

氷盤下面における油の拡がり と氷中取り込みに関する研究

泉山 耕*、宇都 正太郎*、金田 成雄*、下田 春人*
若生 大輔*、金野 祥久**、木岡 信治***、堺 茂樹****

Spreading and Encapsulation of Oil spilled under an Ice Cover

by

Koh IZUMIYAMA, Shotaro UTO, Shigeo KANADA, Haruhito SHIMODA,
Daisuke WAKO, Akihisa KONNO, Shinji KIOKA and Shigeki SAKAI

Abstract

Development of hydrocarbon is in underway in the offshore area of Sakhalin island, which is located just to the north of Hokkaido, Japan. It is planned to have the development in the year-round basis including winter, when the sea is covered by ice, in the near future. This has provoked serious concern over the possibility of oil spilling in ice, especially in Hokkaido that is sure to be affected by such pollution. Knowledge on oil spilling in ice, however, is limited compared with that in open water conditions. In view of the situation a research project had been carried out to study the behavior and recovery of oil spilled in ice-covered waters. Five organizations, Hokkaido University, Iwate University, National Maritime Research Institute, Civil Engineering Research Institute of Hokkaido and North Japan Port Consultants, participated in the project. This report describes the results of a study on the behavior of oil spilled in ice-covered waters, that was made as a part of the project. The study focused the spreading behavior of oil under an ice cover and the encapsulation of the oil in ice.

* 海洋開発研究領域、** 工学院大学工学部、*** 北海道開発土木研究所、
**** 岩手大学工学部

原稿受付 平成 年 月 日
審査済 平成 年 月 日

目 次

記号一覧..... 2

1. まえがき..... 2

2. 水中油流出問題と本研究の内容..... 3

3. 氷盤下面における油の拡がり..... 5

3.1 実験的検討..... 5

3.1.1 水槽実験..... 5

3.1.2 平坦氷盤下面における油の拡がり..... 6

3.1.3 氷盤下面の油に働く界面張力..... 7

3.1.4 氷盤下面の凹凸の影響..... 9

3.1.5 数値シミュレーションの検証..... 11

3.2 実海域条件下における油の拡がり..... 12

3.2.1 実海域での氷盤の下面形状..... 12

3.2.2 実海域に対するシミュレーション..... 13

3.2.3 理論モデル..... 14

4. 油の水中取り込み..... 17

4.1 取り込みメカニズム..... 17

4.1.1 低温室での実験..... 17

4.1.2 取り込み過程..... 18

4.1.3 油の下での氷の成長の計算..... 19

4.2 実海域条件下のシミュレーション..... 22

4.2.1 計算条件..... 22

4.2.2 計算結果..... 23

4.2.3 モデルの将来的な改良の方向..... 25

5. まとめ..... 25

謝辞..... 26

参考文献..... 26

記号一覧

A_L 平坦氷盤下面における油の拡がり面積

A_R 凹凸を有する氷盤下面における油の拡がり面積

C 氷盤下面の凹部に貯留される油の平均的な厚さと氷盤下面の深さの変化の標準偏差との比

Gr グラスホフ数

H_C 対流熱伝達が起こる場合の油層の下の氷の成長量

H_N 対流熱伝達が起こらない場合の油層の下の氷の成長量

K 氷盤下での油の拡がり速度に関わる比例係数

L 氷の潜熱

Nu ヌセルト数

Pr プラントル数

Q 油の流出速度

R 平坦氷盤下面に円形に拡がった油の半径

R_F 平坦氷盤下面における油層の拡がりの最終的な半径

R_S 氷盤下面の深さの変化の標準偏差（氷盤下面の凹凸サイズに対する指標）

Ra レイリー数

T 温度

T_{ICE} 氷の温度

T_{OIL} 油の温度

T_{TOP} 氷の表面温度

T_{WATER} 水の温度

V 油の体積

c 比熱

g 重力加速度

k 熱伝導係数

k_C 対流がある場合の熱伝導係数

h 水平な2表面を有する流体の厚さ

h_C 氷盤下面の凹部に貯留される油の平均的な厚さ

h_T 平坦氷盤下面に流出した油の最終的な厚さ

r 氷盤下面の油層先端部形状の曲率半径

s 氷盤下面の油層先端部の弧上の長さ

t 油の流出開始からの経過時間

ΔP 氷盤下面の油層先端部における圧力差

$\Delta \rho$ 水と油の密度差

ΔT 水平な2表面を有する流体の上面と下面の温度差

α 氷盤下での油の拡がりに関わる無次元パラメータ

β 体積温度膨張係数

δ_{ICE} 微小時間 dt の間に油層下面に成長する氷の厚さ

δq 微小時間 dt の間に油層下面の単位面積を流れる熱量

ϕ 氷盤下面の油層先端部の任意の点における法線の傾き

μ 粘性係数

μ_O 油の粘性係数

ν 動粘性係数

ρ 密度

ρ_{ICE} 氷の密度

ρ_O 油の密度

σ 油と水との間の界面張力

σ_N 氷盤下面の油層に働く正味の界面張力

1. まえがき

北海道の北方に位置するロシア・サハリン島周辺の大陸棚に石油・天然ガスの資源が豊富に存在することは、比較的古くから知られていた。すでに1970年代に、この資源の開発についてわが国とソビエト連邦との間で共同での探鉱事業についての基本的契

約が為されている¹⁾。このように30年近く前にスタートを切りながら、その後続く国際石油価格の低迷及びアフガニスタン紛争等に代表される東西冷戦下の世界情勢にあって、この海域における海底資源は本格的な開発に至らぬまま時が過ぎた。しかしながらこのような状況は、ソビエト連邦の政治・経済体制の変革とロシア共和国の成立という社会背景の下、急速な変化を遂げた。この海域における資源量及び経済性調査のための探鉱が資源開発を目指す企業体により行われるとともに、資源の商業生産による利益の配分について、ロシア連邦との間に生産物分与協定が発効するなど、本格的な開発に向けての状況が整いつつある。

サハリン周辺海域は、現在9区画の鉱区に分割されている。これらの鉱区における開発の段階は様々であるが、サハリン島北東部の鉱区を対象とする開発プロジェクト Sakhalin II においては、1999年夏よりすでに石油の商業生産が開始されている。また、これに隣接する鉱区を対象とする Sakhalin I は、商業生産の開始は Sakhalin II に遅れをとったものの、石油の推定可採埋蔵量は Sakhalin II のそれを大きく上回ると予想され、近い将来の商業生産開始に向けての準備が進められている。

このようなサハリン沖の大陸棚における海底資源開発の本格化は、エネルギー資源確保の多角化を目指すわが国にとっては望ましいことと考えられる。事実、2001年には Sakhalin II において生産された原油が初めてわが国にも輸入された。しかしながらこの一方、この開発に伴う負の影響として、開発現場あるいはその輸送路における油流出事故による海洋環境の汚染を危惧する声が北海道を中心に高まっている。サハリン島東の海域には、島に沿って南下する海流の存在が知られている。この海域において万が一油流出事故が発生した場合は、海流に沿って汚染域が南下し、北海道、特にオホーツク海沿岸域にまで到達することが考えられる。周知のようにこの海域は水産資源の豊富な海域であり、ここが汚染された場合の生態系及び地域経済に与える影響は極めて大きなものとなるであろうことは、ナホトカ号事故の例を引くまでも無く、想像に難くない。

このような油流出事故によるオホーツク海の海洋汚染を考える上で特に注目すべきは、この海域における海水の存在である。サハリン島周辺の開発現場を含んで北海道に至るオホーツク海は、冬季には流氷に覆われる氷海域に変じる。上記の Sakhalin II における開発は、現在は第1フェイズであり、石油の生産は無氷期に限定されているが、2006年からは第2フェイズとして冬季を含む通年生産体制に移行することが計画されている。一方、Sakhalin I における開発については、2005年末から直接通年体

制での石油の商業生産が開始される予定となっている。海水の存在する海域において油流出が発生した場合の油の挙動は通常海域におけるものとは大きく異なり、これに対する汚染防除にも通常海域での流出に対するものとは全く異なる技術・手法が求められる。

氷の存在する海域における油流出問題については、北極海域を中心とする氷海域に大規模油田が発見されたことを受けて1970年代を中心に、石油関連企業あるいは政府による研究・開発が盛んに為された時期があった²⁾。しかしながら、これらのいわゆる北方資源開発のブームが去るとともにこういった研究・技術開発の動きも沈静化した。この時期から現在まで、氷中流出油の機械的回収に関する MORICE プロジェクト³⁾や、近年のサハリン沖大陸棚・ロシア北西部北極海・カスピ海といった結氷海域における油田開発計画の本格化に関連した多少の動きはあるが、氷中油流出問題に関する研究・技術開発にはまだまだ未発達な点が多いと言わざるを得ない。特にわが国においてはその例は極めて少ない。

このような現状に鑑み、筆者らを含む研究グループは、運輸施設整備事業団(現在の独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構)の「運輸分野における基礎的研究推進制度」による研究として、「氷海域における流出油の挙動と回収に関する基礎的研究」(研究代表者 佐伯 浩 北海道大学教授)を、2000年度よりの3ヵ年プロジェクトとして実施した⁴⁾。本研究の目的は、氷海域において油流出が発生した場合の油の挙動を解明し、これに対する油の機械的回収方法について検討することにある。本研究には、北海道大学・岩手大学・北海道開発土木研究所・北日本港湾コンサルタント・海上技術安全研究所の5機関が参加した。

海上技術安全研究所では、氷海域に流出した油の挙動、具体的には、流出油の氷盤下面における拡がりや氷の中への取り込み現象について、水槽並びに低温室での実験を中心とする研究を実施した。これらの研究結果は、他の研究機関における研究結果、特に岩手大学において実施された流出油の拡がりについての数値シミュレーションと組み合わせることにより、上記の2点について、実海域における現象を推定する形で取りまとめた。本報告ではこれらの成果について報告する。

2. 氷中油流出問題と本研究の内容

氷海域において油が流出した場合に発生する現象は、氷の存在により、通常海域におけるものとは大きく異なるものとなる。実氷海域における海水の形態及びここにおける油流出のシナリオは多様であり、

その結果として起こり得る状態には様々なもの考えられるが、これらは氷と油の相対的位置関係という観点から、油が氷盤の上面に存在する場合、油が氷盤と氷盤間の水空き部に存在する場合、油が氷盤下面に存在する場合の3種類のモードに大別できよう。

油の流出事故に対する汚染防除対策という観点からは、これらの3モードの取り扱いが大きく異なる。まず、汚染防除のためには流出油の位置と面的拡がりの程度に関する情報が重要となるが、前2者の場合はこれらの把握は比較的容易である。これに対し、氷の下面に油が存在する場合、氷を通しての視認による油の検知は、成長初期のごく薄い氷盤の場合を除いて一般に困難であり、この他の原理による手法も開発されていない。

一方、現場における油汚染の防除手法としては、一般に、分散剤による油の分散・現場燃焼・回収の3種類の手法が考えられよう。これらの3種類の手法のうち、分散剤の使用と現場燃焼については、新たな環境汚染を引き起こすという観点から、適用が禁じられている場合があるが、ここでは技術的な観点から上記3モードについてこれらの手法の適用可能性を考えてみる。まず氷盤上面に油が存在する状態に対しては、回収及び現場燃焼が有効な手法として挙げられよう。特に油の回収に関しては、雪が存在する場合はこれによる油の吸着が有効であるという報告もある。次に氷盤間の水空き部に油が存在する場合には、気温・油膜厚さ等にもよるが、現場燃焼の適用が考えられる。また、氷盤及び水空きのサイズ等の条件にもよるが、通常海域における油の機械的回収あるいは吸着の手法が応用できる場合もある。ただし、分散剤の使用は、前述のように氷によって波浪等による擾乱が抑えられることから、その効果は高くないとされる。これに対し、氷の下面に油が存在する場合には、燃焼・分散による油の直接的な処理は期待できず、回収あるいは開水域に油を誘導した後の処理といった手法を採らざるを得ない。

以上のように、油の流出後の汚染防除対策という観点から、氷盤の下面に油が存在する場合は最も技術的に困難なモードであることが判るが、この状態で油が放置された場合、氷と油の干渉という氷海域での油流出に特有の現象も発生する。ここで言う氷と油の干渉とは、氷盤下面に存在する油の周囲に新たに氷が成長し、油が水中へ取り込まれる現象であり、油が上下の氷により挟み込まれたような形になるため、このような状態をオイル-アイス・サンドウィッチと呼ぶことがある。氷中に取り込まれた油に対しては、機械的回収等の処理は実用上不可能である。また海水は、一般に風・潮流等の影響により運

動するが、オイル-アイス・サンドウィッチが形成された場合は、海水の運動に伴って油が運搬されるという通常海域には無い汚染領域の移動・拡大メカニズムが発現される可能性がある。

このことは、サハリン大陸棚開発に伴う水中油流出事故の可能性を考えると、わが国にとって重要である。図2-1は、サハリン北東部の沖の開発現場に存在する氷盤上に信号ブイを設置し、その移動を追った記録⁵⁾であるが、いずれの氷盤も北海道方向に向かって流れ下がっていることが判る。このようなサハリンからわが国に向う海水の運動は、その後の衛星画像の解析によっても裏付けられている⁶⁾。従って、万が一サハリン大陸棚の開発現場において油流出事故が発生し、oil-ice sandwich が形成された場合、油が氷とともに北海道沿岸域まで到達する可能性は高い。過去の現地実験によると、oil-ice sandwich の形成により氷中に取り込まれた油を融氷期に再解析した結果、その成分は当初のものほとんど変化していないことが示されている⁷⁾。現在 Sakhalin II において生産されている原油は、揮発成分の含有率が高く、無氷季に流出したとしても比較的短時間にそのかなりの部分が蒸発すると言われている。しかしながら、冬季における流出においては、上記のようなメカニズムにより、変成していない「生の原油」がわが国沿岸に運ばれ、新たな海洋汚染を引き起こす可能性が危惧されている。



図2-1 サハリン島周辺の海水の運動
(文献5)を元に作成)

以上のように、水中油流出の3種類のモードの中で、氷盤の下面に油が流出した場合が汚染防除という観点から最も対策が困難なモードであり、また、氷と油の干渉という水中油流出に特有な問題を引き起こすものであることが判る。また、サハリン大陸

棚における開発を考える場合、開発現場からサハリン島あるいは大陸への海底パイプラインによる原油の輸送が計画されているが、冬季においてこれらのパイプラインからの油の流出があった場合には、氷盤下面に油が広がる状態が最も可能性の高いものとなる。以上のような考察に基づき、本研究では氷盤下面に油が存在するモードを対象として、油の拡がりや水中取り込み現象について研究を行った。

3. 氷盤下面における油の拡がり

本章では、氷盤の下面に油が流出した場合の拡がり挙動についての研究成果を述べる。この問題については、水槽実験によりその基本的特性を求めた。氷盤下面における油の拡がりには、氷盤下面の形状が大きな影響を与える。このため、水槽実験においても水平・平坦な底面を有する場合も含め、様々な底面形状を有する氷盤に対して実験を行った。またこの問題に対しては、共同研究機関である岩手大学により、数値シミュレーションプログラムが開発され、水槽実験結果を用いてこのシミュレーションの妥当性の検証を行った。一方、本プロジェクトの一環として、北海道開発土木研究所により、紋別市沖の海水の底面形状の計測が行われたが、この結果を統計処理して上記シミュレーションに適用することにより、実海域における油の広がり規模を推定した。最後に、氷盤下面における油の拡がりについての理論モデルを示し、これと水槽実験及び実海域の条件に対するシミュレーション結果との比較・検討を行った。

3.1 実験的検討

3.1.1 水槽実験

氷盤下面における油の拡がりに関する水槽実験は、海上技術安全研究所の氷海船舶試験水槽において実施した^{8),9)}。本水槽は、長さ35.0m、幅6.0m、深さ1.8mの試験水槽を冷凍室の中に封設した試験施設である。氷海船舶試験水槽の断面図を図3-1に示す。同図に示されるように、水槽本体下部には地下ピットがある。この地下ピットからは、水槽の底部及び側壁部のそれぞれ8箇所にて設けられた観測窓を通して、実験の水中観測が可能である。また、製氷時には水槽上部の冷凍室内の温度を、併設の冷凍装置により-20℃に冷却することにより水槽内に氷を成長させるが、地下ピットの温度は-2℃に保たれる。このように水槽の下面・側面に空気層を設け、その温度を制御することにより、地盤から水槽へ直接熱が流入することを防ぎ、水槽内に製氷される氷の均一性を保つことができる構造となっている。

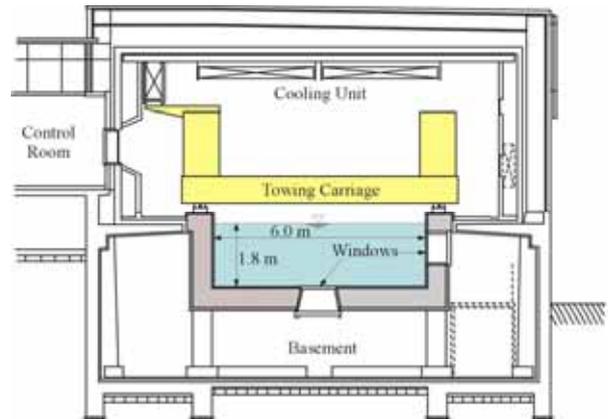


図3-1 氷海船舶試験水槽の断面図

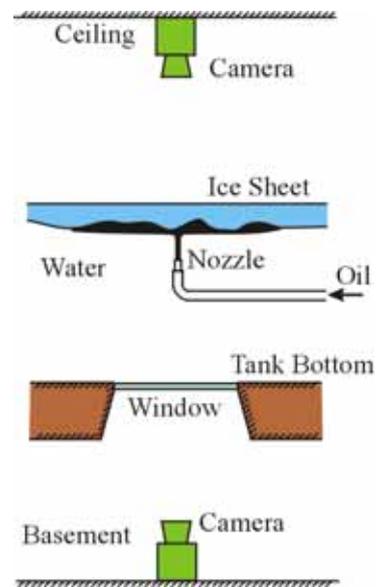


図3-2 水槽実験の手法

実際の事故等における油の流出形態は多様であろう。しかしながら本実験では、油の拡がりについての基本的特性を検討するという観点から、このような流出形態を単純化して、氷盤下面の一点から油が一定流量で流出し一定時間の経過後に停止するという条件に対して実験を行った。水槽実験の手法の概要を図3-2に示す。油は、氷盤下面に設置したノズルから流出させた。ノズルから流出後、油は氷と水の界面を氷盤下面に沿って広がるが、この挙動を水槽底部の観測窓の下及び冷凍室天井に設置したVTRカメラにより撮影し、実験後の解析に供した。実験用の供試油としては、機械用の潤滑油を、VTR画像における油の視認性を向上させるために、染料で濃紺に着色したものをを用いた。この油の0にお

ける密度及び粘性係数は、それぞれ、890 kg/m³ 及び 0.120 Pa·sec である。

氷海船舶試験水槽における船舶等の模型試験においては、氷の強度等の機械的特性を調整するために、何らかの添加剤の水溶液を凍結させたいわゆる模型氷を用いることが一般的である。しかしながらこのような模型氷は、その内部に濃縮された水溶液を閉じ込めた微細な空隙が無数に存在する構造を有するため、その透明度が落ちる。このため本実験では、氷盤上部からの氷を通して油の挙動が観察できるように、淡水を凍結させた氷を用いた。淡水氷は、また、模型氷に比べて強度が高いことから、氷盤下面形状の計測といった作業に際しても扱いが容易となる利点も有する。

3.1.2 平坦氷盤下面における油の拡がり

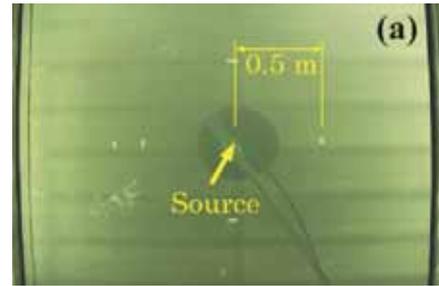
氷盤下面における油の拡がり挙動についての基本的特性を示すために、まず、水平・平坦な底面形状を有する氷盤の場合について考える。

図 3-3 は水平・平坦な底面形状を有する氷盤の下面に油が流出した状態に対する水槽実験の際に観測された油の拡がりである。この図は、油の流量が 2.09 l/min (3.48 × 10⁻⁵ m³/s) の試験ケースにおいて水槽底面の観測窓を通して撮影された画像であり、時間の経過順に、油の流出開始から、60 秒後、180 秒後及び 360 秒後の画像を用いて油層の拡大の様子を示したものである。油は流出点を中心とする円形の領域に広がっていることが判る。

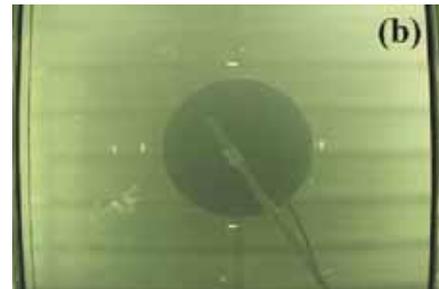
このような平坦氷盤の下面における油の拡がりについては、過去に幾例かの研究がある。Yapa らは平坦氷盤下面の一点から流出する油の軸対象な拡がりについて、油層に働く重力と粘性力を考慮することにより以下の関係を導いた¹⁰⁾。

$$R = K \left(\frac{\Delta\rho g Q^3}{\mu_o} \right)^{1/8} t^{1/2} \tag{3-1}$$

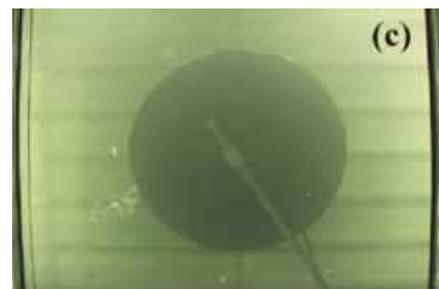
ここに、 R は油の拡がりの半径、 $\Delta\rho$ は水と油の密度差、 μ_o は油の粘性係数、 Q は油の流出速度、 t は流出開始からの経過時間、 K は比例係数である。式(3-1)の形で実験結果を解析した結果の例を図 3-4 に示す。実験結果が同式により与えられる比例関係を満たすものとなっていることが判る。なおこの場合、式(3-1)の関係が成立するのは流出開始から流出停止までの期間である。図 3-3 にも見られるように、油の流出停止後も油の面積はその率は下がるが増加を続ける。Yapa はこのような油の流出及び面積拡大について、流出開始から停止までを定流量モード (Constant Discharge Mode) 流出停止後を定体積モード (Constant Volume Mode) と呼んでいるが、ここでは定流量モードについて考察する。



(a) 流出開始から 60 秒後



(b) 流出開始から 180 秒後



(c) 流出開始から 360 秒後

図 3-3 平坦氷盤下面における油の拡がり

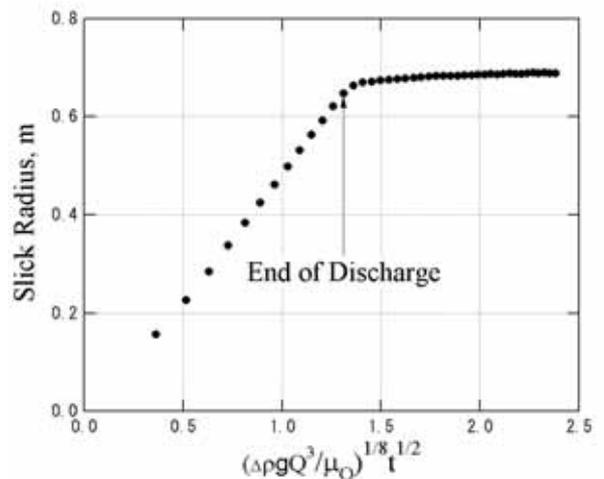


図 3-4 式(3-1)の形による実験結果の表示

式(3-1)に含まれる比例係数 K は、図3-4のデータの直線関係の傾きである。この係数について Yapa らは、実験結果に基づいて、定数とすることを提案した。しかしながら、その後 Izumiyama らは、Yapa らの理論を界面張力の影響が入るように修正することにより、この比例係数が以下のように与えられることを示した。¹¹⁾

$$K = \left(\frac{1}{2\pi^3} \right)^{1/8} f(\alpha) \quad (3-2)$$

ここに、 $f(\alpha)$ は無次元数 α の関数であり、両者はそれぞれ以下のように与えられる。

$$f(\alpha) = \left(\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 2\alpha + 1} \right)^{1/8} \quad (3-3)$$

$$\alpha = \frac{\pi \sigma_N^2}{\Delta \rho g \mu_o Q} \quad (3-4)$$

なお、無次元数 α の計算において、 σ_N は油層に働く正味の界面張力であり、 g は重力加速度である。油層に働く正味の界面張力の詳細については次節において述べる。

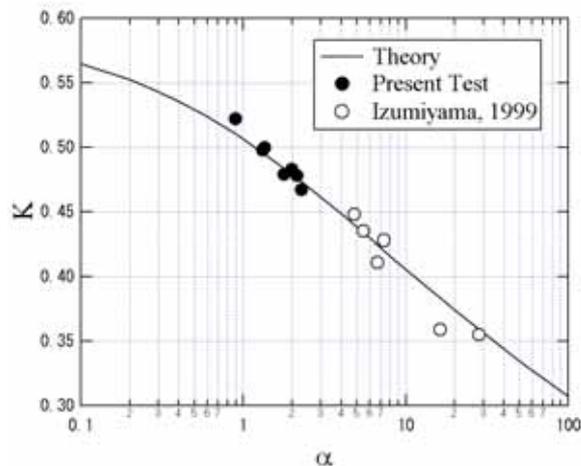


図3-5 係数 K と無次元数 α の関係

Izumiyama らは、上記の理論的考察に加えて、今回のものと同様の水槽実験を行い、式(3-2)から(3-4)の関係を検証しているが、今回の実験結果の解析結果もこれに加えて示した結果が図3-5である。両実験結果と理論曲線の一致が非常に良いことが判る。両実験における実験条件を比較を表3-1に示す。両実験はともに機械用潤滑油を供試油として用いているが、その特性は異なる。また、油の流出量は両実験において大きく異なる。Izumiyama らによる実験

は比較的小規模なものであり、油の総量 V が 5 l 内外程度であるのに対し、今回の実験では、30 l を超えるまでの量の油を用いている。今回の実験では、前回の実験に対する無次元数 α の領域とは異なる領域に対する実験を行うことも一つの目的として実験条件を決定したが、このように異なる α の領域に対する実験結果がともに理論を良く説明する結果となったことは、この理論の妥当性を示すものと言えよう。

表3-1 実験条件の比較

	Izumiyama, 1999	本実験
ρ , kg/m ³	878.00	890.00
μ_o , Pa-sec	0.25	0.12
σ_N , N/m	0.088 - 0.113	0.052
Q , l/min	0.24 - 1.48	1.63 - 4.15
V , l	3.00 - 6.00	5.63 - 34.97
Ice	模型氷	淡水氷

3.1.3 氷盤下面の油に働く界面張力

氷盤下面に流出した油の形状・面積はこれに働く力により決定される。前節で述べた Yapa らの理論においては油に働く重力（浮力、すなわち水と油の密度差）と粘性力の影響が取り入れられ、Izumiyama らの理論ではこれに加えて界面張力の影響が考慮され、Yapa らの理論を発展させる形で式(3-2)から(3-4)の関係が導かれている。厳密に言えば、Yapa らの研究においても界面張力についての考察はなされているが、これは油の流出が停止した後の最終的な油層の面積は油層に働く重力と界面張力の釣り合いにより決定されるという部分に限られ、流出時の油の面積の変化に対する考察には界面張力の効果は取り入れられていない。Yapa らの理論及びその後の Izumiyama らの考察によれば、油層の最終的な形状の半径 R_F は

$$R_F = \left(\frac{\Delta \rho g V^2}{2\pi^2 \sigma_N} \right) \quad (3-5)$$

により与えられる。前述のように、この式中に現れる σ_N を Yapa は正味の界面張力（net interfacial tension force）と呼び、3種類の界面に働く界面張力の和としている。しかしながら、この力の値の決定方法及びその物理的意味についての解釈は与えられていない。本研究では、氷盤下面における油の拡がり挙動を支配する力の一つとして、油層に働く界面張力についての詳細研究を行った¹²⁾。

油層に働く界面張力は、開水域における油の拡がり決定する力の一つである。この場合、油層の端

部には、油-水・油-空気・水-空気の3種類の界面があり、これらに働く界面張力は、一般に油層の面積を拡大させる方向に働き、拡散係数と呼ばれる。これに対し、氷盤下面に存在する油の周辺には、油-水、油-氷、氷-水の3種類の界面が存在し、これらの合力が正味の界面張力である。しかしながら、一般に固体と液体間の界面張力の計測は技術的に容易ではない。特に氷と水の界面については、分子レベルでは固相と液相との間の分子の出入りの平衡状態として平均的に界面が与えられている状態と考えられることから界面張力という概念が適用できるかどうかについても定かではない。

氷盤の下面に存在する油に働く界面張力の決定には上記のような問題がある。これについて、Izumiyaらは、式(3-5)の関係を利用して正味の界面張力の値を推定する方法、すなわち、対象となる油を対象となる水と氷の界面（界面張力の値は海水の塩分濃度等に依存すると考えられる）に流出させてその最終的な面積あるいは半径を計測することにより界面張力を計算する方法、を提案している¹¹⁾。この手法によれば比較的簡便に正味の界面張力を推定することができようが、何らかの低温施設あるいは現地海水を用いた実験が必要となる。また、氷の下面に存在する油に働く界面張力についての物理的意味解釈を与えるものではない。

このため本研究では、氷盤下面に存在する油に働く正味の界面張力の決定についても研究を行った。まず、この問題について理論的考察を行った。油層端部に働く力を考える（図3-6）。油層端部の弧に沿った各点の曲率半径を $r=r(s)$ で表すと、油層先端部における圧力差 ΔP は油と水との界面張力 σ により

$$\Delta P = \frac{\sigma}{r} \tag{3-6}$$

と表される。弧と曲率半径の幾何学的関係から、

$$\Delta P = \sigma \frac{d\phi}{ds} \tag{3-7}$$

を得る。正味の界面張力 σ_N は、圧力差 ΔP を弧に添って積分することにより与えられる。すなわち、

$$\begin{aligned} \sigma_N &= \int_s \Delta P \sin \phi ds \\ &= \int_{\phi} \sigma \sin \phi d\phi \end{aligned} \tag{3-8}$$

上式の積分は、 ϕ に関する積分区間が決まれば確定する。これについては、その詳細については後述するが、氷盤の下面に存在する油滴の形状の詳細解析を行った結果、氷と油の接触角は、ほぼ 180° と考えられる。そこで、これに基づいて積分を実施して次を得る。

$$\sigma_N = 2\sigma \tag{3-9}$$

上式の意味するところは、二つの点において重要である。その第1は、正味の界面張力は油-水間の界面張力のみにおいて決定され、他の2界面における界面張力には依存しない点である。一方、この式から得られる第2の情報、正味の界面張力が油-水間の界面張力の2倍により与えられることである。前述のようにこの値は3種類の界面張力の中で唯一計測可能な値であり、これを対象となる油と水とに対して計測しておけば、この油が氷板の下に流出した場合の正味の界面張力はこの値の2倍により与えられる。

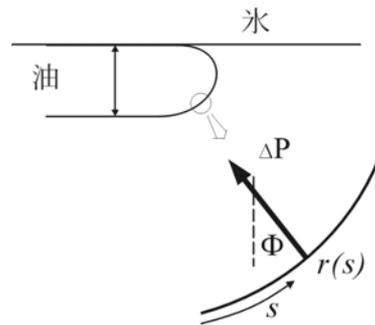


図3-6 油層の先端部

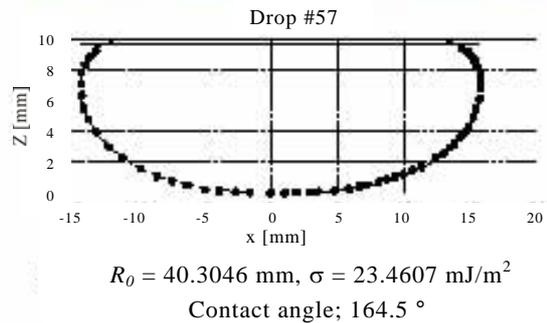
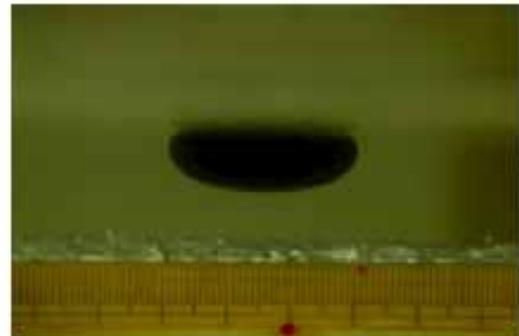


図3-7 氷の下面における油の形状の詳細解析

次に理論的に得られた結果に対して、実験的検証を行った。このために、まず、油-水間の界面張力の静的法 (sessile drop method) による決定を行うとともにこの解析方法を利用して理論的考察結果の検

証を行った。静的法では、一般に固体面上に置かれた液滴の形状を計測することによりその界面張力を求めるが、ここでは平坦な氷板下面に存在する油滴形状から界面張力を求めた。静的法による界面張力の計算方法にはいくつかの種類があるが、本研究では油滴の撮影結果を Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) を用いて解析した。計測装置の概要と油滴の撮影例を図3-7に示す。

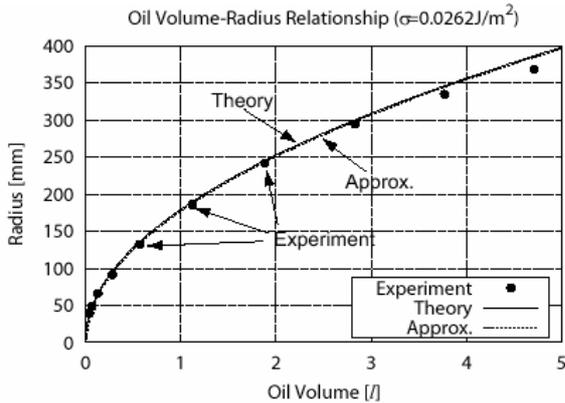


図3-8 油の形状から計算される関係と実測結果との比較

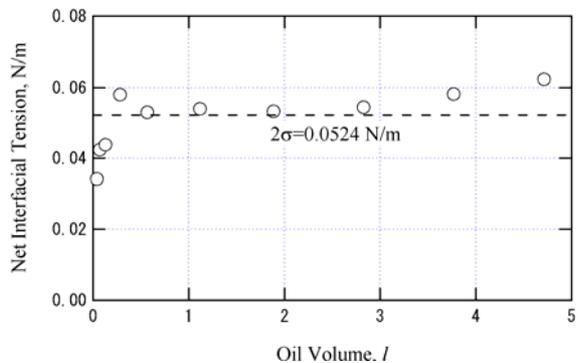


図3-9 正味の界面張力に関する実験と式(3-9)による推定結果の比較

ADSA 解析では、油滴形状の理論解と計測結果を比較することにより界面張力を求めることができる。この手法を逆に利用すると油滴頂点の曲率半径を与えることにより油滴全体形状を計算することができる。前述の正味の界面張力とこの関係を利用して平坦な氷板の下の油層の半径と体積の関係を求め、これと実験結果との比較を行った結果が図3-8である。計算結果と実験結果との一致は良く、理論的考察の結果の第一の結論である、油-水間の界面張力のみにおいて油の形状が決まることが示されている。

また、前述の式(3-5)の関係を利用した実験的手法により正味の界面張力を決定した結果と式(3-9)との比較をしたものが図3-9である。多少のばらつきはあるが、実験的に決定された正味の界面張力が理論値でほぼ良く説明されていると言える。

以上をまとめると、「氷盤下の油に働く正味の界面張力は、油と水の間の界面張力だけで決定され、その2倍の値で与えられる」となり、3種類の界面に働く界面張力の中で最も簡易に計測ができる量を用いて正味の界面張力が与えられることが示された。この結果を油の拡がりの数値シミュレーションにおいても用いた。

3.1.4 氷盤下面の凹凸の影響

氷盤下面における油の拡がり挙動に対して氷盤下面の形状が大きな影響を与える。このため、水槽実験においては、下面に様々なサイズの凹凸を有する氷盤に対して油の流出実験を行った。実験に用いた氷盤の底面形状の計測結果とこの氷盤下面における油の拡がりの様子の例を図3-10及び図3-11にそれぞれ示す。図3-10に示したような氷盤下面の凹凸は、断熱法により作成した。具体的には、水槽室内を冷却して氷がある程度成長した時点で、氷板上面に断熱材を設置し、さらに冷却を続けた。この結果、断熱材の有無により氷の成長の程度が変化し、氷板下面に凹凸が形成された。断熱材の大きさ・厚さ・配置、断熱材を置いた後の冷却時間等を変化させることにより、氷板下面の凹凸のサイズを変化させた。

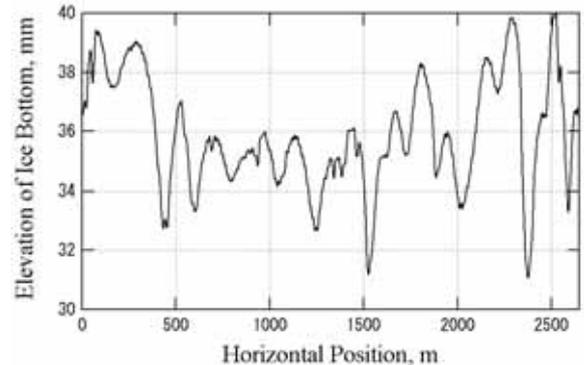
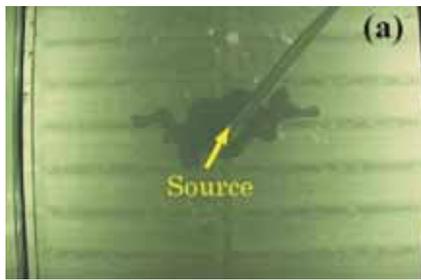


図3-10 氷盤下面の凹凸形状

図3-11は、油の流量が 1.03 l/min ($1.72 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) の試験ケースにおいて観察された油の拡がり挙動であり、流出開始から150秒後、450秒後及び900秒後の油の形状を示したものである。同図から、氷盤下面に凹凸がある場合の油の拡散挙動は、図3-3に示された平坦氷盤の場合とは大きく異なり、極

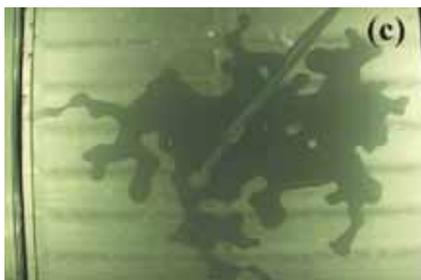
めて不規則な形状に広がっていることが判る。これは油が氷盤下面の凹部に沿って広がったことによる。



(a) 流出開始から 150 秒後



(b) 流出開始から 450 秒後



(c) 流出開始から 900 秒後

図 3 - 1 1 凹凸のある氷盤下面における油の拡がり

氷盤下面に凹凸がある場合の実験結果に対しても図 3 - 4 と同様の解析を行った。この場合、油の拡がり面積と等価な面積を有する円の半径をもって油の拡がり面積の半径とした。この解析の結果、データ点の経時変化に多少のふらつきは見られるものの、氷盤下面に凹凸がある場合においても、全体的には(3-1)式の比例関係が成立することが示された。このため、油の拡がり面積について、氷盤下面に凹凸のある場合と平坦氷盤の場合を比較するために、このような図からデータ点の傾きを計算し、図 3 - 5 と同様の形式でプロットした。この結果を図 3 - 1 2 に示す。図中の曲線は、式(3-2)から(3-4)により与えられる平坦氷板下の拡散に対する理論曲線である。両者を比較すると、氷板下に凹凸がある場合の比例係数 K は一般に平坦氷盤下におけるものに比べて小さい、言い換えると油の面積の拡がり速度が遅

く、従って、油の拡がり面積も小さく抑えられていることが判る。

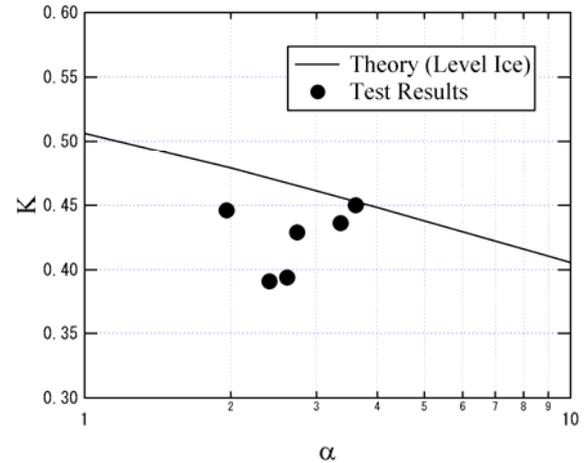


図 3 - 1 2 氷盤下面に凹凸がある場合の係数 K と無次元数 α の関係

前述のように、氷盤下面に凹凸が存在する場合、油は凹部に貯留されながら拡がって行く。このような凹部における油の貯留の程度は、当然のことながら凹部の深さ、別の言い方をすれば、凹凸のサイズに依存する。図 3 - 1 2 においてもデータ点は、平坦氷盤の場合を示す理論曲線から係数 K の低い領域にかけて分布しているが、これは、無次元数 α が同一の場合であっても凹凸のサイズの違いによって油の貯留の程度が変わる影響と考えられる。すなわち、凹凸サイズが小さい場合には平坦氷板の場合と油の拡がる速度がほとんど変わらず、理論曲線の近傍にデータ点が現れるが、凹凸のサイズが大きくなると凹部により多くの油が貯留されることの影響により拡がり面積が抑えられ、係数 K の値が下がるためと考えられる。

このような氷盤下面の凹凸のサイズと油の拡がり面積との関係をさらに定量的に考察するためには、凹凸のサイズを何らかの形で定量化する必要がある。本研究では、図 3 - 1 0 に示されるような氷盤の下面の深さの計測結果より得られる標準偏差 R_S をもって、氷盤下面の凹凸のサイズに対する指標とした。この指標を用いて、油の拡がり面積に対する凹凸サイズの影響を示したものが図 3 - 1 3 である。この図では、氷盤下面に凹凸がある場合の油の拡がり面積 A_R と油の流出速度等の条件が同一の場合に平坦氷盤下面に拡がる油の面積 A_L との比と氷盤下面の凹凸サイズとの関係を示している。なおこの場合の平坦氷盤下面における油の面積は、前節で述べた理論解により計算した値を用いた。氷盤下面の凹凸サイズが増大に伴って A_R/A_L 比が低下している。これは氷盤下面の凹凸サイズの増加に伴って油の貯留量が

増え、この結果として油の拡がり面積が低下することを定量的に示したと言えよう。

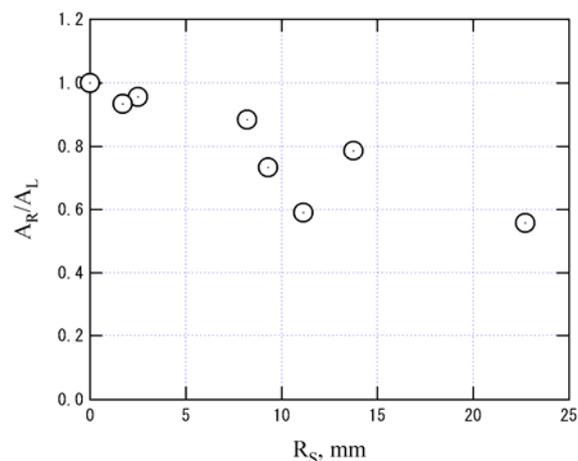


図3-13 油の拡がり面積への氷盤下面凹凸の影響 (水槽実験結果)

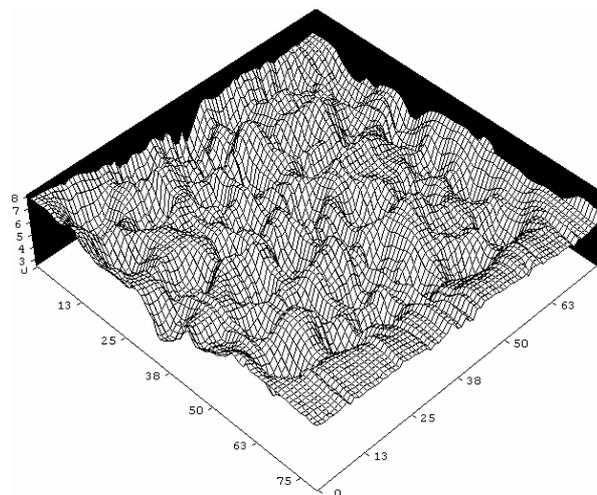
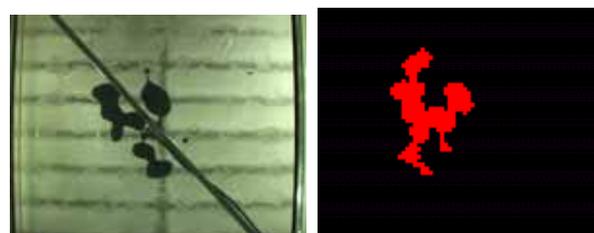


図3-14 氷盤下面形状の3次元計測結果の例

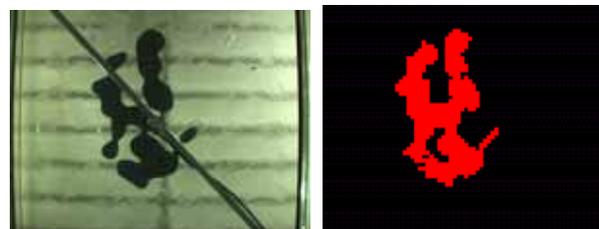
3.1.5 数値シミュレーションの検証

本報告冒頭に述べた研究プロジェクトにおける氷盤下面の油の拡がり挙動に関する研究の最終的な目的は、実海域における油の拡がり面積についての推定を与えることにある。このため、岩手大学において、油の拡がりに対する数値シミュレーションプログラムを開発した¹³⁾。次節以降に述べるように、このプログラムを用いて実海域の条件に対するシミュレーションを行ったが、その前段として、水槽実験に対応した計算を行い、これと実験結果とを比較することにより、シミュレーションの妥当性の検証を行った。

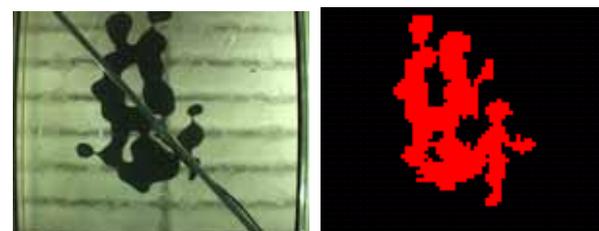
本研究では、氷海水槽での油流出実験結果を、氷盤下面における油の拡がり挙動についての基礎的知見を求めるものとしてとらえるとともに、数値計算結果の検証のためのデータとしても利用した。すなわち、水槽実験の状態を数値計算において再現し、これと実験結果との比較を行った。このような計算を実施するためには、水槽実験における氷盤下面の形状を求める必要がある。このため水槽実験の数ケースにおいて、氷盤下面の図3-10に示したような氷盤下面形状の計測を2あるいは5 cm 間隔で繰り返すことにより、3次元的な氷盤下面形状データを得た。図3-14はそのような計測結果の例である。このような計測結果を数値計算の境界条件として入力し、当該実験時の実験条件に対して油の拡がり挙動のシミュレーションを実施した。



240 秒後



480 秒後



720 秒後

水槽実験 シミュレーション

図3-15 水槽実験とシミュレーションの比較 (油層形状)

図3-15は、実験時に得られた油の拡がりの画像とこれらに対応するシミュレーション結果を、油流出開始からの時間を追って比較した例である。両者を比較すると、例えば油の流出後720秒の時点にお

いて、油層の右側部の部分において、実験では見られない油の進展がシミュレーションでは見られるといったように、細部については必ずしも対応していない部分もある。しかしながら、例えば油が氷盤底面に存在する凹部からその外部に進展するような場合、氷盤底部の微妙な深さの差が進展の方向を決定するような状態があり得ることを考えると、氷盤底面形状の計測がそこまでの精度を有していたかどうかは疑問無しとは言えない。このような点を考慮すると、全体的に見た油の拡がりの形状という観点からは、シミュレーション結果は実験結果に良く一致していると言えよう。

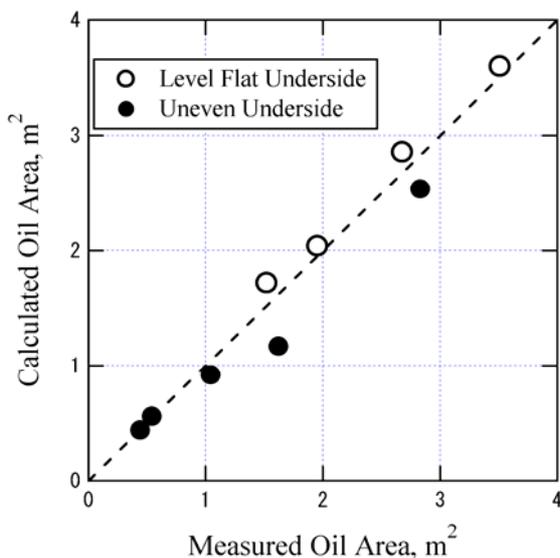


図 3-16 水槽実験とシミュレーションの比較（油層面積）

一方、油の拡がり面積の観点から計算結果と実験結果を比較した図が図 3-16 である。同図には、底部に凹凸のある氷盤の場合に加え、凹凸の無い水平・平坦な底面を有する氷盤の場合の結果も示してある。これについても、全般的に、計算結果と実験結果との間に良好な一致が認められる。ただし、水平・平坦な氷盤の場合に比べて、氷盤底部に凹凸がある場合には、計算により得られた油の面積が、実験によるものを若干下回るものとなることが認められる。このような違いが出てくる理由としては、界面張力の影響が考えられる。

前述のように、氷盤下面に存在する油層に働く正味の界面張力は、油-水間の界面張力の 2 倍の値として与えられることが本研究により示され、本計算においてもこれを取り入れている。しかしながら厳密にはこの取り扱い、氷盤底面が水平の場合を仮定したものであるが、氷盤底面に凹凸がある場合、油

層端部の氷盤底面は局所的には多少の傾きを持つ。理論上この傾きは油層に働く界面張力を減少させ、油の面積を拡大させる方向に働く。この結果、水平な底面を仮定した理論に基づく計算結果は実験に対して小さな油面積を与えることが考えられる。

以上のように、細部に若干の違いがあるものの、計算と実験結果との一致は良く、従って、本研究で開発された数値計算手法は、氷盤下面における油の拡がり挙動をシミュレートするにあたって、妥当なものであると言えよう。

3.2 実海域条件下における油の拡がり

水槽実験との比較により数値シミュレーションの妥当性が検証されたことを受けて、実氷海域における油の拡がり挙動を推定する計算を行った。

3.2.1 実海域での氷盤の下面形状

実海域における油の拡がりについてのシミュレーションを行うためには、実氷の下面形状についての情報が必要となる。このため、北海道開発土木研究所によって紋別沖において実施された実海域計測の結果を統計的に取り扱うことにより、実氷の底面形状の特性を解析した¹⁴⁾。その手法の詳細はここでは割愛するが、この解析では、まず、経時データとして得られている氷盤下面形状データを氷の運動速度データを用いて距離ベースのデータに変換し、このデータより 1200m 毎のサンプルデータを切り出した。図 3-17 はこのようなサンプルデータの例であるが、氷盤の下面形状は非常に変化に富んでいることが示されている。

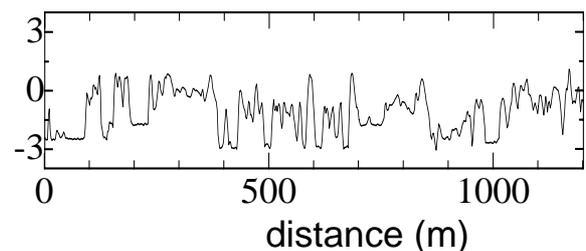


図 3-17 実氷の下面形状の計測例

次にこれらのサンプルデータについて、スペクトル解析を行った。図 3-18 は計測初年度に得られた全サンプルデータのスペクトルを示したものであるが、スペクトル曲線は、図中での高さは異なるがほぼ並行の関係にある、すなわち強度は異なるが周波数特性は同様、という傾向にあることがうかがえる。このことから、各サンプルデータのスペクトルをそ

の分散で正規化した正規化スペクトルを計算した。図3-18に示したデータに対応した正規化スペクトルをプロットしたものが図3-19であるが、高波数領域を除いて、互いに良く一致していることが判る。

全データを解析した結果、氷盤底面形状の正規化スペクトルが計測年及び計測地点によらずほぼ同一の形状を示すことが確認された。この結果を受けて、実海域における氷盤底面形状を代表するスペクトルとして、各サンプルデータの正規化スペクトルを平均することにより、「代表正規化スペクトル」を計算した。図3-19の中の濃い色の線で示されたスペクトルが代表正規化スペクトルである。

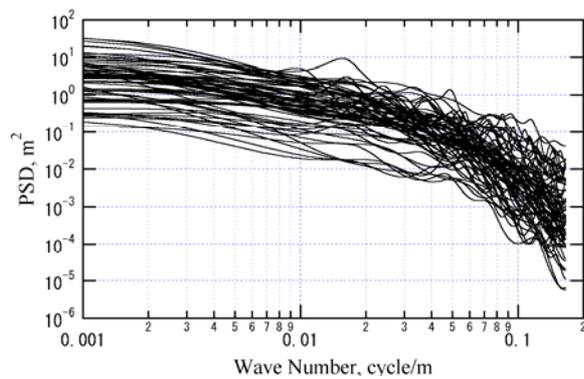


図3-18 氷盤下面形状のスペクトル

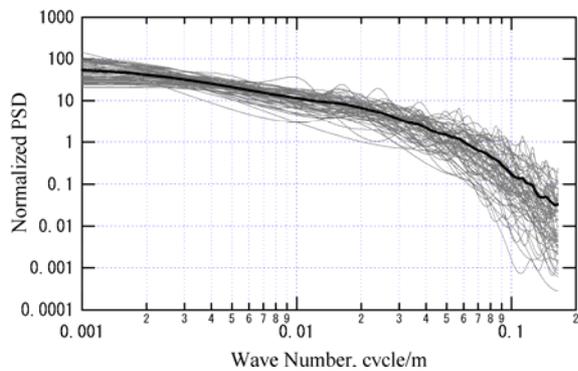


図3-19 氷盤下面形状の正規化スペクトル

3.2.2 実海域に対するシミュレーション

前節に述べたように、紋別沖のオホーツク海の海水の底面形状の計測データの統計解析から、これらを代表するスペクトル形状として、代表正規化スペクトルが得られた。実海域の条件における油の拡がりシミュレーションにおいては、このスペクトルを利用して擬似的な海氷底面形状を作成し、これに対

する油流出計算を行った。

しかしながら、代表正規化スペクトルから海氷底面形状を計算するためには、スペクトルの強度（底面形状の変動の分散あるいは標準偏差）に関する情報が必要となる。このため、サンプルデータの標準偏差を調べた。この結果をヒストグラムとして表したものが図3-20である。同図から判るように、サンプルデータの標準偏差は広い範囲にわたって分布している。氷盤の底面形状に凹凸が発生する理由としては、主に、波浪・潮流等の擾乱を受けて氷盤が破壊・積層する等の外力による変形作用によるもの、積雪等による断熱効果が不均一なために氷の成長速度が局所的に変化することによるもの、といった2種類の理由が考えられよう。図3-20は、こういった現象の影響の程度が空間・時間的に変動していることを示すものである。計算に当たっては、図3-20に示されたデータを参照して、氷盤下面形状の変化の標準偏差として、0.10、0.25、0.50、1.00、1.50 mの5種類の値を用いた。

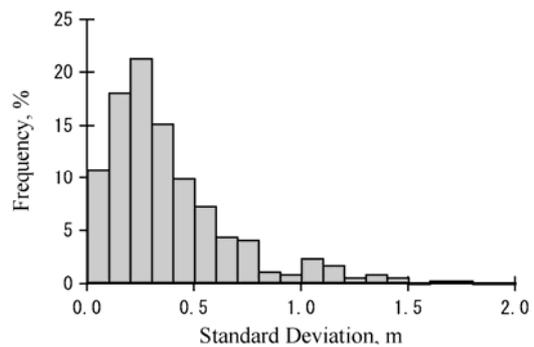


図3-20 氷盤下面形状の標準偏差の分布

油の流出状態については、以下のような流出イベントを想定した。

- ・流量： 0.5 m³/s
- ・流出時間： 10,000 秒 (2.78 時間)
- ・総流出量： 5,000 m³

この場合の油の総流出量は、大型油タンカーの1タンク分程度の量として5,000 m³を想定した。また、油の特性としては、前述の水槽実験結果との比較計算の延長という意味合いも含めて、実験に用いた供試油と同等の特性を有する油が流出したという仮定で計算を行った。従って、計算には水槽実験への供試油の特性量を用いたが、これらの特性量は、実原油の値としても特殊なものではない。

計算結果の例を図3-21から図3-23に示す。図3-21図は、 $R_s = 1.0m$ のケースについて、油の拡がる領域の拡大の様子を、油流出開始時点からの

時間を追って示したものである。氷盤底面の凹凸の影響により、図3-15同様、油は不規則な形状を有する領域に広がっている。

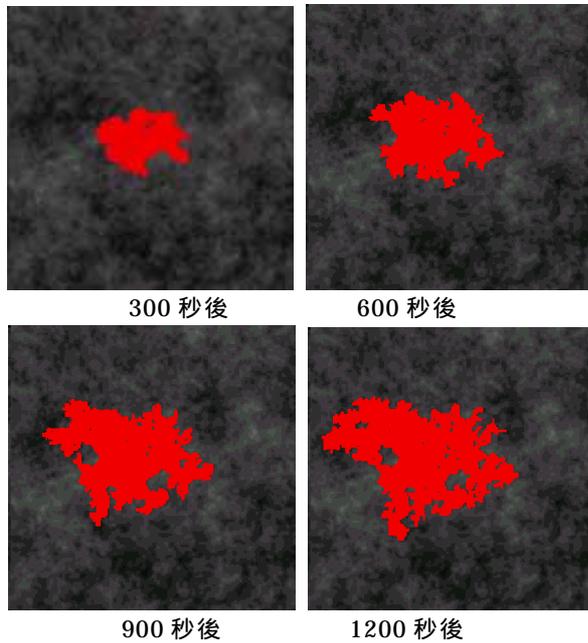


図3-2 1 シミュレーション結果の例 (油層形状)

図3-2 2は、前述の5種類の氷盤下面凹凸サイズの計算ケースにおいて得られた油の面積を、流出開始からの経過時間の関数として示したものである。油の面積は氷盤下面の凹凸サイズの影響を受け、凹凸サイズの増大とともに減少する。このような関係は、図3-1 3に示されるように、水槽実験結果からも得られている。

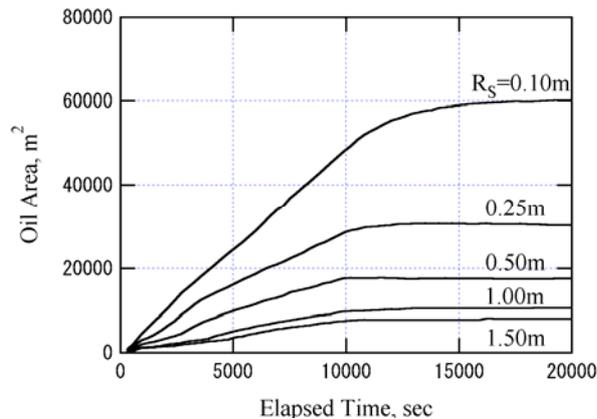


図3-2 2 シミュレーション結果(油層面積)

前述のように、今回の計算は実験に用いた油と同

一の特性を有する油を想定した。従って、数値計算結果は、水槽実験では実施不可能な規模を有する氷盤下面凹凸が存在する状態に対する仮想実験の結果として捉えることができよう。このように考えて、図3-1 3に数値計算結果を付け加える形でプロットしたものが図3-2 3である。両データ群がそれぞれ外挿的な関係にあることが判る。

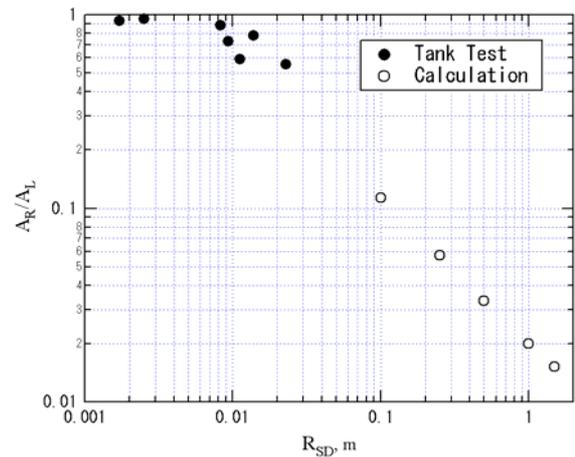


図3-2 3 油の広がり面積への氷盤下面凹凸の影響(水槽実験と数値計算結果)

3.2.3 理論モデル

氷盤下面における油の拡がりは、開水域におけるものと比較すると、その面積が抑えられる。例えば、前述の数値計算の中で $R_S = 0.1m$ の場合を例にとると、油の流出が終了した後の最終的な油の面積は $60,000 \text{ m}^2$ 程度となることが示されている。これに対し、同じく $5,000 \text{ m}^3$ の体積の油が開水域に流出した場合、平均的な油膜厚さを 0.5 mm とすると、その面積は 10 km^2 にも達する。逆の言い方をすれば、氷盤下面に油が流出した場合の平均的な油層厚さは、開水域におけるもの比べて極めて厚い、例えば、上記の例では 83 mm 、ということが出来る。

このように、氷盤の下面に流出した油は、その拡がりが抑えられ、言わば氷盤の下に「保持」される。このような氷盤による油の保持は、2種類のメカニズムが働いた結果と考えることができる¹⁵⁾。その一つは油に働く界面張力の影響である。前述のように、氷盤下面に流出した油に働く界面張力は、油の拡がりを決定する力の一つであるが、氷盤下面に油が存在する場合、この力は油の拡がりを抑える方向に働く。もう一つのメカニズムは氷盤下面の凹部における貯留である。図3-1 2に示されるように、氷盤下面に凹凸がある場合は平坦な氷盤の場合に比べて油の面積が減少する。これは、氷盤下面の凹部に油の

一部が貯留されることによる油の面積の減少と理解することができよう。

これらの2種類のメカニズムによる氷盤下面における油の保持を模式的に示したものが図3-24である。同図では油の全量を、界面張力により保持されるものと氷盤下面の凹部に貯留されるものとの2つの部分に分けて示した。本節では、これらの2種類の油の保持メカニズムに基づいて、氷盤下面における油の面積を計算するモデルを示す。

なお、ここでの議論では、油の流出が終了して十分に長い時間が経過した時点における、油の最終的な面積を扱うものとする。油の面積は、油の流出点からの流出に伴って拡大を続けるが、流出停止後についても油の面積は拡大を続ける。この油の面積は理論的には一定の値に漸近し、Yapaによれば、平坦氷盤の場合、油の領域の半径の漸近値は式(3-5)により与えられる。このような油の面積の拡がり挙動の例は、図3-4に見ることができる。この場合、油の流出中は、油の領域の半径は経過時間の平方根に比例して増加するが、油の流出停止後も増加を続け、徐々にその増加率が減少している。一方、これは氷盤下面に凹凸がある場合にも見られる。図3-22に示されたシミュレーションでは、流出後10,000秒経った時点で油の流出が停止しているが、その後も油の面積は漸増を続けている。以下では油の拡がりの最終段階における面積を解析の対象とする。これはすなわち、油の拡がり面積の最大値である。なお、数値計算においてはこのような値を得るために、最長油の流出時間の6倍までの時間にわたって計算を行い、そのときの面積をもって最終段階における油の面積とした。

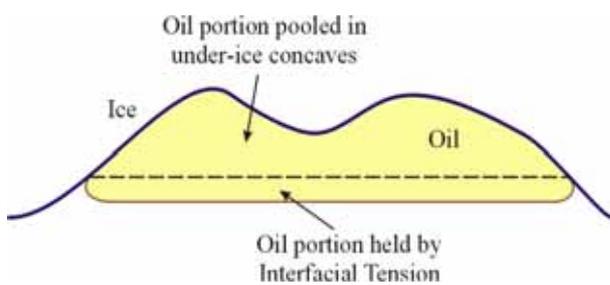


図3-24 氷盤下面における油の保持

氷盤下面に体積 V の油が流出し、最終的な油の面積が A_R となっている状態を考える。このとき、界面張力により保持される油の厚さと氷盤下面の凹部に貯留されるものの平均的な厚さを、それぞれ、 h_T 及び h_C とすると、油の体積は次式で与えられる。

$$V = A_R(h_C + h_T) \quad (3-10)$$

一方、同量の油が平坦氷盤下面に流出した場合、油の面積を A_L とすると、以下の関係が成立する。

$$V = A_L h_T \quad (3-11)$$

式(3-10)と式(3-11)より、氷盤下面に凹凸がある場合の油の面積 A_R と平坦氷盤の場合の面積 A_L の比は、以下のように与えられる。

$$\frac{A_R}{A_L} = \frac{1}{h_C/h_T + 1} \quad (3-12)$$

上式より、氷盤下面に凹凸がある場合と平坦氷盤の場合の油の面積比は、氷盤下面の凹部に貯留される油の平均的な厚さと界面張力により保持されるものの厚さの比により与えられることが判る。ここで、界面張力により保持される油の厚さは、Yapaの考え方で計算できる。彼は油の最終的な拡がり状態に対して、油を拡げようとする力としての重力、すなわち油の浮力（水と油の密度差により与えられる）と界面張力が釣り合うとして平坦な氷盤下面における油の拡がり半径を式(3-5)のように与えたが、これを变形すると、油層の厚さ h_T は次により計算できる。

$$h_T = \sqrt{\frac{2\sigma_N}{\Delta\rho g}} \quad (3-13)$$

また、これを用いると平坦氷盤下面における油の面積 A_R も以下で与えられる。

$$A_L = \frac{V}{h_T} = V \sqrt{\frac{\Delta\rho g}{2\sigma_N}} \quad (3-14)$$

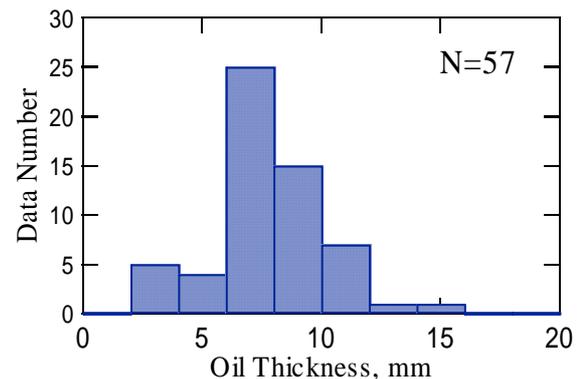


図3-25 平坦氷盤下面における油層厚の分布

平坦氷盤下面における油層厚さは、本実験に用いた油と氷の場合、10 mmである。また、原油その他の精製油が海水板底面にある場合の厚さの分布を示したものが図3-25である。この図は Environment Canada 発行の Oil Catalogue に記載された油種の中

から、密度並びに海水との間の界面張力データが揃っている57種類の油について、式(3-13)により、平坦な氷盤底面における油層の厚さを計算したものである¹⁶⁾。図から判るように、この厚さは油によって変化するが、上記の本実験に用いた油の値はこの中では比較的高めの値となる。これは、一つには、今回の実験では淡水氷を用いたためと考えられる。淡水と油との界面張力は、海水との間のものに比べて一般的に高く、この結果平坦氷盤底面における油層厚も厚くなったのではないかと考えられる。

以上のようなモデルを考えると、氷盤下面に凹凸のある場合の油の拡がり面積は、氷盤下面の凹部に貯留されるものの平均的な厚さが判れば計算できることとなる。しかしながらこの量についての定量的データ等は存在しない。このためここでは、この量が氷盤下面の凹凸サイズに比例すると考え、

$$h_c = CR_s \tag{3-15}$$

なる関係を用いることとした。この関係を用いると式(3-12)は

$$\frac{A_R}{A_L} = \frac{1}{C(R_s/h_T)+1} \tag{3-16}$$

と変形され、氷盤下面の凹凸サイズと平坦氷盤下面における油層厚の比により凹凸のある氷盤下面に拡がる油の面積が計算されることとなる。

式(3-16)の関係の妥当性を検討するために、岩手大学により開発された油の拡がりに関する数値計算手法を用いて数値実験的にシミュレーションを行い、油の面積に対するデータを求めた。具体的には、図3-22に示したものに加えて、油の特性を変化させて同様の計算を行った。氷盤下面の凹凸形状については、図3-22の計算に用いたものと同様のものを用いた。

表3-2にこれらの計算に用いた油の特性を示す。計算では、油の密度 ρ_o 並びに正味の界面張力 σ_N の値としてそれぞれ3種類の値を仮定し、これらの組み合わせによる合計9種類の仮定の油を用いた。これらの油の密度並びに正味の界面張力より計算される平坦氷盤下面での油層厚さ h_T の範囲は広く、図3-25に示された範囲をほぼカバーするものとなっている。

図3-26は、上記の数値計算結果及び図3-13に示した水槽実験結果を、式(3-16)の形式で、氷盤下面に凹凸がある場合と平坦氷盤の場合の油の面積の比(A_R/A_L)を氷盤下面の凹凸サイズと平坦氷盤下面における油層厚の比(R_s/h_T)の関数として示したものである。図中の実曲線は、式(3-16)において、

$$C=0.5 \tag{3-17}$$

とした理論曲線である。

表3-2 計算に用いた油の特性

	ρ kg/m ³	N mN/m	h_T mm
Oil-1	890	45.4	9.18
Oil-2	890	20.0	6.09
Oil-3	890	7.5	3.73
Oil-4	800	45.4	6.81
Oil-5	800	20.0	4.52
Oil-6	800	7.5	2.77
Oil-7	950	45.4	13.61
Oil-8	950	20.0	9.04
Oil-9	950	7.5	5.53

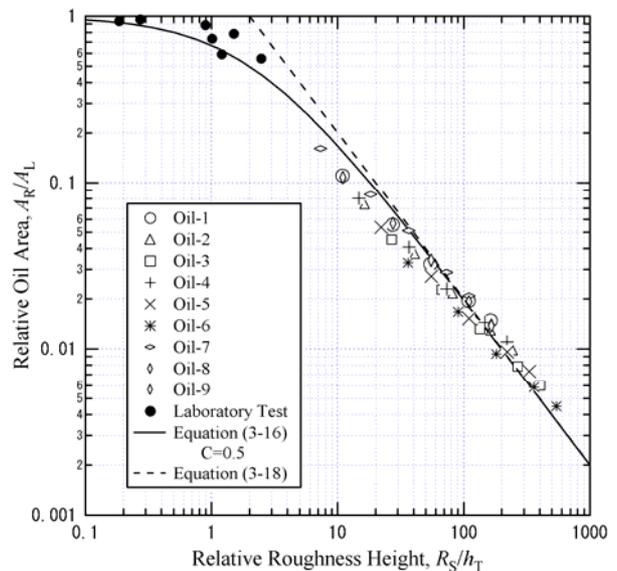


図3-26 油の拡がり面積に対する理論と実験・数値計算結果の比較

図3-26より、式(3-16)によって与えられる理論モデルが、実海域を想定した数値シミュレーション結果及び水槽試験結果を良く説明するものとなっていることが判る。水槽試験の場合のように、氷盤下面の凹凸サイズが比較的小さい場合、氷盤下面における油の保持メカニズムのうち界面張力によるもの

の影響が大きく、氷盤下面凹凸サイズの増加に対する油の面積の減少は小さい。一方、氷盤下面の凹凸サイズが高まるにつれてこの影響が卓越的になり、油の面積は凹凸サイズにほぼ反比例して減少する。このとき、また、氷盤下面の凹凸サイズが平坦氷盤下面における油層厚に対して充分大きい場合について後者を前者に対して無視すると

$$A_R = \frac{2V}{R_S} \quad (3-18)$$

なる関係を得る。この関係を示したものが図3-26中の破線であり、横軸(R_S/h_T)の増加に伴って実曲線で示した理論モデルはこれに漸近する。特に、実海域における油流出は(R_S/h_T)の高い領域での現象となる場合が多いであろうことから、式(3-18)を用いてこのような場合の油の拡がり面積を概略的に推定することができよう。

この一方、図3-26に示した結果は、水槽実験と実海域における現象との関係を考える上での一つの指針を与えるものといえよう。図3-26より、例えば、氷盤下面の凹凸サイズに基づくといった単純な縮尺実験からは実海域での現象を模擬することはできないことは明らかである。もしこのような実験を行ったとすれば、これは実海域での油の拡がり面積を過小評価することとなる。これは氷盤下面での油の保持に関わる2種類のメカニズムの寄与の程度が水槽実験と実海域における現象において異なることによる。もし、縮尺実験を行うとすれば、その時に合わせるべき無次元量は氷盤下面の凹凸サイズと平坦氷盤下における油層厚さの比(R_S/h_T)である。図3-26は、この比の値によって上記の両メカニズムの寄与の程度が変化することを示したものと解釈でき、これを合わせるにより実験から実現象を推定することが可能となる。ただし、現実の問題として、縮尺比が大きくなった場合、平坦氷盤下での厚さが薄い油を水槽実験に使用する必要があり、このような特性(低界面張力、低密度、等)を有する供試油の入手が困難あるいは使用上の制限がある、といった問題が起こる可能性はある。

このように、本研究により示した氷盤下の油の拡がり面積についてのモデルは、実現象を単純化した比較的簡易なモデルであるが、この問題を考える上において有用なものと言えよう。しかしながらその一方、式(3-17)の示す意味についての物理的解釈は得られていない。上述のように、図3-26における理論モデルの計算にあたっては、式(3-17)の関係を仮定した。これは、この関係が数値シミュレーション及び水槽実験結果に最もフィットする理論曲線を与

えるためである。ここで定義を確認すると、比例係数 C は、氷盤下面の凹凸によって貯留される油の平均的な厚さと凹凸のサイズの比である。従って、図3-26に示された結果は、氷盤下面の凹凸サイズ(さらに詳細に言えば氷盤下面形状の変化の標準偏差)の半分の深さが油の貯留に寄与するというように解釈することができよう。これが物理的にはどのようなことを意味するのか、あるいは逆に、どのようなメカニズムによりこのような関係が成立するのか、といった点については更なる研究が必要である。

4. 油の氷中取り込み

本章では、氷盤下面に流出した油の氷中への取り込み現象についての研究結果について報告する。2章において述べたように、氷盤下面に油が流出し放置された場合、海水の成長期には油の周囲に氷が成長することにより、油が氷中に取り込まれる現象が発生する。このように氷中に取り込まれた油の回収は、実質的に困難となる。従って、流出油の回収等の汚染防除対策は、油の氷中への取り込みが起こる前に実施されなければならない。このためには、油の氷中取り込みが発生するまでに要する時間を知る必要がある。本研究の目的は、この問題に対する答えを与えることである。

このため、まず、低温室内において実験的に油の氷中取り込みを発生させ、その過程を観察した。次にこれに基づき、氷の下に存在する油を通しての熱伝達を考慮した油の取り込みモデルを立てた。また、このモデルを用いて実海域における油の氷中取り込みのシミュレーションを行った。このシミュレーションは、前章において述べた油の拡散シミュレーションに上記モデルを組み込んだものである。このシミュレーションでは油の特性の中から粘性係数に注目し、粘性係数の違いが油の氷中取り込みに及ぼす影響について考察した。

4.1 取り込みメカニズム

4.1.1 低温室での実験

油の氷中取り込み現象についての研究では、海上技術安全研究所の低温室を用いて、2種類の実験を行った¹⁷⁾。その第一は、低温室内において油の氷中取り込み現象を発生させる実験である。この実験には、1.0 m四方の水面積を有し、深さ0.6 mの小型の水槽を用いた。この水槽は側面及び底面を発泡材で被って断熱処理をするとともに、1側面に観測窓を設けた構造となっている。この水槽に重量濃度

3.3%の人工海水を満し、低温室内で-20 の室温環境に置くことにより水面に氷を成長させた。氷板が 5 cm 程度に成長した段階で氷板下面に油を流出させて、さらに冷却を継続した。供試油としては、機械用潤滑油及び A 重油を用いた。油の流出後は氷の成長を定期的に観測するとともに、油の氷中への取り込みが完了した時点において油を含む氷を切り出した。

第二の実験は油の下における氷の成長について定量的データを得る目的で実施した。この実験では、側面及び底面を断熱した小型容器に上記人工海水を入れ、その上部に油を満したものを室温-20 の低温室内に置き、一定時間後に油の下面における氷の成長量を計測した。低温室内における冷凍開始時の人工海水及び油の温度は、いずれもこの濃度の人工海水の結氷温度である-1.8 とした。

4.1.2 取り込み過程

図 4-1 は、低温室内において実験的に作成した油の氷中取り込み状態の一例であり、油を取り込んだ氷の断面を示した写真である。この例では、氷が約 60 mm 程度に成長した時点でその下面に油を流出させた。その後冷却を継続した結果油の周囲に氷が成長し、油が氷中に取り込まれた。氷の下部の細長い空隙が油の取り込まれていた部分である。

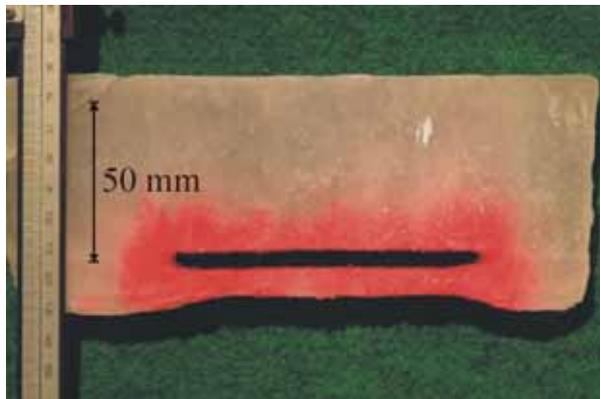


図 4-1 油を取り込んだ氷の断面

図 4-1 に示されるような油の氷中取り込みの過程としては、以下のような 2 種類のものが考えられよう(図 4-2)。

過程 1 : 油の周囲から氷が成長し、これが油の下面に回り込んで油が氷中に取り込まれる。

過程 2 : 油の周囲と底面に氷が同時に成長し、油が氷中に取り込まれる

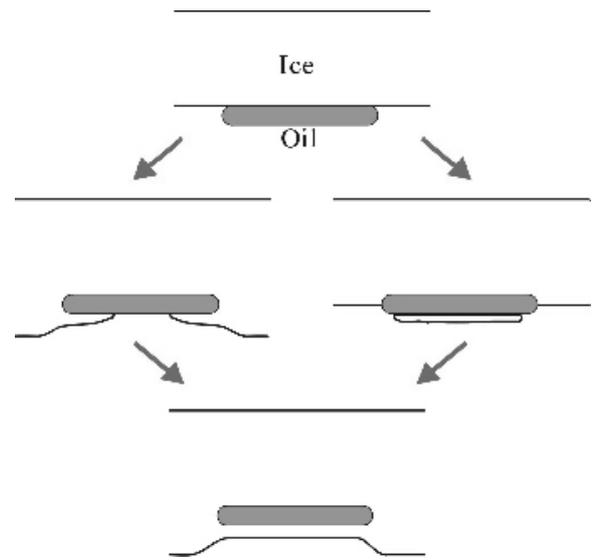
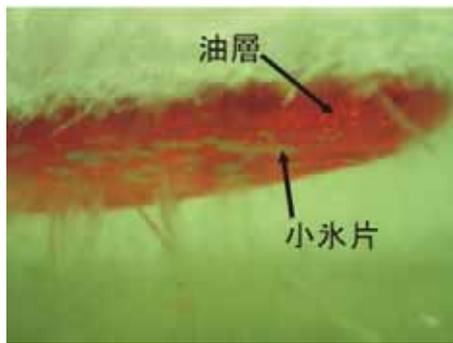


図 4-2 油の氷中取り込み過程

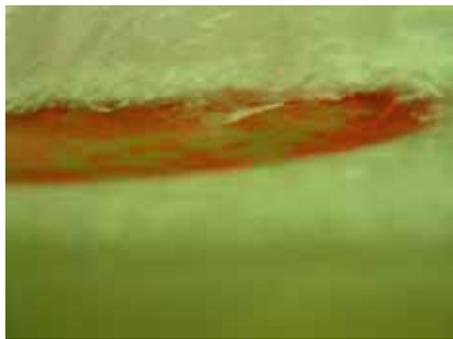
これらの 2 種類の過程は、いずれが起きたとしても結果的には図 4-1 に示されるような油の氷中取り込みに至る。しかしながら、油の取り込みに必要な時間という観点からは大きく異なるものとなる。すなわち、過程 1 の場合は油の氷中取り込みまでの時間が油層の水平方向の拡がりの程度に依存して、油層サイズが大きいほど取り込みに至るまでに長い時間を要するのに対し、過程 2 においてはこのような油層サイズの影響は少なく、油層底面における氷の成長の速度が油の取り込みに要する時間を決めることとなる。

図 4-3 は、実験時に水槽側壁に設けられたアクリル製の観測窓を通して、油の周囲の氷の成長の様子を時間を追って撮影した写真である。図 4-3 (a) は油の流出後 55 分後の写真であるが、この時点において油の底面に小さな氷片が発生していることが判る。この氷片は時間とともにその数を増し(図 4-3 (b))、165 分後の図 4-3 (c)では、ほぼ油の底面全体を覆うまでの状態に至っている。

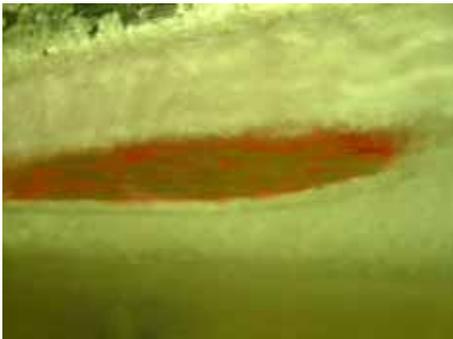
本実験において観察された油の底面における小氷片の発生については、油の氷中取り込みについての実海域実験のときの観測結果として、Martin によって同様の氷片の発生が報告されている¹⁸⁾。また、このような小氷片の発生は氷の成長の初期における一般的過程である。従って、今回の実験において観測された小氷片の発生は、油層下面の人工海水が冷却されて結氷を開始する初期段階の現象と考えることができよう。



(a) 55 分後



(b) 97 分後



(c) 165 分後

図 4-3 油層下面における氷の成長

以上の観測から、氷盤下面に流出した油の氷中取り込みは、前記の2種類の過程のうち、過程2、すなわち、油の周囲と底面に氷が同時に成長し、油が氷中に取り込まれる、という過程によるものと考えられる。

4.1.3 油の下での氷の成長の計算

(1) 計算モデル

前節では油の底面における氷の成長が油の氷中取り込みにおけるキー・プロセスであることを示した。この氷の成長は、油層を通しての熱伝達による潜熱の放出によるものである。一方、図4-1にも見られるように、油の下面における氷の厚さは油の周縁部を除いてほぼ一様であった。この事実は油の下面に

おける氷の成長速度が場所によらず一定であることを示すものである。従って、油層を通しての熱伝達は鉛直方向の一次元的なものにより近似できよう。

一次元熱伝達は、一般に以下の式により表現される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4-1)$$

ここに、 T 、 k 、 c 及び ρ は、それぞれ、温度、熱伝導係数、比熱、密度である。油の下面から油層及び氷を通しての熱伝達については、水、油及び氷の温度を、それぞれ、 T_{WATER} 、 T_{ICE} 及び T_{OIL} とすると、以下の境界条件が与えられる。

$$\begin{aligned} \text{氷上面において: } & T_{ICE} = T_{TOP} \\ \text{油の上面において: } & T_{ICE} = T_{OIL} \\ \text{油の下面において: } & T_{OIL} = T_{WATER} \end{aligned} \quad (4-2)$$

ここに、 T_{TOP} は、氷の上面における温度である。なお、一般に氷の表面温度と氷盤上部のある程度の高さで計測した気温との間には差があり、氷の成長期においては、氷盤上面温度は気温よりも数度高くなっている。油の下面における氷の成長は以下により与えられる。

$$\delta_{ICE} = \frac{\delta q dt}{L\rho_{ICE}}, \quad (4-3)$$

ここに、 δ_{ICE} は微小時間 dt の間に成長する氷の厚さであり、 L 及び ρ_{ICE} は、それぞれ、氷の潜熱及び密度である。また、 δq は dt 内に油の下面の単位面積を流れる熱量であり、以下で計算される。

$$\delta q = k_{OIL} \left. \frac{dT}{dz} \right|_{\text{at Oil-Water Interface}} \quad (4-4)$$

ここに、 k_{OIL} は油の熱伝導係数である。

本研究では、式(4-1)を境界条件(4-2)の下に数値的に解き、式(4-3)及び(4-4)により油の下面における氷の成長量を計算した。計算にあたって油層下面における水温は、氷と水との界面状態が熱的な平衡状態にあるものとして、標準的海水の結氷温度である -1.8 とした。また本計算では、油が流出したときの母氷板の厚さに対して油下面に成長する氷の厚さが十分に薄いものとして、この新たに成長した氷を通しての熱伝達は無視している。

(2) 油層を通しての熱伝達

上記のモデルでは、氷と油を通しての熱伝達を計算することとなる。このうち氷による熱伝達については、基本的には固体の熱伝達として取り扱えよう。これに対して油を通しての熱伝達については、油層内部における対流の影響を考える必要がある。

対流熱伝達は、一般に、ヌセルト数 Nu により表

現される。水平・平行な2平板間の流体を通じた鉛直方向の対流熱伝達のヌセルト数は以下で表現される。

$$Nu = \frac{k_C}{k} \quad (4-5)$$

ここに、 k_C は対流がある場合の熱伝導係数であり、上式は、対流があることにより実効的な熱伝導が、無い場合に対して Nu 倍となることを示している。一般に、ヌセルト数はグラスホフ数 Gr とプラントル数 Pr の積で与えられるレイリー数 Ra の関数として与えられる。

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad Gr = \frac{g\beta\Delta T h^3}{\nu^2}, \quad Pr = \frac{c\mu}{k}, \quad (4-6)$$

ここに g は重力加速度、 ΔT 及び h は、それぞれ、流体の上下面間の温度差及び厚さ、 β 、 ν 、 c 、 μ 及び k は、それぞれ、流体の体積温度膨張係数、動粘性係数、比熱、粘性係数及び熱伝導係数である。

流体内の対流はレイリー数の増大に伴って層流状態から乱流状態へと変化する。ヌセルト数の関数形としては、次式が与えられている¹⁹⁾。

$$Nu = \left\{ \left[1 + 1.446 \left(1 - \frac{Ra_{cr}}{Ra} \right) \right]^{15} + \left[\frac{Ra f(Pr)}{1420} \right]^5 \right\}^{1/15} \quad (4-7)$$

$$f(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0.5}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$$

ここに Ra_{cr} は限界レイリー数であり、流体の厚さと水平方向の長さの比の関数として与えられる。

上式で与えられるヌセルト数により油の下面における氷の成長が説明できるかどうかについて、第2の実験結果によって検証した。式(4-5)に示されるように、ヌセルト数は対流がある場合と無い場合の熱伝導率の比として与えられる。また、油の下面における氷の成長量は、油を通しての放熱量に比例する。従って、第2の実験により計測された氷の成長量 hc と対流熱伝達が無い場合の氷の成長量 h_N の比 hc/h_N は、理論的にはヌセルト数に一致する。このような形で解析した実験結果と式(4-7)により与えられるヌセルト数をレイリー数の関数として示した図が図4-4である。なお、実験結果の解析にあたっては、対流の影響の無い十分に小さなレイリー数におけるデータが無いことから、別の計測で求めた油の熱伝導係数と氷の潜熱から、対流の無い場合の氷の成長量を求めている。

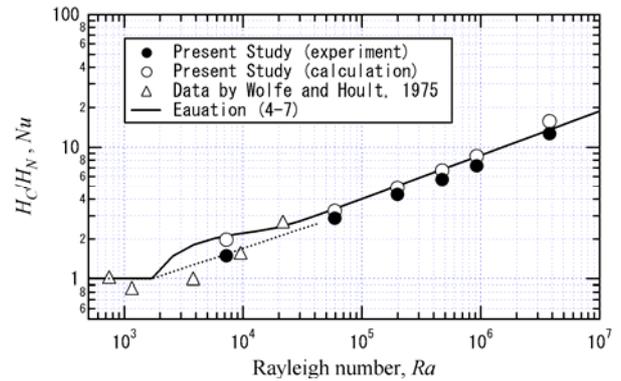


図4-4 ヌセルト数

図4-4より、実験結果は式(4-7)に対して若干小さな値を与えるものの全体としての傾向は良く一致していることが判る。図には、式(4-1)に基づき、油による熱伝導率として式(4-5)及び(4-7)を用いて計算を行った数値計算結果も示した。計算結果は実験結果よりも僅かに高い値を与え、式(4-7)との一致が良い。この理由としては、計算においては油の下面に成長した氷による熱抵抗を無視していることが考えられる。また図には、Wolfeらによるオイル・アイス・サンドウィッチ形成実験結果に基づくヌセルト数の推定結果も示す²⁰⁾。この実験結果も、ばらつきは大きいものの、全体的傾向としては本研究における他のデータとの整合性は良い。以上の結果から本研究では、油を通じた熱伝達の表現式として式(4-7)を用い、油の下面における氷の成長を計算することとした。

(3) 実海域実験結果との比較

冒頭に述べたように、北極海域における大規模油田の発見を受けて1970年代を中心に、水中流出油の挙動と変性についての研究が精力的に実施された。これらの研究の一環として、実海域における油の流出実験が実施された(例えば文献21)。これらの実験の目的の一つは、氷盤下面に流出した油の氷中取り込みについての知見を得ることにあつた。

NORCOR プロジェクトでは、氷の成長の各種段階において2種類の原油を氷盤下面に流出させている²²⁾。これらの実験に際しては鉛直方向に熱伝対を配列した温度分布計測線を予め水中に配置し、これを海水の中に凍結させて、外気・海水・海水を通しての温度の鉛直分布を計測している。一般に海水の成長段階においては、氷の内部の温度は底面が温度が高く(結氷温度)これから上部に向けて温度が低下する温度分布を示す。一方、油の熱伝達率は海水のそれに比べて低いことから、海水と油層内部での温度勾配は異なる。このような特性を利用して、こ

のプロジェクトでは熱伝対による温度計測結果を下に、海水の厚さ・氷盤下面の油層の厚さ・油層下面に成長した氷の厚さの推定を試みている。

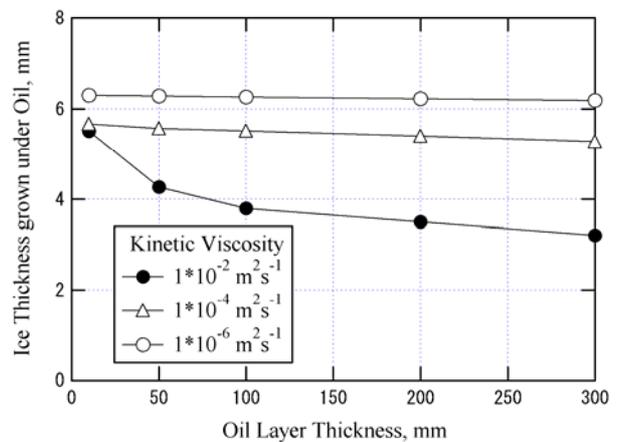
NORCOR プロジェクトにおける油流出サイトの一つである NW3 では、11月14日に 8.3 m^3 の Norman Wells 原油が 55 cm の厚さの氷盤下面に流出された。このときの氷盤下の油の厚さとしては 2 cm という推定が与えられている。油流出より 23 日後の 12月7日の時点において、NW3 中の 2本の熱伝対線 NW3-2 及び NW3-3 の温度計測結果から、それぞれの位置における油層下面の氷の成長量としては、4 cm 及び 10 cm 以下 ("less than 10 cm") という推定が述べられている。また、この間の油が無い部分の氷の成長量としては 10 cm 及び 20 cm という値が推定された。これらの違いは両計測点における積雪量の違いによるものと考えられ、平均値である 15 cm をもって代表値とされている。

上記データについて、前節で示した熱伝導モデルによる計算を同様の条件において実施し、その結果の比較を試みた。この計算にあたっては氷盤上面における温度データが必要となるが、ここでは、11月14日における海水氷盤内の温度計測結果からこのときの氷盤上面の温度を -8 、12月7日におけるものを -12 と推定し、その平均値 -10 をもって氷盤上面の温度とした。油の特性については、Norman Wells 原油の値を用いた (動粘性係数が $1.42 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、その他の値については表 4-1 参照)。計算結果として、油層下面の氷の成長量として、79 mm という値を得た。この値は NW3-2 における推定結果に比較すると過大である。一方、NW3-3 よりの推定結果の表現には不確実なところがあるが、10 cm よりも低い値に近い値、と解釈するとこの計算結果はほぼ妥当なものと言える。

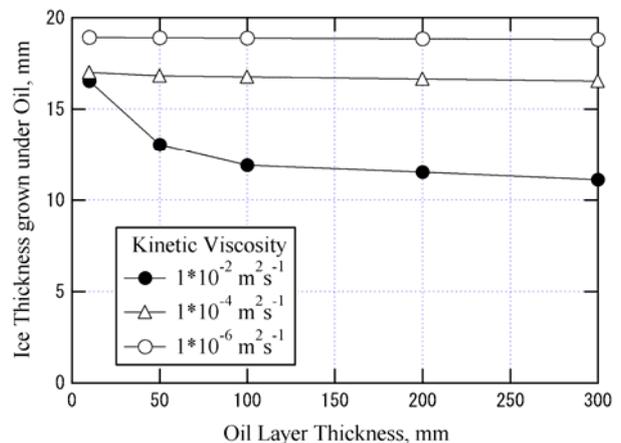
残念ながら、本研究における熱伝導モデルによる計算結果との比較・検討に利用できる現地実験データは極めて少ない。これは一つには、氷盤下面における油層及びその下部に成長する氷の厚さを計測することに対する技術的困難があったことによる。事実、温度分布の計測の空間分解能を決定する熱伝対の間隔を十分に小さくすることには計測上の制約があり、これにより油層及びその下部の氷の内部の温度分布の決定に困難を伴ったであろうことは想像に難くない。また、計算に必要なデータの中に、例えば、油層下面の氷の成長量についてのデータはあるが、油層厚さについては、欠落があるといった場合もある。上記データは手元に収集したレポートの中から見出した唯一のデータである。

このように、実海域実験結果から本モデルの計算結果との比較のために利用できる定量的データの量は限られているが、この一方、油流出後のダイバー

等による観測結果として、油の氷中取り込みについての観察は為されている。これらの結果をまとめる形で、Dickins と Buist は、"In a release of oil beneath a solid ice cover, new ice will completely encapsulate the oil layer within 18 to 72 hours, depending on the time of year."と述べている²³⁾。これは、油の特性・海水厚・温度環境等の様々な条件下での実験結果を含むものであり、また、油の氷中取り込みについての定義も与えられていないが、油の氷中取り込みについて定性的に良くまとめた表現である。これに対応する計算も試みた。



(a) 流出後 24 時間



(b) 流出後 72 時間

図 4-5 油の下面の氷の成長についての計算結果

計算結果を図 4-5 に示す。計算では氷盤の厚さとして 1.0 m を想定し、この下に各種の厚さの油が存在する場合について、油の流出後(a)24 時間後及び(b)72 時間後における油の下面での氷の成長量を計算した。油の特性としては、次節に示す計算と同様

に表 4-1 に示す値を用い、3 種類の動粘性係数を有する油を想定した。また、氷盤上面の温度としては、北極海域としては晩秋から初冬にかけての状態として-15 を仮定した。

計算結果より、油の流出から 24 時間経過した時点では、油の層は 5 mm 内外の厚さの氷に覆われ、72 時間経過後には、この氷は 10 から 20 mm 程度にまで成長することが示されている。この程度の厚さの氷が成長した場合、ダイバーによる観測等では、前述の "new ice will completely encapsulate the oil layer" という状態となっていると言えよう。この比較は定性的なものに留まらざるを得ないが、本研究の熱伝達モデルにより計算された結果は、過去の実海域実験の結果を説明できるものであると思われる。なお、図 4-5 に示した計算結果においては、動粘性係数の値が低い油ほどその下部における氷の成長が早く、また、油層厚が氷の成長に与える影響も動粘性係数が低いほど小さい。これらは対流熱伝達の程度が動粘性係数に依存するためと考えられる。

以上、本研究における熱伝達モデルと過去の現地実験により得られた知見との比較を試みた。上述のように過去の現地実験データの中から、本研究のモデルと直接定量的な比較が可能なデータセットの例は極めて限られている。このような中から NORCOR プロジェクトによるデータとの比較を行ったが、このデータとの比較に関する限り、本研究の熱伝達モデルにより計算される油層下面の氷の成長量としては、現地実験における計測結果と比較して、同程度からやや大きめの値を与えるものとなった。一方、定性的ではあるが、現地実験時のダイバー等による観察結果をまとめた表現によれば、氷の成長による油の取り込みは、比較的短時間の内に発生していることが示される。これについても本研究による熱伝達モデルによる計算を試みたが、計算結果は上記表現を説明できるものとなっている。

以上、限られたデータセットとの定量的比較と定性的な比較ではあるが、本研究における熱伝達モデルによる計算結果は、過去の現地実験結果によるものと比較して妥当な結果を与えるものと言えよう。

4.2 実海域条件下のシミュレーション

4.2.1 計算条件

冒頭に述べたように、本研究の目的は、オイル・アイス・サンドウィッチ形成に要する時間についての具体的な指標を与えることにある。このために、前節で述べた油下面における氷の成長モデルを、本プロジェクトにおいて実施されていた氷盤下における油の拡散についての数値計算結果と組み合わせることにより、現地におけるオイル・アイス・サンドウ

イッチ形成過程をシミュレートした。

計算に用いた油及び氷の特性を表 4-1 にまとめる。油の熱伝導係数・比熱・密度・体積膨張係数については、これらの特性値が油種によってそれほど大きく変化しないことから、前出の Norman Wells 原油の特性値を用いた。一方、動粘性係数については油種により大きく変わる。図 4-6 は Environment Canada による Oil Catalogue に掲載されているデータを対象として油の動粘性係数の分布を示したものであるが、この量が油種によって変化し、極めて広い範囲に分布していることが判る。また、前節において取り扱ったモデルから判るように、動粘性係数は油層を通しての熱伝達のモード・量に影響を与える量である。このような点を考慮し、本シミュレーションにおいては、対象とする油の動粘性係数の値として、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 及び $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の 3 種類の値を仮定し、計算を行った。

表 4-1 計算に用いた油及び氷の特性

特性値	油	氷
熱伝導係数, $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	2.00	0.13
$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	1700	2000
密度, kg m^{-3}	845	910
動粘性係数, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	1×10^{-2} , 1×10^{-4} , 1×10^{-6}	---
体積膨張係数, K^{-1}	9×10^{-4}	---
潜熱, kJ kg^{-1}	---	330

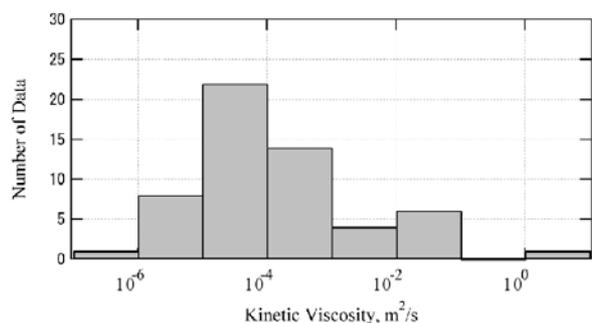


図 4-6 油の動粘性係数の分布

本計算に用いた氷盤下における油の拡散挙動のシミュレーション結果を図 4-7 に示す。前述のように、同図に示したシミュレーションでは、 $5,000 \text{ m}^3$ の油が氷盤下面の一点から流出した状態を想定して計算を行った。氷盤下面の形状は、前述のオホーツク海

における海氷の底面形状の計測結果の中の代表的なものを用いて、これをもとにコンピューター上で擬似的な氷盤下面形状を計算した。図より、 $5,000 \text{ m}^3$ という大量の油の流出にもかかわらず油の拡散が直径 300 m 程度という比較的小さな領域に留まっていることが判る。また同図は氷盤下面における油層の厚さの分布を示したものであるが、油の厚さは厚いところでは 20 cm を超えるものとなっている。これらの結果は、前章に述べた氷盤による油の保持効果によるものである。

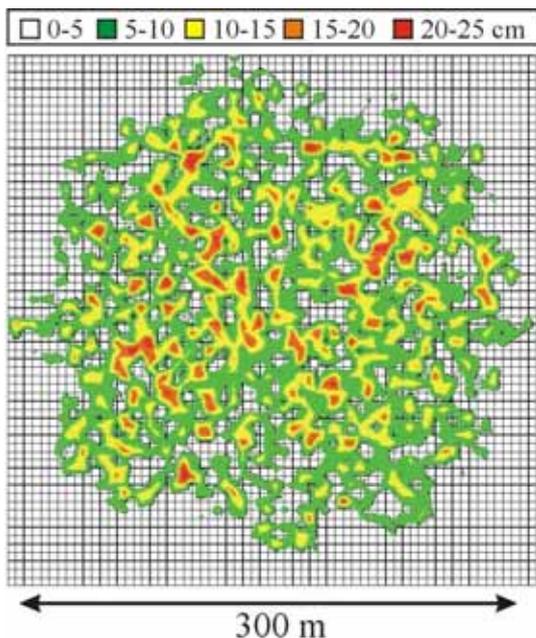


図 4-7 氷盤下面の油層厚の分布

また、氷の上面における温度としては -15 を仮定した。Kamesaki らは、サハリン島沖における海氷の厚さを積算寒度から推定することを目的として、ここにおける温度の推定を行っている²⁴⁾。これによると、現在海底資源開発が最も進捗しているサハリン島北東部の厳冬期における日平均気温は約 -20 である。一方、前述のように、氷盤上表面から上部の大気との間の気温の分布には大きな温度勾配があり、気温と氷盤上面における温度との間には一般に温度差がある。このため、本シミュレーションでは、サハリン北部の厳冬期を対象とするが、この温度差を 5 度と仮定して、氷の上面における温度を -15 として計算を行った。

4.2.2 計算結果

シミュレーション結果を図 4-8 に示す。ここでは紙面の都合上、計算対象とした 3 種類の油の中から、

動粘性係数が最も高い油と低い油についての計算結果を示す。

シミュレーション結果から、油の動粘性係数の違いが油層下面の氷の成長に大きく影響を与えることが判る。油の流出後 5 日経過した時点では、動粘性係数の高い油の場合はその一部が厚さ 20 mm 以上の氷に覆われているだけなのに対し、動粘性係数が低い場合はすでにほぼ全体が厚さ 20 mm 以上の氷に覆われている。10 日後には両方の油ともに厚さ 20 mm 以上の氷に覆われているが、動粘性係数の低い油の方が成長量は大きい。この傾向は油の流出後 15 日での計算結果においてさらに顕著であり、動粘性係数の高い油の下面の氷の厚さは 50 mm 程度であるのに対し、動粘性係数の低い油の場合は底面全体が厚さ 80 mm 以上の氷に覆われている。このような油の動粘性係数の違いによる油層底面での氷の成長の違いは、実海域実験との比較を行う際の計算結果である、図 4-5 にも見ることができ、低動粘性係数を有する油の方がその下での氷の成長が早い。これらの結果は、動粘性係数違いによる油層を通しての熱伝達の違いを反映したものと云えよう。

さらに、図 4-5 と図 4-8 を比較して興味深い点は、油の下面の成長に及ぼす油層厚さの影響である。図 4-5 に見られるように、動粘性係数が $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の油の場合、氷の成長量は油層厚さに依存して変化し、油層厚さの増大に伴って減少する。これに対し動粘性係数がこれよりも低い 2 種類の油では、このような依存性は低い。このような違いは図 4-8 のシミュレーション結果にも見ることができる。動粘性係数の高い油の場合、油の流出後 5 日及び 10 日の時点で、油層の周辺部に局所的に氷の成長量の大きな部分を見ることができる。これらは油層厚の薄い部分である。これに対し動粘性係数の低い油の場合は、油層下面全体に亘ってほぼ均一な氷の成長を見ることができる。これは、動粘性係数の高い油の場合には油層厚さが厚くなっても油層内部の対流熱伝達の影響が低く、油層厚さの増大による温度勾配の低下により油層を通しての熱伝達量が低下した結果と考えることができる。これに対して動粘性係数が低い油の場合は、油層厚さの増大による温度勾配の低下を対流熱伝達の効果が相殺することにより、油下面の氷の成長に対する油層厚さの影響が小さかったものであろう。

流出油の回収等の汚染防除作業の実行に対する油底面における氷の成長量の影響は、作業の手法にもよるため一概には言えないが、成長開始直後の氷の強度が弱いことをも考慮すると、この場合、流出後 1 週間から 10 日程度までの間が流出油に対する汚染防除作業が可能な期間についての一つの目安と考えられる。

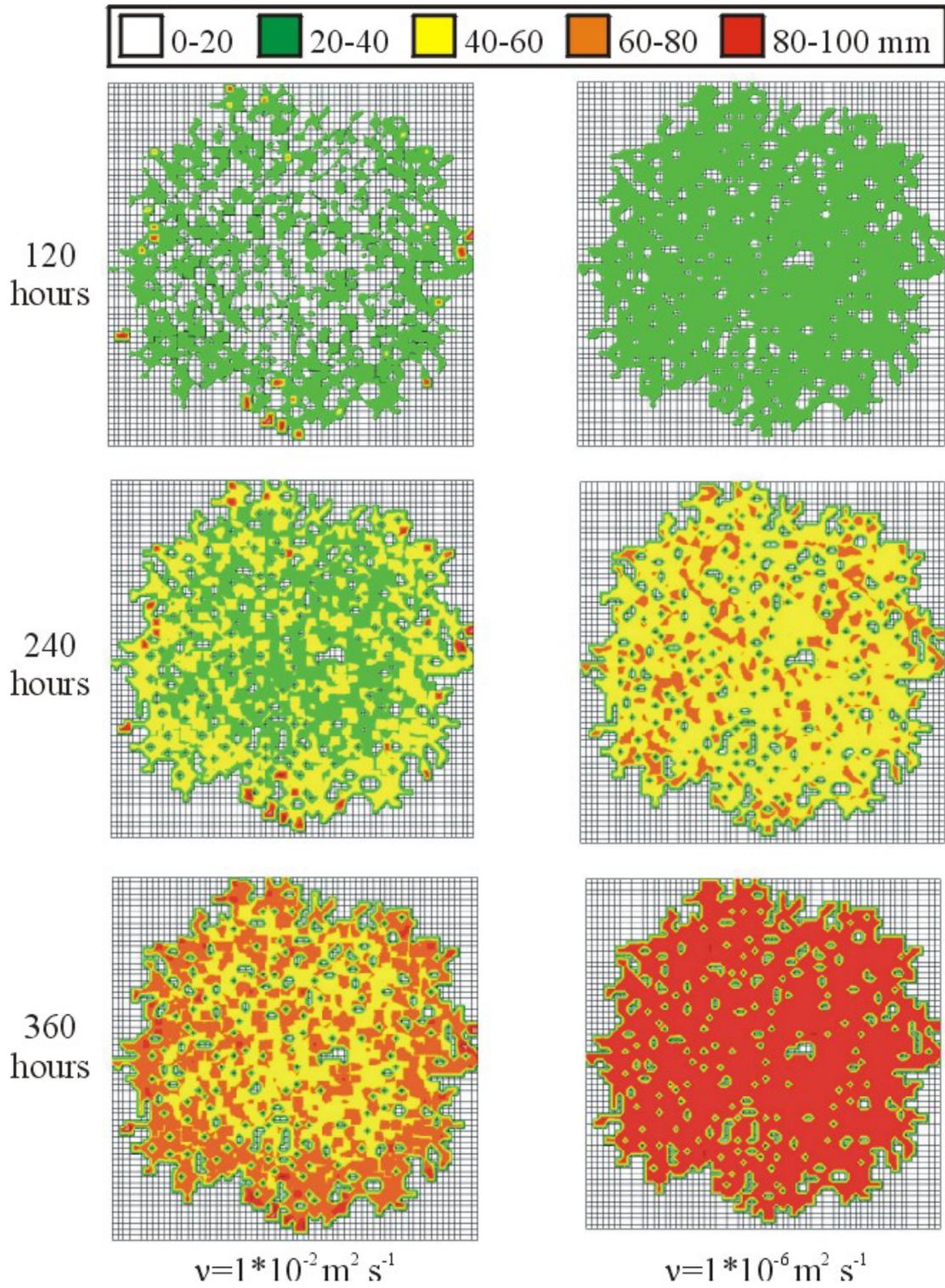


図 4 - 8 氷盤下面に流出した油の底面に成長する氷の厚さについてのシミュレーション結果

4.2.3 モデルの将来的な改良の方向

以上のように、本研究の結果によりオイル-アイス・サンドウィッチ形成についての定量的指標をえることができた。しかしながら、本論文に示した手法は幾つかの面において実現象の単純化を含んでいる。以下、これらについて議論して将来的な研究の発展の方向を探ってみよう。

議論すべき第一点目は、氷板上面の積雪の影響である。本研究では、氷の熱伝導係数としては、海氷について計測された一般的な値を仮定して熱伝達計算を行った。しかしながら、現実の海氷を通しての熱伝達には様々な因子が影響を与える。特に積雪の影響は大きい。雪はその内部に空隙を多く含むため、一般に断熱性が高く、積雪の程度によってその下部の氷の成長が左右される。このような雪による断熱効果は、積雪深・空隙率(雪の密度)等により決まり、これらは対象海域における降雪量・風速・海氷表面の凹凸の程度といったパラメータに依存する。もし、油流出の可能性のある海域として具体的な検討対象海域が設定されるのであれば、その海域における積雪の特性を考慮してこれを含んだ、積雪-海氷-油層を通しての熱伝達モデルによりオイル-アイス・サンドウィッチ形成計算をすることとなる。

一方、氷の上面温度の変動の影響も今回の計算では考慮されていない。今回の計算では、氷の上面温度を -15°C と一定として計算を行ったが、実際には気温の変化・風の影響等によりこの温度は変動する。これについては、氷の上面における温度の変動の影響は氷内部のある程度の深度までにはしか伝わらないことが示されているため、今回の計算例のように氷が比較的厚い場合にはその底部における温度の変動は小さなものとなることが考えられる。しかしながら、氷の成長初期段階で、氷厚が薄い場合にはこのような温度の変動がオイル-アイス・サンドウィッチ形成に影響を与える可能性はある。

5. まとめ

本報告では、氷盤の下面に流出した油の拡がり挙動及び氷中への取り込み現象についての研究成果を報告した。

本研究の背景には、サハリン大陸棚における海底資源の開発の本格化がある。この資源の開発は、一部鉱区ですでに1999年から石油の商業生産及びその輸送が開始されている。衆知のように、サハリン大陸棚海域を含むオホーツク海は冬季には海氷に覆われる海域である。このため、この開発は現時点では、6月から12月という無氷期に限定されて実施されている。しかしながら開発の本格化に伴い、

通年体制で石油を生産する計画が進行中である。すでに商業生産を開始している Sakhalin II では、2006年からの通年生産が予定されている。また、Sakhalin I では、2005年後半に石油の商業生産を開始し、そのまま通年生産を行う予定となっている。この他サハリン島周辺海域は Sakhalin IX までの鉱区に分割され、鉱区によって進捗の程度は違うものの、将来的な商業生産に向けて準備が行われている。

このような開発活動は、エネルギー資源供給の多角化を図りたいわが国にとっては望ましいものである。しかしながらその反面、石油の生産あるいは輸送時における油流出に関する懸念も高まっている。サハリン島周辺において石油の流出事故が発生した場合、海流パターンを考えると、その影響がわが国、特に北海道に到達することは必至である。特に海氷存在時の油流出に関する懸念は高い。氷海域における油流出は通常海域におけるものとは全く様相を異にするものであり、従ってその対応についても新たな技術が求められる。しかしながら、氷海域における油流出に関する研究・技術開発については立ち遅れた面が多い。特に、わが国においてはこの種の知見・技術はほとんど皆無に等しい。このような現状に鑑み、筆者らを含む研究グループは氷中流出油の挙動と回収に関する研究を実施した。本報告の内容は、流出油の挙動に関わるものである。

氷海における油流出は、氷と油の相対的位置により、氷盤上面への流出、氷盤の間のリード等の開水域への流出及び氷盤下面への流出に大別できる。これらの3種類のモードの中で、氷盤下面に流出した場合が、油汚染防除に対する対策という観点から最も困難な状態である。また、サハリン大陸棚開発を考えた場合、開発現場からサハリン島へ、あるいはサハリン島から大陸へ、海底パイプラインによる輸送が検討されている。このような海底パイプラインの損傷等により油の流出が起きた場合、氷盤下面への油の流出は主要な流出シナリオとなり得る。このような点を考え、本研究では氷盤下面における流出油の挙動について研究を行った。ここで言う油の挙動とは、具体的には油の拡がり及び油の氷中への取り込み現象であり、本報告の内容は大きくこの二つの項目に分かれる。

氷盤の下面に流出した油の拡がり挙動については、水槽実験によりその基本的特性を求めた。まず、平坦な底面を有する氷盤下面における油の拡がりについて研究した。この問題については、過去にも当所において研究を行っているが、今回の研究によりこの研究成果をさらに裏付けるデータを得るとともに、氷盤下面での油の拡がり挙動を支配する力である、油層に働く界面張力についても検討を行い、正味の界面張力の与え方を示した。一方、氷盤下面におけ

る油の拡がりには、氷盤下面の形状が大きな影響を与えることから、様々な底面形状を有する氷盤に対しても水槽実験を行った。またこの問題に対しては、共同研究機関である岩手大学により、数値シミュレーションプログラムが開発されており、水槽実験結果を用いてこのシミュレーションの妥当性の検証を行った。

一方、本プロジェクトの一環として、北海道開発土木研究所により、紋別市沖の海域において、海氷の底面形状の計測が行われたが、この結果を統計処理して上記シミュレーションに適用することにより、実海域における油の広がりの規模を推定した。最後に、氷盤下面における油の拡がりについての理論モデルを示した。これは、氷盤下面における油の保持について2種類のメカニズムを考え、両者の影響を取り込んだモデルである。この理論モデルと水槽実験及び実海域の条件に対するシミュレーション結果との比較・検討を行った。本理論モデルは、実現象を単純化した比較的簡易なモデルであるが、水槽実験及び数値シミュレーション結果を良く説明するものとなった。ただし、この中に含まれる係数については、更なる研究が必要である。

一方、油の氷中取り込みとは、氷の成長期に発生する現象であり、氷盤下面に流出した油の周囲に氷が成長する現象であり、油が上下の氷に挟み込まれる形状となることから、オイル-アイスサンドウィッチと呼ばれる場合がある。このような形式で氷中に取り込まれた油の回収は実質的に困難である。従って本研究では、氷盤下面に流出した油の氷中取り込みについては、油汚染防除対策に対する情報を与えるという観点から、油が氷中に取り込まれるまでに要する時間を推定するという目的で研究を進めた。このためにまず、氷中取り込み現象の発生メカニズムについて、低温室内で実験的にこの現象を発生させることにより検討した。この結果、油の取り込み現象は、油の底面に氷が一様に成長することにより発生することが示された。氷の様な成長は、油を通しての熱伝達が、ほぼ一次元的なものであることを示している。

この観測結果に基づいて海水から油層・氷を通して大気へと至る一次元的熱伝導モデルにより油下面の氷の成長を計算することを考えた。この場合、油を通しての熱伝導については、油層内部の対流の影響を考慮する必要がある。このため、再び低温室における実験を行い、油層下面における氷の成長が、ヌセルト数で表される対流熱伝達理論により説明できることを示した。また、このモデルにより計算される油のしたでの氷の成長量について、過去の実海域実験結果との比較を試みた。これについては、残念ながら利用可能なデータが限られたため、定量的

には十分な検討をするには至らなかったが、定性的な意味においては本モデルによる計算結果が実海域実験結果を説明し得るものであることが示された。これらの結果に基づき、実海域における油の取り込みについてのシミュレーションを行った。このシミュレーションは、前項の氷盤下面における油の拡がりについての数値シミュレーションに上記の熱伝導モデルを組み合わせたものである。計算では、油の動粘性係数として3種類の値を仮定し、それぞれについて、油の流出から2週間程度まで時間が経過する場合の油の底面における氷の成長を計算した。

以上、氷盤下面における流出油の拡がりと氷中への取り込み現象についての研究成果を述べた。冒頭に示したように本研究では、油汚染防除の観点から最も対応が困難と考えられる状態として氷盤下面に油が流出した場合を想定し、この状態を対象として研究を進めた。しかしながら氷海域における油の流出シナリオは様々であり、この他の流出モードについての研究も必要である。特に本研究の背景となっているサハリン大陸棚開発がそのペースを増している現在、氷海域における油流出問題についての知見の増強並びにこれに基づく汚染防除技術の開発は目前の急務と言える。本研究における成果・経験をベースとして、今後も氷中流出油問題についての研究を行って行きたい。

謝辞

本報告に述べた研究成果は、旧運輸施設整備事業団（現在の独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構）の「運輸分野における基礎的研究推進制度」による研究「氷海域における流出油の挙動と回収に関する基礎的研究」の一環として実施されたものであり、海上技術安全研究所の担当研究「氷と油の干渉及び拡散・漂流に関する実験的研究」の成果を中心としてこれに関連する他機関での研究結果を示したものである。ここに同事業団に謝意を表す。また、上記研究プロジェクトに携わった関係諸氏、特にその研究代表者を務めていただいた、佐伯 浩 北海道大学教授にも感謝する。

参考文献

- 1) 家田嗣也：「サハリン石油・ガス開発プロジェクトの動きと現状」、北海道経済国際化推進会議、Think Global、サハリン・ビジネス(V) (2000)、19-35頁。
- 2) 成田秀明：「流水域での油回収技術について」、平成12年度(第74回)船舶技術研究所研究発表会講演集(2000)、401-404頁。

- 3) Johannessen, B.O. et al (1997). "Program for Mechanical Oil Recovery in Ice Infested Waters (MORICE)," *Proceedings of 20th Arctic Marine Oil Pollution (AMOP) Seminar*, Vol. 2, pp. 1331-1352.
- 4) 佐伯, 大塚、堺、泉山、山本: 寒冷海域に流出した原油の回収に関する基礎的研究、寒地技術論文・報告集、Vol. 18、(2002)、459-466頁.
- 5) Mochizuki, S. Aota, M. Takatsuka, T. and Truskov, P. "Tracing of Ice Floe in Sea of Okhotsk by Satellite-Tracked Drifters," (in Japanese) *Proc 10th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*, 1995, pp 192-197.
- 6) Enomoto, H., Kumano, T., Kimura, N., Tateyama, K., Shirasawa, K. and Uratsuka, S. "Sea Ice Motion in the Okhotsk Sea derived by Microwave Sensors," *Proceedings of the Thirteenth (2004) International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2003, pp. 518 - 522.
- 7) Nelson, W. and Allen, A. "Oil Migration and Modification Processes in Solid Sea Ice". *Proceedings of 1981 Oil Spill Conference*, 1981, pp. 191-198.
- 8) Izumiyama, K., Konno, A. and Sakai, S. "Experimental Study on Oil Spreading under Ice Covers" *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2002, Vol. 1, pp. 821-826.
- 9) Izumiyama, K., Uto, S., Konno, A., Sakikawa, M. and Sakai, S. "Spreading of Oil under Ice Covers: Effects of Bottom Roughness of Ice" *Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice*, Vol. 2, 2002, pp. 128-133.
- 10) Yapa, P. and Chowdhury, T. "Oil Spreading under Ice Covers." *Proc the Eleventh International Oil Spill Conference*, 1989, pp 161-166.
- 11) Izumiyama, K, Uto, S, Narita, S, and Tasaki, R. "Ice in Surface Waters," Shen (ed.), Vol 1, ,1998, pp 419-426.
- 12) Konno, A. and Izumiyama, K. "On the relationship of the oil/water interfacial tension and the spread of oil slick under ice cover," *Proceedings of 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*, 2002, pp 275-282.
- 13) Sakai, S., Liu, X. and Izumiyama, K. "A Numerical Model for the Simulation of Oil Spreading under Ice Cover," *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 1, 2002, pp. 816-820.
- 14) 山本泰司:「氷海域における流出油の挙動と回収に関する基礎的研究(オホーツク海域における氷象に関する研究)」研究成果報告個別編(独立行政法人 北海道開発土木研究所)(2003).
- 15) Environment Canada. "A Catalogue of Crude Oil and Oil Product Properties (1992 Edition)".
- 16) Izumiyama, K., Uto, S., Kanada, S., Kioka, S. and Sakai, S. "Estimation of Oil Area spilled under an Ice Cover," *Proceedings of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 1, 2004, pp. 910-914.
- 17) Izumiyama, K., Uto, S. and Kanada, S. "Prediction of Oil-Ice Sandwich," *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 2, 2003, pp. 268-273.
- 18) Martin, S. "A Field Study on Brine Drainage and Oil Entrainment in First-Year Sea Ice." *Journal of Glaciology*, Vol. 22, No. 88, 1979, pp. 473-502.
- 19) 日本機械学会: 伝熱工学資料, 改訂版第4版, 1986年.
- 20) Wolfe, S. and Hault, D. "Effects of Oil under Sea Ice," *Journal of Glaciology*, Vol. 13, No. 69, 1974, pp. 123-133.
- 21) Dickens, D., Buist, A. and Pistruzak, W. "Dome's Petroleum Study of Oil and Gas under Sea Ice," *Proceedings of 1981 Oil Spill Conference*, 1981, pp. 183-189.
- 22) Environment Canada. "Review of a manuscript by NORCOR Engineering and Research Ltd., entitled The Interaction of Crude Oil with Arctic Sea Ice, Beaufort Sea Project, Depart of the Environment, Victoria, B.C., Beaufort Sea Technical Report #27, 1975." *Oil-in-Ice Fate and Behaviour, a subsection of the Behaviour of Oil Spills (BOSS) Project*, 1998, pp.

- 192-246.
- 2 3) Dickins, D., Buist, A. and Pistruzak, W.
“Dome’s Petroleum Study of Oil and Gas
under Sea Ice”. *Proceedings of 1981 Oil
Spill Conferenece*, 1981, pp. 183-189.
- 2 4) Kamesaki, K., Tsukuda, H., Yamauchi,
Y. Tada, T. and Iijima, Y. “A Design
Condition for Structures in Sea Ice –
Estimation of Accumulated Freezing Index
and Level Ice Thickness at Chayvo,
Sakhalin.” *Proceedings of 13th
International Symposium on Okhotsk Sea
& Sea Ice*, 1998, pp. 168-174.

正誤表

第4巻第3号

誤

正

P44 表 4-1 計算に用いた油及び氷の特性

特性値	油	氷
熱伝導係数, $Wm^{-1}K^{-1}$	2.00	0.13
$Jkg^{-1}K^{-1}$	1700	2000
密度, $kg\ m^{-3}$	845	910
動粘性係数, $m^2\ s^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-4},$ $1 \cdot 10^{-6}$	---
体積膨張係数, K^{-1}	$9 \cdot 10^{-4}$	---
潜熱, $kJ\ kg^{-1}$	---	330

P44 表 4-1 計算に用いた油及び氷の特性

特性値	油	氷
熱伝導係数, $Wm^{-1}K^{-1}$	2.00	0.13
比熱, $Jkg^{-1}K^{-1}$	1700	2000
密度, $kg\ m^{-3}$	845	910
動粘性係数, $m^2\ s^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-4},$ $1 \cdot 10^{-6}$	---
体積膨張係数, K^{-1}	$9 \cdot 10^{-4}$	---
潜熱, $kJ\ kg^{-1}$	---	330