

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

A STUDY ON A LABOR SAVING OIL RECOVERY SYSTEM TO REMOVE VISCOUS OIL FROM THE WATER SURFACE IN FRONT OF THE BEACH

吉江宗生¹・藤田勇²・佐藤栄治³

Muneo YOSHIE, Isamu FUJITA and Eiji SATO

¹正会員 工修 (独) 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)
²正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)
³非会員 (独) 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

The oil spill accident of Nakhodka in 1997 made many persons (around 400 to 500 thousands) work hard to remove emulsified heavy oil to clean the coasts. They suffered from viscous oil because the conventional oil recovery equipment was not good for the oil of such viscosity of 500Pa·s. They had to use dippers and buckets by their own labor, because the access of heavy machinery to the coast from land or sea was difficult due to irregular terrain conditions and shallow water depth. This paper describes a labor saving oil recovery system for viscous heavy oil on the water surface in front of the beach. The system is able to skim oil from water/oil mixture which contains emulsified heavy oil. It is also able to transport separated oil for long distance without blockade. The performance of the system is equivalent to 150 persons while only 10 persons are necessary for operation. These results have been confirmed by pool test using emulsified heavy oil and operation test at sea.

Key Words : Nakhodka, viscous oil, oil spill response, oil recovery system, net conveyor

1. はじめに

平成9年1月に起きたロシア船籍タンカー「ナホトカ号」による重油流出事故においては、船体から漏れ出したC重油が波により海水と混じり合いエマルジョン化し、冬期で海水温も低かったため、粘度が極めて高くなった。動粘度で約123万cSt (=12,300cm²/s)の報告¹⁾がある。流出したC重油は6,240m³と推定されるが、回収された油水は約62,000m³となっており²⁾、エマルジョン化により内部に取り込まれた海水分のほかに膨大な余水や砂、ゴミ等が混じったものと推察できる。これらのうち漂流油としての回収分は約10%程度であり、沖合いでの回収作業が功を奏さず、多くは海岸前面に漂着したと見られる。

海岸では、福井県でのべ163,632人、石川県でのべ202,947人の人員による回収作業が行われた³⁾。これらの作業はひしゃく、スコップによる掬い作業とバケ

ツリレーなどによる運搬作業などの人海戦術が多く、重労働となり、疲労から亡くなった方もあった。

このため、本研究では海岸の浅い水面で効率的に高粘度油を回収するシステムの研究開発を行った。

2. 海岸の浅い水面での油回収作業の問題と研究開発するシステムのコンセプト

(1) 海岸へのアクセスの問題

海岸は、船舶の喫水の関係から海上からのアクセスに制限があり、また陸上からは近傍の道路までアクセスした後に、水辺までは道路などが無いため、特殊な車両が必要である。重機は道路から海岸の間に大きな高低差がある場合海岸へ入ることができない。そのため、人力による油回収資機材の海岸への搬入が必要であり、油回収機の水面への進水についてもクレーン等の重機の使用ができないことが前提になる。

(2) 対象とする油の性状と資機材の問題

流出地点から浮流して海岸地先まで漂着する間に、原油であっても時間経過による風化作用と波浪によるかく乱によって流出油はエマルジョン化しているものと想定できる⁴⁾。またこの間に海草や浮遊ゴミと混じり合っているものと想定できる。

一般に油の粘度は、温度が低い場合高くなるが、冬の日本海は、水温が10℃～5℃と低く、流出油がエマルジョン化するとその効果も加わって、粘度が100Pa・sを越えることが想定できる。このような高粘度ではポンプや管路の詰まりが発生しやすい。また、油が相互に粘着して塊を形成し、対象を流体として取り扱うような形式のスキマーでは効率が非常に悪くなり、回収油水中の水量が多くなる。海岸では回収油を一時的に貯蔵するピットの設置やドラム缶の搬入なども人力が主とならざるを得ないが、回収した油水の量が増加すればこうした作業も増える。このため、海岸の浅い水面での油回収作業の省力化には高粘度油の回収効率の高い資機材が資する。

(3) 運用するスタッフの問題

油回収作業について専門的な知識を持ち、訓練を受けているような専門家の数は限られているため、資機材の取扱は分かりやすい必要がある。また、ボランティアなど機械装置を普段取り扱わないスタッフでの回収作業は難しい。重労働を伴う作業になれば種々の問題が懸念される。

(4) 研究開発したシステムのコンセプト

以上のことから、本研究で想定した油回収システムのコンセプトは以下のとおりである。

a) サイズの制限

システムを構成する各部の重量は、複数の人力によ

る運搬が可能な範囲とし、スキマー部は進水を人力で行えるように喫水を50cm以下とする。また、各部は現場に急速に到着できるよう陸上をトラックにより運搬するため、幅2.5mを越えないサイズとした。

b) 対象とする油の性状

対象の油はこれまで世界的にほとんど開発されていない高粘度油を対象として、粘度500Pa・s程度のエマルジョン化油に、浮遊ゴミが混入していることを想定した。回収油水中の水量が、油分(エマルジョン化により取り込まれた水分を含む)に対して50%を越えないことを目標とした。また、高粘度油による管路の詰まりを防止する装置を考案することとした。

c) 運用の明快さ

一般的な建設工事の作業に慣れた者による運用を想定して、システムの各部の役割が明快であること、操作する人の役割が明快であること、に努めた。このため、浮流油のあるところへスキマー部を移動する作業は人力とし、油の掬い上げ、及び排送の作業は機械によるものとした。

3. 回収能力の想定

(1) 人力の換算

作業を機械化・自動化するにあたっては、その省力化の目標を数値的に設定することが重要である。このため、人力の換算値が必要と考えるが、現場での一定条件下でのデータは得がたい。このため、便宜的に、海岸での漂着油の回収作業が、1人あたりに換算してどの程度の能力になるか、珠洲市発行のパンフレット⁵⁾による事故当時の1日毎のデータを活用して試算した。

珠洲市の平成9年1月13日から4月27日までの回収作業のデータを作業人員と油水回収量(ドラムに換

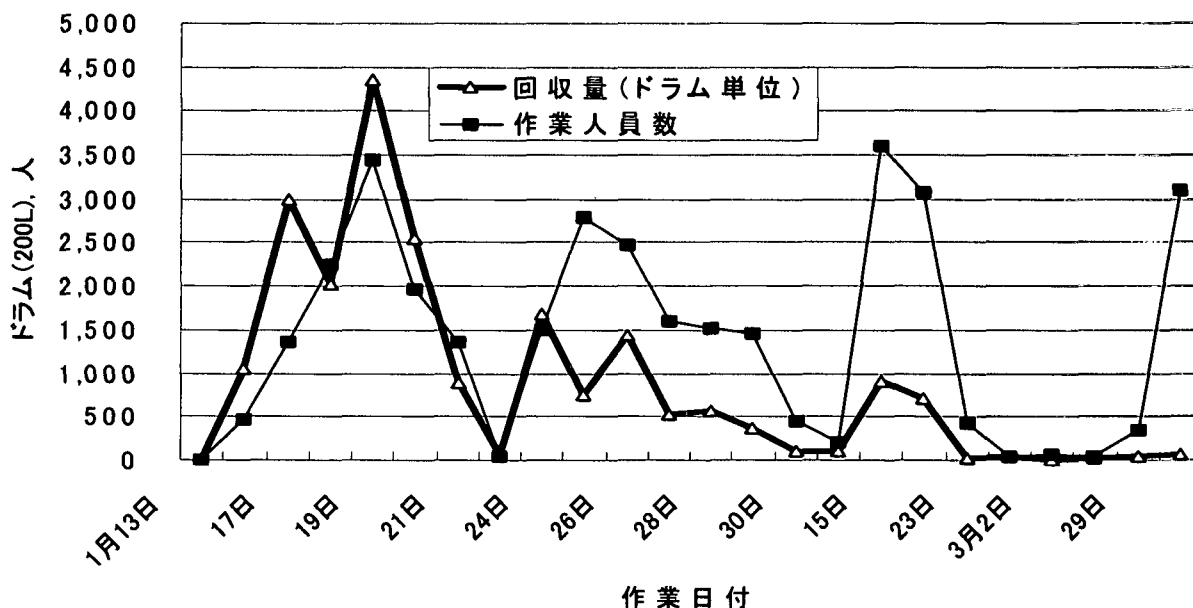


図-1 作業人員数と油水回収量 (珠洲市の作業実績)

算;1ドラム=0.2m³)の関係を表したのが図-1である。1月25日までは一人あたり1~2ドラムの回収量である。しかし26日からは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。

他に、石川県のデータ⁵⁾では漂着油の総回収作業人員が約207,500人に対して、回収された漂着油は85,900ドラムであるから、単純に割れば1人あたりドラム約半分に満たないことになる(海上回収分17%含む)。

こうしたことから、海岸での1人あたりの漂着油回収能力は2[ドラム/人日]が限界ではないかと考えられる。投入された人員数の動きから捉えれば1[ドラム/人日]に満たない程度であり、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。ただし、これらに含まれる作業は、水面からの油の掬い上げ、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、及びその他雑作業であり、もとより1人の人間の油回収能力を示すものではない。

(2) 省力化効果の設定

システムの運用人数に対する回収能力が省力化効果の目標となる。ここで運用人数を15人と想定し、人力のみの場合の15ドラム/日に対して10分の1の省力化を目標とした。したがって、1日1システムで150ドラム(30m³)となる。これは1日の稼働時間を6時間とすれば、5m³/hとなり、システムの油水回収能力の目標とした。

こうした目標値の想定では、1システムあたりの回収能力としてはわずかに30m³であり、本システムで図-1の1月20日の油水回収量約4,500ドラムを実現するためには30システムが必要である。ただし回収に必要な人数は450人で済み、なおかつ各々の作業は機械力を伴う分軽減されることとなる。

4. システム各部の開発の特徴

(1) システムの構成

回収システムは、図-2のように①漂流油を集油ブーム等で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、ピット等に排送する排送機構、の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である。

(2) 集油機構

a) 集油フェンス

浮流油は帯状あるいは塊状の群となって海岸に接近してくると考えられるが、これらをできる限り面的に捕らえることで、省力化効果を高めるために集油フェ

ンスが必要となる。

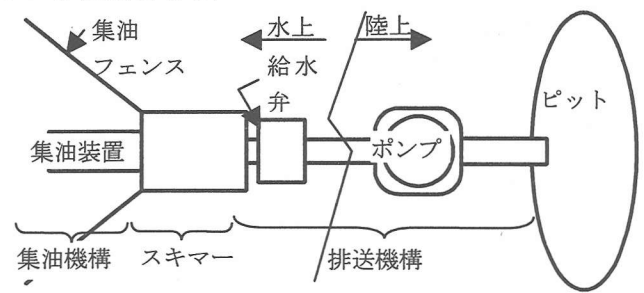


図-2 システム構成

集油フェンスの展張形式はV字、J字等あるが、J字展張は非対称型に展張する必要があるので難しい。本システムでは集油フェンスの先端を広げ、油回収機に向けて序々に絞ったV字の形状とした。また、油の漏出防止能力については高粘度油の場合ネットを用いても十分に確保されることが知られており⁶⁾、油回収機の場合は回収機に取り込むまでの短時間の漏出防止能力を確保できれば良いことから通常のオイルブームは使用せず、せきの効果により水面が盛り上がるのを避け、潮流等により集油フェンスに発生する引張力を低減させて操作性を良くするため、水中のカーテン部にネットを用いて透水性を確保した。

b) 集油装置

一般的にスキマー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問題がある。本システムのスキマーでも水槽実験において、スキマー前面の浮流油の挙動観察より、反射波等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。

集油装置は一般的に、水流による方式、スキマー後面からの吸引などの手法などの開発例がある。しかし、高粘度油では相互に付着し合い、大きな体積のマッサとなることがあり、この場合水流の量が多くないと効果がない。また、付着しあった油塊が集油フェンスの間等に橋状に粘着してしまうと、流れを障害する障害となる。このため、直接的にかき寄せる装置を集油装置として開発した。

かき寄せ装置はレーキ式(熊手式)とし、レーキの



写真-1 かき寄せ装置

回転と走行動作の組み合わせにより油をかき寄せる方式を採用した(写真-1)。

(3) スキマー

a) 開発したスキマーの機構

市販のスキマーを機構的に分類すると、堰式、ブラシ式、ロープモップ式、ディスク式、ドラム式、渦流式、など極めて多くの方式がある。しかしながらその原理は単純であり、大まかには、①水との比重の差を利用して、表面に浮いた油を分離するもの、②簡単な遠心分離を行うもの、③油の粘着力を利用して付着させるもの、④油を吸着する性質の素材を利用するもの、に集約される。また、掬い上げた油水の移送には、ポンプによる圧送を用いるものが多い⁶⁾。

しかし高粘度油の場合、実際の現場では付着や吸着以外の方法では水面の動揺により回収油水中の水量が多くなり、効率が悪い。また、付着・吸着した油を搾り取る機構が複雑になる問題がある。さらに、数百 Pa・s の高粘度油を主に対象としたスキマーの開発例はほとんどない。

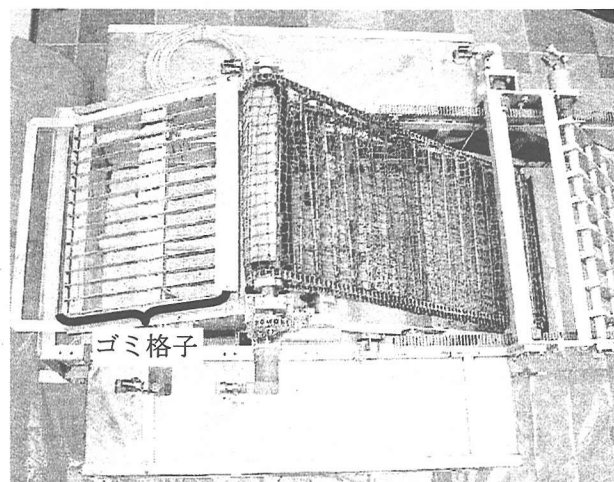


写真-2 スキマー

本研究では、油と水の性状差が最も大きく現れる粘度の差を利用した油水分離方式のスキマーを開発した(写真-2)。これはネットを使用して油水分離を行った上、掬い上げ機構としてはコンベア方式としたものである。

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。箱に異なる目合

表-1 ネット透過時間計測値

目合い(mm)	粘度(Pa・s)		
	184	286	726
2.5	10秒以上	10秒以上	未計測
10.0	5.0	9.5	未計測
20.0	2.0	3.5	10秒以上
25.0	1秒以下	3.0	5.0
計測単位:(秒)			

いのネットを張り、その上に3種類の粘度の油をひしゃく1杯程度載せ、油が網をくぐりぬけ始めるまでの時間を計測した。

実験の結果(表-1)は、目合いが25mmという大きなものでも粘度が300Pa・s以上あれば3秒以内にコンベア上を移動させれば使用できることを示している。そこで目合いを替えたネットコンベアで水面から約500Pa・sの重油を掬う実験を行い、観察した結果、スキマーの反射波を低減させ、網の目詰まりを防止する効果の高い25mmの目合いを採用した。

b) ゴミ対策

本研究で対象とする油は、ペットボトルや木切れ、海藻などのゴミを巻き込んでいる可能性が高い。このため、ポンプの詰まりを防止するために油受けの上面にゴミ格子(写真-2)を設置し、回収油水はこの油受け底部からポンプで吸引するようにした。ゴミ格子は加振機により振動し、ふるいの効果で油は油受けに落下し、ペットボトル等が巻き込まれたゴミは、外部のゴミ受けの袋に落下するものである。

一般的にはスキマーの油水取り入れ口にゴミよけのフィルターを設置するものが多いが、高粘度油の場合にはこれに油が粘着して目詰まりとなり、隙間を海水のみが通過する現象が起きる。しかし本スキマーでは油水を掬い上げた後にゴミを分類するため、こうした現象を防止できる。

(4) 排送機構

スキマー部の重量軽減、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に、スキマーとポンプを分離式としている。ポンプは、ナホトカ号事故の実績及び海外の事例から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チューブポンプを選定した。

$$\Delta P = \frac{cv^2}{2gD}l + h \quad \dots (1)$$

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 [m³/h] より 0.71 [m³/s]
 D : 管径 0.05 [m]
 c : 抵抗係数

$$(c = \frac{64n}{vD} \quad n = \text{粘度 } 0.5 [m^2/s])$$

しかしながらスキマーからポンプまでは吸引力のみであるため、(1)式で計算すると、高粘度油では詰まりを起こす。

このため、管内の油に給水することによって管壁と油表面の間に形成される水膜による潤滑効果によりホースの閉塞を防ぐこととした。混入水量を最小とするため、ポンプの吸引負圧を検知して、ある値を超えた

時に給水する弁をスキマー部に設けた。

(5) 全体の大きさ

以上、かき寄せ装置のついたスキマーの大きさは、長さ約 2.3m×幅 1.4m、重量 130kg、油取入れ口幅約 50cm、喫水 20cm、油圧駆動式となった。排送機構の吸引ホース長は 10m、吐出ホース長 30m、チューブポンプ重量 210kg、管径 50mm、吐出量最大 5.2m³/h（定格）である。この他には集油ブーム、発電機、油圧操作盤などとなっている。

これらはすべて人力により運搬できる重量とサイズであり、海岸の浅い水面に重機類を用いず搬入できる。

5. 水槽実験

約 10m×4m、深さ約 1.2m の平面水槽で、造波装置により波高 10cm、周期 1.7 秒の波をスキマーに直角にかけ、約 460Pa・s に調整したエマルジョン化 C 重油を回収した（写真-3）。スキマーからポンプまでの吸引ホース長さは 10m とした。

結果は表-2 に示すように、回収油水量がかき寄せ装置のレーキ頻度に支配されることが明らかとなり、有効性が確認された。また、回収できた油水の最大値は 20 秒間の計量で 0.03m³ に達し、1 時間あたりに換算すれば 5.4m³/h となり、目標の能力を持つことを実証した。回収水量率（油水中の余水量の割合）は約 20% 程度であり、回収効率も高いことが確認できた。

また、より高濃度の油水による管路の詰まり防止について確認するため、同じ水槽で、波高 20cm、周期 2.0 秒の波をスキマーに直角にかけ、約 650Pa・s に調整したエマルジョン化 C 重油を回収した。

結果は表-3 のとおり、回収水量率がわずか 6% 以下で、極めて高濃度の油水を詰まることなく排送できることが実証できた。また、吸引圧は -0.4～-0.6kg/cm² の間で安定しており、給水弁が効果的に働いたことを確認した。波の影響に関しては、波ありのほうが回収量が多く、集油のためには波で浮流油が運ばれる効果が大きいことが分かった。20cm 程度の波ではスキマーの安定性が疎外されるなどの挙動は示さず、人が補助する程度の作業環境下では十分な耐波性能を持つことが推定できる。ただし、どの程度の波高まで油水の回収ができるかについては、より高い波高を発生できる水槽実験で確認する必要がある。

6. 現地運用試験

実際の現場での搬入、組立、進水、撤去がスムーズに行われ、省力化の効果が十分発揮できることを確認するため、新潟市栄町地先海岸にて現地運用試験として設置、撤去試験を行った（写真-4）。作業は使用機材に対して精通しない者（工事会社）を選んで行い、各作業の所要時間を計測した。資材を積んだトラックか

ら岸辺までの距離は約 30m、砂浜なので小型の不整地



写真-3 水槽実験

表-2 水槽実験の結果

<油粘度 460Pa・s, 波高 10cm, 20 秒間計量>

case	1	2*	3	4*
レーキ頻度 サイクル/min	9	6	4	6
コンペア速度 m/min	20	20	20	10
回収油水量 m ³	0.03	0.022	0.013	0.023
回収油量 m ³	0.024	0.018	0.01	0.018
回収水量 m ³	0.006	0.004	0.003	0.005
回収水量率 %	20	18	23	22
換算回収油 水量 m ³ /h	5.4	4.0	2.3	4.1

*注：Case2*と 4*はネットコンペア上の油が回収油タンクに落下した後、油をレーキでネット上に掻上げる断続運転

表-3 回収水量率

<油粘度 650Pa・s, 波高 20cm>

case	A	B	C
波	なし	あり	あり
水流(集油)	あり	なし	あり
換算回収油 水量(m ³ /h)	0.9	2.4	2.3
回収水量率 (%)	6	1	測定不能
吸引圧(kgf/ cm ²)	-0.4～-0.6	-0.4～-0.6	-0.4～-0.6

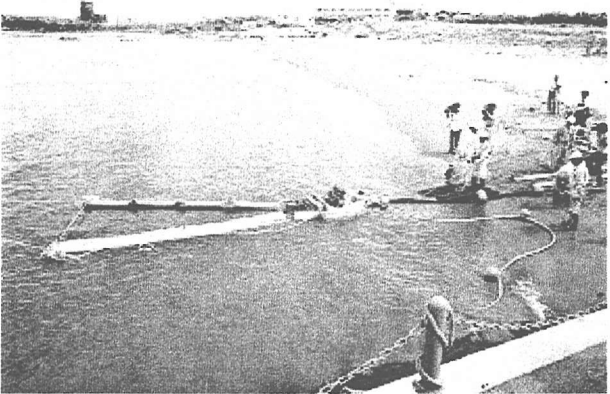
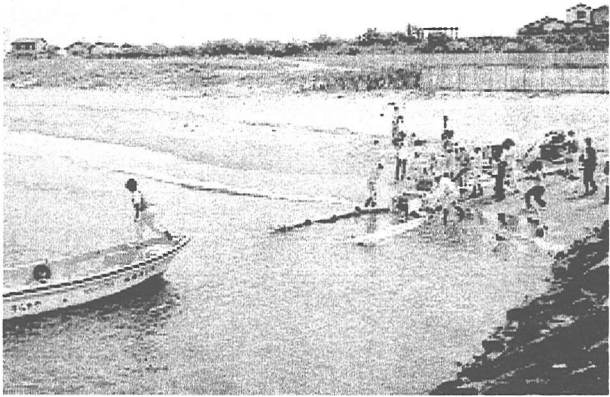
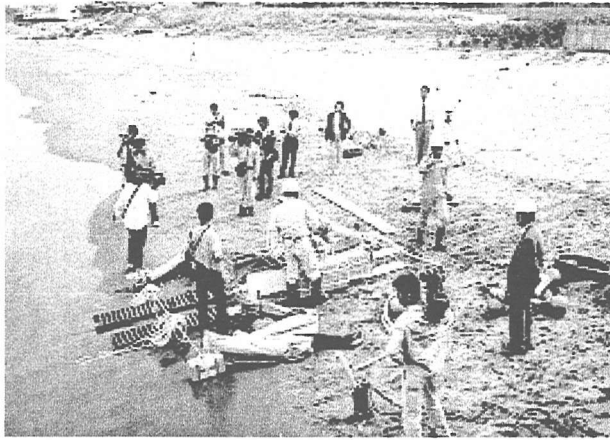


写真 - 4 現地運用試験

運搬車を活用した。試験当日の天候は晴れ，風速 2m/s ，波高は約 10cm であった。

結果は，設置に1回目は56分，2回目52分，撤去は37分（1回のみ）だった（撤去は本体の洗浄作業が含まれていない）。また，スキマーの進水は人力だけで行えた。これらの作業は全体指揮者1，作業指揮者1，トラック運転手1，不整地運搬車1，モーターボート操縦士1，発電機及びポンプ運転者1，作業員2の合計8

人の人員で可能であった。1日に本システムの運転を6時間行う場合，準備，設置，撤去，洗浄で約4時間を見込んでも，人員は10人あれば2人ペアで1時間の休憩を交代で2度とりながら運用する体制が可能であることが確認できた。

7. 結論

本研究で開発した油回収システムは，粘度 $500\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度の高粘度油がスキマー前面一帯に広がっているとすれば，水槽実験から最高 $5\text{m}^3/\text{h}$ （1日6時間稼動で150ドラム）の油水回収能力を持ち，水上から 40m にわたりこれを管路を詰まらせずに排送する能力を持つ。このときの油水の水量率（エマルジョン化して内部に取り込まれた水分は含まない）は20%程度なので回収効率が80%と高い。また，現地運用試験からは，10名の人員で運用が可能であることが確認された。

したがって，本システムによる海岸（地先水面）での油回収作業の省力化効果はすべて人力で行った場合に比較して15分の1の人員で同程度の油水回収が可能であると評価できる。さらに，油水の掬い上げと移送を機械力で行うので，個々の人員の作業の軽減にも大きく貢献するものである。

謝辞：本研究においては金沢大学石田啓先生，海上災害防止センター月野良久氏，（社）日本作業船協会工藤英雄氏，（株）海洋開発技術研究所城野清治氏から多くのご助言をいただいた。また，国土交通省北陸地方整備局及び近畿地方整備局から貴重な情報を提供いただいた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 月野良久：流出油防除資機材の現状と問題点，第16回海洋工学パネル，pp33，1997。
- 2) 運輸省港湾技術研究所，日本海難防止協会：漂流油回収技術研究調査報告書，pp73，1998。
- 3) 海洋工学研究所出版部編：重油汚染・明日のために，海洋工学研究所出版部，pp446-447，1998。
- 4) シップアンドオーシャン財団：大規模油流出事故の初期対応に関する調査研究（まとめ），pp13-32，1997。
- 5) 珠洲市：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，pp30-33，1998。
- 6) 4) に同， pp52-55。
- 7) Robert Schulze, Virgil Keith, Colleen Purcell : WORLD CATALOG OF OIL SPILL RESPONSE PRODUCTS, MSRC, pp2-1~2-23, 1997 / 1998。