研究速報

氷海域の流出油変動シミュレーションモデル

A Numerical Simulation Model for Oil Spill in Ice Covered Sea

林　昌奎*・山口　一**
Chang-Kyu RHEEM and Hajime YAMAGUCHI

1. はじめに

原油価額の高騰，陸地や沿・近海域石油資源の枯渇により，より厳しい環境下での石油開発が進んでいる．このような傾向は今後さらに広がることが予測される．2000メートルを超える超大水深海域での海底油田開発，海の表面が氷に覆われる氷海域での石油開発がその例であり，現在氷海域においては，ロシアサハリン島北東沖合いのオホーツク海にて石油開発が進められている．海洋での石油開発には，常に流出油による環境への影響が大きな問題となっており，流出油による影響海域の推定，油の回収，環境修復など流出油に関連する様々な研究が行われている．しかし，海の表面が氷に覆われる氷海域での流出油の挙動や環境への影響は全くの未知と言って過言ではない．

海氷が水面を覆う氷海域での流出油は，油が海氷の下に隠れるなどにより，その流出範囲の特定及び回収は非常に困難である．氷海域での流出油は流氷と共に移動し，その範囲を広げる．回収には長い時間を要し，その間，周辺海域の環境に及ぼす影響は計り知れない．

氷海域における流出油が環境に及ぼす影響を評価するためには，まず流出油の分布に関する情報を正確に把握する必要がある．氷海域における流出油に関連する研究は，北極圏に膨大な領土をもつカナダ，アメリカの研究が先行しており，日本でもオホーツク海での石油開発と時を合わせて，数年前から研究が行われている．しかし，海氷と開水面が混在する氷海域での流出油を取り扱う研究はほとんどない．

本研究では，氷海域における流出油の拡散・移動の数値シミュレーションモデルを開発し，モデルの有用性を確認する．

2. 海氷と流出油

氷海域と言っても常に全海面が海氷に覆われていることはない．即ち，氷海域には海面全面が海氷に覆われる海面，海面の一部に海氷が浮いている海面，それからある広さの海面上に海氷が全くない海面がある．このように海氷分布状況の相違な海域が混在することが氷海域の最も重要な特性であり，氷海域での流出油の拡散・移動の取り扱うモデルはその全ての海域状況に対応しなければならない．本モデルでは，流出油と海氷および海水との関係を図1のように4つのステージに分けて考える．まず，流出の初期段階では，油は氷盤と氷盤の間で広がる（ステージ1）．流出油の量が増すにつれ，油は氷盤の底面より深いところまで広がる．しかし海氷と油と海水との間に働く界面張力によって油膜の厚さがある値に達するまでは氷盤底面に沿った広がりは起こらない（ステージ2）．流出油の量がもっと増すと，油膜の厚さが増し，重力が界面張力より強くなり，油は一定の厚さを保ちながら氷盤底面に沿って広がる（ステージ3）．氷盤底面に油が充満しても油の量が増え続けると油膜の厚みが増して行く（ステージ4）．海氷が全くない海面および全海面が海氷に覆われている海面は，氷盤と氷盤の間の距離が無限または0の海域である．

ある氷海域で油が流出すると，時間と共に油に覆われる

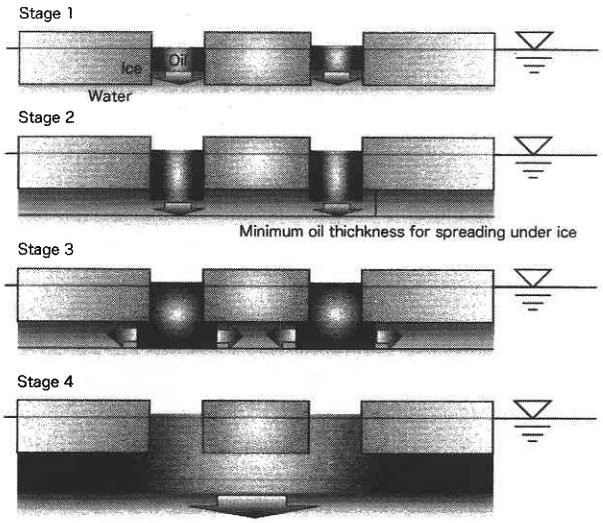


図1　Vertical spreading of oil; relation between oil, floe and water

*東京大学生産技術研究所　海中工学研究センター
**東京大学大学院工学系研究科　環境海洋工学専攻

研　究　速　報

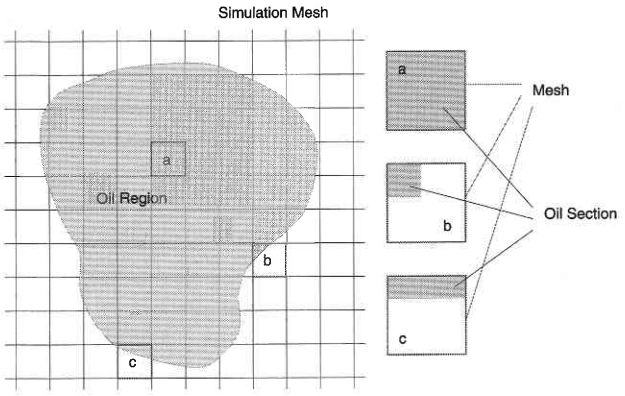


図2　Oil spill region, computaion mesh and oil section

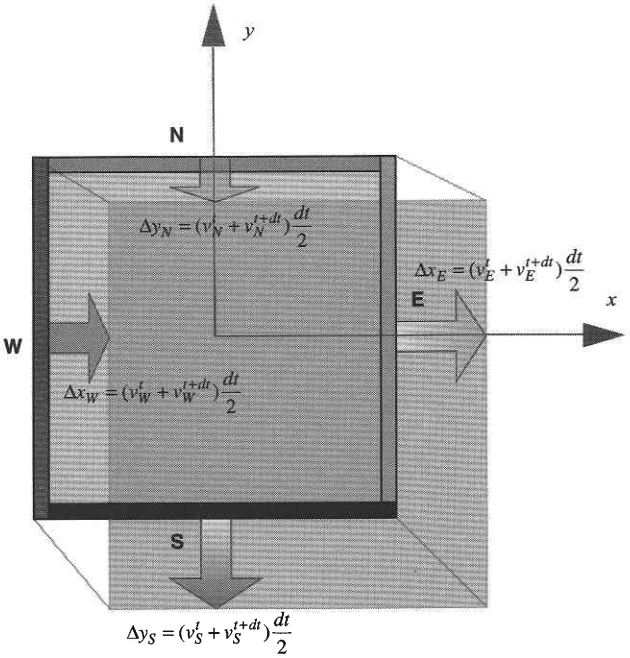


図3　Movement and deformation of oil section

海域が広がる．本モデルでは，海面を図2に示すような直交格子に分割し，流出油はその格子上に広がるものとし，流出油の領域も海面格子に合わせた長方形の油区域に分割し，各々の油区域の移動と変形を求め，全流出油領域の変動を求める．

3. 油区域の移動と変形

各油区域の移動と変形は，図3のように長方形4つの辺の移動により求められる．油区域4つの辺の法線方向速度を求め，ある時間ステップの間，4つの辺の法線方向移動量を求める．各辺の運動方程式は，次式のようである．

$$m_{oil}(v_{oil}^{t+dt} - v_{oil}^{t}) = \sum F dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで，m_{oil}は油区域辺の質量，v_{oil}は油区域辺の法線速度，ΣFは外力である．各辺の運動方程式の外力項は図1の各ステージよって以下のように異なる組み合わせとなる．

ステージ1とステージ2

重力＋風による摩擦力＋海氷の側面および海水との間の摩擦力＋海氷と油と空気との間の界面張力

ステージ3とステージ4

重力＋風による摩擦力＋海氷の側面，海氷の底面および海水との間の摩擦力＋海氷と油と空気との間および海氷と油と海水との間の界面張力

全流出油領域のある時間ステップの間の拡散および移動は，図4のように各の油区域の移動と変形の総和で表される．これで1つの時間ステップが完了する．このような作業を繰り返し行うことで，流出油領域の時間変動が求められる．

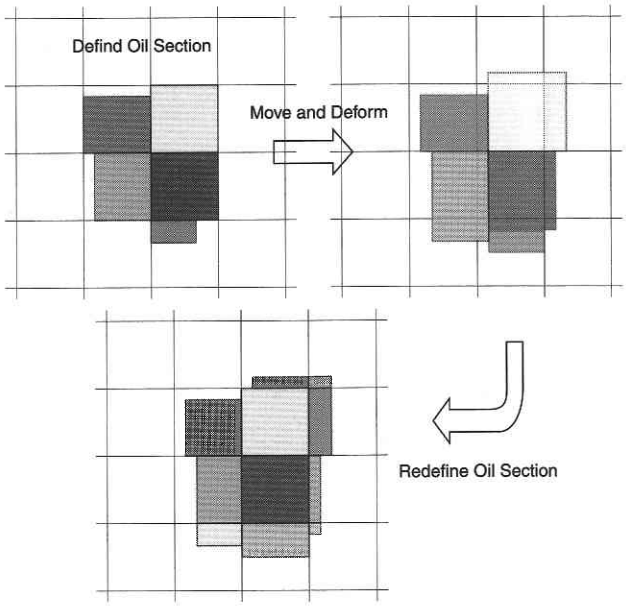
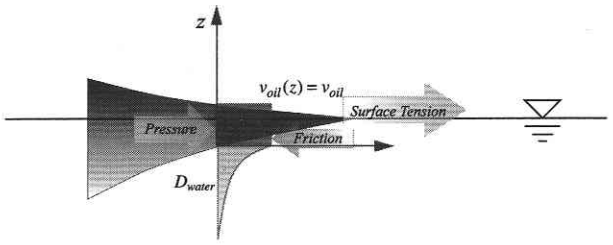


図4　Spreading of oil region

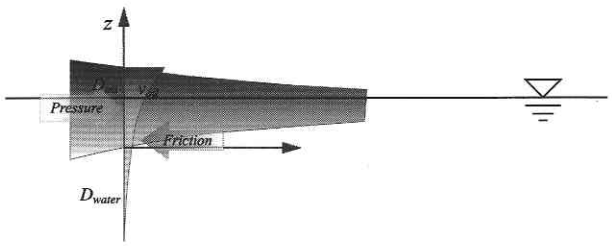
4. 外　　力

氷海域の流出油に働く外力の中，全ての状況で共通となる重力と風による摩擦力，常にある一定の値となる界面張力係数を除くと，海氷と油との間の摩擦力と，海水と油との間の摩擦力が残る．

開水面上の流出油と海水との間の摩擦力は，流出油が広がる先端と内部を分けて考える（図5）．まず流出油が広がる先端においては，図5a）に示すように油膜内の油流速を一定と見なし，(2) 式で表す摩擦応力から求める．そのとき，油の運動に起因する海水の流れの鉛直流速勾配は (3) 式のように仮定し，油と海水の境界での海水の流速は油膜の流速と等しいものとする．

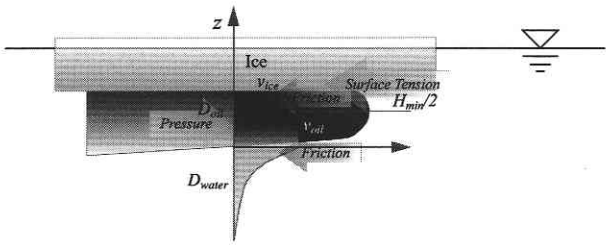


a) Egde oil section

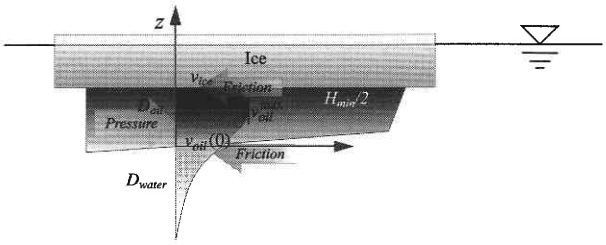


b) Middle oil section

図5　External forces on oil on water surface



a) Egde oil section



b) Middle oil section

図6　External forces on oil under ice

$$\tau_{water} = \mu_{water} \left. \frac{dv_{water}(z)}{dz} \right|_{z=0} = \mu_{water} v_{oil} \frac{\pi}{D_{water}} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$v_{water}(z) = v_{oil} e^{\pi z / D_{water}} \quad \cdots\cdots (3)$$

流出油内部においては，油膜内の油の鉛直流速勾配を（4）式，また油膜下の海水の鉛直流速勾配は（5）式で表し，油と海水の間の摩擦応力は（6）式から求める．

$$v_{oil}(z) = v_{oil}(0) e^{\pi z / D_{oil}^{ref}} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$v_{water}(z) = v_{oil}(0) e^{\pi z / D_{water}} \quad \cdots\cdots (5)$$

$$\tau_{water} = \mu_{water} \left. \frac{dv_{water}(z)}{dz} \right|_{z=0} = \mu_{water} v_{oil}(0) \frac{\pi}{D_{water}} \quad \cdots (6)$$

ここで，油膜の厚さと油の運動に起因する海水の流れが発生する層の厚さとの関係は（7）式から求める．

$$D_{oil}^{ref} = D_{water} \mu_{oil} / \mu_{water} \quad \cdots\cdots (7)$$

海氷底面の流出油においても，同様に流出油が広がる先端と内部を分けて考える（図6）．先端での油膜内部の油の鉛直流速勾配を（8）式で，それから油の運動に起因する海水の流れの鉛直流速勾配は開水面上の場合と同様に（3）式で表す．海氷と油との間の摩擦応力は（9）式，また油と海水との間の摩擦応力は（2）式から求める．内部領域での海氷と油との間および油と海水との間の摩擦応力をそれぞれ（10）式と（6）式から求める．

$$\begin{aligned} v_{oil}(z) &= v_{oil} - (v_{oil} - v_{ice}) \cdot e^{2\pi (z - D_{oil})/H_{\min}} && z \geq D_{oil} - H_{\min}/2 \\ v_{oil}(z) &= v_{oil} && z < D_{oil} - H_{\min}/2 \end{aligned} \quad \cdot (8)$$

$$\tau_{ice} = \mu_{water} \left. \frac{dv_{oil}}{dz} \right|_{z=D_{oil}} = \mu_{water} (v_{oil} - v_{ice}) \frac{2\pi}{H_{\min}} \quad \cdots\cdots (9)$$

$$\tau_{ice} = \mu_{water} \left. \frac{dv_{oil}}{dz} \right|_{z=D_{oil}} = \mu_{water} (v_{oil}^{\max} - v_{ice}) \frac{2\pi}{H_{\min}} \quad \cdots (10)$$

5. モデルの検証

氷海域での流出油の拡散と移動を定量的に捉えた観測の例はなく，モデルによるシミュレーション結果を実海域での観測との比較によりモデルを検証することは，現段階では不可能に等しい．そこで，氷盤下における流出油拡散の室内水槽実験結果と本モデルによるシミュレーション結果を比較する．

実験で使用した油は機械用潤滑油で，油は毎秒24立方センチメートルの流量で124秒間流した．油は時間と共に油を注入した場所を中心に円上に拡散して行く．図7に拡散して行く油半径の時間変動を示す．シミュレーションは全水面が氷に覆われている条件（氷密接度1），それから水面に油が全くない条件（氷密接度0），ならびに水面に一定の割合で氷が浮いている条件において行った．本モデルによる流出油拡散のシミュレーション結果は，実験結果[1]と非常に良く一致している．その他の水面条件においても流出する油の量と氷密接度との関係による油の拡散の特性を的確に捉えている．特に氷密接度0.2での結果がその典

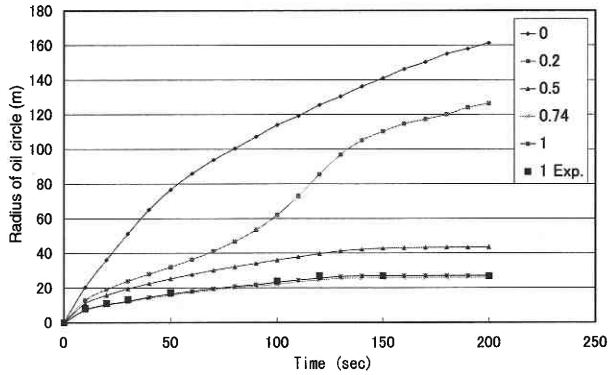


図7　Experiment and simulations of oil spreading with ice concentration

型的な例で，流出初期は油の量が多いため，氷の底面まで油が広がる図1のステージ4の状態となり，油がゆっくり拡散して行くが，拡散領域が広がるにつれ，油と氷との関係がステージ3に，またステージ2となり拡散速度が速くなる．その後，拡散が進むにつれ，油と氷との関係がステージ1となり，氷と油と空気との間の界面張力と，氷と海水との間の摩擦力との比に合わせ拡散速度が遅くなって行く．

6. おわりに

氷海域における流出油の拡散・移動の数値シミュレーションモデルを新たに開発し，その有用性を確認した．新たに開発したモデルは，海面全体が海氷に覆われている海域，海面に一部に海氷は浮いている海域，海面上に全く氷がない海域の全ての氷海域での流出油の拡散・移動のシミュレーションができる世界で唯一のモデルである．流出油と海氷との関係を氷密接度と流出する油の量によって，4つのステージに分け，それぞれのステージごとに運動方程式の外力項を変えることで，異なる状況における流出油変動のシミュレーションを可能にした．数値シミュレーションでは，室内水槽での実験結果とよく合う結果が得られ，流出する油の量と氷密接度との関係による油の拡散を的確に捉えている．今後，実海域などへの適用を進めておく予定である．

（2004年9月15日受理）

参　考　文　献

1)　泉山耕，境茂樹，“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, 1998