

水噴射エダクタを用いた流出油回収装置の研究開発

DEVELOPMENT OF OIL SKIMMING SYSTEM USING WATER-DRIVEN EDUCTOR

藤田勇¹・吉江宗生¹・竹崎健二²・松永康司³・高畑利信⁴・野村宗臣⁴
Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI, Yasushi MATSUNAGA, Toshinobu
TAKABATAKE and Munemi NOMURA

¹正会員 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 国土交通省 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所
(〒730-0029 広島市中区三川町2-10 愛媛ビル6階)

⁴非会員 国土交通省 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所
(〒730-0029 広島市中区三川町2-10 愛媛ビル6階)

A suction oil skimming system using water-driven eductor was developed. This system can be driven by nothing but high-pressure water of 0.5 to 0.6 MPa in pressure and is a good option to add oil recovery function to debris sweeping vessels without oil recovery function so far. Usually debris sweeping vessels has water cannons for manipulating floating debris whose motive water is also used for driving the new oil skimming system. The development started with basic suction performance tests on water-driven eductor followed by system design and oil recovery performance tests in a real scale simulation tank, and finally proved the system has good oil recovery performance in various conditions encountered in real sea.

The system has been adopted as an oil recovery system for a real vessel *Ondo-2000* which owned and operated by Chugoku regional bureau of MLIT this spring.

Key Words : Oil skimming, Water-driven eductor, Debris sweeping vessels

1. はじめに

1997年に日本海において発生したナホトカ号による油流出事故以来10年以上が経過し、その後我国においては大規模な洋上油流出事故は発生していない。世界的に見ても油流出事故の発生件数並びにそれに伴う油流出量は減少傾向を示している。ITOPFの統計によれば¹⁾、タンカーからの7t以上油流出事故の年平均発生回数は1995～1999年において27.8回、2000～2004年においては18.4回である。流出量で見ると1995～1999年においては年平均41,600t、2000～2004年においては年平均15,800tとなっており減少している。とは言え2002年にスペイン沖で発生した*Prestige*号事故(重油63,000t流出)、あるいは2007年12月に韓国泰安沖で発生した*Hebei Spirit*号による原油流出事故などの例があり、21世紀を迎えた今となっても油流出による被害のリスクが無くなったわけではない。特に韓国泰安沖の油流出事故では1997年に日本海で発生した*Nakhodka*号事故における流出量の2倍近い原油

約12,000tが漏洩し、大半の油が沿岸域に漂着したこともあり、環境や経済に多大な被害を及ぼした。日本を含む極東地域における油流出のリスクを10年ぶりに再認識させる事故であったと言える。

国土交通省港湾局では4,000GTクラスの大型3船ならびに11隻の200GTクラスの海面清掃船によりこうした油流出のリスクに備えている。本稿はこのような海面清掃船の内一隻である「おんど2000」に装備する油回収機の開発に関して報告する。おんど2000は従来海面清掃に特化した船であり、これまで油回収機能を持たなかった。こうした船舶にも大きな改造を伴うことなく搭載することができる簡易な油回収機を開発することで、他船への展開も図ることができ、これまで以上に油流出への備えが充実したものとなる。海面清掃船は洋上に漂うゴミ等を集散する目的で放水銃を装備しており、駆動の為に、揚程50～60m、吐出量50～100m³/hr程度のポンプを持っていることが多い。そこで水噴射エダクタを用いることで、こうしたポンプにより供給される水のみにより駆動できる油回収を行うことを

発想した。

本研究開発では、装置の鍵であるエダクタの吸引特性の確認に始まりシステムの検討試設計、実寸サイズ模型の製作、実験水槽における油回収性能の評価等を行い、実機の基本設計を行ったので以下でその内容を述べる。

2. 水噴射エダクタ

流体の持つ圧力のエネルギーを用いてポンプ仕事をさせる機械としてジェットポンプが知られている。駆動流体としては、水、空気あるいは蒸気を用いる物など多様であるが、本研究の様に水を駆動流体として液体を吸引するものをエダクタと称する。構造の模式図を図-1に示す。高压で供給された駆動水はノズルにより絞られ圧力を速度に変換し高速噴流として混合管内部に噴射される（速度 V_j 、単位時間供給質量 M_j ）。その際噴流は周囲に存在する物体を巻き込み（単位時間当りの吸引質量 M_s ）混合管内で巻き込んだ物体に運動量を与え減速し圧力を回復する。検査体積内に流入出する運動量と圧力回復 ΔP はバランスしており、おおよそ次の式(1)

$$M_j V_j - M_d V_d = S_d \Delta P \quad (1)$$

の関係が成り立つ。本研究開発では油水の吸引にエダクターを用いる為、その性能把握は設計上重要であった。そのため小型の模型を製作し、実験値と上の理論式の比較を行った。例として直径 8mm のノズルを用いた場合の吸引特性を図-2に示す。(a)は内径 21.6mm の混合管を用いた場合であり、(b)は内径 41.6mm の混合管を用いた場合である。いずれの場合も実験値と理論線は比較的良好一致をみている。混合管の直径は(a)の様に細い場合には背圧が大きく取れるが吸引流量は小さい。逆に(b)の様に混合管が太い場合には吸引流量は大きくとれるが、半面大きな背圧には対応できない。油回収機の実機を設計する上では、必要とされる油水の吸引量、揚程ならびに発生する圧力損失等を勘案してエダクタの設計を行わなければならない。本開発では水面からの油水吸引量として約 30m³/hr 程度、駆動水压を 0.5MPa と想定した。ノズル直径を 26mm とし、混

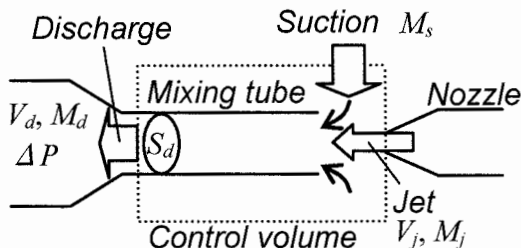
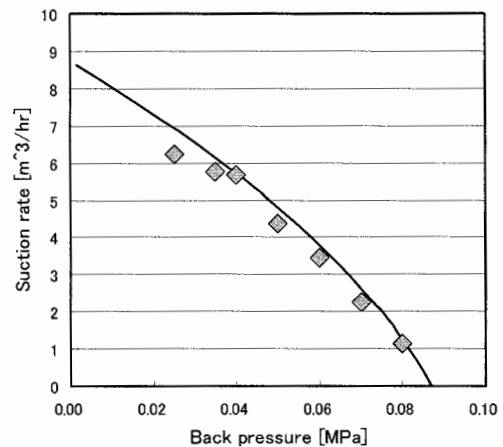
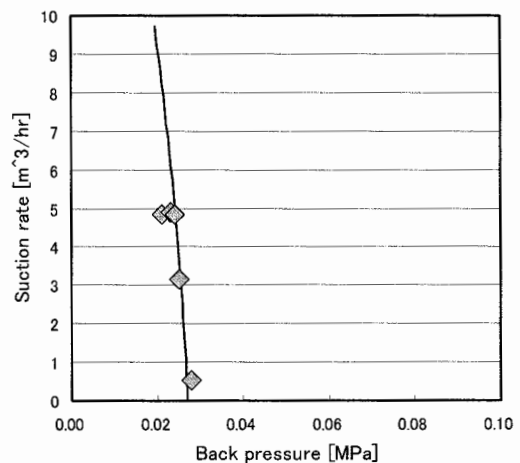


図-1 エダクタの原理

合管として SGP50A 相当を用いる場合のエダクタ特性を図-3に示す。消費駆動水量は約 60m³/hr 前後である。



(a) 混合管直径 21.6mm の場合



(b) 混合管直径 41.6mm の場合

図-2 水噴射エダクタの特性
(実験と理論)

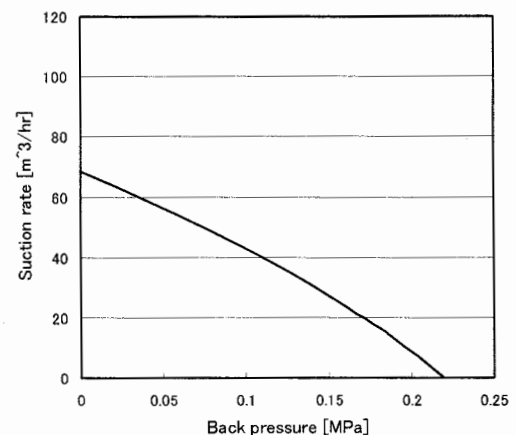
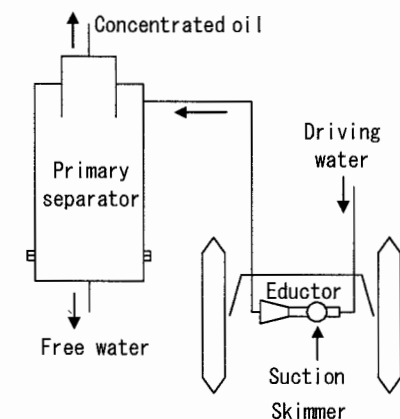


図-3 実機スケールのエダクタ性能予想

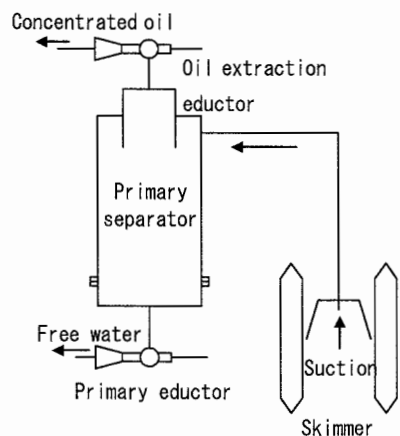
3. 水噴射エダクタを用いた油回収システム

開発する油回収機の基本仕様を表-1 に示す。海面からの油水吸引量は同クラスの油回収船と同程度を想定し $30\text{m}^3/\text{hr}$ とした。吸引油水中に占める実質的な油回収量は $5\text{m}^3/\text{hr}$ と想定した。対応粘度としては低粘度から $50,000\text{mPas}$ 程度を想定している。一般的な油回収機では堰などを用いて油のみのスキミングを行うが、こうした装置では油の粘度が高い場合油のみを回収することが難しくなる。本開発では油水分離を船上のタンクで行うことにし、海面からは油水混合状態で行う方法を採用している。水と油の混相流として回収することで管内潤滑が可能で、高粘度油の回収が可能になる。

開発では図-4 に示す二通りの基本吸引システムについて検討した。(a)は吸引用のエダクタをスキマー内部に設置するもので管路内が正圧で構成されるタイプである。(b)は油水吸引用のエダクタを一次油水分離器の後に入れるタイプであり、吸引管から分離器内部が負圧系になるタイプである。両者の特徴を表-1 に示す。大きな違いは正圧タイプでは



(a) 正圧タイプ



(b) 負圧タイプ

図-4 水噴射エダクタを用いた油回収装置の構成

セパレータ内部が正圧になるので、回収油はセパレータより自噴してくれる。負圧タイプではセパレータより油を取り出すのに別途ポンプあるいはエダクタを要する。構成的には正圧タイプの方が単純であるが、一方でセパレータが処理しなければならない負荷は、正圧タイプの場合には駆動水も取り込まれる為、負圧タイプに比べて大きい。また正圧タイプの場合、エダクタに吸引される際、内部の強い剪断流中を通ることにより油は細かい粒子になり水中に分散する。図-5 に水中に分散した粒子の直径分布の測定例を示す。図中の線は実験値をベータ分布により回帰したものである。油滴の分布の平均直径は $16\mu\text{m}$ であった。Stokes の法則に従えば、粒子浮上の終端速度は 0.0025mm/s と非常に小さく、分離のためには油水分離装置の表面負荷率を非常に大きくする必要が出てくるなど、装置の大型化が懸念される。本開発においては(b)の負圧タイプのシステムを採用することとした。油水分離用のセパレータは円筒型とし、セパレータへの流入は円筒の接線方向から行うことで、重力と遠心力の併用による油水分離を図った。円筒の直径に関しては、 250mm 、 500mm 、 650mm の 3 種類を製作し、分離器下からの油の漏洩の最も少ない 650mm を実機に採用することとした。

表-1 基本仕様と油回収システム比較

基本仕様		
油水吸引量	30m ³ /hr	
油回収量	5m ³ /hr	
対応粘度	～50,000mPas	
波浪範囲	～0.5m	
システム構成比較		
	正圧タイプ	負圧タイプ
スキマー部	エダクタ内蔵	吸引口のみ
一次セパレータ		
内圧	正圧	負圧
油水処理量	約 100m ³ /hr	約 30 m ³ /hr
油回収用ポンプ	不必要	必要

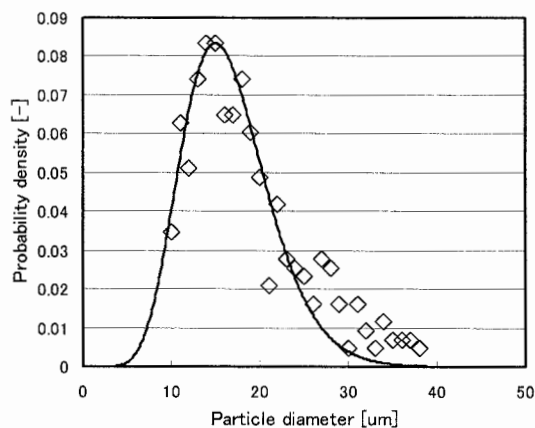


図-5 エダクタを通った油滴の直径分布

4. 実寸試作機の性能試験

(1) 実寸模型試験

本研究においては船に搭載が予想される実機と同じスケールの実験機を製作し、実油を用いた油回収性能試験を実施した。実験機は図-4 の(b)の负压タイプのスキマー部とした。スキマー部は図-6 と図-7 に示す様に双胴型の浮体の間にコの字型の集油かごを設け、その内側に 80A の吸引口を設置した。海水面に浮遊する油を選択的に回収するための堰の様な機構は設けずに海水と油を一緒に吸い込む簡易な機構としている。これは堰などの機構が高粘度油の回収に際して返って流入を阻害するなどの問題があることと、本装置では図-4 の(b)にも示すように別途油水分離器を設けているのでスキマー部分において特段油水分離を行う必要が無い為にもよる。吸引口は静止水面上で口中心線が 8cm 程度水没する位置に取り付けた。一次油水分離器は円筒形とし、直径約 650mm 長さ 1100mm、上部のオーバーフローファインダの直径は約 250mm としている。分離器内部には下から 150mm の位置に渦止め用のバブル板を設けている。油水吸引用のプライマリーエダクタにはノズル径 26mm 混合管径 50mm のものを、油抽出用のエダクタにはノズル径 8mm、混合管径 25mm の物を用いた。駆動水圧は 0.5 あるいは 0.6MPa とした。

性能試験は(独)港湾空港技術研究所の油回収実海域再現水槽において行った。実験系の概要を図-8 に示す。試験では C 重油に水を混合し粘度を調製したエマルジョン化油を用いた。装置の上流より試験油を散布し、潮流、並びに波浪の中での油の回収量を測定した。潮流は最大 100cm/s (約 2knot)、波高は最大 40cm までの範囲で計測を行った。試験油の粘度は 15,000mPas と 50,000mPas の二種類で行った。

(2) 潮流中での油回収

潮流中での油回収性能試験の一例を図-9 に示す。

試験油は粘度 15,000mPas のものを約 300kg 散布し、60s 間における回収量を時間換算したものである。単位時間当りの油水合算の回収量は約 10m³/hr 程度で、低速から試験範囲の 100cm/s までほぼ一定であった。油回収量はおよそ 2m³/hr 強であり、これも流速に関わらずほぼ一定であった。回収物中の

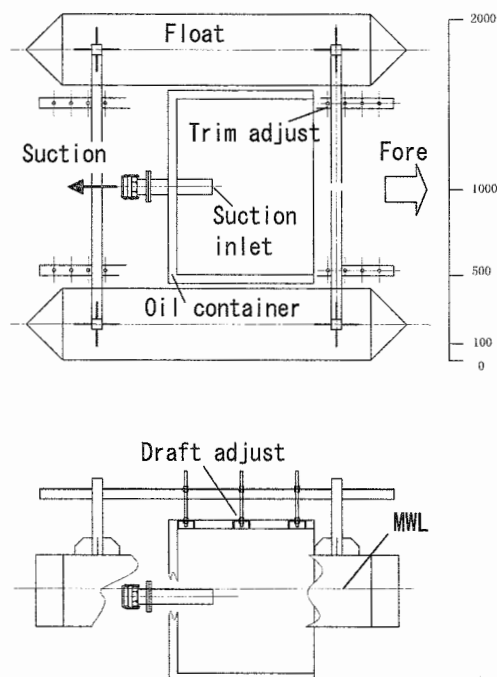


図-6 スキマー部の構造

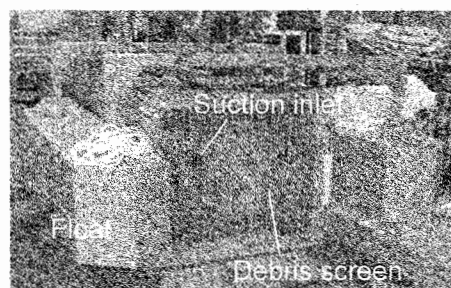


図-7 スキマー部外観

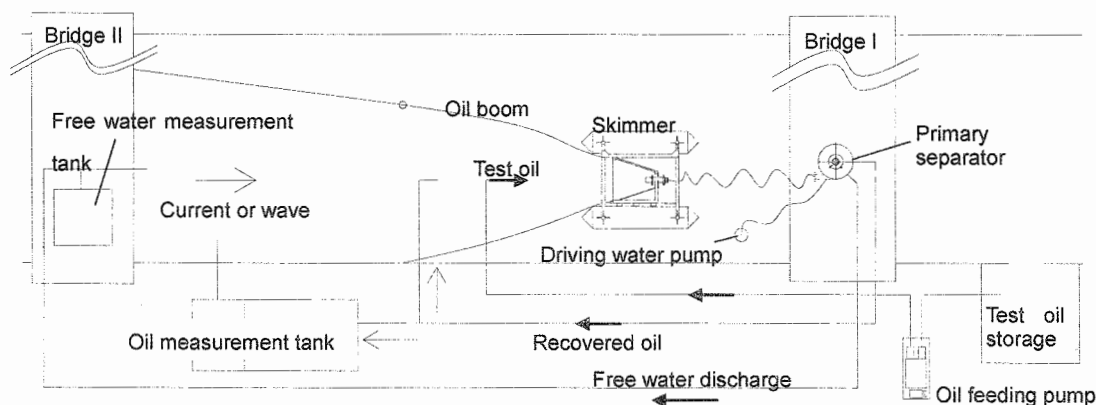


図-8 実寸法模型実験

油水比は式(2)により定義した。

$$(\text{oil/water ratio}) = \frac{(\text{Oil recovery})}{(\text{Water recovery})} \quad (2)$$

この実験では油水比は 0.25～0.32 を示した。一般的な堰式の油回収機においても、波浪などがある場合油水比を高く維持するのは困難であり、遜色ない値であると言える。

一般に海上においてオイルブームにより油を囲い込める限界流速は良くても 2knot (約 1m/s) である。また近年開発された別形式の油回収機²⁾では最大油回収量を示す船速が 1knot であることが知られており、こうした事例と比較しても、1m/s の流速まで性能が低下せずに油回収ができることは評価されるものとする。

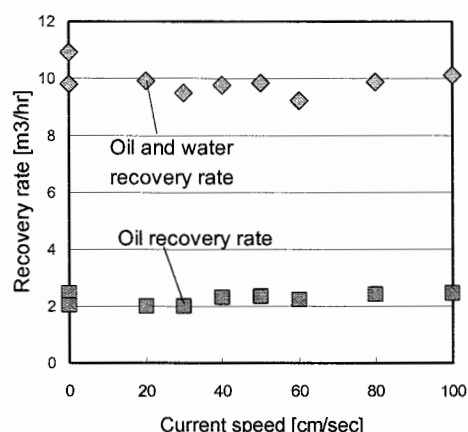


図-9 潮流中の油回収性能

(3) 波浪中での油回収

波浪中における油回収性能試験を行った。潮流は 50cm/s とし、造波機により周期と波高の異なる規則波を発生させ、その中で、油の回収量を計測した。結果の一例を図-10 に示す。図は油水比を示したもので、◆は周期 1.5s の波浪に関するデータであり、■は周期 2.0 の波浪の場合のデータである。破線及び実線は周期 1.5s と 2.0s のデータを各々直線で回帰したものである。周期 1.5s の場合、破線の傾きが示す様に、波高の増加に伴って若干油水比の低下が観察されたが、周期 2.0s の場合には実線で示す様に油水比の低下は観察されなかった。これはスキマーの波運動への追従性と関係があると考えられる。スキマーのピッチングの固有振動数は簡単な動揺試験を行った結果、およそ 2.0s 弱であると推測された。その場合 1.5s では波への追従性が多少悪く、それが波高の増加に伴う油水比の低下に繋がったものと想像される。波周期 2.0s、或いはそれ以上の場合には波への追従性に問題はなく、そのため油水比が低下しなかったものと推測される。本装置が対象としている海域は瀬戸内海であり、代表として岩国沖北緯 34° 06' 東経 132° 15' を例にとると、有義

波高 $H_{1/3}$ の 90%出現確率は 0.34m、周期 $T_{1/3}$ はほぼ 100%近くが 2.6s 以上であり、実海域における装置の波への追従性に問題は無いと考える。

(4) 高粘度油の油回収

ここまでは粘度 12,000mPas 程度の油を用いた場合の試験結果について述べた。次に試験油の粘度が 50,000mPas の場合の油回収性能試験の結果を示す。ASTM の定める試験油の粘度分類に従えば³⁾、前者は II と III の中間、後者はおおよそ IV に相当する。図-11 に実験結果を示す。エダクタ駆動水圧 0.62MPa、50cm/s の潮流を与え、波高を変えた場合の回収性能を示したものである。図-9 に示す粘度 12,000mPas の場合と比較して回収量に低下が見られるものの、回収不能と言う訳ではなく、高粘度油にもある程度対応可能であるとする。

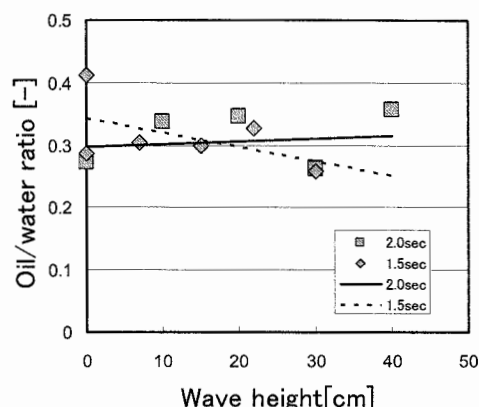


図-10 波浪中における油回収性能

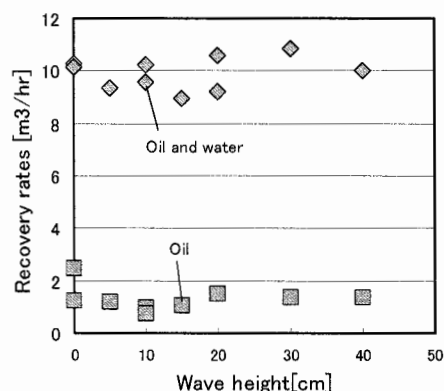


図-11 高粘度油の回収

5. 分散処理への応用

本開発では主に流出油の回収を主目的とした。回収は重要な位置を占める対応方法であるが、分散処理もまた重要な対応方法の一つである。ただし分散処理は適応できる油種や条件に制限があり、こうした制限を緩和することできれば、油濁対応の選択肢

が広がり、流出による被害の低減につながるものと考えられる。分散剤の問題点の一つとして、流出油の粘度の問題をあげることができる。一般的に分散剤が効果ある粘度の限界は 10,000mPas であると言われ、これ以上の粘度の場合は分散処理を期待できないとされる⁴⁾。図-12 は Iranian heavy crude oil の例であるが、海洋に流出した油は急速に風化し、内部に多量の海水を取り込み W/O エマルジョンを形成して短時間の内に 10,000mPas を越える粘度を示すことが多い。こうした風化油に対しても分散処理を行う為には非常に強い混合エネルギーを与える必要があると著者等は考えている⁶⁾。図-5 に見るように水噴射エダクタにより吸引された油は細粒化され水中に分散することが観察されており、適した薬剤を添加することで O/W 型の分散状態を安定化してやれば、高粘度油も分散処理できる可能性が高い。装置の構成としては図-13 の様に油水吸引エダクタ部に薬剤の添加装置を増設することで分散機能を簡便に追加できると考える。実際の効果等については今後の研究課題である。

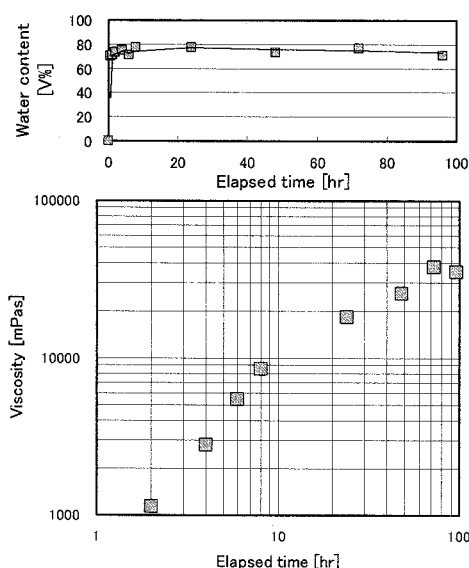


図-12 Iranian heavy crude oilの風化⁵⁾

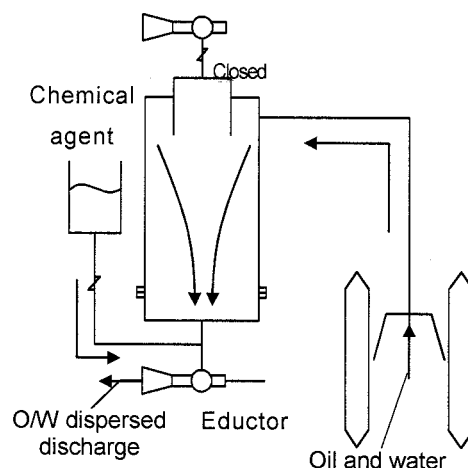


図-13 分散処理への応用

6. まとめ

本稿では水噴射エダクタを用いた流出油回収装置の研究開発について報告した。海面清掃船に通常搭載されている放水銃の駆動水を用いることを想定し、水だけで駆動する油回収を試作した。実機サイズの水槽実験により、油回収性能を評価し、実用化できることを示した。また分散処理への応用可能性について言及した。

参考文献

- 1) Keisha Huijter : Trends in Oil Spills from Tanker Ships 1995-2004, 28th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, 2005.
- 2) I. FUJITA, M. YOSHIE, K. TAKEZAKI, K. OZAKI and H. ODA : A New Weir Skimmer Test for an Oil Recovery Vessel Dr.Kaiyo, OCEANS'08 MTS/IEEE Kobe, CD-ROM, 2008.
- 3) Robert Schulze : Oil Spill Response Performance Review of Skimmers, ASTM Manual Series: MNL34, pp2-3, 1998.
- 4) François Xavier Merlin : Using dispersant to treat oil slicks at sea-Airborne and shipborne treatment, CEDRE technical report, 2005.
- 5) 石油連盟 : <http://www.pcs.gr.jp/>
- 6) 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 2006, CD-ROM, 2006.