



東北大学

電波科学による 防災・減災への取り組み

東北大学 東北アジア研究センター
教授 佐藤 源之

sato@cneas.tohoku.ac.jp

2015年2月6日 災害・危機管理ICTシンポジウム2015
第19回 「震災対策技術展」横浜



あらまし

—豪雨・火山噴火被害の観測と予測—

新しい技術の導入

- 近距離レーダ
- 干渉SAR
- ポーラリメトリ

防災・減災への取り組み

- 地滑り GB-SAR
- 被災者捜索 地中レーダ(GPR)
- 家屋の耐震診断のためのレーダセンサ

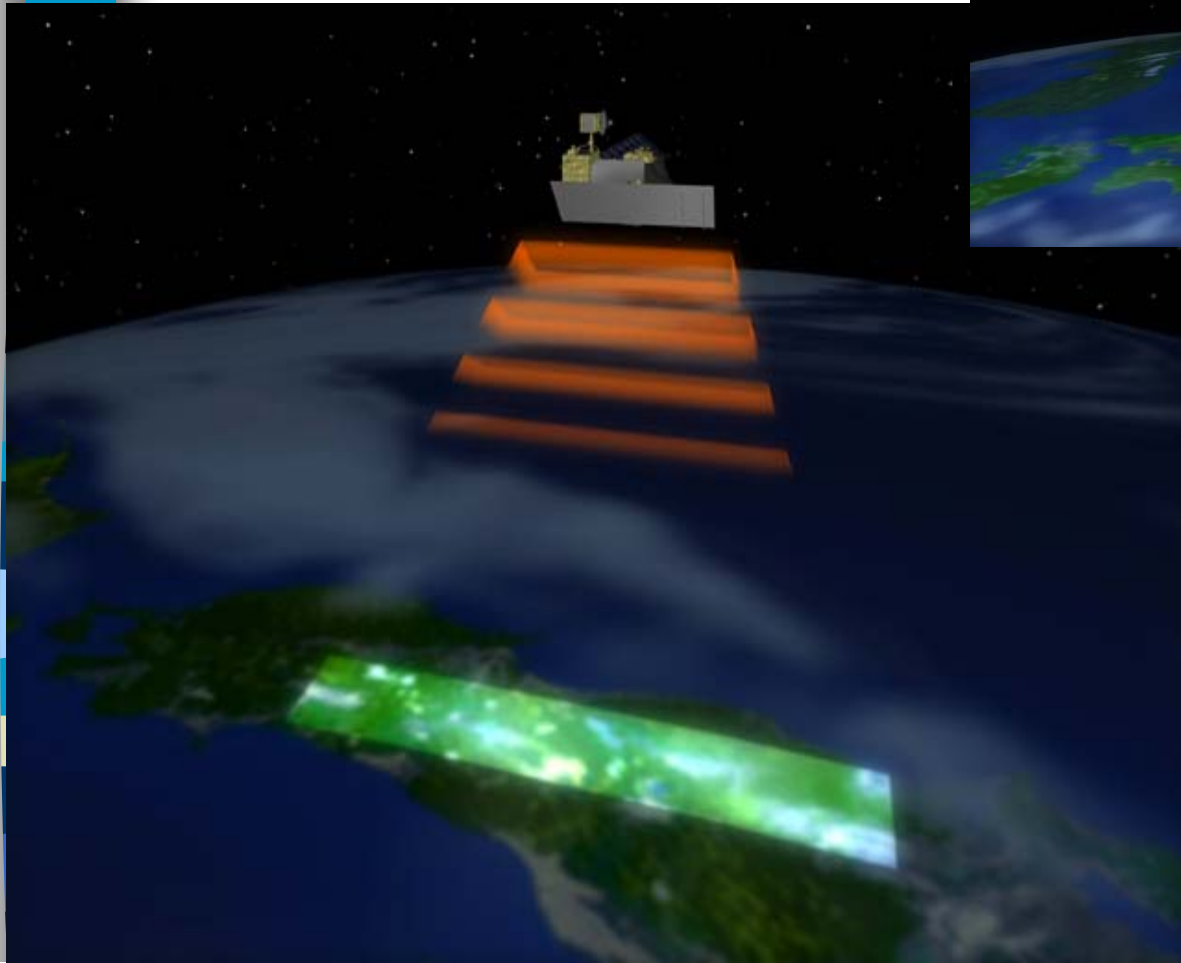




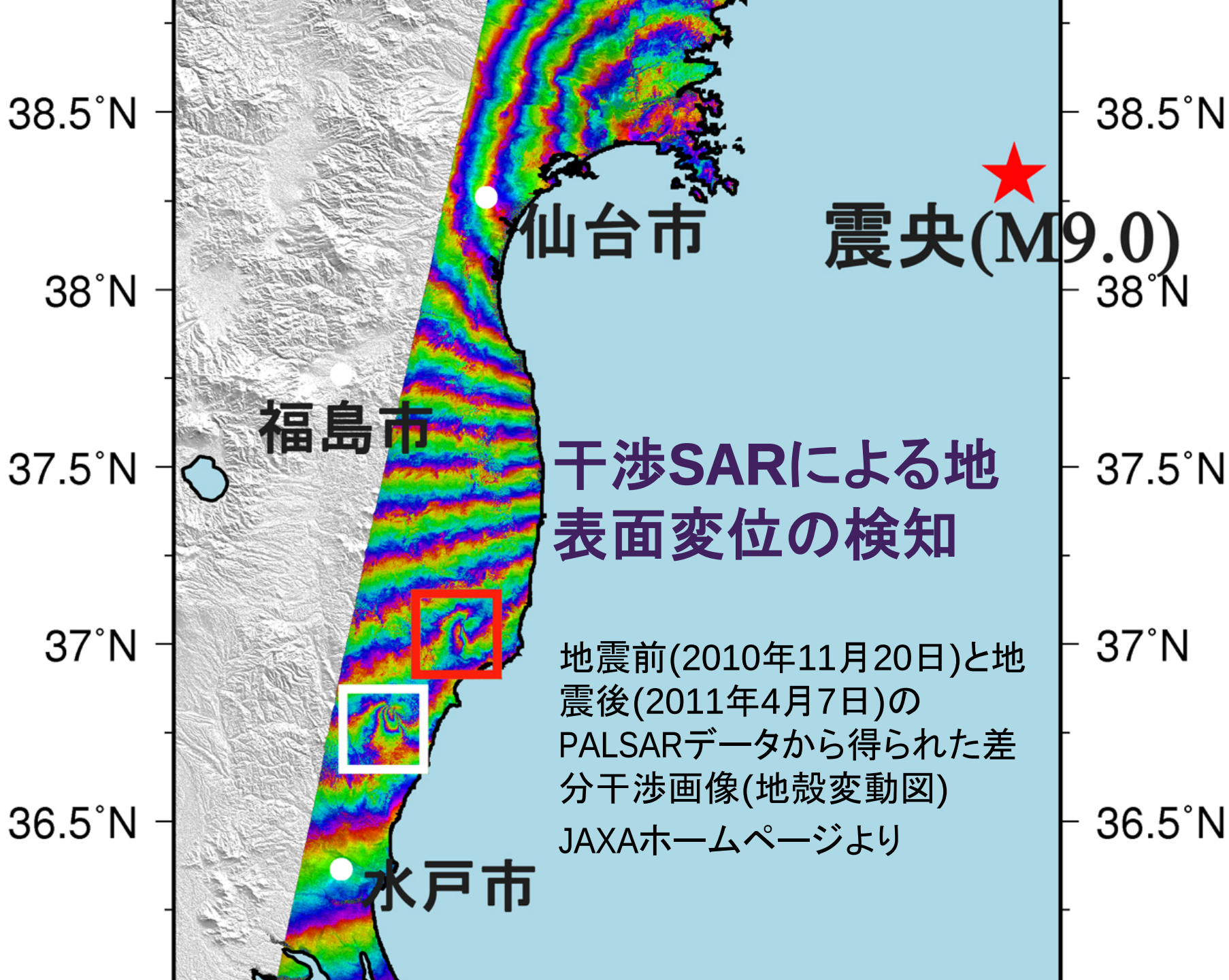
東日本大震災 と リモートセンシング



JAXA 地球観測衛星 ALOS「だいち」

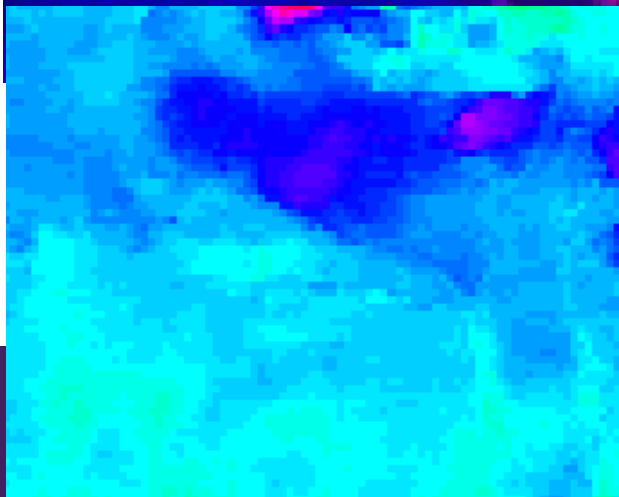
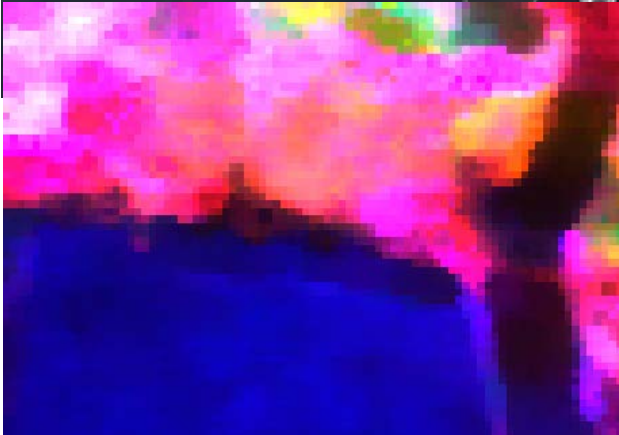


L-band
Full-
polarimetric
SAR
 $f=1.27\text{GHz}$

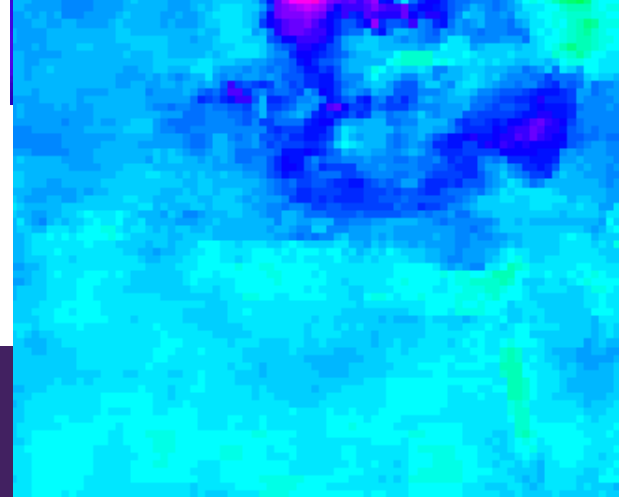




2010年6月



2011年4月



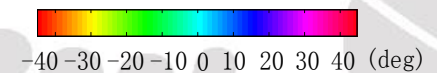
石巻市街地

ALOS/PALSAR

光学センサー

電波散乱の機構

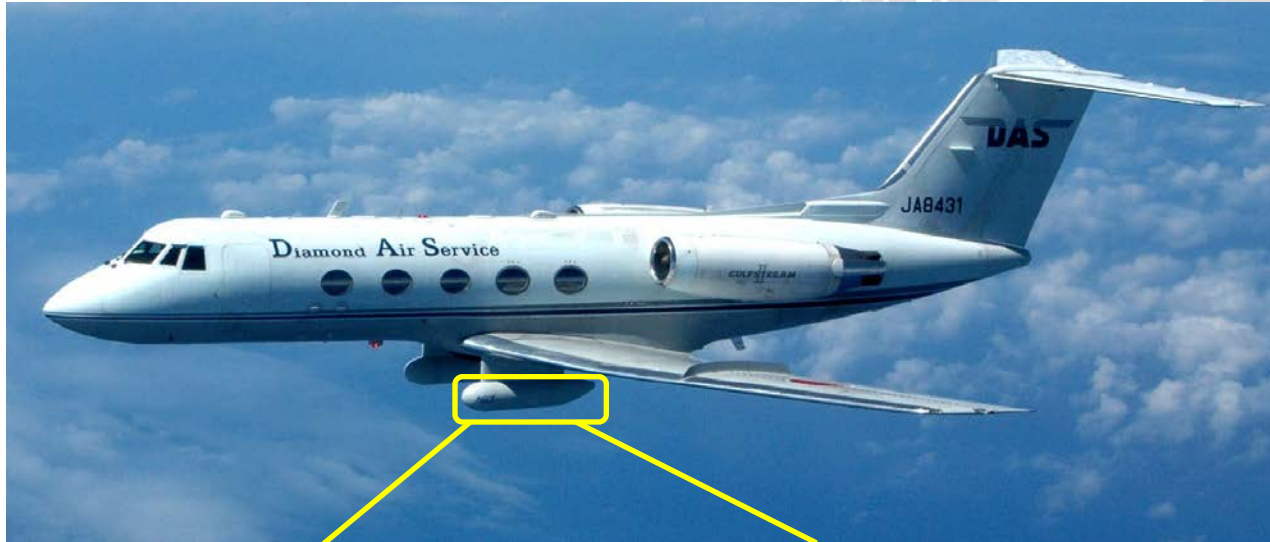
P_d (red),
 P_v (green)
 P_s (blue).



偏波の向き.



Pi-SAR2 (NICT, 情報通信研究機構)

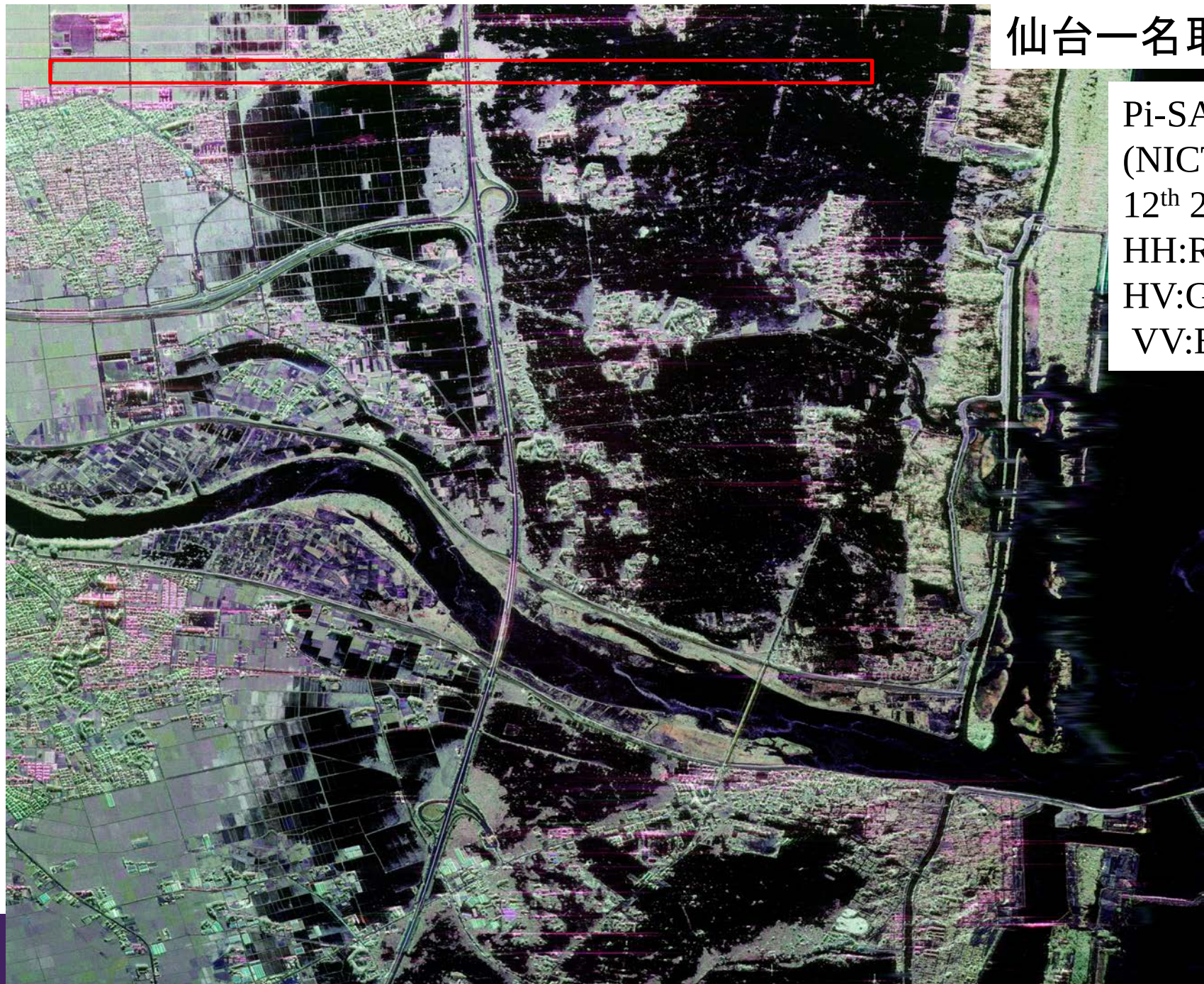


$f=9.55\text{GHz}$

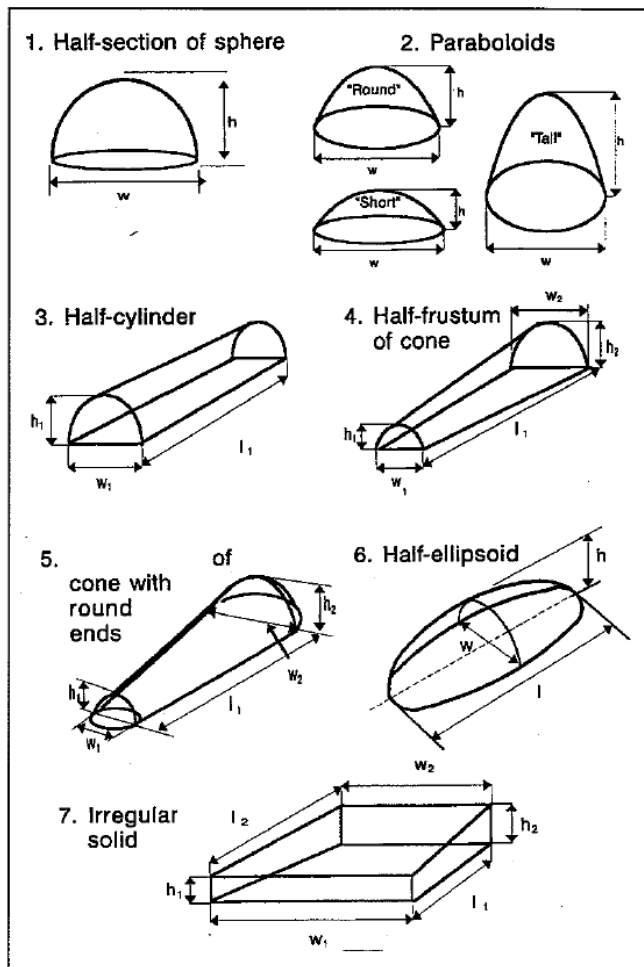


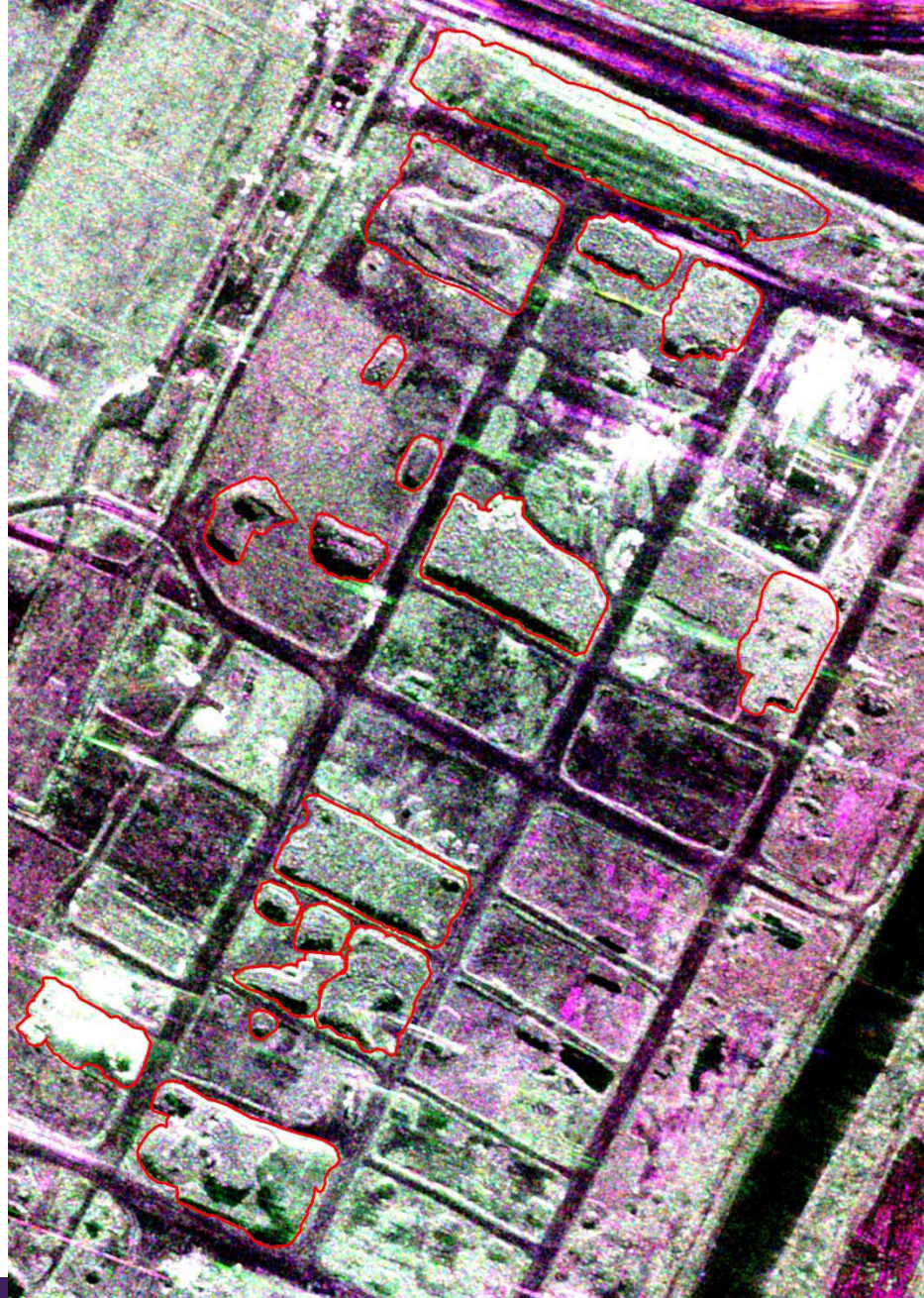
仙台一名取

Pi-SAR2
(NICT) Mar
12th 2011
HH:R
HV:G
VV:B



瓦礫量の推定

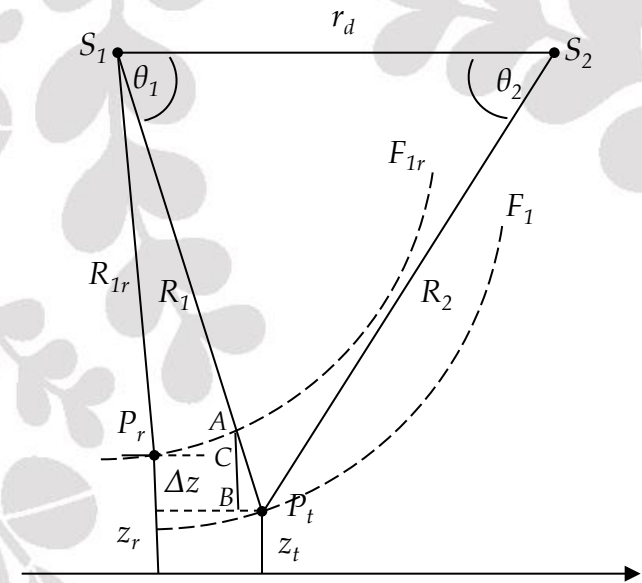
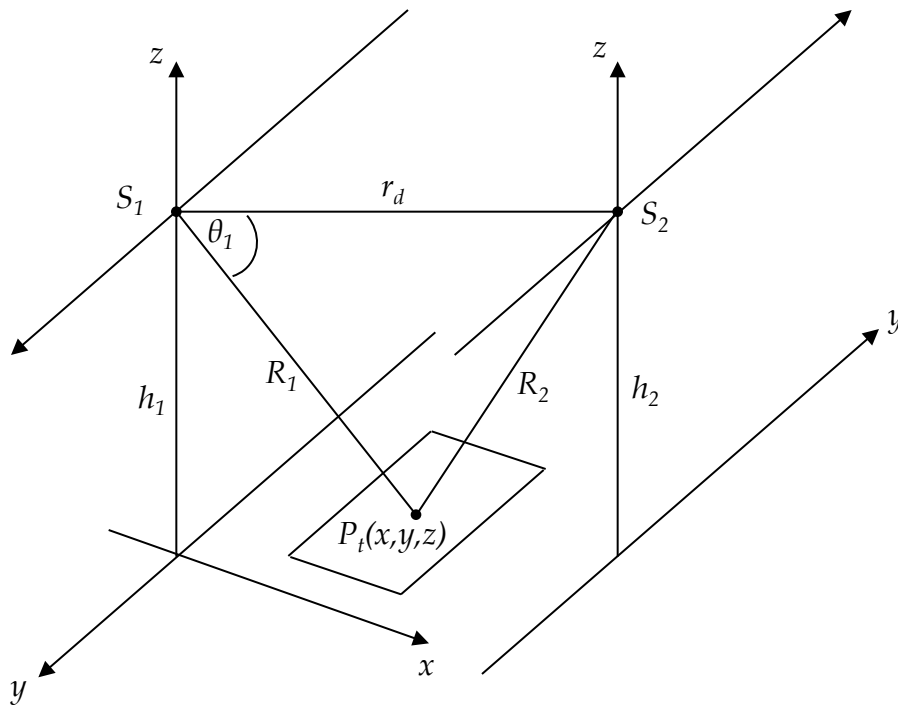




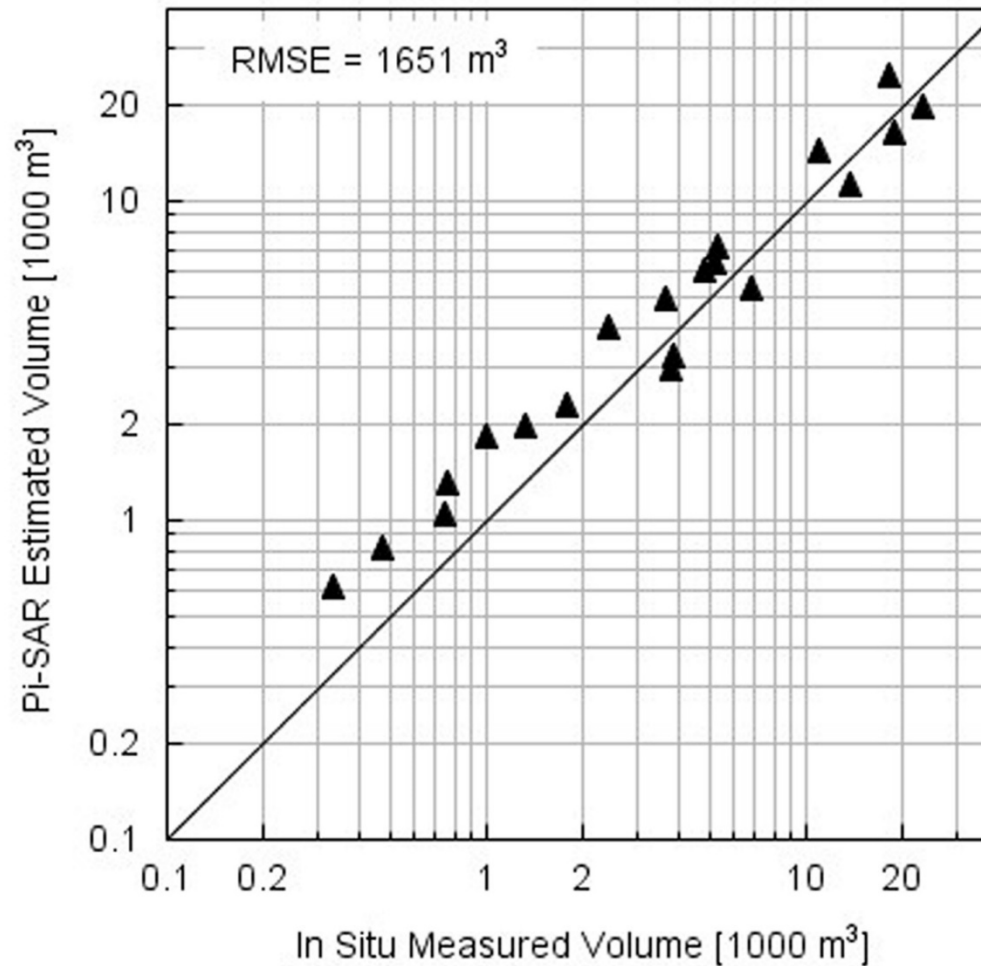
ステレオSAR 投影法による高さ推定

Track altitude: 8753 m

Across-track separation: 16778 m



SARで推定した瓦礫量と実測値の比較



Ground-Based SAR (GB-SAR :地表設置型合成開口レーダ) による地滑り長期モニタリング



栗原市 荒砥沢 大規模地滑り



宮城県栗原市荒砥沢地区

- 2008年6月 岩手・宮城内陸地震による大規模な地すべり
地すべり斜面: 1300 x 900 m
2次災害防止・復旧工事安全確保のための監視が必要
- 2011年11月 GB-SARを設置、試験運用開始
- 2012年6月 長期モニタリング運用開始



地上設置型合成開口レーダ (GB-SAR)



イタリア IDS社製 IBIS-L

- 送受信にホーンアンテナ
- 中心周波数 17.2 GHz (Ku-band)
- 周波数帯域 150 MHz
- 約 2 m のレール上を約 1 分半で走査、2分ごとに1走査
- 5 mm 毎に電波を送受信
- 位相差を利用し微小変動を検知(レーダインターフェロメトリ)

合成開口処理

バックプロジェクション型合成開口処理:

$$g(x, r) = \iint s(x', \tau) dx' d\tau$$
$$\tau = \frac{2}{c} \sqrt{(x - x')^2 + r^2}$$

$g(x, r)$: SAR processed image

$s(x', t)$: Raw data

c : Propagation velocity (= 3×10^8 m/s)

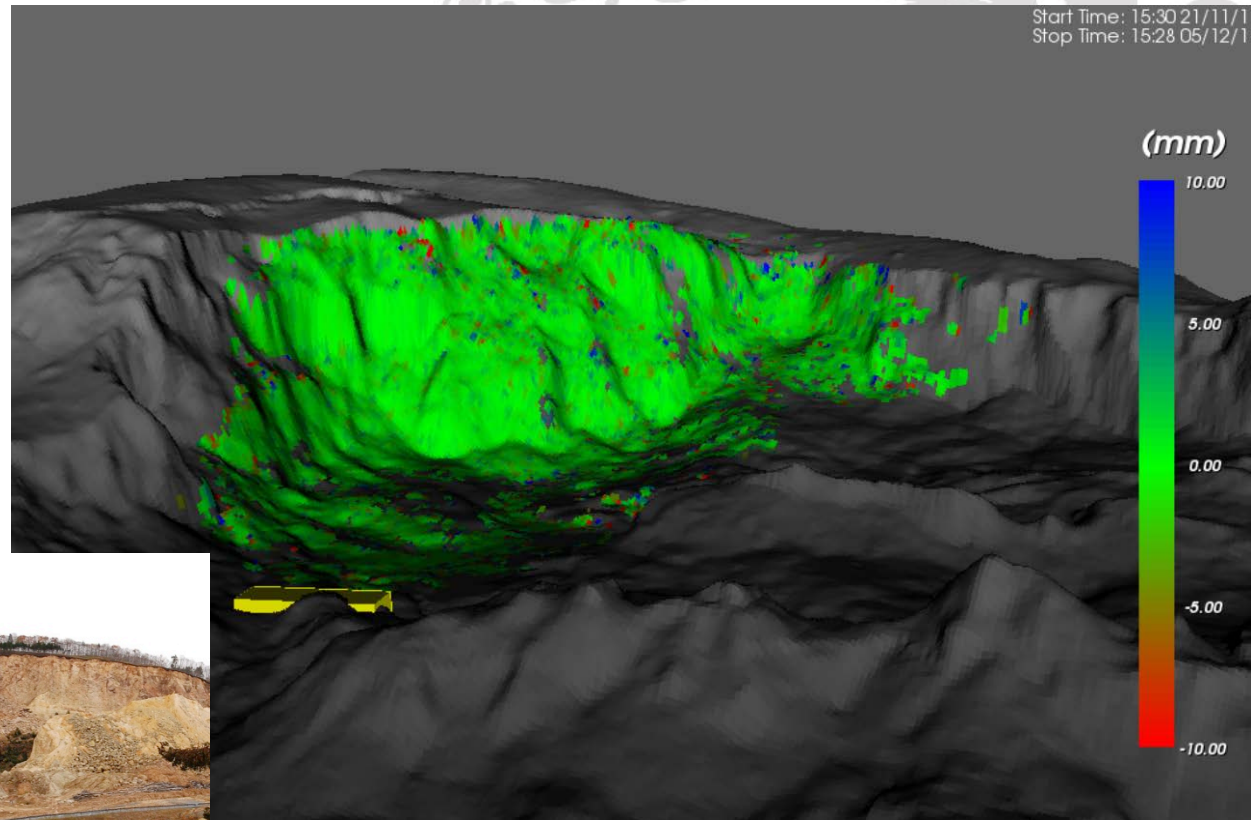
合成開口処理のアニメーション

地すべり斜面の変動分布

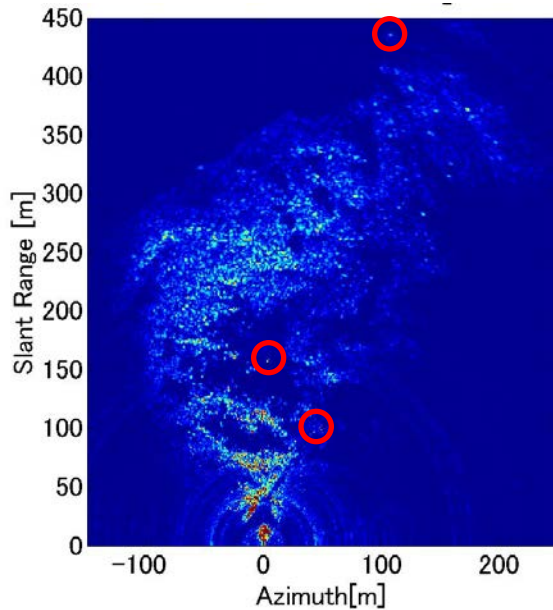
位相干渉により求めた変動をDEM上に投影

正の変動: レーダから遠ざかる変動

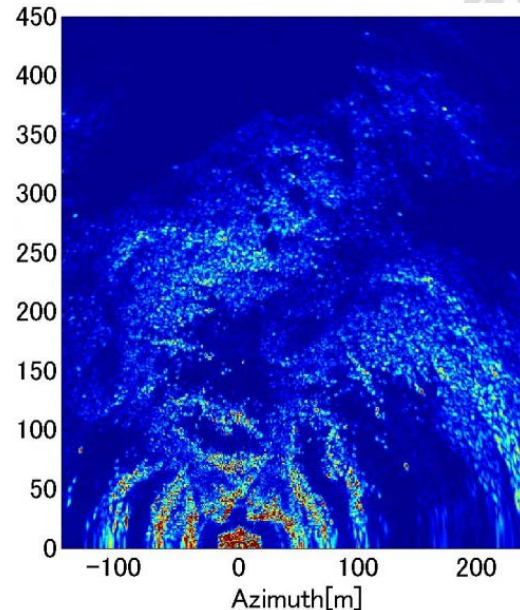
負の変動: レーダに近づく変動



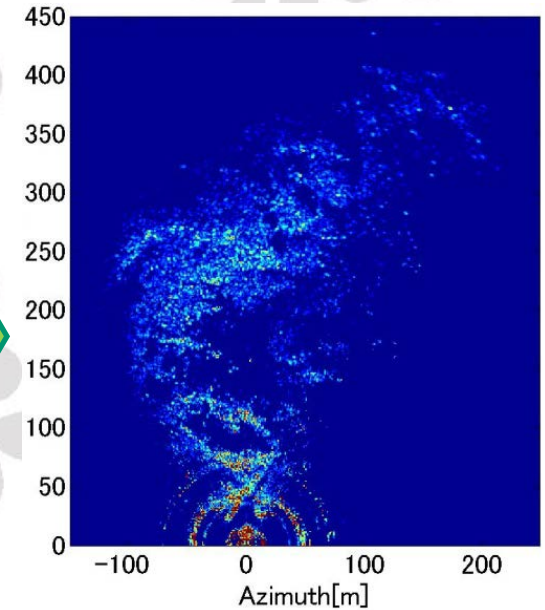
コヒーレント画像の生成



全データによる
SAR画像



提案手法による画像



全データSAR画像の振幅下
位1%のピクセルと同じ所を
0に設定し、虚像を抑制

リサンプルによる虚像の発生



サンプリング間隔が $10\text{mm} > \frac{\lambda_c}{2} (=8.7\text{mm})$



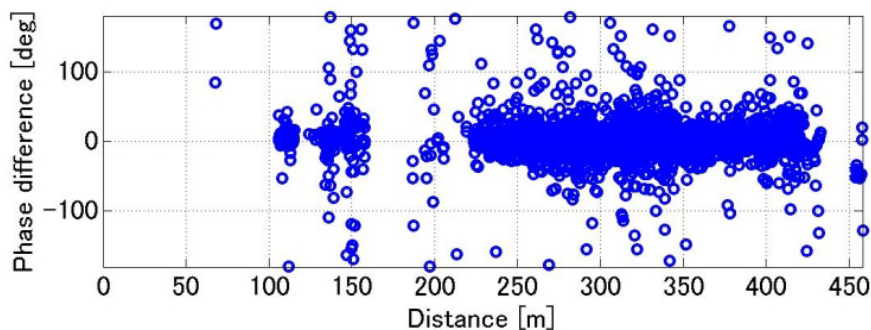
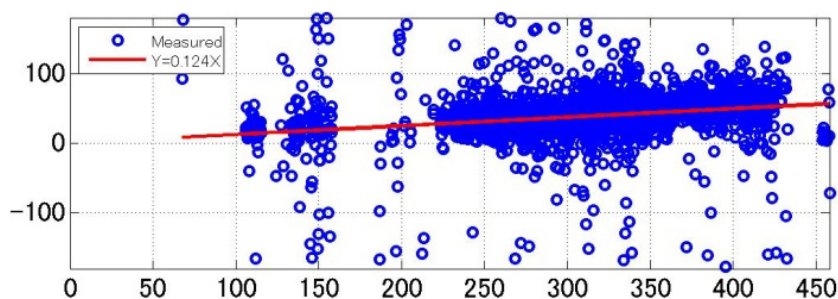
実データを用いた提案手法の検証 - 大気補正と変位推定 -



ターゲット	三面反射鏡(40cm)
レーダとの距離	About 460m(GPS)
変位	視線方向でレーダから離れる方向に8mmまで



位相差と大気補正

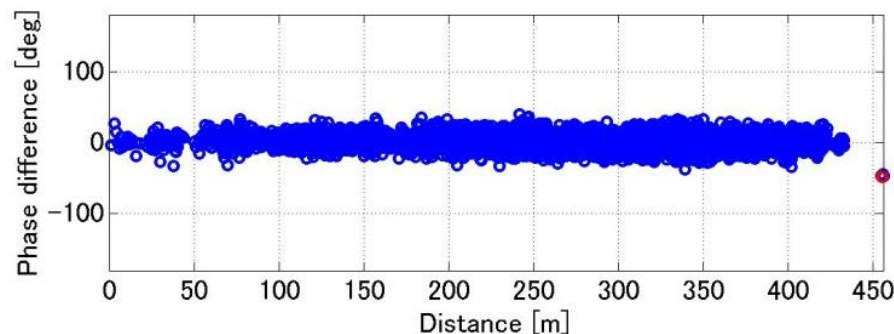
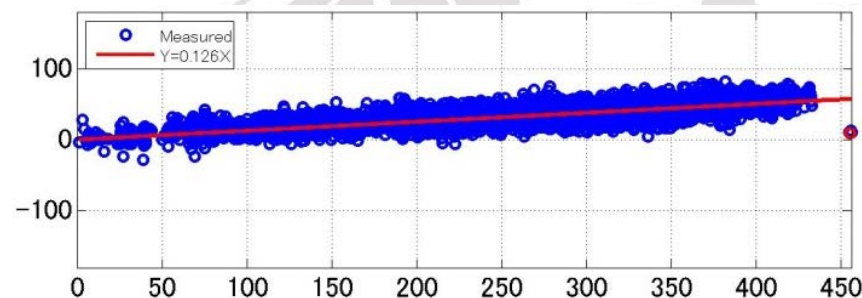


提案手法

傾きを最小2乗法で推定し, 大気補正

$$\Delta\varphi = \alpha \cdot r$$

従来手法と同様の結果が得られた



従来手法

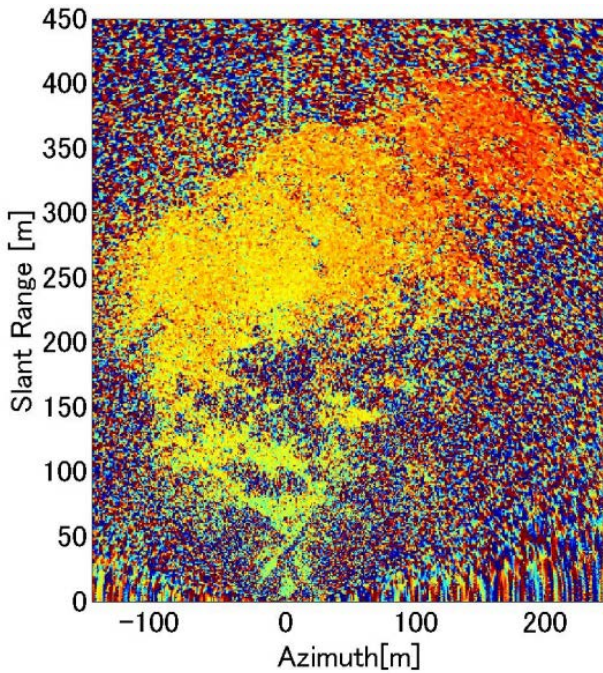
	傾き α [deg/m]
従来手法	0.126
提案手法	0.124

➡ 距離500mで差は1度

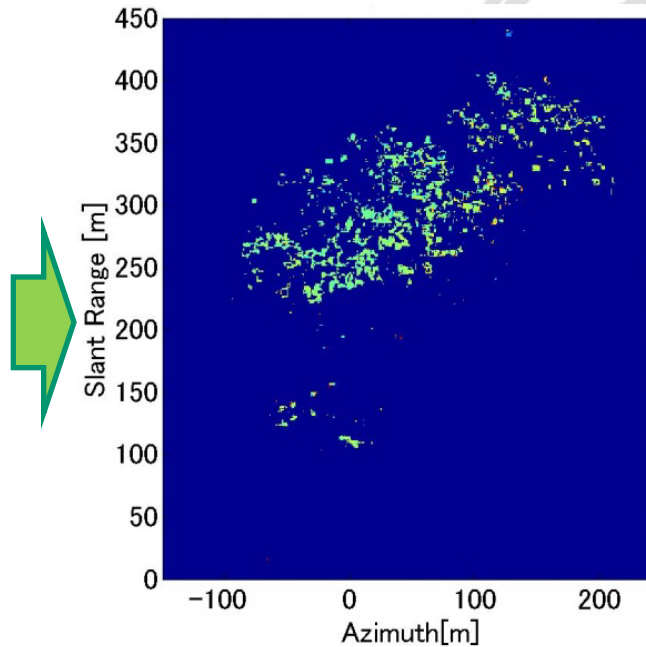


大気補正前後の位相差マップ

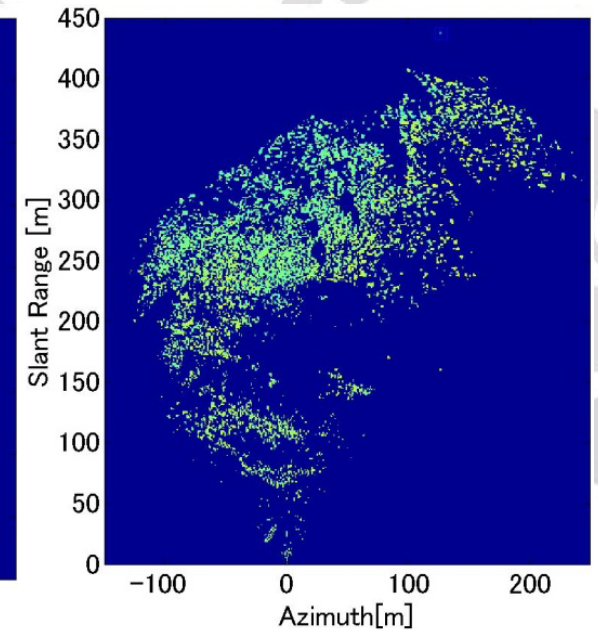
ともに大気の影響が補正



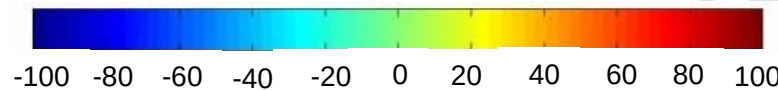
大気補正前



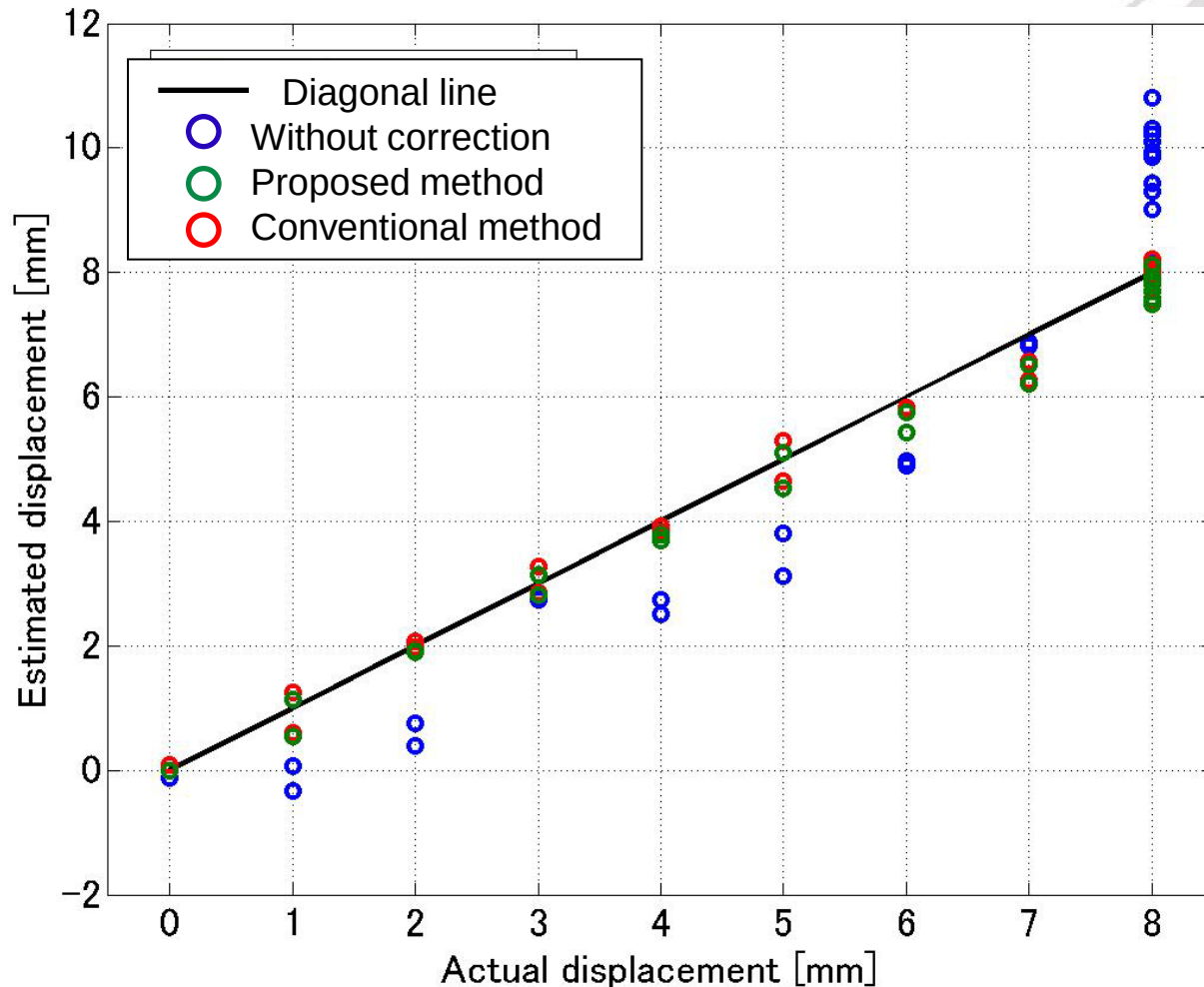
大気補正後
(提案手法)



大気補正後
(従来手法)



三面反射鏡の推定変位



$$Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |a_i - b_i|$$

$a_i : \text{True}$ $b_i : \text{Estimated}$



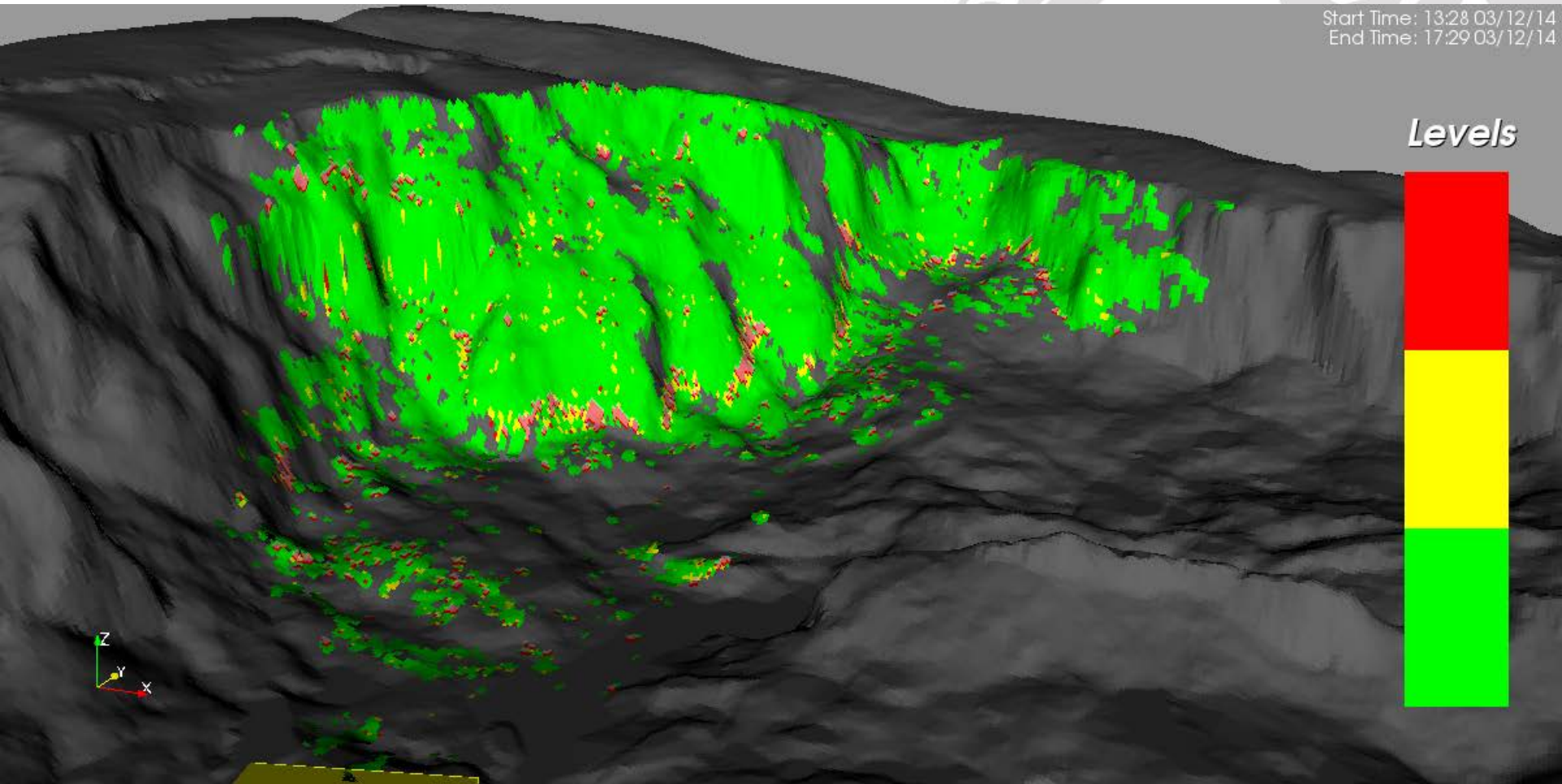
Without 1.24mm
Conv. 0.22mm
Proposed 0.25mm

提案手法でも従来手法と比べ同程度の精度で変位を推定



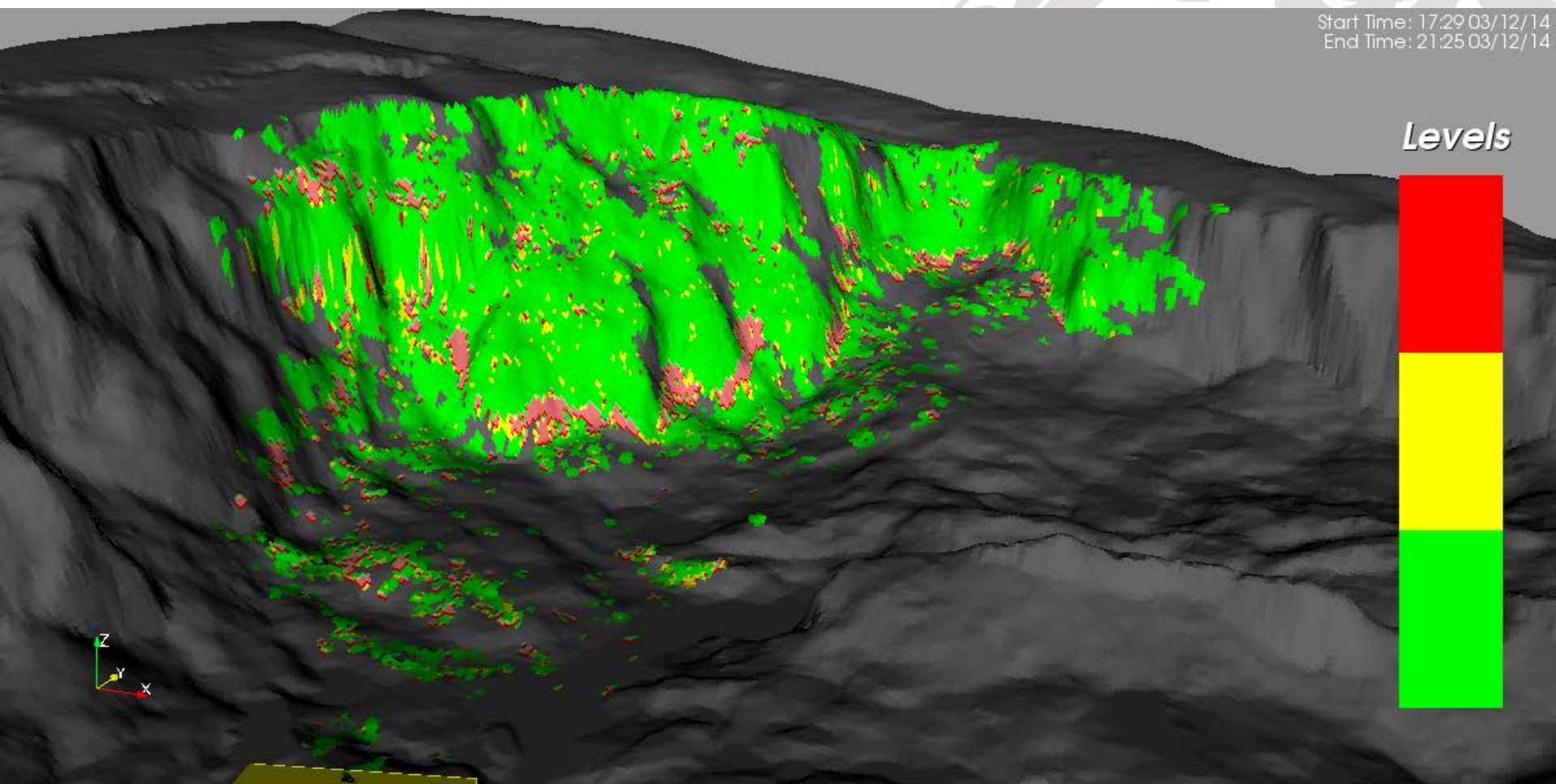
Start Time: 13:28 03/12/14
End Time: 17:29 03/12/14

Levels



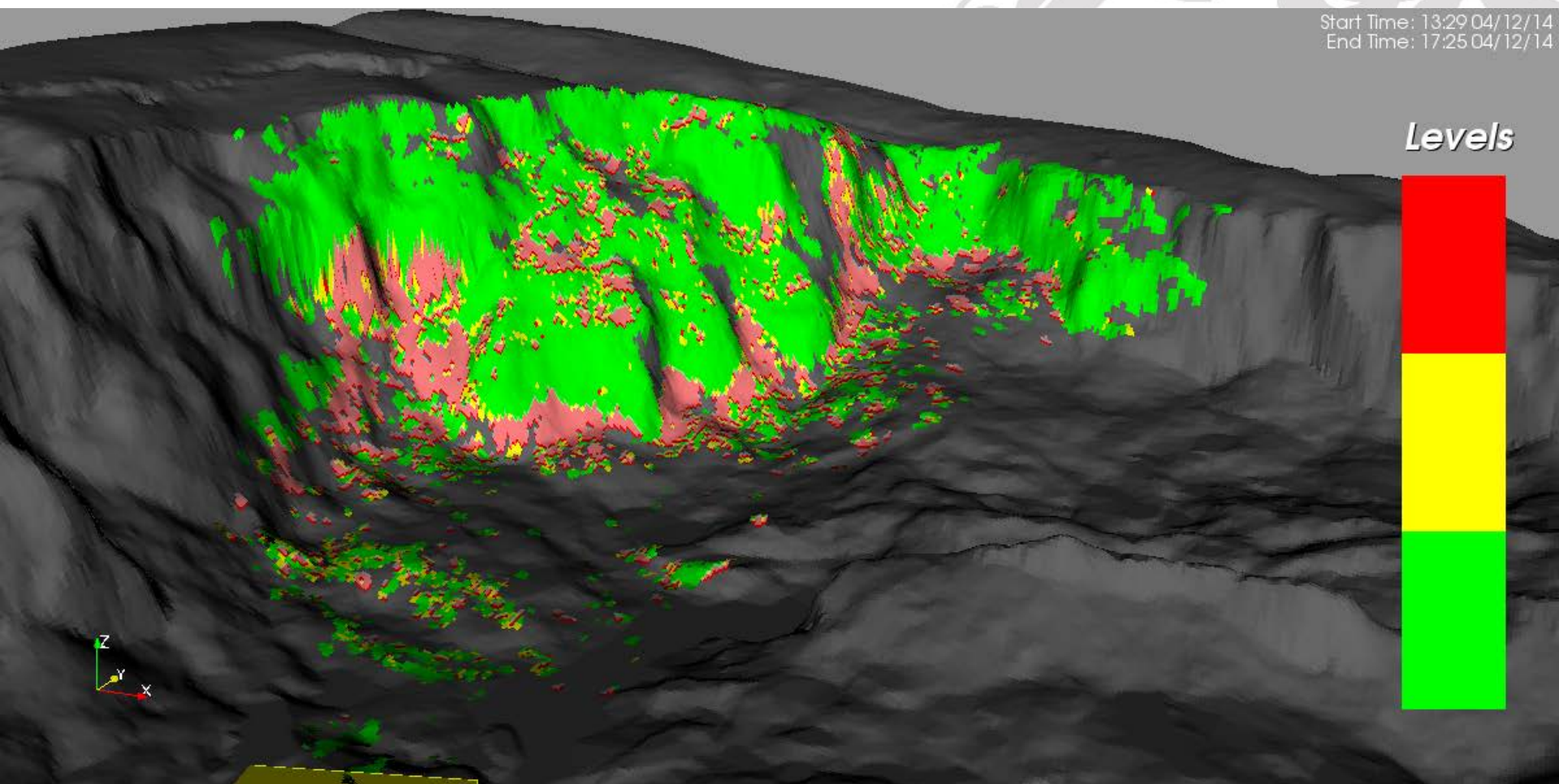
Start Time: 17:29 03/12/14
End Time: 21:25 03/12/14

Levels



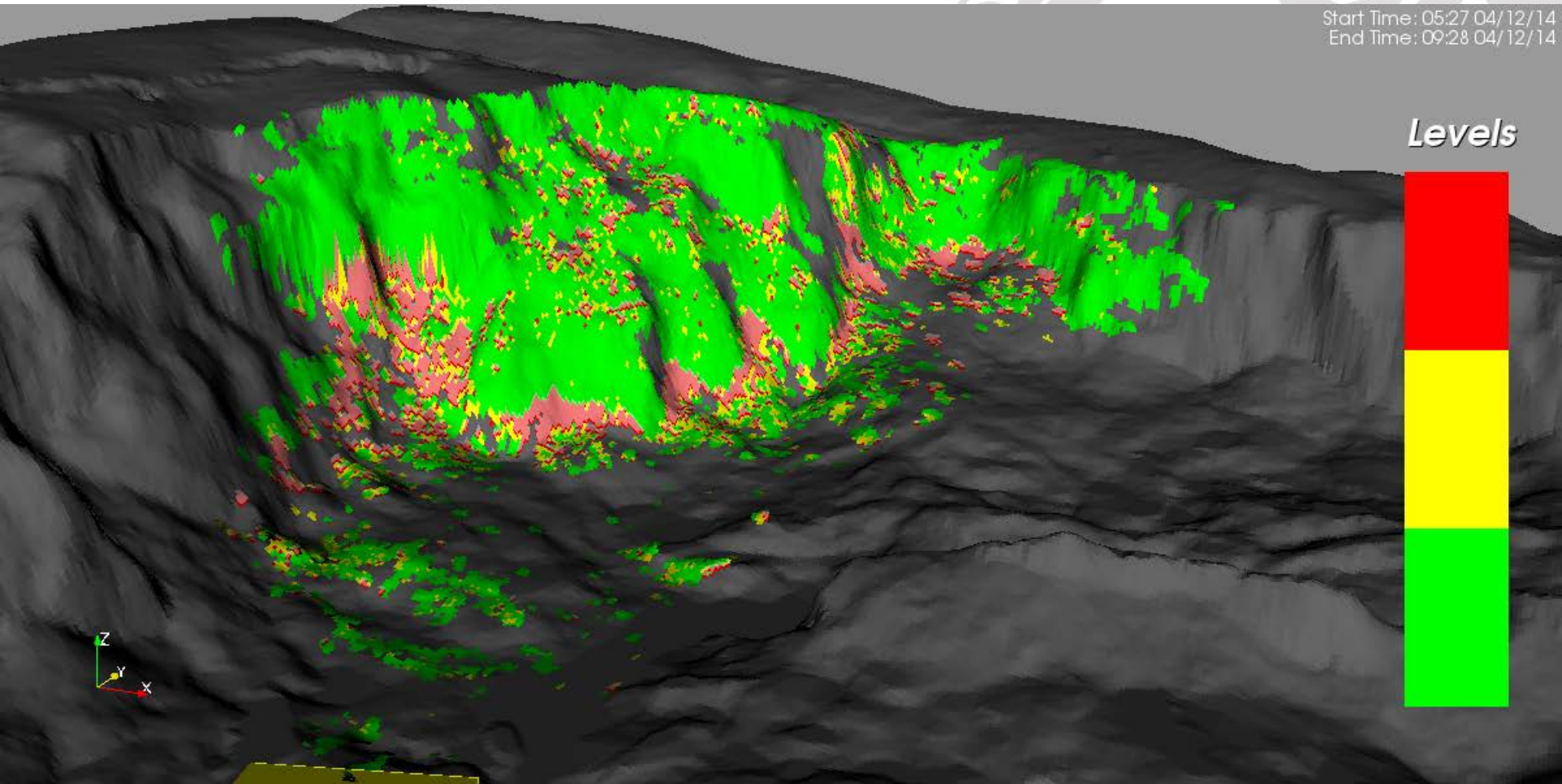
Start Time: 13:29 04/12/14
End Time: 17:25 04/12/14

Levels



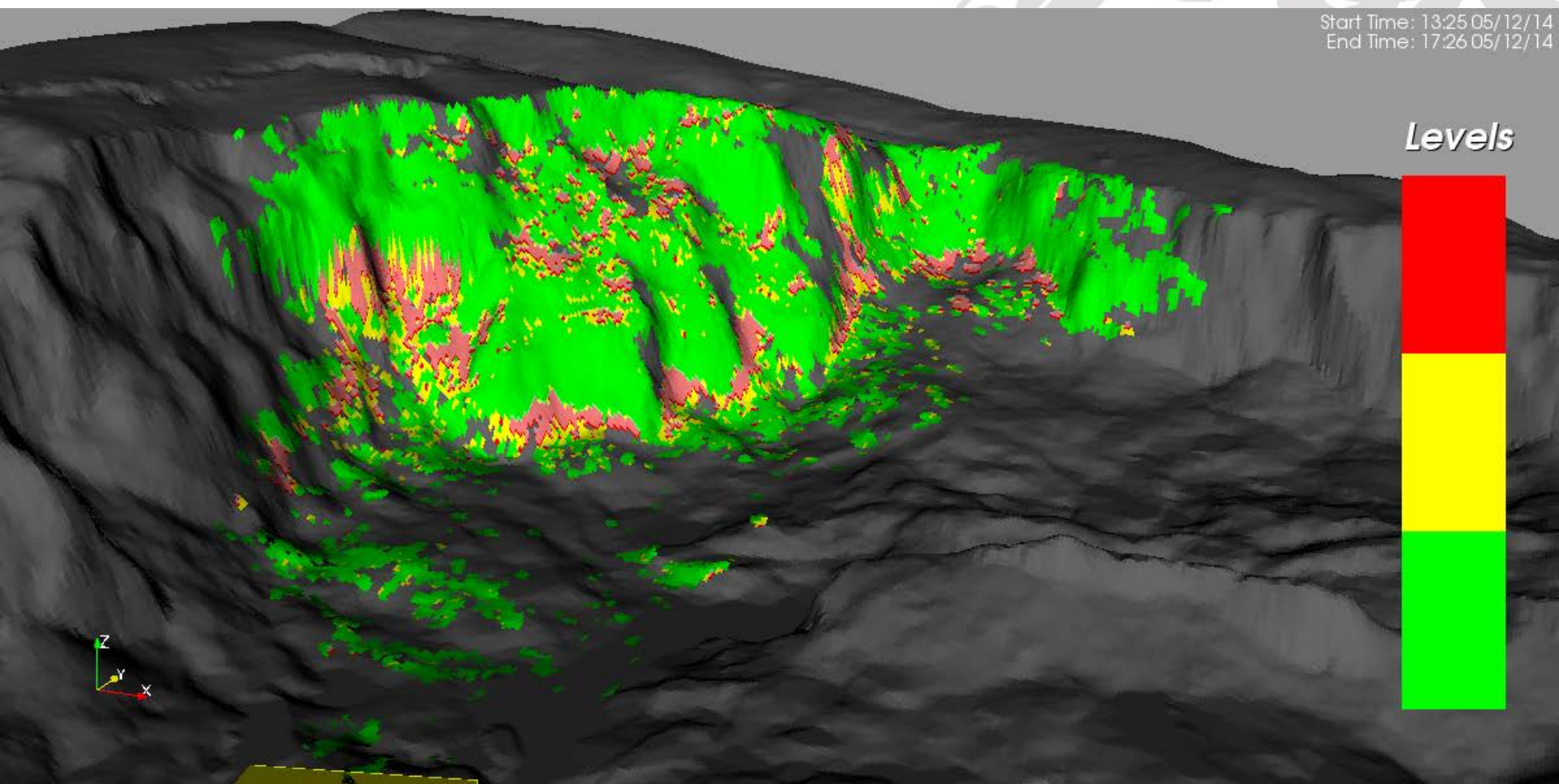
Start Time: 05:27 04/12/14
End Time: 09:28 04/12/14

Levels



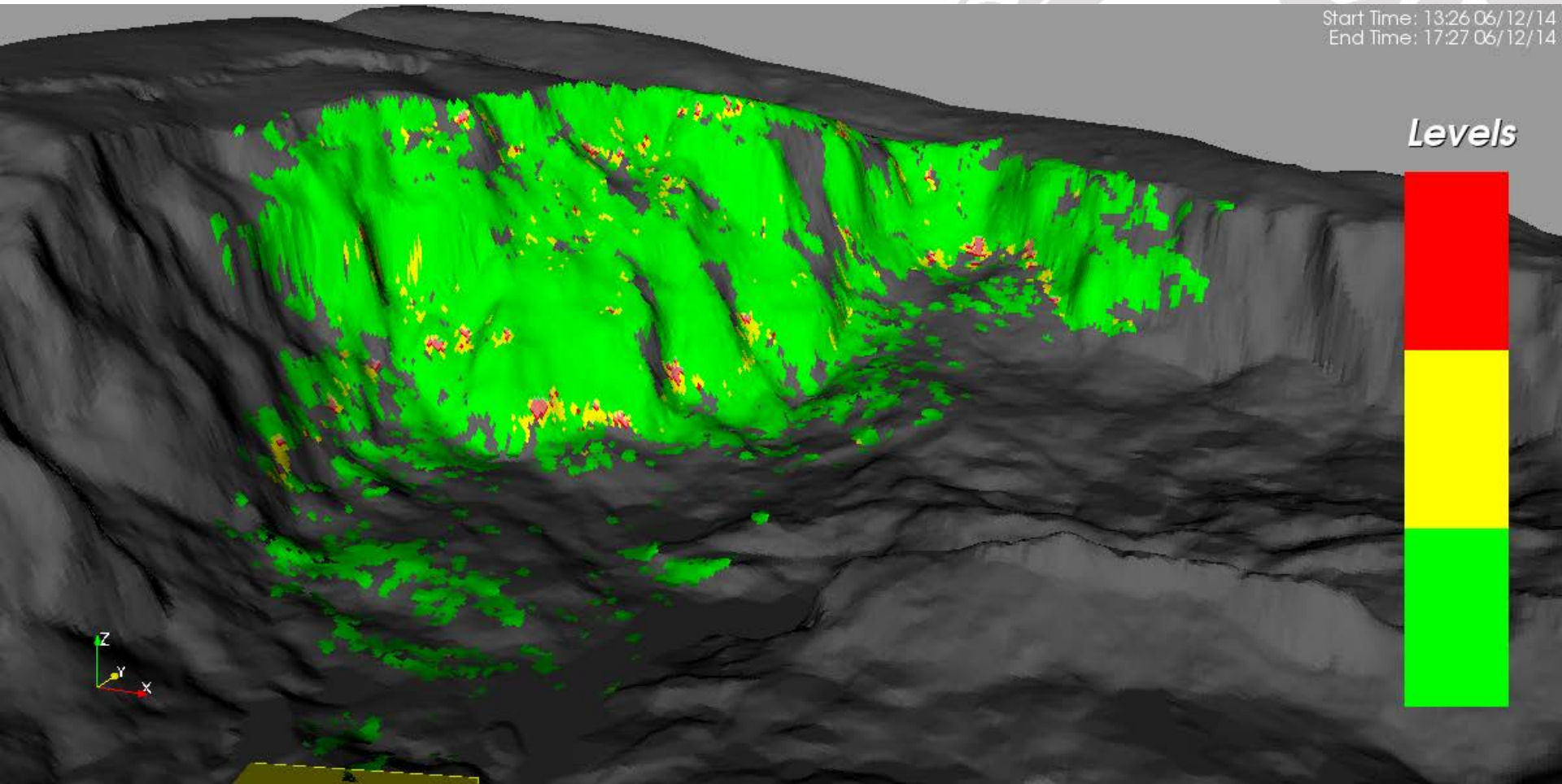
Start Time: 13:25 05/12/14
End Time: 17:26 05/12/14

Levels



Start Time: 13:26 06/12/14
End Time: 17:27 06/12/14

Levels



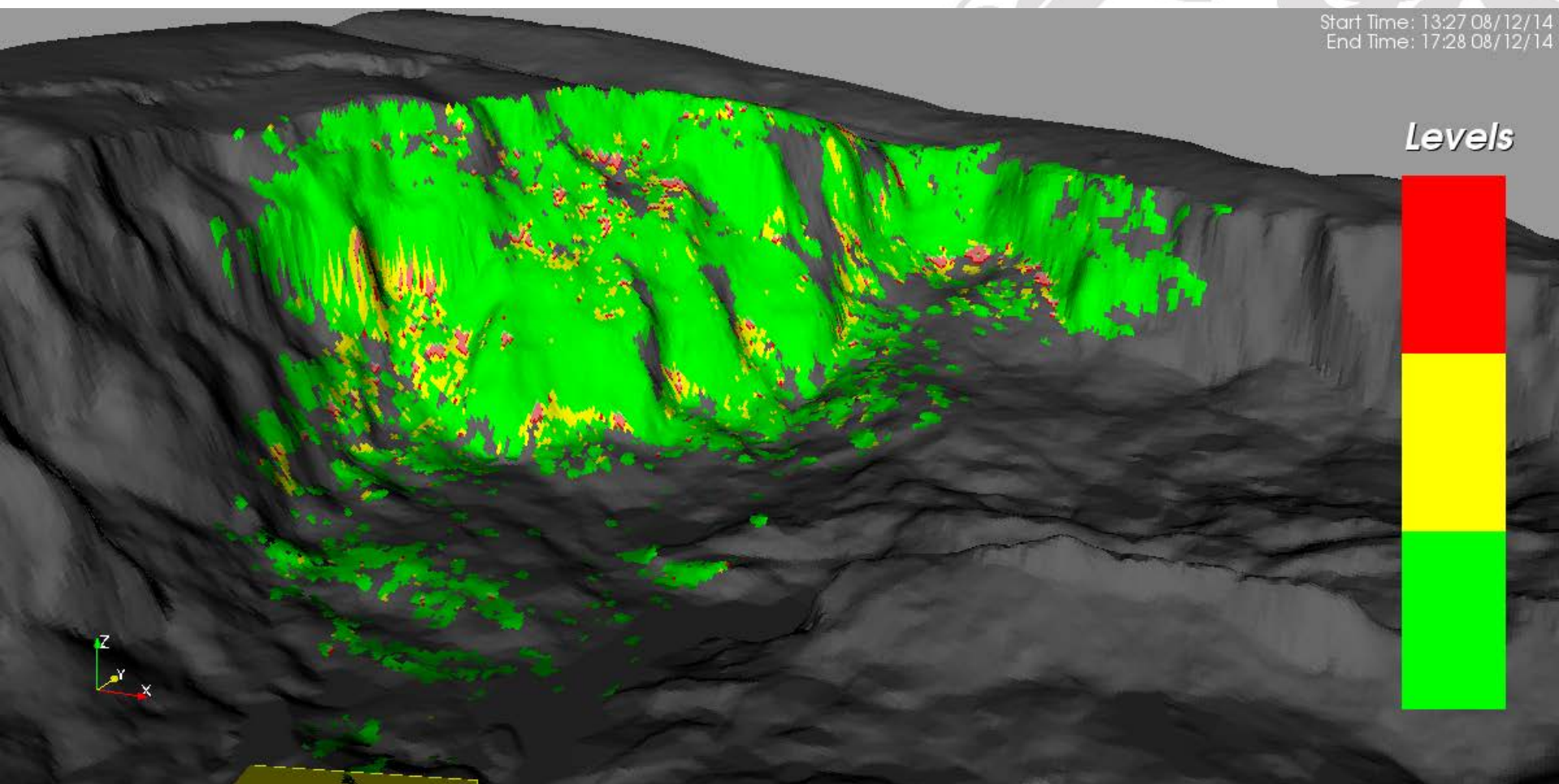
Start Time: 17:27 07/12/14
End Time: 21:28 07/12/14

Levels



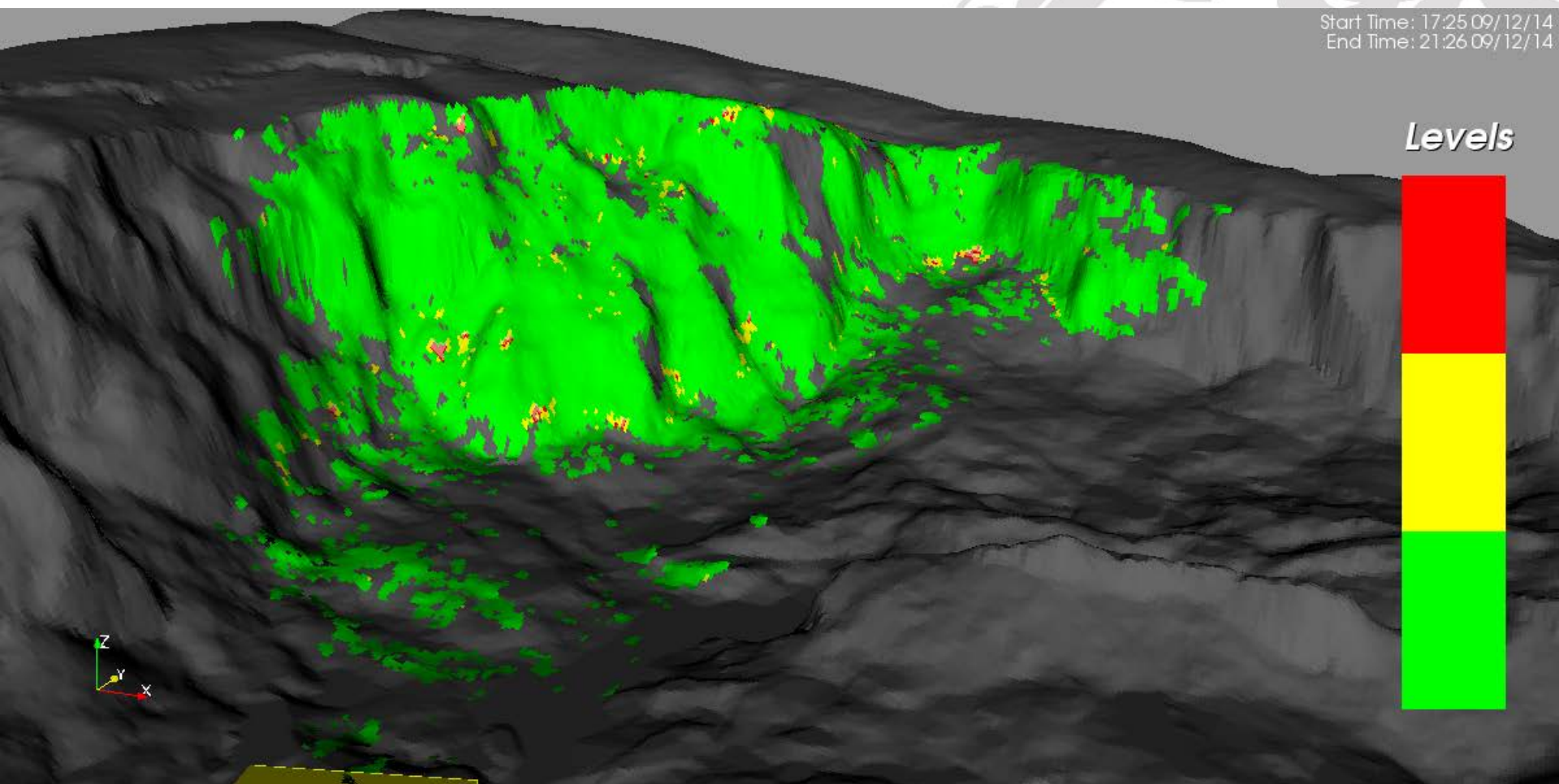
Start Time: 13:27 08/12/14
End Time: 17:28 08/12/14

Levels



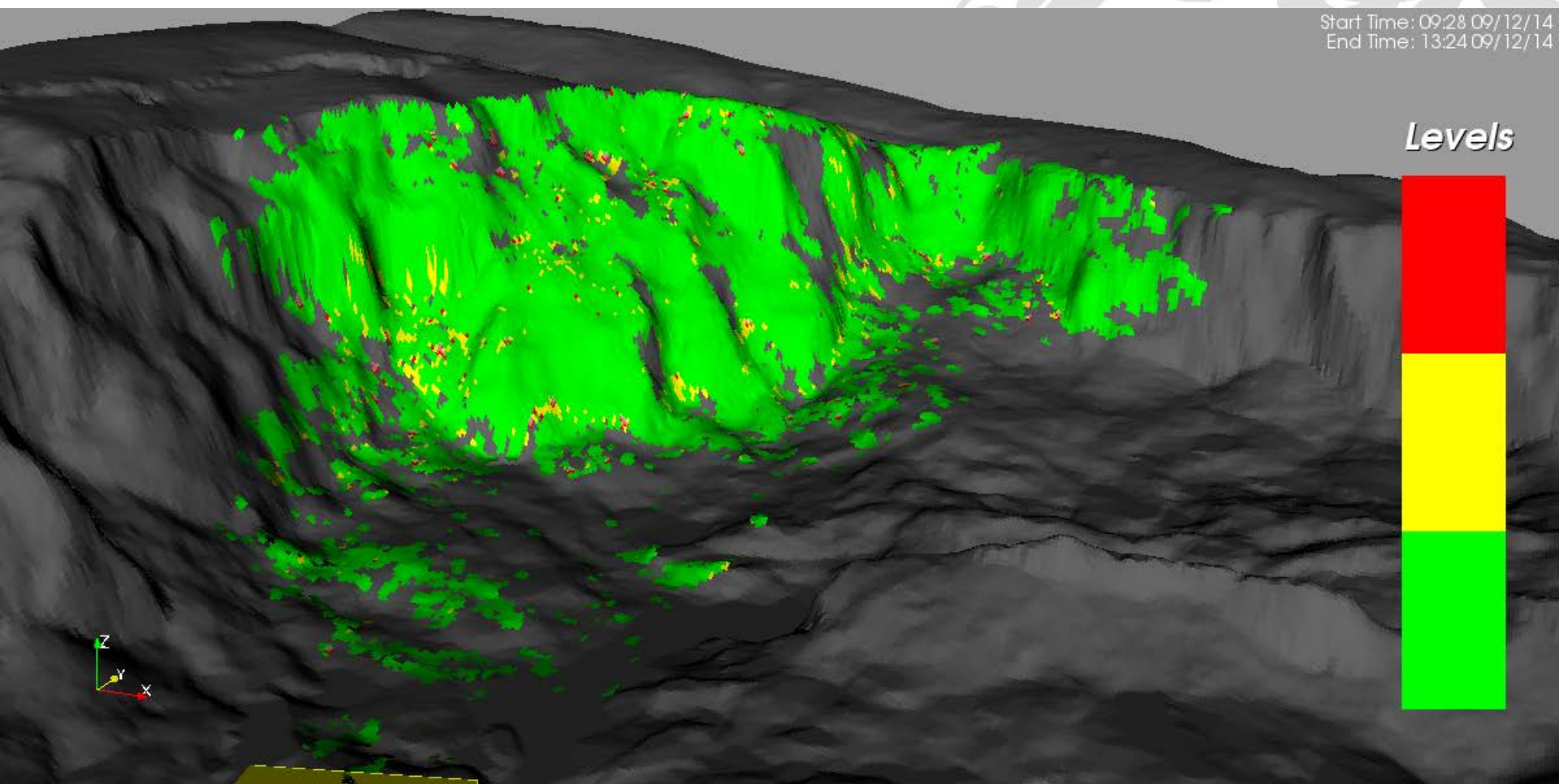
Start Time: 17:25 09/12/14
End Time: 21:26 09/12/14

Levels



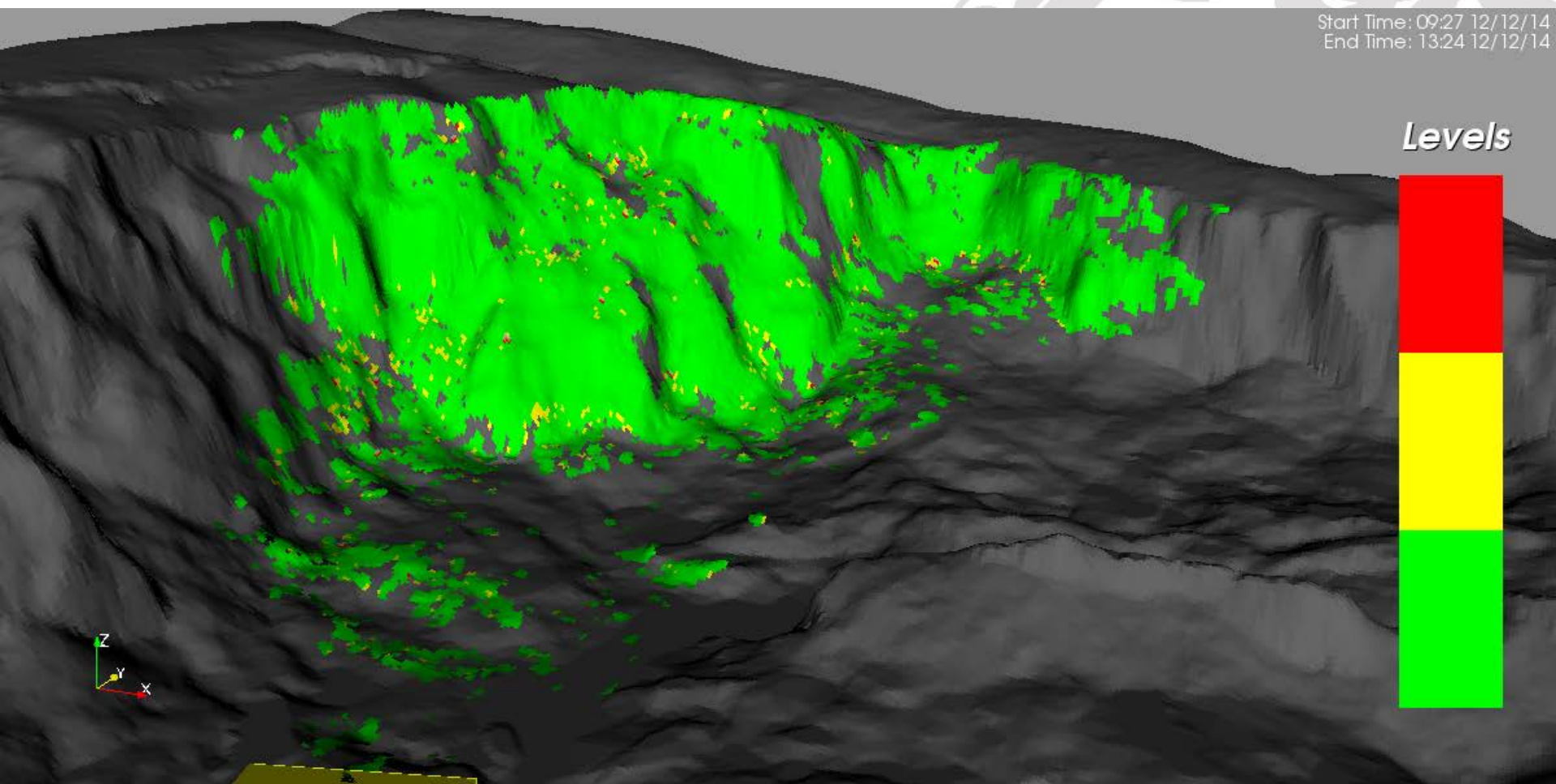
Start Time: 09:28 09/12/14
End Time: 13:24 09/12/14

Levels



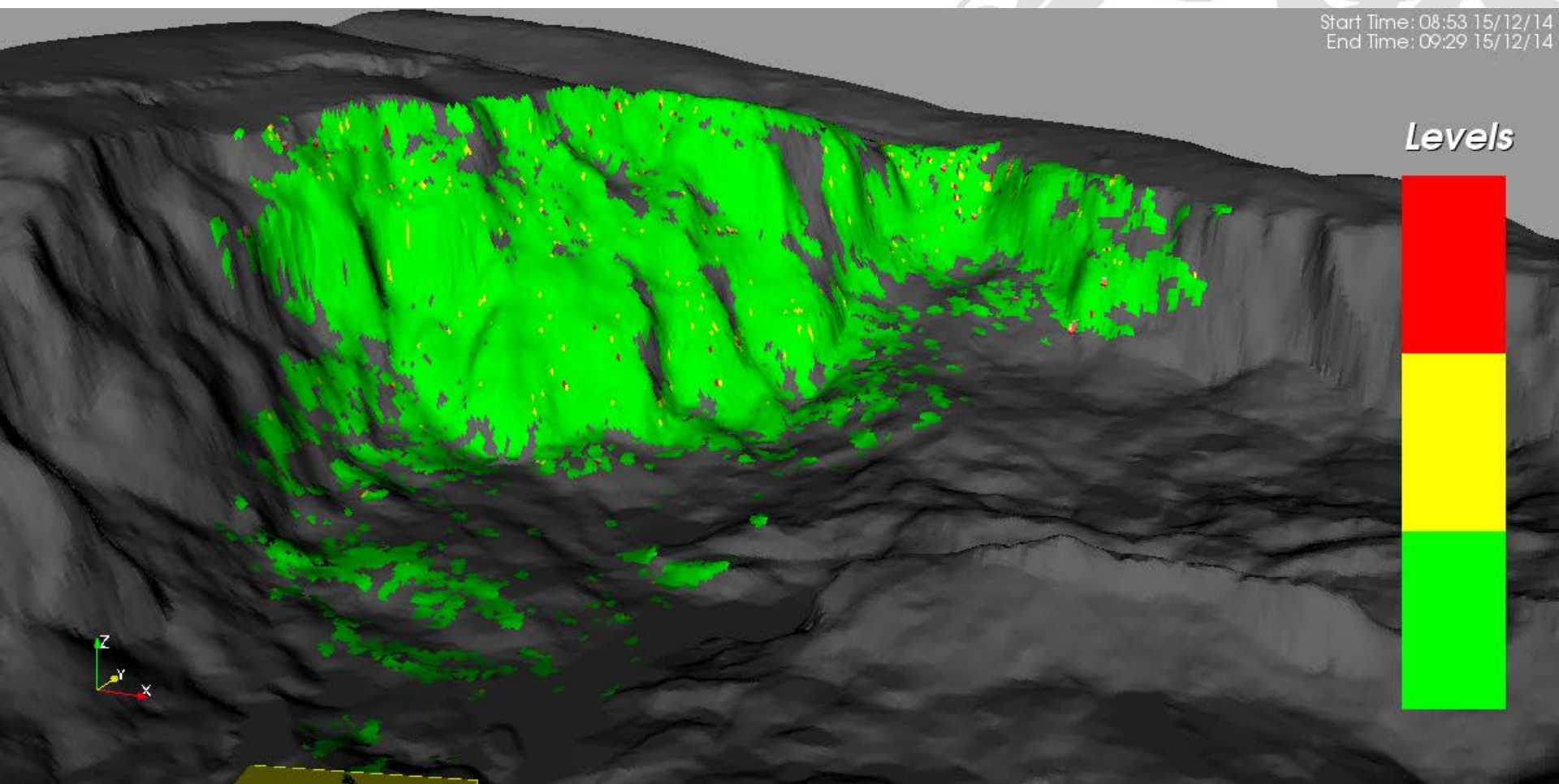
Start Time: 09:27 12/12/14
End Time: 13:24 12/12/14

Levels



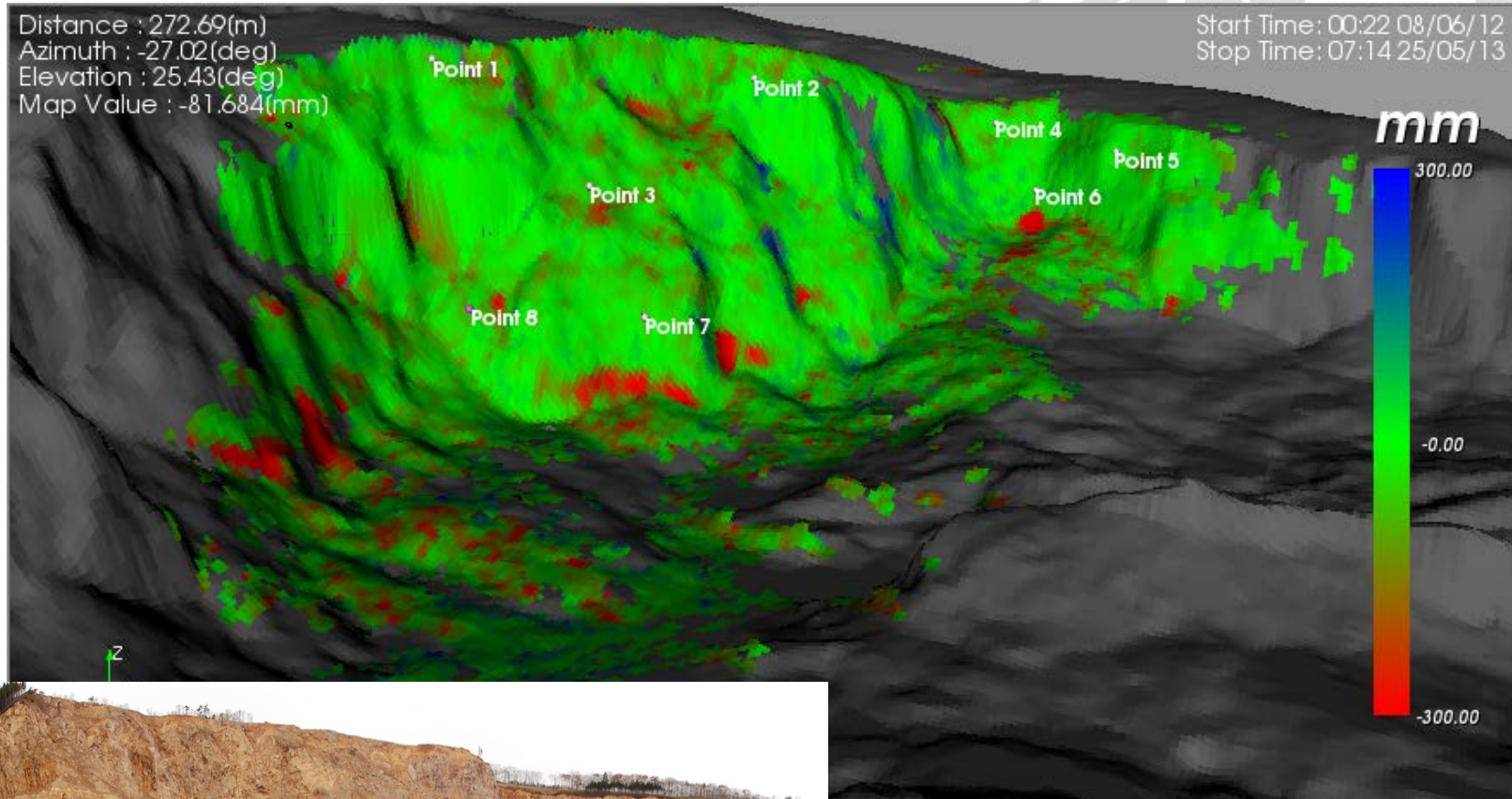
Start Time: 08:53 15/12/14
End Time: 09:29 15/12/14

Levels



地すべり斜面の長期的変動分布

(2012年6月～2013年5月)

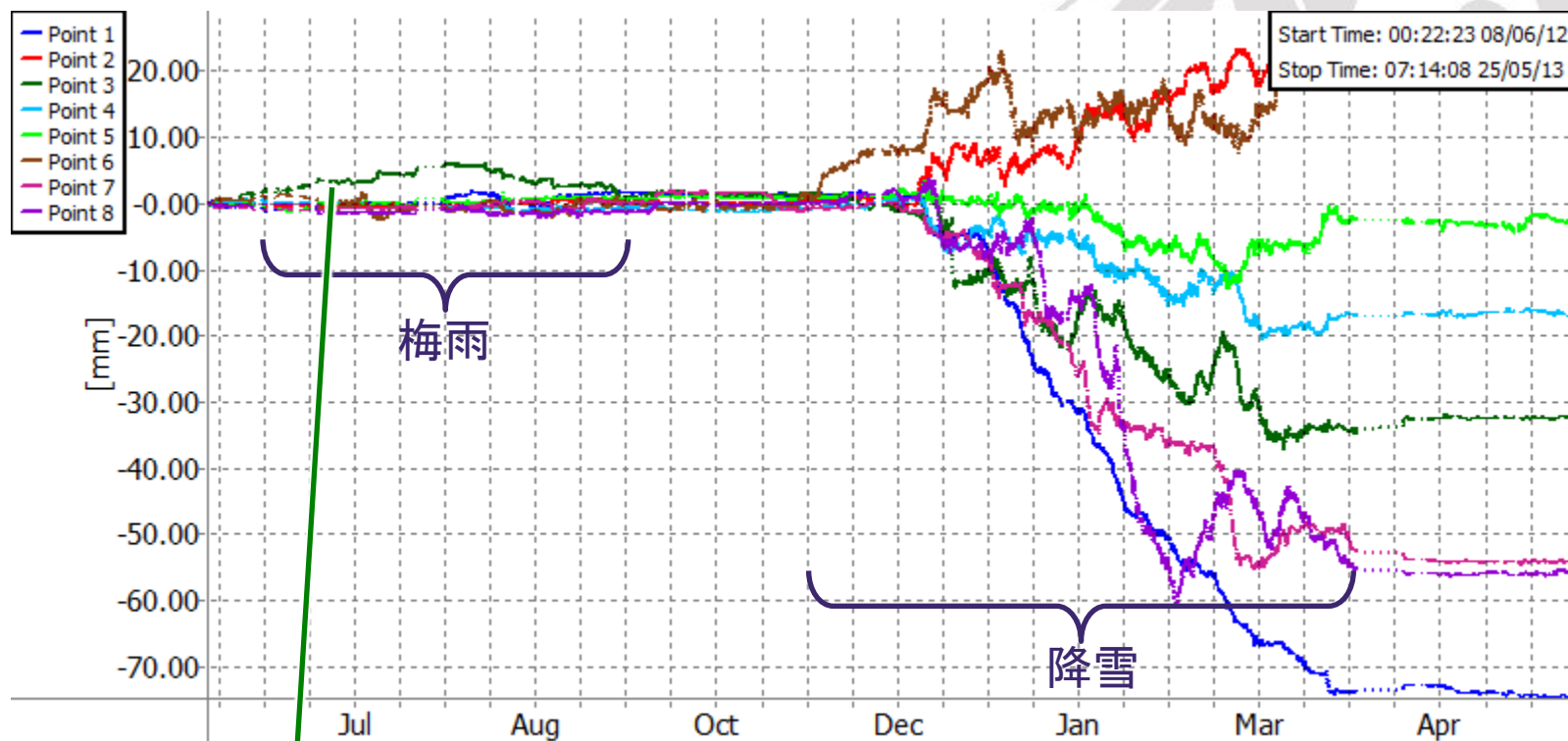


- 斜面全体としては安定
- いくつかまとまった変動が観測



地すべり斜面の長期的経時変化

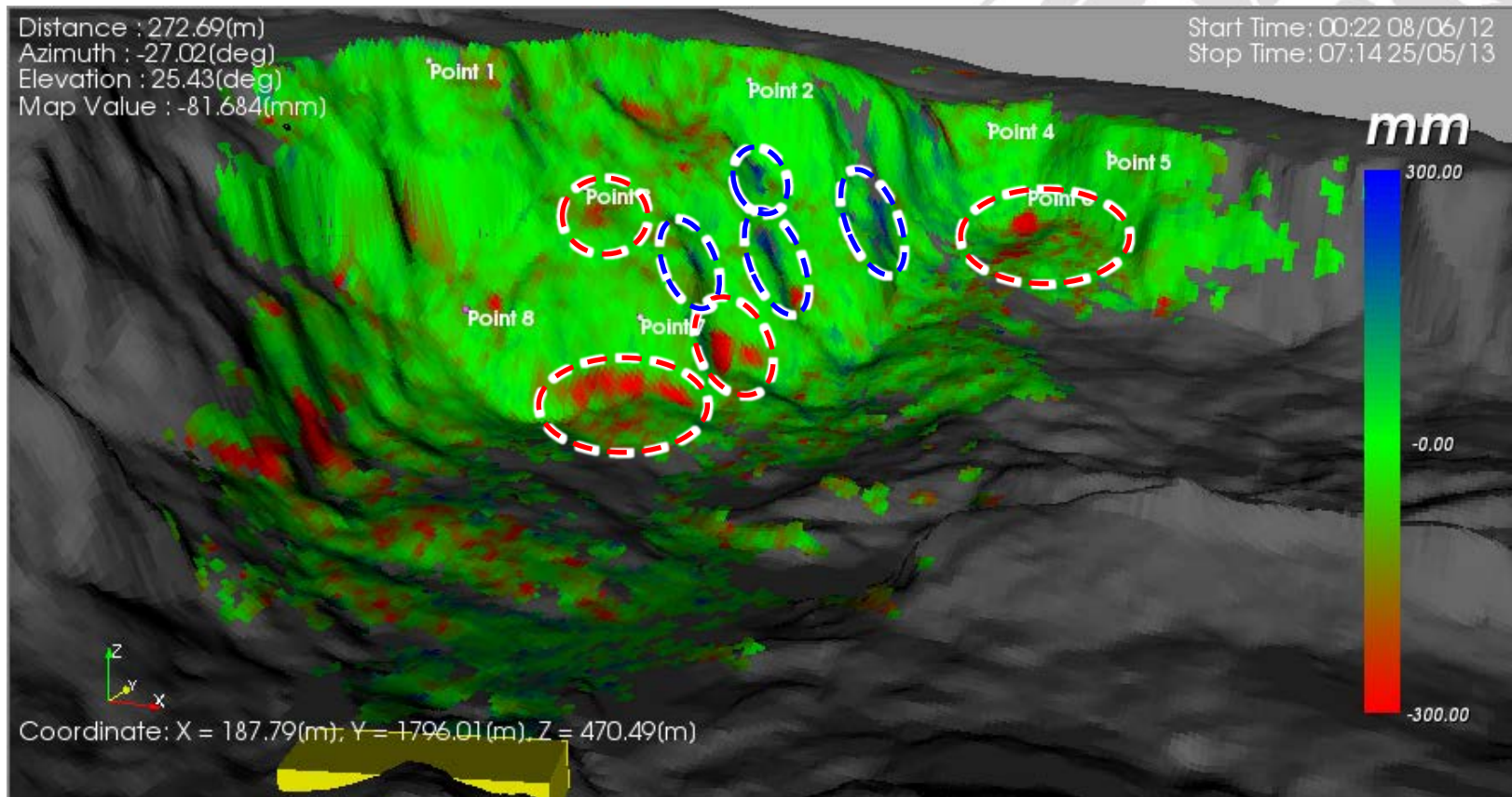
(2012年6月～2013年5月)



- ・ 降雨による土砂の堆積を観測
- ・ 降雪による影響が大きい



地すべり斜面変動

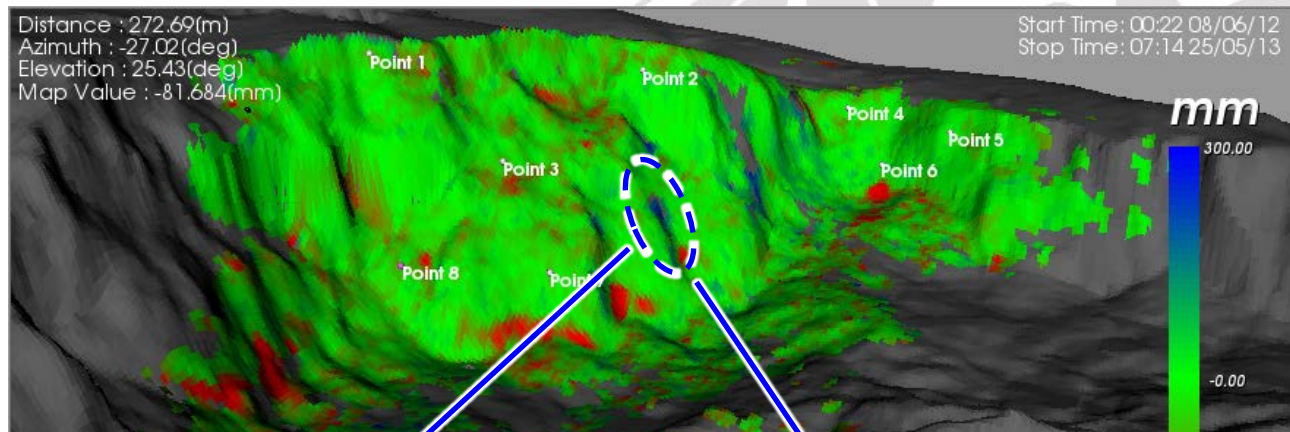


傾斜の急な窪地で正の変化(レーダから遠ざかる変化)

傾斜の緩やかな斜面下部で負の変化(レーダへ近づく変化)

斜面表層土砂の小規模な流出・堆積

監視カメラの映像



2012年6月8日 8:00



2013年5月25日 8:00



地震による地すべり斜面の変化

- 2012年12月7日 17:18に三陸沖を震源とする地震
- 栗原市栗駒で震度4を観測

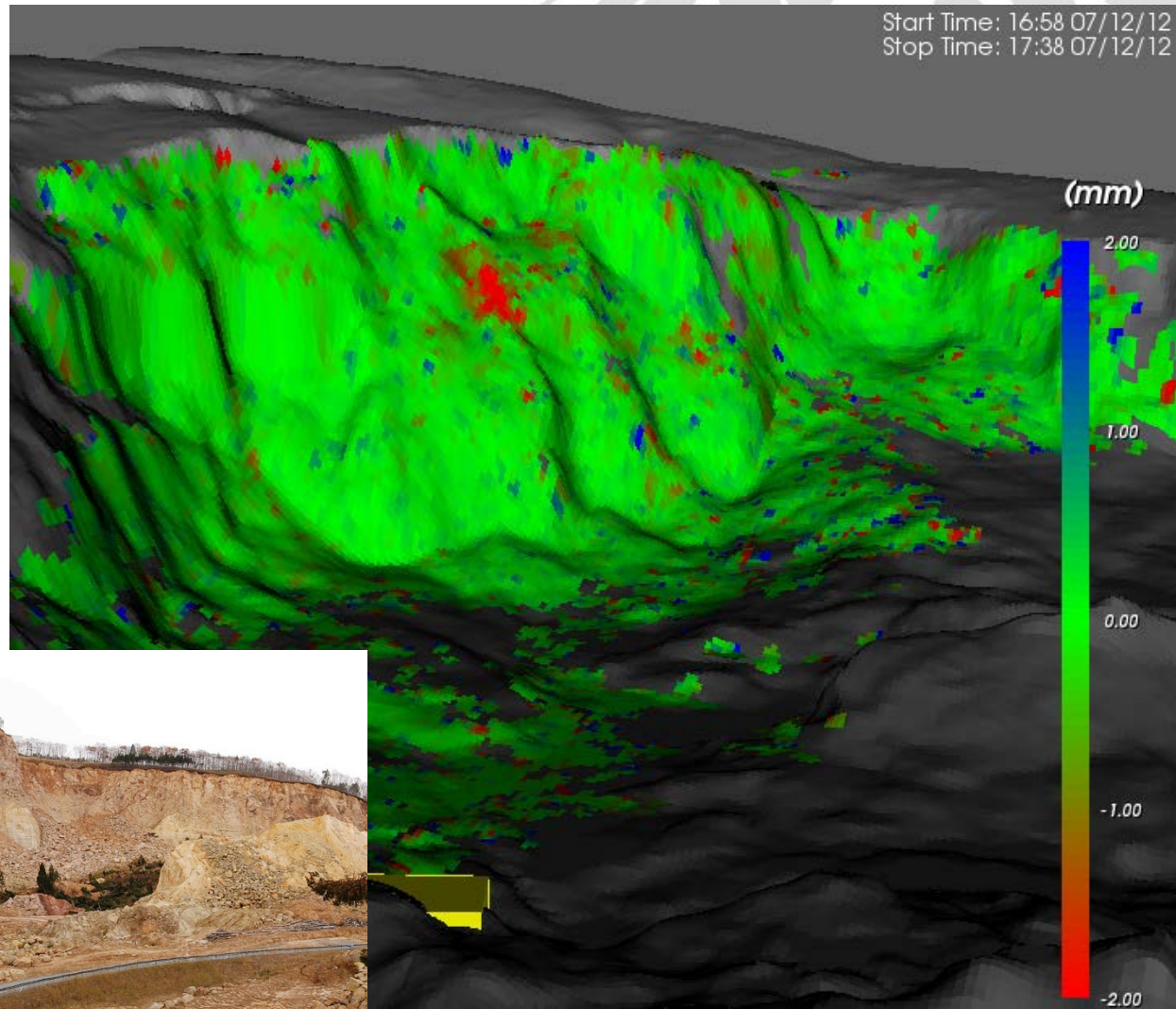


地震前(12月6日 8:00)

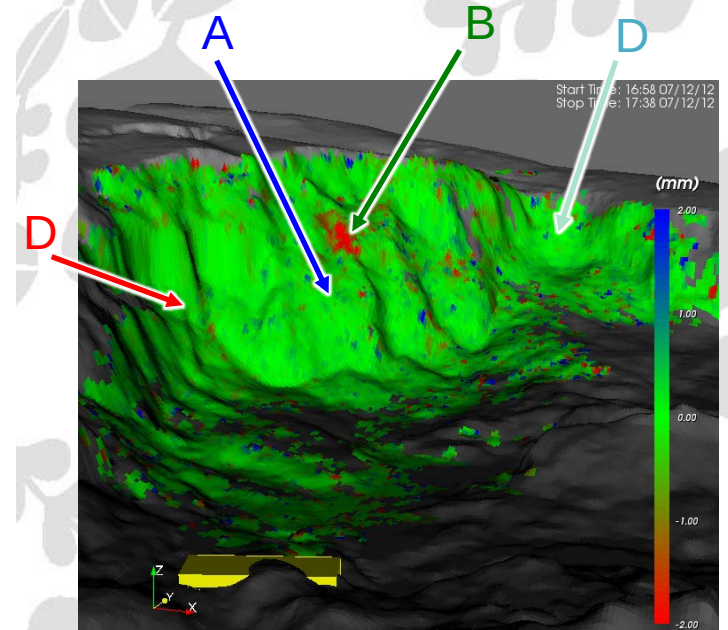
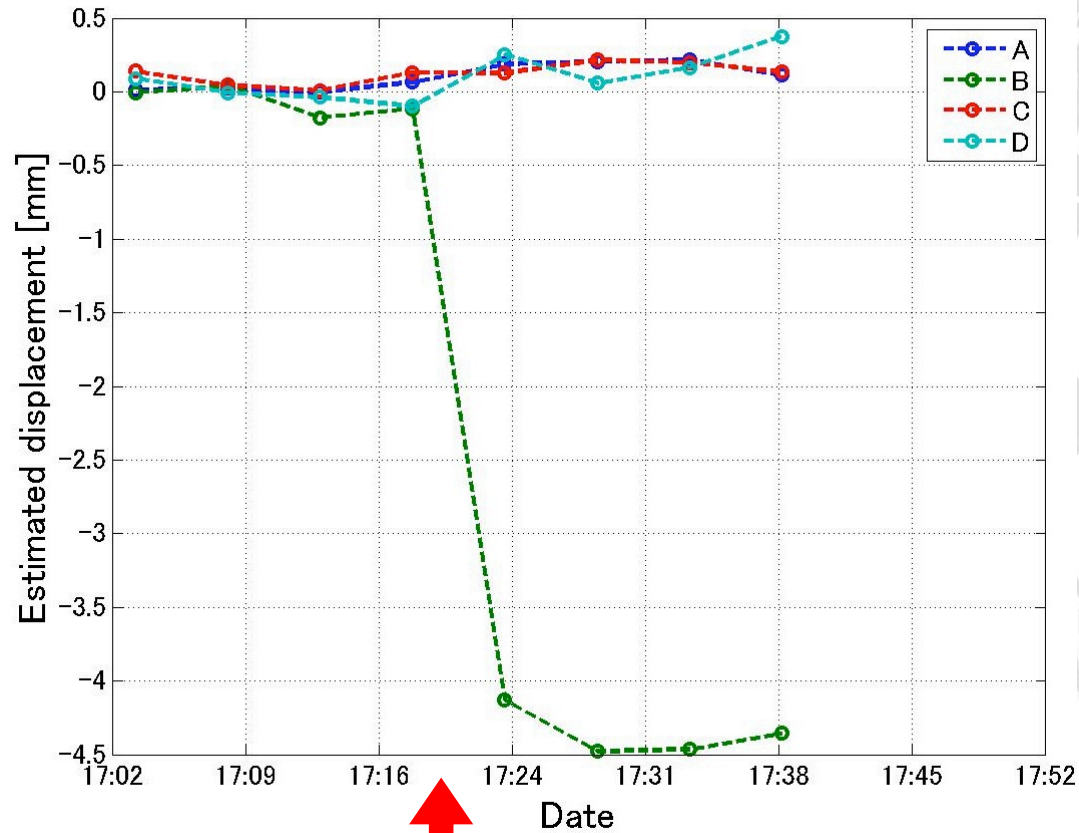


地震後(12月16日 8:00)

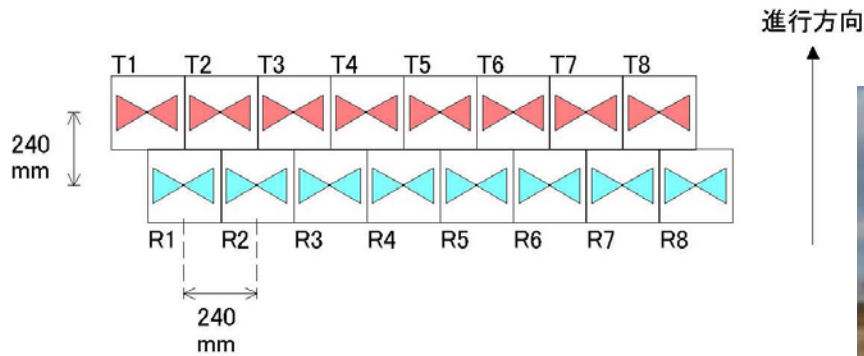
地震前後30分間の斜面の変化



地震による斜面の経時変化



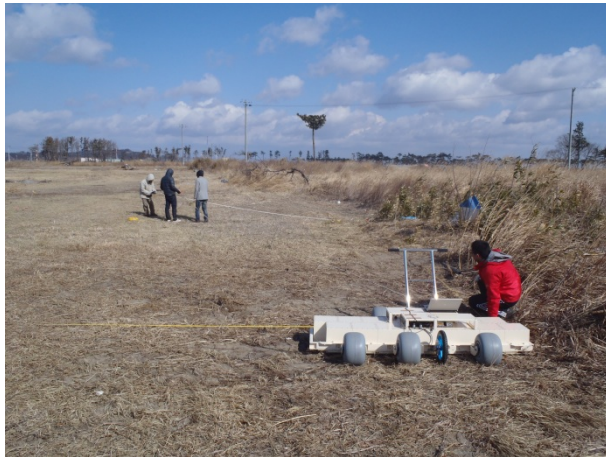
アレイ型地中レーダ「やくも」による 搜索活動



周波数	50MHz - 1.5GHz
レーダ方式	ステップ周波数
アンテナ素子	ボウタイアンテナ
アンテナ数	送信8, 受信8 (3-8組に可変可能)
計測間隔	走行方向に1cm
計測速度	7km/h (1cm間隔で計測時)



野蒜築港でのアレイGPR計測 (2013年2月)



名取市 閑上海岸 2013年3月



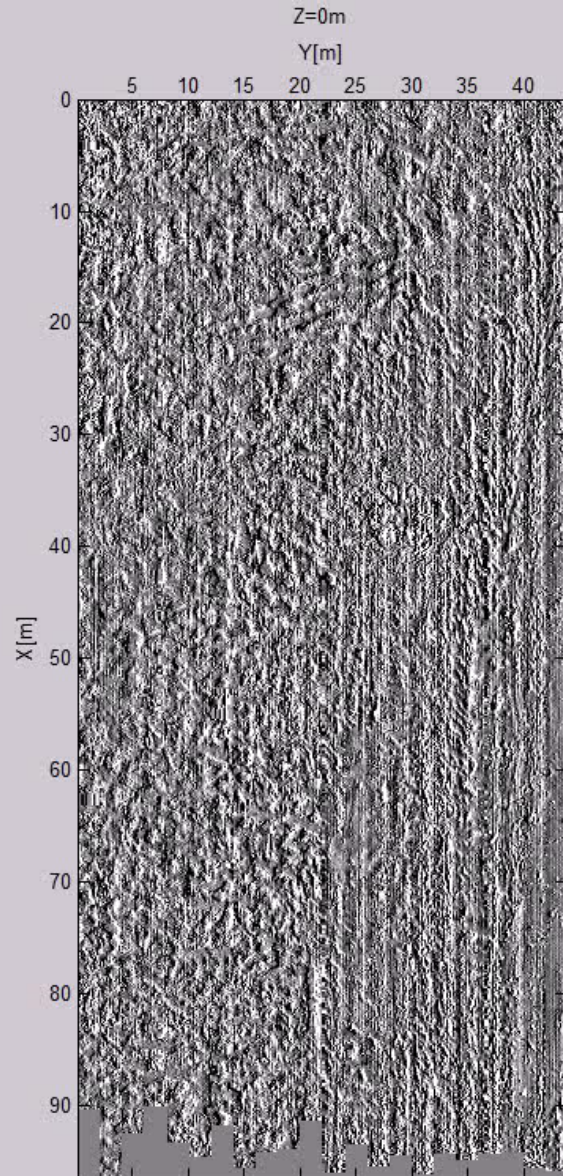
GPR計
測





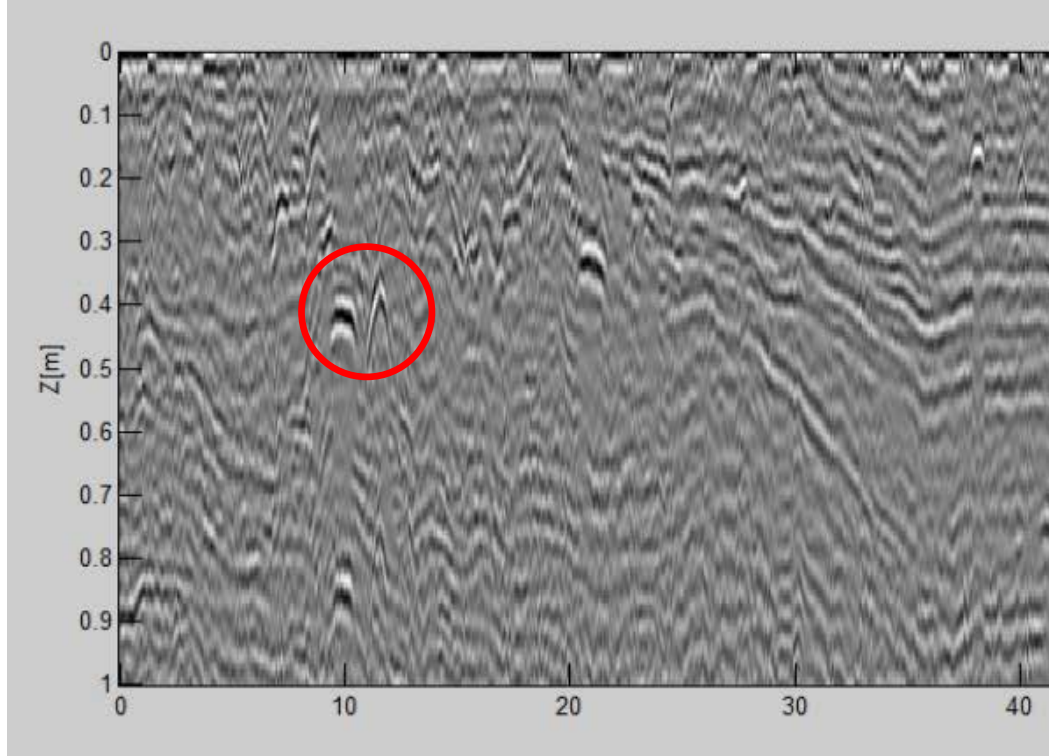
閑上海岸 2013年3月





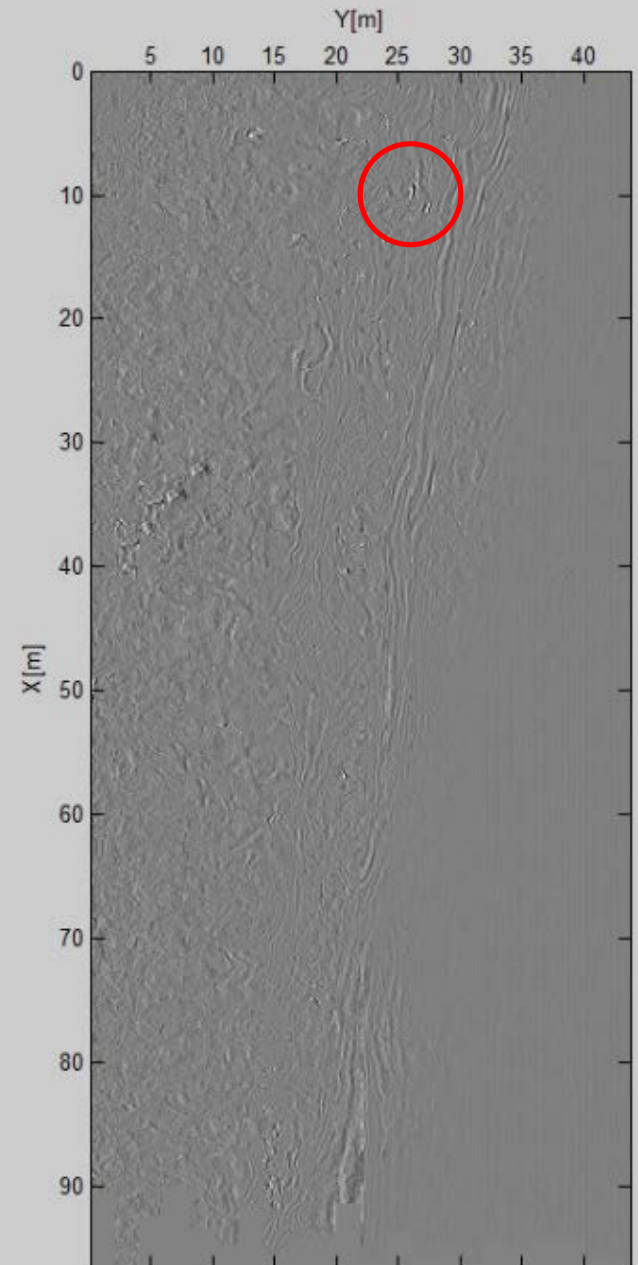
GPRデータの水平面 スライス表示 関上海岸 2013年3月





$V=25.8\text{m/s}$

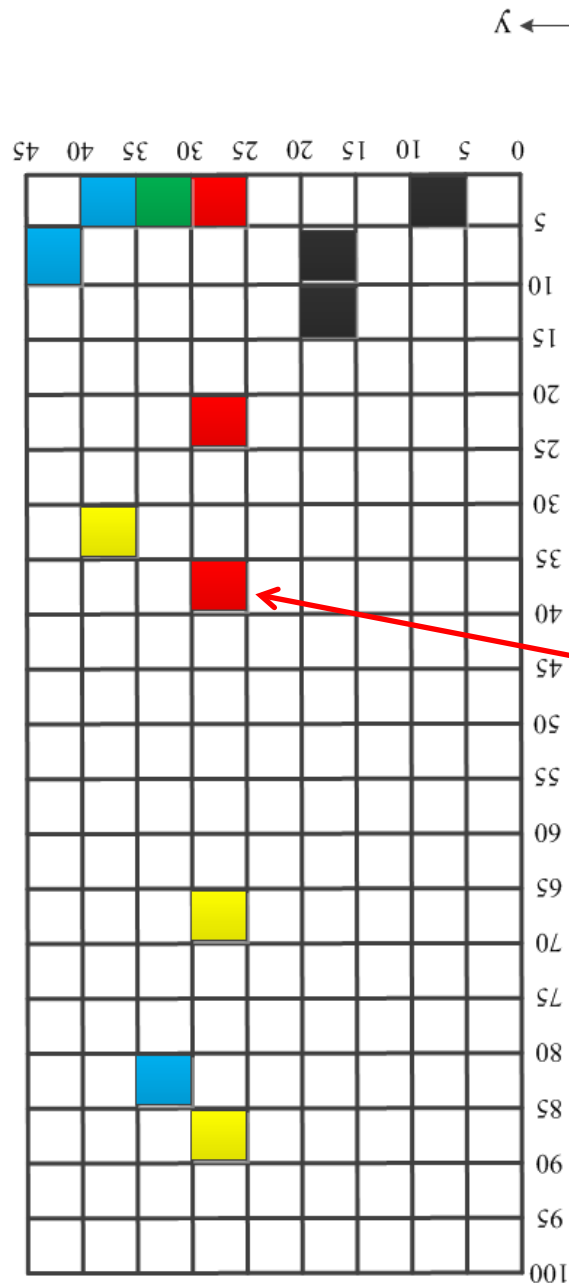
$Z=0.4982\text{m}$



「やくも」が発見した
木造住宅の一部
深さ50cm、長さ1m
以上の梁材？



検知した埋設物

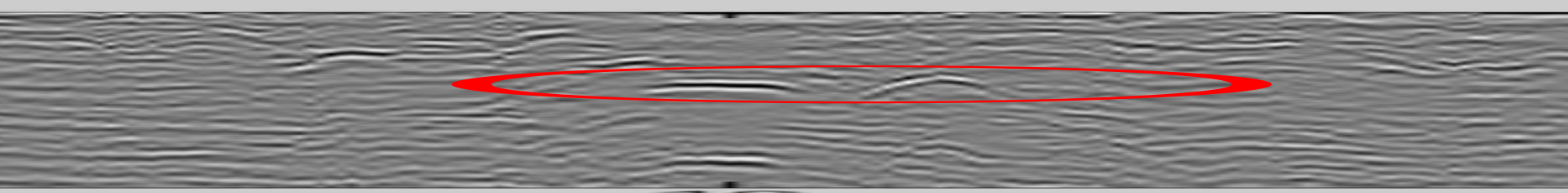


5m格子に埋設物の有無を書き込んでいます。
 こうしたマップを搜索作業を行う皆さんに提供し、砂浜を掘削する地点の参考にします

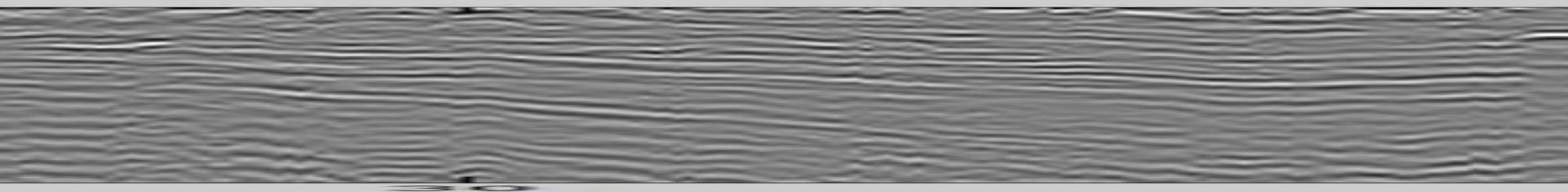
強い反射のある地点
 (金属板では無いと思われる)



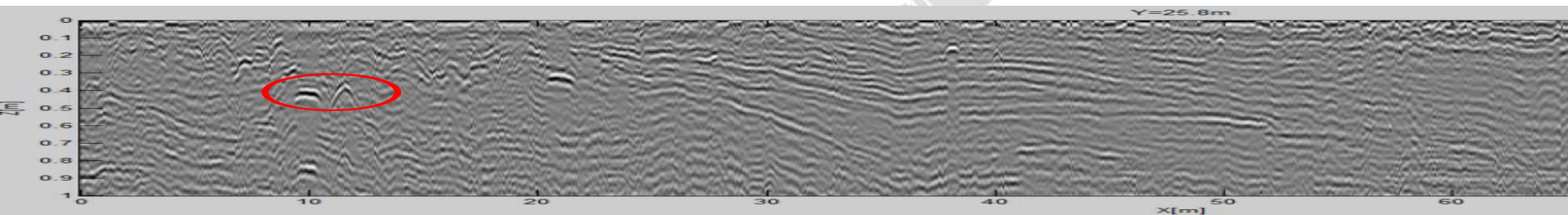
閑上海岸の砂浜断面（2013年3月）



10m 付近 ほぼ正確な縦横比



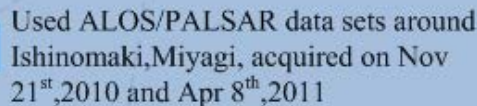
30m 付近 ほぼ正確な縦横比



10-60m 縦横比 1:10



福島・相馬市 原釜海岸



岩手、宮城、福島県警との協力



蒲生海岸で「やくも」が検知した遺留品



蒲生海岸で「やくも」が検知した遺留品

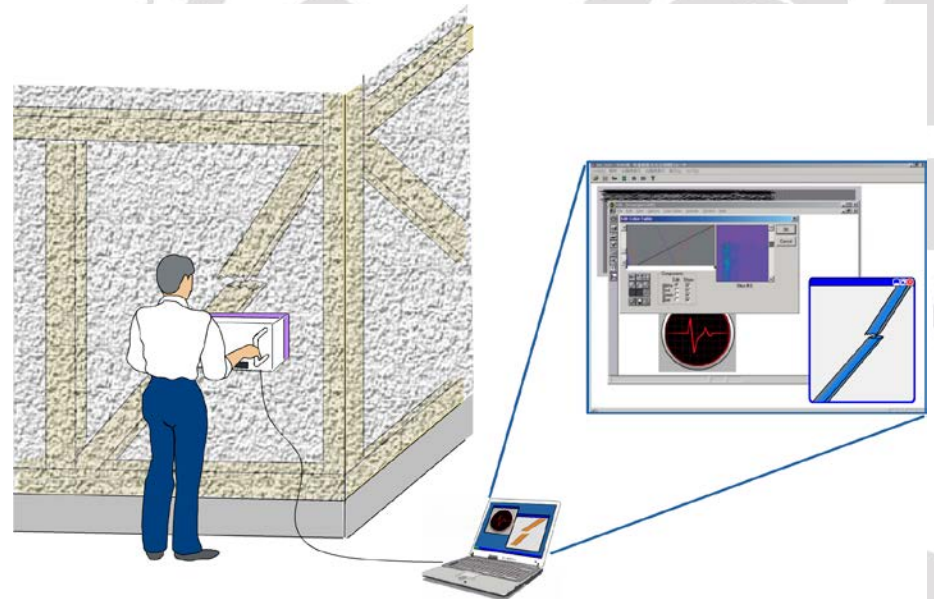


女川町 2011年4月



電磁波を用いた 建造物非破壊センシング技術の研究開発

高度通信・放送研究開発委託研究
情報通信研究機構 (NICT)
(H24～H28)

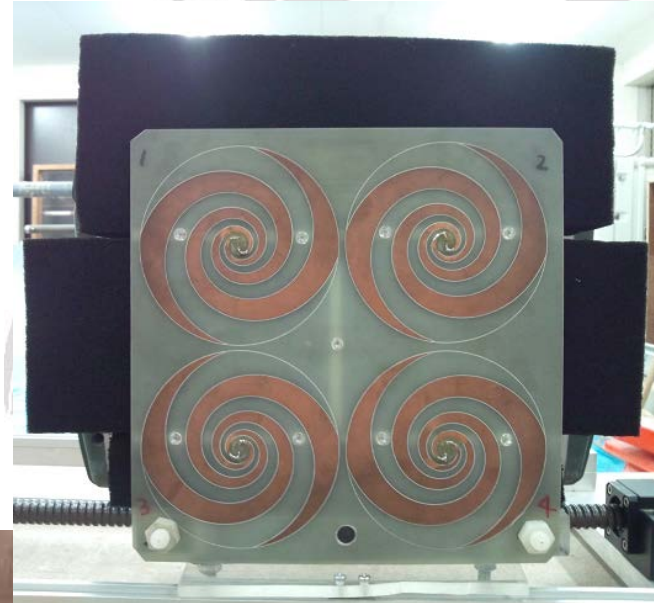


建造物非破壊**センサー**の研究開発と診断技術への実用化



GB-SAR システム(1次元走査)

Spiral Antenna



Positioner

VNA



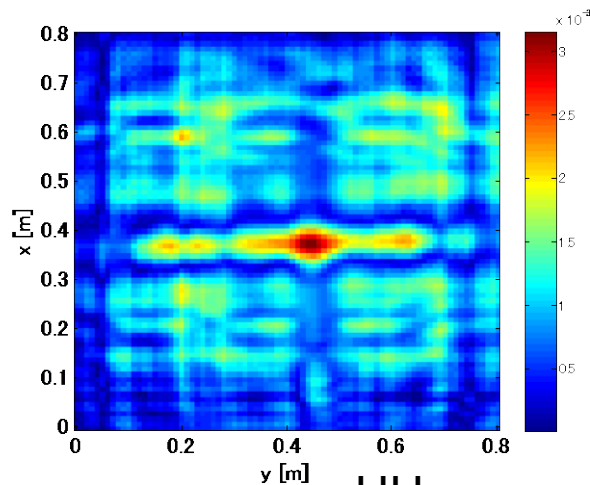
偏波基底の変換

$$\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{LL} & S_{LR} \\ S_{RL} & S_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix}$$

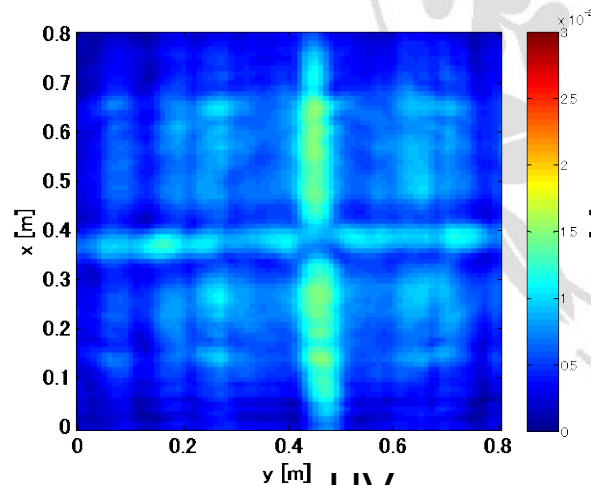
$$\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

...H dipole

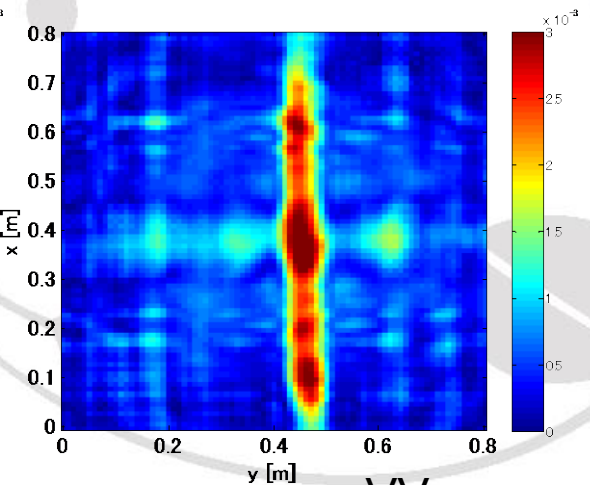
...V dipole



HH



HV



VV



コンクリート供試体の計測実験



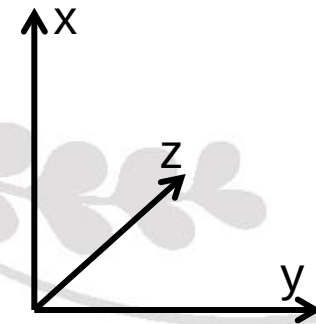
Frequency : 1GHz-4GHz

Scan length (x) : 80cm

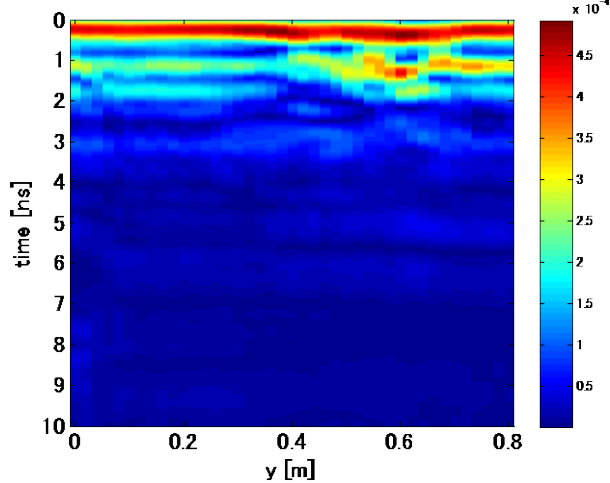
Scan length (y) : 80cm

Scan step (x) : 2.0cm

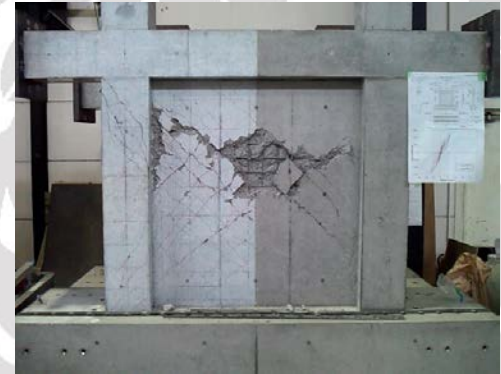
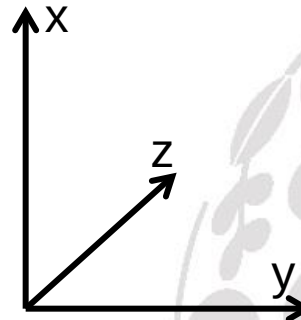
Scan step (y) : 2.0cm



Raw data

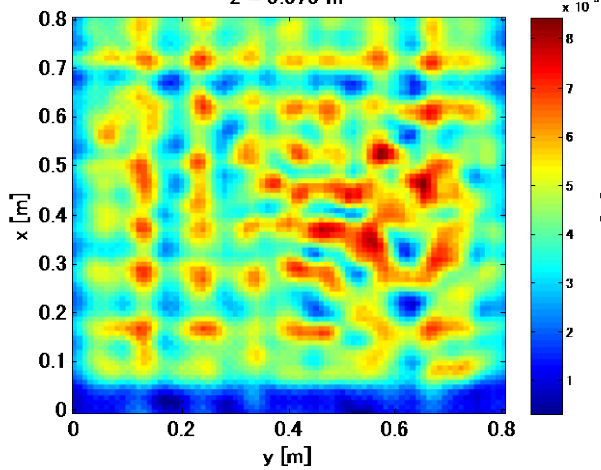


同一偏波



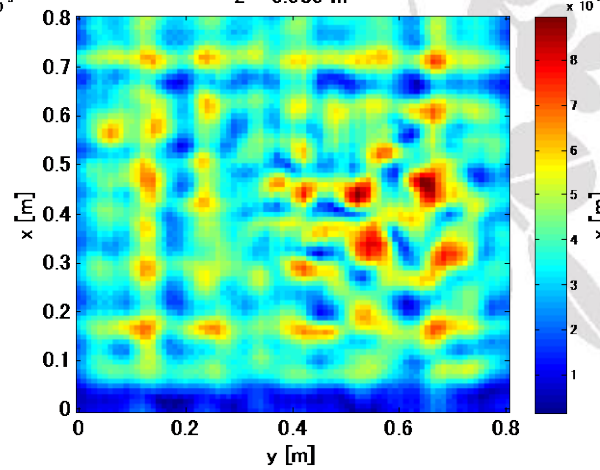
Radar image

$z = 0.070 \text{ m}$



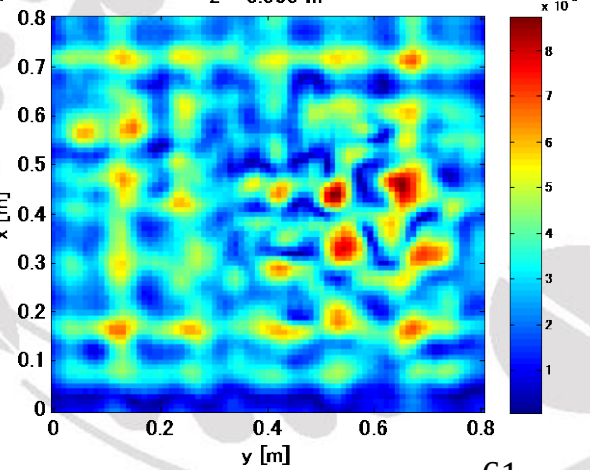
$z=7\text{cm}$

$z = 0.080 \text{ m}$



$z=8\text{cm}$

$z = 0.090 \text{ m}$



$z=9\text{cm}$

61



地震後の木造建築の被災度評価



明らかな損傷
大きな残留変形



全 壊
取り壊し



部分的な損傷
残留変形は僅か

半壊？全壊？
修復可能？不可能？



損傷の形跡は見られるが、壁の内部、接合
の交差部などの損傷程度が分からない！

壁のクラック

接合部の損傷

電磁波センサによる
内部探査

正確な診断をするためには、耐力要素の
内部の損傷を確認する必要がある。

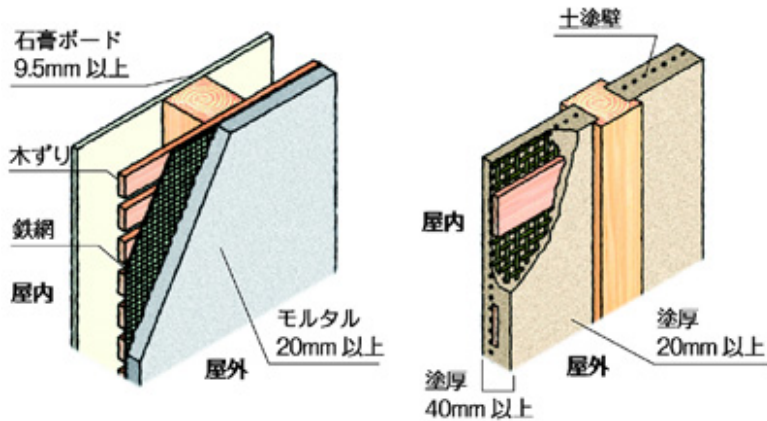


試験体仕様

・木造住宅外周壁(耐力壁)

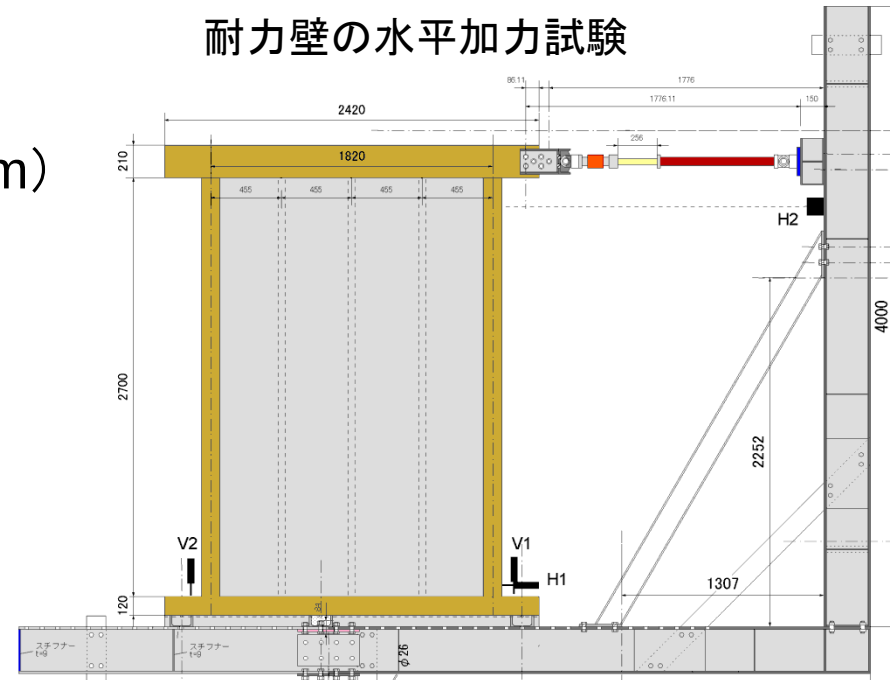
・H24年度:幅1間(1,820mm)

H25年度:幅1.5間～2間(2,730～3,640mm)



壁の仕様 ※新耐震以降を主に検討する

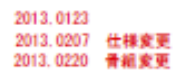
耐力壁の水平加力試験



年代	耐力要素	外装	内装	下地等
新耐震以前	土塗り壁	漆喰	土塗り	木舞
新耐震以降	筋かい	金属板	化粧合板	断熱材(グラスウール)
阪神以降	構造用面材(MDF)	窯業系サイディング	石膏ボード+クロス	防水・透湿シート 断熱材(スタイロフォーム)

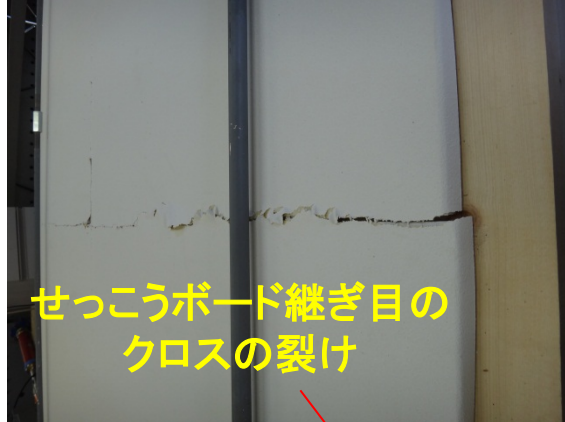
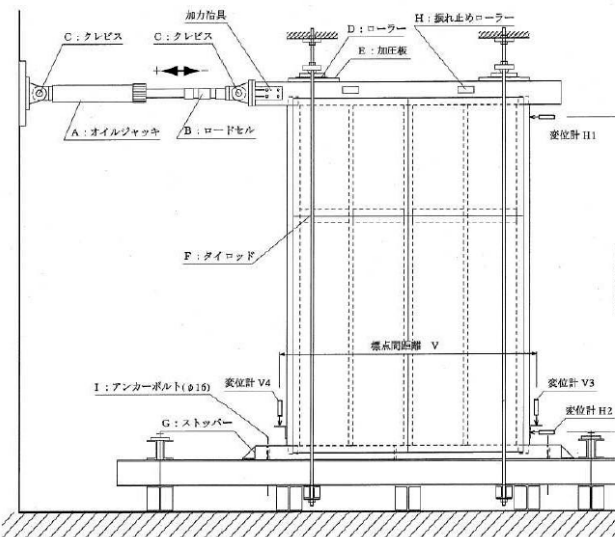


筋違型耐力壁(新耐震～阪神淡路大震災)



変形レベルに応じた損傷の観察

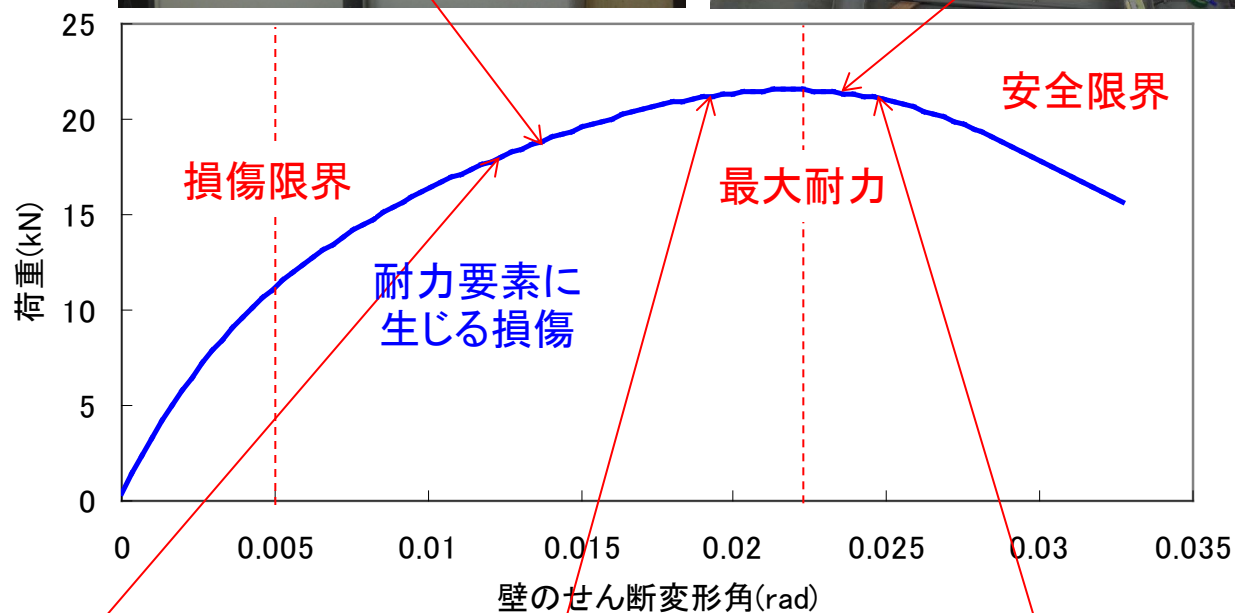
耐力壁の水平加力試験



せっこうボード継ぎ目の
クロスの裂け



壁の全体へのクラック



化粧合板隅部のはがれ
(釘のパンチアウト)



化粧合板の膨れ・はがれ



土台の割裂



固定金具(ヘキサプレート)の変形

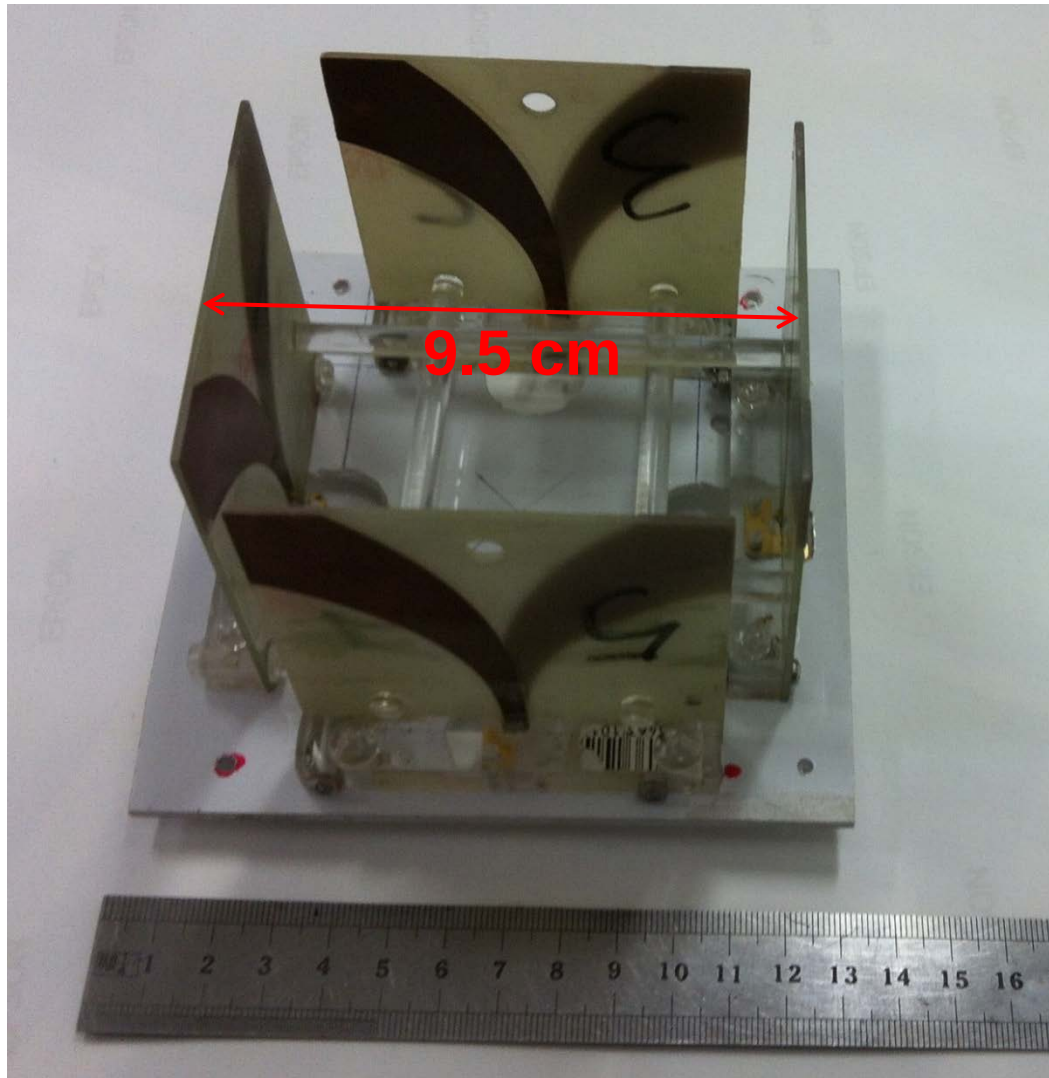


筋交いの損傷





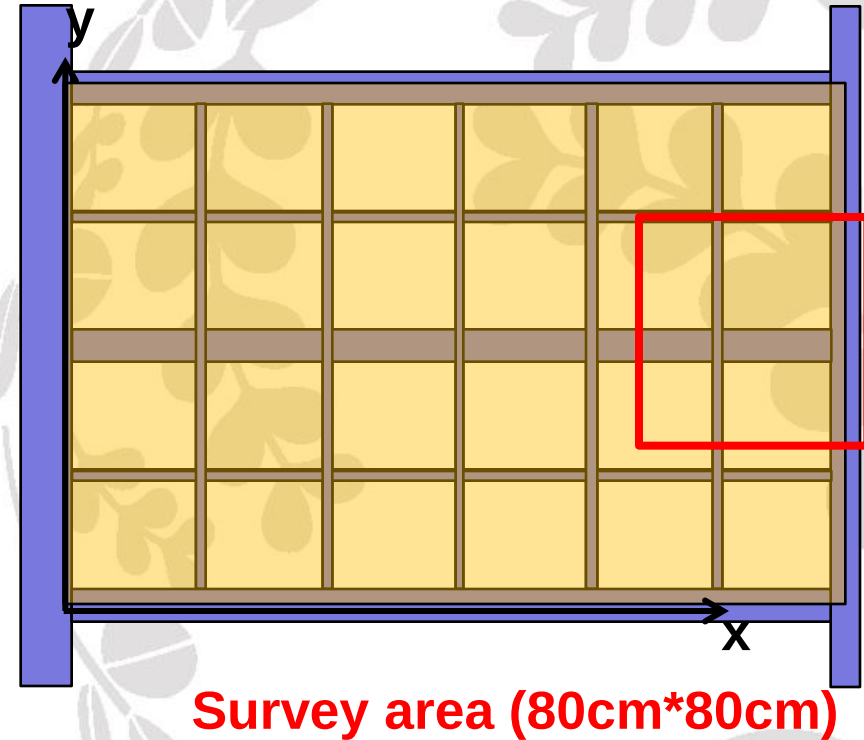
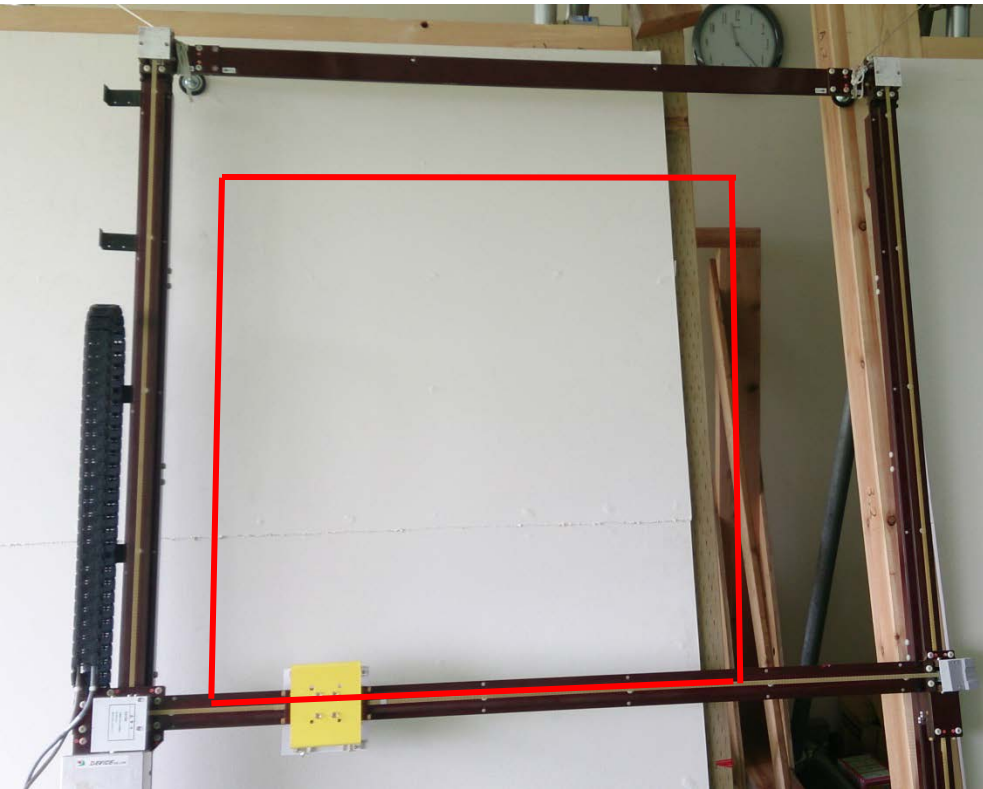
Vivaldi Antenna Array



Vivaldi Antenna
7.5 cm* 7.8 cm



2D Scan on a Wooden Wall Model

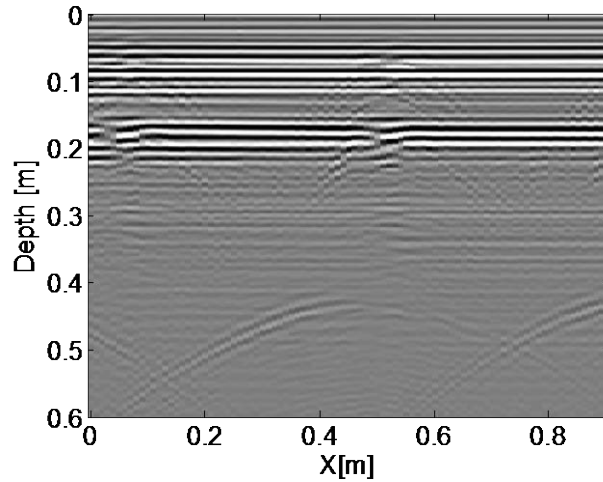


- Frequency rang: 1 GHz – 20 GHz
- Sampling points: 801
- IFBW: 1 kHz
- Polarization: HH, HV, VV(under measuring)
- Scan interval (dx=5 mm, dy=5mm)
- Scan time: 24 hours

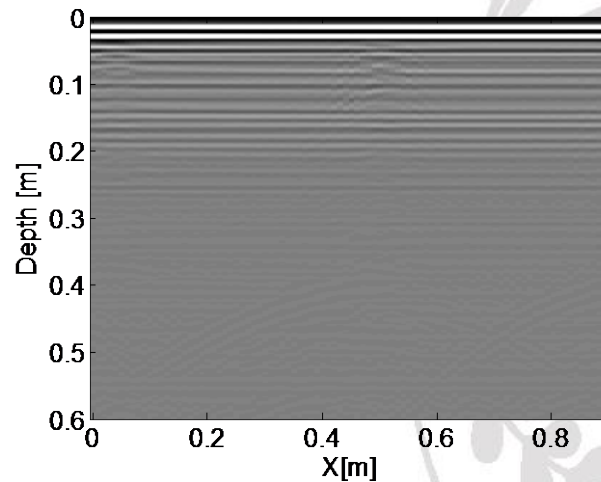


Higher Frequency (5-20 GHz)

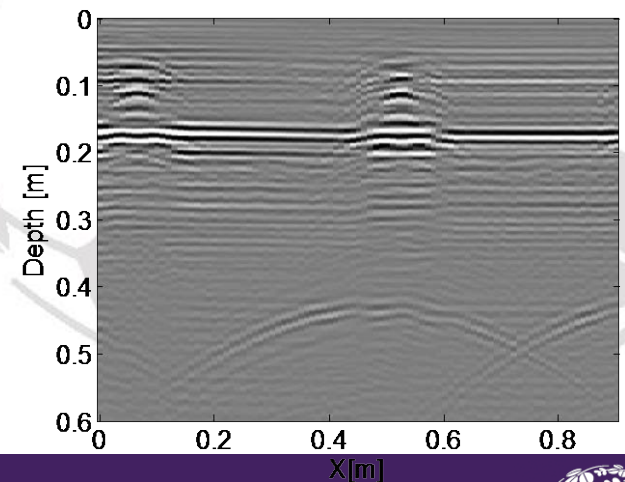
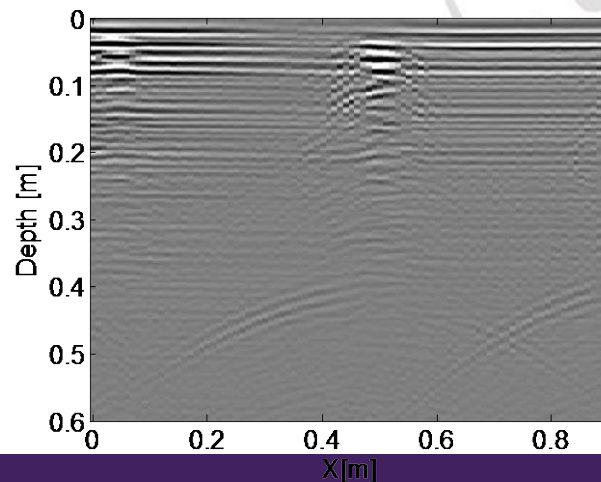
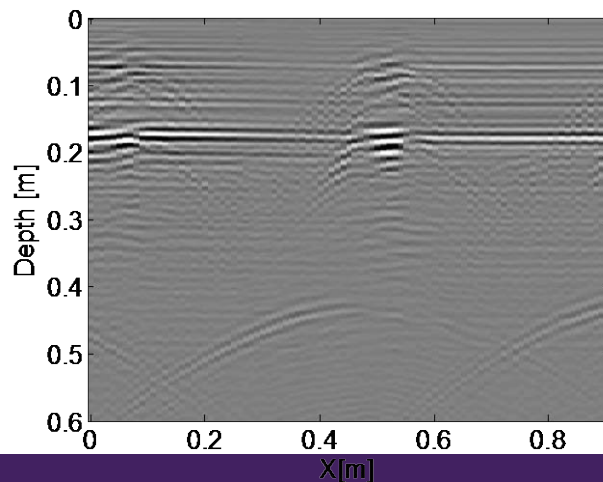
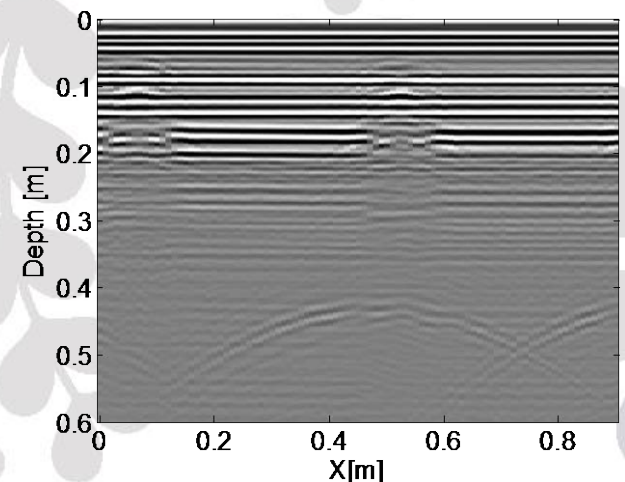
HH



HV



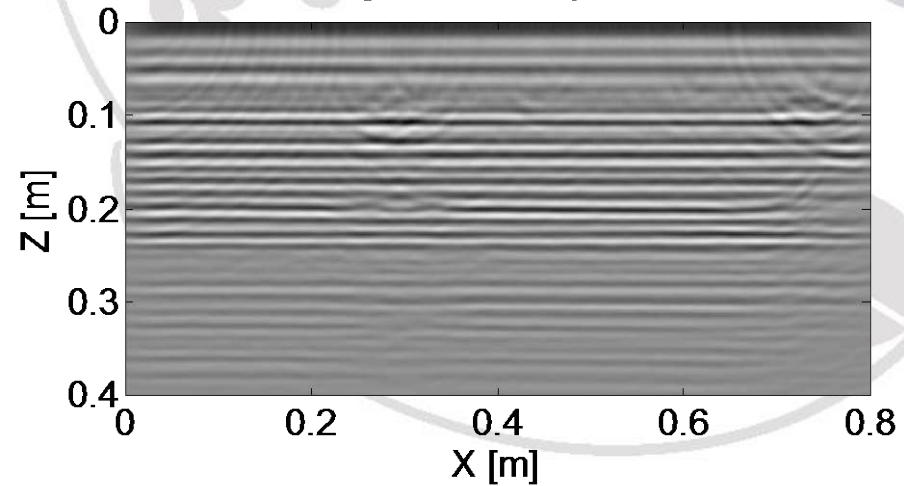
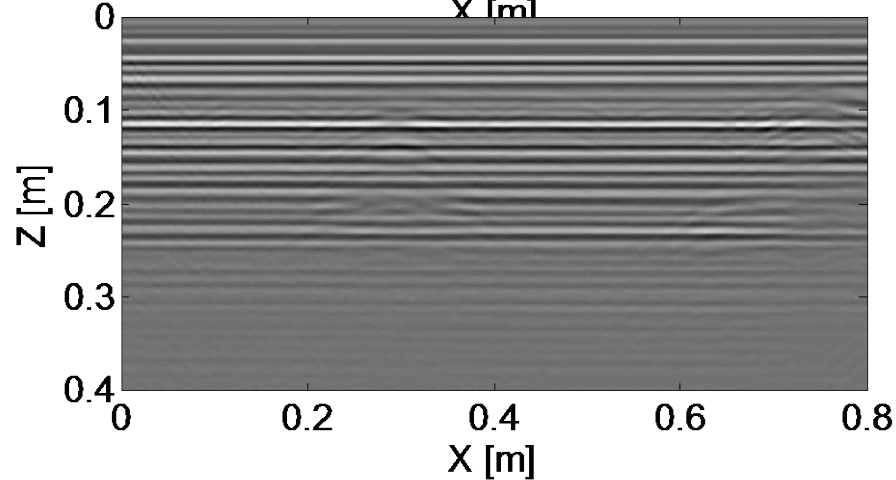
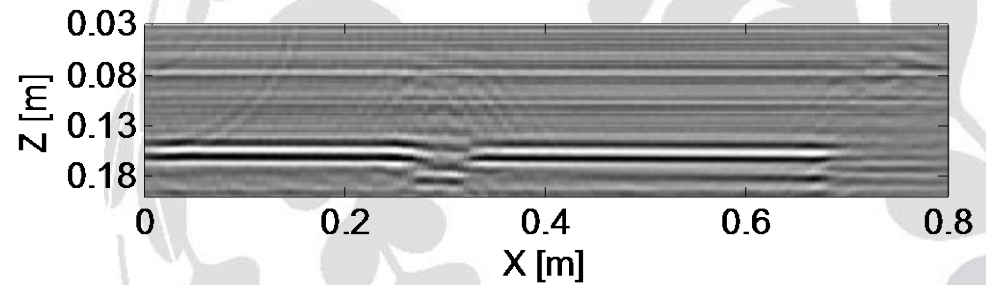
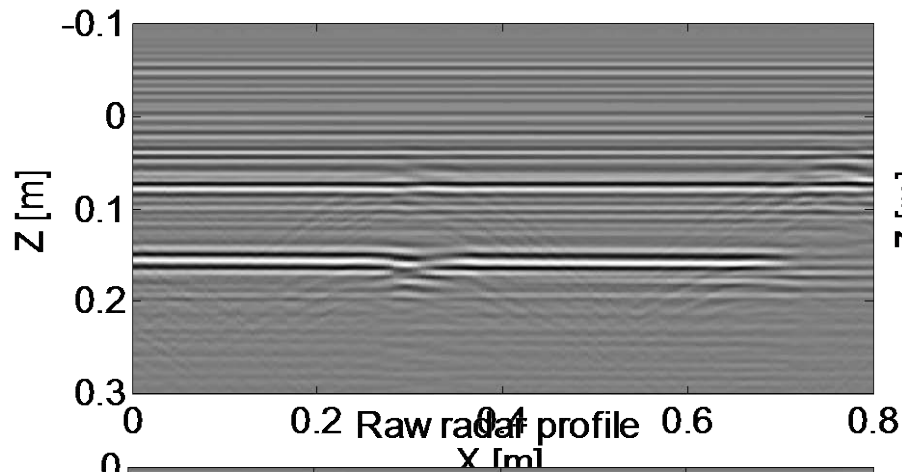
VV



垂直断面

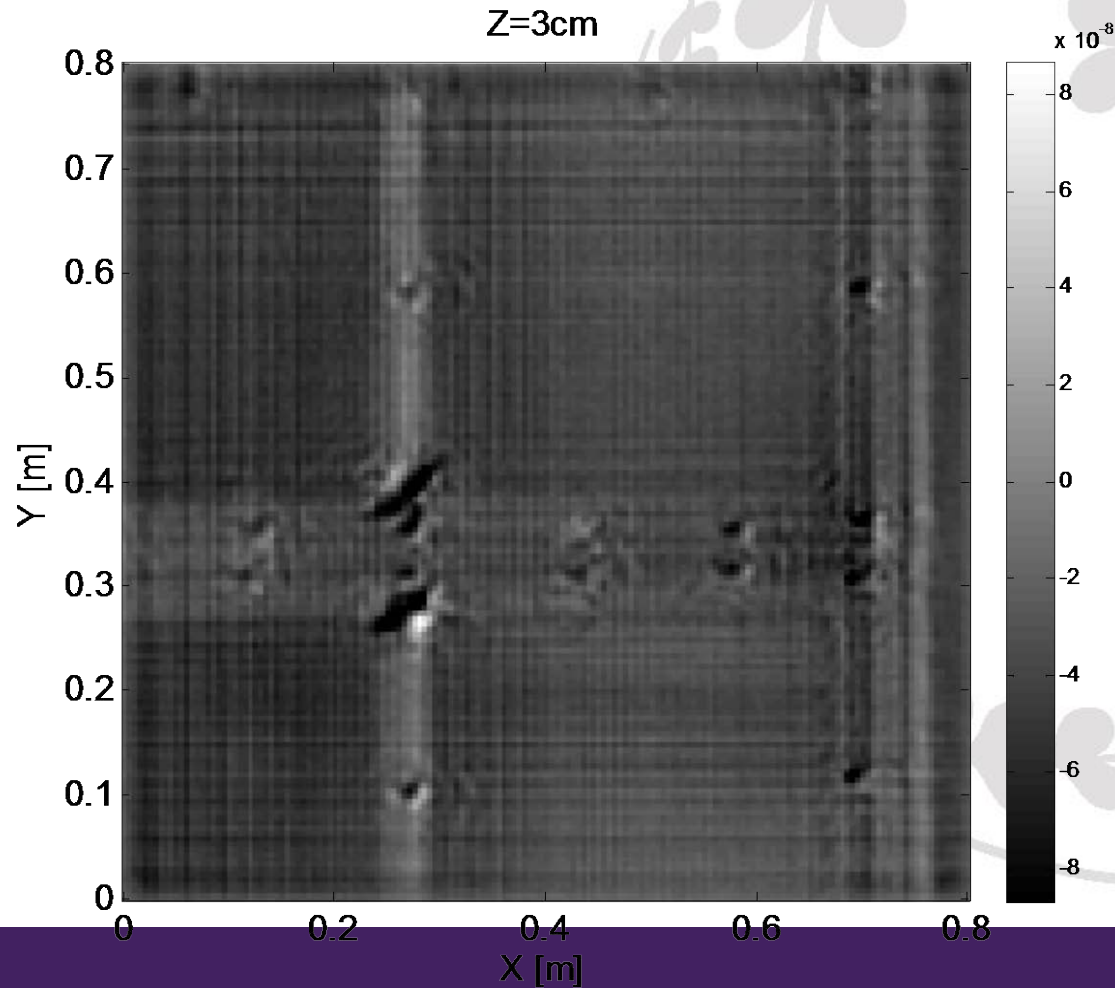
Raw

Migrated

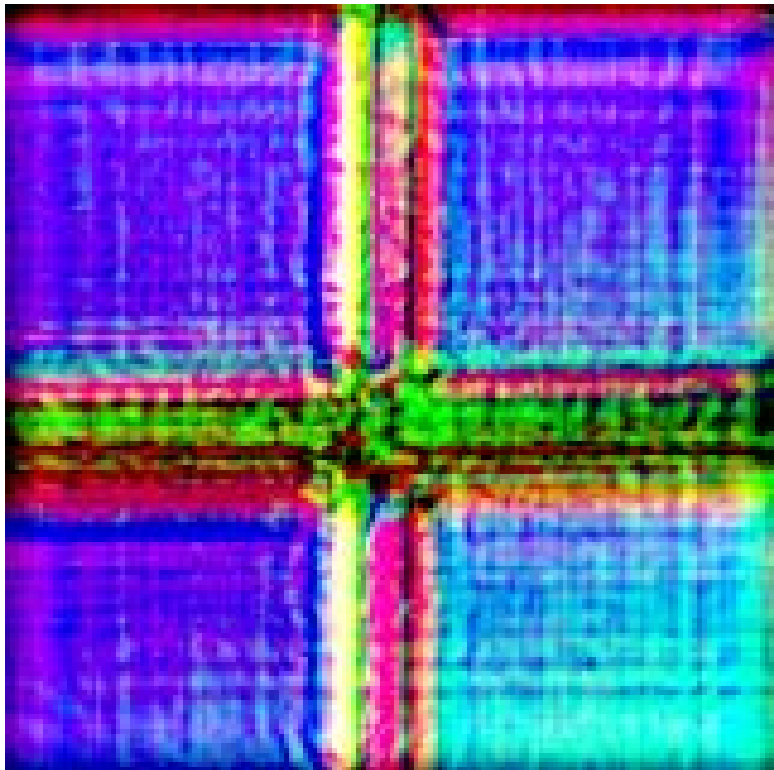


水平断面 (HV)

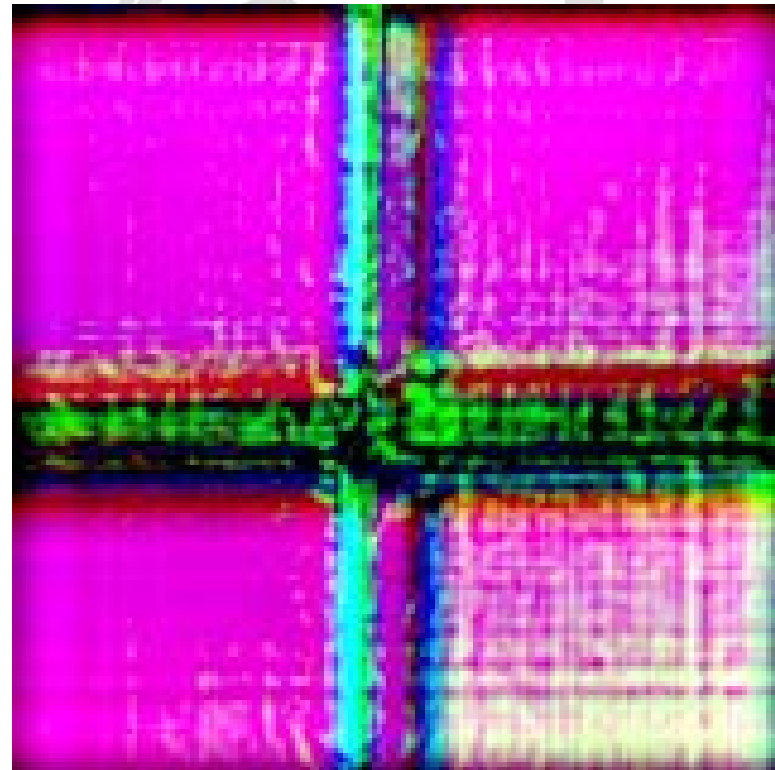
マイグレーションイメージ(動画で表示します)



偏波イメージ RGB Image



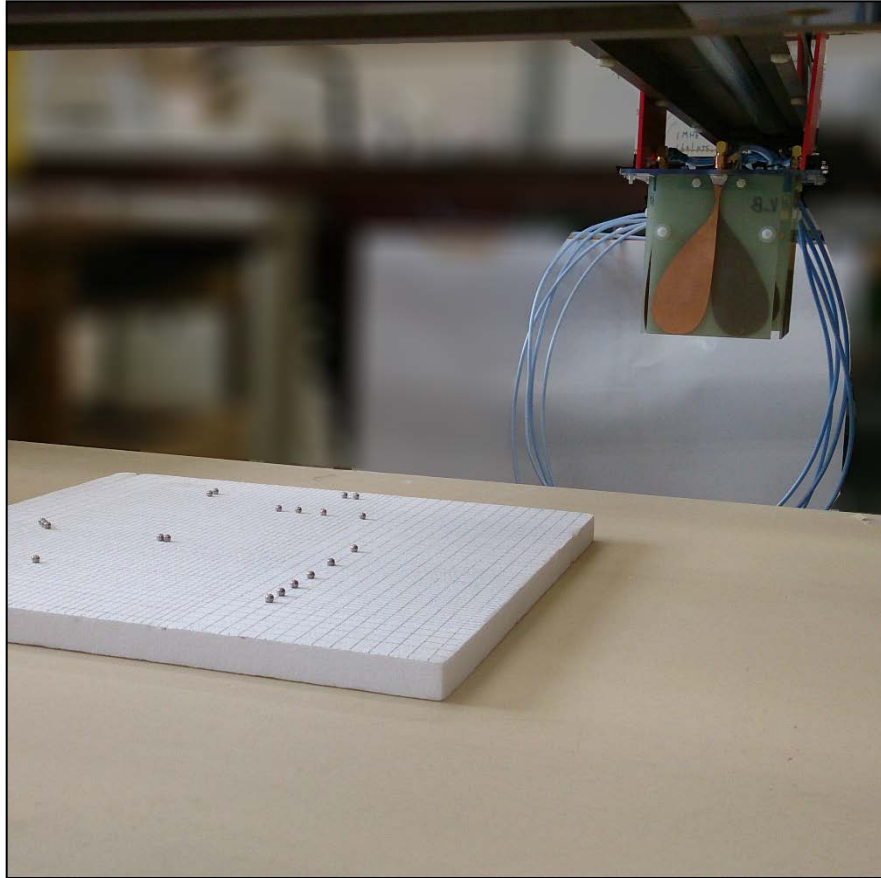
R: $|HH-VV|$
G: $|2HV|$
B: $|HH+VV|$



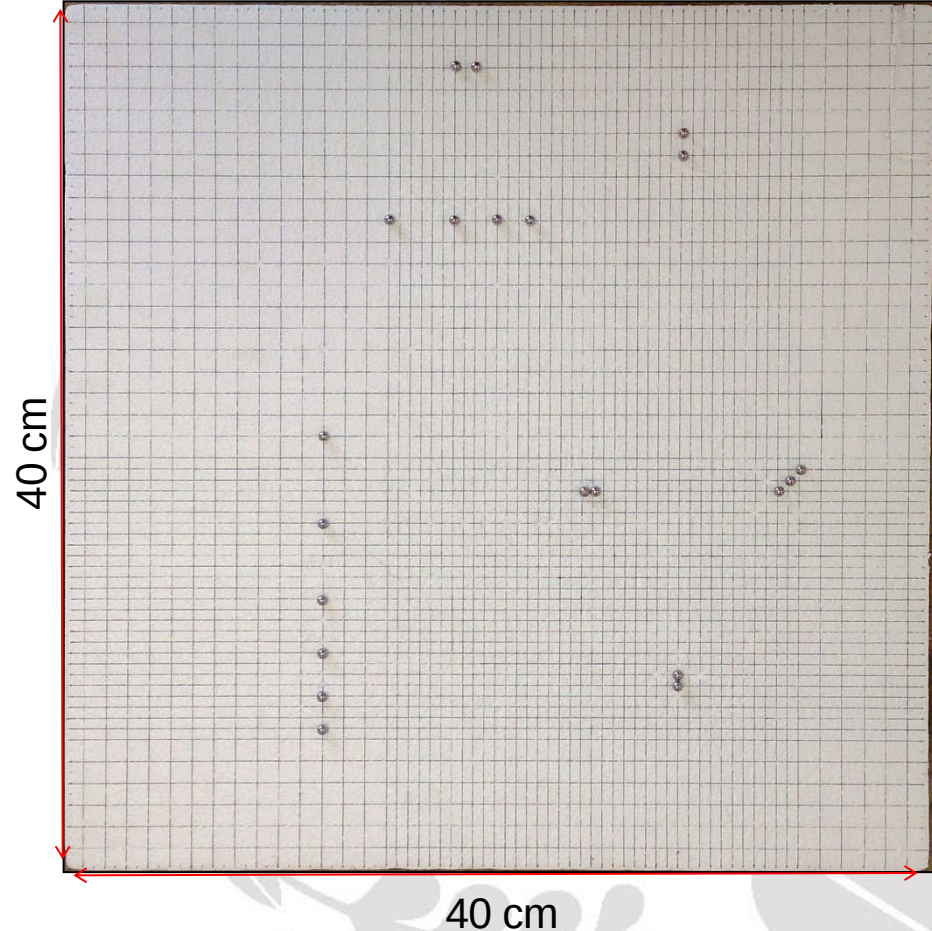
R: $|VV|$
G: $|HV|$
B: $|HH|$



Resolution Experiment with Metal Spheres

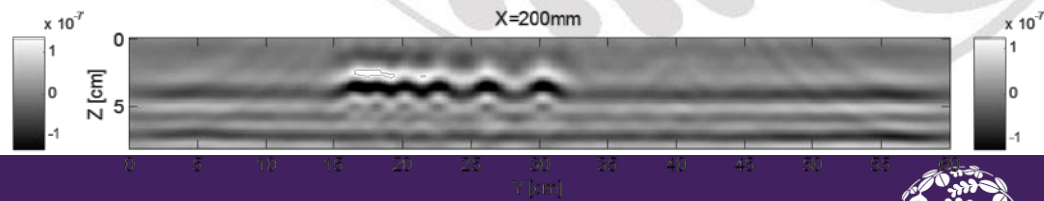
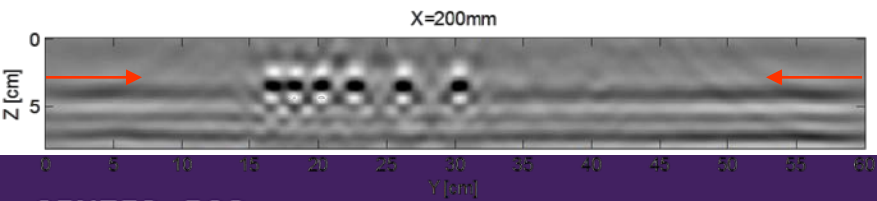
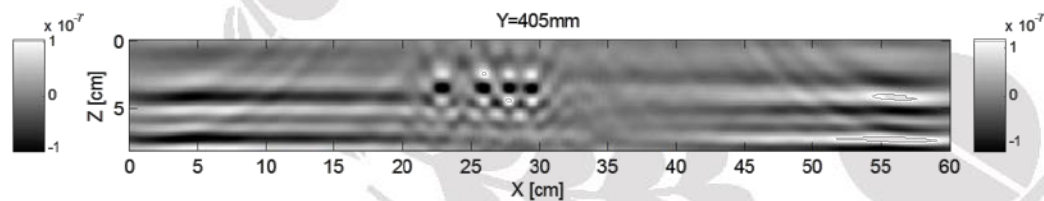
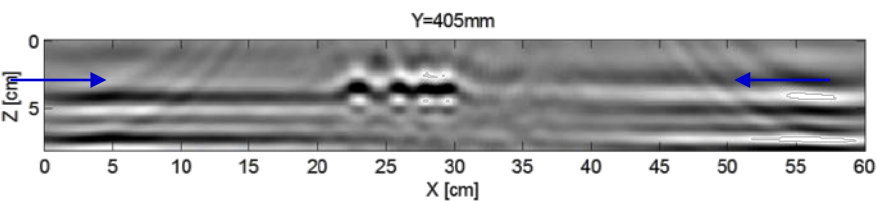
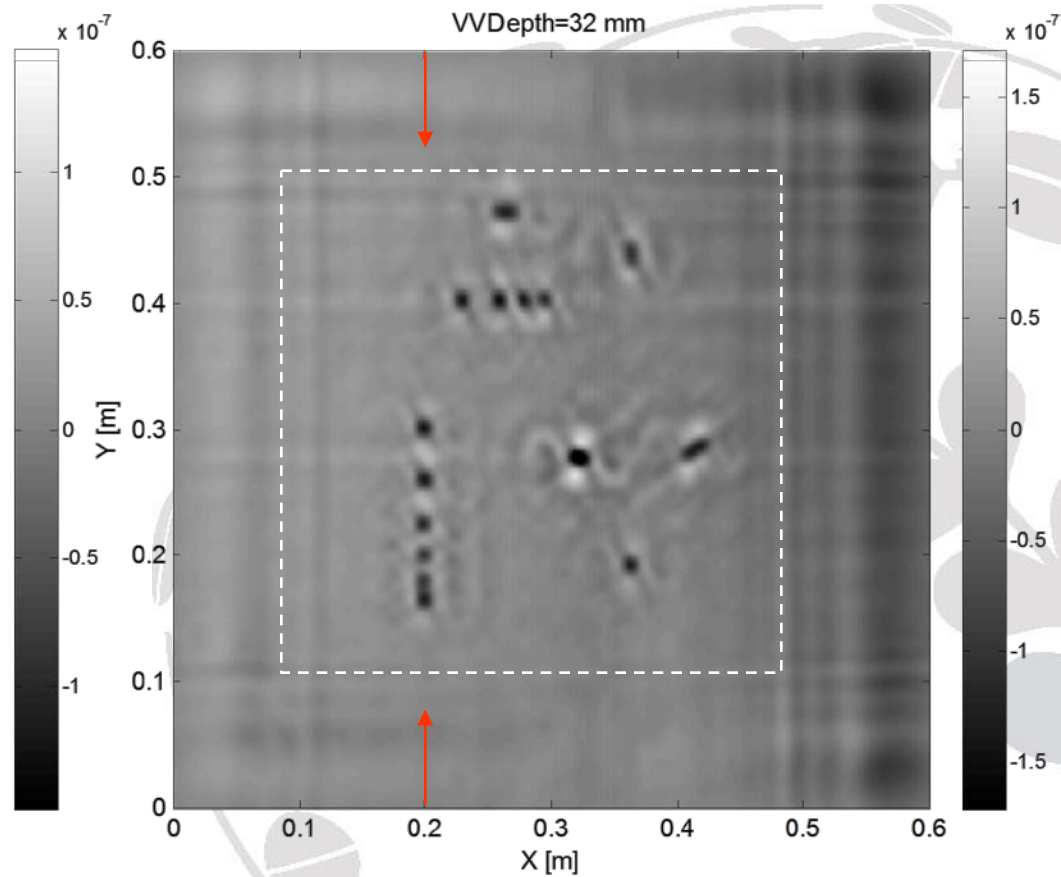
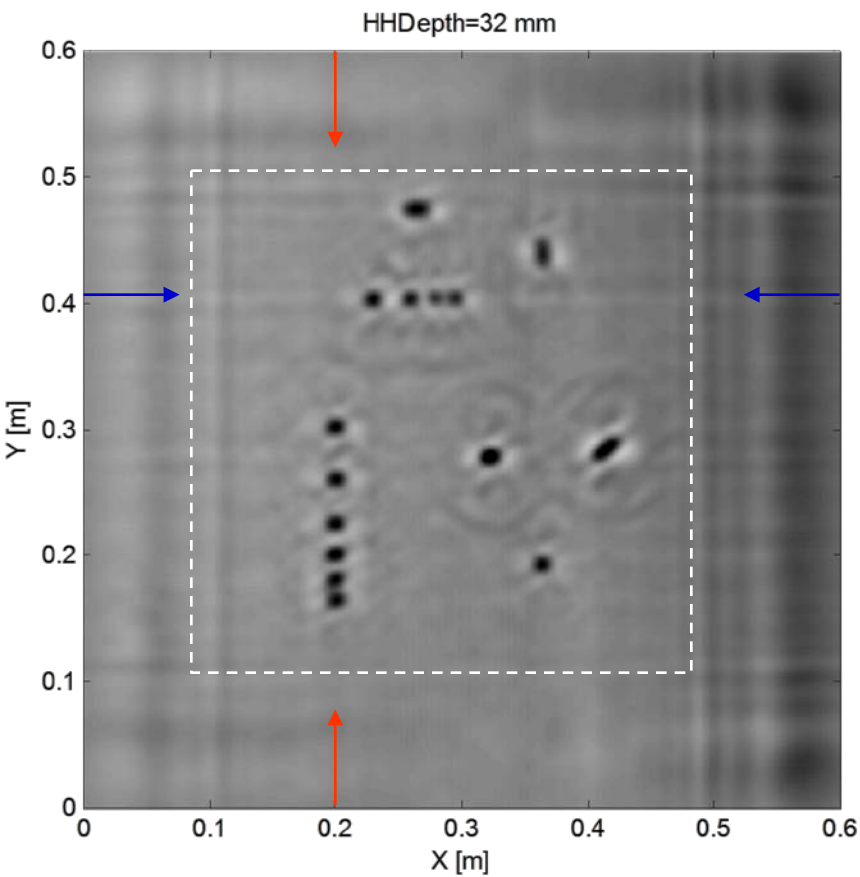


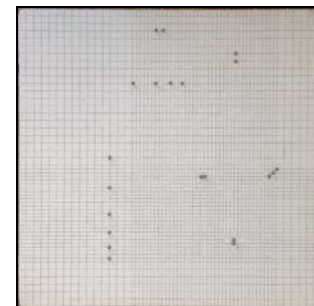
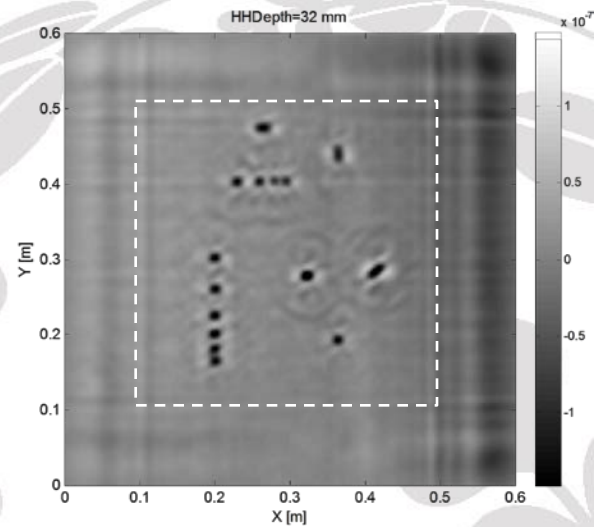
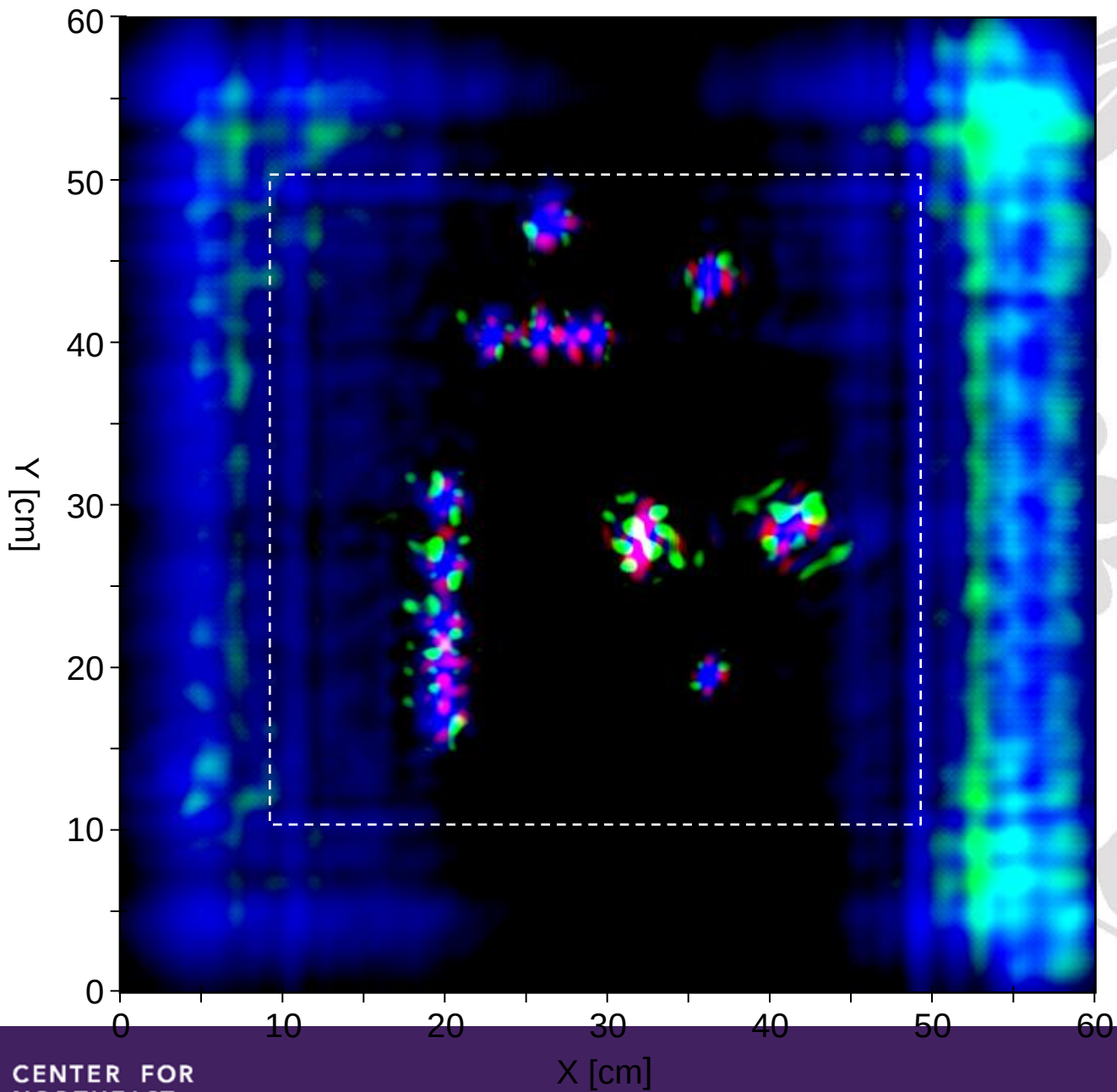
Bandwidth: 10 GHz
Target distance: 28 cm
Aperture length: 25 cm



Number of targets: 21
Sphere diameter: 5 mm
Spacing: 5 – 40 mm







Pauli RGB

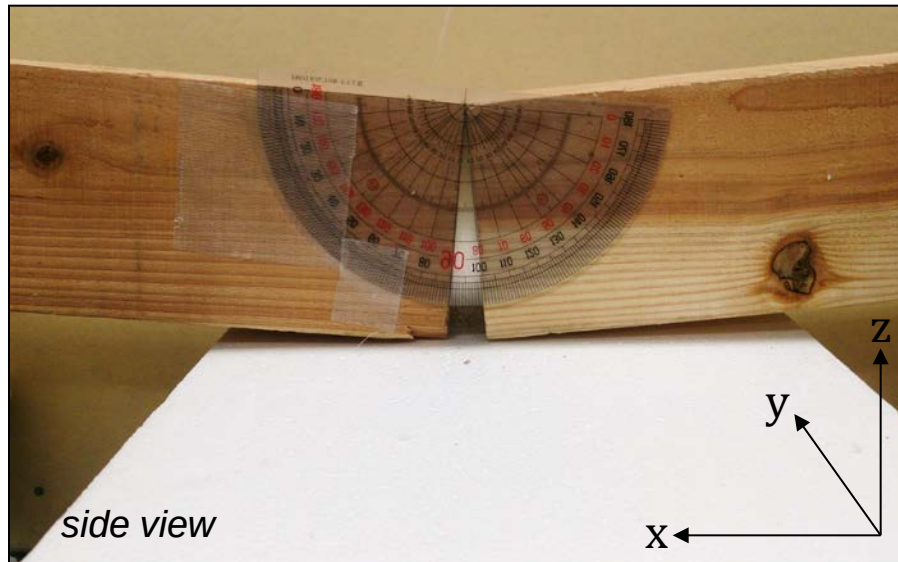
R: $|HH-VV|$

G: $|HV+VH|$

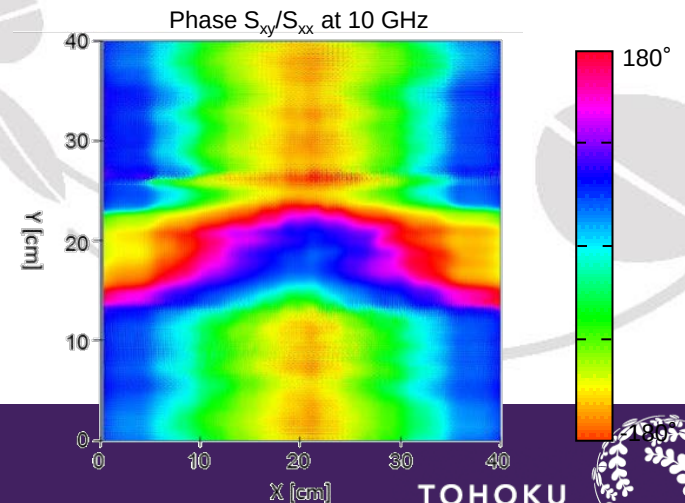
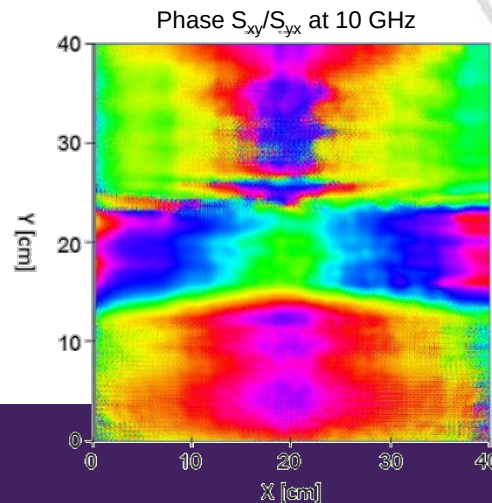
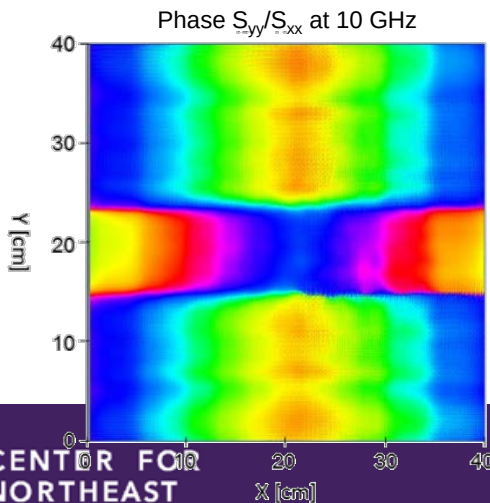
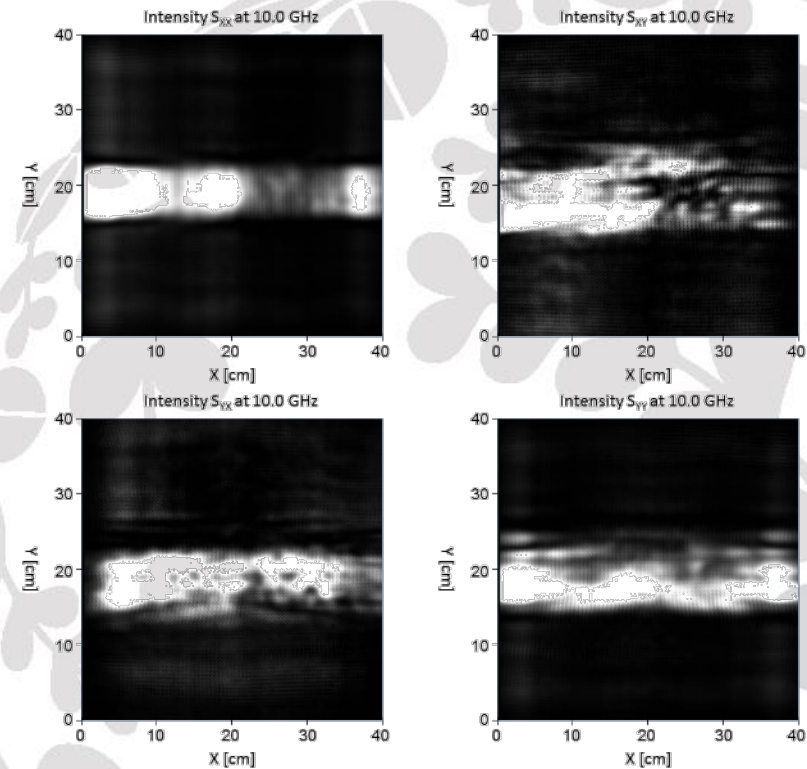
B: $|HH+VV|$



Damage Detection using Polarimetric Phase



Damaged beam with 5 deg. inclinations
(10 deg. opening angle)

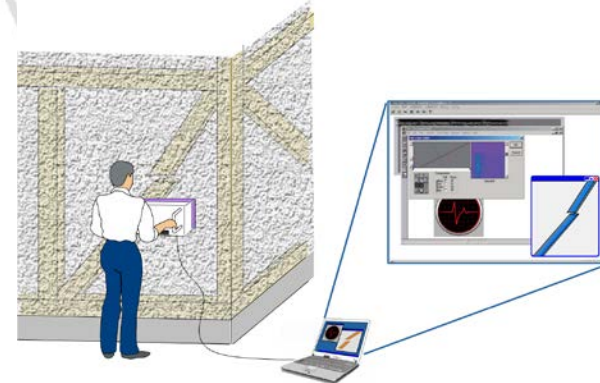
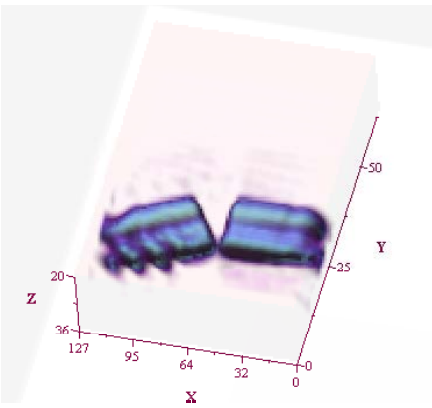


三井造船 10-20GHz システム



Target Specifications for High Resolution Type MPLA-Radar

Application	E.g. Safety assessment of wooden braces inside the walls of wooden houses damaged by a big earthquake
Radar Type	Multi Path Linear Array Radar
Frequency Band	10~20GHz (Step Frequency)
Array Antenna Unit	64 antennas (32 transmitting + 32 receiving)
Spatial Resolution	~7.5mm
Detectable Depth	~200mm
Measurement Width	~480mm
Measurement	Handy Scanning Measurement Speed: 10cm/sec MAX.
Weight	~5kg (Radar Unit), ~15kg (Control Unit)



まとめ 電波科学による防災・減災への取り組み

新しい電波利用の技術

- 近距離レーダ、ポーラリメトリ

常時モニタリングや頻繁なモニタリングの必要性

- 地滑り、火山など防災・減災技術
- インフラモニタリング

新しい計測手法の提案

- 耐震診断
- 被災者搜索

