

平面相関法による土石流フロントの速度場推定

Estimation of velocity field inside debris flow front by means of correlation method

宮沢直季*

By Naoki MIYAZAWA

The debris flow was produced by abruptly supplying water onto the bed composed of gravel and was successively photographed by video camera. The velocity field inside debris flow front was estimated by means of correlation method. It is found that the large-scale periodic vortices are generated inside the front. Its period is about 0.23s by judging from velocity fluctuation in this experimental case. The time-averaged velocity profile at the rear of the front agrees with Takahashi's theory(1991) very well.

Keywords: correlation method, debris flow front, velocity field

1. はじめに

土石流災害の適切な対策を講じるには、土石流の挙動を把握する必要があり、土石流の内部構造の解明は必須の課題である。従来、土石流の構成則に関する理論的研究は多く行われている（例えば、高橋¹⁾、椿ら²⁾、Takahashi³⁾）。これらのモデルは水と粒子を一つの連続体（一流体モデル）として取り扱っている。最近では、粒子-流体間の相互作用や粒子間衝突を直接的に取り扱う研究も始められている（後藤ら⁴⁾）。

一方、最近の画像処理技術の発達により、水工学の分野においてもPIVやPTVなどの流速計測によって、開水路凹部の渦構造（藤田ら⁵⁾）、複断面開水路の組織構造（彌津ら⁶⁾）、植生層上の組織渦構造（池田ら⁷⁾）が明らかにされている。また、新井ら⁸⁾によってPIVの一手法である相関法によって高濃度泥流の乱れ構造の解明が試みられている。

本研究では、土石流の内部構造を解明することを念頭に入れて、実験で得られた土石流の動画像を用いて、平面相関法によって土石流フロントの速度ベクトル場を推定し、その流れの構造を明らかにすることを目的としている。本方法のメリットとしては、1) 濃淡パターンの相関をとっているため、実験材料の砂礫がそのままトレーサーとして利用しやすい、2) 土石流の時空間構造の解明が可能である、デメリットとしては、1) 速度ベクトルは水と砂礫を含んだある範囲の平均速度であるため、個々の粒子速度は測定できない、2) 土石流内部の速度の3成分を測定できない、などが挙げられる。

* 正会員 工修 山梨大学助手 工学部土木環境工学科

(〒400 山梨県甲府市武田4-3-11)

2. 実験装置及ぶ実験方法

図-1 に土石流実験装置を示す。長さ 3.0m、水路幅 10cm、高さ 22cm の透明アクリル製の水路に厚さ 10cm で粒径 4.76mm～9.52mm(幾何平均 6.73mm)、比重 2.64 の礫を敷き詰めて、上流から水を供給して土石流を発生させた。実験条件は河床勾配が 17.5°、上流からの供給流量が 0.0030m³/s であり、水で湿らせておいた礫を水路に敷

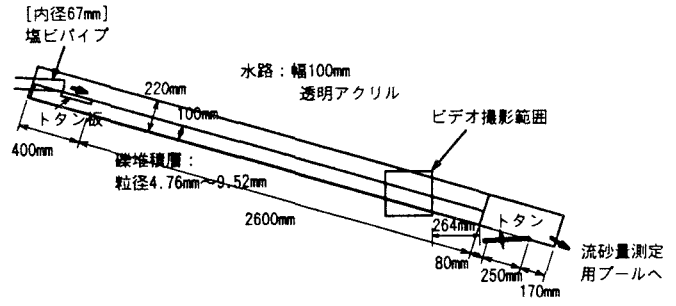


図-1 土石流実験装置

き詰めたので、通水前の礫堆積層は不飽和で乾燥状態に近い。その堆積層の礫容積濃度は $c_v=0.57$ 、内部摩擦角は $\phi=38.3^\circ$ である。市販のビデオカメラを水路下流付近に固定して水路側面を通して土石流の流れを連続撮影した。また、水路下流端で土石流を採取した結果、土石流フロントの礫容積濃度は 0.40 であった。

3. 画像解析

3.1 平面相関法による速度場推定法

画像処理ボード (DIG98、DITECT 社) によって、実験で得られたビデオ映像をデジタル画像データ (512×512 画素、256 階調のモノクロフレーム画像データ) に A/D 変換した。画素間隔は 0.058cm である。これによって時間間隔 1/30 秒の画像データが連続 12 枚得られた。その後、画像中のノイズを除去するためにフィルター処理を行った。本研究では加重平均フィルターを適用した。次に、連続した 2 つの画像 (時間間隔は 1/30 秒) から平面相関法により速度ベクトル場を推定した。 $t = t_0$ の画像においてある画素を中心とする $n \times n$ の大きさの部分画像 (テンプレート) を考える。そのテンプレートの中心の位置を $\bar{L}_0$ 、テンプレート中の各画素の輝度を $f_i (i = 1, 2, \dots, m; m = n \times n)$ とする。次に $t = t_1$ の画像中での同じ大きさのテンプレートの中心の位置を $\bar{L}_1$ 、各画素の輝度を $g_i (i = 1, 2, \dots, m)$ とする。相関係数 $R(\bar{L}_1)$ は次式で表される。

$$R(\bar{L}_1) = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (f_i - \bar{f})^2 \cdot \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (g_i - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{f}, \bar{g}$ は各テンプレート内の輝度の平均値である。 $\bar{L}_0$ を中心の画素とする $n \times n$ のテンプレートの流体は R を最大とするように移動したものと推定され、この間の移動速度は次式で与えられる。

$$\bar{V}(u, w) = (\bar{L}_1 - \bar{L}_0) / (t_1 - t_0) \quad (2)$$

本研究では、テンプレートの大きさを 17×17 画素 (1.0cm×1.0cm) とし、検索はこのテンプレートを含む 43×55 画素の範囲で行った (図-2)。また、相関計算で 0.6 以上の相関が得られない場合は欠測扱いとした。

3.2 過誤の速度ベクトルの除去と欠落データの内挿

求めた速度ベクトルから周囲と著しく異なるもの (過誤の速度ベクトル) を以下の方法で除去した。対象とする速度ベクトルの近傍 24 点の速度ベクトルの成分 (u, w) を平均し、その平均値と対象ベクトルの成分との差 ($\Delta u, \Delta w$) が大きいものを除去した。除去するための基準値 (しきい値) を大きく取ると、過誤の速度ベクトルをあまり除去できず、逆にしきい値を小さく取ると、正しい速度ベクトルも除去することになる。そこで、しきい値を変えて過誤の速度ベクトルが最も効率よく除去できるしきい値を試行錯誤の結果決定した。そして、欠落しているデータをその近傍で既に得られているデータから距離の逆数の重み付けで内挿した。なお、土石流水面より上は背景であるので、その背景内に現れた過誤の速度ベクトルを除去し、欠落データの内挿計算は行わない。

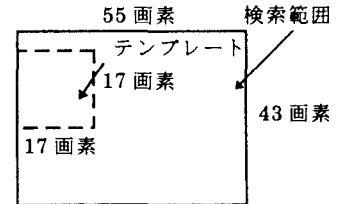


図-2 検索範囲

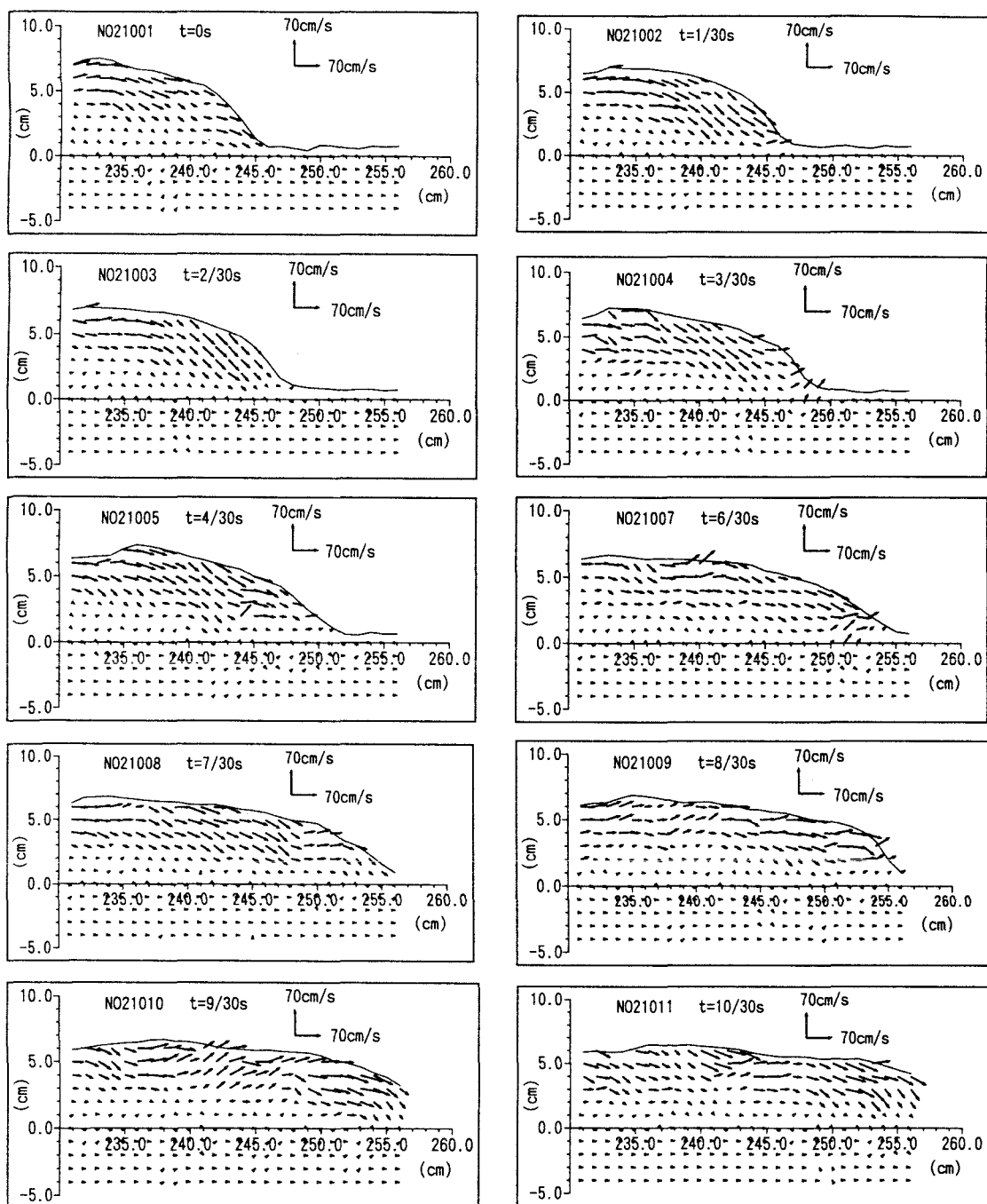


図-3 平面相関法で推定された土石流フロントの速度ベクトル場

4. 解析結果及び考察

4.1 流れの状況

時間間隔 1/30 秒で取り込まれた 12 枚の連続画像から、以下のような土石流フロントの内部状況が観察された。上方にある礫は下方のものよりも速く移動し、弧を描いて最先端部へ現れ、河床付近に落ちると速度が遅いので後方に取り残されるような大規模な渦運動が見られた。先端部の通過後、最初に敷き詰めた堆積層の表面を浸食することなく、それより上方でのみ移動していた。本ケースの土石流の状況は高橋¹⁾による

土石流の流動形態の Type III に対応する。

4.2 土石流フロントの速度ベクトル場

平面相関法によって推定された土石流フロントの速度ベクトル場を図-3に示す。通水前の河床面を x 軸、その垂直方向を z 軸とした。この速度ベクトル図から、以下のことが読み取れる。 $t=0\sim 2/30$ s のベクトル図から、 $x=231\sim 235$ cm 地点で水平の速度ベクトルが卓越し、先端部では下向きの速度ベクトルが卓越している。下方の速度の遅い礫群を乗り越えて上方の礫が先端部に現れることを示している。 $t=9/30\sim 10/30$ s のベクトル図から、 $x=240\sim 245$ cm 地点で上向きの速度ベクトルが見られ、 $x=231\sim 235$ cm に下向きの速度ベクトルが見られる。土石流先端部およびその後方に 4.1 で述べたような大規模な周期渦構造が認められる。本実験ケースの場合、その渦スケールは約 15cm であった。 $t=3/30$ s, $6/30$ s の最先端部で上向きの速度ベクトルが生じている。これは上方の速い礫の河床面との衝突・反撥に因ると考えられる。

4.3 速度の時間変動

上記の大規模な渦構造に対応して速度に変動が現れると考えられる。そこで、各格子点での速度の時間変動を見たのが図-4である。 $x=232$ cm 地点での速度変動を見ると、変動は大きく、特に高さ $z=4$ cm での速度変動が極めて大きいことが認められる。この高さについては後述するように時間平均の速度分布において速度の変曲点 ($z=3.7$ cm) と対応している。また、

速度変動には周期性が見られ、 $t=0.1, 0.23, 0.33$ s でピークが現れる。その周期は約 0.1~0.13 秒である。 $x=234$ cm 地点での速度変動を見ると、高さ $z=3$ cm (変曲点 $z=3.2$ cm) においても同様な周期変動がみられる。図-3 の速度ベクトル図と併せて考察すると、周期渦の卓越周期は約 0.23 秒であるといえる。

4.4 時間平均の速度分布

図-5に上記の速度ベクトル場から求めた時間平均の速度分布を示す。主流方向の速度分布 $\bar{u}$ において変曲点 (図中○印) が認められる。このような変曲点は移動床上での速度分布で一般的であり、Takahashi⁹⁾、樗²⁾の実験結果でも認められる。 $x=231$ cm 地点においては高さ $z=4.2$ cm (流動深の約 2/3) に変曲点があり、それより下流では変曲点の高さが河床面に近づいている。それに伴い、分布形状は上部で膨れた形状を示している。垂直方向の速度分布 $\bar{w}$ において上部でマイナス (下向き) の速度が大きくなっている。これは、4.2 で述べたようにフロントにおける大規模な渦による下降流によって現れたものと考えられる。

土石流フロントで発生する大きな渦が変曲点不安定によって発生する渦であるかどうかを検討した。流速分布に変曲点を有するせん断流れの不安定性を取り扱った Ho and Huerre¹⁰⁾の線形理論の結果によれば、最

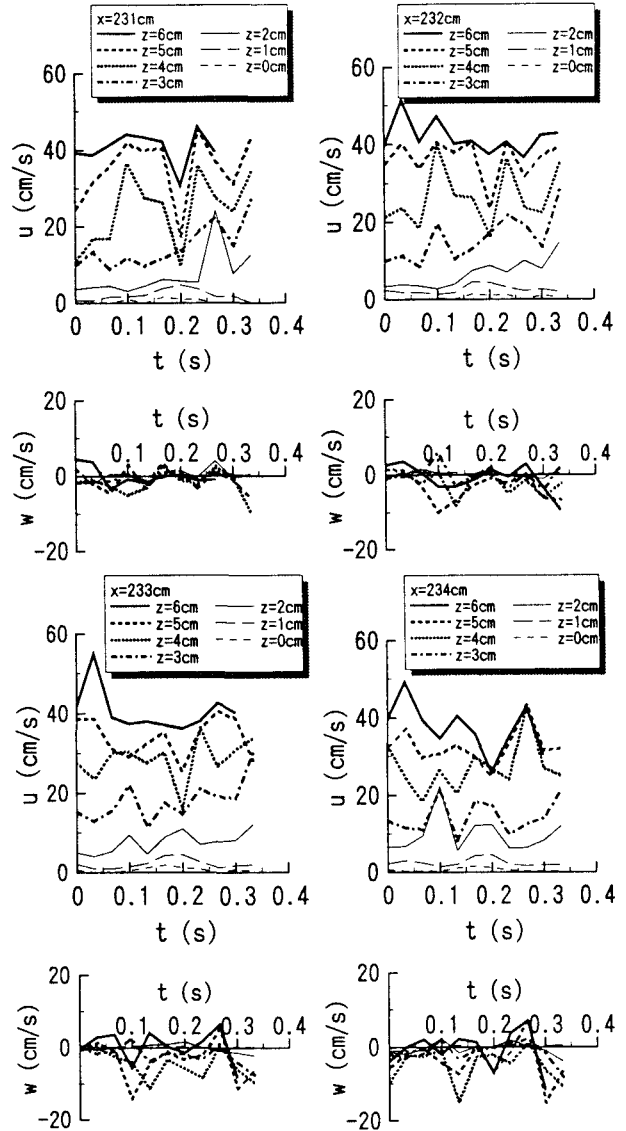


図-4 各格子点での速度の時間変動

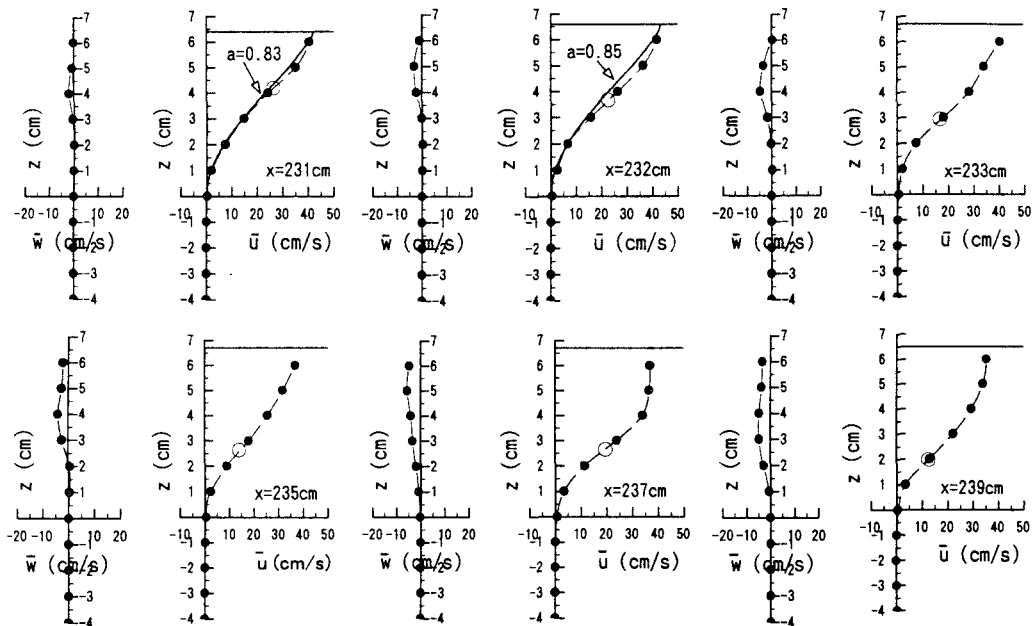


図-5 時間平均の速度分布

大発達率を示す周波数 f は次式で与えられる。

$$f\theta/U_m = 0.032 \quad (3)$$

ここで、 θ は変曲点を挟んだ両側の速度分布のもつ運動量厚さの和、 U_m はせん断層上下2境界における流速の平均値である。本実験ケースにおいて式(3)の周波数を計算した結果、 $f=0.54\sim 0.76\text{Hz}$ (卓越周期 T は $1.3\sim 1.8$ 秒)であった。前述の速度の時間変動から見積もった周期よりも1オーダー高い値となっている。

現在、画像処理ボードのメモリの都合上、速度ベクトルが11ケース(時間長で0.33秒)しか得られていない。しかし、土石流フロントの渦構造を解明するには、さらに長い時間にわたって時間変動および卓越周期を検討する必要がある。今後の課題としたい。

4.5 従来の理論解析との比較

推定された時間平均の速度分布が従来の理論解析によって得られている速度分布と合うかどうかを検討した。移動床での速度分布の理論式は Takahashi³⁾ 及び 椿ら²⁾ によって導かれているが、フロントでの速度分布の理論解析は行われていない。ここでは、等流仮定に最も近い $x=231\text{cm}, 232\text{cm}$ 地点(フロント背後)での速度分布との比較を行った。Takahashi³⁾ の速度分布の理論式は粒子間応力の x 成分 T と z 成分 P との比、 $T/P = -\tan\alpha$ が次式のように流動層の礫容積濃度 c で変化すると仮定して導かれている。

$$\tan\alpha = (1 + 1/\lambda) \tan\alpha_0 \quad (4)$$

ここで、 $\lambda = \{(c/c_0)^{1/3} - 1\}^{-1}$ は線濃度、 c_0 は堆積層の容積濃度、 α_0 は動摩擦角(内部摩擦角よりわずかに小さい)である。速度分布は次式となる。

$$\frac{u}{u_s} = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{3/2} \left(2 + 3 \frac{z}{h}\right) \quad (5)$$

$$u_s = \frac{4}{45} \left(\frac{gh \sin\theta}{a} \frac{\rho}{\sigma \tan\alpha_0 - \tan\theta} \frac{1}{d} \frac{h - \tilde{x}_s}{\tilde{x}_s} \right)^{1/2} (1 + \tan^2\alpha_0)^{1/4} \frac{h}{d} \frac{1 - \tilde{x}_s}{\tilde{x}_s} \quad (6)$$

ここで、 u_s は表面速度、 h は流動深、 a は Bagnold による粒子間応力の構成式中の定数、 θ は河床勾配、 ρ は水の密度、 σ は礫の密度、 d は粒径、 $\tilde{x}_s$ は表面濃度 c_s と堆積層の濃度 c_0 の比 $\tilde{x}_s = c_s/c_0$ で、次式の解と

して得られる。

$$\frac{c_s(\sigma - \rho)}{\rho \tan \theta} \bar{x}_s \left\{ \left(\frac{1}{\bar{x}_s} \right)^{1/3} \tan \alpha_0 - \tan \theta \right\} = 1 \quad (7)$$

式(5)、(6)、(7)に流動深、河床勾配、堆積層の容積濃度等の実験値を代入して求めた速度分布を図-5の実線で示し、これを無次元速度分布で示すと図-6になる。実験値はTakahashiの理論式とよく一致することがわかる。このときの濃度分布の理論式を図-7に示す。断面平均濃度は $\bar{c} = c_s \bar{x}_s \ln \bar{x}_s / (\bar{x}_s - 1) = 0.39$ となり、実験値0.40と一致する。

5. おわりに

実験で得られた土石流のビデオ映像をデジタル画像データに変換し、平面相関法によって土石流フロントの速度ベクトル場を推定した。得られた結果は以下の通りである。

- (1)土石流フロントにおいて大規模な周期渦の発生が確認された。
- (2)速度の時間変動は極めて大きく、周期性が認められた。この速度変動と速度ベクトル図から(1)の大規模な周期渦の卓越周期は本実験装置では約0.23秒であった。
- (3)時間平均の速度分布には速度の変曲点が認められた。流速分布に変曲点を有するせん断流れの不安定性を取り扱ったHo and Huerreの線形理論の卓越周期は(2)の卓越周期よりも1オーダー高い値となった。
- (4)従来の理論解析との比較を行った結果、フロント背後における時間平均の速度分布はTakahashi³⁾の理論とよく一致することがわかった。

謝辞：最後にご指導ご助言をいただいた東京工業大学池田駿介教授並びに山梨大学荻原能男教授に深く感謝致します。実験に協力いただいた本多重徳氏（当時山梨大学大学院生）並びに安藤茂樹氏に感謝致します。

参考文献

- 1)高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研究所年報，第20号B-2，pp.405-435，1977。
- 2)椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，第317号，pp.79-91，1982。
- 3)Takahashi, T.: Debris flow, A.A.Balkema/Rotterdam, pp.36-40, 1991。
- 4)後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰晴：傾斜面を流下する粒子流の数値シミュレーション，水工学論文集，第40巻，pp.1039-1044，1996。
- 5)藤田一郎・神田徹・門脇正夫・森田卓光：開水路凹部流れのPIVおよびLESによる乱流解析，土木学会論文集，No.539/II-35，pp.79-88，1996。
- 6)瀬津家久・阿部 崇・志村拓也・中山忠暢：PTV法による複断面開水路流れの時空間相関解析，土木学会論文集，No.539/II-35，pp.89-98，1996。
- 7)池田駿介・金沢稔・太田賢一：可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の三次元構造と穂波の発生，土木学会論文集，No.513/II-31，pp.33-43，1995。
- 8)新井宗之・高橋 保：高濃度泥流の変動流速測定，水工学論文集，第40巻，pp.1033-1038，1996。
- 9)Takahashi, T.: Debris flow on prismatic open channel, J. Hydraulics Div., ASCE, Vol.106, No.HY3, pp.381-396, 1980。
- 10)Ho, C.M. and Huerre, P.: Perturbed free shear layers, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.16, pp.365-424, 1984。

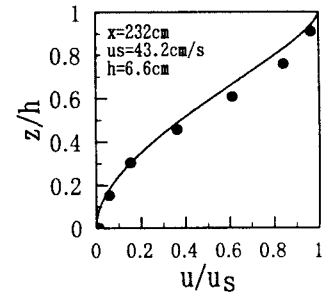
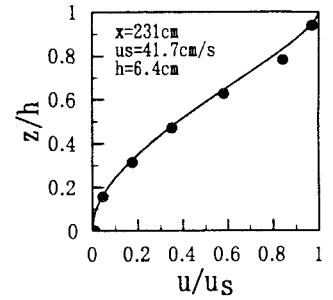


図-6 無次元速度分布

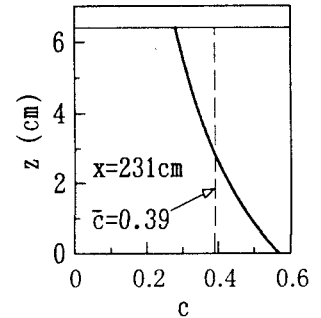


図-7 濃度分布