

水域中における温水噴流の拡散過程

電力中央研究所 正会員 ○片野尚明
 同 上 正会員 和田 明
 同 上 正会員 角湯正剛
 同 上 河村博美

1. まえがき

温排水放出に伴う水域表層の水温上昇範囲を軽減させる対策の一つとして、周囲水との混合、希釈を積極的に期待する深層（水中）放流方式がある。深層放流による温排水の拡散過程を知るためには、種々の放水条件に対する様々な海象条件下での混合過程が把握されなければならない。本文は、放水口から水面に到達するまでの温水噴流の挙動に着目して、(1)静止水域中および(2)流れ水域中における噴流の拡散特性を、主として基礎的な水理実験によって検討したものである。

2. 一樣流体中における重力噴流の数値解析

一樣流体中における重力噴流の理論的研究はMorton, Taylor, Turnerによってentrainment係数の概念が導入され、それ以来多くの人達によって成層流体中や任意の角度で放出した場合等の重力噴流が解析された。また、実験的研究も多く行われて理論解との適合性が検討されてきた。これらの理論的展開のほとんどは実験的に定めねばならないentrainment係数 α を一定値として取り扱っている。その後、Foxは簡単な運動エネルギー式を用いて α が局所内部フルード数に依存することを導いた。また、Anwarは α を噴流の径路と放出内部フルード数の関数になることを実験的に導き、その関係を用いて数値解を得ている。

一樣流体中における円形重力噴流のestablished flow領域において、噴流中心軸に法線方向の流速および密度分布は相似であり、その分布形はGauss分布になるものと仮定する。用いる記号は図-1に示す。

$$u = u_m e^{-(r/b)^2} \dots\dots\dots (1), \quad \Delta\rho = \Delta\rho_m e^{-(r/\lambda b)^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $u_m, \Delta\rho_m$ ：噴流中心軸（ $r=0$ ）における流速，密度差， b ：流速分布から定義される特性幅， λ^2 ：乱流Schmidt数

重力噴流の拡散特性において重要な無次元量である放出内部フルード数 Fro ，および噴流中心軸における希釈倍率 S または温度低減比 Tc は以下の定義に従う。

$$Fro = \frac{u_0}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho_0}{\rho_0} D}} \dots\dots\dots (3)$$

$$S = \frac{\Delta\rho_0}{\Delta\rho_m} \equiv \frac{\Delta T_0}{\Delta T_m} = \frac{1}{Tc} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $u_0, \Delta\rho_0, \Delta T_0$ ：放出端における流速，周囲水との密度差および温度差， D ：放流管口径， g ：重力加速度

さて、式(1)、(2)で示した流速および密度差の分布形を考慮した重力噴流の支配方程式は、結局次の各式で表わされる。

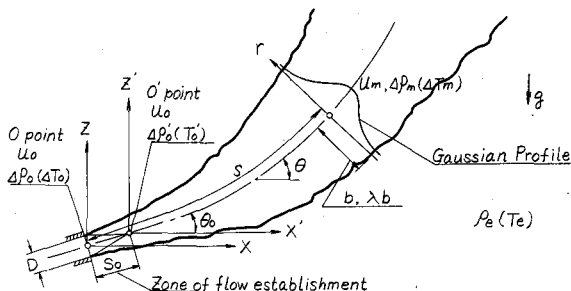


図-1 重力噴流の模式図および記号の説明図

$$\frac{d(u_m b^2)}{d(s-s_0)} = 2\alpha u_m b \dots\dots\dots (5), \quad \frac{d(u_m^2 b^2)}{d(s-s_0)} = 2g \frac{\Delta\rho_m}{\rho_e} (\lambda b^2) \sin\theta \dots\dots\dots (6)$$

$$u_m b^2 \frac{d\theta}{d(s-s_0)} = 2g \frac{\Delta\rho_m}{\rho_e} (\lambda b)^2 \cos\theta \dots\dots\dots (7), \quad \frac{d(\Delta\rho_m u_m b^2)}{d(s-s_0)} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 s_0 は flow establishment 領域の長さであり、 θ は水平座標軸から測った噴流の傾斜角度である。
 entrainment 係数 α は Fox および Hirst に従って次式のように設定する。

$$\alpha = \alpha_1 + \left(2\lambda^2 - \frac{3\lambda^2}{\lambda^2 + 1}\right) FrL^{-2} \sin\theta, \quad (\text{ただし}, \alpha \leq 0.082) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 α_1 : 主に噴流内の乱れの分布関数から定まる係数、 FrL : 特性幅 b に基づく局所内部フルード数、
 また、 λ は噴流拡散過程内で変化するものと考え、水平噴流の場合には $\theta = 0$ で $\lambda = 1.11$ 、 $\theta = \pi/2$ で $\lambda = 1.16$ 、 $\theta = \pi/4$ で $\lambda = (1.11 + 1.16)/2$ を満足するように定めると、次式のようになる。

$$\lambda = 1.11 + 0.0608 \theta^2 - 0.0258 \theta^3 \dots\dots\dots (10)$$

以上の関係式を flow establishment 領域の終端、すなわち計算の出発点である $0'$ 点の境界条件を考慮に入れて無次元化を施し、放出内部フルード数をパラメータにして数値解析を実行する。解析結果は実際の放出端 0 点の値に換算しなければならない。計算結果の一例を図-2 および図-3 に示す。

3. 静止水域中における水平温水噴流

一様密度を有する静止水域中における水平温水噴流の拡散過程を調べるために、長さ 5.4 m 、幅 3.6 m 、高さ 1.5 m の水槽の底面から十分離れた高さに放流管 ($D = 2, 3.24, 5\text{ cm}$) を設置し、周囲水温より $5 \sim 17^\circ\text{C}$ 高い温水を噴出させ、温水噴流内の水温分布を測定した。実験条件は放出内部フルード数 $Fr_0 = 3.5 \sim 70$ 、水深と放流管口径比 $H/D = 6 \sim 40$ の範囲である。実験結果を解析して噴流径路、その径路に沿う温度低減比（または希釈倍率）を求めた。

図-2 は噴流径路に関して、本実験結果、先に示した重力噴流の支配方程式に基づく数値解析結果、並びに既往の研究結果とを比較したものである。図中に示す細い実線は本解析結果であり、太い実線は次式で与えられる実験値の回帰線である。

$$\frac{z}{D} = 0.05 Fr_0^{-2} \left(\frac{x}{D}\right)^3 \dots\dots\dots (11)$$

図-3 は噴流径路に沿う温度低減比に関して、本実験結果、本解析結果並びに既往の研究結果とを比較したものである。同様に、細い実線は本解析解、太い実線は次式で与えられる実験式である。

$$\begin{aligned} \log Y &= 0.0346 (\log X)^3 \\ &- 0.2155 (\log X)^2 + 0.3202 (\log X) \\ &+ 0.1061 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ただし、

$$X = (z/D) \cdot Fr_0^{-1}$$

$$Y = (z/D) \cdot S^{-1}$$

これらの結果から以下のことが要約される。

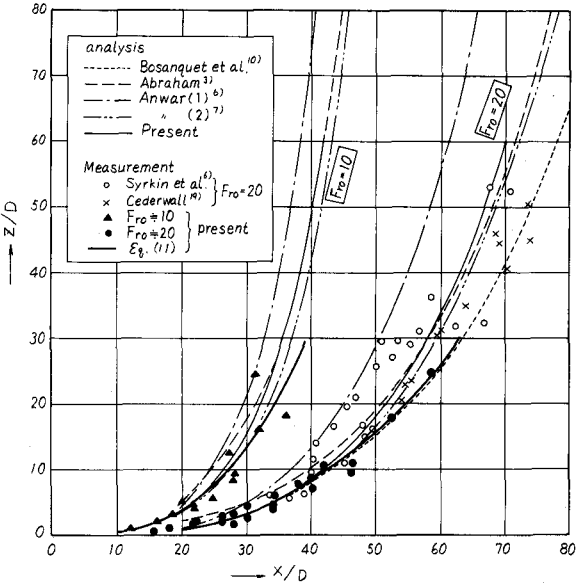


図-2 水平重力噴流の径路

(1) 噴流径路およびそれに沿う温度低減比は, entrainment 係数 α の大きさによって支配され, α が一定の解析結果は実験結果を十分に説明していない。特に Fan または Anwar (1) の解析 ($\alpha = 0.082$, $\lambda = 1.16$) は, 稀釈倍率については実験値と良好に一致を示すが, 径

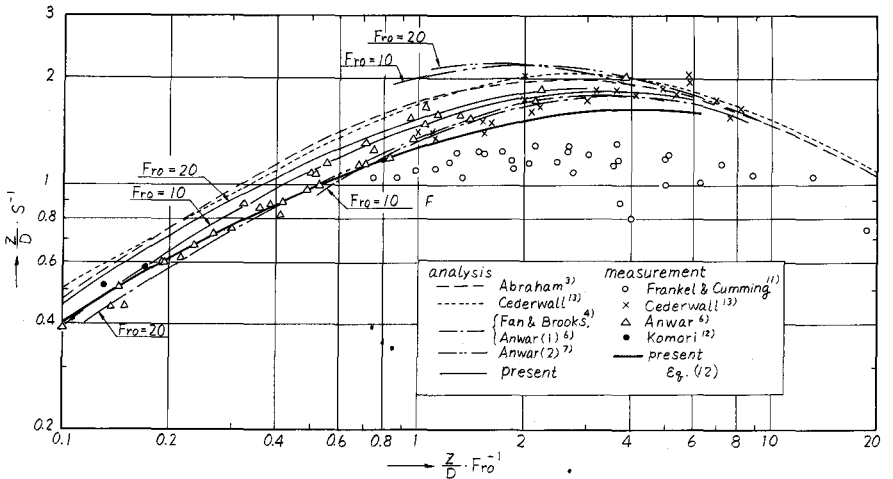


図-3 水平重力噴流の径路に沿う稀釈倍率 (温度低減比)

路については実験値とかけ離れている。(2) 本解析結果に見られるように α が噴流の拡散過程で変化するモデル (式(9)で $\alpha_1 = 0.052$ と設定) に従うと, 解析結果は実験値を比較的良好に説明している。(3) 本実験で得られた水平重力噴流に対する径路および稀釈倍率に関する実験式は, z/D の小さい領域においては既往の研究結果と比較してもほぼ良好な一致を示している。

4. 流れ水域中における水平温水噴流

一様密度を有する一方向の定常的な流れが存在する水域中における水平温水噴流の拡散過程を明らかにするために, 3種類の放出向きに対して基礎的な水理実験を行って, それぞれの放出向きに対する温水噴流の拡散特性を求めた。対象とした放出向きは, (i) 流れに沿う方向, (ii) 流れに逆らう方向, (iii) 流れを横切る方向の3種類である。実験に用いた水槽は長さ20m, 幅1.8m, 高さ1mの規模を有し, 放流管は全実験を通じて内径2.68cmを用いた。実験条件は3種類の放出向きに対して, $H/D = 5 \sim 20$, $Fro = 6 \sim 35$, 放水流速 u_0 と周囲水の流速 U_f との比 $k = 4 \sim 30$ の範囲である。ここに, 新たに付加される無次元量について示す次のようになる。

$$Frf = Fro/k = U_f (gD \Delta\rho_0/\rho_0)^{-1/2}, \ell = k D Frf^{-2} = k^3 D Fro^{-2} \dots\dots\dots (13)$$

4.1 流れに沿う方向に水平放出した場合

周囲水の流れ向きと同一方向に温水を水平放出した場合の拡散過程は, 前述の静止水域中の現象を水平流れで引き伸ばした現象として捕えることができる。温水噴流断面内の水平および鉛直方向の水温分布はほぼ Gauss 分布を満足し, 水面に到達した後も水平方向は Gauss 分布, 鉛直方向は指数関係で近似されることが見出された。

図-4 は噴流中心軸の座標位置を x/ℓ と $(z/\ell) \cdot Frf^6 \{f(k)\}^{-1}$ の関係でプロットしたものである。この関係は先の静止水域における径路の式(11)をも包含することを意図したものである。図中の直線は次式で表わされる。
$$\frac{z}{D} = 0.05 f(k) Fro^{-2} \left(\frac{x}{D}\right)^3, \text{ただし, } f(k) = 1 - \exp(-k^{2/3}/20) \dots\dots\dots (14)$$

$f(k)$ は実験値を満足するように設定した適当な関数であり, 別の形でもかまわない。

次に噴流中心軸における温度低減比 T_c の実験値を x/ℓ と $T_c \cdot Fro^{-2} k^3$ の関係でプロットすると, 図-5 のようになる。図-5 の関係は実験値を十分に説明し, ℓ を $k^3 D Fro^{-2}$ で置換すると次式のような簡単な関係

に帰着する。

$$T_c = 4.5 \left(\frac{x}{D} \right)^{-1} \dots\dots\dots (15)$$

式(15)の関係は鉛直重力噴流および表面重力噴流の式と相似な関係にあることは興味あるところである。

また、噴流の拡散幅および厚さは x/D の $2/3$ 乗に比例する関係を満足し、拡散幅は厚さに比べて約 10% 程度大きくなる。

4.2 流れに逆らって水平放出した場合

流れに逆行する方向に温水を水平放出した場合の噴流の拡散現象は、流れに沿って放出した場合に比べると極めて複雑な混合現象を呈する。放流管より噴出された温水脈は、周囲水の流れの作用を受けて急激に分散されるが、その混合状況は不連続的である。このような現象は極めて非線型な作用を受けていることを示しているが、同時に水槽の壁面境界の影響をも無視することができない。このようにして分散された温水の先端部は、流速比 k の大ききで決定される位置まで進行し、周囲水に負けてその流れ向きを転ずる。この温水はさらに放流管近傍の連行加入に影響を与える。このように、流れに逆行する場合の温水噴流の拡散は大きな変動を伴った不規則過程であるため、噴流の平均的径路を定めることは困難であった。

試みに、噴流断面内の水温変動の統計的性格を調べてみると、水温変動の強さは 40~70% に達しており、そのエネルギースペクトラムの低減勾配は $-5/3$ 乗に近い。また、水槽境界の影響による振動現象も認められた。

一方、水面における温度低減比は x/D の $2/3$ 乗で低減し、水深の効果が他の放出向きに比べて著しく大きいことが特色である。

4.3 流れを横切って水平放出した場合

流れを横切る方向に水平放出された温水噴流は、周囲水の流れの作用によってしだいに流れ向き方向に曲げられる。噴流内の水温分布は流れの作用を直接受ける外側で急峻になり、内側でなだらかなような偏った分布に推移する。さらに進行すると、温水脈は上下に分離する場合が生じ、しかもその場合の主流は下部の水脈に存在し、上部の水脈は下部にくらべて早く流れ向きに追隨する。このような水脈の分離現象は、噴流と周囲水との相互作用によって形成された上下方向の一对の渦が分離したものと考えられる。こうして温水脈は浮力の作用によってしだいに上向きに上昇する。水温分布も噴流自身および周囲水の乱れ的作用によって上下方向に一様化する方向に向かう。同時に、噴流の径路はほぼ流れ向きに一致する。

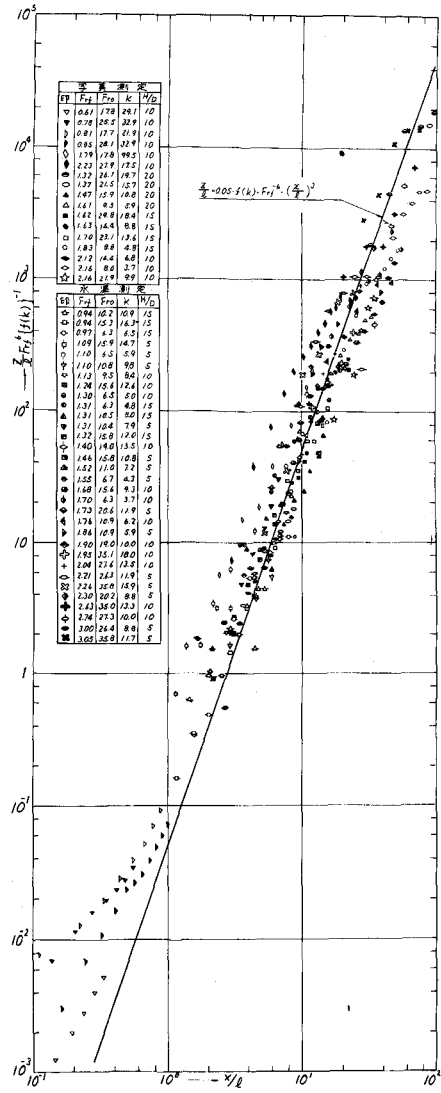


図-4 流れに沿って水平放出した場合の水平温水噴流の径路

このように cross flow における水平温水噴流の拡散過程において、水温分布の相似性を仮定することは適当と思われない。いま、着色染料を噴流に混入させた場合の染料雲の中間点を見掛上の噴流中心軸とすると、 $x-y$ 平面における噴流の径路は図-6 のようになる。図中の直線関係は次式で与えられる。

$$\frac{y}{D} = 1.4 k^{\frac{3}{4}} \left(\frac{x}{D}\right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots (9)$$

また、 $x-z$ 平面における噴流径路は判然としないが、流下距離に比例し、放出内部フルード数に逆比例する傾向がうかがえる。

図-7 は流下距離 x/D と噴流内の最大温度に対する温度低減比 T_c との関係を示したものである。図中の実験値のうち、 $H/D=1.0$ における値が他の実験値にくらべて系統的に低い傾向にあるが、その原因では明らかでない。また、図中の直線関係は次式で示される。

$$T_c = 0.5 k^{-\frac{1}{3}} Fr_o^{\frac{1}{6}} \left(\frac{x}{D}\right)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (10)$$

一方、噴流の拡散幅およびその厚さは x/D の $\frac{3}{4}$ 乗に比例し、 k および Fr_o の増加に伴って増大する。特に、噴流の厚さは、放流管と底面との間が十分離れているにもかかわらず、水槽底面にまでおよぶものがあり、実用上の問題として底面境界の存在が拡散過程全体に大きな影響をおよぼしてくる。この場合にはもはや重力噴流としての理論的取り扱いが困難になるであろう。

5. むすび

以上、静止水域中および流れ水域中における水平温水噴流の径路および径路に沿う温度

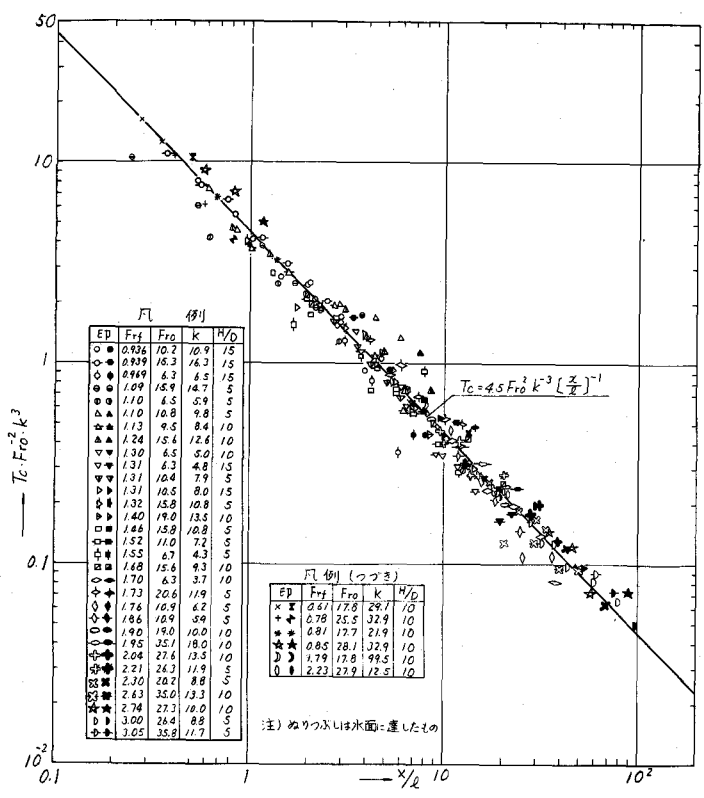


図-5 流れに沿った場合の温水噴流中心軸における温度低減比

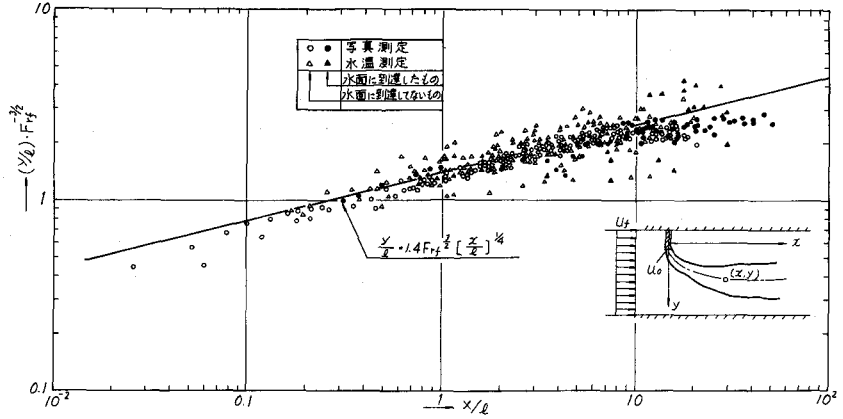


図-6 流れを横切る場合の水平温水噴流の径路 ($x-y$ 平面)

低減比について、実験値を中心に検討した結果を述べた。今後、流れ水域中における重力噴流の理論的取り扱いや、実際に用いる温排水放流管の設計資料となるデータを蓄積せねばならないと考える。

参考文献

- 1) 片野尚明, 和田 明, 角湯正剛, 河村博美: 深層放流による温排水の拡散に関する実験的研究(1), (2), 第29回, 第30回年講, 1974, 1975
- 2) Morton, Taylor, Turner: Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, Proc. Roy. Soc., Ser. A. 234, 1956
- 3) Abraham: Horizontal jets in stagnant fluid of other density, Proc. ASCE, Vol. 91, HY4, July, 1965
- 4) Fan, Brooks: Discussion, Proc. ASCE, HY2. March, 1966
- 5) Fan: Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids, CIT, Ph. D., 1967, Engineering Civil
- 6) Anwar: Behavior of buoyant jet in calm fluid, proc. ASCE, Vol. 95, HY4, July, 1969
- 7) Anwar: Mesurements on horizontal buoyant jet in calm ambient fluid, with theory based on variable coefficient of entrainment determined experimentally, La Houille Blanche, No. 4, 1972
- 8) Fox: Forced plume in a stratified fluid, J.G.R, Vol.75, No. 33, Nov., 1970
- 9) Hirst: Buoyant jets discharged to quiescent stratified ambients, J.G.R Vol. 76, No. 30, Oct., 1971
- 10) Bosanquet et al: The effect of density differences on the path of jet, Proc. Roy. SOC., A263, 1961
- 11) Flankel, Cumming: Turbulent mixing phenomena of Ocean outfall, Proc. ASCE, SA2, 1965
- 12) 小森修蔵: 岸壁に設置した水中放流管による温排水の噴流拡散, 第29回年講, 1974
- 13) Cederwall: Jet diffusion—Reviw of model testing and comparison with theory—Hy. Div., Chalmers Institute of Technology, Sweden, 1967

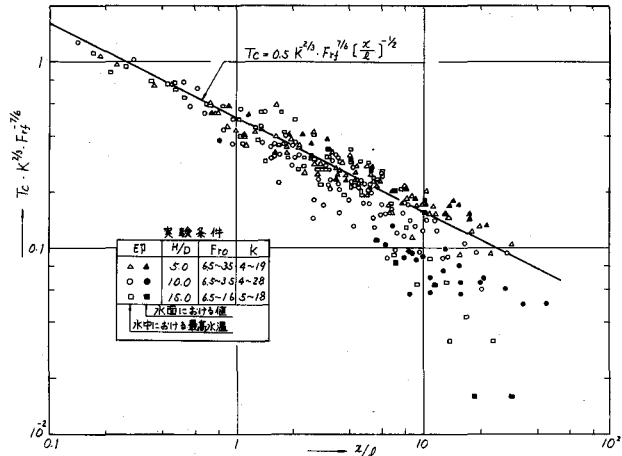


図-7 流れを横切る場合の温水噴流の温度低減比