

14 氷板下の流出油の拡散

海洋開発研究領域 氷海技術研究グループ
岩手大学
工学院大学

* 泉山 耕、金田成雄
堺 茂樹
金野祥久

1. はじめに

ロシア・サハリン島沖の大陸棚における海底資源開発が本格的に動き始めている。鉱区の一つである Sakhalin II では、1999 年に原油の商業生産が開始され、2000 年には日産 8 万バレル、年産 140 万トンの生産量が記録された (Sabirova, 2000)。本開発には、わが国のエネルギー供給の多角化という期待があるが、その一方、油流出事故による海洋汚染の可能性が危惧されている。サハリン大陸棚を含むオホーツク海は、冬季には流水に覆われる海域である。石油の生産は、現在は無氷季に限定されているが、Sakhalin II では、2004 年から通年生産への移行が予定されている (村上, 2000)。氷の存在する海域において油流出事故への対策についてのわが国における研究・技術開発は極めて立ち遅れた状態にある。

このような状況に鑑み、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及び当所の協同研究として、水中流出油の挙動と回収手法に関する研究を平成 12 年度より開始した。本報告では、この研究の中において、岩手大学及び当所が担当する、水中に流出した油の拡散挙動に関する研究結果を報告する。本研究は、当所が担当する水槽における実験と、岩手大学担当の数値計算を組み合わせ実施している。本報告では、氷盤に覆われた海域に油が流出し、氷と水の界面に沿って拡散する状態について、水槽実験及び数値計算両者による研究結果を報告する。

2. 研究の手法

2. 1. 水槽実験

実験は、当所の氷海船舶試験水槽において実施した。実験においては、水槽内に製氷した氷板下の一点から油を流出させ、その拡散挙動を、水槽

室天井及び水槽底面の観測窓の下に設置した VTR カメラで撮影した。撮影された画像は、各実験の前に撮影しておいた格子状スケールの画像と比較することにより、油の拡散領域・面積のデータを得た。なお、本実験では、氷海水槽において通常に実施される船舶等の模型実験に用いるいわゆる「模型氷」ではなく、淡水氷を用いた。淡水氷は透明度が極めて高く、油の挙動の氷板を通しての観測に何ら支障は無い。

実験は、平坦・水平な底面を有する氷板と、凹凸のある底面を有する氷板についてそれぞれ実施した。氷板下面における凹凸は、氷板の部分的断熱により形成した。具体的には、製氷開始後厚さ 10 mm 程度にまで平坦氷板を成長させた時点で、氷板上に発泡ウレタン片を設置し、さらに製氷を続けた。この冷却の過程において、発泡ウレタン片が置かれた下の氷は、これによる断熱効果で成長速度が鈍り、断熱されていない氷との成長量の差により氷板下面に凹凸が生じる。発泡ウレタン片のサイズ・厚さ・分布を変えることにより、氷板底面の凹凸を変化させた。このような手法により製氷した氷板下面の凹凸の例を図-1 に示す。

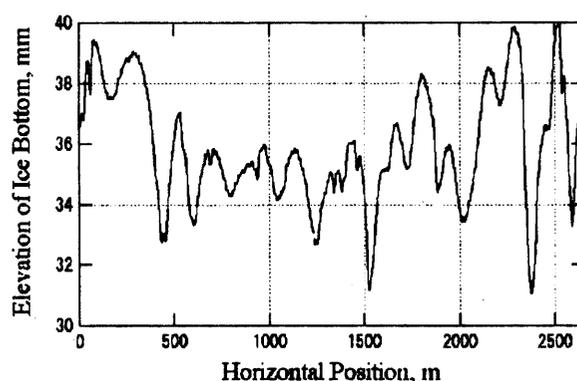


図-1 氷板下面の凹凸

供試油は機械用潤滑油であり、その 0℃における密度及び粘性係数は、それぞれ、0.890 g/cm³ 及び 129 mPa·sec である。実験においては油を、一定流量で一定時間流出させた。氷板下に拡がる油の面積は、流出継続中ばかりではなく、流出停止後も速度は鈍るものの拡大を続ける。流出継続中及び流出停止後の状態を、それぞれ、定流量状態 (constant-discharge mode) 及び定体積モード (constant-volume mode) と呼ぶ。本報告では、定流量状態についての結果を報告する。

2. 2. 数値計算

本研究における数値計算の手法について、以下にその概要を述べる。油の運動の基礎式として、Navier-Stokes 式及び連続の式を考える。油の運動について、鉛直方向 (油層厚方向) の流速成分の変動は他の成分の変動に比べて小さい、また、水平方向の粘性項において流速の鉛直方向の変化に比べて水平方向の変化が小さい、と仮定してそれぞれ無視し、油層の上面から底面まで積分すると最終的には次の式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial x}(vM) &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f_x}{\rho} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial x}(vN) &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f_y}{\rho} \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 u 、 v 、 M 及び N は、それぞれ、深さ方向に平均した x 及び y 方向の油の流速、流量フラックス、 h は油層厚、 H は油層底面の深さ、 f_x 及び f_y は、それぞれ、油に働く外力の x 及び y 方向成分である。本計算では、外力としては、油の粘性に基づく力及び界面張力を考えている。

上記基礎式を数値計算するにあたっての差分化は、空間に関してはスタッガード格子系を、時間に関してはリーブフログ法を用いた。計算では対称領域を矩形格子で分割し、格子中央点に氷の下面位置を与えた。油の流出点に流量に見合った流量フラックスを与えてこれによる各格子各辺での流量フラックスを計算し、これに基づいて格子中央での油層厚を計算した。

3. 氷の下の油に働く界面張力

本研究の結果についての報告に先立って、氷板下に存在する油に働く界面張力について述べておきたい。開水域に流出した油の拡散挙動を支配する力としては、油の浮力、慣性力、流れ・風等による剪断力等があるが、油に働く界面張力も重要な力である。開水域の場合、一般に、油膜縁部に存在する 3 種類の界面、すなわち、油・水、油・空気、水・空気の界面を考え、これらの界面に働く界面張力の合力による油の拡散挙動への影響を考える。これに対して氷の下の油の場合には、油・水、油・氷、氷・水という界面を考える必要がある。しかしながら、油・氷、氷・水という固・液間の界面における界面張力の決定には技術的困難さが伴う。

Yapa ら (1989) は、平坦な氷の下に油が流出して十分に長い時間が経った場合、油の最終的拡散領域は油の浮力 (水と油の密度差) と界面張力の釣り合いにより決定されるとして、上記の 3 種類の界面全てを考慮した正味の界面張力 (net interfacial tension) σ_N と油の拡散領域の関係を導いた。一方、Konno ら (2002) は、氷の下における油滴の形状の詳細観測を行うとともに、油滴形状を決定する方程式をもとに平坦な氷板下における油の最終的拡散領域を推定することを試みた。この結果、彼らは、油と氷の接触角がほぼ 180 度であり、また、この角度が 180 度であるならば、Yapa の与えた正味の界面張力は、水との界面における油の界面張力 σ の 2 倍で与えられる、すなわち、

$$\sigma_N = 2\sigma \quad (2)$$

であることを示した。

本研究における実験結果の解析における界面張力の取り扱いは、(2)式によっている。

4. 実験及び数値計算の結果と考察

3. 1. 平坦氷板下の油の拡散

平坦氷板下の一点から流出した油は、氷板の下面に、流出点を中心とする円形の油層を形成しながら拡がる。図-2 は、今回の実験において観察された油の拡がりの例である。Yapa ら (1989) によれば、定流量状態における油層の半径 R は次で与えられる。

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

ここに、 $\Delta\rho$ は水と油の密度差、 Q 及び μ_o は、それぞれ、油の流量及び粘性係数である。また、 t は流出開始からの経過時間、 K は比例係数である。式(3)の形式で実験結果を示した例を図-3に示す。流出開始から流出停止までの間、式(3)に示される比例関係が実験結果においても確認される。また、図中にはこの実験の条件に対する数値計算結果も示されているが、計算結果は実験における油層半径の変化を定体積状態も含めて良く現したものとなっている。

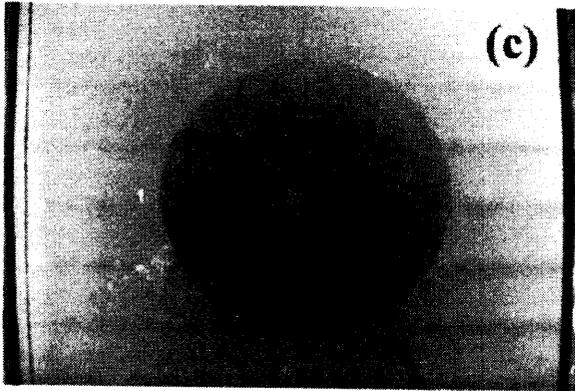


図-2 平坦氷板下における油の拡がり

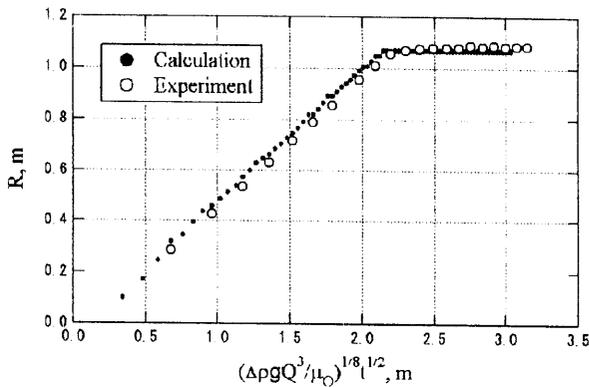


図-3 平坦氷板下面における油層半径の拡大

Yapaら(1989)は、式(3)における比例係数が一定値であるとしたが、泉山ら(1997)は、これが、以下のように与えられることを示した。

$$K = \left[\frac{1}{2\pi^3} \left(\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 2\alpha + 1} \right) \right]^{1/8} \quad (4)$$

ここに、 α は次式で与えられる無次元数である。

$$\alpha = \pi \frac{\sigma_N^2}{\Delta\rho g \mu_o Q} \quad (5)$$

各実験結果に対して図-3と同様のプロットを行い、データの傾斜としてそれぞれのケースについての K 値を求めた。解析結果を式(4)及び(5)の形式で示した図が図-4である。図中の実線は式(4)で与えられる理論曲線である。また、同図には、泉山ら(1997)による実験結果と数値計算結果も示した。

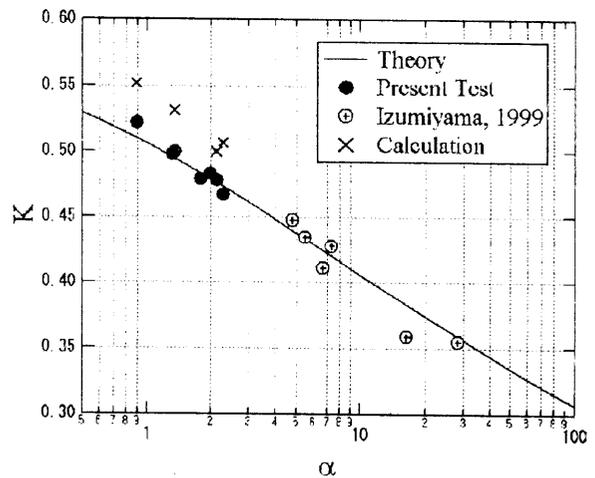


図-4 K値に関する理論・実験・計算結果

表-1 実験条件の比較

	泉山ら(1997)	本実験
$\rho, \text{g/cm}^3$	0.878	0.890
$\mu_o, \text{Pa}\cdot\text{sec}$	0.25	0.12
$\sigma_N, \text{N/m}$	0.088 - 0.113	0.05
$Q, \text{l/min}$	0.24 - 1.48	1.63 - 4.15
V, l	3.00 - 6.00	5.63 - 34.97
水	模型氷	淡水氷

図-4における実験結果は、今回の実験並びに泉山らによる過去の実験ともに理論との一致は良い。泉山らによる実験と今回の実験の条件を表-1に比較した。表中 V は流出させた油の全体積であり、

泉山らの実験に比べて、今回の実験において流出させた油の量が大きいことが判る。この点を含め、2種類の実験の条件は大きく異なる。このような違いにもかかわらず理論と実験結果との一致が良いことは、式(4)及び(5)で与えられる理論の普遍性を裏付けるものと言えよう。一方、数値計算結果は、理論値に比較して、5%程度高いK値を与えている。

3. 2. 凹凸のある氷板下の油の拡散

凹凸のある氷板下における油の拡散挙動は、平坦な氷板の下の場合と大きく異なるものとなった。図-5は、水槽実験時のVTR映像から切り出した油の拡散領域の画像例である。油が氷板底面の凹部を中心に拡散するため、油の拡散領域は不規則なアメーバ状のものとなる。



図-5 凹凸のある氷板下面での油の拡がり

油の拡散面積に対する氷板底面の凹凸の影響を調べるために、油の面積を計測してこれと同等の面積を有する円の半径 R_c を求めた。この結果に対して、図-4と同様に、パラメータ α の関数としてプロットした結果が図-6である。図中の実線は式(4)により与えられる平坦氷板下での拡散に対する理論解である。図より、凹凸のある氷板下における K 値は、平坦氷板下におけるものに比べて小さい、すなわち、油層面積の増加率が小さいことが判る。Kovacs (1981) は、氷板下面に凹凸がある場合、その下に流出した油が氷板底面凹部にトラップされる”pooling”について論じているが、図-6に示された結果は、この pooling の効果を表したものだと言えよう。

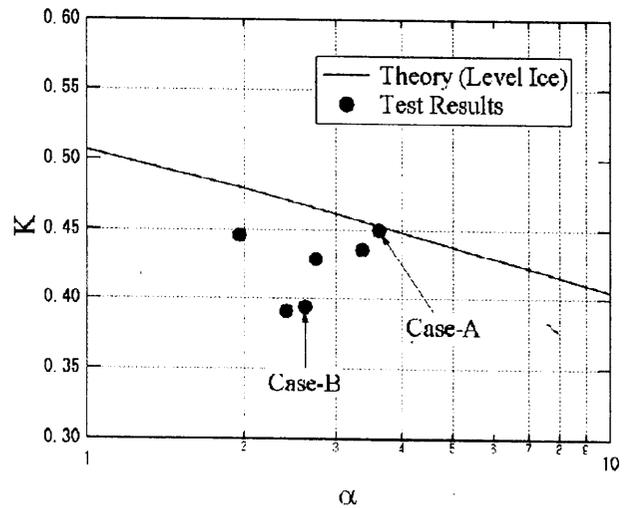


図-6 凹凸のある氷板下でのK値

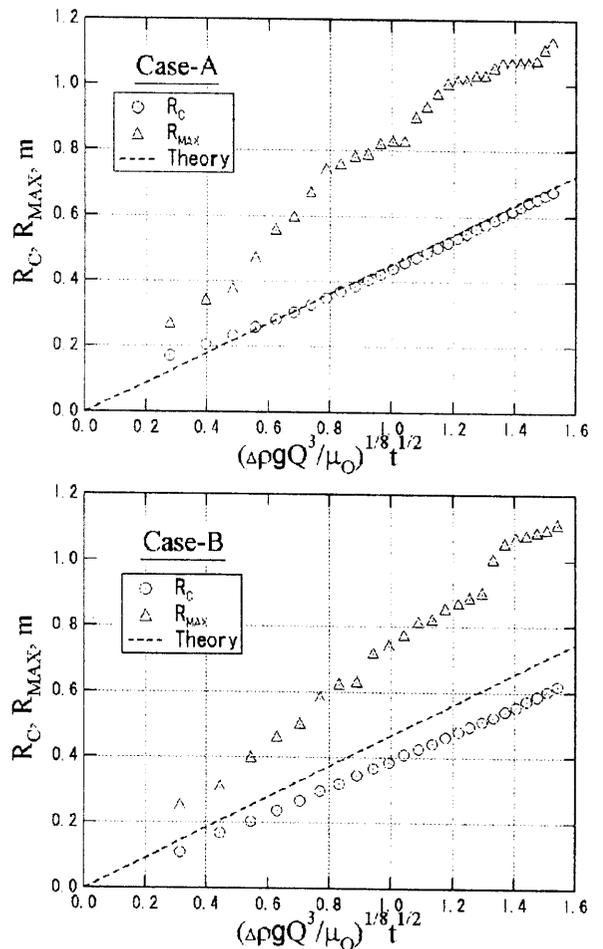


図-7 凹凸のある氷板下での R_c 及び R_{MAX}

図-6では、凹凸のある氷板下面で油の面積が平

平坦氷板下面におけるものに比べて減少することが示されたが、この一方、図-5からは、油の到達距離（流出源からの距離）という点では氷板下面の凹凸の存在が別の形で影響することが予想される。このため、流出点から油層の最遠点間での距離 R_{MAX} についても解析を行った。図-6に示したデータ点の中から、Case-A及びCase-Bについての結果を図-7に示す。なお、図中の破線は、平坦氷板下の油層半径に対する理論値である。Case-Aは、図-6に示されるように、油の面積と言う点においては平坦氷の場合と大きく変わるところは無く、図-7においても R_c と理論値との一致は良い。これに対し、 R_{MAX} の増大率は、 R_c を大きく上回り、油の流出点から最遠到達位置までの距離は、平坦氷板の場合に比べて、2倍近くまで伸びる。一方、Case-Bについては、油の面積と言う観点からは平坦氷板の場合に比べて小さいが、油の最遠到達位置と言う観点からは、やはり平坦氷板の場合を大きく超えて油が拡がること示されている。油の最遠到達位置は、実質的な意味での汚染領域とも言えるものであり、図-7に示された結果は、汚染領域の推定、油の回収といった観点から重要な知見と言えよう。

凹凸のある氷板下の油の拡がりについての数値計算結果（油の領域）の例を図-8に示す。また、図-9は図-8に対応した実験時の画像である。数値計算にあたっては、氷板下面の凹凸の計測結果に基づいて、計算メッシュの格子点において氷板下面位置として与えた。数値計算結果は、氷板下面の凹凸の存在による油の領域の不規則な形状を現したものとなっている。また、比較的横長の領域に広がるという傾向はとらえてはいる。しかしながら、油の領域の最遠点、形状の詳細といった点では、実験時の状態を上手く再現したものとは言えない。

このように、油の拡散領域の形状については、必ずしも実験結果を再現した結果が得られているとは言えない点はあるが、油の領域の面積と言う点では実験と比較的良好一致した結果が得られた。図-10は、凹凸のある氷板下面における油の領域に対する換算半径 R_c を実験結果と計算結果について示したものである。油の面積が大きい領域で

は多少の違いは見られるものの、全体的に、両者の一致は良い。

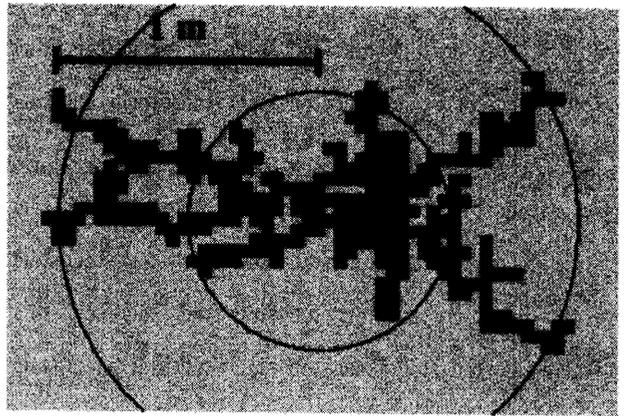


図-8 凹凸のある氷板下の油の拡がりについての数値計算結果の例

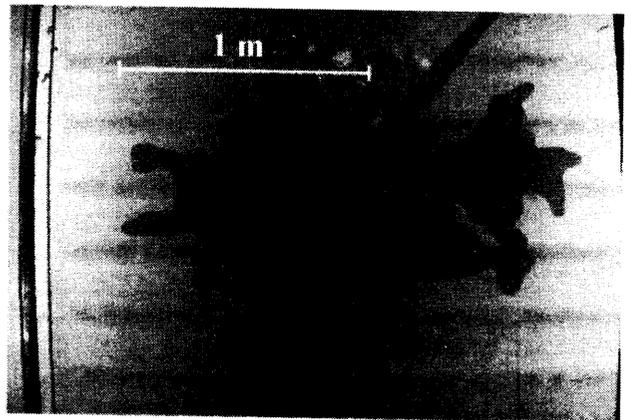


図-9 数値計算に対応した実験時画像

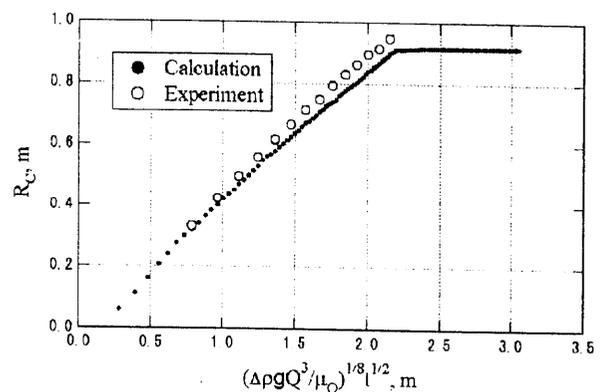


図-10 凹凸のある氷板下面での油層の面積

以上のように、今回の数値計算結果は、油層形

状の再現と言う点では実験結果との対応は必ずしも良くないが、油の面積と言う点では比較的良く一致するものとなっている。一方、油層形状については、本計算が、実験時の氷板下面凹凸の計測間隔に合わせて5 cm 間隔のメッシュに対して行われていることによるところの影響が大きいと考えられる。この場合、当然のことながらこのサイズを下回るような油層形状の詳細を表現することはできない。また、油が氷板底面の凹部を辿りながらその面積を拡大することを考えると、計算メッシュのサイズを下回る規模の凹部があった場合、実験ではこれを通じて油の領域の拡大があったとしても、計算ではこれが再現されないことも有り得る。このような違いは、当然のことながら、その後の油層拡大の方向にも影響することとなる。

今回の計算では、氷板下面の凹凸データを実験結果に基づいて二次元的に与えたため5 cm 間隔のメッシュによる計算となったが、凹凸の一次元データの統計的特徴に基づいて凹凸を再現する手法も考えられる。この場合の計算メッシュは今回の計算よりも細かくすることが可能であり、今後このような方法での計算も行うことにより、計算結果のさらなる検証としたい。

4. おわりに

本報告では、氷の下に流出した油の拡散挙動に関する、実験及び数値計算による研究成果について報告した。本報告は、運輸施設整備事業団による研究制度「運輸分野における基礎的研究推進制度」による研究の一環として実施されたものである。ここに、同事業団に謝意をするものである。

参考文献

- 泉山他 (1997) : 氷板下における流出油の拡散について. 平成9年度秋季 (第70回) 船舶技術研究所研究発表会講演集, 194-199 頁.
- 堺他 (2001) : 氷盤下における油拡散に関する数値計算. 寒地技術論文・報告集, Vol. 17, 340-344 頁.
- 村上 隆 (2000) : サハリン大陸棚における石油・天然ガスの開発と環境. 北海道技術士センター, 北方海域技術研究会報告, 第1号, 31p.
- Konno, A. and Izumiyama, K., 2001. On the Relationship of the Oil/Water Interfacial Tension and the Spreading of Oil Slick under Ice Cover. Proc. of the 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, pp. 275-282.
- Kovacs, A., 1981. Pooling of Oil under Sea Ice. Proceedings of the 6th International Conference on Port and Harbour Engineering under Arctic Conditions, vol. 2, pp.912 - 922.
- Sabirova, E. and Allen, M. (2000) : Year end 2000 - Update on Sakhalin oil and gas project. U.S. & Foreign Commercial Service and U.S. Department of State.
- Yapa, P. and Chowdhury, T., 1989. Oil Spreading under Ice Covers. Proc. of 1989 International Oil Spill Conference, pp. 161-166.