

マイクロ波伝搬と EO センサを用いた FRPM 管の診断技術

上野 文聖[†] 村田 博司[†] 奥田 忠宏[‡] 碓 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 マイクロ波伝搬と EO センサを用いた Fiberglass-reinforced plastic mortar (FRPM) 管の新しい非破壊検査技術について報告する. FRPM 管を短時間で広範囲に診断するために, 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測定する方法を提案する. 直径 250 ~ 1000 mm, 厚さ 20 mm の FRPM 管は, 周波数 1 ~ 10 GHz のマイクロ波に対してシングルモードあるいは高々数個の伝搬モードのみが存在する伝送路であることを見出した. 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, 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 センサを用いて高精度なマイクロ波測定を行えば, 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 パイプ

New Nondestructive Measurement for Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar Pipes Using Microwave Propagation and Electro-optic Sensors

Fumiaki UENO[†] Hiroshi MURATA[†] Tadahiro OKUDA[‡]

Masaya HAZAMA[‡] and Yasuyuki Okamura[†]

[†] 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: [†] fumiakiueno102@s.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. We found that FRPM pipes of 250~1000 mm in diameter and 20 mm in thickness can be a good cylindrical waveguide with single or a few guided modes for 1~10 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 expect to be able to detect defects or problems in FRPM pipes nondestructively.

Keywords Microwave, Waveguide, Nondestructive Inspection, Electro-optic Sensor, Dipole Antenna, 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[1]. 定期的に低コストで欠陥・劣化診断を行うことが求められているが, 農業用水管や電力・通信ケーブル保護管, 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う優れた特徴を持っている. 機械的に堅牢で科学的に安定な

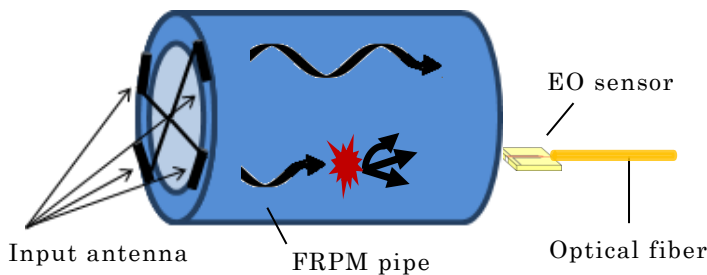


図1 検査方法の概略

FRPM は欠陥・劣化部のみを補修すれば、まだまだ使用することができる。

FRPM 管は幅広い分野で利用されており、例えば、農業用水管に用いられているものは、総延長距離約 5 万 km に達している。したがって、短時間で広範囲の 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、MRI や X 線を用いた方法がある。しかし、これらの検査法では大型の設備が必要であり、埋設された FRPM 管を調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る。加えて、径の小さい管の場合には中に人が入ることが困難であり、検査を行いにく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 ($\epsilon_r = 4 \sim 16$, $\tan \delta \sim 0.01$) であることに着目した新しい検査手法を提案する [2][3]。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。FRPM 管に欠陥や表面状態の乱れがあると、マイクロ波伝搬特性が変化する。この変化を測定することで FRPM 管の非破壊診断ができる。この方法では、一度に数 m ~ 数 10 m の FRPM 管の検査・診断が期待できる。

また、小さな欠陥を特定するには高精度なマイクロ波信号の測定が必要となる。LiTaO₃ 等の電気光学効果を利用した EO センサは、ほとんどの部品を非金属で構成できるので、低擾乱な電磁界センサを実現できる。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、精密な測定が可能である [4]。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測定結果、および 2.4 GHz 帯

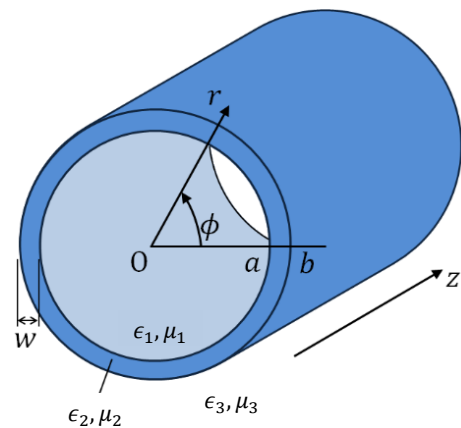


図2 解析モデル

で動作するダイポールアンテナ・コプレーナストリップ線路結合型 EO センサの解析・設計について報告する。

2. マイクロ波伝搬を用いた非破壊検査

我々が提案する診断方法の概略を図 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。マイクロ波の伝搬モードが単一となるようにする。このとき、単一モード線路では、線路中の欠陥等で散乱された電磁波は放射・散逸するよりほかない。一方、多モード線路においては、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。この場合、検出されるマイクロ波出力はあまり変化しない。したがって、マイクロ波を単一モードで伝搬させることが重要となる。

3. マイクロ波伝搬モード解析

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。ここで、各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 ($r < a$)	$\epsilon_1, \mu_1,$
誘電体部分 ($a < r < b$)	$\epsilon_2, \mu_2,$
誘電体の外側 ($b < r$)	ϵ_3, μ_3

また、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。

このとき、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、円筒座標系の Helmholtz 方程式は

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

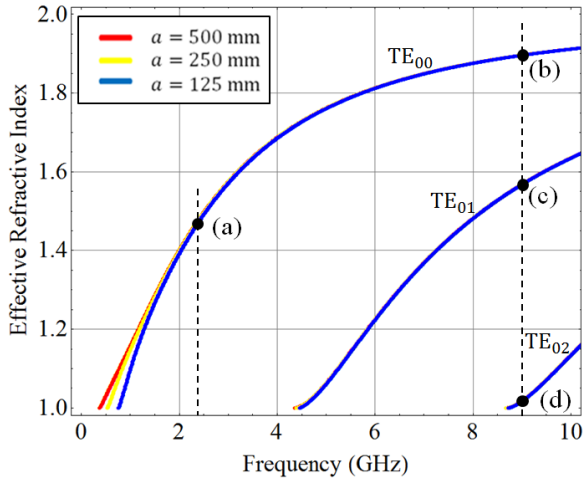


図3 TEモード分散曲線 ($a = 125, 250, 500$ mm)

で与えられる ($i = 1, 2, 3$).

導波モードを TE_{mn} モード ($E_z = 0, H_z \neq 0$) とし、 $\partial/\partial\phi = 0$ ($m = 0$) と仮定すると、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

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

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

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

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

これが誘電体円筒に沿って伝搬する TE モードの固有値方程式である。

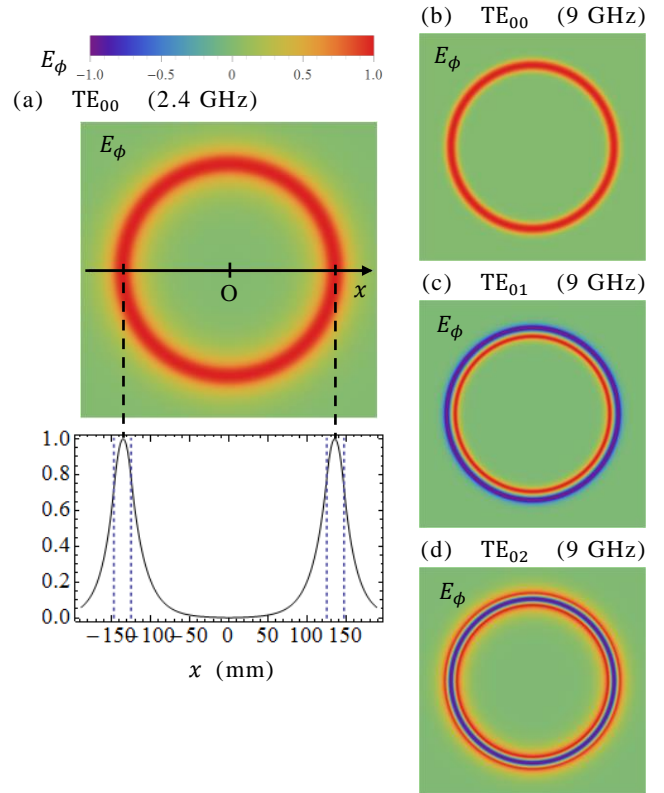


図4 電界分布

一例として、 $a = 125$ mm, $b = 145$ mm, $w = 20$ mm, 誘電体の内側と外側を空気、誘電体を FRPM とすると、 $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 1, \epsilon_2 \sim 4$ である。このときの分散曲線を図3に示す。図3より、0.75~4.5 GHz においてシングルモード伝搬であることがわかる。特に周波数が 2.4 GHz 帯のマイクロ波は、免許不要で用いることができるため、フィールド等において FRPM 管の非破壊検査を行う際に有利と考えられる。

周波数が 2.4 GHz のときについて、誘電体円筒に沿って伝搬する電磁界の分布を求めたものを図4(a)に示す。図4(a)より、電磁界が誘電体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、誘電体円筒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想定される。

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

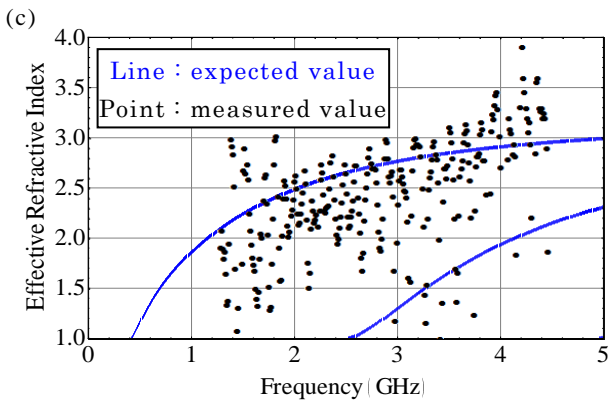
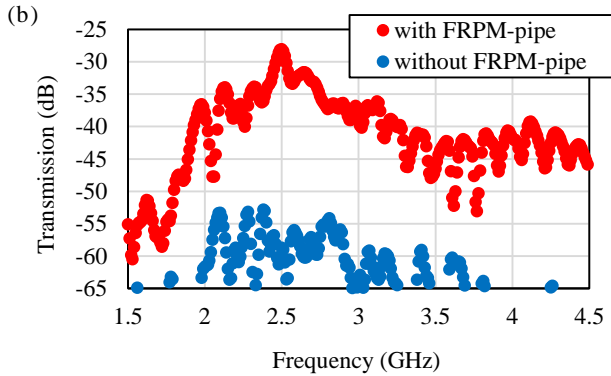
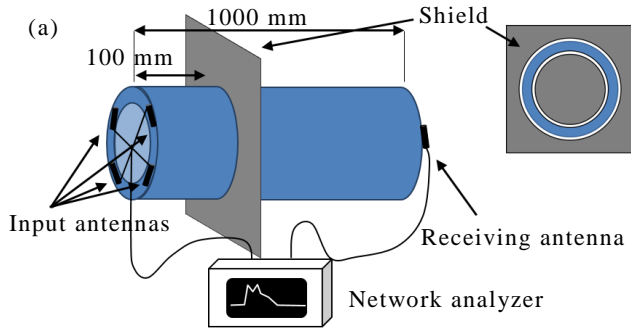


図5 (a)実験系, (b)透過率の周波数依存性, (c)実効屈折率の周波数依存性

4. マイクロ波伝搬特性評価

図5(a)に示す実験系を用いて、マイクロ波がFRPM管壁に沿って伝搬するかどうかを詳しく評価した。試料には、内径250mm、厚さ20mm、長さ1mのFRPM管を用いた。マイクロ波の送信・受信には2.4GHz用モノポールアンテナを用いた。送信側には2つあるいは4つのモノポールアンテナをそれぞれ

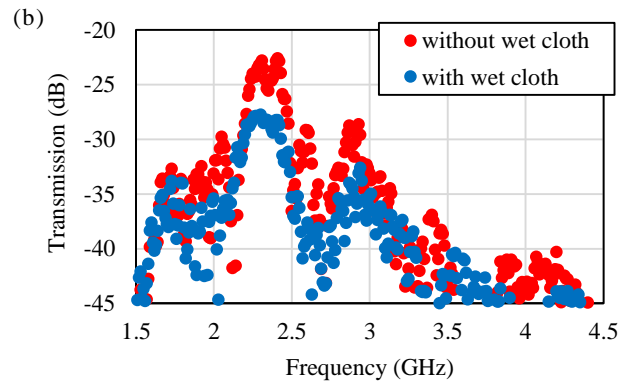
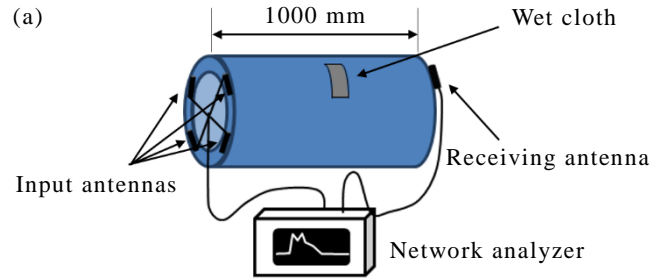


図6 (a)実験系, (b)透過率の周波数依存性

れ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、選択的にマイクロ波をTEモードで励振させた。送信アンテナから100mmの位置に、FRPM管の内側と外側に遮蔽板を設置し、周波数1.5~4.5GHzのマイクロ波を伝搬させた。図5(b)に、FRPM管を置いた場合と置かない場合の伝搬特性の測定結果を示す。図5(b)より、明らかに透過率が減少していることが確認でき、マイクロ波がFRPM管壁に沿って伝搬していると考えられる。図5(c)に、実効屈折率の周波数依存性を示す。理論曲線と概ね一致しており、モード分散の特性が表れていると考えられる。

さらに、図6(a)に示す実験系を用いて、FRPM管の表面状態によるマイクロ波伝搬特性の変化を評価した。測定結果を図6(b)に示す。周波数2.4GHz付近で明らかに透過率に差が生じていることが確認できる。マイクロ波は水分があると大きく減衰するので、この影響を受けたと考えられる。伝搬モード解析からマイクロ波はFRPM管の外側にも浸み出していると考えられるので、妥当な結果であると言える。

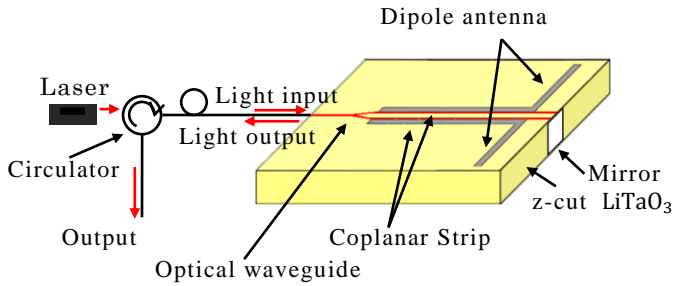


図 7 デバイスの基本構造

5. EO センサ

5.1. デバイス構造

デバイスの基本構造を図 7 に示す. z-cut LiTaO_3 基板上でアンテナ電極と変調電極を結合させた構造となっている. この構造を用いることで, アンテナで受信した測定対象電界によって変調電極上に変調電界が誘起される. また, 変調電極において測定対象となる信号の周波数付近で定在波共振が生じるように設計することで, 信号検出感度を高めることができる.

光導波路は折り返しマッハツェンダ型とし, マッハツェンダ型光導波路の 2 本の直線光導波路の上部に変調電極を作製する. センサに入力された光波は, 入力側の Y 型分岐光導波路で 2 等分される. 等分された光波は, 2 本の直線光導波路をそれぞれ伝搬する. 片側の直線光導波路を伝搬する光波は, 外部電界によって $\Delta\phi$ の位相変調を受ける. このとき, もう一方の直線光導波路を伝搬する光波は, $-\Delta\phi$ の位相変調を受ける. したがって, プッシュプル光変調動作が得られるため, 効率の良い光変調を行うことができる.

アンテナには半波長ダイポールアンテナを用いた. この半波長ダイポールアンテナは使用する金属の面積・体積が小さく, 被測定電界への擾乱が小さいと考えられる.

5.2. 解析・設計

アンテナで受信された信号を効率良く共振型電極に供給するためには, アンテナと共振型電極の接続部分でインピーダンス整合をとることが重要である. そこで, 3次元電磁界シミュレータ HFSS を用いて解析を行った. 設計周波数は 2.4 GHz とした.

図 8(a)に, アンテナ電極上部から 2.4 GHz の x 偏波平面波を照射したときの電極表面における電界分布を示す. これより, 共振型電極上に強い定在波電界が誘起されていることが確認できる. 得られたア

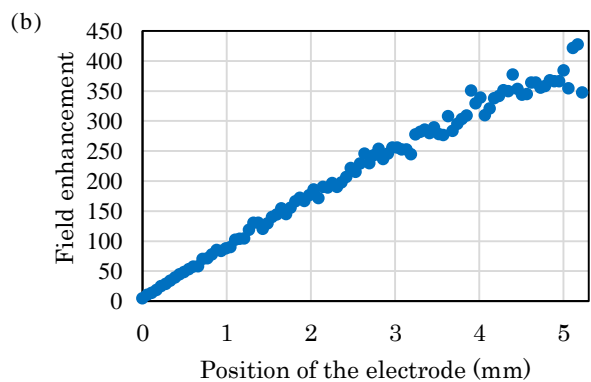
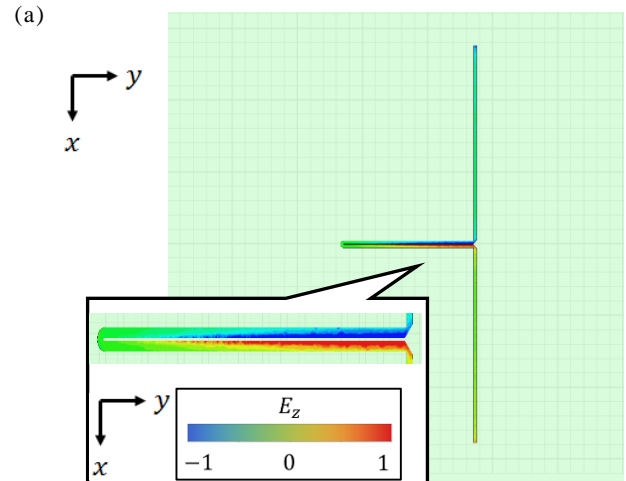


図 8 (a)電極表面の電界分布 (周波数 2.4 GHz), (b)共振型電極のエッジでの電界分布

表 1 設計したアンテナ電極のパラメータ

Operation frequency	2.4 GHz
Al metal thickness	1 μm
z-cut LiTaO_3 relative permittivity, (ϵ_{rx} , ϵ_{ry} , ϵ_{rz})	(43, 43, 41)
z-cut LiTaO_3 thickness	400 μm
Dipole antenna length	14 mm
Resonant electrode length	5.3 mm
Resonant electrode separation	30 μm
Resonant electrode width	100 μm

ンテナ電極の設計パラメータを表 1 に示す.

図 8(b)に, 共振型電極のエッジ部分での定在波変調電界 E_z の分布を示す. これより, 変調電極上において, 照射電界に対して 400 倍もの変調電界が得られることがわかる. したがって, 高感度な EO センサが実現することが期待される.

6. むすび

マイクロ波伝搬と EO センサを用いた FRPM 管の非破壊検査法を提案した。マイクロ波が FRPM 管壁に沿って伝搬し、表面状態によって伝搬特性に変化が生じることを確認した。

また、マイクロ波の高精度計測に向けて、EO センサの設計も行った。現在、設計した EO センサの試作・評価実験を進めている。

謝 辞

電磁界モードの解析および測定評価実験、EO センサの解析において、貴重な御意見を頂きました大阪大学・塩見英久博士、北谷和弘博士および産業技術総合研究所・黒川悟博士、廣瀬雅信博士に深く感謝致します。

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] 奥田忠弘, 間宮聡, 村田博司, 岡村康行, 裕昌也, 藤本光伸, "FRPM 管の非破壊診断," 第 58 回 FRP 総合講演会・展示会 (FRP CON-EX), 2013.
- [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.