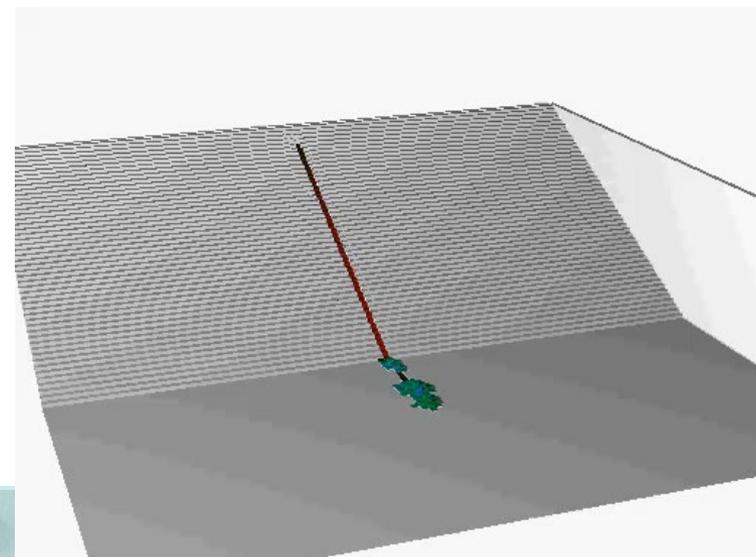
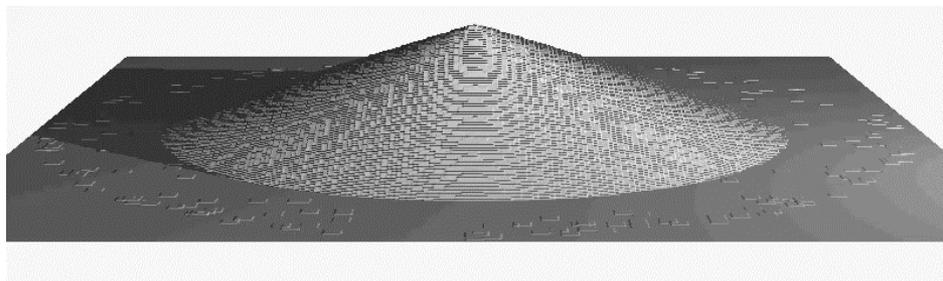


地形形成プロセス科学と連携した 土砂災害・洪水災害軽減工学研究

筑波大学 松島亘志



はじめに（災害現象に対する応用力学の役割）

近年の地球温暖化による土砂災害・洪水災害の激甚化
→土木工学の立場から、

- ・ より迅速で詳細な災害リスク情報の提供
 - ・ 長期対策の提案
- が求められている。



はじめに（災害現象に対する応用力学の役割）

■ 対象となる自然災害の特徴

(1) 土砂災害

地震or豪雨→斜面崩壊→長距離流動→構造物破壊

(2) 洪水災害

豪雨(広域)→長距離流下→堤防の破壊→広域浸水

(3) 津波災害

地震→波の長距離伝播→地形による増幅→堤防破壊
→広域浸水→構造物破壊

* 材料挙動としての複雑さ（固液混相体，材料分離等）

* 広い関連工学分野（地盤，河川，海岸，構造）

* 解析手法としての難しさ（広域・長時間）

→ **応用力学のチャレンジ**

2. 鍵となるイノベーション(1)

■ 国土基盤情報整備

地震情報○, 降雨情報○, 地形情報○,
地質情報△, 地下水情報×

地面の下の情報が絶対的に不足 (精度のボトルネック)

■ 基盤情報の有機的連携 ×

ex) リアルタイムの降雨情報→流況解析→情報提供

なぜ実現していないのか

→**広域評価の困難** (マルチスケールの問題)

→**リアルタイム評価の困難**

(情報伝達システムの未整備 + 計算時間の制約)

2. 鍵となるイノベーション(2)

■ 地形形成プロセス科学との連携

- ・ 現在の地形・地質がどのようにして形成されたのか

→ 地面の下の情報の推定

将来的な自然の脅威の予測 (→ 長期の国土計画)

この**地形形成プロセス**を**数値解析**したい
(Computational Geomorphology)

超長期(10,000年～)の問題 → **応用力学のチャレンジ**

3. スケール分離の方針

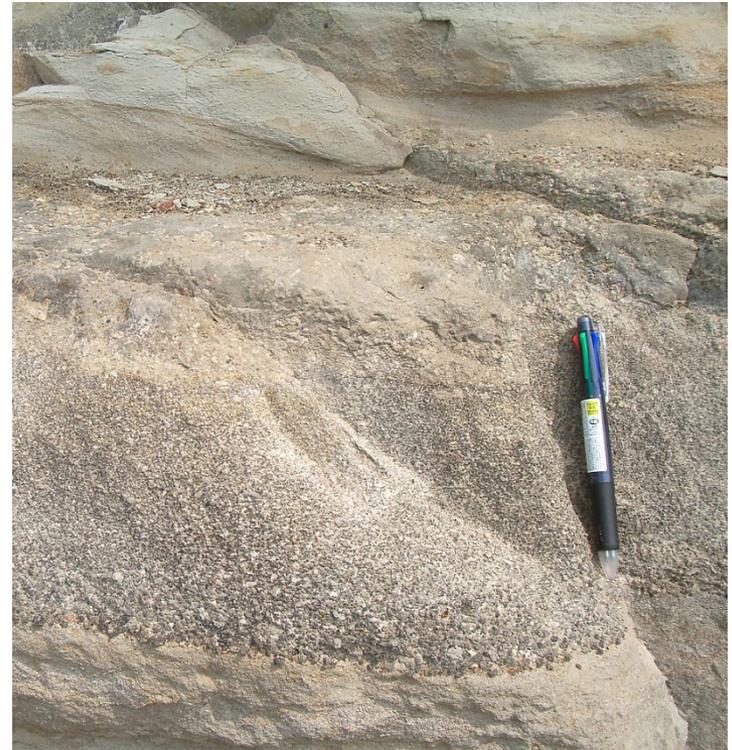
関連する物理現象

- 岩石の風化（凍結融解、化学的風化）
- 斜面崩壊、土石流
- 河川の侵食と堆積（侵食はゆっくり、堆積は一気）
- 土粒子の破碎と摩耗
- 圧密と固結
- プレートテクトニクス
- 気候変動による海水面変動
- 地震、火山噴火

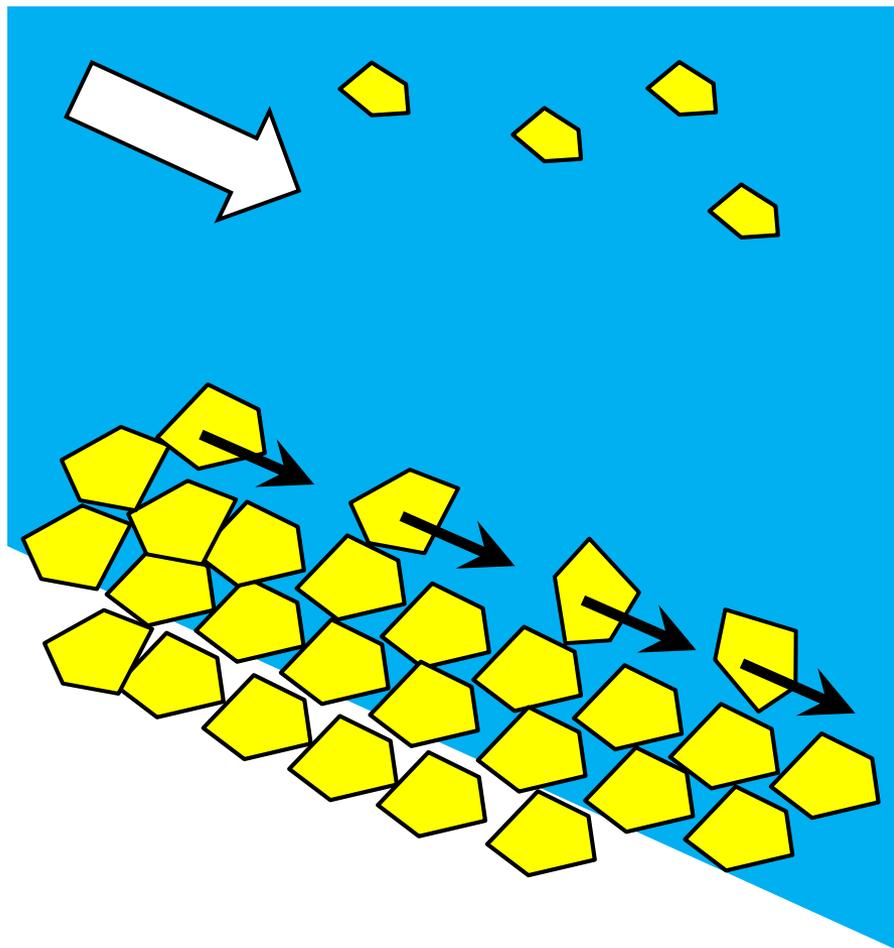
異なる空間・時間スケールの現象をどう扱うか？

イベント性

地層は数百年に1回の**大規模出水**によって一気に数十cm堆積する。
→何百万年の継続計算をする必要はない。



空間スケール（粒子スケール→土砂スケール）



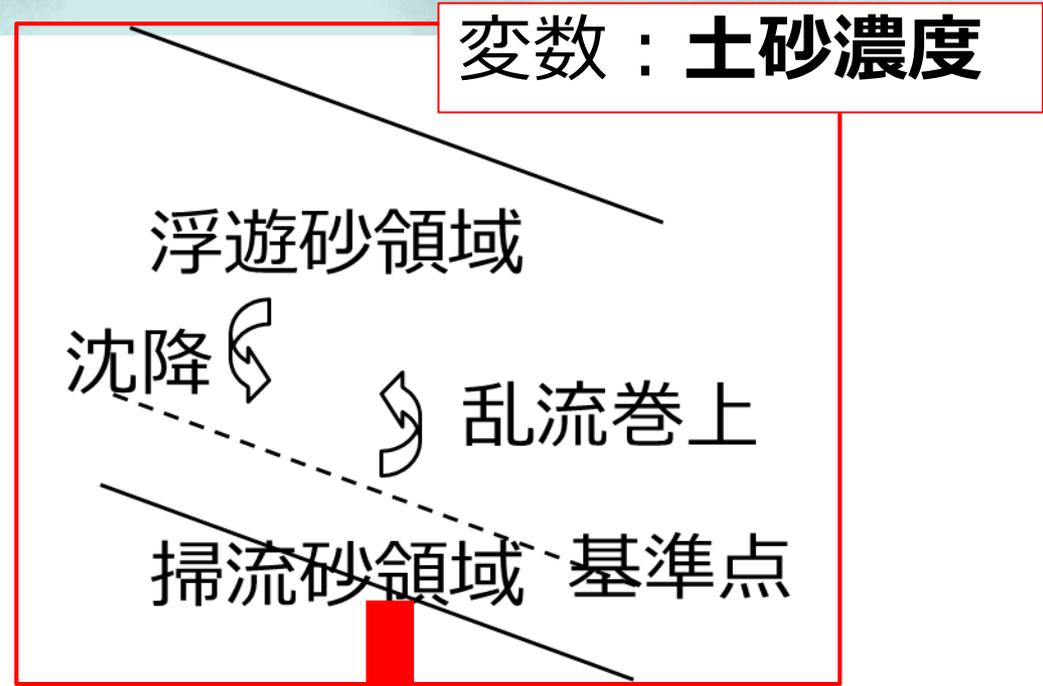
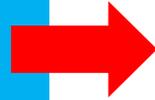
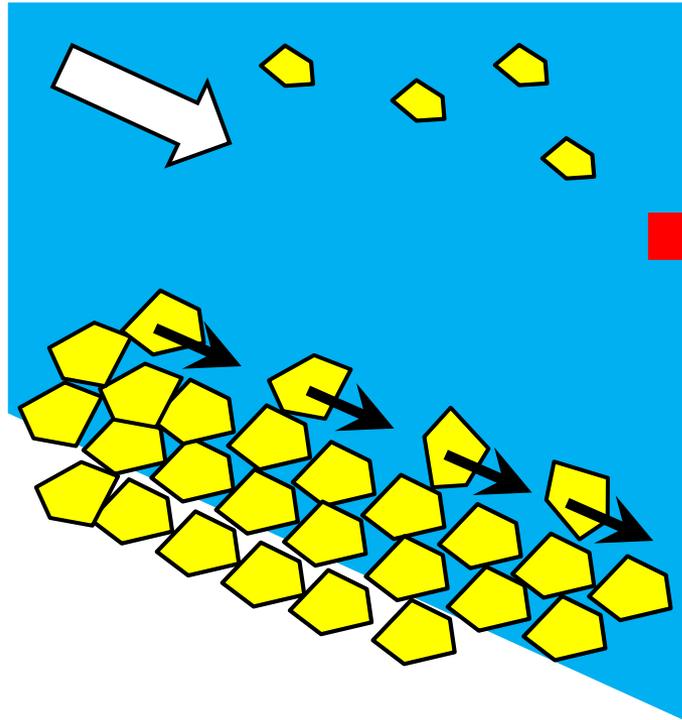
浮遊砂

流体と共に移動
→移動距離大

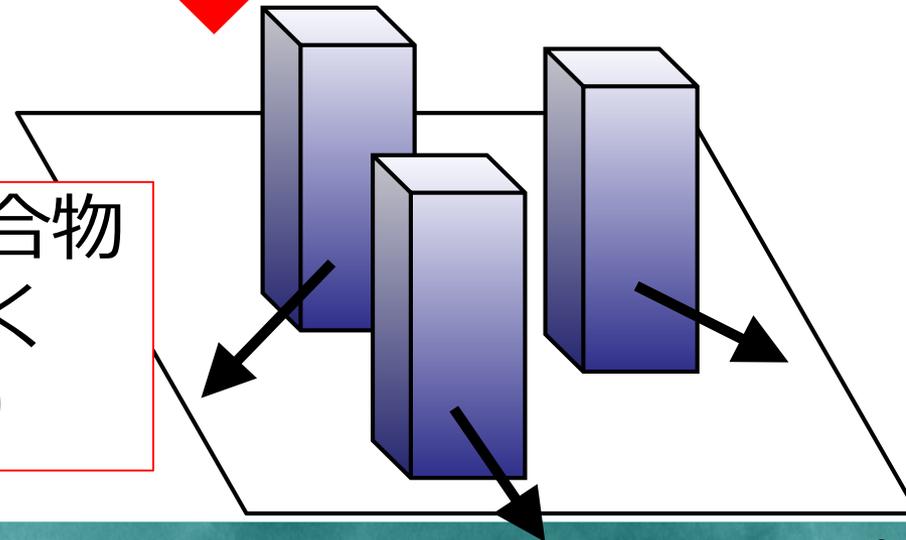
掃流砂

河床に接しながら
ゆっくり移動
→移動距離小

空間スケール（粒子スケール→土砂スケール）



土砂と流体の混合物
の柱の運動を解く
(準3次元解析)

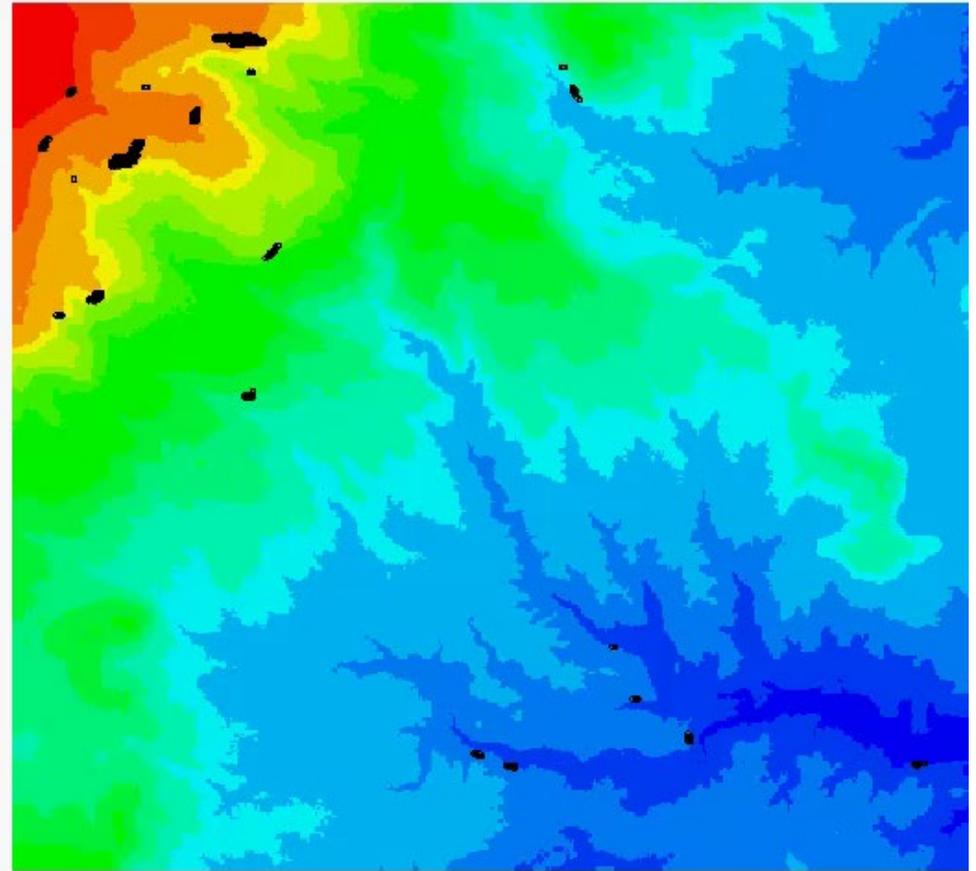


解析手法： 深さ方向積分粒子法(DIPM)

浅水方程式ベースの粒子法

(Hoang et al. 2008, Nakata et al. 2011, Zhang and Matsushima 2016)

- 粒子 = 土砂の柱
- 粒子に作用する力
 - 重力(傾斜方向)
 - 底面せん断応力
 - 水頭差による圧力
- 粒子ごとに土砂濃度を設定
侵食／堆積則により
地形を更新
- 急傾斜斜面の崩壊モデル

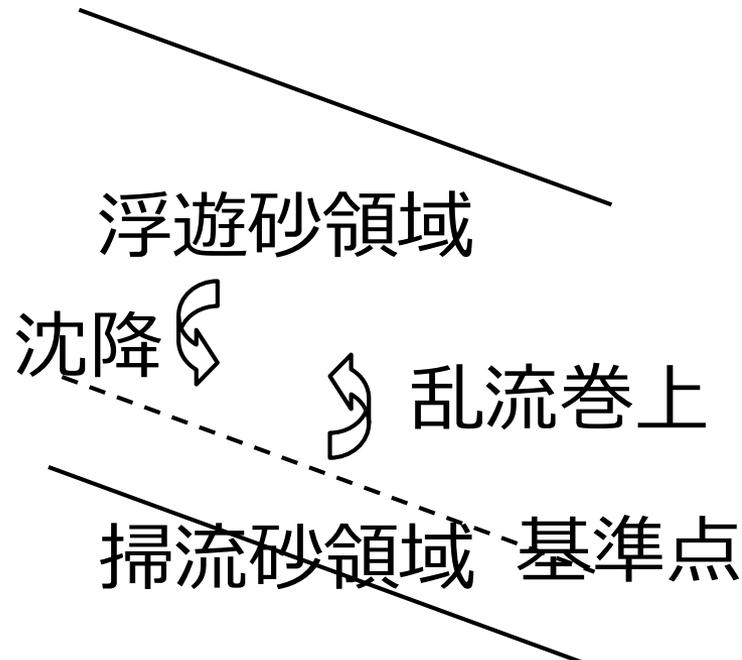


ドゾウ沢土石流
(岩手宮城内陸地震)

浮遊砂の輸送理論

関根：「移動床流れの水理学」，共立出版

- 基準高さを設定→掃流砂領域と浮遊砂領域に分ける
- 巻上げと沈降の収支で**平衡**浮遊砂濃度分布が決まる
- 現在の浮遊砂濃度との差で土砂が移動する



本研究では
浮遊砂モデルのみ
導入

平均流速： \bar{v}

粒径： D

粒子レイノルズ数：

$$R_{ep} = D\sqrt{(\rho_s / \rho_w - 1)gD / \nu}$$

底面せん断応力： τ_b (修正Manning)

粒子沈降速度： \hat{v}_0 (Rubey)

$$\tau_b = \left(\tau_{cr} \|\bar{v}\|^m + \rho g \frac{n^2}{R_h^{1/3}} \|\bar{v}\|^2 \right) \frac{\bar{v}}{\|\bar{v}\|}$$

$$\frac{\hat{v}_0}{\sqrt{(\rho_s / \rho_w - 1)gD}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36}{R_{ep}^2}} - \sqrt{\frac{36}{R_{ep}^2}}$$

摩擦速度： $u^* = \sqrt{\tau_b / \rho_w}$

基準深さ $z_a = 0.05h$ での濃度：

Rouse数： $Z = \hat{v}_0 / \kappa u^*$

$$c_a = \frac{\alpha Z^*}{1 + \frac{\alpha}{0.3} Z^*} \quad Z^* = \left(\frac{u^*}{\hat{v}_0} \right)^5 R_{ep}^3$$

Garcia - Parker

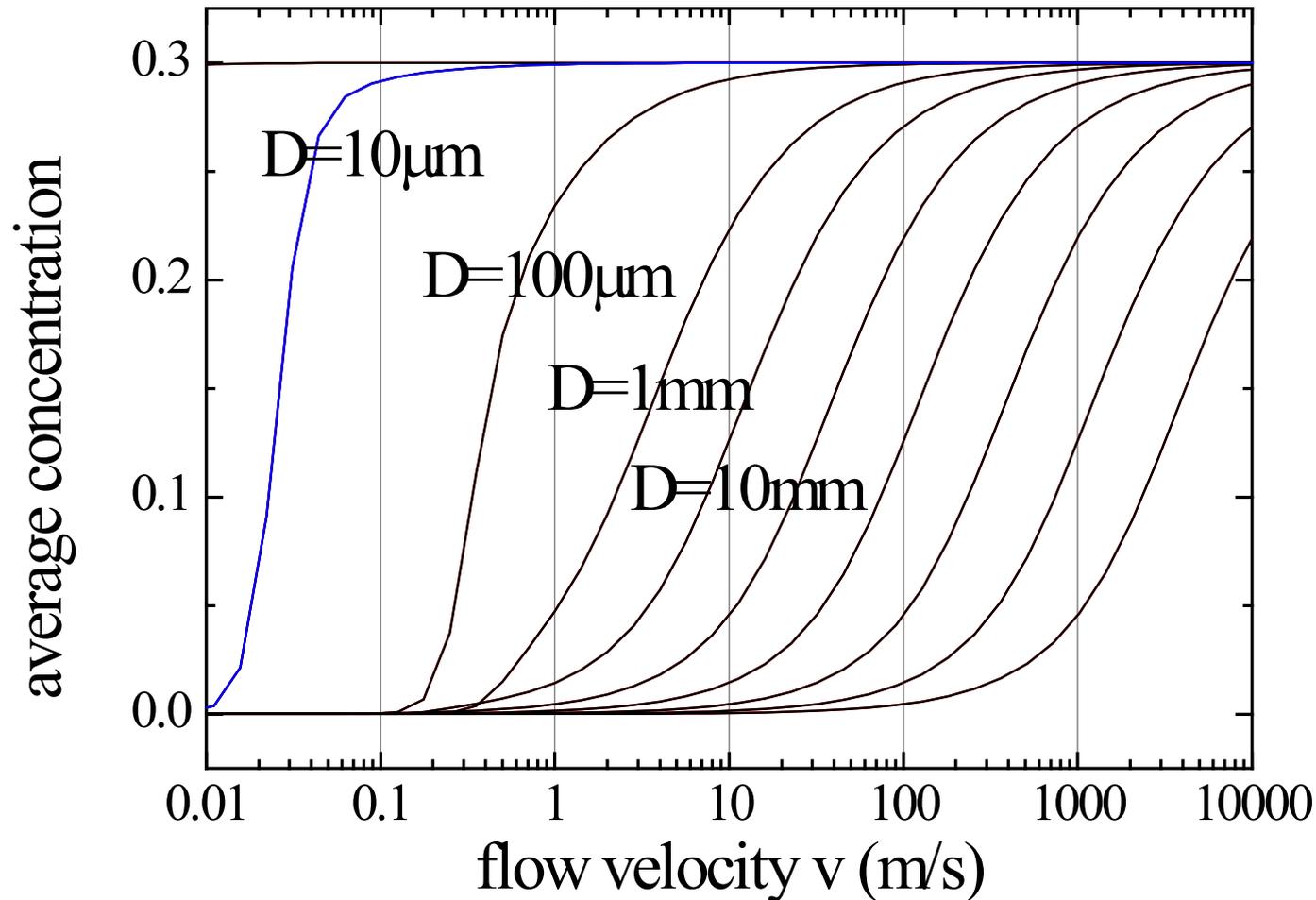
浮遊砂の平均平衡濃度(Lane - Kalinske)

$$\bar{c}_{eq} = c_a \left(-\frac{1}{6Z} \frac{h}{h - z_a} \right) \left[\exp \left(-6Z \left(1 - \frac{z_a}{h} \right) \right) - 1 \right]$$

カルマン定数： $\kappa = 0.4$

溶液の粘性係数： ν

粒径，流速→浮遊砂平均平衡濃度



- 現在の浮遊砂濃度との差で土砂が移動
- 時間遅れを考慮

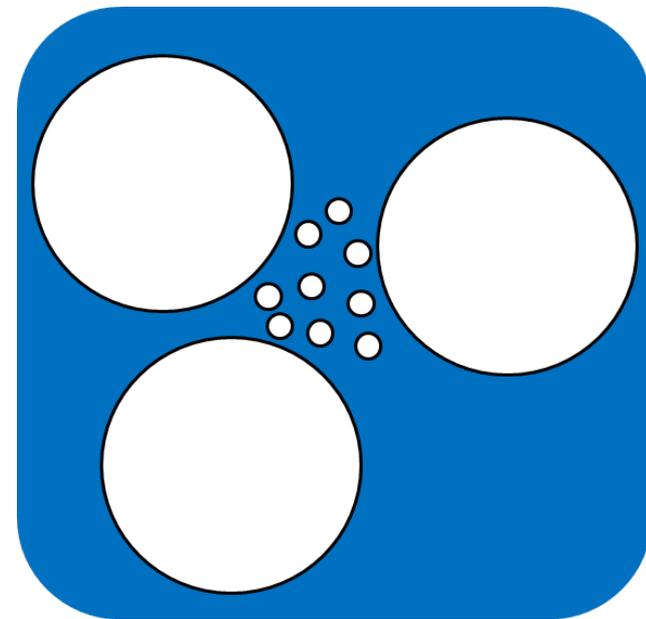
粒度分布を考慮した解析

設定する土砂粒径(べき) : 10^k (m) ($k=-6\sim 0$)

それぞれの粒径成分について前述の浮遊砂モデルを適用

ある粒径成分の濃度は、
それより小さい粒径の粒子体積を
等価流体の媒質体積として考慮、

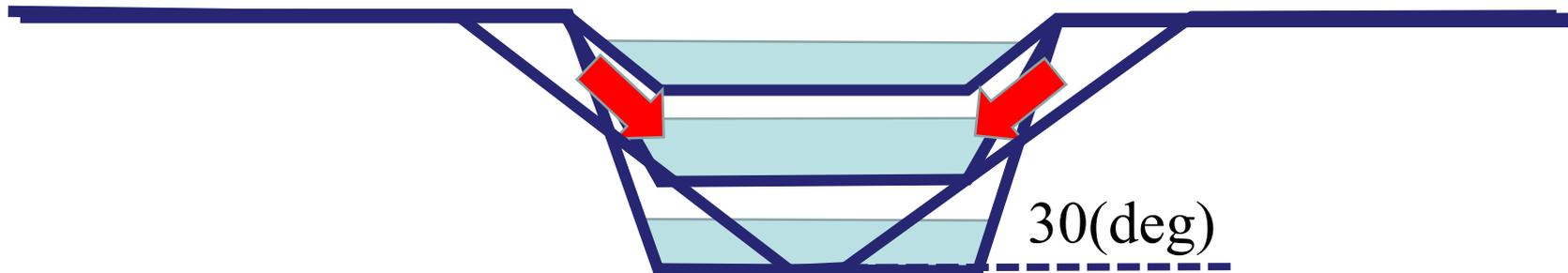
$$c_k = (V_g)_k / V = (V_g)_k / \left(V_w + \sum_{j=-6}^k (V_g)_j \right)$$



斜面崩壊モデル

侵食が進むと，谷側岸の勾配が上昇
→短時間の土砂移動（斜面崩壊）モデルが必要

拡散方程式でモデル化
一定時間毎に安息角まで傾斜調整

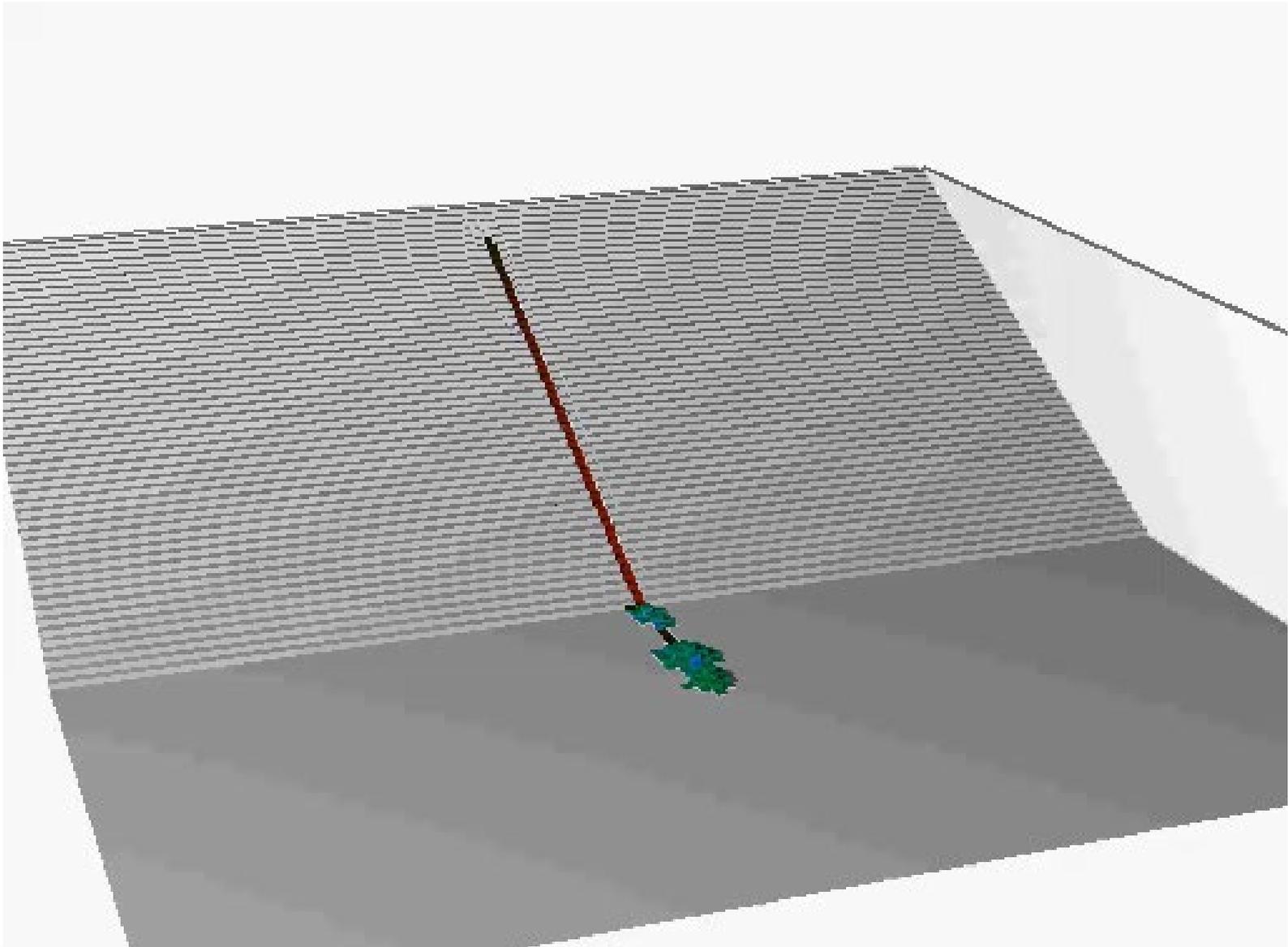


粒度分布を考慮した解析

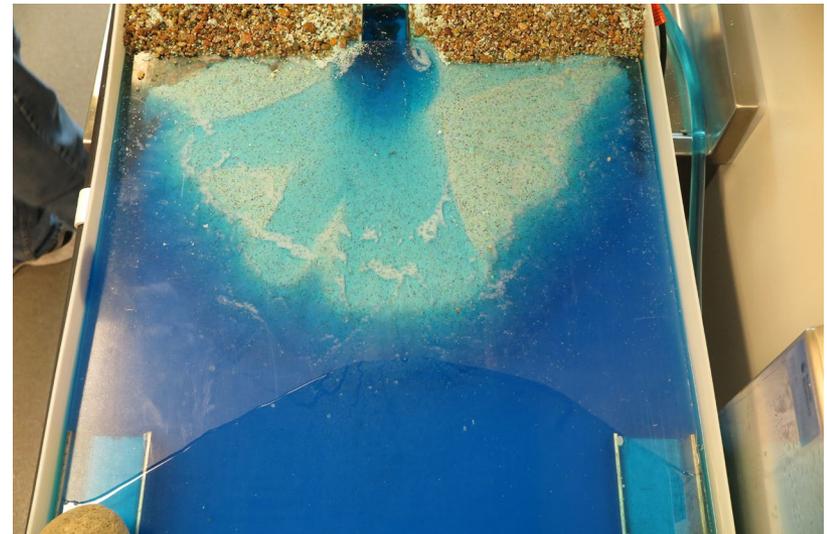
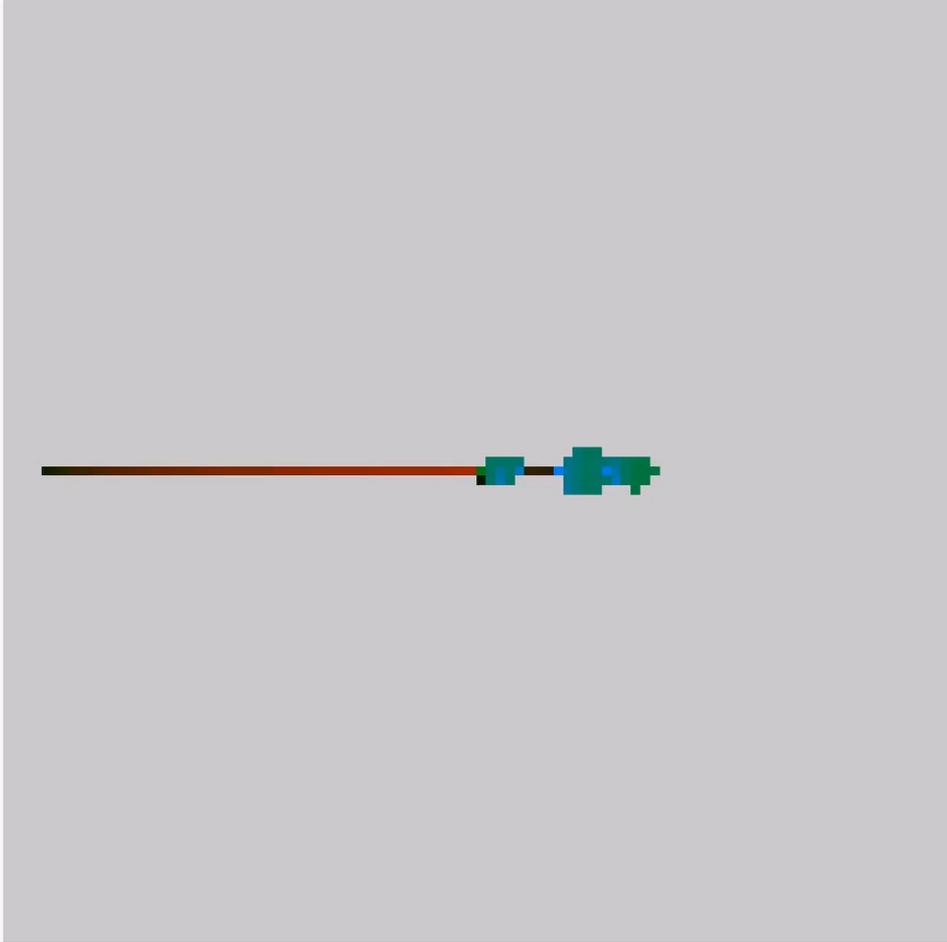
とりあえずの簡易化処理：

- **侵食**に関して，河床底面の粒度分布は考慮しない
→好きな粒度の土砂を好きなだけとりこめる.
- **堆積**に関して，堆積順は考慮しない
→堆積土砂の層構造は今のところ考慮していない

連続的な水粒子流下解析(10s毎, 2.78hの計算)



連続的な水粒子流下解析(10s毎, 2.78hの計算)



<http://sedexp.net>

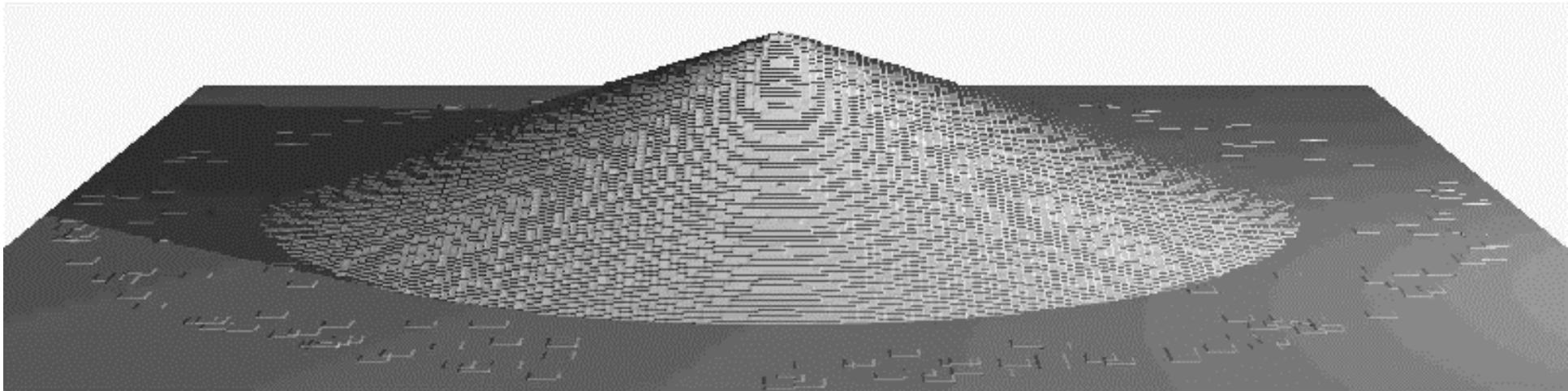
円錐状地形

領域 $1\text{km} \times 1\text{km}$

斜面勾配 $30(\text{deg.})$

5(s)おきに 5m^3 の雨水粒子を
ランダムな位置に発生

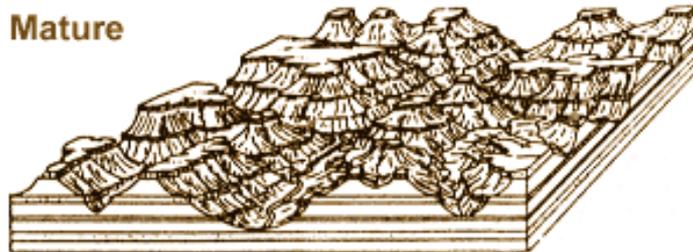
→ 1日の計算



地形輪廻

How have planetary surfaces been formed and evolved?

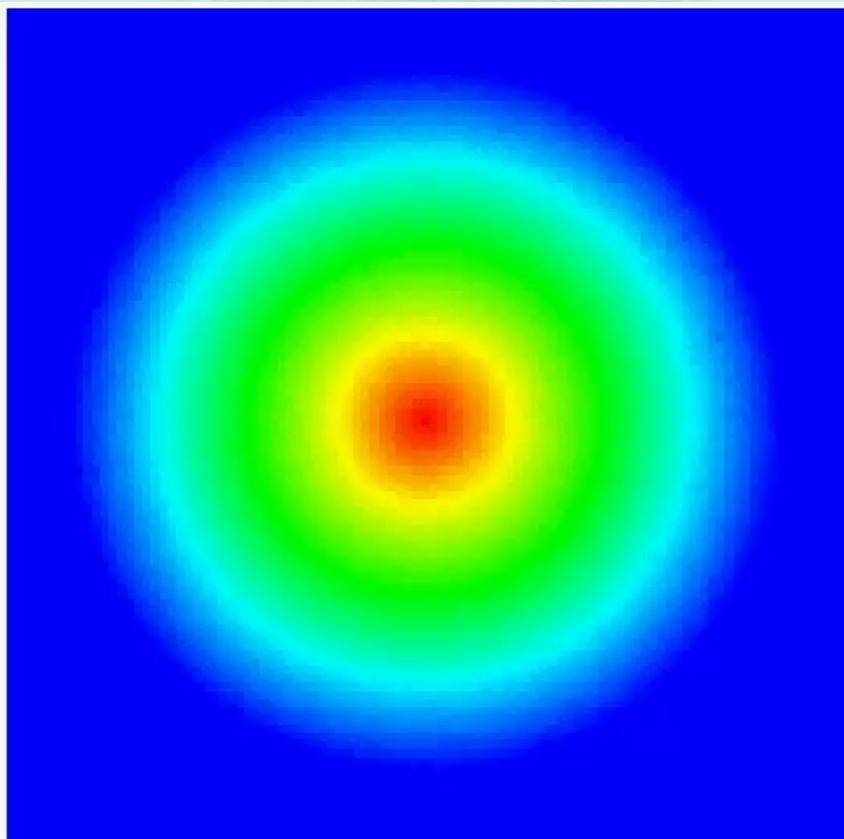
- The central question of Earth and Planetary sciences -



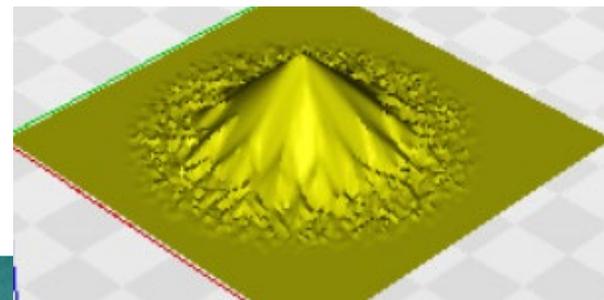
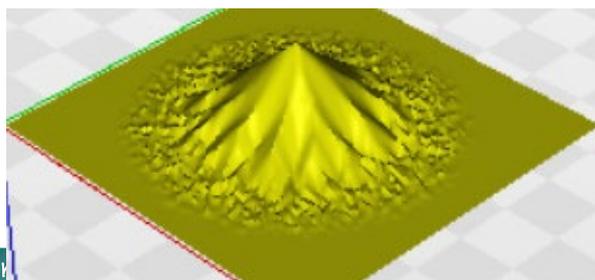
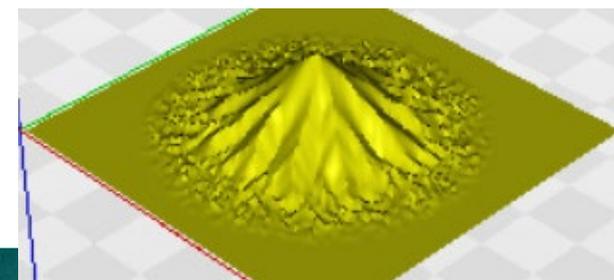
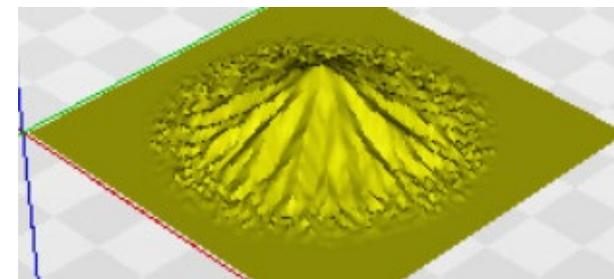
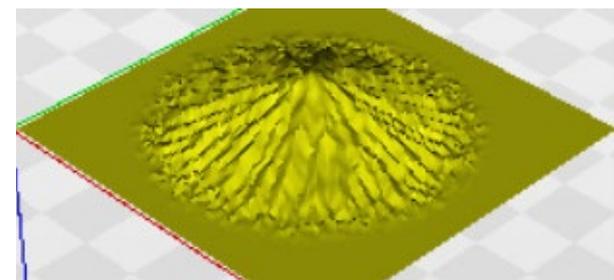
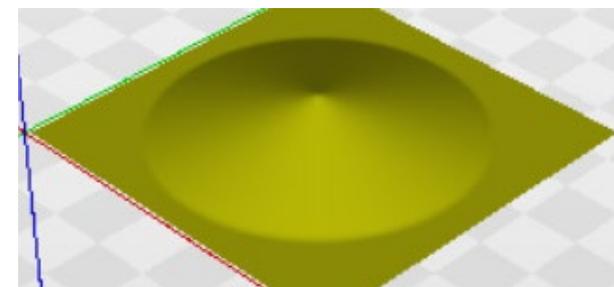
“CYCLE OF EROSION”
Only qualitative concept so far.

Davis, W.M., Stages in the fluvial cycle of Erosion, Geographical essays. Boston 1909.

(降雨 + 隆起) 解析

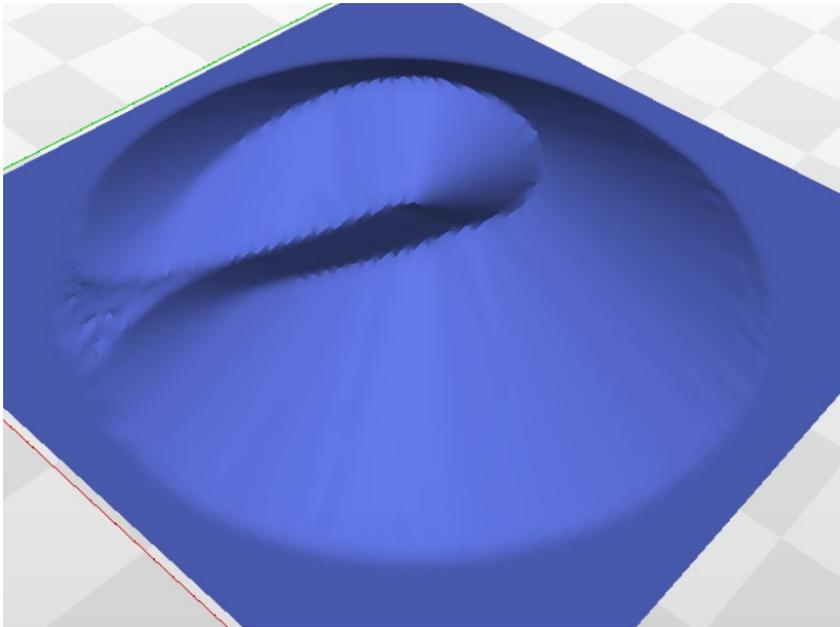


一旦、険しくなってから、平準化される (地形輪廻と同じプロセス)

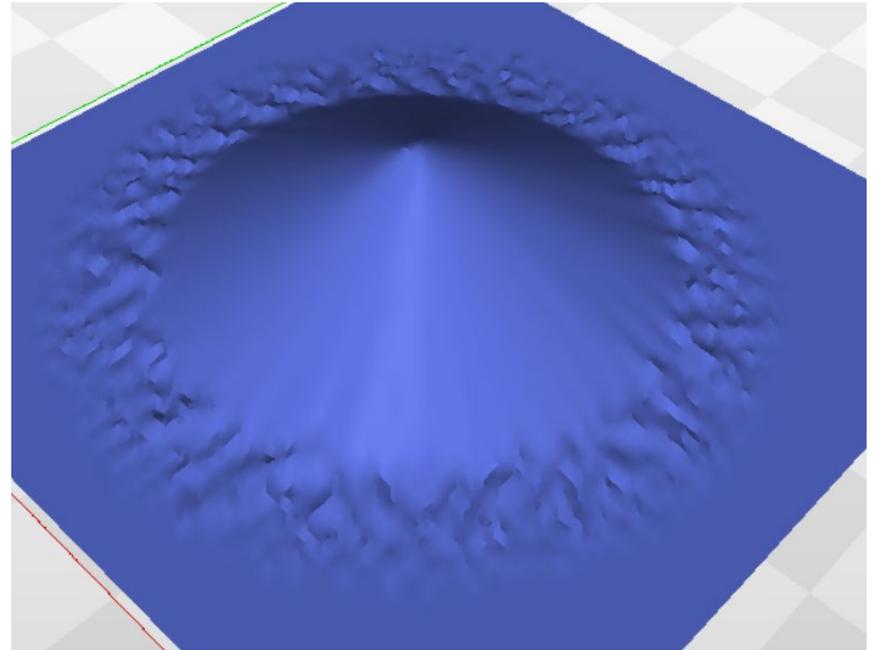


(降雨 + 隆起) 解析

頂上のみ降雨



全体に降雨



隆起 + 侵食による平衡状態形状！？

斜面角度は斜面崩壊モデルの設定角度に支配

おわりに

数値シミュレーションによる**地盤形成の定量評価**

→ 土砂動態と地形変動についてのより良い理解
時間軸マルチスケール構造の検討に有効

災害現象は様々な物理現象が含まれる**複雑問題**

→ 分野横断型の応用力学のチャレンジ対象は多い。

おわり