

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

泉 山 耕*・堺 茂 樹**

1. 緒 言

ソ連からロシアへの政治・経済的変革に伴い, 近年, 南オホーツク海における各種活動が活発化の兆しを見ている。サハリン島北東部沖合いの石油・天然ガスの開発は, 生産物分与協定の発効後急速に本格化し, 早ければ今世紀内にも商業生産の開始が予想されている。また, 北方四島を巡る動きも盛んである。これは領土に関わる複雑な問題であるが, 四島近海の漁業枠組みの妥結, 共同開発の提案など実質的な意味では着実な進展が見られる。このような開発及び交流の動きの中で, 北海道近海の南オホーツク海における経済活動とこれに伴う海上交通が, 近い将来飛躍的に増大するものと考えられる。

一方, これらの活動に伴う環境汚染, 特に油流出による環境汚染の可能性も危惧されるところである。日本海におけるナトコ号の事故のもたらした被害はまだ記憶に新しい。サハリン沖の油井あるいはタンカー等からの油流出があった場合, サハリン島の東の海域には強い南向きの海流があることから, 北海道東部のオホーツク沿岸域にまで汚染が及ぶことが危惧される。また, 北方四島周辺において, 漁船等から燃料油等が流出する可能性もあろう。この場合, 流出量は比較的少なからうが, 陸域に近く, またこの海域が良好な漁場であることから迅速な対応が求められることとなる。

冬季オホーツク海は北海道沿岸域まで流水に覆われるが, これは船舶・海洋構造物等にとっては過酷な環境であり, 事故の発生は, 通常海域に比較して, 可能性が高いとさえ言えよう。しかし, 氷の存在する水域における油流出問題の知見は極めて不十分な状態にある。この問題についての研究は, 北極海域での油田発見を受けて 1970 年代に研究が開始された時期があったが, その後研究活動は停滞した。また, 我が国ではこの種の研究の例は極めて限られている。このような観点から, 運輸省船舶技術研究所では, 平成 8 年度より「寒冷海域での油流出に関する研究」を行っている。

本研究では上記研究の一環として, 氷板下に油が流出

した場合の油の拡散挙動を扱った。油の拡散挙動に関する情報は, 油流出事故の際の回収手法・汚濁防止対策を決定する上で重要である。特に油が氷の下に流出した場合は, 拡散領域の直接的観測が困難であり, 何らかの方法での推定が必要となる。通常水域における油の拡散に関しては多くの研究があり, 様々な推定式等も提案されている。しかし, 氷が存在する水域での油の拡散挙動は通常水域とは全く異なることが予想される。そこで, 本研究では, 氷板下の静水中における油の軸対称拡散について水槽実験を行い, また理論解を求めて実験結果との比較・検討を行った。

2. 実験及び Yapa の解との比較

水槽実験は, 運輸省船舶技術研究所氷海船舶試験水槽において実施した(泉山ら, 1996)。本水槽は, 長さ 35 m, 幅 6 m, 水深 1.8 m の水槽部が冷凍庫内に封設された施設である。冷凍庫内室温は -35°C まで冷却可能であり, これにより水槽水表面に氷を成長させることができる。水槽の底部及び側壁には, それぞれ 8ヶ所の観測窓があり, これを通して水中での現象を観察できる。

実験の概要を図-1 に示す。実験では, 氷板の上面に置いた油容器の下面のオリフィスより水中の小孔を通して油を氷板下に流出させた。油は氷板下面の流出源を中心に軸対称のスリックとなって拡散するが(図-2), その拡散挙動を観測窓より VTR 撮影した。この映像を格子状のスケール画像と比較してスリックの面積を求め, ス

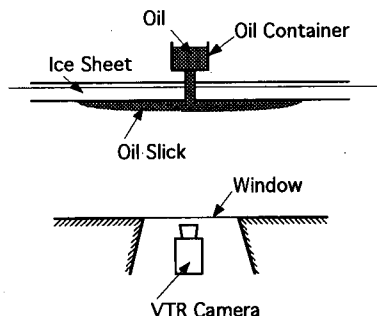


図-1 実験の概要

* 正会員 工修 運輸省船舶技術研究所氷海技術部 主任研究官
** 正会員 工博 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科

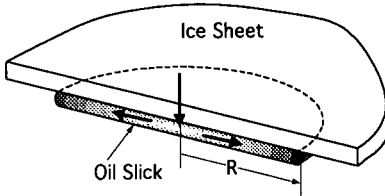


図-2 氷板下における油の軸対称拡散

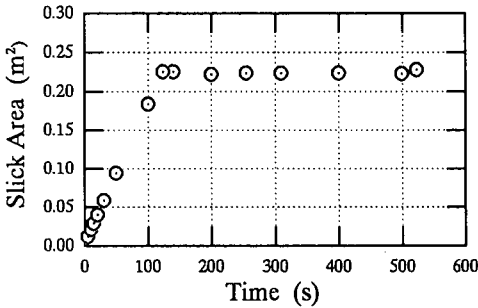


図-3 実験結果の例

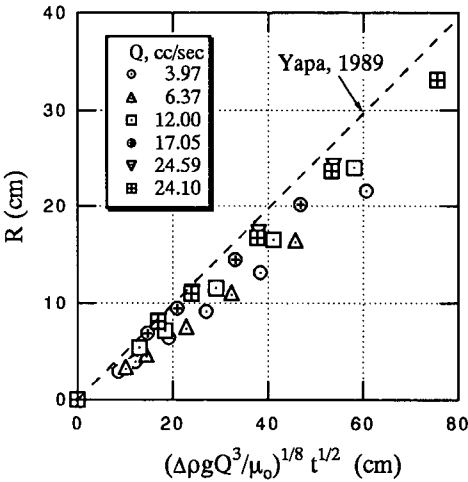


図-4 実験結果の比較

Yapa and Chowdhury (1989) 及び Yapa et al. (1993) は、氷板下での油の軸対称拡散問題について、本研究と類似の実験を行うとともに理論解を求めた。彼らの理論解によると、流量 Q の定流量状態におけるスリック半径 R は、流出開始からの経過時間 t により次のように与えられる。

$$R = k_1 \left[\frac{\Delta \rho g Q^3}{\mu_0} \right]^{1/8} t^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\Delta \rho$ 、 g 及び μ_0 は、それぞれ、水と油の密度差、重力加速度及び油の粘性係数である。また、 k_1 は比例定数であり、実験結果より $k_1 = 0.494$ を得ている。図-4 は、式 (1) の形式で本研究における実験結果をプロットしたものである。定性的には、今回の実験結果も式 (1) の比例関係を満足することが判る。しかし、比例定数 k_1 については、いずれのケースについても Yapa らにより求められたものより低い。

定体積状態については、Yapa らは次の関係を導いた。

$$R = k_2 \left[\frac{\Delta \rho g V^3}{\mu_0} \right]^{1/8} t^{1/8} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 V は油の全体積、 k_2 は比例定数である。この理論解によれば、流出停止後もスリックは上限無く拡大を続けるが、実現象では定体積状態のスリック半径には上限が存在する。

3. 界面張力の影響を考慮した理論解

開水域での油拡散は、時間経過に伴い主要な拡散力及び抗力が重力—慣性力、重力—粘性力、界面張力—粘性力と変化するため、その各々の状態毎に取り扱われる(埜口, 1991)。これに対して氷板下での拡散では、慣性力の影響は流出直後のみに現れ、重力—慣性力状態の継続時間は極めて短い。また、水—油—空気の界面張力は拡散を促進する方向に作用するが、水—油—氷の界面張力の作用方向は逆となり、拡散に対する抗力となるため、界面張力—粘性力状態は存在しない (Hoult et al., 1975)。従って、氷板下での油拡散では重力—粘性力状態が卓越するといえる。

Yapa らは、軸対称拡散における重力—粘性力状態でのスリック半径の時間的変化を式 (1) 及び (2) としているが、前述のように本研究での実験結果に比べて若干過大な値を与える。このことは、重力—粘性力状態での拡散現象では粘性力以外の抗力が作用していることを示唆しており、その要因としては水—油—氷の界面張力が考えられる。

以下では、重力—粘性力状態に対する Yapa らの解析に界面張力の影響を加えた新しい解を誘導する。油の上面が氷板によって覆われていることから、油の蒸発量は少なく、風化も遅いことから、油の量及び物性は一定と

リック半径 R を計算した。実験では、流出開始 $t=0$ から時刻 $t=t_0$ まで油を一定流量で流出させ、これ以降は油の流出を停止し、油の全体積を一定値に保った。以下、油が流出している状態 ($0 \leq t \leq t_0$) を定流量状態 (constant-discharge mode)、流出停止後 ($t_0 \leq t$) を定体積状態 (constant-volume mode) と呼ぶ。

油の流量を4から24 cm³/sに変化させて、合計6回の流出実験を行った。流出させた油の総体積は5つのケースで3,000 cm³、他の1つでは6,000 cm³である。図-3に油のスリック面積の経時変化の例を示す。この例では流出開始後120秒で流出を停止し、定体積状態としている。

見なせる(Ramseier, 1973)。また、慣性力は流出直後のみに現れるため、ここではその影響を無視した。

Yapa and Chowdhury (1989) に倣い、軸対称の円柱に拡散する油の半円部分に作用する重力、粘性力を以下のように与える。まず、スリック厚を h とすると、半周上の重力 F_g (浮力による拡散力) は式 (3) となる。油層内の流速分布を、氷との界面で零となるクエット流的な流速場を仮定し、氷と油の界面上での油の流速 u_i を用いて粘性応力 τ_v を式 (4) の形で与え、スリック厚が空間的に一定であると仮定すると、スリックの半円部分に作用する粘性力 F_v は式 (5) となる。さらに、スリック半径の増加率は u_i に比例するとして (式 (6))、スリック半径と時間の関係を求めたのが Yapa の解である。

$$F_g = \frac{\pi \Delta \rho g R h^2}{2} \quad (3)$$

$$\tau_v = \frac{-2u_i \mu_0}{h} \quad (4)$$

$$F_v = \frac{-u_i \mu_0}{h} \pi R^2 \quad (5)$$

$$\frac{dR}{dt} = k_0 u_i \quad (6)$$

次に、上記の解に対する界面張力の影響を検討する。氷、水、油の3者間では3種類の界面張力が存在するが、それらの合力である正味の界面張力を σ_n とすると、スリックの半周上の界面張力 F_t は式 (7) となり、これと重力、粘性力との釣り合いから、式 (8) を得る。

$$F_t = \pi R \sigma_n \quad (7)$$

$$\frac{dR}{dt} = k_0 \left[\frac{\Delta \rho g}{2 \mu_0 R} h^2 - \frac{\sigma_n}{\mu_0 R} h \right] \quad (8)$$

定流量状態と定体積状態では、それぞれ式 (9)、(10) が成り立ち、また流量 Q 、全体積 V 及び流出停止までの時間 t_0 との関係は式 (11) となる。式 (5) で示すように、粘性力は u_i に比例し、拡散停止時には零となることから、最終スリック半径 R_f は、界面張力と重力との釣り合いから式 (12) のように求められる。

$$Q = \pi R^2 h / t \quad (9)$$

$$V = \pi R^2 h \quad (10)$$

$$V = Q t_0 \quad (11)$$

$$R_f = \left[\frac{\Delta \rho g}{2 \pi^2 \sigma_n} \right]^{1/4} V^{1/2} \quad (12)$$

定流量状態では、式 (9) と式 (8) から式 (13) となるが、長さを最終スリック半径 R_f 、時間を流出停止までの時間 t_0 で無次元化すると、式 (14) となる。なお、 α は無次元量であることを示す。

$$\frac{dR}{dt} = k_0 \frac{\Delta \rho g Q^3 t^3}{2 \pi^2 \mu_0 R^7} - k_0 \frac{\sigma_n Q t}{\pi \mu_0 R^3} \quad (13)$$

$$\frac{dR^*}{dt^*} = \alpha \left[\frac{t^{*3}}{R^{*7}} - \frac{t^*}{R^{*3}} \right] \quad (14)$$

ここで、

$$\alpha = 2 \pi k_0 \frac{\sigma_n^2}{\Delta \rho g \mu_0 Q} \quad (15)$$

上式で明らかなように、無次元化したスリック半径 R^* と時間 t^* の関係は、ここで定義した無次元量 α によって一義的に決定され、 α は氷板下での油拡散現象において極めて重要なパラメータであることがわかる。

誘導の詳細は割愛するが、式 (14) を $t^*=0$ で $R^*=0$ を初期条件に積分すると、式 (16) が得られる。さらに式 (1) と比較するために次元量に戻すと式 (17) となり、本研究での解は Yapa の解に界面張力の影響を無次元量 α の関数として取り入れたものとなっている。

$$R^* = [2\alpha(\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 2\alpha + 1})]^{1/8} t^{*1/2} \quad (16)$$

$$R = \left[\frac{k_0}{\pi^3} \right]^{1/8} \left[\frac{\Delta \rho g V^3}{\mu_0} \right]^{1/8} f(\alpha) t^{1/8} \quad (17)$$

ここで、

$$f(\alpha) = (\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 2\alpha + 1})^{1/8} \quad (18)$$

定体積状態では、式 (10) を式 (8) に代入し、上記と同様な無次元化を行う。 $t^*=1$ の時の式 (16) の値は式 (19) となり、これを初期条件として積分すると、式 (20) となる。

$$R_0^* = (2\alpha)^{1/8} f(\alpha) \quad (19)$$

$$R^{*4} - R_0^{*4} + \ln \left| \frac{1 - R^{*4}}{1 - R_0^{*4}} \right| = -4\alpha(t^* - 1) \quad (20)$$

以上のように、定流量状態及び定体積状態の全体を通して、無次元スリック半径 R^* と無次元時間 t^* の関係は無次元量 α によって決定される。図-5 は拡散状況が α によって変化する様子を示した例である。

4. 考 察

前節では、氷板下における油の軸対称拡散に関する理論解を導いた。この解の有効性の検討のため、実験結果

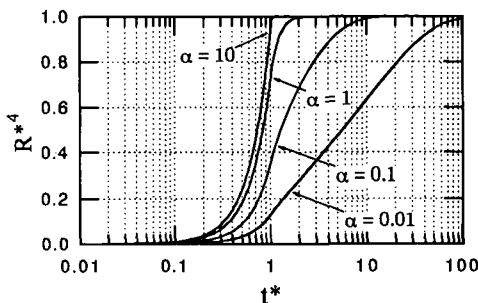


図-5 拡散特性に関する の影響

との比較を行う。このためには、まず、理論解中に現れる界面張力についての議論が必要である。氷板下のスリック周囲には、油、水、氷の間に三種類の界面が存在する。これらのうち、界面張力の直接計測が可能なものと、困難なものがあるため、最終スリック半径の実測値からスリックに働く正味の界面張力を求めることを試みた。

最終スリック半径は、スリックに働く重力と界面張力の釣り合い状態として式(12)により与えられる。今回の実験では、図-3に示されるように、油の流出停止後のスリックの拡大は極めて小さい。幾例かについて実験実施の翌日においてスリック面積の計測を行ったが、実験終了時のものと有意な差は認められなかった。このため、実験終了時のスリック半径を最終スリック半径と考え、これを用いて式(12)より正味の界面張力 σ_n を推定した。この結果、実験ケースにより多少のばらつきはあるが、 $\sigma_n = 0.1 \text{ N/m}$ を得た。また、 k_0 は油の質量保存則より $1/2$ となる。

以上の結果を用いて実験結果と理論解との比較を行う。まず、定流量状態について考える。式(1)と式(17)及び(18)を比較すると Yapa の理論解に含まれる係数 k_1 について次の表現を得る。

$$k_1 = \left(\frac{1}{2\pi^3} \right)^{1/8} f(\alpha) \quad (21)$$

係数 k_1 について、実験結果と上式を比較したのが図-6である。図には当所における実験結果に加えて、Yapa による実験結果も示した。ただし、Yapa による実験結果については、詳細なデータが示されていないことから、データの存在範囲として示した。具体的には、Yapa らのプロットより係数 k_1 の範囲を $0.47 \leq k_1 \leq 0.52$ と読みとり、最終スリック半径に関する計測結果に式(12)を適用して $\sigma_n = 0.05 \text{ N/m}$ と推定して、 α の値の範囲を求めた。図-6より、理論解と実験結果との間には非常に良い一致があることが判る。

次に定体積状態について考察する。図-6から判るように、当所における実験及び Yapa による実験は、 α の値

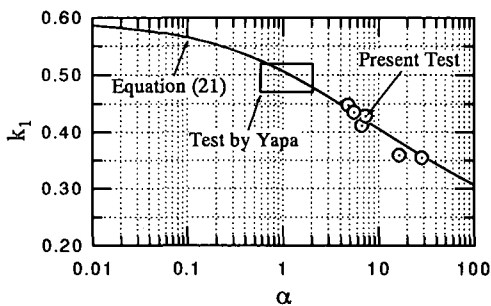


図-6 理論解と実験結果の比較 (定流量状態)

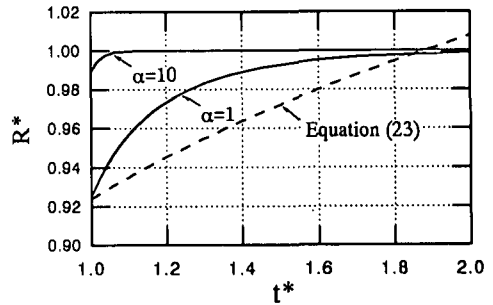


図-7 理論解と実験結果の比較 (定体積状態)

が、それぞれ 10 及び 1 程度の領域に対して行われている。これらの値に対して、定体積状態についての理論解を図-7に示す。前述のように、当所における実験では、定体積状態におけるスリックの拡散は極めて小さなものであったが、 $\alpha=10$ に対応する理論曲線においても定体積状態におけるスリックの増大分は微小であり、流出停止時のスリック半径の約 1% に過ぎない。一方、Yapa により導かれた定体積状態に対する理論解(式(2))は、本研究で導いた理論解で用いている無次元量により次のように書き直すことができる。

$$R^* = (2\pi^2)^{1/4} k_2 \left(\frac{\alpha}{2\pi k_0} t^* \right)^{1/8} \quad (22)$$

上式において $k_0 = 0.5$, $\alpha = 1$ とし、また、Yapa らの実験結果に基づいて $k_2 = 0.506$ とおくと次を得る。

$$R^* = (0.729)^{1/4} t^{*1/8} \quad (23)$$

図-7中の破線は上式の関係を示す。前述のように、定体積状態に対する Yapa らの理論解ではスリック半径は時間の経過とともに上限無く増大するが、現実には定体積状態のスリック半径には上限が存在し、この理論は適当ではない。Yapa らが、式(2)により実験結果が説明できるという結論に至ったのは、流出停止後十分に長い時間計測を行わなかったためと考えられる。従って Yapa らの理論解は、流出停止後の比較的短い時間に対して実験結果を表現したものとして捉えるべきであろう。

以上、定流量状態及び定体積状態について、それぞれ、理論解と実験結果との比較を行った。定流量状態については理論解と実験結果との間には良い一致が見られる。残念ながら定体積状態については定性的な比較にとどまったが、これについても理論解は実験結果の傾向を説明するものとなっている。

次に、本理論を用いて現実の油流出の際の油の拡散挙動を試算する。本理論によれば、氷板下における油の拡散挙動は、式(15)で与えられる無次元パラメーター α により支配される。このパラメーターは、油の各種特性及び流量により決定されるが、ここでは油の粘性係数に着目して、これが油の拡散挙動に与える影響について計算

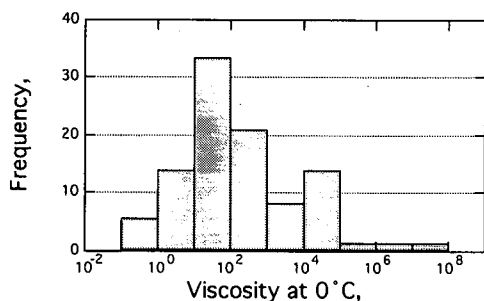


図-8 油の粘性係数の分布

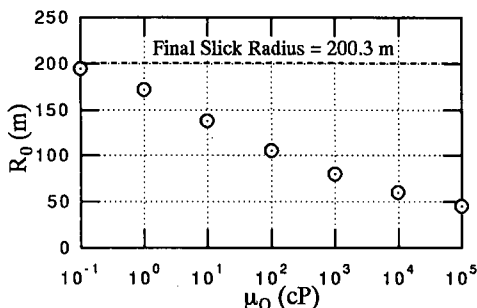


図-9 流出停止時におけるスリック半径に関する試算

した。図-8には、Environment Canada (1992) による油の特性に関するカタログに基づき、0°Cにおける粘性係数の分布を示してある。油の粘性係数は、 10^{-1} から 10^8 cPという極めて広い領域に分布していることが判る。このデータに基づき、粘性係数が 10^{-1} から 10^8 cPの場合について上記の条件に対するスリックの拡散挙動についての試算を行った。その他の油の特性については、密度及びスリックに働く正味の界面張力を、それぞれ、 0.9 g/cm^3 及び 0.1 N/m と仮定した。また、油の流量については、事故の状況、流出源等により様々なレベルが想定されるが、ここでは、 100 l/s の流量の流出が5時間継続する場合を想定した（全流出量は $1,800 \text{ kl}$ ）。

図-9に試算結果の例を示す。同図は、流出が停止した段階でのスリック半径 R_0 を粘性係数の関数として示したものである。最終スリック半径は粘性係数によらず約 200 m であるが、流出が停止した段階でのスリック半径は粘性係数により大きく異なる。粘性係数が低い場合には、流出停止時のスリック半径は最終的なものに極めて近く、粘性係数が 0.1 cP の場合は、流出停止時点ですでに最終スリック半径の90%を越えるスリック半径となっている。これに対し、粘性係数が高い場合は、流出

停止時のスリック半径は最終スリック半径に対して小さく、粘性係数が 10^5 cP の場合のスリック面積は最終的な状態の1/4以下である。

5. 結 言

本論文では氷板下における油の軸対称拡散問題について、水槽における実験結果を報告するとともに、理論解を示した。理論解は実験結果を良く説明するものとなっている。理論解は、油の流量、粘性係数、密度及び界面張力により与えられる無次元量により現象が支配されることを示した。

本論文では、氷板下における油の拡散問題についての研究の第一段階として、平坦な氷板下の静穏な水域への油の流出という、ある意味では理想化された問題を取り扱った。その結果、本問題についての基本的知見を得ることができたと考える。しかし、実際の流出事故においては、氷板下の凹凸、あるいは潮流・波動等による氷板下の水の動き等の条件が油の拡散にさらに影響を与えるものと考えられる。これらの条件を含む一般的な理論解を求めることは困難である。

このため、現在、このような条件をも取り入れることのできる数値計算手法の開発を行っている。まだ予備計算の段階であるが、本論文に示した理論解と計算結果との一致は良い。今後、研究の第二段階として数値計算手法による研究を進展させ、実際の流出事故における拡散予測あるいは油回収技法に反映させて行きたい。

参 考 文 献

- 泉山 耕, 成田秀明, 宇都正太郎 (1996): 氷板下への油流出に関する基礎的実験結果について。第68回船舶技術研究所研究発表会講演集, pp. 48-51.
- 埜口英昭 (1991): 水面上に流出した油の拡がりに関する研究。中国工業技術試験所研究報告, 第9号, p. 109.
- Environment Canada (1992): A Catalogue of Crude Oil and Oil Product Properties (1992 Edition), p. 153.
- Hoult, D. P., Wolfe, S., O'Dea, S. and Paturear, J. P. (1975): Oil in Arctic. Report No. CG-D-96-75, Dept. of Transportation, U. S. Coast Guard, p. 102.
- Ramseier, R. O. (1973): Possible Fate of Oil in the Arctic Basin. First World Congress on Water Resources., pp. 42-52.
- Yapa, P. D. and Chowdhury, T. (1989): Oil Spreading under Ice Covers. Proc. of 1989 Oil Spill Conference, pp. 161-166.
- Yapa, P. D., Weerasuriya, S. A., Belaskas, D. P. and Chowdhury, T. (1993): Oil Spreading in Surface Waters with an Ice Cover. Report No. 93-3, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, p. 84.