

傾斜プリュームの流速特性について Velocity Property of the Inclined Plume

山口大学工学部 正 員 羽田野 袈裟義

山口大学工学部 正 員 齊 藤 隆

九州大学工学部 正 員 平 野 宗 夫

1. まえがき

泥水密度流による土砂輸送を評価するためには、底面せん断力と密度流内部の流れ構造を明らかにする必要がある。一般に下層密度流は先端部に特徴的なふくらみ部分をもつが、底面せん断力はこの先端部の領域で大きな値を示すことが知られており¹⁾、この領域での土砂のまき上げ量は大きいと考えられる。先端部の流れ構造についてはこれまで目視情報をもとに、複雑な lobe and cleft 構造あるいは渦運動などとして定性的な説明がなされているが²⁾ 土砂輸送に結びつく情報はあまり得られていない。

本研究は、密度流による土砂輸送を評価するための第一段階として、下層密度流の先端部から後続部に至る間の流速分布を測定し、速度諸量間の関係を調べることにより、流れ構造の概要を明らかにしようとするものである。

2. 実験

実験装置の概略は図-1に示すようである。実験は、長さ3 m、幅12.5 cm、高さ40 cmの実験水路を所定の勾配に設定し、上流から重量濃度20%の着色塩水を一定の流量0.15 l/sで供給することによりPlumeを発生させた。水路底面勾配は0.0063, 0.0123, 0.0337, 0.0550の4通り変化させた。なお、水路下流端にせきを設置した場合には、密度流フロントがせきに衝突することによる複雑な流れが生じる³⁾。本実験ではこれを回避するため、実験水路の下流端をせきのない状態にし、水を張った水槽内に実験水路を設置した。実験水路上流端より2.2 mの位置の中央付近に、直径80 μmのタングステン線を底面から垂直上方に張り、水素気泡をバルス状に発生させた。水素気泡列を含む鉛直断面をスリット光で照射し、水路側方からモータードライブカメラで水素気泡列と流動状況を撮影した。得られたフィルムをスライドプロジェクターにより投影することにより、下層密度流の流動状況と流速分布の同一地点・同一時刻のものを求めた。水素気泡の発生時間間隔は50 ms、1パルスの継続時間は5 msとした。

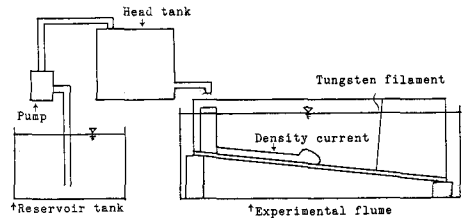


図-1 実験装置の概略

3. 実験結果と考察

(1) 界面形状と流速分布

図-2はタングステン線設置位置における流速分布と内部境界面(目視による)形状の時間的な変化を示したものである。図中Tで示した数値は、密度流最先端がタングステン線設置位置に到達した時から測った時間を秒単位で示したものである。また、内部界面のスケッチの中で界面を2本記入したものであるが、これは下層密度流流体が底面近くを高濃度で流れる層とその上方の希釈層から構成されている状況を示したものである。まず内部界面についてみると、下層密度流先端部では内部の複雑な流れ構造を反映して界面は激しく変動するが、十分後方では変動が抑えられた定常流となる。上述の希釈層は最先端より少し後方から発達し、側方から観察される最大厚さの断面ではかなりの厚さに達する。更に後方になると希釈層は次第に不明瞭となる。流速分布は以上の内部界面の変化とよく対応している。即ち、最先端近くで

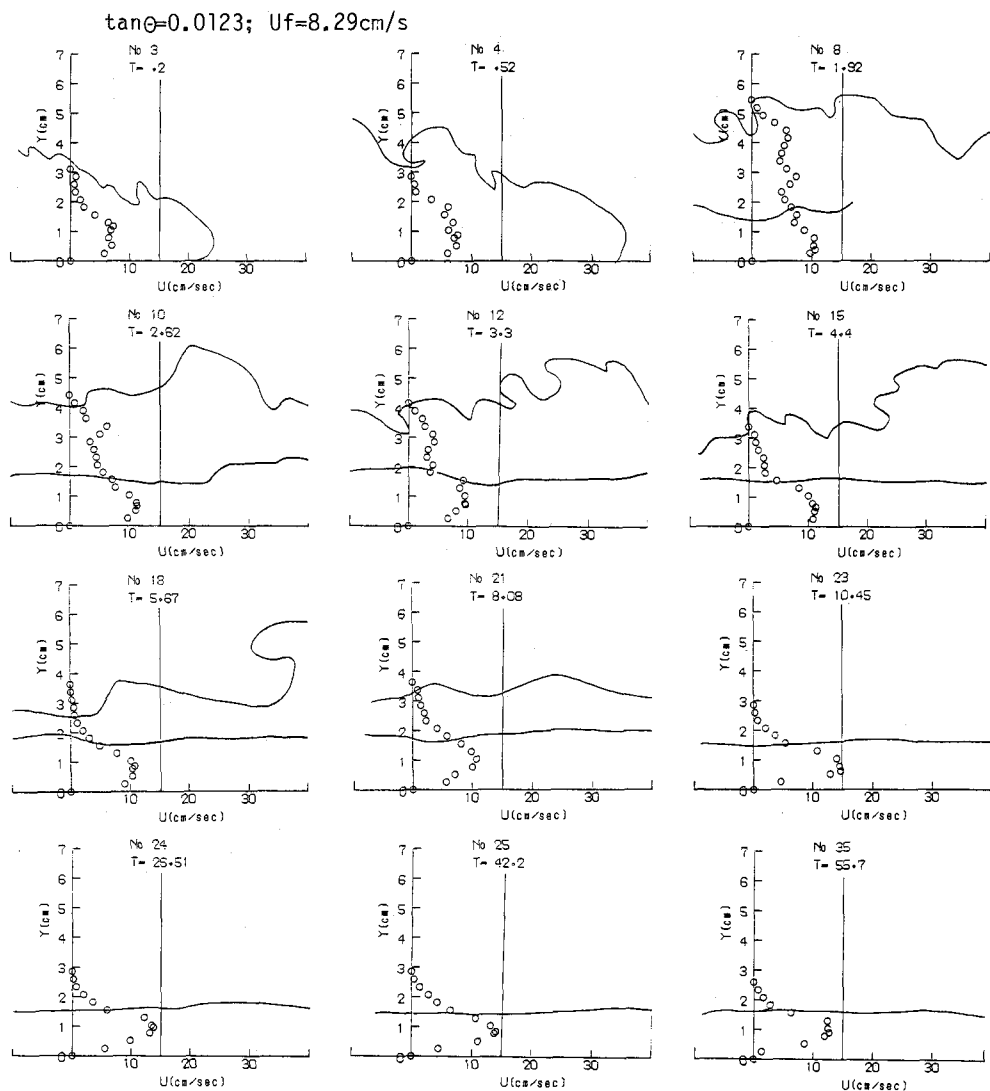


図-2 界面形状と流速分布の時間的变化

は流速分布は複雑に変動しながらも単一な分布形である。流速ゼロ点は内部界面とはほぼ同じ値をとりながら変動する。希釈層の存在する領域では、高濃度層と希釈層との境界に於て流速分布に明確な段差があり流速ゼロ点は希釈層と周囲水との境界とはほぼ一致して変動する。十分後方の定常流の区間では、既報⁴⁾と同様の分布形を示し、流速ゼロ点は目視による境界より少し上方になっている。

以上のように密度流先端部全域にわたり、スリット光で写し出された断面での目視による境界は流速ゼロ点とはほぼ一致しているが、フロント部の内部境界面は複雑な3次元構造をしているため、水路側方から通常観測される目視による境界は流速ゼロ点より少し上方になる。

次に断面最大流速 $U_{\max}$ と流速ゼロ点 $Y(U=0)$ で規格化した流速分布を、フロントから後続部に至る間で求めたものを図-3に示す。前述のようにフロント部では内部の複雑な流れ構造を反映して流速分布は複雑に変動するが、後続部では一定の相似形となっている。またフロントから後方に移るにつれて流速分

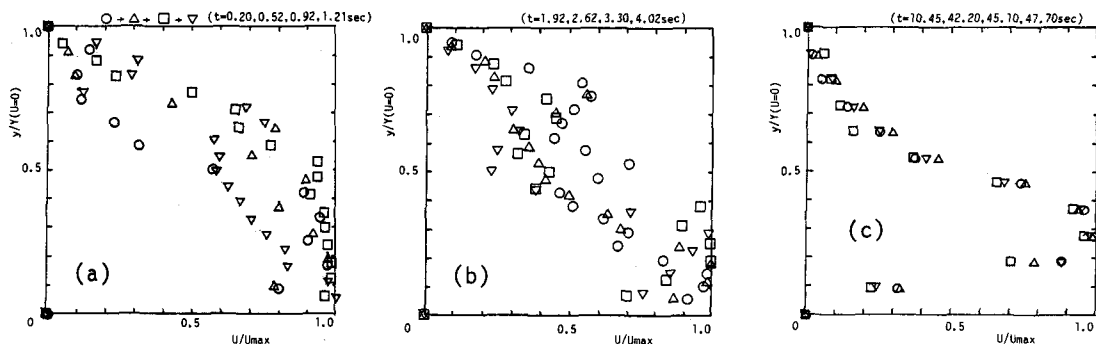


図-3 無次元流速分布形の変化 (a) 最先端付近 (b) 希釈層の存在する領域 (c) 後続部

布はやせてくることがわかる。希釈層の存在する領域では図-2の流速分布の段差が更に明瞭に示されている。十分後方においては最大流速は流速ゼロ点の3割弱の高さで生じている。

(2) 諸量の時間的变化

ここでは下層密度流の特性を示す長さや速度などの量について述べる。なお、時間はすべて密度流最先端がタングステン線設置位置に到達してから時間である。まず、図-4は底面勾配0.0337のケースについて得られた流速ゼロ点の高さ $Y(U=0)$ と最大流速点の高さ $Y(U_{max})$ の時間的变化である。前述のように $Y(U=0)$ はスリット光により写し出された界面とはほぼ一致して変動し、フロント到達後急増したのち、減少して一定値に近づく。なお、図には示さないが勾配の異なるケースを比較すると、 $Y(U=0)$ は先端部では勾配が急な程大きい。このことは、勾配が急な程先端部の流動厚さの増加が著しいという既報³⁾と一致する。後続部では逆に勾配が急な程 $Y(U=0)$ は小さな値を示した。一方 $Y(U_{max})$ は先端部でかなり変動したのち一定値に近づく傾向にあり、フロント部における平均値は後続部における値と同程度である。図-3からも明らかであるが、両者の比 $Y(U=0)/Y(U_{max})$ は先端部で7~8の後続部で3~4程度である。なお、先端部では流速分布がふくらんでいる上に変動がはげしく、このため $Y(U_{max})$ の特定が多少困難である。

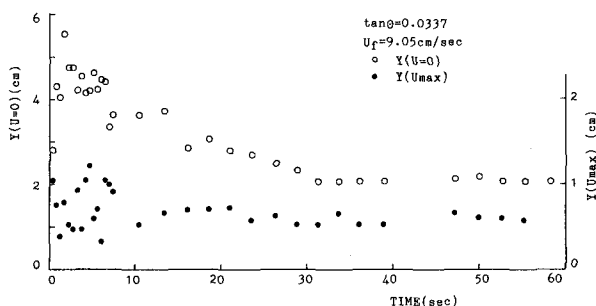


図-4 $Y(U=0)$ と $Y(U_{max})$ の変化

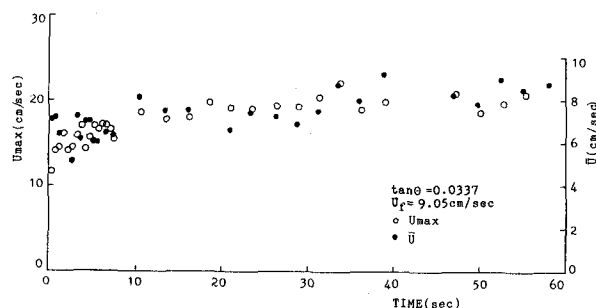


図-5 U_{max} と $\bar{U}$ の変化

図-5は断面最大流速 U_{max} と断面平均流速 $\bar{U}$ の時間的变化を示したものである。 U_{max} はフロント到達直後やや急増し、のち漸増しながら一定値に近づいていく。 $\bar{U}$ はフロント部でかなり変動し、平均的には増大しながらほぼ一定値に近づいていく。 U_{max} 、 $\bar{U}$ とも先端部より後続部の方が大きいことはPlumeでは後続流が先端部に流れ込んでいることを数値的に示しているといえる。

つぎに速度諸量の比について述べる。図-6および7は各々断面最大流速と先端移動速度の比 U_{max}/U_f および断面平均流速と断面最大流速の比 $\bar{U}/U_{max}$ の時間的变化を示したものである。図-6では、先端移動速度 U_f の値は注意を要する。密度流の先端移動速度はかなり変動する³⁾が、図-6中の値は、

先端が15cm移動する間の平均値で与えている。まず U_{max}/U_f の増減は図-5で見た通りであるが、数値は先端部では1.0程度、後続部で1.7~2.3程度の値となっており、勾配が急な程大きな値を示す。 $\bar{U}/U_{max}$ の値は、先端部では $\bar{U}$ の変化を反映してかなり変動するが、後方にいくにつれて減少しながら一定値に近づく。このことは先端部から後続部にいくにつれて流速分布がやせてくることに対応している。

図-8は U_{max}/U_f , $\bar{U}/U_f$, $\bar{U}/U_{max}$ の後続流における値を底面勾配に対してプロットしたものである。前述のように U_f の値は注意を要する。図より、 U_{max}/U_f は1.5~2.2程度の間で変化し、勾配が急な程大きな値となる。このことは勾配が急な程密度流先端部の流動厚さの増加率が大きいことと対応している。 $\bar{U}/U_f$ は0.8程度の値を示し、図でみる限り勾配による変化は認められない。しかしながら、勾配が0.005で1.0程度の値から勾配0.04で0.7程度の値へと、勾配が急になるに従い減少傾向のあることが報告⁵⁾されている。 U_f の値の適否や再現性の問題が考えられ、今後の検討を要する。 $\bar{U}/U_{max}$ は0.4~0.5程度の値をとり勾配による変化はあまり認められない。これは図-3でみたように、後続部では流速分布がほぼ相似形になっていることと対応している。

図-9は下層流の単位幅流量 q の変化を示したものである。 q は流速ゼロ点(図-4)と同様、フロント到達直後顕著なピークを示したのち減少しながら一定値に近づく。ピークの時刻は両者ともほぼ同じであり、勾配が急な程ピーク値が大きい点も同様である。このことは q を構成する $\bar{U}$ と $Y(U=0)$ のうち $\bar{U}$ の変化は平均的には小さいため、 $Y(U=0)$ の変化と q の変化が似かよったものになるのである。

(3) $\delta/\bar{U} \cdot \partial \bar{U} / \partial x$ の値

平野ら³⁾は下層密度流先端部の流動を2層流モデルと特性曲線法により取扱い、流動厚さを δ 、連行係数を E とする時、平均速度 $\bar{U}$ で移動する座標系から観測される流動の厚さの発達割合を次式

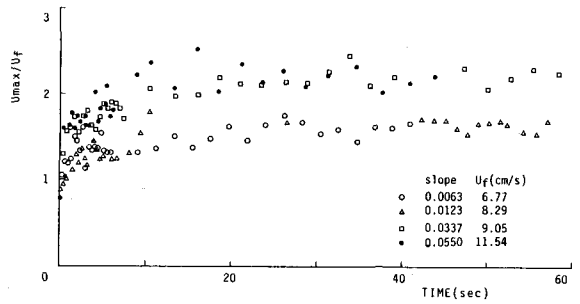


図-6 U_{max}/U_f の変化

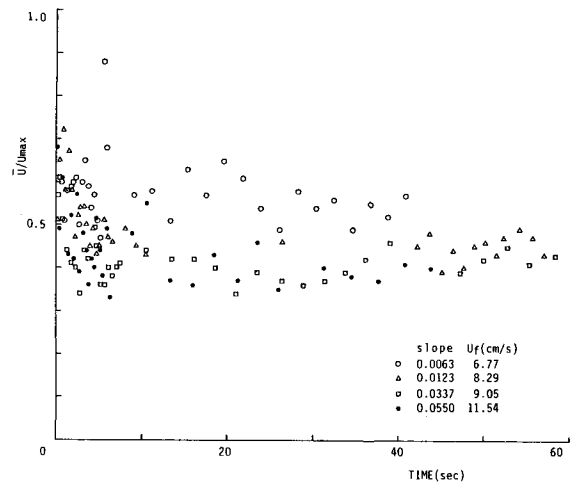


図-7 $\bar{U}/U_{max}$ の変化

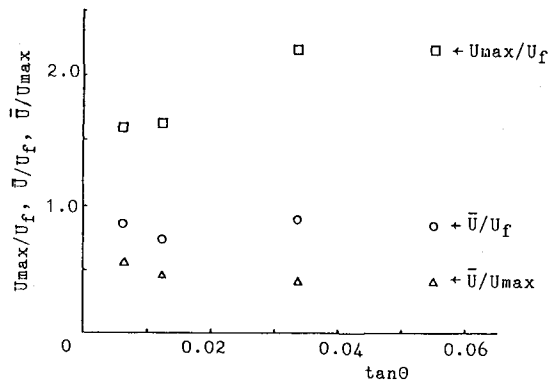


図-8 後続部の U/U_f , U_{max}/U_f , $\bar{U}/U_{max}$ と底面勾配の関係

$$\frac{d\delta}{dx} = E - \frac{\delta}{\bar{U}} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x}$$

で表わし、流動厚さは周囲水の連行（第1項）と、前後の断面における断面平均流速の差（第2項）によって増加することを示した。 δ として流速ゼロ点Y（ $U=0$ ）を採用し、一連の δ と $\bar{U}$ の測定において隣り合う測定時刻での値から $\delta/\bar{U} \cdot \Delta \bar{U}/(\Delta t \cdot U_f)$ により評価した $\delta/\bar{U} \cdot \partial \bar{U}/\partial x$ の値を示したのが図-10である。ここに、 Δt は δ と $\bar{U}$ の一連の測定の時間間隔である。図より、フロントから後続部に至る間で $\delta/\bar{U} \cdot \partial \bar{U}/\partial x$ は一貫して負値をとり

このことは密度の測定結果を用いて示された、plumeでは負値をとり、thermalでは正值をとる、という前報⁶⁾の結果と一致している。また、絶対値はフロント部で大きく、後続部では等流に近づいていくことを示している。図-11はフロント部における $\delta/\bar{U} \cdot \partial \bar{U}/\partial x$ の値を示したものである。図には密度の測定結果から求めた前報の結果も示しているが、本実験の結果は前報⁶⁾に比べ絶対値が小さい。一定幅水路の流れと漸拡水路の流れの差、データのとり方の差、再現性の問題が考えられる。今後詳細に検討する必要がある。

4. 結語

以上、下層密度流の流速分布測定にもとづき、流速特性を種々検討した。本研究で得られた主要な点は以下のようである。

(1) 下層密度流先端部の大部分の領域では底部の高濃度の層上に希釈層が集った状態となっており、流速分布は両層の境界で明瞭な段差を示す。

(2) スリットにより写し出された断面では、フロント部全体において流速ゼロ点は下層（希釈層を含む）と周囲水との境界とほぼ一致する。しかしながらフロント部における内部境界面は複雑なる3層構造をしているため水路側方から通常観測される内部境界面は流速ゼロ点より少し上方になる。

(3) 断面最大流速 U_{max} とフロント移動速度 U_f の比 U_{max}/U_f はフロント部で1程度、後続部で1.7～

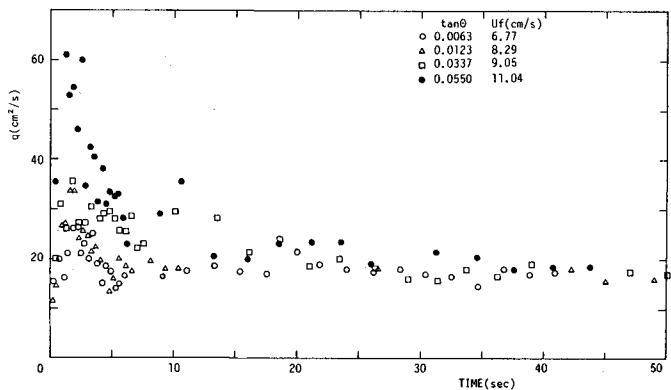


図-9 qの変化

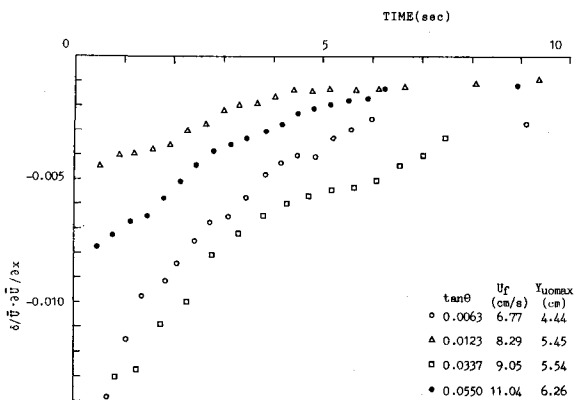


図-10 $\delta/\bar{U} \cdot \partial \bar{U}/\partial x$ の変化

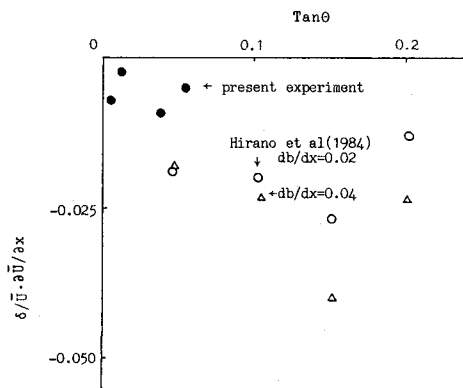


図-11 先端部の $\delta/\bar{U} \cdot \partial \bar{U}/\partial x$ と底面勾配の関係

2.3 程度の値をとり, plume では後続部から先端部への流入が生じていることおよびこの傾向が急勾配な程著しいことなどを示した。

今後、下層密度流によりまき上げられた底質土砂が先端部に集中する過程についてモデル化を行ない、土砂輸送の定量的評価を目指す。最後に、本研究遂行にあたり、実験・データ整理に熱心に協力して頂いた、卒研生、西田圭吾（現青池組）、杉岡伸一（現九大大学院）の両氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 羽田野袈裟義・斉藤隆・平野宗夫：下層密度流の底面せん断力について，土木学会第40回年次講演会概要集，第2部，pp349-350，1985
- 2) たとえば，Simpson, J. E. : Effects of the lower boundary on the head of a gravity current, J. F. M., Vol. 53, pp759-768, 1972
- 3) 平野宗夫・羽田野袈裟義：密度流先端部の流動特性について，土木学会論文報告集，No. 314, pp67-73, 1981.
- 4) Ippen, A. T. and Harleman, D. R. F. : Steady state characteristics of subsurface flow, U. S. Natl. Bur. Standards Circ. 521, pp79-93, 1952
- 5) Middleton, G. V. : Experiments on density and turbidity currents. I. Motion of the head, Canadian Jour. of Earth Science, Vol. 3, pp523-546, 1966.
- 6) Hirano, M., Hadano, K. and Matsuo, T. : On Motion of turbidity current head (part 3), proc of 4th congress, APD-IAHR, Vol. II, pp1647-1661, 1984