

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——

埜口英昭*・早川典生**・橋本英資***・山崎宗広***

1. ま え が き

タンカーや沿岸石油タンクの事故で、広い海面上に一時に大量の油が流出した場合、その拡がりを支配する物理的因子として (i) 油と周囲水との間に作用する重力、慣性力、粘性力、表面張力などの主に静水面上での拡がりに重要な力、(ii) 風および波、(iii) 潮流等が考えられる。

このうち (i) は油の拡がりの基本的特性を決定するもので、Fay¹⁾ はこれらの因子の性質から、静水面上に放出された一定量の油の拡がりが時間的に、(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 領域と呼ぶ) に区分できることを明らかにし、order-estimation の手法で各領域の拡がり法則を決定した。表-1 に、拡がり l と時間 t の関係

表-1 油層の拡がりの法則

	I. 重力・慣性領域	II. 重力・粘性領域	III. 表面張力・粘性領域
一次元	$l \sim (\Delta g)^{1/2} (\nu_w)^{1/2} t^{3/2} \dots (1)$ C=1.39 ⁽¹⁾ (理論) C=1.6 ⁽²⁾ (実験)	$l \sim (\Delta g)^{1/2} (\nu_w)^{1/2} t^{3/2} \dots (2)$ C=1.39 ⁽³⁾ (理論), C=1.76 ⁽³⁾ (理論) C=1.5 ⁽⁴⁾ (実験)	$l \sim \sigma^{1/2} (\rho_w^2 \nu_w)^{1/4} t^{3/4} \dots (3)$ C=0.665 ⁽⁵⁾ (理論) C=1.33 ⁽⁵⁾ (実験)
軸対称	$l \sim (\Delta g)^{1/2} \nu_w^{1/2} t^{3/2} \dots (4)$ C=1.14 ⁽¹⁾ (理論)	$l \sim \nu_w^{1/2} (\Delta g)^{1/2} t^{3/2} \dots (5)$ C=0.978 ⁽³⁾ (理論), C=1.12 ⁽⁴⁾ (理論)	$l \sim \sigma^{1/2} (\rho_w^2 \nu_w)^{1/4} t^{3/4} \dots (6)$ C=0.128 ⁽⁵⁾ (理論)
	(1) Fannelop & Waldman, (2) Suchan & Liang, (3) Buckmaster, (4) Hoult (5) Lee		

および係数 C の値を示す。表中、 V は放出油量、 b は水路幅、 ν_w は水の動粘性係数、 ρ_w, ρ_o を水と油の密度として $\Delta = (1 - \rho_o/\rho_w)$ 、 σ は水の表面張力である。Fay の研究以後、より厳密に解析解を求めるいくつかの試みが発表された^{2),3),4)}。しかし、結果的には大きな進歩は見られず、得られた係数値も表-1 のように様々である。

本研究では、重油を用いて静水面上での 1 次元および軸対称拡がりの実験を行ない、その結果を既存の理論と比較して、(1) Fay の拡がり法則の検討、(2) 拡がり係数 C の評価、の主に 2 点を明らかにしようと試みた。また、こうして得られた室内実験結果とすでに公表されている現地実験との比較も行なった。

2. 実験装置と方法

実験には 図-1 の 3 種類の水槽を用いた。1 次元の実

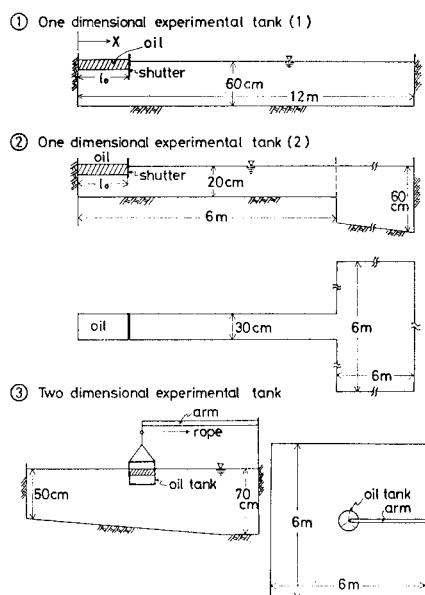


図-1 実験装置

験は水槽 ① (幅 50 cm) および ② を用い、水槽左端に貯留した一定量の油を、shutter を引き上げて瞬間放出し、油膜先端を水路側面から 16 m/m シネカメラで追跡して、その形状と速度および原点から先端までの距離 l の時間変化を求めた。軸対称拡がりの実験は水槽 ③ を用い、中央の中空円筒に貯留した一定量の油を、円筒を瞬時に引き上げて流出させた。水槽上部にセットしたカメラでその拡がりを撮影し、各時刻での油の拡がり面積を求め、それと等面積の円の半径を用いて拡がりの変化を表わした。

表-2 に実験条件を示す。Run 1-1 から 1-4 までは水槽 ① を、Run 1-5 から 1-11 までは水槽 ② を用いた実験で、 l_0 は貯油槽の長さ、 h_0 は初期油層厚さである。

Run 2-1 から 2-5 は、水槽 ③ を用いた軸対称の実験で、貯油槽の直径 ϕ は 29 cm および 14 cm の 2 種

* 正会員 工業技術院中国工業技術試験所
** 正会員 Ph. D 工業技術院中国工業技術試験所
*** 工業技術院中国工業技術試験所

表-2 実験条件

Run No.	Volume of (l x W x H cm)	Temperature of water (°C)	Run No.	Volume of (l x W x H cm)	Temperature of water (°C)
1-1	15L (100 x 50 x 3)	13.6	1-8	6L (20 x 30 x 10)	28.0
1-2	25L (x x x x 5)	15.6	1-9	12L (40 x x x x)	28.1
1-3	5L (x x x x 1)	13.4	1-10	3L (10 x x x x)	28.2
1-4	5L (x x x x x)	14.4	1-11	3L (20 x x x 5)	28.2
1-5	18L (200 x 30 x 3)	9.6	2-1	3L (x 29 x 4.54)	20.5
1-6	6L (x x x x 1)	12.0	2-2	1L (x x 1.51)	24.4
1-7	3L (x x x x 0.5)	9.6	2-3	3L (x x 4.54)	25.6
使用油: 中重油 (粘度 0.99, $\rho_0 = 0.855$, 15°C)			2-4	1L (x x 1.51)	24.2
使用油: ラジウム (粘度 0.855, 15°C)			2-5	0.2L (x 14 x 1.30)	24.5

類を用いた。使用した油は主としてB重油であり、一部流動パラフィンを用いた。

3. 1次元の拡がり

3.1 油層先端の速度

図-2 に、流出した油層先端の運動の一例を示す。流

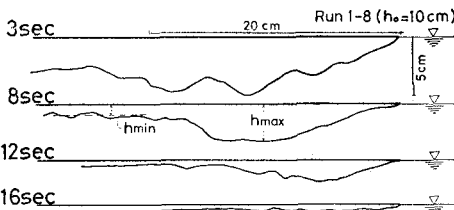


図-2 油層先端部の形状 (1次元の拡がり)

出した油層は先端がくさび状で内部波が生じており、時間とともにその厚みは減少し平滑な slick へと変化していく。しかし、 h_0 が小さな Run 1-3~1-7 では最初から平滑な slick に近い状態で拡がっている。

油層の拡がり初期, I 領域以前の油層先端速度は次のように考えられる。図-3 で $t=0$ では油は領域 ABCD

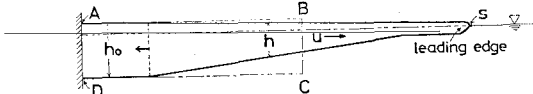


図-3 Initial-growth のモデル

にあり, shutter (BC) を開けて瞬間的に放出すると BC から上下流に向かって攪乱が伝播していくが, これはダムの決壊により発生する段波と類似の現象で, Fannelop ら³⁾はこの部分を initial-growth 領域として特性曲線理論で解析し, 油層先端付近の攪乱の伝播速度 c および油層先端速度 u_{LE} を次式で与えた。

$$c = c_0/2, \quad u_{LE} = c_0 = \sqrt{Ag h_0} \quad \dots (7)$$

図-4 に u_{LE}/c_0 と t の関係を示す。 u_{LE} は 2 秒間の平均値を用いた。各実験で流出開始後 7 秒程度まで u_{LE}

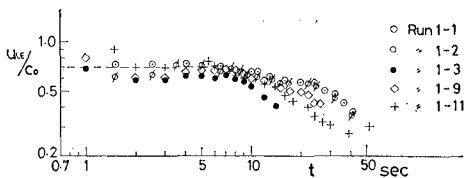


図-4 油層先端の速度 (initial growth 領域)

は一定値

$$u_{LE}/c_0 \approx 0.7 \quad \dots (8)$$

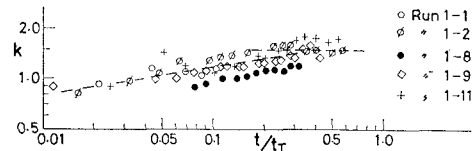
であり, (7) 式より小さい。この原因としては, 先端の油水界面での粘性抵抗の影響と, 先端部では油層の進行に伴ない前方の水もある速度で移動するため, Fannelop らが用いた S 点 (図-3) での流速 $u=0$ の条件が成立しないことなどがあげられる。なお, 3.2 で述べる h_0/L が小さく I 領域が存在しない場合は, (8) 式の関係は認められなくなる。

次に, I 領域での u_{LE} は, 一般に次式のように置ける^{2), 3)}。

$$u_{LE} = kc, \quad c = \sqrt{g h_{LE}} \quad \dots (9)$$

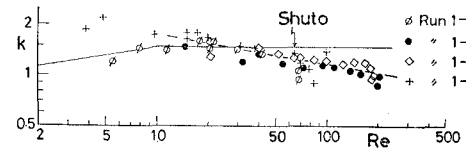
ここに, h_{LE} は先端部の厚さ, k は波速係数である。Fannelop らは, 油層が十分薄層という条件のもとで $k=1$ と置いたが, h_{LE} の定義は明確でない。Benjamin⁵⁾は重力流の解析で, 先端くさび後方の平滑部の厚さを h_{LE} としたが, 今回の実験のように (図-2) 先端部と平滑部分の区別が明らかなでない時は, h_{LE} を明確に定義するのは困難である。本報告では 図-2 の h_{max} を用いた。なお, 図-2 の h_{min} を用いるのも一法であるが, この値は, 内部波による変動でバラツキが大きく, h_{max} に比べて利点が明確でないので採用しなかった。

図-5 に, $k = u_{LE}/(\sqrt{g h_{LE}})$ と t/t_T の関係を示す。

図-5 速度パラメータ k の変化

t_T は 3.2 で述べる I から II 領域への移行パラメータで $t/t_T \approx 0.4$ で II 領域となる。 k は, t/t_T が 0.02 付近で (8) 式に近い値を示し, t/t_T とともに大きくなり II 領域に近づくとき $k \approx 1.5$ となる。この時点では, 先端は平滑な slick に近い。

図-6 に, k と $Re = u_{LE} h_{LE} / \nu_0$ の関係を示す。図中

図-6 k と Re の関係

の実線は, 首藤ら⁶⁾の連続放出での実験結果で

$$\left. \begin{aligned} h_{LE}/H < 0.1 \quad & k = 1.5, \quad Re \geq 10 \\ & k = Re^{0.176}, \quad Re < 10 \end{aligned} \right\} \quad \dots (10)$$

H は水深である。瞬間放出では, Re は放出直後に最大で拡がりとともに減少する。 k は, $10 < Re < 40$ で (10) 式に近い値を示すが, Re の増加とともに減少する。

3.2 拡がりの係数について

図-7に、1次元拡がりでの l/l_T と t/t_T の関係を示

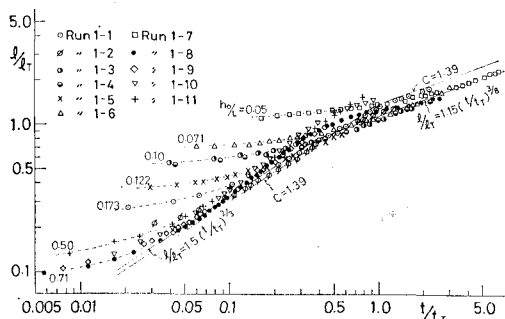


図-7 1次元の油の拡がり

す。 l_T, t_T は、I からII領域への遷移パラメータで、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} l_T &= [(A \cdot g) \nu w^{-2} L^{10}]^{1/7} \\ l_T &= [(A \cdot g)^{-2} \nu w^{-3} L^8]^{1/7}, \quad L = (V/b)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

油放出直後の t/t_T が小さな部分では、 h_0/L が小さいほど拡がりの勾配がI領域よりもゆるやかで、実験値は t/t_T の増加とともにI領域 $l/l_T \sim (t/t_T)^{2/3}$ に漸近し、さらにII領域 $l/l_T \sim (t/t_T)^{3/8}$ へと移行していく。表-1は、各領域の支配的な2つの力が平衡した状態での、平均的拡がり l と時間 t の関係を表わしているが、油放出直後は initial-growth の段階で、表-1のモデルは適用できないものと思われる。

図-7の各実験において、 $h_0/L \leq 0.1$ の場合にはI領域が存在しない。図-7で、油放出後Fayの法則に従う拡がりの領域に達するまでの時間を t_E として、 h_0/L と t_E/t_T の関係を求めると、図-8のようになる。

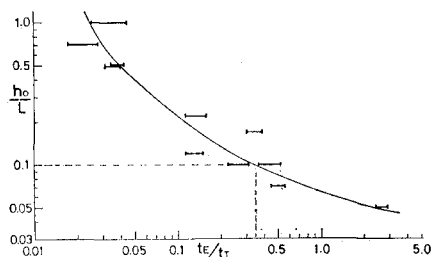


図-8 t_E/t_T と h_0/L の関係

図-8において $h_0/L=0.1$ で $t_E/t_T \approx 0.35$ となるが、これは後述するIからII領域への遷移時刻にほぼ一致する。したがって、初期油層厚さ h_0 の1次元の油の拡がりは、図-8で与えられる遷移時間 t_E を経過後、IまたII領域の法則により表わせることになる。

次に、I領域の1次元拡がりの係数について見ると、理論的にはFannelopら³⁾およびHoult²⁾の解があり、いずれも(9)式の k が定数であることを必要とする解析であるが、3.1で述べたように k は定数ではなく、また、

これら C の理論値は k の与え方で大きく変化するなど、いずれの理論にも難点がある。図-7で、I領域の実験値は $C=1.39 \sim 1.6$ の範囲にあり、実用的には $C \approx 1.5$ としてよいであろう。

II領域での拡がりの係数は、図-7から $C \approx 1.15$ となり、既存の理論値^{3),4)} に比べて小さい。その原因としては、理論はいずれも水深無限大での解で逆流域はないが、実験は有限水深で水路底に沿って顕著な逆流域が生じている。したがって、油水界面でのせん断抵抗が理論と異なり拡がりが押えられたと考えられる。

図-7で、IおよびII領域の拡がり係数を1.5および1.15とすると、IからIIへの遷移時刻は $t/t_T=0.4$ となる。

4. 軸対称の拡がり

4.1 室内実験結果

図-1の円筒の貯油槽から瞬間的に放出された油は、均等な同心円状で四方に急速に拡がるが、やがて周辺部が薄層になり表面張力の作用で時には舌状の突起を生じながら拡がっていく、この場合、油層先端部の形状や油層下部の水の動きの観察が困難で、詳細な運動の機構は検討できず、ここでは拡がりの係数の検討のみ行なった。

図-9, 10に軸対称拡がりの実験結果を示す。図中の

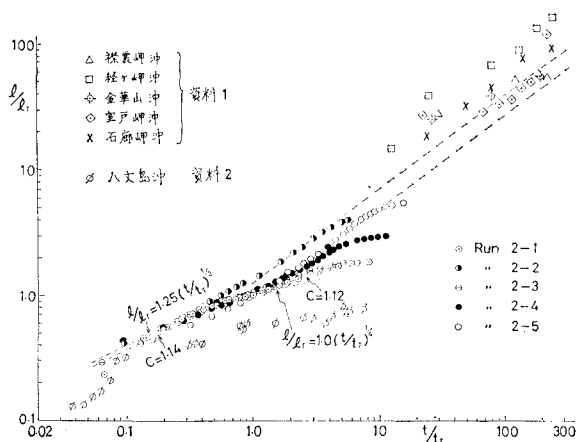


図-9 軸対称の油の拡がり (I, II領域)

l_T, t_T および l_{ST}, t_{ST} は、IからII領域およびIIからIII領域への遷移パラメータで、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} l_T &= [A \cdot g V^5 \nu w^{-2}]^{1/12} \\ t_T &= [V \cdot (\nu w \cdot g)^{-1}]^{1/3} \\ l_{ST} &= [A \cdot g \rho_w \sigma^{-1} V^2]^{1/4} \\ t_{ST} &= \sigma^{-1} (\rho_w^3 \nu w \cdot g)^{1/3} V^{2/3} \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

これらの図には、後述する現地実験結果も示している。

図-10で用いた表面張力値 σ を図-11に示す。これらは、輪環法⁷⁾による20°Cでの測定値である。

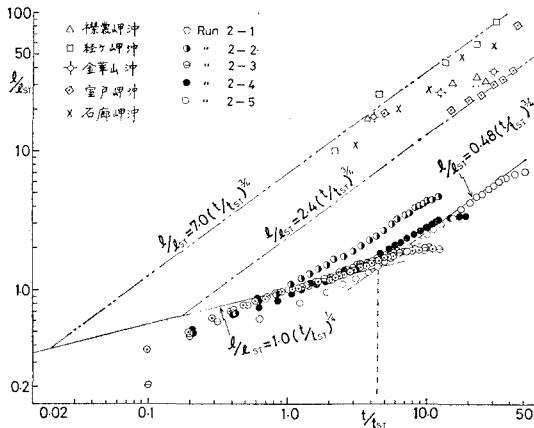


図-10 軸対称の油の拡がり (II, III 領域)

		B 重油	C 重油
	σ_1	68.24 dyne/cm	68.24 dyne/cm
	σ_2	29.62	30.80
	σ_3	18.90	21.30
$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$		19.72	16.14

図-11 表面張力の測定値

図-9, 10 に示す室内実験値には, 1 次元の実験で見られた拡がり初期の遷移領域は観察されないが, 表-1 の Fay の法則に従う 3 つの領域の存在は明確である。I および II 領域で実験から得られた拡がりの係数は, それぞれ $C \approx 1.25$ および $C \approx 1.0$ で, これらは既存の理論値にかなり良く一致する。III 領域では $C \approx 0.48$ で既存の理論とは離れた値を示す。しかし, この領域になると, 各実験の水槽水表面の水質差で表面張力が変るため拡がりの傾向に差が生じ, 前の 2 つの領域に比べて実験値の信頼度は低下する。

なお, 前述の係数値を用いて計算すると,

I から II 領域への遷移時刻: $t/t_T = 0.41$

II から III 領域への遷移時刻: $t/t_{ST} = 4.34$

となる。

4.2 室内実験結果と現地実験結果の比較

図-9, 10 に用いた現地実験データは, 海上保安庁が昭和 41 年 11 月 (資料 1)⁸⁾ および 43 年 7 月 (資料 2)⁹⁾ に行なった洋上実験 (表-3) に基づいている。

表-3 現地実験条件

資料	実験海域	風速 (m/s)	水温 (°C)	投擲油	量	比重 (15°C) (cst)	粘度
1	樺太岬沖	8-11	12	潤滑油系油	2000L	0.914	206.1
	金草山沖	9-12	22	C 重油	*	0.912	48.7
	石廊岬沖	3-7	19	重油スラッシュ	*	0.901	8.67
	室戸岬沖	2-8	21	C 重油	*	0.905	110.4
	雄略岬沖	7-10	20	C 重油	*	0.938	68.9
2	八丈島沖	8	25.7	77-アンバー油	100kL	0.865	6.81

る。しかし, 室内実験と比較してその拡がり係数は 0.6 倍程度と, いくぶん低い値を示す。

資料 1 は, 資料 2 に比べて放出油量は少ないが観測時間が長く, 図でその値は III 領域に相当する部分に分布している。また, 図-10 でその拡がり係数は, 室内実験に比べて 5~10 倍と大きく, パラッキも目立つ。その原因としては, 図-10 で用いた σ が実際と違っていた, 風波の影響を受けた, の 2 点が考えられる。仮に前者が原因ならば, 室内実験値に近づくには σ が 10 倍程度大きくならねばならず, 現実的でない。また, 資料 1 では風が強く, どのデータも風下側へ長く尾を引いて拡がっていることから, 室内実験との差は後者が原因と考えられる。

室内実験は静水面上の理想的状態であるが, 現地では風, 波, 潮流等の要因が作用し, またデータの精度もかなり悪い。したがって, 両者を単純に比較するのは無理があるが, 図-9, 10 から判断して, 拡がりの初期には室内実験による拡がり法則を現地に適用することは可能であろう。しかし, 油が薄層になり III 領域に入ると, 実際の海上では表面張力よりもむしろ風・波の影響を考慮した拡がりを考えることが重要となる。

5. ま と め

本研究では, 静水面上に一定量の油を瞬間的に放出し, その拡がりの特性についての実験的検討を行なった。得られた主要な点を要約すると, 以下の通りである。

(1) 1 次元および軸対称の拡がりについて, Fay の法則の 3 つの領域の存在を確認し, 各領域での拡がりの係数および各領域間の遷移時刻を求めた。

(2) 1 次元の拡がりにおいて, Fay の法則に従う拡がり以前には遷移領域が存在することを見出し, その特性を明らかにした。また, 重力・慣性領域での波速係数 k は定数ではないことを示した。

(3) 軸対称の拡がりについて, 現地実験との比較からその拡がり初期には, 室内実験で得られた法則を現地に適用することが可能である。しかし, 表面張力・粘性領域になると現地での拡がり係数が大きく, 風波の影響が大きいものと思われる。

最後に, 本研究は, 環境庁計上公害防止技術に関する特別研究の一環として行なったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Fay, J. A.: The spread of oil slicks on a calm sea, Oil on the Sea, Plenum Press, 1969.
- 2) Hoult, D. P.: Oil on the sea, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 4, 1972.
- 3) Fannelop, T. K. and G. D. Waldman: Dynamics of oil slicks, AIAA Journal, Vol. 10, No. 4.
- 4) Buckmaster, J.: Viscous-gravity spreading of an oil

資料 2 は, 放出油量は多いが観測時間は短かく, 図-9 において I から II 領域に相当する拡がりとなっている。

- slick, J. Fluid Mech., Vol. 59, 1973.
- 5) Benjamin, T. B.: Gravity currents and related phenomena, J. Fluid Mech., Vol. 31, 1968.
- 6) 首藤伸夫・大野 操: 石油の拡がりの実験, 第24回海岸工学講演会論文集, 1977.
- 7) 実験化学講座 7, 界面化学. p. 14, 丸善.
- 8) 科学技術庁研究調整局: 船舶原油による海水汚濁に関する特別研究報告書, 1968.
- 9) 科学技術庁研究調整局: タンカーの油流出事故対策に関する特別研究報告書, 1969.
-