

# 三次元数値移動床による土石流堆積過程の 数値シミュレーション

3D NUMERICAL MOVABLE BED FOR FORMATION PROCESS OF DEBRIS FAN

原田英治<sup>1</sup>・後藤仁志<sup>2</sup>・酒井哲郎<sup>3</sup>・大野正博<sup>4</sup>

Eiji HARADA, Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI and Masahiro OHNO

<sup>1</sup>正会員 工博 日本学術振興会特別研究員 京都大学工学研究科土木工学専攻  
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>4</sup>学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木工学専攻 (同上)

In the formation process of debris fan, the interaction between sediment particles is one of the most important factors. In this study, the formation process of debris fan is simulated by using 3D movable bed simulator which is able to express the interaction between particles with tracking individual particles. The mechanism of the formation process of the debris fan due to the sudden decrease of bottom slope and the expansion of the width of channel is investigated through the simulation results. The deposition process found in the simulation data reproduces well the characteristics of previous experimental data.

**Key Words:** debris fan, debris flow, Distinct Element Method, 3D Movable Bed Simulator

## 1. 緒言

土石流による激甚災害は、溪流内ではなく、溪流の出口、すなわち土石流扇状地で多く発生することが知られている<sup>1)</sup>。溪流内では流軸方向の運動が支配的で、断面二次元的な構造が分かれば、流動特性の大略は把握できる。特に平衡状態では、いわゆる流動則の議論が土石流を理解する根幹を成すとの立場から活発な研究が展開され、高橋<sup>2)</sup>、椿・橋本<sup>3)</sup>によるDilatant流体モデル、芦田・江頭ら<sup>4)</sup>の擬Dilatant流体モデルに代表される多くの流動則が提案されている。

溪流内の平衡流動に対して定式化された流動則は、扇状地における土石流の停止過程に適用され、土石流危険区域の予測に活用されている。しかし、土石流扇状地の形成過程では、流路勾配の急変、流路幅の急拡といった境界条件の急変が存在し、その流動・堆積には時・空間的非平衡性が顕在化する。非平衡過程に平衡流動則を用いることの妥当性に関しては、やはり検討が必要であろう。

また、停止過程をモデル化するには、土石流の減速要因(移動抵抗)が必要となるが、擬Dilatant流体

モデルに基づく江頭ら<sup>5)</sup>の研究では、降伏応力が減速要因として機能し、高橋<sup>1)</sup>・<sup>6)</sup>によるDilatant流体モデルに基づく研究では、底面摩擦力が減速要因として想定されている。これら既往の流動則は、水と砂礫の混合物を前提とする混合体モデルの範疇に属するから、砂礫間の衝突や砂礫と底面の衝突といった素過程の重畳として現象全体を再構成することができないので、エネルギー散逸に繋がる何らかの付加的要因(土粒子間の相互作用を空間積分して得られる力)を導入することとなる。

砂防施設の建設というハードな対策に加えて、土石流危険区域の開示と区域内の避難計画・訓練といったソフトな対策への迅速な対応を求められる中で、理論的根拠のある危険区域予測という課題に応えるには、平衡流動則の援用は、合理的で妥当な選択であったと考えられるが、平衡流動を対象としたモデルの表現力の限界に起因する予測制度の限界に関しても適正に把握し、評価しておく必要があるだろう。また、溪流の出口は、平均河床勾配が急変すると同時に、土砂流が溪流側壁の拘束から一瞬にして開放される運動の急変点であり、扇状地での堆積過程は顕著な三次元性を呈する。

このような状況に対応するためには、できる限り素過程に忠実なモデルを用いた土石流扇状地の形成過程の直接計算が有効である。本研究では、三次元数値移動床（個別要素法型粒状体モデル）<sup>7)</sup>を用いて、土石流の堆積過程の数値シミュレーションを実施する。シミュレーション結果を三次元グラフィックスとして取りまとめ、堆積プロセスを詳細に示すとともに、室内実験・現地観測では計測することが困難な流動堆積層内部の情報（粒子間の衝突・接触応力）に関しても検討する。

## 2. シミュレーションの概要

### (1) 数値移動床

砂粒子の運動は、粒子間衝突を陽に取り扱える数値移動床<sup>7)</sup>（個別要素法型の粒状体モデル）によって記述した。土石流の運動は、水と粒子が充分に混合された状態を想定し、周囲水を連行した土砂粒子（付加質量を考慮）が、水中を運動する状態（浮力の作用のみ考慮）を想定した。単一粒子の運動は、並進および回転の運動方程式

$$\rho \left( \frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_{pint} + \mathbf{F}_{gr} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma \pi d^5}{60} \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \mathbf{T} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{gr} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\rho \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) A_3 d^3 g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

を用いて記述した。ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $\sigma$ ：土砂粒子の密度、 $C_M$ ：付加質量係数（ $C_M=0.5$ ）、 $A_3$ ：土砂粒子の三次元形状係数（球を想定し、 $A_3=\pi/6$ ）、 $d$ ：土砂粒子径、 $\mathbf{u}_p$ ：土砂粒子の移動速度ベクトル、 $t$ ：時間、 $\mathbf{F}_{pint}$ ：土砂粒子間相互作用ベクトル、 $\mathbf{F}_{gr}$ ：重力ベクトル、 $\pi$ ：円周率、 $\boldsymbol{\omega}_p$ ：土砂粒子の回転速度ベクトル、 $\mathbf{T}$ ：土砂粒子に作用するトルクである。なお、水と土砂粒子が充分に混合された状態を対象としているため、周囲水の土砂粒子への影響は付加質量力と浮力のみとして、水・土砂粒子間の相対速度がゼロとして取扱い、流体抗力項を方程式中に導入していない。粒子間相互作用力は接触粒子間にバネ-ダッシュポット系を導入して記述した。これらの砂粒子間作用力の評価等については紙面の都合上言及できないが、モデルの詳細については後藤ら<sup>7)</sup>を参照されたい。また、本研究で用いたモデル定

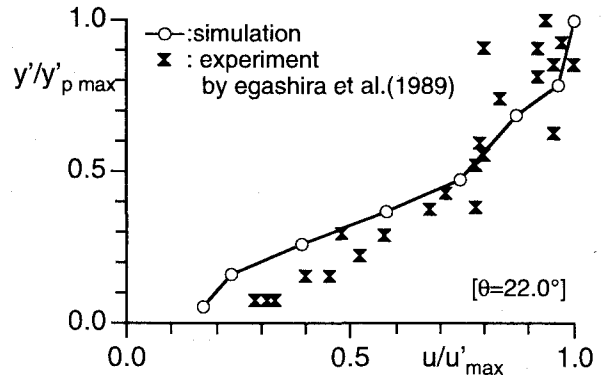


図-1 流速分布

数は、粒状体モデルで用いる計算時間ステップ  $\Delta t=1.0 \times 10^{-3}(\text{s})$  および粒径  $d=2.46 \text{ mm}$  の粒子に対して、後藤ら<sup>8)</sup>の設定法に準拠して、法線および接線方向のバネとダッシュポットについて  $k_n=10.08(\text{N/m})$ 、 $k_s=3.88(\text{N/m})$ 、 $\eta_n=3.28 \times 10^{-4}(\text{Ns/m})$ 、 $\eta_s=1.99 \times 10^{-4}(\text{Ns/m})$  に設定した。これらのモデル定数は、既往の実験結果から得られている平衡流動状態における土石流の流動特性の再現性を重視して選択されたものである。図-1は、江頭ら<sup>9)</sup>の実験結果と本シミュレーションにおける流路内の平衡流動区間における土石流の平均流速分布の比較を示している。ここに、 $y'$ ：流路床と直交する軸（図-2参照）、 $y'_{pmax}$ ： $y'$ 軸方向の土砂層厚、 $u$ ： $x'$ 軸方向（図-2参照）の土石流の流速、 $u'_{max}$ ：土石流の流速の最大値である。底面付近のスリップ速度がやや小さく見積られるものの、実験結果に見られる流速分布形がシミュレーションでも概ね良好に示された。また、断面平均濃度は実験結果とほぼ一致することは別途確認している。これらの特性の一致は、上記のモデル定数選択の妥当性を示すものと考えられる。

### (2) 計算条件

粒状体モデルを用いて、上流側直線流路から重力を駆動力として土石流を流下させ、流路から流出した土石流が下流側の平面床で停止・堆積する過程を計算した。

計算領域を図-2示す。63733個の固定粒子を用いて上流側一様勾配直線流路および下流側平面床を形成し、直線流路の上端部には土砂粒子（比重2.65）29134個を用い、 $(x' \times y' \times z')=(0.13 \text{ m} \times 0.03 \text{ m} \times 0.10 \text{ m})$ の土砂堆積層を配置した。総粒子数は、92867個となる。なお、粒子は粒径  $d=2.64 \text{ mm}$  の均一粒径であり、上流側一様勾配流路床、下流側平面床には、図-3に示すように、粒径の0.073倍程度の凹凸を設けたこととなる。

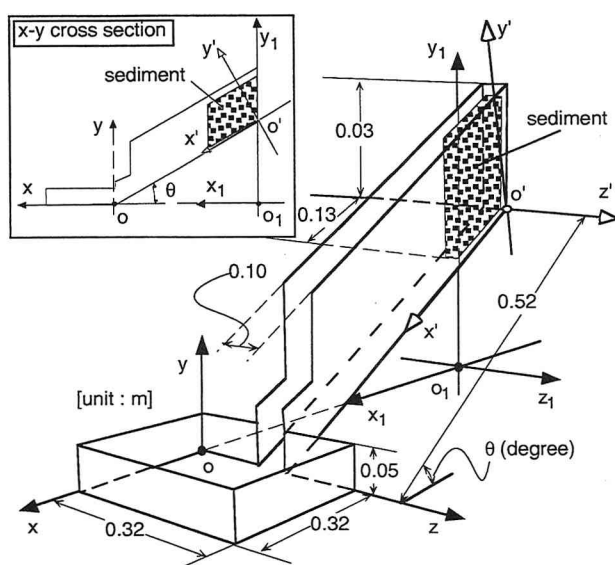


図-2 計算領域

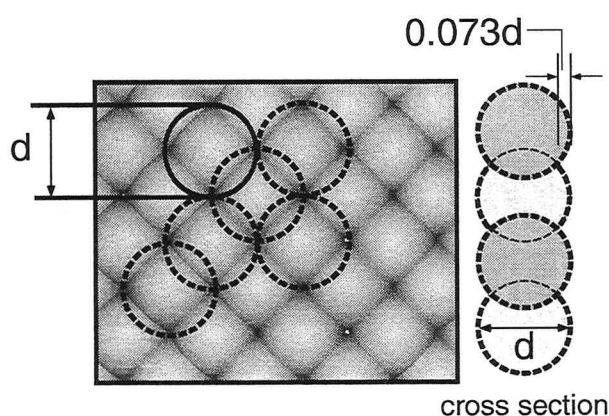


図-3 壁面粗度

### 3. 土石流の堆積機構

#### (1) 堆積過程

図-4に傾斜角 $\theta=22.0^\circ$ の流路を流下した土石流の堆積過程を示す。まず、時刻 $t=0.3s$ で直線流路を流下してきた土石流のフロントは、下流に向かって薄く伸び、路床勾配変化点に接近する。時刻 $t=0.4s$ では、土石流の先端が平面床に叩き付けられ、弧を描くように、主として $x$ 軸方向に高速で飛散している。その後、時刻 $t=1.0s$ で、土石流のフロントは、平面床との接続部での流路急拡に伴う側壁の拘束からの解放によって瞬時に放射状に拡大する。また、上流から供給される土砂粒子は $x$ 軸方向の運動量を保存して流路下端に到達するので、土石流前縁部の $x$ 軸方向への進行は、 $z$ 軸方向と比較して速やかで、流下方向にやや尖った形状を呈してくる(時刻 $t=2.0s$ )。さらに、上流からの土石流の供給によって、堆積層厚を増しながら徐々に堆積領域が拡大する(時刻 $t=3.0-4.0s$ )。

また、この頃、前方での土石流堆積による流動の不活発化に伴って、勾配変化点付近の土石流の堆積が促進され流動が閉塞状態に陥り、上流からの土石流の進行が妨げる傾向が見られる。時刻 $t=4.0s$ 付近で堆積層厚のピークを迎えたあと、上流からの土石流の供給の減少のため、時刻 $t=5.0s$ 付近になると堆積層厚の発達が収束し、その後、ゆっくりと堆積層厚を減少させながら、周囲へ僅かに堆積域を拡げ(時刻 $t=6.0-7.8s$ )、堆積が終了する。

土石流の堆積層厚の流路軸( $x$ 軸)方向の特性を見易く表示するために、 $x$ - $y$ 面上に投影された粒子分布を図-5に示す。時刻 $t=0.3s$ で土石流のフロントが路床勾配変化点に到達し、時刻 $t=0.4s$ に見られるように、土石流と平面床との衝突によって、激しい粒子の飛散が発生し、前縁が高速で $x$ 軸方向に滑るように伸びていく。時刻 $t=1.0s$ から次第に堆積域が流路出口付近に形成されはじめ、堆積層厚が増加する。また、それに伴って流路出口付近での土石流の疎通が妨げられるようになり、時刻 $t=2.0s$ で示されるように上流側流路に流下してきた土砂が停溜する。その後、上流からの土石流の供給が進むと、平面床の堆積土砂が層厚を漸増しながら前進する(時刻 $t=3.0-4.0s$ )。時刻 $t=4.0s$ 付近で堆積層厚のピークを示した後は、ゆるやかに堆積層厚を減少させながら全体に拡大し、堆積を完了する。また、時刻 $t=5.0-7.0s$ に示されているように、土石流の流路への遡上が確認される。静止画像からは判別し難いが、このシミュレーション結果をアニメーションにして確認したところ、この遡上は平面床の土砂堆積停止をトリガーとして発生することが確認できた。

#### (2) 堆積の内部機構

土石流の堆積は、底面との摩擦や土粒間衝突によるエネルギー散逸によって、運動エネルギーが消費されることが原因で生じるが、それら进行评估するために、図-6に接触粒子間に働く法線方向の接触力を示す。接触力は円柱で示し、円柱の太さおよび向きが接触力のレベルと作用方向をそれぞれ表している。表示の対象は、流路中央部の $x$ - $y$ 面を中心として $z$ 軸方向に粒径程度の幅を有する帯状の領域に存在する粒子に作用する接触力とした。時刻 $t=2.0s$ および $t=3.0s$ では勾配急変部の底面付近で土石流の流動方向に接触力の集中が生じている。特に、水平床に堆積した土砂に後続の土石流が乗り上げる時に接触力の集中が勾配急変部一帯に生じることが時刻 $t=3.0s$ の図から理解できる。時刻 $t=4.0s$ 以降は顕著な接触力の集中は確認されないが、底面付近には接触力の極大点が多く見られ、これらの点が支点となって接触力鎖が堆積層内に伸びて堆積層の停止と安定化を支えているものと考えられる。このように、勾配急変部に

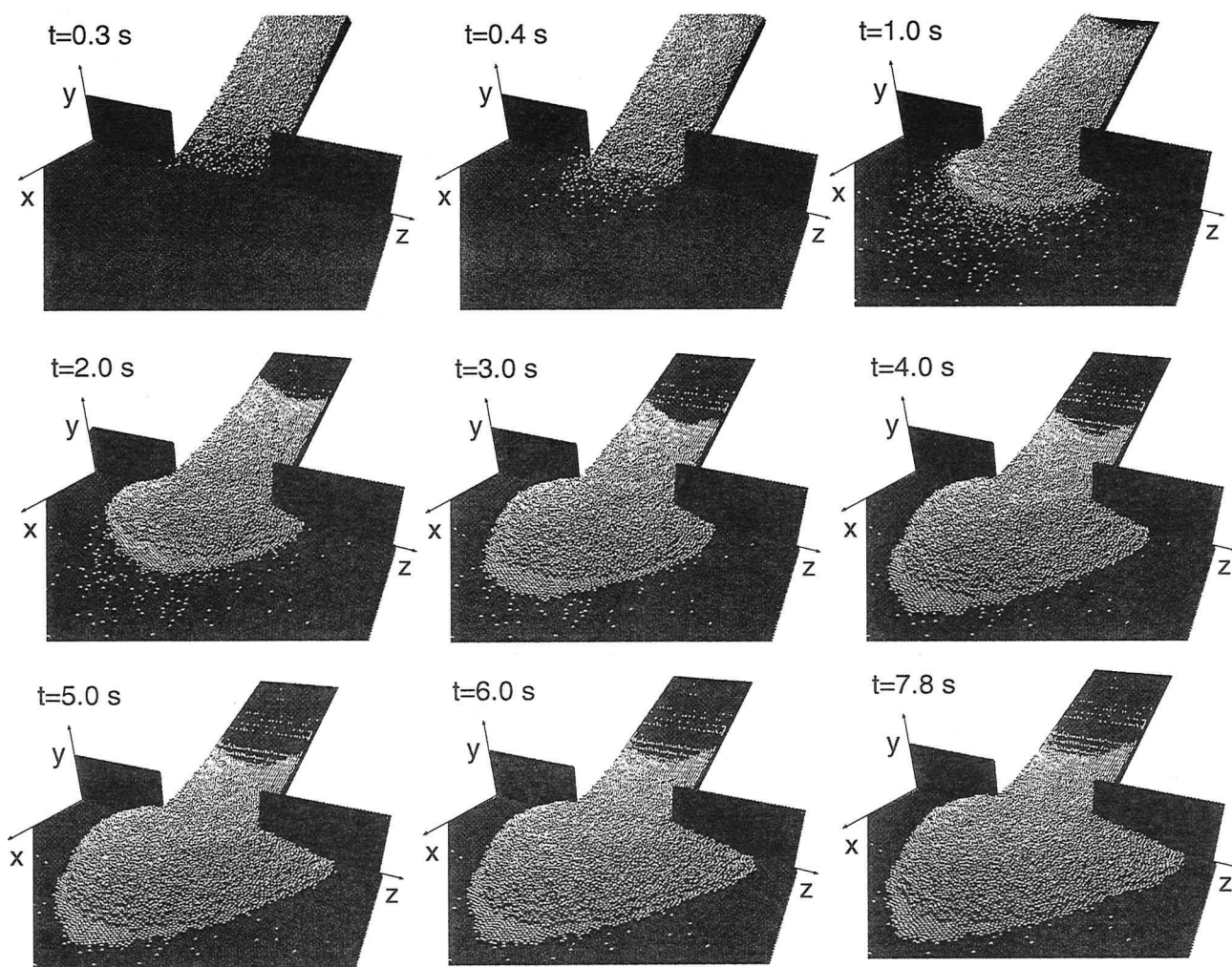


図-4 土石流扇状地の形成過程

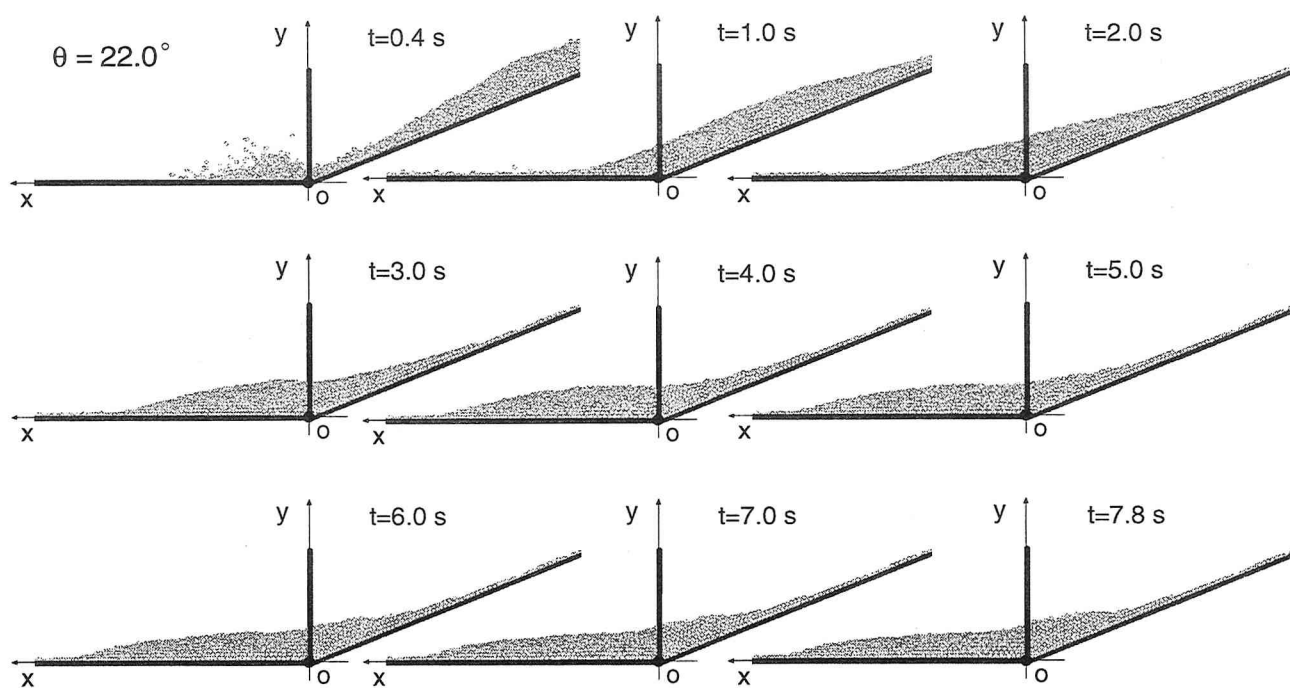


図-5 堆積過程のスナップショット (x-y plane)

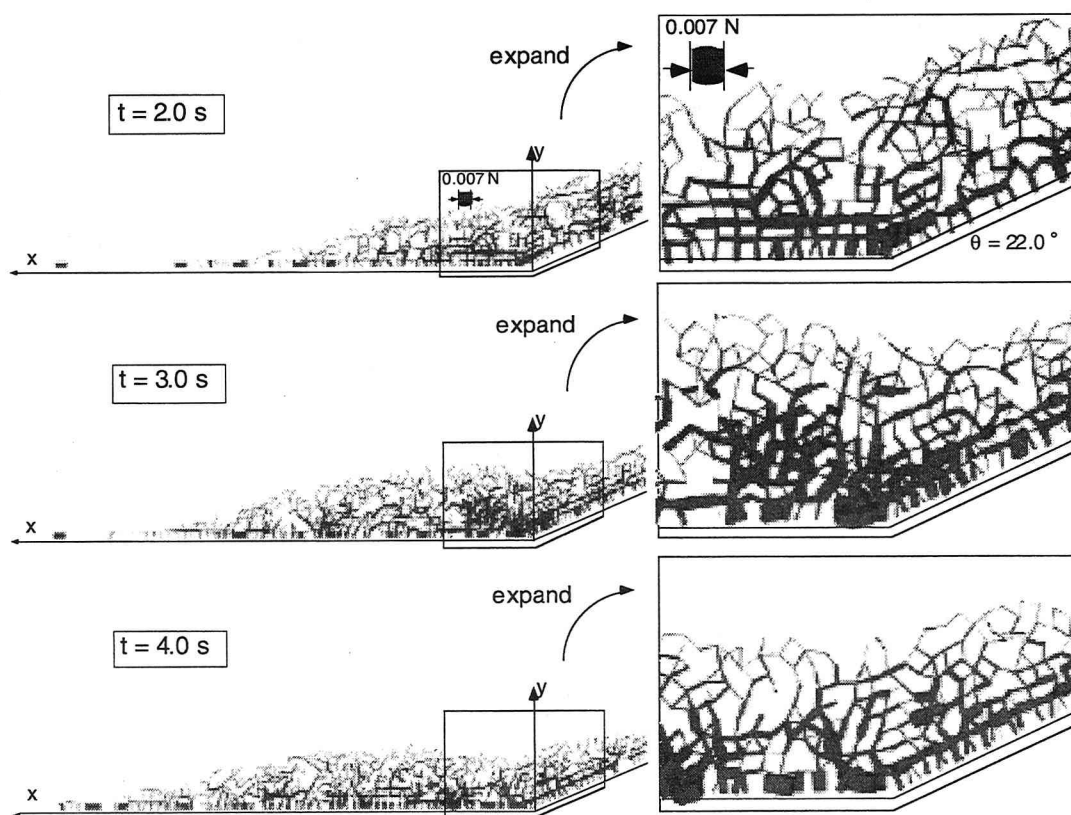


図-6 粒子間接触力分布

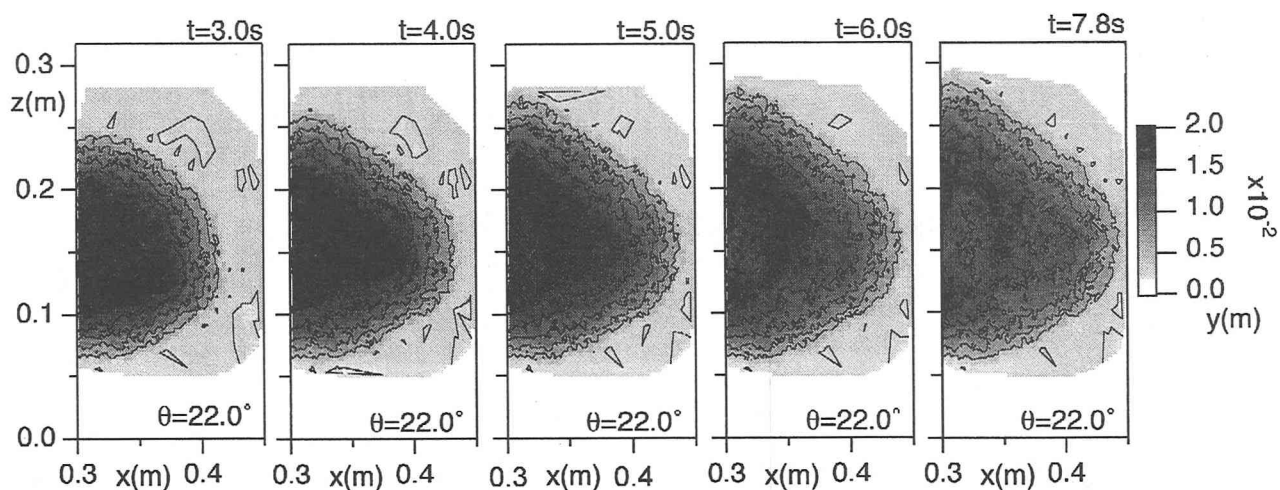


図-7 堆積形状の時間変化

見られる粒子間の大きな相互作用力や底面と土砂の間に作用する接触力が視覚的に示され、実験からは得ることのできない堆積層内部の力学的構造についての情報が得られる点はこの種の特徴と言ってよいだろう。

### (3) 扇状地形成過程

土石流扇状地の平面的広がりや堆積層厚の特性を明確にするために、土石流堆積層厚の等値線を図-7に示す。時刻 $t=3.0\text{--}4.0\text{s}$ 付近で大きな堆積層厚を流路

出口付近で呈するが、その後、上流からの土石流の供給の減少によって堆積層厚の増加は沈静化し、時刻 $t=4.0\text{s}$ 以降から最終形状に至るまでには、堆積域の緩やかな放射状の拡大による、堆積層厚の減少が僅かに見られるに過ぎない。興味深いことに、堆積域は流路中央軸に対して非対称の堆積形状を示している。この種の非対称性（堆積の偏在性）は既往の実験参考文献で示されている傾向に準じた結果になっている。

次に、流路傾斜角 $\theta=15.0^\circ$ と $30.0^\circ$ の場合について

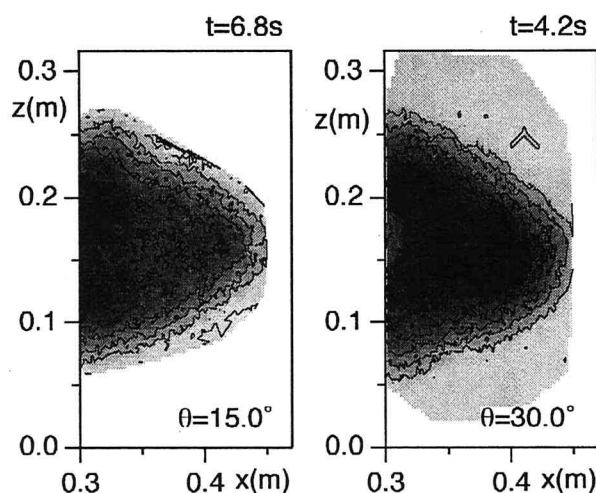


図-8 安定堆積形状の比較

のシミュレーションを実施して、流路傾斜角の違いによる堆積形状を検討した結果を、図-8に示す。なお、凡例は図-7と同様である。 $\theta=30.0^\circ$ の結果では、堆積層前縁の先端付近に小山( $x=0.37\text{m}$ ,  $z=0.15\text{m}$ 近傍のピーク)ができるが、流路勾配が小さい $\theta=15.0^\circ$ の場合は勾配変化点付近にピークが見られ、流路傾斜角が急になるとピークの出現位置が出口付近から遠ざかる傾向を示している。これは、高橋・辻本<sup>10)</sup>による実験において確認されている事実とも一致する。

#### 4. 結 語

本研究では、三次元数値移動床（個別要素法型の粒状体モデル）を用いて土石流の堆積過程のシミュレーションを実施した。土石流扇状地の形成過程を時間発展的に示すとともに、既往の実験で再現されていた堆積形状の非対称性や流路出口での土砂の停留を再現し、土石流堆積域推定への有効性の一端を明らかにした。

土石流の停止を規定する内部機構としては、(i)粒子間衝突および粒子・床面間衝突によるエネルギー散逸と(ii)水・土砂の分離による流動性の低下が挙げられるが、本モデルでは、前者に重点を置いて、前者のみで現象のディテールがどの程度説明できるかを取って検討した。今後は、固相・液相を個別に解

析する混相流的な観点を導入して、水・土砂の分離が表現可能なモデルへと改良を進める必要がある。

本研究で対象としたのは、単一の土石流による平面床上の堆積であるが、現実の扇状地形成には、間欠的に生じる複数の土石流が寄与している。扇状地形成プロセスでは、扇状地の二次侵食なども介在し、堆積事象の初期条件（元地形）が堆積事象にも影響を与えと考えられる。現地地形での予測問題への直接的な本モデルの貢献を念頭に置くと、土石流群の積み重ねで生じる扇状地の変化の予測への対応も重要である。これらの点に留意して、モデルの改良と汎用化に努力したい。

謝辞：本研究の遂行に際しては、第一著者が日本学術振興会から特別研究員としての補助を受けたことを記して、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 高橋 保・吉田 等：土石流の停止・堆積機構に関する研究 (1) -勾配の急変による堆積-, 京都大学防災研究所年報, 第22号 B-2, pp.315-328, 1979.
- 2) 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, pp.405-435, 1977.
- 3) 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, 土木学会論文集, 317号, pp.79-91, 1982.
- 4) 芦田和男・江頭進治・神谷 浩・佐々木浩：斜面における土塊の抵抗則と移動速度, 京都大学防災研究所年報, 28号B-2, pp.297-307, 1985.
- 5) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構, 第32回水理講演会論文集, pp.485-490, 1988.
- 6) 高橋 保：土石流の停止・堆積機構に関する研究 (3) -土石流扇状地の二次侵食-, 京都大学防災研究所年報, 第25号 B-2, pp.327-348, 1982.
- 7) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎：三次元個別要素法による数値移動床の一般化, 水工学論文集, 第46巻, pp.613-618, 2002.
- 8) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎：個別要素法に基づく移動床シミュレーターのモデル定数の最適化, 土木学会論文集, No.691/II-57, pp. 159-164, 2001.
- 9) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第32号 B-2, pp.487-501, 1989.
- 10) 高橋 保・辻本浩史：土石流氾濫・堆積の数値シミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第27号 B-2, pp.467-485, 1984.

(2002. 9. 30受付)