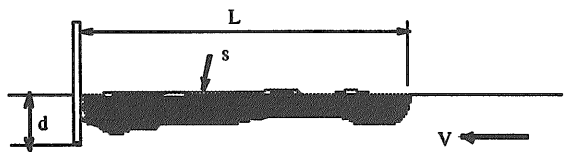
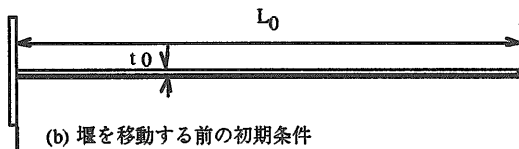


実験結果を図2-6に示す。10⁴ mPa・s以上のC重油の場合には加熱油散布時に油が固まって固体平板のようになり、開水面ができると、その開水面は流れが当たっても縮み難い。この場合の漏油限界速度はF=1程度と大きい。この場合の漏油限界速度はF=1程度と大きい。流速を上げていくと、漏れる時の状況は平板状の油膜が回転して漏れる。

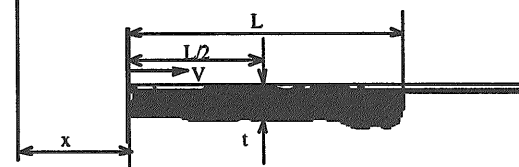
油の粘度が700～9,000 mPa・sの場合にはF=0.4～0.5程度までの変形はほとんど見られないが、F=0.5(流速21.9～24.1 cm/s)程度に流速を上げて行くと、経過時間と共にクリープ現象のようにゆっくりと油層が厚くなり堰の喫水より深くなり、千切れて漏洩する。高粘度のC重油を用いて、堰の喫水を変えて行った実験結果を図2-7に示す。堰の喫水が変わっても油層の状況はほとんど変わらない。



(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

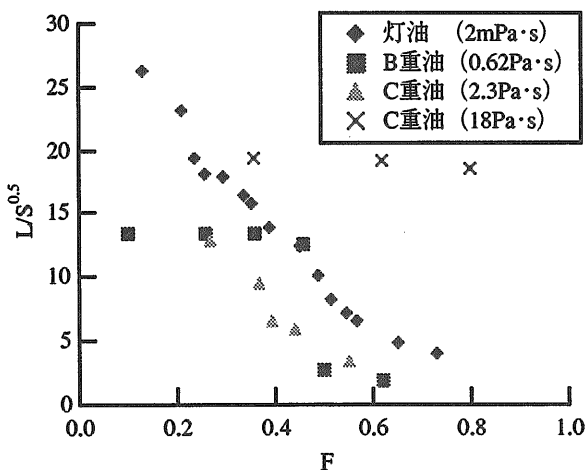


図2-6 粘度が異なる油の滞留油層 (喫水5 cm)

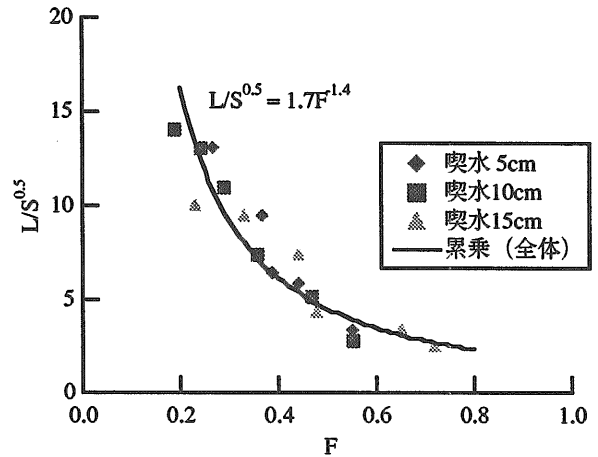


図2-7 喫水を変えた場合の滞留油層 (粘度2,400 mPa・s～4,400 mPa・s)

[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

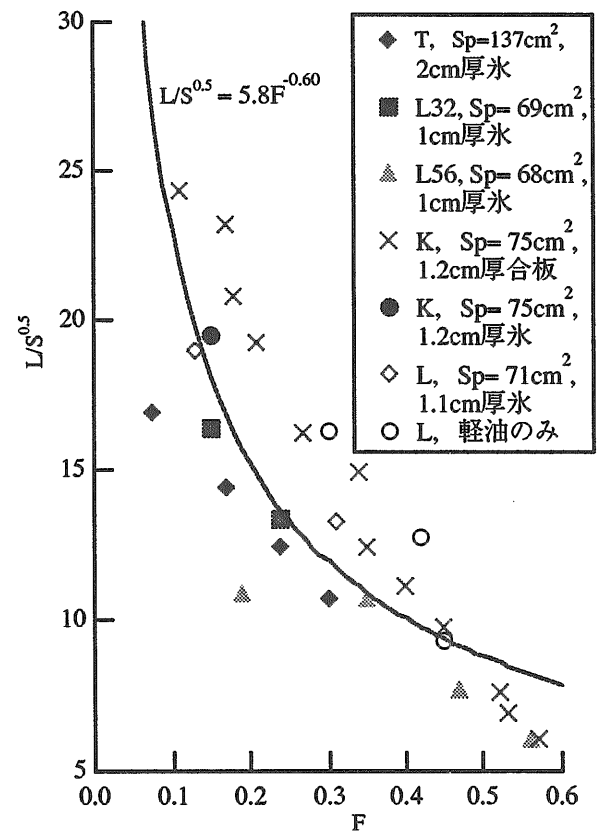


図2-8 油層中に氷板等が存在するときの滞留油層 (S₀ = 266 cm²)

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

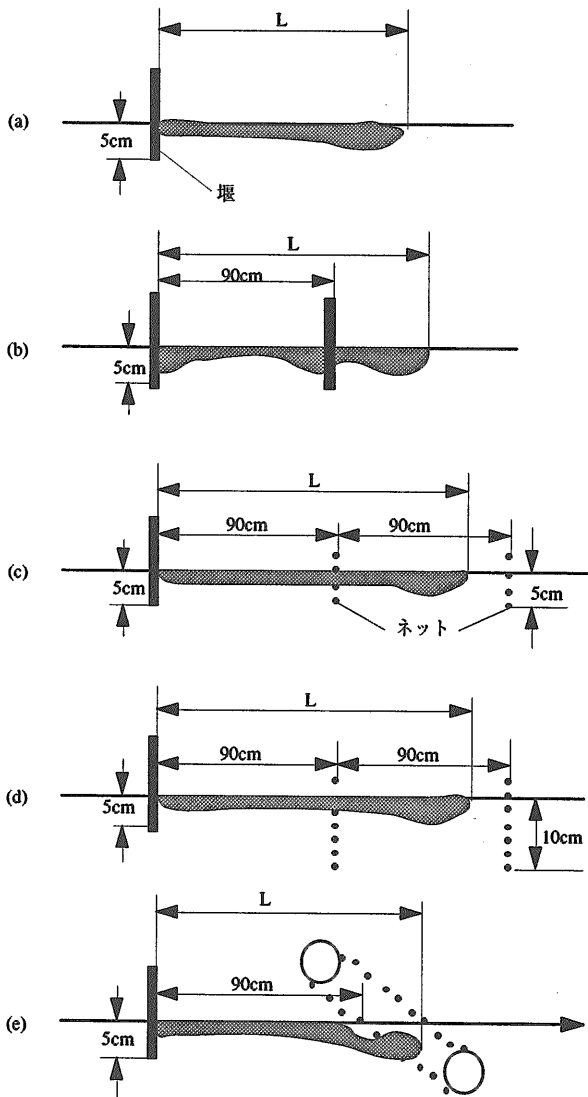


図2-9 堰及びネットの設置位置

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

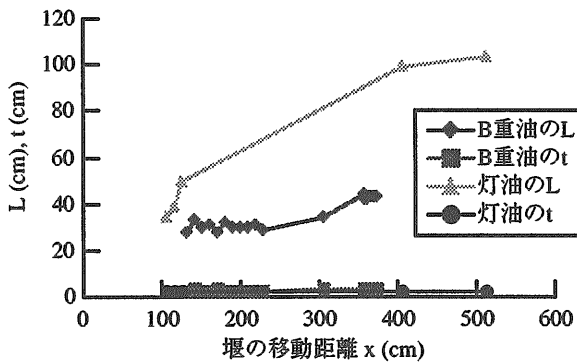


図2-10 移動堰前の油層長さと同さ (堰速度; 18cm/s)

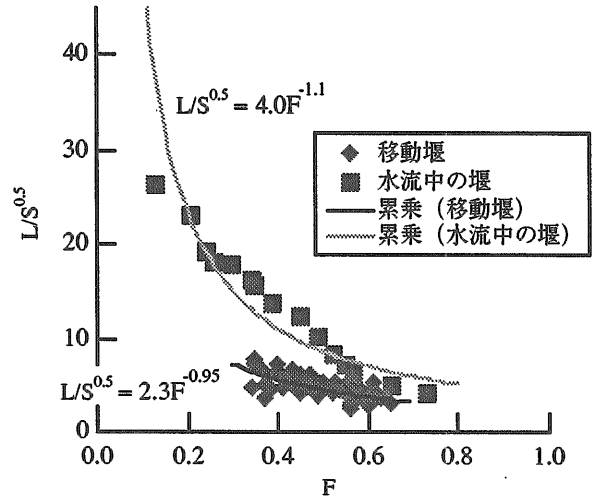


図2-11 移動堰前の油層と水流中の堰前の油層の比較

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。

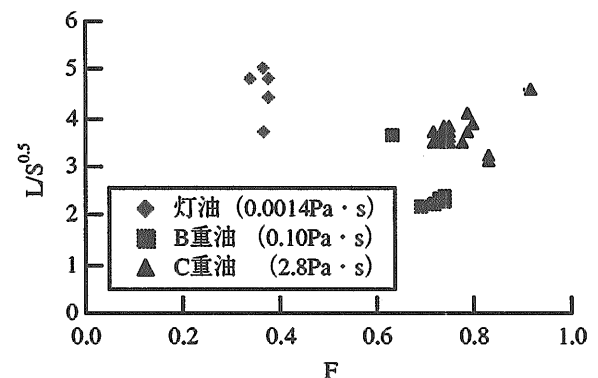


図2-12 粘度が異なる場合の移動堰前の油層 (17 cm/s)

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。

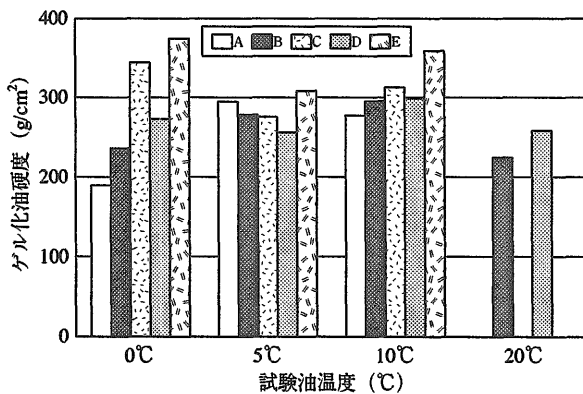


図2-13 ゲル化剤による固化試験結果

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。

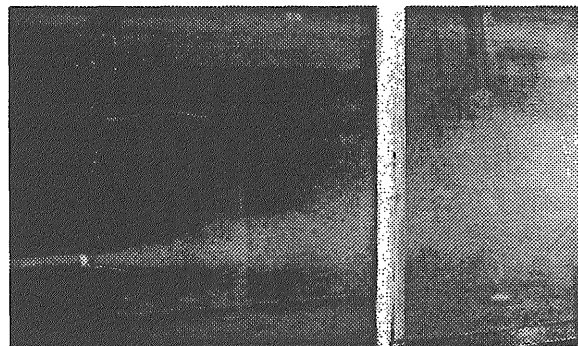


写真2-4 粉末ゲル化剤の水中での散布状況

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使い、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

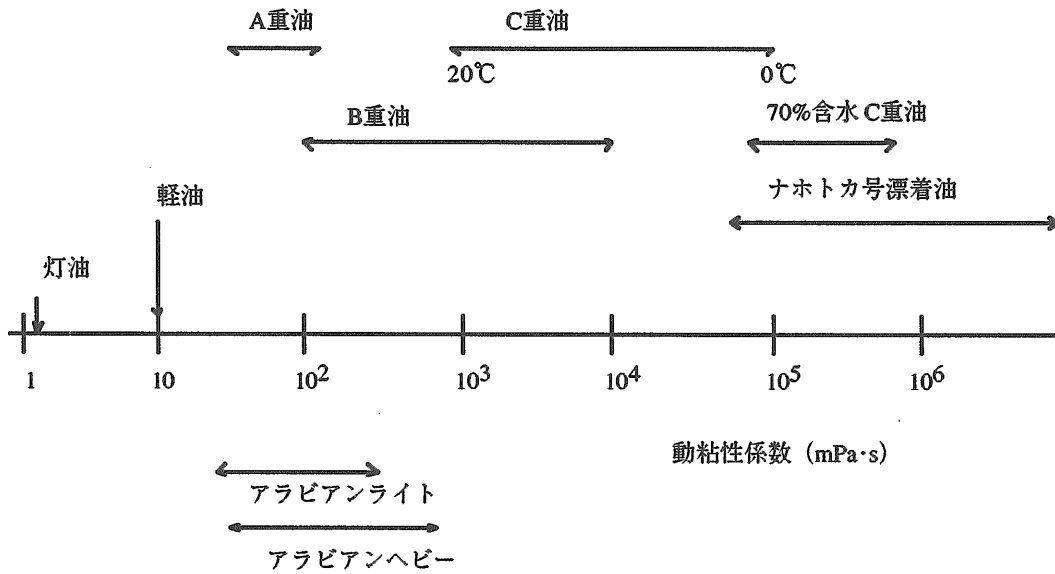


図2-14 油種による動粘性係数の範囲 (0℃~20℃)

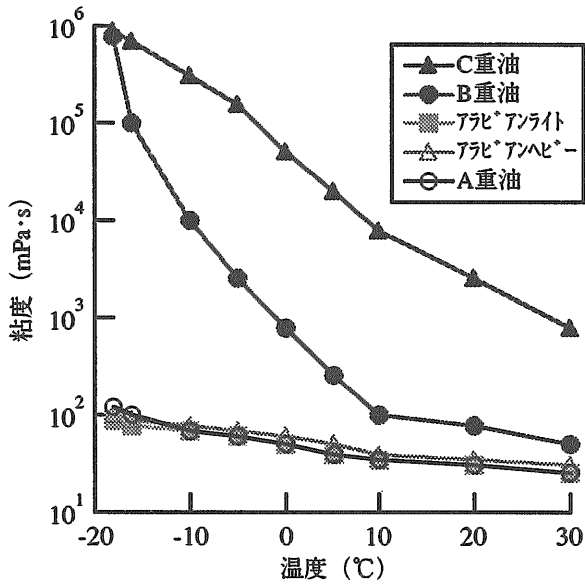


図2-15 油の粘度の温度依存性

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℃~15℃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℃以上の温度ではそれほど変化は見られないが、10℃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

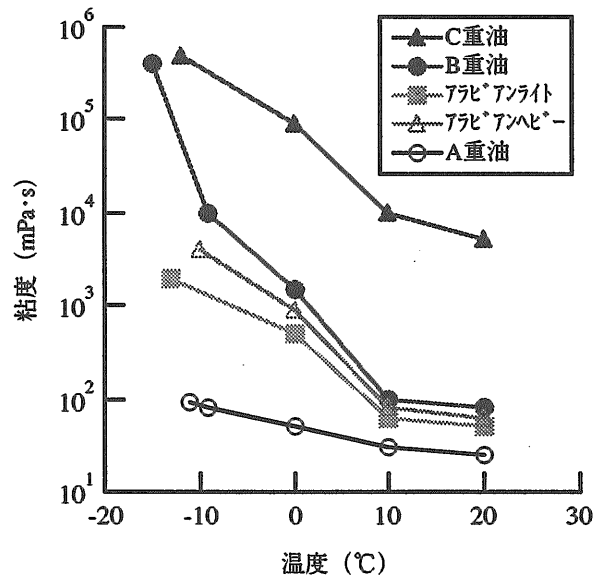


図2-16 大気放置油の粘度の温度依存性

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。

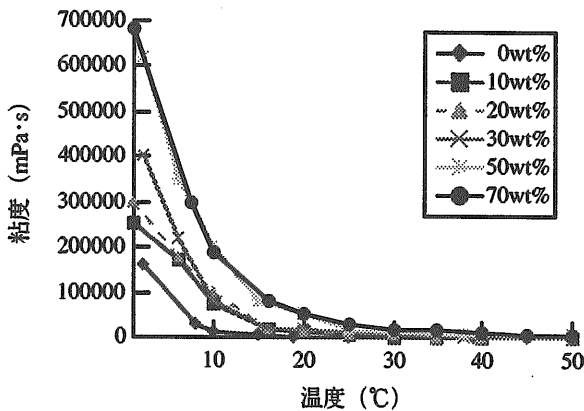


図2-17 C重油エマルジョンの粘度と温度との関係

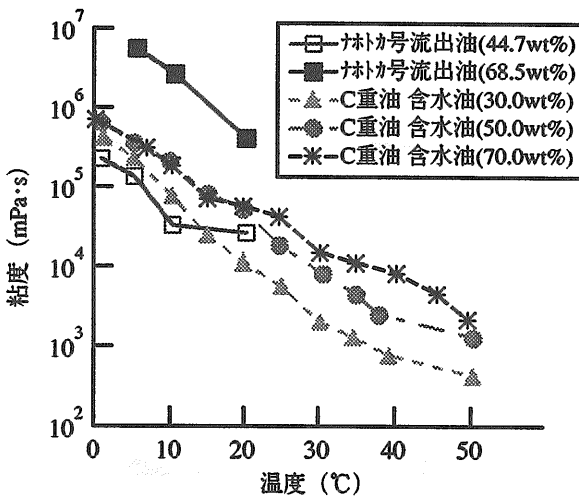


図2-18 含水油の粘度と温度との関係

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。

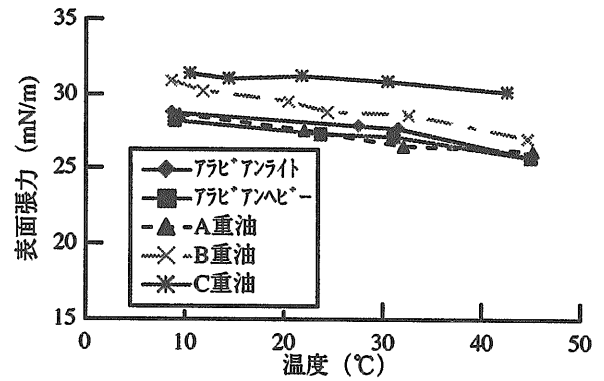


図2-19 油の表面張力と温度との関係

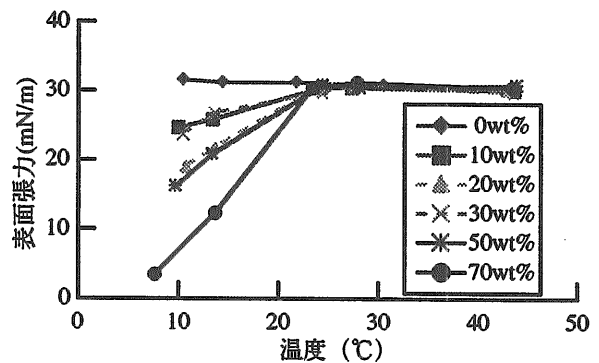


図2-20 C重油エマルジョンの表面張力と温度との関係

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。

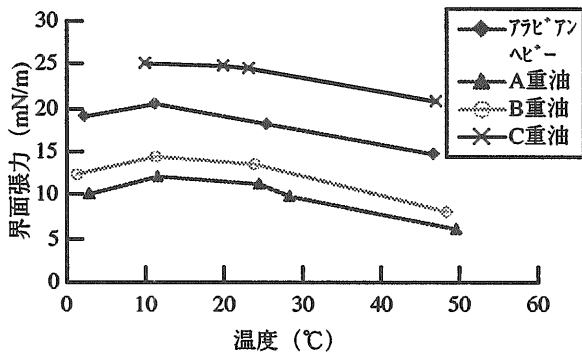


図2-21 油と水の間の界面張力

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）。

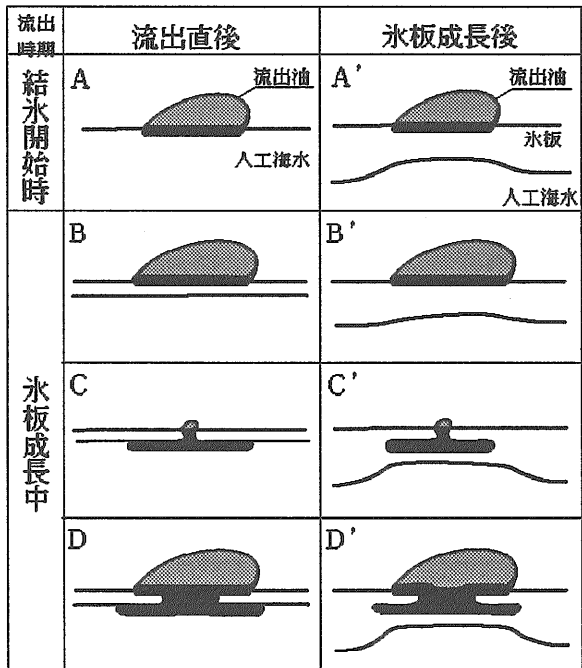


図2-22 油の少量流出時の人工海水の凍結挙動

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たり、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。

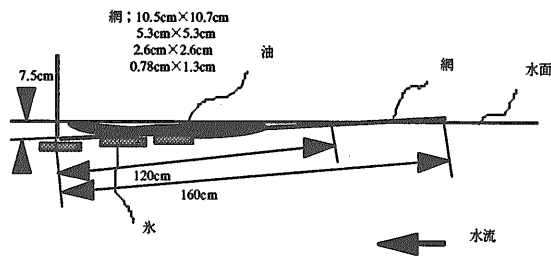


図2-23 網による油と氷の分離実験

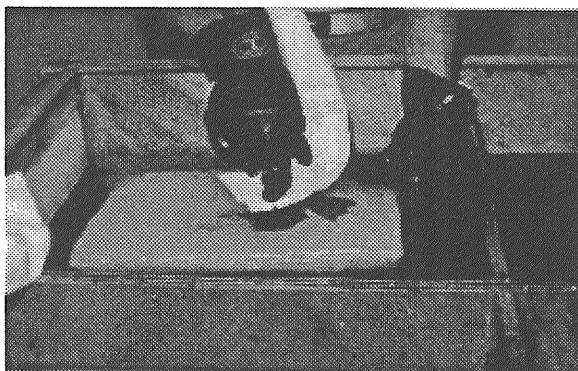


写真2-5 氷表面が滑らかな場合

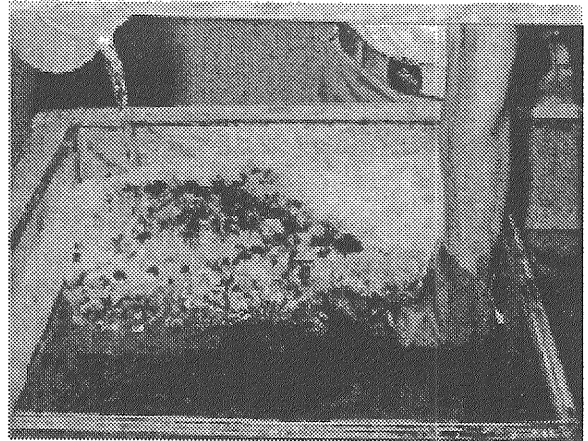


写真2-6 海水で洗い流した場合

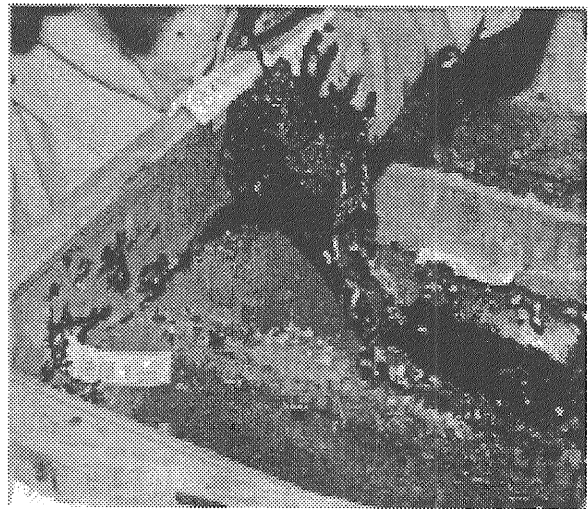


写真2-7 低温室に放置し半固化した油層と氷板の界面を引き剥がした場合

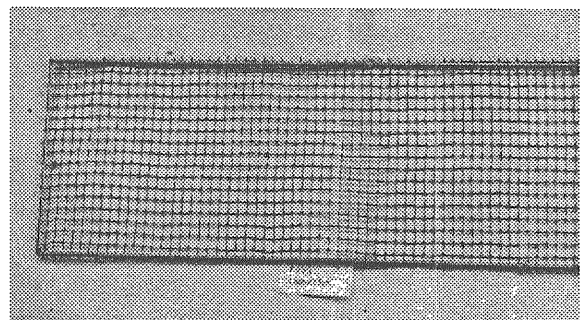


写真2-8 格子間隔2.6cm×2.6cmの網

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°C 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。

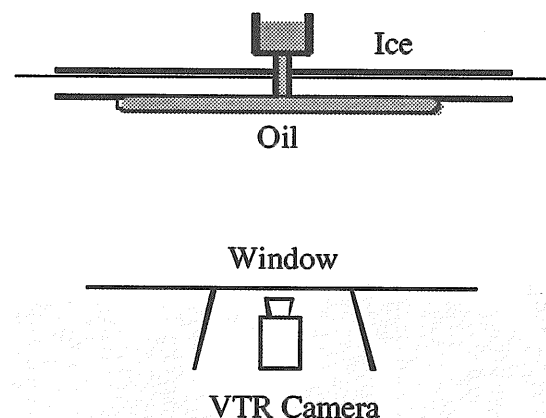


図2-24 氷板下への油の拡散についての実験

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

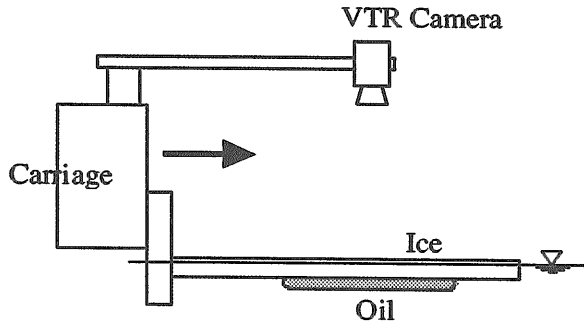


図2-25 氷板下の油膜の流れによる移動実験

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。

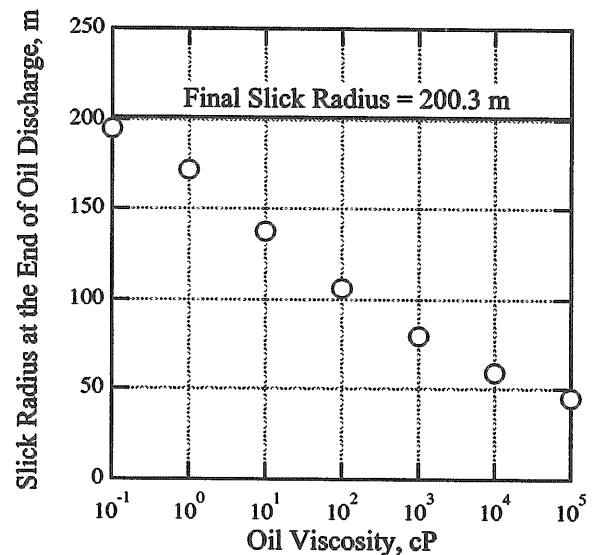


図2-26 流出停止時における油膜半径

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