

重力密度流の流動特性と連行について

Flow Characteristics and Entrainment of Gravity Currents

秋山 壽一郎*・浦 勝**・坂本 浩一***

By Juichiro AKIYAMA, Masaru URA, Koichi SAKAMOTO

Flow characteristics of a miscible gravity current on a slope are investigated. A number of important flow properties involved are quantified experimentally as functions of bottom slopes. The study is directed toward the estimation of an entrainment coefficient in the front part of the flow.

Keywords: Gravity current, Entrainment, Experiment

1. 序論

周囲水より重い流体が斜面上に連続的に放出されると、斜面に沿って流下・発達し、非定常で強い渦運動を伴う先端部(Front Part)とほぼ定常な後続部(Following Part)とより成る重力密度流(Gravity Current)を形成する。大気中においては、火山噴出物の流動、雪崩現象、砂塵嵐、海風フロント、また水圏環境においては、濁水流、Lock Exchange Flowなどは一種の重力密度流である。このように、重力密度流は自然的・人為的に頻発する最も基本的かつ重要な密度流形態の一つである。従って、その流動特性を明らかにすることは、自然災害や水環境問題をはじめとする数多くの問題にとって極めて重要かつ有用である。

さて、重力密度流の流動特性に関する研究はこれまでも実験的・理論的に活発に進められてきた。その結果、先端部の形状、移動速度、層厚などの巨視的な諸量ばかりでなく、流速や濃度分布などの内部特性量に関してもある程度の知見が得られている。ところが、各研究者の実験条件が極めて限定されていることなどの理由で、その流動特性に関する統一的な見解を得るまでには到っていない。更に、本研究の主な目的である先端部の連行量に関しては、連行係数の定義が各研究者によって異なることも加わり、定量的な比較はできないのが実状である。このような現状に鑑み、本研究は傾斜面上を流下する保存性重力密度流を対象とし、(1)主要な巨視的特性量及び(2)先端部の連行量の統一的な定量的把握を目的としたものである。

2. 実験

実験は二つの実験装置を用いて行なった。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(θ)が 5° 、 5.17° 、 8.13° 、 10° 及び 20° の場合に用い、実験

* 正会員 Ph.D 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科(〒804 北九州市戸畑区仙水町)

** 正会員 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科

*** 学生員 九州工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程

装置Bは水槽(長さ1.53m、深さ148m、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 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 及び 90° の場合に用いた。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。測定された流れの特性量は、先端部では移動速度 (U_{fe}) 及び先端部形状、後続部では層厚 (h) 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° の場合に限って、先端部及び後続部の流速 (u_f, u) 分布及び密度 (ρ_f, ρ) 分布も計測した。流速は $\phi=3\text{mm}$ のマイクロプロベラ流速計(篠塚 SV-33W)で計測し、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)を使用し、試料を1点につき約10cc 注意深く採取し、電気電導率計によって塩分濃度を求めた。流入条件及び周囲水の条件を揃えれば、流れの再現性は極めて良好であったので、同一条件下で VTR、採水装置、流速計を用いた実験を別々に繰り返し行なった。実験条件を表1に示す。

3. 実験結果

以下、本研究で得られた主要な特性量について考察する。いずれの特性量も流れの確立(平衡)領域を対象としている。流れの定義図及び用いた記号と座標を図1に示す。

(a) 無次元先端移動速度 (U_{fe}^*)

先端移動速度 (U_{fe}) は、原点からの移動距離 (x_f) と移動時間 (t) を測定し、 $U_{fe} = \Delta x_f / \Delta t$ より求めた。流れの領域は一般に発達領域と確立領域とに区分され、確立領域において、 U_{fe} はある底面傾斜角に対しては一定値となるが、流入条件(相対密度差、 ϵ_0 及び単位幅あたりの流入流量、 q_0) に応じてその値は異なる。そこで、式(1)で定義される無次元先端移動速度 (U_{fe}^*) を用いて整理したもの(一例 ($\theta=60^\circ$ の場合) が図2である。同図から明らかなように、確立領域では U_{fe}^* は流入条件(図中に表示)とほぼ無関係に、一定値を取ることがわかる。さて、先端部では大きな渦が発生し、間欠的に引きちぎられるため、 U_{fe} の値は一般に変動することが知られている²⁾。そこで、本研究では同一条件下で繰り返し実験を行ない、多くのデータの平均値より U_{fe} を決定した。図3に U_{fe}^* と θ との関係を示す。明らかに、 U_{fe}^* は θ に対する強い依存性を持たず、ほぼ一定の値を取り、式(2)で近似できるようである。同図には、Britter & Linden²⁾ (以下 B & L と略する) によって整理された従来の結果も示してある。

$$U_{fe}^* = \frac{h_f}{(B_0 q_0)^{1/3}} \dots (1), \quad U_{fe}^* = 1.37 \pm 0.04 \dots (2)$$

ここに、 B_0 = 流入浮力 ($=(\rho_0 - \rho_a)g/\rho_a$)、 ρ_0 = 流入水の密度、 ρ_a = 周囲水の密度、 g = 重力加速度。

(b) 先端形状

先端の形状は、図4に示すように最大層厚 (h_f) と先端部長さ (L) で無次元化すると、流入条件にかかわらず、同一底面傾斜角に対して、ほぼ相似形を保ちながら流下するようである。しかし、形状そのものは傾斜角によって異なる

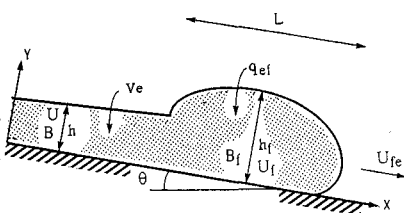


図1. Definition Sketch.

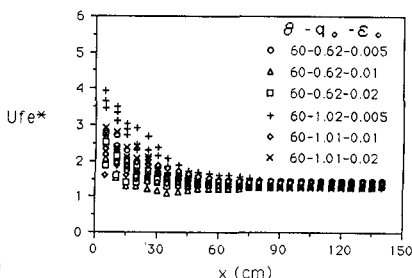


図2. U_{fe}^* vs. x (60°).

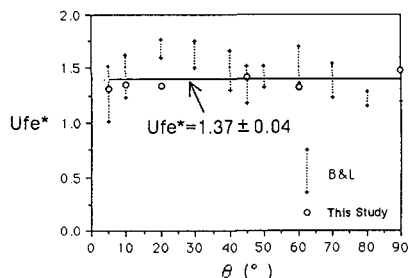


図3. U_{fe}^* vs. θ .

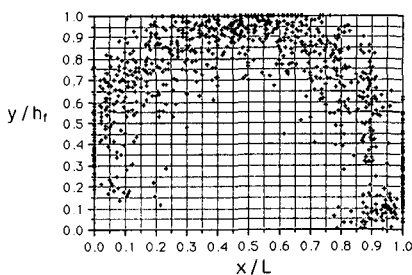


図4. Dimensionless Shape of the Front ($\theta=60^\circ$).

り、 θ の増加に伴い、1/4楕円の形状から半円形的形状へと変化する
ことが認められた。ここでは、先端部の形状に関する特性量として、式
(3)と式(4)でそれぞれで定義される断面アスペクト比($f(\theta)$)と断面面
積比($S(\theta)$)を用いて、先端部の幾何学的形状特性 について議論する。
ここに、 A =先端部断面面積である。

$$f(\theta) = \frac{h_f}{L} \dots (3), \quad S(\theta) = \frac{A}{h_f L} \dots (4)$$

さて、B&LはWood³⁾, Hopfinger & Tochon-Dangay⁴⁾及び彼等
自身のデータを用いて、 $f(\theta) - \theta$ の関係を求めた。彼等の結果に基づ
くと、 $f(\theta)$ は $\theta = 5^\circ \sim 90^\circ$ に対して $f(\theta) = 0.00275\theta + 0.24$ のように式
化できる。しかし、Woodの実験結果を詳しく調べてみると、B & L
はかなりあいまいに L を決定しており、また、 $f(\theta)$ の定量化に用いら
れたデータの個数も極めて少ない。一般に、先端部は発達・減衰を繰
り返しながら流下するため、その形状決定は容易ではない。特に、 θ
が小さい場合には、先端部長さを明確に定義するのは極めて困難であ
る。そこで、本研究では数多くの実験結果に基づき $f(\theta)$ の平均値を
決定した。従来の研究結果を再整理し、本実験結果と一緒に図示した
ものが図5である。B&Lの結果と比較して、 θ に対する依存性は強く、
近似的に式(5)で与えられる。次に、 $S(\theta) - \theta$ の関係であるが、これも
 $f(\theta)$ と同様に、まず頻度分布を求め、その平均値より決定した。 $S(\theta)$
は近似的に式(6)によって与えられるが、 θ に対する依存性は弱く、
 $\theta = 5^\circ \sim 90^\circ$ に対してはほぼ一定と見なして良いようである(図6)。

$$f(\theta) = 0.0053\theta + 0.23 \quad (5), \quad S(\theta) = 0.00046\theta + 0.75 \approx 0.75 \quad (6)$$

(c) 先端部最大層厚変化率(dh_f/dx)及び後続部層厚変化率(dh/dx)

先端部においては渦が置き去られるため、成長・減衰を繰り返しま
がら流下するが、平均的には流れの確立領域において一定の割合で増
加することが知られている。また、連続下層密度流においても流れの
確立領域では直線的に層厚が増加することが理論的・実験的に確かめ
られている。本研究では、同一条件下で得られた複数個のデータを重
ね合わせるにより、平均的な dh_f/dx 及び dh/dx を求めた。従って、

瞬間瞬間の変動量は平滑化されている。 dh_f/dx 及び dh/dx に関する結果を整理したものが図7である。図中には

B & Lによって得られた dh_f/dx に関する結果及び連続下層密度流に対してEllison and Turner⁵⁾(以下E & T
と略する)が求めた結果も示してある。同図より、本研究で得られ dh_f/dx はB & Lの求めた結果とはほぼ一致して
いる。一方、 dh/dx についてはE & Tが与えた結果と良く一致し、後続部と連続下層密度流とが類似した流れであ
ることを示唆している。 dh_f/dx 及び dh/dx はそれぞれ θ の関数として、式(7)及び式(8)で近似的に与えられる。

$$\frac{dh_f}{dx} = 0.0038\theta \dots (7), \quad \frac{dh}{dx} = 0.001(\theta+5) \dots (8)$$

図8に式(7)と式(8)より近似的に求めた層厚比(h_f/h)と θ との関係
を示す。式(9)は本実験結果のみならず、他の研究者によって得られ
た結果とも良く一致しており、同図からも式(7)と式(8)の妥当性が
伺われる。

$$\frac{h_f}{h} = \frac{(\theta+5)}{3.8} \dots (9)$$

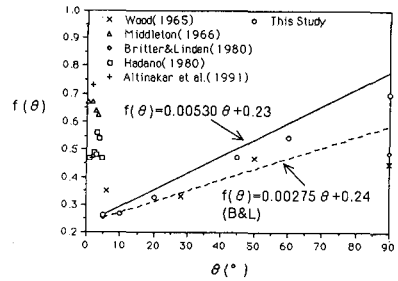


図 5. $f(\theta)$ vs. θ .

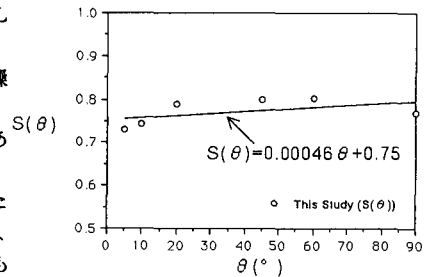


図 6. $S(\theta)$ vs. θ .

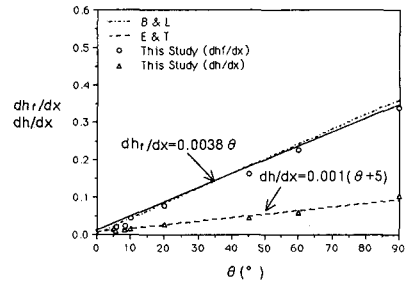


図 7. $dh_f/dx, dh/dx$ vs. θ .

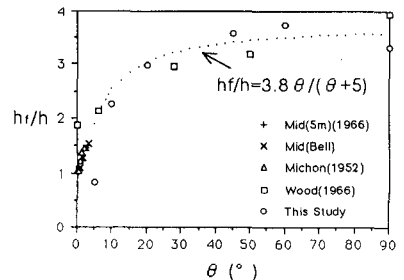


図 8. h_f/h vs. θ .

(d) 流速 (u_i, u) · 密度 (ρ_i, ρ) 分布

図9は先端部及び後続部の流速の相似性を調べたものである。後続部では相似性が良く成立している。一方、先端部ではかなりのばらつきが見られるが、これもある程度の相似性が認められる。同様な傾向は水素気泡法を用いた羽田野ら⁶⁾や福岡ら⁷⁾によっても報告されている。図10に先端部及び後続部の無次元密度分布を示す。先端部では、流速分布と同様に少しふくらんだ形状をしており、混合が活発に行なわれていることを示唆している。後続部では密度分布はy方向に指数的に減少し、連続下層密度流的な分布形を有していることが判る。

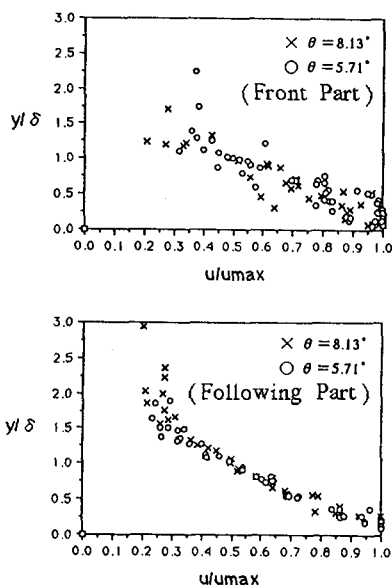


図9. Similarity of Velocity Profile.

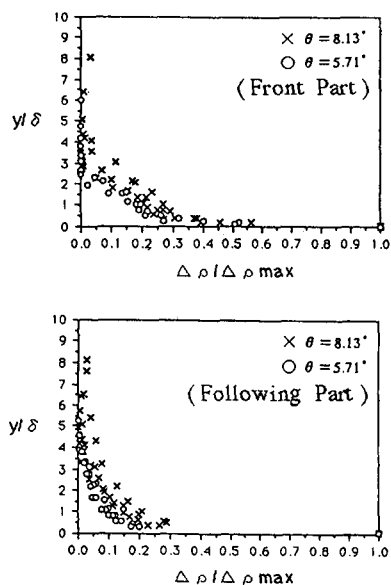


図10. Similarity of Density Profile.

(e) 先端部と後続部の平均流速比 (U_{fe}/U)

先端部よどみ点を通る流線を考え、エネルギー損失と位置エネルギーとがバランスすると仮定すると、ベルヌーイの式より先端移動速度 (U_{fe}) と後続部における流速 (u) との関係が式(10)のように得られる。

$$\frac{U_{fe}}{U} = \frac{1}{2} \left(\alpha + \frac{\alpha_2}{\alpha} R_i \right) \dots (10)$$

ここに、 $\alpha_2 = 0.6 \sim 0.9$ の定数、 α = 後続部の局所流速 (u) と平均流速 (U) との比 ($= u/U$)、 R_i = overall Richardson 数 ($= Bh \cos \theta / U^2$)。

式(10)に於いて R_i を与えるために、流れの確立領域を考える。そこでは、後続部は R_i が流下方向に一定となる "normal" な状態に達していると考えられるので、定常漸変下層密度流についての式(11)に於いて $dR_i/dx = 0$ とし、Turner⁸⁾ が与えた式(12)の連立式を用いると、normal Richardson 数 (R_{in}) は式(13)より解析的に求められる。最終的に、式(10)で $R_i = R_{in}$ として U_{fe}/U が求められる。

$$\frac{dR_i}{dx} = \frac{3R_i}{h} \left[\frac{\left(1 + \frac{\alpha_1}{2}\right) E_e - \alpha_2 R_i \tan \theta + f_b}{1 - \alpha_1 R_i} \right] \dots (11)$$

$$E_e = \frac{0.08 - 0.1 R_i}{1 + 5 R_i} \dots (12),$$

$$R_{in} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots (13)$$

ここに、 $E_e = v_e / U$ 、 v_e = 連行速度、 f_b = 後続部での底面摩擦抵抗係数、 $\alpha_1 = 0.2 \sim 0.3$ の定数、 $A = 0.05 \alpha_1 + 5 \alpha_2 + \tan \theta$ 、 $B = -\alpha_2 + \tan \theta + 5 f_b + 0.04 \alpha_1 - 0.1$ 、 $C = 0.08 + f_b$ 。

図11は、後続部に対して式(12)の適合性を調べたものである。図中のデータは $\theta = 5.71^\circ$ 及び 8.13° の場合の流速分布を用いて得られた連行係数であるが、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狭くないが、式(12)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。図12は、 $\alpha = 0.8, 1.0, 1.2$ の場合の計算結果を実験結果($\theta = 5.71^\circ, 8.13^\circ$)と比較したものである。式(13)の計算において、 $\alpha_1 = 0.25, \alpha_2 = 0.75, f_b = 0.01$ を使用している。 U_{fe}/U の値に関しては、Simpson & Britter⁹⁾が $\theta = 0^\circ$ で $U_{fe}/U = 0.83 \sim 0.91$ 、B&L が $\theta = 30^\circ$ で0.60、Simpson¹⁰⁾が θ = 数度 $\sim 90^\circ$ で0.6、及びHopfinger¹¹⁾が0.67程度と報告している。本研究の結果($\theta = 5.71^\circ$ で0.73、 $\theta = 8.13^\circ$ で0.68)もこれらの結果と同程度であり、 α 値に関して若干あいまいさが残るものの、 $\alpha = 0.8$ として計算した結果は U_{fe}/U と θ との関係を表わしていると思われる。

(f) 先端部の連行量 (q_{ef}) 及び連行係数 (E_{dL}, E_{dR})

先端部の連行量(q_{ef})については、芦田¹²⁾、平野・羽田野¹³⁾、及び秋山・浦¹⁴⁾によって連行係数としてある程度評価されているが、統一的な見解は得られていないのが実状である。序論でも述べたようにこれは、(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)モデルの逆算によって連行係数を求めていることなどが理由として挙げられる。そこで、本研究では先端部の連行量及び連行係数に関して統一的な知見を得るために、様々な実験条件を変化させ、連行量を $q_{ef} = \Delta A / \Delta t$ より直接求めた。ここに、 ΔA = 先端部の面積変化量、 Δt = 経過時間である。図13は式(14)及び式(15)で定義される連行係数と θ との関係を調べたものである。

$$E_{dL} = \frac{q_{ef}}{LU_{fe}} \dots (14), \quad E_{dR} = \frac{q_{ef}}{RU_{fe}} \dots (15)$$

ここに、 R = 先端部を半楕円と仮定したときの周囲長 ($= (\pi/2)^{3/2} (4f^2(\theta) + 1)^{1/2} L$)。

次に、秋山ら¹⁵⁾が与えた式(16)の先端部の体積保存式及び本研究で得られた諸特性量を用いて E_{dL} を推定してみる。既に求められている $S(\theta)$ 、 dh_f/dx 、 $f(\theta)$ 、 U_{fe}/U 及び h/h_f に関する関係式を式(16)に代入し、 kU を0.4として計算すると図14が得られる。 θ の高次項の係数は極めて小さいので、これを無視し、線形近似式で表わすと式(17)が得られる。図14より E_{dL} は θ の単調増加関数として与えられるようである。同様な傾向は数値解析によっても認められている¹⁵⁾。

$$E_{dL} = 2S(\theta) \frac{dh_f}{dx} - f(\theta) \left[\left(\frac{U}{U_{fe}} - 1 + kU \right) \left(\frac{h}{h_f} \right) - kU \right] \dots (16)$$

$$E_{dL}(\theta) = 0.0057(\theta + 1.30) \dots (17)$$

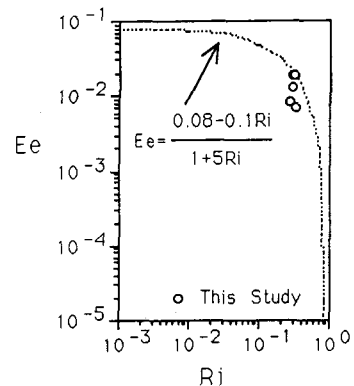


図11. E_e vs. Ri .

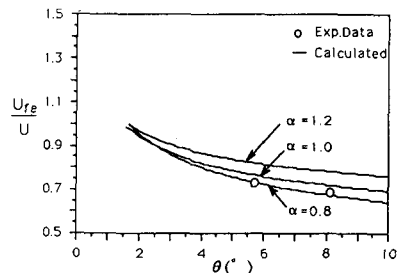


図12. U_{fe}/U vs. θ .

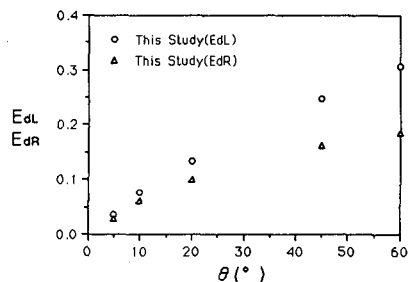


図13. E_{dL}, E_{dR} vs. θ (Exp.).

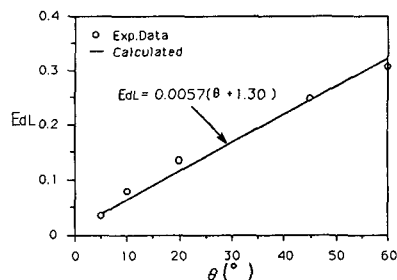


図14. E_{dL} vs. θ (Cal.).

表 1. Experimental Cond.

	θ (°)	B_0 (cm/s ²)	q_0 (cm ² /s)		θ (°)	B_0 (cm/s ²)	q_0 (cm ² /s)
実験装置 A	5.00	2.45	3.39	実験装置 B	45.00	4.90	1.03
			5.01				2.03
		4.90	3.37			9.80	1.02
			5.07				2.02
		9.80	3.38			19.60	1.02
	5.71		5.09				2.02
		20.58	9.00		60.00	4.90	0.62
							1.01
		20.58	9.00			9.80	0.62
							1.01
	10.00	2.45	3.34			19.60	0.62
			5.00				1.01
		4.90	3.31		90.00	4.90	0.63
			4.98				1.01
		9.80	3.34			9.80	0.63
	20.00		4.97				1.01
		2.45	2.16			19.60	0.64
			4.30				1.01
		4.90	2.15				
			4.32				
		9.80	2.16				
			4.38				

謝辞: 本研究を進めるにあたり、森野 純孝氏(栗本鉄工KK)及び竹平由美子君(学部4年生)の協力を得た。ここに記して感謝します。

参考文献

1. 福岡・木村・加納(1978) 密度流先端部の流動機構に関する基礎的研究、土木学会論文集, 274号。
2. Britter, R.E.・Linden, P.F.(1980) The Motion of the Front of a Gravity Current Travelling Down on Incline, J.Fluid Mech., vol.99.
3. Wood, I.R.(1965) Studies in Unsteady Self-preserving Turbulent Flows, U. of N.S.W., Water Res. Lab. Rep., no.81.
4. Hopfinger, E. J.・Tochon-Danguy, J. C.(1977) A Model Study of Power-snow Avalanches, J. Glaciology, vol.19.
5. Ellison, T.H.・Turner, J. S.(1959) Turbulent Entrainment in Stratified Flows, J. Fluid Mech. vol.6.
6. 羽田野・斎藤・平野(1987) 傾斜ブルームの流速特性について、水理講演会論文集、第31回。
7. 福岡・早川・加納(1991) 下層密度流フロントの流動機構に関する研究、年次学術講演会、第46回。
8. Turner, J. S.(1986) Turbulent Entrainment: the Development of the Entrainment Assumption, and its Application to Geophysical Flows, J. Fluid Mech. vol.173,431-471.
9. Simpson, J. E.・Britter, R. E. (1979) The Dynamic of the Head of a Gravity Current Head, J. Fluid Mech. vol. 88.
10. Simpson, J. E.(1982) Gravity Currents in the Laboratory, Atmosphere and Ocean, Ann Rev. Fluid Mech., vol.14.
11. Hopfinger, E. J.(1983) Snow Avalanche Motion and Related Phenomena, Ann. Rev., Fluid Mech. vol.15.
12. 芦田・江頭・中川(1981) 傾斜路床上における泥水塊の挙動に関する研究、京大防災研究年報 24号 B-2.
13. 平野・羽田野(1981) 密度流先端部の流動特性について、土木学会論文集、341号。
14. Akiyama, J.・Ura, M.(1991) Characteristics of Gravity Currents Travelling Downslope, Proc. Int'l Sympo. on Environmental Hydraulics, Hong Kong, vol.1.
15. 秋山・Wang・浦(1991) 非定常傾斜ブルームの数値モデル、水工論文集、第35巻。