

1. 序 タンカーや沿岸石油タンクの事故により広い海面上に一時に大量の油が流出した場合、特に沿岸海洋や閉鎖的内海での事故であれば沿岸住民や生物、水産業に与える被害はきわめて大きいものとなるため、流出した油の拡がりの物理的機構に関する研究、生物化学的影響に関する調査研究などこれまでに多くの報告がなされている。その物理的機構に着目すると、海面に一時に大量に流出した油の拡がりの支配因子としては重力、表面張力、慣性力、粘性力（これらは静水面上での拡がりの支配因子となる）、さらには風波、潮流等がある。例えばトリッキーニオン号事故の報告書¹⁾は、座礁したタンカーから流出した油はパッチ状となって拡がり、その重心の移動は当時の風および潮流による表層水の動きとよく一致し、またパッチ面積の拡大は油自身の拡がり力（重力、慣性力、粘性力等）によるものと推論している。このように海上に流出した油は多くの因子の作用により拡がるがここでは最も基本的な静水面上での拡がりについて考察する。

Fay²⁾は静水面上に放出された油に作用する力の関係を次元解析の手法により分析して、拡がりの大きさは時間的に3つの領域に分けられる（表-1参照）とし、各領域での拡がり大きさと時間との関係の法則を決定した。それ以後 Hoult,³⁾ Fannelop,⁴⁾ Buckmaster⁵⁾等は各領域での拡がりを理論的により厳密に取扱うとともに、Fayの与えた法則についてその拡がりの係数Cを決定しようと試みた。表-1に各領域での拡がり巾(l)と時間(t)の関係および係数値(C)を示す。しかし各領域でえられた係数値は様々でありまた実験報告は少なく特に水平2次元での実験は皆無で、拡がりを決定するパラメータCについて確立された状態とは言えない。ここでは水平1次元および2次元で行なった実験と表-1と比較しながら主に係数Cの値を検討する。表-1 領域区分と拡がりの係数

2. 実験法 実験条件を表-2に示す。1次元の実験は巾50cm、長さ12m、水深60cmの水槽、および巾30cm、長さ6m、水深20cmの水路（この下流側は面積6×6m²、水深60cmの水槽に接続しており、下流側は無限大領域とみなした）を用い、その上流端に一定量の油を貯めそれを瞬間放出し、2次元の実験は面積6×6m²、水深60cmの水槽中央に直径29cmおよび13cmの貯油槽をセットしその中に一定量の油を貯め瞬間放出し、その拡がりを測定した。使用油はB重油および流動パラフィン（実験4）である。

3. 水平1次元の拡がり 図-1は1次元の実験結果をI領域からII領域への遷移パラメータ l_T 、 t_T で整理している。図中実線はFannelopらの与えた係数 $C=1.39$ でI領域からII領域への移行を示している。実験値、例えば実験1,2では t/t_T が大きくなるにつれ $l/l_T=1.39(t/t_T)^{3/8}$ の直線に漸近してI領域が存在し、II領域($l/l_T \sim (t/t_T)^{3/8}$)へと遷移していく。他の実験も同様の傾向を示す。 t/t_T が小さな領域で拡がりの勾配がゆるやかなのは、実験と解析上の初期条件の違いが原因である。すなわち解析上はI領域において $t=0$ で $l=0$ となるが、実験は $t=0$ で $l \neq 0$ である。特に「油層の水平拡がりは油層厚に比べて十分に大きい」という解析上の前程に近づけた実験条件を設定すると、 $t=0$ で見かけ上拡がりの勾配は非常にゆるやかになる。これを補正するには時刻0で $l=0$ となるような仮想の原点を設定する方法が考えられる。図-2は $d(l/dt)|_{t=0}$ の直線と時間軸との交点から仮想原点とのずれ時間 t_0 を求めて各実験値を整理したものである。 t_0 が小さな領域での拡がりの勾配はI領域($2/3$ 乗)にかなり近づくが、 $t=0$ での l/l_T が大きいほど t_0 の誤差が大きく実験値もバラツキが大きいの。

	I. 重力・慣性領域	II. 重力・粘性領域	III. 表面張力・粘性領域
1次元	$1 - (\Delta g)^{1/2} (V/b)^{3/2} t^{3/2}$ C=1.39 (理論) C=1.6 (実験)	$1 - V_w^{1/2} (\Delta g)^{1/2} (V/b)^{3/2} t^{3/2}$ C=1.39 (理論) C=1.76 (実験) C=1.5 ()	$1 - \sigma^{1/2} (\rho_w V_w)^{1/2} t^{3/2}$ C=0.665 (理論) C=1.33 (実験)
2次元	$1 - (\Delta g)^{1/2} V^{1/2} t^{1/2}$ C=1.14 (理論)	$1 - V_w^{1/2} (\Delta g)^{1/2} t^{1/2}$ C=0.978 (理論)	$1 - \sigma^{1/2} (\rho_w V_w)^{1/2} t^{1/2}$ C=0.128 (理論) C=1.12 ()

l: 拡がり巾, V: 放出油量, b: 水路巾, σ : 表面張力
 ρ_w : 水の密度, V_w : 水の動粘性係数

表-2 実験条件

実験番号	放出油量(V) (W) (L) (H) 50cm×100cm×3cm	水温	備考
1		13.6°C	B重油 比重0.906 (27°C) 動粘性係数 425cst (30°C)
2	50 X 100 X 5	15.6°C	
3	50 X 100 X 1	13.4°C	
4	50 X 100 X 1	14.4°C	
5	30 X 200 X 3	9.6°C	流動パラフィン 比重0.855 (30°C)
6	30 X 200 X 1	12.0°C	
7	30 X 200 X 0.5	12.0°C	
8	(φ29cm)×(H)454cm	20.5°C	
9	29X151	24.4°C	
10	29X454	25.6°C	
11	29X151	24.2°C	
12	14X130	24.5°C	

I 領域における拡がりの係数 C を決定する際に解析上の問題となるのは、油膜先端の速度 $U_{LE} = \bar{u} (\Delta g h_{LE})^{1/2}$ (1) の定数 $\bar{u}$ の値である。ここに $\Delta = 1 - \rho_{oil}/\rho_{water}$, h_{LE} は油膜先端の厚さである。Fannelop は $\bar{u} = 1.0$ として $C = 1.39$ を与えた。今回の実験からもこの値がほぼ妥当と考えられる。

次に II の領域では理論的に係数 C を決定したものは Fannelop の $C = 1.39$, Buckmaster の $C = 1.76$ がある。両者とも水深無限大での解析で、理論上の違いは oil-water interface でのせん断抵抗をどのように扱うかである。実験では $C \approx 1.15$ であり Fannelop の $C = 1.39$ が最も近いが、それでもやや大きい。その原因としては境界条件の差、すなわち実験では有限水深で $x=0$ は壁面であり油屑に連行される流量を補うための顕著な逆流部が形成される。実験 1~4 は水深 60 cm で油膜厚さに比べて十分な水深であるが明らかな逆流部が観察される。しかし上記の理論ではこのような現象は生じず、実験は理論と比較してせん断抵抗が大きくなり拡がりの係数 C が小さくなることが考えられる。瀬戸内沿岸のような浅海部に大量の油が流出した場合には、この実験のような境界条件の設定が合理的とも考えられるが、さらに検討の必要がある。

4. 水平 2 次元の拡がり 図-3 は 2 次元の実験結果で、Fay が与えた I, II, III の各領域が存在することを示すが、各領域での係数 C はこれまでの理論値と大きく相違している。I 領域で Fannelop が与えた C は 1.14 (1) 式で $\bar{u} = 1$ であるが実験値は $C \approx 2.5$ となる。実験は水槽面積が小さく、実験初期に「油屑の水平拡がりは油屑厚に比べて十分大きい」という条件を満たしていない。したがって $t=0$ で油屑動水勾配が大きく拡がりが急激で C の値も大きくなったと考えられる。

事実 Fannelop の理論でも $\bar{u} = 2$ になると $C \rightarrow \infty$ となり、Hoult の理論でも $\bar{u} > 1.4$ では C の有意な値が定まらないなど、実験初期に (1) 式の U_{LE} が大きいと C もかなり大きくなる可能性がある。次に実験 9, 11 は同一条件にもかかわらず II 領域から III 領域にかけての傾向がかなり違っている。これは Fay の解析結果からもわかるように、放出油量が小さいと II 領域が現われにくく、また III の領域は水質によって表面張力の大きさが変わりやすく拡がりが不安定なことが原因であろう。また、実験 8, 10 で II 領域以後の拡がりがゆるやかなのは水槽側壁の影響で拡がりが押えられたためである。

油膜の 2 次元拡がりについては次元解析による法則の妥当性を確認できた程度で、拡がりの係数 C の決定などその物理的機構を明確にするにはさらに検討が必要である。

<参考文献>

- 1) J.E. スミス編著, 日高, 宇田 共訳; トリ-キヤニオン号 海難による海洋汚染と生物環境, 日高海洋科学振興財団
- 2) Fay, J.A.; Oil on the Sea, ed. D.P. Hoult, 53-63, New-York, Plenum 1969
- 3) Hoult, D.P.; Oil Spreading on the Sea, Annual Review of Fluid Mech., Vol. 59, 1972
- 4) Fannelop T.K. and Waldman G.D.; Dynamics of Oil Slicks, AIAA JOURNAL, Vol. 10, No. 4
- 5) Buckmaster J.; Viscous-gravity Spreading of an Oil Slick, Jour. of Fluid Mech. Vol. 59, 1973

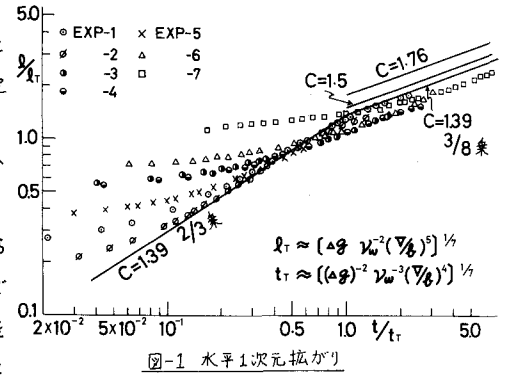


図-1 水平 1 次元拡がり

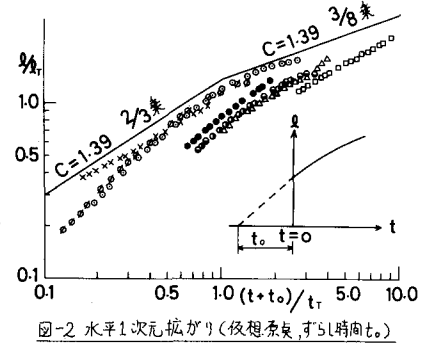


図-2 水平 1 次元拡がり (仮想系, ずらし時間 t_0)

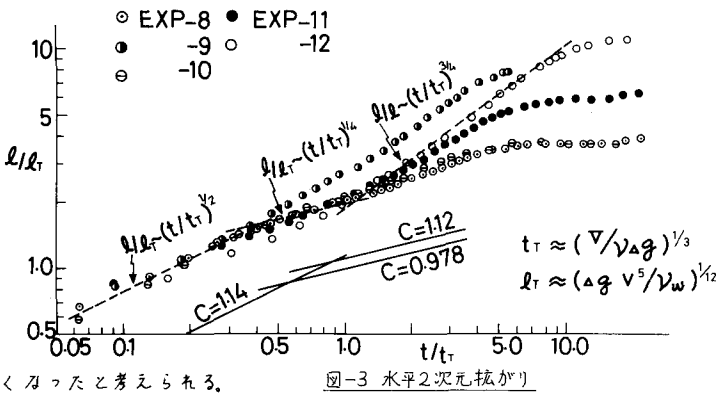


図-3 水平 2 次元拡がり