

# 流水面上に流出した油の拡がりについて

羽田野袈裟義\*・埜口英昭\*\*・斉藤 隆\*・平野宗夫\*\*\*

## Spreading of Oil Spilled on the Surface of Water Streaming

Kesayoshi HADANO, Hideaki NOGUCHI, Takashi SAITOU  
and Muneo HIRANO

### Abstract

This paper deals with the steady state spreading of slicks of oil continuously spilled on the surface of the water streaming. Laboratory experiments were performed in a recirculating water channel by injecting the oil at various velocity ratios. In the experiments, variations of the width of oil slick in the downstream direction were measured. Theory is developed by means of the two-layered model which takes into account the lateral spread of oil slick whose spreading rate is assumed to be proportional to the advancing velocity of the one-dimensional density front in equilibrium state. Thus the governing equations of the mean thickness, mean velocity and the width of oil slick are derived. Calculated results of slick width show similar tendency with experimental data.

### 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及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。その後もタンカーやコンビナートの事故に伴う油汚染があいついでいる。油の流出による海域汚染を効果的に防止するには、拡がり速度が大きい拡がりの初期に適切な措置を構ることが必要で、そのためにはこの段階における拡がりを精度よく予測することが必要である。

油の拡がりについてはこれまで静止水域へ流出した場合を対象として、多くの研究者により実験的検討、及びこれに基づく次元解析的検討がなされている<sup>1),2),3)</sup>。その結果、流出後の油の挙動を主として支配する要因は、慣性力、重力、粘性力、表面張力の順に時間的に変化していくことが明らかにされており、拡がりの発達の段階を、これらの支配要因により分け、その領域区分や各々の領域における拡がり則が提示されている。また、近年埜口・平野<sup>4)</sup>は静止水域に連続点源放出され

た油層の拡がりを、特性曲線法により取り扱い、慣性力、重力、粘性力の作用を考慮した解析を行なっている。しかしながら、実際の海域では種々の要因により潮流が生じている場合がほとんどであり、このような場合の油の拡がりを対象とした研究は皆無に等しい状況にある。

本研究は、そのもっとも簡単な場合として、一様な流水の水面上に流れと同じ向きに油がある速度で連続点源流出した場合について、若干の室内実験を行い簡単な理論解析を試みたものである。

### 2. 実験とその結果

#### (1) 実験装置と方法

実験は、Fig. 1に示すような幅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った。有効実験区間の上下流端に整流格子を設けて実験区間における水流の乱れを抑制するようにした。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。実験区間を流下した油は、その下流端に設置した樋を用いて回収した。油の噴出流量は、貯油タンクに油を入れて密閉しておき、これに窒素ガスをポンペにより注入してタンク内を一定圧力に保つことにより、一定の流量

\* 建設工学科

\*\* 通産省工業技術院中国工業技術試験所

\*\*\* 九州大学工学部

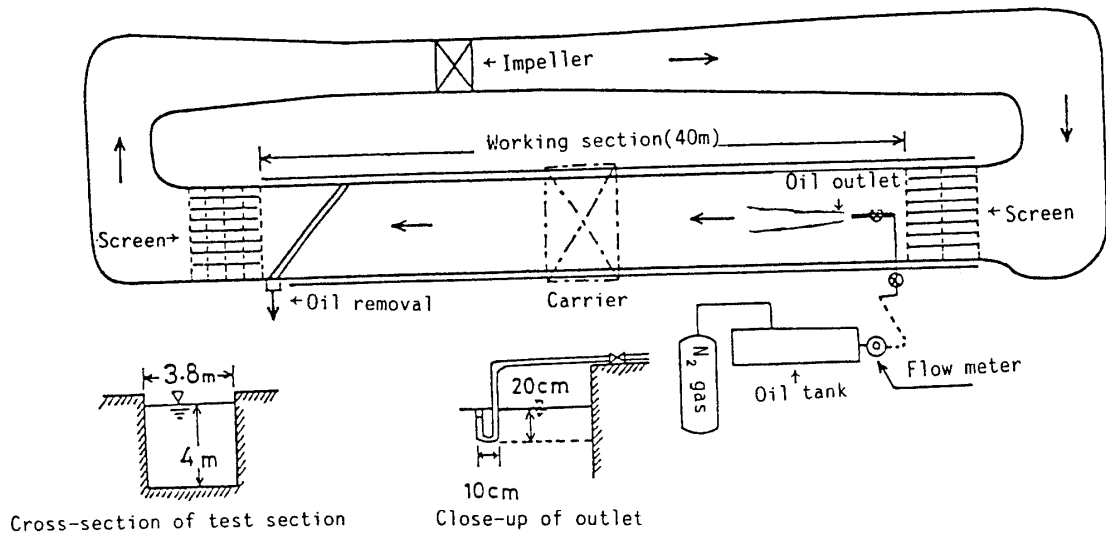


Fig.1 Experimental Apparatus

に制御した。実験に使用した油はマシン油 No. 1, マシン油 No.10および軽油であり, いずれも赤色に着色して油層の拡がりを可視化により計測可能なようにした。これらの油の物性値及び実験条件は Table 1 に示す通りである。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。

油層の拡がりの状況は, 水面上約4 m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計測した。

(2) 実験結果

実験によれば, 各時刻における油層の平面的な拡がりの状況は, 油層幅が単調に増加するもののその増加率は放出口から遠方に行くに従い小さくなる。そして下流まで流下した半円あるいは半楕円形のフロント部分と接続する形態をとる。この油層のフロント部分の中心は時間とともに下流へと移動し, その寸法も増していく。一方, フロントを除く部分の形状は時間的に変化しない。Fig. 2は, 上記の方法により流水面上に放出された油層の平面的な拡がりの状況を2秒間隔で連続撮影し, 得られた一連の写真をトレースしそれらを重ねて図示したものである。図においてフロント部分以外では異なる時刻の輪郭が重なっている。即ち, フロント部分以外では油層の拡がりが定常的であることが示されている。以下, この定常的な油層の拡がりのモデル化を行なう。

3. 理論

取り扱う現象は, 定常な表面密度噴流であり, Fig.

Table 1 Experimental condition

Run	Oil	$\rho_0$ g/cm <sup>3</sup>	$\nu_0$ cSt	$U_a$ cm/s	$U_o$ cm/s	$U_o/U_a$	$F_o$
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

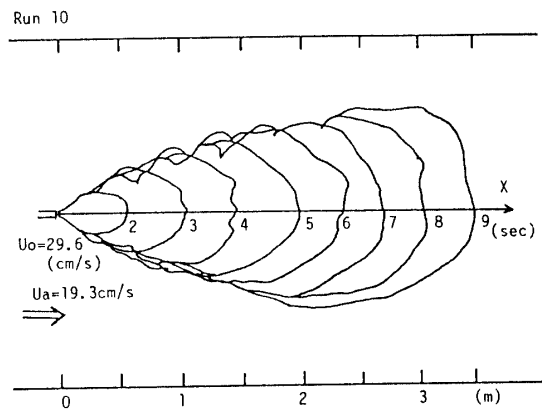


Fig.2 Pattern of the spread of oil slick

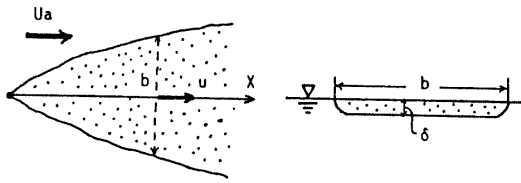


Fig.3 Definition sketch

3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、外部流と同方向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、簡単のため油層は断面を長方形に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、及び流れ方向の運動量方程式であり、それぞれ次式のようになる。

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

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

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

油層断面を長方形に仮定することにより、式(1)は次のように変形される。

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

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次式が得られる。

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

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

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{\frac{\delta}{b} \frac{db}{dx} (\beta F_1^2 - \frac{1}{2}) + \frac{\rho_w}{\rho_o} F_1^{-2} f_i |U_a/u - 1| (U_a/u - 1)}{1 - \beta F_1^2} \quad (5)$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{\frac{1}{2} \frac{u}{b} \frac{db}{dx} + F_1^2 \frac{\rho_w}{\rho_o} f_i |U_a/u - 1| (U_a/u - 1)}{1 - \beta F_1^2} \quad (6)$$

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

連立方程式(5)、(6)を解いて $\delta$ 、bおよびuを求める必要がある。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。そこで流れの中における衝撃波の拡がりの場合と類似の扱いをする。即ち、横方向の広がり速度 $V_t$ を用いて拡がり角度 $d b / d x$ を次式

$$\frac{db}{dx} = 2V_t / U_a \quad (7)$$

で仮定し、 $V_t$ は油層中心軸( $y=0$ )の水面から横断方向に1次元的に拡がる表面密度フロントの移動速度 $U_f$ (従来の研究結果を参照し、 $U_f = C \sqrt{\Delta \rho / \rho \cdot g \delta}$ とおく)に比例すると仮定し、次のようにおく。

$$V_t = K \sqrt{\Delta \rho / \rho \cdot g \delta} \quad (8)$$

ここに、Kは係数Cを含んだ係数である。結局、 $d b / d x$ は次式で評価される。

$$\frac{db}{dx} = 2K \sqrt{\Delta \rho / \rho \cdot g \delta} / U_a \quad (9)$$

#### 4. 計算結果と検討

式(5)、(6)及び(9)を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における広がり幅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 $\delta_o$ と広がり幅 $b_o$ を、 $\delta_o = b_o = \sqrt{a_o}$ とおいた。また、流水面上を油層が流動する場合の境界面での抵抗係数 $f_i$ の値は明かではないが、ここでは第一段階として塩水楔についての結果<sup>5)</sup>を参照し、次式： $f_i = 0.1 \times (\nu^3 / \nu \epsilon g)^{-1/2}$ 、ここに $\epsilon = \Delta \rho / \rho$ 、 $\nu$ は水の動粘性係数；を用い、 $\nu$ として油層の平均流速を採用した。この条件のもとに式(9)中のK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Kの値を求めた。ただし、内部フルード数の値は下流では8~10程度となり、初期値が0.56であるRun 9については途中で式(5)、(6)の分母がゼロとなり発散した。こうして求めたKの値を速度比 $U_o / U_a$ に対してプロットしたのがFig. 4、そして内部フルード数 $F_o$ に対してプロットしたのがFig. 5である。Kの値は本実験の範囲ではだいたい1~3程度の値をとり、出口での内部フルード数、速度比 $U_o / U_a$ が大きくなると減少する傾向が認められる。Run 22, 25のデータを除

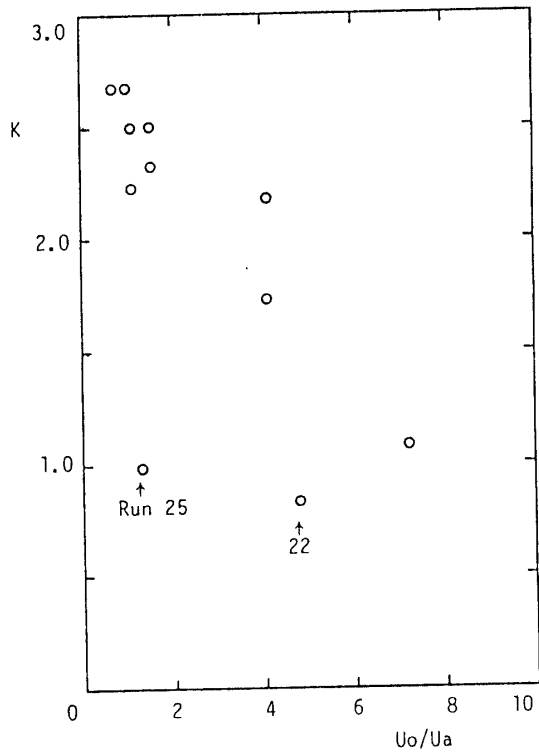


Fig.4 Relation between K and  $U_0/U_a$

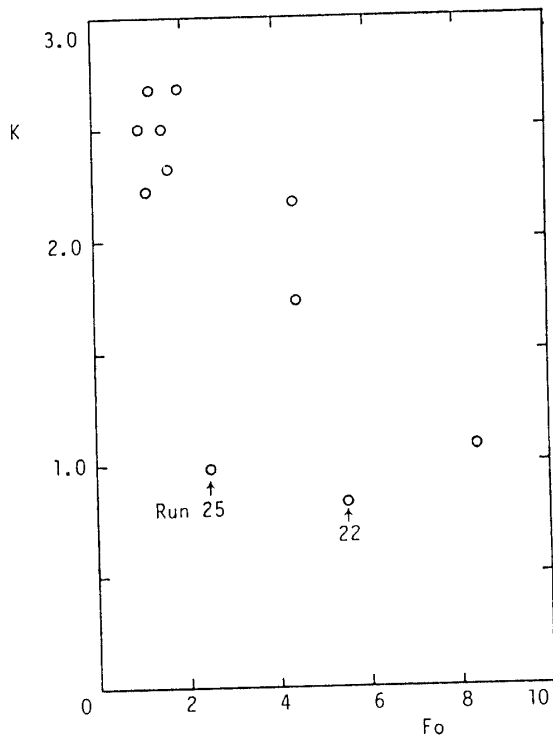
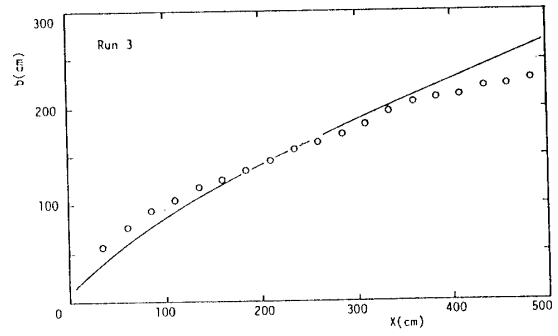
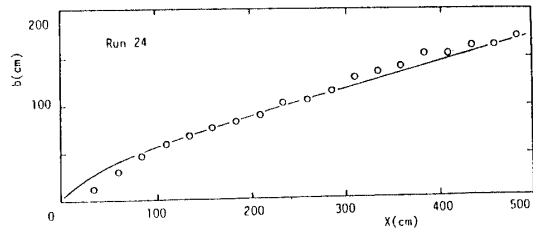


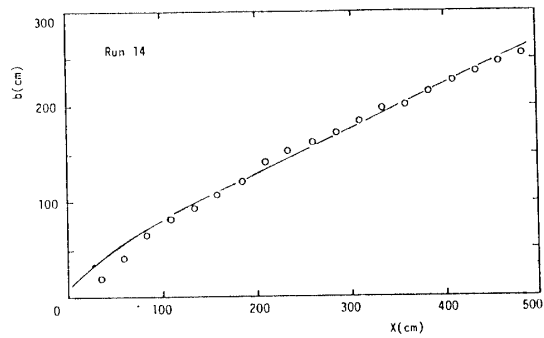
Fig.5 Relation between K and  $F_0$



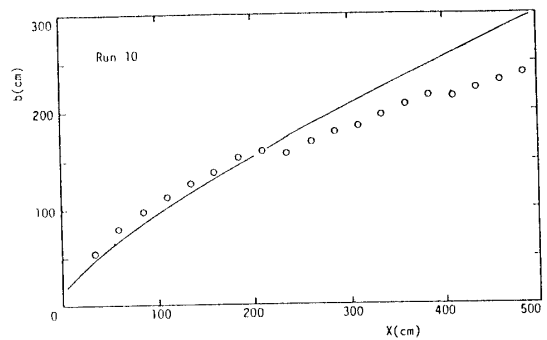
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.6 comparison between the measured and calculated width of oil slick

けば  $K \sim U_o / U_a$ ,  $K \sim F_o$  の両方のプロットはほぼ1本の直線の周りに分布している。3次元表面密度噴流では出口の内部フルード数  $F_o$  や速度比  $U_o / U_a$  が1より大きい場合、表面噴流の流下方向の運動が抑えられその分横断方向に拡がり易くなるが、簡略化された本1次元モデルでこのような機構がどの程度反映されているか、またかりに十分反映されているとして、下層が静止してしかも上下の層で混合が生じうような塩水楔で得られた界面抵抗係数の値をそのまま用いることにも検討の余地がある。しかも界面抵抗係数の値自体かなりばらつくものである。さらに油層の断面形状は長方形ではなく流動厚さは中心軸上で厚く周辺部では薄くなっており、流動厚さや流速の横断方向の低減特性が  $F_o$  や  $U_o / U_a$  により変化することの効果が出ていることが考えられる。以上のようにして求めた  $K$  の値を用いて行なった油層幅  $b$  の計算結果と実験結果の比較の例が Fig. 6 に示されている。上記のような未解明な問題を含むものの、計算結果は本実験の範囲では実験結果と概ね近い傾向を示す。ただし、実験によっては大きな  $x$  において  $b$  の計算値が若干過大になるようである。

## 5. 結 語

以上、一様な流れの水面上に連続点源放出された油

の拡がりに関する実験結果とその1次元モデルによる解析を試みた結果を述べた。解析では、油層についての連続式、運動方程式に、油層の横断方向の拡がり速度が  $\sqrt{\Delta\rho / \rho \cdot g \delta}$  に比例するとの仮定を追加することにより油層の平均厚さ、広がり幅および平均流速を規定する連立常微分方程式を導いた。広がり幅の計算結果は実験結果の傾向をある程度説明することができた。しかしながら実験によっては大きな  $x$  で計算値が過大になるものがあり、今後さらに詳細に現象を把握するとともに高精度のモデルを考案する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) Fay, J.A.: Oil on the sea, Plenum Press(1969), pp53-63
- 2) Hoult, D.P.: Oil spread on the sea, Annual Review of Fluid Mechanics(1972), pp341-368
- 3) 首藤伸夫: 海での石油の拡がり, 第3回環境問題シンポジウム講演集(1975), pp82-87
- 4) 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/I-9, 第393号(1988), pp113-120
- 5) 椿東一郎: 水理学II, 森北出版(1974), pp200-203  
(平成元年4月14日受理)