

次世代センサーネットワーク:

土壌センサーを用いたフィールドモニタリング の基礎と応用



溝口勝



東京大学
大学院農学生命科学研究科教授
(土壌物理学会長)

はじめに

- 篤農家は複雑な土壌の状態を経験的に診断し、作物にとって最適な環境を作る技術を持っている。
- 農業の素人はこうした技術を一朝一夕に習得できるものではない。
- しかしながら、適当な土壌センサーがあれば素人であっても経験に裏打ちされた篤農家の技術に近づくことができるかも知れない。
- そうした期待感が最近のICT農業ブームの背景にある。
- 本発表では、土壌センサーの種類や特徴、それらを実際の圃場で利用するためのモニタリングシステムについて概説する。

土壌センサーの基礎

- 土壌水分や温度などの土壌情報を電気信号に変換する装置
- 通常、電気信号を記録するためのデータロガーと一緒に利用される。
- 土壌水分センサーは農業分野におけるキラーセンサーである。

土壌水分

- 含水比 w (water content)
 - 乾燥した土の質量(M_s)に対する水の質量(M_w)の比
 - M_s : 105°Cで24時間乾燥
 - $w = (M_t - M_s) / M_s$
- 体積含水率 θ (volumetric water content)
 - 土の全体積(V_t)に対する水の体積の比 [m³/m³]
- 乾燥密度 ρ_b (dry bulk density)
 - 土の単位体積(V_t)あたりの乾燥質量(M_s) [g/m³]

マトリックポテンシャル

- 土に吸収されようとする水の圧力 (Pa, cmH₂O)
- 植物にとって重要なのは土壤中の絶対的な水分量ではなく、土壤中の水分を利用できるかどうか
- 土壌は砂を多く含むか、粘土を多く含むかで、“水もち”が異なる
 - 砂質土壌では降雨や灌漑水がすぐにしみ込みすぐに抜ける
 - 粘土質土壌ではしみ込みが遅く排水が遅い
- 植物の根は土壌から水分を吸収
 - 吸水のしやすさは体積含水率では表せない
- 植物に対する土壌水の利用のしやすさ
 - マトリックポテンシャルという指標 (kPa) で表す
 - 吸引圧、水分張力、テンションと呼ばれることもある
 - イメージとしては注射器で土壌中から水分を吸い取るのに必要な吸引圧

毛管現象



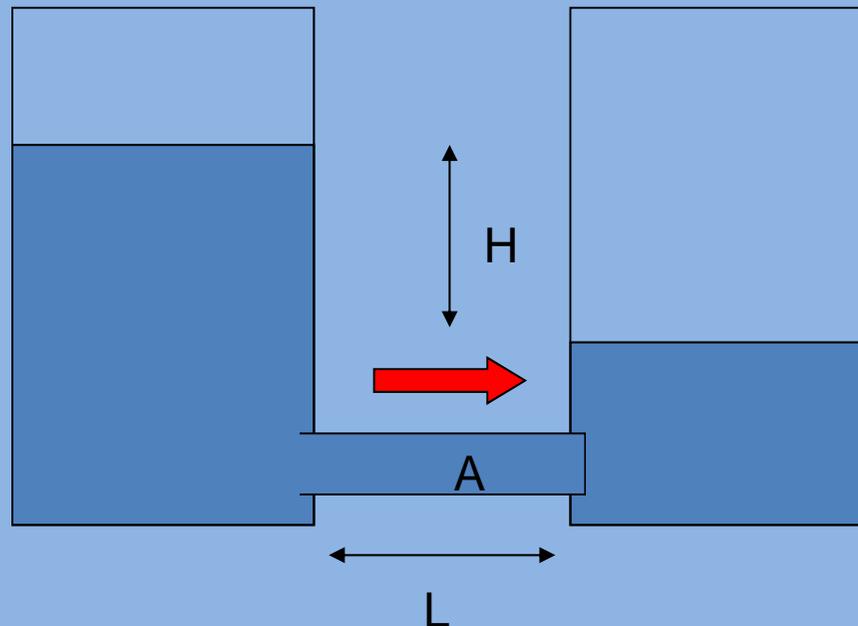
- 水は隙間を昇ってゆく
- 土はいろいろな大きさの隙間で構成される
- 土の中の水は繋がっている
- 水の上昇速度は土の種類で異なる

写真： 濾紙に浸み込んで上昇する水

土の透水性

ダルシーの法則: $Q = -K (H/L)A$

- ・ 水は(ポテンシャルの)高いところから低いところへ流れる
- ・ Kは土によって異なる



Q: 流量 (cm³/s)

K: 透水係数 (cm/s)

H: 水頭差 (cm)

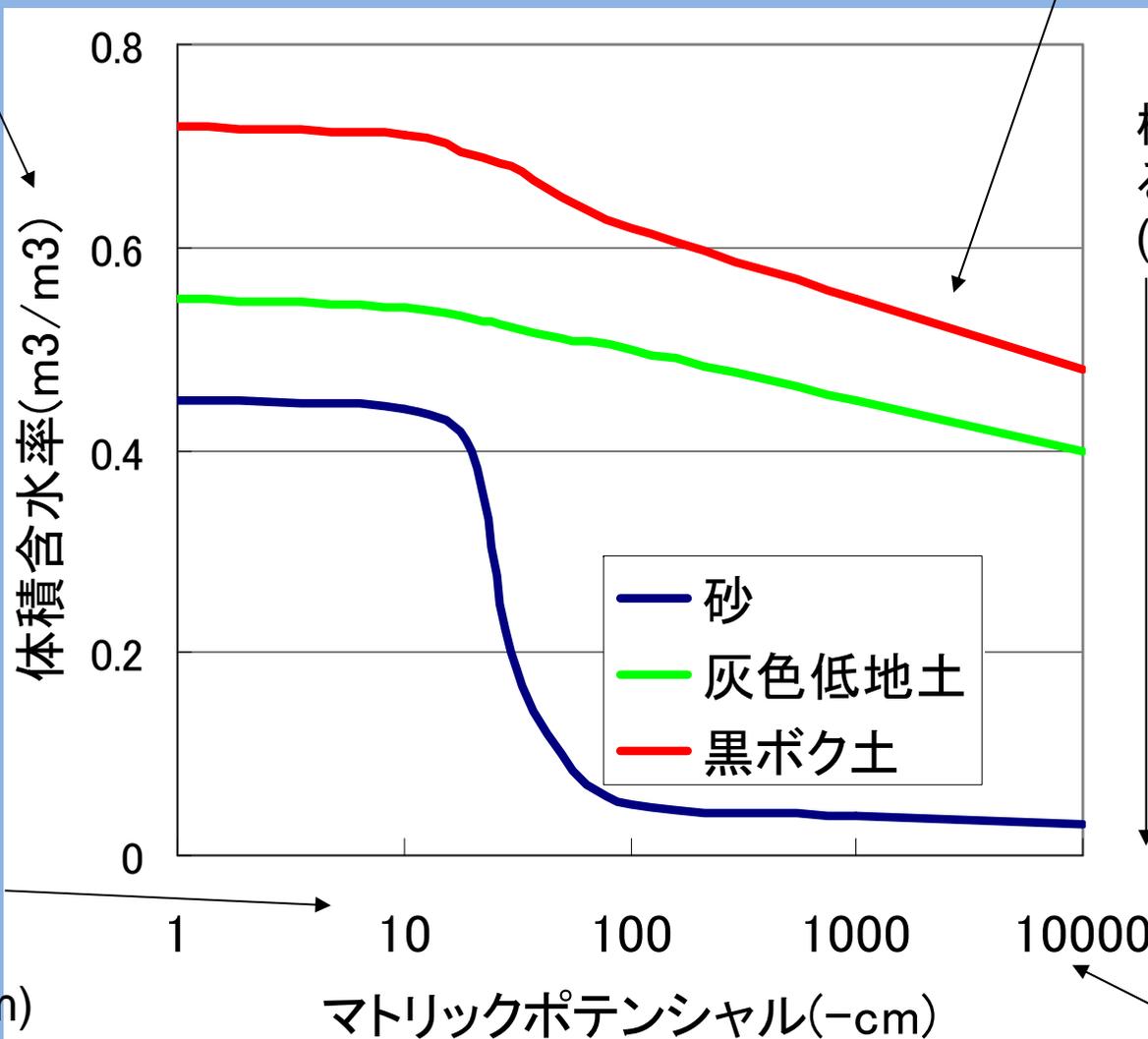
L: 長さ (cm)

A: 通水面積 (cm²)

土の保水性(水分特性曲線)

土の塊に含まれる水の体積

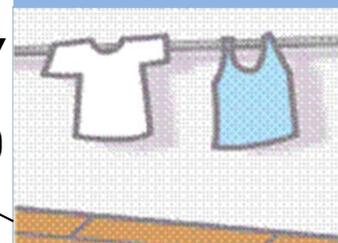
植物の成長に影響



植物が枯れる水分量 (15000)



カビも発生しやすい
湿度99.3%



水面から高さ
10cmの水分量

$$h = 0.15/r \text{ (cm)}$$

マトリックスポテンシャルを極める

化学ポテンシャル (さらに詳しく知りたい人のために)

熱力学第1法則

$$dU = dQ + dW \dots \textcircled{1}$$

体積仕事だけの場合

$$dW = -PdV \dots \textcircled{2}$$

熱力学第2法則

$$dQ = TdS \dots \textcircled{3}$$

①②③より

$$dU = TdS - PdV \dots \textcircled{4}$$

ギブスの自由エネルギー

$$G = U + PV - TS \dots \textcircled{5}$$

$$dG = VdP - SdT \dots \textcircled{6}$$

化学ポテンシャル

= 1モルあたりの自由エネルギー
...⑦

$$G / n \equiv \mu \dots \textcircled{8}$$

$$d\mu = vdP - sdT$$

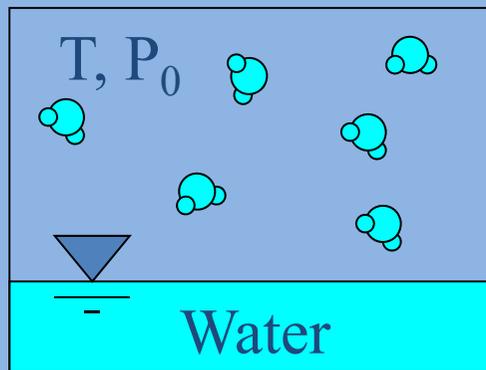
吸着水と水蒸気の平衡 (温度一定)

水蒸気Aと水蒸気B(C)の化学ポテンシャル差 = P_s を P_0 にするために必要な仕事量

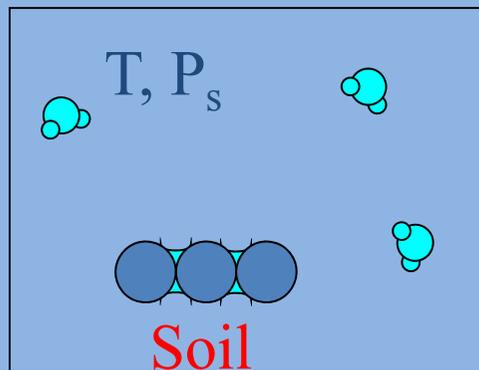
$$\mu_0 - \mu_s = \int_{P_s}^{P_0} v dP = \int_{P_s}^{P_0} \frac{RT}{P} dP = -RT \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right) > 0$$

$$PV = nRT \quad v = \frac{V}{n} = \frac{RT}{P}$$

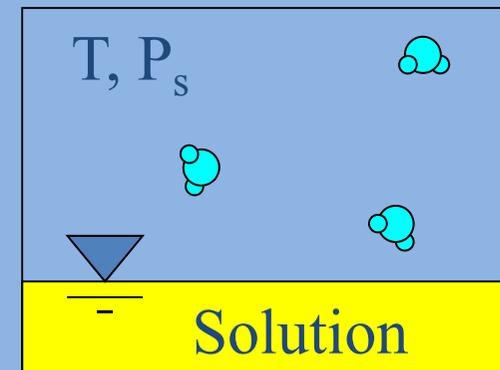
P : 水蒸気圧 v : 体積 (比容積)
 R : ガス定数 T : 絶対温度
 P_s/P_0 : 相対湿度



(A) 水蒸気－純水



(B) 水蒸気－土壤水



(C) 水蒸気－溶液

吸着水の化学ポテンシャル

- 自由水よりも低い！

$$\mu_s(T) = \mu_0(T) + RT \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$$

単位エネルギー

- モルあたり J/mol
- 質量あたり J/kg
- 体積あたり J/m³ = Pa : 圧力
- 重量あたり J/gw = m : 長さ

$$\Delta\mu_s(T) = \frac{RT}{M} \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$$

$$R=8.314 \text{ (J/mol/K)}$$

$$T=293.15 \text{ K (20}^\circ\text{C)}$$

$$M=18 \times 10^{-3} \text{ (kg/mol)}$$

$$\Delta\mu_s(T) = 3.12 \times 10^5 \log\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$$

相対湿度と吸着水のポテンシヤル

湿度	水ポテンシヤル 20℃				
	P_s/P_0	J/kg	Pa	cmH ₂ O	pF
	1	0	0	0	∞
	0.99999	-1	1000	10.2	1
	0.99993	-10	10000	102	2
	0.99926	-100	100000	1020	3
	0.99264	-1000	1000000	10200	4
	0.92877	-10000	10000000	102000	5
	0.8	-30214	30214000	308185	5.5

- 慣行的にpFが使われることもある

$$pF = \log|cmH_2O|$$

吸着水の化学ポテンシャルの計算

例題:

1. 相対湿度80%, 20°Cの水蒸気と平衡する吸着水のpFを求めよ。
2. 相対湿度80%, 20°Cの実験室にある105°Cの乾燥炉で乾燥した土壌の吸着水のpFを求めよ。

解答:

1.
$$\Delta\mu_s(20) = \frac{8.314 \times 273.15}{18 \times 10^{-3}} \ln(0.8)$$

(答)5.5

2. 20°Cにおける飽和水蒸気圧=23.39
乾燥炉に供給される水蒸気圧
23.39x0.8=18.7
105°Cにおける飽和水蒸気圧=1209

$$\Delta\mu_s(105) = \frac{8.314 \times 378.15}{18 \times 10^{-3}} \ln\left(\frac{19.0}{1209}\right)$$

(答)6.9

土壌水の熱力学

- 毛管現象

$$h = 2\sigma/\rho gr \doteq 0.15/r \text{ (cm)}$$

σ : 表面張力 ρ : 水の密度

g : 重力加速度 r : ガラス管の半径

- サクシオン(水ポテンシャル)

$$h = (RT/Mg)\ln(P_s/P_0) \doteq 3 \times 10^6 \log(P_s/P_0) \text{ (cm)}$$

$$pF = \log |h|$$

R : ガス定数 T : 絶対温度 M : 水の分子量

P_s/P_0 : 相対湿度

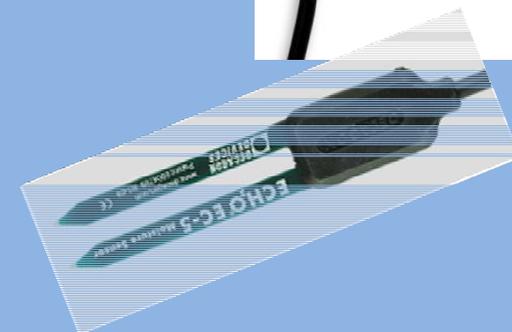
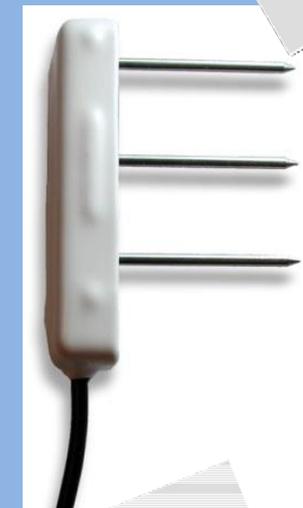
– 相対湿度80%, 20°Cでは、 $pF=5.5$

Soil sensor

<http://www.decagon.com/>



- Soil moisture sensors measure
 - volumetric water content accurately and economically
 - the dielectric permittivity of the soil
- Benefits include:
 - TDR-level performance at a fraction of the cost
 - Very low power requirement
 - Easy installation at any depth and orientation



体積含水率センサー

- 土壌水分は通常、体積含水率で表示される。
 - 土の体積当たりの水の体積パーセント
- 最近の土壌水分センサー
 - 土粒子と水の誘電率の違いを利用したTDR法やADR法の原理に基づく
 - 土壌にセンサーを挿入するだけで簡単に数値が得られる
- この数値の解釈には注意が必要
 - 土壌を構成する土粒子の種類(砂や有機物の含有量)
 - 土の詰まり方(乾燥密度)
 - 微生物によって有機物量が分解
 - 肥料によって土壌溶液中のイオンの種類や濃度が変化
- 農業の現場ではあくまでも一つの指標と考えるべき

マトリックポテンシヤル(MP)センサー

- 一般的に使われるMPセンサー
 - セラミック管に水を入れたテンションメータ
 - 封入された水の圧力をセンサーで測定することでMPを表示
- テンションメータ
 - 作物が必要とする、体積含水率では表示しきれない微妙な土壤水分の状態を検出できる(利点)
 - 土壤水分とセラミック管内の水の平衡状態を前提としているので、急激な土壤水分の変化には追従できないこと、土壤が乾燥しすぎるとセラミック管内に空気が侵入し、センサー機能が低下する(欠点)
- この欠点を補うものとして最近はさまざまな間隙をもつ既知のセラミックの体積含水率を誘電率法で求めMPに換算するセンサーも開発されている。



Broken soil sensor in field



タイのハウレンソウ畑での使用例

土壌水分の測定法

- 炉乾法
 - 105-110°Cの炉で24時間乾燥
- 電子レンジ法
 - 電子レンジで短時間で乾燥させる(亜流)
- テンシオメータ法
 - 土の水分特性から逆算
- ガンマ線法
- 中性子水分計法
- 誘電率測定法
 - TDR, FDR, ADR

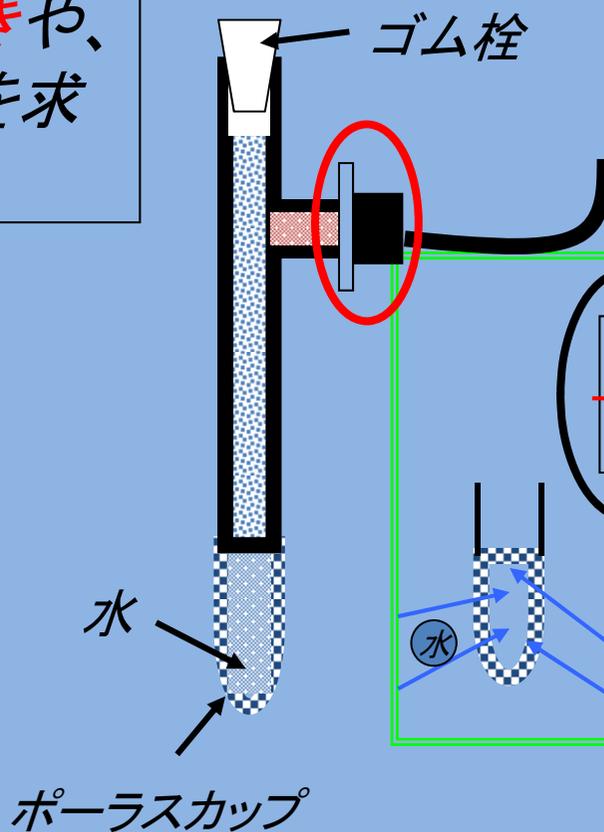
テンシオメータ

土壌水の移動の向きや、
土壌の体積含水率を求
めることができる

土壌水の負圧



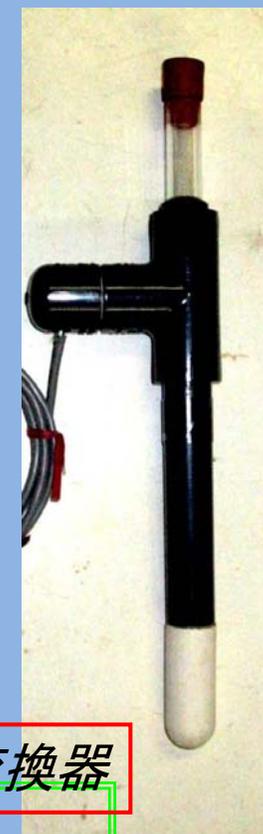
テンシオメータ
内の水圧

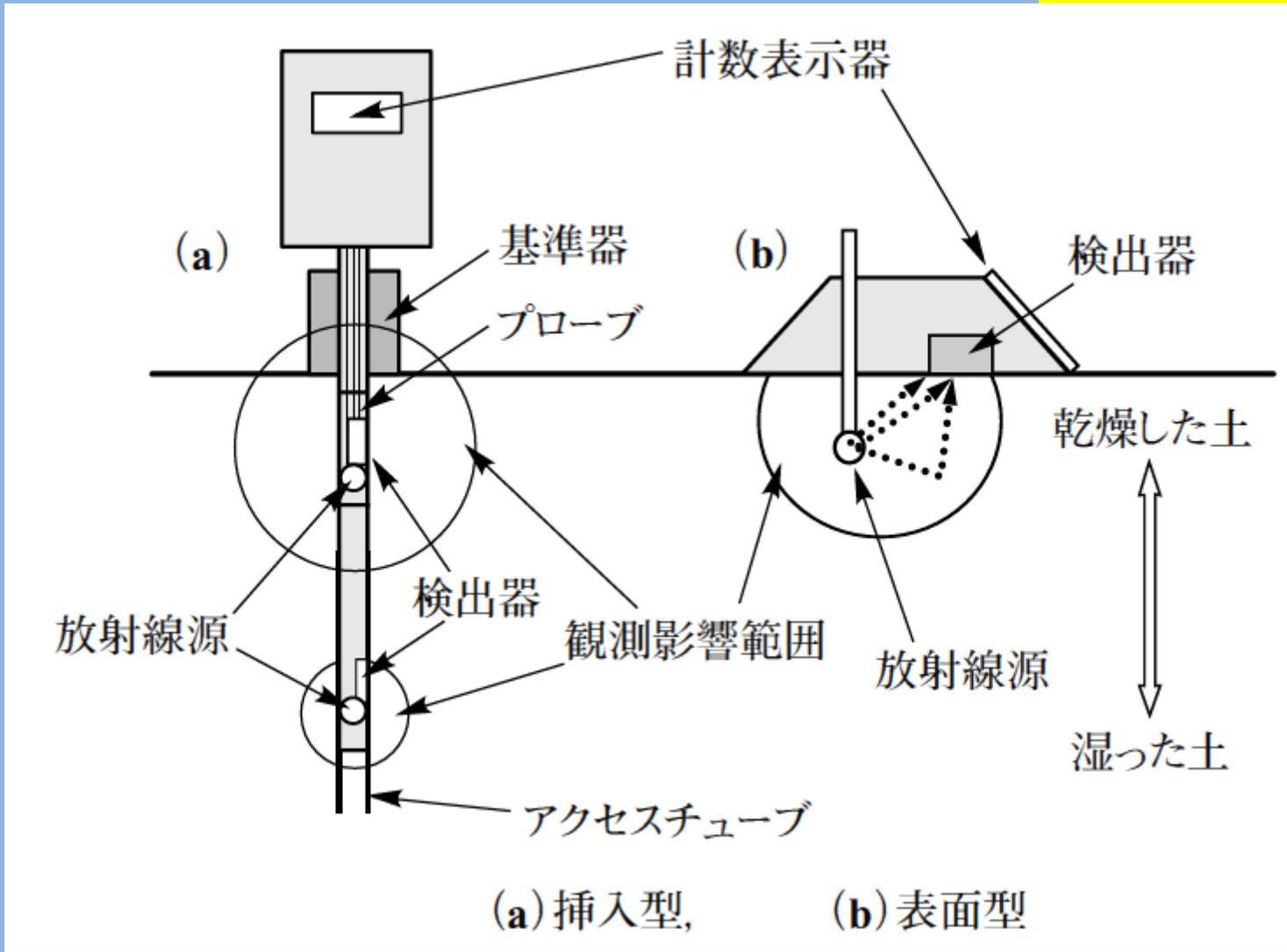


圧力変換器

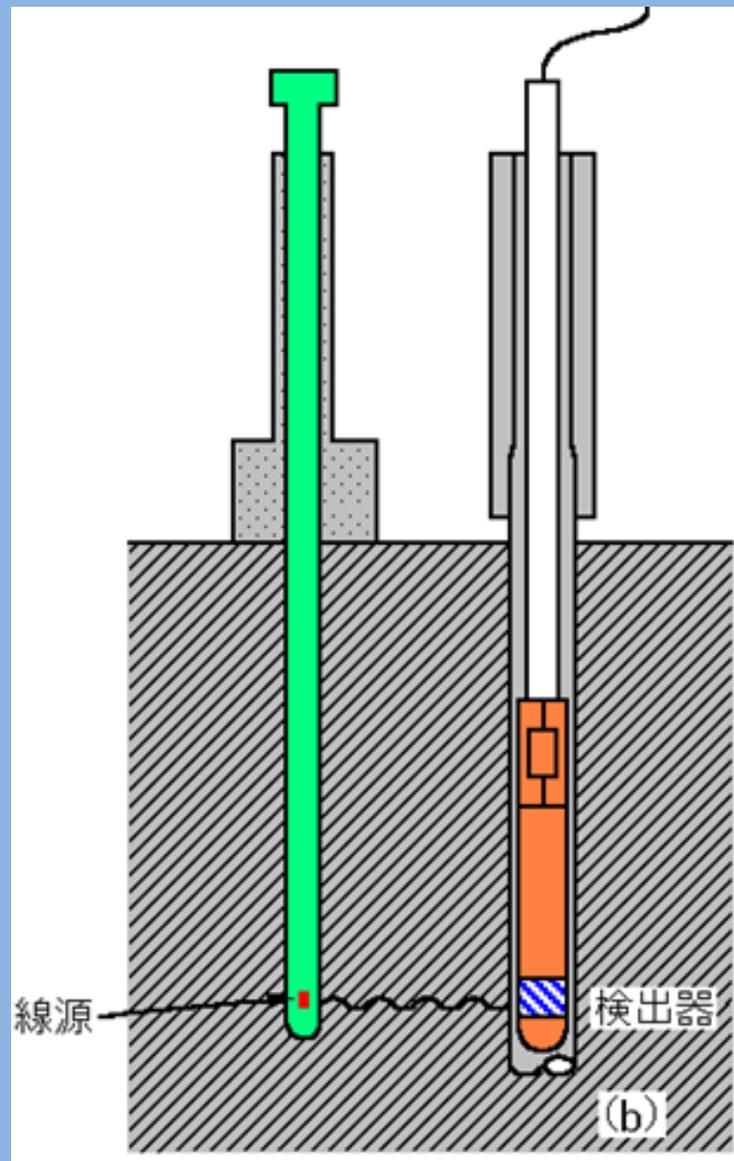
土壌中の圧力が
高いとき

ダイアフラム：
ステンレス製の膜のこと。
ここに圧力がかかること
によるへこみの具合で圧力
を測定する。





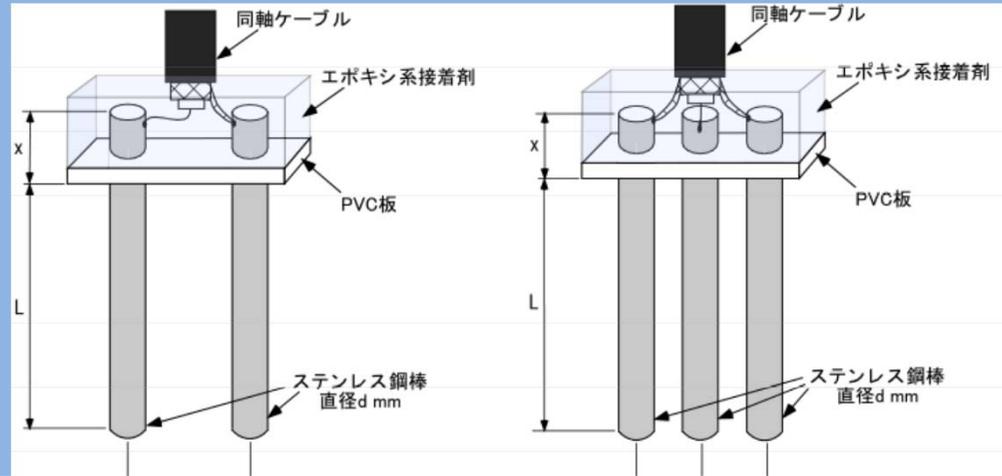
中性子水分計法



ガンマ線水分計の例

誘電率水分計

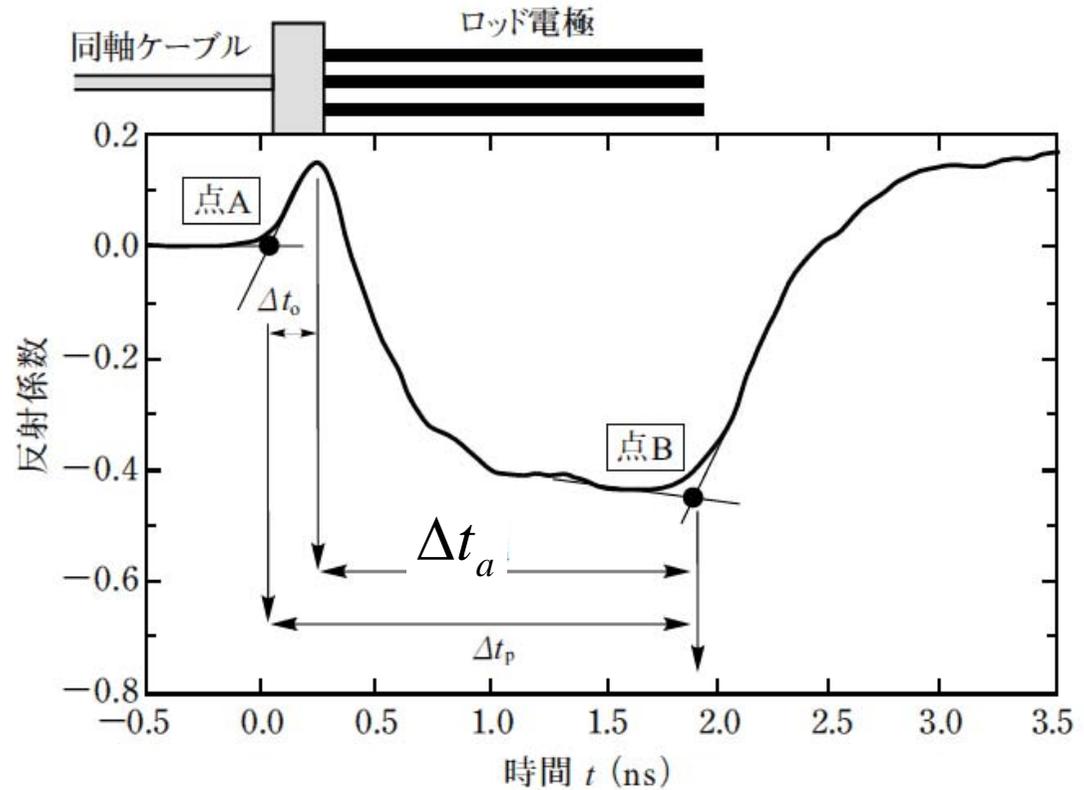
- いちいち炉乾では連続測定ができない
- 相対誘電率
 - 水 \approx 80、鉱物粒子 \approx 3~8、空気 \approx 1
 - 体積割合で重み付け平均
- 中性子もガンマ線も法的規制が厳しい
- もっと簡単に、もっと正確に

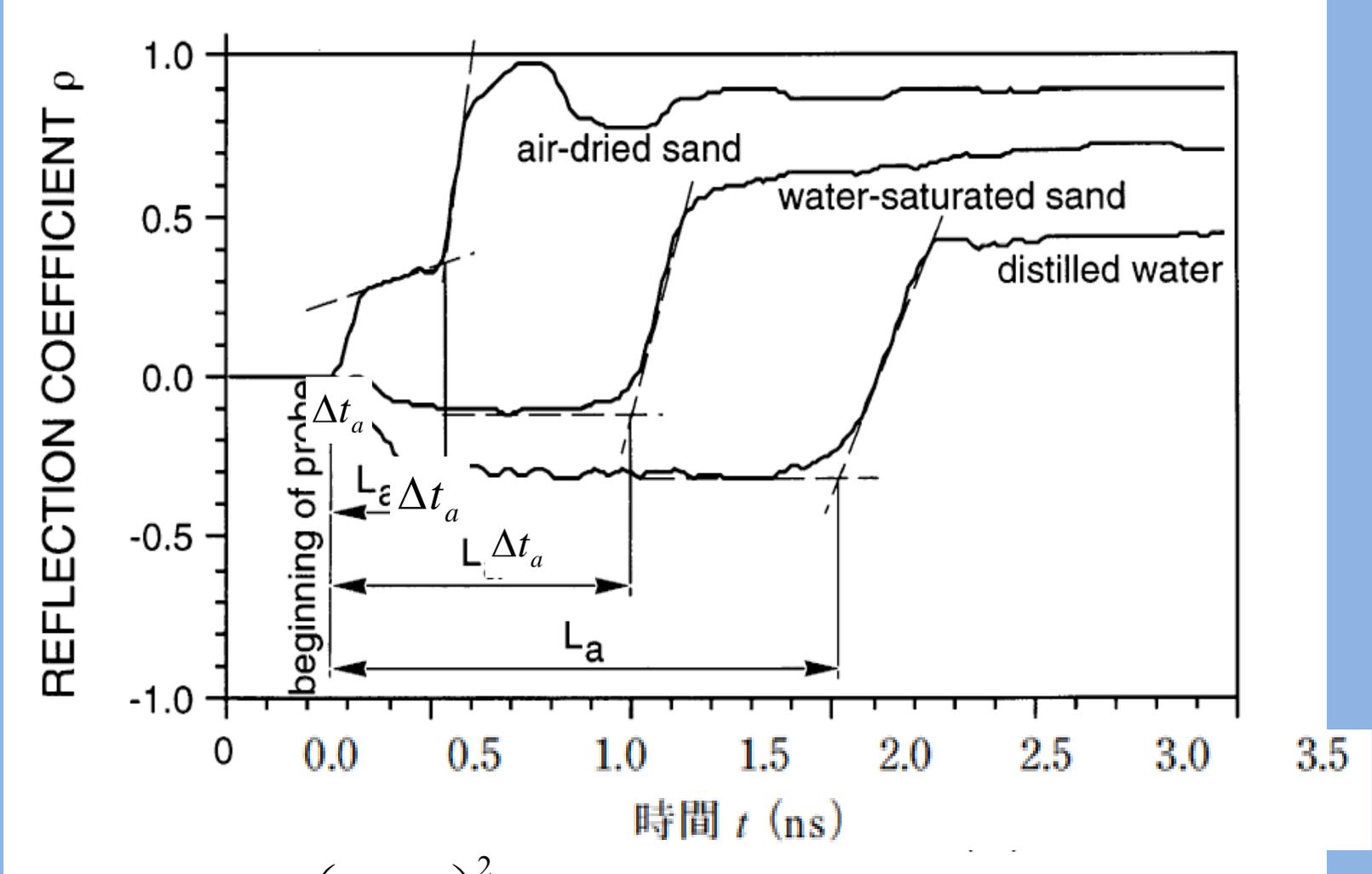


$$\varepsilon = \left(\frac{C\Delta t_a}{2L} \right)^2$$

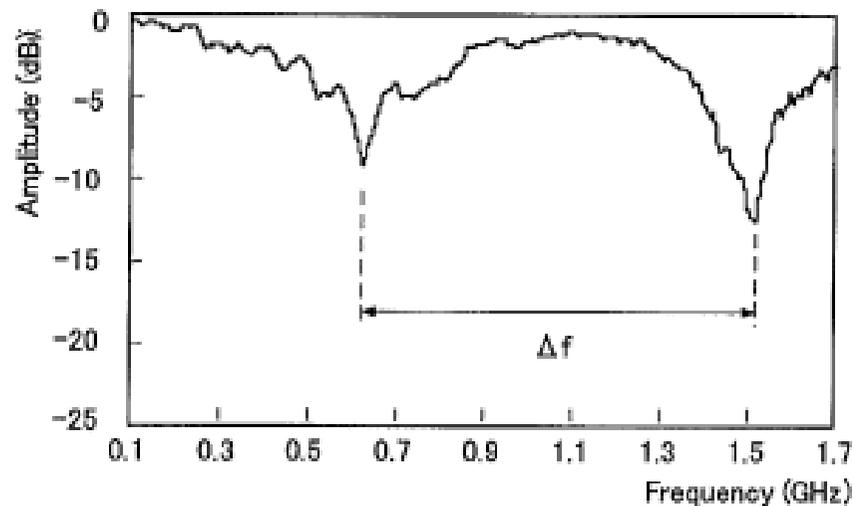
C:光速(m/s)、L:ロッド長(m)

TDR水分計の装置 Time domain refractometry

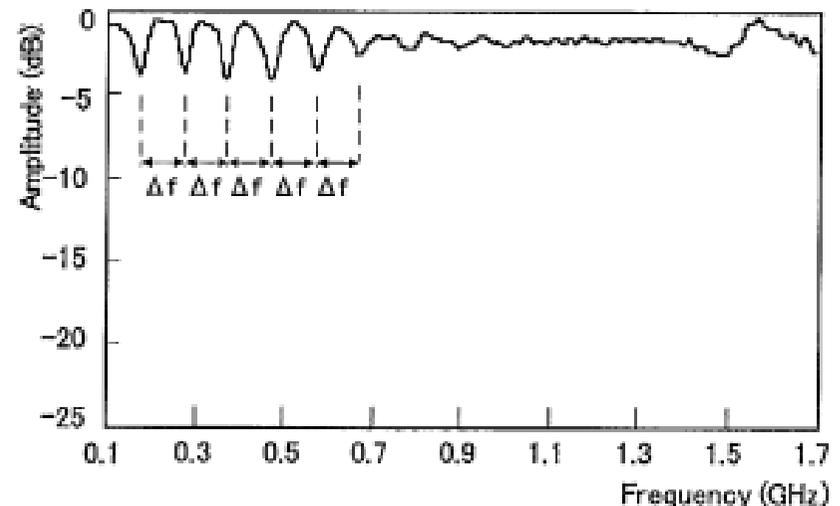




$$\epsilon = \left(\frac{C \Delta t_a}{2L} \right)^2$$



(a) Air (T=20°C)



(b) Water (T=20°C)

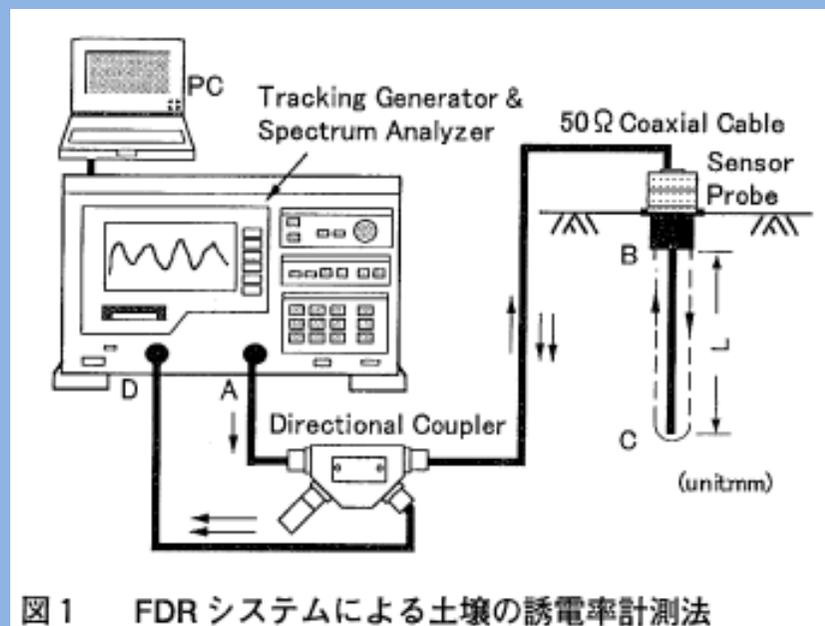


図1 FDRシステムによる土壌の誘電率計測法

$$\epsilon = k \left(\frac{C}{2L} \Delta f_m \right)^2$$

FDR水分計の装置

Frequency domain refractometry

西垣他、地下水学会誌 2004

$$\varepsilon = \left(\frac{C \Delta t_a}{2L} \right)^2$$

$$\varepsilon = \left(\frac{C \Delta t_a}{2L} \right)^2$$

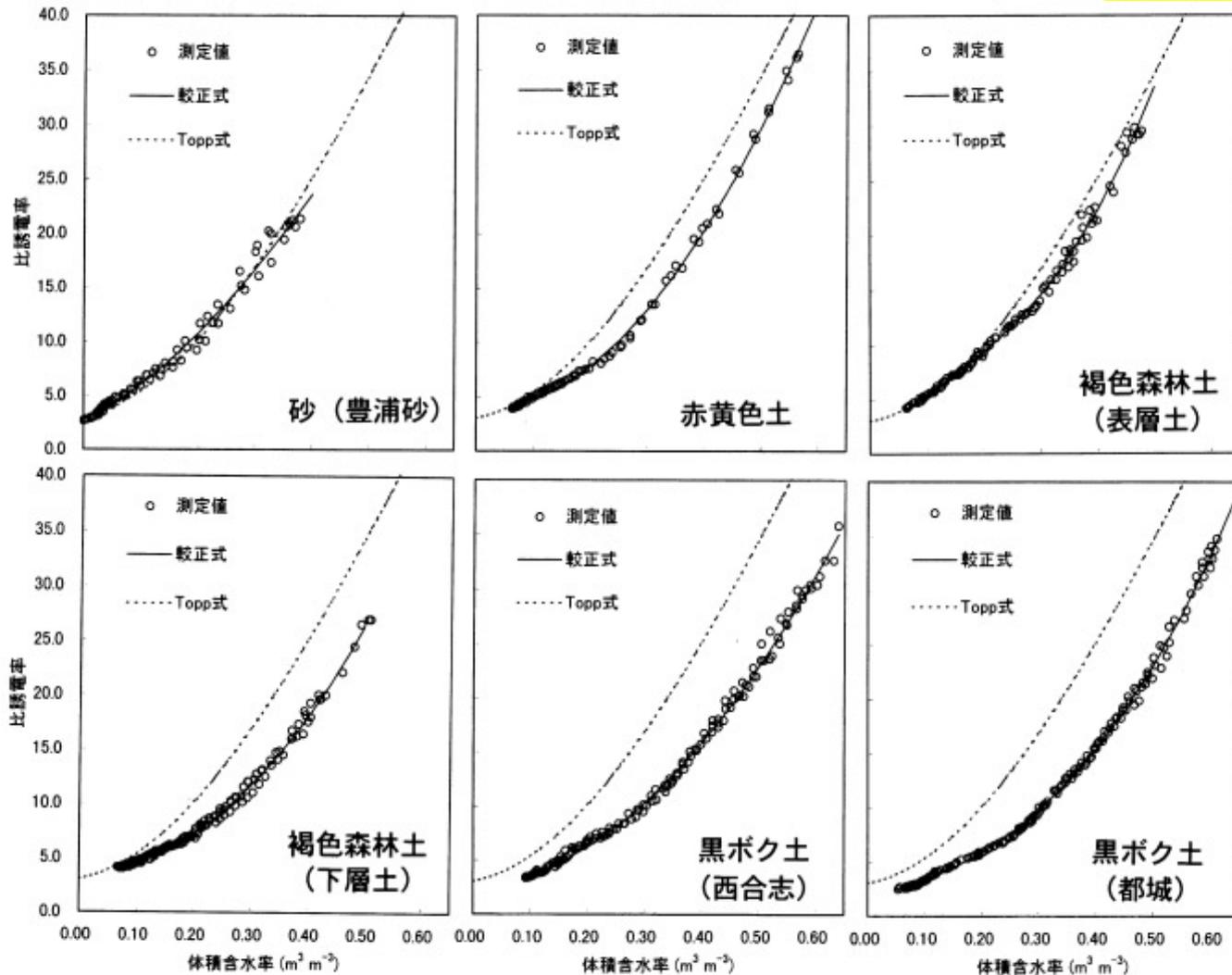
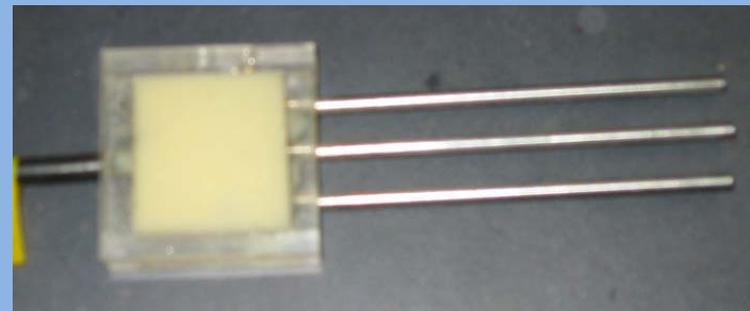
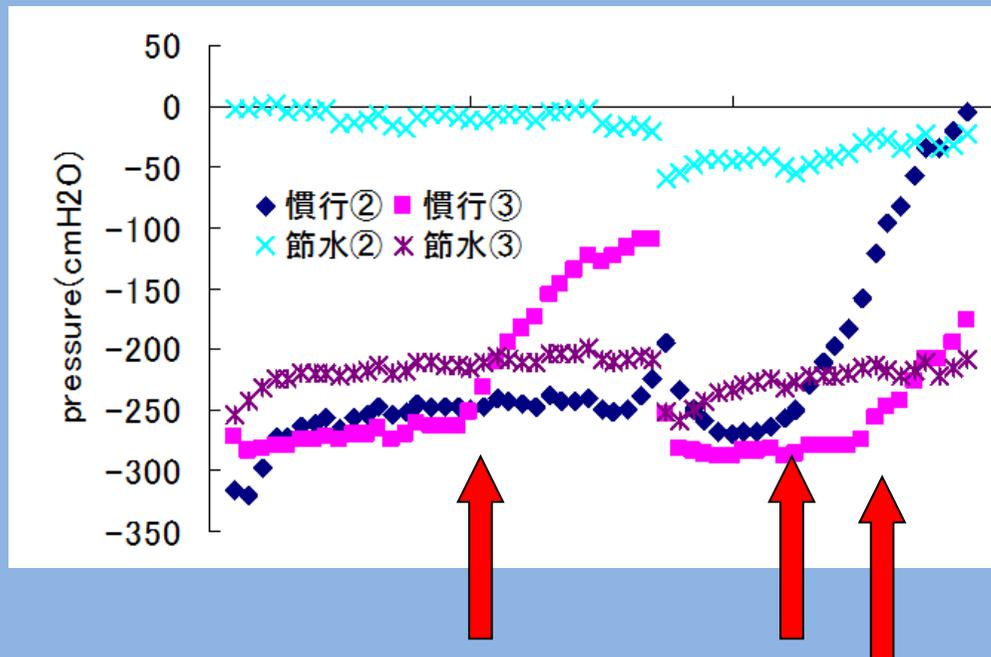
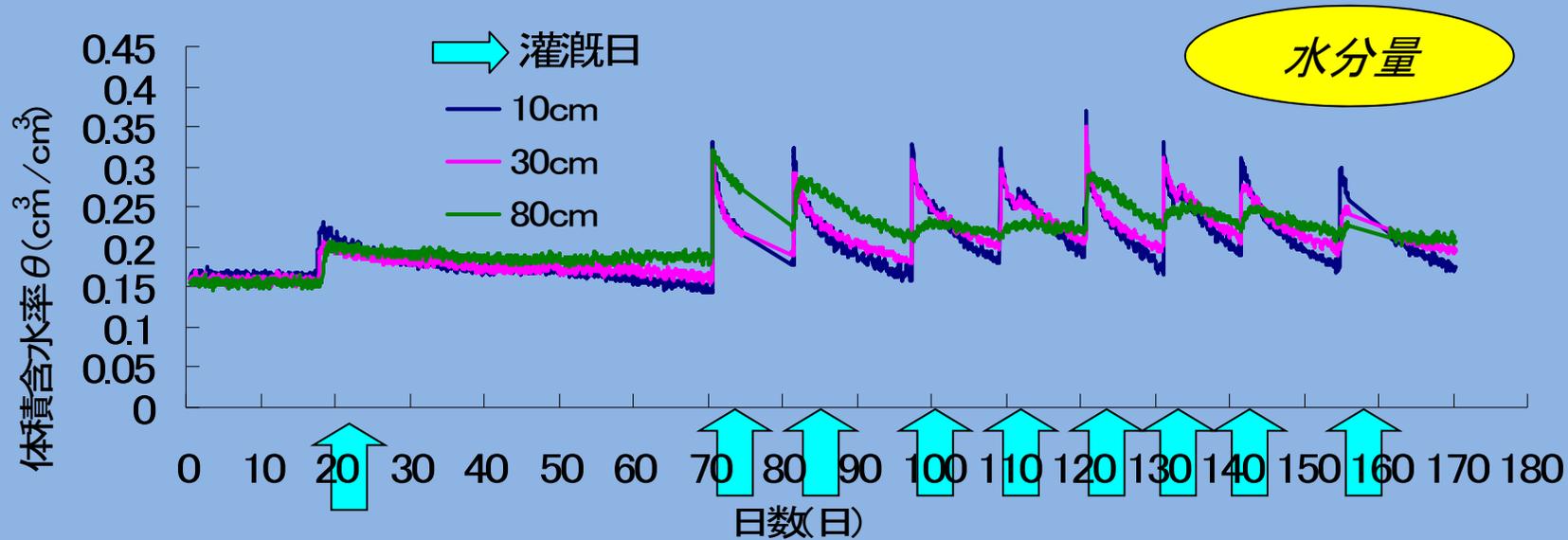


図1 各土壌の体積含水率-比誘電率関係の実測値と較正式の比較

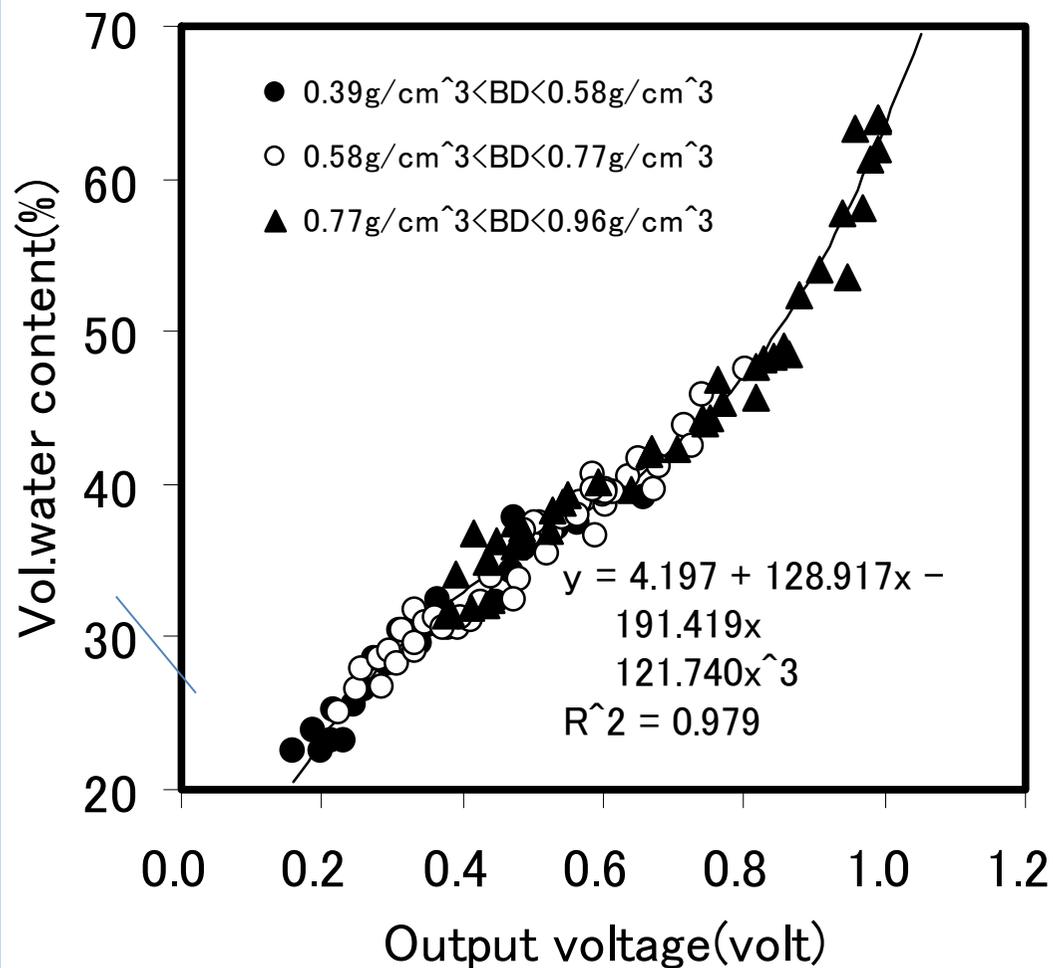
Topp式 $\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_b - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_b^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_b^3$

クロボク土用 $\theta = -3.56 \times 10^{-2} + 4.35 \times 10^{-2} \varepsilon_b - 1.23 \times 10^{-3} \varepsilon_b^2 + 1.48 \times 10^{-5} \varepsilon_b^3$

モニタリング結果



夏季の乾いた時期も問題なく連続モニタリングできた



TUAT Andisol



9Vの印可電圧、0-1Vの出力

府中市のクロボク土とADR水分計の出力

[土壤水分センサーの測定精度の検証]

《ECH₂Oセンサーの測定原理》

- ・比誘電率から水分量を計測
空気:1 土粒子:3~5 水:81

- ・静電容量法

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{t} \left[\frac{RA}{S} \ln \left(\frac{V - V_f}{V_i - V_f} \right) \right]$$

K : 比誘電率 t : 時間 R : 抵抗 A : ロッドの面積 S : ロッド間の距離
 V_i : 起動電圧 V : 電圧 V_f : 印可電圧

◎ 水分量と土壤水分センサーの電圧は比例する

Analogタイプ(電圧出力)

測定: 土壌水分量

EC-5



10HS



Digital出力(比誘電率出力)

測定: 土壌水分量, 電気伝導度,
温度

5TE



5TM



土壌水分換算式

$$\text{EC-5} \quad \theta = 8.5 \times 10^{-4} \times Raw - 0.48$$

$$\text{10HS} \quad \theta = 1.17 \times 10^{-9} \times Raw^3 - 3.95 \times 10^{-6} \times Raw^2 + 4.90 \times 10^{-3} \times Raw - 1.92$$

$$\text{※} \quad Raw = mV \times 4096 / 3000$$

$$\text{5TE \& 5TM} \quad \theta = 4.3 \times 10^{-6} \times \varepsilon^3 - 5.5 \times 10^{-4} \times \varepsilon^2 + 2.92 \times 10^{-2} \times \varepsilon - 5.3 \times 10^{-2}$$

《ECH₂O土壤水分センサーの懸案事項》

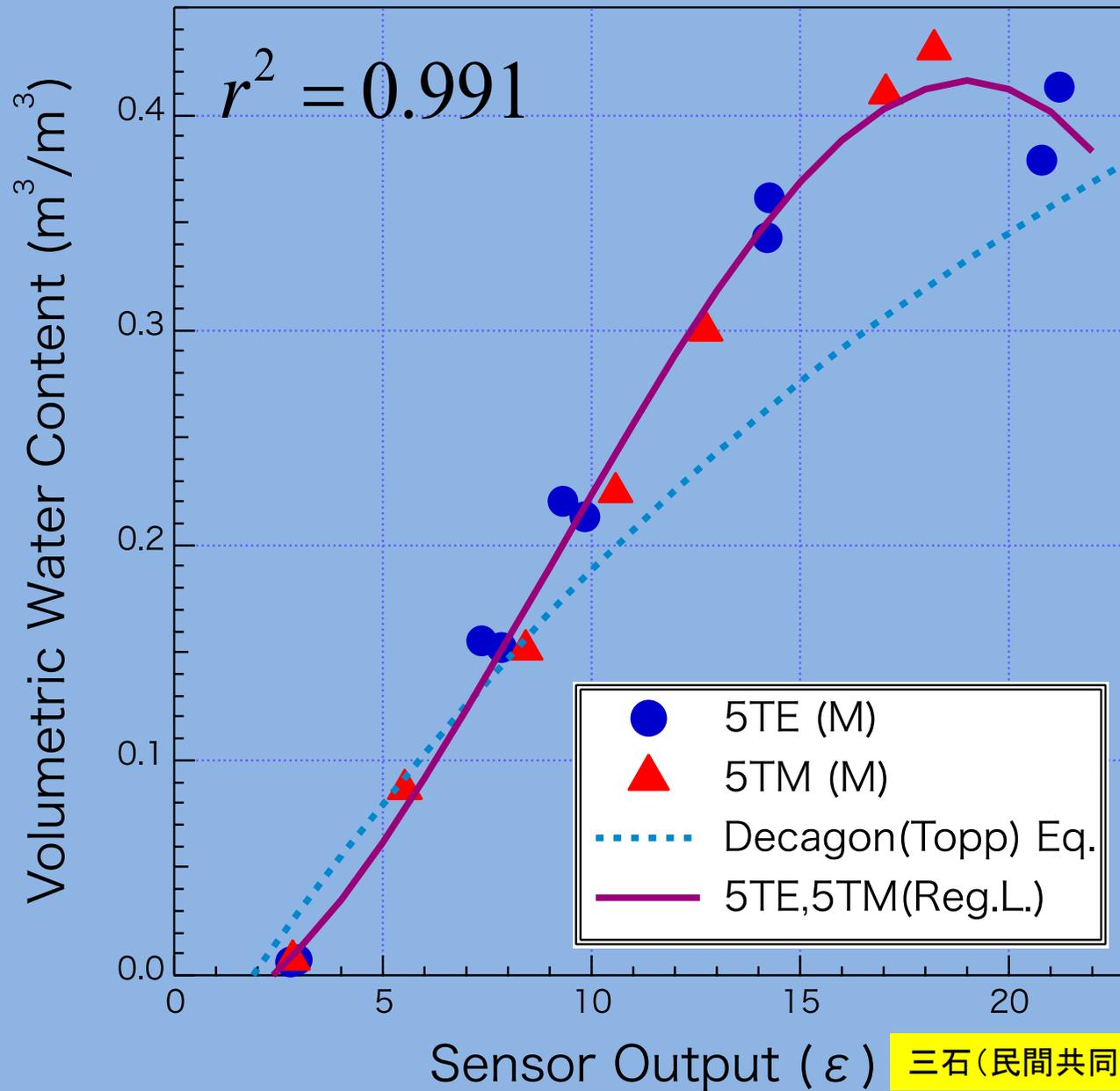
- ・Decagonが提供している土壤水分換算式は正しいのか
- ・Topp式を使用している → 日本の火山灰土壤では正確に土壤水分量を評価できない

キャリブレーションとは

土壌の実際の水分量とセンサーの出力値から計算した土壌水分量を比較して土壌水分換算式の精度を検証すること

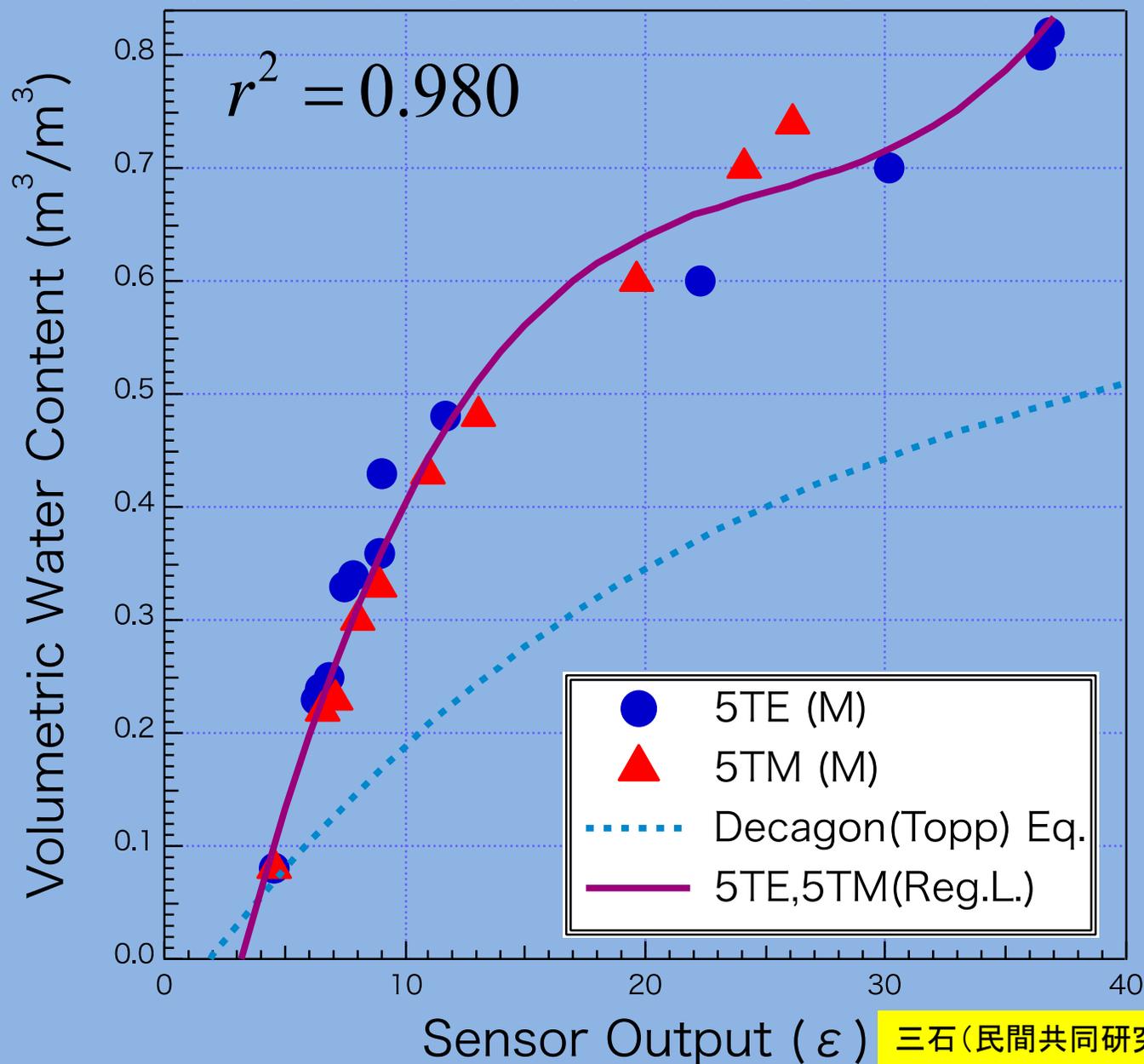
結果: 5TEと5TM(砂)

$$\theta = -1.124 \times 10^{-4} \times \varepsilon^3 + 3.04 \times 10^{-3} \times \varepsilon^2 + 6.323 \times 10^{-3} \times \varepsilon - 3.13 \times 10^{-2}$$

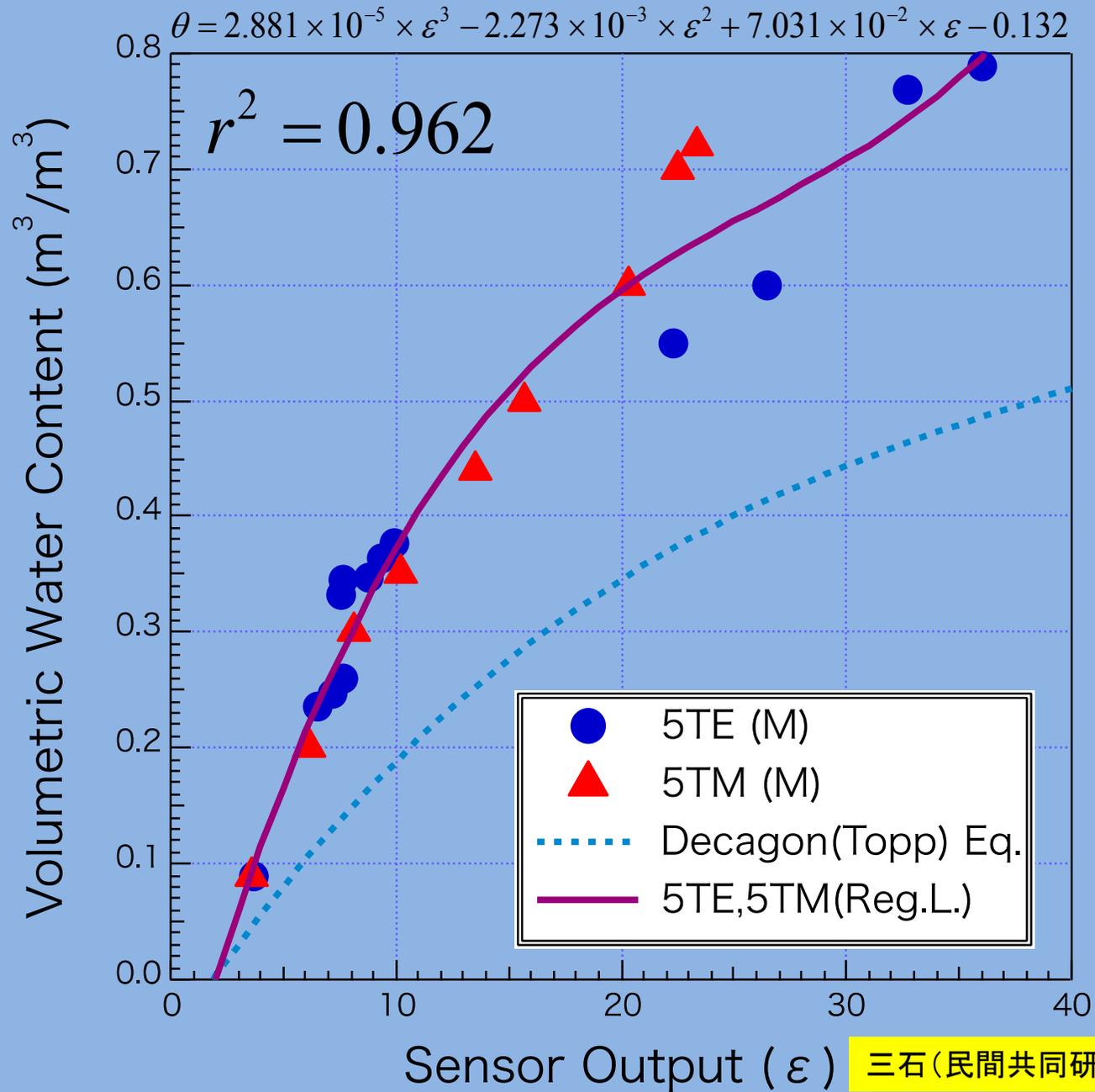


結果: 5TEと5TM(ローム)

$$\theta = 4.982 \times 10^{-5} \times \varepsilon^3 - 3.799 \times 10^{-3} \times \varepsilon^2 + 6.326 \times 10^{-3} \times \varepsilon - 0.291$$



結果: 5TEと5TM(黒ボク)



土壌水分センサーのまとめ

- ・土壌によってDecagon (Topp等) 式では正確に土壌水分量を評価できない

[水ポテンシャルセンサーの測定精度の確認]

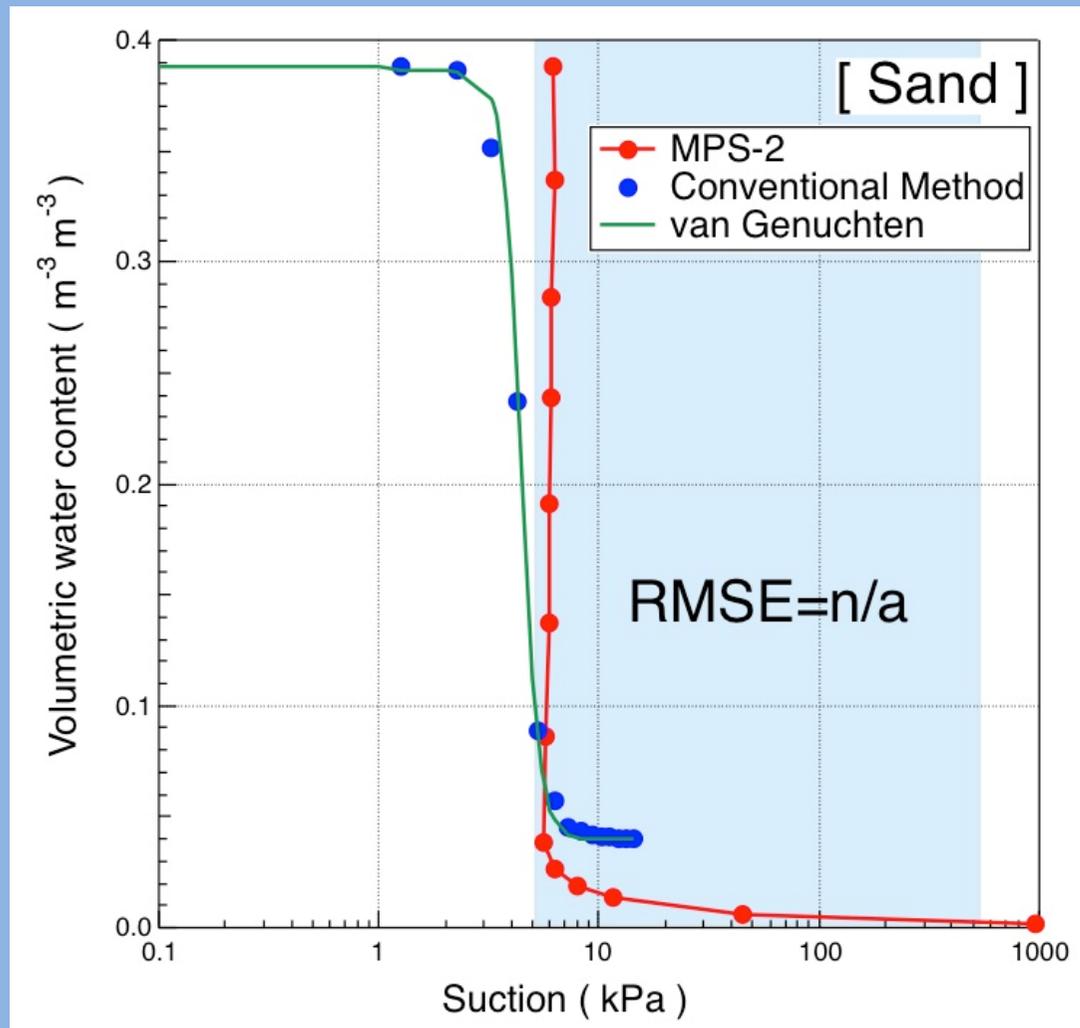
(土壌+水)を表す指標

- ・土壌水分量: 土壌中に含まれている水の量
- ・水ポテンシャル: 土壌水の単位質量あたりのエネルギー(マトリック+溶質ポテンシャル, 単位: MPa)
→ 水の移動しやすさ

MPS-2

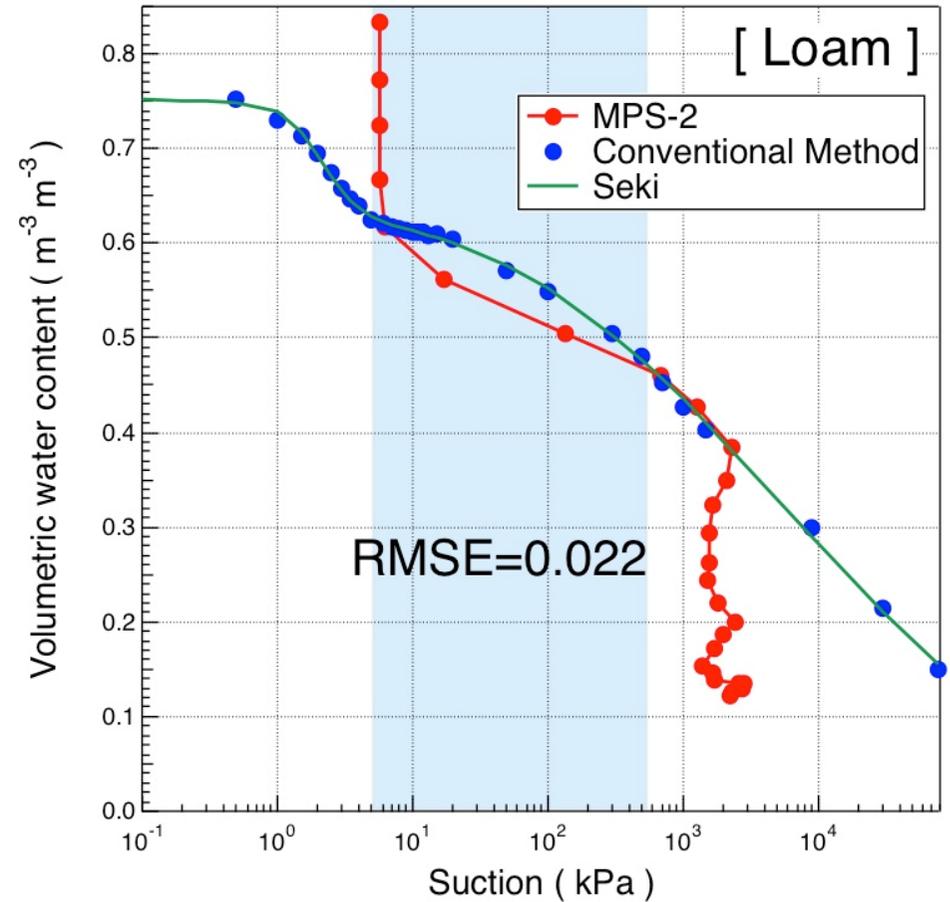
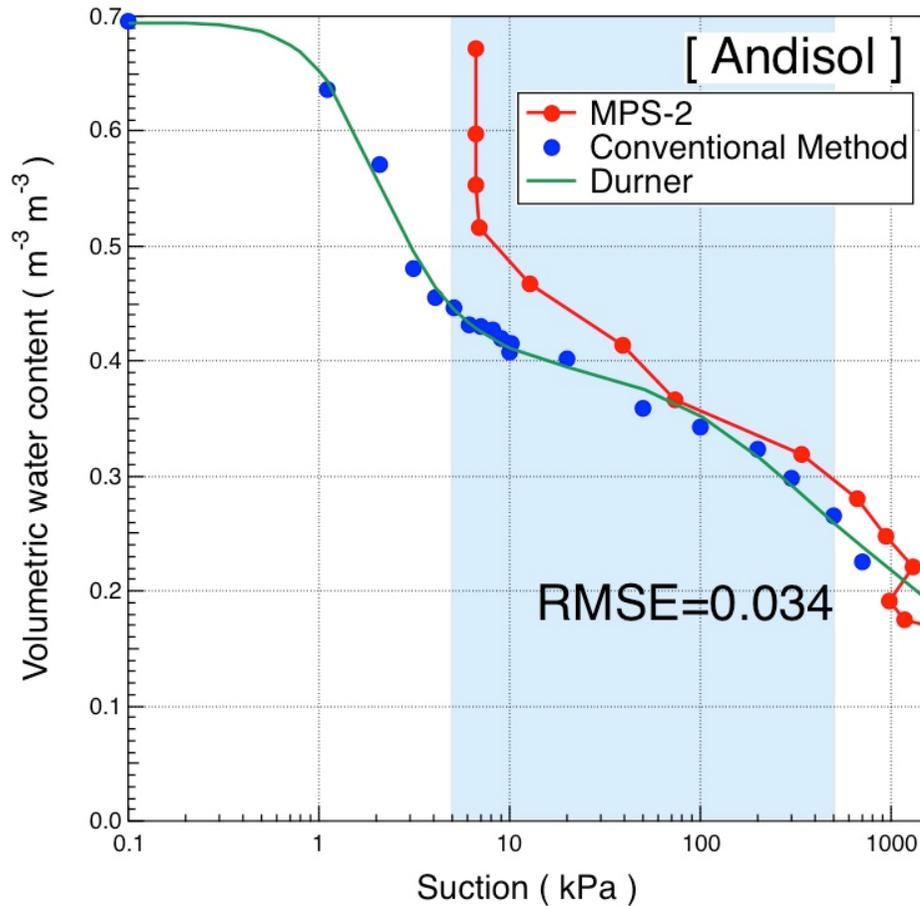


[MPS-2の測定結果:砂]



→ 砂の間隙径 > ディスク(MPS-2)の間隙径

[測定結果: 黒ボク土, 立川ローム]



→ テンシオメータの数値と一致した

[水ポテンシャルセンサーのまとめ]

- ・砂は使用が難しい
 - 土壌間隙径がディスク間隙径より大きいと水が連続しないため流れない
- ・0～-10kPaの範囲は従来法(吸引法)で計測する必要がある
- ・黒ボク土, 立川ローム土はテンシオメータとよく一致した.

測定データの検証

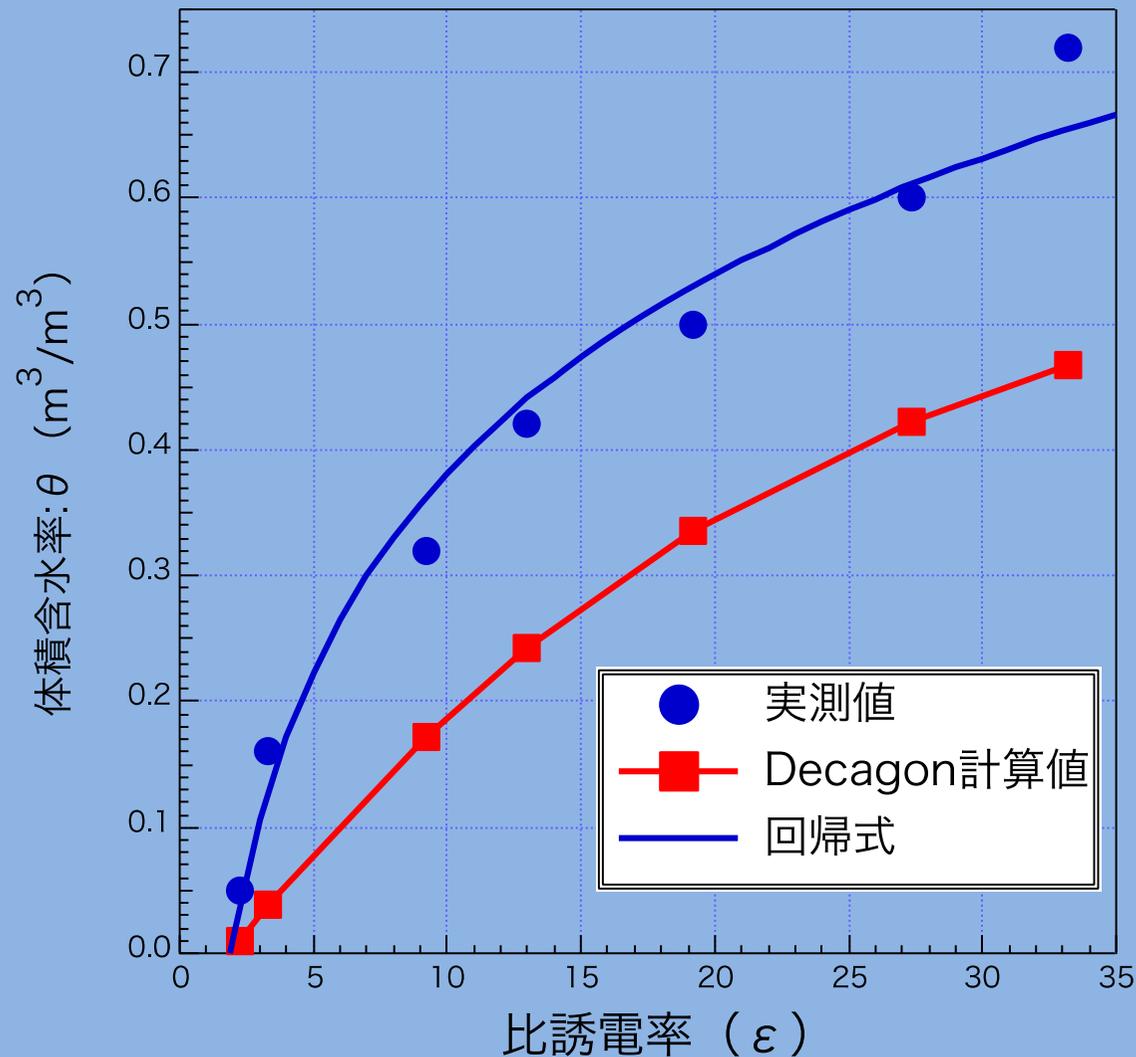
青森県弘前市リンゴ農園

目的: 青森県弘前市リンゴ園の環境調査

供試センサー: 5TE 埋設深: 4, 8, 16, 32, 64cm



キャリブレーション結果(水分調整法)

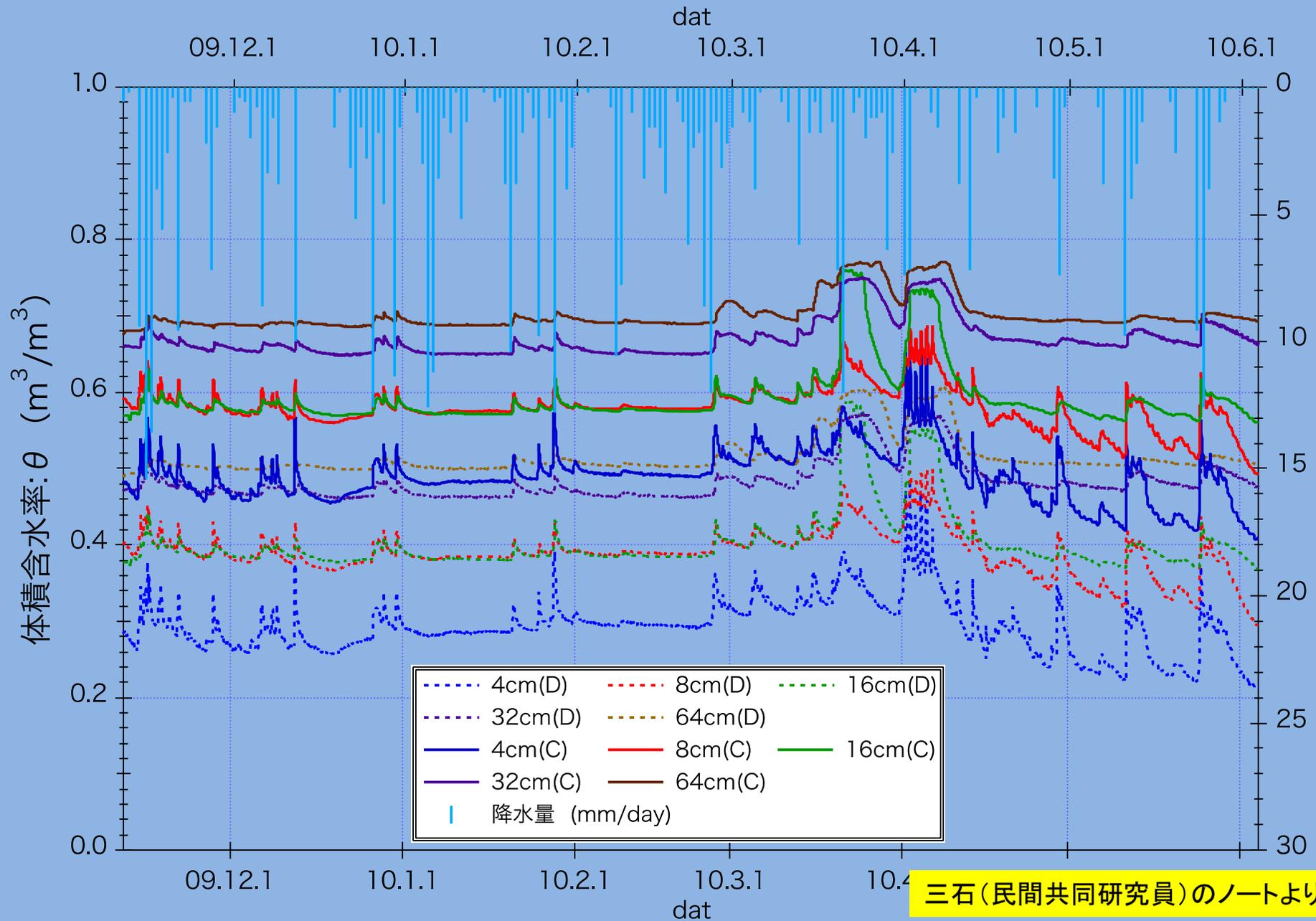


新しい土壌水分換算式: $\theta = 0.2281 * \ln(\epsilon) - 0.1439$

$R^2 = 0.975$

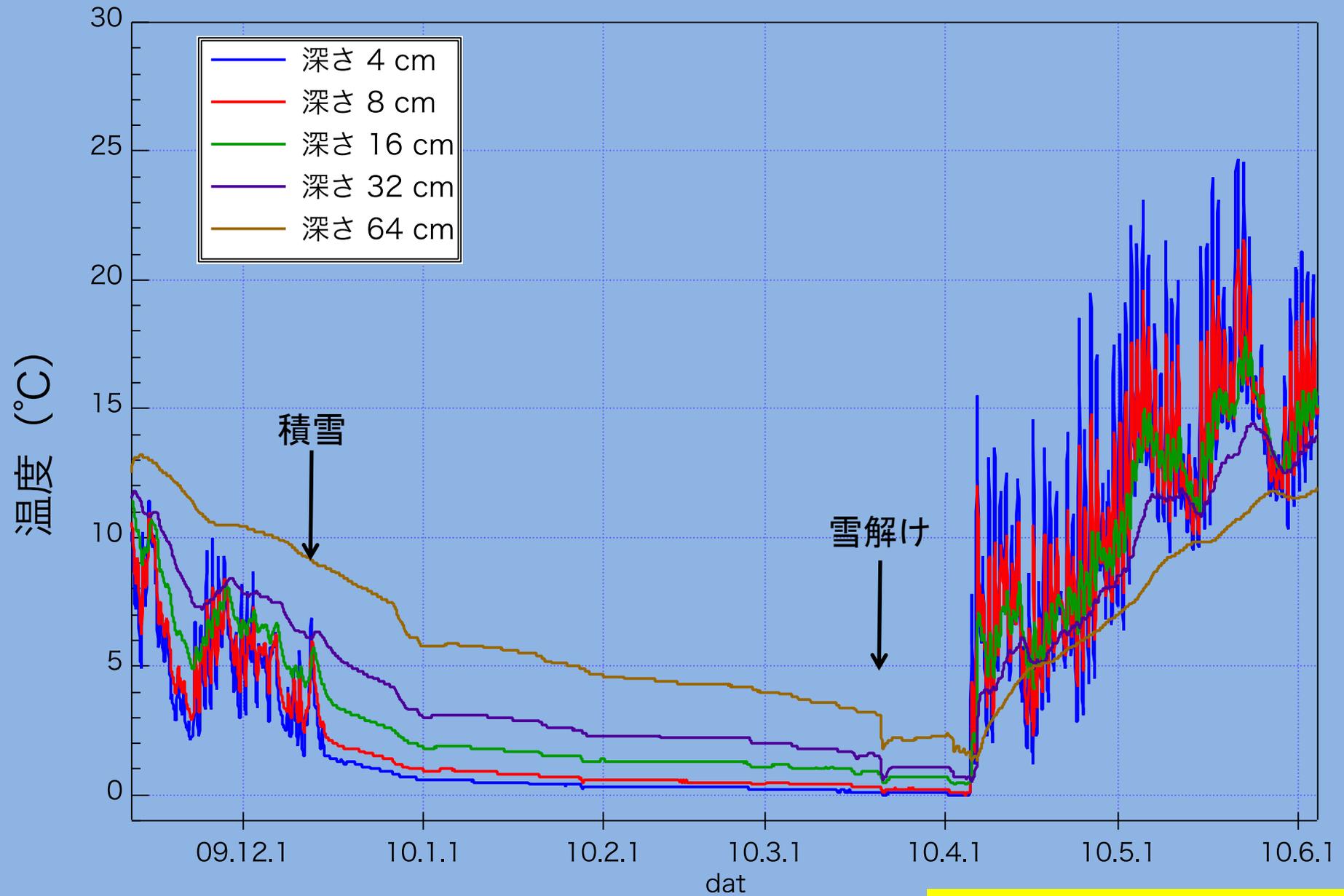
三石(民間共同研究員)のノートより

結果：土壌水分量＋降水量



三石(民間共同研究員)のノートより

結果:地温



三石(民間共同研究員)のノートより

[測定データを検証してみましょう]

- Decagon(Topp)式の水分量は実水分量のほぼ半分だった
- 降水時期と土壌水分量の増加は対応していた
- 地温・電気伝導度の変化もきちんと捉えられていた

- 測定値の土壌を用いてキャリブレーションを行うこと
- 現地土壌のサンプリングを行い、キャリブレーション値と比較してその値が適切であるか検証すること

新たな取り組み その1

◎ ECH₂Oセンサーの耐久性を高めよう！

- ・フィールド測定中に起きる事故
ケーブルの断線, センサーの破損, 盗難, 火災.....



放牧中の牛に齧られたケーブル



FS内に作られた虫の巣

三石(民間共同研究員)のノートより

○ ECH₂Oセンサーは首のところが劣化しやすい



○ 基盤部分が小動物(?)に食われる (@タイ設置センサー)



→ 誤作動を引き起こしたり故障の原因, 計測が途中で止まるのは困る

三石(民間共同研究員)のノートより

☆ ECH₂Oセンサーの基盤部分を保護してみた



三石(民間共同研究員)のノートより

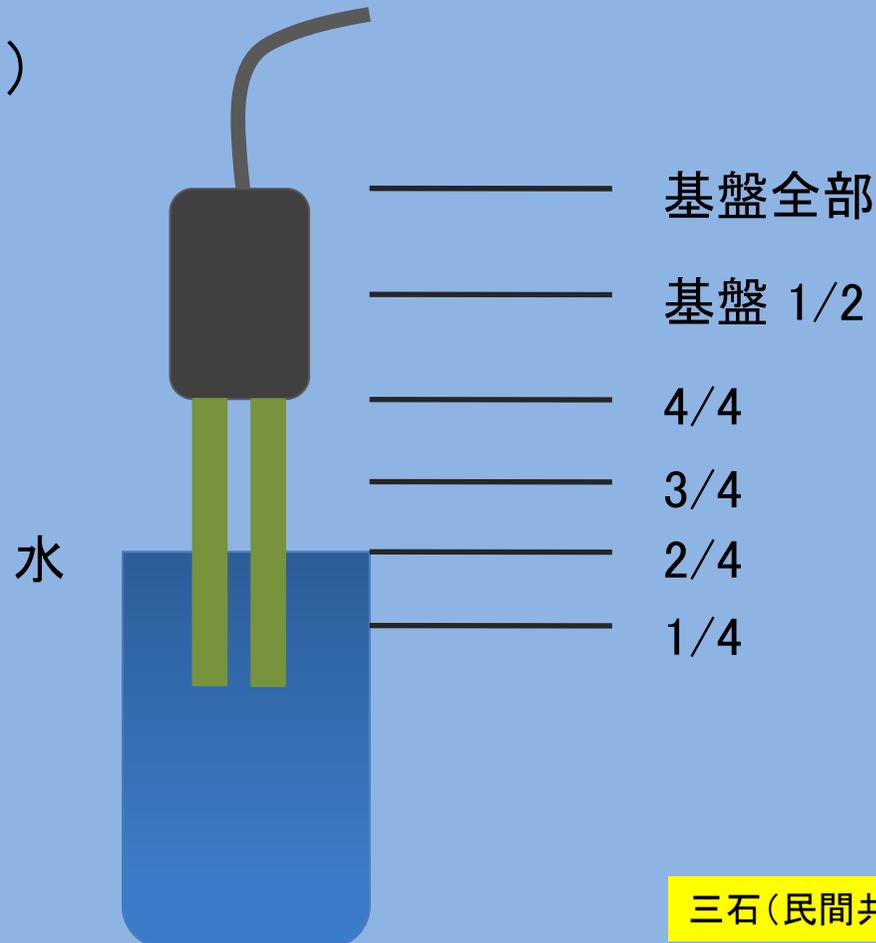
実験:エポキシ処理がECH₂Oセンサーの出力値に与える影響

供試センサー:EC-5, 5TE

供試土壌:砂

測定項目:空気, 水, 様々な水分量の砂試料

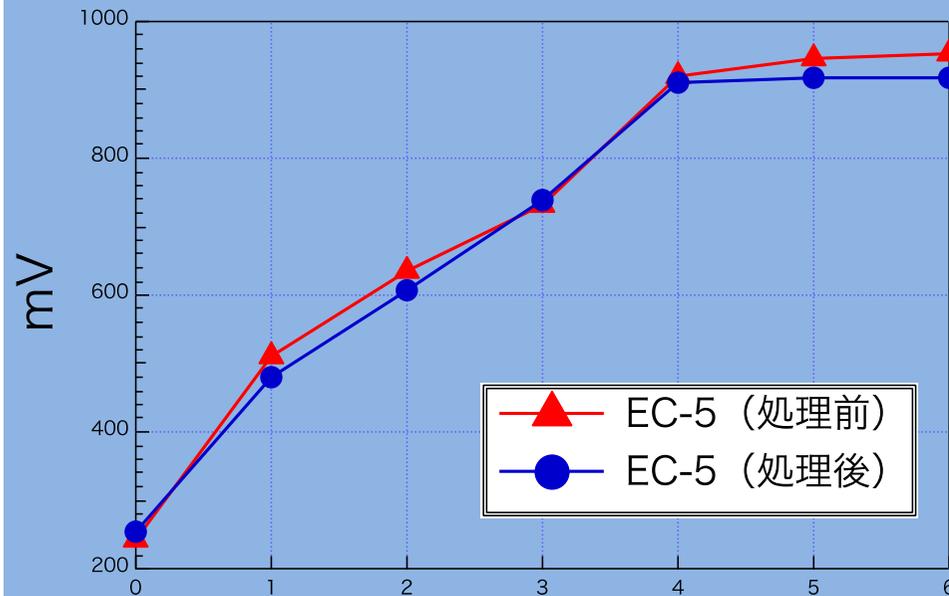
(水実験の概要)



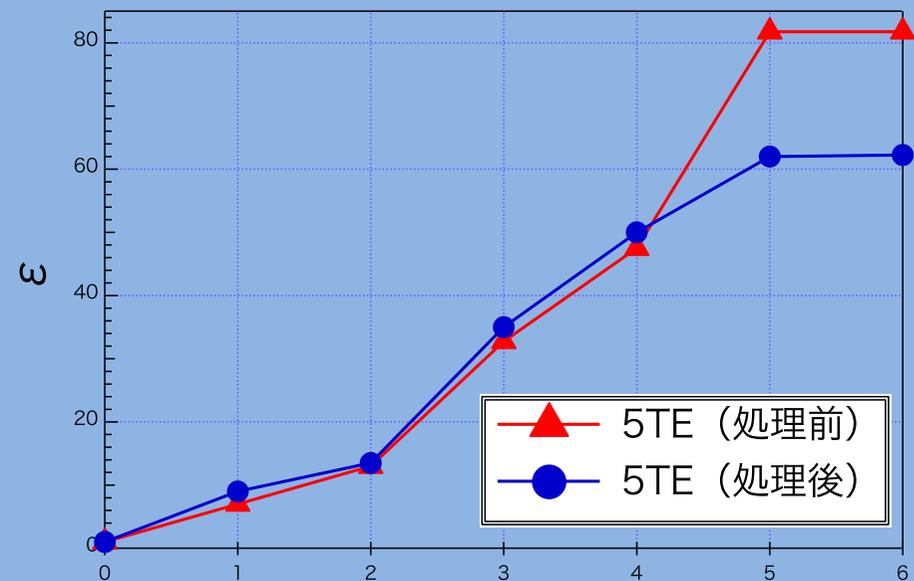
三石(民間共同研究員)のノートより

実験結果1(空気と水)

[EC-5]



[5TE]



0: 空気

1: 1/4 (センサーロッド)

2: 2/4 (センサーロッド)

3: 3/4 (センサーロッド)

4: 4/4 (センサーロッド)

5: 基盤1/2

6: 基盤全部

→ エポキシをすることで基盤部分が濡れたときに出力値が上昇することがなくなった

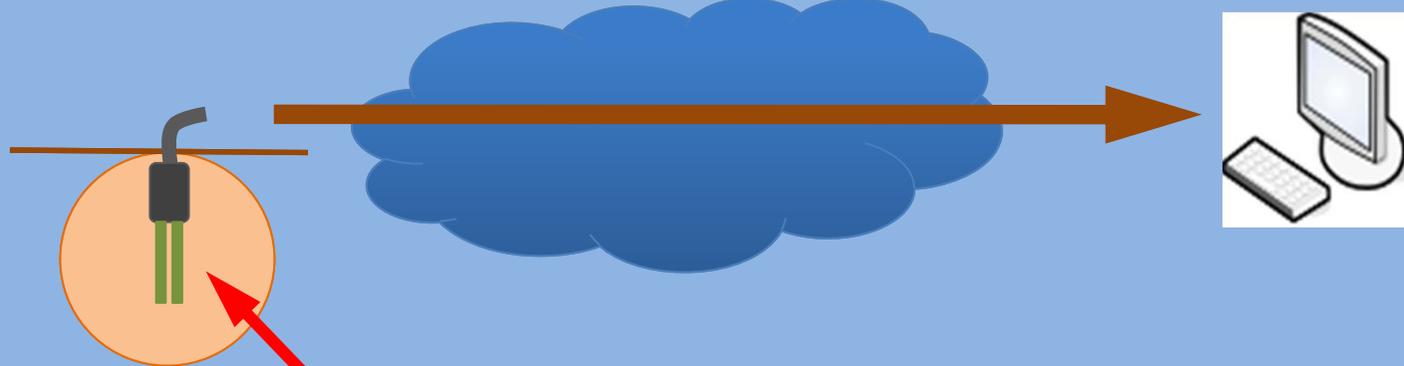


三石(民間共同研究員)のノートより

土壌センサーに関するまとめ

- ・圃場の土壌水分量を管理するためには…
- ・農業技術や経験を数値化するためには…
- ・リモセンデータを検証するためには…

この経路はなんでもよい



本当に大事な情報はココである
センサーの特性に合わせた制御

そのために、センサーの測定値の検証(土壌毎のキャリブレーション、温度や塩類の影響評価、センサーの測定精度等)は必ず行うこと

どんな土壌センサー（高価，安価，メジャー，マイナー）を使用しても，必ず測定対象地の土壌を用いて、**キャリブレーションしてセンサーの測定精度の検証を行う！**

(応用)フィールドモニタリング

- 圃場の土壌環境計測では土壌センサーとデータロガーを組み合わせたシステムが使われる
- 遠隔地にこのシステムを設置した場合、この稼働状況を確認できると便利である
- これは、現地に設置したデータロガーやWebカメラを一時的にインターネットに接続するだけで実現できる
- これをフィールドモニタリングシステム(FMS; Field Monitoring System)と名付け、それに必要な要素技術を開発してきた

フィールドモニタリングシステム Field Monitoring System (FMS)

- 農地におけるモニタリング
 - 気象(気温, 降水量, 日射量, 風速, など)
 - 土壌(水分, 温度, 養分)
 - 作物(成長量, 色)
 - 環境(放射線量?)
- 農地は都会にあるのではない!
 - 電源なし, WiFiなし
- 農地では有線を使わないのが望ましい
 - 草刈り鎌やトラクタによる切断
 - 動物による切断



Setup images of FMS



Ina, Nagano Prefecture in Japan

Field Monitoring System (FMS)

In-situ data → Telecom. → Data Server

Meteorological data



Bluetooth



Field Router



Mobile internet



Image data

Data logger



Bluetooth



Bluetooth adapter



Internet



Laboratory

Soil data

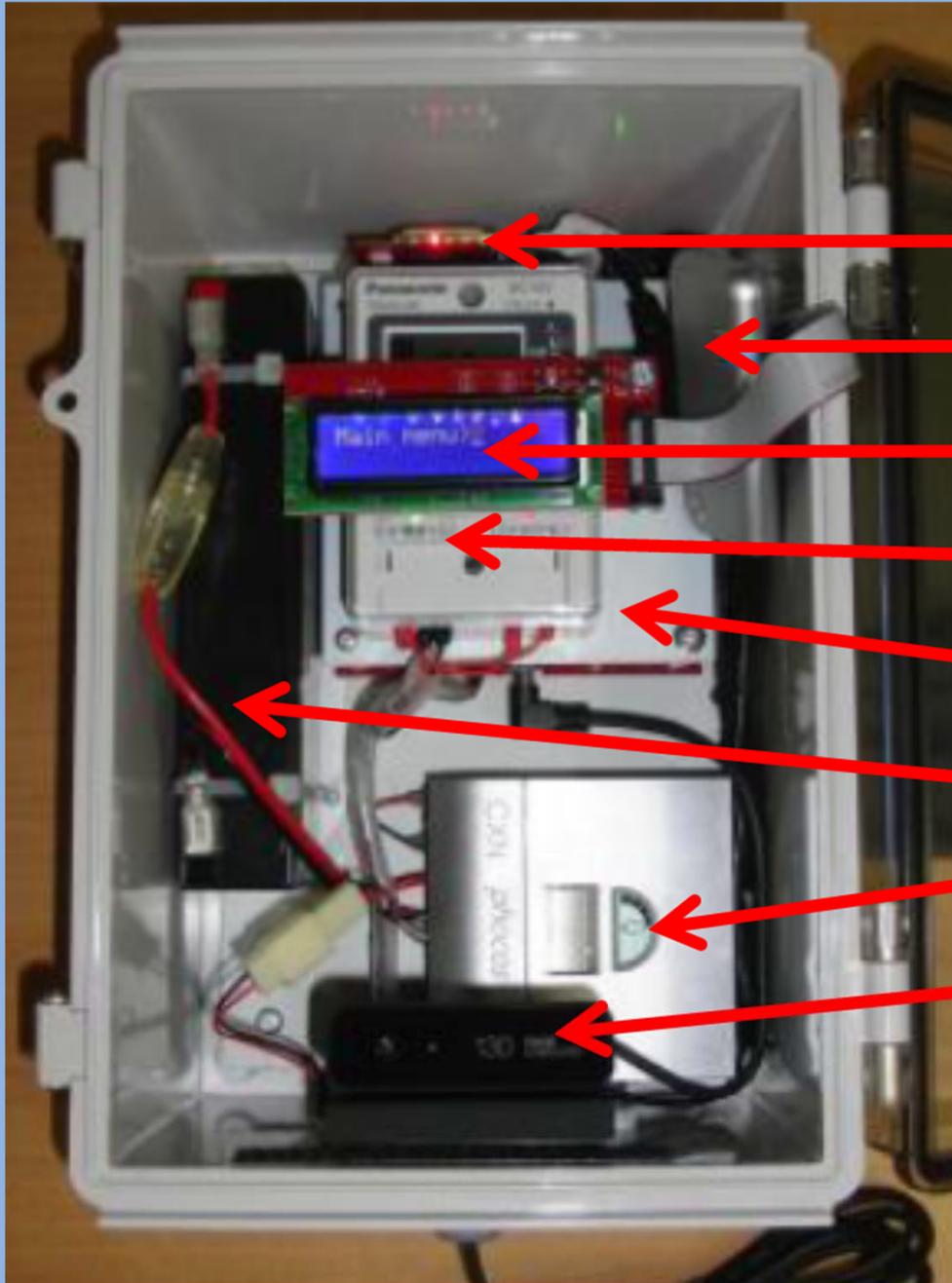


(Soil sensor : Soil moisture, temperature, electrical conductivity...)

フィールドルータ(FR)

- FRは現地データをインターネット経由でサーバに転送する機器である。
- FRはリアルタイム性を多少犠牲にして日単位でデータにアクセスするのが特徴である。
- FRはタイマーにより1日に30分だけ電源がONになる
- 6 W程度の太陽パネルで稼動する。
- 電源がONになると、Webカメラの現地画像と各データロガーのデータがインターネット経由でサーバに送信される。
- 日本国内ならほとんどの地域でFRを利用できる。
- 海外であれば、対象とする地域でGSM/3Gの携帯電話が使えることを確認した上でその国内のSIMカードをUSBモデムに挿入するだけでFRを利用できる。

FieldRouter(FR)



- Status lamp
- USB modem
- Status display
- Timer
- Micro-PC
- Battery
- Charge controller
- Web camera

(38 cm x 25 cm x 10 cm)

ネットワークアダプタBluetooth (NABT)

- NABTは、シリアル通信ポートを持つデータロガーにBluetooth通信機能を付加する機器
- 2 W程度の太陽パネルで稼動
- シリアル接続可能な全てのデータロガーやWebカメラに対応
- 最近普及しているAndroid携帯アプリからデータを取得することも可能
- フィールドでは中継器 (repeater) を用いることで数百mまで接続距離を延長可能

Soil sensor

Radiation sensor

Meteoro-sensor

Water level sensor

Data logger



FieldRouter (FR)

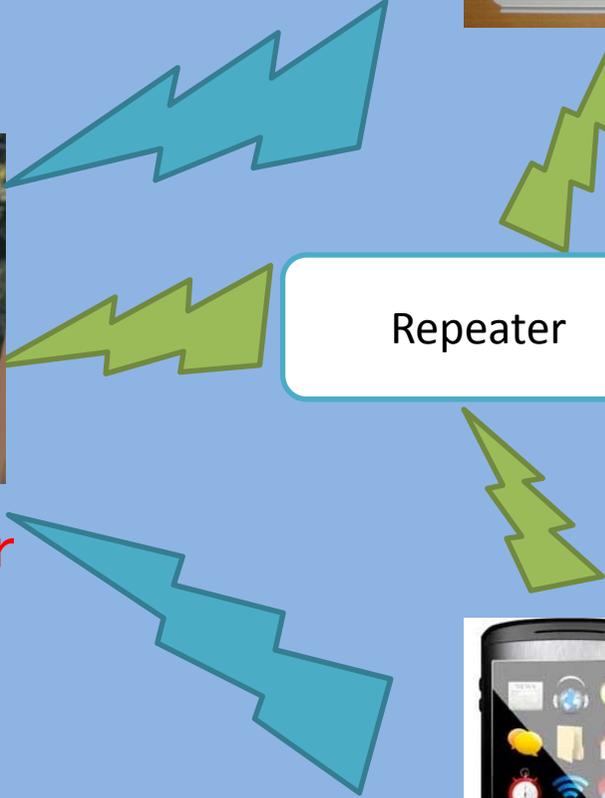


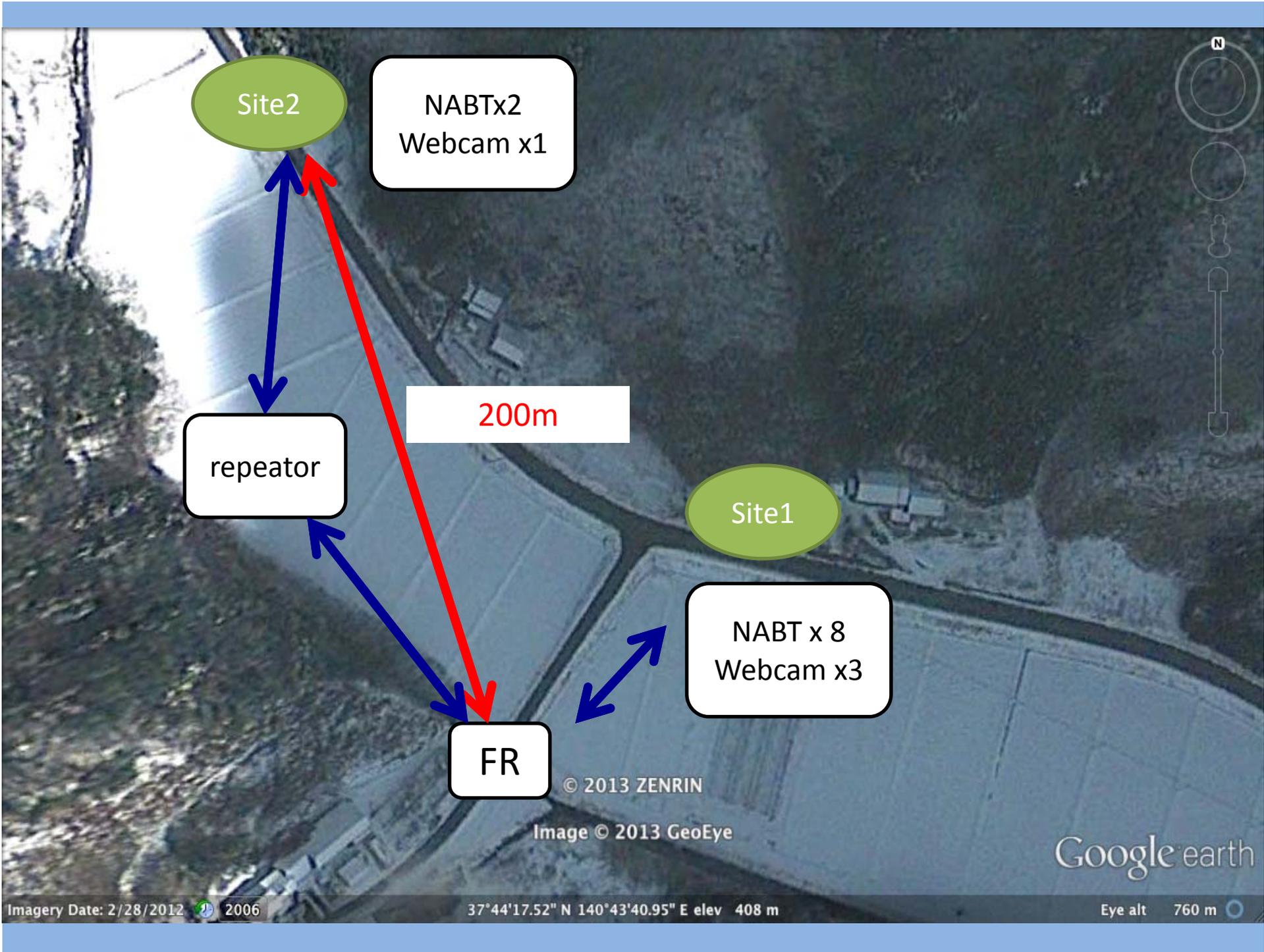
NetworkAdapter

Repeater

Web camera

Smart phone





データサーバ(DS)

- FRで転送された現場データはデータサーバ(DS)に保存される
- ユーザはWebのポータルサイトからDSにアクセスするだけで、遠隔地のデータにアクセスでき、FRやデータロガーの電池の消耗具合などを確認できる

Quasi real-time Monitoring of Farmland using Field Router (Lab. of Soil-Informatics, Dept. of G - Windows Internet Explorer)

http://www.x-ability.jp/~swampred/index.php?dfw=fns2

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ヘルプ(H)

Quasi real-time Monitoring of Farmland using Field Router

Masaru Mizoguchi

Lab. of International Agro-Informatics, Dept. of Global Agricultural Science, Univ. of Tokyo

MizoLab. Current Time (JST)=2012/04/01 20:28:10

▼ Projects

- GRENE
- EDR
- EDR-Tsunami
- EDR-litate
- Tunisia
- Thailand
- Indonesia
- Hokuriku
- Hirosaki
- Dr.Doroemon
- misc

▼ Select

All Del Show

- NVSU, Philippines
- Pattaya, Thailand
- Tunisia-1
- Tunisia-2
- Tunisia-3
- Tunisia-4
- Tunisia-5
- KhonKaen-cassava1
- KhonKaen-cassava2
- Bangkok

[Method](#) [Sites overview](#) [Login](#)

 <p>Tunisia-2 (Map)</p>	 <p>KhonKaen-cassava2 2011.6.17</p>	 <p>Bangkok 2011.6.14</p>	 <p>Bogor-1, Indonesia</p>
 <p>Bali, Indonesia</p>	 <p>Tsumagoi</p>	 <p>Ishikawa 2010.11.29-</p>	 <p>Rikuzen-takada 2011.9.29</p>
 <p>Natori 2011.9.22</p>	 <p>Iwanuma 2011.10.19</p>	 <p>Iitate-Sasu 2011.10.2</p>	 <p>Iitate-Myojin-2 2011.12.4</p>

I=image, M=meteorologic, S=soil (Left side icons for yesterday, right side today)

[Mizo Lab.](#)

<http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/>

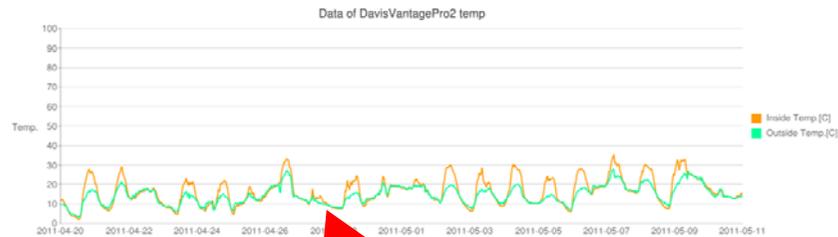
View of individual site

Toyama01 last seen: 2011/05/11 12:30 (JST GMT+9)



Images

[Image0]2011/05/11 12:07 (1890) [image](#) [calendar](#)

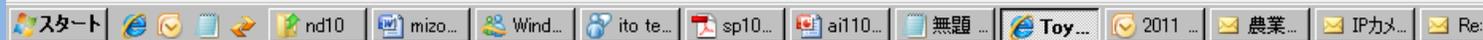


#	Timestamp	Battery	Outside T1	High Outs	Low Outs	Rain fall	High rain	Barometer	Solar radi	Number of Inek
2	2011/4/7 10:30	17.22	17.22	16.22	0	0	1017.98	470	702	
3	2011/4/7 11:00	17.94	18	17.22	0	0	1017.75	587	703	
4	2011/4/7 11:30	18.5	18.67	17.89	0	0	1016.86	652	702	
5	2011/4/7 12:00	18.89	18.89	18.44	0	0	1016.59	515	703	
6	2011/4/7 12:30	19.17	19.39	18.72	0	0	1016.36	477	702	
7	2011/4/7 13:00	19.61	19.61	19.17	0	0	1016.42	459	703	
8	2011/4/7 13:30	20.44	20.44	19.61	0	0	1016.32	495	630	
9	2011/4/7 14:00	21	21	20.1	0	0	1016.05	651	703	
10	2011/4/7 14:30	21.39	21.44	21	0	0	1015.21	652	702	
11	2011/4/7 15:00	22	22.06	21.3	0	0	1014.46	612	702	
12	2011/4/7 15:30	21.72	22.33	21.72	0	0	1014.09	461	703	
13	2011/4/7 16:00	21.5	21.78	21.39	0	0	1013.95	255	702	
14	2011/4/7 16:30	21.61	21.72	21.5	0	0	1013.88	292	703	
15	2011/4/7 17:00	21.06	21.61	21.06	0	0	1014.02	226	702	
16	2011/4/7 17:30	20.83	21.06	20.72	0	0	1014.36	150	703	
17	2011/4/7 18:00	20.26	20.8	20.26	0	0	1014.7	91	702	

Data

DavisVantagePro2 2011/05/11 12:08 battery:[4.29\(0\)](#) logger time:2011-05-11 12:07:36 [Raw](#) [\(292.2K\)](#)

Toyama01 2011/05/11 12:12 battery:[82](#) logger time:2011-5-11 12:5:36 +36 [Raw](#) [\(301.2K\)](#)

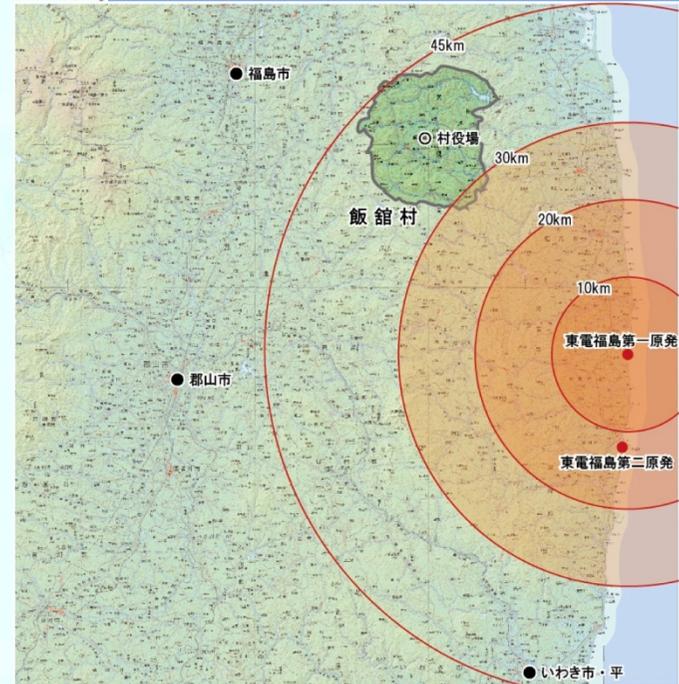
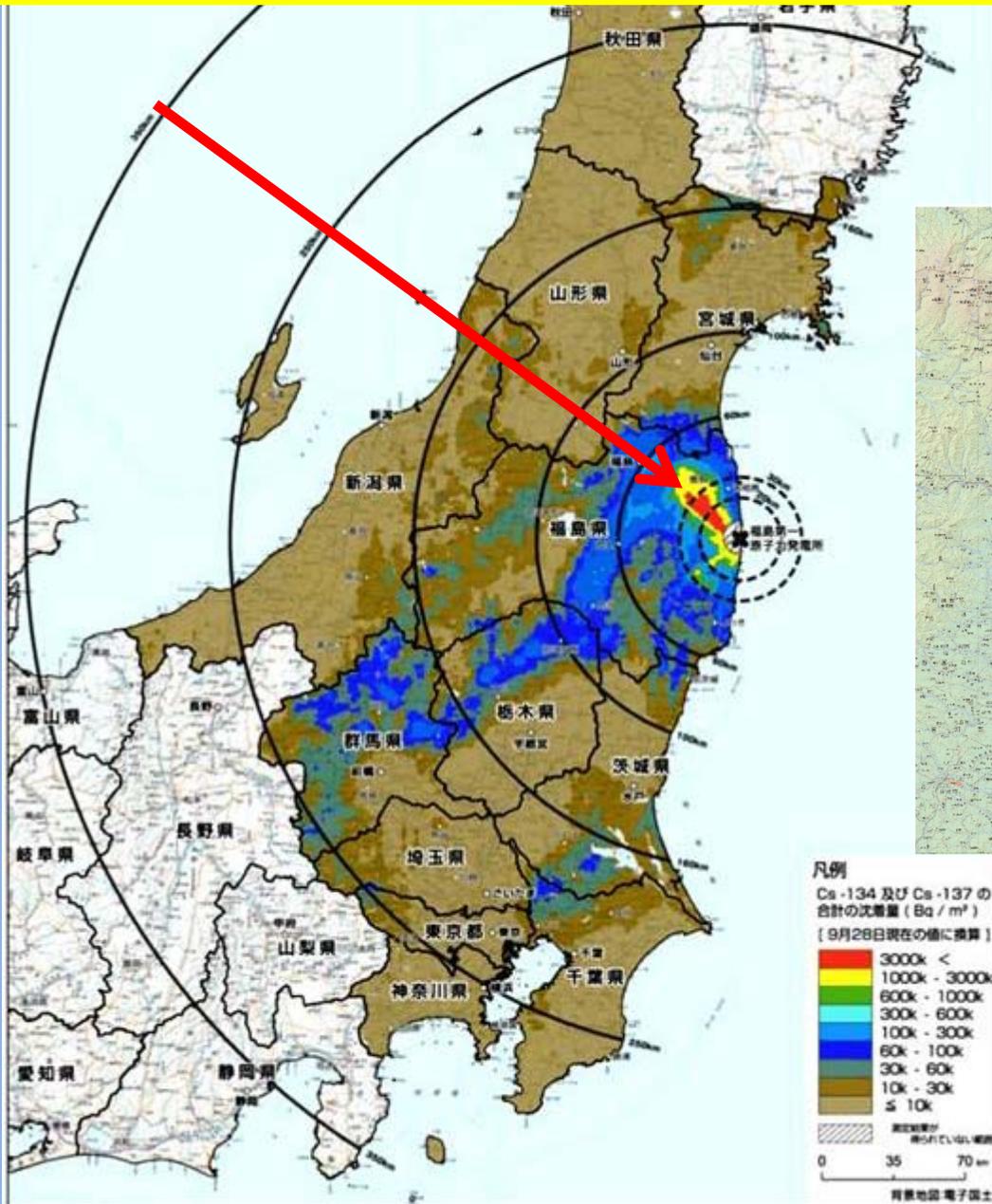


- Weather and soil data can be downloaded in CSV format
 - The data can be processed freely using EXCEL

Calendar view function

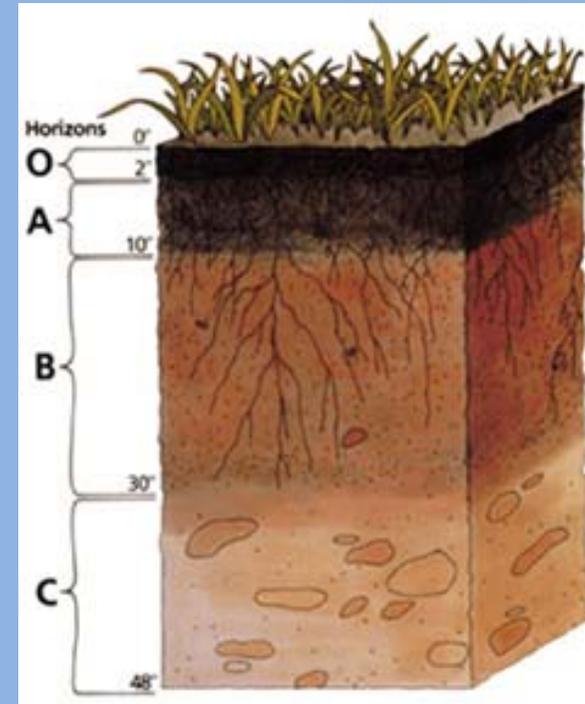
2012 / 8						
Mon.	Tue.	Wed.	Thu.	Fri.	Sat.	Sun.
 8/27	 8/28	 8/29	 8/30	 8/31		
 8/20	 8/21	 8/22	 8/23	 8/24	 8/25	 8/26
 8/13	 8/14	 8/15	 8/16	 8/17	 8/18	 8/19
 8/6	 8/7	 8/8	 8/9	 8/10	 8/11	 8/12
		 8/1	 8/2	 8/3	 8/4	 8/5

福島県飯舘村のモニタリング



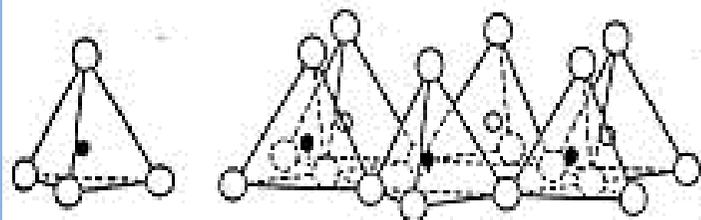
土壌物理学者として

- 土は何でできているのか？
 - 土粒子、水、空気
- 土粒子の分類
 - 大きさで分類される
 - 砂、シルト、粘土
- 粘土の性質
 - 水に沈みにくい
 - 水を含むとドロドロ
 - 乾くとカチカチ

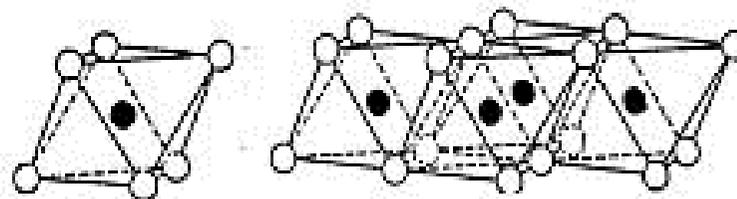


ペットボトルの土粒子沈降実験

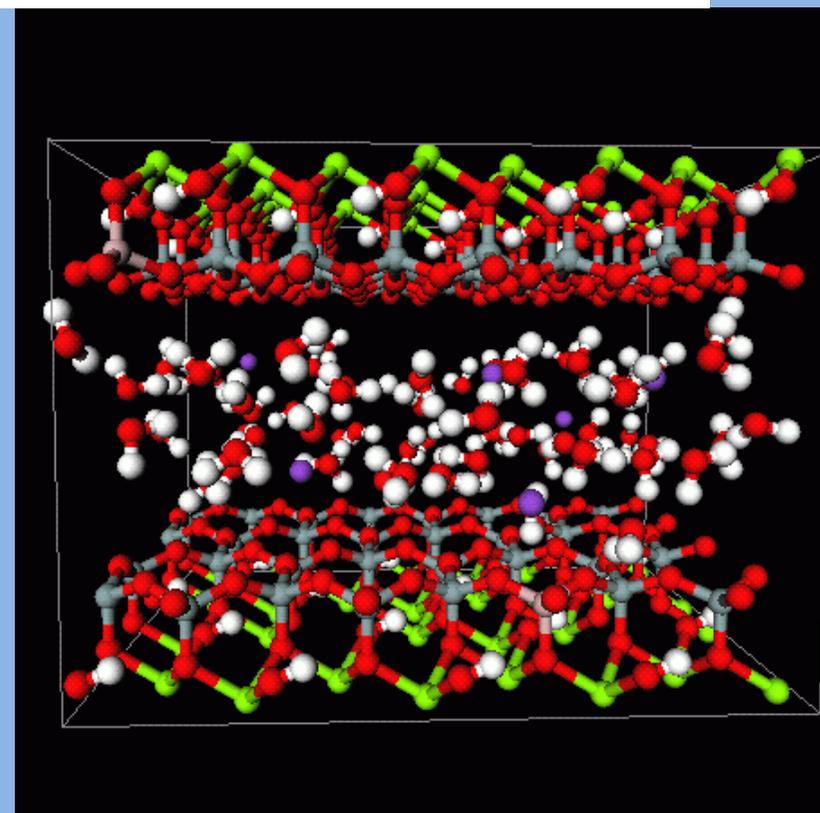
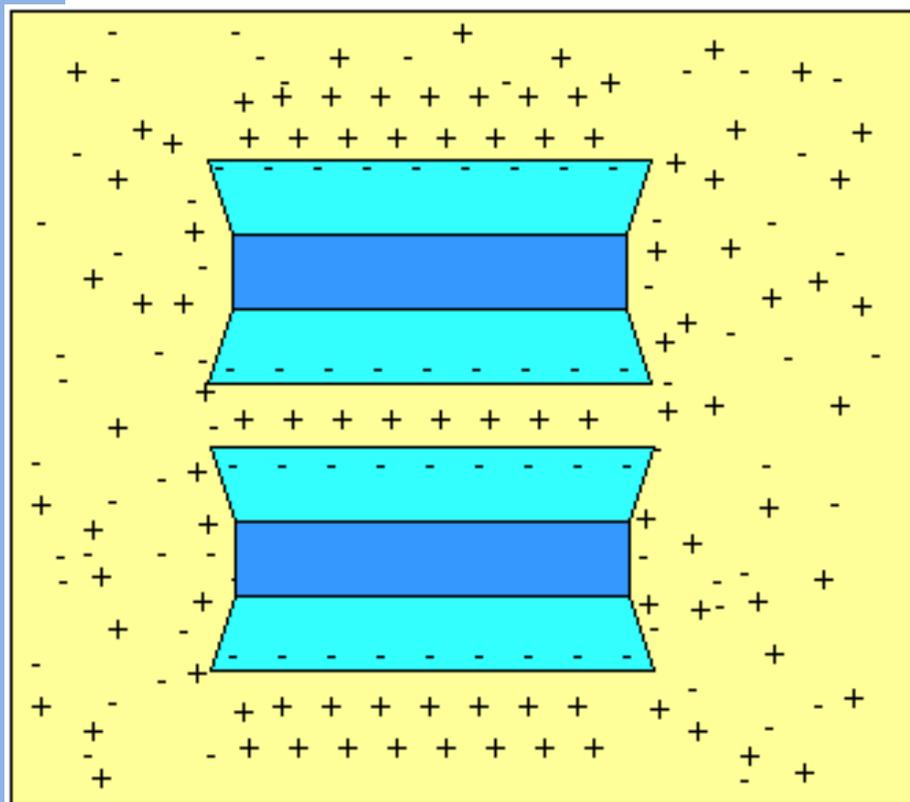
粘土の化学—モンモリロナイト



○酸素原子
●Si 原子



○酸素原子
● M^{n+} : Mg^{2+} , Al^{3+} , etc.



交換性陽イオン

1																	18																																														
1 H 1.0079																	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798																													
3 Li 6.941	4 Be 9.0122																	5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180																	11 Na 22.990	12 Mg 24.305																	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29																																														
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)																																														
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 †	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (291)		118 Uuo (284)																																														

* Lanthanide series

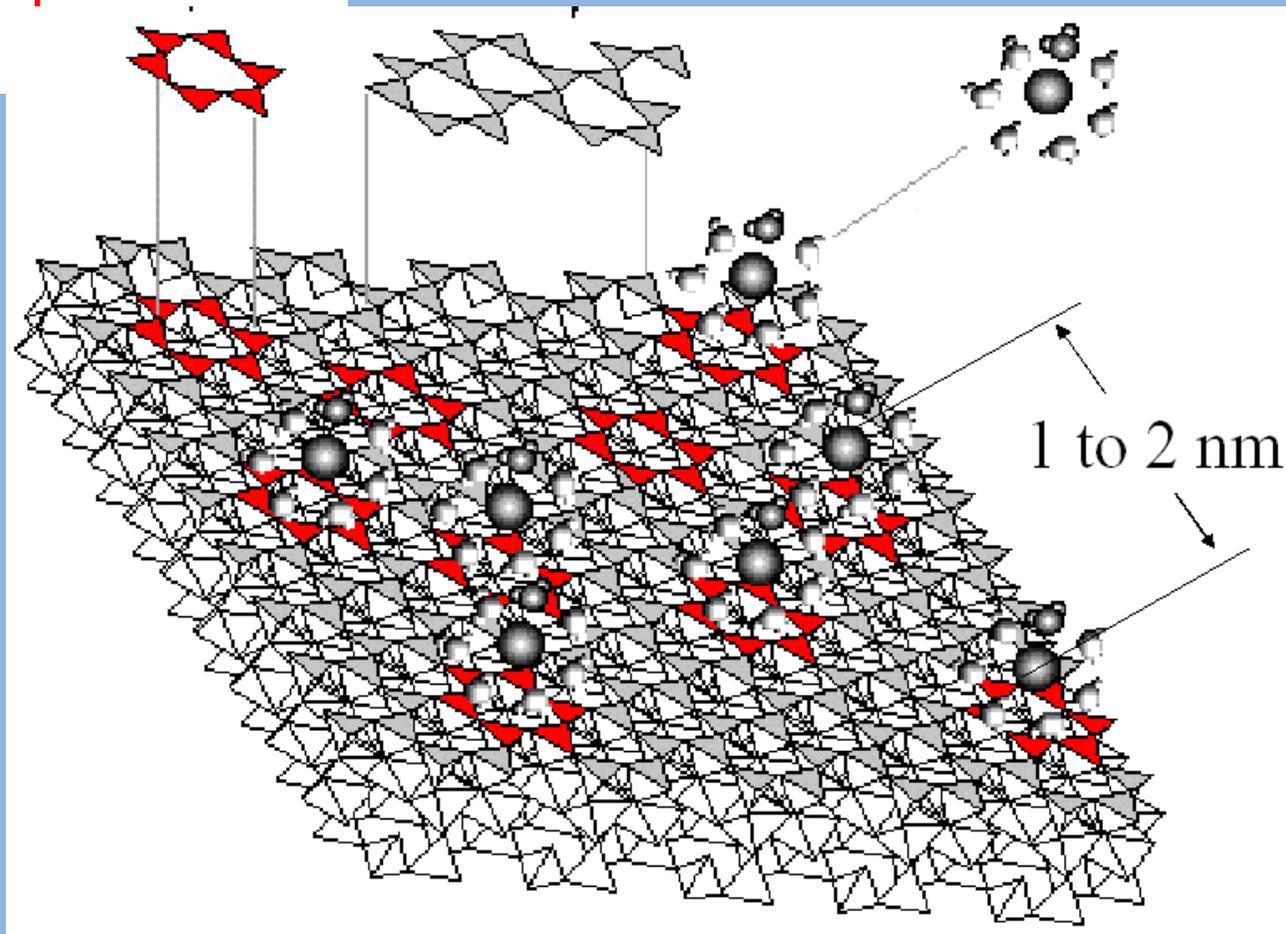
57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

† Actinide series

89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)
-------------------	--------------------	--------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

放射性セシウムは粘土表面の穴に 落ちている！

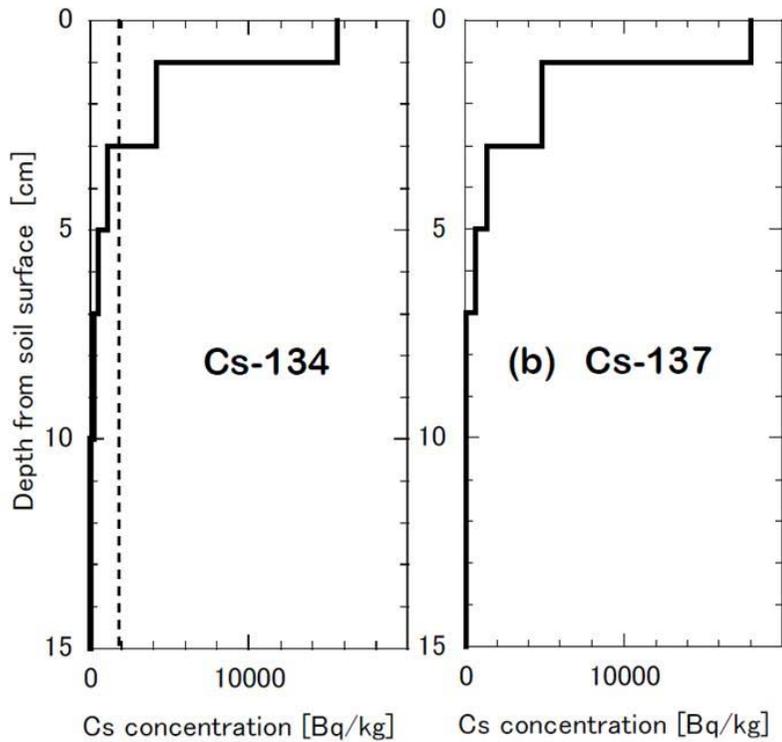
Hydrophilic Sites



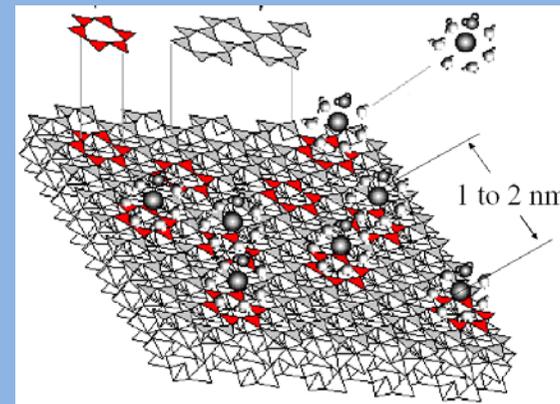
「粘土表面の放射性セシウムの吸着
特性とその挙動」の資料より抜粋

by Prof. C.T Johnston @Purdue Univ.

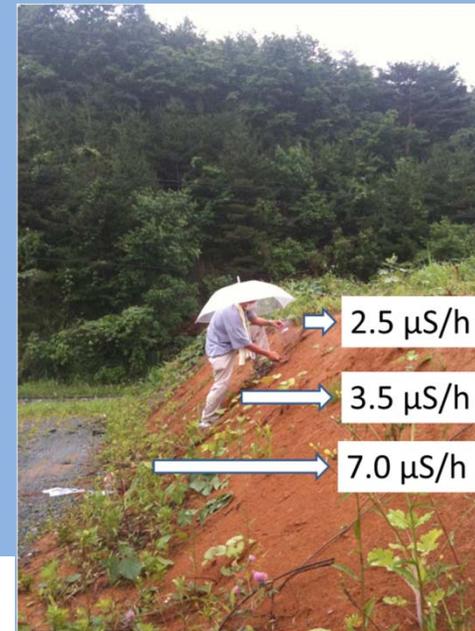
放射性セシウムの基本な考え方



塩沢ら: 福島県の水田土壌における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度, RADIOISOTOPES誌, 8月号, 2011



by Prof. C.T Johnston @Purdue Univ.



卵パックモデル(溝口,2014)

放射性セシウムはカリウムと入替わって土壌中の粘土粒子に固定され続けている



除染法のポイント

- 粘土粒子と一体化して考える
- 粘土の移動に注意する
- 粘土の除去を考える

飯舘村役場横の斜面の放射線量測定 (2011.6.25;溝口・登尾)



2.5 $\mu\text{Sv/h}$

3.5 $\mu\text{Sv/h}$

7.0 $\mu\text{Sv/h}$

道路わきの値が高い(2011.6.25;溝口・登尾)



農地の除染法

農林水産省

農地除染対策の技術書概要 【調査・設計編、施工編】

平成24年8月



表土削り取り



水による土壌攪拌・除去



反転耕

①表土削り取り後の汚染土 行先はどこ？ 汚染土の入ったフレコンバック



飯舘村草野地区 (2012年6月24日)



飯舘村菅谷地区 (2013年8月17日)

中山間地の水田除染をどうするのか？



雑草の処理
(2013年8月3日)



サルの害



イノシシの害
(2012年4月14日)

行政・公的機関の限界

- 公共工事
- 膨大な手続き
- 住民感情
- 意見調整
- その他諸々

NPO活動
できるところから動く

農家自身でできる 農地除染法の開発

飯舘村小宮地区での田植え風景
2013.5.26



飯舘村小宮地区での稲刈風景
2013.10.6



板状で剥ぎ取られた凍土(2012年1月8日)

あれっ、先生じゃないですか！



[動画](#)

地表面からの放射線量(コリメータ付)が1.28 μ Sv/hから0.16 μ Sv/hに低下

凍る水田 除染一気

福島・飯舘

河北新報
(2012.1.17)

東京新聞
(2012.1.19)

菅野さんは「机上の発想と違い、村の実情に合わせて莫大（ぼくだい）な金も掛からない方法だ、

都市と地方の
認識のずれ

住民と研究者グループ実験

福島県飯舘村佐須地区で「掃村」に向けた山林除染などの活動に取り組む住民と研究者のグループが14日、セシウムを含む水田の表土を凍ったままはがし、埋める実験を行った。土中のセシウムの90％は地表5センチ以内にあるとされ、「冬の寒さを生かして、一気に水田除染を行える合理的な方法」とグループは話している。

削除

閉じて覆土をする。マッから、一石二鳥の効果があるという。トは土から地中への水の浸透を防ぎ、また内部にセシウムをよよく吸収する水溶液を入れたアンブルペントナイトという土の層を挟んであることか

このグループは、伊達市内に避難中の農業菅野宗夫さん(60)＝村農業委員会議長＝と、東京、つくは市などの研究者、医師らの「ふくしま再生の会」(150人)。

土壌学の専門家、溝口勝東京大大学院農学生命科学研究科教授が実験を提案。冬は表土が凍る高冷地の村の環境と、セシウムの性質に着目した。実験では、菅野さんの自宅近くの田んぼを使い、深さ5～10センチまで凍った土をパワーショベルではがし、田の端に掘った同1・3メートルの穴に埋めた。

はがされた土は、長さ40センチほどの大ききの固まりになり、セシウムを封じ込めたまま埋めこむことな

く処理できる。仮置き場とする穴には、タムの水漏れ防止工事などに用いられる特殊なマットを敷き、土を密

寒さを生かした「表土はぎ取り式」

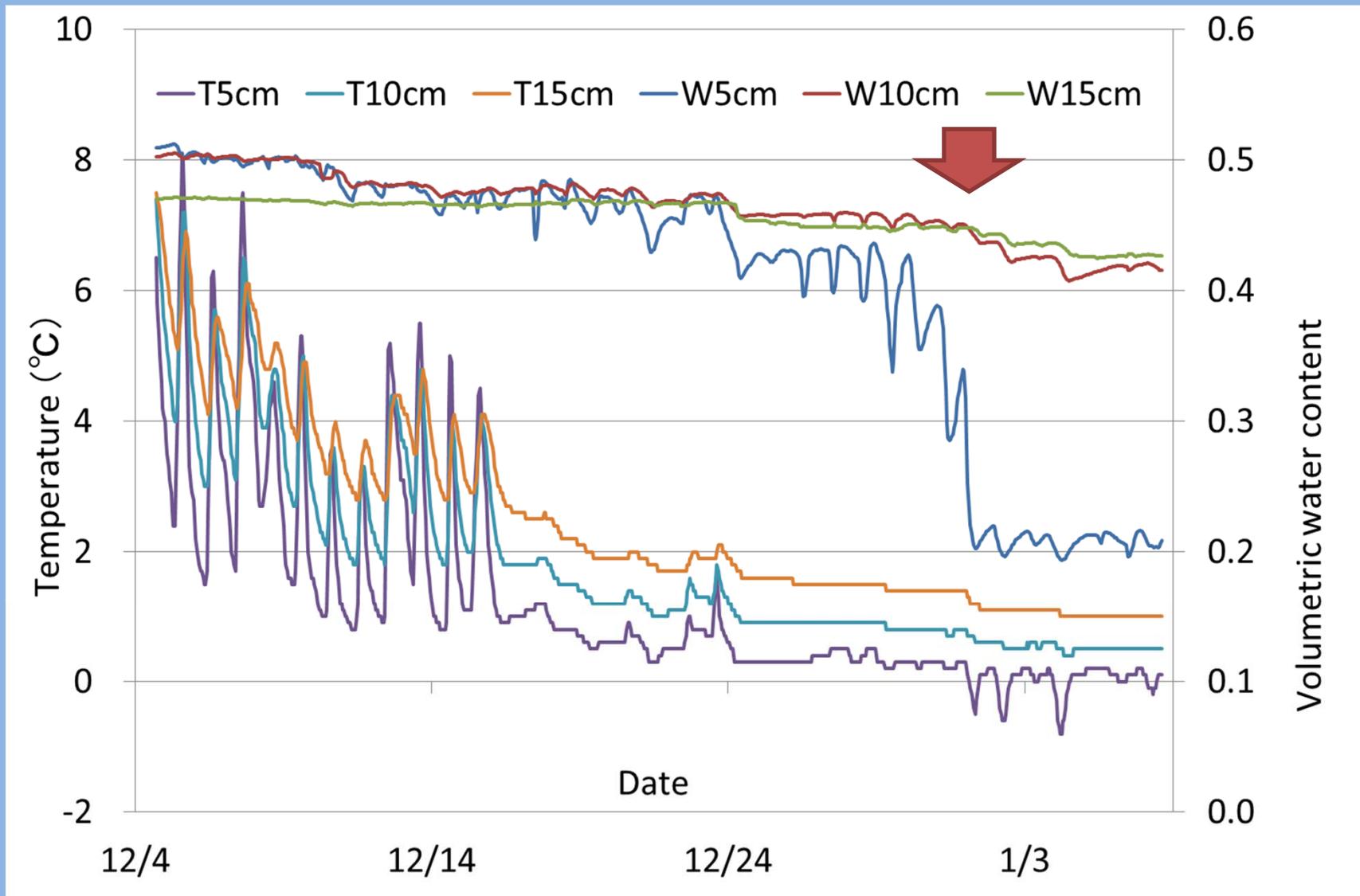
処理も効率的に



田んぼの凍った土をはぎ取って埋める溝口教授らの実験

＝福島県飯舘村佐須地区

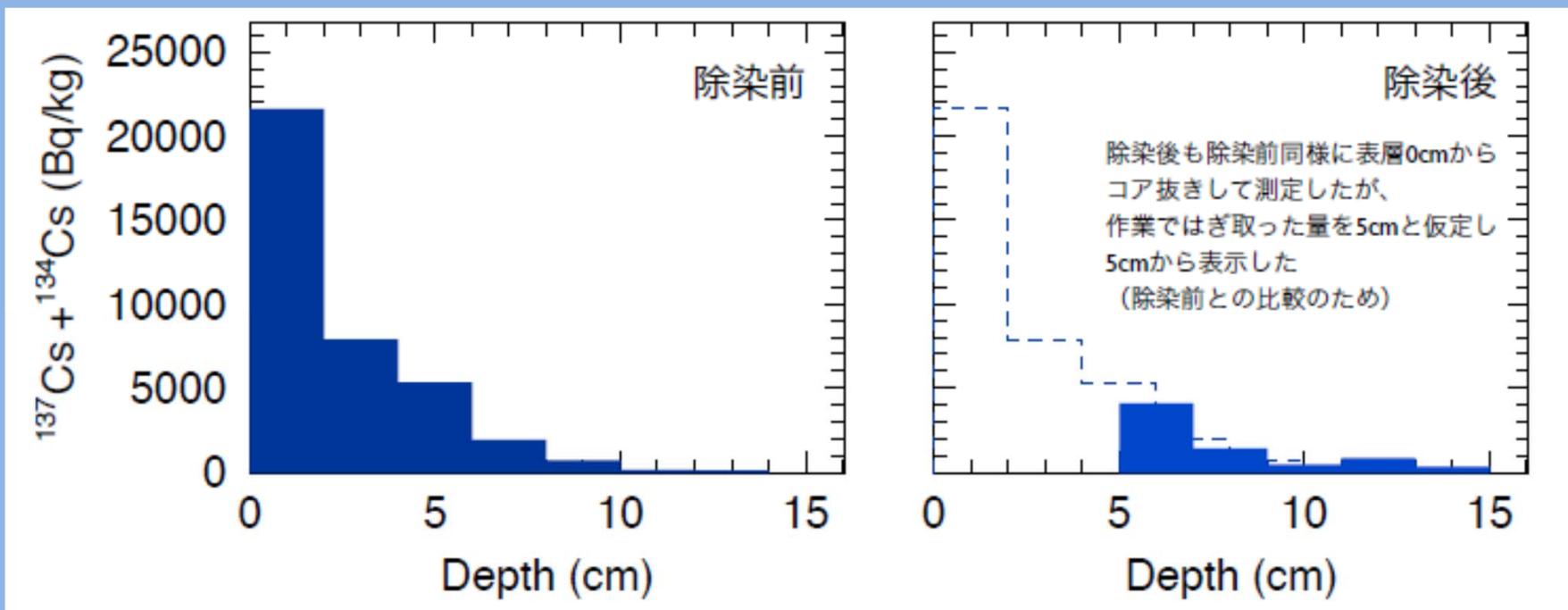
実験水田の地温と土壌水分



田車による除染実験 (2012年4月)



田車代かき掃出し法の効果



までい工法

- 農水省が推奨する除染工法
 - － ①表土剥ぎ取り、②代かき、③反転耕



- までい工法
 - － 農地に穴を掘り、剥ぎ取った汚染表土を埋設
 - － 表土剥ぎ取りと反転耕の組み合わせ工法
 - － 反転耕より丁寧に上下の土を入れ替える

「までい(真手い)」=飯舘村の方言で「手間ひまを惜しまず」、
「丁寧に」、「時間をかけて」、「心を込めて」という意味

泥水強制排水法 (小宮, 2013.5.18)

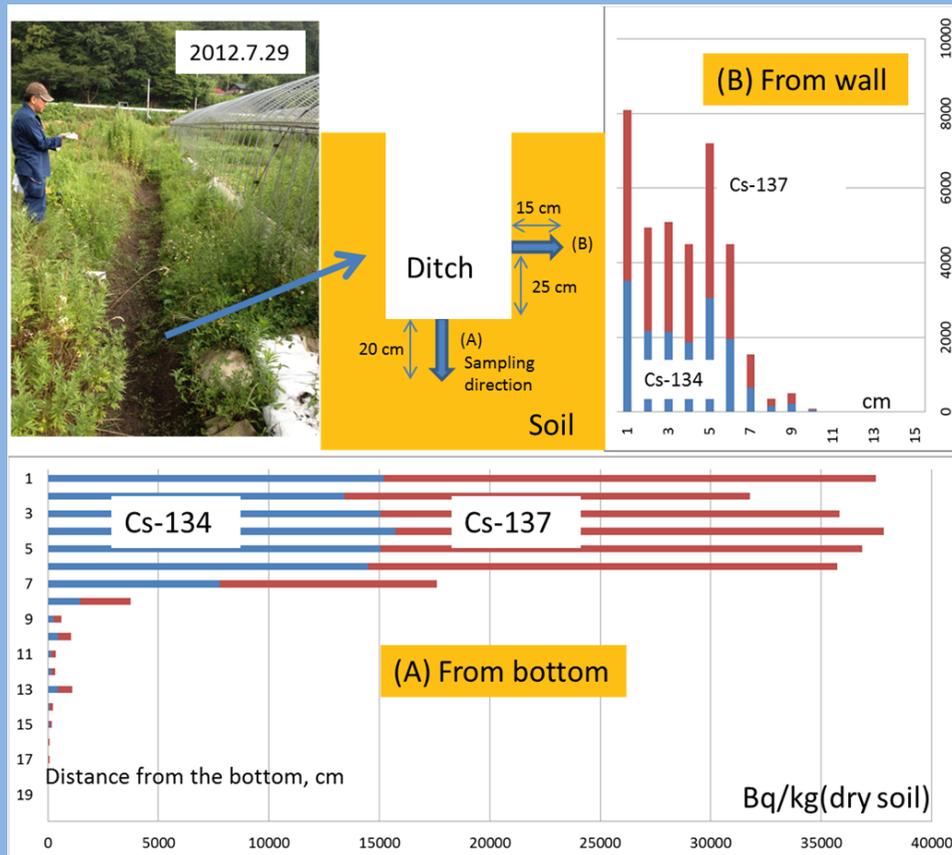


(動画)
土壤採集
正面(その1)、正面(その2)
側面



定点カメラ画像(2013.7.6)

除染土壌の処理実験



洗い流した泥水を溝に蓄積しておき、干上がった後に溝の底と側面の土壌をサンプリングして深度別に放射能測定した結果。

セシウムは土の中に浸みこまない。

土の濾過機能



泥水は砂の層を通るだけで透明になって出てくる。放射性セシウムのほとんどは粘土粒子に強く吸着(固定)されているので、セシウムだけが水中に溶け出すことはない。

農地の下の土はこの実験の砂の層よりも厚い上に、砂よりも細かい粒子で構成されていることが多いので、放射性セシウムを固定した粘土はそれらの粒子の間に次々に捕捉される。

までい工法(実践)



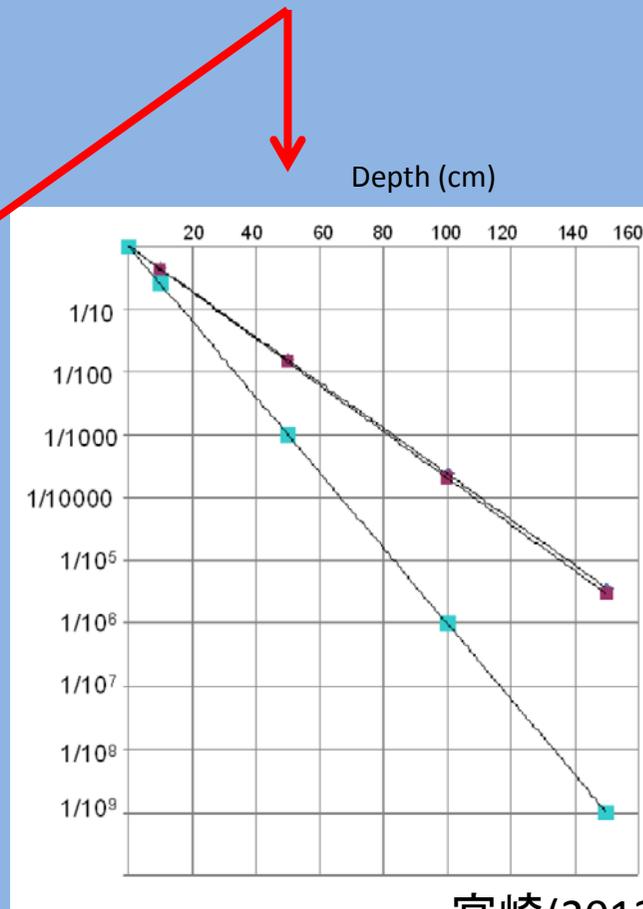
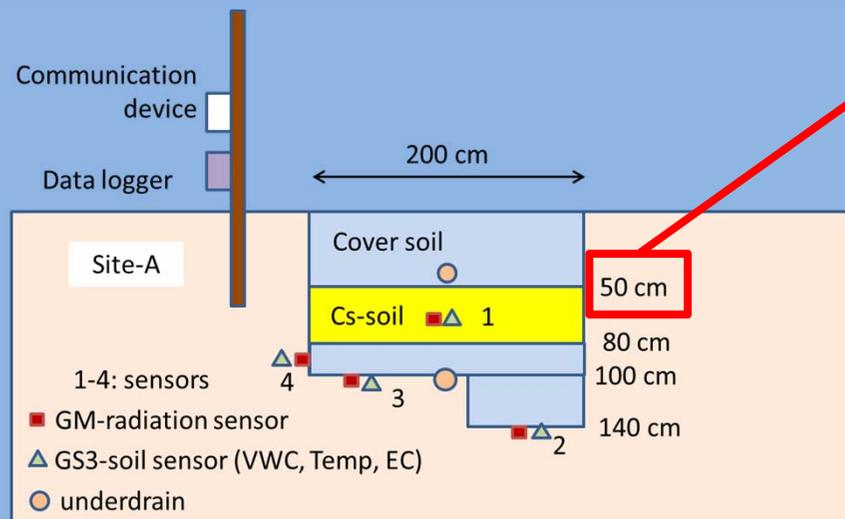
汚染土の埋設

よいとまけ(土の締固め)

2012.12.1

汚染土は素掘りの穴に埋めれば良い

50cmの深さに埋めれば放射線量は1/100 ~ 1/1000 になる



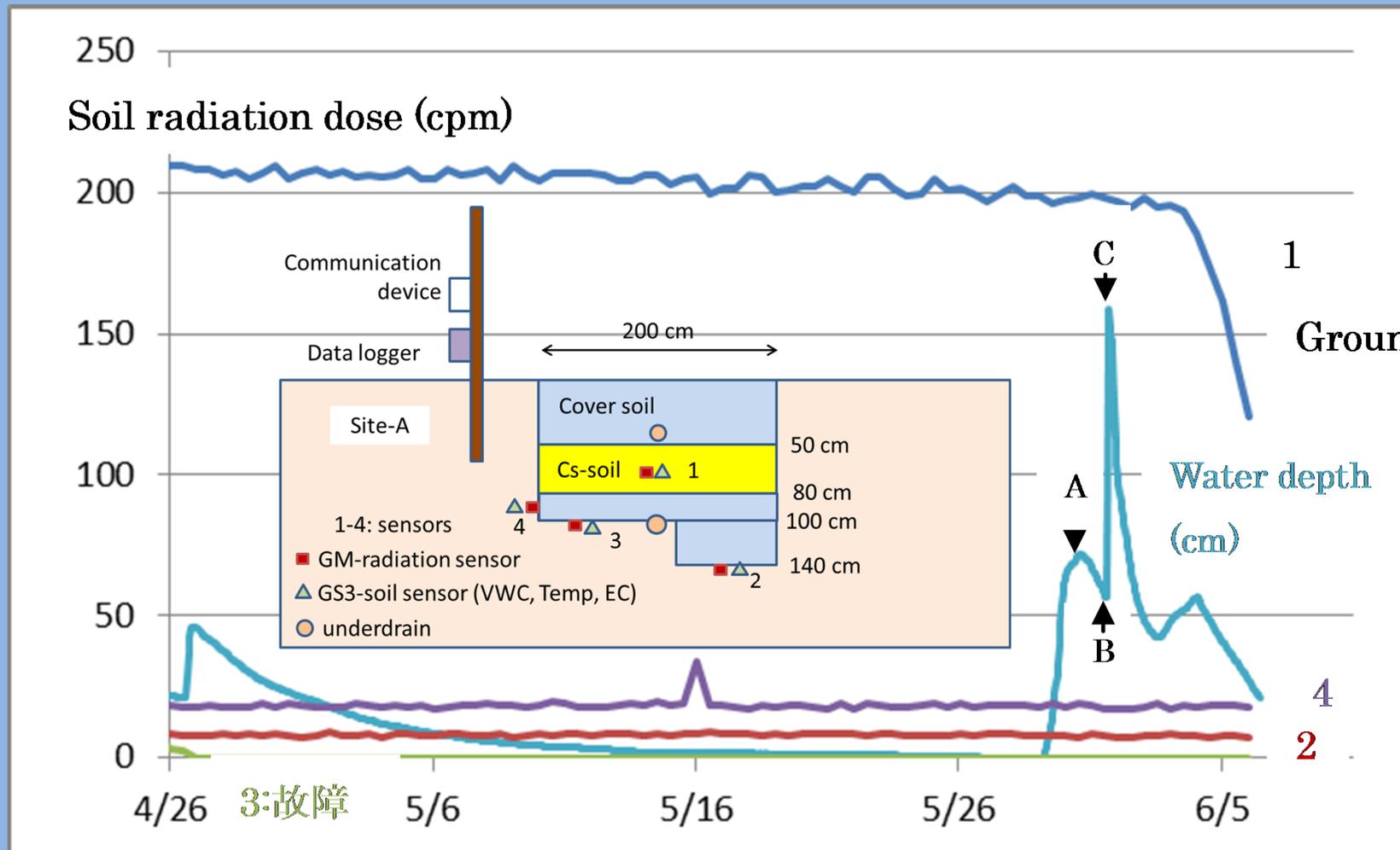
宮崎(2012)より引用

監視用センサの埋設

- 監視（観測）項目
 - － 土壌（センサ）
 - － 地下水位（観測井）
 - － 現地気象
 - － 現地画像
- 遠隔モニタリング
 - － データをサーバに毎日転送
 - － インターネット上に公開



土壤放射線と地下水位の変化



水田湛水に伴う観測井戸水位(cm)と土壤放射線量(cpm)の変化

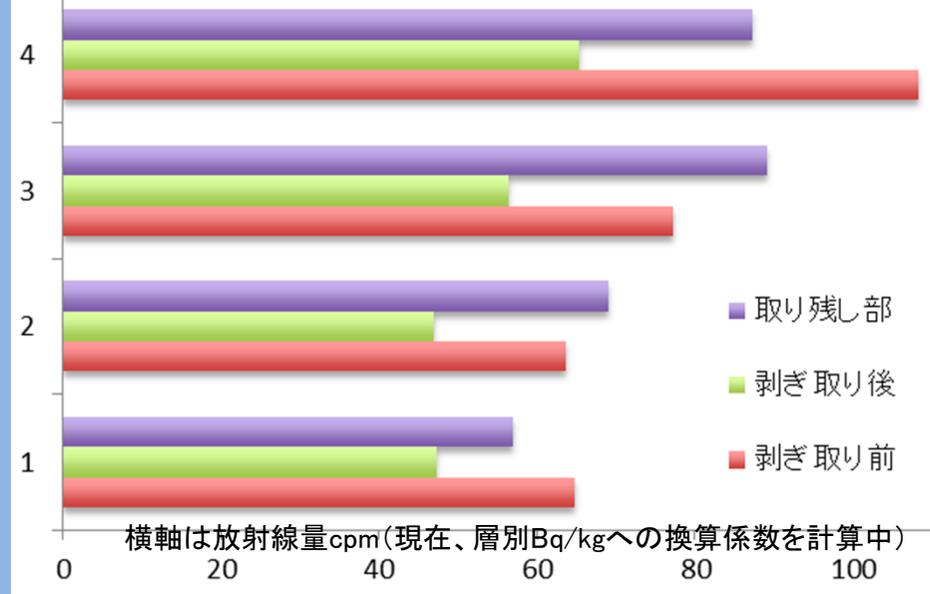
土壤放射能鉛直分布測定器 (開発中)



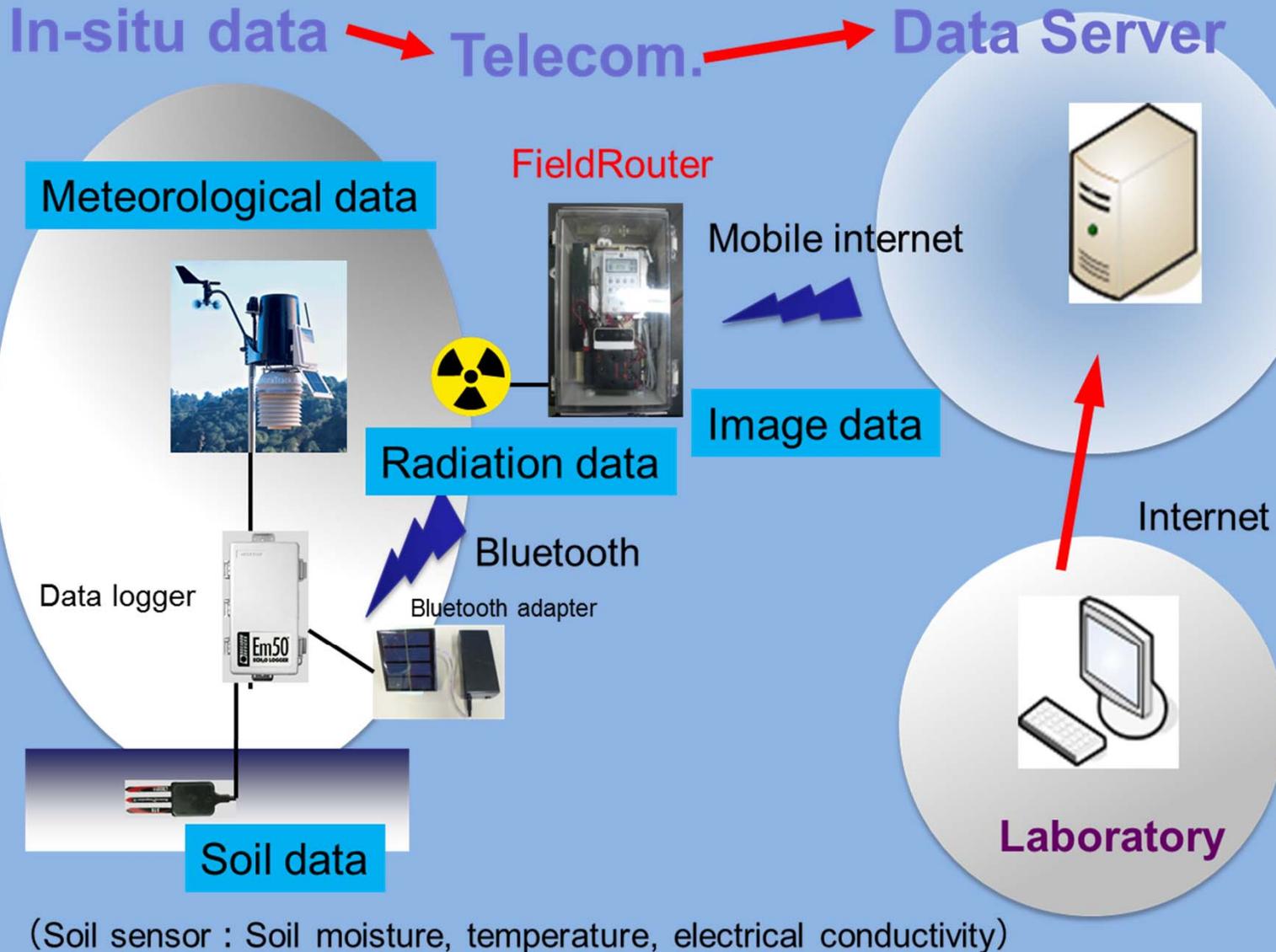
土壤中の放射線量を測定

- 4深度 (GM管を鉛板で挟む)
 - 1F:7-8cm, 2F:5-6cm
 - 3F:3-4cm, 4F:1-2cm
- 測定所要時間
 - 3分

飯館村内某所での測定例(2014.5.11)



The FMS with a radiation sensor



飯舘村の環境モニタリング

[Images](#)

[image0]2014/05/19 12:24 (225.0K) [calendar](#) / [movie](#)

画像カレンダー表示

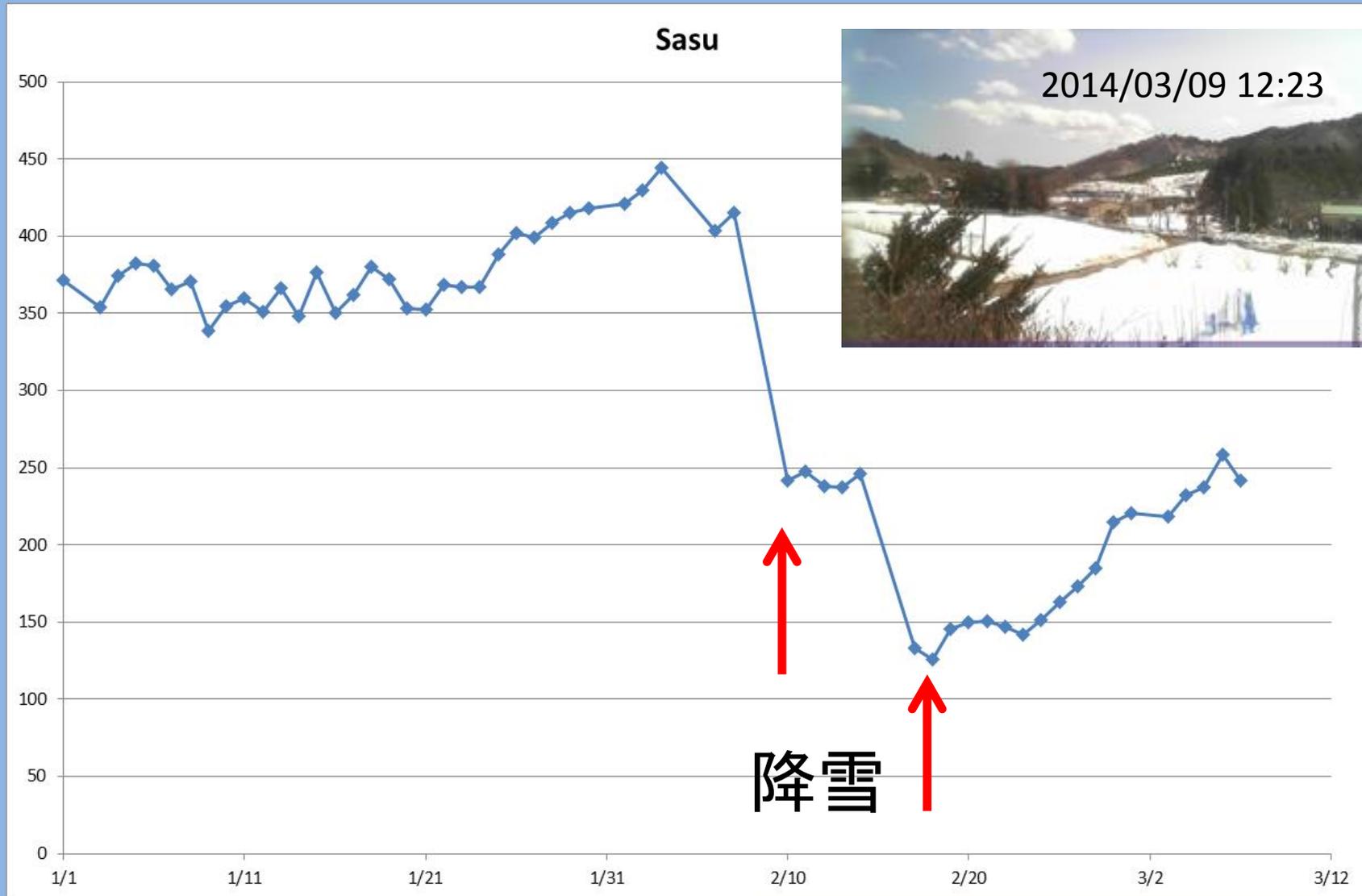
気象グラフ表示

放射線量グラフ表示

[Data](#)

EM14736	2014/05/16 12:23 battery:82 logger time:2002-10-20 1:32:50 +36	CSV	2014	merge	Raw (543.9K)
FriskCounter	2014/05/19 12:33 battery: logger time:2014-05-19 03:13	CSV			Raw (0.4K)
SimpleCounter	2012/09/17 12:18 battery: logger time:2012-09-17 12:12	CSV			Raw (0.2K)

雪による空間線量の低下



群盲評象

個々の知見を繋いで象を動かせるのか？



<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/Blind.JPG>