

# バケットを利用した流出油の回収に関する 基礎的研究

## FUNDAMENTAL STUDY ON RECOVERY ON METHOD FOR SPILLED OIL BY USING A BUCKET

宇佐美宣拓<sup>1</sup>・大塚夏彦<sup>2</sup>・荻原浩二<sup>3</sup>・米田克幸<sup>4</sup>・佐伯浩<sup>5</sup>

Norihiro USAMI, Natsuhiko OTSUKA, Kouji OGIWARA,  
Katsuyuki MAITA, Hiroshi SAEKI

<sup>1</sup>正会員 北電興業(株) (〒060-0031 札幌市中央区北1条東3丁目1番地)

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

<sup>3</sup>学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>4</sup>正会員 (株)西村組 (〒094-0012 北海道紋別市新港町2丁目)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

There are currently offshore oil and natural gas drilling projects being carried out in the Sea of Okhotsk near the northern part of Sakhalin. Following a small-scale oil spill that occurred soon after oil production started due to a detached hose on the oil deservng tanker, there has been an increased awareness of the risk of a major oil spill affecting the coastal areas of Hokkaido on both the Japan Sea and Okhotsk Sea sides. The recovery of spilled oil in the sea is greatly affected by weather conditions, sea condition and the viscosity of the oil. Authors have developed a new efficient method for the recovery of spilled oil, and basic experiments were carried out in this study to test the effectiveness of this method.

*Key Words : Oil Spill, Recovery Method, Bucket*

### 1. 研究の目的

1999年よりサハリン北部オホーツク海沿岸で始まった石油・天然ガス開発において、生産開始直後に貯蔵タンカーからホースが外れ、小規模ではあるが、原油の流出事故が発生した。もし大きな流出事故が発生した場合、原油の漂着によって北海道の日本海側、並びにオホーツク海沿岸地域が被害を受ける危険性が指摘されている<sup>1)</sup>。海洋に流出した油の回収の難しさは、ナホトカ号の事故による回収事例が顕著に示しており、気象、海象、油の粘度によって回収効率が大きく影響される<sup>2)</sup>。著者等はこれまでに、比較的高波浪な条件でも回収実績のあるガット船・グラブ船によるバケットを用いた高粘度の油の回収に際し、海水と流出油を分離し、流出油のみを効果的に回収する方法を提案してきた。

本研究は、これら高粘度の流出油に関する回収方法の改良を行うとともに、同方法による、低粘度流出油の回収への適応性について検討したものである。

### 2. 高粘度油の回収実験

#### (1) 回収箱の作成

昨年度までに著者らは、バケットの模型である底面にスリットを設けた回収箱を用い、高粘度油の回収を対象とした回収実験を行ってきた。すなわち、バケットが油を掴んで閉じた状態を想定した回収箱の中に、油の浮いた海水を入れて引き上げると、はじめにスリットより海水が排出され、その後油が流れ出るまでの時間差が生じる。実際には、この時間差を実際の作業のサイクルタイムに合わせることで、効率的な回収をはかるも

のである<sup>3)</sup>。しかしながら、スリット方式では異なる粘度の油に対してはスリット幅を変化させるほか方法がなく、油の粘度変化に対し細かな対応は困難であった。

そこで、回収装置の底面に粘度に応じた径の孔を有するステンレス板を取りつけることで、回収性能の効率化を図ることにした。

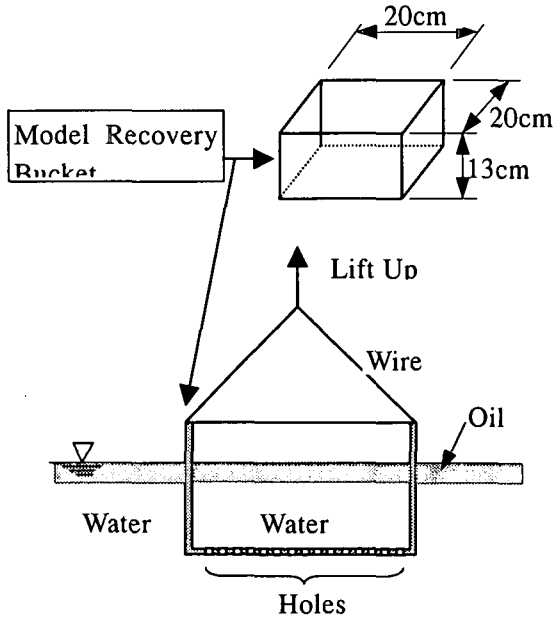


図-1 回収箱

今回製作した回収箱は図-1 に示すように、底部に市販のパンチング丸抜き版を用いた、縦 20cm、横 20cm、深さ 13cm のステンレス製の容器である。回収効率や油の排出時間等について調べるため、底面の孔の直径と個数、板厚を変えた底板を準備した。今回使用した回収箱の形状一覧を表-1 に示す。直径の影響については、直径を 2、3、4、5、8、10、15mm (板厚 1.5mm、空隙率約 30~35%) の 7 ケース、空隙率の影響は、空隙率約 10、20、33、40、51% (板厚 1.0mm、直径 3mm) の 6 ケース、板厚の影響については、厚さ 0.8、1.0、1.5mm (直径 3mm、空隙率約 33%) の 3 ケースについて回収箱を作成した。(底面面積に対する孔の総面積の比を空隙率とする)。

(2) 引き上げ回収実験

実験は、回収箱を-2℃の海水で満たしたタンク中にセットした状態で、回収箱内に予め-4℃に冷却した油を 1200cc 投入し、一定厚さ (3cm) に広がった時点で鉛直上方に引き上げる方法で行った。回収箱の引き上げには図-2 に示す回収箱引き上げ装置を用いた。

測定項目として海水の排出が完了する時間、続

いて油が漏れ始める時間を計測した。また、回収装置と回収箱との間に荷重計を介し、回収箱内の海水と油の総重量を約 2 分間計測した。

使用した油は、2 種の工業用ギアオイル (ISO 粘性グレード 460、1000) を 5 : 1、3 : 1、1 : 1、1 : 3 の比率で混合し、それぞれの単体も含め計 6 種の粘度を有する油を作成し使用した。その温度と動粘度の関係を図-3 に示す。

表-1 回収箱の底面形状

		板厚 (mm)	直径 (mm)	空隙率 (%)
影響の板厚	A-1	0.8	3	33
	A-2	1.0	3	33
	A-3	1.5	3	33
直径の影響	B-1	1.5	2	30
	B-2	1.5	3	33
	B-3	1.5	4	30
	B-4	1.5	5	35
	B-5	1.5	8	34
	B-6	1.5	10	33
	B-7	1.5	15	33
空隙率の影響	C-1	1.0	3	10
	C-2	1.0	3	20
	C-3	1.0	3	33
	C-4	1.0	3	40
	C-5	1.0	3	51

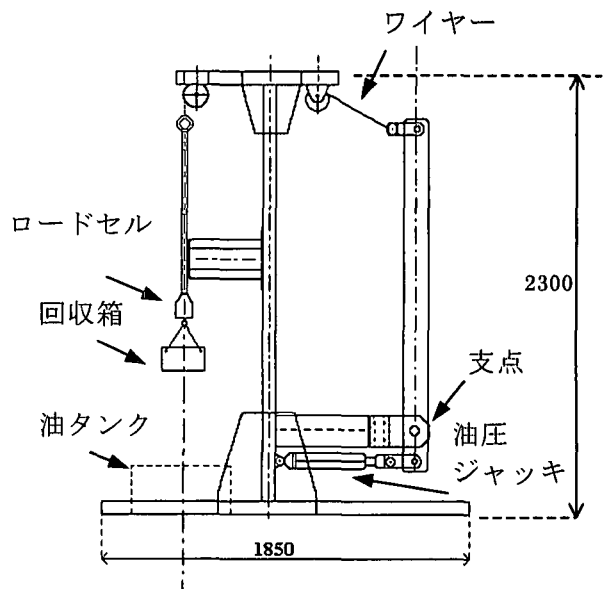


図-2 回収箱引き上げ装置

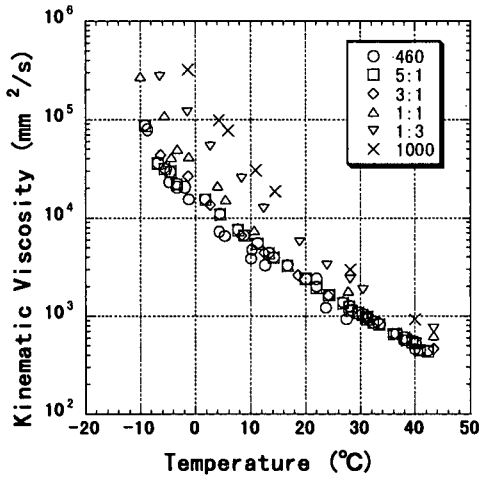


図-3 ギアオイルの温度-動粘度関係

### 3. 高粘度油の引き上げ回収実験結果

#### (1) 板厚の影響 (CASE-A)

回収箱を引き上げると、1~2 秒程度で海水は底面の孔より排水され、その後油が出始めるまで一定の時間差が生じた。海水の排水がほぼ完了した後、回収箱の下方にトレイを設置し、孔より漏れ出す油を回収した結果、その中に含まれていた海水は体積比でおおむね 3~5% 以下であった。ここで、引き上げ後 30 秒後に箱内に残っている油の量を、引き上げ前に回収箱に投入した油量に対する割合を回収率と定義し (ガット船・グラブ船の作業状況調査より、1 回の回収に要するサイクルタイムが約 30 秒であったため)、底板の板厚を変えた場合の回収率を図-4 に示す。

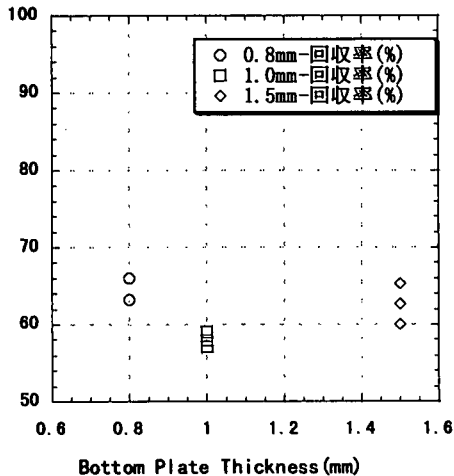


図-4 回収率と底板板厚の関係

使用した油は動粘度  $2.4 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  の油 1 種である。板厚が増加し、孔が円管状になると、壁面より受ける摩擦が増加し、回収率に影響を与えると考えられるが、今回使用したパンチング板の板

厚の範囲ならば、回収率に与える影響はそれほど大きくないことがわかる。また、一度回収に使用した回収箱は、目詰まりを起こすことなく、2 回目以降の回収においても海水の排水は 1 回目と同様に行うことができた。

#### (2) 孔直径の影響 (CASE-B)

次に、孔の直径が与える影響についての結果を示す。本来は海水の排水が完了した時点を目安として、油が出始めた時間を決定すべきであるが、今回は海水の排水時間が 1~2 秒程度と非常に短かったため、引き上げの時点を目安として、油の出始める時間を求めた。使用した油は動粘度  $2.4 \times 10^4$ 、 $3.0 \times 10^4$ 、 $4.2 \times 10^4$ 、 $8.2 \times 10^4$ 、 $1.6 \times 10^5$ 、 $5.2 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$  の 6 種のギアオイルで、実験結果を図-5 に示す。これより、直径が増加するにしたがって、各動粘度の油とも、孔より出始める時間が急激に短くなっていることがわかる。回収に必要な時間差を得るためには、対象とする油の動粘度に合わせ、孔の直径を適切に選択する必要がある。

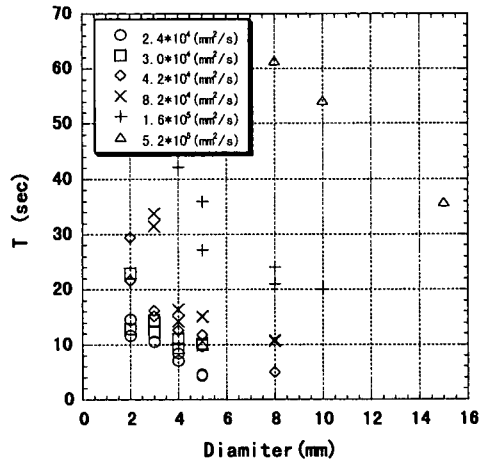


図-5 油が出始める時間に対する直径の効果

#### (3) 空隙率の影響 (CASE-C)

動粘度  $2.4 \times 10^4$ 、 $4.2 \times 10^4$ 、 $8.2 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  の 3 種の油を用いて、水の排出が終わった後に油の出始める時間と底板の空隙率の関係に関する実験を行った。実験結果を図-6 に示す。動粘度  $8.2 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  のケースについては実験回数が少なく、データがばらついていて判断しにくいですが、 $2.4 \times 10^4$ 、 $4.2 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  の油を用いた実験結果から、空隙率は油が出始めるまでの時間に影響を与えないことを示している。

一方、回収箱をオリフィスとみなせることより、空隙率は油が出始めてからの流量を決定する。図-7 に空隙率 10%、と 51% の回収箱を使用したとき (動粘度  $2.4 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) の荷重の時間変化を

示す。これより、空隙率が大きい方が、油が出始めてから荷重（回収箱内の油の重量）の減少する割合が大きくなることがわかる。

実際の回収の際には、バケットの規模が大きくなると、油と共にすくう海水の量が増し、海水を排出する時間は大きくなると考えられる。空隙率は、海水の排水時間を決定する重要な要素となる。

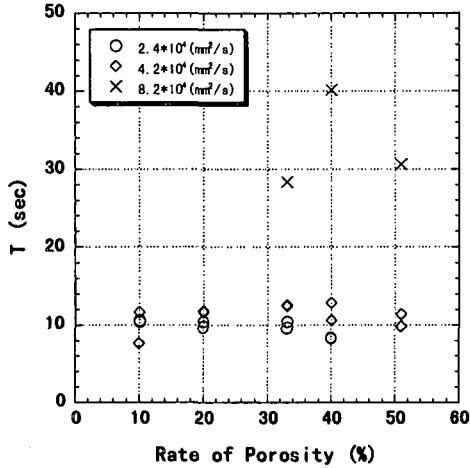


図-6 油が出始める時間に対する空隙率の効果

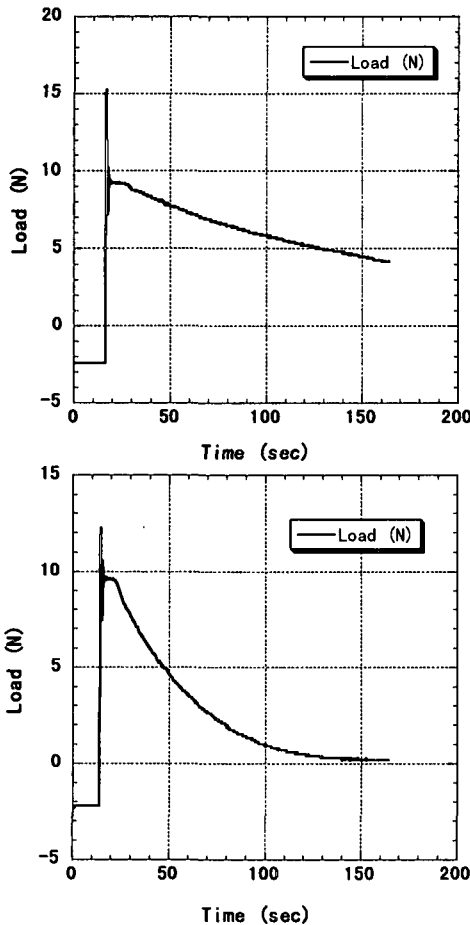


図-7 荷重の時系列

(上：空隙率 10%、下：空隙率 50%)

#### 4. 低粘度油の円管通過実験

##### (1) 低粘度油の回収方法

前述の実験結果より、動粘度  $4.2 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  以上の高粘度油の回収は、回収に要する時間を 30 秒とすると、ほぼ油のみ回収することが可能であった。しかし、さらに動粘度の低い油については、油の出始めるまでの時間が短く、回収作業中に油が出始める恐れがある。流出直後の比較的粘度が低い段階の原油では、底面に市販のパンチング板を使用したバケットを用いての回収は難しいと考えられる。

そこで、バケットを利用した回収方法を低粘度の油に対応させる方法として、板厚を増加させ孔を円管状にすることで、壁面からの摩擦を利用し、孔より油が出始める時間を遅らせる方法を考案した。これに円管を流下する粘性流体の式を適応し理論的な計算を行うとともに、基礎的な実験を実施し、理論値との比較を行った。

##### (2) ハーゲン-ポワズイユの法則の適応

油をニュートン流体と仮定すると、図-8 に示す直立する円管内を流下する粘性流体に作用する力のつりあい式は、以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} p\pi r^2 - \left( p + \frac{\partial p}{\partial s} ds \right) \pi r^2 + \rho g \pi r^2 \cdot ds \\ - 2\pi r \cdot \tau \cdot ds = 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\tau = -\mu \left( \frac{du}{dr} \right)$$

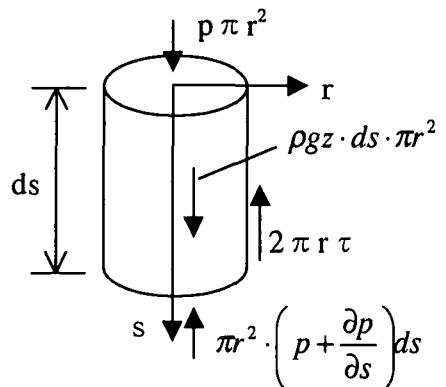


図-8 微小円筒に作用する力

管路内に存在する油量は、バケット内に存在する油量と比べ微小であると考え、最初に油が管路を通過する間、バケット内の油厚  $h$  は変化しないと仮定し、管内平均流速  $V$  を求め、板厚  $l$  で流速を除すことで油が管路を通過する時間  $T$  を求めると以下の式になる

$$Q = \frac{\pi g}{8\nu} \left( 1 - \frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial s} \right) a^4 \quad (2)$$

$$V = \frac{g}{8\nu} \left( 1 + \frac{h}{l} \right) \cdot a^2 \quad (2)$$

$$T = \frac{l}{V} = \frac{8\nu l^2}{a^2 g (l+h)} \quad (3)$$

ここに、  
 $a$  : 管路の半径  
 $\nu$  : 油の動粘度  
 $g$  : 重力加速度  
 $h$  : バケツ内の油厚  
 $l$  : 板厚 (管路の長さ)

### (3) 円管通過実験

前節で示した式より、油が出始めるまでの時間を孔の直径、板厚により調整することは理論的には可能となる。しかしながら、(2) 式は油がニュートン流体と仮定した式であり、実験的に同式が成り立つか確認する必要がある。従って、以下のような室内実験を行った。

図-9 に示すアクリル製で孔を有した円板で底をした、内径 10cm、高さ 20cm のアクリル製円筒容器を準備した。これは円筒を横に倒して油を容器内に注入できる構造になっている。

円筒内に 800cc の油を注入した後、円筒を鉛直に立て、底面の孔より油が出始める時間を目視により計測した。また出始める時間が短いものについては、下方に電子ばかりとトレイを設置し、流下する油の重量を計測することでその流速を求め、管内を通過するのに要する時間を求めた。

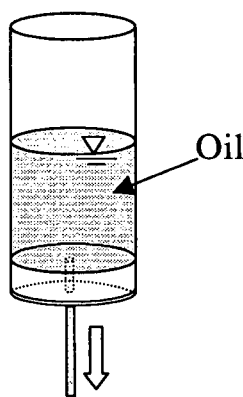


図-9 円管通過実験

使用した油はギアオイルであり、温度条件を変化させることで動粘度約 20、60、470、1000、1800、2500、3100、7200  $\text{mm}^2/\text{s}$  の状態の油を使用した。底面の円板は孔の直径の効果と板厚の効果を調べる為、板厚 3cm の条件下で直径 1、3、5mm の円板、

直径 3mm の条件下で板厚 1、3、5cm の円板を使用した。

直径の効果について図-10 に、板厚の効果については図-11 に示す。横軸に油の動粘度、縦軸に油が出始めるまでの時間を示しており、(3) 式の計算結果を直線で、実験結果をプロットで示す。図より、実験結果は理論計算結果と非常に良く一致しており、これは動粘度  $10 \sim 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  の油はニュートン流体としての性質を有することを示している。従って、対象とする油の粘度に応じて、孔の直径、底板の板厚を調整することで、油が出始める時間を理論的に決定することが可能となった。

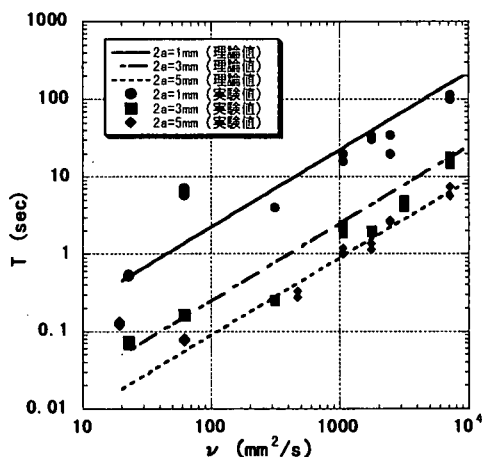


図-10 円管通過実験実験結果 (直径の効果)

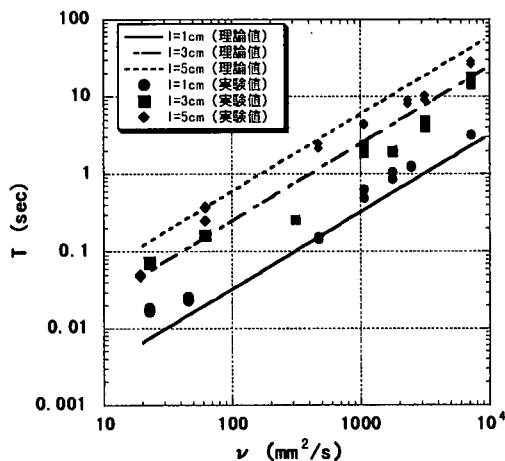


図-11 円管通過実験結果 (板厚の効果)

## 5. 結論

1) バケツの模型として、市販のパunching板を底面とする回収箱を作成し、海水排出後油が出始めるまでの時間差を利用し、油のみを回収することを目的とした、高粘度油を対象とする室内回収実験を行なった。孔径、及び孔の個数を調整す

ること、動粘度が  $4.2 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  以上の油については、油のみを回収可能であることを示した。

2) バケットを用いた回収方法を動粘度が  $4.2 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  以下の低粘度流出油に適応させるため、底面の板厚を増加させる方法を考案、板厚の増加が油の出始める時間に与える影響を調べるため基礎的な実験を行った。また、油をニュートン流体と仮定し、ハーゲン-ポワズイユの法則を用いて油の出始める時間について理論式を導いた。実験結果と、理論値の比較を行ったところ良く一致しており、実験結果より  $10 \sim 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$  の範囲の動粘度を有する油は、ニュートン流体としての性質を示すことが明らかとなった。

3) 以上より対象とする油の粘度に応じ、適当な孔の直径と管路長、即ち板厚を選択することで、油が出始める時間を調整することが可能となった。一方、バケット内の海水は、オリフィス計算より、排水時間が求められ、また孔の個数（空隙率）によって調整可能である。従って1回の回収作業に要する時間から、水の排水時間と油の出始める時間を決定することで、バケットを用いて油のみを効率的に回収することが可能となった。

4) 海上に流出した原油の回収に、今回の回収方法を用いる際、実際の回収作業に取りかかるまでに要する時間を考慮し、流出後3日～1週間程度後の変質した原油の粘度に合わせ、今回の研究結果よりバケットの底面形状を決定すると効果的であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Ohtsuka, N., Takahashi, S., Kawai, K., Tokunaga, M., Ohshima, K., and Saeki, H., Economical and Environmental Impacts on the Coast of Hokkaido Due to Sakhalin's Offshore Oil and Gas Development, TECHNO OCEAN '98 INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Japan, pp.373-376, 1998.
- 2) Proceedings of International Symposium on Marine Oil Spill Response, Editor: Seizo Matora et al. 1997, Tokyo
- 3) 高橋伸次郎、米田克幸、大島香織、大塚夏彦、佐伯浩：流出した原油の回収に関する基礎的研究、海洋開発論文集、第15巻、pp553-557、1999