



みやぎ県民講座 大学開放講座 環境科学概論

地球環境計測

東北大学 東北アジア研究センター

佐藤 源之

sato@cneas.tohoku.ac.jp

2004年 9月24日

みやぎ県民講座 地球環境計測

概要

- ◆ 環境計測の意義
- ◆ 環境計測の手法
- ◆ 電波を用いた計測手法
- ◆ 衛星リモートセンシング
- ◆ 地表設置型レーダ
- ◆ 地中レーダ
- ◆ レーダ技術の環境問題への応用



レーダ プラットフォーム



写真衛星 IKONOS



2004年9月24日

東京お台場付近,提供:スペースイメージング社)



環境計測の意義

- ◆ 環境の現状調査：広域計測、経時変化
- ◆ 環境予測：物理量の定量的な計測
- ◆ 経済効果：二酸化炭素収支

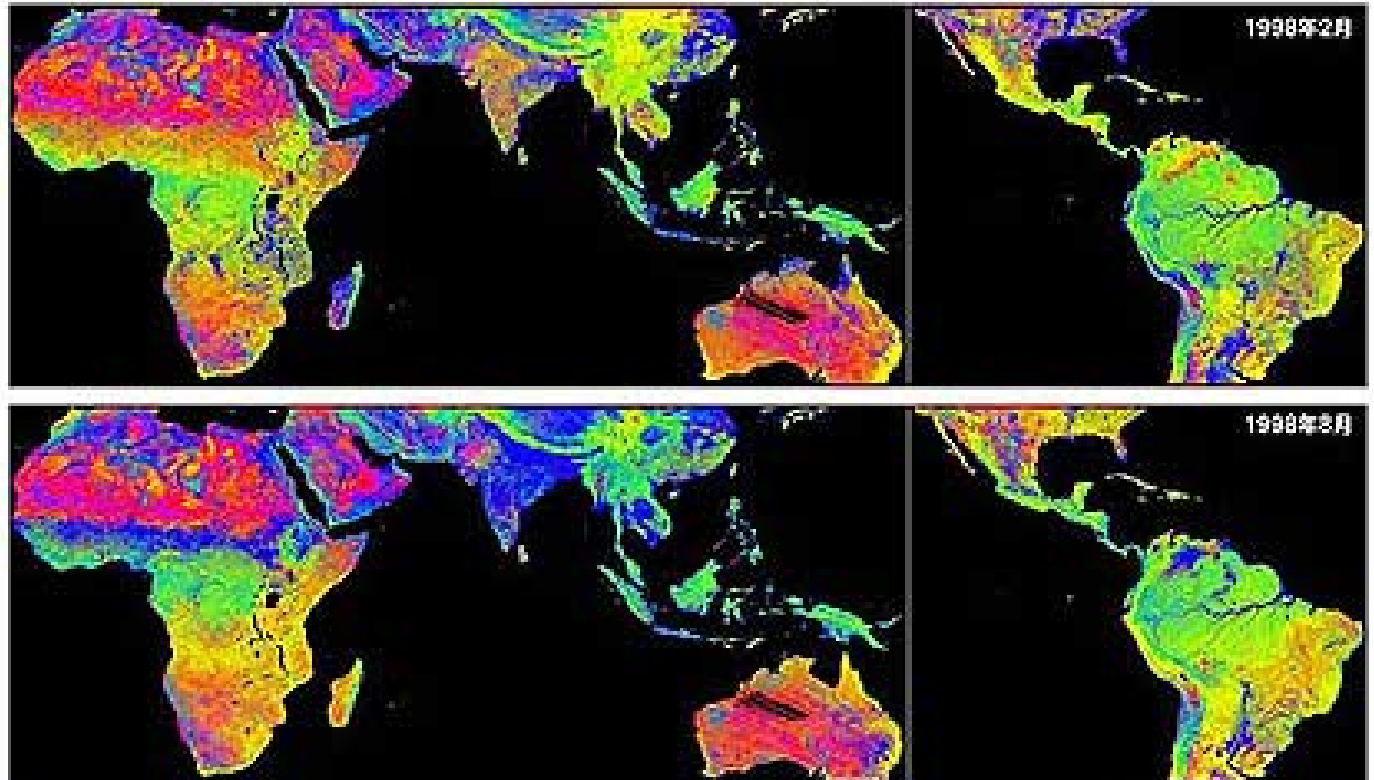
衛星リモートセンシング 広域環境計測

- ◆ 土地被覆
- ◆ 地質調査
- ◆ 河川
- ◆ 砂防
- ◆ 道路
- ◆ 植生
- ◆ 流氷



TRMM/PRによる地表面観測

入射角依存性を考慮した合成カラー画像

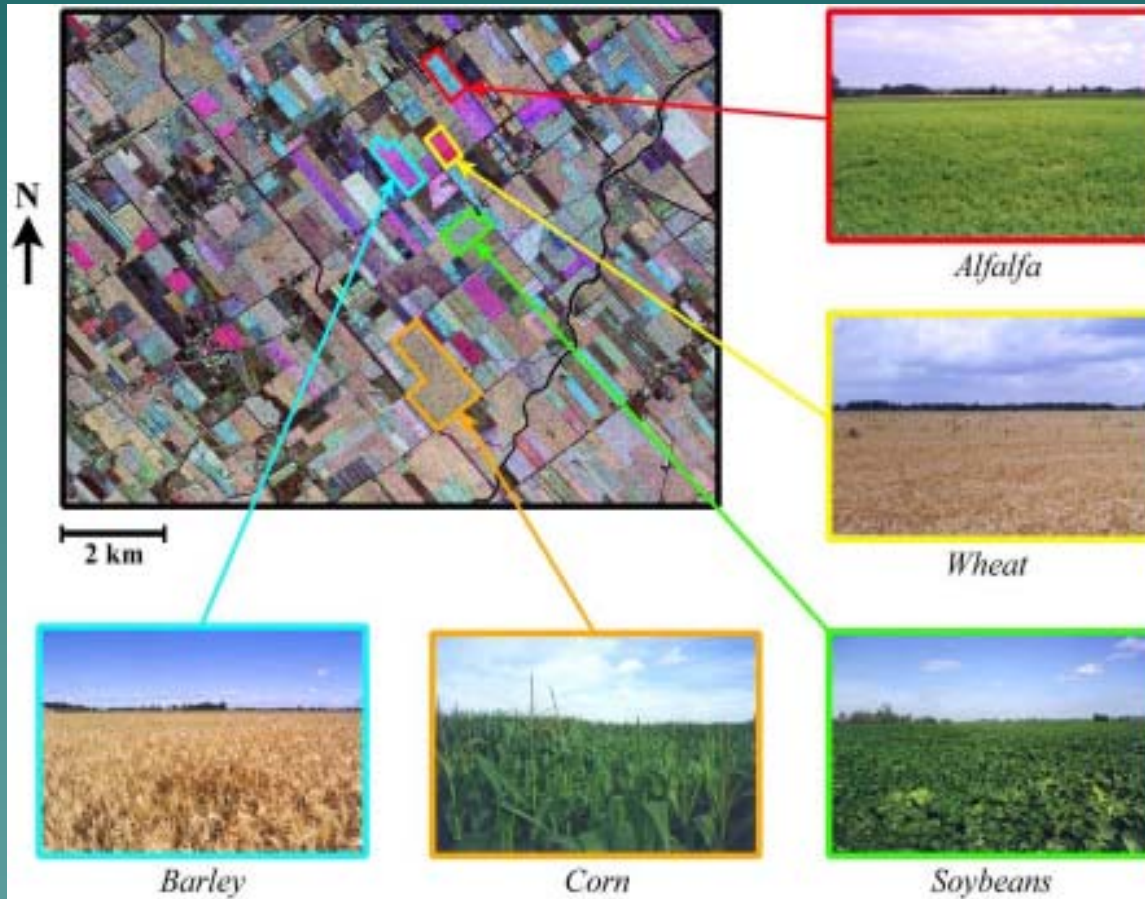


■ 森林密度に対応 (0-8度)
■ 水面・土壌水分に対応(0-13度)
■ 裸地・荒地に対応 (14-18度)

植生分類：農作物の識別

Agriculture

Crop Type



Airborne CV-580 C-Band SAR
South of Ottawa, 1998 July 9
Linear Polarization Composite

R = HH G = HV B = VV

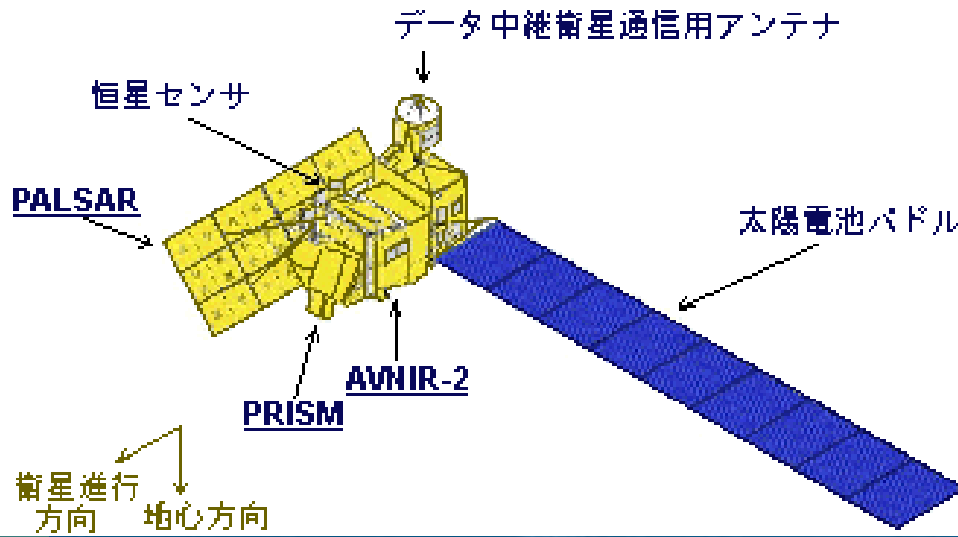
The availability of multiple polarizations will greatly improve the potential for crop type mapping

みやぎ県民講座 地球環境計測

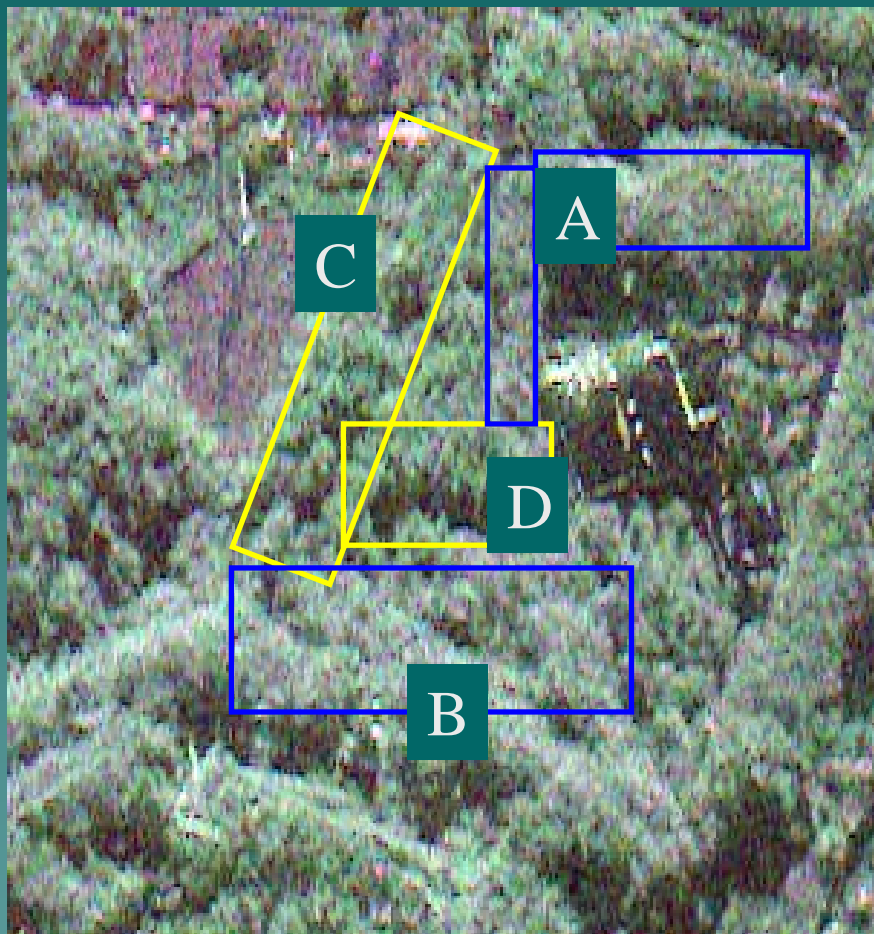


Pi-SAR+ALOS

日本の環境計測技術



仙台市立博物館周辺



青 siteA,B: 広葉樹
黄色 siteC,D: 針葉樹

仙台市立博物館の周辺写真



Site A



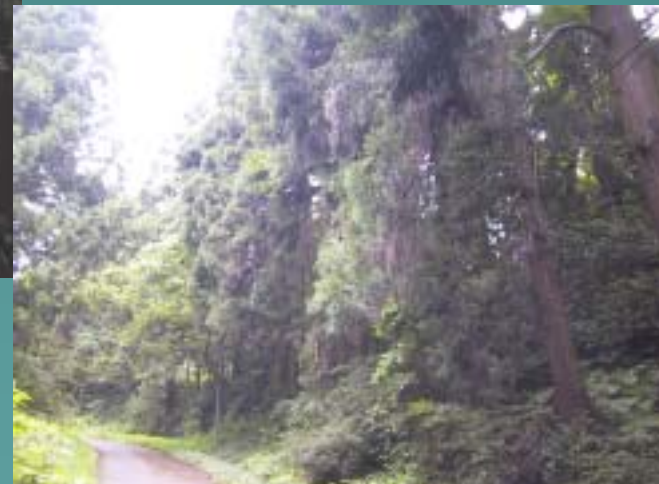
Site B



Site C

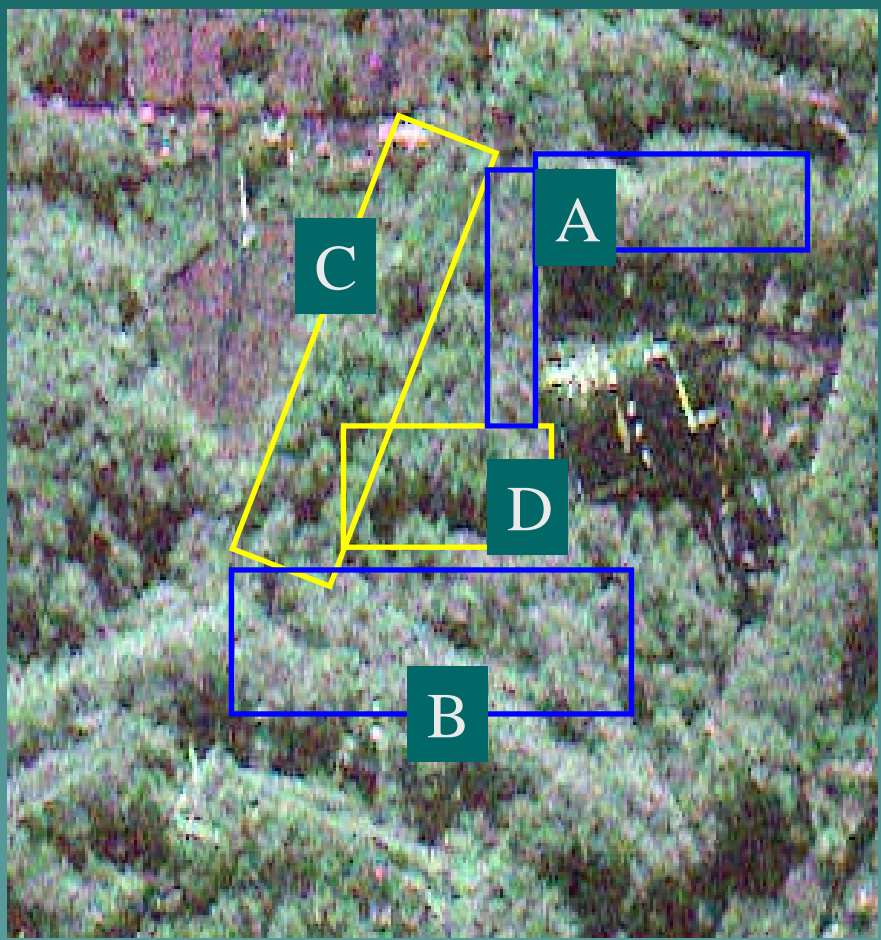


2004年4月2日 Site D

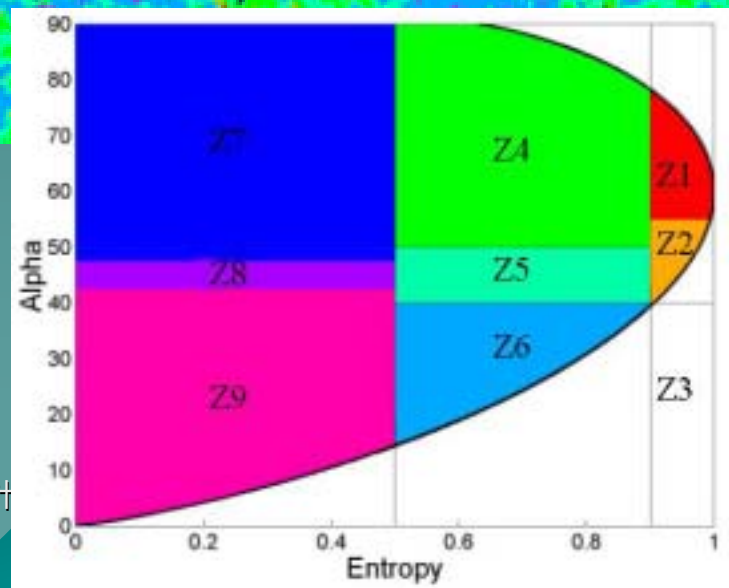
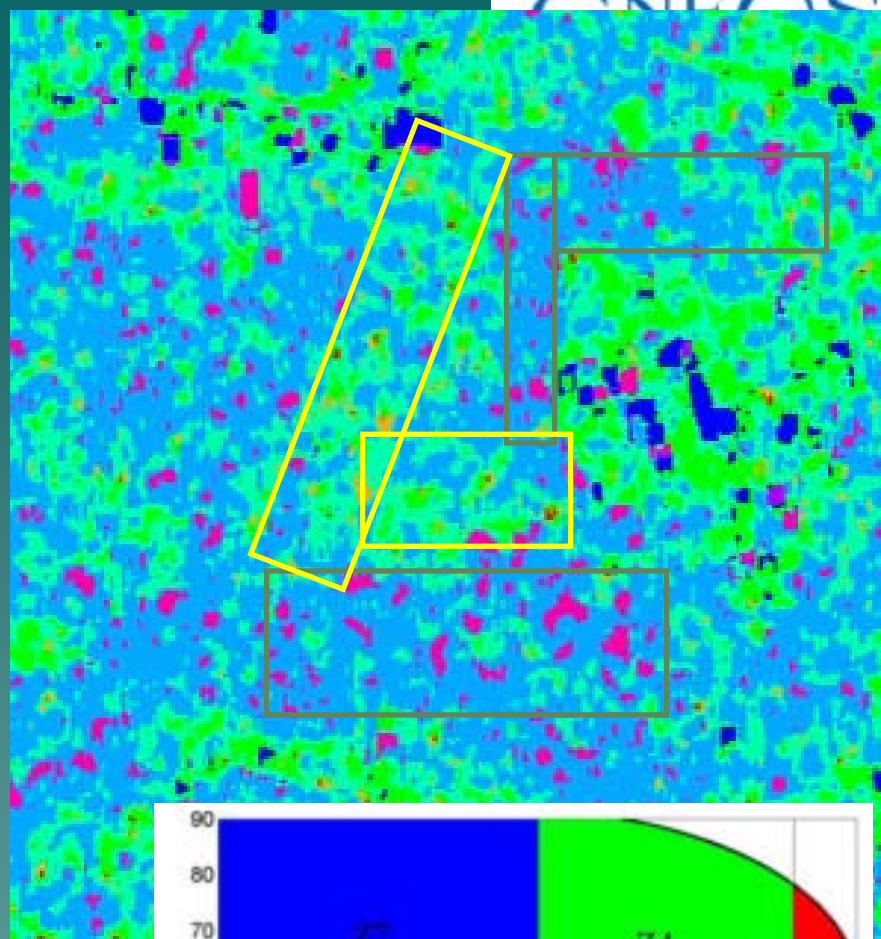


Site D

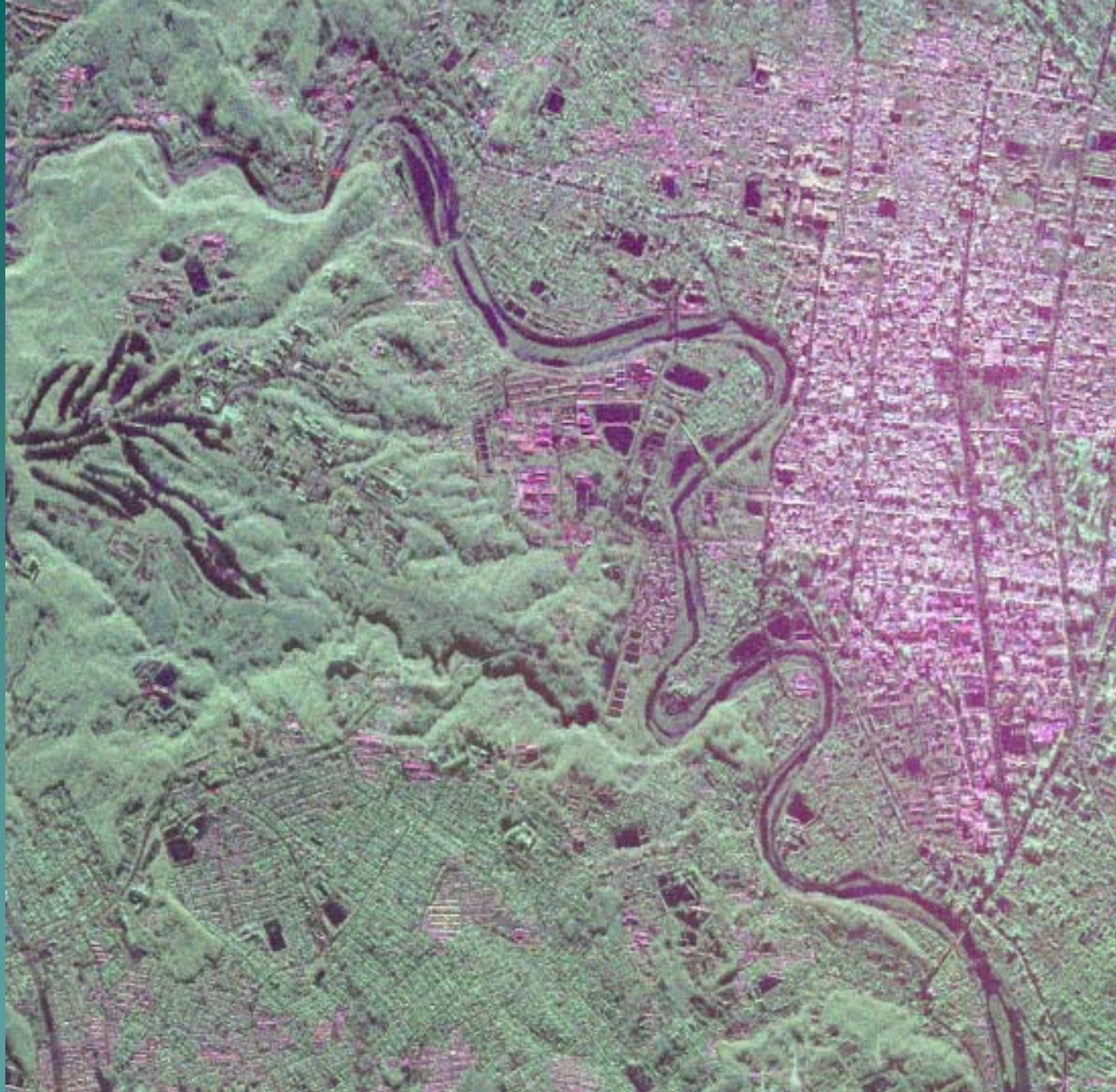
Pi-SARによる森林域植生分類



X-band, 30/08/2001 375m*400m



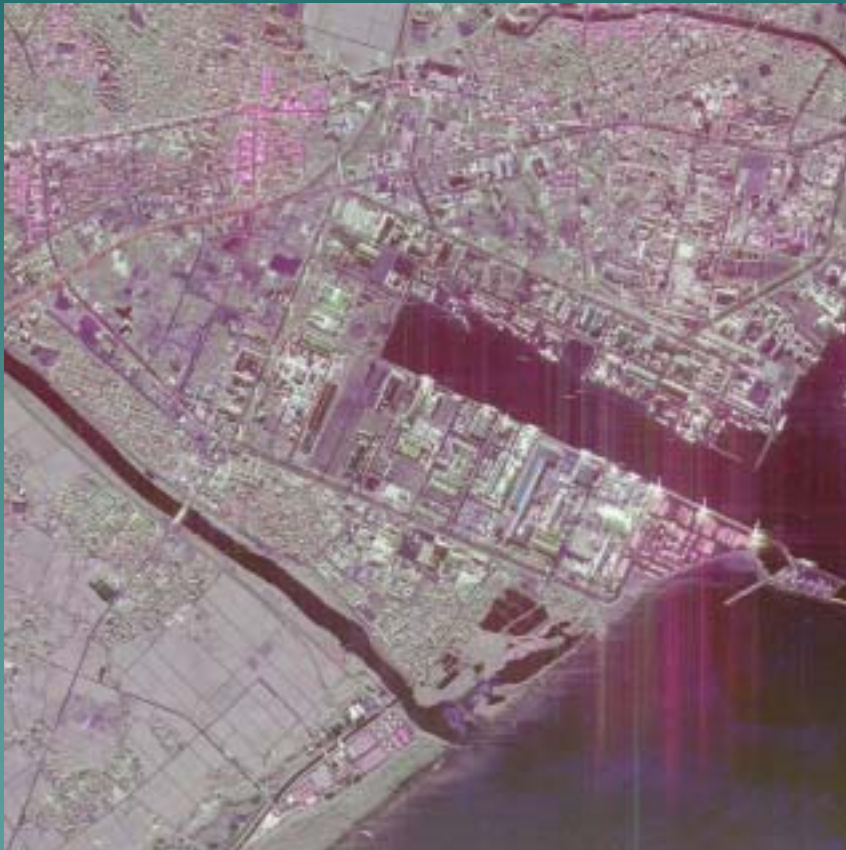
Pi-SARによる 仙台市街地レーダ 画像



L-band,
30/08/2001
仙台市

2004年9月24日

Pi-SARによる蒲生干潟レーダ画像



流水



図2 RADARSAT広観測幅モードによる北海道北東部周辺の観測例
(1998年3月2日 ©CSA)



図3 PI-SAR Lバンドによる海氷の多偏波観測例 (1999年2月23日)

目で見えない物の計測

➤物理量計測

➤地下水

➤鉱物

➤経時変化

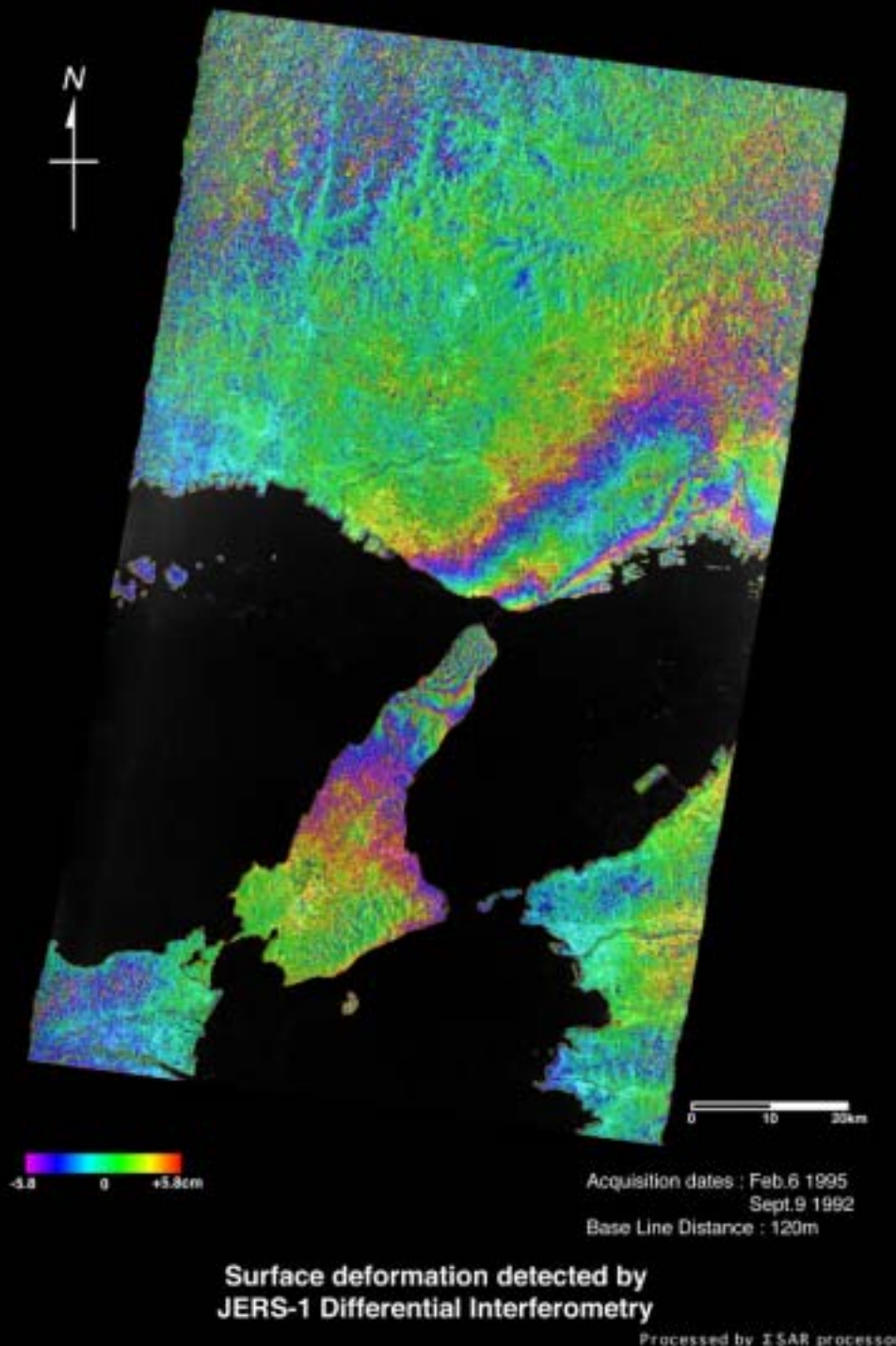
➤定量計測

➤バイオマス計測

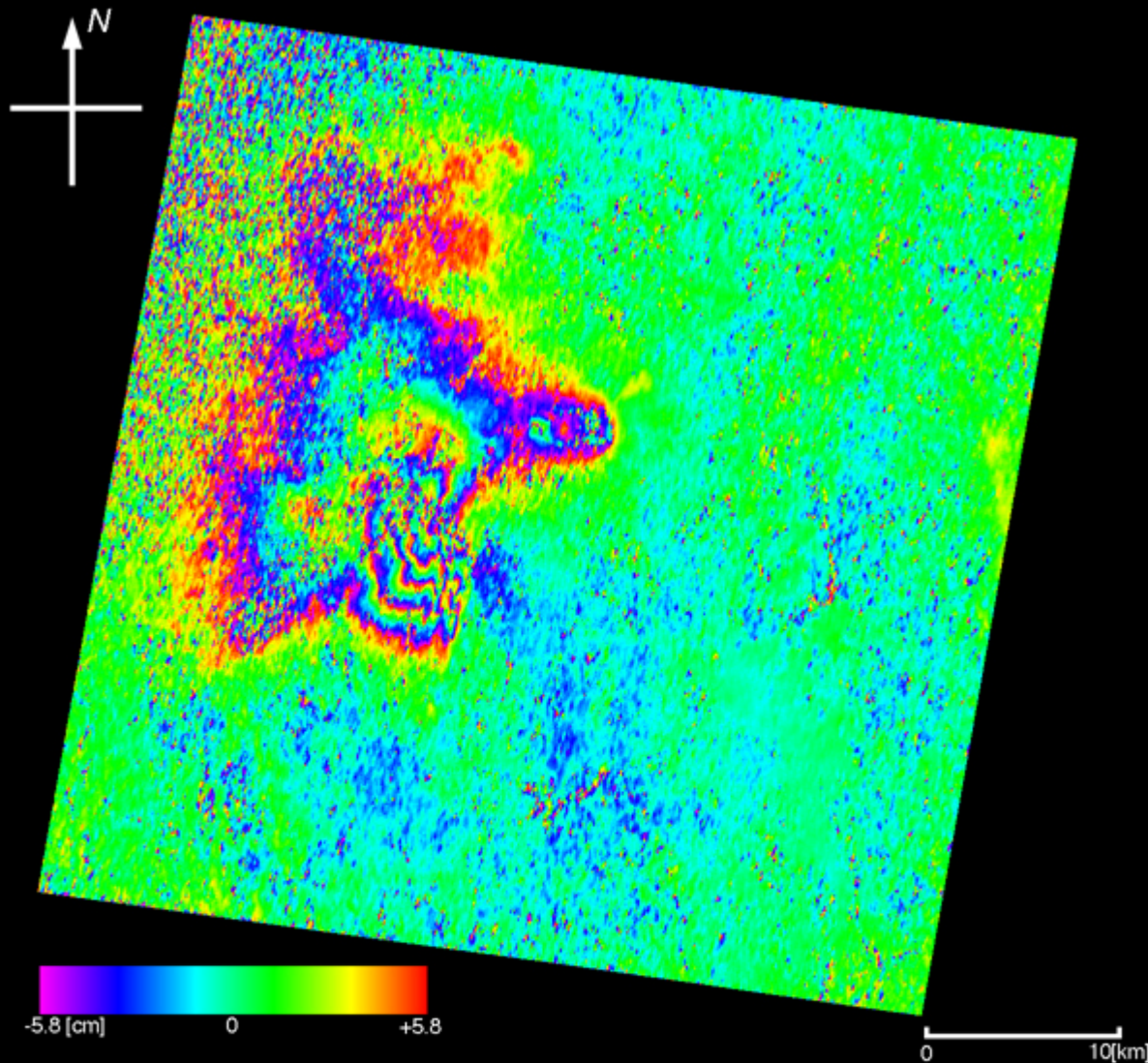
➤降水量

➤農作物の作高予測

➤立体地図



岩手山地殻 変動検知



JERS-1/SAR Differential Interferogram

Path , Row : D064 , 234

Date : 98/9/9 - 97/11/5

Bp : 368m

NASDA/EORC

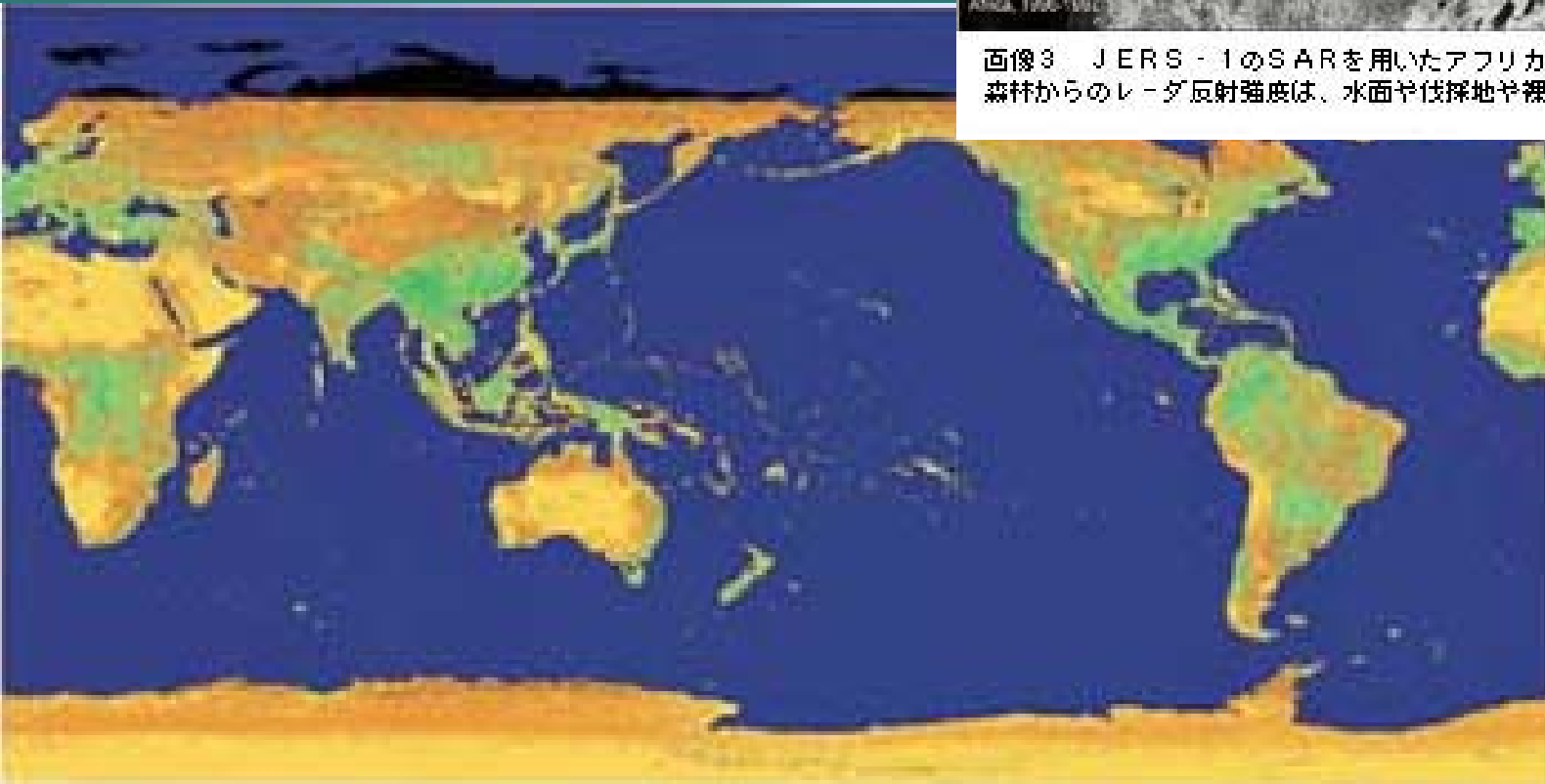
画像A 岩手山雫石近辺の地殻変動図

2004年9月24日

バイオマス量評価



画像3 JERS-1のSARを用いたアフリカ中央部のモザイク画像。森林からのレーダ反射強度は、水面や伐採地や裸地より明るく見える。



画像2 画像1から作成したグローバルな規格化植生指標 (NDVI) 画像。南米アマゾン河流域は雲の影響が取りきれず、実際より指標が小さめになっている。

東京湾の変貌

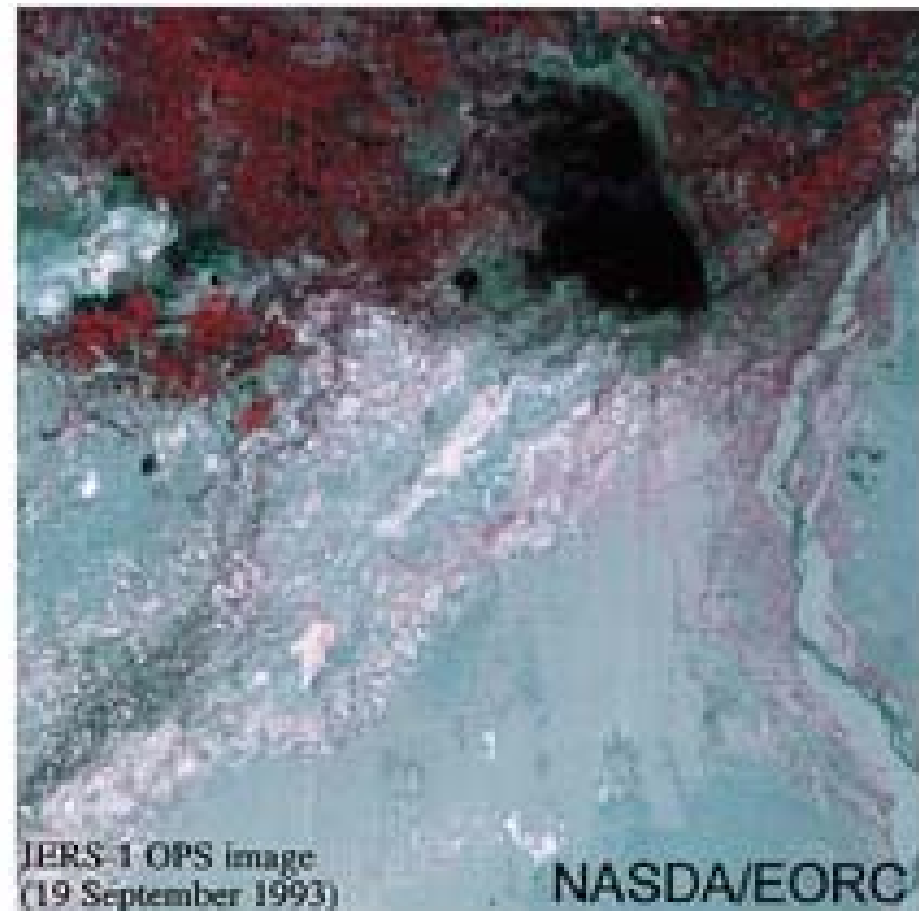
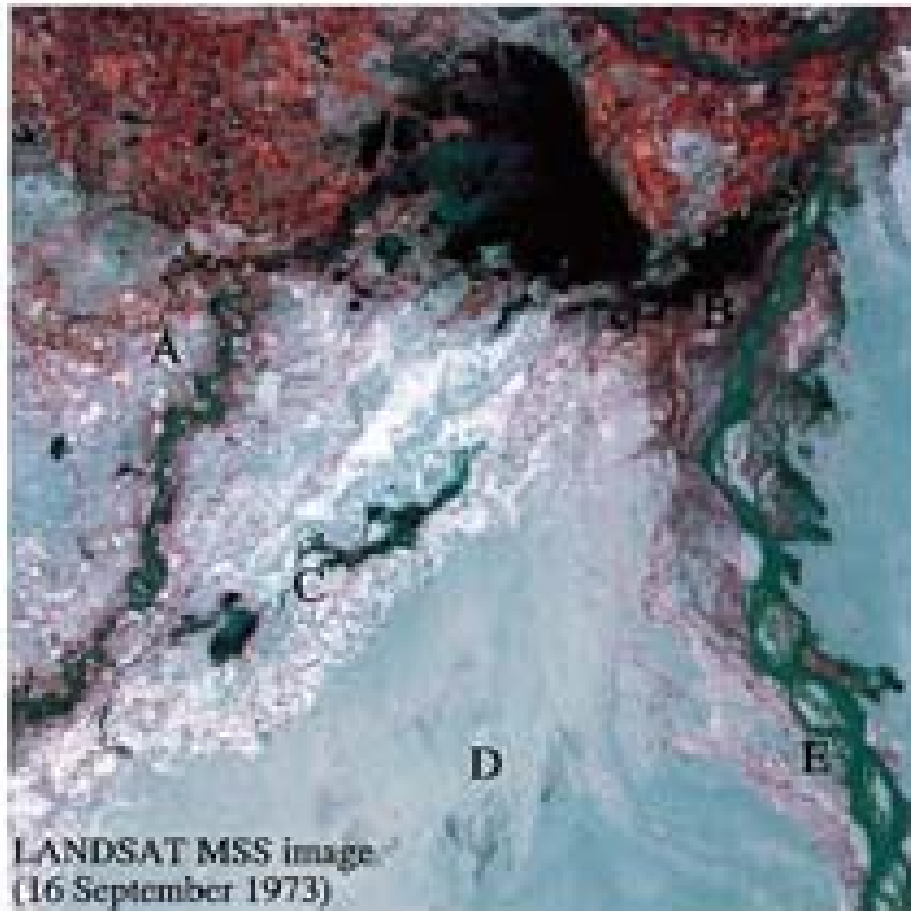


LANDSAT-3 MBS (Dec. 14, 1979)
R, G, B = 3 2, 1 NASDA/EORC



LANDSAT-5 TM (Dec. 13, 1998)
R, G, B = 4 2, 1 NASDA/EORC

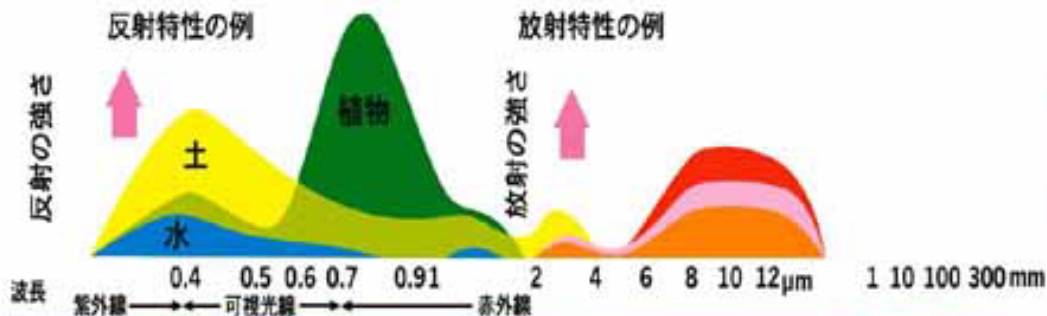
タクラマカン砂漠北部のタリム川流域



なぜ電波で測定するのか

- ◆ 離れた場所の計測が可能
- ◆ 霧や雲を通り抜ける
- ◆ 地中に浸透できる
- ◆ 水分を敏感に検知

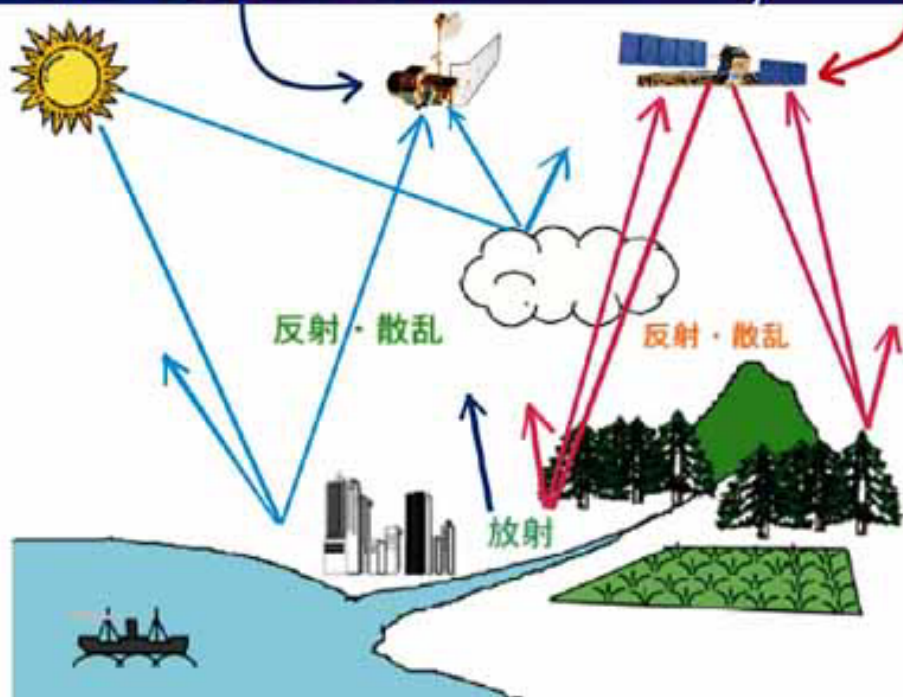
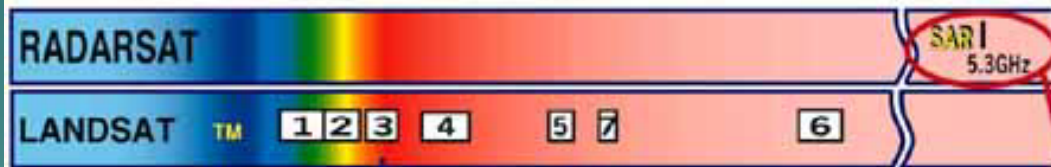
光学センサとマイクロ波センサ



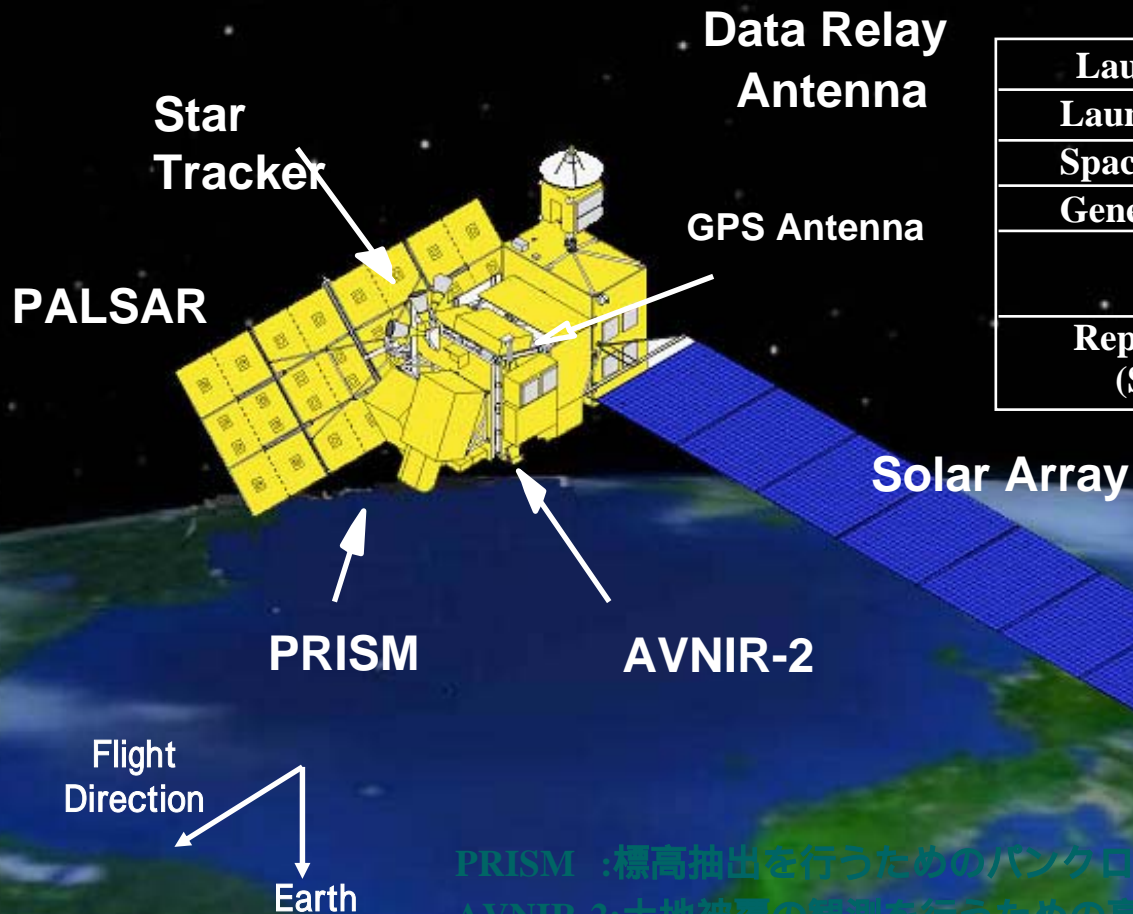
マイクロ波 (SAR) センサ



光学センサ



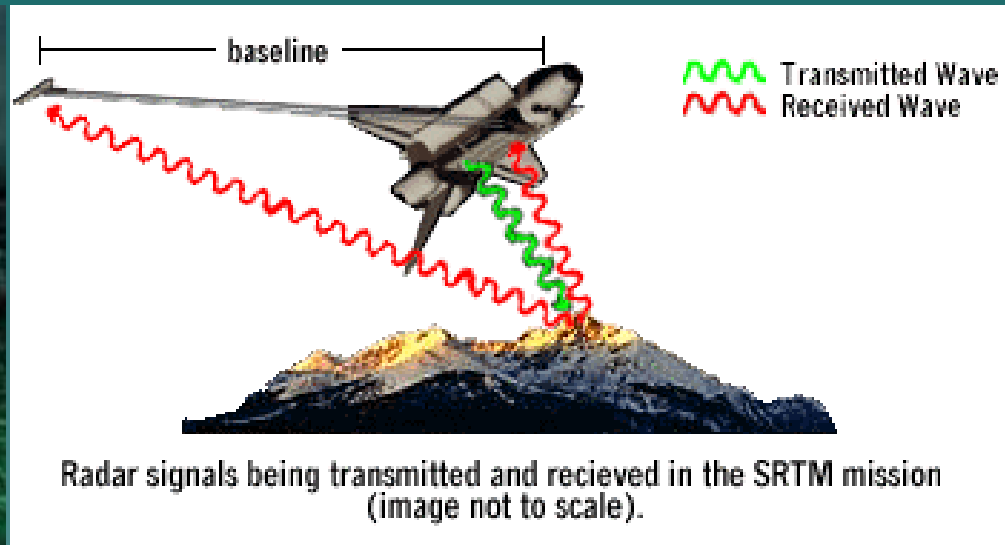
ALOS 2005年夏打ち上げ予定



Launch Date	June 2004
Launch Vehicle	H-IIA
Spacecraft Mass	4,000kg
Generated Power	7kW
Orbit	691.65km Sun Synchronous
Repeat Cycle (Sub-Cycle)	46 days (2 days)

PRISM : 標高抽出を行うためのバンクロマチック立体視センサ
 AVNIR-2: 土地被覆の観測を行うための高性能可視近赤外放射計2型
 PALSAR: フェーズアレイ方式Lバンド合成開口レーダ

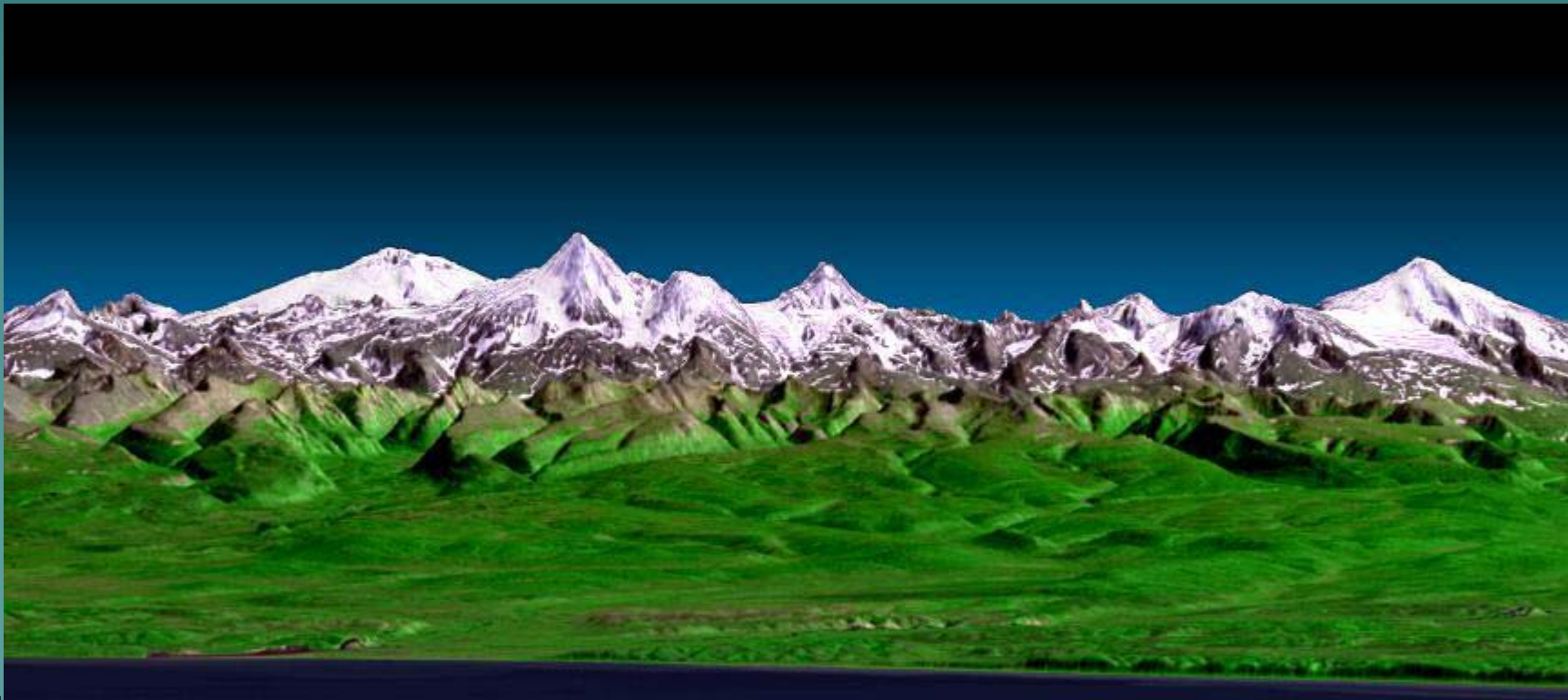
干渉合成開口レーダ (SARインターフェロメトリ)



DEM (Digital Elevation Model)

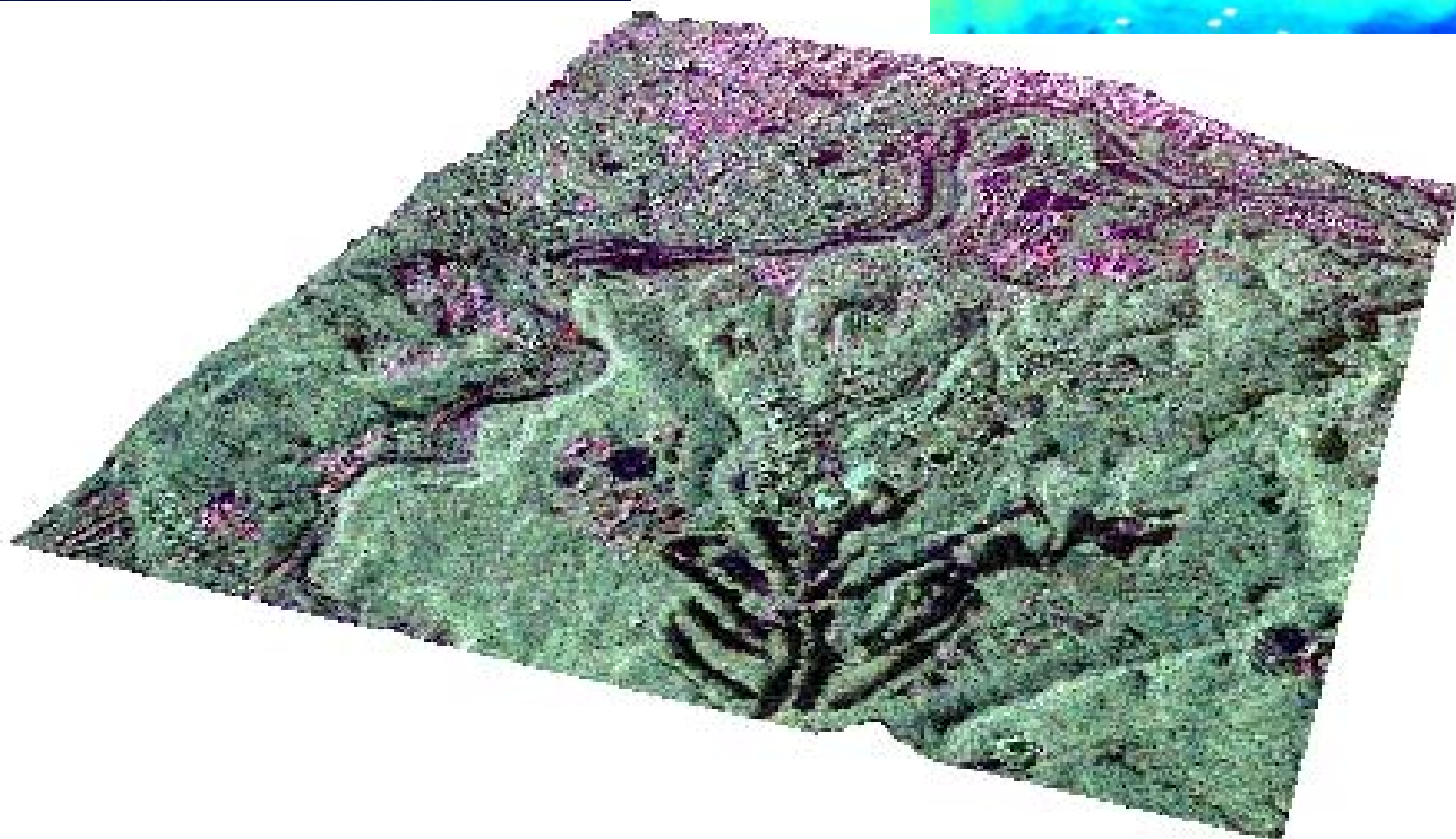
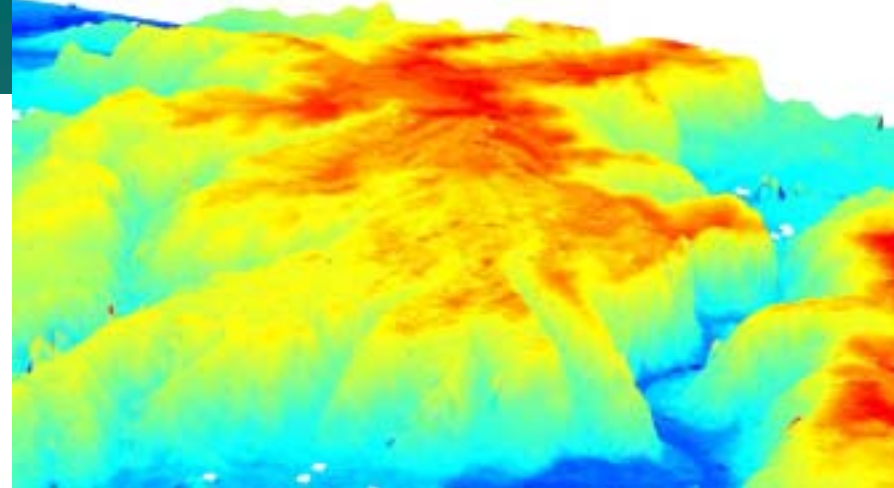
PIA02740:

3-D Perspective View, Kamchatka Peninsula, Russia



セントヘレンズ山(アメリカ)





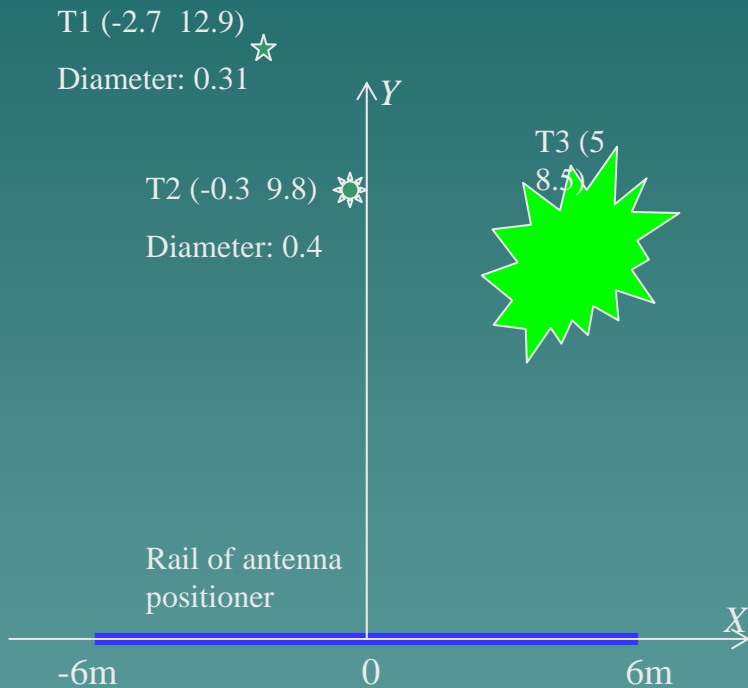
Pi-SARによる仙台市街地立体図

地上設置型SAR



2004年9月24日

樹木のレーダ測定



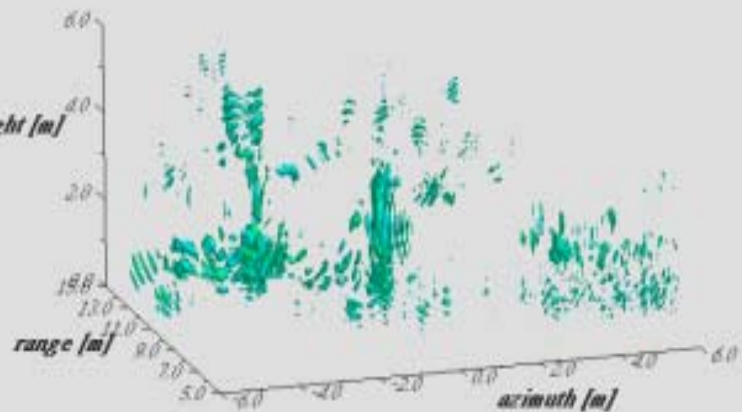
実験サイト (東北大学川内北キャンパス)

みやぎ県民講座 地球環境計測

春

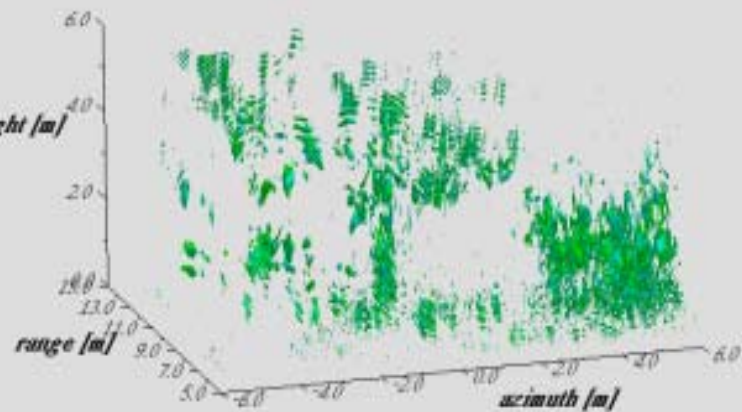
HH of exp#1

on April 19, 2002



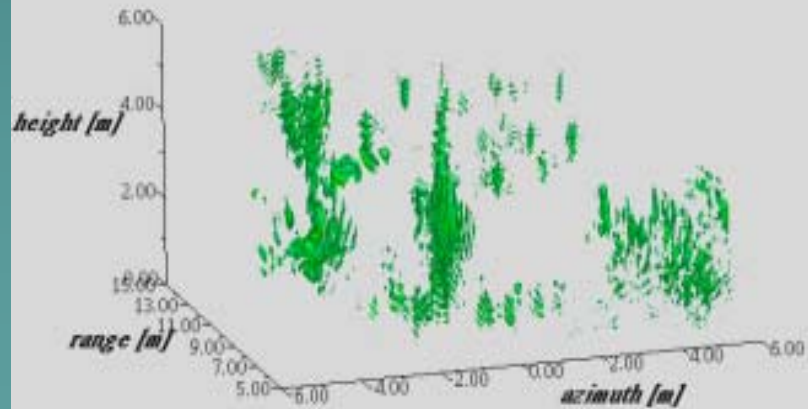
VH of exp#1

on April 19, 2002



VV of exp#1

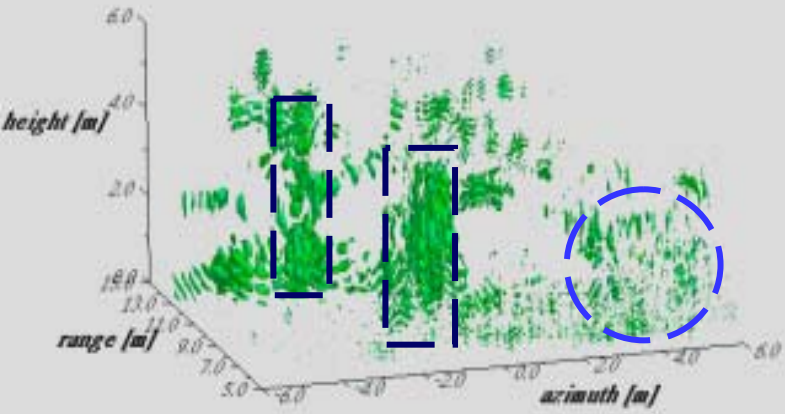
on April 19, 2002



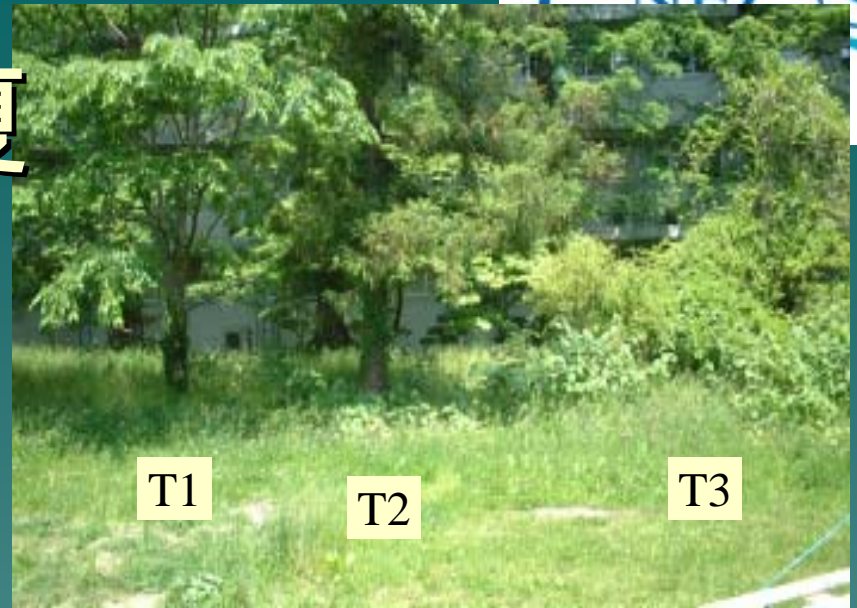
雉座

HH of exp#2

on May 28, 2002

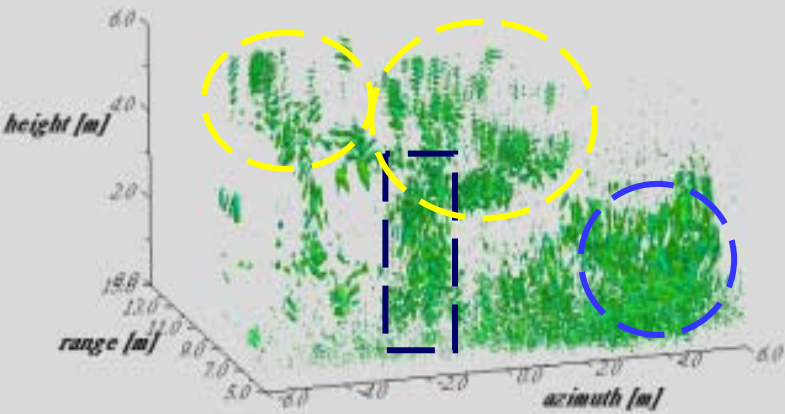


夏



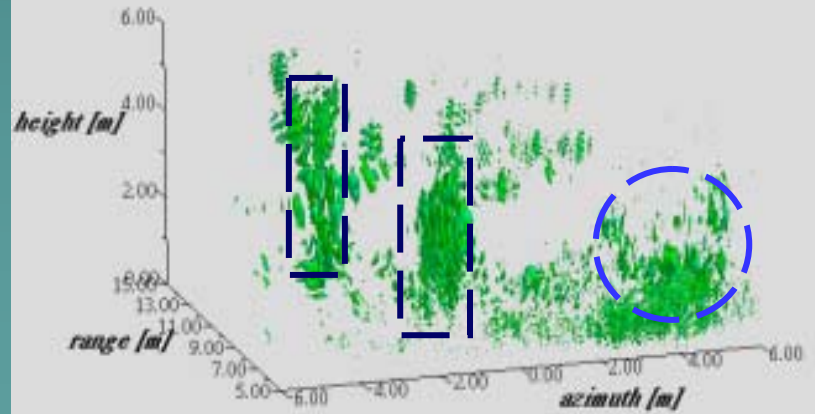
VH of exp#2

on May 28, 2002



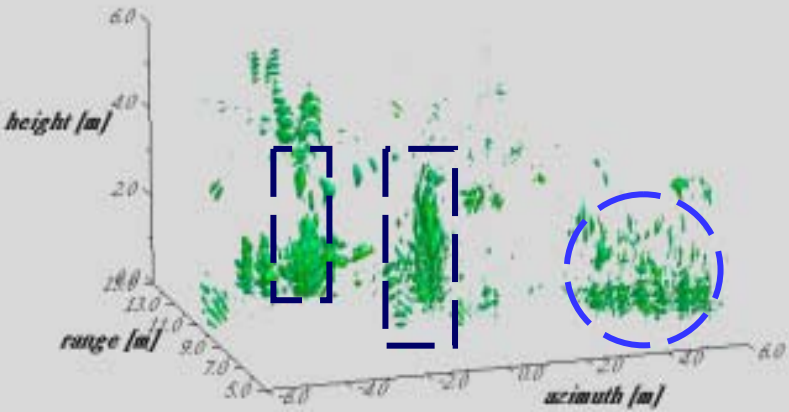
VV of exp#2

on May 28, 2002



藪座

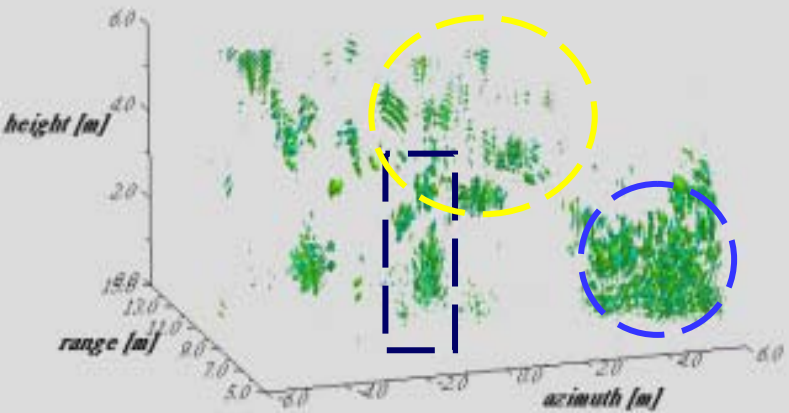
HH of exp#3
on Nov. 11, 2002



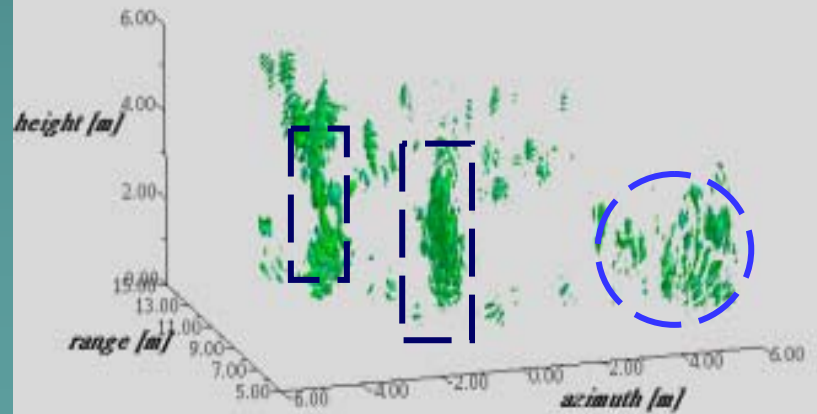
秋



VH of exp#3
on Nov. 11, 2002



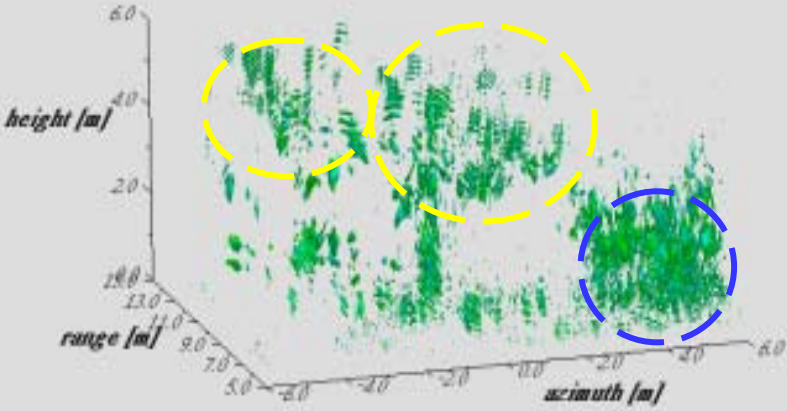
VV of exp#3
on Nov. 11, 2002



講座

VH of exp#1
on April 19, 2002

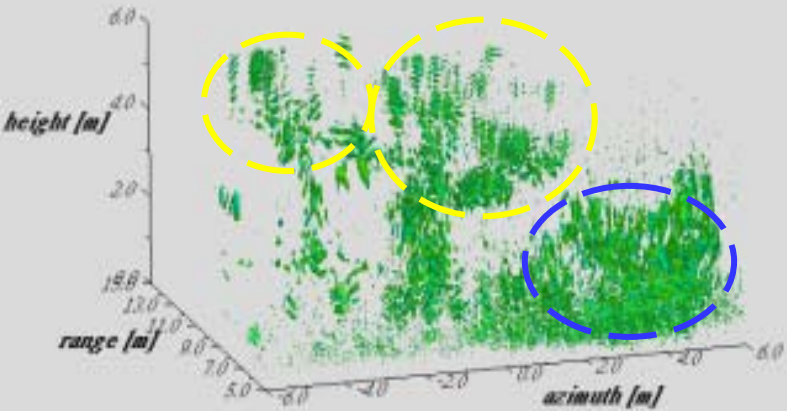
春



季節变化(HV)

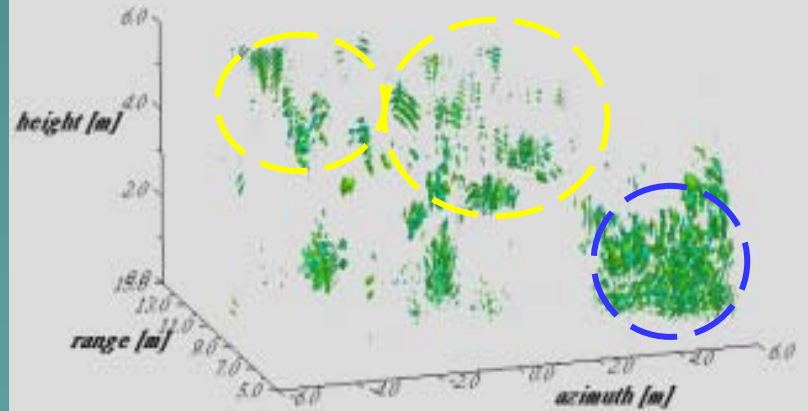
VH of exp#2
on May 28, 2002

夏



VH of exp#3
on Nov. 11, 2002

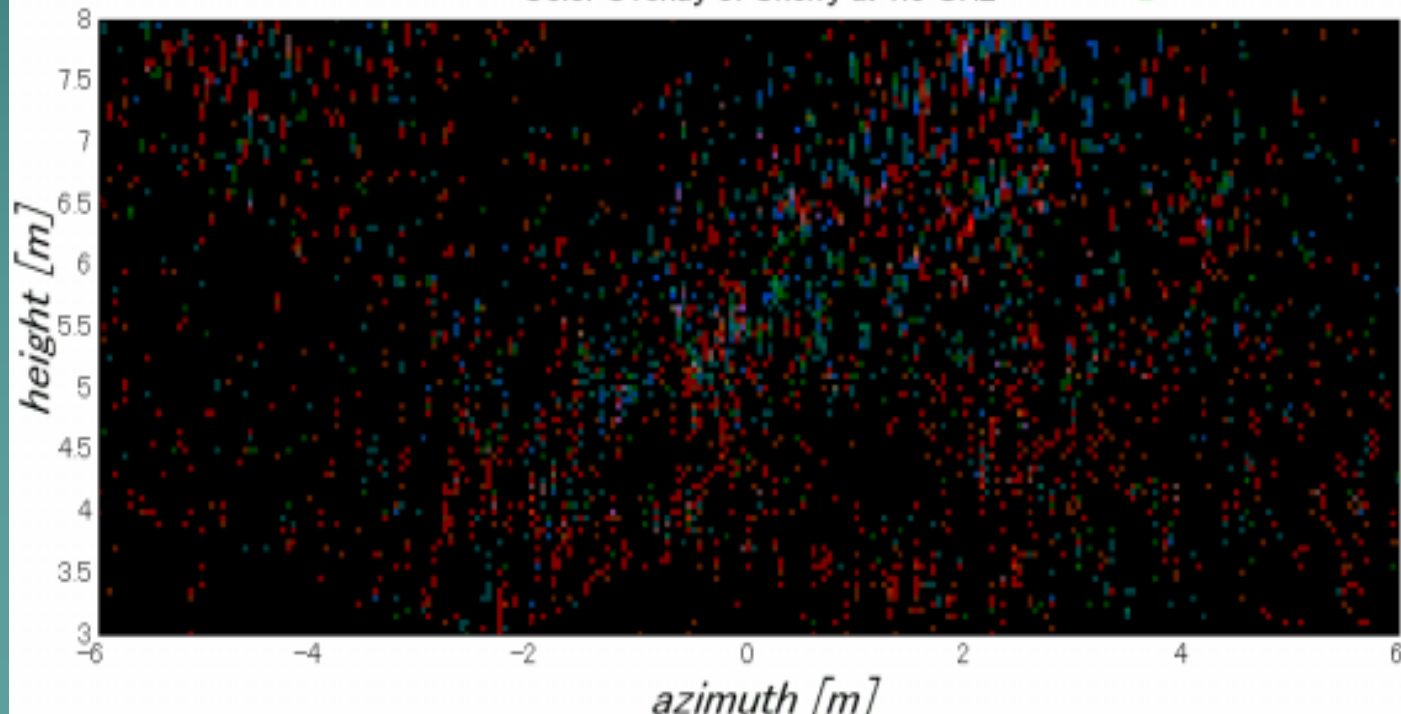
秋



桜1.5 GHz



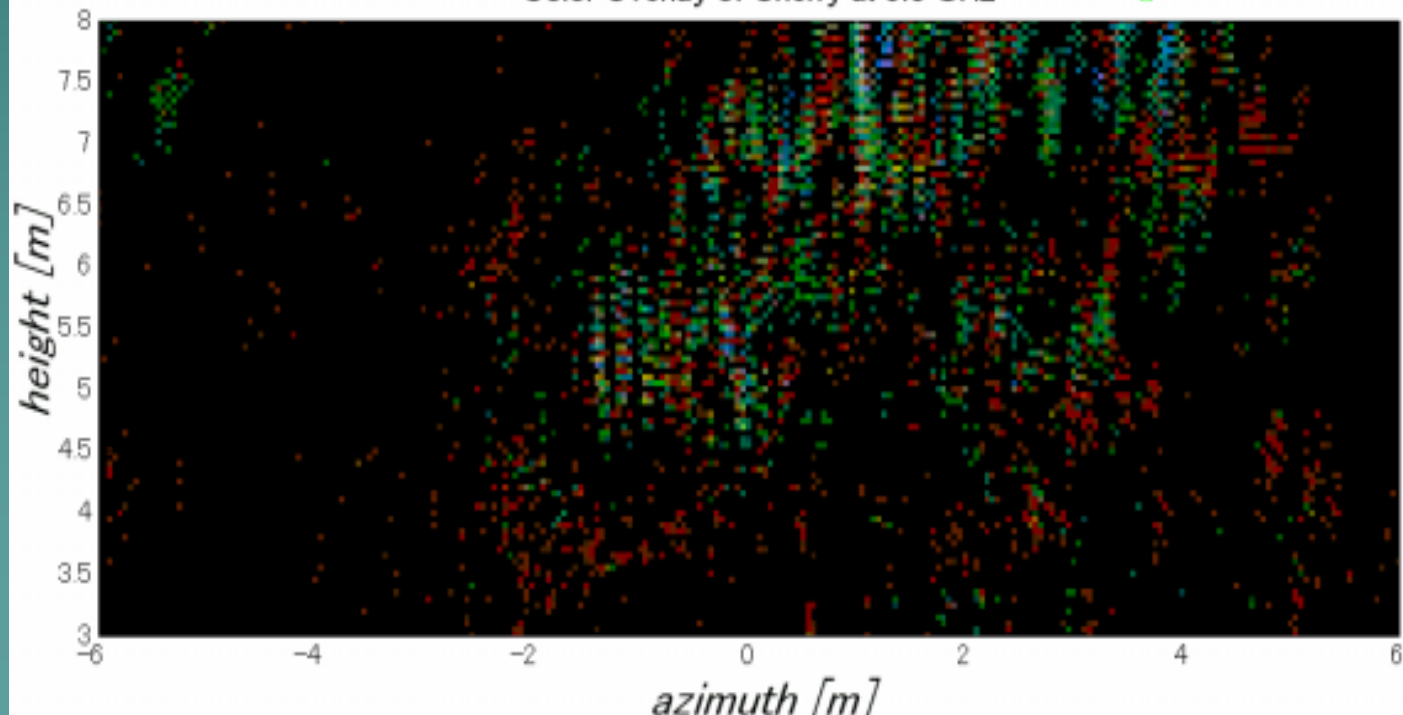
Color Overlay of Cherry at 1.5 GHz red: HH green: VH blue: VV



桜3.5 GHz



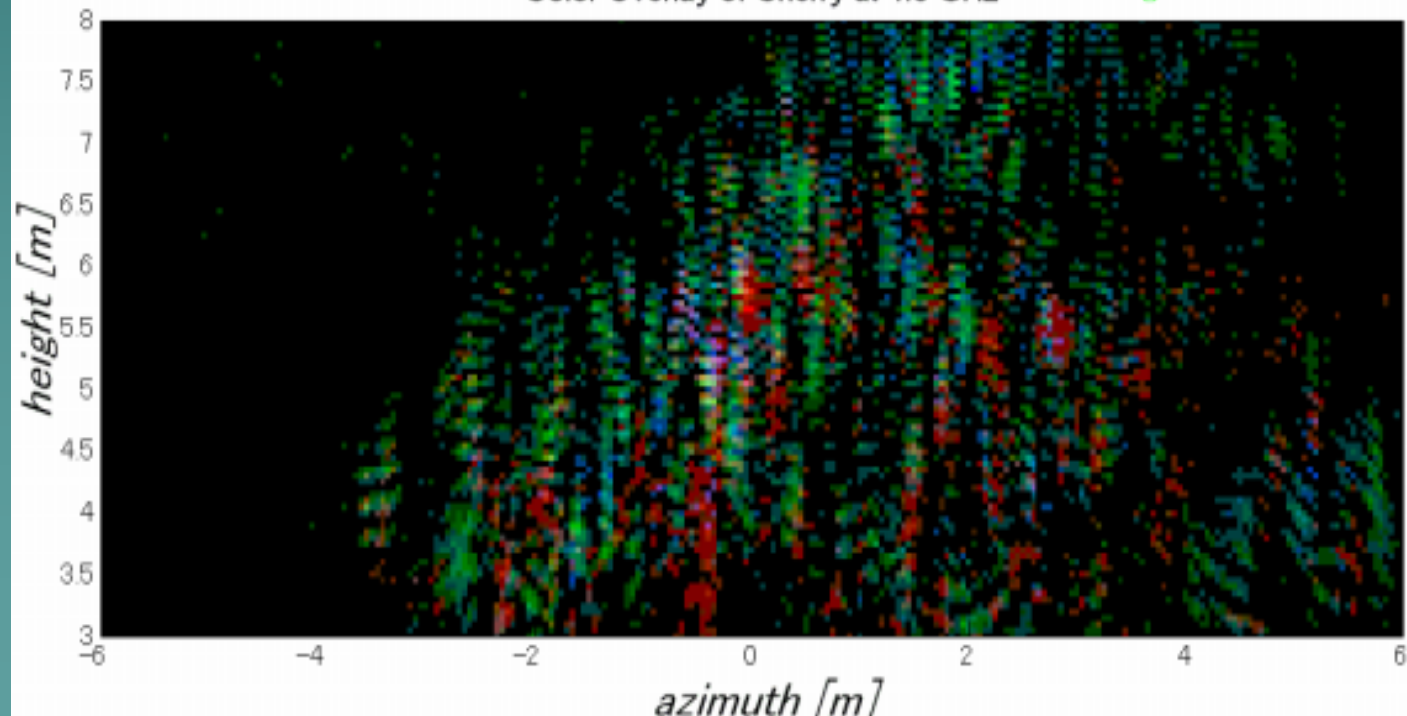
Color Overlay of Cherry at 3.5 GHz red: HH green: VH blue: VV



桜4.5 GHz



Color Overlay of Cherry at 4.5 GHz red: HH green: VH blue: VV

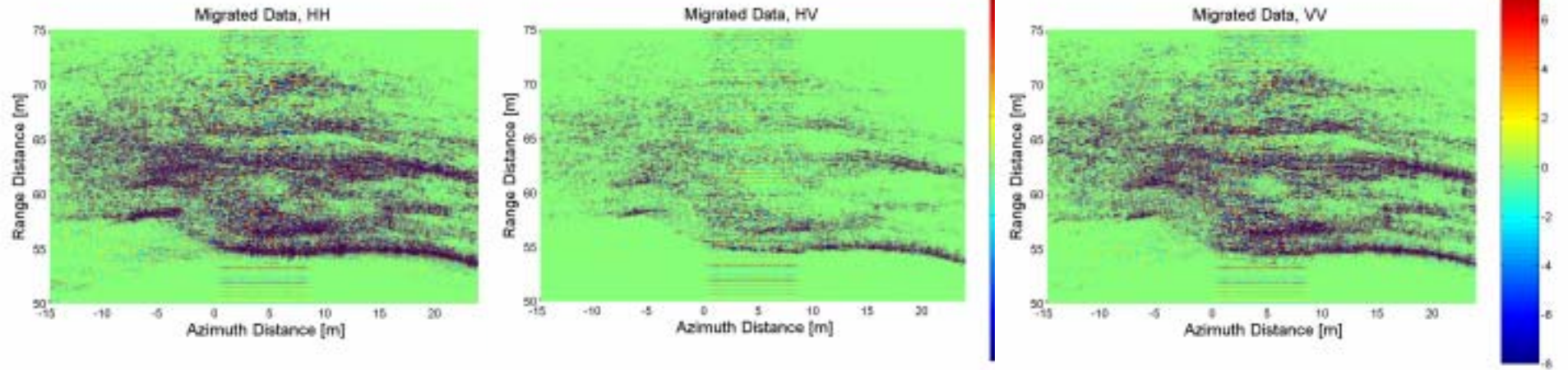


広瀬川河畔計測 鹿落坂付近



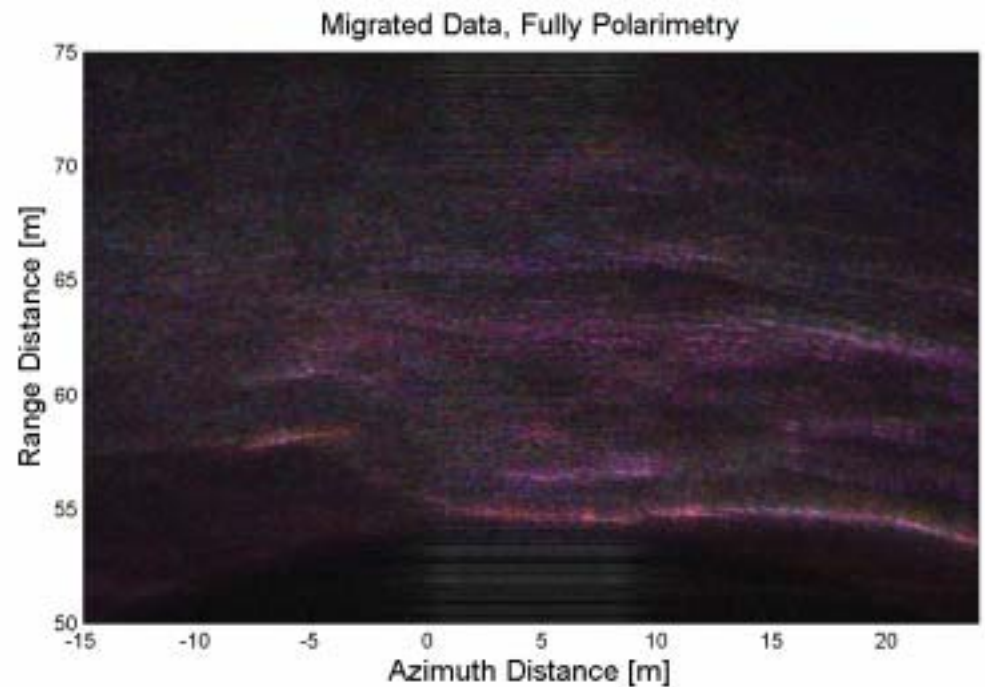
Start Frequency	3.2GHz
End Frequency	4.8GHz
Number of Points	1601
Power (+Amp)	5dBm (+17dB)
Measurement	S_{21} (Transmission)
Angle of the Antenna	Look down 10° from Horizontal
Polarization	HH HV VV

広瀬川河畔計測



2004年9月24日

5



地中レーダ (Ground Penetrating Radar)



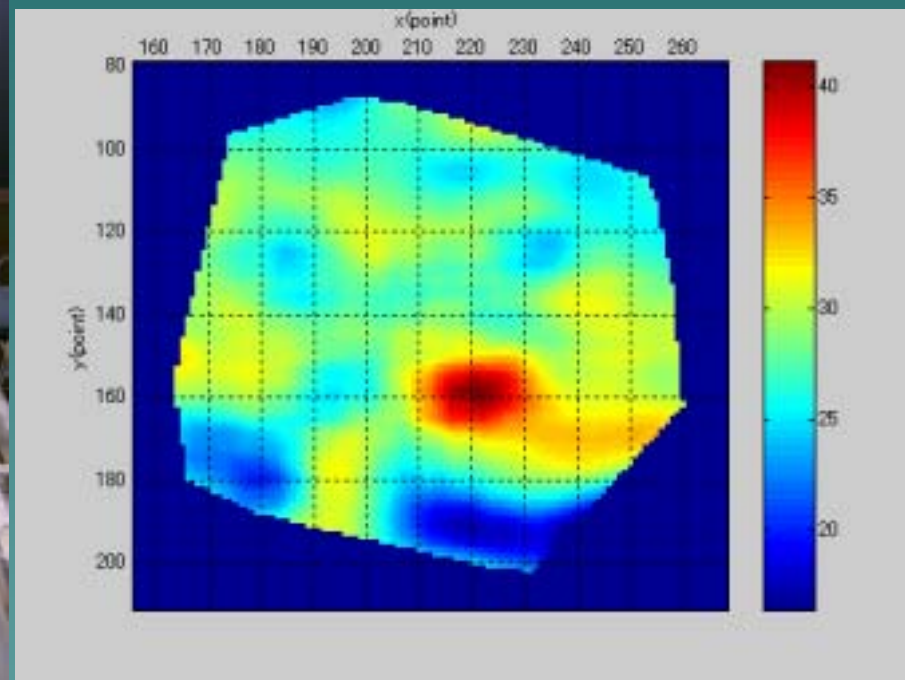
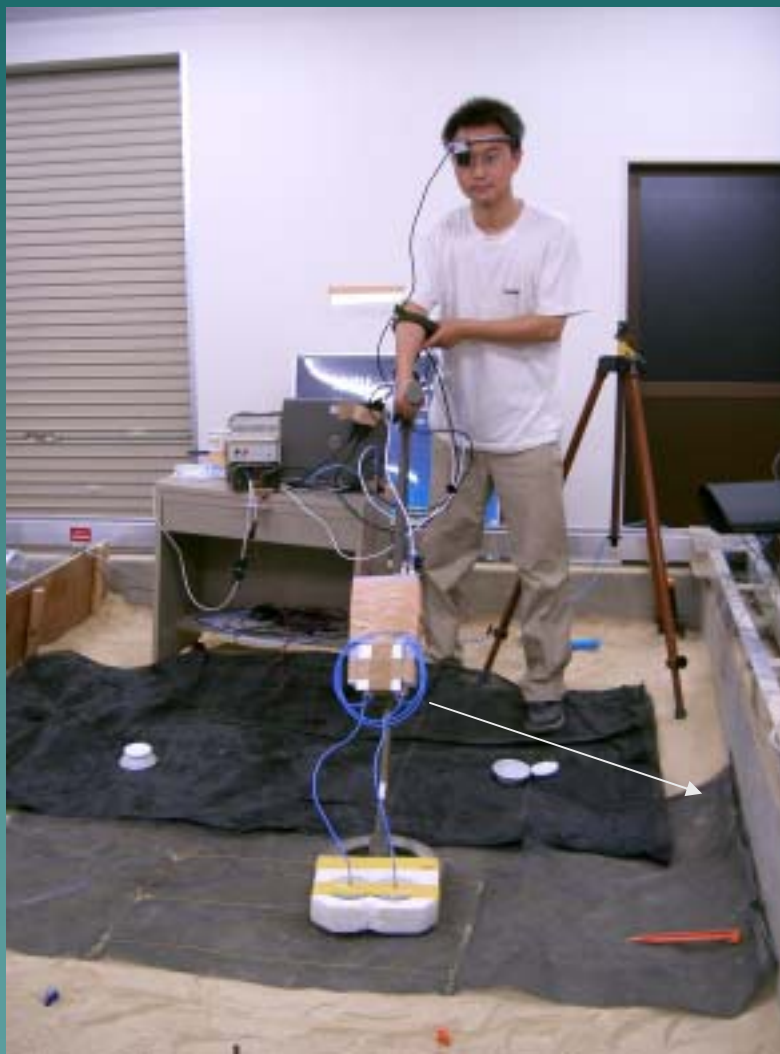
GPRシステム

舗装路面検査用GPR

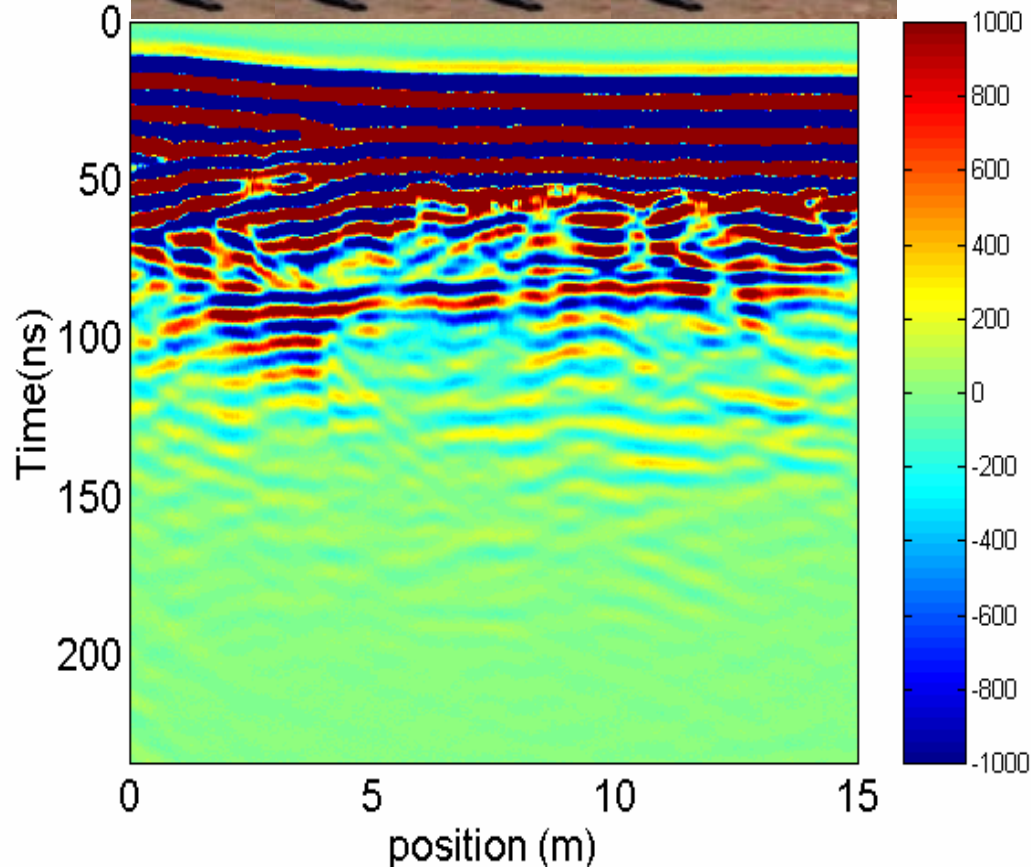


2004年9月

地雷探知用ハンドヘルド GPR

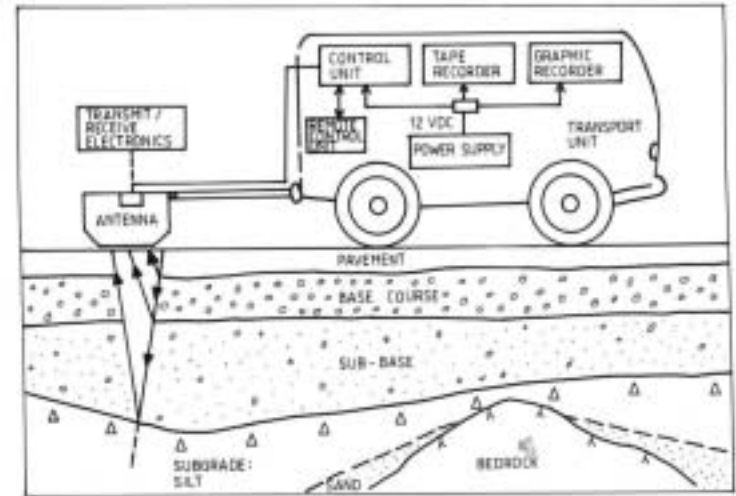


地中レーダの測定方法

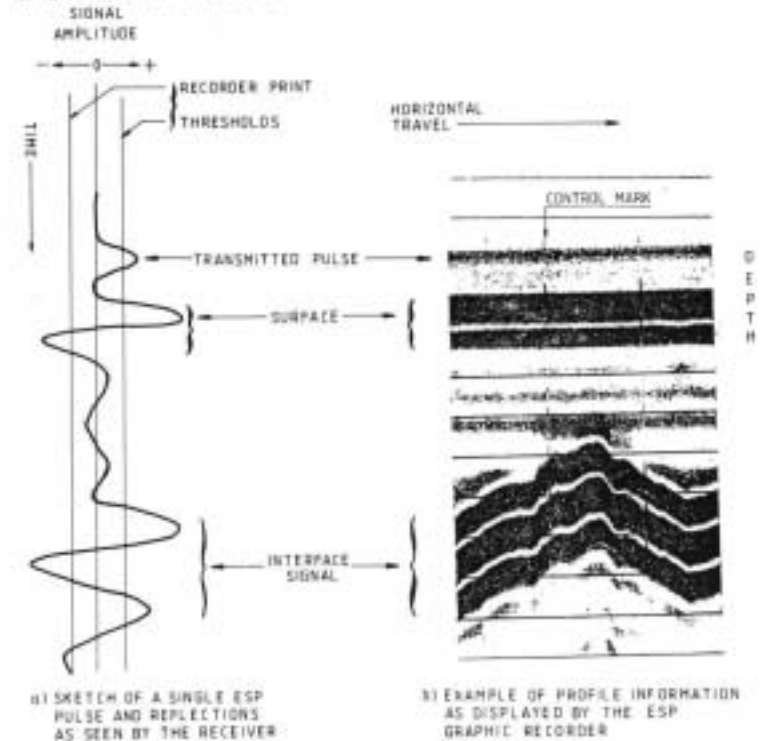


地中レーダの原理

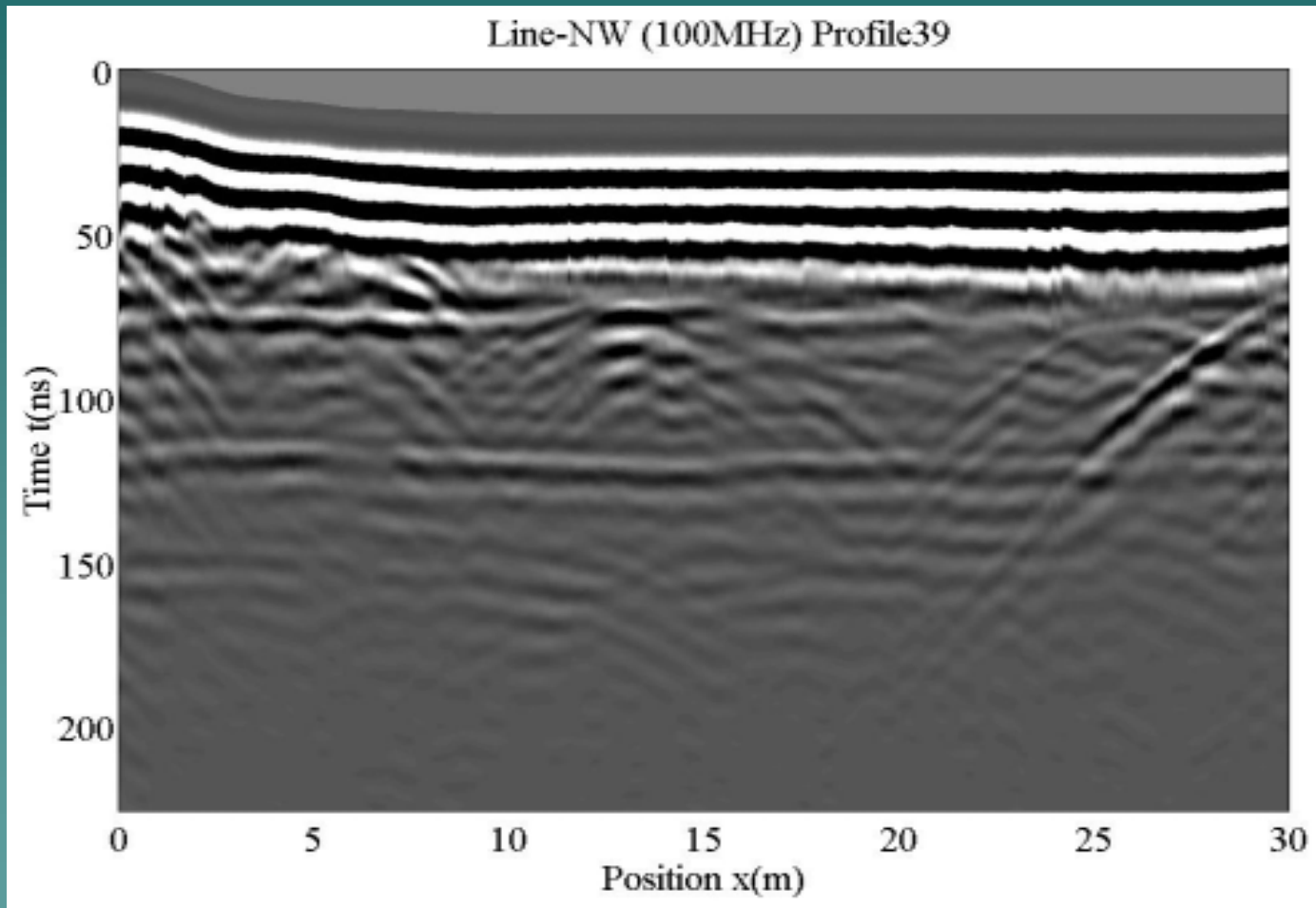
I MEASURING EQUIPMENT



II EXAMPLE OF RADAR DATA



GPRプロフィール



地中レーダの応用

埋設物検知

- ・ 非金属地雷
- ・ パイプ・ケーブル

非破壊検査

- ・ コンクリート
- ・ 建造物
- ・ トンネル

環境調査

土木・建設

- ・ 地盤調査
- ・ 掘削前方監視

路面保全

- ・ 舗装状態
- ・ 空洞検出

地質調査

遺跡探査

地中レーダの特徴

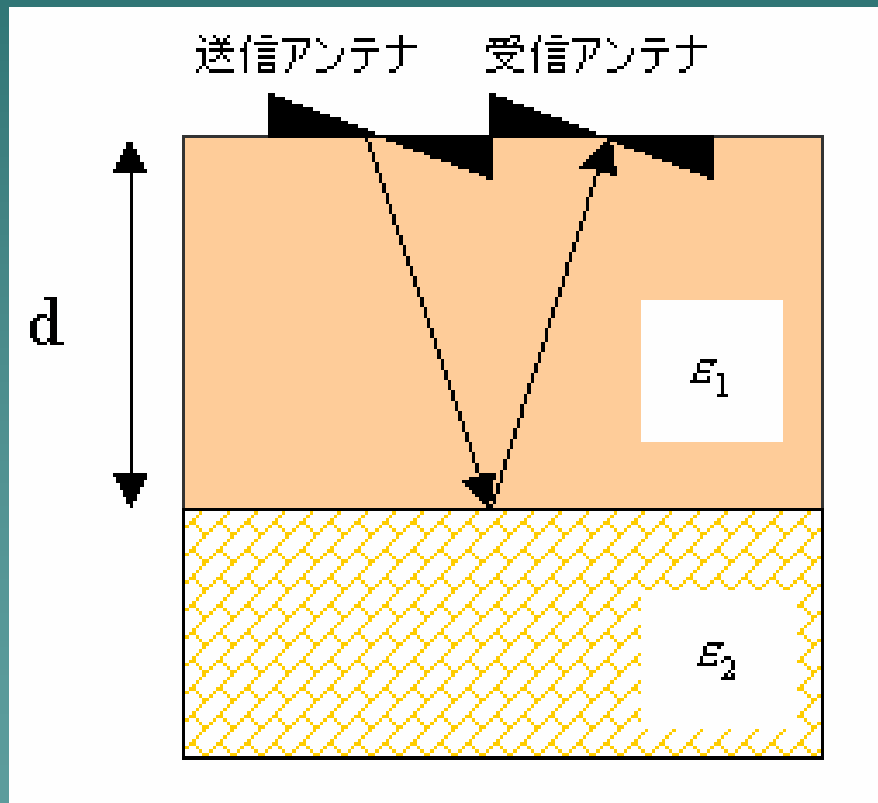
- ◆ 高速・高分解能
 - 現場で地下のイメージングが可能
- ◆ 金属、非金属を問わず検知
 - 用途が広い
 - 水に対する感度が高い

電磁波による計測の対象

分野	目的	導電率	誘電率	透磁率	計測対象
エネルギー資源	石油				水と油の識別
	石炭				層厚の測定
	地熱				地下き裂の検出
鉱物資源	金属鉱床				鉱脈・地層の識別
地質・環境	地下水				水の検出
	凍土・氷				水と氷の識別
	地雷				地層と人工物の識別
土木・建設	埋設物探知				金属探知
	基盤調査				地下水検出
学術	遺跡調査				地層境界の識別

地中レーダの原理

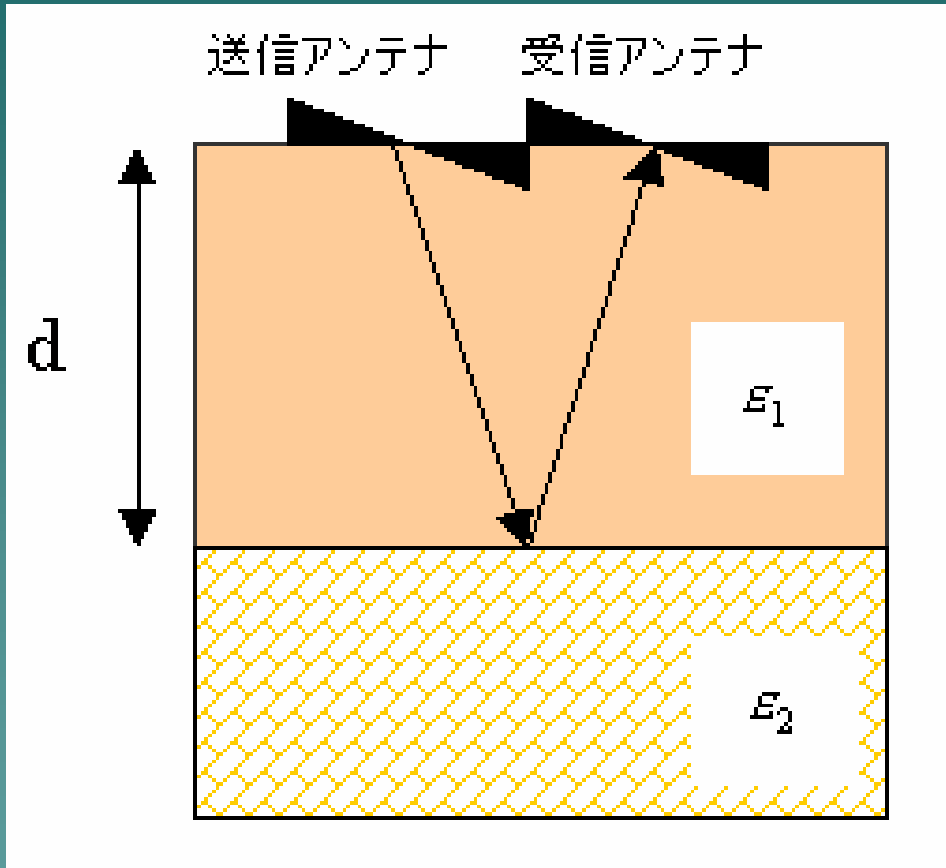
◆ 地中の電磁波伝搬



地中の電磁波速度

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} (m/s)$$

電磁波の反射



伝搬時間と反射体深度

$$d = \frac{v\tau}{2} (m)$$

2層境界面の反射係数

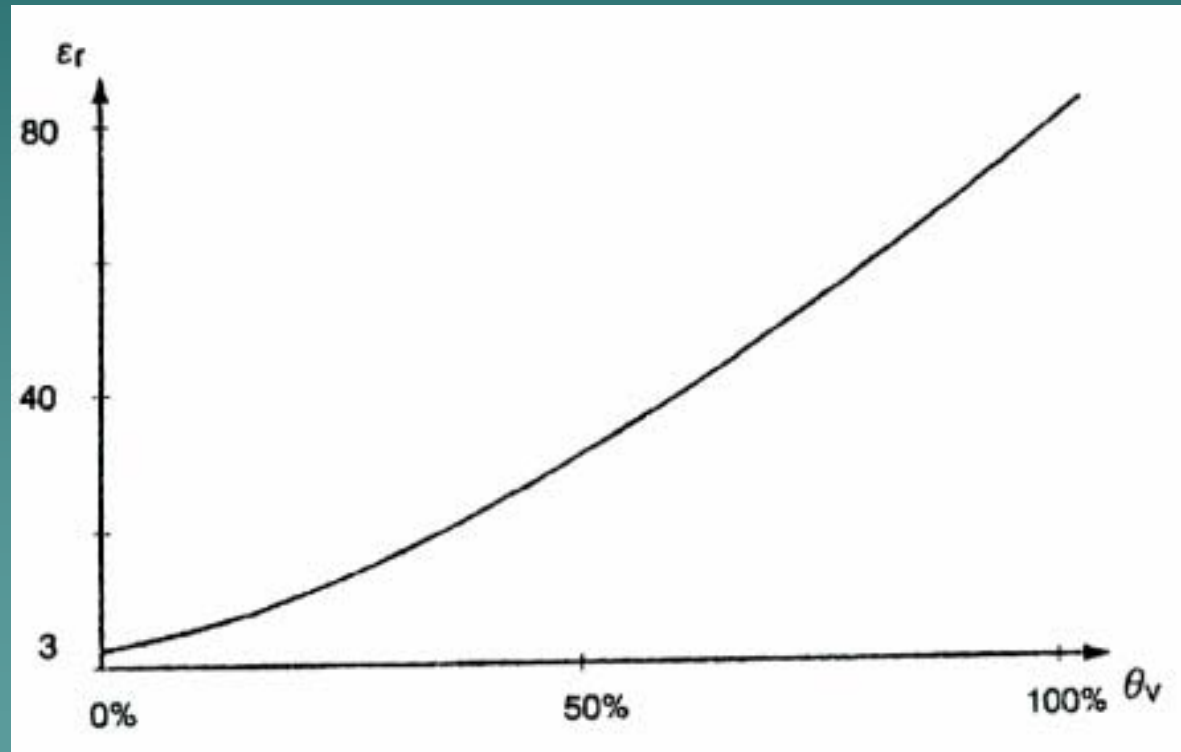
$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

地球構成物質の導電率・誘電率

媒質	導電率 (S/m)		比誘電率	
	乾燥状態	湿潤状態	乾燥状態	湿潤状態
空気	0		1	
真水	$10^{-4} - 10^{-2}$		81	
海水	4		81	
粘土	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-1} - 1$	2-6	15-40
花崗岩	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-2}$	5	7
土壤 (砂質)	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	4-6	15-30
土壤 (ローム)	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	4-6	10-20
土壤 (粘土質)	$10^{-4} - 10^{-1}$	$10^{-1} - 1$	4-6	10-15

土壤水分率と比誘電率

比誘電率



水分率

計測システム

◆ レーダシステムの性能評価

周波数	低い	-	高い
波長	長い	-	短い
減衰量	小さい	-	大きい
分解能	低い	-	高い
探査距離	大きい	-	小さい

レーダ 探査能力

$$PF = \frac{\text{送信出力}}{\text{受信器雑音レベル}}$$

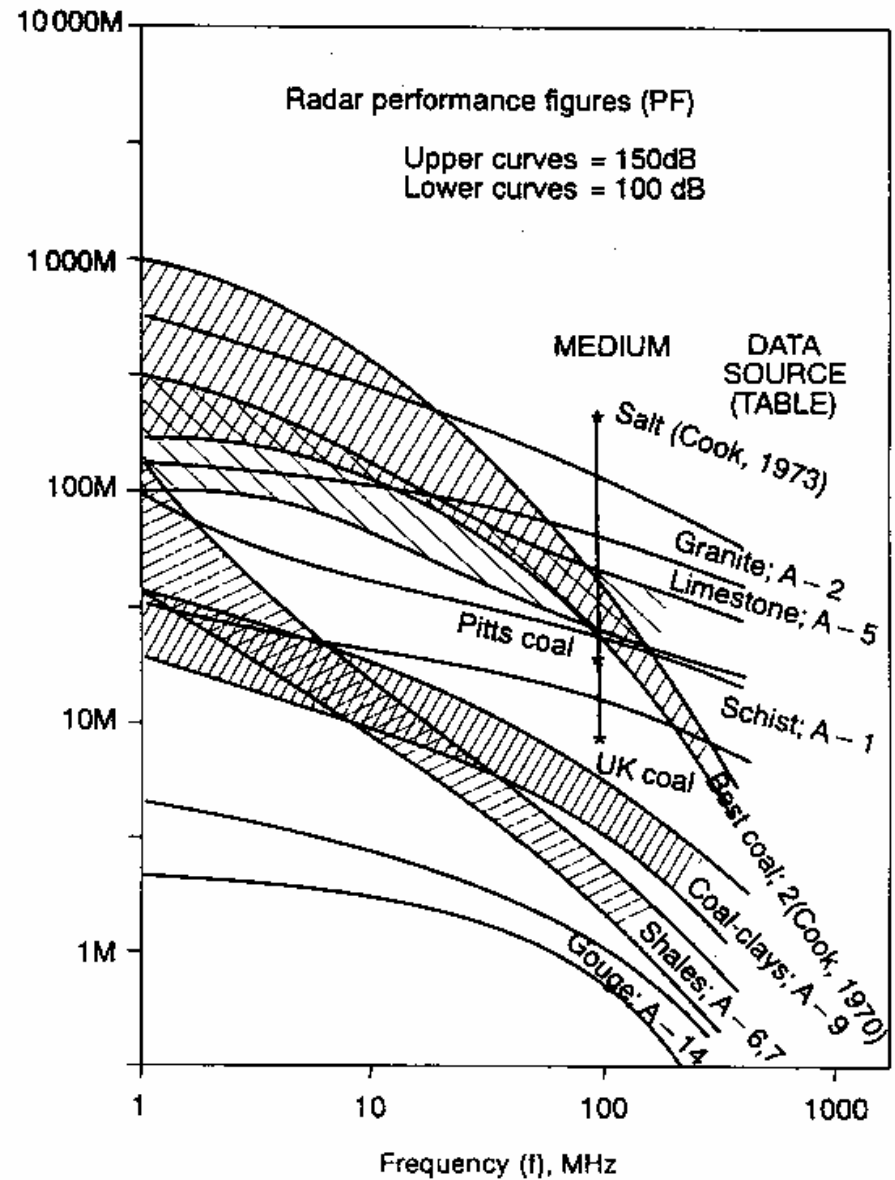
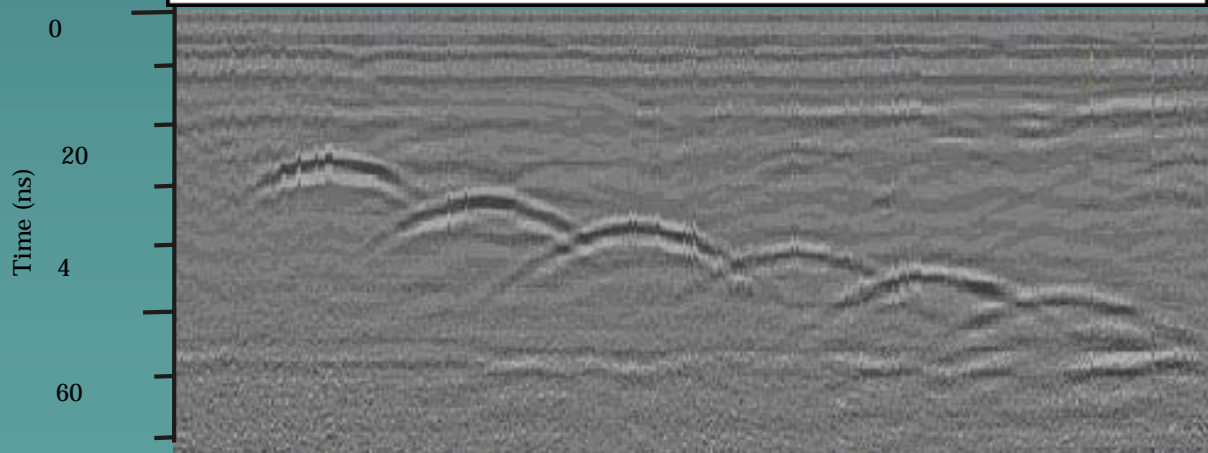
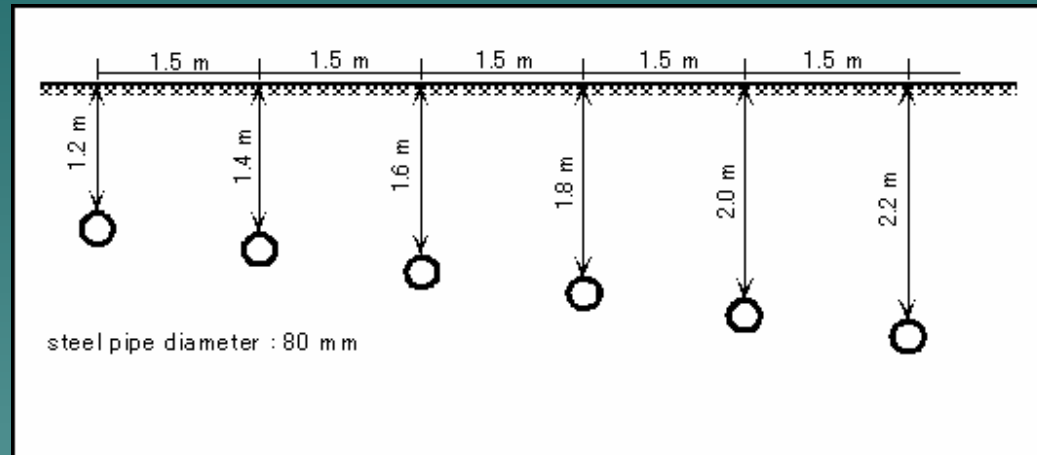


図7.7 典型的な地中媒質に対するレーダ探査距離 (Cook, 1975)

埋設管からのレーダ反射波



GPRプロファイル

原波形

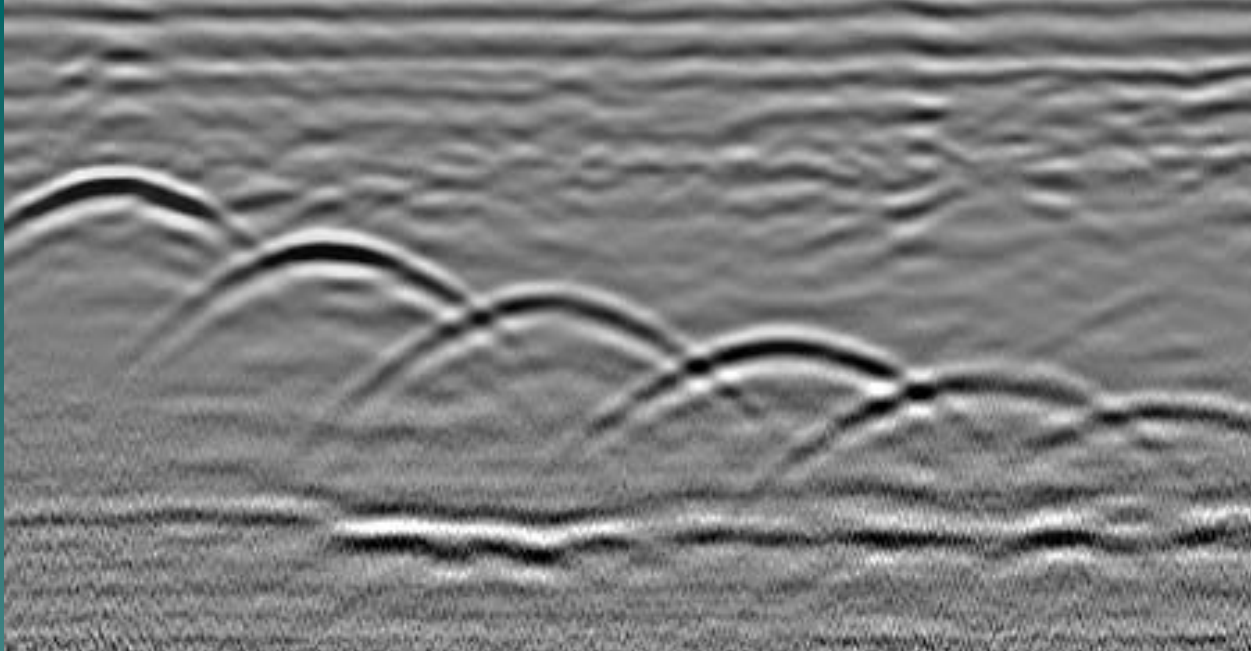


図1 地中レーダによる埋設管検知例（大阪ガス早川秀樹氏提供）

マイグレーション処理

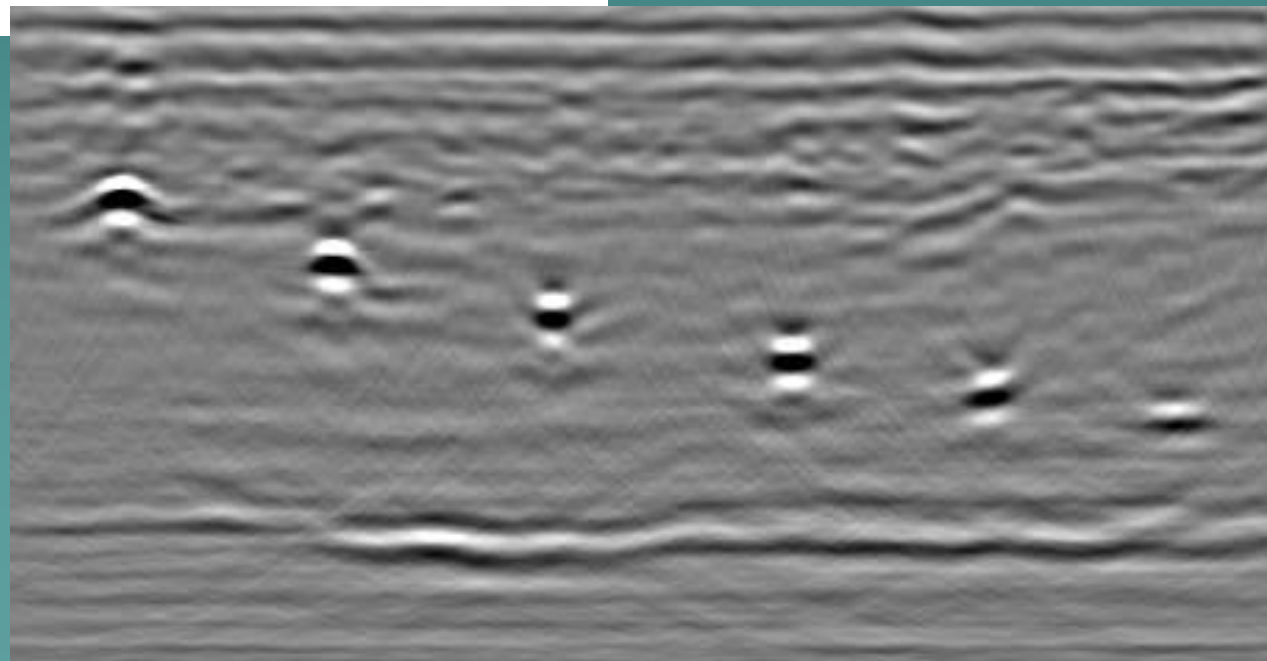
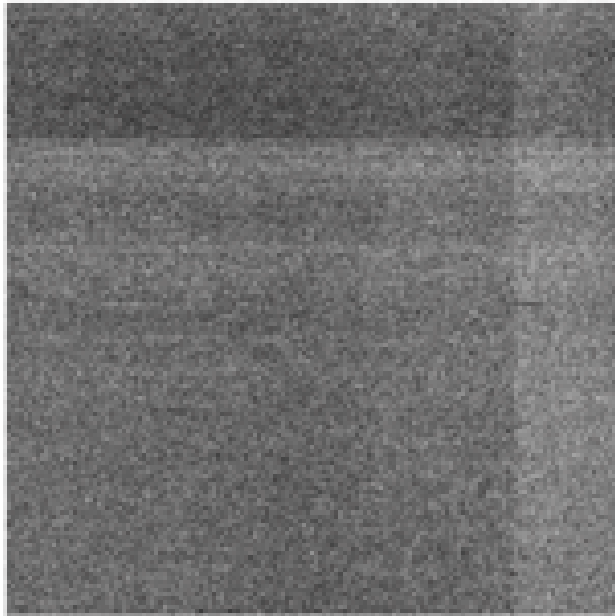


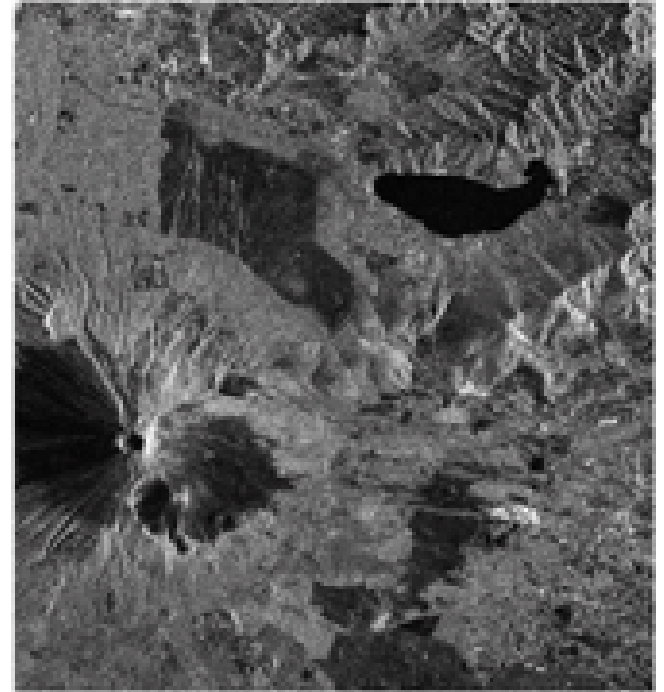
図2 フレームマイグレーション処理を行った波形

マイクロ波リモートセンシング



a)raw data

原データ



b)correlated data

合成開口(SAR)処理

JERS-1, ©METI/NASDA

みやぎ県民講座 地球環境計測



ドイツ

北極

シベリア(ロシア)

モンゴル

韓国

中国

これまで
に研究室
でレーダ
計測を
行った
地点





モンゴル北部 フブスグル湖

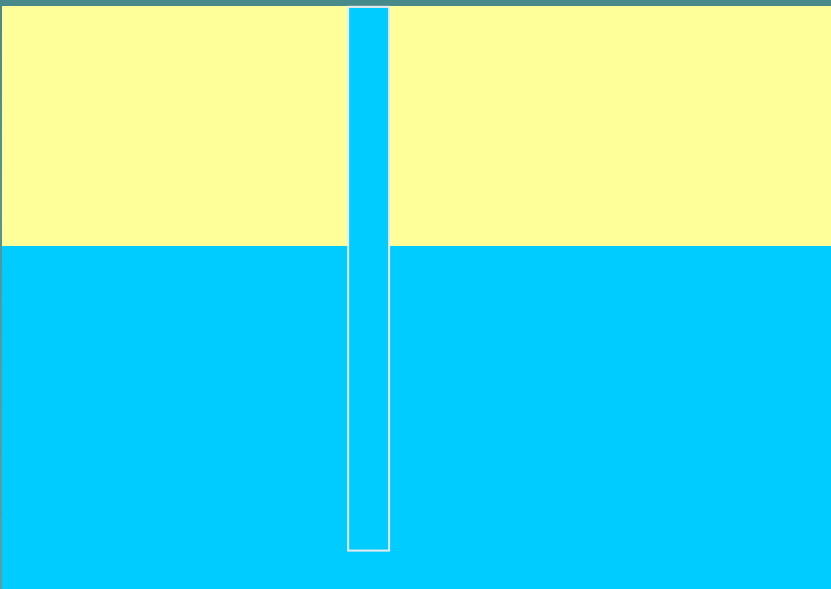
2004年9月24日



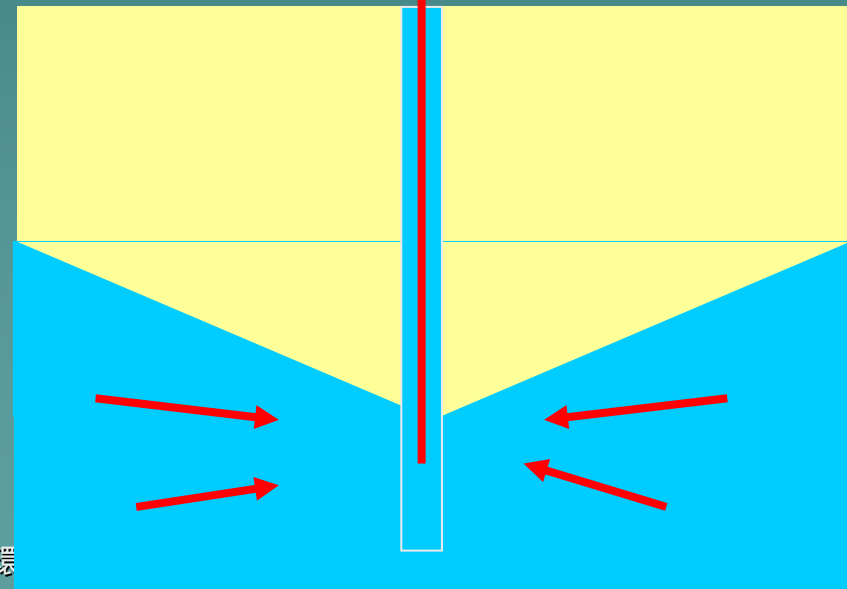
地下水の汲み上げと地下水位

Observation of Dynamic Behavior of Ground water level by GPR

Static State



Production State



ポンプ小屋の前での地中レーダ計測



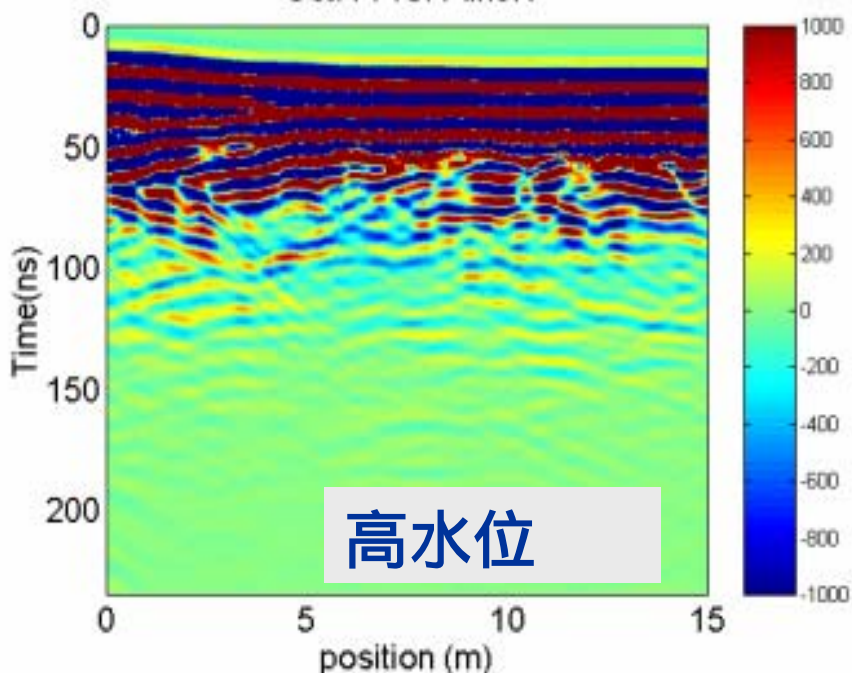


モンゴル地下水 計測実験

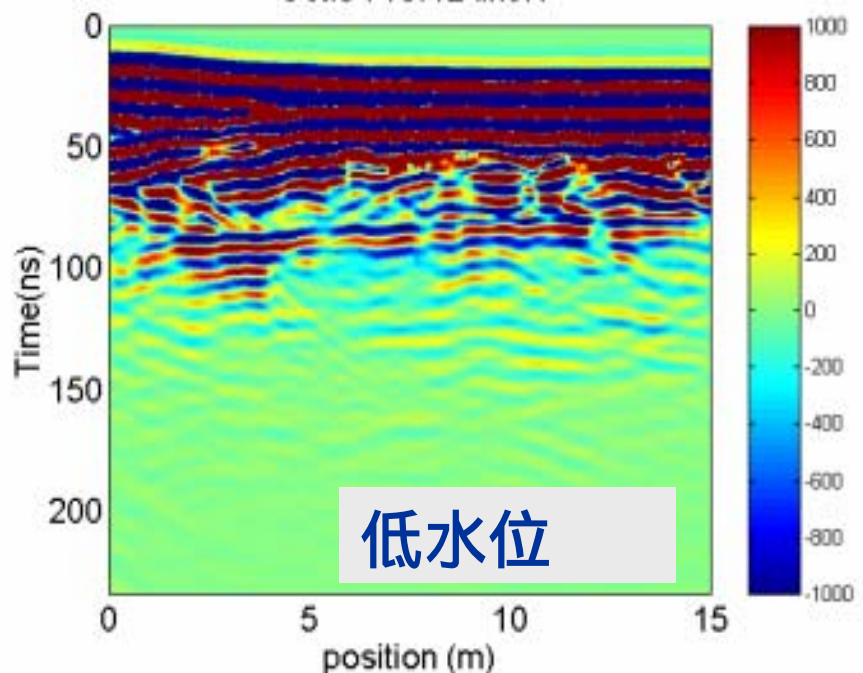
2004年9月24日



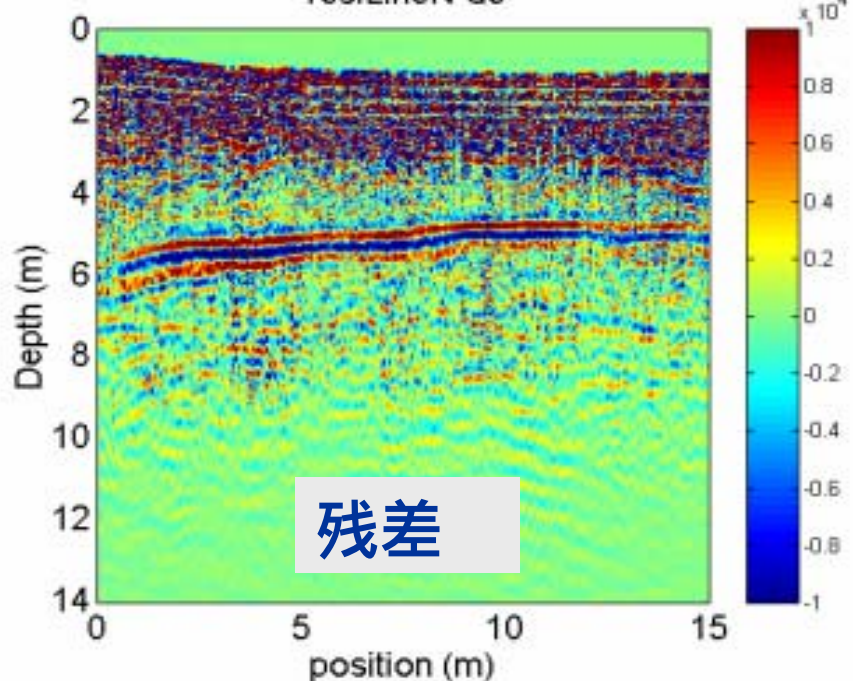
Oct.4 Prof1-lineN



Oct.5 Prof12-lineN



resiLineN-de



地下水変化の モニタリング

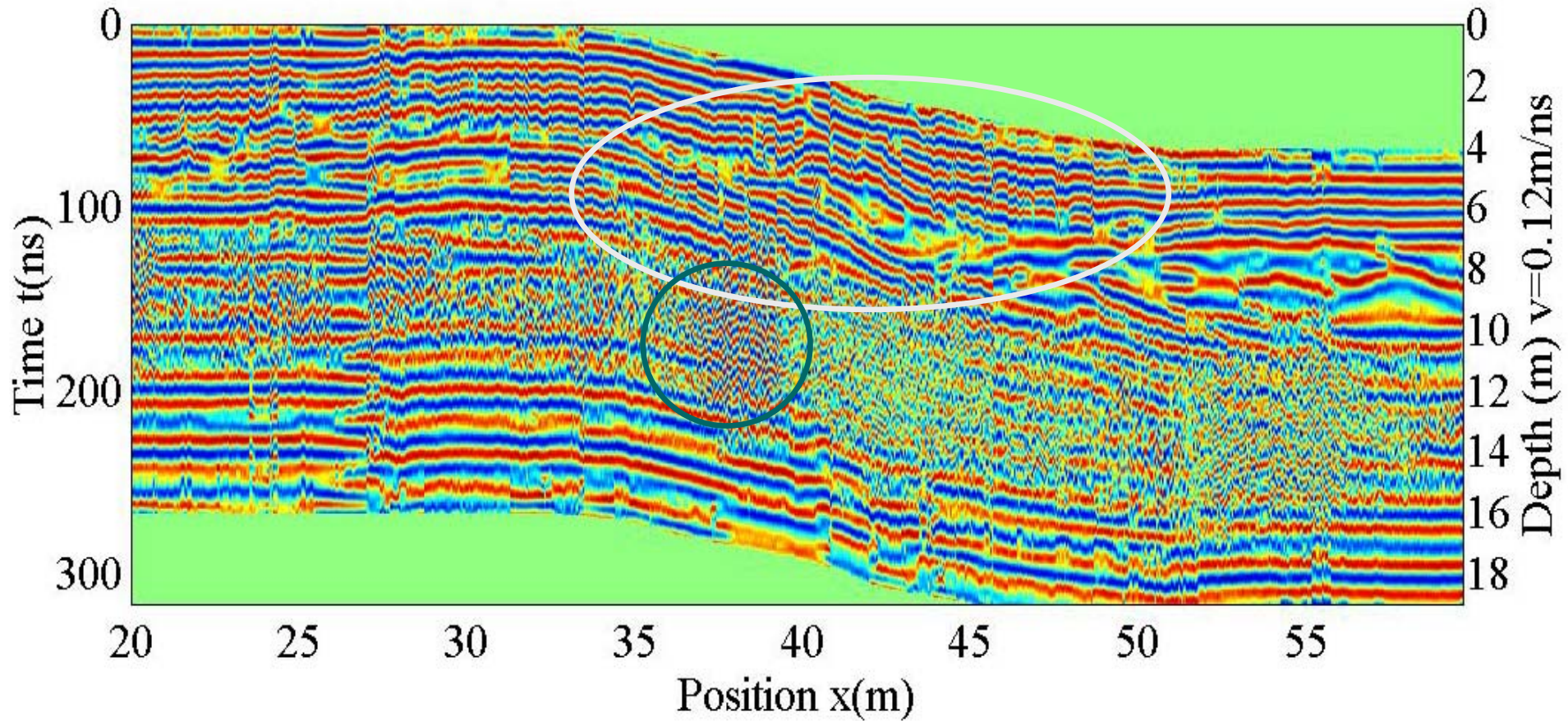
GPR profile along the survey line N.(a)Profile1,water level is 5.30m(+1.15m).(b)Profile12,water level is 4.65m(+1.15m offset).(c)Residual profile of (a) and (b).

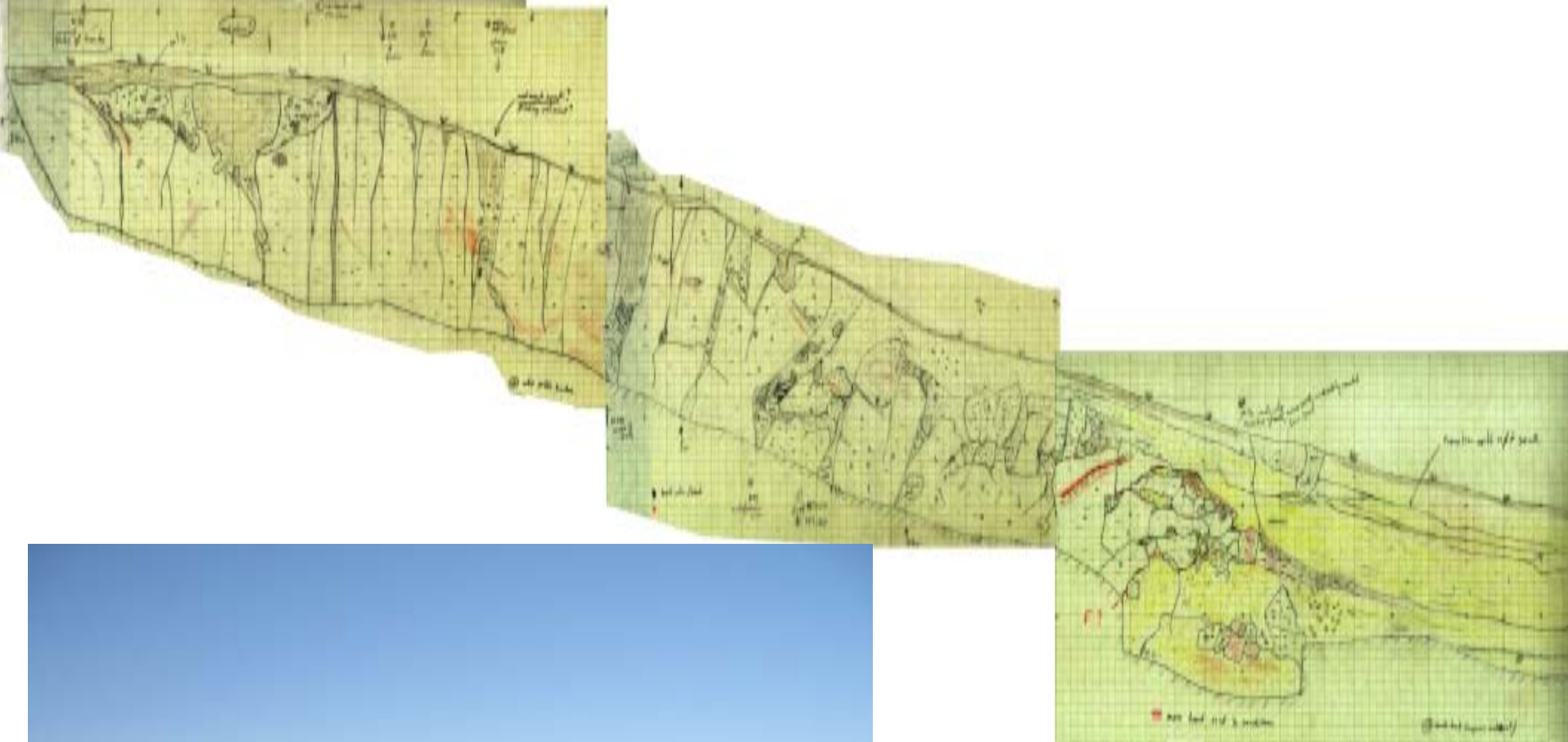


デーレン断層 (ゴビ砂漠)



Processed Result

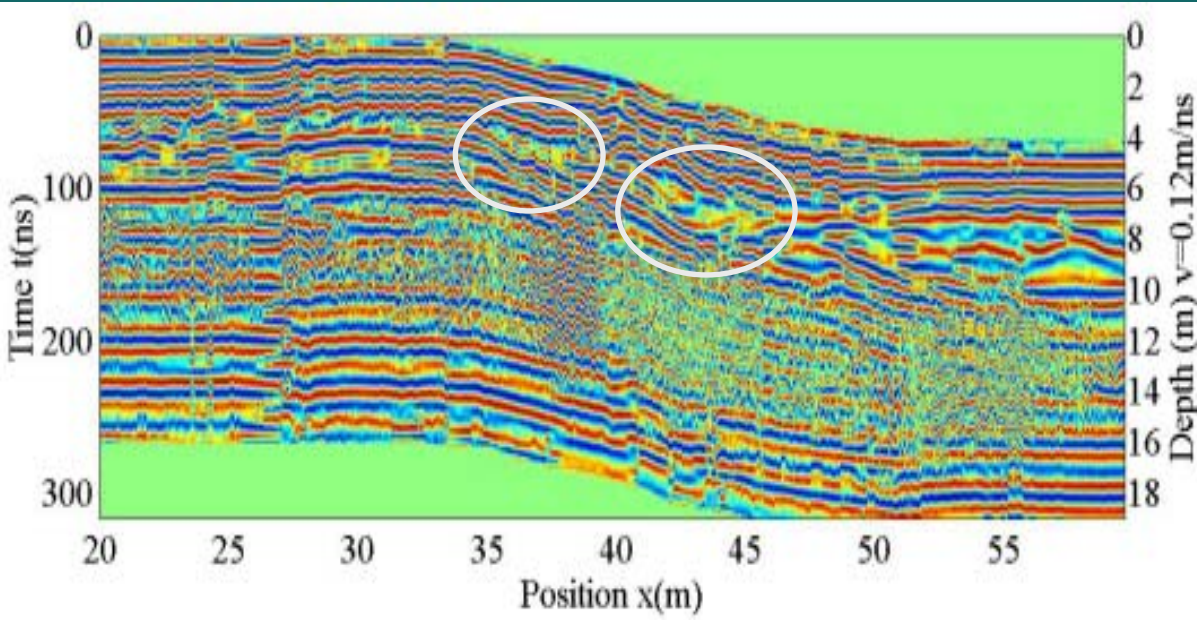




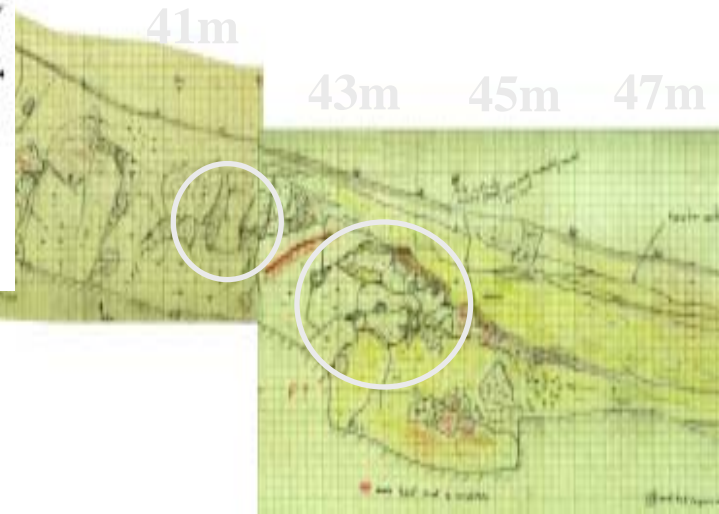
デーレン断層 トレンチ調査

環境計測

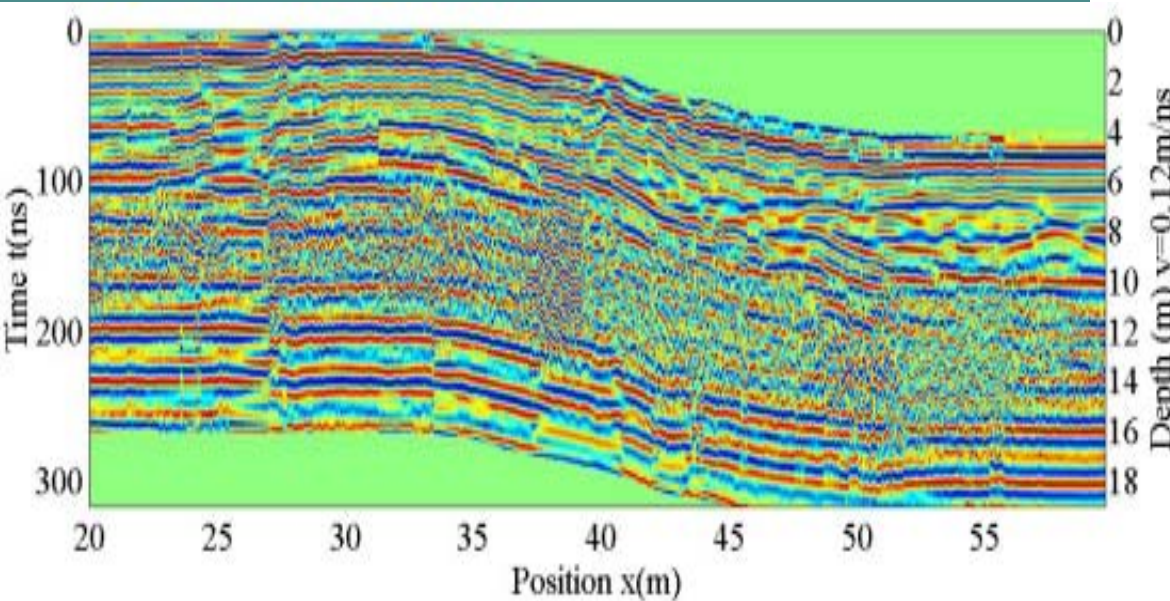
地中レーダ Instantaneous Phase



断層スケッチ

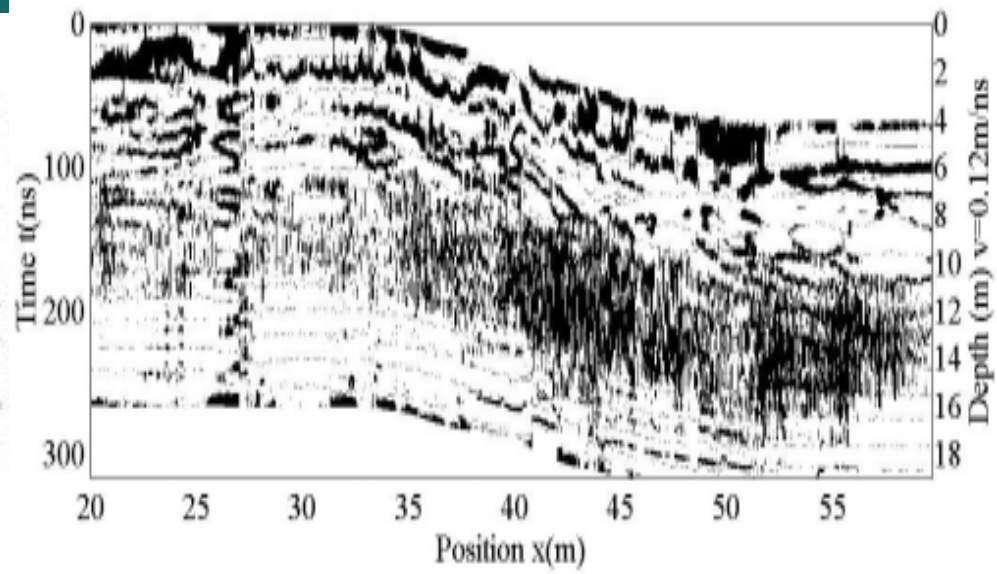
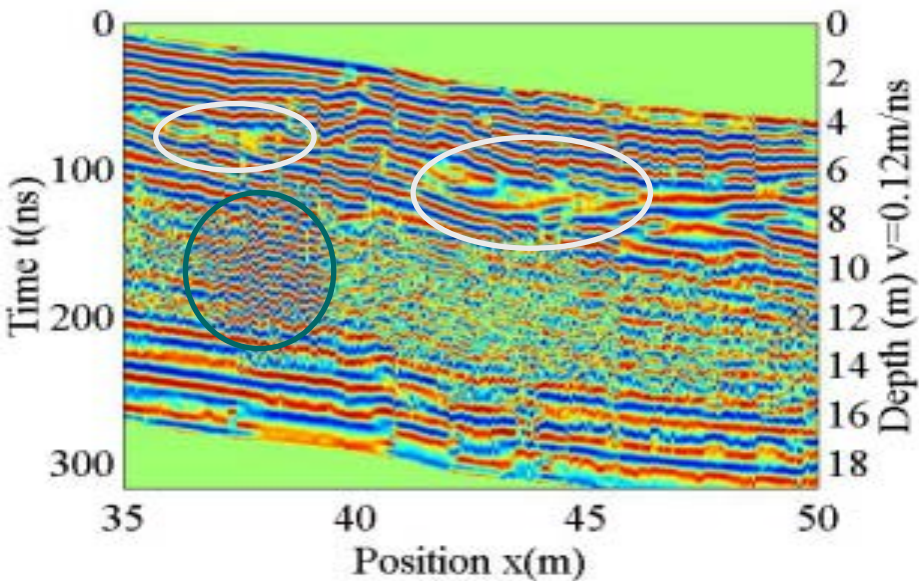


地中レーダ AGC

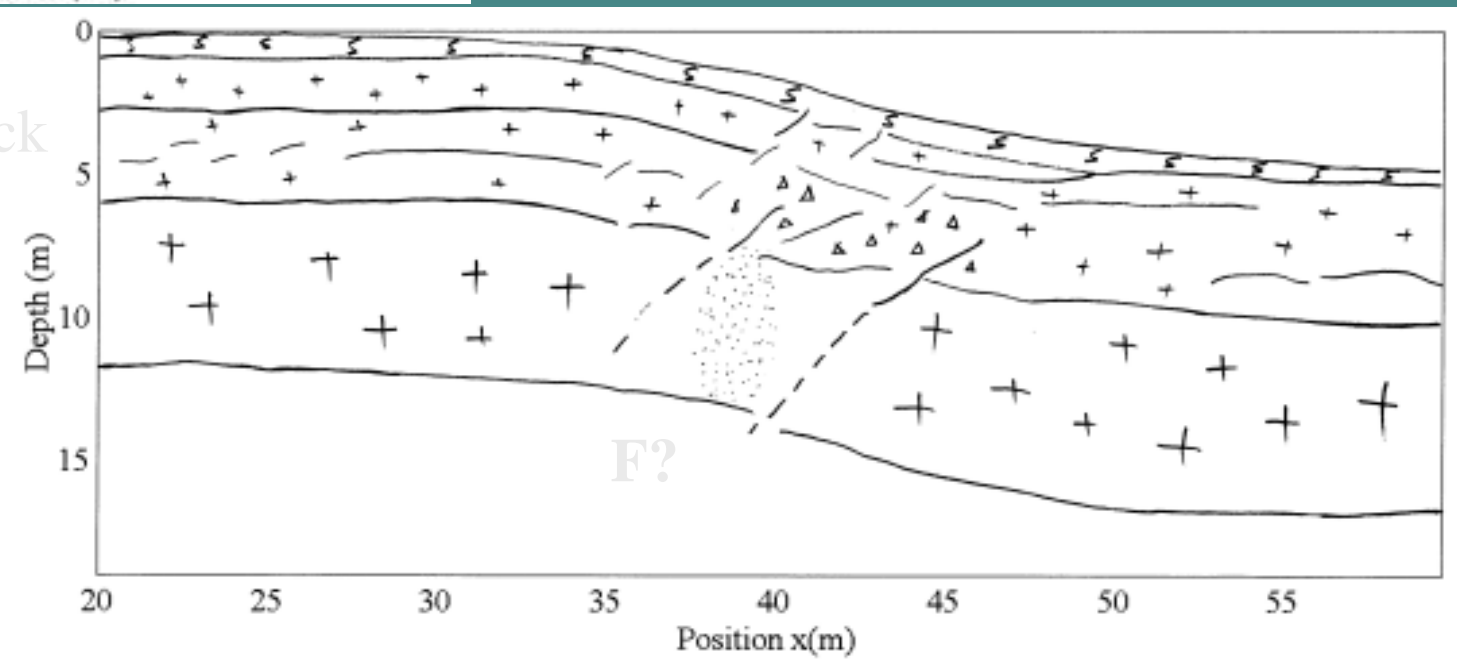


地質断面図

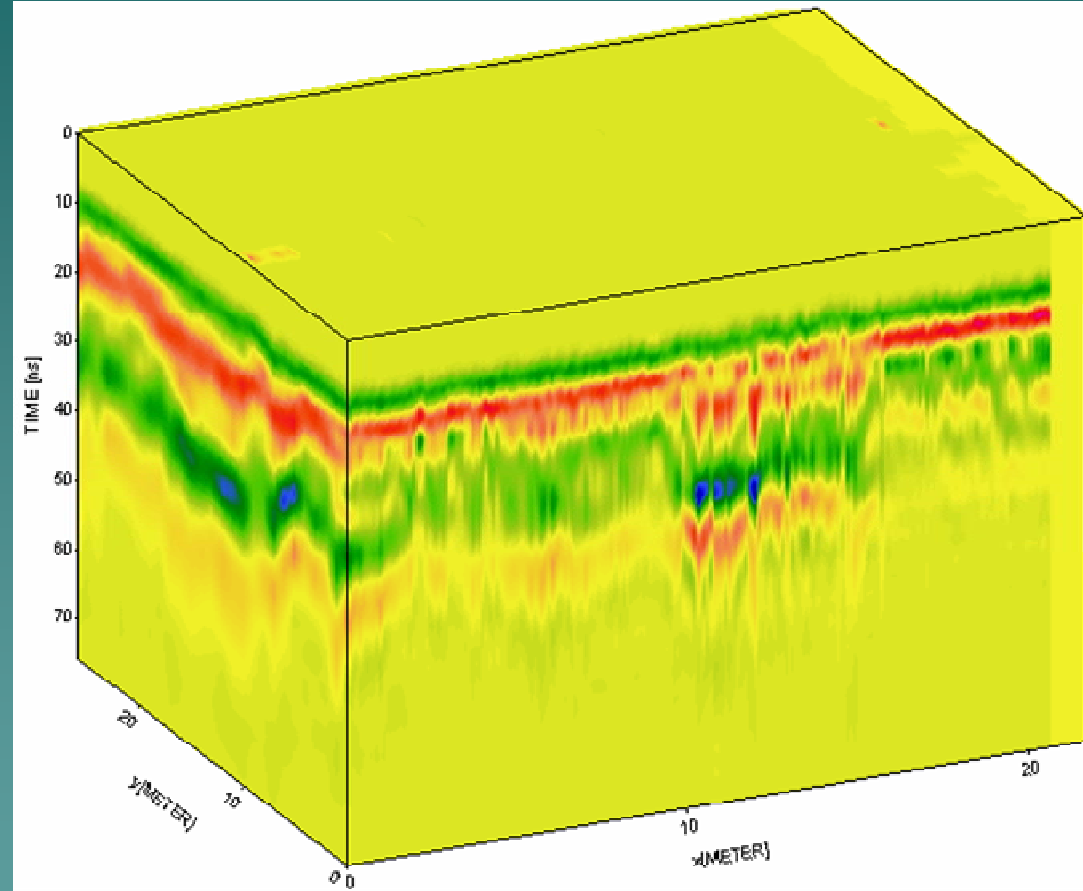
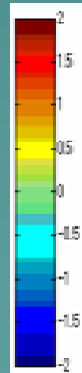
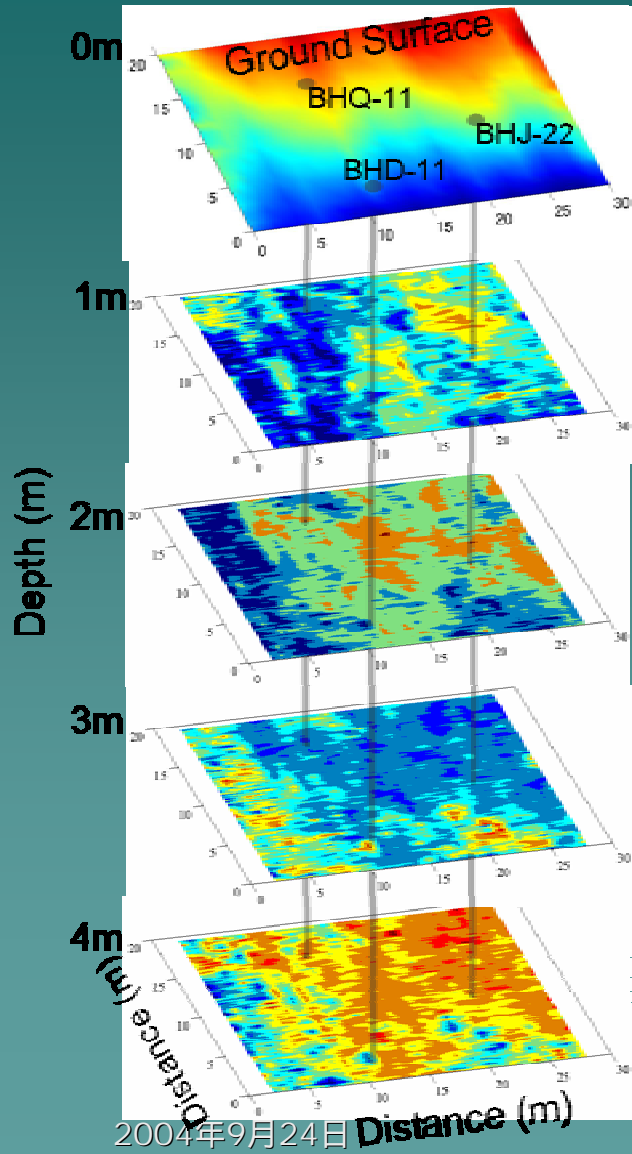
Interpreted Structures



- ss :Top soil
- + :Weathering rock
- + :Basite



土壤汚染への応用





ポラリメトリックボアホールレーダ

みやぎ県民講座 地球環境計測

USGSとの共同研究 (Mirror Lake, NH, USA)

2004年9月24日

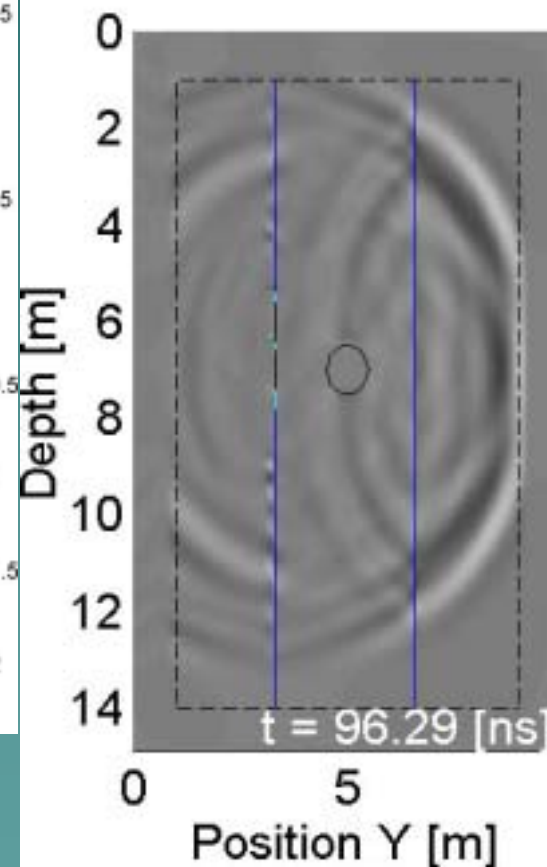
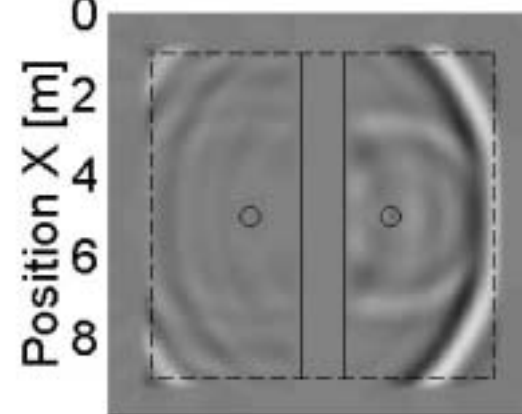
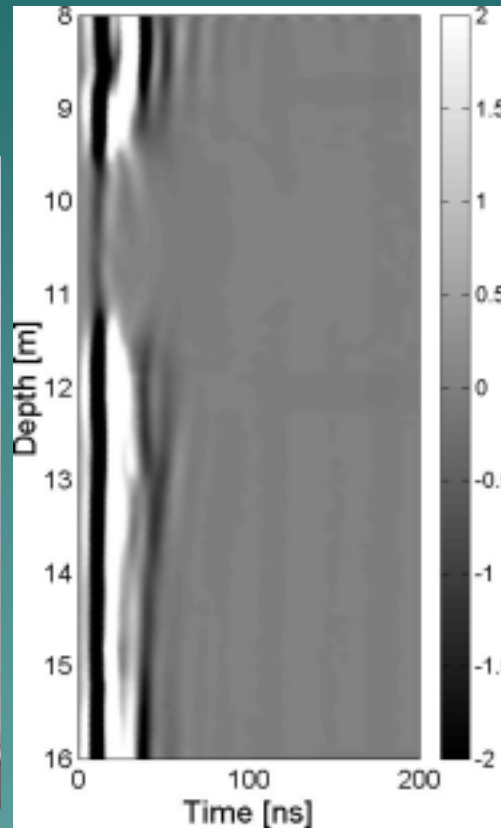
採石場でのボアホールレーダ計測 (KIGAM, 韓国との共同研究)



韓国での 地下水検 知実験



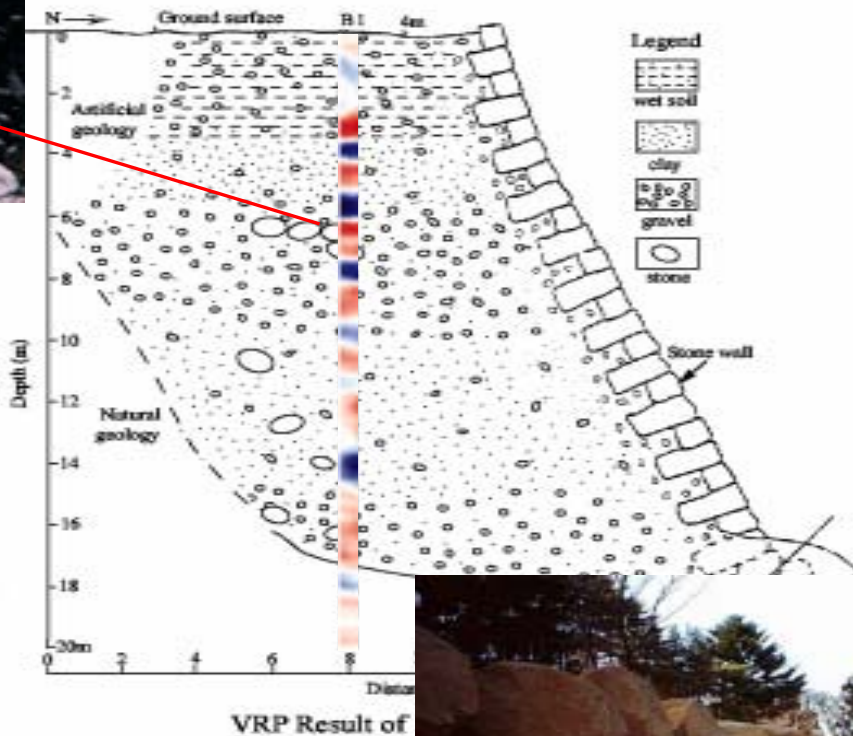
仙台地下鉄工事のための 予備調査





応用例 (遺跡調査)

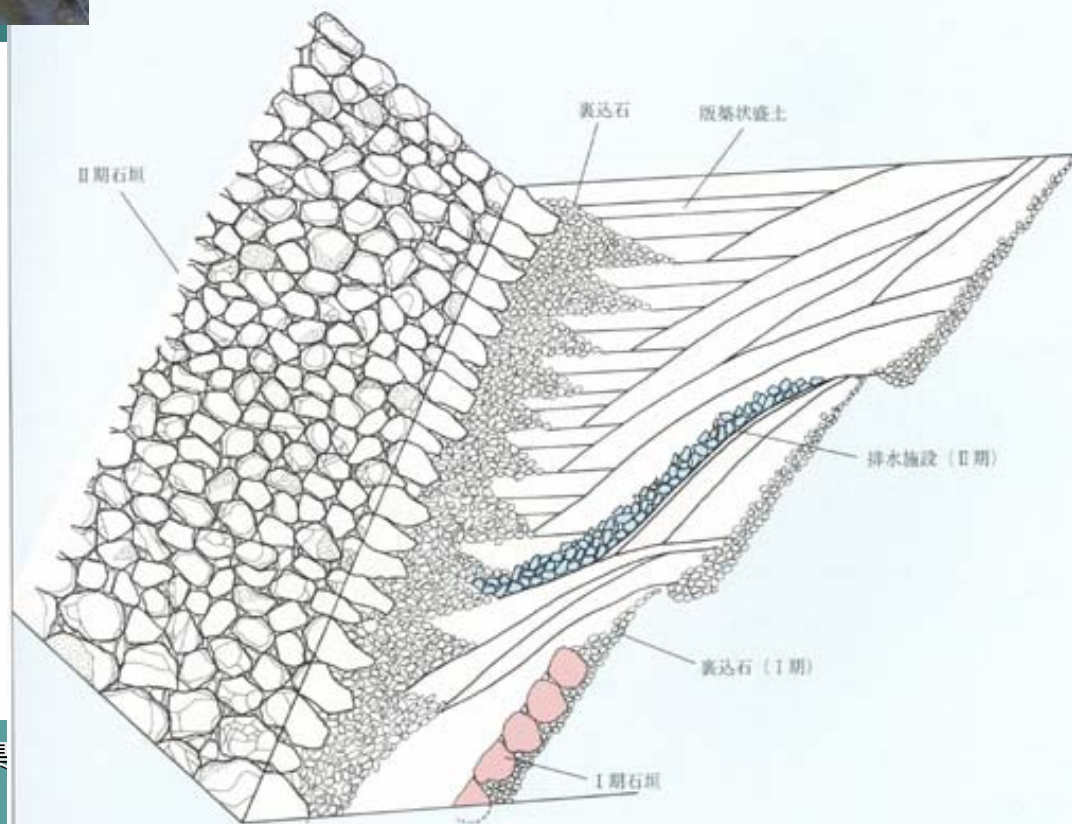
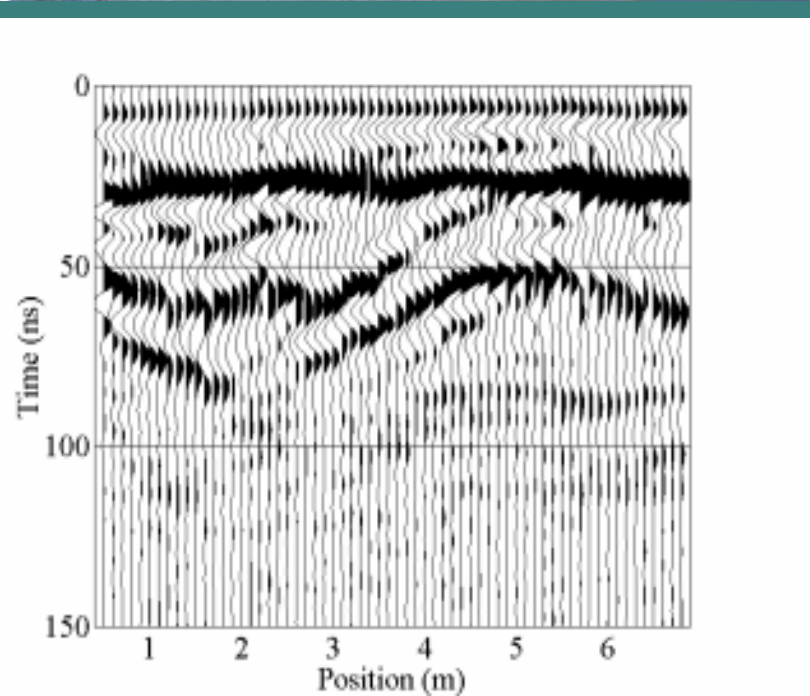
レーダ測定に基づく予想断面図



1997年に実施した地中レーダ調査で、開削前に石組みを見つけることができました



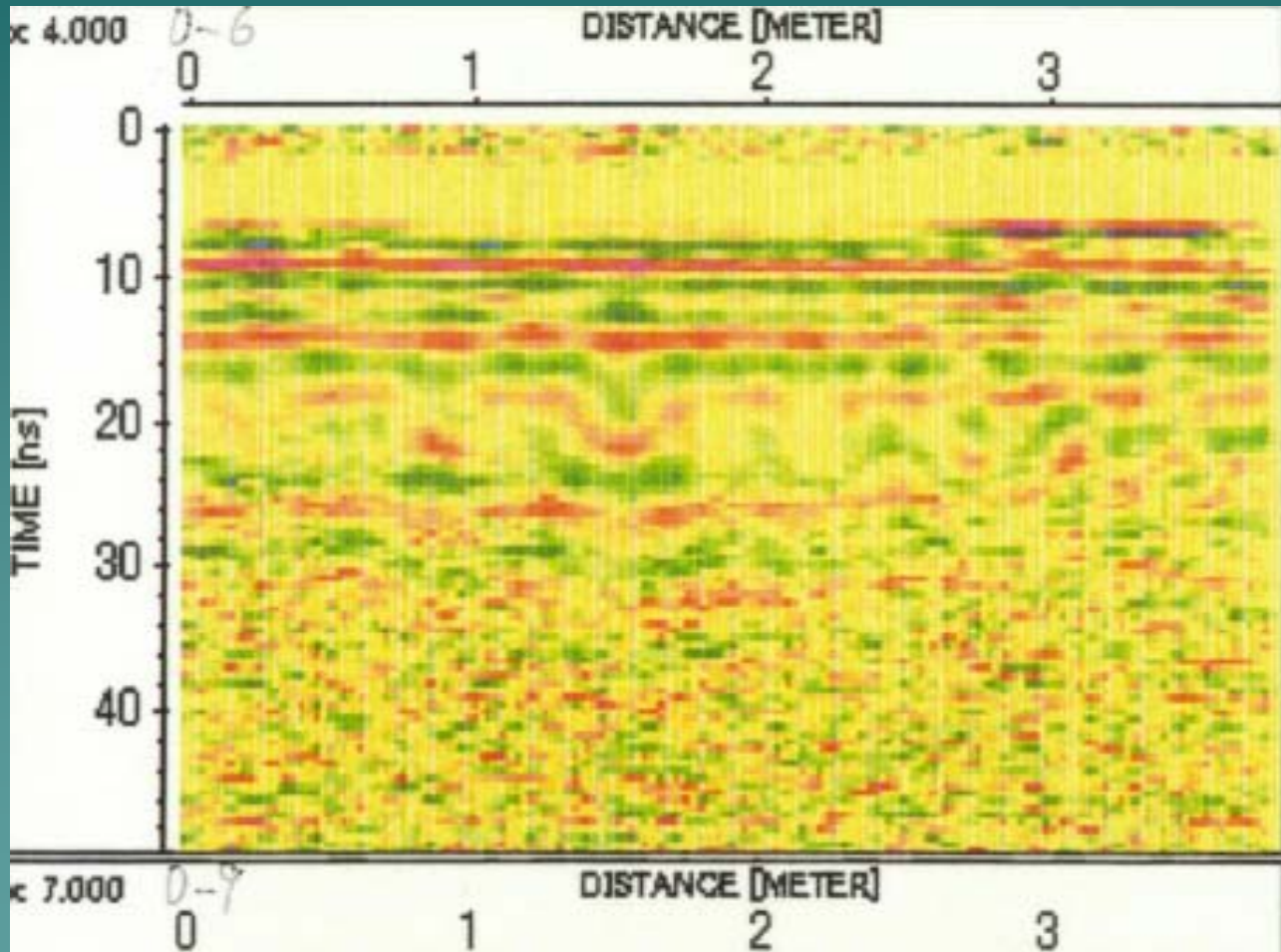
仙台城石垣裏面の排水溝



みやぎ県

2004年9月24日

仙台城石垣



石垣調査

良櫓予定地直下に石垣？

仙台城跡レーダー探査

東北大 佐藤教授ら

1層大「異物」並ぶ

復元計画に影響も

仙台市の仙台城跡(とうじょう)の復元事業で、東北大東北アジア研究センターの佐藤孝彦教授(地球工学)らが、地中レーダー探査を実施した結果、良櫓予定地の直下に、古くは石垣が埋まっている跡があることが、明らかになった。この場所は櫓の礎石と推定されているが、今後の調査結果によっては計画の見直しが必要とされ、復元事業の方向にも影響を及ぼす可能性がある。



地中レーダー装置を使って、仙台城跡の発掘現場を調査する東北大の研究グループ＝7月下旬、仙台城本丸跡

佐藤教授らはレーダー探査の結果、一層として今年7月下旬、本丸跡の直下の地中の様子を探った。調査対象は、良櫓(二層)と石垣の内側から見つかった。一層は石垣の上部分の石の痕跡上、調査の結果、地表から2メートル、最大は1.5メートルの「異物」が何層か並んでおり、形状が瓦のようだった。

「異物」の形状は、二・五メートル四方の正方形で、地下水や砂利の塊の可能性もあり、石垣かどうかは何とも言えない。しかし、これほどの探査結果から、地中レーダー探査(地表に探査機を設置し、探査機から放射される電波が地下に反射して戻ってくる時間差を利用して、地下の状況を把握する)は、比較的簡単に探査できる。比較的簡単に探査できる方法で、地下の状況を把握する。探査結果は、より小さい物体を捉えるのに適している。

佐藤教授は平成9年から、仙台城本丸跡でレーダー探査を実施し、三層石垣の解体調査も今回と同様の結果を導き、一層と二層の間があることがわかった。佐藤教授は「一層と二層の間には、土の層がある」と推定している。佐藤教授は「一層と二層の間には、土の層がある」と推定している。

も重要な調査方法として有効性が認められている。周囲の状況と照らし合わせ、地中がどのような状態かを把握することが可能である。佐藤教授は「一層と二層の間には、土の層がある」と推定している。



对人地雷





地雷除去トレーニング センター



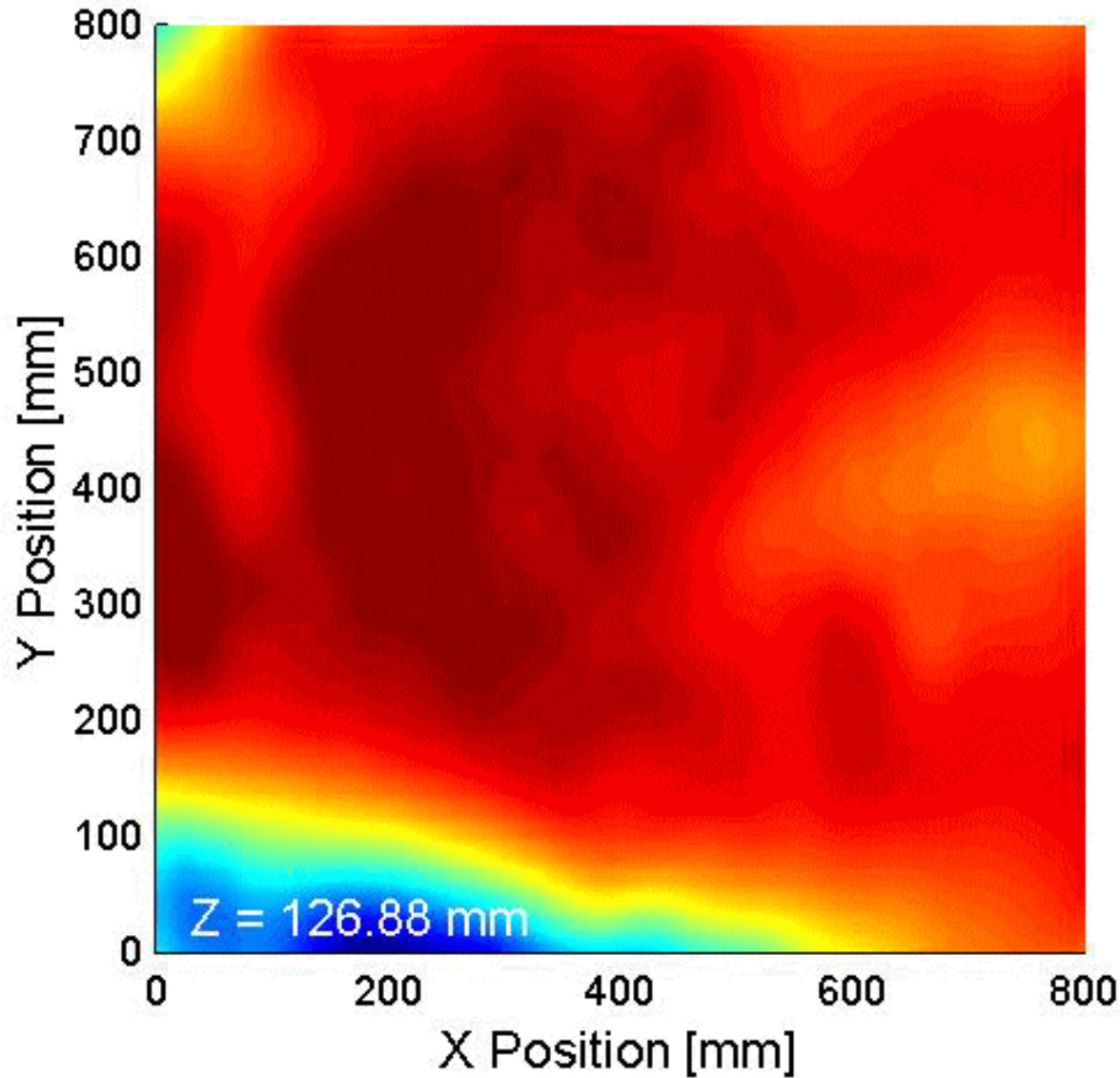
2004年9月24日

みや

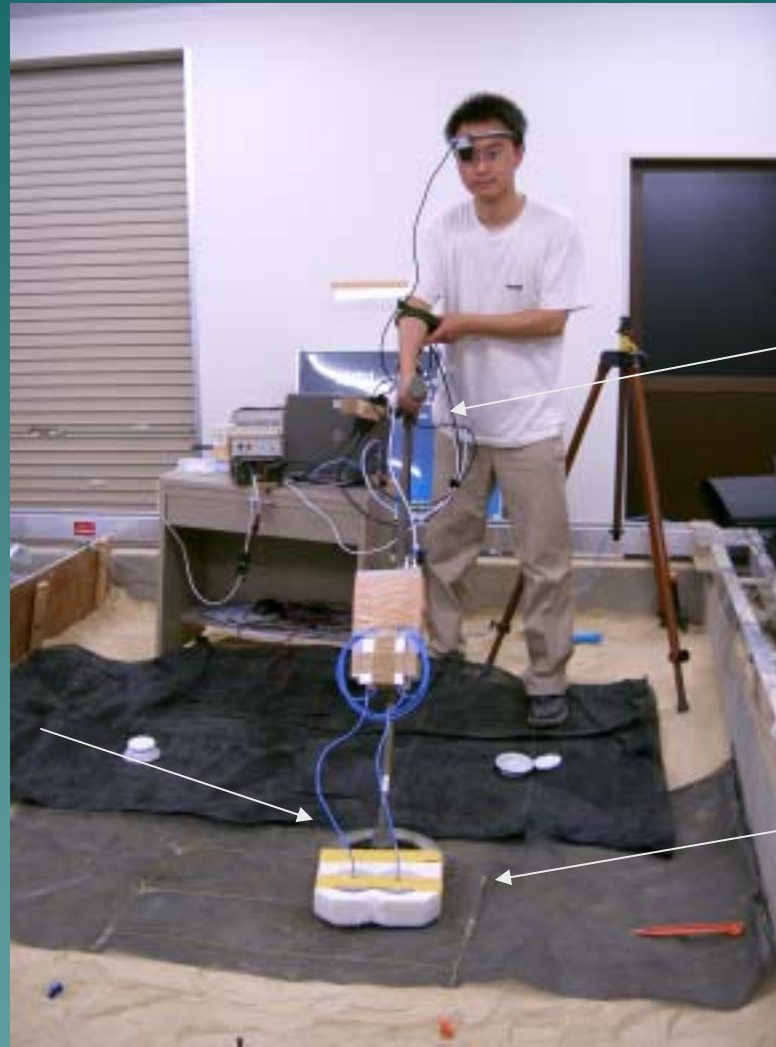
JST小型車両に搭載された金属探知器



地中レーダによる地雷検知



Advanced Landmine Imaging System (ALIS)



金属探
知器

CCD カ
メラ

GPR: 地
中レーダ

ALIS-CCD カメラ



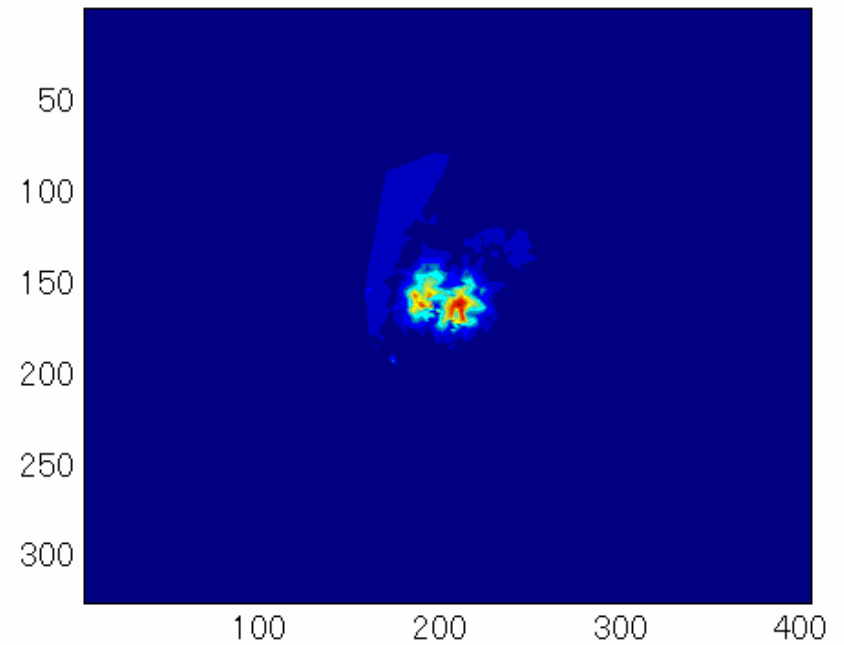
ALIS の操作



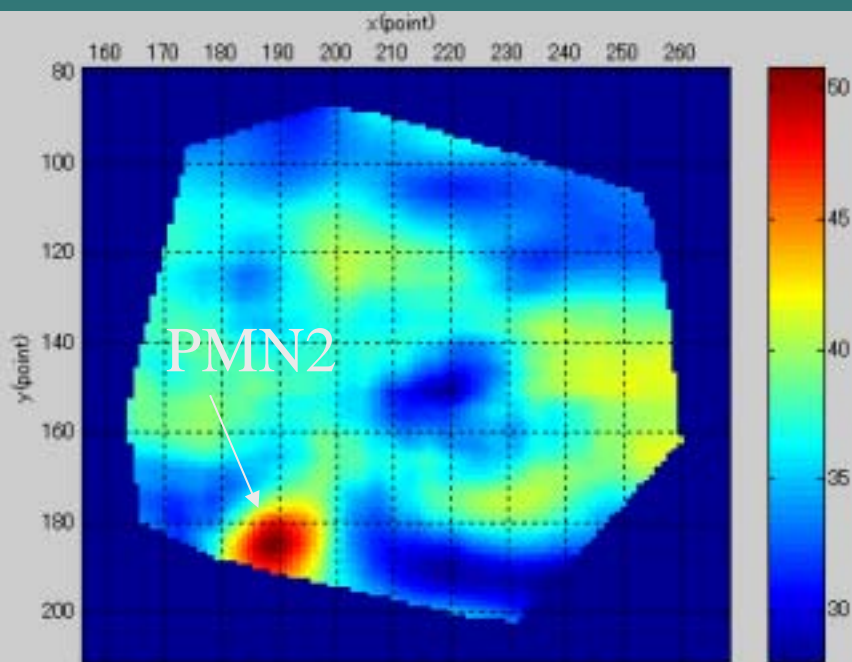
カメラ画像に重ねた金属探知器の応答



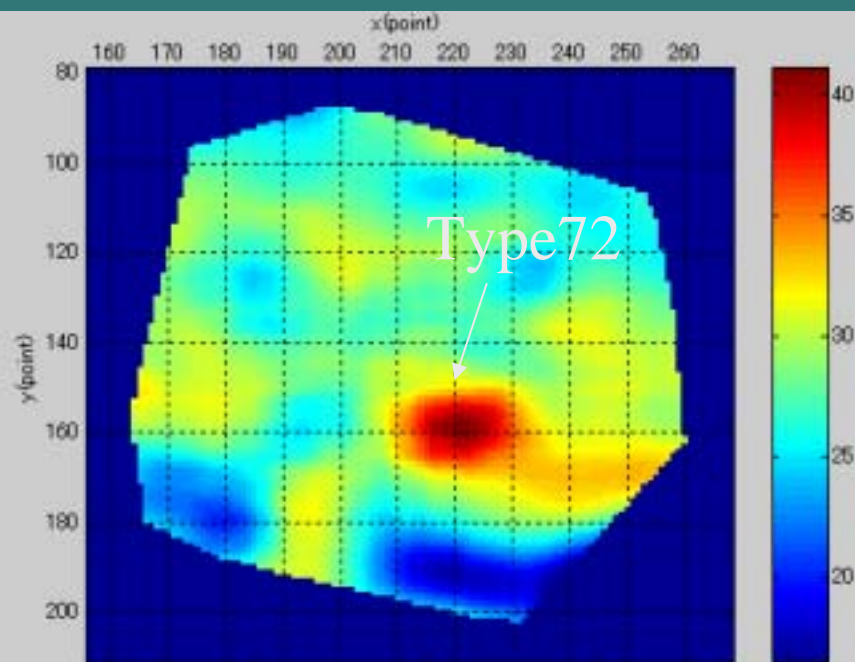
Interpolated Image: Data 1



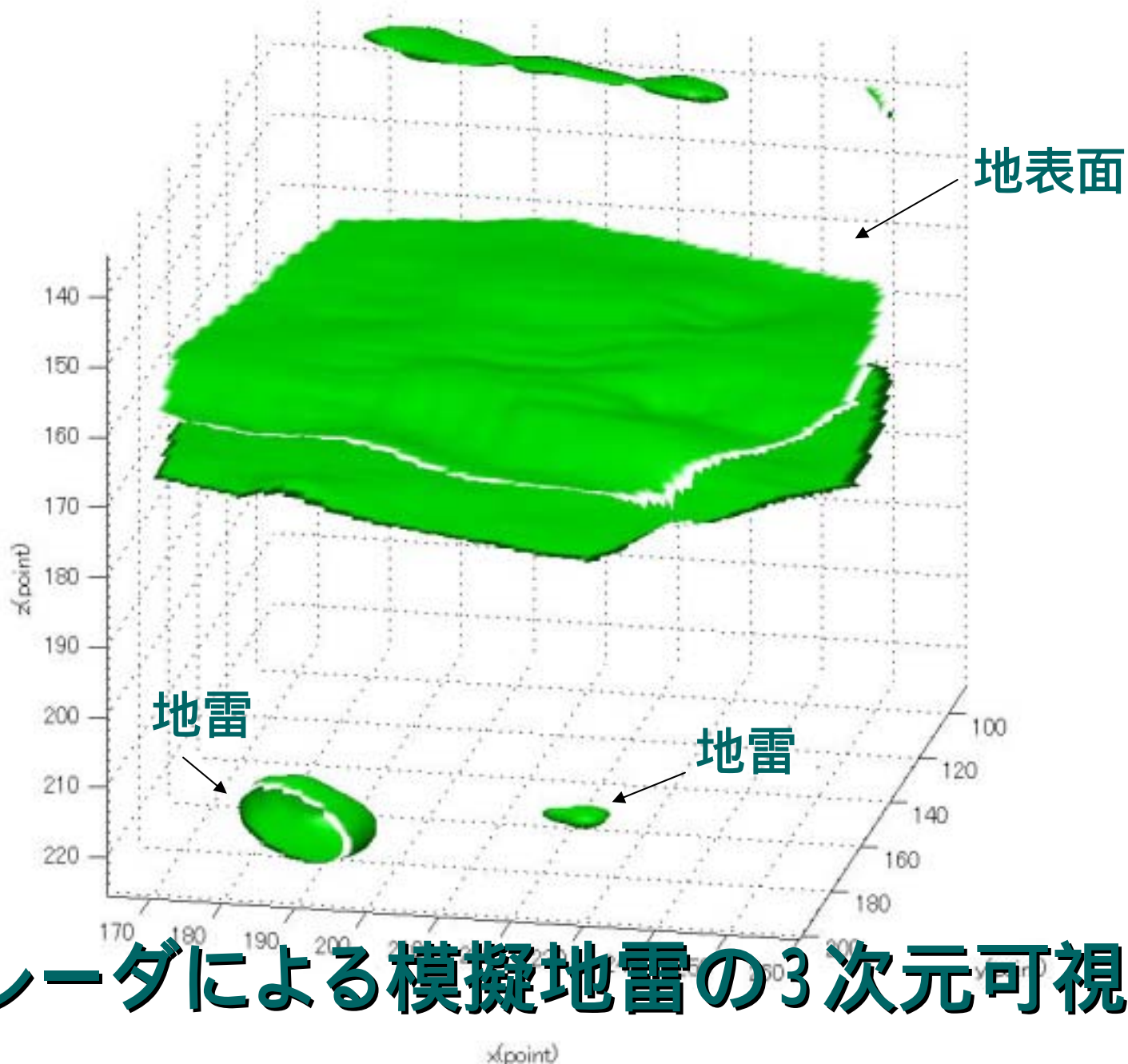
地中レーダによる水平面図



Depth = 219(point)



Depth = 226(point)



地中レーダによる模擬地雷の3次元可視化



かたひらり まつり



夢発見 ぼくらは1日研究隊員



平成16年 **10月10日(日)・11日(祝)**

時間: 午前10時~午後5時 会場: 東北大学 片平キャンパス 仙台市青葉区片平2-1-1
星陵キャンパス 仙台市青葉区星陵4-1

入場無料

- 参加研究所
- 片平キャンパス
 - 金属材料研究所
 - 多元金属材料研究所
 - 星陵キャンパス
 - 固体科学研究所
 - 電気通信研究所
 - 東アジア研究センター
 - 加藤重平研究所