

温排水水中放流実験における歪み模型の適用性

加 藤 正 進*・田 中 伸 和*・和 田 明**

1. はじめに

水中に放流された温排水の水温低減過程においては、放流管近傍領域すなわち放流された温排水が噴流の特性を保持している領域における混合稀釈過程が主要な役割を占めており、この領域における混合稀釈現象は温排水放流の初期条件や地形条件により左右される。

単一管あるいはスロットから水中へ水平・鉛直放流される重力噴流に関しては、多くの研究者により理論的・実験的に検討されており、その混合稀釈特性は噴流の初期条件に関する諸量により表現することができる。

また、複数の放流管から放流される重力噴流の場合には、個々の噴流が相互に干渉し合いスロット噴流と同様な状態へと移行する現象に着目し、干渉点において単一管理論とスロット理論とを接合して複数水中放流管の混合稀釈特性を表現しようとする試みがなされている。

重力噴流に関するこれらの研究結果は、水中噴流の諸特性に関する基礎的な知見を得る上で重要であるが、実際の温排水水中放流構造物が有する混合稀釈特性を検討する場合には、放流地点の地形特性や海底面と水面の存在が混合稀釈現象を複雑化するために、これらの研究結果を直接適用できない場合も多く、地形条件を考慮した水理模型実験手法による検討が必要となる場合が多い。

水中に放流される温排水の混合稀釈現象を実験対象とする水理模型は、原則的には無歪み模型でなければならないが、放流構造物の総延長が長い multiport diffuser から放流される温排水の混合稀釈現象を実験対象とする場合などには、乱流噴流の特性を保持しつつ広範囲の海域を模擬しなければならないため、実験水槽の大きさの制約から無歪み模型による水理実験が困難となる場合が生ずる。

本報告は、diffuser タイプの水中放流構造物から放流される温排水の混合稀釈現象を歪み模型上に再現するための相似則を検討し、その適用性を基礎水理実験により検証した結果を述べるものである。

2. 温排水水中放流水理実験における基本的相似則

水中に放流される温排水の水温低減過程は、主として放流管近傍領域における混合稀釈過程に支配され、水温の低減特性は温排水放流の初期条件により左右される。

空間的に一様な密度を有する海域へ放流される温排水の混合稀釈現象を考える場合には、温排水の混合稀釈率 $\Delta T/\Delta T_0$ は、温排水放流の初期条件から決定される無次元量の関数として式 (1) で表現することができよう。なお水中放流管の一般的形状を図-1 に示す。

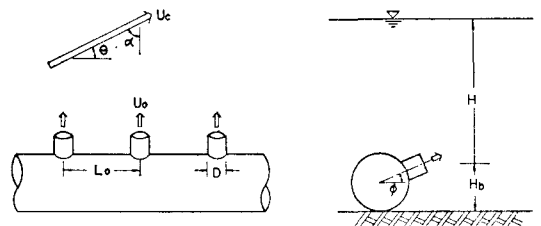


図-1 diffuser の諸元

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = f\left(F_{i_0}, R_{e_0}, \frac{H}{D}, \frac{L_0}{D}, \frac{H_b}{D}, \frac{U_0}{U_0}, \alpha, \phi\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{i_0} = \frac{U_0}{\sqrt{\epsilon_0 g D}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_0 = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$R_{e_0} = \frac{U_0 D}{\nu_0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

ΔT : 混合稀釈後の温排水水温と周囲水温との差

ΔT_0 : 放流水温と周囲水温との差

F_{i_0}, R_{e_0} : 放流水内部フルード数とレイノルズ数

$\Delta \rho_0$: 放流水密度と周囲水密度との差

ρ_0, ν_0, g : 放流水密度と動粘性係数および重力加速度

U_0, U_0 : 放流水流速と海域の流れの速さ

D, L_0 : 放流管管径と間隔

H, H_b : 放流水深および放流管の海底よりの設置高さ

* 正会員 工修 電力中央研究所土木技術研究所

** 正会員 工博 電力中央研究所土木技術研究所

α : 海域の流れの方向と放流方向とがなす角度

ϕ : 海底面と放流方向とがなす角度

温排水の混合稀釈現象が式(1)に従うものとするれば、原型の現象を模型上に再現するためには、式(1)右辺の各無次元量を原型と模型とで同一に保つ必要がある。

式(1)右辺第3項および第4項より次式が得られる。但し添字 r は原型量と模型量との比を意味する。

$$(H/D)_r = (L_0/D)_r = 1 \dots\dots\dots (5)$$

放流水深 H は鉛直距離、放流管間隔 L_0 は水平距離に関連する量であるから、模型の水平縮尺を $(X)_r$ 、鉛直縮尺を $(Z)_r$ とすれば式(5)より次式が得られる。

$$(X)_r = (Z)_r \dots\dots\dots (6)$$

すなわち、水中に放流される温排水の混合稀釈現象を実験対象とする水理実験においては、基本的には無歪み模型の使用が条件づけられる。

式(1)右辺第1項より、内部フルード数一致の条件が要求され、右辺第6項より $(U_0)_r = (U_c)_r$ が要求されるから、模型縮尺を $(S)_r$ とすれば流速縮尺は次式で表わされる。

$$(U_0)_r = (U_c)_r = [(\varepsilon_0)_r (S)_r]^{1/2}, \quad (F_{i_0})_r = 1 \dots\dots (7)$$

もし、 $(\varepsilon_0)_r = 1$ という条件が満足されているならば、式(7)はいわゆるフルードの相似則となり、放流水のフルード数を F_0 とすれば次式が得られる。

$$(U_0)_r = (U_c)_r = (S)_r^{1/2}, \quad (F_0)_r = 1 \dots\dots\dots (8)$$

式(1)右辺第2項よりレイノルズ数一致の条件が要求されるが、一般には原型と模型とのレイノルズ数を一致させることはできない。しかし、レイノルズ数が十分に大きな場合には混合稀釈現象におよぼすレイノルズ数の影響は無視できるものと考えられ、その限界条件は大略次式で表わされる。

$$Re_0 = U_0 D / \nu_0 > 10^3 \dots\dots\dots (9)$$

模型におけるレイノルズ数が式(9)で示される限界条件を満たすためには、水理模型の縮尺は次式の条件を満足する必要がある。但し $(Re_0)_p$ は原型のレイノルズ数である。

$$(S)_r < 10^{-2} [(Re_0)_p (\nu_0)_r (\varepsilon_0)_r^{-1}]^{1/3} \dots\dots\dots (10)$$

もし原型と模型との動粘性係数が等しく、さらに $(\varepsilon_0)_r = 1$ が満足されているフルード模型においては、式(10)は次式で近似できる。

$$(S)_r < 10^{-2} (Re_0)_p^{2/3} \dots\dots\dots (11)$$

式(1)右辺の他の無次元量は、無歪み模型条件、内部フルード数あるいはフルード数一致の条件を適用することにより、原型と模型とで一致する。

以上の結果より、式(6)、式(7)あるいは式(8)、および式(10)あるいは式(11)の相似条件が満足されている水理模型上には、水中放流された温排水の混合稀釈現象が再現可能であるものと考えられる。

3. 歪み模型による温排水水中放流水理実験の相似則

水中に放流された温排水の放流管近傍領域における混合稀釈現象を対象とする水理模型は、前述の通り原則的には無歪み模型でなければならない。しかし、総延長が長い multiport diffuser から水中放流される温排水の混合稀釈特性を検討する場合などには、噴流の乱流特性を保持する条件から無歪み模型による水理実験が困難となり、歪み模型による水理実験が必要となる場合が生ずる。

本章においては、比較的浅水の領域に設置された multiport diffuser から水中に放流される温排水の混合稀釈現象を歪み模型上に再現するための相似則を検討する。

臨海に立地する発電所の温排水を水中放流する場合には、その量が多量であるために複数管による水中放流となり、放流管は工事上の理由などのために水深 10~20 m の比較的浅い海域に設置される場合が多いが、水中放流された温排水は噴流の相互干渉と浅水効果によりほぼ一様に混合し、空間的に一様な温度上昇値を有する混合領域が diffuser の近傍に形成される傾向にある。

Adams¹⁾ はこのような混合稀釈現象に着目し、浅水域に設置される multiport diffuser 近傍の混合領域における稀釈率の推定式を理論的に導き、Harleman らの実験結果によりその妥当性を確認している。

Adams によれば、陸地境界の影響が無視できる浅水域に設置された multiport diffuser から、海域の流れの方向と一致する方向へ温排水を水中放流する場合には、混合領域における稀釈度は次式で表わすことができる。

$$\frac{\Delta T_0}{\Delta T} = 2 \left(\frac{U_c H L}{\pi U_0 D^2 N} \right) + 2 \left[\left(\frac{U_c H L}{\pi U_0 D^2 N} \right)^2 + \frac{H L}{2 \pi D^2 N} \right]^{1/2} \dots\dots (12)$$

ここで N : 放流管本数, L : diffuser の長さ

式(12)で表現される混合稀釈度が原型および模型とで同一であるためには、 $(\Delta T_0 / \Delta T)_r = 1$ の条件より次の関係が成立する必要がある。

$$\left(\frac{U_c}{U_0} \right)_r = 1 \dots\dots\dots (13)$$

$$\left(\frac{H L}{D^2 N} \right)_r = 1 \dots\dots\dots (14)$$

式(13)の条件は、式(7)あるいは式(8)により一般に成立する条件である。

個々の放流管より水中放流された温排水の混合稀釈現象を模型上に再現するためには、式(5)より $(H/D)_r = 1$ が要求され、また模型における diffuser の長さは水平縮尺で決定されるべきであるから、式(14)より次式が得られる。

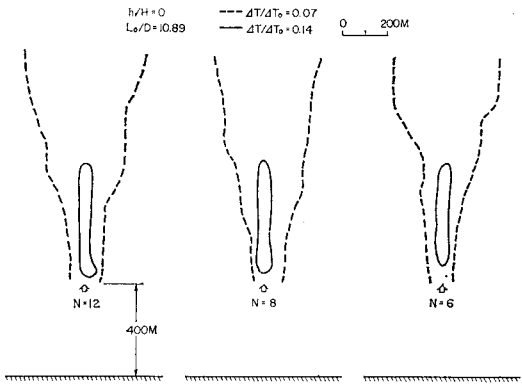


図-2 表層水温上昇範囲の比較 (ケース I)

って定義し、 X は浮上点を原点とする放流方向の距離、 h は測定水深 (水面よりの距離) である。

実験で得た結果によれば、各水深で測定した中心軸水温低下および拡散幅は歪み度の相違による影響を受けずにほぼ同一であり、温排水水中放流により生起する3次元的水温構造が歪み模型上に再現可能であることを示している。

図-5 は、ケース II およびケース III で得た表層水温上昇範囲である。この結果によれば、実験で得た表層水温上昇範囲は無歪み模型 ($N=12$) の場合に最大であり、

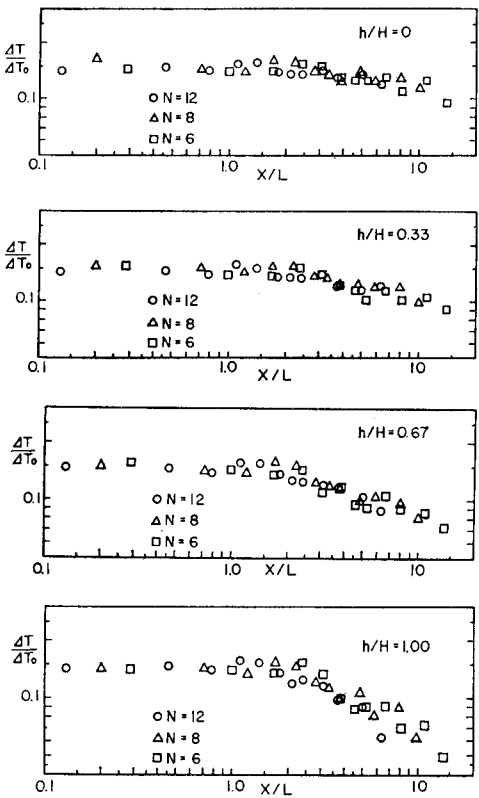


図-3 中心軸水温低下の比較 (ケース I)

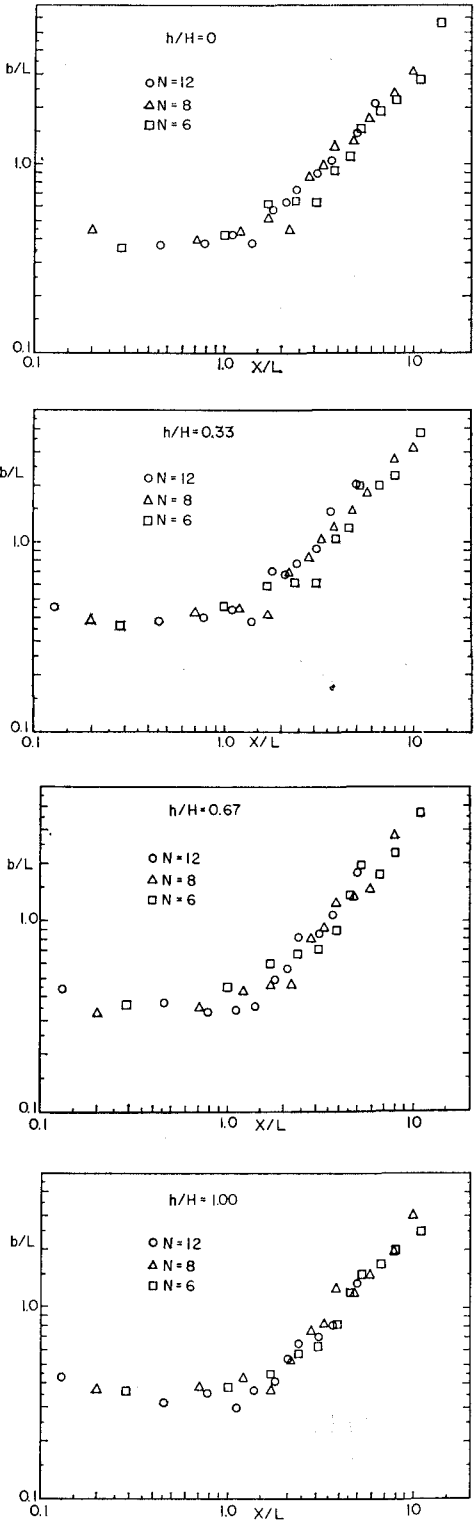
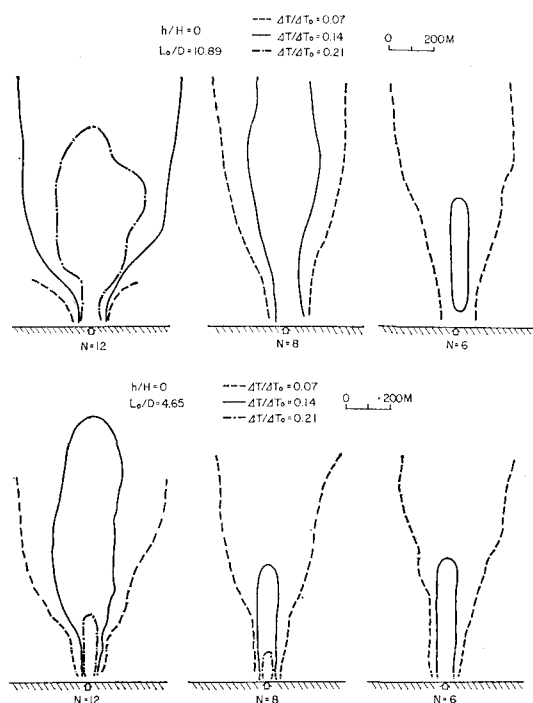


図-4 温排水拡散幅の比較 (ケース I)



図—5 表層水温上昇範囲の比較
(ケースⅡ, ケースⅢ)

歪み度の増大とともに減少する傾向にある。

防波堤や護岸に放流管を配列する場合には、沖合水中放流と異なり放流管背後からの周囲水の連行は不可能であり、周囲水の連行加入現象は壁に沿う方向のみに制約される。しかし放流管の総延長が長い場合には、連行された周囲水が管列中央部まで到達しない状態が生じ、管列中央部での混合稀釈効果が低下する。この現象は放流管列の総延長の減少に伴ない緩和されるため、模型の歪み度の増大とともに放流管本数を減少させる歪み模型に

おいては、管列中央部での混合稀釈効果の低下現象が緩和され水温上昇範囲を過小に見積る恐れがある。

これらの結果より、壁沿いに放流管が配列されている水中放流構造物の場合には、本歪み模型の適用による混合稀釈特性の検討は困難であるものと考えられる。

5. 結 論

浅水域に設置される multiport diffuser の歪み模型に関する相似則を誘導し、その適用性を水理実験により検討して以下の結論を得た。

- (1) 浅水域 multiport diffuser の歪み模型に関する相似則を検討して、式 (15) から式 (20) に示す相似条件を得た。
- (2) diffuser が陸地境界の影響が無視できる沖合に設置されている場合には、式 (15) から式 (20) に示す相似条件を適用することにより、温排水水中放流により生起する水温構造を歪み模型上に再現することが可能である。
- (3) 放流管が壁沿いに配列されている diffuser の場合には、陸地境界や diffuser の長さなどが温排水の混合稀釈現象に大きな影響を及ぼすため、本歪み模型の適用は困難である。

参 考 文 献

- 1) Adams, E.: Submerged multiport diffusers in shallow water with current, M.I.T. Summer Session, Chapt. 4, 1972.
- 2) Koh, R. C. Y., Brooks, N. H., List, E. J. and Wolanski, E. J.: Hydraulic modeling of thermal outfall diffusers for the San Onofre nuclear power plant, California Inst. of Technology Report No. KH-R-30, January 1974.