

埋設されたパイプの位置、方向推定のための 偏波感受型圧縮センシング

廣瀬夏秋研究室 学部4年

03-210499 高原陽太

目次

1. 研究目的と背景
2. 関連知識と先行研究
3. 提案手法
4. 実験手法とその結果
5. まとめと今後の展望

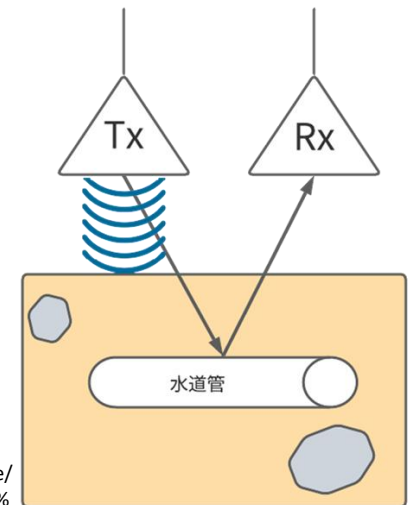
1.研究背景

・土木工事を行う際、地中の埋設物の有無及び形状、位置を推定しておく必要がある

代表例：ガス管や水道管

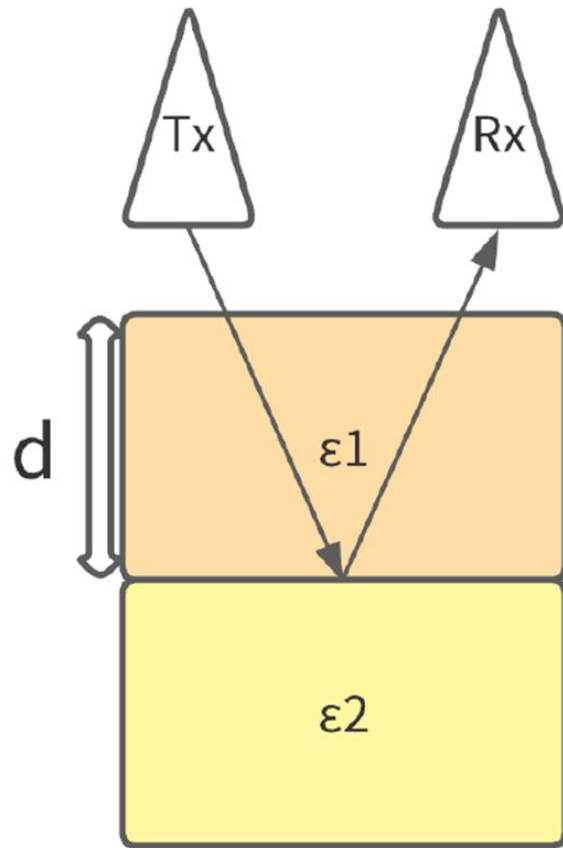
→地中調査段階でそれら埋設物の詳しい情報を得ておくことが重要となる。

埋まっているパイプの位置及び向きも含めた形状を推定する



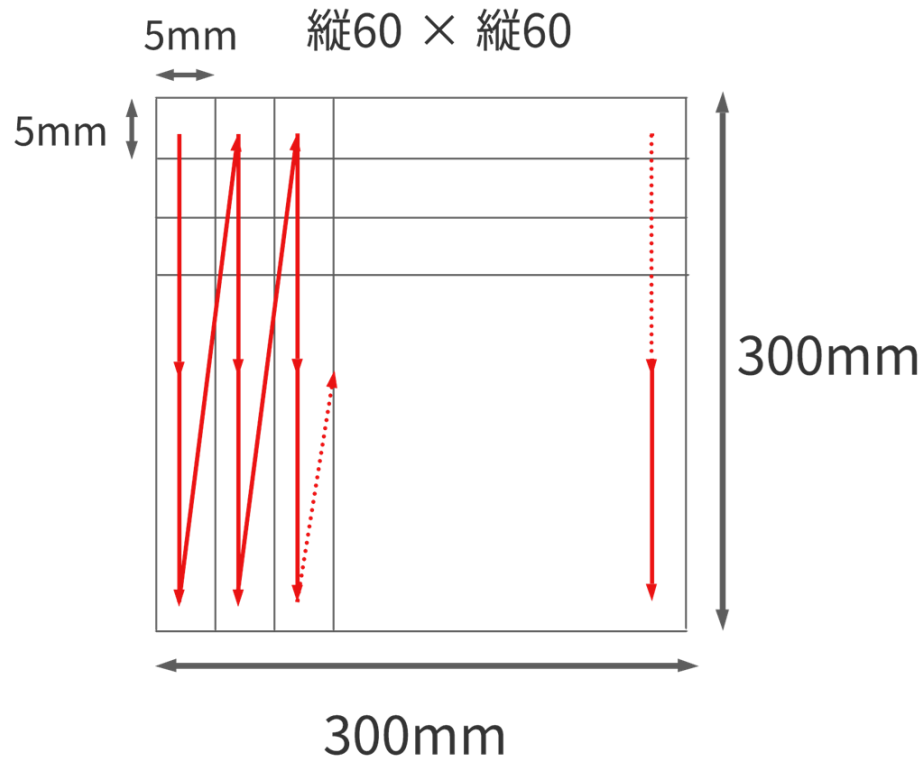
[出
展:<https://www.morishitahouse.jp/info/greenhouse/%E3%83%93%E3%83%8B%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%8F%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%82%BC%E3%83%91%E3%82%A4%E3%83%97%E3%83%8F%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%89%E3%81%AE%E3%83%91%E3%82%A4%E3%83%97%E3%81%AE%E6%9D%90%E8%B3%AA/>]

1.研究背景：地中探査レーダ（Ground Penetrating Radar : GPR）



- ・電磁波を地中に照射し、地中埋設物を探知
- ・放射された電磁波は媒質が異なる境界面で反射
→土壌と異なる物質に反応して反射する

1. GPRの問題点と研究目的



地上から(x,y)座標について細かく移動処理する必要がある
各計測点で複数の周波数を照射する必要がある
→測定に膨大な時間がかかってしまう

研究目的：計測時間を短縮しながらパイプの位置、形状を推定できるようにする

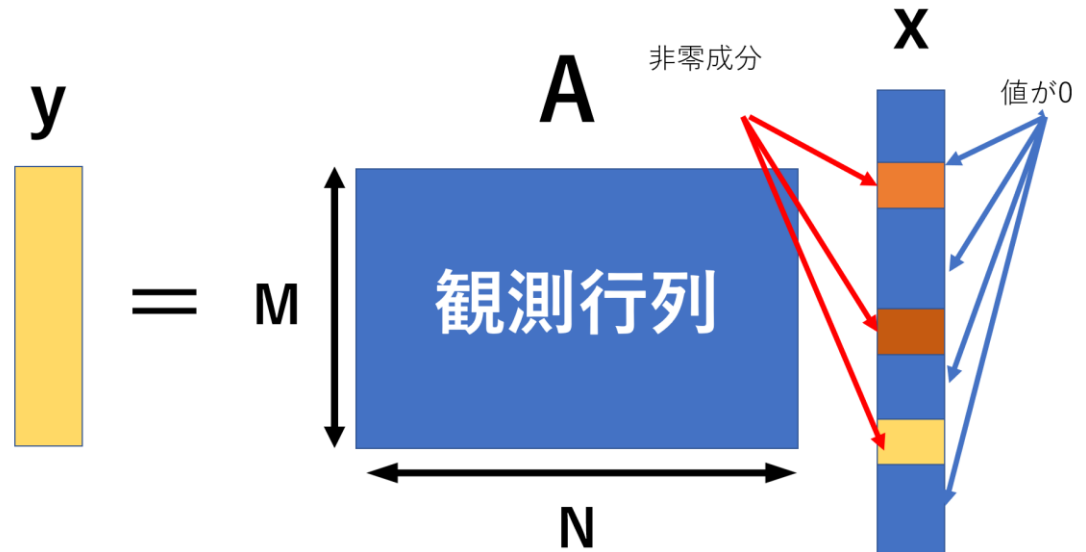
2.関連事項：圧縮センシングとスパース性

- 圧縮センシングとは、対象となる信号をできるだけ少ない観測点数から復元する技術

ほとんどの成分が零を持つ、あるいは期待される性質をスパース性と呼ぶ
→方程式を解くことができる

$$y = Ax$$

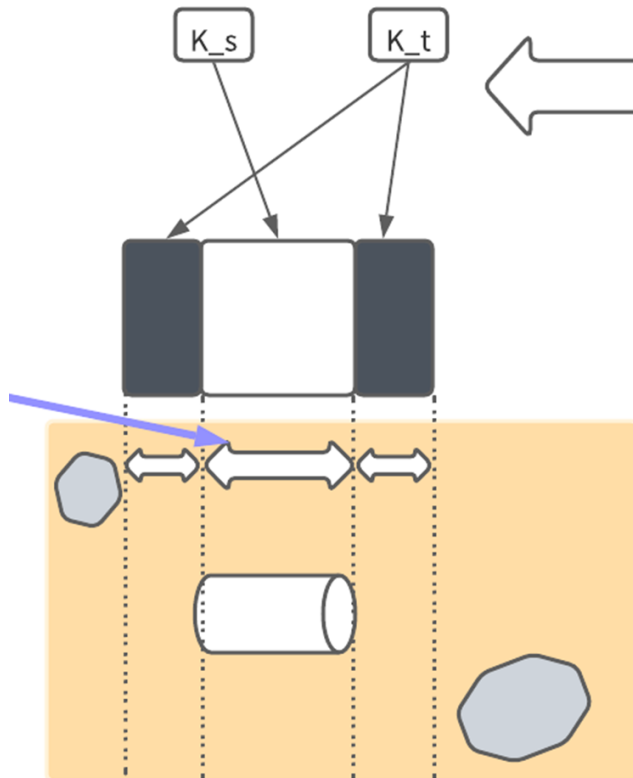
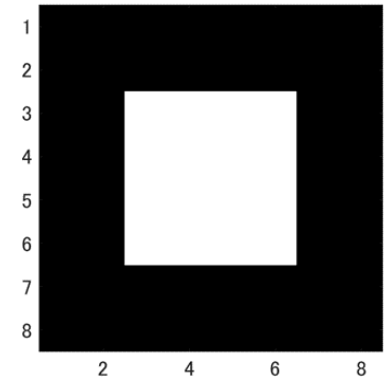
→少ない計測点数で済む



2. 先行研究：二次元モデルを用いた一様性圧縮センシング

R.Imaiらによる埋設物のモデル化

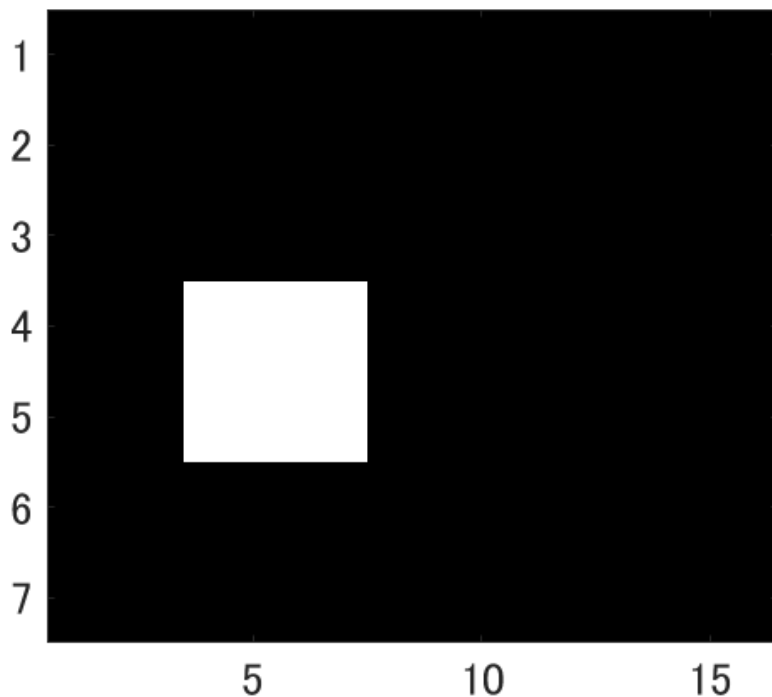
- ・ 右図のようなモデルを仮定する



K_t と K_s の値が
大きく異なる場所を探す

- ・ (x,y) 平面について探索
→ K_s と K_t の内積をとる
→ 埋設物があると推定される場所を探す

2. 先行研究：二次元モデルを用いた一様性圧縮センシング



- ・ 白い領域内での領域平均
 - ・ 黒い領域内での領域平均
- 複素内積をとって類似度を比較

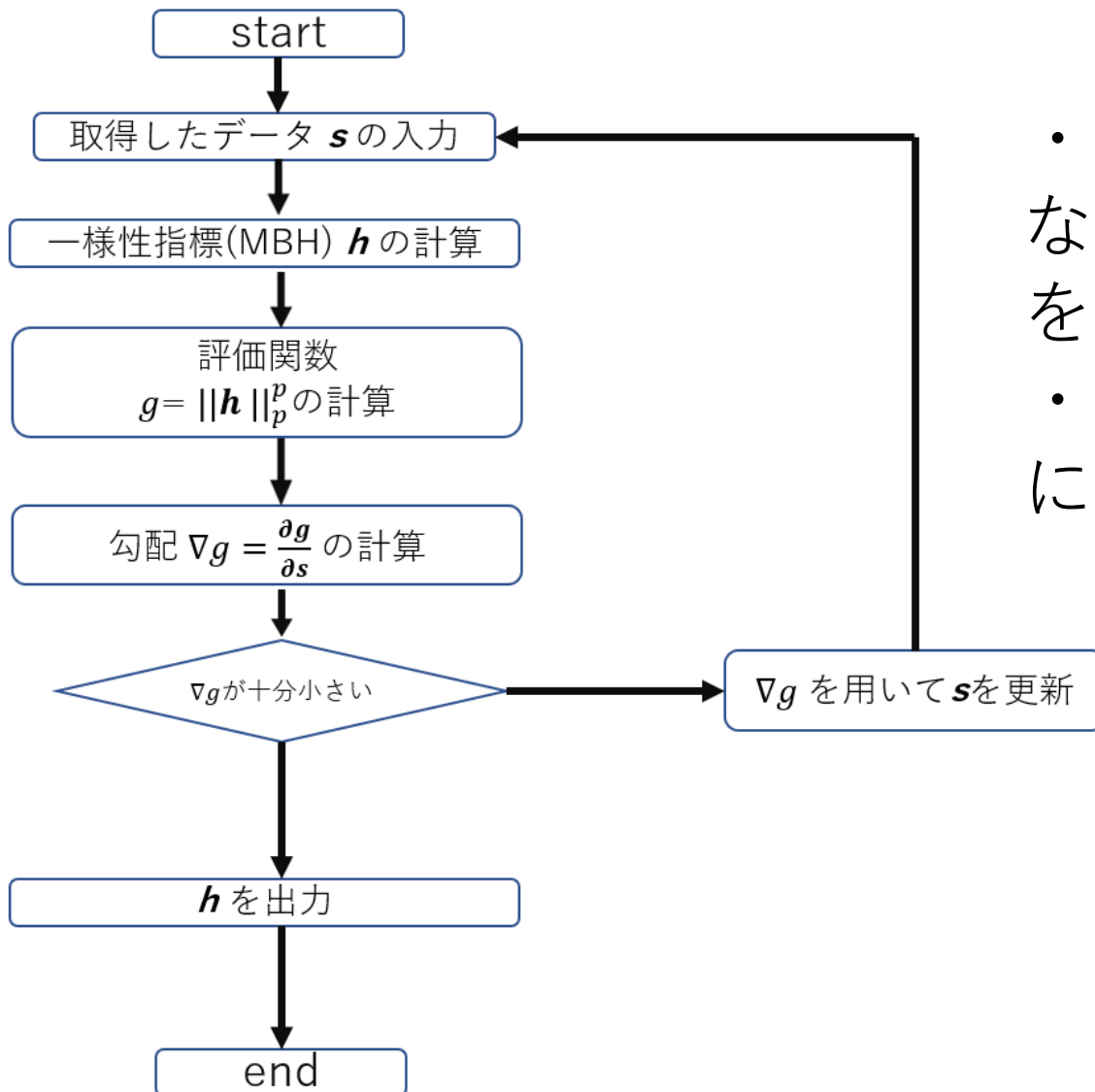
$$h(\mathbf{r}_m) = 1 - \frac{\Re \left(\left(\overline{\mathbf{K}_T(\mathbf{r}_m)} \right)^* \overline{\mathbf{K}_S(\mathbf{r}_m)} \right)}{|\overline{\mathbf{K}_T(\mathbf{r}_m)}| |\overline{\mathbf{K}_S(\mathbf{r}_m)}|}$$

これを測定領域について導出したものが下式

$$\mathbf{h} = [h(\mathbf{r}_{m1}) \ h(\mathbf{r}_{m2}) \ \cdots \ h(\mathbf{r}_{ml}) \ \cdots \ h(\mathbf{r}_{mL})]^T$$

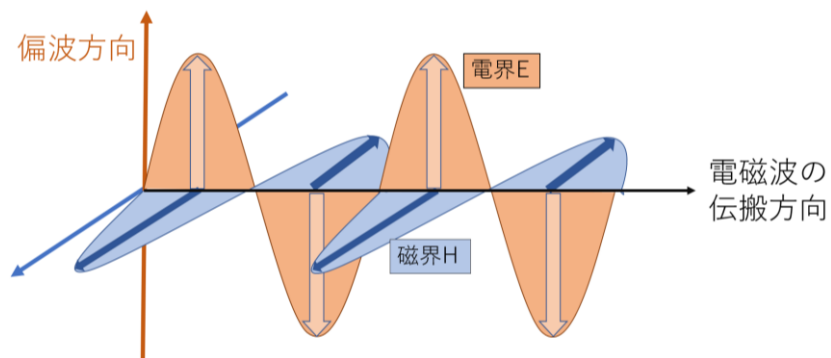
$h(\mathbf{r}_m)$ が極大になる \mathbf{r}_m に目標物があると考えられる

一様性モデルによる圧縮センシングの流れ



- ・ 評価関数が小さくなるように散乱行列を更新していく
- ・ h の値がスパースになるまで行う

2. 関連事項：偏波



- ・電界と磁界が直交しながら伝搬する波における電界の向き

- ・基本GPRは電磁波を照射し、返ってきた波の振幅、位相から目標物の情報を得る

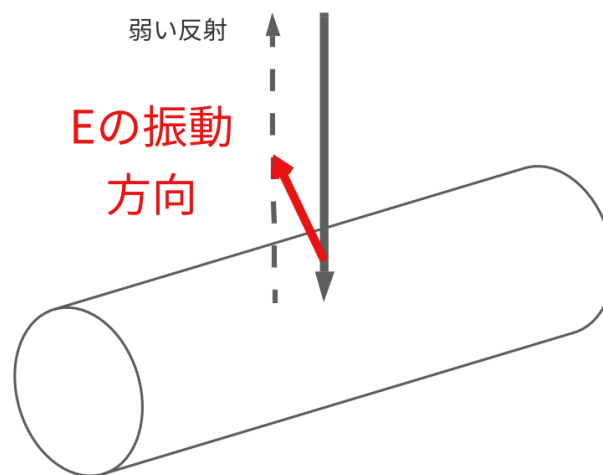
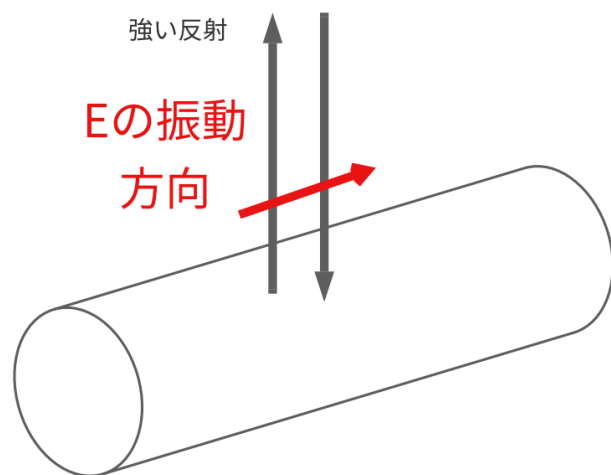
のだが..

[線状物体と偏波の向き]

パイプなどの線状物体の方向と偏波方向が

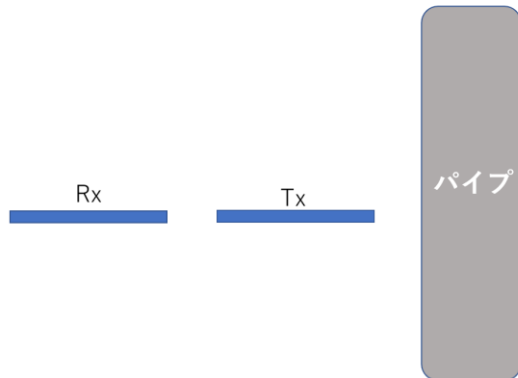
- ：平行なときに強い散乱

- ：垂直なときに弱い散乱

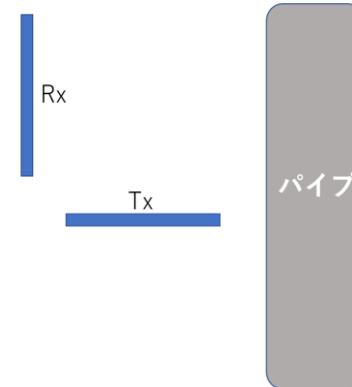


2.関連事項：散乱行列の取得

HH



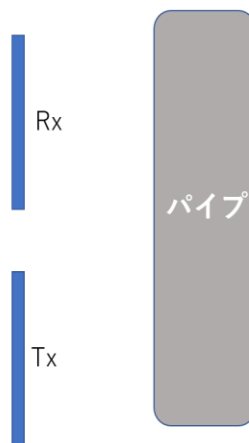
VH



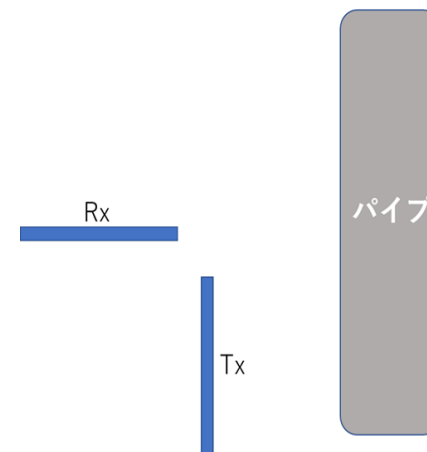
・ アンテナの向き
を変えて四通りに
データを測定

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

VV



→散乱行列を得る **HV**



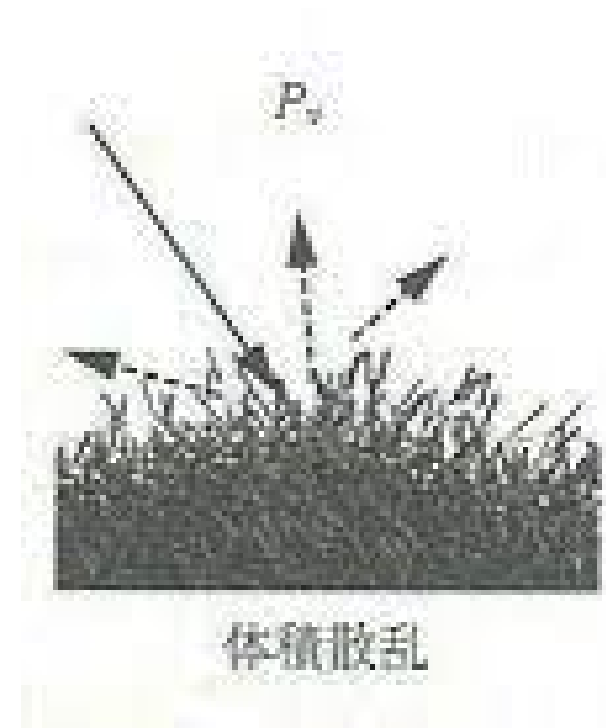
2. 関連事項：Reflection Symmetry

合成開口レーダ(SAR:Synthetic Aperture Radar)の観測による実験事実として平地の草木や自然植生・森林の領域において

$$\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle \approx \langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle \approx 0$$

体積散乱と呼ばれるランダム散乱が起こる
：全方位散乱が起こるため、偏波を入射する向きにほとんど関係がない。

→地中への電磁波掃引にも共通箇所があるので、
GPRを用いたパイプの検出に生かせる。



[出典]:<http://www.jsece.or.jp/event/conf/abstract/2013/pdf/Pb-41.pdf>

2. 関連事項：偏波相関係数

散乱行列の相関係数

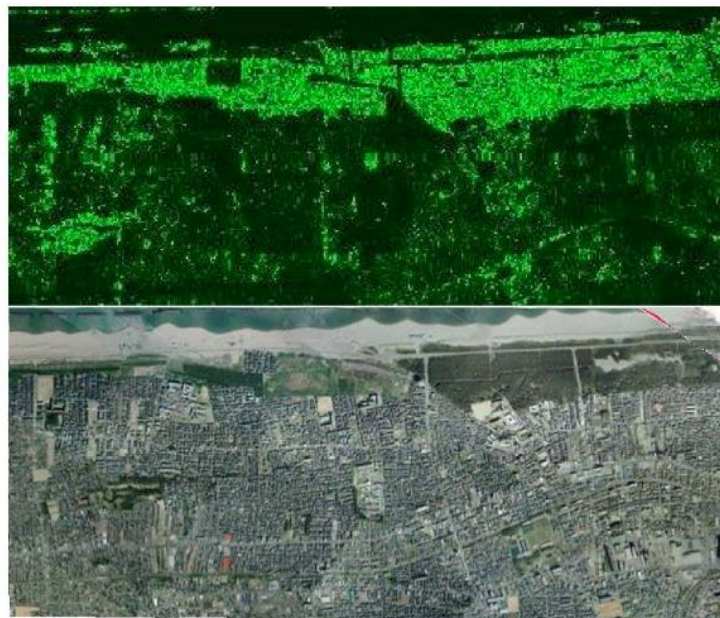
→ 円偏波相関係数円偏波基底(LR基底) は
入射の角度に対して不変

→パイプの向きに左右されにくいため適当

$$\gamma_{LL-RR} = \frac{\langle S_{LL} S_{RR}^* \rangle}{\sqrt{\langle S_{LL} S_{LL}^* \rangle \langle S_{RR} S_{RR}^* \rangle}}$$

- ・ 水平偏波、垂直偏波の送受信結果によって円偏波の送受信を求める

松林の抽出



Green



Trees ?

1

$|\gamma_{LL-RR}|$

Aerial
Photo

[出典]:http://www.wave.ie.niigata-u.ac.jp/yamaguchi/research_remote_sensing/contents/%E5%81%8F%E6%B3%A2%E7%9B%B8%E9%96%A2%E4%BF%82%E6%95%B0/assets/fallback/index.html

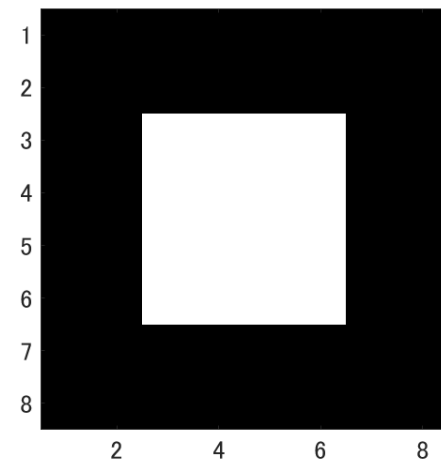
$$\gamma_{LL-RR} = \frac{\langle 4|S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle - j4 \operatorname{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH} - S_{VV} + j2S_{HV}|^2 \rangle \langle |S_{HH} - S_{VV} - j2S_{HV}|^2 \rangle}}$$

$$\varphi_{LL-RR} = \tan^{-1} \frac{4 \operatorname{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle}{\langle 4|S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle}$$

3.提案手法(偏波感受型の圧縮)

①パイプのモデル化を行い
圧縮センシングを考える

図：パイプのモデル



②四通りの計測を行い、散乱行列を求める
→**Reflection Symmetry**や偏波相関係数の情報を用いることができる

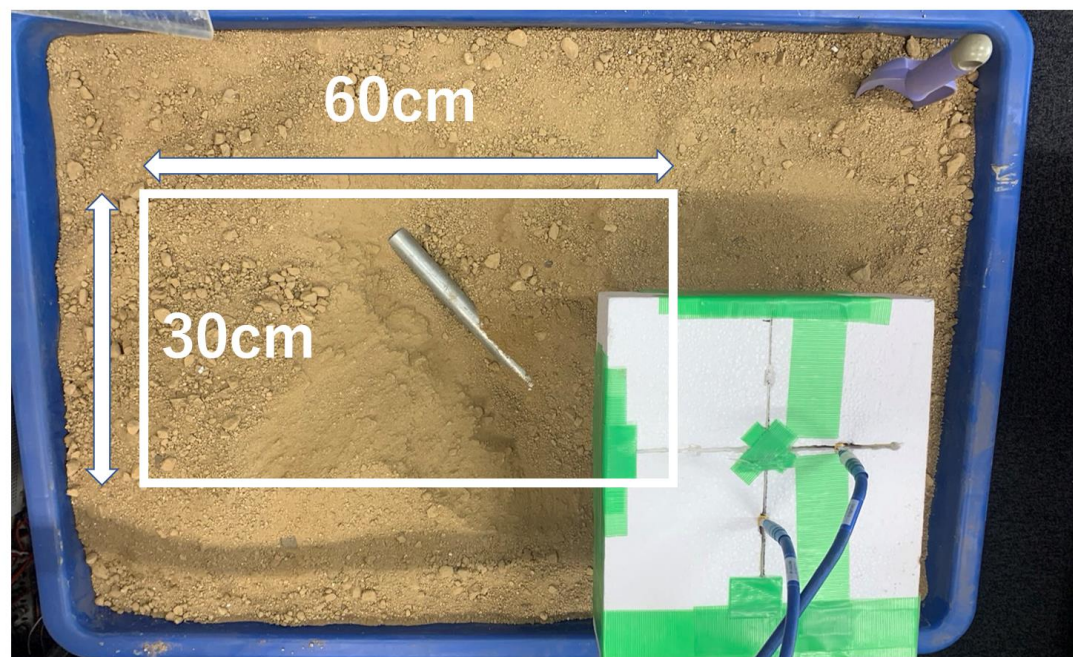
$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

$$h(\mathbf{r}_m) = 1 - \frac{\Re \left(\left(\overline{K_T(\mathbf{r}_m)} \right)^* \overline{K_S(\mathbf{r}_m)} \right)}{|\overline{K_T(\mathbf{r}_m})| |\overline{K_S(\mathbf{r}_m)}|}$$

③類似度を表すhに特徴量として、**Reflection Symmetry**や偏波相関係数を代入しパイプの検出することを提案手法とする。

4.実験手法

- ・パイプの角度を45度に定め、地中4cmに埋める。これを5mm間隔で図の縦方向に60点、横方向に120点測定した。その際 1-11GHzの周波数帯で等間隔に201点取った
 - ・この密に計測されたデータをランダムに間引くことによりまばらな計測を再現する
-
- ・まず測定した密データを用いデータを間引かず行う



4.実験手法：6通りの特徴量の比較

1. 四通りの散乱行列を連結した散乱ベクトル \mathbf{S}
2. Reflection Symmetryの特徴量 $\langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle$
3. 左円偏波と右円偏波の相関係数 γ_{LL-RR}

$$\gamma_{LL-RR} = \frac{\langle 4 |S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle - j4\Re \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH} - S_{VV} + j2S_{HV}|^2 \rangle \langle |S_{HH} - S_{VV} - j2S_{HV}|^2 \rangle}}$$

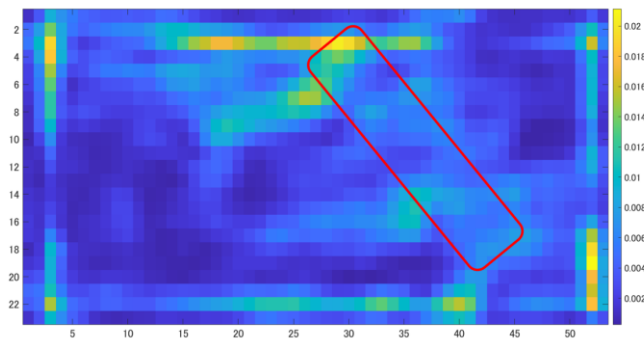
4. γ_{LL-RR} の位相 φ_{LL-RR}

$$\varphi_{LL-RR} = \tan^{-1} \frac{4\Re \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle}{\langle 4 |S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle}$$

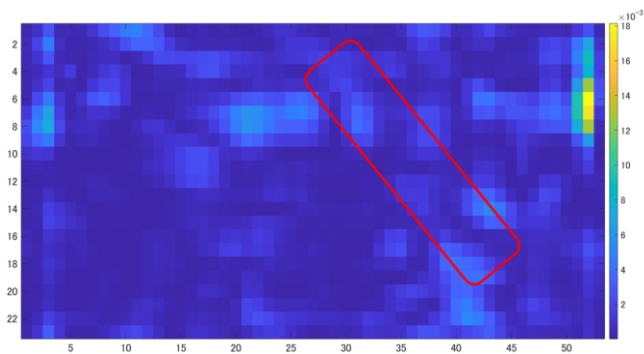
5. γ_{LL-RR} の分子項： $\langle 4 |S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle$
6. γ_{LL-RR} の分子項： $\Re \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle$

一様性の指標である h を (x,y) 空間について求め、性能が良いものを探す
→採用した特徴量を用いて間引いたデータについて圧縮センシングを行う。

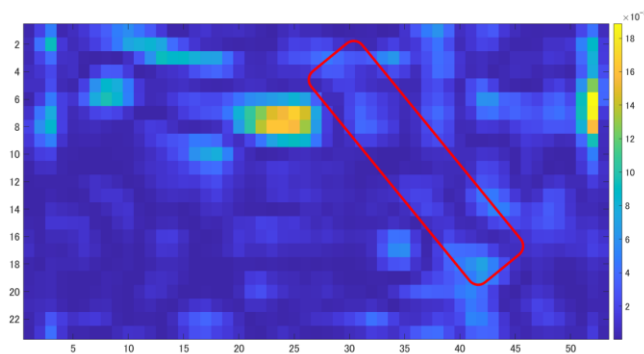
4.特徴量の選択



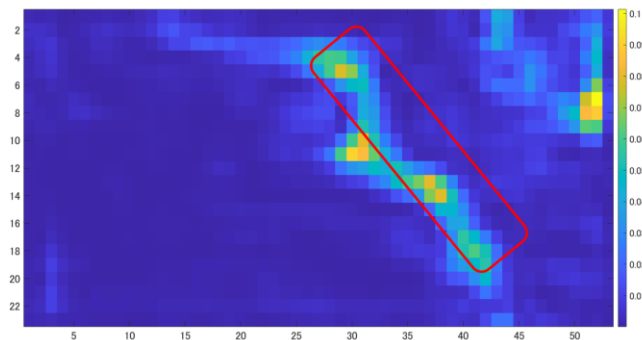
密な散乱行列 S について一様性 h を計算したもの



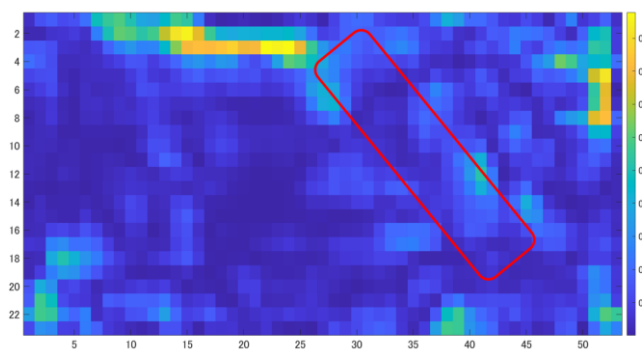
左円偏波と右円偏波の相関係数 γ_{LL-RR} について一様性 h を計算したもの



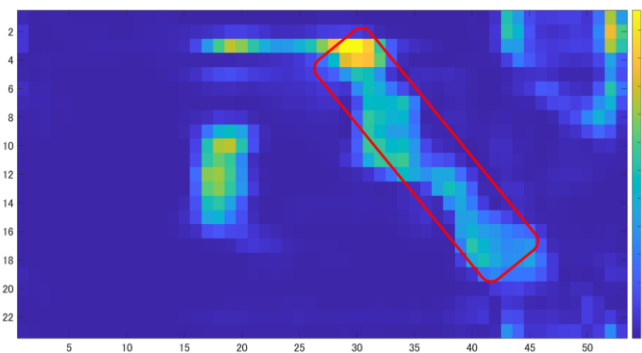
$\langle 4|S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle$ について一様性 h を計算したもの



Reflection Symmetry の指標 $\langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle$ について一様性 h を計算したもの



γ_{LL-RR} の位相 φ_{LL-RR} について一様性 h を計算したもの



$\text{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle$ について一様性 h を計算したもの

4. 特徴量の選択

2. Reflection Symmetry の特徴量 $\langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle$

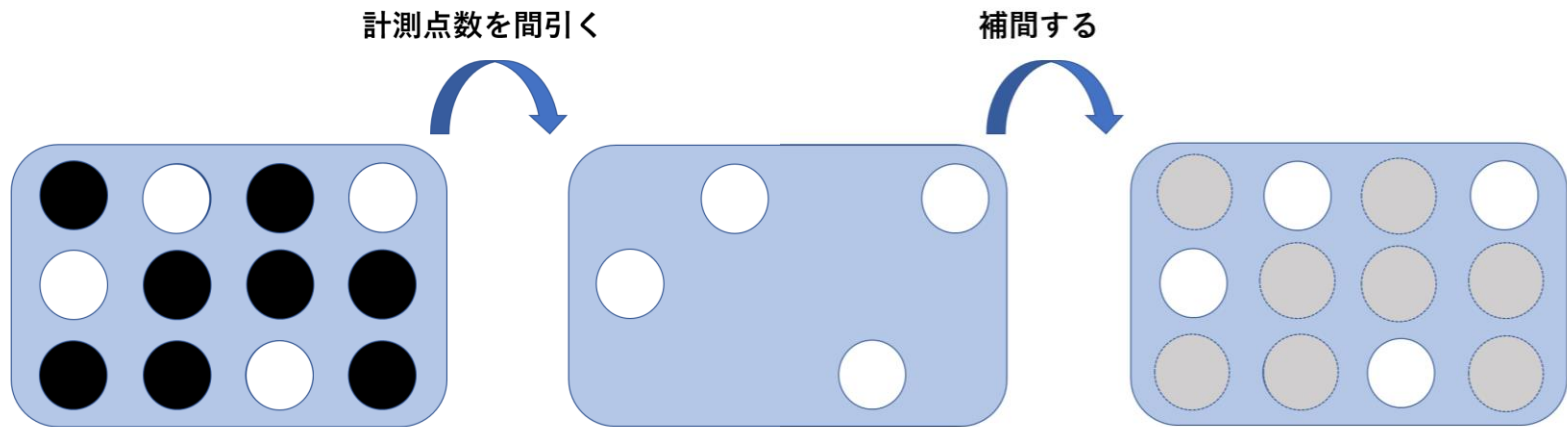
6. γ_{LL-RR} の分子項 : $\text{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle$

- パイプの位置を推定できている
- 特に向きまで推定できていることが重要である
- スパースな反応

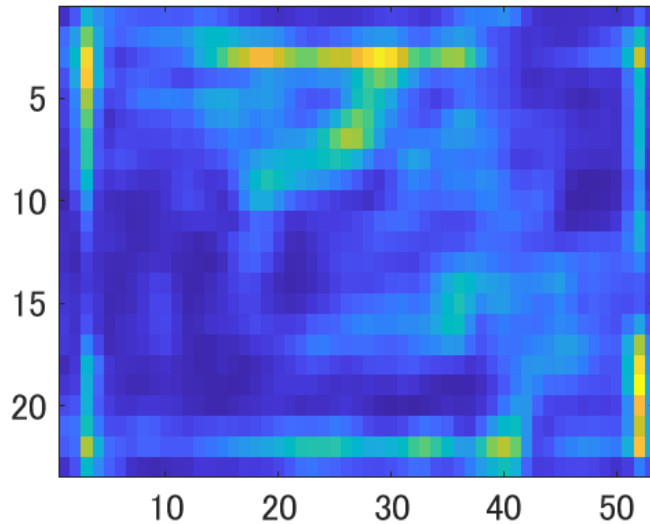
→ この二つの手法と比較として通常の散乱をベクトル S を用いて、比較実験とする。

4. 圧縮センシングの適用

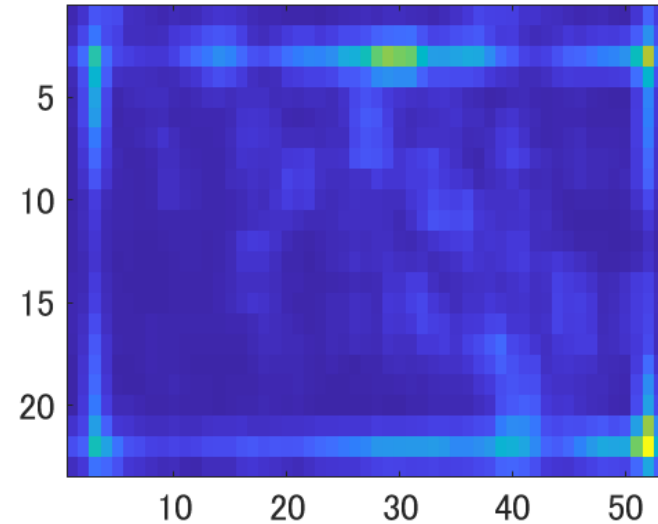
- ・ データを間引き、圧縮センシングを実際に用いる
→ 密データの1/5だけランダム抽出。
評価関数 g を一様性 h の計算によって求め、更新
→ 10回行う



4. 散乱行列を特徴量としたときの補間



密データ



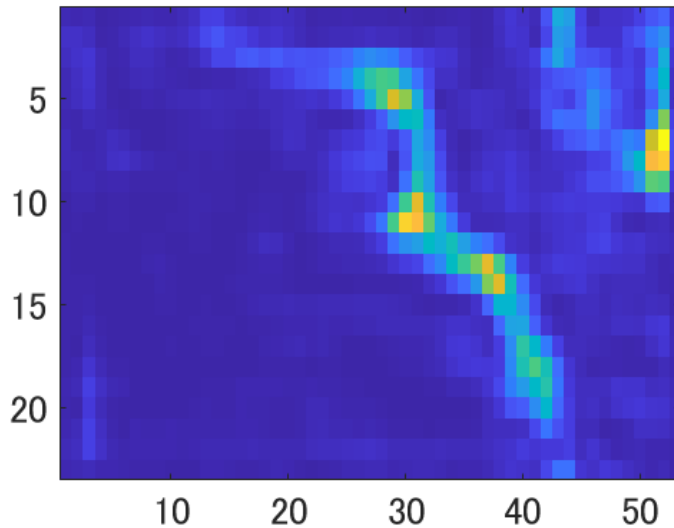
間引いたデータ

$$S(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} S_{HH}(\mathbf{r}) \\ S_{HV}(\mathbf{r}) \\ S_{VH}(\mathbf{r}) \\ S_{VV}(\mathbf{r}) \end{bmatrix}$$

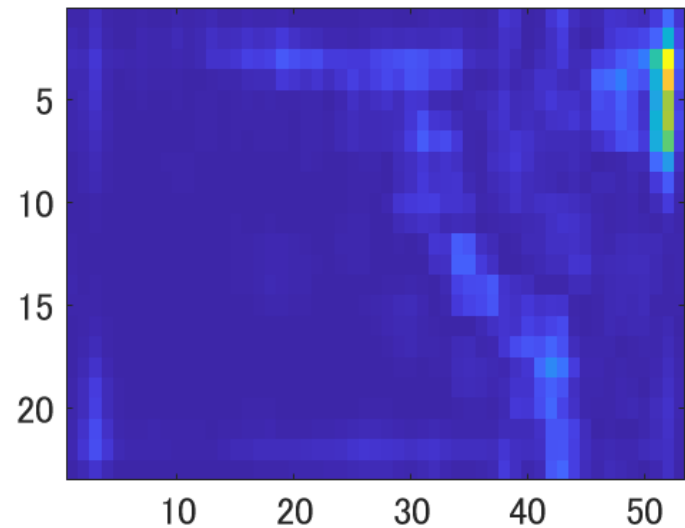
全体的に h の値が場所が場所が四隅に点在している

- ・パイプが埋設されている場所付近での h の値が弱まってしまった
- ・ランダムサンプリングによる影響もある。

4 .Reflection Symmetryを特徴量としたときの 補間



密データ

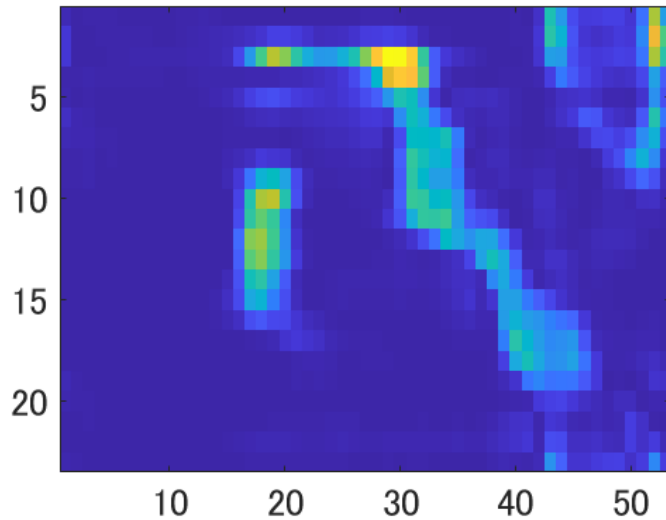


間引いたデータ

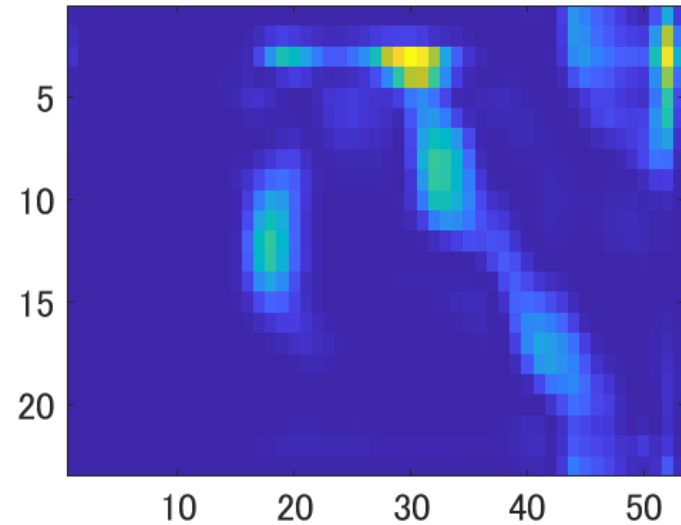
Reflection Symmetry の特徴量 $\langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle$

同様にデータをランダムに間引いた結果である。同様にパイプ周辺での一様性 h の値は小さくなってしまっているが薄っすらとは視認できる。

4.円偏波相関係数の位相項を特徴量としたときの補間



密データ



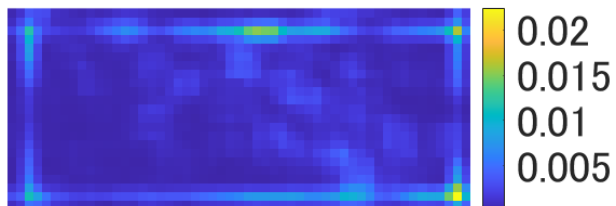
間引いたデータ

$$\text{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle$$

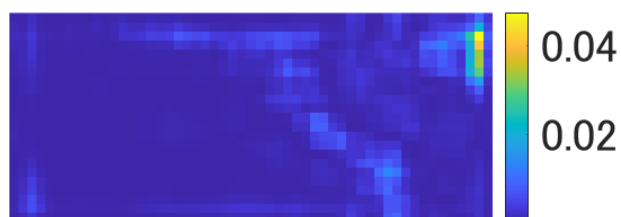
Reflection Symmetryに近づくにつれ0に収束しやすいという性質を持つ。実際に図からも分かるように一様性hの明瞭がはっきりしており、土壌があると思われる箇所には全く反応が見られない。

4.実験結果の比較

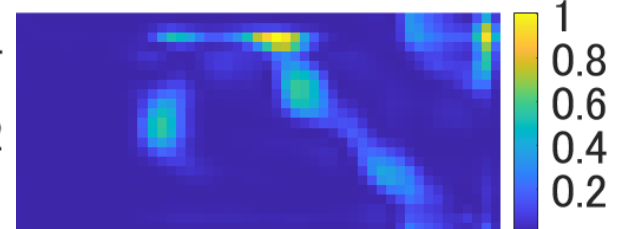
0



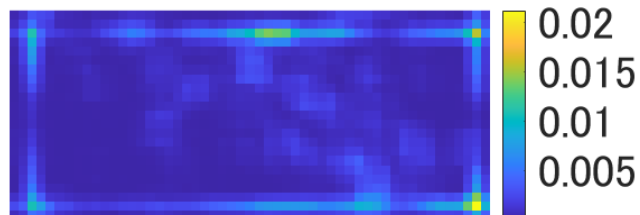
0



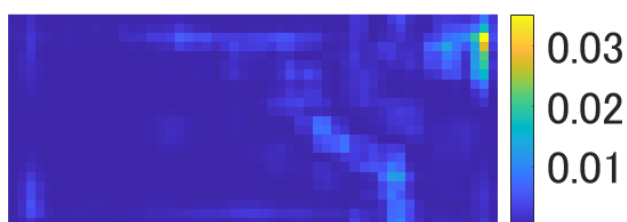
0



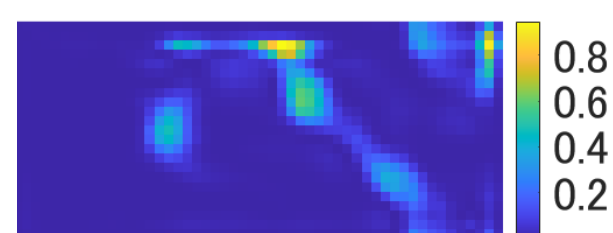
10



10



10



特徴量：散乱行列

特徴量：Reflection Symmetry

特徴量：
円偏波相関係数の虚数項

5.まとめと今後の展望

- ・埋設位置および向きがわからないパイプの位置推定および、向きを検出することができた。加えてデータを1/5に間引いても検出することができた。
- ・測定点数および計測時間の短縮につながったといえる。
- ・その一方でほかの埋設物や障害物に大きく左右されることも感じた。

今後はより一般性を持ったシステムの構築を考え実装することでパイプの多様な状態をより少ない情報から推定できるようにしていきたい。

Appendix

A-1. 偏波相関係数

また、ターゲット識別の偏波指標として相関係数の利用が考えられる。複素信号 $s_1(x), s_2(x)$ では次の恒等式が成り立つ。

$$\left| \int_a^b s_1(x) s_2^*(x) dx \right|^2 \leq \int_a^b |s_1(x)|^2 dx \int_a^b |s_2(x)|^2 dx \quad (1)$$

この式から、

$$0 \leq \frac{\left| \int_a^b s_1(x) s_2^*(x) dx \right|}{\sqrt{\int_a^b |s_1(x)|^2 dx \int_a^b |s_2(x)|^2 dx}} \leq 1 \quad (2)$$

となる。そこで、複素信号 $s_1(x), s_2(x)$ を散乱行列要素に置き換え、下式で表される偏波相関係数を用いる。

$$\gamma = \frac{\langle s_1(x) s_2(x)^* \rangle}{\sqrt{\langle s_1(x) s_1(x)^* \rangle \langle s_2(x) s_2(x)^* \rangle}} \quad (3)$$

A-1.適した偏波相関係数の導出

相関係数は偏波基底によって定まる
 →パイプの検出に適した基底を選択することが可能。

→ 円偏波相関係数円偏波基底(LR基底)
 は垂直偏波や水平偏波と異なり入射の角度に対して不変、ゆえにパイプの向きに左右されにくいため適当であると考えられる。

・水平偏波、垂直偏波の送受信結果によって円偏波の送受信を求めることを考える

$$\begin{bmatrix} S_{LL} \\ \sqrt{2}S_{LR} \\ S_{RR} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & -1 \\ -\sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{LL-RR} = \frac{\langle S_{LL}S_{RR}^* \rangle}{\sqrt{\langle S_{LL}S_{LL}^* \rangle \langle S_{RR}S_{RR}^* \rangle}}$$

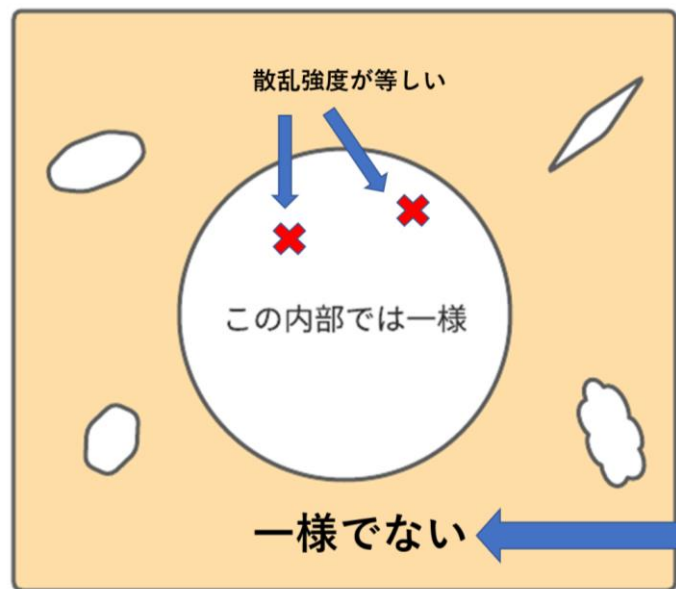
$$\gamma_{LL-RR} = \frac{\langle 4|S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle - j4 \operatorname{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH} - S_{VV} + j2S_{HV}|^2 \rangle \langle |S_{HH} - S_{VV} - j2S_{HV}|^2 \rangle}}$$

$$\varphi_{LL-RR} = \tan^{-1} \frac{4 \operatorname{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle}{\langle 4|S_{HV}|^2 - |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle}$$

A-2.モデル内一様性

モデル内一様性による圧縮

R.Imaiらによる埋設物のモデル化



その内部が一様性を持つようなモデルを仮定する。

：同じ材質、表面状態のものは散乱特性が等しい、一様である

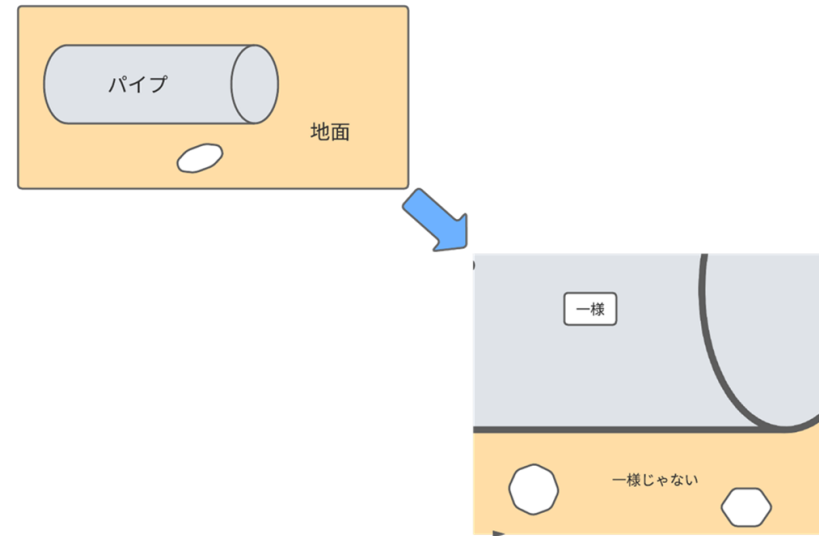
・内部では一様、外部では一様でないところを探す

→埋設物が存在している

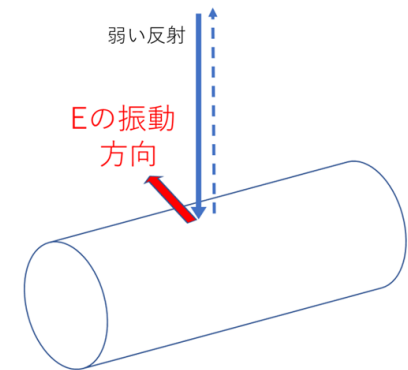
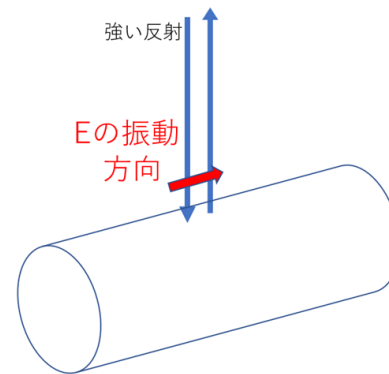
[1] Ryuta Imai, Yicheng Song, Ryo Natsuaki, and Akira Hirose, Model-Based Homogeneity to Extend Compressed Sensing for Ground Penetrating Radar, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 60, 2022

A-3.モデル化を用いたパイプの圧縮センシング

- パイプのモデル化を行い
圧縮センシングを行う

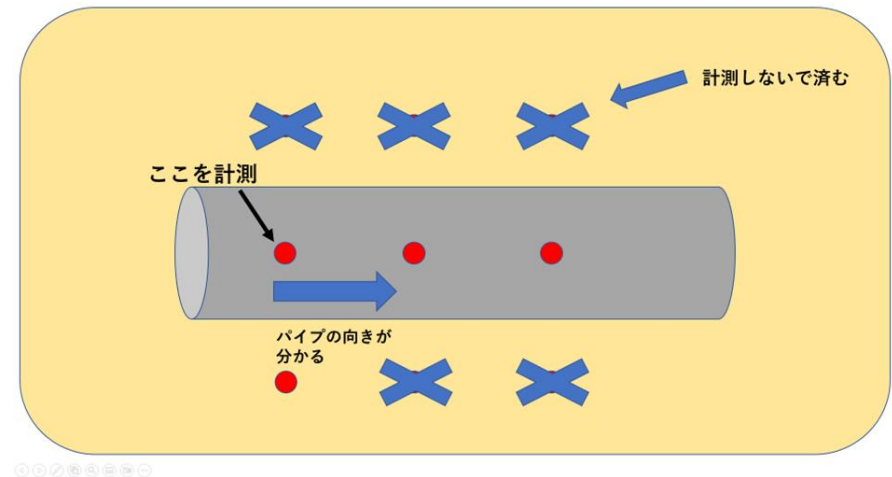
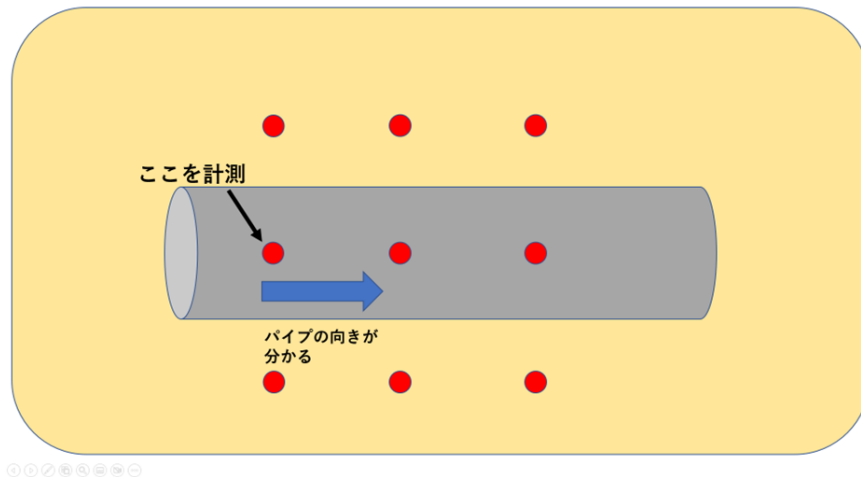


- 新規性として偏波の情報
も考慮し、偏波の向きとパ
イプの向きによってどのよ
うに散乱の様子が異なるか
考える



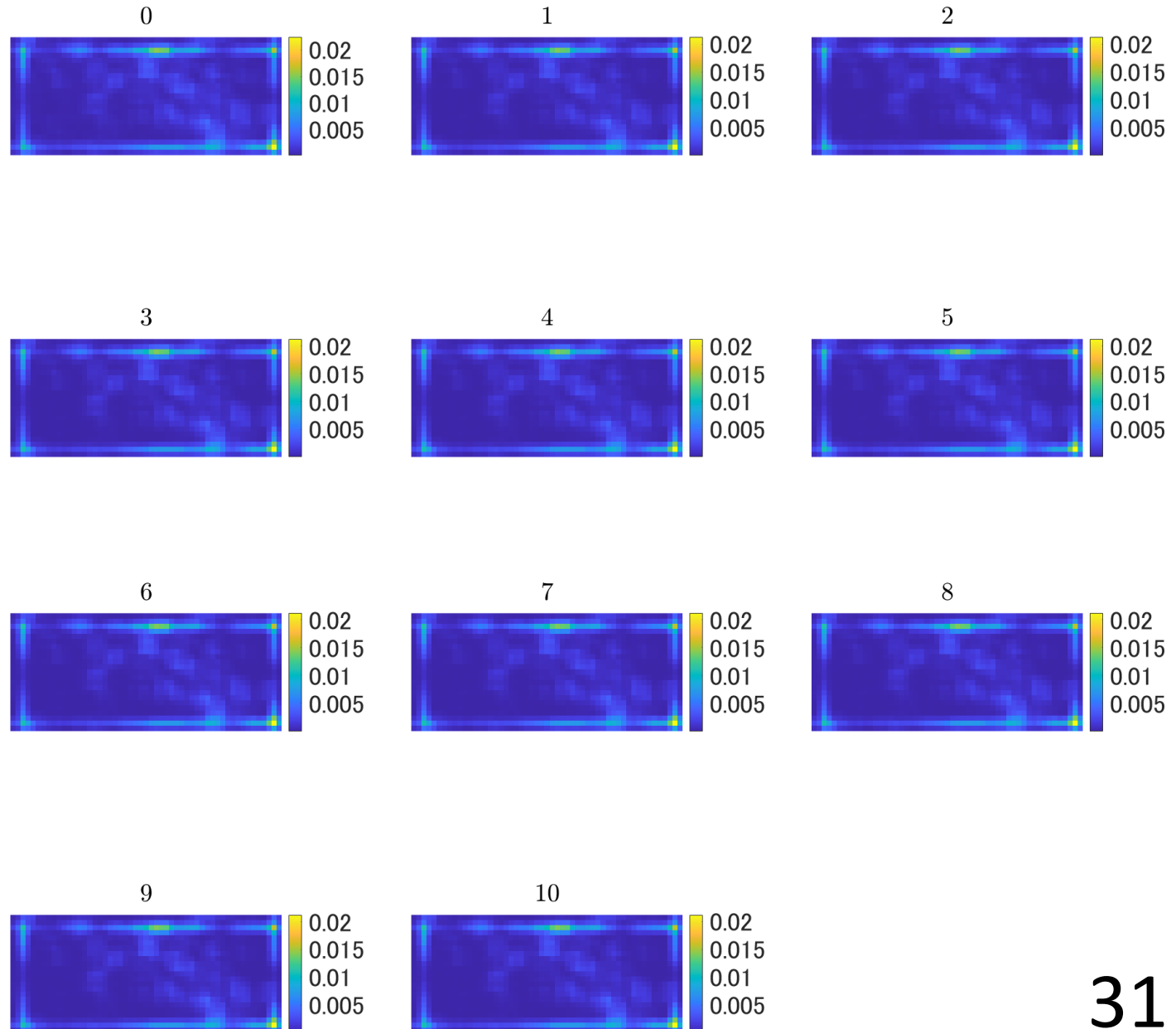
A-4. 偏波感受型の圧縮の有用性

- ・ 垂直偏波と水平偏波を当てることでパイプの向きが推定できる



1点を計測してパイプの向きがわかる
→計測しなくてもいい点が考えられる

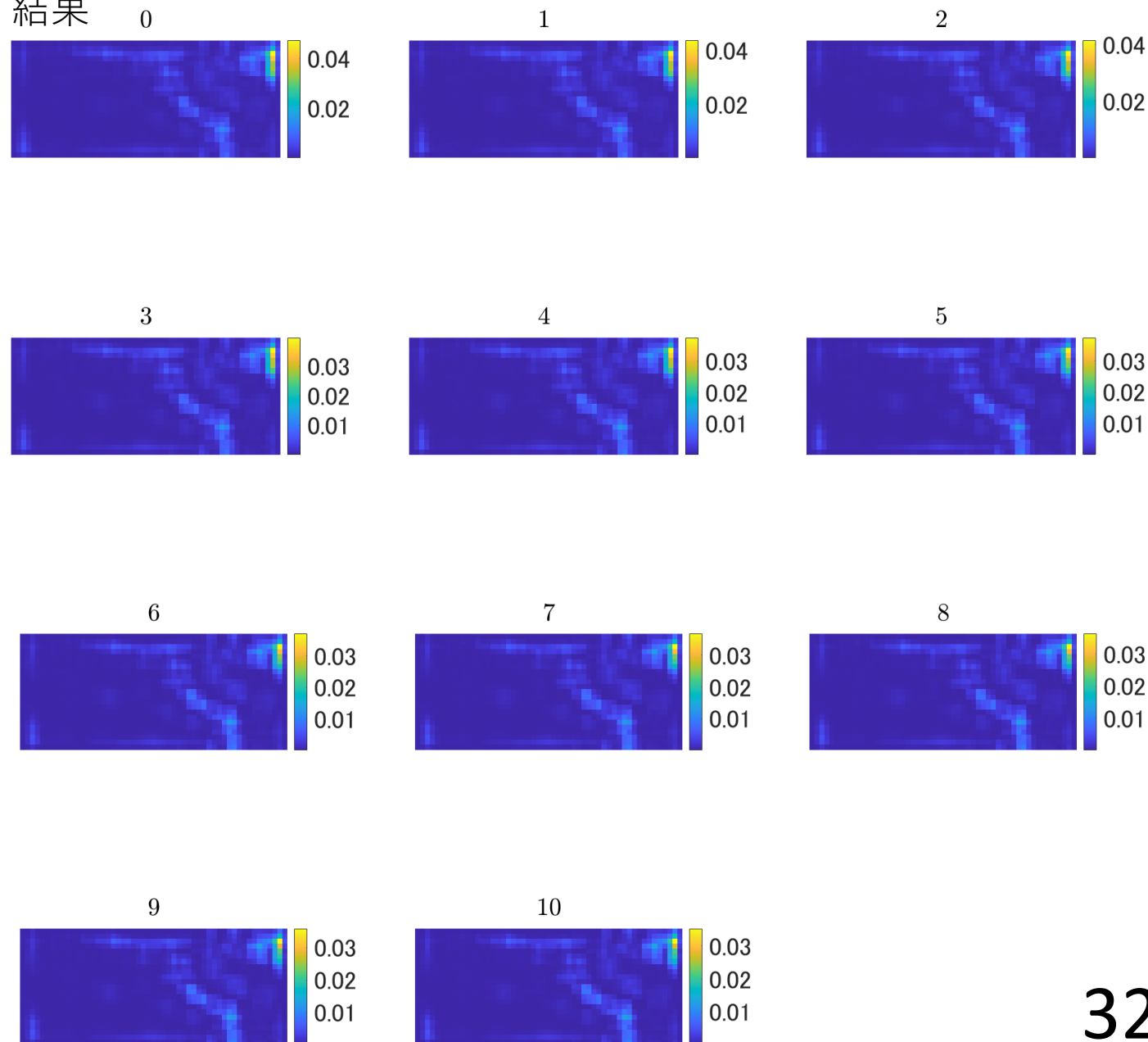
A-5. 散乱行列を特徴量としたときの補間結果



- ・全体的に h の値が四隅に点在している
- ・パイプが埋設されている場所付近での h の値が弱まってしまった。
- ・更新でパイプ付近の反応が強くなるような変化はなかった。

A-6.Reflection Symmetryを特徴量としたときの補間

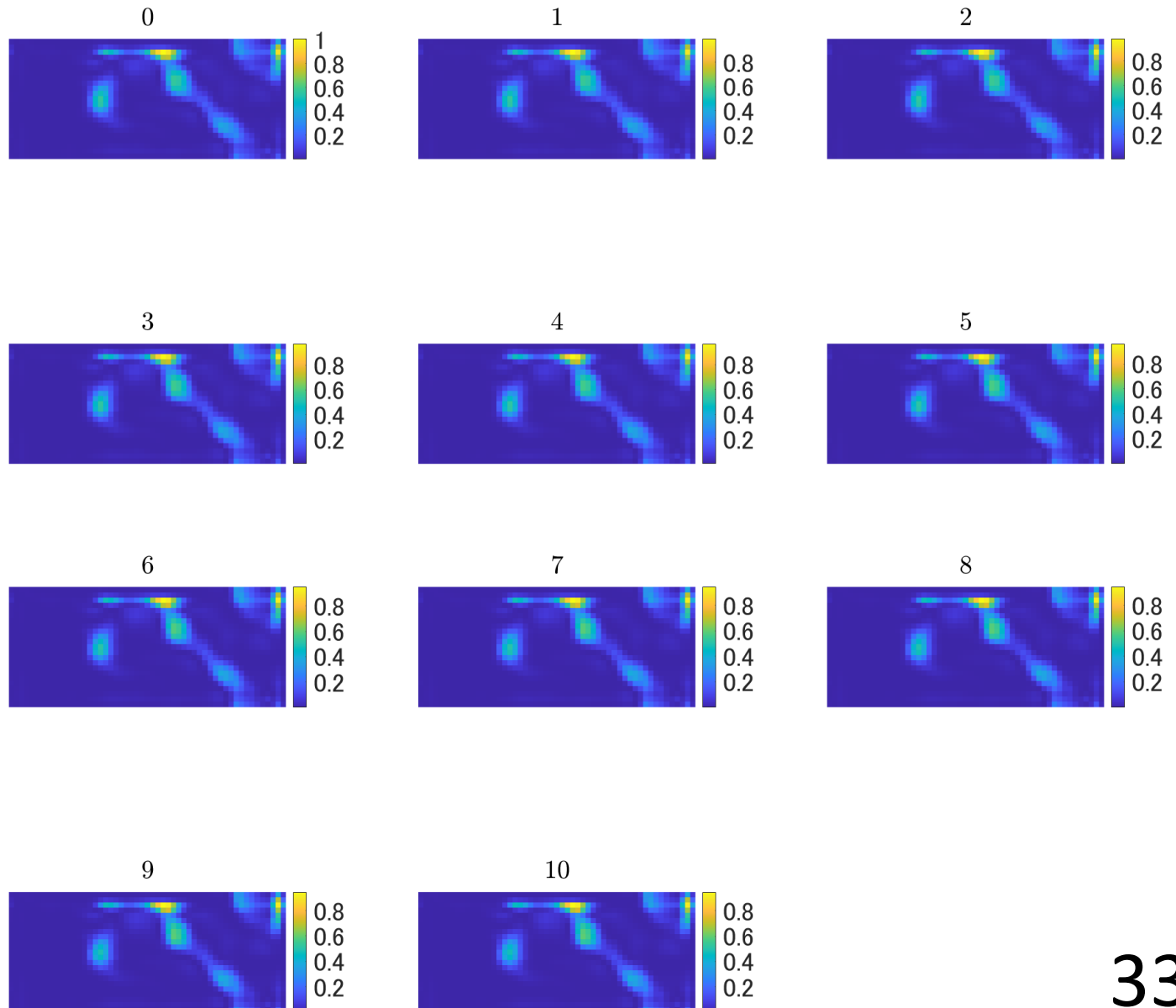
結果



・ 全体的な分布はあまり変わってないように思われるが、
0回目と10回目を比べると全体的に一様性 h の値は小さくなっている

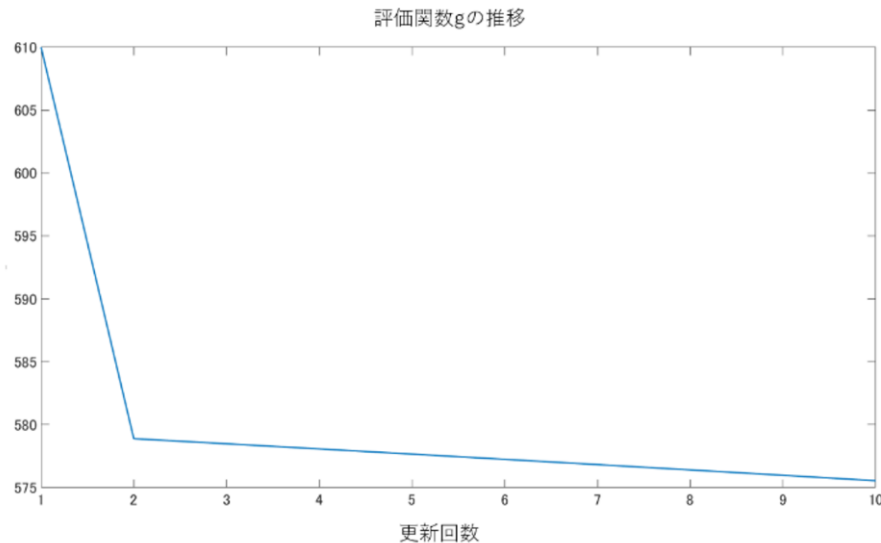
・ 四隅に反応が見られる

A-7.円偏波相関係数の虚数項を特徴量としたときの補間結果



- ・パイプの位置に一様性 h が高くなっている
- ・パイプの線状方向に反応が出ている。
→そのためパイプの概形を視認できるようになった
- ・四隅に分布が見られることも特になかった
- ・パイプの左下付近に反応

A-8.散乱行列を特徴量としたときの補間結果と評価関数



散乱ベクトル S を特徴量とした時の評価関数の推移

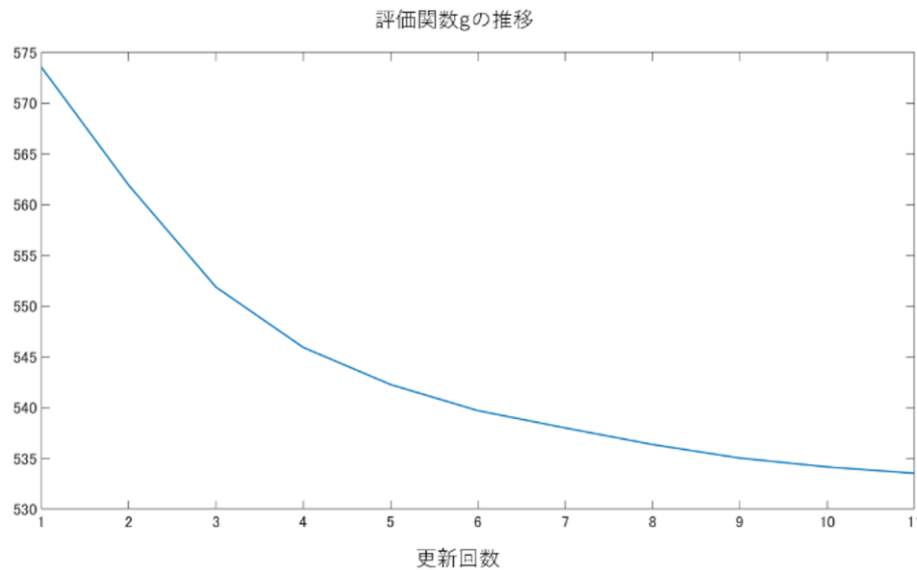
258

- ・計測領域四隅に反応

→これは測定に用いられているプールの端に反応しているのではないかと推測される。

→パイプよりプールの縁のほうが一方向に散乱しやすくそれゆえにパイプより大きな振幅となって反射していることが原因だと思われる。

A-9.Reflection Symmetryを特徴量としたときの補間結果と評価関数

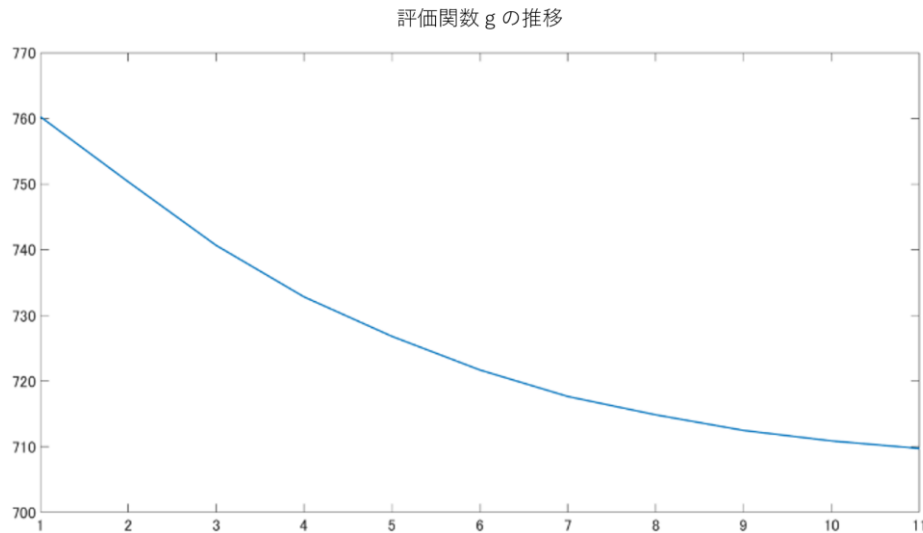


特徴量を Reflection Symmetry とした時の評価関数の推移

257

評価関数自体の値を小さくすることはできているが
→スパースになるような更新はできていないのではないと思われる。
・四隅の反応が見られる。これは**Reflection Symmetry**の式が反応が散乱が偏波の向きによらない箇所では値が小さくなっていくという性質を持つため、プールの縁という方向を持ち、散乱に規則性を持つものに対して反応してしまったのだろうことが考察される。

A-10.相関係数の虚数項を特徴量としたときの補間結果と評価関数



特徴量を $\text{Re} \langle S_{\text{HV}}^* (S_{\text{HH}} - S_{\text{VV}}) \rangle$ とした時の評価関数の推移

- ・ 四隅に一様性 h の分布が見られることも特になかった。
- この特徴量が円偏波相関係数の項によるものであるからと考えられる。円偏波は入射の際に回転を伴うため、照射される物体の向きによらない。そのためプールの縁のような一様な物体への入射では散乱が一様になると思われる。逆に今回パイプの左側に反応が見られた。これは大きめの石だと考えられるが、こういったNon Reflection Symmetryな物体には弱いと考えられる