

静電容量式地盤変状センサ

徳島大学大学院STS研究部

上野 勝利

共同研究者

金沢大学 高原利幸

研究協力者(徳大博士前期生、4年生)

2010年度 小川洋平、石川恭平、杉山栄典、須藤孝彦

2011年度 野々垣遥弥、古南綾大

2012年度 松井雄揮、石川翔太

自己紹介

- 氏名 上野 勝利 (うえの かつとし)
- 所属 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
エコシステムデザイン部門
社会基盤システム工学大講座
- 研究室 地盤工学研究室
- 職位 准教授
- 学位 博士(工学)(東京工業大学)
- 出身 北海道大学工学部土木工学科
同大学院修士課程土木工学専攻
- 連絡先 ueno@ce.tokushima-u.ac.jp
Tel 088-656-7342

静電容量式地盤変状センサ

研究代表者 徳島大学大学院 上野勝利

研究目的

長大な土構造物(盛土、堤防、護岸等)や自然斜面にセンサを埋設し、浸水などの劣化要因に早期に対処することにより、**維持管理費の低減**と、**地盤災害を未然に防ぐこと**を最終的な目的としている。

特徴

地盤計測用静電容量計を開発し、センサとして活用
☆ 高精度(3fF)・広レンジ(32bit)
☆ 浮遊容量キャンセル
☆ センサ設計の自由度が高く、安価

研究内容

室内実験による空洞化再現実験
現場計測

(河川堤防水分変化、平地の地下水位計測)

研究の動機

水浸・排水繰返しによる空洞形成と陥没

常時モニタリング
できないだろうか。

老朽化+震災=
更なる顕在化

平成19年には
4,700箇所



平成23年利根川右岸の樋門と堤防

平成15年墨田区路面下
空洞陥没(H19 国交省資料)

蛇かご工と
壁の間の空洞

平成23年古牟岐海岸



水位、浸水や空洞発生を検出するセンサが必要

対象

道路、堤防、護岸、斜面、盛土、宅地など

特徴

長延長、広範囲

相反する要求

高精度

安価

埋殺し、
多点計測

高感度
高分解能

広レンジ

点から線へ

水に高感度

ϵ_r 比誘電率
空気 1
土粒子 約3
水 約80

静電容量cに着目

$$c = \epsilon_r \epsilon_0 f(l, d)$$

10cm、1m、10m、100m、、、
電極長さ

測定レンジの
上限を撤廃

電極間隔: 検知範囲と分解能

アナログ式静電容量計の問題

分解能とレンジの制約
不安定
浮遊容量の影響
扱いが難しく高価

マイコン式を開発し解決

3~4fF分解能 32bitレンジ上限なし
24日間で変動120fF程度
浮遊容量キャンセル
扱いが容易で安価

解決すべき課題

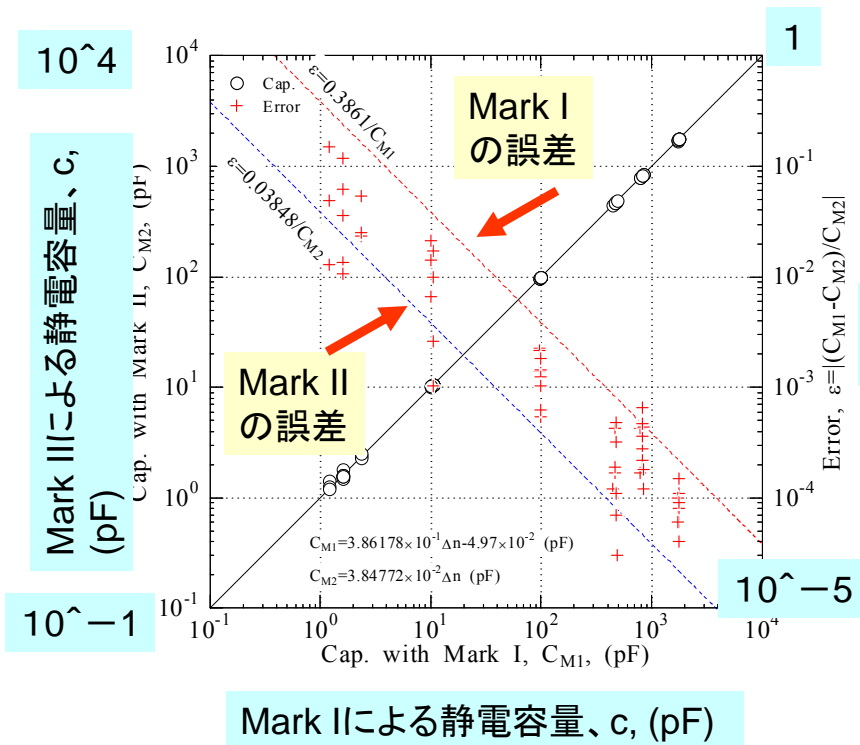
• 実用的な測定を実現するためには、次の問題を解決する必要がある。

- 1 理論上ダイナミックレンジに上限がなく、十分に精細な分解能を持つこと。
- 2 浮遊容量の影響を受けず、微小な静電容量変化を正確に計測できること。
- 3 温度変化などの影響を受けにくく、長期安定していること。あるいは変動をキャンセルできること。

浮遊容量: センサ接続ケーブルや、センサのシールド部などが持つ静電容量

課題1 ダイナミックレンジと分解能 センスアンプの精度検証

ディップマイカコンデンサあるいはCH級積層セラミックコンデンサを使用
感度向上した同型センスアンプによる検定



Mark I 分解能約40fF

Mark II 分解能約4fF

$f=10$ の -15 乗
 $p=10$ の -12 乗

測定範囲は1000pF以上
まだまだいけます。

誤差

広レンジ、高精度、
高分解能の静電容量計
ができた。

4 f F 32 bit

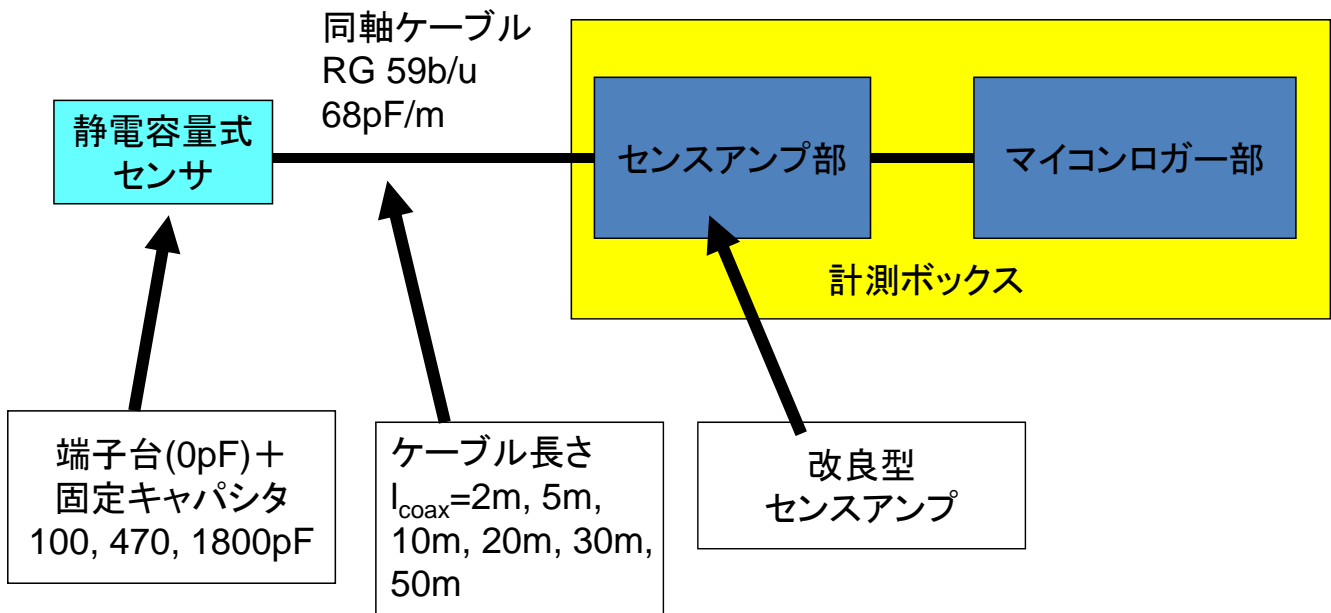
課題2 浮遊容量のキャンセル



センサ接続ケーブルや、センサの
シールド部などが持つ静電容量

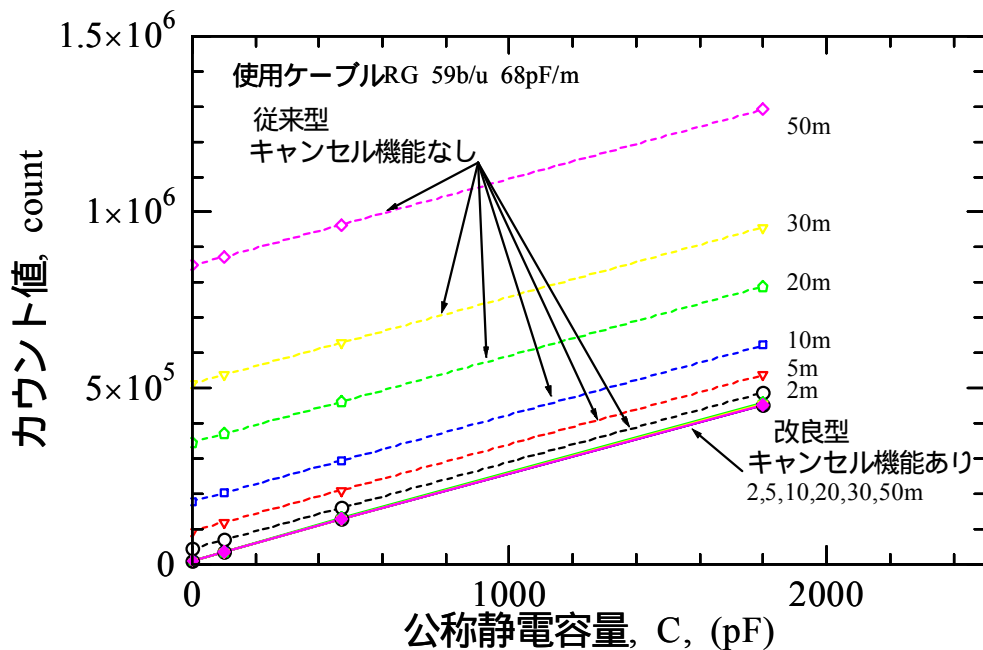
- 方法1 高分解能、広レンジ、高線形化
により、浮遊容量の影響を低減
- 方法2 浮遊容量をアナログ的にキャン
セルするセンスアンプの開発

キャンセル機能の検証手順



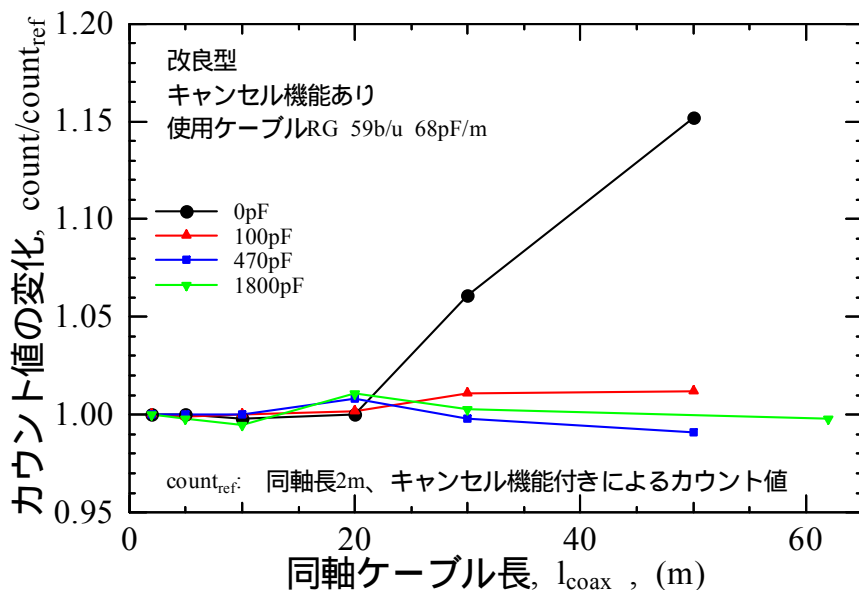
端子台に公称値100, 470, 1800pFの固定キャパシタを取り付け、2m~50mの同軸ケーブルを介してセンスアンプに接続した。そのときのシステムの測定値(カウント値)の変化を、改良型のセンスアンプを用いて実際に測定した。従来型のカウント値は校正係数による計算値であり、参考値として併記した。

キャンセル機能の有無による比較



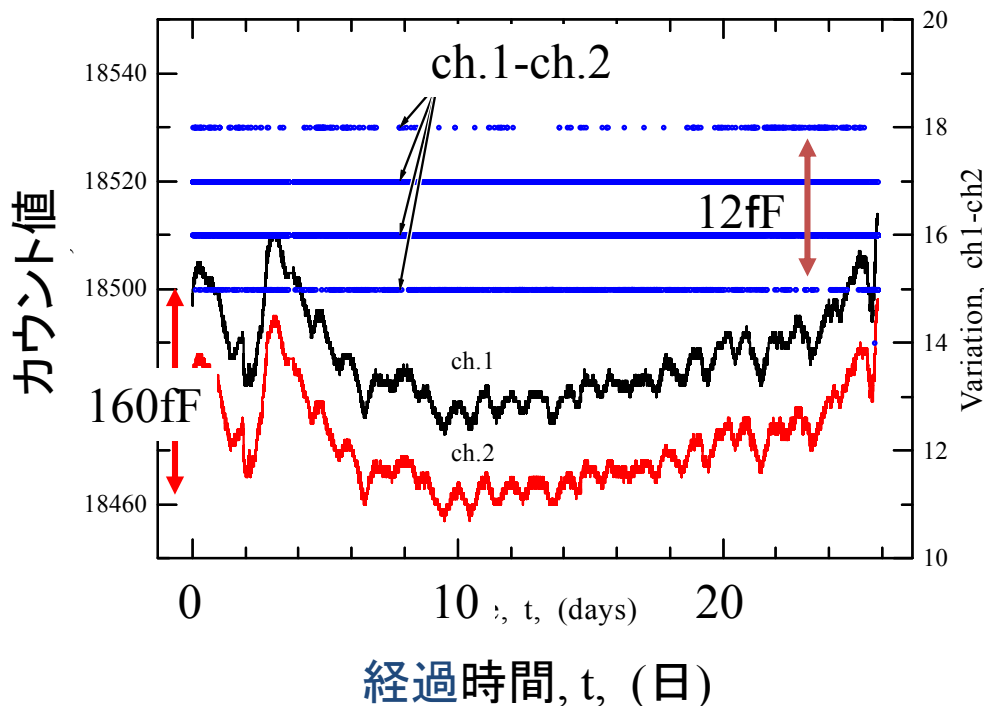
キャンセル機能を有する改良型では、センサ接続に用いた同軸ケーブルの長さによらず、公称静電容量に比例するカウント値が得られている。24個の測定値による回帰分析の結果、重相関係数は0.9998であった。従来型では、ケーブル長に応じてカウント値の上乗せが生じている。

同軸ケーブル長の計測値への影響



同軸ケーブル長によるカウント値の変化を示す。縦軸は、各ケーブル長におけるカウント値を $l_{\text{coax}} 2\text{m}$ のカウント値で正規化したものである。
 同軸ケーブル長20m程度まで、影響は±1%程度に収まっている。測定対象の容量が小さい0pFの結果を除き、50m程度まで影響は小さい。
 本手法により地中にセンサを埋設する際、ケーブルの影響を排除することができる。

課題3 センسアンプの安定度 分解能4fF 32bit

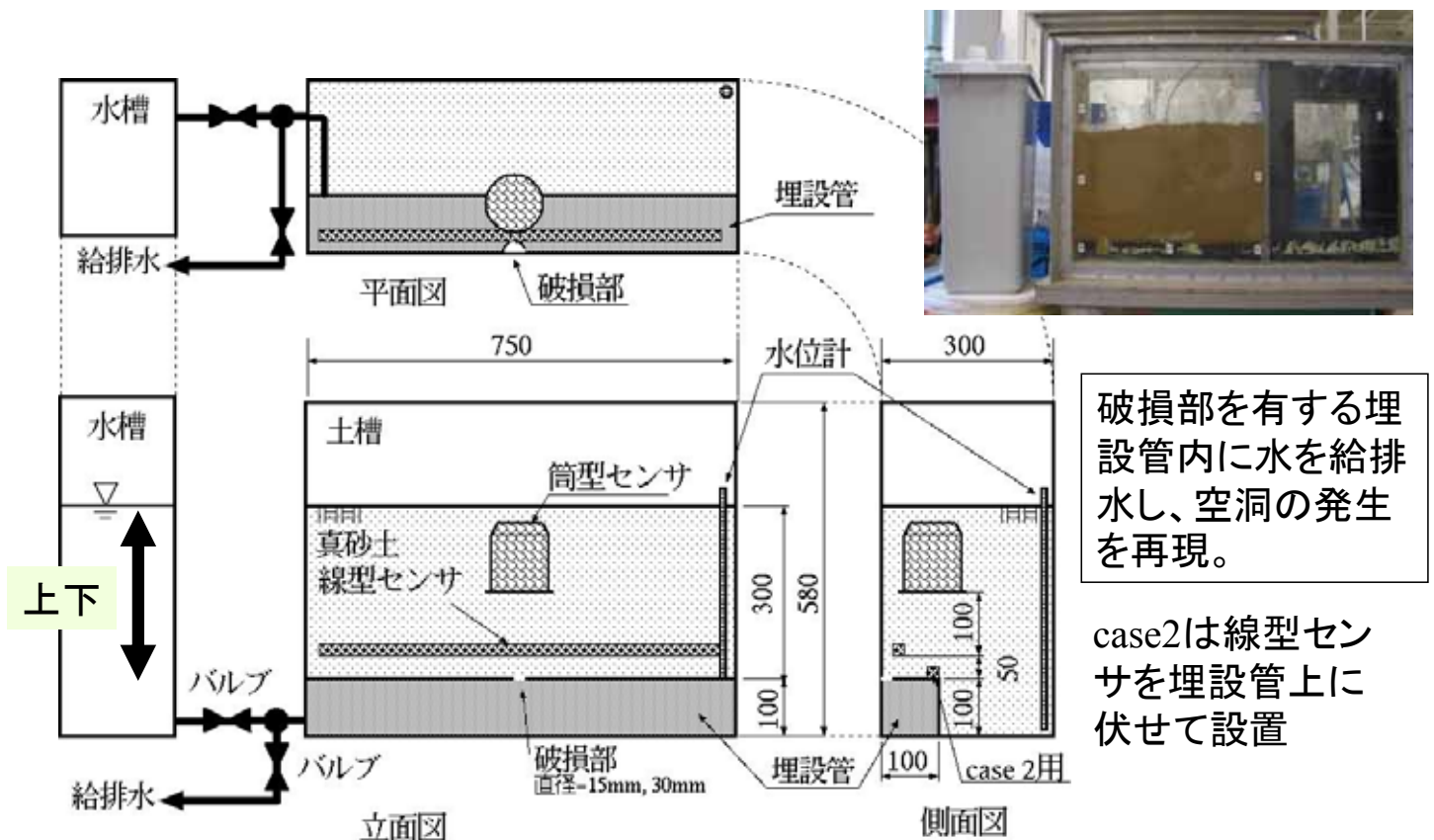


- 約72pFの同軸ケーブルを測定。
- 温度変動は見られるが2ch間の相対誤差は最大12fFと少なく安定していた。

ここまでのまとめ

- 静電容量型センサの測定器として必要な、3つの課題を解決できた。
- 課題1 分解能3fF ダイナミックレンジ32bit
- 課題2 20~50m程度までの同軸の容量をキャンセル
- 課題3 長期安定度は24日間で120fF程度の変化
(測定対象の温度依存性を含む)
CH間変動12fF ->分解能の3倍程度

室内実験による浸水・空洞発生再現



空洞発生実験の結果



空洞の発達過程

CASE 2

1. 空洞の芽が発生
2. 水位の上昇と共に空洞が発達
3. 空洞の上昇
4. 天盤の崩落
5. 浸水と排水を繰り返すとチムニー状の空洞が形成

フィーダ型センサと発生空洞



発生した空洞とフィーダセンサ
(実験終了後、平面)



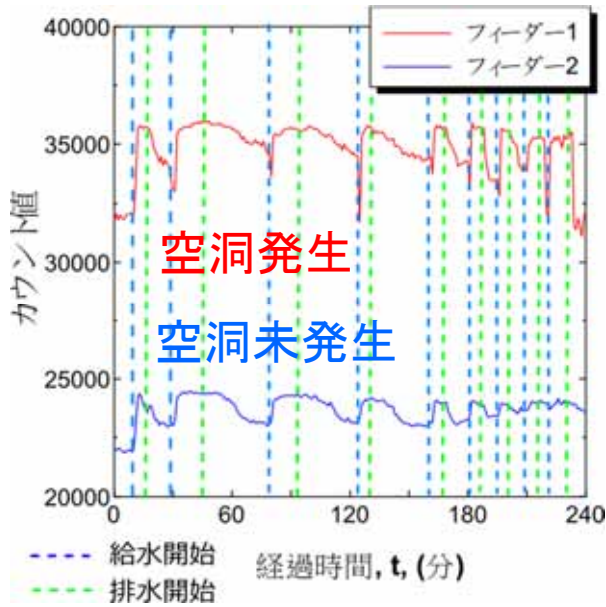
フィーダ型センサ



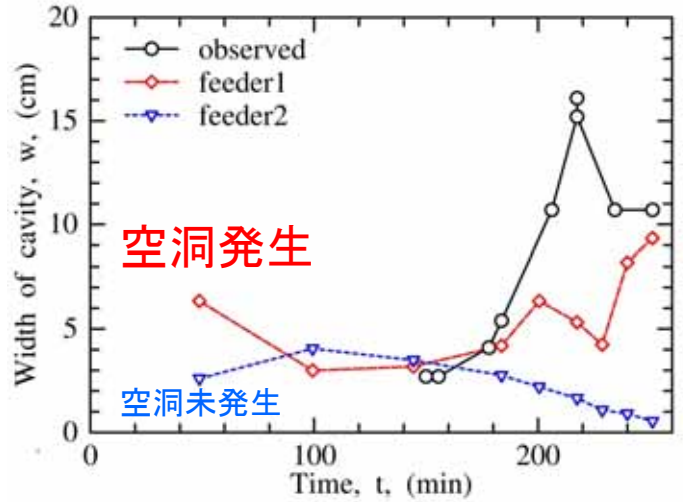
発生した空洞とフィーダーセンサ(正面)

フィーダー線をセンサとして用いた。
地盤内の水道にもならず、締固めも良好に行えた。

実験結果



フィーダー1 空洞発生個所
 フィーダー2 空洞発生せず



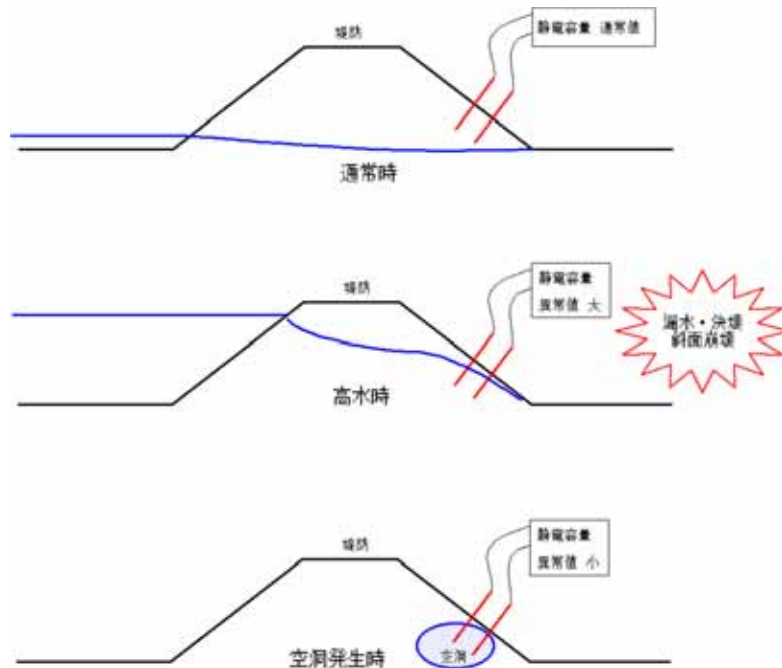
1サイクルのカウント値の変動から、
 空洞幅を推定

空洞幅(cm)=1サイクルでの変動/
 センサを1cm水浸した時の変動

空洞未発生個所では変動が収束し、空洞
 発生個所では変動が増加する。

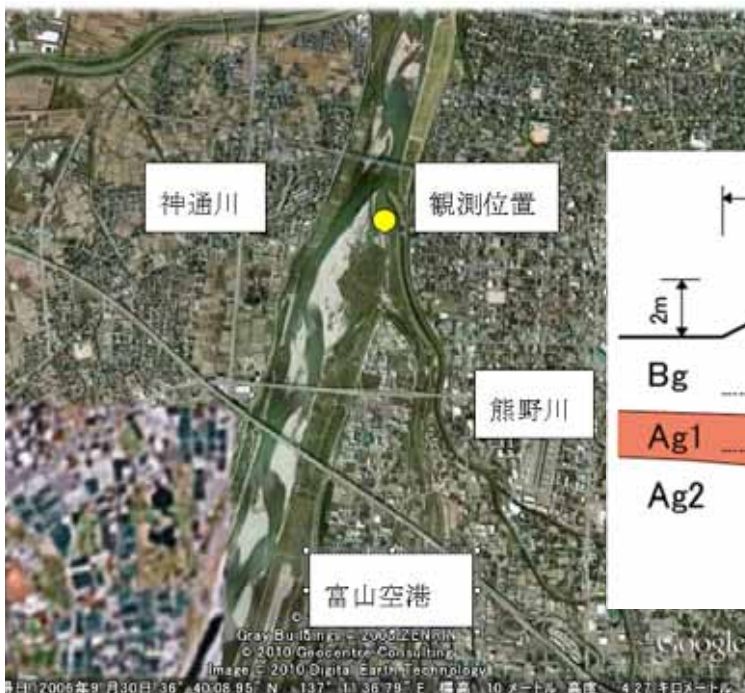
現場計測例

堤防の漏水・空洞モニタリング

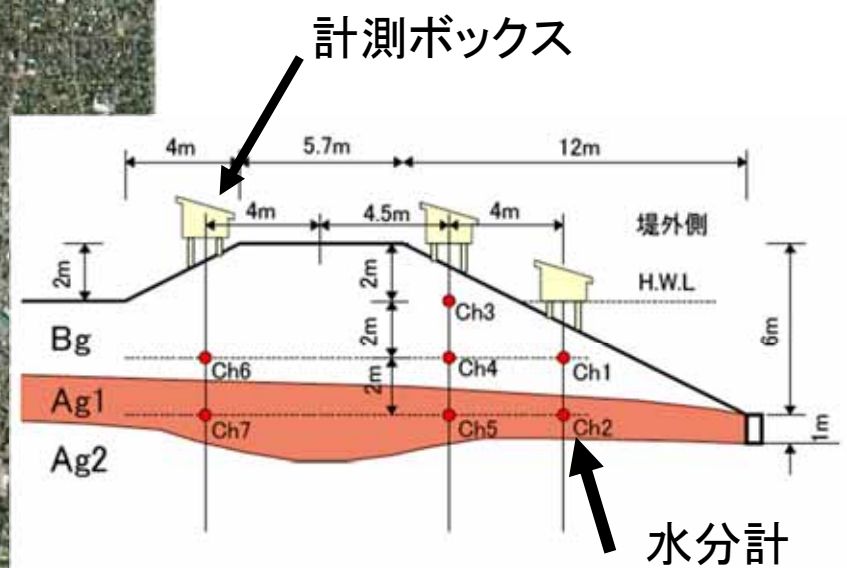


熊野川堤防内水分計測¹⁾

新たなサイトを準備中



計測サイト

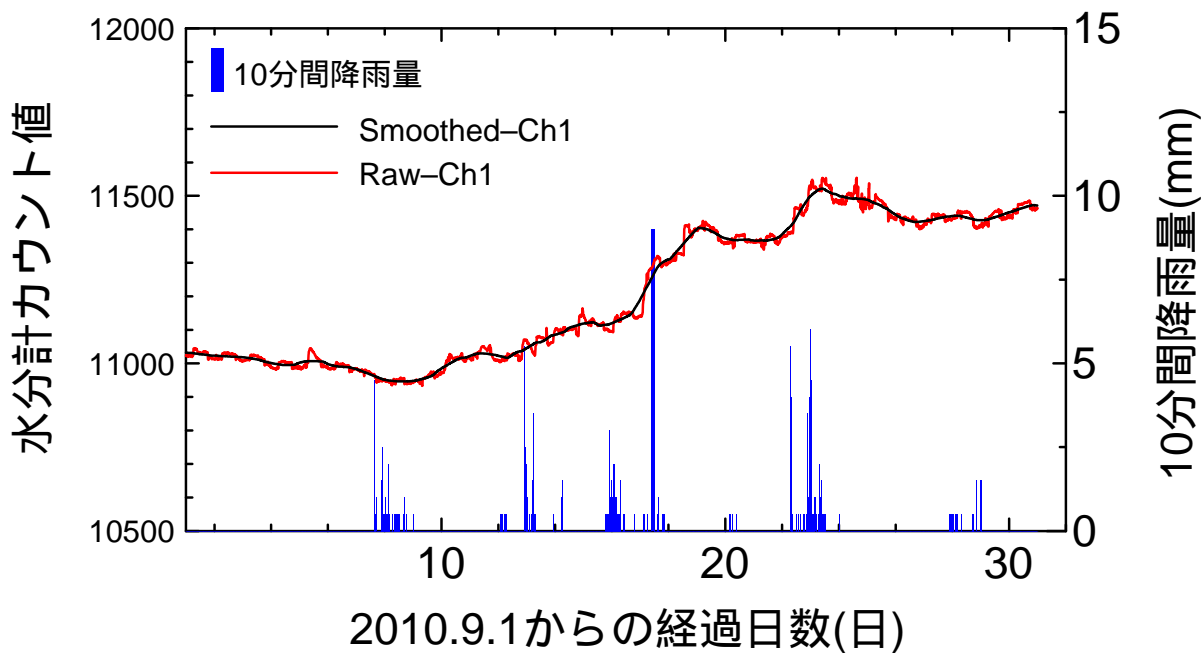


水分計設置箇所

金沢大学高原先生ご提供

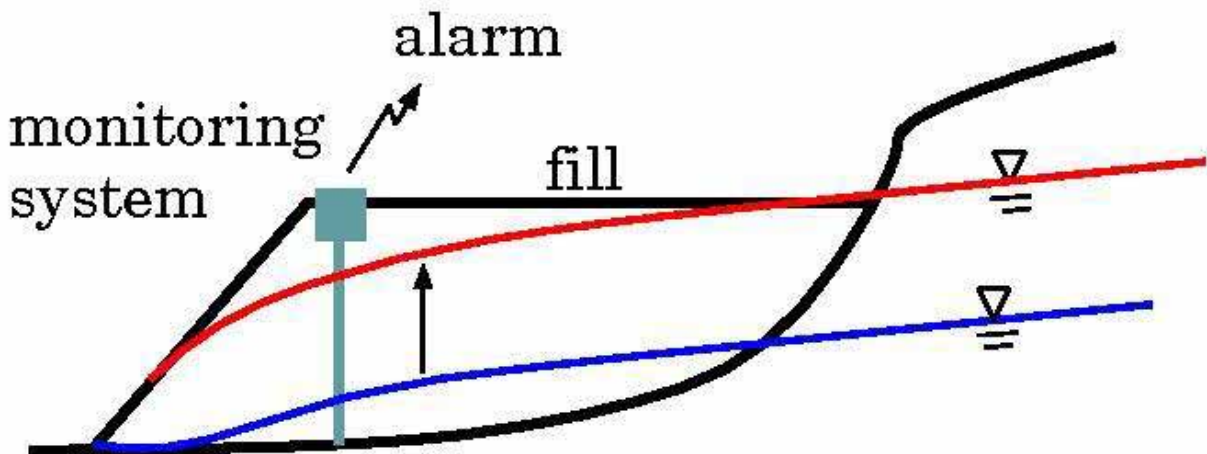
¹⁾高原、上野、杉本(2010);高精度静電容量式水分計による堤体内水分測定と降雨量の関係, 第45回地盤工学研究発表会, pp. 139-140, 2010.8.

堤防の水分変化

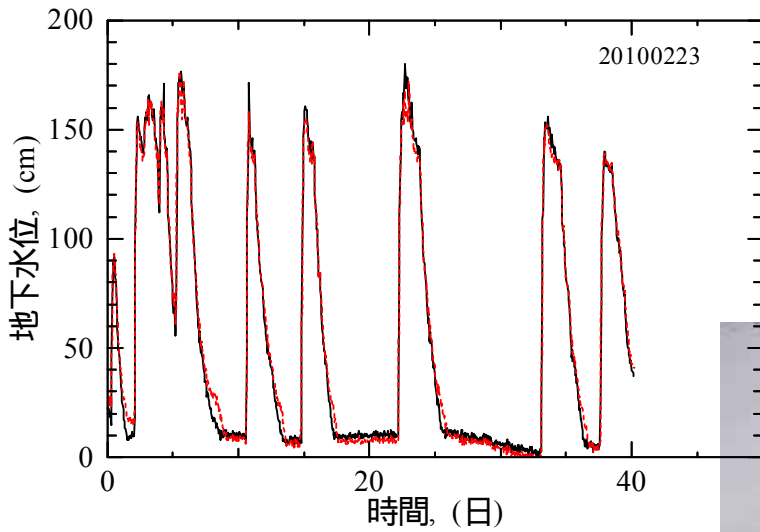


金沢大学高原先生ご提供

盛土のモニタリング



盛土内地下水位計測(3m計)

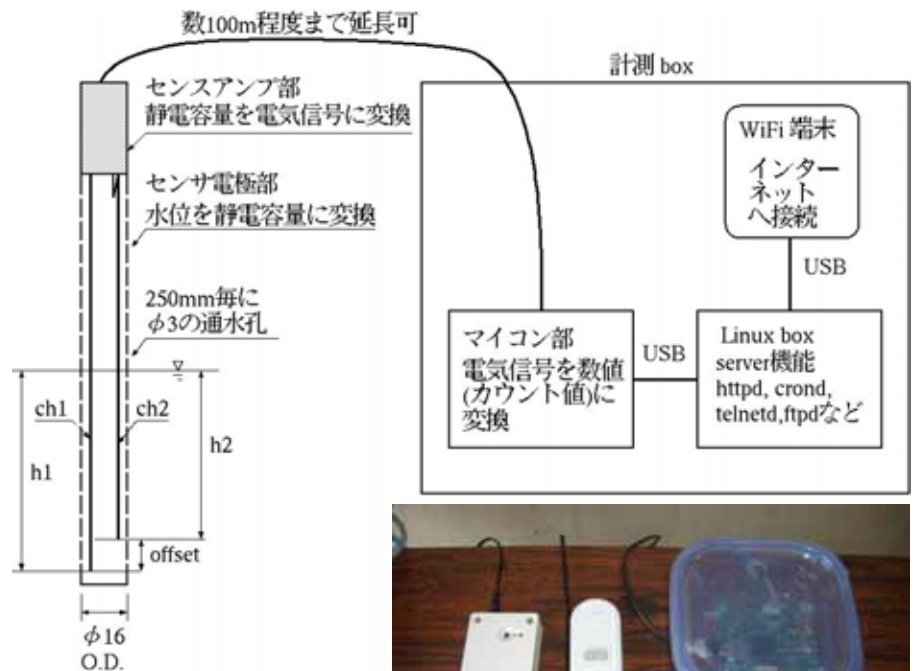


太陽電池とバッテリーによる
スタンドアロン型の計測

ネットワーク対応は次の課題

計測ボックス

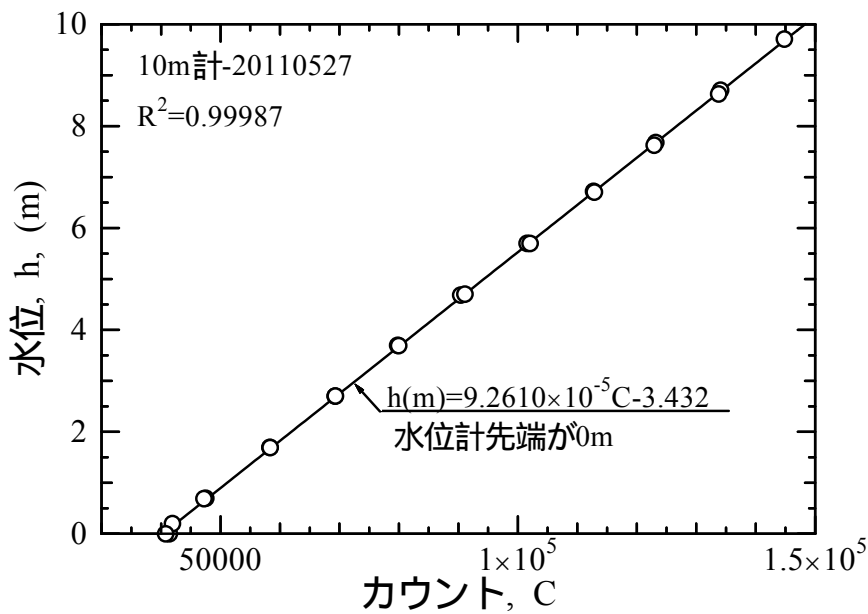
地下水位の常時モニタリング



10m計設置の様子
白いパイプ状のものが水位計電極。
外径16mm、フレキシブルなので、
簡易サウンディング孔などへ設置可。



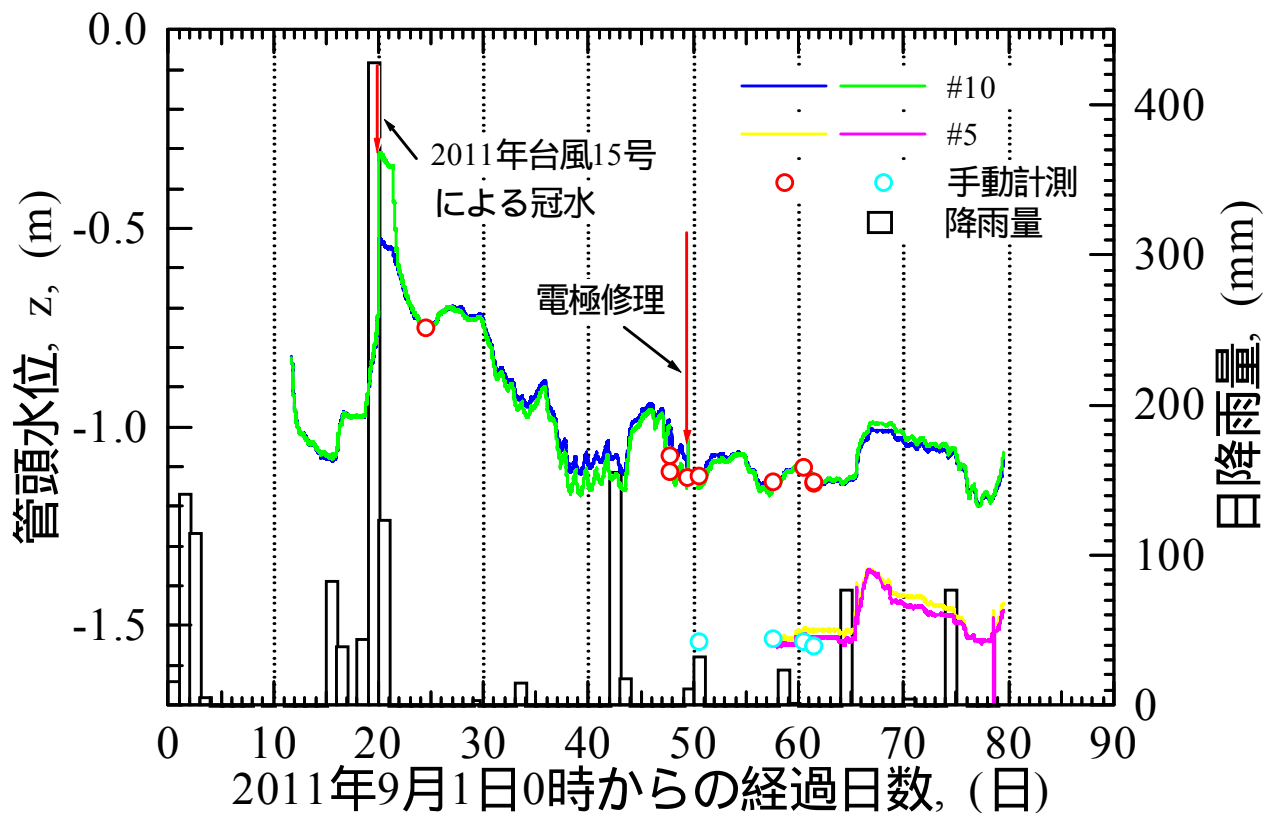
静電容量式地下水位計(10m計)



検定結果
 水位上昇および降下過程

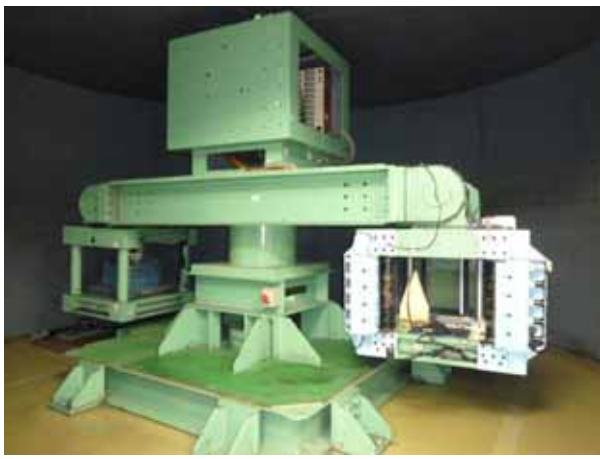
検定用スタンドパイプ
 (一部)

測定結果



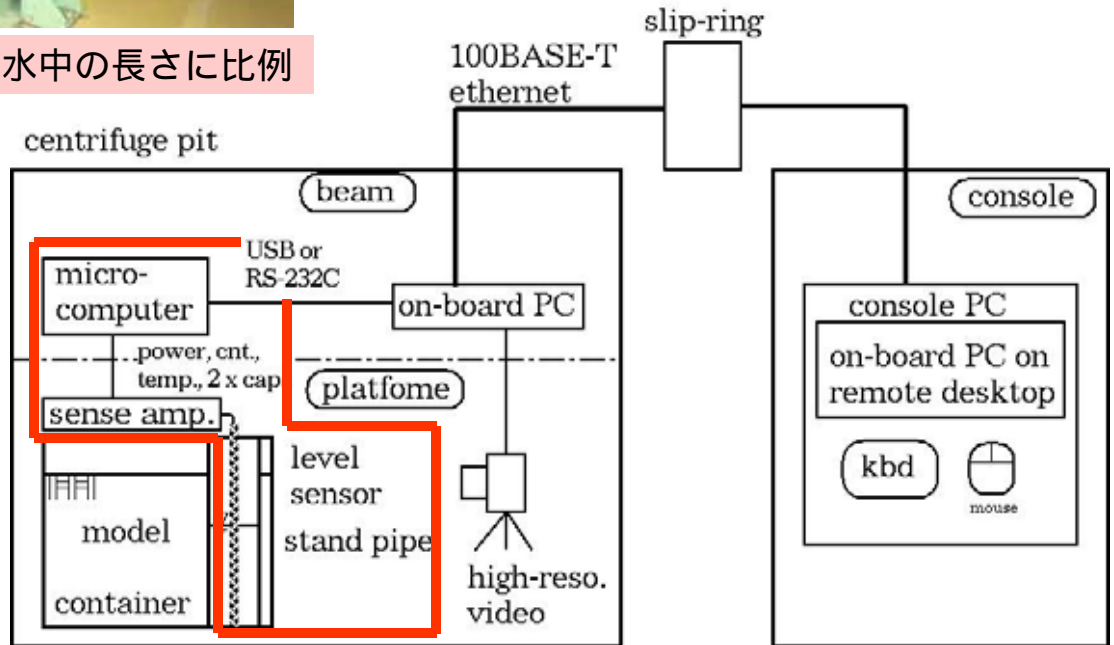
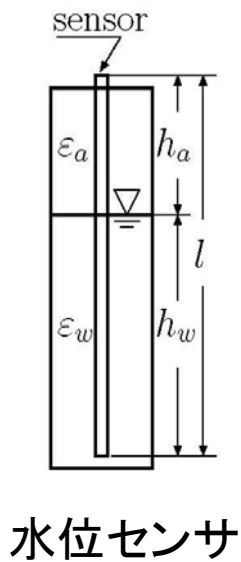
原位置での地下水位計測例

遠心模型実験用水位計

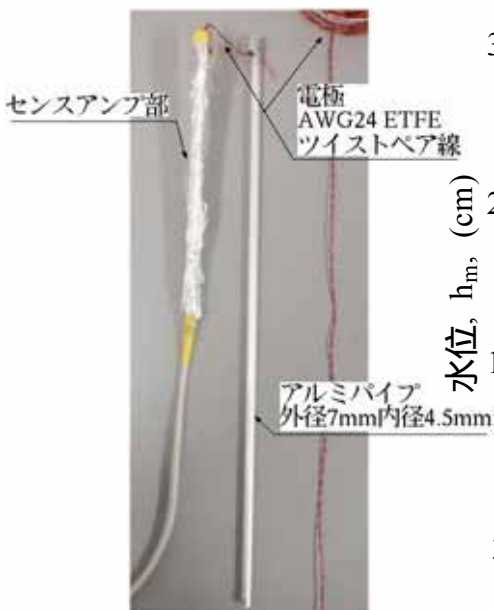


- 利点: ①模型に応じて最適なセンサを製作できる。
 ②重力場から遠心力場まで計測可能。

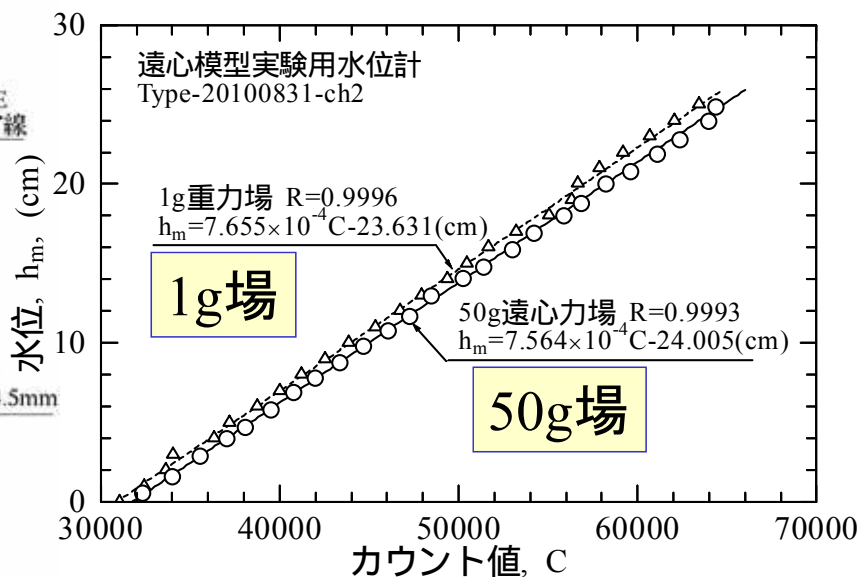
静電容量は電極の水中の長さに比例



遠心模型実験用水位計1



平行2線型
水位センサ

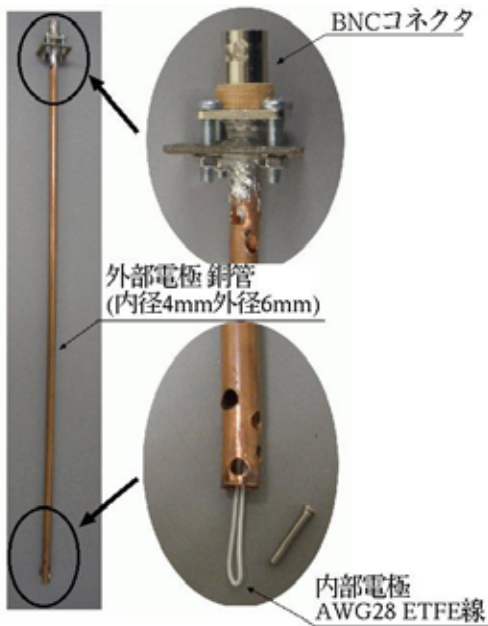


1g場 $R=0.9996$ 、50g場 $R=0.9993$
 と十分な精度

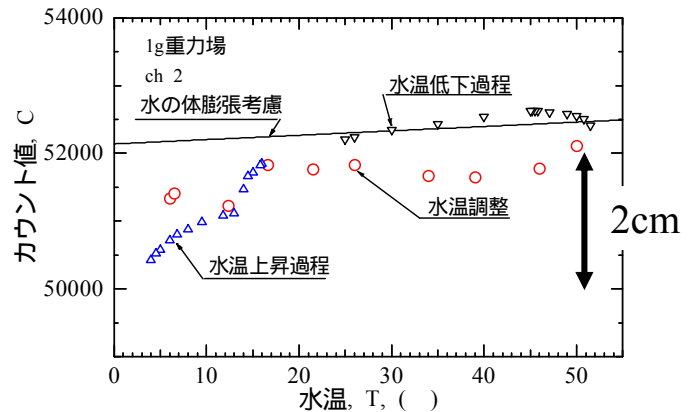
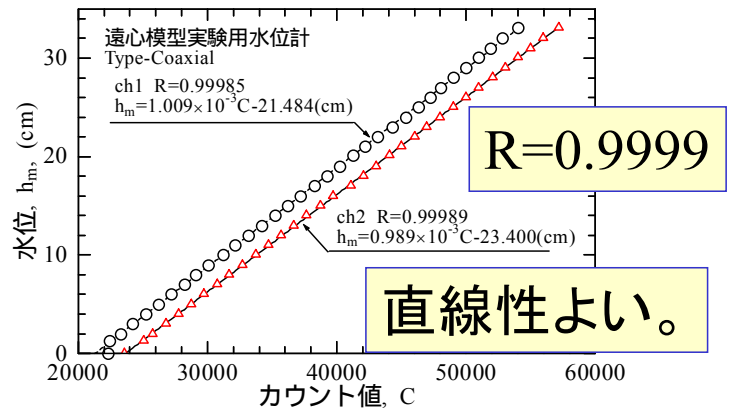


検定具

遠心模型実験用水位計2



同軸型
水位センサ



温度変化が大きき場合は要注意

想定される用途(応用分野)

- ① 従来の機械式水位計の置換(地すべり地等)
- ② 堤防、斜面、谷埋め盛土等の浸水・漏水監視
- ③ 水浸排水繰返しによる路面下、埋設管、樋門、樋管、堤防、護岸などの空洞発生監視
- ④ 廃棄物最終処分場等の地下水位管理や簡易サウンディング跡孔での地下水位監視
- ⑤ 浸水・空洞化センサを具備した建設資材(埋設管、ドレンパイプ、パラペット、擁壁、ジオテキなど)
- ⑥ 模型実験用の小型高精度なカスタムセンサ

など

パートナーへの要望

実用化に向けて次のような方々との
共同研究等を希望

- ☆ ロギング装置の試作、無線化などにご協力いただけるメーカー
- ☆ 建設資材のスマート化をお考えのメーカー
- ☆ 道路や護岸、防潮堤その他社会基盤の維持管理をお考えの管理者、自治体やコンサルタント
- ☆ ホームセキュリティサービス

想定している応用について

平成23年台風6号安芸市穴内漁港防潮堤被害



洗掘により破損した防潮堤



古い防潮堤

防潮堤のつま先が
洗掘され、矢板が露出

古い防潮堤を補修していた箇所

平成23年台風6号 安芸市穴内漁港海岸

劣化したままでは、
高潮や津波に
抵抗できない。

裏込め土が流亡
何時から？

防潮堤

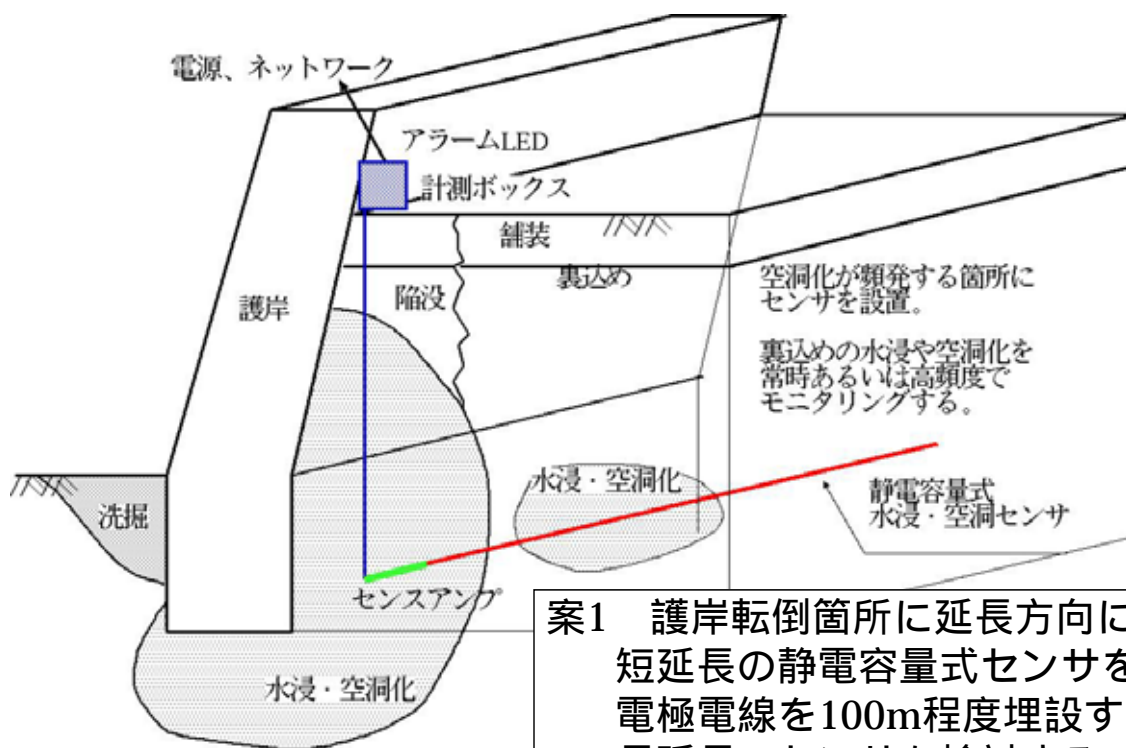


自転車道

舗装に隠されて、空洞
の発達に気づかず

表面が丈夫なほど
大規模な陥没が発生

モニタリング案1



案1 護岸転倒箇所に延長方向に電極を埋設
短延長の静電容量式センサを水平に設置。
電極電線を100m程度埋設する。
長延長のセンサも検討する。
傾斜計についても検討する。

河口部の防潮堤



つま先部が洗掘され、
底面が浮き上がっている

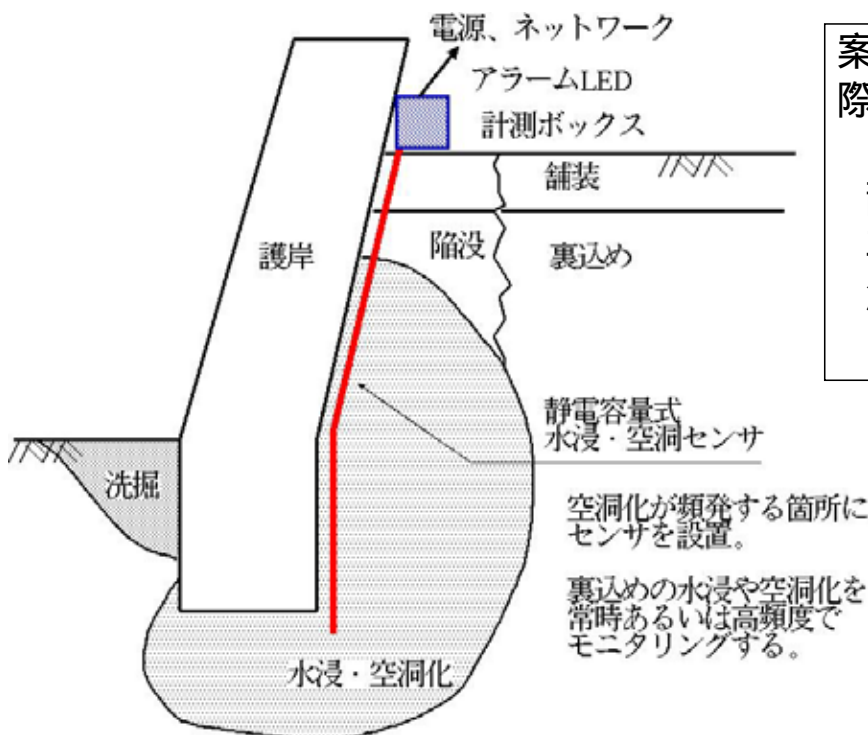


みずみち+
締固め不足



背面は裏込めに空洞が
形成され、舗装が陥没

モニタリング案2



案2 空洞陥没箇所を補修する際に設置
陥没箇所の埋め戻し時に静電容量式センサを埋設し、再発防止のため継続的に計測する。

空洞化が頻発する箇所にセンサを設置。
裏込めの水浸や空洞化を常時あるいは高頻度でモニタリングする。