

冷排水の拡散特性に関する研究

水 鳥 雅 文*・首 藤 啓**

1. ま え が き

コージェネレーションやヒートポンプを利用した地域冷暖房システム、LNG 火力発電所や都市ガスプラントでは、冷排水が海域、河川へ放流される場合がある。その際、冷排水が水域へ与える水温影響を検討するには、冷排水に関する拡散予測手法を確立する必要がある。

冷排水が水中放流された場合の拡散状況を模式的に示すと図—1 となる。放水口から出た冷排水は、周囲水との混合希釈により徐々に水温を上げながら周囲水との密度差の関係から最終的には底面に到達する。この底面に到達するまでの拡散機構は、片野ら (1979) によってほぼ温排水に類似することが確かめられている。底面に到達した以降は徐々に場の流動、乱れ、海底摩擦などの影響を受けることになるが、その拡散特性は機構的に表層を拡散する温排水とは異なることが予想される。

本研究で対象とする冷排水の流量規模や取放水温度差の程度などを認識しておくため、現在運転中ならびに計画されている地域冷暖房システムの一例を表—1 に示す。放流水と周囲水との相対密度差は、水温・塩分によって異なるが概ね 10^{-3} のオーダーとなる。

冷排水拡散と類似の研究としては、貯水池における泥水密度流の研究 (芦田・江頭, 1975; 菅・玉井, 1981; 福嶋ら, 1981), 海水淡水化に伴う排水ブライン拡散の研究 (和田ら, 1978) などがあるが、本研究で対象とする

表—1 地域冷暖房システムの放出諸元

地 点	流 量 (m^3/s)	形 状 (m)	流 速 (m/s)	水温差	設置水深 (m)	内部フルード数
A (温)	1.52	2.5×0.6	1.0	5	-0.7	10.8
	0.92	//	0.6	-3	//	13.5
B (温)	2.78	6.0×2.5	0.18	6	表層	0.86
	0.97	//	0.06	-3	//	0.61
C (温)	1.83	2.2×1.8	0.64	5	表層	3.7
	1.83	//	//	-3	//	7.8

冷排水拡散とは放流形式や放水密度差が大きく異なる。泥水密度流は 2 次元性の強い現象を対象としているのに加え、密度差が $10^{-2} \sim 10^{-1}$ のオーダーと大きい。また、ブラインの排水は本研究と同程度の密度差であるが、既往の研究では放水流速が大きく、底面到達までの水中部における噴流状態の希釈に主眼が置かれている。

従って、底面の影響等の冷排水拡散に関する知見は十分とは言えない。

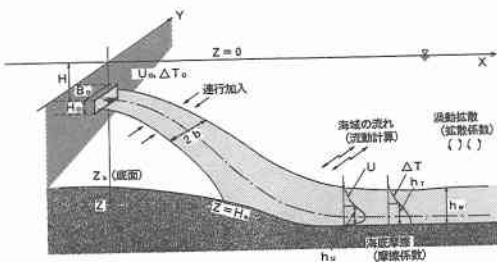
2. 冷排水の拡散特性

(1) 実験設備と方法

冷排水の拡散特性を把握するために 3 次元および鉛直 2 次元の水理実験を行った。

3 次元実験は主に平面的な拡散の概況を明らかにするために、 $23 \times 8 \text{ m}$ の規模を有する平面水槽を用いた。実験は縮尺 1/25、水深 8 m (一様)、放水口形状を一定 (幅 2.5 m、高さ 1.25 m の矩形形状) として、実験パラメータに放流量、放水温度差、放水口位置、および周囲水の流れを選んだ。測定項目は水温および流速とし、水温はサーミスタ温度計により、流速は排水に着色した染料雲を追跡することにより求めた。

一方、鉛直 2 次元実験は鉛直方向の詳細な機構を把握するために行い、流速測定にプローブタイプの 2 成分レーザー流速計、水温測定に熱電対を用いた。なお、本実験では特に冷排水拡散に対する底面摩擦の影響を検討するため、滑面 (平滑な底面)、および粗面 (中央粒径 0.8 mm の砂を被覆した底面) の 2 種類の条件を設定した。



図—1 冷排水拡散の模式図

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部

** 正会員 工修 (株)東京久栄 環境開発事業本部 アセスメント部

(2) 拡散特性量

温排水の拡散特性を表す尺度は、場の流れなどの影響が小さいと仮定すれば次式に示す放水口における平均流体力 M_0 と浮力流束 N_0 によって表すことができる (例えば中辻ら, 1991)。

$$M_0 = U_0^2 A_0 + \frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} g A_0 \frac{H_0}{2} \quad (1)$$

$$N_0 = U_0 \frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} g A_0 \quad (2)$$

ここに、添字 0 は放水口における水理量を示し、 U_0 ：放水流速、 $\Delta \rho_0 (= \rho_0 - \rho_a)$ ：放水密度差、 ρ_0 ：放水密度、 ρ_a ：周囲水密度、 A_0 ：放水口断面積、 H_0 ：放水口高さである。冷排水に関しても同様の尺度を適用すると、次元考察により流速、浮力および長さの特性尺度は次のように定義される。

$$\left. \begin{aligned} \text{長さのスケール} : L_s &= N_0^{-1/2} M_0^{3/4} \\ \text{速度のスケール} : U_s &= N_0^{1/2} M_0^{-1/4} \\ \text{浮力のスケール} : G_s &= N_0^{3/2} M_0^{-5/4} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3) 冷排水の拡散挙動

放水口が底層にある場合の 3 次元の実験から、水温差 -5、流量を 0.5, 1.0 および 2.0 m³/s とした 3 ケースについて拡散の諸量を前述の尺度で無次元化し、流下方向の変化を検討する。

図-2 は主流軸流下方向に対する拡散の特性量変化であり、上より浮力 G_s 、水温の半値厚さ h_T 、半値半幅 b_T および軸上流速 u_c を示している。ここに、 b_T と u_c に関しては、同じ条件の温排水の場合を併記し比較している。

概ね各ケースは同一線上に分布しており、ほぼ無次元距離 6 および 24 で変曲しながら一定の変化を示す。

以上のように、拡散の特性値である水温、流速、厚さおよび幅に対する流下距離特性は概ね 3 つのケースで一致しており、無次元距離によって放水条件にかかわらず特性量が定まる。拡散を支配する要因から流下距離によって 3 つの領域に区分でき、放水口近傍の噴流領域、遠方の成層領域および両者の中間的移行期の遷移領域に分別できる。

(4) 鉛直拡散機構

a) 水温鉛直分布

温排水の水温鉛直分布はガウス分布に従うことが知られている。冷排水の分布に関しても同様の整理を施し、

表-2 底層放流冷排水の拡散特性

領域区分	無次元距離 ($X_* = X/L_s$)	水温変化 (G_c/G_s)	流速変化 (U_c/U_s)	層厚変化 (h_T/L_s)	拡散幅変化 (b_T/L_s)
噴流領域	$x < 6$	$3.2x_*^{-1/2}$	$5.5x_*^{-1}$	$0.23x_*^0$	$1.0x_*^{3/2}$
遷移領域	$6 < x_* < 24$	$1.2x_*^0$	$2.2x_*^{-1/2}$	$0.23x_*^0$	$6.0x_*^{1/2}$
成層領域	$24 < x_*$	$25x_*^{-1}$	$260x_*^{-2}$	$0.047x_*^{1/2}$	$(0.01x_*^{3/2})$

縦軸の鉛直距離を分布の標準偏差の 2 倍に相当する躍層厚さ $h_w (= 1.7h_T)$ 、および横軸の水温を周囲水との最高水

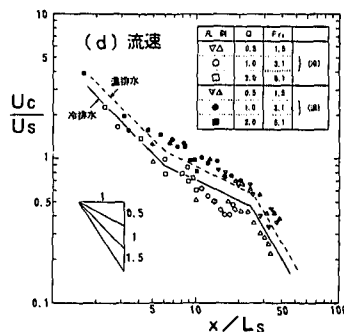
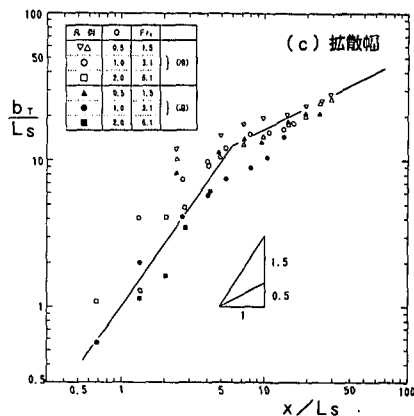
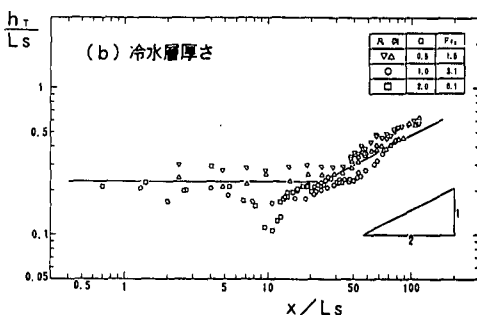
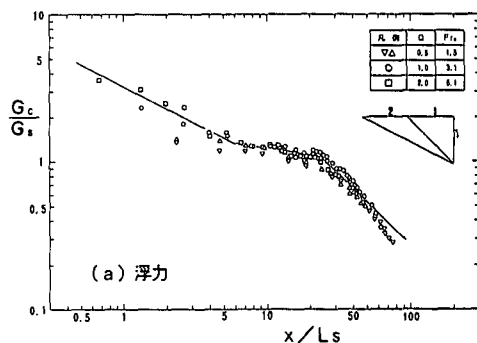


図-2 拡散特性量の流下方向変化

温差 ΔT_m によって正規化する。図-3 はその結果であり、次式に示す指数関数形で近似できることがわかる。また、底面粗度の違いによる水温分布形の相違もほとんど認められない。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_m} = \exp(-2\eta^2), \quad \eta = \frac{z}{h_w} \quad \dots\dots\dots (4)$$

b) 流速鉛直分布

流速分布についても水温分布と同様に躍層厚さ h_w と断面内最大流速 u_m により正規化する。図-4 はその結果であり、最大流速を示す位置はほぼ $\eta = 0.2$ である。

詳細にみると底面粗度の違いがあり、粗度がある場合は最大流速の位置が上方にシフトする傾向がある。しか

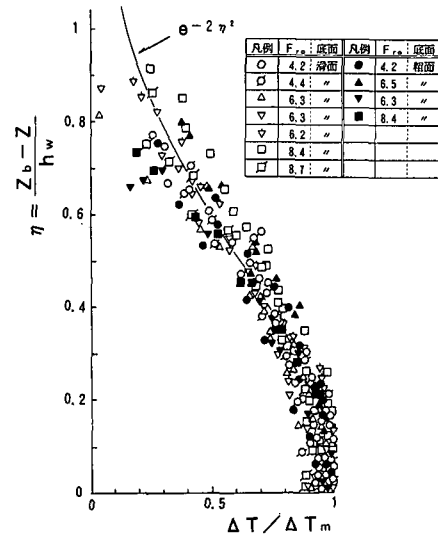


図-3 水温鉛直分布

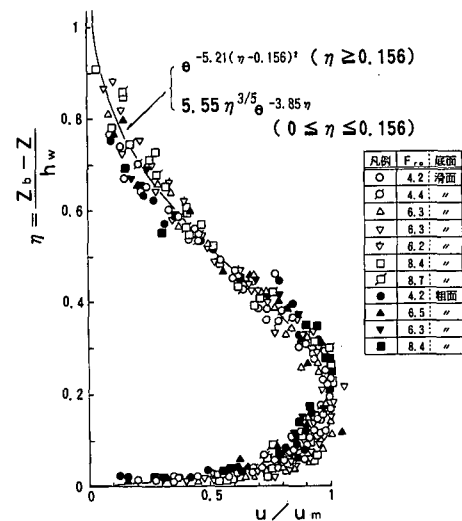


図-4 流速鉛直分布

し、両者を統合して整理すると次式に示す分布によって近似できる。

$$\frac{u}{u_m} = \begin{cases} 5.55\eta^{3/5} \exp(-3.85\eta) & (0 < \eta < 0.156) \\ \exp\{-5.21(\eta - 0.156)^2\} & (\eta > 0.156) \end{cases} \quad \dots\dots (5)$$

なお、流速の半値厚さ h_u は水温の半値厚さ h_T よりも小さく平均すると 1/1.13 である。

c) 底面摩擦係数

底面の摩擦は一般に代表流速と関連づけられ、次式のように表される。

$$\tau_b = k_b \rho U^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 k_b : 底面摩擦係数、 U : 断面平均流速である。

また、せん断応力 τ は分子粘性の影響が小さいと仮定するとレイノルズ応力によって次式で表せる。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \quad \dots\dots\dots (7)$$

従って、底面摩擦係数は次式より算定できる。

$$k_b = -\overline{u'w'} / U^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

図-5 は底面摩擦係数と断面平均リチャードソン数 R_{im} との関連を示したものである。底面摩擦係数は、 R_{im} との相関が明瞭ではなく平均的には 0.0156 となる。

この値は一般的に海域で用いられている海底摩擦係数 ($= 0.0026$) よりもかなり大きく冷排水の主流が底面近傍に位置し、底面付近の乱れが大きいとと考えられる。

d) 鉛直渦動粘性係数・拡散係数

鉛直方向の渦動粘性係数 ε_z および渦動拡散係数 k_z はレイノルズ応力および乱れ熱フラックスにより次式で定義される。

$$\varepsilon_z = \frac{-\overline{u'w'}}{\partial \overline{u} / \partial z}, \quad k_z = \frac{-\overline{w' \Delta T}}{\partial \Delta T / \partial z} \quad \dots\dots\dots (9)$$

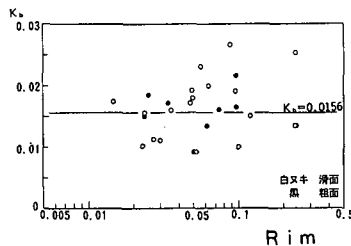


図-5 冷排水放流時の底面摩擦係数

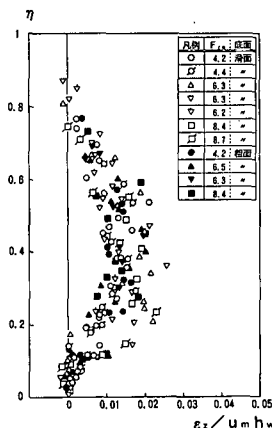


図-6 鉛直渦動粘性係数

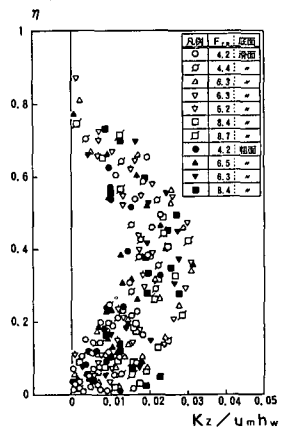


図-7 鉛直渦動拡散係数

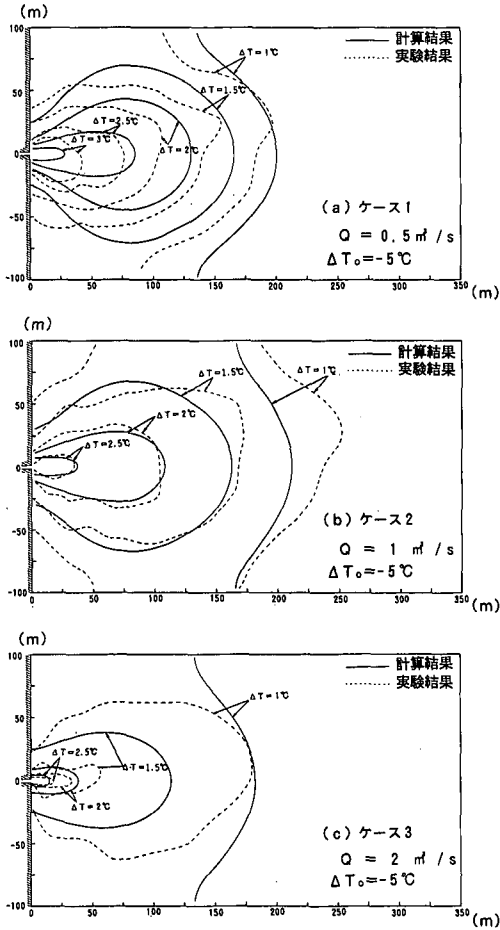


図-9 底面水温分布の計算結果と実験結果の比較

距離 $x/L_s=6$ までを噴流領域として水平拡散係数を既存の経験式を基に以下のように設定する。

軸対称噴流の渦動粘性係数 ε は、噴流の半値半幅 b_T および中心軸上流速 u_c から、

$$\varepsilon = 0.025 b_T u_c \quad \dots\dots\dots (19)$$

これに表-2の拡散特性を用い、水平拡散係数 K と渦動粘性係数 ε との比を 1 と仮定すると次式を得る。

$$K_x = K_y = 0.14 x^{1/2} L_s^{1/2} u_s \quad \dots\dots\dots (20)$$

なお、 $x/L_s=6$ 以降では場の水平拡散係数として現地観測データなどから設定される。

(3) 計算結果と実験結果の整合性

前述した 3 ケースについて放流条件およびモデルの諸

係数を設定し、数値シミュレーションを行った。図-9 は底層の水温平面分布を比較したもので、概ね各ケースとも一致することがわかる。

4. あとがき

本研究の主な結果を以下に示す。

冷排水に関する水理実験から得られた拡散特性に関する知見は以下の通りである。①冷排水の拡散概況は放水口からの距離とともに現象の支配因子が変わり、近傍の噴流領域、遠方の成層領域および両者の中間的な遷移領域からなり、各領域によって拡散特性が異なる。②流速および水温鉛直分布は一樣な分布形で近似できる。③鉛直方向の拡散係数、底面摩擦係数を算定した。

次に、平面 2 次元モデルのモデル化の条件および結果は以下の通りである。④冷排水の層厚は、放水口近傍の噴流域ではほぼ一樣に推移し、その厚さは放水条件によって決まる。⑤初期希釈を考慮するため、周囲水の連行と水平拡散係数を実験結果により設定した。⑥底層放流の場合では、計算結果と実験結果は良好に一致し、本モデルの妥当性は概ね検証された。

なお、本研究の実験および計算に当たっては、シー・アール・エスの太田京助氏、および電力計算センターの田口富貴子氏のご協力を戴いた。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 芦田明男・江頭進治 (1975): 泥水密度流に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 237 号, pp. 37-50.
- 片野尚明・河村博美・和田 明・鈴木慶一・田中一彦 (1979): 冷排水噴流の重力拡散特性に関する実験的検討, 電中研報告, 依頼報告 378560, 55 p.
- 菅 和利・玉井信行 (1981): 貯水池流入部の濁り点および初期混合に関する研究, 第 25 回水講, pp. 631-636.
- 中辻啓二・許 再寧・室田 明 (1991): 三次元表層密度の数値実験, 土木学会論文集 434/II-16, pp. 19-28.
- 福岡祐介・福岡捷二・宮本高行 (1981): 三次元貯水池における密度流先端部の運動, 第 25 回水講, pp. 637-642.
- 水鳥雅文・首藤 啓 (1994): 小流量温・冷排水の簡易予測手法の開発, 電中研報告, 研究報告 U-94010, 40 p.
- 室田 明・中辻啓二 (1984): 二次元表層密度噴流における連行特性に関する研究, 土木学会論文集 351/II-2, pp. 97-106.
- 和田 明・後藤藤太郎・片野尚明 (1978): 海水淡水化にともなう排出ブラインの拡散予測, 第 22 回水講, pp. 75-80.
- Lauder, B. E. (1975): On the Effects of a Gravitational Field on the Turbulent Transport of Heat and Momentum, J. Fluid Mech., Vol. 67, PT3, pp. 569-581.