

淡塩成層海域における温排水の浅海噴流特性

宮 池 克 人*・角 湯 正 剛**

1. ま え が き

臨海に立地する火力・原子力発電所の温排水は、表層放流方式が一般的であったが、最近、水温の影響の低減化対策として、水中放流方式が2,3の発電所で採用されている。この方式の特徴は、噴流による混合稀釈機能により、従来の表層放流方式にくらべて、温排水による水温上昇範囲を大幅に縮小することができることにある。

水中放流設備として、マルチポートディフューザを選定し、これを水深が10m以浅の浅水域に設置する場合を想定する。ポートの口径として、1~2m程度をとると、水深とポート径の比が5~10となり、温排水の噴流は、水面や底面境界の影響をうけて、全水深にわたってひろがる、浅海噴流となる。このため、噴流の混合稀釈過程を支配する周囲水の連行加入は、鉛直方向からは期待できず、水平方向のみに依存するようになるため、ディフューザのポートの形状や配置が、混合稀釈を支配する重要な条件となってくる。

これらの水理現象と、ディフューザの水理設計に関する研究は、多く報告¹⁾されているが、いずれも密度成層が存在しない海域に放流する場合を想定している。図-1は、大河川の流入するI湾湾奥での淡塩成層の季節変

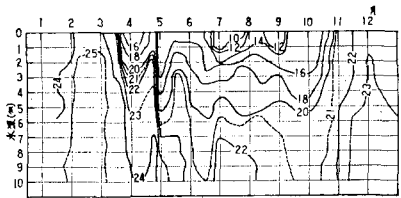


図-1 淡塩成層の観測例(密度 σ_t の鉛直分布の季節変化)

化を、密度の鉛直分布で示したものであるが、冬季を除き顕著な密度成層が形成されていることが認められる。本報告は、河口域や大河川の流入する内湾など、淡塩成層が顕著に形成される海域に、上述のマルチポートディフューザにより温排水を放流する場合の、浅海噴流特性とディフューザの水理設計について、水理模型実験によ

り検討した結果を述べたものである。

2. マルチポートディフューザの水理設計

浅海噴流となる放流温排水の水温低減は、マルチポートディフューザの形状に関する諸元を用いて、たとえば次式で示す無次元数の関数として表わされる。

$$\frac{T-T_a}{T_0-T_a} = \frac{\Delta T}{\Delta T_0} = f\left(F_{i0}, \frac{H_1}{D}, \frac{H_2}{D}, \frac{L}{D}, \frac{W}{B}, \frac{x}{B}, \frac{y}{B}, \frac{z}{H}\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_0 : 放流水水温、 T_a : 周囲水水温、 T : 噴流水温、 D : ポート口径、 H_1, H_2, H : 水深、 L : ポート間隔、 W : ディフューザと陸地境界の距離、 B : ディフューザの全幅、 x, y, z : それぞれ噴流の流下方向、横断方向、鉛直方向の距離、であり図-2の通りである。また、 F_{i0} : ポートでの内部フルード数であり、次式で定義する。

$$F_{i0} = \frac{u_0}{\sqrt{\varepsilon_0 g D}}, \quad \varepsilon_0 = \frac{|\rho_a - \rho_0|}{\rho_a}, \quad R_{e0} = \frac{u_0 D}{\nu_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u_0 : 放流流速、 g : 重力加速度、 ρ_a : ポート水深での周囲水密度、 ρ_0 : 放流水密度、 ν_0 : 放流水動粘性

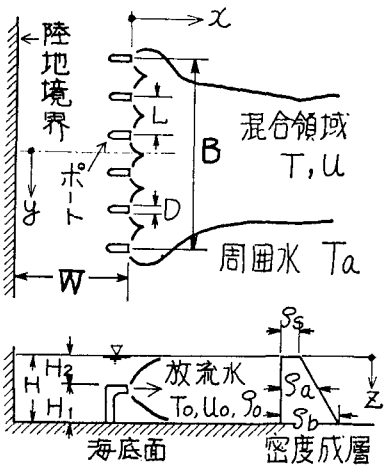


図-2 マルチポートディフューザの諸元

* 工修 中部電力(株)総合技術研究所
** 工修 (財)電力中央研究所土木技術研究所

係数, $R_{\theta 0}$: ポートでのレイノルズ数であり, 図-2 の通りである。

式 (1) には, 潮汐流など, 周囲水の流動と, 密度成層の効果に関する項は, 含んでいない。

図-2 に示すマルチポートディフューザの水理設計に供する目的で, ポート数 6 のディフューザについて, 水理実験を実施した。実験は, 密度成層が存在しない場合, および 図-2 に示した直線的に変化する密度成層が存在する場合のそれぞれについて, L/D , H_1/D , W/B 等をパラメータとして実施した。

図-3, 4 は, $x/D=125$ の位置の噴流横断面で測定された最高水温をその位置の噴流水温として, この低減特性を示したものである。図中には, ポートでの内部フルード数 F_{i0} , および密度成層が存在する場合には, 表・底層間の密度差 ($\rho_b - \rho_s$) を記載してある。図-3 には, F_{i0} および ($\rho_b - \rho_s$) が水温低減におよぼす影響を調べるため, 他のパラメータを同一にして, 比較実験をおこなった結果もプロットしてある。($L/D=3.75$ および 7.5 で実施した結果の一部がこれに相当する。) これらの実験範囲内では, F_{i0} や ($\rho_b - \rho_s$) が $\Delta T/\Delta T_0$ の値におよぼす影響は小さく, 無視できるものと判断できる。なお, 放流水の周囲水との密度差 ($\rho_a - \rho_0$) は, 密度成層が存在しない場合 $0.0024 \sim 0.0029 \text{ g/cm}^3$, 密度成層が存在する場合 $-0.0027 \sim -0.0035 \text{ g/cm}^3$ の範囲で実験を実施した。

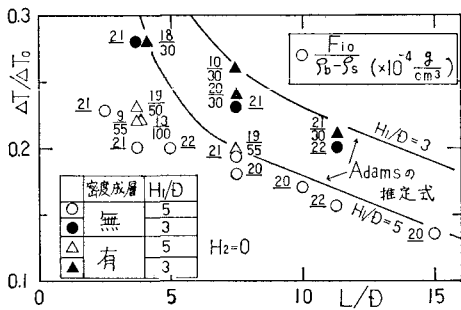


図-3 噴流水温 ($x/D=125$, W/B が十分大きい条件)

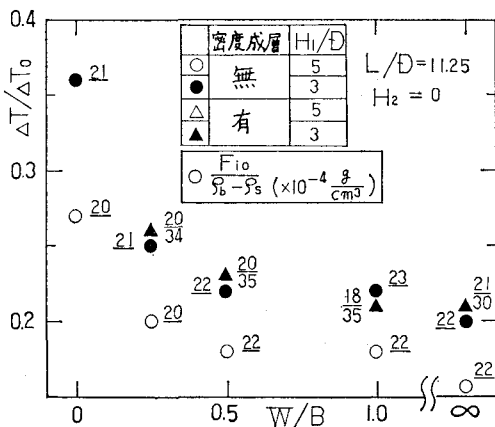


図-4 噴流水温 ($x/D=125$, W/B の効果)

実験結果によれば, 噴流水温は, ポート近傍で急激に低減するが, その後の流下方向の噴流水温の低減割合は非常に小さい。図-3, 4 は, この性質を考慮して, マルチポートディフューザの水温低減性能の予測に利用することができる。

図-3 は, W/B が十分大きい条件のもとでおこなった実験結果である。図中には, Adams が導いた, 混合領域における水温の推定式²⁾ もあわせて示す。図より, 混合領域の水温は, 密度成層の有無によらず同一の値を示し, この値は L/D が 7 以上の範囲では, Adams の推定式と良好な一致を示すことが認められる。

図-4 は, 陸地境界の影響を調べる目的でおこなった実験結果を示す。 W/B が小さくなるにしたがって, ディフューザの水温低減性能が急激に低下することが認められる。 W/B の値が 0.5 以上あれば, 実用的には陸地境界の影響は無視して差し支えないと考えられる。

3. 浅海噴流の構造

前章では, 密度成層の有無によらず, 混合領域の水温は, 式 (1) に示す無次元数の関数として, 大略あらわすことができることを示した。本章では, 浅海噴流が形成する, 水温, 密度, 流速などの分布構造を詳しく調べ, 密度成層の存在の有無による浅海噴流の相異点を明らかにする。

(1) 噴流の水温分布

密度成層の条件として, 図-5 に示す 3 種類のパターン A, B, C および密度成層が存在しないパターン D について, 実験を実施した。実験条件は, ポート数 6, $L/D=11.25$, $H_1/D=3.0$, $H_2/D=0.95$, $W/B=0.5$ である。

図-6 は, 浅海噴流の中心軸上で測定された水温の鉛

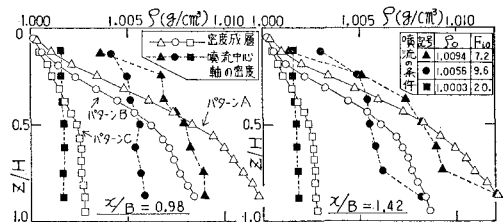


図-5 密度成層と噴流中心軸上の密度の鉛直分布

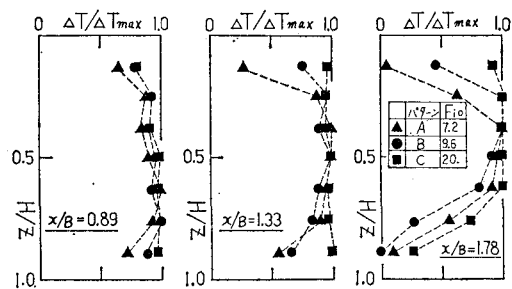


図-6 噴流中心軸上の水温鉛直分布

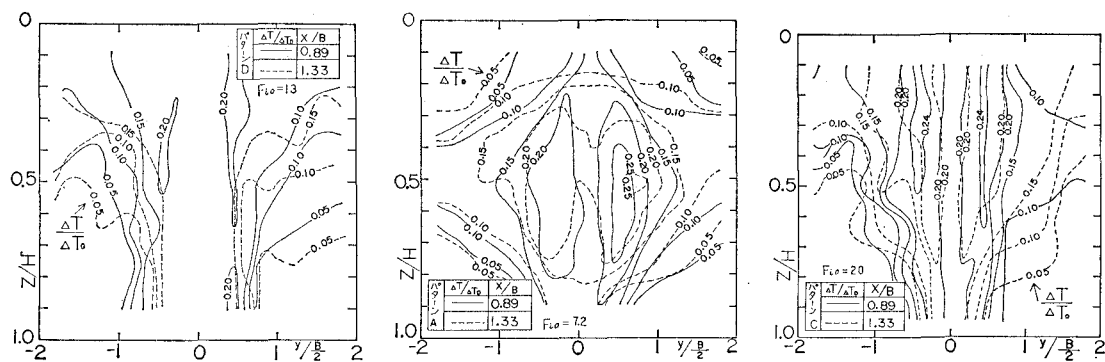


図-7 噴流横断面での水温分布

直分布を一般化して示す。ここに、 $\Delta T_{\max}$ は測定された最高水温 $T_{\max}$ を用いて、次式で定義する。

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_a$$

図より、 $x/B=0.89$ 付近で全水深にわたり様な水温分布を呈していた浅海噴流は、流下するにしたがって、密度成層の影響を受け、 $z/H=0.4\sim 0.5$ 付近に最高水温を示す水温分布を形成していく。このことは、全水深にわたり強い鉛直混合が生じていた浅海噴流が、流下とともに密度成層流へと変化していく過程に相当する。図-5 に示した噴流中心軸上における密度の鉛直分布は、このことを示している。

図-7 は、 $x/B=0.89$ および 1.33 の位置の噴流横断面での水温分布を示す。興味深いのは、高水温域が噴流中心軸の両側に形成されることである。これは、密度成層の存在の有無によらず認められ、浅海噴流の横断面の水温は、必ずしも一様とは言えないことを示している。

この高水温域の発生機構は、次のようである。マルチポートディフューザでは、噴流にとり込まれる連行水の多くを、背後水域からの供給によっている。この連行水は、ポート近傍に形成される放流水のブルームの過程で、その大部分がブルーム内にとり込まれる。各ブルームは、やがて隣り合うブルームと合体し、浅海噴流を形成することになるが、放流水の急激な水温低下は、これまでに終了する。一方、ディフューザの両端部に位置するブルームは、連行水の供給をディフューザの側面からも受けるため、これによって生ずる噴流中心軸に直角方向の流れにより、ブルーム中心軸が噴流中心方向へおし曲げられ、隣り合うブルームと相互干渉をおこす。このため、水温の低下が妨げられ、これが噴流中心軸の両側に形成される高水温域の成因と考えられる。

(2) 水温分布の一般化

水中放流する温排水の遠方領域での水温分布を予測するためには、放水口近傍領域の温排水の拡散特性に基づいて、仮想放水口を設置し、表層放流方式の数理モデルに接続する方法が、しばしば用いられる。この仮想放水口の条件の設定に役立てるため、噴流中心軸の両側に高

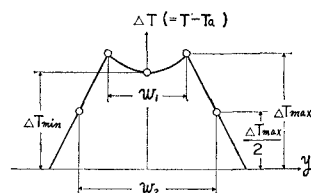


図-8 水平方向の水温分布の一般化

表-1 実験条件

パターン	I	II
密度成層	なし	あり(図-2 参照)
$\rho_b - \rho_s$	0	$50 \sim 60 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$
$\rho_a - \rho_0$	$21 \sim 23 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$	$-40 \sim -60 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$
F_{10}	22~23	14~16

ポートの数 $N=3, 6, 9, 12, 16, 22$

$L/D=11.25$, $H_1/D=3$, $W/B=0.5$, $H_2=0$

水温域が形成されるという特徴を考慮して、噴流中心軸に直交する水平方向の水温分布を、図-8 に示す形状で一般化することを試みる。水温や距離などに関する諸元は、図-8 の通りである。実験は、表-1 に示す条件で実施したが、とくにポートの数 N をパラメータとして考慮した。

実験結果より、 $\Delta T_{\max}$, $\Delta T_{\min}$ (それぞれ、噴流中心軸の両側の高水温域の最高上昇水温、および、これらにはさまれる区間の最低上昇水温) を求め、水温上昇分布より w_1 , w_2 を求めた。これらの結果を、図-9 (1)~(4) に示す。図は、密度成層の有無による結果の相異を対比して示している。図より、次のことが考察できる。

加藤²⁾ は、水中放流する場合の温排水の遠方領域における水温分布をも水理模型実験で予測するために、歪み模型の適用に関する相似律を示した。この相似律は、次式で与えられる。

$$L_p/L_m = D_p/D_m = z_p/z_m \dots\dots\dots(3)$$

$$N_p/N_m = (x_p/x_m)/(z_p/z_m) = (y_p/y_m)/(z_p/z_m) \dots\dots\dots(4)$$

ここに、添字 p および m は、それぞれ原型値、および模型値を意味する。式 (3), (4) によれば、 $N_p=22$

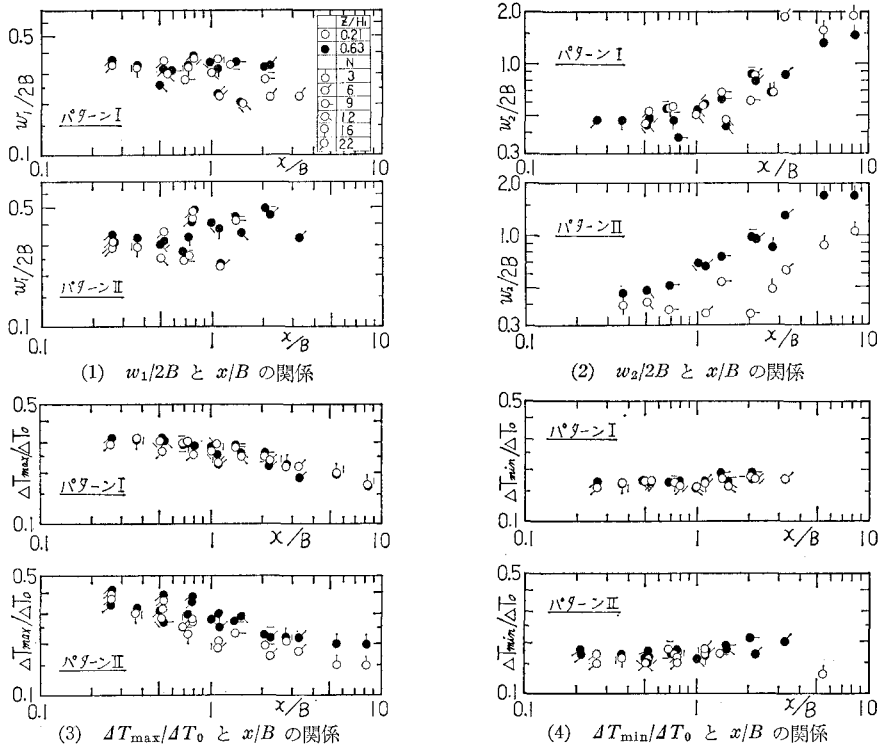


図-9 水平方向の水温分布に関する実験結果

とした場合、本実験条件は歪み度 $N_p/N_m=1$ から、 $N_p/N_m=7.33$ の範囲で実験をおこなっていることになるが、これらの結果から得られた噴流の水温やその広がりに関する諸量 $\Delta T_{\max}$, $\Delta T_{\min}$, w_1 , w_2 などは、歪み度によらず同一の曲線上に集約されてプロットされることが、図-9 (1)~(4) から認められる。このことは、浅海噴流により生じられる3次元的水温構造が、密度成層の存在の有無によらず歪み模型上に再現可能であることを示している。したがって、式 (3), (4) は、密度成層の存在の有無によらず、また、陸地境界の影響を受けない沖合で放流する場合はもとより、 $W/B=0.5$ 程度までは、成立するものと考えられる。

噴流中心軸の両側の高水温域は、 $N=6$ 以上の実験条件で認められ、また W/B が十分大きくても存在する。この高水温域は、噴流内部の水平方向の混合により、やがて消滅するが、その位置は、図-9 (3), (4) より、 $\Delta T_{\max}/\Delta T_0$ と $\Delta T_{\min}/\Delta T_0$ が一致する、 $x/B=2\sim3$ の範囲と考えられる。

噴流の3次元的水温構造は、密度成層の存在の影響を受ける。噴流水温の広がりに関する量 $w_2/2B$ は、図-9 (2) に認められるように、パターンIIの場合は、 z/H_1 により値が異なり、パターンIのように z/H_1 によらず一定の値を示すことはない。これは、浅海噴流が密度成層の影響を受けて、高水温域が中層部に形成される結果による。しかし、中層部における $\Delta T_{\max}/\Delta T_0$ は、図-9

(3) に認められるように、 x/B が1以下の範囲では、パターンIよりやや大きめの値を示すものの、 x/B が1より大きい範囲では、パターンIと同等の値を示す。 $\Delta T_{\min}/\Delta T_0$ は、図-9 (4) に認められるように、密度成層の有無によらず、ほぼ同一の値を示す。

図みに、図-3 に示した実験結果は、 x/B に換算すると、2.2 ($L/D=11.25$ のとき) から 1.0 ($L/D=2.5$ のとき) の範囲であり、上記の考察を加えあわせると、図-3 に示した Adams が与える混合領域の水温は、 x/B が2~3 より大きい範囲で適用されるものと考えられる。

(3) 流速分布

図-10 は、噴流横断面で観測された最大流速 $u_{\max}$ を、

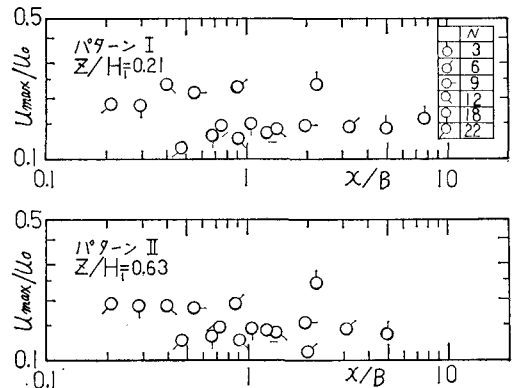
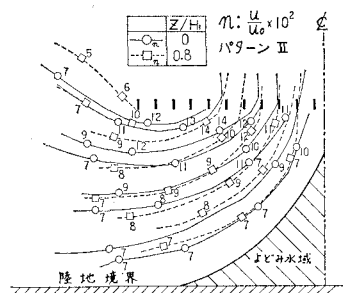


図-10 噴流の最大流速

x/B との関係で示す。実験条件は、表—1 に示したものと同一である。図より、噴流の最大流速は、 $x/B > 1$ の範囲では、放流流速の約 15% 程度と見積もられる。これは、ポート数 N や密度成層の存在の有無によらない。なお最大流速は、パターン I では表層付近に、パターン II では、中層付近に認められるが、 z/H_1 による流速の顕著な差異は、いずれのパターンも認められない。

噴流中心軸に直交する水平方向の流速分布は、詳細な測定が困難であったが、水温分布の広がりに関する量 w_2 を定義した位置では、ほぼ $u_{\max}/2$ の流速値となる。

図—11 は、ディフューザ背後水域の流況を、フロー



図—11 ディフューザ背後の流況

ト追跡により、測定したものである。実験条件は、表—1 のパターン II, $N=22$ 本の場合である。噴流にとり込まれる連行水は、ディフューザ背後水域の全断面を有効に利用して流動するが、ディフューザ中央部の陸地境界寄りには、よどみ水域が形成される。

4. ま と め

密度成層が形成される海域へ、マルチポートディフューザにより温排水を放出する場合、これによって形成される浅海噴流は、噴流水温の鉛直分布構造に密度成層の影響が認められるものの、水温低減性能や放流流速の減衰は、密度成層が存在しない場合のそれと同程度であると考えられる。

また、加藤らの示した、水中放流実験における歪み模型の適用に関する相似律は、海域に密度成層が存在する場合にも成立するものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 加藤正進・和田 明: 水理模型による温排水拡散予測手法の適用性, 第 27 回海講論文集, pp. 502~506, 1980.
- 2) 加藤正進・田中伸和・和田 明: 温排水水中放流実験における歪み模型の適用性, 第 24 回海講論文集, pp. 481~485, 1977.