

氷盤下に拡がった油の流れによる変形及び移動に関する数値計算

松崎義孝¹・小笠原敏記²・堺 茂樹³

サハリン島沖合での石油・天然ガスの生産が本格化しているが、サハリン島付近では南下する東カラフト海流が卓越しているため、流出事故が発生した際には北海道オホーツク海沿岸にも多大な環境被害を及ぼす可能性がある。また、冬期間この海域は氷に覆われ、氷盤下に拡がった流出油が海流によって南下する可能性もあるが、氷盤下での流出油の位置及び拡がりの範囲を目視で確認することは難しく、数値計算による予測が有力な手段といえる。そこで、本研究では流れによる氷盤下の油層の変形及び移動に関する数値計算手法を構築し、実験結果との比較によりその有用性を検証すると共に、油層の移動に及ぼす流速、流出油量、油の物性の影響を検討した。

1. 序 論

近年、サハリン島北東部沖合の大陸棚における石油及び天然ガスの生産が本格化し、これまでは夏期のみ操業であったが、現在は通年生産の段階へと進んでおり、生産及び輸送の活発化に伴い、油流出事故の可能性の増大も懸念されている。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は若土(2001)によるオホーツク海循環の模式図に開発鉱区位置を加筆したものである。開発鉱区内あるいはその付近での油流出事故であっても、流出油が東カラフト海流によって南下し、北海道のオホーツク海沿岸にも多大な環境被害を及ぼす可能性があることが容易に想像される。また、冬期間この海域は氷に覆われるが、この時期に油流出事故が発生した場合、流出油は氷盤下を拡がり、さらに東カラフト海流によって北海道沿岸に達することも想定されることから、氷盤下に拡がった油層に対する流れの影響を検討する必要がある。

氷盤が存在しない通常海域では流出油の位置及び拡がりの範囲は目視で確認できるが、氷盤下での状況は直接的な確認が難しく、数値計算による予測が有力な手段といえる。本研究では氷盤下に拡がった油層に流れが作用した場合の油層の変形及び移動に着目しているが、流れの影響を受けながら氷盤下に拡がる場合も想定されることから、氷盤下での拡がり流れによる変形・移動の両者を含む数値解析法の確立が望ましい。氷盤下での油の拡がりに関しては、堺ら(2003)が既に計算手法を提案しており、実験結果との比較によりその有効性が検証されている。そこで、本研究では上記の計算手法に流れの影響を組み込み、氷盤下の油層の流れによる変形及び移動に関する数値計算手法を構築し、堺ら(1999)の実験結果との比較によりその有用性を検証すると共に、油層移

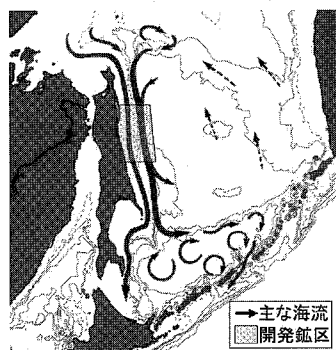


図-1 オホーツク海の流れ分布(若土(2001))とサハリン島北東部大陸棚の開発鉱区

動に及ぼす流速、流出油量、油の物性の影響を検討する。

2. 油の変形及び移動に関する従来の実験結果

堺ら(1999)は平坦な氷盤下に油を流出させた後、氷盤を一定速度で移動させることによって相対的な意味での定常な流れを再現する実験を行い(図-2)、以下のことを報告している。流速が小さい場合には変形、移動とも発生しないが、流速が大きくなるにつれて油層が流れに垂直な方向に延伸し、ほぼ一定な形状で移動(図-3の左)、変形しながら移動(同図中央)、分裂しながら移動(同図右)、という変形・移動パターンがある。また、油層の分裂がなく移動する場合、移動速度はほぼ一定である。変形・移動パターンは油層の初期面積と流速によって図-4のように分類でき、油の初期面積により

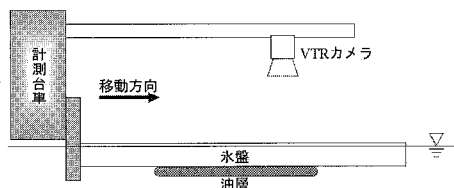


図-2 油層の変形・移動の観測方法

1 学生会員 岩手大学大学院工学研究科 建設環境工学専攻
2 正会員 博(工) 岩手大学助手 工学部建設環境工学科
3 正会員 工博 岩手大学教授 工学部建設環境工学科

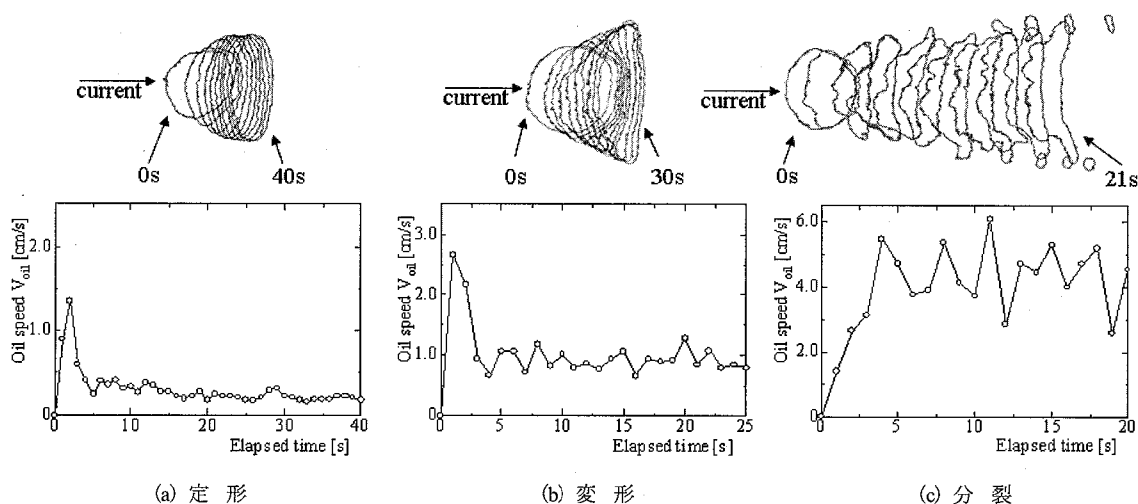


図-3 油層形状と移動速度の時間的变化

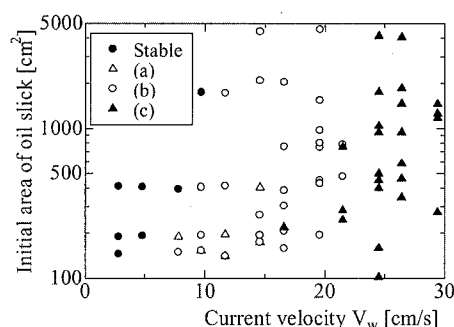


図-4 油層の初期面積と流速による変形パターンの分類

若干の差はあるが、流速が 10 cm/s 未満の場合はほぼ静止状態にあり、20 cm/s を超えると分裂する。

3. 基礎式と流れの影響のモデル化

氷盤下での油の拡がりに関する堺ら (2003) の数値計算では、N-S 方程式と連続の式を基礎式とし、油層厚は平面的な拡がりに比べて非常に薄いことから、長波近似した平面 2 次元長波理論が用いられている。粘性項に泉山・堺 (1998) の理論解を用いると、基礎式は次のようになる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h} \right) + \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{4\mu_o M}{\rho_o h^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{h} \right) + \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{4\mu_o N}{\rho_o h^2} = 0 \quad (2)$$

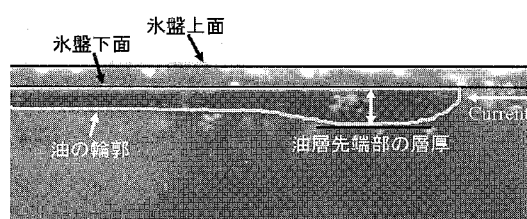


写真-1 油層に流れが作用した際の油層の縦断形状の例

$$\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここで、 M 、 N は x 、 y 方向の各流量フラックス、 h は油層厚、 ρ_o と ρ_w は油と水の密度、 g は重力加速度、 η は油層底面の位置、 μ_o は油の粘性係数である。上式をスタガード格子で差分化し、leap-frog 法を用いて計算する。また、油層周縁部では、油—水—水の界面張力を考慮する (堺ら、2003)。

上記の計算モデルでは、水は油層に浮力を与えることのみで表現されており、水と油の動的干渉は考慮されていないため、油層に流れが作用した場合、その力を直接表現することはできない。そこで、油層に流れが作用した際に、流れに面する周縁部 (以下、先端部) での油層厚が増大することに着目し、先端部の厚さを増加させることによって流れの影響を表現することを試みた。

流れによる先端部の層厚増加に関する実験は、海上技術安全研究所の小型氷海水路において実施した。流れが作用した際に、流れに対して垂直な方向への油層の延伸及び分裂が生じないよう、氷で作成した隔壁によって水路幅を狭くした状態で実験を行った。水路側面の観測窓から油層の変形を VTR カメラで記録し、厚さの変化を読み取った。なお、この実験においても、氷盤を一定速度で移動させることによって相対的な意味での定常流を

発生させた。流れによって油層が流下し得る状態とした場合（油量は2リットル）と、後流側に設けた堰によって流下を制限した場合（油量は2リットルと4リットルの2種類）の計3条件で実験を行った。写真-1は油層に流れが作用した際の油層の縦断形状であり、先端部の層厚が増大していることがわかる。図-5は先端部の層厚増加量と流速の二乗の関係を示す。油量及び堰の有無によってばらつきはあるが、全体的には図中の近似直線で表現できる。なお、堺ら（1999）の実験では、流速が10 cm/s未満の場合は油層の変形、移動とも発生しなかったため、本計算では10 cm/s未満では先端部の油層厚増加を与えない。

本計算では流速に対応した油層厚を図-5中の近似直線から求め、この値を先端部に与えることにより、流れの影響を反映させた。なお、図-5は流れが油層に垂直に作用した場合の結果であるので、図-6の(a)の箇所では流速そのものから、(b)の箇所では先端部に対する垂直成分から油層厚増加量を求める。また、油層が移動すると油層に対する流れの相対速度が減少することから、移動中の流速は油層移動速度を差し引いた相対速度とした。

流速が20 cm/sを超えると油が分裂し、連続流体としての運動ではなくなるため、以下の検討では流速が20 cm/s以下の場合を対象として計算した。なお、若土（2001）によると、オホーツク海での9～12月の海流は20～30 cm/sとされており、また堺ら（1999）によると、冬期では海底面付近の流速は20 cm/s以下である。

計算は以下の手順で行った。

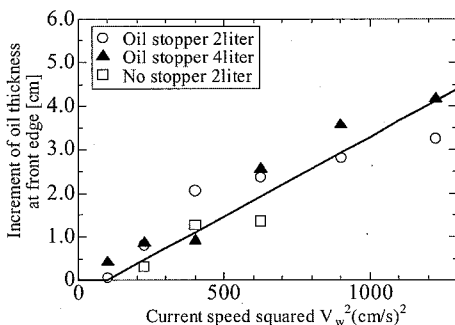


図-5 先端部の層厚と流速 V_w の二乗の関係

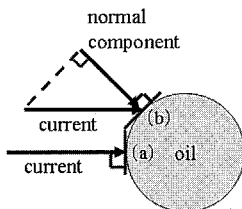


図-6 流速の考え方

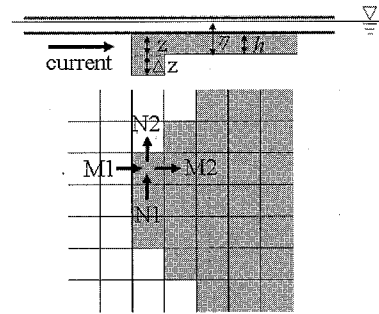


図-7 先端部での層厚の与え方と流量フラックスに対する境界条件

- ①初期形状を円形とし、密度、界面張力から求まる静止時の油層厚に対応した油量を各セルに与える。
- ②図-7上段のように、先端部セルのみに流速に対応した油層厚を加える。ただし、この値は流量フラックスの計算のみに用いられ、セル内油量は変化させない。
- ③先端部を含む周縁部セルでは式（1）、（2）の左辺に界面張力を加える。
- ④式（1）、（2）、（3）を用い、leap-frog法により流量フラックスとセル内油量を交互に計算する。ただし、図-7下段のように、N1、M2は通常通り計算し、M1は0、N2は油量が静水時の半分以下の場合は0とする。
- ⑤先端部セルの油量が限界値（セル面積 $\times 10^{-8}$ m）より小さくなった場合には、そのセルには油がないものとし、その一つ流下側セルを先端部セルとする。

4. 計算結果

図-8は密度 $\rho_o = 878 \text{ kg/m}^3$ 、界面張力 $\sigma_n = 0.05282 \text{ N/m}$ 、粘性係数 $\mu_o = 0.254 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の場合の油層の変形及び移動に関する実験結果と計算結果の比較を示している。なお、同一の座標系で表記すると、図-3のように油層形状の輪郭が重なるため、右へ一定の間隔でずらして表記した。油層に流れが作用すると、先端部での層厚増加の影響が次第に油層内部へ伝わり、後端部の厚さも増加し、後端部での油層内外の圧力差が界面張力を超えると下流側へ流下する。また、先端部が扁平になるに従い、流れに垂直な方向の両端でも層厚が増加し、これによって流れに対して垂直方向へ延伸しながら移動していく様子がよく再現されている。また、図-8には初期油層面積（油量に対応）が400～4,500 cm^2 の範囲の結果が示されているが、再現精度は総油量にかかわらず良好であり、本計算手法の妥当性を示していると言える。

油層の図心の変化から求めた移動速度を図-9に示す。なお、図-9中の各図は図-8のそれぞれに対応している。流れが作用した直後、実験での移動速度は計算結果より

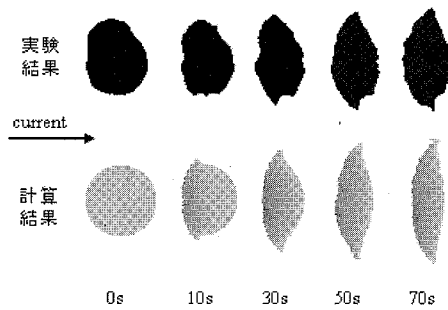
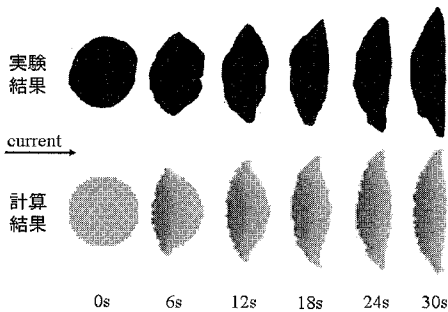
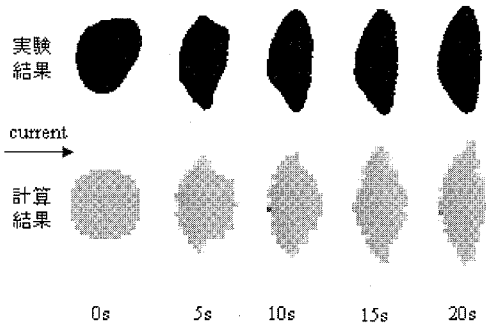
(a) 初期面積 4500cm^2 , 流速 20cm/s (b) 初期面積 1500cm^2 , 流速 20cm/s (c) 初期面積 400cm^2 , 流速 15cm/s

図-8 油の変形の比較

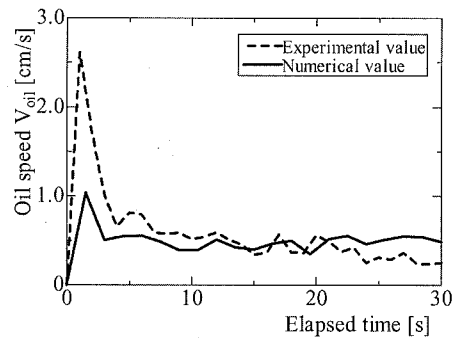
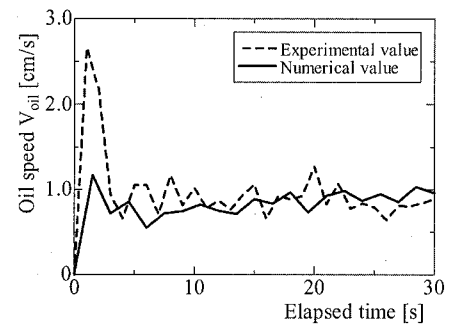
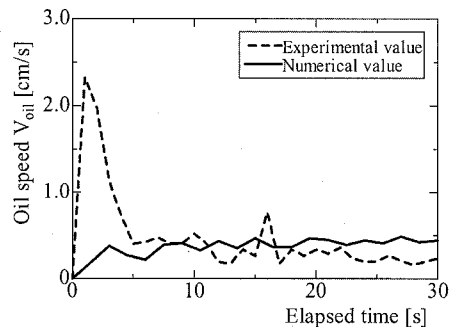
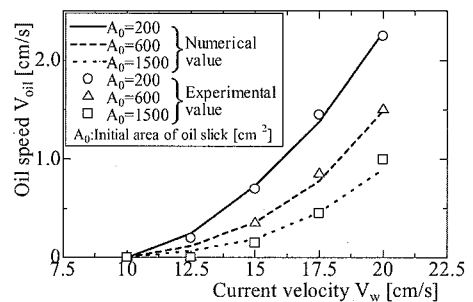
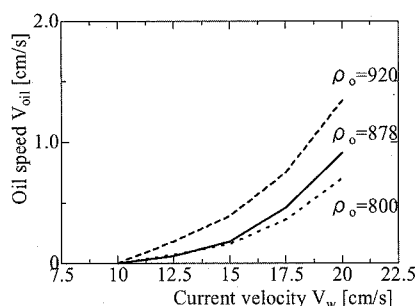
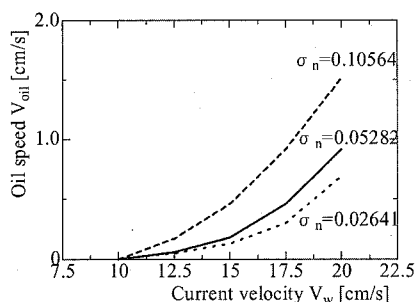
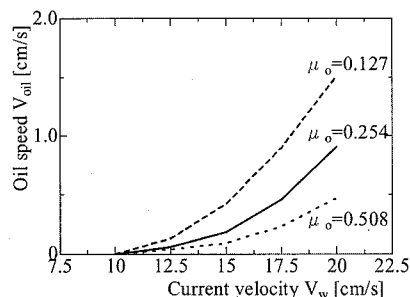
(a) 初期面積 4500cm^2 , 流速 20cm/s (b) 初期面積 1500cm^2 , 流速 20cm/s (c) 初期面積 400cm^2 , 流速 15cm/s

図-9 油の移動速度の比較

大きい、その原因は以下のように考えられる。図-3の上段に示すように、流れが作用した直後でも、下流側の移動量は大きくはなく、油層全体が移動した訳ではない。初期に見られる先端部での大きな移動は流れの作用により層厚が急激に増加し、それに伴い面積が減少したこと、油層が流れに垂直方向に延伸することによる変化も含まれる。したがって、この段階の図心の移動は、上記の効果を含む見かけの移動と見なすことができる。しかし、ある程度移動が進むと、計算値は実験値とよく一致している。

図-10は油層の移動が定常になったときの移動速度に対する流速及び油層初期面積の影響を示している。実験

図-10 流速 V_w 及び油層の初期面積 A_0 に対する油層の移動速度 V_{oil}

図-11 移動速度 V_{oil} に対する油の密度 ρ_o の影響図-12 移動速度 V_{oil} に対する界面張力 σ_n の影響図-13 移動速度 V_{oil} に対する油の粘性係数 μ_o の影響

結果は、流速が大きいほど、あるいは初期面積が小さいほど移動速度は速いことを示しており、計算結果もまったく同一の傾向である。また、定量的にも極めてよく一致しており、本計算手法によって流れによる油層の変形・移動を精度良く予測できることが検証された。

5. 油の物性と移動速度の関係の検討

流れによる氷盤下の油層の変形・移動特性は、油の物性によって異なると考えられるが、堺ら (1999) の実験は1種類の油を用いた実験であるため、油の物性の影響は検討されていない。また、この問題に関する既往研究も現在のところ皆無である。そこで、本研究で提案したモデルが実験結果を良く再現していることから、本モデルによる計算によって油の物性の影響を検討する。

変形・移動に関連する油の物性値としては、密度、界面張力、粘性があげられる。これらの値を種々変化させた計算結果が図-11, 12, 13である。なお、流れが作用する前の油層厚は、密度、界面張力によって異なるが、流れによる油層厚増加量は図-5と同一とみなした。図-11は移動速度と流速の関係に対する密度の影響を示しており、密度が大きいほど移動速度が大きいことが分かる。また、図-12では界面張力が大きいほど、図-13では粘性係数が小さいほど、移動速度が大きい。

6. 結 論

本研究での主要な結果は、以下のようにまとめられる。

1. 氷盤下の油層に流れが作用した場合の先端部での層厚増加量は流速の二乗の関数によってほぼ表現できる。
2. 氷盤下の油層に対する流れの影響を先端部での層厚増加で表現した変形・移動予測モデルは変形形状及び移動速度に関する実験結果を精度良く再現している。
3. 本数値モデルによると、油の密度、界面張力、粘性係数によって流れによる油層の移動速度が異なる。

以上のような成果が得られたが、今後の課題もいくつか残されている。これまでの実験及び数値解析では平坦氷 (氷底面が水平) 下での現象を扱っているが、オホーツク海での氷盤底面には大小様々な凹凸があり、このような氷盤底面形状の影響を考慮する必要がある。また、本数値モデルでは、水の存在は油層に浮力を与えることのみで表現されており、水と油の動的干渉は考慮されていない。しかし、氷盤底面に凹凸がある場合には、底面形状の影響によって局所的に流れ場が変動し、それによる流体力の変化が油層移動にも影響を与える可能性がある。従って、流れ場の計算と油層に対する流体力の計算の両者を含むモデルの構築が必要といえる。

謝辞：本研究での実験に当たり、独立行政法人海上技術安全研究所流体部門氷海技術研究グループ泉山耕氏、金田成雄氏をはじめ関係各位の多大な協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。

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，海岸工学論文集，第45巻，pp. 921-925。
- 堺 茂樹・花井宏太・笹本 誠・金田成雄・泉山 耕 (1999)：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，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1076-1080。
- 堺 茂樹・彭 瑜・岡本 敦・笹本 誠・泉山 耕 (2003)：氷板下の油拡散に関する数値計算，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1276-1280。
- 若土正曉 (2001)：戦略的基礎研究「オホーツク海水の実態と気候システムにおける役割の解明」最終報告書