

II-250

傾斜ブルームと傾斜サーマルの連行係数について

九州工業大学 工学部 正 員○秋山 壽一郎、浦 勝
学生員 坂本 浩一、森田 毅

1. 序論

周囲水より重い流体が斜面上に放出されると、底斜面に沿って流下発達し、重力密度流(Gravity Current)を形成する。この重力密度流は流入条件が連続的か、または瞬間的かによって傾斜ブルーム(Inclined Starting Plume)もしくは傾斜サーマル(Inclined Thermal)にそれぞれ分けられる。前者は、傾斜面上に沿って流下発達する場合、非定常で強い渦運動を伴う”先端部”とその後方のほぼ定常な”後続部”とから構成されるが、後者は後続部が無いのが特徴である。ところで、このような流れを理論解析する際には、連行係数を知る必要があるが、従来の研究では(1)各研究者によって連行係数の定義が異なること、(2)各研究者の実験条件が非常に限定されていること、(3)各研究者の理論モデルが異なり、モデルの逆算によって連行係数を推定していることなどの理由で、いまだ統一的な見解は得られていないのが現状である。そこで本研究では、流入条件及び底面傾斜角を様々に変化させ、同一条件下で繰り返し実験を行い、傾斜ブルーム及び傾斜サーマルの連行量を実験的に求め、連行係数を底面傾斜角の関数として決定した。

2. 実験

傾斜ブルームの実験は2つの実験装置を用いて行った。実験装置Aは水槽(長さ9.0m, 深さ1.22m, 幅0.6m)内に水路(長さ9.0m, 深さ0.45m, 幅0.2m)を設けたもので、底面傾斜角が 5° , 5.71° , 8.13° , 10° および 20° の場合に用い、実験装置Bは水槽(長さ1.53m, 深さ1.48m, 幅1.33m)内に水路(長さ2.0m, 深さ0.36m, 幅0.22m)を設けたもので、 θ が 45° , 60° および 90° の場合に用いた。一方、傾斜サーマルは実験装置Bを用い、 $\theta=30^\circ$, 45° , 60° および 90° の場合について実験を行った。

いずれの場合も塩水を淡水中に静かに流入させ、重力密度流を形成した。測定した特性量としては、傾斜ブルームでは先端移動速度(U_f)及び先端部形状、後続部層厚(h)であり、サーマルでは先端移動速度(U_f)及び形状である。これらの諸量はいずれもVTRの画像解析より求めた。また、 $\theta=5.71^\circ$ 及び 8.13° のブルームの場合に限って、先端部と後続部の流速及び密度分布も測定した。流速測定は $\phi=3\text{mm}$ のマイクロプロベラ流速計(篠塚SV-33W)で行い、密度は10点同時に採水可能な採水装置($\phi=2\text{mm}$ の銅管製)を用い、電気伝導度計により塩分濃度を求めた。

3. 実験結果

傾斜ブルームでは、先端部と後続部の流動特性が異なるので連行特性も異なる。以下、各連行係数について考察を加える。定義図を図-1に示す。

(a) 傾斜ブルーム後続部の連行係数(E_s)

傾斜ブルームでは、先端部上端が碎けながら流下していくため、置き去られた流体塊は後続部で再連行されるが、置き去られた流体塊の密度差は極めて小さいので、後続部の連行特性は連続下層密度流と類似していることが予想される。連続下層密度流の連行係数(E_s)は連続の式より式(1)のように定義されるが、Ellison & Turner(1959)が指摘したように、初期浮力fluxが保存される保存性の連続下層密度流では、Overall Richardson数($R_i=Bh\cos\theta/u^2$)が流下方向に不変となる”normalな状態”が存在する。この状態では、 R_i の定義から明らかなように、断面平均流速 u も一定となり、 E_s は式(2)のように簡単になる。

$$E_s = \frac{1}{u} \frac{d}{dx} (uh) \dots\dots\dots (1), \quad E_s = \frac{dh}{dx} \dots\dots\dots (2)$$

そこで、傾斜ブルームの後続部と連続下層密度流とが類似した流れか否かを検証するために、 $\theta=5.71^\circ$ と 8.13° の実験データを用いて R_i , u , h 及び B の流下方向への挙動を調べた。その結果、流入点よりある程度下流では $R_i=\text{一定}$, $u=\text{一定}$, $h \sim x$, $B \sim x^{-1}$ であり、後続部が連続下層密度流の”normal”状態と同様な挙動を示す事が認められた。よって、後続部の連行係数に関しては、既存の関係式で十分に表現できると考えられる。そこで、本研究ではTurner(1986)によって提案されている式(3)の経験式を用いて比較検討を行った。 $\theta=5.71^\circ$ と 8.13° の場合に対しては u , h , B を流速・密度分布から求め、 R_i を決定した。一方、 $\theta=5^\circ$, 10° , 20° , 45° , 60° の場合に対しては dh/dx より E_s を算定し、連続下層密度流の支配方程式の一つである dR_i/dx に関する式において $dR_i/dx=0$ とした式(4)に基づき R_i を近似

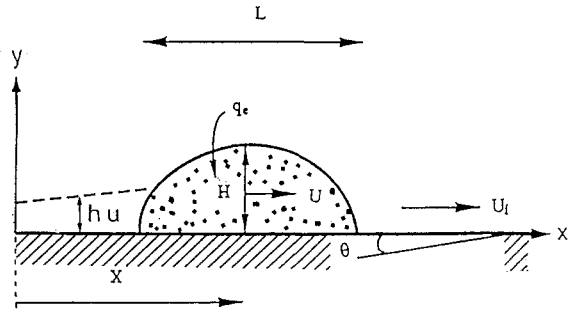


図-1 定義図

的に求めた。このようにして得られた $E_e \sim R_i$ の関係と式(3)とを比較したものが図-2である。斜面上の密度流では底面傾斜角と連行係数との間に対応関係があるので、得られたデータの範囲はあまり広がらないが、式(3)は後続部に対してもかなりの精度で成立するようである。

$$E_e = \frac{0.08-0.1R_i}{1+5R_i} \dots\dots (3), \quad R_i = \frac{(1+0.5\alpha_1)E_e+f_b}{\alpha_2 \tan \theta} \dots\dots (4)$$

ここに、 α_1, α_2 は分布定数、 f_b =底面摩擦抵抗係数であり、式(4)を用いた R_i の計算に際しては $\alpha_1=0.25$ 、 $\alpha_2=0.75$ 、 $f_b=0.01$ を用いた。

(b)傾斜ブルーム先端部及び(E_{LP})傾斜サーマル(E_{LT})の連行係数

いずれの連行量(q_e)も式(5)より算定し、式(6)で連行係数(E_L)を定義した。

$$q_e = \frac{\Delta A}{\Delta t} \dots\dots (5), \quad E_L = \frac{q_e}{LU_f} \dots\dots (6)$$

ここに、 ΔA =ブルーム先端部またはサーマルの面積変化量、 Δt =経過時間、 L =ブルーム先端部またはサーマルの長さ。

連行係数を定義する際の長さのスケールとしては、式(6)で用いた先端部もしくはサーマルの長さ(L)、最大層厚(H)、または周囲長(R)が考えられるが、 L と H の関係はこれまでの著者らの実験研究により傾斜ブルーム先端部に対しては式(7)で、傾斜サーマルに対しては式(8)でそれぞれ近似的に与えられる。 R と L の関係も形状を半楕円と仮定すると式(9)で与えられるので、ここでは式(6)で定義される連行係数についてのみ考察する。

傾斜ブルーム先端部： $H/L = 0.0053\theta + 0.23$ for $\theta = 5 \sim 90^\circ$ (7)

傾斜サーマル： $H/L = 0.0035\theta + 0.29$ for $\theta = 30 \sim 90^\circ$ (8)

$$R/L = (\pi/2^{3/2})(4(H/L)^2+1)^{1/2} \dots\dots (9)$$

各底面傾斜角に対して、式(6)に基づき瞬間瞬間の傾斜ブルームの連行係数(E_{LP})と傾斜サーマルの連行係数(E_{LT})を画像解析より求めた。ブルームの先端部およびサーマルでは渦が置き去られるため、成長・減衰を繰り返しながら流下するが、平均的には流下方向に徐々になくなっていく。そこで、同一条件下で実験を繰り返して行ない、数多くのデータを用いて頻度分布を求め、その平均値をもって E_L を決定した。従って瞬間瞬間の変動量は平滑化されている。図-3はこのようにして算定した連行係数と底面傾斜角との関係を示したものである。いずれの連行係数も θ が増大するとほぼ直線的に増加し、ブルーム先端部とサーマルとの間に著しい差は認められなかった。

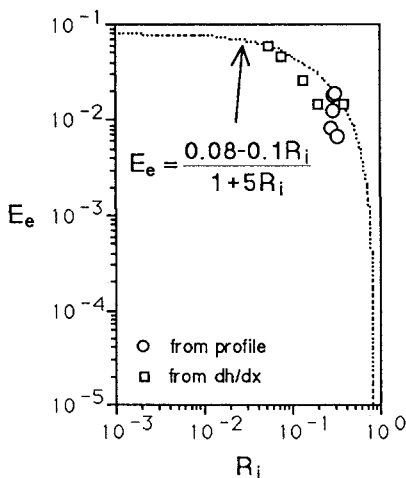


図-2 $E_e \sim R_i$ の関係

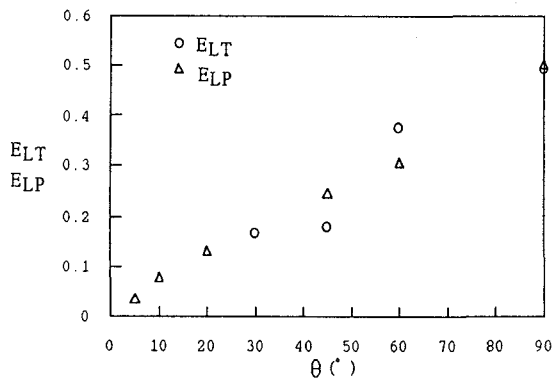


図-3 $E_{LP}, E_{LT} \sim R_i$ の関係

4. 参考文献

- 秋山ら(1993), 水工学論文集, 第37巻
- Beghin et al.(1981), J.F.M. vol.107
- Britter-Linden(1980), J.F.M. vol.99
- Ellison & Turner(1959), J.F.M. vol.6
- Turner(1986), J.F.M vol.173