

静水場および波浪場における事故流出油の 挙動に関する基礎的研究

余 錫 平*・及 川 一 彦**・磯 部 雅 彦***・渡 辺 晃***

1. はじめに

最近、島根県隠岐島沖で発生したナホトカ号の転覆事故や東京湾で発生したダイヤモンド・グレイス号の座礁事故等をきっかけに、海上における油の流出事故への有効な対策や、それに関連する海洋環境アセスメント手法の確立が緊急課題となっている。これらを実現するためには、海上における事故流出油の挙動を正確に予測できる数値モデルの開発が不可欠である。

従来、水域における事故流出油に関わる諸現象について数多くの研究が行われてきた (例えば, Stolzenbachら, 1977; ASCE, 1996)。これらの研究によって、水域に大量流出された油の挙動に、重力による広がり、風や流れなどによる漂流、溶解と揮発、さらに、化学や生物過程を伴う風化が含まれること (Stolzenbachら, 1997; Reed & Gundlach, 1989; 柳ら, 1992) が明らかになった。重力による油膜の広がり現象については、流出直後からの一定期間において、油膜の形状変化に支配的な役割を果たし (ASCE, 1996)、また、油の挙動に対する長期シミュレーションの初期条件ともなるため、これまで多くの研究者に取り上げられた (Hoult, 1972; 首藤・大野, 1977; 埜口・平野, 1988)。これらの研究のほとんどが、Fay (1969) によって提唱された、いわゆる 3 段階理論 (Hoult, 1972) を基本に据えているが、Fay (1969) の理論において、いわゆる粘性力・表面張力段階に関する半経験公式と実現象との整合性などを含めて、まだ多くの不明点が残されている。

本研究は、海上事故流出油の挙動を正確に予測するモデルの開発に必要な知見を得ることを目的としている。そのために、まず、一定体積の油を静水上に瞬間的に放出した後の油の広がりに関する実験を 2 次元水路を用いて行い、Fay (1969) の半経験理論を検証する。そして、数値計算によって、油の広がりにおける油の粘性や表面張力等の影響を検討する。さらに、2 次元水路に波を入射させ、波浪作用下における油の挙動を調べる。

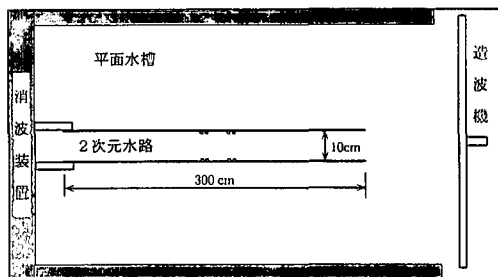


図-1 実験装置

2. 実験方法

実験には、図-1 に示される平面造波水槽中に設置した 2 次元水路を用いることとした。水路のほぼ中央部に垂直可動式の 2 枚の仕切り板を設け、油の体積及び初期形状が制御できるようになっている。

静水場実験では、まず水槽に水を張ったのちに、水路中央部の突起にアクリル板を 2 枚挟んで立て、水路内部に仕切られた空間を設ける。仕切られた空間に、計量した油を漏斗を用いて静かに注ぎ込む。そして、2 枚のアクリル板を同時に引き抜いて、油の広がりを観測する。2 次元水路の上部にメジャーを貼り付けることにより、デジタルビデオカメラで撮影した画像に基づいて油膜の先端位置を時間と対応させることができる。油膜先端位置の時系列データを数値微分すれば、油膜先端の移動速度も得られる。一方、波浪場実験においては、水路の沖側から波を入射させ、進行波が形成されるように岸側に消波材を置く。

実験条件については、油の種類および体積、初期形状を変えて様々な組み合わせを実現した。また、波浪場実験においては、入射波の波高および周期、さらに水深も変化させた。実験に使用した油は市販のサラダ油およびエンジン・オイルの 2 種類であり、油の比重及び粘性係数は表-1 に示す通りである。なお、粘性係数は Poiseuille の原理に基づいて自作した粘性係数測定装置で計測した。

* 正 会 員 工博 東京大学助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
** 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻
*** 正 会 員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

表-1 油の諸量

油の種類	比重	粘性係数 μ ($\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)
サラダ油	0.82	0.0005
エンジン・オイル	0.81	0.0010

3. 静水場における油の広がり数値計算方法

静水場における油の広がり現象が、油と水の密度差、油の粘性および表面張力の各要因にどのように影響されるかを調べるために、図-2に示されているような、一定の初期形状を有する油塊の時間経過に伴う変形過程について数値計算を行った。数値モデルにおいては、粘性の影響に比べて、油の変形加速度が小さく、遅い流れに対する Stokes 近似が成り立つことを仮定した。また、油の変形に伴う周辺水の流れも無視した。したがって、油塊運動を表す基礎方程式として、油圧 p に関する以下のラプラス方程式が成立つ。

$$\nabla^2 p = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$ は勾配演算子である。表面張力を考慮すれば、油と空気との境界および油と水との境界における油圧 p は以下のように表される。

$$p = 2\kappa T_a \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$p = -\rho_w g z + 2\kappa T_w \quad \text{on } \Gamma_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 κ は境界の曲率、 T_a は油と空気との境界面における表面張力係数、 T_w は油と水との境界面における表面張力係数、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。表面張力係数がそれに関係する 2 流体の特性に依存するため、通常の場合においては T_a と T_w の値が異なる。

式 (1)、(2) および (3) によって、油圧 p がラプラス方程式の Dirichlet 問題として定式化されたこととなる。境界積分法を用いると、境界における油圧の法線方向の偏微分値が計算できる。

一方、Stokes 近似を導入した Navier-Stokes 方程式は次のように記述できる。

$$\nu \frac{\partial \omega}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - \frac{\partial v_s}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

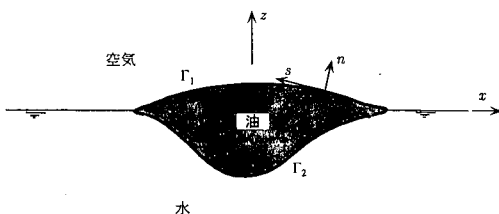


図-2 計算モデルの定義図

$$\nu \frac{\partial \omega}{\partial n} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial v_s}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 n および s はそれぞれ境界の法線方向および接線方向を示す。 v_n および v_s はそれぞれ n および s 方向における流速成分である。 ω は 2 次元平面に直交する方向における渦度ベクトルの成分を表す。また、 ν は油の動粘性係数、 ρ は油の密度である。 ω は流速の s および n 方向での偏微分によって定義される。式 (4) を用いれば、境界上における法線方向の流速成分の時間変化および圧力の偏微分から、渦度の接線方向での偏微分 $\partial \omega / \partial s$ が得られる。境界上における法線方向の流速成分の時間変化を決めるのに繰り返し計算が必要となるが、遅い流れにおいてその値が十分小さければ無視して差支えない。計算された渦度の接線方向での偏微分の離散値を境界線に沿って数値積分すれば、渦度 ω の境界値が求められる。さらに、渦度の定義に、境界面にせん断応力が働かないこと、すなわち、 $\partial v_s / \partial n = 0$ を考慮すれば、境界に沿って、 $\partial v_n / \partial s$ の値が得られる。この数値解を境界線に沿って数値積分を行うと、境界上における v_n の値が求められる。また、

$$\oint v_n ds = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

となるように積分定数を決定するので、油に対する質量保存則がほぼ厳密に満足される。

一方、本計算モデルにおいて、油の境界付近では、流体間の相対運動が無視されたため、渦の発生源が存在しない。したがって、計算領域における渦度の時間変化率が無視できると考えられる。それゆえに、渦度に関する以下のラプラス方程式が成立つ。

$$\nabla^2 \omega = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

境界積分法を用いれば、式 (4) より得られた ω の境界値から、境界上における ω の法線方向での偏微分 $\partial \omega / \partial n$ が得られる。これを式 (5) に代入すれば、境界上における v_s が差分法で求められる。以上で得られた v_n および v_s を用いて、油塊の変形予測ができる。

境界積分法を用いて (1) および (7) を解く際に、ラプラス方程式の基本解として対数関数を適用した。また、境界の離散化は一定要素に基づいた。

4. 静水場における実験および数値計算の結果

静水場において、油の種類、体積および初期形状の変化による油の挙動の違いを調べるために、表-2に示されている条件で油の広がり実験を行った。図-3および4には、時間の経過に伴う油膜の半径 r の変化に関する実験結果を示している。いずれのケースにおいても、初期拘束が解かれた直後には、油の広がり速度が最も大きく、時間の経過とともにその勢いが減衰する（いわゆる

表-2 静水場実験条件

CASE	油の種類	油の体積 V (cm^3)	初期形状	
			縦 (cm)	横 (cm)
s-1	サラダ油	200	4	5
s-2	エンジン・オイル	200	4	5
s-3		400	8	5
s-4		400	3.6	11.2

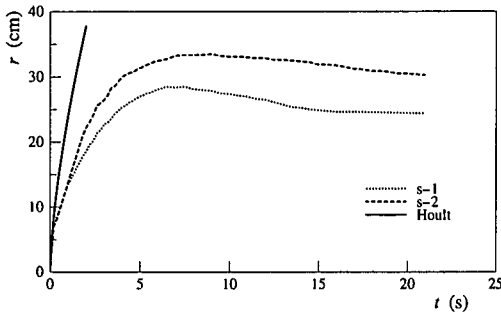


図-3 静水場における実験結果 (油の種類が異なるケース)

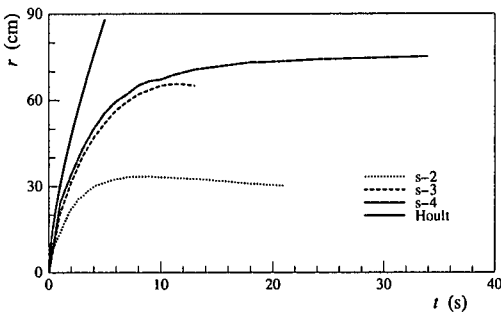
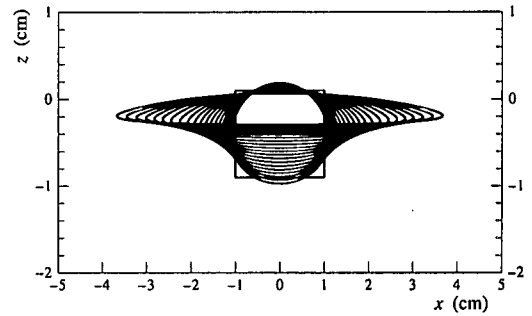
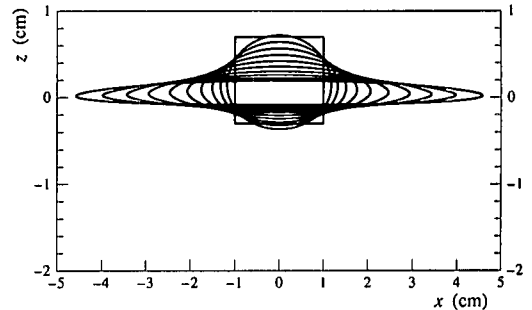


図-4 静水場における実験結果 (油の体積と初期形状が異なるケース)

重力・慣性力段階)。ある段階に至ると、油膜の広がり過程がほぼ終了し、その形状が安定する (表面張力段階)。安定状態に達した油膜の半径は使用した油の体積および油の種類にのみ依存するようで、これは、油膜の安定半径が重力と油の表面張力の釣り合いで決定されることによって説明される。また、油の初期形状において、縦横比が比較的大きく、油の粘性が比較的小さいケースに関しては、重力・慣性力段階における油の広がり速度が比較的大きい。また、油膜の半径が一旦極大値に達してから安定値に回復される傾向が見られる。これは、慣性の影響が粘性のそれに比べて顕著で、さらに、比較的長時間にわたっていることによるものと見られる。また、初期形状の違いによる油の広がり過程に関して有意な差は見られない。比較のために、図-3 および 4 に Hoult (1972) の半経験公式による結果も示している。重力・慣

図-5 静水場における計算結果 (CASE n-1, $t=0\sim 0.5$ s)図-6 静水場における計算結果 (CASE n-2, $t=0\sim 0.5$ s)

性力段階における油の広がり半径が半経験公式の傾向と比較的一致しているものの、表面張力段階においては、油の広がり半径は半経験理論のように時間に対する増加関数とならない。この結果から、表面張力が油の広がりを阻止する方向に働いていると考えられる。

図-5～8 は、異なる比重および粘性の油に対して計算された油の変形状況を示したものである。CASE n-1, CASE n-2 および CASE n-3 において、油の密度 ρ はそれぞれ 0.9, 0.3, 0.9 (g/cm^3), 粘性係数 μ はそれぞれ 0.01, 0.01, 0.1 ($\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$) とした。油の初期形状はすべて横 2 cm, 縦 1 cm の矩形とした。さらに油の初期位置について浮力による鉛直方向の釣り合いが満たされるように設定した。

図-5 から分かるように、油を初期拘束から解放した直後においては、油の変形を引き起こす要因となる圧力差が最も大きい側方部の水面付近で、油が横方向にはらみだし、その分だけ油の底面が引っ張られるように浮き上がる。また、油の上部は静水における釣り合い位置よりもさらに浮き上がる。さらに、油の角の部分は早い段階で丸まってしまふ。そして、ある程度時間が経過すると、釣り合い位置よりもさらに浮き上がった油の上部が少しずつ横方向に流れてゆく。一方、底面部分はさらに浮き上がり続けるので、次第に油は鉛直方向に薄くなってくる。そしてこれ以降は、浮き上がり続ける油の底面の部分の体積がそのまま水平方向の広がりへ寄与する形

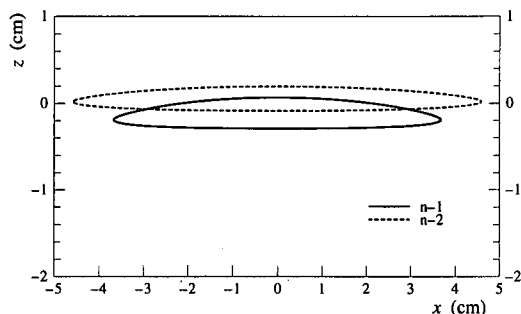


図-7 比重の違いによる油の広がり (t=0.5 s)

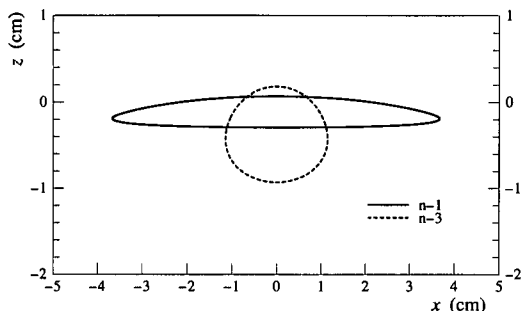


図-8 粘性係数の違いによる油の広がり (t=0.5 s)

で油は広がり続ける。この計算結果は水槽実験で観測された現象の傾向をよく再現している。

図-6は、油に対して非常に小さい比重を仮定し、その他の諸量はすべて図-5に示されたケースと同じにして計算を行ったものである。図-7には異なる比重の油の、時刻 $t=0.5$ sにおける油の形状を比較している。比重の小さい油が比較的早く広がることが分かる。これは、油の比重が小さいほど油の静水面から上に出る体積が比較的大きく、よって油が横方向に広がっていくためのポテンシャル・エネルギーが大きいためであると考えられる。

図-8においては、油の粘性係数の違いによる油の形状変化の過程の差を示している。油の粘性係数が大きいほど、油の広がり速度が小さくなることが分かる。

表-3 波浪場実験条件

CASE	油の種類	V (cm^3)	h (cm)	T (s)	H (cm)	L (cm)	h/L (cm)	H/h (cm)	H/L (cm)	RUN (回数)
w-1	サラダ	200	7.3	0.56	1.6	40	0.183	0.22	0.04	3
w-2	エンジン	200	7.3	0.56	2.4	40	0.183	0.33	0.06	3
w-3	エンジン	200	7.3	0.56	2.0	40	0.183	0.27	0.05	2
w-4	エンジン	400	7.3	0.56	2.4	40	0.183	0.33	0.06	3
w-5	エンジン	200	7.3	0.56	1.6	40	0.183	0.22	0.04	2
w-6	エンジン	400	7.3	0.56	1.6	40	0.183	0.22	0.04	2

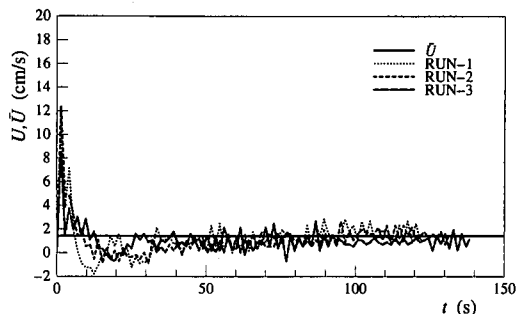


図-9 波浪場における実験結果 (CASE w-1)

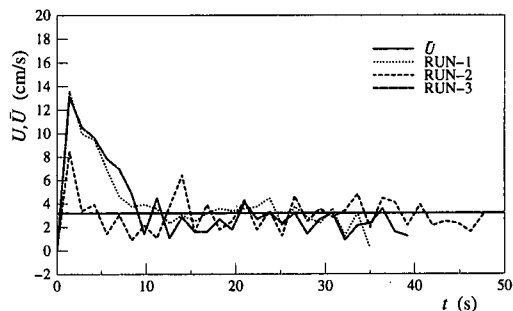


図-10 波浪場における実験結果 (CASE w-2)

5. 波浪場における実験の結果

波浪場における油の広がりに関する実験は表-3に示されている条件で行った。ただし、 V は油の体積、 h は水深、 T は波の周期、 H は波高、 L は波長を表す。すべてのケースにおいて、初期拘束が解かれた直後には、油の挙動に対する波の影響が小さく、静水場における油の広がり実験の場合と同様に、油と水との比重差によって静水面から上に出た部分の油が横方向に流れていく傾向が支配的である。実験結果からも分かるように、この段階においては、粘性や表面張力、あるいは入射波高などの波の諸量は油の挙動に対してほとんど影響を及ぼさない。油の体積や初期形状の影響に関しても静水場実験の場合と同様である。初期拘束が解かれてからある程度時間

が経過して、油が鉛直方向に薄くなり、重力の影響が比較的小さくなると、波のパラメータが油の挙動に大きな影響を及ぼすようになる。一方、この段階では油膜がほぼ広がりがきってしまったので、これ以降は水平方向における変形がほとんど見られず、波に揺られながら波の進行方向に向かって漂流してゆく。

図-9～11においては、定常状

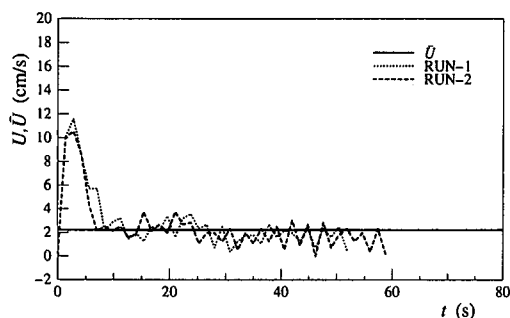


図-11 波浪場における実験結果 (CASE w-3)

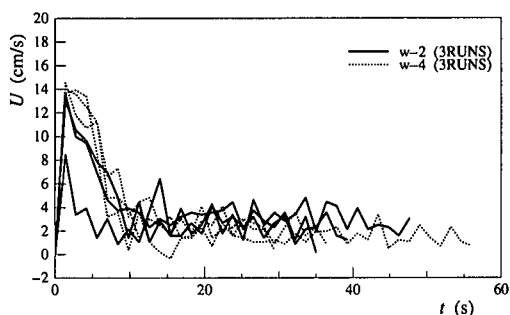


図-12 体積による油の挙動の違い

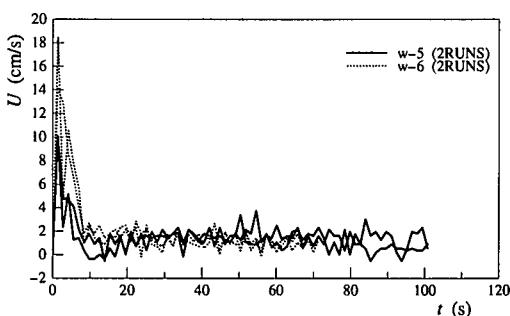


図-13 体積による油の挙動の違い

態における油膜先端部の移動速度と波による平均質量輸送速度式 $\bar{U}$ との比較を試みたものである。 $\bar{U}$ は次式で表されることが知られている。

$$\bar{U} = \frac{1}{8} \sigma k H^2 \frac{\cosh 2kh}{\sinh^2 kh} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 σ は波の角周波数、 k は波数、 H は波高、 h は水深である。図示されたすべての場合において、波による平均質量輸送速度と油膜先端部の移動速度が極めてよく一致していることが分かる。

図-12 および図-13 には、波のパラメータを固定して、油の体積の変化による油膜の広がりの違いを調べたものである。初期拘束が解かれた直後においては、静水場における広がりの実験結果と同様に、重力の影響が大きい間に油膜先端速度の大きい状態が続く。しかし、十分に時間が経過して油が水面を広く覆うようになると、波高の減衰が大きくなるため、漂流に伴う油膜先端部の速度は逆に小さくなることが分かる。

6. む す び

本研究では、海上事故流出油の挙動を正確に予測するモデルの開発に必要な知見を得るために、まず、一定体積の油を静水面上に瞬間的に放出する実験を2次元水路を用いて行い、Fay (1969) の半経験理論を検証した。その結果、表面張力が油の広がりを阻止する方向に働き、それと重力との釣り合いで油膜の安定形状がほぼ決定されることが明らかにされた。また、油の物性が油膜の広がり過程に与える影響を調べるために、遅い流れに対する Stokes 近似を導入した数値計算を行った。計算結果によって、油の比重および粘性が小さくなると油膜の広がりが速まることが分かった。さらに、波浪作用下では、定常状態における油膜先端部の移動速度が波による平均質量輸送速度と極めてよく一致していることが明らかになった。

参 考 文 献

- 首藤伸夫・大野 操 (1977): 石油の広がりの実験, 海岸工学論文集, 第24巻, pp. 509-513.
- 埜口英昭・平野宗夫 (1988): 静水面上に連続流出する油層の広がりに関する研究, 土木学会論文集, 第393号, pp. 113-120.
- 柳 青魯・朴 鍾和・李 和云 (1992): 沿岸域油汚染物質の挙動の Simulation Model, 海岸工学論文集, 第39巻(2), pp. 930-934.
- ASCE Task Committee (1996): State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills, J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 122, No. 11, pp. 594-609.
- Fay, J. A. (1969): The spread of oil slicks on a calm sea, Oil on the sea, Plenum.
- Houtt, D. P. (1972): Oil spreading on the sea, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 4, pp. 341-368.
- Reed, M. and E. Gundlach (1989): A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies, Oil and Chemical Pollution, Vol. 5, pp. 411-449.
- Stolzenbach, K. D., O. S. Madsen, E. E. Adams, A. M. Pollack, and C. K. Cooper (1977): A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks, Tech. Rep., Ralph Parsons Laboratory, MIT.