

氷盤下の油拡散に関する数値計算

堺 茂樹*・彭 瑜**・岡本 敦**
笹本 誠***・泉山 耕****

近年, サハリン島近海での原油・天然ガスの生産が本格化し, 新しいエネルギー供給源として期待される一方, 生産あるいは輸送の際の油流出事故による海域環境汚染も危惧される。この海域は冬季には流水に被われるため, 流出した油は氷盤下を拡がる場合もあり, 氷況によって油の拡がりを目視では確認が出来ない場合, 何らかの方法による予測が必要となる。予測計算法として備えるべき要件は, 油層に作用する各種抗力を正確に記述し, かつ氷下面の凹凸による油の貯留あるいは遮断を考慮し得ることである。本研究では, 著者らが行った実験結果に基づき, 各種抗力をモデル化し, 氷盤下での油の拡がりを予測し得る数値計算手法を開発した。

1. 緒 言

近年, サハリン島近海での原油・天然ガスの生産が本格化し, 新しいエネルギー供給源として期待される一方, 生産あるいは輸送の際の油流出事故による海域環境汚染も危惧されている。更に, この海域は冬季には流水に被われるため, 流出した油は氷盤下を拡がる場合もある。油回収作業に当たっては, まず油の拡がった範囲を特定する必要があるが, 氷況によっては目視による確認が出来ない場合があり, こうした場合には何らかの方法による推定が必要となる。しかし, 通常水域での油の拡がりに関しては既に多くの研究がなされており, いくつかの予測計算手法等も提案されているのに対し, 氷盤下での油の挙動についての研究は極めて少ない。

通常水域での水面上での油の拡がりと比較して, 氷盤下での油の拡がり, は, 力学的及び運動学的ないくつかの点で異なる。力学的な点では, 氷盤下では重力(浮力)の他に油-氷, 油-水の界面に作用する剪断力及び油-氷-水の 3 者の界面に作用する界面張力が支配的な要素であり, 通常水域では存在しない抗力, あるいは性質の全く異なる抗力が作用する。一方, 海域に存在する氷は何らかの外力による破壊と, 低温環境下での再凍結を繰り返し, そのため氷下面には大きな凹凸が存在し, これが油の拡がりに大きく影響する。つまり, 氷盤下に流出した油は重力あるいは海流などの外力によって拡がるが, この際氷の凹部では油の一部が貯留し, また凸部では運動が遮られる。従って, 氷盤下での油の拡がりに関する数値モデルとして必要な要件としては, 油層に作用する各種抗力の影響を正確に記述し, かつ氷下面の凹凸による油の遮断あるいは貯留を考慮し得ることであり, 両者を満足する計算手法の確立が必要となる。

そこで, 本研究では, 著者ら(泉山・堺, 1998; 泉山・今野・松本・堺, 2002)が行った実験結果に基づき, 各

種抗力をモデル化し, 氷盤下での油の拡がりを経時的に予測し得る数値計算手法を開発することを目的としている。

2. 基礎式および粘性力・界面張力のモデル化

(1) 線形長波理論による油の拡がりの記述

粘性流体の基礎式である Navier-Stokes の式は図-1 に示す座標系において,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_0 \nabla^2 u \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = F_y - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_0 \nabla^2 v \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_0 \nabla^2 w \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表現でき, また連続の式は次式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, u, v, w はそれぞれ, x, y, z 方向流速, p は圧力, ρ_0, ν_0 は油の密度及び動粘性係数, F は単位質量当りの外力である。

氷盤下に薄く広がった油層内では, 鉛直方向(油層厚方向)の流速成分 w 及びその変化率は小さく, また流速

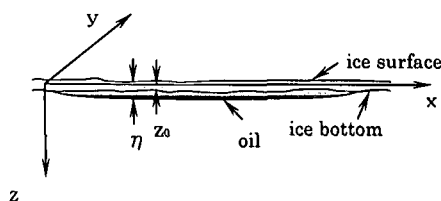


図-1 座標系

* 正会員 工 博 岩手大学教授 工学部建設環境工学科
 ** 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
 **** 正会員 博(工) (独法)海上技術安全研究所

の水平方向の変化は鉛直方向の変化に比べて小さい。これらの条件の下に、上式を油層の上面から底面まで積分すると、最終的には次式ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) \\ = -\frac{\Delta\rho}{\rho_0}gh\frac{\partial\eta}{\partial x} + \nu_0\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_\eta - \frac{\partial u}{\partial z}\bigg|_{z_0} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) \\ = -\frac{\Delta\rho}{\rho_0}gh\frac{\partial\eta}{\partial y} + \nu_0\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_\eta - \frac{\partial v}{\partial z}\bigg|_{z_0} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 M, N はそれぞれ x, y 方向の運動量フラックス、 h は油層厚、 η は油層の底面の位置、 $\Delta\rho = \rho_w - \rho_0$ (ρ_w : 水の密度) である。

(2) 粘性力のモデル化

式(5)、(6)の右辺第2項は油層方向に積分された粘性力であり、粘性係数と流速分布から計算される。海上安全技術研究所で実施した油の拡がりに関する実験では、供試油の粘性係数を、Brookfield型回転粘度計(通称、B型粘度計)を用いて計測しており、回転速度を段階的に変えながら複数回の計測を行い、その平均値として以下のような値を得ている。なお、計測に際しては、エチレングリコールを満たした大型恒温槽の中のピーカーに被計測油を入れた状態で計測を行い、油温の制御を行っている。

$$\mu_0 = 0.123(Pa \cdot s) \dots\dots\dots(8)$$

一方、流速分布に関しては、油層が極めて薄いこと、及び油が氷盤下に存在することにより、実験設備及び計測機器の制約上、油の流速分布を正確に測定することは極めて難しい。そこで、本数値計算では、氷との接触面では流速が零で、水との接触面に向かって直線的に増加するものとした。つまり、水との接触面における速度を u_i とすると、式(5)、(6)の右辺第2項は次式のようにになる。

$$-\frac{2\mu_0}{\rho_0} \frac{u_i}{h} \dots\dots\dots(9)$$

線形な流速分布を仮定することの妥当性を示す根拠は、残念ながら著者らのこれまでの実験で得ることはできなかった。にもかかわらず、上記の式によって粘性力を表現した理由は、平坦氷下での軸対称拡散に関する理論解析(Yapa・Chowdhury, 1989; 泉山・堺, 1998)において、流速を直線分布と仮定しない場合にも、上下接触面での粘性力の合力は結果的には式(9)と同一となっており、さらにこの理論解が実験結果と良く一致してい

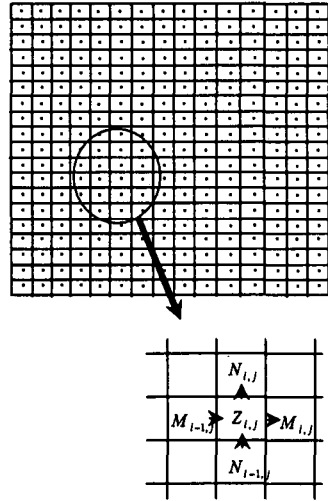


図-2 格子分割及び変数の位置設定

ることである。

(3) 計算スキーム

基礎式を差分化し、スタガード・リーブフロッグ法によって、次のような手順で計算を行う。

- ① 図-2に示すように、対象海域を矩形格子で分割する。
- ② 各格子の中央に氷下面の位置(深さ)を設定する。
- ③ 格子の各辺に流量フラックスの計算点を、中央に油層厚の計算点を設定する。
- ④ 油流出源に、油の流出量に見合った運動量フラックスを与える。
- ⑤ 式(5)、(6)、(7)を用い、リーブフロッグ法によって油の流量と油厚を交互に計算する。

(4) 油層先端部での計算

油層先端部では、油-氷-水の接触する3種類の界面にそれぞれの界面張力が作用する。海上安全技術研究所での実験では、油の拡散が終了した時点での油層厚から界面張力を求めている。これは、拡散が終了した時点では油の速度は零であり、従って粘性の影響はなく、水と油の密度差による浮力と界面張力が釣り合っている状態であることによるものである。こうして求められる界面張力は「正味の界面張力」と呼ばれ、上記の3種類の界面張力の合力に対応しており、以下のような値である。

$$\sigma_n = 0.047(N/m) \dots\dots\dots(10)$$

図-3に示すように、油層先端部以外では油層底面までの深さに多少でも差があれば、それに対応して運動量フラックスが発生する。しかし、油層先端部には界面張力が作用するため、式(5)、(6)の右辺に式(10)を加えた計算を行うことにより、界面張力の影響によって

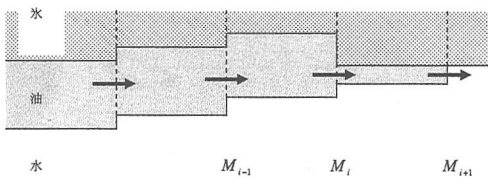


図-3 油層先端部での計算

モデルの有用性がうかがえる。

図-7に示す例は、大きな凹凸が緩やかに続いている場合である。図-8に示す計算結果には、流出開始直後から図中の下方への拡がり強く現れてしまい、逆に図中の左側への拡がりが見られない。これは、図-8のビデオ画像に見られるように、凹部と凹部は極めて細い油の流れで繋がっており、計算で用いる平面形状のデータとして、これが実際より大きく現れていれば、下方への過剰な拡がりとなり、また実際より小さいかあるいは全く再現できていなければ、左側のように拡がりがなく、と言

拡がりにくいことを表現する。

3. 数値計算法の有効性の検証

(1) 氷海水槽実験との比較

a) 計算条件

海上安全技術研究所の氷海水槽での実験では、油の拡がりの状況を観測し、油を回収した後、氷底面の形状を3 cm 間隔で測定している。その底面形状データを境界条件とした計算を行った。なお、計算時間間隔は0.0006 秒である。

b) 計算結果

図-4は、時間経過に伴う油の拡がり面積の増加の様子を示したものである。図中には2 ケースの実験結果が示されているが、両ケースとも、極めて良く一致している。なお、実測値としては油流出速度の小さい場合には約600 秒まで、大きい場合には約330 秒までが示されているが、これはこれ以降は油の拡がった範囲がビデオの撮影範囲を超えてしまったためである。

図-5は、氷底面を水槽底面から見上げた様子であり、小さな凹凸が多く存在する形状となっている。

図-6は、油の拡がりの平面形状に関して、実測値と計算結果を比較したものである。各図の上段は実験中に撮影したビデオからの静止画像であり、下段は同時刻の計算結果である。両者は極めて良く一致しており、本計算

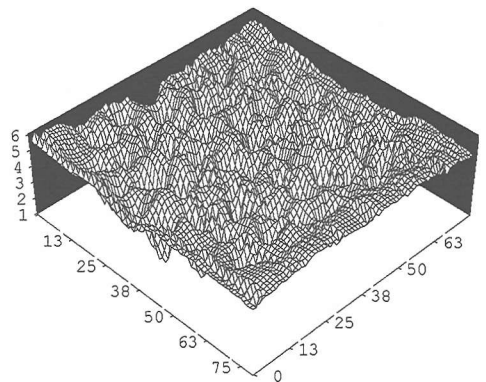


図-5 実験での氷下面形状 (その1)

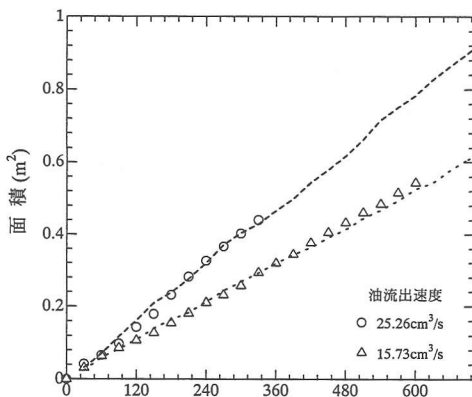


図-4 拡散面積の時間的変化に関する計算結果と実測値の比較

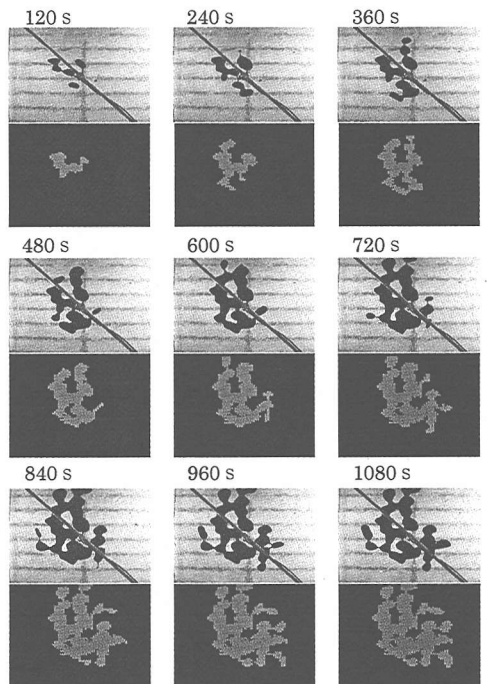


図-6 油の拡がりの平面形状(上段:ビデオ画像, 下段:計算結果)

う結果を生じることになる。従って、このような小規模な凹凸をいかに詳細に再現するかが、計算精度を左右する。

ここで例示した2つのケースでの計算結果から、本研究で提案した数値計算法は、氷盤下での油の拡がりの経時変化を良く再現することができ、その精度は氷下面形状の再現精度に依存すると言える。

(2) 氷下面の凹凸の振幅と位相の影響

図-9は氷下面の凹凸を2次元フーリエ級数で近似し、振幅が小さい場合と大きい場合を比較したものである。平坦氷に比べて、凹凸が大きいほど、拡がる速さ(図

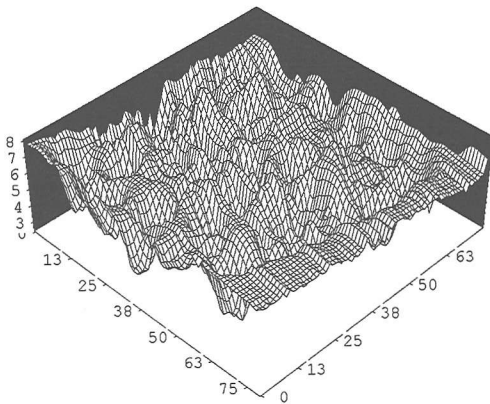


図-7 実験での氷下面形状(その2)

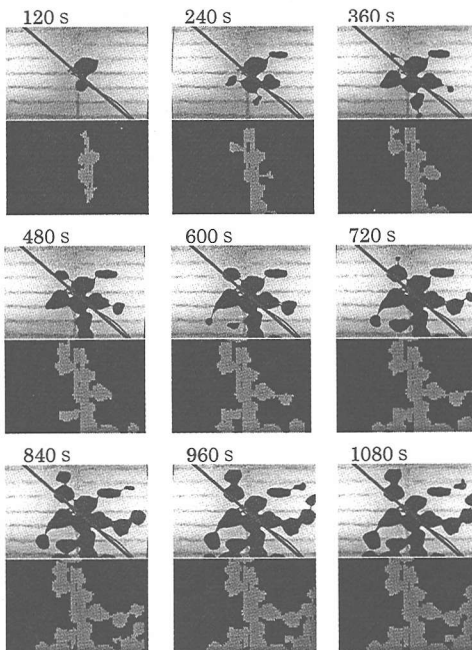


図-8 油の拡がりの平面形状(上段:ビデオ画像, 下段:計算結果)

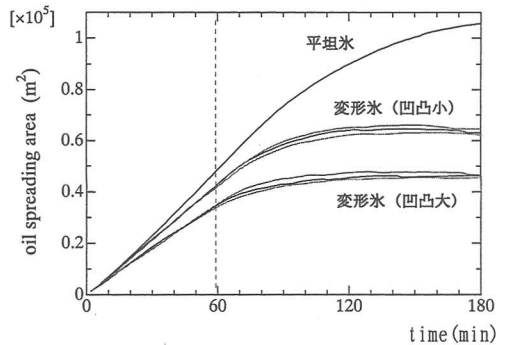


図-9 油の拡がりに対する氷下面の凹凸の振幅と位相の影響

中の曲線の傾き)は小さく、最終的な拡散面積も小さいことが分かる。また、図中には各々3本の曲線が示されているが、これはフーリエスペクトル形状を同一とし、位相を適宜変化させた場合であるが、油の拡がりには氷底面の凹凸の振幅に大きく依存するが、位相の影響は小さいことがわかる。

(3) 実海域への適用

実際の予測にあたり、氷下面の平面形状そのものが知り得るのであれば、最も信頼できるデータといえるが、実際には平面形状の測定は極めて難しい。特に、事故が発生した時点で、当該海域の氷下面形状を測定することは事実上不可能である。一方、本研究で構築された数値計算法による結果から、氷下面の凹凸の振幅によって油の拡がりがほぼ決まることが明らかとなった。従って、現地観測結果を蓄積し、海域毎あるいは季節毎の典型的な値及びその変動幅を把握しておくことにより、油流出事故の場所及び時期から、氷下面の凹凸の振幅を推定し、これによって油の拡がりを予測することが可能になり得る。従って、我が国の結氷海域における現地観測態勢を強化し、氷下面の凹凸に関する多くの情報を蓄積することが望まれる。

4. 結 語

本研究で得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- ① 氷盤下での油の拡がりに関する数値計算法を提案した。
- ② 本研究で開発した数値計算法は、氷下面の凹凸による油の拡がりの遮断や貯留など、実験結果をよく再現しており、その有効性が検証された。
- ③ 氷下面形状の凹凸のスペクトルが同一であれば、油の拡がりはほぼ同一である。従って、本数値計算法を用いて実海域での予測を行う場合、事前の現地調査によって氷下面の凹凸の振幅の典型的な値を把握

しておけば、油の拡がりをおおよそ予測できる。

参考文献

謝辞：本研究は、運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の採択課題「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」の一環として行われたものであることを記し、ここに関係各位に感謝の意を表します。

泉山 耕・堺 茂樹 (1998): 氷海域における流出油の拡散に関する実験及び理論解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 921-925.

泉山 耕・金野祥久・松本健司・堺 茂樹 (2002): 氷盤下における流出油の拡散—氷盤下面の凹凸の影響—, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1341-1345.

Yapa, P. and T. Chowdhury (1989): Oil spreading under ice covers, Proc. of 1989 International Oil Spill Conference, pp. 161-166.
