



山地における土砂生産 と微細土砂の流出

京都大学防災研究所
藤田 正治

内 容

- 京都大学防災研究所穂高砂防観測所高原川流域や滋賀県田上山地試験流域における土砂生産の実態と特性，源頭部からの土砂流出，凍結融解作用による土砂生産に関する研究成果について



土砂生産の実態と特性

穂高砂防観測所での土砂生産に関する観測 (1980年から)

個々の裸地斜面における長期の直接観測

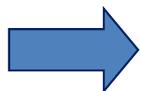


神通川水系高原川

ヒル谷流域(0.85km²)全体における長期の間接観測

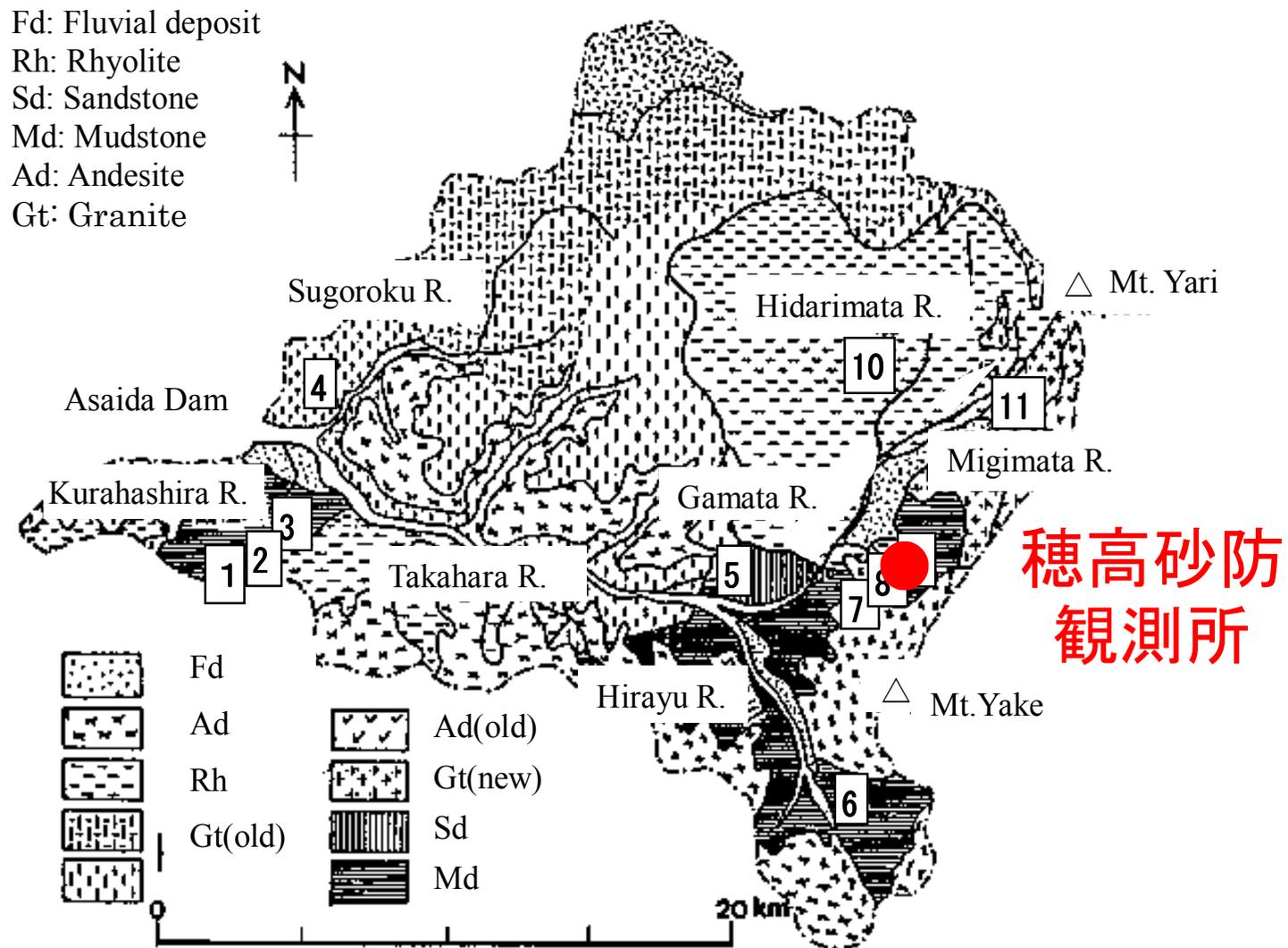


ヒル谷



土砂生産と降雨イベント，凍結融解作用との関係

個々の裸地斜面での観測



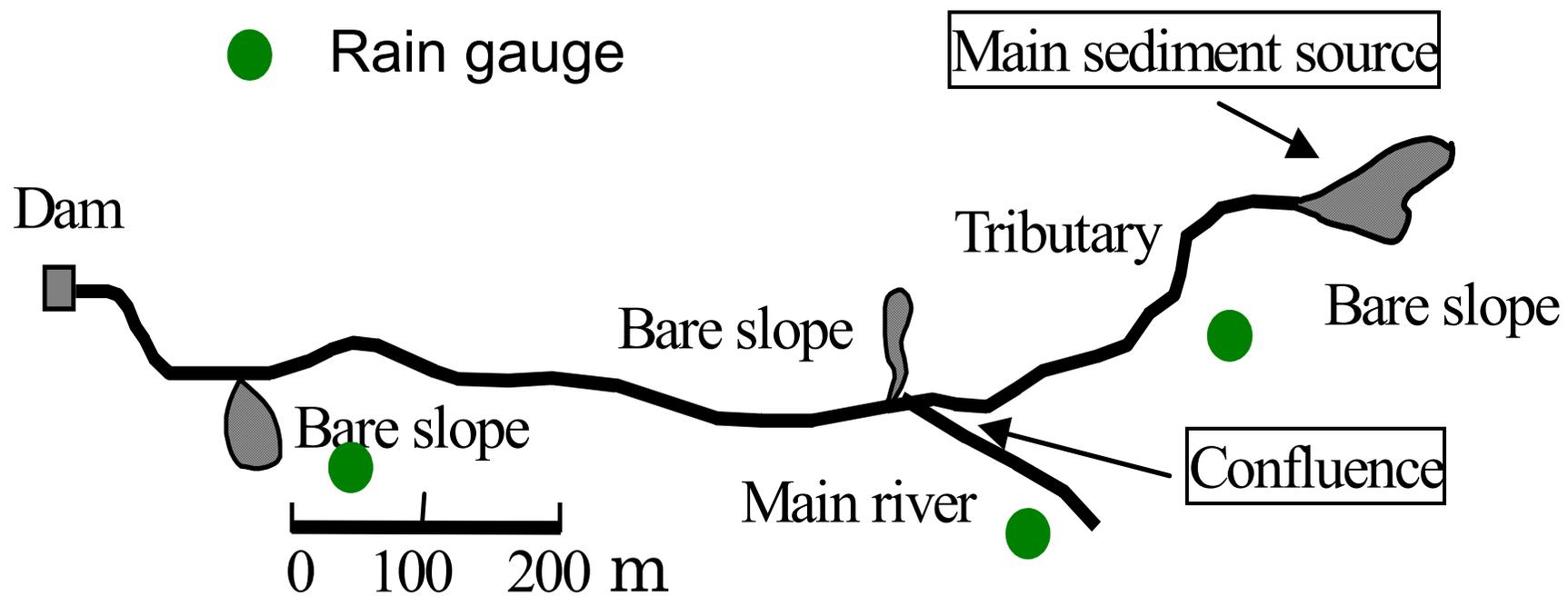
観測項目

- ◆ 個々の裸地斜面からの土砂生産量
1986年から毎週1回(降雪期を除く)
- ◆ 地質, 斜面勾配, 圧縮強度
- ◆ 雨量

採取地点



ヒル谷試験流域における観測



堰堤, 河道, 裸地



観測内容と解析内容

土砂生産過程

土砂供給過程

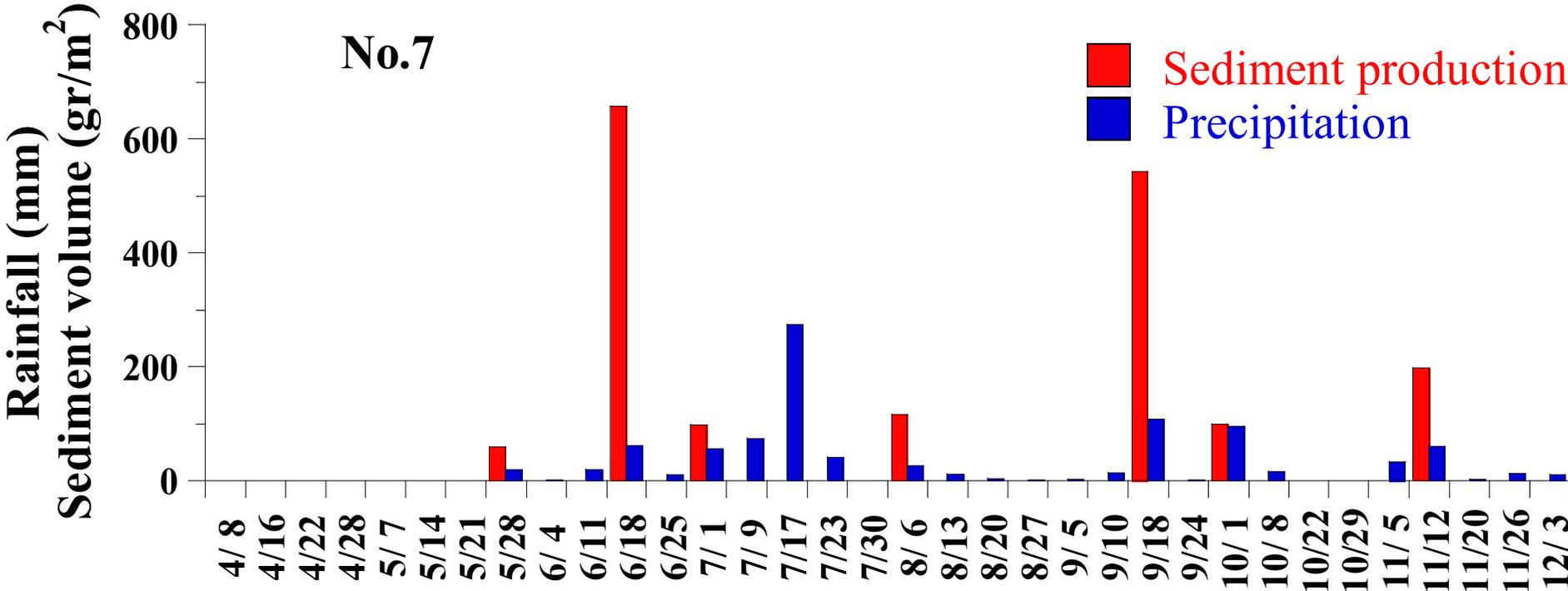
タイミングと供給量

濁度, 流量,
降雨量の観測

土砂移動過程

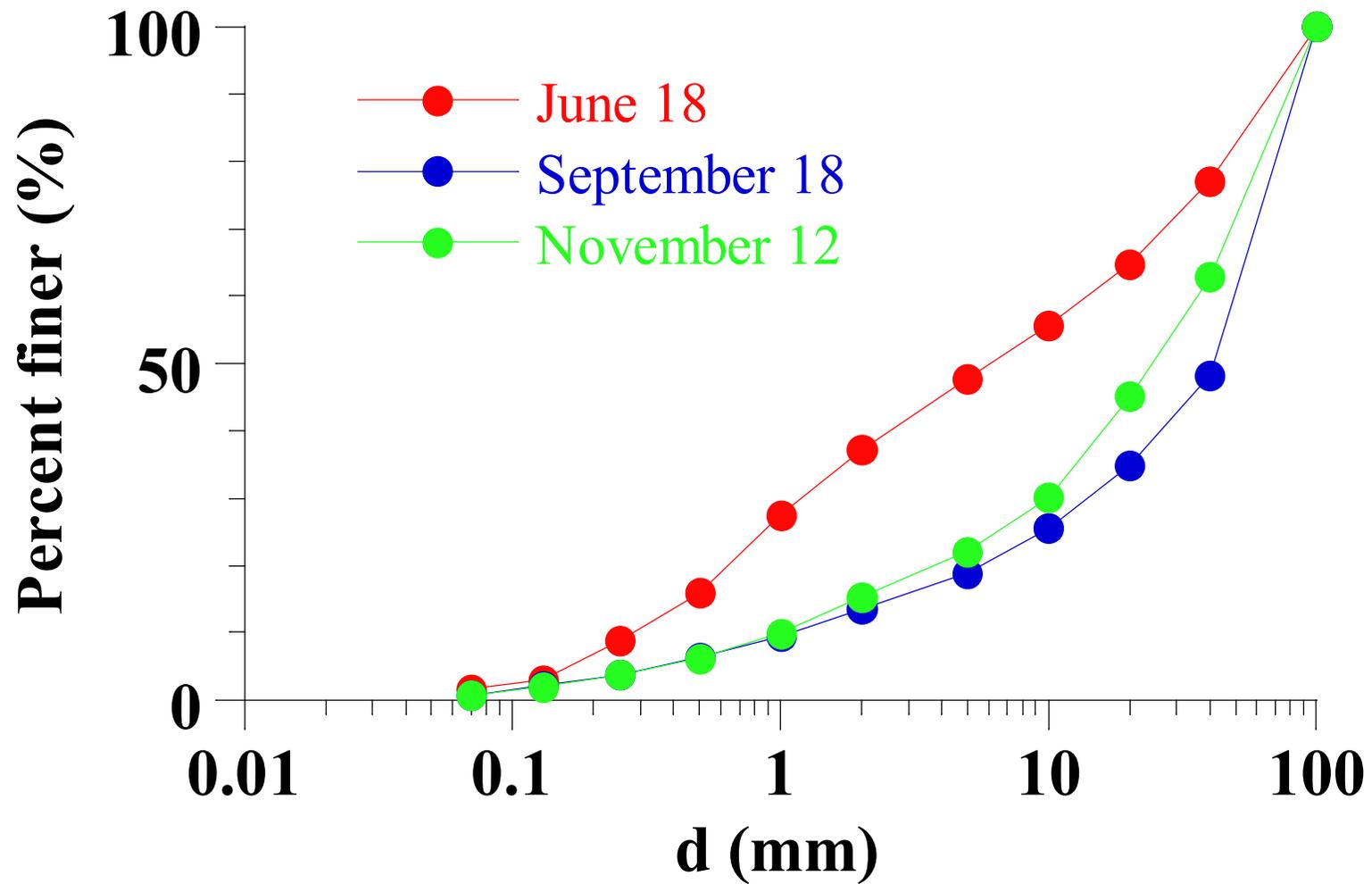
- ◆ 堰堤における堆積土砂
- ◆ 階段状河床のプール内の堆積土砂量
- ◆ 源頭部における凍結融解による土砂生産量
- ◆ 堰堤における流量と流域内雨量

土砂生産と降雨イベントとの関係



2002年における週降雨量と週土砂生産量

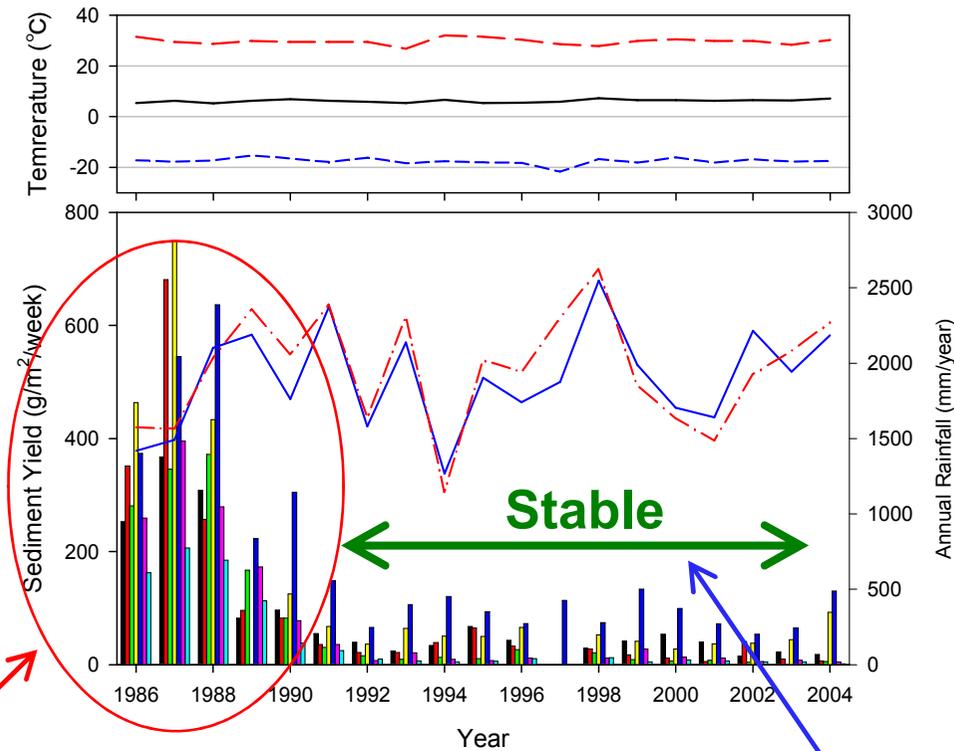
生産土砂の粒度分布



1986年からの土砂生産量の変動

Heavy rainfalls
1979 to 1983

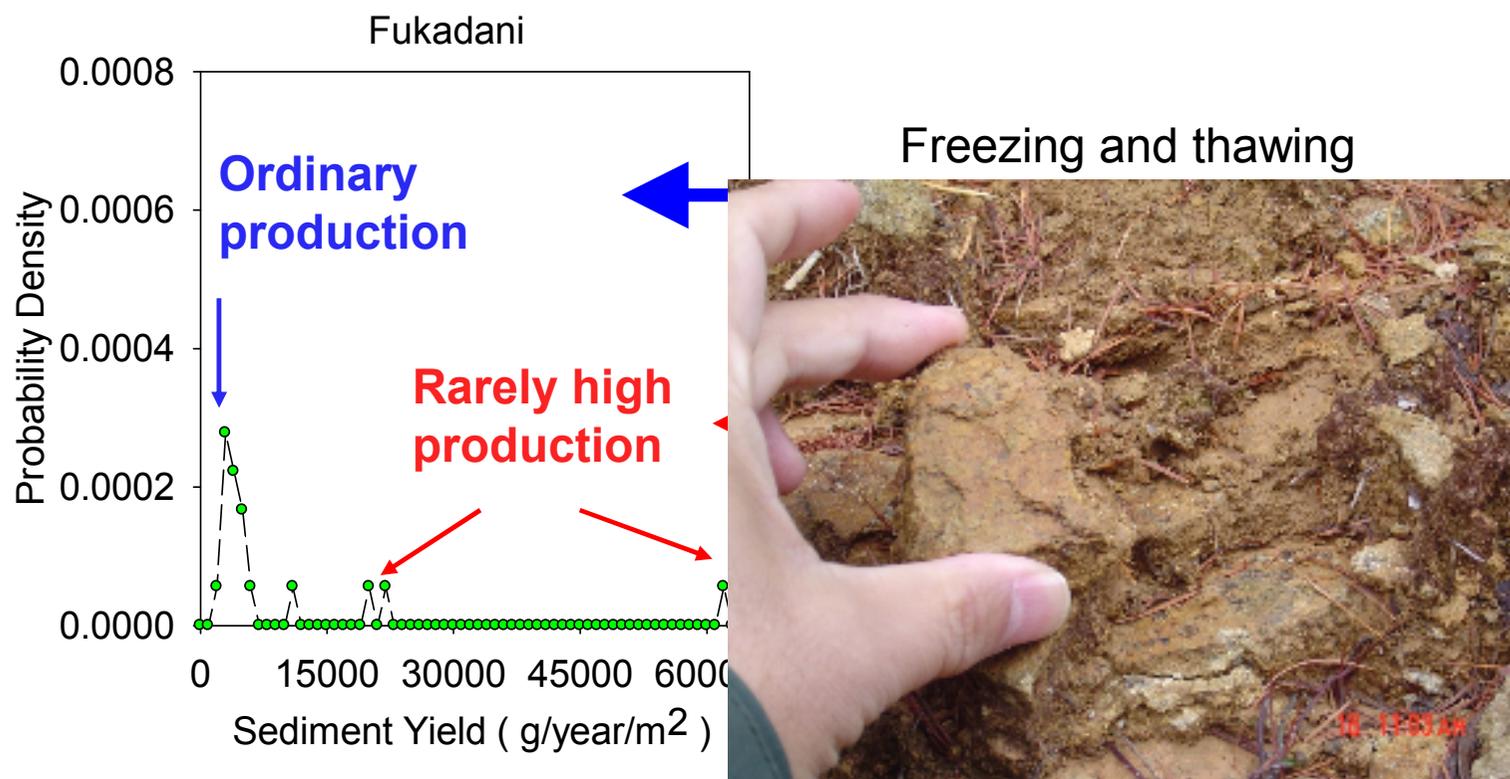
Rarely high production



- | | |
|--------------------------------|--|
| ■ No.1 (Tenmondai1) | — Average Temperature (Tenmondai1) |
| ■ No.2 (Tenmondai2) | - - - Maximum Temperature (Tenmondai1) |
| ■ No.3 (Tenmondai3) | - - - Minimum Temperature (Tenmondai1) |
| ■ No.6 (Hirayu) | |
| ■ No.7 (Hukatani) | |
| ■ No.8 (Sorayama1) | |
| ■ No.9 (Sorayama2) | |
| — Annual Rainfall (Kamioka) | |
| - - - Annual Rainfall (Tochio) | |

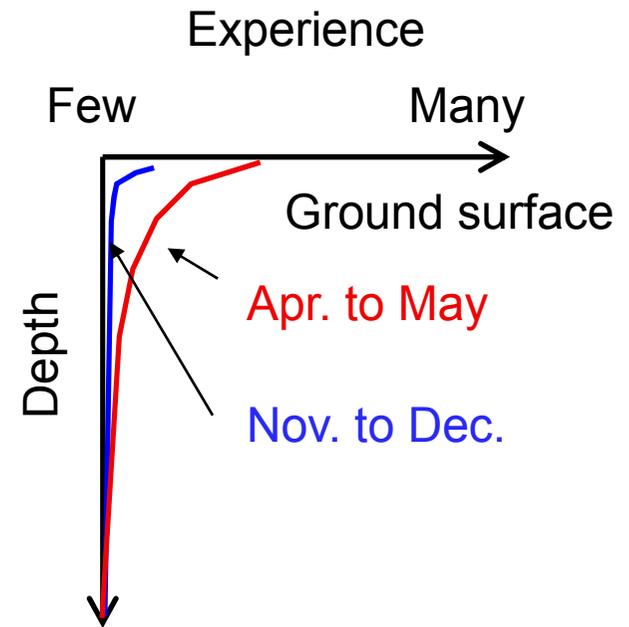
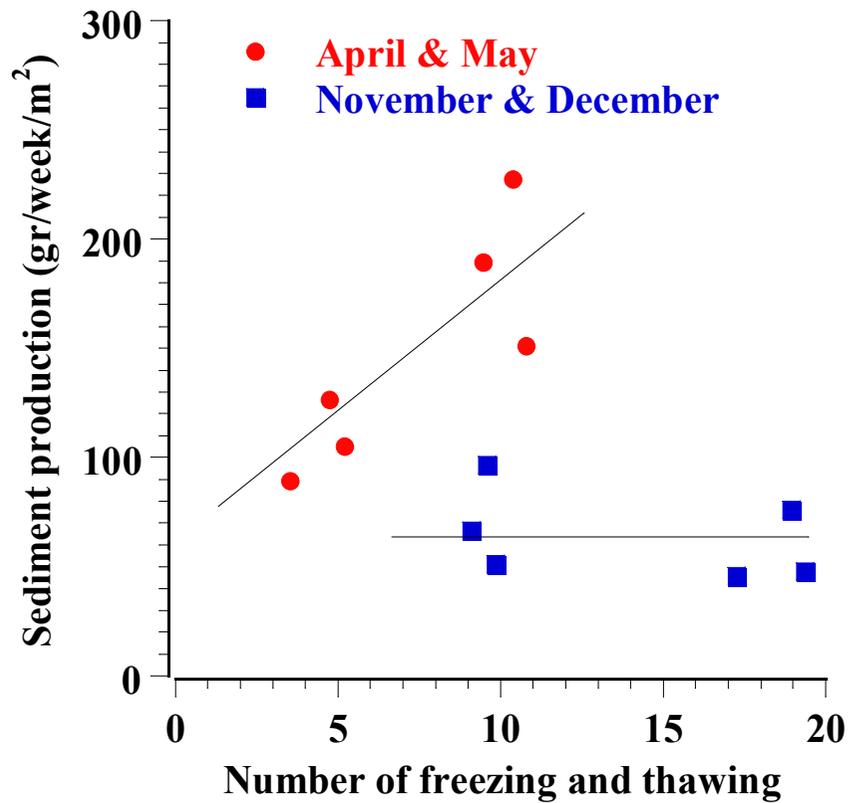
Ordinary production

土砂生産量の確率分布



Sediment production at a bare slope

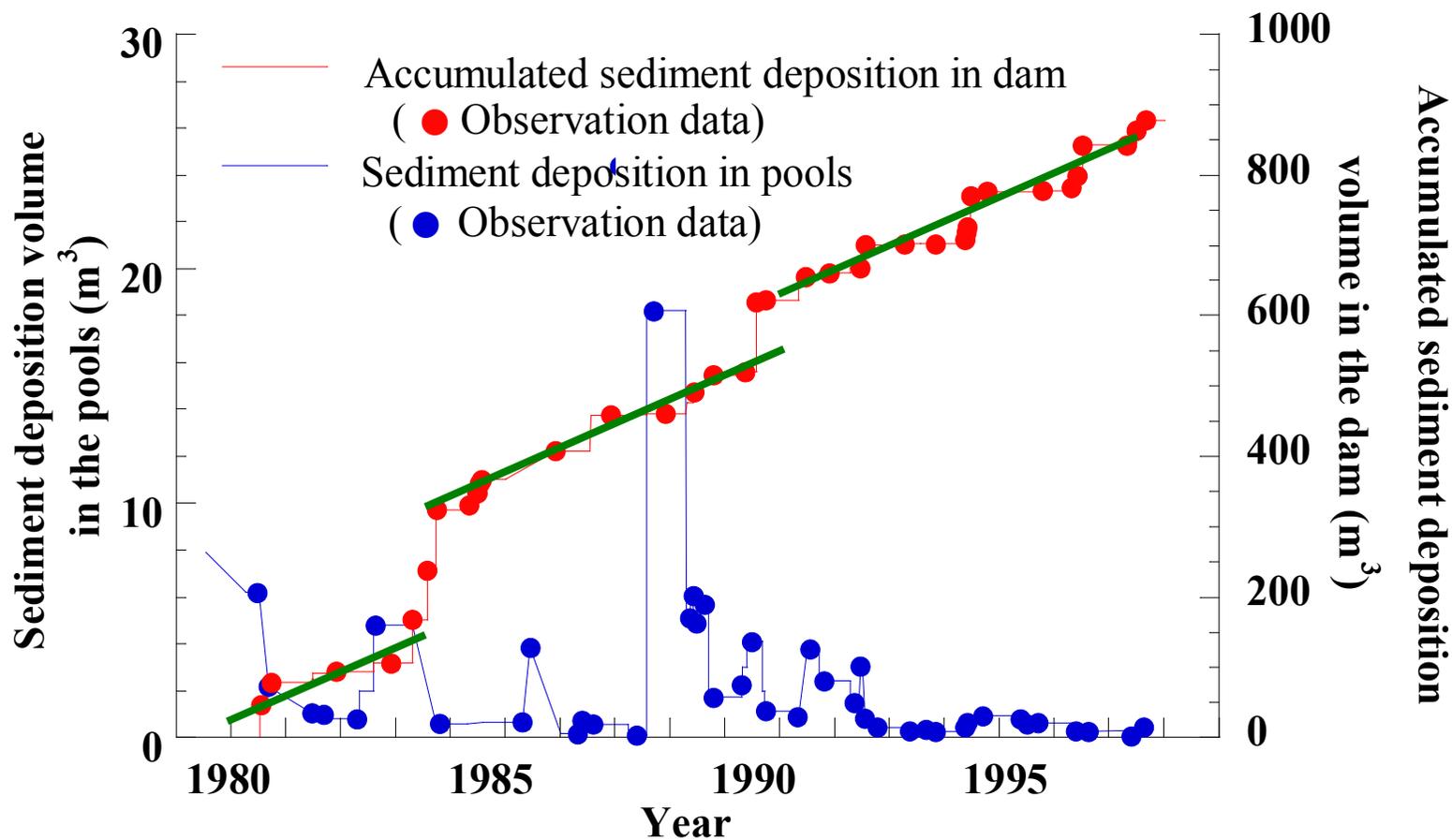
凍結融解作用の影響



Experience of freezing and thawing is very important factor.

ヒル谷流域における土砂生産

堰堤堆積土砂量 階段状河床プール内堆積量



期間別土砂生産量

V_f : F期(冬季から春季)
凍結融解作用時の土砂生産量

V_r : R期(梅雨期から秋季)
集中豪雨, 台風期の土砂生産量

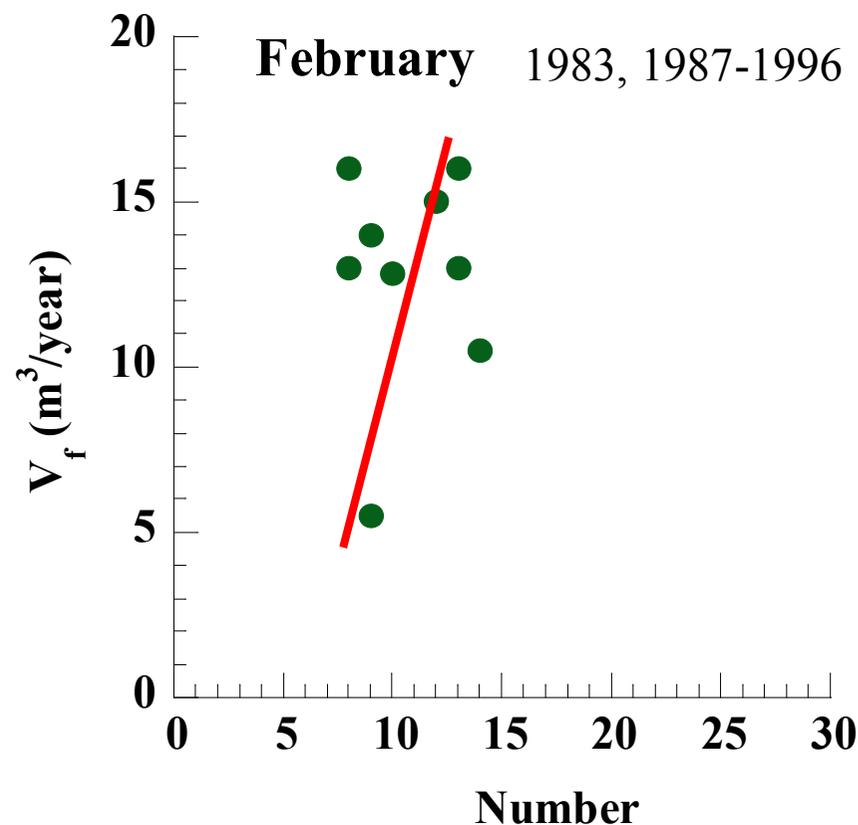
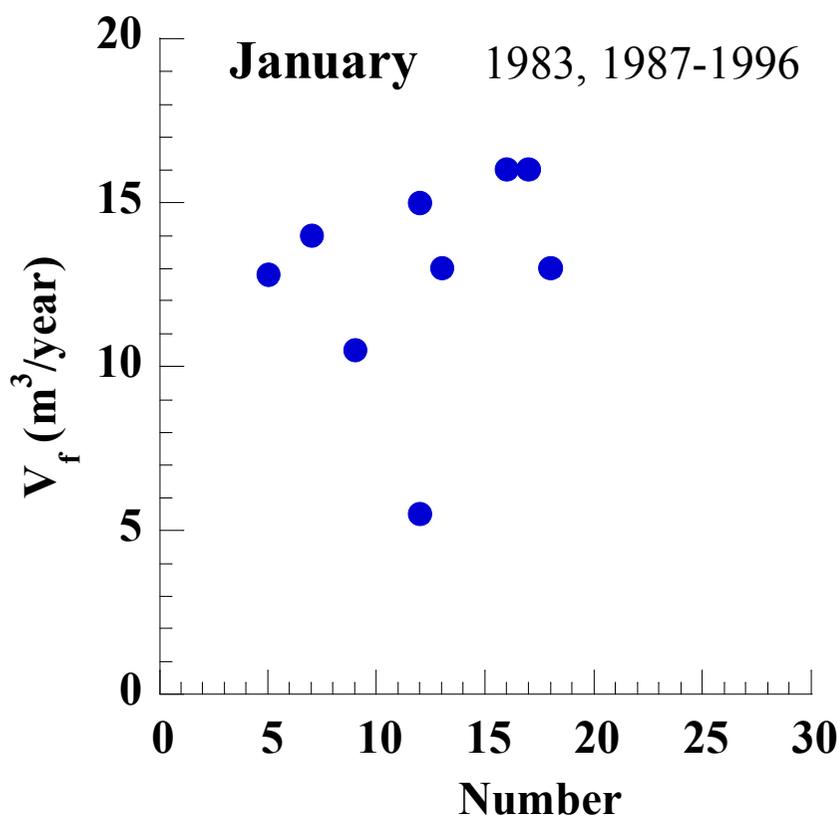
データ

V_d : 各期間内堰堤堆積土砂量

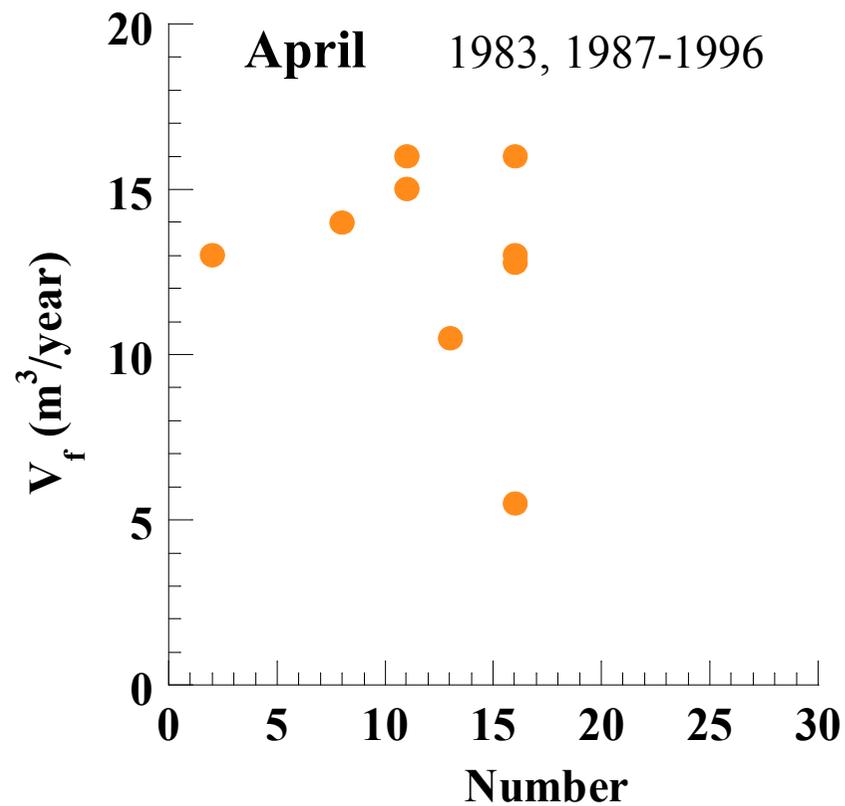
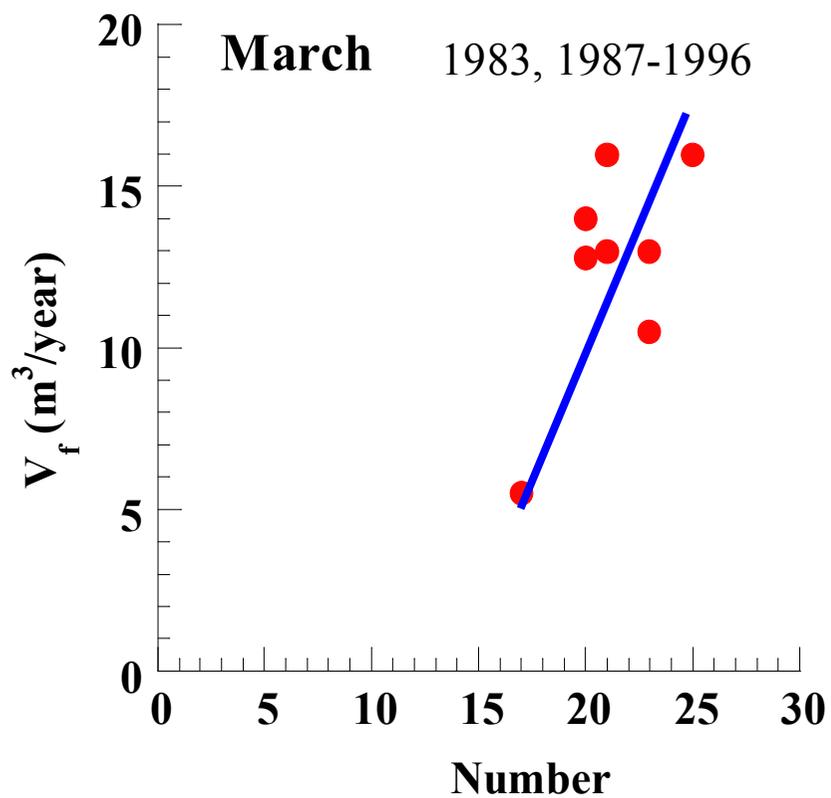
P : 各期間内プール堆積土砂量の変化量
(ただし, 源頭部付近は含まない)

v : 源頭部での凍結融解による生産土砂量

凍結融解と土砂生産量の関係

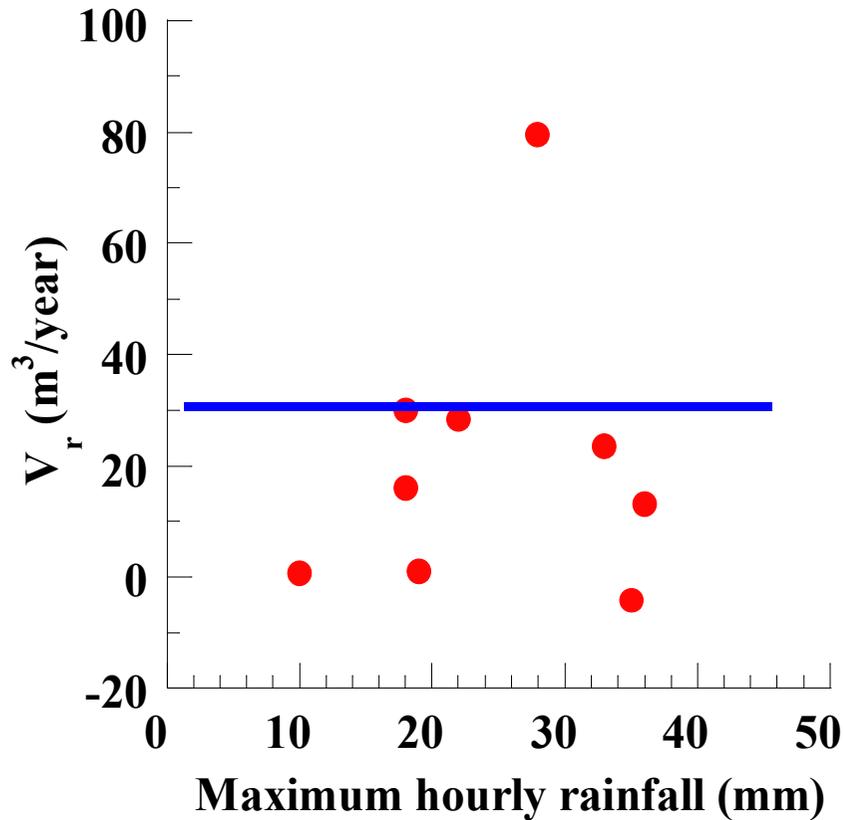


観測所において気温が $0^{\circ}C$ を上下する回数と
F期土砂生産量 (Case 1)

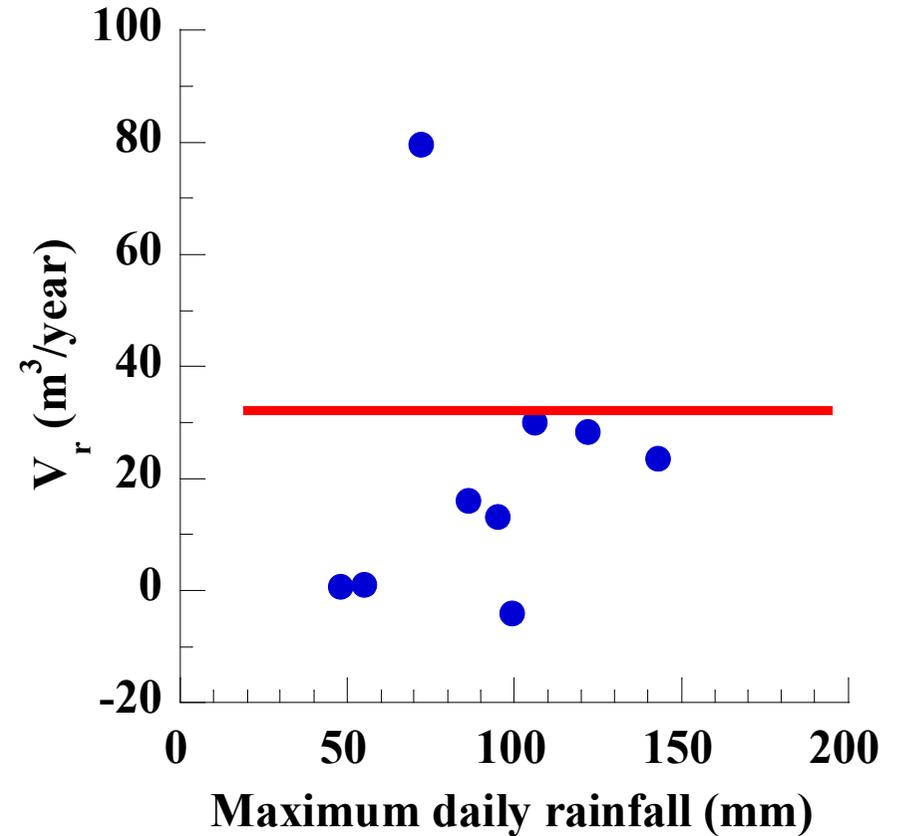


観測所において気温が0°Cを上下する回数と
F期土砂生産量 (Case 1)

降雨量とR期土砂生産量の関係

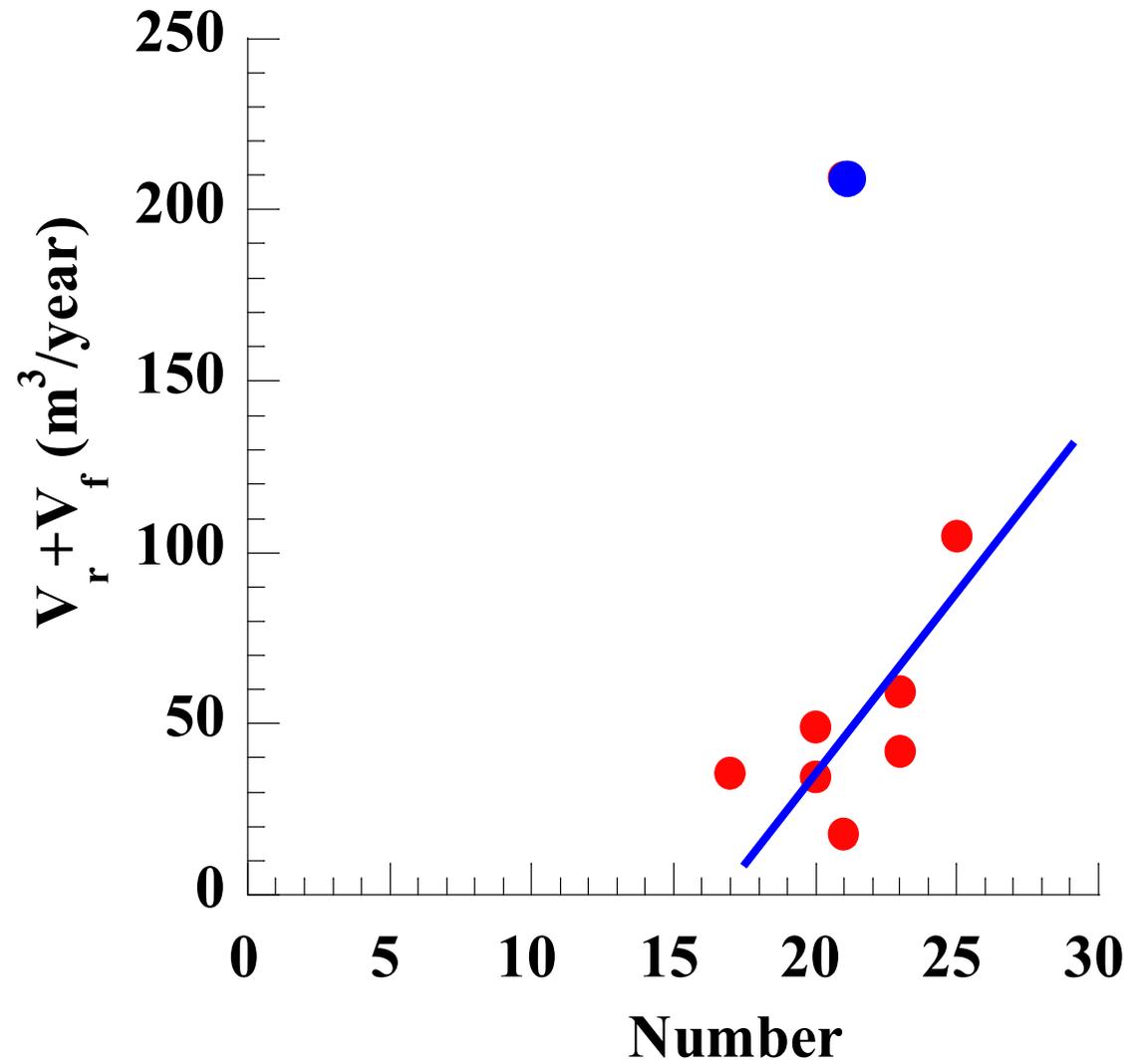


年最大時間降雨量と
R期土砂生産量

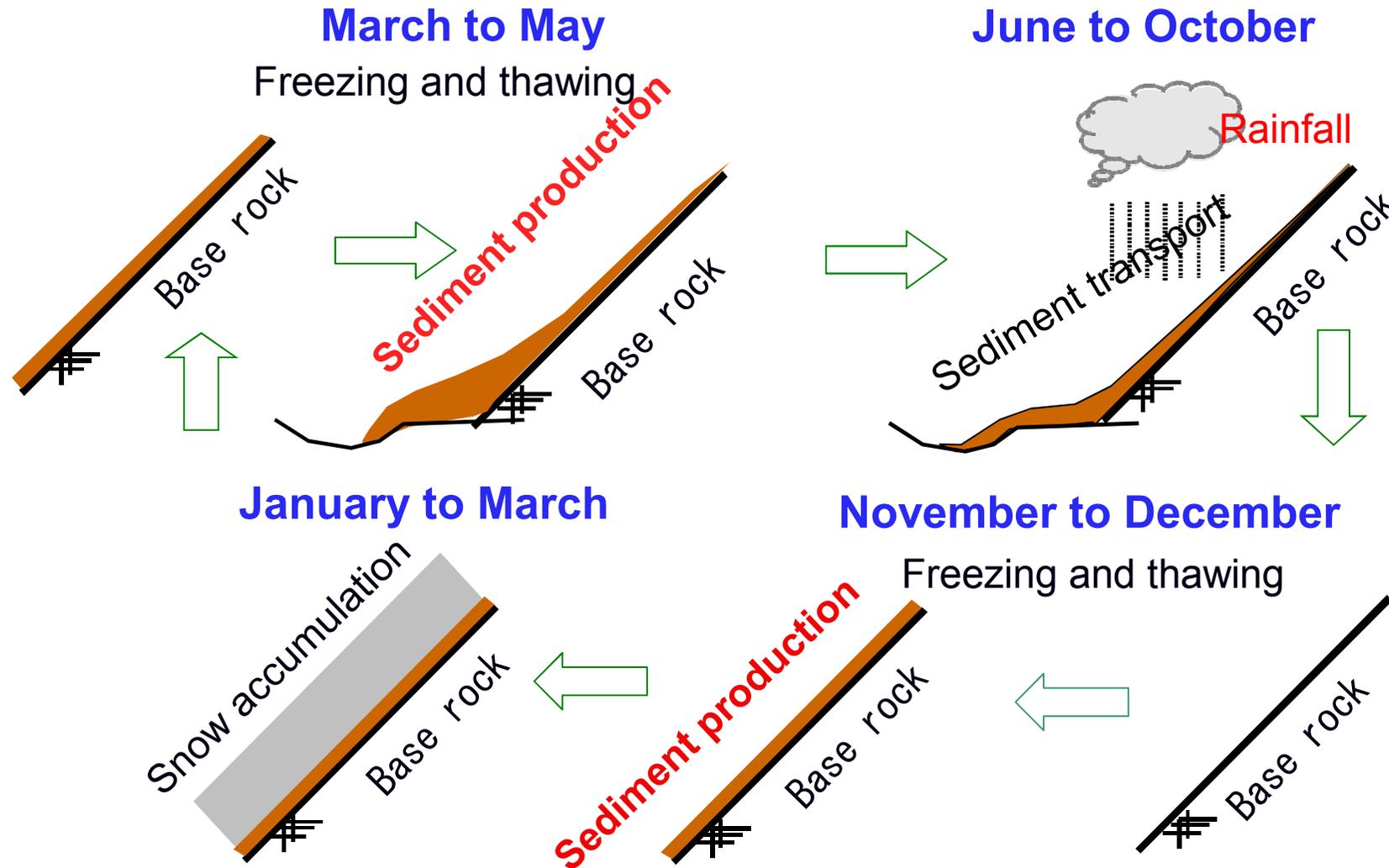


年最大日降雨量と
R期土砂生産量

凍結融解と年間土砂生産量



ヒル谷における土砂生産プロセス

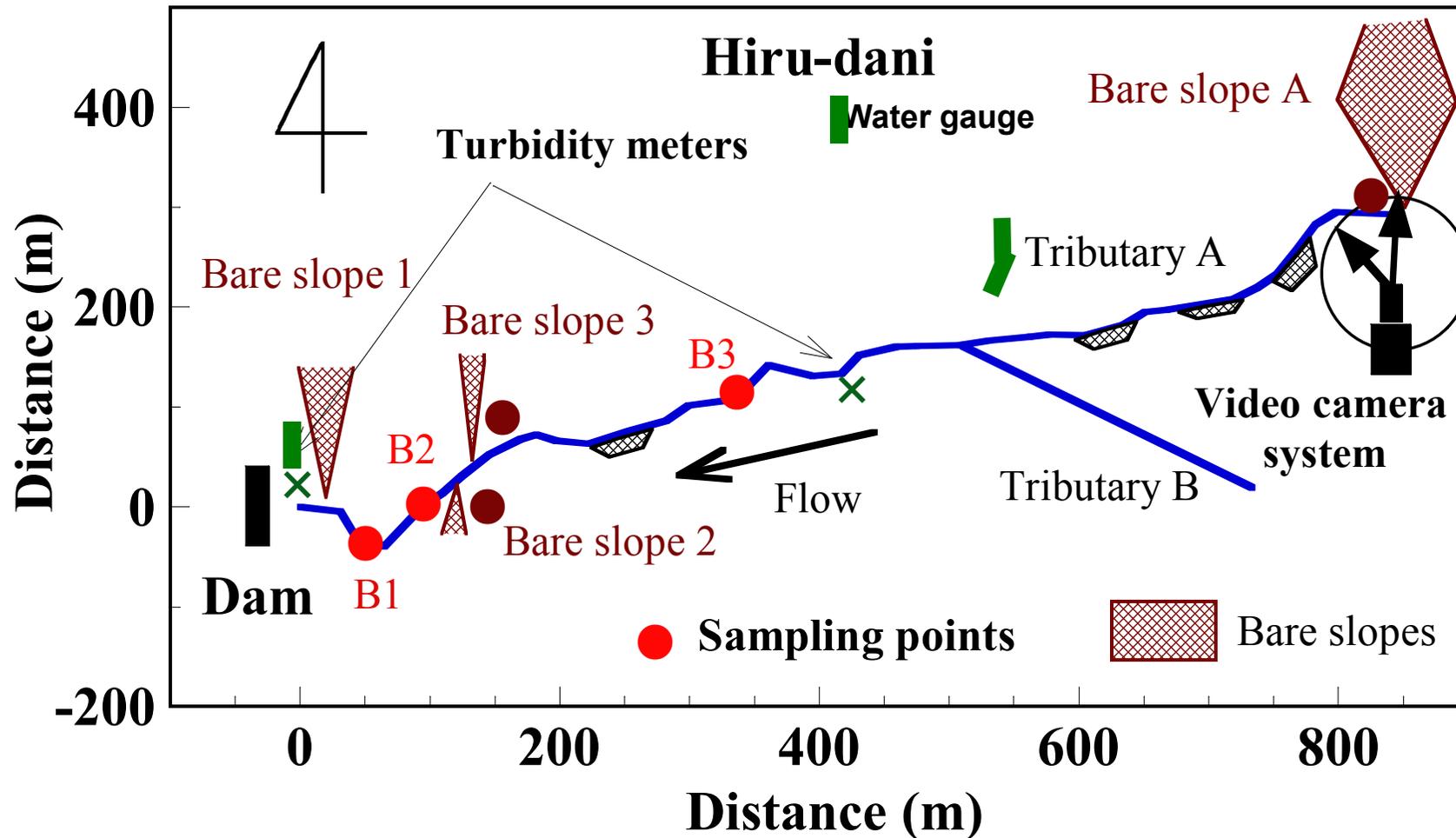


土砂生産特性

- ◆ 土砂生産にとって降雨は重要な外力
- ◆ 土砂生産源の状態の季節変動の影響が大きい
 - 土砂生産量と降雨量は強い相関があるとはいえない
 - 生産土砂の粒度分布が季節的に変化
- ◆ 凍結融解作用に支配される土砂生産
- ◆ 高強度の降雨による土砂生産

源頭部からの土砂流出と濁度変化

ヒル谷流域



源頭部の裸地

早春



晩秋



支川合流点



堰堤上流



階段状河床形

プール部での土砂堆積



試驗堰堤





融雪期

源頭部



梅雨期

02-06-11
16:46:40



支川合流部



02-06-24
10:5:33

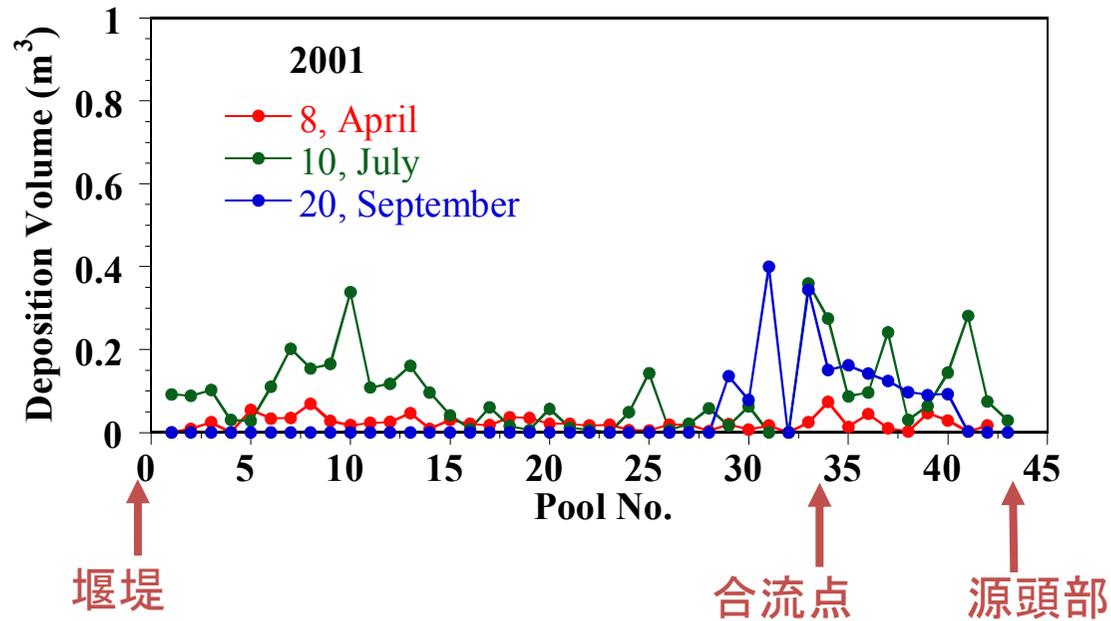
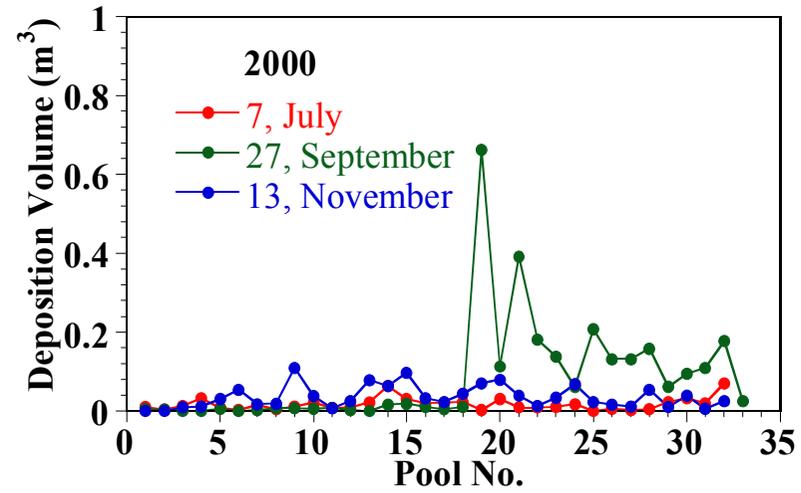
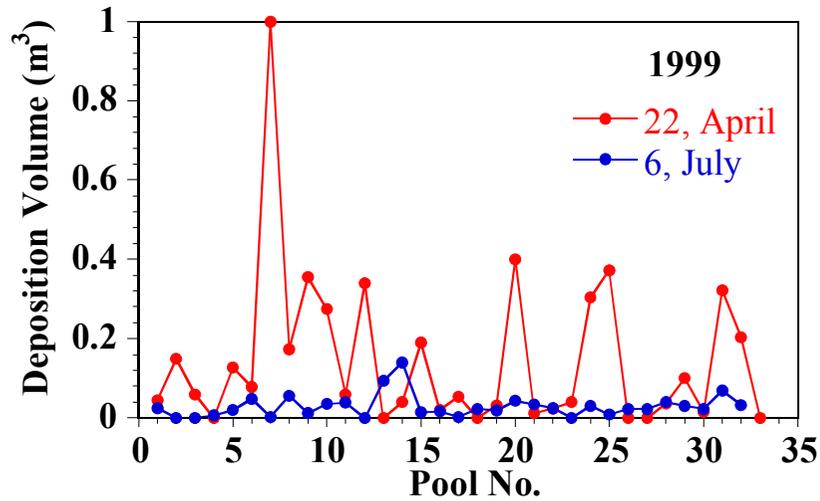


堰堤

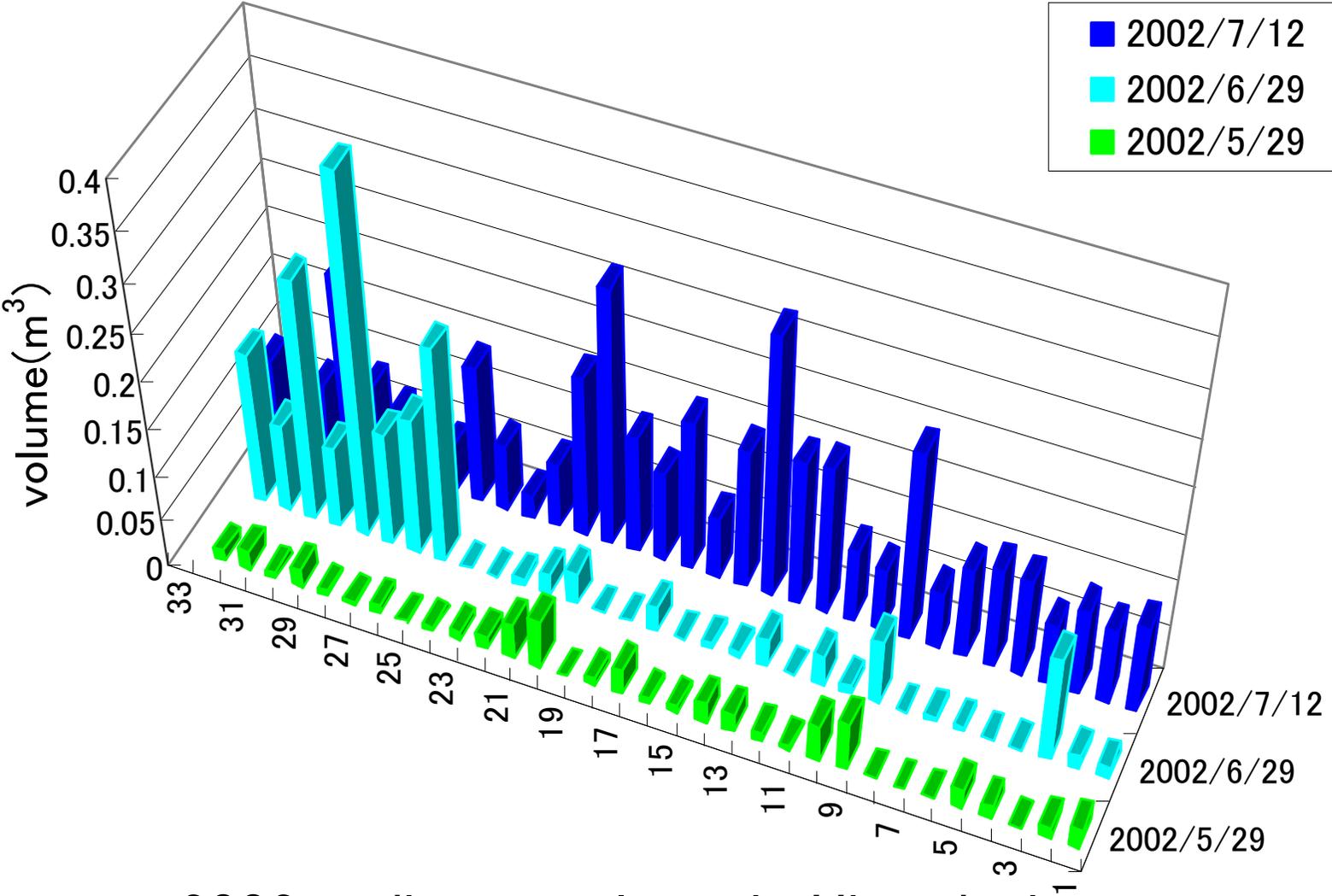


秋季

プール内の土砂堆積量



生産土砂の移動

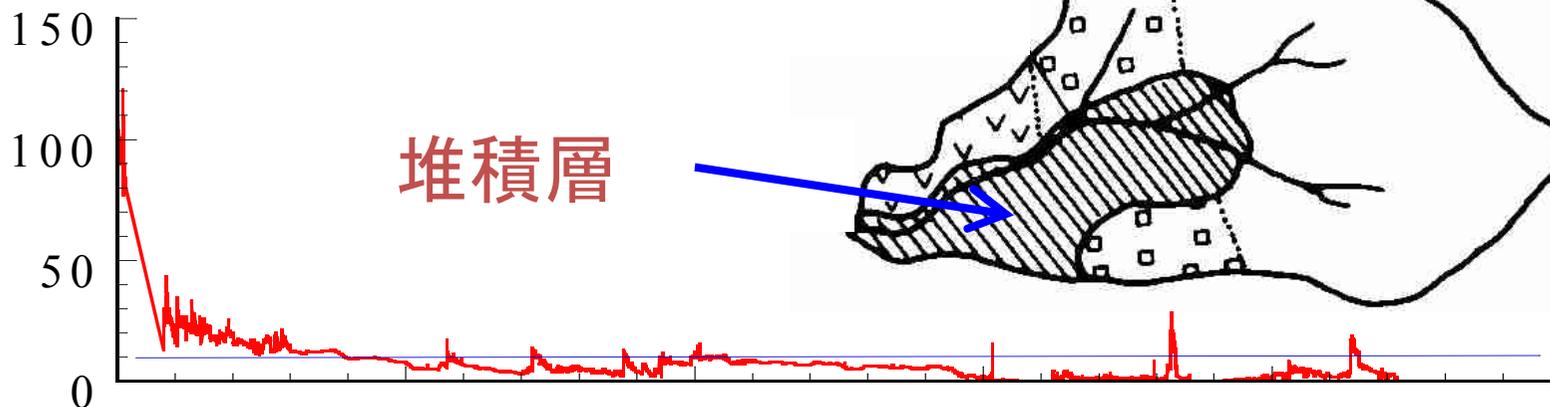


2002 sediment volume in Hiru-dani

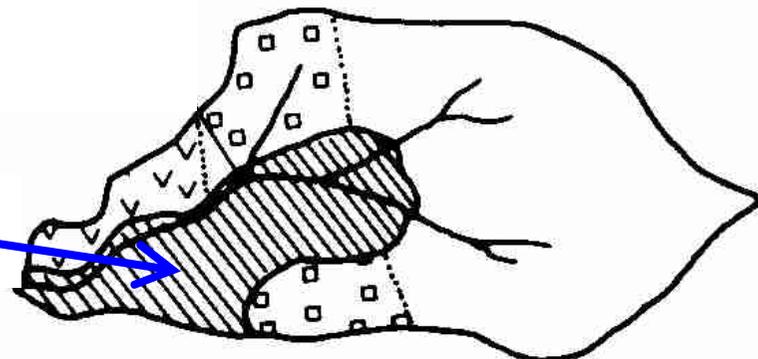
伏流と湧水

源頭部

支川合計流量 (l/s)

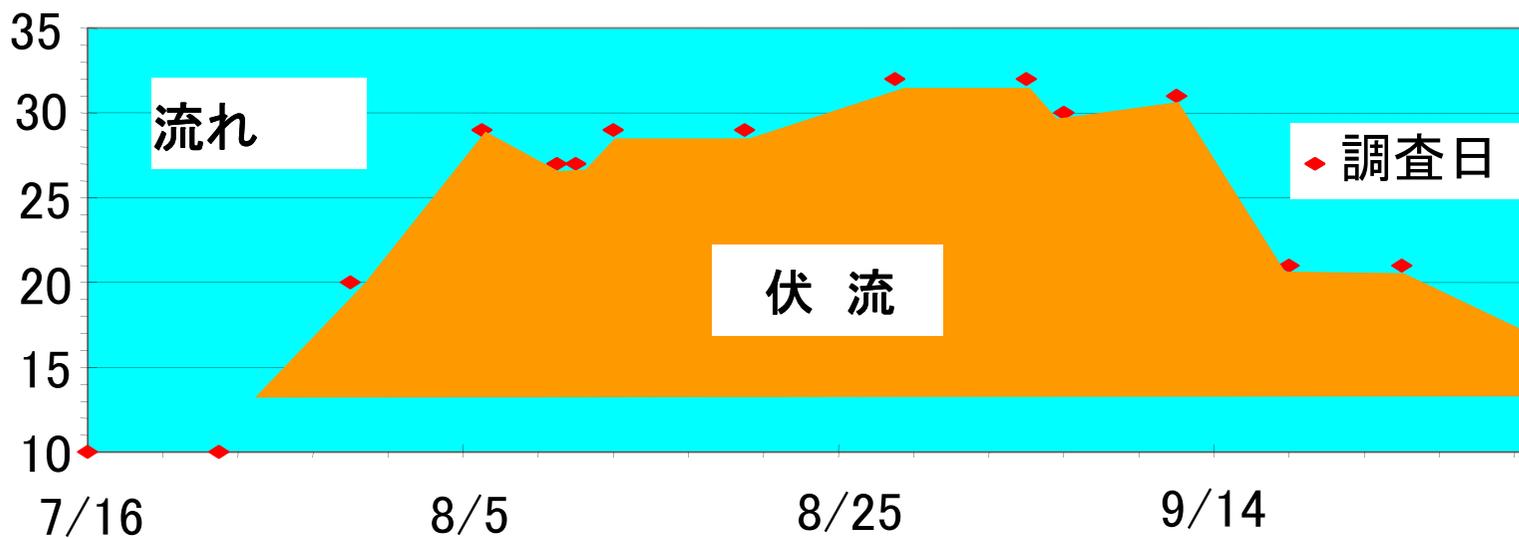


堆積層



合流点

地点番号



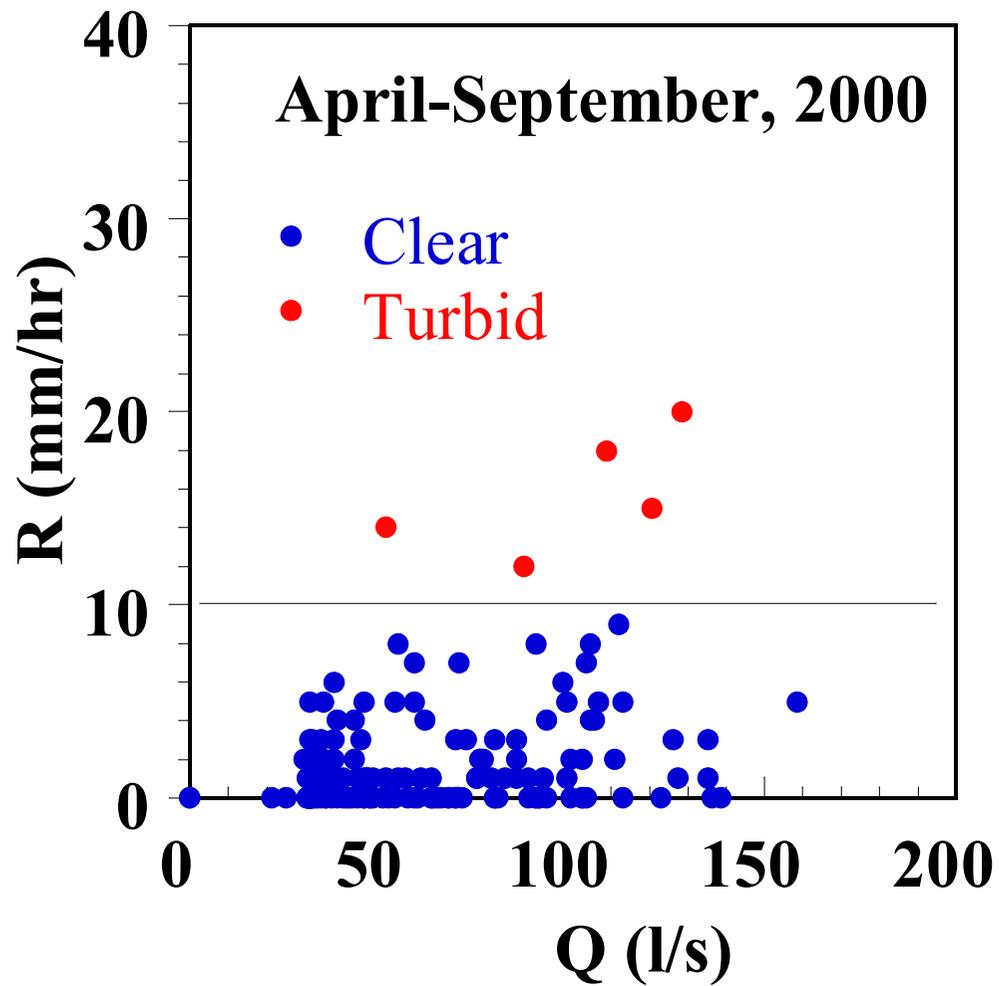
流れ

伏流

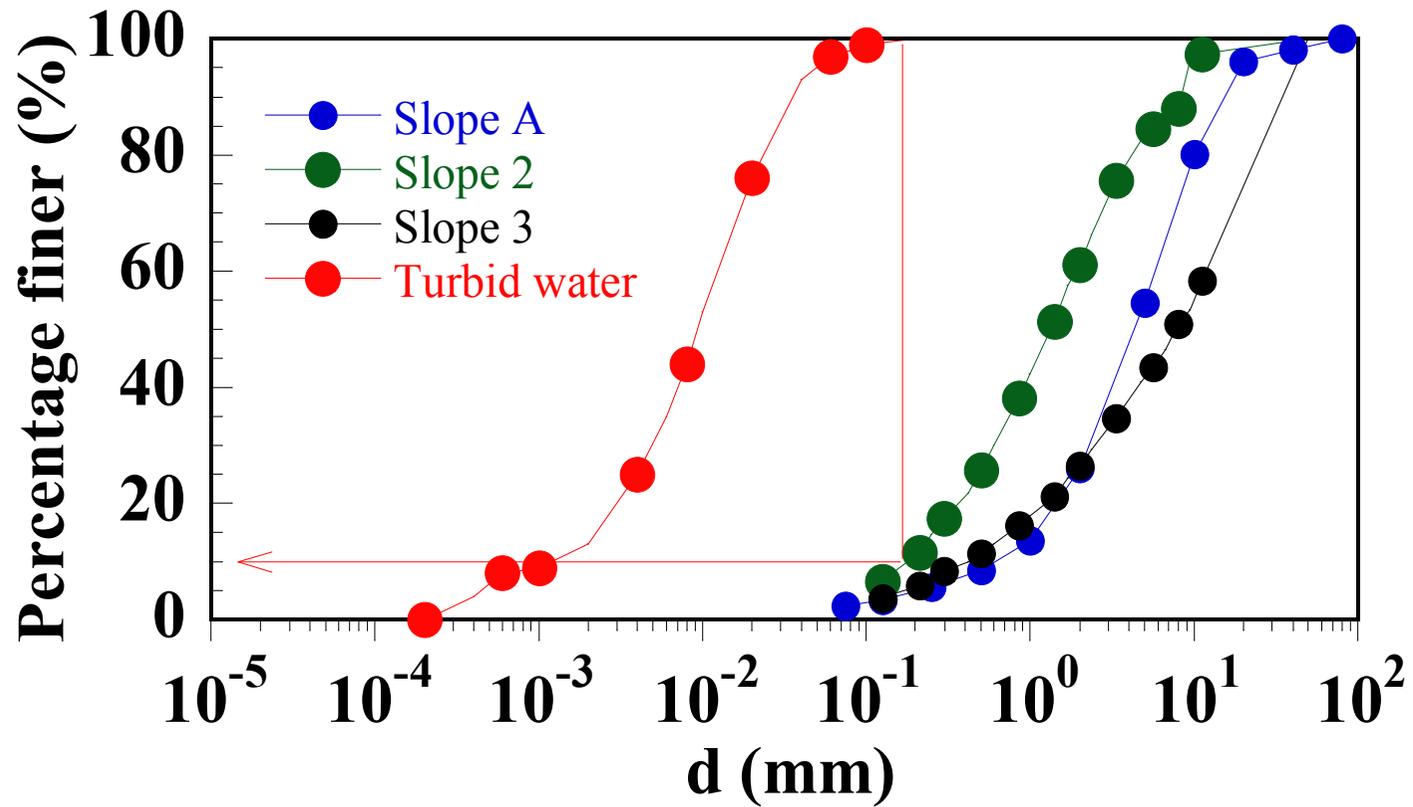
調査日

堰堤

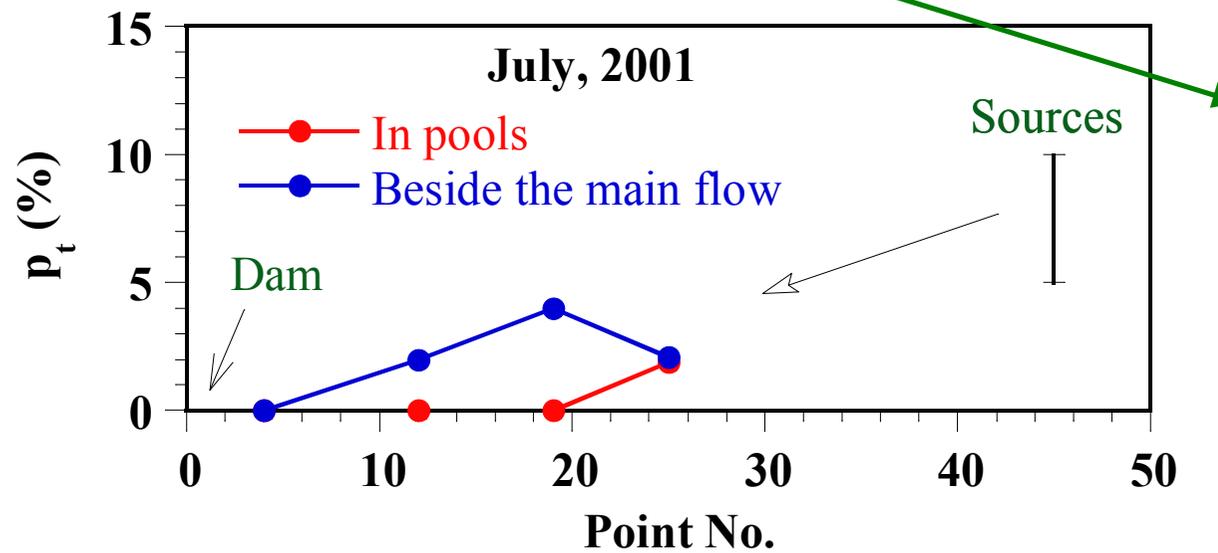
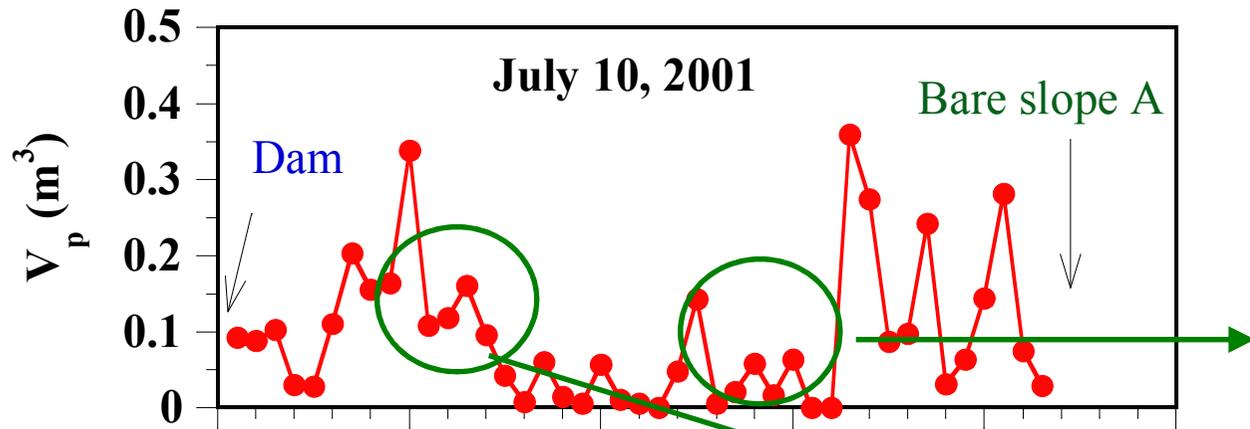
濁水の発生条件



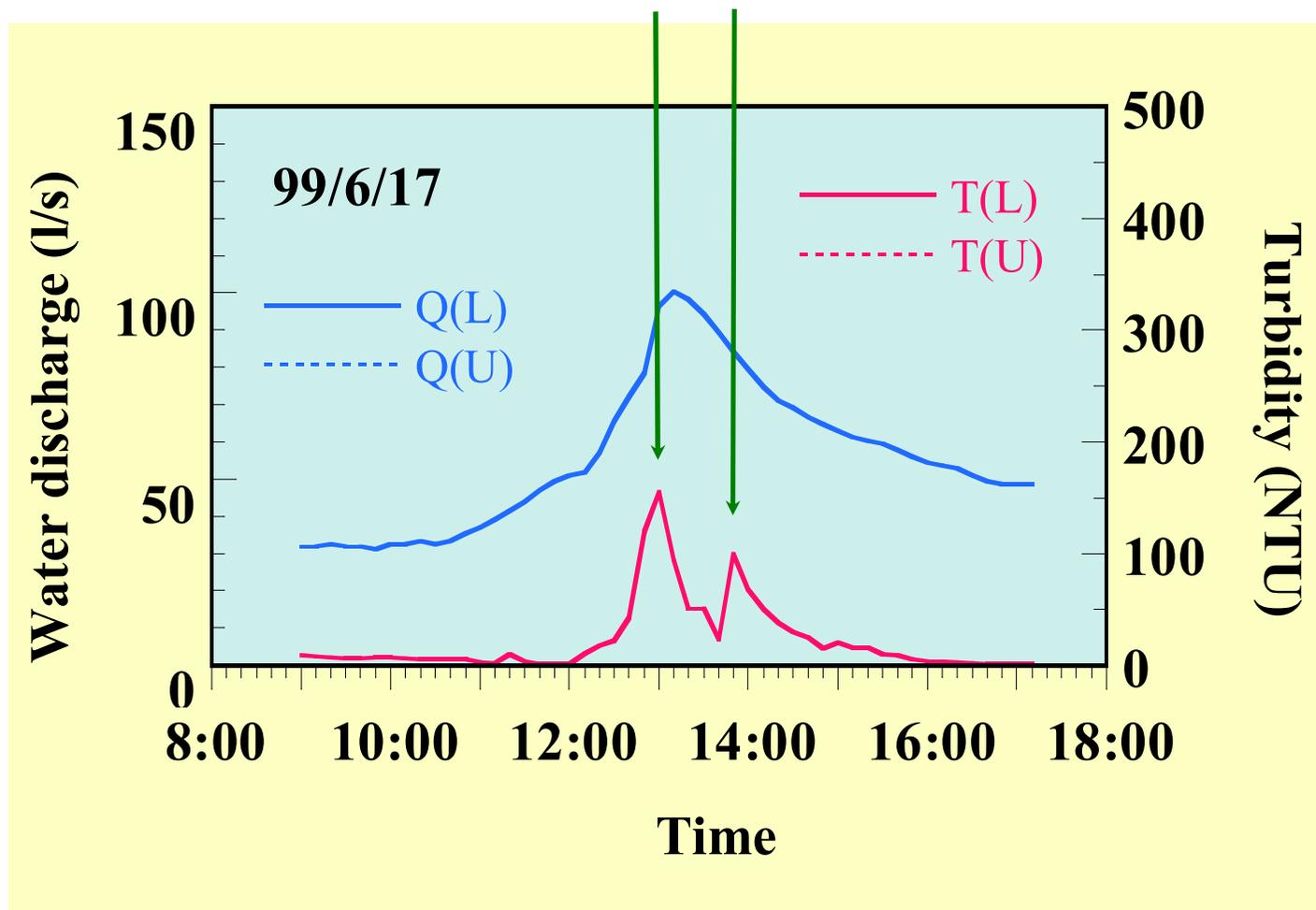
濁度物質と生産土砂の粒度分布



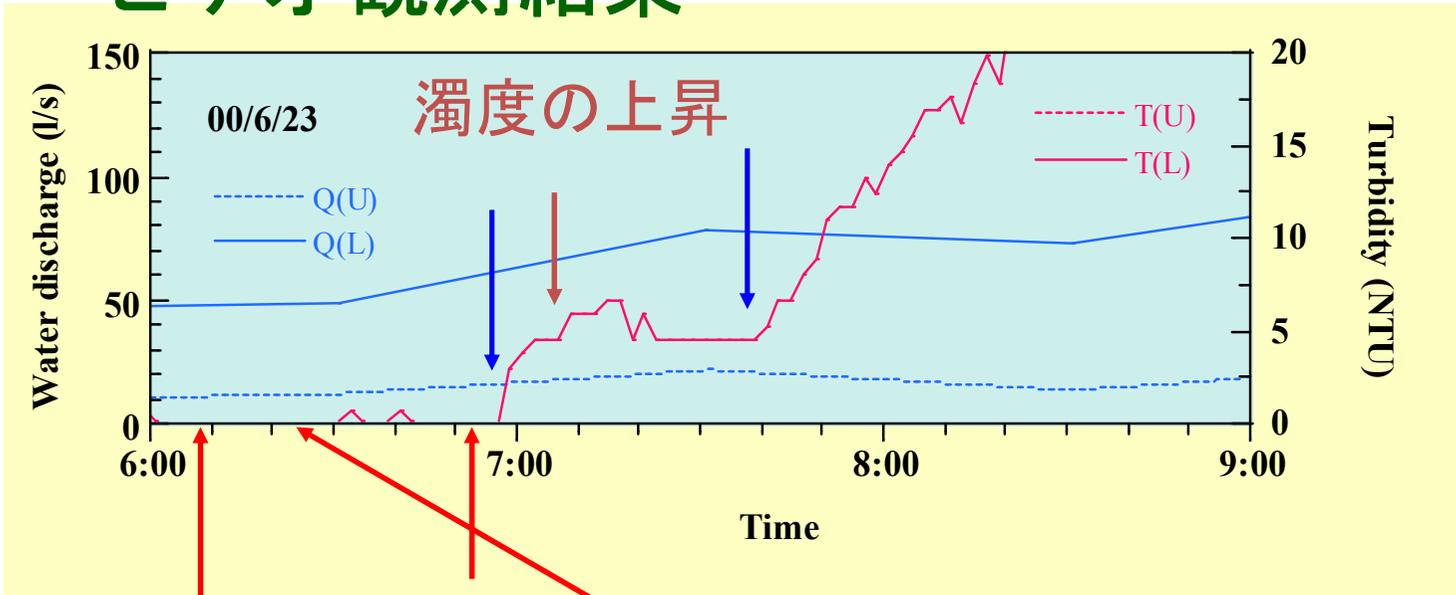
移動土砂中の濁度物質の割合



土砂供給イベントが起こった？



ビデオ観測結果



泥流

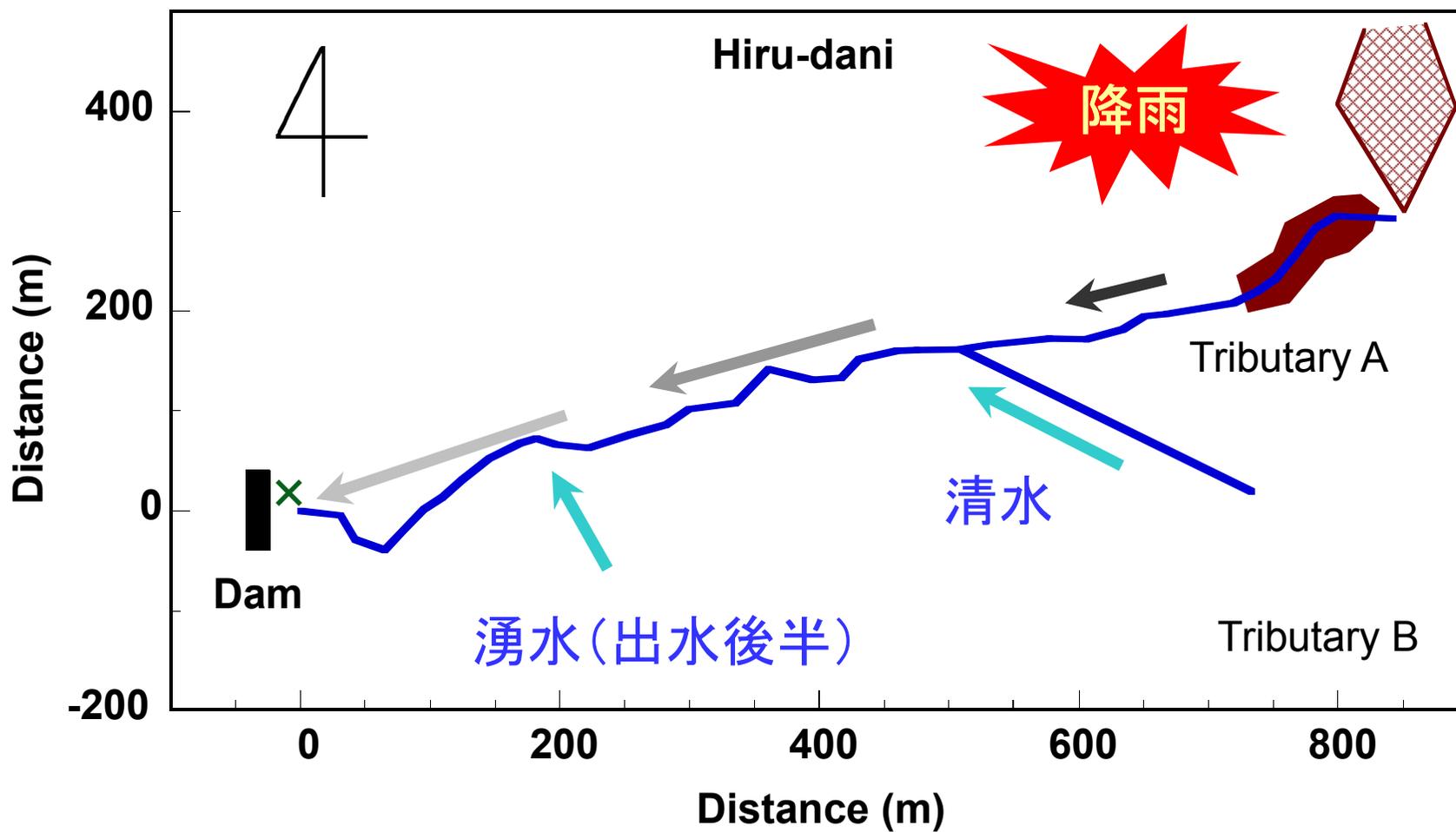


堰堤での濁度変化

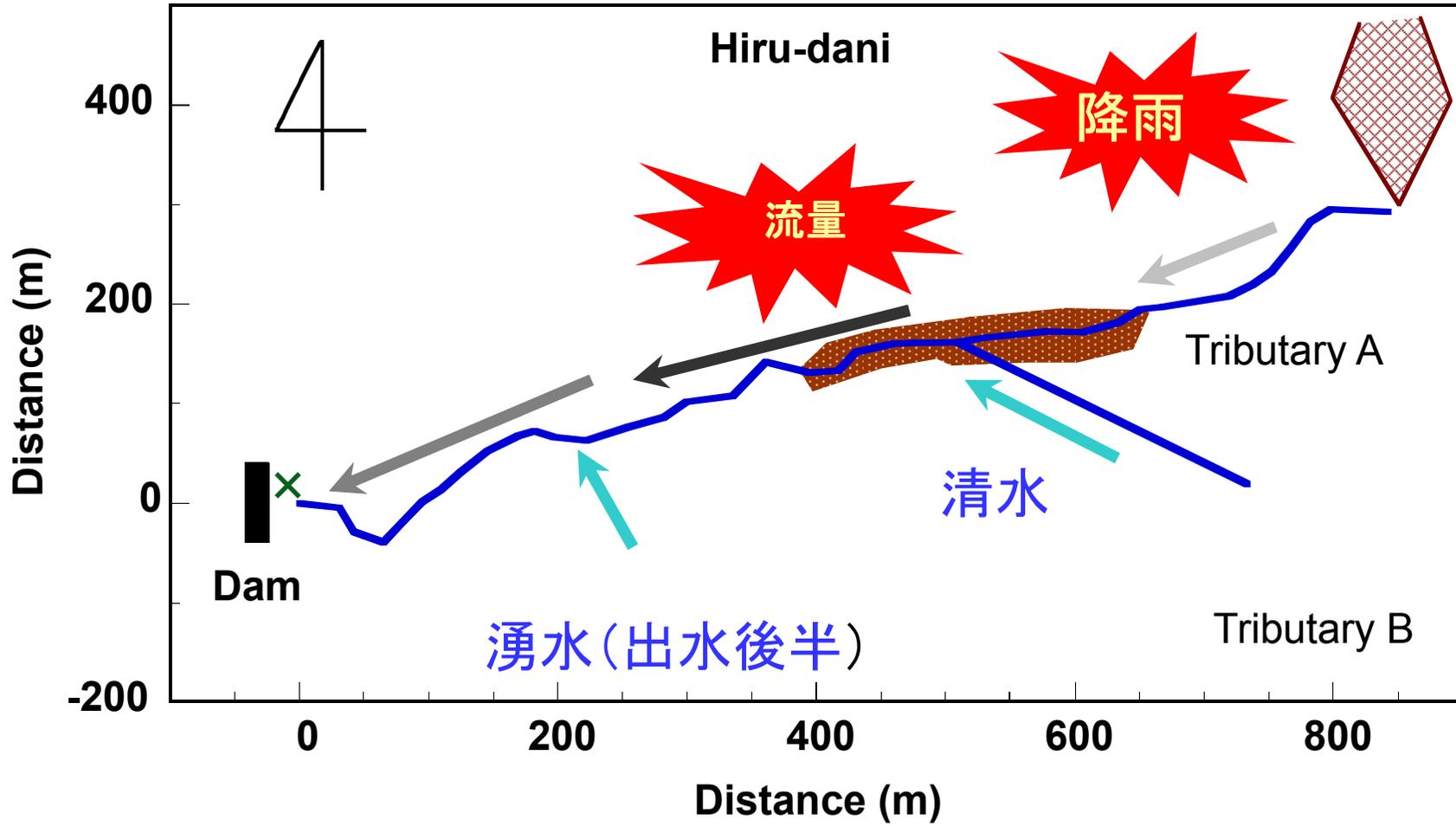
50分程度の遅れ

源頭部での土砂供給イベント

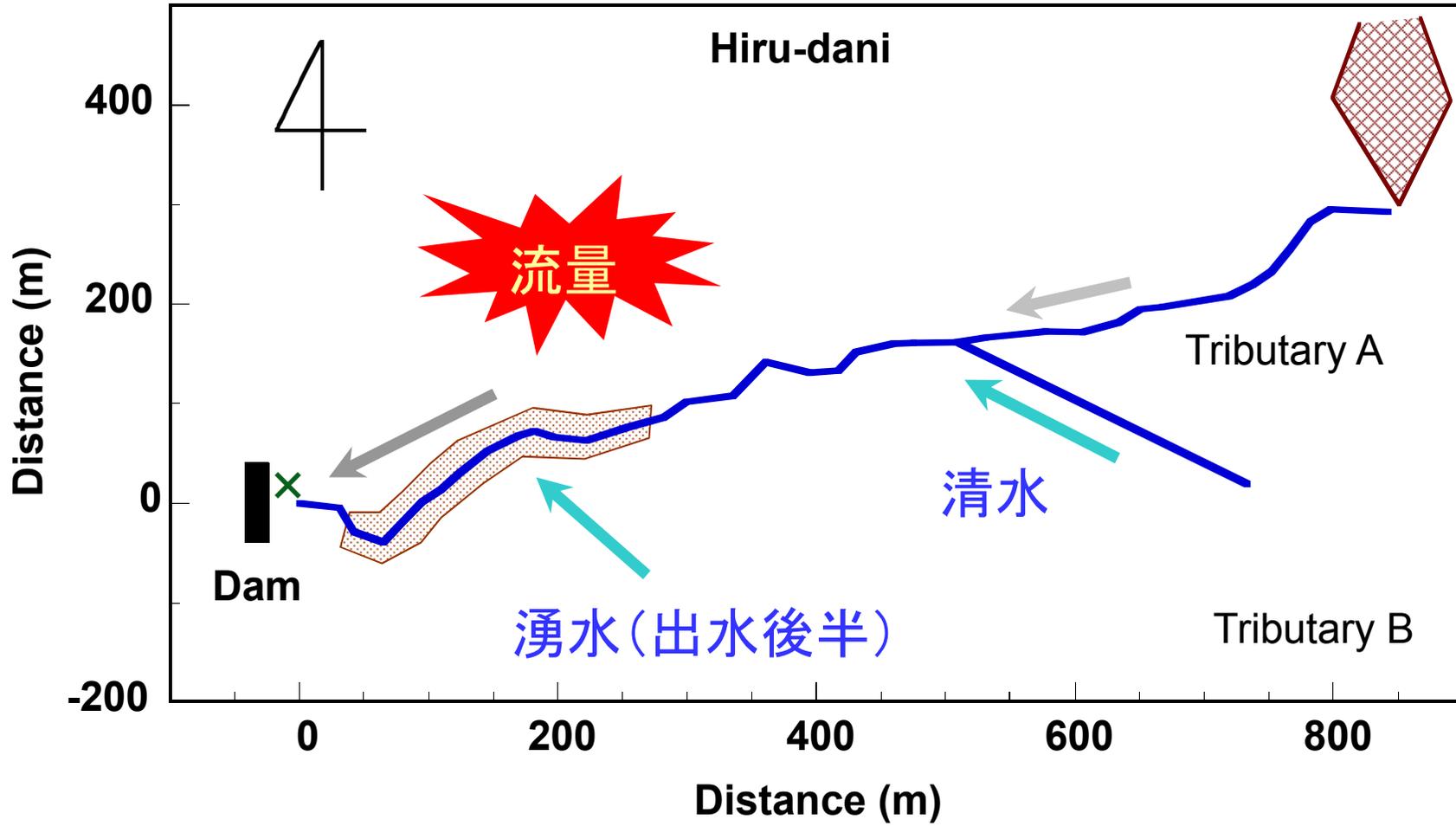
移動初期



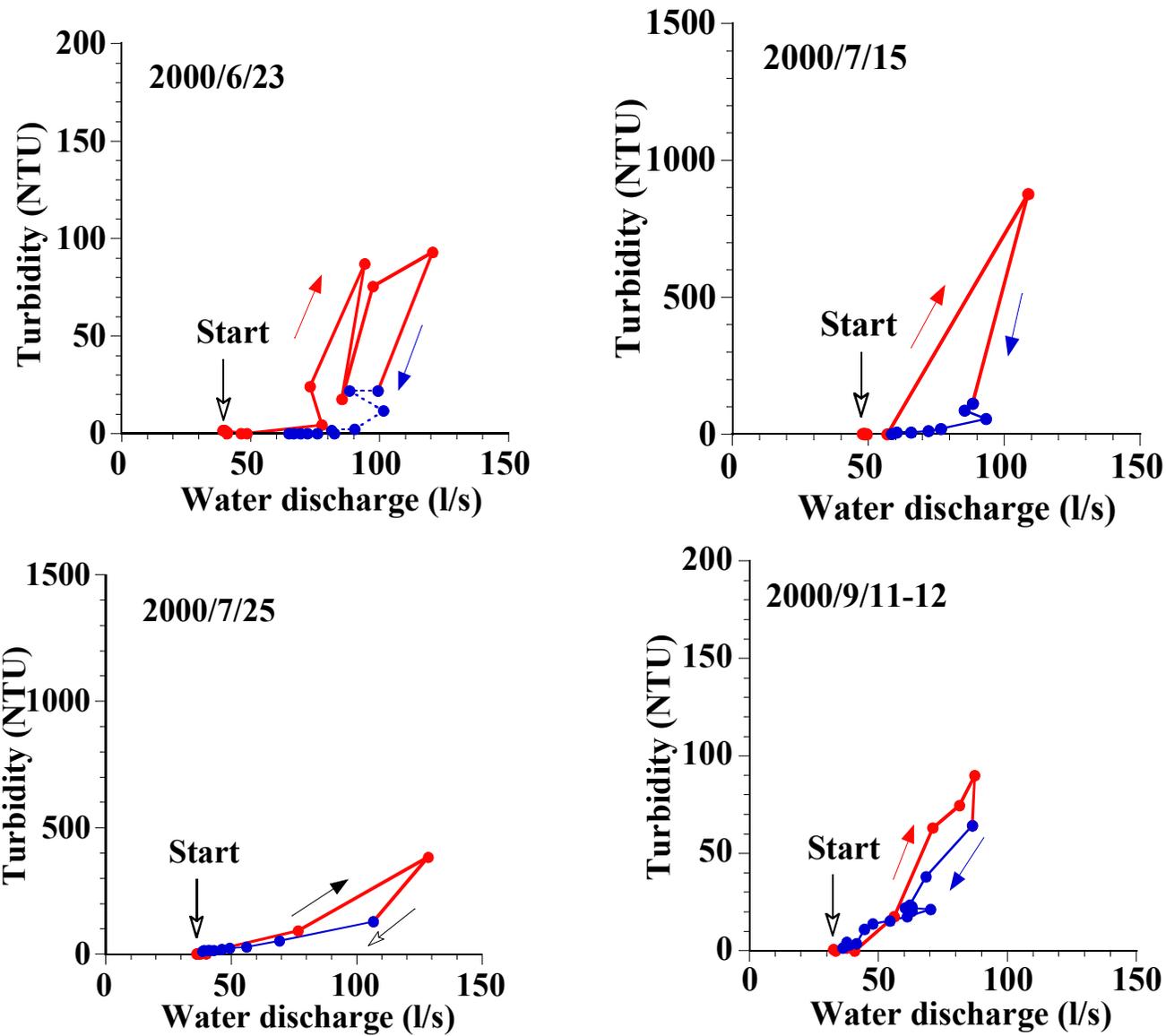
中期



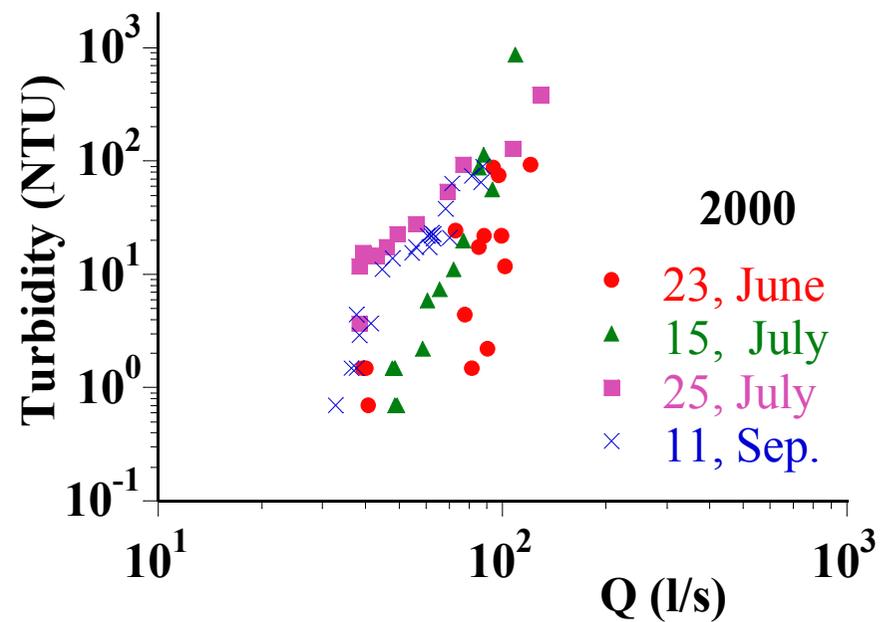
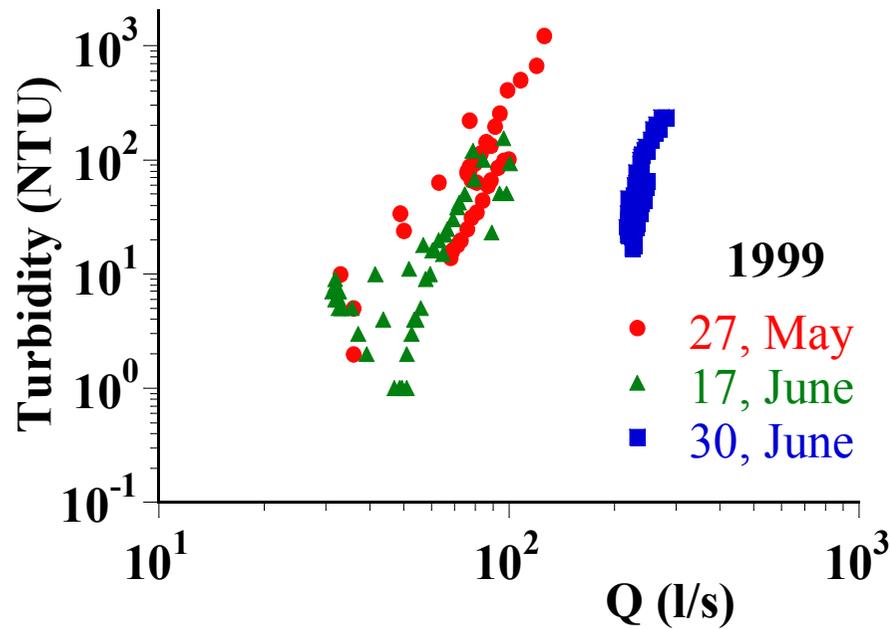
最終期



濁度の履歴から何がわかるか



河道の状況⇔濁度と流量の関係



凍結融解作用による土砂生産



滋賀県 田上山地裸地斜面
(花崗岩)

凍結融解作用による基岩の風化により土砂が発生

着目点

風化基岩の間隙率

基岩が土砂化する時, 何が変化するのか?

基岩 → 風化基岩 → 土砂

間隙率が大きく
間隙構造の変化

風化基岩の強度,
水分移動に影響

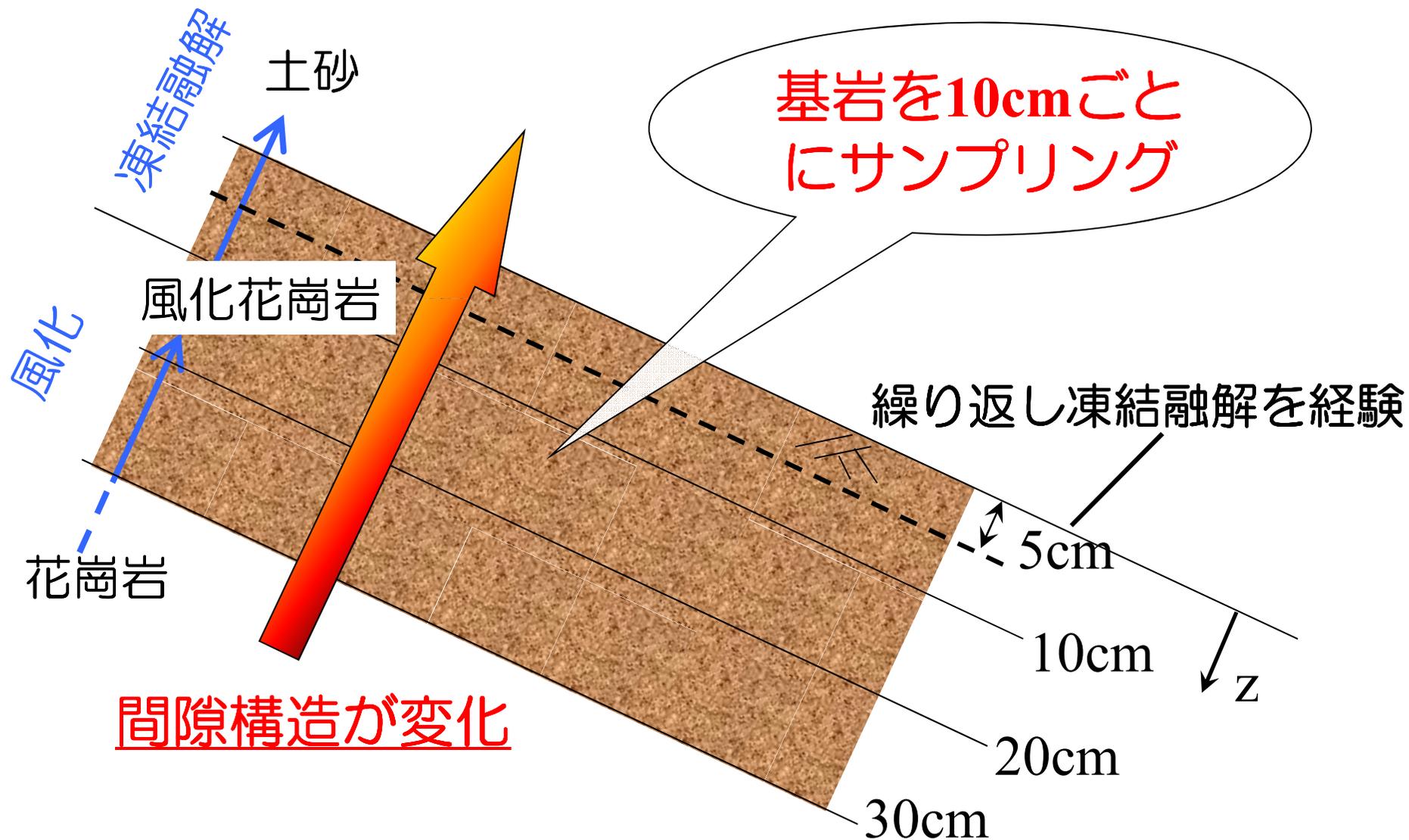
pF試験(間隙率・間隙径を知る)
顕微鏡観察(実際に間隙を見る)

霜柱の形成

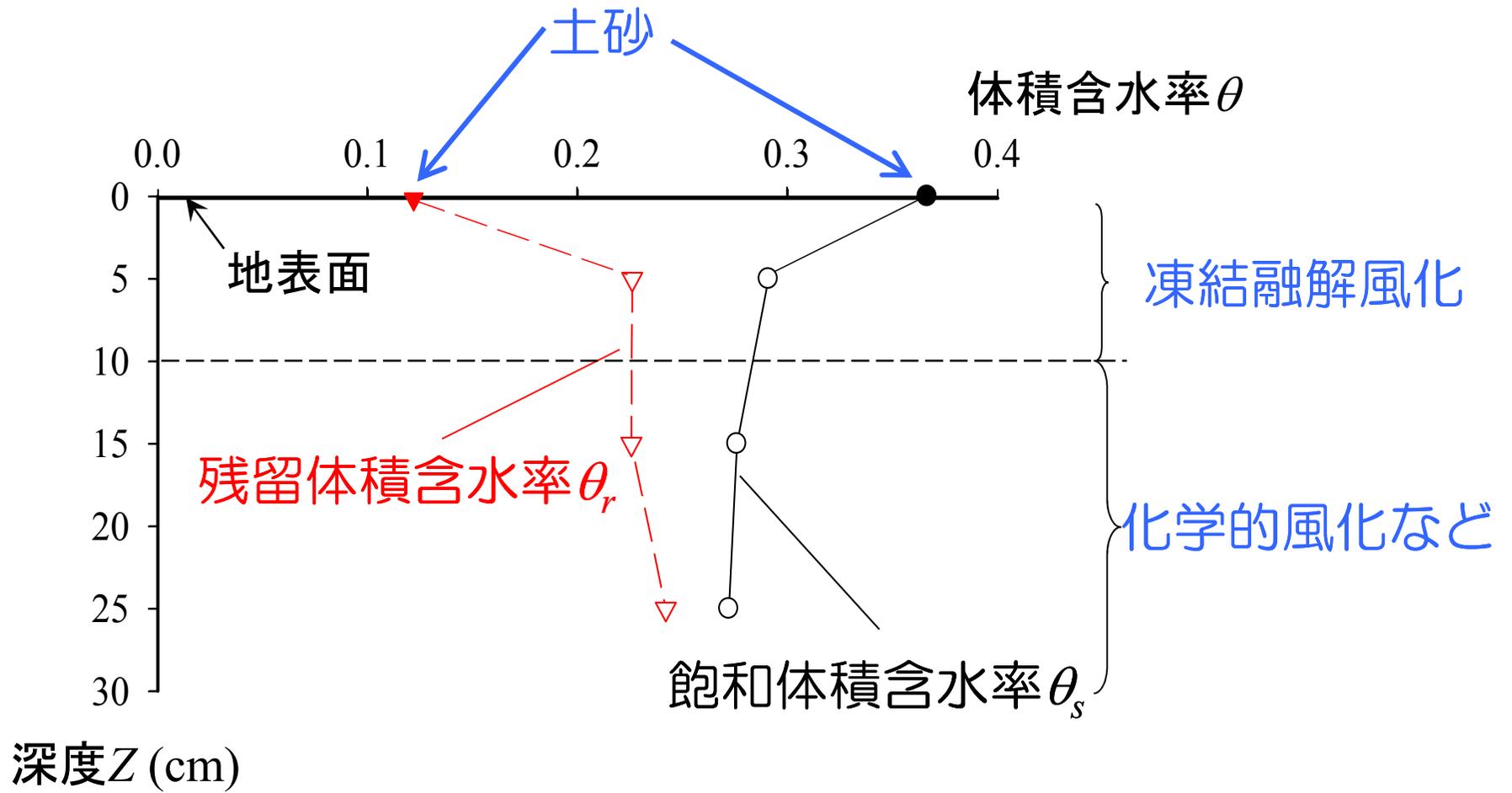
最終的な破壊過程



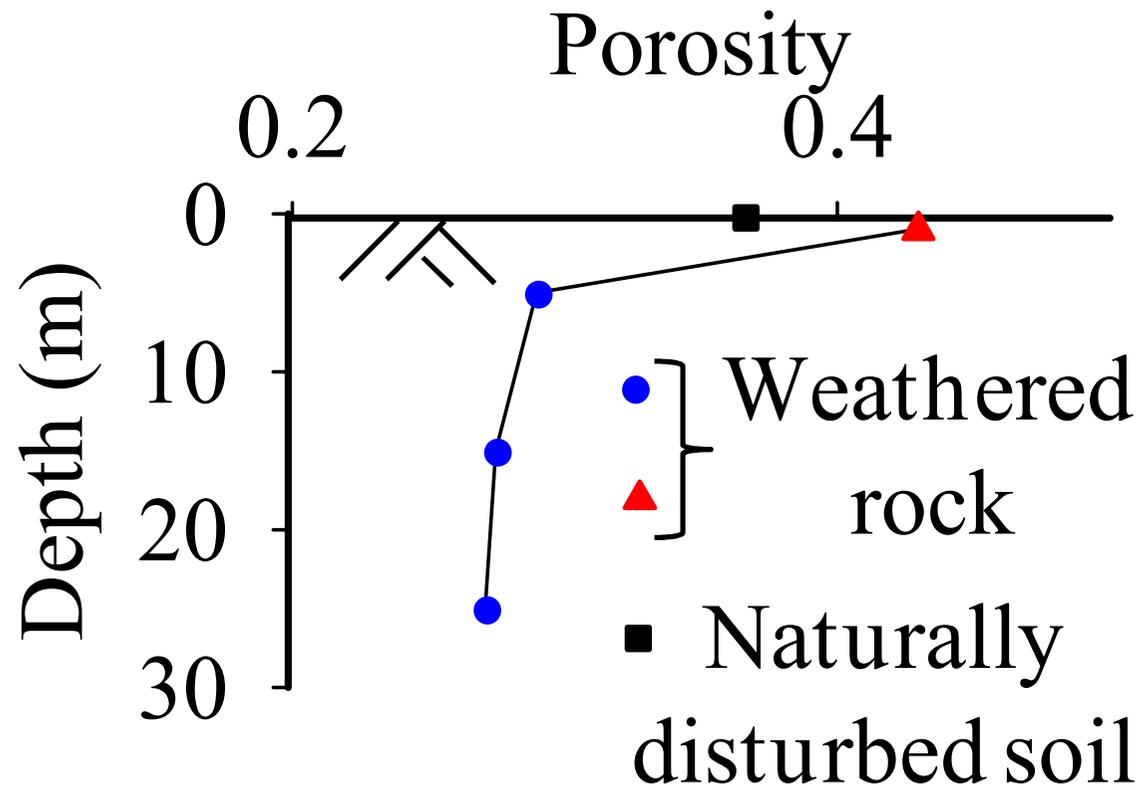
風化基岩の空隙率



飽和体積含水率 q_s と残留体積含水率 q_r



風化基岩の間隙率の鉛直分布



間隙径分布の推定

間隙径

$$r = 0.15 / \psi$$

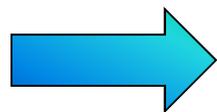
体積含水率

$$\theta = \int_0^r (\theta_s - \theta_r) g(x) dx + \theta_r$$

$g(x)$: 間隙径分布 (確率密度関数)

θ_s : 飽和体積含水率

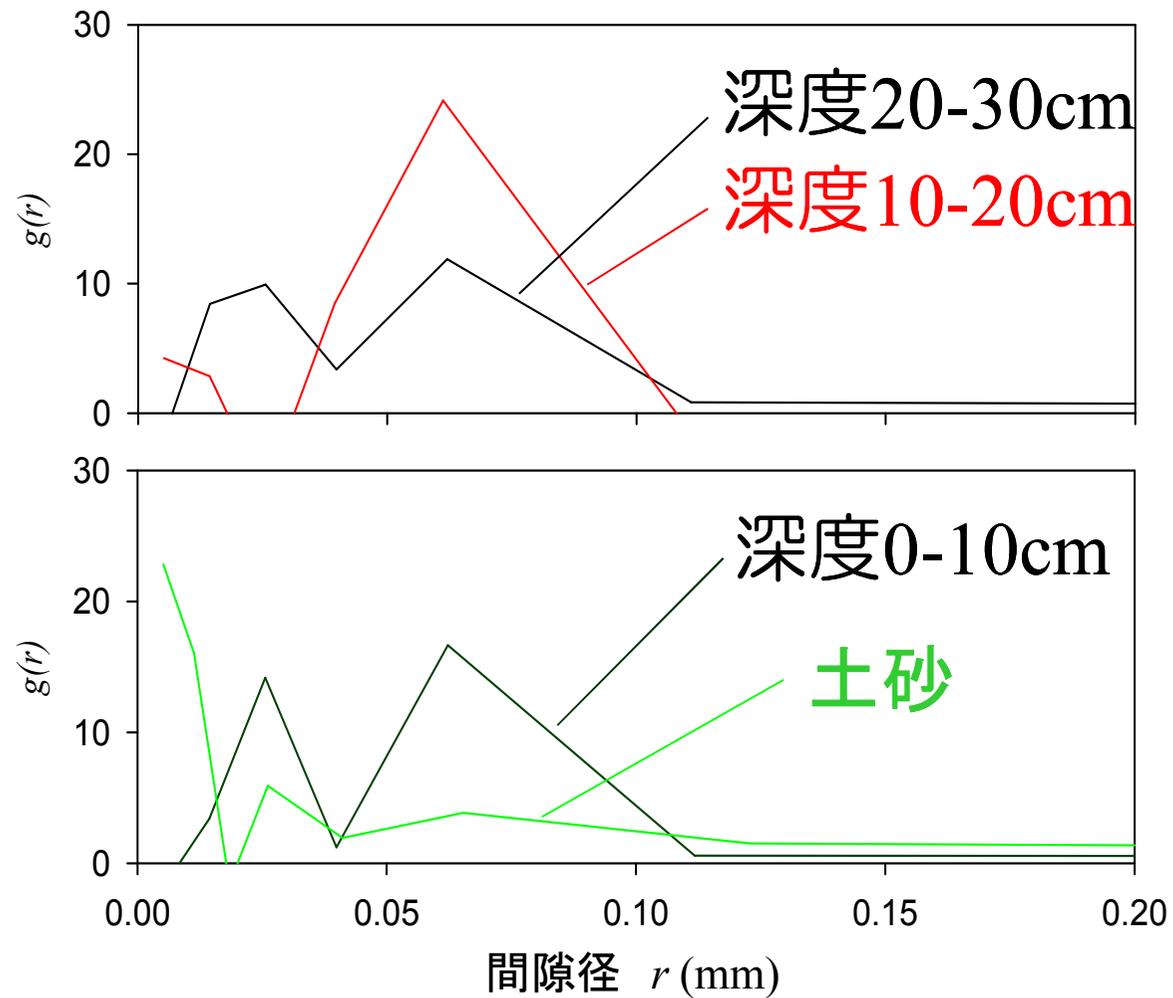
θ_r : 残留体積含水率



$$g(r) = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \frac{d\theta}{dr}$$

間隙径分布

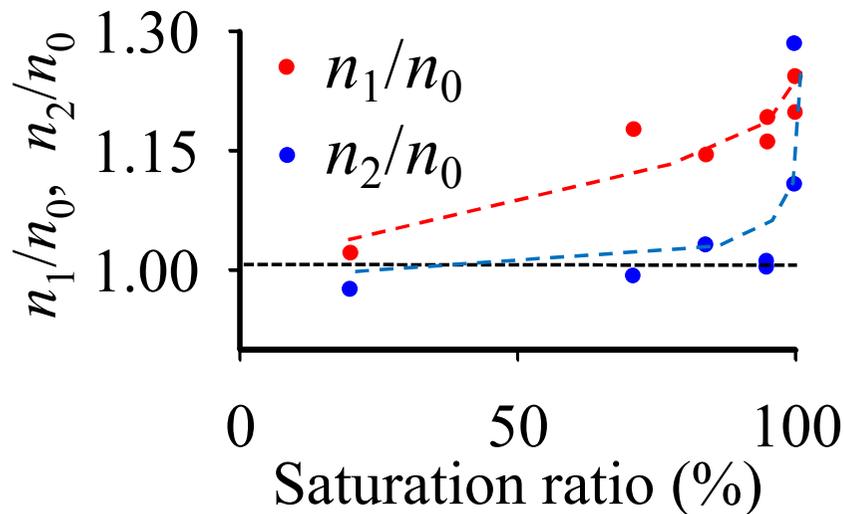
- 間隙径分布 $g(r)$



凍結融解による基岩の間隙構造の変化

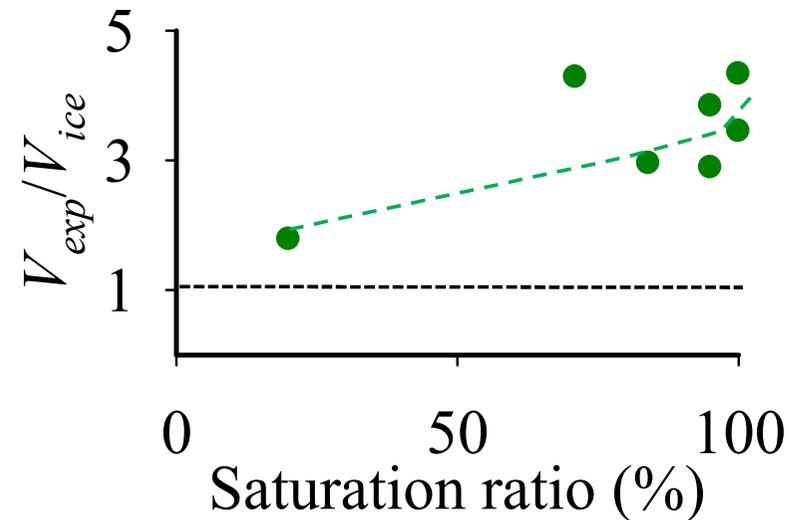
供試体を24時間凍結(-20°C), 24時間融解(20°C)

供試体: 滋賀県 田上山地風化花崗岩



間隙率の変化

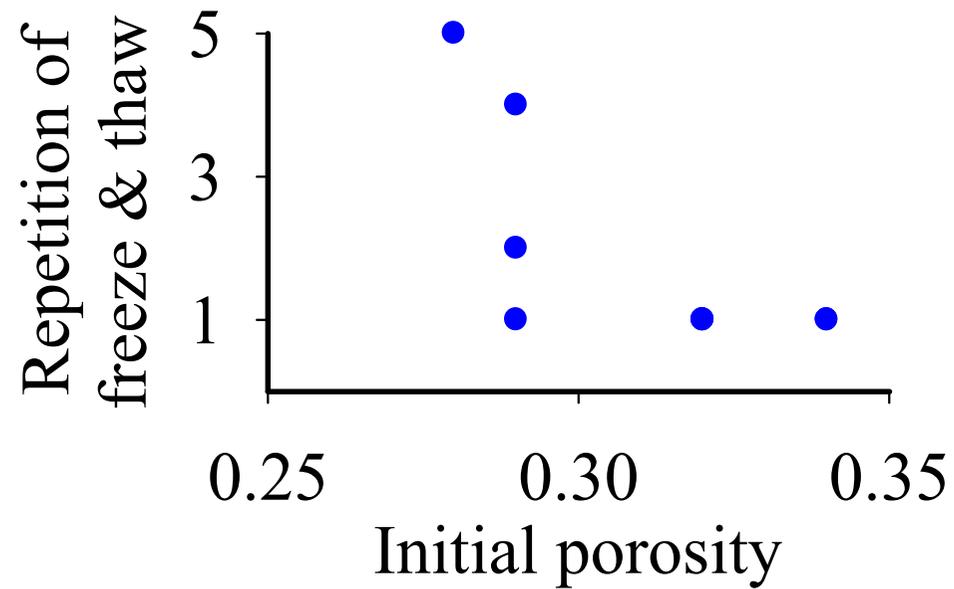
凍結前(n_0), 凍結中(n_1), 融解後(n_2)



間隙の膨張量 V_{exp} と水の凍結膨張量 V_{ice} の比

霜柱の形成

水分補給下での霜柱
発生に必要な凍結融解回数



凍結時の水分移動解析モデル

基礎式・・・Richards式

比水分用量

不飽和透水係数

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \phi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\}$$

$$C(\psi) \equiv d\theta/d\psi$$

$$K(\psi) = K_{sat} \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left(\frac{\int_0^\theta \frac{1}{\psi} d\theta}{\int_0^{\theta_s} \frac{1}{\psi} d\theta} \right)^2$$

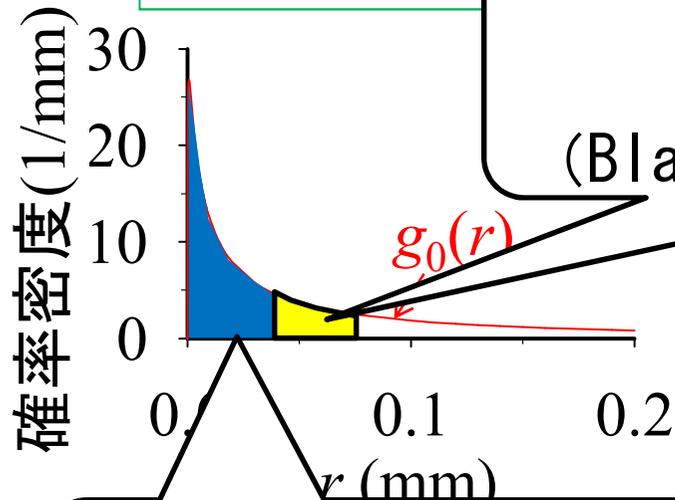
$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \int_0^r g(r) dr + \theta_r$$

$$g(r) \equiv \frac{d\theta}{dr} \frac{1}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma r}} \exp \left[- \frac{\{\ln(r/r_m)\}^2}{2\sigma^2} \right]$$

$$\psi \equiv -0.15/r$$

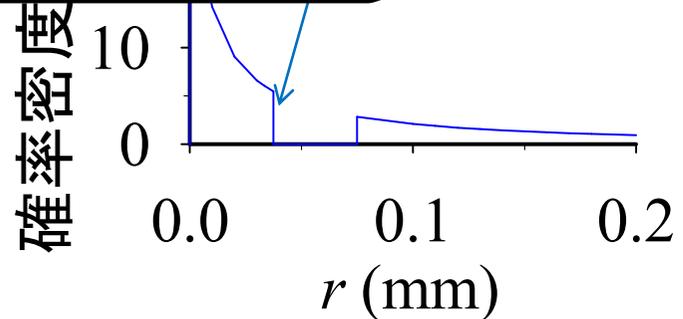
- t : 時間
- z : 深度
- r : 間隙半径
- K_{sat} : 飽和透水係数
- θ : 含水率
- θ_s : 飽和含水率
- θ_r : 残留体積含水率
- ϕ : 含氷率
- ρ_i : 氷の密度
- ρ_w : 水の密度

不飽和状態を考慮

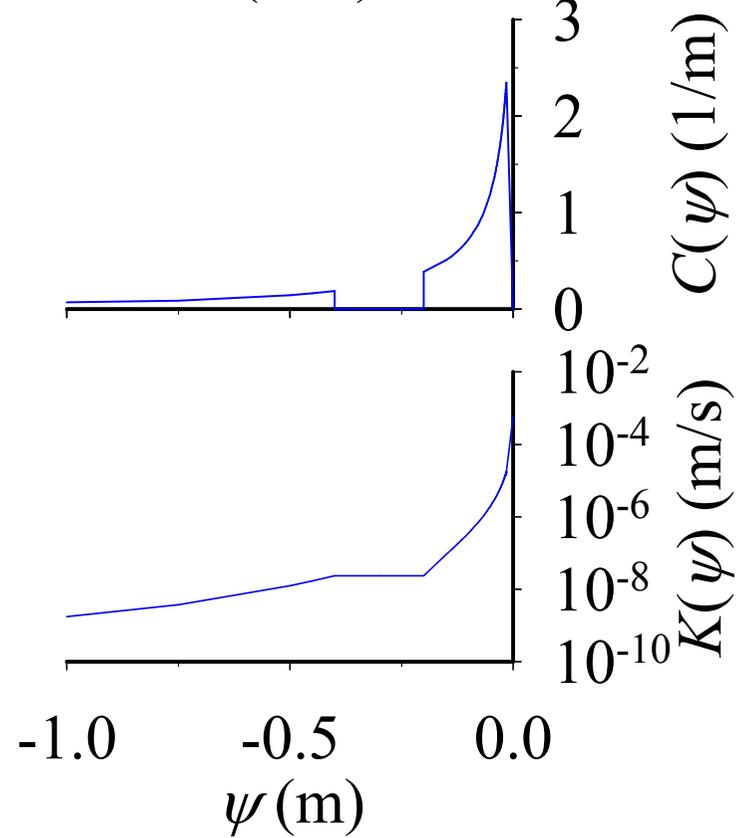
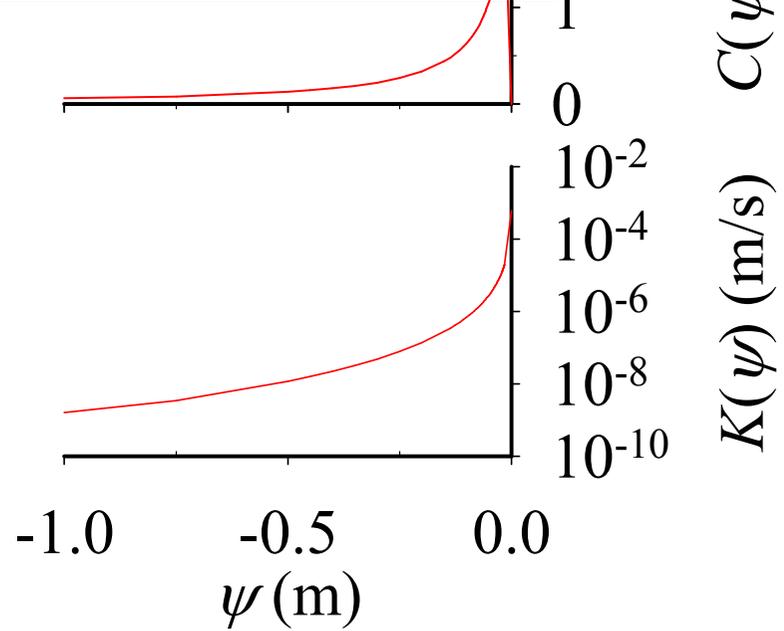


～仮定～
大きな間隙から凍結
(Black and Tice, 1988より)

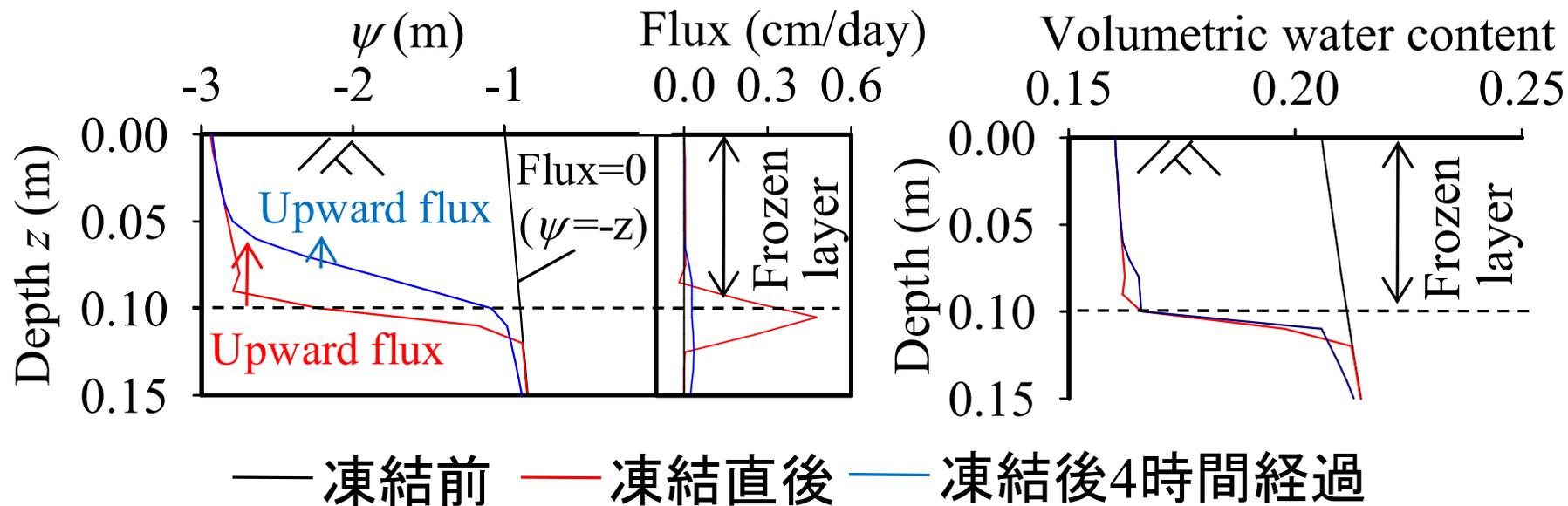
g_1(r)へ変化!



水は毛管作用により
小さな間隙から充填



解析例

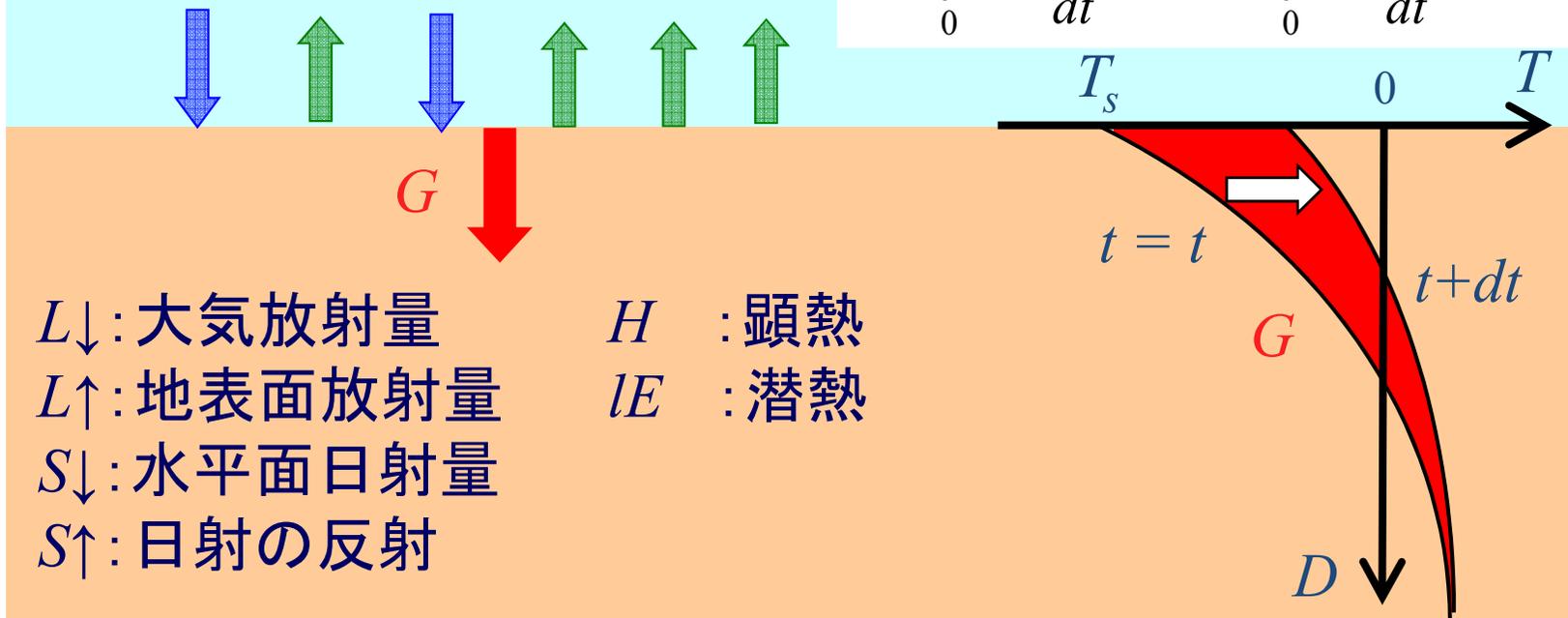


凍結融解のモデル

$$\int_0^D \frac{d(c_G \rho_G T_G)}{dt} dz + \int_0^D \frac{d(\rho_i L_w \phi)}{dt} dz = S \downarrow - S \uparrow + \sigma T_s^4 - \sigma T^4 - c_P \rho C_H U (T_s - T)$$

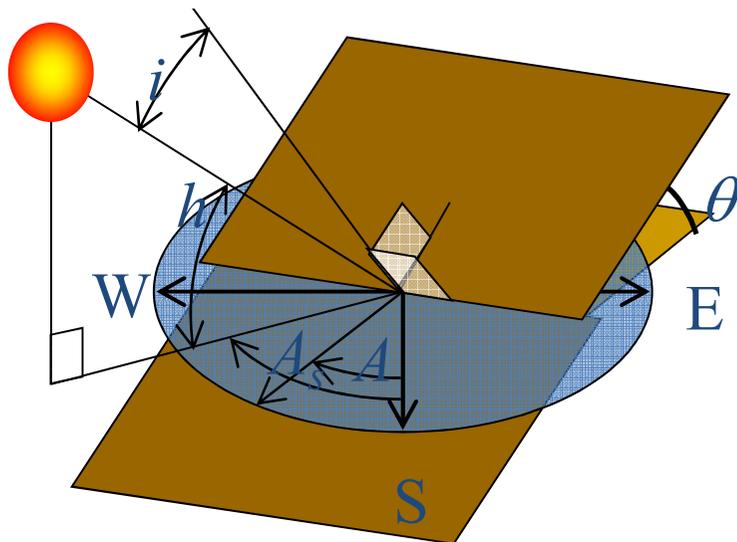
地中への熱伝導量 = 地温変化からの熱変化量

$$G = S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow - H - lE \quad G = \int_0^D \frac{d(c_G \rho_G T)}{dt} dz + \int_0^D \frac{d(\rho_i L_w \phi)}{dt} dz$$



斜面日射量の算出方法

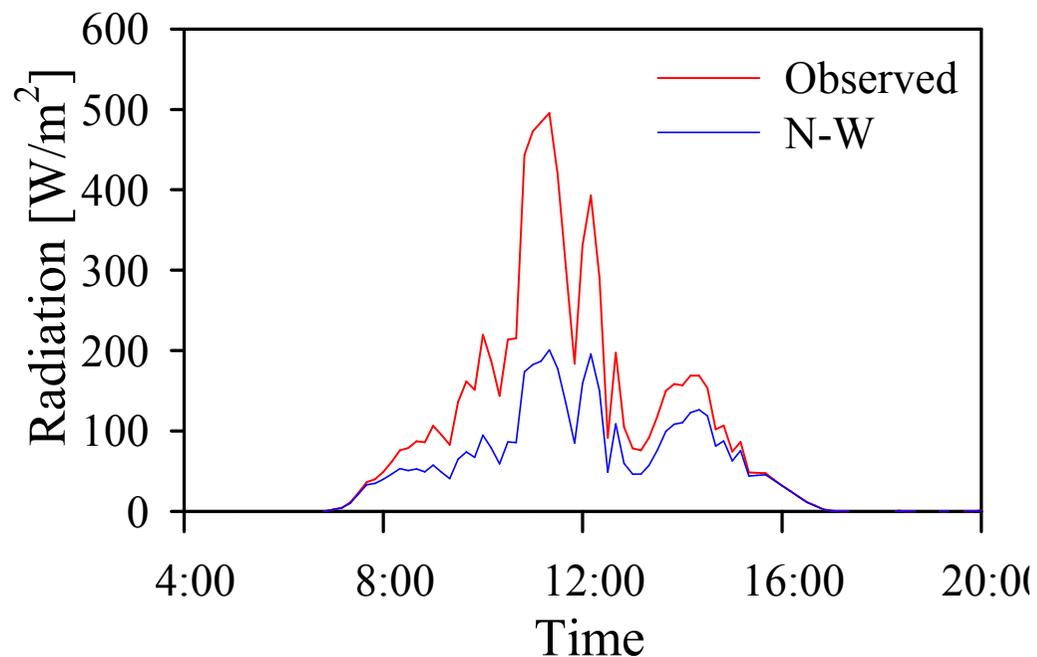
$$\cos i = \cos \theta \sin h + \sin \theta \cos h \cos(A_s - A)$$



斜面方位・傾斜角を入力



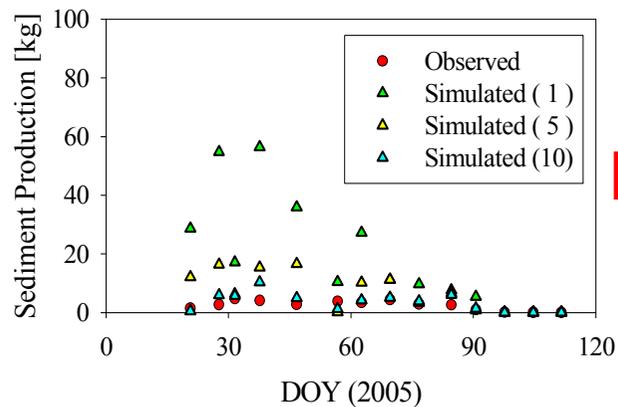
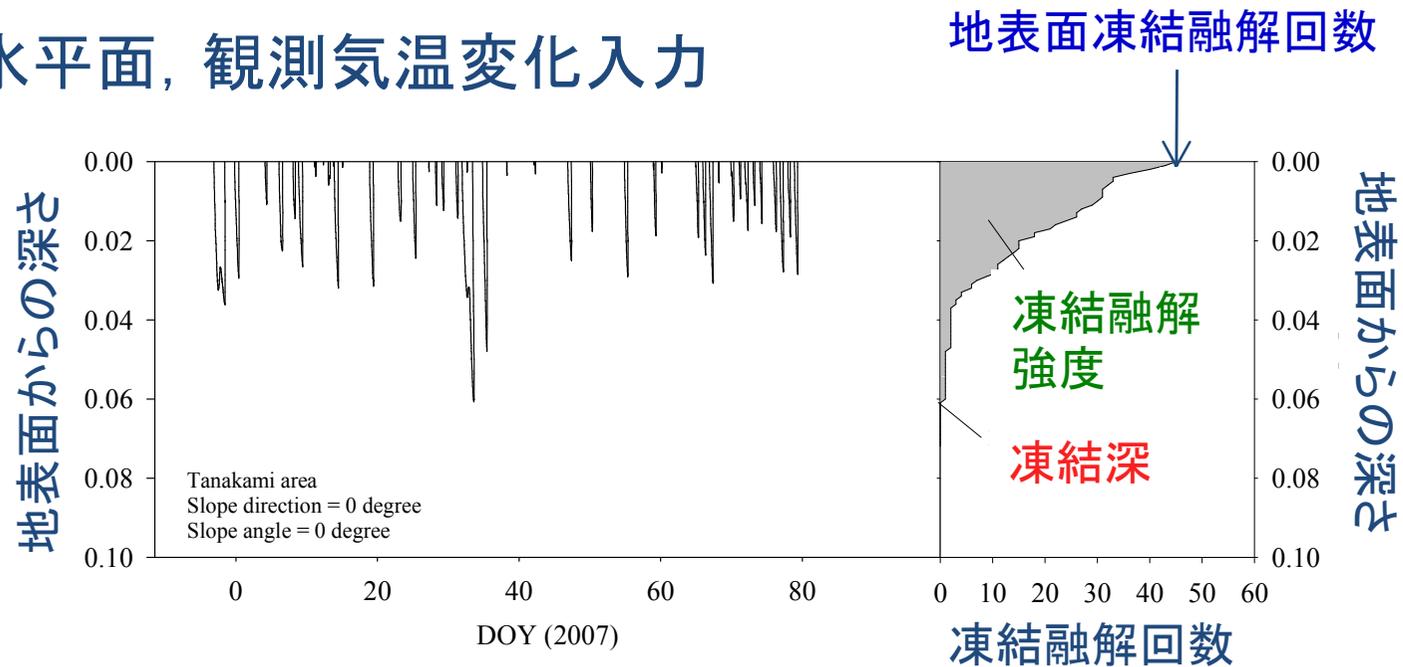
斜面日射量と水平面日射量の比を幾何学的に算出



水平面日射量の実測値を基準に斜面日射量を算出

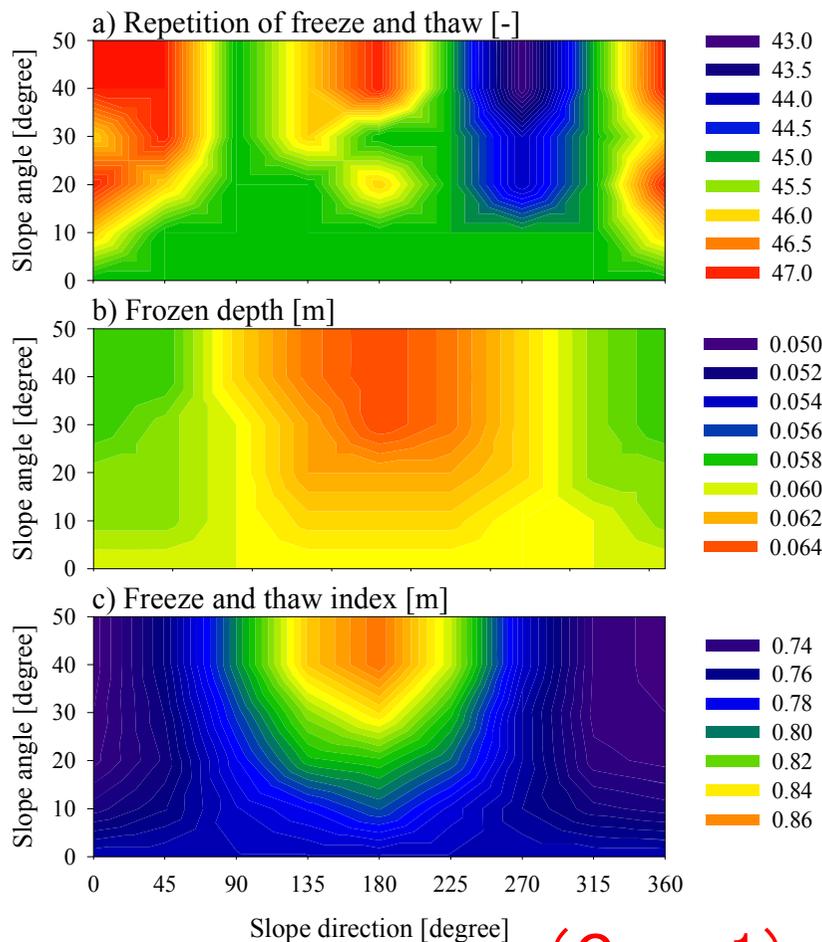
凍結層進行曲線と凍結融解強度

水平面, 観測気温変化入力



既往の研究(田上山地での観測)より、凍結融解による土砂生産量は、凍結融解繰り返し回数とその到達深度によって決定される

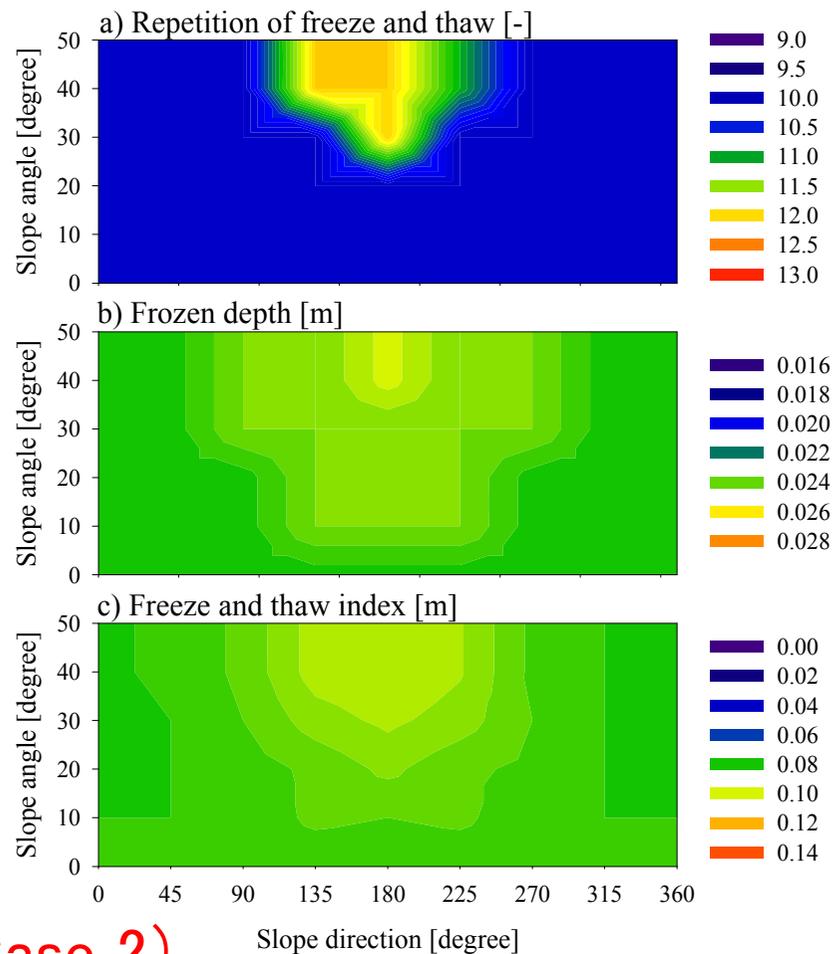
斜面方位・傾斜角一凍結融解指標



回数

深さ

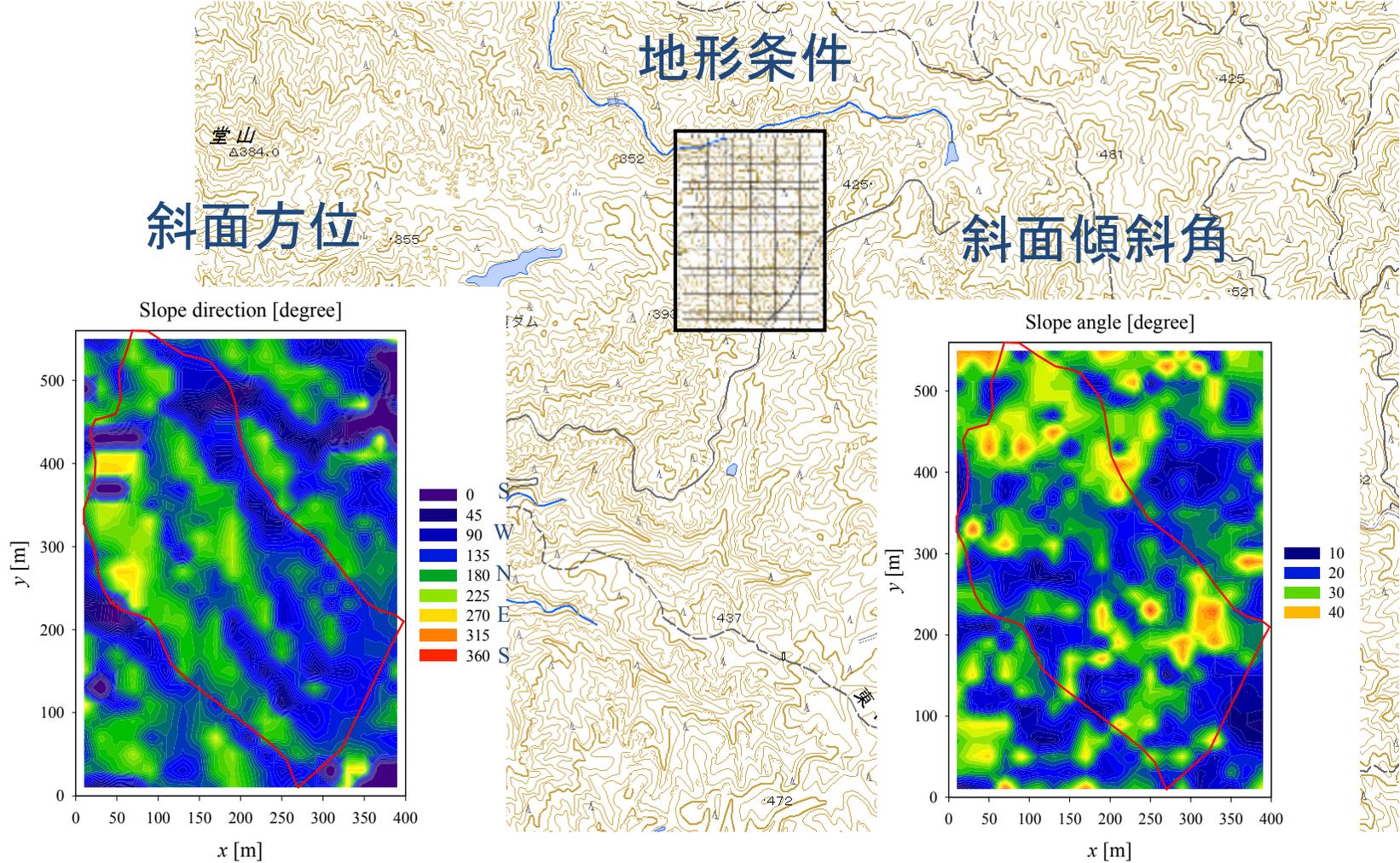
強度



S W N E S

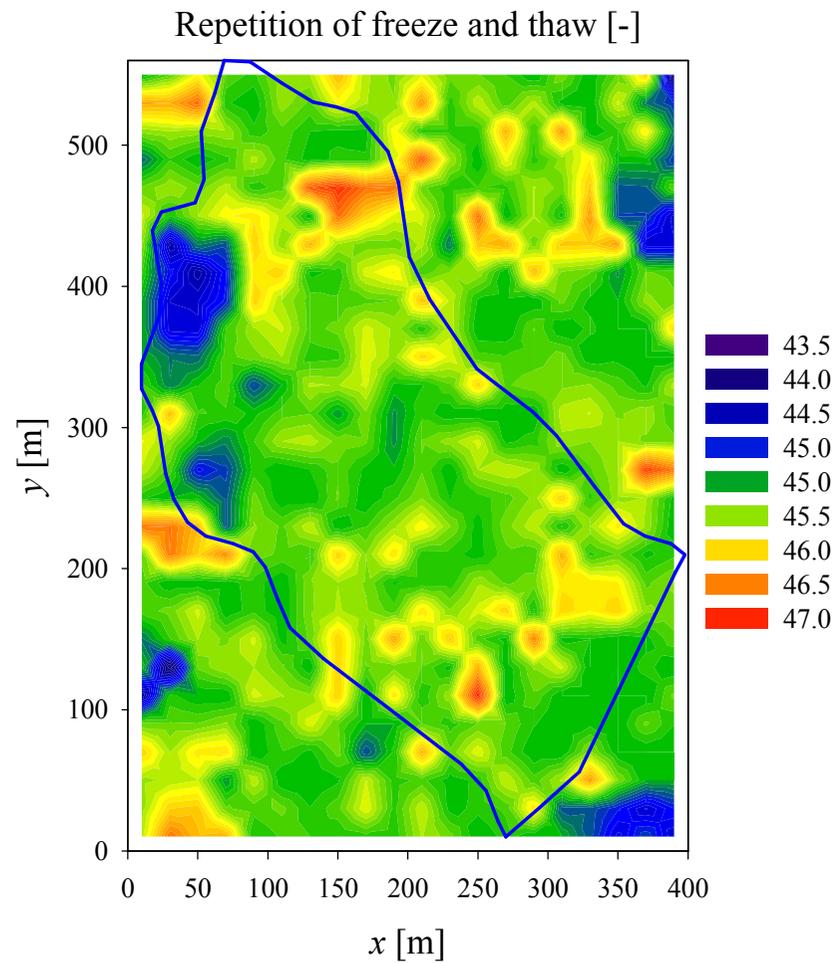
S W N E S

田上山地若女裸地谷への適用

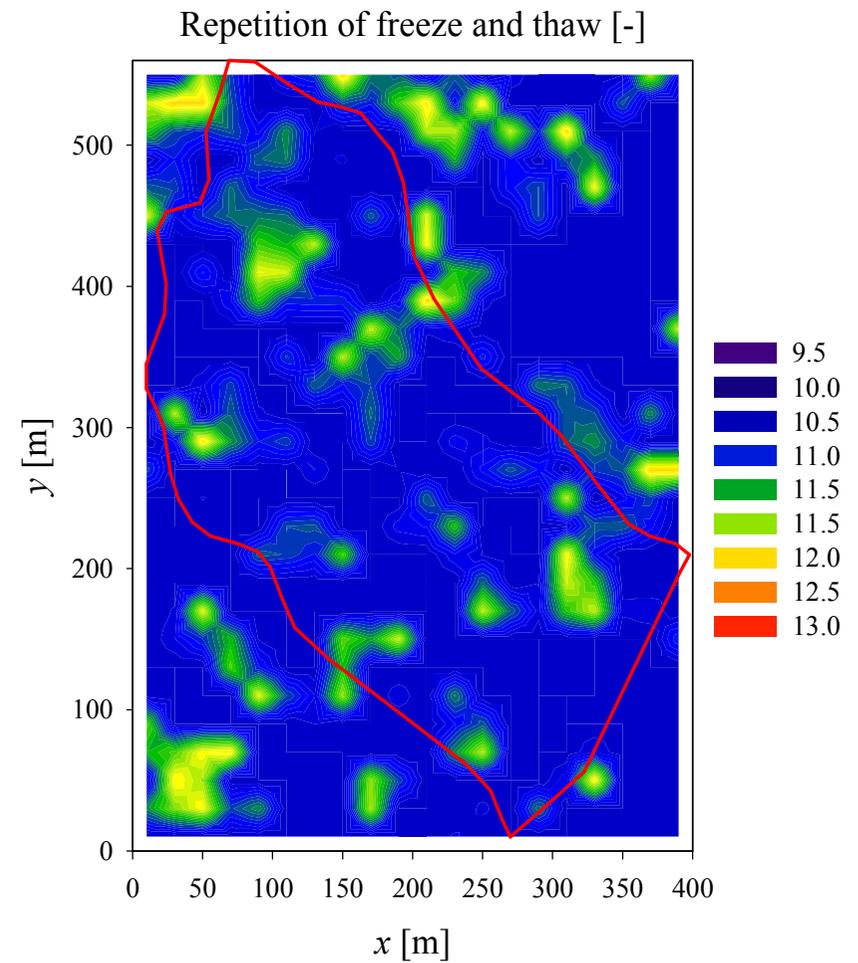


地表面での凍結融解繰り返し回数

Case 1



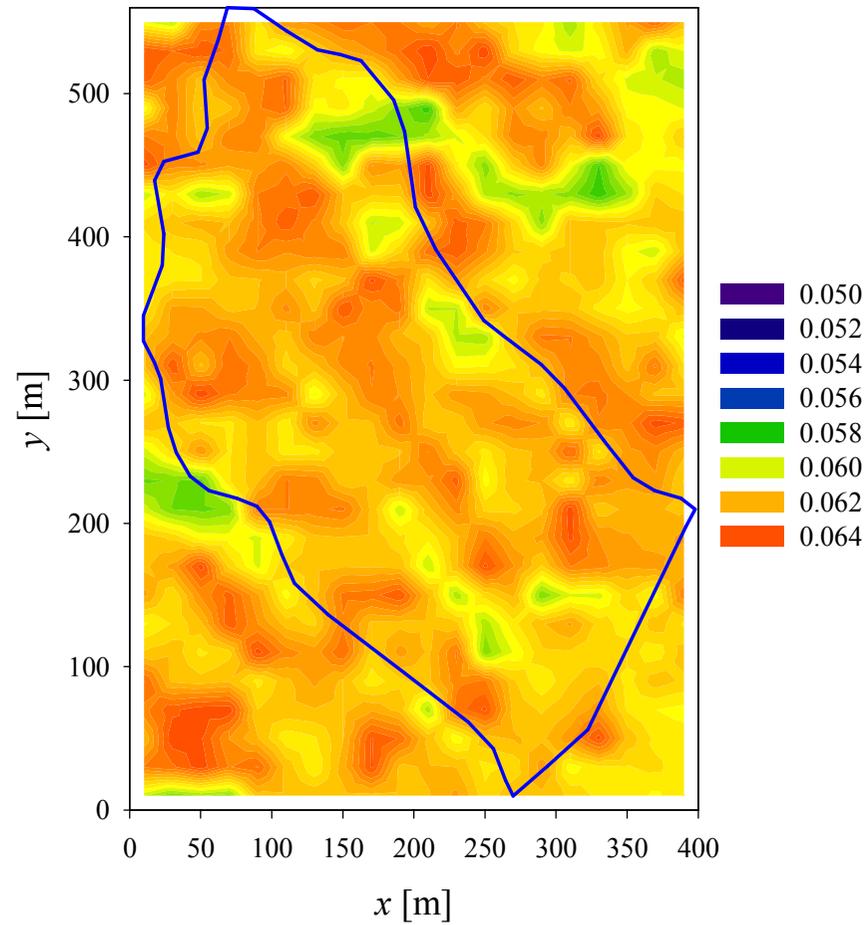
Case 2



凍結深

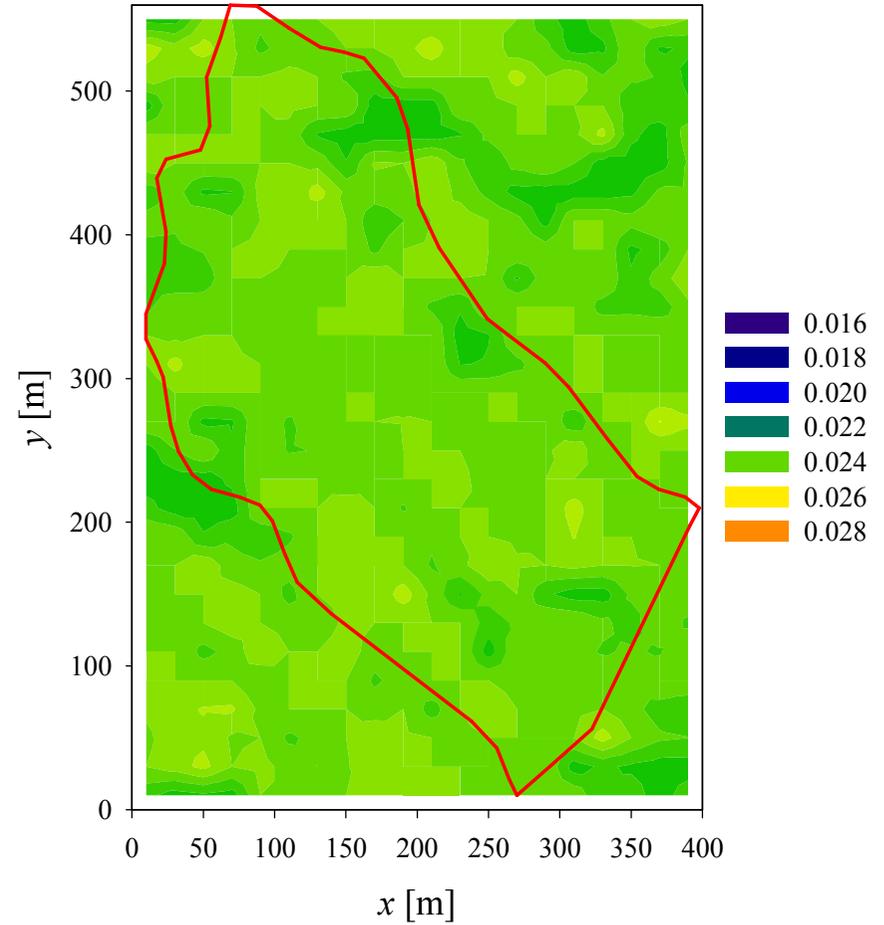
Case 1

Frozen depth [m]



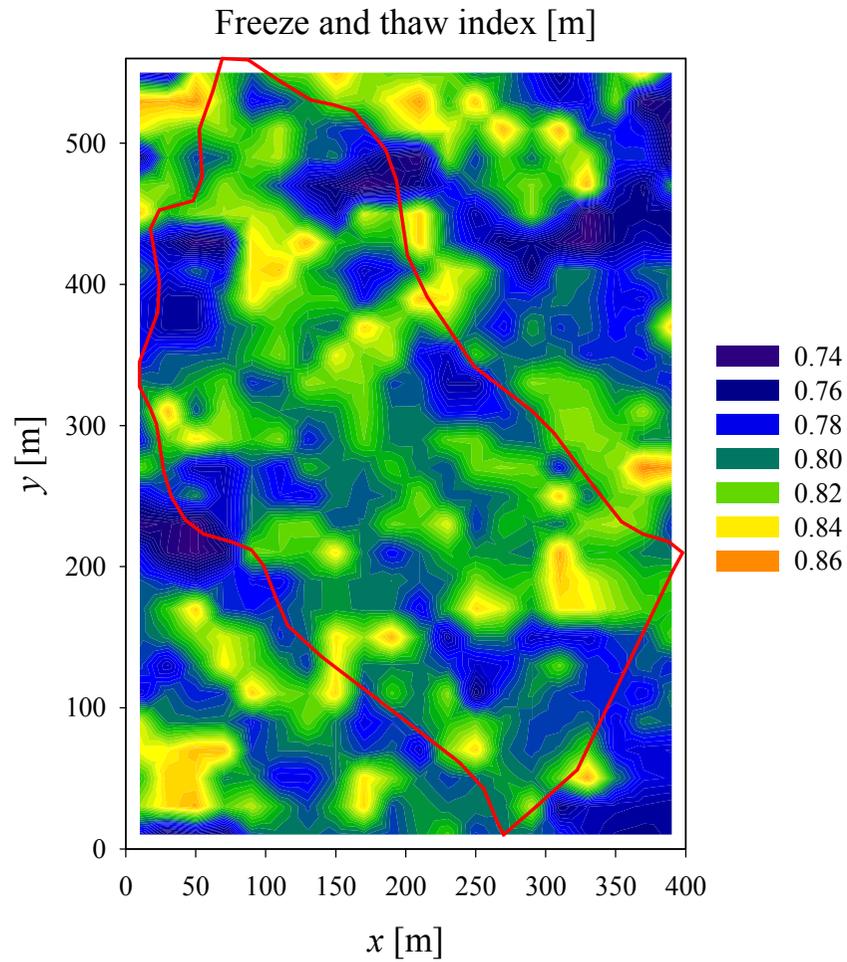
Case 2

Frozen depth [m]

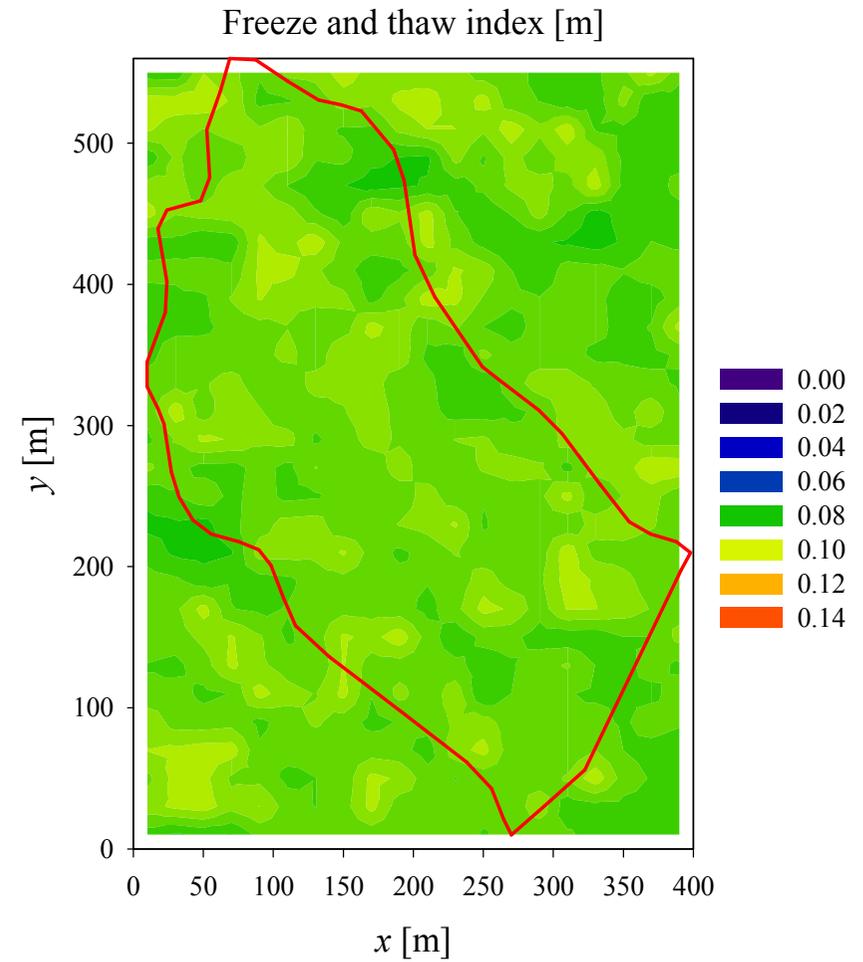


凍結融解強度

Case 1

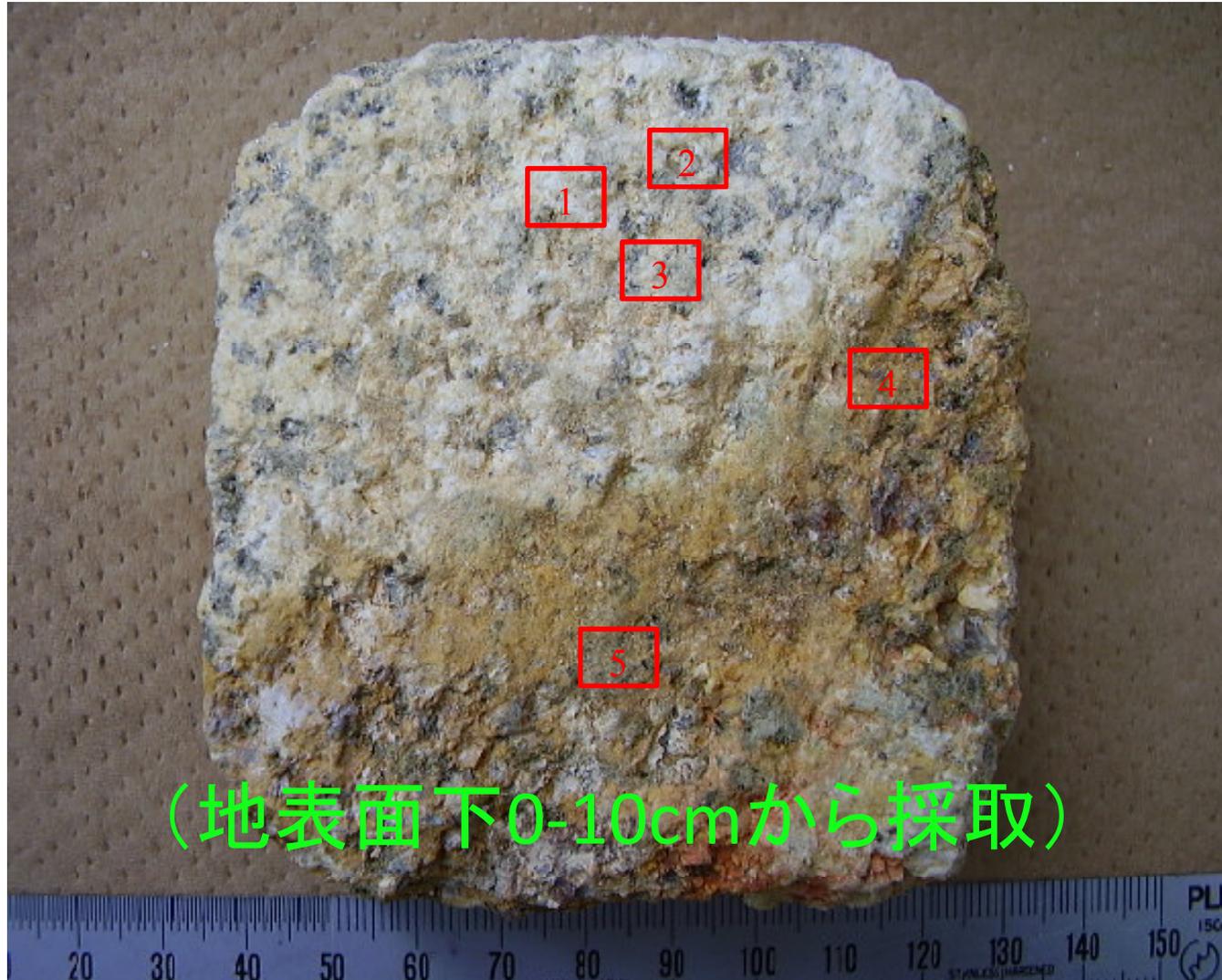


Case 2



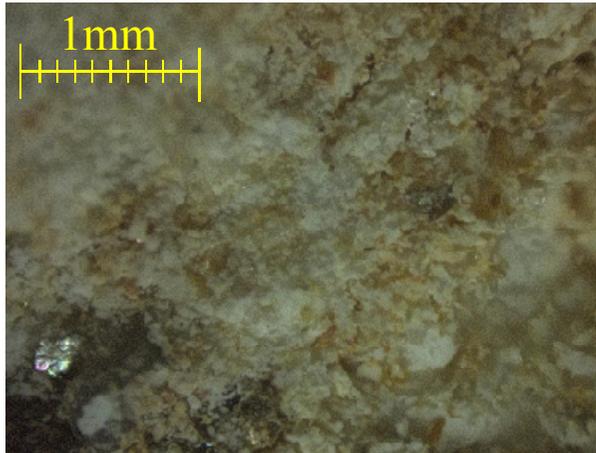
風化花崗岩の鉱物組成

電子顕微鏡で100倍に拡大

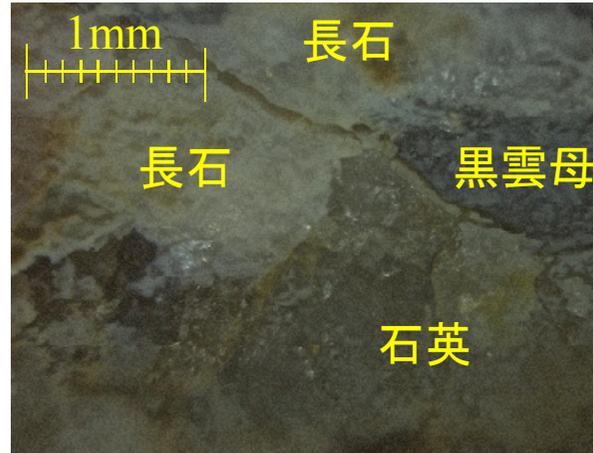


(地表面下0-10cmから採取)

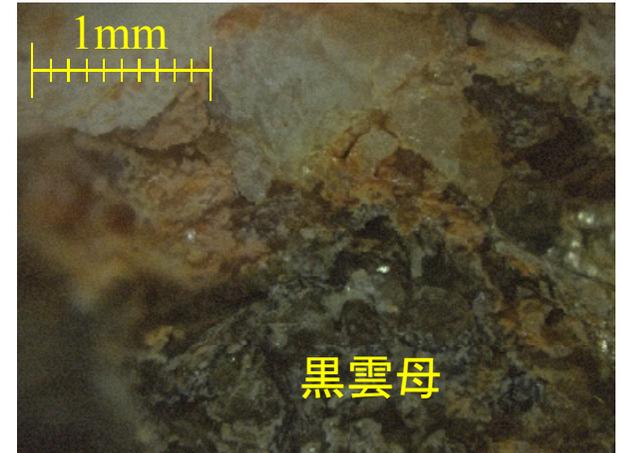
1: 長石が風化した点。風化により0.1mm以下の微細な粒子となったものの集まりである。



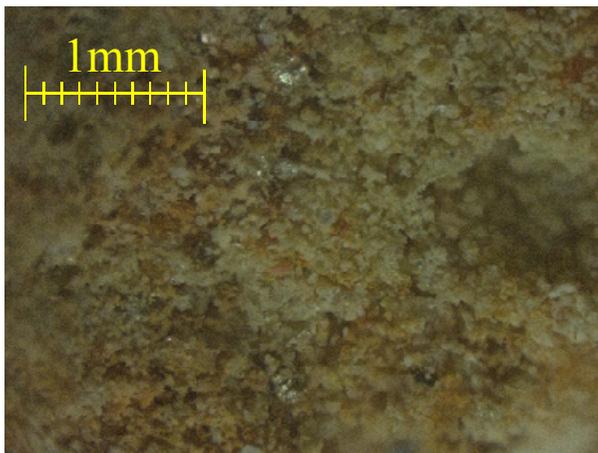
2: 石英、長石、黒雲母がある点。いずれの鉱石も1mm以上の結晶状であり、長石と石英は結合している。



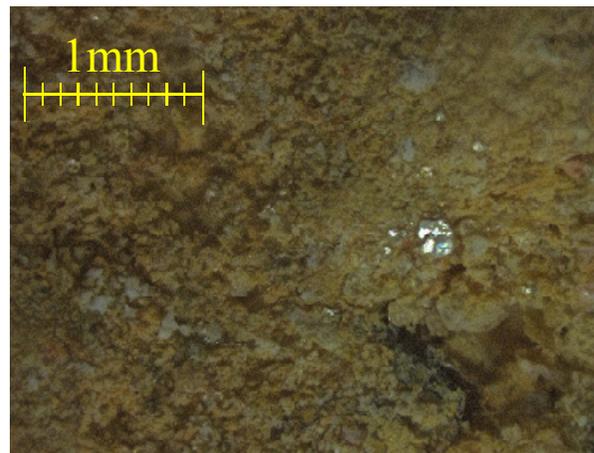
3: 黒色で粘土質の粒子がある点。元々は黒雲母であったと考えられ、風化により0.1mm以下の微細な粒子に変化。

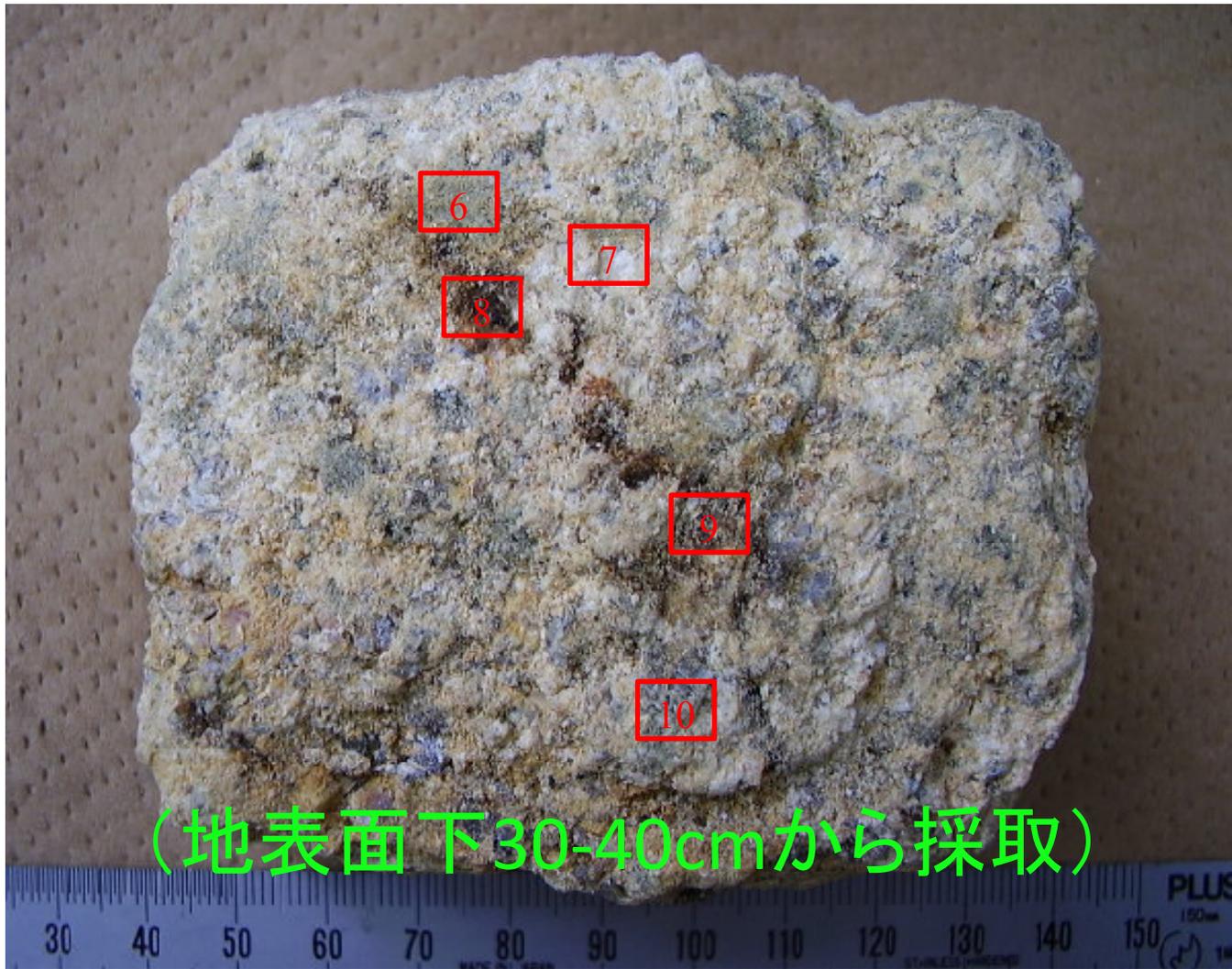


4: 長石が風化した点。風化により0.1mm以下の微細な粒子となったものの集まりである。



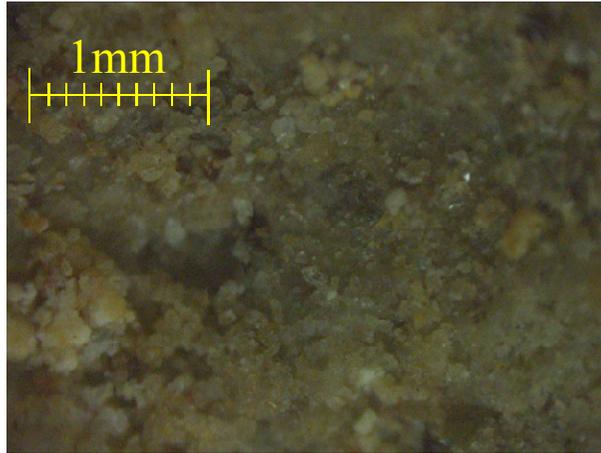
5: 4と同じく長石が風化した点であり、同じ理由で0.1mm以下の微細な粒子の集まりである。



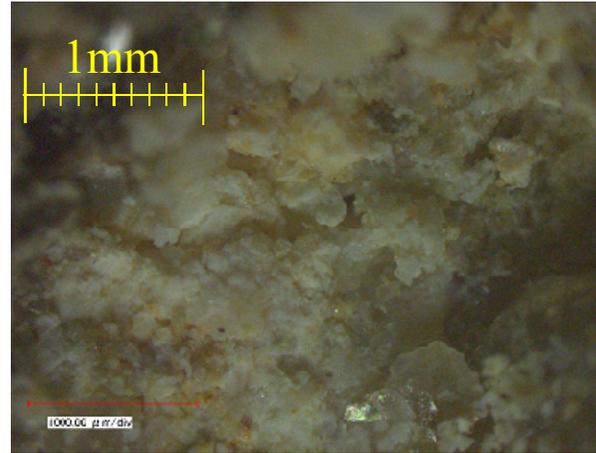


(地表面下30-40cmから採取)

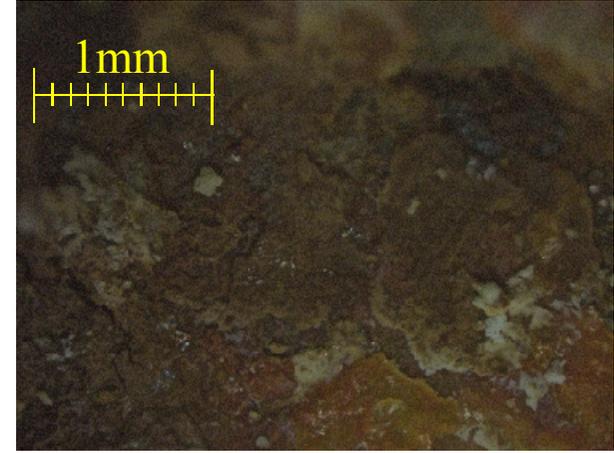
6: 灰色の微細な粒子のある点。元々は長石と考えられる。風化により破壊されているが粒径は0.3mm以下である。



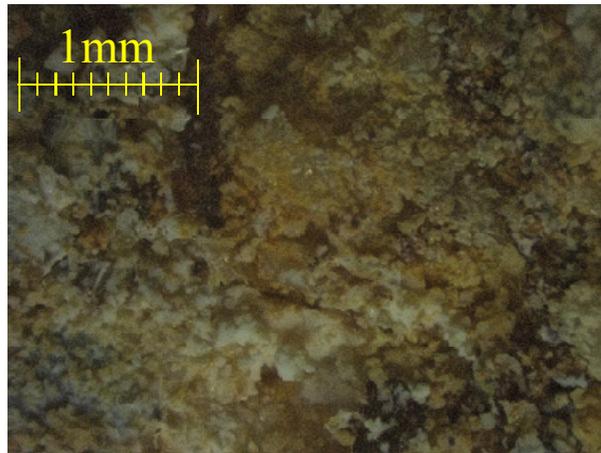
7: 白色の微細な粒子のある点。元々は長石と考えられる。風化により破壊されているが粒径は0.4mm以下である。



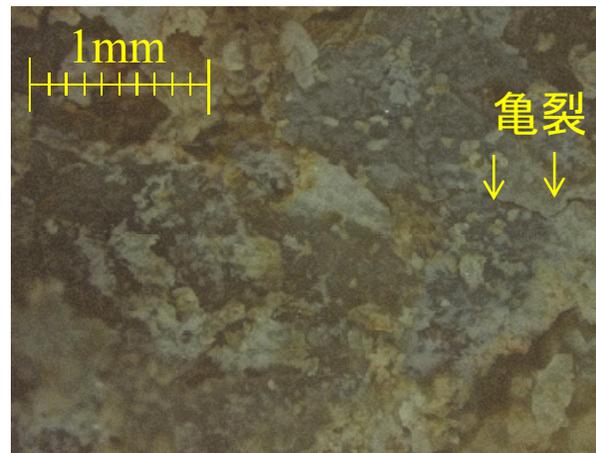
8: 黒色の粒子がある点。黒雲母と考えられる。亀裂は見られず、風化が進んでいない。



9: 茶色の微細な粒子がある点。元々は長石と考えられる。風化により破壊されているが粒径は0.5mm以下である。



10: 石英がある点。0.01mm幅の亀裂がある。石英は1mm以上の大きさで存在している。



ご清聴ありがとうございました。