

# 気泡を用いた水中流出油回収装置

海洋開発研究領域 \* 金田 成雄、泉山 耕、宇都正太郎  
下田春人、若生大輔

## 1. はじめに

近年、サハリン大陸棚における油・ガス資源の開発活動が本格化を向かえているが、この資源開発の活発化はエネルギー需給の多角化を図りたい我が国にとっては望ましい状況にあらう。しかしその一方、石油開発現場や輸送中の油流出事故による海洋汚染が危惧されているのも現実である。油流出事故の悲惨さは言うまでもないが、海水の存在する冬季オホーツク海では、この海水が流出油の回収作業を阻害し、また事故の要因にも成りうる。回収作業は、特に海水存在下で油流出事故が起きた場合、従来の油回収手法では対応が極めて困難であり、新たな技術開発が求められている。

当所では、これまで油回収作業上、最も困難と思われる氷盤下面に油が流出した場合を想定し、気泡上昇噴流による氷と油の分離手法について、その有効性を検証して来た。今回、新たなプロジェクトにより本格的な研究へ移行し実験を行ったので、ここにその成果を報告する。

## 2. 氷と油の分離原理

本研究にて開発を進める水中流出油回収装置は、図1に示すように空気泡を用いて氷と油の分離を行う。気泡は水中より発生させ、これにより以下の3種類の原理で氷と油を分離させる。

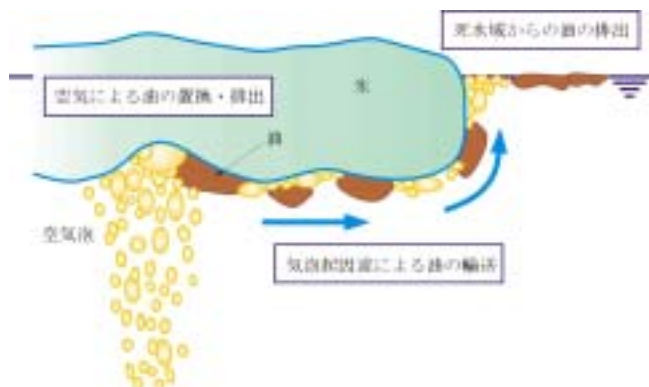


図1 気泡を用いた氷と油の分離原理

### 気泡による油の置換・排出

水中に放たれた気泡は上昇し、氷盤下面に到達する。この時、空気と油との密度差により氷盤下面の凹部に存在する油を気泡が置換し排出する。

### 気泡起因流れによる油の輸送

気泡の上昇に伴い起因された水中の流れは、氷盤下面に到達した時点で水平流れへと変換される。氷盤下面の凹部から排出された油は、この気泡起因の水平流れにより、氷盤側縁部へと輸送される。

### 氷盤側縁（死水域）からの油の排出

水平流れは、氷盤側縁部において開水域へと到達する。この時、氷盤側縁部近傍の水域表面には死水領域が形成され、ここに油が滞留する場合があるが、気泡の流入によりこのような油も死水領域から排出される。

## 3. 水中流出油回収装置概要

本実験は、当所の氷海船舶試験水槽（幅 6m、水深 1.8m、長さ 35m：以下、氷海水槽）において実施した。実験に用いた水中流出油回収装置（約 6×5×2m）の模型の概略を図2に示す。

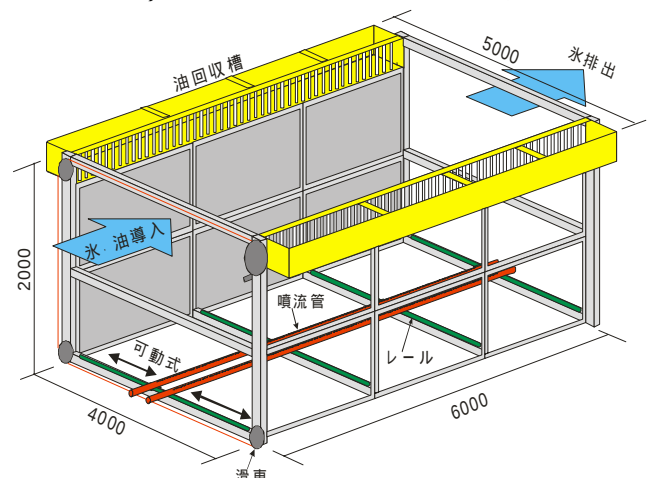


図2 水中流出油回収装置の模型概略

氷と油を分離させる本装置の一連の流れとしては、まず図中左側にある導入口から氷と油を装置内に入れ、両側にあるゲートを閉めて上昇噴流により氷と油を分離する。油回収槽内に流れ込んだ油は、回収槽内にセットしてある回転ドラム式油回収機により回収する。油と分離された氷は図中右側のゲートを開けて装置外に放出するというものである。

本装置は、実機において装置自身で浮く構造を考えているため、装置の外側に浮体を設置することを想定しているが、本実験では氷海水槽の規模を最大限有効に利用できるような水槽底部に設置させた着底型の模型とした。氷と油を分離させる水路（氷・油分離水路）の幅は4 m、長さは6 mであり、気泡を発生させる噴流管は装置下部の水深約1.7 mの位置に設置している。

### 3.1 噴流管

気泡による上昇噴流を放つ噴流管は2本あり、通常は模型の中心軸直下において動作させるが、必要に応じて模型中心軸から対称の水路幅方向一杯まで移動できるようレール上にセットされている。噴流管の移動は、模型両側の四隅（図中左側参照）にハンドル・滑車を取り付け、ワイヤーにより噴流管と結び、模型の両側同時にハンドルを回すことで行う。

長さ約6 mの噴流管には、空気の取り口が噴流管の両端と中央の3カ所があり、エアーフィルター、流量計、バッファタンクを介し、耐圧チューブによりコンプレッサーと接続している。

### 3.2 油回収槽

本模型両サイドに設置してある油回収槽は、幅40 cm、深さ34 cm、長さが約6 mである。前面が格子状（100 mm 間隔）のため、油や水は通すが格子幅以上の氷は通さない。格子には油の付着が少ないテフロン丸棒を使用した。

### 3.3 油回収機

本模型両サイドに設置されている油回収槽の底にはレールが敷かれ、回転ドラム式の油回収機（図3）がそれぞれ2台ずつセットされている。ドラムには直径270 mm、長さ1 mの塩化ビニール管を用い、図にあるようにアーチ状の取手部分を2本残して上部をカットしてい

る。本回収機はレール上にあるため、油の溜まっている任意の場所に移動でき、手でドラムを回転させることにより表面に浮いている油をドラム内に流し入れ、それをポンプにより回収することが出来る。

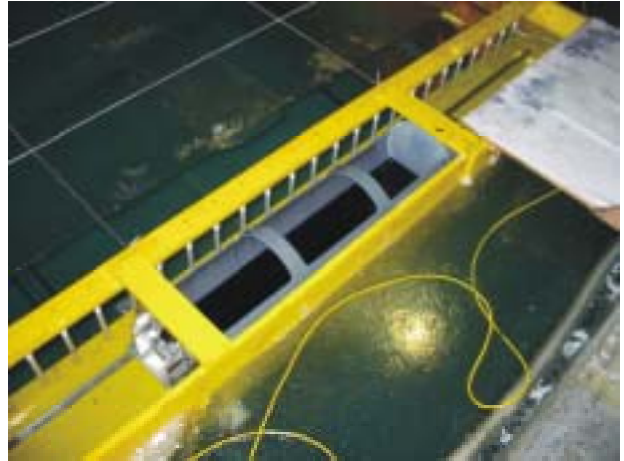


図3 回転ドラム式の油回収機

## 4. 気泡起因流れ

油の回収実験に先立ち、気泡発生による水面での水平流れについて計測を行った。空気流量は流量計を見ながらバルブで調整し、コックの開閉により気泡のON・OFFを切り替えた。実験に用いた空気流量は、コンプレッサーの容量及び気泡発生の一貫性という観点から、噴流管1本1 mあたり1.00～1.50 l/s/mの範囲の流量が適当であると判断した。そこで、この範囲の空気流量と気泡起因流速との関係について以下の計測を行った。

氷・油回収水路に氷が存在する状態では、氷板下面より30～300 mmまでの水平流れをプロペラ式流速計を用いて計測した。また、氷が存在しない開水状態での表面水平流速も計測した。この計測には、トレーサーとしてピンポン球を水面に投入してその運動を撮影し、そのVTR画像の解析により水平流速の計測を行った。

両者の計測結果をそれぞれ図4、5に示す。両者の水平流速分布は、解析方法が異なるため、直接的に比較することは出来ないが、両者はほぼ同程度の流速であると言えよう。また、表面流速については、空気流量との間にほぼ線形関係が見られることが判る。

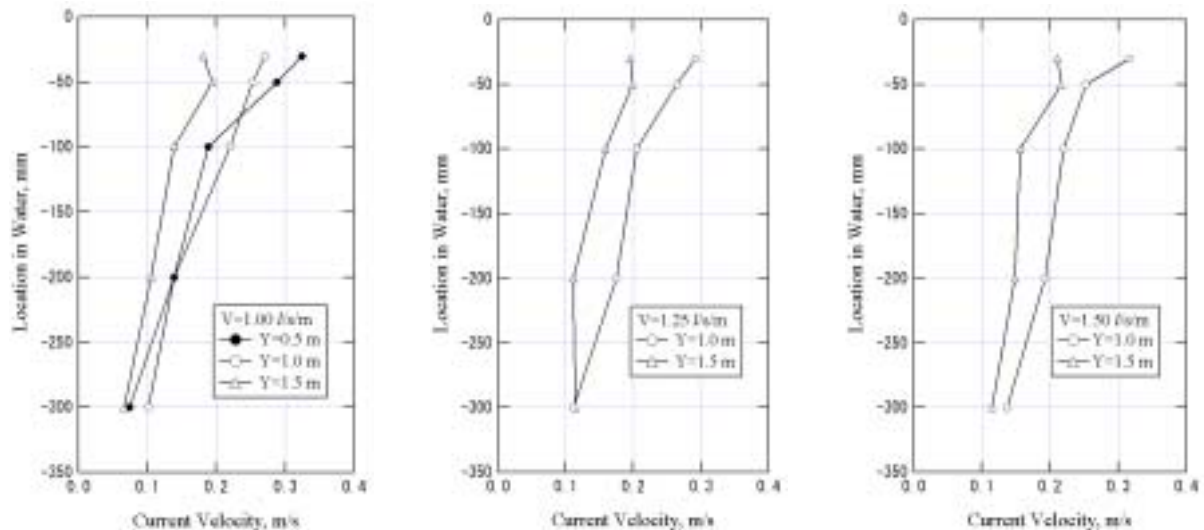


図4 氷-油回収水路に氷が存在する状態での水平流速分布

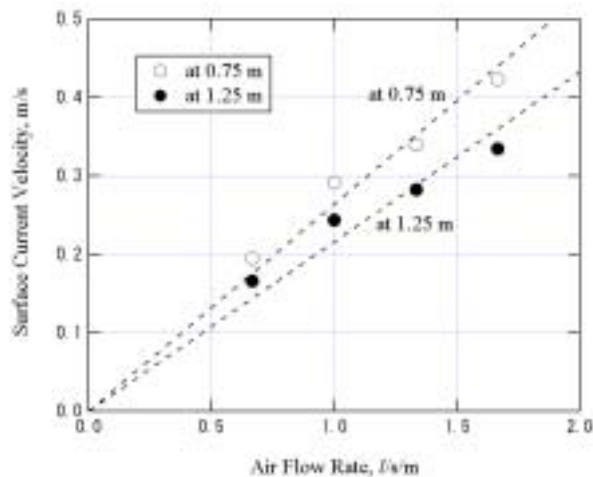


図5 開水状態での表面水平流速分布

## 5. 実験

実海域における海水の存在形態は多様であり、この中における油の流出シナリオも様々なものが考えられる。このため、本実験では、各種氷況に対する本モデルによる油回収特性を把握することを主要な目的としている。氷板形状その他は後述するが、以下の3種類の氷板について実験を実施した。

水平・平坦な氷板

凹凸がある氷板

- ・ 2次元凹凸
- ・ 3次元凹凸

小型な氷板群（水空き部に油が存在）

実験に用いた氷は、透明性を保ち氷板上から油の挙動を観測できる淡水氷を使用した。実験に

用いた供試油は機械用潤滑油で、0における特性は、密度： $890\text{kg/m}^3$ 、粘性係数： $0.120\text{Pa}\cdot\text{sec}$ である。また、油は視認性の向上を図り、着色剤を用いて黒色にしている。

実験では、VTRカメラを模型上部の天井と水中、側方上部の3カ所に設置し、氷と油の分離状況の観測を行った。気泡流量は1.00、1.25、1.50 l/s/mの3段階の流量に対して実験を行った。

## 6. 実験結果

本実験の解析に当たり、氷板下面に存在する油の排出についての定義は、以下の通りとした。

氷板下面の油の運動は、噴流管の直上からの距離の増大に伴い低速化し、油回収槽前面の氷縁部において下方向に向かう流れがあるため、油が停留する場合が少なくない。しかし、油の移動特性を把握するため、本装置の中心軸から1.5m離れた位置（計測基準線）を油の全量が通過した時点をもって油の排出と定義した。

### 6.1 水平・平坦な氷板

水平・平坦な底面を有する氷板は実海域では希であるが、このような氷板下面に存在する油の気泡流による排出実験は、本装置の特性についての基礎的知見を得る意味で重要である。図6は、模型側方上部から撮影したVTR映像から切り出した画像を示したもので、気泡発生前の様子である。気泡発生後、模型

中央部に存在していた油が気泡流により左右に排除されていく様子が観測され、気泡発生 60 秒後には、全ての油が氷板下面から排除される。

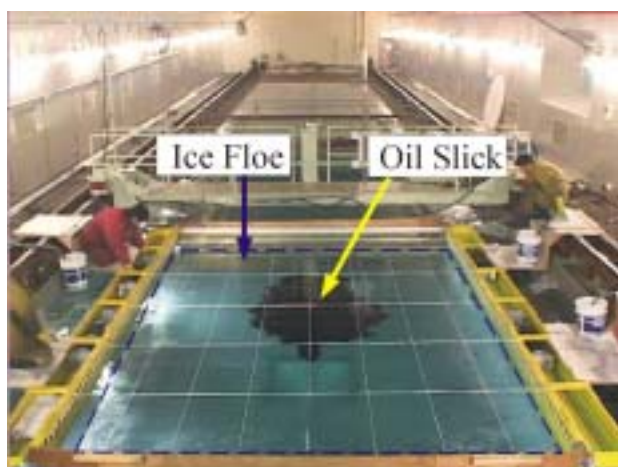


図 6 水平・平坦な氷板の気泡発生前の様子

氷板下面における気泡流による油の移動特性を把握するべく、それぞれの実験条件における水平・平坦な氷板下面からの油の排出時間を示したのが、図 7 である。

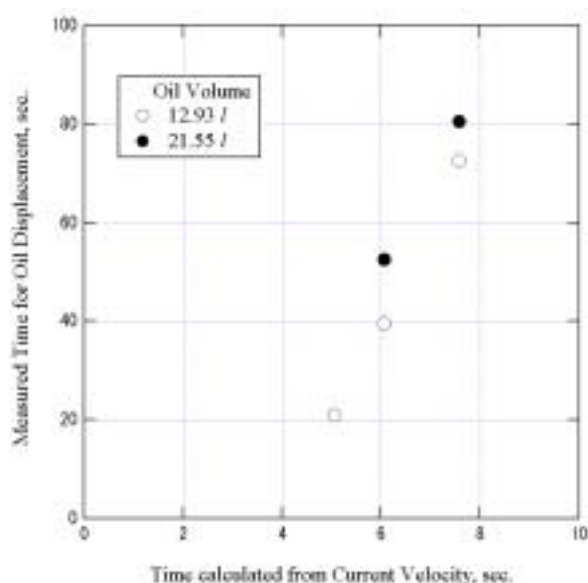


図 7 水平・平坦な氷板の油の排出時間

ここに、気泡起因の水平流れの流速は、図 5 に示した表面流の計測結果の中で本模型中心軸からの距離が 0.75m の位置でのデータの直線近似結果から求めた値である。気泡起因の水平流れについて、気泡流量及び流下距

離の両者に対して直線近似が成立するのであれば、この値を表面流の平均値として捉えることが出来る。図 7 は、気泡起因流の増大に伴い油の移動速度も増大することを示している。ただし、両者の差は大きく、油の排出には流れが到達する時間の 10 倍内外の時間が掛かっている。

## 6.2 2 次元的凹凸がある氷板

図 8 に 2 次元的凹凸氷板を用いた実験の様子を示す。この実験は、氷板底面に切り出した氷板を模型幅方向（図の左右方向）に重ねることで、氷の隔壁を作り、4 本の水路を形成し行った。隔壁により気泡流の挙動を 2 次元的なものとし、氷板下面の凹部からの油の排出を観測して気泡による油の排出を定量的に評価する目的で行ったものである。水路内には、隔壁と直角方向に凸部があり、油の移動に対する障壁となっている。氷板中央の 2 水路には、それぞれ 4 カ所の障壁があり、両側の 2 水路には 2 カ所の隔壁がある。実験開始時点において油は、隔壁と障壁に囲まれた中央部の 4 カ所の凹部に貯留されている。



図 8 2 次元的凹凸氷板の実験の様子

この実験についても、氷板下面からの油の排出時間を解析することにより結果を評価した。氷板下面からの油の排出は、凹部に気泡が溜まり置換されることと、油が水平流れに乗り氷板下面を移動することにより行われる。しかし、中央の 2 水路については、第 2 の障壁のすぐ外側に計測基準線が設けら

れている。また、両側の2水路についても、水路隔壁による横方向への油の拡がりや抑えられる効果により、前項に述べた状態よりも氷板下における油の移動速度は速い。このため、ここでは気泡による油の置換が油の氷板下面からの排出における主要なメカニズムと考え、これと排出時間との関係を見た。

2次元問題を考えると、氷板下面の凹部に油が存在しなかった場合に凹部全体が空気で満たされる時間  $T_0$  は、凹部体積  $V_c$ 、噴流管の単位長さ当たりの空気流量  $Q_A$  として、

$$T_0 = \frac{V_c}{Q_A} \quad (1)$$

で与えられる。氷板下面の凹部に油が存在する場合、油が水と同様の挙動を示すのであれば油の排出に要する時間は、これにより与えられる。しかし、油の挙動は当然のことながら水とは異なり、凹部からの排出時間も(1)式により与えられるものより遅れると考えられる。この遅延効果を考慮して、油の排出に要する時間  $T_D$  を以下のように書く。

$$T_D = C_D \frac{V_c}{Q_A} = C_D T_0 \quad (2)$$

ここに、 $C_D$  は油の遅延を表す係数である。

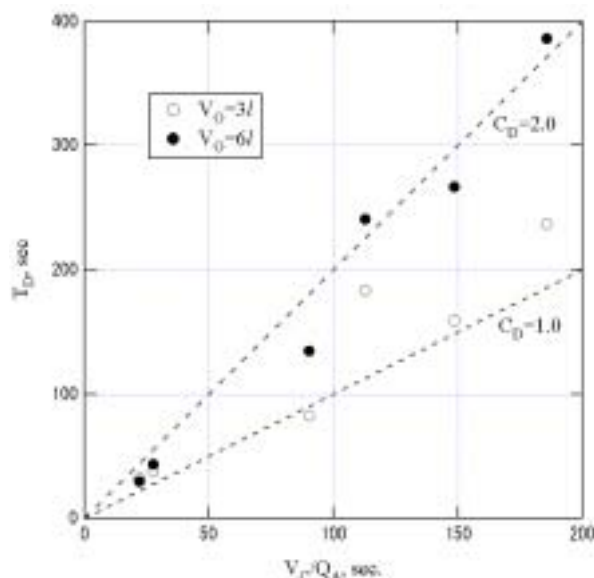


図9 2次元凹部からの油の排出時間

図9は、(2)式の形でデータを整理した結果である。図中の破線は、(2)式において、 $C_D=1.0$  及び  $C_D=2.0$  とした関係である。図

より氷板下面凹部からの油の排出に掛かる時間が油の体積に依存することが判る。油の体積が3lの場合には、油の排出に要する時間は  $C_D=1.0$  の場合を僅かに上回る程度であるのに対し、6lの場合には、油の排出には空気による凹部の置換に要する時間の約2倍程度の時間が掛かっている。このような油の排出時間の油の体積に対する依存性の定量的な説明は現段階ではできないが、油の体積が大きい場合には凹部の油の空気による置換というメカニズムの他に障壁を越える場合の流れへの影響も考慮しなければならないであろう。

### 6.3 3次元凹凸がある氷板

3次元凹凸の実験は、氷板下面に円形の凹部を設け、ここに油が貯留されている状態から気泡による油の排出を行った。図10に実験の初期状態を示す。氷板下面に5列全37カ所の円形凹部を設け、これら全てに油を貯留した状態に対して実験を行った。

気泡発生後、すぐに中央列の凹部から油が排除され、側方の列の凹部に流入する。経過時間は徐々に長くなるが、この現象が連続して起き、最終的に油は油回収槽に到達する。油量が多い場合、あるいは凹部が深い場合には、噴流管のシフトを行ったが、基本的には本手法による氷板下面の凹部からの油の排出効果を確認できたと言える。



図10 3次元凹凸実験の初期状態

### 6.4 小型な氷板群

氷板群中(平均氷板面積:  $0.72\text{m}^2$ )に出来

た水空き部分に油が存在する状態については、氷板群の密接度を 90% で氷 - 油分離水路内に存在させる状態で油を流出させ、油の排出実験を行った。

気泡発生前に油は、氷板間の水空き部分に拡がる(図 11)。気泡発生後、気泡起因の水平流れの影響により、油は側方へと移動するが、これと共に氷板群も移動し、油回収槽に向かって押し付けられる状態となる。氷が油に対するバリアーとして働き、油回収槽内に流入する油量は少ない。このため、一定時間経過した後には噴流管を中心軸から油回収槽側にシフトさせることで油の油回収槽内への流入が高まり、最終的には油の全量を回収することが出来た。しかし、氷板群の密接度や氷厚の影響により、油の排出時間は大きく異なるものと思われるので、今後、密接度や氷厚を変化させた更なる実験が必要であろう。また、氷が存在しない場合の手法による効果もある程度期待できるので、本装置との組み合わせという方向も現実的な手法として考えられる。

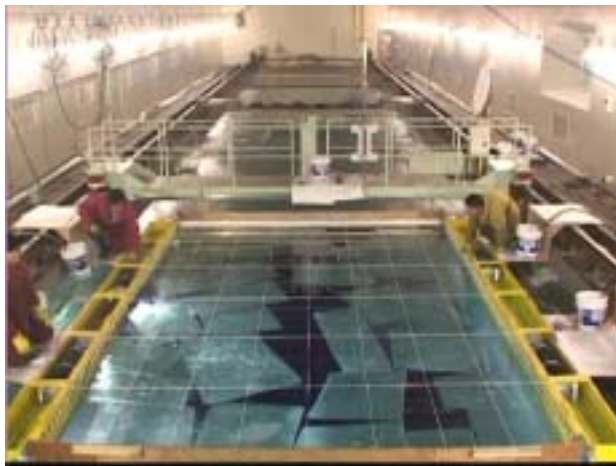


図 1 1 小型氷板群の実験の初期状態

## 7. おわりに

3 種類の氷況に対する油回収実験の結果と今後の課題をまとめると以下ようになる。

水平・平坦な氷板下面に油が存在する場合については、極めて短時間で氷と油の分離を行うことが可能である。しかし、気泡起因流の増大に伴い油の移動速度も増大する

が、両者の差は大きく油の排出には気泡起因流が到達する時間の 10 倍内外の時間がかかることが判った。

凹凸がある氷板下面に油が存在し、その凹部に油が貯蔵された場合については、凹凸サイズが大きくなると気泡が直接当たっていない離れた位置にある油の排出は遠くにあるほど遅れるが、これは噴流管のスキャンニングで対応することが出来る。なお、凹部からの油の排出に要する時間については、ある程度の考察を行うことが出来たが、凹部の深さや凹部の位置関係による流れの影響など、詳細については今後更なる検討が必要である。

小型の氷板群の間に出来た水空き部に油が存在する場合は、本方式による氷 - 油分離にとって最も不得意な条件と考えられる。水空き部に油が一時滞留して氷 - 油分離に時間が掛かるケース、氷板の運動あるいは気泡が直接当たることでの浮力低減による乾舷減少により、氷板上に油が打ち上がるといったケースが観測された。これらの現象が実スケールでも起こり得るかという点も含め、今後更なる検討が必要であろう。本装置の主要な目的の一つである氷板下面からの油の排出については、十分な効果が期待できると考える。今後、実現象の把握と装置改良の方向性を探りながら新たな水槽試験を行い、油排出効果の定量化、油排出効果の更なる向上に向けて検討して行きたい。

謝辞：本研究は、(財)シップ・アンド・オーシャン財団の技術開発基金制度により、北日本港湾コンサルタント(株)が実施している研究プロジェクト「氷海域流出油回収システムの開発」の一環として実施されたものである。この場をお借りして関係者各位に謝意を表する。