

石油の拡がりの実験

——重力、慣性力および粘性力の効果——

首 藤 伸 夫*・大 野 操**

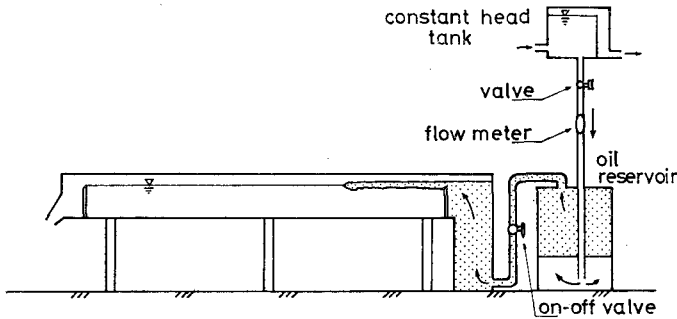
1. 序

石油の拡がりを支配する要因としては、通例、重力、表面張力、慣性力、および粘性力が考えられている¹⁾。これらの力のつり合いは流出後の時間の経過とともに変わり、重力・慣性域、重力・粘性域、表面張力・粘性域の三つの領域を経たのち、石油の変質によって拡がりは停止するとされている。この考えのもとに、深海の静水面上における拡がり法則がいくつか提案されている^{2)~4)}。しかしながら、実際の海面上では、風、流れ等が存在することにより、単に移流効果を受けるにとどまらず非等方的な拡がり方となるうえ、地形の影響などにより複雑な動きを示すことが知られている。このような拡がりを推定するためには、従来の諸法則だけでは困難となっているのが現状である。

著者らは、すでに粘性の小さい油での実験について報告したが⁵⁾、今回はさらに粘性の大きい油を用い、重力・慣性域における、油の粘性力および有限水深であることが拡がりにおよぼす影響について、実験的に研究するとともに、実験結果を計算にとり込む方法についても検討を行なったので、あわせて報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置は図一に示すように、水路、貯油タンク、および定水頭水槽からなる。水路は長さ 7m、幅 20.8



図一 実験装置

cm、深さ 30 cm の透明なアクリル樹脂でできている。この水路内の静水面上に、一定流量の油を連続的に放出し、その先端をビデオカメラで追跡することによって、位置と時間の対応から速度を求めた。油層厚さの測定には、サーボ式水位計と水路底に取り付けた超音波式水位計を用いた。前者は水・油界面の変位を、後者は油・空気界面の変位を測定し、これから厚さを求めた。この測定は放出端から、1.6 m および 3.4 m の二点で行なった。また、実験条件としては、放出流量、水深および油の種類を変えて種々の組み合わせを実現した。使用した油は、軽油、機械油、モーターオイル 20 W 40 およびモーターオイル #30 である。実験の際に計測された、これら油の動粘性係数 ν 、および界面張力 σ の範囲は表一に示すとうりである。

表一 実験に使用した油

	ν [cm ² /sec]	σ [dyn/cm]
軽油	0.043 ~ 0.067	-11.2 ~ +15.2
機械油	0.864 ~ 3.84	-31.5 ~ + 3.2
モーターオイル 20 W 40	4.42 ~ 7.31	- 4.0 ~ + 6.7
モーターオイル #30	13.6 ~ 16.7	-23.2 ~ - 7.5

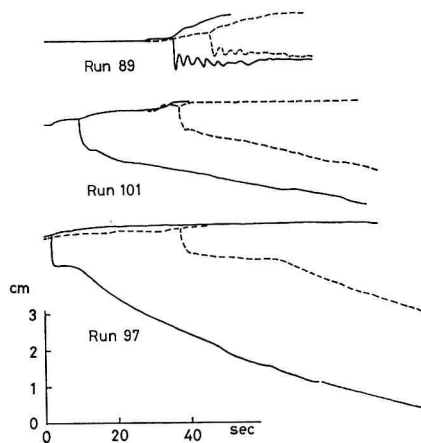
実験を行なう時、水面にわずかでも油が浮いていると界面張力が変化するため、各実験ごとに水路を石けんで洗い、さらに油や石けんなどが残らないよう十分注意した。

なお、粘性は回転式粘度計、表面張力はパーチカルプレート式表面張力計により計測した。

3. 実験結果

油の拡がりは三つの領域に分けて考えることができるとされているが、それにならえば、ここに報告する実験結果では、界面張力がほとんどの場合、負になっていたことから、慣性域および粘性域と考えてよいであろう。表一では軽油の σ の上限値がわりあい大きな正の値となっているが、これはむしろ例外的とも

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修



図—2 油層の断面形状

言える計測値であったことを付け加えておく。

まず、実測された油層断面形状の代表例を図—2に示す。比較のために、水深、流量がほぼ等しく、油種の異なるものを選んであり、Run 89 は軽油、Run 101 は機械油、Run 97 はモーターオイル #30 である。1.6m 地点での測定結果を実線、3.4m 地点での同時刻における結果を破線で示してある。軽油の例では、油層厚さの変化が小さく、内部波の発生が見られる。さらに粘性の大きい機械油では、先端部で内部跳水が生じているようでもあるが、軽油に比べればわずかであり、内部波もほとんど見られないようになる。Run 97 は C 重油ほどの粘性のかなり大きい油である。境界面の勾配はさらに大きくなり、先端部付近では異なった運動をしているようである。

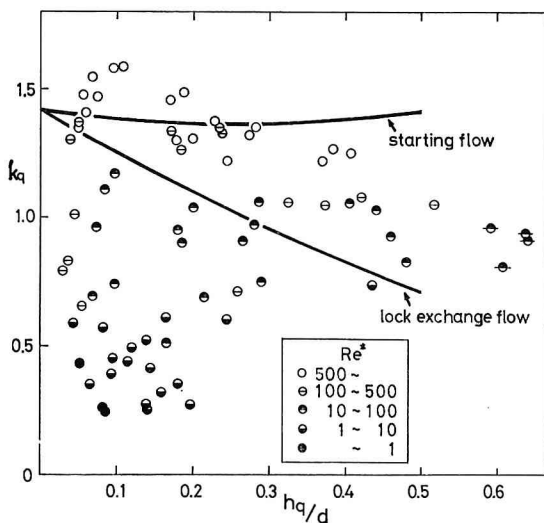
通例、粘性域における拡がり法則は、油の粘性が水に比べ十分大きいとして、油層内での流速を一様分布とみなして導く。粘性抵抗としては、もっぱら下層水から受けるせん断抵抗を考えることになる。図—2 に示した断面形状を比較すると、この考えとは逆に、粘性の小さい油のほうが一様な厚さとなり、粘性の大きい油ほど拡がりや抑えられ、厚さが増していくことがわかる。また、実線と破線で示した二点間の変化を比べれば、拡がりや先端部のある範囲を除いて相似性を保っていることが見られる。

このような油層内でのせん断抵抗の影響をみるために流出速度が一定値に近づいたとみなせる、最終的速度 v_q を

$$k_q = v_q / (\Delta q h_q)^{1/2}$$

の形で一般化して比較してみることにする。ここに d は欠損密度、 h_q は単位幅当りの放出流量 q について $h_q = q/v_q$ で定義される厚さである。パラメータとして $Re^* = q/\nu$ を導入する。 ν は油の動粘性係数である。また、 d は放出前の静水時の水深である。

結果は図—3 に示すようになる。水深の小さな実験例



図—3 最終的流出速度

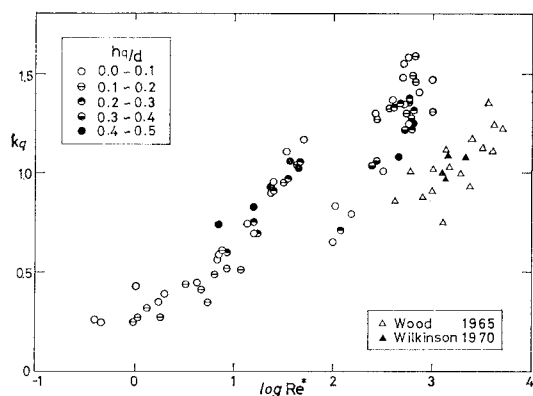
では、放出口付近で油層が水路底にまで達していることがあったので、そのような場合については図中の結果に横棒を付してある。また、重力流の波速について、lock exchange flow モデル⁶⁾および starting flow モデル⁷⁾による、それぞれの解析解もあわせて示してある。これらのモデルのおもな相違点は、周囲水の運動をいかに見積るかにある。前者では重力流の進入した体積分だけ周囲水が重力流とは逆方向に移動すると考えているが、後者ではその前方に押しやられるとしている。これらの解は、ともに相対水深が 0.5 以上での重力流は物理的に存在し得ないとしている。

ここで問題となることは、油層を重力流とみなし得るとき、波速が浅い水域で減少するのか、あるいはその変化を無視し得るのかという事にある。

以上の結果をみる限りでは水深の影響より、むしろ粘性の影響の大きいことに気づく。粘性の大きい油ほど、流出速度が減少していることに留意すべきであろう。

また Re 数の高い場合、水深の低下にともない、波速が減少していくが、水深の大きい場合(写真—1)では内部波の発生が見られるのに対し、水深が小さくなる(写真—2)にしたがって内部波は見られず、境界面の安定

写真—1 軽油 $d=24.4$ cm $q=29.4$ cm²/sec写真—2 軽油 $d=2.8$ cm $q=22.7$ cm²/sec



図—4 淡・塩水重力流との比較

した、異なった運動に移っていくようである。したがって、浅い水深のときにみられる流出速度の減少を、完全流体として導びかれた lock exchange flow モデルによる波速の減少と直接結びつけて考えることは無理があるようである。理論との比較を行なうには、後に述べる先端部について整理した波速 k_f のほうがよいであろう。

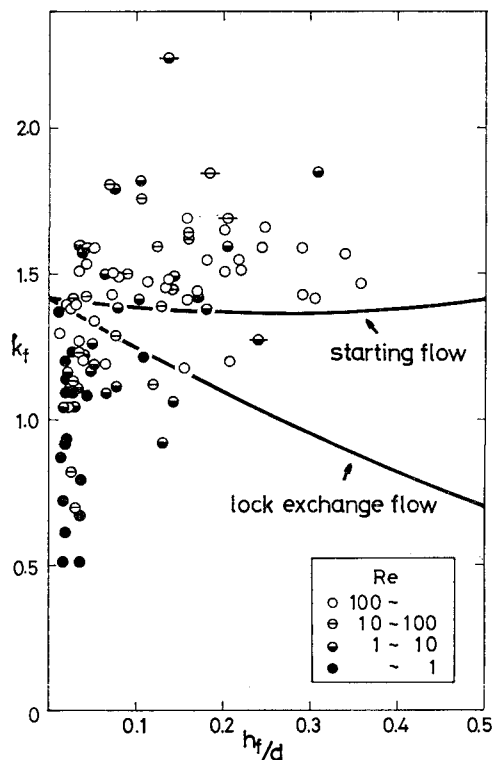
図—4 では、波速係数 k_q を別な観点からみるために、淡・塩水による重力流の結果⁹⁾との比較を行なっている。油と塩水とでは境界面の形成状態、水路底面での摩擦等の相違が当然考えられるが、整理方法としても、重力の効果と二層流としてとらえている一方、粘性の効果と、油層あるいは塩水層についての Re^* 数としてのみとり上げたことの誤りを示唆しているようにも見受けられるが、その違いは不明である。

実用上の問題として必要なことは、油層先端の速度がいかに表現されるかということである。そのために、先端の厚さ h_f と、その時の速度 v_f から

$$k_f = v_f / (\Delta \rho g h_f)^{1/2}$$

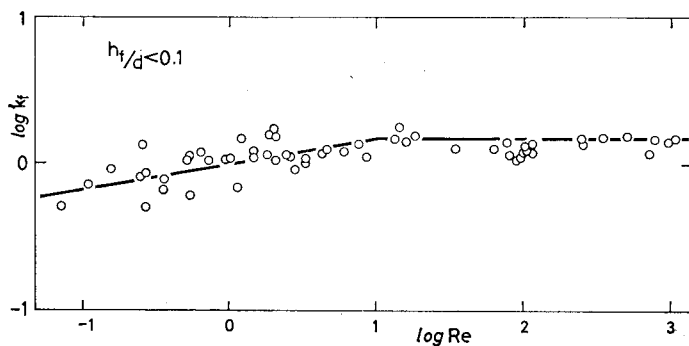
として、波速を整理する。内部跳水や内部波のある時には、先端から数 10 cm 後方の平均的な厚さを h_f とした。パラメータとする Re 数は、 $Re = v_f \cdot h_f / \nu$ である。結果は図—5 のようになる。水深の影響についての断定的な判断は下し得ないが、高い Re 数の場合に限ってみれば、明瞭な変化は見られず、 k_f はほぼ 1.5 であり、starting flow としての見方が適しているようである。また k_f が 2.0 を越える実験値のあることは注意を要するところであるが、このような実験例では放出端の近くで油層が水路底面に着いており、一応除外した方がよいと考え、図中に横棒を付してある。

さらに注意すべきことは、 Re 数の低下にともなう、 k_f の減少が見られることである。この点に着目し、



図—5 先端の波速

$h_f/d < 0$ の場合だけをぬき出して整理すれば図—6 のようになる。ここで Re 数が 10 以上では、 k_f はほぼ定

図—6 $k_f \sim Re$

数とみなせるが、10 以下ではその減少を無視し得ないものと考え、次の実験式 (1), (2) を作製し、図中に示してある。

$$k_f = 1.5 \quad Re \geq 10 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$k_f = Re^{0.178} \quad Re < 10 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この k_f が定数とみなし得ない場合のあるということと、すでに述べた浅い水深のときの k_q の減少は、慣性域から粘性域への移行とあいまって、油膜の非等方的な拡がりを意味しているようである。

4. 数値計算例

以上得られた実験結果を用い、特性曲線法により拡がり速度を求めた例を示す。基本式は

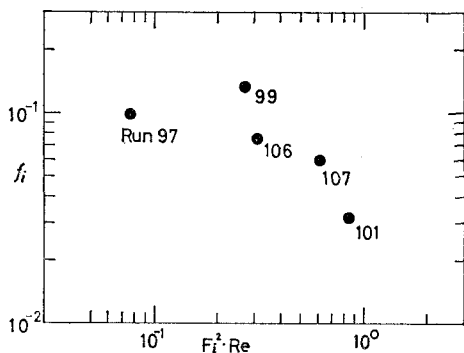
$$\frac{dx}{dt} = U + C \quad \text{上 で} \quad \frac{d}{dt}(U + 2C) = -G$$

および

$$\frac{dx}{dt} = U - C \quad \text{上 で} \quad \frac{d}{dt}(U - 2C) = -G$$

である。ここに $C = (Agh)^{1/2}$, h は油層厚, U は流速である。 x は放出口を原点とし水路方向にとってある。

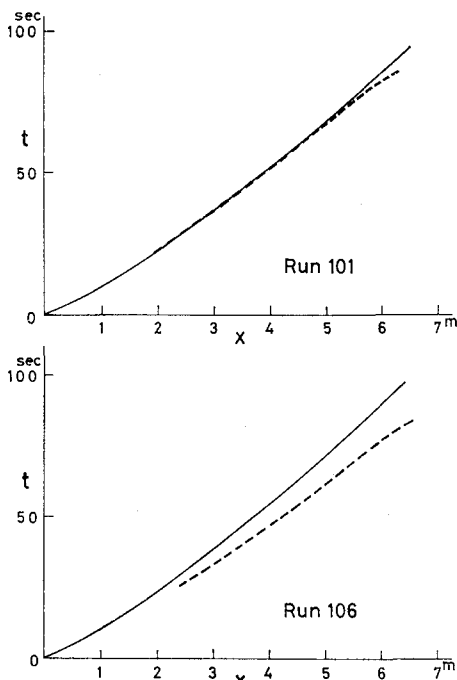
まず、放出口では進行波としての性質のみを持っているとして、 $U = 2C$ が境界条件となる。油層先端での条件としては、 k_f について得られた実験式 (1), (2) を用いる。界面抵抗係数 f_i は、各計算例毎に実験値から概算した値を定数として与える。測定例のいくつかは図—7 のようである。また負の特性量が放出口に持ち込まれるときは、流量一定の条件のもとに、境界条件を修正する。



図—7 界面抵抗係数の測定例

図—8 に、以上の方法によって行なった計算結果を実線で、実験結果を破線で示してある。ここで、実験では流出開始時に不安定性のあることを考え、実質的な原点をとるという意味で、 t 軸について数秒ずらしてある。また、油層が水路終端部に近づくと、周囲水の越流が生ずるのにもない、拡がり速度が増加するようになるので、この部分は除いて考えたほうがよいであろう。

結果をみれば Run 101 (機械油) では比較的一致しているが、Run 106 (モーターオイル 20 W 40) では、計算値のほうが小さい速度となっている。その理由として、 k_f について比べると、Run 101 では実験値が $k_f = 1.09$ のとき計算値は 1.00 であるのに対し、Run 106 では実験値が $k_f = 1.37$ のとき計算値が 0.87 となっており、このような k_f の近似式からはずれる例では、うまく再現できないこともあった。



図—8 計算結果と実験結果の比較

5. 結 び

従来、油層先端における波速係数 $k_f = 1.0$ を用いていたが、むしろ 1.5 としたほうがよいようである。また定数とはみなせない場合もあるため、実験式 (1), (2) を作製したが、まだ原因不明のばらつきが大きいことに、注意する必要がある。

海面上で石油が拡がる時には、揮発、溶解等による変質のため、密度、粘性、界面張力の変化も考えなければならぬであろう。粘性が増せば、以上の実験結果から拡がり速度は減少するようである。その反面、活性成分の作用で油層周囲には薄い油膜の表面張力域が生じ、油・水界面での表面張力減少による界面張力の増加から、この薄い油膜の拡がり速度は増加していくことも考えられる。これら石油の変質をとり入れた実際的な予報方法の確立が必要であろう。

謝辞： 本研究を行なうにあたり、文部省より科学研究費をいただいた。また実験にあたって、当時中央大学生であった、日朝康弘、久保田隆司、松平 章、菊田健三、古田哲夫、松崎亮一の諸君の熱心な助力をえた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Fay, J. A.: The spread of oil slicks on a calm sea, Oil on the sea, Plenum, 1969
- 2) Fannelop, T. K. and G. D. Waldman: The dynamics of oil slicks-or "creeping crude", AIAA 9th Aero.

- Sci. Meet., 1971
- 3) Hoult, D. P.: Oil spreading on the sea, Annual Review of Fluid Mechanics, 1972
 - 4) Buckmaster, J.: Viscous-gravity spreading of an oil slick, Jour. Fluid Mech., Vol. 59, Part 3, 1973
 - 5) 首藤伸夫・大野 操: 海面上の石油の拡がり(第3報), 第31回年次学術講演会講演概要集, II, pp. 389~390 (1976)
 - 6) Benjamin, T. B.: Gravity currents and related phenomena, Jour. Fluid Mech., Vol. 31, Part 2, 1968
 - 8) Wilkinson, D. L. and I. R. Wood: Some observations on the motion of the head of a density current, Jour. Hydraulic Research, 10 (1972) no. 3
 - 9) 前出 8)
-