

流出した原油の回収に関する 基礎的実験

EXPERIMENTAL STUDY ON RECOVERY METHOD FOR SPILLED OIL

高橋 伸次郎¹・米田 克幸¹・大島 香織²・大塚 夏彦³・佐伯 浩⁴

Shinjiro TAKAHASHI, Katsuyuki MAIDA, Kaori OHSHIMA,

Natsuhiko OHTSUKA and Hiroshi SAEKI

1 正会員 (株)西村組 (〒094-0012 北海道紋別市新港町2丁目)

2 学生会員 工修 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

3 正会員 北日本港湾コンサルタント(株) (〒003-0029 北海道札幌市白石区平和通2丁目北11-18)

4 フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

In January 1997, the oil tanker "Nakhodka" spilled about 6,200 kl of heavy oil into Japan Sea. The spilled oil was followed by mechanical and chemical techniques. Usually, physical properties of spilled oil change rapidly due to the hydrodynamic and environmental conditions, and its viscosity increases quickly. Finally, spilled oil becomes high viscosity substance such as mousse. In case of Nakhodka, mechanical recovery methods such as dredger, vacuum track and concrete placer showed good results in recovering of high viscosity oil. This paper reports the experimental results on more effective recovery method through systematic experiments.

Key Words : Spilled oil, recovery method

1. 序論

サハリン北部オホーツク海沿岸の石油・ガス開発, いわゆるサハリン I・II プロジェクトのうちサハリン II が、本年夏より原油の生産を始める。この開発はロシアの P S 法に基づいており、1995~1996 年に契約が開始され、当時の原油価格は 1 バレル 20 US ドルであった。同開発において、現在は石油コストが当時の 1/2 程度となっており、生産過程において費用をかけられない状況となっていることが推測され原油流出の可能性も高まっている。また、原油等の流出により、動植物へ与える影響も多いと報告されている。

ナホトカ号の流出事故においては江線近傍ではバキューム車、ポンプ車の活躍が目立った。浅海域ではガット船やグラブ浚渫船による回収が有効であった。これは流出油の粘度が非常に大きいからである。その回収の際には海水が殆どで、回収率は平均して

1 割程度であった。この 1 割程度の流出油を含んだ海水を船舶で輸送するには、多数航海しなければならず、また陸上部での回収ピットも多大に用意せざるを得なかった。流出原油は蒸発・乳化に伴い粘度が高くなり、またその粘度は温度に大きく依存する。オホーツク海の水温は夏季でも最高で 20℃以下であり、流出油の粘性硬化は他地域に比べ高い。

本研究はそのような粘度の高い流出油に対し、水を通して、流出油のみを回収する方法の開発のため基礎的実験を行った。この方法では回収ピットも小さくて済み、回収時間も大幅に短縮される。

2. 代替材料の物性

蒸発・乳化し含水した原油 (ムース状) を実験に使用するには、その再現性が乏しく、また原油は時間変化が大きいため代替材料を用いた。この代替材料にはギアオイル (ISO グレード 460、1000) を

用い、これらを混合し、かつその温度を調整することによりムース状流出油に相当する粘度を有する材料を製作し、代替材料の物性を調べた。

(1) 物性実験方法

代替材料の密度及び粘度は、石油密度計、ビスコテスター（回転円筒形粘度計、測定範囲 0.002～400 Pa・s）をそれぞれ用いて測定した。様々な粘度が得られるよう、-10℃から 40℃で測定を行った。代替材料の混合は、必要量をビーカーに入れ、60℃程度の湯につけて十分に攪拌した。混合比は ISO 粘度 1000 と 460 を 3:1、1:1、1:3 の 3 種類で行った。

(2) 物性実験結果

代替材料の粘度測定結果を図-1 に示す。ここで見られるように、各粘度のギアオイルの混合比と環境温度を調節することにより、任意の代替材料を作ることができた。粘度は単体のものであればアレニウスの式で表され指数関数になるが、単体によるものではないので単一指数関数にはなっていないが、ほぼ 2 成分の指数関数の足し合わせのような形となっている。

ムース状に変化したものの動粘度は 10⁶ cSt 程度であり、-10℃における ISO グレード 1000 が対応することから、ムース状の代替材料を得ることができたと言える。また、流出して 2 日程度の原油の動粘度は 10⁴ cSt 程度で、ISO グレード 1000 (10℃) もしくは ISO グレード 460 (-10℃) 等で代替することができる。

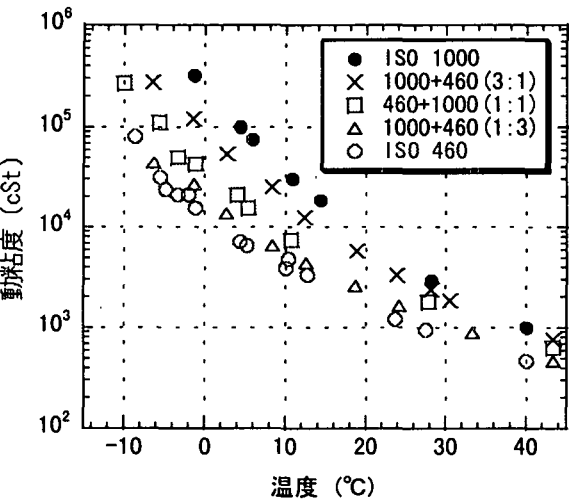


図-1 代替材料の動粘度の温度依存性

密度は温度に対してあまり変化しないことから、10℃における値を平均値として使用した（表-1）。これにより実験の安全性、再現性を確立することができた。回収方法について検討する場合、その粘度に対応した実験条件で行えることとなった。

表-1 代替材料の密度 (10℃)

混合比 (1000:460)	1:0	3:1	1:1	1:3	0:1
密度 (g/cm ³)	0.979	0.968	0.945	0.927	0.909

3. 回収に関する実験

ナホトカ号の事故で回収時に大きな問題となるのが流出油と同時に回収される海水の量が多かったことである。海水を多く含むと陸上におけるピットも巨大になり、また輸送回数が増え、回収サイクルも遅くなってしまう。そのため、ナホトカ号で高効率の回収実績を示したガット船及びグラブ船とバージの組み合わせによる回収を想定して、より回収効率を高める方法に関する基礎的実験を行った。この目的は次の 2 項を満足する必要がある。

- ①水面に浮いている油を 1 回に広い面積で回収する
グラブの開発を行い、回収効率を高める
 - ②可能な限り、回収時に流出油と海水を分離し、ピットに輸送する
- ①、②を満足する方法として、グラブを軽くまた面積も広くし、②の水と油を分離するため、穴もしくはスリットを設け、回収時に油のみにすることである。そのため次のような実験を行った。

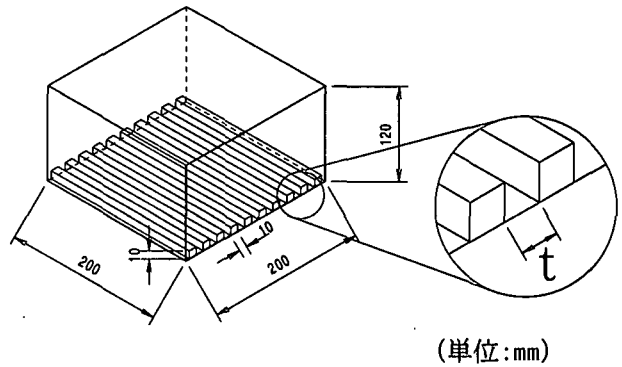


図-2 回収箱の形状

(1) 加速度の測定

回収時の流出油の漏れを再現するためグラブ船（紋別港）及びガット船（石狩湾新港）のグラブやバケットの鉛直加速度をビデオで撮影し、解析した。またそのサイクルタイムを測定した。

その結果、グラブ船におけるその加速度は最大で約 1.0m/s^2 、ガット船では約 5.0m/s^2 であった。引き上げから積込までに要した時間はそれぞれ 30 秒、25 秒であり、回収実験においては、油は 5.0m/s^2 の加速度で引き上げた後、30 秒置けば終了してよいことが明らかとなった。

(2) 回収実験方法

グラブ船による回収率の向上のため、水を分離する方法について検討した。水を通し、油のみを回収するため、図-2 に示すような装置により水面上（水温： -2°C ）に浮いたムース状と同等の粘度を有する代替材料をすくい、回収効率を調べた。

この時のスリット間隔は 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20mm、棧の幅は 1 cm とした。実験にはロードセルと加速度計を装着し、油圧ジャッキにより回収箱を引き上げ、その荷重と加速度を測定し、この装置で代替材料をすくう際には調査で得られた加速度・滞空時間に合うように実験を行った（図-3）。

油と海水の分離状況に注目して次の項目ごとに系統的に行った。

- ① 油の粘度を変化させた時の回収率
- ② スリットサイズの違いによる回収率
- ③ 油厚の違いによる回収率及び油の出始める時間

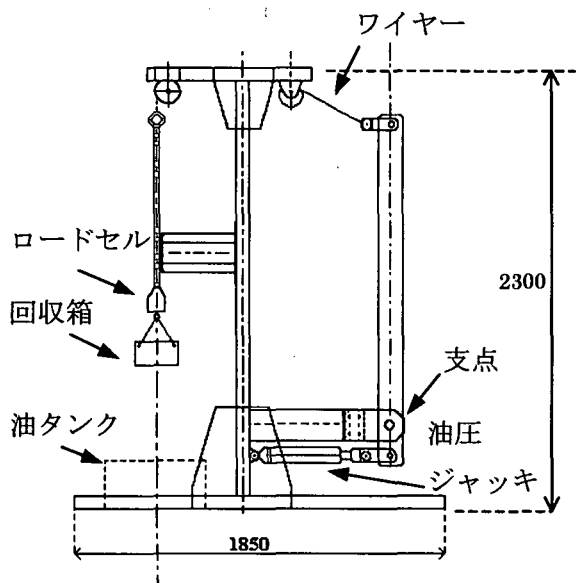


図-3 回収装置の概要

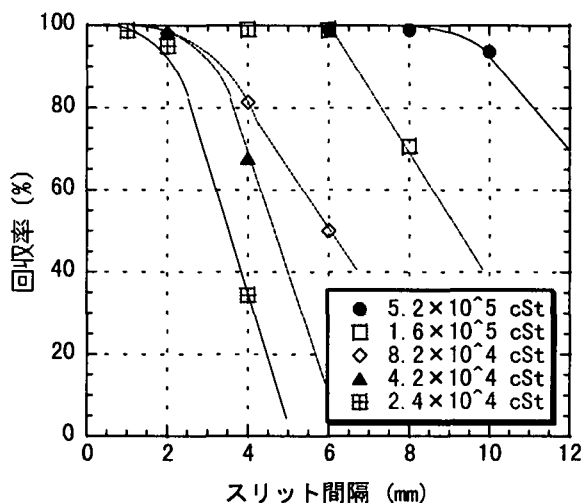


図-4 回収率のスリット間隔依存性
(油層厚；5.5cm)

油厚に関しては、実際に流出油をオイルフェンスで集めた時のことを想定しなければならない。回収時の油厚が 3cm である場合にはグラブにてすくった時には約 2 倍となり、6cm となる。今回は 2~8cm までの油厚で行った。スリット面における油の荷重は油厚に依存するため、油厚の違いによる回収率及び油の出始める時間を調べた。代替材料は、表-1 に示した 5 種類の油を用い、油温 -4.0°C で行った。引き上げは油がほぼ均一に広がった後に行い、その回収量は回収箱の上端からの高さを測定した。

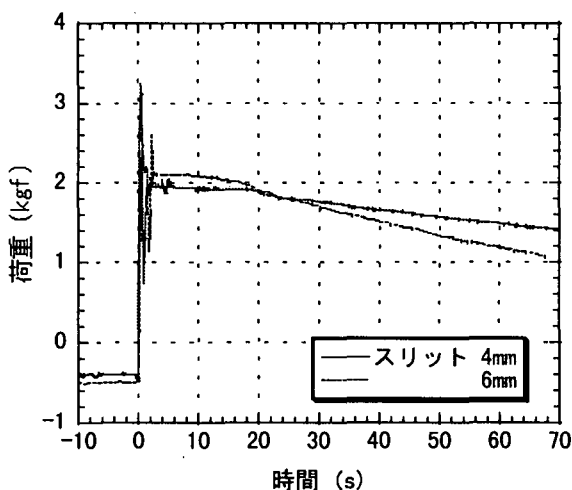


図-5 引き上げ時の荷重
(油層厚；約 5cm、動粘度； 8.2×10^4 cSt)

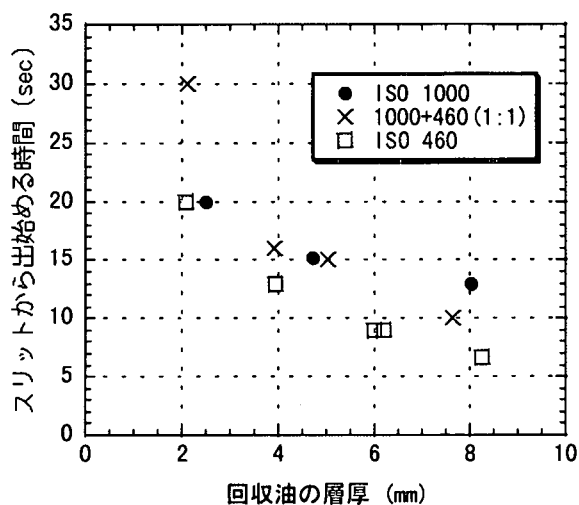


図-6 回収油の層厚の違いとスリットから出始める時間の関係

(3) 回収実験結果

回収結果から 2×10^4 cSt 程度であれば 2mm のスリットで十分に回収可能であった (図-4)。しかし、4mm のスリットにおいては帯状になってスリットから落ち、その結果、回収率は約 35% 程度となった。この程度の粘度であれば 2mm のスリットが有効である。 8×10^4 cSt の時、4mm スリットで 81%、6mm スリットでは約 50% となる。これは回収時間が 30 秒の場合であり、6mm スリットでは 1 分後に 25% となり、著しく低下する (図-5)。ここで、投入量はスリット 4, 6mm でそれぞれ 1.898, 2.165kg である。

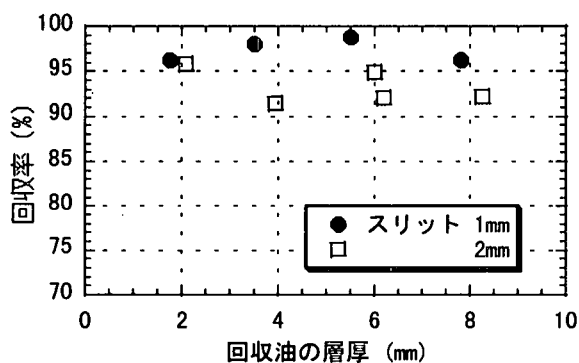


図-7 回収油の層厚と回収率の関係 (動粘度 ; 2.4×10^4 cSt)

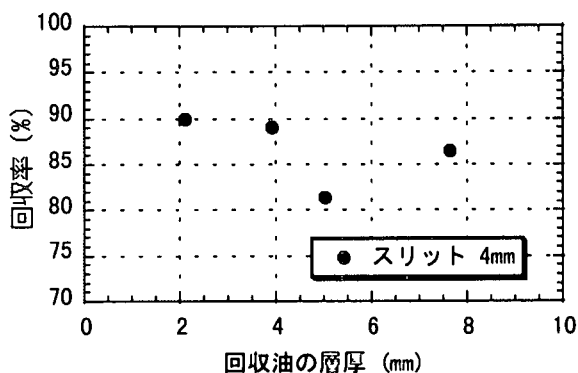


図-8 回収油の層厚と回収率の関係 (動粘度 ; 8.2×10^4 cSt)

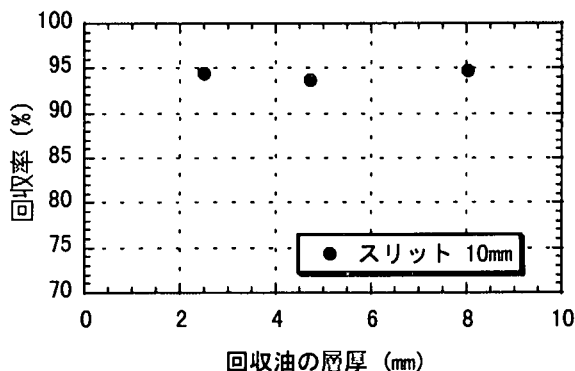


図-9 回収油の層厚と回収率の関係 (動粘度 ; 5.2×10^5 cSt)

この図では、回収箱の重量は差し引いているので、引き上げ後は油と海水の重量の和が表される。回収箱から帯状に落下した油の重量は下に用意した皿に付くまでロードセルは荷重を計測するため、回収量とは一致しない。スリットから落ち始めるとその落下量は経過時間に伴ない増大するため、すくい上げて空けるまでの回収時間が長びいた場合でも回収率の低下があまり問題とならないよう、回収率は 80% 程度以上となる組み合わせの方が良い。

また、動粘度が 1×10^5 cSt の時には 6mm、 5×10^5 cSt の時には 10mm のスリットが使用可能である。

油厚の違いによる回収効率は、あまり変化は見られなかった。スリットから油が出てくる時間はスリット面における油の荷重による違いで早くなるが、全体量も多いのであまり回収効率には影響しない (図-6 ~ 9)。このことから、ナホトカ号の事故の際にはオイルフェンスにより集められた時の流出油の厚さが約 7cm であったので、回収時に倍の 14cm としてもさほど回収率は低下しないと考えられる。

スリットから排水される時間はスリット間隔によって異なるが、5 秒程度で完了する。1, 2mm では隙間が狭いことから油が目詰まりを起こし、他に比べやや遅いが完全に排水される。グラブを改良して行うのであれば、スリット間隔が大きい場合、排水のためには今回行ったような均等なものではなくて、数カ所あれば十分であると考えられる。また、回収率は高まると考えられる。

グラブ船におけるグラブの軽量化はその回収面積を広くするためである。比重の大きい土砂の浚渫を目的としたグラブに比べ、油は比重が 1 以下であるから回収する容量が 2 倍になっても、グラブの重量の面では支障がない。グラブの総重量としてはあまり軽すぎると安定性及び施工速度が遅くなってしまうため、あまり変わらない方がよい。

回収回数の違いによるスリットからの分離率を調べた。この結果、1 回目はスリットに付着するため、投入量に対し分離率は低いが、2 回目から分離率は向上し、回収率とほぼ同等となった。

(4) 原油のエマルジョンについて

流出し、風化して砂浜に打ち上げられた原油はムース状を呈し、30～80%の海水を含有していることから²⁾、原油と海水を 1:3 の比率で家庭用ミキサーを用いて攪拌した。実海域で起きるエマルジョンと同等とは考えにくい、チョコレートムース状となった。このエマルジョン (-1.0℃) を用いて同様に引き上げ実験を行った。

この結果、1cm のスリットでは約 95%の回収率となった。代替材料の様に帯状には落下せず、半固形物といった感じで、ある程度の固まりとして落下した。この際、海水との分離は非常によく行われた。

また、2cm のスリットを用いた場合には約 5 秒後に急激にほぼ全て落下した。海水との分離がよく、回収箱にもあまり付着しないため、この様な時にはスリットをあまり広く取る必要がない。

4. 結論

①蒸発・乳化した原油（ムース状）を作成する代わりに、各粘度のギアオイルの混合比と環境温度を調節することにより蒸発・乳化した原油の代替材料を作ることができた。また、この動粘度の範囲は 355cSt～10⁶ cSt となり、ムース状に変化し

たものまでを含んでいる。これにより実験の安全性、再現性を確立することができた。回収方法について検討する場合、その粘度に対応した実験条件で行えることとなった。

②ガット船、グラブ船における回収時の油に作用する最高加速度は引き上げ初期に発生し、その値はガット船では 1.5～5.0m/s²、グラブ船では 0.5～0.7 m/s² となった。またそれぞれのサイクルタイムは 25 秒、30 秒であったことから、回収実験においては、油は 5.0 m/s² の加速度で引き上げた後、30 秒置けば終了してよいことが明らかとなった。

③対象とする劣化・変質した原油に対する回収効率、実験用回収箱の簀の子のスリット幅は引き上げ加速度 5.0 m/s²、滞空時間 30 秒の場合、動粘度が 10⁴cSt で 1mm、10⁵cSt で 6mm、10⁶cSt で 10mm となった。この時、引き上げ時と滞空時を合せると、回収箱から流出した油は全量の約 1 割以下で、残留水は回収した油の 3 %以下であった。

④実際の回収では粘度の高い油では、すのこ状にしたグラブにより行えることが明らかになった。グラブ自体が軽量化できるため、通常のものに比べ面積が大きくでき、作業半径が大きくとれる。また、通常の作業のような砂・石の積込と異なり、油はある程度均一となるためグラブ面積が大きいても支障がないことも明らかとなった。

参考文献

- 1) E.L.Brannon: Perception or reality: oil spill risks on salmon, *Oil and Hydrocarbon Spills, Modelling, Analysis and Control*, Proc of The first international conference on oil , pp.241-252, 1998.
- 2) (財)シップ・アンド・オーシャン財団: 海上流出油の風化について, 平成 7 年(1995) 8 月, pp.29-44.

(1999. 4. 19 受付)