

# 流砂研究とそれを踏まえた 流路・河床変動予測の現状と課題

2015年12月7日

早稲田大学理工学術院  
関根 正人

# 本日の内容と主な論点

---

- 従来の流砂理論とこれに基づく河床変動予測が抱えている課題
- 非平衡流砂モデルを適用した河床変動計算との課題
- 質点系の運動方程式を基礎とした新たな河床変動予測の現状と抱える課題

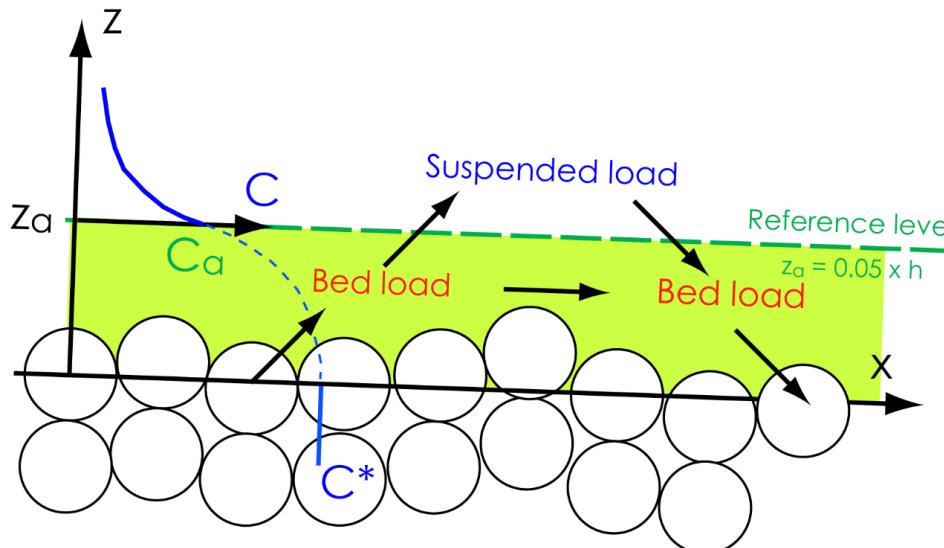
## 1. 従来の流砂理論とこれに基づく河床変動 予測が抱える課題

---

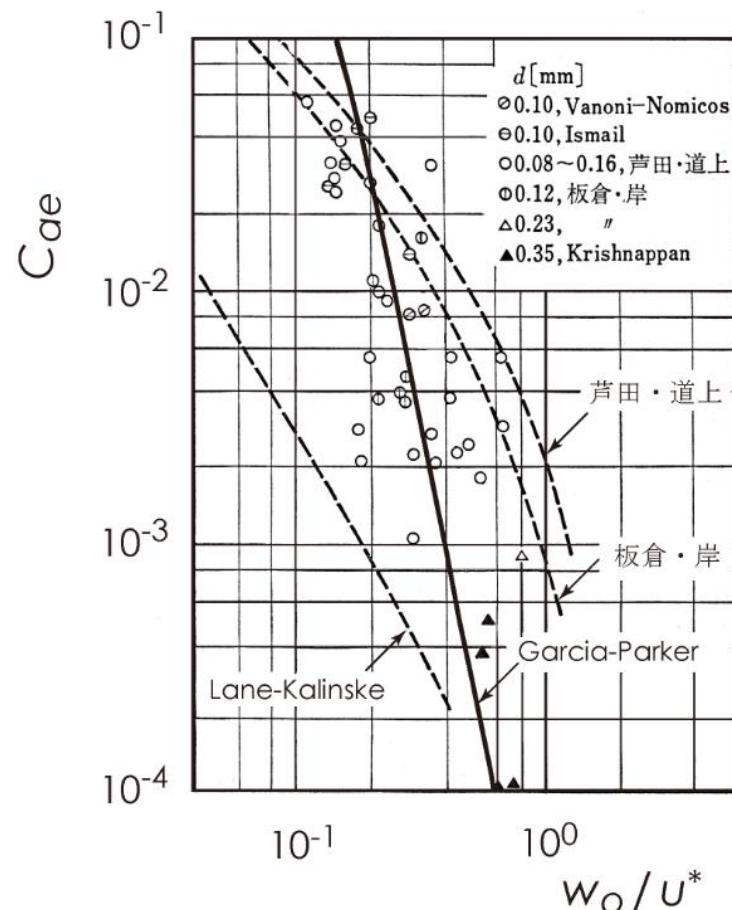
- 浮遊砂としての土砂輸送
- 側岸などの(安息角を超える)急斜面の取り扱い
- 河床材料の粒度分布に関する課題
- 流れの計算精度とのアンバランス

# 浮遊砂理論の抱える課題

- 基準面濃度・基準面高さ：濃度の鉛直方向勾配が大きな「水深の5%」の位置に定義されていることから、計測される濃度のデータに大きな誤差が含まれる。現在の体系はこのような情報に基づくものであるため、この点を克服しない限り大きな精度向上は期待できない。



# 浮遊砂理論の抱える課題



# 浮遊砂理論の抱える課題

- 浮遊砂としての土砂輸送を移流拡散と捉えたとき、濃度拡散係数は力学的にどのように定めればよいのか？
  - 平均的には乱流拡散係数に等しい、あるいは比例するとされるが、掃流力が大きい条件下でこの近似は成り立たなくなる。
  - 土砂濃度が高くなると、粒子間接触の影響や粒子の存在が乱流場に与える影響が無視できない（乱流場の変質）。
  - 浮遊砂の輸送には間欠的に発生する組織渦（coherent structure of turbulence）が顕著な影響を及ぼす。

# 浮遊砂理論の抱える課題

- 
- 河床変動計算を行う際に、平衡状態で計測された基準面濃度  $C_a$  と  $u^*/w_o$  の関係を、非平衡状態での巻き上げ速度  $E_s$  と  $u^*/w_o$  の関係として用いられている。この考え方はどこまで正しいのか？

# 側岸などの(安息角を超える)急斜面の取り扱い

- 計算の空間分解能を上げるために計算格子サイズ $\Delta$ を小さくとろうとすると、局所的な河床勾配が計算途上で安息角を超えるようなことが頻繁に起くる。
- 従来の側岸浸食モデル [長谷川(1981)など] では、定められた軸方向に発生する崩落現象しか取り扱えない。
- 斜面崩落モデル [関根(2003)] の活用を！

## 長谷川(1981)の河岸浸食の取り扱い

---

- 河岸浸食などの崩れが発生する方向を既知とする。たとえば各横断面内でこれが間欠的に発生すると仮定している。
- 崩壊は間欠的に生じるとする。
- もし、崩壊が発生する方向が未知であり、任意の方向をとり得る場合には、この方向を適用することはできない。

長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究，土木学会論文報告集，第316号，37-50, 1981.

# 斜面崩落モデル(2003)の基本的な考え方

点 **O** から線分 **N E** 上の点 **S** に向けて引いたベクトル  $\vec{OS}$  :

$$\begin{aligned}\vec{OS} &= s^* \vec{OE} + (1 - s^*) \vec{ON} \\ &= (s^* \Delta x, (1 - s^*) \Delta y, s^* z_e + (1 - s^*) z_n)\end{aligned}$$

ここに,  $s^*$  は媒介変数 ( $0 \leq s^* \leq 1$ )

$$z_e = \eta_{i+1,j} - \eta_{i,j} < 0; \quad z_n = \eta_{i,j+1} - \eta_{i,j} < 0$$

水平面 **ON'E'** とベクトル  $\vec{OS}$ とのなす角 :

$$\tan \psi = - \frac{|\vec{S}'\vec{S}|}{|\vec{OS}'|} = - \frac{s^* z_e + (1 - s^*) z_n}{\sqrt{(s^* \Delta x)^2 + ((1 - s^*) \Delta y)^2}}$$

- (1) 局所的な勾配  $\alpha$  および  $\omega$  を求める.
- (2) 点 **O** に注目し, 最急勾配の角度  $\psi$  ならびにその方向 (図中のvector **OP'** の方向) を求める.
- (3) 角度  $\psi$  が安息角  $\phi$  より大きくなると, 斜面崩落が生じる.

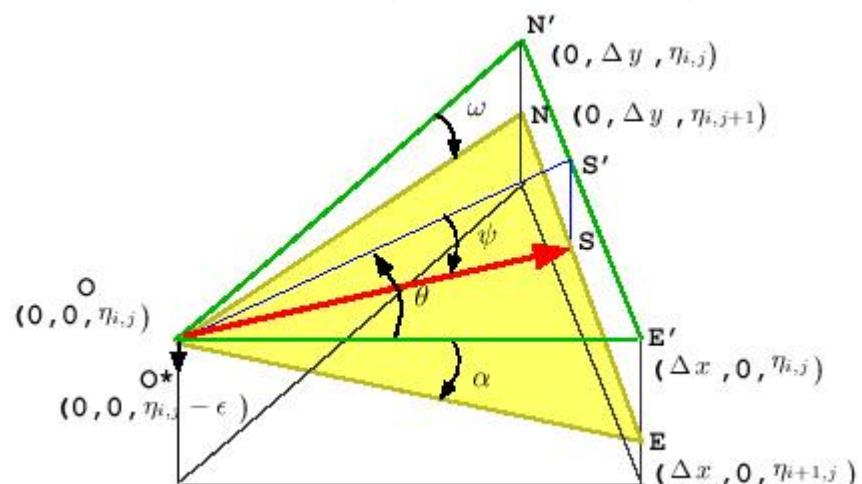
**最急勾配:**

$$s^* = \frac{(\Delta y)^2 z_e}{(\Delta x)^2 z_n + (\Delta y)^2 z_e}$$

$$\tan \psi = \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \omega}$$

ここに,

$$\tan \alpha = - z_e / \Delta x; \quad \tan \omega = - z_n / \Delta y$$



# 斜面崩落モデル(2003)の基本的な考え方

---

点Oにおける地形面の鉛直変位量：

$$\begin{aligned}\epsilon &= |\vec{OS'}| \times (\tan \psi - \tan \phi) \\ &= \sqrt{(s^* \Delta x)^2 + (1 - s^*)^2 (\Delta y)^2} \times (\tan \psi - \tan \phi)\end{aligned}\quad (1)$$

点Oから単位時間当たりに生じる土砂崩落堆積：

$$V = (\epsilon \Delta x \Delta y) / 6 \quad (2)$$

崩落による付加的な流砂量ベクトル：

$$q_{xCollapse} = \frac{(1 - \lambda) V \cos \theta}{\Delta t \Delta y}; \quad q_{yCollapse} = \frac{(1 - \lambda) V \sin \theta}{\Delta t \Delta x} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{(1 - s^*) \Delta y}{s^* \Delta x} \right) = \arctan \left( \frac{\tan \omega}{\tan \alpha} \right) \quad (4)$$

関根正人：斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション, 土木学会水工学論文集, 47巻, 637-642, 2003.

## 適用事例：模擬扇状地の形成実験

移動床水理実験：

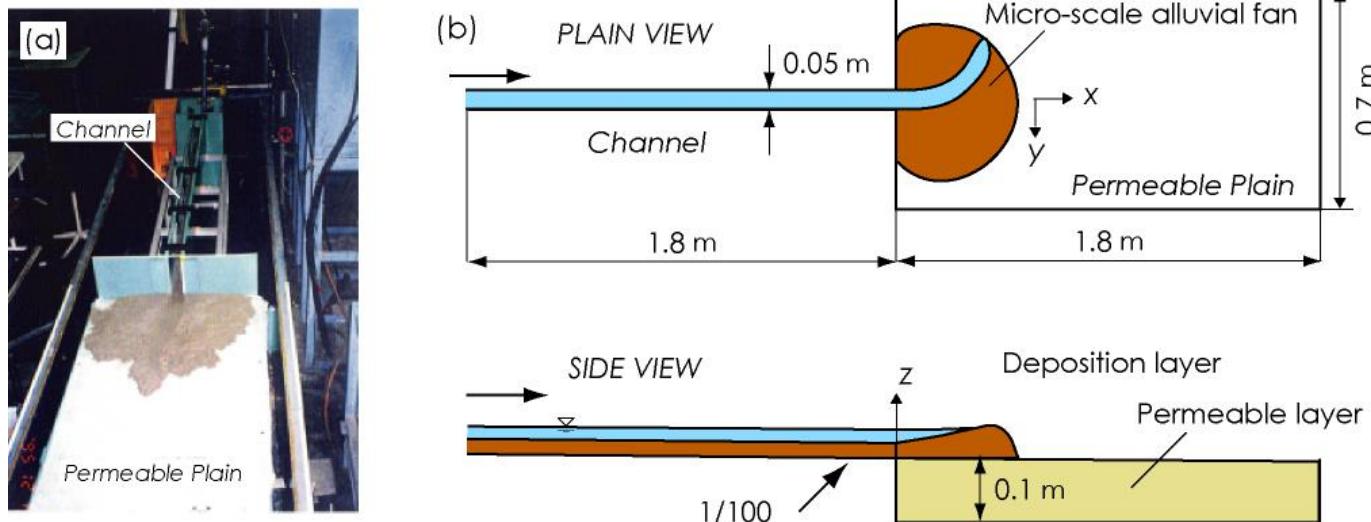
流量 6.0 l/s, 土砂の粒径 0.48mm

関根正人・新井智明・窪田洋一：Fluvial depositional landform on permeable plain, 土木学会水工学論文集, 第42巻, 1087-1092, 1998.

斜面崩落モデルを適用した数値計算による再現実験：

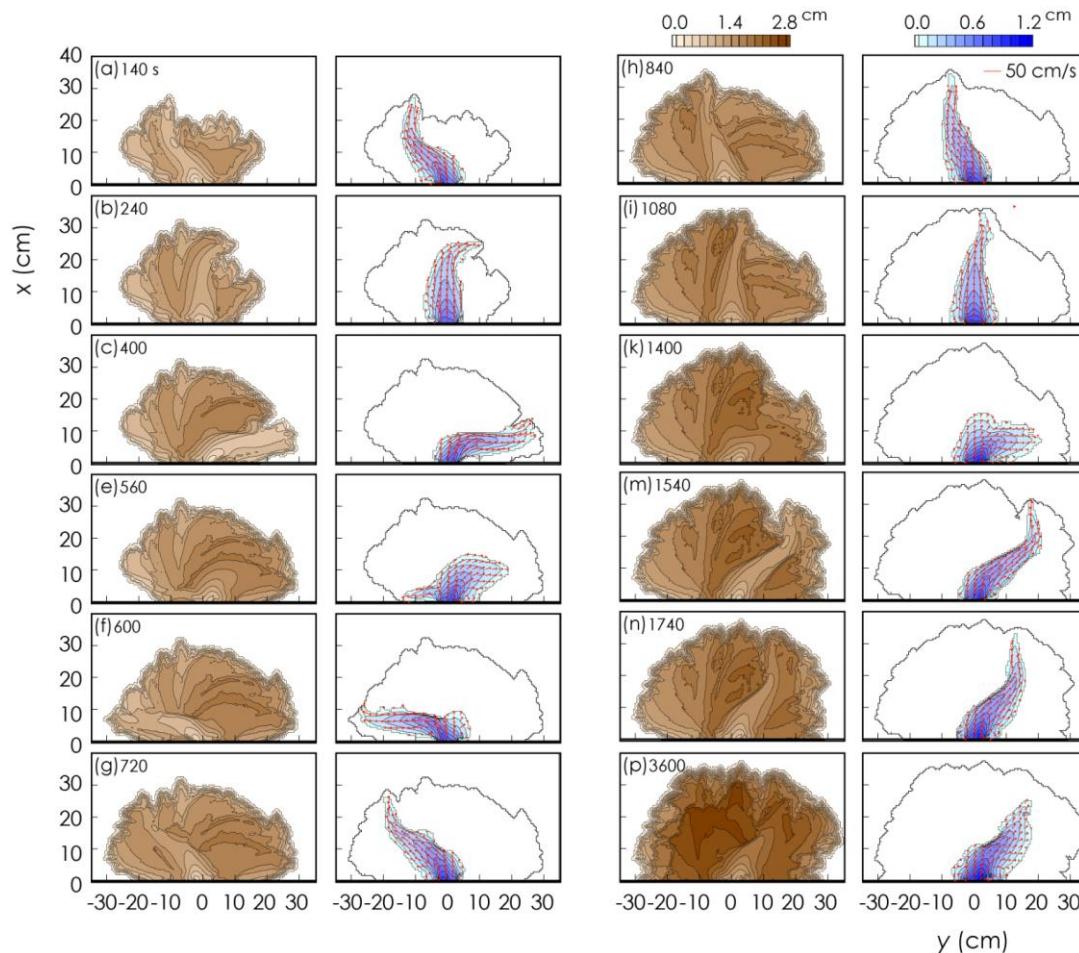
小笠原 基・関根正人：透水性の高い平地上における堆積地形の形成過程に関する数値解析, 土木学会論文集B, Vol. 66, No. 2, 167-178, 2010.

# 解析事例：模擬扇状地の形成実験の概要



- 水路部分には粒径0.48mmの砂を厚さ3cmにわたって敷き詰め、「移動床」とした。また、水路床が動的平衡状態に保たれるように、上流端から同じ砂を供給した。
- 水路下流側には透水性平面(Permeable Plain)があり、この上にこの砂が堆積する。この平面は粒径 5mm のガラスビーズにより構成され、その上面は透水性の高い不織布で覆われている。

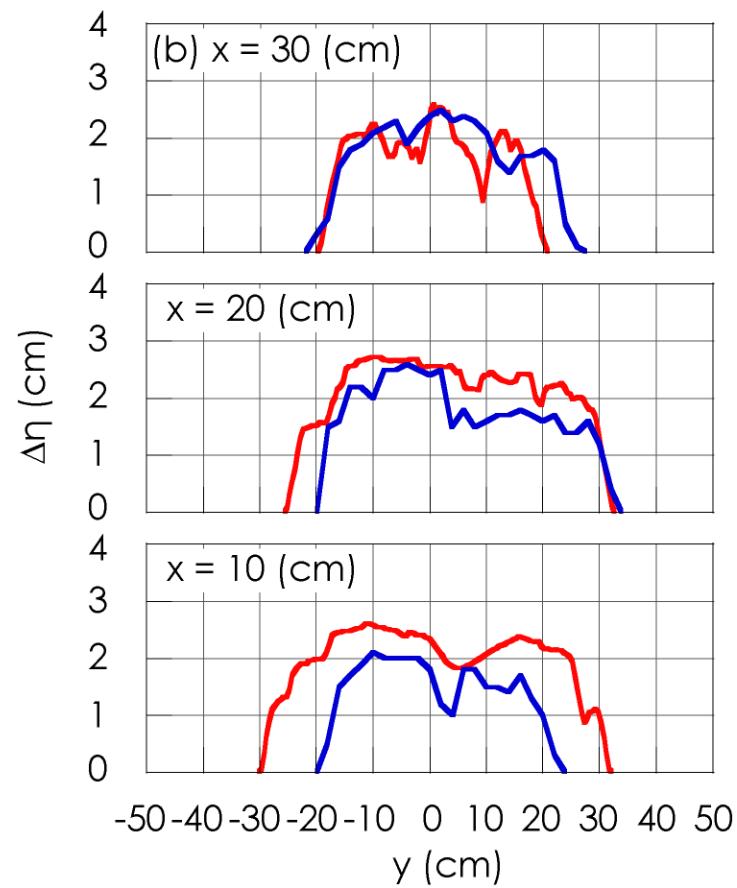
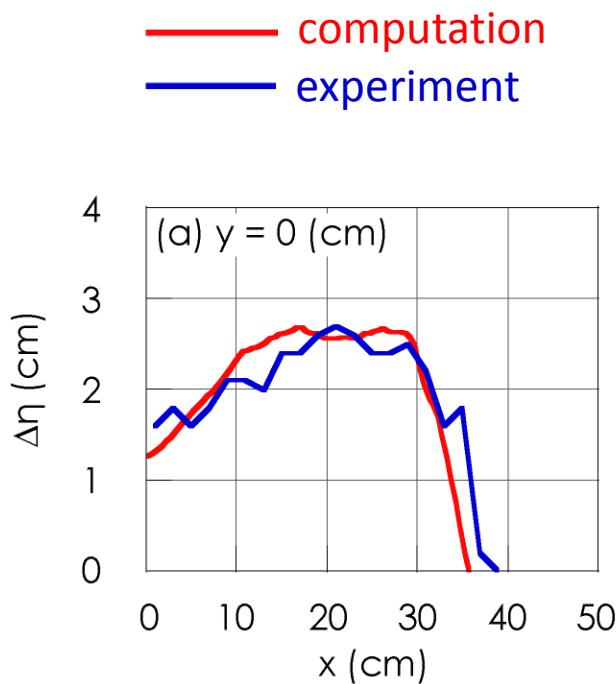
# 模擬扇状地の形成過程 (計算)



左: 地形表面の高さの  
センター図  
右: 水深のセンター図  
と流速ベクトル

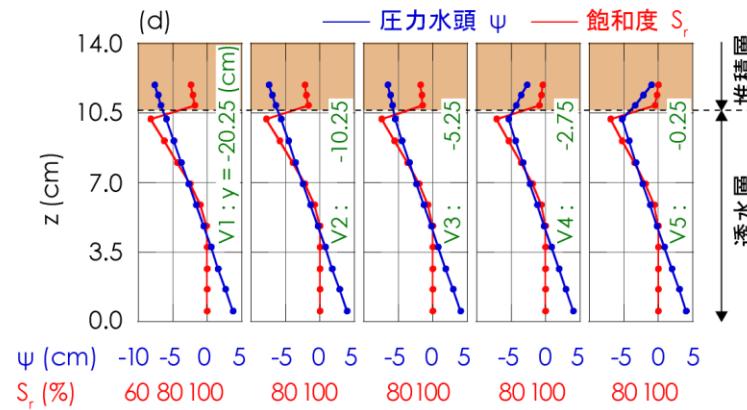
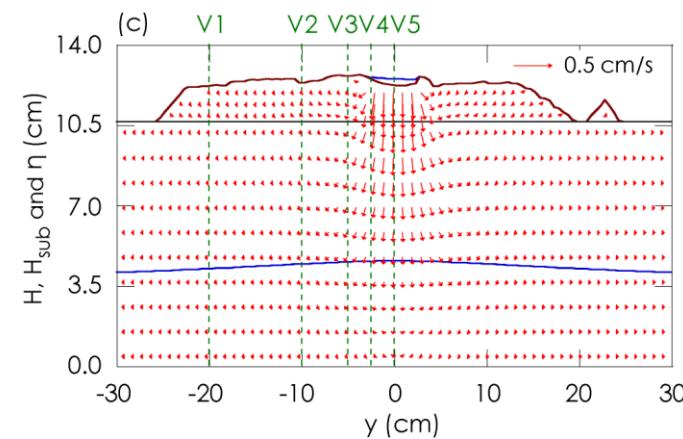
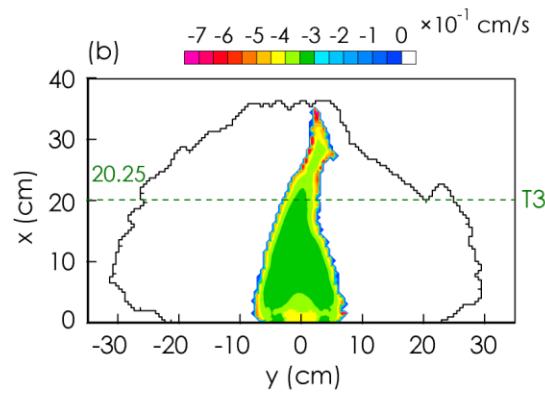
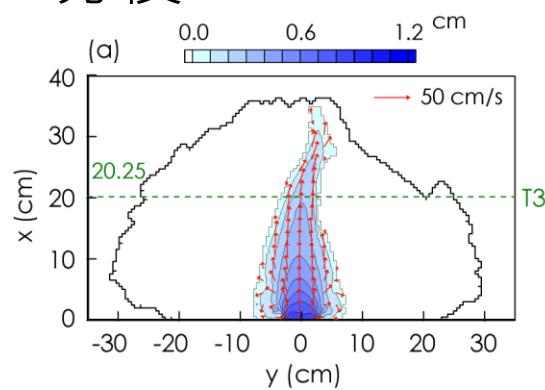
# 解析事例：模擬扇状地の形成実験

3600分後



# 解析事例：模擬扇状地の形成実験

1080分後



Subsurface  
flow

# 河床材料の粒度分布に関する課題

- 従来の流砂理論で暗に想定されているのは、全粒径砂礫が移動すること。河床材料の粒度幅がこれまでの想定以上に大きい場合には、新たな仕組みを考えることが必要。
- 河床材料の鉛直分級と空隙率の変化を考慮する必要あり。交換層の存在。[Sekine & Hiramatsu (2015)]
- 空隙率の時空間的な変化が河床変動に与える影響 [Fujita & Tsutsumi et.al (2015)]

# 流れの計算精度とのアンバランス

---

- 流れ場についてはすでに高精度の計算が可能となっている。一方、現状の流砂の取り扱いにはこれとバランスがとれるほどの精度はない！
- 目的に応じて三次元計算や乱流モデルの適用が必要となるが、一般的には平面二次元計算で十分であろう。

## 2. 非平衡流砂モデルによる河床変動計算

- Step-lengthとPick-up Rateを骨子とする確率論的な取り扱い
- 浸食 (Pick-up Rate  $P_s$ ) は、局所的な掃流力に強く依存し、これに応じて評価可能。
- 移動過程 (Step-length  $\Lambda$ ) は、経路に沿う流れ場の影響を受ける！
- Step-length  $\Lambda$ は、粒径 $D$ の50~200倍程度であるが、計算格子サイズ $\Delta$ は  $\Lambda$ よりも小さくとられなければならない。

# 非平衡流砂過程

---

本研究では、 Nakagawa & Tsujimoto (1980)により提示された「非平衡掃流砂」の考え方に基づき、 砂の堆積過程を取り扱うことにしました。これは、 Einsteinによる確率過程論的な取り扱い(Stochastic Sediment Transport Model)を基礎とするものです。

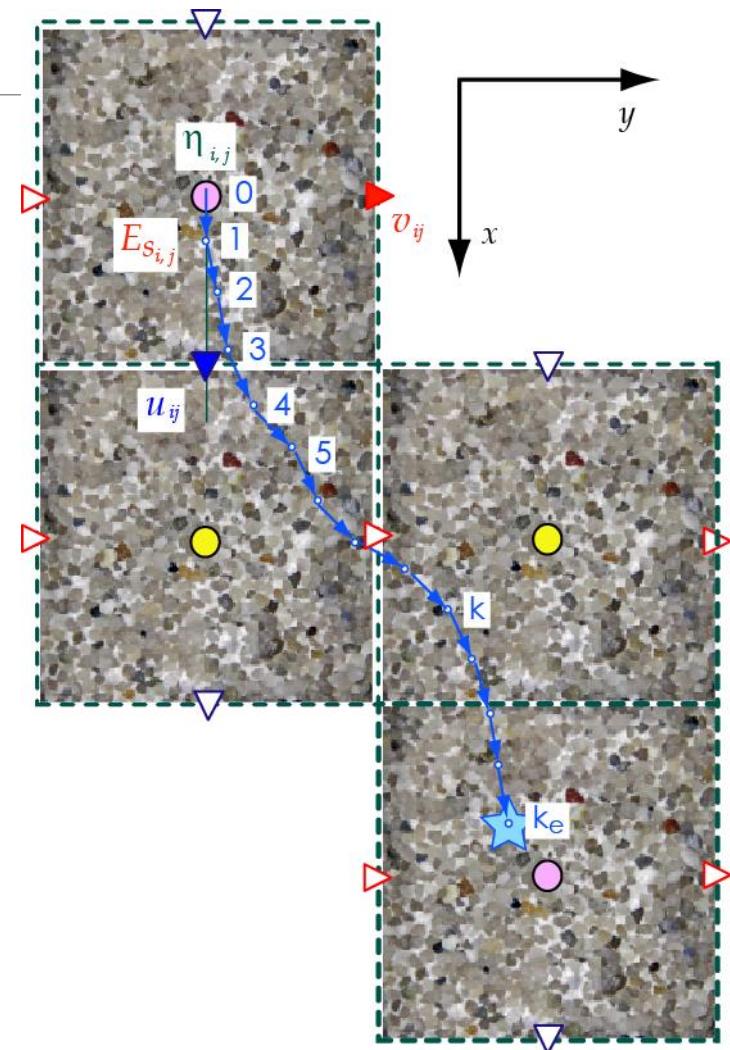
$$q_B(x) = \frac{k_3 D}{k_2} \times \int_0^{\infty} P_S(x - \zeta) \int_{\zeta}^{\infty} f_x(\xi) d\xi d\zeta$$

$$f_x(\xi) = \frac{1}{\Lambda} \times e^{-x/\Lambda}$$

$P_s$  : 離脱率(Pick-up rate),  $\Lambda$  : Step-length

# 砂粒子の移動経路 についての模式図

たとえば、ある瞬間に図の左上の計算格子から浸食された砂粒子群は、流れ場の時空間的な変化を考慮しながら質点系の運動方程式を解くことにより、たとえば図中の青色の線のように求められます。そして、この経路沿いに位置する計算格子上で堆積が生じることになります。



# 非平衡流砂モデルによる河床変動

ここでは、地形を構成するすべての砂粒子の運動を同時に追跡するものではなく、ある計算格子から任意の時刻に移動し始めた粒子群の移動を、ひとつの粒子の運動によって代表させるという取り扱いになっている。



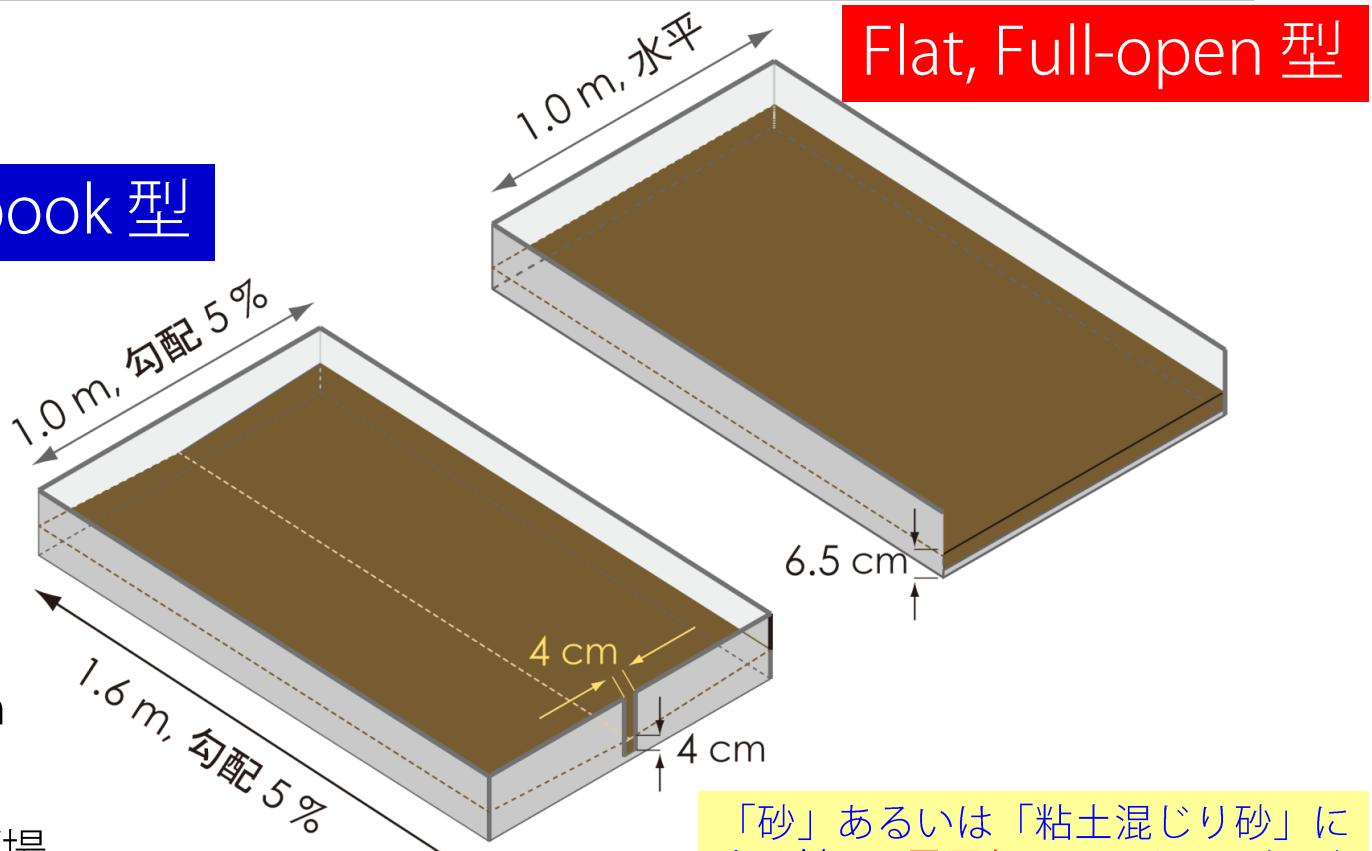
- このような計算を行う上では計算格子幅を十分小さくとる必要がある。ここでは、斜面上に形成される流路群の規模も考慮に入れ、5~10mm程度の間隔で展開された直交格子を用い、時間刻み0.002秒毎に計算を進めた。
- ガリのフロント部などで「局所的に安息角を超える急斜面」が出現する。これに関しては、斜面崩落モデルを適用した。

# 適用事例：降雨による裸地斜面の浸食過程

Open-book 型

数値解析では、正規乱数を用いて初期斜面に粒径オーダーの凹凸を与えた！

- 下流端開口部4cm
- 粘土含有率 0 %
- 降雨量 60mm/h (場所によらず一様)

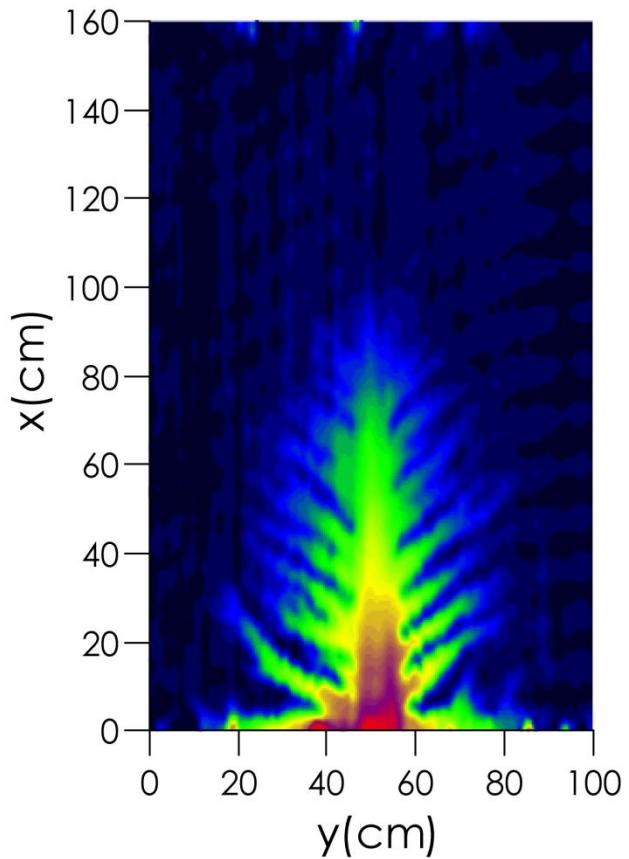


「砂」あるいは「粘土混じり砂」による斜面の層厚を 6.5 cm(Open-book 型の場合にはその中心軸上で)の値

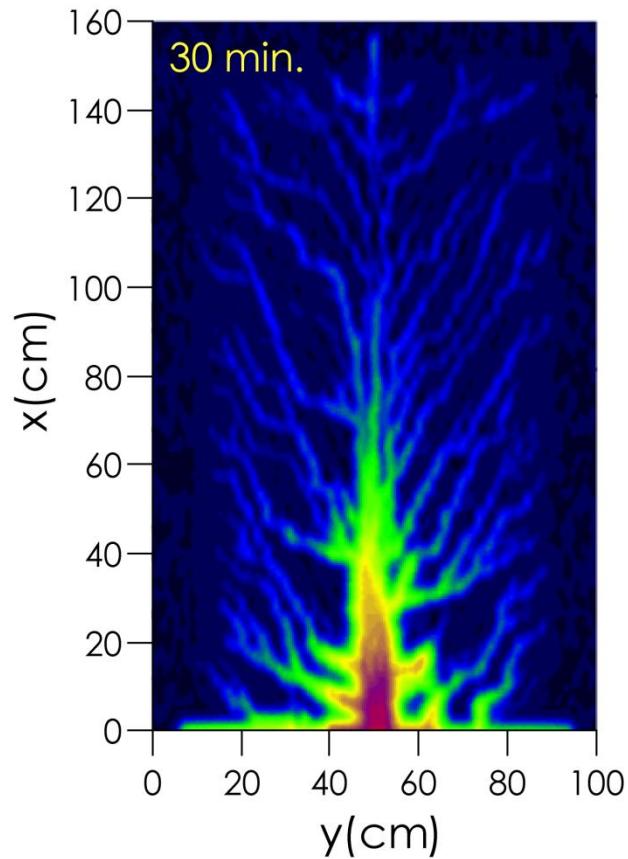
## 水路実験の結果との比較 (Open-Book型斜面)



実験後の写真



水路実験結果

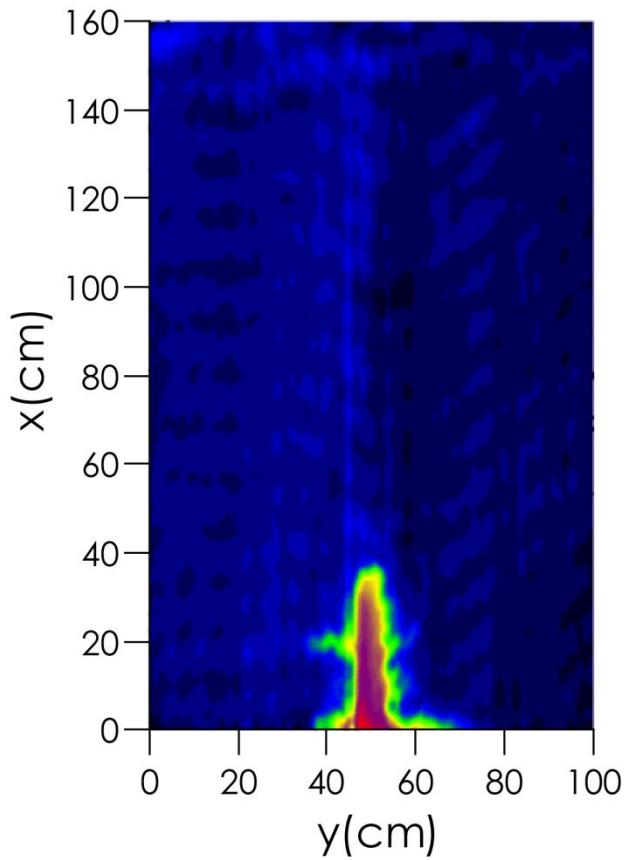


数値解析結果

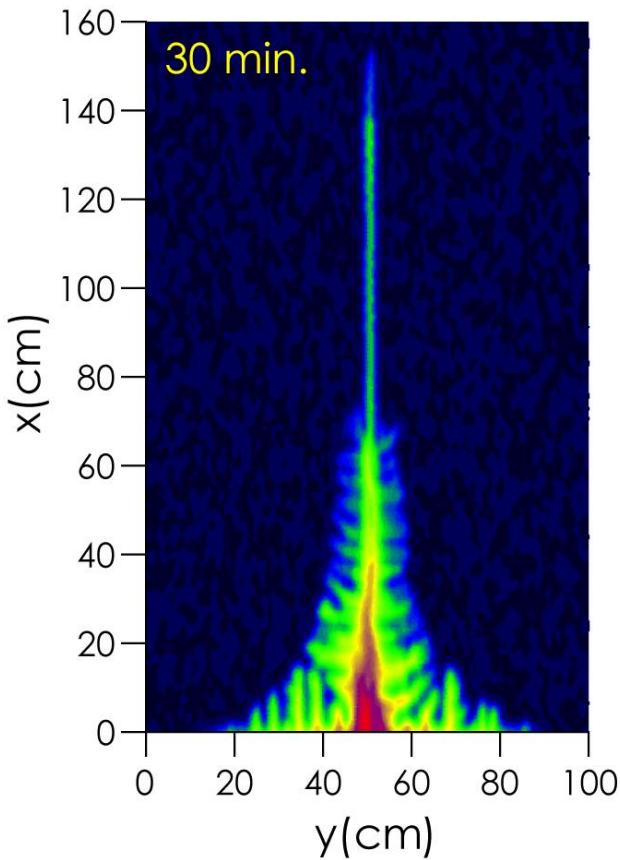
## 水路実験の結果との比較 (粘着性斜面)



実験後の写真



水路実験結果

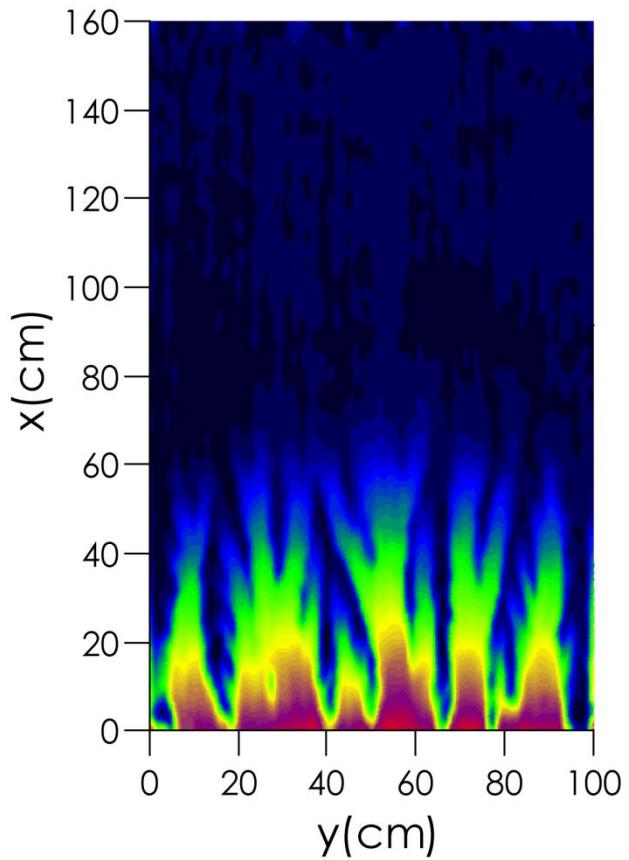


数値解析結果

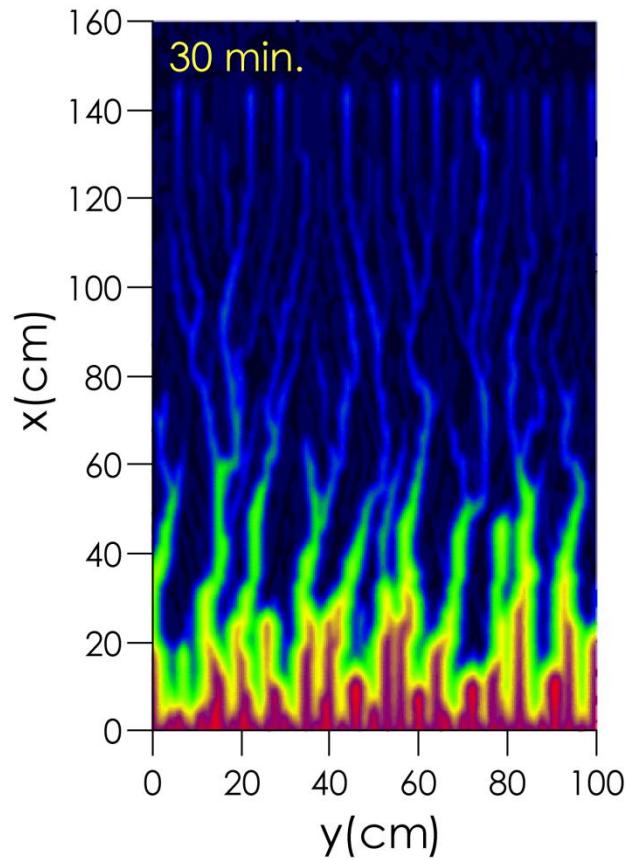
## 水路実験の結果との比較 (Flat型斜面)



実験後の写真

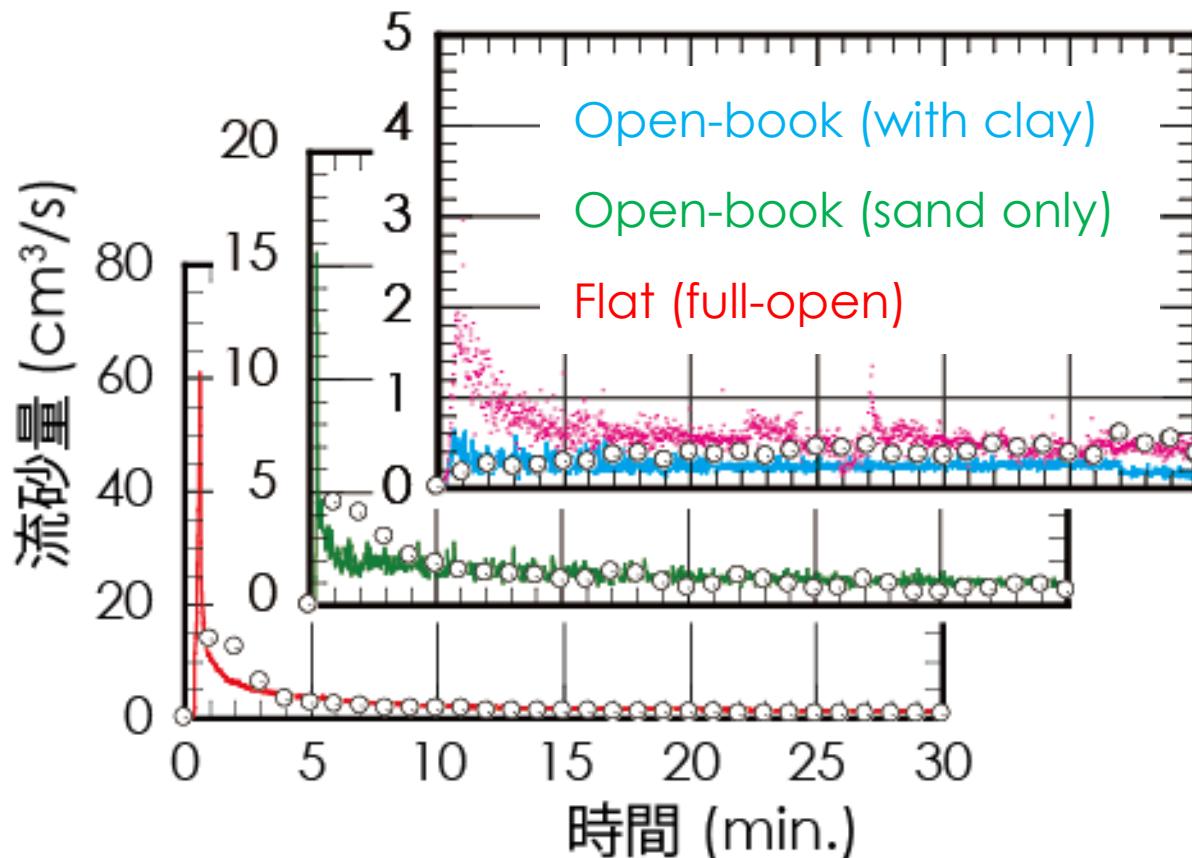


水路実験結果



数値解析結果

# 斜面下流端からの流出土砂量の時間変化



○印が実測値、色つきの折れ線または点が解析値

# 粘土が含有されることによる地形の変動への影響

- 粘土が含有することにより斜面の「耐浸食性」の増大が顕著に現れ、同一の水理条件下での砂のみの場合と比べると、浸食速度は1オーダー以上小さくなる。
- 砂のみの斜面に比べて「安息角」が大きくなり、流路は狭く切り立った側岸を有するものとなり、斜面崩落の規模はより小さなものに止まる。
- 粘土を含有することにより「透水性」が低下する。

粘着性土の浸食速度は、 $E_{sc} = \alpha R_{wc}^{2.5} u^{*3} = \beta u^{*3}$  により評価される(西森・関根, 2009)。ここに、式中の係数 $\alpha$ および $\beta$ は粘土鉱物の種類や水温により異なる値となる。

### 3. 土砂粒子の運動追跡の結果としての河床変動予測の現状と課題

- 近年、個別要素法などのモデルを用いた河床変動計算が行われている。このような拘束力の強いモデルを用いる場合には検証が不可欠である。
- ただし、流速・濃度の分布、地形変動などの実測値と比較するおことによりモデルが検証されたとして、現象の本質であるメカニズムまで迫れるのか、大いに疑問である。
- できるだけ仮定やモデル化を導入せずに予測計算できるようにしたい！

# 土砂粒子の質点系の運動方程式

---

$$\rho \sigma_s V \frac{\partial \vec{u}_p}{\partial t} = \boxed{\rho (\sigma_s - 1) V \vec{g}} + \boxed{\rho V \frac{\partial \vec{u}_f}{\partial t}} + \boxed{\frac{1}{2} \rho C_D A |\vec{u}_r| \vec{u}_r} \\ + \boxed{\rho V C_M \frac{\partial \vec{u}_r}{\partial t}} + \boxed{\frac{1}{2} \rho C_L A [(u_r^2)_T - (u_r^2)_B] \vec{e}}$$

*Gravity*                    *Drag*  
*Pressure*                    *Lift*

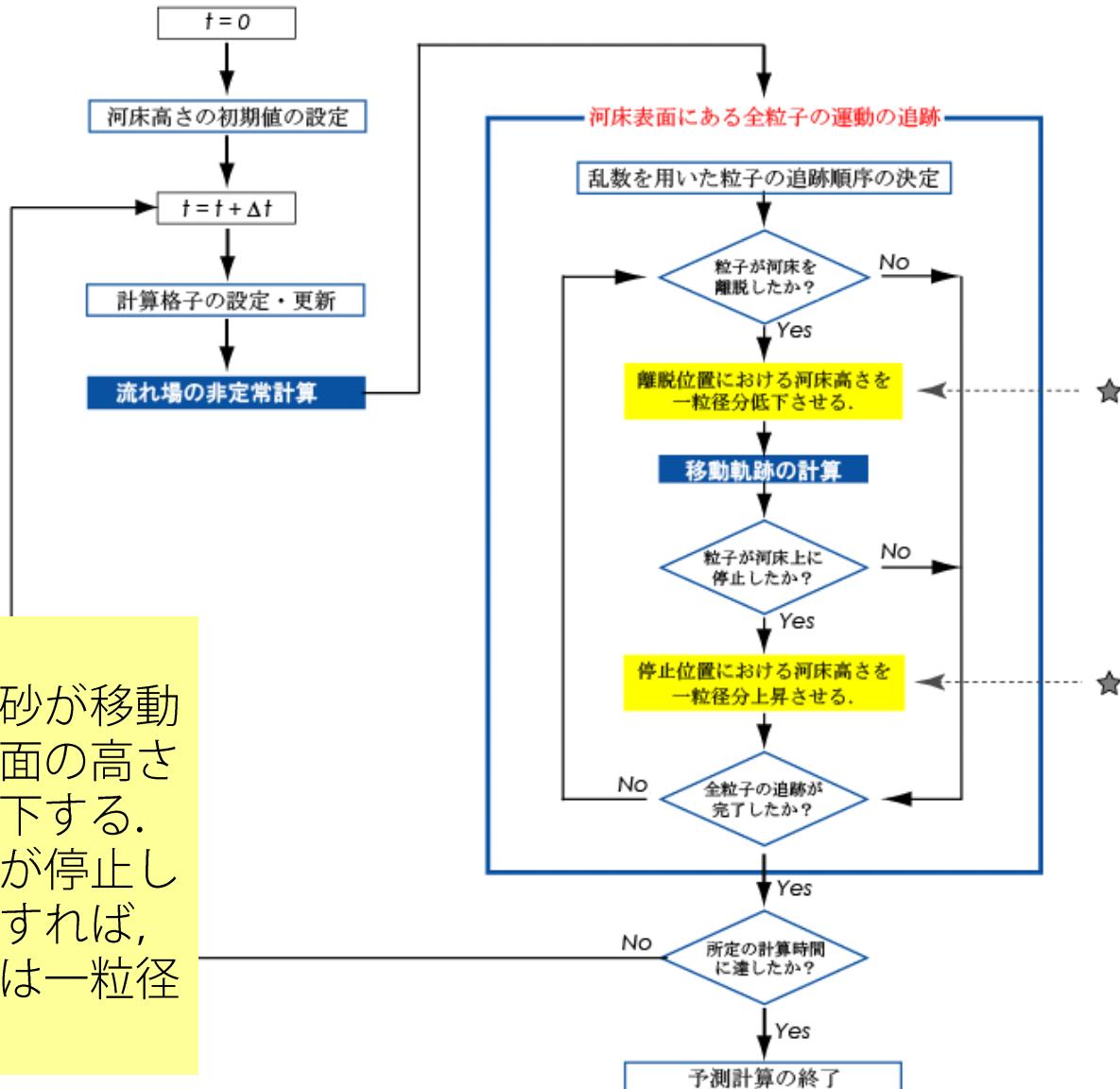
サブスクリプトの  $p, f$  ならびに  $r$  : 土砂粒子の移動速度, 水の流速  
 ならびに両者の間の相対速度をそれぞれ表す.

$C_D$  : 抗力係数 ( $= 24/R_e + 3/R_e^{0.5} + 0.34$ )

$C_L$  : 揚力係数 ( $= 0.2$ )

$C_M$ : 付加質量係数 ( $= 0.5$  : 球の場合)

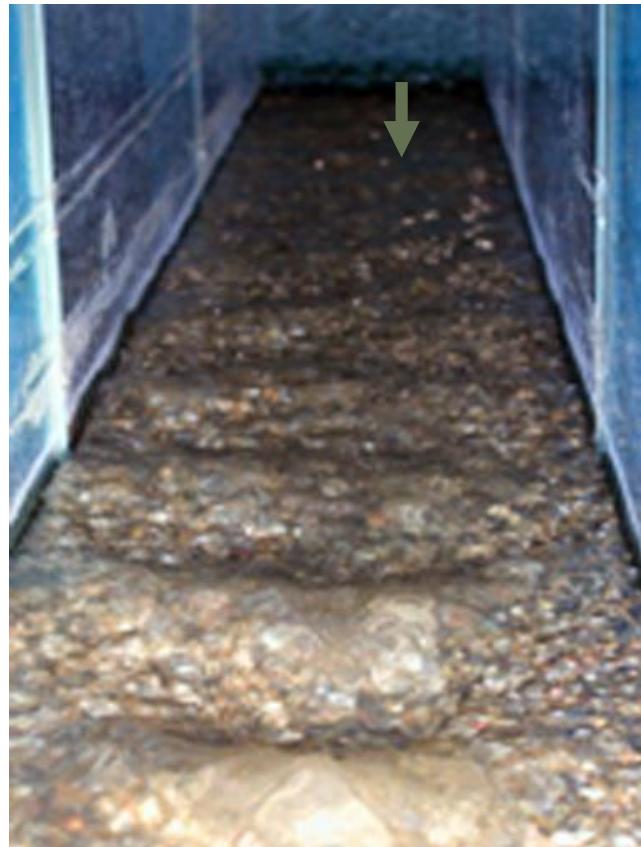
# Flow Chart



基本的な考え方:

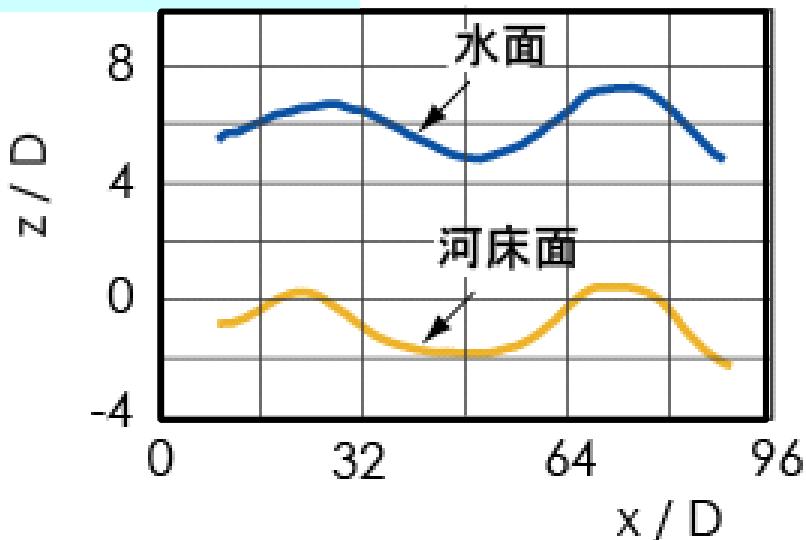
- もし河床面から土砂が移動すれば、その河床面の高さは一粒径分だけ低下する。
- 移動していた粒子が停止して河床面上に堆積すれば、その河床面の高さは一粒径分だけ低下する。

## 適用事例：数値計算の対象とした実験 (宮本邦明先生)



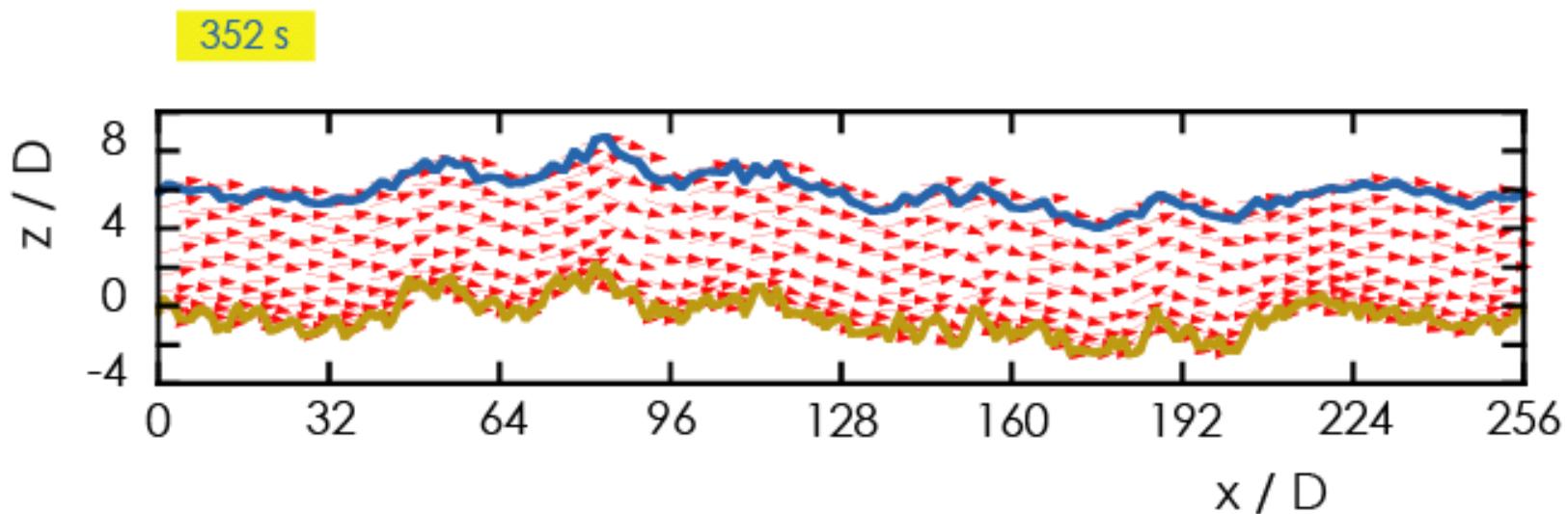
水路長 5 m, 水路幅 0.3 m, 勾配 1/50  
流量 4.8 l/s, 水路床材料の粒径 5 mm

*Measured profiles*



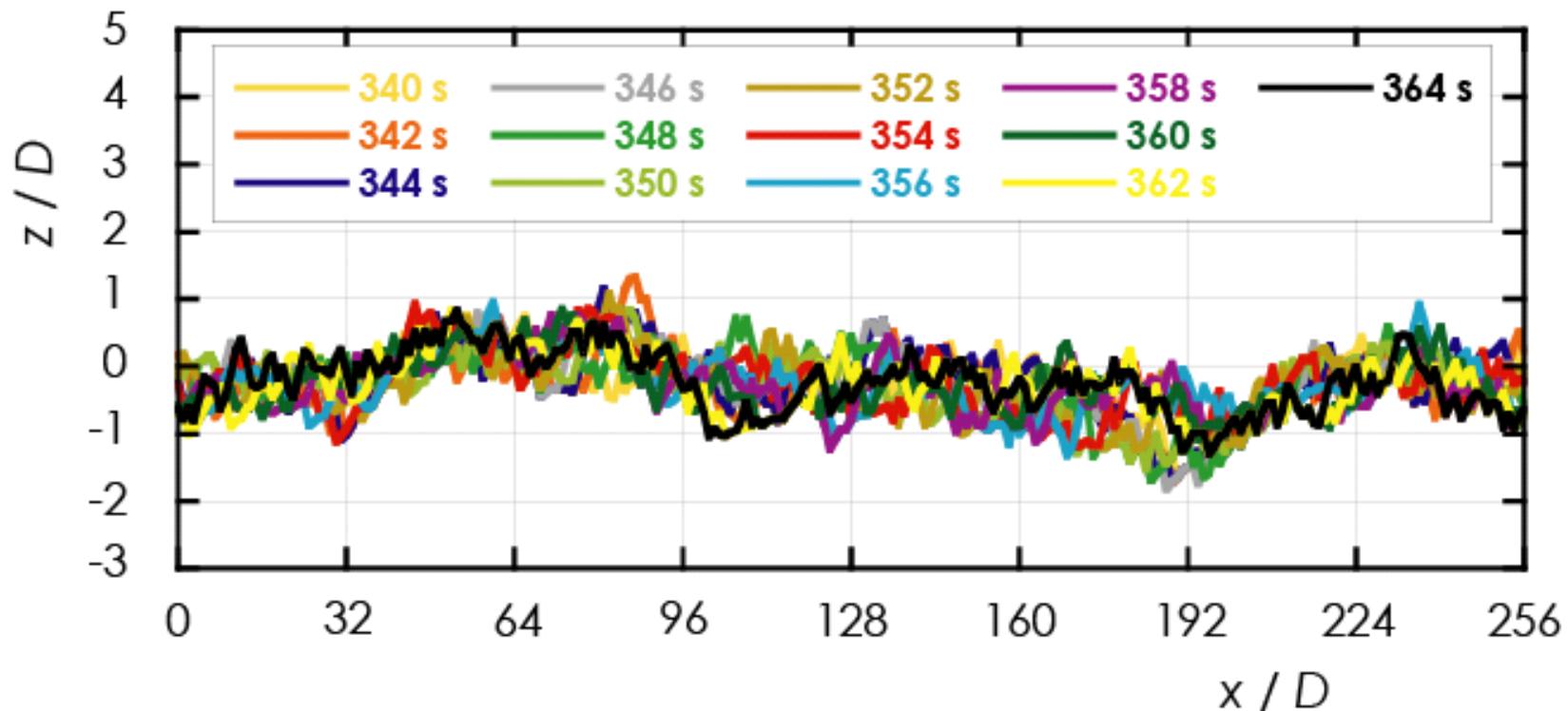
波長は粒径の約 20-40 倍, 振幅は粒径程度. 上流に向かって移動!

# 流れ場の計算例



水面ならびに河床面が変化する毎に,  
境界に適合するような計算格子を設定し直す.

## 河床面高の時空間変化



波長は粒径の約30倍、振幅は粒径程度であり、上流に向かって移動している。実験結果と一致する！

## まとめ

---

- 流砂ならびに流路・河床変動計算には、これからに残されている課題が多い。
- 学生ならびに若手研究者の皆様には、是非とも関心を持ち、この分野の研究に加わっていただけるように願っています。
- 過度に計算に走らず、少しでも現象の本質を極めるような研究をしてほしいと思います。
- 遠慮なくご連絡ください！

以上