

II-73

静水面上における油の拡がりに関する研究

北海道大学工学部土木工学科	○学生員	岩上 哲平
北海道大学大学院工学研究科	正会員	長谷川和義
北海道開発局開発土木研究所	正会員	玉川 尊
株式会社 福田水文センター	正会員	甲斐 達也
北海道開発局開発土木研究所	正会員	斉藤 大作

1. はじめに

一級河川における油の流出事故は、平成9年に327件、平成10年には9月までにすでに356件発生している。また、道内の河川においても、平成9年には33件、平成10年では9月までに50件の油の流出事故が発生している。しかし、河川における油の流出事故は、海洋での流出事故に比べ流出量が少なく、問題視されることが少ない。また、流水中における油の分散現象についても不明な点が多く、研究例も少ない。

油は水面に落下した場合、重力、表面張力によって拡がり、油膜の運動によって生じる水の慣性抵抗と油の粘性によるせん断応力の作用によって抵抗を受ける¹⁾。重力による作用は、油が水よりも軽いために油層の重心が浮力の中心より高くなり、それにより生じる圧力勾配によって外側へ拡がろうとする力である。また表面張力による作用は、一般に水と空気の表面張力が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ろうとする力である。

海洋での大規模な油の流出事故に比べ、河川での流出事故は油膜が薄く重力の作用に比べ、表面張力の影響が大きい。このような表面張力の卓越した場合についての油の拡がりについては、流水面はおろか静水面上においても不明な点が多い。よって、本報告は河川における油の拡散現象を解明する第一歩として静水面上と流水面上における油の拡がりについて、実験を行った結果を示したものである。

2. 実験概要

2.1 静水面上における実験

静水面上における実験は、3×3mのコンクリート製の水槽に水を張り、静水状態を作り、20~200および200~1000 μ L用の2種類のマイクロピペットを用いて、静かに水面に油を瞬間投入することによって実施した。投入直後から油が完全に拡がるまでの間をビデオカメラで撮影し、経過時間ごとの油膜の半径を測定した。このとき、水面に近いところに10cm間隔でメッシュを張り、これを油膜の半径算出の基準とした。また、油膜の撮影に当たっては、水槽の底を黒くし、水槽を白い幕で覆うことにより、油と水の反射率の違いを明確にして行った。その実験の様子の一例を写真-1に示す。(中央にある黒い四角はカメラが写ったもの)

(1マス:10×10cm)

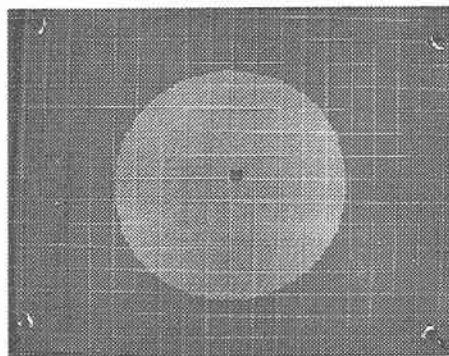


写真-1 静水状態での油の拡がりの様子
(フェアコール A-100# 196.3 μ Lの場合)

Oil pollution on calm water effected by the surface tension

By Teppei IWAGAMI, Kazuyoshi HASEGAWA, Takashi TAMAGAWA, Tatuya KAI
and Daisaku SAITO

表-1 使用した油の種類とその物性

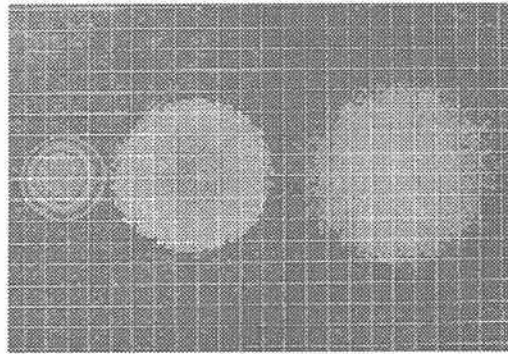
名称	油の物性			流水実験の値	
	表面張力 (dyn/cm, 25°C)	密度 (g/cm ³ , 15°C)	動粘性係数 (cm ² /s, 40°C)	Weber数 (× 10 ⁻⁵)	Reynolds数 (× 10 ⁻⁵)
フェアコールA-100#	35.8	0.888	1.030	1.31	7.1
モービルオイルDTEオイル AA VG-320#	36.2	0.900	3.040	1.81	3.3
A重油	31.0	0.860	0.033	1.50	2.286

使用した油は、潤滑油のフェアコールA-100#、モービルオイルDTE オイルAA VG-320#およびA重油の3種類である。各オイルの物性については、表-1 のとおりである。油は粘性が高く、マイクロシリンジピペットでは正確に滴定できないため、投入に当たっては、その3量を50, 170, 300μLの3量を目安とし、化学天秤により、5~10回の試験計量を行った上でこの値を滴定量とした。実験は前述の3種類の油について3量の計9パターン、各3回づつ計27回行われた。

(1マス:10×10cm)

2.2 流水面上における実験

流水において油の拡散がどのように変化するかを把握するため、流水中での投入実験を行った。流水実験に用いた水路は、幅3m、長さ18mの可傾斜水路であり、水路床に粒径1mmの砂を敷き、等流状態で実験を行った。流れは水路幅方向におおむね一様であり、水路上流端より7mの助走区間を設け、油の投下を行った。この実験についても、静水実験と同様に計27パターン行った。実験の様子の一例を写真-2に示す。(左側が上流)



この実験における、Weber数 Reynolds数をそれぞれ、次式より求め、参考として表-1に示す。

$$We = \frac{\rho U^2 L}{T}, Re = \frac{U \xi}{\nu}$$

ここで、代表曲率半径として $L = \xi$ 。(油の厚さ)、 ρ : 油の密度、 U : 平均流速、 T : 油の表面張力、 ν : 油の動粘性係数

写真-2 流水での油の拡がりの様子 (A重油 39.0 μLが流下して拡がる様子を合成したもの)

3. 実験結果

図-1 に3種類の油について静水と流水状態での実験による時間と油膜の半径の関係を示す。図-1のグラフ内の数字は、投入時の水温と投入量を表している。3種類の油とも投入量の増加によって半径は大きくなっている。静水実験と流水実験の結果を比較すると、流水状態で油の拡がりが速く、最大半径も大きくなっている。また油の種類によって拡がり方が異なっており、それは静水、流水に関係なく特徴が現れている。すなわち、モービルオイル以外の油については、全体として下に凸の形であるのに対し、モービルオイルでは、拡がり始めは上に凸の形から、変曲点をもって下に凸の形へと移行している。

図-1(b)に示す流水実験においては、撮影範囲が短かったため、油の拡がりが十分でなく平衡状態に達する前に撮影下流端から流出した。上の写真-2において、右側の円より右に行くと見えなくなってしまうのである。このため、図-1(b)流水実験に示すモービルオイルの最大半径は多少大きくなるものと予想される。これにより、図-2、図-3に変化が生じるが、油の最大半径が5cm大きくなったとしても、油膜は0.3μm厚くなるだけで、結論はほとんど変わらない。

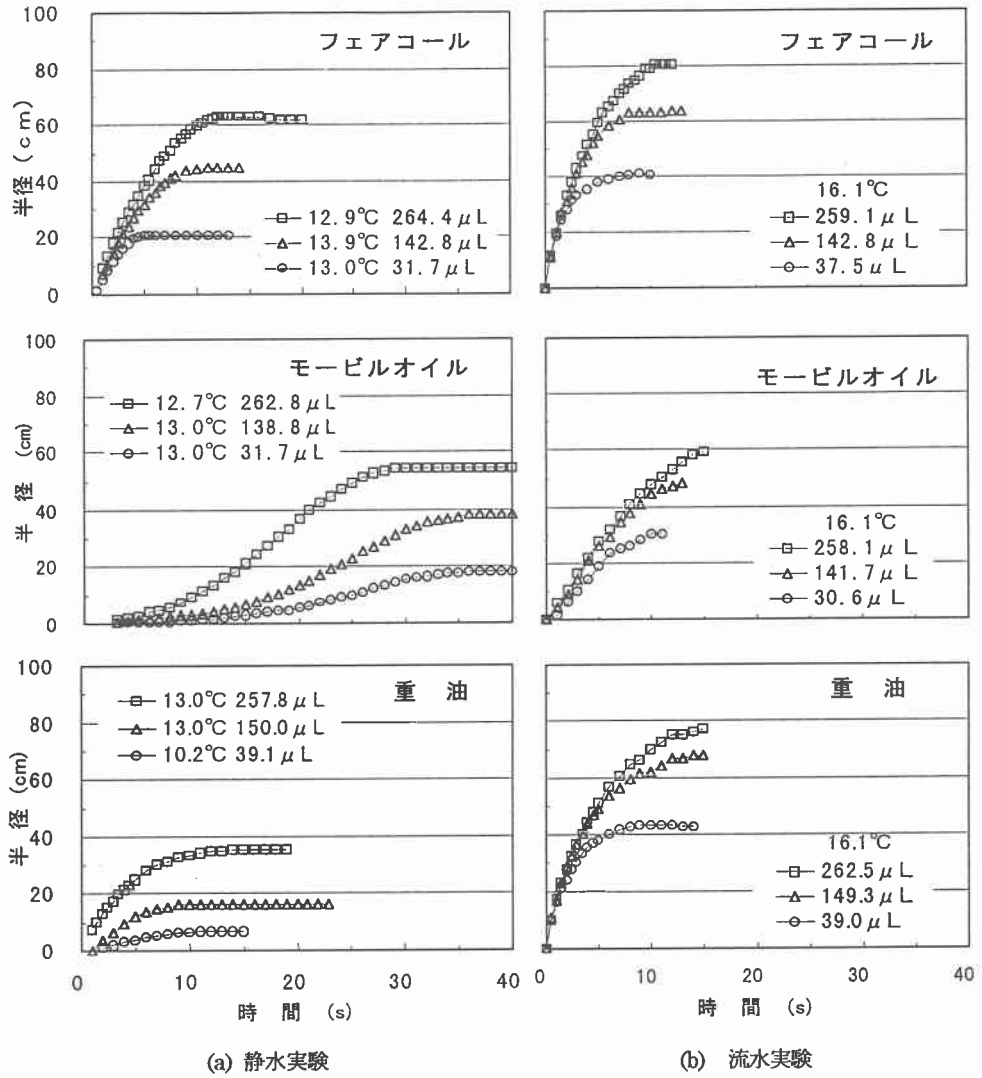


図-1 油膜の半径の時間変化

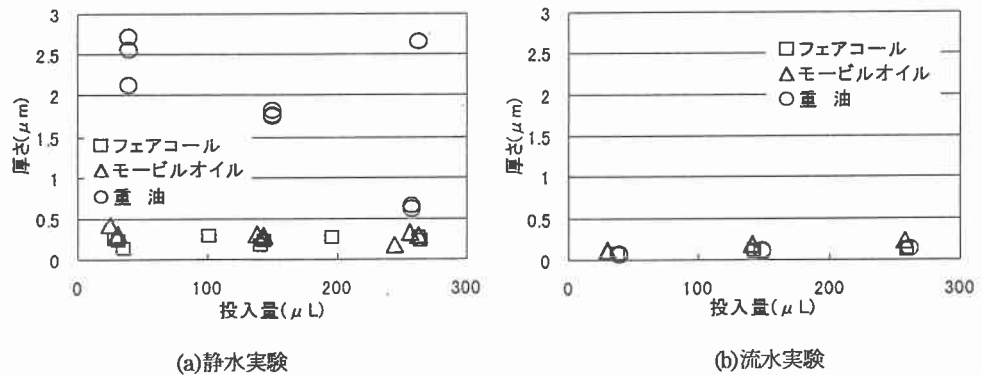


図-2 油の投入量と油膜の厚さの関係

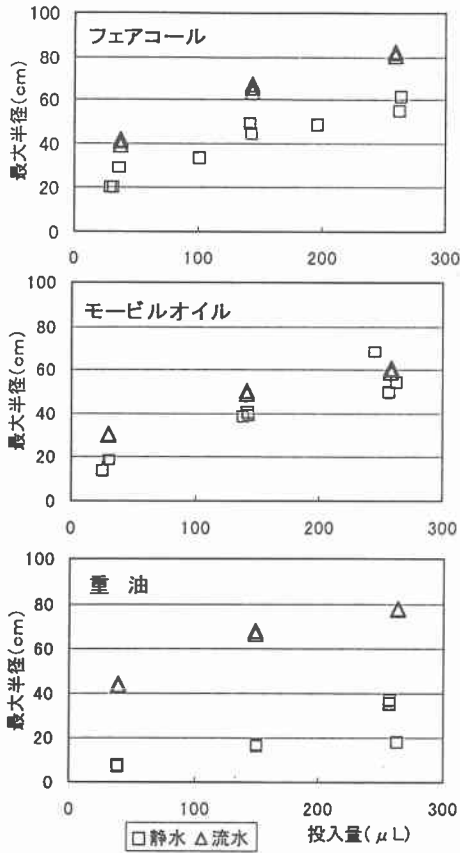


図-3 油の投入量と最大半径の関係

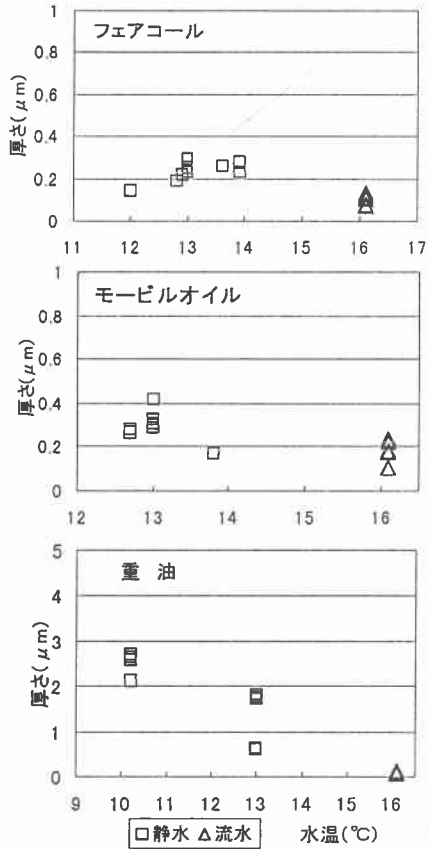


図-4 水温と油膜の厚さの関係

図-2 は油の投入量と油膜の厚さの関係を示したものである。また図-3 は油の投入量と油膜の最大半径の関係について示したものである。重油を除くと全ての油において油膜の厚さが油毎にほぼ一定となっており、油の投入量が最大半径の平方に比例している様子を見ることができる。フェアコールおよびモービルオイルの油膜の厚さは、12~16℃の範囲では、温度により若干薄くなる傾向はあるが、重油と比較するとその傾向はきわめて小さいことがわかる。

次に、油膜の厚さの温度依存性についてみることにする。図-4 に水温と油膜の厚さの関係を示す。これよりフェアコールおよびモービルオイルは温度の変化に対し、厚さは大きくは変化しないが、重油については水温の増加に対し、大きく減少している。よって重油は図-2 においても厚さがばらつく結果となったといえる。

4. 静水面上における油の拡がりについての理論解析

本研究では、油膜が非常に薄いものとして、油の拡散の現象を表面張力と圧力のバランスで解くこととする。力のバランスに関する模式図を図-4 に示す。

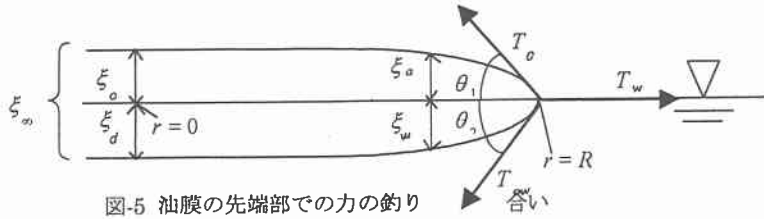


図-5 油膜の先端部での力の釣り

表面張力と静水圧の内部系バランスの式として、次の2式が成り立つ

$$\text{空中部分で、} \quad T_o \left\{ \left(\frac{d\xi_a}{dr} \right)^2 + 1 \right\}^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{d^2 \xi_a}{dr^2} - \frac{T_o}{R} + \rho_o g (\xi_c - \xi_a) = 0 \quad (1)$$

$$\text{水中部分で、} \quad T_{ow} \left\{ \left(\frac{d\xi_w}{dr} \right)^2 + 1 \right\}^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{d^2 \xi_w}{dr^2} - \frac{T_{ow}}{R} + \rho_o g \xi_c - (\rho_w - \rho_o) g \xi_w = 0 \quad (2)$$

ここで、 T_o : 空中での油の表面張力、 T_{ow} : 水中での油の表面張力、 ξ_a : 油膜先端付近での水上部分の厚さ、 ξ_w : 油膜先端付近での水中部分の厚さ、 ξ_c : 油膜中心部での水上部分の厚さ、 r : 任意の点での油膜の半径、 R : 油膜の最大半径、 ρ_o : 油の密度、 ρ_w : 水の密度 である。

一方、油膜の先端部では、(3)式で示される Young の式²⁾が成り立つ。

$$T_w - T_o \cos \theta_1 - T_{ow} \cos \theta_2 = 0 \quad (3)$$

ここで、 T_w : 水の表面張力、 θ_1 : 水面と油の水上部分とのなす角度、 θ_2 : 水面と油の水中部分とのなす角度 である。

(1)式を ξ_a について0から ξ_c まで積分すると、

$$T_o (-1 + \cos \theta_1) + \frac{1}{2} \rho_o g \xi_c^2 - \frac{T_o}{R} \xi_c = 0 \quad (4)$$

同様に、(2)式を ξ_w について0から ξ_d まで積分すると、

$$T_{ow} (-1 + \cos \theta_2) - \frac{1}{2} (\rho_w - \rho_o) g \xi_d^2 + \rho_o g \xi_c \xi_d - \frac{T_{ow}}{R} \xi_d = 0 \quad (5)$$

この(4)式、(5)式に、(3)式および $\xi_c + \xi_d = \xi_w$ の関係式を代入して、

$$T_w = -\frac{1}{2} (1 - \sigma) \rho_o g \xi_w^2 - \frac{T_o}{R} \xi_c - \frac{T_{ow}}{R} \xi_d + T_o + T_{ow}$$

このとき、 ξ_c/R 、 ξ_d/R は非常に小さい値であることから省略する。

よって、油の表面張力が水の表面張力よりも大きいとき、つまり、 $T_o + T_{ow} > T_w$ であるとき

油膜の厚さ ξ_w は、次の(6)式で表される。

$$\xi_w = \sqrt{\frac{2(T_o + T_{ow} - T_w)}{(1 - \sigma) \rho_o g}} \quad (6)$$

(6)式において $T_o + T_{ow} < T_w$ であるとき、油の表面張力<水の表面張力となり、油膜は無限に広がる。そのようなときには、油膜の厚さは油分子レベルの大きさになるものと考えられる。

また(6)式より油膜の厚さは、油の投入量には無関係で油の物性や表面張力によって定まり、水や油の表面張力を決定する水温・油温によって影響されることがわかる。また、(6)式の分母に現れる油の比重や密

度も温度依存性を有するので、油膜の厚さ温度の影響は複雑に効いてくることになる。

5.おわりに

本研究によって得られた結果は以下の通りである。

- 1)油は種類や物性によって、拡がる速さが変わるだけでなく、図-1 で表したように変曲点を持つような拡がり方をするものがある。その特性は静水状態だけでなく、流水状態でも表われている。
- 2)油の厚さは静水状態、流水状態に関わらず、油の種類、油温および水温によってほぼ決まる。それは、水温、油温が表面張力に大きく影響するためである。
- 3)油の厚さは(6)式で示したように、水と油の表面張力、それを左右する水温、油温によって影響される。

参考文献

- 1) 埜口英昭・山崎宗広：海面上に連続流出する油の拡がり、第 26 回水理講演会論文集、pp.596～575、1982 年。
- 2) 井本 稔：表面張力の理解のために、高分子刊行会、1993 年。