

II-74

流水面上における油の分散に関する実験的研究

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 玉川 尊
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 斎藤 大作
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 渡邊 康玄
 北海道大学 土木工学科 学生員 岩上 哲平

1. はじめに

最近、日本近海では1997年1月2日に発生したロシア船籍タンカー「ナホトカ号」の海難事故や、1997年7月2日に発生したパナマ船籍タンカー「ダイヤモンドグレース号」の底触事故に伴う大規模油流出事故が続けて発生しており、その被害状況はマスメディアなどを通じて生々しい記憶として残されている。一方、河川に目を向けると平成8年に一級河川で発生した油流出事故は295件で、水質事故379件のうち約8割が油類の流出によるものであった。この中には、東北地方雄物川水系成瀬川灯油流出事故に代表される上水道取水停止を伴う事故も含まれ、油流出は河川管理上重要な問題となっている。

油流出事故処理はオイルフェンスや吸着マットを使用し油を回収するのが一般的であるが、その為には、油の流下特性を把握することが非常に重要となる。海洋での流水を想定した油の定常的な拡がりには羽田野、埜口ら^{1),2)}によって研究されているが、河川事故を想定した研究はあまり見られない。

本研究は、流水面上における瞬間投入された油が、投入地点からの流下時間の違いにより異なった分散を示すことに着目し、油の分散係数について検討を行うこととした。なお、油の拡がりの最終段階で油層が薄層になった場合に卓越する表面張力の影響が重力の影響よりも大きいことから²⁾、今回の実験では表面張力が油の分散にどの様に関与しているかを実験データを基に解析を行った。

2. 流水面上の油拡実験の概要

実験には、図-1に示される幅30cm、長さ50m、深さ45cmの実験用水路を用いることとした。また、水路は勾配が無い場合、ベニヤ板で縦断勾配を付けるとともにフェルト生地を板の上に貼って粗度を持たせた。油の流下状況は2台のビデオカメラを設置して撮影した。撮影位置は2箇所とし、上流撮影位置を上流端から10m、下流撮影位置を上流撮影位置から3m下流の位置とした。油の投入位置は上流撮影位置の3m及び1.5m上流の2ケースとした。油の投入はマイクロピペットを用いた。実験時の投入量は、その都度若干投入量が異なることから、それぞれの実験に際し行った3~5回の定量の平均値とした。

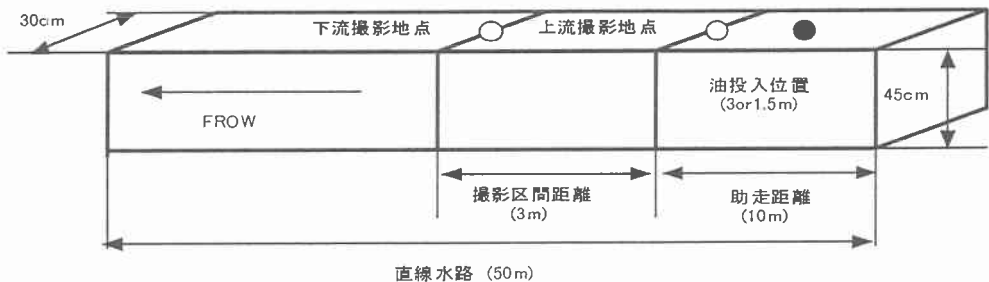


図-1 実験水路および測定個所の概要

Experimental study on dispersion coefficient of oil on the flow
 By Tatsuya KAI, Takashi TAMAGAWA, Daisaku SAITO, Yasuharu WATANABE and Teppei IWAGAMI

実験は、水路条件を等流状態に設定し、撮影地点毎に幅 5cm、長さ 5cm のメッシュを横断方向に 6 マスとり、1 マス毎の油の占める面積を映像から読み取り 6 マス合計値とし、メッシュ全体面積との比率を算出し油の濃度とした。撮影された油の分散の様子について一例を写真-1、2 に示す。

また、撮影区間から 0.5m 上流の地点、撮影区間の中心地点及び撮影区間から 0.5m 下流の地点で、2 次元電磁流速計を用いて表面流速の測定を行った。計測は 30cm の水路幅の左右岸から 6cm までは 1cm ピッチで、それ以外は 2cm ピッチの計 20 測線で行った。なお、流速測定方法は、0.05 秒間隔で 50 秒間測定し、その平均値を各測線の流速とした。

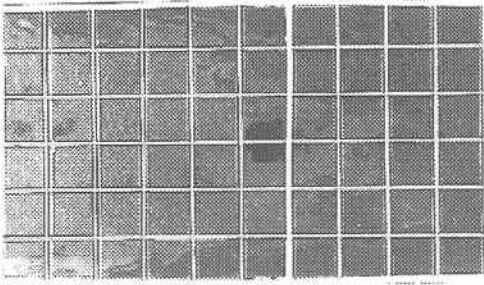


写真 - 1 上流撮影地点での映像

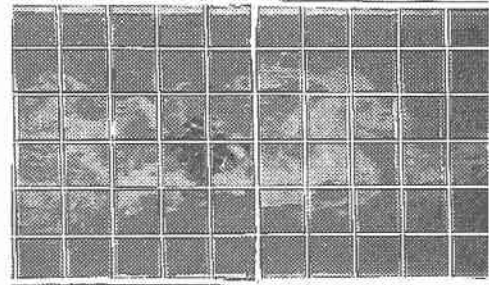


写真 - 2 下流撮影地点での映像

実験条件として流量(Q)は 2,800cm³/s と 8,100 cm³/s の 2 種類とした。投入する油の種類はA重油と潤滑油の一つであるフェアコールAを使用し、投入量(M)は 0.012 cm³ と 0.030 cm³ の 2 種類を目標投入量とした。なお、前述のように、投入量については各実験の実際の投入量は若干異なっている。投入位置はフェアコールAの流量 2,800cm³/s のケースのみ上流撮影位置より 1.5m 上流としたが、それ以外のケースについては 3.0m 上流とした。それぞれのオイル性状は表-1 に、流れの状況を示すフルード数、レイノルズ数及びウェーバー数の 3 種の無次元量は表-2 に示した。なお、投入する際の油は水温と同じ温度に保つため、実験水路に保管場所を設置し温度管理を行った。

表 - 1 オイル性状

	界面張力	密度	動粘度
	N/m, 25°C	g/cm ³ , 15°C	mm ² /s, 40°C
フェアコールA	0.0358	0.8880	103
A重油	0.0310	0.8598	3.27

表 - 2 実験における無次元量

流量 cm ³ /s	フルード数 流れ	レイノルズ数			ウェーバー数	
		流れ	フェアコール A(×10 ⁵)	A重油 (×10 ⁵)	フェアコール A (×10 ⁵)	A重油 (×10 ⁵)
2,800	0.14	10168	1.76	60.51	1.24	1.51
8,100	0.16	33165	2.83	97.37	3.20	3.90

3. 実験結果

3-1. 流速分布

流下方向流速を U (cm)、水路幅の追加距離を左岸から y (cm) とし、上、中及び下流地点の計 3 断面で測定された流速を、それぞれのケースについて図-2 に示した。

各流量条件で計測された 3

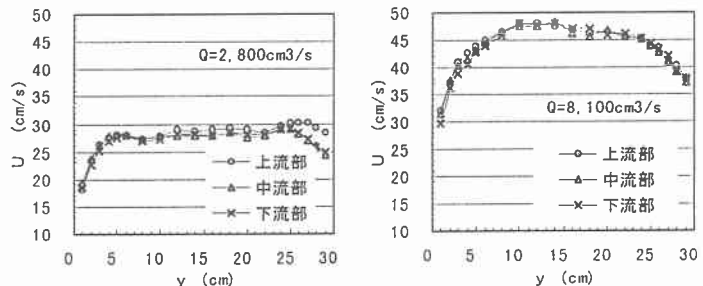


図 - 2 流速分布

断面の断面平均流速は、 $2,800\text{cm}^3/\text{s}$ のケースで 27.48 cm/s 、 $8,100\text{ cm}^3/\text{s}$ のケースで 44.22 cm/s であった。

次に、各条件での流速分布について流心部と壁面近くの流速分布を比較すると、流量が $2,800\text{ cm}^3/\text{s}$ の時は 11.9 cm/s 、 $8,100\text{ cm}^3/\text{s}$ の時は 18.7 cm/s の差があり、流量の多いケースの方が流心と側壁近傍で流速差が大きくなっている。

3-2.油の分散

各調査地点で求められた油の濃度の時系列変化を実験条件毎にフェアコールAおよびA重油についてそれぞれ図-3および図-4に示した。

同一条件で行った3回の実験はほぼ同じ結果となっており、実験の再現性は高いものといえる。各実験の油の流下時間を濃度ピーク値の移動速度として算出したものを表-3に示した。油の流下時間は、流れの平均流速とほぼ等しくなる結果を得た。また、フェアコールAにおける濃度の時系列分布は、各実験とも概ね同じ形状を示している。また、各実験とも上流断面の濃度に比較して下流断面における濃度が低い値となる

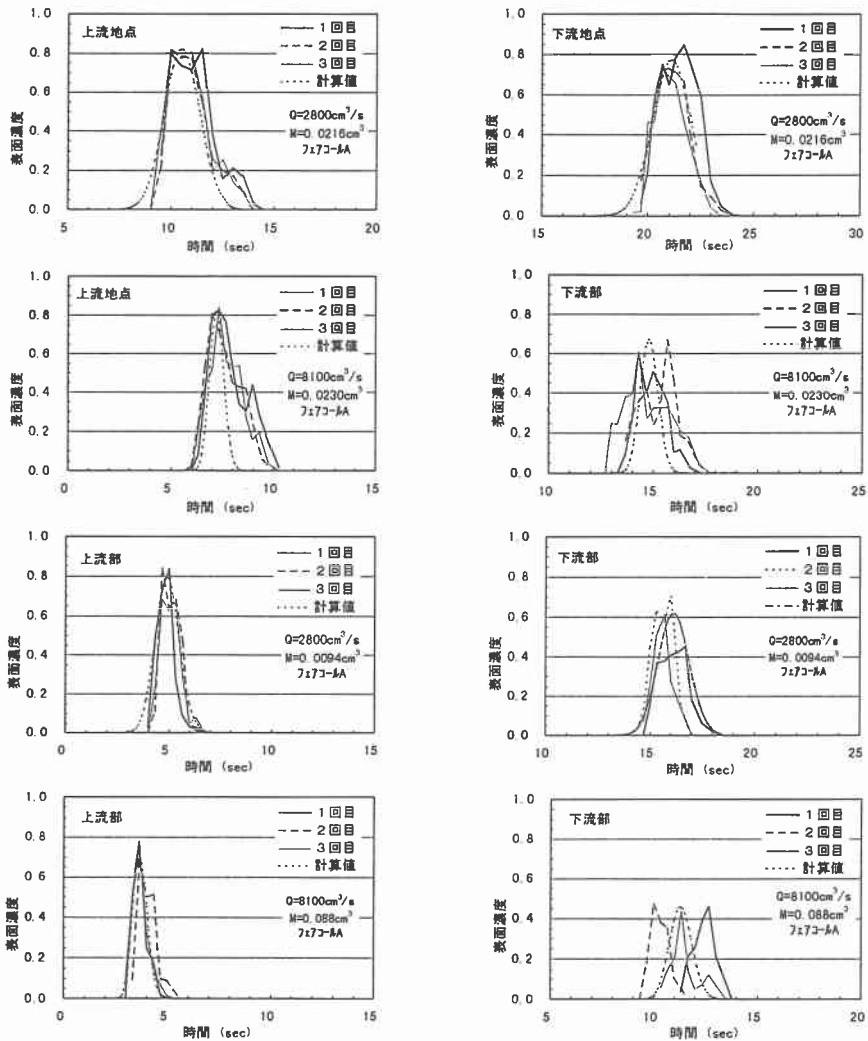


図-3 フェアコールAの濃度の時間変化

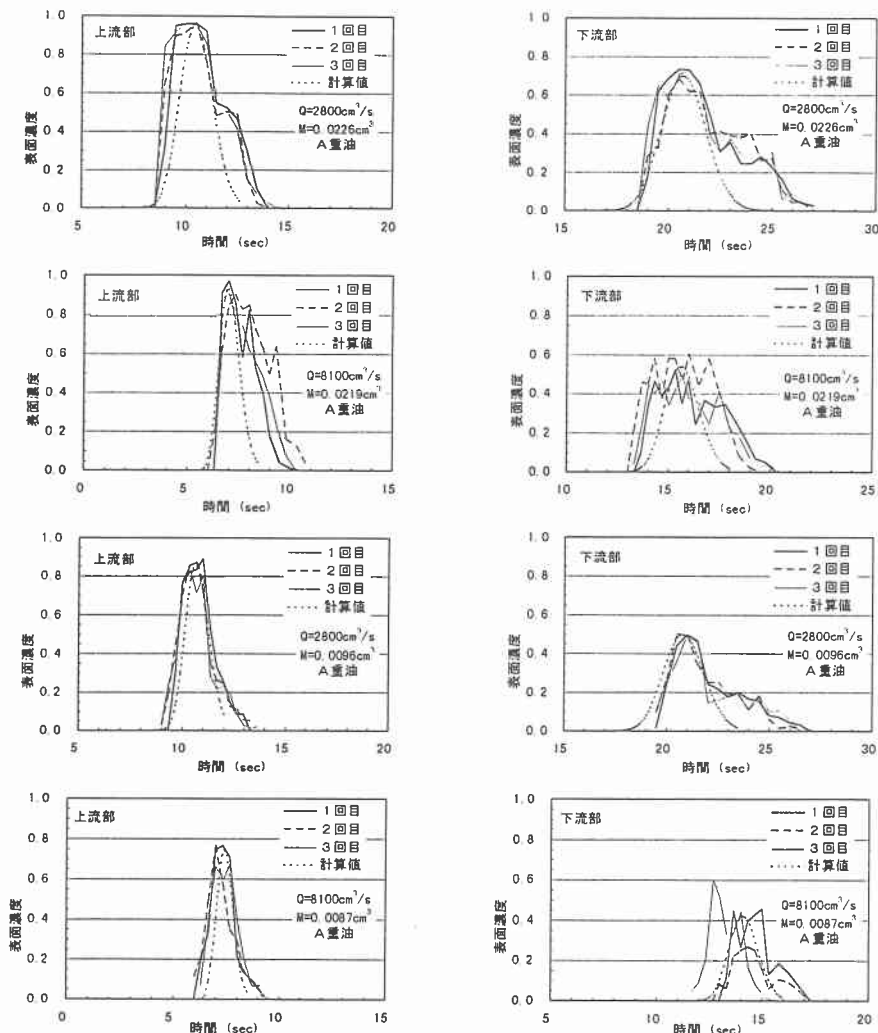


図-4 A重油の濃度の時間変化

表 - 3 油の濃度ピークの流下時間

種類	フェアコール	フェアコール	重油	重油	フェアコール	フェアコール	重油	重油
投入量	0.012cm ³	0.030cm ³	0.012cm ³	0.030cm ³	0.012cm ³	0.030cm ³	0.012cm ³	0.030cm ³
流下時間	11.2sec.	10.6sec.	10.1sec.	10.2sec.	7.6sec.	7.6sec.	6.7sec.	8.6sec.

傾向を示している。一方、A重油についてみると、上流断面の濃度に比較して下流断面が低い値となる傾向は、フェアコールAと同じであるが、下流断面の濃度減少が遅くなっており尾を引いた形状になっている。このことは、A重油が下流断面で、フェアコールAに比較して分散が進んでいることを示すものである。

4. 分散係数に関する考察

撮影地点である上下流断面で得られたそれぞれの油面濃度のピーク値 C_p を用いて (1) 式から2つの断面

における D_L が一致するように点源を決定し算出した。このとき、水溶性物質では投入開始から分散が開始されるが、油の場合は投入直後に急激に広がりその後緩やかに分散が進行する。このため、急激に広がった後の分散現象について考えることとし、上下流断面での油面の濃度ピーク値 C_p および生起時刻を用いて(1)式から D_L を算出することとした。その結果を表-4 に示すとともに、この分散係数を用いて(2)式から得られる濃度分布を、図-3, 4 に併記した。フェアコールAについては、実験値とほぼ同様の濃度分布を示しているが、総量が8割程度に減少している。これは、油膜の厚さを水温等の実験条件の異なる岩上⁵⁾らが行なった実験結果を用いていることによるものと考えられる。A重油については、濃度の立ち上がりは概ね再現しているが濃度の下降期の尾を引いた形状を再現していない。このことは、(2)式は溶解性の物質の分散を表したものであり、下降期に尾を引くような油の分散を十分に表現することができないためである。

$$D_L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{S_i}{2R_i C_p} \right)^2 \quad (1) \quad , \quad c_i(x, t) = \frac{S_i}{2R_i \sqrt{\pi D_L t}} \exp \left[-\frac{(x - ut)^2}{4D_L t} \right] \quad (2)$$

ここで、 t : 追加時間、 C_s : 油表面濃度、 C_p : ピーク濃度、 S_i : 投入面積、 R_i : 油面直径、 x : 距離である。次に、油の分散が流水面上でのみ行われることから、フィッシャーの理論³⁾における水深平均流速に表面流速をあてはめた式(3)を使用して、表面流速分布から分散係数 D_L を算出した。

$$D_L = -\frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} U_s dy \int_{-B/2}^y \frac{1}{\varepsilon_y} dy_1 \int_{-B/2}^y U_s dy_2 \quad (3)$$

ここで、 B : 水路幅、 U_s : 流下方向流速の平均流からのずれ、 ε_y : 流れの横拡散係数である。(3)式における流れの拡散係数は、レイノルズ応力をうまく測定できなかったため、以下の様にして求めることとした。流量が少なく水深が小さい流量が $2,800 \text{ cm}^3/\text{s}$ の実験では水深方向に平均化された(4)式で表される横方向渦動拡散係数を用い、流量が多く水深の大きい流量 $8,100 \text{ cm}^3/\text{s}$ の実験では壁面での抵抗を考慮し、側壁から横方向に対数則を適用した(5)式を用いた。

$$\varepsilon_y(y) = 0.23u_* h \quad (4) \quad , \quad \varepsilon_y = \frac{\kappa u_* B}{12} \quad (5)$$

ここで、 u_* : 摩擦速度、 h : 水路水深、 B : 水路幅、 κ : カルマン定数である。なお(5)式において、流速分布が左右非対称であることから、左右の分布形を平均して対数則に適用した。

(3)式から求められた分散係数及び各実験ケース毎に(1)式から求められた分散係数を表-4 に示した。

表 - 4 理論および実験から求めた分散係数

	投入量	Q=2800cm ³ /s	Q=8100cm ³ /s
フィッシャーの式		18.84	129.4
フェアコールA	0.012cm ³	7.43	25.72
フェアコールA	0.030cm ³	3.42	8.63
A重油	0.012cm ³	22.23	46.72
A重油	0.030cm ³	18.7	69.39

分散係数(cm²/s)

全ての油で、流量が増えると分散係数が増加する結果が得られた。また、油の種類で分散係数に大きな違いが出る結果となった。この原因としては、油の物性の違いによるものと考えられるが、今後さらに検討を要する。

次に、今回得られた油の分散係数のオーダー比較を行なうため、実験より求めた分散係数と玉川ら⁴⁾による実河川での溶解性物質の分散係数と比較することとした。図-5は、分散係数と川幅水深比の関係を見たものである。なお、河川の溶解性物質の分散係数と川幅水深比のデータについても記載している。図に示した近似曲線は、実河川における溶解性物質の分散データより求めたもので、今回の実験結果についても、概ね乗っていると言えるが、表-4からも分かるように分散係数は油の種類により、2~8倍程度の違いがある。

また、油と水、油と大気の界面張力は油の温度、水温等により、大きく異なるため、これらの影響については今後さらなる検討が必要である。

5. まとめ

今回の実験において、流水表面における油の占める面積の割合を油の濃度と定義し、流水中における油の分散を測定することができた。この結果、油の濃度の時間変化は濃度下降期に尾をひく形状で分散していることが分かった。また、フィッシャーの分散係数の理論式を流水の表面流速分布に適用して求めた分散係数

と比較すると、多少小さめの値を示していることがわかった。さらに、実河川で観測された溶解性物質の河幅水深比と分散係数(D/uh)との関係とも概ね一致していることが分かった。

今回の実験結果は油の流出事故を想定し、分散範囲の推定を行うことを目的として行っているが、油の種類、水温、油温等による表面張力の違いが分散現象に影響を与えており、今後さらなる研究が必要である。

参考文献

- 1) 羽田野袈裟義・埜口英昭・平野宗夫・斎藤隆：流水面上に流出した油の定常的な拡がり，水工論文集第35巻，PP197～202，1991.2.
- 2) 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，1982.2.
- 3) Fischer, H. B. : Transverse mixing in a sand-bed channel, U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 575-D, d267～d272, 1967
- 4) 玉川尊・中津川誠・長谷川和義：河川水質事故物質の流下拡散について，土木学会北海道支部論文報告集，PP591～596，平成4年度
- 5) 岩上哲平・長谷川和義・玉川尊・齋藤大作・甲斐達也：静水面における油の拡がりに関する研究，土木学会北海道支部論文報告集投稿中

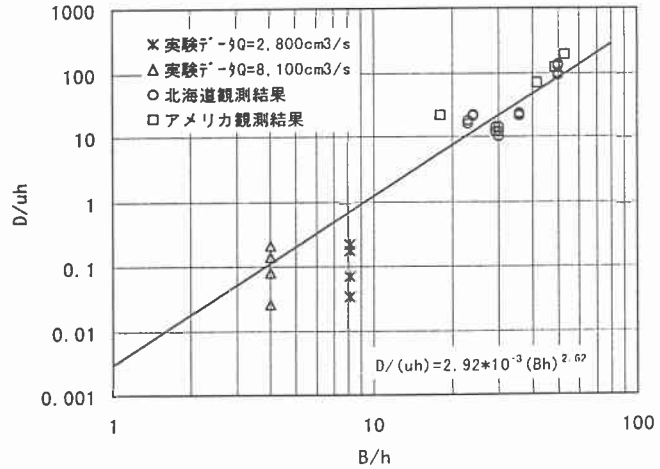


図 - 5 分散係数と川幅水深比の関係