

# 第1回 光応用電磁界計測研究会プログラム

テーマ：「新しい光応用電磁界計測技術の動向と展望」

2016年 7月 1日（金）

[セッション PEM-1] 13:00 ~ 15:15

PEM2016-1 [招待講演] 原子共鳴を利用した磁気勾配および磁気ベクトルセンサの基礎検討

五箇繁善, 生天目雄馬, 前田 亮, 千葉崇人 (首都大)

PEM2016-2 [依頼講演] 自由走査式による電磁界分布可視化システム

佐藤 健 (八戸高専), 斎藤 匠, 塚原智也, 上村佳嗣 (宇都宮大)

PEM2016-3 [依頼講演] 光電界センサを用いた中間周波数帯利用機器近傍の電界測定

和氣 加奈子, チャカロタイ ジェドウィスノプ (NICT),  
有馬 卓司, 宇野 亨 (農工大), 渡辺 聡一 (NICT)

[セッション PEM-2] 15:30 ~ 17:00

PEM2016-4 [一般講演] 変動磁界中における光学的な超音波測定方法に関する予備的検討

吉野 創, 鈴木敬久 (首都大)

PEM2016-5 [一般講演] 双方向光ファイバリンクモジュールを用いた EMI 測定用アンテナの特性測定

黒川 悟 (産総研), 鳥羽良和, 一條 淳 (精工技研), 廣瀬雅信, 余 元峰 (産総研)

PEM2016-6 [一般講演] FRPM 管におけるマイクロ波伝搬・散乱特性の E0 センサを用いた評価

東 良幸, 上野文聖, 村田博司 (阪大), 奥田忠弘, 碓 昌也 (栗本鐵工), 岡村康行 (阪大)

場 所： 首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス

主 催： 電子情報通信学会 光応用電磁界計測時限研究専門委員会

( <http://www.ieice.org/~pem/> )

協 賛： 森田テック株式会社

本予稿集に掲載された論文等の著作権は著者に帰属します。

発行年月日：2016年 7月 1日

発行所：(一社)電子情報通信学会

光応用電磁界計測(PEM)時限研究専門委員会

## PEM 研究会 特別講演

# 原子共鳴を利用した磁気勾配および磁気ベクトルセンサの基礎検討

五箇 繁善 生天目 雄馬 前田 亮 千葉 崇人

首都大学東京 理工学研究科 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

E-mail: goka@tmu.ac.jp

**あらまし** 原子共鳴を利用した磁場勾配および磁場ベクトルセンサに関する新たな測定法に関して報告する。これまでの磁気勾配計測は、複数の磁気センサを必要とする離散的な測定か、測定区間内において磁気センサを移動させる等の方法であった。本提案法では、アルカリガスを封入したガスセルを用意し、このガスセル内の磁場分布を原子共鳴の重ね合わせとして計測する。したがって、区間内の磁場勾配が単調性を有する場合には連続的な計測が可能となる。次に、1本のレーザー光により、直線偏光および円偏光を変えることで磁場ベクトルを推定する方法を報告する。磁場により生じるゼーマン副準位の強度分布から磁場ベクトルを推定する。基礎的な測定結果より、並行光では  $B_x$ ,  $|B_y|$ ,  $|B_z|$  と 2 軸の絶対値が外せないが、少し拡散するレーザー光を用いることで 3 軸計測が可能であろうことも報告する。

**キーワード** 原子共鳴, CPT 共鳴, 磁気勾配, 磁気ベクトル

## Magnetic Field Gradient and Vector Sensors Based on Atomic Resonances

Shigeyoshi GOKA Yuma NAMATAME Ryo MAEDA and Takahito CHIBA

Electrical & Electronic Engineering, Tokyo Metropolitan University

1-1 Minamiosawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397 Japan

E-mail: goka@tmu.ac.jp

**Abstract** Novel magnetic field gradient sensors based on atomic resonances are reported. The conventional magnetic field gradient sensors are consisted of the several magnetic sensors and can measure as discrete data. Since our method is based on the superposition of resonances in the alkali gas-cell, the monotonous magnetic field gradient can be estimated as continuous data. We also report the basics of a novel magnetic field vector sensor based on the coherent population trapping (CPT) resonances. Experimental results show that the observation of distributions of the Zeeman splitting sublevels excited by linear and circular polarization light fields can estimate  $B_x$ ,  $|B_y|$  and  $|B_z|$ . In addition, it is mentioned that a low divergence laser beam is required to estimate  $B_x$ ,  $B_y$  and  $B_z$ .

**Keyword** Atomic resonance, CPT resonance, Magnetic Field Gradient, Magnetic Field Vector

3次元磁場ベクトル推定

- > CPT(Coherent Population Trapping)共鳴を利用
- > 1本のレーザー光による計測が目標
- > 直線偏光と円偏光を利用
- > ゼーマン副準位の強度分布により推定

磁場勾配計測

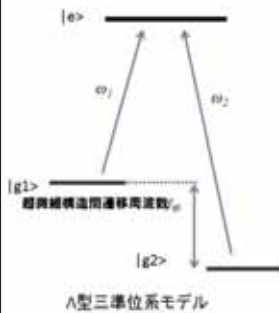
- > 原子共鳴を利用(今回はCPT共鳴を利用)
- > ガスセル内各点での磁場強度が異なる事を利用
- > 各点の共鳴の重ね合わせが観測される
- > 単調性を有する磁場勾配を推定

Coherent Population Trapping (CPT)共鳴を用いた多軸型高感度磁気センサを提案する。

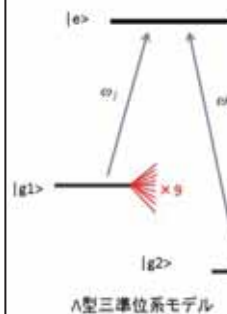
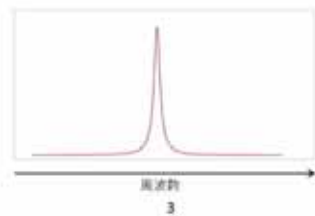
磁気センサとしての基礎的検討を行った。

- アルカリ原子を封入したガスセルを使用
- レーザー光源は面発光半導体レーザー(VCSEL)一つ
- すべてのゼーマン副準位のCPT共鳴信号を観測
- CPT共鳴の占有率を計測

一つのレーザー光源で三軸方向それぞれの磁気ベクトルの絶対値が推定可能であることを明らかにする。



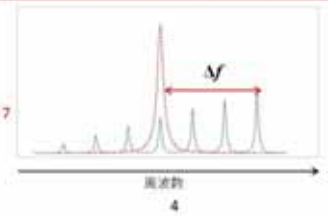
アルカリ原子の2つの基底準位 |g1>, |g2> と励起準位 |e> 間のエネルギーを持った光  $\omega_1, \omega_2$  を同時に原子に照射した時、光の吸収率が低下し、透明化減少が起きる。これをCPT共鳴という。



アルカリ原子に磁場が印加されると、縮退が解け磁気量子数に依存したエネルギー準位の分裂が起こる。これにより元は一つだったスペクトルが複数に分裂して観測される

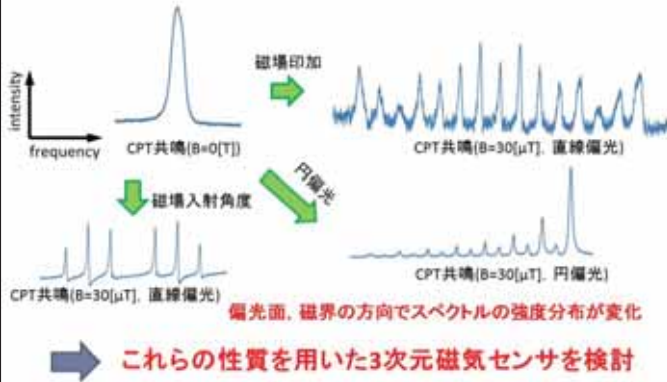
$$\Delta f \approx \frac{2g_F \mu_B m_f B}{h}$$

$m_f$ : 磁気量子数  
 $g_F$ : g因子  $\mu_B$ : ボア磁子  
 $B$ : 印加磁場  $h$ : プランク定数



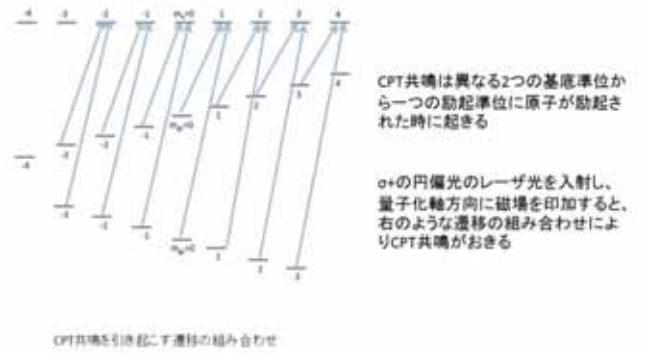
CPT共鳴とゼーマン効果

5



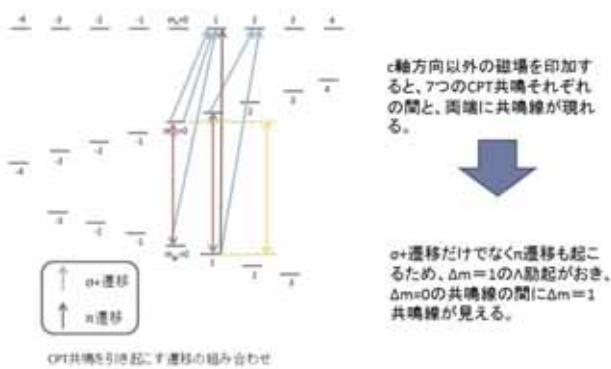
円偏光時におけるCPT共鳴の組み合わせ

6



C軸方向以外の磁場がある場合の組み合わせ

7



CPT共鳴の重ねあわせ

8

CPT信号の時計遷移からの周波数シフトΔfは以下の式で近似できる

$$\Delta f \approx \frac{g_F \mu_B (m_{g1} + m_{g2}) B}{h}$$

磁気量子数の和が等しければ時計遷移からの周波数シフトが等しくなり、CPT共鳴の重ねあわせが起きる

ここで磁気量子数の和 $m_{g1+2}$ を以下のように定義する

$$m_{g1+2} = m_{g1} + m_{g2}$$

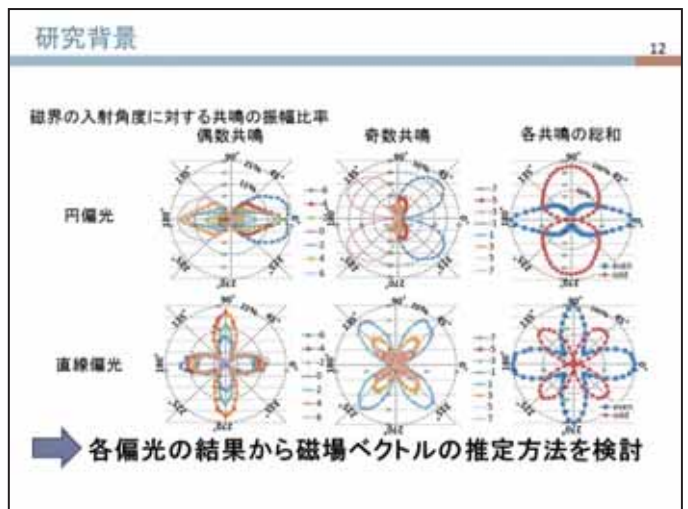
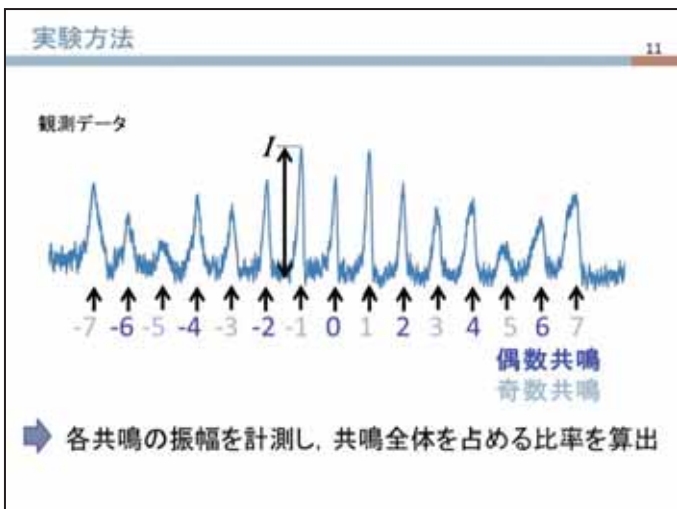
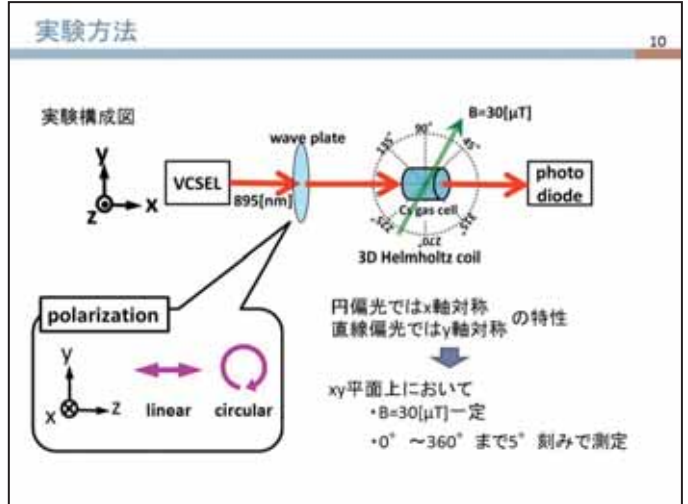
### CPT共鳴を起こす基底準位と遷移の組み合わせ

F=3におけるCPT共鳴を起こす基底準位と遷移の組み合わせ

遷移	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
$\pi \rightarrow \pi$	(-5, 0)	(-2, 0)	(1, 0)	(4, 0)	(7, 0)	(10, 0)	(13, 0)	(16, 0)	(19, 0)	(22, 0)	(25, 0)	(28, 0)	(31, 0)	(34, 0)	(37, 0)
$\pi \rightarrow \sigma$	(-5, 0)	(-2, 0)	(1, 0)	(4, 0)	(7, 0)	(10, 0)	(13, 0)	(16, 0)	(19, 0)	(22, 0)	(25, 0)	(28, 0)	(31, 0)	(34, 0)	(37, 0)
$\sigma \rightarrow \sigma$	(-5, 0)	(-2, 0)	(1, 0)	(4, 0)	(7, 0)	(10, 0)	(13, 0)	(16, 0)	(19, 0)	(22, 0)	(25, 0)	(28, 0)	(31, 0)	(34, 0)	(37, 0)
$\sigma \rightarrow \pi$	(-5, 0)	(-2, 0)	(1, 0)	(4, 0)	(7, 0)	(10, 0)	(13, 0)	(16, 0)	(19, 0)	(22, 0)	(25, 0)	(28, 0)	(31, 0)	(34, 0)	(37, 0)

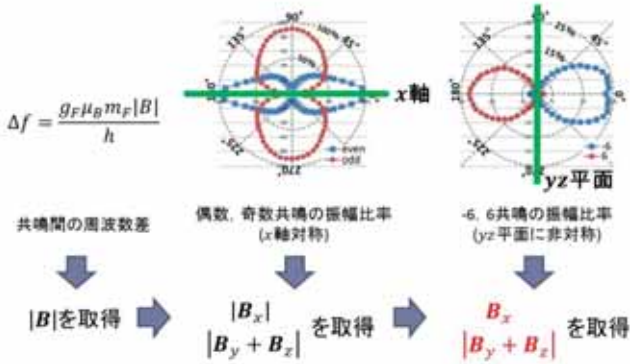
スピンの軌道相互作用により方向とスピンのカップリングすることにより、遷移確率がスピンの向きと、偏光との角度に依存する。

磁場の入射方向と偏光を変化させて、偶数信号、奇数信号それぞれのコントラストを観測し、三軸方向それぞれの磁気ベクトルの大きさが推定可能であることを明らかにした。



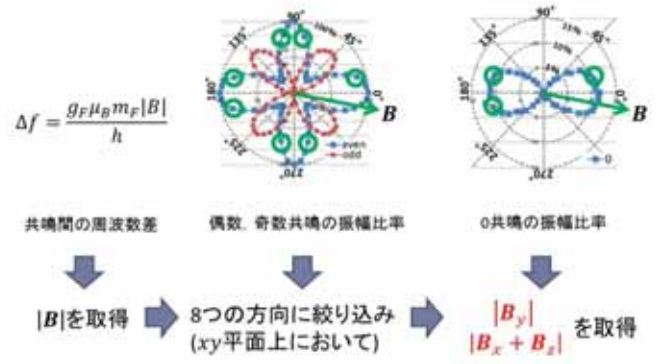
磁場ベクトルの推定:円偏光

13



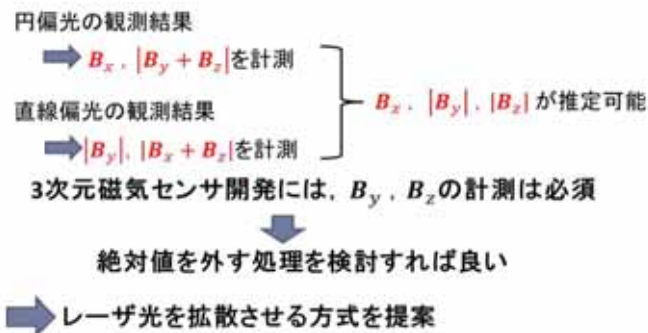
磁場ベクトルの推定:直線偏光

14



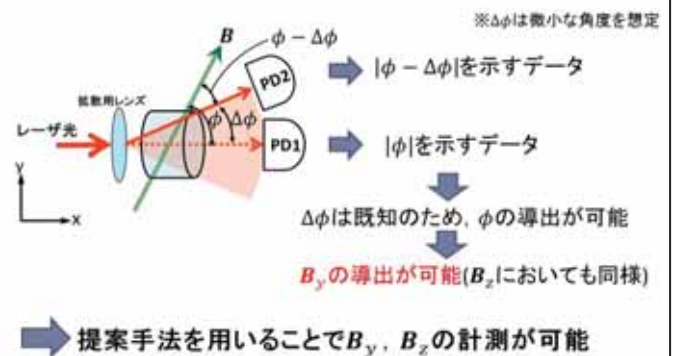
磁場ベクトルの推定:まとめ

15



$B_y$ ,  $B_z$  の計測手法の提案

16



- 3次元磁場ベクトル推定を目標とし、CPT共鳴のゼーマン副準位の強度分布を測る方法を提案した
- レーザ光を2種類の偏光状態にすることにより、 $B_x$ 、 $|B_y|$ 、 $|B_z|$ を推定することが可能であることを明らかにした
- 偏光状態は波長板と液晶を用いることで簡易に変更可能である
- また、少しの拡散だけ拡散したレーザ光を用いることで、絶対値を外す方法も提案した

原子共鳴を用いた磁場勾配センサの提案

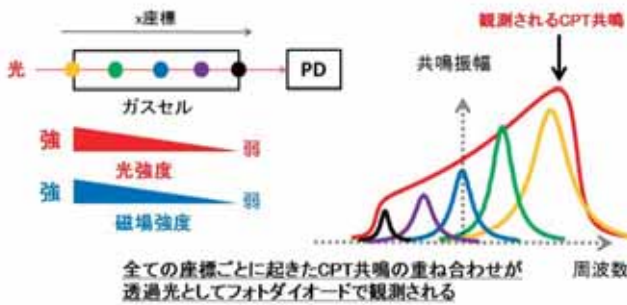
磁気勾配センサとしての基礎的検討を行った。

- 磁場勾配下では共鳴線が非対称になることを利用
- 非対称性から磁場勾配を推定
- アルカリ原子を封入したガスセルを使用
- CPT共鳴を利用
- レーザ光源は面発光半導体レーザ(VCSEL)一つ

単調性を有する磁場勾配を連続的に観測可能な測定法として、CPT共鳴を用いた磁気センサの有効性を実験的に確認する

測定環境に即したシミュレーション条件を導入し、磁場勾配特性の実測値との比較を行い、本研究の有効性を示す

例:レーザ光強度と共に磁場が弱くなる系において

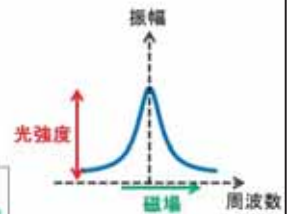


- CPT共鳴
  - 磁場強度で周波数が変化
  - 光強度で振幅が変化

CPT共鳴は以下のローレンツ分布の式に従う

$$P(f; f_0, \gamma) = \frac{I}{\pi [1 + (\frac{f-f_0}{\gamma})^2]}$$

I: 光強度  
 $\gamma$ : 線幅  
 $f_0$ : 中心周波数



- ▶ 実験では長さが2.7cmのガスセルを使用
- ガスセルの位置270点におけるCPT共鳴を積分

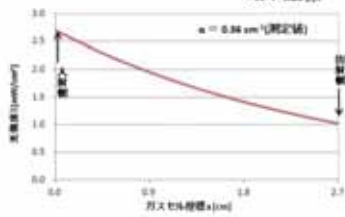
## ガスセル内の光強度分布

21

・ガスセルの各座標における光強度  $I$  は以下の式に従う

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

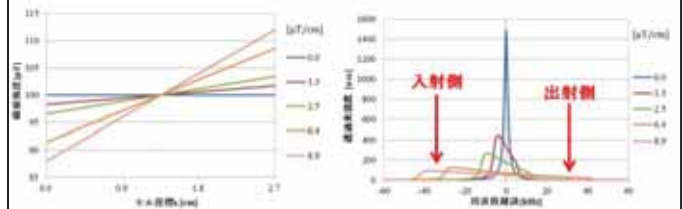
$I_0$ : セルに入射する光強度  
 $\alpha$ : 吸光係数  
 $x$ : 座標



➡ ガスセル内の各座標に対してCPT共鳴の振幅が変化する

## 順勾配磁場下のシミュレーション結果

22

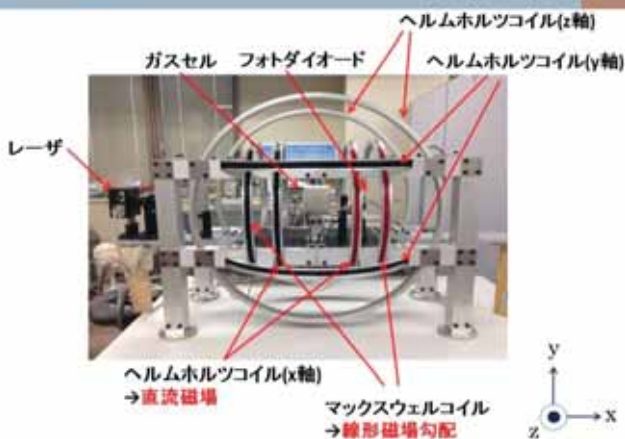


- ・X方向に磁場が強くなる勾配 ( $\mu\text{T/cm}$ )
- ・最大で  $8.9 \mu\text{T/cm}$  の磁場勾配を印加
- ・磁場勾配の大きさに伴い振幅が低下
- ・ピークが左にシフト

入射側に近い座標におけるCPT共鳴が左側に分布している

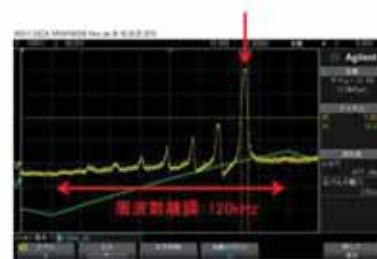
## 実験装置構成

24



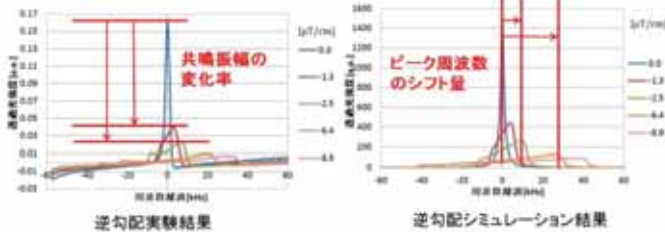
## 観測するCPT共鳴のスペクトル

25



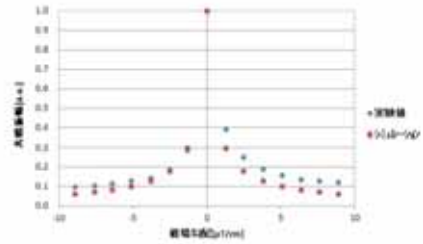
磁場に最も敏感な共鳴の振幅を大きくして測定

- ・円偏光
- ・遷移  $F=4$ , 磁気量子数  $m=3$
- ・ガスセルの温度:  $55^\circ\text{C}$
- ・直流磁場:  $100 \mu\text{T}$



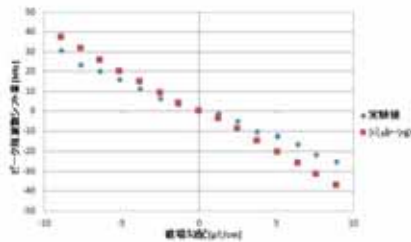
順勾配と同様にシミュレーション結果と同じ傾向が得られた

- 磁場勾配に対して
  - ・共振振幅
  - ・ピーク周波数のシフト量
 が変化することが実験とシミュレーションの両面から明らかとなった



- ・磁場勾配が無いときの振幅の大きさを1とし、変化率を計算
- ・磁場勾配の大きさに伴い共振振幅が小さくなる

共振振幅 ➡ 磁場勾配の大きさの指標



- ・磁場勾配が無いときのピーク周波数を基準とし、周波数シフト量を計算
- ・磁場勾配の大きさにほぼ比例してピーク周波数がシフト

ピーク周波数 ➡ 磁場勾配の向きの指標

- ・CPT共振の形状計測により単調性を有する磁場勾配分布を推定可能な方法を提案した
- ・線形磁場勾配による測定結果は、シミュレーション結果と同じ傾向を示し、本提案法の有効性を示した
- ・共振振幅とピーク周波数の変化を調べることで簡易的に線形磁場勾配の傾きと大きさが測定可能である
- ・一般的な磁場勾配は逆問題を解く必要があり、今後の課題である

# 自由走査式による電磁界分布可視化システム

佐藤 健<sup>†</sup> 斎藤 匠<sup>‡</sup> 塚原 智也<sup>‡</sup> 上村 佳嗣<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 八戸工業高等専門学校 〒039-1192 青森県八戸市田面木字上野平 16-1

<sup>‡</sup> 宇都宮大学工学部 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

E-mail: <sup>†</sup> satok-e@hachinohe-ct.ac.jp

**あらまし** 身近な家電機器等からの漏洩電磁界の安全性を確認するために、電磁界分布を手軽に可視化する方法が求められている。国際機関等によって健康に影響を与える電磁界の閾値が定められており、電磁界分布の測定結果と照らし合わせるにより安全性の目安を得ることができる。電磁界分布の測定は測定位置の同定が重要であり、従来はあらかじめ決定された格子点上に磁界センサを走査することで位置の同定を行っており、そのために大掛かりなロボットアームを用いたり多くの人手を費やしたりしてきた。本稿では、家電機器からの漏洩電磁界の安全性をわかりやすく手軽に判別することを目的とし、可搬性を損なわない程度の小規模な装置を用い、最小限の人手で迅速に電磁界強度分布を得る方法を紹介する。電磁界センサの測定位置の検出に、磁気式トラッキング、光学式トラッキング、及び赤外線トラッキング、Kinect を用いた方式を導入し、電磁界分布を簡便に可視化する方法を実現している。

**キーワード** 低周波磁界、電磁界分布、電波防護指針、磁界センサ、可視化、赤外線カメラ

## A Freehand Scanning system for visualizing EM Field Distributions

Ken SATO<sup>†</sup> Takumi SAITO<sup>‡</sup> Tomoya TSUKAHARA<sup>‡</sup> and Yoshitsugu KAMIMURA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Technology, Hachinohe College 16-1 Uwanotai, Tamonoki, Hachinohe-shi, 039-1192 Japan

<sup>‡</sup> Utsunomiya University 7-1-2 Yoto Utsunomiya-shi Tochigi 321-8585 Japan

E-mail: <sup>†</sup> satok-e@hachinohe-ct.ac.jp

**Abstract** Recently, a visualizing method for confirming safety of a leakage field from home appliances is needed. A safety threshold of magnetic distributions for human health are defined in some guidelines, so we can know that there are some effects by comparing measured value with guidelines. For measuring magnetic distributions, it's important to identify the location of measuring points. Conventionally, it is general that the measuring points are decided in advance coordinated lattice points by using large-scale robot arms or spending many times and operations. In this study, the location of field sensor is decided automatically by using location tracking methods considering with human interfaces. In this report we introduce a method which can visualize field distributions easily by using some small scale equipment. Some kinds of tracking method such as magnetic tracking, optical tracking and IR tracking are used to detect measuring location of a field sensor, then visualize electromagnetic field distributions. And we also describe our recent study.

**Keyword** low frequency field, EMF distributions, field sensor, magnetic tracker, IRcamera

## 自由走査式による 電磁界分布可視化システム

○ 佐藤 健 齋藤匠, 塚原智也, 上村佳嗣  
八戸工業高等専門学校 宇都宮大学工学部


1

## 本日の内容


- 研究の背景・目的
- 関連研究
- 電磁界の可視化手法
- 自由走査式測定法
  - 測定結果の表示
  - 磁気式位置センサ方式
  - 光学式位置センサ方式
  - 赤外線式位置センサ方式
  - モーションキャプチャデバイス
- 応用例
  - 波源推定への応用
  - 時間変動する環境
- まとめ

2


## 研究の背景



急激なICTの発展



医療技術の進歩



電磁界の生体影響

がん, 脳腫瘍?

携帯電話  
スマートフォン  
オール電化  
スマートシティ

MRI  
温熱治療  
磁気マット

問題とされている周波数帯: 可視光より低い

- 携帯電話 1.5 GHz, 電子レンジ 2.45 GHz
- 超低周波(ELF) 50~60 Hz では磁界が問題

3

## 電磁界問題とは

- 生体への影響
  - 刺激効果, 熱効果, 磁気閃光, 小児がん...
  - 曝露評価, 人体モデルシミュレーション
- 電子機器等への影響
  - ESD(静電気放電), 無線・アンテナ, 電力線通信
- 電磁界への不安の増大
  - 理由1) 影響の有無/程度が不明確  
→ 疫学研究, 曝露評価
  - 理由2) 目に見えないこと  
→ **電磁界の可視化の必要性**



NICT人体数値モデル  
<http://emc.nict.go.jp/bio/data/>

4

## 電磁界分布の可視化

- 分布の可視化に必要なもの
  - (1) 電磁界強度の測定値
    - 様々な電磁界センサが市販済み
  - (2) 測定位置の座標
    - 手で取得するもの
    - 自動で取得するもの

強さは?



位置は?



9

## 電磁界強度の測定

- 多くの市販品が利用可能

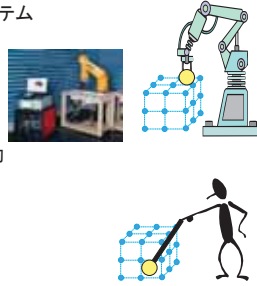


	EFA-200	Wide Range Field Meter	Radman
Freq. Range	5 Hz - 32 kHz	30Hz - 1 kHz (Low) 1kHz - 100 kHz (High)	1 MHz - 40 GHz
			

10

## 従来の測定位置の決定方法

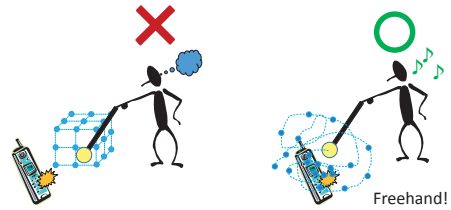
- 自動的に取得する方法
  - ロボットアームなどによる測定システム
  - 高い精度
  - **大規模なシステムが必要**
- 手動で取得する方法
  - 予め決められた位置へ手動で移動
  - **手間と時間がかかる**



12

## 電磁界分布の測定

- 危険領域や波源の探索
  - 格子状にセンサを動かすようなことはしない
  - 対象領域に対して「**自由**」にセンサを走査



14

## そこで...

- 簡便的に電磁界分布を視覚化
  - できるだけ簡易的な装置で
  - できるだけ手軽に
  - できるだけ正確に!
  - 拡張・応用も手軽に!

### 自由走査式による電磁界分布測定

自由に電磁界センサを測定エリアで**走査**することで  
電磁界分布を視覚化する**測定方法の確立**

15

## 自由走査式測定法の特徴

- 利点
  - 測定は**自由な位置**で行うことが可能
    - => 従来法はあらかじめ決められた位置での測定
    - => 電磁界強度を知りたい場所に測定ロッドを自由に  
かざして測定できる
  - 電磁界分布を**リアルタイム**に生成
- 懸念点 **これまでに無い、画期的な測定方法の実現**
  - 位置の**検出精度**



16

## 自由走査式測定法の特徴

- 可搬性: 測定対象に制約が少ない
  - 従来法: 測定対象を測定システムに設置
    - 測定システムは固定
    - 測定対象を持ち込んで実施



- 本手法: 測定対象周辺を自由に測定可能
  - 測定システムは可搬性あり
  - 特定の施設(電気室、変電設備), 屋外も可



17

## 自由走査式電磁界分布測定法

### (1)電磁界強度の測定:

市販の電磁界センサ



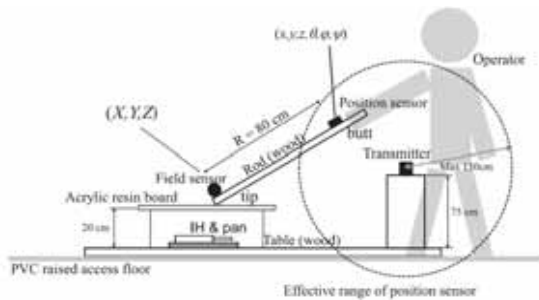
### (2)測定位置の座標: 位置センサを導入

1. 磁気式位置センサを用いた方式
2. 光学式位置センサを用いた方式
3. 赤外線式位置センサを用いた方式
4. Kinect(非接触型入力装置)を用いた方式



18

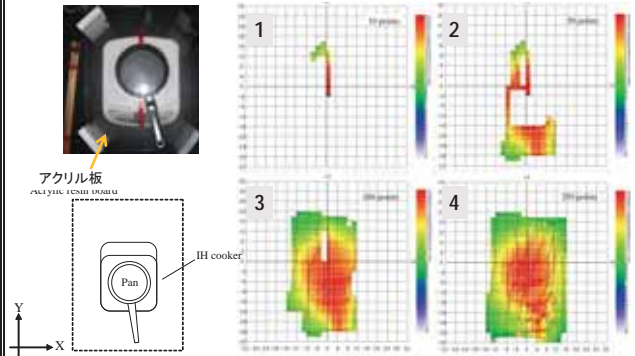
## 磁気式位置センサ方式



K. Sato, N. Miyata, Y. Kamimura and Y. Yamada, "A Freehand Scanning Method for Measuring EMF Distributions Using Magnetic Tracker", IEICE Trans E93.B(7), pp1865-1868, July 2010.

23

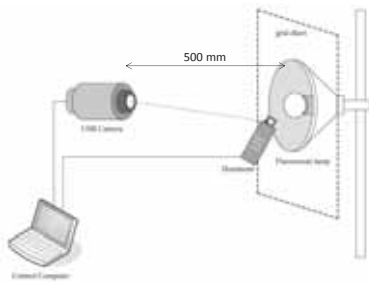
## 測定例



25

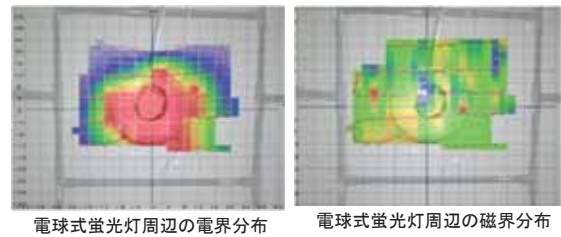
## 光学式位置センサ方式

- USB接続カメラとPCのみ



28

## 測定例



31

## 赤外線式位置センサ方式

	磁気式位置センサ	光学式位置センサ	赤外線式位置センサ
使用機材	トランスミッタ 磁気レシーバ	Webカメラ OpenCVライブラリ	赤外線LED 赤外線カメラ(Wii)
利点	高精度	シンプルな機器構成	高精度
問題点	測定対象との干渉 金属の存在	明るさ一定	アクティブマーカが必要

32

## 赤外線式位置センサ

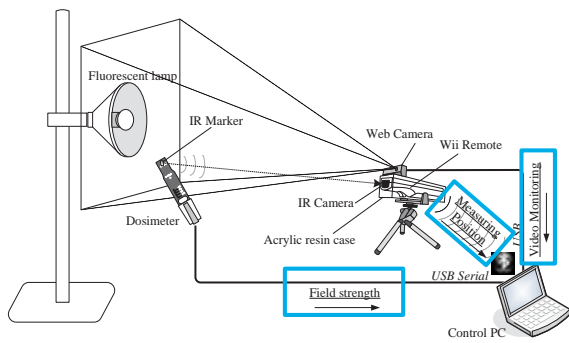
- 電磁界センサにLEDを取り付け
- 赤外線LEDを赤外線カメラでトラッキング
- 測定位置を取得



赤外線カメラとして Wii<sup>®</sup> を使用

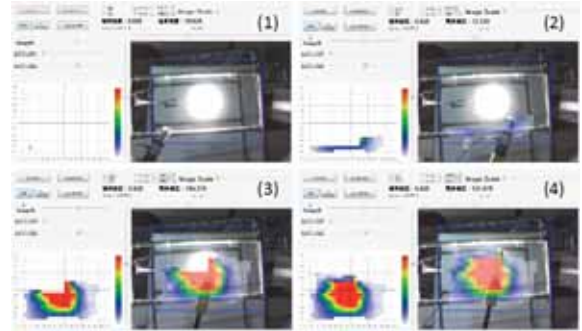
33

### (3) 赤外線式位置センサ(高周波)



36

### 測定結果(高周波:電球式蛍光灯)

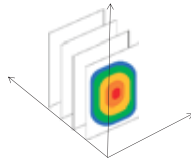


37

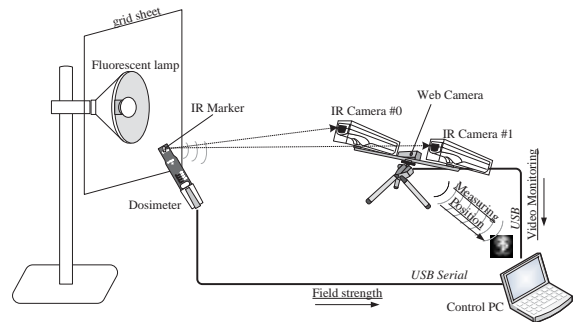
### 電磁界の3次元分布測定法

- 2次元の電磁界分布測定 → 3次元に拡張  
 - スライス状の2次元測定結果から生成

- 3次元位置情報の取得

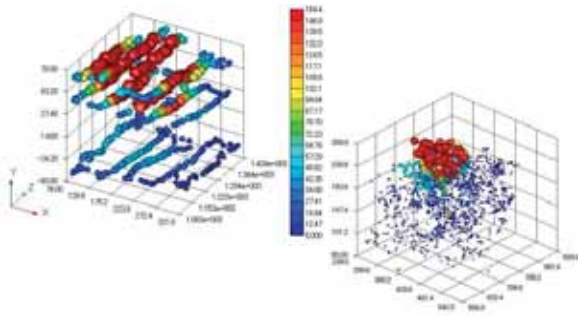


38

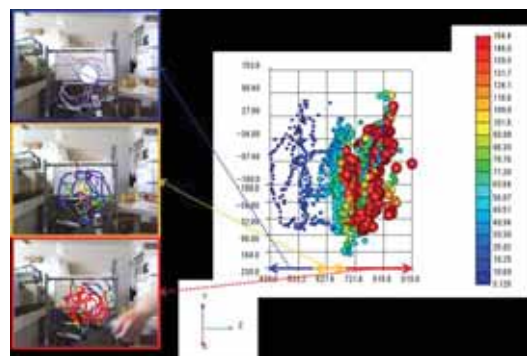


41

### 測定結果



42



44

#### (4) Kinect の例

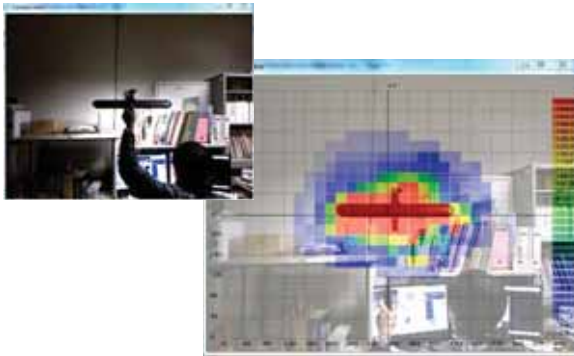
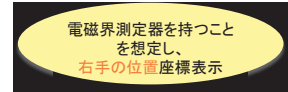
- Kinectは、Microsoft社から発売されている、非接触型の入力装置である
- 購入価格が安価で姿勢認識技術が自由に使えることから、様々な分野で開発、利用されている



43

#### OpenNIによるスケルトントラッキング

- OpenNIでは頭、首、襟、肩、肘、手首、手、指先、胸、腰、膝、足首、足の20個分の関節の座標をトラッキング



47

#### 3次元空間電磁界可視化システム

森田テック株式会社 WM9500



[http://www.morita-tech.co.jp/pdf/WM9500-01\\_web.pdf](http://www.morita-tech.co.jp/pdf/WM9500-01_web.pdf)

48

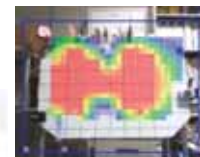
#### 自由走査式測定法の応用

- 3次元空間分布の測定・表示
  - 2台の赤外線カメラを使用した測定
- 時間変動する電磁界の測定・表示
  - 大型ヘリカル装置周辺
  - IH調理器など
- システムの簡略化
  - 可搬性、汎用性のための無線化
  - Raspberry Piベースの小型測定システム
- 大規模測定エリアへの対応
  - 室内空間、屋外エリアでの測定法

51

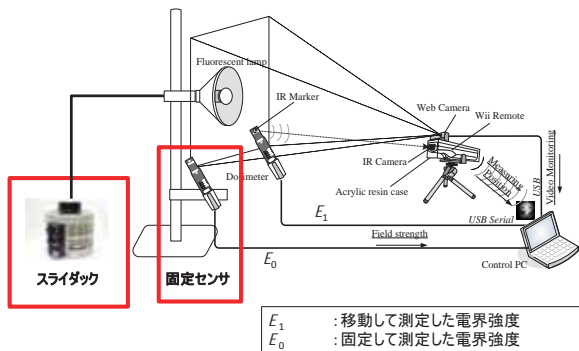
#### 時間変動する電磁界

- 家電製品
  - IH調理器/IH炊飯器
    - 火力調整
  - 電球式蛍光灯
    - スライダックにより電圧を変化させた場合と、変化させていない場合を測定
    - 固定した電磁界センサでの測定値を用いて補正



53

### システム構成:時間変動を伴う環境



### 時間変動を伴う電磁波源の測定方法

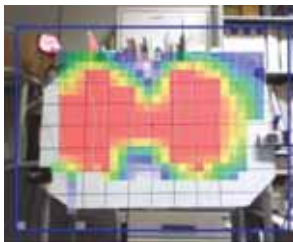
- 固定した測定器の電界強度を用いて測定値を補正

$$E = \frac{E_1}{\left[ \frac{E_0}{E_{0 \max}} \right]}$$

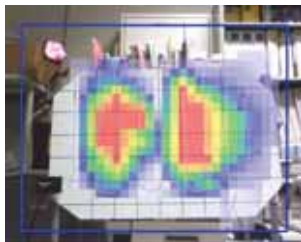
- $E_1$  : 移動して測定した電界強度
- $E_0$  : 固定して測定した電界強度
- $E_{0 \max}$  : 固定して測定した電界強度の最大値

### 実行画面(電界分布の可視化)

電圧変動なし

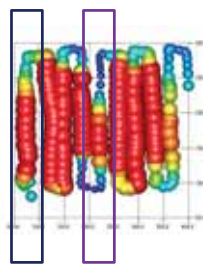


電圧変動あり

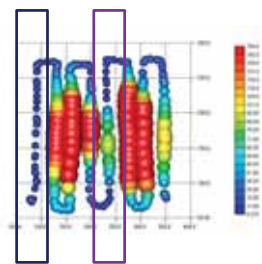


### 電球式蛍光灯周辺の電界分布

時間変動なし

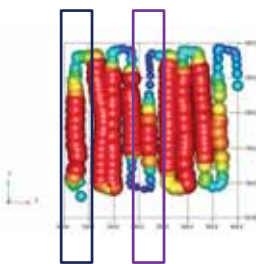


時間変動あり

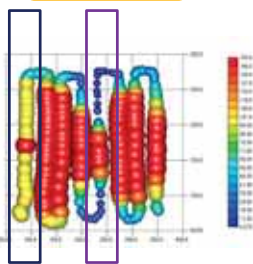


### 電球式蛍光灯周辺の電界分布

時間変動なし



時間変動あり  
補正後



### まとめ(1)

- 自由走査式による電磁界分布測定法の開発と有効性を確認した
  - 磁気式位置センサ方式
  - 光学式位置センサ方式
  - 赤外線式位置センサ方式
- 電磁界分布を大雑把に捉える手法として非常に有効である

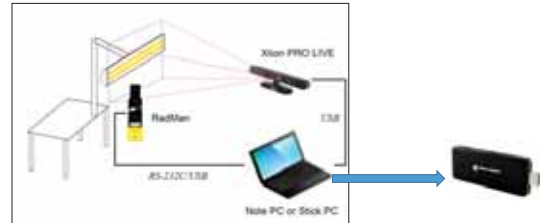
## まとめ(2)

- 磁気式位置センサ
  - 遮蔽物がある環境でも有効
  - 測定環境との干渉, 可搬性, 金属影響
- 光学式位置センサ
  - 非常にシンプルな構成 (カメラのみ)
  - 測定環境の明るさの影響
- 赤外線式位置センサ
  - 可搬性に優れ, 前提条件が少ない
- モーションキャプチャデバイス
  - アクティブマーカ不要, 深度センサも利用も可

64

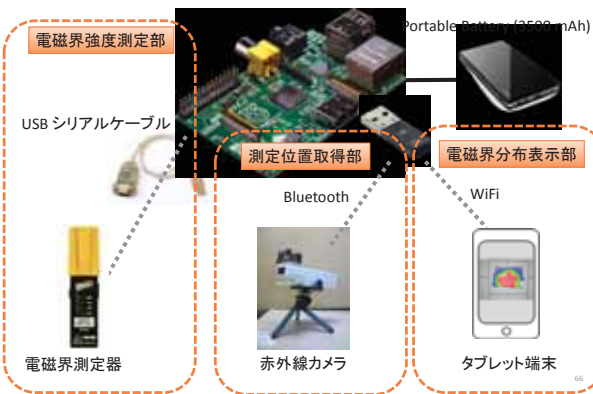
## 最近の研究から

- 電磁界分布測定システムの可搬性改善
  - 制御用PC, 位置センサの小型化:
    - ステックPC
    - ワンボードコンピュータ (Raspberry Pi)
    - Xtion Pro Live (Kinect互換)



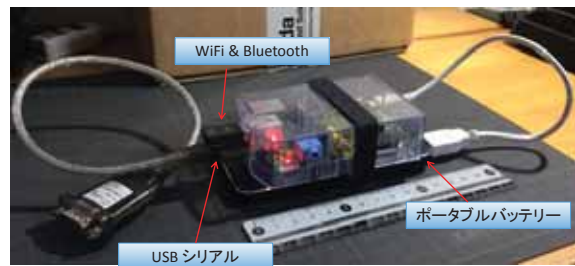
65

## 可搬型電磁界分布測定システム構成



66

## システム構成



67

## 電磁界分布表示(測定結果の再生例)



68

## 最近の研究から

- 表示デバイスの改良
  - タブレット端末への表示
  - タブレット内蔵カメラの利用



69

## 光電界センサを用いた中間周波数帯利用機器近傍の電界測定

和氣 加奈子<sup>†</sup> チャカロタイ ジェドヴィスノブ<sup>†</sup> 有馬 卓司<sup>‡</sup> 宇野 亨<sup>‡</sup> 渡辺 聡一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

<sup>‡</sup> 東京農工大学 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

E-mail: kana@nict.go.jp

**あらまし** 近年、ワイヤレス電力伝送(WPT)システム等の中間周波数帯を利用する機器が増えている。そのため、これらの機器による電磁界ばく露の生体安全性を確認することが急務となっている。本研究では、中間周波数帯利用機器である WPT システムを構築し、その近傍における電磁界分布を測定した。さらに、システム近傍の電磁界分布の測定結果と数値シミュレーションによる比較を実施した。

**キーワード** 中間周波, ワイヤレス電力伝送, ばく露評価, 電磁界計測, 光電界センサ

## Measurement of Electric Fields using an Optical Electric Field Sensor in Intermediate Frequency Band

Kanako WAKE<sup>†</sup> Jerdvisanop CHAKAROTHAI<sup>†</sup> Takuji ARIMA<sup>‡</sup> Toru UNO<sup>‡</sup> and  
Soichi WATANABE<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Electromagnetic Compatibility Laboratory, National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1  
Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795 Japan

<sup>‡</sup> Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakamachi, Koganei,  
Tokyo 184-8588 Japan

E-mail: kana@nict.go.jp

**Abstract** Recently there are growing concern about possible health effect of electromagnetic fields in intermediate frequency (IF) band due to the widespread use of the equipment operating in these frequencies such as wireless power transfer (WPT) systems. In this study, we fabricated two types of WPT system and measured electromagnetic field in the vicinity of the system. Measured electromagnetic fields were compared to that evaluated with numerical simulation.

**Keyword** Intermediate frequency, Wireless power transfer, dosimetry, Measurement, Optical Electric Field Sensor

## 研究背景

中間周波数帯(300 Hz—10 MHz)を利用した機器の利用の拡大

- ✓ Hi調理器
- ✓ RFID
- ✓ ワイヤレス電力伝送(WPT)システム

	EV	Home appliance
System	Magnetic coupling	Magnetic coupling
Transfer power	~ 3 kW (Max.7.7 kW)	~ 100 W
Frequency	79 ~ 90 kHz	6765 ~ 6795 kHz
Transfer distance	0 ~ 30 cm	0 ~ 30 cm
Approach distance for human	> 20 cm *	> 0 cm



## 研究目的

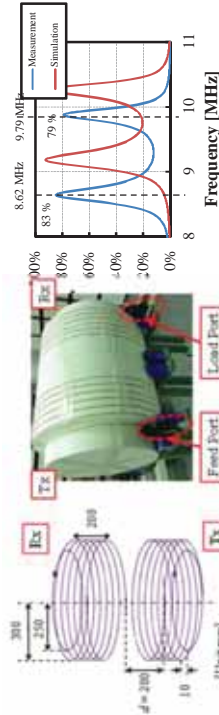
WPTシステムはその近傍に比較的強い電磁界を発生させる可能性がある。

安全に利用するためには人体にどのようなばく露が生じ得るかを確認する必要がある。

そこで本研究では、WPT等の機器近傍における電磁界分布の取得し人体に対するばく露評価を実施する。



## 測定対象 MHz帯ソレノイド型WPT



- コイル巻き数: 6.1 turns
- コイル半径: 300 mm
- ループ半径: 250 mm
- 銅線直径: 1.6 mm(コイル, ループ)

共振周波数: 8.62 MHz, 9.79 MHz  
伝送効率: 79%以上



## 測定対象 MHz帯スパイラル型WPT



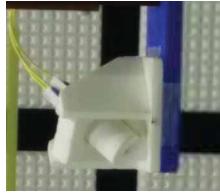
- コイル巻き数: 13 turns
- コイル外半径: 245 mm
- コイル内半径: 120 mm
- ループ半径: 250 mm
- 銅線直径: 1.6 mm(ループ), 1.2 mm(コイル)

共振周波数: 6.35 MHz, 7.44 MHz  
伝送効率: 90%以上



## 電界センサ

電界センサ：精工技研, SH-03EX



仕様	
周波数	100 kHz – 3 GHz
強度	0.002 – 100 V/m



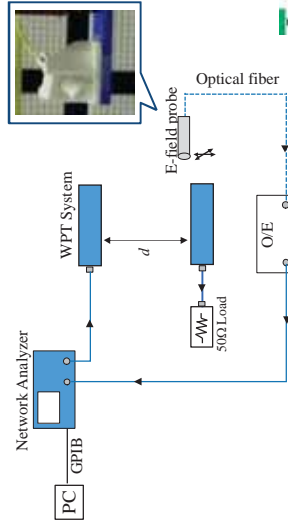
## 電界測定システム

VNA: Agilent, E5071C

Port1: WPTシステムに給電

Port2: 電界センサの出力

S21の強度と位相を測定

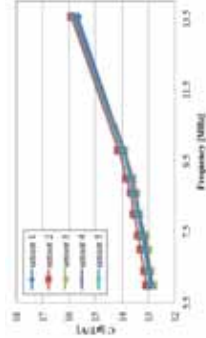


## 磁界センサ

磁界センサ: サーチコイル型



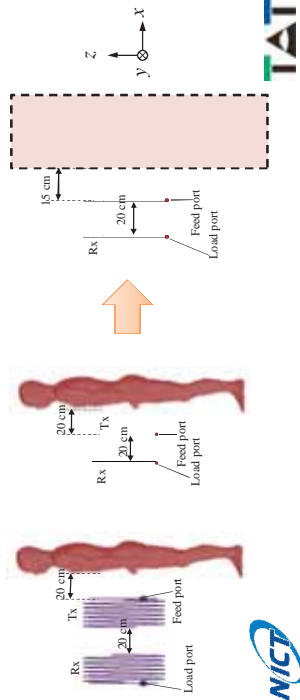
標準ループアンテナ (校正済), 標準電力計 (校正済), 参照用電力計,  
3 開口の方向性結合器を用いて対象周波数において校正を実施



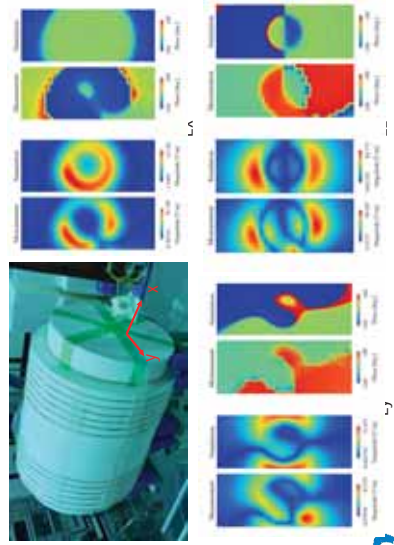
### 測定条件

測定エリア： システム近傍の人体が占める空間 (35x70x180 cm<sup>3</sup>)

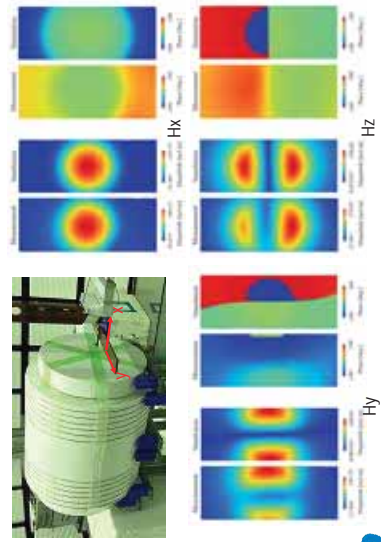
測定間隔： 5 cm



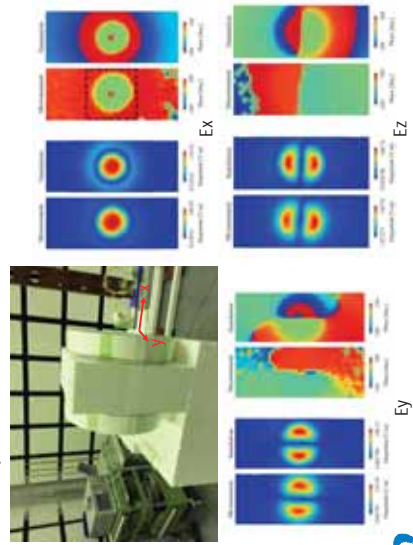
### 測定結果(ソレノイド型, 低周波モード, 電界)

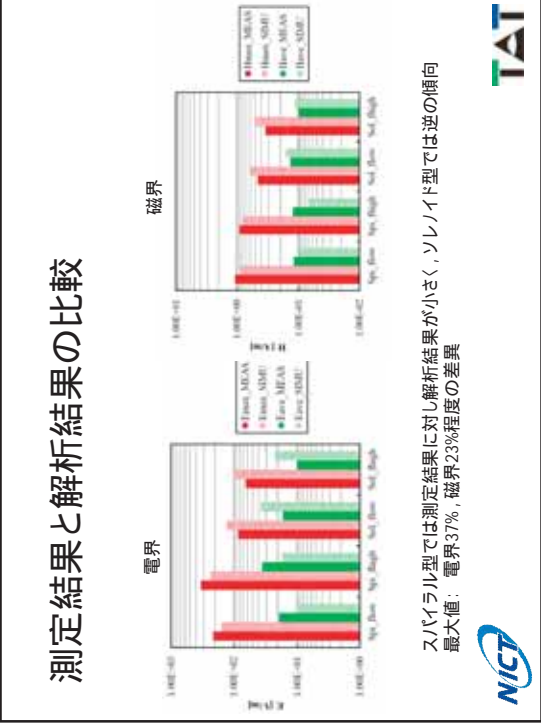
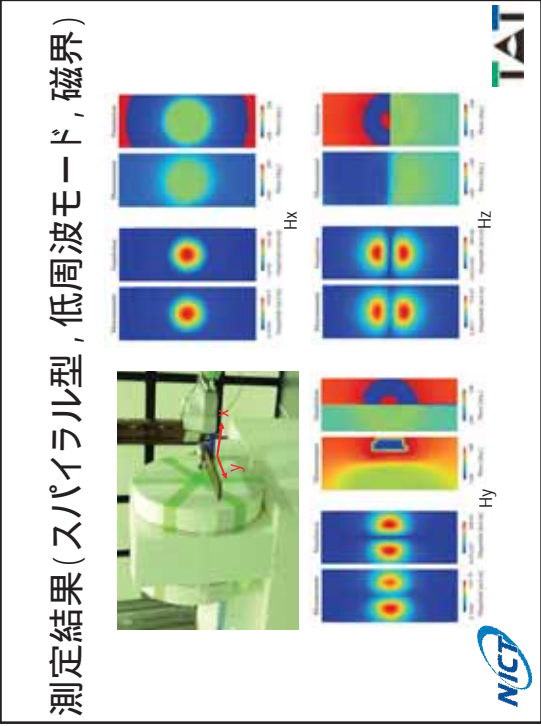


### 測定結果(ソレノイド型, 低周波モード, 磁界)



### 測定結果(スパイラル型, 低周波モード, 電界)





### まとめ

機器近傍3次元電磁界分布について、強度だけでなく位相を考慮した測定システムを開発した。  
 近年開発が進められているWPTシステムに対して、近傍電磁界分布を実測し、数値解析結果と比較した。

# 中間周波数帯変動磁界 in vivo ばく露実験における光学的手法を用いた 超音波測定に関する予備的検討

吉野 創<sup>†</sup> 鈴木 敬久<sup>‡</sup>

首都大学東京 理工学研究科 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

E-mail: <sup>†</sup> yoshino-hajime@ed.tmu.ac.jp, <sup>‡</sup> y\_suzuki@tmu.ac.jp

**あらまし** 中間周波数帯磁界(300 Hz- 10 MHz) の生体影響を調査するために、マウスへの磁界ばく露実験が行われている。実験に用いられる磁界ばく露装置は磁界以外にもローレンツ力や磁歪現象に起因する超音波を発生しており、磁界ばく露以外の環境要因として実験結果に影響を及ぼす可能性がある超音波の影響を防ぐために、装置から生じる超音波の評価が必要である。通常、音波の測定にはダイナミックマイクロホンやコンデンサーマイクロホンが用いられるが、磁界ばく露環境では磁界による誘導電流がマイクロホン内部の回路に生じるため、今回の条件の測定には適さない。以上の背景から磁界の影響を受けない超音波の測定方法が必要となり、本研究ではレーザードップラー効果を用いた音波検出方法について検討を行った。その結果としてレーザードップラー効果により得られた信号と音圧との間に相関があることを見出した。また20kHz磁界発生コイルより発生される超音波の測定を試み、本手法により微小な信号が得られることを確認した。

**キーワード** 磁界ばく露, 超音波, レーザードップラー効果

## A Preliminary Study on the Measurement of Ultrasound Waves with Optical Microphone for the In Vivo Exposure Experiments under the Intermediate Frequency Time Varying Magnetic Field

Hajime YOSHINO<sup>†</sup> Yukihiisa SUZUKI<sup>‡</sup>

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Metropolitan University 1-1 minamiosawa, Hachioji-shi, Tokyo  
192-0397 Japan

E-mail: <sup>†</sup> yoshino-hajime@ed.tmu.ac.jp, <sup>‡</sup> y\_suzuki@tmu.ac.jp

**Abstract** To investigate health effects due to the intermediate frequency (300Hz – 10MHz) magnetic field exposure, we are conducting the in vivo exposure experiment with mouse. Since the exposure apparatus emits ultrasound waves due to the vibration of the magnetic generation coil caused by Lorentz force or a magnetostriction, it is required to evaluate the level of ultrasound waves heard by experimental animals to prevent the unexpected environmental factors except for the incident magnetic field. In the environment with time varying magnetic field, induced current is generated within the circuit of the dynamic microphone or condenser microphone and that influences measurement results, therefore these conventional methods are not suitable under the time varying magnetic field environment. In this study, optical measurement method based on laser Doppler effect is proposed to avoid the induction to the measurement system. It is found that there is the correlation between the signal obtained by the laser Doppler measurement and the sound pressure. In the preliminary measurement, small signals emitted by the 20kHz magnetic field generation coils are detected.

**Keyword** Magnetic Field Exposure, Ultrasound, Laser Doppler Effect

# 中間周波数帯磁界の生体影響



- 中間周波数帯(300 Hz -10M Hz) 磁界を利用した技術
- IH調理器 (20kHz)
  - ワイヤレス電力伝送 (85 kHz)

## 中間周波数帯変動磁界 in vivo (ばく露実験) における光学的手法を用いた超音波測定に 関する予備的検討

首都大学東京 理工学研究科 電気電子工学専攻  
吉野創, 鈴木敬久

実用化に向けて、生体影響の調査が望まれる  
→ 小動物(マウス)を対象にした磁界ばく露実験を 計画

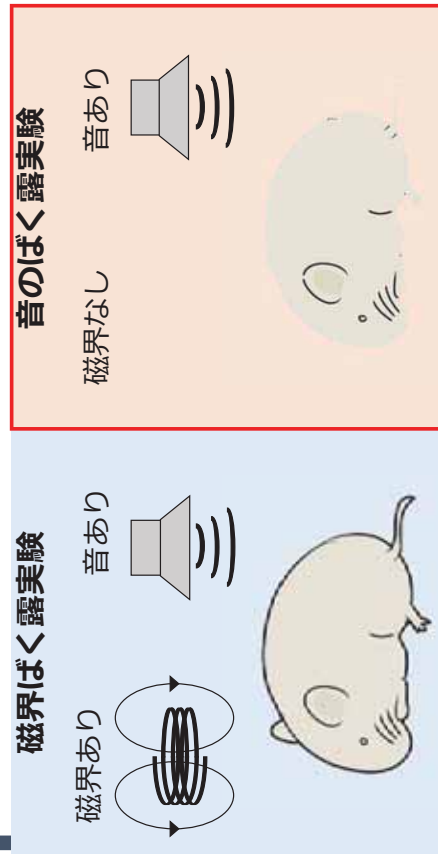
[1] "EV無線充電の実用化へ"; 産経新聞社, <http://www.sankei.com/economy/news/151026/en1510260005-n1.html>, 2 参照Oct.2015.

## 動物を用いた磁界ばく露実験



- 80 kHz 7 mT 磁界ばく露実験
- 非急性影響(非刺激作用)について検討
- マウスに影響を与える磁界以外の環境要因
  - 電界
  - 熱
  - 振動
  - ✓ コイルの振動音 (超音波)
- マウスが超音波から受ける影響[2]
  - ストレス
  - 体温の上昇
  - 結果に影響を及ぼす可能性

## 音の影響調査のための対照実験



音によるマウスへの影響を明らかにするために、コイルの振動音の定量化が必要

[2] W.I.Acton, ULTRASONICS, vol.12, no.6, pp.124-129, May 1974.

## 目的

### 時間変動する磁界の影響下での 超音波測定方法の検討

- ✓ レーザードップラー振動計を用いた光学的音波測定

24

5

## 磁界による影響の調査

コイルから生じる電磁振動音を、2種類の方法で測定

防音なし



磁界による誘導と音圧の  
両方が測定される

防音あり



音圧が瓶によって遮蔽され、  
**磁界による誘導のみ**測定さ  
れる

7

## 電磁振動音の測定

コイルに電流を印加し、発生する電磁振動音を騒音計の  
コンデンサーマイクで測定する



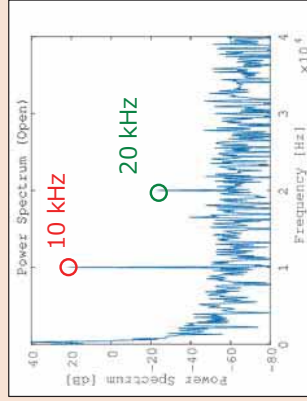
騒音計のマイク  
(コンデンサーマイク)

磁界・音発生コイル  
→ 10kHz, 5μT発生

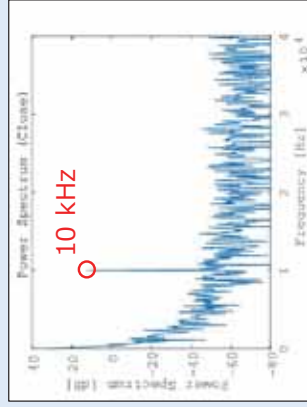
6

## 測定結果 (パワースペクトル図)

防音なし



防音あり



- ✓ 防音を施していても、10 kHzの磁界による測定値への影響が見られる  
→ コンデンサーマイクでは、磁界中で音波を定量的に評価することが困難

光を用いた音波測定法に着目

8

# レーザードップラー振動計



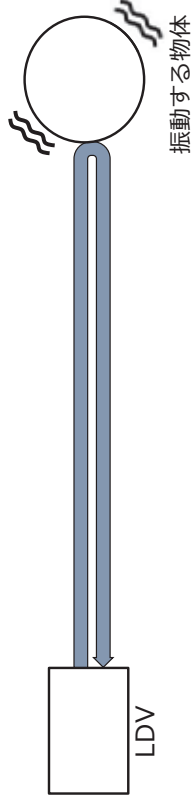
LV-1710 CE

レーザードップラー振動計(LDV)  
対象物の振動に起因するレーザーの  
ドップラー効果を測定

レーザードップラー振動計<sup>[3]</sup>

## 通常的使用方法

振動している物体にレーザーを照射し、振動速度を測定

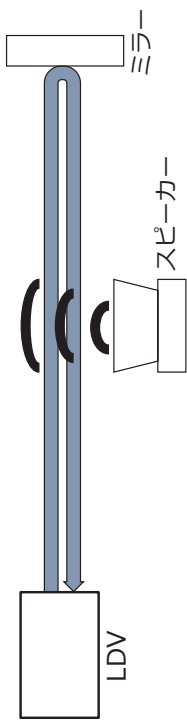


[3] "レーザードップラー振動計," 小野測器, <https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/seisoku/soundvib/vl1720.html>, 照Mar-10, 2016.

# LDVの音場測定への適用

音波測定への適用方法<sup>[4]</sup>

固定されたミラーにレーザーを照射し、光路上に音波を放射  
→音圧による空気の粗密変化を屈折率変化として観測



定量化を行うために、LDVの測定値と音圧との相関について検討

[4] 中村健太郎, 信学技報, US2001-9, pp.15-20, 2001

# LDVを用いた音の定量化の検討

## LDVを用いた測定

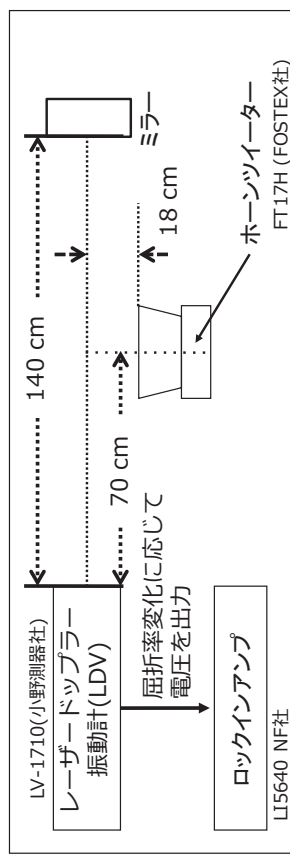
- スピーカーからの音圧を空气中の密度の変化としてLDVを用いて測定
- 測定値は電圧[mV]で出力

## コンデンサマイクによる音圧測定

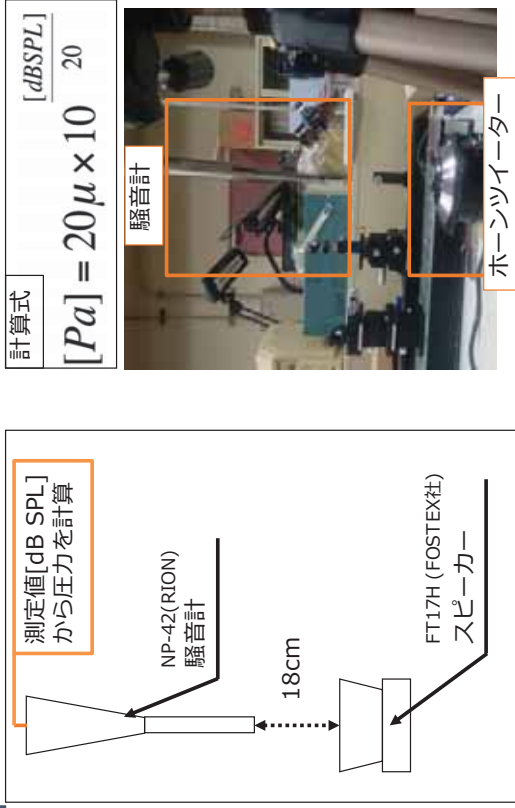
- スピーカーからの音圧をコンデンサマイクを用いて測定
- 測定値をdB SPLで出力  
→音圧を計算

スピーカーより10 - 25 kHzの音波を放射し、LDVの測定値による音圧の定量化の可能性について検討する

# LDVを用いた音圧測定

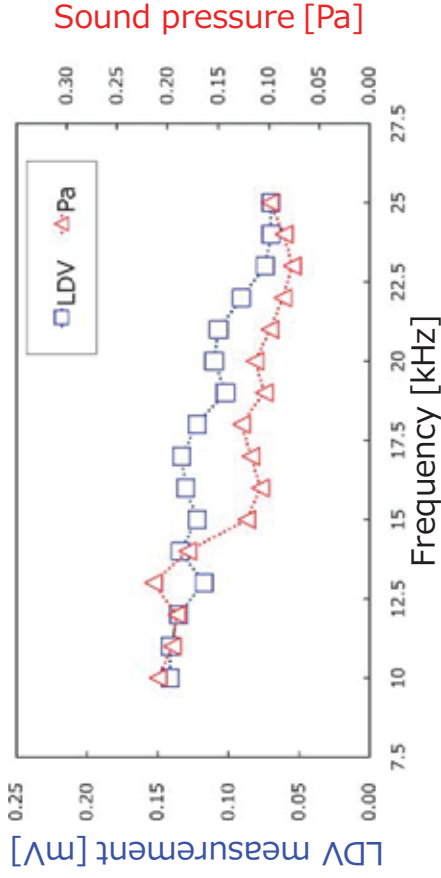


# コンデンサマイクによる音圧測定



13

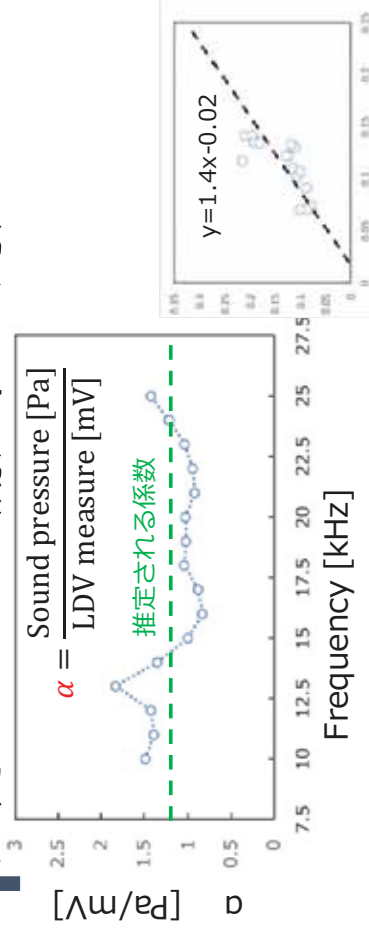
# 騒音計とLDVの測定結果の比較



LDVでの測定値は音圧と似た傾向を示す

14

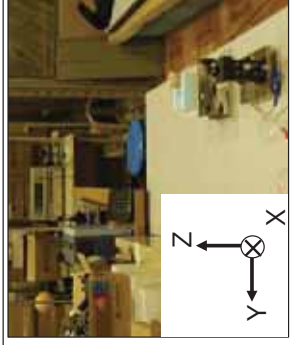
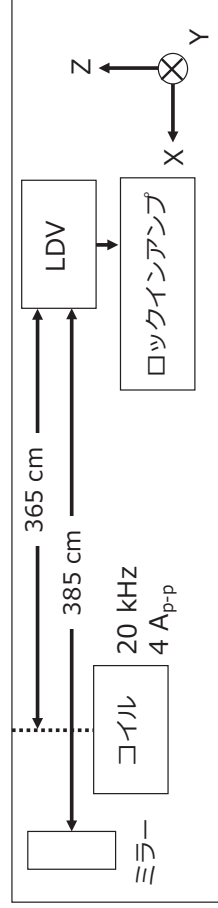
# 圧力とLDVの測定値の対応



LDVの測定値（空気の密度変化）と音圧の相関が高いと考えられる  
 → 測定系と処理方法を検討する必要あり

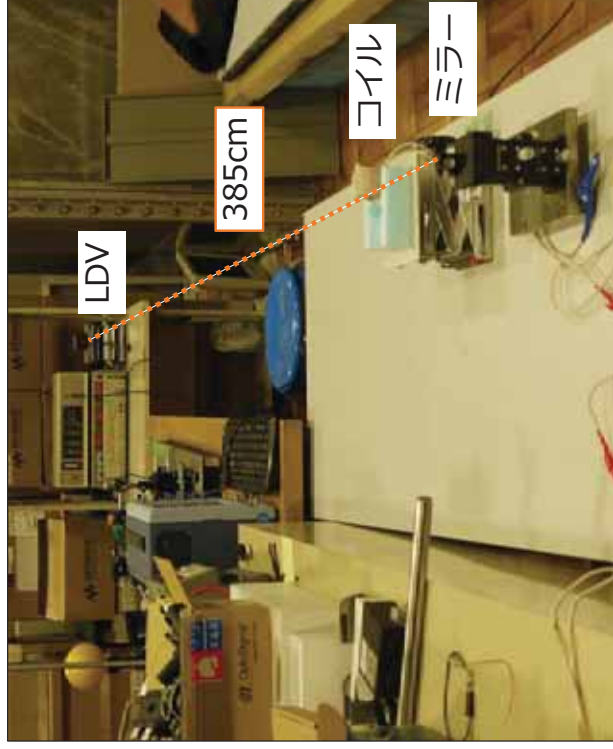
15

# コイルの振動音の測定(予備検討)



コイル ON/OFF で測定値を比較

16



17

## 結論

- ✓ レーザーのDoppler effectを用いた測定
  - LDVの測定値は、騒音計の測定値と同様の傾向を持つ
- ✓ 磁界影響下での測定可能性を検討した

今回検討した光学的手法を用いた音波測定は磁界影響下での測定手法として有効であると考えられる

19

## コイルの振動音の測定結果

ロックインアンプを用いて10秒平均の値を測定

	測定値
コイルON時	3.0 $\mu\text{V}$
コイルOFF時	1.0 $\mu\text{V}$

微小だが差が現れる

コイルに流す電流を4  $A_{p-p}$ より大きくした際に、測定値が顕著に現れる可能性がある  
 →想定しているばく露実験では80  $A_{p-p}$ ほど

コイルを波源とする磁界影響下の超音波測定法として有望である

18

## 今後の課題

- 音場の定量化法の体系化
- 実際のばく露装置の駆動条件(7-20 mT)における測定可能性の検討
- 対照実験のための音ばく露装置の構築

20

## 双方向性光ファイバリンクモジュールを用いた EMI 測定用アンテナの特性測定

黒川 悟<sup>†</sup> 鳥羽 良和<sup>††</sup> 一條 淳<sup>††</sup> 廣瀬 雅信<sup>†</sup> 余 元峰<sup>†</sup>

<sup>†</sup>産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

<sup>††</sup>株式会社精工技研 〒270-2214 千葉県松戸市松飛台 296 番地の 1

E-mail: † { satoru-kurokawa, masa-hirose, yuanfeng.she }@aist.go.jp, †† yoshikazu.toba@seikoh-giken.co.jp

**あらまし** 送信用, 受信用光ファイバリンクモジュールを一体化し, 高周波用方向性結合器を組み合わせた双方向性光ファイバリンクモジュールとベクトルネットワークアナライザを用いたアンテナ測定システムを, 不要電磁波計測に用いられる広帯域アンテナの特性測定に用いることを検討した. 提案システムを用いたボウタイアンテナとログペリオディックアンテナを組み合わせた広帯域アンテナの測定結果は, 通常のアンテナ特性測定に用いる同軸ケーブルシステムでの測定結果に比べて, 50MHz 以下での同軸ケーブルの影響を取り除いた測定が可能であることを示す結果を得た.

**キーワード** 光ファイバ無線, アナライザ, アンテナ測定, 広帯域アンテナ, アンテナ利得, アンテナ係数

### Antenna Measurement for EMI broadband antenna Using Bi-directional Optical Fiber Link Modules

<sup>†</sup>Satoru KUROKAWA, <sup>††</sup>Yoshikazu TOBA, <sup>††</sup>Jun ICHIJYO, <sup>†</sup>Masanobu HIROSE, <sup>†</sup>Yuanfeng SHE

<sup>†</sup>National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

<sup>††</sup>SEIKOH GIKEN Co.,Ltd., 296-1,Matsuhidai,Maysudo,Chiba, 270-2214, Japan.

E-mail: † { satoru-kurokawa, masa-hirose, yuanfeng.she }@aist.go.jp, †† yoshikazu.toba@seikoh-giken.co.jp

**Abstract** We have already proposed an antenna measurement system using bi-directional type optical fiber link module with microwave bi-directional coupler and vector network analyzer. In this paper, we demonstrate the antenna measurement for broadband antenna for electromagnetic interference measurement. Our optical fiber link antenna measurement system can eliminate the reflection wave from metal coaxial cables below 50 MHz.

**Keyword** Radio over fiber, vector network analyzer, antenna measurement, Broadband antenna, Antenna gain, Antenna factor

#### 1. はじめに

アンテナ特性測定に用いることが可能な光ファイバでアンテナと測定器であるベクトルネットワークアナライザ (VNA) を接続して S パラメータ測定が可能なシステムをすでに提案した[1][2]. 測定システムは, 光ファイバでの送受信が可能な光送信・受信モジュールとして, 送信用直接変調レーザダイオード (LD) と受信用フォトダイオード (PD) をそれぞれ内蔵した 5cm×5cm×1cm 程度のコンパクトな光送

受信モジュールとマイクロ波用方向性結合器を組み合わせて用いることにより, VNA のフル 2 ポート校正機能を用いた校正を可能とし, 送受信アンテナを用いた場合の S パラメータ測定を可能としたものである. 提案システムを用いれば, 同軸ケーブルでアンテナと VNA を接続して用いる従来から用いられるアンテナ測定システムと同様な測定が可能である.

本報告ではまず, 光送受信モジュールと VNA を用いたアンテナ測定システムの概要を述べる. 次に, 放射

EMI(Electromagnetic interference)測定に用いる広帯域アンテナの校正を実施することを想定した測定として、ボウタイアンテナとログペリオディックアンテナを組み合わせた複合アンテナを用いた測定結果を示す。

## 2. 双方向性 RoF モジュールの概要[2]

### 2.1 光送受信モジュールと方向性結合器を組み合わせた双方向性 RoF モジュールの周波数特性

光送受信モジュール (RoF モジュール) は, VNA からの出力信号をレーザ光の強度変調に変換し, 光ファイバで伝送する送信モジュールと, 光ファイバで伝送された強度変調光を電気信号に変換するフォトダイオードで受信する受信モジュールで構成され, 光ファイバ1本で光送信・受信モジュールを接続して利用することが可能である. VNA のポート1を方向性結合器の入力端子に接続し, RoF モジュールの受信ポートに方向性結合器の出力端子を接続し, RoF モジュールの送信ポートに方向性結合器のカップルポートを接続した. VNA のポート2には, 方向性結合器の入力端子を接続し, 方向性結合器の出力端子に RoF モジュールの出力端子を接続した. 方向性結合器のカップルポートには, RoF モジュールの入力端子を接続した. 方向性結合器は, 1 MHz~2 GHz までの結合度(coupling)=10 dB 程度の Minicircuits 社製 ZFDC-10-5 を用いた. 図3に双方向性 RoF モジュールの周波数特性測定概念図を示し, 図4に周波数特性測定結果を示す. 測定結果は,  $S_{11}$  と  $S_{22}$  が, 2GHz 程度まで-10dB 以下となった.  $S_{21}$  と  $S_{12}$  に 20dB 以上の差がある結果となった. これは,  $S_{12}$  が, 2個の方向性結合器のカップルポートを通過するためである.

### 2.2 双方向性 RoF モジュール 2 セットを用いたアンテナ計測システム

図1に示した双方向性 RoF モジュールと方向性結合器を組み合わせた構成 2 セットを VNA と組み合わせる図3に示すセットアップにより, VNA のフル 2ポート校正機能を用いることが可能である. 双方向性 RoF モジュールの RF コネクタ先端で校正を行った後に各種デバイス, アンテナの特性などの測定が可能である. 図4にシステムのダイナミックレンジ測定結果, 測定結果は, 2GHz まではアッテネータ値 ATT=60 dB(-60 dBm 程度)まで測定可能であり, 500 MHz までは ATT=70 dB(-70 dBm 程度)まで測定が可能であることを示している.

図5にリニアリティ測定結果を示す. 30 MHz~600 MHz の周波数範囲では, 入力レベル= -50 dBm 以上でリファレンスとなる ATT=0 dB の場合との差は±0.5 dB 以下, 30 MHz~1 GHz の周波数範囲で入力レベル=-40 dBm 以上での差は±0.3 dB 以下となることがわかる. このことから, アンテナ間減衰量 40dB 以下であれば, ±0.3 dB 以下のリニアリティでアンテナ特性が測定可能であることがわかる.

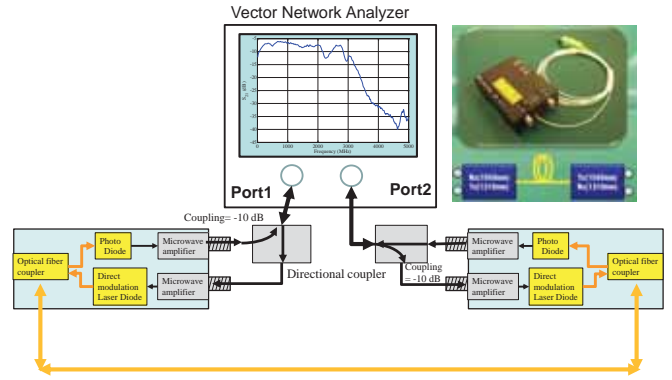


図1 双方向性 RoF モジュールの周波数特性測定概念図

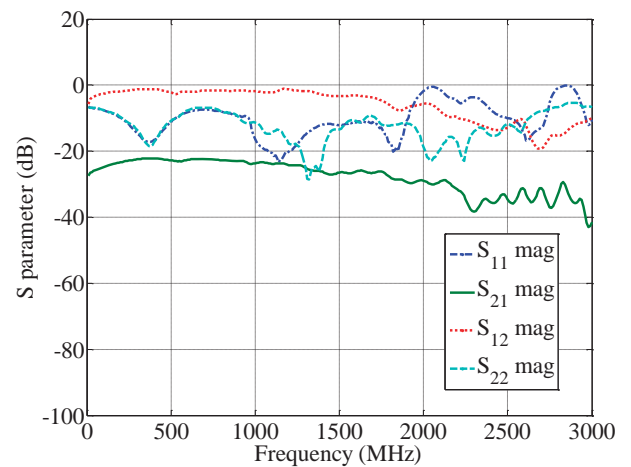


図2 双方向性 RoF モジュールの周波数特性測定結果

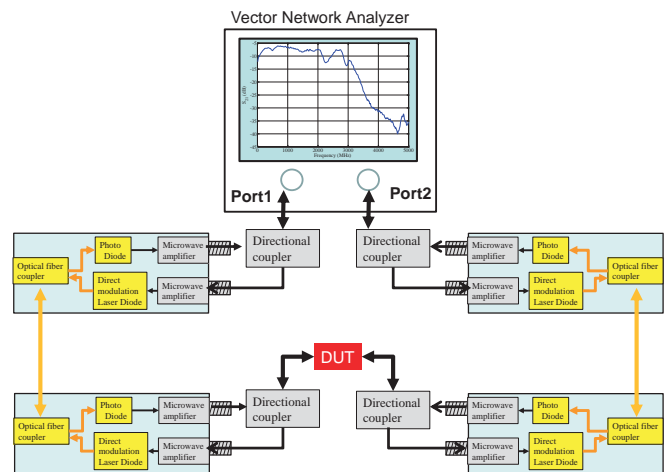


図3 双方向性 RoF モジュール 2 セットを用いたアンテナ計測システム概念図

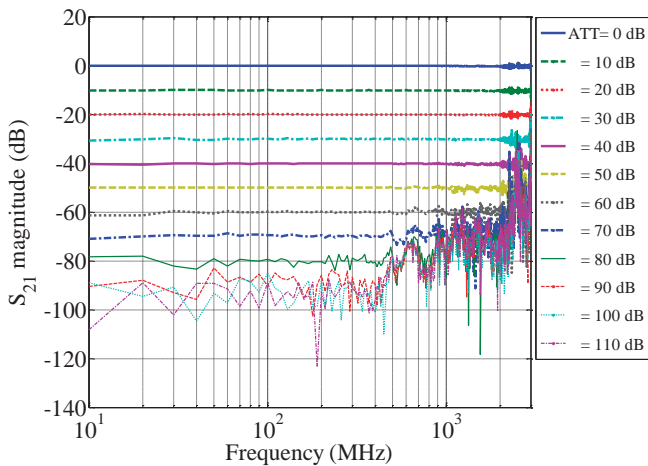


図4 双方向性 RoF モジュール2セットを用いたアンテナ計測システムのフル2ポート校正後の入力信号による応答特性測定結果

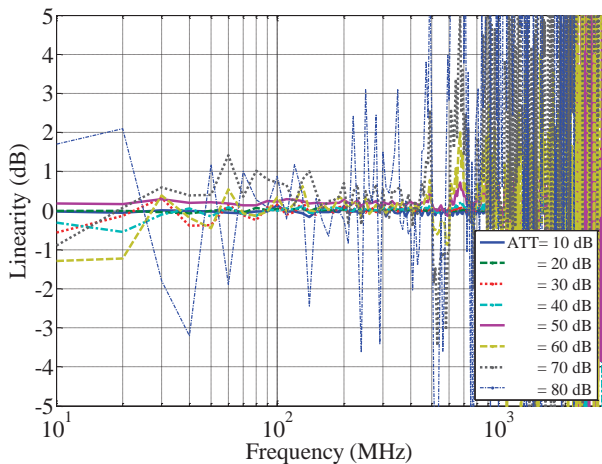


図5 双方向性 RoF モジュール2セットを用いたアンテナ計測システムのフル2ポート校正後の入力信号による応答特性測定結果

### 3. 放射 EMI 測定用アンテナの特性測定

#### 3.1 提案光システムによるアンテナ測定結果と同軸ケーブルシステムによるアンテナ測定結果

双方向性 RoF モジュールをアンテナ特性測定に用いることを想定して、30 MHz～1000 MHz の放射 EMI 測定に用いる広帯域アンテナの特性測定を実施した。アンテナは、ポウタイアンテナとログペリオディックアンテナを組み合わせたアンテナである TESEQ 社製 6112D バイログアンテナを2本用いて、アンテナ接続端にて電子校正キットを用いてアンノンスルーフル2ポート校正実施後に反射係数( $S_{11}$ )測定と伝送特性( $S_{21}$ )測定を実施した。アンテナは、床面から1.5 mの高さに対向して、アンテナ先端間距離=3 mとして設置し、電波暗室内で測定を実施した。VNAは、Keysight Technology 社 PNA ネットワークアナライザを用い、1 MHz～3 GHz、周波数間隔 1 MHz、IF=100 Hz として測定を実施した。図6に測定概念図を、図7にアンテナ測定実施時の写真を示す。

図8に  $S_{11}$  測定結果を同軸ケーブルを用いた場合の測定結果と比較して示す。図中[RoF Pol.H 3 m], [RoF Pol.V 3 m]はそれぞれアンテナ先端間距離 3 mでの提案光システムを用いた測定結果を示し、Pol.H は水平偏波、Pol.V は垂直偏波での測定結果を示し、[Coax Pol.H 3 m], [Coax Pol.V 3 m]はそれぞれ、アンテナ先端間距離 3 mでの同軸ケーブルシステムを用いた測定結果を示している。 $S_{11}$  振幅測定結果は提案光システムと同軸ケーブルシステムそれぞれの測定結果に差は無く、 $S_{11}$  位相測定結果ではほぼ同一である。測定結果は、被測定アンテナが、300MHz～1 GHzまでに水平偏波、垂直偏波の場合に差がある結果となった。これは、水平、垂直それぞれの場合で床面方向の放射パターンの差によるものと考えられる。提案光システムと同軸ケーブルシステムでの測定結果は垂直偏波の場合に 300 MHz～1 GHzで差がある結果となった。これは、金属である同軸ケーブルからの反射などの影響によるものと考えられるが、今後の検討課題である。 $S_{11}$  時間領域包絡線算出測定に提案光ケーブルでの測定結果と同軸ケーブルを用いた場合の測定結果に差は見られない。図9に  $S_{21}$  測定結果を同軸ケーブルを用いた場合の測定結果と比較して示す。 $S_{21}$  振幅測定結果は、水平偏波と垂直偏波の場合に床面電波吸収体、側面電波吸収体からの反射波の影響と考えられる差がある結果となった。同軸ケーブルでの測定結果には、40 MHz以下で同軸ケーブルの影響と考えられるディップが存在する結果となった。時間領域包絡線算出結果では、水平偏波と垂直偏波に 50 ns 以降に床面電波吸収体、側面電波吸収体からの反射波の影響と考えられる差がある結果となった。提案光システムと同軸ケーブルシステムの結果には 80 ns 以降に同軸ケーブルからの反射の影響と考えられる差がある結果となった。差の詳細な原因については、今後の検討課題である。これらの結果は、提案光システムを用いた測定では、同軸ケーブルからの反射の影響を含まない測定結果を得ることができることを示している。

#### 3.2 提案光システムによるアンテナ測定結果と同軸ケーブルシステムによるアンテナ測定結果の安定性比較

アンテナ間距離を 3 m～5 mまで、250 mm 間隔に移動させてバイログアンテナを用いて伝送特性( $S_{21}$ )測定を各アンテナ間距離で5回の測定を実施した。アンテナを水平方向に移動するため、測定は床面を金属面として測定を実施した。アンテナは、水平偏波として測定を実施した。図10, 11に  $S_{11}$  測定結果と各距離での5回測定の標準偏差を示す。図12, 13に  $S_{21}$  測定結果と各距離での5回測定の標準偏差を示す。測定結果は、アンテナを水平方向に移動して測定した場合の各距離での5回測定の結果の標準偏差が、 $S_{11}$  測定結果で 0.002 dB 以下、 $S_{21}$  測定結果で 0.001 dB 以下であった。図14, 15に同軸ケーブルを用いた場合の  $S_{11}$  測定結果、 $S_{21}$  測定結果各距離での5回測定の標準偏差をそれぞれ示す。標準偏差が、 $S_{11}$  測定結果で 0.0003 dB 以下、 $S_{21}$  測定結果で 0.0002 dB 以下であった。測定結果は、提案光システムは、同軸ケーブルに比べて安定性は劣るが、5回測定の標準偏差が 0.01 dB 未満であることから、電波暗室内でのアンテナ特性測定への適応が可能と考えられる。今後、実際のアンテナ利得校正、アンテナ係数校正測定へ適応したい。

#### 4. まとめ

本報告では、マイクロ波デバイスやアンテナの特性を同軸ケーブルを用いずにベクトルネットワークアナライザのフル2ポート校正機能を用いた校正実施後に測定可能な双方向性光ファイバリンクモジュールを用いたアンテナ測定を実施した。アンテナ特性測定として、30 MHz~1 GHz の放射 EMI 測定に用いるパイログアンテナについて、反射特性( $S_{11}$ )と伝送特性( $S_{21}$ )測定を実施した。提案システムを用いた測定では、同軸ケーブル測定結果でその影響が確認された 50MHz 以下でも同軸ケーブルの影響を受けない測定が可能である。さらに、提案光システムの安定性評価として、アンテナを水平方向に 3 m~5 m まで 250 mm 間隔で移動して各距離で 5 回測定を実施した場合の測定結果の標準偏差は反射特性( $S_{11}$ )と伝送特性( $S_{21}$ )ともに、0.002 dB 以下であり、アンテナ利得、アンテナ係数校正等の特性測定にも用いることが可能である。

今後は、放射 EMI 測定用各種広帯域アンテナのアンテナ利得、アンテナ係数校正に適応したい、

#### 文 献

- [1] 黒川悟, 鳥羽良和, 廣瀬雅信, 飴谷充隆, “簡易型光ファイバリンクモジュールを用いた EMI 測定用アンテナ特性測定,” 電子情報通信学会技術研究報告, PEM2013-10, AMT2013-09, Oct, 2013.
- [2] 黒川悟, 鳥羽良和, 廣瀬雅信, 飴谷充隆, “双方向性光ファイバリンクモジュールを用いたアンテナ測定システム,” 電子情報通信学会技術研究報告, PEM2015, Jan, 2016.

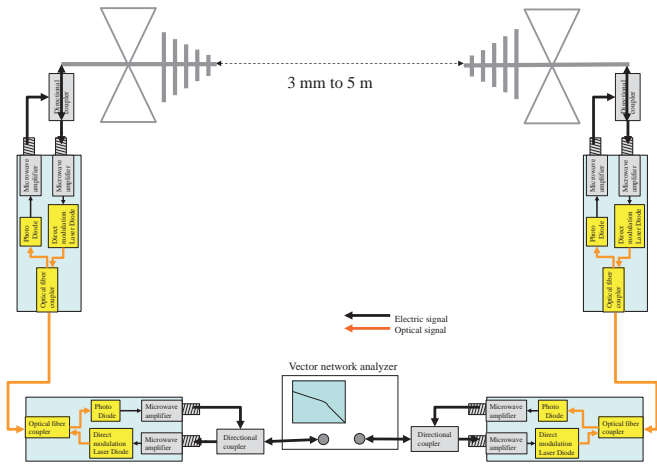


図 6 双方向性 RoF モジュールを用いたアンテナ測定概念図

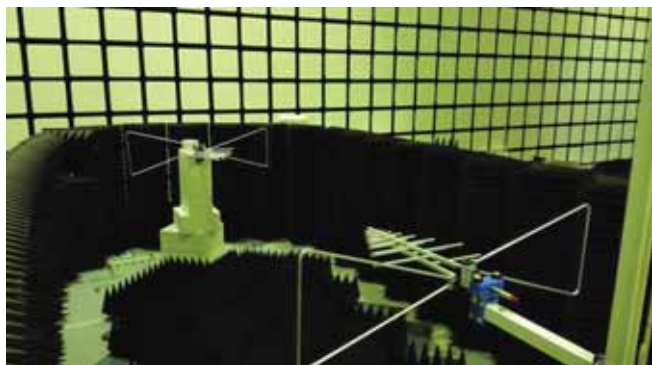


図 7 電波暗室内でのアンテナ測定の様子

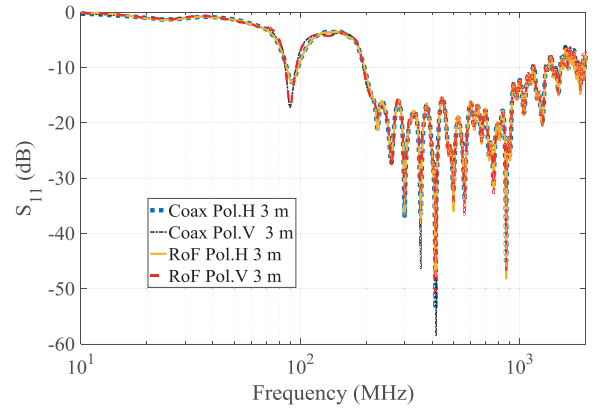


図 8(a)  $S_{11}$  振幅特性測定結果

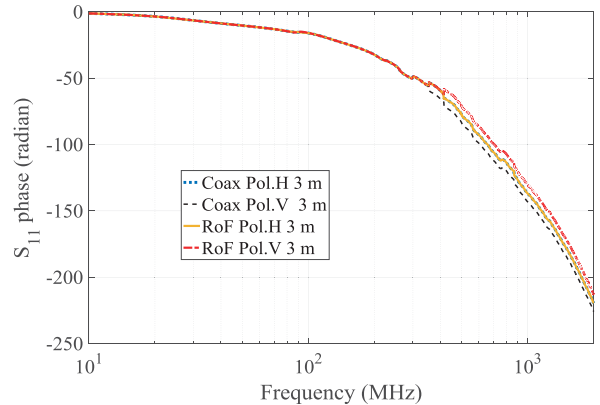


図 8(b)  $S_{11}$  位相特性測定結果

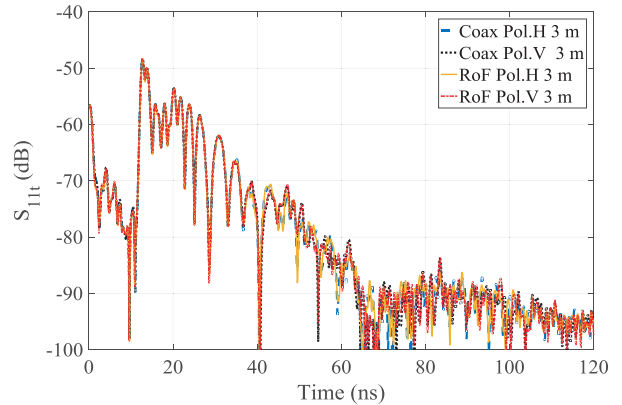


図 8(c)  $S_{11}$  時間領域包絡線算出結果

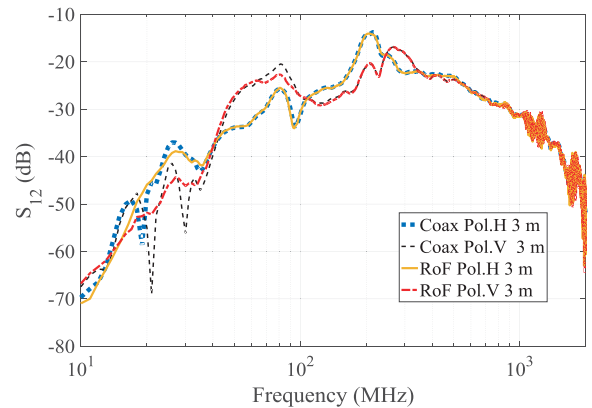


図 9(a)  $S_{21}$  振幅特性測定結果

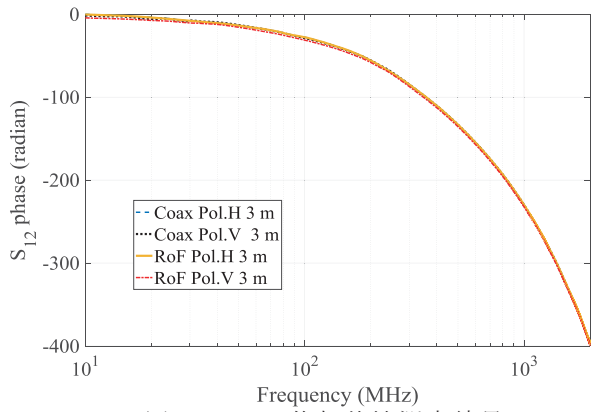


図 9(b)  $S_{21}$  位相特性測定結果

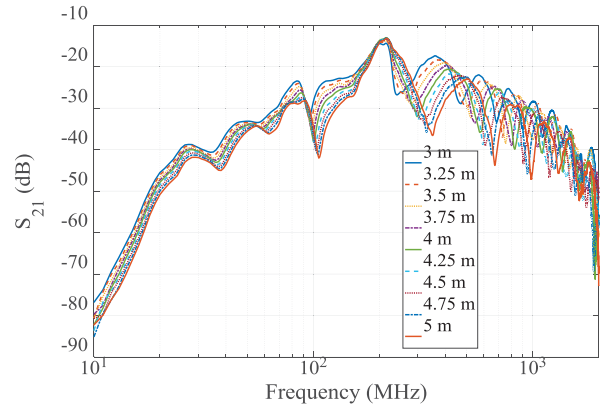


図 12  $S_{21}$  の各距離での測定結果

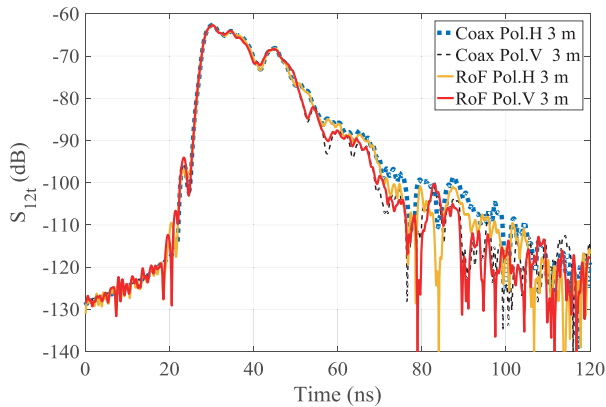


図 9(c)  $S_{21}$  時間領域包絡線算出結果

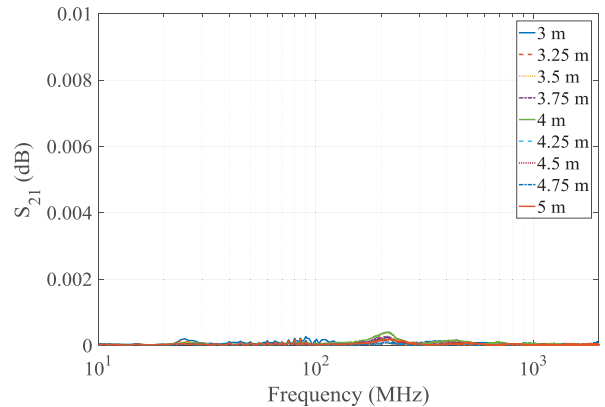


図 13  $S_{21}$  の各距離での 5 回測定の標準偏差

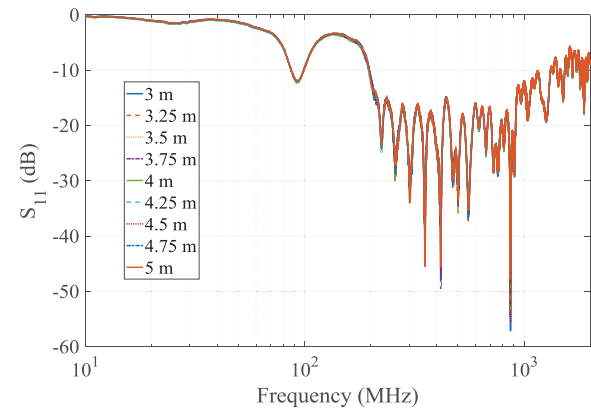


図 10  $S_{11}$  の各距離での測定結果

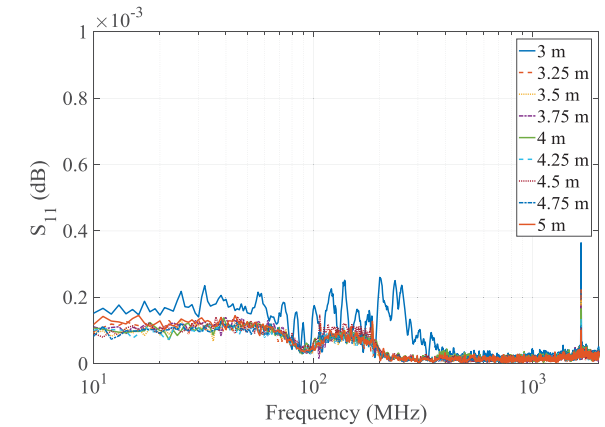


図 14  $S_{11}$  の各距離での 5 回測定の標準偏差(同軸)

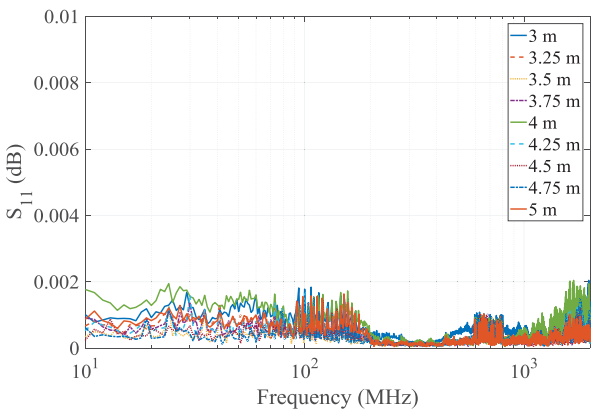


図 11  $S_{11}$  の各距離での 5 回測定の標準偏差

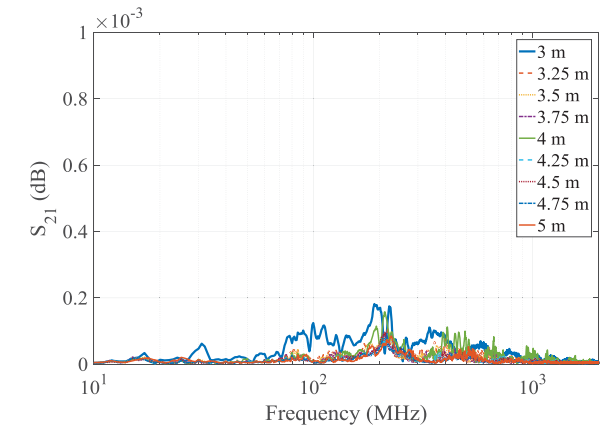


図 15  $S_{21}$  の各距離での 5 回測定の標準偏差(同軸)

# FRPM 管におけるマイクロ波伝搬・散乱特性の EO センサを用いた評価

東 良幸<sup>†</sup> 上野 文聖<sup>†</sup> 村田 博司<sup>†</sup> 奥田 忠弘<sup>‡</sup> 裕 昌也<sup>‡</sup> 岡村 康行<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府待兼山町 1-3

<sup>‡</sup> 栗本鐵工所 〒527-0108 滋賀県東近江市小八木町 1

E-mail: <sup>†</sup> yoshiyukiazuma113@s.ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々はマイクロ波導波モードと Electro-optic (EO) センサを用いた Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar (FRPM) 管の新しい非破壊検査法を提案している。提案する検査法は FRPM 管壁をマイクロ波の伝送線路とみなし、マイクロ波を FRPM 管壁部に沿って伝搬させ、欠陥や表面状態によるマイクロ波伝搬特性の変化を低擾乱な EO センサを用いて測定することで欠陥などを特定するものである。本報告では、FRPM 管壁に沿うマイクロ波の伝搬・散乱特性を低擾乱な EO センサを用いて測定することで FRPM 管壁内部および表面にある欠陥を特定することができたので、その結果について報告する。また、地中に埋設されている FRPM 管においても同様に測定実験を行ったのでその結果についても報告する。

キーワード Electro-Optic(EO)センサ, マイクロ波, FRPM 管, 非破壊検査

## Measurement of Microwave Propagation and Scattering Characteristics along Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar Pipe Using Electro-Optic Sensor

Yoshiyuki AZUMA<sup>†</sup> Fumiaki UENO<sup>†</sup> Hiroshi MURATA<sup>†</sup> Tadahiro OKUDA<sup>‡</sup>

Masaya HAZAMA<sup>‡</sup> and Yasuyuki OKAMURA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

<sup>‡</sup> Kurimoto LTD. 1 Koyagi, Higashiohmi, Shiga, 527-0108 Japan

E-mail: <sup>†</sup> yoshiyukiazuma113@s.ee.es.osaka-u.ac.jp

**Abstract** A new nondestructive inspection method for Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar (FRPM) pipes using microwave guided-mode propagation and photonic techniques has been proposed. This method is based on the precise measurement of a microwave guided-mode propagated along an FRPM pipe-wall by use of an Electro-Optic (EO) sensor. By measuring the microwave propagation and scattering characteristics with scanning an EO sensor on the surface of the FRPM pipe, a crack in the FRPM pipe was identified successfully. Identification of a crack in the FRPM pipe buried underground was also succeeded using the proposed inspection method.

**Keywords** Electro-Optic Sensor, Microwave, FRPM pipe, Nondestructive Inspection

### 1. はじめに

現在の日本の ICT ネットワークは様々なインフラストラクチャによって支えられているが、近年ではそのインフラストラクチャが順次耐用年数を迎えてきていることが問題となっている。そのため、検査時間が短く低コストで簡単に検査可能な非破壊検査法の需要が高まっている。効率的な非破壊検査法がまだ確立されていないインフラストラクチャの中に下水道管や電力ケーブル保護管、農業用水管などに利用されている Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar (FRPM) 管も含まれ

ている。

FRPM 管とは繊維強化プラスチックとモルタルを組み合わせた複合管である。FRPM 管は従来のコンクリート管や鉄管と比べて軽量であり、機械的強度や耐腐食性、耐震性、水密性が高く施工性も良いという特長を持つ優れたパイプである。また、FRPM 管は元来、堅牢で化学的にも安定であるため定期的に検査・補修を行うことで長寿命化させることも可能である。そのため、FRPM 管は幅広い分野で利用されており、特に、農業用水管に関しては国内敷設距離が 5 万 km にも達

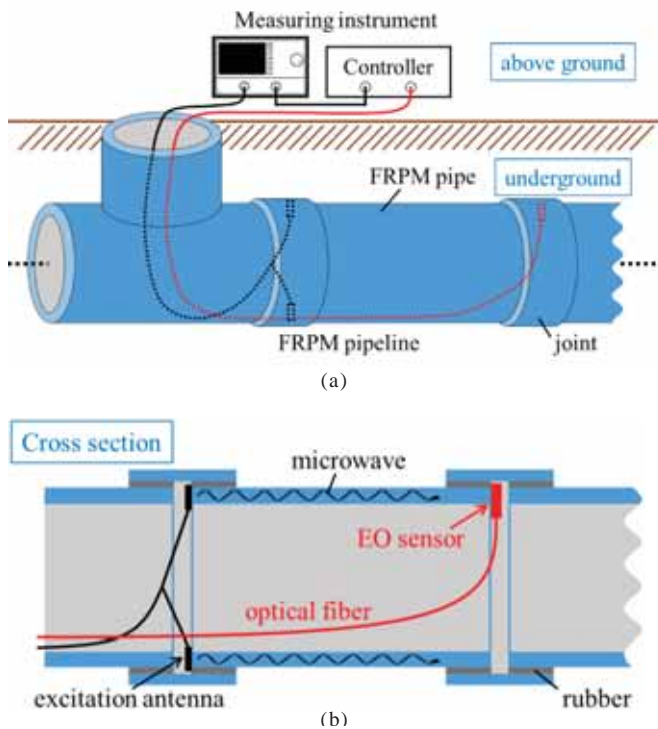


Fig.1 Schematic of the proposed inspection method.  
 (a)whole view, (b)cross section of FRPM pipeline.

している。したがって、短時間に広範囲の FRPM 管の診断ができるような効率的な非破壊検査法の要求が高まっている。

FRPM 管の非破壊検査法の候補として MRI や X 線、超音波を用いた方法が挙げられる [4]~[6]。しかし、MRI や X 線を用いる検査法では大型の設備が必要であるため、埋設されている FRPM 管には不向きである。また、超音波を用いる検査法では超音波を十分に侵入させやすくするために表面にゲル状の物質を塗布することが多く、広範囲に敷設されている FRPM 管には不向きである。さらに、人手に頼った検査法であるので径の小さい FRPM 管では中に人が入ることが出来ず検査が困難である。

そこで、我々は FRPM 管がマイクロ波に対して比較的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、新しい非破壊検査法としてマイクロ波伝搬と Electro-Optic (EO) センサを用いた検査法を提案している [7], [8]。提案する検査法は、FRPM 管をマイクロ波の伝送線路とみなし、マイクロ波を FRPM 管壁部分に伝搬させ、欠陥などの表面状態によるマイクロ波伝搬特性の変化を低擾乱な EO センサを用いて精密に測定することで、FRPM 管を非破壊で検査する。この検査法を用いれば、一度に数 m ~ 十数 m ごとの一括検査が可能になることから、検査時間の短縮が期待できる。また、検査自体は簡易であるので熟練した技術

者が必要なく人手不足の解消も期待できる。

この検査法では小さな欠陥によるマイクロ波伝搬特性の微弱な変化の測定や、FRPM 管壁表面から漏れ出る微弱なエバネッセント波の測定を行うため、マイクロ波信号の精密な測定が必要となる。LiNbO<sub>3</sub> や LiTaO<sub>3</sub> などの電気光学結晶を利用した EO センサは金属をほとんど含まないため、低擾乱で電磁界計測が可能である [9]~[11]。さらに、EO センサは光ファイバを用いて光で信号伝送を行うため、外部からの電磁的ノイズの影響をほとんど受けることなく信号を伝送することができる。したがって、EO センサは提案するマイクロ波伝搬を用いた FRPM 管の検査には非常に有効であると考えられる。

本稿ではマイクロ波と 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述べる。また、提案する検査法を用いて行った基礎実験や地中埋設 FRPM 管で行った測定実験について報告する。

## 2. 提案する FRPM 管の非破壊検査法

我々が提案するマイクロ波伝搬と EO センサを用いた非破壊検査法の概略図を Fig.1 に示す。この検査法では FRPM 管をマイクロ波の伝送線路と考える。まず、適切な励振アンテナを用いてマイクロ波 (1~6 GHz) の TE または TM モードを選択的に励振させる。FRPM 管の端面からマイクロ波を入力し、FRPM 管の管壁部にマイクロ波を導波させる。マイクロ波は管壁中および管壁表面に沿って伝搬する。そして、伝搬後のマイクロ波信号を管の終端あるいは適切な位置で測定することで、入力端から測定位置までの FRPM 管の情報を取得し、FRPM 管を非破壊で検査する。実際の FRPM 管は Fig.1 のように定尺 4 m 又は 6 m の FRPM 管が継手によって何段にも接続されており、継手部にあるわずかな隙間に励振アンテナや EO センサを設置することが可能である。

マイクロ波がシングルモード伝搬となる周波数においては、欠陥などによって散乱されたマイクロ波は反射・放射されるだけである。つまり、FRPM 管内の欠陥の有無をマイクロ波透過信号の信号レベルの変化によって確認できると考えられる。

一方、マルチモード伝搬となる周波数を用いた場合、欠陥などによって散乱されたマイクロ波は反射・放射するだけでなく、他のモードと結合することがある。このとき、マイクロ波透過信号の信号レベルはあまり変化しない。しかし、マルチモード伝搬を用いた場合はモードの遷移が起こることから、シングルモード伝搬の場合に比べてマイクロ波の電界分布が大きく変化する。そのため、より小さな欠陥にも敏感に反応すると考えられる。したがって、小型の EO センサを用い

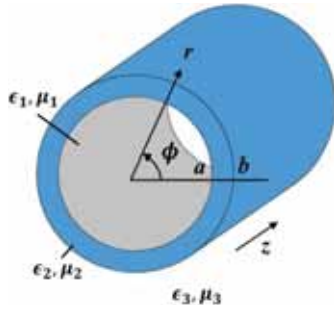


Fig.2 Structure of hollow cylindrical dielectric waveguide.

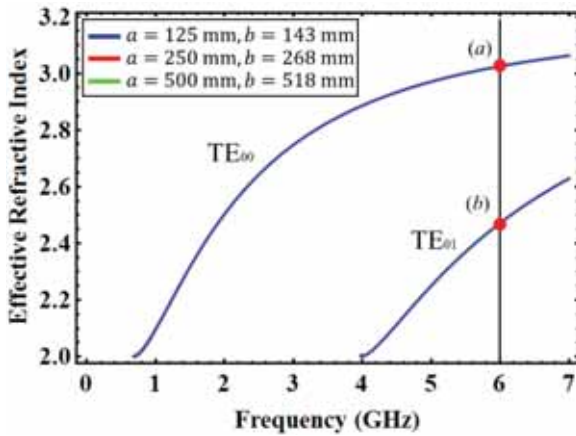


Fig.3 Dispersion curve.

れば FRPM 管に沿って伝搬するマイクロ波の電界分布を測定することができるので、マルチモード伝搬するマイクロ波の電界分布の変化を測定すれば、より小さな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、シングルモード伝搬とマルチ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。

### 3. FRPM 管におけるマイクロ波伝搬モード

Fig.2 のように FRPM 管を円筒形誘電体導波路と仮定してマイクロ波の伝搬モード解析を行った。FRPM 部分は内側や外側の領域よりも誘電率が高いので、低誘電率のクラッド領域に高誘電率のコア領域が挟まれているような円筒形誘電体導波路構造になっている。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、誘電体部分を伝搬すると考えられる。

#### 3.1. 固有値方程式の導出

円筒の内径を  $2a$ 、外径を  $2b$  とし、それぞれの領域

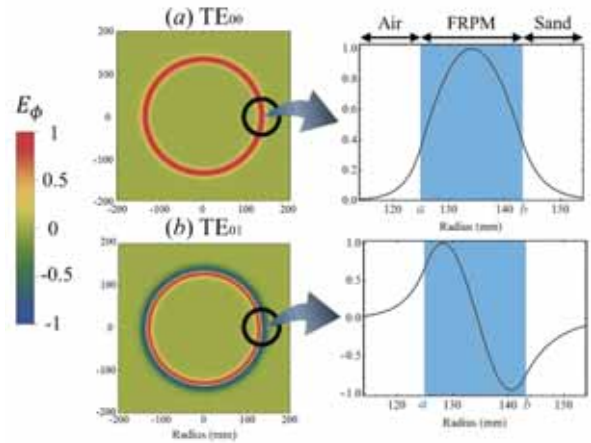


Fig.4 Electric field distributions in the cross section at 6 GHz.

(a)TE<sub>00</sub> モード, (b)TE<sub>01</sub> モード

での誘電率と透磁率は次のようにおく。

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

各媒質は等方性で様なものであり、電荷や電流はないものとする。

以前に固有値方程式の導出は報告しているので詳細は割愛する[7],[8]。TEモードの固有値方程式は次のように書くことができる。ただし、 $\partial/\partial\phi = 0$ とした。

$$M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21} = 0 \quad (1)$$

ここで、

$$M_{11} = \frac{\mu_1}{\gamma_1} \frac{I_1(\gamma_1 a)}{I_0(\gamma_1 a)} J_0(k_2 a) - \frac{\mu_2}{k_2} J_1(k_2 a) \quad (2)$$

$$M_{12} = \frac{\mu_1}{\gamma_1} \frac{I_1(\gamma_1 a)}{I_0(\gamma_1 a)} N_0(k_2 a) - \frac{\mu_2}{k_2} N_1(k_2 a) \quad (3)$$

$$M_{21} = \frac{\mu_3}{\gamma_3} \frac{K_1(\gamma_1 b)}{K_0(\gamma_1 b)} J_0(k_2 b) + \frac{\mu_2}{k_2} J_1(k_2 b) \quad (4)$$

$$M_{22} = \frac{\mu_3}{\gamma_3} \frac{K_1(\gamma_1 b)}{K_0(\gamma_1 b)} N_0(k_2 b) + \frac{\mu_2}{k_2} N_1(k_2 b) \quad (5)$$

#### 3.2. 分散曲線と電界分布

地中に埋設されている FRPM 管について考える。したがって、Fig.2 において誘電体を FRPM ( $\epsilon_2 = 10.24$ ,  $\mu_2 = 1$ )、誘電体の内側を空気 ( $\epsilon_1 = 1$ ,  $\mu_1 = 1$ )、外側を土 ( $\epsilon_3 = 4$ ,  $\mu_3 = 1$ ) とする[12],[13]。このとき、TE<sub>0n</sub>モードの分散曲線は Fig.3 のように描くことができる。

分散曲線からカットオフ周波数が約 0.77 GHz であり、約 0.77 GHz~4 GHz の周波数帯でシングルモード伝搬し、それ以上の周波数帯でマルチモード伝搬することがわかる。また、FRPM 管の厚みが一定であれば

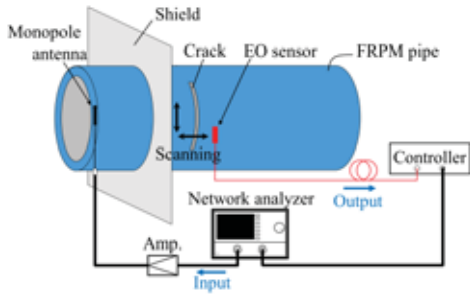


Fig.5 Experimental setup for measuring two-dimensional field distribution.

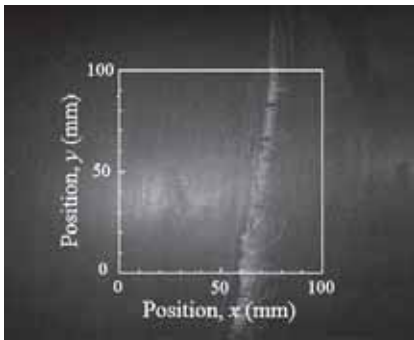


Fig.6 Outer surface of the FRPM pipe around a crack.

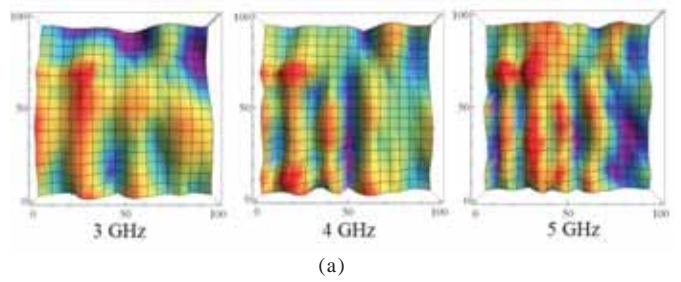
径が変化しても分散曲線はほとんど変化しないことがわかる。つまり、管の厚みが同じであれば様々な径のFRPM管に対して提案する検査法は利用できると思われる。

$a = 125 \text{ mm}$ ,  $b = 143 \text{ mm}$ とした場合、周波数 6 GHz においては 2つのモードが存在し、それぞれの電界分布は Fig.4(a), (b)のようになる。FRPM領域に電界が集中しており、管壁に沿って伝搬していることがわかる。また、FRPM管壁表面から空気や土の領域に浸み出して伝搬していることから、FRPM管の内部および表面の状態によってマイクロ波伝搬特性が変化すると考えられる。どちらの電界分布においても誘電率の高い外側に引き寄せられ外側に多く浸み出しており、妥当な結果が得られている。したがって、地中埋設FRPM管に対して提案する検査法を用いて診断することが可能であると考えられる。

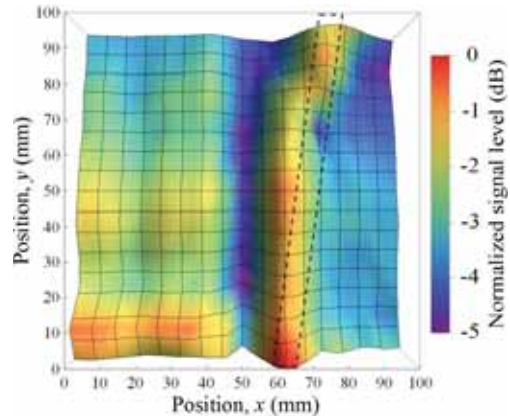
#### 4. FRPM管のマイクロ波伝搬特性基礎実験

##### 4.1. 外側表面からの測定

EOセンサをFRPM管の外側表面で2次元的に走査させ、欠陥周辺のFRPM管の外側表面のマイクロ波の電界の2次元分布の測定を行った。実験系を Fig.5 に示す。試料には  $a = 125 \text{ mm}$ ,  $b = 143 \text{ mm}$ ,  $L = 1000 \text{ mm}$ のFRPM管を用いた。ネットワークアナライザからマイクロ波(1~6 GHz)をモノポールアンテナを用いて



(a)



(b)

Fig.7 Two-dimensional electric field distribution on the outer surface of the damaged FRPM pipe. (a)Single frequency (3, 4, 5 GHz), (b)Average frequency (3~5 GHz)

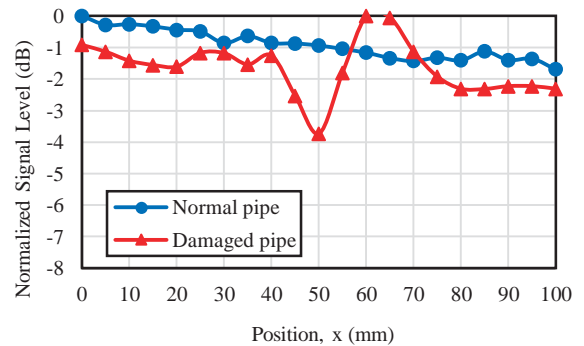


Fig.8 Electric field distribution at  $y=20 \text{ mm}$  of Fig.7.

FRPM管壁部に入力し、選択的にTEモードを励振させた。伝搬してきたマイクロ波信号をEOセンサ(精工技研CS-1210)を用いて測定した。Fig.6に示す白線で囲われた範囲でx軸方向に5mm間隔、y軸方向に10mm間隔でEOセンサを走査させ、各位置でのマイクロ波電界強度を測定した。

測定結果を Fig.7 に示す。Fig.7(a)のように単一周波数であればコヒーレンスが高く、FRPM管端面などで生じる不要な共振や干渉が起こるため、欠陥による電界分布の変化が埋もれてしまい欠陥の特定が困難である。FRPM管端面などで生じる不要な共振や干渉は周波数によってFRPM管内の様々な位置で起こることに

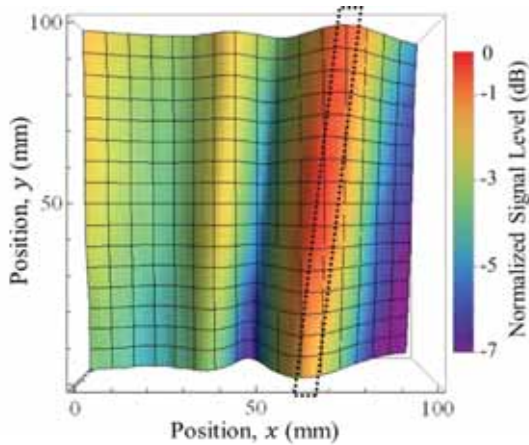


Fig.9 Two-dimensional electric field distribution on the inner surface of the damaged FRPM pipe (frequency average 3~5 GHz).

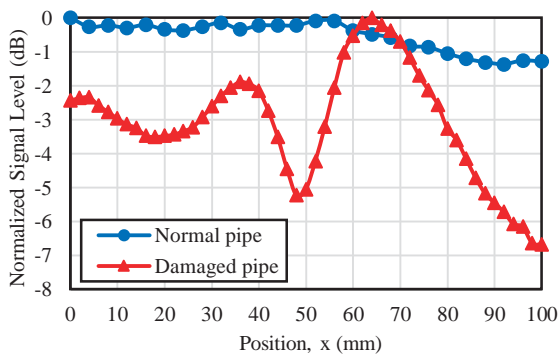


Fig.10 Electric field distribution at  $y=20$  mm of Fig.9.

対して、欠陥による電界分布の変化はどの周波数においても欠陥周辺に現れると考えられる。つまり、測定結果を周波数軸上で平均化することで FRPM 管端面などで生じる不要な共振や干渉を抑え、欠陥による電界分布の変化のみをピックアップできる。周波数 3~5 GHz で平均化した結果を Fig.7(b)に示す。点線で囲まれている位置が欠陥の位置であり、欠陥直上でマイクロ波信号レベルが強くなり、欠陥の直前で弱くなっていることがわかる。これは欠陥によってマイクロ波が散乱され反射・放射が起こり、直上では欠陥が放射されるマイクロ波の新たな波源となることから、信号レベルが強くなり、また、直前では同相で反射された反射と進行波とが干渉したことが原因だと考えられる。

Fig.8 は、Fig.7(b)の  $y = 20$  mm におけるマイクロ波の電界強度分布を示している。比較のために、欠陥のない健全管において同様の測定実験を行った結果も記載した。Fig.8 において健全管ではマイクロ波が伝搬するにつれて信号レベルが低下している。これは、マイクロ波の伝搬損失が現れており、妥当な結果が得られている。これより、FRPM 管表面を EO センサを走査させることで、欠陥の位置や大きさを同定できることがわかった。

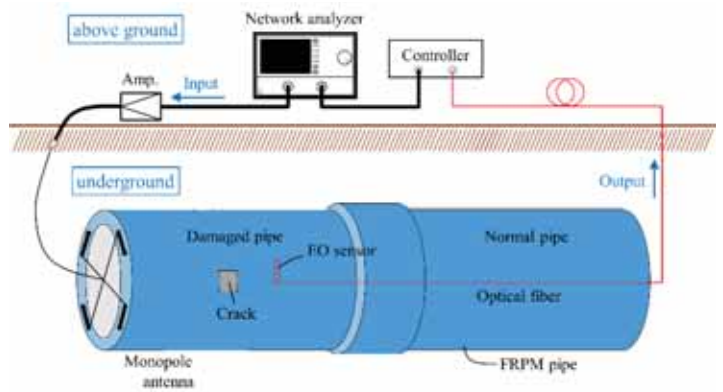


Fig.11 Electric field distribution at  $y=20$  mm of Fig.9.

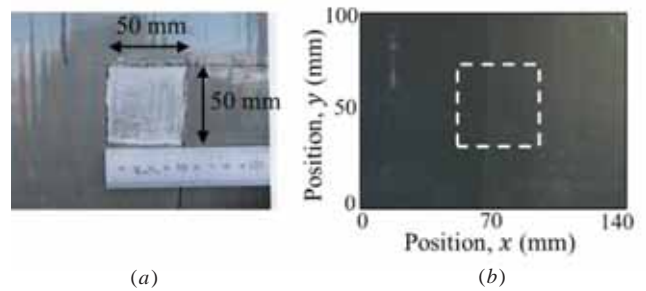


Fig.12 surface of buried FRPM pipe (a)outer surface, (b)inner surface.

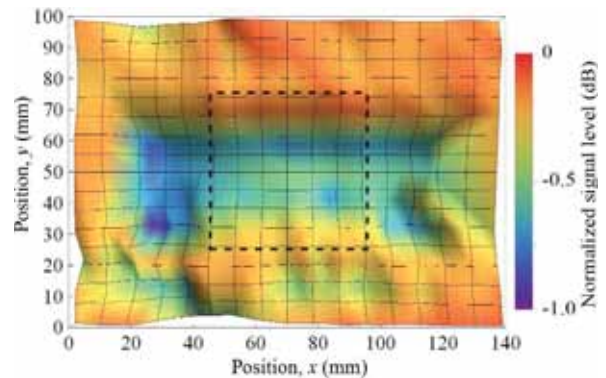


Fig.13 Two-dimensional electric field distribution on the inner surface of the damaged buried FRPM pipe (frequency average 3~5 GHz).

#### 4.2. 内側表面からの測定

前節と同様の測定実験を測定する場所を FRPM 管の内側表面に変更して行った。また、治具の関係上 EO センサを走査する間隔を、 $x$  軸方向に 2 mm 間隔、 $y$  軸方向に 20 mm 間隔に変更してマイクロ波電界分布の測定を行った。

測定結果を Fig.9 に示す。前節と同様に周波数 3~5 GHz で平均化している。また、Fig.10 は Fig.9 の  $y = 20$  mm におけるマイクロ波の電界強度分布を示している。外側表面を測定した場合と同様に欠陥の直上でマイクロ波信号レベルが強くなり、欠陥の直前で弱くなっている。Fig.7, 8 と Fig.9, 10 を比較すればわかるよ

うに、内側から測定した結果の方が外側からの測定結果よりも明瞭で大きな変化が得られた。振幅が最大となっている領域と欠陥の位置も内側からの測定の方がより良い一致を得た。この理由としては、外側に比べて内側の方がレンズ効果により散乱されたマイクロ波が集中したことが原因だと考えている。詳細については現在検討中である。この結果より、FRPM管の内側表面のマイクロ波信号の電界分布を測定することで、外側表面にある欠陥を特定できることがわかった。

## 5. 地中埋設 FRPM 管での測定実験

Fig.11のような実験系を用いて地中埋設 FRPM 管で欠陥の同定実験を行った。試料には  $a = 500 \text{ mm}$ ,  $b = 518 \text{ mm}$ ,  $L = 6000 \text{ mm}$  の FRPM 管が継手で接続されている全長  $12000 \text{ mm}$  の FRPM 管を用いた。ネットワークアナライザからマイクロ波(1~6 GHz)をアンテナを用いて FRPM 管端面に入力し、TE モードを選択的に励振した。伝搬後のマイクロ波信号を EO センサを用いて測定した。FRPM 管の外側表面には Fig.12(a)のような幅  $50 \text{ mm}$ , 長さ  $50 \text{ mm}$ , 深さ数  $\text{mm}$  の剥離されたような欠陥がある。Fig.12(b)は FRPM 管の内側表面を示しており、点線の位置の外側に Fig.12(a)の欠陥がある。Fig.12(b)に示す範囲で  $x$  軸方向に  $5 \text{ mm}$  間隔,  $y$  軸方向に  $10 \text{ mm}$  間隔に EO センサを 2 次元的に走査させ、マイクロ波電界分布の 2 次元分布を測定した。

測定結果を Fig.13 に示す。欠陥の前でマイクロ波信号レベルが弱くなっており前章の結果と同様の傾向が得られている。また、欠陥の形に応じた幾何学的な傾向が確認できる。これより、地中埋設 FRPM 管においても欠陥を同定可能であり、提案する検査法は有効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法について述べた。地中に埋設されている FRPM 管におけるマイクロ波伝搬モードの解析を行うことで、埋設されている FRPM 管に対しても提案する検査法が有効であることを示した。また、FRPM 管の内側の電界分布を測定することで外側にある欠陥を同定できることを明らかにした。さらに、地中埋設 FRPM 管においても、内側表面の電界分布を測定することで外側表面にある欠陥を特定することに成功した。

今後は、より詳細な解析を進めるとともに、位相情報を用いるなどして進行波成分と散乱波成分を分離することで、欠陥をより正確に同定できるようにする予定である。また、埋設管を模した FRPM 管で測定を行うことで、埋設環境下でのより詳細なマイクロ波伝搬特性の評価を進める予定である。

## 謝辞

電磁界解析および評価実験において、貴重なご意見を頂きました大阪大学・真田篤志博士、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] M.J.S. Lowe, D.N. Alleyne, P. Cawley, "Defect detection in pipes using guided waves," *Ultrasonics*, 36 (1998), pp. 147-154
- [4] E. Marfisi, C. J. Burgoyne, L. D. Hall, and M. H. G. Amin, "Use of the MRI technique to study concrete and FRP reinforced concrete behavior," *Research Leading to the Development of Design Guideline for the Use of FRP in Concrete Structure - 2nd ConFiberCrete Young Researcher Conference*, Corfu, Greece, June 2002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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/APMP - 2014*, TuED-2, Oct. 2014
- [8] F. Ueno, Y. Azuma, H. Murata, T. Okuda, M. Hazama, and Y. Okamura, "Nondestructive Inspection and Crack Detection of FRPM Pipe Using Electro-Optic Sensor and Microwave Guided-Mode Propagation," *PEM 2015-12*, Jan. 2016.
- [9] H. Togo, S. Mochizuki, and N. Kukutsu. "Optical fiber electric field sensor for antenna measurement," *NTT Technical Review*, vol.7, no.3, Mar. 2009.
- [10] H. Togo, N. Shimizu, and T. Nagatsuma, "Tip-on - fiber Electro-optic probe for Nearfield Measurement," *NTT Technical Review*, vol.4, no.1, Jan. 2006.
- [11] Lee, D. J., Kwon, J. Y., Kang, N. W., Lee, J. G., & Whitaker, J. F. "Vector-Stabilized Reactive-Near-Field Imaging System. Instrumentation and Measurement. *IEEE Transactions*, Vol.60, No.7, 2702-2708, July 2011.
- [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.
- [13] M. Ito. "土壌吸着水分系の誘電的性質." *農業土木研究*. 別冊, Vol.1965, No.11, pp. 13-18, .

## 光応用電磁界計測（PEM）時限研究専門委員会について

電子情報通信学会 光応用電磁界計測（PEM）時限研究専門委員会は、平成 24 年 4 月に発足した新しい研究専門委員会です。

PEM 研は、急速に進化・変貌を遂げつつある電磁界環境を正確に評価・計測するために、電磁界と光・物質との多彩な応答を利用した、新しい電磁界計測技術を追究することを目標としています。アンテナや電磁両立性等の電磁界計測分野と光センサ・光デバイス等の応用光学分野の専門家がコアメンバーです。対象とする電磁界は、アンテナや高周波回路だけでなく、プラズマ電磁界、宇宙到来電磁波など、人工および自然発生電磁界全般を含みます。また、それらと関連性の深い各種の現象についても議論したいと考えています。光・電磁界・マイクロ波・アンテナ等の様々な最先端研究分野を有機的かつ横断的に結びつけた新しい研究領域を開拓して、その成果を社会へ還元することを目指しています。

### <委員名簿>

委員長	村田 博司	大阪大学
副委員長	鈴木 敬久	首都大学東京
	水野 麻弥	情報通信研究機構
幹事（研究会運営）	笹川 清隆	奈良先端科学技術大学院大学
幹事（財務）	羽賀 望	群馬大学
幹事補佐	佐々木 愛一郎	日本電信電話株式会社
専門委員	石井 望	新潟大学
	石山 和志	東北大学
	今莊 義弘	スタック電子株式会社
	菅野 敦史	情報通信研究機構
	近藤 順悟	日本ガイシ株式会社
	齊藤 一幸	千葉大学
	佐藤 圭	株式会社 NTT ドコモ
	佐藤 源之	東北大学
	余 元峰	産業技術総合研究所
	セツト ジイヨン	東京大学
	染野 薫	バイテックグローバルエレクトロニクス株式会社
	田島 公博	NTT アドバンステクノロジー株式会社
	土屋 明久	神奈川県産業技術センター
	鳥羽 良和	株式会社精工技研
	日景 隆	北海道大学
	日隈 薫	住友大阪セメント株式会社
	久武 信太郎	大阪大学
	平田 晃正	名古屋工業大学
	深沢 徹	三菱電機株式会社
	柳澤 幸樹	株式会社多摩川電子
顧問	大西 輝夫	株式会社 NTT ドコモ
	黒川 悟	産業技術総合研究所
	陳 強	東北大学

## ☆ ソサイエティ大会シンポジウム講演のご案内

9月20日（火）～23日（金）に北海道大学にて開催される電子情報通信学会ソサイエティ大会中、PEM研のシンポジウムセッションを20日の午後に開催予定です。多数の皆様のご参加をお待ちしております。

## ☆ 第2回 PEM 研究会のご案内

11月24日（木）、25日（金）に、機械振興会館（東京）にて第2回 PEM 研究会を開催致します（EMCJ、WPT 研との共催）。多数の皆様のご参加をお待ちしております。

## ☆ Facebook “Pem 研究会（光で電波を測る）”

Facebook に PEM 研究会のページを作りました。PEM 研究会の活動紹介や光応用電磁界計測の情報発信を進める予定です。フォロー、「いいね！」をよろしくお願ひします。



## ☆ PEM 研究会コミュニティサイト “PEM-com”

PEM 研究会のコミュニティサイト「PEM-com」を開設しました。

このサイトは、PEM 分野の技術交流活性化のための様々な情報発信に活用する予定です。現在、チュートリアル記事等を公開しています。URL : <http://pem.main.jp/>

