

京都大学 防災研究所 正会員 江頭進治
 京都大学 防災研究所 正会員 茅田和男

1. まえがき 水温成層化した貯水池や塩水楔が形成されている河口部において、種々の水質現象を解析する場合、流速分布と同様、渦動拡散係数の推定が重要な課題になる。安定な密度成層場における拡散係数については、経験的方法¹⁾、半経験的方法^{2), 3), 5)}や流体力学的方法^{3), 6)}に基づいた多くの研究がある。いずれの研究においても、密度こう配による安定効果が拡散係数に対してどのような影響を及ぼすかを評価しようとしたものである。これらの研究によって、渦動粘性係数よりも拡散係数の方が密度成層の影響もより強く受けることなど、定性的にはかなり明らかにされている。しかし、これらの推定式間においてそれぞれに式の特異性が異なっており、拡散係数の量的推定においては、いまだ多くの問題が残されている。これは、おのれの推定式が異なった流れを対象として求められていることに主因があるものと思われる。著者は、これまでに上層および中層密度流の流速・水温分布および界面の抵抗係数に関する研究を進めたが、本報においては、このような密度成層せん断流における拡散係数の分布について考察する。

2. 渦動拡散係数の推定理論 流速分布の場合と同様、質量に関する混合距離を $l_p = l_{op} + K_p z$ (l_{op} : 界面における混合距離) のように仮定し、constant flux layer⁷⁾の条件下で水温および密度分布則が導かれたが、このような混合距離を用いると質量に関する拡散係数の鉛直成分 ϵ_p が、上層流に対して次式のように表示される。

$$\epsilon_p(z) = (l_{op} + K_p z) u_* \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 K_p : 質量の混合距離に関するカルマン定数、 u_* : 界面の摩擦速度、 z : 界面より鉛直上向き座標である。上式は、 l_{op} , K_p および u_* によって拡散係数の分布形が定まることを意味するものである。 l_{op} および K_p に関しては先の研究⁸⁾により、それぞれ次式が導かれている。

$$l_{op} = \beta_p d_1 = r_p (U_1/u_*)^3 d_1, \quad (r_p \approx 1.0) \dots \dots \dots (2)$$

$$K_p = K F_i^2 \frac{U_1}{u_*} \left(\frac{\beta_p + K_p l_{op}}{K_p} \frac{\beta_p + K_p}{\beta_p} - 1 \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 β_p : 界面の無次元混合距離 $\beta_p = r_p (U_1/u_*)^3$ 、 d_1 : 上層水深、 K : 進行率を定めた係数 $K = 0.0015$ 、 U_1 : 平均流速、 F_i : 内部フルード数である。流速係数 U_1/u_* は、界面抵抗係数 f_i を用いると $U_1/u_* = \sqrt{2f_i}$ であって、 f_i に著者の式⁸⁾を用いるとつぎのように書ける。

$$U_1/u_* = [2 / \{ A/R_e + 0.00207 F_i^2 + 0.0015 (H-d_1)/H \}]^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 H : 全水深、 R_e : レイノルズ数、 A : 定数である。図-1には、(3) および (4) 式を用い、 $A=15$ 、 $(H-d_1)/H=0.5$ として推定されるカルマン定数比 K_p/K_{pN} が示されている。ここに、 K_{pN} は中立安定状態のカルマン定数 $K_{pN} = 0.4$ である。つぎに、(1) および (2) 式を用い、さらに単位幅流量 $Q (= U_1 d_1)$ を用いて $\epsilon_p(z)$ を無次元表示すると次式が導かれる。

$$\epsilon_p(z)/Q = \{ r_p (U_1/u_*)^3 + K_p z/d_1 \} (U_1/u_*)^{-1} \dots \dots \dots (5)$$

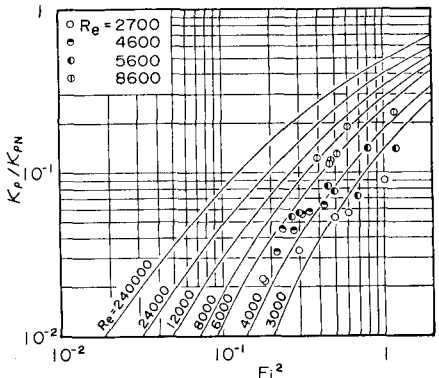


図-1. 質量の混合距離に関するカルマン定数 (熱量に関するカルマン定数を K_H とすると) $K_p = K_H$ とする。

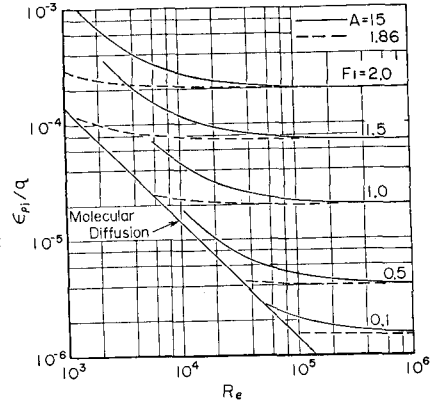


図-2. 密度境界面における渦動拡散係数

上式は水温境界層が十分発達した領域の分布則であるが、密度成層流においては乱流プラントル数が大きく、落下距離が短い場合は主流域全体が水温境界層に覆われることは希である。(5)式によると水温一様層における拡散係数は小さく推定されるため、この場合は、 K_p の代わりに運動量の混合距離に関するカルマン数 K を用いた次式によって推定する方がよいであろう。

$$\epsilon_p(z)/\rho = \left\{ \epsilon_p(U_1/U_*^3) + Kz/d_f \right\} (U_1/U_*)^{-1} \quad (5')$$

ここに、 $K = 2/\{1 + \sqrt{1 + 2K(U_1/U_*^3)}\}$ 、 $K_w = 0.4$ である。(5)あるいは(5)'式で $z=0$ とおくと界面の拡散係数 $\epsilon_{pi}/\rho = \epsilon_p(U_1/U_*^3)$ が得られるが、これに(4)式を適用して求められる ϵ_{pi}/ρ と Re および Fr_2 との関係が図2に示されている。なお、熱に関する拡散係数についても同様に導くことができる。結果は質量に関するものと同じである。

3. 推定理論と実験値との比較 実験値はトレーサー法によって得られたものである。図3(a)(b)には、拡散係数の測定点とそれぞれ水温境界層内および一様層にあると思われるものについて、実験値と(5)および(5)'式とが比較されている。同図には、水温および流速分布に関する測定値と計算値も示されている。これらの図より、(5)および(5)'式の妥当性が伺える。図4(a)(b)は、上層流の実験より得られた全てのデータと(5)および(5)'式とを比較したものである。

これらの式は、中層流でも簡単に拡張できる。図5(a)(b)には、中層流の実験より得られたデータと計算値とが比較されている。これらの図の結果より明らかなように、(5)および(5)'式を用いて密度成層流における渦動拡散係数の推定が可能であることが推察される。

4. あとがき 渦動拡散係数の鉛直成分に関する一種推定法について略述し、この方法による計算値と実験値との比較を行った。その断端であるにもかかわらず、実験値は、一様等式の条件を用いて得られたものであり、また、推定法にも若干の尚類があるように思われる。しかし、以上の結果から考え、この方法によって、拡散係数の実用的な推定はできるものと思われる。

* 妥当な言葉かどうかはわからないが、ここでは、有意味な水温こう配が存在する流動層の意味に使用している。

参考文献

1) Munk-Anderson (Jour. Marine Res., Vol. 7, 1948, pp. 276~295); 2) Webb (Quar. Jour. Roy. Met. Soc., Vol. 16, 1970, pp. 67~90); 3) Oke (Jour. Applied Met., Vol. 9, 1970, pp. 778~786); 4) McWhill (Quar. Jour. Roy. Met. Soc., Vol. 90, 1964, pp. 136~146); 5) Ellison (Jour. Fluid Mech., Vol. 2, 1957, pp. 456~466); 6) Launder (Jour. Fluid Mech., Vol. 67, 1975, pp. 569~581); 7) Egaehira-Ashida (Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 29, 1980, pp. 165~178); 8) 江頭・芦田 (京大防災研究所年報, 22号B-2, 1979, pp. 355~381)

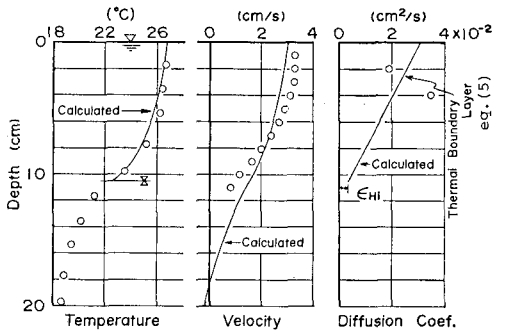


図3(a) 水温・流速・拡散係数の分布

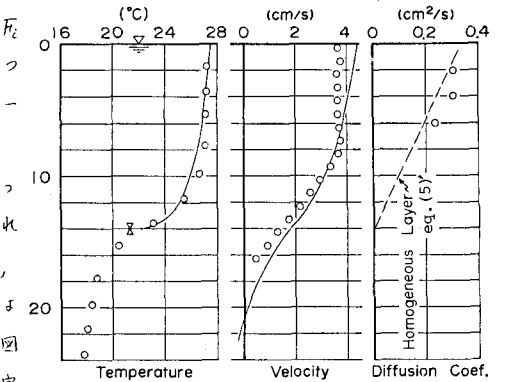


図3(b) 水温・流速・拡散係数の分布

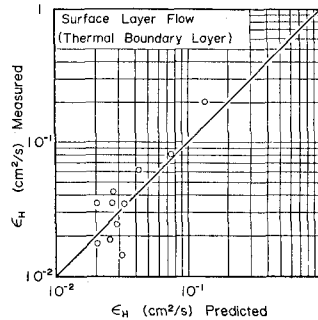


図4(a) 上層流(水温境界層)

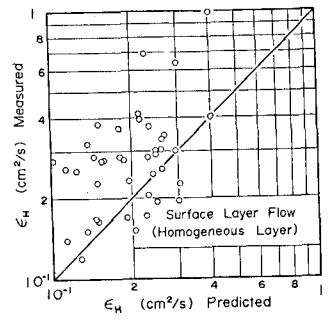


図4(b) 上層流(水温一様層)

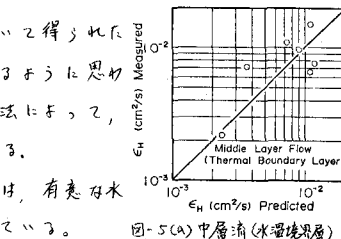


図5(a) 中層流(水温境界層)

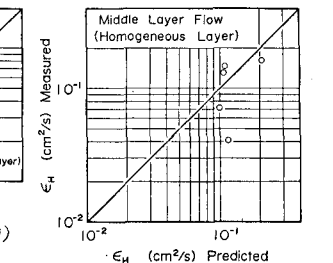


図5(b) 中層流(水温一様層)