

流水中に放出される鉛直重力噴流の拡散過程

水鳥 雅文*・片野 尚明**・曾我 雅海***・和田 明****

1. ま え が き

本研究は、一様な水平流れの中へ放出される正の浮力を持つ鉛直重力噴流の拡散過程について実験的に検討したものである。このような現象に関する既往の研究としては、Fan, Slawson and Csanady, 首藤, Chu and Goldberg らの理論および実験が挙げられよう。

その中で首藤¹⁾は、Slawson らと同様に噴流と周囲水との速度差が密度差によって生ずる鉛直流速 w のみであるという仮定のもとに解析的な定式化を行った。ここでは新しく仮想原点の考え方を導入し、初期放出流速 w_0 の影響および解析にあたって仮定が成立しない領域をこの仮想原点の中へ含めることにより、放出水の経路、希釈率、幅、厚さについての半実験式を提案した。これらの式では、連行係数 α ならびに仮想原点の位置を実験的に定めなければならない。

それに対して Chu and Goldberg²⁾ は、ほぼ同様な仮定に基づき、運動量と浮力を考慮した基礎式を展開し、放出水の経路や希釈率に関する解析解を得た。彼らの提案した式は、浮力特性長のほかに運動量に関する特性長を含んでおり、実験的に定める定数が連行係数のみである点に特徴がある。

本研究においては、これらの研究の中で取扱われている放出条件に比べて、水深 H と放出口直径 D との比 H/D や初期放出流速 w_0 と周囲流速 u との比 $k (= w_0/u)$ が非常に大きい条件の現象を対象に実験的検討を行い、その重力噴流の拡散特性について論じるとともに、Chu らの解析解に基づいた新たな実験式を提案するものである。ここに提案する式は、重力噴流の経路、中心軸に沿う希釈率、幅、厚さ、および中心軸に沿う鉛直流速変化に関するものである。

2. 実験装置と実験方法

実験装置は図-1に概略を示すように拡散水槽、塩溶解槽、塩水混合槽および放出水供給水槽から成り立っている。拡散水槽は、一方向定常流を発生できる長さ 20 m、幅 1.8 m、高さ 1 m の規模の水槽である。水槽の両端部には流れを均一化するための整流装置が設けられている。水槽内の流れはポンプによる強制循環系で発生させ、流速の大きさは配管路途中に設けてある自動制御弁の開度を調節することによって変化させる。

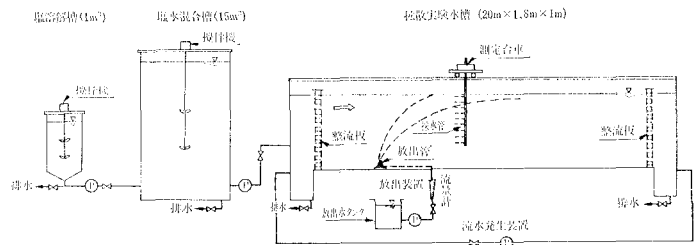


図-1 実験装置

本実験では周囲水に塩水、放出水に淡水を用いた。塩溶解槽で造られた比較的濃い塩水は、塩水混合槽において所定の密度に調整し、拡散水槽へ送られる。淡水は、ポンプにより流量計を介して放水ノズルへと導びかれる。ノズルの出口は水槽底面より $30D$ ないし $60D$ 立ち上げている。

放出水の濃度（希釈倍率）の測定については、採水による蛍光度分析による方法を用いた。つまり、放出水にトレーサーとして蛍光染料（フルオレッセンナトリウム）を溶解させ、所定の測点において採水管（ $\phi=2\text{ mm}$ ）を介して採水した試水の蛍光度を蛍光光度計により測定し、放出水の蛍光度との比から希釈倍率を求めた。測定は、放出水が左右対称に広がることを確認して、流下方向に対して右側の断面内に配置し、移動台車に一断面分の採水管を取り付け、下流側から上流側に適宜移動して測定した。測点数は、一横断面当り約 50 点で、1 ケースにつき 10 断面程度を測定した。

流速測定は小型電磁流速計を用いて、放出水の中心軸を含む縦断面内における流速分布を測定した。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木研究所水環境研究室
 ** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土木研究所水環境研究室長
 *** 正会員 (財)電力中央研究所 土木研究所水環境研究室
 **** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土木研究所副所長

本研究で実施した実験ケースは合計 50 ケースにおよぶ。本実験のパラメータ範囲は、以下のとおりである。

$$D=1.25\sim 1.6\text{ mm}$$

$$\Delta\rho\text{ (周囲水と放出水の密度差)}=0.025\text{ g/cm}^3$$

$$H/D=320\sim 520$$

$$k=15.75\sim 157$$

$$Fr_{w0}\left(=\frac{w_0}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho)gD}}\right)=40\sim 142$$

$$Fr_u\left(=\frac{u}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho)gD}}\right)=0.64\sim 2.71$$

本研究の特徴は、上記の実験条件の内、 H/D , k および Fr_{w0} が既往の研究で取扱われている条件に比べて非常に大きい範囲を対象に実験を行っている点にある。

3. 実験結果とその検討

(1) 実験式の誘導

本実験で測定された濃度分布結果より、重力噴流の拡散状況は概ね次のようなものであった。放出口から高速で出た直後の重力噴流は、鉛直方向の運動量と浮力とによって真っ直ぐ上昇するが、次第に横方向からの流れの作用により向きを水平方向に転じ、それと共に濃度は徐々に低減していく。一方、噴流の濃度横断分布形状は、放出直後円形状をしていたものが、しだいに馬蹄形状に変化していく。また、放出条件によってはその後林ら³⁾の指摘した噴流の分岐現象へと推移していくものも認められた。

本研究では、このような重力噴流の拡散特性を表わす種々の物理量に関する実験式の導入について検討する。

首藤¹⁾は、このような現象に関して次のような解析解を導いている。

$$\frac{z-z_0}{l}=\frac{3^{1/3}}{2}\alpha^{-2/3}\left[\frac{x-x_0}{l}\right]^{2/3}\quad (\text{経路})\quad \dots(1)$$

$$\frac{C_m}{C_0}\left(=\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_0}\right)=3^{-2/3}\alpha^{-2/3}k^{-1}Fr_u^4\left[\frac{x-x_0}{l}\right]^{-4/3}\quad (\text{希釈率})\quad \dots(2)$$

ここで、 x , z は水平および鉛直方向の座標、 C_0/C_m または $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ は中心軸上の希釈率、 x_0 , z_0 は仮想原点の座標、 l は浮力に関する特性長 ($=kDF_{ru}^{-2}$) である。

前述のように、上式中の連行係数 α と仮想原点の位置は実験的に定められ、首藤は $\alpha=0.33$, $x_0/l=-0.7Fr_u^{-3}$, $z_0/l=0$ を提案している。

一方、Chu らは、①重力噴流の水平流速成分は周囲流速に等しい、②抗力係数は連行係数に比較して無視できる、という2つの基本的な仮定をもとに次のような解析解を導いている。

$$z=\left(\frac{3^{1/3}}{4\alpha^2}\right)^{1/3}\left(\frac{1}{2}l_b x^2+l_m^2 x\right)^{1/3}\quad (\text{経路})\quad \dots(3)$$

$$\frac{C_m}{C_0}=(36\alpha^2)^{-1/3}k^{-1}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{l_b}{l_m}\right)\left(\frac{x}{l_m}\right)^2+\left(\frac{x}{l_m}\right)\right]^{-2/3}\quad (\text{希釈率})\quad \dots(4)$$

$$r=\left(\frac{3\alpha}{4}\right)^{1/3}\left(\frac{1}{2}l_b x^2+l_m^2 x\right)^{1/3}\quad (\text{噴流の半径})\quad \dots(5)$$

ここで、

$$l_b=\frac{4F_0}{\pi\rho_a u^3},\quad l_m=\left(\frac{4M_0}{\pi\rho_a u^2}\right)^{1/2}$$

F_0 および M_0 は、十分な乱流状態となっている実質的な原点における浮力フラックスおよび運動量フラックス、 ρ_a は周囲水の密度である。

本研究では、上式 (3)~(5) を基に実験式を作成することとする。今、 F_0 および M_0 を実際の放出口で定義すると、 l_b および l_m は、

$$\left. \begin{aligned} l_b &= l \\ l_m &= lFr_u^2(\rho_0/\rho_a)^{1/2} \doteq lFr_u^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots(6)$$

となる。ここで、 ρ_0 は放出水密度である。上式を式 (3)~(5) に代入し、首藤の式と同様な形式に書き改めると次式のようになる。

$$\frac{z}{l}=\frac{3^{1/3}}{2}\alpha^{-2/3}\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2+2Fr_u^4\left(\frac{x}{l}\right)\right]^{1/3}\quad \dots(7)$$

$$\frac{C_m}{C_0}=3^{-2/3}\alpha^{-2/3}k^{-1}Fr_u^4\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2+2Fr_u^4\left(\frac{x}{l}\right)\right]^{-2/3}\quad \dots(8)$$

$$\frac{D}{l}\left(=\frac{2r}{l}\right)=3^{1/3}\alpha^{1/3}\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2+2Fr_u^4\left(\frac{x}{l}\right)\right]^{1/3}\quad \dots(9)$$

これらの式の特徴は、実験的に定める定数が α のみであり、仮想原点を含まないという点にある。

ここで、この Chu らの式と首藤の式の関連について若干考察する。

式 (3)~(5) の括弧内に着目すると、放出口での運動量の影響と浮力の影響が等しくなる点の座標は、次式によって表わされることがわかる。

$$x_t=\frac{2l_m^3}{l_b},\quad z_t=\left(\frac{3l_m^4}{\alpha^2 l_b}\right)^{1/3}$$

これは式 (6) より次のように書き改められる。

$$x_t=2lFr_u^4,\quad z_t=3^{1/3}\alpha^{-2/3}lFr_u^{8/3}\quad \dots(10)$$

仮想原点の意味から考えると、首藤の式は式 (10) で示される点以降の拡散領域を取扱っていると考えることができよう。そこで式 (1) が式 (10) で示される点を通ると仮定し、首藤の場合と同様に $z_0=0$ とおくと、仮想原点の x 座標は、次式のように求められる。

$$x_0/l=(2-2^{3/2})Fr_u^4\doteq -0.83Fr_u^4\quad \dots(11)$$

これを首藤の実験的に求めた $-0.7Fr_u^3$ と比較すると、 Fr_u がかなり大きい条件において値の相違が表われることが予想される。

(2) 中心軸の経路

重力噴流の中心軸の経路について、式(7)をもとに実験結果を整理すると、図-2に示すとおりとなり、経路に関する実験式は次式のように求められる。

$$\frac{z}{l} = 1.16 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 + 2F_{ru}^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{2/3} \quad \dots\dots\dots (12)$$

(3) 中心軸に沿う希釈率

同様に、噴流中心軸に沿う希釈率の変化についても、式(8)をもとに実験結果を整理すると、図-3に示すとおりとなり、希釈率に関する実験式は次式のように求められる。

$$\frac{C_m}{C_0} = 1.37 k^{-1} F_{ru}^4 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 + 2F_{ru}^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{-2/3} \quad \dots\dots\dots (13)$$

上式に式(12)を代入すると次のような単純な形に変

形できる。

$$\begin{aligned} \frac{C_m}{C_0} &= 1.84k \left(\frac{z}{D} \right)^{-2} \\ &= 2.34 \frac{Q}{u \cdot z^2} \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ここで、 Q は放出口での初期放流量 $\left(= \frac{\pi}{4} D^2 w_0 \right)$ である。式(14)より、希釈率は周囲流速および放出口からの鉛直方向距離の2乗に反比例、放流量に比例することがわかる。

図-4には、本実験結果と首藤の式との比較を示している。図中の実線は首藤の実験式を、破線は本実験結果より、首藤の式における連行係数に関する係数のみ帰帰した式を示している。首藤の実験式においても本実験結果との相関は比較的良好であると認められるものの、図中の式からわかるように、連行係数値に関して今回の実験結果との間に差異が認められる。

(4) 噴流拡散の幅

重力噴流の拡散幅および後述する厚さを定義するに当たっては、希釈率 2×10^{-4} (希釈倍率5000倍)の等濃度線、および半値幅の2つの場合について検討した。

図-5には、希釈率 2×10^{-4} で定義した場合の拡散幅 B の実験結果を示す。これより、式(9)をもとに求めた実験式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \frac{B}{l} &= 1.22 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2F_{ru}^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{1/3} \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

これに対し、半値幅 $B_{0.5}$ で定義した場合には次式によって表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{B_{0.5}}{l} &= 0.54 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2F_{ru}^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{1/3} \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

(5) 噴流拡散の厚さ

図-6には、希釈率 2×10^{-4} で定義した場合における重力噴流の厚さ H の実験結果を示す。これより、式(9)をもとに求めた実験式は次のとおりである。

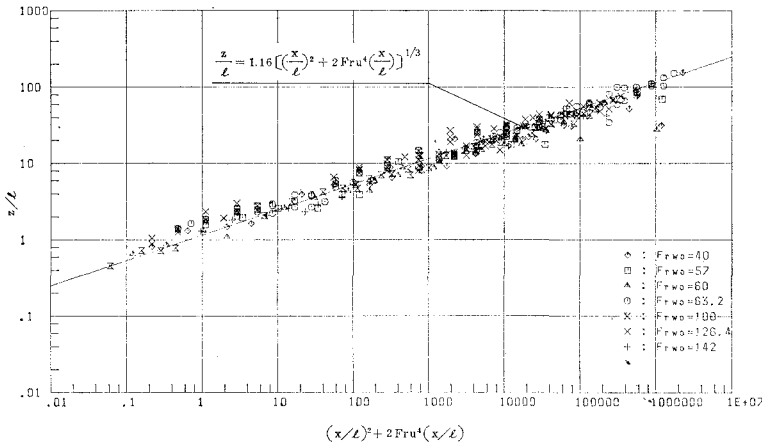


図-2 重力噴流中心軸の経路

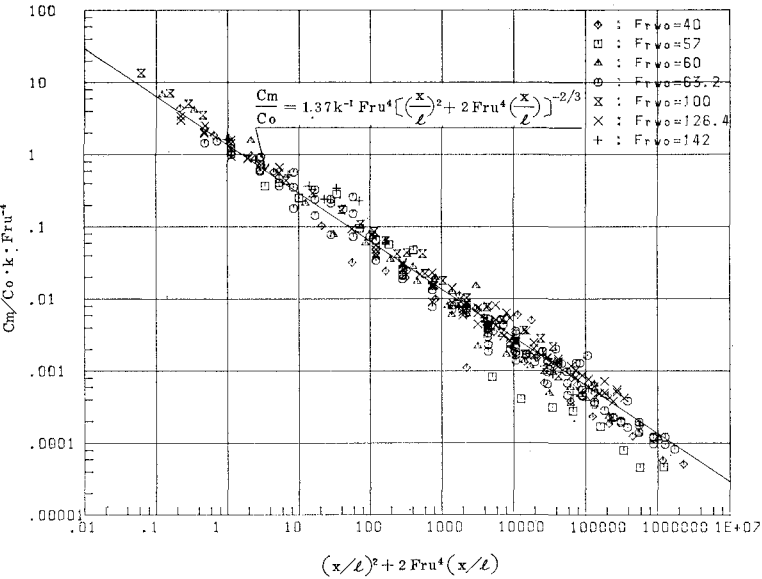


図-3 重力噴流中心軸に沿う希釈率

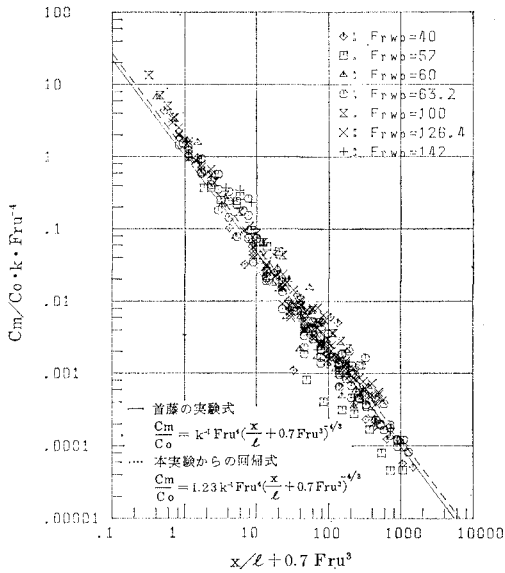


図-4 中心軸に沿う希釈率の実験値と首藤の式との比較

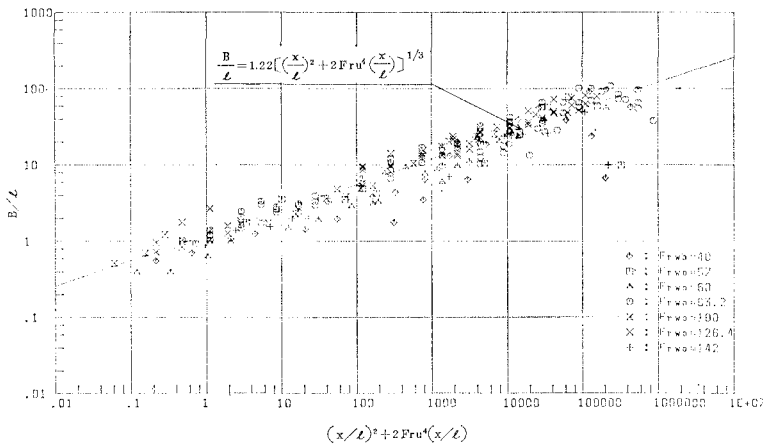


図-5 重力噴流の拡散幅

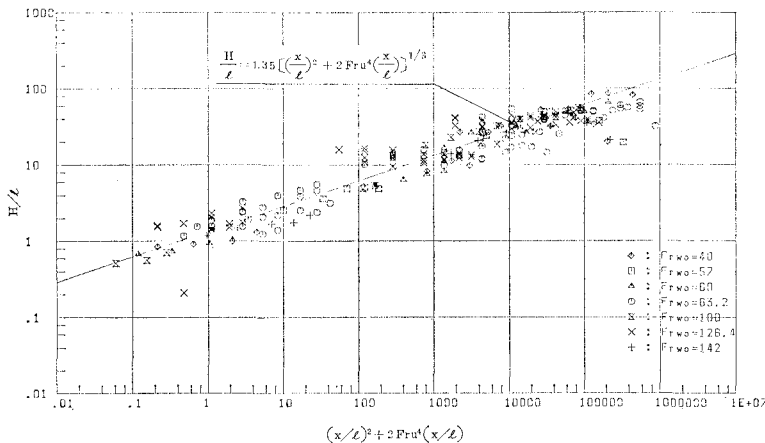


図-6 重力噴流の厚さ

$$\frac{H}{l} = 1.35 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 + 2 Fru^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{1/3} \quad \text{.....(17)}$$

これに対し、半値幅 $H_{0.5}$ で定義した場合には次式のようなになる。

$$\frac{H_{0.5}}{l} = 0.66 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 + 2 Fru^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{1/3} \quad \text{.....(18)}$$

ここで注意すべきことは、式(7)と式(9)とを比較してわかるように、本実験式によると幅および厚さは、 z と一義的な関係となっていることである。

次に、水表面に到達後の厚さの変化について検討した。

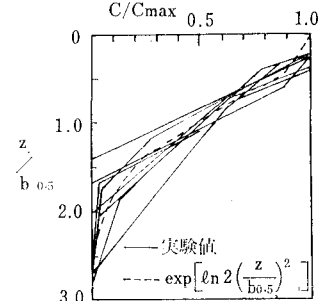


図-7 水面到達後の濃度分布形状

図-7 には、水面到達後の濃度鉛直分布の一例を示す。縦軸は濃度の半値幅 $b_{0.5}$ 、横軸は最高濃度 C_{max} で無

次元化している。また、図中の破線はガウス分布を示しており、分布形状はほぼガウス分布形を満足することがわかる。

図-8 は、今回の実験で水面到達後の水平拡散領域を水槽内で比較的長くとることのできたケースにおける水面到達後の厚さ H_w (希釈率 2×10^{-4} で定義) の変化を示している。ただし、その値は式(17)によって計算される厚さ H_0 で無次元化している。この図より、水面到達後の厚さは、概ね式(17)で計算される値の3割程度で安定する傾向が認められる。

(6) 中心軸に沿う鉛直流速変化

ここでは、既往の実験データではあまり得られていない噴流中心軸に沿う鉛直流速の変化について検討する。

鉛直流速 w は解析上の仮定より、次のように表わされる。

$$w = u \cdot dz/dx \quad \text{.....(19)}$$

上式に式(7)を代入すると、次式のような解が得られる。

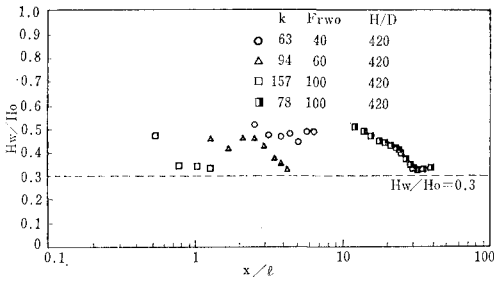


図-8 水面到達後の重力噴流の厚さ

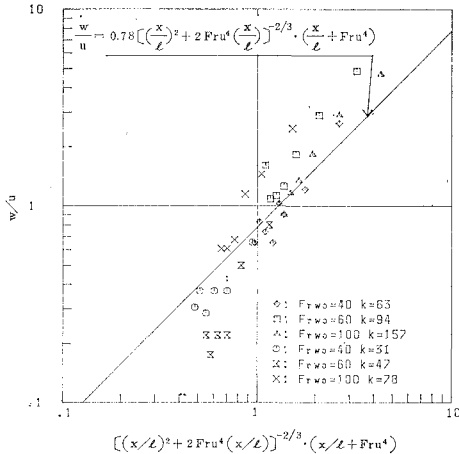


図-9 重力噴流中心軸に沿う鉛直流速変化

$$\frac{w}{u} = \left(\frac{2}{9\alpha^2} \right)^{1/3} \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 + 2F_{ru}^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{-2/3} \left(\frac{x}{l} + F_{ru}^4 \right) \quad (20)$$

上式をもとに実験結果を整理すると 図-9 のようになり、鉛直流速変化に関する実験式は次式によって表わされる。

$$\frac{w}{u} = 0.78 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 + 2F_{ru}^4 \left(\frac{x}{l} \right) \right]^{-2/3} \left(\frac{x}{l} + F_{ru}^4 \right) \quad (21)$$

ただし、今回の鉛直流速測定は、測定ケースおよびその測定範囲ともに限られたものであるため、今後さらに多くのデータを蓄積していく必要がある。

(7) 連行係数

以上の実験式より連行係数 α を算定する。ただし、ここでは比較的定義が明確で、実験精度の高いと考えられる希釈率と経路を対象に検討する。その結果、希釈率に関する実験式 (13) からは $\alpha=0.21$ という値を得た。この値は、Fan の 0.4~0.5、首藤の 0.33 に比べ小さいものとなっている。これに対し、経路の実験式 (12) から算定すると $\alpha=0.49$ となり、希釈率から求められた値に比べ大きいものとなった。この理由として、今回の実験条件下では噴流の経路に対し、解析上無視している抗力がある程度影響を及ぼしていることが考えられる。

4. 結 論

一様な水平流れの中へ放出される正の浮力を持つ鉛直重力噴流の拡散について、 H/D および k の非常に大きい場合を対象に実験的検討を行い、経路、希釈率、幅、厚さ、および鉛直流速変化について Chu らの解析解をもとに新しい実験式を作成した。いずれの物理量に関する実験式とも実験結果との相関は良好で、これらの式の適用性は十分高いものと判断される。

今後は、本現象に対する数値解析手法による検討を実施していくとともに、成層化した流水中へ放出される場合についても検討していく予定である。

〔謝辞〕 本研究で用いた実験結果は、東京電力株式会社および日本原燃サービス株式会社の委託によって実施した研究の一部である。また、本実験の計測作業については(株)東京久栄の方々の協力を得た。ここに記して、関係各位に対し、深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 首藤： 流水中での重力拡散，第 17 回海岸工学講演会論文集，pp. 349~354，1970。
- 2) V. H. Chu and M. B. Goldberg: Buoyant forced-plumes in cross flow, Proc. of ASCE, Vol. 100, HY 9, pp. 1203~1214, 1974。
- 3) 林，首藤： 流れの場に海洋放出された廃液の浮上ブリームの分岐拡がり，第 17 回海岸工学講演会論文集，pp. 355~359，1970。