

気泡を用いた水中流出油回収装置 (その2)

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、瀧本忠教

1. はじめに

本報告では、昨年の報告に引き続き、気泡を用いた水中流出油回収装置に関する研究結果について報告する。冬季オホーツク海において発生する氷況は、大小様々な大きさを有する氷盤群が水面に存在する状況が最も一般的である。しかしながら、昨年行われた油回収実験の結果は、このような氷盤群の間の水開き部に油が存在する状態が、本方式による氷-油分離にとって最も「不得意」な条件と言う結論を得た。

このため、本年度の実験では冬季オホーツク海の氷盤群中で起きた油流出事故を想定し、このような状況に集中して実験を行い、本装置による油回収特性を把握することとした。具体的には、実験に供する全氷盤数を変化させる氷密接度変化の実験と、氷密接度を一定にし、油の量を変化させる油量変化実験、及び小さな氷片が集まった小氷片群中の実験を行い、氷盤群中で氷と油の分離効率の把握とその手法の向上に向けて検討した。また、本装置を実機として考える場合の考察を記した。

2. 水中流出油回収装置概要

前年度に引き続き、当所の氷海船舶試験水槽(以下、氷海水槽)において模型実験を実施した。実験に用いた水中流出油回収装置の模型は、基本的には前年度に使用した模型と同様であり、その詳細については前年度の講演集を参照されたい。本装置は幅4m、長さ6mの氷-油分離水路を有し、水面から気泡を発生するエアバブラー管までの深さは約1.7mである。本装置の実機の形態としては浮体型の油回収装置を想定し、装置側部にはポンツーン型の浮体を備えることとなるが、実験では氷海水槽の幅を最大限に生かし、できる限り大型の模型による実験を行うために浮体を省略して氷海水槽内に模型を設置した。実験に先立って、

氷海水槽の水を抜いた状態で水槽内に実験装置を組み上げた状況を図-1に示す。

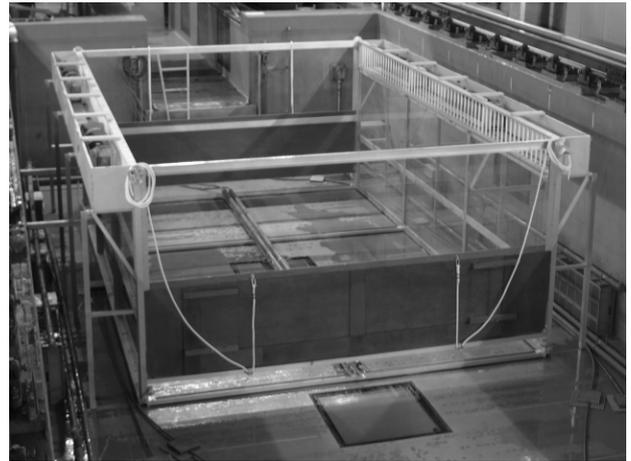


図-1 水中流出油回収装置の模型

3. 実験条件

今回の実験では、高辻(2003)によるオホーツク海の氷盤群サイズについての研究結果に基づいて実験条件を設定した。この研究結果は限られた海域・時期のデータを対象としているが、氷盤サイズについての研究例としては、比較的大規模な氷盤だけに留まらず、小型氷盤を含み統計的に有意と考えられるデータ数を持つ解析結果である。本研究においては、この貴重なデータを用いることとした。

高辻の研究によると、オホーツク海における氷盤は、大半が直径10m以下の大きさである。今回の実験では、この範囲にある氷盤から、直径が3m、2m及び1mの氷盤(以下、それぞれ、大・中・小氷盤と記述する)を代表氷盤として選択した。高辻の解析結果によれば、これらの氷盤数の比率は、大凡1:3:7となる。そこで今回の実験では、この比率を一定に保ったまま全氷盤数を変え氷-油分離水路の中の氷密接度を変化させながら実験

を行った。また、これに加えて小さな氷片が集まった状態である小氷片群中の実験も行った。

具体的な氷盤のサイズ及び形状を表-1及び図-2に示す。本実験に用いた油回収装置模型の実機に対する縮尺は、1/3程度と想定した。従って、大・中・小の3種類の氷盤の直径は、それぞれ1m・0.67m・0.33mとなる。厚さについても直径と同程度の比率を保つように設定した。大氷盤の厚さは、実機スケールで50cm程度となる。氷盤形状としては、直線的な辺部を有する氷盤の場合は、このような辺同士が接触することにより氷盤による油の移動に対するブロック効果が高まってしまうことから、このような直線的な辺を有しない円形の氷盤を実験に使用することが望ましいが、氷盤作成作業の難易性との兼ね合いで、大及び中氷盤については八角形、小氷盤については正方形の形状とした。

供試油としては、これまでの油回収実験及び油の拡散挙動に関わる実験に使用していたものと同じの機械用潤滑油を使用した。本供試油の温度0°Cにおける密度及び動粘性係数は、それぞれ、890 kg/m³及び0.12 Pa·secである。またこれもこれまでと同じように、油には専用着色剤を用いて暗紺色に着色し、視認性を高めている。

表-1 供試氷盤サイズ

氷盤	幅 (mm)	厚さ (mm)
大	1000	160
中	670	115
小	330	65

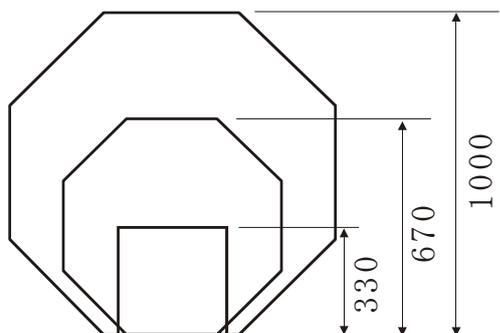


図-2 供試氷盤の形状

実験条件を表-2に示す。これらの実験では以下のような内容を実施した。

- ① 氷密接度変化実験 (PI-5~11)
氷・油分離水路に入れる氷盤は氷盤数比率 (大:中:小=1:3:7) を一定にし、全氷板数を変化させた。油量は15Litterで一定とした。
- ② 油量変化実験 (PI-6、7、12、13)
氷密接度変化実験で行った最大氷密接度 (78%) の状態で油量を10、15、20Litterと変化させた。なお、①及び②両者の実験とも、気泡流量は一定で1.25 L/m/sec (75Litter/min/tube) である。
- ③ 小氷片群中実験 (PI-14)
氷片は15~20cm程度の大きさの氷片で、厚さは約65mmである。氷密接度を50%とし、油は20Litter投入した。気泡流量は1.00 L/m/sec (60Litter/min/tube) とした。

表-2 実験条件一覧

実験番号 (Pack Ice)	総油量 (Litter)	空気流量 (L/m/sec)	氷盤数 (大:中:小)	密接度 (%)
PI-5	15	1.25	6:18:42	67
PI-6	15	1.25	7:21:49	78
PI-7	15	1.25	7:21:49	78
PI-8	15	1.25	6:18:42	67
PI-9	15	1.25	5:15:35	56
PI-10	15	1.25	4:12:28	44
PI-11	15	1.25	3:09:21	33
PI-12	20	1.25	7:21:49	78
PI-13	10	1.25	7:21:49	78
PI-14	20	1.00	—	50

4. 実験方法

実験では、油回収装置模型の上部の天井、側方上部、水中からの3箇所にてVTRカメラを設置し、氷と油の分離状況を観測した。昨年の実験より、エアバブラー管を中央に位置させたままでは氷盤群中からの油の排出のために長時間を要する、あるいは回収が不可能であることが示されている。このため、本年度の実験では、2本のエアバブラー管を段階的に油回収槽に向けて移動させ、油を油回収槽へ「追い立て」る方式を採った。実験では、本装置の氷・油分離水路に氷板と油を混在さ

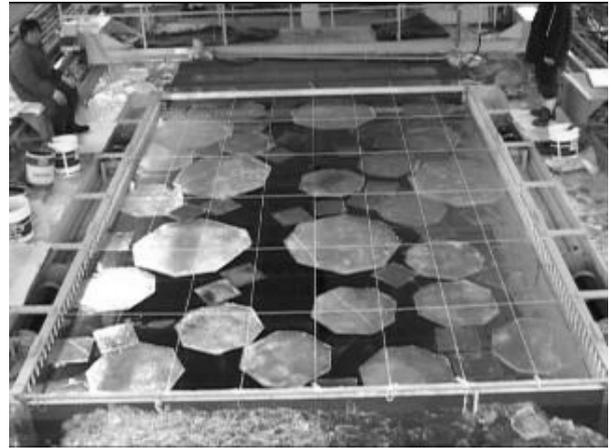
せた状態で、まず、水路の中心軸直下に2本のエアバブラー管をセットし、気泡を発生させた。この上昇噴流に起因する表面流により油は装置の両サイドにある油回収槽方向に流されるが、その動きは氷盤によりブロックされる。この油の動きを見ながら、噴流管を中心軸直下から徐々に広げて行った。このエアバブラー管のシフトは、装置の中心から1.5mまでの油を油回収槽側に排出するまで行った。また、エアバブラー管のシフトは中心から50cm毎に段階的に行った。

実験結果の解析にあたっては、装置上部に設置されたVTRの映像を元に①中心から両方向50cm以内の油が排出されるまでの時間、②噴流管をセンターから50cm位置まで移動させるために要する時間、③センターから両方向1mまで油が排出されるまでの時間、④噴流管を1m位置まで移動させるために要する時間、というように1.5mまで50cm毎に油を排出させるために要する時間と噴流管の移動に要する時間を単純に足し合わせて、その実験条件下の油排出時間とした。ただし、エアバブラー管のシフトは人力で行うため、これにかかる時間は実験ケース間で多少の差異がある。このような差異が油回収に要する時間の解析結果に影響を与えることを避けるため、上記解析にあたっては、エアバブラー管を移動させるために要する時間は全て5秒として計算した。また、実験によっては片側のエアバブラー管の移動機構に不具合が生じ、この管のシフトに逆側の管のシフトに要する時間に比べて長い時間を有するケースがあった。

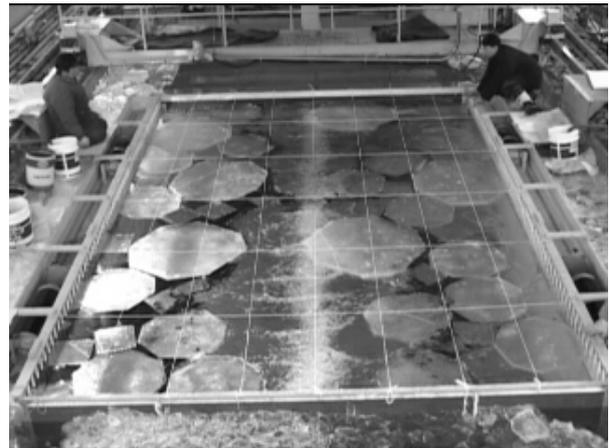
5. 実験結果

図-3に氷密接度67%の状態(Exp.No.:PI-5)での実験の様子を示す。これらの図は、回収装置模型の側方上部に設置した観測VTRカメラにより撮影された映像から切り出した画像であり、氷油分離水路の中における油と氷盤の状態を見ることができる。図中(a)は気泡発生前の氷盤群と油が混在している初期状態である。氷油分離水路の中心軸直下から気泡を発生させると油と氷盤は両サイドにある油回収槽の方向に流される。(同図(b))一部の油は油回収槽内に流入するが、氷盤群は油回収槽に押し付けられる状態となり、油は

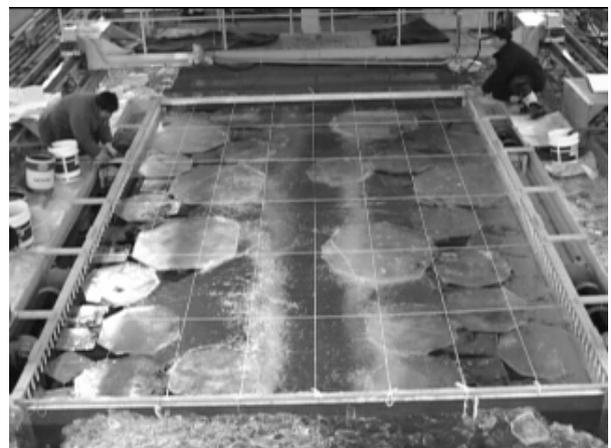
氷盤群に堰き止められる。そこで、2本ある噴流管を両サイド側に0.5m、1m、1.5m(同(c)、(d)、(e))と徐々に広げていくと氷盤は上昇噴流を乗り越え2本あるエアバブラー管の間、つまり中心付近に戻っていく。この氷盤の動きにより氷板間



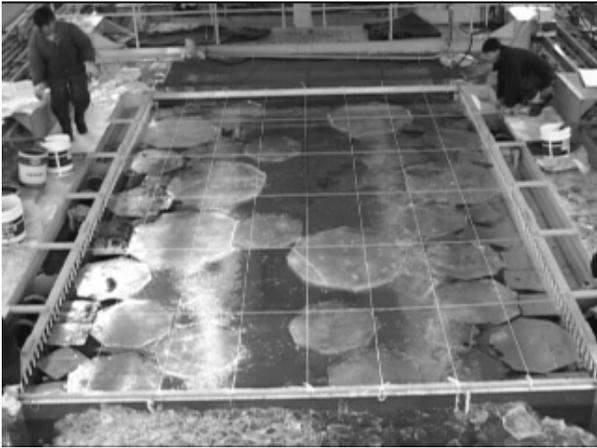
(a) 気泡発生前



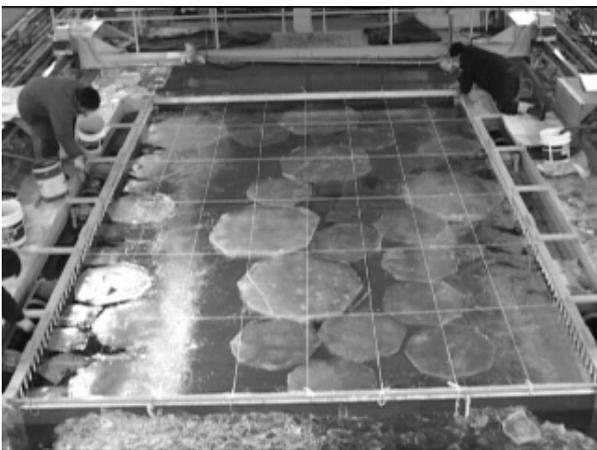
(b) 中心軸直下での気泡発生直後



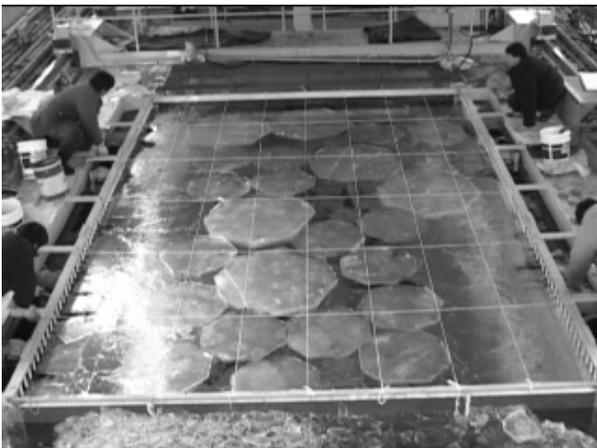
(c) 0.5m位置での気泡噴流状態



(d) 1m 位置での気泡噴流状態



(e) 1.5m 位置での気泡噴流状態



(f) (e)の数秒後

図-3 氷盤群中からの油の排出

に隙間が生じ油は回収槽方向に移動する。しかし、氷盤が戻る際にその周りであった油の一部もつられて動くので、最終的には中心付近に多少の油は残ってしまう (図-3 (f))。しかしながらこのよ

うな油の量は投入した油の数パーセントと微量であり、今回行った氷密接度 78%の状態までの実験では、氷盤群中の油はほぼ排除できたと言えることができる。

一方、小氷片群中の実験 (PI-14) では、噴流管を中心軸直下から徐々に広げていき 1m 位置に移動した場合まで、油は殆ど油回収槽内に入らず、小氷片群の隙間に存在した。図-4で油回収槽内に油がないのが判る。エアーバブラー管を 1.5m 位置まで広げた時点でようやく油回収槽内に入り始めるがこれは少量であり、殆どの油と氷片は装置中央に戻るときに氷片の動きにつられて動いてしまう。エアーバブラー管を中央方向へ徐々に戻すと少しずつ油回収槽内に入っていき、管が中央に戻った時、半分近い油がまだ残っている。実験開始から 10 分以上経過しても油は半分程度しか排除できていなかった。エアーバブラー管の動きが悪く、これに時間が掛かっていることもあるが、これがスムーズに行われたとしても、油を全て排除するには、エアーバブラー管を数回往復することが必要であり、かなりの時間が必要となるものと思われる。

本手法による油回収の原理の一つは、気泡起因流れに対する氷と油の運動の差異を利用して両者を分離しようとするものであるが、この実験で見られた問題は、氷片サイズが小さくなってその慣性力の影響が相対的に小さくなることにより、このような原理の効果が薄れた結果と言うことがで

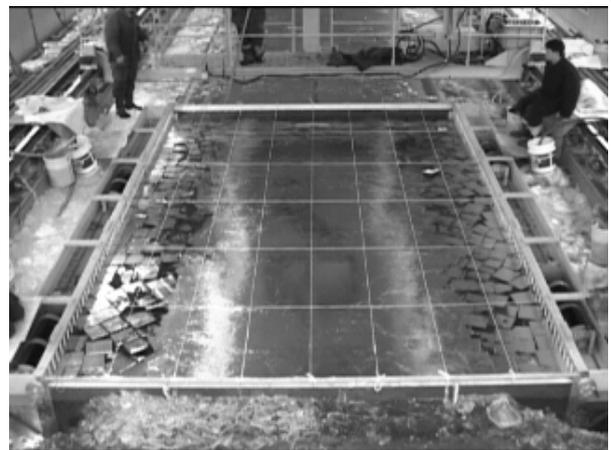


図-4 小氷片群中の実験
(1m 位置での気泡噴流状態)

きよう。また、氷盤群中からの回収実験においても、一部の小氷盤が立ち上がることで、流れを遮断し油を滞留させる現象が見られた。このような小型の氷片・氷盤に関わる問題は、模型スケールで発生する問題で、実機スケールでは相対的に重要性が低い問題かもしれない。しかしながら、小氷片については、油回収槽への流入により水・油分離効率の低減を招く可能性もある。今回の実験ではこれらの点について十分に検討することはできていないが、これらも将来的課題として念頭に置いておきたい。

氷盤群からの油の分離実験について、装置の中心から 1.5m までの油を油回収槽側に排出するまでに要する時間を氷密接度の関数として示したものが図-5 である。氷密接度の増加に伴って、油の排出時間が長くなることが判る。なお、図中の黒丸 (●) の 2 データについては、前述のエアバブラー管の移動に問題があったケースであり、片側のエアバブラー管の動きが悪く最初のステップで両サイド側に 0.5m 開くところを片側だけが先行した。このため、これらについては見かけ上より長い時間が掛かっているが、この遅延は油回収時間と言う点からは本質的なものではなく、実験結果は白丸 (○) のデータの傾向として捉えるべきである。一方、油量が変化した場合の実験結果を図-6 に示す。油量変化は、10Litter から 20Litter と変化量は少なかったが、はっきりと油排出時間に違いが見られ、油量の増加に伴い油の排出に要する時間が増大することが示されている。

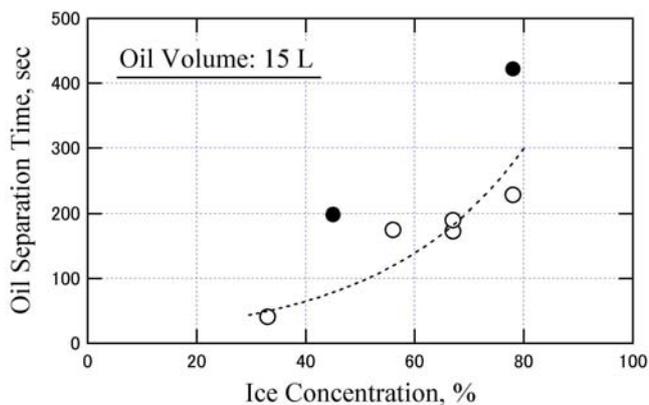


図-5 油の排出時間と氷密接度の関係

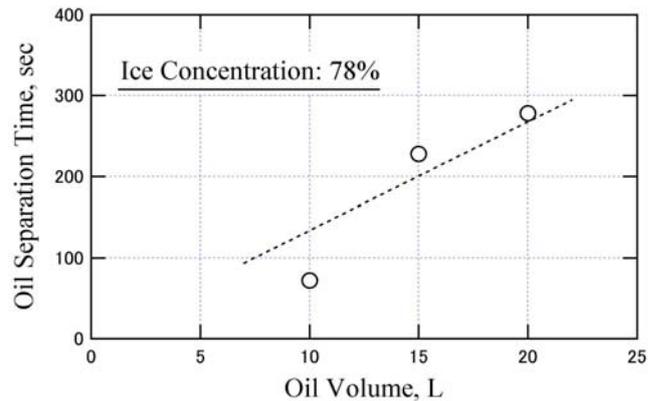


図-6 油の排出時間と油量の関係

6. 実機の利用形態

本装置の実機としての利用形態には様々なものが考えられる。回収装置自体は、比較的簡易な構造・形式を有するものとして、これに他の船舶等を利用して氷と油を導くようなシステムを考えると、このような装置の建造は技術的にも比較的簡易で、建造費も安価なものに抑えられる。しかし、油汚染水域においてオイルフェンスを展開し囲い込む作業や回収装置への氷と油の誘導等を考えると油を回収する際のオペレーション技術や作業者の習熟を必要とするところが大きいであろう。

一方、氷海域での油流出に対応した油回収船の建造が実現すれば、これはサハリン大陸棚開発に関わる油流出に対する危惧が高まっている北海道等の地域においては大きな安心材料であろうし、世界的に見ても画期的なものとなる。しかしながらこの回収船は、例えば双胴船のような特殊な船舶であると同時に、ある程度以上の耐氷性・氷中可航性が求められる船舶であり、今後技術的に詰まなければならない点が多々にある。もちろん、価格的にも高価な船となる。

このように、上記の2種類の形態にはそれぞれに長所・短所があるが、これらの長所を取り入れ短所を補うものとして、本油回収装置を砕氷船等へのアタッチメントとする形態が考えられる。この場合、油回収装置本体は比較的簡易なもので良く、船舶が移動することにより油と氷盤の装置への導入並びに処理後の氷盤の排出が可能となる。また、気泡噴出用のコンプレッサー・気泡管移動システム等への電力も船舶から供給することが可能であ

り、回収した油もある程度の量までは船上に一時貯留することも可能であろう。油回収装置の流出現場海域への運搬は、船舶への搭載あるいは船舶での曳航により行う。本油回収装置は船舶に対して比較的大型のアタッチメントとなることから、船舶との接合部における剪断力を軽減するために装置自身も十分な浮力を持つ形式とする。

船舶へのアタッチメントの形式としては、図-7のように、船首部に本装置を設置する形式と、船側部に設置する形式の2種類の形式が考えられよう。船首部への装着については、氷盤中においてより広く、よりクリーンなチャンネルを啓開するために、剪断碎氷型のアタッチメントを船首に取り付けて利用する試みがロシアにおいて為されているなど、技術的には十分に実現可能な形式であろう。また、船橋前方に回収装置があることから、操船上も比較的問題は少ないと考えられる。ただし、このような形式を採る場合には、油分離処理の終わった氷盤をスムーズに排出するために、船首部喫水線と油回収装置との間に十分なクリアランスが必要となる。氷盤形状が円形で近似できると考えれば、氷・油分離水路に取り入れることのできる最大の氷盤を排出するためには、このクリアランスは氷・油分離水路の幅以上であることが必要となる。一方、船側部へ本装置を装着する場合にはこのような問題は無い。また、回収装置の長

さについても、船舶の平行部の長さにも依存するが、船首部へのアタッチメントとしての形式よりも長くすることが可能であろう。しかしながら、油回収のための操船と言う観点からは船首部への装着方式よりも習熟を必要とする方式と言えよう。

7. おわりに

本年度は、昨年度の結果に基づいて、オホーツク海の氷盤群中に油が流出した状態を想定し、氷盤サイズと氷盤数比率を意識して流出油の回収実験を行った。

この結果、氷盤群中からの本装置による油回収能力についての特性を得ることができた。また、本装置の実機としての形態については、油回収装置を船舶へのアタッチメントとして考えることを提案した。

昨年度からの2年間の研究により、気泡を用いた水中流出油回収装置についての基本的知見を得て、この方式の有効性を示すことができた。しかしながら、本装置を実機として考えるためには、まだ検討しなければならない点が多々あり、今後も本装置についての研究を続け、これらの点を解決して行きたい。

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。

参考文献

高辻慎也：オホーツク海南部における氷盤分布の特徴。2004年、北海道大学大学院地球環境科学研究科 大気海洋圏環境科学専攻 2003年度修士論文, 60p.

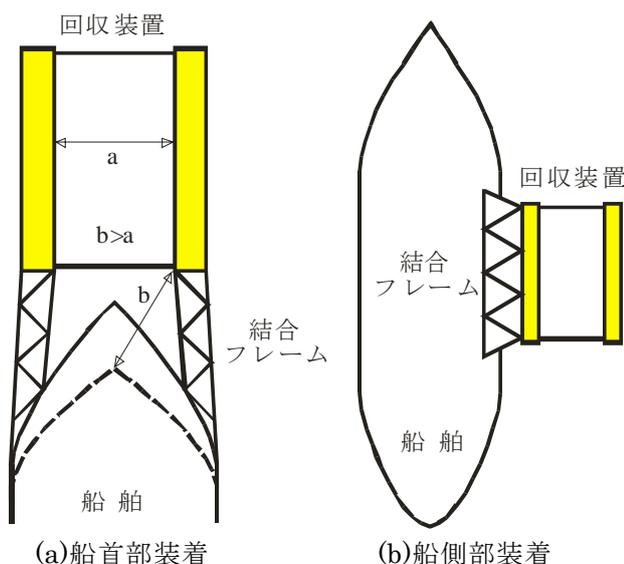


図-7 船舶へのアタッチメントとしての水中流出油回収装置