

人道的地雷除去のための探知装置開発と科学技術による社会貢献

左藤 源之
東北大学
東北アジア研究センター

寒河江高等学校「メイフラワーカレッジ」
2006年 9月13日(水)



担当授業

東北大学東北アジア研究センター

工学部 機械知能航空工学科

•電磁気学I,II

環境科学研究科(大学院)

•環境リモートセンシング学

•地球計測工学特論

工学と理学の違い

理学： 自然の摂理の探求

工学： 自然を人間のために利用する

ヨーロッパの大学には工学部が無い

日本では大学の始まりから工学部を設置した

工学では何を学ぶのか

工

T

II

何を勉強するか

- 機械・航空・ロボット
- バイオテクノロジー
- 化学・マテリアル
- 電気・情報・IT技術
- 環境
- 土木・建築
- 社会・歴史
- 経済
- 文化・言語
- 法律

対人地雷の被害



<http://www.masayo.org/angel/>

- 被害者は一般市民
- 命をとりとめても、手足の切断等、心身ともに大きな傷を抱えて生きなければならない



世界中に残された地雷は1億個以上





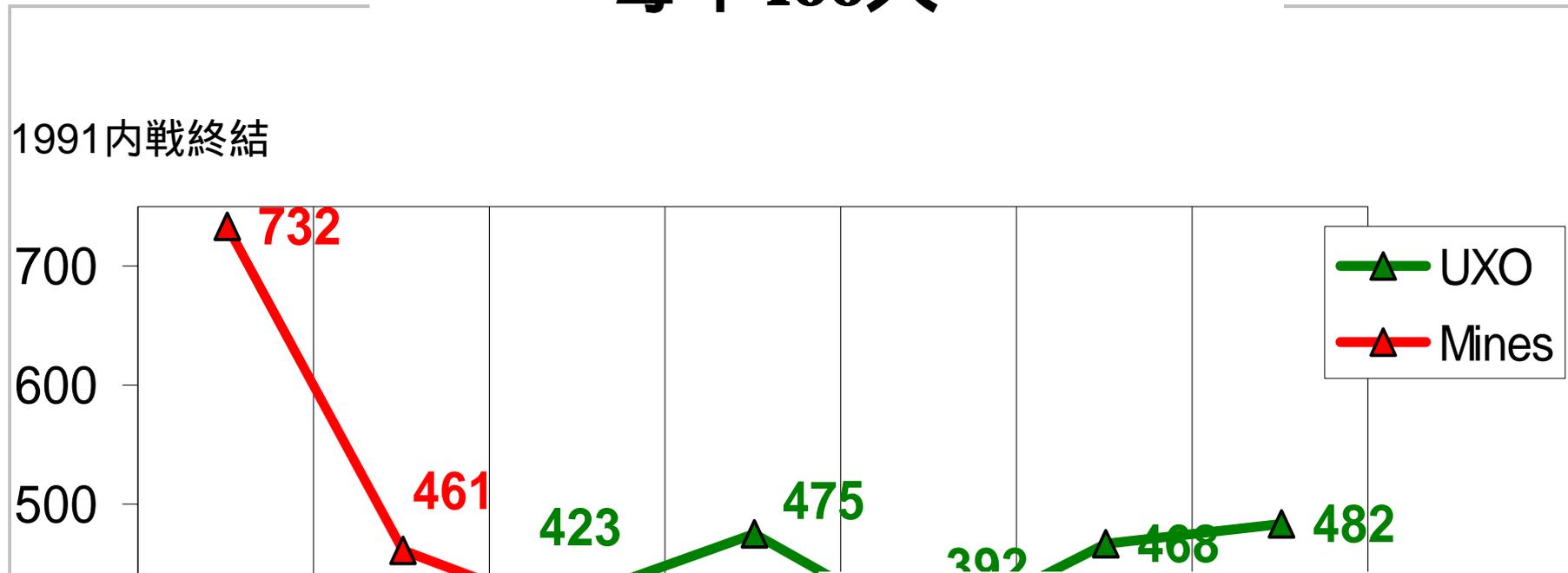




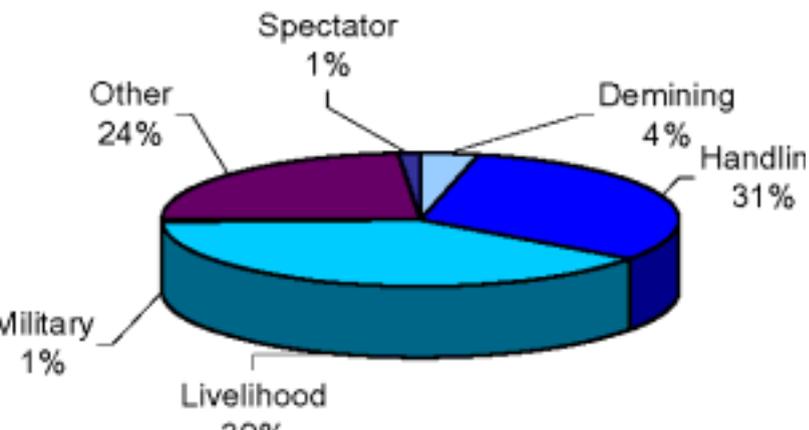




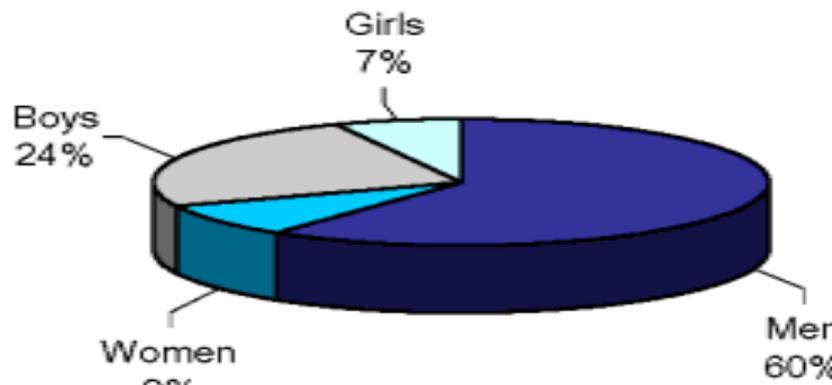
カンボジアの地雷/UXO(不発弾)の被災者 毎年400人



39%が日常生活での被災



31%が子供





人道的地雷除去の目的

- 地雷による住民の被災を減らす
- 生活環境、耕作地の安全を確保
- 経済復興援助





DENMARK

Belarus

Russia

Poland

Ukraine

MOLDOVA

BELGIUM

CZECH REP.

SLOVAK REP.

CROATIA

BOSNIA HERZEGOVINA

ALBANIA

TUNISIA

ALGERIA

NIGER

CHAD

ANGOLA

NAMIBIA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

Sudan

ERITREA

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ANGOLA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA

DEM. REP. OF CONGO

RWANDA

ZAMBIA

ZIMBABWE

SWAZILAND

DJIBOUTI

YEMEN

UGANDA





対人地雷PMN-2(プラスチック地雷)



日ソビエト製
アフガニスタンで大量
に敷設
直径12cm、厚さ4cm
5kg加重で爆発



金属探知機による地雷検知

人道的地雷除去
で最も普及している
検知手法



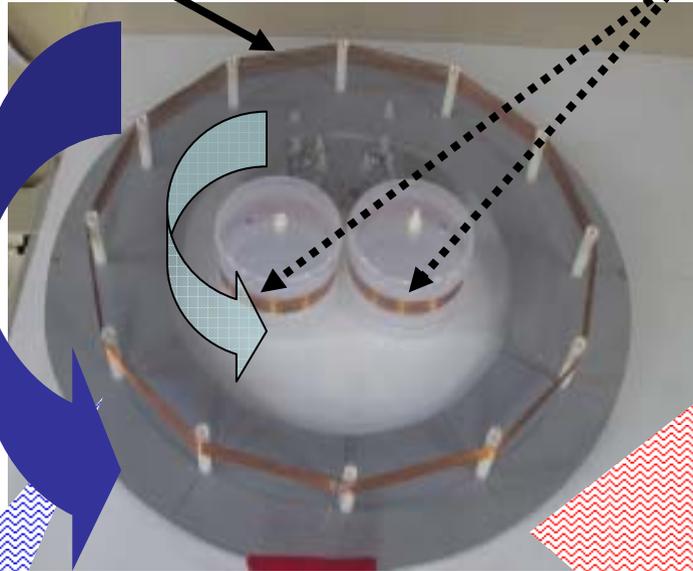
金属探知器の動作原理

送信コイル

受信コイル

送信コイルへ
電流を流す

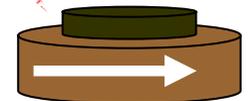
受信コイルに発
生する誘導電圧
を検知



磁界が発生

うず電流が金
属中に発生

誘導2次磁
界の発生



金属探知器による地雷検知の手順

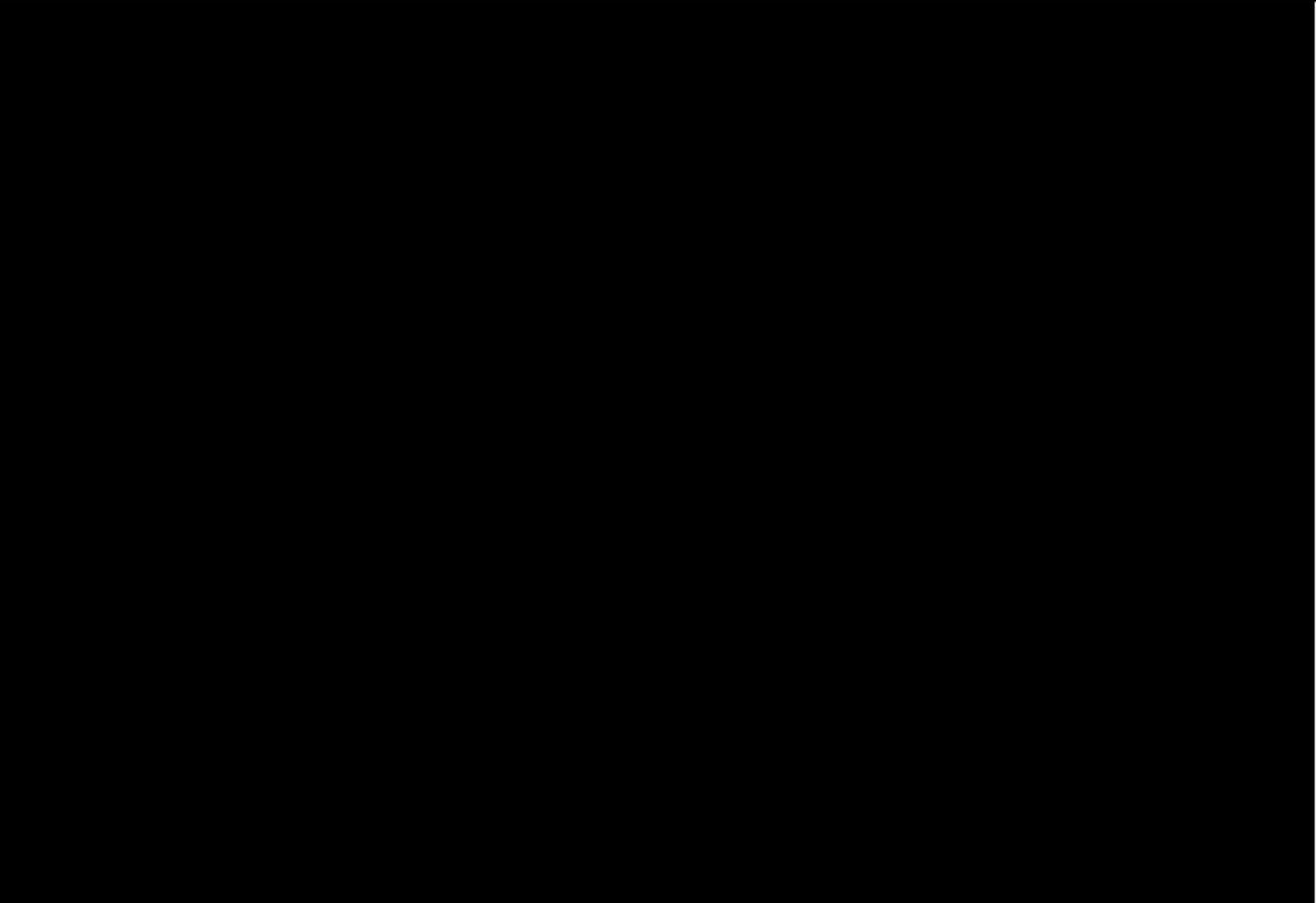


MD123

地雷除去作業



地雷の爆破処理



カブール市内、Bibi Mahiro における
実地雷処理作業

Detonation

アフガニスタン Bibi Mahiro での地雷除去実績



地雷	277
不発弾 (UXO)	2135
金属片	218320

地雷を識別する
方法が必要



地雷犬による地雷検知



地雷中の火薬
が気化したガ
スの臭いを検
知する



地雷犬による除去活動



- アフガニスタンでは33チームが活動
- 地雷に含まれる爆薬のガスを検知
- 非常に精度が高い
- コストが高い



地雷蜂

飛行中に体に着いた火薬を検出し地雷の有無を調べる



機械除去

- 平らな場所では有効
- 日本からODA援助の実績(アフガニスタン、カンボジア)
- 15%の地雷が残留
- 爆破破片が土壌を汚染

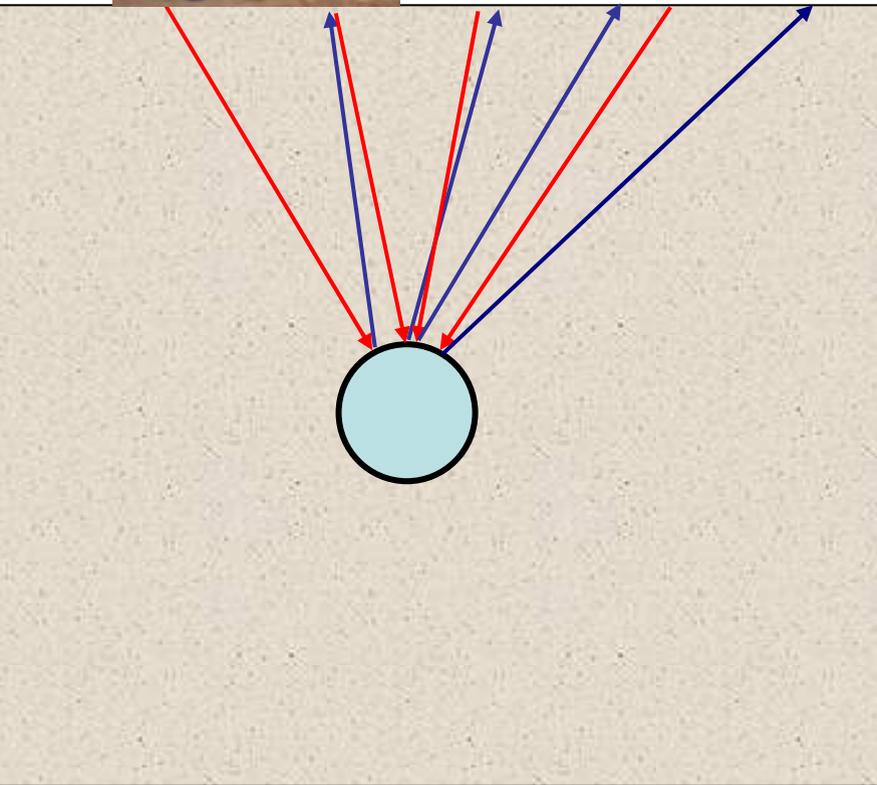


医用電子工学 — 体内の可視化

(超音波、X線、NMR、CT、PET)

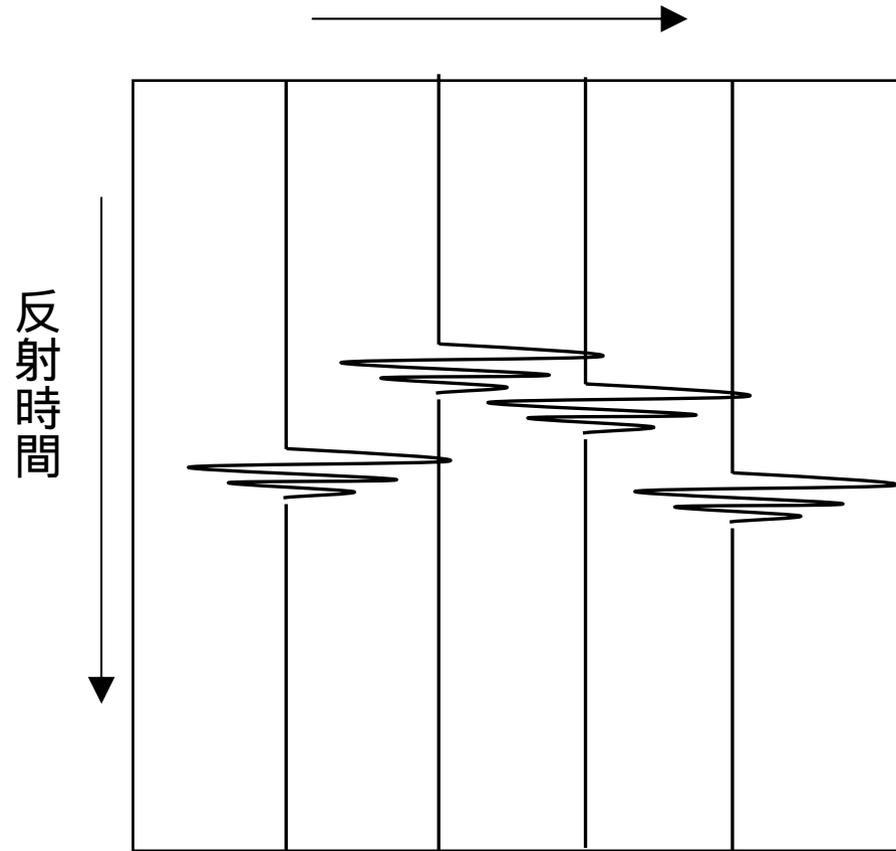


電波による地下の可視化：地中レーダ

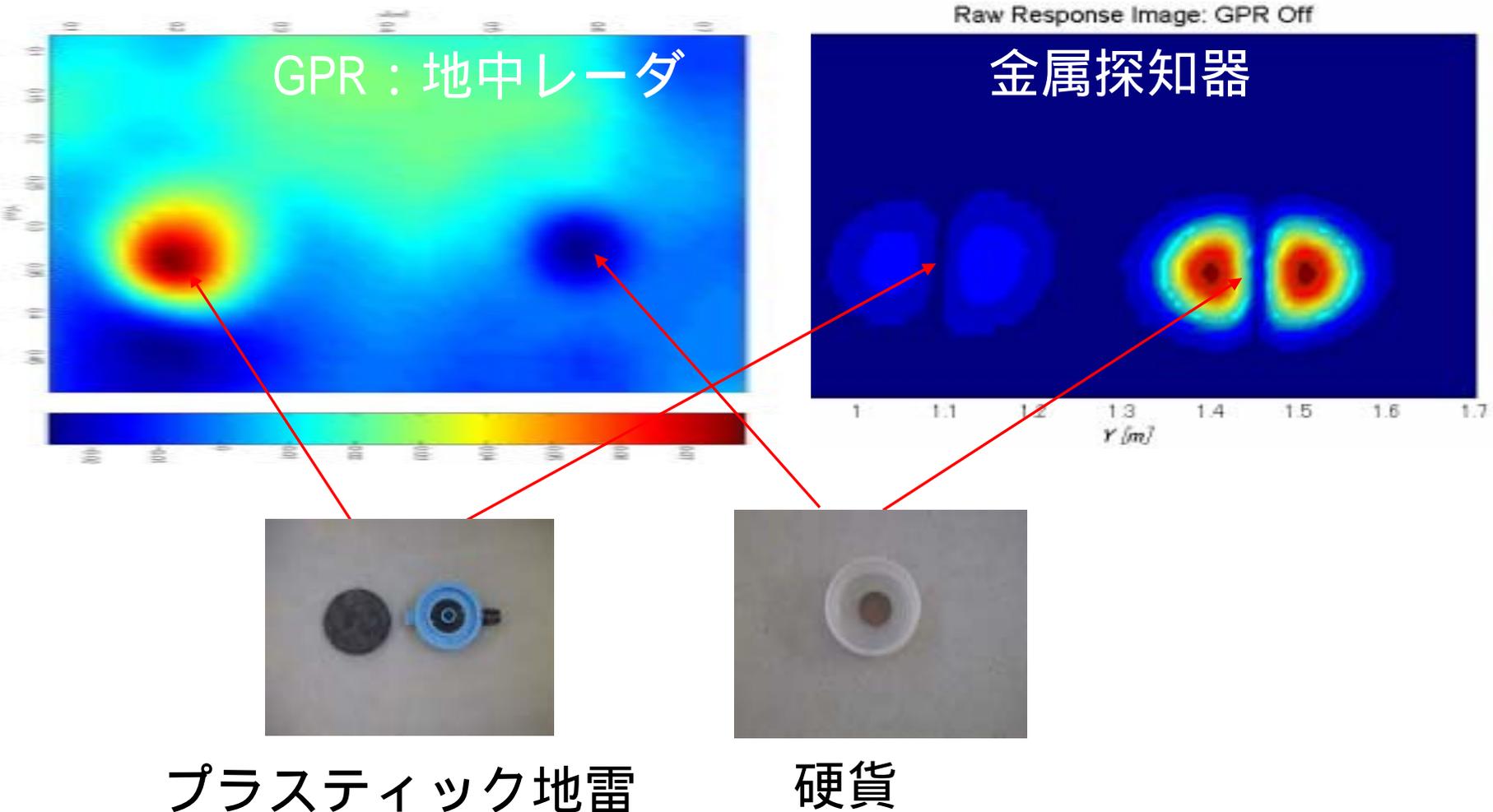


記録されるレーダ波形

測定位置



金属探知器と地中レーダGPR を統合したデュアルセンサ



人道的対人地雷除去 – 我が国の取り組み

新しい検知・除去技術の 開発と現地試験

地雷廃絶への道のり

1997年12月

オタワ条約署名会議

2002年1月

アフガニスタン復興支
援国際会議

- **文部科学省**
 - 2002 研究開発
 - 2006 カンボジア
- **経済産業省**
 - 2003 研究開発
- **外務省**
 - 2004 アフガニスタン
 - 2006 カンボジア



地雷検知用レーダの開発

技術的難しさ

- 対人地雷は小さい
- 対人地雷の誘電率は土壌と類似
- 土壌は不均質でランダムな散乱が強い
- 湿り気など土壌条件は不安定

技術開発の目標

- 広帯域、高速なデータ取得可能なハード
- ランダムな散乱による影響を低減するソフト
- 軽量で安価な装置の供給



電磁気学 高校と大学では

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$



Maxwellの方程式の一次元化

$$\text{rot}\mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z}$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial H_x}{\partial z}$$

電磁波散乱の数値シミュレーション

FD-TD

Finite-Difference Time-Domain

Maxwell方程式の 直接解法

時間－空間の離散化

$$z = i \cdot \Delta z$$

$$t = n \cdot \Delta t$$

$$F^{(n)}(i) = F(z, t) = F(i \cdot \Delta z, n \cdot \Delta t)$$



空間の離散化と 電界・磁界のサンプル位置

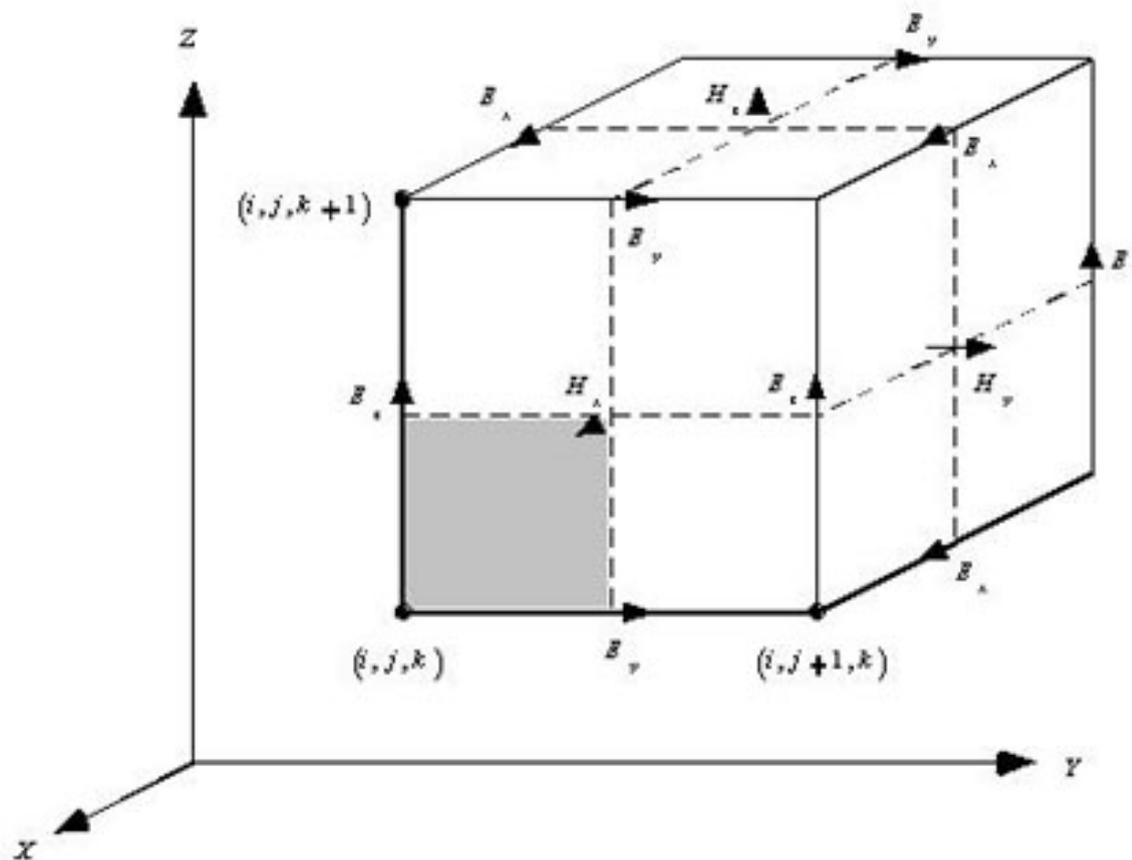


Figure 2-1: Yee's lattice for the FDTD method.



時間・空間微分の差分化

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z}$$

$$\frac{E_x^{n+1}(i) - E_x^n(i)}{\Delta t} = -\frac{1}{\varepsilon(i)} \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2})}{\Delta z}$$

$$E_x^{n+1}(i) = E_x^n(i) - \frac{\Delta t}{\Delta z \varepsilon(i)} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}) \right]$$

差分化されたMaxwellの方程式

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial H_x}{\partial z}$$

$$E_x^{n+1}(i) = E_x^n(i) - \frac{\Delta t}{\Delta z \varepsilon(i)} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}\right) \right]$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}\right) = H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\Delta z \mu(i)} \left[E_x^n(i+1) - E_x^n(i) \right]$$



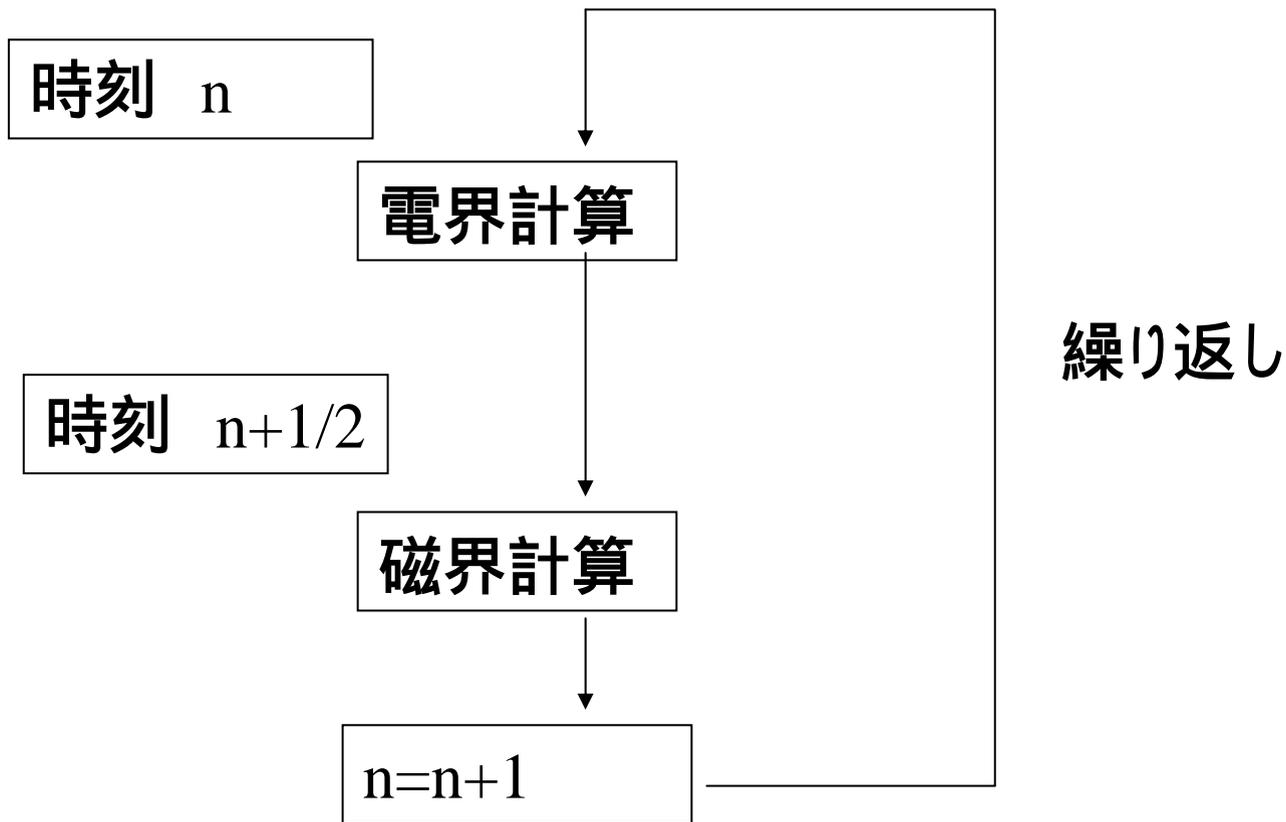
電磁界を計算するアルゴリズム

$$E_x^{n+1}(i) = E_x^n(i) - \frac{\Delta t}{\Delta z \varepsilon(i)} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}) \right]$$
$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\Delta z \mu(i)} \left[E_x^n(i+1) - E_x^n(i) \right]$$

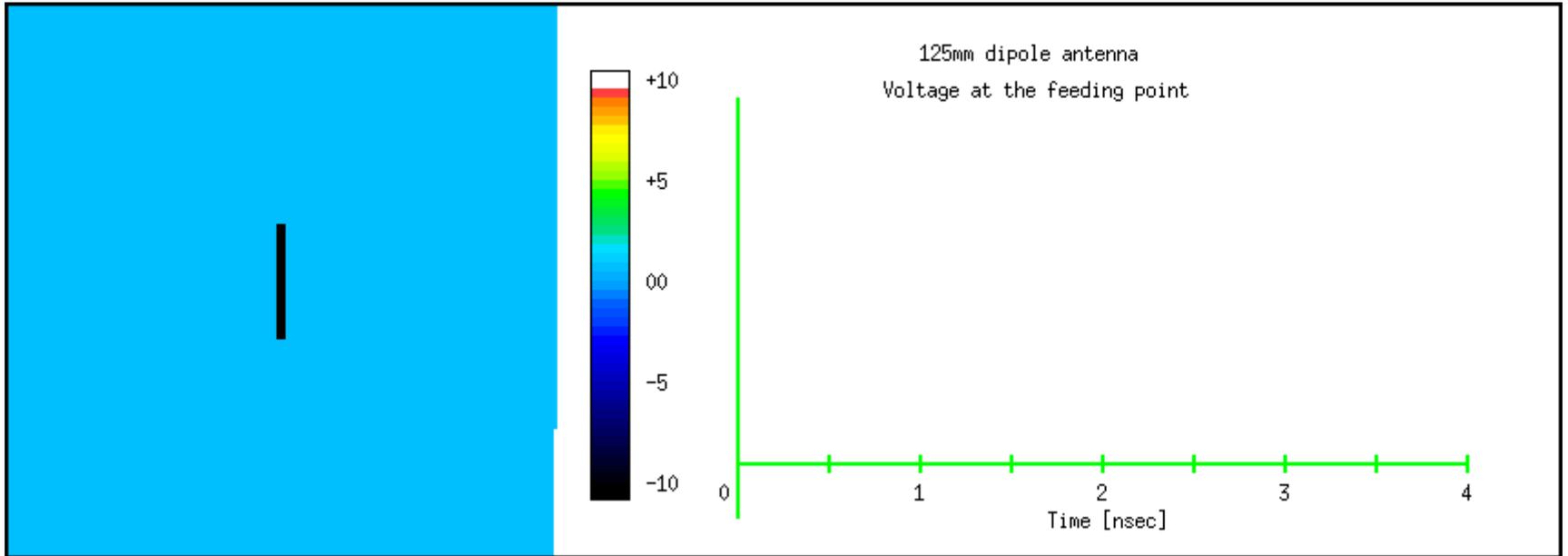
- 常に以前の時間における電磁界を使って未来の電磁界を計算する。
- 空間のパラメータ(導電率、誘電率)を容易に組み込める



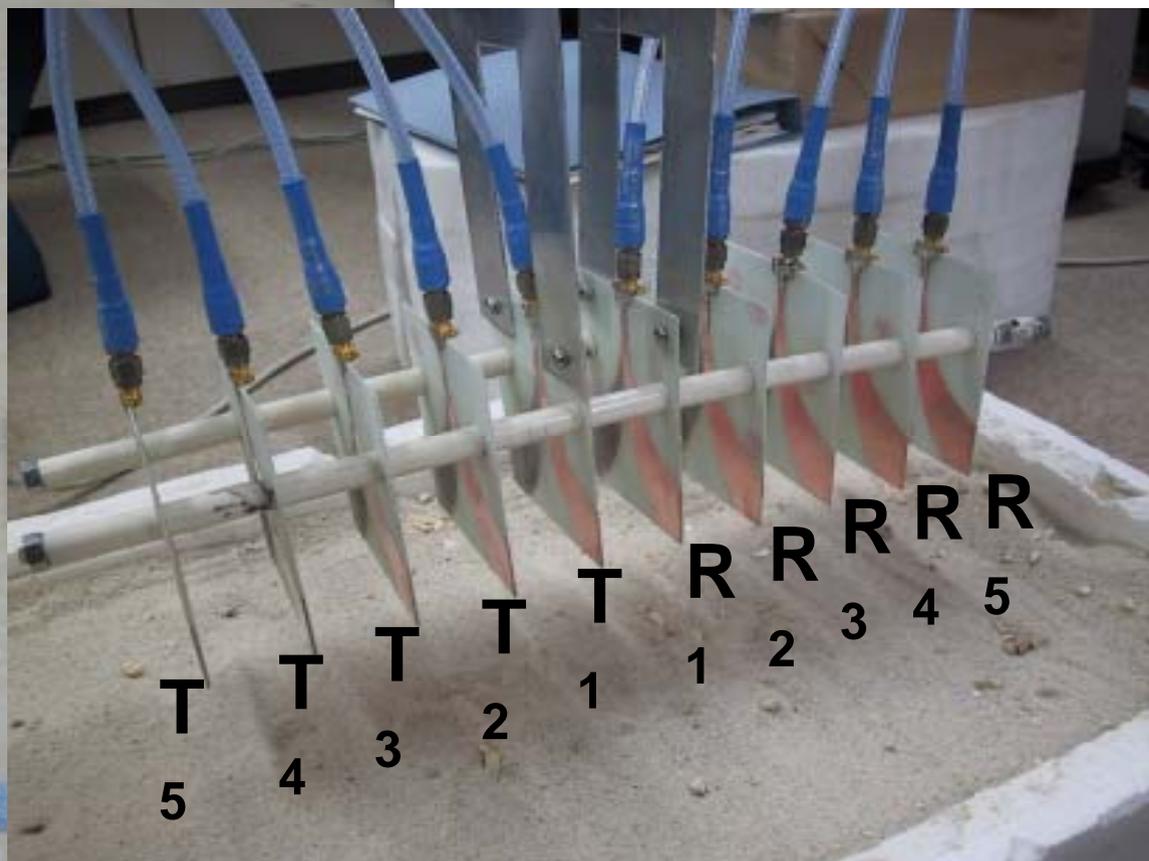
FDTD計算アルゴリズム



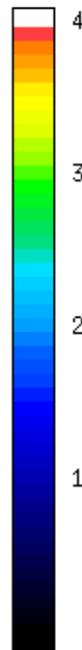
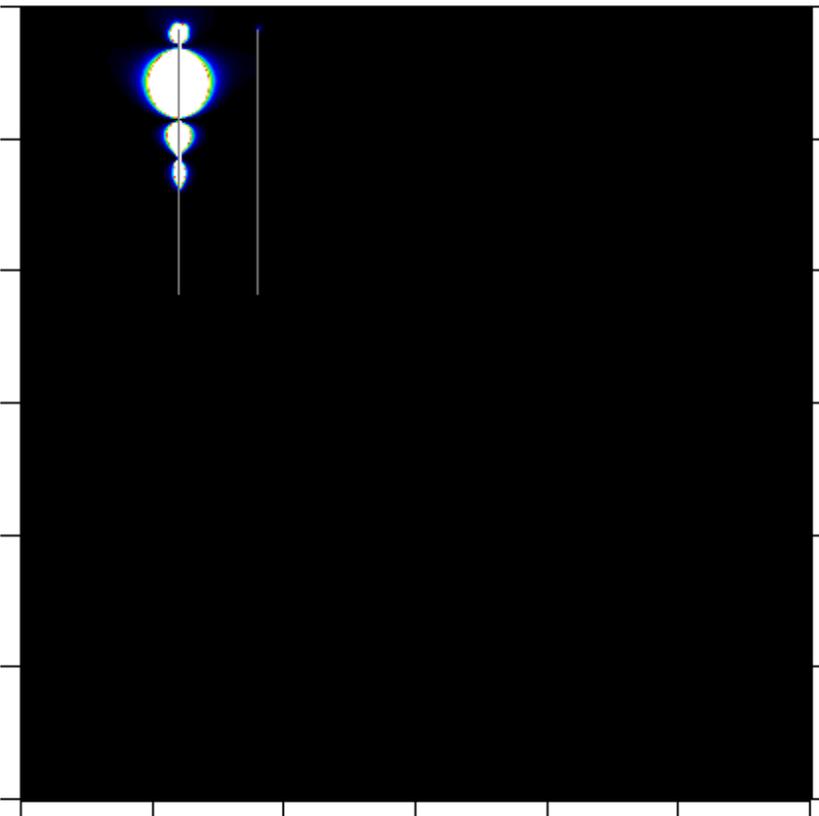
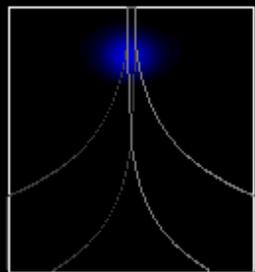
ダイポールアンテナからの電波放射



SAR-GPR用に開発した広帯域アンテナアレイ



ビバルディアンテナから放射される電波の可視化

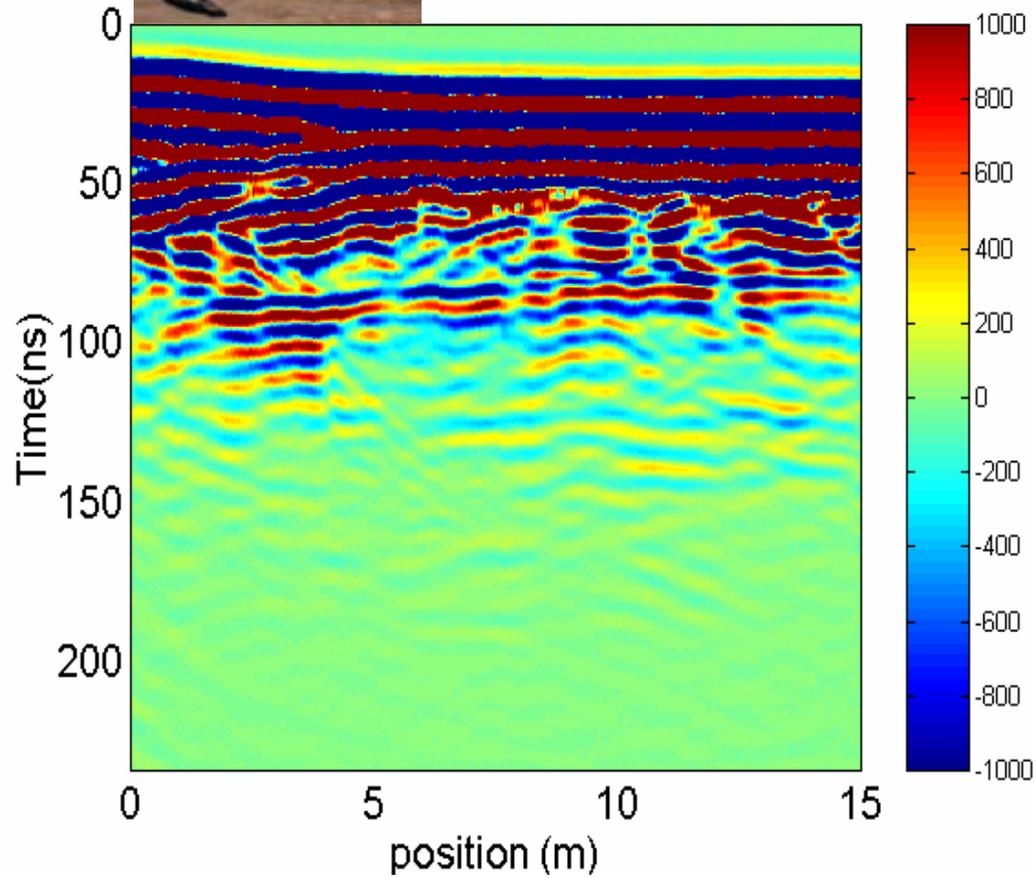




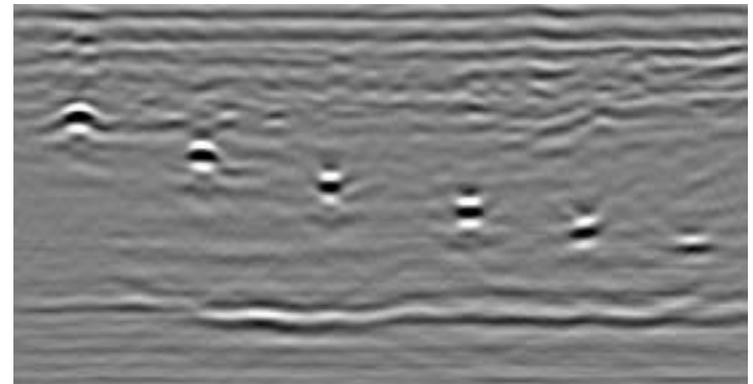
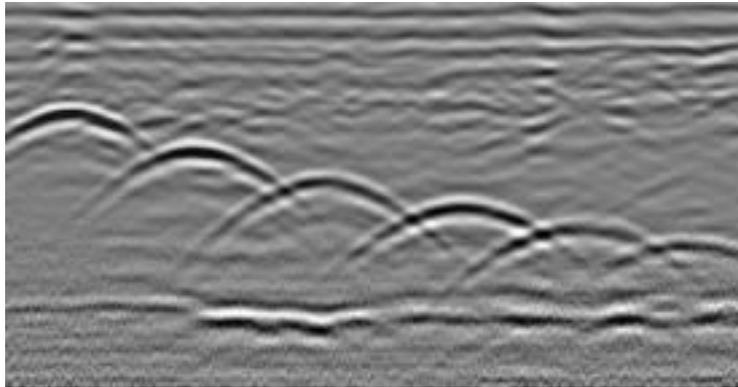
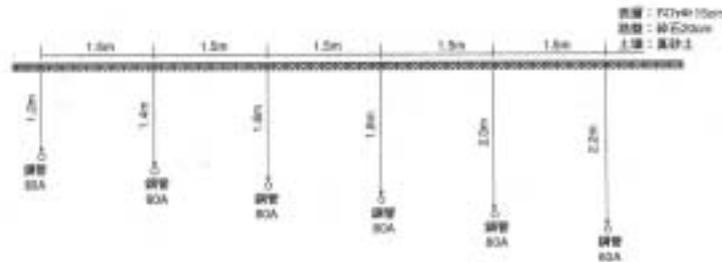
地中レーダの計測法



5 Prof12-lineN



GPRにおける合成開口処理



反射波のイメージング Krichhoff migration integral

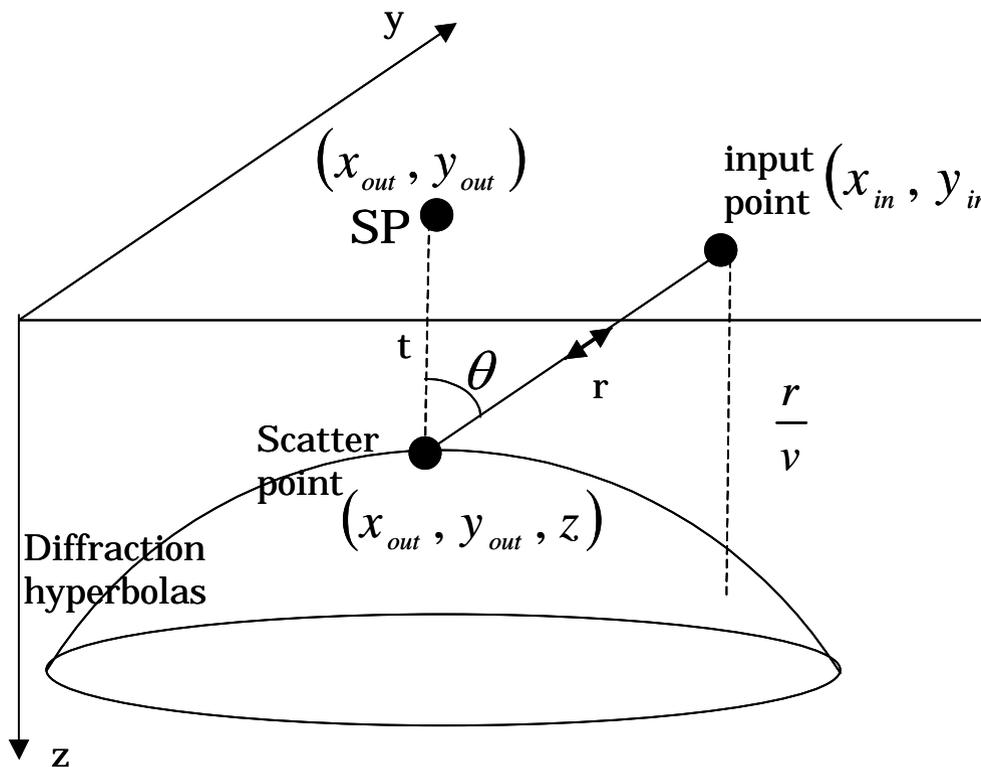
$$u(x_{out}, y_{out}, z, t) = \frac{1}{2\pi} \iint \left[\frac{\cos\theta}{r^2} P_{in} \left(x_{in}, y_{in}, z=0, t + \frac{r}{v} \right) + \frac{\cos\theta}{vr} \frac{\partial}{\partial t} P_{in} \left(x_{in}, y_{in}, z=0, t + \frac{r}{v} \right) \right] dx_{in} dy_{in}$$

$$r = \sqrt{(x_{out} - x_{in})^2 + (y_{out} - y_{in})^2 + z^2}$$

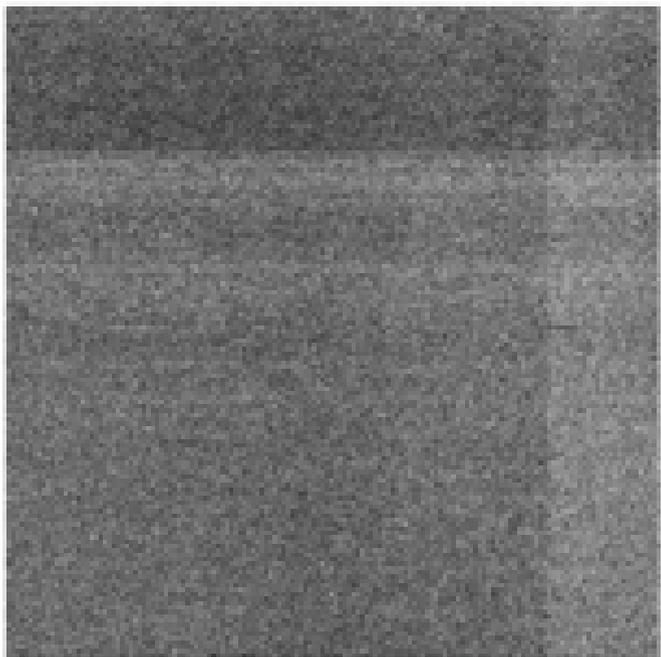
The obliquity factor or the directivity factor, $\cos \theta$.

The spherical spreading factor $1/vr$.

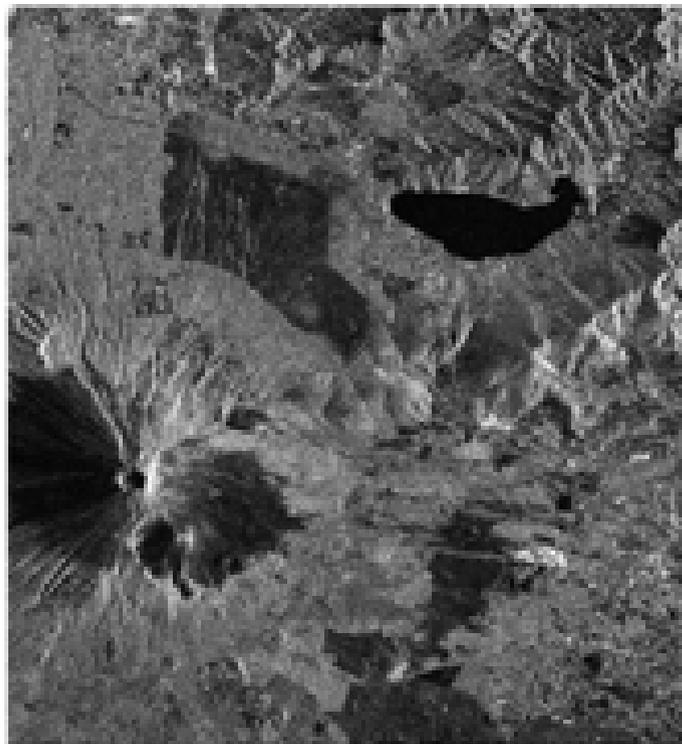
The wavelet shaping factor $\frac{\partial}{\partial t}$.



合成開口レーダ SAR



a)raw data



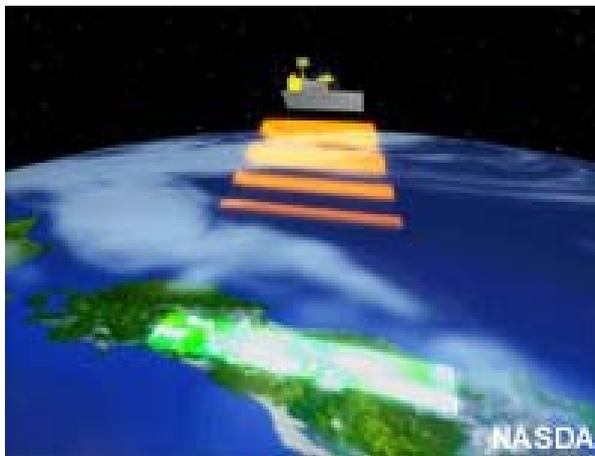
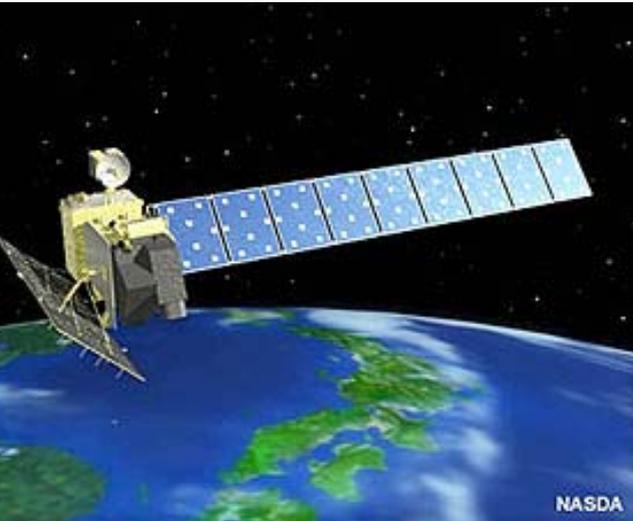
b)correlated data



H-IIAロケット8号機の打ち上げ



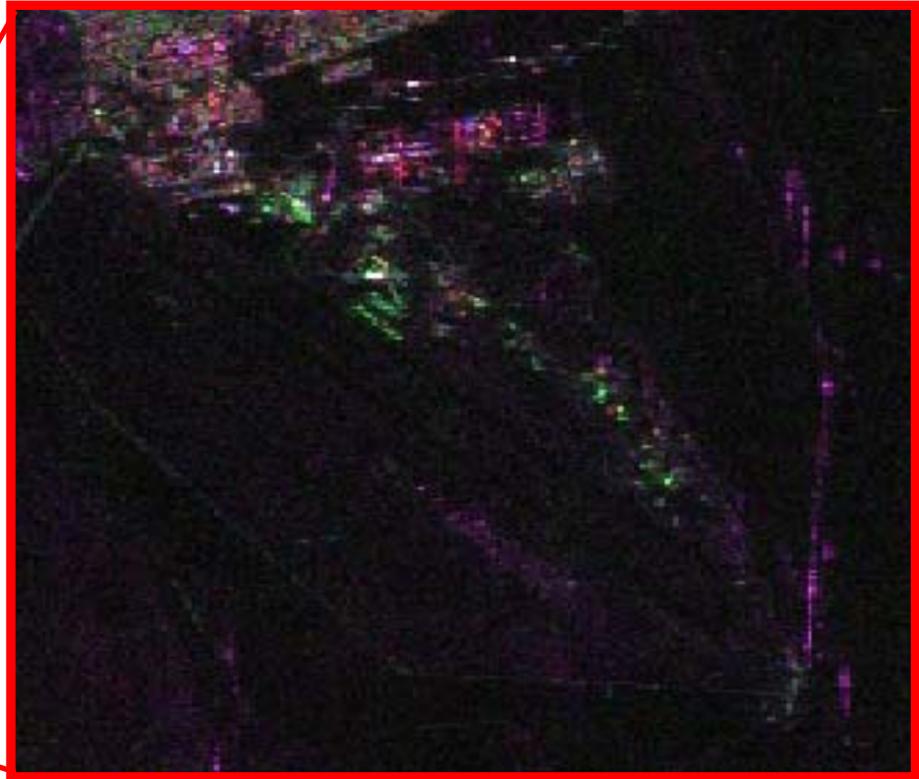
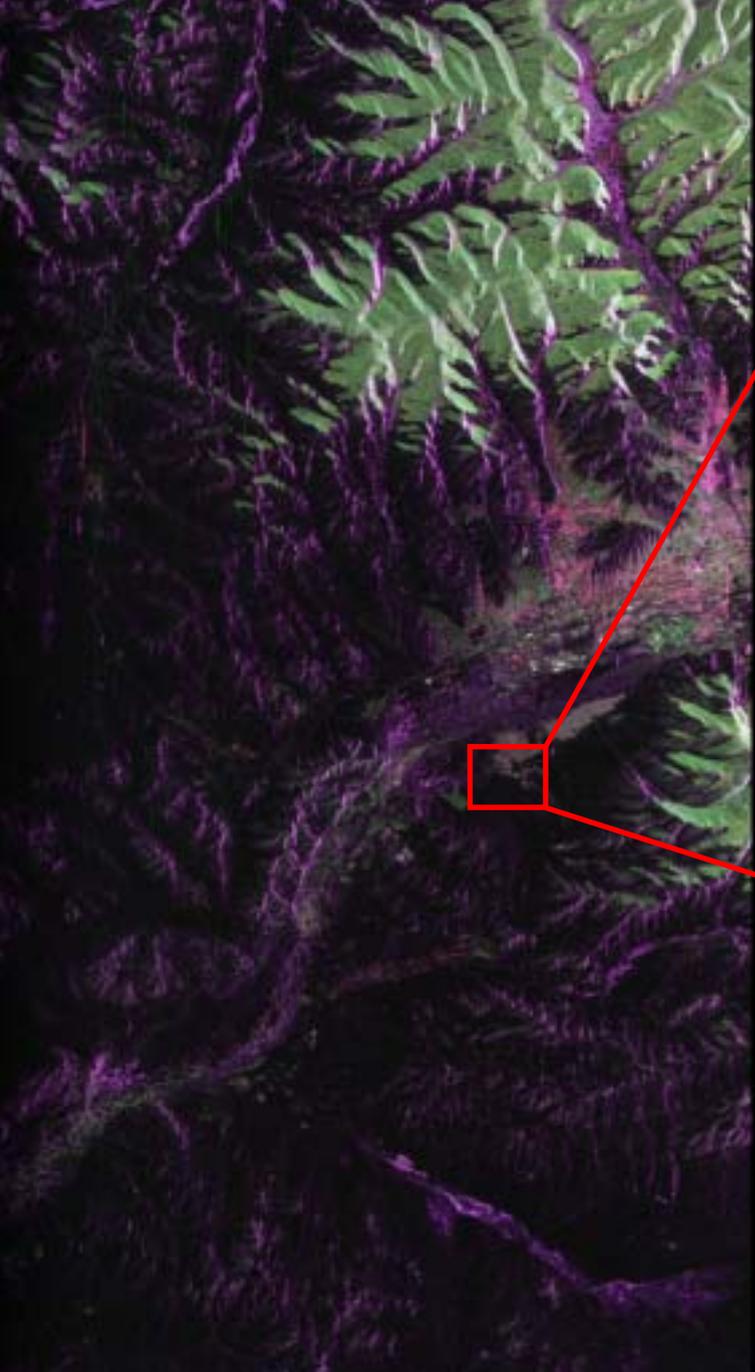
レーダ プラットフォーム



衛星搭載SAR: ALOS



Level 1.5 MGP Data



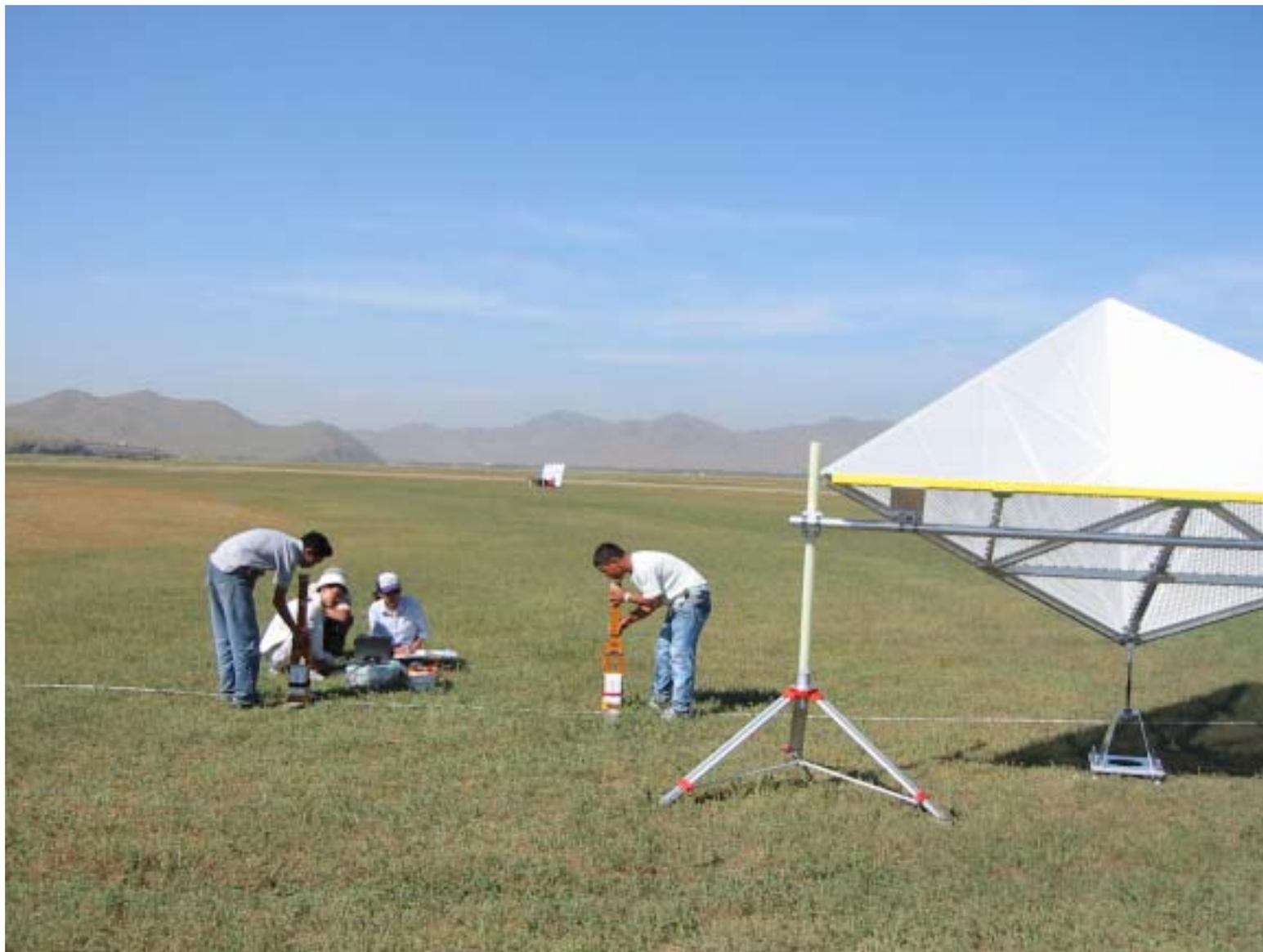
4050m*3437m

May 25, 2006 🌞

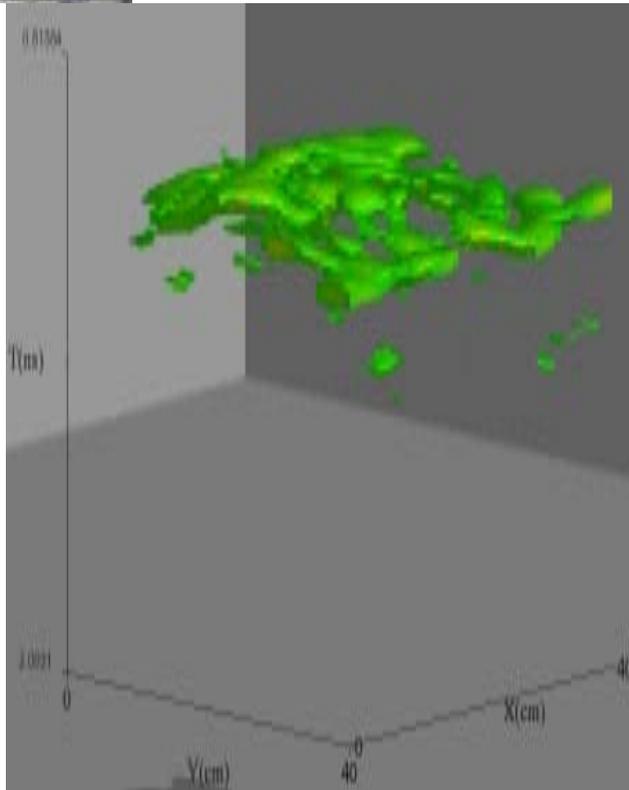
Red: HH, Green: HV, Blue: VV

37km(Az)*63km(Rg) (2996*5300pixels)

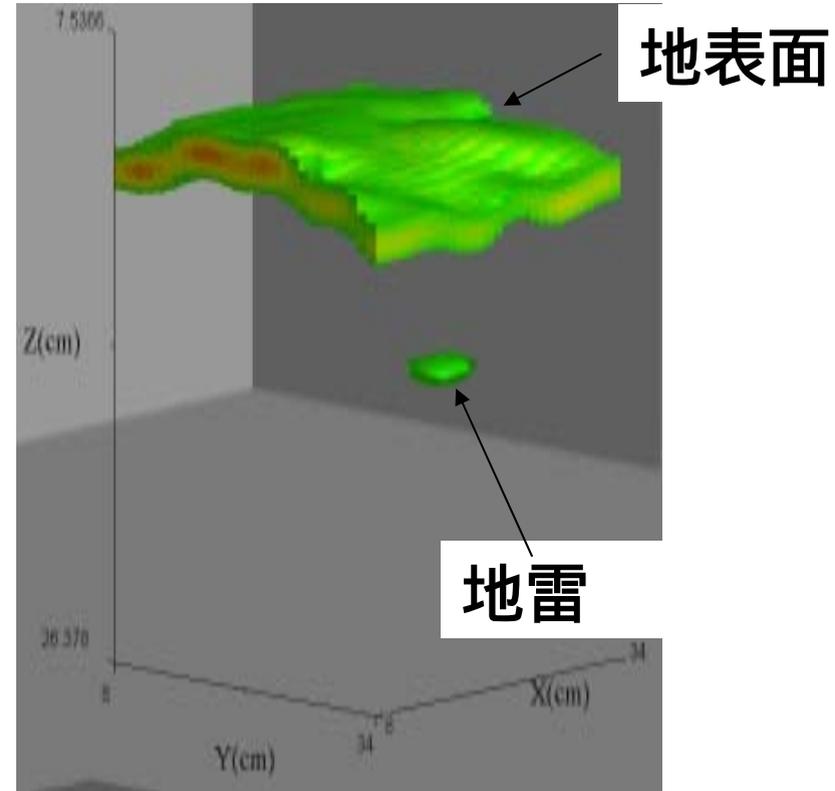




信号処理による埋設地雷 の3次元可視化



原波形



SAR-GPR信号処理画像



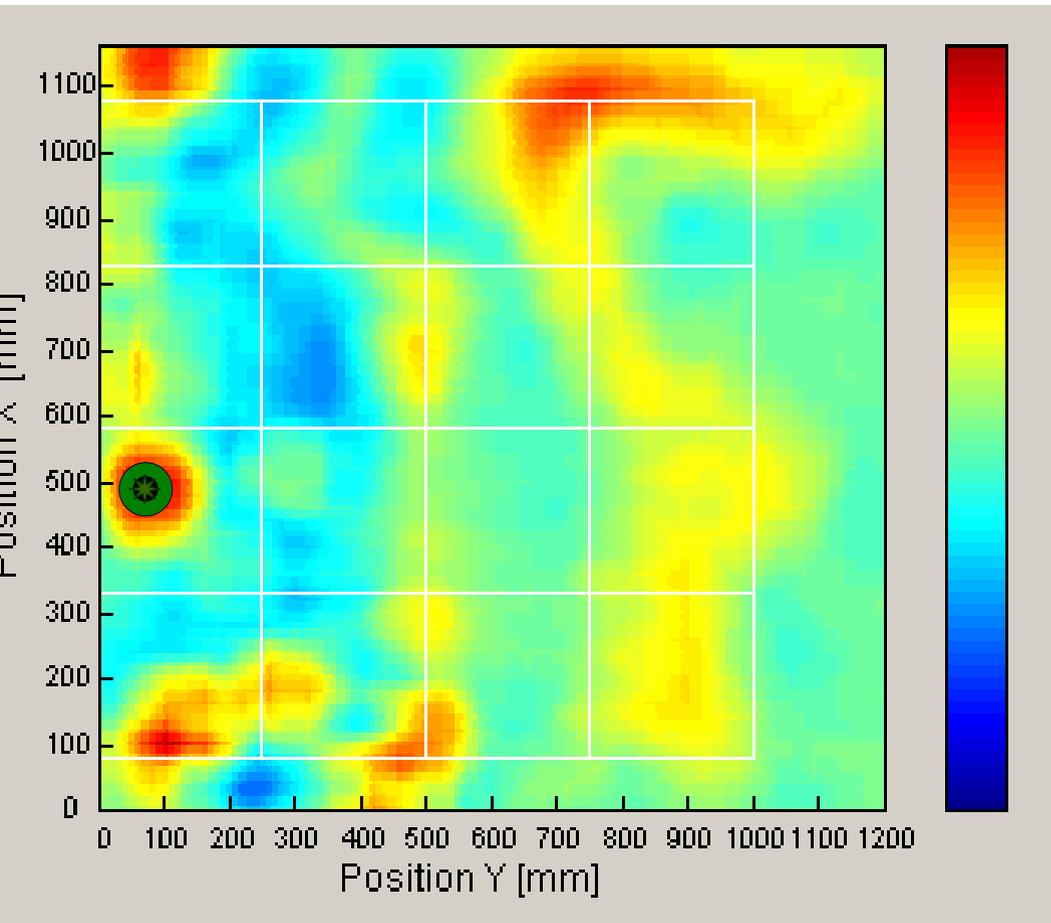
ロボット車両に搭載されたSAR-GPR

技術的ブレイクスルー

- アレイアンテナと信号処理によるクラッタ雑音除去
- 小型ベクトルネットワークアナライザ(1.5kg)による広帯域(10M-6GHz)計測の実現



地雷検知の例



PMA-2

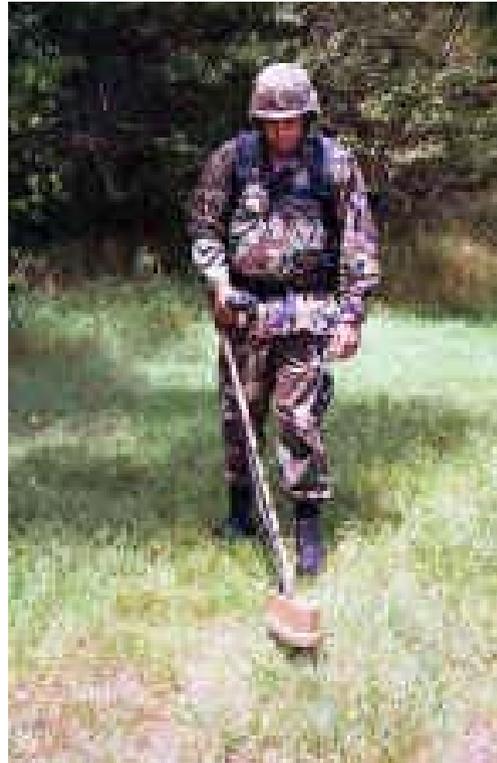
地雷ロボットは万能か？



実用化が期待される ハンドヘルド・デュアルセンサ



イギリス: Mine Hound



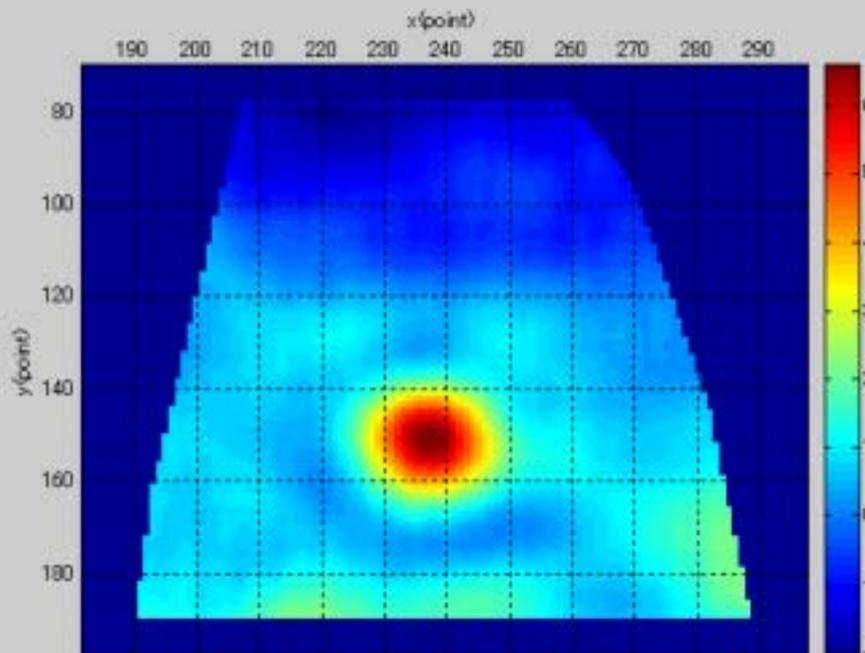
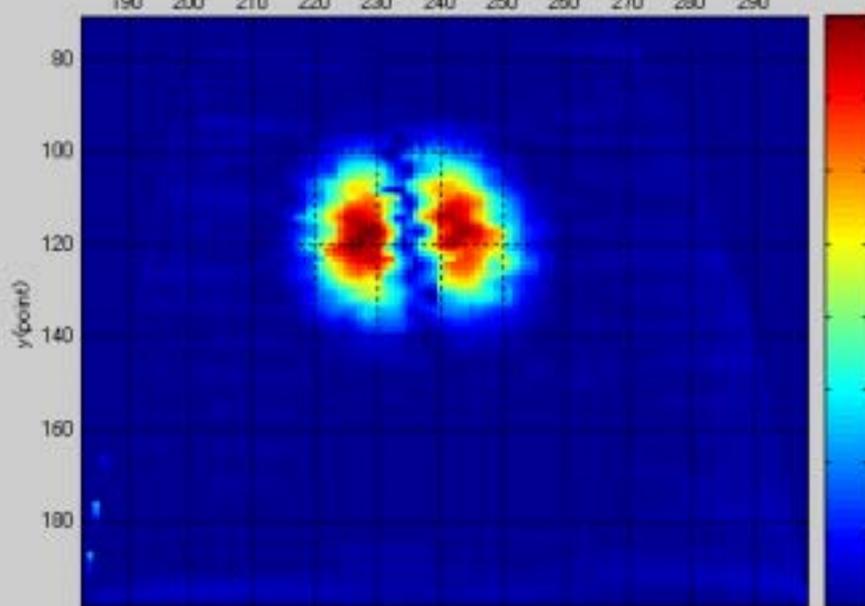
アメリカ:
HSTAMIDS



東北大学: ALIS



Target: Yellow PMN2. Depth:2cm



Operation of ALIS



Battery

PC

Display

VNA, metal detector control unit

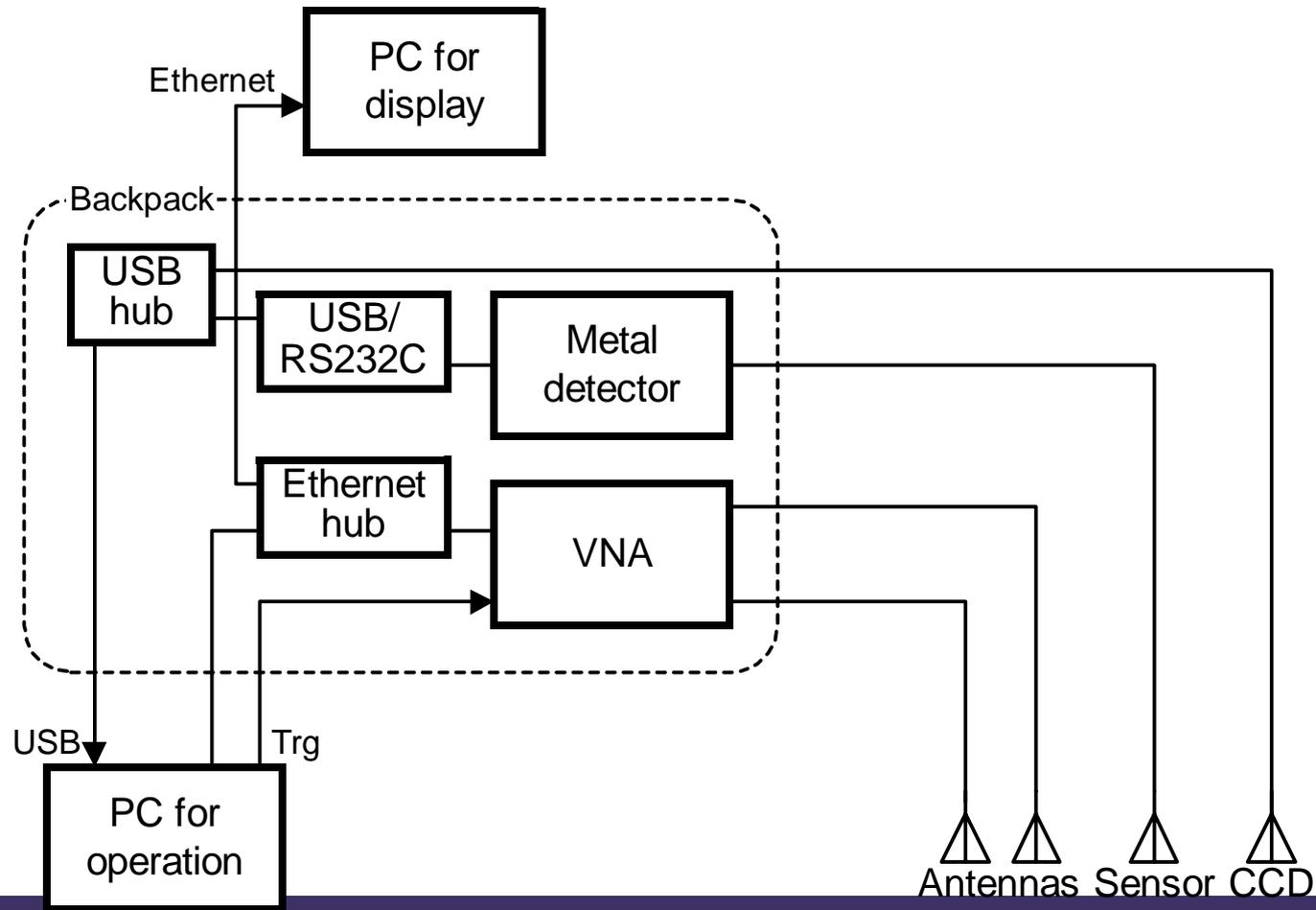
CCD camera

GPR antenna

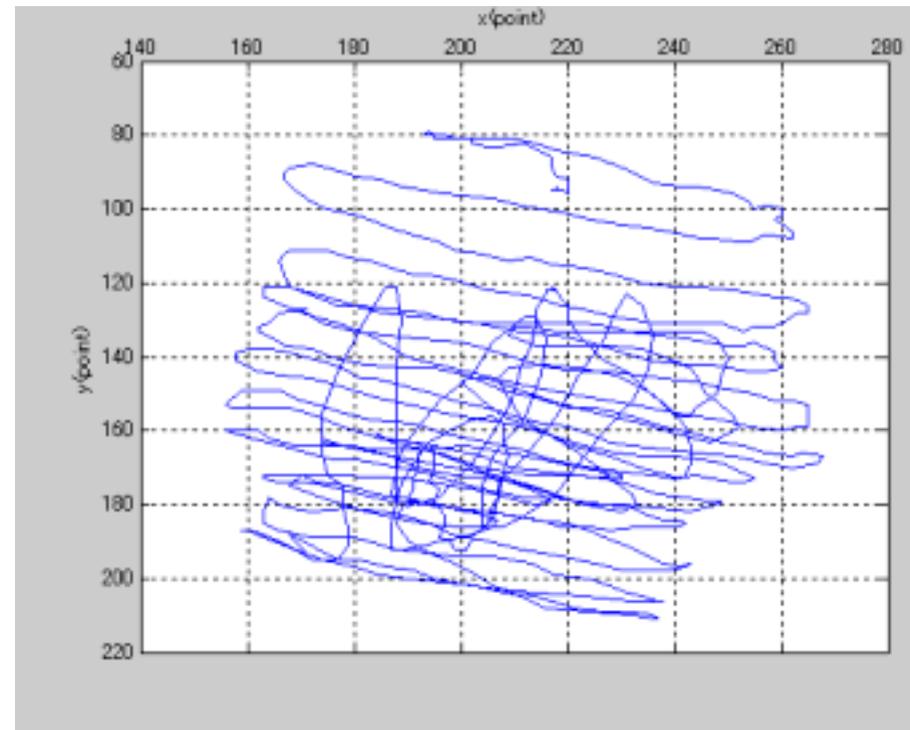
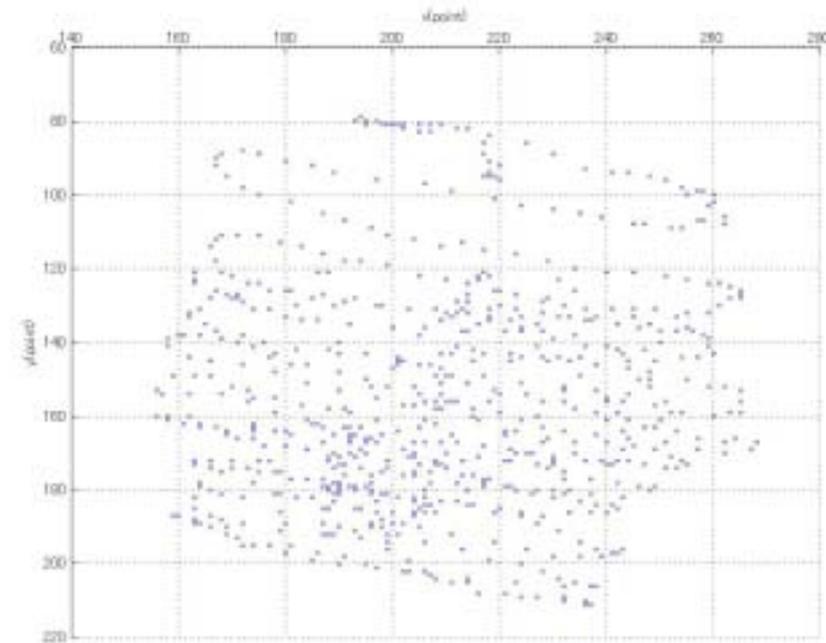
Metal detector sensor



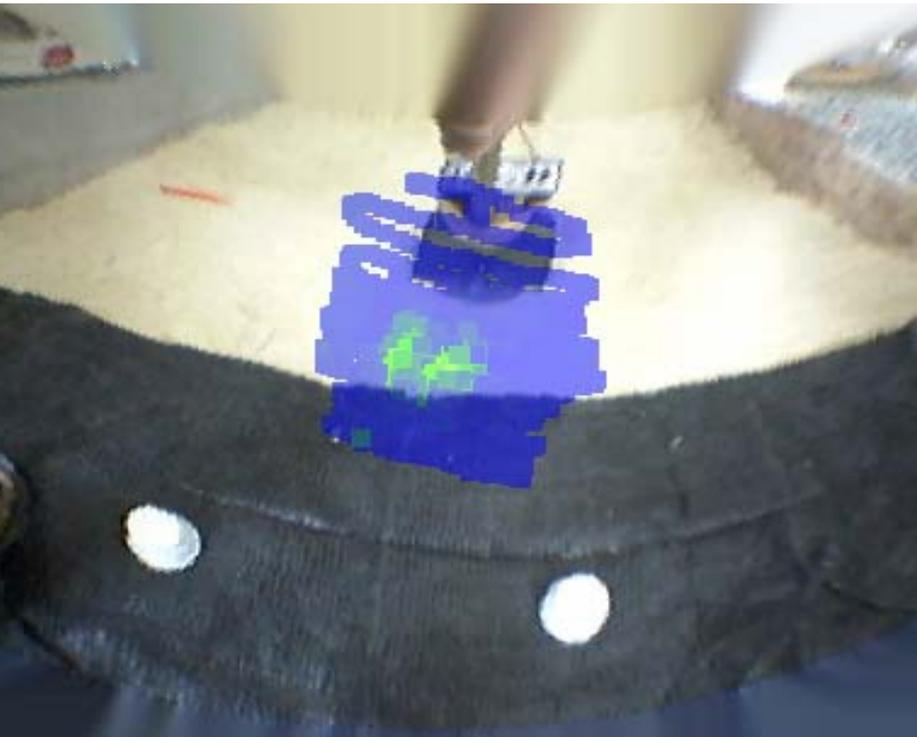
Hardware Configuration (VNA Type)



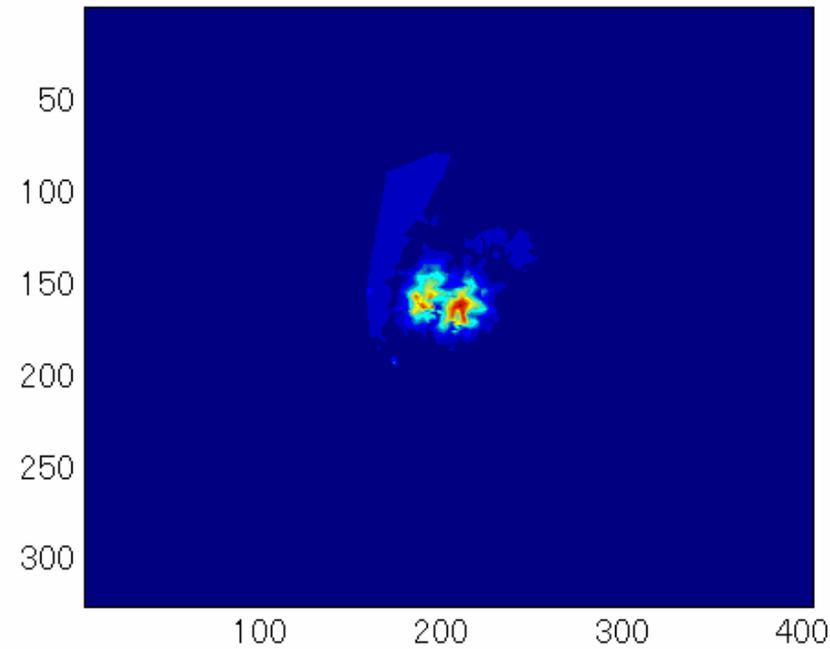
Sensor locus by hand-held scanning



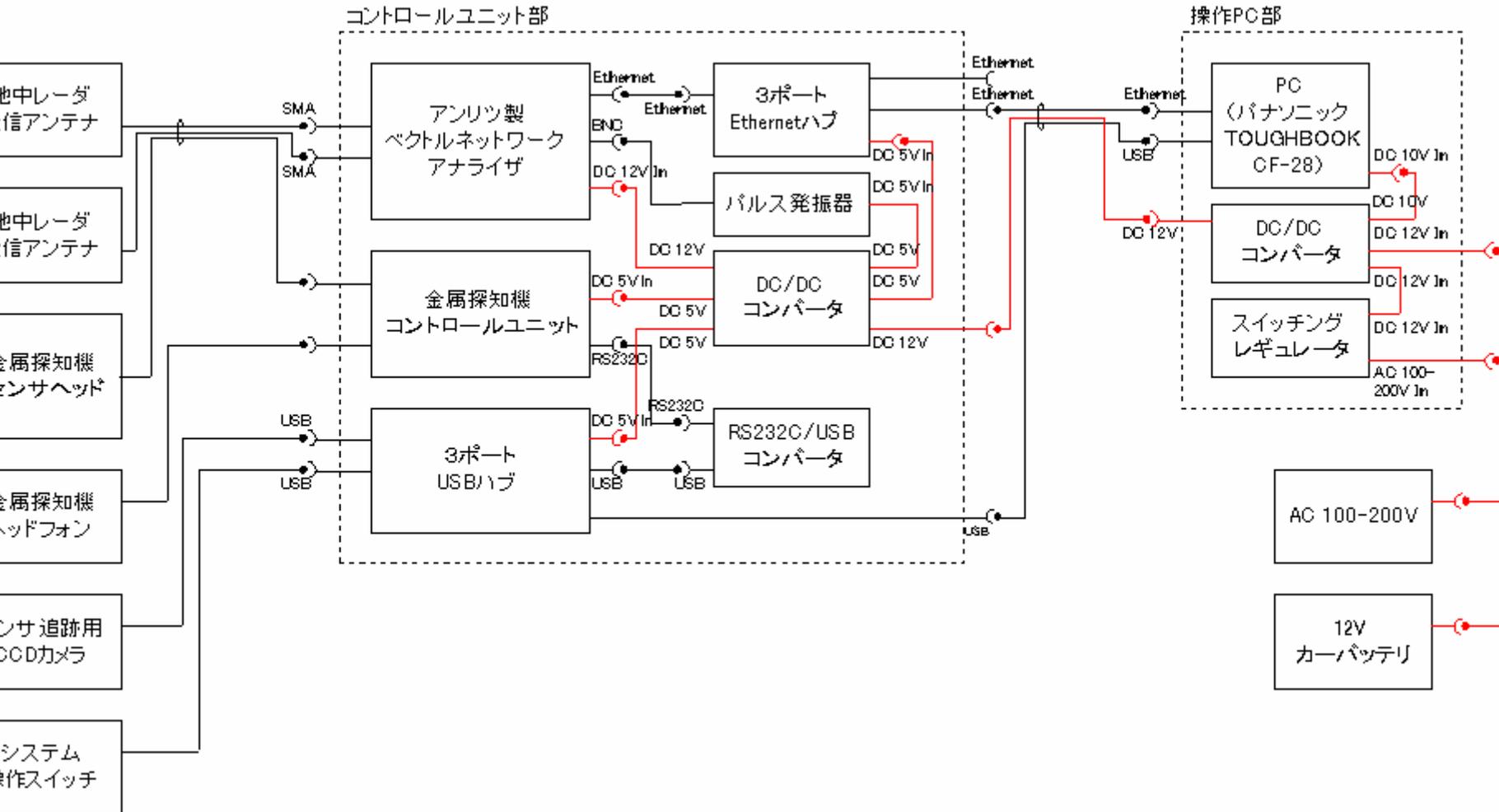
CCD camera superimposed by MD signal



Interpolated Image: Data 1



ALIS システム



Compact Vector Network Analyzer

Measurement	S21
Temperature	-20 - +50C
Frequency	100MHz-4GHz
Dynamic Range	70dB
Acquisition rate	646pt/sec
Accuracy	± 1 dB
Power supply	DC12-15V, 15W
Size	250X170X60
Weight	1.5kg



ALISの 現地評価試験

2004年12月
外務省ODA
アフガニスタン

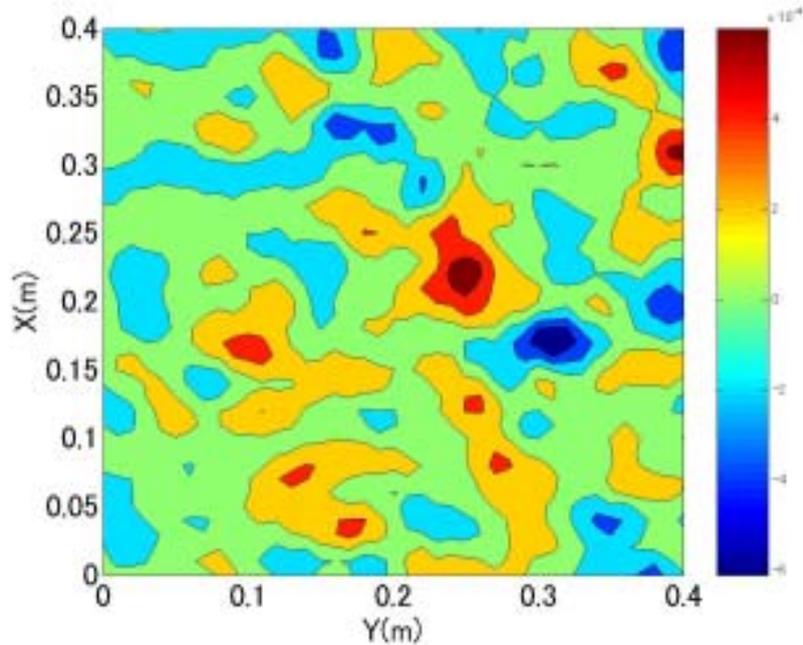
ALISの技術的ブレークスルー

- ・小型ネットワークアナライザ搭載(10MHz-4GHz)による広帯域計測
- ・センサ追尾機能による信号の可視化とイメージング

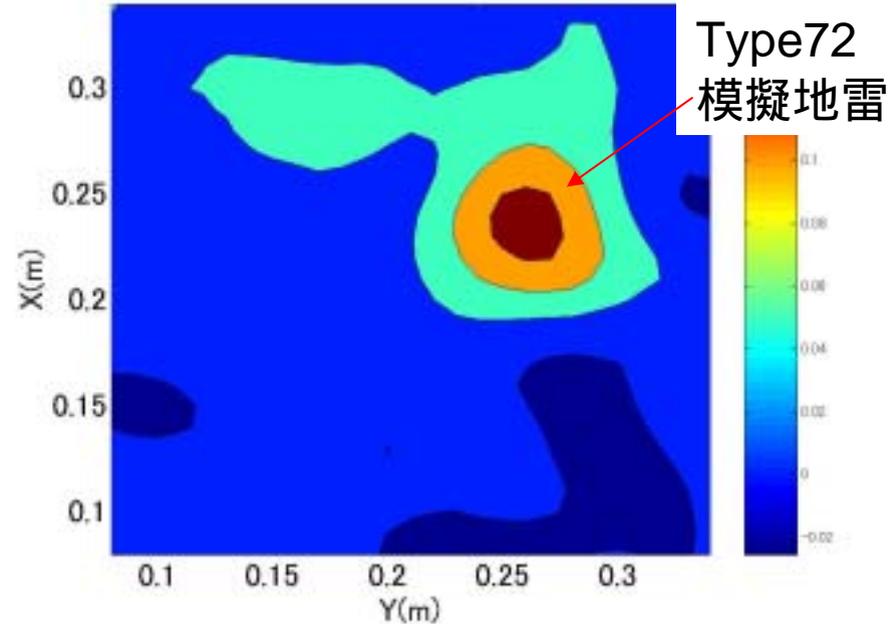
ALIS-BiBiMahiro



信号処理による クラッタ雑音の除去



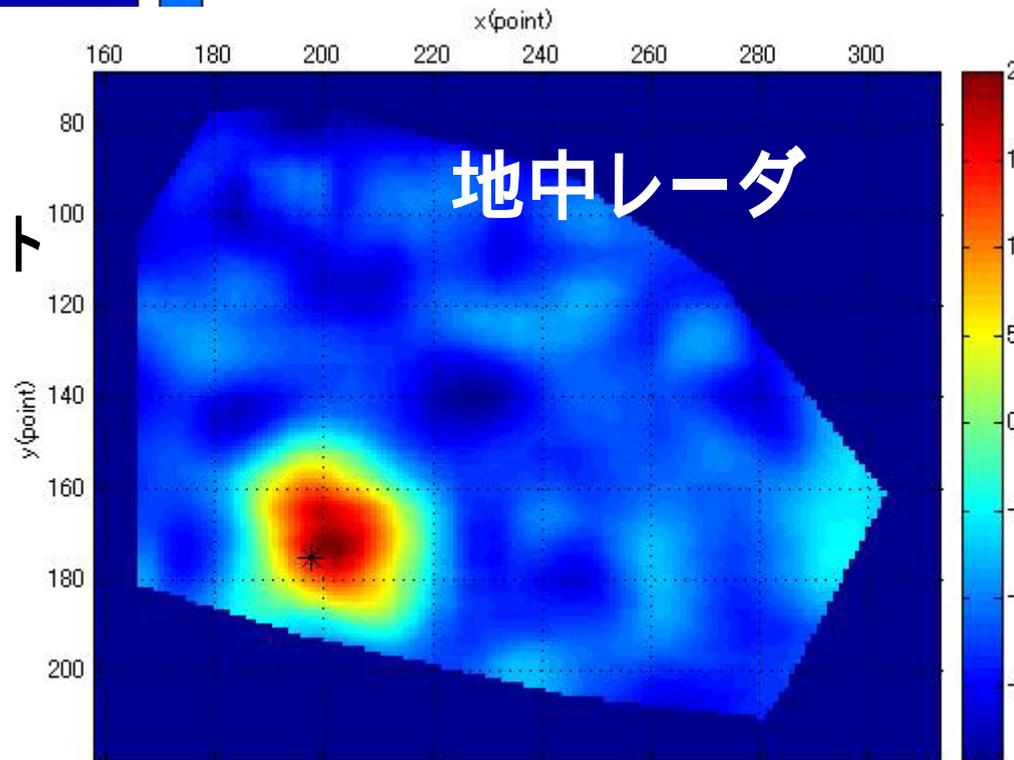
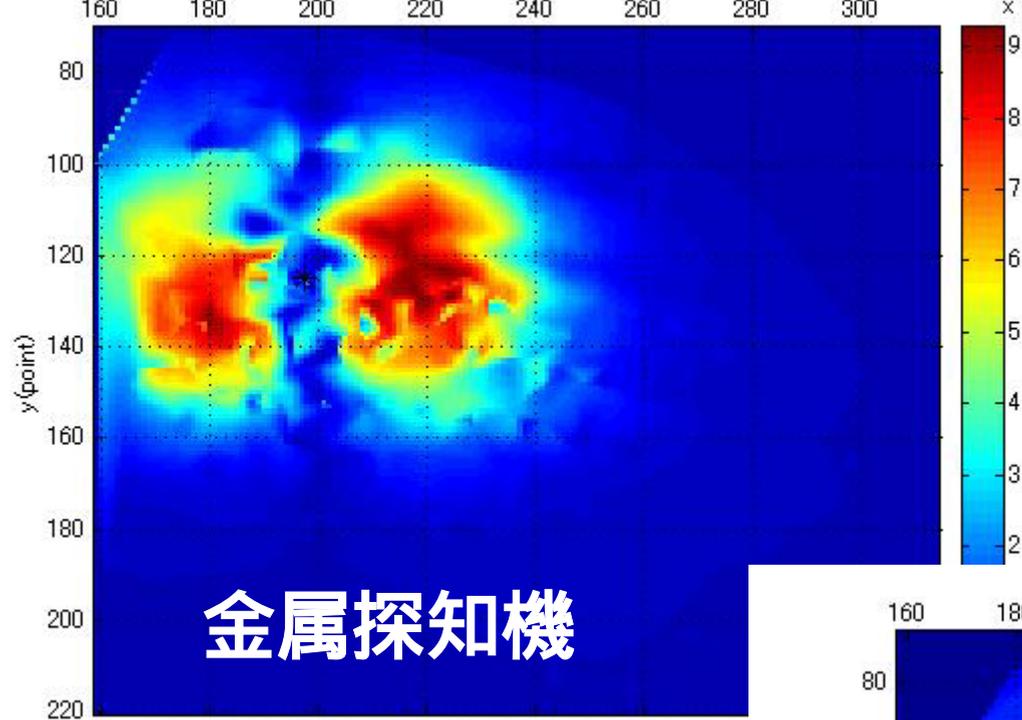
原データ(センサ追尾なし)



信号処理後のGPRイメージ



ALISで検知した地雷

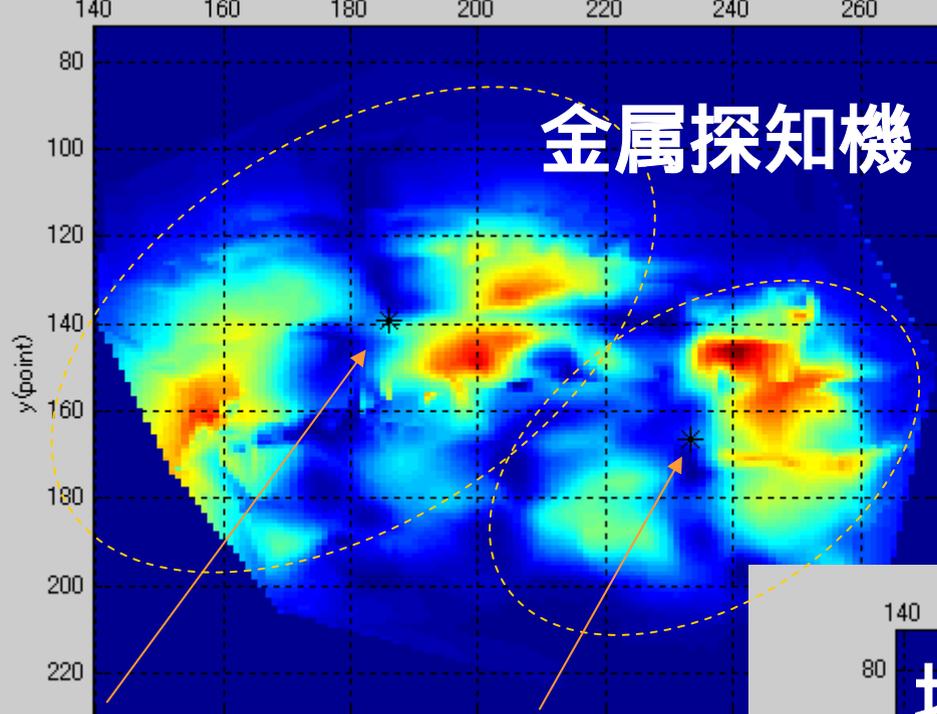


アフガニスタン・CDSテストサイト

ブラインドテスト

(埋設物を知らされていない)

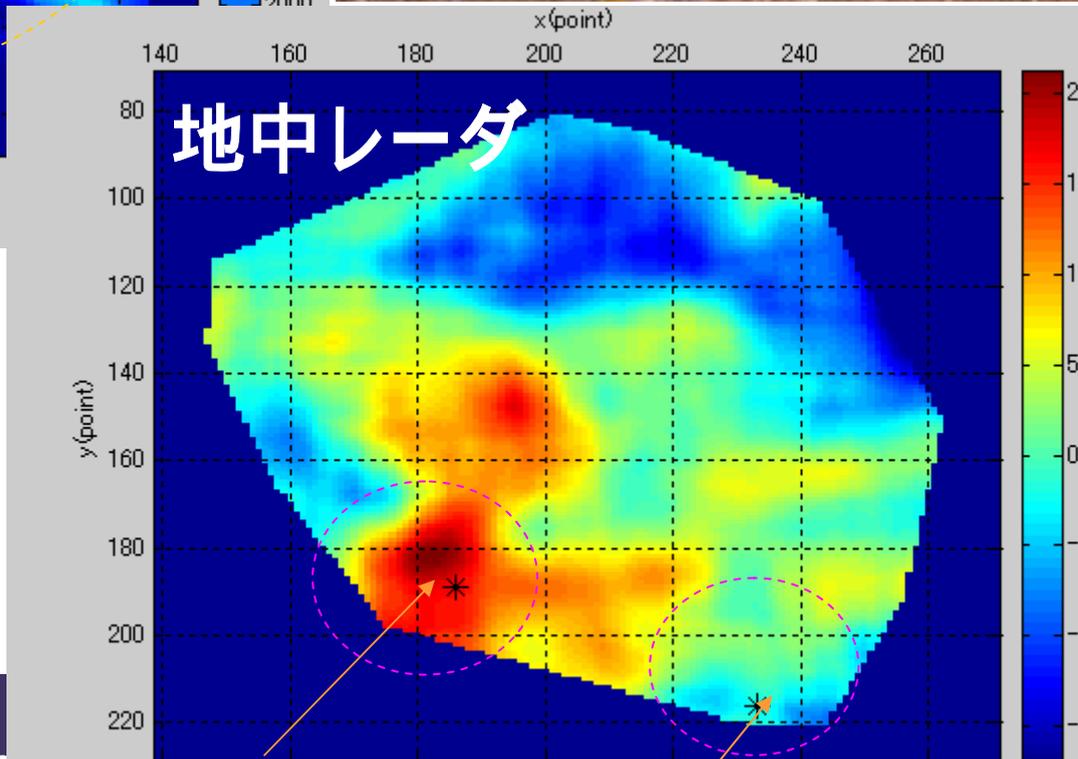
PMN-2 実地雷と予想



地雷

金属片

PMN-2 プラスティック
容器にTNT爆薬を
充填したモデル



地雷

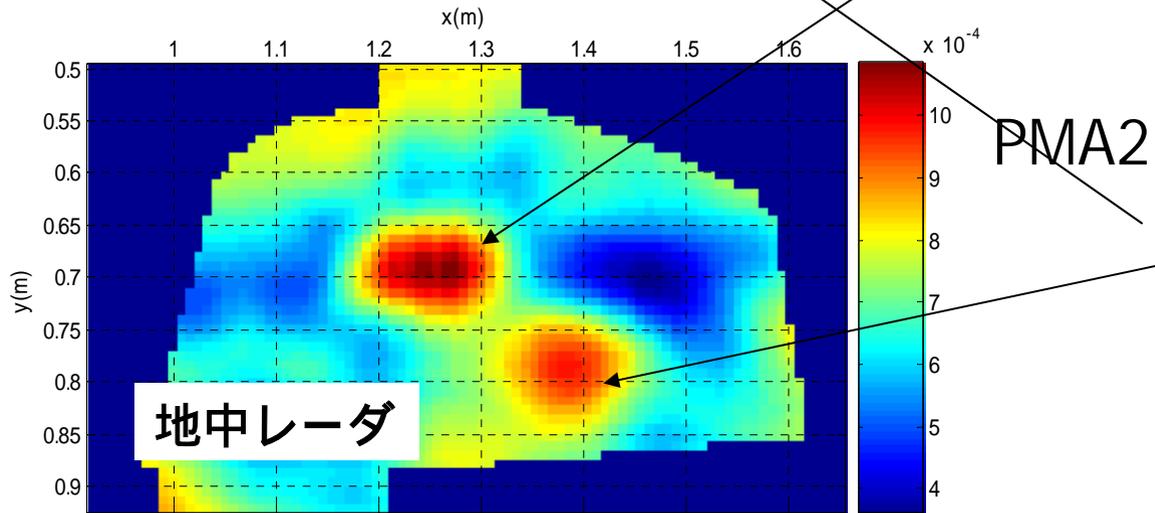
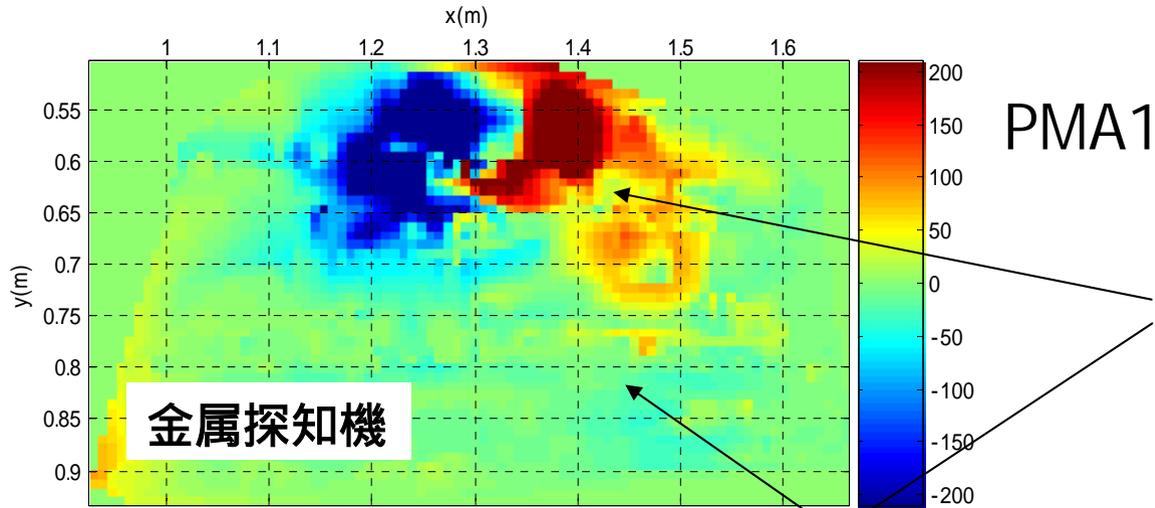
金属片



クロアチアでのALIS 長期評価 実験2006年2月



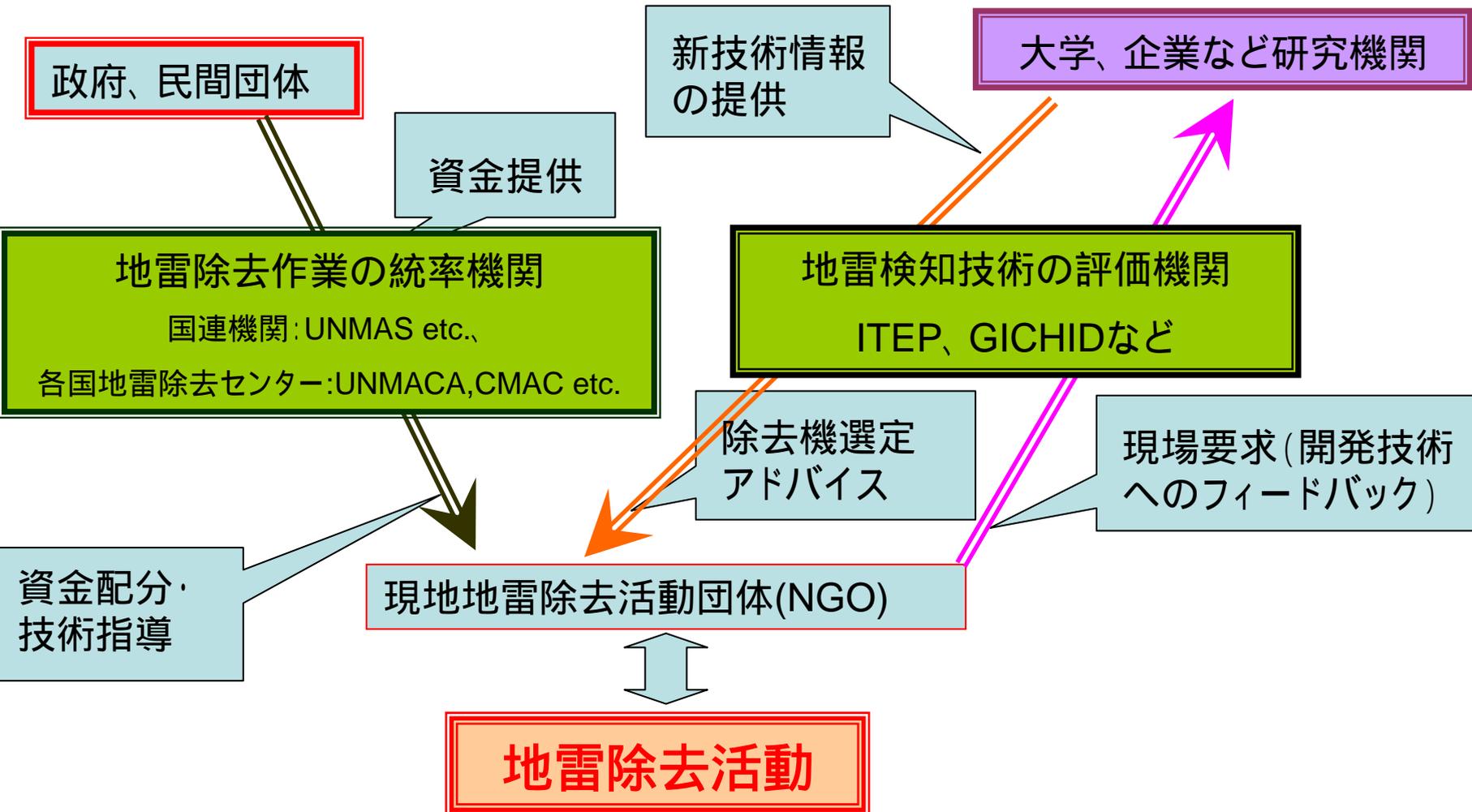
対人地雷 PMA1 と PMA2 (深度8cm)



バギー搭載型ALIS



地雷検知技術を現場で有効に利用するために



どうやって工学を極めるか

新しい発想と努力

新技術

社会の要求

既存技術



古くて新しい工学の問題

- 環境への配慮
- 科学倫理

技術が奢ってはいけない



地雷除去研究のまとめ

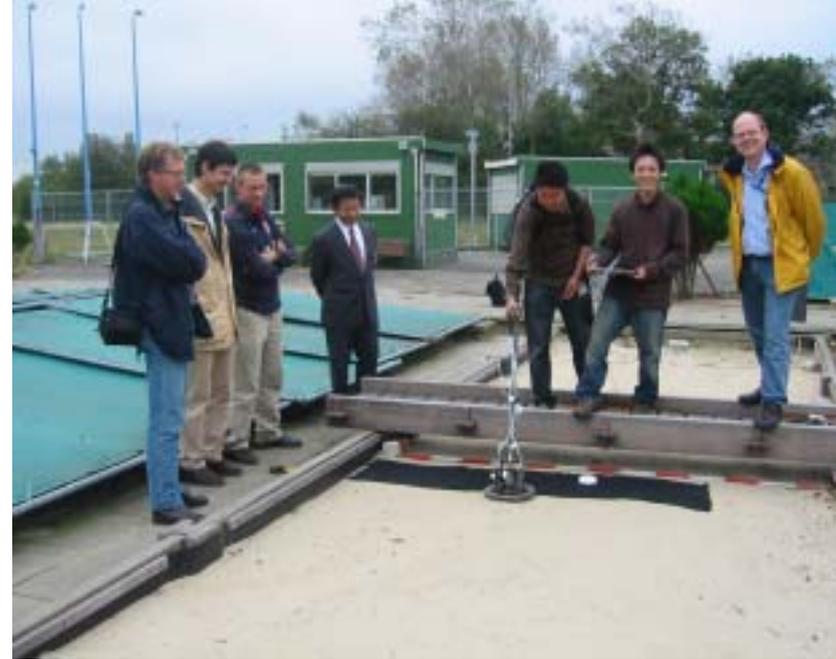
ハンドヘルド型センサ
ALISを開発

現地テストによる改良

国際機関による技術検証

- カンボジアテスト(2006冬)
- ITEP・クロアチアテスト
(2007)

ODAを通じた技術供与



ITEP評価テスト(オランダTNO)

