

## II-244 三次元表層密度噴流の流動に及ぼす浮力効果について

大阪大学大学院 学生員 許 再寧

大阪大学工学部 正 員 中辻啓二

大阪大学工学部 正 員 室田 明

1. まえがき : 著者等は矩形分布形を仮定した単純な積分モデルを用いて、三次元表層密度噴流の流動が形状比 $A(=2B/H)$ と密度Froude数 $Fd$ との関係で分類できることを示した。<sup>1)</sup> 本研究では三次元数値実験によりその妥当性を検討するとともに、表層密度噴流の流動に及ぼす浮力効果について言及する。

2. 三次元数値モデルの概要 : 数値モデルは第32回水講<sup>2)</sup>で発表したものと同様であるが、移流項と拡散項の計算において Spalding のhybrid scheme を新たに採用した。本モデルの特徴は自由水面高に依存して変動する表層コントロール・ボリュームを設定することによって自由水面変動を直接計算できることである。また、鉛直方向流速成分 $W$ は底面から自由水面まで上積みしたコントロール・ボリュームに連続方程式を適用して求めた。運動量等の乱流輸送は渦動粘性の概念を採用した。乱流係数は均質円形噴流に関する Reichardt(1942)の提案式を用いて与え、かつ三方向にわたって同値とした。浮力による成層安定効果は渦動粘性係数については Webb の提案式を、乱流 Schmidt数については Munk & Anderson の提案式を用いて、局所Richardson数の関数として表わす。乱流係数の決定法の妥当性については既に検討済である<sup>3)</sup>。計算の放流条件は流速 $U_0 = 2\text{m/s}$ 、水深 $H_0 = 2\text{m}$ 、半幅 $B_0 = 5\text{m}$ であり、密度Froude数 $Fd_0 = U_0 / \sqrt{(\Delta \rho_0 / \rho_a) g A_0^{1/2}}$ は種々の密度差を与えることによって 0.80-5.35の範囲で変化させた。形状比 $A_0$ は 5.0である。

## 3. 計算結果と考察:

(1)流動特性と流動区分 数値計算から得られた流動特性を図-1~3に表わす。無次元変数として $L_s = M_0^{3/4} / N_0^{1/2}$ で定義される長さスケールと $U_s = N_0^{1/2} / M_0^{1/4}$ で定義される流速スケールを採用した。 $M_0$ は流体力、 $N_0$ は浮力fluxである。図-1は最大流速 $U_m$ の流下方向減速特性を示す。流速は流れの確立領域で流下距離 $x/L_s$ の-1乗に従って減速しているが、 $Fd_0 \approx 1.0$ の密度Froude数の小さな場合には、微小ではあるが、放流口近傍で一時加速される。かつ、小さい $Fd_0$ 数ほど、その加速傾向が明瞭である。これは河川流出流で観察される一時加速現象に相当する。図-2は密度差分布の半値半幅で定義される噴流水深の流下方向変化を示す。図から明らかなように、 $Fd_0$ の大きい2ケースで噴流水深は最初に増加してまもなく減少する。しかし、 $Fd_0$ の小さい他の3ケースでは噴流水深は放流口を出て直ちに減少し始める。最終的には、噴流水深は $H_0/5/L_s \approx 0.1$ に漸近し、 $x/L_s > 8$ では鉛直方向の混合が抑制されていることが分る。図-3は $Fd = U_0 / \sqrt{(\Delta \rho_s / \rho_a) g H_e}$ の流下方向変化を表わす。ここに、 $\Delta \rho_s$ は中心軸上の水表面密度差、 $H_e$ は流速が $U_m$ の $1.0/e (=0.3679)$ となる水深である。 $Fd$ の変化は $Fd_0$ の大きい2ケースで単調に減少するのに対して、他の三ケースでは一時的に増加してから減少する傾向を示す。

以上のことを総合して考察すると、次のように推察できる。すなわち、温排水のような大きい $Fd_0$ 数の流れは、運動量流束が卓越しているので密度噴流の形態をとる。初期段階では表層厚を増大させるが、流下にとまなう初期運動量の急激な減少と $Fd$ の減少、そしてその結果生じる連行の遅減により、流れは成層密度流に移行する。一方、河口流出流のような $Fd_0 \approx 1.0$ の流れでは放流口付近で一時加速された後に減速する。その時、 $Fd$ は単調に増大するために連行が活発になり、流れは体積を増す。その結果、 $Fd$ が減少し始め、噴流水深は最終的な厚さに漸近する。Murota et al.<sup>1)</sup>は放流流束の分布形を矩形と仮定した積分モデルを展開して、流れの形状比 $A$ と $Fd$ との関係から表層放流密度流の流動を次のように区分した。

I :  $dH/dx > 0$  ,  $dU/dx < 0$  ,  $dFd/dx < 0$ II :  $dH/dx < 0$  ,  $dU/dx < 0$  ,  $dFd/dx < 0$ III :  $dH/dx < 0$  ,  $dU/dx < 0$  ,  $dFd/dx > 0$ IV :  $dH/dx < 0$  ,  $dU/dx > 0$  ,  $dFd/dx > 0$ 

図-4はこの関係を図式化したものである。図中の・印は本研究における放流条件に相当する。 $Fd_0 = 0.80$ および $1.00$ はIV領域に属しており、一時加速および $Fd$ の増大をみせた後に、流速が遅減するIII領域と、諸

量が減少するⅡ領域を順に経て一定の噴流水深に漸近する。また、 $Fd_0 = 5.35$ および $3.35$ はⅠ領域に属し、最初は噴流水深を増大させるが、やがては一定の噴流水深となる成層密度流的な挙動に移り変わる。このことは数値実験結果と一致するもので、流動区分に関する Murota et al.<sup>1)</sup>の結果の妥当性を裏づけている。

(2) 流動に及ぼす浮力効果 図-5は流速及び密度差に関する半値半幅の流下方向変化を示す。流速の半値半幅は $Fd_0$ 数にそれほど依存せず、その拡がり率は略0.52である。一方、密度差の半値半幅の拡がり率は $Fd_0$ 数に非常に敏感である。 $Fd_0$ 数の小さいほど、成層効果が有効に働き、水平方向の拡がり率は増大する。図-6は放流口での水面上昇量を表わす。縦軸は数値計算結果を、横軸は板倉ら<sup>4)</sup>の積分モデルによる結果である。噴流型の流れにおいては両者は比較的良く一致するが、 $Fd_0$ の小さい河口流出流型の流れでは両者の差異は大きくなる。放流口での水位上昇量は河川の不等流計算の下流端条件を設定するうえで重要であり、今後この数値モデルを用いて詳細に検討する予定である。

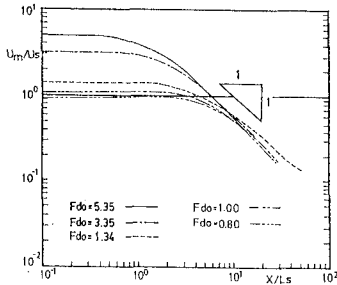


図-1 中心軸上最大流速の逡減特性

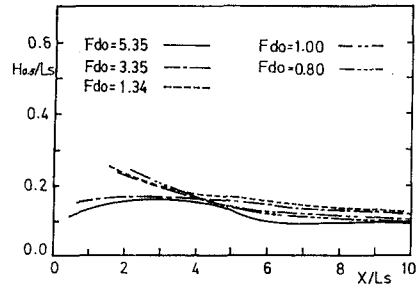


図-2 噴流水深の流下方向変化

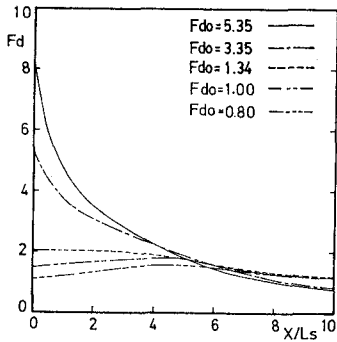


図-3 Fd の流下方向変化

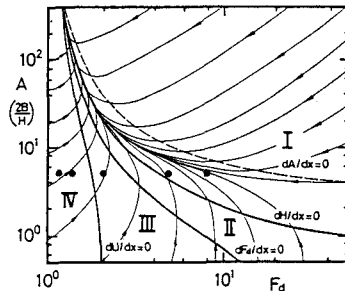


図-4 形状比とFd との関係

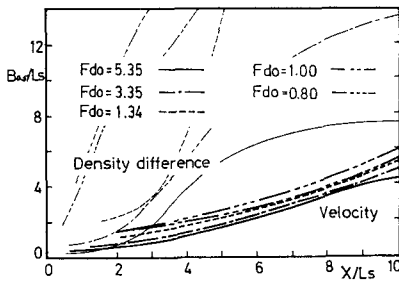


図-5 流速と密度差の半値半幅

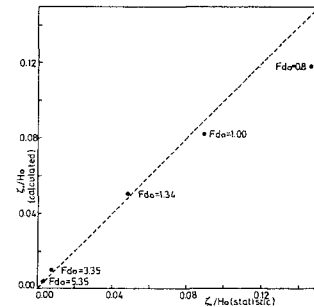


図-6 水面上昇量の比較

参考文献 1) Murota et al. : J. Hydro. & Hydr. Eng., Vol.2, No.2 (1984) 2) 室田ら：第32回水講 (1988) 3) Murota et al. : 6th APD-IAHR (1988) 4) 板倉ら：土木学会論文集第 303号 (1985)