

流水・線形成層域中へ放出される鉛直重力噴流の拡散挙動について
Diffusion Behavior of Vertical Forced Plume in Linear-Stratified Cross Flow

(財)電力中央研究所 水鳥雅文 Masafumi MIZUTORI

(財)電力中央研究所 片 野 尚 明 Naoaki KATANO

(財)電力中央研究所 仲 敷 憲 和 Norikazu NAKASHIKI

The characteristics of vertical forced plume in a uniform cross flow of stably linear stratified environment are studied both numerically and experimentally. The empirical formulas for the diffusion characteristics of vertical forced plume (trajectory, dilution, etc.) are presented experimentally. The three-dimensional numerical model is used to quantitatively simulate the behavior of the vertical forced plume in these ambient conditions. The performance of the three-dimensional model is evaluated by comparison of numerical results with experimental measurements. By using numerical model, the production and disappearance of vortex pairs are discussed as plume flow downstream.

Keywords : vertical forced plume, diffusion, linear-stratified cross flow

1. はじめに

一般に重力噴流の拡散挙動は、噴流自身の放出条件とともに、その放出される場（周囲流体）の状態によって様々に変化する。例えば、一般の海象条件を考えると海水の流れや密度成層等の存在がその拡散挙動に大きく影響するものと考えられる。特に夏季沿岸域ではこれらの要因が共存するといった状況も想定されるが、こうした2つの環境要因が複合的に影響する条件下での重力噴流拡散については今だ未解明な点が多い。

筆者らは、前報¹⁾において流水・二成層域中へ放出される鉛直重力噴流の拡散挙動について、3次元モデルを用いた数値解析手法により考察した。その結果、成層界面に到達後の混合希釈特性に均一密度場とは異なる幾つかの特徴が見い出された。

本報では、線形な密度成層を形成しかつ水平流れの加わる周囲水条件下における鉛直重力噴流を対象として、その拡散挙動や混合希釈特性について、水理実験の手法ならびに数値解析手法を用いて考察した。

2. 実験的検討

(1) 実験装置と実験方法

本研究で用いた実験装置の概略を図-1に示す。実験水路の出入口部は水深方向に5層に分かれており、各層独立に循環し所定の流量を保つよう自動制御される。水温は、水路出入口部に設置された温度計に従い層毎に熱交換水槽において所定水温に自動調整される。温度差の設定は、各層間2℃まで可能である。ただし、このままでは階段状の温度分布となるため、水路への流入部において上下混合用のスリットを置き、線形分布となるよう調整している。

本実験では周囲水に塩水、放出水に淡水を用いた。淡水は、水槽底面より30D（D：ノズル直径（=1.6 mm））立ち上がった放水ノズルより鉛直上向きに放出される。放出水には蛍光染料を溶解させ、採水による蛍光度分析により放出水の濃度（希釈倍率）を測定

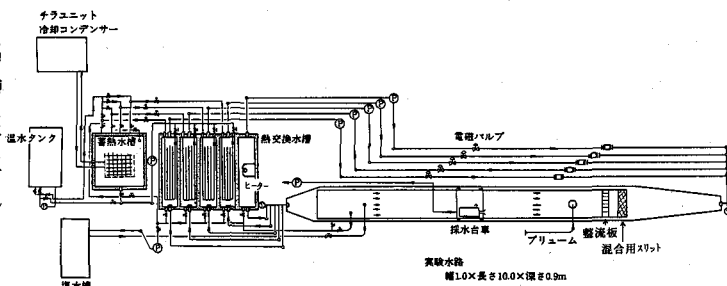
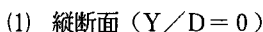


図-1 実験装置概要



した。採水管は流下方向に対して片側断面に配置し、下流側より上流側へ順次移動して採水した。

図-3 流水・成層域における鉛直重力噴流の
拡散パターン

$$\text{Fr}_0 = \frac{W_0}{(\Delta \rho_0 / \rho_0 g D)^{1/2}} = 40,60$$

$$Fr_u = \frac{Ue}{(\Delta\rho_0/\rho_0 gD)^{1/2}} = 0.191-0.638$$

$$S = \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} = 1.1 \times 10^{-6} - 3.9 \times 10^{-6}$$

$$H/D = 470 \quad (H: \text{放出口設置水深})$$

$$\Delta \rho = 0.025 \text{ g/cm}^3$$

図-2に、本実験で得られた噴流濃度の縦断面および横断面分布の一例を示す。流水・成層域における鉛直重力噴流の拡散形態は図-3の模式図に示す3つの形態が考えられるが、本実験範囲ではすべてCパターンとなった。これらの形態は、後述する最大上昇高さ H_m および安定上昇高さ H と、放出口設置水深 H_0 との大小関係から、図中に示す条件により判別することができる。

一方、実験結果より噴流に対する密度成層の影響をみると、密度勾配が大きいほど鉛直方向の拡がりや抑制され、噴流の経路は低く、横断面形状は偏平となる傾向を示した。また、均一密度場の場合に指摘されている噴流の分岐現象が今回の実験でも認められたが、流下方向に進むにつれ、その分岐が不明瞭となる傾向もみられた。

図-4 および5は、本実験で得られた噴流中心軸の経路およびそれに沿う希釈率の変化について、筆者らが流水・非成層域に対して提案した実験式²⁾に基づいて整理した結果を示す。放出口近傍では初期運動量が

周囲水の密度成層の影響より卓越しており、非成層域の実験式とはほぼ一致するが、噴流が上昇するにつれ、徐々にこの実験式より分かれてくる。経路についてみると、最大上昇高さを経てやがてはほぼ一定の高さ（安定上昇高さ H_b ）を保持するようになる。この H_b を前述の無次元パラメータを用い実験結果より回帰すると次式が得られる。

$$H_b / D = 0.60 S^{-1/3} Fr_u^{-1/2} Fr_o^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

(図中には $z/\ell = 0.60 S^{-1/3} Fr_u^{5/2} Fr_o^{-2/3}$ と表示)

また、希釈率の変化も噴流の上昇と共に非成層域に比べやや緩やかな一定の傾きに変化する。これを経路と同様に回帰式として求めると次式のようになる。

$$\frac{C_m}{C_o} K Fr_u^{-4} = 4.06 S^{1/3} Fr_u^{-5/2} Fr_o^{3/4} \left[\left(\frac{X}{\ell} \right)^2 + 2 Fr_u^4 \left(\frac{X}{\ell} \right) \right]^{-1/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ℓ は浮力に関する特性長（ $=k D Fr_u^{-2}$ ）， $k=W_o/U_e=Fr_o/Fr_u$ である。

図-6および7は、噴流の最大上昇高さ H_m およびそこの希釈率の実験結果を示す。これを前述の無次

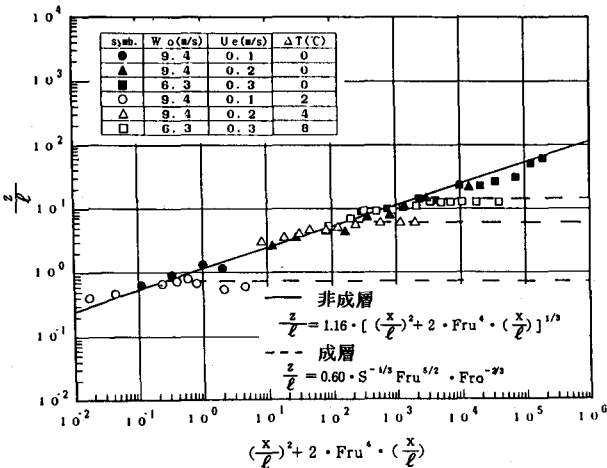


図-4 重力噴流の経路（実験結果）

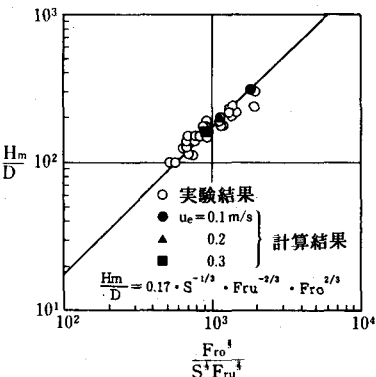


図-6 最大上昇高さ

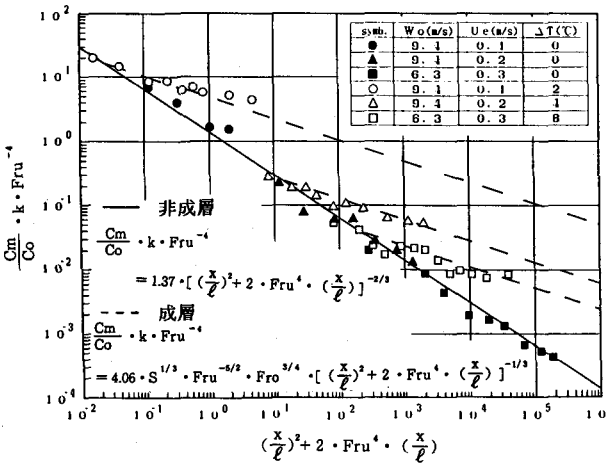


図-5 噴流経路に沿う希釈率（実験結果）

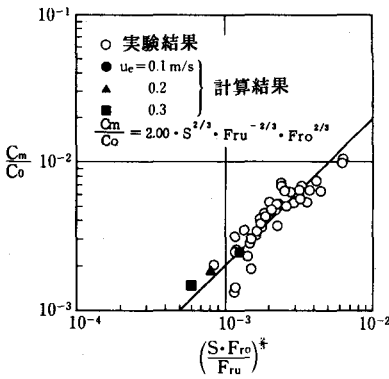


図-7 最大上昇高さでの希釈率

元パラメータで回帰すると以下の式が得られる。

$$\frac{H_m}{D} = 0.17 S^{-1/3} Fr_u^{-2/3} Fr_o^{2/3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{C_m}{C_o} = 2.00 S^{2/3} Fr_u^{-2/3} Fr_o^{2/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

本回帰式では、結果的に放出水と周囲水との密度差の影響が相殺されている。この点は現象的には考えにくく、今後実験パラメータの範囲や回帰関数の設定等について確認していく必要があると考える。

3. 数値解析的検討

(1) 数値モデルの内容と計算条件

本研究では、3方向の運動方程式、連続式および水温・塩分に関する拡散方程式から構成される3次元数値モデルを用いる。式中の渦動粘性・拡散係数は、噴流の拡がり幅（半値半幅）を混合長とした代数式によって算定する。基本方程式をはじめとするモデルの詳細、境界条件や渦動粘性・拡散係数の設定、および計算手順については前報¹⁾において詳細に記述しているため、ここでは略す。

本解析では、海面下 44 m に位置する直径 7.5 cm のノズルより初期流速 6.3 m/s で放出される鉛直重力噴流を想定する。前述の実験と同様に放出水は淡水、周囲水は塩水とし、両者の密度差は 0.026 g/cm³ とする。周囲水の成層条件は、上下層の温度差 2℃ の線形成層である。周囲流速は、0.1, 0.2, 0.3 m/s の3ケースとする。本設定条件下での前述の無次元パラメータは、 $S = 7.15 \times 10^{-7}$, $Fr_o = 46$, $Fr_u = 0.72, 1.45, 2.17$ となる。

(2) 計算結果

図-8 および 9 は、噴流中心の経路およびそれに沿う希釈率の変化について、計算結果と前述の実験式との比較を示す。いずれも放出口近傍から水温成層の影響を受ける領域まで両者は良く一致している。

また、前出の最大上昇高さおよびそこでの希釈率に関する図-6 および 7 中には実験式および実験値と共に本計算結果を併記している。これについても両者は良い一致を示している。

以上の結果より、本研究で用いた3次元数値モデルによるシミュレーション結果は、流水・線形成層場における鉛

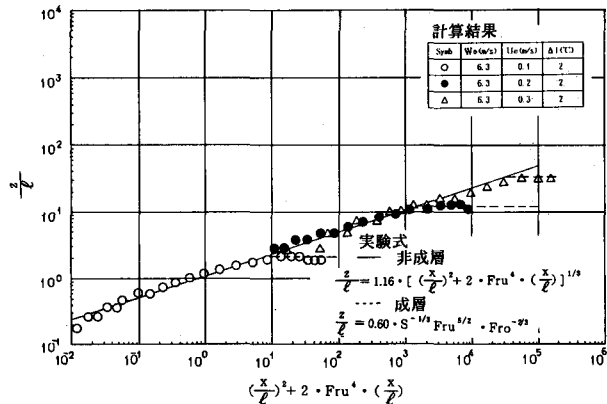


図-8 噴流経路の計算値と実験式との比較

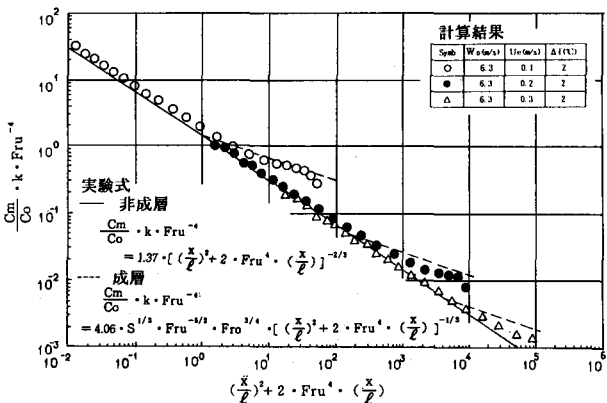


図-9 経路に沿う希釈率の計算値と実験式との比較

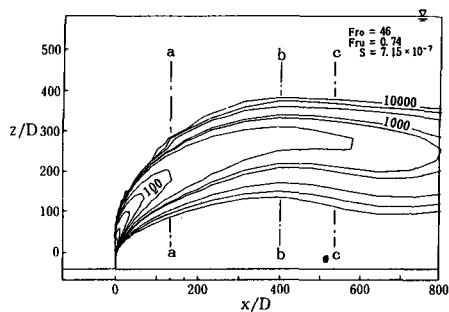


図-10 噴流濃度の縦断面分布（計算結果）

直重力噴流の拡散挙動を精度良く再現していることが確認された。

図-10は、周囲流速 0.1m/s の場合の噴流濃度の縦断面分布を示す。 $X/D=400$ 付近で最大上昇高さまで到達し、その後徐々に安定上昇高さの層へと移行する様子が認められる。

図-11には、この時の横断面濃度分布の変化を示す。分布形は、成層の影響により偏平な形状に変化する傾向がうかがえると共に、前述の実験結果と同様に噴流の分岐現象は明瞭に現われていない。

図-12は、前図と同じ断面での流速ベクトルの横断面分布を示す。噴流が上昇する過程の断面($X/D=133$)では非成層の場合と同様 $y/D=0$ を軸として1組の渦対が形成されている。それに対し、最大上昇高さ到達点付近($X/D=400$)では、前述の第1の渦対の上・下に新たな渦対が発生し、その後($X/D=533$)第1の渦対は徐々に不明瞭となる。こうした新たな渦対の形成や消滅は、非成層の場合に見られないものであり注目される。

図-13および14には、やはり同じ断面での温度および浮力フラックスの横断面分布を示す。こうした渦対の形成と消滅は、断面内での浮力の発生状況より解釈することができる。放出直後は、噴流自身の持つ初期浮力フラックスの影響により、噴流内のほとんどの領域で正の浮力が働いている。しかし、噴流の上昇と共に徐々に初期フラックスの影響は弱まり、逆に噴流内では第一の渦対のために水温成層が押し上げられ、その結果として噴流の上・下部に負の浮力が発生し、渦対の変化をもたらしている。なお、こうした渦対は最終的には全体的に減衰していくものと予想され、こうした変遷は過渡的なものと考えることができる。

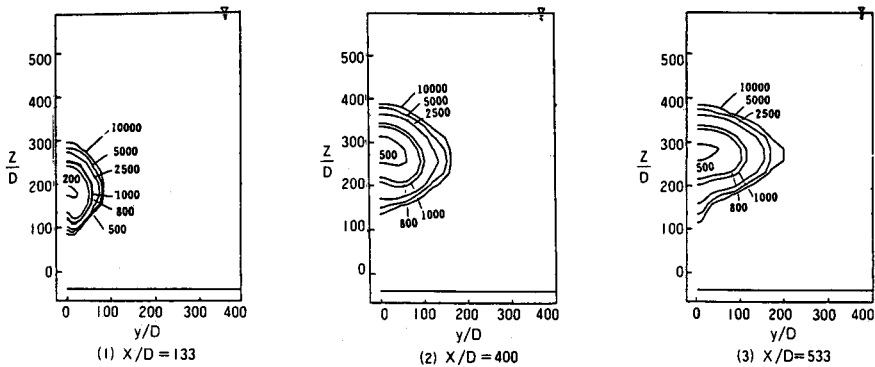


図-11 噴流濃度の横断面分布 (計算結果)

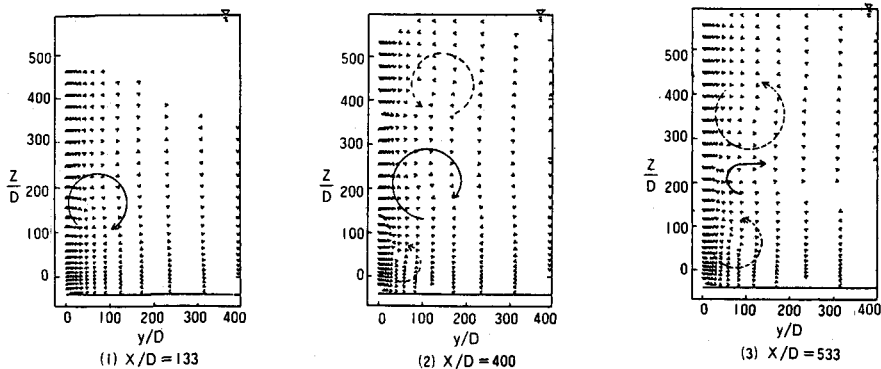


図-12 流速ベクトルの横断面分布 (計算結果)

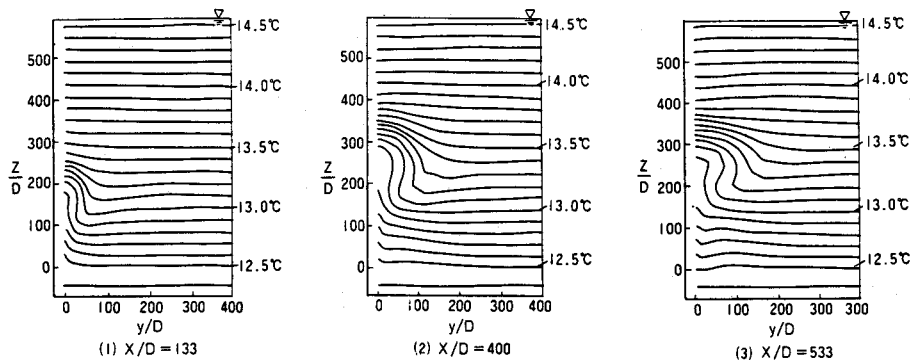


図-13 水温の横断面分布 (計算結果)

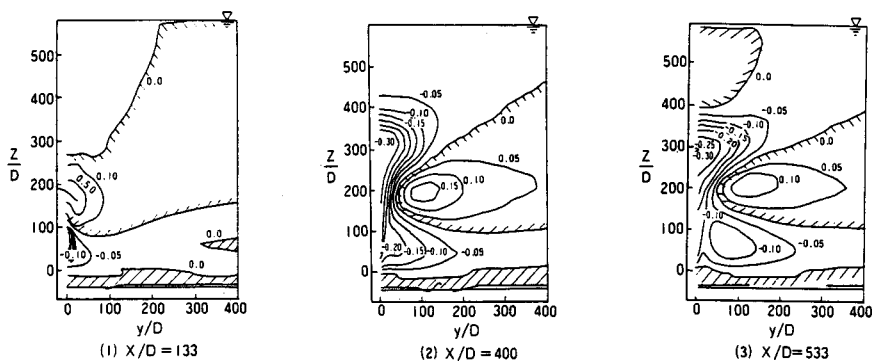


図-14 浮力フラックス ($= g \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a}$) の横断面分布 (計算結果)

4. おわりに

線形な密度成層を形成しかつ水平流れの加わる周囲水条件下での鉛直重力噴流拡散について、実験的手法を用い、その基本的混合希釈特性を明らかにした。また、3次元モデルによる数値解析手法により本現象を精良く再現できることを示すと共に、線形成層場特有の渦対の形成機構を示した。

(参考文献)

- 1) 水鳥・片野・和田, 第31回水理講演会論文集, pp. 509-514, 1987
- 2) 水鳥・片野・曾我・和田, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 581-585, 1986
- 3) 水鳥・片野・仲敷, 電力中央研究所 研究報告 U 88051, pp. 1-77, 1988