

水面上の油の拡がりについて

山口大学 工学部 学○田 村 宜 史 山口大学 工学部 正 羽田野袈裟義
山口大学 工学部 学 受 川 弘 信

1. はじめに

海面上に流出した油の拡がりを精度よく予測することは海域環境上重要な課題である。この問題を2層流モデルとして特性曲線法を用いて解析する場合、先端部および境界部の取り扱いが重要となる。本研究では、静止流域でのタンカーなどの事故による点源から油が流出する場合を想定し、軸対称の場合について油層拡がりのモデル化を行った。また、先端条件を再検討するとともに「瞬間流出」の場合について検討を行った。

2. 2層流モデルによる解析

(1) 基礎方程式と計算式

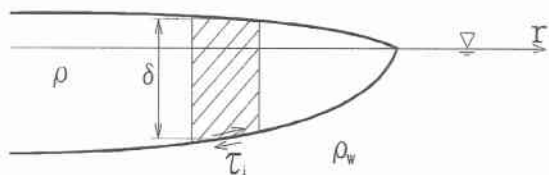


図-1. 油層の模式図

図-1に示すように密度 ρ_w の静止水域に密度 ρ の油が流出した場合、油は表面密度噴流として流動する。基礎式は上層流体の連続式と運動方程式である。水・油の境界面での連行はないから、連続式は式(1)で、また運動方程式は式(2)で与えられる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + u \frac{\partial \delta}{\partial r} + \delta \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{u\delta}{r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{\partial \delta}{\partial r} - \frac{\tau_i}{\rho \delta} \quad (2)$$

Massauの方法にならい $C^2 = \Delta \rho g \delta / \rho$ を導入して式(1)、式(2)を変形し、特性曲線表示すると式(3)、式(4)が得られる。

$$\omega_+ \text{ 上で } \frac{d}{dt}(u+2C) = -\frac{\tau_i}{\rho \delta} - \frac{Cu}{r} \quad (3)$$

$$\omega_- \text{ 上で } \frac{d}{dt}(u-2C) = -\frac{\tau_i}{\rho \delta} + \frac{Cu}{r} \quad (4)$$

一定幅の油層拡がりの場合は式(1)、式(2)の右辺第2項がゼロである。これらの式をしかるべき初期条件

と境界条件のもとに解くこととなる。以下に必要な界面抵抗、境界条件、初期条件を述べる。

(2) 油・水境界での抵抗

前報¹⁾を踏襲し、油・水境界面が傾斜した状態で油層先端が進行し、周囲水を加速して押しのける際の慣性抵抗として油層先端部の付加的な界面抵抗を評価する。油層先端部が周囲水を押しのけることによる界面抵抗は次のように評価される。

$$\tau_F = \rho_w \frac{\partial \delta}{\partial t} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial x} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} u \quad (6)$$

よって、全体の界面抵抗の評価式として、これに漸変流の抵抗式を加えて式(7)で与える。

$$\tau_i = \tau_F + f_i \rho_w u^2 \quad (7)$$

ここで、 f_i は漸変流の界面抵抗係数でLau²⁾らの研究により油・水境界面の場合には0.003程度の値と見なされる。

(3) 初期条件

埜口³⁾によると、1次元と軸対称の瞬間流出では、水平長さ L_0 の貯油槽にためられた厚さ h_0 の油層の仕切をはずすと、仕切位置の油層厚さが $h_0/2$ となり、油層はこれより前方に延び、水の層が逆に下半分に侵入する。埜口は、流出直後の t_0 時間のうちに油層が L_0 だけ進行するものとして、次元的考察をおこなった。さらに、初期の油層進行のフルード数がほぼ1であることを確かめ、次の関係式を与えた。

$$t_0 = (L_0 / \Delta \rho g / \rho)^{1/2} \quad (9)$$

$$\delta_0 = L_0 h_0 / 2 \quad (10)$$

1次元の場合¹⁾、初期条件は以上を考慮してなおかつ単純な式で次ぎのように与えられる。

$$\delta = h_0 : u = 0 \quad \text{for } 0 \leq x \leq (L_0 - \delta_0) \quad (11-a)$$

および

$$\delta = \delta_0 = h_0 / 2 : u = \left(1 + \frac{x - L_0}{\delta_0} \right) \frac{u_0}{2} \quad \text{for } (L_0 - \delta_0) \leq x \leq (L_0 + \delta_0) \quad (11-b)$$

ここで、 $u_0 = (\Delta \rho g \delta_0 / \rho)^{1/2}$ である。軸対称の場合も

同様であるから式(11)で $x \rightarrow r$ と置き換えて初期条件とする。

(3) 境界条件

既報¹⁾では大野の実験結果を用いて先端条件を定式して用いた。しかし、先端厚さ δ_f の特定に任意性があった。そこで、天野⁴⁾の実験結果を再整理し、内部境界面上で先端に最寄りの渦放出位置での上層流体厚さを先端厚さ δ_f に採用した。これと移動速度 u_f を用いて先端条件を調べた結果 $Fr = A \cdot Re^n$ で近似され、次式を得た(図-2参照)。

$$\begin{aligned} A &= 0.1559, \quad n = 0.02902 \quad \text{for } Re < 1000 \\ A &= 1.1573, \quad n = 0 \quad \text{for } Re \geq 1000 \end{aligned} \quad (12)$$

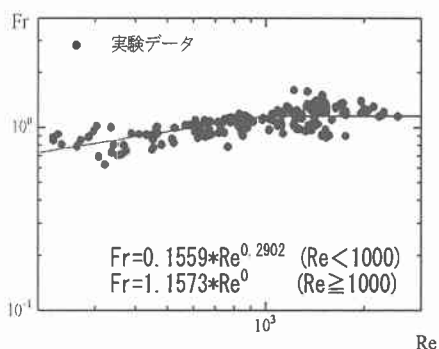


図-2. Fr と Re の関係

また、既報¹⁾では δ_f が小さくなると計算不能となったため、 δ_f が 0.3cm 以下になった場合、 δ_f を 0.3cm に固定したが、0.3cm の意味が不明なうえ、一部の計算では適合性が劣っていた。この改善策として δ_f と平均層厚 $\bar{\delta}$ の 1/4 の値を比較して、大きい方を計算上の先端厚さに設定した。

3. 解析結果

以上の条件により RUN2-1, RUN2-2 ($h_0 = 4.54\text{cm}$, $L_0 = 14.5\text{cm}$), RUN2-3 ($h_0 = 1.51\text{cm}$, $L_0 = 14.5\text{cm}$) に対して計算を行った結果を図-3に示す。

RUN2-1, RUN2-2 では $t = 4$ 秒あたりで $\delta_f = 0.25\bar{\delta}$ にシフトし、RUN2-3 では $t = 18$ 秒あたりで $\delta_f = 0.25\bar{\delta}$ にシフトしている。いずれも計算は実験値をよく再現している。また、先端条件の取り扱いを既報と変えたことの効果を調べるため、1次元の実験 RUN9, ($h_0 = 10\text{cm}$, $L_0 = 10\text{cm}$), RUN10 ($h_0 = 10\text{cm}$, $L_0 = 40\text{cm}$) について、既報の計算結果と本研究の計算結果との比較を図-4に示す。既報の計算方法に比べて本計算法では、適合値

が改善されていることが明確である。

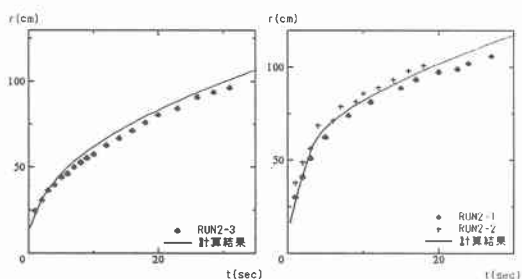


図-3. 軸対称流出解析結果

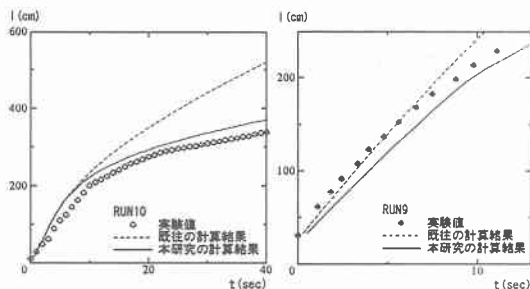


図-4. 1次元流出解析結果

4. 結論

以上、軸対称の場合について油層拡がりのモデル化を行い先端条件を再検討するとともにいわゆる「瞬間流出」についてモデルの再検討を行った。計算結果は実験結果をよく再現し、計算法の妥当性が認められた。また、先端条件の取り扱いを改善したことにより、適合性が向上した。

参考文献

- 1) 羽田野ら: 水面上の油層の1次元的な拡がりについて, 土木学会論文集 No. 593/II-43, 117-124, 1998. 5
- 2) Lau, Y. L. & Moi, J.: Booms used for oil slick control, J. of the Env. Eng., ASCE Vol. 105, No. EE2, 1979
- 3) 埜口英昭: 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報告, 第9号, 1991
- 4) 天野卓三: 油層の拡がりとは表面密度噴流の流出直後の流動に関する研究, 山口大学修士論文, 1998