

光電界センサとマイクロ波伝搬モードを用いた FRPM 管の非破壊診断 およびクラックの検出

上野 文聖[†] 東 良幸[†] 村田 博司[†] 奥田 忠弘^{††} 裕 昌也^{††}
岡村 康行[†]

[†] 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 〒565-0456 滋賀県東近江市小八木町 1

E-mail: [†]fumiakiueno102@s.ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar (FRPM) 管に沿って伝搬するマイクロ波モードとその Electro-Optic (EO) センサによる精密測定を用いて, FRPM 管を非破壊で診断する新しい検査技術について報告する. 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. 本報告では, EO センサを掃引させることで, 欠陥の位置・大きさの同定が可能であることを明らかにした. 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 配管の非破壊検査技術として有効と考えられる.

キーワード 光電界センサ, マイクロ波伝搬モード, 非破壊検査, FRPM 管

Nondestructive Inspection and Crack Detection of FRPM Pipe Using Electro-Optic Sensor and Microwave Guided-Mode Propagation

Fumiaki UENO[†], Yoshiyuki AZUMA[†], Hiroshi MURATA[†], Tadahiro OKUDA^{††}, Masaya HAZAMA^{††},
and Yasuyuki OKAMURA[†]

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

^{††} Kurimoto Ltd. 1 Koyagi-cho, Higashi-Ohmi, Shiga 527-0108 Japan

E-mail: [†]fumiakiueno102@s.ee.es.osaka-u.ac.jp

Abstract In this report, a nondestructive inspection method for fiberglass-reinforced plastic mortar (FRPM) pipes using Electro-Optic(EO) sensor and microwave guided-mode propagation is presented. This method is based on the accurate measurement of microwave signals which are transmitted in/along the FRPM pipe-walls. We found that FRPM pipes of 250 ~ 1000 mm in diameter and 18 mm in thickness can be good cylindrical waveguides with single or a few guided modes for 1 ~ 6 GHz microwaves and that the microwave signal transmitted along a FRPM pipe is rather affected by defects or cracks in the FRPM pipe. In addition, we successfully identified the position and size of defects in FRPM pipes by scanning with an EO sensor. With accurate measurement of a transmitted microwave signal using an EO sensor, we can detect defects or cracks in FRPM pipes nondestructively.

Key words Electro-Optic sensor, Microwave guided-mode propagation, Nondestructive inspection, FRPM pipe

1. はじめに

近年, ライフラインを支える様々なインフラストラクチャが順次耐用年数を迎えることが問題となっている. 簡便に低コストで欠陥・劣化診断を行う技術の要求が高まっているが, 農業用水管や電力・通信用ケーブル保護管, 下水道管等に用いられ

ている Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar (FRPM) 管の効率的な非破壊検査技術は未だ確立されていない.

FRPM とは, ガラス繊維とプラスチック材料の複合材料である FRP とモルタルを組み合わせたもので, 軽量である上に機械的強度や耐腐食性が高いといった優れた特長を持っている. 元来, 機械的に堅牢で化学的に安定な FRPM は長寿命である

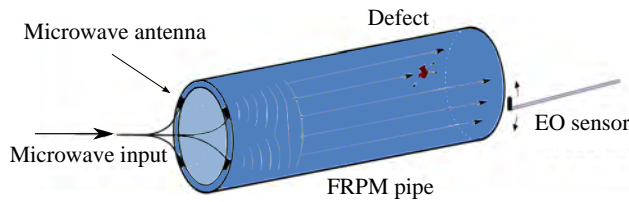


図1 マイクロ波を用いたFRPM管の非破壊検査方法の基本構成
Fig. 1 Basic scheme of the proposed inspection method.

ので、適切に診断・補修を行うことでさらに長い期間使用することができる。それゆえ、FRPM管は幅広い分野で利用されており、さらに現在ではいくつかのインフラ設備がFRPM製へ置き換えられつつある。例えば、農業用水管に用いられているFRPM管は、国内敷設距離がおよそ5万kmに達している。したがって、短時間で広範囲のFRPM配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、MRIやX線、超音波を用いた方法がある[3]~[5]。しかし、MRIやX線を用いた検査法では大型の設備が必要であり、埋設されたFRPM管を検査するには不向きである。また、超音波を用いた検査法では、被検査物の内部に超音波を十分に浸透させるために、表面にゲル状の物質を塗布することが望まれ、広範囲のFRPM管の診断には不向きである。加えて、径の小さいFRPM管を検査する場合には、中に人が入ることが困難であり、人手による検査が難しいといった問題がある。

そこで、我々は、FRPMがマイクロ波に対して損失の小さい誘電体 ($\epsilon_r = 4 \sim 16$, $\tan \delta \approx 0.01$) であることに着目した新しい検査手法を提案している[6]。FRPM管をマイクロ波に対する伝送路と考え、マイクロ波をFRPM管壁に沿って伝搬させる。そのマイクロ波の欠陥による伝搬特性の変化を測定することで、FRPM管を診断する方法である。この方法では、一度に数m~数10mのFRPM管の診断が期待できる。

このとき、小さな欠陥による伝搬特性の変化を正確に測定するには、マイクロ波信号を低擾乱で高精度に測定することが必要となる。LiNbO₃やLiTaO₃等の電気光学結晶を利用したEOセンサは、ほとんどの部品を非金属で構成できるので、低擾乱で電磁界計測が可能である[7]~[11]。また、EOセンサは、絶縁体である光ファイバを用いて信号を伝送できるので、外部からの電磁的ノイズの影響をほとんど受けず、精密な測定が実現できる。つまり、マイクロ波伝搬を用いたFRPM管診断では、EOセンサの利用が非常に有効であると考えられる。

本報告では、マイクロ波伝搬とEOセンサを用いたFRPM管の非破壊検査技術について述べる。第2節では、短時間で広範囲のFRPM管の診断が可能な非破壊検査方法を提案する。第3節では、FRPM管壁に沿って伝搬するマイクロ波モード解析について述べる。第4節では、マイクロ波伝搬モードとEOセンサを用いたFRPM管における欠陥同定実験についての結果を報告する。最後にまとめとする。

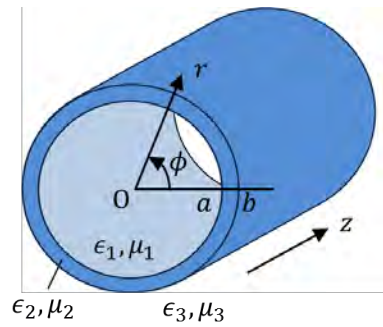


図2 解析モデル
Fig. 2 Structure of a hollow dielectric cylindrical waveguide.

2. マイクロ波伝搬とEOセンサを用いたFRPM管の非破壊検査

我々が提案する診断方法の基本構成を図1に示す。FRPM管をマイクロ波伝送路と考え、マイクロ波をFRPM管壁に沿って伝搬させ、欠陥・劣化による伝搬特性の変化を測定する方法である。入力側には、適切な構成のラインアンテナ等を用いて、マイクロ波(1~6GHz)のTEまたはTMモードを選択的に励振する。励振されたマイクロ波は、FRPM管壁中およびその表面に沿って伝搬する。伝搬後のマイクロ波を管の終端あるいは途中の適切な位置で測定することにより、入力端から測定位置付近までのFRPM管の情報を取得して、検査・診断を行うものである。伝搬後のマイクロ波信号の計測には、EOセンサと光ファイバを用いる。センサを自走ロボットに載せても良い。

マイクロ波が単一モード伝搬となる周波数帯を用いた場合、FRPM管中の欠陥によって散乱された電磁波は放射・散逸されるほかない。つまり、欠陥の有無を検出されるマイクロ波信号レベルの変化として捉えることができる。

多モード伝搬となる周波数帯を用いた場合、散乱された電磁波は、ほかのモードと結合し、散逸せずに伝送され、出力される可能性がある。このとき、検出されるマイクロ波出力のレベルはあまり変化しない。一方、小型であるEOセンサを用いれば、FRPM管に沿って伝搬するマイクロ波モードの電界分布を測定することができる。多モードを用いた場合では、モードによって電磁界の管壁外部への浸み出し量が異なるので、欠陥や表面状態によるモードへの影響が異なる。各モードの伝搬特性の変化量は、欠陥や表面状態の情報に対応したものになると考えられる。したがって、多モードで伝搬するマイクロ波の電界分布の変化を測定すれば、欠陥の同定が期待できる。さらに、モードの分離を行い、各モードの振幅や位相関係を計測すれば、より詳細なFRPM管の状態を把握できる可能性がある。つまり、単一モード伝搬、多モード伝搬を用いて得られる情報をそれぞれ組み合わせることで、FRPM管の新しい非破壊検査・診断技術として有効であると考えられる。

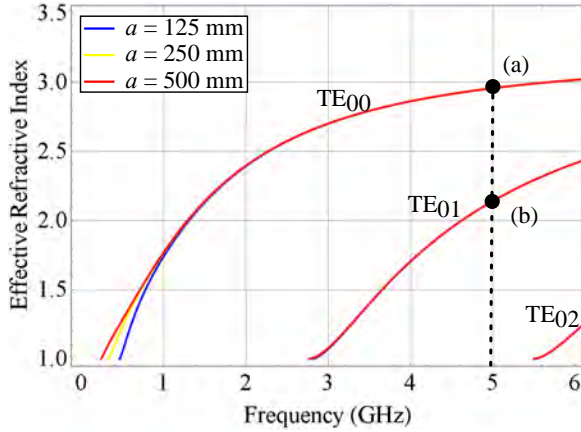


図3 TEモード分散曲線 ($a = 125, 250, 500$ mm, $w = 18$ mm)

Fig. 3 Frequency dependence of the effective refractive indices of first several TE_{0n} modes in the hollow dielectric cylindrical waveguide ($a = 125, 250, 500$ mm, $w = 18$ mm).

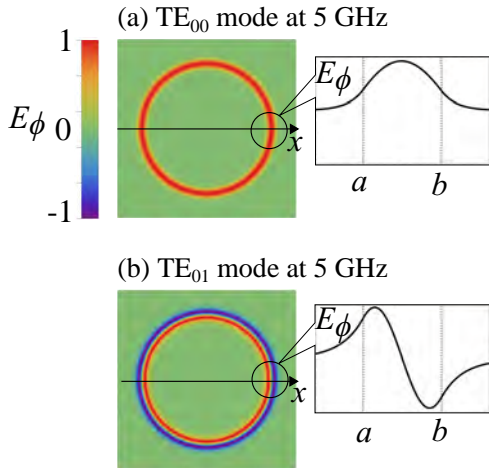


図4 周波数 5 GHz における電界 E_ϕ の分布: (a) TE_{00} モード, (b) TE_{01} モード ($a = 125$ mm, $w = 18$ mm).

Fig. 4 E_ϕ distributions of TE modes: (a) TE_{00} mode at 6 GHz, (b) TE_{01} mode at 6 GHz ($a = 125$ mm, $w = 18$ mm).

3. 誘電体円筒におけるマイクロ波伝搬モード解析

3.1 固有値方程式の導出

FRPM 管を図 2 に示すような誘電体円筒とみなし、マイクロ波の伝搬モード解析を行った。誘電体円筒とそのまわりの領域での誘電率と透磁率をそれぞれ次のようにおく。

誘電体の内側 ($r < a$)	ϵ_1, μ_1
誘電体部分 ($a < r < b$)	ϵ_2, μ_2
誘電体の外側 ($b < r$)	ϵ_3, μ_3

各媒質は等方、一様、線形で、媒質中に電荷、電流はないものとする。

誘電体円筒導波路は、内半径 a 、外半径 b の高屈折率のコア領域と、そのまわりの低屈折率のクラッド領域から成る。したがって、マイクロ波は 2 つのコア-クラッド境界面を、全反射を繰り返しながら伝搬することが可能と考えられる。

誘電体円筒に沿って伝搬するマイクロ波の時間因子を $e^{j\omega t}$ 、伝搬因子を $e^{-j\beta z}$ とすると、円筒座標系における Helmholtz 方程式は

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

で与えられる ($i = 1, 2, 3$)。

導波モードとして TE_{mn} モード ($E_z = 0, H_z \neq 0$) を考える。また、 $\partial/\partial\phi = 0$ (i.e. $m = 0$) と仮定する。 $r = 0, \infty$ で H_z が発散しないように式 (1) を解けば

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

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 は任意の定数である。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、 I_n は n 次の第 1 種変形ベッセル関数、 K_n は n 次の第 2 種変形ベッセル関数である。

電磁界の接線成分 H_z, E_ϕ は、境界 $r = a, b$ において連続でなければならない。この境界条件から係数 A, D を消去し、係数 B, C が自明解を持たない条件を求めると以下ようになる。

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

ここで

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

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

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

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

これが誘電体円筒に沿って伝搬する TE_{0n} モードの固有値方程式である。他の TE モードや TM モードについても同様にして固有値方程式を求めることができる。

3.2 分散曲線および界分布

一例として、図 2 の誘電体を FRPM ($\epsilon_2 = 10, \mu_2 = 1$)、その内側および外側が空気 ($\epsilon_1 = \epsilon_3 = 1, \mu_1 = \mu_3 = 1$) とする。このとき、 $a = 125$ mm, $b = 143$ mm, $w = 18$ mm とすると、 TE_{0n} モードの分散曲線は図 3 のようになる。図 3 より、およそ 0.5 ~ 2.8 GHz においてシングルモード伝搬であることがわかる。

周波数 5 GHz における FRPM 管に沿って伝搬するマイクロ波の電界分布を求めたものを図 4 (a) および (b) に示す。これらより、電磁界が FRPM の内側と外側の空気の領域に浸み出した状態で伝搬することがわかる。すなわち、FRPM 管の内部および表面の状態によって伝搬特性が変化することが期待される。

図 3 には、内半径 $a = 250, 500$ mm の場合の分散曲線も同様に示している。これより、誘電体の厚さが同じであれば、内

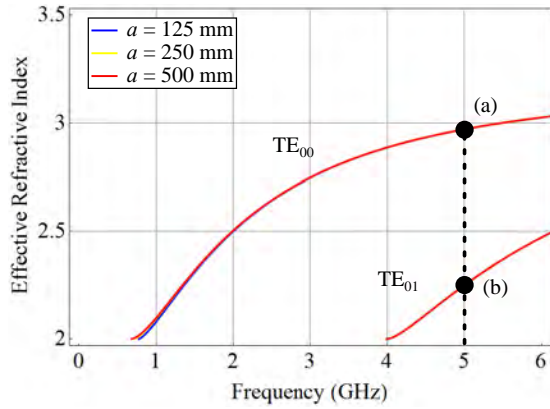


図5 地中埋設状況下での TE モード分散曲線 ($a = 125, 250, 500$ mm, $w = 18$ mm, $\epsilon_3 = 4$)

Fig. 5 Frequency dependence of the effective refractive indices of first several TE_{0n} modes in the hollow dielectric cylindrical waveguide ($a = 125, 250, 500$ mm, $w = 18$ mm, $\epsilon_3 = 4$).

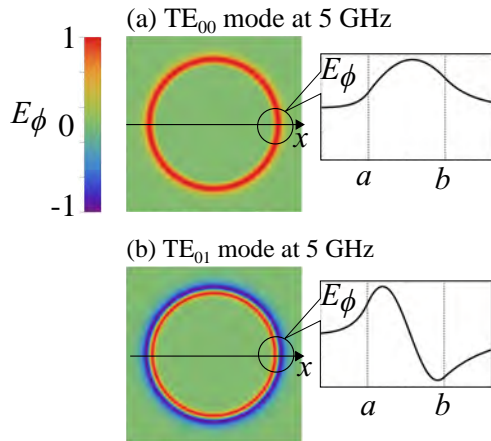


図6 地中埋設状況下での周波数 5 GHz における電界 E_ϕ の分布 : (a) TE_{00} モード, (b) TE_{01} モード ($a = 125$ mm, $w = 18$ mm) .
Fig. 6 E_ϕ distributions of TE modes for the buried pipe : (a) TE_{00} mode at 6 GHz, (b) TE_{01} mode at 6 GHz ($a = 125$ mm, $w = 18$ mm).

径が変化しても分散曲線にほとんど変化はなく、単一モード伝搬となる周波数範囲もほぼ同じである。つまり、本方法では、様々な径の FRPM 管に対応可能と考えられる。

もう一例として、地中埋設 FRPM 管を想定し、誘電体の内側を空気 ($\epsilon_1 = 1, \mu_1 = 1$)、外側を砂 ($\epsilon_3 = 4, \mu_3 = 1$)、誘電体を FRPM ($\epsilon_2 = 10, \mu_2 = 1$) とする [12]。このときの分散曲線を図 5 に示す。これより、およそ周波数 0.7 GHz 以上のマイクロ波は固有伝搬モードとして FRPM 管壁に沿って伝搬することがわかる。

また、周波数 5 GHz におけるマイクロ波の電界分布を求めたものを図 6 (a) および (b) に示す。前例と同様、電磁界が FRPM の内側と外側の空気の領域に浸み出した状態で伝搬することがわかる。また図 6 (a), (b) は図 4 (a), (b) と比較して、電界分布が高誘電率の外側に多く浸み出しており ($\epsilon_3 > \epsilon_1$)、妥当な結果が得られている。これらの結果より、地中埋設環境下においても、我々の提案する検査手法を用いて FRPM 管の診断を行うことが可能であると考えられる。

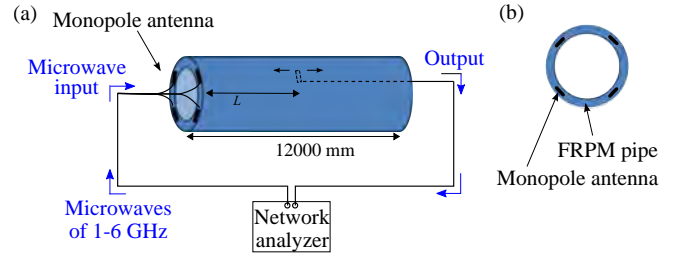


図7 実験系の概略図 (a), 入力端から見た実験系 (b)
Fig. 7 Experimental setup (a) and experimental setup viewed from the input end (b).

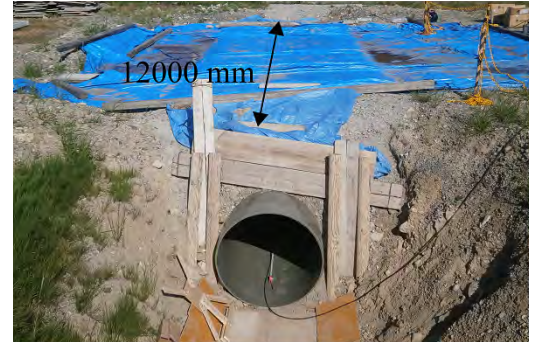


図8 地中埋設 FRPM 管 ($a = 500$ mm, $w = 18$ mm, $L = 12000$ mm)
Fig. 8 Buried FRPM pipes ($a = 500$ mm, $w = 18$ mm, $L = 12000$ mm) .

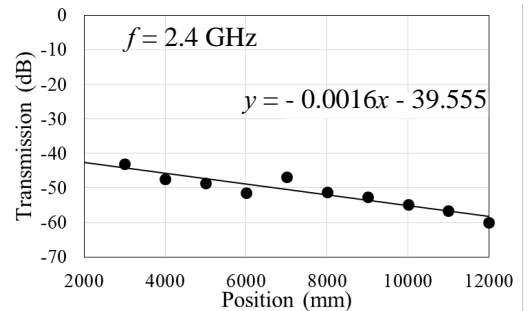


図9 地中埋設 FRPM 管におけるマイクロ波伝搬損失
Fig. 9 Measured transmission loss for the buried FRPM pipe.

4. 地中埋設 FRPM 管におけるマイクロ波伝搬実験

これまで、電波暗室における測定で、マイクロ波信号 (1 ~ 6 GHz) が FRPM 管壁に沿って伝搬すること、伝搬損失が周波数 2.4 GHz においておよそ 1.2 dB/m となることを明らかにした [6]。そこで、実際に地中埋設 FRPM 管におけるマイクロ波伝搬特性実験を行った。

FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波モードの伝搬損失の測定を行った。実験系の全体図を図 7 (a) に、入力端から見た詳細図を図 7 (b) に示す。ネットワークアナライザからのマイクロ波信号 (1 ~ 6 GHz) を、モノポールアンテナを用いて FRPM 管の端面に入力した。モノポールアンテナは図 7 (b) のように FRPM 管の断面に沿うように配置し、電場の振動方向を周方向にすることで、選択的に TE モードのマイクロ波を励振させた。受信アンテナは FRPM 管の内表面に設置して、1000

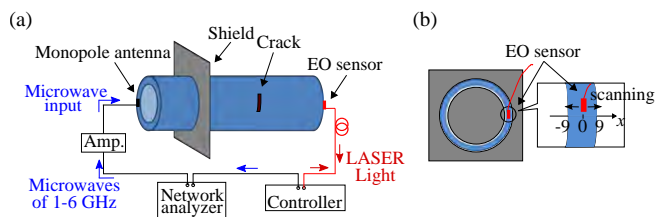


図 10 EO センサを用いたマイクロ波伝搬モードの電界強度分布測定の実験系 (a), 出力側から見た実験系 (b),
Fig. 10 Experimental setup (a) and experimental setup viewed from the output end (b).

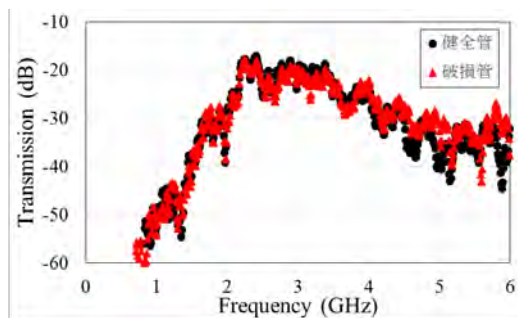


図 11 FRPM 管 ($a = 125$ mm, $w = 18$ mm, $L = 1000$ mm) におけるマイクロ波透過率
Fig. 11 Measured microwave transmission along FRPM pipes ($a = 125$ mm, $w = 18$ mm, $L = 1000$ mm).

mm ずつ管軸方向に移動させて、マイクロ波透過率を測定した。実験には、図 8 に示すような内径 1000 mm, 管厚 18 mm, 管長 12000 mm の地中埋設 FRPM 管を用いた。

図 9 に、測定した周波数 2.4 GHz におけるマイクロ波信号レベルの伝搬距離依存性を示す。これより、周波数 2.4 GHz において伝搬損失はおよそ 1.6 dB/m と求まった。地中埋設管においては、予想通り、砂の水分によりマイクロ波の伝搬損失が実験室での測定値と比較して大きくなったが、雑音信号レベルが -70 dB 程度であることから、マイクロ波信号は地中埋設 FRPM 管においても 10 m 以上伝搬可能であると確認できる。つまり、地中埋設 FRPM 管においても、1 度の検査で広範囲を診断できることが期待される。

5. マイクロ波伝搬モードと EO センサを用いた欠陥同定実験

5.1 マイクロ波伝搬特性

図 10 (a) および (b) に示す実験系を用いて、FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波の特性を詳しく測定し、破損管と健全管の比較を行った。前節と同様に、ネットワークアナライザからマイクロ波信号 (1 ~ 6 GHz) を、モノポールアンテナを用いて FRPM 管端面に入力し、TE モードを励振して伝搬させた。もう一方の端面には EO センサ (精工技研 CS1210) を FRPM 管壁中央 ($x = 0$) に設置し、マイクロ波伝搬特性を測定した。さらに、図 10 (b) のようにセンサの位置を半径方向に走査して、出力端におけるマイクロ波の電界分布を測定した。送信端から 100 mm の位置には、FRPM 管の内側と外側に遮蔽

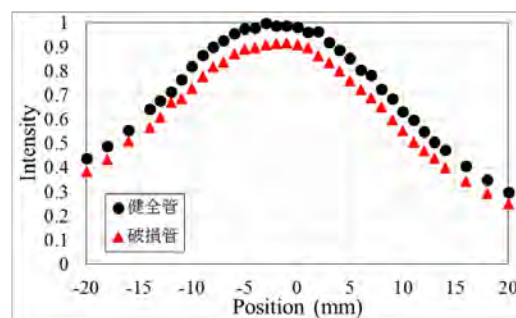


図 12 周波数 2.4 GHz におけるマイクロ波電界強度分布
Fig. 12 Measured distributions of microwave field at 2.4 GHz at the end of the normal/damaged pipe.

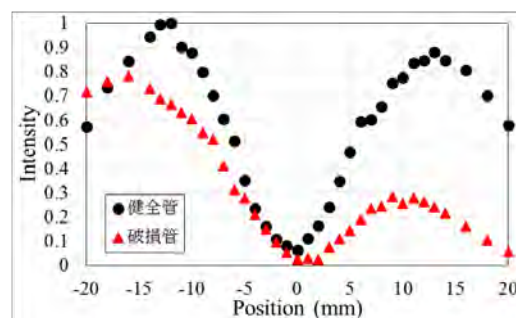


図 13 周波数 6 GHz におけるマイクロ波電界強度分布
Fig. 13 Measured distributions of microwave field at 6 GHz at the end of the normal/damaged pipe.

板を設置し、直接波の影響を十分低減させた。試料には、内径 250 mm, 厚さ 18 mm, 長さ 1000 mm の破損管および健全管を用いた。

図 11 に、EO センサを FRPM 管壁中央 ($x = 0$) に設置したときのマイクロ波伝搬特性を示す。図 11 より、両者に明らかにマイクロ波伝搬特性に差が生じていることが確認できる。

また、図 12 および図 13 に、出力端において EO センサの位置を半径方向に走査して測定した周波数 2.4 GHz および 6 GHz におけるマイクロ波電界強度分布をそれぞれ示す。図 12 において、破損管に対してマイクロ波信号レベルが低下していることが確認できる。マイクロ波が単一モード伝搬となる周波数 2.4 GHz のマイクロ波を用いた場合、FRPM 管中の欠陥によって散乱されたマイクロ波は放射・散逸されるほかないことが原因であると考えられる。

図 13 においては、伝搬するマイクロ波モードの分布が明らかに変化していることが確認できる。これは、マイクロ波が多モード伝搬となる周波数 6 GHz のマイクロ波を用いているため、欠陥によりモード結合が生じたことが原因だと考えられる。これらの結果より、マイクロ波伝搬と EO センサを用いて FRPM 管の非破壊診断が可能であると考えられる。

5.2 欠陥位置の特定

EO センサをクラック周辺で 2 次元走査し、FRPM 管の外表面でのマイクロ波電力の 2 次元分布の測定を行った。実験系を図 14 に示す。実験には、内径 250 mm, 管厚 18 mm, 管長 1000

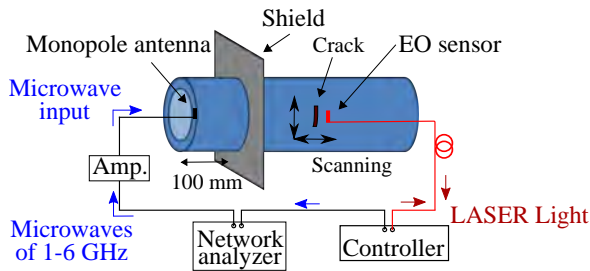


図 14 欠陥同定実験系の概略図

Fig. 14 Experimental setup.

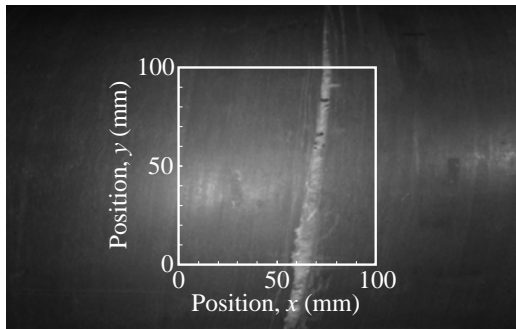


図 15 欠陥の様子

Fig. 15 Crack.

mm の FRPM 管を用いた。前節と同様に、ネットワークアナライザからマイクロ波信号 (3 ~ 5 GHz) を、モノポールアンテナを用いて FRPM 管端面に入力し、TE モードを励振して伝搬させた。図 15 の白枠内において、管軸方向に関して 5 mm 間隔、周方向に関して 10 mm 間隔で EO センサを走査し、マイクロ波電力の 2 次元分布の取得を行った。

実験においてコヒーレンスの高い信号を用いた場合、FRPM 管端面等で生じる不要な共振・干渉が FRPM 管壁内で起こると考えられる。この状態下で、EO センサを管軸方向に掃引し、マイクロ波の測定を行った場合、欠陥付近以外でもマイクロ波の不要な共振・干渉の様子が観測され、欠陥によるマイクロ波の反射・散乱の情報が埋もれ、欠陥の同定が困難となる可能性がある。そこで、不要な共振・干渉の影響を避けるために、図 15 の白枠内の各点 ($\Delta x = 5 \text{ mm}$, $\Delta y = 10 \text{ mm}$) において、周波数 3 ~ 5 GHz のマイクロ波に対する透過率を測定して、それらを周波数軸上で平均化したものを各点での透過率とした。

測定結果を図 16 に示す。欠陥の位置は点線で示してある。図 16 より、FRPM 管壁を伝搬するマイクロ波の強度は、クラックの直前で低下し、クラックの直上で上昇していることがわかる。これは、クラックによってマイクロ波が同相で反射・散乱され、進行波と干渉したことが原因であると考えられる。つまり、FRPM 管をマイクロ波伝送路として考えた場合、クラックによってインピーダンスが容量性へ変化し、マイクロ波信号が容量性反射されたことが原因であると言える。

図 17 には、 $y = 20 \text{ mm}$ におけるマイクロ波電力分布を図 16 から抽出したものを示した。比較のために、健全管においても同様に EO センサを走査して、測定したマイクロ波電力分布の結果も併せて記載した。図 17 より、クラックのない健全管に

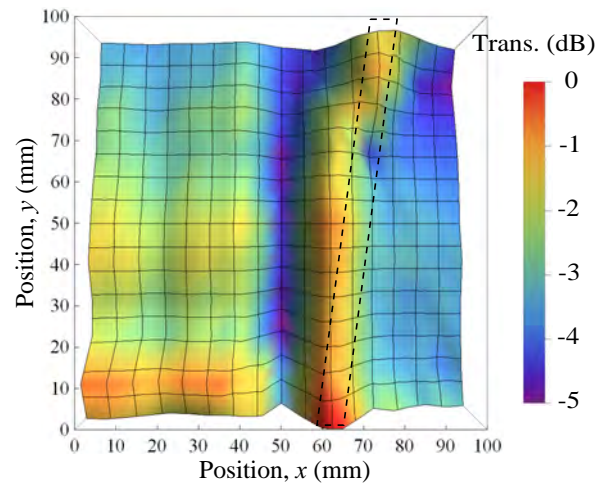


図 16 破損管の欠陥周辺におけるマイクロ波電力の 2 次元分布

Fig. 16 Measured two-dimensional distribution of microwave field for the damaged FRPM pipe using the EO sensor.

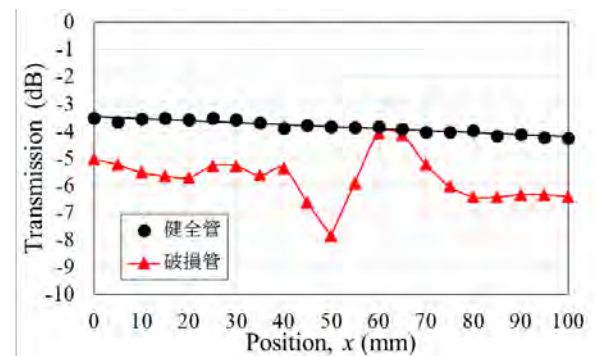


図 17 $y = 20 \text{ mm}$ におけるマイクロ波電力分布

Fig. 17 Measured distribution of microwave field for the damaged FRPM pipe along $y = 20 \text{ mm}$ using the EO sensor.

においては、マイクロ波が伝搬するにつれ信号レベルが減少していることがわかる。つまり、マイクロ波が伝搬損失している様子が観測されており、妥当な結果が得られた。これらの結果より、EO センサを走査させることでクラックの位置・大きさまでもが同定可能であることがわかった。

6. むすび

マイクロ波伝搬と EO センサを用いた FRPM 管の新しい非破壊検査技術と欠陥同定実験について述べた。誘電体円筒におけるマイクロ波伝搬モードの解析から、マイクロ波が FRPM 管壁内部とその近傍に集中して伝搬することを明らかにした。また実験により、FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波特性および電界強度分布の変化を測定することで欠陥を同定できることを確認した。さらに、EO センサを FRPM 管表面において走査することで、FRPM 管の欠陥の詳しい位置・大きさの同定に成功した。

今後は、より詳細な解析を進めるとともに、FRPM 管内からの測定で FRPM 管の欠陥および表面状態の同定を行っていく予定である。また、フィールドでの埋設した破損 FRPM 管におけるマイクロ波伝搬特性評価実験も進める予定である。

謝辞

電磁界解析および測定評価実験において、貴重な御意見を頂きました大阪大学・塩見英久博士と井上敏之博士、産業技術総合研究所・黒川悟博士と廣瀬雅信博士に感謝致します。また、EO センサをご提供頂いた精工技研・鳥羽良和博士にも感謝致します。

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] S. Uribe, N. Nakamura, H. Ogi, and M. Hirao, "Mode Conversion of SH Guided Waves at Defects for Pipeline Inspection," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol.1096, no.1, pp.1550-1557, 2009.
- [3] E. Marfisi, C. J. Burgoyne, L. D. Hall, and M. H. G. Amin, "Use of MRI Technique to Study Concrete and FRP Reinforced Concrete Behaviour," *Research Leading to the Development of Design Guidelines for the Use of FRP in Concrete Structures - 2nd ConFibreCrete Young Researchers Conference*, Corfu, Greece, June 2002.
- [4] A. Kamal, and M. Boulfiza, "Durability of GFRP Rebars in Simulated Concrete Solutions under Accelerated Aging Conditions," *Journal of Composites for Construction*, Vol.15, No.4, pp.473-481, August 2011.
- [5] Y. Yokono, S. Matsubara, S. Matsui, M. Kitajima, H. Yabushita, S. Utoyama, and N. Wakita, "Air-coupled Ultrasonic Inspection Technique for FRP Structure," *Asia-Pacific Conference on NDT*, 2006.
- [6] 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," *Proc. MWP/APMP2014, TuED-2*, pp.371-374, October 2014.
- [7] M. Hirose, S. Kurokawa, M. Ameya, and K. Komiyama, "Near-field Antenna Measurements Using Photonic Sensor of Mach-Zehnder Interferometer," *International Journal of Antennas and Propagation* 2012, 2012.
- [8] L. Xiaohu, H. Ota, S. Arakawa, K. Arai, and R. Sato, "Measurement of Electric Near Field Distribution by Optical Electric Field Probe," *Proc. EMC'04/Sendai 1C5-1*, pp.157-160, June 2004.
- [9] H. Togo, N. Shimizu, and T. Nagatsuma, "Tip-on-fiber Electro-optic Probe for Near-field Measurement," *NTT Technical Review*, vol.4, no.1, January 2006.
- [10] H. Togo, "Metal-free Electric-field Probe based on Photonics and its EMC Applications," *Proc. EMC'14/Tokyo 16P3-H2*, pp.662-665, May 2014.
- [11] R. Zeng, B. Wang, and B. Niu, "Development and Application of Integrated Optical Sensors for Intense E-field Measurement," *Sensors*, Vol.12, no.8, pp.11406-11434, 2012.
- [12] O. P. N. Calla, M. C. Borah, P. Vashishtha, R. Mishra, A. Bhattacharya, and S. P. Purohit, "Study of the properties of dry and wet loamy sand soil at microwave frequency," *Indian Journal of Radio and Space Physics*, Vol.28, No.3, pp.109-112, June 1999.