

油層先端の条件とその1次元解析法への適用

山口大学工学部 正員 羽田野袈裟義 学生員 天野卓三
 名神建設コンサルタント 正員 〇河上 隆 大
 宇部短期大学 正員 松本 治彦

1. はじめに

タンカーの座礁などにより海域に流出した油の拡がりを予測することは海域環境上重要な課題である。前報¹⁾では、2層流としての取扱いで上層流体の連続式と運動方程式を特性曲線表示し、フロント近くの層厚が適当に小さな値の部分の部分をいわゆる先端とみなして、これより後方を取り扱う方法を示した。その中で、二次元的考察から得られた先端条件を計算に組み込むとともに、Fannelopら²⁾が先端部の境界層の発達を考慮して与えた界面抵抗の評価式を用いたが、油層の実験との比較はできなかった。今回、瞬間流出と連続流出の場合の初期条件と境界条件を検討すると共に、瞬間流出の場合の埝口の実験結果への適用を試みる。

2. 理論の概要

図-1に示すように、密度 $\rho_2(=\rho+\Delta\rho)$ の水の静止域に密度 ρ の油が流出した場合、油水面上を流動する。水・油の混合や油の変質を無視すると、油層の連続式と運動方程式は次のようである。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial (u\delta)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \delta = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \rho g \delta^2 \right) - \tau_i \quad (2)$$

Massauにならい、 $C^2 = \Delta \rho g \delta / \rho$ を導入して得られる式(1)

と(2)の変形式の和と差を特性曲線表示すれば、特性曲線 ω_+

と ω_- 上で次のようになる。

$$\omega_+ : dx/dt = u + C \text{ 上で } d(u + 2C) = -\tau_i / (\rho \delta) \quad (3)$$

$$\omega_- : dx/dt = u - C \text{ 上で } d(u - 2C) = -\tau_i / (\rho \delta) \quad (4)$$

ここで、 τ_i は境界面のせん断応力で、Fannelopらにならい、先端から後方に向かって界面に境界層が発達すると考えて、Leading edgeの位置を x_{LE} 、その速度を u_{LE} として界面抵抗を次式で与えた。

$$\tau_i = (\rho_w \mu_w / \pi)^{1/2} u_{LE}^{1/3} (x_{LE} - x)^{-1/2} + f_i \cdot \rho u^2 \quad (5)$$

式(5)では $x = x_{LE}$ で τ_i が無大となる。これを回避するため、後述の先端条件(式(8))を満たす流動厚さを δ_i 、その位置を x_i とすると、 $x_{LE} = x_i + \beta \delta_i$ とした。また、 u_{LE} は先端移動速度 u_i を与えた。

先端条件は、先端部の形状とフロント速度に関する大野の詳細な実験結果に、先端部の作用力のバランスを考慮した二次元的考察を適用して得た次の関係式を用いる。

$$\delta_i \sqrt{\Delta \rho g \delta_i / \rho} / \nu = A (U_i \delta_i / \nu)^n ; A=2.41, n=0.822 \quad (6)$$

3. 初期条件と境界条件

まず、瞬間流出の場合を述べる。埝口によれば、厚さ h_0 、長さ L_0 の貯油槽のシャッターを解放して瞬間流出をおこすと、流出直後に先端は貯油槽の油層厚のほぼ1/2倍の厚さ(δ_0)となって進行する。油層の拡がりを支配する作用力のバランスは、流出後の時間の経過と共に慣性力・重力→重力・粘性力→粘性力・表面張力と移行していくことが知られている。流出直後に距離 l_0 だけ油層先端が進行した時刻を計算の初期時刻とする。流出後これに至るまでの時間 t_0 を二次元的考察から、式(7)により定義する。また、同じような二次元的考察により、流出初期には先端部の密度フルード数が一定で推移すると考えられる。実験によれば、1次元の場合流出前の油層厚を用いた密度フルード数で約0.7、流出後の先端部厚さをを用いた密度フルード数で約1となっている。式(7)とこのフルード数の条件を組み合わせると、式(8)を得る。

$$t_0 = [l_0 / (\Delta \rho g / \rho)]^{1/2} \quad (7) ; \quad l_0 = \delta_0 \quad (8)$$

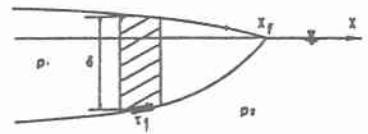


図-1 流れの模式図

したがって、計算の初期条件としては図-2のように与える。即ち

$$\begin{aligned} \delta &= h_0 \quad (0 \leq x < L_0 - \delta_0); \quad \delta = \delta_0 = h_0/2 \quad (L_0 - \delta_0 \leq x \leq L_0 + \delta_0) \\ u &= 0 \quad (0 \leq x < L_0 - \delta_0); \quad u = [1 + (x - L_0)/\delta_0] \cdot u_{\pm 0}/2 \quad (L_0 - \delta_0 \leq x \leq L_0 + \delta_0) \end{aligned} \quad (9)$$

次に境界条件を示す。境界条件は上流端と下流端で与えるが、下流端の条件は連続流出の場合と同じで式(8)となる。上流端の境界条件は上流端に壁がある条件となり $x=0$ で $u=0$ が課される。なお、これは実際に貯油槽の壁が存在する場合であるが、貯油槽の両側のスリットを同時に解放する瞬間流出の場合、流動は左右対称になるから、流出前の貯油槽の中央を $x=0$ として $x>0$ の領域だけを計算すればよい。この場合境界条件は $x=0$ で $u=0$ となる。ただし、式(9)の L_0 は $L_0/2$ に置き換えられる。

連続流出の場合、流出直後において流動厚さと流速が出口近くの長さ l_0 の部分で一定と考えて差し支えないであろう。このとき式(7)と式(8)の条件は変わらない。また、出口の流量が制御される事情は流出初期でも変わらないから、初期条件はこれとフルード数1の条件を組み合わせる次のように与えられる。

$$\delta = (q_0 / \sqrt{\Delta \rho g / \rho})^{2/3}; \quad u = (q_0 \cdot \Delta \rho g / \rho)^{1/3} \quad (0 \leq x \leq \delta) \quad (10)$$

ここで、 q_0 は初期の流量である。次に境界条件であるが、先端の条件は前と同様に式(6)で与えられる。出口の条件は、 $q(t) = u\delta$ となり、計算ではこの関係と特性曲線 ω 上で与えられる関係(式(4))とを組み合わせ δ の3次式を解く。

4. 計算結果

以上のようにして先端位置 $x_{\pm}$ の時間的変化を求めた。なお、先端条件として式(6)を課す場合、途中で先端速度が著しく小さくなり、ある程度時間が経過するとフロントの進行がみられなくなる。式(8)が $\delta_{\pm} > 0.3 \sim 0.5 \text{ cm}$ について得られていることを考慮して $\delta_{\pm}$ がこれらの値以下になったらこれらの値に固定してみた。図-2は計算値と実験値を時刻に対してプロットしたものである。計算値は途中で弱い折れ線となるが、これは計算の中で先端の厚さ $\delta_{\pm}$ が式(5)による値から一定値へとシフトしたことを示す。

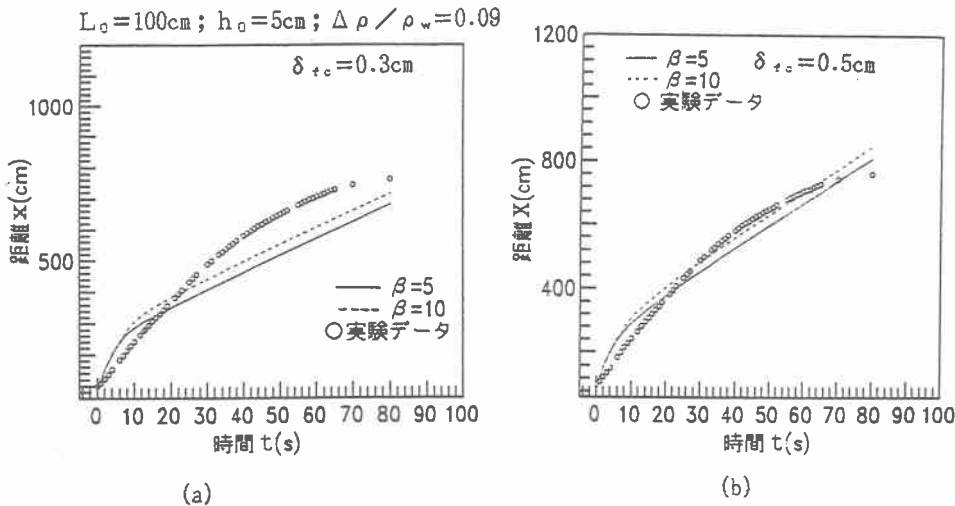


図-2 先端位置の実験値と計算値

参考文献

- 1) 羽田野ら(1995): 第50回土木学会年講概要集, pp.536-537。
- 2) Fannelopら(1972): AIAA Journal, Vol.10, No.4, pp.508-510。
- 3) 壁口英昭(1991): 中国工業技術試験所研究報告、第9号。