

勾配の急減と幅の急拡大による土石流の堆積過程 - 粒子の停止距離について -

Grains Deposition from Debris Flow Due to Decrease of

Channel Slope and Expansion of the Width

平野 宗夫^{*}・橋本 晴行^{**}・田崎 武詞^{***}・宮島 正悟^{****}

By Munee HIRANO, Haruyuki HASHIMOTO, Taketsugu TAZAKI and Shogo MIYAJIMA

There occurs rapid deposition from debris flows at the mouth of mountain canyon because of rapid flattening of the slope. First, grain movement in debris flow in the deposition process is investigated experimentally and theoretically. From the measurement of the locations of deposited grains in the experiments, their mean, standard deviation and correlation coefficient are determined. The equation for the period of grain movement and the mean location of deposited grains are derived. Finally, by using the results of grain movement deposition profile is calculated.

Keywords: debris flow, hyperconcentrated flow, granular flow, deposition

1. まえがき

土石流災害の多くは勾配が急減し、幅が急拡大する溪流出口付近など、土石流が流出して堆積するところに発生する。その堆積危険地帯を予測するためには土石流中の粒子がどのような範囲に堆積するかを明らかにする必要がある。そのような観点からの研究としては大別して2つの接近法がある。ひとつは、土石流を連続流体として取り扱い、運動量方程式と連続式を差分化して堆積過程を調べる方法であり^{1), 2), 3)}、他のひとつは、土砂粒子の停止過程を解析したのち、土砂の保存則から土石流の堆積過程を調べるラグランジュ的な観点からの方法^{4), 5), 6)}である。

前者の方法では、土石流の堆積過程において、土砂と水が分離過程に入るため大きな濃度分布が現われ、その結果として流速分布形が変質していることが考えられ、従来の抵抗則が利用できるかどうか疑問がある。さらには連続式における土砂の堆積速度の評価においても勾配が急変するような場合に適しているかどうか、

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

*** 正会員 工修 洋林建設㈱

(〒746 山口県新南陽市大神1-9-12)

**** 学生員 九州大学大学院 工学研究科

問題があろう。

一方、後者の方法については、複雑な地形条件下では、土砂粒子の停止過程を実験によって調べる必要があり、実用上問題を残している。

本研究は、後者の方法の延長上にあるもので、まず、勾配の急減と幅の急拡大を受けた土石流の堆積において粒子の停止距離の確率的特性を調べる実験を行った後、その平均的挙動について理論的考察を加える。次いで、この成果を基に土石流の堆積形状の計算を行い、実験と比較する。

2. 粒子の停止距離に関する実験

2・1 実験方法

水路は、図-1に示すように、移動床部と固定床部からなる長さ9.5m、幅 $B_u=10\text{cm}$ の土石流発生・流下水路と、長さ195cm、幅123cmの固定床堆積水路とをヒンジで接続させたものを用いた。

実験は、移動床部に平均粒径 $d=1.9\text{mm}$ 、密度 $\sigma=2.58\text{g/cm}^3$ の砂礫を厚さ10cmに敷き、上流端から流量 $q_{w0}=100\text{cm}^2/\text{s}$ の水を急激に給水し、土石流を発生させて行った。固定床の土石流流下水路と堆積水路の底面には、移動床部の河床材料と同じ砂礫が粗度として貼られ、固定床粗面としている。

堆積水路に到達した土石流は勾配の急減と幅の急拡大のため堆積を開始するが、その様子を真上からVTRカメラを用いて撮影すると同時に粒子の停止距離を調べるため、着色砂礫の投入装置を図-2のように勾配変化点上に設置し、土石流先端部の表面に着色砂礫を投入した。その投入装置の中は仕切り板で5等分され、センサーで土石流を感知すると同時に底が開くように工夫されている。その結果、土石流到達後、着色粒子がその表面に達するまでの時間は $T_{ir}=0.15\sim0.43\text{s}$ であった。それぞれの仕切り板内（底面積 $1.52\text{cm}\times1.52\text{cm}$ ）には5種類に色分けされた着色砂礫を40個ずつ入れた。土石流が堆積水路上に流入してから $T_D\approx10\text{s}$ 間実験を継続させ、その後、土石流の流入を停止して埋没した着色砂礫を注意深く捜し出し、その停止位置 (x_d, y_d) を測定した。なお、実験は、上流側勾配 $\theta_u=14^\circ, 16^\circ, 18^\circ$ と下流側勾配 $\theta_d=2^\circ, 4^\circ, 5.85^\circ, 8^\circ$ との組合せを種々変えて行った。

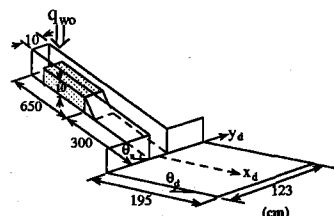


図-1 実験水路

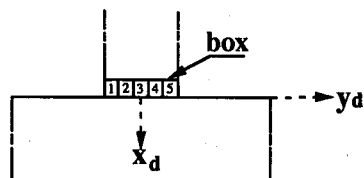


図-2 着色砂礫の投入装置

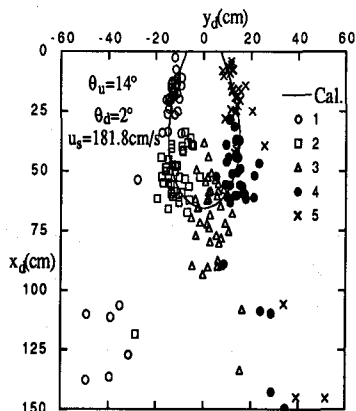


図-3 着色砂礫の停止位置

2・2 実験結果

図-3は着色砂粒の停止状況を示している。U字型をなして分布している砂粒群とそれから下流方向に離れて分布している砂粒群とが存在し、後者は堆積土砂から絞り出された水流によって2次的に動かされたものと考え、考察から除外した。いずれの粒子も

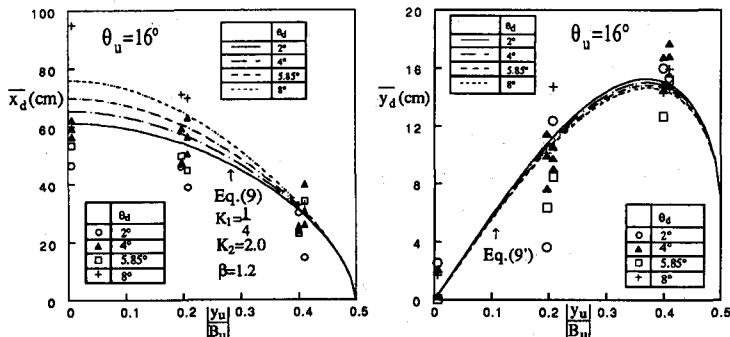


図-4 粒子の平均停止距離と投入位置との関係

ほぼ河床底面上に分布している。図-4は、粒子の停止位置の平均値 ($\bar{x}_d, \bar{y}_d$) を投入位置 y_u に対して示したものである。停止位置は投入位置 y_u によって異なり、水路中央付近で投入された粒子ほど下流方向 (x_d 方向) に進行して停止するが、側壁付近で投下された粒子は横方向 (y_d 方向) に偏向して停止する。この結果を平面上に下流側勾配 θ_d 別に示したものが図-5である。当然、 θ_d が大きいほど粒子は下流に停止している。

次に、標準偏差 (σ_x, σ_y)、 x_d 方向の変動係数 $\alpha_x = \sigma_x / \bar{x}_d$ および相関係数 R_{xy} を求めたのが図-6, 7, 8, 9である。 x_d 方向の標準偏差 σ_x は上流側勾配 θ_u によって異なり、 $\theta_u = 14^\circ, 16^\circ$ では $\sigma_x \approx 12\text{cm}$ 、 $\theta_u = 18^\circ$ では $\sigma_x \approx 8\text{cm}$ でバラツキが小さい。また y_d 方向の標準偏差 σ_y は θ_u に無関係に $\sigma_y \approx 3.5\text{cm}$ で、一般的に $\sigma_x > \sigma_y$ である。 α_x は投入位置 y_u と上流側勾配 θ_u によって若干異なり、水路中央付近で投下された粒子ほど、また上流側勾配 θ_u が大きいほど、比較的小さな α_x をとる。平均的には $\theta_u = 14^\circ, 16^\circ$ で $\alpha_x \approx 0.3$ 、 $\theta_u = 18^\circ$ で $\alpha_x \approx 0.15$ となる。相関係数 R_{xy} はバラツキが大きい、平均的には $\theta_u = 14^\circ, 16^\circ$ では $R_{xy} \approx y_u / B_u$ 、 $\theta_u = 18^\circ$ では $R_{xy} \approx -y_u / B_u$ の関係がある。

3. 粒子の平均停止距離についての理論的考察

図-10に示すように、土石流が幅 B_u の急勾配水路から、幅の急拡大した緩勾配の堆積水路に突入した瞬間を考える。このとき土石流は両側壁の拘束を免れ、その幅を瞬間的に拡大するものとする。一方、流れの中の微小部分に着目すると、急勾配水路における微小幅 dB_u は堆積域では拡大して幅 dB_d となると考える。土石流中の粒子には抵抗力として粒子間力 F^g が、推進力として流体力 F^f と重力がそれぞれ作用しているので、急勾配水路の微小幅 dB_u における質量 m の単一粒子について、流れ方向の力のつり合い式を求めると、

$$0 = -F_{ux}^g + F_{ux}^f + mg \sin \theta_u \quad (1)$$

一方、堆積域上の微小幅 dB_d における粒子の運動方程式は、

$$x_d: m(1 + \rho/(2\sigma)) d^2x/dt^2 = -F_{dx}^g + F_{dx}^f + mg \sin \theta_d \quad (2)$$

$$y_d: m(1 + \rho/(2\sigma)) d^2y/dt^2 = -F_{dy}^g + F_{dy}^f \quad (3)$$

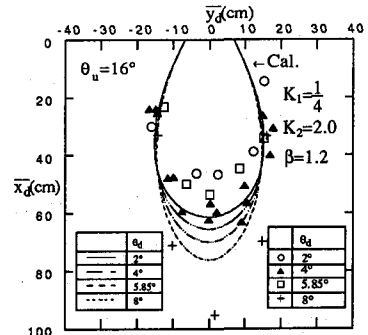


図-5 着色砂粒の平均停止位置

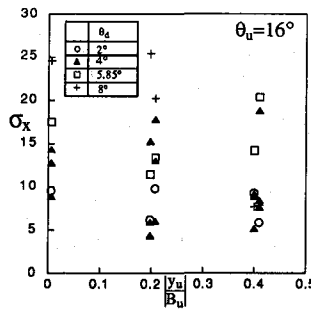


図-6 x_d 方向の標準偏差

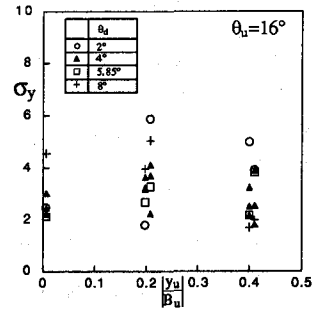


図-7 y_d 方向の標準偏差

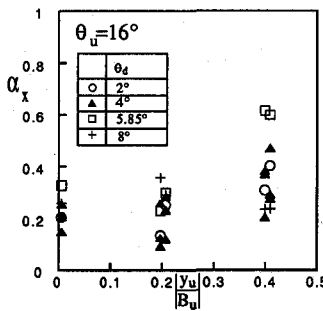


図-8 x_d 方向の変動係数

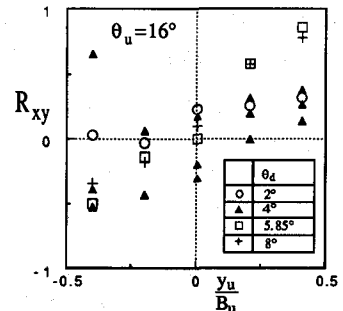


図-9 相関係数と投入位置との関係

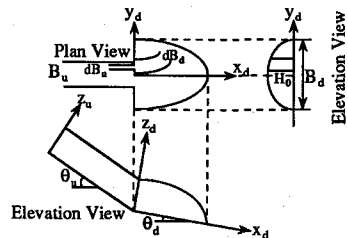


図-10 堆積水路に流入した土石流の模式図

ここに、添字 u, d はそれぞれ上流側、下流側斜面における物理量を表わす。

勾配変化点直前(急勾配水路)から堆積域突入直後(緩勾配水路)にかけて、粒子位置は $(0, y_{u0}, z_{u0})$ から $(0, y_{d0}, z_{d0})$ に、粒子速度は $(u, 0, 0)$ から $(u_{d0}, v_{d0}, 0)$ に、それぞれ変換されるとする。ここに、 $a_0 = \sqrt{1 + (v_{d0}/u_{d0})^2}$ として、 $z_{d0} = z_{u0} / [a_0 \cos(\theta_u - \theta_d) \cdot dB_d/dB_u]$ 、 $u_{d0} = u(z_{u0}) \cos(\theta_u - \theta_d)$ と仮定される。従って粒子間力は、その表示式⁷⁾を参照して

$$F_{dx}^g = a_0 F_{ux}^g (dy_d/dy_u)^3 \cos^5(\theta_u - \theta_d) \quad (4)$$

$$F_{dy}^g = (v_{d0}/u_{d0}) F_{dx}^g \quad (5)$$

と近似される。ここに、幅の拡大率 $dy_d/dy_u = a_0 (dB_d/dB_u)$ である。また、粒子間力は、堆積域突入直後から停止に至るまで時間的に一定と仮定している。式(1)、(4)、(5)を式(2)、(3)に代入すると、流体力の役割は粒子間力に比べ小さく、流体力を含む項は互いに相殺し合うので近似的に次式を得る。

$$d^2x/dt^2 = -g/(1 + \rho/2\sigma) \{ a_0 \left(\frac{dy_d}{dy_u} \right)^3 \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) - \sin\theta_d \} = -G_x \quad (6)$$

$$d^2y/dt^2 = -g/(1 + \rho/2\sigma) \{ a_0 \left(\frac{dy_d}{dy_u} \right)^3 \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) \left(\frac{v_{d0}}{u_{d0}} \right) \} = -G_y \quad (7)$$

幅の急拡がない、勾配急減のみによる堆積においては、 $dy_d/dy_u = 1$ 、 $v_{d0} = 0$ となるため、上式(6)は椿・橋本⁴⁾の求めた式と一致する。

初期条件 $t = 0$ で $x = 0$ 、 $dx/dt = u_{d0}$ 、 $y = y_{d0}$ 、 $dy/dt = v_{d0}$ のもとで式(6)、(7)を解くと、粒子の x_d 、 y_d 方向の速度がそれぞれ0となる時間 t_x 、 t_y および、その停止距離 x_{sp} 、 y_{sp} はそれぞれ

$$t_x = u(z_{u0}) \cos(\theta_u - \theta_d) / G_x \quad (8) \quad t_y = v_{d0} / G_y \quad (8')$$

$$x_{sp} = u^2(z_{u0}) \cos^2(\theta_u - \theta_d) / (2G_x) \quad (9) \quad y_{sp} = v_{d0}^2 / (2G_y) + y_{d0} \quad (9')$$

さて、問題は、上式に含まれる dy_d/dy_u や v_{d0}/u_{d0} の評価である。ここでは、平均停止距離の実験値が式(9)、(9')を満足するように逆算する方法が取られる。まず、前者は、横断方向の水面形を

$$H/H_0 = \{ 1 - (2y_{d0}/B_d) K_2 \}^{K_1} \quad (10)$$

と仮定し、連続条件を用いて求めると

$$\frac{dy_d}{dy_u} = \beta \{ 1 - Y_{d0}^{K_2} \}^{-K_1} \quad (11)$$

となる。ここに、上流側急勾配水路における水深を h として

$$\left. \begin{aligned} \beta &= h / \{ H_0 \cos(\theta_u - \theta_d) \} \\ Y_{d0} &= 2y_{d0} / B_d \\ \frac{y_u}{B_u} &= \frac{1}{2} \int_0^{Y_{d0}} (1 - Y_d^{K_2})^{K_1} dY_d / \int_0^1 (1 - Y_d^{K_2})^{K_1} dY_d \end{aligned} \right\} \quad (11')$$

である。幅の拡大率 dy_d/dy_u は $Y_{d0} = 2y_{d0}/B_d$ を媒介にして y_u の関数になっている。一方、 x_d 方向の平均停止距離の実験値を式(9)に代入すると、 G_x 中の $a_0^{1/3} (dy_d/dy_u)$ を逆算することができ、その結果が図-11に示されている。 a_0 を1と近似して式(11)と比較すると、 $\theta_u = 16^\circ$ では $K_1 = 1/4$ 、 $K_2 = 2.0$ 、 $\beta = 1.2$ が適していることが分かる。

次に、 v_{d0}/u_{d0} については、 y_d 方向の平均停止距離の実験値を式(9')に代入して求めることができる。その結果が図-12である。いずれの勾配においてもほぼ、

$$v_{d0}/u_{d0} = \gamma y_u / B_u \quad (12)$$

の関係を満たしている。ここに、 γ は比例定数である。

図-3, 4, 5の曲線は、上で評価された諸係数値を用いて式(9), (9')より求めた計算結果である。平均停止距離の評価式として式(9), (9')がほぼ妥当であることが分かる。なお、式(9), (9')は表面粒子について検証されたに過ぎないが、これらの式が内部の粒子にも適用できるものと仮定して、以下では考察を行う。

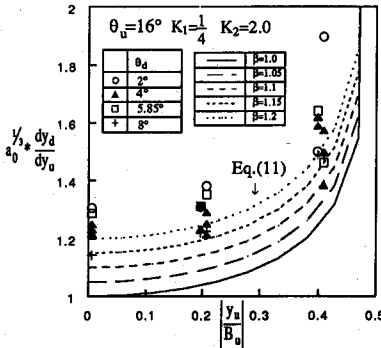


図-1 1 幅の拡大率と粒子投入位置との関係

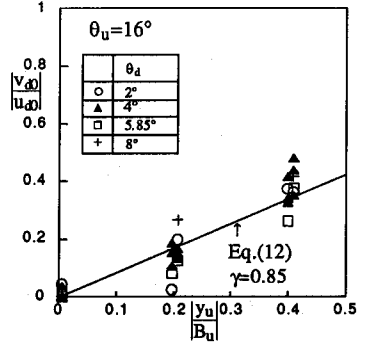


図-1 2 粒子の初速度成分比

4. 土石流の初期堆積形状に関する考察

図-1 3 に示すように、上流側水路の微小断面 $z_u \sim z_u + dz_u$, $y_u \sim y_u + dy_u$ を濃度 C , 速度 $u(z_u)$ で通過した粒子群は、勾配 θ_d の堆積水路において平均停止距離 $(\bar{x}_d, \bar{y}_d)$ のまわりに2次元確率密度関数 $p_{zu, yu}(x_d, y_d)$ に従って停止するものとする。このとき、粒子群が下流側水路の微小平面 $x_d \sim x_d + dx_d$, $y_d \sim y_d + dy_d$ に停止する確率は $p_{zu, yu}(x_d, y_d) dx_d dy_d$ となる。堆積路上 (x_d, y_d) において流入位置 (z_u, y_u) に起源をもつ粒子の堆積高を $\delta z_{zu, yu}$ 、堆積層における粒子濃度を C_* とおくと、砂の保存式は

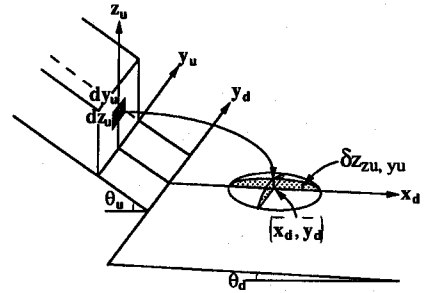


図-1 3 土砂粒子の堆積モデル

$$C_* \frac{\partial}{\partial t} (\delta z_{zu, yu}) dx_d dy_d = u(z_u) C(z_u) dz_u dy_u p_{zu, yu}(x_d, y_d) dx_d dy_d \quad (13)$$

となる。上式を時間 t で積分し、堆積開始時間を t_{sp} とおくと

$$\delta z_{zu, yu} = \frac{C(z_u)}{C_*} u(z_u) (t - t_{sp}) p_{zu, yu}(x_d, y_d) dz_u dy_u \quad (14)$$

となる。 (x_d, y_d) の位置には、上流側断面の $z_u = d/2 \sim h$, $y_u = -B_u/2 \sim B_u/2$ の範囲の様々な高さから流入してきた粒子が停止するので、その範囲に渡って式(14)を積分すると (x_d, y_d) の位置における堆積高 z を次式のように求めることができる。

$$z = \int_{d/2}^h \int_{-B_u/2}^{B_u/2} \frac{C(z_u)}{C_*} u(z_u) (t - t_{sp}) p_{zu, yu}(x_d, y_d) dz_u dy_u \quad (15)$$

さて、堆積開始時間 t_{sp} は、粒子の停止に要する時間であるから、式(8), (8')で与えられる t_x, t_y のいずれか大きい方である。 $t_x > t_y$ であるから、 $t_{sp} = t_x$ とおける。停止確率密度関数 $p_{zu, yu}(x_d, y_d)$ としては2次元正規分布を仮定し、次式で与えられる。

$$p_{zu, yu}(x_d, y_d) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-R_{xy}^2} \sigma_x \sigma_y} \exp \left[-\frac{1}{2(1-R_{xy}^2)} \left(\frac{(x_d - \bar{x}_d)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2R_{xy}(x_d - \bar{x}_d)(y_d - \bar{y}_d)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y_d - \bar{y}_d)^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (16)$$

式(15)において、 x_d 方向の変動係数、 y_d 方向の標準偏差、相関係数を、2章の実験からそれぞれ $\alpha_x = \sigma_x / \bar{x}_d = 0.3$, $\sigma_y = 3.5$ cm, $R_{xy} = y_u / B_u$ において、堆積高 z を計算すると図-14のようになる。なお、簡単のため、濃度分布は一様と仮定し、流速分布は高橋の式⁸⁾を用いた。また、土砂濃度 C , 水深 h , 表面流速 u_s はあらかじめ実験を行って求められており、 $C = 0.39$, $h = 3$ cm,

$u_s = 200$ cm/s とおいた。堆積形状の実験値は、土石流の流入を停止

して測定しているため、必ずしも正確ではないが、計算値とは概ね合っている。注目すべきことに、計算値が水路中央に沿って低くなっている。これは、その部分が周辺より流動性が良いため、堆積に遅れが生じているためである。

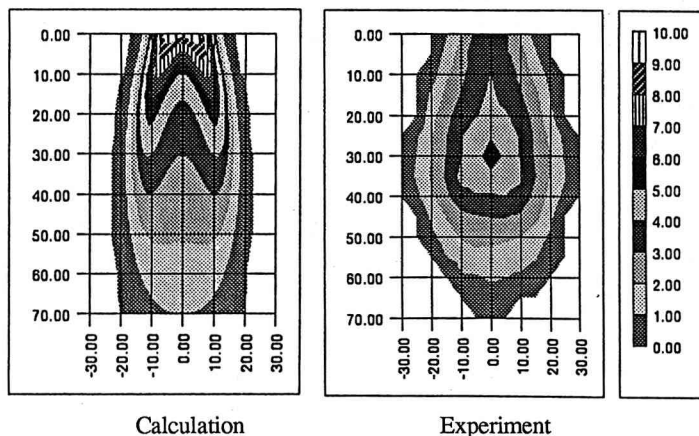


図-14 土石流の堆積形状の等高線 (単位: cm)
($\theta_u = 16^\circ$, $\theta_d = 4^\circ$, $t = 3.6$ sec)

5. 結論

土石流の堆積過程において粒子の停止距離に着目した実験を行い、その確率特性を調べるとともに、平均停止距離の評価式を理論的に誘導した。その式には実験係数が含まれるものの、実験結果を概ね説明できることが分かった。この成果を基にして土石流の堆積形状の計算式を導いた。計算値は水路中央に沿って比較的低い値を示し、注目すべき結果となっている。今後は十分に時間が経過した場合の堆積形状の計算について、検討を進めていきたい。

最後に、実験やデータ整理に際し、松岡雅博(現・建設省)、峯敏雄(現・電源開発株)、高尾直徳(現・北九州市)、および本学部学生の木藤賢一の4氏に多大の助力を受けた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋保・辻本浩史: 土石流氾濫、堆積のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第27号B-2, 1983.
- 2) 高橋保・中川一・山路昭彦: 土石流氾濫危険範囲の指定法に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第30号B-2, 1987.
- 3) 芦田和男・江頭進治・矢島啓: 土石流の流動・堆積機構, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, 1988.
- 4) 椿東一郎・橋本晴行: 土石流の勾配急変による堆積機構, 第28回水理講演会論文集, 1984.
- 5) 橋本晴行・溜池博文・元野一生・椿東一郎: ラグランジュ的手法を用いた土石流の2次元堆積形状の計算法, 第29回水理講演会論文集, 1985.
- 6) Hashimoto, H. and Hirano, M.: Model of Deposition of Grains from Debris flow, Hydraulics/Hydrology of Arid Lands. Proc. of Int'l Symposium, ASCE, 1990.
- 7) 橋本晴行・椿東一郎: 土石流における逆グレイディング機構, 土木学会論文報告集, 第336号, 1983.
- 8) 高橋保: 土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, 1977.