

傾斜ブルームと傾斜サーマルの連行係数について II

九州工業大学工学部 学生員○サニット ウォンサ、坂本 浩一
同 上 正 員 秋山 壽一郎、浦 勝

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、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、後者で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。しかし、従来の研究では、(1) 連行係数の定義が異なること、(2) 実験条件が非常に限定されていること、(3) 理論モデルが異なるにもかかわらず、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、いまだに統一的な見解は得られていないのが現状である。本研究は、流入条件および底面傾斜角を様々に変化させ、同一条件下で実験を繰り返し行い、傾斜ブルームおよ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、重力密度流の連行係数を統一的に比較検討したものである。

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° , 10° および 20° の場合に用い、実験装置Bは水槽内に水路 (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流入させることによって重力密度流を形成した。測定はVTRカメラを用い、傾斜ブルームおよび傾斜サーマルの先端移動速度 (U_f) および先端部形状を画像解析より求めた。定義図を図-1に示す。

3. 実験結果

傾斜ブルームでは、先端の移動速度が後続部の断面平均速度よりも遅いために、両部の間に相対速度が生じ、高密度の流体が後続部から先端部へ送り込まれる。それと同時に先端部では強い渦運動のために周囲水が連行され、先端部は混合希釈される。希釈された流体は先端部の上部界面に生じる強いせん断力のため引きちぎられ、先端部後方へ混合流体を残しつつ、先端部は前進する。その結果、先端部後方に置き去られた流体は混合層を形成し、混合層の流体は後続部において再連行され、ふたたび先端部へ送り込まれる。一方、傾斜サーマルでは、後続部が存在しないので、先端部への浮力供給が無いところに特徴がある。そこで、傾斜ブルームの後続部から先端部へ供給される流量を q_i 、傾斜ブルーム先端部および傾斜サーマルの連行量を q_e 、後続部に置き去られる流量を q_o とすると、傾斜ブルーム先端部の瞬間的な体積は q_i 、 q_e 、および q_o のバランスによって決定される。一方、傾斜サーマルの場合は連行量 q_i と混合流体の分離量 q_o によって規定される。瞬間的な傾斜ブルーム先端部の体積バランスは式(1)のようになる。

$$\frac{dA}{dt} = q_i + q_e - q_o \quad \dots (1)$$

ここに、 A = 単位幅体積、 t = 時間である。

さて、 q_i を決定するためには流速を知る必要があるが、重力密度流は強い変動性を持った非定常現象であるので、後続部下流端における流速を測定し瞬間の q_i を決定することは、限られた実験条件下では可能であっても広範囲な実験条件下ではほとんど不可能に近い。そこで本研究では、以下に述べる方法を用いて連行量を算定した。

いま、流れが十分に発達した流れの確立領域における特性量の平均的な挙動を考える。そのような場合では、後続部ならびに先端部はそれぞれ一定の速度で流下し、相対速度は一定に保たれるので、 q_i は瞬間的には変動するが、平均的にはある一定の値を取ることが予想される。そこで、いま平均的な q_i を $\bar{q}_i$ と表し、平均的な $(q_e - q_o)$ を $\bar{q}_e$ と表示し、時間 Δt の前後の単位幅体積を A_1 、 A_2 とすると、 Δt における単位幅体積の変化量は $\Delta A = A_1 - A_2$ であるので、瞬間の単位幅体積変化率は $\Delta A / \Delta t$ で近似的に与えられる。瞬間の $\Delta A / \Delta t$ はVTRを用い、画像解析より決定することが可能であり、時間 Δt の前後における q_i は上述の理由で一定であるので、平均的な単位幅体積変化率 $\Delta \bar{A} / \Delta t$ は式(2)で表される。

$$\frac{d\bar{A}}{dt} = \bar{q}_e \quad \dots (2)$$

ここに、 $\bar{\quad}$ = 平均値を表す。

すなわち $\bar{q}_e$ は、数多くの $\Delta A / \Delta t$ の集合平均を取ることで求められることができる。いま、傾斜ブルーム先端部および傾斜ブルームの連行係数 E_e を直接に比較するために式(3)で定義する。

$$E_d = \frac{q_e}{LU}, \quad \dots (3)$$

ここに、 L = ブルーム先端部またはサーマルの長さ、 U = 先端移動速度である。

長さスケール L に基づく傾斜ブルーム先端部の E_d を E_{dLP} 、傾斜サーマルの E_d を E_{dLT} と表示すると、図-2、3 にそれぞれ示すような頻度分布が得られる。ここで、 L および U は時間 Δt 前後の平均値を用いている。

なお、連行係数を定義する際の長さスケールとしては、式 (3) で用いたブルーム先端部もしくはサーマルの長さ L 以外に、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研究により傾斜ブルームに対しては式 (4) で、傾斜サーマルについては式 (5) でそれぞれ近似的に与えられ、 R と L の関係は形状を半楕円形と仮定すると式 (6) で与えることができるので、式 (3) で定義した E_d は他の長さスケールおよび流速スケールに基づく連行係数に容易に変換することができる。

$$\text{傾斜ブルーム先端部} \quad : H/L = 0.0053\theta + 0.23 \text{ for } \theta = 5^\circ \sim 90^\circ \quad \dots (4)$$

$$\text{傾斜サーマル} \quad : H/L = 0.0035\theta + 0.29 \text{ for } \theta = 30^\circ \sim 90^\circ \quad \dots (5)$$

$$\text{半楕円形状ブルームまたはサーマル} : R/L = (\pi/2^{3/2})(4(H/L)^2 + 1)^{1/2} \quad \dots (6)$$

図-4 は式 (3) に基づき算定した連行係数 E_{dL} と底面傾斜角 θ との関係であり、図-5 は最大層厚 H に基づく E_{dH} 、図-6 は周囲長 R に基づく E_{dR} の関係である。

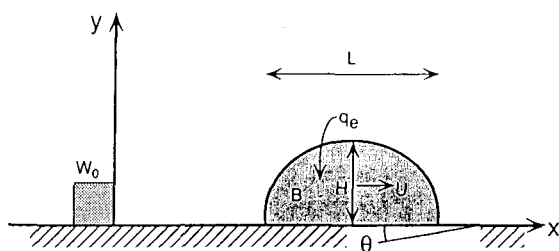


図-1 傾斜ブルームおよびサーマルの定義図

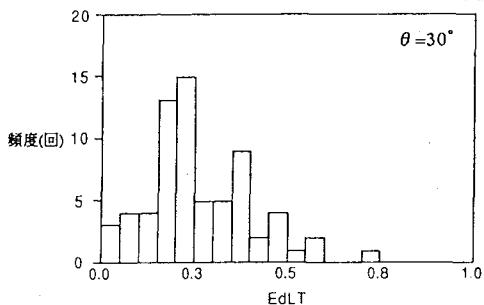


図-3 傾斜サーマルの E_{dLT} の頻度分布

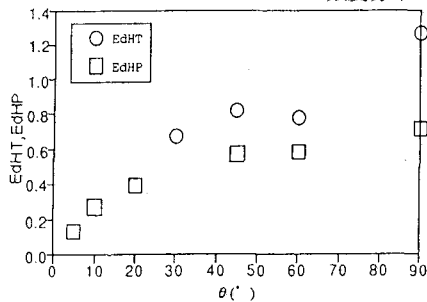


図-5 $E_{dH} \sim \theta$

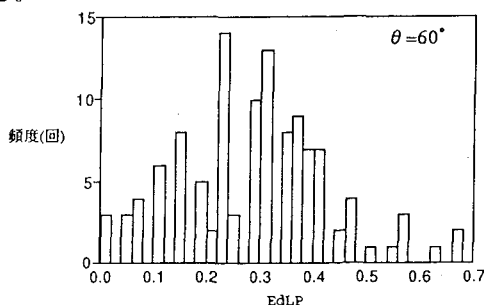


図-2 傾斜ブルームの E_{dLP} の頻度分布

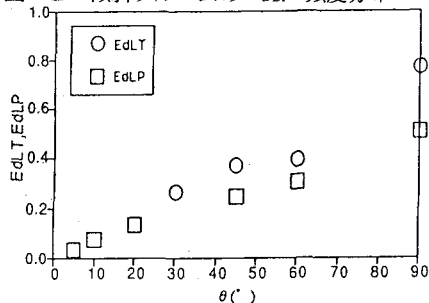


図-4 $E_{dL} \sim \theta$

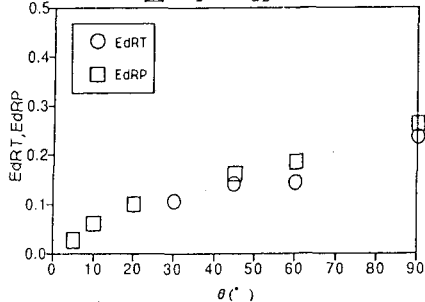


図-6 $E_{dR} \sim \theta$

参考文献： 1) 秋山ら 西部支部研究発表講演会、1993。