

表面張力の影響を考慮した流水面上における油膜の分散係数

Dispersion coefficient of oil pollution on the flow with considering the effects of surface tension

北海道大学大学院 ○学生員 岩上 哲平 (Teppeï Iwagami)
 北海道大学大学院 正 員 長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)
 北海道開発局 正 員 玉川 尊 (Takashi Tamagawa)
 北海道開発局 正 員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)

1. はじめに

河川における油流出事故は、海洋での巨大タンカー座礁などの油流出事故に比べ、その流出量が圧倒的に少なく、水面に薄い油膜となって汚染域を下流へと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メディアやマスコミで取り上げられてこなかった。しかし、近年環境汚染の問題が非常に多く取り上げられ、水質汚濁などの調査が進められた結果、河川における油流出事故の件数が増え続けていることが明らかとなり、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。

河川において油流出事故が発生した際、流出した油の拡がり下流のどの位置まで達しているのかをいち早く知ることが最も重要になる。オイルフェンスを張る最適回収場所を決定しなければならないためである。海洋における油の拡がりに関する研究¹⁾²⁾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。これに対し、河川における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、昨年度までに行なった水路実験の結果³⁾をもとに、油膜分散のメカニズムを理論的に解析しようとするものである。

2. 油膜の分散実験の結果

実験は長さ50m、幅30cm、水路勾配1/1100の実験水路を用いて等流状態で行ない、上流と下流の2カ所にビデオカメラを設置して油膜の拡がりを調べた。実験で使った油はフェアコール、A重油、モービルオイルの3種類で流路の中央より瞬間投入した。また、1.4L/s、2.8L/s、4.0L/s、8.1L/sの4ケースの流量で行なった。使用した油の物性を表-1に

表-1 油の種類と物性

	表面張力	動粘性係数	密度	
	dyn/cm, 25℃	mm ² /s, 15℃	g/cm ³ , 15℃	g/cm ³ , 25℃
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

		Froude 数		Reynolds 数 (× 10 ⁻⁴)			Weber 数 (× 10 ⁻⁴)		
流量 (L/s)	水深 (cm)	流れ	流れ	フェアコール	A重油	モビルオイル	フェアコール	A重油	モビルオイル
1.4	2.5	0.39	4.8 × 10 ⁷	1.52	45.0	0.73	0.66	0.67	0.95
2.8	3.7	0.46	1.0 × 10 ⁸	2.17	64.3	—	1.35	1.38	—
4.0	5.1	0.42	1.5 × 10 ⁸	2.36	69.7	1.14	1.57	1.61	2.28
8.1	7.5	0.52	3.3 × 10 ⁸	3.50	103.5	—	3.49	3.58	—

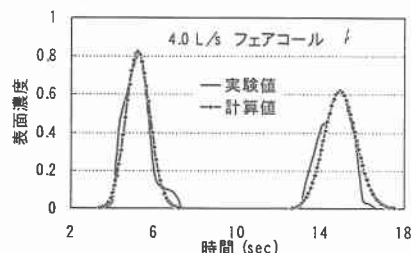


図-1 油の濃度の時系列変化

示す。A重油は表面張力・動粘性係数が他の2種類の油より小さいのに対し、フェアコールとモービルオイルは、表面張力はほぼ同じであるが、後者の方が動粘性係数大きいという特徴をもっている。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。

実験における分散係数を算出する場合、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、油表面濃度のピーク値から油の分散係数を算出する方法を用いた。上下の撮影断面で求められた油の表面濃度の時系列変化の一例を図-1に示した。図-1はフェアコールを13.0μL投入した場合で、左側の分布は上流側で測定した濃度分布であり、右側は下流側のものである。下流側(右側)の分布のほうが表面濃度のピーク値が小さく、横に広がっていることから分散が進行していることがわかる。図中に記述した計算値は、式(1)に示すFickの濃度分布式から求めたものである。

油は水溶性物質よりも表面張力が大きいため、投入した直後急激に拡がり、その後緩やかに分散が進行していく。このため、急激に拡がった後の分散現象について考えることとし、油投入の点源を上流側にずらすという仮想点源の方法をとった。

まず、仮想の油投入地点から上流撮影断面までの想定流下時間を $\tilde{t}_1$ とし、下流までの時間を $\tilde{t}_2$ とする。次に、上下流断面で得られたそれぞれの油膜濃度のピーク値 C_p を用いて式(2)に代入し、上流と下流の分散係数が一致するように式(3)から $\tilde{t}_1$ と $\tilde{t}_2$ を算出し、仮想点源を決定した。その後、再び式(2)を用いて分散係数 $\tilde{D}_L$ を求めた。

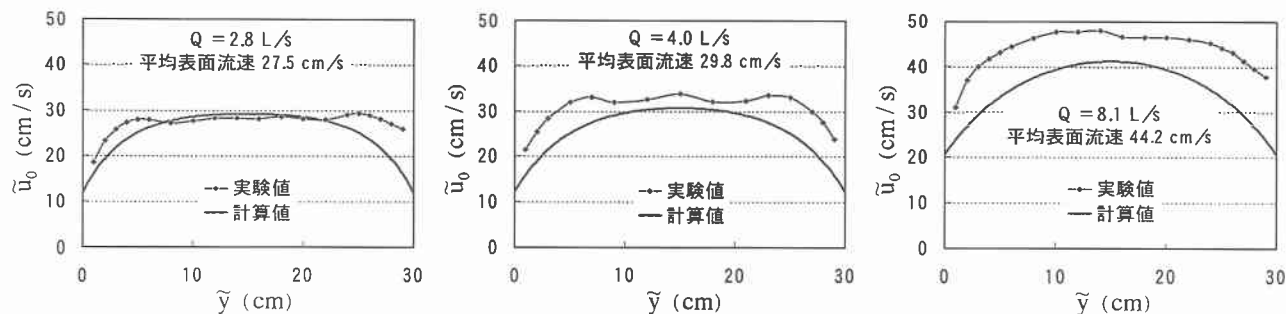


図-2 表面流速分布図

$$C_s(\tilde{x}, \tilde{t}) = \frac{\tilde{S}_0}{2\tilde{R}_0\sqrt{\pi\tilde{D}_L\tilde{t}}} \exp\left[-\frac{(\tilde{x}-\tilde{U}_0\tilde{t})^2}{4\tilde{D}_L\tilde{t}}\right] \quad (1)$$

$$\tilde{D}_L = \frac{1}{\pi\tilde{t}} \left(\frac{\tilde{S}_0}{2\tilde{R}_0 C_{P1}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{1}{\pi\tilde{t}_1} \left(\frac{\tilde{S}_0}{2\tilde{R}_0 C_{P1}} \right)^2 = \frac{1}{\pi\tilde{t}_2} \left(\frac{\tilde{S}_0}{2\tilde{R}_0 C_{P2}} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{t}$: 追加時間(s)、 $\tilde{t}_1$, $\tilde{t}_2$: 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、 $\tilde{S}_0$: 投入面積(cm^2)、 $\tilde{R}_0$: 油面直径(cm)、 $\tilde{x}$: 油投入位置からの距離(cm)、 $\tilde{D}_L$: 分散係数(cm^2/s)、 $\tilde{U}_0$: 平均表面流速(cm/s)である。

流下方向の表面流速を $\tilde{u}_0$ (cm/s)、水路幅の横断距離を左岸から $\tilde{y}$ (cm)として、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-2に示した。図中に記述した計算値は、式(8)から求めたものであり、計算方法については後述する。

各流量条件で計測された平均表面流速 $\tilde{U}_0$ は、図-2に示した通り、流量2.8L/sのケースで27.5cm/s、4.0L/sで29.8cm/s、8.1L/sでは44.2cm/sである。なお1.4L/sのケースについては、2次元電磁流測計での測定結果が十分に得られなかったため、図-2から省略した。1.4L/sのケースの平均表面流速については、上下撮影断面間を通過した油の平均流速19.2cm/sをこの流量の平均表面流速 $\tilde{U}_0$ として計算を行った。

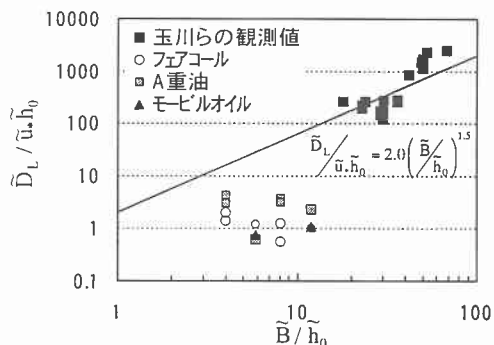


図-3 分散係数と川幅水深比の関係

次に、式(2)から得られた油実験の分散係数と、玉川ら⁴⁾により求められた実河川での溶解性物質の分散係数を比較し、図-3に示した。図-3は分散係数を摩擦速度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の関係を見たものである。図-3に示した近似線は、Iwasa & Aya⁶⁾によって提示された実験水路および河川から

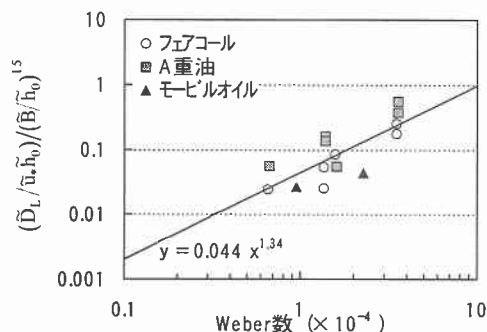


図-4 川幅水深比で無次元化した分散係数とWeber数の関係

求められた1次元分散係数を代表する経験式

$$\frac{\tilde{D}_L}{\tilde{u}_0 \tilde{h}_0} = 2.0 \left(\frac{\tilde{B}}{\tilde{h}_0} \right)^{1.5} \quad (4)$$

である。本実験における分散係数は式(4)よりやや小さめに現れており、また、川幅水深比 $\tilde{B}/\tilde{h}_0$ が変化しても無次元化分散係数 $\tilde{D}_L/\tilde{u}_0\tilde{h}_0$ がほとんど変わらない結果となっている。この違いが油類の表面張力の影響と考え、慣性力と表面張力との比であるWeber数と、無次元化分散係数 $\tilde{D}_L/\tilde{u}_0\tilde{h}_0$ を $(\tilde{B}/\tilde{h}_0)^{1.5}$ で除したものととの関係について調べ、結果を図-4に示した。ただし、Weber数の値は次の式(5)により求めた。

$$\text{Weber数} = \frac{\tilde{\rho}_0 \tilde{U}_0^2 \tilde{L}}{\tilde{\Gamma}} \quad (5)$$

ここで、 $\tilde{\rho}_0$: 油の密度(g/cm^3)、 $\tilde{U}_0$: 流れの平均表面流速(cm/s)、 $\tilde{L}$: 代表長さとして油膜の厚さ(cm)、 $\tilde{\Gamma}$: 油の表面張力(dyn/cm)である。

図-4で両者は非常によく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数が増えると、それに伴って無次元化した分散係数 $\tilde{D}_L/\tilde{u}_0\tilde{h}_0$ 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、また表面流速が大きいほど油膜の分散は進行しやすいことがわかった。

3. 理論解析

これらの実験結果をより理論的に説明するために、山坂ら⁷⁾による流れの解析方法を利用して計算を行った。山坂らは一様湾曲流路の流れの3次元解析を行なっているが、その中のゼロ次方程式は直線水路の鉛直・横断方向2次元流を扱ったものになっている。ここでは、彼らのゼロ次解の結果を補完して利用することにし、以下にその概要を述べる。

鉛直方向座標を $\tilde{z}$ 、横断方向座標を $\tilde{n}$ とし、後述の無次元化をおこなって表すと、基礎式は式(6)で表される。ただし、横断方向圧力を一定とみなし静水圧分布を仮定している。式(6)は線形の非同次偏微分方程式であるので、同次方程式の解と非同次方程式の解の和が式(6)の解となる。同次方程式と非同次方程式をそれぞれ解き、水面($z=1$)と底面($z=0$)における境界条件 $\partial u/\partial z=0$ 、 $u=\chi_b \partial u/\partial z$ を満足する解をそれぞれ求めることにより得られた流速分布を式(7)に示した。次に次元を元に戻し、水面($\tilde{z}=\tilde{h}_0$)の場合を考えると、表面流速の分布は式(8)で表される。

ここで、式(7)中の級数の係数 A_j は、側壁での境界条件 $u=\pm\chi_s \partial u/\partial n$ を任意の z において満足するように決定されるべきであるが、式が煩雑となるため山坂らは、 $k_j \tan k_j = 1/\chi_b$ を満たす固有値 k_j のうち、絶対値が最小のものを使い近似を行なっている。本研究の場合、このような近似を行なうと矛盾を生じるため、 $j=1\sim 3$ で固有値 k_j をそれぞれ求め、それらの固有関数の和として解を求めることにした。

$$\frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} + \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 u_0}{\partial n^2} = -\frac{R_{ce}}{Fr^2} i_0 \quad (6)$$

$$u_0(n, z) = \sum_j A_j \cosh(\beta k_j n) \cdot \cos k_j (1-z) - \frac{R_{ce}}{Fr^2} i_0 \left(\frac{1}{2} z^2 - z - \chi_b \right) \quad (7)$$

$$\tilde{u}_0(\tilde{n}, \tilde{h}_0) = \tilde{U}_0 \sum_j A_j \cosh(k_j \tilde{n} / \tilde{h}_0) + \tilde{U}_0 \frac{R_{ce}}{Fr^2} i_0 \left(\chi_b + \frac{1}{2} \right) \quad (8)$$

ここで、 $u_0 = \tilde{u}_0 / \tilde{U}_0$ 、 $n = \tilde{n} / (\tilde{B}/2)$ 、 $z = \tilde{z} / \tilde{h}_0$ 、 $\beta = (\tilde{B}/2) / \tilde{h}_0$ 、 $R_{ce} = \tilde{U}_0 \tilde{h}_0 / \tilde{\epsilon}$ 、 $Fr^2 = \tilde{U}_0^2 / (\tilde{g} \tilde{h}_0)$ 、 $\chi_b = 1/(15\sqrt{C_f}) - 1/3$ 、 $\chi_s = \chi_b / \beta$ 、 $k_j: k_j \tan k_j = 1/\chi_b$ を満たす固有値で、 $j=1\sim 3$ の範囲をとる。 $\tilde{u}_0$: 任意の点における流下方向流速(cm/s)、 $\tilde{U}_0$: 平均表面流速(cm/s)、 $\tilde{h}_0$: 水路水深(cm)、 i_0 : 流下方向の水面勾配、 $\tilde{B}$: 水路幅(cm)、 $\tilde{\epsilon}$: 渦動粘性係数、 $\tilde{g}$: 重力加速度である。上部に $\sim$ の付いた量は次元量を意味し、式(7)で表している無次元量と区別している。

式(8)によって表される表面流速分布を図-2に計算値として示した。2.8L/s、4.0L/sのケースの場合は、計算値と実験値がほぼ一致しているのに対し、8.1L/sのケースでは、実験値と比べ計算値の方が全体的に小さな値となっている。これは実験時の流量測定が不正確であったためと考えられる。よって式(8)で表される計算値は、実験での表面流速分布をほぼ再現できており、これを用いて分散係数を導くことにする。

分散係数の理論式を誘導するために、Fischer⁹⁾の理論を表面流速分布に当てはめた式(9)を使用する⁹⁾。このとき、流れの横拡散係数 $\tilde{\epsilon}_y$ は河床による鉛直拡散係数に比例しているものと考え、水深方向に平均化された式(10)を用いることとした。次に、式(8)から得られる表面流速の偏り $\tilde{U}_s$ を式(9)に代入し、分散係数 $\tilde{D}_L$ を摩擦速度 $\tilde{u}_*$ と水深 $\tilde{h}_0$ で除した結果を式(11)に示した。式(11)において、川幅水深比 $\tilde{B}/\tilde{h}_0$ を変化させることにより、溶解性物質の近似線と比較したものを図-5に示し、油実験での分散係数も併記した。このとき α は、 $\alpha = \kappa/6$ より $\alpha = 1/15$ とし、摩擦抵抗係数 C_f は実験における平均値である $C_f = 0.005$ を用いた。

$$\tilde{D}_L = -\frac{1}{\tilde{B}} \int_{-\tilde{B}/2}^{\tilde{B}/2} \tilde{U}_s dy \int_{-\tilde{B}/2}^y \frac{1}{\tilde{\epsilon}_y} dy_1 \int_{-\tilde{B}/2}^{y_1} \tilde{U}_s dy_2 \quad (9)$$

$$\tilde{\epsilon}_y = \alpha \tilde{u}_* \tilde{h}_0 \quad (10)$$

$$\frac{\tilde{D}_L}{\tilde{u}_* \tilde{h}_0} = -\frac{1}{2\alpha\beta C_f} \sum_j \frac{A_j^2}{k_j^3} \left[3 \sinh(\beta k_j) \cosh(\beta k_j) - \left(\frac{2\beta k_j}{3} + \frac{4}{\beta k_j} \right) \cdot \sinh^2(\beta k_j) + \beta k_j \right] \quad (11)$$

ここで、 $\tilde{U}_s$: 流下方向表面流速の平均表面流速からの偏り(cm/s)、 $\tilde{\epsilon}_y$: 流れの横拡散係数、 $\tilde{u}_*$: 摩擦速度(cm/s)、 $C_f = (\tilde{u}_* / \tilde{U}_0)^2$ である。

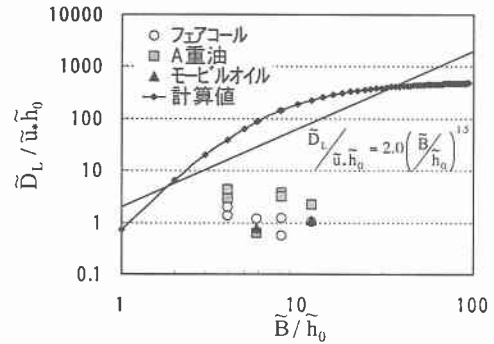


図-5 分散係数と川幅水深比の関係

図-5において計算値は、川幅水深比 $\tilde{B}/\tilde{h}_0$ が大きくなるにつれて急激に大きくなっており、 $\tilde{B}/\tilde{h}_0$ が2~30では近似線より大きくなっている。その後、 $\tilde{B}/\tilde{h}_0$ が20くらいからはほぼ横ばい状態を示す結果となった。河川では川幅水深比が10以上になると、交互砂州の影響が現れてくることが知られている。このため、流心が蛇行し表面流速が横断方向で左右対称とならず、式(9)では十分に表現できない流速分布が現れるものと考えられる。 $\tilde{B}/\tilde{h}_0 > 20$ において式(11)が経験式(4)から反れる傾向を示すのは、こうしたことが原因になっているものと考えられる。

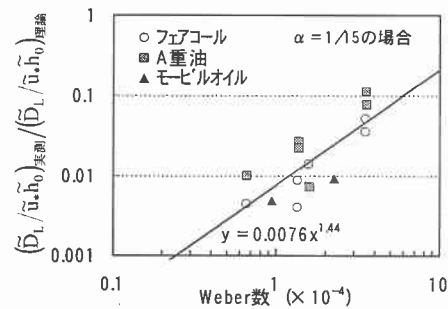


図-6 無次元分散係数とWeber数の関係($\alpha = 1/15$)

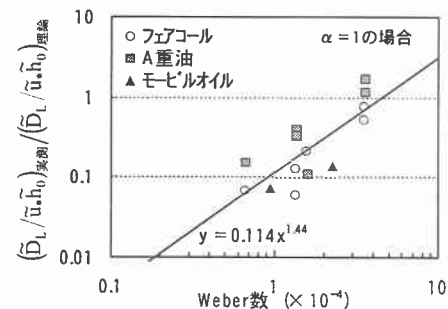


図-7 無次元分散係数とWeber数の関係($\alpha = 1$)

図-5における実験値を計算値で除したものとWeber数との関係について調べた結果を図-6に示す。図-6は式(11)中

の α が1/15のときのものであるが、両者はまとまった関係を示しており、Weber数は α によって表せることがわかる。

このため式(11)から α を除いた値によって実験値を除し、Weber数との関係を見ると図-7となる。図-7の近似式より式(12)が導き出される。この式を式(11)に代入することによって、実験から得られた分散係数の実測値に近い値を表現することができる。

$$\alpha = 8.77 \times (\text{Weber数})^{-1.44} \quad (12)$$

以後の便宜のために、油の移流分散係数推定により得られた成果をまとめて表示しておく。

これまでの我々の研究結果から、静水および様な流水状態における油膜の厚さ ξ は、

$$\xi = \sqrt{\frac{2(\tilde{T}_o + \tilde{T}_{ow} - \tilde{T}_w)}{(1-\sigma)\tilde{\rho}_o\tilde{g}}} \quad (13)$$

で表されることが分かっている¹⁰⁾¹¹⁾。 $\tilde{T}_o = \tilde{T}_{ow}$ とすれば式(13)は、

$$\xi = \sqrt{\frac{2(2\tilde{T}_o - \tilde{T}_w)}{(1-\sigma)\tilde{\rho}_o\tilde{g}}} \quad (14)$$

となる。ここで、 $\tilde{T}_o$:水面上での油の表面張力、 $\tilde{T}_{ow}$:水中での油の表面張力、 $\tilde{T}_w$:水の表面張力、 $\sigma = \tilde{\rho}_o/\tilde{\rho}_w$ 、 $\tilde{\rho}_w$:水の密度である。

式(14)を式(5)に代入してWeber数を求めると、

$$\text{Weber数} = \frac{\tilde{U}_o^2}{\tilde{T}_o} \sqrt{\frac{2\tilde{\rho}_o(2\tilde{T}_o - \tilde{T}_w)}{(1-\sigma)\tilde{g}}} \quad (15)$$

が得られる。したがって、式(11)に式(12)と式(15)を代入すると、分散係数は

$$\frac{\bar{D}_L}{\bar{u}_h \bar{h}_0} = -\frac{1}{17.5\beta C_f} \left[\frac{\tilde{U}_o^2}{\tilde{T}_o} \sqrt{\frac{2\tilde{\rho}_o(2\tilde{T}_o - \tilde{T}_w)}{(1-\sigma)\tilde{g}}} \right]^{1.44} \sum_j \frac{A_j^2}{k_j^3} \times \left[3\sinh(\beta k_j) \cosh(\beta k_j) - \left(\frac{2\beta k_j}{3} + \frac{4}{\beta k_j} \right) \cdot \sinh^2(\beta k_j) + \beta k_j \right] \quad (16)$$

で表される。ただし、

$$\beta = (\bar{B}/2)/\bar{h}_0$$

$$C_f = (\bar{u}_h/\tilde{U}_o)^2$$

$$\chi_b = 1/(15\sqrt{C_f}) - 1/3$$

$$k_j \tan k_j = 1/\chi_b$$

$$A_j = \frac{-K_j}{\chi_b + 1/3 - \sum K_j \sin k_j/k_j}$$

$$K_j = \frac{2\sin k_j}{k_j^2 (\sin k_j \cos k_j + k_j) \{ \cosh(\beta k_j) + \chi_b \beta k_j \sinh(\beta k_j) \}}$$

であり、適用範囲は $1 < \beta < 15$ である。

4. まとめ

昨年度までに行なった油の実験によって得られた油濃度の時系列変化から分散係数を求めると、Weber数と分散係数の間に非常にまとまった関係が成り立っていることがわかった。

今回はこの実験結果をより理論的に示そうとしたものであるが、式(6)の非同次偏微分方程式を解くことにより、式

(8)のような表面流速分布式を導き出すことができた。この表面流速分布式を実験値と比較した結果、8.1L/sのケースでずれが生じたものの、他の2ケースではほぼ再現することができた。

また、式(9)で表されるFischerの分散係数の理論式に表面流速分布の式(8)を代入し、式(10)のように横拡散係数 $\tilde{\epsilon}_y$ を α の式で表すことで分散係数の式を理論的に導くことができた。導き出した式(11)は、Iwasa & Ayaによって提示された経験式(4)より川幅水深比1~10間で急勾配を示している。しかし、図-6、図-7で実測値と理論値の比をとり、Weber数との関係を調べるとよくまとまっていることがわかった。

さらに、図-7の近似式を用いて α を式(12)で表せることから、これを分散係数の理論式(11)に代入することにより、実測の分散係数に近い値を表現することができた。しかしながら、図-5において川幅水深比 $\bar{B}/\bar{h}_0$ が20のあたりから、計算値がほぼ横ばい状態になってしまっている。これは交互砂州の影響と考えられ、今後はこの影響を考慮した式の構築が必要であるといえる。

5. 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.569-575, 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) 岩上哲平・長谷川和義・玉川尊・渡邊康玄・神尾健太郎:流水面上における油膜の分散に対する表面張力の影響, 土木学会北海道支部論文集, pp.190-195, 平成11年度
- 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, pp.591-596, 平成4年度
- 5) 玉川尊・渡邊康玄・斎藤大作・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, pp.348~353, 平成10年度
- 6) Iwasa, Y. and Aya, S.: Predicting longitudinal dispersion coefficient in open channel flows, Environmental Hydraulics (ed. Lee and Cheum, Balkema), pp.505-510, 1991.
- 7) 山坂昌成・池田駿介・酒寄建之:一様湾曲流路の流れの三次元解析, 土木学会論文集 第411号, pp.99-108, 1989年11月
- 8) Fischer, H.B.: Transverse mixing in a sand-bed channel, U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 575-D, d267-d272, 1967.
- 9) 斎藤大作・星清:移流拡散方程式の解析解(2), 北海道開発土木研究所
- 10) 岩上哲平・長谷川和義・玉川尊・甲斐達也・斎藤大作:静水面上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, 平成10年度
- 11) 井本稔:表面張力の理解のために, 高分子刊行会, 1993.