

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.48    No.4    December 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 4 号 (Vol. 48, No. 4), 2009年12月 (December 2009)

## 目 次 (CONTENTS)

杭の軸直角方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案 ..... 菊池喜昭.....	3
(Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile ..... Yoshiaki KIKUCHI)	
断面修復を施したコンクリート床版の鉄筋腐食性状に関する検討 ..... 加藤絵万・審良善和・岩波光保・横田弘.....	23
(Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching ..... Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA)	
水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発 ..... 松本さゆり・片倉景義・吉住夏輝.....	53
(Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens ..... Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI)	
空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案 ..... 前川亮太・蘇凱・水上純一・坪川将丈.....	71
(Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers ..... Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA)	
水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発 ..... 吉住夏輝・松本さゆり・片倉景義.....	89
(Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure ..... Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA)	
流出油回収装置への蒸気エゼクタの応用 ..... 藤田勇・吉江宗生・竹崎健二.....	109
(Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery ..... Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI)	

## 流出油回収装置への蒸気エゼクタの応用

藤田 勇\*・吉江 宗生\*\*・竹崎 健二\*\*\*

### 要 旨

蒸気エゼクタを用いた油回収装置について実験的に検討した。海上に流出した油は W/O 型エマルジョンを形成し体積の増加と共に、時として 1,000,000mPa.s といった高い粘度を示すようになる。こうしたレオロジー的な変化は現場における油回収を非常に困難なものとしている。蒸気エゼクタはこのような問題に対して、従来広く用いられてきた油回収機には無い有利な点を有している。蒸気の凝縮に伴い発生する熱による急速加熱は高粘度油の吸引管内部の流れを促進する。またエゼクタ内部の超音速流の蒸気流は非常に強い攪拌力を有しており、薬剤を添加した際のエマルジョン分解反応を促進する。本研究ではこのような効果を持つ蒸気エゼクタを油回収に応用することを目的に、蒸気エゼクタによる吸引式油回収機の小型模型を製作し、実験により油回収能力を検証した。試験ではエゼクタの吸引特性の把握に始まり、小型模型における油回収率、油水比、蒸気消費率などを測定するとともに、波浪などの影響を検証した。合わせて蒸気エゼクタ吸引におけるエマルジョンブレイクの効果等を検証した。蒸気エゼクタが油回収あるいは対応において優れた性能を示すことが明らかとなった。

キーワード：油回収機，蒸気エゼクタ，エマルジョンブレイク

---

\* 港湾空港技術研究所 油濁対策研究チームリーダー  
\*\* 港湾空港技術研究所 情報化技術研究チームリーダー  
\*\*\* (元) 港湾空港技術研究所 油濁対策研究チーム 研究員  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5065 Fax：046-844-0575 e-mail:fujita@pari.go.jp

## Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery

**Isamu FUJITA\***

**Muneo YOSHIE\*\***

**Kenji TAKEZAKI\*\*\***

### Synopsis

An application of steam-driven ejector to oil skimming system 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 hardly seen in other conventional oil skimming devices to overcome these difficulties. Rapid heating accompanied by condensation of the steam can enhance the flow of the high viscosity spilled oil inside the suction pipe. Supersonic steam flow in the ejector may provide very strong mixing energy required for an emulsion breaking reaction 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. This report also presents the basic suction characteristics of the steam-driven ejector and some argument about the emulsion breaking by the steam-driven ejector. It is concluded that the steam-driven ejector system may be a good option for oil recovery or response.

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

---

\* Leader, Oil Spill Response Research Group, Construction and Control System Department

\*\* Leader, Applied Information Technology Group, Construction and Control System Department

\*\*\* Research engineer, Oil Spill Response Research Group, Construction and Control System Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, Kanagawa, 239-0826, JAPAN

Phone: +81-46-844-5065 Fax: +81-46-844-0575 E-mail: fujita@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	109
1. はじめに .....	113
2. 蒸気エゼクタ式油回収装置の試作検討 .....	114
2.1 実験模型の概要 .....	114
2.2 実験方法 .....	117
3. 実験結果と考察 .....	117
3.1 蒸気エゼクタの性能確認 .....	117
3.2 油回収性能 .....	120
3.3 蒸気エゼクタ方式の利点 .....	123
4. まとめ .....	125
参考文献 .....	125



## 1. はじめに

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年に発生したロシア船籍のタンカーNakhodka号による油流出事故や平成14年度にスペイン沖で発生したPrestige号による油流出事故、平成19年には韓国泰安沖で1万klを越す原油流出事故が起きるなど、事故の発生を未然に防ぐことは完全にはできていない。このような大規模な油流出事故に加えて、国内においても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、環境に対する被害を最小限に留める効果的且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環境維持並びに危機管理上重要である。

海上における流出油への対処法としては、大きく分けて回収処理、分散剤等化学薬品による拡散処理、および現場焼却などの手法がある。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、現状では、海水温度が低い場合や、重質成分が多くエマルジョンを形成した流出油の様に流動性に乏しい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。

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<sup>1)</sup>。このように多様な形式のスキマーが存在するという事は、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。流出油汚染の回収除去の効率はいろいろな要素に影響されるが、回収作業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”, すなわち得意とする粘度の範囲を持っている。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ない。低粘度から高粘度までをカバーできる油回収スキマーの開発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。

高粘度油対応の油回収機の開発は1997年に日本海で発生したNakhodka号による油流出事故以降、精力的に行われてきており、港湾空港技術研究所が関与した開発においても、ネットコンベア式<sup>2)</sup>、真空吸引式<sup>3)</sup>、高圧水駆動のエダクタを使用したハンディ型オイルスキマー<sup>4)</sup>などの例を挙げることができる。ネットコンベア式は油の網状のものに油を付着させ、それを巻き上げるタイプのものである。真空吸引式は空気流により油を吸引除去するもので、気液混相流の応用である。ハンディ型オイルスキマー水噴射エダクタの応用であり、液液混相流に分類される技術である。高粘度油に対応するための技術開発はこの様に幾つかの実例を見ることができ一方で油回収現場におけるエマルジョンの分解については、これまで十分な検討がなされているとは言えない状況にあった。

著者等はこの様に高粘度油対応及びエマルジョンの分解による回収油の減容化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ゼクタの使用に着目した<sup>5-7)</sup>。蒸気エゼクタは、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。前述のハンディ型オイルスキマーに用いた水噴射エダクタもその一つであるが、噴流ポンプの昇圧特性は基本的に混合管内に入ってくる運動量と混合管から出て行く運動量の差に従うため、駆動流体としては、水や空気のような不凝縮性の物質より、水蒸気のような凝縮性のある物の方が有利である。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、蒸気エゼ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、蒸気エゼクタは有利である。蒸気エゼクタ

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ゼクタであるが、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、またその際ど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、蒸気エゼクタ式油回収装置の実現可能性について検討するために、比較的単純な構造の原型モデルを設計試作し、実油を用いた油回収模擬試験を行った。モデルは想定実機

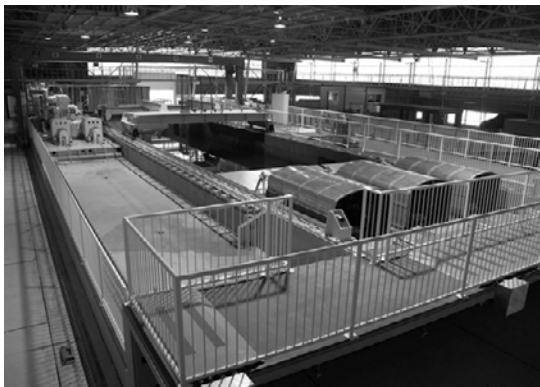


写真-1 油回収実海域再現水槽(STORMS)

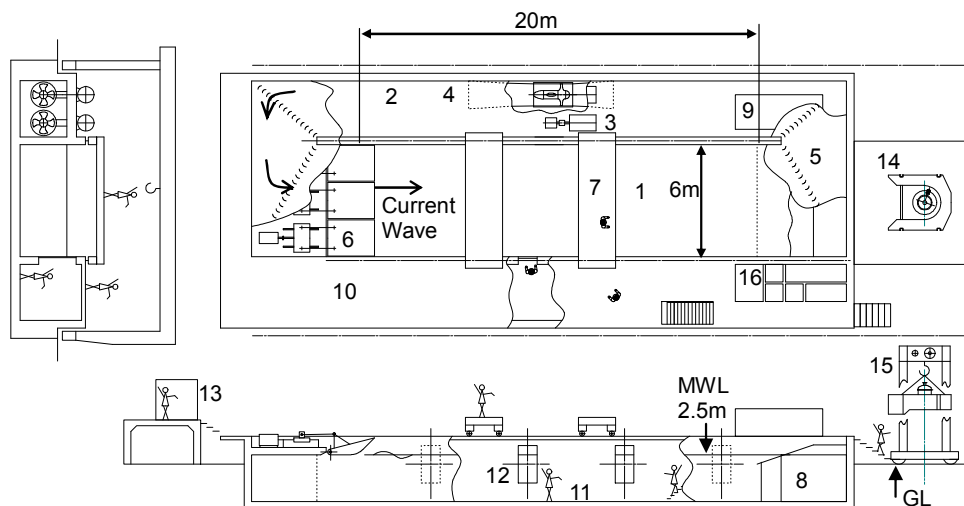
の1/2スケールとし、大型油回収用試験水槽 (STORMS)<sup>8)</sup>において油回収性能試験を行った。また高速にエマル

ジョン分解を行う上で必要な物理的な条件を調べるとともに、蒸気エゼクタを用いたエマルジョン分解特性について検討した。

## 2. 蒸気エゼクタ式油回収装置の試作検討

### 2.1 実験模型の概要

蒸気エゼクタの海上流出油回収装置への応用の可能性を検証する目的で、実験用模型を設計制作した。実験は(独)港湾空港技術研究所所有の油回収実海域再現水槽 (STORMS : Simulation Tank for Oil Recovery in Maritime Situations) に於いて行うこととした。STORMSは、実際の油回収現場の環境を模し、油回収資機材の実物大から4分の1程度の模型または実物の実験を行うために建設された大型回流水槽である。油回収機の性能は波、波形、船速(潮流)、水温、風、油の粘度、海水の比重等多くの要因に影響を受ける。そのためこれらの因子を同時に再現できる大型回流水槽は必須であり、当所のSTORMSは油回収作業シミュレートできる専用水槽としては、世界でも最高レベルの施設である。外観を写真-1、構成を図-1に示す。本研究ではこの水槽を用い、流れと波浪のある条件の中で実際の重油及び重油エマルジョンを用い蒸気エゼクタを用いた吸引式油回収装置に関



1)Test water surface 2)Water circulation channel 3)Current generator 4)Diffuser 5)Flow rectifier 6)Wave generator 7)Moving bridge 8)Break water 9)Chiller unit 10)Apron 11)Observation pit 12)Observation window 13)Operation room 14)Cleaning booth 15)Crane 16)Oil reservoir

図-1 油回収実海域再現水槽 (STORMS) のレイアウト



する基本的な性能を評価した。

実験模型のサイズあるいは縮尺は、想定実機との対応を考慮して決める必要がある一方、実験施設上の制約あるいは要請を加味してバランス良く決める必要がある。今回検討した装置の実用形としては 200GT クラスの海面清掃油回収船のメインになる油回収装置を想定した。同様のクラスで且つ、蒸気吸引と似た手法の油回収機を搭載している船として四国地方整備局の海面清掃油回収船「いしづち」があげられる。いしづちは平成 17~18 年に大規模な改修を行っており、その際に従来の渦流型の油回収装置を真空吸引式油回収装置<sup>3)</sup>に換装し、油回収能力の向上を図っている。この船の公称油回収能力は時間当たりの油水回収量が  $30\text{m}^3/\text{hr}$  であり、これを参考として、本装置の実用形においても同様の性能を想定するのが妥当であると考えた。本実験における模型のサイズは、施設寸法、実験時の操作性等を勘案し、寸法比で 0.5、流量比で 0.25 程度を想定し、代表管呼び直径を 40A とした。使用するエゼクタは比較的入手が容易な、水吸引用の一般品を転用することとした。実験ではこの内想定した縮尺比に近いものとして (株) 北斗製スチームエゼクタ SPS-S を使用した。

試験用システムの系統図を図-2 に示す。システムは、蒸気ボイラー、レギュレータ、蒸気エゼ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より構成される。

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、スキマーの蒸気エゼクタに送られる。本研究で用いたエゼクタの断面を図-3 に示す。蒸気はエゼ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。油回収実験で用いた蒸気エゼクタのノズルの喉部の直径  $D_t$  は 10mm である。蒸気エゼ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。蒸気エゼ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。

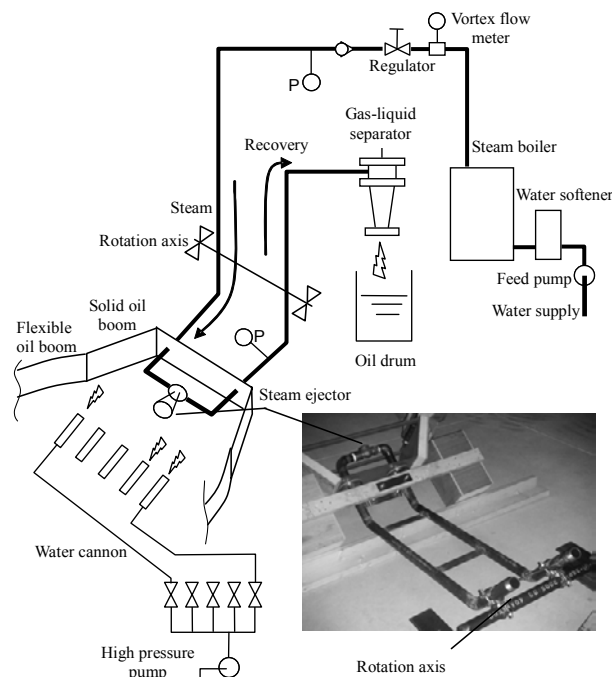


図-2 実験装置の概要

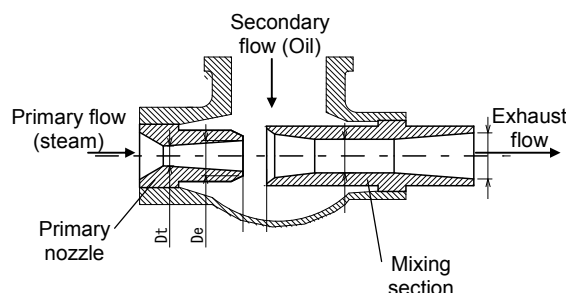


図-3 蒸気エゼクタ断面

性能試験は油回収実海域再現水槽を用いて行ったが、その際の実験装置の配置を図-4 に示す。装置は実験水槽水面上 2100mm の計測台車よりつり下げられる形で設置した。水面から気液分離器までの正味の揚程はおおよそ 4m 程度である。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。図-2 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。

スキマー部は回転の自由度と浮きの組み合わせにより海面の波やうねりに追従できる機構とした。写真-2 は油水吸引部を正面から撮影したもので中央に蒸気エゼクタ開口部の。蒸気は左側より超音速状態で開口部内部に噴射され、開口部より油水を吸引する。吸引油は右側より吸引管を通じて回収タンクに送られる。オレンジ色の

部分は鋼製集油板。両端にオイルブーム取り付け用の治具を具備する。写真-3はオイルブーム (NASKO QA-20) を繋げた様子である。オイルブームの主要寸法は水面上110mm, 水面下200mmであり長さは5m。スリット状コネクタにより脱着, 延伸が容易。法令品ではないが, 小規模実験用として使用した。写真-4はサイクロン式の気液分離器である。エゼクタにより吸引された油水は条件によっては, 蒸気あるいは空気と液体の混相状態で吸引管を上がってくる。サイクロン式気液分離器では入ってきた流れを旋回流にし, 遠心力により気体と液体を分離する。図では上部左側より流入, 下方の管より液が, 上方のフランジより気体が分離排出される。写真-5, 6は実験装置を水槽に設置した際の様子である。

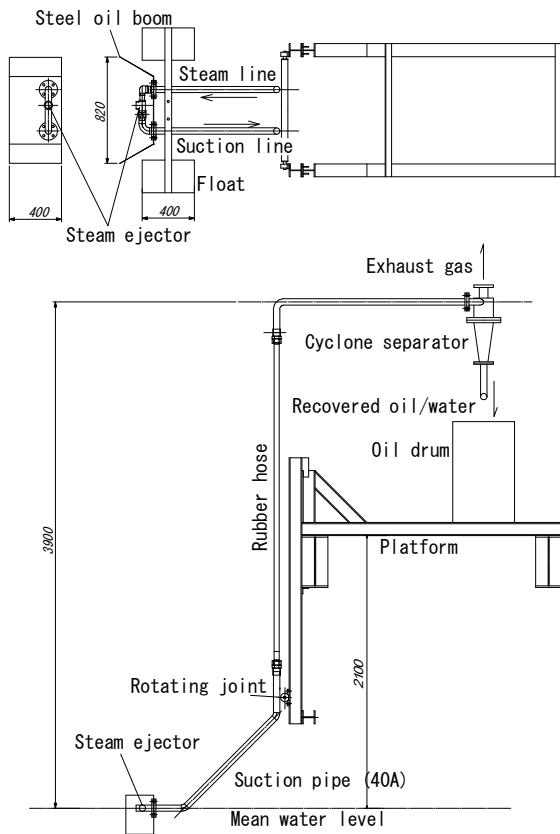


図-4 実験装置の配置

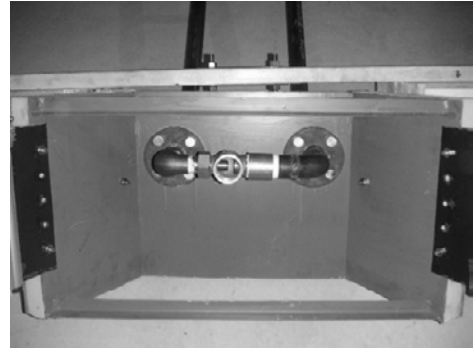


写真-2 油水吸引口部 正面



写真-3 オイルブーム接続



写真-4 サイクロン式気液分離器



写真-5 実験模型設置状況



写真-6 実験模型オイルブーム展帳風景



写真-7 放水銃による集油

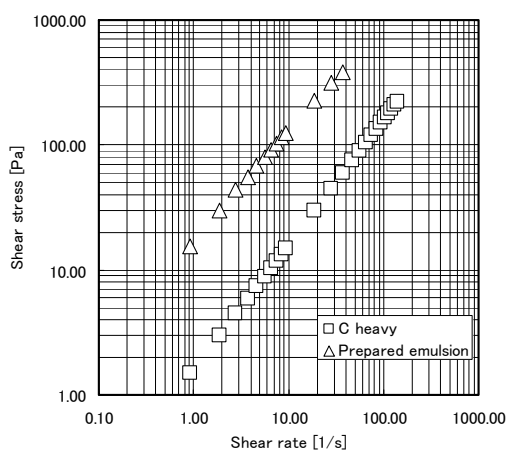


図-5 試験油の粘度特性

## 2.2 実験方法

実験は写真-6に示す様に実験機を実験水槽水面に垂下し、オイルブームをJ字展帳した上で、上流より供試油を散布し、それを実験機により回収、秤量すると方法で行った。実験パラメータとして、①吸引口の位置（水没深さ）、②駆動蒸気圧力、③波浪条件等を変化させて吸引油水量の測定を行った。測定は一定時間に回収された油水をドラム缶に受け、総重量を測定、その後上部に溜

っている油分をドラム缶より排出し、残存自由水の重量を測定した。①～③に加えて、油回収の補助的手段として、写真-7に示す様に④放水銃による集油の効果についても本実験の中で併せて行った。

試験で用いた油は市販のC重油に水道水をおおよそ等量混ぜて十分な時間攪拌しエマルジョン化したものを用いた。原料油と調製エマルジョンの粘度特性を図-5に示す。計測は20°Cにおけるものである。原料油のズリ速度10[1/s]における粘度は1600mPa.sであり、調製エマルジョンの同条件における粘度は13,480mPa.sであった。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 蒸気エゼクタの性能確認

油回収実験に先立ち、装置の鍵である蒸気エゼクタの吸引性能に関して試験を行った。蒸気エゼクタは既に各分野で広く用いられておりその理論も確立している。ここでは性能確認の意味で使用した蒸気エゼクタによって発生する吸引圧力と駆動蒸気圧力の関係および蒸気消費量等を調べた。エゼクタのノズルには喉部直径 $D_i$ が5mm、末広部出口直径 $D_e$ が7.8mmの物を用いた。

吸引圧力に関してはエゼクタの吸引口を閉塞し、そこで発生する吸引圧力を計測した。結果を図-6に示す。横軸が駆動蒸気圧力であり、縦軸が吸引負圧を示している。エゼクタの背圧（エゼクタの出口圧力）は大気圧である。蒸気圧力が小さい場合には吸引圧力は小さい。蒸気圧力を徐々に高めていくと、0.2MPa程度のところで最大値を示す。更に駆動蒸気圧を高めていくと吸引圧力は逆に小さくなる。図中の線は不凝縮性圧縮性流体のラバルノズルに関する理論線であり、

$$\frac{P_0}{P} = \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (1)$$

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left( \frac{(\kappa-1)M^2 + 2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \quad (2)$$

により計算した。ここで、 $P$ は圧力、 $T$ は温度 $\kappa$ は比熱比、 $M$ はマッハ数、 $A$ は流路断面積である。この式は蒸気がノズル内部で超臨界膨張する場合に適用できる。図からわかるように駆動蒸気圧力が0.2MPa以上の領域では、

実験値と理論線は比較的良好一致を見ている。

次に蒸気エゼクタにおける蒸気消費量を調べた。超音速ノズルを有するエゼクタでは、流れがノズル喉部において臨界状態に達している限りにおいては、蒸気消費量は背圧の影響を受けない。計測の結果を図-7に示す。図中の線は理論線であり、

$$G = A\psi\sqrt{\frac{2P}{V}} \quad (3)$$

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{2} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (4)$$

に基づいている。ここで  $G$  は質量流量[kg/s]、 $V$  は比体積[m<sup>3</sup>/kg]、 $A$  はノズル喉部断面積、 $\kappa$  は比熱比であり蒸気の場合 1.3 である。実験値と理論線の一致は比較的良好。

図-8 は吸引圧力と背圧との関係を見たものである。吸引量は零である。図からわかるようにエゼクタの背圧が大きくなると閉め切り吸引圧力は小さくなる。一方駆動蒸気圧については、圧力が大きいほうが、吸引圧力を維持できる範囲が大きいことがわかる。

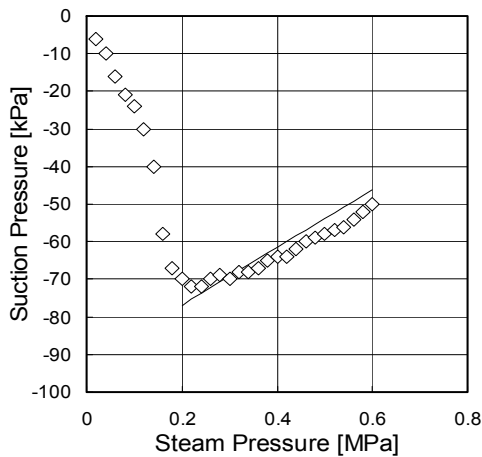


図-6 蒸気エゼクタの吸引圧

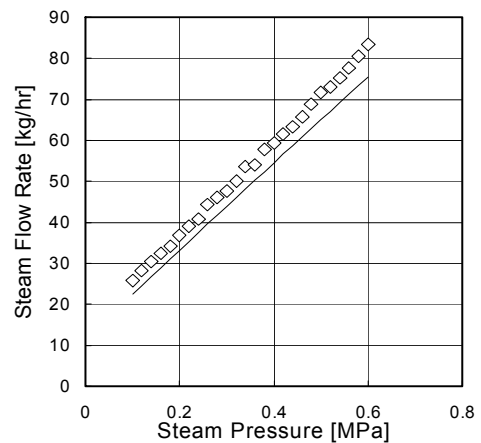


図-7 蒸気エゼクタの蒸気消費量

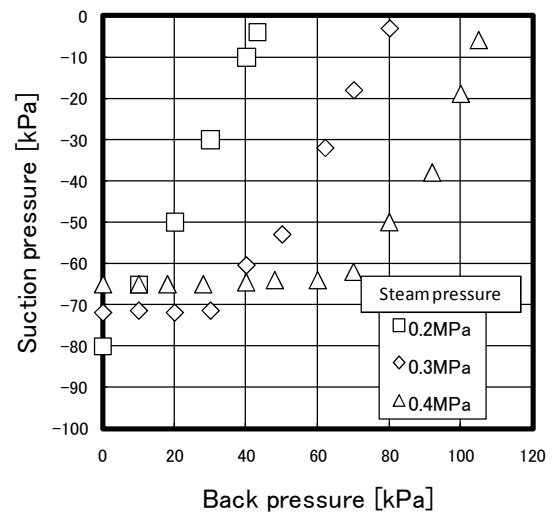


図-8 背圧と吸引圧力の実験結果

図-9 に蒸気エゼクタにより空気を吸引した場合の空気流量と吸引圧力の関係を示す。エゼクタの背圧はゼロである。駆動蒸気圧として 0.2, 0.3 及び 0.4MPa の場合についてプロットしている。図からわかるように背圧の無い状態での空気の吸引量は、駆動蒸気圧の影響は無く、もっぱら吸引圧力と関係している。

次に背圧が無い場合の水吸引の結果を図-10 に示す。この場合、駆動蒸気圧の影響は余り認められない。吸引圧で最大を示すのは吸引水量が 10 l/min 前後であり、これ以下の流量では吸引圧力は小さくなる。また流量が多い場合も吸引圧力が小さくなるのがわかる。このように 10 l/min 前後の流量を挟んで特性が V 字状に変化するのは、水蒸気の凝縮と関連している。吸引水量が小さい場合には駆動蒸気は混合管内で完全には凝縮できない。そのためエゼクタから排出される運動量が大きく、その

反動として吸引圧力が小さくなる。一方吸引水流量が大きくなり蒸気の凝縮量が増大するとともに、エゼクタから排出される流れの持つ運動量が小さくなるため、吸引圧力は大きくなる。完全凝縮の状態では吸引水量が増大すると、吸引圧力は減少する。これは通常のポンプと同様の特性である。

次に背圧が存在する場合の水吸引特性を図-11 に示す。図-10 のように背圧が無い場合、駆動蒸気圧力の影響がほとんど認められなかったが、図-11 の様に背圧が存在する場合には駆動蒸気圧力により特性の違いが認められる。基本的には背圧が大きくなると、吸引流量が減少する。また駆動蒸気圧力が大きくなると、吸引流量の減少が小さくなることからわかる。従って駆動蒸気圧の設定には発生する背圧の大きさを把握しておく必要がある。

油回収実験で用いた蒸気エゼクタ ( $D_f=10\text{mm}$ ) における蒸気消費量の測定値を図-12 に示す。図には吸引口の位置を変えた3種類のデータがプロットしてあるが、それらの間に大きな違いは認められない。今回使用した蒸気エゼクタ 5PS-S のカタログでは蒸気圧力約 0.3MPa の値として 180kg/hr となっているので今回の実験でもおおよそ近い値が得られている。

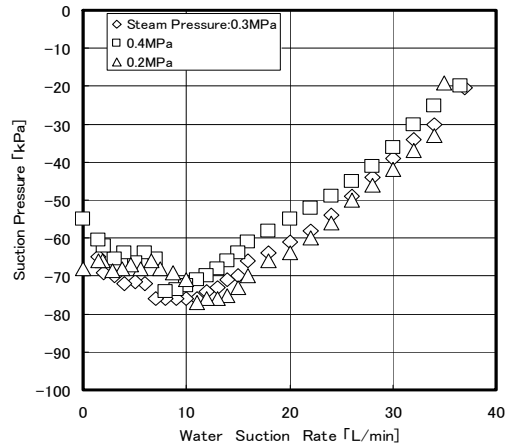


図-10 水吸引流量と吸引圧力の関係

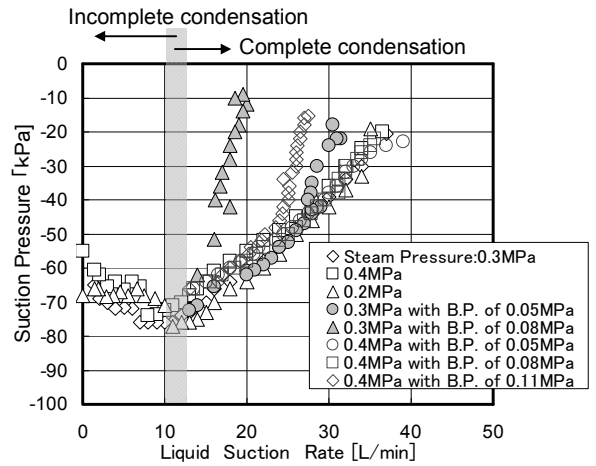


図-11 背圧が存在する場合の水吸引

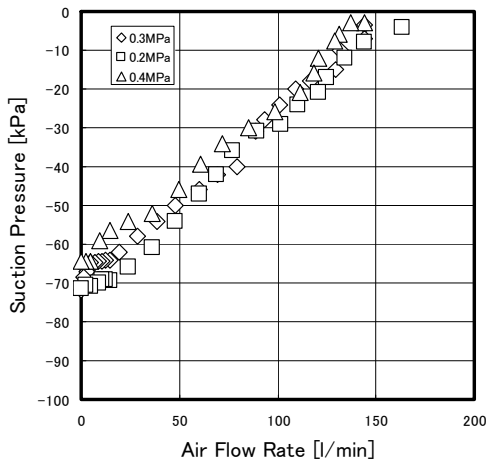


図-9 空気吸引流量と吸引圧力の測定

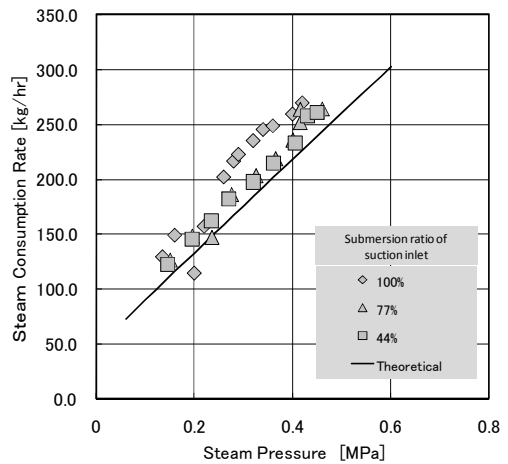


図-12 蒸気エゼクタ式油回収実験における蒸気消費量

### 3.2 油回収性能

#### (1) 吸引口の設置位置

吸引口の位置による吸引量の違いについて検討した。実験は吸引口の没水率 (Submersion ratio, 定義は図-13) を変えて海水を吸引し, 吸引量の計量により評価した。実験時には波浪, 潮流等は与えていない。結果を図-14 に示す。吸引口没水率が 100%, すなわち吸引口が完全に水没している場合には, 蒸気圧力 0.35MPa で 10m<sup>3</sup>/hr の吸引量が得られる。一方, 没水率が 100%より小さい場合, すなわち水と同時に空気も吸引する場合には, 水吸引量の低下が著しいことが分かる。このような状況では, もっぱら空気が吸引され, 水は吸引され難いため海上流出油回収にエゼクタを用いる場合には, 吸引口部を大気中に曝すことなくある程度水面下に沈めておく必要があるということになる。実用機を考える上では完全水没型にするのはさして難しいことではないが, 一方で半水没型の吸引口の方が油膜面下の余分な海水を取り込むことが少ないので, 半没水型でより多くの液体を吸引する手法がないのかという設問は興味深い。試みに吸引口部に 20cm 程度の助走管を継ぎ足して, 半水没吸引実験を行ってみた。水平管内気液二相流においては, 気相と液相の流速により流動様式が変化する。図-15 に示すように気相流速が大きくなるに従って, 気液界面に波立ちが観察されるようになり, 更に気相流速を大きくすると, 波が成長し管を閉塞するようになる。これをスラッシングと言うが, このような状況では気液界面の剪断応力が大きく, それに従って液相流量の増加が期待される。先の助走管の追加はこのような効果を狙ったものである。助走管ありの場合と無しの場合の吸引量の計測結果を図-16 に示す。図を見る限り助走管の有無による吸引量の顕著な違いは認められなかった。このため以降の実験では吸引口は全没水とした。後述するように実用上は適切な集油機構を併用することで, 半水没型ではなく完全水没型としても問題は生じることはないようである。

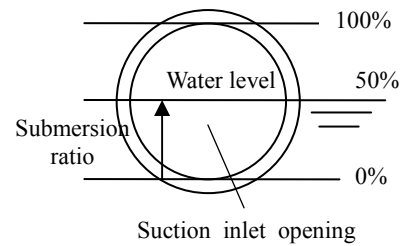


図-13 吸引口没水率の定義

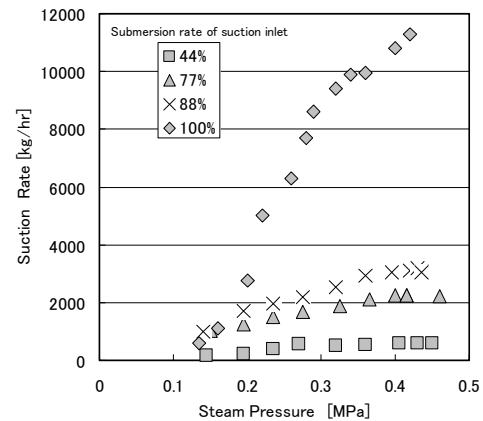


図-14 吸引口没水率による液吸引量の変化

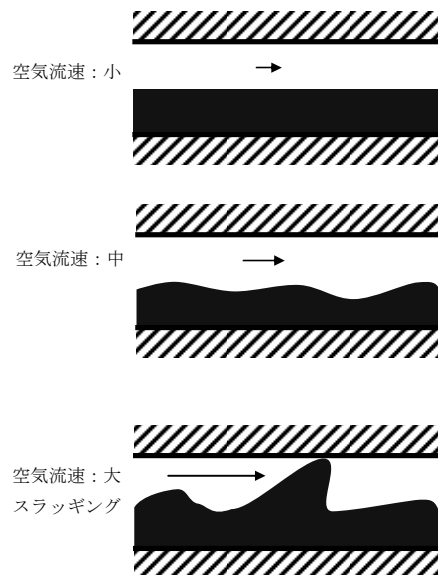


図-15 水平管気液二相流におけるスラッシングの発生

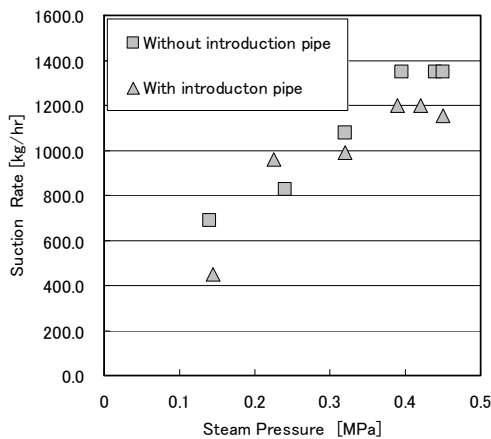


図-16 助走管の有無による吸引量の違い

(2)油回収特性

今回試作した蒸気エゼクタ式油回収装置の油回収実験結果を述べる。エゼ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、もう一つ放水銃を用いて、油膜操作を行った場合である。この場合、写真-7 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-17 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-18 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-19 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-20 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-21 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、実用化への可能性を十分示したものであると考える。

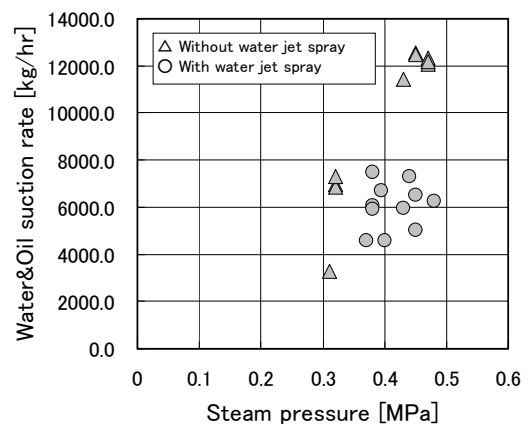


図-17 油水回収率

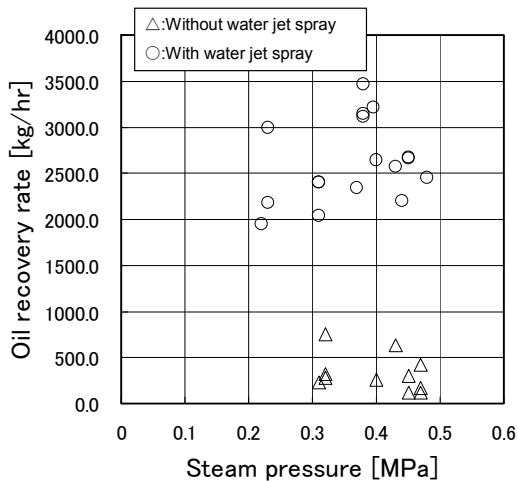


図-18 水を含まない正味の油回収率

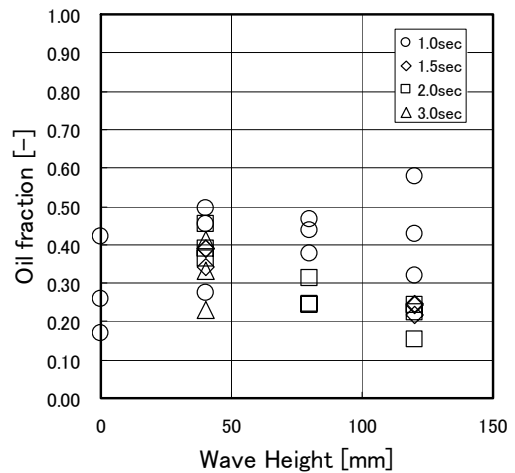


図-21 含油率への波浪の影響

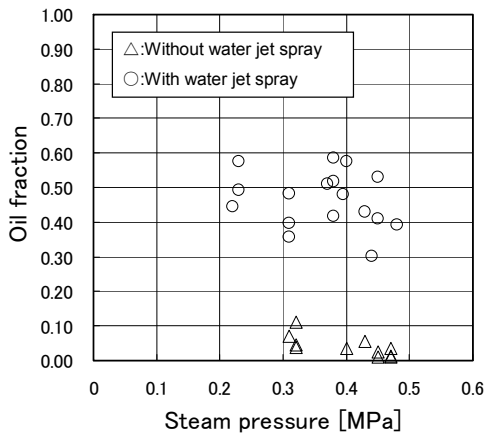


図-19 含油率

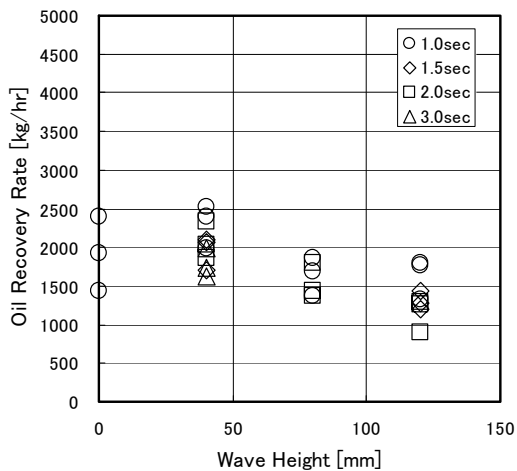


図-20 油回収率への波浪の影響

### (3)船舶用実用機の仕様検討

装置を実用化する上では必要とされる油回収量に対してどの程度の蒸気が消費され、そのためにはどの程度のボイラを装備する必要があるのかといった設計上の問題に答える必要がある。すなわち単位油水回収量に対する蒸気消費の割合に関する知見が重要である。今回の実験における回収油量と蒸気消費量の比を図-22 に示す。データにばらつきが見られるがその範囲はおおよそ 20～40 程度であった。

今仮に時間当たりの油水回収量  $30\text{m}^3/\text{hr}$  が求められていると設定する。油水/蒸気比を 30 と仮定すると、必要な蒸気量は、約  $1000\text{kg}/\text{hr}(=0.27\text{kg}/\text{sec})$  となる。水の蒸発潜熱をおおよそ  $2300\text{kJ}/\text{kg}$  として必要な熱入力は  $621\text{kW}$  である。燃料として A 重油を想定すると、単位質量当たりの発熱量は  $39.1\text{MJ}/\text{kg}$  なので、時間当たりの燃料消費は  $57\text{kg}/\text{hr}$  前後となる。一日に 8 時間運転したとして  $457\text{kg}/\text{day}$ 、200L ドラムで約 2.5 本分が運転に必要な燃料になる。これを船の主機関の燃料消費と比較しよう。200GT 船で  $700\text{kW}$  の機関を有しているものと仮定する。ディーゼル機関の熱効率を 40% と仮定して熱入力は  $1750\text{kW}$ 、A 重油の時間消費量は約  $160\text{kg}/\text{hr}$ 、港と現場との行き帰りに各 1 時間を要したとして、一日 10 時間、 $1600\text{kg}/\text{day}$  を消費することになる。この値と比較すれば、油回収に掛けるコストとして  $457\text{kg}/\text{day}$  の A 重油は決して法外というわけではなく、十分リーズナブルな値だと判断できる。

実験と想定実機の比較を表-1 にまとめる。長さスケールでは模型と想定実機は 2 倍、回収油量では 4 倍、必要蒸気量、ボイラー燃料等は 4 倍となる。



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 <sup>3</sup> /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

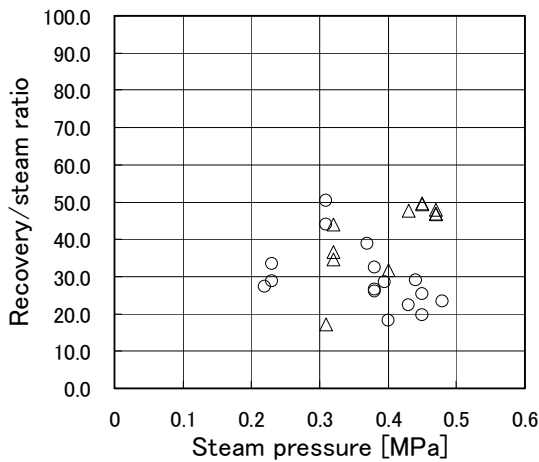


図-22 油水回収量/蒸気消費量比

### 3.3 蒸気エゼクタ方式の利点

#### (1)加熱による流動性の向上

以上見てきた様に蒸気エゼ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。蒸気エゼクタを用いることのメリットははじめにも書いたように、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。水蒸気はエゼ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-23に示す。エゼ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。図-24はエマルジョン化C重油の粘度の温度依存性を計測した例であるが、粘度は温度に敏感であり、10℃で200,000mPa.s近い高粘度油であっても30℃程度に加熱することで数千mPa.s程度にまで粘度を下げることができ、流体としての扱いを容易にすることができる。このように蒸気エゼ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ることは大きなメリットである。

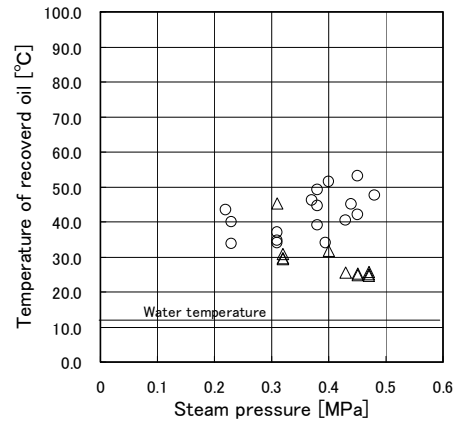


図-23 蒸気エゼクタ吸引における昇温特性

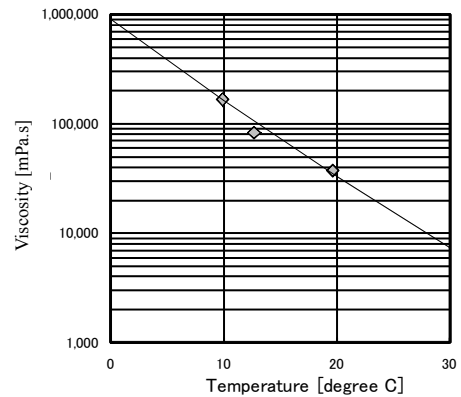


図-24 エマルジョン化C重油の粘度の温度特性

#### (2)エマルジョンの分解

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ゼクタは有している。エマルジョン化油は導言でも述べた様に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<sup>9)</sup>。狭隘な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ー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。

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right), \quad (5)$$

ここで、 $\mu$ 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 $\dot{\gamma}$ [1/s]に強く依存していた。例を図-25に示す。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 $\dot{\gamma}$ 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

$$t_0 \propto \dot{\gamma}^{-2} \propto \frac{1}{[\text{Energy dispersion rate}]}, \quad (6)$$

が成り立つものと予想できる。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。蒸気エゼクタに視点を戻して考える。エゼ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。このことを確認するために写真-8及び図-26に示す実験装置を構成し、蒸気エゼクタによるエマルジョン分解実験を実施した。これはエマルジョン化した重油を蒸気エゼクタで吸引し、その際界面活性剤を添加し急速攪拌を行うものである。界面活性剤としてはスルホコハク酸ジオクチルナトリウム（日光ケミカル社製の

OTP-75)を用いた。エゼクタによる吸引処理を行った結果を図-27に示す。図中の□は試験に用いたエマルジョン化油であり、◇は薬剤を添加せずにエゼクタ吸引を行った油を示している。両者に大きな違いは認められない。一方エゼクタ吸引時に薬剤を添加したケースでは、大幅な粘度の低下が認められている。目視観察においても、薬剤を添加して吸引を行った場合には、排出油からエマルジョン化していた水の分離が顕著に観察された。

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<sup>10)</sup>、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ためだと想像される。蒸気エゼ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。

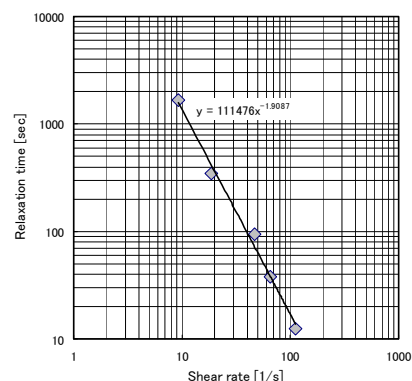


図-25 エマルジョン分解時間とズリ速度の関係

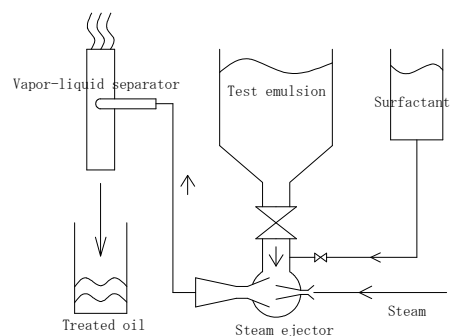


図-26 蒸気エゼクタによるエマルジョン分解装置



写真-8 蒸気エゼクタによる  
エマルジョン分解装置

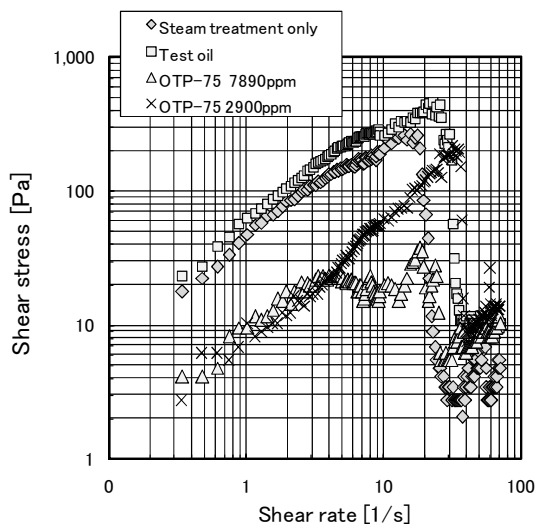


図-27 蒸気エゼクタによるエマルジョン分解

#### 4. まとめ

本研究では油回収における熱流体の利用を検討した。具体的には蒸気エゼクタを具備した吸引式油回収装置の小型モデルを試作し、油回収実海域再現水槽において油回収性能試験を行った。その結果、蒸気エゼクタによる吸引方式が海上流出油回収装置に応用可能であることが明らかになった。また蒸気エゼクタ吸引と薬剤の添加を併用することで吸引除去と同時にエマルジョンブレイクができる可能性があることを明らかにした。

#### 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) 吉江宗生, 藤田勇, 佐藤栄治, 海岸の浅い水面での高粘度油の回収作業を省力化する油回収システムの研究, 海洋開発論文集, Vol.19, pp.43-48.
- 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, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.1247-1252, 2004.
- 4) M.Tatsuguchi, M.Mizutani, M.Sano, M.Fudo, H.Ishida and I.Fujita, "Development of a handy Oil-skimmer", Techno-Ocean 2004, CD-ROM, 2004.
- 5) I.Fujita, Y.Saito and M.Yoshie, "Steam jet pump for oil recovery and reformation", International Oil Spill Conference, CD-ROM, 2005.
- 6) 藤田勇, 吉江宗生, 齊藤, 蒸気エゼクタによる油濁除去技術, 海洋開発論文集, Vol.21, pp. 1083-1088, 2005.
- 7) 藤田勇, 吉江宗生, 竹崎健二, 蒸気吸引式流出油回収方法, 海洋開発論文集, Vol.23, pp.685-690, 2007.
- 8) 藤田勇, 油回収実海域再現水槽 (STORMS), 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.43, No.5, pp.699-703, 2008.
- 9) 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.
- 10) Cedre, "Using dispersant to treat oil slicks at sea", Response manu

港湾空港技術研究所報告 第48巻第4号

2009.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile .....	Yoshiaki KIKUCHI .....	3
Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching .....	Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA .....	23
Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens .....	Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI.....	53
Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers .....	Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA .....	71
Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure .....	Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA .....	89
Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery .....	Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI .....	109