

# 第26回 理工学部門研究談話会

日時 : 平成 30年 10月 17日(水) 13:30~15:00  
場所 : 理工学部 2号館 6階第1会議室

## 話題及び提供者

『降雨による地すべり・斜面崩壊の発生メカニズム  
—土の変形の観点からの検討—』

笹原克夫

『核磁気共鳴で覗く電子の世界』

加藤 治一

教職員, 大学院生, 学生, 一般の方々のご来場をお待ちしております  
(お問い合わせ : [ryooka@kochi-u.ac.jp](mailto:ryooka@kochi-u.ac.jp))

# 降雨による砂質模型斜面の変形の計測 — 斜面崩壊発生予測の第一歩 —

笹原克夫（理工学部門）

## 1. はじめに

### 1.1 土砂災害の発生予測

以下の2つの予測を行う必要がある。

- ① 場所の予測
- ② 時の予測

### 1.2 土砂災害の種類

国土交通省による定義

- ・ 土石流
- ・ 地すべり
- ・ がけ崩れ

2

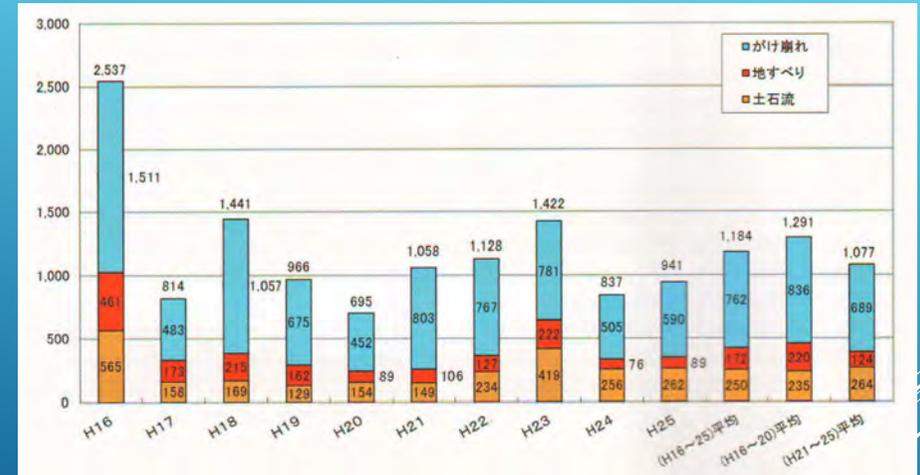
2015/5/12  
土石流 (広島、2014)



(C)国際航業株式会社・株式会社バス

がけ崩れ (2012, 熊本県阿蘇市)

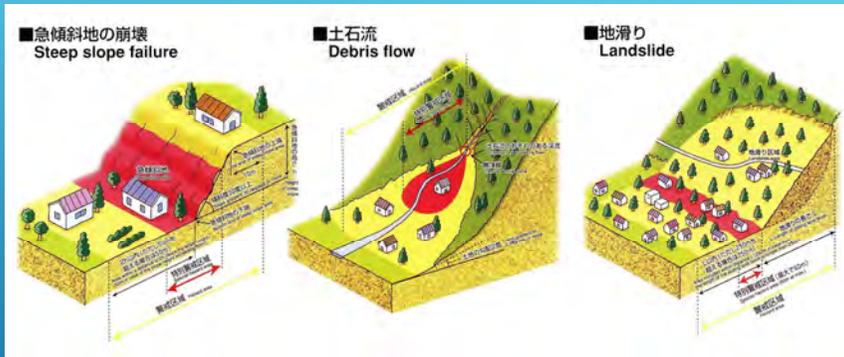




平均して年1000件程度の土砂災害が報告されているが、そのうちの6割強が「がけ崩れ」である。

### 1.3 場所の予測

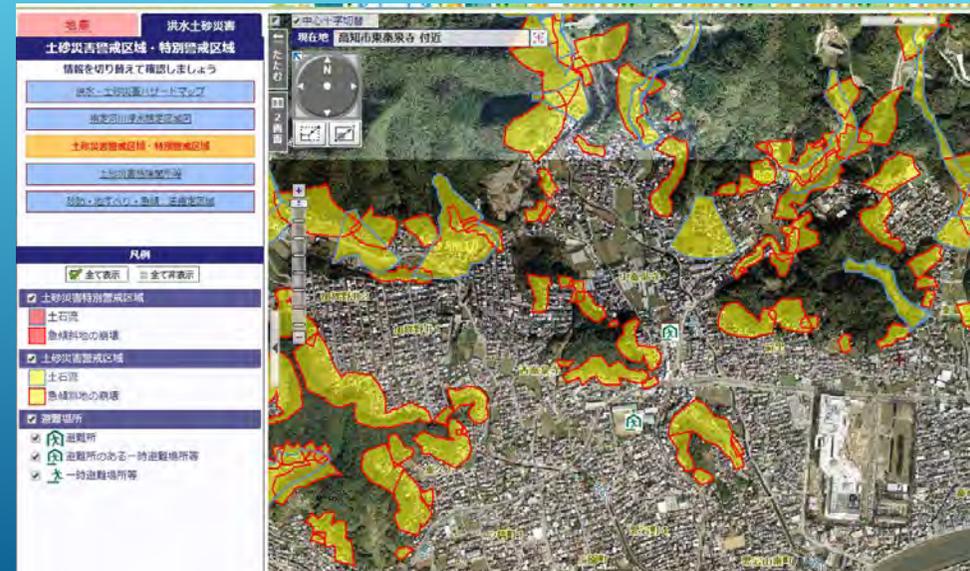
#### 土砂災害警戒区域及び土砂災害特別警戒区域



土砂災害警戒区域: 土砂災害のおそれがある区域  
 土砂災害特別警戒区域: 土砂災害警戒区域のうち、建築物に損壊が生じ、住民に著しい危害が生じるおそれがある区域

土砂災害警戒区域では、市町村長は情報伝達、警戒避難体制の整備と、警戒避難に関する事項の住民への周知を行わなければならない。

#### 高知県の公開する「土砂災害警戒区域」の例



土砂災害警戒情報



基本的に市町村単位で発令される

弱点：  
「俺んちの裏山崩れるかどうか」がわからない

NHK TV ニュース (平成19年9月7日午前 9:00)



土砂災害警戒情報の警戒文の内容がアナウンサーによって何度も読まれる。

1. 研究の背景と目的

斜面の変形や土壌水分(間隙水圧)のモニタリングは斜面崩壊の発生検知に有効である。そのため様々な計測装置が開発されている。



伸縮計

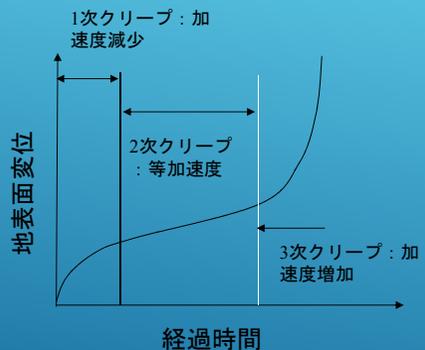
地表面変位は斜面のせん断変形に伴い、斜面表面が下方に移動する量である。



連結式傾斜計

傾斜計は斜面土層のせん断変形に伴って、傾く。

モニタリングに基づく斜面崩壊発生時刻の予測手法として、地表面変位に基づきクリープ理論に基づいた斉藤(1981)や福園(1985)の方法がある。



彼等は2次クリープないしは3次クリープ段階の地表面変位速度の経時変化を、実測データに基づく経験式をリアルタイムで作成し、その経験式により時々刻々と崩壊発生までの余裕時間を計算するアルゴリズムを考案した。

しかしこの方法は変形データのみを用いるものであり、例えば降雨強度の変化による斜面内間隙水圧の変化など、斜面内の応力変化を考慮していない。よって斜面内応力の変化による斜面変形(地表面変位)速度の変化は扱えない。

計測装置の開発は盛んであるが、計測データから斜面崩壊発生予測を行うための解析手法、モデルの開発が進んでいない。地表面変位の計測データから斜面崩壊発生時刻を予測する方法（三次クリープ理論、斉藤など）はあるが、変位のみデータを用いるため、斜面内の応力変化が反映されず、その意味で信頼性に欠ける。

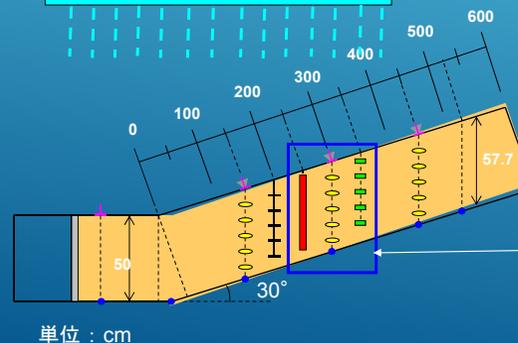
上記の問題を解決するには、斜面の変形のみならず「応力」の計測値も用いた、土の応力～ひずみ関係に基づく簡便な力学モデルが必要である。

### 3. 実験方法

#### 2.1 模型斜面と計測装置配置

- : 間隙水圧計 P
- : 土壌水分計 VW (10, 20, 30, 40, 50cm)
- : テンシオメータ Su (5, 15, 25, 35, 45cm)
- ▽ : 伸縮計 Dh
- : 内部歪計 F (4.6, 13.8, 23, 32.2, 41.4, 50.4cm)
- ↑ : 斜面変位計 Dv
- ⊥ : 鉛直変位計 Dv3- (10, 20, 30, 40, 50cm)

降雨装置（降雨強度30 mm/h）



筑波山まさ土を用いて作製。

湿潤単位体積重量：16.1～16.4(kN/m<sup>3</sup>)

間隙比：1.46～1.53

D<sub>30</sub>=1.3mm, U<sub>C</sub>=22.23, ρ<sub>s</sub>=2.675g/cm<sup>3</sup>

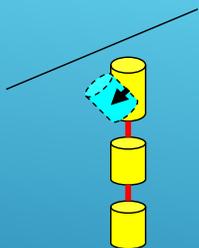
検討対象

体積含水率：斜面下端から300cm

サクシオン：斜面下端から350cm

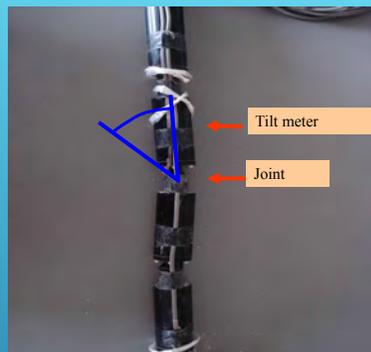
せん断ひずみ：斜面下端から250cm

13



Increase of increment of tilt-meter :  $\Delta\theta$   
Shear strain increment  $\Delta\gamma = \tan(\Delta\theta)$

せん断ひずみの定義

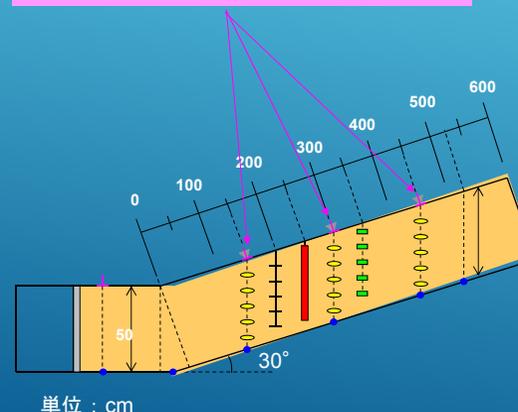


連結式傾斜計

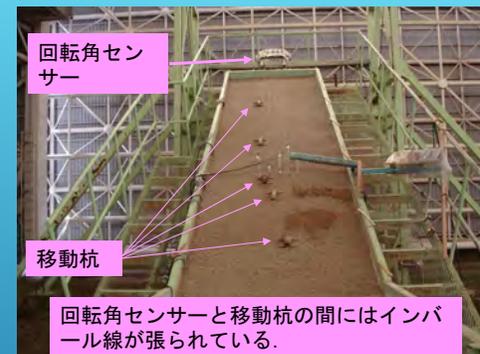
鉛直方向に9.2cm毎に入れた傾斜計の傾きより、各傾斜計の中心深さにおけるせん断ひずみを求める。

せん断ひずみの計測方法

地表面変位：傾斜変換点から150cm, 300cm, 450cmの位置に設置した伸縮計の移動杭の斜面下方への変位量。斜面のせん断変形に伴って、移動杭は下方へ移動する。



地表面変位



回転角センサー

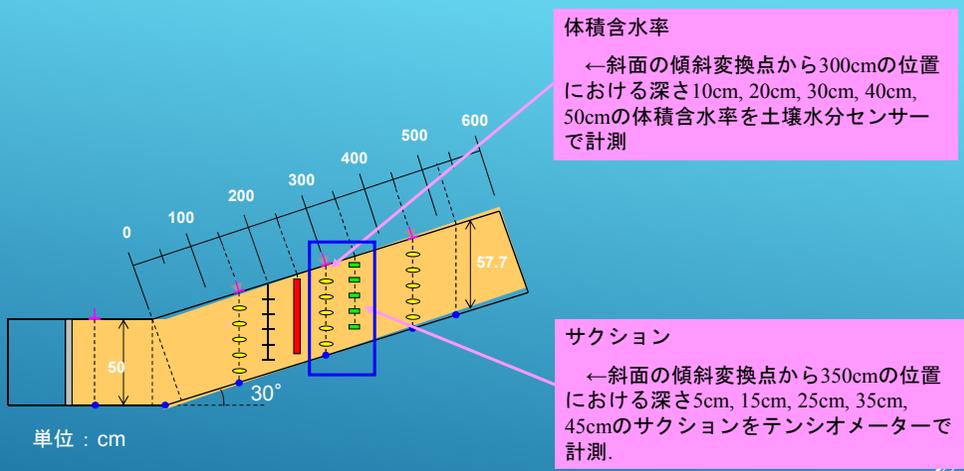
移動杭

回転角センサーと移動杭の間にはインバール線が張られている。

伸縮計（ただし異なる実験の写真）

15

16



**体積含水率**  
 ←斜面の傾斜変換点から300cmの位置における深さ10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cmの体積含水率を土壌水分センサーで計測

**サクシオン**  
 ←斜面の傾斜変換点から350cmの位置における深さ5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cmのサクシオンをテンシオメーターで計測。

単位 : cm

体積含水率とサクシオンの計測

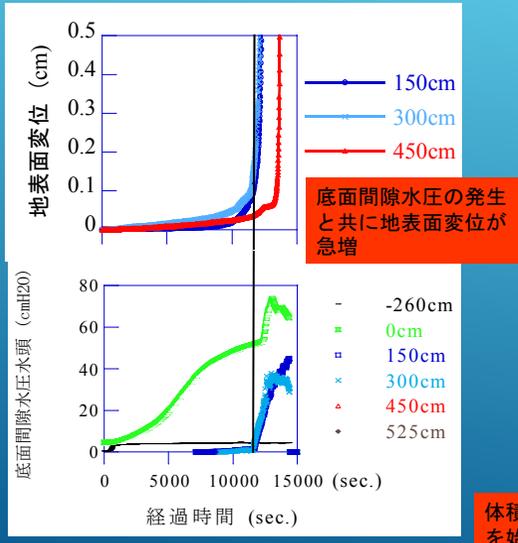
**2.2 実験ケース**

イベント	時間雨量 (mm/hour)	降雨開始時刻	降雨終了時刻
1	30	10/20 11:00:30	10/20 14:00:00
2	30	10/23 9:34:30	10/23 11:15:00
3	15	10/26 9:45:00	10/26 12:42:40
4	30	11/4 11:00:00	11/4 15:00:00

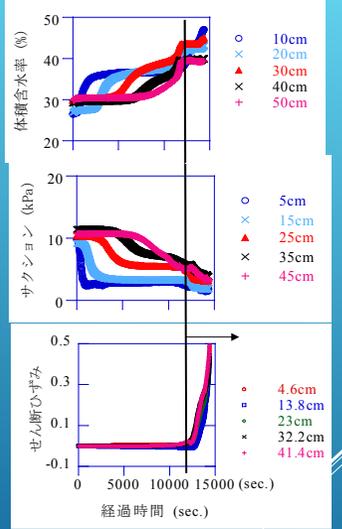
本報告では、  
 (1) 降雨イベント4における崩壊直前の斜面の挙動  
 (2) 降雨イベント1~4における繰り返し降雨下の斜面の挙動  
 の検討結果を報告する。  
 特に斜面内のせん断ひずみと間隙水圧の関係に焦点を当てて報告する。

**3. 崩壊直前の斜面の挙動**

**3.1 地表面変位と底面間隙水圧**



**3.2 斜面内の体積含水率, サクシオンとせん断ひずみ**



体積含水率, サクシオンが2回目の上昇を始め, 斜面内がほぼ飽和した時点でせん断ひずみが急増。

**斜面内のせん断変形**



すべり面が発生する前には, 土層はせん断変形している。



側面

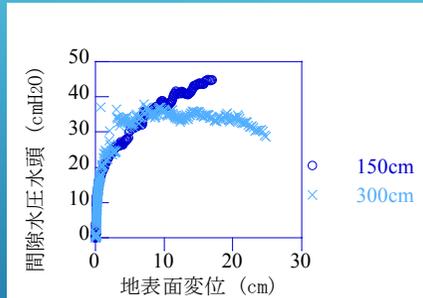


正面

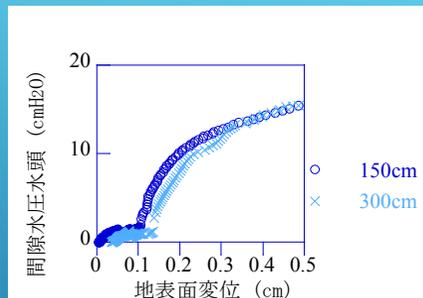
斜面崩壊の発生

## 4. 考察

### 4.1 地表面変位と底面間隙水圧



(a) 実験全体期間



(a) 変位の小さい期間

- ・ 底面間隙水圧と地表面変位の関係は、土の応力～歪み関係と同様に双曲線形である。
- ・ 間隙水圧の発生しない不飽和状態でも変位は発生するが、間隙水圧発生後の変位の方が圧倒的に大きい。

### 4.2 斜面内の間隙水圧とせん断ひずみの関係

図中の「間隙水圧水頭」は斜面内の各々の深さにおける間隙水圧水頭である

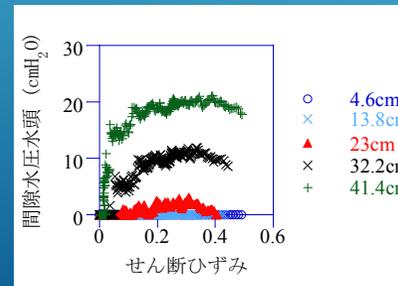
深さzにおける間隙水圧水頭

$$= \text{底面間隙水圧水頭} - (\text{土層深} - \text{鉛直} \text{深さ})$$

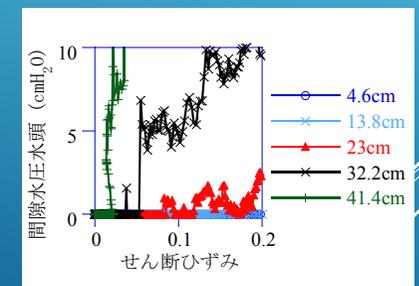
- ・ 土中のせん断ひずみと間隙水圧の関係も双曲線形である。
- ・ 間隙水圧の最大値は深い箇所ほど大きい。
- ・ 不飽和状態での変形は浅い箇所ほど大きい。

土層深

深さzにおける間隙水圧水頭

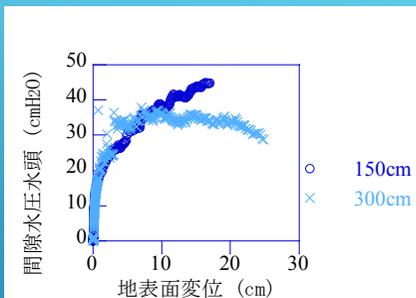


(a) 実験期間全体



(b) 変形の小さい期間

## 5. 降雨による斜面崩壊発生時刻予測手法の提案(への第一歩)



地表面変位と底面間隙水圧のリアルタイムのモニタリング（ないしは室内の土質実験）より、最小自乗法により予め地表面変位と底面間隙水圧の間の双曲線関係を求めておけば、今後降雨により間隙水圧が発生した場合の地表面変位を予測できる。

$$d_{sur.} = \frac{1}{G_{sur.}} \frac{p_f \cdot p}{p_f - p}$$

ここで  $d_{sur.}$ : 地表面変位,  $p$ : 底面間隙水圧,  $p_f$ : 破壊時の底面間隙水圧

## 核磁気共鳴で覗く電子の世界

数学物理学科 物理科学コース 加藤治一

この世界には様々な物理的性質（物性）——例えば色・堅さ・電気伝導性・磁性 等——をもつ物質であふれています。そしてごくわずかに原子配列・電子の個数や周りの環境（温度・圧力等）を変えることによって、物性は大きく変化します。なぜ物性にこんなにもバラエティがあるのか？そして、どうすれば有用な物性を産み出せるのか？…それらの問いを原子レベルまで原因をさかのぼって「実験」「理論」の両面から理解しようとする試みが「物性物理学」です。固体中にはその中に実に膨大な数の原子およびそれに付随する電子を含みますが、特にそれら電子が互いに強く相互作用しあっている場合（強相関係）、そこに予想もしなかった物性の様態が広がる余地があり、また実際に様々に新奇なる物性が開発されてきています。

加藤は**遷移金属酸化物**等の固体化合物の物性を、実験分野の立場から研究しています。“物質を作って、物性を測って、物理を考える”——というモットーのもと、物質合成および物性測定を行っています。最近、電子が局在と遍歴のはざまにある物質について、その微視的なあり方を**核磁気共鳴（NMR）法**により観測することに注力しています。NMRは電子レベルでの局所情報を、静的・動的な側面から与えてくれる強力な手法です。その一例を以下に紹介します。

$\text{CaCu}_3\text{B}_4\text{O}_{12}$ の組成をもつ化合物群は、 $B$ サイトに入る原子によって様々な物性が変化します。 $B$ サイトにTiが入る $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ （以下 CCTO）では $T_N = 27\text{ K}$ をもつ反強磁性絶縁体ですが、 $B=\text{Ru}$ たる $\text{CaCu}_3\text{Ru}_4\text{O}_{12}$ （CCRO）では低温まで常磁性の金属になることが報告されていました。この狭間で電子状態はどうなるのか？ということに興味をもち、物材機構の桜井氏との共同研究で混晶化合物  $\text{CaCu}_3(\text{Ti}_{4-x}\text{Ru}_x)\text{O}_{12}$  を作成しました。巨視的な物性測定によると、Ti→Ruの置換に伴い Mott 転移として知られる枠組みで整理できそうだとということがわかりました（T.H.Kao, et al., Phys. Rev. B 95, 195141(2017)）が、一歩進めて Cu 核 NMR 測定により微視的な観点で把握しなおしてみると、図式的な Mott 転移の枠組みよりももう少し複雑な様態が広がっていることが示されます。NMR で示された本系の特徴は次のようなものです。①Cu のもつ d 電子の「軌道」が、CCTO に代表される絶縁相と、CCRO を含む金属相では全く異なる ② $\text{CaCu}_3(\text{Ti}_{4-x}\text{Ru}_x)\text{O}_{12}$  では、（巨視的な測定で決定された相境界を超えた広い範囲で）絶縁相/金属相の2相が共存している。おそらく、それぞれとも Ti/Ru の局所的なランダムネスの範囲を超えて存在する（Anderson 転移のようなものではないだろう）。③ $\sim 150\text{ K}$  付近に顕著になる絶縁相のゆらぎが金属相にも反映する。つまり、両相が微視的な意味で相関している。 これらの特徴は金属絶縁体転移の理解に資するのではないかと考えています。