

# 海面上に連続流出する油の拡がり

## Spreading of Continuously Spilled Oil

工業技術院 中国工業技術試験所 正員 埜口 英昭

工業技術院 中国工業技術試験所 正員 山崎 宗広

### 1. はじめに

油による海洋汚染では、タンカーの海難事故等による油の流出がその大きな原因の1つになっている。ひとたびこの種の事故が発生すると一時に大量の油が流出し、水産業などの受ける被害はきわめて重大となるので、十分な防災体制による流出事故防止の努力が常に必要である。しかし、不幸にして事故が発生し大量の油が流出した時、汚染地域を予測しその処理作業を効果的に進めるためにも油の拡がりを予測する手法の確立が必要となる。本研究ではその基礎的データをを得るため、水面上に油を流出させる2種類の実験を行ない、油の拡がりの基本的特性について検討した。

実験はまず、①幅 30 cmの小湾口から 12 m四方の静水面上へ連続的に重油を流出させ、湾外での油の拡がりと流出時間の関係を調べた。これは、油と周囲水との間に作用する重力、慣性力、粘性力等の物理的因子と油の拡がりとの基本的関係を明確にするためである。次に、②海峡部など潮流が卓越する場での流出油の挙動について調べるため、大型回流水槽を用いて水面上に連続的に油を流出させ、下流へブリューム状に拡がる油の様子を観察した。

### 2. 流出油の拡がりの機構<sup>1), 2), 3), 4)</sup>

水面上に流出した油層が拡がるのは2つの物理的な性質による。その1つは重力で、油が水より軽いため油層の重心が浮力の中心より高くなり、その結果生ずる圧力勾配によって外側へ拡がろうとする力であり、他の1つは表面張力で、一般に水と空気の表面張力は油と空気の表面張力より大きいため、その差により油膜を外側へ引っ張る力である。これに対し抵抗として作用するのは油層の運動によって生じる周囲水の慣性抵抗と、油水界面での粘性によるせん断応力である。Fay<sup>1)</sup>はこれら4個の因子のオーダーを次式のように表わし、各項のorder-estimationを行なって容積  $V_0$  の油が一時に流出した場合(瞬間流出)の拡がりの法則を決定した。

$$\text{重力} : \rho_0 \Delta g h^2 \ell \quad (1), \quad \text{表面張力} : \sigma \ell \quad (2)$$

$$\text{慣性力} : \rho_0 h \ell^3 t^{-2} \quad (3), \quad \text{粘性力} : \rho_w \nu_w^{1/2} \ell^3 t^{-3/2} \quad (4)$$

ここに  $\ell$  と  $h$  は油層の拡がりの幅と平均厚さ、油および水の密度を  $\rho_0$ ,  $\rho_w$  として  $\Delta = 1 - \rho_0 / \rho_w$ ,  $\sigma$  は表面張力,  $\nu_w$  は水の動粘性係数である。

なお、この解析の前程として(1)油の拡がりは等方的で油層厚さの水平的な分布は考慮せず平均厚さだけを考える、(2)油の粘性は水に比べて十分に大きい、(3)油は均質で蒸発、溶解による体積減および性状の変化はない、等の仮定が含まれる。

Fay<sup>1)</sup>によれば、静水面上に容積  $V_0$  の油が流出した場合、拡がりの初期、油層が厚い状態では(1)式と(3)式でその拡がりが決定され、時間の経過とともに拡がりを妨げる力として粘性抵抗が卓越してきて(1)式と(4)式でその拡がりが決定される。さらに、拡がりの後期、油層が薄層になると重力に代って表面張力が拡げる力として卓越し、(2)式と(4)式でその拡がりが決定されるようになる。この3領域は、(I)重力・慣性領域、(II)重力・粘性領域、(III)表面張力・粘性領域(以後、それぞれI, II, III領域とする)と呼ばれる。

#### 2-1. 静水面上での連続流出による拡がり

ここで単位時間当たり  $Q$  の油量の油が、静水面上に連続して流出した場合について考える。この場合の油の

拡がりも Fay に従って初期から後期へとⅠ, Ⅱ, Ⅲの3つの領域に分けられると仮定すると, 流出時間  $t$  と拡がりのスケール  $\ell$  との関係は以下のように表わせる。

いま, 流出開始後  $t$  時間経過時の拡がりのスケールを  $\ell$ , 油層の厚さを  $h$  とすると  $h$  のオーダーは,

$$h \sim Q t \ell^{-2} \quad (5)$$

(1) 式から (4) 式および (5) 式より, 各領域での拡がりは

$$\text{Ⅰ領域} : \ell = K_I (\Delta g)^{1/4} Q^{1/4} t^{3/4} \quad (6)$$

$$\text{Ⅱ領域} : \ell = K_{II} \{ (1-\Delta) \Delta g \}^{1/6} \nu_w^{-1/6} Q^{1/3} t^{2/3} \quad (7)$$

$$\text{Ⅲ領域} : \ell = K_{III} \sigma^{1/2} \rho_w^{-1/2} \nu_w^{-1/4} t^{3/4} \quad (8)$$

ここに,  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  は各領域での拡がりの係数である。また, Ⅰ領域からⅡ領域への遷移点での  $t$  と  $\ell$  は (6), (7) 式から次式のように表わせる。

$$\ell_c(\text{Ⅰ, Ⅱ}) = (K_{II}^9 / K_I^7)^{1/2} \cdot \ell_{TC} \quad (9)$$

$$t_c(\text{Ⅰ, Ⅱ}) = (K_{II} / K_I)^6 \cdot t_{TC} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに, } \ell_{TC} &= (1-\Delta)^{3/4} (\Delta g \nu_w^3)^{-1/8} Q^{5/8} \\ t_{TC} &= (1-\Delta) (\Delta g \nu_w)^{-1/2} Q^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

である。同様に, Ⅱ領域からⅢ領域への遷移点では,

$$\ell_c(\text{Ⅱ, Ⅲ}) = (K_{III}^9 / K_{II}^7)^{1/2} \cdot \ell_{STC} \quad (12)$$

$$t_c(\text{Ⅱ, Ⅲ}) = (K_{III} / K_{II})^6 \cdot t_{STC} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに, } \ell_{STC} &= \{ (1-\Delta) \Delta g \}^{3/4} \nu_w^{1/2} \rho_w^{7/4} \sigma^{-7/4} Q^{3/2} \\ t_{STC} &= (1-\Delta) \Delta g \nu_w \sigma^{-3} \rho_w^3 Q^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

である。

## 2-2. 一様流の水面

次に, 一様な流速  $U$  で流れている水面上に, 固定源から連続して油が流出する場合を考える。流出口から単位時間当り  $Q$  の油量で流出する油は流れによって下流に運ばれながら拡がっていくが, 後述するように流出開始後その先端が十分下流へ達すると, 流出口付近では油はほぼ一定の拡がりの形状を示すようになる。この時流れの中の乱れが弱く, 油の拡がりへの影響が無視できるならば, 次のようなモデルを適用することができるであろう。

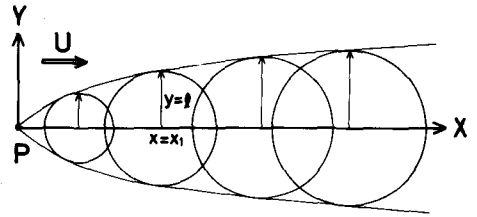


図-1 一様流速  $U$  の流れにおける拡がり

図-1に示すように  $X$  方向に一様流速  $U$  の流れにおいて流出口  $P$  より下流へ距離  $x = x_1$  の点での油の拡がり幅  $y = \ell$  は, 油の流出口  $P$  を流速  $U$  で  $X$  方向に移動させたとして, 流出開始後の経過時間  $t (= x_1 / U)$

における静水面上での拡がり (6) ~ (8) 式と同様に表わせる。したがって各領域での拡がり係数は,

$$\text{Ⅰ領域} : y / \ell_{TC} = E_I \{ x / (U \cdot t_{TC}) \}^{3/4} \quad (15)$$

$$\text{Ⅱ領域} : y / \ell_{TC} = E_{II} \{ x / (U \cdot t_{TC}) \}^{2/3} \quad (16)$$

$$\text{Ⅲ領域} : y / \ell_{STC} = E_{III} \{ x / (U \cdot t_{STC}) \}^{3/4} \quad (17)$$

となる。ここに  $\ell_{TC}$ ,  $t_{TC}$ ,  $\ell_{STC}$ ,  $t_{STC}$  は (11), (14) 式で表わされ,  $E_I$ ,  $E_{II}$ ,  $E_{III}$  は各領域での拡がりの係数である。

## 3. 湾口からの流出に関する実験

静水面上での連続流出の単純なモデルとして, 小湾口から広い水面への油の流出に関する実験を行なった。

図-2に示すように, 幅  $12 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ , 水深  $30 \text{ cm}$  の平面水槽の一辺の中央に, 幅  $30 \text{ cm}$ , 奥行き  $50 \text{ cm}$

の小湾を作り、湾奥から一定量の油を連続して流出させ、湾外での油の拡がりを追跡した。また、油膜厚さ測定器を、湾内（湾口から 25 cm 奥）、湾口、湾口から 2 m 沖の 3 点に設置し、流出する油層の厚さを連続的に測定した。湾外での油の拡がりの様子は、水槽上約 15 m の高さに設置したモータドライブカメラおよび 16 mm シネカメラで撮影した。表-1 に実験条件を示す。使用した油は A 重油および B 重油で、Run 3-5 では B 重油を加熱して、流出口での油温を水温より約 10 °C 高くして流している。

図-3 は、湾外での油の拡がりの変化を何枚ものフィルムから重ねて写し取った図である。流出油が湾口を中心として半円状に均等に拡がっていく様子がよくわかる。図中の数字は、油が湾口から流出し始めた時を  $t = 0$  とした時間を示す。

図-4 は、ある時刻での油層の状態を模式的に示している。油層の中心部 A は黒色の油層が厚い部分で、その周囲に褐色から明黄色へと変化して油層厚さの減少が識別できる B 部が、B のさらに外側には目視でようやく判別可能な薄膜部 C がある。この B、C 部は流出開始直後は目立たないが、流出油量が少ないほど、また時間の経過とともに急速に拡大していく。図-5 は、湾口部で油層表面に直径 2 cm、厚さ 1 mm の発泡スチロールのフロートを次々に浮かべてその軌跡を描いた図である。最初、図-4 の A の部分の先端付近にあったフロートが B から C の部分へ入ると、A の部分にあるフロートに比べてかなり速い速度で拡がっていく。これは C の部分では表面張力が卓越し、薄い油膜が外側へ急速に引っぱられて拡がるためと考えられる。油の境界をどのようにとるかは問題であるが、ここでは拡がりの平均的な大きさを表わす量として湾口から沖に向かって B の先端までの長さを  $\ell$  として定義した。実際の油と水との境界は C の先端であるが、C の部分は非常に薄膜で A、B の部分に比べて油量的にも問題とならない。本論で扱うのは油の厚さを均一と仮定した平均的な拡がりのスケールであり、したがって、B の先端までを油の領域と定義するのが最も合理的と考えられる。図-3、図-5 は、この B の部分の拡がりを表わしている。

図-6 は、A 重油と B 重油について 3 台の油膜厚さ測定装置による油の厚さの測定結果の 1 例である。例えば Run 3-3 では、湾内、湾口の

油層厚さは流出開始後約 50 秒でほぼ一定となっており、湾口で油層厚さが一定となるのは I 領域から II 領域へ移行する時間とほぼ一致する。

図-7 は、各実験での  $\ell$  と  $t$  の関係を (11) 式の  $\ell_{TC}$ 、 $t_{TC}$  で無次元化した図で、I 領域から II 領域にかけての拡がりを表わす。図-8 は、同様に (13) 式の  $\ell_{STC}$ 、 $t_{STC}$  で

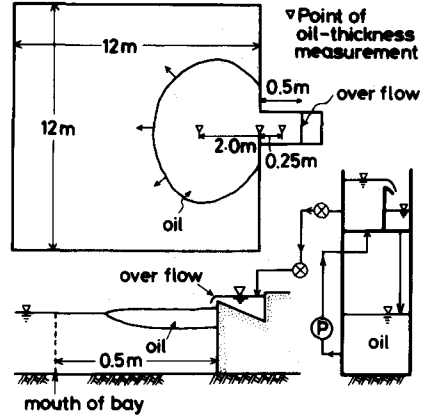


図-2 実験装置（湾口からの流出）

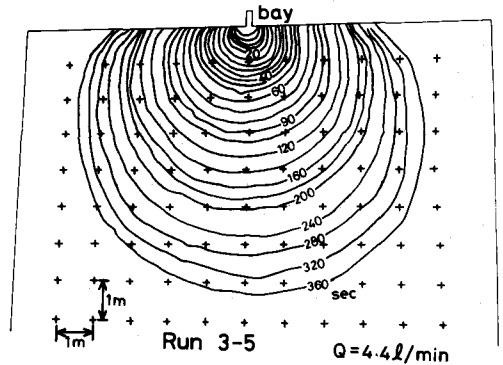


図-3 湾口から流出する油の拡がり

| Run No. | Discharge of oil (cc/sec) | Type of oil | Specific gravity of oil | Temperature of oil (°C) | Temperature of water (°C) |
|---------|---------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 3-1     | 15.3                      | B-heavy oil | 0.900                   | —                       | 26.3                      |
| 3-2     | 60.0                      | "           | "                       | —                       | 27.2                      |
| 3-3     | 130.0                     | "           | 0.914                   | 23.4                    | 20.9                      |
| 3-4     | 94.1                      | "           | "                       | 25.5                    | 21.5                      |
| 3-5     | 72.6                      | "           | "                       | 31.0*                   | 20.8                      |
| 3-6     | 70.0                      | A-heavy oil | 0.837                   | 23.2                    | 24.9                      |
| 3-7     | 136.0                     | "           | "                       | 23.4                    | 25.0                      |

\* heated oil

表-1 実験条件（湾口からの流出）

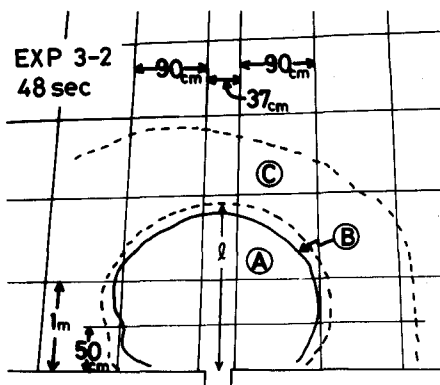


図-4 油層の拡がりのパターン

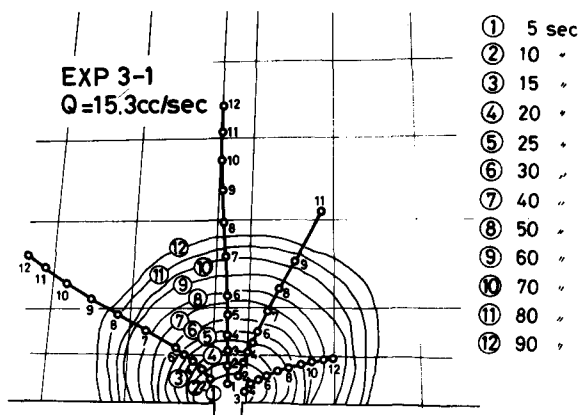


図-5 油層上のフロートの動き

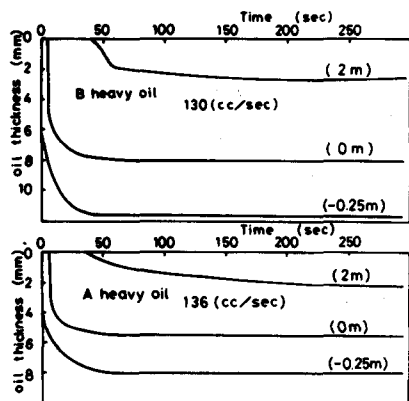


図-6 油層の厚さ分布

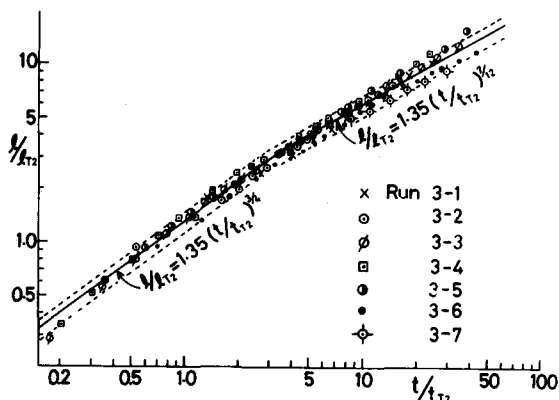


図-7 I 領域から II 領域での拡がり

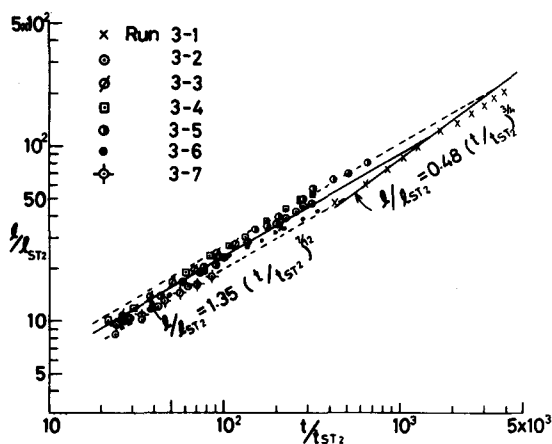


図-8 II 領域から III 領域での拡がり

無次元化した図で、II 領域から III 領域にかけての拡がりを表わす。図中の実線は (6), (7), (8) の各式を示す。これらの図において、I, II, III の各領域間の拡がりの勾配に大きな差がなく、また実験値に若干のバラツキがあるなどの難点はあるが、連続流出の場合にも Fay の法則に従う 3 つの領域が存在し、各領域では (6), (7), (8) 式の関係が成立している。これらの図から拡がりの係数を求めると、 $K_I = 1.35$ ,  $K_{II} = 1.6$ ,  $K_{III} = 0.48$  となる。なお、一連の実験の中で明らかに III 領域での拡がり認められたのは、流出油量の最も少ない Run 3-1 の場合だけであるが、(8) 式からわかるように、III 領域では瞬間流出も連続流出も、流出

油量に関係なく同一の拡がりとなるはずで、図-8 の  $K_{III} = 0.48$  は瞬間流出での実験値をそのまま当てはめたものだが、Run 3-1 とよく一致している。また、静水面上に連続して油が流出した場合の拡がりはほとんど重力と粘性力が支配的な II 領域内での拡がりとして扱うことが可能で、例えば流出油量が  $1 \text{ kl/min}$  の場合でも、流出開始後約 6 分で I 領域から II 領域へと移り、その時点での拡がりは  $\ell = 40 \text{ m}$  程度、それ以後

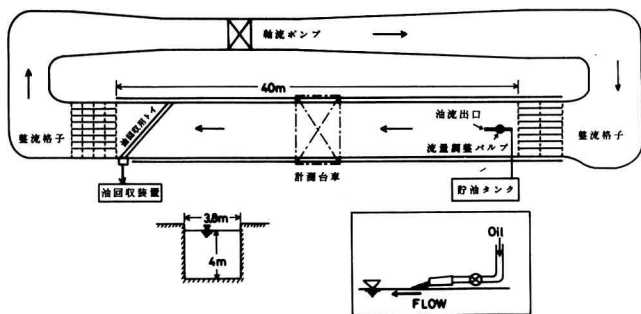


図-9 回流水槽実験装置

| Run No. | Discharge of oil (l/min) | Velocity of oil (cm/sec) | $\ell_{TC}$ (m) | $t_{TC}$ (sec) |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------|----------------|
| 4-4     | 6.0                      | 11.0                     | 0.49            | 7.5            |
| 4-5     | 12.0                     | 11.0                     | 0.76            | 10.6           |
| 4-6     | 24.0                     | 11.0                     | 1.18            | 15.1           |
| 4-7     | 6.0                      | 30.0                     | 0.49            | 7.5            |
| 4-8     | 12.0                     | 30.0                     | 0.76            | 10.6           |
| 4-9     | 24.0                     | 30.0                     | 1.18            | 15.1           |
| 4-13    | 30.0                     | 30.0                     | 1.35            | 16.8           |
| 4-16    | 24.0                     | 40.0                     | 1.18            | 15.1           |
| 4-17    | 30.0                     | 40.0                     | 1.35            | 16.8           |

Temperature of water : 23.9°C  
 Temperature of oil : 25.0°C  
 Type of oil : machine oil No.10  
 (13.0cst, 30°C)

表-2 実験条件 (流れの中での拡がり)

は長時間に渡ってⅡ領域での拡がりとなる。

#### 4. 一様流の水面上での拡がりに関する実験

一様流速  $U$  で流れる流れの水面上での油の拡がりに関する実験は、図-9に示す幅 3.8 m, 有効実験区間 40 m, 水深 4 m の大型回流水槽を用いて行なった。水槽上流側で水面直上に幅 5 cm の「とい」を設置し、そこから下流へ向けて流水面上に連続して油を流出させた。流出した油は、水槽下流側の水面に設置した油回収用の「とい」によって集められ、油回収装置へ送られる。

実験条件を表-2に示す。油回収装置の制約上から、実験で使用する油は比重 0.857, 動粘度 13.0 cSt (30°C) のマシン油 (A 重油相当) を用いた。実験時の水槽水温は 23.9°C, 油温は 25°C であった。流速分布の測定は、直径 2 cm のプロベラ流速計を使用して油の流出口から 2.6 m, 12.6 m, 22.6 m の三断面で、水深 5 cm の点で横断方向に 7 点で計測した。今回の実験では、乱れ強度は平均流速の 3~4% で、かなり小さかった。

油を流出口から流出させると同時に、16 mm シネカメラおよび 35 mm モータドライブカメラで下流側へと拡がる油の状態を撮影した。これらのカメラは、水槽に付属した計測台車に組み上げた高さ 6 m のヤグラの上にセットし下流方向へ移動させた。写真 1, 2 は、流出口付近での油の拡がりの状況である。流下する油層には写真 2 のようにその内部に多数の空洞を形成しながら拡がる場合が多く見られた。また、図-4 で見たような油層の外縁で表面張力の作用により薄膜が形成されるような現象も観察されなかった。これは、水槽水中に油分が含まれることや、油の物性の差による表面張力の作用の変化が原因と考えられる。

図-10 は、フィルムから各時刻での拡がりを写し取りそれを重ね合わせた図で、拡がりの形状を示す。図中の数字は油の流出開始からの経過時間である。この図から  $y$  軸方向 (流れに直角方向) の油の拡がり幅  $\ell$  を読み取った。流出口から単位時間当たり  $Q$  の油量で流出する油は、流出開始後その先端が十分下流へ達すると流出口付近のかなり広い区間で  $y$  軸方向にほぼ一定の拡がり形状を示すようになる。図-11 は、そのよう

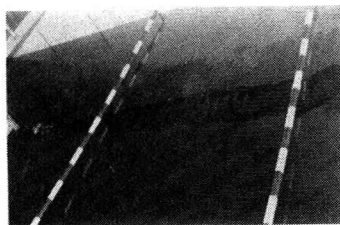


写真 1 (Run 4-7)

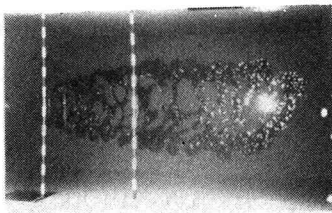


写真 2 (Run 4-5)

な状態での拡がり幅  $\ell$  と距離  $x$  の関係を  $\ell_{TC}$  および  $U \cdot t_{TC}$  で無次元化して示した図である。この場合前述の油層内の空洞については考慮せず、油層は  $y$  軸方向に均一な厚みを有するものと見なした。図中の実線は (16) 式で拡がりの係数  $K_{II} = 0.58$  とした場合のⅡ領域での拡がりを、一点鎖線は湾口

からの流出実験で得られた係数  $K_I$   
 $= 1.35$ ,  $K_{II} = 1.60$  を用いた I,  
 II 領域での拡がりを表わす。図によ  
 れば、実験値に若干のバラツキはあ  
 るが、全体としては (16) 式の関係  
 にほぼ一致した拡がりの傾向を示し  
 ている。

しかし、個々の実験値についてみ  
 ると、流出油量の少ない Run 4-4,  
 4-5, 4-7, 4-8 では (16)  
 式よりもゆるやかな勾配となる傾向  
 を示し、また他のケースでも拡がりの  
 後半においては同様の傾向が見ら  
 れる。これは、油の流出点から離れ  
 るにつれて図-1 のモデルが成立し  
 なくなることが原因ではないかと考えら  
 れるが、さらに検討を要する。なお、湾口か  
 らの流出に関する実験では、その拡がりの  
 大半が II 領域に属することを示したが、図  
 -11 でも I 領域 (15) 式) に相当する  
 部分は顕著でなく、II 領域 (17) 式) に  
 相当する部分も確認できなかった。

流れの中の「乱れ」が大きい場での拡が  
 りに関しては、Murray<sup>5)</sup> の報告がある。  
 彼は 1970 年 3 月メキシコ湾で起きた油井  
 からの流出事故での観測データに Taylor  
 の連続源型の乱流拡散理論を適用し、潮流  
 が卓越し流れの中の乱れが大きい場での油

の拡がり幅は、Lagrange の自己相関係数を指数形で近以した場合の Variance

$$\sigma_y^2 = 2 v' l_* (x/U) - 2 l_*^2 + 2 l_*^2 e^{-P} \{ v' x / (U l_*) \} \quad (18)$$

で表わせるとした。ここに、 $\sigma_y$  は油の拡がり幅、 $v'$  は乱れ強度、 $l_*$  は Lagrangian eddy size である。  
 しかし、その解析の中では流出油量  $Q$  を考慮してないため流出口に近い範囲での適用には問題がある。また  
 (18) 式では流出口からの距離  $x$  が大きくなると  $l \sim x^{1/2}$  に漸近し、実際の観測データもそのような傾向を  
 示すとしているが、これは (16) 式にかなり近い関係を示しているデータとして興味ある事である。

## 5. まとめ

本研究では、海上に流出した油の拡がりを予測するのに必要な基礎的データを得るために、2 種類の実験を  
 行なって拡がりの特性について検討した。その結果得られた主要な点を要約すると以下の通りである。

(1) 静水面上に連続流出する油の拡がりには、重力・慣性力領域、重力・粘性領域、表面張力・粘性領  
 域の 3 領域が存在することを示し、流出油量  $Q$ 、流出時間  $t$ 、拡がりのスケール  $l$  の間の関係および各領域  
 での拡がりの係数を決定した。

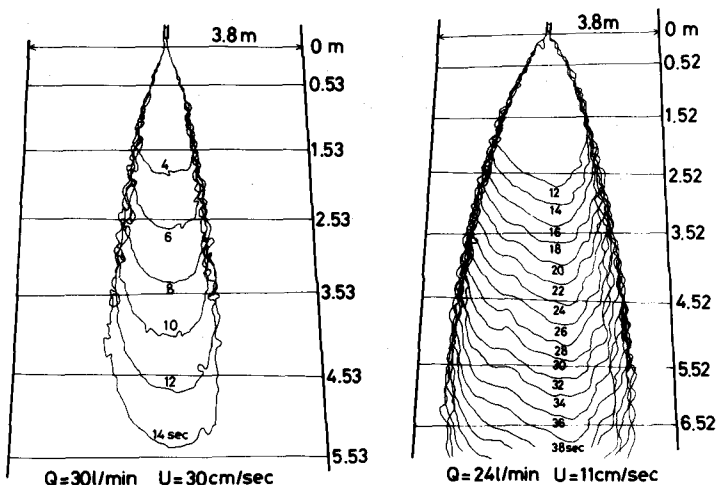


図-10 一様流速  $U$  の流れの場での拡がりの形状

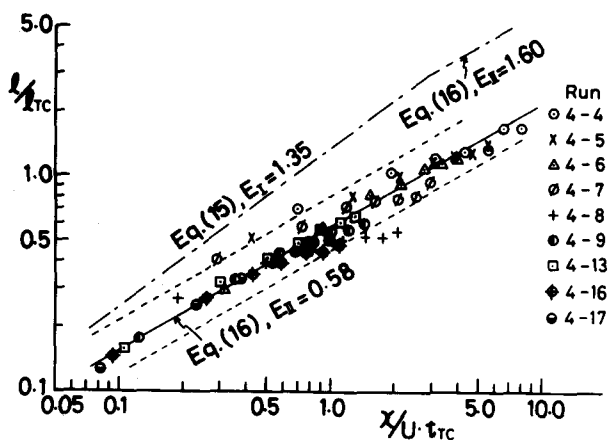


図-11 一様流速  $U$  の流れの場での  $l$  と  $t$  の関係

(2) 固定源からの連続流出による拡がりは時間的には、油層の動水勾配と油水界面での粘性抵抗が主な支配因子となるいわゆる重力・粘性領域での拡がりが大半と見なせる。

(3) 一様流速  $U$  で流れる流れの水面上へ、固定源から単位時間当たり  $Q$  の油量で連続流出した油は、流出開始後その先端が十分下流へ達すると、流出口付近のかなり広い区間で  $y$  軸方向にほぼ一定の拡がりの形状を示す。

(4) 一様な流れにのって拡がる油の、流出口から下流へ距離  $x$  の点での拡がり幅は、流出口を流れの速度  $U$  で移動させると仮定して流出時間  $t = x/U$  での静水面上での拡がりと同じの法則で表わせる。

ここで扱った2つのタイプの油の拡がりはいずれも基本的なタイプのもので、2節の最初に述べたような3つの仮定が含まれている。しかし、そこから得られた結果は流出の初期では拡がりの範囲を決定する上で重要な役割を果し、実際の海上ではこれに複雑な潮流や風、波等の外的な因子の作用、さらには流出油自身の物性の変化等が重ね合わさって最終的な拡がりが決定される。

#### 参考文献

- 1) Fay, J.A. : Oil on the Sea, Plenum Press, p.53, 1969
- 2) Hoult, D.P. : Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.4, p. 341, 1972
- 3) 埜口英昭他 : 海上に流出した油の拡がりについて (瞬間放出による実験的研究), 第26回海岸工学講演会論文集, 1979
- 4) 埜口英昭他 : 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, 1980
- 5) Murray, S.P. : Turbulent Diffusion of Oil in the Sea, Limnology and Oceanography, September 1972, Vol. XVII, No. 5