

流水面上に流出した油の定常的な拡がり

Steady State Spreading of Oil Spilled
on the Surface of Water Streaming

羽田野袈裟義・埜口英昭・平野宗夫・齊藤隆

By Kesayoshi Hadano, Hideaki Noguchi, Muneo Hirano and Takashi Saitou

Steady state spread of oil slick formed when the oil is continuously poured on the surface of uniform water stream is dealt with. Theory is developed by means of the two-layers model which takes into account the lateral spread of oil slick whose velocity is assumed proportional to the advancing velocity of the density front. Governing equations of the average thickness, average velocity and the width of oil slick are derived. Calculations of width of oil slick is compared with experimental data.

Keywords: Oil slick, Oil spread, Surface buoyant jet.

1. 序論

1974 年岡山県水島の石油化学コンビナートの事故の際流出した油による瀬戸内海およびその沿岸での油汚染被害の実態は生々しい記憶として残っている。油の流出による海域汚染を効果的に防止するには、油層の拡がりを精度よく予測することが必要である。静止水域へ流出した場合油の拡がりについてはこれまで実験的・理論的研究が活発に行なわれており^{1)~7)}、拡がりの定量評価がある程度可能になっている。しかしながら、実際の海域では流れを生じているのがふつうで、この場合についての研究はあまりみられない。

本研究は、流水面上に流出した油の拡がりのもっとも単純な問題として、一様な流速で流れる水の表面上に、油が流れと同じ向きに一定の流量・流速で連続的に流出した場合について、油層の定常的な拡がりを予測する簡便な方法を提案するものである。理論解析は、従来の3次元表面密度噴流の1次元解析法と同様の

・ 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科
(〒755 宇部市常盤台)

・・ 正会員 通産省工業技術院中国工業技術試験所
(〒737-01 呉市末広2-2-2)

・・・ 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科
(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

・・・ 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒755 宇部市常盤台)

ものであるが、油層幅の流下方向の増加率を評価する新たな方法を提案している。なお、水流速度がゼロの場合、油層の定常的な拡がりは実現されないのでこのケースは本研究の対象としない。

2. 実験と実験結果の概要

実験装置と方法については第26回水理講演会⁸⁾に発表したものである。実験は、幅 3.8m、水深 4m、有効実験区間長約 40m の大型回流水槽を用いて行なわれている。油の放出は、実験区間内の水槽中央の水面位置に下流向きに設置した放出口から連続的に噴出する形とした。実験値および実験に用いた油の物性値は表-1に示すとおりである。表中の物性値は15°Cにおける値であり、実験時の水温は13-14°Cに保たれた。F₀は出口での内部フルード数である。

表-1 実験条件

Run	Oil	ρ_o g/cm ³	ν_o cSt	U_1 cm/s	U_o cm/s	U_o/U_1	F_0
3	No.10	0.857	13.0	19.3	21.1	1.09	1.179
9	No.10	0.857	13.0	19.3	9.0	0.51	0.560
10	No.10	0.857	13.0	19.3	29.6	1.53	1.680
14	No.10	0.857	13.0	19.3	78.6	4.07	4.459
15	Light	0.833	6.0	19.3	21.0	1.09	1.101
19	Light	0.833	6.0	19.3	29.2	1.51	1.533
20	Light	0.833	6.0	19.3	79.3	4.09	4.418
22	No.1	0.874	23.0	19.3	91.3	4.73	5.518
24	No.1	0.874	23.0	19.3	139.0	7.20	8.402
25	No.1	0.874	23.0	31.7	41.5	1.31	2.508
29	No.10	0.857	13.0	31.7	22.2	0.70	1.259
30	No.10	0.857	13.0	31.7	31.6	1.00	1.794

実験によれば、油層は時間とともに平面的なサイズを増大する半円あるいは半楕円形のフロント部分と、これに接続する定常流的な形状の部分からなっている。油層の拡がりの状況は、水面上約 4m の高さに設置した 35mm カメラにより撮影し、得られた写真により油層幅を計測した。以下、定常的な油層の拡がりのモデル化を行なう。

3. 解析モデルと計算法

3.1 基礎方程式

取り扱う現象は、定常な表面密度噴流であり、図-1に示すような2層流モデルで考える。油の噴出方向が水流と同じ向きであるため、外部流と同じ向きの運動が卓越すると考えられることから1次元解析により取り扱う。また、簡単のため油層は長方形断面を保ちながら流下するものと仮定する。基礎方程式は油層についての連続式、および流れ方向の運動量方程式であり、それぞれ次のようになる。

$$\frac{d(uA)}{dx} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx}(\beta \cdot \rho_o u^2 A) = - \frac{\rho_o}{\rho_w} \Delta \rho g \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \delta^2 b \right) + \tau_i \cdot b \quad (2)$$

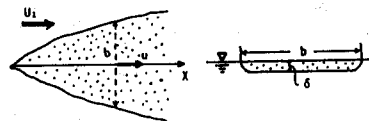


図-1 解析モデル

ここに、Aは油層断面積、 δ は油層厚さ、bは油層幅、uは油層断面平均流速、 ρ_w 、 ρ_o 、 $\Delta \rho$ はそれぞれ水と油の密度及び両者の差、 β は運動量補正係数、 τ_i は内部界面でのせん断抵抗で、水流速度 U_1 と界面抵抗係数 f_i を用いて $\tau_i = f_i \rho_w |U_1 - u| (U_1 - u)$ とおく。

油層断面を長方形に仮定することにより、式(1)は式(3)のように変形される。また、連続式を用いて式(2)を変形し、さらに、 $A = b \delta$ の関係を考慮すれば式(4)が得られる。

$$u \frac{d\delta}{dx} + \delta \frac{du}{dx} = -u \frac{\delta}{b} \frac{db}{dx} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta \rho g}{\rho_w} \frac{d\delta}{dx} + \beta u \frac{du}{dx} = - \frac{\Delta \rho \delta}{2 \rho_w b} g \frac{db}{dx} + \frac{\tau_i}{\rho_o \delta} \quad (4)$$

式 (3), (4) を $d\delta/dx$, du/dx について解けば,

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{\frac{\delta}{b} \frac{db}{dx} (F_i^2 - \frac{1}{2}) + \frac{\rho_w}{\rho_o} F_i^2 f i | \frac{U_i}{u} - 1 | (\frac{U_i}{u} - 1)}{1 - F_i^2} \quad (5)$$

$$\frac{du}{dx} = - \frac{\frac{u}{2b} \frac{db}{dx} + \frac{\rho_w u}{\rho_o \delta} F_i^2 f i | \frac{U_i}{u} - 1 | (\frac{U_i}{u} - 1)}{1 - F_i^2} \quad (6)$$

ここに, $F_i = \sqrt{\beta u / \sqrt{\Delta \rho g \delta / \rho}}$ は内部フルード数である。

3. 2 油層幅の変化の評価

連立方程式 (5), (6) を解いて δ , b および u を求めることが必要である。しかしながら, 式が2個, 未知数が3個で条件が1個不足する。同様の問題は静止水域に流出する3次元表面密度噴流でもおこり, その場合には, Prych⁹⁾の方法を踏襲して拡がり率 db/dx を次式(7)で仮定している¹⁰⁾。

$$\frac{db}{dx} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{F_i^2 - 1}} \quad (7)$$

上式による評価は, 例えば河口で河川水が外海に流出する場合に表面密度噴流としての流れ幅が急に増加する場合に対処できるようになっている。しかしながらここで対象とする, 流れの中に流出する油層の拡がりでは水流速度も関与するはずで, 式(7)をこのケースにそのまま適用することは問題と考えられる。そこで境界面の運動学的条件を, 油層の水平方向の拡がりの油・水境界に適用することにより拡がり率の評価を行なう。即ち, 油層の拡がりの中心線から横方向に y 軸をとり, 境界面を $y = b_1(x)$: $b_1(x) = b(x)/2$; とすると, $D(y - b_1(x))/Dt = 0$ の条件より $db_1/dx = v(b_1)/u(b_1)$ を得る。 b_1 は目視による平面形状の境界を対象とするから, $u(b_1) \approx U_i$, また $v(b_1)$ は密度フロントとしての横方向への拡がり速度 U_r で評価することができる。したがって油層幅の変化率を次式で置く。

$$\frac{db}{dx} = 2U_r/U_i \quad (8)$$

密度フロントの移動速度は1次元の場合について従来多くの研究がなされている。その最もポピュラーな表現は定数 k_1 , フロント部の代表厚さ δ_r を用いた式(10a)であり, k_1 の値は1から1.5程度である。ここでは表面密度フロント U_r の移動速度を求め, 1次元の表面密度フロントの速度 U_{r1} との比を式(9)のようにCとする。

$$C = U_r/U_{r1} \quad (9)$$

$$U_{r1} = k_1 \sqrt{\Delta \rho g \delta_r / \rho} \quad (10a)$$

また, 首藤³⁾は静止水面上の油層の拡がりの実験を行ない, 水深が十分深い場合の油層の拡がり速度 U_r を, 適当にとった油層先端部の厚さ δ_r を用いて次式で与えている。

$$U_r = k_r \sqrt{\Delta \rho g \delta_r / \rho} \quad (10b)$$

$$k_r = 1.5 \quad ; U_r \delta_r / \nu_o \geq 10$$

$$k_r = (U_r \delta_r / \nu_o)^{0.176} \quad ; U_r \delta_r / \nu_o < 10$$

ここに, ν_o は油の動粘性係数である。一般に密度フロントは不規則な変動を繰り返しながら進行すること, および先端部の特定に任意性が入りやすいことなどのため上式の適合性を詳細に検討することは困難である。

ここで U_f の特性を、著者ら¹¹⁾の淡塩水の実験結果から検討する。著者らの実験は一定幅の水路に塩水を湛水しておき、水路端部の水表面から幅方向に一様に一定の流量で淡水を供給させる形で行なわれている。単位幅あたりの淡水流量を q 、淡水供給開始からの経過時間を t 、出口から密度フロントまでの距離を x_f とするとき、平均淡水層厚 δ_m ； $\delta_m = q t / x_f$ を用いて定義される K ； $K = U_f / \sqrt{\Delta \rho g \delta_m / \rho}$ の値は、時間とともに流れのレジームが変化することに対応して変化するが、フロント部が安定な形状を保ちながら進行する範囲ではほぼ一定に保たれる。この状態は driving force と抵抗がバランスした状態と考えられる。図-2 は、このほぼ一定の K の値を淡水層のレイノルズ数 q/ν に対してプロットしたものである。実験値はかなりばらつくものの、 K の値はレイノルズ数が 800 以下ではレイノルズ数とともに漸増し、これを越えるとほぼ一定となる傾向が認められる。 K は式 (10 b) の k_f に相当するから、レイノルズ数の定義が両者で異なるものの、この結果は首藤らの提示式と定性的に一致した傾向といえる。したがって、本解析では U_f に式 (10 a) を用いた場合と式 (10 b) を用いた場合の両方について検討する。

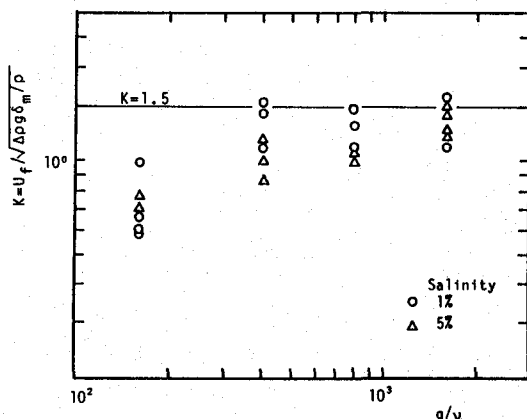


図-2 K と q/ν の関係

4. 計算結果と検討

式 (5)，(6) に (8) を追加し、ルンゲクッタ法により解いた。実験データとして種々の x における油層幅 b の値が得られている。計算では、出口の条件として油の噴出流量を Q_o 、出口の断面積を a_o として、 $u_o = U_o = Q_o / a_o$ 。により速度の初期値を与え、出口での流動厚さ δ_o と油層幅 b_o を、 $\delta_o = b_o = \sqrt{a_o}$ とおいた。なお、内部フルード数の初期値が小さく途中で式 (5) と (6) の分母が負から正に移行する、いわゆる支配断面が生じるような場合にはこのままでは正常な計算は出来ない。内部境界面での抵抗係数 f_i は、流水面上を油層が流動する場合についての Lauら¹²⁾の結果を参照し、 $f_i = 0.003$ を用いた。この条件のもとに、 db/dx に式 (7) の変形式； $db/dx = C / \sqrt{2(F_i^2 - 1)}$ (11) とおいた場合、および式 (8) を用いてフロント速度に式 (10 a) と (10 b) を用いた場合の合計3通りに対して式 (9) 中の C の値を種々変化させて計算を行ない、 b の実験値と計算値の差を最小とする C の値を求めた。

4・1 横方向の拡がりのモデルについて

上述のようにして求めた最適な C の値を用いて油層の幅を計算した。その結果を図-3 に示す。図より明らかなように、 db/dx に式 (11) を用いた場合に比べ式 (8) を用いた場合の方が良好な結果を得ている。また、フロント速度に式 (10 b) を用いた場合が、式 (10 a) を用いた場合に比べ誤差が小さく良好な一致を与えている。以下、 db/dx に式 (8) を用い、フロント速度に式 (10 b) を用いたものをモデルとして採用し、検討する。

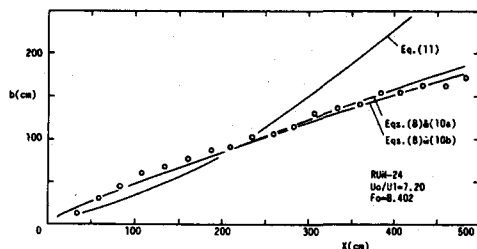
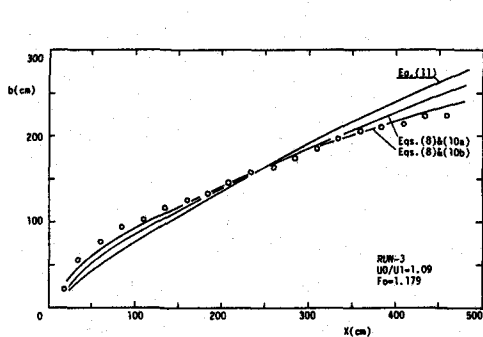
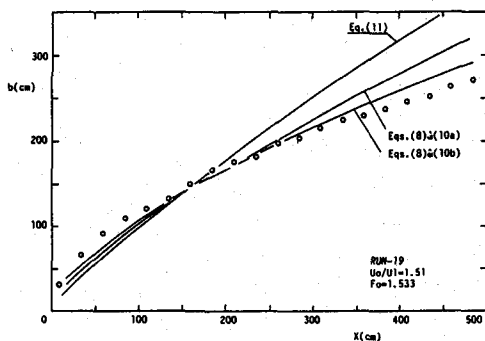


図-3 油層幅の実験値と計算値 (a)



(b)



(c)

図-3 油層幅の実験値と計算値

4・2 係数Cについて

上で得られたCの値を速度比 U_0/U_1 および初期内部フルード数 F_0 に対してプロットしたのが図-4および5である。Cの値は本実験の範囲ではだいたい0.4 - 2.7程度の値をとり、出口での内部フルード数 F_0 、速度比 U_0/U_1 が大きくなると減少する傾向が認められる。また、動粘性係数が比較的大きな $0.23 \text{ cm}^2/\text{s}$ の油を用いておこなわれた実験では他の実験に比べてCの値が小さいようである。

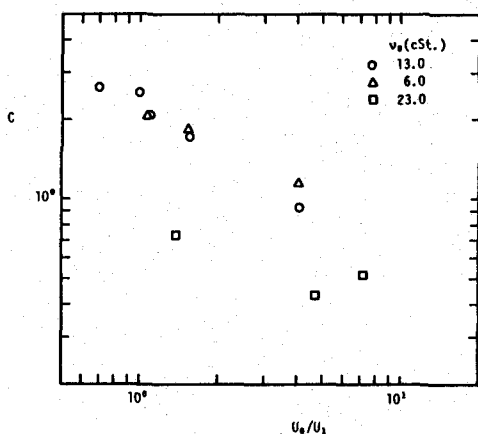


図-4 Cと U_0/U_1 の関係

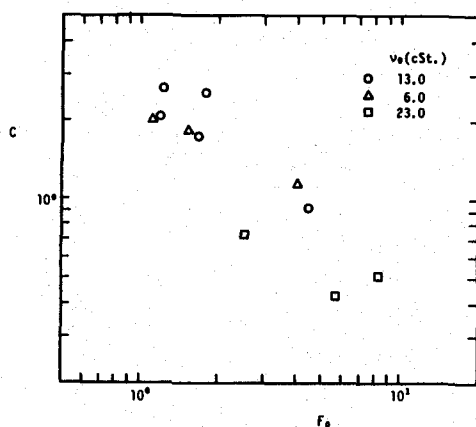


図-5 Cと F_0 の関係

Cの値が速度比や内部フルード数の初期値などにより変化する原因についてごく簡単に考察を加える。本解析モデルでは、横方向に広がる密度フロントの速度を、力のバランスがとれた状態での速度で評価しているが、出口では明らかにゼロである。このため流出速度の大きい実験でCの値が小さくなるのであろう。したがってフロント速度は、初期値問題の解として得られるものを用いるべきであろう。また、 F_0 や U_0/U_1 が大きい場合Cが小さくなることは、淡水水の表面密度噴流の連行との関連でもある程度説明され

る。淡水水の表面噴流では噴流流速が周囲流速に比べて大きい場合、周囲流体が噴流内に取り込まれるべき圧力状態が形成されているはずである。水と油の場合、連行が起こらないから上記の圧力状態は境界面を油層側へ後退させるように作用し、したがって C の値が1より小さいものが現われることが考えられる。

5. 結語

以上、一様な流れの水面上に油が下流向きに連続的に放出された場合に形成される油層の定常的な拡がりに関する1次元モデルによる解析を試みた。油層についての連続式、運動方程式に、油層の横方向への拡がり速度を追加することにより油層の平均厚さ、拡がり幅および平均流速を規定する方程式を導いた。そして、境界面(線)の運動学的条件を平面形状の油・水の境界に適用し、油層幅の流れ方向の変化率を表示する式を提案した。この提示式による油層幅の計算結果は、Prychの評価式によるものに比べ実験値とより良好に一致することを確認した。また、式(9)に導入された比例係数 C の挙動について簡単な考察をおこなった。

今後の課題として、フロント速度の評価を再検討することが必要である。また、現実問題としては水流速度が流れ方向や幅方向に分布をもつ場合、あるいは水流速度や流出状態が時間的に変化する場合は重要であり、これらのケースに対して適用可能なモデルの開発が望まれる。

参考文献

- 1) Fay, J.A.: Oil on the sea, Plenum Press, pp.53~63, 1969.
- 2) Hoult, D.P.: Oil spread on the sea, Annual Review of Fluid Mechanics, pp.341~368, 1972.
- 3) 首藤伸夫・大野 操: 石油の広がりの実験, 第24回海岸工学講演会論文集, pp.509~513, 1977.
- 4) 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, 1980.9.
- 5) Fannelop, T.K. and Waldman, G.D.: Dynamics of oil slicks, AIAA J., Vol.10, No.4, 1971.
- 6) Abott, M.B.: On the spreading of oil fluid over another, La Houille Blanche, No.5, pp.622~628; No.6, pp.481~491, 1973.
- 7) 埜口英昭・平野宗夫: 静水面上に連続流出する油層の拡がりに関する研究, 土木学会論文集, 第393号/II-9, pp.113~120, 1988.5.
- 8) 埜口英昭・山崎宗広: 海面上に連続して放出する油の拡がり, 第26回水理講演会論文集, pp.569~575, 1982.2.
- 9) Prych, E.: An analysis of a jet into a turbulent fluid, Water Research, Vol.7, pp.647-657, 1973.
- 10) 例えば室田明・中辻啓二・柴垣雄一: 積分モデルによる三次元表面密度噴流の解析, 土木学会論文集, 第351号/II-2, pp.117~125, 1984.11.
- 11) 羽田野袈裟義・松本守正・斉藤隆・平野宗夫: 非定常1次元表面密度噴流の流れ特性について, 第40回土木学会中国四国支部講演概要集, pp.112~113, 1988.
- 12) Lau, Y.L. and Moi, J.: Booms used for oil slick control, Journal for the Environmental Eng. Div., ASCE, Vol.105, No.EE2, pp.369~382, 1979.