

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1246**      December 2011

緊急時における高い運用性を有する高粘度油回収システムの研究

吉江 宗生

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

# 目 次

要 旨 .....	3
1. 序論 .....	4
1.1 研究の背景と目的 .....	4
1.2 本論文の構成 .....	4
2. わが国の油濁防除体制の現状と課題 .....	4
2.1 ナホトカ号重油流出事故 .....	4
2.2 ナホトカ号重油流出事故時の政府の対応 .....	4
2.3 油濁防除体制の現状 .....	7
2.4 わが国唯一の油回収資機材試験用大型水槽の建設 .....	8
2.5 現状の課題 .....	11
3. 油回収システムの課題 .....	11
3.1 世界の油回収システムの開発状況 .....	11
3.2 エマルジョン化油の問題 .....	11
3.3 ロジスティクスの問題 .....	12
3.4 運用と操作のわかりやすさ .....	13
3.5 結語 .....	16
4. 浅海域用高濃度油回収システムの開発 .....	16
4.1 コンセプト .....	16
4.2 各部の機構と特徴 .....	19
4.3 水槽試験 .....	24
4.4 現地運用試験 .....	28
4.5 適用事例 .....	32
4.6 結語 .....	34
5. 工事用作業船を用いた油回収システムの提案 .....	35
5.1 コンセプト .....	35
5.2 システムの構成 .....	37
5.3 かき寄せバケット式油回収機の開発 .....	39
5.4 集油装置の開発 .....	50
5.5 海上での運用試験 .....	61
5.6 結語 .....	67
6. 結論 .....	68
謝辞 .....	72
参考文献 .....	73

# **A Study on the Highly Operable Viscous Oil Skimming System in Emergency**

**Muneo YOSHIE\***

## **Synopsis**

NAKHODOKA oil spill in January, 1997 was the unprecedented serious disaster caused damages of around 36 billion yen as a result. Though many volunteers worked on removing oil with enthusiasm at the time, it was difficult for the people which are lack of skill and knowledge about oil spill response to cope with the various problem on the machineries and the materials effected negatively by heavy viscous oil which was emulsified and contains debris at the coast. Because of this, the national and local governments were complained about the flaw of technical support and the oil-spill equipments.

On these backgrounds, objective of this study is development and research of the oil skimming system which performs efficiently and has usable operation system even if people who do not have skill and knowledge enough about oil spill response operate it.

The first chapter deals with the objective and the background of the study. The second chapter shows the current oil spill response preparation in Japan, and expresses necessity of the serious development and research of the oil skimming system. The third chapter discusses about engineering problem which should be overcome in order to make the operation of the oil skimming system to be easy to use. The fourth chapter shows "Oil Recovery System at the Site of Coastal Shallow Water for High Viscous Oil", the system was developed for people operating by only hand at the shallow water site where no heavy machineries and no work vessels are able to access. The fifth chapter shows "Development of an Oil Skimmer Operated by Crane Barges", the system enable the crane barges which are working in most of all Japanese ports to be oil skimming boats in emergency. The sixth chapter reviews and frames, through the two developed oil skimming systems, a conclusion of the way of oil skimming system which enable the operation at the oil spill response site to be efficiently. It suggests that automated solution against the unique trouble of the oil recovery caused by the high viscous oil and debris should be prepared, and the system should be designed to make people understand the operation easily, and shows the technology, engineering, application of the system and future challenge.

**Key Words:** Viscous Oil, Oil Skimmer, Workvessel, Oil Spill Response, Operation, In-situ Test

---

\* Director of New Technology Development Field

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:yoshie@pari.go.jp

# 緊急時における高い運用性を有する高粘度油回収システムの研究

吉江 宗生\*

## 要 旨

1997年1月に起きたナホトカ号重油流出事故は、最終的に被害額約360億円を計上した未曾有の規模の油濁事故となった。当時の油回収作業現場では、多くのボランティアによる作業が熱心に行われたが、エマルジョン化して粘度が高くなり、海岸のゴミを含んだ重油が使用機材に様々な悪影響を及ぼすことから、油濁防除作業に対する知識の乏しい作業者がこれに対処することは非常に難しかった。このため、国や地方自治体等による技術支援や資機材の不備が後に多く指摘された。

本研究はこうした背景のなか、油濁防除の知識や経験が浅い者によっても効率的に油濁防除作業が可能となる高い運用性に配慮した油回収システムを開発することを目的に行われた。

第1章では本研究が行われた背景と目的について簡単に述べた。第2章では我が国の油濁防除体制の現状について紹介し、油回収機の本格的な研究開発の必要性を述べた。第3章では油回収システムの運用を簡単にするために克服すべき技術的な課題について論じた。第4章では、重機や作業船が入り込めず、手作業を強いられる水深の浅い海岸で、人力で運用できる油回収機として研究開発した「浅海域用の高濃度油回収システム」の研究開発について述べた。第5章では、全国に在船するクレーン付台船を緊急時に油回収船とする「工事用作業船を用いた油回収システム」の研究開発について述べた。第6章では研究開発した2つの油回収システムを通じて、油濁防除作業において運用が簡単な油回収システムの在り方として、高粘度油とゴミによる油回収作業特有のトラブルは自動的に回避され、油回収作業は見て分かりやすいように配慮すべきこと、及びその技術、今後の課題、適用性についてまとめた。

**キーワード**：高粘度油，油回収機，オイルスキマー，工事用作業船，油濁対策，運用，海上試験

---

\* 新技術研究開発領域長

## 1. 序論

### 1.1 研究の背景と目的

1997年1月に起きたナホトカ号重油流出事故は、我が国の日本海沿岸に多くの油濁被害をもたらした。重油が推定 6,240kl 流出し、被害はわが国では未曾有の規模となった。このため地元の水産業、観光業など各方面に大きな社会的インパクトを与えた。重油が漂着した海岸を所管する地方自治体はもとより、当時の運輸省、海上保安庁、環境庁、国土庁など直接あるいは間接的な被害の復旧に当たった国の省庁の防災体制の在り方にまで国会で言及される事態となった。最終的に被害額は約 360 億円を計上し、1997年4月頃に一応の終結を見たが、その後も環境への影響に関する論文が提出されるなどその影響は長期にわたるものであった。

運輸技術審議会総合部会においては 1997年12月に「流出油防除体制の強化について」が答申され、その中で大規模な油濁事故に今後対応できるような技術開発の必要性が盛り込まれた。実際に当時の油回収作業現場ではエマルジョン化して粘度が高くなり、さらに海岸のゴミを含んだ重油が使用機材に様々な悪影響を及ぼすことが指摘され、油濁防除作業に対する知識の乏しい中でこれに対処することは大変に難しかった。当時は多くのボランティアによる作業も試みられたが、現場での試行錯誤による厳しい作業を強いられ、国や地方自治体等による技術的なサポートや資機材の不備に不満がつのった。エマルジョン化した極めて粘度の高い油を対象とし、我が国の現場での運用性を考慮した研究・開発がほとんどなされておらず、その研究・開発環境についても、実油を用いて実験をすることができる大形造波水槽がない状況であった。

本研究はこうした背景のなか、油濁防除の知識や経験が浅い者によって効率的に油濁防除作業が可能となる運用が簡単な油回収機のシステムを開発することを目的に行われたものである。海岸で用いるためのシステムおよび緊急時にクレーン台船を用いて油回収を行うシステムの2通りの研究開発をほぼ終了したため、その内容についてここに報告するものである。

海岸で用いるためのシステムは、ナホトカ号重油流出事故の海岸漂着油の回収作業で、多数のボランティアを含む作業者が、ひしゃくや各人が工夫した道具とバケツリレーによらざるを得なかった教訓から、当時存在しなかった、人力で浅い海岸へ陸側から進水して用いることができる油回収システムである。また、緊急時にクレーン台船を用いて油回収を行うシステムは、わが国のどの

沿岸域でも被害を受ける可能性がある状況下で、全国の油回収船の配備状況を補完し、早くて効率的な復旧作業を支援する油回収システムのパッケージである。

### 1.2 本論文の構成

本論文では、第1章で本研究が行われた背景と目的について簡単に述べる。第2章では我が国の油濁防除体制の現状について紹介し、油濁防除資機材を運用する視点からその課題について論じる。第3章では油回収システムの運用を簡単にするために克服すべき技術的な課題について論じる。第4章では、重機や作業船が入り込めず、手作業を強いられる水深の浅い海岸において、人力で運用できる効率的な油回収機の要件として、余水を出来るだけ排除して高粘度油を回収でき、かつ油回収の専門知識を要しない運用性を持った「浅海域用の高濃度油回収システム」について、実際に研究開発し、克服した種類の技術的な内容について紹介する。第5章では、第4章と異なり、全国に在船する工事用作業船の中の特にクレーン付台船を緊急時に油回収船として用いる「工事用作業船を用いた油回収システム」について紹介する。油回収船が配備されていない地域で使用することから、使用者は油回収の専門家でないことを前提とした運用性を有するように工夫し、研究開発した油回収機と集油ブーム（フェンス）の技術内容を紹介する。第6章では研究開発した2つの油回収システムを通じて、油濁防除作業において運用が簡単な油回収システムの在り方及び今後の課題、適用性などについてまとめる。

## 2. わが国の油濁防除体制の現状と課題

### 2.1 ナホトカ号重油流出事故

#### (1) 概要

本節ではタンカー事故としてわが国で最大規模の被害をもたらした、本研究の契機となったナホトカ号重油流出事故について述べる。

ナホトカ (Nakhodka) 号はロシア船籍のタンカーで、総トン数 13,157 トン、全長 177.2m、乗組員は全員ロシア人であった。進水年次が 1970 年で、事故当時の船齢は 27 年目に入っていた。ナホトカ号は 1996 年 12 月に上海からカムチャツカ半島のペトロパブロフスクへ向けて航行中、1997 年 1 月 2 日、島根県隠岐島北北東 106km 付近で荒天により船首部分が折損し、船首部はそのまま漂流し、船尾部は沈没した。ナホトカ号は C 重油 19,000kl を積載しており、そのうちの 6,240kl が流出したと推定

された。流出量の推定は切断された部分に搭載された C 重油が約 3,700kl であったが、その後海底-2500m に沈んだ船尾部を科学技術庁及び海洋科学技術センターが ROV ドルフィン 3K により調査した結果を踏まえて行われた。乗組員は総勢 32 名のうち船長を除く 31 名は救命筏で脱出し、海上保安庁の巡視船及びヘリコプターにより救助されたが、船長は後に遺体で発見された。海上保安庁の巡視艇による曳航作業は難航し、船首部はその後漂流を続け、1 月 7 日福井県三国町安島岬沖に漂着・座礁した。

海上保安庁は 1 月 3 日に関係自治体への通報を行った。1 月 4 日に第八管区海上保安本部から当時わが国唯一の大型油回収船（浚渫船の兼用船）である清龍丸の出動要請が当時の運輸省第五港湾建設局に出され、同船が名古屋港を出港した。1 月 5 日には海上自衛隊に災害派遣要請が出され、舞鶴地方隊の全艦艇 5 隻が出動する態勢となり、最終的には艦艇 25 隻、航空機 7 機の態勢となった。1 月 6 日には関係省庁連絡会議が開催された。1 月 9 日に清龍丸は京都府京丹後市丹後町の経が岬沖で油回収作業を開始した。1 月 10 日には運輸大臣を本部長とする政府の災害対策本部が設置され、政府全体として流出油の防除に取り組んだ。

浮流油は移動しながら最終的には 9 府県の海岸 1,000km 以上にわたり漂着した。漂着油の回収作業は同年 2 月 18 日にほぼ終結した。この間、ボランティアは延べ 100 万人が作業に従事したといわれている。回収油水量は約 6 万トンにのぼり、このうち海岸での回収分は約 86% という資料がある。ナホトカ号事故の油濁被害額は、油濁損害と防除措置費用のクレーム総額が 358 億円にのぼったが、最終的に 261 億円に査定された。

### (2) 海上の油回収作業

日本海では冬季の風浪が激しく、ナウファスの経ヶ崎の波高計のデータでは 1997 年の 1 月、2 月で有義波高が 1m を切るデータはひと月に数日しかなかったことがわかる。一般に海洋工事等では洋上で作業を行なえる波高の限界が 1m 程度であることから、海上での油回収作業が難航した事実の裏づけといえよう。

洋上で作業した油回収船は、「清龍丸」（運輸省第五港湾建設局）、「あすわ」、「第 3 たかほこ」、「はくりゅう」（国家石油備蓄会社）、であった。回収量は清龍丸が延べ 42 回の出動で 940kl、他の 3 隻が延べ 57 回の出動で 75kl、その他の海上保安部の巡視艇等が延べ 3,425 回、漁業取締船が延べ 242 回、自衛隊艦船が延べ 920 回、ガット船が延べ 21 回、漁船および外洋タグは出動回数不明で、回収量

は 4,650kl であった。他の資料では、運輸省が 938kl、海上保安庁が 641kl、海上自衛隊が 625kl、水産庁が 43kl の回収量とある。このため、1 回の出動での回収量を単純に計算すると、運輸省の清龍丸が約 22.3kl、中型の油回収船が約 1.3kl、海上保安部の船が 0.2kl、海上自衛隊艦船が 0.7kl、漁業取締船が 0.2kl となる。ここまで単純に比較すればやはり油回収船は効率が高いと考えられる。しかしながら、ガット船と漁船及びその他（外洋タグと回収装置）によって 3,341kl が回収されており、絶対量は圧倒的に多い。ガット船は 1,000 トン回収したとの記述のある資料<sup>4)</sup>があり、また、漁船は延べ数万回出動しただろうとの情報が同じ資料にある。漁業取締船は 500 総トンクラスのものが多く、漁船は 5 トンや 10 トン程度と考えられるが、1 回あたりの回収量を同じ 0.2kl（ドラム缶 1 本）と仮定して、ガット船の分を除いた 2,341kl を 0.2kl で除して 11,705 回という数字を算定できる。記述におよそ符合することとなる。この中でガット船が 1,000kl を 21 回で回収したとすると、1 回当たり 47.6kl の回収量となり、注目に値する。

### (3) 海岸の油回収作業

海岸においてはほとんどが人海戦術の手作業となったことが報道等によく知られた。しかしながら、様々な機器類が実際には用いられており、ひしゃくとスコップとバケツリレーのみで回収したようなイメージとは異なる。本研究ではこれらの現場で用いられた機器類の情報から開発すべき機器類の仕様などを検討しているので、紹介する。

海岸では油の漂着を防ぐためのオイルブームを展開した。静穏な状況では効果があり、また、油吸着材を暖簾状にしたり、ぼんぼん状にして連結した簡易なオイルブームも効果があった。しかし、風浪での切断や越波のため効果がなかった事例も多かった。したがって、海岸への漂着防止や漂着油の囲い込みについて長期間維持することは困難であると考えべきであろう。

海岸での回収作業では、まず大量の回収油水を貯蔵するピットを掘る、タンクを準備するなどを行っている。福井県三国町のピットは容量が 2,600m<sup>3</sup> のものが一晩で造成された。このピットにバキュームカーが海岸の回収現場のドラム缶等から油水を集めて投入し、貯蔵した。ピットは三国町に 4 箇所、敦賀、金沢、珠洲にも造成された。ただし、珠洲市では漂着油の粘度が極めて高く、回収油は土嚢袋に保管され、トラックに積み込まれて搬送される分が多かった。

回収現場では、上述のバキュームカーのほか、吸引方

式が異なる強力吸引車、コンクリートポンプ車が転用された。吸引する上で、高粘度であることやゴミが混じることにより、常に詰まりを生じる危険性があった。コンクリートポンプ車は長いブームの先に吸引ホースが伸びており、その使用された車両の仕様の例は Table 2.1 の通りである。また、バキュームカーのうち強力吸引車はブロワを用いた方式で、多量の空気と同時に油水を吸引するため詰まりが生じにくかった。

Table 2.1 Specification of the Concrete Pump Car (example)<sup>4)</sup>

Pump	pump type	hose pump
	capacity	80m <sup>3</sup> /h
	discharge pressure(Max.)	16kgf/cm <sup>2</sup>
	pumping transfer distance	300m
Boom	boom type	M four-section flexion
	boom length(Max.)	22.3m
	diameter (inlet, discharge)	125A
	turret angle	360°
Body Size	length	9110mm
	width	2490mm
	height	3480mm
	weight	15900kg

浚渫工事用のジェットポンプを動力として油水をくみ上げた例もある。ジェットポンプは高圧水をホース内に吹き込んで発生する負圧により吸引するものである。ホース口径は 200mm と大きく、通常のパキュームカーのホース径は 60mm、強力吸引車は 100mm、コンクリートポンプ車は 125mm であるのに比べて詰まりなどに強いと見られる。しかしながら回収される油水の 90% は水であり、回収タンクに水中ポンプを入れて余水を急速に排水する必要があった。一般にこれらの吸引方式では、高粘度油だけを狙って吸引すると粘度による管内摩擦損失で詰まりを生じるため、意図的に海水を十分に吸引させる必要があった。

土嚢やドラム缶を海岸から道路へ移送する手段としては、重機が入り込める場合はクレーンやバックホーが用いられた。ドラム缶の容量は 1 本 0.2kl で、約 200kg ほどの重量となるため、人力で運ぶのは重労働となる。砂浜では漂着した油を砂ごとブルドーザでいったん海中に押し戻し、浮いた油を油吸着材等で回収する方法などがとられた。

しかしながらこれら重機を用いた場合に、重機により踏まれた油は砂中深く埋もれてしまうとの批判もあり、海岸に平行に一列に並んで少しずつ海に向かって手作業で回収する人海戦術によりきれいな砂浜に再生した事例

が有名になった。

重機が入り込めない海岸でも、ベルトコンベアにより土嚢を搬出し、効果を挙げた。また、高所へ土嚢を持ち上げる場合には、瓦上げ器が使用された。そのほかに農地等で使用される小型の不整地運搬車が重量物の移送に用いられた。

こうした機械類が使用できないところはやはりバケツリレーが行われた。また、回収用の道具としては穴あきひしゃく、スコップ、その他考えられる様々な容器類が用いられた。共通して、いかに水を排出しながら油をすくいとるかということであり、網、孔などを工夫して用いられた。

## 2.2 ナホトカ号重油流出事故時の政府の対応

1 月 2 日の事故を受け、政府は 1 月 6 日に 18 省庁の連絡会議を開いた。1 月 10 日には運輸省に運輸大臣を本部長とする「ナホトカ号海難・流出油災害対策本部」を設置した<sup>5)</sup>。対策本部構成メンバーは、内閣安全保障室、警察庁、防衛庁、科学技術庁、環境庁、国土庁、外務省、厚生省、水産庁、資源エネルギー庁、運輸省、海上保安庁、郵政省、建設省、自治省、消防庁であった。対策本部では、応急対策全般について検討が行われた。1 月 20 日には、閣議口頭了解により、内閣官房長官主宰の「ナホトカ号流出油災害対策関係閣僚会議」を随時開催することとなった。会議では応急対策、被害対策及び再発防止対策等について、緊密な連携のもと、効果的かつ総合的な対策の推進を図ることを目的としていた。

同会議の下には幹事会が設置され、Table 2.2 のようなプロジェクトチーム (PT) 及びワーキンググループ (WG) で検討が行われた。

また、平成 9 年 3 月 5 日に運輸技術審議会総合部会に「流出油防除体制総合検討委員会」が設けられて、今後の事故再発防止対策及び流出油防除対策画総合的に検討された。その結果、平成 9 年 6 月 20 日に「流出油防除体制の強化について」の中間報告が、また、同年 7 月 2 日に東京湾で起きたダイヤモンドグレース号油流出事故などもかんがみて、12 月 12 日に最終の報告がなされた。

同報告では事故再発防止策、流出油防除対策、海洋汚染防止国際協力体制の構築をうたっている。その中の流出防除対策としては、それまでナホトカ号のような外洋での大規模な油流出事故が想定されていなかった体制について、即応体制の強化をすること、防除体制の強化をすること、リスク情報の事前管理と漂流油予測などが挙げられている。

Table 2.2 Executive board meeting of cabinet meeting for Nakhodka oil spill response and Project Team

Project Team for Oil Spill Damage Control	Working Group of grasping the situation of damage
	Working Group of compensation problem
	Working Group of other damage control
Project Team for Prevention a Recurrence	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grasping the directly damage of oil spill</li> <li>Work on the executing of response by the ship owner</li> <li>Application of current system</li> </ul>
Project Team for Rapid-Response to the Massive Oil Spill	<ul style="list-style-type: none"> <li>International cooperation for ascertaining the cause of the accident</li> <li>Enhancement and improvement of the oil spill response system</li> <li>Confirmation of Rapid-Response System of the Relative Governments</li> </ul>

## 2.3 油濁防除体制の現状

### (1) 政府の対応政策

油流出事故をおこした場合、船長等から海上保安庁に通報がある。海上保安庁は、阪神大震災を契機に1996年に内閣に設置された内閣情報集約センターへ連絡する。必要に応じて内閣危機管理監が官邸対策（連絡）室を設置し、内閣官房の担当者及び関係各省庁から連絡担当者が参集する。大規模な油濁災害となっていない場合でも、事故の規模や広域性から応急対策の調整等が必要な場合、海上保安庁長官を本部長とする警戒本部が設置される。ナホトカ号重油流出事故時は被害が発生するまではこうした準備態勢をとる法的なしくみが無かった。大規模な被害が発生した場合には、国土交通大臣を本部長として非常災害対策本部が設置される。関係行政機関の総合調整のみならず、関係行政機関に対して指示を行う権限が与えられる。それぞれの省庁の油流出事故対応能力を發揮・調整させるための関係省庁連絡会議（課長級）、関係局長等会議、関係閣僚等会議を事態の重要性に合わせて先の警戒本部、非常災害対策本部に共催する<sup>6)</sup>。

油防除作業は大規模な場合は海上保安庁から独立行政法人海上災害防止センターに指示し、作業にあたらせるほか、関係行政機関等への出動要請も海上保安庁が行う。ナホトカ号重油流出事故以前は領海外の外国船舶による事故への対応で海上災害防止センターに指示できなかったが、これが可能になっている。また関係行政機関の長に対して防除措置の実施を要請できるようになり、海上保安庁の役割の強化がなされ、現在は海上保安庁が中心となった体制が明確になっている<sup>7)</sup>

### (2) 防除資機材の体制

海上で油流出事故が起きた場合には、油の拡散が早く、広範囲に及ぶことから大量の防除資機材が必要となる。Fig 2.1, 2.2に現在の防除資機材等の分布を示す。わが国では原因者となる事業者に対して防除資機材を事前に準備することを義務付ける「海洋汚染

防止法」および「石油コンビナート等災害防止法」がある。これらの法律により、ある規模以上の油保管施設やタンカーの所有者、係留施設管理者はオイルフェンスや油回収装置、油回収船、油処理剤、吸着材等を準備しなければならない。これらの中で外航船の所有者の多くは実際には（独）海上災害防止センターに委託している。

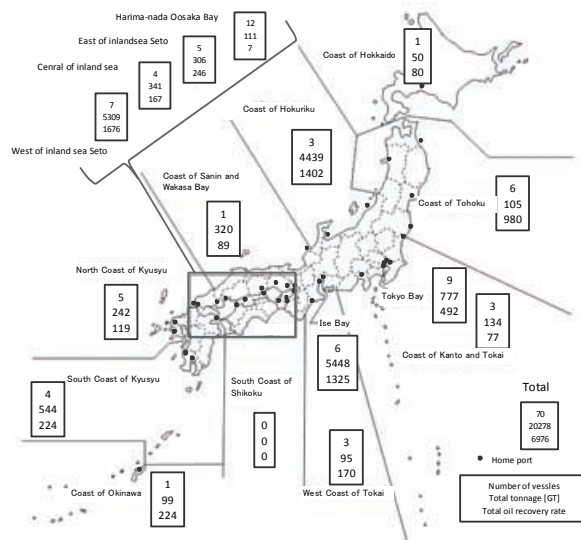


Fig 2.1 Distribution chart of oil skimming vessels

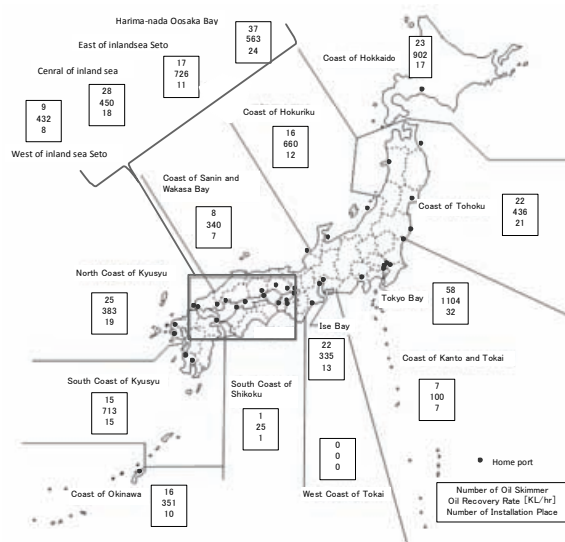


Fig 2.2 Distribution chart of oil skimmers

ナホトカ号重油流出事故後は、外洋での作業に対応する資機材の整備が行われ、海上保安庁ではブラシ式の高粘度油対応型油回収機10基、ブラシ式と吸引式を組み合わせた大型真空式油回収装置1基などを整備している。国土交通省港湾局は4000総トンクラスの浚渫兼油回収船である清龍丸（新）、海翔丸、白山の3隻を建造して、48時間以内に日本全国をカバーできるとしている。また、200総トンクラスの環境整備船11隻に油回収機を搭載、または搭載予定である。石油連盟は新たに大型油回収機



トランスレックを3機配備し、海上災害防止センターも1基配備した。

これにより防除資機材の体制は、現状では油回収船70隻、回収能力約7,000kl/hとなっている。油回収機は214基、10,110kl/hである。

## 2.4 わが国唯一の油回収資機材試験用大型水槽の建設<sup>8)</sup>

### (1) 概要

1997年のナホトカ号重油流出事故以後、わが国では様々な油回収資機材が研究開発されている。しかし開発された資機材や既存の製品が実際の海上でどのような性能を発揮できるかの判断が難しい。これに対して、米国やカナダでは Ohmsett の巨大な曳航水槽で、ノルウェーでは回流水槽および数年おきの海上で、実油による実験を行い、技術の向上を図っている。しかしながらわが国ではこうした水槽施設がないため、研究開発には限界があった。ナホトカ号重油流出事故後に油回収機に関する研究開発で使用された大型水槽では、(株)海洋開発技術研究所の平面水槽が有名である。当時、実油を投入した実験を行える唯一の水槽として使用されていたが、水深が1.2mと浅いため、持ち込める油回収機の大きさなどが限られた。

こうした情勢の中で、2003年に独立行政法人港湾空港技術研究所に予算措置がなされ、実海域の油回収に影響する条件をできるだけ再現した大型造波・回流水槽が整備されることとなった。筆者は本施設建設のための調査を行って、その仕様が決定された。本施設のねらいは、特に環境等へ大きな被害をもたらすエマルジョン化した重油を対象とした研究開発を促進することである。本実験水槽においては、波、船速(流速)、水温、対象油の性状、風等の要因と各種スキマー、集油ブーム(装置)および油回収システムの性能および挙動特性に関する実験を行えるように各機能を設定した。

これにより、本水槽は計測水面幅6m×長さ20m×水深2.5m、水槽水を海水とし、水温調整施設、造波機(最大波高0.5m)、水流発生装置(最大流速1.0m/s)を持つ。

### (2) 油回収技術の研究上の問題

油濁対策技術の研究開発のためには、まず油の物理的な挙動について十分把握する必要がある。しかしながら油は非ニュートン流体で、粘度が様々であり、資機材の表面に対するぬれ性が極端に良く、接着しやすい。これらの挙動はすべて油回収作業の難易度に直接的にかかわ

っており、分析的な取扱が難しい。ペレットなどによる実験は水の挙動を再現するものであって、浮遊する油の挙動を再現しているとは言いがたい面がある。したがって、実際の油を使用して実験を行わなければ、実験データの評価そのものが難しい課題となってしまう。このため、ISOにおいても油回収機の試験は実油を用いることになっており、油濁対策の研究開発のためには、実際の油を使うことができる専用の実験施設が必要である。

また、油回収機はその機構の動作が合理的であることによつてよりよい性能を発揮する。各部分の基礎実験だけでは結局どのような回収能力を有するか判断することはできない。したがって模型の縮尺はこうした機構がすべて働くことができるように製作できる合理的な大きさにすべきであり、実物より極端に小さくすることはできない。

さらに、粘性の取扱上、相似則をどのように設定すべきか議論の分かれるところであり、この点からも縮尺を極端に小さく設定することは難しい。このため、実験模型の規模は実機になるべく近い縮尺にせざるを得ない。

こうした諸事情を反映し、2004年3月にわが国唯一となる大型水槽が完工した。

### (3) 国内外の実験水槽の調査

#### a) Ohmsett<sup>9)</sup>

米国の流出油事故対策実験施設(the National Oil Spill Response Test Facility)である Ohmsett は Oil and Hazardous Materials Environmental Test Tank の略称である。その設立は米国環境省(EPA)により1973年に行われた。

Ohmsett の水槽は世界最大の油回収実験用水槽であると考えられ、屋外の曳航水槽で幅が20m、長さが203mという規模を誇っている(Fig 2.3)。施設はブリッジが3台、実験観測棟、浄水設備が水槽にじかに建てられており、この他に工場、事務所、油貯蔵タンク、化学実験トレーラーが設置してある。水槽水は海水で、塩分濃度は2000年からは外洋と同じ32-35ppmに調整されている。

造波機は非常に単純な構造をしており、最大波高約0.7mである。水流発生装置はなく、基本的には曳航水槽であり、3台のブリッジにより曳航、油散布、計測を行う。

なお、水槽水は重力分離、遠心分離等により実験終了のたびに油分が取り除かれており、メンテナンスのため水槽水を海洋に戻す際には、ろ過装置により15ppm以下に処理し、放流する。



Fig 2.3 Panoramic View of Ohmsett Facility

b) KYSTVERKET (ノルウェー)

KYSTVERKET は旧名を SFT と言い、英語では The Norwegian Pollution Control Authority となっており、この組織が Horten に所有する水槽において研究開発や油濁対策資機材の試験を行っている。この水槽は回流水槽となっており、深さ 4m の水槽が二重底になっていて、水槽水が底側と表面側で上下に回流する仕組みである。

水槽の幅は 7m、長さが 30m で最大 1m の波高と最大 1.5knt の水流が出せるようになっている。Ohmsett に比較すると幅が約 3 分の 1 で、曳航水槽ではないので長さは 7 分の 1 で済んでいるが、水深は約 2m で遜色ない。この仕様で数多くの研究開発が行われ、十分機能していることを新しい水槽を建設するうえで参考とし、規模の仕様を検討した。

c) 旧筑波研究所海流水槽<sup>10)</sup>

筑波研究所は 1995 年から閉鎖となっている。この水槽は、潮流、波、風の自然条件を再現して測定観測できる施設であることをうたっており、波と潮流のスペックが高い。また、水深がたいへん深いため、喫水の深いタイプのスキマーの実験が可能である。また、屋内水槽であることを活かして大掛かりな送風装置が設置されている。

主な仕様

潮流：0.1～1.5m/s

波：最大波高 0.6m、波長 10m まで、

規則波、不規則波、Transient Wave

風速：5～20m/s

油散布能力：1.5m<sup>3</sup>/min

計測水路：長さ 60×幅 3.8×深さ 5.1m (基準水深 4.3m)

d) 旧筑波研究所角水槽<sup>11)</sup>

「広い水面での試験を目的とするもので、船舶の対航性能、操縦性能等の試験、海洋構造物の波浪中の試験等

が行われるほか、水槽に直接油を散布して実験を行うことができる」とうたっており、非常に広い水面を使った曳航試験も可能である。しかもこの水槽も屋内水槽であるため、天候による風波の発生等の影響がない。

主な仕様

波：最大波高

計測台車：移動速度 最大 2m/s

試験水面：長さ 80m

幅 45m

深さ 2.6m

基準水深 2.3m

(4) 油回収実海域再現水槽の建設

建設された水槽は「油回収実海域再現水槽：STORMS；Simulation Tank for Oil Recovery in Marine Situations」という名称となった。

水槽の大きさについては、たとえば国土交通省北陸地方整備局が運航する浚渫兼油回収船「白山」に搭載されている舷側設置式渦流型スキマーは国内最大級の規模となるが、これを 2 分の 1 スケールで実験が可能であるように設計した。また、国土交通省の各地方整備局が運航する双胴式海面清掃船等の場合は、双胴間が約 3m なので、実機スケールの双胴間を再現できるような水槽幅を持たせた。この結果、実験用水路の幅 6m、長さ 20m、水深 2.5m と設定した。

また、海上での挙動を再現できるように、造波機と水流発生装置を整備した。造波特性は規則波での最大波高 50cm である。また、水流の障害とならないようにソルターダック方式を採用した。水流発生装置は、回流ダクト方式で水中プロペラ 2 基がダクト中に設置されている。出力は 1 基 132kw で、2 基により発生できる流速値は最大約 1.0m/s (2knt) である。油回収船により海上の浮油を回収する作業は、航行速度が速いとオイルブームを油が潜り抜けるなど、あまりうまくいかないといわれている。しかしながら操舵等のためにはある程度の速度が必要となり、現場では約 2knt 程度の速度で作業される場合が多い。したがって、本水槽では実作業時の船速をそのまま再現することができる。

このほか、世界でも初となる加温と冷却ができる水槽水の温度調整器があり、水槽水を 5℃～30℃の間で調整することができる。

仕様を Table 2.3 にまとめた。また、写真を Fig 2.4、見取り図を Fig 2.5 に示す。

第 5 章で行った研究開発においては、水槽試験は全て本水槽で行われたものである。

Table 2.3 Specifications of STORMS

Type	Circulating
Scale (test basin)	L20×W6×D2.5m
Wave Height	0.5m
Current	1.0m/s
Wind	Option
Water	salty water
Oil	heavy oil
Temperature Control	5~30°C heat and cool

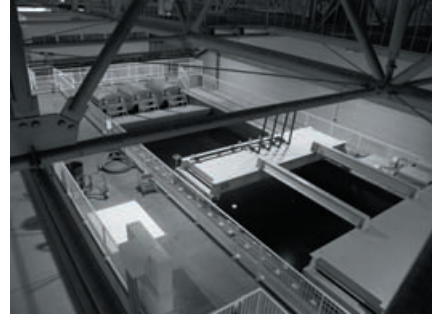


Fig 2.4 Bird's Eye View of STORMS

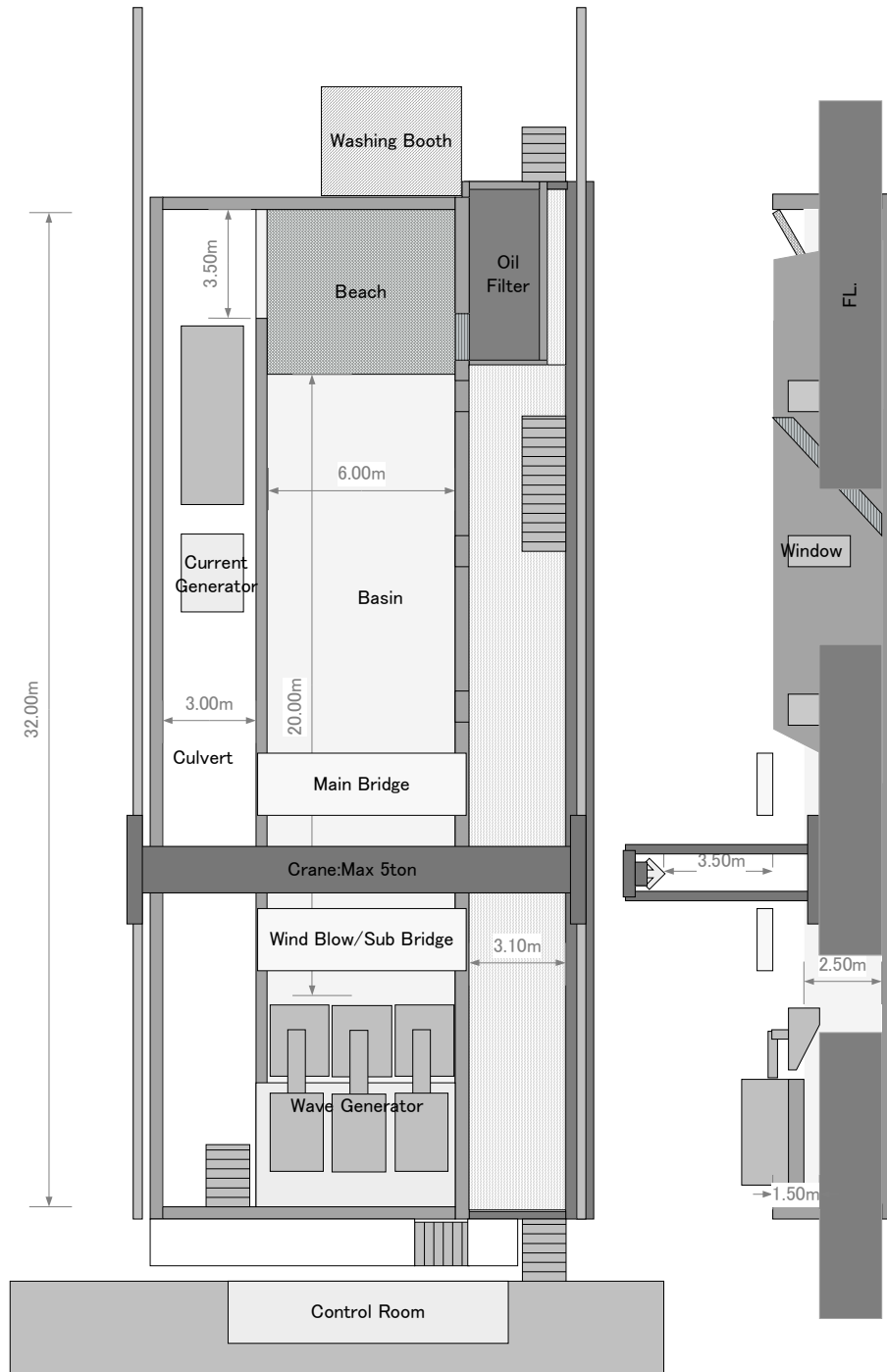


Fig 2.5 Plan of the STORMS

## 2.5 現状の課題

わが国では数値的にかかなりの数量の防除資機材が配備されているが、Fig 2.1, 2.2を見るとおり、配備地域には偏りがある。これは法律がタンカー等の所有者に資機材の配備を義務付けていることに関連しており、東北や山陰で特に少ない傾向がわかる。しかしながらナホトカ号重油流出事故でもわかるとおり、産業と被災地のとの関連性は少ないといえる。わが国近海では日本海も太平洋も同様に非常に多くの外航船舶が航行しており、油流出事故の蓋然性はあらゆる地域で高いと考えるべきである。大型貨物船の燃料タンクの容量は数百トンから数千トンに至り、海難事故があればタンカーの事故と変わらない規模の油濁被害が発生する可能性がある。

また、大型船舶の燃料油は粘度が高く、エマルジョン化しやすい C 重油が一般的であるため、回収作業時には高粘度であると考えられるが、古い油回収機の多くは法律の定めにより対象油を B 重油としており、最近新たに配備した高粘度油に対応する機器以外はあまり性能を発揮できないものと考えられる。実際にナホトカ号重油流出事故後、通常油回収機では油の粘度が高いために回収が難しいことが指摘されている<sup>12)</sup>。

ナホトカ号重油流出事故後は、緊急時の指揮系統の整理、省庁間の協力体制など行政的な体制整備は一定の進展を見たと考えられる。しかしながら同時に答申された油回収資機材等の技術開発や研究については、各所で様々な取り組みがなされているが、本格的な実験施設の整備が行われたのは 2004 年度であり、現状ではまだまだ不十分である。

## 3. 油回収システムの課題

### 3.1 世界の油回収システムの開発状況

世界の油回収用資機材の開発状況と製品を一覧することのできる資料として WORLD CATALOG が有名である。本資料は油回収機、オイルブーム、ビーチクリーナー、分散剤等の散布装置等を網羅しており、2 年おきに更新されている。この中で油回収機については対象となる油の粘度のクラスが個々の製品ごとに記載されている。しかしながら現状では数十万  $\text{mPa} \cdot \text{s}$  のエマルジョン化した高粘度油と数百～数千  $\text{mPa} \cdot \text{s}$  の C 重油程度の粘度まで対応できる油回収機はほとんど見られない。また、油回収機には波によって大きく影響を受けるものが少なくない<sup>13)</sup>など、運用に際してのノウハウや油回収機に関する知識が要求されるものが多い。

これらは回収対象の油の物理的な性質が、水に比べて

比重が小さい流体の状態から粘度が高い流体、極端に粘度の高い半固体のような状態と、エマルジョン化することによって大きく変化するため、機械的な対応に限界が生じるためである。また、ナホトカ号重油流出事故において油回収機が役に立たなかった理由として専門家の不足が挙げられたことは、これら油回収資機材の多くが、専門家以外の者による運用性について積極的に考慮していないことを推察させるものである。

### 3.2 エマルジョン化油の問題

一般的に、油流出事故においては風化やエマルジョン化による高粘度化が回収作業の問題点となる。海上に流出した油は、時間の経過とともに揮発成分が蒸発し、不揮発成分は波による運動で海水と混合を繰り返し、エマルジョン（ある液体中に混じりあわない他の液体が微細粒子となり分散して浮遊している状態）を形成する。油流出事故で形成されるエマルジョンには Fig 3.1 に示すとおり水中に油微粒子が分散した水中油型（oil in water, O/W 型）エマルジョンと、逆に油中に水微粒子が分散した油中水型（water in oil, W/O 型）エマルジョン 2 形態が存在する。

水中油型エマルジョンは、油滴が小さく拡散するために、バクテリアによる分解が容易となる。このため、油濁対策としては、特に軽質分が多い場合は分散剤や散水、スクリーによる攪拌等で積極的に海上へ拡散させることに効果がある。しかし油中水型エマルジョンは、見かけ上、油のような粘性の高い物理性状を示し、取り込んだ海水の滴の量により体積が膨張する。流出油が原油や重油の場合は、油中水型エマルジョンを 24～48 時間程度でほぼ形成し、油の成分によって異なるが、水分比は 60～80%に達する。このため、見かけ上の体積は揮発成分が蒸発した残油分の 4～5 倍にも膨張する。また、粘度は数万～百万  $\text{mPa} \cdot \text{s}$  といった状況となる。文献等によれば先のナホトカ号重油流出事故では、粘度が 123 万  $\text{cSt}$  に達した<sup>14)</sup>。

高粘度化した油中水型エマルジョン化油は、分散剤のような界面活性剤が浸透しにくくなるため、その効果が期待できなくなり、海上で拡散しにくく、残存性が高くなる。また、高粘度となって流動性が悪くなり、吸着材の内部に捕らえられにくくなる。粘度の高さにより、ポンプを動力とした移送管の内壁との摩擦損失が過大となるため、移送がたいへん困難である。また、ゴミは流出油と同様に海岸付近まで常時漂着していると考えられ、海岸付近ではこれに海藻類が多く加わる。実際に筆者の勤務する研究室が現地で採取した油には大量の海草やゴ

ミが混入していた。これらのゴミをエマルジョン化油から分離することは、高粘度な物性により容易ではなく、ポンプによる移送をより困難にしている。

また、粘度の高い油は厚い油塊を形成する場合があります。ナホトカ号事故の際にも数十センチ単位の厚さになったことが確認されている。このため、一般的なスキマーでは回収口を油塊が橋を架けたような状況のままつかえて入らなくなるなどの現象を引き起こした。

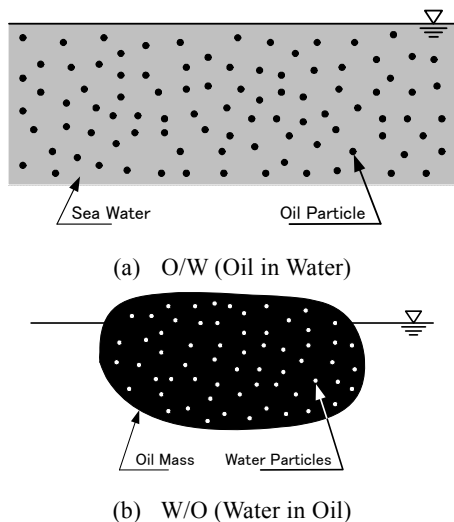


Fig 3.1 Diagram of the emulsified oil

### 3.3 ロジスティクスの問題

油濁対策の中で中心となる油回収作業においては、ロジスティクスの確保はたいへん重要である。ここで論じるロジスティクスは2つに分けられ、ひとつは資機材の現場への搬入・移動・搬出と作業を行なう人的資源の確保である。またもうひとつは回収した油水や油の付着したゴミの貯蔵と排送である。

#### (1) 資機材の現場への搬入・移動・搬出

油回収現場では、能力の高い資機材を一刻も早く搬入する必要がある。資機材を全ての港湾に配備することは事実上不可能なので、特定の港湾や防災基地等の拠点に配備することとなるが、この拠点から現場まで、輸送する船舶や航空機、車両等を予定し、確保すると同時に、それぞれの輸送手段に対して適した資機材の重量・大きさ等で全ての資機材を準備する必要がある。例えば、船舶による輸送を想定する場合は、使用できる船舶の搭載能力に合わせた大きさや重量にすることだけではなく、搭載するための岸壁の確保および資機材の重量によってはクレーン設備が必要となる。

油回収現場に到着してからは、油の移動に合わせて資機材も移動する必要がある。海上では油回収作業が1日

で終了することはまれであり、海上で資機材を設置して回収作業を開始し、作業を終えて資機材を格納して帰港し、翌日また回収現場へ出港するといったサイクルが十分に早く行えるような工夫が必要となる。海岸で漂着した油を回収するような場合には、水深が浅い、岩礁が多いなどで、船舶により海上から海岸付近に近寄ることが困難な場合を想定する必要がある。この場合、重量の大きな資機材の場合は陸上からどのようにして搬入するか難しい問題となる。したがって、油回収現場の状況に合わせた重量や大きさの資機材を予め準備するか陸上から重機により搬入するためのルートや特殊車両の確保が必要になる。

このように、事故時には資機材を現場へ搬入するために全ての条件に整合性がないと結果的には作業の遅れとなって顕れてしまう。資機材の量や重量に見合った重機械や作業員数、それらが入り込めるようなルートがあるかどうかの地理的な条件といった各要素に問題があればこれをフィードバックして、持ち込める資機材の種類や重量を軽減する、ルートを変更する、重機械の種類を変更する、作業員数を変更するなどの検討を迅速に行わなければならない。

#### (2) 人的資源の確保

海上を浮遊する油および海岸に漂着した状態の油を回収する経験を持つ者はほとんどいないと考えられる。我が国で1年間に発生する海上の油濁事故は数件であると考えられ、その際に出動する海上保安官および地方整備局の油回収船の乗組員はごく限られた貴重な人材といえる。1997年のナホトカ号重油流出事故においては多くの現場と大量の流出油に対して、専門家はもとより油回収の経験者が大変に少ないことが問題点として指摘された。

独立行政法人海上災害防止センターでは油濁対策のための講習を行っており、地方自治体の消防署員等が油濁事故の際の油の性質や油回収機の操作方法、回収手順の計画の仕方などの講習と訓練を受けている。しかしながら現地でこれらの訓練や講習を受けた人材が配置されるような仕組みは確立していると言えず、海上で機動力を持つ船舶の所有者や海岸等で使用する重機の所有者がこうした訓練を受けている可能性は少ない。

2007年の韓国泰安沖で起きたヘーベイスピリット号油流出事故では延べ120万人以上ものボランティアが現地で油回収作業を行い、予想以上に迅速に復旧された<sup>15)</sup>。大規模な人海戦術がとれるならば、経験値が浅くても対応が可能であろう。ただし、この際にも必要のない吸着

材の大量使用が見られるなどの指摘があった。

油濁対策において、経験が重要な理由としては、通常は取り扱うことがない浮遊物の回収作業に加えて、油がエマルジョン化して、非常に粘着力があり、見かけ上流体のようにも固体のようにも振舞う状態であることが大きく関係する。当然ながら資機材や人員の配置に関してはより高次の専門的知識を必要とする。これを受けて油回収現場では資機材の有効な活用を求められる。しかしながら、油回収機その他の資機材は通常は使用する機会のないものである。また、通常のポンプ類の転用などを行うこともあり、この場合油回収特有の使い方をしなければ、詰まりを発生したり効果がないのに無駄に使用したりすることとなる。たとえば、ナホトカ号重油流出事故では<sup>3)</sup>、持ち込まれたポンプなどの機器類に関してはほとんどが詰まりを発生してすぐに使用できなくなるトラブルがあったが、これは1日の作業終了時にフラッシングをせず放置したり、油を吸引・移送する際に、高粘度油の滑りを良くする水を間欠的に吸引するという経験的な方法を知らなかった、と言われている。

海上でも、オイルブームを2船で曳航して集油効果を高める手法や、ブームバッグを使用した曳航による高粘度油の回収手法などが提案されたりするが、実際には操船の問題などから訓練なしでの実施は難しかった。

他にも、重機や建設機械を用いることで回収その他の効率が高まるが、これらはいずれも資格の必要なものであり、一般市民を多数ボランティア等で配置できても使用できないため、建設会社等から人員を頼むなどの対策が必要である。また、油回収作業とは別に、油汚染により生命の危機にさらされている鳥や小動物のクリーニングが行われたが、これらは日本野鳥の会による指導によるものであった。

このように、油回収現場には油回収の専門家、回収経験のある者、訓練を受けた者、現場作業に関するノウハウや機器類の資格保持者などの人的資源の確保に配慮する必要がある。

### (3) 回収油類等の貯蔵、排送

油回収作業を行えば、回収された油水やごみ類がたまる。海上では船上にこれを貯蔵する必要がある。貯蔵できるタンクの容量は国土交通省の大型油回収兼浚渫船で1,000トン程度であり、中小の油回収船では数十トン程度である。回収する対象が油なので、油回収船以外では漁船など船倉に貯蔵することは難しい。このため、貯蔵用の容器が必要となる。しかしながら、一般的に使用されることが多いドラム缶はリサイクルがよくできており、

急な事故時に空のドラム缶を大量に入手することは難しい。また、通常はドラム缶の容量は200lであり、容量は比較的少ないが、油水が入った状態では重量が200kg程度になるため、取り扱いが簡単でなくなるという注意が必要である。

油回収作業はこれらの貯蔵用タンクなどの容量が一杯になった時点で中断しなければならない。ナホトカ号重油流出事故では重油が約6,000トン流出し、回収油水は約60,000トンに上った。油回収機の効率は現状では良いとは言えず、油のみを回収することはできない。また、C重油の場合、エマルジョン化によって体積は4~5倍になるため、油回収船等の海上作業では貯蔵用タンク等の容量が流出量に対して明らかに少ないことが普通であり、タンク内の油水を排送するために現場と港を往復しなくてはならない。したがって、港などでは油回収船などの作業を行って戻ってきた船舶から油水を受け取り、これをいずれかに排送するか一時的に貯蔵する必要がある。ナホトカ号事故に限らず、大規模な油濁事故では、あらかじめ大量の油水の受け入れ先とそこまでの運搬手段を確保しなければならない。

海岸での作業では、最終的に油水とゴミの受け入れ先としてピットを掘る、土嚢袋に入れて海岸のある区画に並べるなどの処置をとるが、さらにその受け入れ先までの運搬方法もスムーズでなければ、回収作業全体が滞ることとなる。

さらに油回収作業が終了したあとで、油水とゴミの膨大な廃棄費用が発生する。したがって、迅速な油回収作業のためには貯蔵と排送の仕組みが十分に確保されると共に、油回収において余分な水の回収及びゴミの発生を防ぐことはたいへんに重要である。

## 3.4 運用と操作のわかりやすさ

### (1) 油回収機の特異性

3.3で述べたように、油回収作業現場などにおいて十分な経験や専門知識を持った人員が配置されることは必ずしも期待できない。このため、使用される資機材の運用や操作が正しく行われない状況が予想される。油回収作業は水面に浮いた油をすくうことを中心としたものであるが、そのための回収機のしくみについては様々な手法があり、初めて使用する場合に理解できないまま操作を誤るなどが考えられる。また、使用されるポンプは高粘度油に対応するために通常の現場作業などで使用するポンプとは異なるタイプの場合もある。油回収機は事故時にのみ使用される機械であり、通常使用される機器類



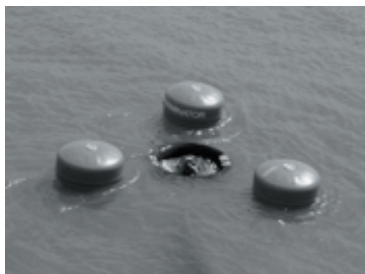
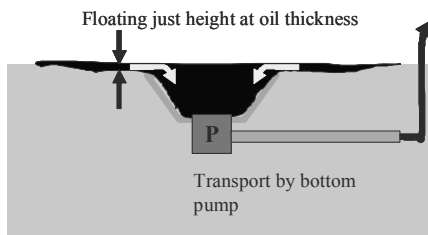
ではなく、特殊であると考えべきである。このため、油回収機の運用と操作についてわかりやすく適切に示すこと及びこれをすぐに覚えられようなものであることが重要である。石油連盟は油回収資機材の貸出業務を行っているが、筆者のヒアリングによれば、貸し出し用に調達する油回収機についてはよく知られているものを優先することが選定条件の一つとなる。

油回収機についてはその方式により分類ができるが<sup>16, 17)</sup>、そのそれぞれにいて運用と操作のわかりやすさについて以下に述べる。

(2) 油回収機の方式と特徴

a) せき式

水面近くにせきを設けこれを越えた油のみを回収する工夫をしたものをせき式スキマーと呼ばれる (Fig 3.2)。原理は簡単であるが、油の回収率はせきの高さを適正に維持することができるかどうかで左右されるため、そのための工夫が凝らされている。高粘度油には対応しないものが多く、誤って対象外の高粘度油の回収に用いるとほとんど回収できない場合がある。また、油膜厚さを厚くするようにオイルブームでの集油作業を行うことが重要であるが、経験や知識がなければこうした作業は行われにくいと考えられる。スキマーを少しずつ前進させる必要のある方式と、油膜中に投げ入れて浮遊した状態で用いるものがあるが、こうしたことも専門知識と考えられ、装置の状況を見ているだけでは気づかない可能性が高い。

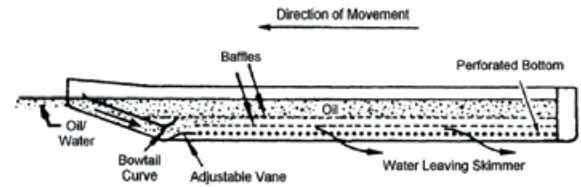


Reference ; RO-CLEAN DESMI website photograph.  
<http://www.desmi.com/RO-CLEANDESMI/Products/Oilskimming/DESMIWEIRSKIMMERS/Terminator>

Fig 3.2 Weir skimmer

b) 傾斜版式 (没水平版式)

水面下のせきをくぐりぬけた油のみを回収する工夫をしたもの (Fig 3.3)。回収機の形状を観察しても専門知識がなければ原理を推し測ることは難しい。原理から少しずつ前進させて回収する前進式スキマーとなるが、最適な速度での運用の必要性がある。



Reference ; WORLD CATALOG 2008 2-14

Fig 3.3 Fixed submersion plane skimmer

c) 吸引式

吸引口を水面下あるいは水面上に固定してポンプで吸引するもの (Fig 3.4)。原理は一見たいへんわかりやすいが、実際には吸引口の高さを適正に維持する必要があるため、どの高さが適正なのか、あるいは適正な高さというものがあるということの知識が必要である。また、吸引口以外の装置部分について、不具合がおきた場合に油回収に関する専門知識がないとその原因の推定や対策を講じることが難しい。

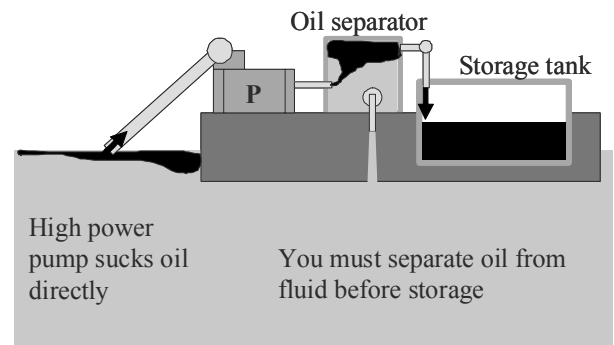
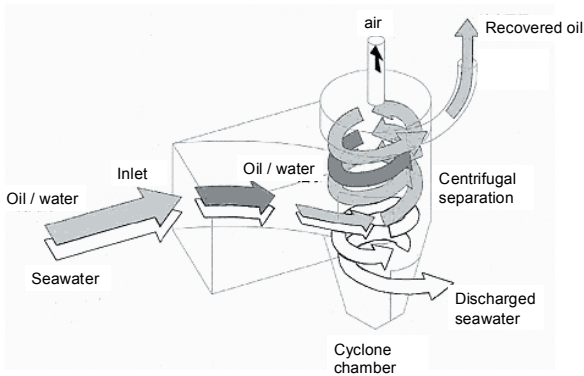


Fig 3.4 Suction oil skimming system

d) 過流式

流れ込む油水が渦流になって、中心部に油が分離する仕組みとしたもの (Fig 3.5)。油と水の分離をせきを用いず行っているが、前進式のせき式スキマーに形状が似ている。専門知識がなければ原理を推し測ることは容易でない。運用や操作などで現場での工夫を加えたり、不具合を修正したりすることは難しい。しかしながら波に強く、海翔丸、白山、清龍丸などで搭載されている。



Reference;

Hokuriku Regional Development Bureau, MLIT website  
[http://www.pa.hrr.mlit.go.jp/vision/ecoport/seibi04\\_b.htm](http://www.pa.hrr.mlit.go.jp/vision/ecoport/seibi04_b.htm)

Fig 3.5 Cyclone oil skimmer

e) ロープモップ式

モップ上の吸着材をロープで繰り出し回収し、油を搾り取るもの (Fig 3.6)。原理はわかりやすく、油の回収状況も目で確認できる。運用や操作についてはわかりやすい方式の一つである。

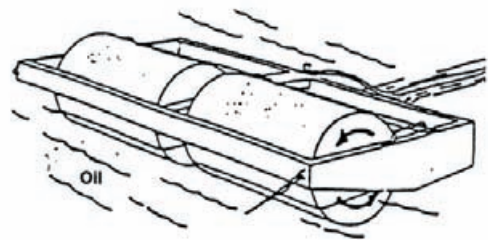


Reference ; Eureka Nordic d.o.o. website photograph.  
<http://www.eurekanordic.com/VerticalAdhesionBandOilSkimmer.htm>

Fig 3.6 Rope mop oil skimmer

f) ドラム式

水上でドラムを回転させ、付着した油をかきとって回収するもの (Fig 3.7)。高粘度油の場合、油膜表面に水膜が薄く載る場合があり、この場合油が付着しにくくなる。高粘度油の場合、油をかき取るスクレイパーが十分には働かなくなる場合がある。しかしながら観察することによって原理等は理解しやすい。常に油膜に接触しなければ回収できないが、油膜に対してスキマーを近づけると油膜が逃げてしまう現象がおきやすい。そうした状況は観察することで理解しやすいため、運用や操作はわかりやすい方式である。

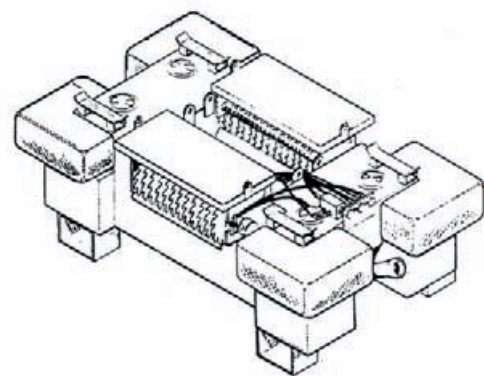


Reference; WORLD CATALOG 2008 2-8

Fig 3.7 Drum oil skimmer

g) ディスク式

水中で何枚ものディスクを回転させ、表面に付着する油をかきとって回収するもの (Fig 3.8)。ディスクの隙間にゴミを噛みこみやすいため注意が必要であるが、事前にその情報を持たないと噛みこみを防ぐ作業を行わない可能性がある。



Reference ; WORLD CATALOG 2008 2-8

Fig 3.8 Disk oil skimmer

h) ブラシ式・ベルト式

剛毛のブラシを植えたドラム、ベルト、またはロープを回転させ、付着した油を搾り取るもの (Fig 3.9)。見



た目に原理がわかりやすい。油膜に対して常に接触する必要があるため、スキマーを油膜に近づけるように動かすと、油膜が逃げてしまう現象がおきやすい。これらの状況も観察することで理解しやすいため運用や操作はわかりやすい。

Absorbing or trapping oil on conveyor

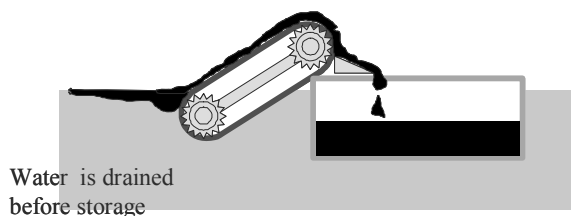


Fig 3.9 Belt conveyor oil skimmer

i) グラブ式

クレーンに取り付けたグラブで水面の油塊を掴み取るもの。運用も操作も最もわかりやすい。わが国では沿岸域に漂流した高粘度の大量の油を回収する作業でしばしば使用されている。油塊とともに大量の余水をすくい上げるため、一時貯蔵タンクの容量が大きい必要がある。

j) 複合式

せき式の弱点を克服するためにディスク、ロープモップ、ベルト、その他を組み合わせて、状況に応じて判断し、交換して用いるもの。状況の判断には専門家の知識が必要であり、交換作業は油圧系統、信号系統の結線の正しい結合作業が必要になる。専門家の指導のもとに使用するべき資機材ではないかと考えられる。

以上について評価すると Table 3.1 に示すように方式ごとの特性が明らかとなる。研究開発をすべき油回収機の特性で重要となるのは、高粘度油に対応できること、油回収効率 (Oil Recovery Rate) が十分高いこと、ゴミに強いこと、波の影響が小さいこと、そして油回収の専門家のスキルを要しないことである。

Table 3.1 Characteristics of the skimmer type

Skimmer type	Oil Type (viscosity)	Oil Recovery Rate	Oil Recovery Efficiency	Effect of Debris	Effect of Wave	Need of training
1.Wier	low	high	low	high	high	yes
2.Fixed submersion plane	low-med.	high	low	high	med.	simple
3.Suction	low-high	high	low	high	high	yes
4.Cylone	low-high	high	low	high	high	yes
5.Rope mop	med.-high	med.	med.	low	med.	simple
6.Drum	low-high	med.	high	med.	med.	simple
7.Disk	med.	med.	high	high	med.	simple
8.Belt, brush	med.-very high	med.	med.	med.	med.	yes
9.Grab bucket	med.-very high	med.	low	low	med.	no
10.Complex	low.-very high	vary	vary	med.	vary	yes

3.5 結語

油回収システムはわが国においてはその基準として対象油を B 重油としてきた。また、特に大量の油流出が考えられるのは、原油タンカーの事故や石油掘削現場での暴噴事故であるため、対象油は原油となる。しかしながら、大型の外航船舶は、燃料として C 重油を数百トンあるいは数千トン積載している。わが国周辺海域のほとんどは外航船舶の通航量が年間 10,000 隻以上であり<sup>18)</sup>、貨物船による油流出事故のリスクは高い。したがって、C 重油を対象とした油回収システムの充実が重要である。

C 重油はエマルジョン化しやすく、粘度が数千~数十万 mPa・s と広範囲を想定され、最終的には極めて高い。したがって一般的な油回収システムでは回収が難しく、高粘度を対象とした資機材を用いる必要がある。しかしながら、どの油回収機を用いるかの判断には専門知識が必要である。さらに現場では資機材の搬入搬出や回収油水の貯蔵場所などのロジスティクスが十分確保されることが必要である。油回収システムの運用には本来は訓練や経験によるスキルがあることが望ましいが、そうした人的資源の確保は難しい。

したがって、油回収システムの運用と操作を分かりやすいものとしてできるだけ油回収という日常的にありえない作業を緊急の現場で理解し、実施できるようにすべきである。しかしながら油回収機は様々な形式があり、効果的な使用方法もそれぞれ異なっている。しかし中にはそのしくみのイメージがつかみやすい形式のものもある。

このため、油回収システムを構築するにあたっては、現場でのロジスティクスの確保が十分にできる条件を備え、対象とする油は C 重油のエマルジョンに対応し、これを操作する者に対しては油回収の専門知識が無いものと想定して、操作が容易でそのしくみのイメージがつかみやすいものとするのが理想であると考えられる。しかしながら、これらの条件をすべて満たすことは非常に難しく、本論文の研究開発においては回収現場の状況を想定して油の粘度や資機材の設置条件、操作者の練度を条件設定した。

4. 浅海域用高濃度油回収システムの開発<sup>19~22)</sup>

4.1 コンセプト

(1) 背景と基本的なコンセプト

大規模な油濁事故での油回収作業では、洋上での回収率は 15%前後であることが多く、ナホトカ号重油流出事

故においても同様であり、回収油は海岸に漂着したものを回収した分が多かった。沖合では作業するためには海象条件が厳しく、浮流油も広い範囲に分布するためこれを追跡したり集めたりするのに高度な技術を要する。これに対して、海岸では陸地に自然に浮流油が寄せられる傾向にあり、漂着すれば人海戦術でも回収が可能である。しかしながら、人海戦術では個人にかかる負担が大きく、ナホトカ号重油流出事故の作業では過労と考えられるボランティアの方の死亡事例もあった。このため、海岸で使用できる効率の良い機器が当時なく、人海戦術を取らざるを得ない状況に対して批判があった。結果的に人海戦術による回収作業は長期間にわたり、ナホトカ号重油流出事故では珠洲市の場合<sup>23)</sup>、1月13日から4月27日の間、延べ24回の回収作業で作業人員が延べ35,219人、回収油水量が4,835キロリットルであった。なおこのときの海上浮流分は579キロリットルで、全体の約12%であり、一般的に言われている比率<sup>24)</sup>に近いことがわかる。

こうした状況から、海岸で使用できるより効率の良い油回収機器の開発が必要であると考えた。油回収作業は、漂流油の囲い込み、集積、スキマーの投入、スキマーから陸上の仮設タンク等への排送、仮設タンクから処分地への配送、といった手順を踏んで行われるが、これらのロジスティクスがすべて滞りなくできなければすべての作業が中断してしまう。しかし、現地で作業にあたる人員は特別に訓練された者が十分に確保できないため、本格的なオイルフェンスの展張作業や囲い込み、既存の様々な機器の選択や転用、高粘度油への対処、ゴミへの対処等をケースバイケースで迅速に行うことは期待できない。更に、ひざ程度の水深での作業でも危険が伴うことから、機器を使用しない手作業の場合の効率性はごく低いものになってしまう。

こうした状況を踏まえ、船舶の入れない水深の浅い沿岸域で、集油し、掬い上げ、陸上に配送する一貫したシステムを企図し、研究開発を行った。

## (2) 対象とする油

一般的に、油流出事故においては風化やエマルジョン化による高粘度化が回収作業の問題点となる。海岸に漂着するまでに24時間以上経過していると想定すれば、海岸付近に到達する浮流油はすでにエマルジョン化が進んでいると考えられる。通常の油回収機材は油が流動性を持つことを前提にしたものが多く、高粘度化が進むと対応しにくくなる。文献等<sup>14)</sup>によれば事故の際の粘度は123万cStにも達した。浮遊ゴミと流出油は潮目などで

合流する場合が多いと考えられ、海岸付近ではこれに海藻類が多く加わる。実際に現地で採取した油には大量の海藻やゴミが混入しており、ポンプによる排送をより困難にしている。

また、粘度の高い油は厚い油塊を形成する場合があり、ナホトカ号事故の際にも数十センチ単位の厚さになったことが確認されている。このため、一般的なスキマーでは回収口が小さいために油塊がつかえるなどの問題があった。

こうしたことから、対象とする油の条件を油層厚が厚く、かつ数十万 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上の高粘度で海藻等のゴミが混入していると想定した。

## (3) 対象とする現場条件

水深の浅い沿岸では大きな船舶が立ち入ることができず、また、迅速な資機材の運搬の面から見ると、近傍まで資機材を運ぶ機動力は車両のほうが有利である。しかしながらこの場合、海岸から資機材を展開することとなり、資機材の重量が大きい場合はクレーン等の重機を乗り入れられるなどの条件がそろわなければならない。スキマーを進水させるためにはスキマーの喫水まで海岸から沖へ向かって出さなければならないが、重機が使用できない場合を想定しなければならない。実際の海岸では、海水浴場等の砂浜の場合は近傍の道路から重機を乗り入れられる可能性があるが、岩礁地帯や礫浜ではほとんど不可能であると考えられる。砂浜の場合でも重機によるわだちぼれによる環境への影響も考えられる。このため、クレーンの場合はブームのリーチが近傍の道路等から海岸のどの範囲まで届くかで重機の使用可能範囲が決まると考えられる。

こうしたことから機材の搬入の観点からは、重機の使用は想定すべきではない。このため、装置各部の重量及びスキマーの喫水は人力を想定したものとす。また、入り込める船舶の喫水はごく浅いことから、回収油は近傍の道路から陸送により排送されるものとした。このため、貯蔵ピットやタンクは道路近傍に設置するものとし、人力の場合にバケツリレーとなるスキマーからの回収油水の排送を管路により貯蔵ピットやタンクまでポンプで圧送することとした。

## (4) 目標能力の算定

### a) 人力の算定

作業を機械化・自動化するにあたっては、その能力が人力に明らかに勝るということが重要である。このため、

海岸での漂着油の回収作業が、作業員 1 人あたりに換算してどの程度の能力になるか調査した。

筆者の所属する研究所職員がナホトカ号事故当時において現場ヒアリングを行ったときの感想としては、力の強い人が一生懸命働いても一人あたりの回収能力は 1 日ドラム缶 1 本であろうとのことであった。

次に、現場での投入人員と回収量の関係から推算してみた。珠洲市発行のパンフレット<sup>23)</sup>に事故当時の詳細なデータが載っており、これを活用して試算した。石川県のデータ (Table 4.1) では漂着油の総回収作業員が約 207,500 人に対して、回収された漂着油は 85,900 ドラム (1 ドラム 0.2kl) であるから、一人あたりドラム缶約半分に満たないことになる。ただし、これらのデータには海上回収分も含まれているものがあるようだが、漂流油の回収分は全体の 17%に過ぎないのでドラム缶半分以下であるとの判断は妨げないものとする。

珠洲市の 1 月 13 日から 4 月 27 日までの回収作業のデータからは、日別にわかるのでより詳しく解析した。

解析結果 (Fig 4.1) のデータからは 1 人あたりの回収量が 1 ドラムに達しなくても、人員の投入量を減らしていないことがわかる。こうしたことから、海岸での一人あたりの漂着油回収能力は 2 [ドラム/人日] が限界と推測できる。通常の作業として捉えれば 1 [ドラム/人日] が最高値であり、災害現場での覚えやすさということも考慮して、本研究ではその能力の目安としての原単位を 1 [ドラム/人日] とした。これらに含まれる作

業は、水面からの油のすくい上げ、バケツリレー等によるピットや道路上の運搬車までの排送、及びその他雑作業となる。

Table 4.1 Recovered Oil / Water Fluid Converted in Drums(from the Data of Ishikawa Prefecture)

City, Town, Prefecture	Recovered Amount (kl)	Converted into 0.2kl Drum	Head-Count of Participants	Recovered Amount (Drums) per Head
Suzu City	4,835.2	24,176.0	35,219	0.69
Wajima City	3,693.0	18,465.0	28,450	0.65
Monzen Town	1,298.2	6,491.0	12,357	0.53
Togi Town	518.4	2,592.0	8,724	0.30
Siga Town	301.9	1,509.5	6,540	0.23
Hakui City	185.7	928.5	10,576	0.09
Shio Town	16.3	81.5	3,392	0.02
Oshimizu Town	112.5	562.5	5,073	0.11
Takamatsu Town	62.1	310.5	4,770	0.07
Nanatsuka Town	83.6	418.0	5,186	0.08
Unoke Town	53.0	265.0	3,135	0.08
Uchinada Town	211.8	1,059.0	10,448	0.10
Kanazawa City	194.8	974.0	14,083	0.07
Mattou City	107.0	535.0	8,310	0.06
Mikawa Town	40.8	204.0	2,795	0.07
Neagari Town	50.2	251.0	8,575	0.03
Komatsu City	18.5	92.5	4,471	0.02
Kaga City	5,401.8	27,009.0	35,385	0.76
Ishikawa Prefecture	17,184.8	85,924.0	207,489	0.41

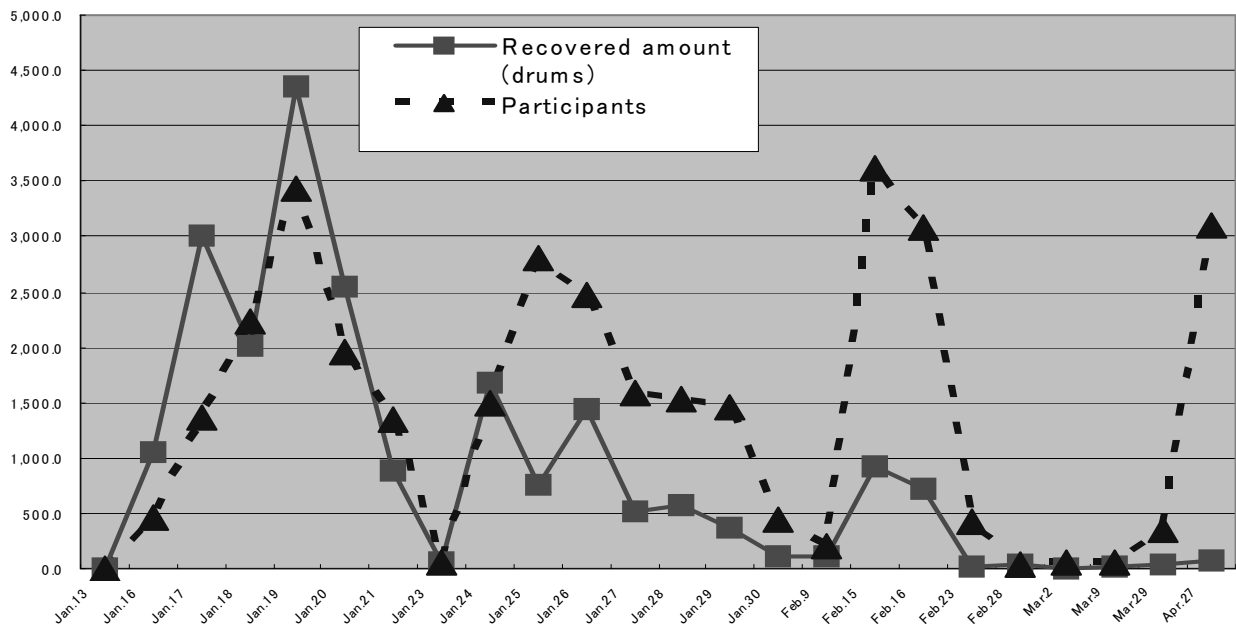


Fig 4.1 Conversion of Recovered Oil / Water into Drums (Data of Suzu)

#### b) 必要能力の設定

時間あたりの回収能力はできる限り大きいことが望ましいが、機材の重量と大きさには制限があるので、その範囲内での最大限の能力を目標とする。(1)の解析結果から1日当たりの1人の作業員が回収する油水量を1ドラム/人日とする。回収機材をオペレートするために必要な人員を15人と想定すると、15ドラム/日よりも明白に大きな能力が必要となる。そこで人間の10倍を目標とすると、1日1台で150ドラム(30m<sup>3</sup>、油層厚20cmで150m<sup>2</sup>)となる。1日の稼働時間を6時間とすると、5m<sup>3</sup>/h(油接触幅50cm、油層厚20cm、時間あたり回収面積25m<sup>2</sup>)となる。高粘度油に適した容積型ポンプの重量等を鑑みて、5m<sup>3</sup>/hを能力の目標とした。

#### (5) 構築するシステムの全体

以上の条件から、回収システムの全体について以下のように3つの機構が連携して、オペレーターの簡便な補助により高効率で働くものと設定した。

- ① 漂流油を集積し掃海面積を稼ぐ集油機構
- ② 集油した高粘度油を掬い、油水分離を同時に行うスキマー
- ③ 掬い取られた油を陸上あるいは道路上の仮設タンクやドラム缶に排送する排送機構

各部材は集油ブーム、スキマー、排送ポンプ、排送管などに分離合体し、それぞれ適当な運搬補助具を付属することとした(Fig 4.2)。これにより人力で運用可能な大きさと重量の範囲に抑えることとする。また、オペレーション面からは、専門家がいなくても機能が損なわれないこと、海岸用のポートが出せる状況の波の状況までは問題なく回収できることを前提とする。したがって、油回収地点に常に回収機を移動させて保持することのみで回収作業が行われるような半自動的な動作環境を提供できるシステムとした。油の状態は50万mPa・s程度のエマルジョン化した高粘度油に海藻等の繊維状のゴミが混じった状態とし、油塊が大きくなった場合にも対応できるように回収口を大きく設定した。

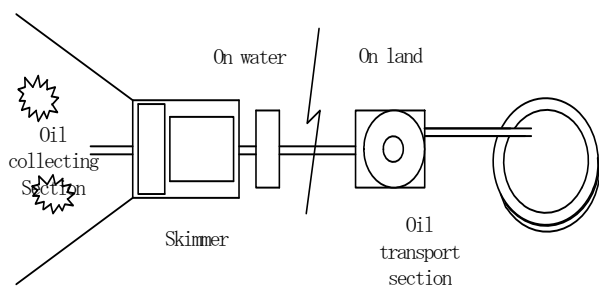


Fig 4.2 Concept of the oil skimming system

## 4.2 各部の機構と特徴

### (1) スキマー部

#### a) 原理の検討

第3章で述べたように、スキマーには油の物理的な性質を利用した様々な方式がある。原理上、付着式が最も高濃度の油水として回収が可能である。しかしながら、付着力を発生させるためには油表面に載った水膜が障害となる。また、ゴミが混じる場合にディスク式はこれを噛み込んでしまう。

一方で、ナホトカ号重油流出事故時には、ひしゃく、スコップ、などが人力回収の主役であった。これらは油と水の粘度の差を利用して油水を分離する作業である。原理としては付着式も有効であるが、粘着力と粘度の関係は不明であること、粘度がある程度以上高くなった場合には油塊が板状になってしまう現象もみられることから、粘着力ではなく掬い取ることを基本とし、油水分離の原理は水との大きな粘度差を利用することとした。

#### b) 高粘度油の網透過実験

掬い上げる機構としてどのようなものがあるか検討した。ひしゃくの作業やグラブ船の作業を模するためには安定したプラットフォームが必要となる。また、これらの作業は常に油を狙うという高度な認知と制御を行う必要があり、システムとしては難しいものになる。そこで、ベルトコンベアを利用して、これに水切りの機能を付加することとした。このため、ベルトの代わりにネットを用いるネットコンベアを開発し、スキマーとして構築することとした。

高粘度油がネットを透過しにくいことはこれまでも研究されてきている<sup>25)</sup>。また、回収資材として高粘度油回収ネットが各地の海上保安本部に配備されており、回収バッグの目合いは2~3mmである。しかし、回収の問題となるスキマーの反射波を少なくするためには、使用するネットの目合いはなるべく大きな方がよい。

そこで、水槽実験の前に、ネットの目合いと粘度とコンベアの速度の関係を考察するために、簡易な実験を行った。箱にそれぞれの目合いのネットを張り、その上に3種類の粘度の油を載せ、油が網をくぐりぬけ始めるまでの時間を計測するものである。

この実験から、高粘度油は予想以上にネットを透過しにくいものであることが分かった(Fig 4.3)。実験の結果(Table 4.2)は、目合いが25mmという大きなものでも粘度が十分に高ければネットから通り抜ける前に貯

蔵タンクへ掬い上げることができる。また、粘度が低い場合には目合いを小さくすれば良いことがわかる。

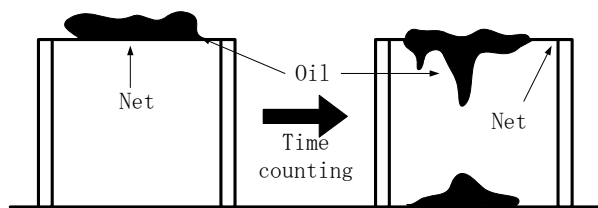


Fig 4.3 Time test of high viscous oil passing through nets

Table 4.2 Results of time test of the high viscous oil passing through nets

Mesh (mm)	Oil viscosity (mPa·s)		
	184,000	286,000	726,000
2.5	10~	10~	-
10.0	5.0	9.5	-
20.0	2.0	3.5	10~
25.0	~1	3.0	5.0

(s)

### c) スキマーの構造 (Fig 4.4)

スキマーは浮力材と集油タンクの前面にネットコンベアを取りつけた形式をしている。ネットは漁網状の網を加工したものである。ネットの幅は 50cm で、水上の油はネット上に乗り上げ、そのまま 40cm ほど上部に掬い上げられる。スキマーは水上に浮いているため、ある程度の波に対しては本体が波の動きに追従できると考えられる。また、ネットにより水切りがなされるため、この時点で油水分離が完了し、油回収効率は高い。

スクレイパーはスポンジ状のドラムによる方式で、正逆回転が可能である。ネットの油は最上部でスクレイパーによりかきとられ、後部の貯油タンクに落としこまれる。スキマーの動力は 2 個の油圧モーターによる。ネットコンベアとスクレイパーを駆動しており、動力源の油圧ユニットは陸上 (渚) に置いてスキマー部の重量を軽減している。油圧ユニットによりコンベアの色度は連続的に変えることができ、その幅は 5~40m/min となっている。

貯油タンクにはすのこ状のゴミ格子が設けられており、振動させることで油とともに載った大型ゴミを転が

り落とし、ゴミ袋でキャッチするようになっている。タンクの底には排送管がつながっており、これも重量低減のため陸上 (渚) に置いたポンプにより吸引、排送する。このように、スキマーの重量を増加させるポンプを分離することではじめて人力による移動が可能な重量を実現している。なお、スキマーのフレーム等の構造材はアルミ材を使用した。

スキマーは喫水が浅くかつ安定性が保たれるように浮体をフレームの両サイドに取り付け、この浮体部にネットコンベアと貯油タンクが取り付けられ、前方に後送するかき寄せ装置が取り付けられる。

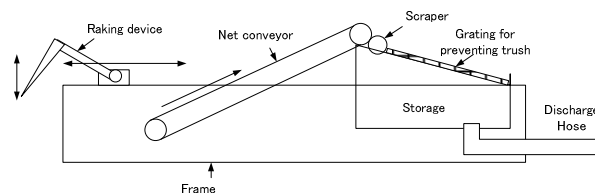


Fig 4.4 Outline of the oil skimmer

### (2) 集油機構

#### a) 集油ブーム

油回収機は油塊と遭遇する確率を高めないと効率的な回収ができない。漂流油は帯状あるいは数カ所の塊となって海岸に接近してくると考えられるが、これらができる限り面的に捕らえるために集油機構が必要となる。このため、スキマー入り口から集油ブームを展開するようになっている。なお、わが国では集油フェンス、オイルフェンスなど、ブームとは言わずフェンスと呼び習わしているが、国際的な用語としてはブームの方が適当であるため、本論文ではブームという呼称を用いる。

集油ブームの展張形式は、Fig 4.5 のように V 字、J 字、U 字等あり、現場で用意される船舶の条件や油回収機の方式などに応じて選ばれるが、いずれも油遭遇率を高め、油層厚を大きくするものである。なお、J 字展張は非対称型に展張する必要があるため、形状を維持することが難しい。本システムでは集油ブームの先端を広げ、油回収機に向けて徐々に絞った V 字の形状とした。これによりスキマーの回収口付近が最も油膜厚さが大きくなると考えられる。また、通常のアイルブームは使用せず、絞り込みにより水面が盛り上がるのを避け、潮流等による引張力の発生を低減させるため、水中のカーテン部に透水性ネットを採用した。このため集油ブームは、発泡材をターポリンで覆った浮体とネットカーテンで構成される独自のものとなった。

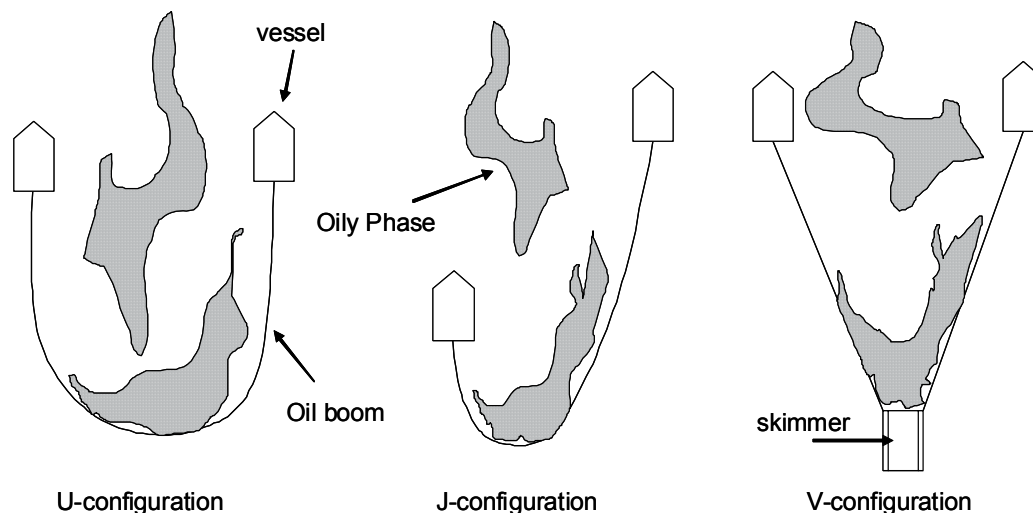


Fig 4.5 Configurations for Boom Deployment

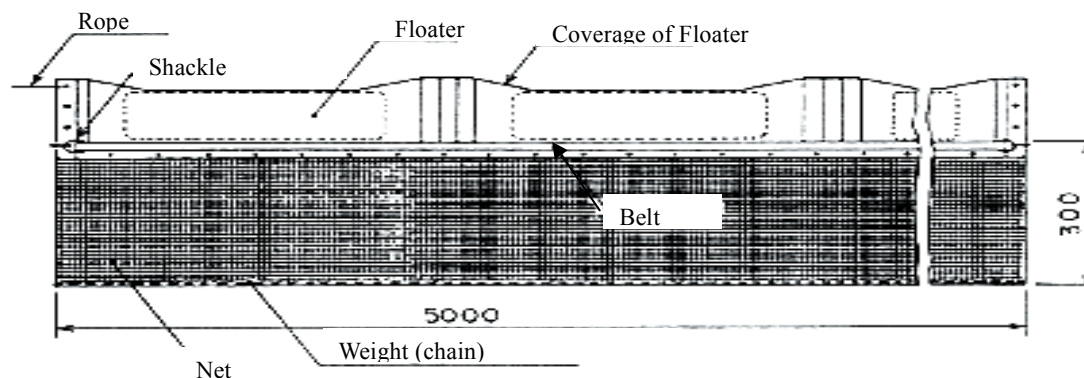


Fig 4.6 Collecting oil boom (net is adopted as the skirt)

構造を Fig 4.6 に示すが、浮体とネットの接合部に補強ベルトを配置し、ベルトの端部にロープを接続するためにシャックルが取り付けられている。なお、ネットを使用することについては十分な滞油性能を持つことが文献<sup>25)</sup>等により確認されている。

#### b) かき寄せ装置

油回収機自体が波の反射や潮流の妨げとなって、浮流油がスキマーの油取り入れ口に近づかない現象が予想された。実際に当初の水槽実験において Fig 4.7 に見られるように、ネットコンベア前面の油の挙動観察より、スキマーの反射波、ネットコンベアによる逆方向流の発生による障害が起きることから、何らかの積極的な集油装置が回収能力を高めるために必要なことが判明した。

油回収機において集油機構は、水流による方式、スキマー後面からの吸引<sup>26)</sup>などの手法の開発例がある。しかし、ナホトカ号重油流出事故の油回収現場では高粘度油が付着し合い、比較的大きな体積の厚い塊となることがあり、この場合油塊の重量が大きくなって、水流の量が

少ない場合には効果が疑問である。また、付着しあつた油塊が集油フェンス間に橋状に付着するとこれが障害となって流れが阻害される。このため、直接かき寄せる装置の方が確実であると判断した。かき寄せ装置はレーキ式（熊手式）とし、レーキの回転と走行動作の組み合わせにより油を掻き寄せる方式とした (Fig 4.8)。こうした方式は他に例がなく、本研究開発による初の試みとなる。



Fig 4.7 Oil is pushed back in front of the conveyor

レーキは油回収装置のフレーム上を前後に移動する走行台上に油圧トルクモータにより回転する軸を介して取り付けられている。走行台は油圧モーターにより駆動されるピニオンによりフレーム上に固定されたラックと嚙

み合って移動する (Fig 4.9)。かき寄せ動作は定期的な自動運転と、様子を見ながら行うマニュアル運転を可能にように製作した。

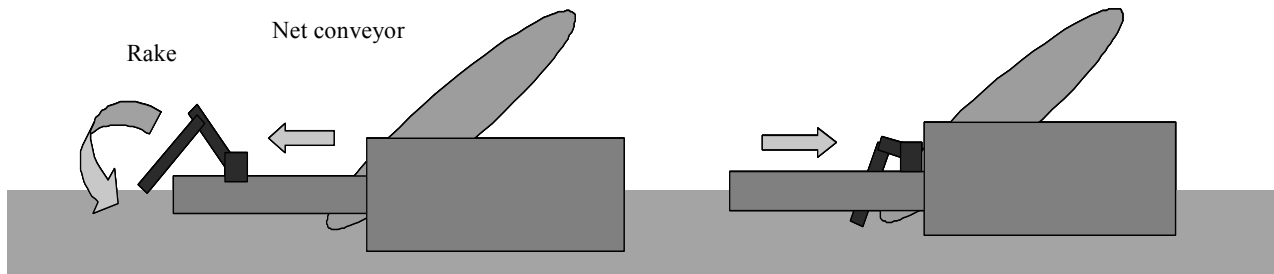


Fig 4.8 Diagram of the raking mechanism

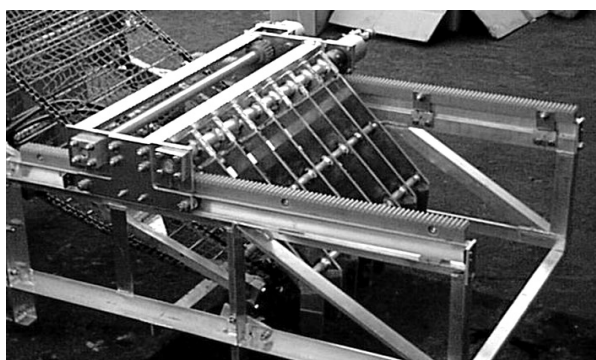


Fig 4.9 Structure of the raking device

### (3) 排送機構

#### a) 吸引用ポンプの選択

ネットコンベアにより回収された油をいったん貯油タンクに受け、陸上に設置したポンプにより吸引する方式とした。これはスキマー部の重量軽減のため、及びポンプの故障の際は現地でポンプのみ交換できるためである。

スキマー部の油受けから一時貯油タンクまで排送する機構に使用するポンプは、ナホトカ号重油流出事故での実績及び海外の事例を参考に検討した。現場では専門家がオペレーションにかかわるとは限らないため、操作上のロバスト性が高いことが条件のひとつになる。検討の結果、チューブポンプを選定した。Fig 4.10 にチューブポンプの概観を示す。主要目から分かるように吐出圧力が極めて大きい。吸引力は真空ポンプ等と同様であり、特筆すべきものではないが、異物に対する許容度合が大きくコンクリートや泥土の圧送に使われている。また、カラ運転しても問題なく、操作性が良い。また、故障の際にも一般的なポンプであるため現地で調達できる可能性も高く、本システムを使用するとき以外は別用に活用

することもできるため、コスト的に有利である。

型式	電動チューブポンプ
吐出量	最大 5.2m <sup>3</sup> /h
口径	50mm
吐出圧力	5kgf/cm <sup>2</sup> (490 kPa)
吸入負圧	760mmHg
電動機	全閉外扇野外形インバータモータ AC200V, 3相, 3.7kW
最大電流	14.9A
重量	210kg

なお、チューブポンプは本システム上での適性に優れているが、単体では数十万 mPa・s の高粘度の油に対する特段の詰まり防止策はなされていない。このため排送機構の管路のどこかで詰まりを起こした場合、システム全体が止まってしまうことから、詰まり防止のための機構が別途必要である。経験上、どのポンプを使うか、という選択だけではこの問題は解決できない。

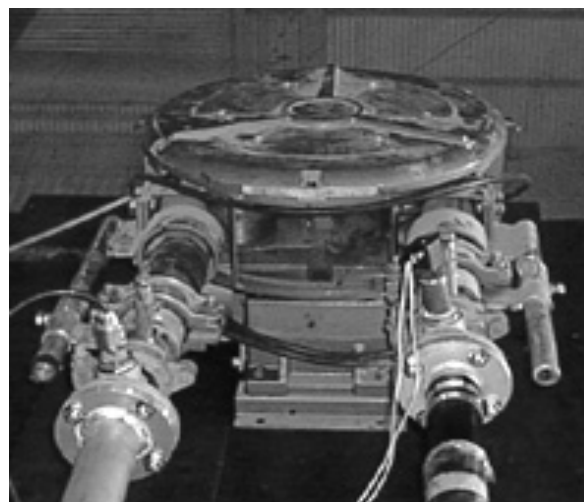


Fig 4.10 Tube pump



b) 詰まり防止対策の検討

高粘度油を排送するにあたって、管壁の摩擦等による圧力損失で排送（吸引）距離が決まると考え、50 万 mPa・s の油の吸引可能距離を以下の（4.1）式にて算定すると 2cm となり、このままでは実用にならない。

$$\Delta P = \frac{cv^2}{2gD}l + h \dots (4.1)$$

ここに

ΔP：圧力損失[m] 10[m]

h：高低差 [m] 1[m]

l：吸引可能距離[m] 0.02[m]

v：流速 流量 5[m<sup>3</sup>/h]より 0.71[m<sup>3</sup>/s]

D：管径 0.05[m]

c：抵抗係数  $(c = \frac{64n}{vD}, n = \text{動粘度 } 0.5[\text{m}^2/\text{s}])$

※動粘度は粘度を密度で除した値であるが、使用したエマルジョン化した C 重油の比重は 0.9 以上であり、計算上は 500,000mPa・s を 0.5 m<sup>2</sup>/s とおいた。

しかし、ナホトカ号重油流出事故の油回収現場での実際の使用にあたっては、水の混入により、吸引距離を伸ばすことが可能であることが確認されている。これは経験的に、ある程度の水の混入を行えばみかけの粘度を下げられ、抵抗係数が小さくなるためであると考えられる。おそらく管の壁面と油の間に水膜が形成されると考えられる。実際、実験においても計算上は吸引できない数十万 mPa・s の油でも、チューブポンプのみで移送が可能であった。これは、移送ホース出口の油吐出状況の観察から、油表面に水膜が形成されるためと推定される。同時期に海外でも注水による潤滑効果で高粘度油を長距離移送する実験が行われていた<sup>27)</sup>。

このため、管内の油に給水することによってホースの閉塞を防ぐこととした。しかしながら、回収効率を稼ぐため混入水量は最低限とすべきであり、そのためある程度自動化した機構が必要である。なお、排水長さは水上のスキマーの取り回しを考慮して吸引側ホース長さを 10m とし、吐出圧力が高いことから吐出側ホースを 30m とし設計を行った。

c) 負圧吸水弁の設置

回収油の粘度が高くポンプ吸引側の油移送ホースが閉塞する兆候は吸引負圧が急に高まることで予測できる。このためポンプの吸引負圧を検知して、ある値を超えた

時に吸水する装置を装備することとした。油移送ポンプの吸引側の負圧が上昇したときに油移送ホースに自動的に注水するための弁である。Fig 4.11 に負圧吸水弁の接続方法を示す。

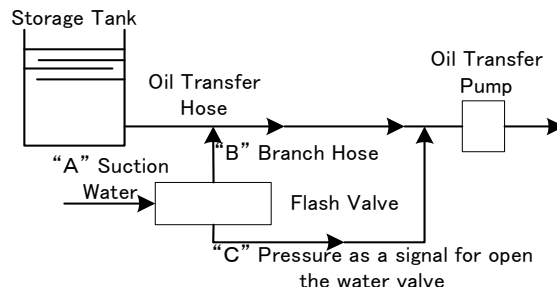


Fig 4.11 Principle of the flash valve for clearing stuck

負圧吸水弁の作動原理は、吸水口の弁の開閉を“C”の負圧信号によって行い“B”の分岐管へ導水するもので、“B”の圧力 P<sub>B</sub> と“C”の圧力 P<sub>c</sub> をスプリングによりバランスをとってある一定の P<sub>B</sub> と P<sub>c</sub> の差が生じた時に、弁が開くようになっている。この機構はセンサーによる電磁弁の作動といったものとは異なるきわめてシンプルな機構となっている。

d) 高圧注水装置（エゼクター）

本装置の使用者は、油濁対策の専門家ではないという条件としている。このため、注水装置でも詰まりを起こすような場合に備えて、回収油タンク内の油吸引口付近に高圧水を噴射する装置を装備した。本装置はタンク内の油を強力に吸引するエゼクター効果とチューブポンプの吸引を補助する効果を狙ったものである。万一ホースが閉塞した場合でもこの装置により復帰できる可能性が高いほか、ホース内を洗浄するために便利な機構である。ただし、大量の水を注入することになるため、通常の運転時には使用しない。主要目は次の通りである。

油吸引口径	44mm
水噴射ノズル径	2.4mm
高圧水量	32l/分
水压	50kg/cm <sup>2</sup>

現地では万が一システムが閉塞した場合に一刻も早い復帰が望まれるが、復帰のために他の装置が必要となるような場合はその日の復帰が不可能になって回収機会を逃す可能性が高い。本システムではこうした詰まり防止装置に加えた高圧注水装置により閉塞時にも迅速な復帰を可能とするものである。Fig 4.12 に排送関係の全体図を示す。



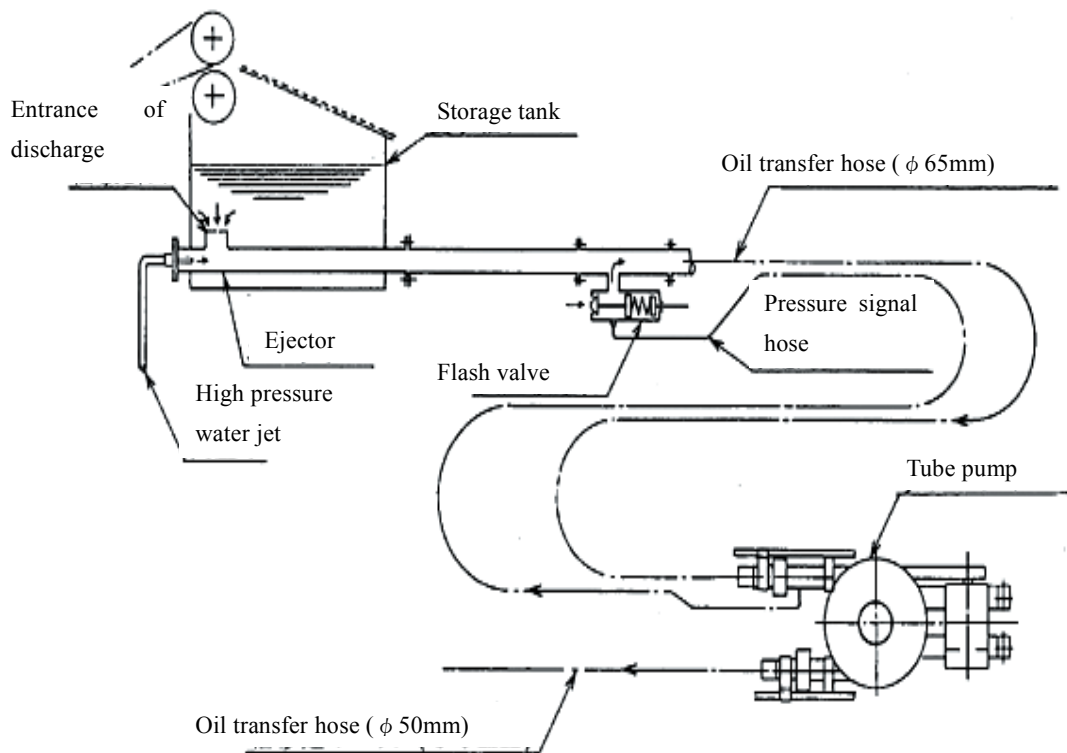


Fig 4.12 Diagram of the recovered oil / water fluid transfer line

(4) ゴミ対策

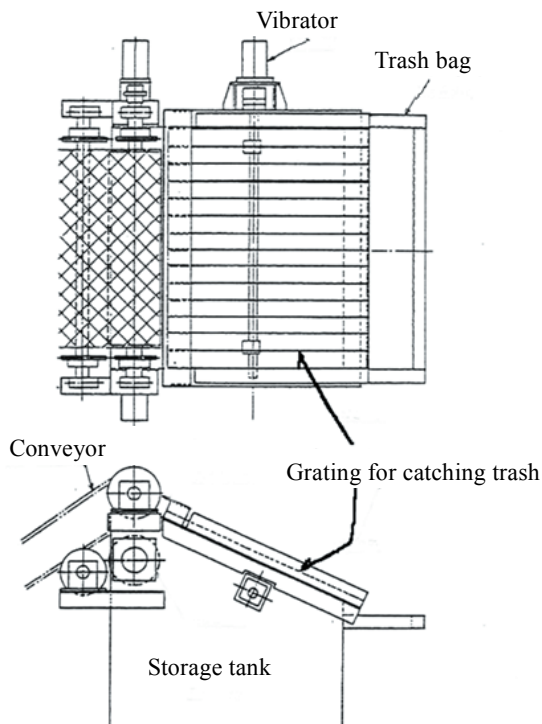


Fig 4.13 Prevention equipments of debris and trash

油は漂着するまでに海面に浮いているゴミを絡めてしまう。油の漂着の多い海岸は元々ペットボトルのようなゴミが集まりやすいところでもある。これらのゴミが排送管を詰まらせる事態を防止する必要がある。管内にゴミをかんでしまった場合の閉塞からの復帰は非常に困難である。

ゴミ対策としてはカッターを装備する回収システムも見受けられるが、機構が複雑になるとともに軽量化しにくい。本システムでは、すのこ状の格子で分離することとした (Fig 4.13)。チューブポンプはコンクリートポンプとして使われるように、管径より小さなゴミならほぼ問題がないため、こうした簡便な装置で十分である。すのこは振動ふるいとして、油とゴミとの分離を促進するものである。分離され転がり落ちたゴミは後部のゴミ受に入るようにしている。

4.3 水槽試験

(1) ネットコンベアの油回収実験

a) 実験の目的と方法

実験の目的は比較的大きな目合いのネットをコンベ

アベルトとして用いたネットコンベアが水面の油を回収する状況の観察とコンベア速度等の設計データの取得である。

実験は模型を水槽にロープ等によって固定し、模型に対して簡便な造波装置による波とスクリューによるわずかな流れを起こして、主に高粘度油とスキマーの挙動、網目合いの影響、スクレイパーの状況を観察した。なお、集油機構は取り付けず、ネットコンベアの挙動のみを観察した (Fig 4. 14)。

供試油はC重油と水を攪拌しエマルジョン化させることによって高粘度としたものを用いた (Fig 4. 15)。粘度の調整は難しいため、実験は  $500,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  クラス、 $250,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  クラス、 $100,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  クラスとし、実際の粘度は別に記録した。

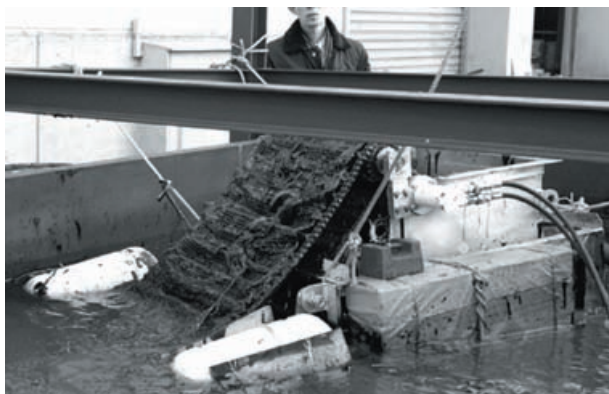


Fig 4. 14 Tank test of the net conveyor skimmer



Fig 4. 15 Test oil : Emulsified C heavy fuel oil, viscosity is about  $500,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$

#### b) 結果と考察

実験は状況を観察しながらケースを変えて行った。実験の状況を Fig 4. 16, 4. 17 に、結果を Table 4. 3 に示す。

全般的には、 $25\text{mm}$  といった非常に大きい目合であっても油が網を透過することはほとんどなく、問題は網の目詰まりであった。目合いを大きくするにしたがって目詰まりが減少し、水の透過がよくなるため波の反射がなくなって油がネット上に良く載るようになった。スクレイパーは粘度が高い場合には効果がよく認められた。

コンベアの速度は、速いと前面の水をかきあげたり、外向きの流れを起こしたりするため、油がネットに載りにくくなる。ただし遅すぎるとネットから油が漏れてしまうので、実験では  $20\text{m/s}$  程度に設定することで、この影響を抑えることができた。したがって、 $100,000\sim 500,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  クラスの油回収の場合、網目合いを  $20\sim 25\text{mm}$ 、コンベア速度を  $20\text{m/s}$  以下と設定することで十分に有効な回収作業ができることが分かった。また、ネットによる油水分離は想定どおりよく働き、水面の油を余水がほとんど加わらない高濃度の状態ですくい取ることに成功した。



Fig 4. 16 Oil scraping roller



Fig. 4-17 Skimmed oil on the conveyor

Table 4.3 Test results

Viscosity (mPa·s)	Mesh (mm)	Conveyor speed (m/min)	State
500,000	2.5	15.0	Oil /water fluid was reflected by low transparent net
		40.0	Oil /water fluid was pushed away by the flow to opposite direction of wave
	10.0	30.0	There was water chopping in front of the net conveyor
		20.0	Good performance
		10.0	Good performance
	25.0	25.0	High transparency of water made calm water surface in front of the net conveyor
		15.0	little turbulence of water makes good condition of
5.0		Scraper worked well	
250,000	25.0	15.0	Good performance
100,000	25.0	15.0	Oil stuck to the scraper

(2) 集油機構を搭載した実験

a) 水槽実験の概要

本研究開発の当時はまだ STORMS の整備がなされて

おらず、民間の平面水槽を借用して実験を行った。水槽は株式会社海洋開発技術研究所が所有するもので、実験では水路幅 4m, 長さ 10m, 水深は約 1.2m の造波水槽をオイルブームで仕切ってこの中に供試油を一面に散布した。当時は本水槽以外に実油実験を行うことのできる大形水槽はなかった。水深が 1.2m と浅いが、海岸付近で使用する浅海域用の油回収機であるため問題はない。波高 5~10cm, 周期 1.7s の波をスキマーに対して直角にかけ、約 460,000mPa・s に調整した C 重油を用いた実験を行った (Fig 4. 18, 4. 19)。供試油は集油フェンス内側の水面全面を覆うように十分な量を散布した。本結果を踏まえて、油回収率等の能力を推定するための実験ケースを検討した。その結果、装置本体は波高 15cm でも安定した挙動を示した。油回収実験では波高を 10cm, 周期 1.7s で実験した。

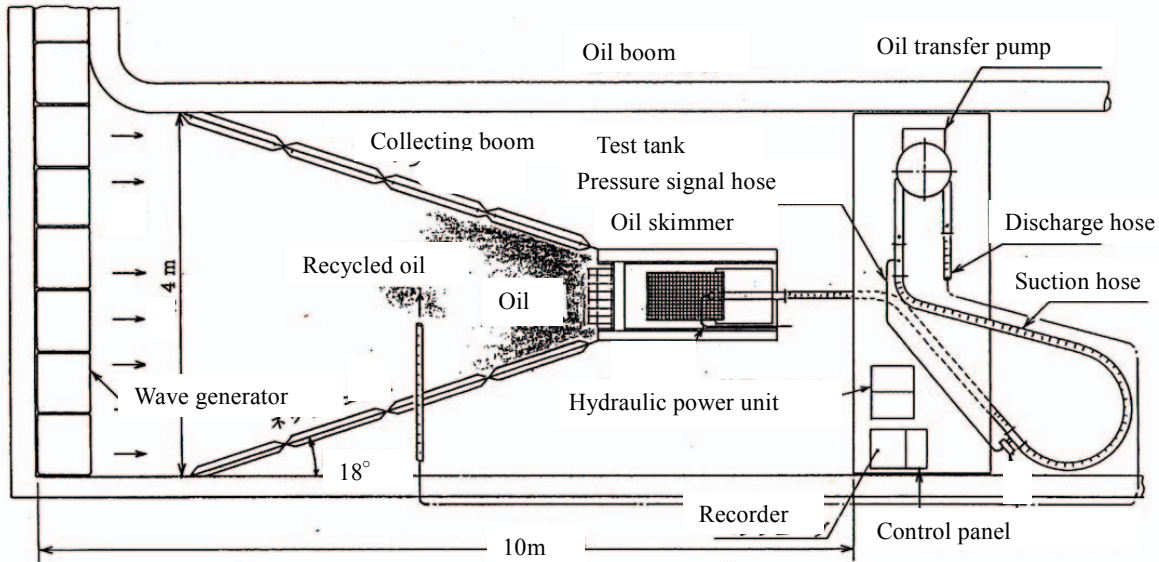


Fig 4. 18 Tank test of the oil skimmer installed the oil raking system



Fig 4. 19 Photograph of the tank test with oil

b) 実験の結果と考察

スキマー取入口前面にV字に展張した独自の集油ブームにより浮流油は問題なく集積されることを確認した。ブームのカーテン部は目合 10mm のネットであるが、波浪中でも油の漏れはなく、また集積部における水面の盛り上がりもない良好な状態であった。

Table 4. 4 に実験の結果を示す。回収油量, 回収油量, 回収効率はいずれもかき寄せ装置のサイクル (速度) に支配された結果となっている。これにより搭載したかき寄せ装置が集油装置としてたいへん有効であることがわかった。観察からも、漂流油はレーキによって手繰り寄せられ、さらにネットに押し付けられることで確実にネット上に捕捉され、すくい上げられることが確認できた (Fig 4. 20)。ネットコンベアのトルクが不足気味で、大



量の油を載せた場合に極端にコンベア速度が下がる場合が生じたため、case2, 4 においては貯油タンクに油が落下するのを待つ操作を加えた。実験の結果、回収できた油水の最大値は 20 秒間の計量で 30 リットルに達し、1 時間あたりに換算すれば  $5.4\text{m}^3/\text{h}$  となり、目標能力である  $5\text{m}^3/\text{h}$  を達成することを実証した。

波なしで実験した場合には、ネットコンベアの動きにより装置前面に漂着した油を沖側に押し戻す伴流が発生し、掻き寄せレーキの作動範囲外まで油が押し戻される状況が見られたが、波（波高 10cm, 周期 1.7s）ありの場合、油は掻き寄せレーキの作動範囲内まで接近し、かき寄せに大きな支障はみられなかった。これは伴流による力よりも波による浮流挙動の方が勝っていたためと考えられる。なお、波高 15cm とした場合について、回収装置は大きく動揺するものの、回収作業には支障なかった。

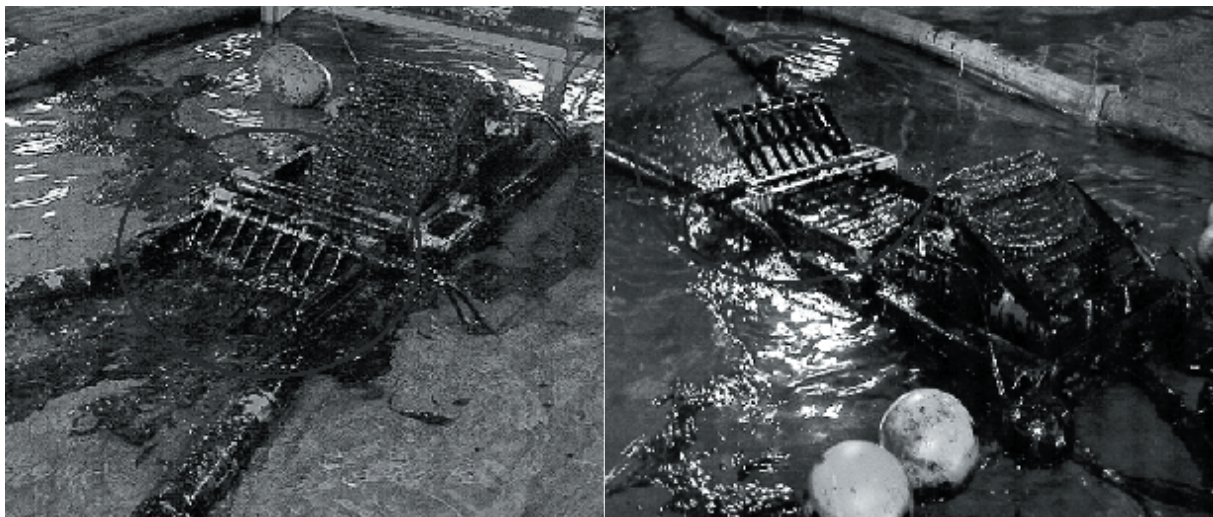


Fig 4. 20 Action of the raking the oil

### (3) 排送機構の実験

#### a) 詰まり防止機構の効果

詰まり防止としてスキマー本体に取り付けた負圧給水弁により注水する方法及びジェット水による排送圧の増強効果について実験し検討した。

スキマーの貯油タンクに回収された油を内径 63.5mm, 長さ 10m の吸引ホースを通して Table 4. 5 に示す 4 種類の方法でチューブポンプにて吸引し、吸引圧力、ポンプ吐出油の性状を調査した。なお、表中の回収水量率は、回収された油水の状態の見掛け上の含水率であり、エマルジョン化して油と一体となった水分は含まない。

注水による効果が十分認められることが表から読み取れる。特に水ジェットにより積極的に注水した場合、60%の水量率となるが、閉塞傾向は全くなくなる。閉塞

Table 4. 4 Test Results(Oil Viscosity :460,000mPa · s)

	case 1	case 2*	case 3	case 4*
Raking Velocity cycles/min	9	6	4	6
Conveyor Velocity m/min	20	20	20	10
Recovered Fluid $\text{m}^3/20\text{s}$	0.03	0.022	0.013	0.023
Recovered Oil $\text{m}^3/20\text{s}$	0.024	0.018	0.01	0.018
Recovered Water $\text{m}^3/20\text{s}$	0.006	0.004	0.003	0.005
Water Content Ratio %	20	18	23	22
Fluid Recovery Rate $\text{m}^3/\text{h}$	5.40	3.96	2.34	4.14

\*case 2,4: was controlled operation that the operator waited to rake until the oil on the net conveyor falls into the tank.

を防ぐ目的からは、負圧給水弁で十分な効果があることがわかる。なお、空気吸引の場合も若干の効果が認められるが、この実験ではネットコンベア上で油塊の上に載っていた水や油層内に閉じ込められて油水分離しきれなかった余水が 20%あると考えられるため、空気のみでの効果かどうかは不明確である。

Table 4. 5 Suction test result

<viscosity 880,000mPa · s,  
valve relief point 58.8kPa,Suction pump;5.2 $\text{m}^3/\text{h}$ >

case	situation	suction pressure kPa	Recovered water content %
1	Flash valve is shut	-58.8	20
2	Air inlet	-49.0	20
3	Flash valve is opened	-29.4	40
4	High pressure water jet	0	60

#### b) 回収水量率の改善

回収水量率を改善するため、貯油タンクのより上流側から注水するように排送機構の負圧給水弁給水位置をより油タンク側（上流）へ変更した。造波装置により波高20cm、周期2.0Sの波を回収機に直角にかけ、約650,000 mPa・sに調整したC重油を回収した。

その結果、回収水量率が6%以下でも詰まりを生じずに排送できた。負圧給水弁位置の変更により油水が管に入る直後から注水による潤滑作用が働いたと考えられる。これにより高粘度の油を極めて高濃度の状態の油水として詰まることなく排送できることが実証できた（Table 4.6）。また、吸引圧は-39.2~-58.8kPaの間で安定しており、負圧給水弁が効果的に働いたことを証明した。

Table 4.6 Improvement of place of the flash valve  
<viscosity 650,000mPa・s,  
valve relief point;58.8kPa,Suction pump;5.2m<sup>3</sup>/h>

case	A	B
Wave height	-	20cm, 2s
Recovered fluid (m <sup>3</sup> /h)	0.9	2.4
Water content (%)	6	1
Suction pressure (kPa)	-39.2~-58.8	-39.2~-58.8

#### c) ゴミ除去装置の効果

ネットコンベアで回収された油に混入するゴミ（各種異物）を除去するため、回収油タンク上にゴミ除去格子を設けた。ふるい振動効果を調査するため、ゴミ（ペットボトル、空き缶、ヒモ）混じりの油回収実験を実施し、ふるい振動<あり/なし>の場合のゴミ除去格子上の油の挙動を比較した。実験の結果、回収油とゴミのふるい分けについては、ふるい振動なしの場合、ゴミは油の粘着力のためゴミ格子上で殆ど動かなかったが、加振すると、ペットボトルと空き缶は傾斜した格子上を滑り落ち、水面に落下した。但しヒモは殆ど動かなかった。また、ゴミ格子上の高粘度の回収油挙動には大きな差はみられなかったが、加振した場合に油は幾分早めに落下した。格子面積は十分余裕があり、油は格子面積の上半分程度で透過していた。

### 4.4 現地運用試験

#### (1) 運用のコンセプト

どのような優秀な機器も、現場への搬入が不可能では使用できない。予め専用の船によるオペレーションを前提にして製作されたシステムでは、その船の有無で使用

の可否が決まり、さらに、現場水深が浅かったり、岩礁の入り組んだ海岸であれば使用できない。また、船に取り付けたものは船の速度でしか現地まで移動できない。これに対して、実際の現場での搬入、組立、進水、撤去が海洋工事会社の作業員の手によりスムーズに行えるという本システムのコンセプトは、本研究開発の上で最も重要である。

本システムは各部ごとのブロックの接続で全体システムが構築される方式であるため、分割してトラックにて陸上輸送可能である。このため道路のあるところならばごく近傍まですばやく運搬できる。さらに、各部の重量が比較的軽量で喫水が20cmと小さいため、クレーンに頼らず人力で海岸から進水できる。また、実際の現地では専門家の数は少なく、わかりやすいマニュアルの整備とともに、機器の働きについて直感的に理解できることも必要な条件である。

本システムではスキマー部はオープンなコンベアとなっており、前面に滞留する油をレーキがかき寄せるとい、人間の作業をほぼそのまま機械動作に置き換えたものであるため、誰が見ても油がすくわれ回収されていくあらしを理解しやすいものとなっている。したがって、トラブルが起きそうな部分についてはすぐに人力による補助を現場で思いつくことができる。これに対して、ポンプや排送管の詰まりに関しては、一見してその原因を探ることは不可能である。このため本システムでは詰まり防止の機構が入念に設けられている。

このように本システムでは「人力による機動性」を発揮できるような取扱性と、回収機構の明瞭さを運用のコンセプトとしている。しかしながらこれらについては、実際に機械システムを運用してみなければ実証できない。このため、平成12年9月に新潟市栄町地先海岸にて開発した油回収システムの設置、撤去試験を行った。

高粘度油が海岸に漂着したことを想定し、最寄の道路までトラックで機材を陸上輸送し、すみやかに機材を油回収態勢まで展開するものである。試験は主に機材のハンドリング評価を目的とし、作業に携わった人たちからアンケート調査を行った。また、各作業ステップの所要時間の記録を取り、特に問題になるステップがないかどうか確認した。作業は使用機材に対して精通しない者(工事会社)を選んで行った。

#### (2) 実験内容

##### a) 搬入機材及び人員配置

現地搬入機材のリストは以下のようである。

- 集油フェンス (5m×2, 水噴射ホース付属)
- 浮体 (1基, スキマーと合体させる)
- 油スキマー (1台)
- 油移送ポンプ (1台)
- 油圧パワーユニット (2台)
- 電気制御盤 (1面)
- 機器台 (2個)
- 油吸引ホース (10m)
- 回収油移送ホース (10m)
- 集油用水噴射ポンプ (70l/min. 1台)
- エンジン発電機 (35kva 以上, 1台)
- 不整地運搬車 (荷台寸法 1m×1.5m, 搭載能力 500kg)
- クレーンつき 4tトラック (機材運搬用 1両)
- モーターボート (1隻)
- ロープ, ウェイト類 (1式)
- ローラーコンベア (2本)
- 足場板 (4本)

- 電気ケーブル (1式)
- また, 実験要員として下記のような構成とした.
- 全体指揮者 (1名)
  - 記録係 (1名)
  - 作業指揮者 (1名)
  - トラック運転者 (1名)
  - 不整地運搬車運転手 (1名)
  - モーターボート操縦士 (1名)
  - 発電機及びポンプ運転者 (1名)
  - 作業員 (2名)

この際, 人員については油回収作業の専門家を避け, 地元の工事会社に依頼した. 資機材の不整地運搬車は, 工事現場等に一般的に使用されているものであり, 入手しやすいことから, 浜辺の水平移動用に採用した. マニュアルについてもこうした資機材について掲載し, 使用を勧奨している. なお, 現地の資機材の配置は Fig 4.21 のとおりである.

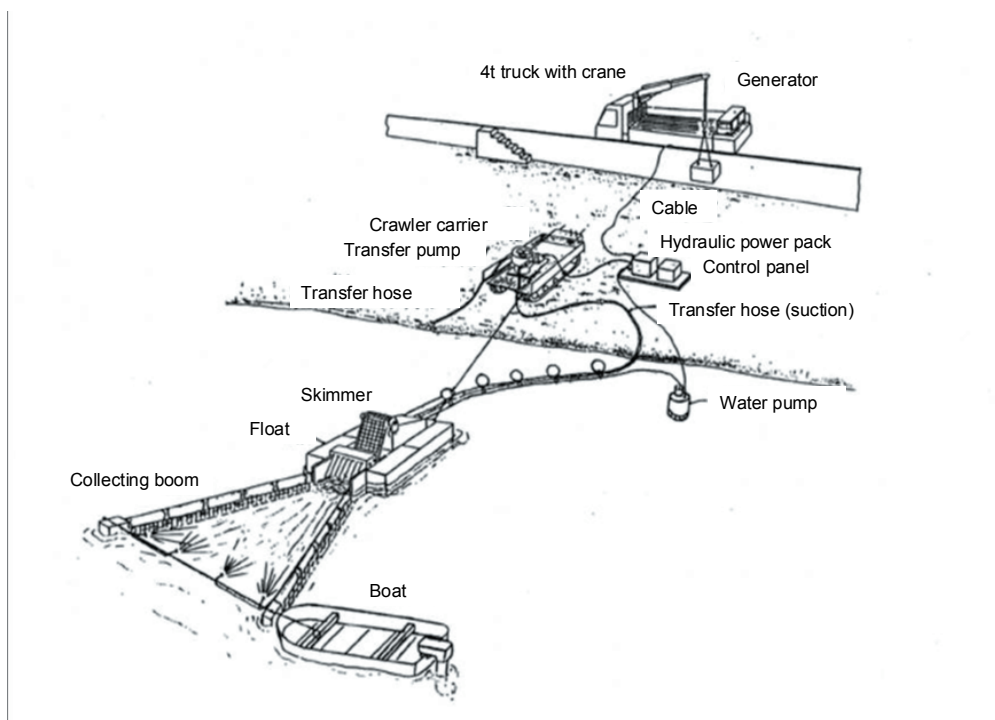


Fig 4.21 Layout of equipments and materials for operation test at the site

b) 現地でのシステムの展開方法

本システムはトラックにて現場に急送できることを前提としている. 現地ではトラックを海岸に近接する道路に駐車し, この時点から各種のタイム計測を行った. トラックの駐車地点からスキマーの進水地点までの距離は約 30m で, この区間について重量物は不整地運搬車で, その他のものは人力で運搬した. 詳細な作業手順は以下のとおりである (Fig 4.22).

① 集油フェンス, 独立浮体, 及びパイプを水際まで運

ぶ. 水際にウェイトを置き, ボートから投げたロープを縛り付けておく.

② フェンスの開口幅を決めるために独立浮体 2 個をパイプの両端に縛り付け, そのパイプの両端にフェンスの先端を縛り付ける.

③ ボートから 2 本のロープを集油フェンスの先端へ結びつける.

④ 海岸に油スキマーを進水させるためのローラーコンベア及び足場板を敷く.

- ⑤ 足場板の上で油スキマーを組み立てる.
- ⑥ 油スキマーの後端にロープを結びつけ, その端をウエイトに預けておく.
- ⑦ 油スキマーに油移送ホースを接続する. ボートで集油フェンスを引くとともに, 陸側から油スキマーを押し出す.
- ⑧ ボートを移動して集油フェンスをハンドリングしやすい位置につける.
- ⑨ 油移送ポンプを不整地運搬車に搭載して水際へ運び, ホースを接続する.
- ⑩ ポンプ, 制御盤及び発電機間の配線を行う.

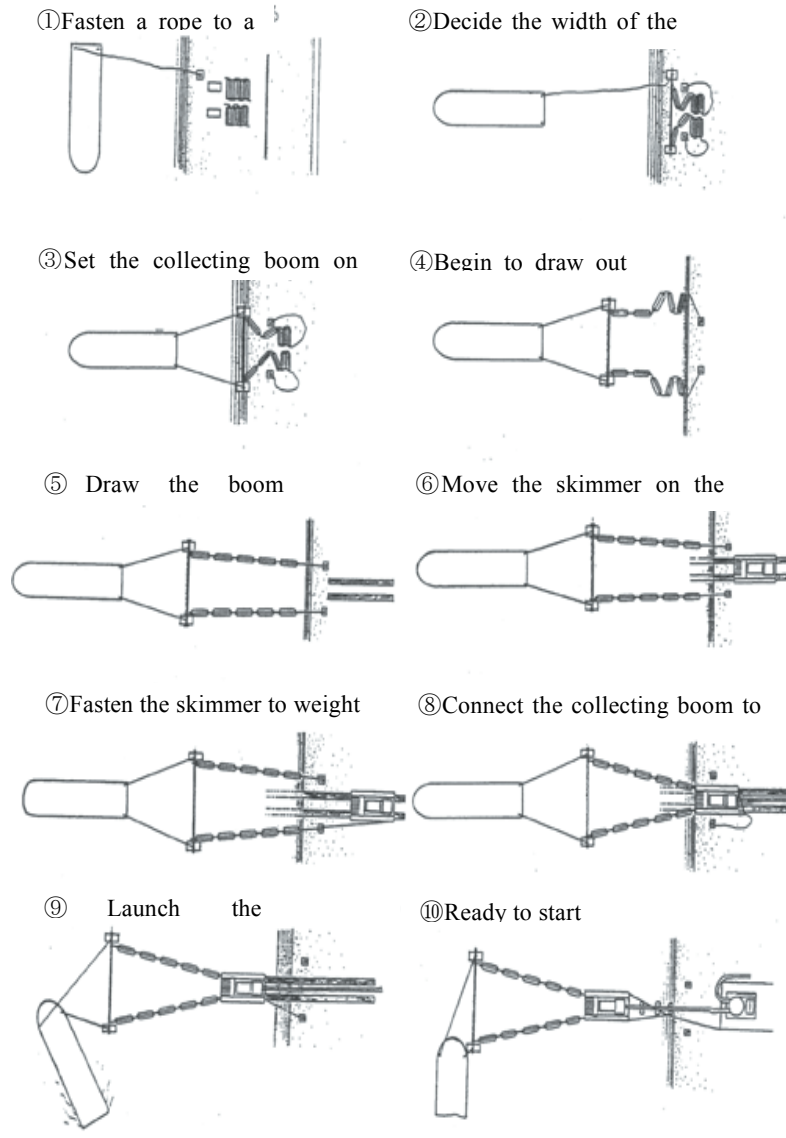


Fig 4.22 Procedure of launching the skimmer

c) 撤収作業

撤収作業は基本的には展開作業の逆工程である. 実際の現場では資機材に付着してしまった油の洗浄作業が重要であるが, 今回の実験ではこれを再現することは困難であり, 実施できなかつた. 工程は下記のとおりである.

- ① 電気ケーブルの結線ははずし, 束ねる.
- ② 油移送ホース, 油圧ホースの接続をはずし束ねる.
- ③ 油移送ポンプ, 油圧パワーユニット, 制御盤を灯油を沁みこませたウエスで拭く.
- ④ 不整地用運搬車または手持ちにて主要機器をトラックへ運ぶ.
- ⑤ 電気ケーブルを簡単にウエスで拭き, シートで覆ってトラックへ運ぶ.
- ⑥ ホース類は外面の汚れが激しいので高圧水で洗浄する. 端末をウエスで覆うこと.
- ⑦ 油スキマーを引き上げるためのローラーコンベア及び足場板を水際に敷く.
- ⑧ 油スキマーを不整地用運搬車の力を借りながら引き



上げる。

- ⑨ 集油フェンスをはずし、油スキマーを高圧水で洗浄する。
- ⑩ 油スキマーを不整地用運搬車で道路まで運びトラックに搭載する。
- ⑪ 集油フェンスを高圧水で洗浄してからシートで覆い、トラックに搭載する。
- ⑫ モーターボートの舷側を水洗いし、港または船揚場等に回航する。
- ⑬ ホース類をトラックに搭載する。

### (3) 運用試験の結果

#### a) 概要

実験は平成 12 年 9 月 28 日と 29 日の 2 日間にわたって新潟市栄町地先海岸で行った。28 日は強風と高波のためスキマーを進水させることを見送った。29 日は風波も収まって、油スキマーを海上まで引き出す一連の作業ができた。なお現地は離岸堤の設置された海岸であり、28 日天候は晴れ、風速 10m/s、堤内の波高は約 50cm であった。29 日は天候晴れ、風速 2m/s、堤内の波高は約 10cm であった。実験の状況を Fig 4. 23 に示す。

なお、基本的に人力作業のため、50cm 程度の波でも作業は中止せざるを得ないが、本システムの目的としては、人力作業の機械作業への置き換えであり、波の条件が厳しい場合の作業形態についてはまた別途研究開発する余地がある。



①The crawler carrier ②Preparation of launching ③～⑤Launching

Fig 4. 23 Launching operation of the oil skimmer



b) 運用試験の時間計測結果

運用試験の時間計測結果を Table 4.7 に示す。大まかに分析すれば、設置に約 52~56 分、撤去に 37 分かかっている。撤去は油で汚れた本体を洗浄するという作業が含まれていないが、少なくとも設置は 1 時間弱で可能とみられる。本システムは現地稼働時間を 6 時間とみて 1 日約 30m<sup>3</sup> の油水を高濃度な状態でピット等まで回収、排送するものとしており、時間的には十分な稼働時間を取れることがわかった。

Table 4.7 Results of the each operation period at the site test

Operation	28, September	29, September	
Crawler carrier round-			
First	3min20s	Carried by hand	weights, hoses, etc cables, scaffolding boards, etc oil skimmer hydraulic power unit control panels transfer pump
Second	5min40s	Carried by hand	
3rd	8min55s	8min40s	
4th	6min59s	5min16s	
5th	11min 6s	4min50s	
6th	4min	2min55s	
subtotal	40min	21min41s	
launching oil skimmer carrying by hands, pipeworks, cable arrangements	8min23s 7min37s	6min10s 24min5s	
Total preparation time	56min	51min56s	
Total time of back off works	37min	-	

c) 人力による機動力の評価

油スキマーの進水作業は人力で行うことに成功した。ただし、作業員の感想からは、遠浅な海岸ではより喫水の浅いものが望ましいとあった。また、集油フェンスのスカート部が若干引き出しの抵抗になっていたものと考えられる。油回収用ホースはワンタッチカップリングを用いて作業の容易さに配慮したが、これについては好評であった。対して、レンタル品である発電機と、制御盤の接続についてもワンタッチ式にすべきであるとの要望が出た。

作業員については、運用も含めて 8 人の人員で可能であり、交代等を考慮しても人員は 10 人程度で運用可能であることがわかった。作業後の感想からは若干もう少し作業員が欲しい場面もあったとみられるが、システム全体が約 150 人分の能力を持つことから、所期の目的である沿岸域での油回収作業の機械化による効率化と、海岸での機動力の発揮というコンセプトが実証できた。

4.5 適用事例

国土交通省近畿地方整備局においては、新造船「Dr.海洋」(平成 18 年 1 月着工, 19 年 3 月完工, 総工費約 10

億円)の就航記念式典が平成 19 年 4 月に神戸港湾事務所で開催された。本船は海洋環境船(海面清掃船兼油回収船)として、同所の「紀淡丸」代替になるもので、名称は公募により市民が応募し、その中から有識者により選定したものである。その主要目は、総トン数 196GT, 全長 33.5m×全幅 11.6m, 最大喫水 2.64m, 最大速力 15.4 ノットとなっている<sup>28)</sup>。

本船には油回収機が 2 種搭載されることとなり、そのうち対象油が極めて高粘度である場合に対応する副機として、浅海域高濃度油回収システムを船舶搭載用に改造したネットコンベア式油回収機を搭載した。船側に取り付け、オイルブームにより集油して油水を回収し、船上のポンプで船上の貯油タンクへ移送する。主機は通常の重油から対応する方式のものとなっているため、極めて粘度が高いエマルジョン化油に最も適した本機が副機となった。まだ、油流出事故での使用実績はない。

Fig 4.24 に「Dr.海洋」、Fig 4.25 が船側に設置された油回収機、Fig 4.26 に浅海域高濃度油回収システムと今回搭載された改造機の比較を示す (Fig 4.24, 4.25 は文献<sup>28)</sup>)。



Fig 4.24 Dr.Kaiyo



Fig 4.25 The net conveyor skimmer installed by the side of Dr.Kaiyo

船舶搭載用とするために改良した点として、まず、集油ブームの取り付け方法を V 字展張から船側を集油ブームの替わりに利用できるように J 字展張に変更した (Fig 4.27)。これにより油回収機は船の近くに取り付けられる

ため、油水の吸引長を短く設定でき、詰まりを起こしにくいように配慮した。また、船の外側の集油ブームを張るために舷側から突き出すアルミ製のパイプの長さを短くできる。ネットコンベアの材質は、海岸で使う場合にはトラブルがあっても入手と交換がしやすいナイロン製の網としていたが、ステンレスメッシュに変更して、耐久性を優先した。また、メッシュの目合いは25mmを10～15mmのものとして、対象油の粘度  $300,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  以上を  $100,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  程度以上に引き下げた。これは、「Dr.

海洋」が瀬戸内海で使用されることから、海岸に漂着する状況よりも早めの対応であること、海水温が冬季でも  $15^\circ\text{C}$  前後とみられ、極端に高粘度にはならないと想定したためである。回収幅及び想定する回収能力は同じである。その他、防爆仕様に統一するため、吸引用ポンプの動力を電動モーターから油圧モーターへ切り替えた。設置や搭載等は全てクレーン等を用いることから、耐久性を優先して本体と浮体を一体構造とし、さらに吊具を取り付けた (Fig 4. 28)。

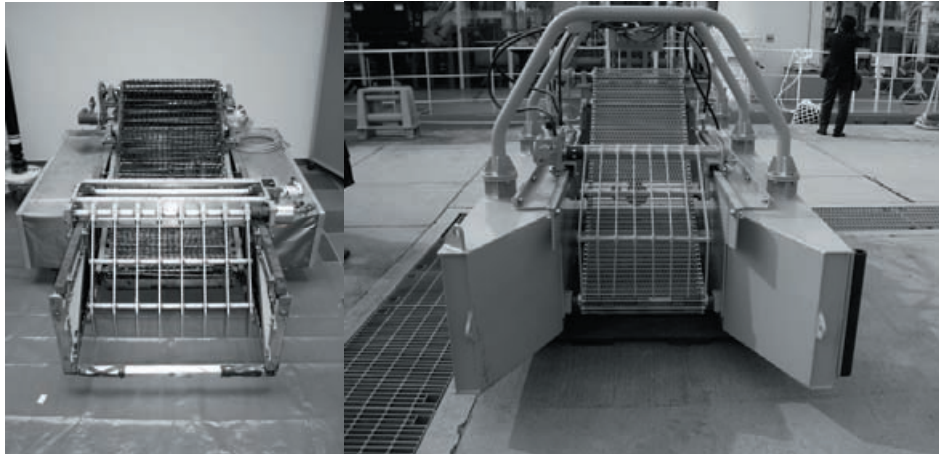


Fig 4. 26 A photograph in left is the developed original net conveyor oil skimmer with rake, in right one is the customized one for Dr.Kaiyo

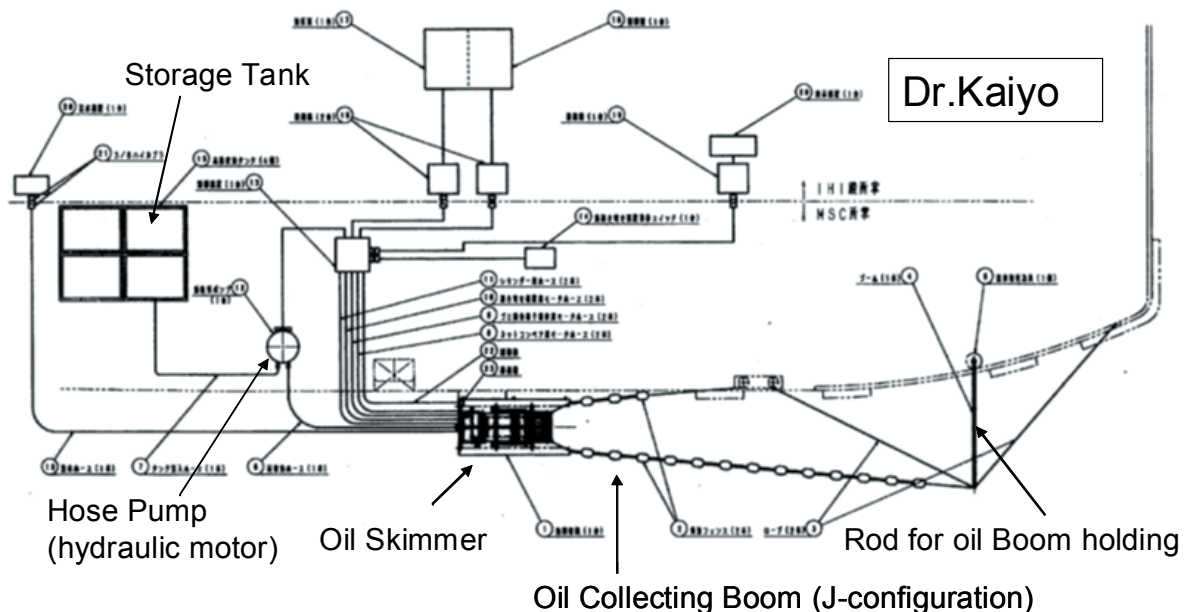


Fig 4. 27 Installation of Net-conveyor Skimmer on the side of Dr.Kaiyo

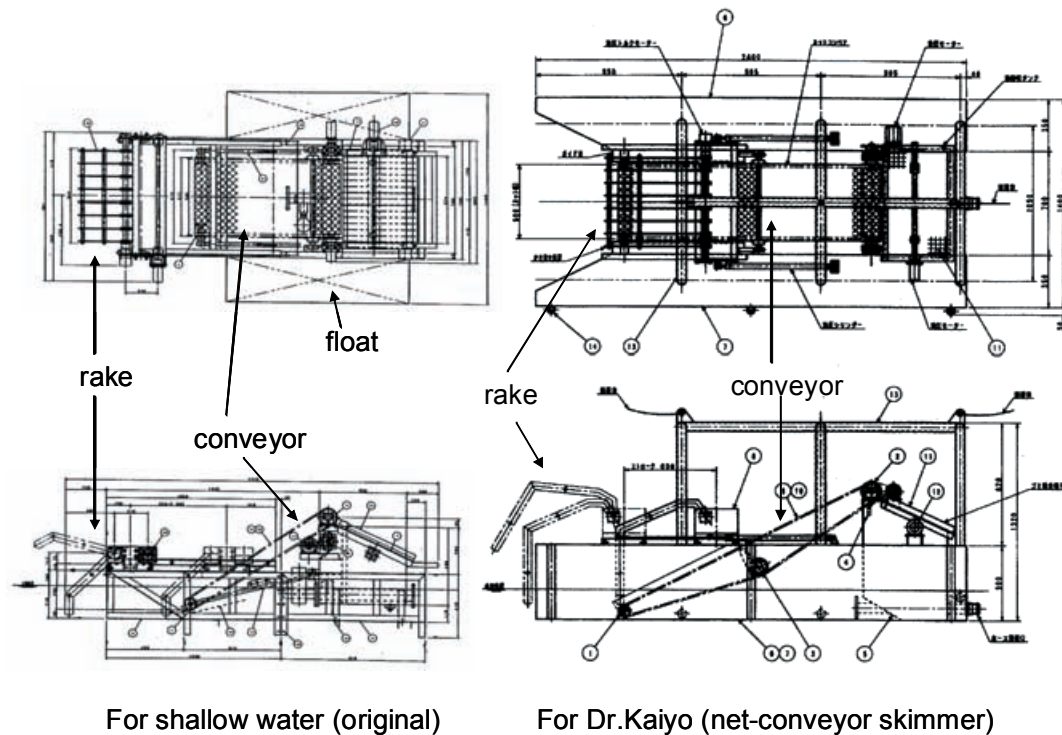


Fig 4.28 Comparison between the original net-skimmer and the customized one for Dr.Kaiyo

#### 4.6 結語

通常開発されているスキマーは対象油の粘度をクラス分けし、クラスごとに対応している。しかしながら文献 WORLD CATALOG<sup>16),26),36)</sup>などは、高粘度油は動粘度 130,000~170,000cSt (1mm<sup>2</sup>/s = 1cSt) 程度を最高としており、本研究で主に対象とした 500,000mPa・s 以上の粘度の油に当てはめることは難しい。こうした高粘度油に関しては、近年 ISO において 500,000cP (1mPa・s = 1cP) 以上の高粘度油を対象とした油回収機の試験基準が検討されているところである (文中の単位がまちまちなのはそれぞれの基準で使用されている記述をそのまま使用したため)。本システムでは、数十万 mPa・s 以上の高粘度油を回収できるものであり、回収油水中の余水の割合が非常に少ないにもかかわらず詰まることなく陸上のピットや一時貯蔵タンクに排送できるものである。

また、システム全体の現場での取扱性について考慮した結果、機器の各部分は軽量小型化されており、重機を使用できない海岸においても人力で設置、展開、運用、撤収ができる機動力を備えたものとなった。

こうした本システムの特徴を列記すると以下のようになる。

- ① 対象油の粘度は約 500,000mPa・s で、約 300,000mPa・s 以上から取扱える
- ② スキマー部は長さ約 2.3m×幅約 1.4m, 重量 130kg,

とコンパクト、軽量で、喫水も約 20cm と浅い水深に対応し、進水時の人力の負担を軽減

- ③ かき寄せ装置により油水回収能力最大約 5m<sup>3</sup>/h, 定格能力 2.5m<sup>3</sup>/h で、1日最大 150 ドラム (6 時間運転), 人力換算で 150 人分の能力を持つ。油取入口幅がスキマー部で 50cm と大きい。
- ④ 油水中の余水の割合は約 0~20%程度以下と高濃度な油水の回収が可能
- ⑤ 吸引管側の詰まり防止機構により超高粘度にもかかわらず油の詰まりが起きない
- ⑥ チューブポンプの採用によりゴミに強く、圧送距離が長く、また、振動ふるいにより空き缶やペットボトル大の大きなゴミに対応
- ⑦ 詳細な取扱説明書 (現地での運用マニュアル) により油回収のエキスパートでなくても工事会社等の作業員なら運用が可能

このようなさまざまな 7 つの特徴を持ち、海岸の水上から陸上の、たとえば道路そばの一時貯蔵ピットやタンクまでのロジスティクスの整合性を取って開発されたものである。本システムの研究開発は 1998 年度~2001 年度の 4 年間にわたって行った。個々に用いた技術は工学的に斬新なものではないが、当初から目的とした渚など浅海域での人力作業であるひしゃくとバケツリレーによる回収作業を機械化すること及び、重機を用いずに設

できる機動力を持つシステムであること、そして誰の目にも分かりやすく、現場のいわゆる人間系の能力を活かしやすいこと、といったコンセプトを守り、達成できた。

また、一般的な製品が対象としている常識的な粘度の範囲を逸脱した 500,000mPa・s 以上のゴミ混じりの高粘度油に対応するために、ネット式のコンベア、初の試みとなったレーキ式かき寄せ装置、注水装置による管路の詰まり防止など各部の機構のアセンブリが全体として非常に高い効率性と能力を発揮する結果につながった。

さらに、現地での運用について実験を通じた評価を行うことにより、システム全体が初期の目的を果たすことができることを証明できた。

文献 WORLD CATALOG は世界で市場にあるほとんどの油回収資機材を網羅していることで有名であるが、この資料によれば機械的なかき寄せ機構により油回収機の反射波等により油取り入れ口に油膜が入りにくい現象を解消した油回収機はない。

浅海域用高濃度油回収システムは、油回収機の分類上はベルト式油回収機であり、類似のタイプにブラシ式油回収機がある。いずれも高粘度油を対象としており、アルキメディックポンプ等の油の移送ポンプを油回収機の一時貯蔵タンク（ホッパー）に取り付け、船上に圧送するのが通例である。しかしながら、本体の反射波等によりベルトに油が寄らない現象があり、油とスキマーの間に適度な相対速度が発生するようにスキマーを前進させる必要がある。本論の方式ではレーキ式かき寄せ装置によりこの難点を克服した。また、軽量化のためにポンプを分離したことによって一時貯蔵タンクかポンプまでは吸引する必要が生じ、高粘度油の移送が難しくなるが、これについては自動でのフラッシュ機構によって解消した。

このように技術的には世界で初めて試みたレーキ式かき寄せ装置による油回収率を確保した。また、高粘度油の移送中の管路の詰まり防止のため、スキマーの一時貯油タンクに一体化することが常識であった容積ポンプを分離することに成功することで、人力による現場での設置作業を可能とした。

## 5. 工事用作業船を用いた油回収システムの提案

### 5.1 コンセプト

#### (1) 油回収システム開発の目的

第4章においては、重機や作業船が入り込めない水深の浅い沿岸域での油回収作業を、機械力を用いて効率的

に行なうための油回収機の開発を行った。これは機械力の持込が難しかった場所に人力で搬入搬出ができることを条件とした本格的な油回収機を開発を狙ったものである。これに対して、本章では油回収船及び油回収作業の訓練等を受けた者が配置されていない地域においても、緊急時にクレーン台船を油回収船として用いて、油回収作業の経験が無い者が対応できる油回収システムの開発を行ったので報告するものである。

わが国の油濁防除体制においては、国土交通省地方整備局が大型の浚渫兼油回収船を3隻運航し、ほかに海面清掃兼油回収船等を11隻運航しており、海上での油回収作業のための機動力を持っている。しかし、油回収船の全国での分布状況は一部の地域と他地域とで大きな差がある（Fig 5.1: 1996年当時33）。本研究を開始する2004年当時は当該データを用いて研究の必要性を検討した。現状の同様の図は第2章のFig 2.1となっており、本研究の必要性はますます増大している。わが国は長い海岸線上のほとんどの地域で社会・経済活動が活発に行われており、全国すべての沿岸域で等価な災害対策が望まれるといえよう。

一方でわが国には港湾法上の港湾が、重要港湾が128、うち特定港湾が23、地方港湾942と、合計1,008港存在する。これらの港湾の中には建設中の施設を持つものも多く、したがって、これに従事する工事用の作業船は全国に分布している。油流出事故時にこれらの作業船を油回収作業に転用することができれば、迅速で効果的である。

本研究では、全国の港湾に在船する工事用作業船のなかから緊急時に油回収作業に転用可能なものを抽出して、事故時に簡単にこれらに装備できる油回収システムを開発・提案することを目標とした。なお、開発を行った油回収機と集油ブームおよび周辺資機材をひとまとめにしたものを油回収システムと呼ぶ。本研究は2004年度から2006年度にかけて行った。

2004年度においては、工事用作業船の中から活用する対象となる船種として一定の能力以上のクレーン付台船等を抽出し、これが全国に900隻以上在船することがわかった。このため、クレーン台船を対象とした油回収機および集油ブームおよびその全体のコンセプトを考察した。油回収機はグラブバケットの操作に類似した機構と、余水の発生を抑える手法を独自に考案した模型を製作し、水槽実験を行なった。また、比較対象としてグラブバケットの模型を製作し、水槽実験を行ない比較した。集油ブームは潮流を利用して自動的にブームの展張ができるように、ブームを曳航するブイを考案し、模型を製作して水槽実験を行なった。2005年度は2004年度の実験結果



を反映した改良を考案し、それぞれの模型を新たに製作し、水槽実験を行なった。2006年度についてはそれぞれの模型の改良を加えて実機に対して縮小プロトタイプを製作し、油回収機については大型水槽試験により実機の性能を推定した。また、集油ブームについては安定性の確認を行なった。

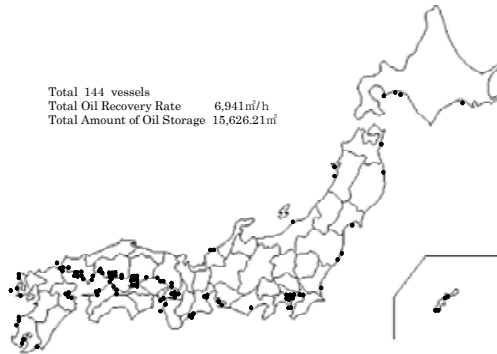


Fig 5.1 Chart of the oil skimming vessels (1996)

(2) 油回収作業へ転用する工業用作業船の条件

a) 転用の条件

工事用作業船は「作業船一覧 2003 年版」(社団法人 日本作業船協会発行)によれば 40 種類程度に分類できる。この中で油回収作業に転用する条件を以下の通り設定した。

① 現地での作業性の考慮

現地では人力のみでは移動することに苦勞する重量の資材や廃棄物を入れたフレコンバック、ドラム缶等が発生する。また、作業船が岸壁に係船した状態での荷物の積み下ろしでは、運送してきたトラックに移動式クレーン等が装備されていなくても船のクレーンで可能である。このため現地の作業性を考慮して、クレーンが搭載されていることを必須条件とした。

② 想定する資機材のサイズ

開発の目標となる油回収システムは、1 回につき最大で、いわゆる 4 トントラック 2 台分程度 (1 台で長さ 6m × 幅 2m 程度) の資機材を目安とするのが適当と考えられる。その理由は、小さな港湾においても転用できる作業船が在船している場合があり、作業船だまりまでの道路の幅員等を考慮すれば、4 トントラック程度を対象とするのが妥当なためである。なお、米国沿岸警備隊ではコンテナ化することにより航空機で輸送することも前提としているが、わが国ではトラックによる輸送が現実的

ある。このため、搬送時の重量及び体積はトラックの輸送力に左右されるとともに、各港湾の作業船だまりへのアクセス路等による制限を考慮する必要がある。したがって、システムを構成する部材はおよそ最大幅 2m、長さ 6m、高さ 2.5m、重量 4 トン以内とする。また、貯油タンクは組み立て式の市販品で 10m<sup>3</sup> (ドラム缶 50 本分) 貯蔵できるものなどがあり、トラックの荷台スペースと得られる容量から効率がよいこれらを選定する。

③ 甲板の広さ等

甲板の形状は油回収機器等の配置を容易なものとし、作業がしやすいように平型の作業船の船種であることとする。面積については Table 5.1 のような油回収資機材の配置が可能となるように Fig 5.2 から長さ 10m × 幅 4m 以上または長さ 8m × 幅 6m 以上の 2 つの条件が設定できる。

Table 5.1 Minimum working space on deck of the barge

Equipments and materials	Volume	Space
Oil Recovery equipments and materials	4t class truck bed capacity × 2	6m × 2m × 2
Storage tanks	10m <sup>3</sup> × 1	φ3.2m (FAST TABK 2000)

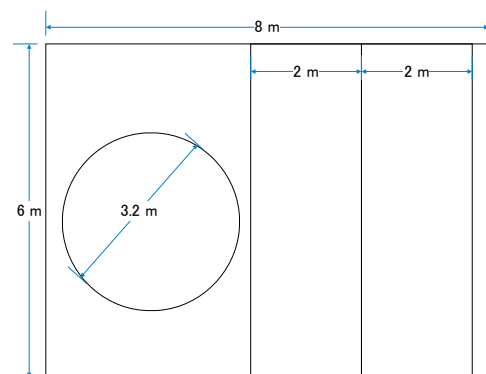
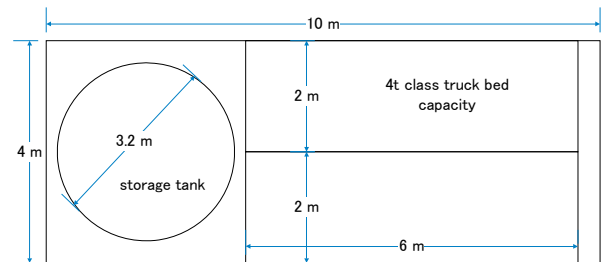


Fig 5.2 Requirement of the barge deck space

b) 油回収作業の転用に適した工事用作業船の全国分布状況

a) の条件により「作業船一覧 2003 年版」(前出) から対象となる工事用作業船を抽出した結果、全国で海のある各都道府県すべてに在船していることがわかった (Fig

5.3). 総数は 927 隻にのぼる。ただし、自航船は少なく、基本的には非自航船を対象に油回収システムを検討する必要があることがわかった。

このため、油回収作業への転用のための資機材を現場近傍の港に向けて急送することでわが国の長い海岸線の多くをカバーできることが明らかとなった。



Fig 5.3 Distribution chart of the crane barge in Japan

### (3) 回収作業の各種条件の設定

#### a) 海象条件

対象となる作業船は、港湾工事に用いられるものであることから、作業限界波高は一般的に 1m 程度である。対応する周期を 4s とすると、このときの波長は約 25m となる。船舶の移動速度は回収時にはオイルブームの一般的な滞油性能の限界が 1 ノットなので、最大 1 ノットを仮定する。作業海域は、これらの条件から沿岸域や湾内に限られる。

水温は冬季を考慮すれば 10℃前後で、水温が低いいため作業員は水中には立ち入らないこととする。

風の影響についても、クレーン作業に準じた作業となるため、クレーン台船が使用できる風速が限界の風速となる。クレーン台船は移動式クレーンであるが、この場合は、クレーン等安全規則第 74 条によって、地上 10m の高さにおける 10 分間の平均風速が毎秒 10m 以上の場合は作業を中止することとなっている。また風向による油の移動に対しては常に風下側に浮流油は流れると考えられ、また、オイルブームも風下側でなければ展帳できないため、台船の向きを変えて適宜対応する。

#### b) 対象とする使用者および作業員に期待できるスキル

現地でのオペレーションは海洋工事会社とし、油回収作業に関する専門知識は持たないが、海洋工事で通常使用する発電機やクレーン、その他の機器の使用経験や必要な資格を有するものとする。また作業時の開所条件は

通常の海洋工事における条件と同様に波高 1m を限界とする。作業員は常時は海洋での土木工事を行っているものとする、以下についてのスキルが期待できる。

- ・ クレーンオペレータが確保できる。
- ・ 玉がけ作業ができる。
- ・ 簡単な電気工事（配線）ができる。
- ・ 簡単な配管作業ができる。

これに対して、以下のスキルは期待できないものとする。

- ・ 流出油の粘度を推定する。
- ・ 粘度に応じた排送システムを組み立てる。
- ・ 粘度や油膜厚さから油回収機の調整、または適当な回収機を選択する。

#### c) 対象とする流出油の条件

対象とする流出油は大型貨物船の燃料油である C 重油及びそのエマルジョンとする。軽油や原油の場合は、初期にはガス分が気化するため、防爆が不十分な船舶の転用は火災の危険があるとともに専門知識がないまま作業にあたることは安全上大いに問題がある。また、軽質分は結果的にはほとんどが気化して空中に分散してしまうため、回収がほぼ不可能である。

流出油は船舶等の事故後漏れ出し、海岸に向かって浮流しているものとする。外洋に向かって浮流しているものは、油回収船の到着を待つ時間的な余裕ができる。また、通常の工事用作業船では航行区域の制限があり、外洋までは出動できない可能性が高い。

また、事故直後の回収が望ましいとはいえ、その状況把握のための時間および準備時間、現地到着時間を考えると 12 時間以上経過した状態での作業となる。この場合、C 重油はエマルジョン化しており、海水温が低い場合（10℃前後）は粘度が数千～数十万  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  程度になると考えられる。このため、一般的な C 重油の粘度数百  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  から数十万  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  程度の油を対象とする。

## 5.2 システムの構成

工事用作業船を転用する油回収システムは、少ない配備数で広域をカバーできるようにトラックにより陸送で現場へ持ち込み、台船のクレーンで積みおろしする。クレーン台船上に Fig 5.4 のように設置し、油の流れの下流側に集油して油を回収する。システムに含むべき機材の構成は以下のとおりである。

#### a) 動力関係

油回収システム全体の動力源となる資機材を準備す

る。対象とする油種はC重油及びそのエマルジョンなので揮発性が少なく作業船と同様に防爆仕様ではなく、通常の工事現場で使用している資機材から選択し、トラブル時に速やかに対処できるように配慮する。したがって、動力源はディーゼル発電機およびコンプレッサー等とする。

#### b) 貯油タンク

ドラム缶は搬送しやすく便利だが、油回収システムの能力が高いと頻繁に交換しなければならない。また、たとえば4トン車で空ドラム缶を搬送する場合、外径が60cmとすると30本程度で荷台が一杯になってしまう。容量が1本約0.2klなので6kl分で4トン車が1台必要になる。一方で組み立て式の貯油タンクが市販されており、こちらは搬送時には、たとえばFAST ENGINEERING社のFASTANK 2000では長さ1.6m×幅0.5m×高さ0.5mにたたまれており、組み立て時には貯油量が10klとなるなど、スペース効率がよく、オープンタイプなので回収作業時に内部に揮発ガスがたまることもなく適性が高い。この他にも曳航式のオープンタイプの貯油タンクがある。曳航式は必ずしも取扱が簡単とはいえないことから、組み立て式のオープンタイプの貯油タンクを対象とするのが適切である。

#### c) 油回収機

流出油事故においては、ガット船のグラブバケットにより海面に浮流する油を掴み取る回収作業が行なわれることがある。ナホトカ号事故においても多大な成果を挙げていることは既に述べた。したがって、グラブバケットと同程度以上の油回収率（Oil Recovery Rate：1時間あたりの油回収量）を確保する。グラブバケットの容量は、クレーン台船で使用されることが多い4m<sup>3</sup>のものを対象とする。なお、全国に特に多く在船するクレーン台船ではガット船と異なり油を貯蔵できる船倉がない。このため、グラブバケットに比較して油回収効率（Oil Recovery Efficiency：回収油水中の油分の比率）が高く、船上の一時貯油タンクの容量を確保しやすいようにする。これにより、油回収作業の機会を多く得られ、かつ廃油処理費用が削減できる。

機構としては、高粘度油やごみ混じりの油水で問題になる管路の詰まりを生じないように工夫する。そのオペレーションにあたっては、油回収作業の専門家がいないと想定して、取扱い方法が粘度の違いに大きく左右されないものとする。使用方法がすぐに理解でき、通常のクレーン操作で使用できるものを目標とする。

#### d) 集油ブーム

集油ブームは滞油性を高くするためには大型のC型以上の規格品が望ましいが、展張作業などは若干の訓練が必要とされている。特に長い距離を展張する場合や2船で曳航して集油する場合などは非常に難しいとされている。

海洋工事においては自船からの油濁防止のためのオイルブームを作業船が準備していることが多いが、航行しながら集油作業を行うことはまずない。しかしながらこうした作業は油回収を行ううえでは必須となることから、以下のような集油ブームを準備する。

- ・ 集油時の航行および展張がしやすいようにブーム延長を短くする。
- ・ 集油時のオイルブーム形状を適正に保つことが容易である。
- ・ 展張したオイルブームにかかる抗力によって作業船が受ける影響を少なくする。

#### e) ポンプ

貯油タンクへの油水の排送は、油の粘度が高くなるにつれて排送管の詰まりやポンプの故障が心配される。また、海岸近くでの回収作業はゴミの混入を避けられないことから、十分な配慮が必要となる。このため基本的にポンプはダイヤフラムポンプとする。このポンプは駆動源がエアや油圧で本体には駆動源を持たないため非常に軽量でコンパクトである。また容積式ポンプであり、呼び水が不要で空運転が可能であるため取扱が簡単である。さらにコンプレッサー等の空気圧または油圧で出力の調整が可能のため、インバーター等の制御盤が不要である。ゴミに対しては渦巻きポンプより若干許容性がある。

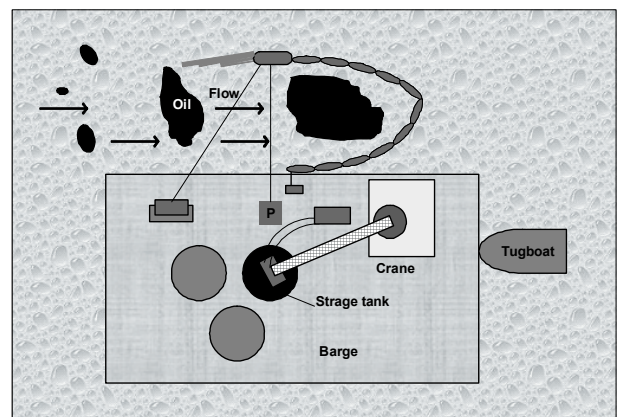


Fig 5.4 Diagram of arrangement of the equipments and materials on the barge

### 5.3 かき寄せバケット式油回収機の開発<sup>34)</sup>

#### (1) 油回収機の基本的な構成

グラブバケットによる浮流油の掴み取りによる油回収が高粘度油の場合に特に効果があるという声について検討する。操作性を考えた場合、ポンプや管路のような詰まりを生じる恐れがある機構が全くないため、高粘度油やゴミ混じりの沿岸での回収で利点がある。また、浮流油を直接狙って掴み取ることから回収作業がたいへんわかりやすい。これらの利点を生かすために、機構について2つの機能に分化して検討すると、グラブバケットは油をかき寄せる動作と貯油する機構が一体となっていることがわかる。しかしながらこのために、かき寄せ動作は1回のみであり、そのたびに台船上の貯油タンクまで油水を移動する必要がある。また、余水を多く掴み取った場合にもこれを効果的に分離することはできない。このため、かき寄せ動作と貯油の機能を分離した構成にすることで、わかりやすい動作と余水の低減を図る機能を併せ持つ油回収機を提案する。

提案する油回収機は、かき寄せ機構を設けて、水面の油膜を本体のバケットに引き寄せ、タンク前面の板を越流させ、できるだけ表面の油のみを回収する。油回収作業においては、浮遊する油に近づいて、あるいは潮流等の流れの下手側で待ち受けて油を回収する場合、水に接している油回収機の本体及び部材が流れを妨げたり乱したりするため、回収口前面まで近寄った油が乱れた流れにより遠ざかる、あるいは油回収機の周辺に逸れてしまう現象が起きる。さらに、油回収機に入射した波は当然ながら油回収機本体に反射されて、浮遊して近づいた油を押し戻す現象も起きる。流体力学によりこうした油回収機に特有の本体からの反射波等により油膜が回収口から遠ざかってしまう現象を抑止する油回収機の形状等の設計を行うことはたいへん難しいと考えられるが、かき寄せ機構はこれを簡単に、強制的に解消するものである。かき寄せ機構を搭載する油回収機は4章で述べた本研究において初めて開発されたと考えられるため、本論文では「かき寄せバケット式スキマー」と呼称する。

本体のバケットに入った油水は重力分離により下面に余水が溜まるので、これをダイヤフラムポンプで排出する。排出水に油分が混じったら、ポンプを停止し、油回収機を引き上げ、台船上の貯油タンク内に排出する。排出は油回収水平から傾けて行う。このため手法としては堰式スキマーとなるが、本体に一時貯蔵タンクを持ち、油の移送をポンプ等の管路を用いず、高粘度油及びゴミによる詰まりが起きない構造となっている。

こうしたグラブバケットを模して余水の低減を図る油回収の研究として、バケット形状を角型として底面に細孔をあけ、海面から一時貯蔵タンクまでの操作中にバケット内部の余水を細孔から排出する方法が提案されている<sup>35)</sup>が、この方式の場合、油の粘度に合わせて穴の口径を調整しなければ、クレーンの回頭速度が遅すぎると途中で油が漏れてしまい、早すぎると十分に余水を排出できない。本論文では現場作業員の油回収に関するスキルを要求しないことをコンセプトとしているため、ポンプによる余水排出とし、排出水の色で余水の排出状況を判断する方法としている。このため、余水の排出ができた時点でポンプを停止すれば、そのままさらに油水を回収する作業が続けられる。したがって対象とする油の粘度により機器の設定や構造を変える必要がなく、油の粘度という専門的な知識や判断を必要としない。

#### (2) かき寄せバケット式スキマー1号機

2004年度に開発したかき寄せバケット式スキマー(1号機)をFig 5.5, 5.6に示す。水槽実験が可能な縮小模型である。原寸は現場で多く使われる4m<sup>3</sup>のグラブバケットを想定した。このため、グラブバケットの掃海幅2mに対して縮小模型の掃海幅を0.5mとした。これにともなって、本体各部の寸法も実機のほぼ4分の1程度にした。Fig 5.8に示すように、上面が開放された本体のバケットの前方に斜板を取り付け、かき寄せ機構が本体に向かって油水をかき寄せる仕組みである。この斜板によって、かき寄せた油水が海面高さより高いバケット口に誘導されるものとした。

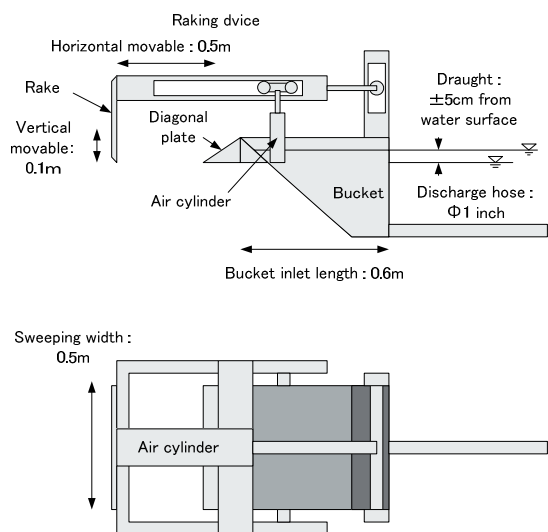
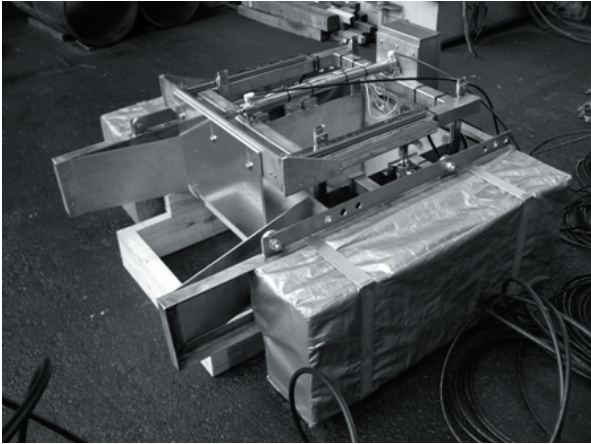


Fig 5.5 Illustration of the bucket oil skimmer with rake model (1)





( Floats are attached both side of the skimmer's frame )  
 Fig 5.6 The bucket oil skimmer with rake model (I)

本体の底部に口径 1 インチの排水管を設け、これをダイヤフラムポンプに接続して、底部に溜まる余水を排出する。排出は余水のため、高粘度油を回収しても実際に管路を通ることはないこと、ポンプは高粘度流体に対応するようせき式ポンプのなかからダイヤフラムポンプを選択したことから、排水管の口径はポンプに合わせた小口径のもので十分と判断した。

バケット内の油水の排出は、貯油タンク上でバケットを前方に傾けることによって行う。傾ける角度の軽減のため、バケット前面は斜めにカットした形状とした。

本体の水面に対する高さは、Fig 5.9 のように側面に浮力材を取り付けて調整した。また、駆動はエアシリンダによるものとし、コンプレッサーからのエアホース、信号線、1 インチの排水管が接続された状態で作動する。

### (3) かき寄せバケット式スキマー (1 号機) の水槽実験

#### a) 対象とする油及び波の条件

流出後 24 時間以上経過してエマルジョン化した C 重油の想定として、含水率約 60% に調整したエマルジョン化油、比較的早期の回収作業の想定として、C 重油 2 種類について実験した。粘度は含水率 60%、水温 10°C で約 100,000~110,000mPa・s 程度である。また C 重油の粘度は水温約 10°C で約 7700mPa・s であった。

波の条件は、水深があまり大きくない沿岸域を想定し、作業船の作業限界である波高 1m 及びこの波高での波長 25m、また通常想定される波高 0.5m、波長約 13m とした。かき寄せバケットスキマー模型が長さで実機の 4 分の 1 なので、水槽では作業限界の 4 分の 1 の波高 25cm、波長約 6m を最大とし、通常時の波ありは波高 12.5cm、波長

3.5m とした。また、浮流油をオイルブームで保持するため、水槽では約 7cm/s の微速で水流を与えた。

実験は供試油約 0.1kl を水面に散布しこれをオイルブームで保持しておき、静穏な場合と波のある場合での各種データの比較を行った。Table 5.3 に実験の条件を示す。

#### b) 回収油の計測方法

実験は、貯油タンクの容量がほぼ満たされた状態になるまで油回収作業を行ない、それまでの時間を計測した。また、油水の回収量の内訳は、貯油タンクの水面高さを先に計測し、回収した油水の総量を計算した。次に重力分離が行われる十分な時間貯油タンクを静置し、底の余水を排水して、残った油分面の高さを計測して油分の回収量を計算した。

#### c) グラブバケット模型の製作

作業船を転用する場合に使用され、実績をあげているグラブバケットによる油回収能力を同時に実験により評価する。このため、標準的なグラブバケットの 4 分の 1 模型 (Fig 5.7) を製作し、水槽実験を行った。なお、模型の都合上グラブの開閉はエアシリンダによるものとした。今回の実験では、現場と同じタイプのクレーン (ジブクレーン) が使用できないため、門型クレーンによる回収作業とした。

グラブバケット模型による実験状況を Fig 5.8 に、かき寄せバケット式スキマー模型による実験状況を Fig 5.9 に示す。



Fig 5.7 1/4 scale model of the grab bucket



(a) Grasp the oil / water fluid



(b) Scoop up the oil / water fluid

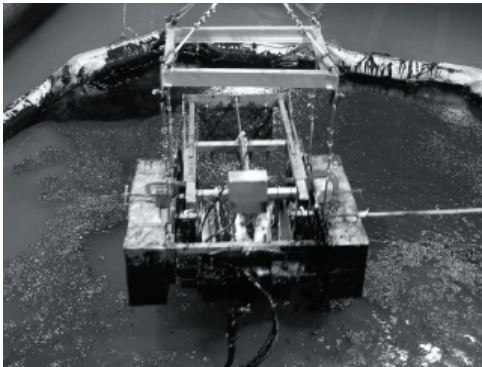


(c) Opening the grab on the storage tank

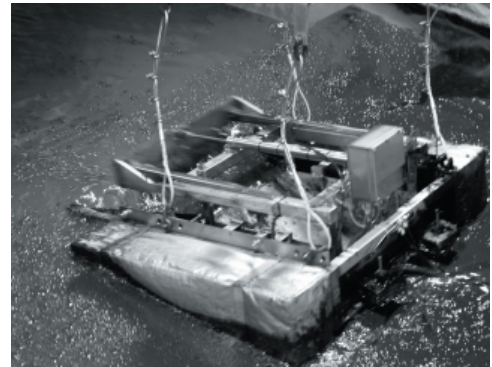


(d) The oil / water fluid was recovered in the tank

Fig 5. 8 The experiment of the grab bucket model



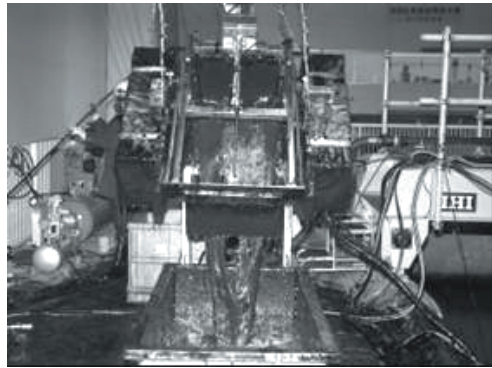
(a) Extend the rake forward the oil slick



(b) Raking up the oil / water fluid into the tank



(c) The oil / water fluid flew into the tank



(d) Tipped the bucket and the oil / water fluid was recovered in the storage tank

Fig 5. 9 Experiment of the bucket oil skimmer with rake model ( I )

Table 5.4 Results of the tank test (the grab bucket model)

Grab bucket model					
Oil condition	Water content (%)	Emulsified	Emulsified	C Heavy Fuel	C heavy Fuel
		62	62	62	0
	Viscosity (mPa·s)	100,000	100,000		
Wave condition	Wave height (m)	0.25	0	0.125	0
	Period (s)	2	-	1.5	-
	Wavelength (m)	6	-	3.5	-
Water temperature °C	primary	10.7	10.6	10.1	10.2
	end	10.7	10.7	10.2	10.4
Time of recovery	s	1,015	895	1,083	1,123
Actions of discharging	number of times	5	8	10	10
Recovery Fluid height	cm	19	24	19	21
Oily Phase height	cm	3	5	3	3
Oil Recovery Efficiency	%	16	21	14	14
Recovery Fluid	Liter	252	318	245	278
Recovered Oily Phase	Liter	40	66	33	40
Recovered Water	Liter	212	252	212	239
Oil Recovery Rate	Liter/h	141	267	110	128
Recovery Fluid Rate	Liter/h	894	1,280	815	893

(4) 実験結果

実験の結果は Table 5.4, 5.5 に示す. 本論文では油回収効率 (Oil Recovery Efficiency) を(5-1)式, 油回収率 (Oil Recovery Rate)を(5-2)式で定義する.

$$ORE = ROP / RF \times 100 \text{ (\%)} \quad \dots \dots \dots (5-1)$$

$$ORR = ROP / \text{time} \quad \dots \dots \dots (5-2)$$

ここで,

ORE : Oil Recovery Efficiency, 油回収効率 (%)

ROP : Recovered Oily Phase, 回収した油分量 (体積または質量, エマルジョンに含まれる水分を含む)

RF : Recovery Fluid, 回収油水の量 (体積または質量)

ORR : Oil Recovery Rate, 油回収率

time : 回収作業時間

Table 5.4, 5.5 から, グラブバケットの模型の方が油回収率が大きく, 波なしのエマルジョン化油の場合ではグラブバケットの約 267 l/h に対してかき寄せ式バケット式スキマー模型では約 68 l/h であった. しかしながら C 重油で波なしの場合はグラブバケットが約 128 l/h に対してかき寄せ式バケット式スキマーでは約 67 l/h とその差は小さくなる. 油回収効率はグラブバケットが最高で約 21%であったのに対してかき寄せ式バケット式スキマーでは最低でも約 19%, 最高では 56%となっており, 余水排出機構の効果が出ている.

波による回収作業への悪影響については, 今回の実験では制御側の船にあたる計測台車等は波による揺れを再現できないため実海域とは異なるが, やはり双方の方式で認められる. かき寄せバケット式スキマーでは, 波が直接バケット内に入り込むため, 波高 25cm 時の実験を中止した.

対象油の粘度の影響は, グラブバケットの方に明らかに認められるが, かき寄せ式バケット式スキマーの方は

Table 5.5 Results of the tank test (the bucket oil skimmer with rake model (I))

Bucket oil skimmer with rake model (I)						
Oil condition	Water content (%)	Emulsified	Emulsified	Emulsified	C Heavy fuel	C Heavy Fuel
		68	64	64	64	0
	Viscosity (mPa·s)	110,000	110,000	110,000	7,700	7,700
Wave Condition	Wave height (m)	0	0	0.125	0.125	0
	Period (s)	-	-	1.5	1.5	-
Water temperature °C	primary	10.7	9.8	9.9	10.1	10.4
	end	10.8	9.9	10.5	10.1	10.5
Time of recovery	s	3,277	3,525	3,837	3,279	2,368
Actions of discharging	number of times	3	3	4	5	4
Actions of raking	number of times	86	114	109	89	76
Recovery Fluid height	cm	8	9	11.5	12	9.5
Oily Phase height	cm	4.5	5	4.5	2.3	3.3
Oil Recovery Efficiency	%	56	56	39	19	35
Recovery Fluid	liter	106	119	152	159	126
Recovered Oil Phase	liter	60	66	60	30	44
Recovered Water	liter	46	53	93	129	82
Oil Recovery Rate	liter/h	66	68	56	33	67
Recovery Fluid Rate	liter/h	117	122	143	175	192

はっきりした判断が下せない.

(5) かき寄せバケット式スキマー2号機の製作

a) 1号機の課題点

かき寄せバケット式スキマー1号機の模型は, 波による越流を防止するためにバケットの油水取り入れ口を水面よりも高い位置に設定する必要があった. また, 越流させるためにはかき寄せ機構の動作速度を速く設定する必要があった. このため, 十分なかき寄せ流量の確保が難しかった.

波に対しては, 上部が開放してあるため, 内部の様子が見える利点があったが, 波高が大きい場合, 回収動作に入る前からどんどん越流してバケットが満水となり, これを回復する手段がなかった.

また, 油水を貯油タンクへ排出する作業の簡単さとバケット内部の底水と油の分離の促進のために, バケット形状を楔形としたが, 油水取り入れ口直後に斜面形状の壁面ができたため, 油塊の先端が壁面に付着し, バケット内への流入の障害となった.

底水の排出に関しては, ポンプの吸引による吸引口近傍の乱れが大きく, 油水の分離に大きな影響を与えてしまった. このため, 十分な底水の排水ができなかった.

そのほか, バケットの浮体幅が大きく, 水面での姿勢の安定性を浮体により確保するためには全幅を油水取り入れ口の幅 (掃海幅) に対して2倍以上の幅を取る必要があった. このため, 当該油回収機の4倍の掃海幅を想定している実機では, 全幅が5mを超えるものとなり, これを陸送する場合, 分解搬送及び現地組み立て方式を検討する必要がある.

また, バケットからの排出方式を, バケット傾け方式としたことで, バケットを架台上におろしてクレーン操



作により傾ける作業となったが、この場合、クレーン操作で慎重な取り扱いが必要となることや、傾け時にクレーン操作を誤るとバケット内の油水が勢いよく流出し、受け側の貯蔵タンクから外へ飛び出してしまう可能性があった。

b) 油回収手法の変更

かき寄せバケット式スキマー（1号機）では十分な油水のかき寄せ量が期待できないため、2号機ではこの点を根本的に見直した。ただし油水をかき寄せ機構で強制的に回収容器内に導流するコンセプトは同様である。

まず、かき寄せ板を枠構造に変更した。第4章の浅海域用高濃度油回収システムでは数万  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  以上の高粘度油を対象としたかき寄せ機構はレーキ状として水面の浮流油のみをかき寄せるものであった。これは高粘度油の場合、浮流油は油塊となって容易に拡散せず、かたまりのまま取り扱うことができたことから、水の抵抗の軽減を図るため、レーキ状としたものである。本研究では数百  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  程度の通常のC重油も対象としたことから、櫛状のレーキでは隙間から抜けてしまうため、従来のレーキの構造から単純な板に変更して、流動性のある浮流油もかき寄せられるようにしたものである。しかしながら油水取り入れ口下部の回収機本体から反射する流れおよびかき寄せ板の動きによる影響で、かき寄せ板の進行方向に直行し、外へ向かう方向の流れが生じ、この流れに乗って逃げてしまう浮流油の割合が多く、効率が悪くなってしまった。このため、2号機は枠構造とすることで、浮流油は枠外へ逃げにくくすると考えられる (Fig 5.10)。

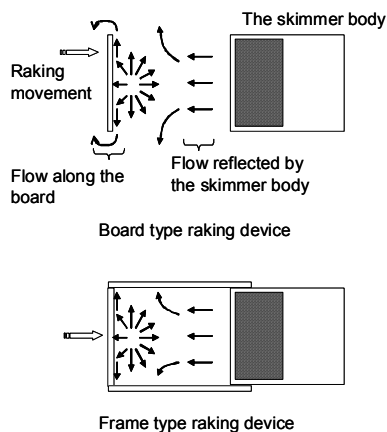


Fig 5.10 Diagram of the raking device type

1号機は従来からある堰式スキマーの喫水を常時水面上に置くことで余分な海水の流入を防止し、かきよせによる堰の越流を利用するものであった。これに対して2号機は通常の堰式スキマーと同様に油水取り入れ口は常時

水面下として油水の流量を容器内外の水位差で主に決め、これにかき寄せ機構による効果を付加したものとなった。これによりかき寄せ油水量は十分な量を期待できる。ただし、かき寄せ動作時のみ開口する蓋を設けて、余分な海水の流入を防止した (Fig 5.11 の側面から見た概念図)。動力はエアシリンダによるものである。

通常の堰式スキマーは、スキマー容器内に油水を取り入れるために容器内の水位をポンプによって下げて吸引する構造となっている。このため、浮流油が十分に厚く集油され、連続的な回収が望まれるような場合には、適切な堰の喫水を制御できるならば有効である。しかしながらわずかな波浪でも回収機との相対的な水位が油層厚を超えてしまうような状況では適切な喫水を制御することが困難となるため、余水が多くなってしまう。またスキマーに吸引される向きに理想的な流れができなければ、浮流油が連続的に回収されない。

本方式では、浮流油がある場合のみかき寄せ動作によって油水取り入れ口が開く仕組みとなっているため、上記のような通常の堰式スキマーにまつわる問題点は解消される。クレーンで常時吊り下げられているため、浮流油が理想的に連続的な流れを形成できなくても、浮流油のある箇所に容易に回収機を移動できる。

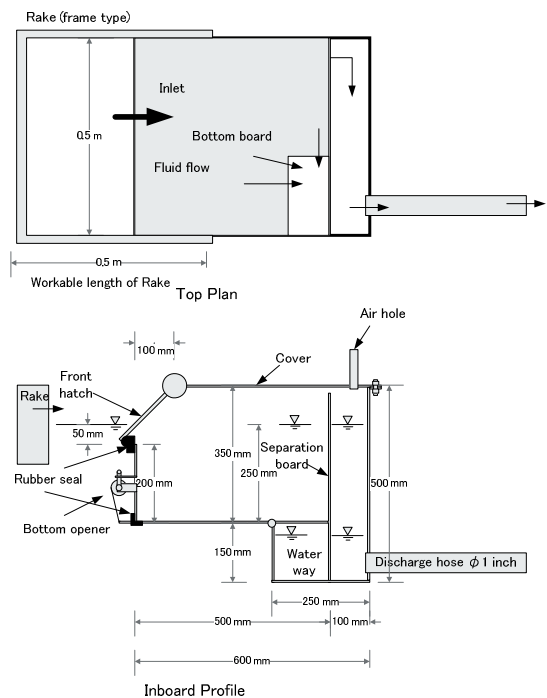


Fig 5.11 Illustration of the bucket oil skimmer with rake model (II)

c) バケット形状の変更

1号機のようにバケットに斜面がある場合、その斜面

に油が付着しやすいことから、バケット内部の斜板を廃止して、すべて水面に対して垂直な部材とした。また、底水の吸引によるバケット内部の乱れを防止するため、吸引管の取り付け箇所とバケット容器の間に板を設けて直接的な影響を遮断するとともに、バケット容器内底面に設けた吸引口を大型にして吸引流速を緩和するとともに吸引管取り付け口までの流路を長く取って乱れの影響を緩和した (Fig 5.11 の上面から見た概念図及び側面から見た概念図)。

バケット上面には蓋を設け、波の進入を防止した。また、蓋を閉じた状態で底水の吸引ができるように空気抜き穴を設けている。

1号機はバケット本体は浮力材により水面に浮く設計として、適切な喫水を浮力材及び錘により調整するものであった。しかしながら、適切な喫水は集油した浮流油の油層厚さによって決められるものであるため、現場では状況により刻々と変化するものである。堰式スキマーではこれを油分の比重を利用して自動的に喫水調整するものや超音波式油膜厚センサにより堰の高さを自動的に上下させる仕組みなどが用いられているが、いずれも油層厚さがある程度以上薄くなると制御が難しくなる。

2号機ではバケットを水に浮かないものとした。このため浮力材を廃止した。これにより本体の外形サイズの小型化が図られた。ただし、クレーンのオペレーションは状況に応じて吊り下げ高さを調整することとなり、グラブバケットで浮流油を回収する作業時の高さ調整と同様の運用となった。しかし、上記の喫水調整により油膜厚に合わせるといった緻密な作業は要求せず、余水の低減はもっぱら底水の排水によるものとした。こうした作業について、オペレーターの疲労を考慮すれば改善すべきではあるが、吊り下げ高さの精度を管理することはクレーン作業の基本動作であることから、通常海上工事の作業としてみれば問題はない。Fig 5.12 に装置の概観を示す。

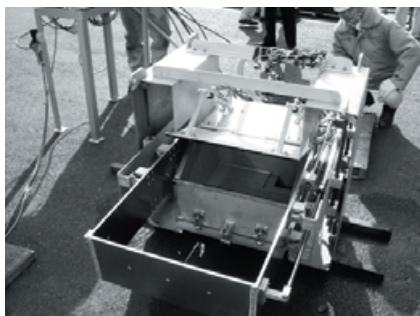


Fig 5.12 Improved bucket oil skimmer with rake model (II)

d) 油水の排出方法及びオペレーションの変更

バケット内の油水は2号機と同様に管路を経由せず、バケットから貯蔵タンクへ直接排出する方式である。ただし、バケットの底を開閉するようにしてクレーン作業及び貯蔵タンク周辺で待ち受ける作業員の作業を簡単にした。バケット底の開閉は模型では手動にしたが、本来は自動開閉式が望ましい。これらの一連の動作に関しては、グラブバケットと同等の取り扱い性の良さを取り入れたいと考えたものである。

底水の排出についてはダイヤフラムポンプにより行なうが、バケット容量が約40lに対して、排水ポンプの流量も約40l/minとなったのでポンプを1分間作動させるとバケットが空になる。底水は油回収のためのかき寄せを行なうにつれて減少していくため、バケットの様子を見ながら排水に明らかな油分が混じったらバケットを引き上げて貯蔵タンクに油水を排出するという手順とした。この底水の排出に関する判断はあいまいな部分を多く残してしまっていたが、2005年度当初の計画では次のように仮定していた。

かき寄せ動作による油水の導流量は、当初の実測により3回でバケット内が満水となったことから、1回で約13lの油水が導流されると仮定できる。この油水の余水を90%と仮定すると、1回について12lの余水を排出すれば最も理想的に余水の排出ができる。そのためには約18秒ポンプを作動させればよいことになる。ところが実際にはかき寄せ動作ごとの油水の導流量は一定でなく、オペレーターが浮流油をうまく取り入れようと微妙な喫水調整を行ったり、これを失敗したりするたびに変わることや、浮流油との遭遇機会を逃さないようにするためには底水排水を待ちきれないなどの問題があった。これらを総合的に人間が判断して排出調整をすることが作業上支障になったため、かき寄せ時の油水の導流状況をみてバケット内の水位から適宜かき寄せ動作の間隔を調整する代わりに、底水の排水は基本的に油分が排水に確認されるまで連続で行なうこととした。

#### (6) かき寄せバケット式スキマー (2号機) の水槽実験

かき寄せバケット式スキマーの2号機は操作方法および本体構造を大幅に変更したことから、水槽試験の条件についても変更した。

2号機の水槽試験では、回収油水および油分の計測をより確実にするため、散布油量を1号機の実験より増やし、ドラム缶約1本分(0.18m<sup>3</sup>)程度の油水を回収したらその重量を計測し、静置後、底の余水を排出して油分の重量を計測した。また、実験ケースを増やして、波高



の影響と周期（波長）の影響についてより詳細にデータを取った。水槽にオイルブーム（オイルフェンス）を張り、0.2 knt の微弱な流れで散布油が上流に拡散しないように維持した。実験は散布した油をほぼ回収し終えたところ、あるいは回収した油水の量がおよそ 0.18m<sup>3</sup> に達した時点で終了する。回収した油水はドラム缶に移し替えて、その重量を回収した全体の油水量とする。供試油は C 重油およびそのエマルジョンなので油水の重力分離が速いため、しばらく静置したのち底部にある余水を排出して再度重量を計測し、これを回収した油量とした。比較対象のグラブバケット模型についても同様に実験を行った。水槽試験の配置等を Fig 5.13 に示す。また、実験ケースについて Table 5.6 に示す。

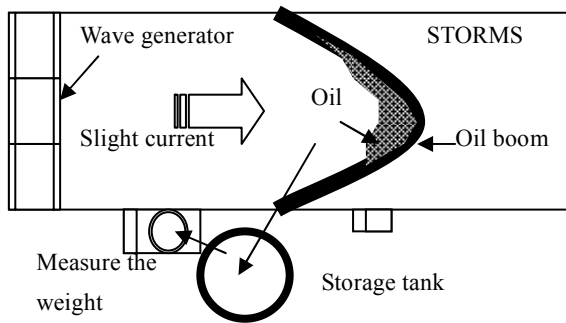


Fig 5.13 Arrangements of large tank test

Table 5.6 Parameter of the tank test

	Case							
	0	0.125	0.2				0.3	
Wave Height (m)								
Wave Length (m)	-	3.5	5	10	15	20	10	15
Wave Period (m)	-	1.5	2	3	4	4	3	4
C Heavy Fuel Oil Viscosity (mPa·s) at 10 (1/s), 10(°C)	1,300							
Emulsified Oil Viscosity(mPa·s) at 10 (1/s), 10(°C)	40,000							
Water Temperature (°C)	10~11							

(7) かき寄せバケット式スキマー2号機の実験結果

a) 回収能力の評価

実験の結果を Table 5.7, 5.8 に示す。波なしのデータである波高 0m についてみると、かき寄せバケット式では C 重油の場合に平均で油回収効率が約 81%, 油回収率が約 304kg/h, エマルジョン化油の場合に油回収効率が 64%, 油回収率が 224kg/h であった。これに対してグラブバケットでは C 重油の場合に油回収効率が約 37%,

油回収率が約 321kg/h, エマルジョン化油の場合に油回収効率が約 55%, 油回収率が約 291kg/h であった。

Table 5.7 Results of tank test of the bucket oil skimmer with rake model (II)

Oil condition	Wave Height (m)	Wave Period (s)	Time of Recovery (min)	Recovery Fluid Weight (kg)	Recovered Oily Phase Weight (kg)	Oil Recovery Efficiency (%)	Oil Recovery Rate (kg/h)	Fluid Recovery Rate (kg/h)
C Heavy fuel	0		20	119	92	77	276	357
	0		19	125	105	84	332	395
	0.125	1.5	30	120	67	56	134	240
	0.125	1.5	29	138	77	56	159	286
	0.2	1.8	46	28	17	61	22	37
	0.2	1.8	37	77	23	30	37	125
	0.2	2.6	27	128	88	69	196	284
	0.2	3.5	24	140	77	55	193	350
Emulsified	0		19	111	71	64	224	351
	0.125	1.5	27	140	88	63	196	311
	0.125	1.5	29	136	91	67	188	281
	0.2	1.8	24	82	38	46	95	205
	0.2	1.8	30	154	58	38	116	308
	0.2	2.6	20	67	45	67	135	201
	0.2	2.6	29	118	65	55	134	244
	0.2	3.5	20	86	70	81	210	258
	0.2	3.5	23	134	90	67	235	350
	0.2	4.4	20	124	97	78	291	372

Table 5.8 Results of tank test of the grab bucket model

Oil condition	Wave Height (m)	Wave Period (s)	Time of Recovery (min)	Recovery Fluid Weight (kg)	Recovered Oily Phase Weight (kg)	Oil Recovery Efficiency (%)	Oil Recovery Rate (kg/h)	Recovered Fluid Rate (kg/h)
C heavy fuel	0		7	144	41	28	351	1234
	0		12	128	58	45	290	640
	0.125	1.5	5	144	35	24	420	1728
	0.125	1.5	4	126	24	19	360	1890
	0.2	1.8	9	144	72	50	480	960
	0.2	1.8	10	165	79	48	474	990
	0.2	2.6	8	197	63	32	473	1478
	0.2	2.6	7	141	50	35	429	1209
	0.2	3.5	7	137	43	31	369	1174
	0.2	3.5	16	127	88	69	330	476
	0.3	2.6	4	160	58	36	870	2400
	0.3	2.6	11	166	50	30	273	905
Emulsified	0		16	142	80	56	300	533
	0		16	140	75	54	281	525
	0.125	1.5	10	124	44	35	264	744
	0.125	1.5	12	155	63	41	315	775
	0.2	1.8	6	140	29	21	290	1400
	0.2	1.8	5	151	23	15	276	1812
	0.2	2.6	10	198	50	25	300	1188
	0.2	2.6	5	162	32	20	384	1944
	0.2	3.5	11	175	64	37	349	955
	0.2	3.5	9	136	60	44	400	907

実海域の波高と波長をおよそ 4 分の 1 に合わせたデータである波高 0.125m のときのデータでは、かき寄せバケット式では C 重油の場合に平均で油回収効率が約 56%, 油回収率が約 147kg/h, エマルジョン化油の場合に油回収効率が 65%, 油回収率が 192kg/h であった。これに対してグラブバケットでは C 重油の場合に平均で油回収効率が約 22%, 油回収率が約 390kg/h, エマルジョン化油の場合に油回収効率が約 38%, 油回収率が約 290kg/h で

あった。

こうした比較からは、波のある通常の作業環境ではグラブバケットに比べてかき寄せバケット式は回収効率が非常に高いが、油回収率がグラブバケットの38～67%程度と十分高いとはいえない。しかしながらグラブバケットの場合は膨大な余水が発生することとなるため、回収油水を一時的に受け入れる貯蔵タンクの容量が小さい場合や、このタンクから余水を排出するポンプ流量が小さい場合などでは途中で作業を中断する必要がある。

波高と周期・波長の組み合わせを変えたデータからは、かき寄せバケット式スキマーもグラブバケットも同じ波高で周期・波長が長い方が油回収効率が良くなる傾向がある。また油回収率も同様の傾向がみられる。両方式ともに波形勾配が大きい場合に油膜表面を狙いにくくなることから、波長が長い方が回収しやすいものとみられる。

#### b) プロトタイプへ反映すべき観察結果等

プロトタイプを実機サイズとする場合、かき寄せバケット式スキマーでは2号機の構造をとる場合に、かき寄せ機構を駆動するエアシリンダがバケット側面に張り出しており、全幅に占める割合が比較的大きい。水槽実験の結果、エアシリンダの容量が比較的小さく、動作が緩慢になったことが回収作業に悪影響を与えていると考えられる。

底開式の油水排出方式は1号機のバケット傾け式の油水排出方式に比べて作業上の安全性と安定性が確保されたが、底蓋は油水吸引口のあるバケット内の水路を含めて全開とすべきであったこと、および油水が排出される方向を一方に絞るガイドとなる側板が必要である。

また、かき寄せる長さがグラブバケットは1.25m、かき寄せバケット式スキマーが0.5mで、掃海幅が同じでも掃海面積が一動作あたりグラブバケットの5分の2となっていることから、掃海速度が小さくなってしまう。プロトタイプ及び実機においては、この点を考慮して設計することが必要である。

### (8) かき寄せバケット式スキマーのプロトタイプ(3号機)の製作

#### a) 課題のまとめ

かき寄せバケット式油回収機模型(2号機)の課題は、以下のものであった。

- かき寄せ機構を駆動するエアシリンダの張り出しが大きく、掃海幅の割に全幅が大きい。
- 側面の駆動機構取り付け構造材が板状のため、波に

より不都合な流れが生じる。

- エアシリンダの容量が小さく、動作が緩慢になり、回収作業に悪影響を与えている。
- 底開式の油水排出で底蓋の構造により油水が飛散し、作業性が悪い。
- グラブバケットに対して一動作あたりの掃海面積が小さいため回収能力が低い。

このため、3号機はこれらの点を鑑みつつ、回収能力を高めるための改良を施した。

#### b) 実機の大きさの想定とプロトタイプの縮小率

油回収機の改良点は上記を踏まえて以下のとおりである。プロトタイプは実機の大きさが理想であるが、水槽実験における制約およびコスト削減のため、縮小モデルとしている。なお、縮小率に関しては4分の1としているが、油膜厚さなどに関しては粘度の相似をとる事が難しいため、模型実験においても実際と同時状況であり、このためかき寄せ機構の設計上、実機は幾何学的相似形にならない。このためTable 5.9は実寸法の想定との参考的な比較とする。なお、Table 5.9の本体寸法の長さはバケットの長さである。想定する実機は、掃海幅2m、かき寄せストローク4mとして、プロトモデルは実質的に4分の1の縮尺と考える。

Table 5.9 Dimension of the bucket oil skimmer with rake

Ballpark Dimension (m)	Sweep Width	Height	Length	Tank Capacity (liter)
Real Size	2.0	2.0	2.4	4,000
Model II	0.5	0.5	0.6	63
Model III (Prototype)	0.5	0.5	1.2	125

#### c) 機構上の改良点

機構の改良は以下の点について行った。

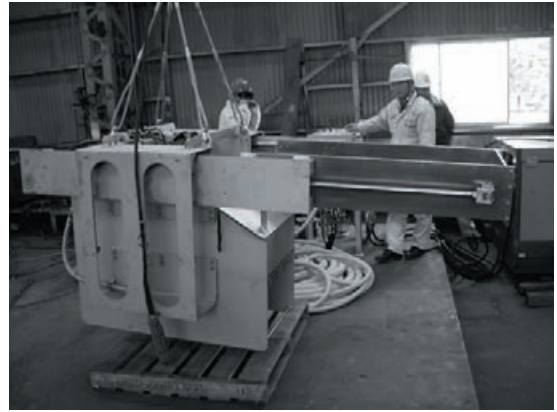
• エアシリンダ及びスライダーを取り付ける構造材は油回収作業の邪魔にならないように小型化するとともに、不要な部分は肉抜きをして伴流の発生を防ぐ (Fig 5.14(a), (b)に見える側面の部材)。

- 駆動用エアシリンダの容量を大きくし、動作が緩慢になることを防ぐ。
- かき寄せレーキのストロークを2号機の2倍の1.0mとする
- 底蓋はポンプ吸引口を取り付ける槽底部も含めて開く構造とし、油水の排水方向を1方向のみに導く導流板を取り付ける。動力による開閉動作とする (Fig 5.14(C))。

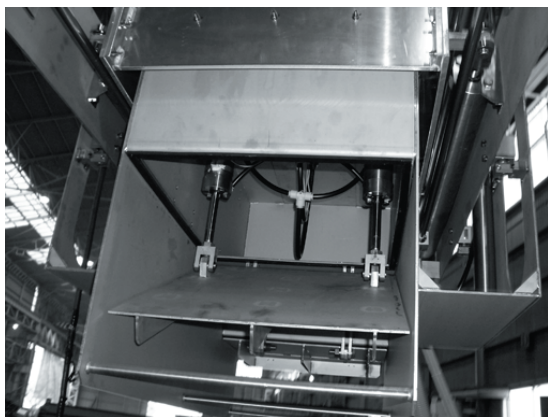
これらの改良を施した縮小プロトタイプモデルを Fig 5.16 に示す。



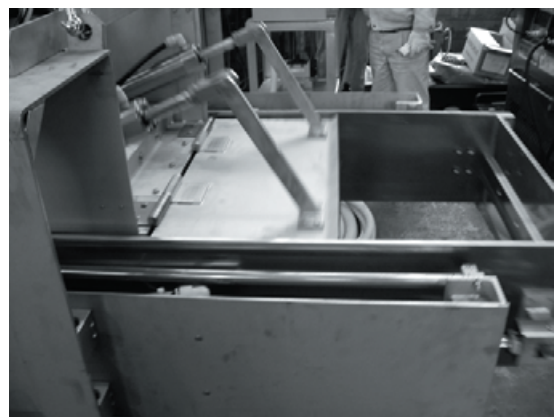
(a) The state of retracting the rake



(b) The state of extending the rake



(c) The state of opening the bottom hatch



(d) The state of opening the inlet hatch

Fig 5. 14 The bucket oil skimmer with rake down scale model ( III )

## (9) 実験結果

### a) 実験条件

実験は 2005 年度に行った 2 号機と同条件として、手順も同様とし行った。ただし、グラブバケット模型の実験は行わず、2005 年度のデータと比較した。

油回収機のオペレーションは、クレーン操作に 1 名、油回収機の制御盤のオペレーションに 1 名、排水ポンプ 1 名の 3 名で行った。油の散布量は  $0.16\text{m}^3$  から  $0.18\text{m}^3$  程度で、水槽内の流速が約  $0.2\text{knt}$  と 2005 年度と同様なので、油膜厚さも同条件である。油の分布状況から見て、拡散面積は  $8\text{m}^2$  程度とみられることから、油膜厚さは  $2\text{cm}$  程度と推定される。散布した供試油は、C 重油と C 重油に約同量の水をエマルジョン化させたエマルジョン化油である。

実験ケースの波と周期の組み合わせは Table 5. 10 のとおり実現場の 4 分の 1 を仮定し、2005 年度の実験を踏まえ、実現場での性能の比較のために必要な数に絞っている。なお、2006 年度版の縮小プロトタイプモデルにつ

いては、性能を推算する場合の縮尺と水槽実験における相似比は異なっており、波に対する条件の波高については、縮小プロトタイプモデルの高さの寸法が実機の 4 分の 1 であることから 4 分の 1、波長については縮小プロトタイプモデルのバケットの長さの寸法が実機の 2 分の 1 なので 2 分の 1 としている。

水槽水の水温は実験期間中ほぼ  $10^\circ\text{C}$ ~ $11^\circ\text{C}$  に保たれていた。使用した供試油は  $10^\circ\text{C}$  の粘度を計測すると、C 重油はずり速度  $10(1/\text{s})$  において約  $3,800\text{mPa}\cdot\text{s}$  であった。C 重油は実験中に波により若干エマルジョン化し、試験終了時には約  $9,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  まで粘度が高くなっていた。エマルジョン化油は同様に  $10^\circ\text{C}$ 、ずり速度  $10(1/\text{s})$  において約  $40,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  であった。エマルジョン化油の粘度は試験終了時にもずり速度  $10(1/\text{s})$  において同様であった。ただし、ずり速度  $1(1/\text{s})$  の場合で比較すると、当初約  $145,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  だったものが試験終了時に約  $41,000\text{mPa}\cdot\text{s}$  に下がっていた。

なお、2005 年度の実験では、C 重油の粘度は約  $1,300\text{mPa}\cdot\text{s}$  (ずり速度  $10(1/\text{s})$ ) 程度で 2006 年度より

も低かった。また、エマルジョン化油は同様に約 40,000 mPa・s (ずり速度 10 (1/s)) で行われた。したがって 2006 年度は C 重油の粘度が 2005 年度の実験に比べ高粘度であった。これらを Table 5.11 にまとめて示す。また、実験の状況を Fig 5.15~5.18 に示す。

Table 5.10 Test Case

Tank Basin			Equivalent to the coast	
Wave Height (m)	Wave Length (m)	Wave Period (s)	Wave Height (m)	Wave Length (m)
0	—	—	—	—
0.125	3.5	1.5	0.5	7
0.2	10	2.6	0.8	20

Table 5.11 Parameter of the tank test

	Case		
Wave Height (m)	0	0.125	0.2
Wave Length (m)	-	3.5	10
Wave Period (m)	-	1.5	2.6
C Heavy Fuel Oil Viscosity (mPa・s) at 10 (1/s), 10(°C)	1,300 (Grab Bucket) 3,800 (Skimmer Developed)		
Emulsified Oil Viscosity (mPa・s) at 10 (1/s), 10(°C)	40,000 (both Grab Bucket and Skimmer Developed)		
Water Temperature (°C)	10~11		



Fig 5.15 Preparation of the tank test (feeding the oil)



Fig 5.16 Hang the skimmer on the oil slick

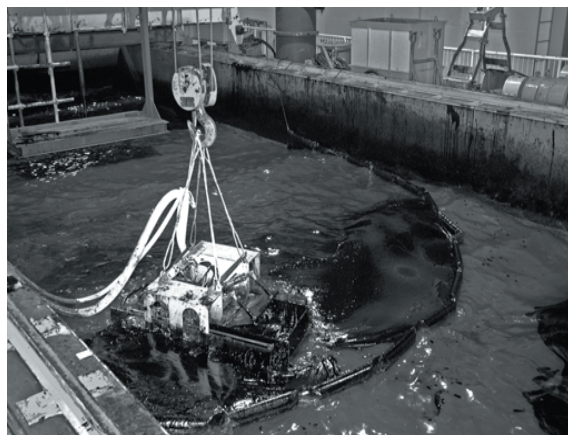


Fig 5.17 Recovery action (Raking, the hatch opens, the fluid flows into the tank)



Fig 5.18 Test oil (emulsified)

b) データ解析結果と考察

かき寄せバケット式スキマー縮小プロトタイプモデルによる水槽実験結果を Table 5.12 に示す。また, Table 5.13 に 2005 年度に行ったグラブバケット模型によるデータを抜粋し再掲する。

Table 5.12 Results of the tank test of the bucket oil skimmer with rake down scale model ( III )

Oil condition	Wave Height (m)	Wave Period (s)	Time of Recovery (min)	Recovery Fluid Weight (kg)	Recovered Oily Phase (kg)	Oil Recovery Efficiency (%)	Oil Recovery Rate (kg/h)	Recovered Fluid Rate (kg/h)
C heavy fuel	0	-	14	151	101	66	432	647
	0	-	17	170	156	91	550	600
	0.125	1.5	22	131	68	51	185	357
	0.125	1.5	20	195	111	56	333	585
	0.2	2.6	13	114	85	74	392	526
	0.2	2.6	11	121	86	71	469	660
Emulsified	0	-	25	166	125	75	300	398
	0.125	1.5	18	122	96	78	320	406
	0.125	1.5	13	99	80	80	369	456
	0.2	2.6	14	123	72	58	308	527



Table 5.13 Results of the tank test of grab bucket model  
(extract from Table 5.8)

Oil condition	Wave Height	Wave Period	Time of Recovery	Recovery Fluid Weight	Recovered Oily Phase Weight	Oil Recovery Efficiency	Oil Recovery Rate	Recovered Fluid Rate
	(m)	(s)	(min)	(kg)	(kg)	(%)	(kg/h)	(kg/h)
C heavy fuel	0	-	7	144	41	28	351	1234
	0	-	12	128	58	45	290	640
	0.125	1.5	5	144	35	24	420	1728
	0.125	1.5	4	126	24	19	360	1890
	0.125	2.6	8	197	63	32	473	1478
Emulsified	0.2	2.6	7	141	50	35	429	1209
	0	-	16	142	80	56	300	533
	0	-	16	140	75	54	281	525
	0.125	1.5	10	124	44	35	264	744
	0.125	1.5	12	155	63	41	315	775
	0.2	2.6	10	198	50	25	300	1188
	0.2	2.6	5	162	32	20	384	1944

① 油回収率, 油回収効率・時間あたり回収油水量の比較

Table 5.12, 5.13 の比較から, かき寄せバケット式スキマーは比較的粘度の低い C 重油, 非常に粘度の高いエマルジョン化油の双方ともに, ほぼ同じ大きさのグラブバケット模型と油回収率は同等で, かつ, 油回収効率が良いことがわかる. 平均で比較すると, 時間あたりに換算した油回収率は同等の 366 kg/h, 油回収効率は約 2 倍の 70% となっており, 総合的に見て, グラブバケットよりも成績が良い.

② 波浪下の比較

Fig 5.19~5.21 に波高ごとの比較を示す.

Fig 5.19 を見ると, 波高によるばらつきはグラブバケットの方が小さい. また, グラブバケットはエマルジョン化油よりも C 重油の方が各波高において油回収効率が低い傾向が見えるが, かき寄せバケット式スキマーは明確ではない.

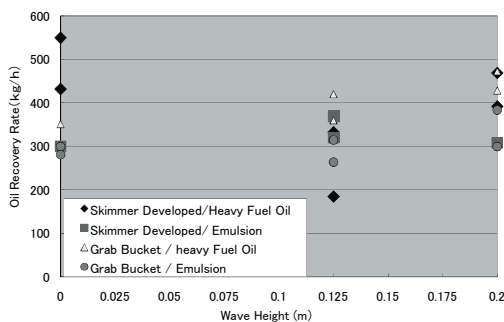


Fig 5.19 Comparison of the Oil Recovery Rate

Fig 5.20 を見ると, 各波高においてかき寄せバケット式スキマーの油回収効率がグラブバケットより優れていることが明かである. Fig 5.21 を見ると, 波がある場合

の時間あたり回収油水量がかき寄せバケット式スキマーに対してグラブバケットが顕著に多いことがわかる.

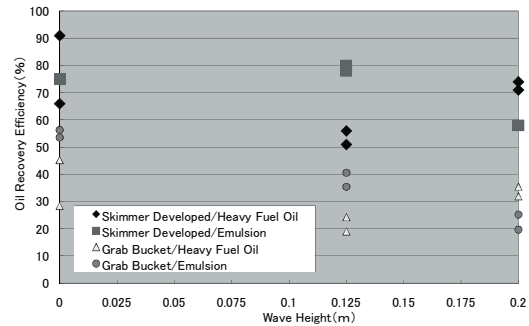


Fig 5.20 Comparison of the Oil Recovery Efficiency

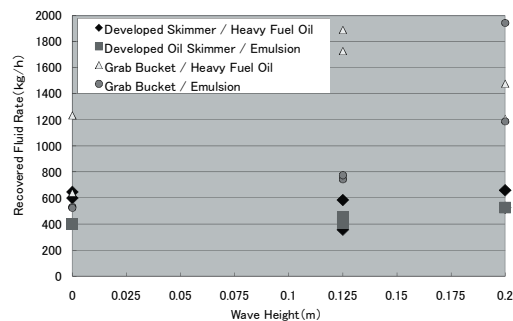


Fig 5.21 Comparison of the Recovered Fluid Rate

③ 実機の性能の推算

実機では掃海面積が双方とも 16 倍となり, 油膜厚さは相似比を取らないので, 水槽実験と同じと仮定すると, 動作速度のファクターを無視すれば, 性能は模型実験の 16 倍と考えられ, Table 5.14 のように推算できる. ただし, Table 5.14 の値は波高の影響を無視して平均している.

本推算によれば, かき寄せバケット式スキマーの油回収率は約 5.9t/h, 油回収効率は約 70% である. グラブバケットの油回収率は約 5.7t/h, 油回収効率は約 34% である. これらの数値を比較すれば, かき寄せバケット式スキマーならば 1 日 6 時間の稼動で約 35t (ドラム缶約 176 本分) の油が回収でき, 準備すべき貯油タンク容量は約 50t (ドラム缶約 251 本分) である. これに対してグラブバケットの場合, 1 日 6 時間の稼動で約 34t (ドラム缶約 171 本分) の油が回収できるが, 準備すべき貯油タンクは約 99t (ドラム缶約 497 本分) もの容量になる.

これらから, 開発したかき寄せバケット式スキマーはグラブバケットと同等の油回収率で, かつ, 余水が半分の量に抑えられる高い油回収効率を持ったものとなり,



当初の開発目標の能力を達成した。また、油の粘度の影響も少ないといえる。

Table 5. 14 Estimation of the capacity about oil recovery in real size oil skimmer and the grab bucket

Type	Capacity Oil Type	Model (1/4 scale)			Real size		
		Fluid Recovery Rate	Oil Recovery Rate	Oil Recovery Efficiency	Fluid Recovery Rate	Oil Recovery Rate	Oil Recovery Efficiency
		kg/h	kg/h	%	kg/h	kg/h	%
Bucket Oil Skimmer with Rake	C Heavy Fuel Oil	577	394	68	9236	6296	68
	Emulsified	446	324	73	7131	5188	73
	Average	523	366	70	8361	5853	70
Grab Bucket	C Heavy Fuel Oil	1160	410	35	18560	6553	35
	Emulsified	903	301	33	14444	4821	33
	Average	1035	355	34	16560	5687	34

④ 他の形式の油回収機との比較

Table 5. 15 に他の形式の油回収機との比較を示す。表は文献<sup>27),36)</sup>から作成したものである。対象油の粘度は、low を数百 mPa・s 程度以下、med. を 2,000mPa・s 程度の重油、high を 20,000mPa・s 程度の C 重油およびエマルジョン化油、very high をそれ以上の高粘度なエマルジョンとして判断した。油回収率は、大形船舶で使用するにより、大形化及びポンプ能力を拡張でき、数百 m<sup>3</sup>/h 以上の能力が発揮されるものを high とした。油回収効率は high を 90%以上、med. を 70%程度、low は 50%より少ないものとして表記した。波による影響で大きく油回収効率が下がるものは静水面で高いものでも low とした。

Table 5. 15 Estimation of the capacity about oil recovery in real size oil skimmer and the grab bucket

Skimmer type	Oil Type (viscosity)	Oil Recovery Rate	Oil Recovery Efficiency	Effect of Debris	Effect of Wave	Need of training
1.Wier	low	high	low	high	high	yes
2.Fixed submersion plane	low-med.	high	low	high	med.	simple
3.Suction	low-high	high	low	high	high	yes
4.Cylone	low-high	high	low	high	high	yes
5.Rope mop	med.-high	med.	med.	low	med.	simple
6.Drum	low-high	med.	high	med.	med.	simple
7.Disk	med.	med.	high	high	med.	simple
8.Belt, brush	med.-very high	med.	med.	med.	med.	yes
9.Grab bucket	med.-very high	med.	low	low	med.	no
10.Complex	low.-very high	vary	vary	med.	vary	yes
11.Bucket oil skimmer with the rake	med.-very high	med.	med.	low	med.	no

一般的に油回収機は程度の差はあるが、使用するための訓練が必要である。開発した油回収機は運用試験で検証したとおり、訓練が必要ないと考えられる。また、想定する対象油は主に重油以上の粘度の油であるため、粘度の範囲は 2,000mPa・s 程度以上の広範囲であるが、水槽試験での検証と構造上から十分その範囲を満たしてお

り、他の形式ではこうした範囲で機能するものは少ないことがわかる。また、ゴミに強く、油回収率、油回収効率で同程度以上の能力を持つことがわかる。このため、かき寄せバケット式スキマーはゴミや波の影響も含めて運用性が他の回収機に比べて高く、油回収効率が比較的高く、油回収率は機器の大きさに対して通常的能力を持つといえよう。

5.4 集油装置の開発

(1) 自動展張式オイルブームのコンセプト

a) 台船に簡単に取り付けられる集油ブーム

海洋工事においては若干のオイルブームを準備することが多いが、これは作業船等からの油漏れを防ぐためのコンテインメントブームである。これに対して、油回収作業においては、他方から侵入する油を防御し、浮流油を集め回収しやすくするオイルブームが必要となる。

USCG (米国沿岸警備隊) が準備しているアウトリガータイプの集油装置 (Fig 5. 22, USCG インターネットホームページより引用) に対して本研究開発においては曳航ブイを基本としたシステムを開発する。アウトリガータイプは取り付けられる船舶の形状に若干の制限があるが、本方式の場合はワイヤロープを取り付けるだけであるためこの制限がより少ないと考えられる。また、後述するジェット水による浮流油の導流延長効果により実際のオイルブーム長さに比べて集油範囲を広く取れる。



Fig 5. 22 Collecting boom (outrigger type ; USCG)

b) 基本的な構成

本体は自動展張ブイ、オイルブーム、ジェット水噴射装置、展張用ワイヤロープで構成されている。自動展張ブイを先頭にしてブイの後部にオイルブームが連結され

ている。その末尾は船舶に取り付けられる。自動展張ブイ上にジェット水噴射装置が取り付けられ、自動展張ブイの前方に向かってジェット水を噴射し、浮流油を導流する。自動展張ブイは斜め前方と真横にワイヤロープが張られ、主に斜め前方のワイヤロープにより位置の制御を行う (Fig 5.23)。

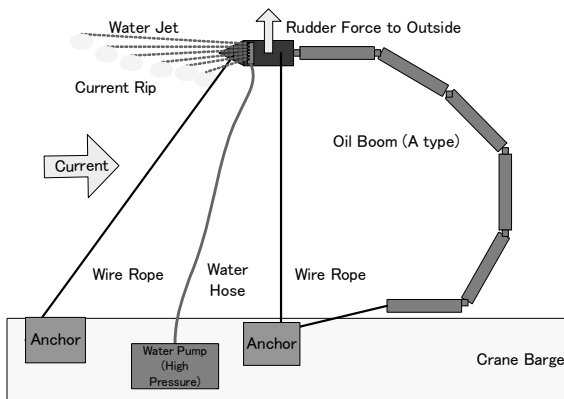


Fig 5.23 Diagram of the Buoy System to Deploy Oil Boom Automatically

c) 各部の役割

① 自動展張ブイ

自動展張ブイは推進動力を持たないで、その場の潮流あるいは船速による相対流速で流されるものである。固定舵をブイ下面に備え、これにより船舶から遠ざかる向きに流れる。このため、船の前方から後方に流されることを防止するワイヤを張る。舷側から離れる向きに常に流れることによって連結されたオイルブームが展張される。

② オイルブーム

浮流油を集め、回収しやすいように油膜厚さを大きくする効果を持つ。

③ ジェット水噴射装置

ジェット水を曳航ブイ上から前方海面上に噴射し、浮流油をオイルブーム内に導流する。これにより実効上のオイルブーム長さは最大でジェット水の着水面まで延長される。

ジェット水による集油装置は、国土交通省中部地方整備局が平成 18 年度から旧清龍丸に替えて運航しているドラグサクシオン兼油回収船「清龍丸」に世界で初めて搭載されたものである<sup>37)</sup>。ジェット水のある線上に噴射することで海面に流れ、水頭差、乱れを持つ水面が形成される。この水面は、ジェット水が着水した線の内側と外

側の間に水面流が自由に入出入りできない境界面を形成すると考えられる。このため、オイルブームと同様に海面を仕切る壁の効果を得られると考えられる。

d) 模型の製作

模型は、連結するオイルブームを A 型とし、実機では C 型以上とする。A 型と C 型の実際の寸法差は水面下のスカート部で A 型が 30cm 以上に対して C 型は 70cm で、寸法の縮尺は 3/7 である。オイルブームの展張形状はブーム材の弾性等に影響されると考えられるが、水流から受ける力はスカート部の挙動を支配すると考えられるので、これを代表値とした。なお、オイルブームの規格は Table 5.16 のとおりである。

実機のオイルブームの開口部を約 8m、オイルブーム全長を約 20m、GAP RATIO 0.4 程度とすると、C 型のオイルブームでは相対流速が 1knt で、Fig 5.24 から発生する引っ張り力は 350 ポンド、160kgf 程度である。なお、GAP RATIO とはオイルブームを展張したときの開口部の幅をオイルブームの長さで除したものである。模型ではこれらを約 7 分の 3 に縮小し、開口幅約 3.5m~4m、オイルブーム全長約 10m(完全に水没しない部分を含む)とした。引っ張り力は両端合計で 1knt では約 50~80kgf になる。自動展張ブイの役目はこのオイルブームを船舶から遠ざかる向きに引っ張ることとジェット水噴射装置を搭載することである。オイルブームを船舶側に引き戻す力は自動展張ブイを斜めに引っ張るワイヤロープの分力として発生するのでこれに釣合うような力を発生できるように自動展張ブイおよび舵を大概設計した。

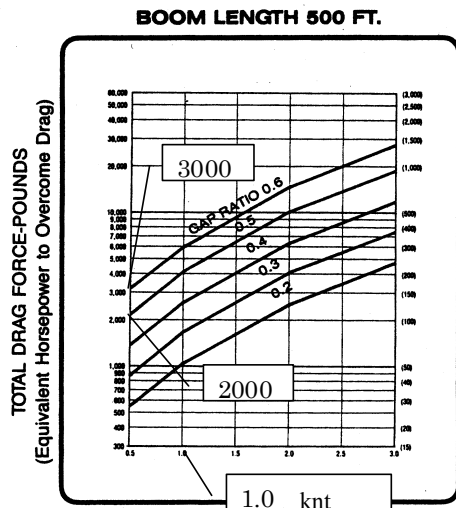
これらから、模型の各部の主な仕様は次の通りである。Fig 5.25 にその概要を示す。

- オイルブーム：A 型，全長 10m
- 自動展張ブイ：固定舵の中心線に対する最大角度を 30 度として、これに 1knt (0.5m/s) の流速が作用すると、  
 $0.5\text{m/s} \times 0.4\text{m} \times 1.0\text{m} \times \sin 30$   
 $\times \cos 30 \times 1\text{t/m}^3 = 0.087\text{t/s} > 80\text{kg/s}$  である。
- ジェット水噴射装置：ノズル 5 連式，高圧水ポンプ。

Table 5.16 Standard of Oil Boom in Japan

Type	Minimum height on water surface	Minimum length under water surface
A	20 cm	30 cm
B	30 cm	40 cm
C	45 cm	60-70 cm *
D	60-80 cm *	80-100 cm *

\*Only A and B type are standardized in the law, C and D are generally products data.



GAP RATIO = BARRIER GAP OPENING / BARRIER LENGTH

Reference ; “World Catalog of Oil Spill Response Products sixth edition” BOOMS 1-13 DRAG FORCE ON OPEN WATERBOOMS

Fig 5.24 Drag force on open water booms

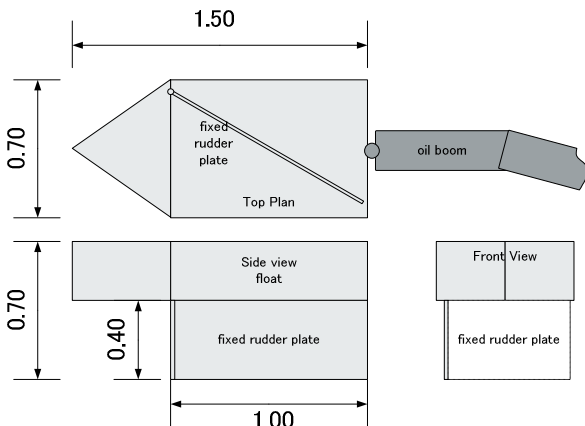


Fig 5.25 Illustration of the Buoy System to Deploy Oil Boom Automatically model ( I )

(2) 模型 (1号機) による水槽実験 <sup>39)</sup>

a) 実験条件の設定

水槽実験は、当所の油回収実海域再現水槽 (STORMS) でC重油を用いて行った。回収作業時の現地状況を再現するために、以下の条件を設定した。

現地の回収条件は以下のとおり。

- ・ 最大波高：作業限界 H=1m
- ・ 通常時波高：0.1~0.5m (波長は波高 0.5m で 13m 程度)
- ・ 船速 (相対流速) :  
回収時最大：2knt (1m/s)

通常回収時最低流速 0.5knt (0.25m/s)

- ・ 対象油：大型船の燃料油であるC重油及びエマルジョン

実験ケースとしては、模型の縮尺が 3/7 程度になることから、ブイの安定性に影響する波高は 2 分の 1 とし、造波機的能力から以下の条件とした。

- ・ 最大波高：0.5m, 周期 2 秒 (造波機的能力限界から)
- ・ 通常時波高：0.25m, 波長 6m, 周期 2 秒
- ・ 流速：0.5~2.0knt (0.25m/s~1.0m/s)
- ・ 計測項目：曳航体前方張力 F, 側方張力 S, オイルブーム末端張力 R (Fig 5.26 参照) および挙動を動画で記録。

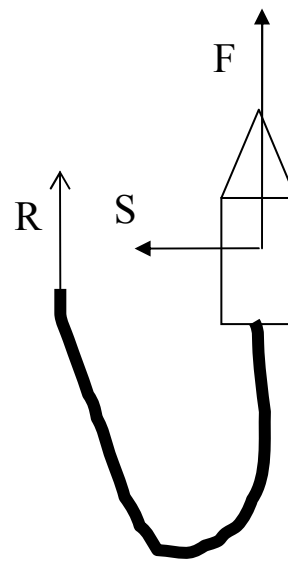
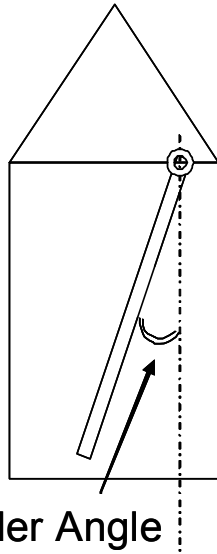


Fig 5.26 Measurement of the rope tension

b) 水槽実験

実験の目的は、自動展張ブイが安定的にオイルブームを船側から遠ざかる方向へ曳航すること、自動展張ブイ本体の安定性、ジェット水の浮流油導流効果を観察することにある。このため、若干の試行錯誤の後、安定な状況でこれらの集油機構を支持するロープの張力を計測した (Fig 5.28)。

自動展張ブイは流速が低い状態ではオイルブームの影響を受けて不安定であるが、ある程度の流速が与えられると安定する。しかしながら、舵角度 (Fig 5.27) が大きいと流速が上がるにつれて船舶側に傾き転覆の恐れが出た。このため、流速が早い状況では舵角度を浅めにとってワイヤロープ張力の計測を行った。なお、波に対しては自動展張ブイの安定性が損なわれることはなかった。ワイヤロープの張力は波の影響が大きく、最大時に測定器の限界 50kgf を越えた。



Rudder Angle

Fig 5. 27 Rudder and setting angle

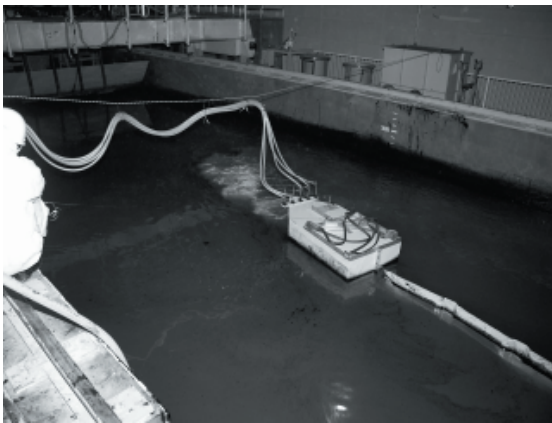


Fig 5. 28 Tow the oil boom to outside

c) 実験結果

実験結果は Table 5. 17 に示す。曳航体がオイルブームを曳航する挙動 (Fig 5. 28) に関しては、流速が 0.5knt では舵 (Fig 5. 29) を 20 度にした状態でも横方向の張力が 1~1.5kgf 程度であり、あまり強力な曳航力が得られていない。波のある状況では若干張力が増加するがこれは波による周期的なものであり、計測は最大値を読み取っているので曳航に対する安定性には寄与していない。

流速が 1knt を越えると横方向の張力は大きくなり、舵の角度 20 度では曳航体のローリングが大きくなる。1.5knt 時と 1knt 時の横方向の張力が同じ程度で、1.5knt ではローリングが大きくなりすぎ、転覆の心配が出たため、舵角度を 1.5knt では 10 度に設定しなおした。

流速 1.5knt においては舵を 10 度に設定したのを見ると横方向張力が 15kgf ほど生じており、1knt 時の挙動から見ると舵角度はもう少し小さくても曳航能力の問題は生じない。

Table 5. 17 Results of tank test of the buoy system model (I)

Rudder angle (degree)	Wave height (m) Wave period (s) Water jet pump (kHz)	Current velocity (knt) (m/s)	0.5	1	1.5	2
			0.25	0.5	0.75	1
20	-	F	2.8	16.7	25.3	
		S	1.5	10.5	10.5	
		R	2.1	6.2	12.5	
		F+R	4.9	22.9	37.8	
	0.25 2	F	20.4	32.5		
		S	3.5	16.5		
		R	8	6.8		
		F+R	28.4	39.3		
	-	F	6.5	16		
		S	1	9.2		
		R	3	4.5		
		F+R	9.5	20.5		
30	F	11	18			
	S	1	7.5			
	R	3	9			
	F+R	14	27			
10	-	F			26	
		S			15.5	
		R			13	
		F+R			39	
	0.25 2	F			33	
		S			22.5	
		R			15	
		F+R			48	
	0.25 2	F			35	
		S			25.5	
		R			15	
		F+R			50	
0.25 2 30	F			28		
	S			20		
	R			15.5		
	F+R			43.5		
0.25 2 60	F			32.5		
	S			21.5		
	R			16.5		
	F+R			49		
5	0.25 2 30	F				45
		S				15
		R				20.5
		F+R				65.5
	0.5 2 30	F				50
		S				21
		R				35
		F+R				85



Fig 5. 29 Fixed rudder plate of the buoy

流速が 2knt での実験は本模型のほぼ限界の挙動を示した。舵を 5 度として曳航体のローリングを抑えているが、舵にかかる力によりブイ本体は大きく傾いた。舵面積の縮小等の対策が必要である。



波の影響を見ると、曳航体を後方に引っ張る張力に大きく表れている。曳航体の受ける波力は大きく、これが張力の最大値を高くしている。波高 25cm の影響は力で 6~7kgf 程度とみられるが、これは試算値と流速 2knt 時の張力の合計からも符合している。

ジェット水の効果に関しては、浮流油の導流効果を観察したところ、波高 0.25m においてもその効果が十分に認められた (Fig 5.30)。ジェット水の向きは曳航体中心線の延長上前方 3m 程度の間を 5 本のノズルを並べて噴射している。曳航体の動きにより着水点はかなり変化するが、効果は持続した。この現象について詳細な分析は行われていないが、観察したところによると、着水点の水表面に大きな乱れが発生しており、水表面の自由な流れを阻害している。また、着水点からは供給された水流により、外へ向かう表面の流れができる。こうしたことが浮流油の流れる方向に影響を与え、導流の効果が表れていると推測される。

なお、1号器で使用した A 型のオイルブームでは、流速 1knt からはほとんど浮流油を保持することができなくなり、後方へ抜け出てしまった。



Fig 5.30 Oil gathering by water jet stream

### (3) 問題点の抽出と改良

#### a) 自動展張ブイ

自動展張ブイの持つオイルブームの展張能力 (オイルブームを船舶から遠ざける方向に曳航する力) は舵角と流速で調整可能であることがわかったが、流速が遅いと展張能力が不足気味であり、また、流速が早いと、舵角を小さくしても自動展張ブイの安定性に問題が起きる。このため、舵角だけでは自動展張ブイの安定性を十分に制御できない。また、流速が変化する場合、舵角を固定した状態で安定性を得ることは難しい。

自動展張ブイは波力の影響をかなり受けることもわ

かった。このため、曳航索にかかる張力は波力の影響を考慮したもので設計する必要がある。また、自動展張ブイの向きによって曳航方向に影響が出ることから、本体が流れに対して常に平行になるような工夫が必要である。

#### b) ジェット水噴射装置

ジェット水噴射装置についてはその効果を確認することとどまったが、適正な仕様を決めるためには、流量と流速について効果の現れる限界値を知る必要がある。また、噴射する水の流速と流量のどちらがより大きな効果を担っているか検証する必要がある。その他、給水ホースの取りまわしは実機においては工夫が必要である。

2004 年度は拡散性の高い C 重油を用いたが、水表面の乱れが導流効果を生んでいると仮定すると、慣性力が大きな油の塊を作りやすい高粘度油に対する効果の確認も必要である。

#### c) 曳航するオイルブームの滞油性

1号器模型に使用した A 型のオイルブームは 1knt 程度の流速で滞油性能をほぼ失ってしまった。通常のオイルブームでは 1knt 程度が滞油性の限界であるといわれており<sup>18)</sup>、実際の現場ではこの点が最も問題となりやすい。水中のスカート部の水深を深くし、アンカーチェーンの重量を増すことによって改善すると見られるが、その分浮体も大型化する。なお、滞油性能に関する流速はスカート部に対して直角方向の成分であり、今回提案する方式では GAP RATIO を 0.4 程度としているため、問題となるのはオイルブーム最深部の個所である。

#### d) 自動展張式オイルブームの自動展張ブイの形式の変更

2号器として 2005 年度には主に船体のローリングを抑え、十分な展張力を確保するために、船体の形式を変更することとした。ローリングを抑える手法としては、舵の効きすぎの抑制をアクティブに行うか、復元力を大きくしてロール角を抑え込んでしまうかの 2通りがあると考えた。

アクティブ制御を行うにあたっては、設定を失敗すると振動で共振する可能性もあり、また、各種センサの搭載、駆動力の付加が必要になる可能性もある。このため、単純な手法として船体形状の変更による復元力の増大を図ることとした。

2号器は船体を双胴型とするとともに、船体幅を 1号器の 0.7m から 1.2m に拡大した。舵は中央の浮力材のない箇所に置いた。双胴部は実機では中央にスライドさせ



れば十分搬送できる大きさまで縮小できるので取り扱い性がよい。また、舵（フラップ）面積の増大によりより大きな曳航力を得られるようにした（Fig 5.31）。

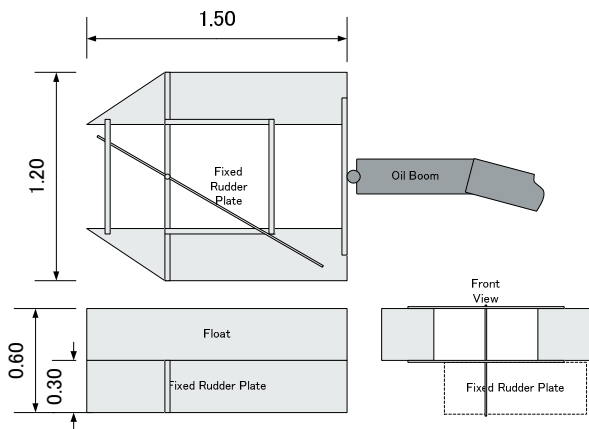


Fig 5.31 Illustration of the Buoy System to Deploy Oil Boom Automatically model ( II )

(4) 水槽実験（2号機）

a) 実験ケース

1号器を用いた実験から、固定舵（フラップ）角度をある程度大きくしなければ流速が小さい場合に十分な曳航力が得られないため、角度を1号器の実験の最大値の20度に設定し、この状況で流速が速い場合の曳航体の安定性等について計測した。

また、波の影響を見るために、波高を最大50cmまで設定して実験した。ただし造波機の性能の限界から、周期は2秒（波長約6m）に固定し、波による振動モードの影響はみなかった。

これらから実験ケースは Table 5.18 のように設定した。

Table 5.18 Test Case

Current velocity	0.25m/s (0.5knt)				
Wave height (m)	0	0.15	0.25	0.4	-
Current velocity	0.5m/s (1.0knt)				
Wave height (m)	0	0.15	0.25	0.4	-
Current velocity	0.75m/s (1.5knt)				
Wave height (m)	0	0.15	0.25	0.4	-
Current velocity	1.0m/s (2.0knt)				
Wave height (m)	0	0.15	0.25	0.4	0.5

Wave period 2s

b) 計測項目

計測項目は以下のとおりである。

① 曳航体の水面上の位置座標

② 曳航体の支持ロープおよびオイルブームの支持ロープの張力

③ 曳航体のピッチおよびロール角度

①については、画像センサにより自動計測した。画像センサは曳航体を色と形状により認識し、自動的にその座標を解析、記録するもので、KEYENCE 製高速デジタル画像センサ CV-3500 による。座標値は画像センサにより撮影された画面内に設定される相対的な数値である。なお、画像センサに取り込むデータ取得用カメラは水面を真上から撮影できるように水槽上面天井部に取り付けた（Fig 5.32）。ただし、画像センサは解析速度が遅く、1秒間に2回（2Hz）のデータ取得である。

②については、支持ロープに直接張力計を取りつけ、計測した。

③については傾斜計によるデータ計測を行った。データの取得周期を10Hzとし、210秒間計測して比較した。これらの配置を Fig 5.33 に示す。

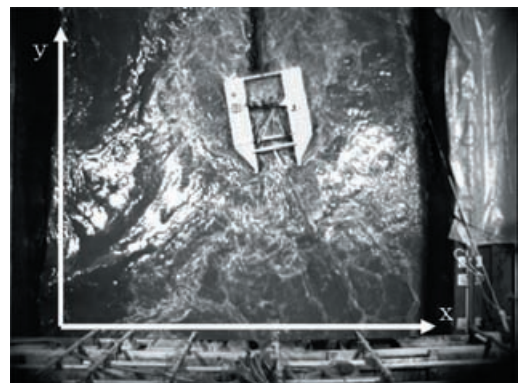


Fig 5.32 Image sensor ( KEYENCE CV-3500) captures position of the buoy

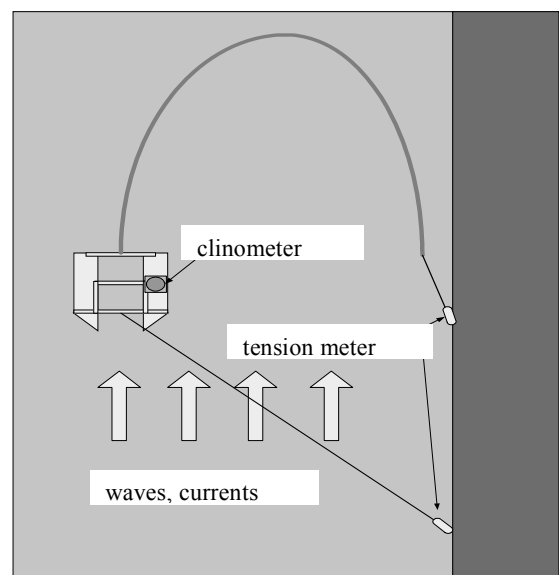


Fig 5.33 Arrangement of the sensors

c) 実験の結果

実験の結果、Fig 5.34 のとおり自動展張ブイの安定性は十分確保されていることが分かった。波高 0cm, 流速 1.5knt では、Fig 5.34 のとおりピッチングもローリングも低い値に抑えられている。Fig 5.35 の波高 25cm, 流速 1.5knt では波によるものとみられるピッチングへの影響がローリングへの影響よりも多く出ているが、値は低く抑えられており、転覆等の可能性はない。

Fig 5.36 の波高 40cm, 流速 2.0knt では、ピッチングが傾斜計の計測測定限界を越えたデータもあるが、すぐに復帰しており、これも転覆等の心配はない。ローリングは低い値に抑えられており、たいへんに安定している。

次に、自動展張ブイがオイルブームを安定して展張できるかどうかについて、画像センサによる位置データを Fig 5.37, 5.38 に示す。流速が 0.75m/s のときが最も安定して位置を保っている。しかしながら流速 0.25m/s および 0.5m/s のときは明らかに周期的に台船（船体）側へ戻ってくるような動きをしており、これを抑制する必要

がある。波の影響を受けている波高 0.25m のほうが安定している。また、流速 1.0m/s では不安定な動きが現れるが、台船（船体）側から離れた位置を維持し続けており、流速から十分な曳航力を引き出せていることがわかる。

実験の観察からは、自動展張ブイの先端部が台船（船体）側に向く現象がときおり観察されており、この影響で台船（船体）側に向かって自動展張ブイが移動を始める。波があると先端部が再び外側に向きなおすため、台船（船体）側へ向かう動きが解消される。自動展張ブイの先端の向きが台船（船体）側へ向く動きを抑制するためには、曳航ワイヤの取り付け位置の変更などの改良が必要である。また、Fig 5.37, 5.38 からも明らかな通り、流速が低い場合の展帳力をもう少し強く設定する必要がある。

そのほかに、水槽に自動展張ブイを設置あるいは撤去する際の玉がけと玉はずしに実験作業員が苦勞をしたことから、これを簡単にできる方法（治具等）を検討することが望ましい。

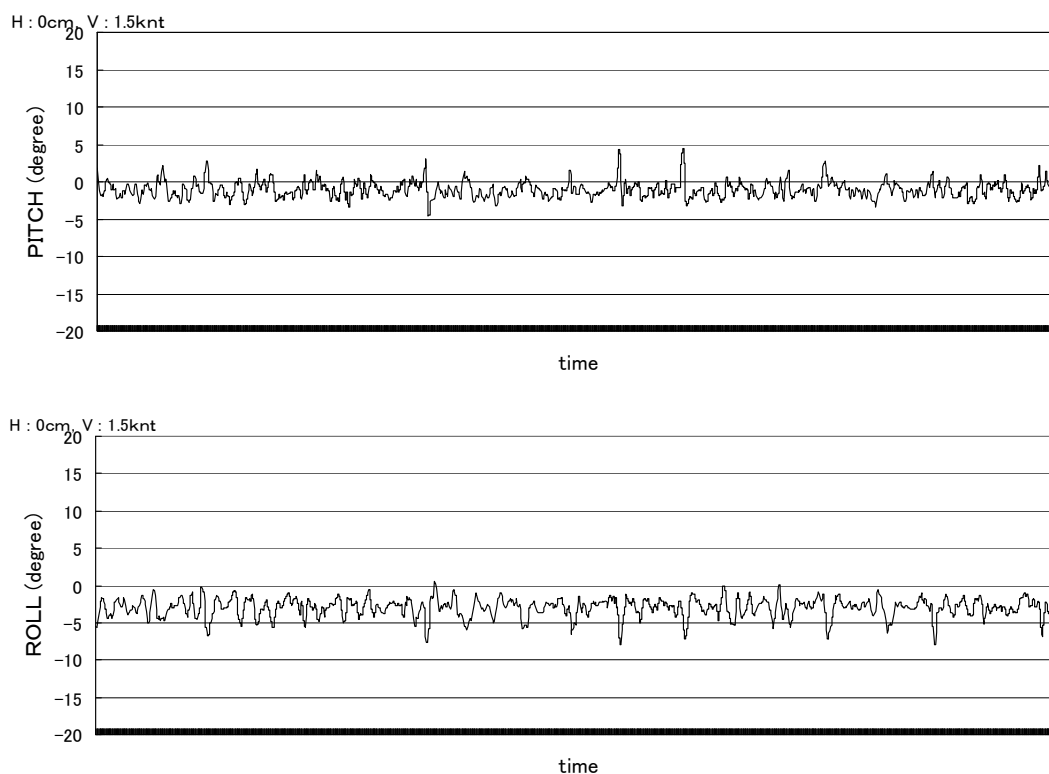


Fig 5.34 Pitching and rolling behavior of the buoy(wave height : 0cm, current velocity : 0.75 m/s)

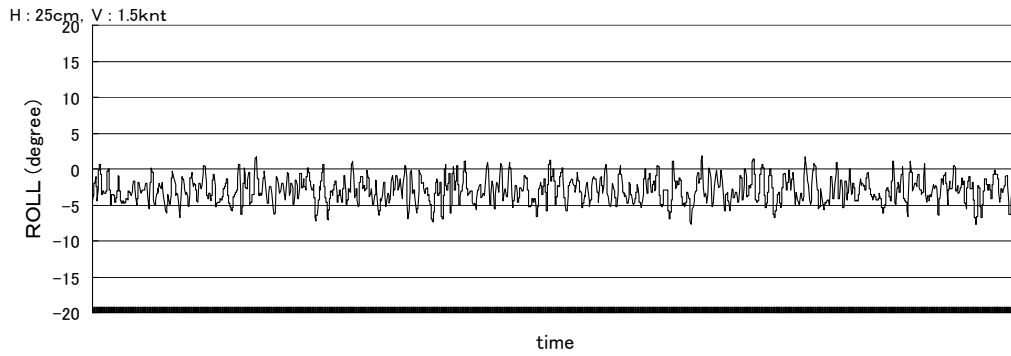


Fig 5. 35 Pitching and rolling behavior of the buoy (wave height : 25cm, current velocity : 0.75 m/s)

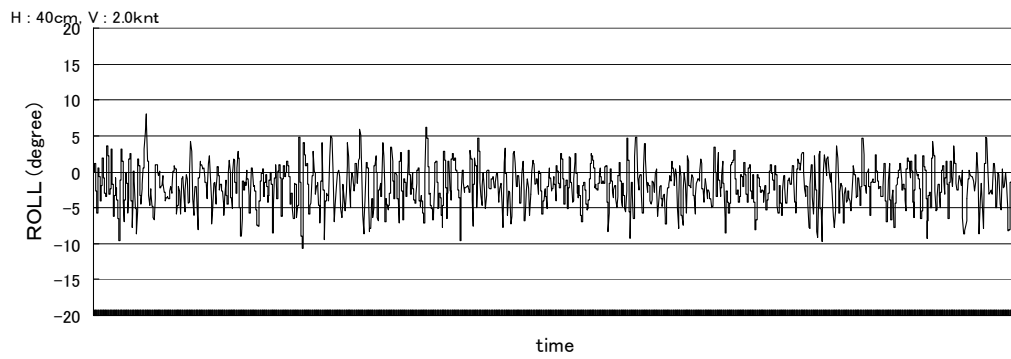
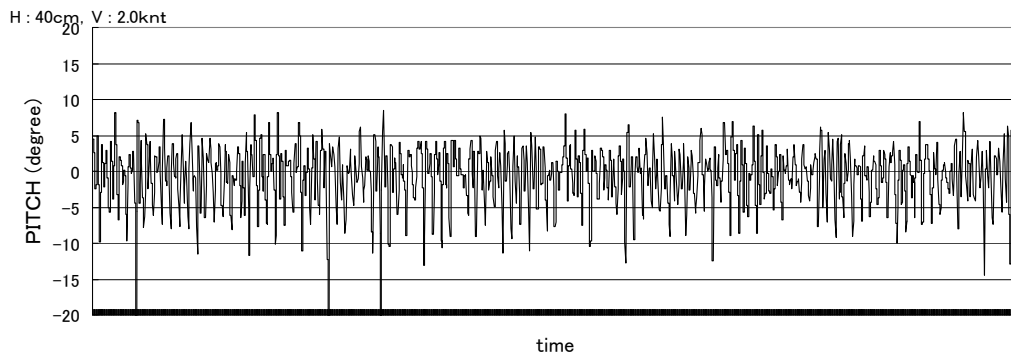


Fig 5. 36 Pitching and rolling behavior of the buoy (wave height : 40cm, current velocity : 1.0 m/s)

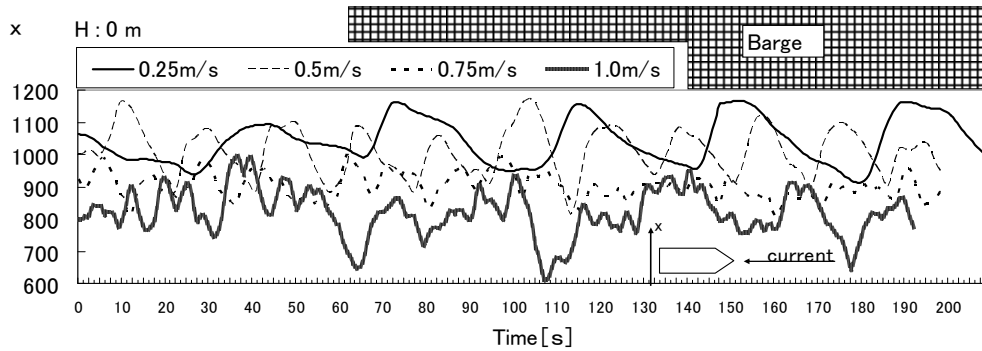


Fig 5. 37 Current velocity and positioning of the buoy from the barge ( wave height 0m)

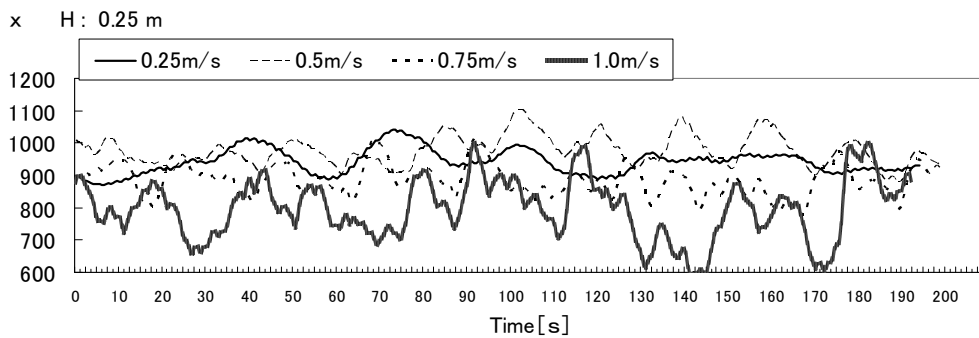


Fig 5.38 Current velocity and positioning of the buoy from the barge ( wave height 0.25m)

(5) 自動展張式オイルブーム (2号機) の課題とプロトタイプモデルの製作

a) 課題

2005年度に提案した自動展張式オイルブーム2号器の課題は、以下のようであった。

- ・ 船体側へ戻ってくるような動きを抑制する工夫が必要である。
- ・ 流速が低い場合の展張力をもう少し強く設定する必要がある。
- ・ プロトタイプモデルとして、クレーンにより水面に設置あるいは撤去する際の玉がけに関して便利な手法を検討する必要がある。
- ・ プロトタイプモデルとして、台船への衝突時のショックを吸収する部材を追加すべきである。

b) 改良

2006年度は、プロトタイプモデルとして海上での使用を想定した仕様としている。ただし、予算上、模型製作コストを削減する必要があり、2号器の仕様であるA型オイルブームより大きなB型オイルブームを曳航できる大きさにとどまった。このため縮小プロトタイプと呼ぶ。

また、曳航するオイルブームの取り付け点をブイの中心軸から偏らせることで、船側に寄ってくるような不安定な動きを防止することとした。

自動展張ブイの本体の形状については、2号器の双胴船形を踏襲し、本体の大きさと翼の面積の算定を行った。特に翼の面積が重要であり、以下にその算定方法を示す。

2号器ではA型オイルブームなので、スカート深さを0.3m、水槽実験様なのでオイルブーム長さを10mとした。実海域では20m程度は必要であると考えられ、2006年度の縮小プロトタイプではB型オイルブームを使用し、スカート深さ0.4m、オイルブーム長さ20mとしている。

これらを元に翼寸法を算出している。

オイルブームに発生する力  $F_0$  をある定数  $K$  を用いて表すこととすると、オイルブームが発生する力  $F$  はオイルブーム長さとスカート深さに比例するので、

$$2 \text{号器本体にかかる力: } F_{02} = 0.3 \times 10 \times K = 3K$$

$$\text{このときの翼面積 } A_{02}: 0.3 \times 1.5 = 0.45 \text{ (m}^2\text{)}$$

縮小プロトタイプは、

$$\text{縮小プロトタイプ本体にかかる力: } F_{03} = 0.4 \times 20K = 8K$$

$$\text{ここで、翼面積は } A_{03} = 8K/3K \times A_{02} \geq 8/3$$

したがって、縮小プロトタイプの翼面積  $A_{03}$  としては、 $0.45 \times 8/3 = 1.2\text{m}^2$  を確保すればよい。そこで、縮小プロトタイプでは翼高さ0.6m、長さ2.2mとした。

$$A_{03} = 0.6 \times 2.2 = 1.32 \text{ (m}^2\text{)} > 1.2 \text{ (m}^2\text{)}$$

また、実機の場合の翼面積を同様に算定すると、実機ではC型オイルブームを曳航するので、スカート深さは0.7m、オイルブーム長さを20mとすると、

$$\text{実機にかかる力: } F_r = 0.7 \times 20K = 14K$$

よって、翼の面積は、

$$A_r = 0.45 \times (14/3) = 2.1 \text{ (m}^2\text{)}$$

から、 $2.1\text{m}^2$ 以上必要となる。

その他の部分の大きさについてはこの翼の寸法から設定した。また、想定する実機はさらに大型になるため、トラックの荷台寸法を鑑みて、設定するものである。

Table 5.19 にこれらの外形寸法を示す。

Table 5.19 Dimension of the Buoy System to Deploy Oil Boom Automatically

Dimension (m)	Float		Rudder		Boom
	width	height	length	height	length
Developed buoy model (I)	0.70	0.30	1.50	0.40	1.00
Developed buoy model (II)	1.20	0.30	1.50	0.30	1.50
Prototype down scale model (III)	1.90	0.45	2.20	0.60	2.20
Estimated real size buoy	1.90	0.60	2.80	0.80	2.80

※Skirt depth of booms: A type: 0.3m, B type: 0.4m, C type: 0.7m

その他、海上投入と撤収に玉掛けが便利な吊金具を採

用し、取り付けた。また、台船への衝突時の衝撃吸収のため浮きを側面に取り付けた。Fig 5. 39, 5. 40 にその全体を示す。

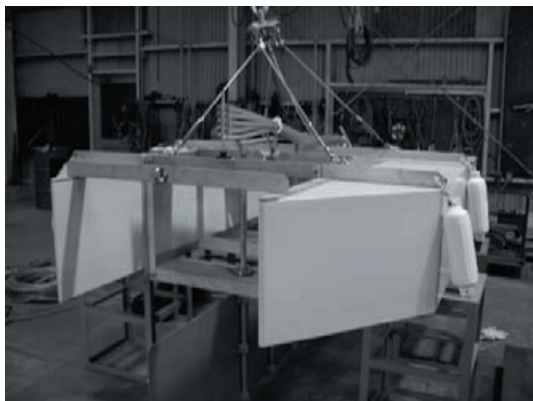


Fig 5. 39 Prototype down scale model of the buoy ( III ) installed water jet nozzles

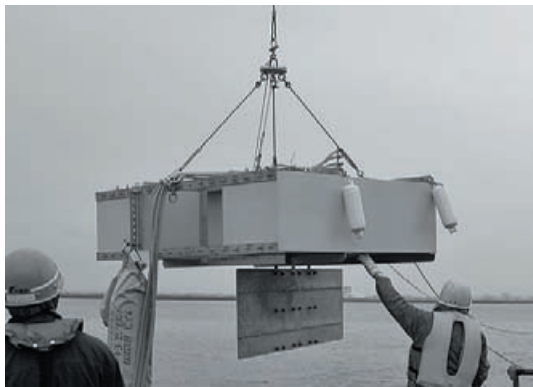


Fig 5. 40 Back view and the rudder of the prototype down scale model of the buoy ( III )

(6) 2号機を改良した自動展張式オイルブームの水槽実験

a) 実験方法及び実験ケース

縮小プロトタイプ of 自動展張ブイの水槽実験は、2号機の実験で問題になった、ブイが台船（船体）側に向かって戻ってくる周期的な運動を抑止することを目的としたオイルブーム取付け点の変更による効果を確認することである。したがって、計測は画像センサによる位置の測定のみである。また、実験ケースは Table 5. 20 のとおりである。なお、水槽の大きさの制約から、2号機を改良して実験を行った。

Fig 5. 41~5. 44 に実験の状況を示す。オイルブームの取り付け位置は Fig 5. 41 のように船側から見て沖側の浮体に変更した。2005 年度の実験と同様に画像センサは水槽真上に取り付け ( Fig 5. 42 ), Fig 5. 43 のようにパターンマッチングによりブイの重心位置を認識して位置座

標を計測する。 Fig 5. 44 は実験中の自動展張ブイの状況である。

Table 5. 20 Test case of tank test

wave height (m)	current velocity (m/s)			
	0.25	1.00	1.50	2.00
0	○	○	○	○
0.15	○	/		
0.25	○			
0.35または0.4	○			

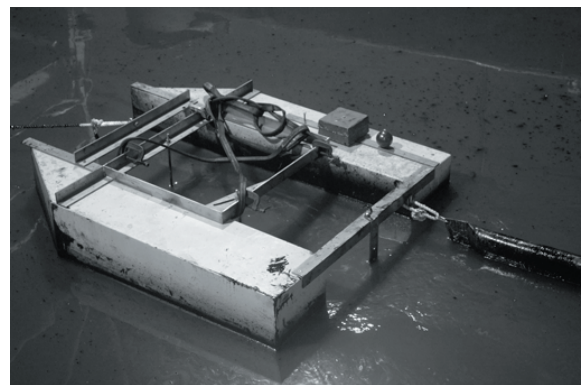


Fig 5. 41 Change of towing point



Fig 5. 42 View from the position of image sensor camera over the tank

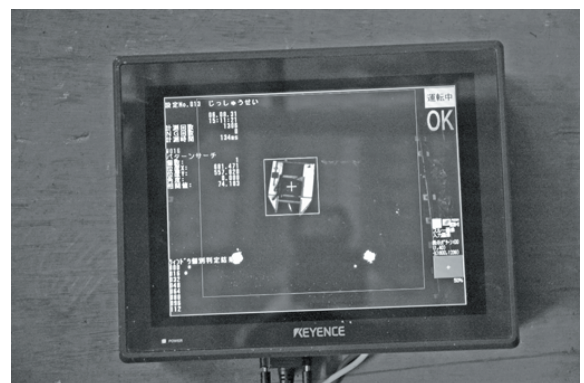


Fig 5. 43 The monitor shows the image sensor captured the buoy





Fig 5.44 Tank test of the buoy model (II) changed towing point in STORMS

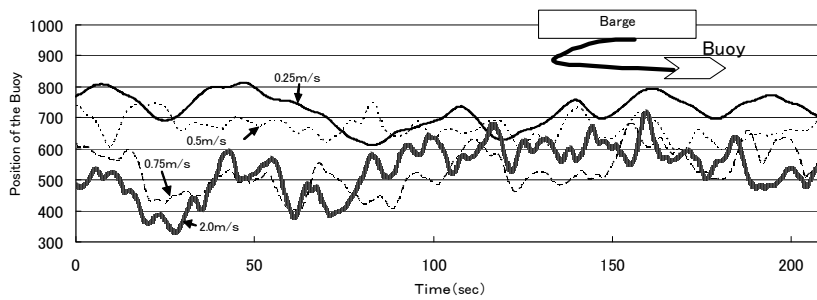
b) データ解析結果と考察

Fig 5.45~5.46 に画像センサによる挙動の計測結果を示す。図の縦軸の値は 2005 年度と 2006 年度とでは画像センサの取り付け位置によって原点がずれるために、相対値である。ただし、絶対量は同等である。

ブイの中心線上にオイルブームを取り付けていた 2 号器のデータでは、流速が 0.5knt と 1.0knt において大きな位置の移動が周期的に見られ、安定的なオイルブームの曳航に問題があった。2006 年度のオイルブームの取り付け位置を海側へずらすことによって、Fig 5.45 に示すように、周期的な位置の移動が抑制されていることが明らかである。実験中の挙動観察においても同様に安定性が増したことが確認されている。

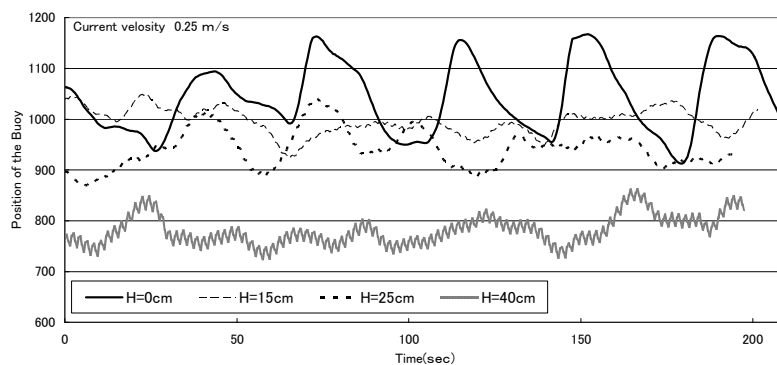
Fig 5.46 は流速が低い 0.25m/s で波高と安定性の状況を見たものである。2 号器のデータでは、波高が 0m の場合、周期的に船側に近づいてくる挙動が大きい。波が大きくなると挙動が変化し、最も波高が大きい (H=40cm) 時が最も安定していた。これに対して、Fig 5.47 に示すオイルブームの取り付け位置を変更した 2006 年度のデータでは、どの波高においても挙動が安定している。

これらから、オイルブームの取り付け位置の変更により、2005 年度に問題となった自動展張ブイの不安定な挙動が解消されたといえる。



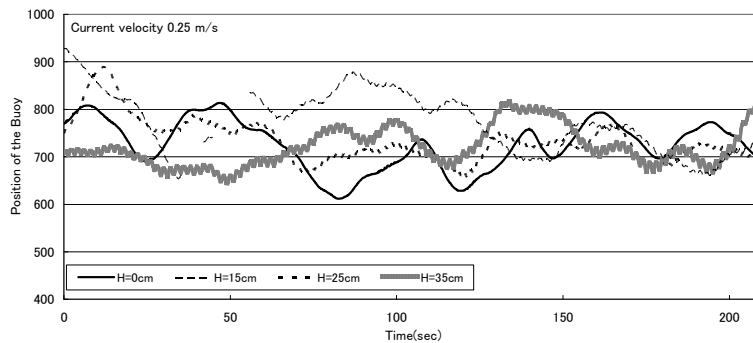
(wave height 0 cm, current velocity 0.25-2.0m/s)

Fig 5.45 Positioning stability of the buoy model ( II ) changed towing point of the boom



(current velocity : 0.25m/s, wave height 0-40cm)

Fig 5.46 Wave height and positioning stability of the buoy model ( II )



(current velocity : 0.25m/s, wave height 0-35cm)

Fig 5. 47 Wave height and positioning stability of the buoy model ( II ) changed towing point

## 5.5 海上での運用試験

### (1) 現地の選定と準備

本研究の油回収システムは、全国のクレーン付台船等を緊急時に油回収船として活用するパッケージとなるものである。システム一式を拠点に配備しておき、ある時間以内にクレーン付台船が待ち受ける岸壁までトラック輸送でき、かつ、海洋工事会社の作業員が簡単な説明書でそのオペレーションを理解し、実施できるものをコンセプトとしている。このため、搬送と機器類の組立・撤去、及びそのオペレーションを含んだ運用試験を行うにあたって、現地の選定についてはシステムを配備している拠点と事故が起きてこれを使用することになったクレーン付台船の接岸している港の2箇所を設定する必要がある。

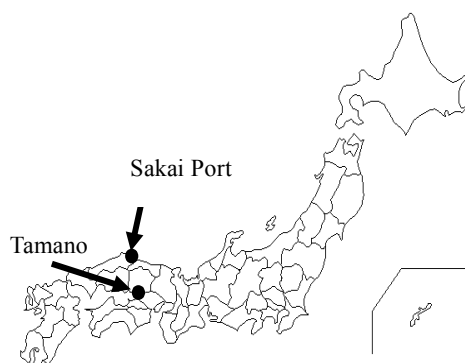


Fig 5. 48 Location of on-site operation test

本研究においては、トラックによる陸送から実験を開始することとした。実海域試験なので、使用する油回収システムは水槽試験を行う前の油が付着していない状態

で行いたかったことから、かき寄せバケット式スキマーの縮小プロトタイプを製作した企業の工場を配備拠点に見立て、被災地をその近傍の港湾に設定した。この結果、配備拠点は、岡山県玉野市、現地実験（被災地）として、ナホトカ号重油流出事故の被災地近傍の鳥取県境港を選定した (Fig 5. 48)。

### (2) 試験方法

試験は、境港においてクレーン付台船が待ち受けており、接岸岸壁まで前日に発送した油回収システム（4トン車2台）が到着したところから各作業にかかる時間の計測を始め、海上作業を終えて帰港した時点で終了する。ただし、実際の油回収作業では、資機材が油により汚れているため、洗浄作業に多くの時間がかかると考えられることに注意しなければならない。

作業を開始する前に、作業を請け負った工事会社の作業担当者全員（7名）に対して簡単な説明を行い、その他組立等の説明はプロトタイプの製作メーカーの組立説明書をみながら適宜行ってもらうようにして、初めての作業でも機材の運用ができることを実証した。また、実験終了後に作業場の問題点について聴取した。

### (3) 試験の実施

#### a) 資機材の積み込み及び運送

玉野にて前日の夕刻に油回収資機材の一式をトラックに積み込み、境港へ向けて発送した。資機材の量は目標どおり4トン車2台分を下回り、実験では11トン車1台に全ての資機材を積み込むことができた。このため、

受け入れ先のアクセス路が狭隘な場合は、4トン車2台に分けることで運送できる (Fig 5. 49). 積み込んだ資機材のリストは Table 5. 21 のとおりである.



Fig 5. 49 The oil recovery system package on the 11 ton class truck bed

Table 5. 21 The list of the oil recovery system package for the test of operation at site  
(a)Bucket oil skimmer with rake

Materials	Characteristics	counts	Remarks
Main unit	250kg	1	Air drive
Control panel		1	100V, 100W
Compressor	Capacity 5m <sup>3</sup> /h, 875kg	1	
Air hose 1	Compressor→Control panel	1	
Air hoses 2	Control panel→Main unit	6	
Air hose 3	Compressor→Diaphragm pump	1	
Electric cord	Generator→Control panel	1	
Signal cables	Control panel→Main unit	4	
Slings		4	
Discharge pump	Diaphragm pump	1	Air drive
Hose joint	Swivel type, One-touch coupler	1	
Discharge hose valve		1	
Suction hose	30m	1	
Discharge hose	5m	1	
Air hose		1	
Air connector		1	
Flange for pump		1set	

(b)The Buoy System to Deploy the Oil Boom Automatically

Materials	Characteristics	counts	Remarks
Buoy	340kg	1	
Mounts		4	For buoy
Oil Boom	B type, 20m	1	
Winch		1	Tow the buoy. Weld to the deck.
Rope	φ10×30m	1	Withstand load 1t. for winch
Submersible Pump	High pressure	1	3-Phase, 200V, 2.2kw
Rope	φ6×10m	1	For water pump
Flange for pump		1	
Water jet nozzles		5	
Bracket for nozzles		5	
Branch pipe		1	For water jet hoses
Water hose 1	Submersible pump→Branch	1	10m
Water hoses 2	Branch→Water jet nozzles	5	30m. Mount on the oil boom.
Hose band		1 set	
Control panel	Inverter	1	3-Phase, 200V
Electric wire 1	Inverter→Submersible pump	1	
Electric wire 1	Generator→Inverter	1	
Generator		1	3-Phase, 200V

(c)Other

Materials	Characteristics	counts	Remarks
Storage tank	Plastic tank Φ150cm×h90cm	1	For recovered water
Plastic sheets	3.6×3.6m	5	
Nylon rope	φ6mm×20m	1	
Nylon rope	φ12mm×10m	1	

なお、今回の実験においては、リストにある発電機は積み込んでいない。これは事前にクレーン船 (ガットバージ船; 第26高神, Fig 5. 50) が有している発電機の容量が十分であることがわかったためである。また、貯油タンクは本来は大容量の組立式タンクなどが好ましいが、予算の都合で準備できなかった。このため、折りたたみずかさばるが、樹脂製の容量約 1.2kl (ドラム缶 6 本分) のタンクとしている。



Fig 5. 50 Kojin 26th, crane vessel

b) 資機材のクレーン付台船への積み込み

資機材のクレーン付台船 (運用試験においては、諸事情により、ガットバージ船側に台船を固定した) への積み込みは、クレーン等のないトラックを使用したが、予定通り船のクレーンで行うことができ、当初の狙い通り、荷物の積み下ろし用のクレーンを別に準備する必要がなかった。境港の岸壁に到着したトラックからの積み込み状況を Fig 5. 51 に示す。



Fig 5. 51 Loading goods on the barge from the truck

c) 資機材の組立と設置

資機材の組立は、離岸前に行った。これは当方が指示したものではなく、安全上の問題と岸壁の広いスペースが必要な状況を想定したためである。航行しながらの組立を現地の作業員が行わない可能性があることを示しており、装置類の組立時間は極力少ないようにしないと出港が遅れることがわかった。

組立については、模型製作メーカーが作成した説明書を見て行った。組立工具はメーカーが同梱したもののほかは作業を請け負った工事会社所有のものを用いた。油回収機は結線、ホース類の連結のみの作業で、作業量が少なかったが、自動展張式オイルブームは水ジェットホースをオイルブームに取り付ける作業量が多かった。組立の状況を Fig 5.52～5.55 に示す。

組立作業が終了後、離岸し、海上試験を行う現場海域へ向けタグにより曳航して移動した。現場海域に到着後、自動展張ブイを繋ぐウインチを台船甲板上の適当な位置に固定した (Fig 5.56～5.58)。



Fig 5.53 Mounting the fixed rudder plate



Fig 5.55 Connecting the wires to the control panel of the oil skimmer



Fig 5.57 Arrival at the test site



Fig 5.52 Put the buoy on the mounts



Fig 5.54 Fastening the water jet hose to the boom



Fig 5.56 Departure to the test site



Fig 5.58 Fix the winch on the board (winch tows the buoy)



d) 油回収システムのオペレーション

自動展張式オイルブームの投入 (Fig 5.59, 5.60) に当たって、当初は玉はずしと撒収の際の玉がけの作業に難航すると考え、専用の玉はずし及び玉がけの治具を用意して資機材に同梱しておいたが、実際の現場では作業員が治具に気づかず、船に備え付けの道具等で行ってしまった。現場では取扱説明書を全て読んでから作業するわけではなく、わからなくなった時点で拾い読みする傾向が見受けられ、同梱の治具についても、これを使用せずに問題なく設置できたためと考えられる。

自動展張ブイは翼（固定舵）の設置向きを正しく行わなければならないが、特に問題なく取り付けられた。ジェット水の噴射についても問題なく行うことができた (Fig 5.61)。

当日の天候は曇りで、波がほとんどない状況で、流速測定 (Table 5.22, Fig 5.62, 5.63) の結果からも潮の流れが全く見られないような穏やかな状況であった。流速は水槽実験での最小の流速 25cm/s を下回っており、自動展張式オイルブームの自動展張はうまく行かなかった。流れがある場合の展張状況を確認するために途中からタグのスラストによる水流をかけた。タグのスラスト付近で約 108cm/s の流速をかけた 1 回目で十分な展張が行えた。

かき寄せバケット式スキマーのオペレーションについては、実海域では油は用いることができないので単純に海水をすくう作業にとどめた。しかしながら、機器の動作にかかる操作については数回の試行で理解できたと見られる。作業状況を Fig 5.64~5.65 に示す。

Table 5.22 Current velocity on site

Measured point	Near the oil boom deployed #1	Near the thruster of tugboat #2		
		running the thruster (1)	running the thruster (2)	stop the thruster
situation	stop the thruster			
Vx (cm/s)	8	40	120	10
Vy (cm/s)	20	100	100	10
Vxy (cm/s)	22	108	156	14



Fig 5.60 Deployment of the oil boom automatically

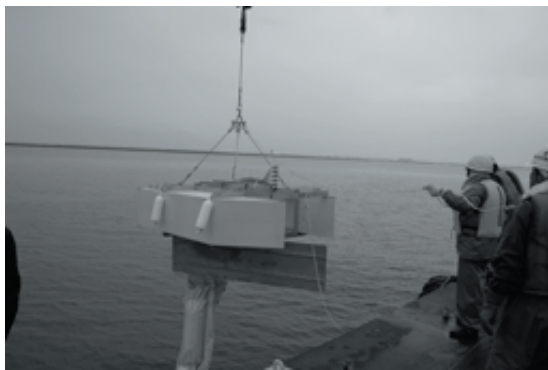


Fig 5.59 Setting of the buoy



Fig 5.61 Water jet

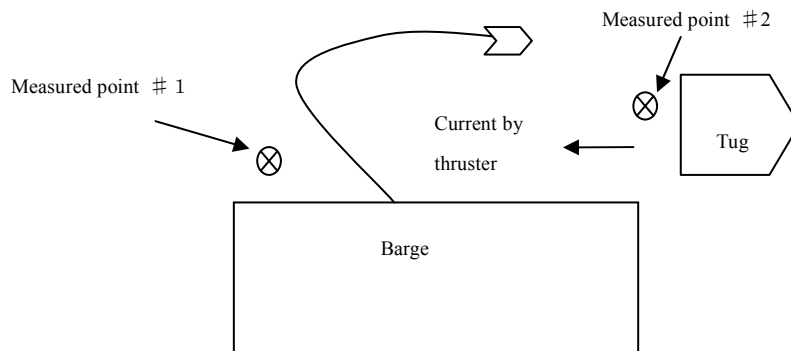


Fig 5.62 Measurement of current velocity on site





Fig 5. 63 Measure the current velocity (near the thruster)



Fig 5. 64 Operation of the Bucket oil skimmer with rake model



Fig 5. 65 Scoop the seawater and discharge into the storage tank. Operator is nearest man.



Fig 5. 66 Putting back the buoy



Fig 5. 67 Returning to port



Fig 5. 68 Unloading to the truck bed

e) 撤収作業

撤収作業は実際には油を回収していないので、汚れがなく、非常に簡単にできた。自動展張式オイルブームは解体においても長くかさばるオイルブームの折りたたみやジェット水のホースの取り外しに若干手間がかかった。油回収機は結線やホース類の取り外しとまとめ作業だけであり、たいへん簡単であった。撤収時に手配したトラックは4トン車2台で、問題なく全部の資機材が積み込めた。Fig 5. 66～5. 68 は撤収時の状況を示す。

(4) データ解析結果と考察

a) 作業単位と作業時間

Table 5. 23 に作業単位ごとに計測した作業時間を示す。トラックから台船上への荷卸は、船のクレーンを用いて行ったが、作業時間は30分を切り、全く問題がない。自動展張式オイルブームの組立は1時間18分を要しており、翼(固定舵)取り付けの順番を理解する時間、部品や部材の同定に要する時間、オイルブームにジェット水用ホースを固定する時間など、多少手間取る様子が観察

された。油回収機の組立は構造的な組立が全くなく、電気配線とホース類の結束のみで、わずか24分で終わった。資機材の設置は台船を岸壁に接岸したまま行い、トータルで約2時間を要した。

Table 5.23 Time counts of each work unit

Preparation

Work units	start	end	time
Loading from trucks to the barge	9:20	9:48	0:28
Building of the buoy system	9:50	11:08	1:18
Building of the oil skimmer	11:08	11:32	0:24
From departure to the site	13:00	13:28	0:28

Operation

	First day			Second day		
	start	end	time	start	end	time
Fixing the winch	13:36	13:45	0:09	-	-	
Setting of the buoy system	13:50	14:00	0:10	9:36	9:45	0:09
Trial operation of the oil skimmer	11:35	11:50	0:15	-	-	
The oil skimmer operation (1st)	14:45	14:48	0:03	9:44	9:51	0:07
The oil skimmer operation (2nd)	14:48	14:51	0:03	9:51	9:57	0:06
The oil skimmer operation (3rd)	14:51	14:54	0:03	9:57	10:03	0:06
Hanging up the buoy system	14:55	15:03	0:08	10:26	10:30	0:04
Removing the materials				start	end	time
Dismantling the buoy system				11:10	12:10	1:00
Dismantling the oil skimmer				11:10	12:10	1:00
Unloading on the trucks				13:00	-	

次にオペレーションについては、まず、自動展張ブイを台船と繋ぐためのウインチを固定する作業から始まったが、台船上にウインチの台座を簡単に溶接することで、わずか10分足らずで終了した。工船用台船を用いる利点の一つであると考えられる。

自動展張式オイルブーム全体を海上に浮遊させる作業についても10分程度で終了している。油回収機の試運転については、その動作と制御盤のスイッチの関係等を飲み込むために15分ほどかかっている。油回収機のオペレーションについては実際に油を回収するわけではないことから実感はなく、簡単に海水を掬っただけで終わっている。このため作業時間はたいへん短いこととなった。オペレーション上、油回収機の高さ調整はクレーン船のジブの上げ下げで行っていたが、実際の油回収作業としては大まか過ぎるきらいがあった。実際に油回収作業を行なうと、かき寄せバケット式スキマーは回収状況が見え易い方式であるため、ワイヤの巻き上げ巻き下げで行ったほうがよいことにオペレーターが気づく可能性はあ

る。1日目と2日目について得に大きな違いはなかった。2日目で油回収機のオペレーション時間が多少長くなっているのは、海面上の油回収機の位置を3箇所移動させることを指示したためである。

資機材の撤去に関しては、自動展張式オイルブーム及び油回収機の仕舞いを同時並行で行っているため、各々の時間計測が困難だったが、結果的には1時間で終了している。もし、実際に油を回収していたら、この時間に資機材の洗浄や回収油水の排送のための時間が加えられると理解しなければならない。

b) 現場作業担当者の意見

全行程の終了後、作業担当者から意見を聴取した。その結果以下のような意見が抽出された。

① 自動展張式オイルブームについて

- ・ 翼（固定舵）の取り付け方法がブイ浮体の下からなので、たいへん取り付けにくい。
- ・ オイルブームにホースを結びつける作業は面倒なので、インシュロックを使うなど工夫して欲しい。
- ・ 翼（固定舵）の角度調整を行うために緩めるねじなどは浮体上面側でできるようにして欲しい。
- ・ 玉がけや玉はずしについては、たいていの作業船に備え付けてあるレコ環を使えば十分できるので、特殊な吊治具は不要。特に今回のシャックルがねじれやすい構造は要改善である。

② その他

- ・ 説明書は濡れても大丈夫な材質にして欲しい（当日は途中から雨が降った）。

これらの意見はおおむね的を射ていることが作業状況の観察からも明らかであった。なお、水ジェットのホースについては、高圧ポンプを自動展張ブイ浮体に内蔵することが改造によって可能であるので、より細かい電気配線のみで改善できることから、より簡単な取り付け方法を考案できるものと考えている。

c) 運用の評価

今回の海上実験において、運用上の評価ができなかった項目としては波の影響がある。当日は非常に穏やかな天候で、波がほとんどなかった。このため、定常的な波の中での作業性についてはほとんど評価できない。ただし、航跡波がたびたびあり、この際には自動展張ブイは横波を受ける形となり、船側に押し寄せられる挙動が出た。したがって、波向きが船に向かう方向で、潮流と異

なっているような場合には注意が必要である。

現地にトラックが着いて船上での組立が終わるまで 2 時間弱、その後出航して現地海上へ到着すれば、ほとんど時間をおかずに作業に入れることはたいへん評価できると考える。現地海上での作業は、今回の実験では台船を投錨して完全に固定した上で行ったが、この投錨作業は 10 分弱で行われており、問題ない。このため、トラックの到着から海上での作業までの時間は 2 時間強に海上までの移動時間を加えればよい。

海上でのオペレーションについては、特に問題はないと考えるが、自動展張式オイルブームについては潮流がないような場合に使用できない状況である。ただし、オイルブーム自体が全く広がらないほどの潮流だったので、実際の事故現場では浮流油に向かって船が微速で近づいて補足するような運用が必要である。

油回収機に関しては、実際に油を回収する作業上の理解・無理解については油を流さない実海域実験では把握不能であった。ただし、水槽実験においては最初の簡単な説明後は、作業員がよく理解して実験を行えている事実があるため、海上実験で油回収機各部の操作に関しては簡単に習得できていることから、問題ないと考える。

なお、本研究においては実機のサイズによる運用試験ができなかった。想定する実機は、十分に今回の陸送用トラックに収まる大きさである。5.3(8)の Table 5.9 のように、かき寄せバケット式スキマーについて想定する実機本体の外形寸法は 2.0×2.0×2.4m であり、4 トン積みトラック荷台の半分弱を占める大きさである。また、自動展張ブイについては、5.4(5)の Table 5.19 のように想定する実機の外形寸法は 1.9×0.6×2.8m となっており、これも 4 トントラック荷台の半分強を占める大きさである。したがって、4 トン車 2 台で実機サイズにしても問題なく陸送できるコンパクトさを維持できる。

実機の製作に当たっては、自動展張式ブイについては、ジェット水ポンプの内蔵化と組み立てやすい翼(固定舵)取り付け構造とする必要がある。かき寄せバケット式スキマーについては、縮小プロトタイプでは予算上製作したモデルのサイズに対して効率がよいエア駆動とした。実機では重量が増えることと外形サイズの拡大を抑制するため、重量に適正な駆動力であり、相対的に駆動用シリンダ径をおさえて小型化ができる油圧を採用する必要がある。また、タンク容量の拡大に伴って、余水を排水するポンプ能力を 4 倍に増強する必要がある。

## 5.6 結語

本研究により開発した油回収システムの成果をまと

めると以下のとおりである。

### a) かき寄せバケット式スキマー

かき寄せバケット式スキマーについては、水槽実験により、油膜厚さ 2cm 程度の条件で、実機サイズでは 1 時間に約 5.9 トンの油分が回収でき、(Oil Recovery Rate 5.9 t/h) このときの油水中の余水は 30%に抑えられる (Oil Recovery Efficiency 70%) ことが推算できた。これは同様にグラフバケット模型実験からの推算値であるそれぞれ 5.7t/h (Oil Recovery Rate) および余水分 66% (Oil Recovery Efficiency 34%) を上回る成績を示している。また、運用試験においても組立やオペレーション上の問題は特になかった。

かき寄せバケット式スキマーの今後の実機による実用化にあたっての課題として、タンク容量の拡大に伴って、余水を排水するポンプ能力を増強する必要がある。また、かき寄せレーキのストロークや重量の増大に伴って、駆動系も実験用のエア駆動から油圧式に変更する必要がある。これにより外形サイズの拡大の抑制も図られる。なお、現状はトラック輸送を前提としているため大型化には限界があるが、台船を用いたシステムであることから、油回収率はより大きいことが望まれるため、主要港据置型の大型高容量タイプの検討が必要である。

### b) 自動展張式オイルブーム

自動展張式オイルブームについては、流速 0.5knt (約 25 cm/s) 以上において、その目的である集油ブームとして必要な間口を確保し、安定的にオイルブームを展張しつづけられることが水槽試験で確認できた。しかしながら、海上での運用試験においては、航跡波による横波の影響を受けやすかった事実から、横方向の波に対する対策の必要があることがわかった。また、若干の構造上の改良で現地組立が簡単になることがわかった。

自動展張式オイルブームの今後の実機による実用化にあたっての課題として、ジェット水ポンプの内蔵化によるジェット水ホースの取り回しの改善と、組み立てやすい翼(固定舵)取り付け構造とする必要がある。また、横波に対する安定性の向上が必要である。外形サイズについてはブイの効率を高め、小型化することが望ましい。

### c) 運用面

本研究においては実機サイズのプロトタイプによる運用試験ができなかった。しかしながら、実機では油回収システム全体の重量が増加することは必然であるが、クレーンの能力には十分な余裕がある。また、想定する

実機の大きさは、縮小プロトタイプ的设计からみて十分に4トントラックに収まる大きさとできる。このため、運用面の問題はおおむね生じないと考えられる。

本研究において2004年度の研究開発当初から一貫したコンセプトは、全国に900隻余りあるクレーン台船を有効活用するために、4トントラック2台程度に積載して陸送できる油回収システムのパッケージを開発することである。本研究は最終的に縮小プロトタイプの製作とこれを用いた運用試験を行ったところでまとめた。

油回収システムを配備する拠点としては、海岸線上の適切な港湾等に置き、その港湾から陸上輸送の時間距離を設定することにより多数の港湾についてカバーする方法が考えられる。また、高速道路が整備されている場合は時間距離が非常に短いことから、港湾よりも高速道路のI.C.付近に配備するほうが良い場合もある。たとえば、横浜横須賀道路の佐原I.C.付近に配備しておけば、東北・八戸青森・釜石の青森東I.C.まで約10時間30分で輸送することが可能であり、全国の配備拠点の箇所数を少なくできる。

逆に、配備計画は輸送時間よりもトラックの手配時間の方が長くかかることも予想され、常駐のトラックが確保できなければ、できるだけ全国の随所に配備する必要が生じ、トラックを常駐あるいは極めて短い時間で確保できれば、高速道路網上の港湾については疎に、主要幹線道路上の港湾については比較的密に配備することとなる。いずれにせよ、配備計画等の体制のあり方については今後の研究課題である。

今後は油回収システムの実機の製作と実証試験等を行って、より完成度を高めていきたい。また、配備および貸し出しを行う体制や仕組みについて行政的な検討が必要である。また、転用の対象となる作業船の検索と依頼を行なうしくみについて研究開発すればさらに緊急時の対応に資するものとする。

## 6. 結論

1997年1月に起きたナホトカ号重油流出事故を契機に、わが国では多くの油濁対策に関する技術開発等が行われた。本研究も同様にナホトカ号重油流出事故後から継続的に行われ、その結果主に浅海域用高濃度油回収システムおよび工事用作業船を用いた油回収システムの開発と提案を行なうことができた。

本研究は第1章の序論で述べたとおり、大規模事故においては油回収作業に従事する専門家や資機材の数量が不足であり、また、資機材を配備しても訓練をせずに使

用することは困難であることから、経験の浅い使用者にとってもわかりやすく、運用性が高い油回収機のシステムを開発することを目的に行ったものである。

このため、第2章においては、主に1997年に起きたナホトカ号重油流出事故を例に、我が国の油濁防除体制についてその課題を抽出した。その結果、ナホトカ号重油流出事故での油回収作業は多数のボランティアを含む人海戦術に頼るものとなり、使用機材も油回収資機材ではない通常の様々な建設用資機材等が活用されて成果を上げたことがわかった。ナホトカ号重油流出事故以降に、政府は即応体制の強化等を打ち出し、また資機材についても大型油回収船を建造するなど充実を図っている。しかしながら、資機材は配備には偏りがあり、全国的に見れば資機材がほとんどない地域のほうが多い。また、ナホトカ号の積み荷であり、現在では船舶燃料として一般的であるC重油以上の高粘度油に対応した資機材が少ないということがわかった。

次に第3章においては、油回収システムの課題について、エマルジョン化油の問題、運用における資機材および資機材のロジスティクスの問題、運用にあたる人的資源の問題、大量の回収油水の問題を抽出した。これによりエマルジョン化油は粘度が非常に高いため、対応した資機材が必要であることがわかった。また、資機材を現場に搬入・搬出する手段を準備しておかなければ作業ができないことから、資機材についても搬入・搬出のための配慮が必要であることがわかった。人的資源としては、実際に経験や訓練した者が数少ない油回収作業では専門家の確保が非常に重要であることがわかった。また、大量の回収油水が発生することによる貯蔵場所の確保や処分費用の増大を防ぐために、出来るだけ余水や回収に伴って生じるごみの減量化が重要であることがわかった。このため、一般的な油回収機を例に、運用のわかりやすさを中心に評価した。

このように、第1章～第3章により、解決すべき課題は、およそ以下の通りであることがわかった。

### 解決すべき課題

- ① C重油およびそのエマルジョンといった高粘度油に対応すること。
- ② 現場への搬入・搬出について配慮したものであること。
- ③ 回収油水の余水をできるだけ低減した高濃度な油水を回収できること。
- ④ 運用性が高く、専門家のスキルを必要としないこと。
- ⑤ ゴミによる作業の問題に対応すること。
- ⑥ 我が国の資機材の配備が手薄い地域の油濁防除能

力を高められること。

これらの課題を受けて、第4章では、浅海域用高濃度油回収システムの研究を報告した。本機は海洋工事事会社等の作業員によるオペレーションを前提として、重機が入り込めない海岸での効率的な油回収作業が可能な装置を目標とした。資機材の搬入搬出作業を軽減できる効率の良いロジスティクスを重視して、油回収機自体の性能は、余水をほとんど回収しないこと、高粘度油とゴミの問題が無いことをめざした。その結果、油回収率 (Oil Recovery Rate) が  $5\text{m}^3/\text{h}$  (1日6時間運転で  $30\text{m}^3$ , ドラム缶150本分)、油回収効率 (Oil Recovery Efficiency) が80%以上の高濃度な油水の回収ができるシステムとなった。

運用面ではスキマー本体とポンプを分離することにより、搬入搬出を各部分ごと人力で運搬可能な重量に抑えることができた。また、油をスキマーのコンベアへかき寄せるかき寄せ機構を開発し、通常スキマーで生じやすく、現場でのスキマー本体の操作等による対策をせざるを得ない、本体の反射波や伴流で浮流油が寄ってこないという現象を根本的に解決した。コンベア方式を採用し、ゴミを振り落とすゴミ格子を採用することにより、油が回収されていく様子、ゴミに対するフィルタリングが非常にわかりやすい装置となった。これに対して、高粘度油の回収作業で必ず生じる管路の詰まりは、ポンプの負圧の境界値で注水する負圧給水弁により管路内を潤滑することで、 $86\text{万 mPa}\cdot\text{s}$  の高粘度油を吸引側  $10\text{m}$ 、吐出側  $30\text{m}$  の移送が可能であり、これらにより油回収作業の専門知識があっても苦慮する詰まりの問題を解決した。

実海域での運用試験により、人力による搬入、組立、設置作業が問題なく行われ、10人で十分に操作できるシステムであることを実証した。これらを箇条書きでまとめると以下ようになる。

#### ① 高粘度油への対応

排送用ポンプはチューブポンプを選択し、高粘度液体に強い条件を設定した。排送管にわずかな水を自動的に給水するバルブを先駆けて設け、管の内壁と高粘度油の間に水膜を形成する手法を取り、 $86\text{万 mPa}\cdot\text{s}$  の高粘度油を吸引側  $10\text{m}$ 、吐出側  $30\text{m}$  の移送を可能とした。さらに、閉塞時に高圧水を吹き込んで管内を洗浄する装置を併置した。

#### ② 現場への搬入・搬出のしやすさ

本体からポンプを切り離すことにより軽量化し、喫水を約  $20\text{cm}$  と浅くして、人力により設置が可能であることを現地試験で実証した。また、各部材の大

きさはトラックにより運搬が可能な大きさとした。

#### ③ 回収油水の余水を低減すること

ネットコンベア方式として、海面から油水をすくい上げると同時に余水のほとんどが排出される仕組みとしたため、油回収効率 (Oil Recovery Efficiency) が80%以上であることが、水槽試験により実証された。

#### ④ 運用性の高さ

高粘度油により生じる諸問題のうち、目に見えない管内で生じる詰まり対策は上述の給水バルブ等の設置で自動的に回避される。また、回収口に油が寄ってこない現象については、世界的に例を見ないかき寄せレーキを初めて搭載することで解決すると共に、ネットコンベア方式とすることで水面の油が回収される様子と仕組みが専門家でなくてもすぐに理解できる。また、ポンプは建設現場で使用されるチューブポンプを選択して、海洋工事事会社の作業員のスキルを發揮しやすようにした。また、呼び水が不要でカラ運転も可能であるため、ボランティアによる使用でもトラブルが生じにくいと考えられる。

#### ⑤ ゴミの対策

油回収機本体にゴミ除けのスクリーンを設置したこと、ホース内径を通過できる固形物は問題がないチューブポンプを使用したことでゴミの問題は解決したと考えられる。

⑥ 油回収資機材の手薄な地域の油濁防除能力の向上  
本機の油回収率 (Oil Recovery Rate) は  $5\text{m}^3/\text{h}$  であることが水槽試験により実証された。本機は10人で運用が可能であり、海岸で作業する場合、1日で人力の150人分に相当する能力となっている。このため、全国の防災拠点等に多数配備されれば、トラックによる陸上輸送により迅速な現場対応が可能であると考えられる。

このように課題の解決策のひとつは第4章の研究によってなされたが、対象現場は人力を前提とする海岸側から近い浅海域であった。油回収作業としてはできるだけ沖合で早期に開始できることがその後の被害の低減に大きく役立つ。このため、第5章では、油回収船を代替することを目標として行った、工事用作業船を用いた油回収システムの研究開発について報告した。本研究では、クレーン台船上に緊急に設置し、油をクレーン作業に擬して回収する油回収機と、僚船が不要な自動展張式ブイを用いた集油ブームを開発した。この二つのアイテムを主要機材として、実機サイズにしても4トントラック2



台で運搬できるコンパクトなシステムとして、緊急配備に対応した。

開発した油回収機は、貯油タンクの容量を稼ぐために、余水を吐出しながら回収するものであり、また、高粘度油を排送する方法はバケット式であるため、詰まりやゴミの問題とはほとんど無縁である。さらにかき寄せ装置によりバケット内に浮流油を導き入れる方法は、その原理がすぐに理解できる。さらに対象とする油の粘度の範囲に制限が無いため、粘度による使い分けは必要が無い。その能力は油回収率（Oil Recovery Rate）5.9t/h、油回収効率（Oil Recovery Efficiency）70%で、通常容量4m<sup>3</sup>規模のグラブバケットで回収した場合と油回収率はほぼ同様で、油回収効率は約2倍の値を示した。

集油ブームは、クレーンにより投入、切り離すことで流れの下流側にオイルフェンスを自動的に展張できる。ただし、流れが弱いと十分に展張できず、横波を受けると不安定な挙動が出る。しかしながら、僚船を用いず、広い幅で集油できる本方式は効率的な運用に資すると考えられる。これらを箇条書きでまとめると以下ようになる。

#### ① 高粘度油への対応

本機では油水の排送系には管路もポンプも使用していない。バケットの底板を貯蔵タンク上で開くことにより排出するため、詰まりは生じない。

#### ② 現場への搬入・搬出のしやすさ

すべての構成部材を4トントラック2台で搬送できるように設計しており、また、クレーン台船を対象としているため、クレーンによる迅速な積み込みができることを運用試験で実証した。さらに、組立や海域での設置作業も迅速に行えることが運用試験で実証できた。

#### ③ 回収油水の余水を低減すること

スキマー本体バケットの下部の余水をポンプにより排出しながら回収する方式であり、油回収効率（Oil Recovery Efficiency）が70%であることが、水槽試験により実証された。

#### ④ 運用性の高さ

海洋工事会社の作業員のスキルを發揮しやすいように、かき寄せバケット式油回収機はクレーン作業のイメージで油回収ができるように、グラブバケットをモデルとして開発した。また、かき寄せレーキにより油をかき寄せて、バケットの上蓋をあけて流し込む方式は、見てすぐにその原理がわかる。このため、運用試験において詳細な説明のないまま操作が可能であることが実証された。また、対象の油の

粘度は通常のC重油からエマルジョン化油の広範囲に広げており、C重油の流出事故の場合は事故直後から対応が可能である。自動展張式の集油ブームは僚船がない場合やまだ現場でオイルブームによる処置がなされていない場合でも油回収作業を開始できる。海上に投入すると流れの下流側に集油されるように自然に展張されるので、流れのない場合を除いて集油ブームが自然に展張される状況が油回収作業の最も良い態勢となる。

#### ⑤ ゴミの対策

油回収機本体の取り入れ口は大きく開き、また貯蔵タンクに排出するときは底板が大きく開く。このため、粗大なごみでなければ全く影響がないと考えられる。

⑥ 油回収資機材の手薄な地域の油濁防除能力の向上  
本機の油回収率（Oil Recovery Rate）は5.9t/hと推計できることが大型水槽試験により実証された。容量4m<sup>3</sup>グラブバケットに対してほぼ同様の能力である。ナホトカ号重油流出事故時にガット船が活躍したことから、より大型化し、高容量のグラブバケットと同様の能力を持つことにより油濁防除能力は向上すると考えられる。

これらの油回収システムの開発を通じて、運用が簡単な油回収システムを構築するために必要な検討項目の確認ができた。まず、現場で作業する人員のスキルを設定することである。これは、油回収機およびシステムは通常は使用されない機械であることから、ある程度の機械類に対するスキルを設定すること、通常は経験しない油回収のスキルを設定しないこと、が重要である。本論文の2つの例はともに海洋工事会社の作業員のスキルを設定している。このことで、電気配線、油圧ホース、各種組立、クレーン作業などが現地で滞りなく実施できた。

これに対して、油回収作業のスキルとしても最も基本となる油の粘度に関してはできるだけ無視して作業可能であるような油回収機とした。浅海域用高濃度油回収システムでは、海岸付近に漂着した油は通常既にエマルジョン化しており、粘度が数千～数十万 mPa・s であると考えられ、もっぱら高粘度油特有の問題を生じると推定されるため、高粘度側の限界が非常に高い油回収機として、運用に資することとなっている。また、現場作業員が見ただけで油回収の原理が理解できる方式を採用したため、現地の試験では操作を簡単に理解できた。同様に、かき寄せバケット式スキマーは、適用粘度の範囲に限界は無く、緊急時に用いる油回収機として適当である。バ

ケットにかき寄せるしくみ、詰まりが生じない機構は油回収作業のスキルをほとんど要せずすむこととなることを考える。また、当初からクレーン台船を対象としているため、現地での重量物の移動などで機動力が高い。

このように、運用が簡単な油回収システムのあり方としては、本研究の場合は、海洋工事会社のスキルで運用でき、油回収のスキルが要求されないものとするのであった。

これらの2例のうち、浅海域用高濃度油回収システムは、改造したものが国土交通省近畿地方整備局の「Dr. 海洋」の副機として適用された。当初の目的である海岸から人力で進水させて運用するシステムという喫水の浅い、各部の重量が軽いという部分は適用されないが、その動作のわかりやすさ、高粘度油とゴミ対策の性能のよさ、本体にポンプを内蔵しないことからくる重量の小ささが優れている。

工事用作業船を用いた油回収システムは、実機サイズでの実験や運用試験が行われていないことが今後の課題である。本システムを陸上または主要港湾などの防災拠点に配備することにより、高速道路近傍であれば全国で数箇所の配備で半日以内に災害現場近傍の港に停泊するクレーン付台船まで達する。こうした防災拠点配備に適用することが最も適していると考えられる。今後さらに実機製作による検証を行いたいと考えている。

以上から本研究で導き出された2つのシステムをTable 3.1に当てはめると、Table 6.1のようになり、運用面で重要な項目について十分な性能を持つ他に類例のない油回収システムであることが分かる。

Table 6.1 Characteristics of the developed skimmer compared with general skimmer type

Skimmer type	Oil Type (viscosity)	Oil Recovery Rate	Oil Recovery Efficiency	Effect of Debris	Effect of Wave	Need of training
1. Wier	low	high	low	high	high	yes
2. Fixed submersion plane	low-med.	high	low	high	med.	simple
3. Suction	low-high	high	low	high	high	yes
4. Cylone	low-high	high	low	high	high	yes
5. Rope mop	med.-high	med.	med.	low	med.	simple
6. Drum	low-high	med.	high	med.	med.	simple
7. Disk	med.	med.	high	high	med.	simple
8. Belt, brush	med.-very high	med.	med.	med.	med.	yes
9. Grab bucket	med.-very high	med.	low	low	med.	no
10. Complex	low.-very high	vary	vary	med.	vary	yes
11. Net conveyor oil skimmer with the rake	high-very high	med.	med.	low	med.	no
12. Bucket oil skimmer with the rake	med.-very high	med.	med.	low	med.	no

The developed skimmers are 11. and 12.

本論文においては、浅海域用高濃度油回収システムは約5.4m<sup>3</sup>/h、かき寄せバケット式スキマーは5.9m<sup>3</sup>/hの能力（油回収率、余水を含まない）を持っている。作業環境に恵まれ、日中8時間稼働したと仮定すると、前者で43.2m<sup>3</sup>/day、後者で47.2m<sup>3</sup>/dayの油を回収できる。ナホトカ号重油流出事故では約6,000m<sup>3</sup>のC重油が流出した。エマルジョン化して内部に60%の海水が分散したと仮定すると体積は15,000m<sup>3</sup>程度に膨張したと考えられる。これらの全てが沿岸域に到達し、海岸にすべて漂着した場合、論文にあるように1人1日0.2m<sup>3</sup>（ドラム缶1本）の回収量が期待できる。ただし、余水分の量が不明なので仮に100%として考えても、延べ75000人の作業が必要である。これに対して、浅海域用高濃度油回収システムならば延べ347台、延べ3470人の人員が必要となる。また、かき寄せバケット式スキマーの場合は延べ317台、延べ317隻のクレーン台船が必要となる。浅海域用高濃度油回収システムは多数用いる小型の油回収機として、現地での実効性を運用性の良さにより高められることから、通常の油回収機に対して、緊急時での即応のための運用性が特に優れた油回収機として作業に資すると考えられる。また、かき寄せバケット式スキマーは油圧駆動にすることで実機ではかき寄せ装置の駆動を速くすることでサイクルタイムが短くなれば、より油回数率が向上すると考えられる。

なお、ナホトカ号重油流出事故においては油回収作業によって流出した油がすべて回収されたとは考えにくく、海中に分散、沈降したものや回収できない箇所に入り込んで残されたものも多いと考えられる。しかしながら、膨大な量の流出油に対応するためには、大容量の油回収システムの性能の向上が必要になる。本論文に示したかき寄せ装置や余水排除の技術等を大容量の油回収システムに応用することによって、より効率的な油回収システムの開発が可能となると考える。

油濁対策に関する研究開発は、目的が海上、海岸、海底での油回収技術という、たいへん範囲の広いものであり、どの分野についても研究の進歩による貢献度合いは大きいと考えられる。現状では回収量全体の15%程度といわれる海上での回収率の低さは大きな課題である。また、ISOにおいても近年やっと油回収機の評価試験について基準ができ始めたところであり、カタログ値については現在のところ一定の条件下での評価となっていない。したがって、研究開発の余地は非常に多いと考えられる。

これまで述べたとおり、我が国の油回収体制の技術的な向上を目指して、緊急時の運用性が高い油回収システムの研究を行ってきたが、実際の配備のために、コスト

面の検討も必要であると考えている。また、今後はさらに以下に示すような油回収機等の研究開発を行ってまいりたい。

① 岩礁に付着した漂着油の回収システム

現状では、高圧水による洗浄が付着生物に必ずしも良い影響を与えないことから、人力によるぬぐい作業となっている。これを機械化することにより作業者の負担を低減する。

② 砂浜上に漂着した油を効率よく回収する軽量な回収システム

現状では重機により海上に押し出し、浮いた油を回収しているが、重機による砂浜への影響が大きいいため、人力による作業が好まれることがある。砂浜への影響の少ない機械回収方法が必要である。

③ センサにより自動的に油塊近傍に移動して油への遭遇度合いを高める油回収機

我が国では船舶の事故等による中小規模の油濁事故は珍しくない。この場合、エマルジョン化した燃料油は数十 cm～数 m 程度の間隔で離散的に海上を漂流する。したがって、支援船から投げ込まれたスキマー部分が自動的にこれらのそばに移動することで作業効率が向上すると考えられる。また、火災の危険があるような場合に無人で油回収作業ができる。

④ 大容量高効率の油回収システム

現在、我が国では世界的に例の少ない大型油回収船（浚渫船と兼用）3隻（白山、海翔丸、清龍丸）による油濁防除体制を持っているが、こうした大型船に搭載する油回収機の効率、運用性の向上が必要である。

また、油回収作業を支援する以下のような技術についても研究してまいりたい。

① 大規模事故時に海上に投げ込んで、浮流油に自動的に追従し、海象データ等の発信をするシステム。これについてはすでに研究を開始している。

② 地理的条件や現地の状況に最適な油回収資機材等の提案システム

筆者は1998年にGISを用いた油回収資機材の提案システムの研究を行ったことがあるが、現在格段に向上したウェブ環境を活用したシステムとして再提案してまいりたい。

以上のように多岐にわたる研究となるが、そのどれもが油濁防除技術に現実的に不足しているものである。また個々の技術としてはカギとなる専門性が異なっているため、多くの研究者と協力することにより複合的な研究

テーマとして課題解決に取り組んでまいりたい。

(2011年8月12日受付)

謝辞

本稿は著者の博士学位論文の書式を変更し、港湾空港技術研究所資料として発表するものである。

本論文を作成するにあたり、本研究の遂行に際してご指導、ご協力をいただいた方々に感謝いたします。

まず、大阪大学大学院工学研究科教授、加藤直三先生には本論文をまとめるにあたって、暖かいご指導、ご鞭撻を賜りました。心より篤く感謝申し上げます。また、同工学研究科教授長谷川和彦先生、戸田保幸先生ならびに出口一郎先生には、本研究についての確で貴重なご指摘、ご意見をいただきました。

本研究において、浅海域用高濃度油回収システムの研究では、平成10～12年度にわたり環境庁（当時）から国立機関公害防止等試験研究費を受けて行うことができました。実海域試験においては、国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港整備事務所及び新潟技術調査事務所の皆様にご協力いただきました。また、本装置を船舶搭載用に改造して搭載したDr.海洋は、2008年度に土木学会の環境賞（小型の環境整備船に搭載可能な新たな油回収システムの開発～油回収の効率化による閉鎖性海域の環境保全～）を受賞し、その概要に「ネットコンベア方式の油回収機を別途搭載することが可能となり、対応できる流出油の粘度範囲を大幅に拡げることができた」<sup>40</sup>と評価されました。国土交通省神戸港湾空港技術調査事務所及び神戸港湾事務所の関係者の皆様に篤く御礼申し上げます。

工事用作業船を用いた油回収システムの提案については、環境省から平成16～18年度地球環境保全等試験研究費を受けて行うことができました。また、実海域試験におきましては同中国地方整備局境港空港整備事務所その他多くの関係者のご協力を得られました。ここに謹んで感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたっては、元海上災害防止センターの故月野良久氏には多くのご指導を頂きましたことを感謝いたします。さらに社団法人日本作業船協会及び同協会の辰口雅光氏、株式会社海洋開発技術研究所の城野清治社長には油回収機および試験水槽等に関する技術を多岐にわたりご教示いただきましたことを感謝いたします。また、元施工・制御技術部長の白石哲也氏（現四国地方整備局次長）および歴代の部長をはじめとする旧施工・制御技術部（旧機械技術部）の皆様には本研究の実験の実施等、多大なるご協力をいただきました。ここに

深く感謝の意を表する次第であります。

最後に本研究を進めるにあたり、格別のご配慮と叱咤激励をいただきました小和田亮元理事長ならびに金澤寛前理事長をはじめとする港湾空港技術研究所の皆様改めて深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 海上災害防止センター, 海上防災 事故事例集, 特集号, 平成 14 年 2 月.
- 2) (社) 日本海難防止協会: 特集 あれから 10 年ナ号海難の教訓はどう活かされたか, 海と安全, NO.532, 平成 19 年 2 月.
- 3) 海洋工学研究所「重油汚染・明日のために」1998 年 12 月.
- 4) 運輸省港湾技術研究所・環境庁国立環境研究所: 油流出事故に備えた回収対策及び環境・災害情報整備に関する調査, 平成 10 年 3 月.
- 5) 平成 9 年版 海上保安白書.
- 6) 稲葉一雄: 政府としての油濁事故への対応体制～危機管理の観点から～, 石油連盟 2001 国際会議 (油流出に関する国際シンポジウム), 平成 13 年 3 月.
- 7) 野間清二: ナホトカ号事故とその後の油流出対応体制の変遷, 石油連盟 2001 国際会議 (油流出に関する国際シンポジウム), 平成 13 年 3 月.
- 8) Muneo Yoshie, Isamu Fujita, Yukihiko Saito: About Construction of Simulation Tank for Oil Recovery in Marine Situations, OCEANS'04 MTS/IEEE/TECHNO-OCEAN'04, paper No.183, 2004,11.
- 9) JOSEPH V. MULLIN & JAMES S. LANE: R&D Users Guide to the Ohmsett Oil Spill Response Test Facility, Spill Science & Technology Bulletin, Vol.6, No. 1, 2000, p.77.
- 10) 「筑波研究所 回流水槽」パンフレット, (財) シップ・アンド・オーシャン財団.
- 11) 「筑波研究所 角水槽」パンフレット, (財) シップ・アンド・オーシャン財団.
- 12) 海洋油汚染とその対策—ナホトカ号の事故を契機に— 討論 1, 海洋工学連絡会, 第 16 回海洋工学パネル, 平成 9 年 7 月 25 日, p.21.
- 13) 月野良久: 流出油防除資機材の現状と問題点, 海洋工学連絡会, 第 16 回海洋工学パネル, 平成 9 年 7 月, pp.66-67.
- 14) 月野良久: 流出油防除資機材の現状と問題点, 海洋工学連絡会, 第 16 回海洋工学パネル, 平成 9 年 7 月, p.33.
- 15) 除宇楽: ヘベイ・スピリット号事故への対応と韓国が学んだこと, 石油連盟, 2009 国際ワークショップ (第 1 回油濁対策ワークショップ), 平成 21 年 3 月.
- 16) WORLD CATALOG of OIL SPILL RESPONSE PRODUCTS 9TH EDITION, SL Ross Environmental Research Limited, 2008.
- 17) Merv Fingas: The Basics of Oil Spill Cleanup, CRC Press LLC, 2001, pp.89-99.
- 18) 平成 12 年度日本沿岸域船舶航行環境調査報告書, (社) 日本海難防止協会, 平成 13 年 3 月, pp.103-104.
- 19) 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, 社団法人 土木学会 海洋開発委員会, 海洋開発論文集, VOL.19, 2003.7, pp.43-48.
- 20) 吉江宗生, 平林丈嗣, 田中俊成, 藤本健幸, 原田貴久, 剣持知浩, 辰口雅光: エマルジョン化高粘度油に対応したネット式スキマーの開発, TECHNO-OCEAN2000 International Symposium Vol.II, 2000.11, pp.207-212.
- 21) 吉江宗生, 佐藤栄治, 辰口雅光: 浅海域に対応したエマルジョン化高粘度油回収システム, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演集, VII-47, 2001.10, pp.94-95.
- 22) 吉江宗生, 佐藤栄治, 白井一洋: 沿岸域の高粘度油高濃度回収システムの研究開発, 港湾空港技術研究所報告第 42 巻 1 号, 2003.3, pp.115-137.
- 23) 珠洲市ロシアタンカー重油流出災害記録 美しい海岸が甦るまで, 珠洲市, 平成 10 年 5 月.
- 24) Iwan White: 油流出対応—実績, 動向及び大規模事故対応後の進歩, 石油連盟, 油流出に関する国際シンポジウム, 平成 13 年 3 月.
- 25) 大規模油流出事故の初期対応に関する調査研究まとめ, シップ・アンド・オーシャン財団, 1997 年 7 月, pp.52-55.
- 26) Robert Schulze: 1997/1998 WORLD CATALOG OF OIL SPILL RESPONSE PRODUCTS SIXTH EDITION, World Catalog JV, SKIMMERS 2-14, 1997.
- 27) Flemming Hvidbak: 船体からの重質油の回収について—回収のための装置と高粘度流出油のポンプ輸送技術, 石油連盟, 油流出に関する国際シンポジウム 2003, 平成 15 年 2 月.
- 28) 海の環境を守る名医 海洋環境船 Dr.海洋 パンフレット, 国土交通省近畿地方整備局神戸港湾事務所,

2007 年.

- 29) Muneo Yoshie, Kenji Takezaki, Isamu Fujita:  
Development of an oil skimmer operated by crane  
barges, International Oil Spill Conference 2008, 2008.5,  
pp.469-474.
- 30) 吉江宗生, 藤田勇: 強制排水によるバケット式油回収機の大型造波水槽実験, 社団法人 土木学会 海洋開発委員会, 海洋開発論文集 VOL.22, 2006.4,  
pp.975-pp980.
- 31) 吉江宗生: 港湾工事用作業船を活用する油回収システムの提案-港湾及び沿岸域の迅速な油濁防除対応のために-, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 42 巻 5 号, 2007.9, pp.21-26.
- 32) 吉江宗生, 藤田勇, 竹崎健二: 工事用作業船を転用した油回収システムの開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1185, 2008.12.
- 33) 海上防災ハンドブック, 海上災害防止センター・海上防災事業者協会, 1996, pp.118-125.
- 34) 吉江宗生, 藤田勇, 竹崎健二: かき寄せバケット式スキマーの開発と運用試験, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演集, No.2-219, 2007.9.
- 35) 宇佐美宣拓, 大塚夏彦, 荻原浩二, 米田克幸, 佐伯浩: バケットを利用した流出油の回収に関する基礎的研究, 社団法人 土木学会 海洋開発委員会, 海洋開発論文集, 第 16 巻, 2000.6, pp.123-128.
- 36) Robert Schulze: WORLD CATALOG of OIL SPILL RESPONSE PRODUCTS 9TH EDITION, SL Ross Environmental Research Limited, skimmer 2-2~2-22, 2008.
- 37) 矢野州芳, 熊本均, 渡辺孝則, 小川武, 三宅直人: ドラグサクシオン浚渫兼油回収船“清龍丸”, 三菱重工技, VOL.43 NO1, 2006, pp.26-27.
- 38) Muneo Yoshie, Isamu Fujita, Kenji Takezaki: Field Simulation of Oil Skimming System Package for Crane Barges in Emergency, OCEANS'08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN '08, 2008.4.
- 39) 吉江宗生, 藤田勇: オイルブーム展帳ブイの開発と実験, TECHNO-OCEAN2006 / 19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, paper No.46, 2006.10.
- 40) 土木学会ウェブ,  
[http://www.jsce.or.jp/prize/tech/pd/2008\\_18.pdf](http://www.jsce.or.jp/prize/tech/pd/2008_18.pdf)



港湾空港技術研究所資料 No.1246

2011. 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 株式会社シーケン

Copyright © (2011) 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。



古紙配合率70%再生紙を使用しています