

# 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

堺 茂樹\* ・花井宏太\*\*・笹本 誠\*\*\*  
金田成雄\*\*\*\*・泉山 耕\*\*\*\*\*

## 1. 緒 言

ロシア領海内サハリン島北東部沖合いでの石油及び天然ガスの商業生産が数年以内にも本格化する見通しとなり、我が国への新しいエネルギー供給源として期待されている。原油生産及び海上輸送が活発となれば、これらに伴う海域環境汚染も危惧され、想定される最悪の事態としては油流出事故がある。その原因には、油井の暴噴、パイプラインの損傷、タンカーの海難等が考えられ、いずれも操業の本格化に比例するかたちで可能性も増大する。オホーツク海ではサハリン島から北海道へ向かう東カラフト海流が卓越している。図-1 は日本全国沿岸海洋誌(日本海洋学会, 1985)に記載されているモロシユキンによる夏季の海流分布図を基に、表示法の変更と石油及び天然ガスの開発鉱区の範囲の加筆を行ったものである。開発鉱区内あるいはその近海で油流出事故が発生した場合、サハリン島東岸沿いの海流により南下した流出油は、さらに北海道のオホーツク海沿岸に沿って南下することが予想され、我が国沿岸にも多大な環境被害を及ぼす可能性がある。

また、この海域は冬季には流水に覆われ、流水の存在は油拡散に於ける支配的外力である海象に影響する。氷海域を伝播する間に波浪エネルギーは減衰し、氷海域での波浪は通常海域に比べてむしろ穏やかであるが、海流に対する流水の影響は未だ良く理解されていない。流水下での流れも通常時とほぼ同程度の規模を有することを示していると考えられる観測例もある。例えば、図-2 は北海道開発局が紋別沖合で実施している波浪・海流観測の解析結果(堂崎, 1999)の一例であるが、海底での方向別平均流速は流水が存在する時期もその前後も大きな変化が見られない。このことは、北海道オホーツク海沿岸の海流は流水の有無に係わらない可能性があることを示唆している。

氷海域に於ける流出油の回収設備・回収技術及び油拡

散の予測手法に関する早急な研究・開発が望まれるにもかかわらず、この種の研究は極めて少なく、我が国ではわずかに大島ら(1998)の研究があるのみである。氷海域での油拡散の状況は、氷況及び油流出の過程によって異なる。例えば、海中に流出した油が海表面を覆う広大な氷板の下面に沿って拡散する場合や、海表面上の油が多数の浮水間を拡散する場合あるいは両者が混在する場合など、多様な状況が想定される。本研究では、油処理対策の検討に際して必須の課題の一つである、氷板下での油拡散について検討する。氷板下での油拡散には、油の物性、氷板下面の形状・粗度、海流・波浪などが影響

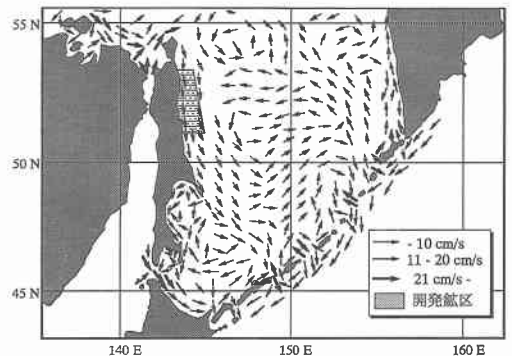


図-1 オホーツク海の流れ分布とサハリン島北東部沖合の開発鉱区

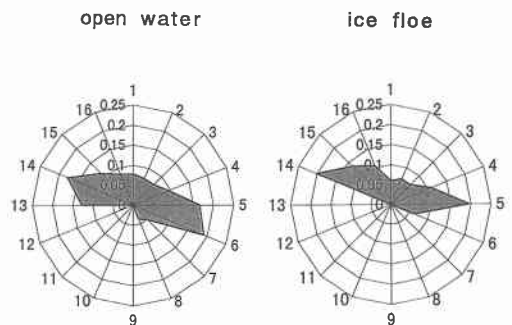


図-2 紋別沖合に於ける流水存在時とその前後での平均流の比較(図中の単位は m/s)

\* 正 会 員 工 博 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科  
\*\* 学生会員 岩手大学大学院工学研究科  
\*\*\* 正 会 員 岩手大学技官 工学部建設環境工学科  
\*\*\*\* 運輸省船舶技術研究所 研究官  
\*\*\*\*\* 正 会 員 工 修 運輸省船舶技術研究所 主任研究官

する。氷海域に於ける拡散現象の基本となる平坦な氷板下の静水中の拡散に関しては昨年報告した(泉山ら, 1998)。ここでは、前述の南下する海流の存在に着目し、平坦氷下の油拡散に対する流れの影響について検討する。

2. 実験装置及び実験方法

実験は、運輸省船舶技術研究所の水海船舶試験水槽に於いて行った。本実験施設は、長さ 35 m、幅 6 m、深さ 1.8 m の試験水槽を冷凍庫内に封設した施設であり、水槽水表面に氷板を成長させることができる。

実験に用いる供試油としては、安全性及び処理等を考慮して、機械用潤滑油を用いた。供試油の密度は 0.878 g/cm<sup>3</sup> であり、粘性係数は回転式粘度計を用いて計測した。数種類の温度条件で行った粘性係数の計測結果を図-3 に示す。実験時の油の温度の直接計測は行っていないが、氷板下面にあることから、氷の融解温度である -0.1 度程度であると考えられる。従って、計測結果を外挿して、実験時の油の粘性係数は 0.254 Pa·s と推定される。

本研究の目的は、海流等が存在する海域に於いて氷板下に流出した油の挙動についての知見を得ることにある。この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、水槽が幅 6 m、深さ 1.8 m と大断面であるため、所定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、及び水槽内の流速分布の 2 次元性を保つことが困難であることなどが懸念された。このため、本実験では氷板下に油を流出させた後、氷板を一定速度で移動させることによって、相対的な意味で定常な流れを再現することとした。また、本実験での供試油と同種のものを用いた著者らの実験(泉山ら, 1998)では、油を氷板下の静水中に流出させてからある程度の時間が経過すると、油層に働く浮力と界面張力が釣り合う状態となり、油層の面積及び厚さが定常となる平衡状態に達することが確認されている。本実験では、氷板下に油を流出させてから氷板を移動させるまでの時間を、上記の平衡状態に達するまでの時間より充分に長くとってある。従って、本実験は氷板下の静水中での平衡状態にある油層に定常な流れが作用する状況を再現したことになる。

油層の運動はビデオカメラによって記録したが、氷が半透明であることから、図-4 に示すようにカメラを油層の直上に設置し、氷板を通して撮影した。なお、氷板及びビデオカメラとも計測台車に固定されているため、氷板に対して相対的な油層の運動が撮影される。また、油層形状の視認性を向上させるために、染料によって油層を着色するとともに、定量的画像解析のために、氷板

上に格子状のスケールを置き、あらかじめ写し込みを行った。

氷厚 40 mm 程度の氷板を水槽に製氷し、以下の手順で計測を行った。

- ①水槽の全面に製氷された氷板から長さ 10 m 程度の部分を切り出し、その前方の氷を取り除き、また水槽の両側面との凍結部分を取り除くことによって、切り出された氷板が水槽長軸方向に運動できるようにする。
- ②氷板下面に油を流出させる。この際、作業台車から給油管を氷板下に差し入れ、給油ポンプにより所定の位置に所定の量の油を流出させる。
- ③氷板を計測台車により所定の速度で移動させ、この時の油の運動をビデオカメラにより撮影する。氷板の移動距離は移動速度によって多少異なるが、おおよそ 10 m である。
- ④氷板を当初の位置まで戻し、速度を変えて実験を繰り返す。
- ⑤画像解析装置により、油層の移動速度及び形状変化を求める。

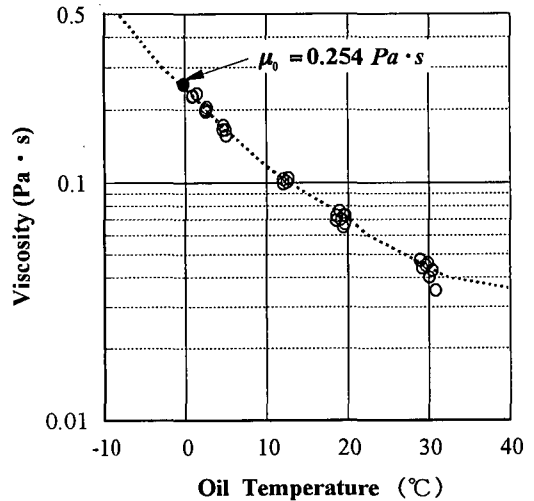


図-3 供試油の粘性係数と温度の関係

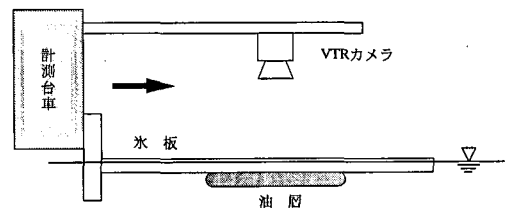


図-4 ビデオカメラによる油層運動の撮影方法

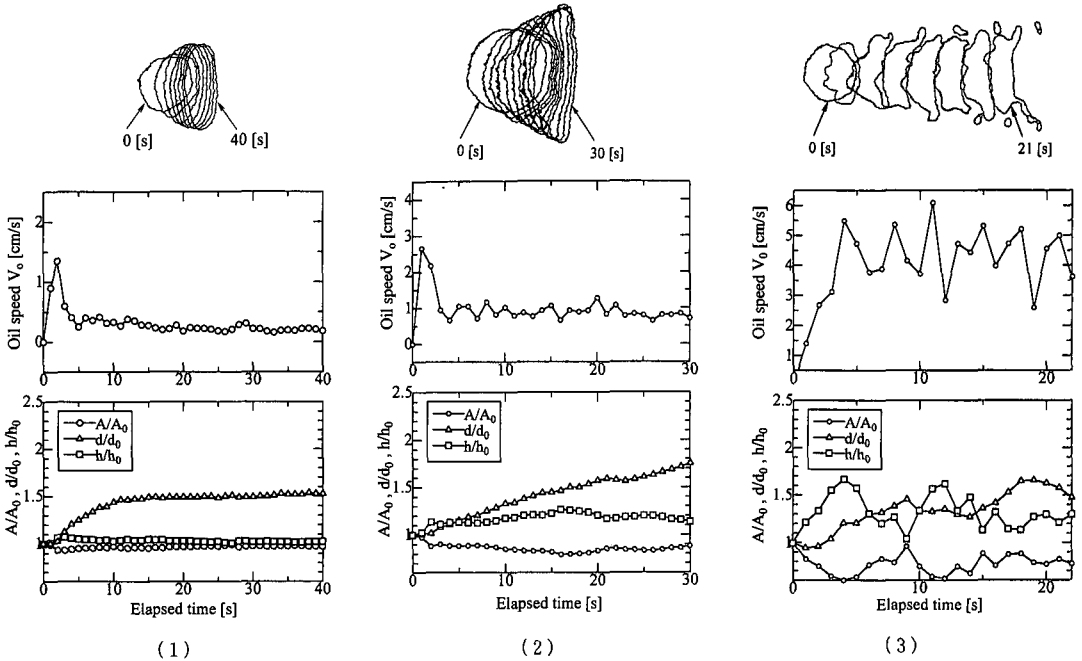


図-5 油層形状と移動速度の時間的变化

3. 実験結果及び考察

3.1 油層の形状変化

氷板下の静水中での平衡状態にある油層に流れが作用すると、油層は変形し、流速が大きくなると移動が始まる。変形と移動の程度には、油の量及び流速に応じていくつかのパターンが見られたが、大別すると以下の4つに分類できる。

- (a) 形状はほとんど変化せず、静止したままである
- (b) 流れに対して垂直方向に扁平となり、その後は安定した形状(ほぼ楕円形)で移動する(図-5(1)の上段)
- (c) 流れに対して垂直方向への変形が進行しつつ、移動する(図-5(2)の上段)
- (d) 垂直方向への伸びが極端となり、油の一部が先端部より分離しつつ、移動する(図-5(3)の上段)

図-5の中段及び下段は、それぞれ油層移動速度と油層形状(面積 $A$ 、幅 $d$ 、厚さ $h$ )の時間的变化を示している。なお、幅の定義は図-6に示すとおりである。また、画像解析では厚さの計測はできないため、体積が一定であることから面積の変化から厚さの変化を求めた。従って、ここでの厚さの変化は油層の平均層厚の変化である。

安定した形状で移動する(b)の場合は、流れが作用し始めると幅と厚さが増大するが、ある一定時間経過後には安定する。これと同時に、移動速度もいったんは過大に上昇するが、その後は一定速度となる。また、変形しつつ移動する(c)では、幅は増大し続けるのに反して、

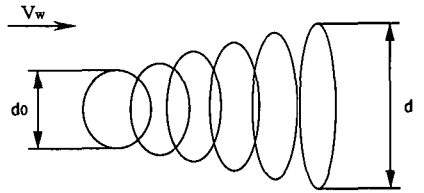


図-6 幅の定義

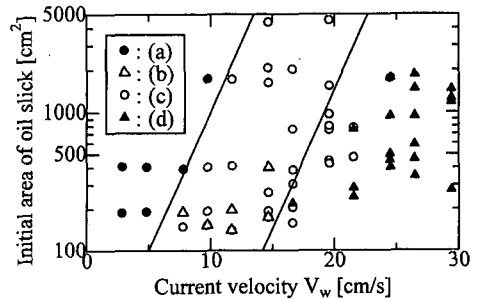


図-7 油層の初期面積と流速による変形パターンの分類

速度はほぼ一定となる。ただし、図に示したものの以外の中には、速度も若干変動する場合がある。分裂が発生する(d)では、形状及び移送速度とも不規則に変動している。なお、本実験では長さ10mの氷板が約10m移動する間の変形を測定しており、測定時間は氷板の移動速度によって異なり、氷板の移動速度が大きい場合には測定

時間が充分ではないこともあり得る。従って、(c) の状態は (b) あるいは (d) への遷移期にあると思われる。

油の量及び流量と上記パターンとの関係を示したのが図-7であり、油の量としては氷板移動開始時の油層面積(初期面積  $A_0$ )を用いている。初期面積が大きく、流速が小さい場合には (a) のパターンとなり、面積が小さく、かつ流速も大きくなると、(b) さらには (d) となる。以上のような全体的傾向を踏まえて、図中の2本の直線によって、(a), (b), (d) の3領域に分類すると、(c) のパターンとなったケースは (b) と (d) の2つの領域に現れる。(c) は測定時間内は遷移期にあるが、測定時間が十分に長ければ、いずれは図中で分類されているパターンに遷移するものと推測される。

3.2 油層の移動速度

油層の移動速度  $V_o$  に対する流速  $V_w$  及び油層の初期面積  $A_0$  の関係を示したのが図-8である。流速が大きくなるほど、油層の移動速度は増加していることが分かる。また、初期面積が小さいほど、油層移動速度は大きく、油層が移動を開始する限界の流速は小さい。

前述のように、変形パターン (b) の全ておよび (c) の一部では、ある程度時間が経過した後の移動速度が一定となっている。従って、このような状態にある油層に作用する力は釣り合っていることになる。移動する油層に作用する力は図-9に示すように、油層の前面に作用する形状抵抗  $F_D$ 、油-水の剪断抵抗力  $F_{ow}$ 、水-油の剪断抵抗力  $F_{io}$  が考えられる。 $F_D$  と  $F_{ow}$  は一般的に、

$$F_D = \frac{\rho_w}{2} (V_w - V_o)^2 C_D dh \dots\dots\dots (1)$$

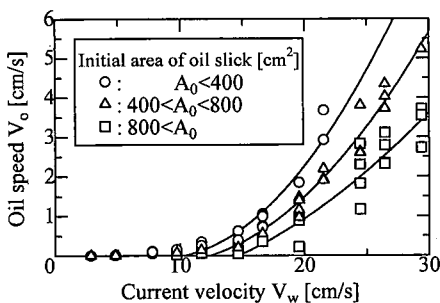


図-8 油層の移動速度に対する油層の初期面積及び流速の影響

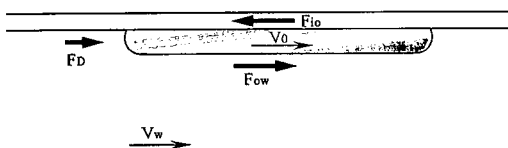


図-9 油層に作用する力

$$F_{ow} = \frac{\rho_w}{2} (V_w - V_o)^2 C_{ow} A \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\rho_w$  は水の密度、 $C_D$  は形状係数  
 $C_{ow}$  は油-水の剪断抵抗係数  
 と記述できる。一方、水-油間の剪断抵抗力  $F_{io}$  としては、 $F_{ow}$  と同様な流体の粘性抵抗と、クーロン摩擦のような速度に依存しない抵抗の2通りが考えられる。つまり、

$$F_{io} = \frac{\rho_o}{2} V_o^2 C_{io} A \dots\dots\dots (3)$$

あるいは、  
 $F_{io} = \Delta \rho g A h \mu' \dots\dots\dots (4)$

ここで、 $\rho_o$  は油の密度  
 $C_{io}$  は水-油の剪断抵抗係数  
 $\mu'$  は水-油の動摩擦係数  
 $\Delta \rho$  は水と油の密度差  
 $g$  は重力加速度  
 である。一定速度の状態にある場合には、粘性抵抗(式(3))とすると、

$$C_D \frac{dh}{A} + C_{ow} = \frac{\rho_o}{\rho_w} C_{io} \frac{V_o^2}{(V_w - V_o)^2} \dots\dots\dots (5)$$

また、クーロン摩擦(式(4))とすると、

$$C_D \frac{dh}{A} + C_{ow} = \frac{2 \Delta \rho g \mu'}{\rho_w} \frac{h}{(V_w - V_o)^2} \dots\dots\dots (6)$$

が成り立つことになる。  
 $C_D, C_{ow}, C_{io}$  が一定値であれば、 $V_o^2 / (V_w - V_o)^2$  (あるいは  $h / (V_w - V_o)^2$ ) と  $dh/A$  の関係は線形となるはずであるが、移動速度が一定となった場合の結果を用いて両者の関係を調べたが、線形な関係は認められなかった。従って、 $C_D, C_{ow}, C_{io}$  の全てあるいはいくつかは流体場に依存すると考えられる。一般的に、形状係数  $C_D$  はレイノルズ  $Re$  の関数として表され、例えば低レイノルズ数領域での円柱の形状係数は  $Re$  に逆比例し、また溶液中を運動する液滴の形状係数も  $Re$  のべき乗に逆比例することが知られている(化学工学協会東海支部, 1982)。そこで、ここでは仮に形状係数  $C_D$  は  $Re = h(V_w - V_o) / \nu_o$  ( $\nu_o$ : 油の動粘性係数) に逆比例するものとして  $V_o^2 / (V_w - V_o)^2$

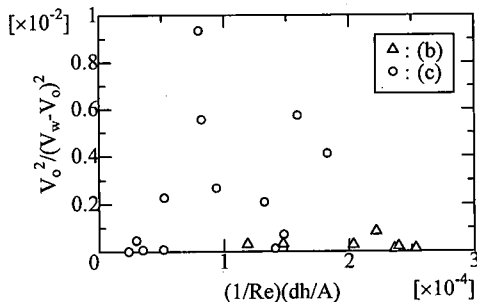


図-10 粘性抵抗を仮定した場合

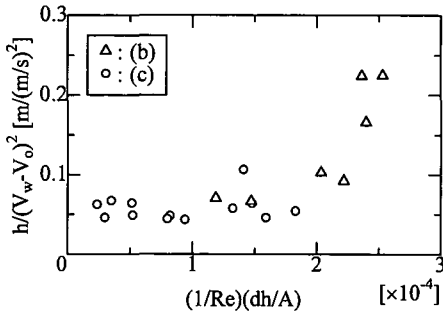


図-11 クーロン摩擦を仮定した場合

$-V_o)^2$ ,  $h/(V_w - V_o)^2$  と  $1/Re \times dh/A$  との関係を示したのが、図-10, 11である。粘性抵抗を仮定した式(5)に基づく結果には何ら相関が見られない。一方、クーロン摩擦を仮定した式(6)によるものからは、以下のようなことが言える。 $Re_e$ が小さい範囲では、油層下面での  $F_{ow}$  と  $Re_e$  の関数である  $F_D$  の和が油層の動摩擦力と釣り合うような相対速度となる。一方、 $Re_e$ が大きくなると、油層に作用する流体力としては  $F_{ow}$  が支配的となり、油層厚に応じたある一定の相対速度となるように油層の移動速度が決定される。

以上のように、氷板下での油移動を考える際の氷-油の剪断抵抗としてクーロン摩擦を仮定すると、上記のような特性を見ることができる。

### 3.3 油層の扁平度と分裂

図-5に示したように、油層は流れの影響を受けると、流れに対して垂直方向に伸び、扁平な形状となる。扁平度を示す指標として、図-6に示す値  $d/d_0$  を用いると、流速との関係は図-12のようになる。流速が増加するに伴い、扁平度も次第に大きくなるが、扁平度が2を越えることはなく、変形の程度には限界が存在することが分かる。図-12は変形のパターンをパラメータとして示されているが、扁平度と流速及び変形パターンとの関係は以下のように理解できる。つまり、油層前面に作用する形状抵抗によって油層は扁平となり、このような変形は油層の流れ方向の投影面積の増大をもたらす、結果的には形状抵抗を増大させる。増大した流体力によって油層は加速されるが、これは油層に対する流れの相対速度の減少となり、流体力は減少する。扁平化による形状抵抗の増大と相対速度の減少による全流体力の減少が釣り合うところで、油層の投影面積と移動速度が一定となる。このような平衡状態となっているのが、変形パターンの(b)であり、図-5(1)の中段及び下段に示す移動速度及び形状の時間的変化の解析結果からも上記のことがいえる。一方、安定な相対速度となるのに必要な流体抵抗に至らない段階では、扁平化は進行し、これが(c)に対応している。しかし、扁平化がある限界に達すると、油層

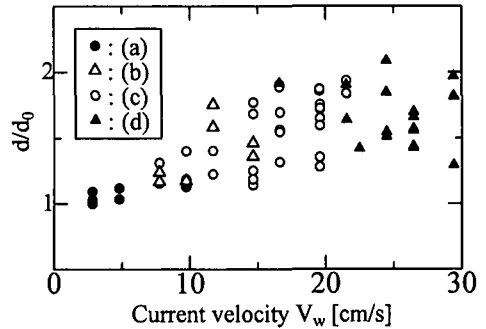


図-12 扁平度、流速及び変形パターンの関係

先端部の不安定により分裂が生じ、限界以上の扁平化が抑制される。

## 4. 結 語

本研究では、氷板下に流出した油の拡散に対する流れの影響に関して、氷海船舶試験水槽での模型実験を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 流れによる油層の形状変化は、油の量と流速によって分類される。
- (2) 油層の扁平化による形状抵抗の増大とこれに伴う相対速度の減少による全流体力の減少が釣り合うように、油層の投影面積と移動速度が決定される。
- (3) 上記の平衡状態に至らない場合には、油層形状の扁平化が進行するが、ある限界に達すると分裂が生じ、扁平化が抑制される。
- (4) 移動中の油層と氷板に作用する剪断抵抗力としてクーロン摩擦を仮定すると、油層と流れの相対速度とレイノルズ数を含むパラメータとの間に、ある一定の関係が見られる。
- (5) 油層の移動速度は油の量が少ないほど早いため、分裂した小規模な油層は本体から急速に離れることになり、回収が困難となる可能性がある。

## 参 考 文 献

- 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, 土木学会海岸工学論文集, 第45巻, pp. 921-925.
- 大島香織・大塚夏彦・宇佐美宣拓・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.
- 化学工学協会東海支部 (1985): 気泡・液滴・分散工学: 基礎と応用, 245 p.
- 堂崎真弓 (1999): 結氷海域に於ける波浪特性に関する研究, 岩手大学大学院修士論文, 85 p.
- 日本海洋学会 (1985): 日本全国沿岸海洋誌, 1106 p.