油対策に関する研究（其の二）

藤田 勇¹・馬場 智²・平澤 充成³

¹（独）港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 油濁対策研究チームリーダー
（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1）

² 本省港湾局 国際・環境課 課長補佐
（〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-3）

³ 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 所長
（〒651-0082 神戸市中央区小野浜町 7 番 30 号）

国土交通省港湾局が所管する直轄作業船を中心とした海上流出油対策の技術開発について紹介する。高粘度回収油の効率的なオフローディング技術として注水潤滑によるパイプライン輸送時の摩擦損失低減手法および同じく高粘度油対応技術として薬剤の使用に関する検討を説明する。

また、実際の油回収現場で得られた知見をもとに装置の改善を図るといった技術のフィードバックの例についても具体的な事例をもって紹介する。

キーワード 海上流出油、油回収船

1. はじめに

韓国泰安沖油流出事故に見るように流出油が海岸線に漂着した場合の被害は非常に大きくなる。このため回収処理あるいは分散処理等、洋上における早期な対応を行うことで油濁被害を最小限に抑える必要がある。その為の道具立てとして油回収船は非常に重要である。本研究では直轄作業船を中心としたこうした船舶のこれまでの在り方を分析し、また今後の役割、技術開発の方向性などを議論し、具体的な研究開発に繋げるものである。

初年度である平成20年度においては、韓国泰安沖油流出事故、明石海峡油流出事故などの事例研究、油濁防除における直轄作業船の役割をレビュー、これから求められる要素技術テーマについての研究を行った¹⁾。

その中で、今後の技術開発の方向性として、高粘度油のオフローディング技術の必要性、分散処理の活用の可能性、油回収船の清掃費用の縮減、乗組員の高齢化等が進行しているおり、現在以上に人力作業を軽減できる装置、作業をより簡素化できる装置の開発の要請、更には現場における経験を開発にフィードバックする必要性などが指摘された。

研究の2年度目にあたる本稿では、昨年度の研究で示された技術開発の方向性を踏まえた具体的な研究開発の

事例と、実際の油回収現場で得られた教訓のフィードバックの事例を紹介する。

2. 油濁対策における要素技術の研究開発

(1) 注水潤滑による管摩擦損失の低減²⁾

海上に流出した油は波浪により海水と混合されW/O型エマルジョンを形成し非常に高粘度の液体となる。このようなレオロジー的な物性変化は油濁防除活動の諸相において困難をもたらす。海上浮遊油の回収作業時に加えて、回収油を陸揚げする際にも容易にはパイプライン輸送ができないなど、高粘度油の扱いは極めて難しいものとなっている。1997年に発生したNakhodka号による油流出事故においては、大型油回収船「清龍丸」により大規模な油回収が行われた。回収油は寄港先においてパイプラインにより陸揚げを試みているが、回収タンク内の油は極度に高粘度化していたため、通常の方法ではタンク内から油を取り出し輸送することが難しかった。流動性を向上させるため、タンク内への蒸気注入によるバルクヒーティングが用いられた。1,000m³を超える大容量タンクのバルクヒーティングを行う為には、蒸気ボイラーを始めとする大規模な陸上支援を必要とした。しかしながら大規模油流出事故といった突発的な事態において常

に陸上支援が得られる保証はなく、任意の港において自力で高粘度油を陸揚げできるシステムは強く求められるところである。問題はパイプライン輸送における管摩擦損失が過大であることであり、摩擦損失を低減する手法が求められる。こうした問題の解決に向けて港湾空港技術研究所では注水潤滑による管摩擦低減手法の研究開発に取り組んだ。粘度の高い油の円管内流に少量の水を加えることで、油相と管壁面の間に水の薄い環状相を形成し潤滑を行うものである。

互いに混じり合わない二つの液体が円管内を流れる液液混相流では、各相の流速に応じて幾つかの流動様式が観察される。この中で管摩擦損失の低減の見地から興味深いのはCAF (Core Annular Flow) である。油水混相流の場合、CAFは図-1に示す様に管中心部にコアとなる油相と、その周囲を環状に取り巻く水相により構成される。このような系では高粘度の油相は水膜により管壁から隔離されるため、油単相流に比べて摩擦損失が小さくなるといった特徴がある。CAFに関する既往の研究は幾つかあるが、海上流出油の様にエマルジョン化した非常に高い粘度の油に対する研究事例は非常に少なく、本手法を油回収船に用いる上では、摩擦損失や注水量に対する定量的な把握が不可欠である。

研究では図-2に示す実験装置を用いて、高粘度のエマルジョン化C重油（粘度39,000~180,000mPa.s）を供試油とした場合の管内圧力損失を注水率を変えて測定した。実験は図-3の流動様式線図で示す様に、注水率

$$\varepsilon = \frac{Q_W}{Q_c + Q_W} \quad (1)$$

が、およそ0.015から0.35の範囲で行った。ここでここで Q_w は水の流量であり、 Q_c は油の流量を表す。実験では油、水各々の単相流についても圧力損失を測定した。油単相の場合に比べて、注水を行った場合は圧力損失は各段に小さくなることが観察された。注水量と圧力損失の低減効果を定量的に表現するために、本研究では油水混相流と水単相流の場合の圧力損失比($\Delta P_F/\Delta P_W$)が

$$\frac{\Delta P_F}{\Delta P_W} = \varepsilon^{-m} \quad (2)$$

の様に注水率のべき乗で表されるとする簡易なモデルを提案した。実験結果との比較より $m=2.15$ とした場合、図-4に示す様に式2が注水の効果を比較的良く表現できることが分かった。

実用上は要求される油輸送量に対して使用する管径及び注水量を決定する必要がある。油の量に対して注水量には最適値が存在する。注水量が少ない場合には十分に発揮されない。一方注水量が多すぎる場合には、管内流速が大きくなり圧力損失が大きくなる。計算の結果注水量は油の量に対して10~20%が最適であることが分かつ

た。この結果を用いて100mのパイプライン輸送を行う場合の管摩擦による圧力損失を見積もった結果を図-5に示す。図は注水割合が油に対して10%の場合であり、たとえば125Aの配管を用いれば約0.1MPaというポンプサイドからみて十分現実的の圧力損失で時間当たり100m³の大流量のオフローディングが可能であるとの試算ができる。大型油回収船における高粘度油のオフローディングに活用できる技術である。

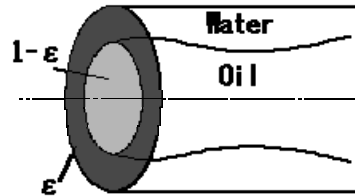


図-1 CAF (Core Annular Flow) の模式図

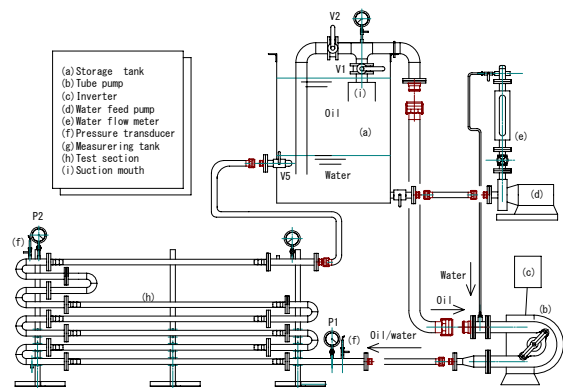


図-2 高粘度油の注水潤滑実験装置

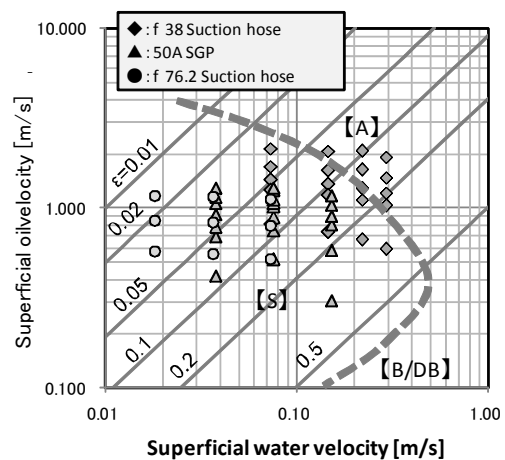


図-3 実験条件と流動様式

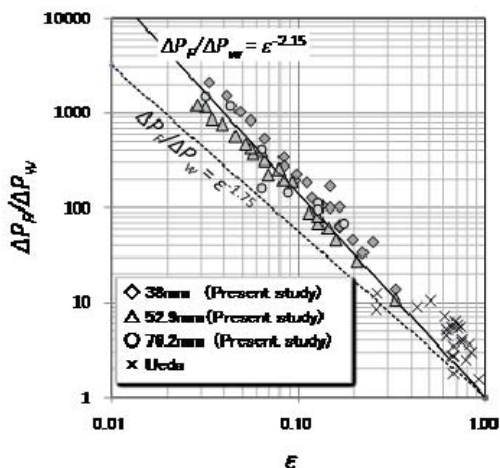


図-4 圧力損失比と注水率の関係

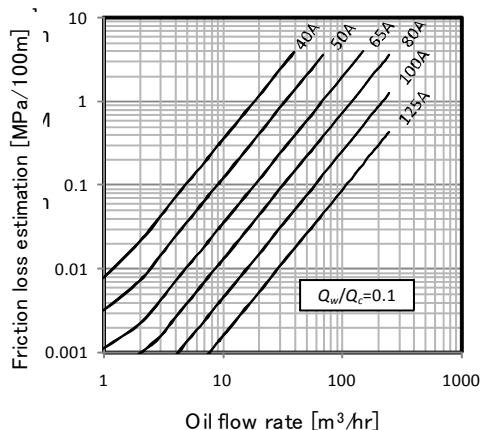


図-5 注水潤滑による高粘度油の長距離搬送

(2)薬剤添加による高粘度油対応³⁾

前節では注水といった比較的簡易な方法による高粘度対応技術を紹介した。油流出油が高粘度化する主な原因はW/O型エマルジョンの形成にある。いったん形成されたエマルジョンは自然な状態においては安定しているが、ある種の界面活性剤を添加することで安定性を壊して油相と水相に分解することができる。エマルジョンの分解に伴い粘度が低下するため、回収油をパイプラインにより排送する際にエマルジョンを分解すれば、注水潤滑同様圧力損失を低減することができる可能性がある。薬剤によるエマルジョン分解においては油処理剤による分散処理同様、薬剤と油の攪拌が大きな鍵を握る。B型粘度計を用いた試験によると、薬剤添加後の粘度の低下は粘度計の回転数が大きい程大きくなる。粘度の時間経過に伴う変化を、

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \quad (6)$$

の形で表すと時定数 t_0 はブリー速度 $\dot{\epsilon}$ の冪関数として、添

加する界面活性剤の種類によらず、おおよそ、

$$t_0 = t_0(\dot{\epsilon}) = C \dot{\epsilon}^{-2} \quad (7)$$

であることがこれまでの研究から分かった。このことは薬剤添加によるエマルジョン分解の速度が攪拌によって散逸されるエネルギーに比例することを示すものと考えられる。

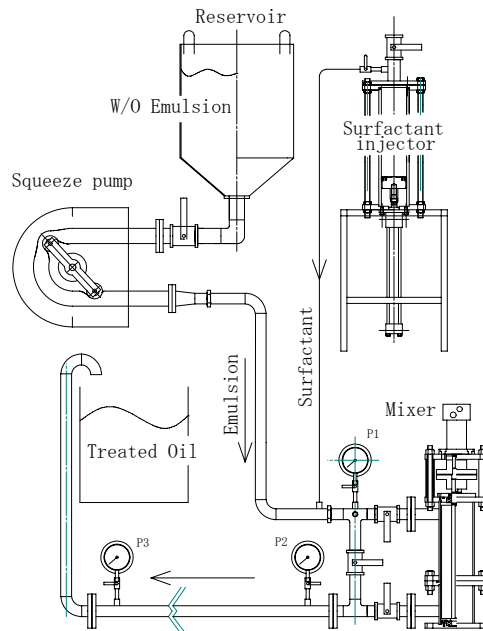


図-6 インラインエマルジョン分解実験装置

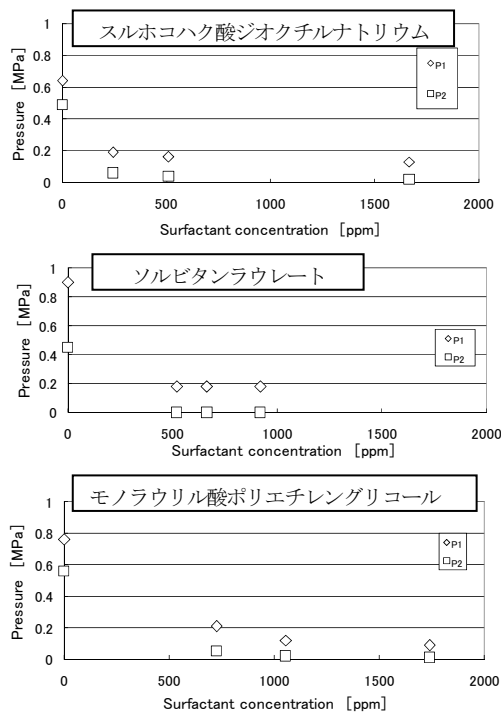


図-7 薬剤による圧力損失の低減

そこで、回収油の陸揚げ時にインラインで使える装置の開発を目標に、図-6に示す機械式の攪拌装置を組み

込んだ小型模型を試作し、複数の界面活性剤との組み合わせにおけるエマルジョン分解の効果を実験的に検証した。添加剤として(1)スルホコハク酸ジオクチルナトリウム、(2)ソルビタンラウレート、(3)モノラウリル酸ポリエチレングリコール等の界面活性剤の希釈液を用いたところ、薬剤の添加により図-7に示す様な管内圧力の低下が観察された。

注水潤滑は簡便であり、設備上の制約も少ないというメリットの半面、添加した水の量だけ処理しなければならない廃油水の量を増やす、陸上上げた油はエマルジョン状態のままであるため、陸上の仮設タンクでは再度高粘度状態になるといったデメリットがある。薬剤添加による方法は水と比べて薬剤が高価である、装置が複雑になるといったデメリットがある反面、エマルジョンを分解してしまうために陸上仮設タンクないでは高粘度化しない、油水分離がすでに進行しているため、その後の搬送処理が容易であるといったメリットがあると思われる。図-8は薬剤処理した油にアクリルの板を浸して引き揚げた様子であるが、表面への油の付着があまり認められない。回収作業後の油回収船の清掃には大きな時間、労力、費用が発生するが、このような薬剤を用いたエマルジョン分解がタンク内壁への油の付着性を緩和するとしたら、課題解決への技術的な糸口になっていく可能性もあると思われる。



図-8 薬剤処理された油の付着性

とは状況によっては困難であり、回収と油処理剤による拡散処理とをうまく組み合わせて対応していくことが必要となる。油処理剤の使用に関する世界的な潮流においても、これまで使用を禁止していたデンマーク、スウェーデン、フィンランドなどの国が油処理剤の使用に門戸を開くなどの動きをみせている⁴⁾。現有の海洋環境整備船における流出油対応は洋上回収を主として、拡散処理については放水銃や航行による補助的手段に留まっているが、拡散処理においても活用していくことができれば、流出油に対するレスポンスのオプションが増えることになり、油濁による海洋環境の被害を低減することができる。たとえば現状における分散処理が適用できる流出油の粘度は1万cSt程度までであるが、これは海面上の漂流油に薬剤を散布した場合の、いわば解放系における処理限界である。一方管路内といった閉鎖系においては分散に必要な混合のエネルギーを強制的に与えることが可能であり、適用粘度範囲を従来以上に広げることができる可能性がある。このような観点から図-9に示すように、従来の浮遊堰式油回収機に高圧水エダクタを組み合わることで、高粘度油の分散処理を可能にする装置の研究開発に取り組んでいる。

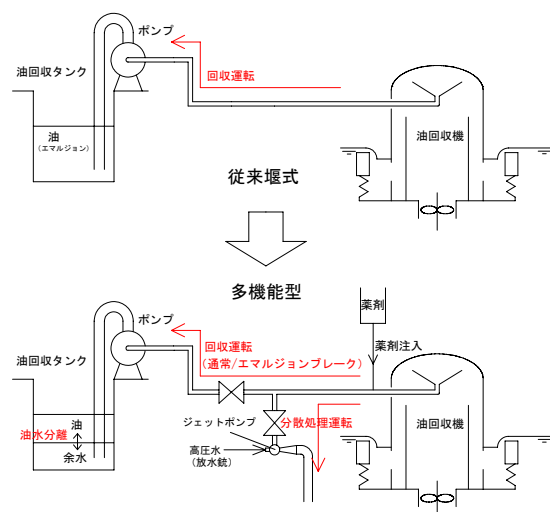


図-9 多機能型油回収処理機のコネプト

(3) 多機能型油回収処理機の可能性

更に港湾空港技術研究所においては、油回収船の機能増強の観点から高粘度油の分散処理の可能性の検討を行っている。エマルジョンの分解と流出油の分散処理は界面化学的には似通った技術であり、上で述べたエマルジョン分解に関する結果は高粘度の分散処理の可能性にもつながっていく。日本の油濁対応のプライオリティは第一に回収であり油処理剤の使用はセカンドプライオリティとなっている。これは、油処理剤剤の使用については、環境影響等への慎重な配慮が必要となるため、一般的に見ても妥当な戦略である。

しかしながら実際には回収のみで流出油に対応するこ



図-10 環境整備船Dr.海洋

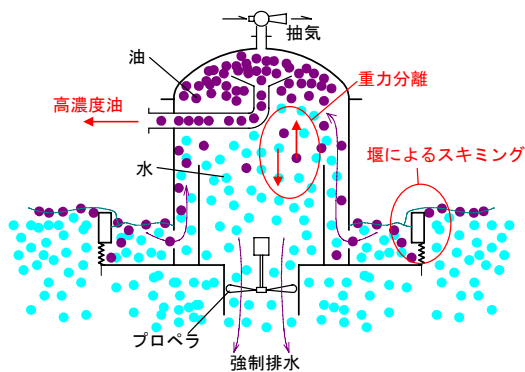


図-11 浮遊堰式油回収装置

3. 油回収現場からの技術フィードバック⁴⁾

(1) 環境整備船Dr.海洋

前章では、研究サイトにおける油濁対策に関する要素技術の開発と油回収船への応用という流れを紹介した。一方、国内に沿岸域における油による汚染は年間300件程度報告されているが、そのほとんどは軽微なものであり、油回収船の出動が要請されるケースは数が限られる。このため、実際の油回収現場における経験は非常に貴重なものとなる。得られた体験は技術的工学的に咀嚼され、装置の改良、あるいは次の研究開発に遅滞なくフィードバックされなければならない。ここではそのような例として環境整備船Dr.海洋のケースを紹介する。Dr.海洋(図-10)は神戸港を母港とする環境整備船であり、海面浮遊ゴミの回収、海上流出油の回収、環境調査などを行う多機能船として2007年3月に就航した。油回収機能としては低中粘度用油回収機と高粘度用のネットコンベア式油回収機を搭載している。低中粘度用の油回収機にはDr.海洋用に新規に開発した浮遊堰式油回収機を採用している。図-11に示す様にスキマーと重力式油水分離装置を一体化することで、従来の堰式スキマーでは不可能であった高濃度の油回収を実現するものであった。その性能は港湾空港技術研究所の油回収実海域再現水槽において実機を用いた試験により確認している。Dr.海洋は2008年3月5日に発生した明石海峡における油流出事故の際に実戦投入され油回収作業を行った。高濃度油回収という装置の特徴は実海域における油回収でも発揮された一方、実海域特有の課題があることが判明した。これを受けて2008年度に装置の改良を行っている。

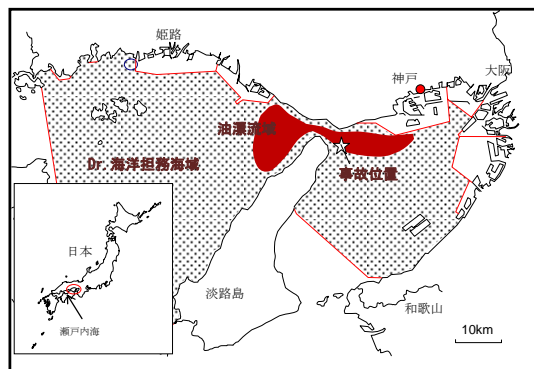


図-12 明石海峡油流出事故状況 (2008.3.6朝)

(2) 明石海峡油流出事故におけるDr.海洋の油防除作業

平成20年3月5日14時55分頃、神戸市沖の明石海峡で船舶3隻による多重衝突が発生し、ベリーズ船籍の貨物船ゴールドリーダー(1,466t)が沈没する事故が発生した。沈没船からは約40キロリットルのC重油が漏洩、周辺海域に広がったため最盛期の海苔漁やイカナゴ漁に影響を与えた(図-12)。

近畿地方整備局および神戸港湾事務所は神戸海上保安部から油防除の出動要請を受け、警戒体制を発動し、3月6日早朝からDr.海洋による油回収作業を開始した。明石海峡は最大7ノットの潮流があり、時間によって潮の向きも東西入れ替わるため、漂流油の捕捉が難しい状況であったが、3月6日には油水1.3m³、7日には1.0m³、8日は1.1m³、3日間合計で3.4m³を回収した。その後は油膜が薄くなったため放水銃による拡散へと油防除作業方針を転換した。拡散作業は5月16日まで続いた。注意体制が解除される10月7日までの期間は、油の探査を行うとともにゴミ探査・回収作業を行った。



図-13 ストレーナの清掃

(3) 油回収機の改良

Dr.海洋に搭載されている浮遊堰式の油回収機は開発目標であった高濃度油回収という点では明石海峡油流出事故においても予想通りの性能を発揮した。しかし、実海域における回収作業では水槽試験にはないゴミの問題が潜んでいた。海藻や木片あるいは葦類といった小さな

固形物が高粘度化した油と混ざり、油回収管を閉塞するトラブルが発生した。そのため現場では詰まった油管やフィルタの清掃作業に多くの時間を割かざるを得なかった(図-13)。こうした事故対応の経験を生かし、さらなる油回収効率の向上と、作業性の改善を目指し、以下に示す改良を加えた。

a) ストレーナの変更

当初設計においてもゴミ対策はある程度考慮しており、油吸引ポンプ前には複式ストレーナを設置していた。複式ストレーナの場合、片側のストレーナに詰まりが生じた場合、もう一つのストレーナに切り替えて、その間に詰まりの生じたストレーナを清掃するというのが基本的な戦略になる。しかしながら使用したストレーナは既成品のものであり、濾過面積、メッシュサイズともに必ずしも油回収に適したものとは言えず、弁を切り替えてもすぐにメッシュに詰まりが生じてしまうことになった。こうした問題を解決するために、新たに油回収機に適したごみ取りストレーナの設計を行った。第一にストレーナの容積および濾過面積を増やした。これにより許容できるゴミの量が増え、ストレーナが機能不全に至るまでの時間を長くすることができる。メッシュの穴径も油吸引ポンプが許容できる固形物直径20mmまで拡張することとした。作業性の向上に関しては、ストレーナに詰まりが生じた場合にも迅速に清掃作業が行えるように容器の蓋はレバー式の開閉にし、スパナー等の工具が必要無い形とした。メッシュ板自体も一体型とはせず詰まりの生じた部分のみを分割して取り出せる形とした。更に詰まりが生じたかどうかの判断の為圧力計によるモニタリングができるように改良を行った(図-14)。

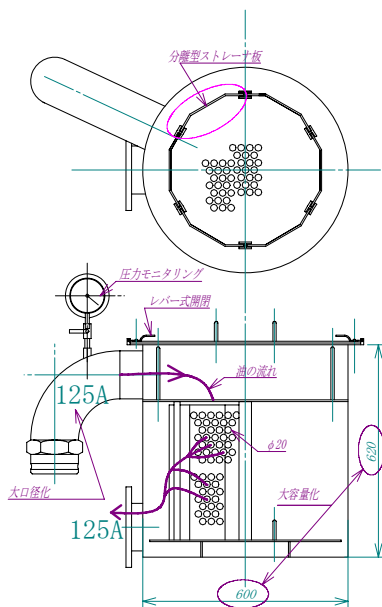


図-14 改良型回収油ストレーナ

b) 配管の見直し

油吸引ラインの管径の見直しを行った。従来は80Aを用いていたがそれを125Aにサイズアップした。更に閉塞が生じやすいU字管部は分解清掃作業が迅速に行える様にカムロック等によるワンタッチ着脱式に変更した。また管路途中にも圧力計を設置し、閉塞部分の特定ができるように改造した(図-15)。

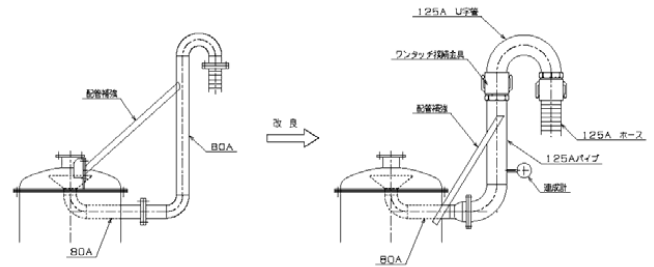


図-15 配管の改良

c) 本体部の変更

油吸引管内にゴミを吸い込まない様にベルマウス状の吸引口部に35mm間隔の柵状のゴミよけを配置できるように改造した。また、吸引口部でゴミの詰まりが生じた場合でも内部の清掃作業を容易にするため鏡板の開閉は蝶番式とするとともに、軽微な詰まりに対しては新たに設置した小窓から対応できるように改良加えた(図-16)。

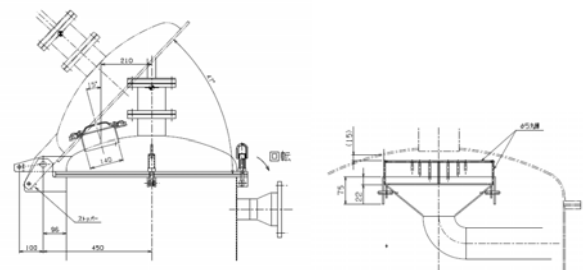


図-16 本体部の改良

以上の様に実際の油回収現場での貴重な経験を踏まえて、問題解決のための改良を加えた。このように装置のブラッシュアップを行ったことで、今後は更に作業効率や安全性が向上し、油回収機が本来持っている能力を低下させることなく、継続的に作業を行うことが可能になったと考える。

更に今回得られた知見は新たに建造される環境整備船の油回収機の設計にも反映していくこととした。油回収機の様には日常的に使用することの少ない危機対応型の機器においては、現場経験は非常に大切であり、そこで得られた知見は漏れることなく、装置、操作法、あるいは次期の開発へとフィードバックされていかなければならないが、本例はその一つとして紹介した。

4. まとめ

国土交通省港湾局においては、海上における油流出事故による被害発生に備えて、大型浚渫兼油回収船および環境整備船による油濁対応体制をとっている。こうした油回収船の機能を常に高いレベルで維持するために研究開発並びに機器の改良を積極的に行っている。本稿においては技術開発の視点から、近年行われた研究開発の例ならびに現場経験からのフィードバックによる装置の改良の例を紹介した。

参考文献

- 1)藤田勇・加藤 利弘・平澤 充成、直轄作業船を中心とした海上流出油対策に関する研究、平成 20 年度国土技術研究会
- 2)藤田勇・竹崎健二・松崎義孝・加藤由朗・柿崎慶治、注水による重油エマルジョンの管内摩擦損失の低減に関する研究、平成 21 年度海洋開発シンポジウム
- 3)Isamu Fujita, Experimental Study on Emulsion Breaking of Water in Oil Emulsion and its Application to Viscous Oil Offloading, InterSpill'09
- 4)EMSA, Inventory of national policies regarding the use of oil spill dispersants in the EU Member States.
- 5)玉井和久、明石海峡油流出事故における「Dr. 海洋」の対応と改良について、平成 21 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集