

スロット状温水噴流の混合稀釈特性について

片野 尚明*・和田 明**・落合 実***

1. ま え が き

温排水を海域に放流する場合の水温低減対策として水中放流方式が有効と考えられている。筆者らは先に、温排水の水温低減化に関する研究の一環として、一様密度の静止水域および流れ水域を対象にして、単一水平放流管による温水噴流の混合稀釈過程に関して実験と理論の両面から検討を行い、温水噴流に関する基本的な拡散特性を明らかにした^{1),2)}。

しかし、大量の温排水を水中放流方式で処理する場合の放流構造物としては、通常、水平方向の分散を計算するためにスロット型およびマルチパイプ型（複数の放流管）などが用いられる傾向にある。これらの放水口形状を用いた場合の重力噴流に関する実験例は単一円管などにくらべて数少なく、しかも数値解との比較に耐え得る実験データはほとんど見当たらない。

また、マルチパイプからの重力噴流の場合には、相隣り合った単一円管噴流が相互に干渉して併合した後は、スロット重力噴流と見なすことができるとされていて、数値解析上それらの等価関係について二、三の提案がなされている^{3),4)}。さらに、マルチパイプの諸元をスロットの諸元へ変換する関係式が multi-port diffuser などに適応されているが、その適用範囲は明確でない。

本報告は、スロット型およびマルチパイプ型放水口による静止水域中の温水噴流の拡散現象に関して、水理実験と数値解析手法を用いて検討し、放水口の形状や初期条件の違いによる拡散特性の変化およびマルチパイプ型をスロット型へ変換する関係式の適用範囲について得られた結果を述べるものである。

2. 水理実験の内容

水理実験の基本的考え方として、第一に、温水噴流の拡散現象におよぼす放水口背面や底面境界の影響をできる限り無視できるような放水口配置としたこと、第二に、温水噴流の拡散現象は噴流中心軸に対して左右の対称性を仮定して面対称3次元として取り扱ったこと、第

三に、着目する拡散現象は放水口から水面付近までの領域としたことなどである。

用いた拡散水槽は長さ 20 m、幅 1.8 m、高さ 1 m の規模を有する片面ガラス張り水槽で、放水口はその中央部ガラス面側に接して配置した。図-1 はスロット型およびマルチパイプ型放水口の設置状況、模式的な温水噴流の拡散概況、並びに以下に用いる記号の説明を表示したものである。

実験はスロット型およびマルチパイプ型のそれぞれに

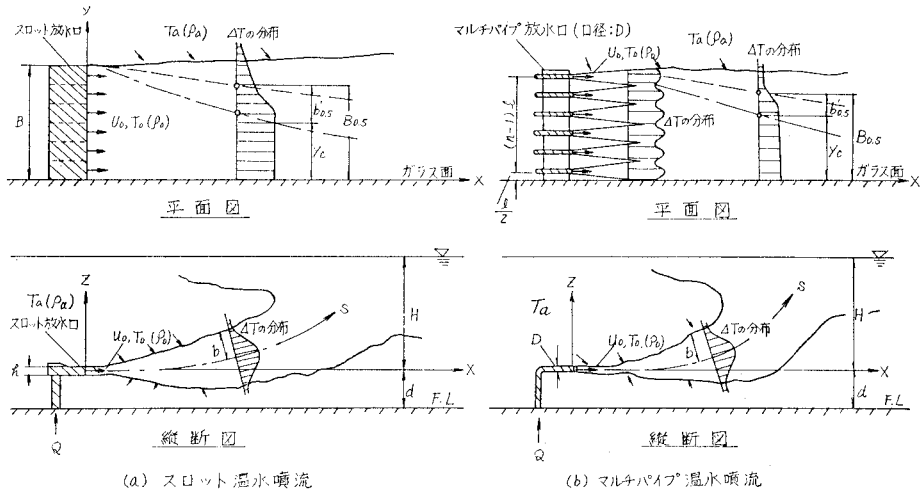
表-1 スロット型の実験条件

Case No.	h (cm)	B (cm)	u_0 (cm/sec)	$\frac{B}{h}$	F_s	R_s ($\times 10^3$)	Remark
A-I-1		9	14	18	12.8	0.9	$H=30$ cm
2			28		24.6	1.8	$d=10\sim 20$ cm
3			42		36.4	2.6	$\Delta T_0=8.2\sim 9.4^\circ\text{C}$
A-II-1	0.5	15	14	30	12.8	0.9	
2			28		24.9	1.8	
3			42		36.4	2.6	
A-III-1		21	14	42	13.2	0.9	
2			28		24.9	1.8	
3			42		38.9	2.6	

表-2 マルチパイプ型の実験条件

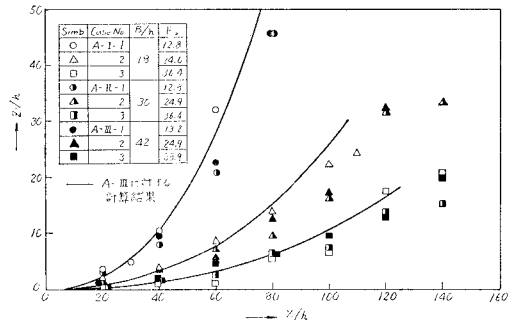
Case No.	D (cm)	n (本)	l (cm)	u_0 (cm/sec)	$\frac{l}{D}$	F_r	R_r ($\times 10^3$)	Remark
B-I-1		3	12	13.9	15	10.1	1.4	$H=24$ cm
2				27.9		19.3	2.8	$d=16$ cm
3				41.8		29.9	4.2	$\Delta T_0=7.7\sim 10.7^\circ\text{C}$
B-II-1	0.8	5	8	13.9	10	11.1	1.4	
2				27.9		21.6	2.8	
3				41.8		31.6	4.2	
B-III-1		9	4	13.9	5	11.2	1.4	
2				27.9		19.9	2.8	
3				41.8		31.2	4.2	
B-IV-1	1.6	5	4	13.9	2.5	7.2	2.8	
2				27.9		14.2	5.6	
3				41.8		21.0	6.3	

* 正会員 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
*** 正会員 工修 日本大学生産工学部土木工学科



図—1 スロット型およびマルチパイプ型放水口からの温水噴流の拡散模式図と記号の説明図

対して 表—1 および 表—2 に示す実験条件で実施した。ただし、表—1 中の記号で B はスロット幅、 h はその開口高、 u_0 は放出流速、 F_s および R_s は h を用いた場合の放出内部フルード数と放出レイノルズ数である。また、表—2 中の記号で n は管本数、 D は管径、 l は管間隔、 u_0 は放出流速、 F_r および R_r は D を用いた場合の放出内部フルード数と放出レイノルズ数である。さらに、表—2 の最下段に示すケース B-IV は、後述の式 (7) を用いれば 表—1 のケース A-III と同等の条件となり、スロット型とマルチパイプ型の実験結果を直接比較することができる。



図—2 スロット型温水噴流の径路

3. 実験結果

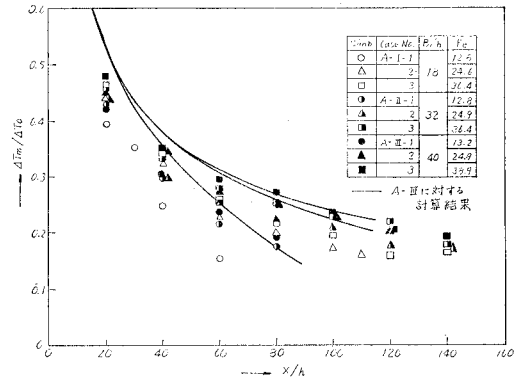
(1) 噴流断面内の水温分布形

スロット温水噴流中心軸に直交する断面内の水温分布形は、水深方向には単一円管の重力噴流と同様にガウス分布、幅方向には噴流中心軸近傍では一様温度、周囲水と接する端部においてはガウス分布を満足する。

一方、マルチパイプ温水噴流においても、噴流中心軸に直交する方向並びに幅方向の端部の水温分布形はガウス分布となる。さらに、幅方向においては相隣り合った単一円管噴流が併合した後は、スロット同様な一様温度の噴流幅 y_c の存在が認められた (図—1 参照)。噴流の幅方向に温度勾配が零となる y_c の存在は、近似的に鉛直 2 次元現象の成立を意味していると解釈できる。

(2) 温水噴流の径路と温度低減率

スロット型の噴流径路および噴流径路に沿う温度低減率 $\Delta T_m/\Delta T_0$ の実験結果をそれぞれ 図—2 および 図—3 に示す。噴流径路は、 F_s が大きくなるにつれて水平方向に引き伸ばされる。放水口の形状比 B/h の大きさによる差は明瞭でない。温度低減率は流下距離と共に指数関数的に減少するが、 F_s の効果は明瞭に表われない。し



図—3 スロット型温水噴流の径路に沿う温度低減率

かし、水深との関係に直せば F_s の効果は明確となる。また、 B/h の大きさによる影響が若干認められる。なお、図中の実線で示す関係は、ケース A-III に対する後述の数値解析の結果を示したものであり、実験結果とほぼ良い一致を示している。

一方、マルチパイプ型の噴流径路および温度低減率の実験結果を 図—4 および 図—5 に示す。図中の実線は、

筆者らが過去に作成した単一円管に関する実験式¹⁾から算定したものである。噴流径路は、当然、 F_r の増加と共に水平方向に引き伸ばされる。また、 l/D の影響をわずかに受け、 l/D が減少すると噴流径路は早く立上る傾向となる。しかし、全体的に見ると単一円管の径路に近い特性となっている。温度低減率も l/D の大きさに影響され、特に、相互干渉のもっとも強い $l/D=5$ の場合には、稀釈特性は単一円管にくらべて相当悪化することが認められる。

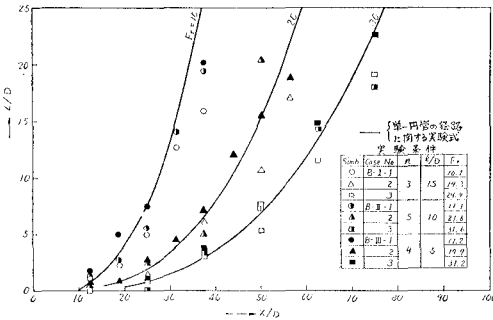


図-4 マルチパイプ型温水噴流の径路

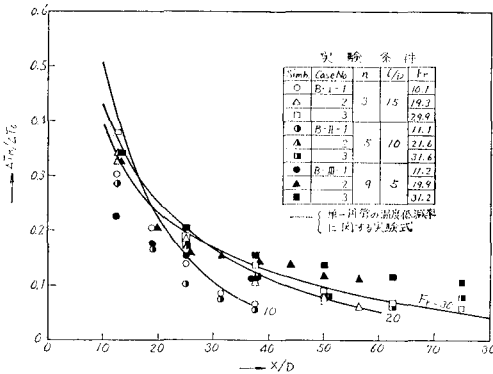


図-5 マルチパイプ型温水噴流の径路に沿う温度低減率

4. スロット状温水噴流の数値解析

(1) 基礎方程式

ここで扱うスロット重力噴流の基礎方程式は、鉛直2次元現象を仮定した他の研究者^{3),5)}によって用いられている方程式と同等である。ただし、噴流径路に対して浮力効果が微妙に影響することを考慮して、原則的には水温と密度の関係を非線形関数として扱った。

噴流流速 u 、温度差 ΔT または密度差 $\Delta \rho$ に対してガウス分布を仮定すると、次式のように表わせる。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_m \exp \left\{ -\left(\frac{n}{b} \right)^2 \right\} \\ \Delta T &= \Delta T_m \exp \left\{ -\left(\frac{n}{\lambda b} \right)^2 \right\} \\ \Delta \rho &= \Delta \rho_m \exp \left\{ -\left(\frac{n}{\lambda b} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 u_m 、 ΔT_m 、 $\Delta \rho_m$ ：噴流中心軸の流速、温度差、密度差、 b ：噴流の特性幅、 λ^2 ：シュミット数

質量、運動量および熱量の保存方程式は、式(1)の分布形を用いて、 n 方向に $-\infty \sim +\infty$ で積分すれば最終的に次のようになる。

$$\frac{d}{ds'}(u_m b) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} V_e \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{d}{ds'}(u_m^2 b) = \sqrt{2} \frac{\Delta \rho_m}{\rho_a} g \lambda b \sin \theta \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{d\theta}{ds'} = \frac{\sqrt{2}}{u_m^2} \frac{\Delta \rho_m}{\rho_a} \lambda g \cos \theta \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d}{ds'} \left(\sqrt{\frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1}} \Delta T_m u_m b \right) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 s' ：噴流中心軸に沿う座標 ($=s-s_e$, s_e は流れの形成領域の長さ)、 V_e ：連行加入速度、 θ ：噴流の鉛直傾度、 g ：重力の加速度

(2) 連行加入係数とシュミット数

式(2)の右辺の連行加入速度は重力噴流の拡散特性を支配する。いま、Morton らの考えに従うと次式となる。

$$V_e = \alpha u_m \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 α は連行加入係数で、放出内部フルード数の大きさや噴流の拡散過程内で変化するものと考えられるので、次式に示す Fox モデルに従う。

$$\alpha = \alpha_1 + \left(2\lambda^2 - \frac{3\lambda^2}{\lambda^2 + 1} \right) \sin \theta \frac{1}{F_{sL}} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 α_1 は $F_s \rightarrow \infty$ における連行加入係数で Albertson らによれば、 $\alpha_1 = 0.069$ と求められている。また、 F_{sL} は $u_m / (g b \Delta \rho_m / \rho_a)^{1/2}$ で示される局所内部フルード数である。

一方、シュミット数 λ^2 については明確な値が得られていないが、 $F_s \rightarrow \infty$ で $\lambda = 1.41$ 、 $F_s \rightarrow 0$ で $\lambda = 0.89$ の範囲が得られている。

本数値モデルにおいては、これらの α_1 および λ を未定係数として扱い、前章の実験結果と比較してその大きさを決定することにする。数値計算は、スロット型のケース A-III の実験条件を規準にして、 α_1 および λ の値を種々変化させて実施した。その結果、 α_1 および λ の増加に伴って、噴流径路は早く立上り、同時に稀釈率も増加する傾向が認められた。実験結果にもっとも近づく数値計算結果は、 $\alpha_1 = 0.059$ 、 $\lambda = 1.00$ の場合と判断された (図-2 および 図-3 参照)。

5. マルチパイプ型とスロット型の拡散特性の比較

マルチパイプ型における単位長さ当りの流量および運動量がスロット型に等しいとおくことによって、マルチパイプの諸元は次式によってスロット型に変換できる。

$$\left. \begin{aligned} h' &= \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{l} \\ B' &= nl \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 h' 、 B' はマルチパイプ型放水口を式 (8) で変換した場合のスロット開口高および幅である。

式 (8) の整合性をみるために、マルチパイプ型のケース B-IV ($l/D=2.5$) とスロット型のケース A-III の実験結果を比較すると、型流径路に関して 図-6、温度低減率に対して 図-7 を得る。それぞれの図において横軸はスロット型、縦軸はマルチパイプ型の実験値を示し

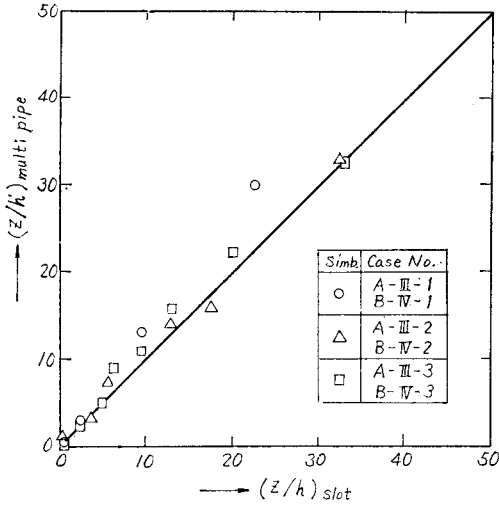


図-6 スロット型とマルチパイプ型の噴流径路に関する比較

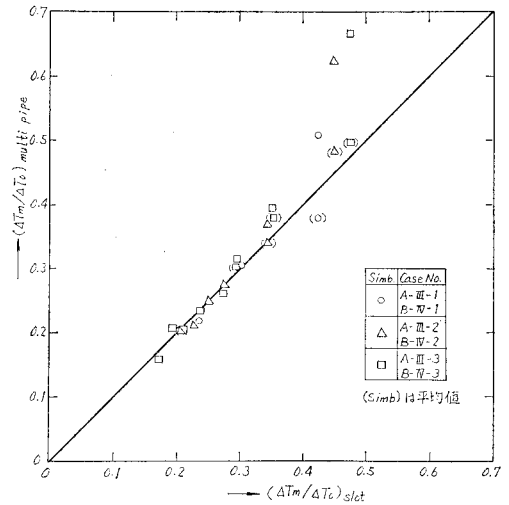


図-7 スロット型とマルチパイプ型の温度低減率に関する比較

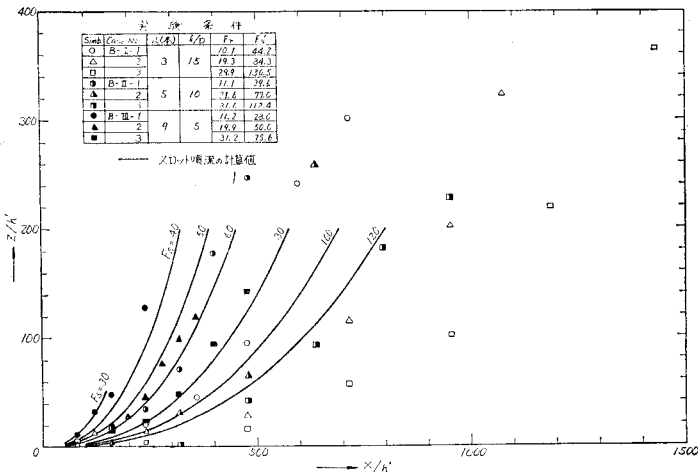


図-8 スロット換算したマルチパイプ型の噴流径路

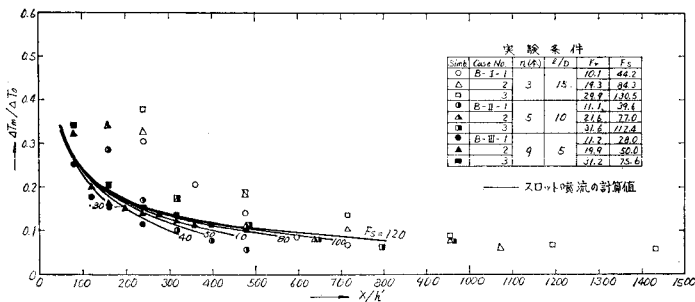


図-9 スロット換算したマルチパイプ型の温度低減率

たものである。両者は良好な一致を示している。ただし、図-7中の()付のシンボルは、噴流が併合する以前の幅方向の平均値を意味する。

つぎに、実験ケース B-I ~ B-III の噴流径路および温度低減率に対して、式(8)を用いてスロット換算し、その結果と前章のスロット状重力噴流モデルによる数値解とを比較すると、図-8および図-9となる。これらの図より、 $l/D=5$ の実験結果と数値解析結果とは良い一致が認められるが、 $l/D=15$ の場合の結果はスロット数値解と著しくかけ離れてしまう。さらに、 $l/D=10$ の場合には、両者の中間的な状態を示し、噴流の併合以前の領域では単一円管、併合後の領域ではスロット型の拡散特性に近似している。

6. む す び

スロット型およびマルチパイプ型放水口より放流される温水噴流の拡散特性に関して、実験的および解析的な検討をした結果、以下の結論が得られた。

(1) 静止水域中に水平方向へ放流する場合のスロット型およびマルチパイプ型の重力噴流に関して、初期放出条件とその基本的拡散特性である噴流径路および温度低減率との関係を明らかにした。

(2) スロット重力噴流モデルにおいて、実験係数 α_1 および λ の値は実験結果との比較照合から $\alpha_1=0.059$,

$\lambda=1.00$ と求められた。

(3) マルチパイプ型をスロット型へ変換する式(8)の適用範囲は、 $l/D \leq 5$ である。 $l/D > 10$ になると噴流間の相互干渉が弱まり、単一円管の拡散特性に近付くことが見出された。

参 考 文 献

- 1) 片野尚明・和田 明・河村博美・角湯正剛：水域中における温水噴流の拡散過程，第20回水講演文集，pp. 440-441, 1975.
- 2) 片野尚明・河村博美・和田 明：水中放流方式による温排水の水温低減化に関する研究，第24回海講演文集，pp. 476-480, 1977.
- 3) Fan, L. N. and N. H. Brooks: Numerical solution of turbulent buoyant jet problems, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Sciencs, C.I.T., Report No. KH-R-18, January, 1969.
- 4) Shirazi, M. A. and L. R. Davis: Workbook on thermal plume prediction, Volume 1: Submerged Discharges, EPA Water Pollution Control Research Series 16130 FHH, August, 1972.
- 5) Jirka, G. and D. R. F. Harleman: The mechanics of submerged multiport diffusers for buoyant discharges in shallow water, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, MIT, March, 1973.