

FRPM 管に沿って伝搬するマイクロ波導波モードと その EO センサを用いた評価

村田 博司[†] 上野 文聖[†] 東 良幸[†] 岡村 康行[†] 奥田 忠弘[‡] 碓 昌也[‡]

[†] 大阪大学 大学院基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

[‡] 栗本鐵工所 〒527-0108 滋賀県東近江市小八木町 1

E-mail: [†] murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし Fiberglass-reinforced plastic mortar (FRPM)管は、軽量かつ機械的強度および耐腐食性が高いという優れた特長を持っている。農業用水管や下水管、電力ケーブル保護管などに多用されているが、現状、その非破壊検査技術は未確立である。我々は、FRPM 管に沿って伝搬するマイクロ波導波モードとその EO センサによる精密計測を用いて、FRPM 管を非破壊で診断する新しい検査技術の開発に挑戦している。これは、FRPM 管壁をマイクロ波に対する伝送路として用いて、マイクロ波を FRPM 管壁に沿って伝搬させ、欠陥や表面状態による伝搬特性の変化を EO センサで測定するものである。管壁に沿って伝搬する導波モードを解析したところ、直径 250~1000 mm、厚さ 18 mm の FRPM 管においては、周波数 1~6 GHz のマイクロ波に対して、単一あるいはたかだか数個の固有伝搬モード (TE モードおよび TM モード) が存在することがわかった。実際に FRPM 管におけるマイクロ波伝搬特性の測定実験を行い、マイクロ波が FRPM 管に沿って数 m に渡って伝搬すること、さらに、欠陥や表面状態によってマイクロ波伝搬特性に明瞭な差が生じることを確認した。低擾乱で電磁界計測可能な EO センサを用いることにより、FRPM 配管の非破壊診断技術として有効と考えられる。

キーワード マイクロ波、導波路、非破壊検査、光電界センサ、ダイポールアンテナ、FRPM 管

Microwave Guided-Modes Propagating along Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar Pipe and their Measurement Using Electro-optic Sensor

Hiroshi MURATA[†] Fumiaki UENO[†] Yoshiyuki AZUMA[†] Yasuyuki Okamura[†]
Tadahiro OKUDA[‡] and Masaya HAZAMA[‡]

[†] Graduate School of Engineering Science, Osaka University 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531 Japan

[‡] Kurimoto LTD 1 Koyagi-cho, Higashi-Ohmi, Shiga 527-0108 Japan

E-mail: [†] murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

Abstract- A new nondestructive inspection method for fiberglass-reinforced plastic mortar (FRPM) pipes using microwave and photonic techniques is proposed. A FRPM pipe has been widely used for water pipelines and electrical cable protection tubes since it shows high mechanical strength and high corrosion resistance despite being light weight. However, nondestructive inspection method for FRPM has not been established as far as we know. Recently, we found that a FRPM pipe of 250~1000 mm in diameter and 18 mm in thickness can be a good cylindrical waveguide with single or a few TE/TM guided modes for 1~6 GHz microwave and that the microwave transmission along a FRPM pipe is rather affected by defects in the FRPM pipe or its surface condition. With accurate measurement of a transmitted microwave signal using an electro-optic sensor, we can detect a defect or crack in a FRPM pipe nondestructively.

Keywords Microwave, waveguide, nondestructive inspection, electro-optic sensor, dipole antenna, FRPM pipe

1. はじめに

検査対象物に損傷や劣化を与えずにその内部の情報を取得できる非破壊検査技術は、さまざまな分野において非常に有用である。例えば、医療分野では、X線や超音波、核磁気共鳴画像法（Magnetic Resonance Imaging: MRI）を用いた人体内部の情報が診断・治療に不可欠となってきた。また、建物やトンネル、橋梁などの各種建造物・構造物の欠陥・劣化の診断においても、非破壊検査・診断技術の重要性は論を待たない。これまでにさまざまな建造物・構造物のための多くの非破壊検査技術が開発されているが[1]、検査対象となる物質や材料によっては、内部情報の取得が困難であるものがある。

非破壊検査法が十分に確立されていない材料の1つに、FRP（Fiberglass Reinforced Plastics）がある。FRPはガラス繊維などの繊維をプラスチック材料の中に入れた複合材料であり、軽量で耐腐食性が高いという優れた特長を持っている。また、モルタルと組み合わせたFRPMは、下水道用管や電力地中線ケーブル保護管などに広く用いられている。例えば、農業用水管に用いられているFRPM管では、国内での敷設総延長距離が約5万kmに達している。機械的に堅牢で化学的に安定なFRPMは、定期的に診断を行って劣化部を補修すれば、安全を担保しつつ使用期間を延ばすことが可能と考えられる。それゆえ、短時間で広範囲にFRPM管を診断できる方法が求められている。

FRPM管の非破壊検査法としては、MRIやX線を用いる方法が考えられるが、これらは大型の設備が必要である。また、埋設FRPM管の検査には不向きである。超音波を用いる方法も有力であるが、通常、何らかの走査が必要であり、結合効率向上のためには表面状態処理（ゲル等の塗布）が必要である。現状では、特に人的検査が困難な小径管では、有効な検査・診断法は見当たらない。

一方、我々は、FRPMがマイクロ波に対して損失の小さい誘電体（ $\epsilon_r = 4 \sim 16$, $\tan \delta \sim 0.01$ ）であることに着目した新しい検査手法を提案している[2][3]。FRPM管をマイクロ波に対する伝送路と考えて、マイクロ波帯の固有伝搬モードをFRPM管壁に沿って伝搬させる。このとき、FRPM管の内部や表面に欠陥等があると、モードの伝搬特性が変化する。この変化を測定することでFRPM管の非破壊診断を行うものである（図1）。この手法では、検査対象であるFRPM管自身を検査用信号の伝送路としても利用するために、一度に数～数十mの長さのFRPM管の検査・診断が期待できる。

この方法を用いて、数mm程度の小さな欠陥を同

定するためには、伝搬後のマイクロ波モードの状態を高精度に測定する必要がある。このような精密測定には電気光学(Electro-Optic: EO)センサを用いることができる。EOセンサは、ほとんどの部品を非金属材料で構成できるので、低擾乱でマイクロ波の電界振幅や位相を計測することができる。また、光ファイバを用いて信号を伝送することにより、測定対象以外のマイクロ波や電磁ノイズの影響を受けずに所望のマイクロ波電界の精密な測定を行うことが期待できる[4]。

本報告では、マイクロ波伝搬とEOセンサを用いたFRPM管の非破壊検査方法について述べる。以下では、FRPM管壁に沿って伝搬するマイクロ波の伝搬モード解析と実際のFRPM管におけるマイクロ波伝搬特性の測定結果を示す。市販のEOセンサを用いたマイクロ波伝搬モードの評価結果についても述べる。

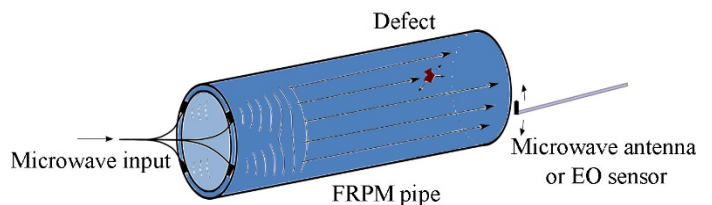


図1 マイクロ波伝搬を用いたFRPM管の非破壊検査・診断の基本構成

2. マイクロ波伝搬を用いた非破壊検査

我々が提案しているFRPM管診断方法の基本構成を図1に示す。定尺4mあるいは6mのFRPM管をマイクロ波に対する固有モードの伝送路として用いる。マイクロ波を管の特定の部分（例えば定尺管の接続継手部分）から入力して、FRPM管壁に沿って伝搬させる。そして、伝搬後のマイクロ波を適当な位置（例えば他方の継手部分）で検出・測定する。FRPM管に欠陥や劣化が無い場合は、あるレベルのマイクロ波信号が検出される。一方、欠陥・劣化があると検出信号レベルが変化するために管路の異常が同定できる。

入力されたマイクロ波の周波数と偏波に対して、FRPM管が単一モード伝搬である場合には、マイクロ波はFRPM管の欠陥で反射あるいは散乱（放射）されることになり、出力信号レベルが低下する。一方、複数の伝搬モードがある場合には、反射・散乱に加えて欠陥によって他のモードへの変換・結合が生じる可能性がある。これにより、出力マイクロ波信

号の分布や位相が大きく変わることが予想される。

マイクロ波信号の FRPM 管への入力には種々のラインアンテナやカプラを利用することができる。また、出力側（信号検出側）については、FRPM 管における伝搬モードが単一の場合には小型ラインアンテナやプローブを用いることができる。一方、複数の伝搬モードが存在する場合には小型 EO センサが有効である。EO センサは、欠陥・劣化の位置を検出する際にも有効である。

3. マイクロ波固有伝搬モードの解析

FRPM 管を図 2 に示す誘電体円筒と考え、円筒に沿って伝搬するマイクロ波固有伝搬モードを求める。

各領域での誘電率と透磁率を次のように定める。

$$\begin{aligned} \text{誘電体の内側 } (r < a) & \quad \epsilon_1, \mu_1 \\ \text{誘電体の内部 } (a < r < b) & \quad \epsilon_2, \mu_2 \\ \text{誘電体の外側 } (b < r) & \quad \epsilon_3, \mu_3 \end{aligned}$$

各媒質は等方、線形、一様であり、媒質中に電荷や電流は存在しないものとする。

円筒に沿って伝搬するマイクロ波の時間因子と伝搬因子を $e^{j\omega t}$, $e^{-j\beta z}$ とすると、波動方程式から以下の円筒座標系における Helmholtz 方程式が得られる。

$$\left(\frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \omega^2 \epsilon_i \mu_i - \beta^2 \right) \begin{Bmatrix} H_z \\ E_z \end{Bmatrix} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $i = 1, 2, 3$ である。

導波モードとして TE_{mn} モード ($E_z = 0, H_z \neq 0$) を考える。 $\partial/\partial\phi = 0$ ($m = 0$) であるときは、式(1)の解は、

$$H_z(r) = \begin{cases} A I_0(\gamma_1 r) & r < a, \\ B J_0(k_2 r) + C N_0(k_2 r) & a < r < b, \\ D K_0(\gamma_3 r) & b < r, \end{cases} \quad (2)$$

となる。ここで、 $\gamma_1^2 = \beta^2 - \omega^2 \epsilon_1 \mu_1$, $k_2^2 = \omega^2 \epsilon_2 \mu_2 - \beta^2$, $\gamma_3^2 = \beta^2 - \omega^2 \epsilon_3 \mu_3$ で、 A, B, C, D は定数である。また、 J_n は n 次の第 1 種ベッセル関数、 N_n は n 次の第 2 種ベッセル関数（ノイマン関数）、 I_n は n 次の第 1 種変形ベッセル関数（第 1 種ハンケル関数）、 K_n は n 次の第 2 種変形ベッセル関数（第 2 種ハンケル関数）である。

電磁界の接線成分 H_z, E_ϕ は、円筒の境界 $r = a, b$ において連続でなければならない。この境界条件から振幅の定数を消去し、さらに、自明でない解を持つ条件を求めることにより、以下の固有値方程式が得られる。

$$M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21} = 0 \quad (3)$$

$$M_{11} = \frac{\mu_1}{\gamma_1} \frac{I_1(\gamma_1 a)}{I_0(\gamma_1 a)} J_0(k_2 a) - \frac{\mu_2}{k_2} J_1(k_2 a), \quad (4)$$

$$M_{12} = \frac{\mu_1}{\gamma_1} \frac{I_1(\gamma_1 a)}{I_0(\gamma_1 a)} N_0(k_2 a) - \frac{\mu_2}{k_2} N_1(k_2 a), \quad (5)$$

$$M_{21} = \frac{\mu_3}{\gamma_3} \frac{K_1(\gamma_1 b)}{K_0(\gamma_1 b)} J_0(k_2 b) + \frac{\mu_2}{k_2} J_1(k_2 b), \quad (6)$$

$$M_{22} = \frac{\mu_3}{\gamma_3} \frac{K_1(\gamma_1 b)}{K_0(\gamma_1 b)} N_0(k_2 b) + \frac{\mu_2}{k_2} N_1(k_2 b). \quad (7)$$

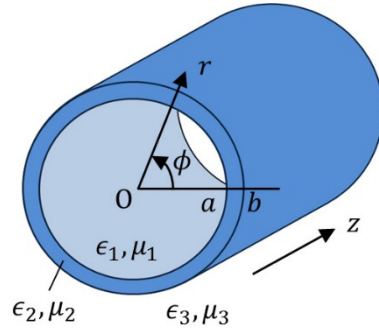


図 2 解析モデル

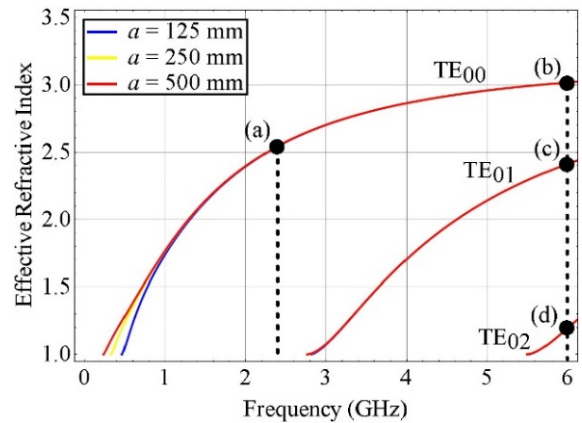


図 3 TE モードの分散特性 ($a=125, 250, 500\text{mm}$)

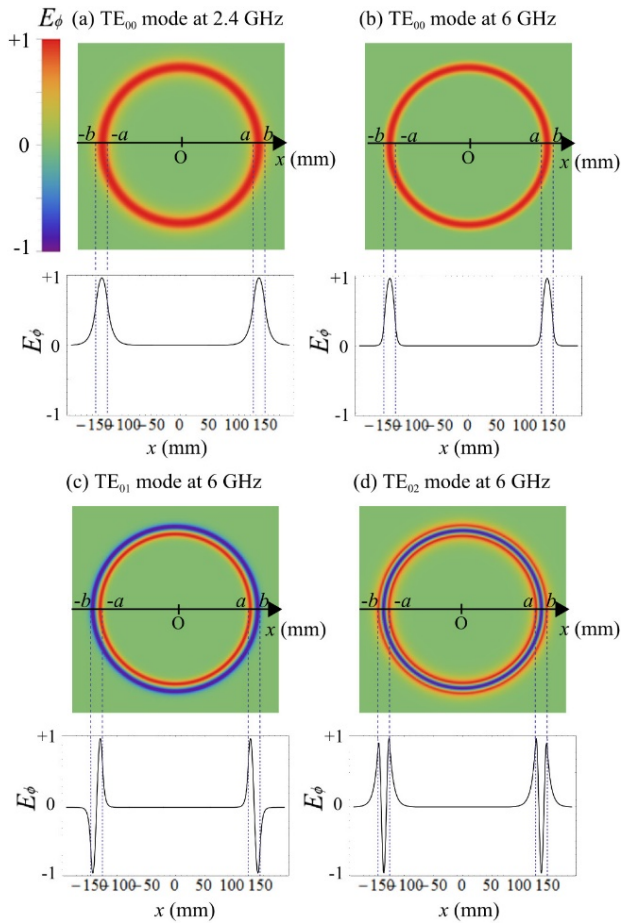


図4 TE導波モードの電界主成分 E_ϕ の分布
 (a) TE₀₀ 2.4GHz, (b) TE₀₀ 6GHz
 (c) TE₀₁ 6GHz, (d) TE₀₂ 6GHz

例として、誘電体円筒を厚さ $w=18\text{mm}$ 、内径 $2a=250\text{mm}$ ($b=143\text{mm}$) の FRPM 管 (比誘電率 $\epsilon_r=4$) として、FRPM 管の内側と外側が空気 ($\epsilon_r=1$) としたときの TE モードの分散曲線を図 3 に示す。TE モードは約 0.4~2.8 GHz において単一モード伝搬であることがわかる。

図 3 には、管壁厚さが同じで直径が 2 倍、4 倍 ($a=250\text{mm}$, 500mm) の FRPM 管における分散曲線も示した。これらの 3 つ FRPM 管の分散曲線は、カットオフ近傍を除いてほぼ重なっている。誘電体の厚さが同じであれば、内径が数倍程度変化しても分散特性はあまり変化せず、単一モード伝搬となる周波数範囲もほぼ同じである。したがって、管の厚さが同程度であれば、種々の直径の FRPM 管に対して同様な検査手法を適用できると考えられる。

周波数が 2.4 GHz および 6GHz のときの TE モードの電界分布を図 4(a)~(d) に示す。電磁界が誘電率の

高い FRPM にトラップされ、内側と外側の空気の領域にも浸み出した状態で伝搬することがわかる。それゆえ、FRPM 管の内部および表面状態によってマイクロ波出力信号が変化することが期待される。

4. マイクロ波伝搬特性評価実験

実際に、FRPM 管を用いてマイクロ波伝搬特性の評価実験を行った。実験系の全体図を図 5(a) に、入力端から見た詳細図を図 5(b) に示す。実験には、内径 250 mm、厚さ 18mm、長さ 1000mm の FRPM 管を用いた。

マイクロ波信号の入力および検出には市販の 2.4 GHz 用モノポールアンテナを用いた。入力側には、2 つあるいは 4 つのモノポールアンテナをそれぞれ FRPM 管の端面に沿って対称に配置して、各アンテナには同振幅・同位相のマイクロ波信号を供給した。このとき、各アンテナから放射されるマイクロ波の電場の方向を FRPM 管の円周方向に揃えて、TE モードを選択的に励振させるようにした。検出用のアンテナは、管の途中あるいは終端に置いた。ベクトルネットワークアナライザのポート 1 からの 1.5~4.5GHz のマイクロ波信号を入力側アンテナに供給し、検出用アンテナをネットワークアナライザのポート 2 に接続した。入力端から 100 mm の位置には FRPM 管の内側および外側に遮蔽板を設置して、自由空間を介した直接波の影響を排除した。

図 5(c) は、検出用アンテナを FRPM 管の終端に置いたときのマイクロ波の透過信号の周波数スペクトルである。参考のために、入力用・検出用アンテナと遮蔽板を固定して、FRPM 管のみを取り去った状態で測定した透過信号も示した。両者の測定信号レベルに 20dB 以上の差があることから、マイクロ波が FRPM 管に沿って伝搬すること、および FRPM 管におけるマイクロ波伝搬モードへの入力・結合とその検出が可能であることを確認することができた。

図 5(d) には、入力・検出用アンテナ間の透過係数の位相角から求めた伝搬モード実効屈折率の周波数依存性を示す。自由空間伝搬の場合 (分散なし) とは明瞭に異なる分散特性を示している。端面等による反射波の影響のために、求めた実効屈折率の値に多少のバラつきが見られるが、概ね理論曲線と一致する傾向を示している。これより、FRPM 管壁に沿うマイクロ波固有モードが励振されて実際に FRPM 管に沿って伝搬することを確認した。

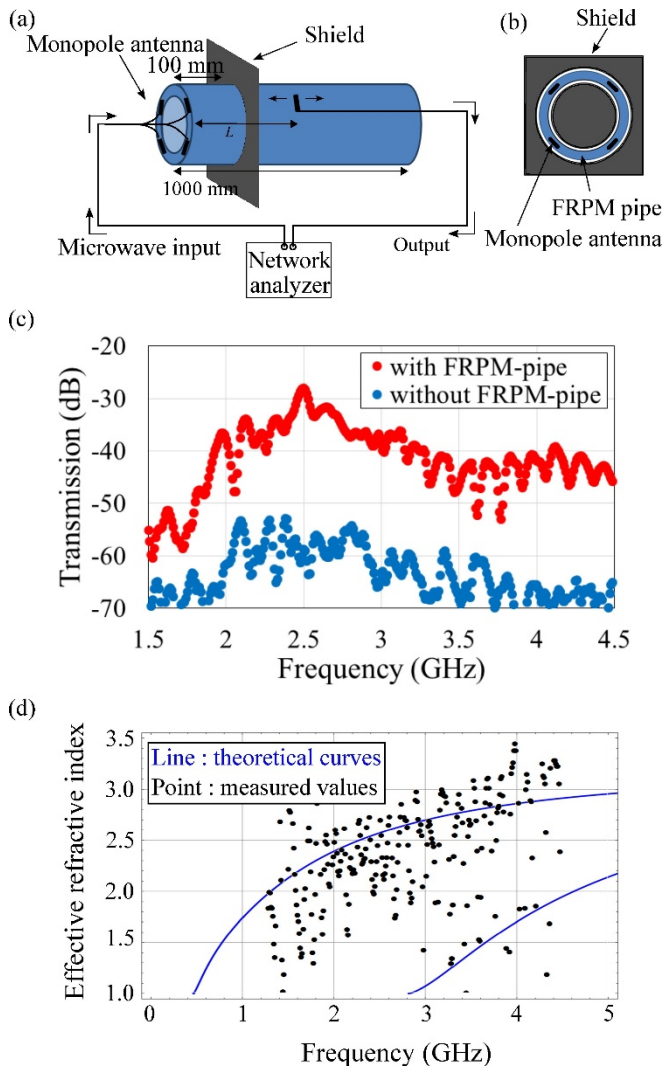


図5 FRPM管におけるマイクロ波伝搬評価実験
 (a) 実験系の全体図 (b) 入力端の詳細図
 (c) マイクロ波透過係数の周波数特性
 (d) 位相角から求めた実効屈折率の周波数特性

5. EO センサを用いた評価

さらに、EO センサを用いて、マイクロ波導波モードの電界分布を詳しく調べた。実験系を図 6(a)および(b)に示す。前節と同様に、ネットワークアナライザからのマイクロ波信号を、アンテナを用いてFRPM 管の一方の端面に入力し、TE モードを伝搬させた。そして、FRPM 管の反対側の端面に EO センサを設置して、出力端におけるマイクロ波の電界分布を測定した。実験には、内径 $a=250$ mm、厚さ $w=18$ mm、長さ $L=1000$ mm の FRPM 管を用いた。EO センサは精工技研株式会社製 CS-1210 を用いた。

測定においては、入力するマイクロ波信号周波数を固定して、EO センサを図 6(b)の x 軸方向に走査し

たときのセンサ出力信号強度を測定した。EO センサを走査してもマイクロ波透過特性にはほとんど影響を与えないと考えられるので、センサを走査することにより、出力端でのマイクロ波電界強度分布を求めることができる。

図 6 (c)および(d)に測定した強度分布を示す。TE₀₀ モードのみが伝搬可能である周波数 2.4 GHz においては、図 6 (c)に示す FRPM 管壁中央付近をピークとする単峰の分布が得られた。一方、TE₀₁ モードも伝搬可能な周波数 6 GHz においては、図 6 (d)のような 2 つのピークを持つ強度分布が得られた。図 6 (c)、(d) には、電磁界モード解析から求めた電界 TE₀₀、TE₀₁ モードの強度分布も示した。EO センサによる測定結果は、電磁界モードの解析から求めたものとよく一致することがわかる。したがって、EO センサを用いることにより、FRPM 管に沿って伝搬する導波モードを同定できることがわかった。

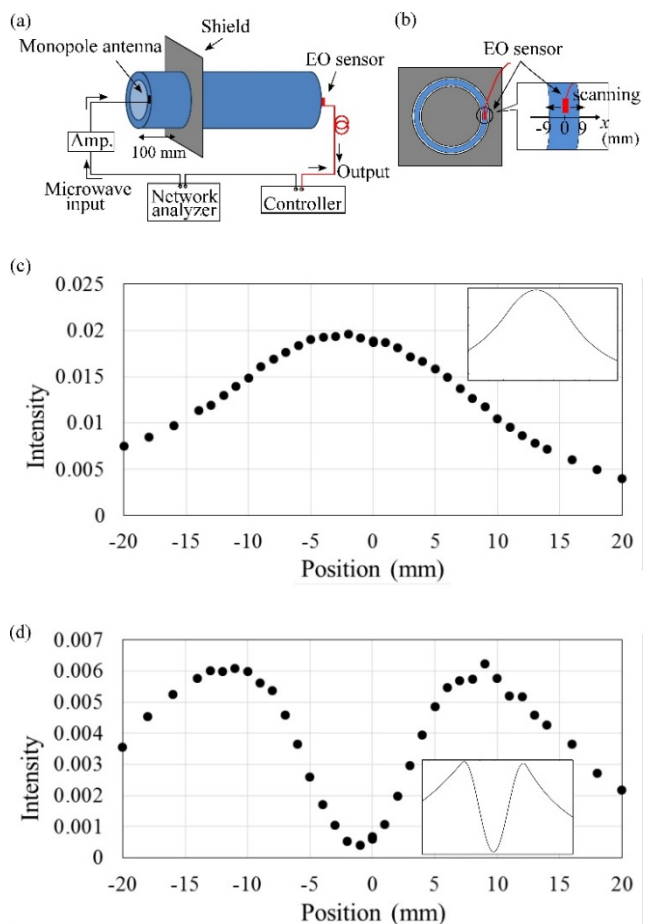


図6 EO センサを用いたマイクロ波伝搬特性評価
 (a) 実験系の全体図 (b) 出力端と EO センサ
 (c) 周波数 2.4GHz におけるマイクロ波電界強度分布
 (d) 周波数 6GHz におけるマイクロ波電界強度分布

6. むすび

マイクロ波固有伝搬モードと EO センサを用いた FRPM 管の新しい非破壊検査技術について紹介した。周波数 2~6GHz・波長 50~150mm のマイクロ波に対しては、厚さ~20mm の FRPM 管は比較的低損失な誘電体導波路であることを示した。適切なアンテナ等を用いてマイクロ波を入力・結合すれば、マイクロ波固有モードを FRPM 管壁に沿って伝搬させることができる。現在、種々の実験を続行中であり、伝搬特性が FRPM 管の内部や表面状態によってかなり変化することを確認しており、数 mm 程度の亀裂であれば検出可能との見通しを得ている。また、管壁表面の水分等による減衰・散乱がモードによって異なることを利用した診断方法も考えられる。

謝 辞

貴重な御意見・ご議論を頂いた大阪大学・塩見英久博士、産業技術総合研究所・黒川悟博士と廣瀬雅信博士に深く感謝します。また、実験で使用した EO センサを快くご提供頂いた精工技研・鳥羽良和博士にも深く感謝します。

文 献

- [1] A. Cataldo, G. Cannazza, E De Benedetto, and N. Giaquinto, "A TDR-based system for the localization of leaks in newly installed, underground pipes made of any material," *Meas. Sci. Technol.* vol. 23, pp. 1-9, September 2012.
- [2] 上野文聖, 村田博司, 岡村康行, 奥田忠弘, 裕昌也, "マイクロ波伝搬と光電界センサを用いた FRPM 管の非破壊検査", 秋季電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-14-9, 2014.
- [3] F. Ueno, H. Murata, T. Okuda, M. Hazama, and Y. Okamura, "New Nondestructive Measurement for Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar Pipes Using Microwave and Photonic Techniques," *MWP/APMP2014*, TuED-2. Oct. 2014.
- [4] K. Tajima, R. Kobayashi, N. Kuwabara, and M. Tokuda, "Development of optical isotropic E-field sensor operating more than 10 GHz using Mach-Zehnder interferometers," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E85-C, no.4, pp. 961-968, April 2002.