

水平方向に放出された重力噴流の拡散挙動について

Diffusion Behavior of a Forced Plume Discharged in the Horizontal Direction

* * * **
仲敷憲和 ・ 松梨史郎 ・ 坂井伸一 ・ 丸山康樹
By Norikazu NAKASHIKI, Shiro MATSUNASHI,
Sin-ichi SAKAI and Kohki MARUYAMA

The diffusion behavior of a forced plume discharged in the horizontal direction was investigated both experimentally and numerically. Velocity and temperature fluctuations in the plume were measured by FLV and thermocouple, respectively. The diffusion behavior was primary classified into two types, based on the effect of the bottom. In each case, a three-dimensional turbulent closure model ($k-\epsilon$ model) was applied to quantitatively simulate the behavior of the forced plume. The performance of the three-dimensional model was evaluated by the comparison of the numerical results with experimental measurements.

Keywords: forced plume, turbulent mixing, hydraulic experiment, $k-\epsilon$ model

1. まえがき

発電所から放出される温排水は、表層放流方式や水中放流方式によって周囲海域に放出される。一般に、水中放流方式によって放流された温排水は、重力噴流として混合・希釈されながら海表面へと到達する。水平方向に放出された温排水は、放出口近傍では、放出口での初期の運動量が支配的であり、噴流として混合・希釈される。温排水は、流下するにつれて運動量の効果は小さくなり、浮力の効果により浮上し海表面に到達する。放出口近傍の噴流の挙動は複雑であり、水中放流された温排水の数値シミュレーションを行うためには、このような重力噴流の希釈・混合過程を把握することが、まず重要である。

重力噴流が水平方向に放出される場合は、流速分布や温度分布、浮上経路や経路に沿った希釈特性など、平均的な拡散・希釈特性に関して多くの研究が行われている（例えば、片野（1983））。しかしながら、噴流内での、乱れ強度、渦動粘性係数や渦動拡散係数については測定が行われていないのが現状である。このため、本実験では、水平方向に放出された重力噴流の挙動を解明するため、放出管高さの違いによる拡散形態の差異について検討するとともに、噴流内が浮上するまでの領域において流速変動や水温変動を同時計測し、乱流混合特性について検討を行った。

* 正会員 * (工修) ** (工博) 電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部 海洋科学グループ
(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

噴流を計算する方法としては、平均値モデルや種々の乱流モデルが提案されている。(例えば、Chen et. al, 1992)。本研究では、計算の精度や実現象への適用性等を考慮してk-εモデルを適用した。本論文では、水理実験結果のうち代表的な2つの拡散形態について計算を行い、流速や水温の分布等の再現性について検討を行った。

2. 水理実験による検討

2.1 実験装置と実験方法

図-1に、本実験に使用した実験装置の概略と用いた座標系の定義を示す。実験に使用した水路は、長さ10m、幅1m、高さ1mであり、レーザードップラー流速計による計測や可視化測定のため、両側面は透明なガラス製である。

本実験では、水路内に仕切り板を設置して、測定区間を長さ6m、幅0.7mの水路として使用した。また、排水の影響が及ばない水路下流端より、放水量と同量の排水を行った。これにより、測定時間、測定区間内では、流速分布や温度分布は、ほぼ一定に保たれて、現象は準定常とみなすことができる。放水管は、放水水深を任意に変化できるように水路底部からの高さを可動式とした。本実験に用いた放出口の直径(D)は2.7cmで、噴流内部の流速変動や水温変動を測定するのに十分な大きさとして設定した。また放出口でのレイノルズ数は数1000程度であり、十分に乱流状態となっている。

表-1に、実験条件を示す。

重力噴流の経路等の測定には、サーミスタ水温計を使用した。鉛直方向に、サーミスタ水温計を1cm間隔で20個配置して計測を行い、鉛直方向の水温分布の測定を行った。水平方向の水温の測定は、現象が噴流中心軸に対して対象なため、中心軸を含めた片側のみ行った。水温の測定は、流下方向に10測線、流下方向と直角方向には5cm間隔で6測線行い、各測線が交差した位置の水温鉛直分布を測定した。測定された水温データは、サンプリング・タイム0.5秒でA/D変換を行い、サンプリング数20個の平均値を収録した。重力噴流の流速の変動成分の測定には、2方向成分を測定できるレーザードップラー流速計（FLV（Fiberoptic Laser Velocimeter））を使用した。また、水温の変動成分の測定には、乱流成分が十分に計測できるように、周波数応答が速い熱電対を使用した。静止水域に水平に放出された重力噴流は、噴流中心軸に対して左右対称な現象である。このため、流速及び水温の測定は、中心軸およびその片面において実施した。各測点で計測された流速（水平成分および鉛直成分）と水温は、サンプリング・タイム0.005秒でA/D変換を行い、8192個（約40秒）のデータを収録した。測定されたデータについては、大型計算機を用いて統計解析を行い、混合・希釈特性について検討を行った。

2-2 実験結果と考察

水中放流された温排水は、水平重力噴流として浮上・拡散するが、海底面が近い放出口での内部フルード数や放出口高さによって、拡散挙動や希釈特性が異なることが知られている。本実験では、まず底面が重力噴流に及ぼす影響について検討する。

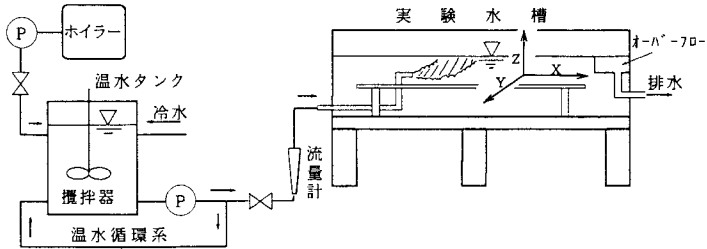


図-1 実験装置の概略

表-1 実験条件

実験 ケース	放水口水深 (cm)	放水流速 (cm/s)	ΔT_0 (°C)	内部7点-数
A	16.0	34.6	7.0	16.5
B	16.0	23.1	7.0	11.0
C	16.0	46.2	7.0	22.0
D	16.0	57.7	7.0	27.5
E	16.0	34.6	5.0	20.0
F	16.0	34.6	10.0	13.5
G	17.3	34.6	7.0	16.5
H	14.7	34.6	7.0	16.5
I	14.7	46.2	7.0	22.0
J	14.7	57.7	7.0	27.5
K	13.4	34.6	7.0	16.5
L	13.4	46.2	7.0	22.0
M	12.0	34.6	7.0	16.5
N	12.0	46.2	7.0	22.0
O	12.0	57.7	7.0	27.5
P	18.0	11.5	7.0	5.5
Q	18.0	23.1	7.0	11.0

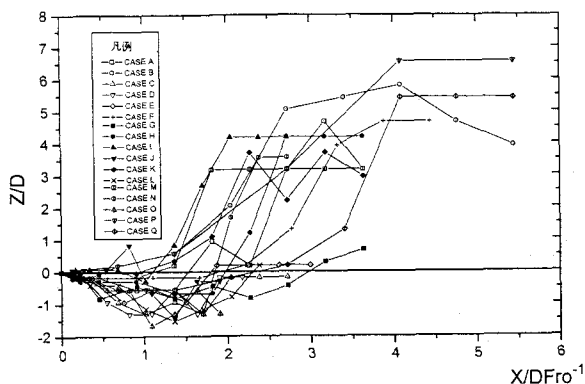


図-2 重力噴流の浮上経路

(a) 重力噴流の浮上経路

図-2に、各実験ケースにおける重力噴流の浮上経路を示す。
放出口での内部フルード数 (F_{r0}) は、次式で示される。

$$\text{内部フルード数: } F_{r0} = \frac{U_0}{\sqrt{\Delta \rho / \rho D g}} \quad (1)$$

ここに、 U_0 : 放出流速、 D : 放出口径、 h : 底面から放出口中心までの高さ、 $\Delta \rho / \rho$: 放出口での相対密度差、 ρ : 周囲水の密度、 g : 重力加速度である。重力噴流の中心軸上の各鉛直断面において、温度の最大値を示す位置を重力噴流の軸し、その軌跡を噴流の経路とした。重力噴流の経路は、無次元化された流下方向の距離 (x/DF_{r0}^{-1}) が1程度から浮力の効果が現れ重力噴流が浮上するパターンAと、 x/DF_{r0}^{-1} が3程度まで流下しても重力噴流は浮上していないパターンBに分類される。

図-3に、噴流放出口での内部フルード数や放出口高さ、底面の影響の関係を示す。縦軸は、放水口での内部フルード数 (F_{r0}) であり、横軸は無次元化した放水口高さ (h/D) である。図中の△は、重力噴流が浮上せずに底面付近で拡散・希釈される場合であり、○は浮上したケースである。また、図中の▲、●は、片野ら (1977) の実験結果であり、同様に▲は、浮上せずに底面付近で拡散・希釈される場合であり、●は浮上したケースである。

以上の様に、底面近傍で水平方向に放出される重力噴流の拡散パターンは、放出口での内部フルード数や放水口高さによって浮上するケース、底面で拡散するケースに大別される。底面で拡散するケースは、放水口が底面に近く放出流速が速い場合であり、底面の影響により噴流の下側からの連行量が抑制されて運動量が卓越する領域が持続されるため、噴流は浮上せずに底面付近で拡散すると考えられる。

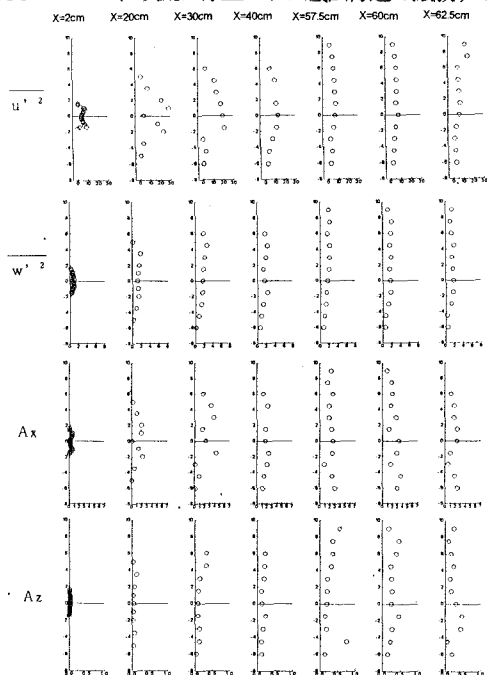


図-4 重力噴流内の乱流量 (Case-M)

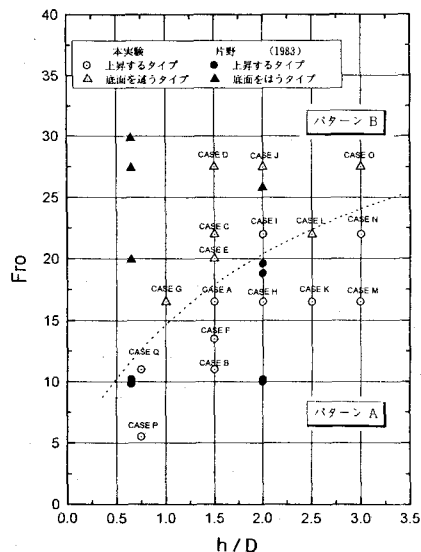


図-3 重力噴流に及ぼす底面の影響

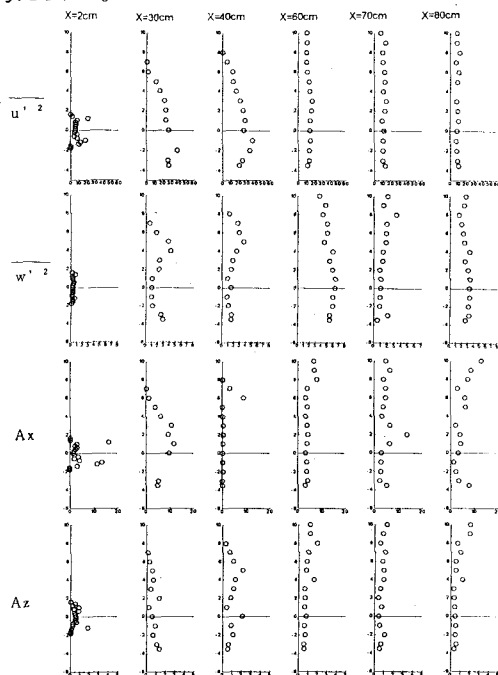


図-5 重力噴流内の乱流量 (Case-J)

b) 重力噴流内の乱れ流量の測定

図4、図5に、噴流中心断面での、乱れ強度、渦動粘性係数の鉛直分布を示す。Case Mでは、放出口近傍の領域（ $x=40\text{cm}$ 程度まで）では、放出初期の運動量が卓越している。各鉛直断面内では、乱れ強度や渦動粘性係数の分布は双峰系になっており、水平噴流として挙動している。噴流が流下するにしたがって、浮力の影響が卓越し始め重力噴流となり、その経路が浮上するとともに、乱れ強度や渦動粘性係数の鉛直分布も変化している。また、乱流混合特性を示す流速や水温の乱れ強度、渦動粘性係数等の鉛直分布は、総合的にみれば、温排水噴流の中心軸より下側の方が大きくなる傾向があり、周囲水の連行は主として噴流の下側で起こっていると思われる。Case Jでは、放出口近傍では、噴流は水平噴流として挙動している。しかしながら、噴流下側からの連行が底面により抑制されているため、流下するにつれて噴流は下降して底面近くで拡散する。流下するにつれて初期の運動量より浮力の効果が卓越するようになり、急速に浮上する。Case Mに較べて、噴流初期の運動量の影響は、比較的に短い距離で消滅し、鉛直断面内での乱れ強度や渦動粘性係数の分布は比較的一様な分布に近づいている。また、噴流が底面近くを拡散していることから、底面での摩擦等の影響も考えられる。次に、流速や温度の拡散特性を表すため、両者の拡散の比である乱流プラントル数について検討を行った。

図6に、水平重力噴流内の、鉛直方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数を示す。水平重力噴流の乱流拡散特性に関する測定は、行われていないのが現状であり、比較のため鉛直重力噴流内での乱流プラントル数（石垣、1982）を図中（実線）に示した。噴流が水平重力噴流として挙動するCase Mでは、実験結果にはばつきはあるものの、噴流中の乱流プラントル数は、ほぼ一定の値を示している。ただし、Case Jでは、渦動粘性係数は、渦動拡散係数と同程度の大きさであり、 Pr_t は、0.67より大きくなる傾向にある。噴流が底面付近で拡散する場合には、流速や水温の鉛直分布が一様になる傾向があり、水平重力噴流とは、乱流拡散過程が異なっているためと考えられる。

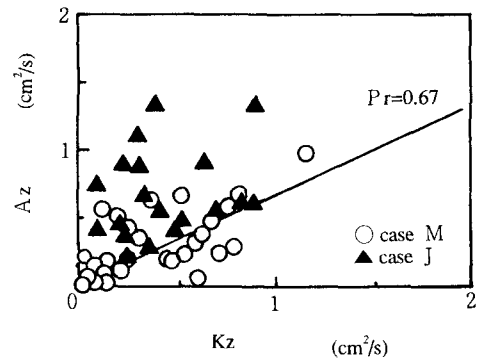


図-6 鉛直方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数

3. 数値モデルによる検討

3-1 数値モデルの概要

本研究では、水平重力噴流の挙動を検討するため、3次元の乱流モデル（ $k-\epsilon$ モデル）を用いた。本計算では、主として放出された重力噴流が浮上するまでの領域を計算対象としており、放出の運動量の効果が卓越しているため密度分布の効果は運動量方程式中のみ考慮した。以下計算に用いた基礎式を示す。

$$\text{質量保存式} : \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\text{運動量保存式} : \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (3)$$

$$k \text{ の保存式} : \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_k \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + P_b - \epsilon \quad (4)$$

$$\epsilon \text{ の保存式} : \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_\epsilon \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon + C_{\epsilon 3} P_b) \quad (5)$$

$$T \text{ の保存式} : \frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\theta u_j} \right) \quad (6)$$

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad P_b = -\beta g_i \overline{u_i \theta}, \quad -\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k, \quad -\overline{\theta u_j} = \alpha_t \frac{\partial T}{\partial x_j},$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \alpha_t = \frac{C_\mu}{Pr_t} \frac{k^2}{\epsilon} = \frac{\nu_t}{Pr_t}$$

$$C_k = 0.09, C_\mu = 0.09, C_\epsilon = 0.07,$$

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, C_{\epsilon 3} = 1.40$$

図-7に、計算領域と各境界における境界条件を示す。計算領域の上・下流端については、自由境界とした。本計算では、重力噴流が水表面に浮上するまでの領域を対象としており、実験水路側面の影響が無視できるため、計算上の側方境界は自由境界とした。また、浮上した重力噴流の水温上昇(約1℃)が小さいこと、実験室の室温を水温と同じにしていることより、水面での境界条件は、断熱条件とした。

水表面の境界条件

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{\partial V}{\partial n} = 0$$

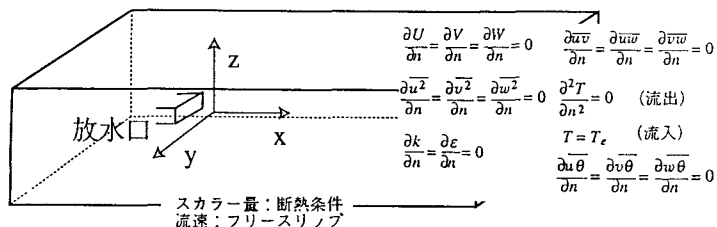
$$\frac{\partial \overline{uw}}{\partial n} = \frac{\partial \overline{vw}}{\partial n} = \frac{\partial \overline{wv}}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u^2}}{\partial n} = \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial n} = \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u\theta}}{\partial n} = \frac{\partial \overline{v\theta}}{\partial n} = \frac{\partial \overline{w\theta}}{\partial n} = 0$$



放水口の条件

U_0 : 放水流速

Q_0 : 放水流量

k_0 : $k_0 = \alpha U_0^2$ 放水口での乱れエネルギー ($\alpha = 0.002$)

ϵ_0 : $C_\mu \frac{k_0^2}{l}$ 放水口での乱れエネルギー散逸率 (l : 放水管径, $C_\mu = 0.09$)

$\overline{u^2}$: $= 2k_0$ x方向の乱れ強度 cm^2/s^2

$\overline{v^2}$: $= 0$ y方向の乱れ強度 cm^2/s^2

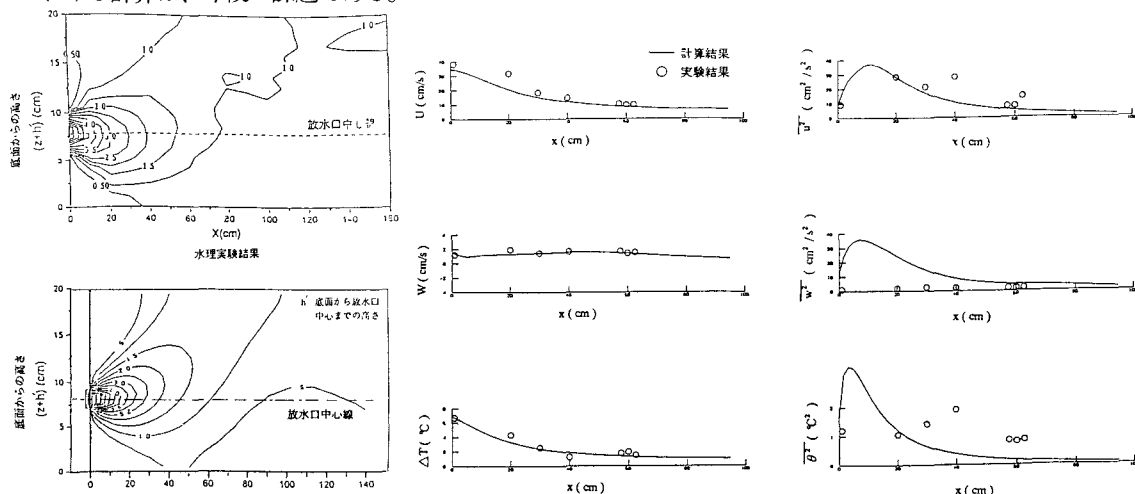
$\overline{w^2}$: $= 0$ z方向の乱れ強度 cm^2/s^2

図-7 計算領域と計算条件

水平方向に放出された重力噴流は、放出口での内部フルード数や底面からの高さ等により、拡散形態が異なる。放出口が底面より十分離れている場合には、噴流は重力噴流として拡散し水面に浮上する (Case-M)。放出口が底面に近い場合には、噴流は底面の影響を受けて、底面付近を這うように拡散する (Case-J)。本研究では、これらの代表的な2つの拡散形態について計算を行い、流速や水温の分布の再現性についてについて検討を行った。

3-2 計算結果と検討

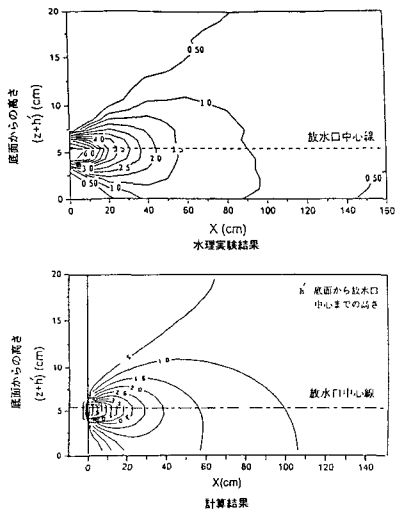
図-8(1)に、測定された水温分布と計算結果を示す。図中の水温分布は、水中放流された温排水の中心軸 ($y=0$) 上での鉛直分布 ($x-z$ 平面) を示している。Case-Mは、海底面の影響が小さい場合であり、噴流は、水平重力噴流として希釈・拡散される。計算された水温分布は、定性的には測定結果と良く一致している。1℃のコンターで見た浮上位置や浮上経路等は、測定結果と計算結果は良く一致している。しかしながら、放出口近傍の高温域に関しては、計算結果の方が若干大きくなる傾向にあり、この領域における計算は、今後の課題である。



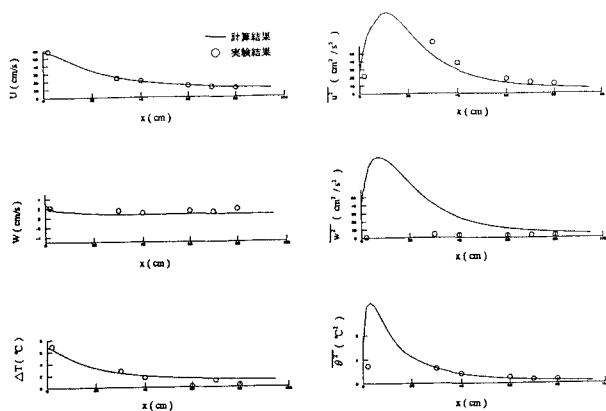
(1) 水温分布

(2) 流速・水温の低減

図-8 計算結果と測定結果の比較 (Case-M)



(1) 水温分布



(2) 流速・水温の低減

図-9 計算結果と測定結果の比較 (Case-J)

図8(2)に、中心軸断面での流速・水温低減を示す。鉛直方向の乱流量 ($\overline{w'w'}$) の計算値が実験結果に比べ大きくなっているが、平均流速や平均水温等に関しては、計算結果は測定結果と良く一致している。

図9(1)に、測定された水温分布と計算結果を示す。図中の水温分布は、水中放流された温排水の中心軸上での鉛直分布を示している。Case-Jは、放出口が底面に近く、噴流は底面によって連行を抑制され、底面を這うように希釈・拡散される。計算された水温分布は、浮上することなく底面で拡散しており、定性的には測定結果と良く一致している。放出口近傍域に関しては、Case-Mの場合と同様に、高温域で計算結果の方が若干大きくなる傾向がある。

図9(2)に、中心軸上における流速・水温低減を示す。平均流速や水温等に関しては、計算結果は測定結果と良く一致している。しかしながら、Case-Mと同様に、鉛直方向の流速変動 ($\overline{w'w'}$) は、計算値の方が大きくなっている。

4 まとめ

水平方向に放出された重力噴流の3次元的な挙動を把握するため、水理模型実験を行った。また、3次元の乱流モデル ($k-\epsilon$ モデル) を水平重力噴流に適用した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 水平方向に放出された重力噴流の挙動は、放出口での内部フルード数と底面から放出口中心までの高さに大きく依存する。噴流の拡散パターンは、噴流が水平重力噴流として浮上・拡散するパターンと、浮上せずに底面付近で拡散・希釈される場合に大別される。
- (2) 水平重力噴流が底面の影響を受けない場合には、噴流内の乱流プラントル数は0.7程度であり、鉛直重力噴流内の乱流プラントル数に関する既往の実験結果と同程度であった。また、底面の影響を受ける場合には、乱流プラントル数は、0.7より大きくなっている。
- (3) 底面の影響が小さい場合および大きい場合において、水温分布や重力噴流の浮上経路等の平均量については、計算結果と測定結果は良く一致している。しかしながら、放出口直後の高温域については、計算結果の方が若干大きい傾向にある。

今後はより実際的な場合として、放出管が複数の場合、周囲水に流動や成層がある場合について検討を行う予定である。

なお本研究は、資源エネルギー庁受託「環境影響評価技術等実証調査」により、平成5年度に水理実験、平成6年度に数値計算を実施した成果である。本研究に関して貴重なご意見やご指摘を頂いた関係者の方々には、深く感謝の意を表します。

参考文献

1. Chen, C. J., 田中伸和、乱流モデルの基礎と応用、構造計画研究所刊、1992
2. 片野尚明、河村博美、電力中央研究所土木研究所、研究報告、No.376012、1977
3. 石垣博、日本機械学会論文集 (B編) 48巻433号、pp1701-1708、1982