
表層崩壊発生場所の予測手法の検討

内田太郎

土木研究所

土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム

話題

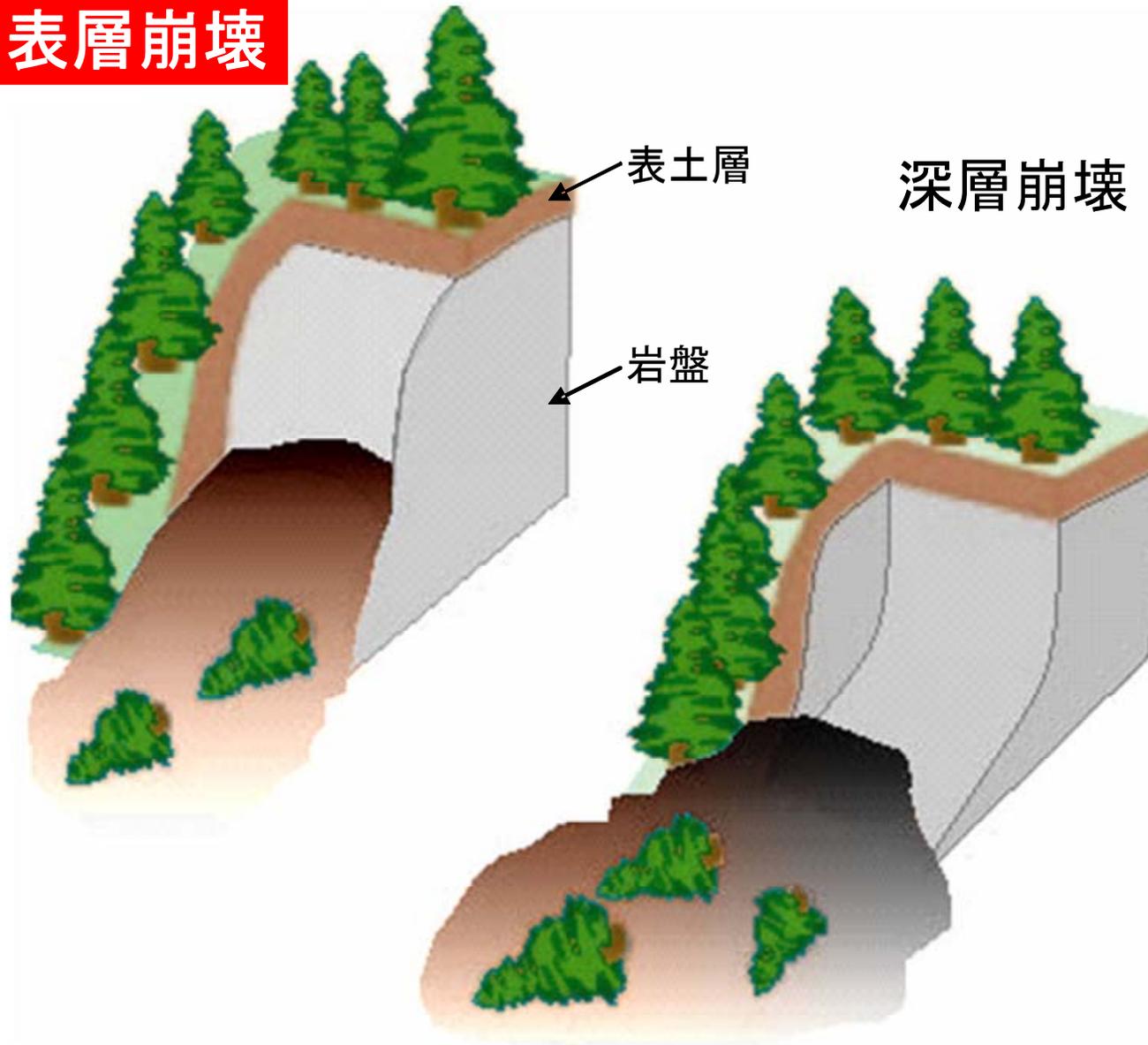
- 斜面スケールの表層崩壊予測手法
- 土層厚の空間分布
- 流域スケールへの拡張に向けて

斜面スケールの表層崩壊発生予測

表層崩壞

表層崩壞

表層崩壞



背景

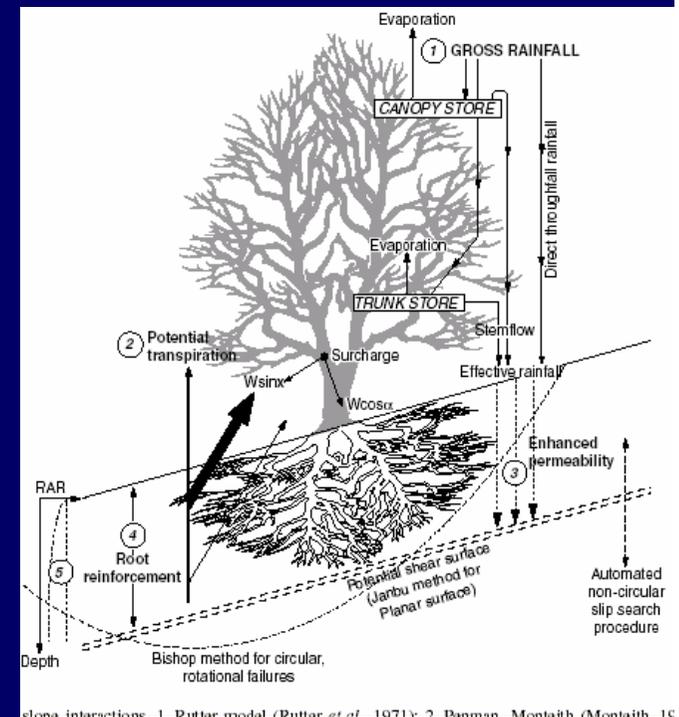
□ 表層崩壊発生予測モデル

1980年代以降数多くのモデルが提案されてきた

近年、非常に様々な要素を取り入れたモデルの開発が行われてきている。

しかしながら、依然として、モデルの入力パラメータをすべて計測するのは困難

また、計算に多大な時間がかかる



表層崩壊発生予測モデル (広域用)

●概要

水文モデルと斜面安定モデルの組合せ。
メッシュやFlow tubeに領域に区分

●仮定

土層厚は(ほぼ)一様

→ 地中水は地表面地形に従って流下.

→ 地表面勾配を使って安定解析

しばしば, 無限長斜面の安定解析を使用

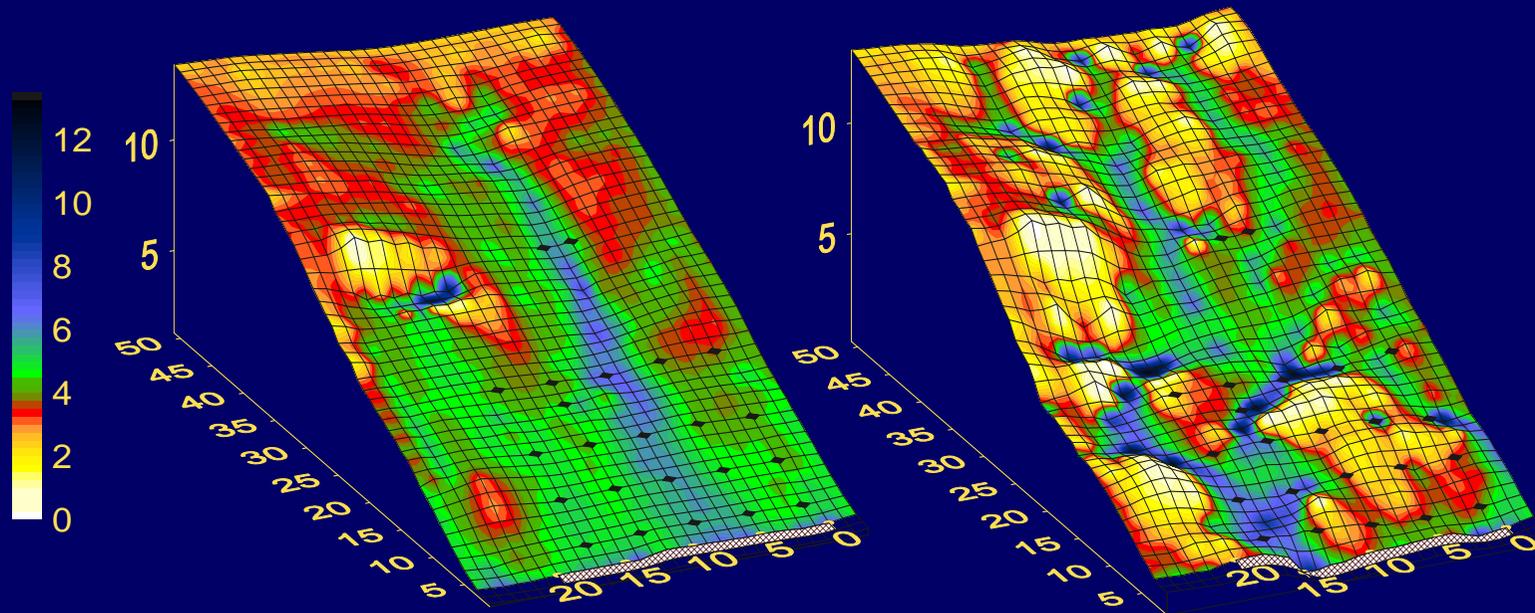
しばしば, 地中の水分状態は定常状態を仮定

選択的な側方流・岩盤中の水の流れは無視

土質強度等は空間的に(ほぼ)一様

ばらつきの大い土層厚

土層厚の空間分布は大い [e.g., 飯田・田中, 1987]
土層厚は必ずしも, 地表面地形と相関が高くない [e.g.,
Heimsath et al., 2001]

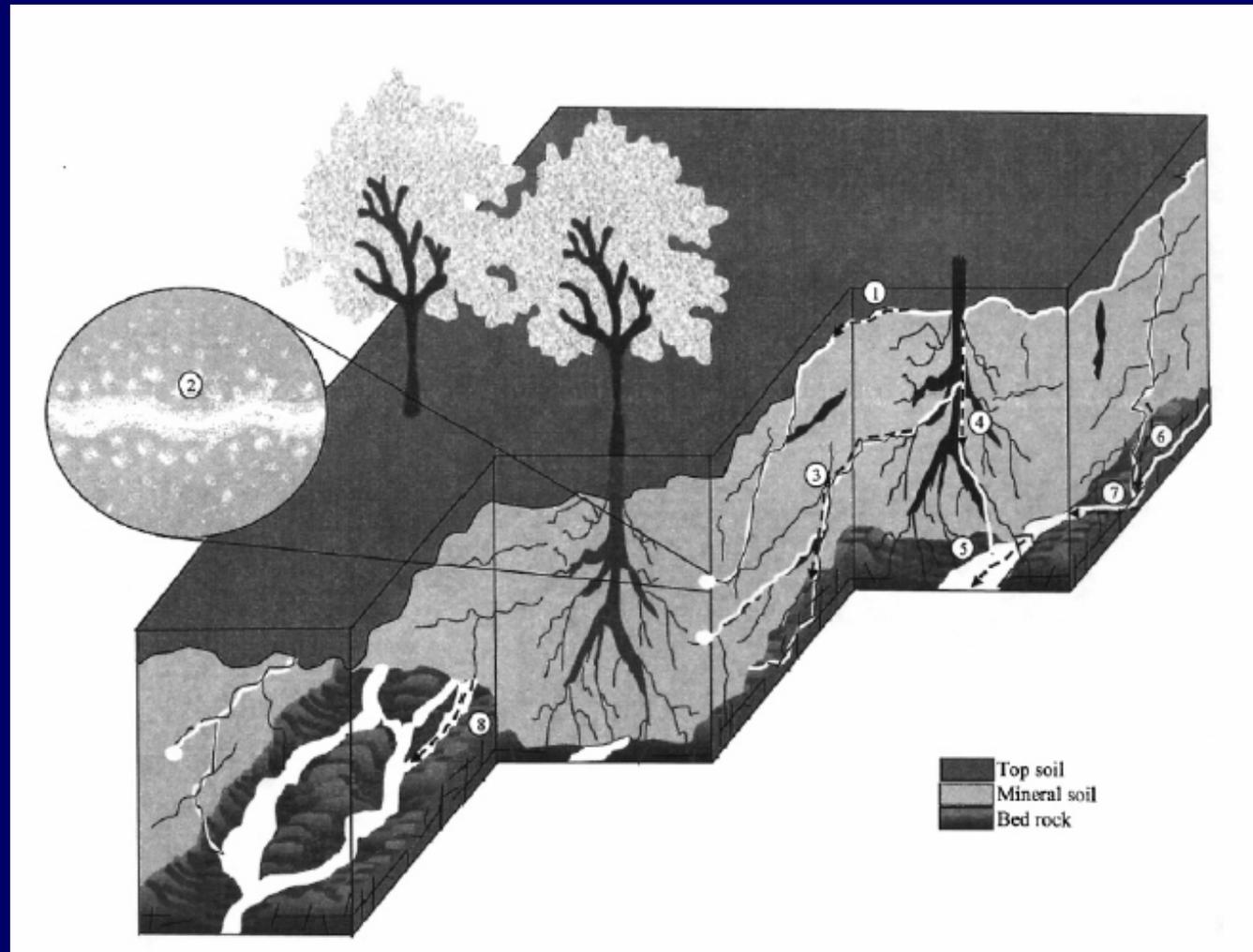


Surface topography

Bedrock topography

Panola mountain in Georgia USA

複雑な水文過程



課題

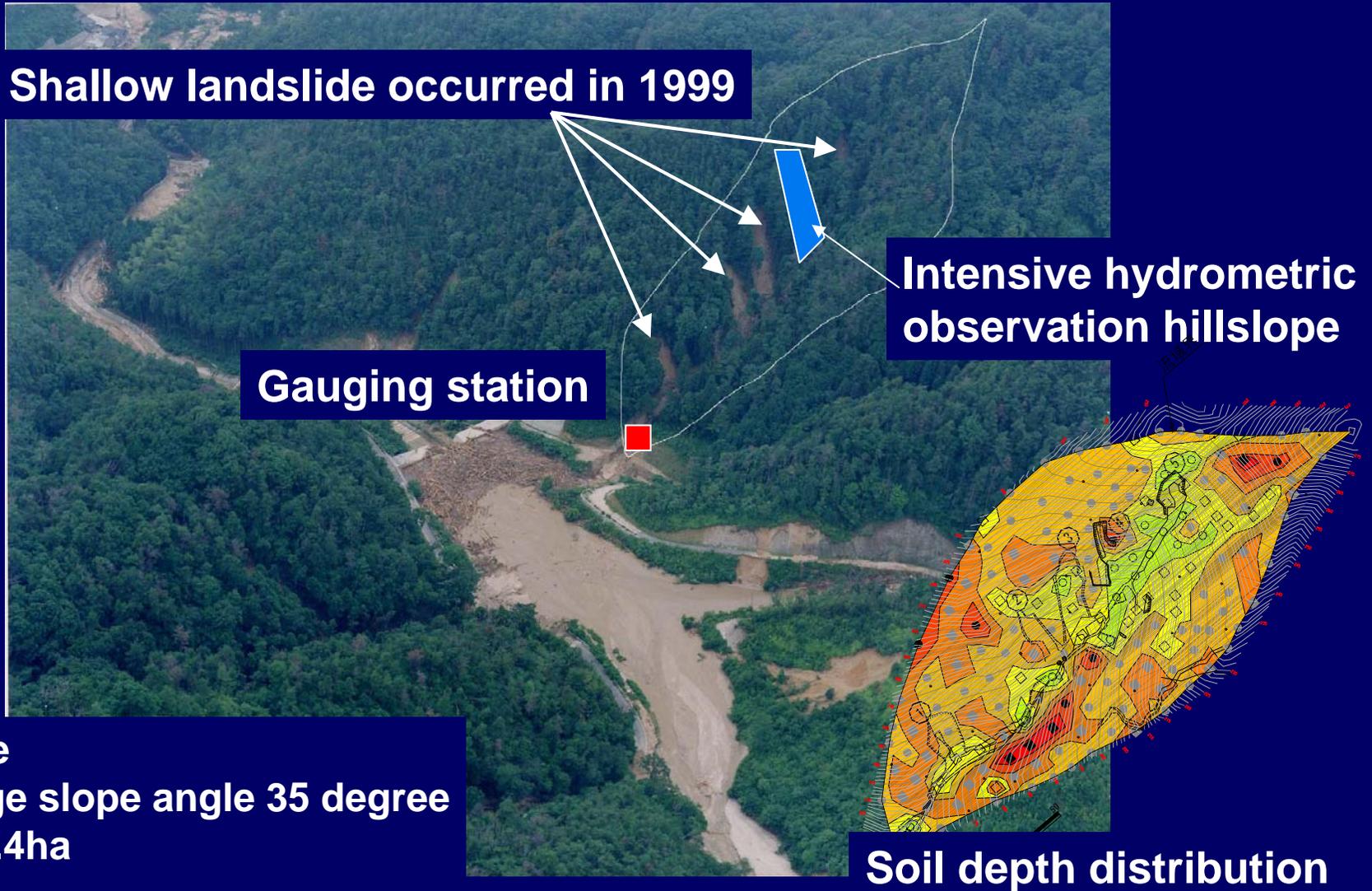
- モデルの複雑さ(表現するプロセス)
- データ取得の可能性。労力

検討内容

- 表層崩壊の発生場所の予測に及ぼす以下の影響を検討する。
 - ① 土層厚の空間分布
 - ② 地形量の算出方法
 - ③ 透水係数の影響

荒谷流域

広島西部山系



表層崩壊発生危険度評価

表層崩壊発生危険最小定常降雨強度を算出.

- 1) 無限長斜面安定解析
- 2) 定常状態及びダルシー則

Saturated conductivity

cohesion

Soil depth

Friction angle

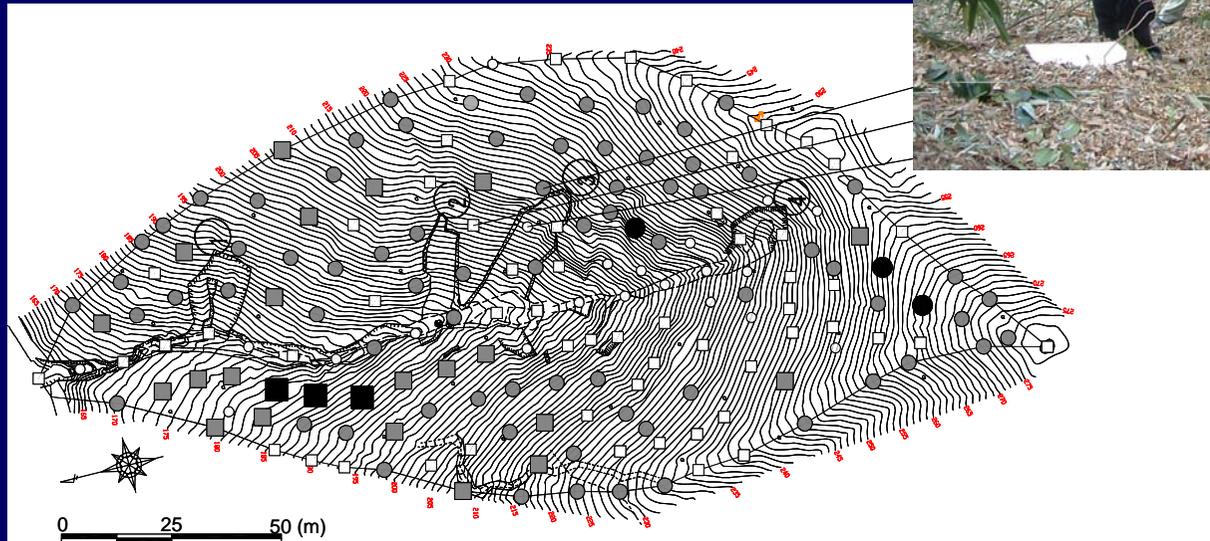
Slope gradient

$$r_c = \frac{K_s \sin I \{c + \gamma_t h \cos I (\cos I \tan \phi - \sin I)\}}{A \{ \gamma_w \cos I \tan \phi + (\gamma_s - \gamma_t) (\sin I - \cos I \tan \phi) \}}$$

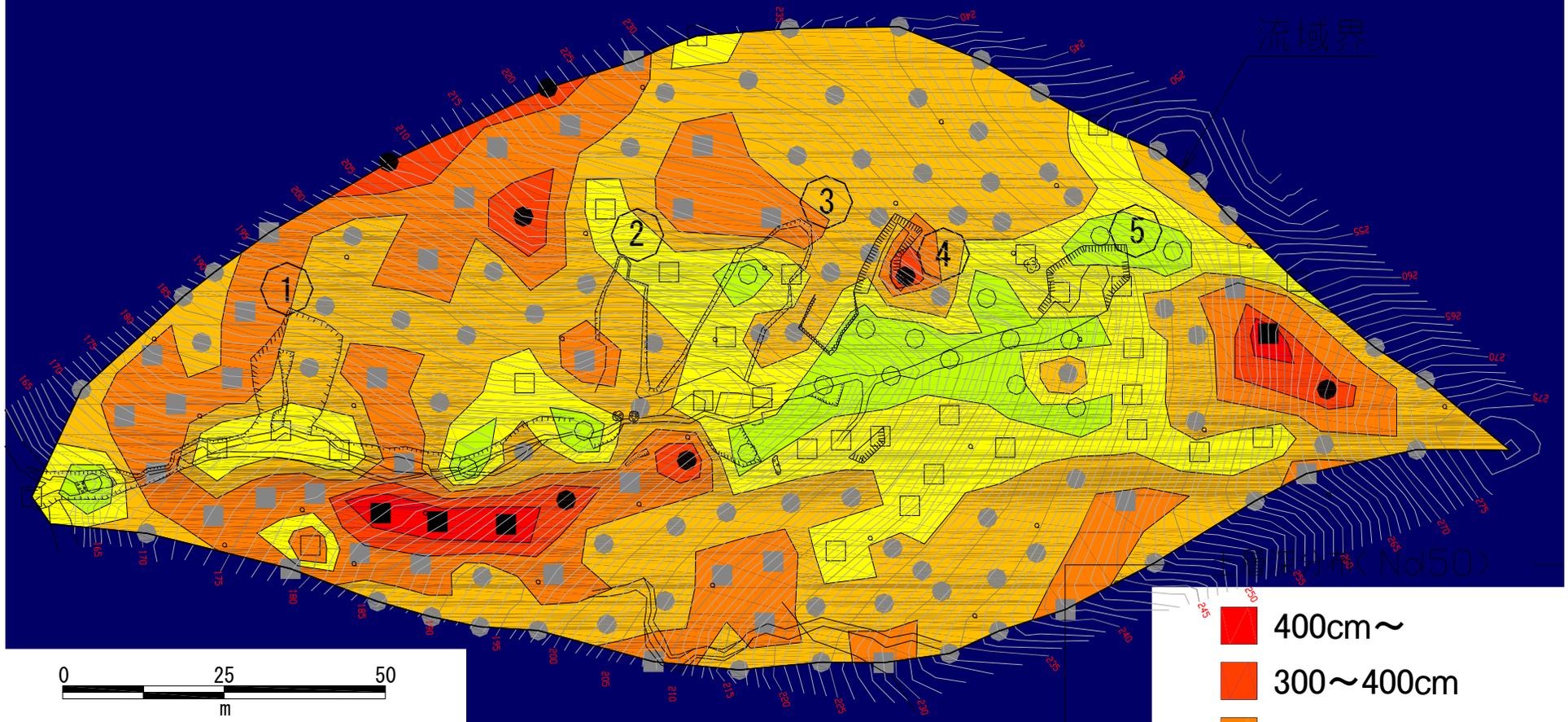
Drainage area

土層厚計測

簡易貫入試験により計測

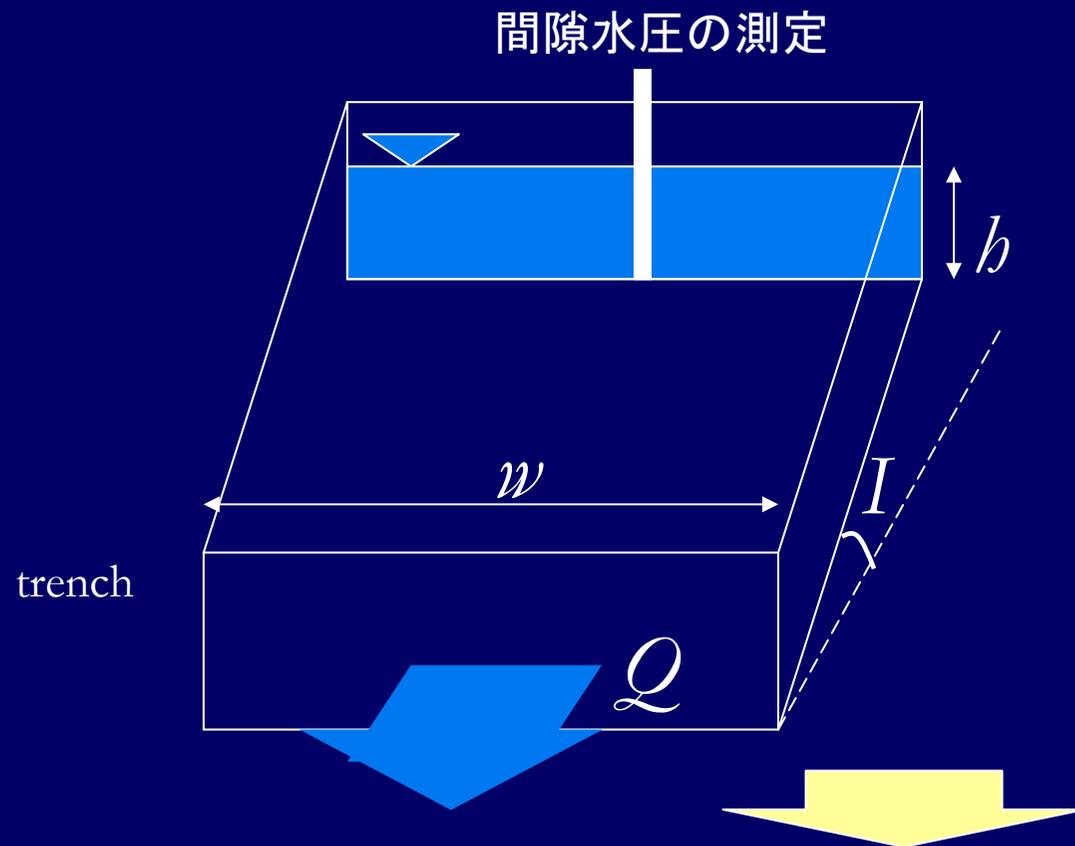


土層厚分布



斜面の等価飽和透水係数の推定

斜面水文観測結果から、



$$K_{eff} = \frac{Q}{Iwh}$$

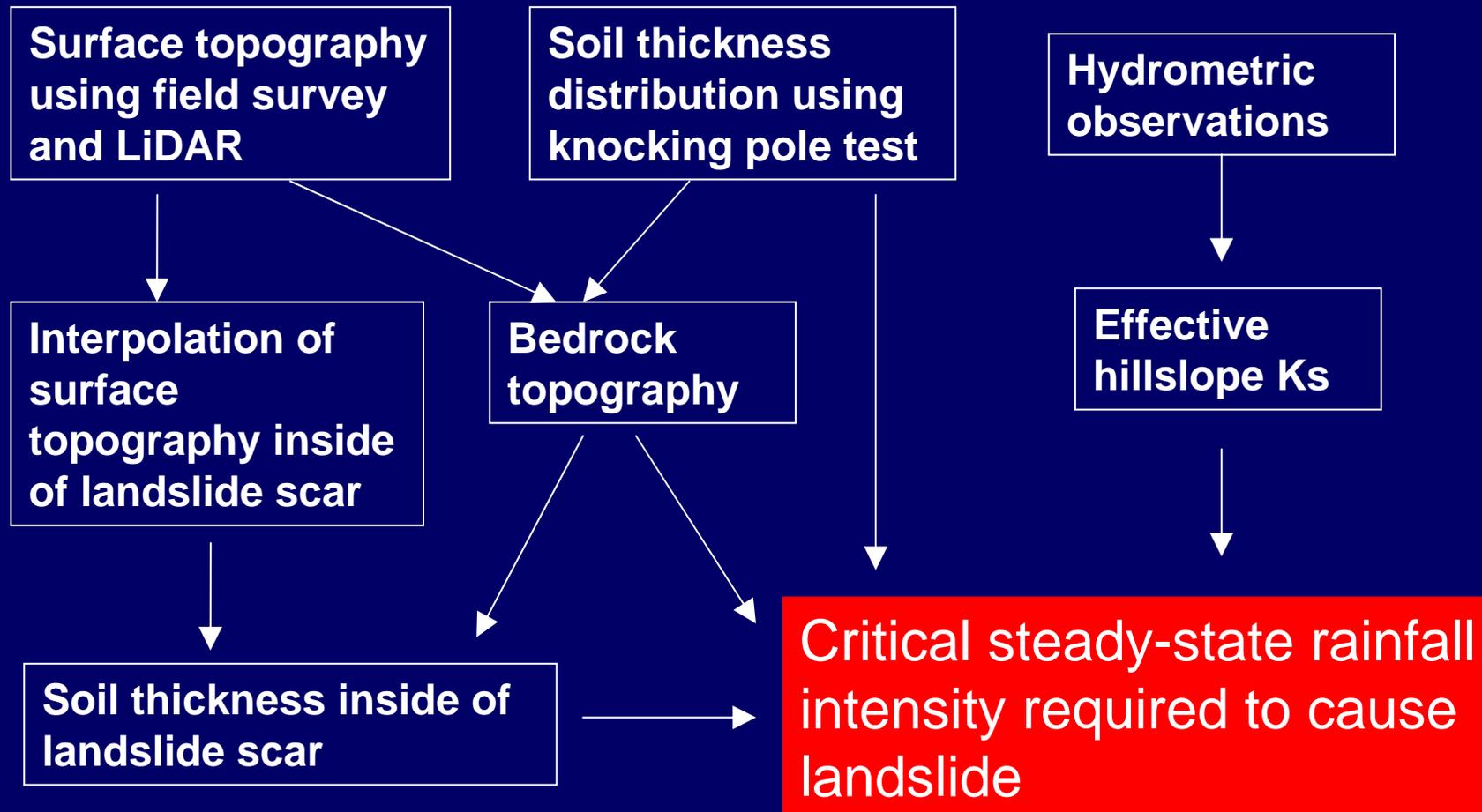
Soil saturated conductivity

$3.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$

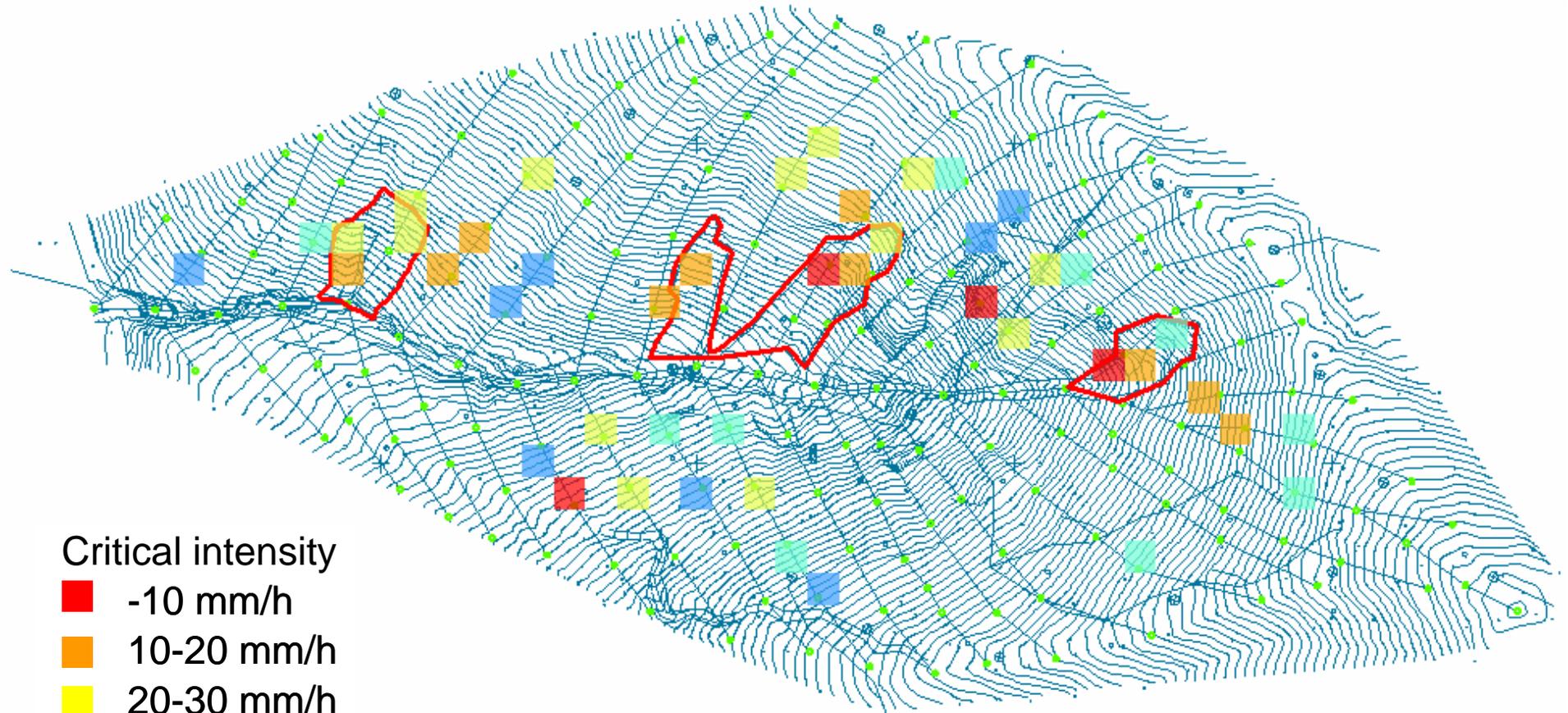
Hillslope effective conductivity

$5.2 \times 10^{-2} \text{cm/s}$

方法



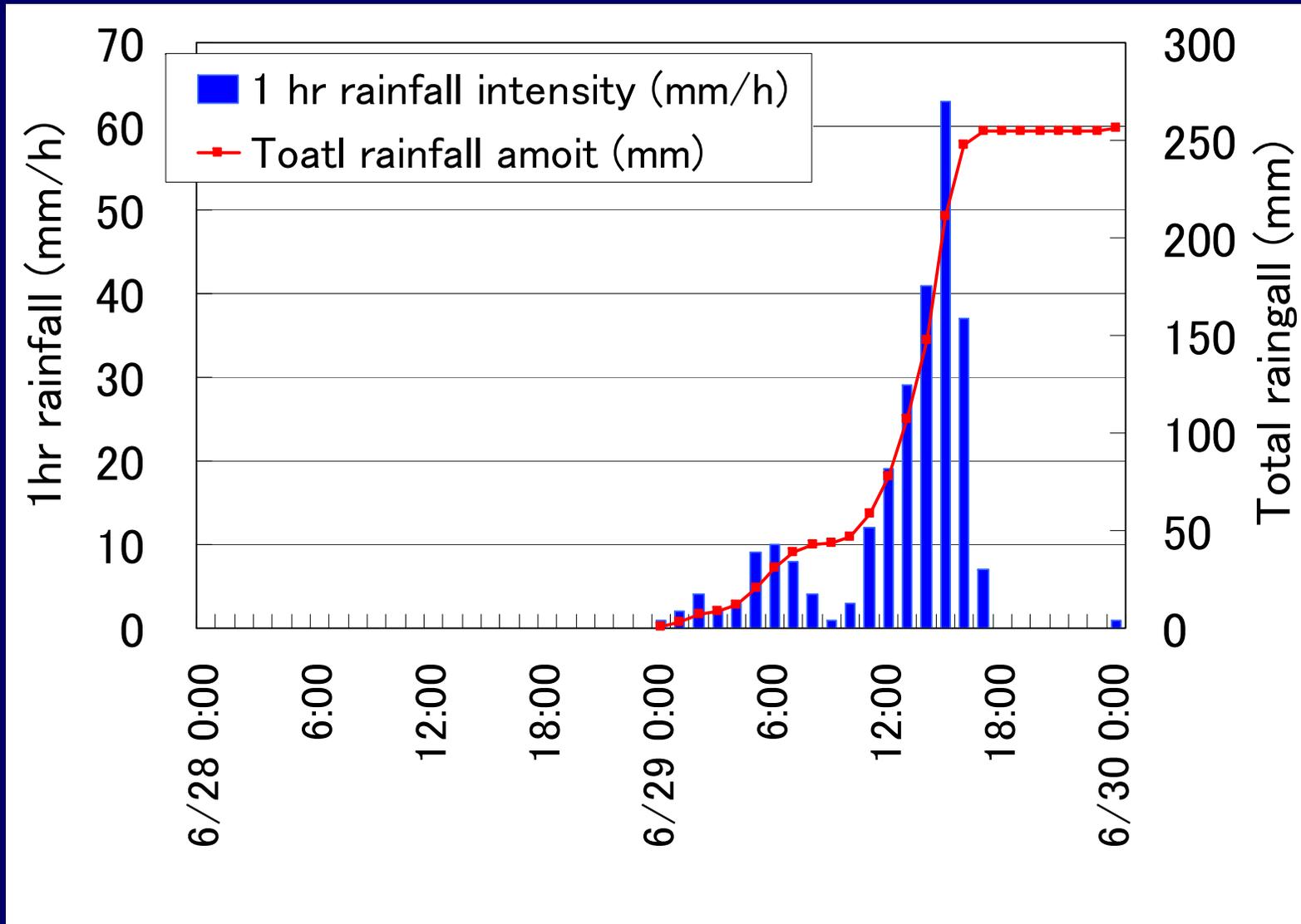
結果



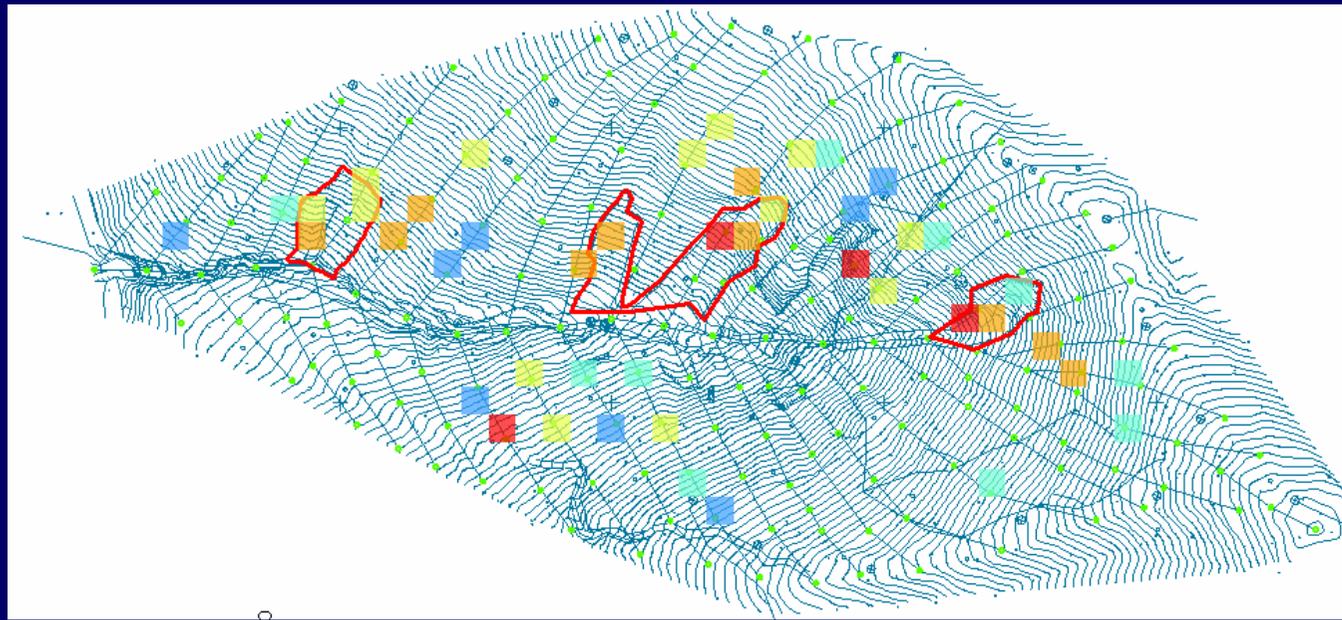
Critical intensity

- -10 mm/h
- 10-20 mm/h
- 20-30 mm/h
- 30-40 mm/h
- 40-50 mm/h
- 50 mm/h-

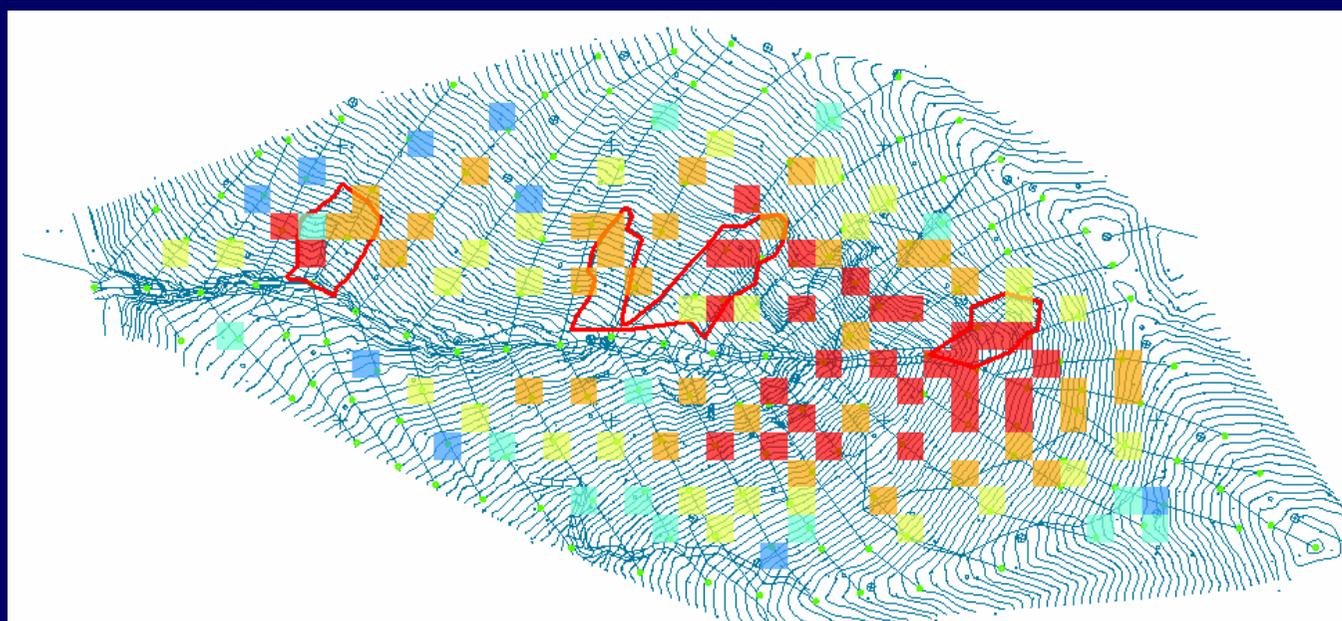
Storm in June 1999



① 土層厚分布の影響



計測土層厚



平均土層厚

Critical intensity

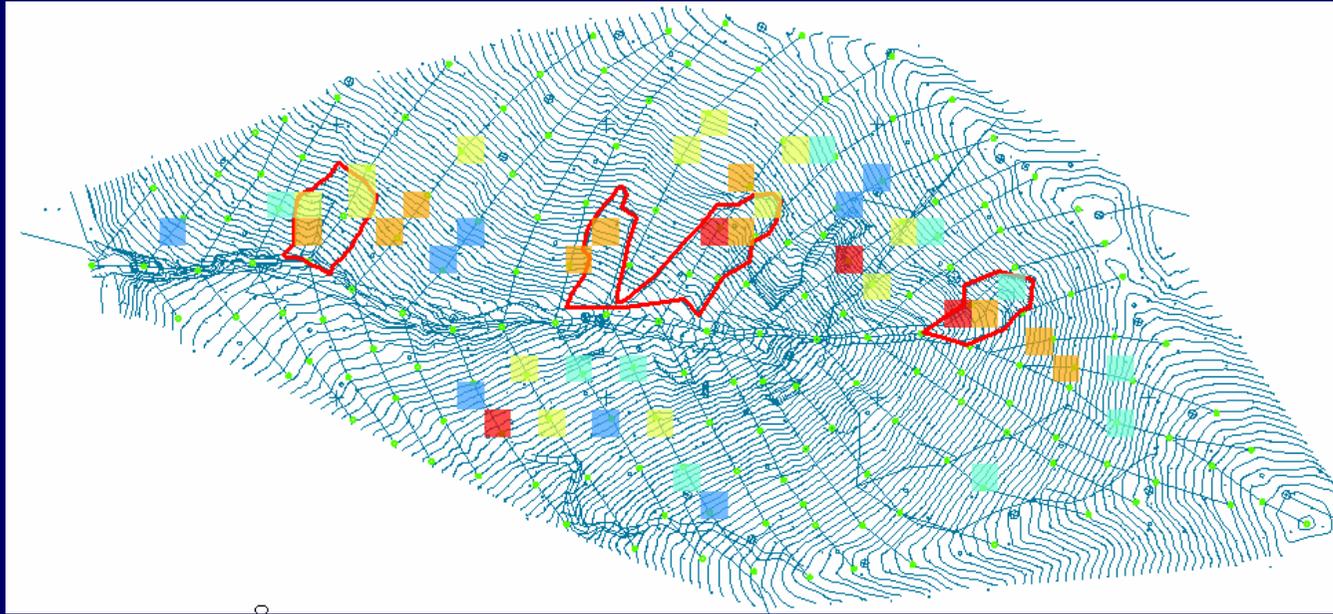
- -10 mm/h
- 10-20 mm/h
- 20-30 mm/h
- 30-40 mm/h
- 40-50 mm/h
- 50 mm/h-

② 地形量の算出方法

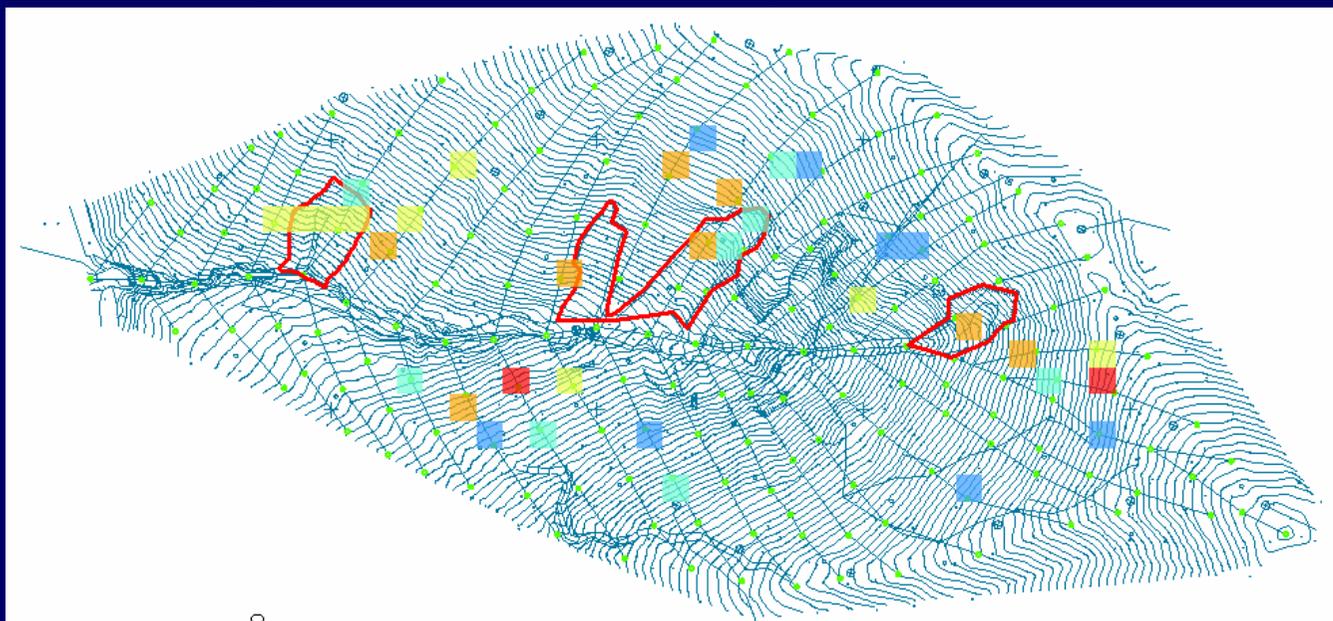
よく用いられる仮定

- 表面地形に沿って水が流れる。
- 隣接するメッシュの最大傾斜方向に水が流れる。

地表面と岩盤面の地形の違いの影響



岩盤面地形



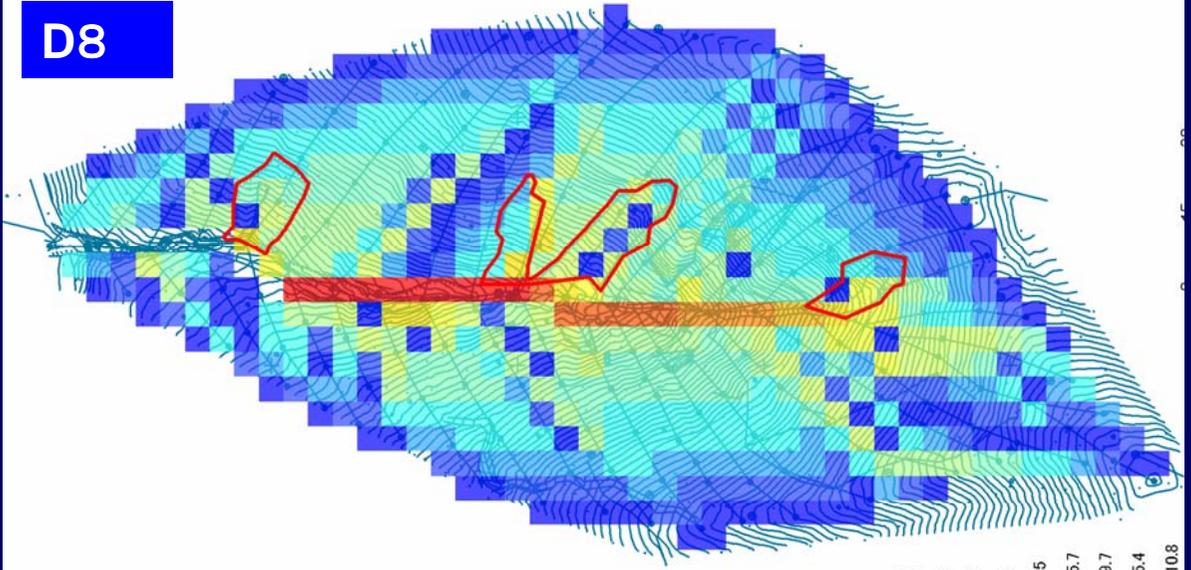
地表面地形

Critical intensity

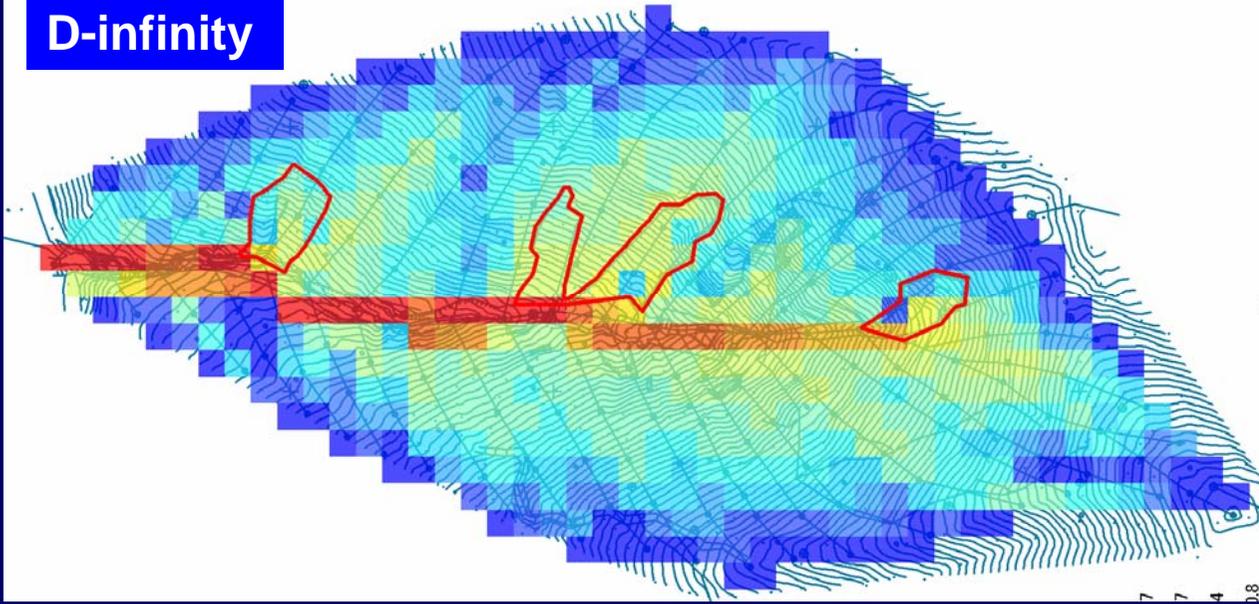
- -10 mm/h
- 10-20 mm/h
- 20-30 mm/h
- 30-40 mm/h
- 40-50 mm/h
- 50 mm/h-

地形量の算出方法

D8

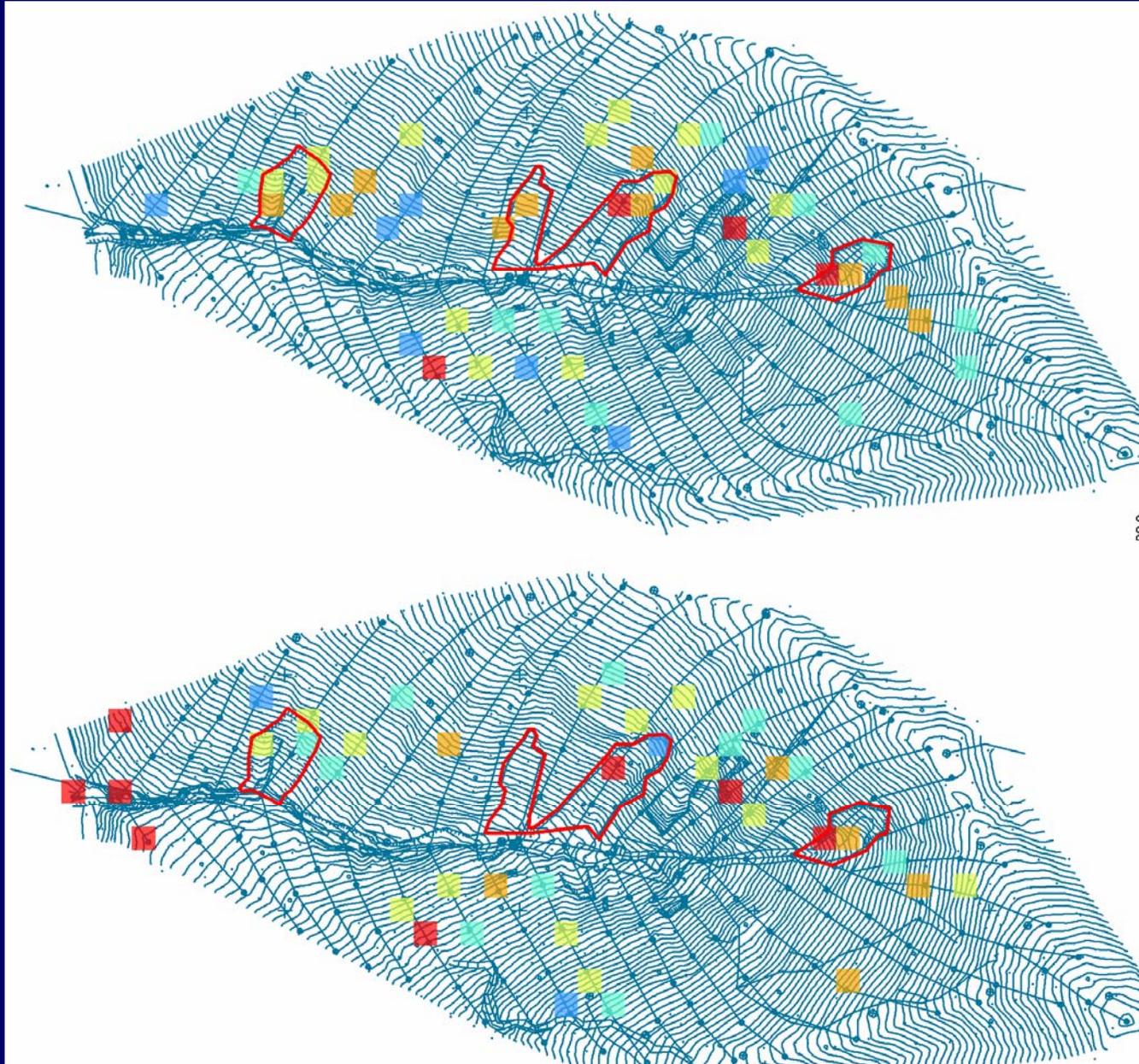


D-infinity



7
7
4
0.8

地形量の算出手法の影響



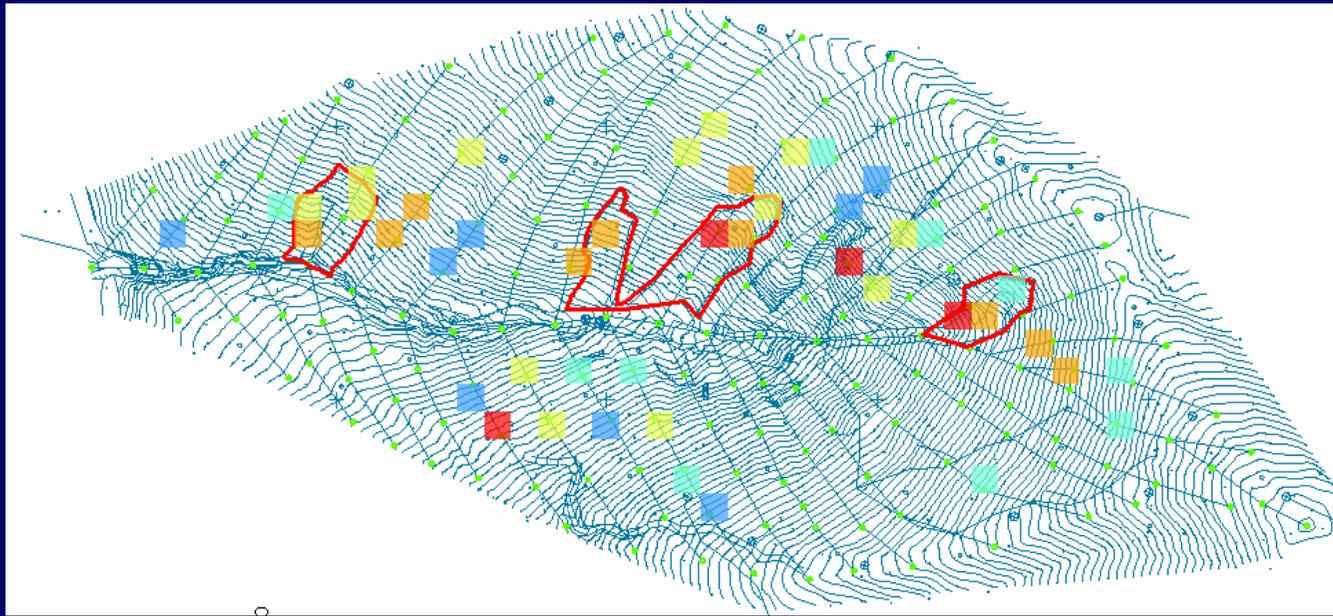
D-infinity

D8

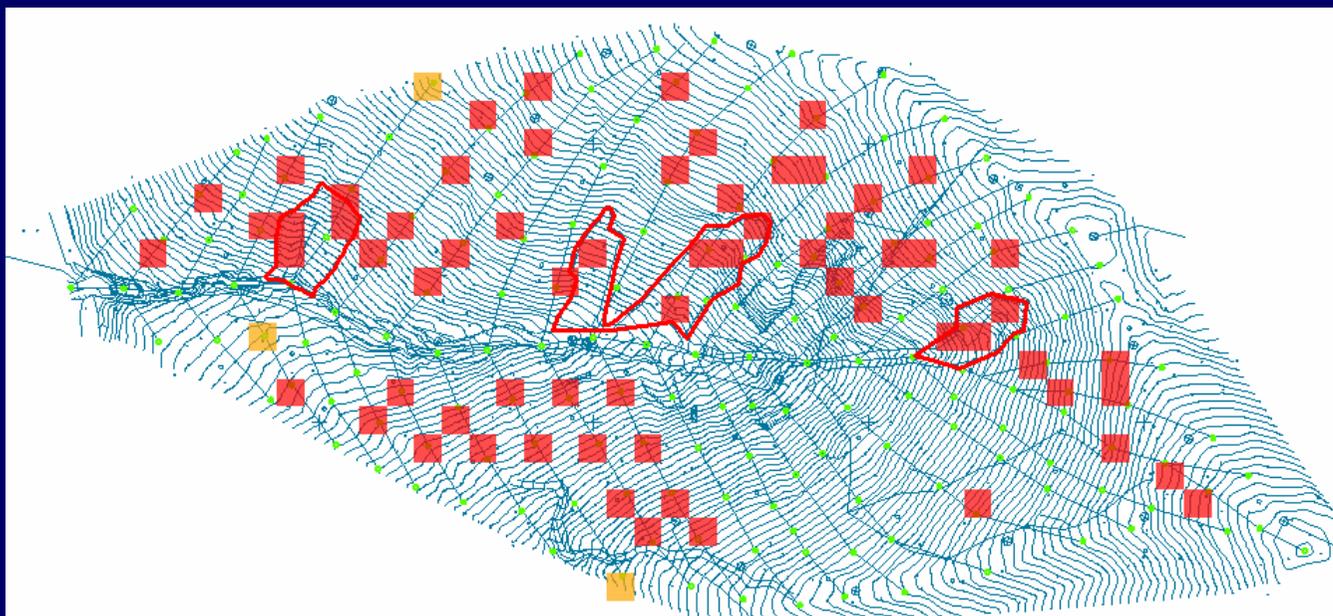
Critical intensity

- -10 mm/h
- 10-20 mm/h
- 20-30 mm/h
- 30-40 mm/h
- 40-50 mm/h
- 50 mm/h-

③ 透水係数(選択流)の影響



逆算値



測定値

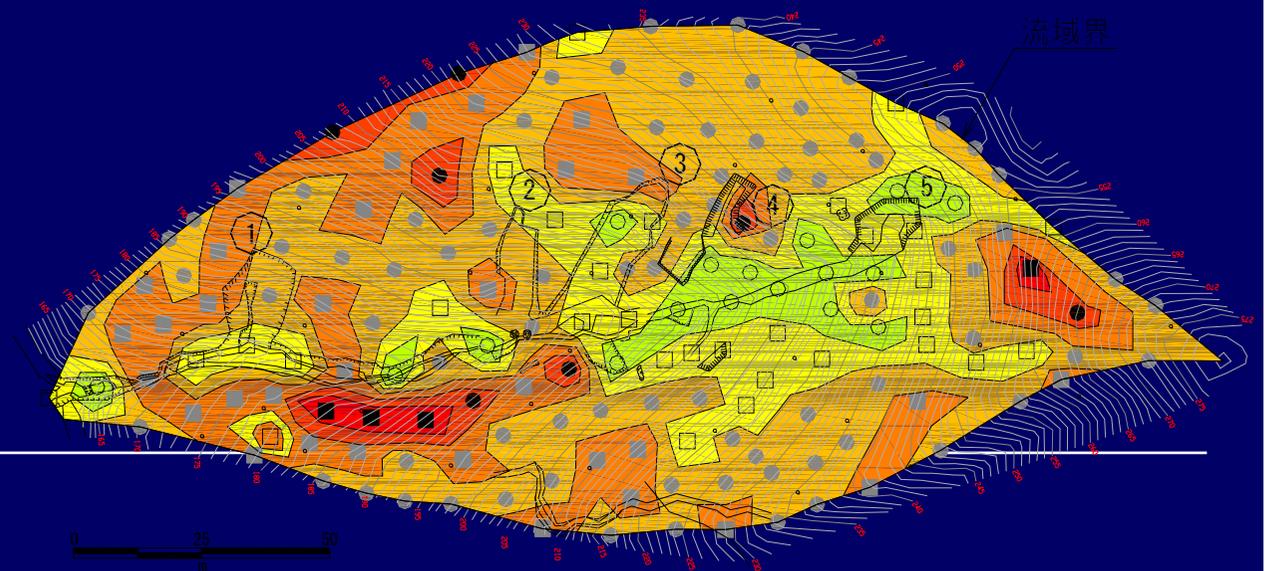
Critical intensity

- -10 mm/h
- 10-20 mm/h
- 20-30 mm/h
- 30-40 mm/h
- 40-50 mm/h
- 50 mm/h-

斜面スケールの表層崩壊予測

- 定常状態を仮定した水文モデルおよび無限長斜面の安定解析を用いても、土層厚を計測するなど場の条件を適切に入力することにより、表層崩壊の発生場所はある程度精度よく予測できる。

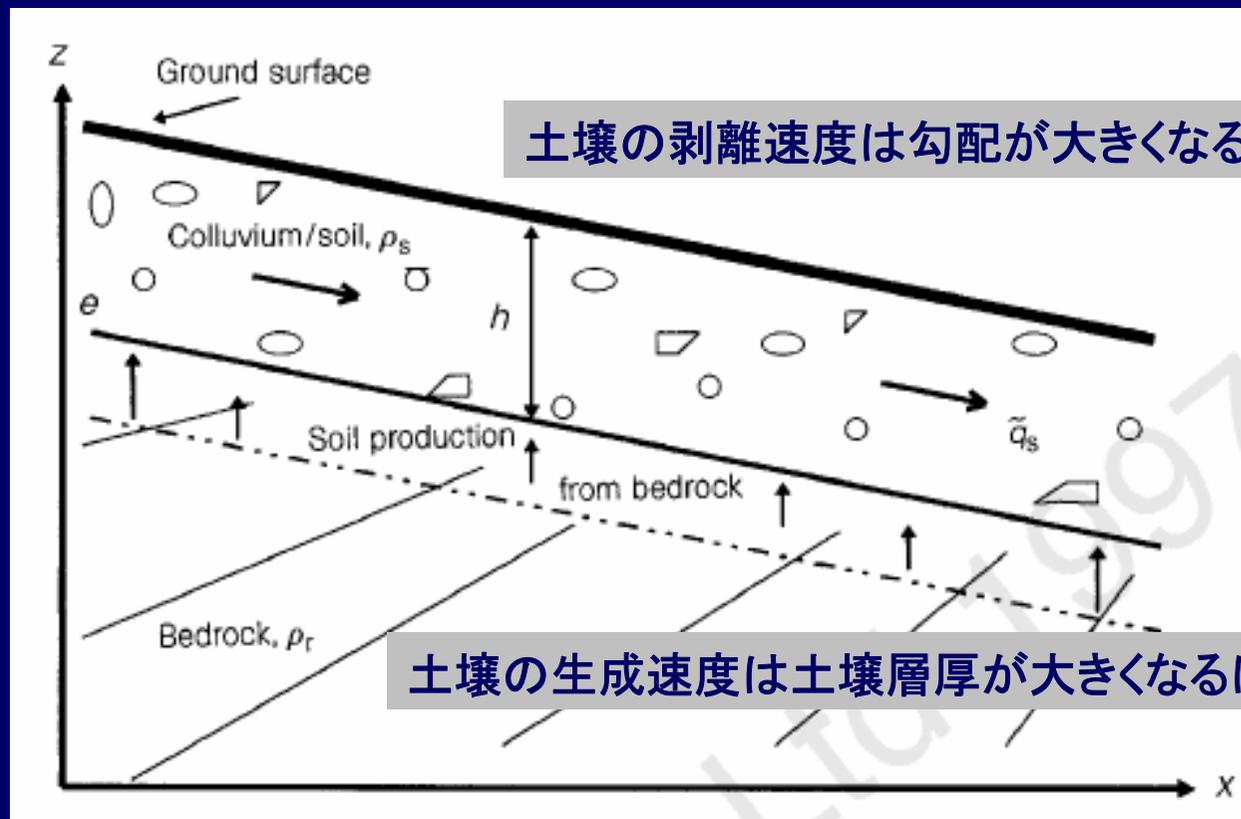
土層厚と地形の関係



Classic concept in geomorphology

Gilbert (1909)など

土層厚は侵食(剥離)と生成のバランスで決まる定常状態にある



土壌の剥離速度は勾配が大きくなるほど大きくなる

土壌の生成速度は土壌層厚が大きくなるほど小さくなる

曲率と土層厚の関係

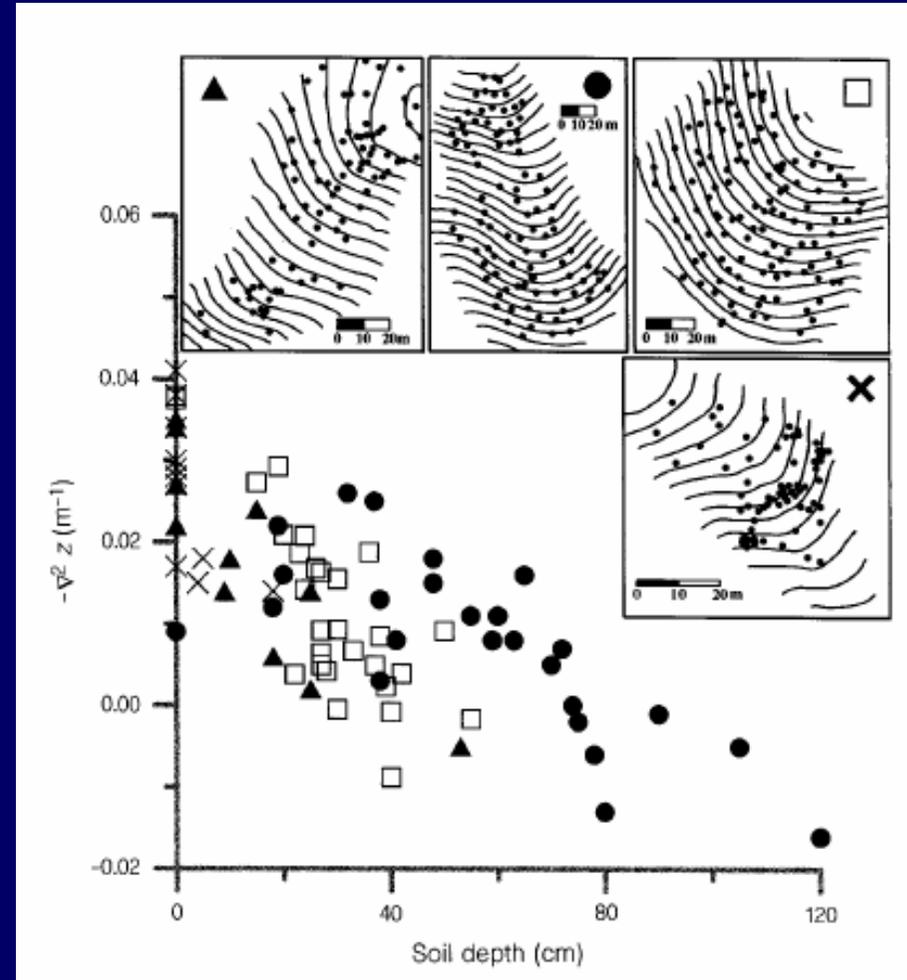
Heimsath et al. (1997)

比較的勾配の緩い斜面では
土層厚は曲率と関係がある

定常状態仮説を支持

$$\rho_s \frac{\partial h}{\partial t} = -\rho_r \frac{\partial e}{\partial t} - \nabla \cdot \rho_s \tilde{q}_s$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{\rho_s}{\rho_r} K \nabla^2 z$$



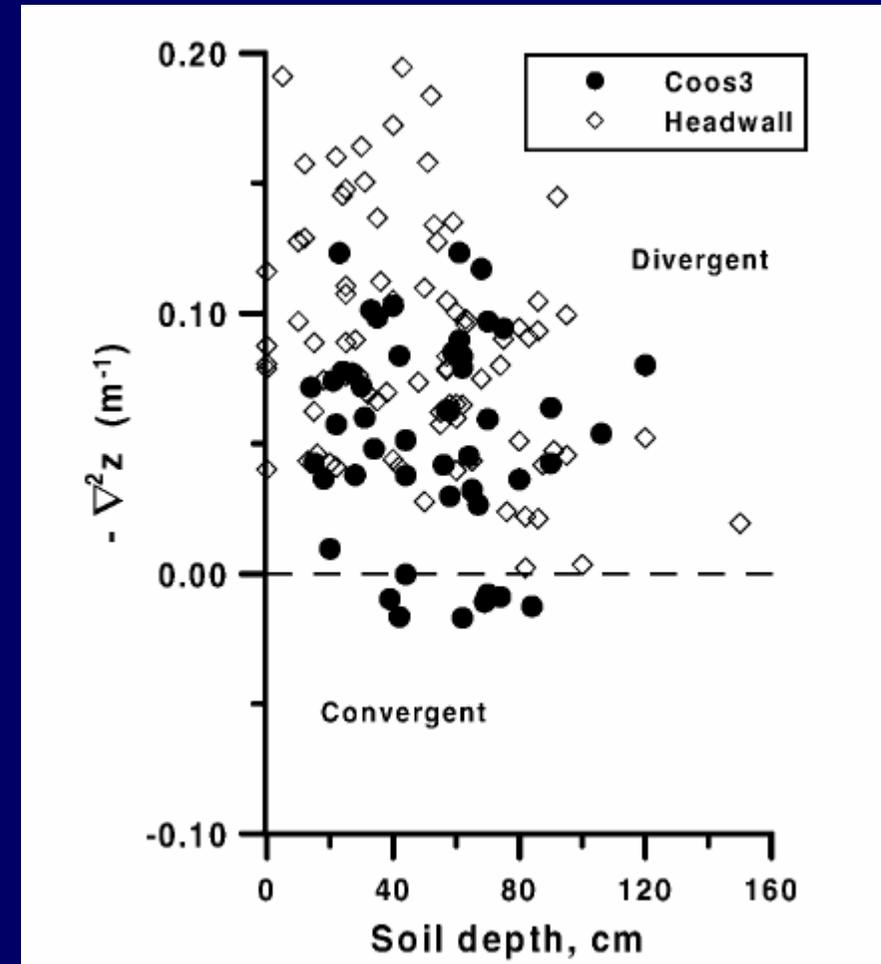
Heimsath et al. (1997) Nature

曲率と土層厚の関係

Heimsath et al. (2001)

比較的勾配の急な斜面
では曲率と土層厚の関
係は明瞭でない

同様な結果は、飯田・田
中(1997)など

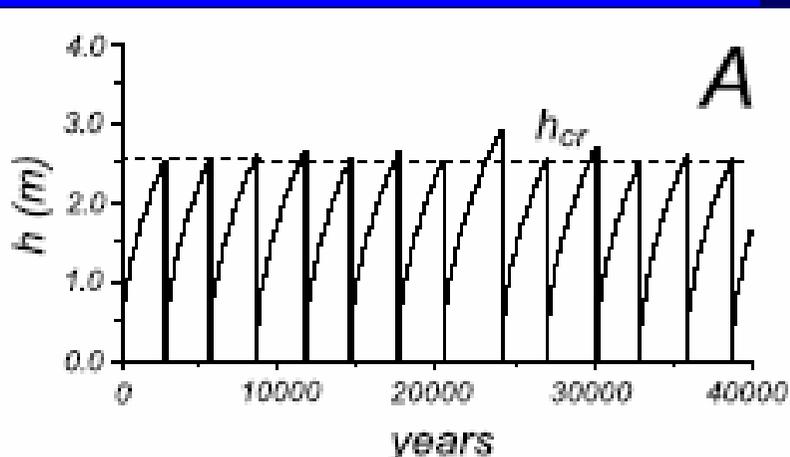


Heimsath et al, (2001) ESPL

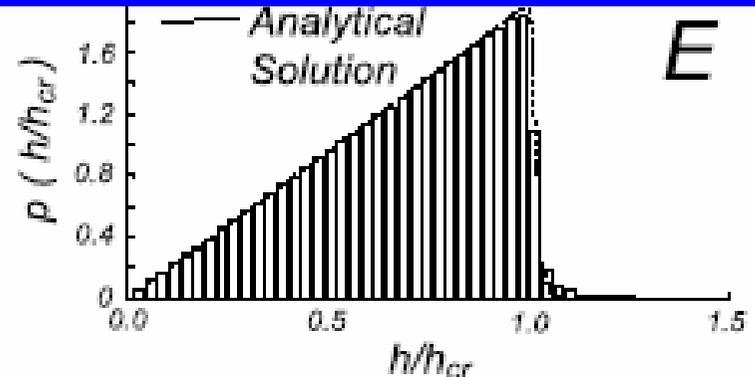
確率モデル

- 急勾配斜面において，表層崩壊の発生，風化等による土層厚の増大，をモデル化した土層厚の時系列変化に関するモデルが提案。
- モデルによると，土層厚－出現確率関係は，斜面勾配，集水面積，曲率，化学的風化速度，土質強度，大規模降雨の出現確率によって表現できる。[e.g., D'Odorico and Fagherazzi, 2003].

Temporal dynamics of soil depth



Probability distribution of soil depth

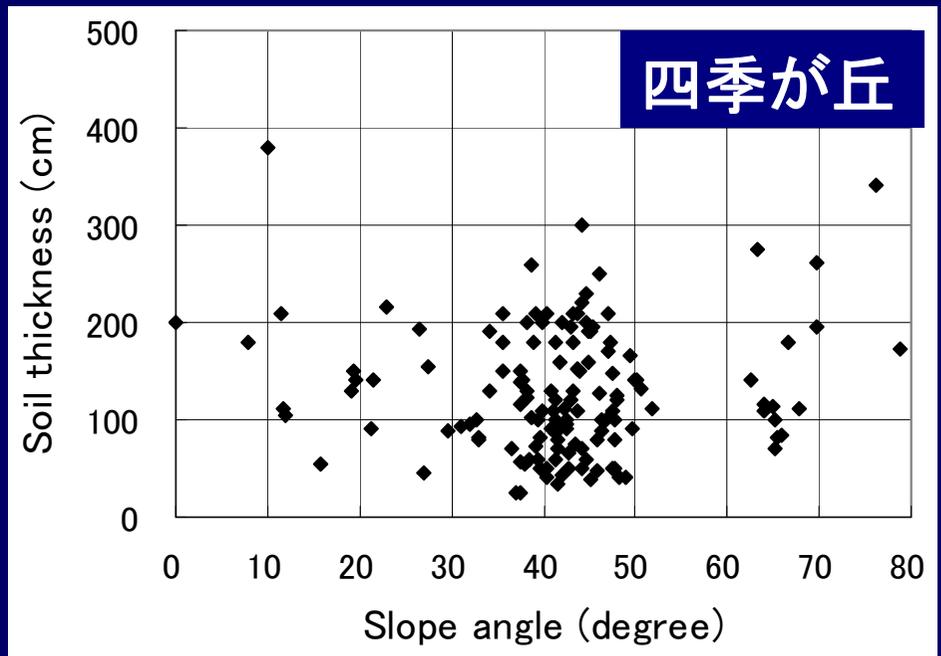
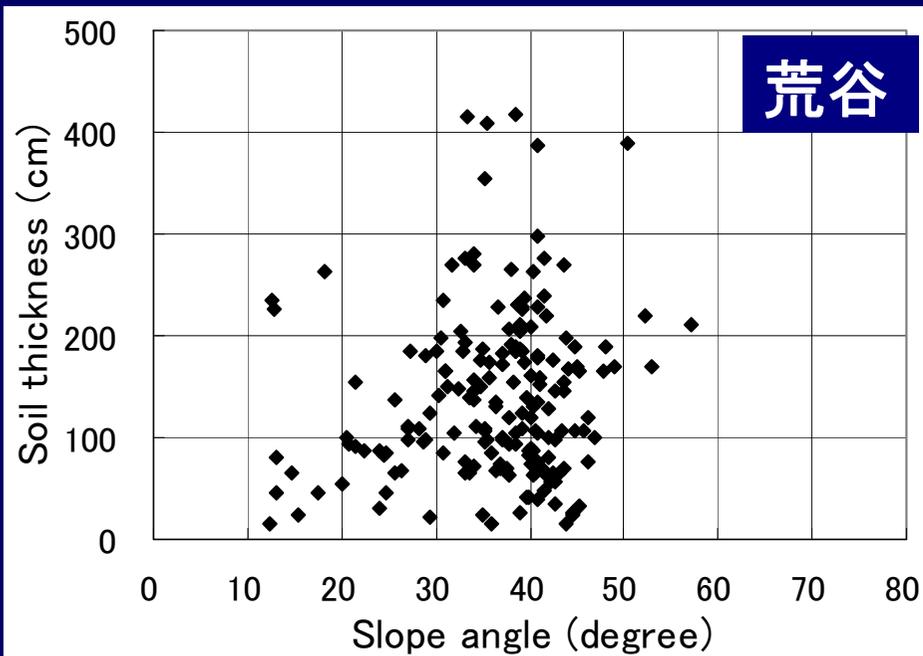
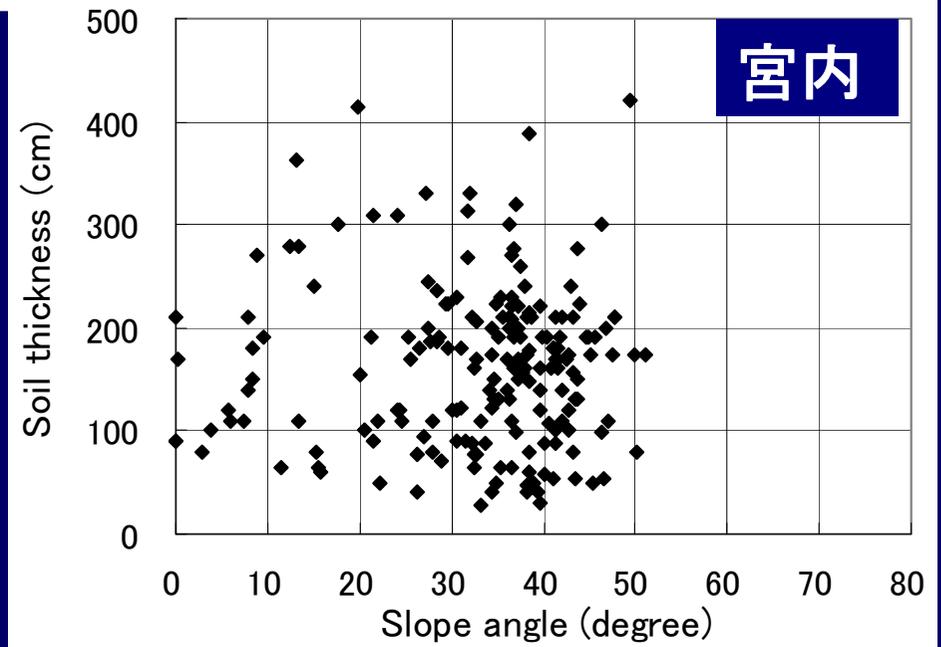


D'Odorico and Fagherazzi (2003) WRR

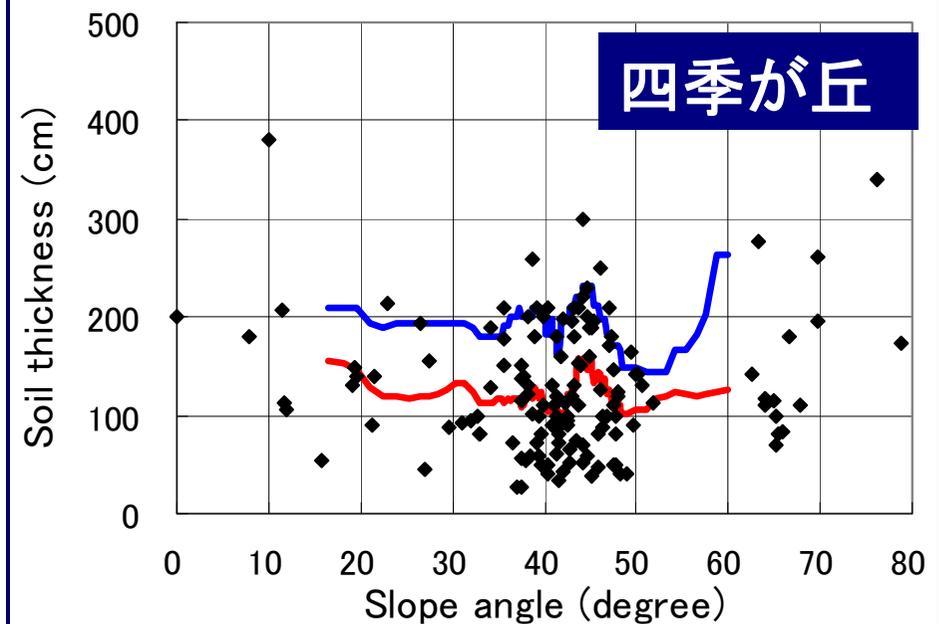
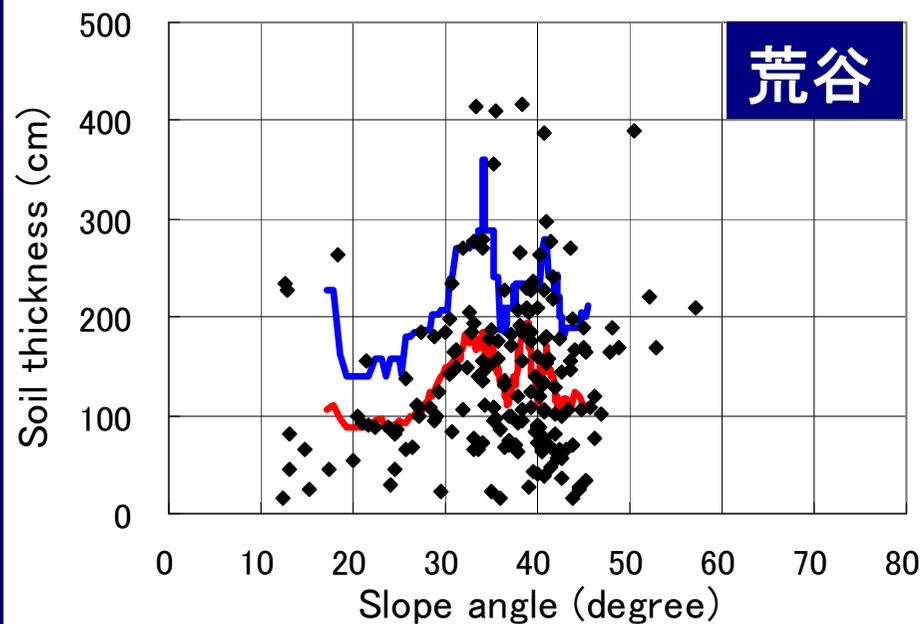
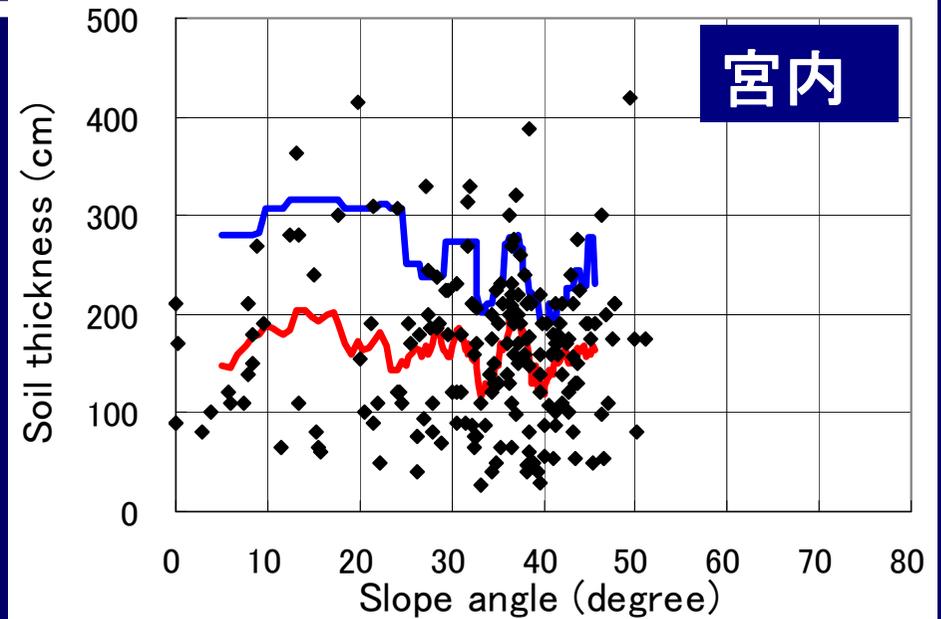
作業仮説

- 気候・地質の条件が等しい場合，土層厚
— 出現確率関係は，斜面勾配，集水面積，
曲率，によって表現できる。

土層厚と地表面 勾配の関係

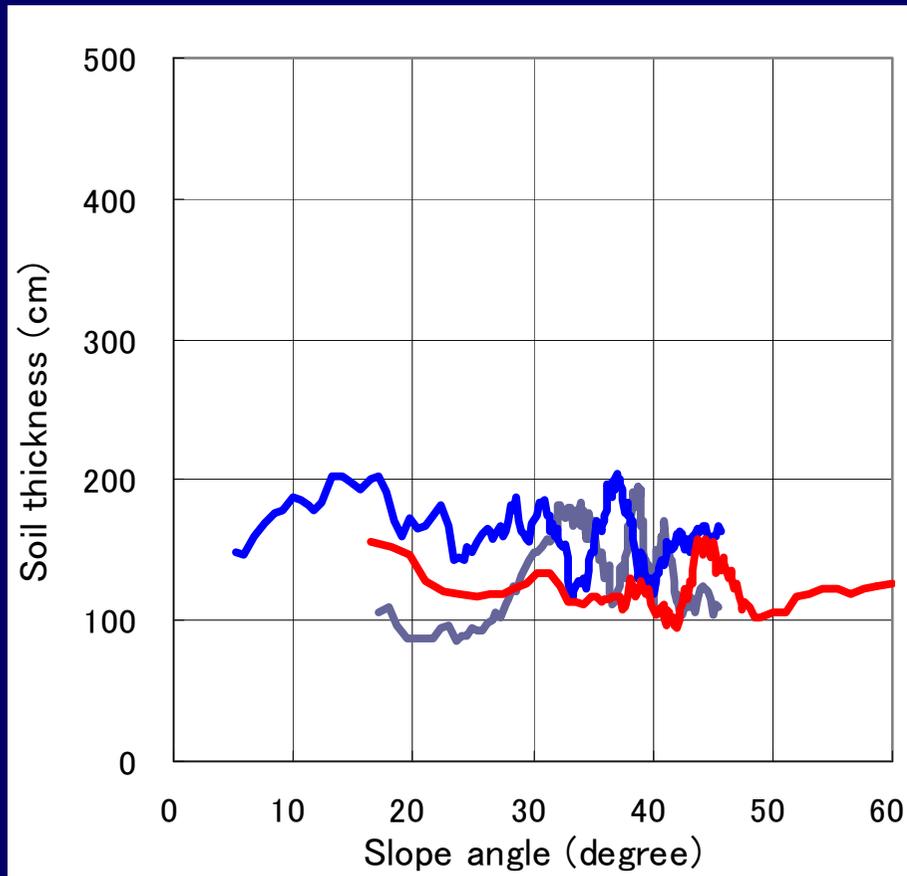


土層厚と地表面 勾配の関係

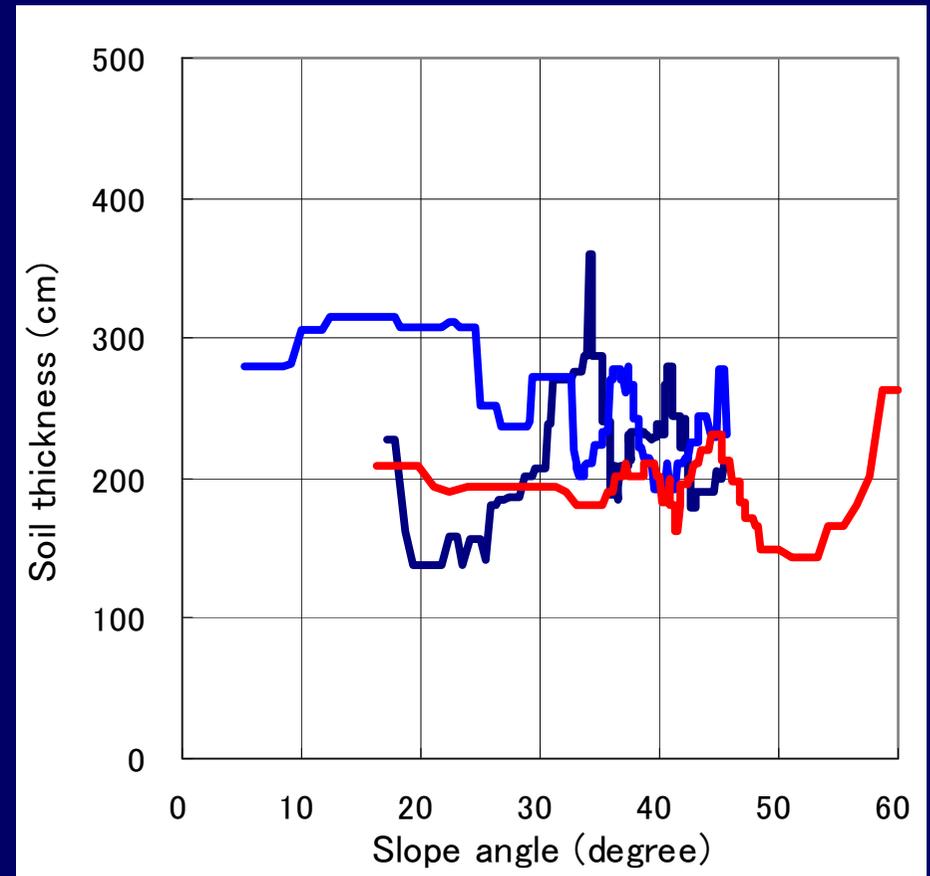


流域間の比較(地表面勾配)

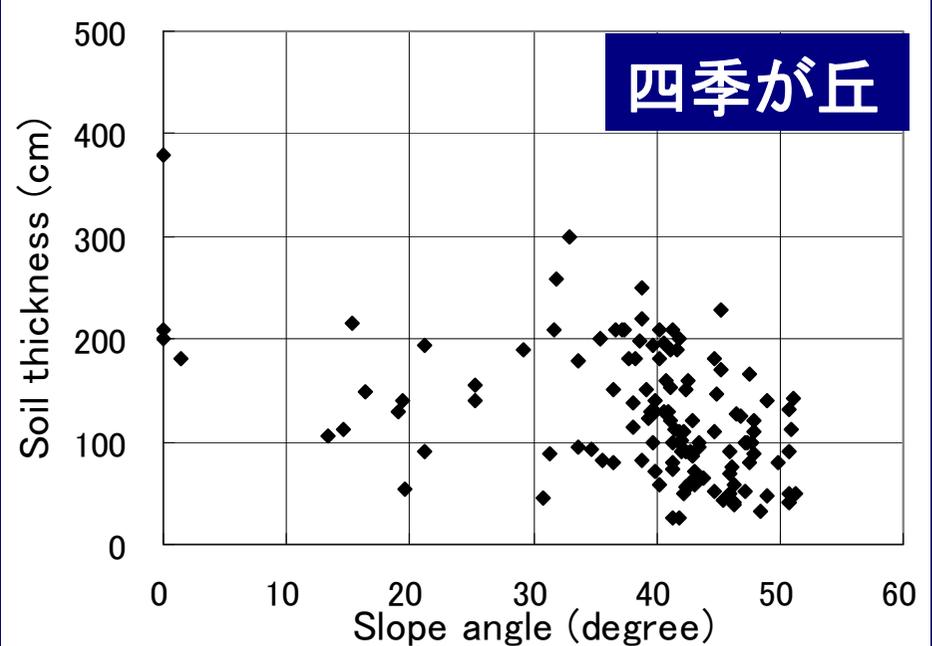
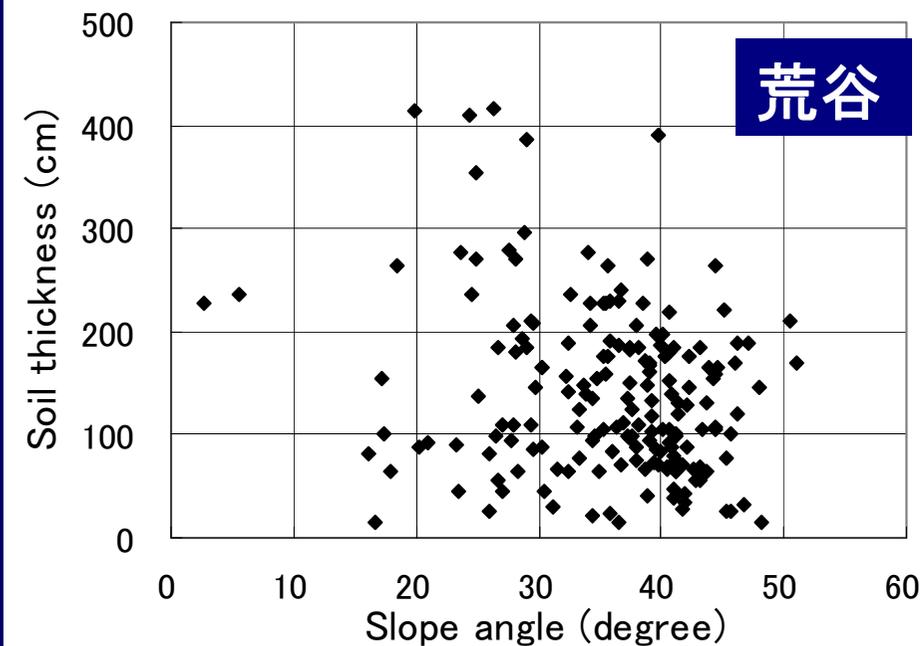
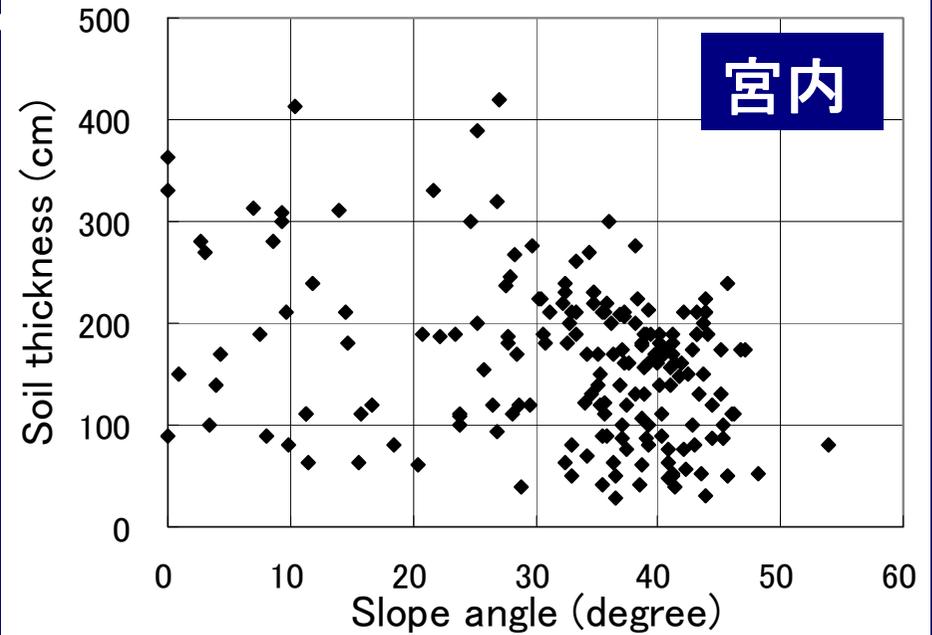
平均値



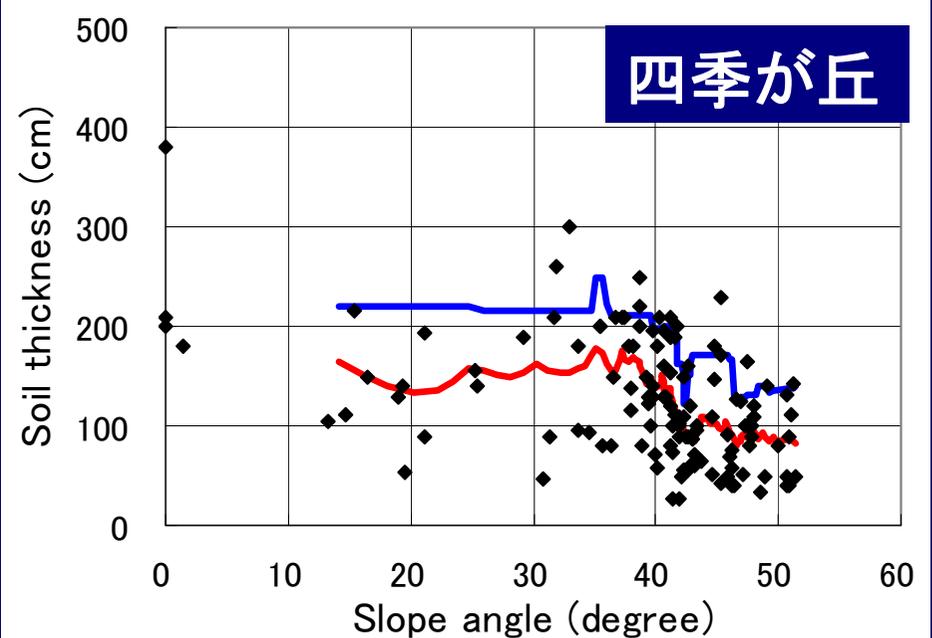
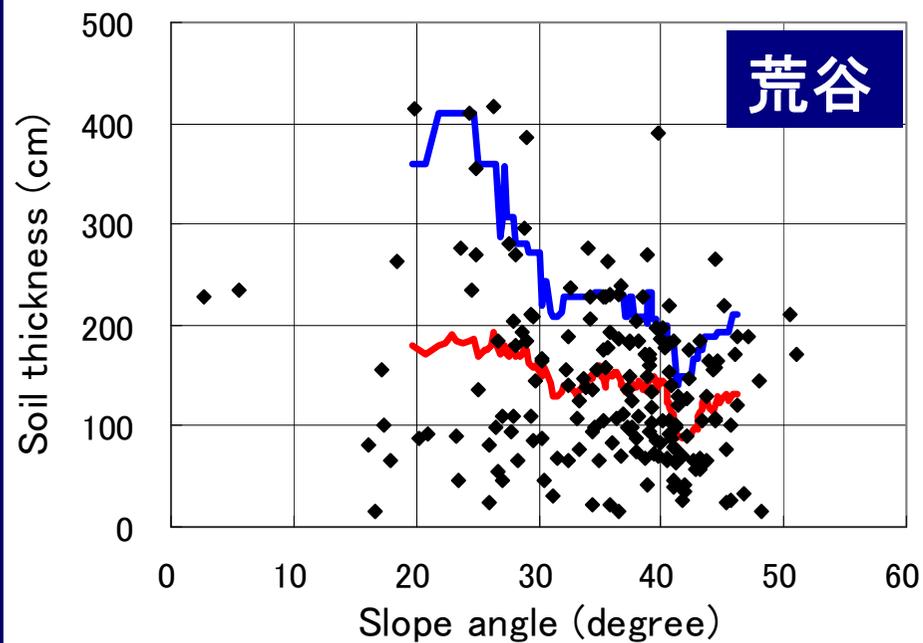
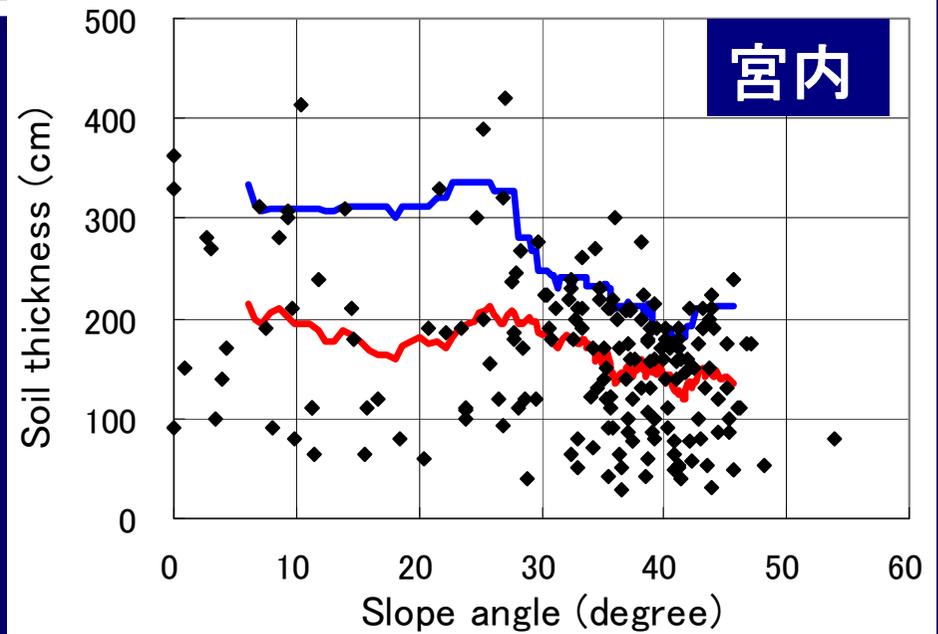
90%値



土層厚と岩盤表面 勾配の関係

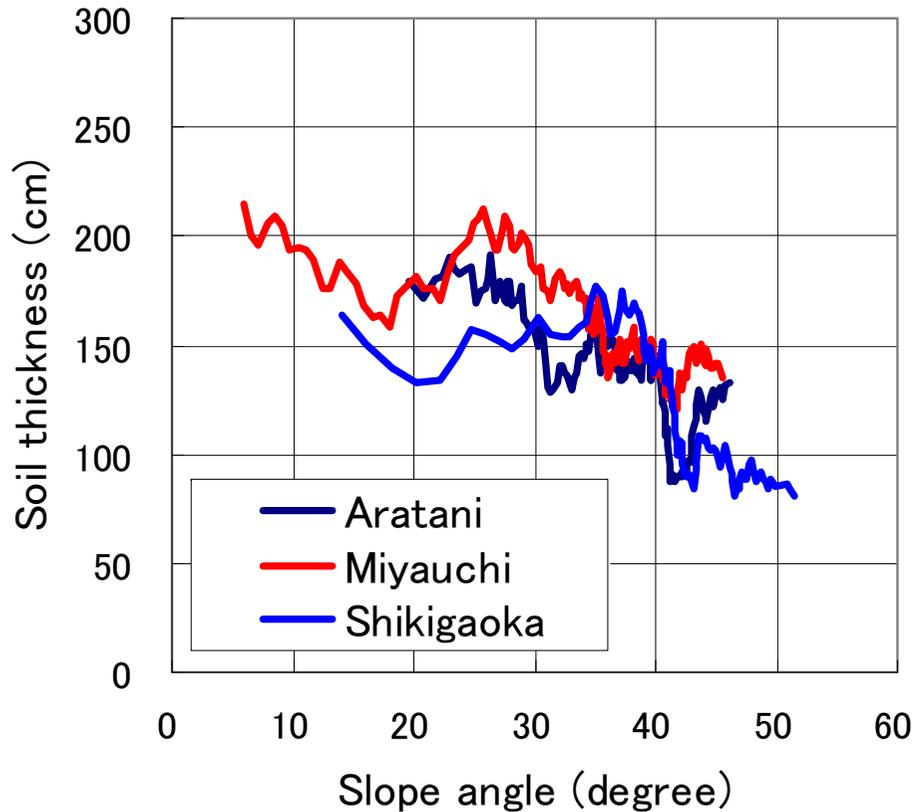


土層厚と岩盤表面 勾配の関係

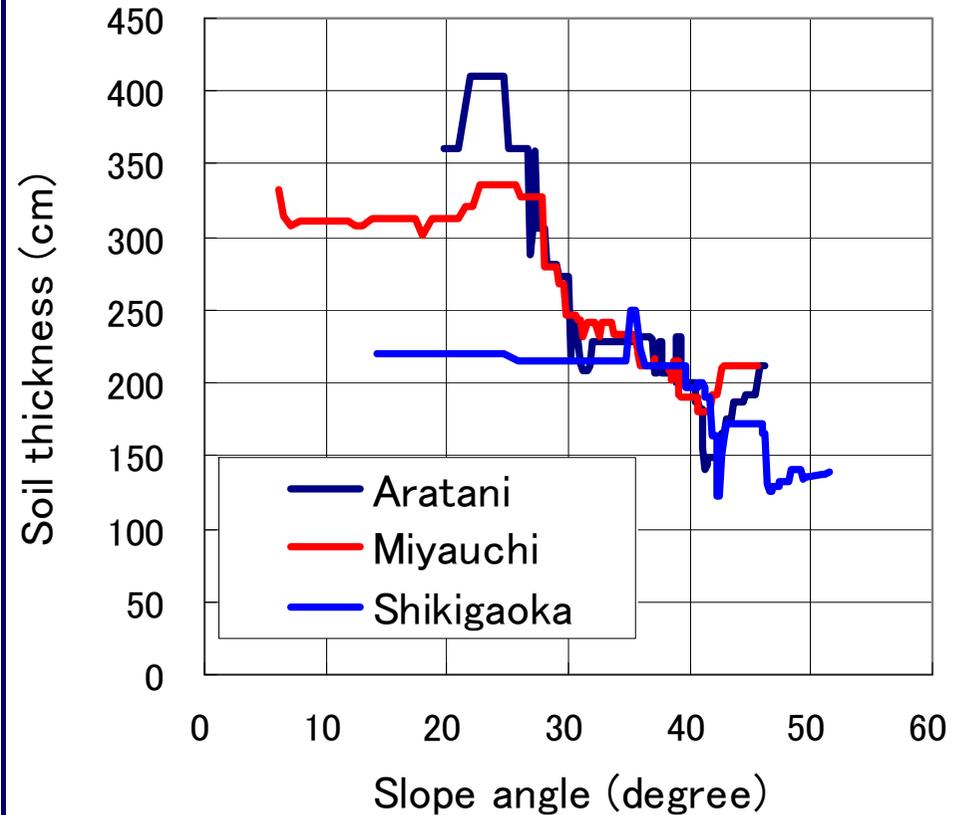


流域間の比較 (岩盤表面勾配)

平均値



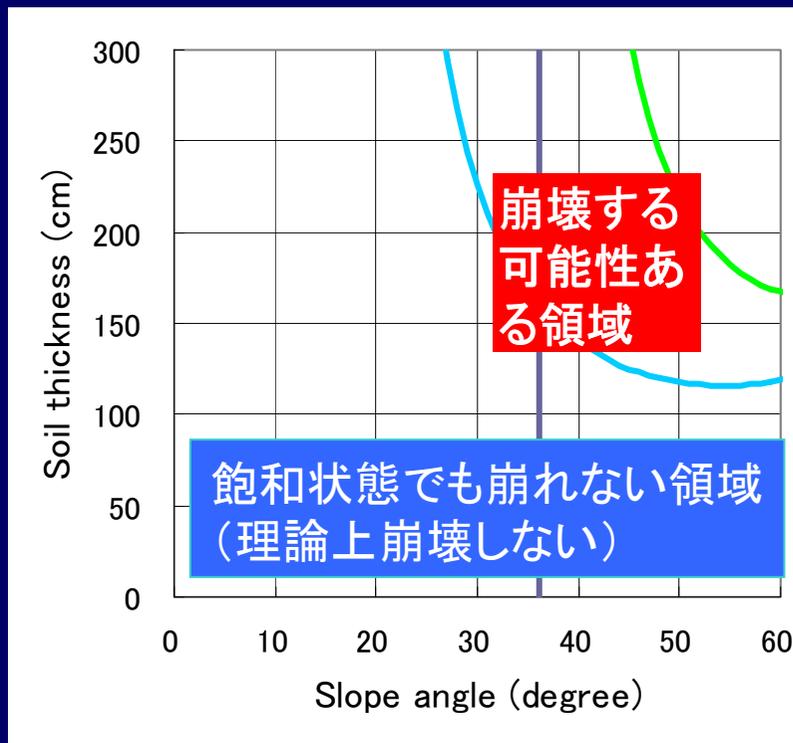
90%値



斜面勾配と土層厚、表層崩壊発生の関係

土層厚が厚いほど
安全率が高い

土層厚が厚いほど
安全率が低い



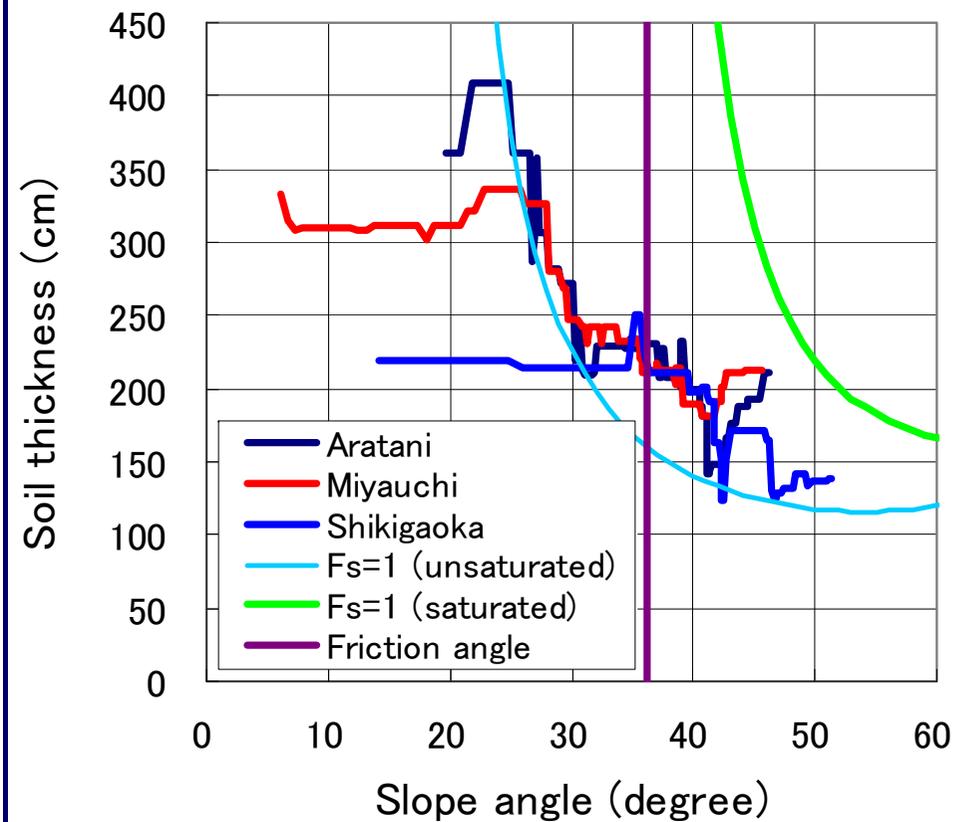
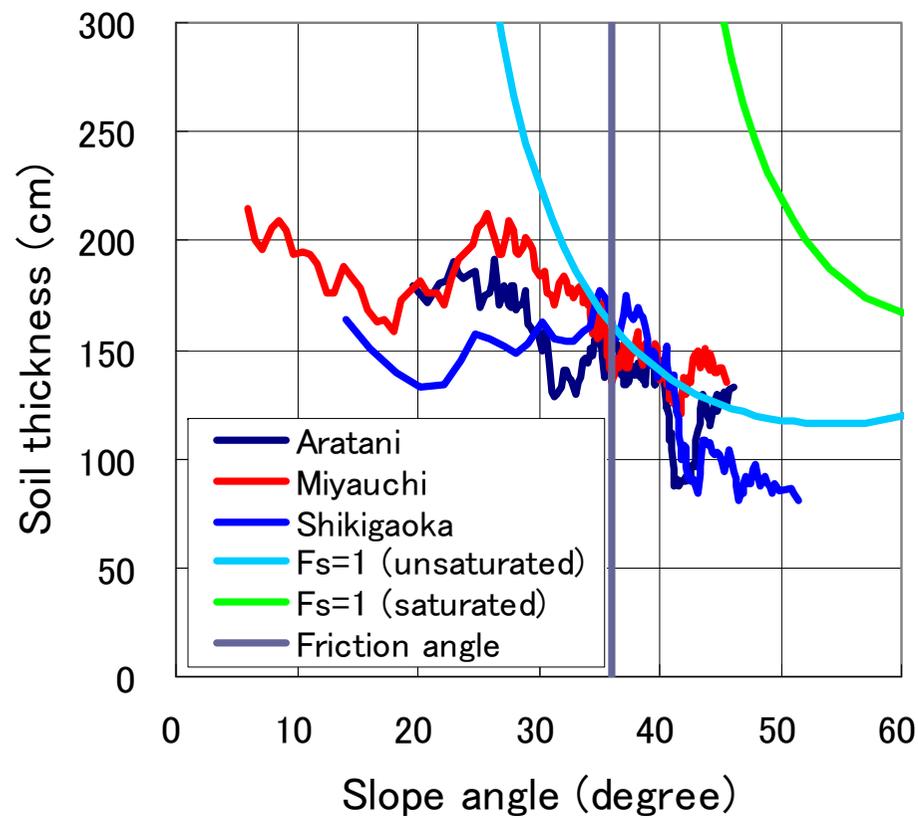
不飽和状態でも崩れてしまう領域
(理論上、存在しない)

不飽和状態で安全率が1となる条件

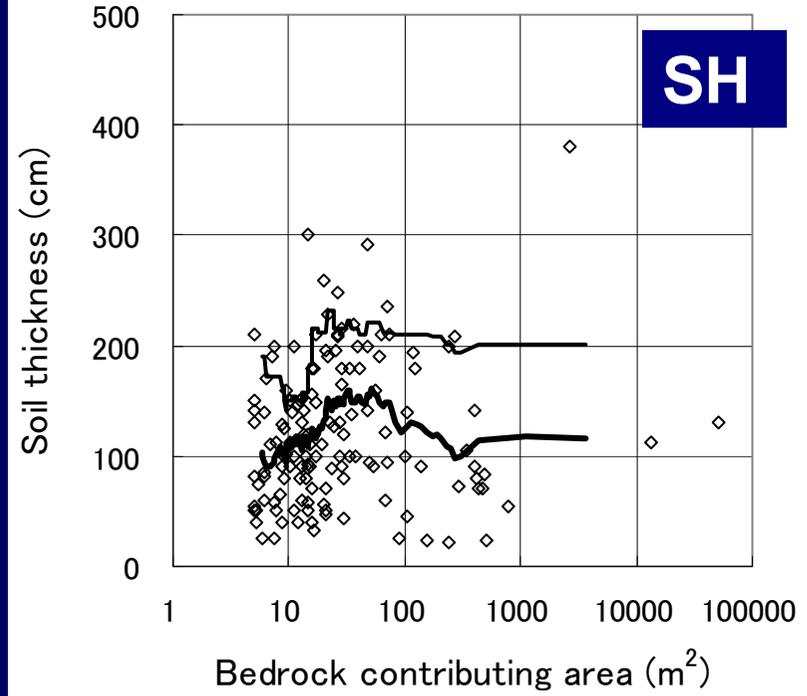
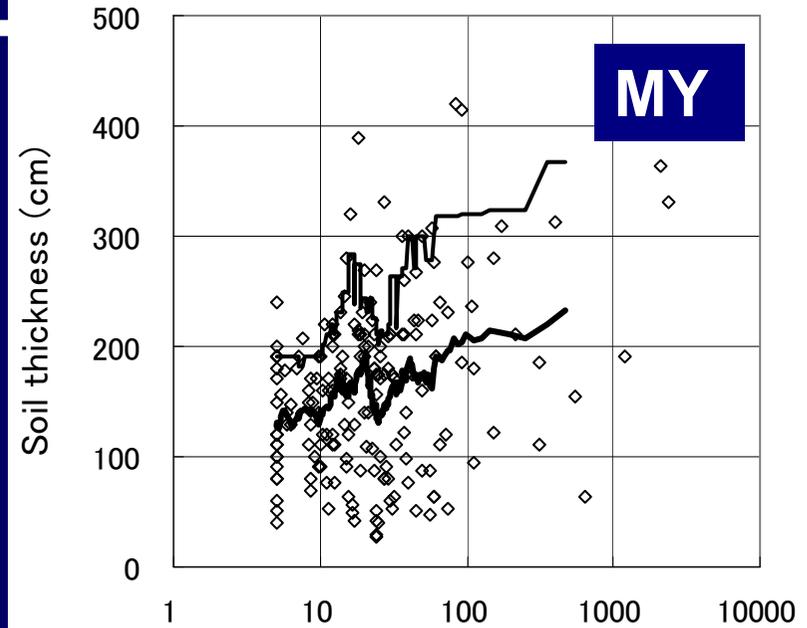
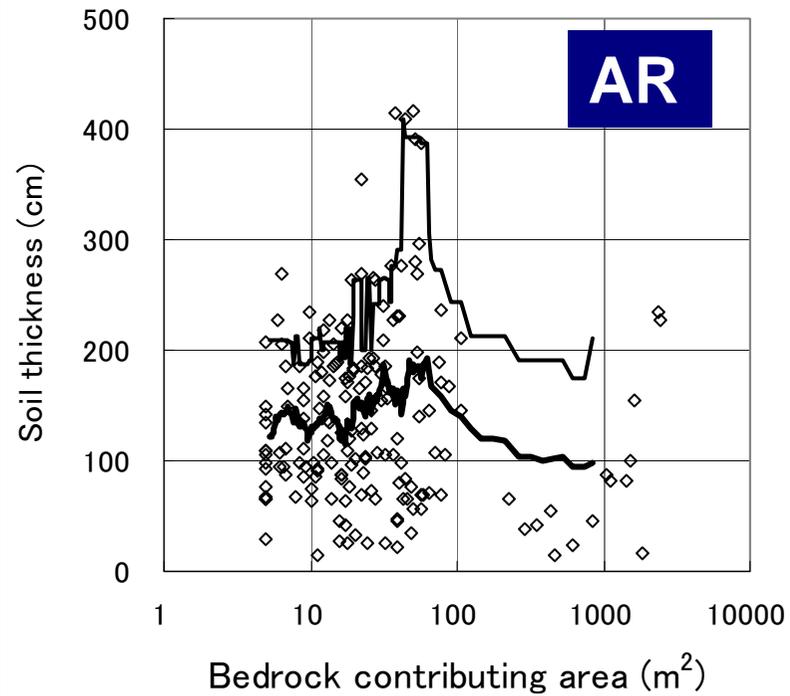
飽和状態で安全率が1となる条件

内部摩擦角

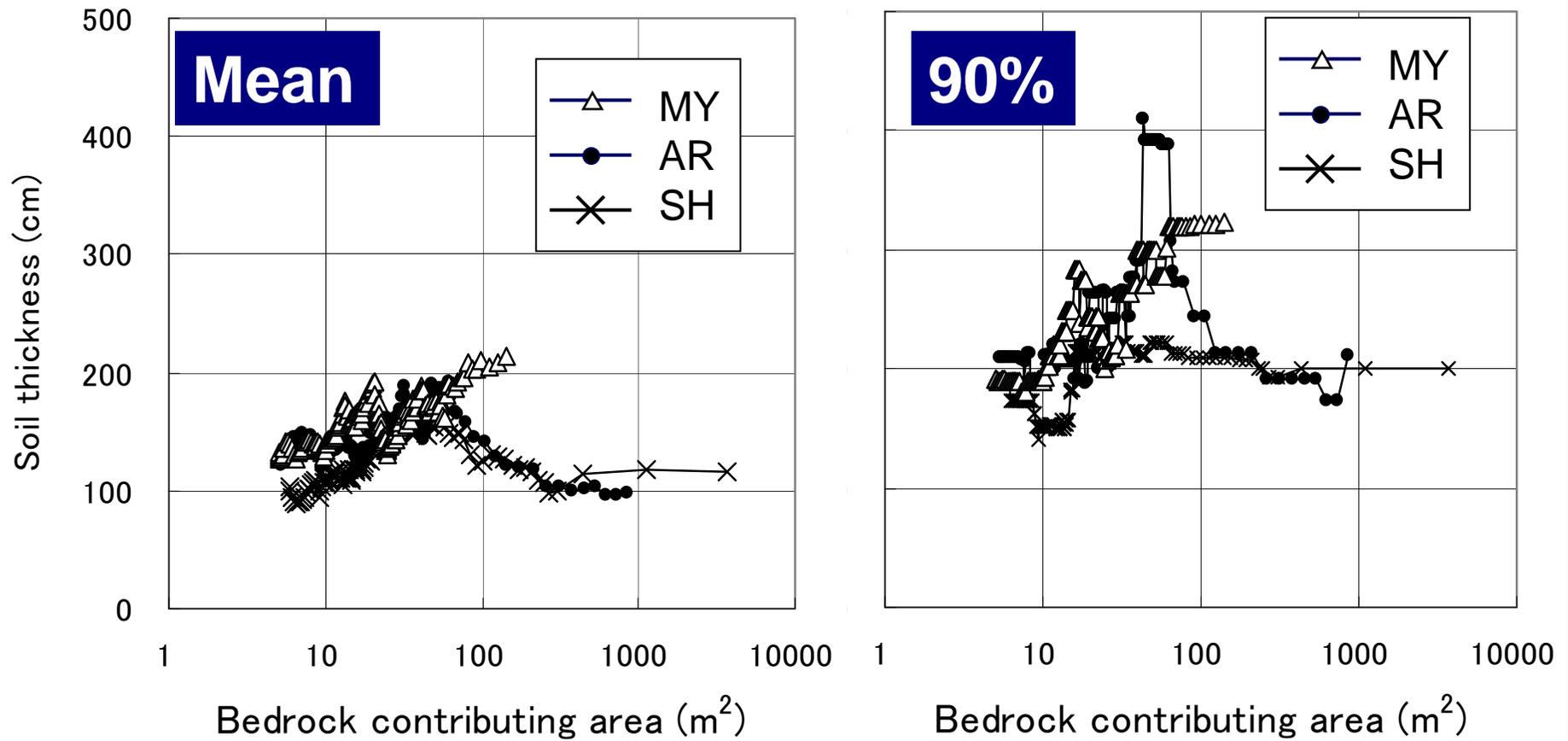
測定結果との比較



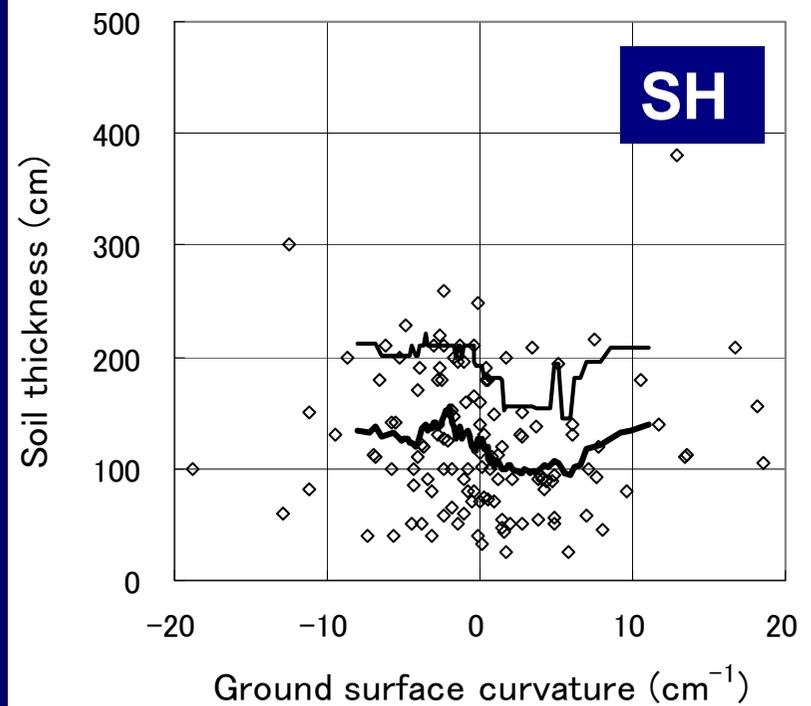
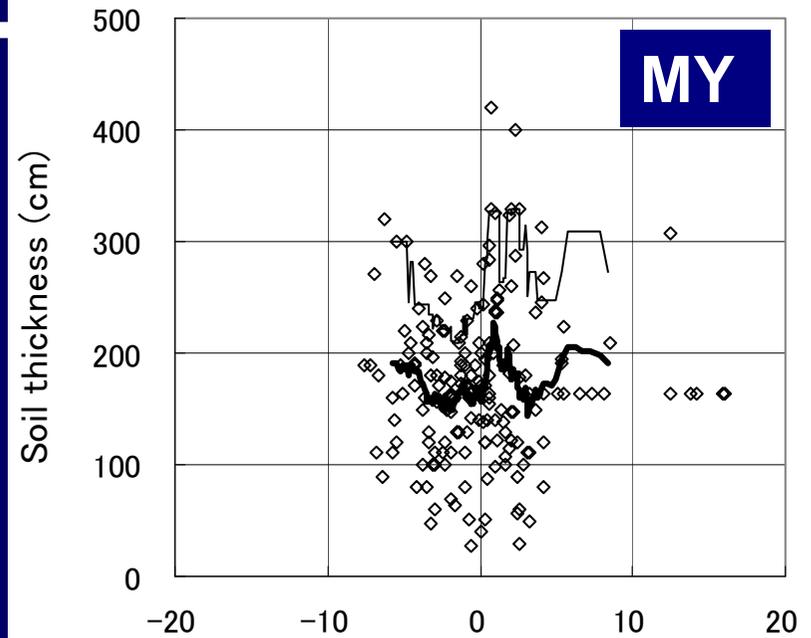
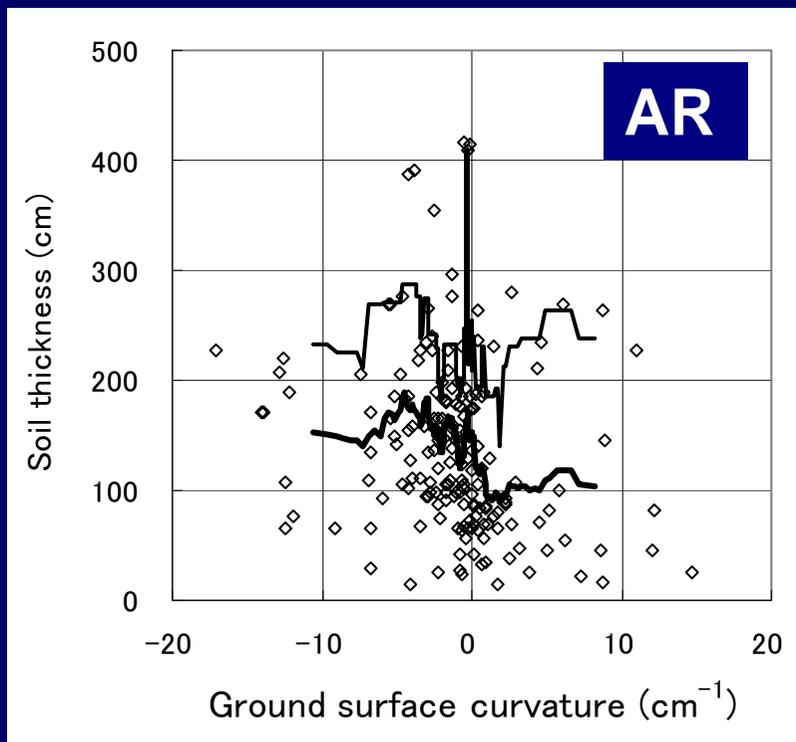
集水面積と土層厚



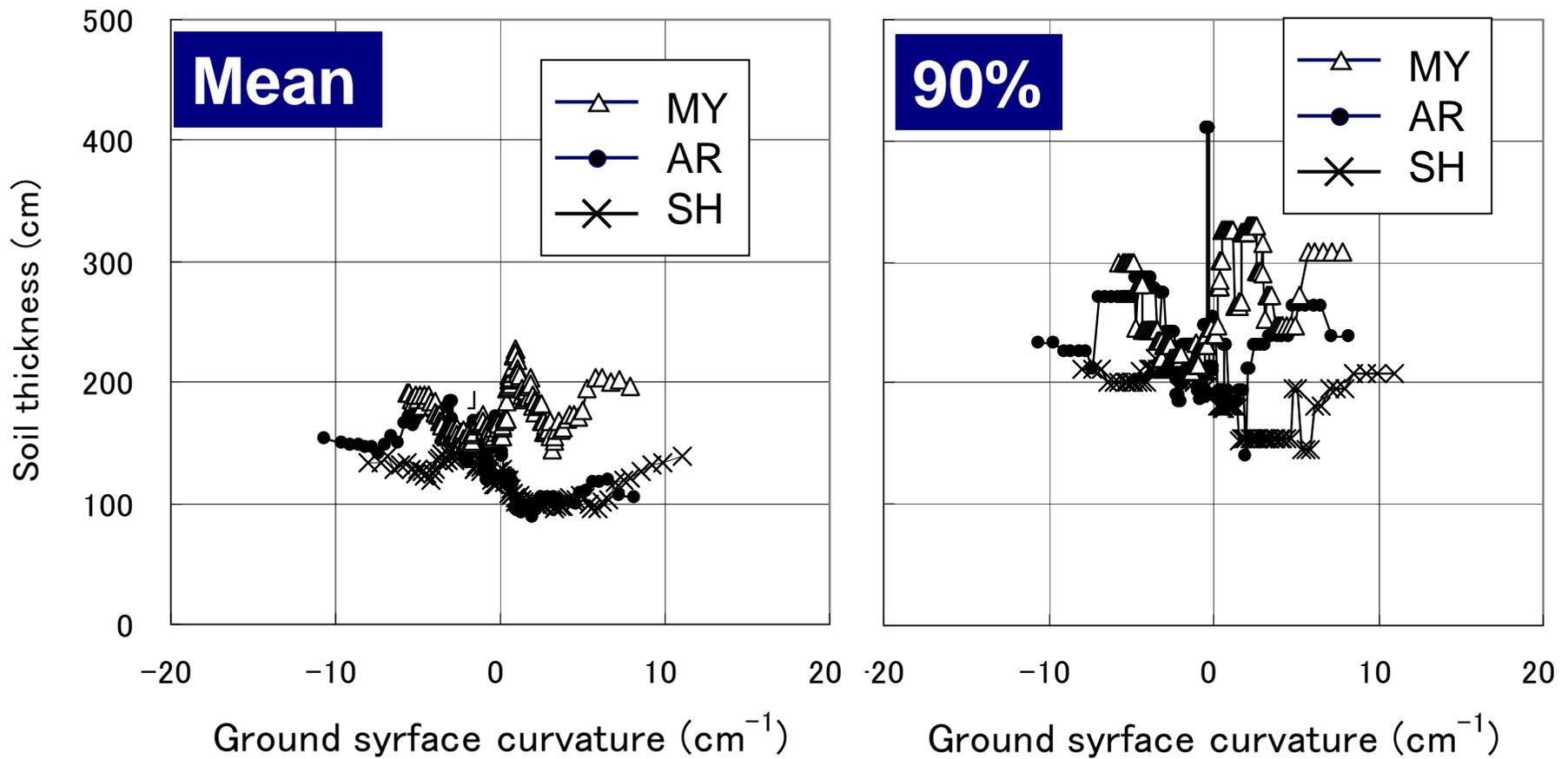
集水面積と土層厚



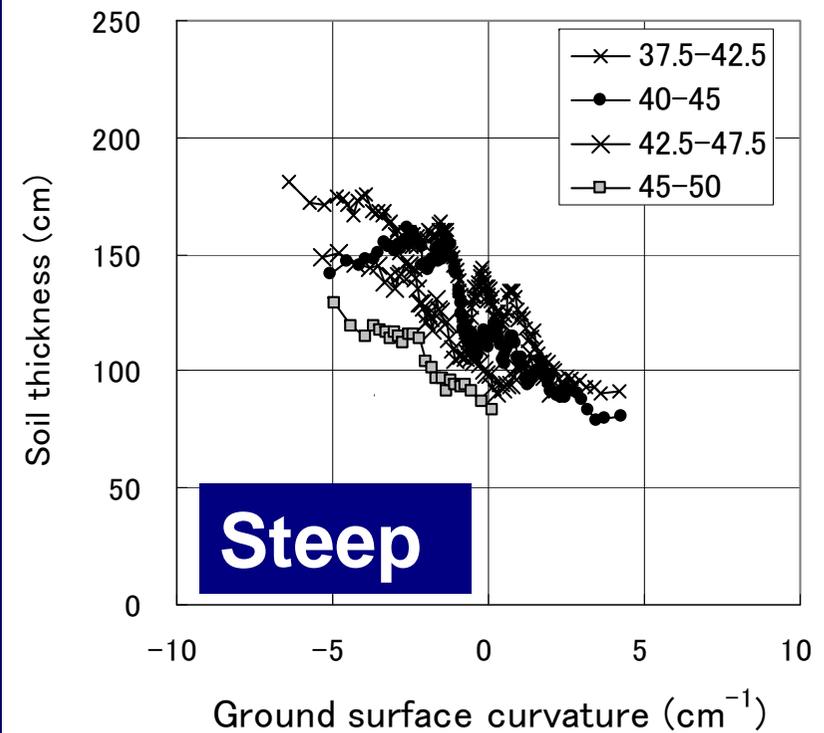
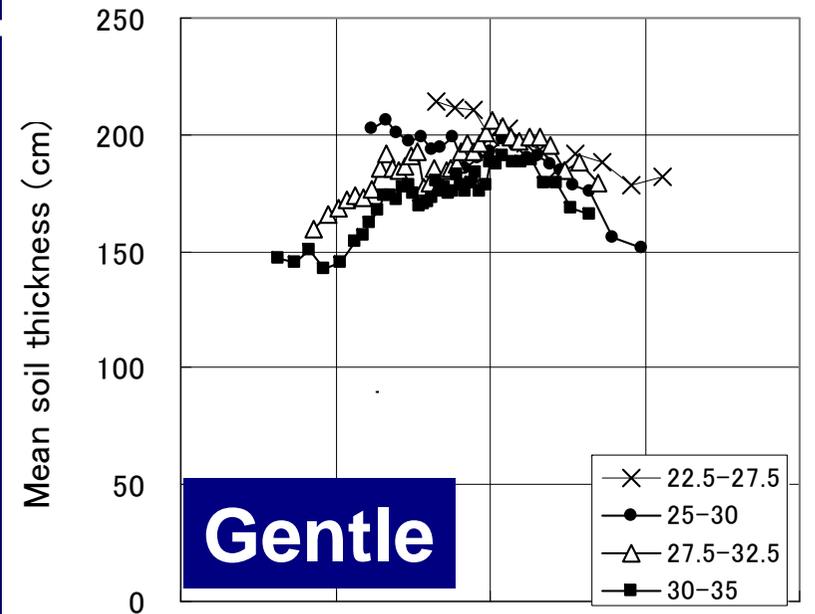
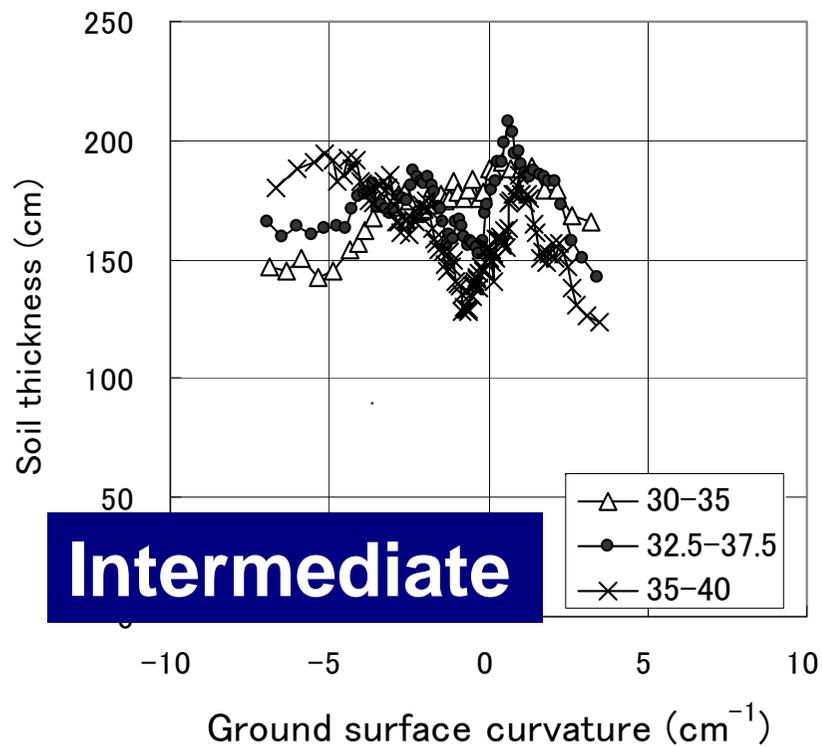
最急勾配方向曲率と 土層厚



斜面方向の曲率と土層厚



曲率と土層厚



急勾配斜面の土層厚の分布

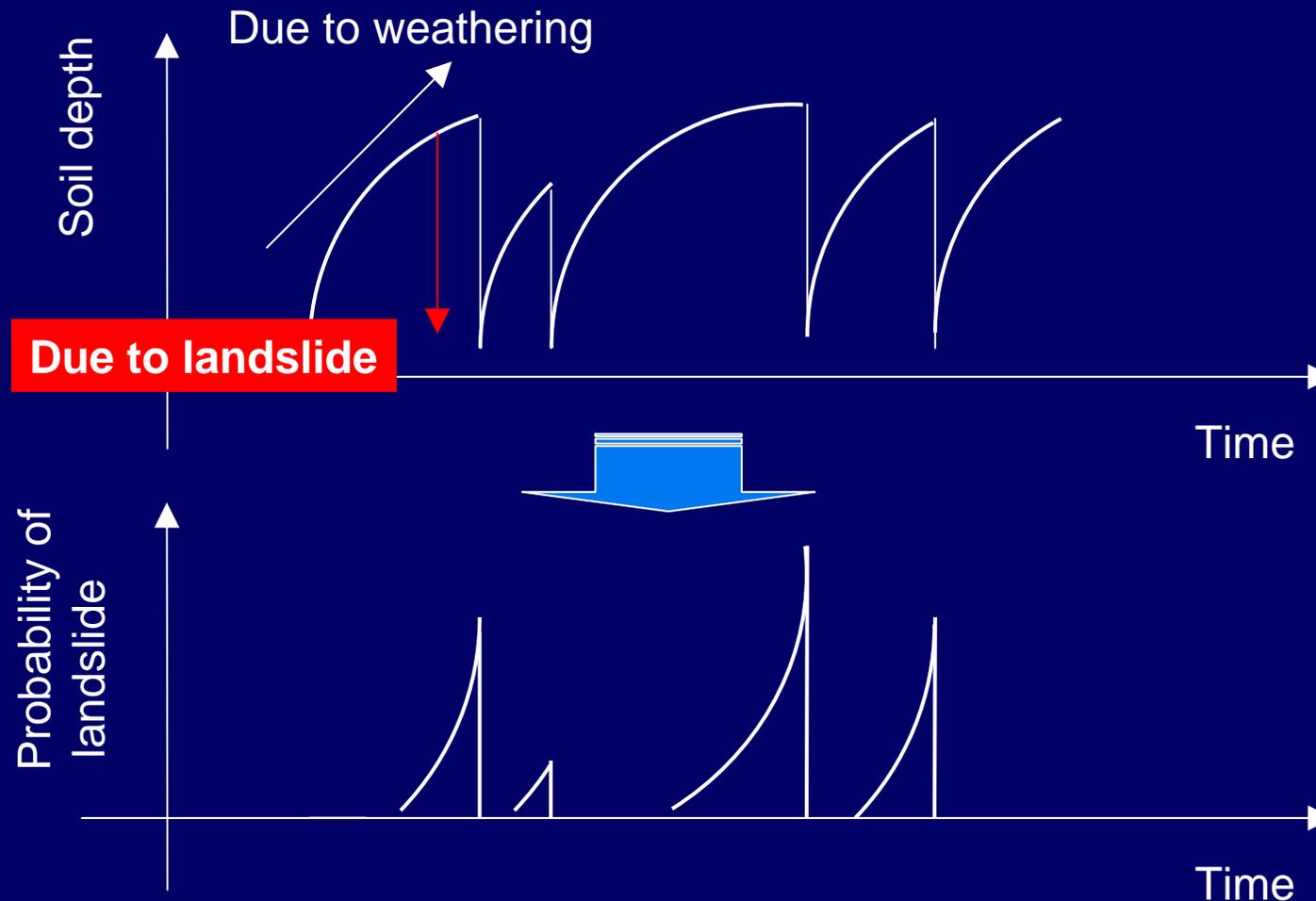
- 同じ勾配であっても、土層厚は大きくばらつく。
 - 特定の地点の土層厚を推定するためには、計測する必要があると考えられる。
- 土層厚と勾配の関係は、地表面勾配に比べて、岩盤表面勾配の方が、関係が明瞭である。
- 内部摩擦角より岩盤表面勾配が大きい領域では、土層厚と勾配に負の相関がある
 - 過去の表層崩壊が土層厚をコントロールしている。

急勾配斜面の土層厚の分布

- 気候、地質条件が類似している3流域で比較すると、岩盤表面勾配と土層厚の出現確率の関係は内部摩擦角より大きい領域で、似た関係になる。
 - 地質条件、過去の大規模降雨履歴などによって、急勾配斜面の土層厚はコントロールされている可能性がある

土層厚発達モデル

- Iida (1999, 2004), D'Odorico (2000)など, 表層崩壊, 土層発達(風化など)を時系列で再現するモデルを提案。



計算例

土層厚の時系列変化

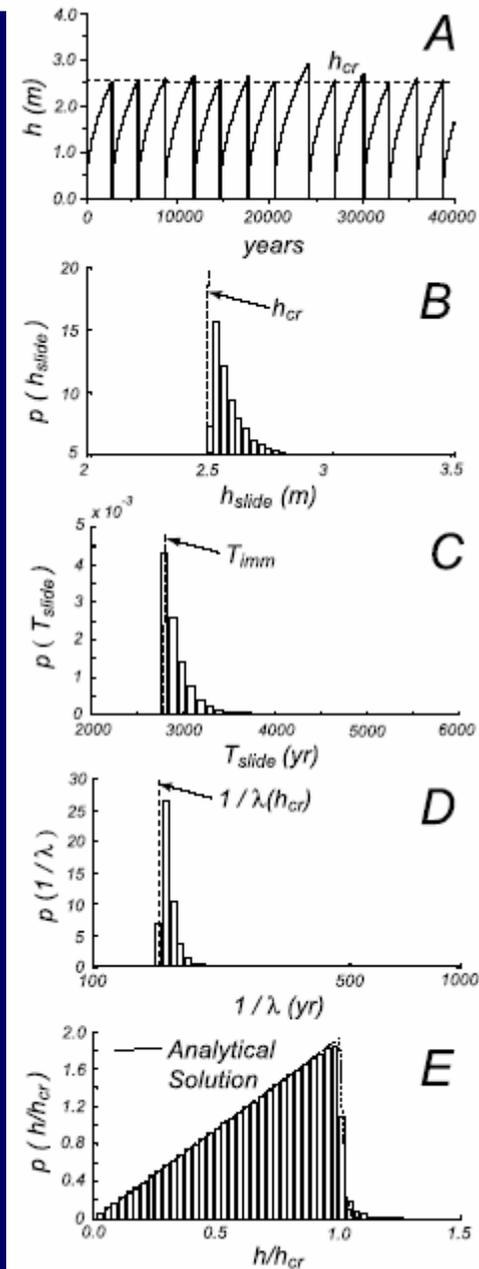
崩壊発生時の土層厚

表層崩壊の回帰年

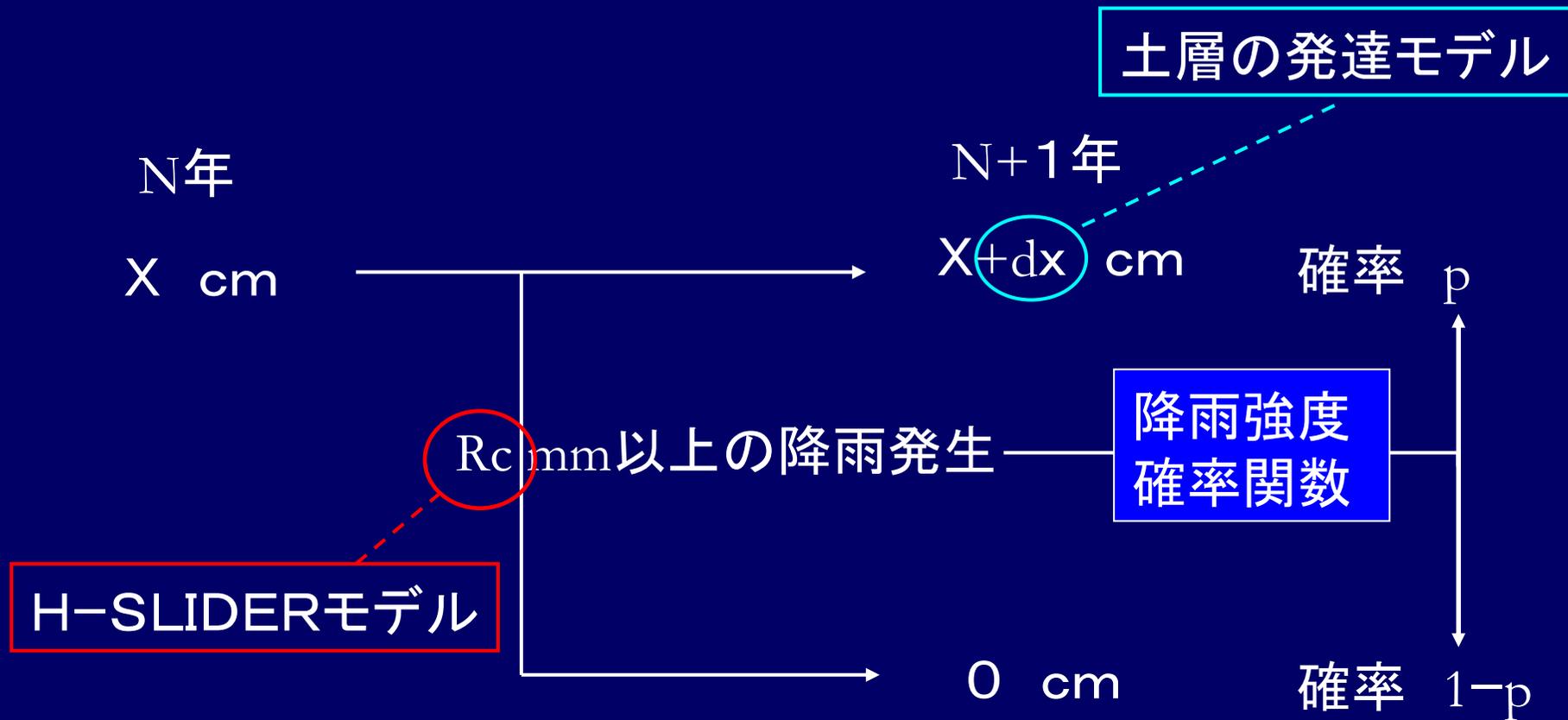
表層崩壊の起因となる降雨の確率規模

土層厚の確率分布

D'Odorico and Fagherazzi (2003) WRR

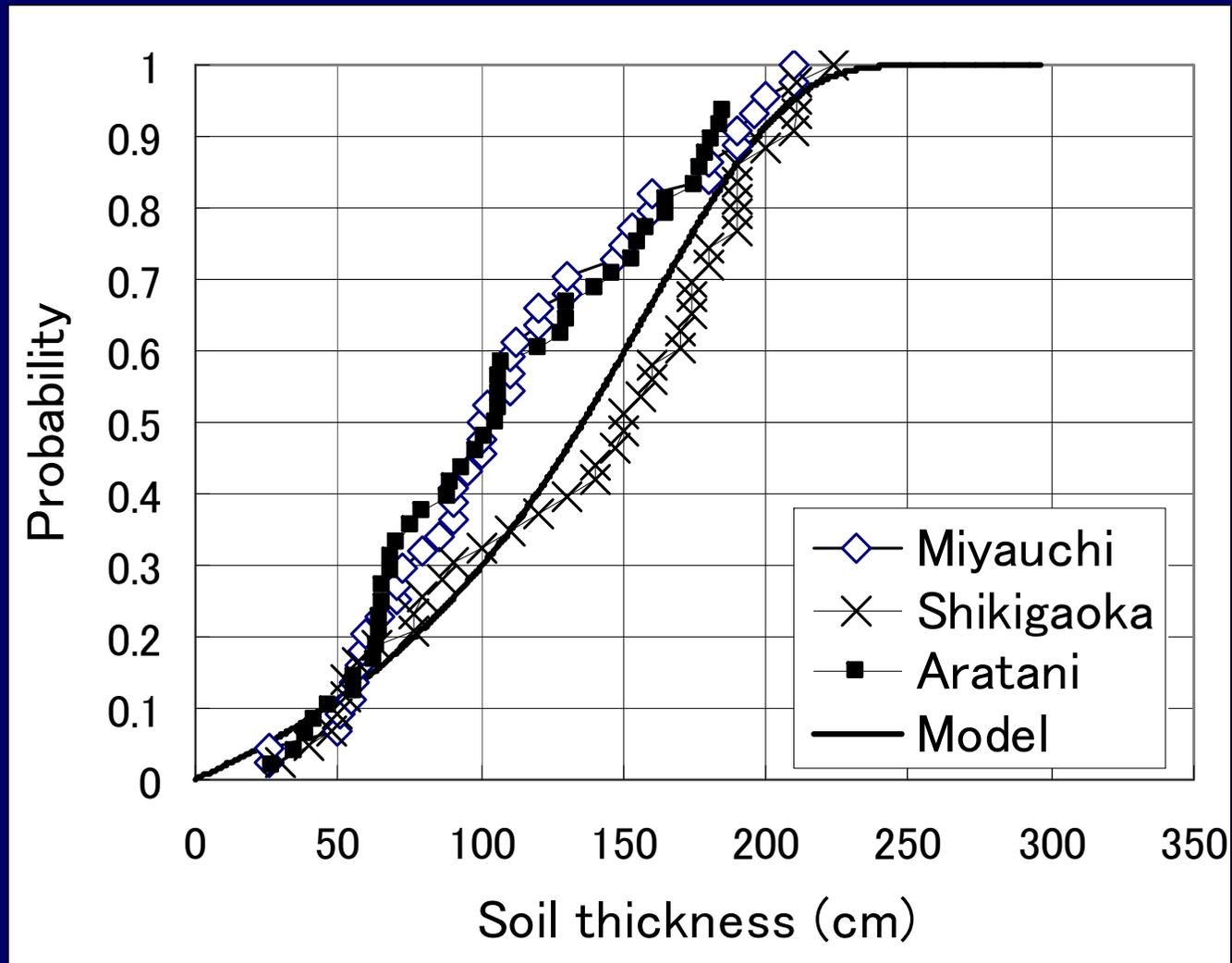


モデルの構造



計算結果

勾配40-45度のケース

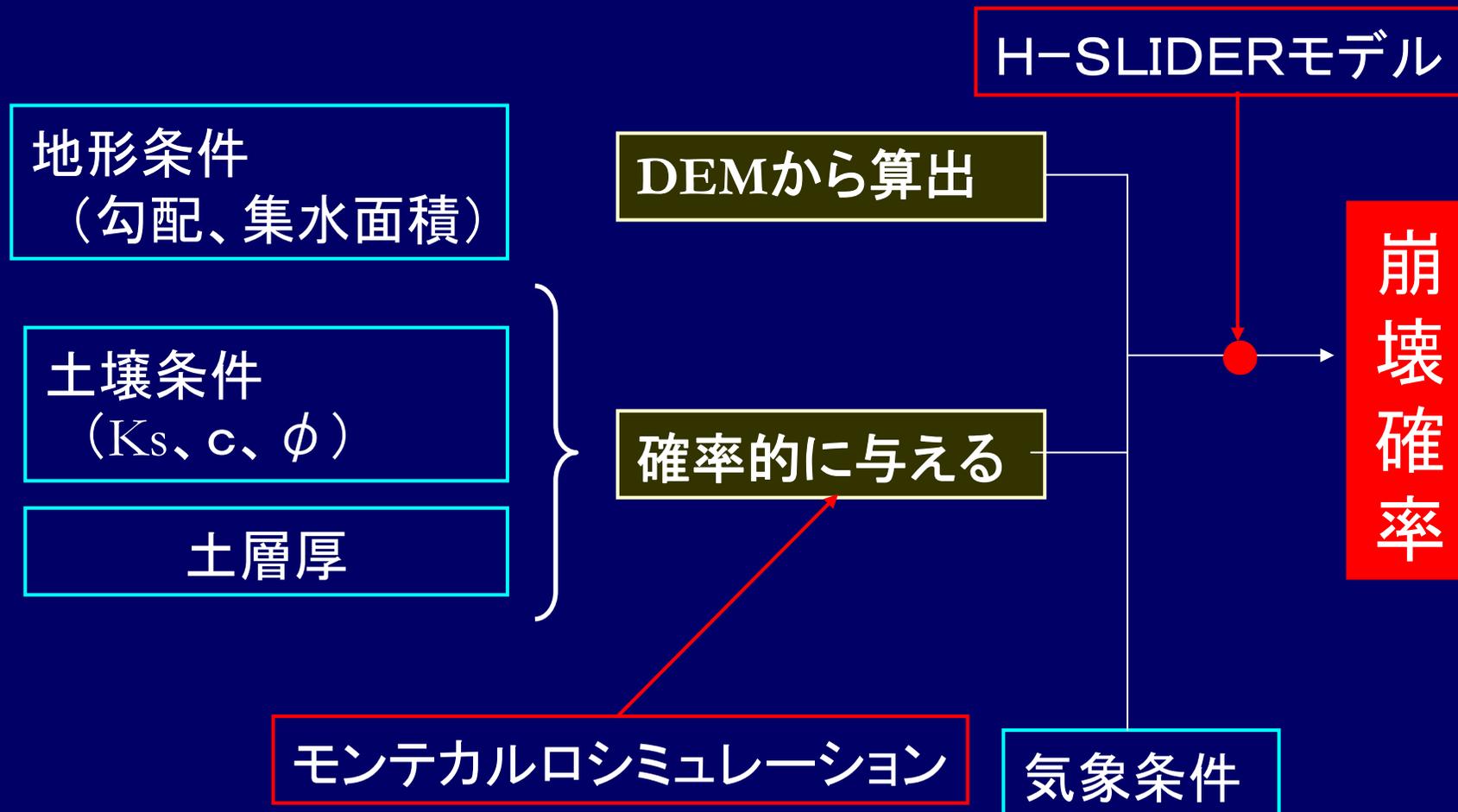


広域の危険度評価に向けて

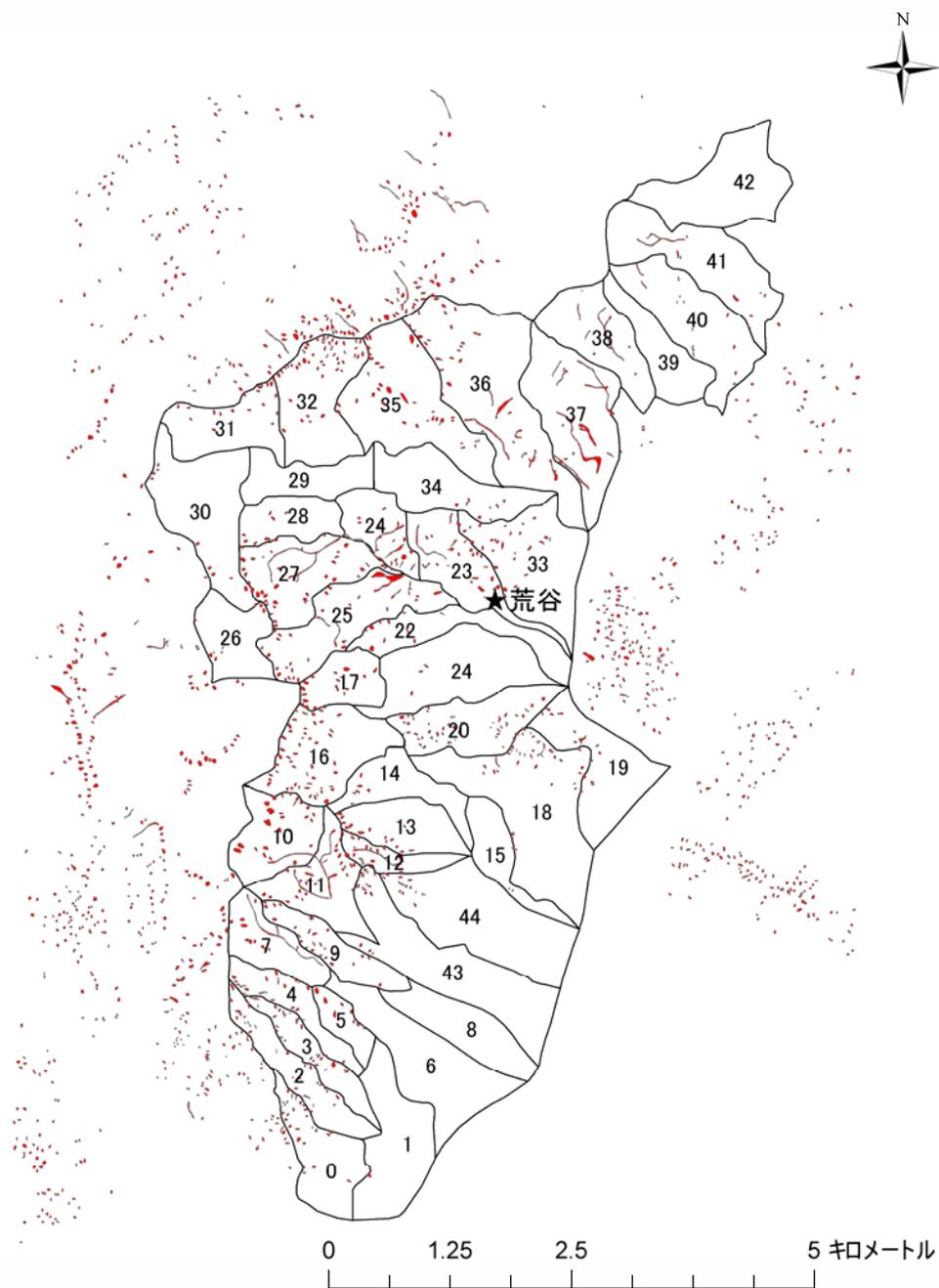
背景と作業仮説

- 物理モデルの入力条件のうち、降雨条件、地形情報は比較的容易に手に入るものの、土層厚、土質強度、土の水理特性は広域で面的に情報を得ることは現時点では多大な労力を必要とし、困難であることが多い。
- 一方、実測結果に基づき、当該地域・溪流の土層厚、土質強度、土の水理特性を確率的にでも評価できれば、ある程度地下の情報を取り入れた崩壊発生確率を推定することができる可能性がある。

流域単位の危険度評価



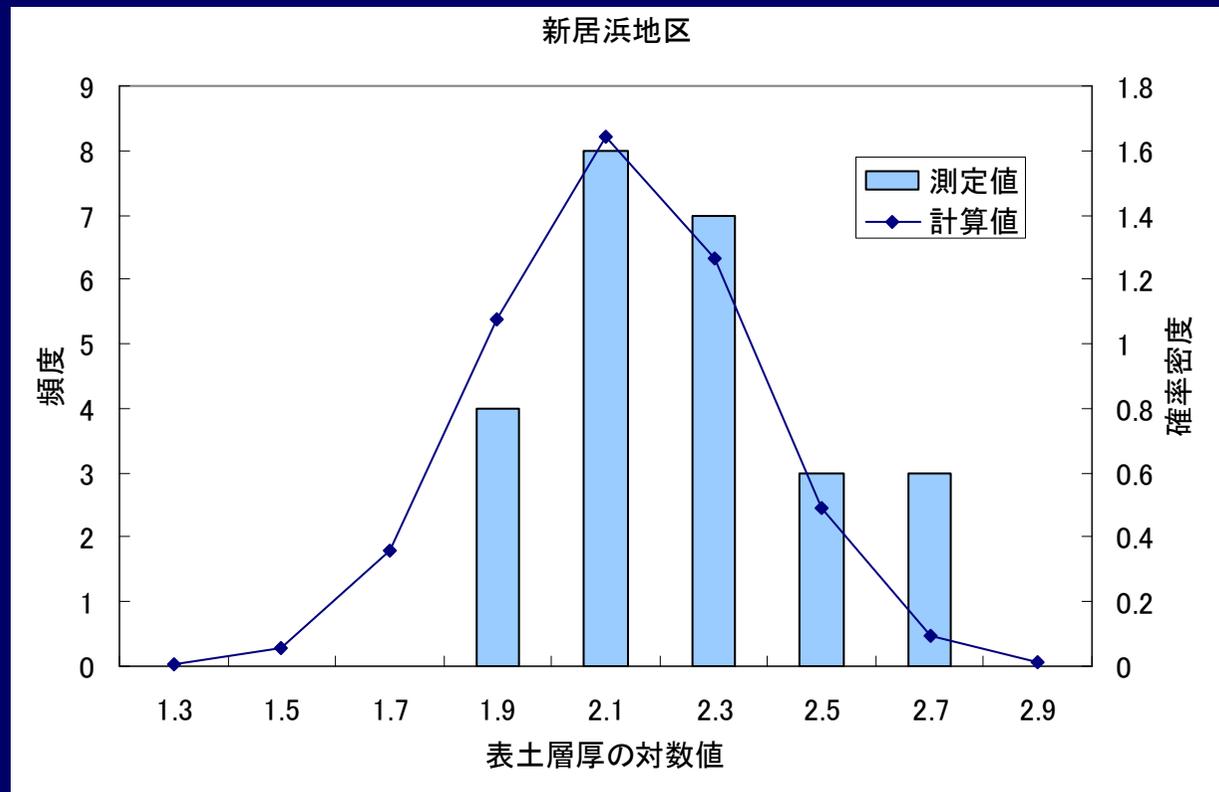
適用地域



パラメータの確率分布

土層厚

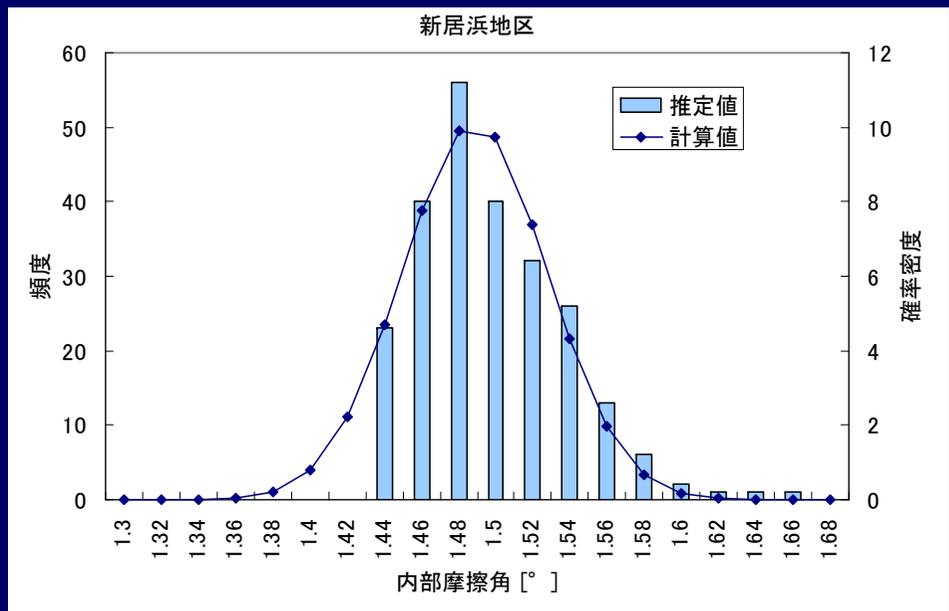
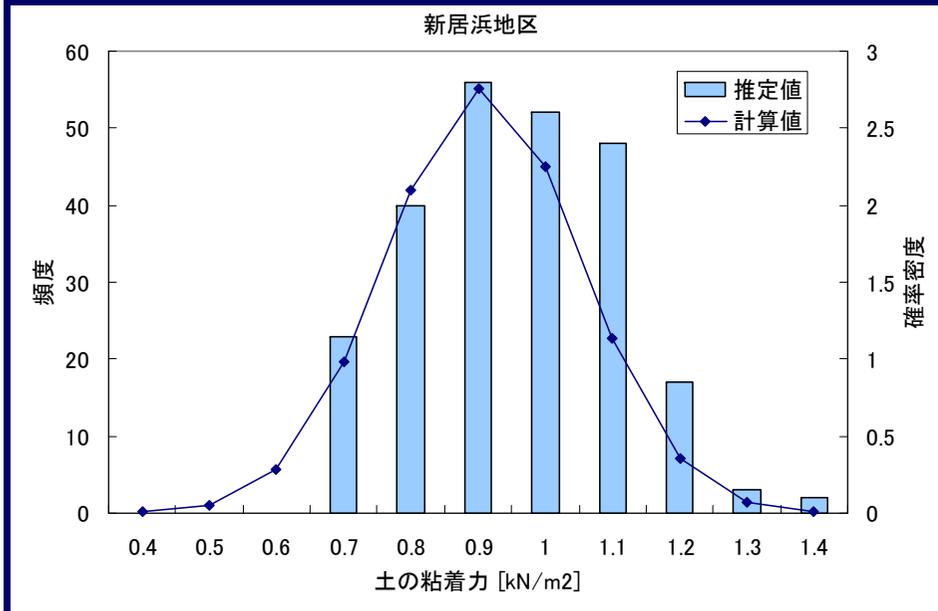
貫入試験結果より設定



パラメータの確率的設定

粘着力・内部摩擦角

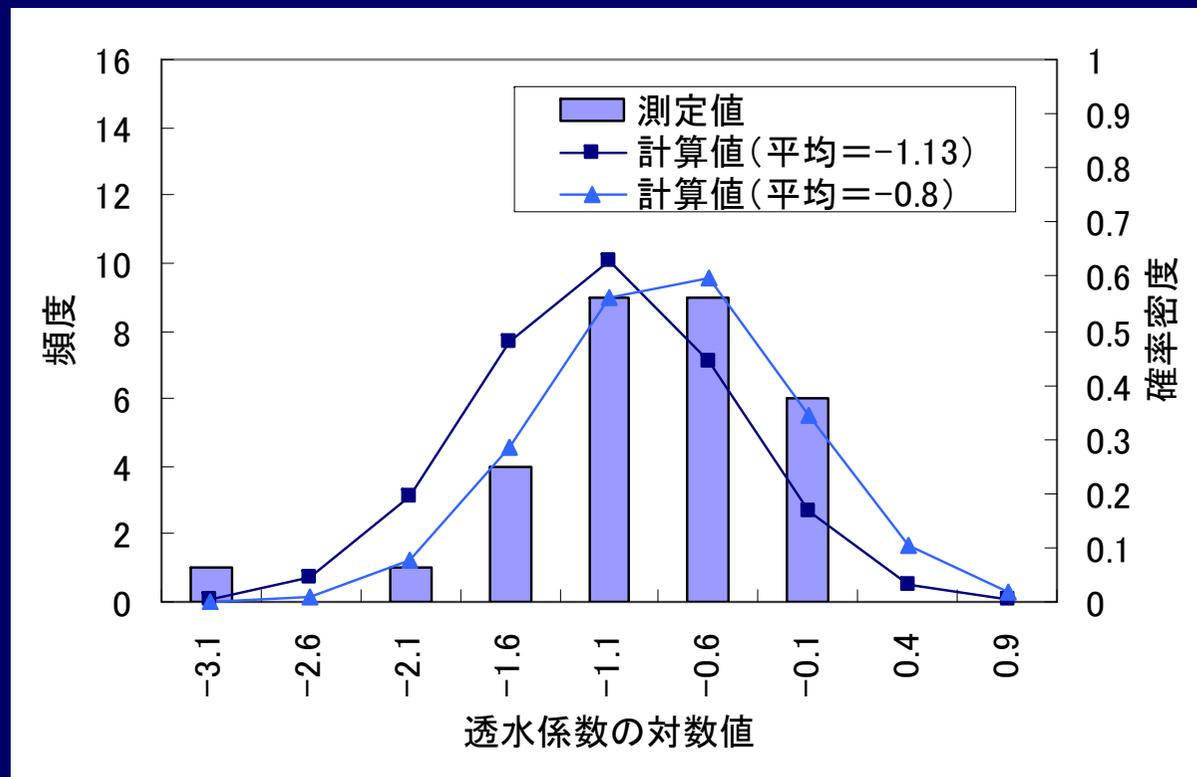
N値-c、 ϕ の関係式より設定



パラメータの確率分布

飽和透水係数

六甲山地の結果 (Hedrayanto 1999) より設定



結果（崩壊危険面積）の算出

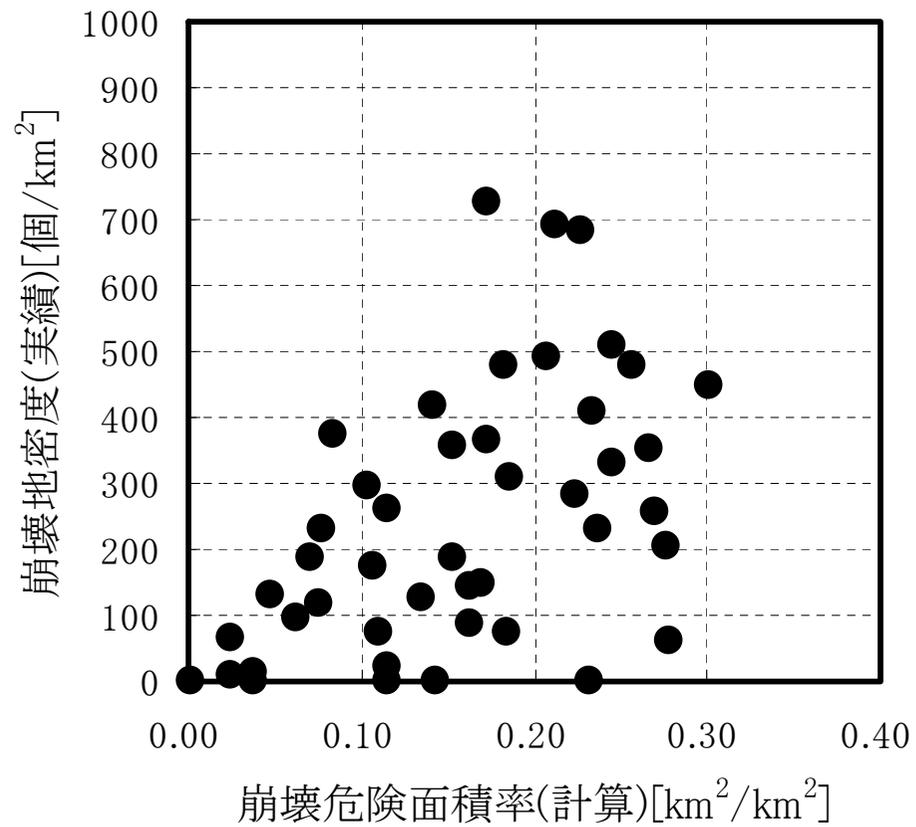
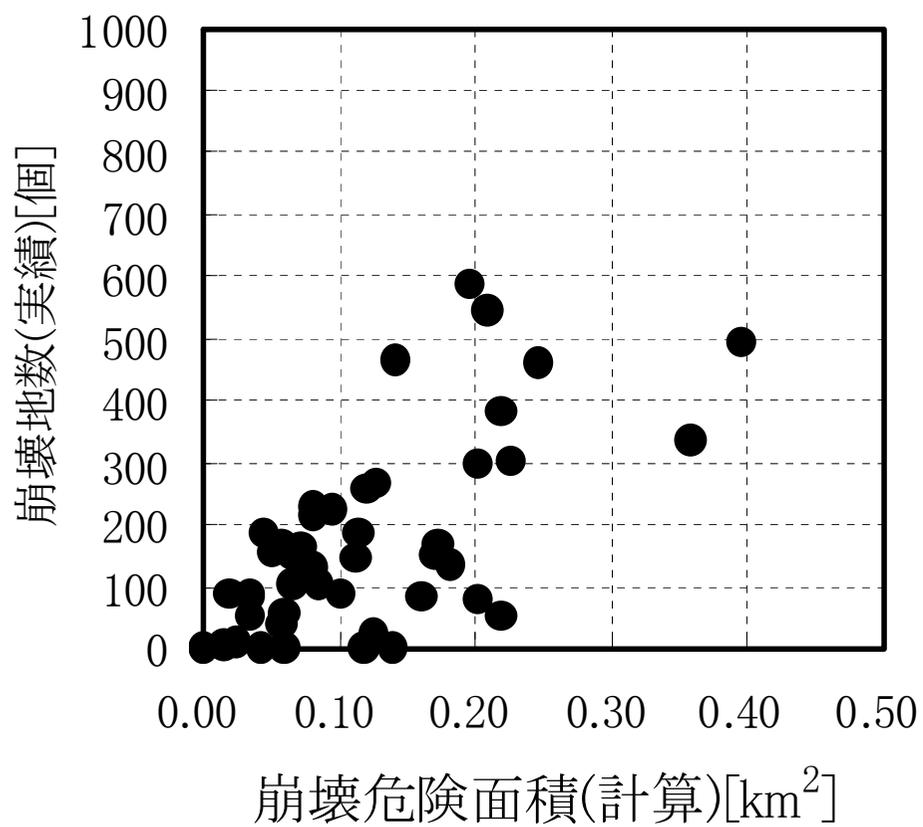
$$\alpha = \sum_{i=1}^n ap_i$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n ap_i$$

$$\alpha / A = \sum_{i=1}^n ap_i / A$$

a は各メッシュの面積（=100m²）、 p はメッシュ i の崩壊確率（10000回の計算で安全率1以下になる確率）、 n は溪流内のメッシュ数、 A は各溪流の面積

結果



まとめ

- 表層崩壊は場の条件を適切に設定できれば予測可能
- 土層厚の分布は大きく、表層崩壊予測のために計測が重要
- 土層厚－出現確率関係は気候・地質によって決まっている可能性
- 土層厚－出現確率関係などを用いることにより、流域スケールの表層崩壊発生予測もある程度可能に