

静水面上に連続流出する油層の拡がりに関する研究

A STUDY OF THE SPREAD OF CONTINUOUSLY SPILLED OIL ON CALM WATER

埜口英昭*・平野宗夫**

By Hideaki NOGUCHI and Muneo HIRANO

In this study, a mathematical model of axisymmetrical oil spread on calm water is developed. Two basic equations are used to express the characteristics of oil slick: one is the conservation of volume and the other is the r -component of the equation of motion. By using the kinematic wave theory, those equations are transformed into characteristic equations along the characteristic curve. These simultaneous equations are solved to give the spreading rate of the oil front. This model describes the motion of the oil slick ranging from the gravity-inertial to the gravity-viscous spread. The theory is examined by comparing it with the experiments for the spread of continuously spilled oil from a small outlet onto open calm water.

Keywords: oil spill, spreading of oil on water, kinematic wave theory

1. ま え が き

油濁による海洋汚染の大きな原因の1つとして、航行船舶や石油貯蔵施設の事故による大量の油の流出がある。過去にも三菱石油水島製油所事故¹⁾ (1974年12月18日, 水島), アコモ・カジス号事故²⁾ (1978年3月16日, フランス, プルタニュー沖) などの大量の石油の流出事故が発生し, そのたびに生態系や水産業は大きな打撃を受けた。近年は, このような大規模な油流出事故は発生しておらず, また環境庁水質保全局の資料³⁾によると, 海洋汚染防止関連の法律の整備, 監視体制の強化等により, 1975年以降の船舶等からの油による海洋汚染確認件数は, かなり減少傾向にある。それでも1986年度の環境白書⁴⁾の報告によると, 1985年のわが国における海洋汚染発生確認件数のうち, 油による汚染は628件と, 全体の78%を占めており, このうち船舶からのものが475件と大半を占める状況にある。

最近の世界の経済情勢は, 2度にわたる石油危機を経て停滞気味であり, 1980年頃から世界の原油生産量は

減少傾向にある⁵⁾。わが国における石油消費量をみても, 産業における省エネルギー・燃料転換の急速な進展等により1975年度以降大幅な減少を続け, ここ数年は横ばいの状態が続いている⁶⁾。また, 将来における石油資源の枯渇というような, 長期的な視点でみた場合の石油需給逼迫という状況に対しては, 代替エネルギーの開発研究も進められつつある。しかし, 1990年代以降も当分の間は, 必要とするエネルギーの大部分は石油に頼らざるを得ず, わが国のエネルギー政策の一環としての, 大型タンカーによる石油洋上備蓄や, むつ小河原, 上五島などの国家石油備蓄基地建設計画の実施も, そのような長期展望に基づくものと考えられる。

このような現状を考慮すると, 今後とも石油の大量流出事故の潜在的な危険性は常に存在しているのであり, 十分な防災体制を整備して, 流出事故を未然に防止する日常的な努力を怠ってはならないが, 不幸にして事故が発生し大量の油が流出したとき, 汚染地域を予測し, その処理作業を効果的に進めるためにも, 油の拡がりを予測する手法の確立が必要である。本研究は, このような大量流出油の流動現象の基本的な特性を明らかにし, その拡がりを予測する手法を見出すための一環として行ったものである。

広い海上に一時に大量の油が流出した場合, 油層の拡

* 正会員 中国工業技術試験所 海洋開発部
(〒737-01 呉市広末広 2-2-2)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水土木工学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-1-10)

がり特性を決めるのに重要な役割を果たす物理因子は、油層と周囲水の間で作用する重力、慣性力、粘性力等である。実際の海上では、これらの作用に、潮流、風、波等の作用が重なって、その拡がりが見定される⁷⁾。このうち、重力、慣性力等の基本的因子の作用が支配的な静水面上の拡がりについては、Fay⁸⁾の提出したモデルが代表的なものであろう。Fayは、静水面上に流出した油について、時間の経過とともにいずれの力が卓越するかを分析し、その拡がりが見(Ⅰ)重力・慣性力領域、(Ⅱ)重力・粘性力領域、(Ⅲ)表面張力・粘性力領域の3つの領域に分類できることを示した。

Hoult⁹⁾, Fannelop & Waldman^{10),11)}, Buckmaster¹²⁾らは、Fayのモデルを発展させ、相似解を仮定して油の運動方程式を理論的に解くことを試みたが、結果的にはFayのモデルによる結論の域を出ていないようである。また、Abbott¹³⁾のように、重力・慣性力領域での拡がりを見特性曲線法によって数値的に解いた例もあるが、実際の現象への適用範囲はかなり限定されると考えられる。なお、ここに挙げた研究例は、いずれも、水面上に拘束されて静止していた一定量の油が、ある瞬間に解き放たれて拡がる、いわゆる瞬間流出の形態について取り扱ったもので、水面上に油が連続的に流出して拡がる連続流出の場合についての研究は、その例をみないようである。

貯水池における turbidity current のように、周囲流体より重い流体が重力の作用で底面に沿って流動する、いわゆる傾斜密度流の先端部の流動は、周囲水の連行という点を除けば、水面上を拡がる油層先端部の流動に類似した非定常性の強い現象と考えられる。このような密度流先端部の流動機構の解明を目的とした研究は多いが、最近では平野・羽田野^{14),15)}の研究がある。平野らは、密度流先端部の運動を見非定常な二層密度流として扱い、特性曲線法により先端速度および濃度の流下方向の変化を見規定する式を見導いた。

本研究は、平野らと同様の解析法を見油層の拡がりを見適用して、静水面上に流出した油層の拡がりを見運動方程式および連続の式を見用いて表わすとともに、特性微分方程式を見作ってこれを見解き、油層先端の速度と油層の拡がり半径の関係を表わす式を見求めた。さらに、これを見連続流出での実験結果と見比較して、式の中に含まれるパラメータを見決定した。なお、この手法は、油の拡がりを見Fayのモデルのように時間的な領域区分することなく一貫して記述できるという点で見一歩前進した解法といえよう。

2. 油層の拡がりの解析法

(1) 解析のモデル

広い静水面上に大量の油が流出して拡がっている状態について考える。このとき流出した油層を拡げる力として作用するのは重力で、油が水より軽いため、油層の重心が浮力の中心より高くなり、その結果生じる圧力勾配によって、外側へ拡がろうとする力である。油層が薄層になると、表面張力が油層を拡げる力として卓越してくると考えられるが、ここでは表面張力の作用は見考慮しないものとする。このような油層を拡げようとする力に対し、抵抗として作用するのは、油層の運動によって生じる周囲水の慣性抵抗と、油水界面での界面抵抗である。Fig. 1に示すように、流出した油は同心円状に四方に急速に拡がっており、これを水平方向に見r軸、鉛直方向に見z軸をもつ軸対称の拡がりとしてモデル化する。r軸方向の油の流速を見u、z軸方向の油の流速を見wとすると、油の拡がりを見表わす連続の式、r軸方向の運動方程式、およびz軸方向の運動方程式は、それぞれ次のように表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{u}{r} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ_0 は油の密度、 p は油層内の圧力、 μ_0 は油の粘性係数、 g は重力の加速度である。

Fig. 1に示すように、油層表面の高さを見 z_e 、油水界面の高さを見 z_i で表わすと、それぞれの位置においてz軸方向の流速 w は、次のように表わされる。

$$w(z_e) = \frac{\partial z_e}{\partial t} + u(z_e) \frac{\partial z_e}{\partial r} \dots\dots\dots (4)$$

$$w(z_i) = \frac{\partial z_i}{\partial t} + u(z_i) \frac{\partial z_i}{\partial r} \dots\dots\dots (5)$$

式(3)において、油層の鉛直方向の慣性項は小さいと仮定して無視すると、静水圧分布の仮定、

$$p(z) = \rho_0 g (z_e - z) \dots\dots\dots (6)$$

が導かれる。

また、 z_e と δ の間には次式の関係が成り立つ。

$$z_e = \delta \frac{\Delta \rho}{\rho_w} \dots\dots\dots (7)$$

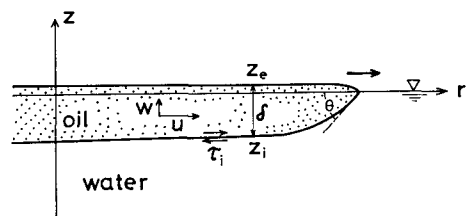


Fig.1 Schematic sketch of oil slick.

ここに、 ρ_w は水の密度、 $\Delta\rho = \rho_w - \rho_0$ である。

油層内での r 軸方向断面平均流速を U 、油層の厚さを δ で表わし、式 (1)、(2) を z_i から z_0 まで積分して、式 (4)、(5)、(6) および (7) の関係を用いて若干の計算を行うと、油層の運動を表わす基礎方程式として、

• 連続の式：

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + U \frac{\partial \delta}{\partial r} + \delta \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

• r 軸方向の運動方程式：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} = -g \frac{\Delta\rho}{\rho_w} \frac{\partial \delta}{\partial r} - \frac{\tau_i}{\delta\rho_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。ここに、 τ_i は油水界面でのせん断応力で、 $\tau_i = \mu_0(\partial u/\partial z)_i$ である。

なお、ここでは前述のように表面張力は考慮されていないので、油層が薄層になり、表面張力が油を拡げる力として卓越する領域では、以下に述べる解析法は適用できない。また、流出する油層は均質で、ニュートン流体として扱うことができ、蒸発、溶解による体積減および物性の変化はないものとする。

(2) 特性微分方程式による解法

一階偏微分方程式の特性帯の理論¹⁶⁾によると、式 (8) および (9) に対する特性微分方程式は、それぞれ次の形に表わされる。

$$\frac{dt}{1} = \frac{dr}{U} = -\frac{d\delta}{\delta \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \right)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{dt}{1} = \frac{dr}{U} = -\frac{dU}{g \frac{\Delta\rho}{\rho_w} \frac{\partial \delta}{\partial r} + \frac{\tau_i}{\delta\rho_0}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式 (10)、(11) から、油層の任意断面での厚さ δ および平均流速 U は、特性曲線 $dr/dt = U$ 上で、それぞれ

$$\frac{d\delta}{dr} = -\delta \left(\frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{dU^2}{dr} = -2 \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho_w} \frac{\partial \delta}{\partial r} + \frac{\tau_i}{\delta\rho_0} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

の形に表わされる。式 (12)、(13) を連立で解くと、特性曲線に沿った δ および U の変化を求めることができるが、両式には偏微分項 $\partial U/\partial r$ および $\partial \delta/\partial r$ が含まれるため、一般に解くことが困難である。そこで、ここでは油層先端部付近の流速および油層厚さに、次のような相似性の仮定、

$$\frac{U}{r_f} = \zeta \left(\frac{r}{r_f} \right), \quad \frac{\delta}{\delta_f} = \psi \left(\frac{r}{r_f} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

を導入して解析を進める。ここに、添字 f は油層先端部 ($r = r_f$) での U および δ の値を、 $\zeta(r/r_f)$ および $\psi(r/r_f)$ は r/r_f についての関数を表わす。式 (14) を r で微分すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial r} &= \frac{U_f}{r_f} \zeta' \left(\frac{r}{r_f} \right) \\ \frac{\partial \delta}{\partial r} &= \frac{\delta_f}{r_f} \psi' \left(\frac{r}{r_f} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

となり、 $r = r_f$ のところでは、

$$\left[\frac{\partial U}{\partial r} \right]_f = \frac{U_f}{r_f} \zeta'(1) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\left[\frac{\partial \delta}{\partial r} \right]_f = \frac{\delta_f}{r_f} \psi'(1) \quad \dots\dots\dots (17)$$

と表わされる。

式 (12) を油層先端部に適用し式 (16) を考慮すると、

$$\frac{d\delta_f}{dr_f} = -(C_1 + 1) \frac{\delta_f}{r_f} \quad \dots\dots\dots (18)$$

が得られる。ここに、 $C_1 = \zeta'(1)$ である。式 (18) は容易に積分できて次式の解が得られる。

$$\frac{\delta_f}{\delta_s} = \left(\frac{r_f}{r_s} \right)^{-(C_1+1)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 δ_s は初期条件 $r_f = r_s$ の位置での油層の厚さを表わす。

次に、式 (13) を油層先端部に適用し、式で油層底面に働く抵抗力 τ_i を、

$$\frac{\tau_i}{\rho_0} = \frac{1}{2} f_i U_f^2 \quad \dots\dots\dots (20)$$

と置く。 f_i は抵抗係数である。式 (17) および (19) を用いて式 (13) を変形すると、

$$\frac{dU_f^2}{dr_f} + \frac{f_i}{\delta_s} \left(\frac{r_f}{r_s} \right)^{C_1+1} U_f^2 + 2gC_2 \left(\frac{\delta_s}{r_s} \right) \left(\frac{r_f}{r_s} \right)^{-(C_1+2)} = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる。ここに、 $C_2 = \psi'(1)$ 、 $g' = g(\Delta\rho/\rho_w)$ である。

f_i を定数と仮定し、初期条件として、 $r_f = r_s$ の点での油の流速を $U_f = U_s$ 、油層の厚さを $\delta_f = \delta_s$ とし、さらに、 $r_f/r_s = r_*$ 、および $U_f/U_s = U_n$ と置いて常微分方程式 (21) を解くと、油層先端部の無次元速度 U_n は、

$$U_n^2 = \exp \{ K(1 - r_*^{C_1+2}) \} - \frac{2C_2}{F_{rs}^2} \exp \{ -K \cdot r_*^{C_1+2} \} \\ \times \int_1^{r_*} u^{-(C_1+2)} \cdot \exp \{ K \cdot u^{C_1+2} \} du \quad \dots\dots\dots (22)$$

で表わされる。ここに、

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{f_i r_s}{(C_1+2)\delta_s} \\ F_{rs} &= \frac{U_s}{(g'\delta_s)^{1/2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

である。

油層先端部の移動距離と油の流出時間との関係は、

$$r_*(x) = r_*(x-1) + U_n(x-1)\Delta t_* \quad \dots\dots\dots (24) \\ (x=1, 2, 3, \dots)$$

を逐次計算することにより得られる。ここに、 $\Delta t_* = \Delta t \cdot (U_s/r_s)$ である。

なお、油層の運動を表わす基礎方程式(8),(9)に特性微分方程式の理論を適用して得られた式(22)は、Fayのモデルのように時間的な領域区分をすることなく、重力・慣性力領域から重力・粘性力領域までの油層の流動に対して適用できる。また、式(22)中には流出油量 Q がパラメーターとして入っていないので、原理的には連続流出および瞬間流出のいずれの場合にも適用できると考えられるが、そのためには連続流出、瞬間流出のそれぞれの場合について、係数 C_1 および C_2 の値が確定されなければならない。本研究では連続流出の場合のみを対象とし、次章で述べる連続流出の実験結果を用いてこれらの係数を決定した。

3. 解析結果および考察

(1) 抵抗係数 f_i について

密度の異なる2種類の流体が、内部に明確な密度界面を作って共存しながら運動する場合、その界面での抵抗は、実用的な立場から式(20)の形で表現されることが多い¹⁷⁾。しかし、油水界面の現象は、界面を通して上下層流体間の混合が生じないのが他の密度流現象とは大きく異なる点であり、その抵抗係数についての研究例は少なく不明な部分が多い。ここではいくつかの研究結果を引用しながら、油水界面での抵抗係数について考察する。

首藤・大野¹⁸⁾は、幅20cm、深さ30cm、長さ7mのアクリル水槽の一端から石油を流出させ、その油層断面形状の測定結果から油水界面の抵抗係数 f_i を求め、 $\Psi = F_i^2 \cdot R_e$ をパラメーターとして整理した。 F_i は油層の密度フルード数で $F_i^2 = U^2 / (\Delta\rho / \rho_w) g \delta_i$ 、 R_e は油層のレイノルズ数で、 ν_0 を油層の動粘性係数として $R_e = U\delta / \nu_0$ で定義される。首藤らの実験は Ψ が0.08から1の範囲で行われ、 f_i の値は約0.1から0.02の間に分布している。また、 Ψ が0.2以上では f_i は減少する傾向にある。

後藤¹⁹⁾は、津波による油の拡がりに関する数値計算において、首藤らの実験をもとに、

$$f_i = f'_i / R_e \dots\dots\dots(25)$$

と仮定した。ここに f'_i は定数で、その値は、埜口らによる瞬間流出の実験データと、 f'_i を変化させた数値解との比較結果から、 $f'_i = 0.2$ が与えられた。

Lau & Moir²⁰⁾ や Berry & Rajaratnam²¹⁾ は、流れに対して横断方向に設置されたオイルフェンスに補足されてその上流側に集積する油層と、その下層の水流との相互作用についての研究を行った。彼らは、そのなかで、油層の集積厚さを決定するのに必要な抵抗係数 f_i を実験的に求めている。Lauらは、油と水の粘性係数の比 (μ_0 / μ_w) の異なる3種類の synthetic oil (No.1: $\mu_0 / \mu_w = 7.14$, No.3: $\mu_0 / \mu_w = 66.04$, No.4: $\mu_0 / \mu_w = 348.09$)

について、油層断面形状の計算値が実験値と一致するように抵抗係数を求め、OIL No.1 で $f_i \approx 0.006$, OIL No.3 で $f_i \approx 0.010$, OIL No.4 で $f_i \approx 0.012$ の値を得た。これらの実験では、油層下部の水流のレイノルズ数はほぼ同じ条件に設定されているにもかかわらず、粘性の大きい油ほど抵抗係数の値が大きくなっている。Berryらは、粘性係数 $\mu_0 = 22.75$ cP の CWO base oil を用いて油水界面付近の流速分布の測定結果から抵抗係数を計算し、 $f_i \approx 0.008 \sim 0.013$ を得た。両者の得た値はほぼ同じオーダーとなっている。

以上の研究結果から考えて、式(20)中の抵抗係数は油層のレイノルズ数の関数と考えるのが妥当であろう。しかし、現状ではその普遍的な関数形を確定するにはデータが不十分である。Fig.2は、次節で述べる湾口からの油の連続流出の実験で、湾内(湾口から奥へ0.25mの位置)湾口、および湾口から沖へ2mの位置の三点で、油膜厚さ測定装置により、油層厚さの時間変化のようすを測定した例²²⁾である。使用した油は、A重油とB重油の2種類である。図中の数字は湾口を原点とした測点の位置を示している。図によれば、連続流出時の油層先端部では、瞬間流出の実験で流出直後にみられる内部波の現象は観察されず、最初から平滑なスリック状にゆるやかに拡がっている。したがって、本研究で扱っている連続流出の実験の範囲では抵抗係数は一定とし、Lau & Moirによって得られた実験値を抵抗係数として用いることとする。

(2) 係数 C_1, C_2 について

式(16)および式(17)を用いて連続の式(8)を変形すると

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = -(C_1 + C_2 + 1) \frac{U_r \delta_r}{r_r} \dots\dots\dots(26)$$

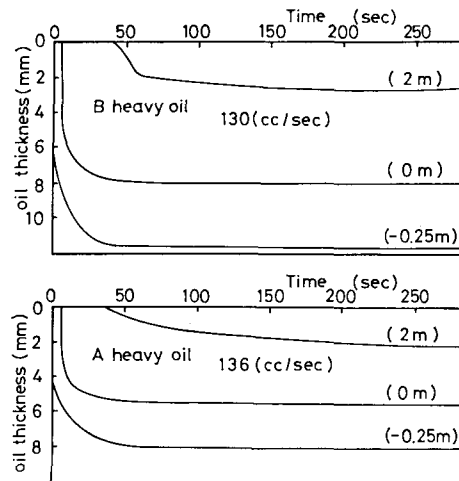


Fig.2 Change of the thickness of continuously spilled oil from the mouth of the outlet.

が得られる。油層先端がある点 $r=r_f$ に達し、そこを通過した直後においては、その点で観察すると式 (26) 左辺の $\partial\delta/\partial t$ は正の値を取るの

$$C_1 + C_2 < -1 \dots\dots\dots(27)$$

の条件が得られる。また、油層先端部の厚みは時間の経過とともに減少していくので、 $d\delta_f/dr_f$ は常に負または 0 の値をとる。したがって、式 (18) より、

$$C_1 \geq -1 \dots\dots\dots(28)$$

の条件が得られる。また、Fig. 1 からわかるように油層先端部では常に $\partial\delta/\partial r \leq 0$ であるから、式 (17) より

$$C_2 \leq 0 \dots\dots\dots(29)$$

の条件が得られる。

平野・羽田野²³⁾は、傾斜密度流先端部の流動機構の実験において、流下する密度流先端部に向けて後方から常に塩水が流れ込んでいる、いわゆるプリュームの場合には先端部付近の速度勾配 $\partial U/\partial r$ は負となり、後方からの塩水の流れ込みがないサーマルの場合には $\partial U/\partial r$ は正の値を取ることを示した。ここで扱っている油の拡がりについても類似の現象が生じていると考えられ、流出源から常に油が供給されている連続流出の場合は先端部付近の速度勾配 $\partial U/\partial r$ は負の値を取る。したがって、式 (16) より、連続流出の場合

$$C_1 < 0 \dots\dots\dots(30)$$

の条件が得られる。

式 (27), (28), (29) および (30) から、連続流出の場合に係数 C_1, C_2 のとり得る値の範囲は、Fig. 3 の斜線の部分で表わされる。

(3) 解析結果と実験値との比較

2. で述べた理論を検証するため、小湾口から湾外の水面へ連続的に油を流出させた場合の実験結果を用いて、実験値と理論値との比較を行った。実験は、幅 12 m×12 m、水深 30 cm の平面水槽を用いて行い、水槽の一边の中央に幅 30 cm、奥行 50 cm の小湾を作り、そこから一定量の油を連続的に流出させて、湾外での油の拡がりを 16 mm カメラで写真撮影した²⁴⁾。

Fig. 4 は、B 重油 4.4 l/min を流出させた場合の拡が

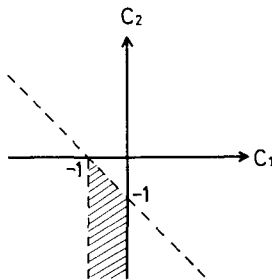


Fig. 3 Limits of the value of the coefficients C_1 and C_2 .

りの一例を示している。図中の数字は、油が湾口から流出し始めたときを $t=0$ s とした経過時間である。流出油は、湾口を中心として半円状に拡がっていくが、湾口付近では側壁の摩擦の影響で横方向への拡がりが抑えられ、完全な軸対称の拡がりとはならない。ここでは、拡がりの半径として、側壁の影響が最も小さいと考えられる、湾口から側壁に直角に沖に向かって油層先端までの距離 r_f をとり、それを拡がりの半径として理論値と比較した。また、油層先端の速度 U_f の実験値は、 r_f の測定値をもとに、 $U_f = dr_f/dt$ として求めた。

本実験で使用した油は、A 重油および B 重油の 2 種類で、一部の実験には水槽水温より約 10°C 加熱した B 重油を使用しているが、その粘性はほぼ A 重油の粘性に等しい。A 重油の粘性は Lau らの使用した OIL No.1 の粘性にほぼ等しく、B 重油の粘性は OIL No.3 の粘性にほぼ等しい。したがって、式 (22) により油層先端速度 U_n を計算する場合には、実験に使用した油が A 重油の場合については抵抗係数 f_i は 0.006 を、B 重油の場合には 0.01 を与えた。

連続流出の場合の係数 C_1, C_2 のとり得る値の領域は、Fig. 3 で示されるが、それぞれの値を理論的に決定するには至っていない。したがってここでは、次のような方法で C_1, C_2 の値を決定した。ある 1 つの実験ケースについて、まず、それと同じ初期条件のもとに、式 (24) から各時刻での油層の拡がり r_{*c} を求め、その値と実験で得られた各時刻の油層の拡がり r_{*e} との差の標準偏差 σ を求める。このとき、計算に用いる C_1 と C_2 の値は、Fig. 3 で許される領域内での適当な組合せを与える。次に、 C_1 と C_2 の値を変えて同じ計算過程を繰り返して、 r_{*c} と r_{*e} の差の標準偏差値が最も小さくなるように、 C_1, C_2 の値を決定する。なお、解析上の初期条件としては、油が湾口から流出し始めた時刻を $t=0$ s とし、湾口から流出開始直後の第 1 回の形状測定時の r および U を r_s, U_s として与え、さらに $t=0$ か

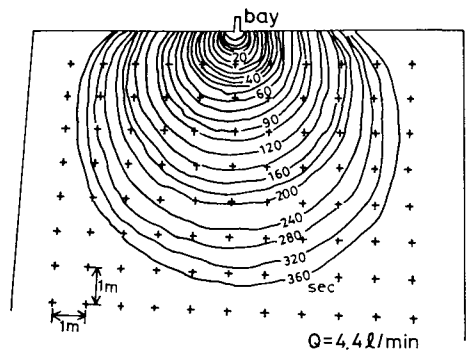


Fig. 4 Typical spreading pattern of continuously spilled oil from the mouth of the outlet.

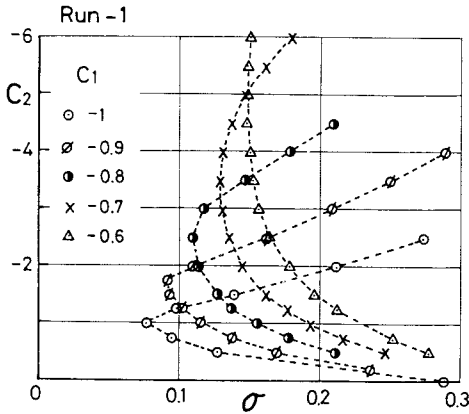


Fig. 5 Standard deviations of residual between τ_{*e} and τ_{*c} (Run-1: heated B-heavy oil).

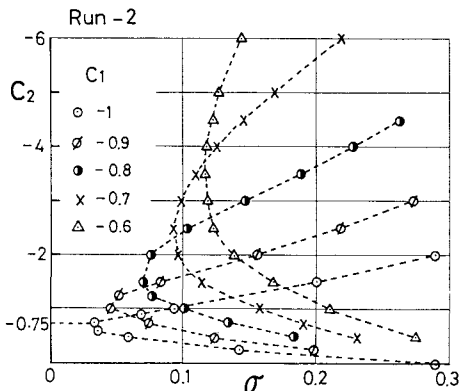


Fig. 6 Standard deviations of residual between τ_{*e} and τ_{*c} (Run-2: B-heavy oil)

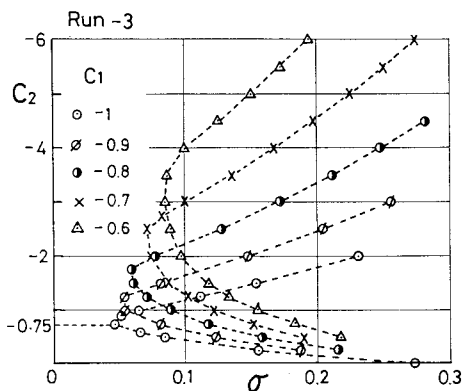


Fig. 7 Standard deviations of residual between τ_{*e} and τ_{*c} (Run-3: A-heavy oil).

ら t_s までに流出した油量から流出半径 r_s の仮想円の油層厚さを求め、それを δ_s と仮定した。Fig. 5 に、Run-1 の実験ケースについて求めた σ の変化の様子を

示す。図は、縦軸に係数 C_2 をとり C_1 をパラメーターとして図化している。図によれば、Run-1 で実験値と計算値の差の標準偏差が最も小さくなる C_1 と C_2 の組合せは、 $C_1 = -1$ 、 $C_2 = -1$ の場合であった。同様の計算を他の 2 つの実験ケース Run-2、Run-3 についても行った。その結果を Fig. 6、7 に示す。この 2 つの実験ケースでは、いずれの場合も σ の値が最小となる C_1 と C_2 の組合せは、 $C_1 = -1$ 、 $C_2 = -0.75$ であった。以上の結果から、 C_1 の値は -1 、 C_2 の値としては -0.75 ないし -1 程度と考えられる。Run-2、3 の値を採用して、 $C_1 = -1$ 、 $C_2 = -0.75$ とすると、式 (22) は

$$U_n^2 = \exp\{K(1-r_*)\} + \frac{1.50}{F_{rs}^2} \exp(-Kr_*) \times \int_1^{r_*} u^{-1} \cdot \exp(Ku) du \dots \dots \dots (31)$$

と表わされる。

Fig. 8(a), (b), Fig. 9(a), (b), および Fig. 10(a), (b) は、3 つの実験ケースについて、式 (31) による U_n および r_* の計算値と実験値の比較を行った結果を示している。図において、横軸の t_* は $t \cdot (U_s/r_s)$ を表わし、また図中の実線は計算値を、黒丸印は実験値を示している。計算値は実験値によく一致しているといえよう。なお、 $C_1 = -1$ とすると、式 (19) から $\delta_r/\delta_s = 1$ が得られる。これに式 (17) をあわせて考えると、連続流出で $C_1 = -1$ の場合は、油層先端には薄いくさび状の形状が一定の部分があり、その部分を追跡して油層の拡がりを

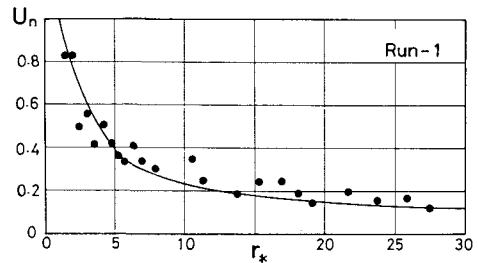


Fig. 8(a) Comparison between the calculated and measured values of U_n (Run-1: heated B-heavy oil, $f_i = 0.006$).

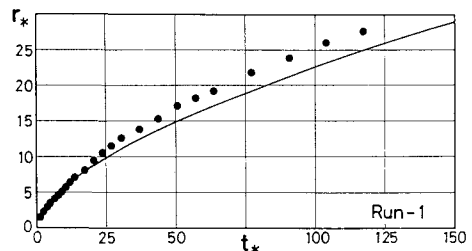


Fig. 8(b) Comparison between the calculated and measured values of r_* (Run-1: heated B-heavy oil, $f_i = 0.006$).

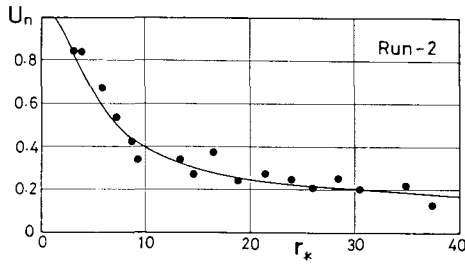


Fig. 9(a) Comparison between the calculated and measured values of U_n (Run-2: B-heavy oil, $f_i=0.010$).

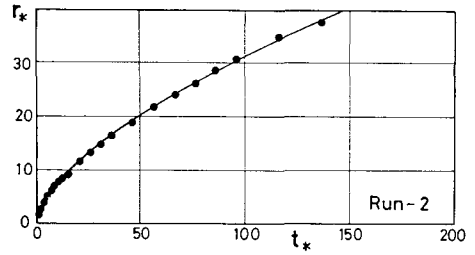


Fig. 9(b) Comparison between the calculated and measured values of r_* (Run-2: B-heavy oil, $f_i=0.010$).

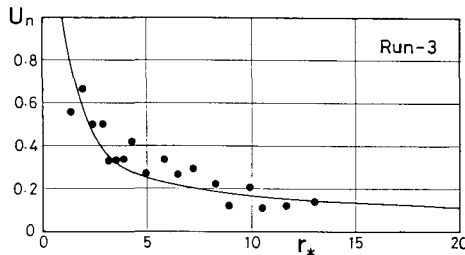


Fig. 10(a) Comparison between the calculated and measured values of U_n (Run-3: A-heavy oil, $f_i=0.006$).

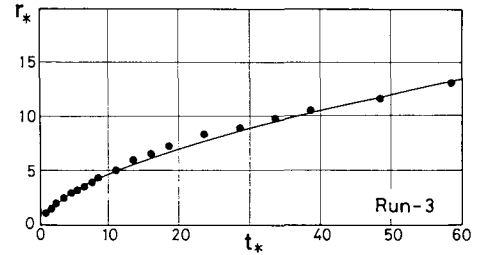


Fig. 10(b) Comparison between the calculated and measured values of r_* (Run-3: A-heavy oil, $f_i=0.006$).

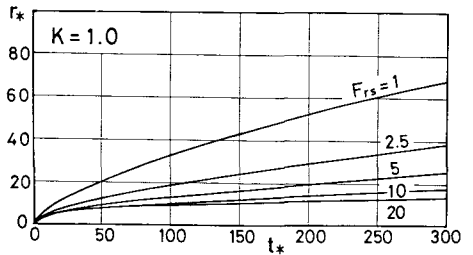
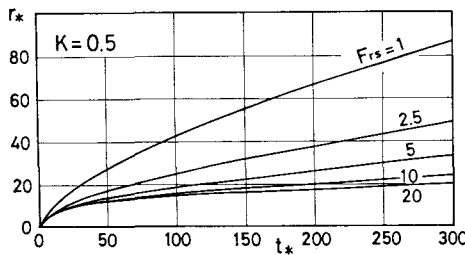
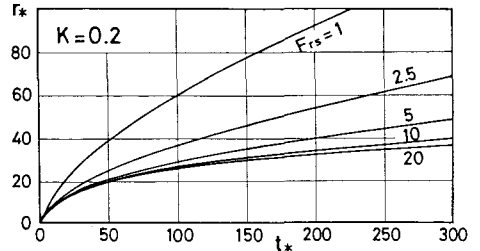
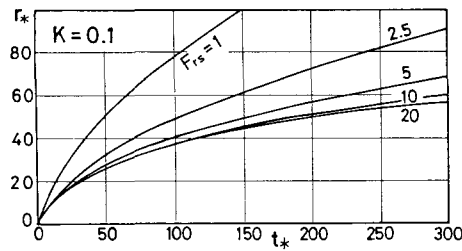


Fig. 11 Change of r_* versus K and F_{rs} .

求めていることになる。この仮定は、比較的小量の油が一定量で連続的に流出する今回の実験のような場合には、ほぼ妥当な仮定と考えられるが、種々の実験条件に対し本モデルの適合性を高めるためには、油層先端部の形状の変化に関するデータを蓄積して、係数 C_1 、 C_2 の精度を向上させることが不可欠であろう。

Fig. 11 には、 F_{rs} および K をパラメーターとして式 (31) および式 (24) から求めた r_* および t_* の関係

が示されている。図によれば、 K が一定の場合には F_{rs} が大きくなるほど r_* の傾きはゆるやかになり、 F_{rs} が一定の場合には K が大きくなるほど r_* の傾きはゆるやかになっている。

4. むすび

本研究は、静水面上に流出して軸対称的に拡がっていく油層について、油層先端流速の変化、および油の流出

後の経過時間と油層先端の拡がり大きさの関係を解析的に求めたもので、その主な内容を要約すると以下のとおりである。

(1) 油層の運動方程式および連続の式から、特性微分方程式を作ってそれを解き、油層先端の流速変化を規定する式を導いた。

(2) ここで得られた油層先端の流速変化、および油層の拡がり大きさと流出時間の関係を表わす理論式は、重力・慣性力領域から重力・粘性力領域にかけての油の拡がりに適用できる。ここでは湾口から連続流出する油の拡がりの実験データに基づいて、理論式の検証が行われた。

(3) 連続流出の場合の油水界面での抵抗係数の値は、Lau & Moirの実験を参考にして、A重油の場合には $f_i=0.006$ 、B重油の場合には $f_i=0.01$ の値を用いた。

(4) 理論式の中に含まれる係数 C_1 、 C_2 の取り得る値の領域はFig. 3で示される。さらにその値は、実験データをもとに、実験値と計算値の差の標準偏差が最小になるように決定され、 $C_1=-1$ 、 $C_2=-0.75$ が与えられた。これらの値を用いた連続流出の場合の計算値は、実験値によく一致することが確認された。なお、ここで得られた係数 C_1 、 C_2 の値は連続流出の場合についての結果であり、瞬間流出の場合には異なる値をとるものと考えられる。それについては、さらに実験等に基づいた詳細な検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 徳島県：三菱石油流出油事故対策報告書，1976年。
- 2) 田尻宗昭：油濁の海，日本評論社，1981年。
- 3) 環境庁水質保全局・(社)瀬戸内海環境保全協会：瀬戸内海の環境保全(資料集，昭和60年)，pp. 83。
- 4) 環境庁編・大蔵省印刷局発行：昭和61年版環境白書，pp. 206~208。
- 5) 資源エネルギー庁監修：1985年資源エネルギー年鑑，pp. 203~204，通産資料調査会，1985年。
- 6) 前掲5)，pp. 383~340。
- 7) 津田 覚 編：瀬戸内海の油汚染，pp. 89~120，大日本図書，1976年。
- 8) Fay, J. A. : The spread of oil slicks on a calm sea, Oil on the Sea, Prenum Press, pp. 53~63, 1969.

- 9) Hoult, D. P. : Oil spreading on the sea, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 4, pp. 341~368, 1972.
- 10) Fannelop, T. K. and Waldman, G. D. : The dynamics of oil slicks-or "Creeping Crude", AIAA 9th Aero-space Sciences Meeting, No. 71-14, January 25-27, 1971.
- 11) Fannelop, T. K. and Waldman, G. D. : Dynamics of oil slicks, AIAA Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 506~510, 1972.
- 12) Buckmaster, J. : Viscous-gravity spreading of an oil slick, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 59, part 3, pp. 481~491, 1973.
- 13) Abbott, M. B. : On the spreading of one fluid over another, La Houille Blanche, No. 5, pp. 622~628, No. 6, pp. 827~846, 1961.
- 14) 平野宗夫・羽田野袈裟義：密度流先端部の流動特性について，土木学会論文報告集，第314号，pp. 67~73, 1981年。
- 15) 平野宗夫・羽田野袈裟義：漸拡水路における密度流先端部の挙動，土木学会論文報告集，第322号，pp. 47~54, 1983年。
- 16) たとえば，犬井鉄郎：偏微分方程式とその応用，pp. 43~48，コロナ社，1957年。
- 17) 土木学会編：水理公式集一昭和60年度版一，pp. 59, 1985年。
- 18) 首藤伸夫・大野 操：石油の拡がりの実験，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 509~513, 1977年。
- 19) 後藤智明：津波による油の拡がりに関する数値計算，土木学会論文集，第357号，II-3, pp. 217~223, 1985年。
- 20) Iau, Y. L. and Moir, J. : Booms used for oil slick control, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. EE2, 1979.
- 21) Berry, B. A. and Rajaratnam, N. : Oil slicks in ice covered rivers, Journal of the Hydraulic Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. 3, March, 1985.
- 22) 埜口英昭・山崎宗広：海面上に連続流出する油の拡がり，第26回水理講演会論文集，pp. 569~575, 1982年。
- 23) Hirano, M. and Hadano, K. : On motion of turbidity current head (Part 3), 4th Congress-Asian and Pacific Division IAHR, Chanmai, Thailand, September, 1984.
- 24) 埜口英昭・山崎宗広・橋本英資：静かな海面上に流出した油の拡がりについて，中国工業技術試験所報告，第12号，pp. 17~40, 1980年。
- 25) 前掲24)

(1987.10.28・受付)