

研究速報

偏波を考慮した Diffraction Tomography における再構成

猪又 憲治† (准員) 山口 芳雄† (正員)
山田 寛喜† (正員)

The Experimental Results for Polarimetric Diffraction Tomography
Kenji INOMATA†, Associate Member, Yoshio YAMAGUCHI†, and
Hiroyoshi YAMADA†, Members

†新潟大学工学部情報工学科, 新潟市

Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

あらまし co-pol 成分と cross-pol 成分を使った Diffraction Tomography に関する実験を行い, cross-pol 成分によって物体のエッジ情報が強調されることを示した。また, 15% の比誘電率差でも再構成が可能であった。

キーワード Diffraction Tomography, フィルタ補正逆伝搬法, 偏波, cross-pol

1. まえがき

物体断面の再構成の研究において, Diffraction Tomography が提案され, 検討されてきている [1]~[6]. シミュレーションによれば, cross-pol 成分より物体のエッジ情報が得られることが期待されている [6]. しかし, 測定では技術的な問題が多いため, 実験はほとんど行われていない。我々は, ネットワークアナライザを用いることにより高い精度で振幅と位相を測定し断面の再構成を試みた。本文では最初に 1 次 Born 近似を用いたフィルタ補正逆伝搬法の理論を示し, その再構成法を用いた実験結果, cross-pol 成分を用いたエッジ検出結果について報告する。

2. 再構成理論

断面の再構成には 1 次 Born 近似を適用したフィルタ補正逆伝搬法を用いる。観測波として電磁波を用いるため, 物体関数を比誘電率分布として計算を進める。なお, 物体関数を $f(\mathbf{r}) = \epsilon_r(\mathbf{r}) - 1$ とし, ϵ_r は比誘電率である。また, 空間全体で比透磁率は 1 とする。

観測される全電界 u は入射電界 u_i と散乱界 u_s の和である。散乱電界 $u_s(\mathbf{r})$ は物体関数 $f(\mathbf{r})$ と全電界 $u(\mathbf{r})$, 波動方程式のグリーン関数の畳込み積分として次のように表される。

$$u_s(\mathbf{r}) = k^2 \iint_S f(\mathbf{r}_0) u(\mathbf{r}_0) G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 \quad (1)$$

ここで, S は物体関数 $f(\mathbf{r}_0)$ を囲む任意の 2 次元領域とする。また, 時間因子を $\exp(-j\omega t)$ とすれば,

$G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = (j/4) H_0^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|)$ であり, $H_0^{(1)}$ は第 1 種ハンケル関数である。また, 1 次 Born 近似を適用し, $u(\mathbf{r}_0) \simeq u_i(\mathbf{r}_0) = u_0 \exp(jk\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{r}_0)$ と仮定する。 k は使用する電磁波の波数, \mathbf{s}_0 は平面波の進行方向の単位ベクトルである。

測定では図 1 に示すように, ϕ 方向に平面波を入射し, 受信ライン軸上において全電界 $u(X)|_\phi$ を得る。入射電界を引くことにより, 散乱電界 $u_s(X)|_\phi$ を得る。 $u_s(X)|_\phi$ のフーリエ変換を $u_s(\omega)|_\phi$ とし, 原点から受信ラインまでの距離を l とすると, 式 (1) より次の関係式を得る。

$$u_s(X)|_\phi = \frac{jk^2 u_0}{4\pi} \int_{-k}^k \frac{1}{\beta} \exp[j(\alpha X + \beta l)] d\alpha \\ \times \iint_S g(X_0, Y_0) \exp[-j\{\alpha X_0 + (\beta - k)Y_0\}] dX_0 dY_0 \quad (2)$$

ここで, $g(X_0, Y_0) = f(X_0 \cos \psi - Y_0 \sin \psi, X_0 \sin \psi + Y_0 \cos \psi)$ (但し $\psi = \phi - \pi/2$) である。また, $\alpha^2 + \beta^2 = k^2$ である。式 (2) の 2 重積分は, 物体関数 $f(x, y)$ の直角座標系における 2 次元フーリエ変換である。 $F(\Omega, \theta)$ を物体関数 $f(x, y)$ の円筒座標系での 2 次元フーリエ変換とすると, 次式で表される。

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} d\Omega F(\Omega, \theta) \\ \times \exp[j\Omega R] \Omega \\ R = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3)$$

ここで, Ω は θ 方向の空間周波数を表す。式 (2) を X に関してフーリエ変換することにより, 周波数領域における散乱電界と物体関数の関係式を得る。この関係

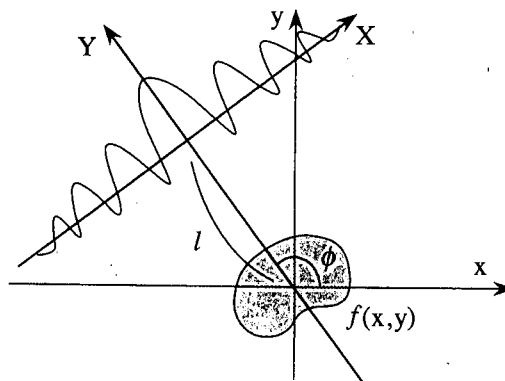


図 1 測定環境の座標系
Fig.1 Geometry of the model.

式を式(3)に代入し各変数間の関係を使うと、次式の物体関数と散乱電界の関係を表すフィルタ補正逆伝搬法の式を得る[3],[5].

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} d\phi \int_{-k}^k d\omega \frac{1}{jku_0} \exp[-jkl] u_s(\omega)|_{\phi} \times |\omega| \exp[j(\sqrt{k^2 - \omega^2} - k)(Y - l)] \times \exp[jX\omega] \quad (4)$$

式(4)ではコンピュータ実行上、 $u_s(X)|_{\phi}$ のフーリエ変換を行い、位相補正を行った後、逆フーリエ変換によって N 本の X 軸に関する値を得る。ここで、 Y の間隔が大きいと誤差が大きくなるため、ここでは FFT の点数 M も考慮し、観測点数 128 点、 $M = N = 128$ とし、再構成画像も 128×128 とした。

3. co-pol 成分による再構成

再構成実験では散乱電界測定装置としてネットワークアナライザ (HP8720C) を用いた。また、ホーンアンテナを使用し、ステッピングモータで操作することにより、 $1/40$ mm 間隔で位置を操作できるようにした。この理論では 2 次元問題を扱うので、物体は円柱物体を用いた。また、理論では入射波は平面波としている。そこで、 100λ 離れた送信アンテナと受信アンテナを平行に移動させることにより疑似的に平面波を生成した。

実験には比誘電率 1.15、直径 10.2 cm、高さ 57.5 cm の円柱を用いた。理論では物体、またはアンテナラインを 360 度回転させデータを取得するが、ここでは対称性を考慮し、1 回の測定で 360 度すべて同じ値が得られるものとした。測定の条件を図 2 と表 1 に示す。測定点数は 128 点、測定間隔は 0.5 cm、測定距離は 64 cm、測定周波数を 15 GHz、座標中心と受信アンテナラインの距離を 50.0 cm とした。

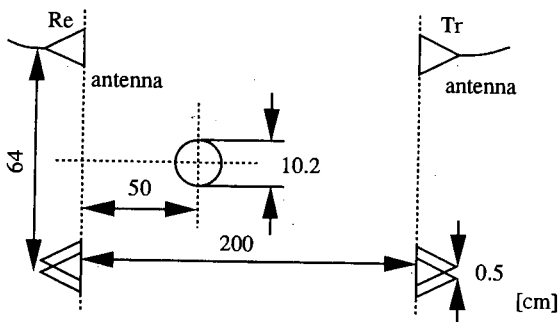


図2 測定のモデル図
Fig.2 Plan view of the measurement.

1 点の測定につきネットワークアナライザでは 32 回計測し、その平均値をその点での測定値とした。解析に必要な散乱電界を得るために、測定は物体がある場合とない場合の 2 度行った。図 3 に測定した散乱電界の振幅、図 4 に位相を示す。横軸はアンテナの位置を表している。これによる再構成図を図 5 に示す。高さ方向は比誘電率の大きさを表す。この図の原点を通るように切り取った断面図が図 6 である。横軸は距離、縦軸は比誘電率を表す。実験の結果、物体の比誘電率の値は 1.15 に近い値となっていることがわかる。比誘電率が約 1.15 となっている領域の直径は約 5.4 cm と測定物体の 10.2 cm の半分となっている。しかし、物体のエッジ部分はなだらかになっており、比誘電率が 1 に対して半分の位置 $\epsilon_r = 1.07$ でほぼ直径が一致している。これにより、1 次 Born 近似を用いたフィルタ補正逆伝搬法の理論で、実際に波動の回折を考慮した

表1 測定条件
Table 1 Measurement parameters.

測定点数	128 点	
測定間隔	0.5 cm	$1/4\lambda$
測定距離	64 cm	32λ
測定周波数	15 GHz	
座標中心までの距離	50.0 cm	25λ

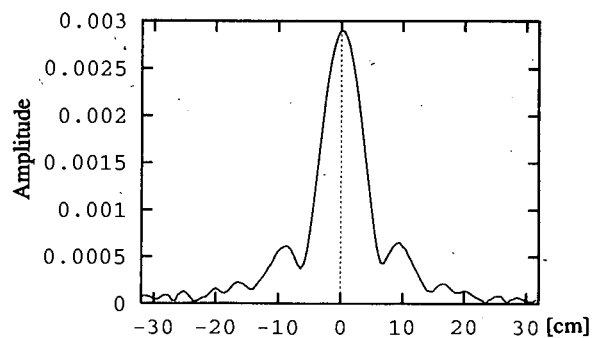


図3 測定した散乱波の振幅
Fig.3 Amplitude of scattered wave.

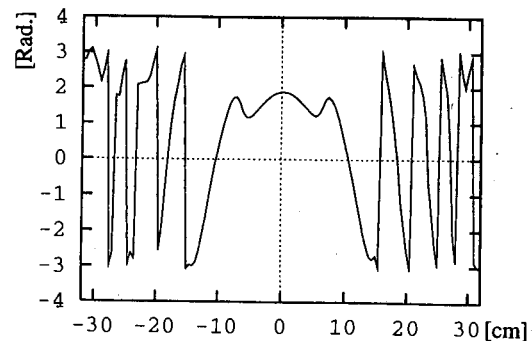


図4 測定した散乱波の位相
Fig.4 Phase of scattered wave.

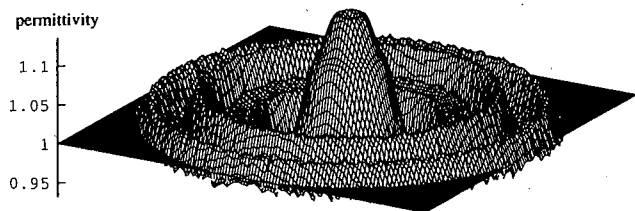


図5 立体再構成図

Fig.5 Reconstructed image of permittivity.

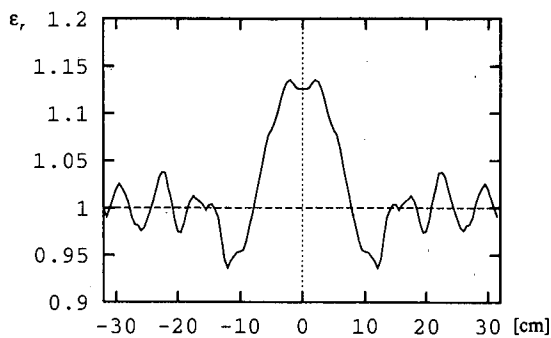


図6 再構成断面図

Fig.6 Cross-sectional cut of Fig.5.

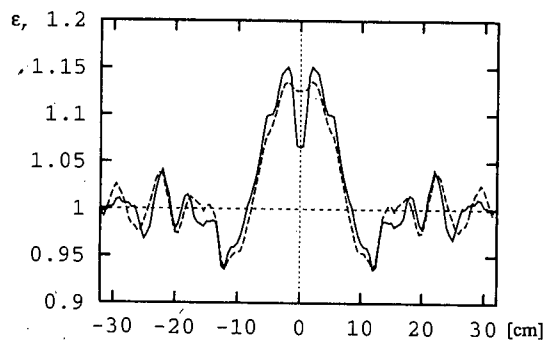


図7 断面図 (破線は空洞のない場合の断面図)

Fig.7 Cross-sectional cut of hollowed object (the dotted line is from Fig.6).

物体の再構成ができることが確かめられた。今までのシミュレーションでは比誘電率差は数%以内でなければ1次 Born 近似は保たれないと言われてきたが、今回15%の比誘電率差でも再構成が可能であることが実験的に確かめられた。

つぎに中心に直径3.65cmの空洞のある物体で実験を行った。物体の形状の変更のみで、比誘電率、実験の条件は前の実験と同じである。

空洞のある場合、ない場合の再構成断面図を重ねて図7に示す。結果より外壁の半径は空洞のないものと、ほぼ一致している。中心の空洞は比誘電率が1にならなかったが、その存在が明らかに確認できた。中心の直径と電磁波の波長の関係より、この大きさが下限と

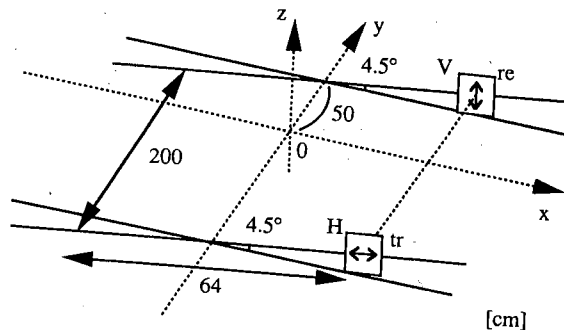


図8 HV 偏波の測定モデル

Fig.8 Geometry of measurement in the HV polarization basis.

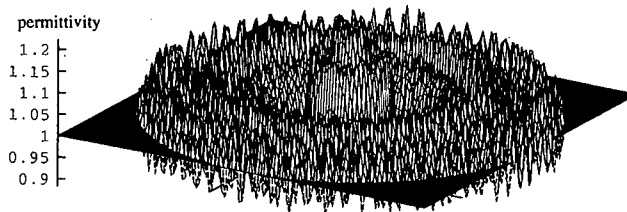


図9 立体再構成図 (HV 偏波)

Fig.9 Reconstructed image in the HV basis.

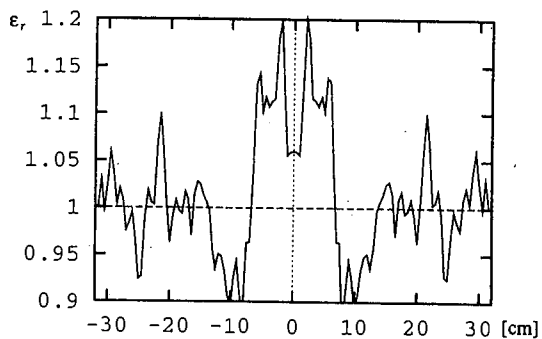


図10 再構成断面図 (HV 偏波)

Fig.10 Cross-sectional cut of Fig.9.

思われる。

4. cross-pol 成分による再構成

つぎに、送信と受信アンテナの向きを直交させ、cross-pol 成分をデータとして取得し偏波を考慮した物体再構成を試みた。この方法のシミュレーション[6]は行われているが、実験的に確かめられていない。

実験ではアンテナラインをx軸より4.5度だけ傾けて行った。実験の条件を図8に示す。測定ラインを傾けることにより相対的に電界が物体表面に対し斜めに入射することになる。斜め入射することにより、入射波に対するcross-pol成分をもつ散乱電界が生じ、この情報より物体のエッジ情報の再構成が可能となる。

実験の条件は前節と同様であり、HV偏波による再

構成の実験を行った。これは送信アンテナが水平偏波、受信アンテナが垂直偏波となる。物体は空洞のあるものを用いた。

実験の結果を図 9, その断面図を図 10 に示す。

この実験の結果、物体のエッジ情報が得られることがわかる。また、物体の比誘電率も、ほぼ正しい値となっている。cross-pol 成分を使った再構成では、物体のエッジがはっきりしており、物体の位置情報が精度良く求められることがわかる。

5. むすび

高精度にアンテナを操作しネットワークアナライザを用いた測定により、精度の良い Diffraction Tomography の再構成図が得られた。今までの計算では外部との比誘電率差が数%以内でなければならないが、今回 15% の比誘電率差でも再構成が可能であることが実験的に確かめられた。また、cross-pol 成分による再構成では、物体のエッジ成分が強調されることが実験によって確かめられた。しかし、物体以外の部分にも多くのピークが見られる。これは外部ノイズによる誤差と思われる。cross-pol 成分の振幅は非常に小さく、測定環境の影響を受け易いためである。また、他の要因として、数値計算上での FFT による影響もあると考えられる。今後、数値計算のうえからもノイズ

に対する検討が必要である。また、理論的に根拠はないが co-pol 成分と cross-pol 成分の情報を重ねることによって、より精度の高い物体の再構成が期待できるので、更なる研究が必要である。

文 献

- [1] H. Harada, David J.N. Wall, T. Takenaka, and M. Tanaka, "Conjugate Gradient Method Applied to Inverse Scattering Problem," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.43, no.8, pp.784-792, 1995.
- [2] P. Chaturvedi and R.G. Plumb, "Electromagnetic Imaging of Underground Targets Using Constrained Optimization," IEEE Trans. Geosic. Remote Sensing, vol.33, no.3, pp.551-561, 1995.
- [3] A.J. Devaney, "A Filterd Backpropagation Algorithm For Diffraction Tomography," Ultrason. Imaging, vol.4, pp.336-350, 1982.
- [4] A.J. Devaney, "A Computer Simulation Study of Diffraction tomography," IEEE Trans. Biomed. Engig., vol.BME-30, no.7, 1983.
- [5] Simin Haykin ed., Array Signal Processing, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, Chapter 6, pp.351-423, 1985.
- [6] Y. Yamaguchi, M. Mochida, W.-M. Boerner, M. Sengoku, and T. Abe, "Effect of View Angle Variation in Vector Diffraction Tomography," J.E.W.A., vol.7, no.11, pp.1455-1478, 1993.

(平成 7 年 11 月 8 日受付, 8 年 1 月 5 日再受付)