

## 斜面上を流下するThermalの挙動について

九州大学工学部 正会員 平野 宗夫

九州大学工学部 正会員 羽田野 繁義

九州大学工学部 学生員 〇松尾 俊洋

## 1. まえがき

洪水時に生じた濁水が長期にわたり池内に滞留し、放流されつづける。いわゆる濁水長期化現象は大きな社会問題となっている。また、これに関する研究が活発に行なわれており、高濃度の濁水流入は洪水初期の比較的短時間に限られるとの報告もなされている。

本研究は上記の濁水流入の性質をふまえ、周囲流体より重い流体塊が流体中では、瞬時に放たれて傾斜した面上を流下するInclined thermalの流動に関して理論的・実験的考察を加えたものである。

## 2. 理論

ここでは2次元流を取扱うことにし、図-1に示すような2層流モデルを考える。図の斜線の流体部分に対して体積保存則・質量保存則および流れ方向の運動方程式は次式である。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = V_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \delta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \eta)}{\partial x} = \rho_0 V_e \quad (2)$$

$$\int_0^\delta \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = - \int_0^\delta \frac{\partial p}{\partial x} dz + \int_0^\delta \rho g \sin \theta dz + T_i - T_b \quad (3)$$

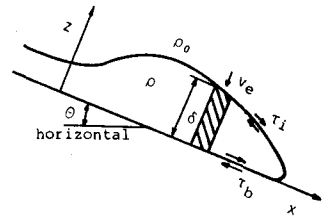


図-1 解析モデル

ここに、 $\delta$ は下層流の流動厚さ、 $\eta = \eta(x, t) = \int_0^\delta u(x, z, t) dz$ 、 $V_e$ は周囲流体の進行速度、 $\rho$ は流体の密度、 $\rho_0$ は周囲流体の密度、 $u$ および $w$ はそれぞれ $x$ および $z$ 方向の流速成分、 $\theta$ は底面傾斜角、 $T_i$ および $T_b$ はそれぞれ内部界面および底面におけるせん断応力である。式(1)~(3)は連続方程式などを用いて変形され、特性曲線  $dx/dt = \bar{u}$  上で、それぞれ次のように表される。

$$\frac{d\delta}{dx} = E - \frac{\delta}{\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{d\rho}{dx} = -\frac{\rho E}{\bar{u}} \quad (5)$$

$$\frac{d\bar{u}^2}{dx} = 2 \frac{\Delta p}{\rho} g \sin \theta - \frac{2}{\rho \delta} g \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} \rho \delta^3 \right) - 2 \frac{\bar{u}^2}{\delta} \left[ E(1-k) + f \right] - 2(\beta-1) \bar{u} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} \delta) + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \bar{u} \right\} - 2 \bar{u}^2 \frac{\partial \beta}{\partial x} \quad (6)$$

ここに、 $\beta$ は運動量補正係数で  $\beta \bar{u}^2 \delta = \int_0^\delta u^2 dz$ 、 $f$ は抵抗係数で  $f \rho \bar{u}^2 = T_b - T_i$ 、 $k = U_{20} g / \bar{u}$ 、 $E = V_e / \bar{u}$  は進行係数である。また、式(3)の変形において圧力に静水圧分布を仮定した。式(4)~(6)は連立方程式であるが、右辺の偏微分の項を評価するのは困難なため、ここではplumeの場合と同様<sup>2)</sup>以下の取扱いをする。すなわち、Inclined thermalに関する最近の研究により、底面勾配が一定の場合、先端部の最大厚さが流下距離に対してほぼ直線的に増大すること、および形状がほぼ相似に保たれることが認められており、今回の実験においても確かめられている。以下これを仮定して取り入れて解析を進める。まず最大厚さの断面を対象とすることにし、

$$\delta \frac{d\delta}{dx} = m = E - \frac{\delta}{\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (7)$$

を一定とすると式(8)が、さらに進行係数を一定とすると式(5)、(7)および(8)より式(9)が得られる。

$$\delta = m(x - x_0) + \delta_0 \quad (8) \quad \frac{\Delta p}{\Delta \rho} = \left( \frac{\delta}{\delta_0} \right)^{-\frac{E}{m}} = \left\{ m \frac{x - x_0}{\delta_0} + 1 \right\}^{-\frac{E}{m}} \quad (9)$$

また、式(6)の $\delta$ および $\Delta p$ に式(8)および(9)を代入し、 $E$ 、 $m$ 、 $K$ 、 $\beta$ および $f$ を一定とすると式(6)は積分される。その結果を  $X = x/\delta_0$ 、 $U = \bar{u}/\bar{u}_0$  および  $F_0 = \bar{u}_0 / \sqrt{\Delta \rho g \delta_0 / \rho}$  を用いて無次元形で示すと次のようになる。

$$U^2 = \frac{2 F_0^2 \sin \theta}{E(1-2K) + 2f - 4(\beta-1)(Xm-E) + m} \{m(X-X_0) + 1\}^{-5/6} \\ + \left\{ 1 - \frac{2 F_0^2 \sin \theta}{E(1-2K) + 2f - 4(\beta-1)(Xm-E) + m} \right\} \{m(X-X_0) + 1\}^{-2 \frac{E(1-K) + f - 2(\beta-1)(Xm-E)}{m}} \quad (10)$$

ここに,  $\delta_0$ ,  $\Delta \rho$  および  $U_0$  は  $X=X_0$  における  $\delta$ ,  $\Delta \rho$  および  $U$  の値である。

### 3. 実験およびその結果と考察

(1) 実験 実験装置は前報と同様のものを用いた。実験は予め水路に水道水を満たして置き, 上流端で着色塩水(濃度10000ppm)を投入した。投入方法は所定の体積の塩水を瞬時に放流する方法をとった。実験条件は表-1に示すとおりである。測定は, 塩分濃度, 先端部の発達および先端移動速度について行った。

| RUN | $\sin \theta$ | volume(l) |
|-----|---------------|-----------|
| 1,2 | 0.203         | 2.0       |
| 3,4 | 0.052         | 5.0       |
| 5   | 0.102         | 5.0       |

表-1 実験条件

(2) 実験結果 式(7)で定義した  $m$  は周囲水の進行および後流の流入による先端部の流動厚さの増加割合を示すが, この  $m$  をふくらみ係数と呼ぶことにする。図-2

は本実験における  $m$  を  $\sin \theta$  に対してプロットしたものである。図中, 実線は Beghin らの thermal の実験, 破線は著者の plume の実験での結果であり, Bühler の実験値も示した。図より  $m$  は勾配とともに増大しているが, 本実験では  $m$  は plume の場合に比べて小さい値となっている。

次に進行係数  $E$  であるが, 式(5)を  $E = \text{const.}$  として積分すると次式を得る。

$$E = \frac{-\ln(\Delta \rho / \Delta \rho_0)}{\int_{x_0}^x dx / \delta} \quad (11)$$

流動厚さと密度の測定値から式(11)の分母・分子を求めてプロットした結果が図-3に示されている。図より勾配はほぼ  $E$  は大きくなっている。また, 図には同じ水路で RUN 1, 2 と同じ勾配で行った plume 実験での値もプロットしているが,  $E$  の値は thermal の場合の方が plume の場合より若干大きな値となることわかる。

### 4. 実験値と計算値の比較

式(9)および(10)の適合性をみるために, 密度と速度の実験値と計算値を図示したのが図-4および5である。図より  $E/m = 2 \sim 3$  程度の値で計算値と実験値はほぼ一致を示しており, このことは図-2および3の結果と対応している。

#### <参考文献>

- 1) 安芸周一; 自然災害特別研究成果, No.A-54-5, 1979
- 2) 平野宗夫・羽田野繁義; 工本学会論文報告集, No.314, P.67, 1981
- 3) P. Beghin; E. J. Hopfinger and R. E. Britter; J.F.M., Vol.107, P.407, 1981
- 4) Bühler; Proc. of 2nd Intn. Symp. on stratified flows, IAHR/Trondheim, 1980

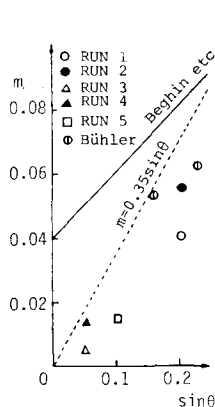


図-2

$m$  と  $\sin \theta$  の関係

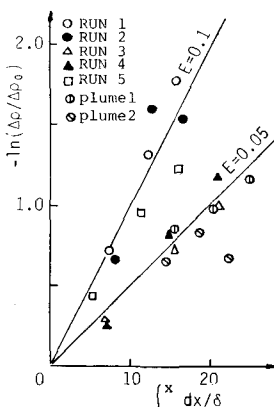


図-3

$\ln(\Delta \rho / \Delta \rho_0)$  と  $\int_{x_0}^x dx / \delta$  の関係

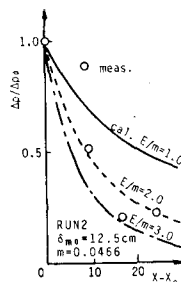


図-4

密度の実験値と計算値

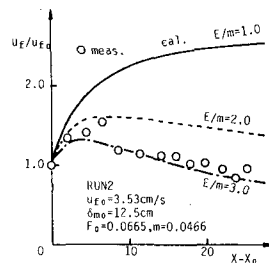


図-5

先端速度の実験値と計算値