

水面上に流出した油の拡がりに関する研究

埜口, 英昭

<https://doi.org/10.11501/3059397>

出版情報 : 九州大学, 1991, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :



第4章 静水面上に瞬間流出する油の拡がり

第1節 はじめに

水面上での油の流出の基本的な形態としては、流出源から長時間にわたって連続的に油が流出する、いわゆる連続流出の形態をとる場合と、ある一定量の油が一時に流出する、いわゆる瞬間流出の形態をとる場合が考えられる。このうち、前者の単純なモデルとして、静水面上での軸対称連続流出については、第3章でその拡がりの特性を明らかにした。ここでは、後者の場合の基本的モデルとして、静水面上での瞬間流出する油の拡がりについて検討する。

ある一定量の油が静水面上に一時に流出する、いわゆる瞬間流出の油の拡がりについては、第2章の表2-1に示したように、これまでもかなりの研究が行なわれている。このうち、一次元の拡がりについては、一、二の実験結果も報告されているが、軸対称の拡がりについては、解析結果についての実験的検証が行なわれた例はない。ここでは、まず、重油を用いて行なった、一次元および軸対称の瞬間流出の実験結果に基づいてその拡がりの特性を検討する。一次元瞬間流出の実験では、油層先端部の速度の低減特性について調べるとともに、油の流出後の経過時間と拡がり大きさの関係について、表2-1に示されている過去の研究結果との比較検討を行なう。また、軸対称の瞬間流出の実験結果についても、油の流出後の経過時間と拡がり大きさの関係について、表2-1の結果との比較検討を行なうとともに、海上保安庁で行なわれた現地実験結果についても述べる。

つぎに、連続流出の解析と同様の特性曲線法を、瞬間流出する油の拡がりに適用して、油層先端部の拡がりを規定する式を導くとともに、式

中に含まれるパラメータや初期条件の決定法について検討する。その結果を用いて、一次元瞬間流出および軸対称瞬間流出のそれぞれの場合の拡がりを計算し、実験結果との比較検討を行う。

第2節 瞬間流出に関する実験と考察

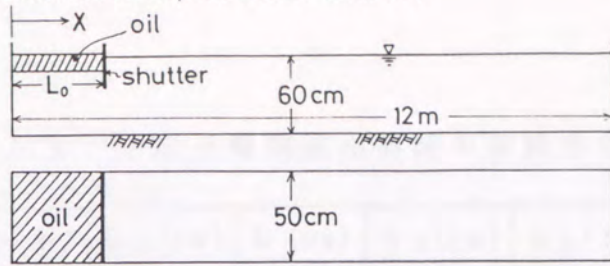
2. 1 実験装置と実験方法

一次元瞬間流出の実験は、図4-1に示す幅50cm、長さ12m、水深60cmの水槽①を用いて行ない、水槽左端に貯留した一定量の油をシャッターを引き上げて瞬間的に流出させ、油層先端付近を水槽側面から16mmシネカメラで追跡して、その形状と速度および原点から油層先端部までの距離 l の時間変化を求めた。この場合、油層先端部が進行するにつれて水槽右端の壁面の影響で拡がりが押さえられるのが避けられないと考えられるので、その後の実験では幅30cm、長さ6m、水深20cmの水槽②を用いた実験も追加して行なった。水槽②の右端は幅6m×6mの平面水槽に接続しており、近似的に右側は半無限領域と見なせる。

軸対称瞬間流出の場合の拡がりの実験は、図4-2に示した広さ6m×6m、水深約60cmの水槽を用いて行い、水槽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、水槽上方にセットした35mmモータドライブカメラおよび16mmシネカメラで油層の拡がりを撮影した。

表4-1に、一次元瞬間流出実験の実験条件を示す。Run1-1から1-4までは水槽①を、Run1-5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、 b は水路幅、 h_0 は初期油層厚さである。実験に使用した油は、B重油である。ただし、Run1-4では流動パラフィンを用いた。また、表4-2に、二次元軸対称の瞬間流出実験の実験条件を示す。水槽中央部に設置した貯油槽の直径 ϕ は、29cmおよび14cmの2種類を用いた。実験に使用した油は、B重油である。

① One dimensional experimental tank (1)



② One dimensional experimental tank (2)

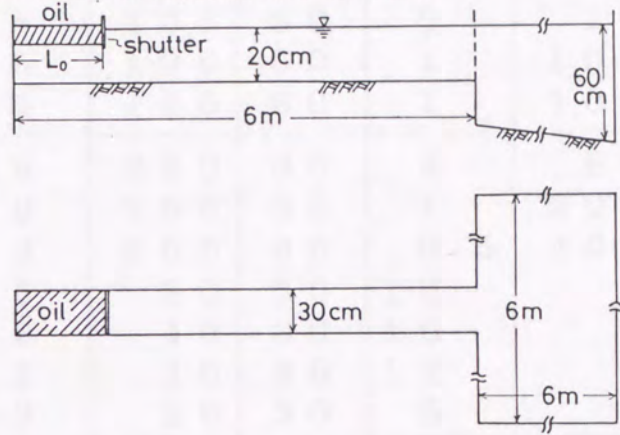


図 4 - 1 一次元瞬間流出での実験装置

Two dimensional experimental tank

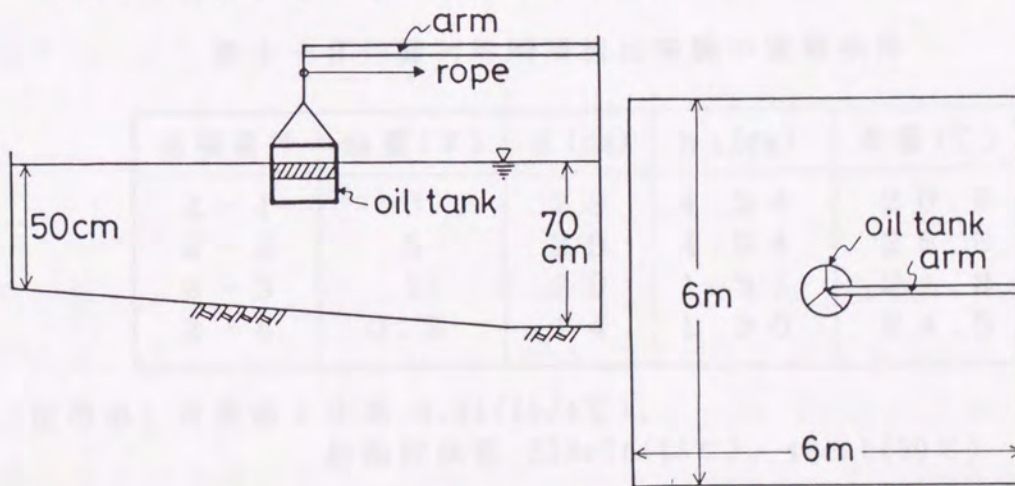


図 4 - 2 軸対称瞬間流出での実験装置

表 4 - 1 一次元瞬間流出実験の実験条件

実験番号	油量 (ℓ)	L_0 (cm)	b (cm)	h_0 (cm)	L_0/h_0	水温 (°C)
1 - 1	15	100	50	3	33	13.6
1 - 2	25	100	50	5	20	15.6
1 - 3	5	100	50	1	100	13.4
1 - 4 *	5	100	50	1	100	14.4
1 - 5	18	200	30	3	67	9.6
1 - 6	6	200	30	1	200	12.0
1 - 7	3	200	30	0.5	400	12.0
1 - 8	6	20	30	10	2	28.0
1 - 9	12	40	30	10	4	28.1
1 - 10	3	10	30	10	1	28.2
1 - 11	3	20	30	5	4	28.2

<使用油> B重油：比重 0.91(15/4°C)，
動粘性係数 239cSt(15°C)，48cst(30°C)

* paraffin liquid：比重 0.855(15/4°C)

表 4 - 2 軸対称瞬間流出実験の実験条件

実験番号	油量 (ℓ)	ϕ (cm)	h_0 (cm)	水温 (°C)
2 - 1	3	29	4.54	20.5
2 - 2	3	29	4.54	25.6
2 - 3	1	29	1.51	24.2
2 - 4	0.2	14	1.30	24.5

<使用油> B重油：比重 0.91(15/4°C)，
動粘性係数 239cSt(15°C)，48cst(30°C)

2. 2 一次元拡がりの実験結果

(1) 油の先端部の速度

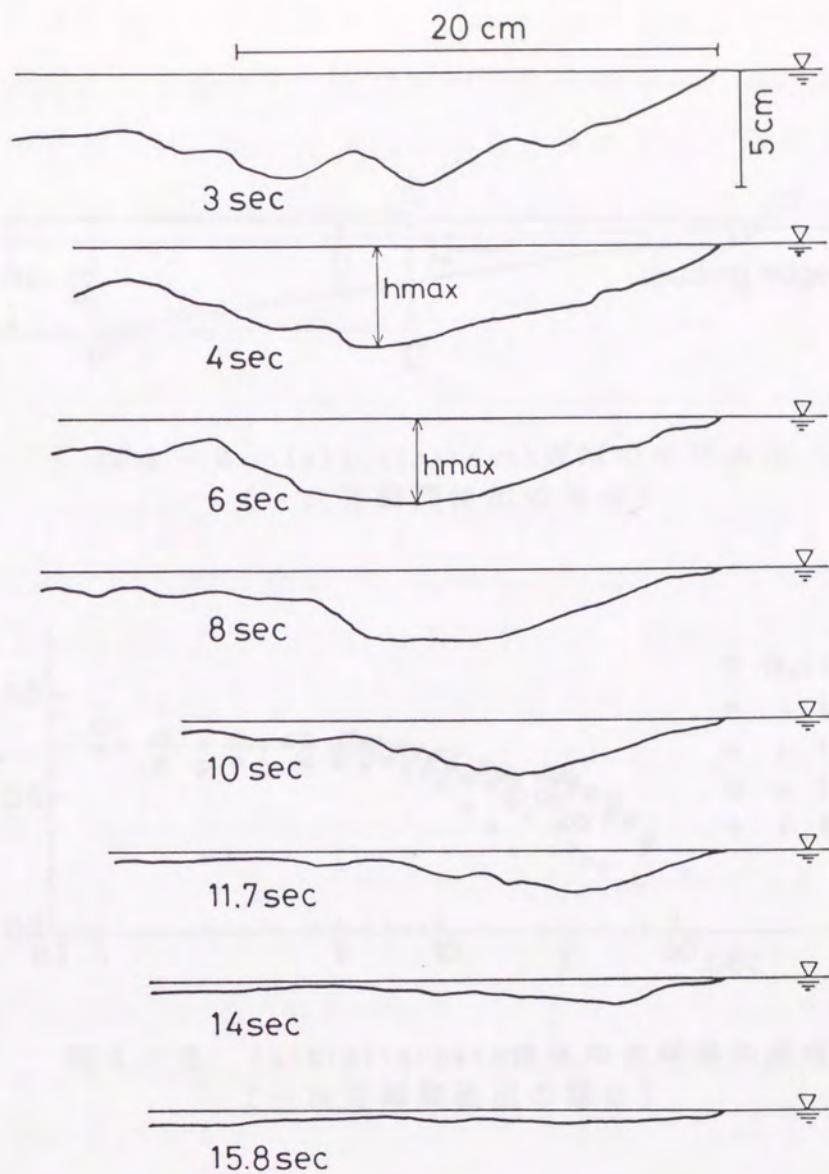
図4-3は、Run 1-8においてシャッターを引き上げて油を流出させた直後から、15.8秒経過するまでの油層先端部の形状の変化の様子を示している。流出した油層は、その先端部がくさび状で、いわゆる密度流先端部の流動に特有の顕著な内部波が見られ、時間とともにその厚みは減少して平滑なスリックへと変化していく様子がわかる。このような流出初期の内部波の現象は、 L_0/h_0 が小さなRun 1-8から1-11で特に顕著であるが、 L_0/h_0 が大きなRun 1-3から1-7では、最初から平滑なスリックに近い状態で拡がっていく。

Fannelopら¹⁾にならって、一次元の油の拡がりの、流出直後の状態を模式的に示すと、図4-4のように表わされる。図において、時刻 $t=0$ で領域 ABCD にあった油層は、シャッター BC を開けて瞬間的に放出すると、油層の先端 P は前方へ、下端の点 P' は後方へと、急速に拡がっていく。Fannelopらによれば、放出された直後の油層は、その先端部の移動速度を一定に保って拡がり、その後、I領域の拡がりへと移っていく。この、I領域の前の段階での拡がり initial-growth の領域として定義され、そこでの油層先端部の速度は

$$C_0 = \sqrt{g' h_0} \quad \text{-----} \quad (4-1)$$

と表わされる。ここに、 $g' = \Delta g$ であり、 h_0 は初期油層厚さである。図4-5は、表4-2で L_0/h_0 が 33 以下の実験ケースについて得られた u_{LE}/C_0 と流出時間 t との関係を示す。 u_{LE} は、実験から得られた油層先端部の移動速度で、16mmフィルムから読み取った2秒間の移動速度の平均値で与えている。図によれば、各実験において流出開始後約7秒程度経過するまでは u_{LE} が一定の領域があり、平均的には、

$$u_{LE} \cong 0.7 C_0 \quad \text{-----} \quad (4-2)$$



Run 1-8

図 4 - 3 水面上を進行する油層先端部の形状の変化
(一次元瞬間流出の場合)

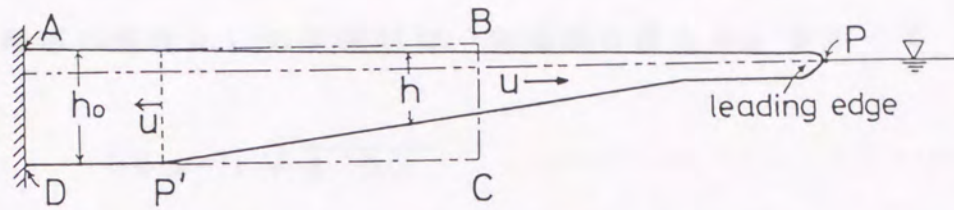


図 4 - 4 Initial-growth領域のモデル化
(一次元瞬間流出の場合)

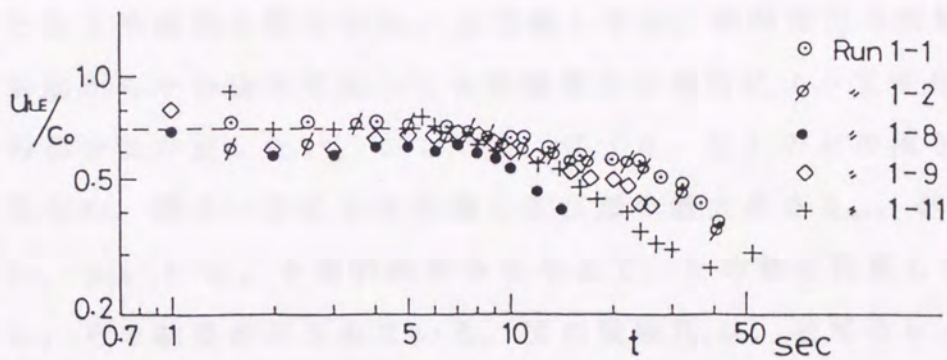


図 4 - 5 Initial-growth領域の先端部の速度
(一次元瞬間流出の場合)

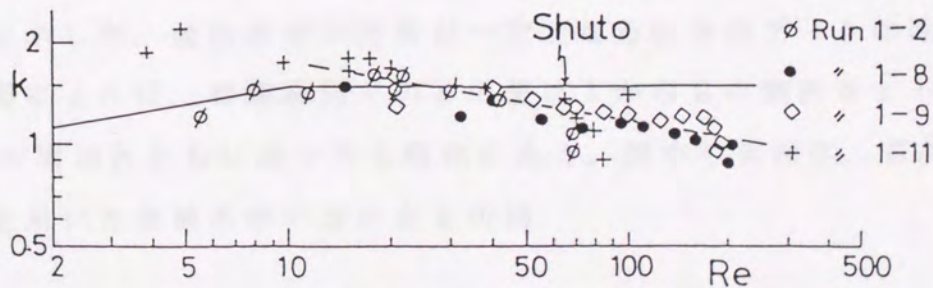


図 4 - 6 I領域での先端部の速度の低減特性
(一次元瞬間流出の場合)

の関係が認められる。

つぎに、第2章で述べたように、Fannelopらの研究でI領域の油の拡がりを理論的に解く場合に、油層先端部の速度をどう表現するかということが重要であった。密度流先端部の流動を取り扱う際によく用いられる先端部の速度 u_{LE} の定義法は、先端部の厚さ h_{LE} を用いて

$$u_{LE} = k \sqrt{g' h_{LE}} \quad \text{----- (4-3)}$$

とおく方法である。Fannelopらは、この定義法を用いて、油層が十分に薄いという条件のもとで $k = 1$ とおいたが、 h_{LE} の定義が不明である。Benjamin²⁾は、重力流の解析で、先端くさび部から十分後方の、厚さが一定となる平滑部の厚さを h_{LE} と定義したが、瞬間流出の実験では、油層先端部から十分後方であっても油層厚さは場所によって変化し、一定厚さの部分は存在しない。ここでは、式(4-3)の k の値を実験的に調べるため、図4-3に示す先端くさび部の最大厚さ h_{max} を h_{LE} として使い、 u_{LE} と h_{LE} を実験結果から与えて、 k の値を計算した。図4-6に、その結果が示されている。図の横軸 Re は、油層のレイノルズ数で、 $Re = (u_{LE} \cdot h_{LE}) / \nu$ で与えられる。瞬間流出では、 Re 数の値は、油の放出直後に最大となり、拡がりとともに小さくなっていく。したがって、図中の各実験ケースでの k の値は、時間の経過とともに右側から左側へとたどって行くことになる。なお、これらのデータの中で、図4-5で示した、流出直後の速度が一定となる部分のデータは除かれている。図によれば、瞬間流出での k の値は1から2の範囲をとっており、 Re 数の増加とともに減少する傾向にある。図中の実線は、首藤ら³⁾が、石油を用いた実験の中で求めた k の値

$$\left. \begin{array}{ll} h_{LE}/H < 0.1 \text{ で} & k = 1.5, \quad Re \geq 10 \\ h_{LE}/H < 0.1 \text{ で} & k = Re^{0.176}, \quad Re < 10 \end{array} \right\} \text{----- (4-4)}$$

を示している。ここに、 H は水路の水深であり、 h_{LE} は油層先端から数10cm後方の平均厚さをとっている。図において R_e 数が10から40程度の範囲、すなわち、油層の拡がり l がI領域の後半になっていると考えられる範囲では、実験値は首藤らの結果に近い値をとるようであるが、 R_e 数が大きい範囲では幾分小さくなる傾向を示す。

(2) 油の拡がり

ここでは、一次元瞬間流出実験の実験結果と、Fayによって与えられた、式(2-9)および式(2-10)で表わされる結果とを比較検討する。図4-7に、拡がり l/l_{T1} と流出時間 t/t_{T1} の関係を示す。 l は、図4-1で水槽左端の $x=0$ を原点とした油の先端までの距離を表わす。また l_{T1} 、 t_{T1} は、それぞれ距離および時間についての、IからII領域への遷移パラメータを表わし、次のようにして求められる。IからII領域への遷移点では、式(2-9)から求めた l と式(2-10)から求めた l は等しくなるので、その l の値を l_{T1} とし、式(2-9)と式(2-10)を等しいと置いて、そのときの時間 t_{T1} を求めると、

$$t_{T1} \equiv \{(g')^{-2} \nu_w^{-3} \bar{v}^4\}^{1/7} \quad \text{-----} \quad (4-5)$$

が得られる。ここに、 \bar{v} は単位幅当たりの流出油量であり、式(4-5)で拡がり係数 A_I 、 A_{II} の値はいづれも1としている。式(4-5)を式(2-9)あるいは(2-10)に代入して l_{T1} を求めると

$$l_{T1} \equiv \{g' \nu_w^{-2} \bar{v}^5\}^{1/7} \quad \text{-----} \quad (4-6)$$

が得られる。

図4-7の中の各実験値の左端に記入されている数値は、各実験での貯溜された油層の長さ L_0 と初期油層厚さ h_0 の比 L_0/h_0 の値を示し

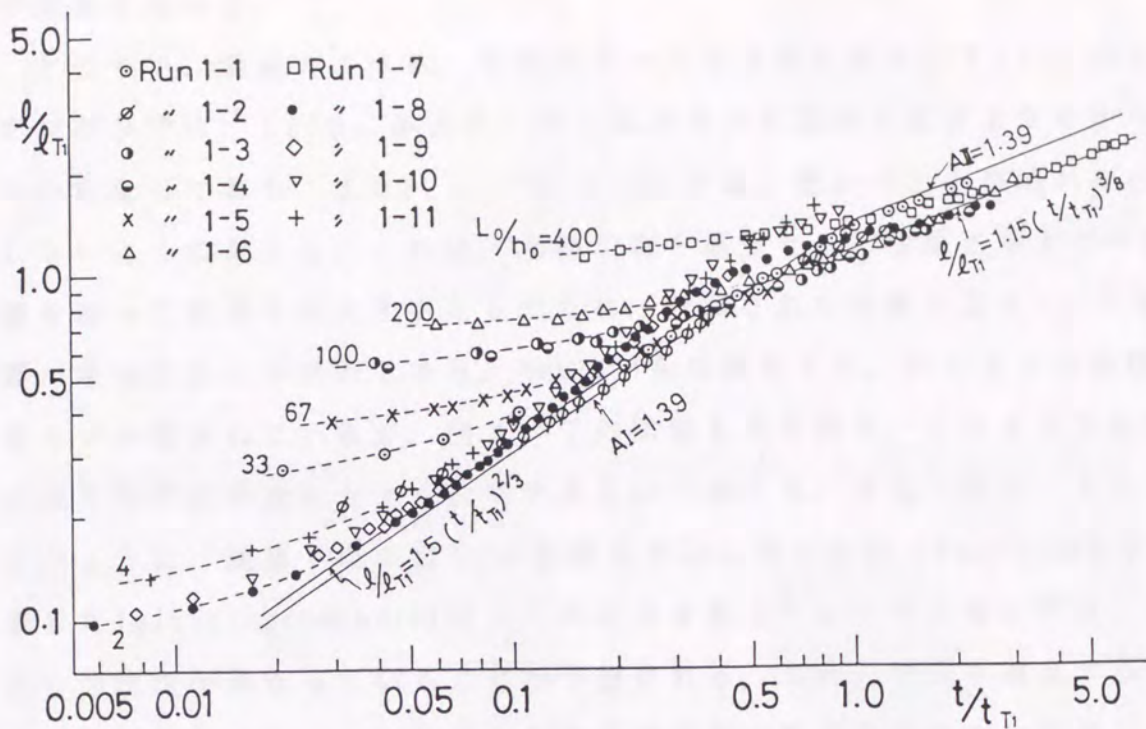


図 4-7 一次元瞬間流出での l/l_{T1} と t/t_{T1} の関係

ている。図によれば、各実験ケースで油の流出直後で t/t_{T1} が小さな部分では、 L_0/h_0 が大きいほど拡がりの勾配が I 領域よりもゆるやかになっており、 t/t_{T1} の増加とともに、式 (2-9) で表わされる I 領域の拡がりの関係 $l/l_{T1} \sim (t/t_{T1})^{2/3}$ に漸近し、さらに、式 (2-10) で表わされる II 領域の拡がり $l/l_{T1} \sim (t/t_{T1})^{3/8}$ へと移行していく。 L_0/h_0 が小さい Run 1-8 から 1-11 では、比較的よく式 (2-10) の傾向に一致しているが、それでも、拡がりの初期には緩やかな勾配になっている。図 4-7 の実験値で、その勾配が式 (2-9) に一致している部分のデータのみから判断すると、I 領域の拡がりの係数 A_I は、表 2-1 に示したのとほぼ同じ程度の 1.39~1.6 の範囲に入っており、平均的に $A_I = 1.5$ 程度となるようである。また、II 領域での拡がりの係数 A_{II} は、図 4-7 では、 $A_{II} \cong 1.15 \sim 1.39$ 程度の値とな

っており、表 2-1 に示されたいくつかの係数値よりは小さめの値を示す結果となった。

ところで、前述のように、各実験ケースで油流出直後の t/t_{T1} が小さな部分では、 L_0/h_0 が大きいほど拡がりの勾配が I 領域よりもゆるやかになっており、また、 $L_0/h_0 > 100$ では、見かけ上 I 領域が存在しないように見える。これは、水槽左端を原点として油層先端までの距離を取って拡がりの大きさとしたため、貯溜された油層の長さ L_0 の影響が現れたことが原因である。Hoult⁴⁾らの報告でも、同じような座標の取り方がなされているが、図 4-7 の結果を見る限り、このような座標の取り方では現象をうまく説明できないと言える。また、図 4-4 で示したように、油層下端の点 P' が側壁の点 D に達する前 (Fannelopらが定義した Initial-growth の領域もこれに含まれる) とそれ以後とでは、拡がりの状況が異なっていることが予想される。これらの点を改良するための、新たなパラメータを導入した実験結果の整理方法については、第 4 節で述べる。

2. 3 軸対称拡がりの実験結果

(1) 室内実験結果

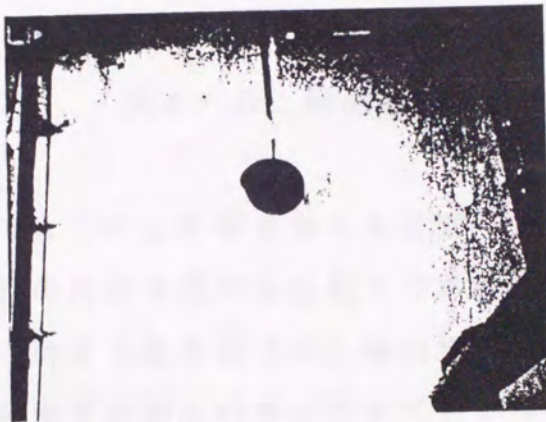
図 4-2 に示した円筒の貯油槽から瞬間的に流出した油は、同心円状に拡がっていく。その一例が写真 4-1 に示されている。流出した油は、その中央部分に油が厚い領域、その周囲に褐色から明黄色へと変化しながら薄くなって行く領域があり、この部分までは写真で判別できる。さらにその外側には、目視でようやく判別が可能な薄膜部があり、その部分は表面張力の作用が大きい領域と考えられ、時間とともに急速に拡大していく。水と油の境界は、この薄膜部分の先端であるが、その部分は油量的には非常に少ない。ここで扱うのは、油の厚さを均一とした平均的な拡がりのスケールであるから、拡がりの平均的な大きさを表わす油の境界として、写真で判別可能な先端部までを油の領域と定義した。そ



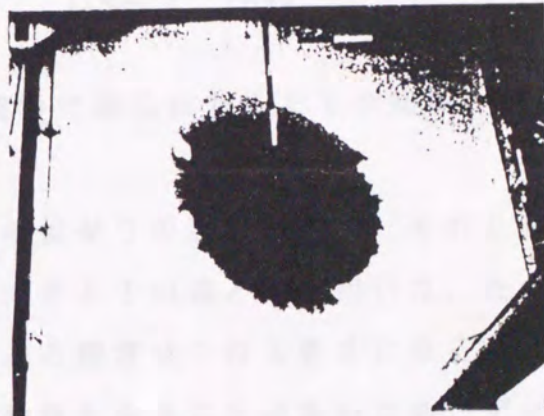
0 sec



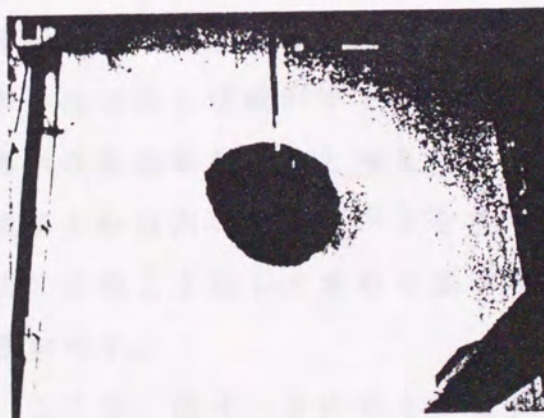
50 sec



10 sec



70 sec



30 sec



90 sec

RUN 2-4

写真 4 - 1 軸対称瞬間流出の油の拡がりの様子

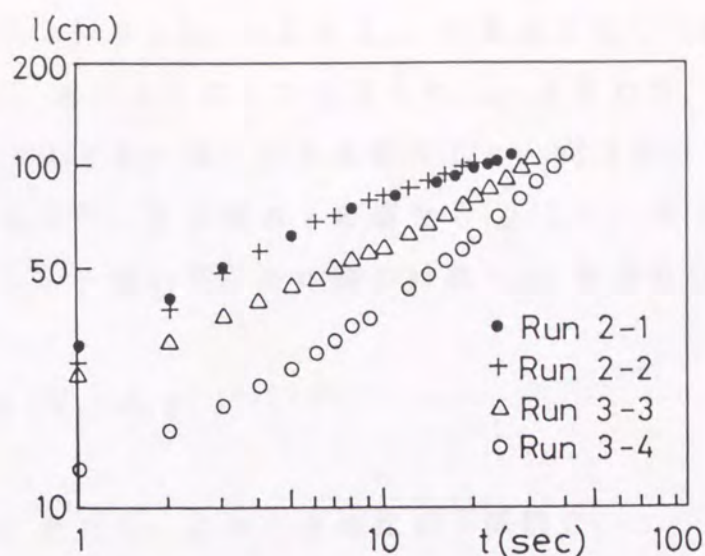


図 4-8 軸対称瞬間流出実験で得られた l と t の関係

のようにして写真から各時刻での油の拡がりの面積を求め、それと等面積の円の半径を各時刻での拡がりの大きさ l の値として用いた。ただし、このような方法では、油の拡がりがある程度以上の大きさになると、その形状が同心円からずれていびつな形状となることが多いため、データの精度が悪くなることはやむを得ない。また、いずれの実験ケースでも、上記の方法で求めた拡がりの半径が 1 m より大きくなってくると、その拡がり方が緩やかになって行く。これは、実験に使用した水槽の大きさが 6 m 四方と比較的小さいため、側壁の影響が表れてきて油の拡がりが抑制され始めたものと考えられる。したがって、ここでは、拡がりの半径が 1 m 以内の実験データを使用して解析を行うものとする。図 4-8 は、このようにして求めた拡がりの大きさ l と流出後の経過時間 t の関係を示す。

ここで、図 4-8 に示されたデータを用いて、Fay によって導かれた軸対称の拡がりの関係式と実験値の適合性について検討する。まず、慣性領域 (I 領域) から粘性領域 (II 領域) にかけての拡がりを見るため、各実験での拡がりの大きさ l と流出時間 t の関係を、I 領域から II 領域

への遷移パラメータ l_{T2} および t_{T2} で無次元化して表示する。 l_{T2} および t_{T2} は、次のようにして与えられる。すなわち、I から II 領域への遷移点では、式 (2-6) から求めた l と、式 (2-7) から求めた l は等しくなるので、その時の l の値を l_{T2} とし、式 (2-6) と式 (2-7) を等しいと置いて、その時の時間 t_{T2} を求めると、

$$t_{T2} \equiv \{V_0 (\nu_w g')^{-1}\}^{1/3} \quad \text{-----} \quad (4-7)$$

が得られる。ただし、このときの拡がり係数 C_I 、 C_{II} の値はいずれも 1 としている。式 (4-7) を式 (2-6) あるいは (2-7) に代入して l_{T2} を求めると、次式のように表される。

$$l_{T2} \equiv \{g' \nu_w^{-2} V_0^5\}^{1/12} \quad \text{-----} \quad (4-8)$$

このようにして得られた l_{T2} と t_{T2} を用いて、図 4-8 の全データを無次元化して表示したのが図 4-9 である。なお、図中には、海上保安庁で行われた実際の海上での流出実験の結果も記入されているが、これについては、次の現地実験結果の項で述べる。

また、Fay が与えた式 (2-6) および (2-7) を、 l_{T2} と t_{T2} を用いて無次元化すると、I 領域および II 領域の拡がりは、それぞれ次式で表わされる。

$$\text{I 領域} : \frac{l}{l_{T2}} = C_I \left(\frac{t}{t_{T2}} \right)^{1/2} \quad \text{-----} \quad (4-9)$$

$$\text{II 領域} : \frac{l}{l_{T2}} = C_{II} \left(\frac{t}{t_{T2}} \right)^{1/4} \quad \text{-----} \quad (4-10)$$

図 4-9 の中では、Fannelopら が与えた係数 $C_I = 1.14$ 、および C_{II}

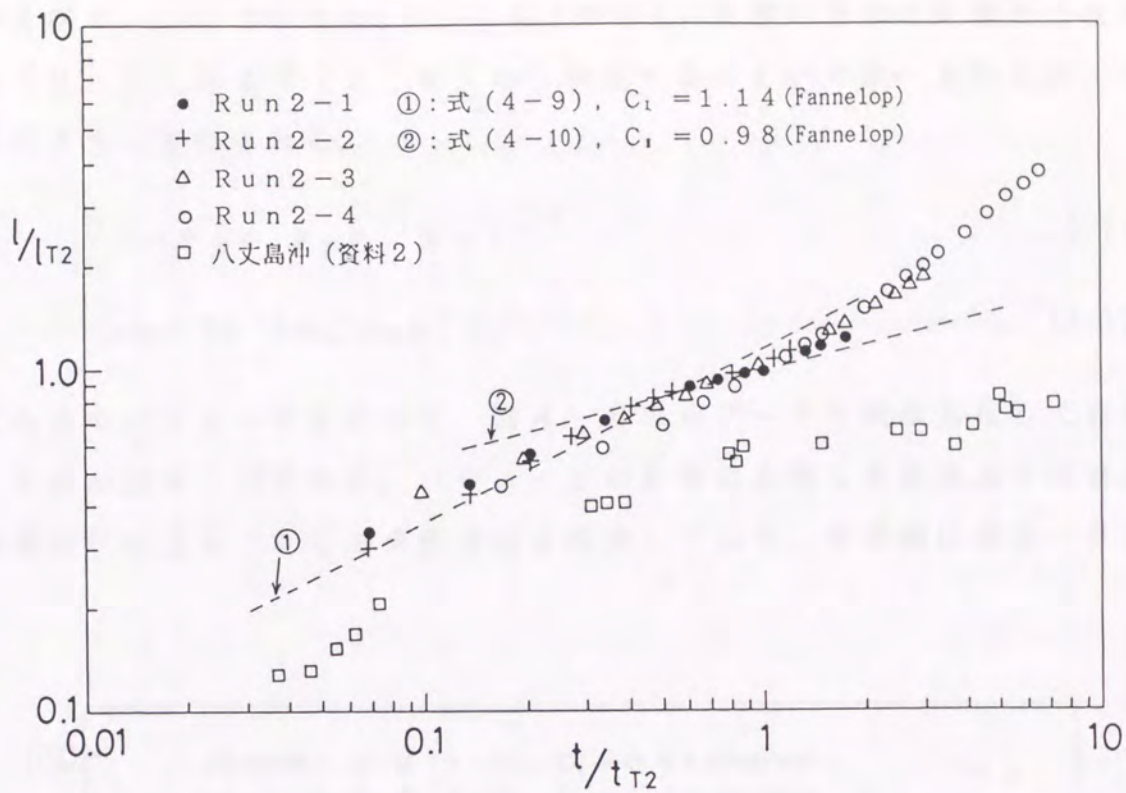


図 4-9 軸対称瞬間流出での I 領域から II 領域にかけての拡がり

= 0.98 を用いた場合の I 領域および II 領域での拡がりが破線で示されている。

図 4-9 によれば、放出油量の多い Run 2-1 および 2-2 では、拡がりの初期に、係数 $C_1 = 1.14$ を用いた式 (4-9) で表される I 領域に相当する部分が存在するが、他の実験ケースでは I 領域に相当する部分は見られない。また、拡がりの係数 $C_1 = 0.98$ を用いた式 (4-10) で表される II 領域については、Run 2-1、2-2、および Run 2-3 には、一部これに近い領域が存在するがあまり明確ではなく、I 領域と II 領域の区別もつきにくい。

つぎに、Fay の言う粘性領域 (II 領域) から表面張力領域 (III 領域) にかけての拡がりを見るため、図 4-8 の全データを、II 領域から III 領域への遷移パラメータ l_{ST2} および t_{ST2} を用いて無次元化する。 l_{ST2}

および t_{ST2} については、 l_{T2} および t_{T2} を導いたのと同様の方法で、式(2-7)および(2-8)から決定することができ、それぞれ、次式のように表わされる。

$$l_{ST2} \equiv \{g' \rho_w \sigma^{-1} V_0^2\}^{1/4} \quad \text{----- (4-11)}$$

$$t_{ST2} \equiv \{\sigma^{-3} \rho_w^3 \nu_w g' V_0^2\}^{1/3} \quad \text{----- (4-12)}$$

これらのパラメータを用いて、図4-8の全データを無次元化して表示したのが図4-10である。パラメータの計算に必要な表面張力 σ の値は、輪環法⁵⁾による20℃での測定値を採用しており、その値は表4-3に

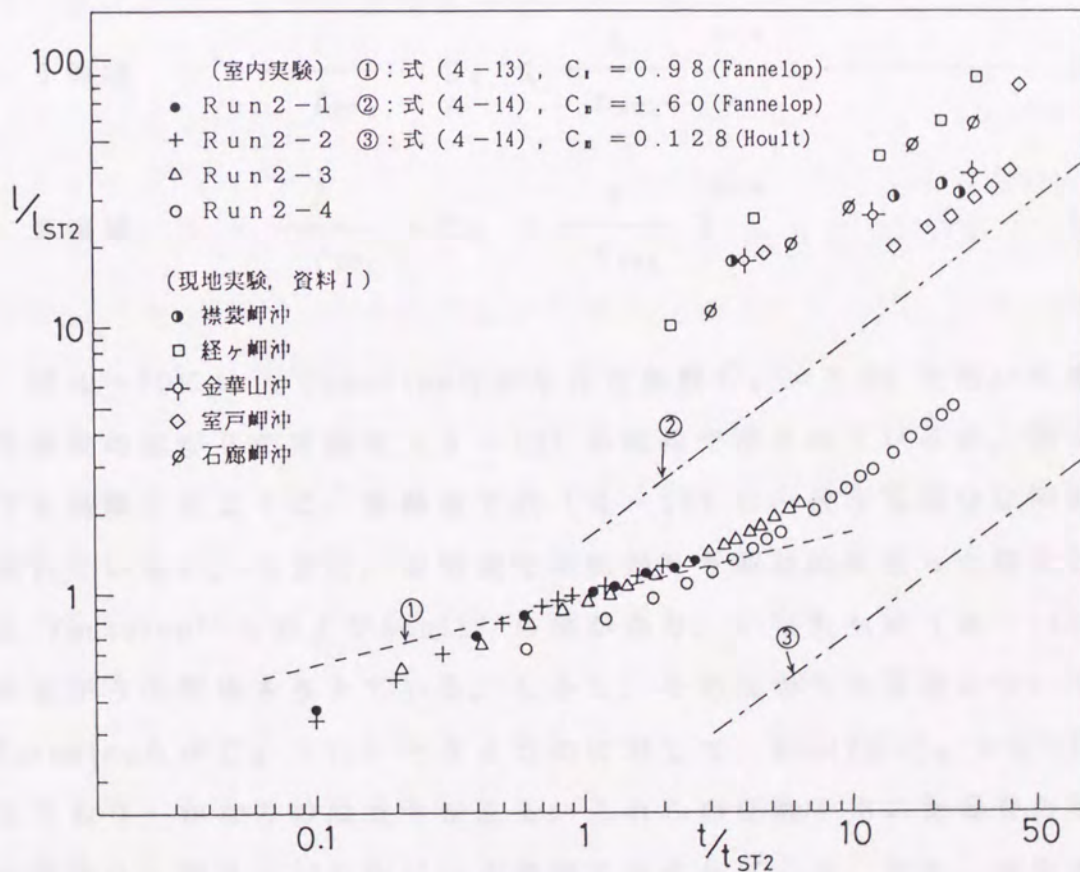


図4-10 軸対称瞬間流出でのⅡ領域からⅢ領域にかけての拡がり

表 4-3 表面張力の測定結果 (B重油, 20℃)

大気と水の界面での表面張力値 (σ_1)	68.2 dyne/cm
大気と油の界面での表面張力値 (σ_2)	29.6 dyne/cm
油と水の界面での表面張力値 (σ_3)	18.9 dyne/cm
水面上の油膜の拡がりに寄与する表面張力値 ($\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$)	19.7 dyne/cm

示されている。なお、図 4-10の中には、図 4-9と同じく海上保安庁での現地実験結果が記入されているが、これについては次項で述べる。

l_{ST2} と t_{ST2} を用いて、式 (2-7) および (2-8) を無次元化すると、II 領域および III 領域の拡がりは、それぞれ次式で表わされる。

$$\text{II 領域} : \frac{l}{l_{ST2}} = C_{II} \left(\frac{t}{t_{ST2}} \right)^{1/4} \text{----- (4-13)}$$

$$\text{III 領域} : \frac{l}{l_{ST2}} = C_{III} \left(\frac{t}{t_{ST2}} \right)^{3/4} \text{----- (4-14)}$$

図 4-10には、Fannelopらを与えた係数 $C_{II} = 0.98$ を用いた場合の II 領域の拡がりの実験式 (4-13) が破線で示されているが、図 4-9でも指摘したように、実験値で式 (4-13) に一致する部分は明確には表れていない。つぎに、III 領域での拡がりを解析的に扱った研究としては Fannelop⁶⁾らおよび Hoult⁷⁾の例があり、いずれも式 (4-14) の形の拡がりの関係を与えている。しかし、その拡がりの係数については、Fannelopら $C_{III} = 1.6$ と与えたのに対して、Houltは $C_{III} = 0.128$ を与えており、かなりの隔たりがある。これらの係数を用いた場合の拡がりの関係は、図 4-10の中に一点鎖線で示されている。また、図中の各実験のうち、式 (4-14) で表される拡がりのべき数 (3/4乗) に近い関

係を有するのはRun 2-4であるが、FannelopおよびHoultのいずれの結果とも一致していない。図に示した拡がり半径 l の実験値は、写真から描いた比較的油層の厚い部分での拡がりの形状を、等面積の円に換算して求めた値であり、このような手法が、油層が薄くなって表面張力が卓越する領域の拡がりまでを正確に捉えられるかどうかは議論の余地がある。したがって、Run 2-5の後半部の拡がりが、表面張力の影響を受けた拡がりになっているとは断定できない。このように、いわゆるⅢ領域の拡がりについての議論が分かれるのは、油層に作用する表面張力について不明な部分が多く、その力学的なモデルが確立されていないこと、表面張力の値が油や表層水の物性に大きく左右されるため、その値を正しく評価することが困難なこと、等が原因であり、今後に残された問題点が多いと言わざるを得ない。

(2) 現地実験結果

図4-9 および4-10に示し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⁾、および昭和43年7月(資料2)⁹⁾に我国の周辺海域で行なった洋上での油の投棄拡散実験結果に基づいている。実験時の洋上における気象条件、投棄油の種類、物性等については、表4-4に示されている。投棄された油の拡散範囲の測定は、船上からの目視観測を主体に行なわれており、一部、航空機からの写真撮影による観測も併用されている。したがって、これらのデータは、洋上という特殊な場所での観測の困難さや、観測者の個人差などの条件が重なって、データの精度はあまり良くない。しかし、洋上での油の拡散の傾向は把握できると考えられ、また我が国でのおそらく唯一の現地実験として貴重なデータであるので、室内実験結果と合わせて比較検討を行なった。

資料1は、表4-4中に示された各実験海域で、2キロリットルの油を船上から投棄し、船上からの目視観測により油の拡がりを追跡したものである。この実験で得られたデータは、倉品¹⁰⁾によって整理され、観

表 4 - 4 海上保安庁によって行われた海上実験の諸元

資料	実験海域	風速 (m/s)	水温 (℃)	投棄油	油量	比重	動粘性係数 (cst)
1	襟裳岬沖	8~11	12	潤滑油系廃油	2000 l	0.914	206.1
	金華山沖	9~12	22	C重油	"	0.912	48.7
	石廊岬沖	3~7	19	重油スラッジ	"	0.901	8.7
	室戸岬沖	2~8	21	C重油	"	0.905	110.4
	経ヶ崎沖	7~10	20	C重油	"	0.938	68.9
2	八丈島沖	8	25.7	イランペトロ原油	100k l	0.855	6.8

測時間と拡がりの大きさが図化された。それによれば油投棄後8時間ほど経過するまでは油の拡がりは大きくなっているが、その後は目視で観測される油の範囲は急速に小さくなるとともに、切れ切れのパッチ状になっている。また、拡散の状況は、いづれの海域においても、風の方向に帯状に長くなり、風上側が薄く風下側が厚くなっていたと報告されている。図4-10には、この資料1のデータが示されている。これらのデータは、いづれも倉品によって示された図から読み取ったものであり、そのなかで油層が拡がりつつある段階でのデータのみを採用した。図によれば、これらの現地実験値は、 $l \sim t^{3/4}$ の関係にあるいわゆるⅢ領域に相当する部分に該当するようであるが、その拡がり室内実験に比べて5~10倍と大きくバラツキも目立つ。資料1の各実験ケースでは、投棄された油の量が2キロリットルと少ない上に、いずれの場合も実験時に海上では強い風が吹いており、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、この風の影響も考慮する必要がある。

資料2では、八丈島沖の実験海域で原油100キロリットルを油袋に入れて洋上に浮かべ、袋を切断して一時に油を流出させている。その拡がりの様子は、航空機から16mm撮影機で撮影され、そのフィルムを解析することにより油の拡がりが求められている。観測時間は、油流出後約30分であり、その間、油はほぼ円形に拡がったと報告されている。図4

— 9 には、この資料 2 のデータが示されている。図における資料 2 のデータは、その拡がりの勾配から判断して、I から II 領域に相当する拡がりとなっている。しかし、室内実験と比較してその拡がりは 0.6 倍程度のいくぶん低い値を示している。

第 3 節 瞬間流出する油の拡がりの解析

第 3 章で明らかにしたように、静水面上での油の拡がりを運動方程式および連続の式を用いて表し、それを特性曲線法で解析する手法は、瞬間流出での油の拡がりに対しても適用することが可能である。ここでは、一次元瞬間流出および軸対称瞬間流出のそれぞれの場合について、特性曲線法による解析法を適用して、油層先端の拡がりを規定する式を導くとともに、式に含まれるパラメータや初期条件の決定法について検討し、油の拡がりの計算結果と実験値の比較検討を行う。

3. 1 解析のモデル

図 4-11 に示すように、水平方向に r 軸、鉛直方向に z 軸を持つ軸対称の拡がりとしてモデル化する。一次元瞬間流出の場合には z 軸を壁面

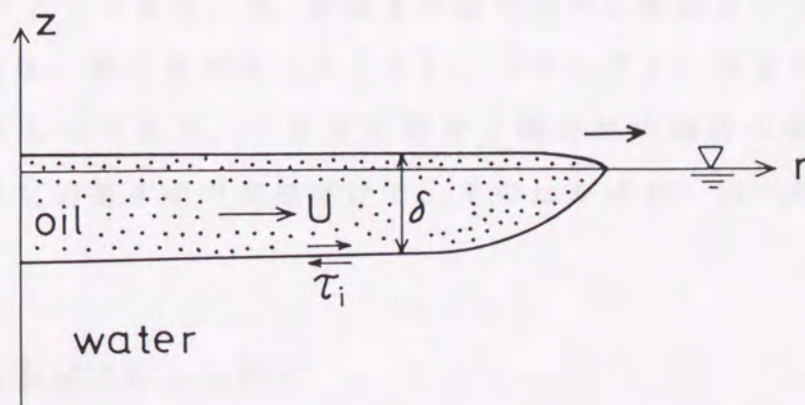


図 4-11 瞬間流出拡がりの油層形状のモデル

として r 軸に沿った一方向の拡がりとなり、軸対称瞬間流出の場合には z 軸を油層の中心として半径 r の同心円状の拡がりとなる。

任意断面での油層の厚さを δ 、油層内での r 軸方向の断面平均流速を U とすると、油の拡がりを表わす連続の式、 r 軸方向の運動方程式、および z 軸方向の運動方程式は、それぞれ次のように表わされる。

連続の式：

(一次元瞬間流出の場合)

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + U \frac{\partial \delta}{\partial r} + \delta \frac{\partial U}{\partial r} = 0 \quad \text{----- (4-15)}$$

(軸対称瞬間流出の場合)

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + U \frac{\partial \delta}{\partial r} + \delta \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \right) = 0 \quad \text{----- (4-16)}$$

r 軸方向の運動方程式：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} = -g' \frac{\partial \delta}{\partial r} - \frac{\tau_i}{\delta \rho_0} \quad \text{----- (4-17)}$$

ここに、 $g' = \Delta g$ であり、 τ_i は油水界面でのせん断応力である。

これらの式は、第3章で式(3-6)、(3-7)、および(3-8)から導かれたものであり、一次元の場合と軸対称の場合の違いは、式(4-16)の左辺第4項の有無だけで、そのほかは全く同一の式の形となっている。

3. 2 特性曲線法による解析

式(4-15)と(4-17)、あるいは式(4-16)と(4-17)を用

いて導かれる、特性曲線 $d r / d t = U$ に沿った油層の厚さ δ および平均流速 U の変化を表す式は、次の通りである。

一次元瞬間流出の場合；

$$\frac{d \delta}{d r} = - \delta \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial r} \quad \text{----- (4-18)}$$

$$\frac{d U}{d t} = - g' \frac{\partial \delta}{\partial r} - \frac{\tau_i}{\delta \rho_o} \quad \text{----- (4-19)}$$

軸対称瞬間流出の場合；

$$\frac{d \delta}{d r} = - \delta \left(\frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \quad \text{----- (4-20)}$$

$$\frac{d U}{d t} = - g' \frac{\partial \delta}{\partial r} - \frac{\tau_i}{\delta \rho_o} \quad \text{----- (4-21)}$$

これらの式に含まれる偏微分項については、油層先端部付近の流速および油層厚さに相似性の仮定を用いて、次のように置かれる。

$$\left[\frac{\partial U}{\partial r} \right]_f = C_1 \frac{U_f}{r_f} \quad \text{----- (4-22)}$$

$$\left[\frac{\partial \delta}{\partial r} \right]_f = C_2 \frac{\delta_f}{r_f} \quad \text{----- (4-23)}$$

ここに、添字 f は、油層先端部での値を表す。

式 (4-18) あるいは (4-20) を油層先端部に適用し、それぞれに式 (4-22) の関係を代入して積分を実行すると、次式の解が得られる。

一次元瞬間流出の場合；

$$\frac{\delta_f}{\delta_0} = \left(\frac{r_f}{l_0} \right)^{-c_1} \quad \text{----- (4-24)}$$

軸対称瞬間流出の場合；

$$\frac{\delta_f}{\delta_0} = \left(\frac{r_f}{l_0} \right)^{-(c_1+1)} \quad \text{----- (4-25)}$$

ここに、 δ_0 は、初期条件 $r_f = l_0$ の位置での油層の厚さを表わす。

次に、油層先端部付近で油層底面に作用するせん断応力 τ_i を、次式のように表す。

$$\frac{\tau_i}{\rho_0} = \frac{1}{2} f_i U_f^2 \quad \text{----- (4-26)}$$

ここに、 f_i は抵抗係数である。

式(4-19)に、式(4-23)、(4-24)、および(4-26)の関係を代入して整理すると、一次元瞬間流出での先端速度の変化を表す式が、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{d U_f}{d t} + \frac{f_i}{2 \delta_0} \left(\frac{r_f}{l_0} \right)^{c_1} U_f^2 \\ + C_2 g' \left(\frac{\delta_0}{l_0} \right) \left(\frac{r_f}{l_0} \right)^{-(c_1+1)} = 0 \end{aligned} \quad \text{----- (4-27)}$$

同様にして、式(4-21)に、式(4-23)、(4-25)、および(4

-26) の関係を代入して整理すると、軸対称瞬間流出での先端部の速度の変化を表す式が、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{d U_f}{d t} + \frac{f_i}{2 \delta_0} \left(\frac{r_f}{l_0} \right)^{c_1+1} U_f^2 \\ + C_2 g' \left(\frac{\delta_0}{l_0} \right) \left(\frac{r_f}{l_0} \right)^{-(c_1+2)} = 0 \end{aligned} \quad \text{----- (4-28)}$$

式 (4-27) および (4-28) の両式で、油層先端部の速度 U_f を $U_f = d r_f / d t$ と置き、また、 $r_f / l_0 = r_*$ および $t \sqrt{g' / l_0} = t_*$ で定義した変数を用いて無次元化すると、次式が得られる。

一次元瞬間流出の場合；

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r_*}{d t_*^2} + \frac{f_i}{2} \left(\frac{l_0}{\delta_0} \right) r_*^{c_1} \cdot \left(\frac{d r_*}{d t_*} \right)^2 \\ + C_2 \frac{\delta_0}{l_0} r_*^{-(c_1+1)} = 0 \end{aligned} \quad \text{----- (4-29)}$$

軸対称瞬間流出の場合；

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r_*}{d t_*^2} + \frac{f_i}{2} \left(\frac{l_0}{\delta_0} \right) r_*^{c_1+1} \cdot \left(\frac{d r_*}{d t_*} \right)^2 \\ + C_2 \frac{\delta_0}{l_0} r_*^{-(c_1+2)} = 0 \end{aligned} \quad \text{----- (4-30)}$$

式(4-29)および(4-30)が、それぞれ一次元瞬間流出および軸対称瞬間流出で油層先端部の拡がりを表す式であり、これを数値積分すると、油層の拡がり大きさと流出後の経過時間の関係を求めることができる。また、第3章で述べたように、式(4-29)あるいは式(4-30)において、 t_* が大きくなると式中の左辺第一項($d^2 r_* / dt_*^2$)は、他の二項に比べてオーダー的に小さくなり省略することが出来る。その場合には、次のような解析解が得られる。

$$r_* = \{(n+1)K t_* + c\}^{1/(n+1)} \quad \text{----- (4-31)}$$

ここに、 c は積分定数であり、また、

$$\text{一次元瞬間流出の場合； } n = (C_1 + 1/2) \quad \text{----- (4-32)}$$

$$\text{軸対称瞬間流出の場合； } n = (C_1 + 3/2) \quad \text{----- (4-33)}$$

および

$$K = \left[- \frac{2 C_2}{f_i} \left(\frac{\delta_0}{l_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{----- (4-34)}$$

である。

3. 3 計算式に含まれる係数值 C_1 、 C_2 の検討

連続の式(4-15)あるいは(4-16)それぞれに、式(4-22)および(4-23)の関係を代入して整理すると、次式の関係が得られる。

$$\text{一次元瞬間流出の場合； } \frac{\partial \delta}{\partial t} = - (C_1 + C_2) \frac{U_f \delta_f}{r_f} \quad \text{----- (4-35)}$$

$$\text{軸対称瞬間流出の場合； } \frac{\partial \delta}{\partial t} = - (C_1 + C_2 + 1) \frac{U_f \delta_f}{r_f} \quad \text{----- (4-36)}$$

油層先端部がある点に達し、そこを通過した直後においては、その点で観察すると式(4-35)および(4-36)の左辺 $\partial \delta / \partial t$ は正または0の値を取るの

$$\text{一次元瞬間流出の場合； } C_1 + C_2 \leq 0 \quad \text{----- (4-37)}$$

$$\text{軸対称瞬間流出の場合； } C_1 + C_2 \leq -1 \quad \text{----- (4-38)}$$

の条件が得られる。

第3章で述べたように、流出源から常に油が供給される連続流出の場合には、油層先端部付近の速度勾配 $\partial U / \partial r$ が負の値を取るため $C_1 < 0$ の条件が得られた。また、傾斜密度流についての平野らの報告¹¹⁾では、後方からの塩水の供給がないサーマルの場合、斜面を流下する密度流先端部の後方では塩水が取り残されて、先端部付近の速度勾配 $\partial U / \partial r$ は正の値を取るとされる。しかし、静水面上を拡がる瞬間流出の油層先端部では、その速度勾配 $\partial U / \partial r$ の値の正負について判断することは出来ず、したがって C_1 の値が正負いずれの値を取るのかを確定することは出来ない。

第4節 一次元瞬間流出での計算値と実験値の比較

4.1 新たなパラメータ t_0 、 l_0 を用いた実験値の整理

一次元拡がりの実験結果の項で述べたように、図4-7の各実験ケースで油流出直後の t / t_{T1} が小さな部分では、 L_0 / h_0 が大きいほど拡がりの勾配がI領域よりもゆるやかになっており、また、 $L_0 / h_0 > 100$

では、見かけ上 I 領域が存在しないように見える。これは、水槽左端を原点として油層先端までの距離を取って拡がりの大きさとしたため、貯溜された油層の長さ L_0 の影響が現れたことが原因と考えられた。また、図 4-4 で示したように、油層下端の点 P' が側壁の点 D に達する前とそれ以後とでは、拡がりの状況が異なっていることが予想される。以下では、これらの点を考慮して、座標の原点を貯溜された油層の先端にとるとともに、新たなパラメータを導入して実験値の整理を行う。

図 4-12 は、一次元瞬間流出においてシャッターを開けた後の油層の拡がりの形状を模式化して示している。破線はシャッターを開ける前の油層の状態であり、 h_0 は貯溜された油層の厚さ、 L_0 は初期油層長さを表わす。シャッターを開くと、まず実線で示すような形状で、油層先端の点 P は前方へ、下端の点 P' は後方へ、中点 G を挟んで対称な曲線形で油層は拡がり始める。点 P' が側壁の点 T まで達した後は、油層は一点鎖線に示すような形状で、全体の厚みを減少させながら拡がっていくであろう。ここでは、シャッターを開いた直後の、油層の形状が実線で示されているような形になっている状態を、初期状態として考える。シャッターの位置から油層先端の点 P までの油層の長さを l_0 とし、シャッターを開けてから l_0 になるまでの経過時間 t_0 を次式で定義する。

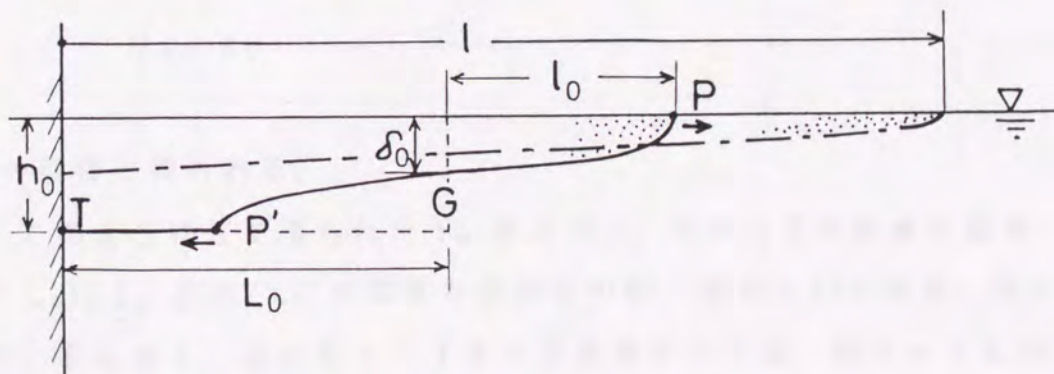


図 4-12 シャッター解放後の油層形状のモデル化
(一次元瞬間流出の場合)

$$t_0 = \sqrt{l_0 / g'} \quad \text{-----} \quad (4-39)$$

ここに、 $g' = \Delta g$ である。

また、点Pでの油層の速度 U_{f_0} は、図4-5の実験結果から得られた式(4-2)で与えられる。さらに、 U_{f_0} と δ_0 を用いて表した内部フルード数が1に等しいという条件を考慮すると、次のような関係が得られる。

$$\begin{aligned} U_{f_0} &= 0.7 C_0 = 0.7 \sqrt{g' h_0} \\ &= \sqrt{g' \delta_0} \quad \text{-----} \quad (4-40) \end{aligned}$$

したがって、 δ_0 と h_0 の間には、次のような関係が成り立つ。

$$\delta_0 = 0.49 h_0 \quad \text{-----} \quad (4-41)$$

また、 l_0 と t_0 および U_{f_0} の間には、 $l_0 = t_0 \cdot U_{f_0}$ の関係が成り立つので、式(4-39)および(4-40)から、

$$l_0 = \delta_0 \quad \text{-----} \quad (4-42)$$

の関係が得られる。

このようにして得られた t_0 および l_0 を用いて実験値を整理し、 $(l - L_0)/l_0$ と t/t_0 の関係を求めたのが、図4-13である。図において、Run 1-3から1-7までの実験ケースは、表4-1に示したように L_0/h_0 の値が67から400までの、比較的大きな範囲についての結果を示している。これらの実験ケースでは、図4-12に示した点P'が

点Tに達するまでの時間が長く、Run 1-6や1-7では、実験の後半までこのような状態にあったものと推定される。また、Run 1-8から1-11までは L_0/h_0 が4以下の実験ケースの場合であり、シャッターを開けた直後に点P'が点Tに達し、実験の大半は、図4-8に一点鎖線で示された拡がりの状態になっている。図4-9によれば、各実験値は比較的うまく一本の線上にまとまっており、 t/t_0 が100より小さな範囲では $(l-L_0)/l_0$ は t/t_0 の1乗に近い拡がりの傾向を示している。しかし、 t/t_0 が100よりも大きな範囲になると、それよりも幾分ゆるやかな $2/3$ 乗程度の拡がりとなっている。

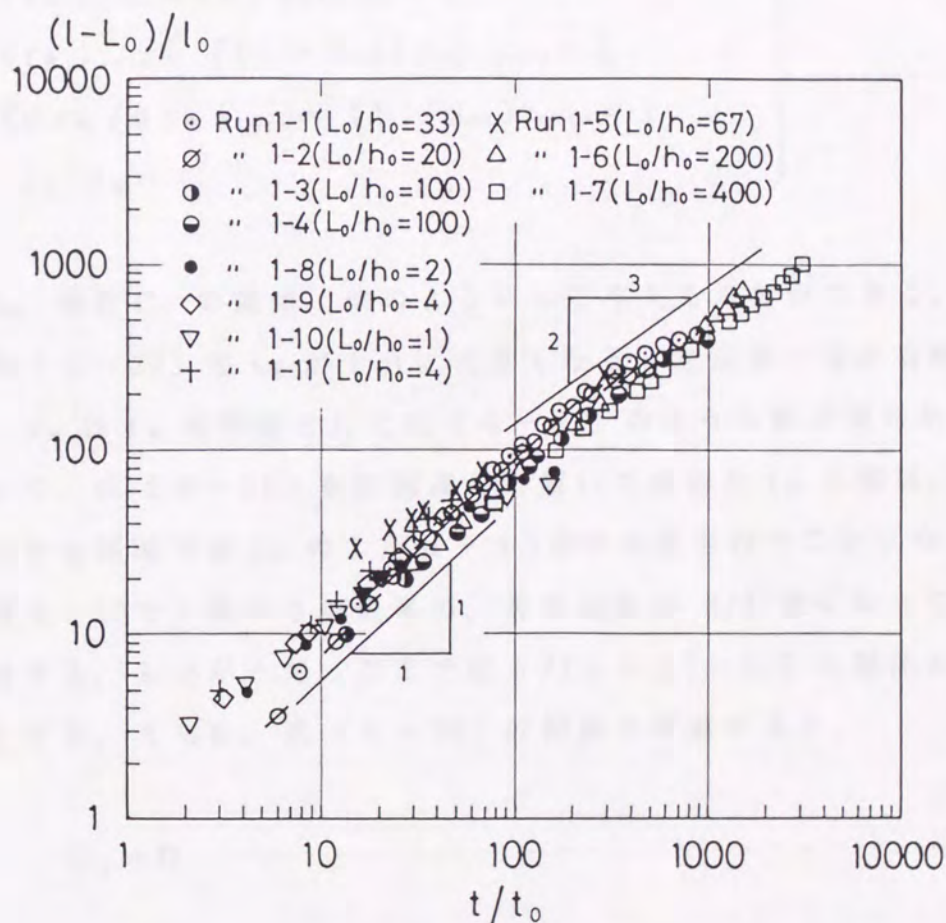


図4-13 一次元瞬間流出での $(l-L_0)/l_0$ と t/t_0 の関係

4.2 計算値と実験値の比較

一次元瞬間流出の拡がりは、第2節の図4-7に示したFayらの手法ではうまく整理することができず、図4-13のように、 t_0 と l_0 の二つの新たなパラメータで無次元化することによってうまく整理することが出来た。ここでは、特性曲線法による解析で得られた、一次元瞬間流出での油層先端部の拡がりを表す式(4-29)による計算結果と、図4-13の結果とを比較して、理論の妥当性についての検証を行う。計算の初期条件は、次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} (t_*)_{t=t_0} &= (t/t_0)_{t=t_0} = 1 \\ (r_*)_{t=t_0} &= \{(l - l_0)/l_0\}_{t=t_0} = 1 \\ (dr_*/dt_*)_{t=t_0} &= (U_f/U_{f0})_{t=t_0} = 1 \\ l_0/\delta_0 &= 1 \end{aligned} \right\} \text{----- (4-43)}$$

また、係数 C_1 の値は、次のようにして与えることができる。すなわち、式(4-29)で t_* が十分に大きくなると左辺第一項が省略できるので、 r_* は t_* の関数として式(4-31)のような解が得られる。したがって、式(4-29)を数値積分で解いて求めた r_* の値は、 t_* が十分大きな領域では t_* の $1/(n+1)$ 乗の勾配を持つことになる。これは、図4-13で、拡がりの後半の、その勾配が $2/3$ 乗になっている部分に相当する。したがって、ここでは $1/(n+1) = 2/3$ の関係が成り立つものとする。さらに、式(4-32)の関係を考慮すると、

$$C_1 = 0 \text{ ----- (4-44)}$$

が得られる。また、式(4-37)で $C_1 = 0$ と置くと、 C_2 に関して次の条件式が得られる。

$$C_2 \leq 0 \quad \text{-----} \quad (4-45)$$

以上の条件を用いて、式(4-29)の数値積分を行ない、 t_* と r_* の関係を求めた。 C_2 の値をあらかじめ確定することはできないので、計算は C_2 をパラメータとして行なった。抵抗係数 f_i の値は、連続流出の場合に用いた値をそのまま用いることとし、 $f_i = 0.01$ とした。図4-14に、実験値と計算値の比較結果を示す。図中の黒丸印は、図4-13に

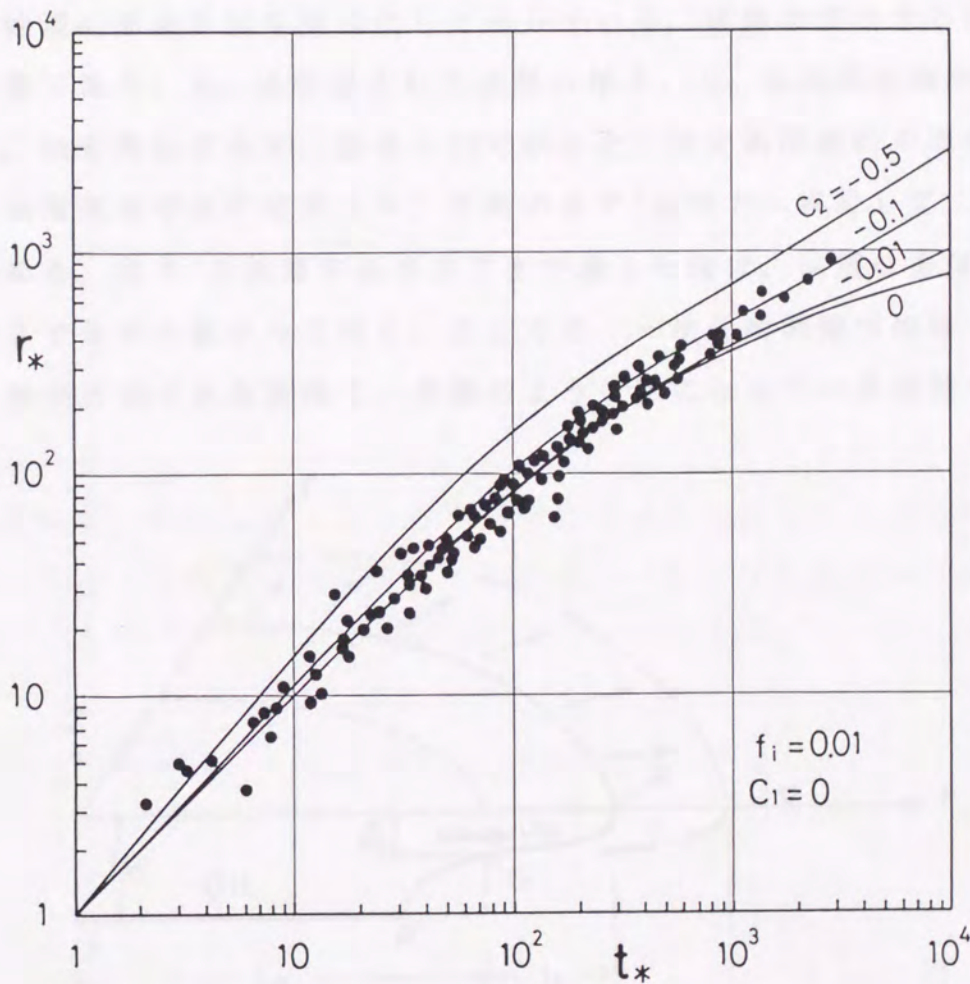


図4-14 一次元瞬間流出における r_* と t_* の関係についての計算値と実験値の比較(計算値は C_2 をパラメータとした場合、●印は実験値)

示した全実験値を表している。 C_2 の値は、0から-0.5までの範囲で変化させた。図によれば、 $C_2 = -0.1$ とすると、計算値は実験値の傾向をよく説明することができる。

第5節 軸対称瞬間流出での計算値と実験値の比較

図4-15は、軸対称瞬間流出での油の拡がりについて、油を放出した直後の油層の断面形状を模式化して示している。破線は放出する前の油層の状態であり、 h_0 は貯留された油層の厚さ、 L_0 は初期油層半径を表わす。油を放出すると、図4-12で示した一次元瞬間流出の場合と同様に、油層先端の点Pは前方へ、下端の点P'は後方へ移動して、油は拡がり始める。点P'が油層中央の点Tまで達した後は、油層は全体の厚みを減少させながら拡がっていく。ここでは、一次元瞬間流出の場合と同様に、油が放出された直後で、実線のような形になっている状態を初期

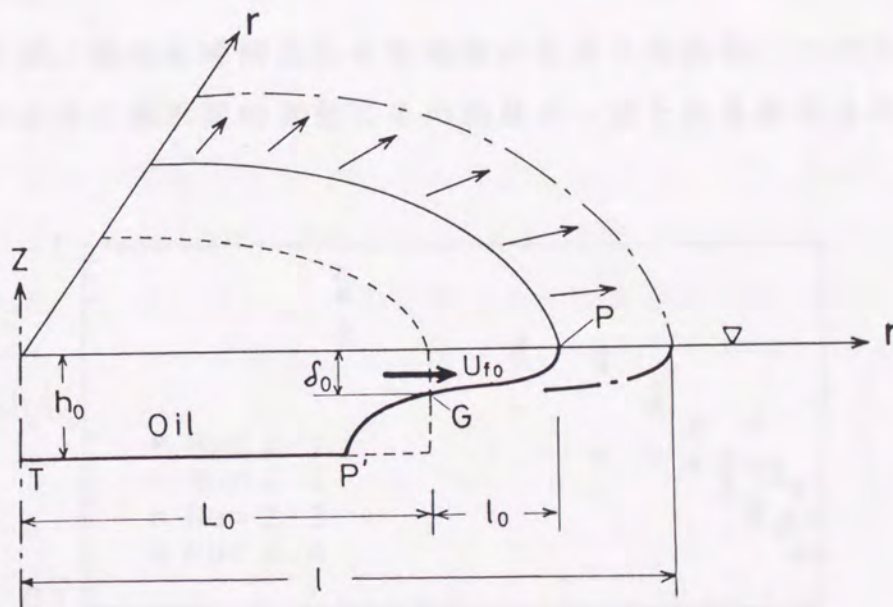


図4-15 油の流出直後の油層形状のモデル化
(軸対称瞬間流出の場合)

状態として考え、放出前の油層先端の位置 G 点から放出後の先端の点 P までの水平距離を l_0 、油層の厚さを δ_0 とする。また、 l_0 になるまでの経過時間 t_0 を次式で定義する。

$$t_0 = \sqrt{l_0 / g'} \quad \text{----- (4-46)}$$

ここで、油層先端部の拡がり速度の初期条件について検討する。図 4-16 は、縦軸に無次元化した先端部の速度 U_f/C_0 を、横軸には実時間 t (sec) を取って表した、流出初期の先端部の速度の実験値を示している。図において、 U_f は、図 4-8 で示した油層の拡がり大きさと流出時間の関係から逆算した、先端部の 1 秒間の移動速度の平均値で、油の放出開始から 10 秒までの間のデータを表示している。また、 C_0 の値は次式で与えられる。

$$C_0 = \sqrt{g' h_0} \quad \text{----- (4-47)}$$

図によれば、軸対称瞬間流出の先端部の拡がり速度は、一次元瞬間流出の場合のように流出開始直後にその速度が一定となる領域は存在せず、

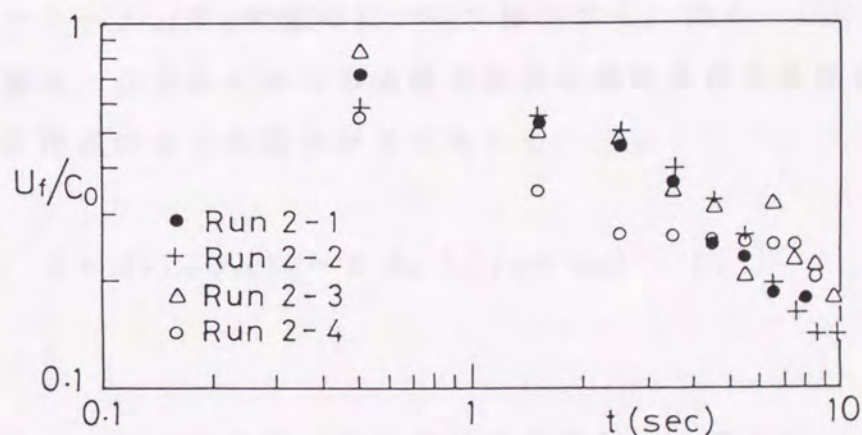


図 4-16 軸対称瞬間流出での油層先端部の速度変化

流出開始直後から減少していく。また、図において流出開始後1秒経過時の平均速度から求めた U_f/C_0 の値は、0.55(Run 2-5)から0.83(Run 2-4)の範囲であり、その平均値は0.68であった。この様な実験結果を考慮して、軸対称瞬間流出の油層先端部の拡がり速度の初期条件 U_{f0} を、 αC_0 で与える。ここに、 α は係数である。さらに、 U_{f0} と δ_0 を用いて表した内部フルード数が、1に等しいという条件を考慮すると、次のような関係が得られる。

$$U_{f0} = \alpha \sqrt{g' h_0} = \sqrt{g' \delta_0} \quad \text{----- (4-48)}$$

したがって、 δ_0 と h_0 の間には、次式のような関係が成り立つ。

$$\delta_0 = \alpha^2 h_0 \quad \text{----- (4-49)}$$

油層先端部の拡がり速度の初期条件として、図4-16に示した流出開始後1秒経過時の平均速度の値を用いると、 α の値は0.55から0.83、平均的には0.68程度の値を取ることになる。この平均値は、一次元瞬間流出で得られた実験値にほぼ等しい。

次に、油層の拡がりを表す式(4-30)に含まれる、初期条件に関するパラメーター l_0/δ_0 の値について検討する。図4-15において、油を放出直後の、G点から前方の油層先端部の油の体積を見積もると、オーダー的に次式のような関係が与えられる。

$$2\pi\delta_0 L_0 U_{f0} t_0 \sim \pi\delta_0 \{(l_0 + L_0)^2 - L_0^2\} \quad \text{----- (4-50)}$$

式(4-50)において、流出直後の先端部の内部フルード数が1の条件から $U_{f0} = \sqrt{g' \delta_0}$ を与え、式(4-46)を考慮すると、 l_0/δ_0 と

して次式の条件が得られる。

$$\frac{l_0}{\delta_0} \doteq \frac{4}{(l_0/L_0 + 2)^2} \quad \text{----- (4-51)}$$

式(4-51)において、 $l_0/L_0 \ll 1$ とおける場合には、次の関係が得られる。

$$l_0/\delta_0 \doteq 1 \quad \text{----- (4-52)}$$

これは、一次元瞬間流出の場合と同じ条件である。ちなみに、式(4-51)において、 δ_0 および L_0 を実験値から与えて l_0 を計算し、その結果得られる l_0/δ_0 の値は、Run 2-1 および 2-2 では 0.88、Run 2-3 では 0.95、Run 2-4 では 0.92 で、1 に近い値をとる。また、後に示す拡がりの計算で、 l_0/δ_0 の値を 0.8 から 1 程度まで変化させても、その計算結果にほとんど差はみられない。したがって、式(4-51)において、第一近似として $l_0/L_0 \ll 1$ とおいても問題はないと考えられる。

油層先端部の油の体積について、式(4-50)のような関係を与えることは、初期条件としての先端部の形状を矩形で仮定したことに相当する。一方、図4-15において、油を放出直後の、G点から前方の油層先端部の断面形状を、PとGを直線で結んだ三角形で近似した場合、先端部の油の体積について、オーダー的に次のような関係が与えられる。

$$2\pi\delta_0 L_0 U_{f_0} t_0 \sim \pi\delta_0 l_0 (L_0 - l_0/3) \quad \text{----- (4-53)}$$

式(4-50)において用いたのと同じ条件で上式を整理すると、次の関係が得られる。

$$\frac{l_0}{\delta_0} \doteq \frac{4}{\{1 + (l_0/L_0)/3\}^2} \quad \text{----- (4-54)}$$

式(4-54)においても、 $l_0/L_0 \ll 1$ とおける場合には、次の関係が得られる。

$$l_0/\delta_0 \doteq 4 \quad \text{----- (4-55)}$$

このように、 l_0/δ_0 の値は、油層先端部の油の体積にどのような関係式を与えるかで変わってくる。式(4-50)のように油層先端部の形状を矩形で近似した場合、 l_0/δ_0 は1に近い値を取る。また、式(4-53)のように油層先端部の形状を三角形で近似した場合、 l_0/δ_0 は4程度の値を取る。

次に、式(4-30)において、 dr_*/dt_* は油層先端部の移動速度 U_{f*} を表わし、

$$U_{f*} = \frac{dr_*}{dt_*} = \frac{d(r_f/l_0)}{d(t/t_0)} = \frac{U_f}{(g'l_0)^{1/2}} \quad \text{----- (4-55)}$$

と、表わされる。したがって、内部フルード数が1の条件を考慮すると、油層先端部の移動速度 U_{f*} の初期条件は、次式のように表される。

$$U_{f*0} = U_{f0} / \sqrt{g'l_0} = \sqrt{\delta_0/l_0} \quad \text{----- (4-56)}$$

以上の条件を考慮して式(4-30)の数値積分を行うと、軸対称瞬間流出の油層の拡がりについて、拡がりの大きさ r_* と流出時間 t_* の関

係を求めることができる。計算の初期条件は、次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} (t^*)_{t=t_0} &= (t/t_0)_{t=t_0} = 1 \\ (r^*)_{t=t_0} &= \{(l-L_0)/l_0\}_{t=t_0} = 1 \\ (dr^*/dt^*)_{t=t_0} &= \sqrt{\delta_0/l_0} \end{aligned} \right\} \text{----- (4-57)}$$

ここで、式(4-30)に含まれる係数 C_1 の値について検討する。式(4-30)を数値積分で解くと、 t^* が十分大きな領域では、式(4-31)に示されるように r^* は t^* の $1/(n+1)$ 乗の関係がある。一次元瞬間流出の場合には、図4-13で示したように、実験データから推定された r^* は t^* の $2/3$ 乗の関係にあった。図4-17では、軸対称瞬間流出の実験から得られた r^* と t^* の関係が示されている。縦軸の r^* は $(l-L_0)/l_0$ を表し、 l_0 の値は、式(4-49)と(4-52)の関係を用いて、 $l_0=0.49h_0$ ($\alpha=0.7$)で与えた。これは、一次元瞬間流出の

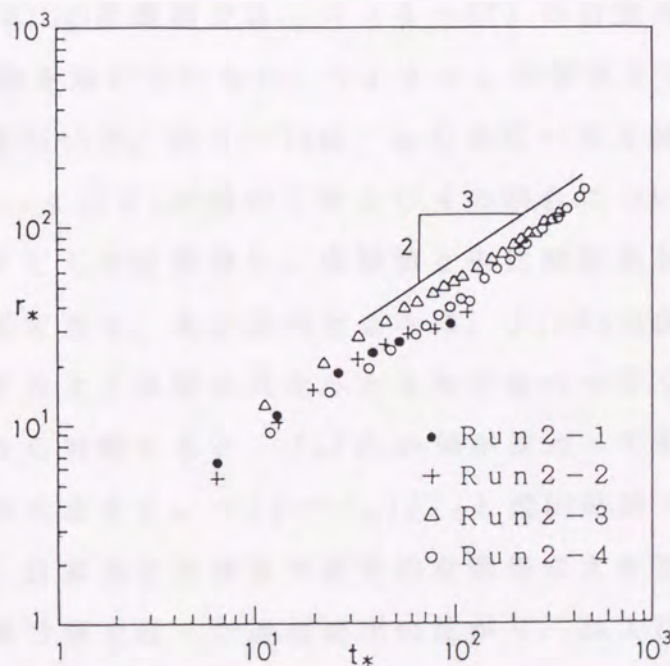


図4-17 軸対称瞬間流出での r^* と t^* の関係の実験結果

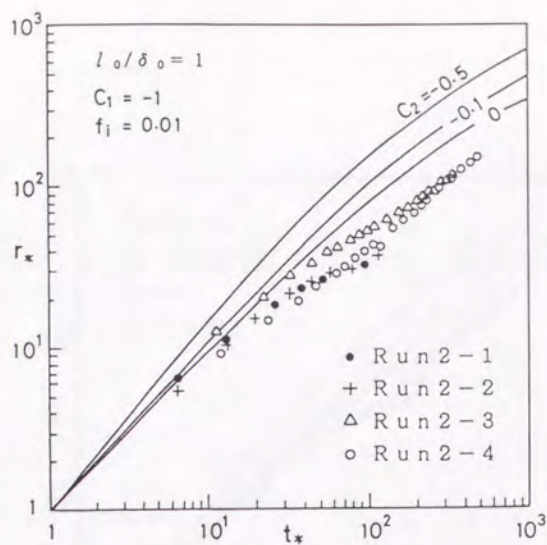
場合と同じ条件である。また、横軸の t_* は t/t_0 を表し、 t_0 は式 (4-46) で与えられる。図によれば、各実験ケースごとのばらつきはあるが、Run 2-3、Run 2-4 の後半では、 r_* は t_* のほぼ $2/3$ 乗に近い関係で広がっている。なお、 l_0 の値を変えても、 r_* と t_* についてのこの関係は変わらない。したがってここでも、一次元瞬間流出の場合と同様に、 $1/(n+1)=2/3$ の関係を用いる。その場合、式 (4-33) から、

$$C_1 = -1 \quad \text{-----} \quad (4-58)$$

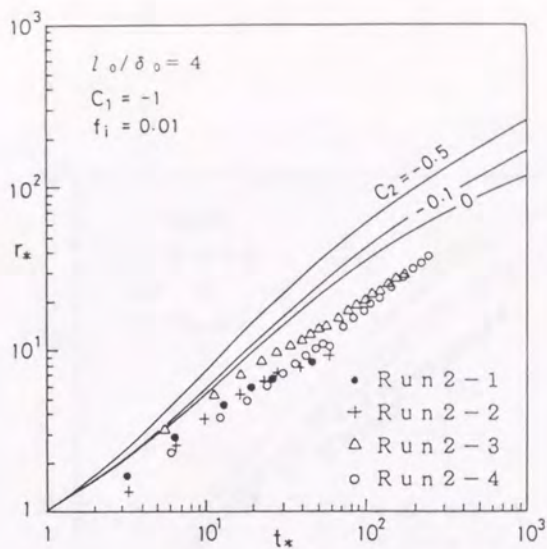
が得られる。さらに、式 (4-38) で $C_1 = -1$ と置くと、 C_2 に関して次の条件式が得られる。

$$C_2 \leq 0 \quad \text{-----} \quad (4-59)$$

式 (4-30) の数値積分は、式 (4-57) の初期条件および式 (4-58) の C_1 の値を用いて行ない、 t_* と r_* の関係を求めた。抵抗係数の値は、0.01 を用いた。図 4-18 は、 α の値に一次元瞬間流出の場合と同じ 0.7 を与え、 l_0/δ_0 の値が 1 および 4 の場合について、それぞれ C_2 をパラメータとした計算値と、実験値との比較結果を示す。図中の実線は、計算結果である。先に述べたように、 l_0/δ_0 の値は、油層先端部の油の体積にどのような関係式を与えるかで変わってくる。しかし、図 4-18 の結果から判断すると、 l_0/δ_0 の値が変わっても、それだけでは、油層の拡がり大きさ $r_* = (l - L_0)/l_0$ と流出時間 $t_* = t/t_0$ の関係についての、計算値と実験値の相対的な関係に大きな変化はないといえる。また、第 3 章で扱った連続流出の拡がり、および前節で扱った一次元瞬間流出の拡がりにおいては、 l_0/δ_0 を与えるための条件式として、式 (4-50) と同様の関係式を用いている。したがって、軸対称瞬間流



(a) $l_0/\delta_0 = 1$

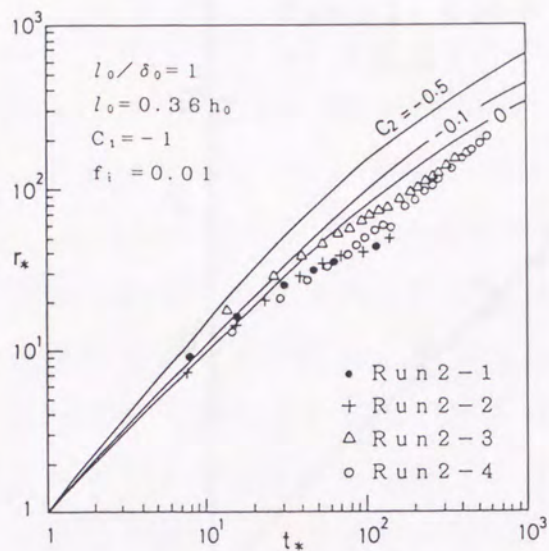


(b) $l_0/\delta_0 = 4$

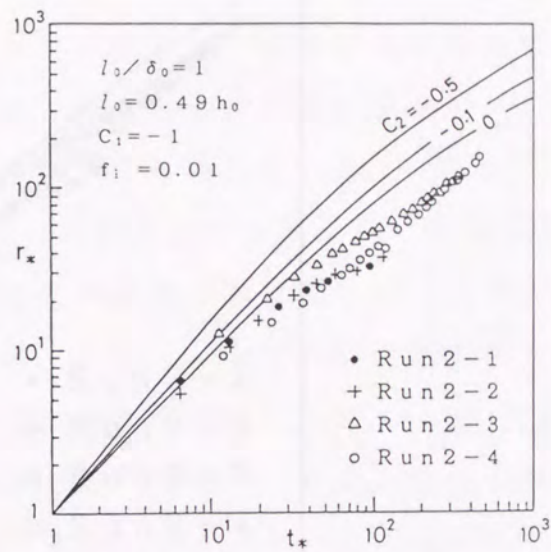
図4-18 軸対称瞬間流出における r_* と t_* の関係についての計算値と実験値の比較 (l_0/δ_0 および C_2 をパラメータとした場合)

出の拡がりもそれに準じて、 $l_0/\delta_0 = 1$ とする。

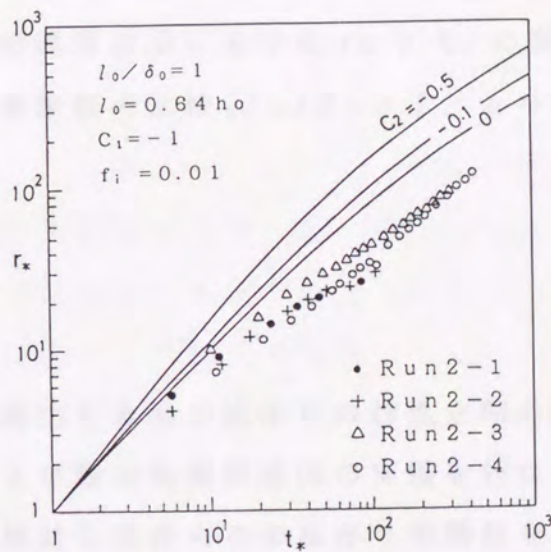
図4-19は、 $l_0/\delta_0 = 1$ とし、 α の値を0.6、0.7、および0.8と変化させた場合の、計算値と実験値の比較結果を示している。 α を0.6、0.7、および0.8と変化させると、 l_0 の値は、それぞれ、 $0.36h_0$ 、 $0.49h_0$ 、および $0.64h_0$ となる。先に述べたように、 $\alpha = 0.6$ は、実験から得られた先端部の初期速度の最小値に近い値であり、 $\alpha = 0.8$ はその最大値に近い値である。また、 $\alpha = 0.7$ とした場合は、一次元瞬間流出と同じ条件を与えたことになる。図によれば、 $\alpha = 0.6$ とした場合の計算値が、実験値に最も近い傾向を示している。図4-20は、図4-19において、計算結果が実験値の傾向に近い、 $\alpha = 0.6$ 、 $C_2 = 0$ の場合の結果をあらためて示したものである。軸対称瞬間流出の拡がりでは、初期条件を $l_0/\delta_0 = 1$ 、 $l_0 = 0.36h_0$ ($\alpha = 0.6$) で与え、 $C_1 = -1$ 、 $C_2 = 0$ とすると、計算値は実験値の傾向を比較的良く説明することができる。



(a) $\alpha = 0.6$



(b) $\alpha = 0.7$



(c) $\alpha = 0.8$

図4-19 軸対称瞬間流出における r_* と t_* の関係についての計算値と実験値の比較 (α および C_2 をパラメータとした場合)

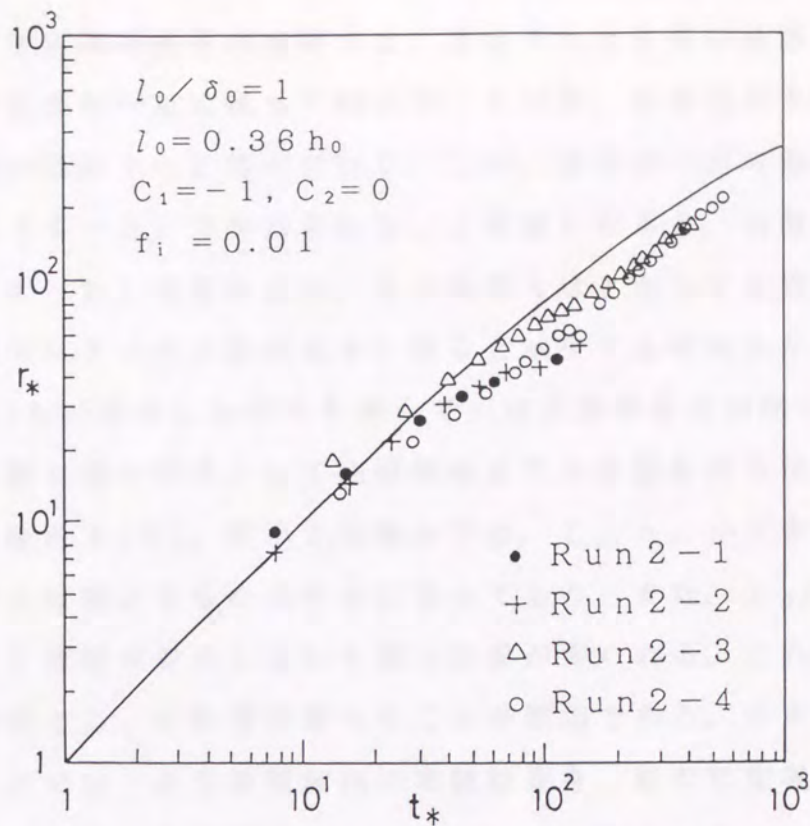


図 4-20 軸対称瞬間流出における r_* と t_* の関係についての計算値と実験値の比較 ($l_0 / \delta_0 = 1$ 、 $\alpha = 0.6$ 、 $C_2 = 0$ の場合)

第 6 節 まとめ

静水面上に瞬間流出した油の拡がりの特性を明らかにするため、まず、一次元瞬間流出および軸対称瞬間流出の実験を行ない、従来の研究で得られた成果と比較検討しながらその拡がりの特性を調べた。次に、連続流出の油の拡がりの解析と同様の特性曲線法を、一次元瞬間流出および軸対称瞬間流出の拡がりに対しても適用して、油の流出時間と拡がりの大きさの関係を求め、それによる計算結果を実験値と比較して理論の妥当性についての検証を行った。その主な内容を要約すると以下の通りである。

(1) 一次元瞬間流出の実験では、放出された直後の油層は、その先端部の移動速度を一定に保って拡がり、その後、移動速度を減少させながら I 領域の拡がりへと移って行く。この、速度が一定の領域での移動速度は、式(4-2)で表わされる。I 領域になると、油層先端の移動速度は式(4-3)で表わされ、その係数 k は 1 から 2 の程度の値をとり、油層先端のレイノルズ数が大きくなると減少する傾向を示す。

(2) Fayらの提示した手法を用いて一次元瞬間流出の拡がりを整理した場合、水槽左端を原点として油層先端までの距離を取る従来の方法では、油流出直後の t/t_{T1} が小さな部分では、 L_0/h_0 が大きいほど拡がりの勾配が I 領域よりもゆるやかになっており、また、 $L_0/h_0 > 100$ では、見かけ上 I 領域が存在しないと言う結果が得られる。これは、貯溜された油層の長さ L_0 の影響が現れたことが原因である。その点を改良するため、ここでは一次元瞬間流出の実験結果を、新たに定義した変数 t_0 、および l_0 を用いて整理し、 $r_* = (l - L_0)/l_0$ を $t_* = t/t_0$ の関数として表した。その結果、Fayの手法ではうまく整理できなかった一次元瞬間流出の拡がりを、図4-13に示すようにうまく一本の線上にまとめることができた。

(3) 静水面上での連続流出の解析と同様の特性曲線法を、一次元瞬間流出および軸対称瞬間流出の拡がりに対して適用し、油の流出後の経過時間と油層の拡がり大きさの関係を表す式(4-29)および(4-30)を導いた。これらの式は、 t_* が大きくなると式(4-31)の形の解を持つ。式に含まれる係数 C_1 の値は、式(4-31)を利用して、その勾配を表す右辺の指数が実験から得られる拡がりの勾配に一致するように決定した。その結果、一次元瞬間流出では $C_1 = 0$ 、軸対称瞬間流出では $C_1 = -1$ が得られた。

(4) 式に含まれる係数 C_2 の値は理論的に決定できないので、式の計算は C_2 をパラメータとして行った。その結果、一次元瞬間流出では、初期条件として $l_0/\delta_0 = 1$ 、および $\delta_0 = 0.49h_0$ を与え、 C_2 を -0.1 と

すると、計算値は実験値の傾向によく一致することが明らかになった。
一方、軸対称瞬間流出では、初期条件として $l_0/\delta_0 = 1$ 、および $\delta_0 = 0.36h_0$ を与え、 C_2 の値を 0 とすると、計算値は実験値の傾向によく一致することが明らかになった。