

II-37

流水面上における油膜の分散に対する表面張力の影響

北海道大学大学院工学研究科 ○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 正会員 玉川 尊
 北海道開発局 正会員 渡邊 康玄
 株式会社 福田水文センター 正会員 神尾謙太郎

1. はじめに

河川における油流出事故は、海洋における巨大タンカーからの流出事故に比してその流出量が圧倒的に少なく、薄い油膜になって汚染域を広げるのが一般である。このため、あまり深刻な問題として取り上げられてこなかったきらいがある。しかし、近年事故件数が大幅に増え続けており、1級河川だけでも平成9年度327件、平成10年度356件などとなっていて、上水や河川生物へ打撃を与えるケースが起き始めている。

河川の油流出事故が発生した際、流出油の拡がりやどの位置まで達しているかをいち早く知ることが最も重要になる。対策時点におけるオイルフェンスによる最適回収場所を決定しなければならないからである。海洋における油の拡がりに関する研究は近年大きく前進しており、特に水面上での油層の重力的流動が詳しく解明されてきている。しかし、河川におけるような薄い油膜の拡がりに関する研究は皆無に近く、流水面上におけるせん断力や乱流拡散および油の表面張力の支配的な現象に対する研究が必要になっている。

本研究は、事故で流出することの多い数種の油を対象にして流水面上で薄く拡がる実験を行ない、その基本的な性質を調べようとするものである。

2. 実験概要

実験は長さ50m、幅30cmの実験水路を用いて行なった。水路勾配は1/1100で、油の流下状況を2台のビデオカメラを設置して撮影した。撮影位置は上流撮影位置を水路上流端から10m下流、下流撮影位置を上流撮影位置から3m下流にとった。油の投入位置は、上流撮影位置の1.5mもしくは3m上流の位置とした。実験は、水路条件を等流に設定して所定の量の油滴を投入し、撮影地点ごとに5cm四方のメッシュを横断方向に6マスとり、1マスごとの油の占める面積を映像から読み取る方法によって行われた。その後、拡がり面積を合計し、メッシュ全体面積との比率を算出して油の表面濃度とした。

実験条件は、平成10年度に行われた流量8.1L/s、2.8L/sの2ケースに加えて、今回流量4.0L/s、1.4L/sの2種類の実験が追加されている。投入する油の種類は、昨年使用したフェアコール、A重油に加えて、モービルオイルを用い、計3種類である。使用した油の物性を表-1に示す。また、実験における流れの状況を示す、Froude数、Reynolds数およびWeber数の3種の無次元量を求め、表-2に示した。なお、投入する際の油は、すべての実験において実験時の水温と油温を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なった。

表-1 油の種類と物性

	表面張力	動粘性係数	密度	
	dyn/cm, 25°C	mm ² /s, 15°C	g/cm ³ , 15°C	g/cm ³ , 25°C
フェアコール	35.8	103	0.888	0.882
A重油	31.0	3.27	0.860	0.853
モービルオイル	36.2	304	0.900	0.893

表-2 実験諸条件および無次元量

流量	Froude 数		Reynolds 数			Weber 数		
	流れ	流れ	フェアコール ($\times 10^{-4}$)	A重油 ($\times 10^{-3}$)	モービルオイル ($\times 10^{-4}$)	フェアコール ($\times 10^{-4}$)	A重油 ($\times 10^{-4}$)	モービルオイル ($\times 10^{-4}$)
2.8 L/s	0.46	10168	2.17	6.43	-	1.35	1.38	-
8.1 L/s	0.52	33165	3.50	10.35	-	3.49	3.58	-
1.4 L/s	0.39	4808	1.52	4.50	0.73	0.66	0.67	0.95
4.0 L/s	0.42	15193	2.36	6.97	1.14	1.57	1.61	2.28

Effects of surface tension for dispersion coefficient of oil pollution on the flow
 By Teppei IWAGAMI, Kazuyoshi HASEGAWA, Takashi TAMAGAWA, Yasuharu WATANABE and Kentaro KAMIO

3. 流速分布

表面流速の測定は上流撮影位置から0.5m上流の地点、上下撮影位置の中間地点、下流側撮影位置から0.5m下流の地点の計3点で、2次元電磁流速計を用いて行なわれた。横断方向に15～20点の測定線を設け、0.05秒間隔で50秒間測定し、その平均値を各測線の表面流速とした。

流下方向の表面流速をU (cm/s)、水路幅の横断距離を左岸からy (cm)とし、上流、中流および下流地点の計3点で測定された表面流速の平均値を図-1に示した。各流量条件で計測された平均表面流速は、図に示すとおり、流量2.8L/sのケースで27.48cm/s、4.0L/sで29.79cm/s、8.1L/sでは44.22cm/sであった。なお1.4L/sのケースについては、2次元電磁流速計での測定結果が十分に得られなかったため図-1から省略した。また、1.4L/sのケースの平均表面流速については、上下撮影断面を通過した油の平均流速19.23cm/sを平均表面流速として、計算を行うものとした。

図-1における表面流速分布を見ると、流量が2.8L/sのケースでは壁面付近を除き、流速分布がほぼ一定となっている。流量が4.0L/sの場合においても、同様に流速分布が一定となる部分が現れている。8.1L/sに流量が増えると、壁面付近と流心部との流速差が大きくなっており、流速一定の部分も流心部付近でわずかに見られる程度である。これは側壁の影響が卓越するようになり、河床の粗度による影響が表面にまで及ばなくなったことによる。

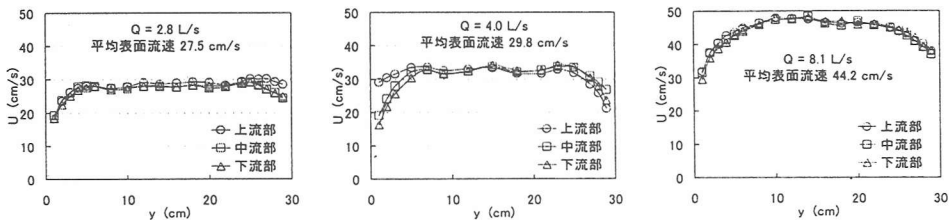


図-1 流速分布

4. 油の分散

上下撮影断面で求められた油表面濃度の時系列変化を実験条件ごとにフェアコール、A重油およびモービルオイルについて図-2に示した。図中に記述した計算値は、式(3)に示すFickの濃度分布式から求めたものであり、分散係数を求める手順は後述する。

同一条件で行った3回の油投入の実験結果は、図からわかるようにほぼ同じ形の濃度分布となっており、実験の再現性は高いものといえる。実験における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、流れの平均表面流速とほぼ等しくなる結果を得ている。また、フェアコールにおける濃度の時系列分布は、各実験条件ともおおむね同じ形状を示し、上流断面の濃度と比較して下流断面が低い値となる傾向を示した。次に、A重油について見てみると、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に対して、上流断面より分散が進んでいることを示すものである。モービルオイルについては、フェアコールと似たような分布形状を示した。

表-3 実験条件別濃度ピークの測点間流下時間

流量	8.1L/s				4.0L/s		
	フェアコール		A重油		フェアコール	A重油	モービルオイル
投入量	10.6 μL	24.3 μL	11.2 μL	26.3 μL	13.0 μL	12.8 μL	13.5 μL
上流断面 実測時間 (s)	3.7	7.2	7.4	7.0	5.2	5.0	4.9
上流断面 想定時間 (s)	4.5	13.6	3.2	3.5	13.2	18.3	13.3
下流断面 実測時間 (s)	11.3	14.8	14.1	15.6	14.9	15.7	15.0
下流断面 想定時間 (s)	11.3	20.4	10.0	10.2	23.3	28.4	23.4
流量	2.8L/s				1.4L/s		
	フェアコール		A重油		フェアコール	A重油	モービルオイル
投入量	9.9 μL	25.9 μL	10.1 μL	25.5 μL	13.4 μL	12.8 μL	13.5 μL
上流断面 実測時間 (s)	4.9	10.5	10.7	10.5	7.3	8.0	7.0
上流断面 想定時間 (s)	17.5	81.4	5.4	12.4	45.0	13.6	30.8
下流断面 実測時間 (s)	16.1	21.1	20.8	20.7	22.8	23.6	23.1
下流断面 想定時間 (s)	28.4	92.3	16.3	23.3	60.5	28.8	46.9

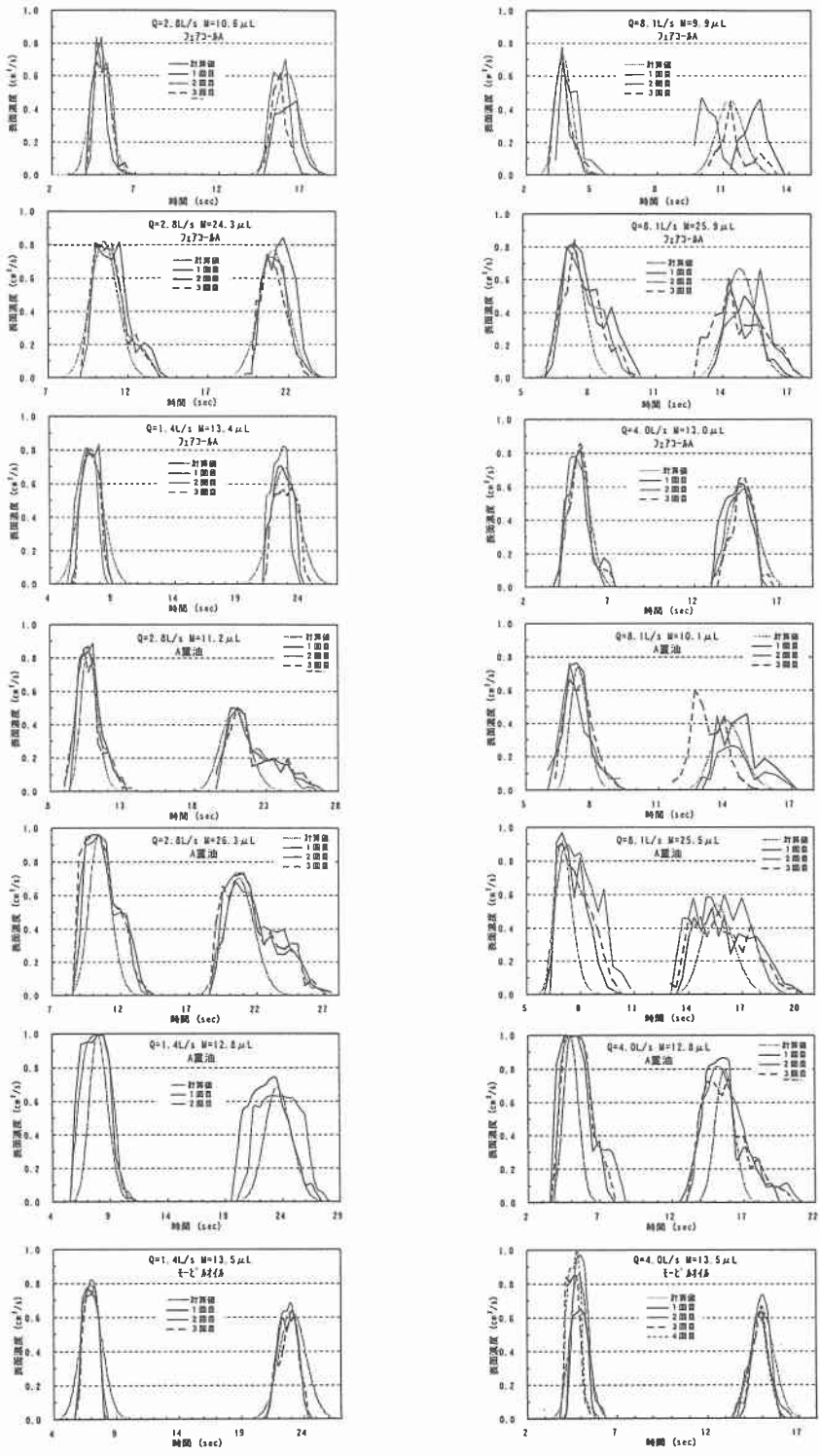


図-2 油の濃度の時間変化
 (図中左側の分布：上流部、図中右側の分布：下流部)

5. 油の分散係数に関する考察

今回の実験でも昨年度の実験同様、油の分散係数を2つの方法で求め、検討を行うこととした。1つは実測の濃度分布形状から分散係数を算出することができないため、実測の濃度分布をFickの濃度分布式で表すことができると仮定し、油面の濃度ピーク値から油の分散係数を算出する方法である。もう1つは式(4)に示すFischerの理論式⁴⁾を用いて、表面流速の分布のみから油の分散係数を算出する方法である。流量が1.4L/sのケースについては前述のように表面流速の分布が測定できなかったため、Fischerの理論式による分散係数の算出が行なえず、実測による分散係数のみを算出した。

まず、実測の濃度ピーク値による方法で油の分散係数を求めることとする。一般に水溶性物質の場合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った後、緩やかに分散が進行していく。急激な広がりには水と油の表面張力の差によるものであり、純粋な流水による分散とは考えられない。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た。すなわち、油の投入後に直ちに純粋な分散が始まるものとみなし、点源を上流側にずらす方法をとることとした。

油投入地点から上流撮影断面までの想定流下時間を t_1 とし、下流までの時間を t_2 とする。上下流断面で得られたそれぞれの実測油膜濃度のピーク値 C_p を用いて、上流と下流の分散係数が一致するように式(2)から t_1 と t_2 を算出し、仮想点源を決めた。その後、式(1)を用いて分散係数 D_L を求めた。なお、実測時間と想定時間は表-3に示し、式(1)から求められた各実験の条件での分散係数 D_L を表-4に示すとともに、式(3)のFickの分散方程式から求められる濃度分布を図-2に併記した。

$$D_L = \frac{1}{\pi t} \left(\frac{S_0}{2R_0 C_p} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\pi t_1} \left(\frac{S_0}{2R_0 C_{p1}} \right)^2 = \frac{1}{\pi t_2} \left(\frac{S_0}{2R_0 C_{p2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$C_s(x, t) = \frac{S_0}{2R_0 \sqrt{\pi D_L t}} \exp \left[-\frac{(x - Ut)^2}{4D_L t} \right] \quad (3)$$

ここで、 t : 追加時間(s)、 t_1, t_2 : 点源から上流断面(下流断面)までの想定時間、 C_s : 油膜の表面濃度、 C_{p1}, C_{p2} : 上流断面(下流断面)でのピーク濃度、 S_0 : 投入面積(cm^2)、 R_0 : 油面直径(cm)、 x : 油投入位置からの距離(cm)、 D_L : 分散係数(cm^2/s)、 U : 平均表面流速(cm/s)である。

図-2において、油ごとの実測濃度分布とFickの分散方程式から求めた濃度分布形状を比較する。フェアコールは、実測分布とFickの濃度分布式とがほぼ一致しているが、油の総量が8割程度に減少している。これは、投入面積 S_0 を求める際、油膜の厚さを昨年の一様流実験の結果から求めた値にとっているため、本実験と水温等の実験条件が異なることによるものと考えられる。

A重油は同様に比較すると、濃度の立ち上がり部ではおおむね一致しているが、下降部ではFickの濃度分布式が立ち上がり部と対称な形状を示しているのに対し、実測値は尾を引いた形状をなしており、明らかに立ち上がり部とは異なる分布形状を示している。このことは、式(3)が溶解性物質の濃度分布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。このために、A重油の分散係数は実際の分散係数より小さな値となった。

次に、Fischerの理論式を用いて油の分散係数を求める。油の分散は流水面上でのみ行われることから、Fischerの理論を表面流速分布に当てはめた式(4)を使用して分散係数を算出した。

$$D_L = -\frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} U_s dy \int_{-B/2}^y \frac{1}{\epsilon_y} dy_1 \int_{-B/2}^{y_1} U_s dy_2 \quad (4)$$

ここで、 B : 水路幅(cm)、 U_s : 流下方向水面流速の平均水面流速からの偏り(cm/s)、 ϵ_y : 流れの水面横分散係数(cm^2/s)である。

式(4)における流れの横分散係数 ϵ_y は、水面近傍のレイノルズ応力を上手く測定できなかったため、以下のようにして求めることとした。

流量が2.8L/s、4.0L/sの水深が比較的浅い場合は、流心付近の流速が一定なので壁面の影響より河床

の影響が大きい。また、流量が8.1L/sの水深が深い場合は、壁面から流心にかけて流速が増加しているため、河床より壁面の影響が大きいことが図-1から読み取ることができる。このことから、Fischerの理論式で用いられる流れの横拡散係数 ϵ_y は、流量が2.8L/s、4.0L/sのケースでは水深方向に平均化された式(5)で表される横方向渦動粘性係数を用いることとした。また、流量が8.1L/sのケースについては、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式(6)を使用した。

$$\epsilon_y = 0.23U_y h \tag{5}$$

$$\epsilon_y = \frac{\kappa U_y B}{12} \tag{6}$$

ここで、 U_y :摩擦速度(cm/s)、 h :水路水深(cm)、 κ :カルマン定数、 B :水路幅(cm)である。

なお、流速分布が左右非対称であることから水路特性があったものと考えられ、式(6)において左右の分布形を平均して対数則に適用した。そして、式(4)から求められた分散係数を、各実験ケースごとに式(1)より求められた分散係数と併記し表-4に示した。

表-4 理論および実験から求めた分散係数

流量	2.8 L/s				4.0 L/s				
	Fischerの理論式	フェアコール	A重油	モービルオイル	Fischerの理論式	A重油	モービルオイル		
油の種類									
投入量		10.6 μ L	24.3 μ L	11.2 μ L	26.3 μ L	13.0 μ L	12.8 μ L	13.5 μ L	
分散係数(cm ² /s)	16.58	7.44	3.41	22.31	18.79	46.07	11.18	7.31	5.78
流量	8.1 L/s				1.4 L/s				
	Fischerの理論式	フェアコール	A重油	モービルオイル	Fischerの理論式	A重油	モービルオイル		
油の種類									
投入量		9.9 μ L	25.9 μ L	10.1 μ L	25.5 μ L	13.4 μ L	12.8 μ L	13.5 μ L	
分散係数(cm ² /s)	119.90	31.69	21.72	47.18	68.74	—	3.49	7.75	3.76

6. 分散係数に及ぼす表面張力の影響

次に、今回得られた油の分散係数と実河川での溶解性物質の分散係数を比較した。実河川での溶解性物質の分散については玉川ら⁵⁾による観測値を用いることとした。図-3は分散係数を平均流速と水深で除し無次元化したものと、川幅を水深で除して無次元化したものとの関係を見たものである。図-3に示した近似線は実河川における溶解性物質の分散データにより求めたものである。今回の実験は、川幅水深比 B/h が変化しても無次元化した分散係数 D_L/uh が変わらない結果となった。しかし、この結果は油の表面張力の影響によるものかもしれない。このため次に、慣性力と表面張力との比であるWeber数と無次元化した分散係数との関係について調べてみた。結果を図-4に示す。Weber数の値は(7)式により求めた。

$$\text{Weber数} = \frac{\rho_0 U^2 L}{T} \tag{7}$$

ここで、 ρ_0 :油の密度(g/cm³)、 U :流れの平均表面流速(cm/s)、 L :代表長さとして油膜の厚さ(cm)、 T :油の表面張力(dyn/cm)である。

図-4では、使用した3種類の油によらず、 D_L/uh がWeber数に対して直接的な関係をもたないように見える。しかし、逆に川幅水深比 B/h の違いが描点の散らばりをもたらしているものとも考えられる。そこで、図-3における実河川での溶解性物質の分散データを基にした近似線を用いて、 D_L/uh を $(B/h)^{2.62}$ で除し、それをWeber数と比較する。両者の関係を図-5に示した。

非常に興味深いことに、両者はまとまった関係を示しており、使用した3種類すべての油についてWeber数が上がると、それに伴って無次元化した分散係数の値も上がっていることがわかる。このことから、油の表面張力が小さく、また流速が大きいほど油の分散は進行しやすいことがわかる。

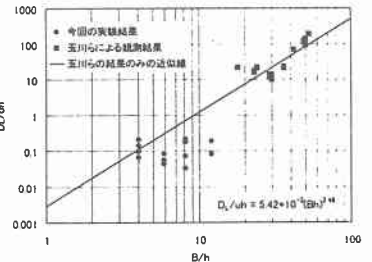


図-3 無次元分散係数と川幅水深比の関係

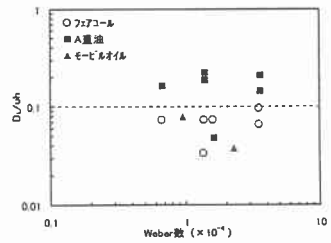


図-4 無次元化した分散係数とWeber数の関係

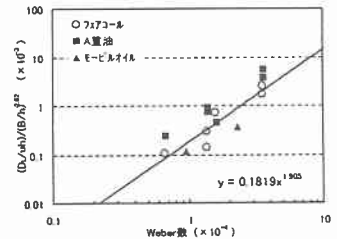


図-5 川幅水深比で無次元化した分散係数とWeber数の関係

7. まとめ

流水表面における油の占める面積割合を油の濃度と定義することにより、流水中における油の分散を測定した。水溶性物質を対象としたFickの濃度分布式を用いて表した濃度分布と、実測による濃度分布の形状は実測値の方が濃度下降期に尾を引くような形状で分散していることがわかった。

また、Fischerの分散係数の理論式と実測で求めた分散係数とを比較すると、理論式で求めた方が大きな値を示した。このことは実測値を用いて求める際の横拡散係数 e_y の与え方や、積分範囲の見直しなどの改良の余地が考えられる。

無次元分散係数と川幅水深比の関係については、川幅水深比の増加に対して、ほとんど変化しない結果を得た。このため、川幅水深比の影響を除去した分散係数とWeber数との関係を調べた。川幅水深比の影響を除去した無次元化分散係数はWeber数に対してよくまとまり、後者の増加に伴って増える傾向を示した。ただし、今回の実験ではWeber数のデータ範囲が小さいため、今後さらにデータの蓄積が必要である。

今回の実験は油の流出事故を想定し、分散範囲の推定を行なうことを目的として行なっている。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大きな影響を与えていることが見出された。より信頼性の高い分散係数推定式の定式化のためには、今後さらなる研究が必要とされる。

8. 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.
- 2) 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，PP.197～202，1991.2.
- 3) 井本稔：表面張力の理解のために，高分子刊行会，1993.
- 4) Fischer.H.B.:Transverse mixing in a sand-bed channel,U.S.Geol.Survey Prof.Paper,575-D,d267～d272,1967.
- 5) 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，PP.591～596，平成4年度.
- 6) 玉川尊・渡邊康玄・齋藤大作・佐藤耕治・甲斐達也：移流拡散を考慮した汚染物質の一次元予測手法，土木学会北海道支部論文集，p348～353，平成10年度
- 7) 齋藤大作・星清：移流拡散方程式の解析解(2)，北海道開発土木研究所
- 8) 甲斐達也・玉川尊・齋藤大作・渡邊康玄・岩上哲平：流水面上における油の分散に関する実験的研究，土木学会北海道支部論文集，P342～347，平成10年度
- 9) 甲斐達也・玉川尊・齋藤大作・渡邊康玄・岩上哲平・長谷川和義：油の分散に関する実験的研究，開発土木研究所月報，No.552，1999.5.
- 10) 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集，P342～347，平成10年度