

油層先端の条件と1次元モデル

山口大学工学部 正 員 羽田野袈裟義
山口大学大学院 学生員 ○天野 卓三
山口大学大学院 学生員 矢野 晶人
宇部短期大学 正 員 松本 治彦

1. はじめに

海面上に流出した油が拡がる現象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層流モデルで解析する場合、先端部の取扱いが重要となる。よって、本研究では、既往の油層先端の実験結果を用いて先端条件を検討し、その結果を下流端の条件として非定常2層流モデル解析に適用することを試みる。

2. 解析方法

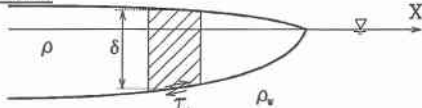


図-1 流れの模式図

図-1に示すように、密度 ρ_w の水の静止域に密度 $\rho(=\rho_w - \Delta\rho)$ の油が流出した場合、油層の連続式と運動方程式は次のようになる。

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

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

Massauにならい、 $c^2 = \Delta \rho g \delta / \rho$ を導入して式(1)、(2)を変形し、その和と差をとって特性曲線式を得る。その差分表示式を用いて解析を行う。

2-1 先端条件

首藤らは油層先端の条件を実験的に検討し、Fr数とRe数の関係を示したが、データの散乱が著しい。ここでは、作用力のバランスの点から再検討し、図-2及び式(3)を得た。すなわち、油が水の抵抗を受けながら進行し、水の動粘性係数を用いた方がまとまりがある。したがって、水の動粘性係数を用いるべきであると考えられる。

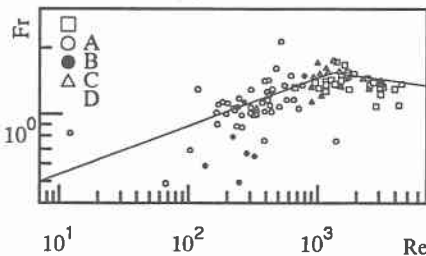


図-2 Re数とFr数の関係（動粘性係数；水）

$$\frac{u_f}{\sqrt{\Delta \rho g \delta_f / \rho}} = A \left(\frac{u_f \delta_f}{\nu} \right)^n \quad (3)$$

$$\text{Re} > 1500 \quad ; \quad A = 2.87 \quad n = -0.0960$$

$$\text{Re} \leq 1500 \quad ; \quad A = 0.317 \quad n = 0.209$$

2-2 界面抵抗の評価式

2-2-1 Fannelopら

彼らは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、Leading Edgeの位置を x_{LE} 、その速度を u_{LE} として界面抵抗を平板に沿う境界層の壁面抵抗の表現から次式で与えた。

$$\tau_w = \sqrt{\frac{\rho_w \mu_w}{\pi}} u_{LE}^{\frac{1}{3}} \frac{1}{\sqrt{x_{LE} - x}} \quad (4)$$

式(4)では $x = x_{LE}$ で τ_w が無大となる。これを回避するため、ここでは、先端条件(式(3))を満たす流動厚さを δ_f 、その位置を x_f 、この周辺の δ_f 程度の区間での平均的な界面勾配をgradとし、 x_{LE} を次式で与える。

$$x_{LE} = x_f + K \delta_f / \text{grad} \quad (5)$$

2-2-2 慣性抵抗の評価

油の移動に伴って任意区間の水塊は加速し、これにより運動量が増加する。これを慣性抵抗として考え、次式を与える。

$$\tau_w = \rho_w \frac{\partial \delta}{\partial t} \left\{ 1 - 2k' \left[1 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} u \quad (6)$$

以上は油層先端部の界面抵抗の評価であり、後方部の界面抵抗の適切な評価ができない。そこで、式(7)を与える。

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

ここで、 f_i は摩擦抵抗係数であり、ここでは塩水楔の経験式の k_f 倍、及びLauらの結果の双方により、次のように評価する。

$$\text{塩水楔} \quad ; \quad f_i = 1 \times k_f \left[\frac{u^3}{\nu(1 - \Delta \rho)g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8-A)$$

$$\text{Lauら} \quad ; \quad f_i = 0.003 \quad (8-B)$$

2-3 初期条件および境界条件

壁口によれば厚さ h_0 、長さ L_0 の貯油槽のシャッターを解放して発生する瞬間流出の場合、流出直後にシャッター位置の油層厚がほぼ1/2倍の厚さ(δ_0)となって進行する。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 を次元的考察から、式(9)により定義する。また、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、一次元の場合、流出前の油層厚を用いたフルード数で約0.7、流出後の先端部厚さを用いた密度フルード数で約1となっている。よって、式(9)とこのフルード数の条件から、式(10)が得られる。

$$t_0 = \left(\frac{l_0}{\Delta \rho g / \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9) \quad l_0 = \delta_0 \quad (10)$$

以上により、計算の初期条件としては次のように与える。

$$\delta = h_0 \quad (0 \leq x \leq L_0 - \delta_0)$$

$$\delta = \delta_0 = \frac{h_0}{2} \quad (L_0 - \delta_0 \leq x \leq L_0 + \delta_0) \quad (11-A)$$

$$u = 0 \quad (0 \leq x \leq L_0 - \delta_0)$$

$$u = \left(1 + \frac{x - L_0}{\delta_0} \right) \frac{u_{f0}}{2} \quad (L_0 - \delta_0 \leq x \leq L_0 + \delta_0) \quad (11-B)$$

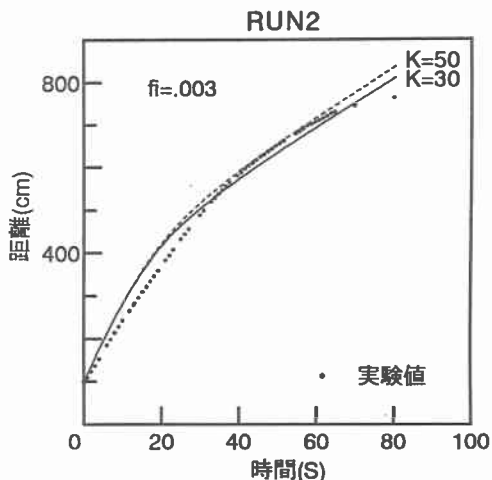
$$u_{f0} = \sqrt{\Delta \rho g \delta_0 / \rho} \quad (11-C)$$

境界条件は上流端と下流端で与えるが、下流端の条件は式(3)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。

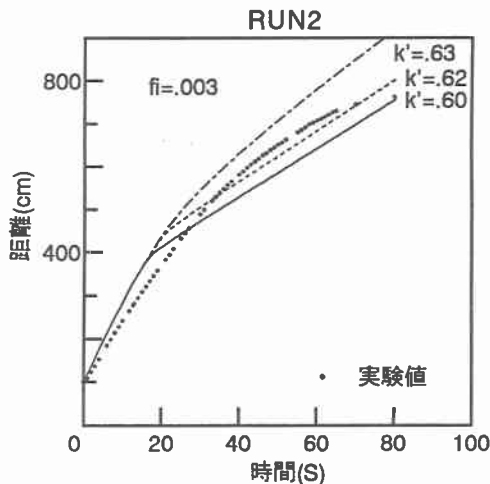
3. 計算結果

以上により瞬間流出の場合の先端位置の時間的な変化を求めた。なお、先端条件として式(3)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先端の進行がみられなくなるので、先端油層厚 $\delta_f = 0.3\text{cm}$ 以下となった場合、その値を0.3に固定した。これらの条件での解析結果を、図-3に示す。

界面抵抗の評価式は油層厚が小さい時はFannelopの方法の方が、油層厚が大きくなると慣性抵抗を評価する方法の方が実験値に近くなる。その理由としては、Fannelopらの方法は、迎え角ゼロの場合の平板境界層の式であるためだと考えられる。また、後続部の摩擦抵抗係数はLauが油層の実験で求めた結果を用いるのが妥当であると考えられる。



($L_0 = 100\text{cm}, h_0 = 5\text{cm}, B = 50\text{cm}, \Delta \rho / \rho = 0.9$)
図-3-a 先端位置の実験値と計算値(Fannelop)



($L_0 = 100\text{cm}, h_0 = 5\text{cm}, B = 50\text{cm}, \Delta \rho / \rho = 0.9$)
図-3-b 先端位置の実験値と計算値(慣性抵抗)

4. まとめ

以上、先端条件を再検討し、図-2及び式(3)を得た。また、先端部の界面抵抗の評価において、慣性抵抗としての評価を行い、Fannelopらの方法を用いるよりは合理的であることが示唆された。

参考文献

- 首藤・大野ら : 第24回海岸工学講演会(1977)
- Lau・Moirら : ASCE, Environmental Engineering Division (1979)