

寒冷海域での油流出に関する研究

山口 眞裕*、小山 鴻一*、成田 秀明*、北村 茂*、
泉山 耕*、前田 利雄*、高島 逸男*、宇都正太郎*、
田村 兼吉*、金田 成雄*、下田 春人*、瀧本 忠教*、
若生 大輔*、上田 浩一**、藤井 忍**、山之内 博**、
疋田賢次郎**、在田 正義***、櫻井 昭男***

On Oil Spill Problems in Cold Waters

by

Masahiro YAMAGUCHI, Koichi KOYAMA, Shumei NARITA, Shigeru KITAMURA,
Koh IZUMIYAMA, Toshio MAEDA, Hayao TAKASHIMA, Shotaro UTO,
Kenkichi TAMURA, Shigeo KANADA, Haruhito SHIMODA, Tadanori TAKIMOTO,
Daisuke WAKO, Koichi UEDA, Shinobu FUJII, Hiroshi YAMANOUCHE,
Kenjiro HIKIDA, Masayoshi ARITA and Akio SAKURAI

Abstract

Cold-water oil spill countermeasures may be very complicated by low temperature, presence of ice, short period of daylight and lack of support facilities in northern areas. Japan has had no offshore operating experience in such cold environments. Considering of the recent development of oil and gas resources at the Sakhalin shelf, it seems very critical that Japan should develop, strategically and technically, a level of preparedness to prevent and respond against accidental oil spills from tankers or offshore oil production facilities in the Sea of Okhotsk.

The main objectives of this study are 1) to identify a set of vital requirements and conditions needed to develop a national contingency system for preventing and responding to a big oil spill in ice-infested water, and 2) to develop fundamental understanding on the fate and behavior of spilled oil in ice-infested waters and to identify key technologies and techniques to recover spilled oil in drift ice.

With the abovementioned objectives in mind, the following themes have been studied. (See Fig.1)

* 水海技術部

** 装備部

*** 大阪支所

原稿受付 平成11年11月4日

審査済 平成12年9月13日

1) Study on total oil spill response system for cold oceans:

A general survey was made on existing maritime laws and regulations for the prevention of shipping accidents and pollution of marine environment, Japan's current contingency response system, environmental sensitivity index maps, and related information and database systems. Besides, sea ice and other meteorological and environmental conditions of the Sea of Okhotsk were reviewed and risks of oil spills were investigated.

Six recommendations were raised as the conclusions of this study: (1) To establish a cooperative relationship with Russia and other nations concerned, (2) To establish a regional cooperative network among governmental and local institutions and experts, (3) To prepare maps of environmental sensitivity index of the northern coasts, (4) To develop reliable technology for mechanical oil recovery in drift ice, (5) To develop a method for estimating the spreading and drifting of oil slick in drift ice and method for identifying the oil slick covered by snow and ice, (6) To develop a real-time information system for assisting the oil spill response operations

In addition to the above, an Internet-accessible sea ice database system for the Southern Sea of Okhotsk was established based on the data from three governmental institutes.

2) Review and assessment of the capability of existing oil-recovery equipments in cold icy ocean:

Existing different oil recovery systems have been evaluated when in use in icy waters and their defects were identified. Based on this review, an experimental effort was made to develop a "net-belt type" oil recovery system especially designed for collecting highly viscous oil. In addition, the leaking behavior of highly viscous oil captured in front of oil booms have been studied experimentally. Different gelling powders were examined of its gelling efficiency on different oils. And a trial was made on how to apply the gelling powder from underwater to oil slick staying under the ice.

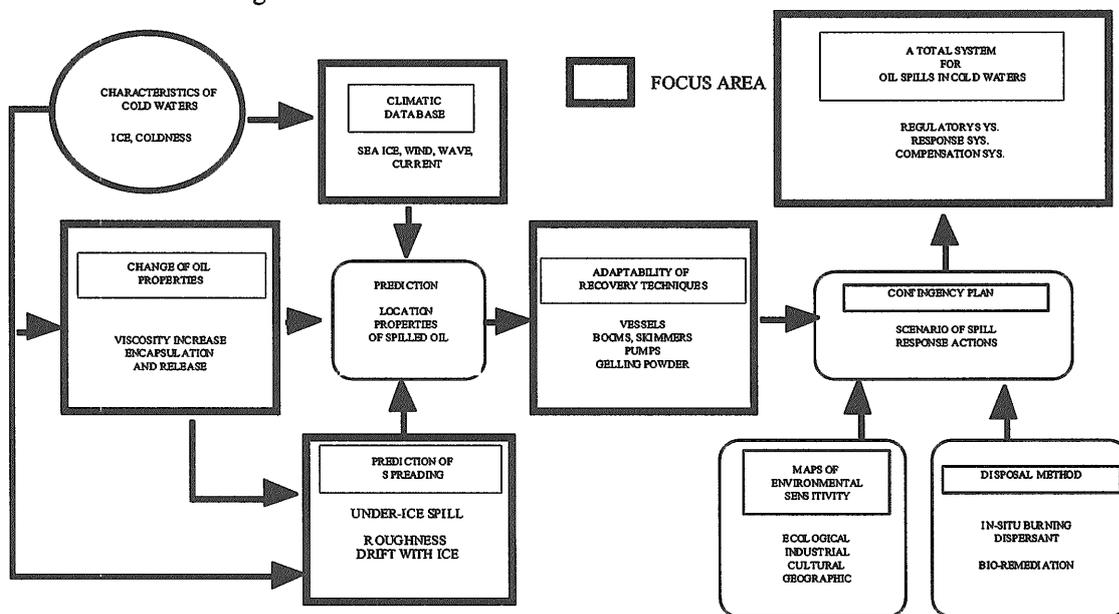
3) Study on the change of oil properties in icy waters:

Laboratory studies were made on changes of oil properties such as viscosity and interfacial tension when the oils were cooled down from normal temperature and brought to freezing temperature. The process of oil encapsulation in ice and release from ice were laboratory-studied. The adhesion strength of oil slick to ice was investigated and the removal of oil slick from ice was successful by flushing with sea water.

4) Study of oil spreading in ice-infested waters:

A theoretical analysis was made to predict the extent of oil slick spreading underneath the ice in the initial stage(short time after the release). A numerical simulation program for the same case has been developed, based on a level-set method describing the time-based change of oil slick profile. The numerical model seemed more adaptive to non-homogeneous cases than analytical method where ice has uneven underwater surface. The migration of the oil slick by sea current have been studied in the ice tank of SRI.

Fig.1 GENERAL SCHEME OF STUDY



目 次

1. 序章－研究の全体像	
1.1 研究目的と背景	
1.2 寒冷海域での油汚染対策の特殊性	
1.3 オホーツク海と流水	
1.4 総合研究計画	
2. 研究内容と成果	
2.1 既存の油回収・処理技術の寒冷海域適用性の評価	
2.1.1 はじめに	
2.1.2 ネットベルトによる回収	
2.1.3 吸引回収の評価	
2.1.3.1 実験方法	
2.1.3.2 実験結果および考察	
2.1.4 堰前の油層の挙動の把握	
2.1.4.1 水流上の堰	
2.1.4.2 前進する堰	
2.1.5 粉末ゲル化剤の性能評価	
2.1.5.1 ゲル化剤の油種適合性	
2.1.5.2 ゲル化油硬度の相対評価	
2.1.5.3 水中からの添加実験	
2.1.6 油汚染監視技術調査	
2.1.7 まとめ	
2.2 寒冷海域での油の性状変化に関する研究	
2.2.1 概要	
2.2.2 粘度	
2.2.3 表面張力	
2.2.4 油と水の界面張力	
2.2.5 油汚染水の性状	
2.2.6 汚染水からの油の分離	
2.3 寒冷海域における油の拡散挙動	
2.3.1 概要	
2.3.2 実験的研究	
2.3.3 拡散シミュレーション	
2.3.4 まとめ	
2.4 オホーツク海海水データベース	
2.4.1 概要	
2.4.2 氷密接度データベース	
2.4.3 氷厚データベース	
2.5 油汚染対策の全体システム	
2.5.1 あらまし	
2.5.2 システムの構成要素	
2.5.3 寒冷海域油流出シナリオの検討	
2.5.4 寒冷海域適合油汚染対策全体システム	
3. おわりに	
参考文献	
付録 1：研究発表ならびに特許取得実績	
付録 2：寒冷海域での油流出事故例のまとめ	

1. 序章－研究の全体像

1.1 研究目的と背景

20世紀後半、石油資源開発は温帯から亜寒帯、さらに寒帯へと拡げられて来た。1960年代アラスカ州ノーススロープでの大油田発見や1970年代北海での海洋油田開発に続き、アラスカやカナダの北極海沿岸水域、シベリヤの北極海沿岸部にも有望な油田が発見され、一部は開発が進められた。米国は96年よりアラスカ州産石油の輸出を解禁し日本向け輸出も始まった。現在サハリン島北東部沿岸では二つの石油・ガス資源開発プロジェクトが進行中で、21世紀初頭での本格生産開始が予告されている。将来日本や東南アジア諸国に対するサハリンやアラスカ方面の石油輸出は益々増加し、いきおい北方海域での原油採掘や輸送に伴う油流出事故も増加するであろう。それゆえ、寒冷海域の特性や周辺事情を十分に配慮にいった、油流出事故防止の為に各種法的規制ならびに流出事故発生に備えた行動計画や体制の整備を進める必要がある。サハリン島のあるオホーツク海は漁業資源の世界的宝庫であるうえ、地球環境と生態系維持の観点からも重要な海域であると多くの海洋生物学者が認めている。それ故、この海域の油汚染はあらゆる手段を用いて防止すると共に、不幸にして油汚染事故が発生したときの緊急対応の体制や回収・処理に関する技術を備える必要がある。

温暖海域においてすら、外洋で大規模油流出が起こると海上での速やかな回収・処理は困難である。酷寒と流水の支配する寒冷海域での油流出対応は、さらに幾層倍の困難が予想される。流出油は拡散しつつ風化・変質し、漂流の向きによっては海岸線に漂着して深刻な汚染に発展することがある。この間、および事故の後も長期に亘り、大自然及び人間社会に多大な損害を与える。油流出への対応は、現場海域の特性、流出油の量と性質等を考慮し、すみやかに十分な人的・物的資源を動員して一挙に行うことが肝要である。

このため本研究では、温帯を対象にした従来の油回収技術や緊急対応システムの総合的レビューを行った上で、寒冷海域固有の不利な事情に配慮して、油汚染防除の技術と事故対応体制のあるべき姿を探究することとした。ただし、次節で述べるように、流出状況の複雑さのために技術開発の面で取り組む問題が徒に広範になるのを避けるため、寒冷海域では一般に油の高粘性化が起こりやすいので、高粘性化した油の回収技術を中心に研究を進め、流水の回収への影響については、流水の形態があまりにも多種多様なので、平坦水のみを考慮した。事実、流水を選別除去する問題は、回収以前の機械的選別処理に属する問題であり、今後研究すべき内容である。流

出油拡散については、汚染域半径の第一近似を与える初期拡散に焦点を絞って研究を行った。

1.2 寒冷海域での油汚染対策の特殊性^{2), 3), 4), 7)}

流水の存在のために油流出の様相は複雑になり、酷寒の下では回収・浄化作業は極めて困難になる。図1-1は氷海域に流出した油がどのように氷の間に溜まり、拡散、溶解、生物分解して行くかを示す。海水は、油の水面での拡散を妨げ、氷板の上・下、氷片の間隙などに滞留させる。氷は成長時に内部に油を封じ込め、融解の際には油を解放する。低温のため、流出油の粘性が増加し、拡散は遅くなる。油の蒸発や乳化などの風化作用、海中への溶解や分散はかなり遅れる。油（分散）処理剤等の化学薬品の効果も悪くなる。微生物による油の分解も遅い。重要なことは、氷海域流出油は風化が極めて遅くなるので、毒性が長期にわたり保たれ、その分生物に及ぼす被害が拡大すると言うことである。

図1-1のように、流出油の存在は氷の状態に応じて様々な様相を呈するので、回収処理もそれに依って様々な方法・手段が必要になる。海面に多数の氷片が浮遊すれば油の回収の邪魔になるが、大きな厚い氷板は油の拡散を防ぐ堰として、あるいは作業足場として役立つ。密集した流水域の油汚染現場には、通常型の船舶がアクセス出来ない場合があり、航空機からの分散処理剤散布または海上での焼却ができない場合もある。油の回収を実施するには砕氷船ないし砕氷能力を持つ回収船が必要となるほか、ブームやスキマーなど機器類の補強や凍結防止対策が必要であろう。流水やその上に積もった雪は流出油を覆い隠し、視認することが困難となる。それ故、雪や氷が覆っていても使える新しい油探知技術も必要である。

寒冷海域においては、海面凍結のほか、降雪や着氷などが起こる。日射欠乏と低温のため生命活動が抑制され、生態系の汚染被害からの回復力も乏しい。低温下では回収用機器類の性能劣化や破損が生じ易く、船体着氷や霧の発生が作業員の能率低下や危険の増加を招く。このようにさまざまな障害を克服することが必要になる。寒冷海域の隣接地域は概して人口希薄でインフラが未発達であり、産業・経済の中心地からは遠い。そのため事故現場への速やかで手厚い支援は困難である。寒冷海域での油流出への対応は戦略的にも戦術的にも温暖海域での対応とは様相が異なり、一段と複雑になる。

1.3 オホーツク海と流水^{5), 6)}

オホーツク海はアジア大陸と千島列島弧で囲まれる半閉囲海域であり、西部は広大な大陸棚が発達し、東部は太平洋と多くの海峡で繋がっている。アムー

ル川等からの大量の河川水が表層水となるため、比較的低緯度でありながら結氷する。このようなユニークな海洋構造を有する海域である故に、世界的な漁業資源の宝庫であるうえ、地球環境と生態系維持の観点からも重要な海域であると多くの海洋学者が認めている。

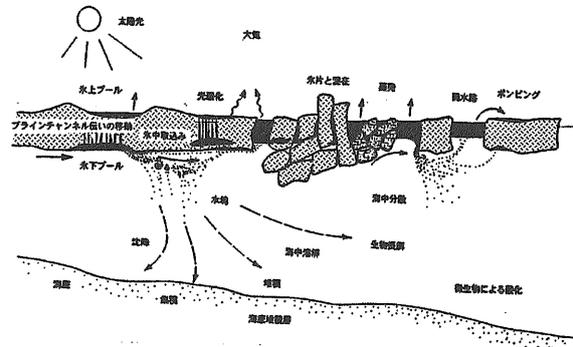


図1-1 寒冷海域流出油の運命

オホーツク海沿岸部一帯は、各種のカニが生息し、ホタテガイ、ホッキガイ、アワビ、カキ等の優れた養殖生産地であり、定置網による沿岸漁業も盛んである。オホーツク海に生息する魚類は、さけ・ます類、さんま、すけとう、ほっけ、いわし等多種で漁獲高も多い。海岸線は単調で大部分が傾斜の緩い砂質の海岸で、知床半島、能取岬周辺のみが岩石質の断崖地形をなす。知床半島を中心として国立・国定公園に指定され、自然保護指定地域が多い。一旦この付近で油流出事故が起これば、これらの貴重な海産資源や沿岸・海底の生態系に甚大な被害が生じるであろう。

冬季のオホーツク海の自然環境とその変動については、科学的研究調査も充分進んでいないため、詳細は不明である。海上気象と流水の動きの概略については、人工衛星や航空機からの定期観測で情報が得られるが、海中の様子は観測手段が乏しく殆ど判っていない。図1-2はオホーツク海の海流分布を示す。サハリン島東海岸を南下する寒流、宗谷海峡から流入し北海道オホーツク海沿岸に並行する宗谷暖流、およびクナシリ島・エトロフ島のまわりの海峡を通過して太平洋に向かう流れが我が国にとって重要である。これらが北海道周辺の流水の流れを基本的に支配し、ここに北寄りの風が加われば流水は北海道の岸辺に強く押し付けられる。図1-3はオホーツク海の流水分布の変化（拡張期）を示す。例年1月頃、流水はサハリン島東海岸に沿って南下し、同月末北海道北部の海岸に漂着し、以後約3ヶ月にわたりオホーツク海岸に沿って知床半島方面に展開しつつ離岸接

岸を繰り返す。このことから、この流水中に原油等が流出すれば、海洋はもとより、北海道北部沿岸一帯および根室海峡、さらには北方4島を含む南千島列島の沿岸と海洋が油汚染される確率が高いと想像さ

れる。

北海道に襲来する流水は、様々な成長段階の海水を含み氷野の凹凸も大きい、平均的な厚さは40から60 cmである。写真1-1および1-2は、南部オホーツク海でしばしば観測される流水野の景観の2例を示す。流水は海流と風力で漂流する。穏やかなときでも0.5ノット程度の速度を有し、天候が悪化すれば場所によりしばしば2から3ノット程度の速度を持つ。海域には直径10 kmオーダーの渦がところどころに発生し、このため流水の漂流パターンは複雑である。氷野は厚いところ薄いところが混在し、開水面も出来易く、密接度にむらがある。この様な流水野の形態や運動に支配される流出油の拡散は複雑である。汚染範囲の予測や監視技術もこれに対応できるものを開発整備する必要がある。

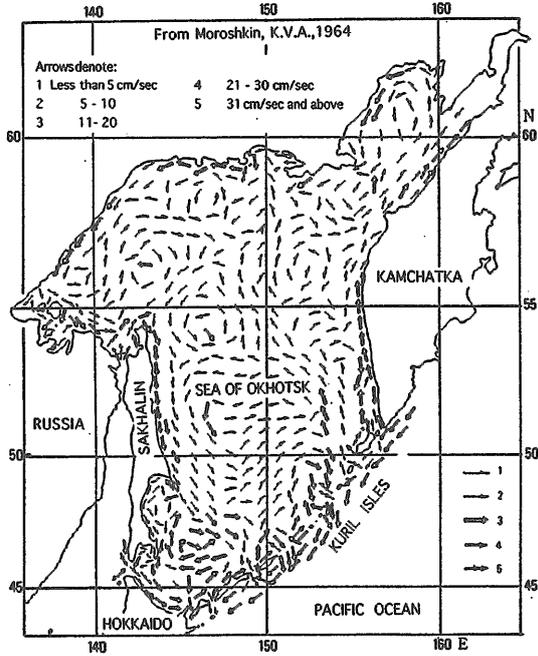


図1-2 オホーツク海海流分布

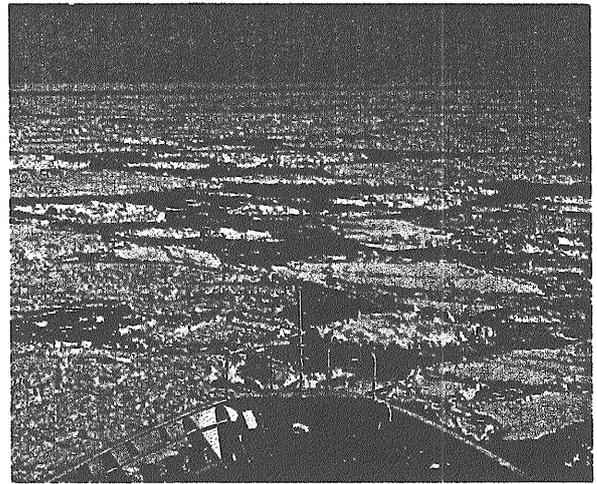


写真1-1 オホーツク海の流水の景観
(比較的密集度の低い流水)

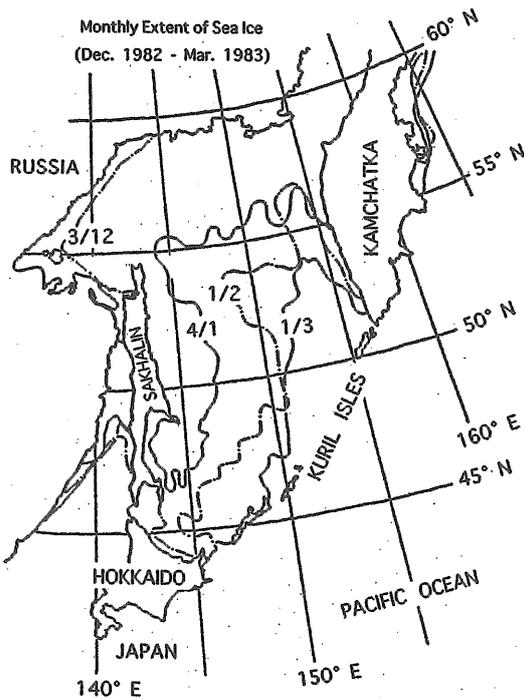


図1-3 オホーツク海流水分布

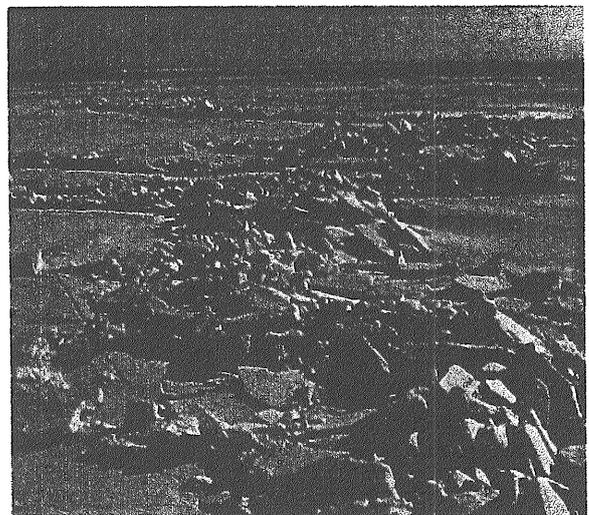


写真1-2 オホーツク海の流水の景観
(氷丘脈を含む緊密な氷野)

1.4 総合研究計画

本研究では、寒冷海域油流出という事象が非常に複雑なものであり、一筋縄では対応できないことを配慮して二つの方向からのアプローチを試みた。これは、巨大な山塊に二つのルートから先遣隊を送り込むことに譬えることが出来よう。その一つが鳥瞰図を得るための視点からのアプローチであり、総合的な海上油汚染防除の全体システムの考察である。これは海洋汚染防止の規則と緊急対応の体制を含む政策を考察する立場である。もう一つのアプローチは一つの戦略的ポイントに肉薄するやりかたで、高粘度化した流出油の機械的回収方法の追求である。そして、ここには既存の油回収手法の寒冷海域適応性の評価、寒冷海域での流出油の性状変化ならびに拡散挙動の研究が付随している。図1-4は、研究全体の構成の見取り図であり、テーマごとのキーワードおよびテーマ相互の結びつきと進め方を示す。本研究は、第1のアプローチである「全体システム」、第2のアプローチである4つのサブテーマ「既存の油回収・処理技術の寒冷海域適用性の評価」、「寒冷海域における流出油の性状変化」、「寒冷海域における流出油の拡散」および「オホーツク海水況データベースの構築」で構成した。また、図1-5は、各研究領域で得られた知見が全体システムの計画或いは事故対応の作戦行動のどの段階で利用されるかを説明している。

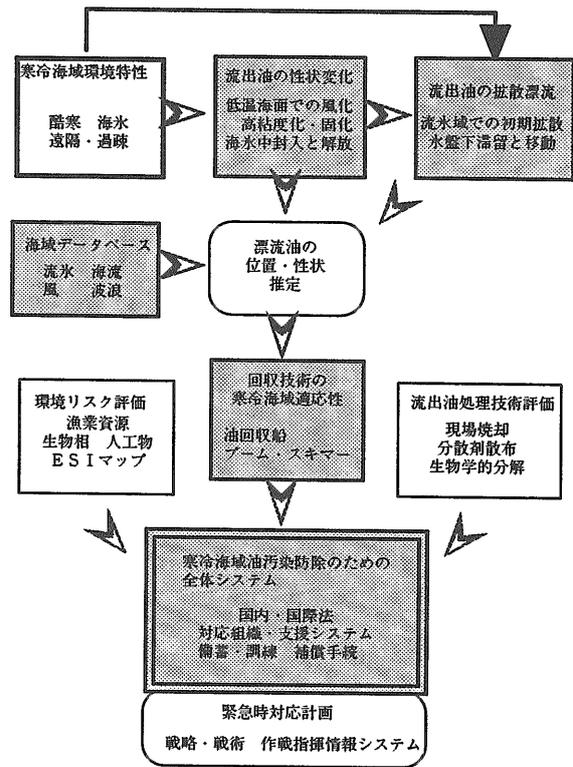


図1-4 研究の構成

一般に総合的な海上油汚染防除システムは、油汚染の環境影響評価を基礎として、①事故防止、②流出量極小化、③流出油の回収・処理、④事故評価とフィードバックの4段階を考慮に入れて構築される。各段階には以下のような要素項目が含まれる^{1), 3), 9)}。

[事故防止]

航路整備、航行管制、航海性能・操縦性能の基準、船体構造・設備規則、船舶定期検査、船員能力資格規制、航行支援情報サービス

[流出量極小化]

船体構造規制（二重船殻、タンク容量規制など）、油回収設備の搭載

[流出油の回収・処理]

流出油監視・追跡、風化と性状変化の把握、拡散漂流予測、囲い込み、安定化、環境影響と最適処理の選択基準、回収現場への資材・機材の補給・運搬、回収・貯蔵・運搬、化学的分散処理、海上焼却、回収油・油汚染物処理

[事故評価とフィードバック]

損害査定、事故責任解明と補償、事故対応作戦評価、教訓のフィードバック、事故データベースの作成、事故影響追跡調査

このような制度、人、物および技術体系を含む総合的システムを、簡略のために、ここでは「全体システム」と称する。通常（温暖）海域での海洋油流出事故に対する全体システムは、従来からIMO（国際海事機構）での海洋汚染防止に関する国際条約制定の動きにリンクして世界各国でそれぞれの国情に合わせ構築されて来た。第1のアプローチである「全体システムの研究」においては、このような我国の既存システムを「寒冷海域の特殊事情」に照らして再点検し、補完・改善すべき点を抽出した。具体的には、ナホトカ号油汚染事故を含む汚染事故対応の実施例とそれから得られた教訓に基づき、寒冷海域に適用可能な、総合的な海上油汚染防除の全体システムを考察し、オホーツク海方面の発展動向を睨みつつ新たに補完構築すべき重要項目を見いだした。

第2のアプローチでは、寒冷海域での油流出事故の事例調査に基づき、寒冷環境が起因する流出油の挙動や回収・処理に関わる特殊性を抽出し、この特殊性を反映した油汚染防除技術について検討を加え向上を図ることとした。先ずカナダ等北方諸国での寒冷海域油汚染防除技術の研究状況を調査し、現状技術水準及び問題点の整理を行い、既存の（通常海域向けの）油回収技術の寒冷海域適用性を評価した。次に、流出油の性状変化や流水の存在を考慮した高粘度油回収メカニズムを考案し基礎実験を行い回収特

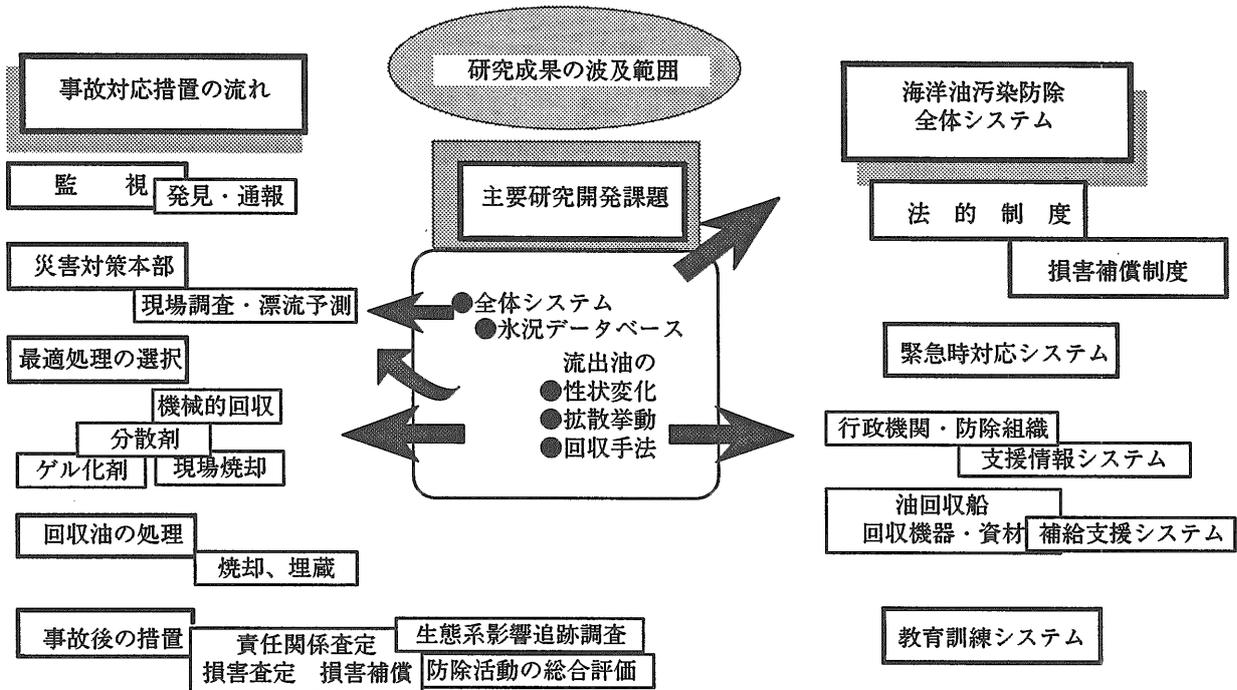


図1-5 研究成果の活用範囲

性を明らかにし、同時に油ゲル化剤等による回収効率向上の可能性を検討した。この際、流水の存在の回収への影響については、流水の形態があまりにも多岐にわたるため、平坦水以外は敢えて考慮外に於いた。同時に、流出油の寒冷海域における初期性状変化を実験的に調べ、さらに氷の成長と融解による流出油の水中閉じこめや解放について実験を行った。また、粘性と比重および界面張力を配慮した流出油の初期拡散メカニズムについて理論的に検討した。つぎに、海中の流れや波浪が氷野の下の油の拡散に及ぼす影響を評価し、多相流の計算手法を利用して、平坦水下の油膜拡散の数値シミュレーションの可能性を検討した。また流出油の漂流予測に必要な南部オホーツク海の流水分布と海上気象の観測資料のデータベース化を図った。

2. 研究内容と成果

2.1 既存の油回収・処理技術の寒冷海域適用性の評価

2.1.1 はじめに

寒冷海域で油が流出し、その油が閉鎖性海域に滞留すると、低温のため風化が遅れ生物による油の分解がゆるやかになるので、長期にわたり放置されれば、環境に大きく影響を及ぼす恐れがある。これを

避けるには流出油をすみやかに除去することが必要である。このため低温かつ氷の存在する環境下で既存の油回収技術、油処理剤の適用性、監視技術の適応性を評価する必要がある。

流出油の粘度は油種や温度、風化の度合で異なるが1 mPa・sから10⁵ mPa・sの広範囲にわたる。流出直後の油の流れやすい時以外は高粘度油の拡散防止や回収が必要になる。回収方式にはポンプ等による吸引方式、油の粘性を利用した回転円盤やベルトによる回収方式、水面下に堰を設けて油層を流し込む方式、モップ等に油を付着させて回収する方式、渦を発生させ中心に油を集めて吸引する方式等がある⁹⁾。しかし高粘度油の回収の場合は、油が回収部に流入しにくいいため、どの方式を用いても回収は難しい。従来の油回収機の性能認定試験ではB重油相当の油(20℃で100 mPa・s)で評価していたが、寒冷海域ではこれよりはるかに高粘度の油に対応していく必要がある。

高粘度油回収の必要条件として次のことが上げられている。①連続的に油を回収するメカニズムが必要。②波やうねりのなかで効率良く作動すること。③ゴミ処理能力を備えること。④回収油中の水量を極力少なくすること。⑤回収機は頑丈なもので、展開、操作、回収作業はできるだけ簡単なものであること等である¹⁰⁾。高粘度油の回収のために、上記の条件にかなうと考えられるネットベルトによる回収方式を検討した。この方式は流れや波を反射せずに通過

させるために油を回収部へ誘導し易く、水深方向に深く設置することにより波浪対策もできる。

ところが、流出直後の比較的低粘度の油はネットベルトで回収できないため、吸引式や堰方式によって回収する必要がある。これらの回収方法では油より水を多く回収する傾向にあり、それを防止するために、回収部に溜まる油層を厚くする必要がある。また回収条件を評価するためにはオイルフェンスにより油の広がりを防止するときと同様に、前進する堰前の油層の滞留状態について把握する必要がある。そこで、堰前の油層について2次元水槽で実験を行い、滞留状態を把握することを試みた。

流出油の処理については現場焼却や分散剤の研究が最近多く見られるが、我が国では海浜に人家が近いことや多くの漁場があるため、これらの処理は好まれない。そこで、破損したタンク内の残留油や水板下の油の場合には、水中からの粉末ゲル化剤の散布により油をゲル化してから回収する方法を検討した。

2.1.2 ネットベルトによる回収

我が国では法定で粘性係数が $100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の流れ易い油を回収機等の評価試験に使用しているが¹⁾、寒冷海域では油が高粘度化し、流入し難くなることが予想され、その対策が必要である。実際の流出油は粘性係数が $10^5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 程度の高粘度になっている場合もあるため、このような高粘度油が回収でき、かつ波浪に対応できる油回収機が必要である。そこで高粘度油が回収できかつ波浪に対応できる油回収機として図2-1に示すような構造を考えて回収機の評価を行った。この方式は高粘度の油は傾斜させたネットベルトで回収し、低粘度の油は吸引回収する方式で、前方の両側面には波の影響を受けないよう水深方向に深い油層誘導ネットベルトを取り付け、流れ難い油層を回収部へ誘導する構造となっている。図2-2(a)に示すように、流れに抵抗のある回収装置では、反転流や反射波により油が回収部に流れ難いが、ネットベルトを使用することにより、図2-2(b)に示すように流れや波がネットベルトを通過し、浮遊油層がうまくネットベルトに乗りやすく、回収され易い。図2-3は粘度の異なる油を水面に浮かべて、それをメッシュの異なる網ですくい1分間保持したときの、平均回収厚さ h を、平均浮遊油層厚さ h_0 で割って回収率を示したものである。油は水面に注ぎ広がった状態にしておいて、油の粘度とすくえるか否かを調べたもので、網の目としては 2 mm 角、 4 mm 角、 6 mm 角のものについて調べた。 $2,500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以上の粘性の油ではすくった油はこぼれ落ちなかったが、すくい網の周辺部では油を完全に拘えないために、回収率が 100% になっていない。この結果から

$2,500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以上の粘度の油であれば $2 \sim 6 \text{ mm}$ 間隔の網で十分に回収できる。写真2-1に実験に使用した高粘度油回収装置を示す。網の材質はポリエチレンで、格子間隔は $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ の防風ネットを使用した。油層誘導用の網ベルトも網は油回収ネットベルトと同じものを使用した。写真2-2に回収網ベルトと油層誘導網ベルトを組み合わせた実験の状況を示す。水流速は約 17 cm/s とした。観察により油層誘導網ベルトにより油層が回収部へ誘導できることが確認できた。波高約 5 cm の波がある場合の実験を行ったが、この実験では油層が波により回収部へ打ち寄せられ、波のない場合より回収状況は良かった。

水流を妨げないようにネットの目詰まりを防ぐために、ネットに付着した油の掻き取り性能を良くする必要があることが最初の実験の結果判明した。そこで柔構造材として発泡ウレタンフォーム製のローラを実験装置のワイパー部に写真2-3に示すように内側から押さえるように取り付けた結果、油の掻き取り部で良く回収することができた。

油層中に氷塊が存在する場合には、氷塊が油の流れを妨げ油の回収性能は低下する。ネットベルトの水平からの傾斜角を 30° で実験を行ったが、時々氷は油と一緒に回収される。氷と油と一緒に回収する場合には傾斜角を 30° より小さくし、氷を回収しないためには傾斜角を 30° より大きくする必要があることがわかった。氷を油と一緒に回収しないと油層がたまった氷で邪魔されて回収油量は減少する。

流出油やゴミは潮目等に集まりやすい。ゴミには木材、プラスチック等いろいろなものが混じっている。流出油の回収装置には粉碎する装置が吸引回収機の中に取り付けられていて、油吸着材等を吸引した場合ディスパーゼーのように粉碎して吸引する方式もある。種々のゴミがある場合、ゴミの種類によって粉碎する方式が異なる。図2-1に示す油回収装置はゴミも高粘性油と同時に回収して粗大のまま焼却処分場で処分する方式を考えた。

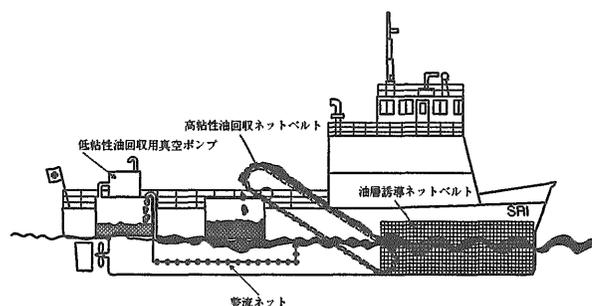
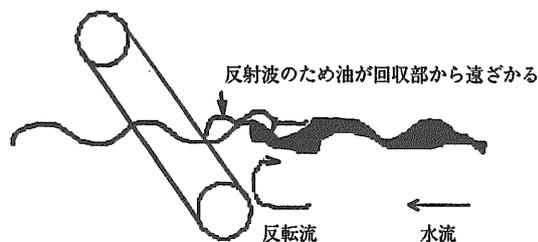
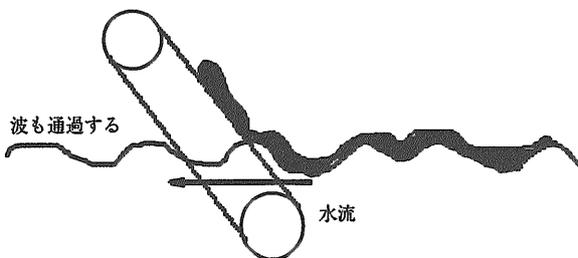


図2-1 波浪対応型高粘度油回収装置



(a) 流れが穴の無いベルトで妨げられる場合



(b) ネットベルトの場合

図2-2 ネットベルトにより回収する場合の利点

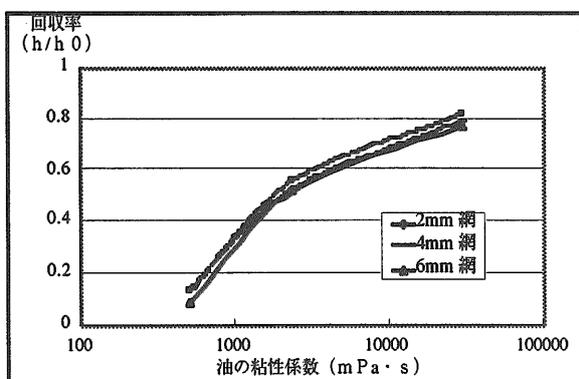


図2-3 ネットによる浮遊油の回収

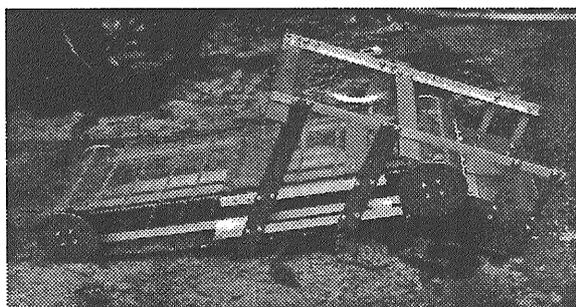


写真2-1 ネットベルト式回収装置模型

2.1.3 吸引回収の評価

ネットベルトで回収できない低粘度の油の回収方法として吸引回収方式を検討した。在来の堰方式回

収装置は回収油中の含水率が大きいため¹¹⁾、本研究では水面上からの吸引方式を検討した。

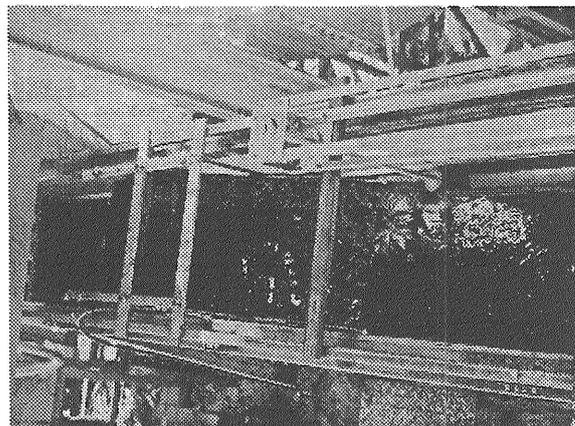


写真2-2 油回収ベルトと油誘導ベルト (片側のみ)

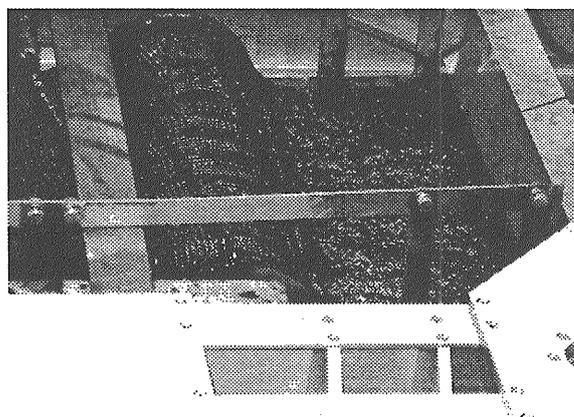


写真2-3 ネットベルト式油回収装置の油回収部と油溜まり

2.1.3.1 実験方法

油の粘度の吸引回収への影響を調べるために、軽油(L)、潤滑油基材3種類(L32、L56、T)、B重油(B)、C重油(C)の6種類の油を用い回流水槽の静止水面上に図2-4に示すように厚さ5mm、長さ6,580mm、幅450mmの油層を滞留させておき、油層面と吸引部の水平板との間隔Hを初期に5mmの状況にしておき吸引実験を行った。吸引部は油面に沿って100mmの平行部を有しており、有効幅は406mmである。静止水面上で油を浮かべた状態で吸引を開始し、2分間吸引を行った後、回収タンクに回収した油水の量を計量した。

氷板で閉ざされた油層を氷板下から吸引回収するモデル実験として、氷板を模した合板と水の間での回収実験を行った。図2-4の実験概略図においてH

= 0として間隙のない状態にし、その上に合板をかぶせて油の種類を変えて2分間の吸引回収実験を行った。

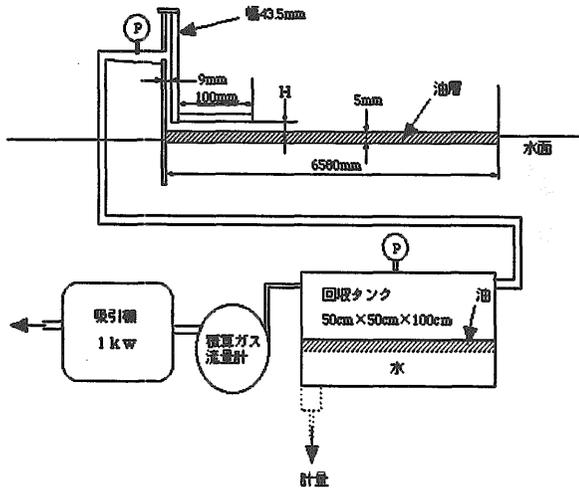


図2-4 吸引による浮遊油回収実験装置

2.1.3.2 実験結果及び考察

実験結果を表2-1に示す。粘性が低いと流れ易いが油層がとぎれて、中程度の粘度の油程追従性が良くないため、油の回収量が少なくなると考えられる。潤滑基材の100 mPa・s程度の油が流れも追従性も比較的良好。さらにB重油の450 mPa・s程度になると側壁への付着力が強く、吸引しても油が近寄らなくなる。しかし、C重油の様に高粘度になると固化するが、回収部の流れの振動等で油膜が破断され、回収部分への付着の影響が少なくなり、油の回収量が多くなっていると考えられる。

氷板を模擬した平板下からの吸引回収実験結果では、油層と氷板との界面と油層と合板との界面の付着状況は異なるので界面の影響についてはさらに検討する必要があるが、次のように考えられる。平板により気密性が高くなり、空気の吸引量が少なくなるだけ、水の吸引量が多くなり液体の回収総量は増加する。しかし油層と空気との界面より平板と油層の界面の方が摩擦抵抗が大きくなり、油の回収量は少なくなる。

表2-1 油の粘性を変えた場合の単位幅当たり
単位時間当たりの回収量

(単位: cm³/cm・s)

	水のみ	軽油	T	L32	L56	B重油	C重油
回収水量	5.8	5.2	4.51	6.72	5.04	8.87	5.58
回収油量	0.0	0.6	1.19	1.08	1.16	0.23	0.82
含水率(%)	-	90	82	86	81	97	87
動粘性係数(mPa・s)	1.0	5.5	120	110	160	500	3,200

結論としては、今回のように水面上から浮遊油を吸引する方式でも回収油水中の含水率はかなり大きく、中程度の粘度のB重油の回収率が良くなかった。

2.1.4 堰前の油層の挙動の把握

流出油を囲い込むオイルフェンスや油回収機の回収部で油層を厚くするために用いる堰を想定して水槽とモデル平板を用いて実験的に調べた。流れの場に置かれた堰前の油層及び前進する堰前の油層の滞留状況について水路実験により調べた。さらに油層中に氷板等が存在する時の状況や堰前の油量の影響、堰からの漏油防止の方法についてもそれぞれ実験を行って検討した。

2.1.4.1 水流上の堰

流れに垂直に平板を置き、滞留する油の種類を変え、粘性による滞留状況の差異及び漏油の状況について調べた。供試油として灯油(K)、軽油(L)、潤滑基材3種類(L32、L56、T)、B重油(B)、C重油(C)を使用した。幅45 cmの回流水槽に供試油を12リットル散布し、2~3時間後に実験を行った。高粘度のB重油及びC重油は加熱してから散布した。

流れがある場に置かれた堰の前の油層の滞留挙動についての実験¹²⁾、¹³⁾や解析¹⁴⁾等が多く行われている。図2-5(a)に示すように水槽の単位幅当たりの油量をS、油の密度をρ₁、水の密度をρ₂、σ = ρ₁/ρ₂、流速をV、堰から油層の先端までの長さをLとすると、田宮らの解析により次式¹⁴⁾が与えられている。

$$L/\sqrt{S} = 2.1F^2$$

ここでFは油層フルード数で、gは重力加速度。

$$F = V/\sqrt{g(1-\sigma)\sqrt{S}}$$

現実にはこの式から少しずれるため、

$$L/\sqrt{S} = aF^b$$

とおき、a、bを実験的に求める。a、bは粘度により異なるが、粘度が100 mPa・sの油を使った実験ではa = 4.8、b = -1.1が得られ、1.5 mPa・sの場合にはa = 4.0、b = -1.1であった。

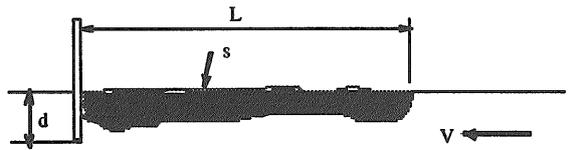
いずれの実験でも水槽のセンターライン上の堰から油層の先端までの長さを油層の長さL cmとし、横軸に油層フルード数Fを、縦軸に無次元油層長さL/√Sをとり、油層の状況を表わすと共に、漏油状況を観測し漏油現象が現われ始める時まで実験を行った。氷板等が存在する時のFを計算する時のSはS = S₀ + S_p × ρ_p/ρ₁とした。S₀は水槽の単位幅当たりの油層量cm³/cm、S_pは水槽の単位幅当たりの氷板または模擬合板の量cm³/cm、ρ₁は油の密度、ρ_pは氷板または模擬合板の密度である。

[油の粘度の影響]

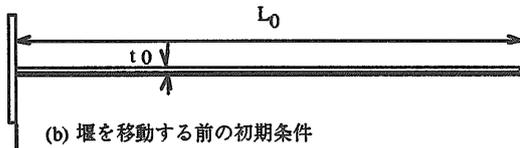
堰部の喫水を5 cmにし、油の種類を変えて行った

実験結果を図2-6に示す。10⁴ mPa・s以上のC重油の場合には加熱油散布時に油が固まって固体平板のようになり、開水面ができると、その開水面は流れが当たっても縮み難い。この場合の漏油限界速度はF=1程度と大きい。この場合の漏油限界速度はF=1程度と大きい。流速を上げていくと、漏れる時の状況は平板状の油膜が回転して漏れる。

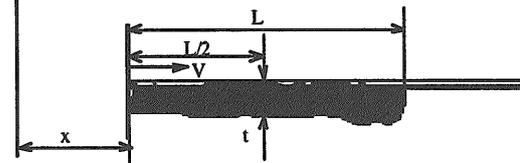
油の粘度が700～9,000 mPa・sの場合にはF=0.4～0.5程度までの変形はほとんど見られないが、F=0.5(流速21.9～24.1 cm/s)程度に流速を上げて行くと、経過時間と共にクリープ現象のようにゆっくりと油層が厚くなり堰の喫水より深くなり、千切れて漏洩する。高粘度のC重油を用いて、堰の喫水を変えて行った実験結果を図2-7に示す。堰の喫水が変わっても油層の状況はほとんど変わらない。



(a) 水流中の堰前の油層



(b) 堰を移動する前の初期条件



(c) 移動堰前の油層

図2-5 堰前の油層

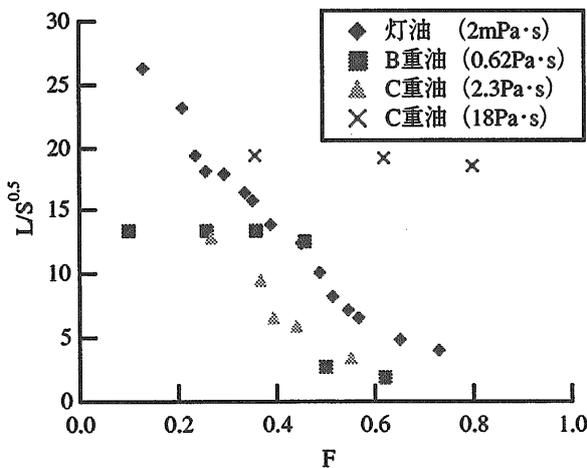


図2-6 粘度が異なる油の滞留油層 (喫水5 cm)

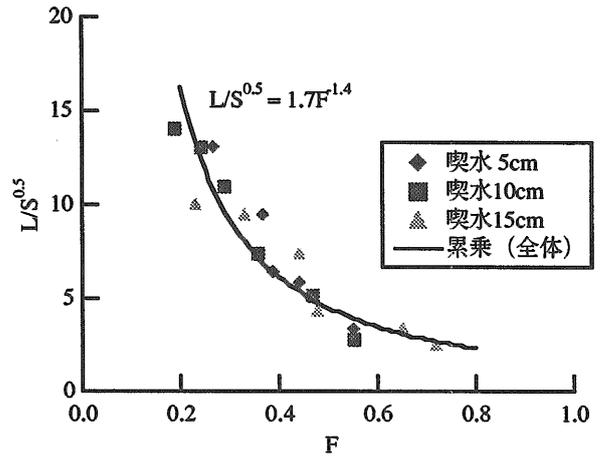


図2-7 喫水を変えた場合の滞留油層 (粘度2,400 mPa・s～4,400 mPa・s)

[油層中に氷板等が存在する場合]

油層中に氷板等が存在する時の実験結果を図2-8に示す。高粘性になると油層そのものが平板状になるため、比較的粘度の低い油で実験を行った。軽油

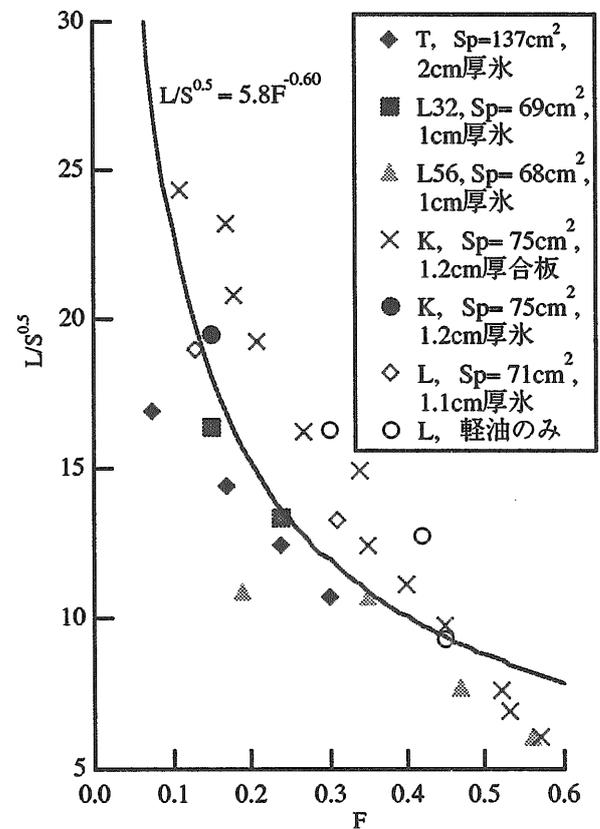


図2-8 油層中に氷板等が存在するときの滞留油層 (S₀ = 266 cm²)

や灯油のような軽い油層の場合には氷板の影響は少なく、油水界面に膜状のものを生成して $F=5.5$ 付近から漏れ始め、その漏れは流速を上げると次第に増加する。比較的高粘度の油では氷が融け難いためL56の場合は限界流速まで実験できたが、 $F=0.72$ の時、油層と氷板が回転して同時に漏れた。氷厚さ2cmとT油の実験では流速約20cm($F=0.39$)で油が氷板の下に流れ溜まり、氷板が傾き回転して漏れた。氷板の替わりに用いた合板では実験が容易であり、合板と灯油の実験では流速が33cm/s($F=0.56$)付近で油膜を生じて漏れたが、その時合板は先端部が下に少し傾斜していた。

[堰前の油量の影響]

堰前の水槽の単位幅当たりの油量 S を $22\text{ cm}^3/\text{cm} \sim 331\text{ cm}^3/\text{cm}$ まで $22\text{ cm}^3/\text{cm}$ ずつ変えて喫水10cmでC重油を用いて実験を行った。油量が多い時、堰の喫水を d とすると $d/\sqrt{S} \leq 1.0$ の場合には無次元油層長さ L/\sqrt{S} と油層フルード数 F の関係はほぼ $L/\sqrt{S} = 1.2F^{2.4}$ となった。この場合には油層は堰下端から千切れて漏れる。油量が少ない場合 $d/\sqrt{S} > 1.0$ では乖離する。この場合油水の界面波が縦渦に巻き込まれて漏れる。

[滞留油層の漏油防止]

油の堰止めの方法として図2-9に示すように、堰のみの場合と整流用の網を組み合わせた場合について調べた。図2-9の(a)図のように堰(喫水5cm)のみの場合の実験結果(油量12リットル、 $S = 266\text{ cm}^3/\text{cm}$ 、油種；潤滑油、 $\sigma = 0.885$ 、 $\mu = 310\text{ mPa}\cdot\text{s}$)では、 $F = 0.63$ ($V = 27\text{ cm/s}$)になると堰際の油水界面の波の振幅が大きくなり、油は堰をくぐって漏れた。

図2-9の(c)のように堰(喫水5cm)の前方90cmと180cmの位置に格子間隔6mm×6mmのネットを喫水深さ5cmに2列に設置した場合の実験結果(油量12リットル、 $S = 266\text{ cm}^3/\text{cm}$ 、 $\sigma = 0.887$ 、 $\mu = 420\text{ mPa}\cdot\text{s}$)では、流速が18.6cm/s($F = 0.45$)の時油水界面に大きな油中水滴(シャボン玉のような形で回りが油で中が水)が発生し、ほんの少しではあるが漏れ始める。油水界面の波が大きく振動し、その界面波が堰をくぐって多量に漏れ出すのは $V = 31\text{ cm/s}$ ($F = 0.73$)の時であった。

図2-9の(d)図のように堰前方の網の喫水を10cmに深くし、2列に設置した場合の実験結果(油量12リットル、 $S = 266\text{ cm}^3/\text{cm}$ 、油種；潤滑油基材、 $\sigma = 0.888$ 、 $\mu = 360\text{ mPa}\cdot\text{s}$)では、流速16cm/s($F = 0.37$)で前の網部で大きな油滴(油膜の中に水があるもの)が発生するが途中で消える。 $V = 18\text{ cm/s}$ ($F = 0.43$)ではたまに大きな油滴が堰の下から漏れる。 $V = 23$

cm/s($F = 0.52$)では中間の網部で大きな油滴(水中油滴)が発生し、時々漏れるようになる。そして $V = 31\text{ cm/s}$ ($F = 0.73$)で油水界面に発生する大きな界面の波が堰をくぐり抜けて漏れるようになる。

これらの実験を比較すると、網を前部に設置することにより、油層の滞留性能は向上する。しかし油層の厚さは薄いため、網の深さを深くしても、5cmでも10cmでもほとんど効果は同じであり、表面の流れだけをゆるやかにすれば良いため、網の喫水は深くしてもその効果は変わらないと考えられる。

図2-9の(c)と同じ条件で粘度が高い油の場合について行った実験結果では(油量12リットル、 $S = 266\text{ cm}^3/\text{cm}$ 、 $\sigma = 0.92$ 、 $\mu = 4,200\text{ mPa}\cdot\text{s}$)では $V = 29\text{ cm/s}$ ($F = 0.81$)まで水槽の壁面に付着して動かず、 $V = 33\text{ cm/s}$ ($F = 0.92$)で初めて油層が動きだし、網まで油層が移動した。 $V = 38\text{ cm/s}$ ($F = 1.1$)で

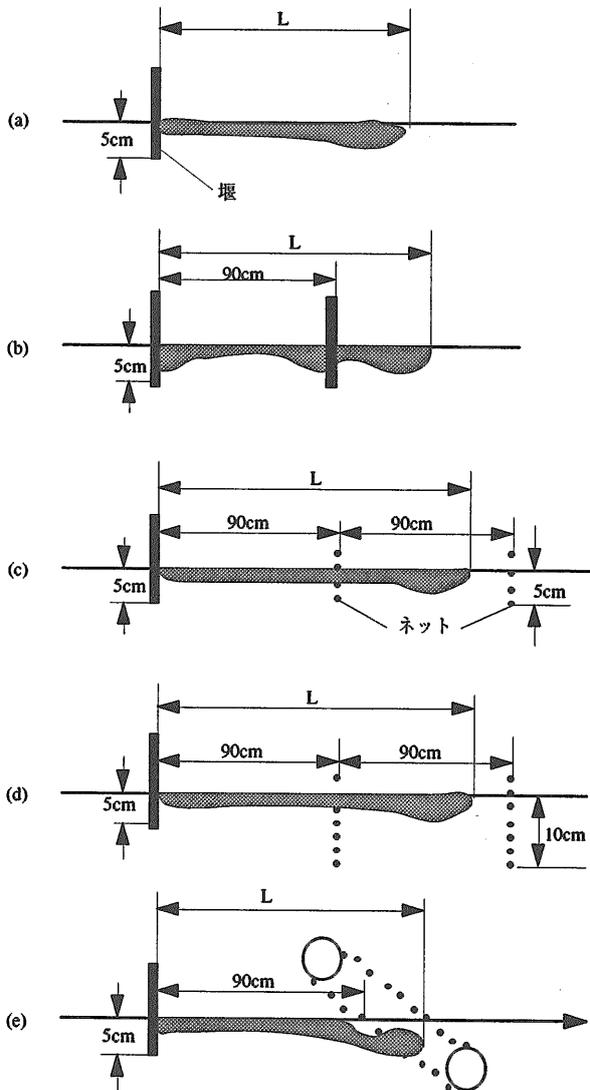


図2-9 堰及びネットの設置位置

網の下から多量に漏れだし、それが堰の後方まで漏れる。図2-9の (b) の2重の堰や (e) のように回収用網ベルトを堰の前方に設置した場合の滞油性能は良くならなかった。

2.1.4.2 前進する堰

実際に油を回収する時には、図2-5 (c) に示すように、油層があるところを堰が移動するので、その時の油層の状態を把握する必要がある。そこで油層中を堰を移動させた場合の滞留油層の挙動について、灯油、B重油、C重油を用いて調べた。実験は幅45 cm、水深45 cm、直線部8 mの回流水槽の水路部を使用して行った。図2-5 (b) に示すように、最初12リットルの油を堰前部に注いだ。実験直前に油層長さ L_0 を計った。油量を $L_0 \times B_0$ (B_0 は水路の幅で45 cm)で割り、初期の油層厚さを求めた。灯油の場合には L_0 は680 cmから860 cm、 t_0 は0.31 cmから0.39 cmで、重油の場合には L_0 は300 cmから750 cm、 t_0 は0.44 cmから0.88 cmであった。堰を一定速度で移動させ、堰部の油層の写真をモータードライブカメラ及びビデオカメラにより撮影した。その写真を用いて、滞留している油層長さ L 、及び $L/2$ の位置の油層厚さ t を求めた。 t と L についての実験例を図2-10に示す。図2-10において x は堰のスタート点からの距離である。この場合、ここで $S = L \times t$ とし、 F を油層フルード数

$$F = V / \sqrt{g(1-\sigma)\sqrt{S}}$$

(ここで V は堰の移動速度) と無次元油層長さ (L/\sqrt{S}) で、移動堰前の滞留油層についてこれらの関係を検討してみる。図2-11は低粘度の灯油の結果で、移動堰前の滞留油層は流れを堰き止めた堰の前の滞留油層より短くなっている。図2-12は粘性が異なる場合の移動堰前の油層の長さについての実験結果で、低粘度 (1.4 mPa·s) の油層は中程度の粘度 (100 mPa·s) の油層より前方に流れ易いため、長く

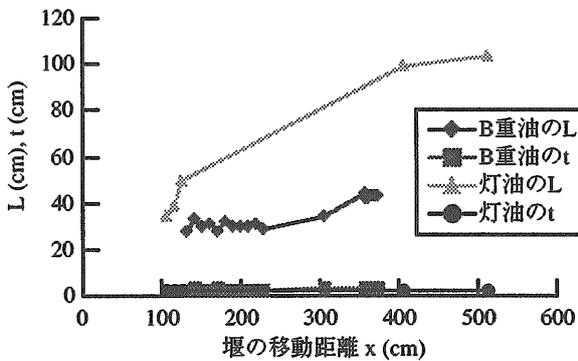


図2-10 移動堰前の油層長さと同さ (堰速度; 18cm/s)

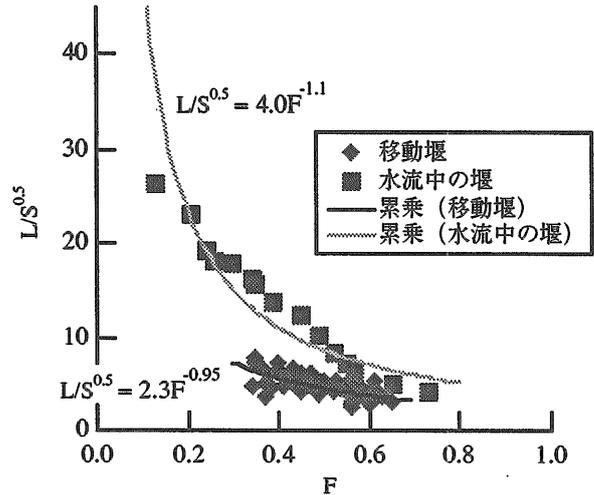


図2-11 移動堰前の油層と水流中の堰前の油層の比較

なる。また高粘度 (2,800 mPa·s) の油層は変形し難くそのまま前へ押し出される結果、中程度の粘度の油層より長くなる。

2.1.5 粉末ゲル化剤の性能評価

ゲル化剤は、油をゲル化し、流動性をなくした後ネット等によって回収するための薬剤で、オイルフェンス等で囲まれた海面や損傷した船舶の区画内の油を回収するためのものである。

ゲル化剤には液体と粉末の2種類があり、液体ゲル化剤はゲル化させるためには油と攪拌が不可欠で、ゲル化された油は柔らかく、粉末油ゲル化剤は攪拌が不要で油面に散布し直ちに硬いゲル化油が成形される。

寒冷海域における流出油の回収の場合、作業を敏速に行う必要性から、粉末油ゲル化剤 (以下ゲル化剤と記す) の適用性について実験を行った。

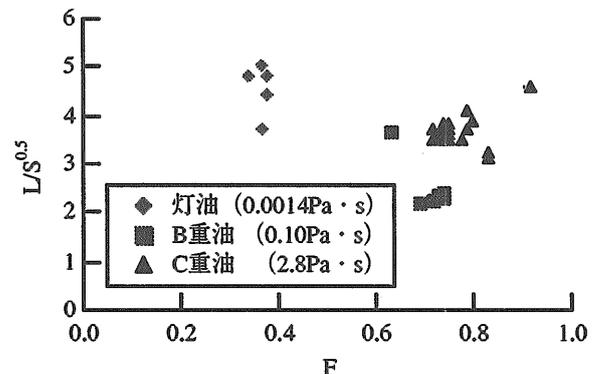


図2-12 粘度が異なる場合の移動堰前の油層 (17 cm/s)

2.1.5.1 ゲル化剤の油種適合性

ゲル化剤は、運輸省型式承認¹⁶⁾を得られたものを用いた。現行試験基準¹¹⁾では、試験油はB重油、ゲル化剤の添加率は30%でゲル化率は90%以上が要求されている。

ゲル化剤の添加率は、油の重量に対するゲル化剤の添加重量の比(%)を表し、ゲル化率は、油とゲル化剤との結合(固化)の割合を示す値である。

油種毎のゲル化率を求めた表2-2から、現行試験基準の30%よりも少なく15~20%で、試験油B重油以外でも十分なゲル化性能をもっていることが明らかとなった。

表2-2 粉末油ゲル化剤の平均ゲル化率

油種	添加率 (%)	
	15	20
A重油	98.68	98.74
B重油	95.85	99.90
C重油		96.19
原油(AL)		99.93
原油(AH)		99.98

試験温度 = 20度

2.1.5.2 ゲル化油硬度の相対評価¹⁷⁾

ゲル化剤によって流出油がゲル化されたゲル化油の硬さは、それらを回収する際の効率に影響している。また、寒冷海域における流出事故の場合、環境温度及び海水温度が低いことから、各油種の温度を0~20℃、ゲル化剤の添加率を15~30%に変えてゲル化油の硬度を求めた。

硬度の測定方法は、ゲル化油の硬さがゴム程度であることから、アスカ式(スプリング式)の硬度計を用いた。

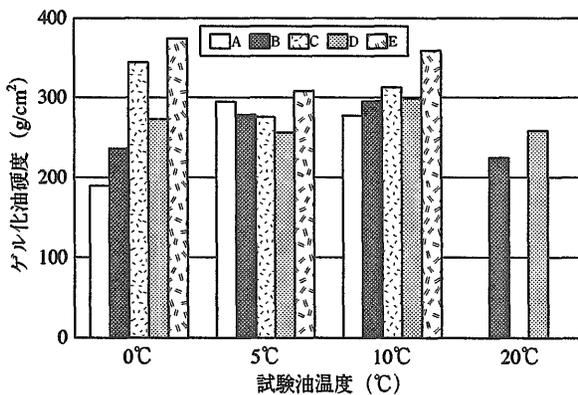


図2-13 ゲル化剤による固化試験結果

低温海域に稼働する船舶の燃料油はA重油であることから、A重油の硬度を測定した結果を図2-13に示した。

これから、C重油以外は0℃における硬度が十分あることから、低温海域においても十分使用が可能であることが明らかとなった。

2.1.5.3 水中からの添加実験

粉末油ゲル化剤は本来油面に散布しゲル化・回収するために用いられるものであるが、本研究では、氷板の下に滞留した流出油をゲル化する方法について検討した。

氷板下部に滞留している油をゲル化するためには、ゲル化剤を水中から散布しなければならない。そのためには粉末油ゲル化剤を水中に直接散布することができないため、水中にゲル化剤を混合して水面と滞留油面との境界面に散布しなければならない。

そのため、水に混合したゲル化剤をノズルから水中に散布し、ゲル化剤の水中浮上分布状況の把握、ゲル化性能を把握する実験を行った。

その結果、ゲル化剤は写真2-4に示したように水中で容易に浮上し、比較的均一に拡散して油面に到達し、網等によって回収可能なゲル化油が形成された。このことから、氷板下に滞留している流出油を回収するために使用できることが明らかとなった。

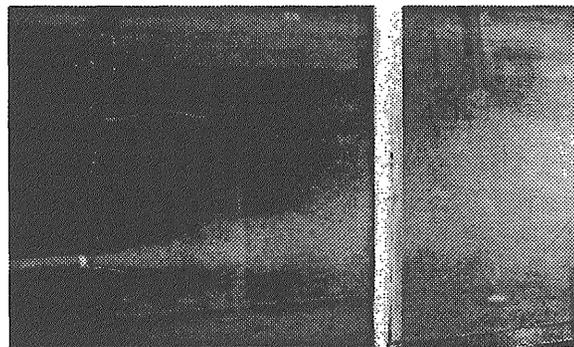


写真2-4 粉末ゲル化剤の水中での散布状況

2.1.6 油汚染監視技術調査^{2), 3), 15)}

既存の流出油の監視技術として、広域な情報を得ることのできる人工衛星によるリモートセンシングや局域の情報を得るための航空機によるマイクロ波、紫外線、赤外線等を用いるセンシング方法が種々行われている。人工衛星による海洋表面の流出油の監視は放射率や反射率の違いを計測して得られ、監視海域に人工衛星があれば、マイクロ波領域のセンシングにより計測が昼夜及び気象、海象の影響を受けず可能となる。現在、人工衛星による一般海域における流出油の拡散領域の探知技術はほぼ確立されて

いると言える。しかしながら人工衛星による氷海における流出油の監視は氷の存在により十分な情報が得られないと考えられる。

一方、航空機等による流出油の各種の計測結果は流出油の処理、回収の方法の選択に利用するとともに、処理効果の評価にも使用できる。最近では流出油の広がり、油膜の厚さ、拡散方向等をリアルタイムで監視する技術が求められている。しかしこれらのセンシング方法のうち、赤外線、紫外線カメラによる流出油の探知では検知できない場合や識別できない場合等が報告されている。また開発中のレーザー蛍光センサーは海藻、氷、雪等が介在しても流出油の探知が可能なことや、油の種類識別等ができたとの報告が見られた。また、油膜の厚さの探知について波長の異なるレーザー等を用いた実験の報告が見られた。

これらの流出油監視技術が確立されれば、氷海における流出油の監視にも十分適用可能と考える。流出油の探知ができて、氷の状況を把握できなければ、回収に役立たないことである。即ち、氷海における流出油の監視は氷の状況のセンシングと統合する必要がある。

2.1.7 まとめ

高粘度流出油回収対策として今回試作した網ベルト式の油回収機では、水流や波が反射されることなく網ベルトを通過するので、水面に浮いた油を回収部へ誘導しネット面ですくい上げ易くよく回収できる。

低粘度の油の効率良い回収には油層を厚くする必要があり、流出直後の低粘度の油を堰き止めて吸引等により回収する場合、移動する堰前の油層長さは水流中に置かれた堰前の油層に比べて短くなる。従って低粘度の油を回収する場合、移動堰の前で油を回収すると油層を厚くでき回収効率を向上できる。移動する堰前の中程度の粘性の油層長さは低粘度の油層や高粘度の油層より短くなった。

氷盤下の流出油をゲル化する場合を想定して、粉末ゲル化剤を水と混合し水中散布することを試みた。ゲル化剤は広くひろがり、ゆっくり浮上し、油膜に浸透し、これをゲル化することがわかった。

氷海における流出油の監視は氷の状況のセンシングと統合し広域の人工衛星による監視技術の充実と航空機等によるリアルタイムの監視技術の確立が望まれる。

2.2 寒冷海域での油の性状変化に関する研究

2.2.1 概要

流出油の拡散予測や回収・処理の戦術を検討する

ための基礎データとして、流出油の性状が、時間の経過及び環境条件によってどのように変化するかを把握しておく必要がある。流出油の性状は温度、蒸発率、水とのエマルジョン化の程度により著しく変化することが知られている。常温及びそれ以上の温度での油の物性値—比重、粘度、表面張力、界面張力—の報告は多いが、結氷点を含む低温側のデータは少ない。ちなみに、油で見た場合、寒冷海域の雰囲気配慮すべき油の粘度の範囲は大略図2-14に示すように $1.0 \times 10^6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の範囲に亘っていると考えてよい。それ故、油回収機の効率を評価する場合には、A重油、B重油、C重油及びC重油のエマルジョンを用いて試験を行えば、寒冷海域で配慮すべき油の粘度を一通りカバーできると考えられる。近年我が国に輸入されている原油は数十種類あるが、原油を用いて回収機器の評価試験を行うことは、危険である。また、水面に放置すれば蒸発やエマルジョン化のために時時刻々成分や物性が変化するため、原油を用いて機器の評価をするのはデータの再現性の面で難がある。そこで、比較的性状が安定している前述の油とエマルジョン油で回収機の評価を行うことが実用上望ましい。しかしながら、寒冷海面にこれらの油が流出した場合に対応する粘度、表面張力、油水間の界面張力の変化を常温から低温まで系統的に調べた例は見当たらない^{18), 19)}。

そこで本研究では、主としてA、B、C重油の0℃付近での粘度、表面張力、水との界面張力を計測し、信頼すべきデータベースを作ると共に、一部原油を用いて同様の測定を行い、この性状がA重油からC重油の変化の範囲に入っていることを確認した。さらに、上に述べた原油及び重油が、寒冷海域に流出した場合の汚染水の性状を、温度変化、氷の存在との関係で実験的に調べた。

また、氷への油の取り込みと解放の様態や油汚染水からの油の分離性についても調べた。

2.2.2 粘度

粘度の測定は、常温から氷点下に温度を変化させながら効率よく測定するため、回転式粘度計と低温恒温水槽を組み合わせた測定装置を整備して用い、常温～-20℃の範囲で行った。また、試験油は重油3種類(A、B、C重油)、原油2種類(AL:アラビアンライト、AH:アラビアンヘビー)及びエマルジョン油(含水油)を使用した。

各供試油の粘度の温度依存性を調べた結果の一例を図2-15に示す。これによると、原油及びA重油は温度の影響があまりみられないのに対して、C重油の粘度は温度の低下に伴いほぼ指数関数的に増大し、-18℃で100万 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ に至った。また、B重油は10℃以下で急激な粘度上昇を示し、-18℃付近になる

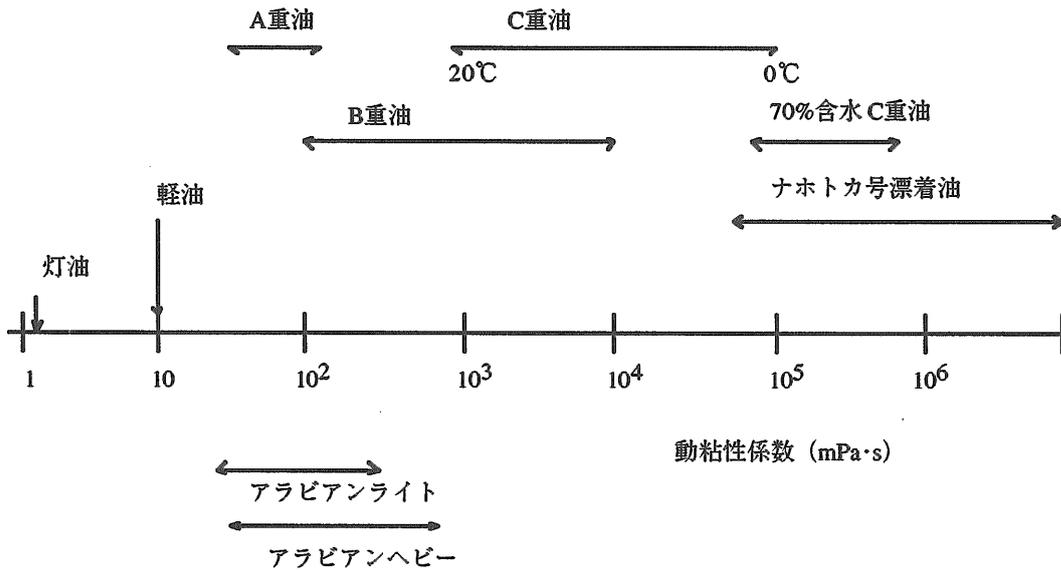


図2-14 油種による動粘性係数の範囲 (0°C~20°C)

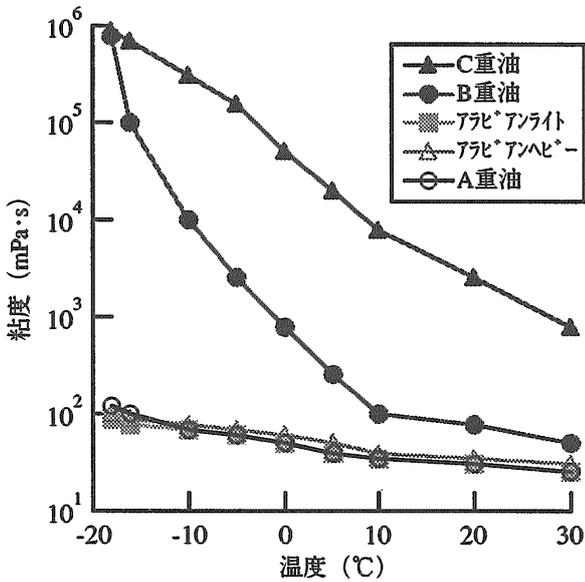


図2-15 油の粘度の温度依存性

とC重油と同程度の値にまで達した。

図2-16は流出油の粘度に及ぼす経時変化の影響を把握するため、供試油を5°C~15°Cの大気中に約3ヶ月間放置後に再度粘度の温度特性を調べた結果である。元来蒸発成分が少ない重油についてはあまり変化がみられなかった。これに対し、原油の場合は10°C以上の温度ではそれほど変化は見られないが、10°Cより低い温度になると急激に粘度が上昇する傾向を示した。これは低分子量成分が蒸発し、難蒸発成分の割合が高くなるためであり、図2-15のB重油あ

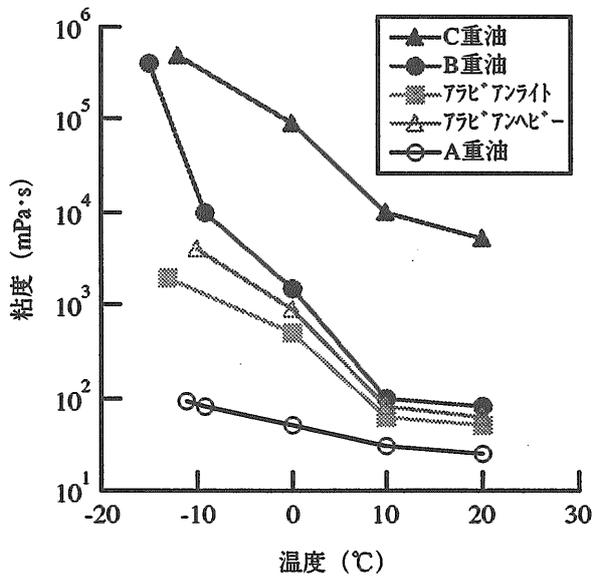


図2-16 大気放置油の粘度の温度依存性

るいはさらにC重油の粘度特性に近づいていくことがわかった。このことは原油が流出しある程度経過し、低分子量成分が蒸発すると通常海域ではあまり粘度の変化は見られないが、寒冷海域では急激に粘度が上昇し流れにくくなることを示している。

次に、油は水を吸収して油中水型のエマルジョンを形成し、その体積は3~4倍に増大することがある。このようなエマルジョン作用が油の性状を変化させる。この油の含水の影響を調べるため、これまでの結果を踏まえて温度依存性の大きいC重油を選

び、C重油エマルジョンを作製し、粘度の温度依存性を調べた。その結果を図2-17に示す。C重油エマルジョンの粘度は含水率(図中の()内に示す)の増加につれて大きくなり、また温度の低下に伴い急激に増大し、0℃付近で $3 \times 10^5 \sim 7 \times 10^5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ になることが明らかとなった。

実際にナホトカ号より流出・漂流した油の粘度をC重油エマルジョンの粘度と比較した結果を図2-18に示す。1997年1月14日に三国町で採取した風化油(含水率44.7 wt%)の粘度はC重油エマルジョンとそれほど差異はないが、約半月後の1月30日に片岩町で採取したもの(含水率68.5 wt%)の粘度はほぼ同じ含水率(70 wt%)のC重油エマルジョンの約10倍も大きな値を示した。

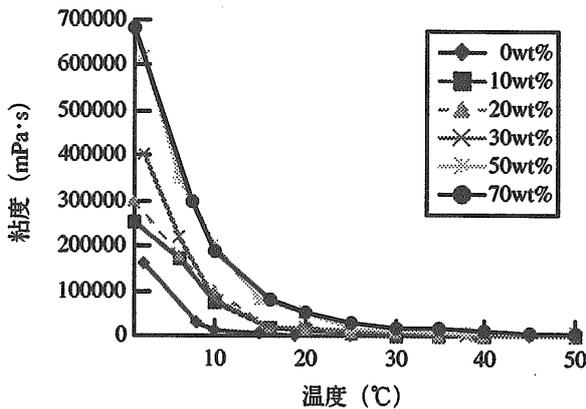


図2-17 C重油エマルジョンの粘度と温度との関係

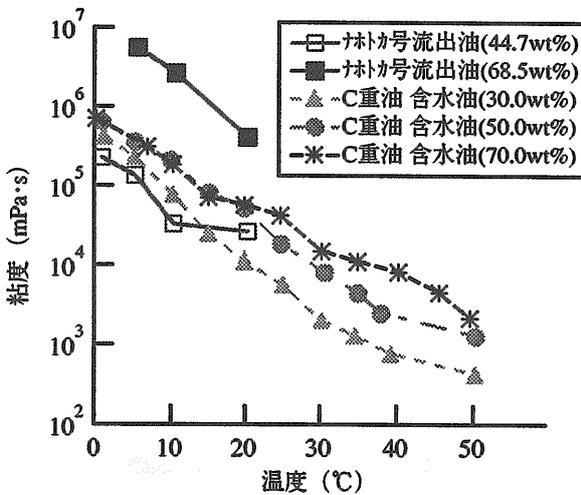


図2-18 含水油の粘度と温度との関係

2.2.3 表面張力

油の粘性を利用して油を回転円盤や移動ベルトに付着させて回収する場合には、粘度と回転円盤等の

速度の積を表面張力で割った値が影響する。そこで5種の油について油温を変えつつ表面張力をCounter Balance and Vertical Plate Method式自動表面張力計を用いて測定した。

表面張力の温度依存性を原油2種類(AL,AH)及び重油3種類(A,B,C重油)について調べた結果を図2-19に示す。これによると、各供試油の表面張力は温度の低下に伴いわずかに大きくなる傾向を示した。

また、表面張力の油種による違いは、原油及びA重油はほぼ同じ値を示したが、粘度の比較的大きいB、C重油は原油及びA重油に比べやや大きな値を示した。

水分を含まない場合から飽和含水状態までの含水率(0~70 wt%)におけるC重油エマルジョンの表面張力について、温度依存性を調べた結果を図2-20に示す。C重油エマルジョンの表面張力は25℃付近までは温度の低下に対してほとんどかわらず、それより低い温度になると減少する傾向を示し、5℃以下では粘度が著しく増大するため測定が困難となる場合もあった。

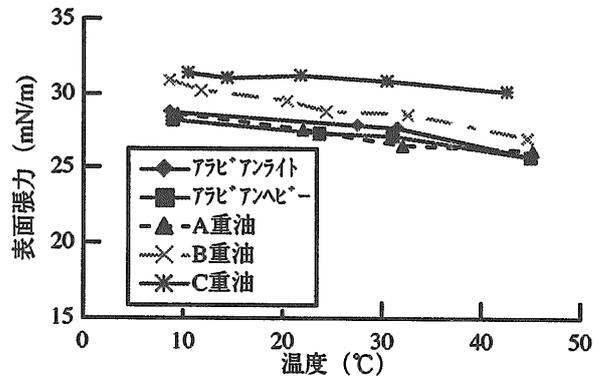


図2-19 油の表面張力と温度との関係

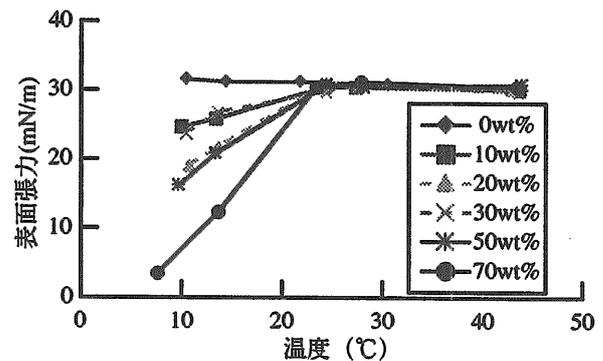


図2-20 C重油エマルジョンの表面張力と温度との関係

2.2.4 油と水の界面張力

オイルフェンスを用いて油を堰き止める場合、油と水の界面から油滴が発生して水流に取り込まれて、オイルフェンスの底をくぐって漏れる現象がある。この現象には水の密度、流速、油滴の直径、油と水の界面張力、重力加速度が関係していると考えられる。そこで油と人工海水の界面張力の温度特性について表面張力の場合と同じ自動表面張力計を用い、4種の油について測定を行った。その結果を図2-21に示す。界面張力は温度の低下に伴いやや大きくなる傾向がみられ、油種による違いは、C重油が表面張力の場合と同様に最も大きな値を示し、A、B重油はC重油の約1/2の値となりその差は顕著にみられた。また、原油の場合はAHが比較的大きな値を示し、B重油よりも大きくなっている。これは供試したAHが小瓶に分けて保管しておいたものであり、経時変化により低分子量成分が蒸発し、難蒸発成分の割合が高くなっていったためと思われる。

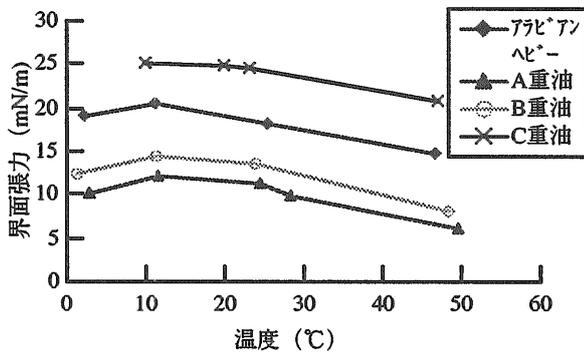


図2-21 油と水の間の界面張力

2.2.5 油汚染氷の性状

油汚染氷の性状を調べるために、油汚染氷実験用水槽を製作し、油の少量流出時の人工海水の凍結挙動を冷却実験により調べた。使用した油は20℃のA重油、C重油であり、一部の実験については原油（アラビアンライト）及びB重油による比較も行った。流出時の気温は-5℃及び-30℃の2条件である。その結果、結氷開始直前に流出した油は水面上に拡がるが、海水に触れると温度が下がるため、B、C重油では粘度が急上昇し、拡散はほとんど停止する（図2-22-A）。そのままの状態では放置すると、油膜下に氷が成長したが、油膜の断熱効果により、結氷速度は遅くなる（図2-22-A'）。氷板成長中に流出した場合は、氷板下で油がほぼ円形状に拡がる。そこで粘度が上昇し、また、氷、油、海水の比重の大小関係から、油は氷板下にとどまる（図2-22-C）。

そのまま結氷を続けると、油膜を取り囲むように氷板が成長し、オイルーアイスサンドイッチが生成

した（図2-22-C'）。

大量流出時の油汚染模擬海水の凍結挙動の実験は冷却速度や模擬海水の組成等の結氷条件を同一にするため、水槽を4分割して人工海水を張り、約4cm厚さに結氷した時点で各区画に油層厚さが0（油流出しない）、1、2、3cmになるようにC重油を氷板下に注入して結氷挙動を観察した。注入直後、区画全面に油が拡散し氷板下に油層ができる。このまま放置すると油層の下側にも結氷し、氷と油の積層状のオイルーアイスサンドイッチが生成した。

2.2.6 油と氷の分離性

前節の実験で生成された氷板を用い、流出油の氷板への付着・分離状況を調べた。氷表面が滑らかな場合はオイル吸着マットでほぼ完全に油を拭き取ることができる（写真2-5）。しかし、表面が凹凸の場合はオイル吸着マットが触れない凹部に油が残り、完全には拭き取ることはできなかった。これに対し、海水で洗い流すと氷の表面状態に関係なく、水と一緒にきれいに流れ落ちることがわかった（写真2-6）。また、結氷板の上に比較的厚い油層になるようにC重油を流出して生成した油汚染氷板を切り出し、-20℃の低温室に放置して定常に達した後、半固化した油層と氷板の界面を引き剥がすと、きれいに剥離し、氷表面には油分は見られなかった（写真2-7）。

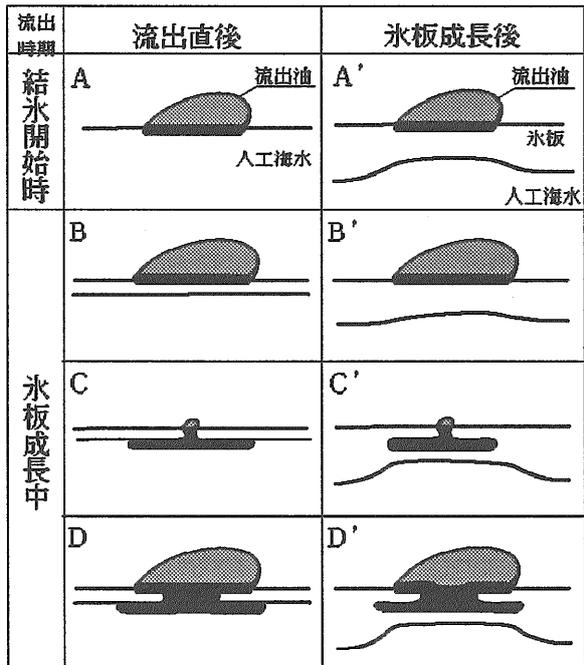


図2-22 油の少量流出時の人工海水の凍結挙動

これまでの実験結果より氷と油の分離性が良かったことから、氷と油の混在時の油回収に必要な油と

氷の分離試験を試みた。試験は図2-23に示すようにオイルフェンスを想定した堰前に低傾斜角度のネットを取り付け、氷は水流により網の下面を移動して堰をくぐらせる。また、油は網を通過させて浮上させ、網と堰で囲まれた領域に滞留させるようにして分離する。この場合の網の目の間隔を変えて、氷とB重油の分離状況を調べた。網は写真2-8に示すようなポリエチレン製の網で、その格子間隔0.8 cm×1.3 cm, 2.6 cm×2.6 cm, 5.3 cm×5.3 cm, 10.5 cm×10.7 cmの場合について流速を約8 cm/sから最大47 cm/sまで変えて観察した。油はB重油を網の位置の前方に12リットル注ぎ、その後流速を上げて実験を行った。その結果、網の目の間隔が10 cmを越えると氷が引っかかり、堰と網で囲まれた領域の流れを緩やかにできないため、油が後方に流れ易く、分離効果は良くない。また網の目の間隔を1 cm程度以下にすると、網全面に油が付着し、油の浮上を抑制し、氷も油も堰の後方に流れて分離し難い。網の目の間隔が2.5 cmから5 cm程度の場合には、油は網部で滞留し浮上する。氷は後方に流れるため、氷と油の分離性能は良かった。氷と油の分離を良くする為には、網の長さを長くとり、氷を網面で転がせたり、滑らせることにより、油を氷から分離して浮上させ、油を良好に捕捉できると考えられる。

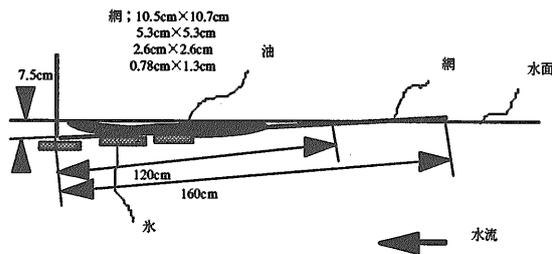


図2-23 網による油と氷の分離実験

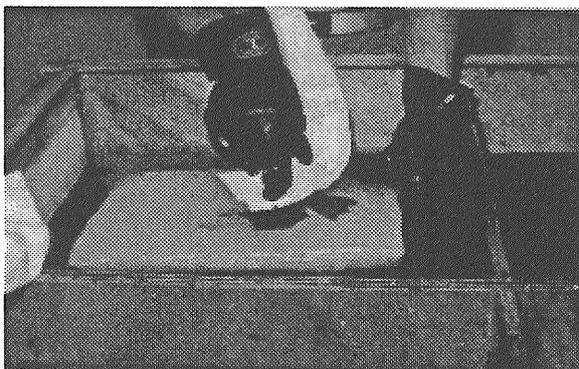


写真2-5 氷表面が滑らかな場合

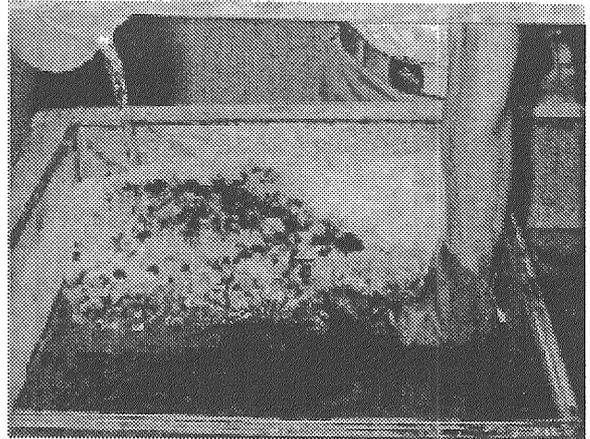


写真2-6 海水で洗い流した場合

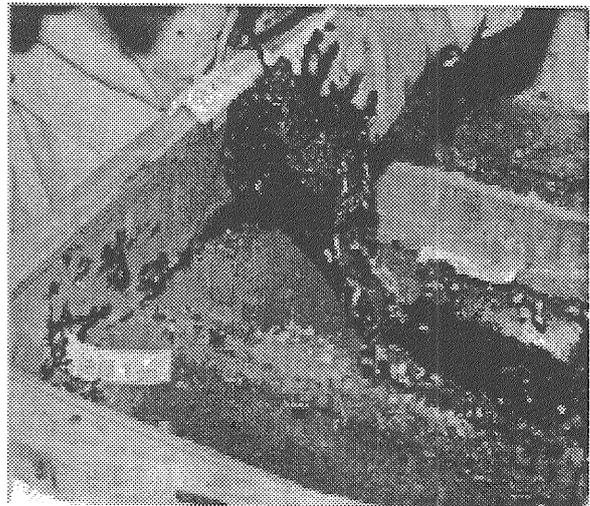


写真2-7 低温室に放置し半固化した油層と氷板の界面を引き剥がした場合

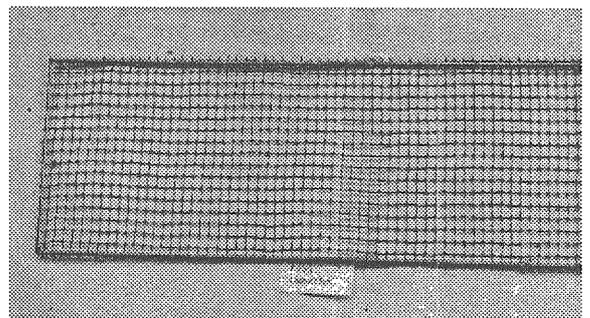


写真2-8 格子間隔2.6cm×2.6cmの網

2.3 寒冷海域における油の拡散挙動

2.3.1 概要

寒冷海域における油流出は、通常海域におけるものと比較して、次の2点が大きく異なる。その第1は、低温環境であることにより油の物理・化学的性状が常温状態に比べて大きく変化することであり、その第2は、流出海域に存在する海水により、流出油の挙動が開水域とは全く異なることである。従って、寒冷海域における油流出問題に関する研究的取り扱いも、通常海域における場合とは必ずから大きく異なるものとなる。低温環境における油の特性に関する研究成果については前節で述べた。本節では海水の存在する海域における流出油の拡散挙動に関する研究成果について述べる。

海水は様々な形態で存在するが、本研究では、海水の最も基本的な形態として、一様な厚さを有する「平坦水」に覆われた海域を想定し、ここに何らかの理由により油の流出があり、平坦水の下面に油が拡散する状態を取り扱った。このような流出事故では、流出油は流出源から上昇した後、氷板下面に沿って拡散する。氷板下面の油の拡散領域の推定は、流出油の回収、汚染範囲の拡大防止等に極めて重要である。しかしながら、氷が存在する水域への油の流出問題についての研究は、開水域における油流出問題に関する研究に比べて研究の量が著しく少なく、氷板下の油の拡散挙動については未解明な部分が多い。

一般に、油が海中に流出した場合、時間の経過に伴って、揮発成分の蒸発、エマルジョン化等の性状変化が起こることが知られている。従って、流出油の拡散問題は、初期拡散と長期拡散に分けてそれぞれ異なる取り扱いをしなければならない。しかしながら、氷板下に油が流出した場合には、氷板の存在により蒸発が妨げられるとともに波動等の影響が小さいことから性状変化の発生も遅延すると考えられる。このため、本研究項目では油の初期拡散を研究の対象として、油の拡散挙動に対する油の性状の変化の影響は考慮せず、平坦水の下面に油が拡散する現象についての基本的知見を得ることを目的として、水槽における模型実験を行うとともに、数値シミュレーション手法の開発を行った。

2.3.2 実験的研究^{20), 22), 23), 24), 25)}

実験は船舶技術研究所水海船舶試験水槽において行った。本試験水槽は、長さ 35 m、幅 6 m、水深 1.8 m の試験水槽を冷凍庫内に封設した実験施設であり、冷凍庫内を低温（-20℃程度）に保つことにより水槽表面に氷を張らせる能力を持つ。本研究ではこの水槽に氷を張り、この下面に機械用潤滑油を流出させ、この挙動を観測した。

本研究では2種類の実験を行った。その第一は、氷板下の水に流れ等の無い静穏な状態において氷板下に流出した油がどのように拡散するかについての実験である。これは、海底パイプライン等から油が流出し、氷板下へ拡散するような状態を想定した実験である。このような場合、油の拡散範囲の推定が油の回収等の作業のために重要な因子である。このため、図2-24に示すような手法で実験を行った。この実験では、氷板に設けた小孔から油を氷板下に流出させた。この結果、油は氷板の下に流出孔を中心とする円状の油膜として拡散する。この油膜の拡散挙動を水槽底部に設けてある観測窓からビデオカメラにより観測した。第二の実験は、氷板下に流れがある場合の油の運動についての実験である。これは、流出後の油が潮流等の作用により、移動・拡散する場合を想定したものである。氷板の下に流れがあるような状況を水槽内に再現する手法としては、ポンプ等により水槽内に流れを起こすことが最も直接的である。しかしながら、水槽が幅 6 m、水深 1.8 m と大断面を有することにより、所用の流速を発生させるためには大流量のポンプが必要であること、水槽内の流速分布の二次元性を保つことが困難であること、が懸念された。このため、氷板下に油を流出させた後、氷板を一定速度で運動させる手法を採った。実験手法の概要を図2-25に示す。実験では、氷板下に油を流出させた後、氷板を一定速度で運動させ、この時の油の運動を油膜の上部に設定したビデオカメラで撮影した。両実験の結果は、ビデオ画像を画像解析することにより求めた。

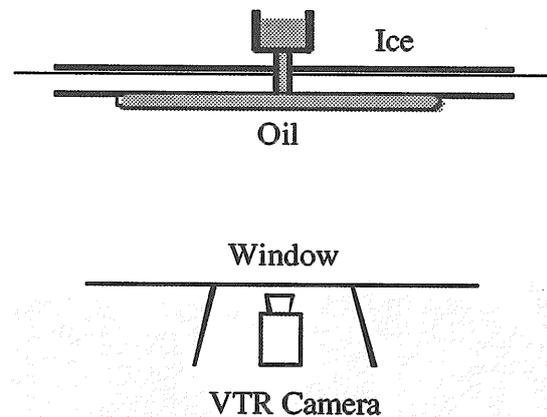


図2-24 氷板下への油の拡散についての実験

氷板下に流出する油の拡散挙動については、これまでいくつかの研究例があるが、本研究の結果、これらの研究成果を裏付ける結果を得るとともに、過去の研究において知られていなかった知見を得、氷板下における油の拡散について新たな推定式を導い

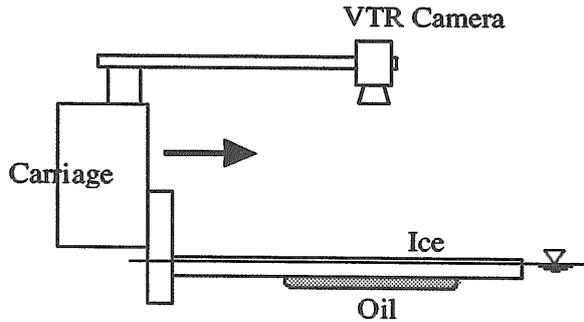


図2-25 氷板下の油膜の流れによる移動実験

た。実験の結果、一定流量で油を流出させた場合の油膜の直径は、流出開始からの時間の平方根に比例して増大することが示された。これは、過去の研究結果と定性的には一致するものの、定量的には異なることが判った。このため、理論的考察をした結果、油に働く界面張力を考慮することにより、このような定量的差異が説明できることが示された。この理論解によれば、氷板下に流出した油の拡散挙動は、油の比重、粘性係数、油の流出率及び界面張力により定まる無次元パラメーターにより支配される。

この理論解に基づいて油の拡散挙動を試算した。この試算では、100 l/secの流出率で5時間にわたって油が流出を続けた場合を想定した。上記の無次元パラメーターについては、油の比重及び界面張力に比べて、油の粘性が油の種類・温度等によって大きく異なることを考慮して、油の粘性を変化させて計算を行った。計算結果を図2-26及び2-27に示す。油は流出源からの流出が停止しても拡散を続け、最終的には油の密度と界面張力の関係で決まる最終的な油膜サイズに到達する。この試算の場合、この油膜サイズは半径200.3 mとなる。図2-26は、流出が停止した直後の油のサイズと粘性係数の関係を示したものである。図より、粘性係数の低い油は、流出停止直後ですでに最終的なサイズに近い範囲まで油膜が広がっているのに対し、高粘度油では、油の拡散領域はまだ小さいことが判る。一方、図2-27は流出停止後の油が、最終的な油膜サイズの90%の半径に達するまでの時間を示したものである。油の粘性係数が0.1 cPの場合は流出停止時にすでにこのサイズに達している。これ以降油の粘性が高まるにつれて、油膜の拡散に要する時間は、時間単位から日単位と長くなり、最も油の粘性が高い場合には極めて長時間を要することが判る。ただし、このような長時間の内には氷板下といえども油の変性が進み、それが拡散挙動にも影響を与えるであろうことを記しておく。氷板下に流出した油の回収には油の特性によるこのような拡散挙動の違いを考慮する必要がある。

一方、氷板下の油に対する流れの影響に関する実験からは次のような結果を得た。まず、流れによる油膜の変形・移動のパターンは、流れの強さが増大するにつれて、(1) 動かない、(2) 流れと直角方向を長軸とする楕円形に変形して移動、(3) 変形がさらに進んで流れと直角方向の端から油膜が分離、というように変化する。この変化は、流れの強さばかりではなく、油膜のサイズに依存し、油膜サイズが小さいほど流れの影響を受けやすい。流れによる油の移動・拡散を考えた場合、油の移動限界流速及び流速と油の移動速度との関係が問題となる。これについては、油膜サイズが小さいほど移動限界速度が低く、また、流れに対する油膜の移動速度も高い。本実験の場合、移動限界速度は、油膜面積が400 cm²以下の場合には50 cm/s程度、800 cm²以上では150 cm/s程度となる。今回の実験では氷板下の粗度が低いが、実際の海水では氷の変形・成長・融解等のためもっと大きな粗度があると考えられるので、移動限界速度が本実験結果よりも高くなることが考えられる。

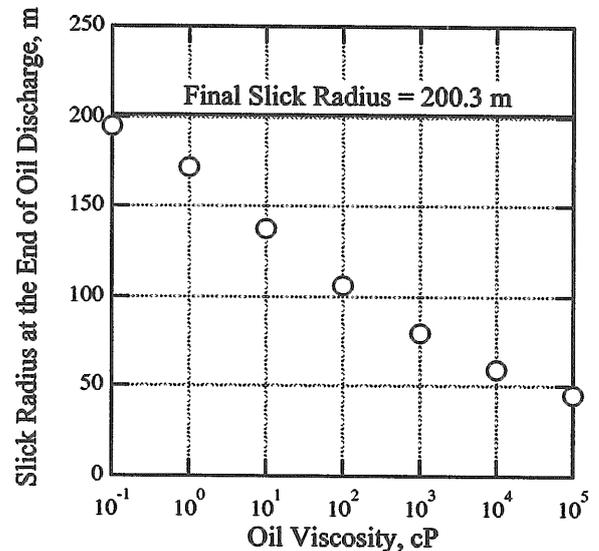


図2-26 流出停止時における油膜半径

2.3.3 拡散シミュレーション²¹⁾

(1) シミュレーション手法の検討

氷盤下流出油の拡散に関しては従来から実験的・理論的手法に基づく研究が行われているが、数値解析的手法による研究例は少ない。本問題のメカニズムの解明に資するためには、計算に要する負荷が大きくても、できる限り高精度の手法を採用する必要がある。そこで本研究では流体運動を厳密に記述したナビエ・ストークス方程式の直接解法に基づく、多相流数値シミュレーションの適用を試みた。文献調

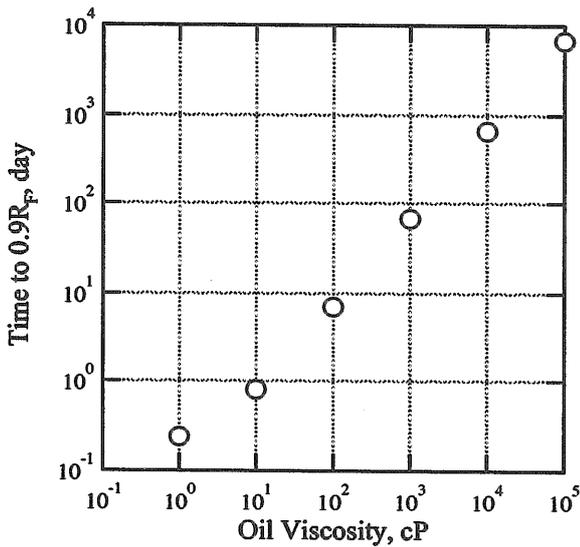


図2-27 最終油膜サイズの90%に達するまでの時間

査により代表的な多相流計算アルゴリズムとしてVOF法、CIP法及びLevel-set法を採りあげ、それぞれの手法の得失を評価した。その結果、本研究ではこれらのアルゴリズムの中で最も計算精度が高いと考えられるLevel-set法を採用した。

(2) 氷板下流出油の拡散シミュレーション

平坦氷板下に流出した油の拡散挙動をLevel-set法で計算した。本研究ではカリフォルニア大学デビス校のサスマン助教授（研究当時）が開発した計算コードをベースに、氷板と水・油の三相が交わる接触点における接触角に関する境界条件を与えることによって固液間の界面張力をモデル化する手法を新たに提案した。

図2-28に氷板下流出油の軸対称拡散シミュレーション結果の一例を示す。ただし、油の比重及び動粘性係数はそれぞれ0.878 g/cm³及び0.254 mPa・sであり、油の流量率は24.59 cm³/sである。ただし接触角は160°とし、油水の界面張力は49.2 mN/mとした。本計算で設定したパラメータは平成8年度に氷海水槽で実施した実験結果と一致させている。時間の経過とともに油が拡散していく様子が図の曲線（=油氷界面）の移動によって示されている。油が拡散する速さを実験結果と比較した結果、両者は非常に良く一致し、本計算手法の精度が十分に高いことがわかった。

2.3.4 まとめ

平成8年度及び9年度には流れのない条件下で氷盤下に流出した油の軸対象拡散に関する実験的及び理論的検討を実施した。その研究成果は平成10年度に

実施された数値シミュレーションの妥当性を検証するデータとして用いられた。これらの研究では氷盤底面の凹凸がない理想化した状態のみを対象としたが、実際の氷盤底面には凹凸がある場合が殆どである。この場合には局所的な窪みに油がトラップされるために、凹凸のない場合に比べて拡散範囲は狭くなると考えられる。従って、本研究結果は、十分に大きな氷盤の底面に油が流出した場合について、氷盤と流れの相対速度がない条件の下で初期に拡散し得る範囲の最大値を与えると解釈できる。

現実には氷盤底面の凹凸とともに氷盤とその下部の流れに相対速度が存在する。そこで相対速度の影響について平成10年度に氷海水槽を用いて実験を行った。その結果、油の移動速度が相対流速及びスリック半径に依存することを示すとともに、相対流れを有する現実に近い状況の下で油による汚染領域が拡散・移動するシナリオを提示した。

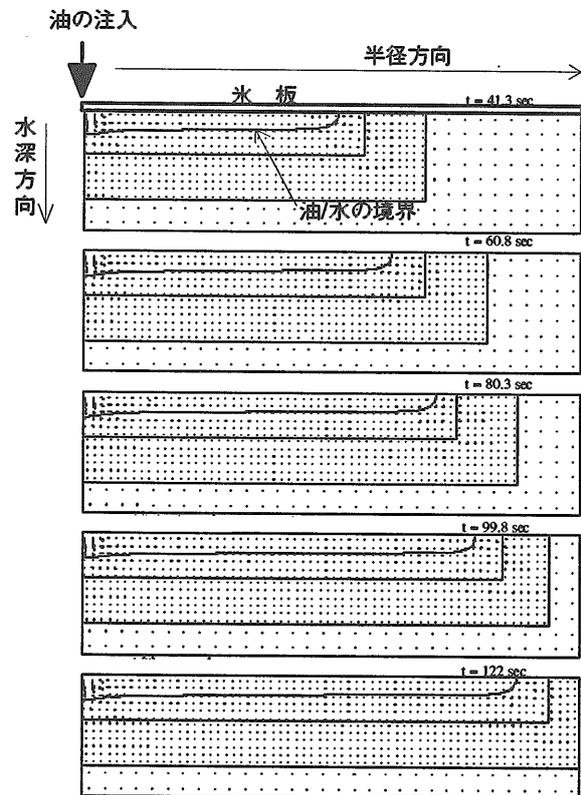


図2-28 氷板下流出油の軸対称拡散シミュレーション結果

2.4 オホーツク海海水データベース

2.4.1 概要

冬季オホーツク海で油流出事故が起きた場合、除去・漂着防除作戦の立案・実行には海水データが必

須である。また、将来、油を含有した海水の拡散数値予測を行う場合にも、基礎データとして海水データが必要となる。このため、本研究では、現状で手に入る限りのオホーツク海海水のデータを集集し、データベース化することとした。データベースは、氷密接度データベース、氷厚データベースの2種類のデータベースから構成される²⁶⁾。

2.4.2 氷密接度データベース

海水氷密接度データは、5日毎の氷密接度情報であり、気象庁及び第一管区海上保安本部のデータを基に作成した。現在1989年～96年度の7年分の海水期のデータを保有しており、海域の範囲は東経135度～162度、北緯42度～61度とオホーツク海ほぼ全域をカバーしている。分解能は15分×15分であるため、東西に約20 km、南北に約28 kmのセル毎のデータとなる。このセル毎に、氷密接度を0、1-3、4-6、7-8、9-10の5段階に区分し、青、緑、黄、赤と5色で色分して表示を行う。図2-29はその表示例である。

データベースソフトウェアは、Java言語とHTMLの組み合わせで独自に開発したものであり、インターネットのブラウザ (Netscape NavigatorやInternet Explorer等) を使用して、パソコンレベルで検索することが可能である。

氷密接度データベース使用の際は、Select Windowを表示させ、プルダウンメニューから、年平均、月平均、週(5日毎)かを選択し、期間を選べば密接度が表示される。データベースとしては5日毎のデータを持っており、年平均、月平均はJava言語によってここから計算する。表示海域はズームイン、ズームアウトも可能である。年平均密接度の表示は、年間を通じて密接度の高い海域がわかるとともに、年毎の海水の勢力の強さの比較も行うことができる。

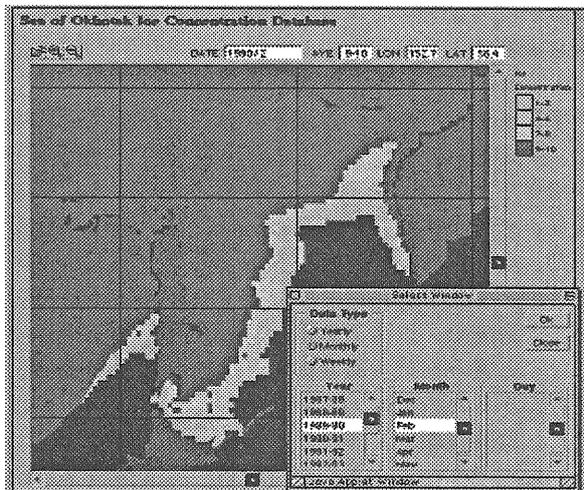


図2-29 海水氷密接度データベース表示例

2.4.3 氷厚データベース

氷厚情報は、作戦立案上、非常に重要性が高い情報であるが、現在のところ、衛星リモートセンシングによって定量的な情報を得ることは困難である。これを補完する目的で、当所では1991年より海上保安庁装備技術部と共同で冬季オホーツク海の氷厚データ収集を行って来た^{27), 28), 29), 30), 31)}。船上に設置したCCDカメラにより、船体によって割れて起きあがってくる氷塊をVTRに納め、画像解析により氷厚を解析する。

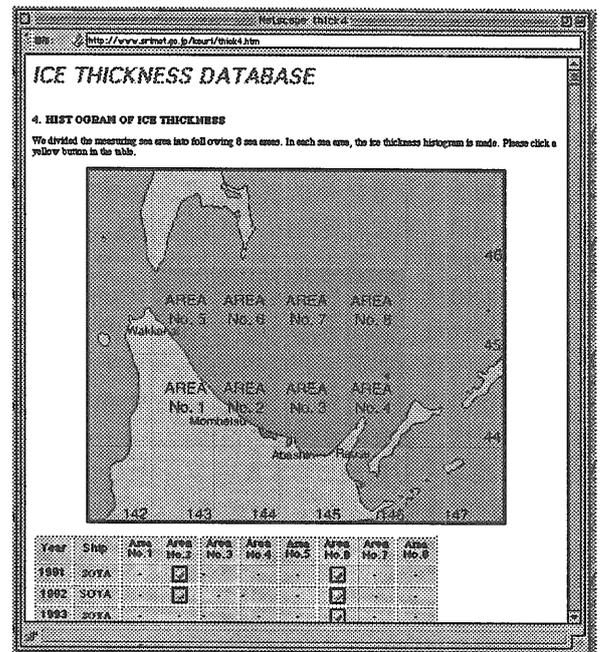


図2-30 実船試験海域分割方法

1991年から毎年行われている計測海域は、東経142度～146度、北緯44度～46度の範囲に集中している。そこで、これを図2-30に示すように、東経、北緯とも1度毎、8つの海域に分割し、海域ごとの氷厚のヒストグラムを計算した。データベースはHTML言語で作成されており、海域をクリックすることにより、図2-31に示すような海域ごとの氷厚のヒストグラムが表示される。時間的・空間的にも局所的なデータではあるが、希少な氷厚情報として注目度は高い。

2.5 油汚染対策の全体システム

2.5.1 あらまし

流出事故への対応を考察する際、事故現場の海域・海岸域の地理的・生態学的特徴や気候・海洋学条件を基礎として、起こりそうな事故のシナリオや流

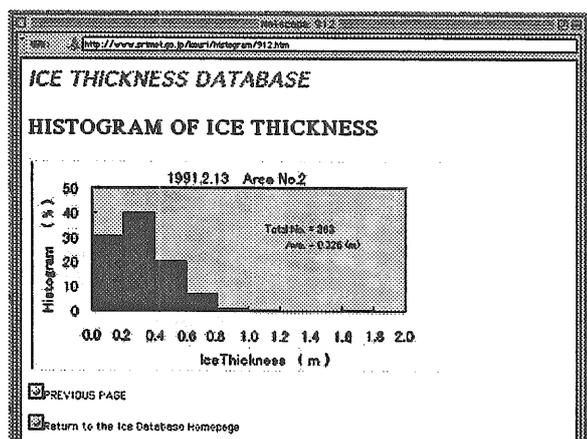


図2-31 氷厚ヒストグラム例

出油の種類などを想定する。こうした想定の下で、事故防止の施策、環境影響評価、流出の監視、緊急対応体制、油回収・処理技術や作戦支援のソフトの体系などを有機的に統合した体系を「全体システム」という。寒冷海域に対応するため、これまでのシステムにどのような変更を加えるべきかを考察した。

海洋油汚染対策の研究は、事故防止の施策、汚染事故への対応、事故後の補償、教訓のフィードバックなどに関連する極めて膨大な内容を含んでいる。平成8年度は、全体システムを構成するこれらのサブシステムに含まれる要素を抽出した。平成9年度は、我が国に直接影響を及ぼすであろうオホーツクの石油ガス開発と冬季オホーツク海の自然条件を考察し、油汚染事故の可能性を考察し、海上交通の安全対策を考えた。そして、この海域の特殊事情に鑑み、前述の諸要素に重み付けを行った。重み付けとは、寒冷海域の地理・気候条件、社会事情などに起因する特別な要件を見いだすことである。平成10年度は、既存の全体システムを拡張し、新しい機能を付加するに際して、サブシステムまたは構成要素の着手の優先順位を示すと共に、それらの備えるべき要件や考慮すべき周辺条件について調査し考察を加えた。近い将来我が国が直面するであろうオホーツク海流氷域での油汚染事故に備えるために、この海域の氷況ならびに気象データは不可欠である。そこで、海上保安庁及び気象庁のデータを基に、流水の密接度データベースを、又氷厚のデータベースを海上保安庁/船舶技術研究所の共同観測を基に作成した。(2.4参照)

2.5.2 システムの構成要素

海洋油汚染対策は、事故防止施策、環境影響評価、監視、汚染の最適処理、事故後の補償、教訓のフィードバックなどに関連する極めて膨大な内容を含んで

いる。これを寒冷海域特有の事情に基づき、評価検討することが本研究の眼目である。平成8年度は、全体システムを構成するこれらのサブシステムに含まれる要素を拾い出し、その一般的要件を考察した。

a. 事故防止の施策

公海上でのタンカーの事故防止のためには、船体構造設備の規則・標準、船体等の定期検査、航路の規制、運航者能力の資格制度などの海事規則類が、国際的な見地より標準化・義務化される必要がある。海氷、着氷、暗夜と霧が重大な航行障害となる寒冷海域に対しては、一層厳しい規制が必要とされる。また、航路上の流水状況等を観測し、航海支援情報として放送するシステム、砕氷船による航行支援なども有効であろう。

b. 環境影響評価

事故が起きたときの汚染被害の大きさは周辺環境の汚染に対する鋭敏度に依存する。事前に沿岸部の環境影響鋭敏度マップ(ESIマップ: Environmental Sensitivity Index Map)を作り、これを参照しつつ、様々な事故を想定し、最適な対応作戦を準備しておくことがいざという急場に有効である。ESIマップに載せるべきデータの種類とアイコン等の表示形式を選定し、標準化する必要がある。我が国のESIマップ作りは東京湾、大阪湾、伊勢湾についてのみ作成が終わり、それ以外は未着手である。オホーツク海向けのESIマップの作成は緊急課題である。

c. 監視と拡散の予測

効果的な流出油回収作戦を立案するには、常に寒冷海域を航行中又は航行予定のタンカーの位置を把握すること、および流出油の発見と油種の同定が必要である。また、いったん事故が起きた場合、油がどのように拡散漂流するかシミュレーション出来るプログラムの開発が必要である。リアルタイムで、流出油の性質、海流、流水の漂流、海上の風速などの変数が直ちに入手できるネットワークやデータベースを構築する必要がある。

d. 最適処理と支援情報システム

寒冷海域での事故には他からの支援が得にくいので、流出直後には自船で一定の対応(流出の極小化)ができることが望まれる。近隣の汚染防除組織が到着後、その海域での最適処理(=機械的回収、現場焼却、分散剤散布など)を実行することになる。最適とは必ずしも汚染除去の観点での最適とは限らない。人命安全、コスト重視の判断も含まれる。何もしないと言う選択もあり得る。速やかに最適処理を選択できるためには、汚染事故情報や海域情報、ESIマップ関連情報、油類の風化特性、油処理剤の特性と油種適合性のデータ、油回収船・汚染防除機材の在庫および性能データ、防災組織およびその指揮連絡系統などの情報やデータが必要である。

e. 国際協力

タンカー等船舶の事故を未然に防止するには、船舶、設備および船員の質を高め、航行支援や航行制限を行う必要がある。事故が起きたとき、事故船、沿岸国、被災者、サルベージ会社、損害保険会社の利害が輻輳するが、これら当事者が様々な国籍に属する人が多い。適正な事故予防の規制および事故補償の体系を構築するには国際的協力を欠かせない。国際海事機構IMOの活動を通じて、我が国の周辺国を巻き込んだ取り組みを推進することが望まれる。オホーツク海を対象とするので、日露2国のみとせず、寒冷海域油汚染対策の経験知識が豊富な米国やカナダの参画を得ることが賢明であろう。

2.5.3 寒冷海域油流出シナリオの検討

寒冷海域での油流出事故に対応できる技術や汚染防除の全体システムを考察するための基礎として、過去の事故例に学ぶと共に、将来事故発生が予想される想定海域の自然環境特性を知ることが肝要である。そこで、カナダ、アラスカ、北欧等での過去の船舶事故例、および北極海沿岸での油田開発に関連して行われた油汚染防除技術の研究の歴史をレビューした。そして、今後油流出事故の発生が予想されるオホーツク海の開発動向および流水の特性について調べ、現実性がありそうな油流出のシナリオを検討した。全体システムに関しては、ナホトカ号事故の教訓に鑑み、我が国の政府や防災組織がどのような改善・改良を既存の防除機材や既存の全体システムに取り入れたかを調査し、寒冷海域での事故に対応出来る全体システムの持つべき特徴ないし要件を考察した。

a. 寒冷海域での油流出事故例

最も有名なものが1989年3月、アラスカ湾で起きたExxon Valdez号による4万kl余の原油流出事故である。寒冷海域では交通量が小さいため、衝突事故は少なく、多くは座礁事故が占める。アラスカ、カナダ、バルト海等を航行する船舶の座礁事故による油流出が数例記録に残されている。荒天の遠隔地で、汚染防除組織が早期に現地に派遣できない、寒気のため作業が極めて困難などの理由で、海上での油回収は不成功となるケースが大部分であった。座礁した大型タンカーTorry Canyon, Amoco Cadizの場合は、荒天で船体の破壊が進み、10～20万klもの大規模流出となった。流水域での大規模重油流出事故の例として、中型タンカーKurdistan号の船体破断事故が有名である。(1973年カナダ東岸) 荒天のため7,000 tonのC重油が流水と混じり合い、回収不能であった。油井からの原油流出も、火災や暴噴事故の場合は補修が困難で大規模なものになる。北極海沿岸部での石油資源開発では様々な形式のリグが使用

されたが、大規模油流出の記録は見あたらない。定着水域での油流出対策はカナダ、アラスカで研究され、回収・処理のマニュアルも整備されているが、これらの技術の多くは厚い定着水域には適するが、不安定な流水域での油流出には適用できない。

b. 寒冷海域での油汚染対策の特殊性

寒冷海域での流出油の挙動の最大の特徴は、海水があるため通常海面でのそれと全く異なる極めて錯雑した状況を呈することである。海水は生成・融解・変形しつつ形態を変え、油も種類によって比重や粘度が違うため挙動が異なる。このため、回収や処理は一筋縄では行かない。流水の中での様々な油の滞留状態、変質状態に応じて、それに適する回収機器が必要になる。しかし、世界中を見ても流水域に適する油回収装置は未開発である。一方、酷寒のため回収機器の性能劣化や破損が生じやすく、作業員の能力が劣化し、暗黒や流水による船舶の航行障害がおきるなど数々の障害があり、これらを克服する技術が必要である。遠隔地ゆえ補給支援が困難で、生命の安全が脅かされる。その他あらゆる点で効率と安全のコストが大きくなる。

c. オホーツク海の流水と自然環境

サハリン島東海岸沖から北海道北岸に至る南部オホーツク海の流水のマクロな分布や漂流運動については、近年は人工衛星や航空機による日常的な定期観測が行われている。しかし、流水の生成・融解・変形、流水の下の海流・潮流などの詳細情報は不明であり、今後の科学的観測に待たねばならない。流水のマクロな動きが流出油の漂流拡散を支配するのであれば、サハリン島東北部大陸棚の石油開発現場での流出油は確実に北海道、北方四島方面に運ばれる。また、宗谷海峡やサハリン島南部での船舶の座礁事故からの流出油は、いわゆるオホーツク海岸沿いに流れて知床半島に達すると考えられる。いずれの場合も沿岸部を中心とする魚介類・海藻類など海洋生態系への油汚染被害が大規模となると考えられる。流水域に流れた油がどのように流水と混合し、変質するかについては、今後の詳細な実験的研究が必要であり、この結果を基礎として、沿岸部での汚染防除対策が検討されるべきと考えられる。

d. オホーツク海での油流出事故シナリオ

油井からの油流出はサハリン島東北部沿岸で生じ、巨大氷丘(スタムハ)の海底掘削による海底パイプラインの破損と掘削リグ上または海底部からの暴噴に起因するものが考えられる。一本の海底パイプラインからの油流出は規模が高々千klのオーダーだが、暴噴による流出量は数万klに達することもある。流出油は細い黒帯状になって南下し、日本に達するには30日程度掛かる。そのころには油は流水中に拡散し、回収不能となる公算が大きい。船舶からの油流

出は、サハリン産原油を満載したタンカーが宗谷海峡付近で座礁する場合が最大級であり、数万kl規模の流出が起こる可能性がある。この場合、毒性の強い原油が流れるため、海洋生態系に最も大規模な汚染被害をもたらすであろう。

e. ナホトカ号事故の教訓

ナホトカ号の油流出事故では老朽船が荒天下を航行し、8,000klあまりのC重油を漏出させた。荒天のため洋上での回収が進まず、重油は海水を含んでムース化し兵庫県から秋田県に至る海岸を汚染した。この事故で日本の油汚染防除体制には、次のような不備があることが明らかになった。

- 1) 数千kl級の大規模油流出に対応できるだけの組織・機材の備えが日本に無かった。
- 2) 油回収船や回収機器、防災組織が太平洋側、それも重要港湾にのみ偏在していた。
- 3) 従来の基準で認定された油回収船や回収機器が高粘度油の回収には不相当であった。
- 4) 領海外の事故に、国の責任で緊急対応する規定が無かった。
- 5) 沿岸国が協力して事故に対応する国際協定も成立していなかった。

事故発生後、国家および地方自治体、防災関係組織による熱心な反省と検討が為され、上記欠陥を是正する措置が国際協力を含めて実行されつつある。しかし、環境が特殊な北方海域に対する配慮は見られない。

f. 防除体制整備の緊急性

現在オホーツク海方面では、我が国はもとより、サハリン島においても油汚染防除の備えは貧弱である。サハリンプロジェクト主体が準備する防除体制や装備についてはまだ公開されていないが、事故の際、遠隔地からの支援で対応しようと考えているとの説も流布されている。オホーツク海方面に関しては、日中韓露のNOWPAPの協定は適用されない。従って、公海上での油流出事故への日露協力は今後の課題である。しかし、報道されているようにサハリンからの原油輸出が2005年に本格化されるのであれば、汚染防除の協力体制構築と装備・機器の配備を急がねばならない。流水中を航海する船舶の構造規制、航行規制、支援体制構築など事故予防のための施策を沿岸国が共同で案出し実施して行くことが肝要である。

2.5.4 寒冷海域適合油汚染対策全体システム

前年度に引き続き我が国をめぐる海洋油汚染防除に対する政府機関、防災組織の改善・改良の動向を調査した。また、オホーツク海方面でのプロジェクトの進捗にも目を注いだ。これらを配慮しつつ、引き続き全体システムへの考察を深め、最終的に、寒

冷海域油汚染防除に最も重要と考えられる下記6項目の提言を行った。

1) 国際協力体制の構築

氷海域を航行する船舶の構造・設備要件、運航・荷役オペレーションの安全基準の制度化、大規模海洋油流出への緊急対応、流水域に適した汚染防除技術の開発は、いずれも社会的コストが大きく、国際協力なしには達成できない。オホーツク海流水域での大規模油汚染事故に備えるには、氷海の知識が豊富で有力な砕氷船などを保有するロシア、アメリカ、カナダなどの協力が不可欠である。世界的な海産資源の宝庫と言われるオホーツク海を環境汚染から守るために、UNEP（国連環境計画）の一環であるNOWPAP（北西太平洋行動計画）の活動を強化して、適切な海洋汚染防止の協力体制が形成されることが望まれる。

2) 国内及び地域協力体制の構築

従来、オホーツク海沿岸部の地場産業は漁業と水産加工および観光であり、オホーツク海を大型船舶が航行することもなく、この地方での大規模油流出は皆無で、地域汚染防除の体制や装備の備蓄も港湾部を対象とする小規模なものに留まっていた。しかし、今後数年のうちに、管轄官庁・地方自治体および防災業者間の連携を強化し、地域の防災計画を策定しておき、緊急時の機動的運用を可能とすることが肝要である。特に防除を実施する当事者である海上保安庁、海上自衛隊、漁業共同組合、海洋土木建設組合等の組織化、指揮連絡網の確立、共同訓練の義務化とともに、緊急時財政措置や事故責任と補償の体系の合理化を図ることが肝要であろう。

そのほか環境NGOや油汚染防除の専門家とのネットワーク構築も欠かせない。もちろんこのような組織体制の整備充実は、国全体の緊急時対応体制整備との整合性を持たせる必要があるが、この地域特有の環境条件などの事情を十分勘案しなければならぬであろう。

3) 沿岸域環境鋭敏度マップ（ESIマップ）の整備

油汚染の被害は、魚介類、海草類および海鳥やほ乳類など生物相の豊かな海岸線に集中する傾向がある。それゆえ、各地の海岸の保護の優先度、そこでの流出油の処理方法を的確に判定するための基礎資料としてESIマップ（環境鋭敏度地図）の整備が優先される。ここには生物の生息情報以外に、海岸地形・土質や、養殖場等水産施設の情報も必要である。

オホーツク海沿岸については、冬季の水況の情報が欠かせない。ちなみに米国等では、ESIマップを基礎として、地域ごとの汚染防除対策が検討され、詳細な対応マニュアルが整備されつつある。

4) 流水域での流出油回収技術の開発

油にまみれた流水から、油を分離させ掃き寄せる

技術とプロセスを開発することが必要であるが、その前提として、流水域に流出した油が風化して氷に混ざり、どのような状態になるかを系統的に調べて置くことが不可欠である。流出油の性質と滞留状態に応じて回収装置の効率が異なるので、各種装置の得失を系統的に調査する必要がある。流水の混在と低温下での使用に耐える使い易い装置を開発すべきである。回収装置とは高級な機械である必要はなく、状況によっては、ナホトカ号事故の際に手作りされた道具のようなものも役に立つであろう。その上で、回収作業のマニュアルを整備することが肝要である。

5) 流出油の拡散予測技術と検知技術

流水域における流出油は、氷の上、下面、氷の中、隙間に滞留しつつ、拡散する。さらに、この上に雪が降り積もることもある。防除作業を効果的に実施するために、風・波などの外乱のある流水域での油の拡散の推定技術が求められている。そして、航空機の上から、氷原に隠された油膜を検知する技術と共にその性状を短時間で測定するポータブルな機器の開発も必要である。

6) 関連情報データベースの整備

油流出事故への効果的な対応を行うためには、油の風化特性、回収機器の性能、動員可能な人員や装備の在庫、事故現場海域の自然条件など様々な情報が必要である。前述のESIマップの情報もここに含まれる。これらをデータベース化し、コンピュータ画面で素早く参照できれば、防除作戦計画の立案が効率化され、緊急対応がより効果的に行えよう。米国ではこのようなデータベースを基に地域防災計画と緊急対応のマニュアルが整備されつつある。

我が国にとって北方のエネルギー資源へのアクセスは、21世紀にはますます死活の重要性を帯びると考えられる。サハリンの石油・ガス資源の採掘利用は必須であるが、海産資源の豊富なオホーツク海の海洋環境を損なうことなく進めることが望まれる。そのため、ロシアと協力しつつ、この方面での海域事情にふさわしい汚染防止の様々な施策と汚染事故への緊急対応等の仕組みを構築することが国家としての最重要課題である。これと平行して、北海道沿岸部の地域防除協力体制の構築ならびに沿岸環境及び生態系を適切に保護するための基礎資料としての「環境保全リスク情報マップ」の整備を自治体等が中心となり進める必要がある。流水域は極めて複雑で変化の大きい環境であり、流出油がこの環境でどのように風化変質するのかを解明し、状況に応じた適切な回収ないし現場処理の技術とそれらの選択基準をシステム化することが重要である。これは海上保安庁、海上災害防止センター、国立研究機関等が連携協力して研究すべき、我が国にとって新しく大き

な技術課題である。

油汚染防除のシステムは各国の国情に応じて異なっている。これまでの日本の体制は局地的な事故対応しか考えてこなかったが、外洋での大規模油汚染事故の対応は一国では不可能であり、多国間協力が必要である。ナホトカ号の重油流出事故を契機として、日本海方面での協力体制の構築が始まったことは大きな前進である。今後はオホーツク海方面での協力体制を早急に確立する必要がある。この成否によって全体システムのありようも大きく影響される。不安定な環境である流水域での油流出にいかに対応するかという技術的問題については、北方の各国とも実際の経験が十分にあるわけではなく、基礎的な実験的研究をベースとして開発研究を始めてから未だ日が浅い。非常に大きな複雑な問題であり、国際共同研究の形で知恵を集め、コストを分担できれば、効果的であろう。サハリン島大陸棚の石油・ガス開発が本格的に進めば、オホーツク海での船舶による油汚染事故のリスクが増大する、それも流水季であれば事故の確率は一層高いと考えられる。我が国には氷海域での航行の知識は乏しく、この面での経験知識が豊富な隣国ロシア等の協力を得つつ最適なシステムを構築すべきであろう。

3. おわりに

本研究は寒冷海域の油汚染問題に我が国として初めて取り組む先駆的な研究であり、全般的な視野と基礎的な知見を得ることを基本指針とした。また、本研究は、流水季オホーツク海の知識が不十分な段階で開始されたため、次の段階で現実的な知識を構築することを念頭に置きつつ、敢えて問題を単純化して、いわば第一近似的なアプローチで実施した。3か年の研究を通じて、制度的にも技術的にも問題全体の展望が得られ、今後解決すべき課題が次第に明らかになってきたことは、着実な成果であると考えられる。しかしながら、流水で覆われた海上や海岸での油汚染対策に直接適用出来る成果を得るには至らなかった。今後は、実務担当者との交流を深め、実用に結びつく課題を一つ一つ攻略してゆくことが肝要であろう。

なお、カナダ等の北方諸国において70年代以後に実施されたこの種の研究は、北極海の定着水域が対象であったので、不安定な流水のある海上での機械的油回収に関しては、そのまま利用できる研究成果に乏しいことがレビューの結果判明した⁴⁾⁷⁾。また、流出油および油分散処理に用いる化学薬品の生物毒性についても、欧米での研究結果は、生態系環境の異なるオホーツク海に対してはそのまま適用できな

いことは明らかである。本研究は寒冷季のオホーツク海の海洋事情等が詳しく判っていない段階で、我国では始めて行うパイロット的な性格を有する研究である。また、船舶技術研究所は寒冷海域油汚染の防除技術研究のための専用実験施設も保有しないため、3年という期間に達成できる範囲／レベルは自ずと限られる。

寒冷海域での油流出事故対応の実例は未だ世界的にも少なく、回収作業の成功例は定着水域での事故を除き殆どない。流出状況の複雑さ、作業環境の悪さ、機器の作動不良、遠隔地などがその理由である。対応に極めて高いリスクとコストが掛かるため、油流出事故の発生は是非とも未然に防止すべきである。第2章5節では、日本が今後寒冷海域での油流出事故に対する備えを構築するに当たり、最重要な事柄を6項目の提案として述べた。その中でも第1番目の事故の予防が最優先される。すなわち、船体構造の改善、乗組員資質の向上、航行管制、航行支援などの予防的措置を関係国が協力して早急に制定することが最善の策であろう。

通常海域での油流出の場合でも、流出油の種類、経過期間、海象条件等により最適な対応は異なっている。この方面の経験や研究の歴史は長いが、現実の対応が満足のいく形で行われたことは少ない。まして、寒冷海域での油流出対応を検討する場合、まず事故現場の自然条件—海水の状態、海中の流れ、気象と海象—の情報が必要であり、それと共にその

環境の中での流出油の性状変化や拡散・漂流を予測できれば対応策が立てやすくなる。流水域で油流出事故が起きた場合、どのような汚染状態が発生・進行するのか、海洋生態系への毒性がいつまで持続するのか等は、現象が複雑なため予測が付きにくい。これの解明には、実態に即した研究が必要であり、例えばオホーツク海沿岸部に流水域油汚染実験水槽を作り、実物の原油を使って実験する必要がある。その結果を基に、回収機器や現場処理の技術を開発することが次の段階の中心的課題であろう。

図3-1は寒冷海域での油流出への対応スキームの一例であるが、この中で「海上での流出油の変化」のところが第一番目に具体的に解明され、それによって最適な回収・処理の方法が見いだされる必要がある。このプロセスは、通常海域の場合よりも格段に複雑であり、その解明には学際的協力が必要で、数多くの実証実験を必要とするが、我が国だけでなく、関係国と協力して進めるべき課題と思われる。また、工学分野のみならず、化学、生物学、水産学の研究者および汚染防除の実務エキスパートを含めた研究協力体制を構築すべきであろう。寒冷海域の中でもオホーツク海の海洋環境保全は、我が国の国益にも、地球環境問題にも強く関連しているため、我が国と近隣諸国の長期的かつ総合的な政策的課題として取り組むべきと考えられる。この見地より、国としての統一のとれた環境政策の一環として、寒冷海域での油汚染対策の研究をさらに強力に推進すべきと考えられる。

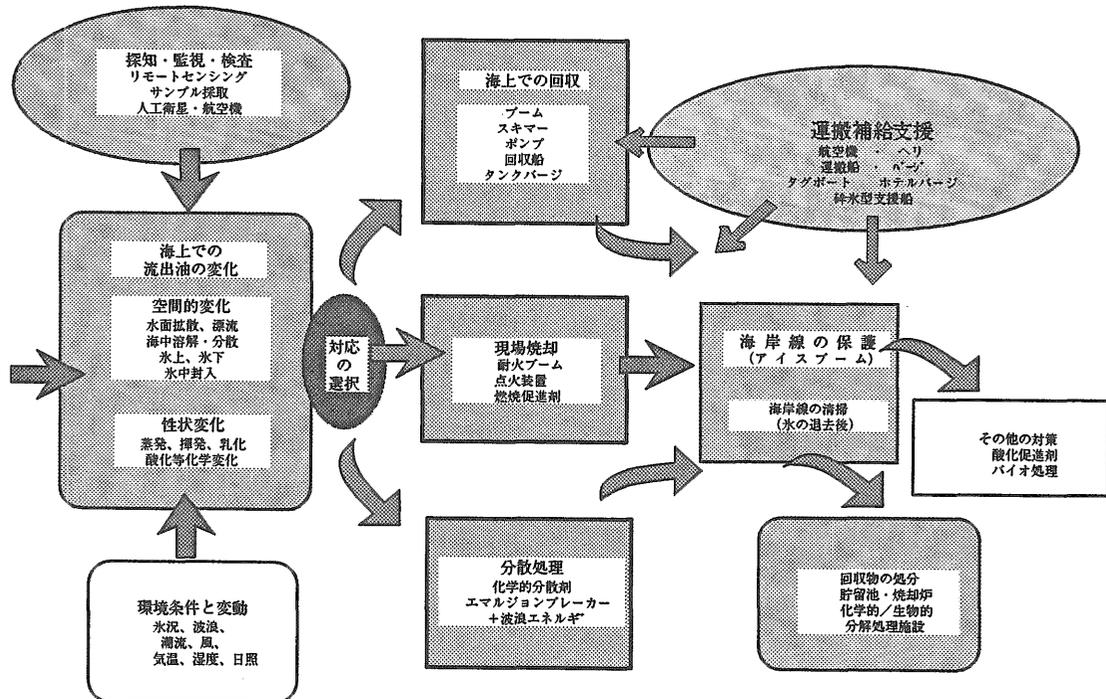


図3-1 寒冷海域での油流出対応スキーム

完結に当たり、本研究に付随して行った二三の関連事項を付記しておく。

本研究の助走段階では、北方諸国における寒冷海域での油汚染事故対応の事例や技術開発動向について予備知識を得る事に努めた。すなわち、油濁防除技術関係の重要な国際研究集会 (AMOP: 極域海洋油濁防止プログラム、IOSC: 国際油濁防止会議等) への参加を通じ、カナダ・米国の政府機関が制定した海洋油濁防止関連法規や緊急対応マニュアル、ならびに EXXON 社など巨大石油企業等が実施した技術研究報告等を入手することに努めた。また、科学技術振興調整費による国際研究交流制度を利用して、フィンランドからの最新研究情報を獲得した。このような情報収集を行う中で、当該技術分野の代表的レビューである文献²⁾の邦文意識を作り、関係者による勉強会を行った。平成7年12月、当所に於いて寒冷海域油汚染対策に関する氷海技術部主催のセミナーを開催し、勉強会で得た知識の紹介ならびに米国クラークソン大学の P.Yapa 教授による流出油拡散予測シミュレーションならびに海上災害防止センター防災訓練所所長の佐々木邦昭氏によるナホトカ号重油汚染事故対応の教訓に関する講演を行った。

本研究の実施にあたり、学識研究者として元つくば海洋油濁防止研究所長で当研究所顧問である田崎亮博士 (シップ・アンド・オーシャン財団)、岩手大学工学部環境建設工学科の堺茂樹助教授、伊勢湾防災株式会社取締役の浦上純也氏並びに前述の佐々木邦昭氏の四氏を定期的に研究検討会に招き、討論に参加していただくと共に、氏らの実務経験に基づく貴重な助言を得つつ、研究内容を修正・改善することに努めた。研究終了に当たり、四氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 「海洋油流出対応」(石油連盟翻訳)、1997、国際タンカー船主汚染防止連盟 (ITOPF)
- 2) "Cold Water Oil Spills", 1990, Cutter Information Corp., USA
- 3) "Oil Spill Response in the Marine Environment", 1992, J.W.Doerffer, Pergamon Press
- 4) Proc. of the 20th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, 1997, Vancouver BC, Canada
- 5) 日本全国沿岸海洋誌、1985、日本海洋学会編、東海大学出版会
- 6) アルゴス・ブイによるオホーツク海流水の漂流観測、1995、望月、高塚、青田、第10回オホーツクシンポジウム
- 7) 氷海域における油濁防止装置の開発に関する調査研究報告書、1985、日本造船振興財団
- 8) タンカー事故による海洋汚染防止策について、1994、在田、足達、第12回海洋工学シンポジウム
- 9) 船舶技術研究所報告、第24巻、5号、昭和62年5月
- 10) 氷海域における油濁防止装置の開発に関する調査研究報告書、日本造船振興財団、昭和59年3月、67頁
- 11) 海洋油濁防止装置の性能評価基準に関する調査報告書、日本造船研究協会、昭和58年3月、58頁
- 12) Brown H.M., R.H.Goodman, C.-F.An, "Flow Around Oil Containment Barrier", Proceedings of the 21st Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Environment Canada, pp.345-354, 1998
- 13) Delvigne G.A.L., "Barrier Failure by Critical Accumulation of Viscous Oil", Proceedings of 1989 Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Environmental Protection Agency, and United States Coast Guard, pp.143-148, 1989
- 14) Tamiya, S., H. Kato, Y. Watanabe, T. Komura, "A Treatment of Equilibrium of Oil Layer on Water Flow", Journal of Society of Naval Architects of Japan, No.135, pp.71-80, 1974.
- 15) Proc.3rd Themat Conf. Remote Sens. Coast Environ, 1995 Vol.1, 2.
- 16) 運輸省型式承認試験基準
- 17) 粉末ゲル化剤の硬度についての報告書、平成10年5月、船舶技術研究所、粉末ゲル化剤懇話会
- 18) A CATALOG OF CRUDE OIL AND OIL PRODUCT PROPERTIES (1992 Edition), Environment Canada, Environmental Protection Directorate, River Road Environmental Technology Centre, Ottawa, Ontario K1A0H3, EE-144 Feb. ,1993
- 19) 氷海域における油濁防止装置の開発に関する調査研究報告書、日本造船振興財団、1985年3月、8頁
- 20) Izumiyama, K., Uto, S., Narita, S. and Tasaki, R. Effects of Interfacial Tension on the Spreading of Oil under an Ice Cover. Ice in Surface Waters, pp. 419-426, 1998.
- 21) Sussman, M. and Uto, S., 1998. Multi-Phase Flow Simulation of Oil Spreading Underneath an Ice Sheet. Proc. of 1998 Autumn Meeting of Ship Research Institute, pp. 31-34
- 22) Yapa, P.D. and Chowdhury, T., 1990. Spreading of Oil Spilled under Ice, Journal of Hydro Engineering, ASME, 116(12), 1468-1483
- 23) 泉山 耕、堺 茂樹 (1998): 氷海域に於ける流

出油の拡散に関する実験及び理論解析. 第44回土木学会海岸工学講演会論文集

- 24) 大島香織、大塚夏彦、宇佐見宣拓、高橋伸次郎、川合邦広、佐伯 浩 (1998): 氷盤下に流出した原油の回収方法の開発. 寒地技術論文・報告集、Vol. 14、pp.333-339
- 25) 堺 茂樹、花井宏太、笹本 誠、金田成雄、泉山 耕 (1999): 氷板下での油拡散に及ぼす流れの影響に関する実験的研究. 第44回土木学会海岸工学講演会論文集
- 26) 田村兼吉 他、オホーツク海水データベースの概要、第70回船舶技術研究所発表会 pp.222-225 (1997)
- 27) 宇都正太郎他: 巡視船「そうや」によるオホーツク海航行実験 (第3報)、第64回船研研究発表会 (1994)
- 28) H. Shimoda, et al., Measurement of Sea Ice Conditions and Manoeuvrability of Icebreaker "PLH SOYA" at the Sea of Okhotsk, POAC1997, pp.217-224 (1997)
- 29) 下田春人 他、JERS-1 SAR画像を用いたオホーツク海の海水識別について、第20回極域気水圏シンポジウム (1997)
- 30) 下田春人他、船上観測による北海道沿岸オホーツク海域の氷況について その2 JERS-1/SAR 画像の地上検証、第13回北方圏国際シンポジウム、pp.123-128 (1998)
- 31) Shotaro UTO et al., Preliminary Study on Sea Ice Observation using a ship-born laser altimeter, 14th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, pp.72-77 (1999)

付録1：研究発表ならびに特許取得実績

研究発表

発表題名	掲載法/学会等	発表年月	発表者
(誌上发表) ・氷板下への油流出に関する基礎的実験結果について	第68回船舶技術研究所研究発表会講演集	8.12	泉山 他
・寒冷海域における流出油の性状変化	第70回船舶技術研究所研究発表会講演集	9.12	前田 他
・ Multi-phase Flow Simulation of Oil Spreading underneath the Ice Sheet	第72回船舶技術研究所研究発表会講演集	10.12	Sussman, M. and Uto, S.
(口頭発表) ・粉末油ゲル化剤の性能について	第31回日本水環境学会講演集	9.3	藤井
・氷板下における油の拡散について	第70回船舶技術研究所研究発表会	9.12	泉山 他
・既存の油回収・処理技術の寒冷海域適用性の評価 第1報 油層流れのせき止め	第72回船舶技術研究所研究発表会講演集	10.12	上田 他
・氷海域に於ける流出油の拡散に関する実験及び理論解析	土木学会海岸工学講演会	9.11	泉山 他
・寒冷海域での油汚染に関する研究計画	第70回船舶技術研究所研究発表会	9.12	成田 山口 他
・流水域での油流出のリスクと備えについて	第72回船舶技術研究所研究発表会	10.12	成田 山口 他
・既存の油回収・処理技術の寒冷海域適用性の評価 第2報 油の性状変化と堰き止め及び回収	第72回船舶技術研究所研究発表会講演集	10.12	上田 他
・寒冷海域での油層流れの堰き止め	第13回北方圏国際シンポジウム	10.2	上田 山之内 他
・流水域油汚染の可能性と対策について	第14回北方圏国際シンポジウム	11.2	成田 在田 他
・氷板下での油拡散に及ぼす流れの影響に関する実験的研究	土木学会海岸工学講演会	10.11	堺 泉山 他
・既存の油回収・処理技術の寒冷海域への適用	第14回北方圏国際シンポジウム	11.2	藤井 上田 他
・粉末油ゲル化剤のゲル化油硬度について	第33回日本水環境学会講演集	11.3	藤井
・ Possible Risk of Oil Spills in the Sea of Okhotsk	UJNR-MFP Regular Conference Proceedings	10.11	S. Narita et al.
・ Withdrawal of Highly Viscous Oil and Oil Layer at a Moving Barrier	22nd Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Canada	11.6	K.Ueda, H.Yamanouchi et al.
・ Effects of Interfacial Tension on the Spreading of Oil under an Ice Sheet	IAHR International Symposium on Ice	10.8	Izumiyama et al.

特許

特許等の名称	願書年月日	公告番号	公告期日	登録番号
波浪対応型流出油回収装置	9.4.30		11.8.10	2979142

付録2：寒冷海域での油流出事故例のまとめ

1 Exxon Valdez^{1),2)}

アラスカ州ノーススロープ産原油120万bblを積んだ20万DWTタンカー"Exxon Valdez"は、1989年3月24日の真夜中、アラスカ湾奥部の積出し基地Valdez港から25マイル西方のPrince Williams Soundの東端にあるBligh Reefに座礁した。当夜、船長は酒に酔っており、3等航海士が操縦していたこと、付近に流水があり、それを避けて航行していたことが座礁の原因とされる。8個の原油タンクが破損、25万8千bblの原油が数時間内に流出した。船主のExxon Shipping Companyは直ちに事故対応センターを組織し、同社の対策要員を事故発生後18時間で現場に送り込み、一方、Alyeska Pipeline Service Co.は初期対応の資材を動員し、さらに4つの防除会社に外洋向け回収資材を注文した。第1日目の終わりには15,000ftのブームと26隻の船が投入されたが、時化のためブームの大部分は破損した。3隻のタンカーによる原油の瀬取りは24日より4月3日迄行われ100万バレルが移送された。Valdez号は4月5日に離礁し、近くのNaked Islandで応急修理を受けた後回航された。

25、26日に分散剤散布と現場焼却の実施申請をしたが、許可が出されたときには、強風により油膜は西南西に流され、許可海域外に達した。油膜は1週間後に90マイル、11日後に140マイル、19日目に250マイル40日目に350マイル南西方向に流され、Prince William Sound内の多数の島々およびKenai Peninsula, Kodiak Islands, Alaska Peninsulaの海岸線を汚染した。漂流する油膜の囲い込みとすくい取りの努力は事故後数ヶ月に亘り行われたが成果は乏しく、6月には沖合での回収は大方中止された。海岸に漂着した原油はいろいろな程度にエマルジョン化し、海岸の岩や砂を汚染し、魚介類、海鳥、アザラシなどの哺乳類その他の水辺の生物を殺した。汚染された海岸の清掃浄化は様々な手段で行われた。Exxon Co.の事故処理報告では効果ありとされている処理手法のうち、後日の再評価の結果、副作用等を考えるとむしろ何もしない方が良かったと考えられるものも多い。この事故でExxon Co.が防除・清掃に費やした金額は、初年度が約20億ドル、2、3年度が合わせて30億ドルに達すると言われる。また、アラスカ州と住民に対する和解金の額は、11.5億ドルと伝えられる。これらの費用合算は邦貨で約7,200億円となる。原油1リットル当たり処理費用が約1万8千円掛かった計算になる。

2 Amoco Cadiz³⁾

1978年3月16日夜、VLCCタンカー Amoco Cadiz

はフランス北西海岸の岩礁に座礁した。翌日、船体が二つに裂け、2週間にわたり22万トンに及ぶ軽質のアラビア産・イラン産原油を流出した。原油は速やかにムース化し、風によってブリタニー海岸に吹き寄せられ140kmの海岸を汚染し、多数の海水浴場、養魚場及び各種の漁業施設に損害を与えた。強風と大波のため回収作業は殆ど出来なかった。現場焼却は危険と判断され、船から1.5km離れた陸地へ油をパイプで送ることも出来なかった。フランス政府は油分散剤の使用を禁じたが、後日この措置は不相当であると判定された。

数カ月にわたり大がかりな海岸汚染除去作業が行われ、ピーク時には8千から1万人、多数のスキマー、100台のタンク車、140台のバキュームトラック、80台の農業液肥散布車等が動員された。各種の化学的処理剤、油吸着剤、生物分解剤、海浜および岩の洗浄装置が用いられた。流出油とデブリ(油汚染ごみ)総計20万トンが回収され、これらから2万トンの油が抽出された。

数年間にわたって海岸付近の生態系の汚染が続いた。海藻類、貝類は汚染直後に死滅した。繁殖地や生息地の回復は2、3年かかった。船体の残骸付近の魚類は鱈などに奇形が発生した。波浪エネルギーレベルの低い沼沢地等では回復が遅く、数年を要すると考えられた。沖合漁業には大きな被害は無く平年並みの漁獲量が記録された。浄化作業や被害補償の費用は5千万ドルに及んだ。

3 Arrow³⁾

1970年2月4日、中型タンカー Arrowは、Nova Scotia州 Chedabucto Bay 沖で座礁し、C重油36,000～73,000bblを流出させた。強風と高波のため、流出油は300kmに及ぶ海岸線を汚染した。大部分の油は激しい波の作用と10トンの分散剤のために微細粒子に分解された。湾の北及び西側の海岸は油で汚染され、砂/砂利/油/岩の混合物によるしつかりした舗装面で覆われた。1976年に至って油汚染は漸く目に見えて減少した。いろいろな海岸が機械的方法で清掃された。10年後でさえも、閉囲水域では油汚染が残った。波浪エネルギーレベルが低い、生物堆積物の乏しいエリアでは、油汚染物質を機械的に除去するのは好ましくない。Teal and Howarthによれば、閉囲水域での草木は汚染直後に死滅したが、2年後に回復した。軟殻の貝類は6、7年後も発育不全である。魚類へのインパクトがどのようであったかについての調査結果は無い。油にまみれた海鳥200羽とアザラシ24頭が死体となって発見された。

4 Ekofisk Bravo³⁾

Ekofisk油田はノルウェー沖の北海にある。1977年

4月22日、Bravoプラットフォームで暴噴が起き、約一週間にわたって油流出が続いた。推定流出量はおよそ195,000 bblである。噴出後の2週間で流出油の約60%を占める揮発成分が蒸発したと報告されている。付加的な防火対策として、プラットフォーム周囲に油分散剤が散布された。囲い込みの努力はおおむね無駄であった。機械的方法では1%程度が回収できたのみであった。拡散・漂流して海岸に達した油は無かったと報告されている。魚類の汚染度は軽微で、油が海底に達したかどうかは十分な証拠がない。別の報告では、海底の汚染は若干あったが、数週間で回復したとされる。

5 Tanio³⁾

フランス北西部のブリタニー海岸沖合いで、1980年3月7日、小型タンカーTanioは船体中央から二つに折れた。積荷のNo.6燃料油26,000 tonのうち約13,000 tonが流出した。現場は1977年にTorrey Canyon, 1978年にAmoco Cadizが遭難した場所の近くである。船首部分は水深90 mの海底に沈んだが、船内の積み荷は少しずつ流出した。7,500 tonの油を積んだ船尾は静穏な港に曳航され、荷降ろしされた。

時化のため海上での囲い込み・回収はうまく行かず、高粘度のため分散剤の効果も乏しかった。油は2、3日後に海岸に達し、最終的には潮位差が8 mもある延長200 kmの海岸線を汚染した。海水浴場や観光地も汚染被害を受けた。海岸の人工建造物はプラスチックシートで覆われ、重要地点ではオイルブームが展開された。油の回収にはトラクター牽引のパキュムトラックが使われたが、油が高粘度のため寒い日にはこの方法は効果が無かった。海浜に副作用があるも拘わらず、ブルドーザーやフロントエンドローダーが海岸で用いられた。回収された油はプラスチックバッグに詰められ、タンカー油濁水処理施設に運ばれて処分された。

クリーンアップの最も困難な段階は、磯の岩の洗浄であった。面積が広く、油が落ちにくい上、作業者の接近困難な場所が多かった。岩の洗浄は、中程度の圧力の温水、または高圧の冷水で行った。沈んだ船首は油の流出防止工事の後に油抜き取りを行ったが、全体で1年を要した。流出した油の毒性は弱かったので環境影響は小さかった。所々で渚の生物は窒息死した。商業的漁獲には影響はほとんどなかった。損害の額は50万ドル以上と推定された。

6 Torrey Canyon³⁾

1967年3月28日、大型タンカーTorrey Canyonはイングランド南海岸沖16海里の地点で座礁し、10日間にわたりクウェート産原油90万bblを流出した。イギリスは長年に亘り流出事故対策の充実に努めてい

たが、Torrey Canyon 事故はそれまでとは異なる認識をもたらした。時化のため囲い込みは不成功で、油膜の現場燃焼も不首尾であった。結局、空軍機を使って、座礁した船に高性能爆弾やナパーム弾、航空機燃料を投下し、残っていた油を燃焼させた。船はロケット弾で破壊された。

この次の段階では、軍隊を動員して、分散剤散布、被害に敏感な港湾のブームによる保護、各種の機械的手段による回収が行われた。ブームは、波が2、3 mになると効果が失われた。

このときまでに開発されていた分散剤は、タンクの油落とし洗剤 (detergent) であり、生物に対して毒性の強いものであった。かなり大量にかつ無秩序に撒かれたため、油の分散と岸への漂着防止には成功したが、海中の生物相を傷つける結果になった。総計250万 gallon (8,200 ton) の分散剤が海上へ散布され、50万 gallon が岸の洗浄に用いられた。英仏海峡諸島の島では分散剤が少量しか配られなかった事が幸いして、散布による海中生物への影響は殆ど無かった。

7 Tsesis³⁾

小型タンカーTsesisの油流出事故は小規模であったがその影響は良く調べられている。本船は1977年10月26日、SwedenのStockholmに近い小列島に座礁し、海洋生態系観測ステーションの近くで約1,100 tonのNo.5燃料油が流出し、そのうち500 tonが回収された。事故現場は比較的波浪エネルギーレベルの低い場所であった。調査の結果、油流出がプランクトンに及ぼす影響がかなりよく判明した。甚大な影響は数日間、しかも事故船近傍のみに限られた。流出直後には植物プランクトンの増大が見られ、反面、動物プランクトンは減少した。植物プランクトンの増加は、事故による動物プランクトンの減少のためかも知れない。植物相と動物相に対する汚染の影響度のはっきりした違いは、汀線部において観測された。植物は(冬のため)休眠していたので被害は少なかった。しかし海藻とこれを食物とする動物は激減した。汀線部の生態系の回復は2カ月後に始まり、1年後に従来の密度まで回復した。タンカーが座礁した場所でニシンの油汚染は検出されなかったが、ニシンの産卵に関しては事故の場所では比較用の他の場所においてよりも少なかったが、これがTsesisの油流出に起因するの否か断定は出来ない。

8 KURDISTAN⁴⁾

1979年3月15日、英国籍タンカーKURDISTAN (30,000DWT) は、カナダ、New Foundland州、Cabot Straitの流水域を通過し時化の海に出た直後、船体が船首と船尾に分断され漂流した。およそ7,000 tonの

C重油が流出した。事故処理は、流出した油、7,000 tonを積んだ船首、16,000 tonを積んだ船尾に対して、3面作戦で行われた。政府要員が漂流中の船首と船尾に対応した：

船尾は時化の氷海を通過して Nova Scotia の Port Hawksbury まで曳航され、油の抜き取りがなされた。船首はあらかじめ選ばれた Scotian Shelf 上の海面まで曳航され、艦砲射撃で撃沈された。

事故から12日後、油の漂着が始まり、700 kmの海岸が汚染され、6カ月に及ぶ海岸の清掃浄化作業が行われた。事故への対応は以下のような理由で困難であった。

- ・油がしばしば流水で包囲されたり覆われて回収ができなかった。
- ・油が海面下を漂い、高度のリモートセンシング技術を持ってしても、所在の確認ができなかった。また、油は突如として海面に浮き上がり、数カ月に及び海岸を汚染した。
- ・そして、時間とともに環境、社会経済的な関心がますます高まった。
- ・最終的に、油で汚染された百万個ものガラクタを詰めた袋が集められたが、今度はこれを適切に処理する施設の不足が問題となった。
- ・幸いなことに、流水が流出油を外洋へ運んだため、この事故による沿岸への環境影響は概して少なかった。

9 LEE WANG ZIN ⁴⁾

1979年12月25日、Alaska州Panhandle南端沖合いで台湾籍鉱石運搬船LEE WANG ZINが転覆し、推定2,381から7,143 bblの燃料油とディーゼル油が、アラスカからカナダにかけての海域に流れた。事故後1週間で延長350マイル以上の海岸が油で汚染された。1カ月後、事故現場から210マイル北方の海上で油膜の漂流が観測された。深海に沈めるべく曳航中に、本船は国際的に著名な野鳥生息地からわずか8海里隔たった場所で突然沈没した。全般的にみて、数多くの敏感な魚、貝類、ほ乳類および鳥類が潜在的に影響を受けた。厳しい気象条件及び凹凸の多い複雑な地形のため、現場への接近、清掃浄化作業、回収作業にはそれぞれ固有の困難があった。1980年4月までに、推定585 bblの油が除去され、\$2,089,000のコストを支払った。

10 F.V. Ryuyo Maru No.2 ⁴⁾

1979年11月8日夕方、Alaska州本土から西方300海里にある、アザラシの繁殖地として良く知られたPribilof諸島のSt. Paul島に入港を試みた日本のトロール式漁船Ryuyomaru(第2陸洋丸)は折からの強風と高波にあおられて、Village Cove付近の岩場

に座礁した。座礁した際流出した油はおよそ40,000 gallon(130 ton)と推定される。南西からの風で吹き流された油はlagoonに流れて渚や浅海の生物を汚染し死滅させた。

難破船は、11月22日に海軍により爆破処分された。この事故への対応作戦の結果、寒冷な海域で遠隔地であること、地形的に輸送支援困難であること、生態系への影響等への配慮などの諸条件の下での回収・浄化作戦のいろいろな問題点—総合判断と作戦指揮などが教訓として得られた。

11 Tank Barge "the Bouchard #65" ⁵⁾

1977年2月28日の遅い午後、バージBouchard No.65はCleveland East Ledgeの西方0.6 km地点で座礁した。これは、タグF.E.Bouchardが針路上の密集氷に道を開こうとしてバージを離れた直後に起こった。左舷5タンクのうち4個に穴が開き、318 klのNo.2燃料油が流出した。バージが深みへ沈没するのを防ぐため、5.6 km離れたWings Neck南の砂地に乗り上げさせた。事故の翌日から2月22日まで米国沿岸警備隊が浄化活動を実施した。解氷が始まり、油が薄膜状に広域拡散したため、浄化作戦は中止された。

(訳者註： 事故現場はBoston市南方のバザーズ湾。流出油は流れやすいNo.2 Fuel Oilで動粘性係数は7.74 cP(センチポアズ)。氷況は海氷、厚さは0.3から0.5 mないしそれ以下であろう。早い潮流のために岸に押しつけられて、いかだ氷や氷丘を生じている。なお、この文献には、この事故の際の油の回収・除去の経験が述べられている。)

事故対応から得られた主要な結論：

- A. Rafted Iceの段差上に最大15 cmの深さの油溜まりが出来る。このように溜まった油が流出油全体の約30%を占めた。この油をバキュームトラックで直に吸引して回収し、流出総量の15%を回収できた。この油溜まりの発生は流出中の1日の間に生じた。これまではこの種の事象は知られていなかった。
- B. 氷は油の水面での広がりを抑制する。岸に固着した氷は岸を汚染から隔離する。また、氷は波浪を抑制するので、流出油が水中及び水底に散乱するのを防ぐ。
- C. 解氷(Break-up of ice)の後、汚染氷がCape Codの湾や入江に運ばれ、融解して僅かに風化した油をまき散らした。この氷(Ice floe)は既存のブームでは囲えなかった。このかたちでの油の長距離輸送が極地の油汚染の特徴的メカニズムであろう。
- D. 氷と低温の下でも、油の風化は起こる。より

長期間空気に曝された油はよりひどく風化した。二つの極端なケース：氷盤下の油では体積で6.2%のロス；回転した氷の中に含まれた油では体積で47.4%のロス。

- E. 水面の氷と氷の隙間 (lead) に油が確実に保持されることはない。0.5m/sec 程度の流れがあると油は氷盤の下に持って行かれる。岸辺の定着氷の下面にも薄い油膜の流れが観察された。
- F. 氷の下を潮によって運ばれた油の大部分は、2日間の間にハンモックアイス、リッジおよびラフトアイスの下面の窪みに溜まり、解氷までは安定して滞留した。
- G. 流出後7日して厚さ0.1 mの積雪が流出油を覆った。空中査察、調査活動および浄化活動がこのために著しく妨げられた。油溜まりの油は雪と混じり油分30%程のスラッシュとなった。
- H. 風が油溜まりの油を比較的平滑な氷の表面に吹き散らすので、油汚染氷を増加させ、その結果氷のアルベドを低下させ、油の風化を加速するメカニズムを産む。
- I. 油は氷の表面から5cmの深さにまで浸透した。氷中の油分は体積比で最大5%に達した。油分のばらつきは、油と氷の接触面積、接触時間、氷の表面粗度、氷の空隙率などによる。
- J. 氷から解放された油は薄い油膜=オイルシールとなり広大な水面に拡がる。油が氷に閉じ込められていたときの広さ0.1km²の汚染域が、解氷の後には19.4 km²にも拡大した。
- K. 氷板の上に出来た油溜まりの最良の浄化技術はバキュームホースでの吸引である。コーストガードの報告では、焼却では約50%が処理されたが黒煙と煤が問題となった。油汚染氷を力づくで引き上げてトラックに積むのは、極めて非効率的である：汚染氷に含まれる油分はわずか1%であるし、汚染氷から垂れた油が地表を汚染した。海面で用いる機械的な油回収手段はこの氷況の下では、役に立たなかった。

1981, American Petroleum Institute et al.

- 5) Cleanup Efficiency of a Fuel Oil Spill in Cold Weather; Eric Schirier and Carl Eidam, Proceedings of 1979 Oil Spill Conference, pp.419-427

参考文献

- 1) 重油汚染・明日のために－「ナホトカ」は日本を変えられるか、1998、海洋工学研究所出版部編
- 2) VALDEZ OIL SPILL TECHNOLOGY, 1989 OPERATIONS, 1990, EXXON PRODUCTION RESEARCH COMPANY
- 3) REVIEW OF OIL SPILL OCCURENCES AND IMPACTS, MAY 1989, EXXON PRODUCTION RESEARCH COMPANY
- 4) Proceedings of 1981 Oil Spill Conference, March