

浅水域に放出される温水噴流の拡散特性について

片野 尚明*・河村 博美**・和田 明***

1. ま え が き

温排水を海域に放出する場合の水温低減対策として水中放流方式が有効視されている。筆者らは、先に、温排水の水中放流に関する研究として、単一放流管¹⁾およびスロット状放水口²⁾より放出される温水噴流の重力拡散特性について、水理実験並びに数値解析の両面から検討を行ってきた。しかし、実海域で大量の温排水を放出する場合には、水深に対して放水口の鉛直寸法が極めて大きくなる条件、すなわち、浅水域に放出する条件となる。そのため、温水噴流は直ちに全水深にわたって混合し、境界の影響を受けない3次元重力噴流としての挙動範囲が、極めて狭いことが予知されていた。

本文は、浅水域に設置したディフューザ型放水口（マルチパイプ型）より放出される温水噴流の拡散特性を明らかにするために、水理模型による実験的検討およびその実験結果を考慮した数理モデルによる解析的検討を行ない、得られた知見を述べたものである。

2. 水理実験の内容

実験装置の概略を図-1に示す。用いた拡散水槽は、気温、湿度コントロール付きの断熱建屋に設置しており、長さ 23 m×幅 15 m×高さ 0.7 m の規模を有する。模型は原型の 1/200 程度を考慮して製作した。海岸線は直線とし、水深は沖合に向かって 1/100 勾配で変化させた。放

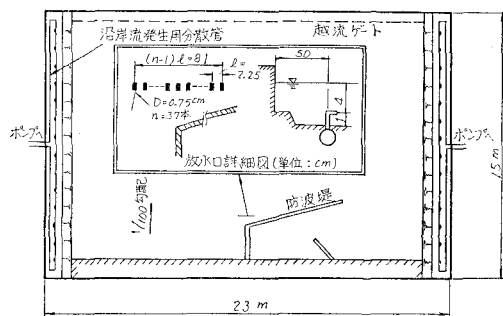


図-1 実験装置の概略図

水口の形状および寸法は図-1にも示すように、最大放水量 $Q=0.53$ l/sec に対して内径 $D=7.5$ mm のパイプを間隔 $l=22.5$ mm で 37 本並置したものである。また、その配置は防波堤より 50 cm 離れた水深 5 cm の位置に、沿岸流に対して直角方向に水平放出するものとした。

実験は、表-1 に示すように放流量をパラメータにとった静止水域の場合、および代表流量に対する沿岸流を考慮した場合の 2 種類について実施した。放流管 1 本当りの放出内部フルード数は $F_0=33$ であり、また放出レイノルズ数は $R_0=2400$ である。

表-1 実験条件

ケース No.	Q (l/sec)	n (本)	$B_0=nl$ (cm)	u_0 (cm/sec)	u_a (cm/sec)	ΔT_0 (°C)
1	0.106	7	15.75	34.3	零 (静止)	7.0
2	0.247	17	38.25	33.0		
3	0.389	27	60.75	32.6		
4	0.530	37	83.25	32.5		
1-R	0.106	7	15.75	34.3	右 1.8	
1-L					左 1.3	
4-R	0.530	37	83.25	32.5	右 1.8	
4-L					左 1.3	

3. 実験結果とその考察

(1) 静止水域の場合

図-2 は、温水噴流放出に伴う水面での平面水温分布並びに流況の一例として、ケース 4 の実験結果を示す。図より明らかなように、ディフューザから放出される温水噴流の初期稀釈は、放水口背後および放流管の両側から水平的に加入する周囲水との混合作用によって生じる。

図-3 は、ケース 1~4 における流下距離に伴う水面での最大温度上昇および最大流速の変化を示す。同様に、図-4 は温度の拡散幅 ($B_{0.5}$ =半値全幅) の変化を示す。これらの図より、温度および流速は極大値を経た後、流下距離に伴って単調に減少し、拡散幅はほぼ比例して増加する傾向が認められる。

図-5 は、温水噴流を横断する方向の水温分布形の一例である。水温分布は放水口近傍を除いて、図中の破線

* 正会員 (財) 電力中央研究所土木技術研究所
 ** (財) 電力中央研究所土木技術研究所
 *** 正会員 工博 (財) 電力中央研究所土木技術研究所環境水理部長

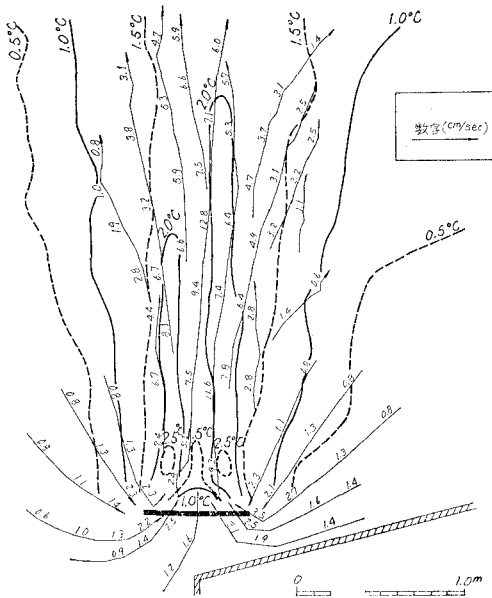


図-2 ケース4の平面水温分布と流況

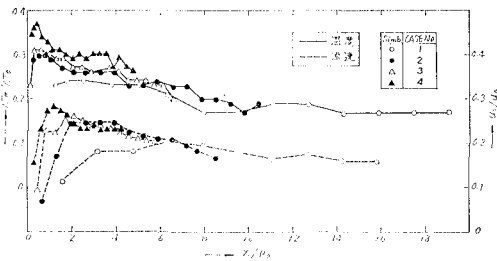


図-3 流下距離に伴う水温上昇値および流速値の変化

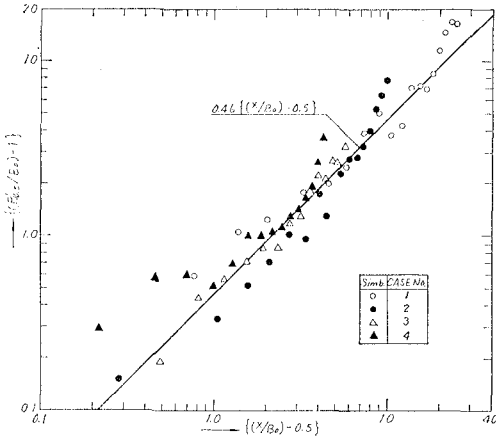


図-4 流下距離に伴う温度拡散幅の変化

で示すガウス分布と良い一致を示す。また、温度と流速の拡散幅を比較すると、両者の比 λ は近似的に $\lambda=2$ を満足する。図-6 は噴流中心軸における温度および流速の鉛直分布形を示す。鉛直分布は、噴流が水面に達していると目される近傍では一様化し、以後、流下距離と共に指数型の分布に推移してゆく傾向が認められる。

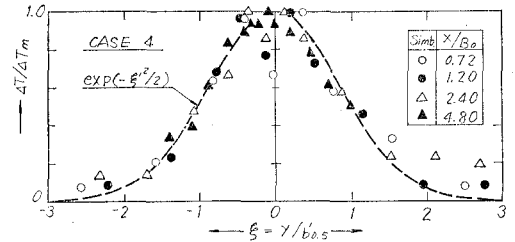


図-5 噴流横断方向の水温分布形の一例

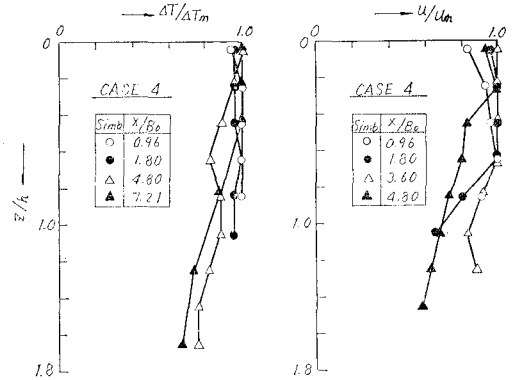


図-6 水温および流速鉛直分布の一例

(2) 沿岸流を考慮した場合

図-7 は平面水温分布の一例としてケース4-Lの結果を示す。図中の細線で示す等温線は、後述の数値解析結果である。温水噴流の径路は周囲水の流れの作用によって曲げられ、それが大きい程流れ方向に早く曲げられる。また、径路に法線方向および鉛直方向の水温分布は、ほぼ指数型の分布形で近似できる。

このようにディフューザ型放水口より浅水域へ放出さ

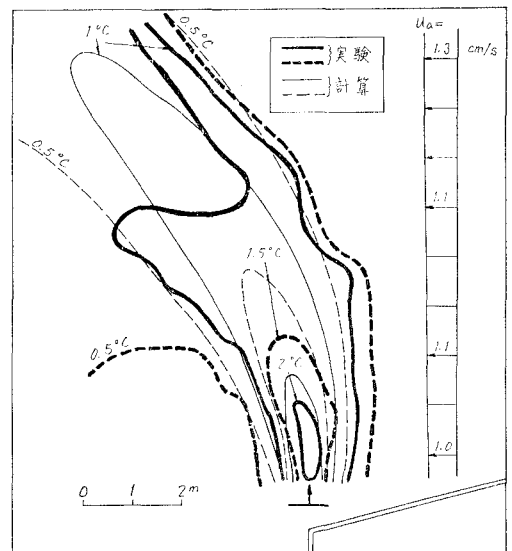


図-7 ケース4-Lの平面水温分布

れる温水噴流の拡散現象は、平面 2 次元噴流に近似して
いるとみなせる。

4. 数値モデルの内容

(1) 基礎方程式

数値モデルの概略および用いる記号の説明図を 図-8
に示す。温水噴流内の流速および温度は実験結果から判
断して次式に示す相似分布形を仮定する。

$$\left. \begin{aligned} u &= \Delta u_m f_1(\xi) f_2(\eta) + u_a \cos \theta \\ \Delta T &= \Delta T_m g_1(\xi) g_2(\eta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\Delta u_m = u_m - u_a \cos \theta$, $f_1(\xi) = \exp(-\xi^2)$,
 $f_2(\eta) = \exp(-\eta^2)$, $g_1(\xi) = \exp(-\xi'^2)$,
 $g_2(\eta) = \exp(-\eta'^2)$, $\xi = n/b$, $\xi' = n/\lambda b$,
 $\eta = z/h_w$, $\eta' = cz/h_w$,

ここに、 Δu_m , ΔT_m : 噴流中心軸表面における噴流のみ
の流速と温度差, u_a : 周囲水の流速, θ : 噴流径路と u_a
とのなす角度, b : 噴流の特性長, h_w : 温水の含まれる
厚さ, λ : 温度と流速の拡散幅の比, c : 分布係数

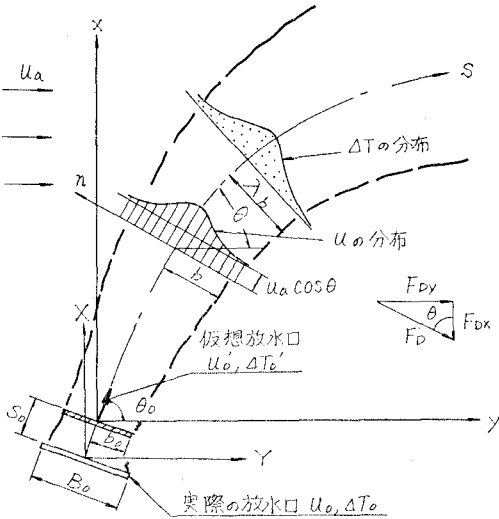


図-8 平面 2 次元噴流の記号説明図

噴流の拡散を支配する質量、運動量および温度の保存
式が次のように表わされるものとする。

$$\frac{d}{ds} \left[\int_0^{h_w} \int_0^\infty u ndnz \right] = V_e h_w \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{d}{ds} \left[\int_0^{h_w} \int_0^\infty u^2 dndz \right] = V_e h_w u_a \cos \theta \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = - \frac{h_w (V_e u_a \sin \theta + F_D)}{\left[\int_0^{h_w} \int_0^\infty u^2 dndz \right]} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d}{ds} \left[\int_0^{h_w} \int_0^\infty u \cdot \Delta T \cdot dndz \right] = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 V_e は連行加入速度³⁾, F_D は周囲水の流れが噴
流に作用する抗力⁴⁾で次式をもって表わす。

$$V_e = \alpha (|u_m - u_a \cos \theta| + a u_a \sin \theta) \dots\dots\dots (6)$$

$$F_D = C_D u_a^2 \sin^2 \theta / 2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 α : $u_a = 0$ における連行加入係数, a : 周囲水
の連行加入量に関する比例係数, C_D : 抗力係数

式 (2)~(5) に式 (1) の分布形を代入して、 $h_w = \text{const.}$
として積分すれば以下の式を得る。

$$\frac{d}{ds} (Vb) = \frac{V_e}{I_1 I_2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{d}{ds} (V^2 b) = \frac{V_e u_a \cos \theta}{I_3 I_4} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = - \frac{1}{I_3 I_4} \left(\frac{V_e - F_D}{V^2 b} \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$(I_5 I_6 \Delta u_m + I_7 I_8 u_a \cos \theta) \Delta T_m b = \text{const.} \dots\dots (11)$$

ただし、 $V = \Delta u_m + \sqrt{2} u_a \cos \theta$,

$$I_1 = \int_0^\infty f_1(\xi) d\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{2}, \quad I_2 = \int_0^1 f_2(\eta) d\eta \doteq 0.747$$

$$I_3 = \int_0^\infty f_1^2(\xi) d\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{4}, \quad I_4 = \int_0^1 f_2^2(\eta) d\eta \doteq 0.598$$

$$I_5 = \int_0^\infty f_1(\xi) g_1(\xi) d\xi = \frac{\lambda \sqrt{\pi}}{2 \sqrt{\lambda^2 + 1}},$$

$$I_6 = \int_0^1 f_2(\eta) g_2(\eta) d\eta \doteq 0.662$$

$$I_7 = \int_0^\infty g_1(\xi) d\xi = \frac{\lambda \sqrt{\pi}}{2}, \quad I_8 = \int_0^1 g_2(\eta) d\eta \doteq 0.856$$

また、噴流径路は次式で表わせる。

$$\frac{dx}{ds} = \sin \theta, \quad \frac{dy}{ds} = \cos \theta \dots\dots\dots (12)$$

式 (8)~(12) が平面 2 次元噴流の基礎式である。この
基礎式を無次元方程式に直すと共に、最適な実験係数
を選定し、流速比 $K_0 = u_0/u_a$ (u_0 : 放出流速) をパラメー
タにして数値計算を実施する。

(2) 仮想放水口の設置

前記の噴流モデルをディフューザから放出する温水噴
流に適用するに際しては、仮想放水口を設けることにす
る。仮想放水口の初期条件は、実際の放水口の放出条件
と関連づけて決めねばならない。静止水域中における実
験結果から、 $B'_{0.5}/B_0 = 1$ となる点を仮想放水口とす
ると、実際の放水口と計算の出発点である仮想放水口間
の距離は、 $s_0 = 0.5 B_0$ となる。また、仮想放水口にお
ける噴流の特性長 b_0 と実際の放水口幅 B_0 とは次の関係
をとる。

$$b_0 = k B_0 / 2\lambda \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $k = b/b_{0.5} \doteq 1.20$, $\lambda = b'_{0.5}/b_{0.5} \doteq 2.0$, $B_0 = B'_{0.5}$
 $= 2b'_{0.5}$ である。ダッシュ付きの幅は温度拡散幅を意味
する。

さらに、仮想放水口における流速および温度は次式の
熱量保存式から算定する。

$$(u_0 \Delta T_0 B_0 h_0) = 2(I_5 I_6 u_0' + I_7 I_8 u_a \cos \theta_0) \Delta T_0' b_0 h_w$$

実際の放水口

仮想放水口

ただし, $u_0', \Delta T_0'$ は仮想放水口における流速および温度である。

いま, $\theta_0 = 90^\circ$, $h_0 = \pi D^2/4l = 0.196 \text{ cm}$, $h_w = 5 \text{ cm}$ とすれば, $(u_0'/u_0)(\Delta T_0'/\Delta T_0) \approx 0.125$ となる。実験結果より, $u_0 = 33 \text{ cm/sec}$, $u_0' = 9.5 \text{ cm/sec}$ と選べば, $\Delta T_0' = 7^\circ\text{C}$ に対して $\Delta T_0' = 3.05^\circ\text{C}$ となる。

5. 解析結果と実験結果の比較

基礎方程式の中に含まれる実験係数 α , a および C_D の値は, 実験結果との比較から決定する。 α については, 図-3 に示した静止水域の拡散幅に関する実験データから, $\alpha = 0.055$ と求められる。この値は, 噴流の連行加入係数値としては妥当な値と考えるが, 周囲水の流れが作用した場合には, 噴流と陸地境界にはさまれた領域からの連行加入はほとんど期待できない実験事実から, 最終的に $\alpha = 0.025$ と定めた。また, $a = 3.0$, C_D は流速比 K_0 の関数で, 流速比が小さい程大きい値をもつようにし, ケース 1-R~4-L を通じて 0.6~2.1 の間を変化させた。

図-9~11 は, 沿岸流を考慮した場合のそれぞれ噴流径路, 径路に沿う温度低減率および拡散幅に関する数値解析結果と実験結果を比較したものである。また, 前出の図-7 には, 平面水温分布に関する解析結果と実験結果を比較して示した。これらの結果より, 解析結果の拡散幅は実験結果に比べて狭い傾向となっているが, 径路並びに温度低減率の特性は実験結果と良好に整合しているとみなせる。拡散幅が実験結果に比べて狭くなる原因は, 水面付近における密度流効果並びに周囲流速のシア

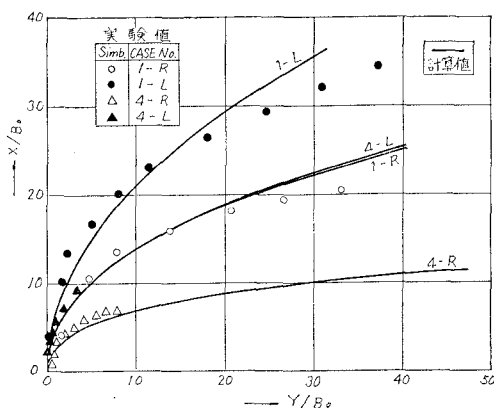


図-9 噴流径路に関する解析結果と実験結果の比較

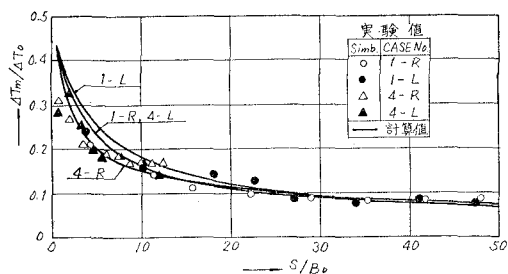


図-10 温度低減率に関する解析結果と実験結果の比較

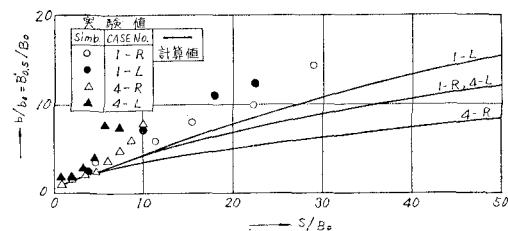


図-11 噴流拡散幅に関する解析結果と実験結果の比較

一効果が無視されているためと考える。

6. むすび

ディフューザ型水中放水口より, 浅水域へ放出される温水噴流の拡散特性について実験的検討を行なった結果, 温水噴流の拡散性状は平面2次元噴流に近似している関係が見出された。そこで, 平面2次元噴流の数値モデルを作成し, 数値解析を実施した結果, 放水口近傍から中間領域に到る温水噴流の拡散特性を説明できる結果を得た。しかしながら, このような噴流型の解析モデルが実規模現象に適用できる範囲は, 拡散場である海域の流れに関する時空間の定常性や均一性から制限を受けるであろう。試みに, その適用範囲を想定すれば, 空間スケールとして最大 1 km 程度と考える。

参考文献

- 1) 片野尚明・河村博美・和田 明: 水中放流方式による温排水の低減化に関する研究, 第24回海講論文集, pp. 476-480, 1977.
- 2) 片野尚明・和田 明・落合 実: スロット状温水噴流の混合稀釈特性について, 第25回海講論文集, pp. 528-532, 1978.
- 3) Hirst, E. A.: Analysis of round, turbulent, buoyant jets discharged to flowing stratified ambients, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-4685, 1971.
- 4) Fan, L. N.: Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids, CIT, Ph. D., 1967.