

II-337

一般曲線座標系を用いた2次元密度流解析

京都大学大学院 学生員 大久保忠彦

京都大学工学部 正 員 岩佐義朗

京都大学工学部 正 員 綾 史郎

大 阪 市 正 員 尾植正順

1. はじめに: 本研究は一般曲線座標系における鉛直2次元数学モデルを用いて、密度流の数値解析を行ったものである。本モデルにより、種々の境界条件、初期条件下の密度流場の考察が可能となるが、本論文では地形形状の密度流に及ぼす影響を検討することを目的とし、路床形状の上層及び下層密度流におよぼす影響についての計算と考察を行った。

2. 基礎方程式系: 水路幅方向の一様性を仮定し、デカルト座標系における x_1, x_2 軸方向の運動量方程式、連続式、温度の乱流拡散方程式を座標変換

$$\xi_i = \xi_i(x_1, x_2, t) \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

によって一般曲線座標系上のものに改めると、以下の式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{J} \right) \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\frac{1}{J} \right) \begin{pmatrix} u_1 \frac{\partial \xi_i}{\partial t} \\ u_2 \frac{\partial \xi_i}{\partial t} \\ 0 \\ T \frac{\partial \xi_i}{\partial t} \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\frac{1}{J} \right) \begin{pmatrix} u^i u_1 \\ u^i u_2 \\ u^i \\ u^i T \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\frac{1}{J} \right) \begin{pmatrix} \tau^{1i} \\ \tau^{2i} \\ 0 \\ s^i \end{pmatrix} + \frac{1}{J} \begin{pmatrix} -g \frac{\partial \xi_i}{\partial x_1} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi_i} + g \frac{\partial \xi_i}{\partial x_2} \frac{\partial D}{\partial \xi_i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{J} \begin{pmatrix} -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_1} \frac{\partial p_d}{\partial \xi_i} \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_2} \frac{\partial p_d}{\partial \xi_i} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここに、 u_i : x_i 軸方向の流速、 u^i :流速ベクトルの反変ベクトル成分、 τ^{ij} :レイノルズ応力の反変ベクトル成分、 s^i :勾配輸送型温度フラックスの反変ベクトル成分、 T :温度、 ρ_0 :基準密度、 p_d :動水圧、 ζ :水位、 D :正規化された密度偏差の水深積分値、 J :Transformation Jacobian、 x_1 :水平方向座標、 x_2 :鉛直方向座標である。なお、式(2)の第1、第2式は、各々 x_1, x_2 軸方向の流速 u_1, u_2 に関する運動量方程式でブジネスク近似が用いられており、第3式は連続式、第4式は温度の乱流拡散方程式である。(2)式と密度と温度の関係を表す状態方程式により、基礎方程式系は構成される。

3. 数値解析結果とその考察: (1)実験方法と計算条件

対象とした水路モデルは、水路長320.0cm、上流端水深を約11.5cm、下流端水深を約23.0cmとし、その中間を一部曲面でつないだもの(水路A)であり、水路Bは水路Aの路床中央付近に高さ4.0cm、長さ53.0cmの正弦波状のランプを有している。水路は流下方向(ξ_1 軸方向)に80分割水深方向(ξ_2 軸方向)に23分割され、非正方形格子網が生成された。数値計算にあたっての各変数の定義点はFig. 1に示した様であり、各定義点について水深および D が計算される。計算時間間隔 $\Delta t = 0.01s$ とし、水平方向の渦動粘性係数は $\nu_{th} = 100.0cm^2/s$ 、乱流拡散係数は $\gamma_{th} = 100.0cm^2/s$ とし鉛直方向のそれらはRichardson数の関数として以下のように表す。

$$\nu_{tv} = (\nu_{tv})_0 e^{-1.5 Ri} \quad (3)$$

$$\gamma_{tv} = (\gamma_{tv})_0 e^{-3.0 Ri} \quad (4)$$

$$(\nu_{tv})_0 = (\gamma_{tv})_0 = 1.0cm^2/s \quad (5)$$

(2)計算結果; 水路A, Bに対し、Table 1に示す3種の水利条件下における数値解析をおこない、定常状態とみなされる計算結果をFigs. 2~4に示す。Fig. 2は条件1に対応し20℃の一樣密度場の上流端の水路床から高さ6.0cmの領域

Table 1 数値実験の諸量

Run. No	流入流量 q (cm ³ /s)	流入水深	初期分布水深
1 (下層密度流)	0.0 0.0 < b < 5.5 (cm) 0.0 5.5 < b < 11.5 (cm)	10℃	$T = 20^\circ\text{C}$ (全領域)
2 (上層密度流)	20.0 0.0 < b < 11.5 (cm)	20℃	$T = 20^\circ\text{C}$ 0.0 < b < 15.0 (cm) $T = 10^\circ\text{C}$ 15.0 < b < 23.0 (cm)
3 (上層密度流)	50.0 0.0 < b < 11.5 (cm)	20℃	$T = 20^\circ\text{C}$ 0.0 < b < 15.0 (cm) $T = 10^\circ\text{C}$ 15.0 < b < 23.0 (cm)

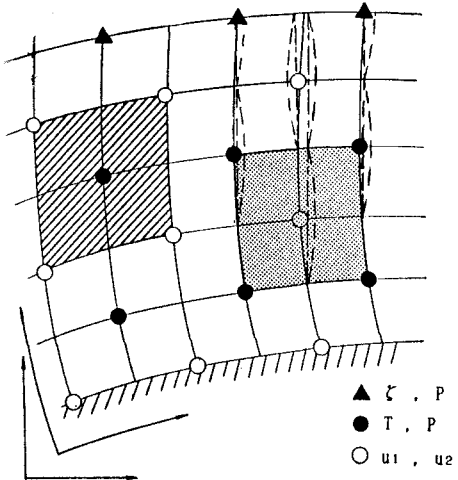


Fig. 1 従属変数の定義点

で10℃の水が流入する下層密度流の計算結果であり、Fig. 3は条件2に対応し、下層水温10℃、上層水温20℃の2成層場に、20℃の水が流入する上層密度流の計算結果である。さらに、Fig. 4は条件3に対応し、流入流量を条件2の2.5倍にしたものである。各々、ハンプのある場合と無い場合の等温度線図が示されている。これらの図から以下のことが理解される。1)下層密度流の場合(Fig. 2(a)(b))、2層間の混合に及ぼすハンプの影響はさほど大きいものではない。2)上層密度流の場合、条件2に対しては、ハンプのない場合の方が、2層間の混合が促進される(Fig. 3(a)(b))が、条件3のように流量を大きくした場合では、ハンプの存在により混合が促進される(Fig. 4(a)(b))。

4. 結論：一般曲線座標系による鉛直2次元密度流の数値解析モデルを作成し、水路床にハンプが存在する場合の上、下層密度流の数値解析を行った。今回の数値解析結果では、2層間の混合に関しては、上層密度流の場合の方がハンプの影響が顕著に現れ、上層流量によりハンプの影響が異なる結果を得た。今後、詳細な数値実験を行うとともに、理論的、水理実験的研究と比較して検討して行きたいと考えている。

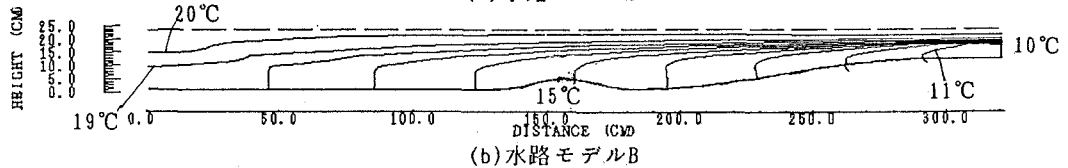
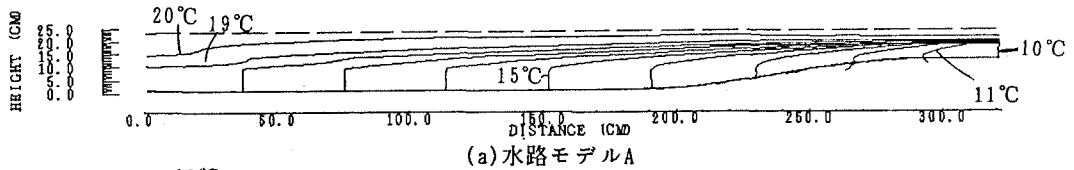


Fig. 2 下層密度流の計算結果(等温度線図)

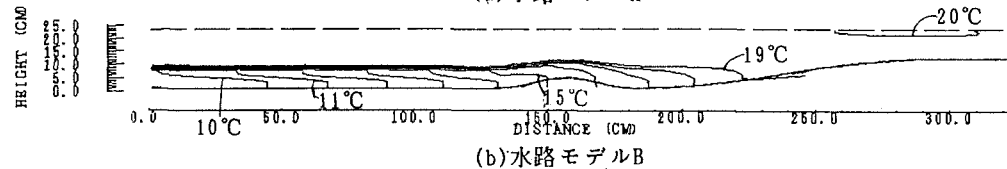
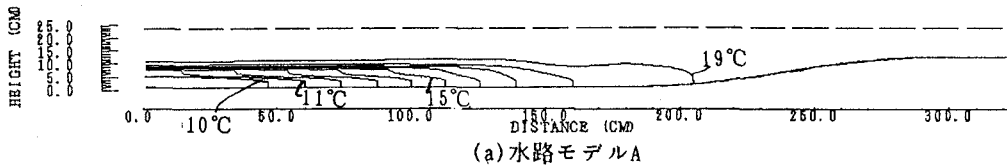


Fig. 3 上層密度流(Run No. 2)の計算結果(等温度線図)

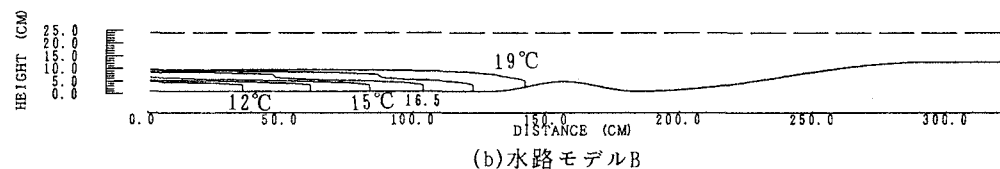
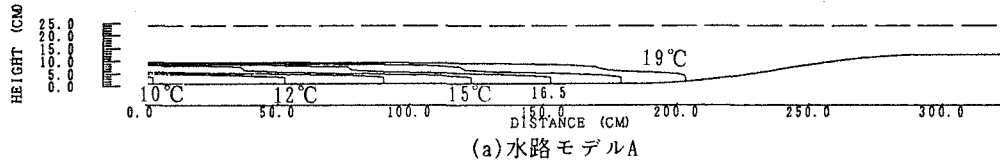


Fig. 4 上層密度流(Run No. 3)の計算結果(等温度線図)