

# 保存性 2 次元傾斜サーマルと傾斜ブルーム先端部の流動特性の比較

Comparison of Flow Characteristics Between Conservative  
2-D Inclined Thermals and The Front of Inclined Starting Plumes

秋山 壽一郎\*・浦 勝\*\*・早川 史郎\*\*\*

By Juichiro AKIYAMA, Masaru URA, and Fumio HAYAKAWA

Miscible conservative two-dimensional gravity currents traveling downslope, namely, inclined starting plumes and inclined thermals, are investigated in the laboratory, emphasizing on differences and similarities in flow characteristics of the flows. Using a large volume of experimental data, such gross flow properties as the dimensionless propagation speeds, the spatial growth rates, the shape factors, and the entrainment functions are quantified for the bottom slope angles ranging from  $5^{\circ}$  to  $90^{\circ}$ . The study is directed toward the comparison of entrainment functions of the flows.

**Keywords:** gravity current, inclined plume, inclined thermal, flow characteristics

## 1. 序論

傾斜面に沿って流下発達する重力密度流(以下、傾斜重力密度流と略する)は、流入状態が連続的か瞬間的かによって、傾斜ブルーム(Inclined Starting Plume)と傾斜サーマル(Inclined Thermal)とに分類される。傾斜重力密度流は、自然的・人工的に頻繁に発生し、雪崩現象は傾斜サーマルの、貯水池などの閉鎖水域における濁水流現象は傾斜ブルームの代表的な例である。

傾斜重力密度流の流動形態は、周囲流体が静止・一様密度の場合、流入条件と底面傾斜角度によって規定される。傾斜ブルームと傾斜サーマルとでは流入条件が異なり、前者では流入浮力flux、後者では初期総浮力および初期流入形状が流入条件となる。また、流入流体と周囲流体との密度差が、塩水などの保存性物質による場合は保存性傾斜重力密度流を、温度や浮遊粒子などの非保存性物質による場合は非保存性傾斜重力密度流を形成する。このように、これらの諸条件の組み合わせによって、様々な傾斜重力密度流が形成される。

傾斜重力密度流に関する研究は、気象学、地質学、水理学などの幅広い分野にわたってこれまで数多く重ねられて

---

|         |       |           |                                       |
|---------|-------|-----------|---------------------------------------|
| * 正会員   | Ph.D. | 九州工業大学助教授 | 工学部設計生産工学科建設工学教室 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1) |
| ** 正会員  | 工博    | 九州工業大学教授  | 工学部設計生産工学科建設工学教室                      |
| *** 学生員 |       | 九州工業大学大学院 | 工学研究科博士前期課程                           |

きた。これらの研究では、2次元のみならず3次元傾斜重力密度流を対象としたものも数多く存在するが、以下、2次元の場合に対象を限定し、議論を進める。傾斜サーマルの流動特性については、例えば、Beghin et al.<sup>1)</sup>、芦田ら<sup>2)</sup>、Liu et al.<sup>3)</sup>、秋山ら<sup>4),5)</sup>によって、傾斜ブルームの流動特性については、福岡ら<sup>6)</sup>、羽田野ら<sup>7)</sup>、Britter & Linden<sup>8)</sup>、福岡<sup>9)</sup>、秋山ら<sup>10),11)</sup>によって、それぞれの流動特性量が調べられており、流動特性量の予測モデルについても研究されている。しかし、Beghin et al.<sup>1)</sup>、Britter & Linden<sup>8)</sup>、秋山ら<sup>4),5),10),11)</sup>の研究を除き、いずれの研究においても実験条件の範囲が極めて限定されていることや各研究者による現象のモデル化の違いに起因する特性量の定義の相違があることなどの理由で、得られた知見は現象を理解する上で有益であっても断片的資料であり、現象の普遍的評価を行うための資料としては十分なものとは言えないのが実情である。また、これらの実験結果のなかには、流れが十分に発達していないものもあり、この点においても問題があると思われる。さらには、かなり普遍性が高いと一般に考えられているBritter & Lindenや Beghin et al.の研究結果についてもまったく問題がないわけではない。例えば、保存性傾斜ブルームに関するBritter & Lindenの研究では、彼ら自身ならびに従来の実験結果を用い、広範囲の底面傾斜角に対して断面アスペクト比、先端移動速度、および最大層厚変化率の定量化が試みられているが、問題としている現象は本質的に強い変動性を有しているにもかかわらず、十分な量と質のデータに基づき特性量の定量化が行われているわけではない<sup>10)</sup>。一方、保存性傾斜サーマルに関するBeghin et al.の研究では、流れの特性を定量的に理解する上で重要な特性量が広範囲な実験条件下で調べられている。ところが、層厚変化率や連行係数が他の研究結果と比べてかなり大きいようであり<sup>4)</sup>、その定量化については検討の余地があると思われる。このように、最もシンプルな流動形態である保存性2次元傾斜重力密度流についても、十分な定量的知見が得られているわけではない。

このような状況にあって、傾斜サーマルと傾斜ブルーム先端部とは極めて類似した流れであると漠然と考えられている。そこで、両者の差異を明らかにする研究がわずかながらではあるが試みられている。例えば、Beghin et al.は、彼らが得た傾斜サーマルの特性量のうち最大層厚変化率と形状アスペクト比に関して、Britter & Lindenが得た傾斜ブルーム先端部の実験結果との比較を5~90°の底面傾斜角の範囲で行っている。その結果、最大層厚変化率については傾斜サーマルの方が全角度で大きく、形状アスペクト比については全角度でほぼ一致すると報告している。また、平野ら<sup>12)</sup>は底面傾斜角が11.7°での実験を行い、保存性2次元傾斜サーマルの連行係数は傾斜ブルーム先端部のそれに比して2倍程度であると報告している。しかし、これらの比較結果についても、上述のような理由で、その正否を云々するためのデータの十分な信頼性に必ずしも裏づけられているわけではない。このように、傾斜サーマルと傾斜ブルーム先端部の流動特性量の差異については、いまだ憶測の域を出ておらず、明確な見解が得られているわけではない。

本論文では、以上の事実を踏まえ、著者らがこれまで蓄積してきた実験データに基づき、傾斜角5~90°の範囲における保存性2次元傾斜サーマルと傾斜ブルーム先端部の流動特性量の類似点・相違点を定量的に明らかにする。特性量の比較に当たっては、できる限り同一の定義を用い、統一的に比較検討を加えることを試みた。連行係数の定量的比較を行うことが本研究の主たる目的である。

## 2. 実験

用いた実験装置は大型水槽内にアクリル製可変勾配水路を設けたもので、傾斜ブルームでは、5°、10°、20°、45°、60°および90°、傾斜サーマルでは、5°、15°、30°、45°、60°、75°および90°の各底面傾斜角 $\theta$ で実験を行った。いずれの場合もウランで着色した塩水を淡水中に流入させることによって、傾斜重力密度流を形成した。流体塊の移動速度と同じ速度でVTRカメラを移動させ、VTRに収録した画像を解析することにより、先端移動速度および形状を求めた。また、傾斜ブルームの連行量の算定に当たっては、後続部から先端部へ送り込まれる流量を知る必要があるため、 $\theta=5.17^\circ$ および $8.13^\circ$ の場合について先端部ならびに後続部の塩分濃度および流速分布の測定を行った。本研究では、実験データの信頼性を高めるために、いずれのケースでも同一条件下で5回の繰り返し実験を行った。実験条件については、参考文献<sup>4),10)</sup>を参照されたい。傾斜重力密度流の定義図を図1に示す。

3. 実験データの処理方法

問題としている現象は本質的に強い変動性を有しており、数少ないデータを用いて決定された特性量は十分な精度を持たないことが容易に予想される。そこで本研究では、同一条件下で繰り返し実験を行い、得られた数多くの実験データの集合平均をとることにより、流れの平均的特性量を求めた。また、保存性傾斜重力密度流は、流れが十分に発達した「流れの確立領域」とそれ以前の「流れの発達領域」より成るが、特性量の定量化に当たっては、流れの確立領域の実験データのみを用いた。流れの確立領域における最大層厚 $H$ は、傾斜ブルーム先端部と傾斜サーマルのいずれにおいても、流下距離 $x$ に比例して線形的に増大するが、流れが十分に発達していない流れの発達領域においてもこの関係が成立し、確立領域の範囲を決定するための適切な指標とは見なせなかった。そこで、流れの確立領域の範囲の決定に当たっては、傾斜ブルーム先端部では先端移動速度 $U_f$ が流下方向に一定、傾斜サーマルではOverall Richardson数 $R_f$ が流下方向に一定の条件をそれぞれ用いた。

4. 特性量の比較

傾斜ブルームは先端部と後続部から構成され、高濃度・高速の後続部から低濃度・低速の先端部へ浮力の供給があることが特徴である。一方、傾斜サーマルは後続部がなく、初期総浮力が保存されることが特徴である。以下、傾斜ブルーム先端部および傾斜サーマルの各特性量について比較検討を加える。傾斜ブルームの特性量は添字 $P$ で、傾斜サーマルは添字 $T$ で表わし区別する。また、簡単のためブルーム先端部とサーマルをクラウドと呼ぶ場合がある。

(a)形状および形状係数( $F$ ,  $S$ )

ブルーム先端部ならびにサーマルの形状を $y$ 方向に最大層厚 $H$ 、 $x$ 方向にクラウド長 $L$ で無次元化すると、図2に一例を示すように流入条件・底面傾斜角にかかわらず、流下方向に半楕円形状の相似形をほぼ保つことがわかる。また、図3から明らかなように、 $\theta \geq 20^\circ$  ではブルーム先端部とサーマルとの間に明確な差異は認められないようである。

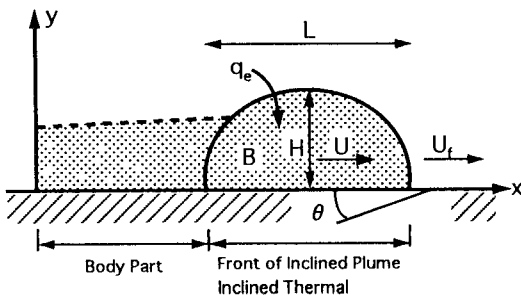


図1 定義図

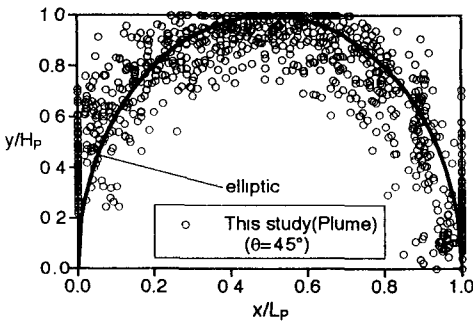


図2a ブルームの無次元形状の一例

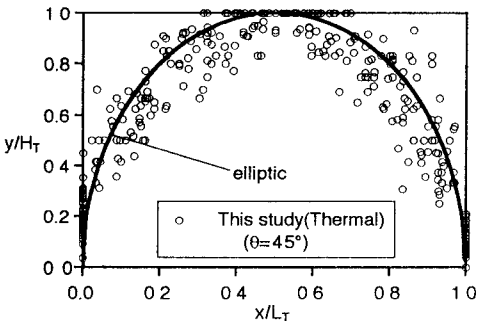


図2b サーマルの無次元形状の一例

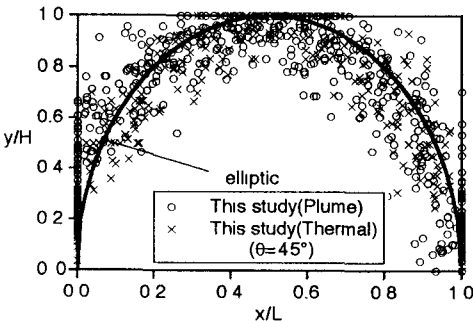


図3 ブルームとサーマルの無次元形状の比較の一例

断面アスペクト比 $F(=H/L)$ は、図4に示すようにブルーム先端部、サーマルのいずれも $\theta$ に線形的に依存し、両者の間には大きな差異がないことがわかる。また、それぞれ $\theta$ の関数として式(1)、(2)で精度良く近似できる。図中には、Beghin et al. およびBritten & Lindenの結果も併せて示してあるが、 $\theta=90^\circ$  の場合を除いて、本研究結果と著しい差異は認められないようである。

$$F_P = 0.0053\theta + 0.20 \cdots (1)$$

$$F_T = 0.0040\theta + 0.22 \cdots (2)$$

断面面積比 $S(=A/(HL))$ は、図5に示すようにブルーム先端部、サーマルのいずれも $\theta$ に依存せず、それぞれ式(3)、(4)で精度良く近似できることがわかる。ブルーム先端部の $S$ 値の方が後続部の存在のため全角度においてサーマルよりも若干大きいようである。いずれにせよ、これらの値は半楕円形状の $S$ 値である $\pi/4(=0.785)$ に極めて近いことがわかる。また、図中のBeghin et al.の結果は、本研究結果と比較すると全角度において若干大きめの値となっていることが認められる。

$$S_P = 0.785 \pm 0.017 \cdots (3)$$

$$S_T = 0.744 \pm 0.025 \cdots (4)$$

#### (b)最大層厚変化率( $dH/dx$ )

最大層厚変化率 $dH/dx$ は図6に示すようにブルーム先端部、サーマルのいずれも $\theta$ に線形的に依存し、両者はほぼ一致しており、それぞれ $\theta$ の関数として式(5)、(6)で近似できる。また、本研究結果とBritten & Lindenの結果とはほぼ一致するが、Beghin et al.の結果はそれよりも全角度において約5割程度大きめの値となっていることがわかる。

$$\frac{dH_P}{dx} = 0.0037\theta \cdots (5)$$

$$\frac{dH_T}{dx} = 0.0040\theta \cdots (6)$$

#### (c)先端移動速度( $U_f^*$ )

ブルーム先端部、サーマルの無次元先端移動速度 $U_f^*$ は、それぞれ式(7)、(8)で定義される。図7に一例を示すように、無次元先端移動速度と流下距離 $x$ との間には、 $U_{fp}^*$ 、 $U_{ft}^*$ ともに流下距離 $x$ について一定の関係がある。しかし、それぞれの定義から明らかなように、先端移動速度 $U_f$ についてはそれぞれ $U_{fp}=x$ について一定、 $U_{ft} \sim x^{-1/2}$ なる関係があり、ブルーム先端部とサーマルとでは先端移動速度の特性に明らかな違いがある。既に検討を加えたように、ブルーム先端部とサーマルの幾何学的形状および最大層厚変化率は極めて類似しており、後述する連行特性も同様に酷似している。これらのことから、浮力の供給の有無は両者の先端移動速度特性ならびに平均浮力特性に差異を生じさせて

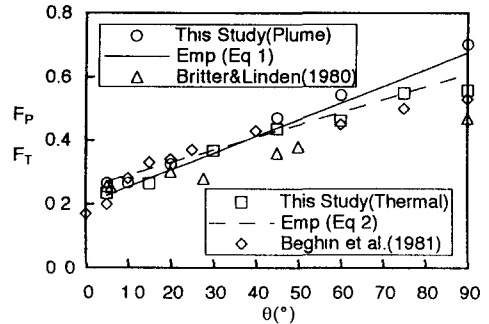


図4 断面アスペクト比 $F$ と $\theta$ との関係

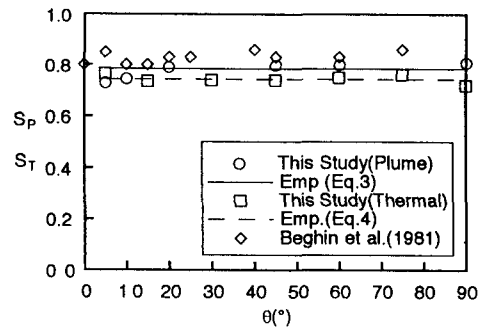


図5 断面面積比 $S$ と $\theta$ との関係

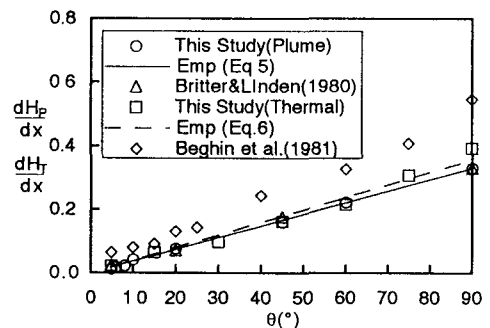


図6 最大層厚変化率 $dH/dx$ と $\theta$ との関係

いると推察される。

$$U_{P^*} = \frac{U_P}{(B_0 q_0)^{1/3}} \cdots (7)$$

$$; \quad U_{T^*} = \frac{U_T}{\sqrt{W_0 / H_T}} \cdots (8)$$

ここに、 $B_0$ =流入浮力、 $q_0$ =単位幅流入流量、 $W_0$ =初期総浮力である。

$U_{P^*}$ については定義が異なるため直接比較はできないが、図8に示すように $U_{P^*}$ 、 $U_{T^*}$ の $\theta$ に対する依存性はそれぞれ式(9)、(10)で近似できる。また、傾斜ブルームに関するBritter & Lindenの結果は本研究の結果と比較すると、 $\theta=20\sim40^\circ$ の範囲でやや大きめの値を取っているが、全体的にはほぼ一致しているようである。

$$U_{P^*} = 1.34 \pm 0.03 \cdots (9)$$

$$; \quad U_{T^*} = -0.00015\theta^2 + 0.020\theta + 0.31 \cdots (10)$$

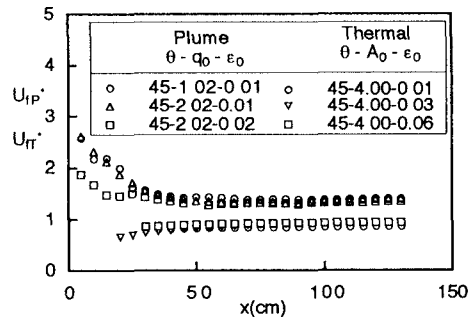


図7  $U_{P^*}$ とxとの関係の一例

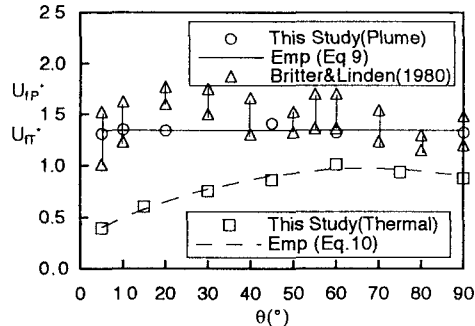


図8  $U_{P^*}$ と $\theta$ との関係

(d)連行係数( $E_d$ )

連行係数 $E_d$ を式(11)で定義する。 $E_d$ 値の算定法については、文献<sup>9), 10)</sup>に詳しく示してあるので、ここでは詳細を省略する。

$$E_d = \frac{q_e}{LU_T} \cdots (11)$$

ここに、 $q_e$ =連行量、 $L$ =クラウド長である。

図9はそれぞれの流れの連行係数の頻度分布の一例である。サーマルでは、2通りの方法で連行係数を決定したが、ここではその平均値を用いて表示している。図10は各底面傾斜角度について図9のような頻度分布より集合平均を求め、それぞれの連行係数と底面傾斜度との関係を示したものである。これより、ブルーム先端部、サーマルのいずれも線形的に $\theta$ に依存し、両者はほぼ一致し、 $\theta$ の一次関数として式(12)で精度良く近似できる。この理由としては、ブルーム後続部から先端部への流入フラックスが先端部連行量に比して極めて小さいためであると考えられる。また、Beghin et al.の結果は本研究結果と比して、かなり大きいことがわかる。

$$E_d = E_{dP} = E_{dT} = 0.0045\theta \cdots (12)$$

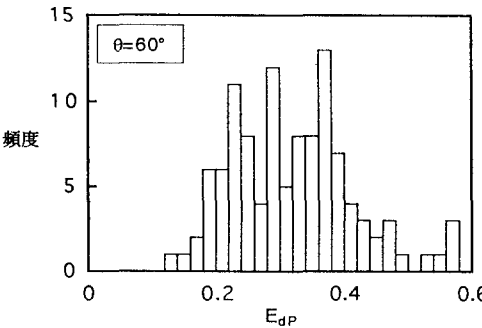


図9a 連行係数の頻度分布の一例(ブルーム)

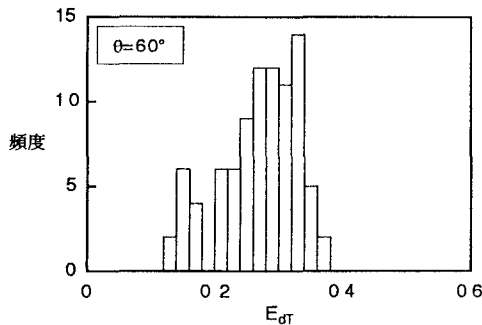


図9b 連行係数の頻度分布の一例(サーマル)

ところで、式(11)では、クラウドの長さ $l$ および先端移動速度 $U_f$ に基づき連行係数を定義したが、長さスケールとして周囲長 $C$ あるいは最大高さ $H$ 、速度スケールとして重心移動速度 $U$ を用いて、連行係数を表現することもできる。たとえば長さスケールについては、式(1)や式(2)を用いると、式(12)を $H$ に基づく連行係数に、式(13)の形状係数を用いると、 $C$ に基づく連行係数に変換することができる。また、速度スケールについては、式(14)を用いて $U$ に基づく連行係数に変換することができる。

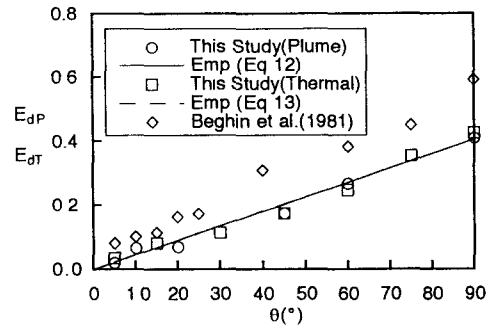


図10 連行係数 $E_d$ と底面傾斜角 $\theta$ との関係

$$\frac{C}{\sqrt{HL}} = \frac{(\pi/2^{3/2})\sqrt{4F^2 + 1}}{\sqrt{F}} \dots (13) ;$$

$$\frac{U_f}{U} = 1 + \left( \frac{1}{2F} \right) \left( \frac{dH}{dx} \right) \dots (14)$$

#### 4. 結論

本研究では、保存性2次元傾斜ブルーム先端部と傾斜サーマルとの流動特性量の定量的比較を試み、以下のような結論を得た。(1)形状およびそれに関する係数はほぼ一致する。従って、形状抵抗係数もほぼ同様な値を取るものと推察される。(2)最大層厚変化率ならびに連行係数もほぼ一致する。(3)先端移動速度については流入状態の違いに起因する明確な差異がある。最後に、(4)著者らがこれまで行ってきた一連の理論的・実験的研究結果から推察すると、傾斜ブルーム先端部の平均密度を求めることが極めて困難なため、これと関係した特性量である浮力 $B$ およびRichardson数 $R_i$ については実験的に検証することはできないが、傾斜ブルーム先端部では、 $U_f = \text{const. with } x$ 、 $H \sim x$ 、 $B \sim x^{-1}$ および $R_i = \text{const. with } x^{10,11}$ 、一方、傾斜サーマルでは、 $U_f \sim x^{-1/2}$ 、 $H \sim x$ 、 $B \sim x^{-2}$ および $R_i = \text{const. with } x^{4,5}$ なる関係が成立するようである。この特性量の違いは、後続部からの浮力の供給の有無によって生じると考えられ、傾斜ブルームでの後続部からの浮力供給は、周囲流体の連行に伴う先端部の浮力の低減を抑制するとともに流下方向に先端移動速度を一定に保つ役割を果たしていると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費、一般研究 (C) (代表者：秋山 壽一郎、課題番号06650568) の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Beghin, P., Hopfinger, E.J. & Britter, R.E. (1981): Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, J. of Fluid Mechanics, Vol.107, pp.407-422.
- 2) 芦田和男・江頭進治・中川一 (1982): 密度流先端部の解析における相似理論の適用性、京都大学防災研究所年報、25B-2, pp.1-17.
- 3) Liu, Q., Schlapfer, D. & Buhler, J. (1991): Motion of dense thermals on incline, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.117, No.12, pp.1588-1599.
- 4) 秋山壽一郎・浦勝・斎藤俊一郎 (1996a): 保存性2次元傾斜サーマルの流動特性の普遍的定量化、水工学論文集、第40巻.
- 5) 秋山壽一郎・浦勝・富岡直人・今宮盛雄 (1996b): 保存性2次元傾斜サーマルの流動特性の予測、水工学論文集、第40巻.
- 6) 福岡捷二・木村和正・加納敏行 (1978): 密度流先端部の流動特性に関する基礎的研究、土木学会論文集、第274号, pp.41-55.
- 7) 羽田野袈裟義・斎藤隆・平野宗夫 (1987): 傾斜ブルームの流速特性について、第31回水理講演会論文集, pp.455-460.
- 8) Britter, R.E. & Linden, P.F. (1980): The motion of the front of a gravity current traveling down an incline, J. of Fluid Mechanics, Vol.99, pp.531-543.
- 9) 福岡祐介 (1993): 固体粒子浮遊による二次元下層密度流先端部の解析、土木学会論文集、No.461/II-22, pp.21-30.
- 10) Akiyama, J., Ura, M. & Sakamoto, K. (1994a): Flow characteristics and entrainment of two-dimensional starting plumes traveling downslope, J. of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.12, No.2, pp.1-16.
- 11) Akiyama, J., Ura, M. & Wongsu, S. (1994b): Unsteady numerical model of two-dimensional starting plumes traveling downslope, J. of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.12, No.2, pp.17-30.
- 12) 平野宗夫・羽田野袈裟義・大本照憲・外村健司 (1983): Inclined Thermal の流動特性について、第27回水理講演会論文集, pp.103-108.