

成層剪断流中の熱—塩拡散特性について

Diffusion Characteristics of Heat and Salt
in Two-Layered Shear Flows

仲敷憲和*・水島雅文**

By Norikazu NAKASHIKI and Masafumi MIZUTORI

Mixing processes in shear flows with temperature and salinity stratifications depend on the composite effect of double diffusion and turbulence. Diffusion characteristics in such flows are studied both experimentally and numerically. Experiments are carried out on two types of double diffusive flows (diffusive and finger types). In each type of diffusion, the eddy viscosity and eddy diffusivities of heat and salt are estimated in relation with the Richardson number. A two-dimensional numerical model is applied to simulate the double diffusive shear flows. The performance of the model is evaluated by the comparison of numerical results and measurements.

Keywords: stratified shear flow, double diffusion, eddy viscosity, eddy diffusivity

1. まえがき

我が国において、発電所の多くは臨海地域に建設されている。大河川が流入している海域や内湾などでは、河川水の流入や大気との熱交換作用などの影響により、水温や塩分による成層が形成され、水平方向や鉛直方向に非一様な密度場を呈していることがある。このような海域に放出された温排水は、海域の密度構造の影響を受け、その拡散挙動は、密度分布が一様な海域に放出された場合とは異なる様相を示すことが知られている。水島ら¹⁾は、河川水が流入している代表的な2つの海域について、その現地測定を行ない温排水の拡散特性を明らかにした。

このような密度分布が一様でない海域における温排水の拡散は、3次元的な挙動を示しており、拡散特性を評価するためには、その鉛直方向の混合特性を把握することが重要である。低温、低塩分の河川水と、高温、高塩分の温排水が混合する場合には、熱と塩分という分子拡散係数が約100倍程度異なる2種類の物質が拡散するために、内部境界面では「二重拡散」と呼ばれる複雑な混合過程を示すことが予想される。したがって、温排水の拡散予測を行なうためには、熱—塩密度境界面における拡散係数等の混合特性を明らかにする事が重要となってくる。

* 正会員 電力中央研究所 水理部 環境水理研究室 研究室 担当研究員
(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工博 電力中央研究所 水理部 環境水理研究室 研究室 主査研究員

本研究では、水島らの実測結果に基づいて、温排水（高温、高塩分）が河川水（低温、低塩分）の上に拡がる場合、温排水が河川水の下に拡がる場合の2つのケースについて、実験を行なった。いずれのケースにおいても、密度分布は安定である。まず、上述の2つの実験ケースについて、可視化実験を行ない、内部境界面での混合状態を検討するとともに、二重拡散の影響を明らかにした。次に、流速、水温、塩分の同時測定を行ない、熱-塩境界面における渦動粘性係数、渦動拡散係数について定量的な評価を行なった。

さらに、2次元数値モデルを用いて計算を行ない、流速、水温、塩分の分布を実験結果と比較することにより、内部境界面での渦動粘性係数、渦動拡散係数の評価やモデルの妥当性について検討を行なった。

2. 実験の概要

2-1. 実験装置及び実験条件

図-1に、実験に使用した実験装置の概略を示す。実験水路は、長さ20m、幅1.8m、深さ1mのステンレス製であり、可視化のため片面はガラス製である。本実験では、2次元的な混合特性を検討するために、ガラス面側に仕切りを作り、幅11.6cmの水路として使用した。放水口は上下2層とし、実験条件に応じて上層が温排水の場合、上層が河川水の場合について、検討が行えるようになっている。また、測定区間以外の水路を十分に広く設定し、排水の影響がおよばない遠方から、放水量と同量の排水を行なった。測定時間、測定区間内では、水温、塩分の鉛直分布は、ほぼ一定に保たれており、現象は準定常と見なすことができる。座標系としては、導流板先端より、流下方向をx軸、鉛直下向きをz軸とした。

可視化実験では、下層水にフローレスセンを混入しておき、レーザーライトシートを用いて内部境界面の可視化を行なった。

流速の測定には、2成分レーザー流速計（FLV（Fiberoptic Laser Velocimeter））を用いた。一般に、密度流の測定においてレーザー流速計を使用する場合には、密度境界面近傍では、密度差によるレーザー光線の屈折のための誤差が考えられるが、本研究では、焦点距離の短い（50mm）FLVを使用することによって、屈折による誤差の影響が小さくなるようにした。水温、塩分の測定には、それぞれサーミスタ、導電率

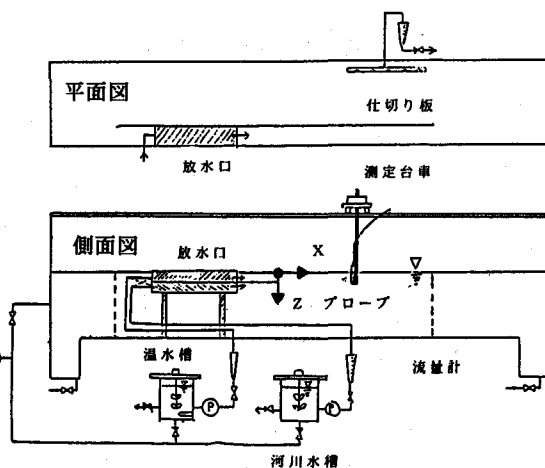
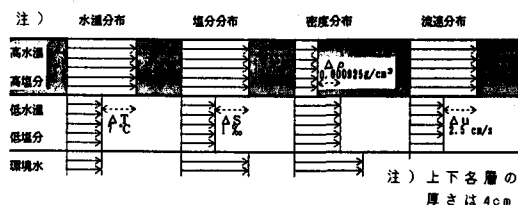


図-1 実験水路の概略

パターン1



パターン2

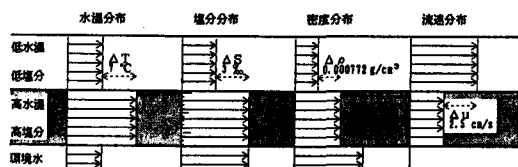


図-2 各パターンにおける水温、塩分分布

表-1 実験条件

ケース	パターン	流体-1 (上層)			流体-2 (下層)			密度差 (g/cm³)	測定断面 (cm)
		水温 (°C)	塩分 (‰)	流速 (cm/s)	水温 (°C)	塩分 (‰)	流速 (cm/s)		
1	1	28.3	10.2	2.5	21.4	6.7	5.0	0.00083	100
2		28.3	10.2	2.5	21.3	6.7	5.0	0.00097	50
3		28.4	10.2	5.0	18.8	6.7	2.5	0.001021	20
4		30.4	10.2	5.0	24.0	6.7	2.5	0.000890	20, 50
5	2	21.4	6.7	5.0	28.3	10.2	2.5	0.000777	100
6		18.0	6.7	5.0	28.3	10.2	2.5	0.000776	50
7		24.4	6.7	5.0	30.7	10.2	2.5	0.000768	20
8		24.4	6.7	5.0	30.7	10.2	2.5	0.000768	50

注) は温排水に相当する放水、なお環境水（最下層）の塩分は10.2‰、水温は、河川水と同じである。

計を用いた。測定したデータは、サンプリング周波数200Hz で8,192 個収録した後、大型計算機を用いて統計解析を行なった。

2-2.実験条件

水鳥らの実測結果に基づいて、代表的な2つの拡散パターンについて実験を行なった。図-2に、モデル化した各パターンの流速、水温、塩分の分布を示す。表-1に、実験条件を示す。

2-3.内部境界面における混合特性

図-3、4に、パターン1、2における内部境界面での混合に関する可視化結果を示す。パターン1と2では、内部境界面での混合状態が異なっており、パターン1はパターン2より境界面での密度差が大きく安定であるにも係わらず、境界面での混合は大きい事が分かる。パターン2における内部境界面での混合は、主として上下層間の流速差に起因するKelvin-Helmholtz波の碎波によって引き起こされる。これに対して、パターン1における内部境界面では、熱と塩分による二重拡散現象が生じていることが分かる。熱の分子拡散係数 k_T ($\approx 1.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$) は、塩分の分子拡散係数 k_s ($\approx 1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$) より約

100倍大きいため、内部境界面では"Salt-Finger"と呼ばれる不安定現象が発生して(例えばTurner²⁾、寺本³⁾)、境界面での混合は大きくなる。Turnerは、平均流のない対流効果のみによる場合について、安定解析を行ない、"Salt-Finger"の生じる条件を示している。熱に関するRayleigh数を R_{aT} 、塩分に関するRayleigh数を R_{as} とすれば、十分大きな R_{aT} 、 R_{as} に対して"Salt-Finger"の生じる条件は以下の通りである。

$$R_{aT}, R_{as} < 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\alpha \Delta T}{\beta \Delta S} < \frac{k_T}{k_s} \quad - (1)$$

$$R_{aT} = \frac{g \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot d^3}{k_T \cdot \nu} \approx -7.0 \times 10^6 (\text{パターン1}), 7.8 \times 10^6 (\text{パターン2}) \quad - (2)$$

$$R_{as} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta S \cdot d^3}{k_s \cdot \nu} \approx -3.1 \times 10^6 (\text{パターン1}), 9.3 \times 10^6 (\text{パターン2}) \quad - (3)$$

ここに、 T は水温、 s は塩分、 g ($=980 \text{cm/s}^2$) は重力加速度、 ν ($\approx 0.01 \text{cm}^2/\text{s}$) は動粘性係数、 d は層水深である。また、 α ($\approx 2.4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) および β ($\approx 7.5 \times 10^{-4} \text{ } \text{‰}^{-1}$) は、それぞれ熱膨張係数、塩分収縮係数であり、密度を以下に示す様に、水温、塩分の一次式として近似した時の比例定数である。

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha \cdot T + \beta \cdot S) \quad - (4)$$

本実験では、内部境界面では上述の熱塩拡散と同時に剪断力も作用しているが、基本的な熱塩拡散特性は R_{aT} 、 R_{as} によって表わされたと考えると、パターン1では、内部境界面に"Salt-Finger"が発生し、パターン2では、内部境界面は安定であることが分かる。

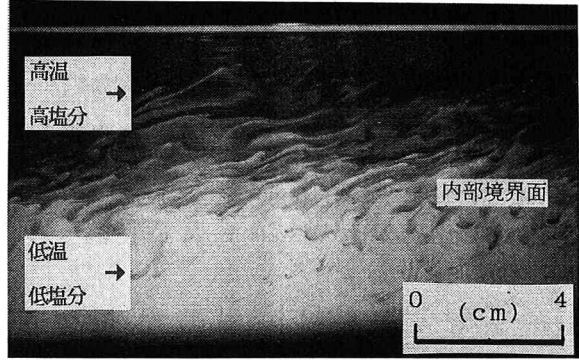


図-3 界面における混合過程 (パターン1)

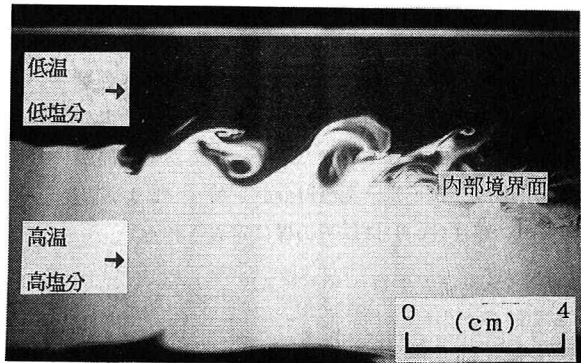


図-4 界面における混合過程 (パターン2)

2-4. 渦動粘性係数及び渦動拡散係数の評価

内部境界面における混合特性を定量的に評価するために、流速、水温、塩分の同時測定結果より、渦動粘性係数 ϵ_m 、熱および塩分の拡散係数 ϵ_T 、 ϵ_s について検討を行なった。内部境界面における混合は、熱-塩拡散と乱流混合との複合作用と考えられるが、本研究では、これらの2つの作用を併せて、 ϵ_m 、 ϵ_T 、 ϵ_s を以下の様に定義した。

$$\text{渦動粘性係数} \quad -\overline{u'w'} = \epsilon_m \frac{\partial u}{\partial z} \quad - (5)$$

$$\text{渦動拡散係数 (熱)} \quad -\overline{T'w'} = \epsilon_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad - (6)$$

$$\text{(塩分)} \quad -\overline{s'w'} = \epsilon_s \frac{\partial s}{\partial z} \quad - (7)$$

ここに、 $-$ は時間平均を、 $'$ は時間平均からの変動量を示す。また、流動に及ぼす密度の効果や、熱、塩分の拡散特性を表す基本的なパラメータである、局所 Richardson 数 (Ri)、乱流 Prandtl 数 (Pr)、乱流 Schmit 数 (Sc) は以下の様に定義される。

$$\text{局所リチャードソン数} \quad Ri = -g \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) / \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad - (8)$$

$$\text{乱流プラントル数} \quad Pr = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_T} \quad - (9)$$

$$\text{乱流シュミット数} \quad Sc = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_s} \quad - (10)$$

ただし、密度の計算にはクヌーツセンの式を用いた。

内部境界面での混合特性を規定する代表的な量としては、混合層の厚さ D 、および混合層の上下における流速差 U が考えられる。また、内部境界面では、熱や塩分の拡散は密度成層の影響により抑制されるため、Rodi⁽⁴⁾等が示しているように、渦動粘性係数や渦動拡散係数は Ri の関数となることが考えられる。図-5、6に、混合層および流速差を用いて無次元化した混合層内での渦動粘性係数を示す。測定値は若干ばらついているが、渦動粘性係数は、 Ri のべき乗で表わされる。パターン2では、乱れは主として K-H波によって引き起こされているが、パターン1では、乱れは K-H波による乱れに、更に二重拡散による乱れが複合した物であり、渦動粘性係数はパターン1の方が大きい。

$$\frac{\epsilon_m}{U \cdot D} = 0.01 (1 + 10 \cdot Ri)^{-1} \quad (\text{パターン1}) \quad - (11)$$

$$\frac{\epsilon_m}{U \cdot D} = 0.01 (1 + 25 \cdot Ri)^{-1} \quad (\text{パターン2}) \quad - (12)$$

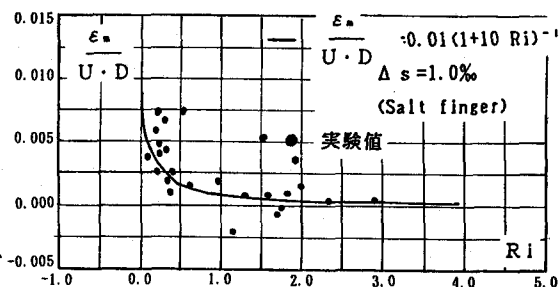


図-5 渦動粘性係数 vs. Ri (パターン1)

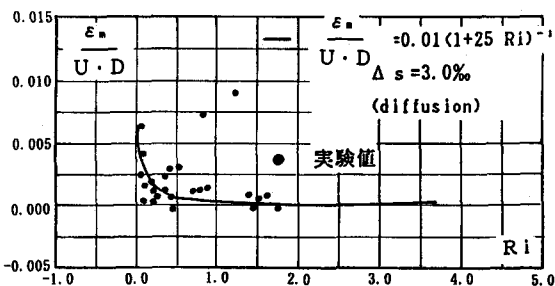


図-6 渦動粘性係数 vs. Ri (パターン2)

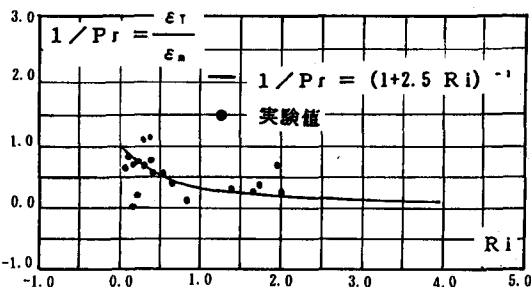


図-7 $1/Pr$ vs. Ri

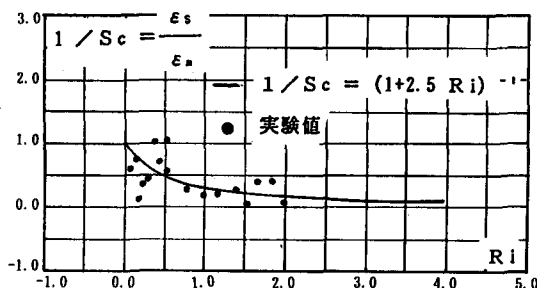


図-8 $1/Sc$ vs. Ri

次に、熱や塩分の渦動拡散係数と渦動粘性係数の比であるPr やSc について考えてみる。牛島ら⁵⁾が示している様に、内部境界面での密度差が大きくなるにつれて、熱や塩分等のスカラー量は、運動量の拡散に比べて強く抑制されることが考えられ、したがってPr やSc は、Ri の関数で表わされることが予想される。熱や塩分の渦動拡散係数の値は、渦動粘性係数と同様に、パターン2よりも、K-H波による乱れに更に二重拡散現象が複合しているパターン1の方が大きい。また、Ri との関係は、パターン1、2ともに渦動粘性係数と同様の傾向を示しており、渦動拡散係数と渦動粘性係数の比であるPr、Sc に関しては、パターン1と2の間に大きな差異は見られなかった。図-7、8に、Pr、Sc とRi の関係を示す。

$$\frac{1}{Pr} = (1 + 2.5 \cdot Ri)^{-1} \quad \frac{1}{Sc} = (1 + 2.5 \cdot Ri)^{-1} \quad - (13)$$

3. 数値モデル

3-1. 数値モデルの概要

渦動粘性係数、熱や塩分の渦動拡散係数の定式化の妥当性を検討するために、本実験の条件である熱及び塩分成層がある剪断流について、数値計算を行なった。計算に用いたモデルは、鉛直2次元の平均流モデルであり、各基礎方程式は以下のように示される。

・連続式
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad - (14)$$

・運動方程式
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \epsilon_m h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_m v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad - (15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \epsilon_m h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \epsilon_m v \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad - (16)$$

・熱量保存式
$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = k_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \epsilon_T h \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \epsilon_T v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad - (17)$$

・塩分保存式
$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + w \frac{\partial s}{\partial z} = k_s \left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} \right) + \epsilon_s h \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \epsilon_s v \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} \quad - (18)$$

・密度式
$$\rho(T, s) \quad (\text{クヌーツセン式を使用}) \quad - (19)$$

ここに、添字h、vは、水平成分、鉛直成分を示す。図-9に、計算領域および各境界における境界条件を示す。計算格子間隔は、水平方向には、放出口近傍で5cm、流下方向に漸増させ最大34cm、鉛直方向には、水深12.5cmまでは5mm、それ以深は漸増させて底面では6cmの不等間隔メッシュを用いた。また、水平方向の渦動粘性係数、渦動拡散係数は、全計算領域で一定(=10cm²/s)とした。鉛直方向の渦動粘性係数、渦動拡散係数については、実験より

求めた式(11)、(12)、(13)を用いて算定した。計算にあたっては、混合層厚さDおよび流速差Uを求める必要があるが、本計算では、各時間ステップにおいて、温度(または塩分)勾配が、最大値の20%以上になる区間を混合層と定義し、各時間ステップ毎に、D、U、渦動粘性係数、渦動拡散係数を計算した。

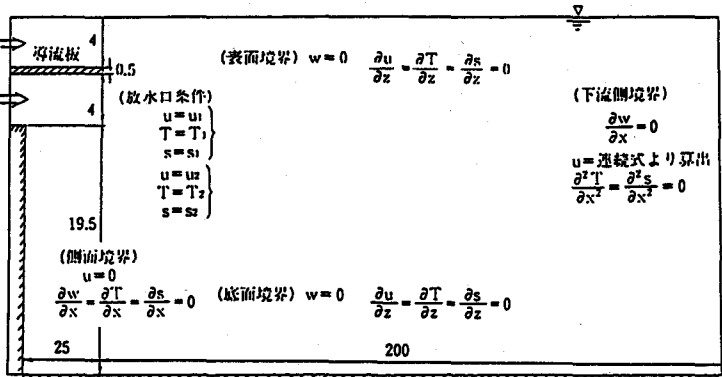


図-9 計算領域と境界条件

3-2. 計算結果と実験結果の比較

代表的な実験ケースとして、パ

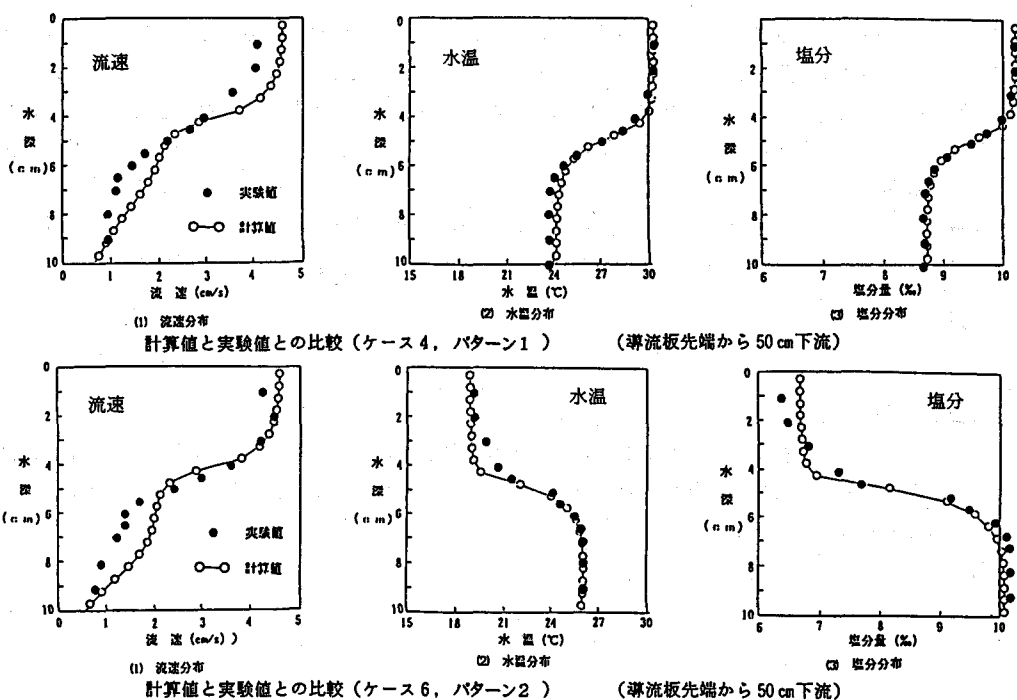


図-10 計算結果と実測結果の比較（流速、水温、塩分）

ターン1についてはケース4、パターン2についてはケース6について、数値シミュレーションを行なった。図-10に、測定した流速、水温、塩分の鉛直分布および計算結果を示す。水温や塩分の鉛直分布に関しては、実験結果と計算値は非常によく一致している。流速分布に関しては、水深5～9cmの間において、分布型が少し異なっているが、これは、導流板先端部の楔型の形状が、数値計算上十分に表わされていないために生じるものとおもわれる。以上、実験結果と計算値は概ね一致しており、本研究で得られた渦動粘性係数、渦動拡散係数の評価式は、妥当なものと思われる。

4. おわりに

水温、塩分成層がある海域での温排水の拡散を評価するために、内部境界面における拡散特性について検討を行なった。内部境界面での混合は、熱-塩二重拡散と乱れや剪断による拡散との複合過程であり、二重拡散の影響が強い場合（パターン1）には、境界面での混合は大きくなる。水温、塩分成層を伴う剪断流での、渦動粘性係数、渦動拡散係数は、 Ri の関数で表わされ、式(11)、(12)、(13)を用いて評価することができる。これらの式を、2次元モデルに適用して計算を行ない、実験結果との比較により妥当性を確認した。

今後は、これらの結果に基づいて、水温、塩分成層がある海域での温排水の拡散予測手法について検討を行なう予定である。

<参考文献>

1. 水島雅文, 片野尚明(1988): 密度成層場における温排水の拡散過程, 第32回水理講演会論文集, pp239-244
2. Turner, J.S.(1973): Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press
3. 寺本俊彦 編(1974): 海洋物理学, 東京大学出版会
4. Rodi, W.(1980): Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of The Art Review, IAHR
5. 牛島省, 守屋祥一(1988): 2方程式乱流モデルの成層流への適用性, 電力中央研究所報告, U8707