

蒸気吸引式流出油回収方法

OIL RECOVERY WITH STEAM-DRIVEN EJECTOR

藤田勇¹・吉江宗生²・竹崎健二³

Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE and Kenji TAKEZAKI

¹正会員 博(工) (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(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)

An application of steam-driven ejector to oil skimming devices has been experimentally examined. Formation of W/O emulsion gives the spilled oil very high viscosity occasionally up to 1,000,000 mPas as well as volume inflation. The change of rheological behavior makes an on-site oil recovery very difficult. The steam-driven ejector has potential advantages which are seldom seen in other conventional oil skimming devices to overcome the difficulties. Rapid heating accompanied by condensation of the steam can enhance the flow of the high viscosity spilled oil inside the suction pipe. Super sonic steam flow in the ejector may provide very strong mixing energy required for emulsion breaking when some chemical agents are employed. A small-size model of the steam-driven suction skimmer was designed and its basic suction recovery performance was experimentally tested. The tests included various aspects such as an oil recovery rate, an oil/water ratio, a steam consumption rate as well as sensitivity to wave. It is concluded that the steam-driven ejector system may be a good option for oil recovery or response.

Key Words : Oil spill response, Steam-driven ejector, Oil skimmer, Emulsion break

1. 諸言

海上流出油の回収作業においては, 多様な油回収機(スキマー)が用いられる。代表的なものとしては堰式, 親油性の表面を持つ円盤を回転させるディスク式, ブラシ式, あるいはネットコンベア式などを挙げることができる¹⁾。このように多様な形式のスキマーが存在するということは, 逆にいうと一つの形式のスキマーをもってあらゆる状況には対応しきれないということの証でもある。状況を困難にしている要因の一つとして粘度の問題がある。海上においてタンカーや貨物船から油が流出した場合, 流出油は風化によりその性状が時間と共に変化する。軽質油成分は蒸発等により失われ, 主に重質成分が海面上に残留する。残留した重質油は波浪等の影響により海水と混合され, 内部に海水を滴状に取り込んだ油中水型(W/O型)のエマルジョンを形成する。海象条件にもよるがC重油の流出の場合, 12時間から24時間経過した段階で, 50~60vol%の水を取り込み, 100,000mPa.sを超える非常に高い粘度を示すようになる。上に挙げたスキマーは各々粘度に対してOperation windowを持っている。流出油の風化の程度進行を正確に予測し, それに適したスキマーを選択するのは簡単なことでは無い。低粘度から高粘度までをカバーできるスキマーは強く望ま

れるところである。

流出油の回収におけるもう一つの問題には, 体積の増加がある。風化油は内部に多量の海水を取り込んでいるのが普通であり, 一見全てが油の様に見えても, 成分としては, その実半分程度が海水である。流出油の回収において油回収槽が満杯になったとして, その半分が海水ということになる。もし流出油の回収現場において風化油のエマルジョンを分解して, 真に油分のみを回収することができれば, 従来と同じ規模の船で実質的には倍程度の流出油を回収処理できることになる。

著者等は上記の二点を同時に解決する手法として, 熱流体である水蒸気を作動流体とする蒸気エジェクタの使用に着目している^{2), 3)}。蒸気エジェクタは, 噴流ポンプの一種で構造が単純で故障が少なく, 気体, 液体, 粉粒体のいずれも吸引搬送が可能であり, 基本的に気液の境界面に浮遊している油塊の吸引に適していると思われる。こうしたポンプ仕事に加えて, 作動流体として水蒸気を用いることで, 熱的な副次効果を期待できる。液体の粘度は温度に強い依存性を持っており, 蒸気エジェクタ吸引における急速加熱によって, 回収油の流動性は飛躍的に改善される。またエマルジョンの分解に関しても, 蒸気エジェクタは有利である。蒸気エジェクタは内部に非常に強い剪断流れを伴っており, それが, エマルジョン

の分解に必要な薬剤との混合の促進に寄与することが予想される。

このように、幾つかの利点を持つ蒸気エジェクタであるが、実際に漂流油の回収に用いた場合、装置としてどのように構成し、またその際の程度の性能が期待できるのかについては検討しなければならない。本研究では、この点に関して、基本的な模型を設計試作し、実油を用いた油回収模擬試験を行い、蒸気エジェクタ式油回収装置の実現可能性について検討した。模型は想定実機の1/2スケールとし、大型油回収用試験水槽⁴⁾(STORMS)において性能試験を行った。

2. 試験模型と試験方法

試験用システムの系統図とスキーマ部分の写真を図-1に示す。主な構成は、蒸気ボイラー、レギュレータ、蒸気エジェクタを備えた浮体式スキマー、気液分離器、ドラム缶およびそれらを接続する配管からなる。

蒸気ボイラーで発生した高圧の水蒸気はレギュレータにおいて所定圧に調整されたのち、スキマーの蒸気エジェクタに送られる。本研究で用いたエジェクタの断面を図-2に示す。蒸気はエジェクタの一次ノズルの中で膨張し、負圧の超音速流となってノズルより吹き出す。高速気流は周囲の流体を巻き込み、混合セクション内部に流れ込み、再び圧力を回復して正圧の低速流となって排出される。蒸気は超臨界膨張を行うため、一次ノズルとしてラバルノズルを用いている。ノズルの喉部の直径 D_t は10mmである。蒸気エジェクタは吸引口を水槽の上流に向けた形で、側面及び背面を鋼製の集油板に囲まれた領域の真ん中に配置した。集油板と吸引口部は発泡スチレン製の浮体により水面上に浮かんでおり、配管途中に設けた軸を中心とした回転により、波に追従できるようにしている。蒸気エジェクタによって吸引された油はサイクロンに導かれ気体と液体に分離される。液体は下方に配置されたドラム缶に溜る。装置の寸法は油水回収管の管径で代表できるとすれば、本模型では40mmが代表寸法になる。

性能試験は油回収専用の実験水槽STORMS (Simulation Tank for Oil Recovery in Marine Situations) において行った。実験中の写真を図-3に示す。鋼製の集油板の先から上流側に向かってプラスチック製の集油ブームを接続した。上流より調製した試験油を散布し、装置による回収実験を実施した。実験では、油水回収量、回収油の含油率、蒸気消費量、波浪中における性能の変化等を計測した。また、図-3にあるように上流側に放水銃を設け、放水による集油効果、回収促進効果の有無について検証した。試験油はC重油と真水を混合した、W/O型エマルジョンを用いた。粘度はB型粘度計により測定し、20℃、ずり速度10[1/s]において13000mPa・sを示した。試験水槽の水温は約10℃であった。

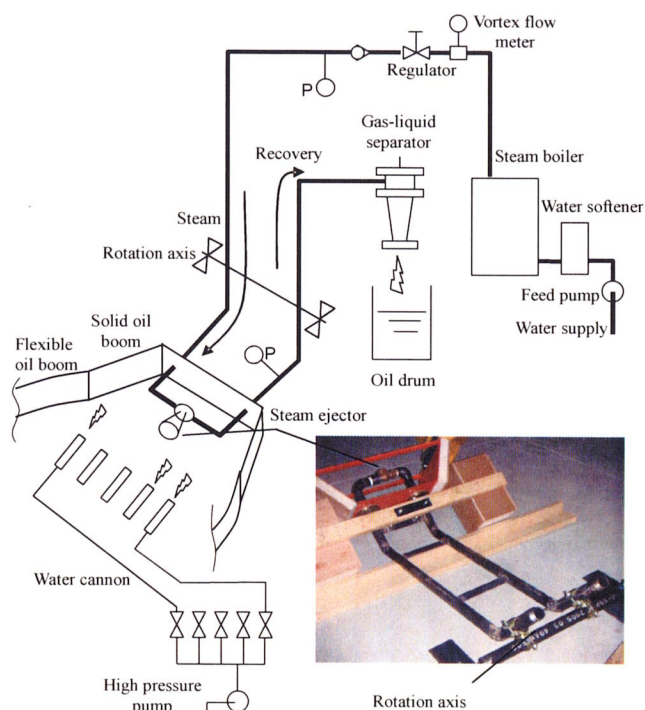


図-1 実験モデルのシステムとスキマー部の写真

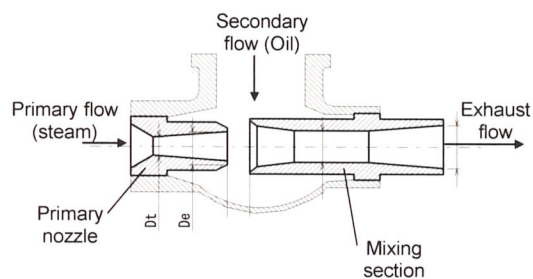


図-2 エジェクタ断面

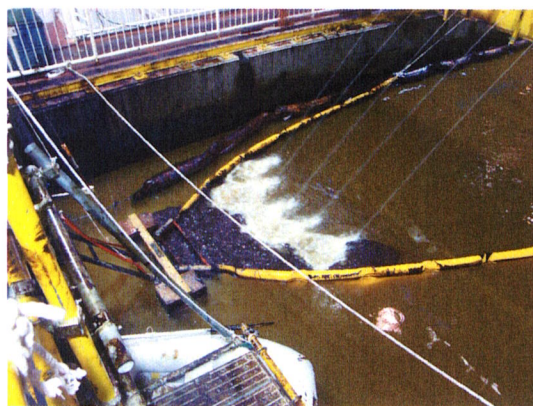


図-3 STORMSにおける模型試験の様子

3. 実験結果と考察

(1) 水吸引試験

はじめに、油を散布しないで、水のみを吸引する試験を行った。試験では、吸引口の水面に対する相対位置を変え、空気の混入による水の吸引特性の変化を計測した。ジェットポンプの特徴として、多様な吸引物に対応できることがあげられる。こうした特性は定性的には気液混合吸引が起こり易い浮遊油の吸引除去に基本的には適していると考えられる。一方で定量的には、空気の混入がどの程度液相の吸引に影響を与えるのかを把握しておく必要がある。実験の結果を図-4に示す。吸引口の水没率をパラメータとして蒸気圧力を変化させた場合の液吸引量をプロットしている。水没率は図に示したように水中に吸引口の高さの割合として定義している。図から分かる様に、水没率が100%の場合、すなわち空気混入が無い場合には、0.35MPaの蒸気圧で10000kg/hrの吸引量が得られたのに対して、空気混入がある場合、例えば水没率が比較的高く88%ある場合でも、液体の吸引量は3000kg/hrとなり、著しい減少を示すことが判る。このことは、エジェクタの吸引口は、水面上に顔を出さないで、完全に水没する位置に設置しなければならないことを示している。反面、水面に薄く広がっている油膜を吸引することを考えた場合、下の水を多く吸引することに繋がる為、余り歓迎されることでは無い。しかしながら、後述するように、油膜厚を大きくする補助的手段を併用してやることで、こうした弱点は十分に克服でき、蒸気エジェクタを流出油回収に用いることは十分に可能である。

(2) 油回収試験

次に実際に水槽に試験油を散布し、今回試作した蒸気エジェクタ式油回収装置により回収する実験を実施した。エジェクタの吸引口の位置は100%水没状態とした。水槽の水面近傍の流速として0.5knot（約25cm/sec）を与えた。回収実験は二通りの方法により行った。一つは、放水銃による浮遊油の操作を行わない方法であり、もう一つは放水銃を用いて、油膜操作を行った場合である。この場合、図-3に示す様に上流側斜め上より複数個の水ジェットをスキマー側に向かって放水した。回収した油と水の合計量を図-5に示す。△が放水を行わない場合で、○が放水を行った場合である。放水を行わない場合の方が、回収油水量が大きいことが分かる。このことは一見すると、放水が油回収に悪い影響を与えているかの様に思われるが、実際にはそうではない。回収油水の内正味の油分に着目すると、全く逆の結果が得られる。図-6に油成分のみの回収量の計測結果を示す。放水を行わない場合の油回収量は500kg/hrを下回っているのに対し、放水を行った場合は2500～3500kg/hr程度の油回収量が得られており、放水により、油回収量が大幅に改善されていることが分かる。これを回収物中の含油率で見たのが、図-7である。放水を行わない場合の含油率は0.1を下

回っているのに対し、放水を行うことで含油率は0.4～0.6程度まで向上していることが分かる。放水によって油膜を下流側に寄せ集め膜厚を増すことができる。油膜を厚くすることができれば、吸引口が水面下にある程度没していても、高い含油率を維持しながら、油の吸引除去が可能である。通常の堰式スキマーでは高い含油比の回収を行う為に、油層のみが堰を越える様に堰高の調整を行うなど工夫をしているケースを見るが、波浪中では越波により海水も同時に堰を越えて流入してくることが多く、高い含油率を維持することが難しいのが現状である。また高い粘度の油になると堰自体が流動抵抗となり油が堰内部に流れ込まなくなり、収率が極端に落ちることが多い。その様に考えると、本実験の様に、吸引口には特別な機構は設けずに、放水銃により油膜の制御を行う方式も現実的な解であると思われる。改めて油の回収量を見ると、今回の模型の2倍を実機の寸法とすれば、実機での流量は模型の4倍になり、10～14 ton/hrの油の回収が期待できることになる。この値は200GTクラスの海面清掃油回収兼用船に一般的に求められる油回収能力にほぼ匹敵するものである。

次に波浪中の油回収性能について見る。油回収機にとって波浪の影響は重要である。平水中において良い性能を示す機械であっても、波浪中においては、越波により含油率が低下したり、あるいは装置前縁における波の反射により油が思うように装置に流れ込まれなくなるケースなどが時に見受けられる。本模型における波浪の影響の例を図-8に示す。波高120mmまでの波をいろいろ周期で与えた場合の自由水を含まない正味の油の回収量を計測したものである。波高の増大に伴って多少の回収量の低下が観察されたが、左程顕著と言う訳ではないように思われる。含油率の測定結果を図-9に示す。波高の増加に伴って値のばらつきが若干大きくなる傾向が見られたものの、比較的高い含油率を維持することができた。波浪の影響はスキマー部分の浮体としての動特性などが絡むため、今回の小型の模型実験の結果がそのまま大型実機の特性に直接読み替えられるわけではなく今後の検討を要する部分であるが、今回の結果は模型を用いた一次評価としては、悲観的なものではないように思われる。

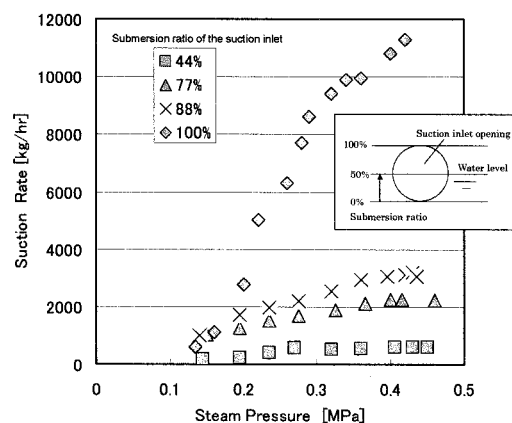


図-4 吸引口位置による吸引液体量の変化

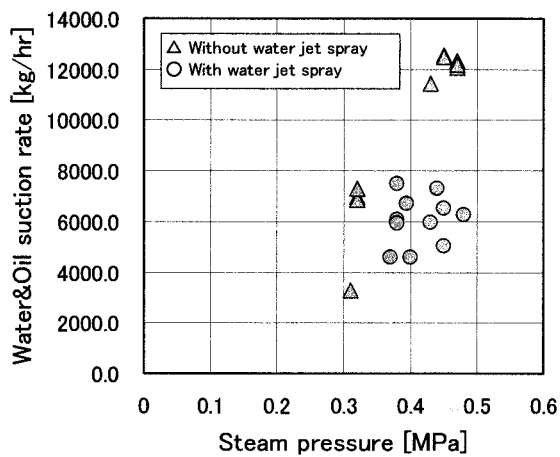


図-5 油水回収率

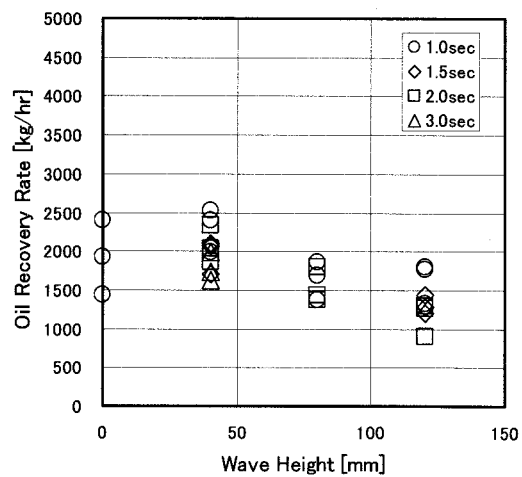


図-8 油回収率への波浪の影響

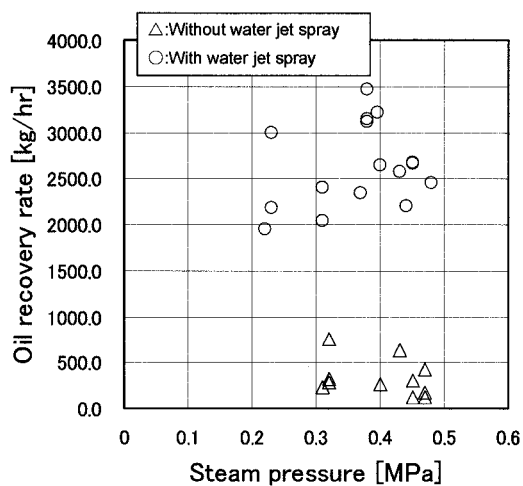


図-6 水を含まない正味の油回収率

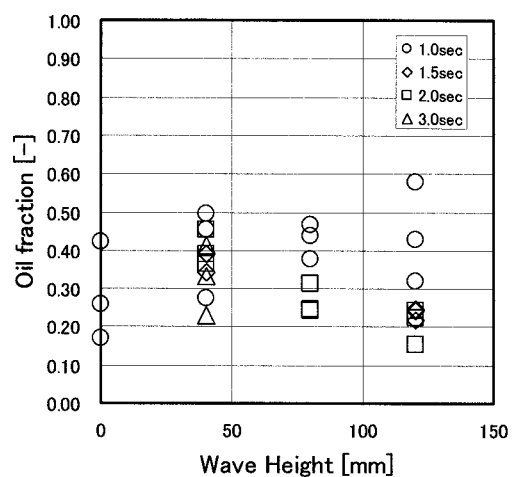


図-9 含油率への波浪の影響

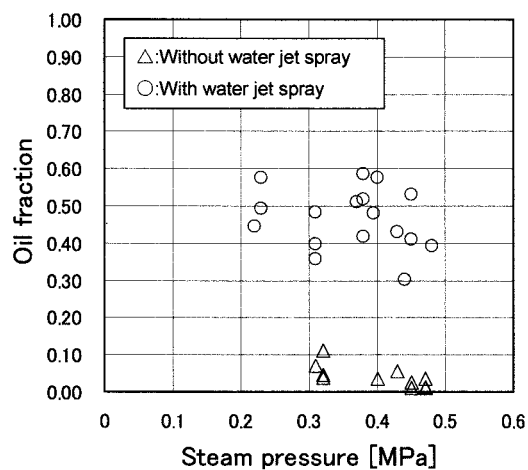


図-7 含油率

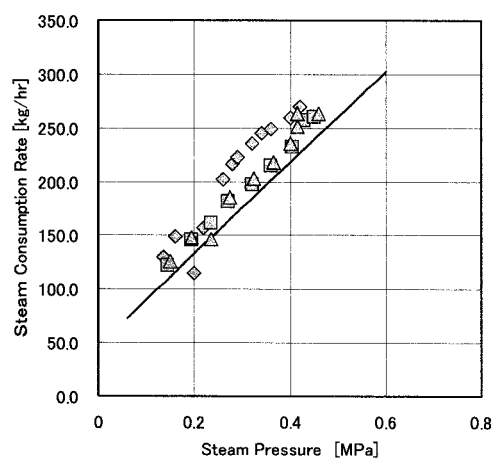


図-10 蒸気消費率

蒸気の消費量を図-10に示す。図中の点は実測値で線は理論値を示す。異なるシンボルは吸引口の水没率の違いを示す。多少の偏倚はあるが、いずれも理論値と一致している。蒸気圧0.35MPaにおける蒸気量は220kg/hr程度であった。これと図-5から7の結果を合わせると、大型実機における主要目が表-1に示すように得られる。

表-1 模型実験の結果と想定実機の主要目

	Test model	Expectation
Scale factor [-]	1/2	1/1
Total Oil and water recovery rate [m ³ /hr]	6	24
Oil fraction [-]	0.4-0.6	0.4 to 0.6
Suction pipe diameter [mm]	40	80
Steam consumption rate [kg/hr]	220	About 1000
Fuel consumption rate [kg/hr] *)	13	About 60

*) Assuming kerosene for the fuel oil

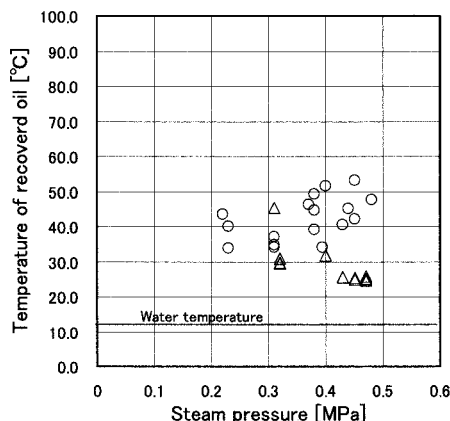


図-1 1 蒸気エジェクタ吸引における回収油の温度上昇

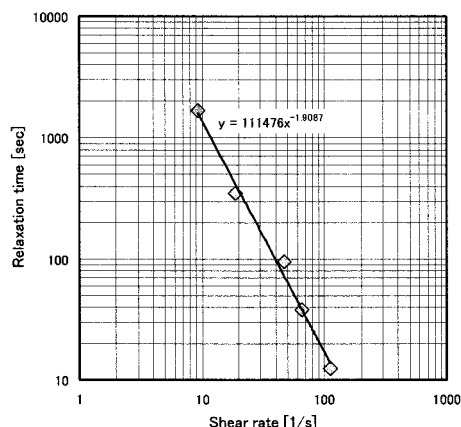


図-1 2 エマルジョン分解時間とずり速度の関係

(3) 蒸気エジェクタ方式の利点

以上見てきた様に蒸気エジェクタによる吸引は浮遊油の吸引除去に使用できることが分かった。蒸気エジェク

タを用いることのメリットは緒言にも書いたように、その効果が単なる油の吸引に留まらない点にある。直截的な効果としては急速加熱をあげることができる。水蒸気はエジェクタ内部で凝縮し水に相変化する。その際1kg当たり約2400kJの潜熱を放出するため、瞬間的に吸引流体を加熱昇温することが可能である。実験における昇温特性を図-11に示す。エジェクタにより回収した油は水槽の水温に対して20から30℃前後の温度上昇が認められた。エマルジョン化した油は通常非常に高い粘度を有し、スキミング並びにスキミング後の油水分離や、船外排出といった後工程をも困難にしている。バルクヒーティングやローカルヒーティングあるいは水インジェクションなどの手法がこうした後工程における問題解決に用いられている。蒸気エジェクタによるスキミングにおいては、吸引と同時に加熱昇温を実現することができ、回収油の粘度が飛躍的に低くなるため、上記の様な方法に頼らずに後工程における困難を回避することができる。

こうした昇温による流動性の向上に加えて、薬剤との組み合わせにより、更に先端的な油濁対策技術の創出の可能性を蒸気エジェクタは有している。エマルジョン化油は高粘度であると同時に、多量の水を内包している。このようなエマルジョン化水を現場において分離し、正味の油分のみを回収することができれば、タンク容量が同じでも約倍あるいはそれ以上の流出油を回収処理することができるようになる。このようにエマルジョン化水を分離（エマルジョンブレイク）するためには、界面活性剤等の薬剤添加を行う必要がある。どのような薬剤が適しているのか等の研究は別途行っていく必要があるが、一方で、エマルジョンブレイクの速度は高粘度のエマルジョン化油においては通常余り速くなく、如何にして反応を促進するかといった点が大きな課題である。著者等はこの点に関連して基礎的な試験を行った³⁾。狭い平行平板内のせん断流れ（クエット流）においてどのような条件がエマルジョンブレイクの促進に寄与するかを実験した。そこでは活性剤濃度、温度、ずり速度等をパラメータとしたが、最も注目すべき条件はずり速度、すなわち攪拌エネルギーであった。クエット流れ内のエマルジョン化油の粘度の時間変化を界面活性剤添加後に連続的に計測し、粘度変化を一次反応として次式で回帰した。

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right), \quad (1)$$

ここで、 μ は粘度、 t は経過時間、 t_0 は変化の時定数であり、粘度が初期状態に比べて1/eになるまでの時間であり、反応の速度の指標となる。実験によると時定数 t_0 は流れのずり速度 $\dot{\epsilon}$ [1/s]に強く依存していた。例を図-12にあげる。これはGEMTEK社製のSC-1000を用いた場合であるが、この場合反応の時定数 t_0 がずり速度 $\dot{\epsilon}$ の-1.9087乗に比例していることを示している。他に複数種の界面活性剤により同様の実験を行ったが、冪指数はい

ずれも概ね-2前後であった。クエット流におけるエネルギーの散逸率はずり速度の自乗であることを考えると、エマルジョンの分解速度として

$$t_0 \propto \dot{\epsilon}^{-2} \propto \frac{1}{[\text{Energy dispersion rate}]}, \quad (2)$$

がかなりの確度で成り立つのではないかと想像できる。すなわち、高速でエマルジョンを分解するためには、強い攪拌エネルギーが必要だと言える。蒸気エジェクタに視点を戻して考える。エジェクタ内部には蒸気の超音速の噴流が存在し、周囲にせん断領域を伴っている。その強さは上で述べたクエット流の実験の比ではなく、エマルジョンの分解に必要なエネルギーをほぼ瞬時に与え得る強さであると考えられる。従って、少量の界面活性剤を駆動蒸気に添加するか、あるいは油と同時に吸引するかなどしてやれば、回収除去とほぼ同時にエマルジョンを分解できる可能性が高いと考えられる。また薬剤としてエマルジョンブレーカでは無く、一般の分散剤を用いることも考えられる。一般的に分散剤による拡散処理は低粘度流出油に限られるが⁵⁾、これは高粘度油では、反応の進行に必要な攪拌エネルギーを得にくいと想定される。蒸気エジェクタと組み合わせることで、強大な攪拌エネルギーを与えることができ、分散剤による拡散処理の適用範囲を高粘度油にまで広げることができる可能性も大きい。この場合、従来の様に海上といった開放系において直接散布するのでは無く、装置内部で添加する為、薬剤の使用量を必要十分な最小量に抑えることができる等のメリットもある。

4. 結言

本稿究では、流出油回収における水蒸気の利用という新しい着想の有効性について検討を行った。特に流出油の回収除去への応用に主眼をおき、吸引除去装置の試作検討、実験機の制作、大型模型水槽における実証的性能試験等を行った。その結果、蒸気エジェクタによる吸引方式を海上流出油回収装置に用いることが可能であることが明らかになった。また本方式の持つ将来的可能性について議論した。今後は搭載船を想定した設計、性能試験等の実践的検討が必要である。

参考文献

- 1) R. Schulze, "Oil spill response-Performance review of skimmers", *ASTM manual series*; MNL 34, ISBN 0-8031-2078-8, 1998.
- 2) I.Fujita, Y.Saito and M.Yoshie, "Steam jet pump for oil recovery and reformation", *International Oil Spill Conference*, CD-ROM, 2005.
- 3) 藤田勇, 吉江宗生, 竹崎健二: 流出油エマルジョン分解に関する研究, テクノオーシャン'06, CD-ROM, 2006.
- 4) M.Yoshie, I.Fujita and Y.Saito, "About construction of simulation tank for oil recovery in marine situations", *Techno-ocean 2004*, CD-ROM, 2004
- 5) Cedre, "Using dispersant to treat oil slicks at sea", *Response manual*, 2005.