

第6回 光応用電磁界計測研究会

—PEM2017報告・一般—

PEM2017-10～15

2018年 1月26日(金)

於： 姫路・西はりま地場産業センター(じばさんびる)

主 催： 電子情報通信学会
光応用電磁界計測特別研究専門委員会

併 催： 電子情報通信学会
フォトリックネットワーク研究会 (PN)
電磁界理論研究会 (EMT)
光エレクトロニクス研究会 (OPE)
レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE)
エレクトロニクスシミュレーション研究会 (EST)
マイクロ波・ミリ波フォトリック研究会 (MWP)
電気学会 電磁界理論技術研究会 (IEE-EMT)

第6回 光応用電磁界計測研究会

プログラム

テーマ：「 PEM2017 報告・一般 」

2018年 1月 26日 (金) 9:30 ~ 12:00

9:30 - 9:55 PEM2017-10

〔依頼講演〕 PEM2017 報告

水野麻弥 (情報通信研究機構)

9:55 - 10:20 PEM2017-11

〔依頼講演〕 MTLC ファントムを用いたミリ波ばく露下の非侵襲温度測定
～ PEM 2017 Best Visuals Award 報告 ～

鈴木敬久 (首都大)

10:20 - 10:45 PEM2017-12

〔一般講演〕 FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波の散乱・反射と非破壊検査・
診断技術への応用

東良幸・佐々木博礼・村田博司 (阪大)

奥田忠弘・裕 昌也 (栗本鐵工所)

10:45 - 11:10 PEM2017-13

〔一般講演〕 光応用電磁界計測技術を用いた広帯域ホーンアンテナ用アンテナ係数測定システム

黒川悟・廣瀬雅信 (産総研)

11:10 - 11:35 PEM2017-14

〔一般講演〕 光電界センサを用いた電界計測システムの国際標準化の現状

飴谷充隆・黒川 悟 (産総研)・鳥羽良和 (精工技研)

今莊義弘・植松浩司 (スタック電子)

11:35 - 12:00 PEM2017-15

〔一般講演〕 変調レーザを用いた高周波磁界計測

石山和志 (東北大)

場 所： 姫路・西はりま地場産業センター(じばさんびる)
主 催： 電子情報通信学会 光応用電磁界計測特別研究専門委員会
(<http://www.ieice.org/~pem/>)
併 催： 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会(PN)
電磁界理論研究会(EMT)
光エレクトロニクス研究会(OPE)
レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE)
エレクトロニクスシミュレーション研究会(EST)
マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会(MWP)
電気学会 電磁界理論技術研究会(IEE-EMT)

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： 2018年 1月 26日

発行所： (一社) 電子情報通信学会

光応用電磁界計測(PEM)特別研究専門委員会

[依頼講演] PEM2017 報告

水野 麻弥

情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: mmizuno@nict.go.jp

あらまし 2017年10月5日から6日の2日間、スイスのチューリッヒにて2nd International Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements (PEM2017) が開催された。光技術を応用した電磁界計測を中心として、光ファイバやアンテナ、信号処理など広い分野の研究を対象として行われた。本報告では、PEM2017の概要について紹介する。

キーワード 光学、電磁界、計測技術、ワークショップ

Report on PEM2017

Maya MIZUNO

National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795
Japan

E-mail: mmizuno@nict.go.jp

Abstract 2nd International Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements (PEM2017) was held in Zurich, Switzerland on October 5-6, 2017. PEM2017 was an international workshop devoted to the research, development, and application of photonics in electromagnetic measurements and closely related fields, such as fiber-optic signal transmission, photonic signal processing, display integrated antennas, and photonic device technology. I report summary of the workshop.

Keyword Photonics, Electromagnetics, Measurement Technique, Workshop

1. はじめに

2017年10月5日から6日の2日間、スイスのチューリッヒにて2nd International Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements (PEM2017) [1] が開催された。スイス・英国・米国・日本等から約35名の参加があり、全員参加型の活発な議論が交わされた。

本ワークショップは、電子情報通信学会の光応用電磁界計測特別研究専門委員会 (PEM 特別研専) [2]が中心になり、光技術を利用した電磁界計測技術に関する情報交換の場を提供することを目的として2015年にスタートした国際ワークショップである。第2回目となる今回は、スイス連邦工科大やスイス政府、通信関連企業の出資による研究財団であるIT²IS Foundationと共同で実施した。光を応用した電磁界計測を中心として、光ファイバやアンテナ、信号処理など広い分野の研究を対象とし、2件基調講演と5件の招待講演、一般講演 (口頭13件、ポスター7件) が行われた。標準化や産業化に向けたアンテナや電気光学 (EO) 材料を用いた電磁界計測の実例などが紹介され実りあるワークショップとなった。本報告では、講演の概要等について紹介する。

2. 講演の概要

講演初日は、本ワークショップのCo-chairであるPEM特別研専委員長の村田博司氏 (大阪大学) の挨拶に始まり、1件の基調講演と2件の招待講演、2つの一般講演のセッションが行われた。基調講演では、黒川悟氏 (産業技術総合研究所) より「Antenna measurement using PEM technologies」という題名で、光デバイスを用いて開発した電界計測システムの現状についてお話しいただいた (図1)。金属材料からなる同軸ケーブルに比べて計測機器からの反射を抑えることができるため、近傍界測定など様々な用途へ利用できる可能性が示された。また、招待講演ではセットジヨン氏 (東京大学) に「Optical sampling with a picosecond pulsed laser and its application to high-speed time-domain E-field sensing」という題名で時間領域電界測定のためのEOプローブを用いた160GHzを超える電界計測システムについてお話しいただき、Myles Capstick氏 (IT²IS Foundation) には「Photonic measurement technology for electrically small antennas」という題名でRF over fiber技術を用いたデバイスにより摂動を最小限に抑えたインピーダンス測定例を紹介いただき、電磁界計測分野における光技術の進展を実感することができた。



図 1 基調講演
Fig. 1 Keynote speech

2 日目には、基調講演として Lukas Novotny 氏 (Swiss Federal Technical Institute Zurich) より「Controlling light-matter interactions on the nanometer scale」という題名でナノ光アンテナによる近接場イメージングや操作の最前線についてお話しいただいた。微小領域において電磁界応答を利用、促進するナノフォトニクスが、材料科学や生物学などにおいて今後更に応用されることが期待される内容であった。招待講演では Benjamin Loader 氏 (National Physical Laboratory) に「Development of optically-based sensors for E-field measurement」という題名で様々な電磁界センサーの特徴について紹介いただき、また、久武信太郎氏 (岐阜大学) には「Photonics-based millimeter and THz-wave visualization techniques for industrial applications」という題名で同期と非同期型 EO 検出法による電界測定に関してお話しいただいた。さらに最後のセッションでは、和氣加奈子氏 (情報通信研究機構) に「Measurement of E-fields from devices in intermediate frequencies using an optical sensor」に関してお話しいただき、無線通信、レーダー、無線電力伝送などの機器から放射された電磁界を評価することを目的とした計測技術の開発ならびに実状を垣間見ることができた。

一般講演においては、Basic theory and techniques of photonics applied to EM measurements と Photonics applied to EM measurement systems and new applications, New technologies in photonics applied to EM measurements, Biomedical applications of photonics applied to EM measurements という 4 つのセッションに分けて発表が行われた。アンテナや EO 材料の開発、それらを応用した電磁界の強度と位相、周波数の計測など標準化、産業化に向けた様々な発表があった。ま

た、Schmid & Partner EngineeringAG 社と招待講演者により、一般講演の中から光応用電磁界計測分野の向上に貢献する研究を行った研究者と、優れた電磁界の可視化を行った研究者が選定され、以下のように「Best scientific contribution award」と「Best visuals award」が授与された。

■ Best scientific contribution award

水野 麻弥 (情報通信研究機構)

“Reflection property measurement of skin in THz range using spectrometer with photoconductive antennas”

■ Best visuals award

鈴木 敬久 (首都大学東京)

“Non-invasive temperature elevation measurement under millimeter wave exposure with transparency phantom including micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystals”

(敬称略)

ワークショップ期間中には、講演に加えて、協賛企業による展示が催され、光を応用した様々な周波数の電磁界計測技術に関する意見交換が終始活発に行われ、盛況のうちにワークショップを終えることができた。PEM 特別研専では、今後も本ワークショップならびに光応用電磁界計測技術の発展に寄与する活動を推進する。

謝 辞

本ワークショップを開催するにあたりご支援・ご協力を賜りました、実行委員やスタッフ、ならびに講師の皆様、協賛企業、参加者の皆様に心より感謝申し上げます。

文 献

- [1] PEM2017, <https://www.itis.ethz.ch/pem2017/> (参照 2018/1/1).
- [2] 光応用電磁界計測特別研究専門委員会 <http://www.ieice.org/~pem/1> (参照 2018/1/1).

[依頼講演]MTLC ファントムを用いたミリ波ばく露下の非侵襲温度測定 — PEM 2017 Best Visuals Award 報告 —

鈴木 敬久[†]

[†] 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: [†] y_suzuki@tmu.ac.jp

あらまし 本プレゼンテーションでは PEM 2017 Best Visuals Award に関する報告を行う。PEM 2017 では、高周波ばく露による温度分布の変化を測定するための新しい非侵襲的な手法を紹介した。この手法では高空間分解能で温度変化に対する感度が高い感温液晶マイクロカプセルを温度プローブとして用いる。ここでは手法の適用例としてミリ波帯電磁界を感温液晶マイクロカプセルを分散させた透明ゲルファントムに照射したときの内部の温度分布の可視化を示す。また予備的検討として現在取り組んでいる、順伝搬型ニューラルネットワークを用いた可視化画像からの温度の定量手法に関して紹介する。

キーワード ミリ波, ばく露評価, 感温液晶マイクロカプセル, 温度分布可視化, 順伝播型ニューラルネットワーク

Non-invasive temperature elevation measurement under millimeter wave exposure with transparency phantom including micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystals — A report on the PEM 2017 Best Visuals Award —

Yukihisa SUZUKI[†]

[†] Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Metropolitan University 1-1 Minamiosawa, Hachioji, Tokyo 192-0397 Japan

E-mail: [†] y_suzuki@tmu.ac.jp

Abstract This presentation shows a report on the PEM 2017 Best Visuals Award. A new non-invasive method to measure the changes of temperature distribution due to high frequency electromagnetic field power absorption is introduced at PEM 2017 presentation. A micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystal (MTLC) is employed as the temperature probe because of its nature of high resolution and high sensitivity. In this paper, we show the temperature visualization with transparency gel phantom including MTLC for the dosimetry under millimeter-wave exposure. As the preliminary investigation, a feedforward neural network method is examined to quantify the temperature distribution from the visualization image.

Keywords millimeter-wave, dosimetry, micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystal, visualization of temperature distribution, feedforward neural network

outline

- Introduction
- Visualization of millimeter-wave power absorption inside the phantom
- Quantification of temperature using a feed forward neural network
- Conclusion

1

Back ground

- Recently, applications using electromagnetic field have become common in the millimeter wave (MMW) high frequency band.
 - Vehicle collision prevention systems
 - Millimeter wave scanner for airport security screening
 - High-speed wireless communication
- Exposure to MMW in daily life is expected to increase

2

Introduction

- The penetration depth of Millimeter-waves (MMWs) is smaller than a few mm into the highly water content biological tissues.
 - High power level MMWs exposure causes highly localized temperature elevation within shallow area from the surface of the biological bodies.

Example; Penetration depth of water

frequency	30 GHz	70GHz	100GHz	300GHz	1THz
penetration depth [μm]	~500	~350	~250	~180	~160

3

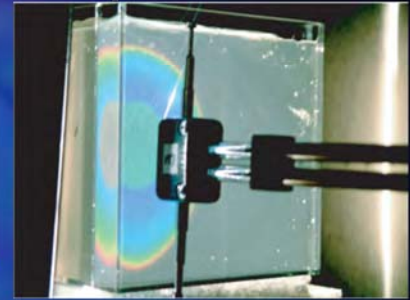
Evaluation of absorption power

- To evaluate absorption power for MMW experimentally, it is required high spatial resolution measurement method.
- We are developing the temperature visualization method using micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystals as temperature probes.

4

MTLC method with transparent phantom

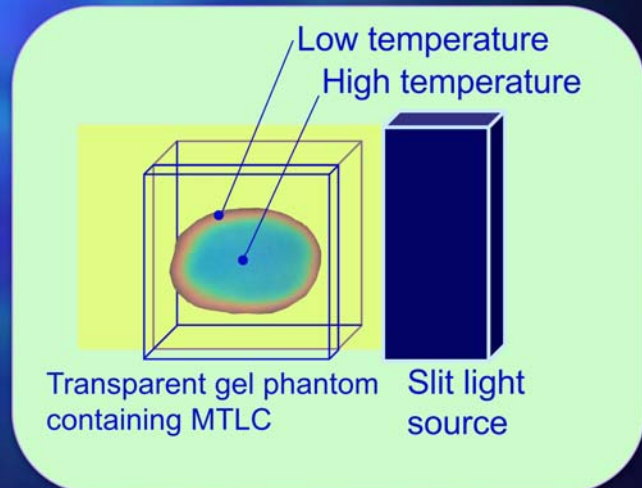
- Example of micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystals (MTLC) method



- high spatial resolution
- non-destructive
- non-invasive



1.45 GHz, 14 W exposure



5

Purpose

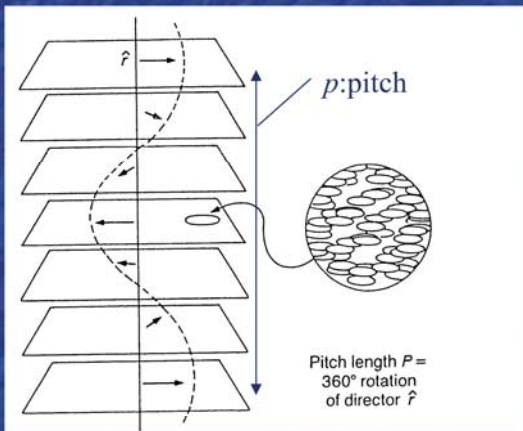
- To show the feasibility of MTLC method to detect the temperature distribution changes due to MMW frequency band exposures.
- To examine quantification of temperature using a feed forward neural network from captured image toned by MTLC.

6

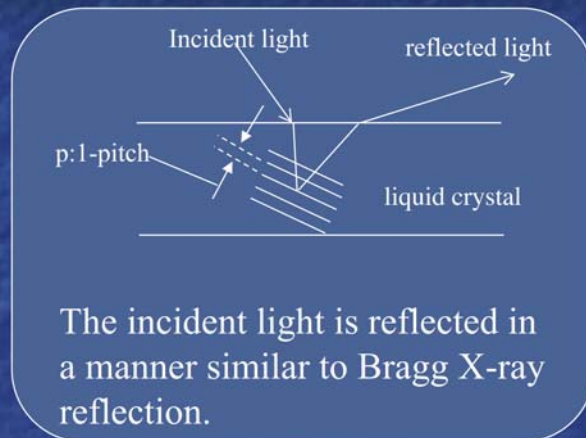
Thermo-chromic liquid crystal

- Liquid crystal of cholesteric phase is used for temperature sensor.

The cholesteric liquid crystal structure



D. Dabiri and M. Gharib, Experiments in Fluids 11, 77-86(1991)



$$\lambda = 2np \cos \frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi_i}{n} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi_s}{n} \right) \right\}$$

λ : wave length of reflected light
 p : pitch

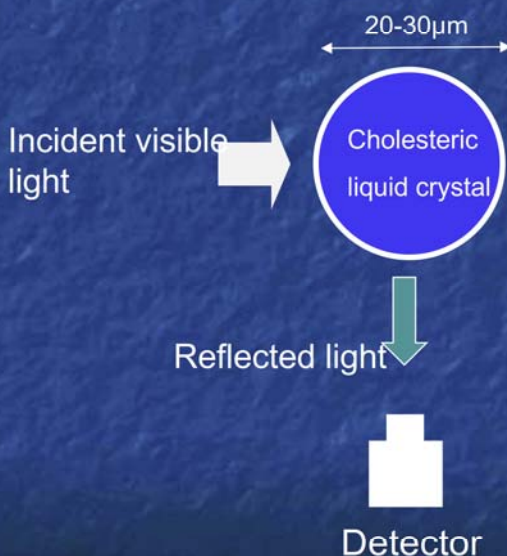
As the temperature of the liquid crystal changes.

→ The pitch p of liquid crystal changes.

Micro-encapsulated Thermo-chromic Liquid Crystal (*MTLC)

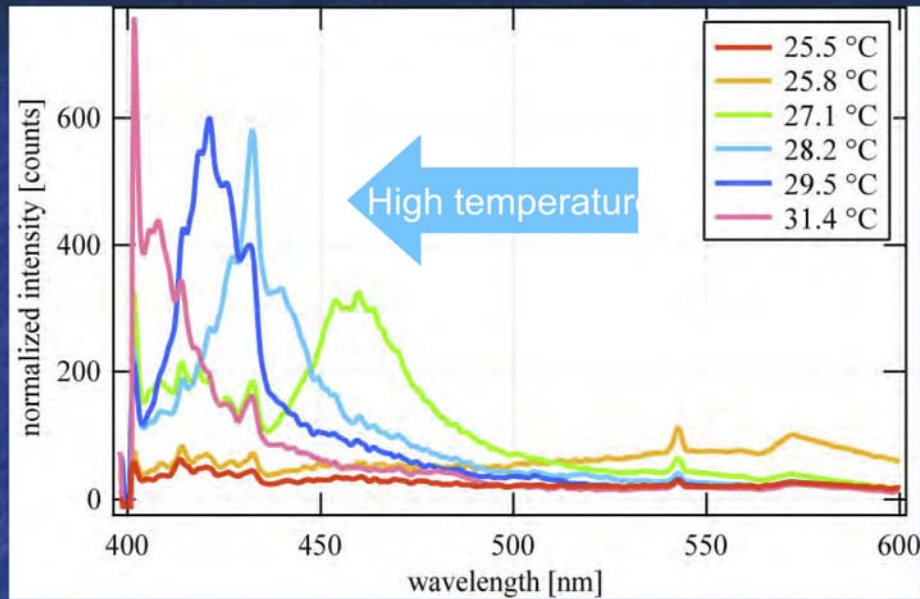
Micro-encapsulated liquid crystal are used in this study.

*MTLC is produced by Japan Capsular Products.



- The diameter of MTLC is about 20 to 30 micrometers.
- Liquid Crystal is capsulated into urea resin.
- MTLC is used by suspending in the water or transparent gel.
- Reflected light is measured suitable detector (CCD, spectroscope)
- Advantage of MTLC : visualize temperature without affecting the dielectric properties surrounding matrices.

Scattering light from MTLC



Coloring width: 25-30°C



- Spectrum of scattering light is depend on temperature

Visualization of millimeter-wave power absorption inside the phantom

Transparent Gel Phantom Containing MTLC

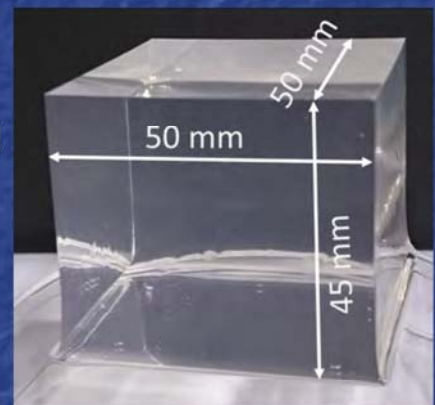
Desirable properties for phantom

- High viscosity to prevent convection.
- High transparency to observe scattered light.
- Adjustable its dielectric properties to those of biological tissue.

- We examined “carrageenan” as a substitute, which is extracted from seaweeds.
- It forms gel by mixing counter-ions.

Gel phantom*

- Phantom mimics high water content tissue
- “carrageenan” is used as a substitute
 - Higher transparency
 - Sufficiently strength for self standing
- MTLC toned from 25°C to 30°C are dispersed uniformly



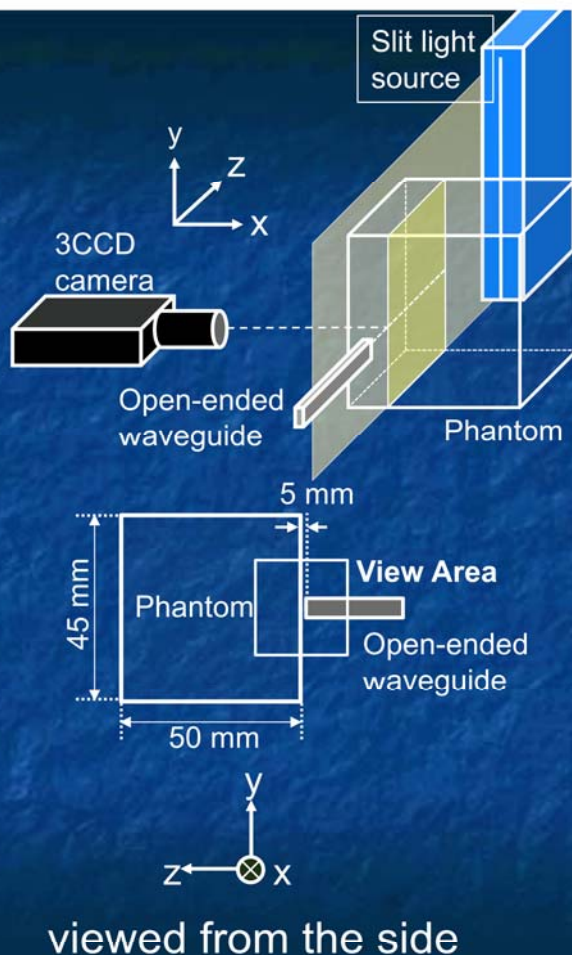
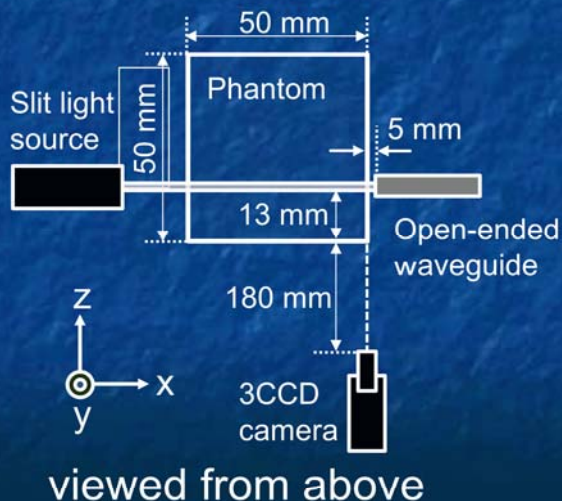
Composition of phantom

MTLC	Carrageenan	Sucrose	KCl	Pure water
0.06 wt%	2.0 wt%	30.0 wt%	0.5 wt%	67.5 wt%

[*] Y. Suzuki et al., IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation, Vol. 13, pp.744-750

Setup for MTLC visualization

Basic configuration of MTLC measurement

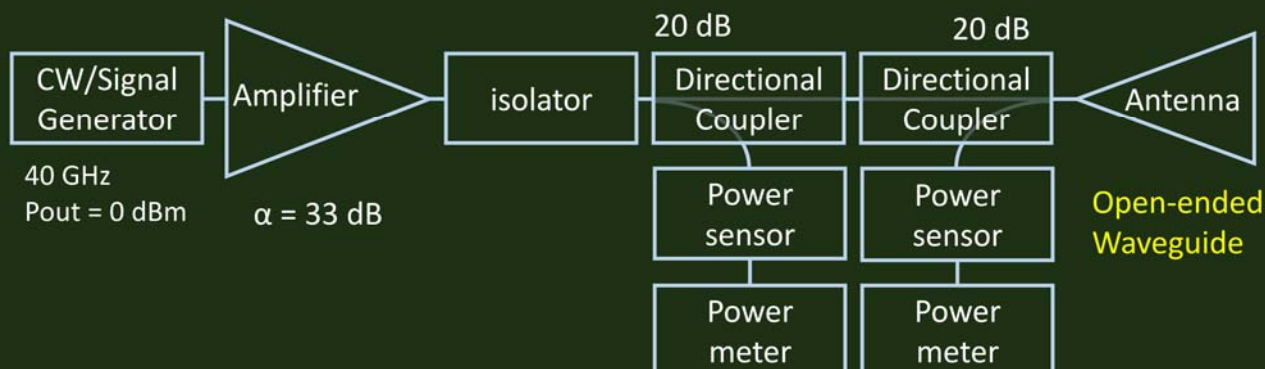
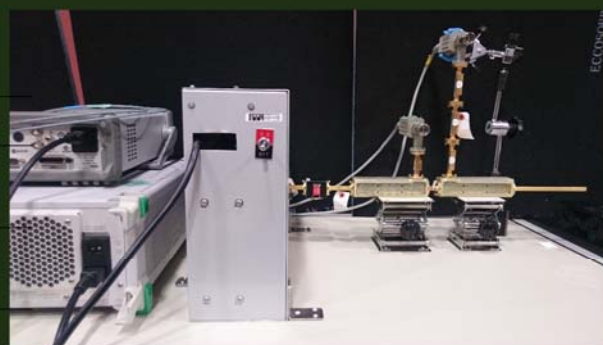


13

Exposure system

Exposure condition

Frequency	40 GHz
Input power for open-ended waveguide	28 dBm(0.416W)
Distance between phantom and waveguide	5 mm
Exposure time	420 s



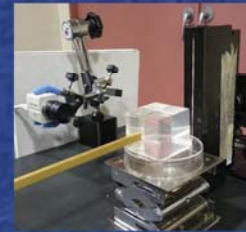
14

Exposure Experiment for 40GHz

- Temperature distributions at a lateral surface and inside of the phantom was measured.



Surface

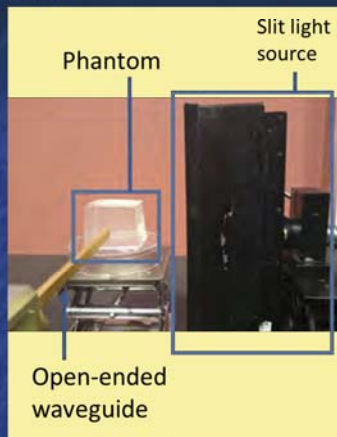


Inside

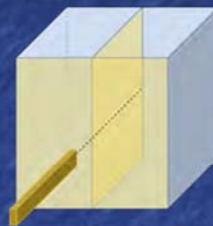
Exposure condition

Frequency	40 GHz
Input power	27.9 dBm (616 mW)
Distance between the phantom and the open-ended waveguide	5mm
Exposure duration	420 s

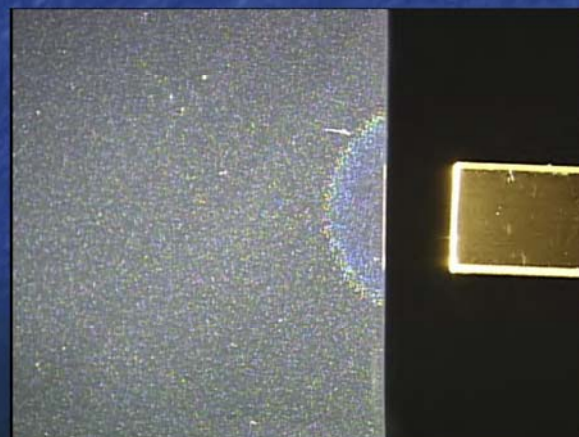
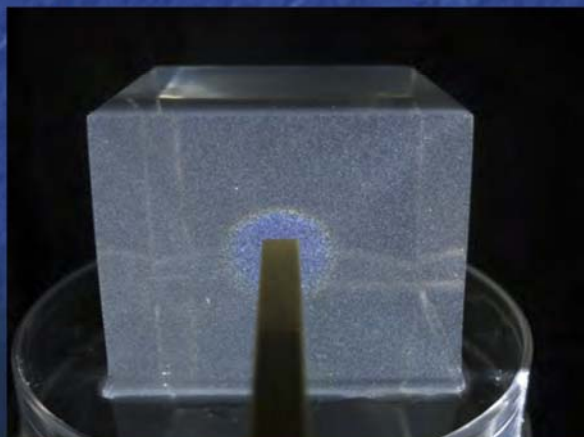
Surface



Results of visualization



Inside



Results of visualization

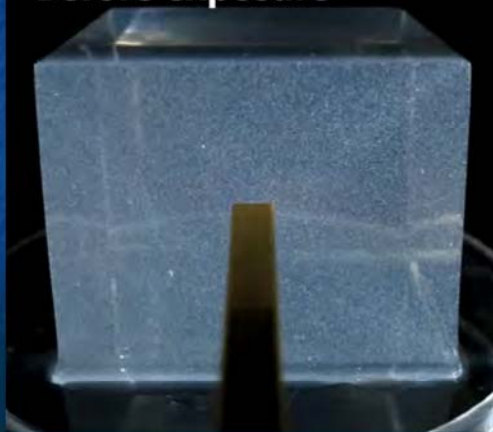
Surface



Inside



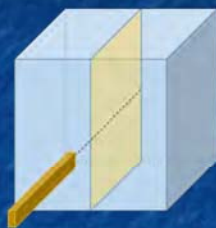
Before exposure



- The coloring region within the phantom expands as time goes on.
- The center of the coloring region is blue, and the edge of the coloring region is red.

Results of visualization

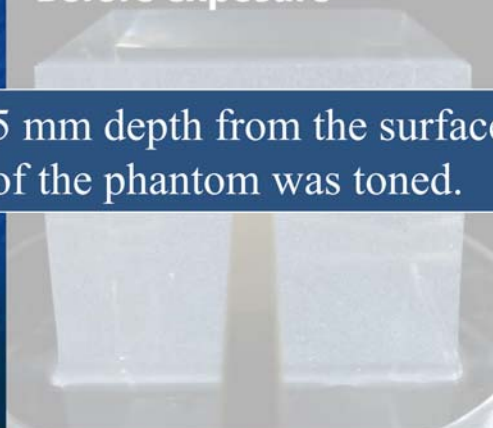
Surface



Inside

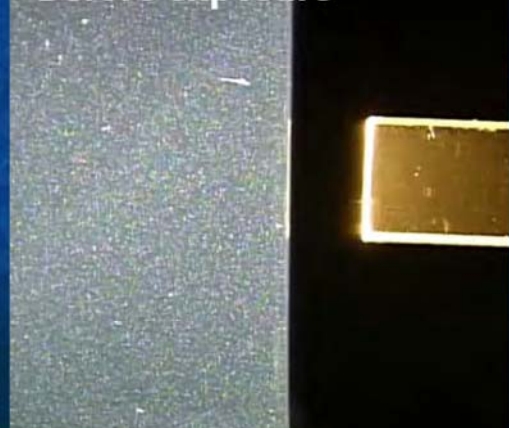


Before exposure



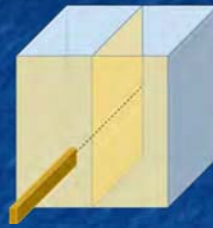
5 mm depth from the surface of the phantom was toned.

Before exposure

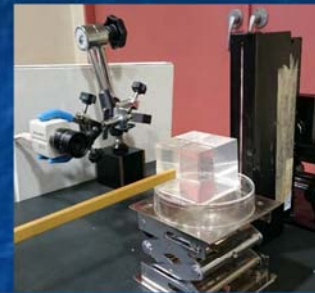


Results of visualization

Surface



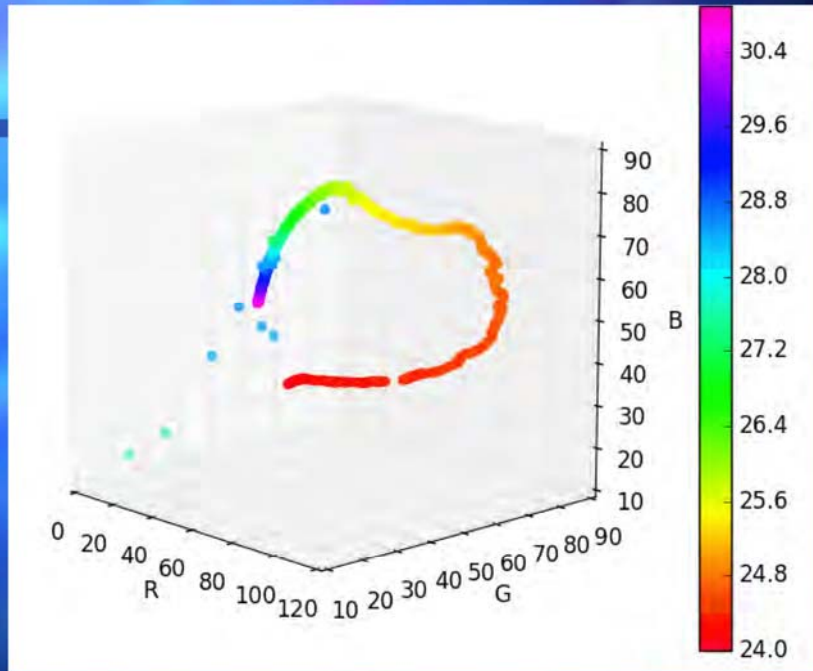
Inside



We have visualized the highly localized temperature elevation by 40 GHz MMWs exposure with MTLC-method. We confirmed the usability of MTLC method for the MMWs exposure.

Quantification of temperature using
a feed forward neural network

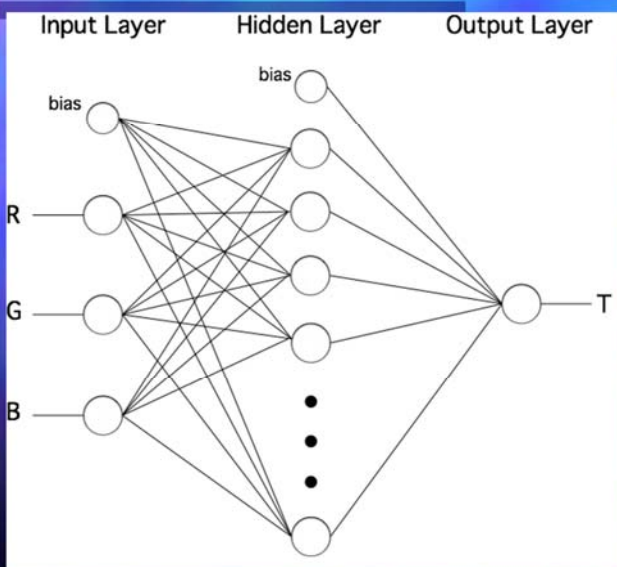
Trajectory of temperature in the RGB space



- Temperature value (T) is as a function of R, G, and B.
- Relationship between T and R, G, B is nonlinear mapping.
- This relationship is expressed by multi-layer neural network (perceptron).

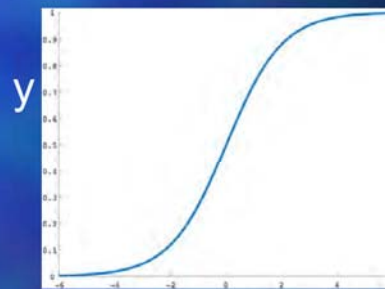
21

Feed forward neural network



Feed forward neural network

- Hidden layer : 1
- Unit number of hidden layer : 1000
- Activation function for hidden layer :
-> sigmoid function
- Activation function for output layer :
-> Identity function



x
sigmoid function

22

Training procedure for NN

Evaluation function

$$E(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \|T_n - y_n(\mathbf{x}_n, \mathbf{w})\|^2$$

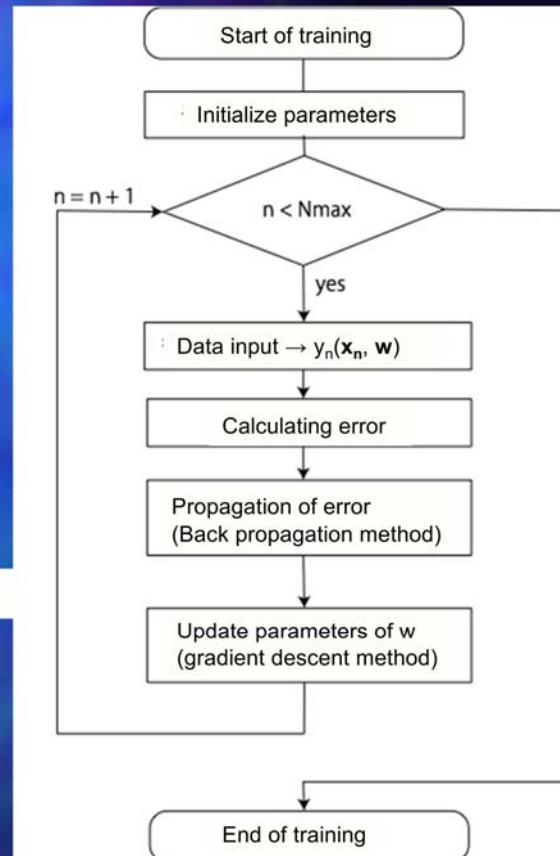
T_n : Measured temperature for n-th number

\mathbf{x}_n : RGB vector for n-th number

\mathbf{w} : Weighting parameter for NN

$y_n(\mathbf{x}_n, \mathbf{w})$: Predicted temperature for n-th number

Obtainig weighting parameters of \mathbf{w} to minimize the evaluation function $E(\mathbf{w})$



23

Acquisition of learning data

MTLC solution

Fluoroptic thermometer

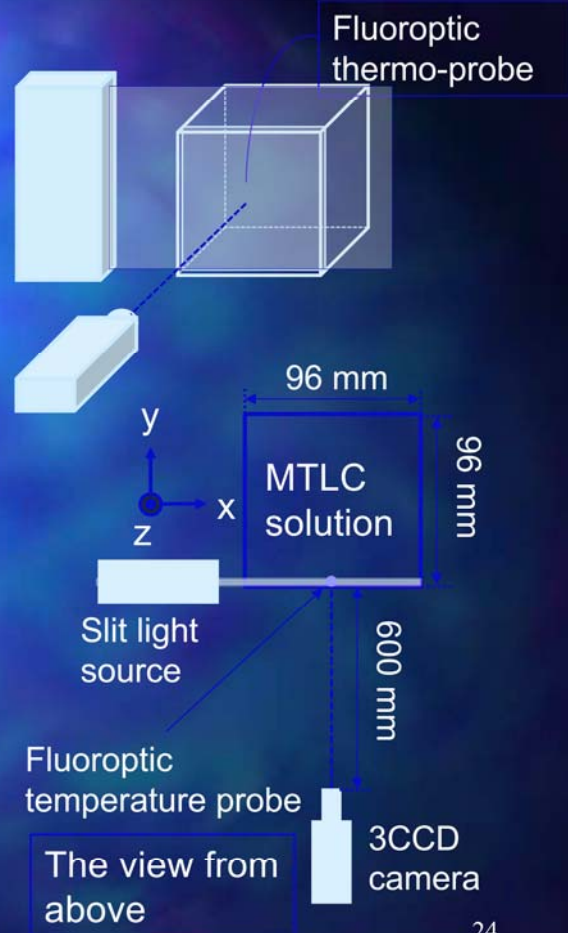
View area

Fluoroptic temperature probe

Temperature measurement point



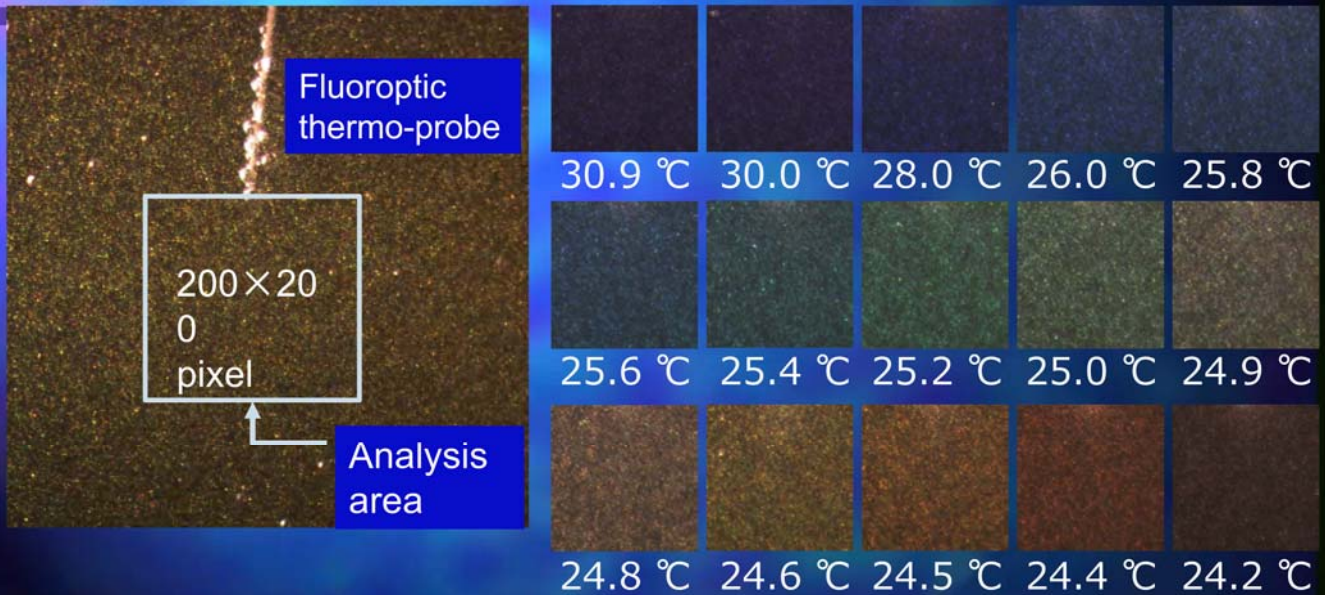
The view from front



The view from above

24

Obtained learning data

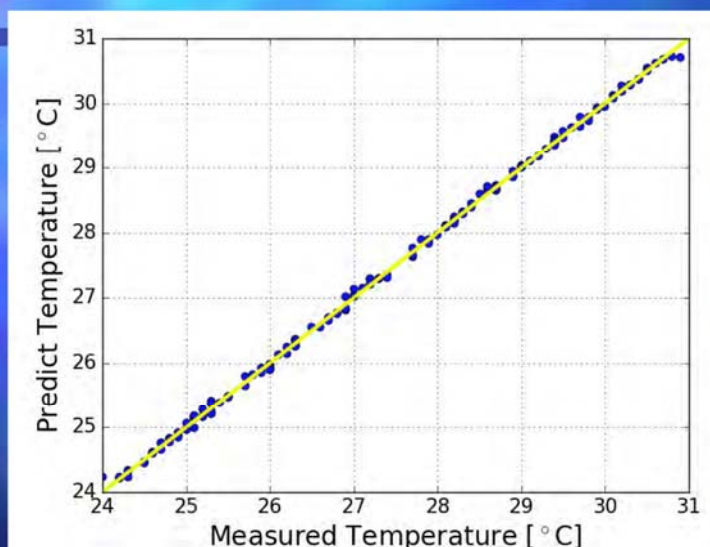


1374 sets of Learning data are obtained from 30.9 to 24.2 °C

25

Confirmation of accuracy for NN

1237 sets of data are used for training the neural network.
The rest of 137 sets of data are used for testing NN.



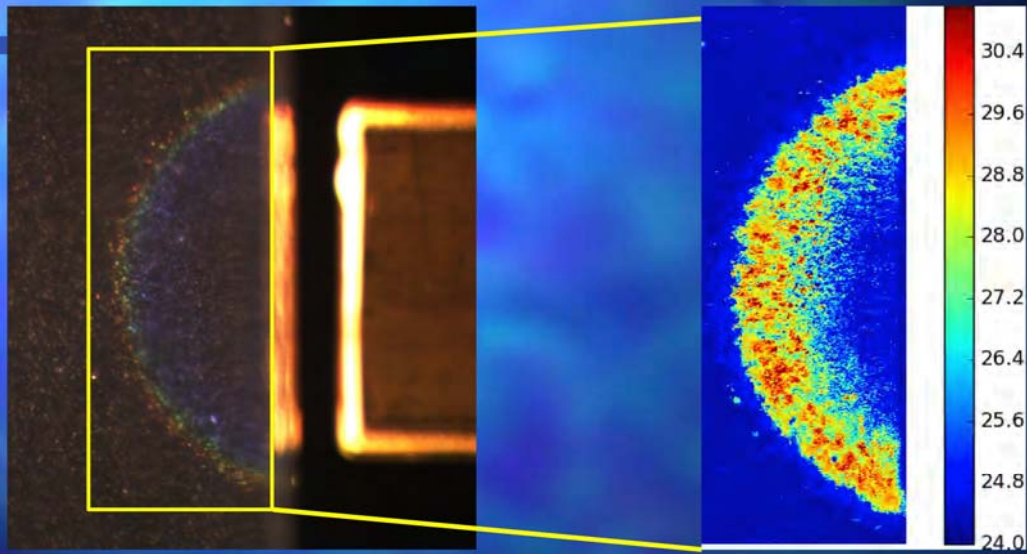
Maximum error :
0.3°C@31°C

Correlation between measured and predicted temperature

In this investigation, predicted temperature values almost agree with measured temperature value.

26

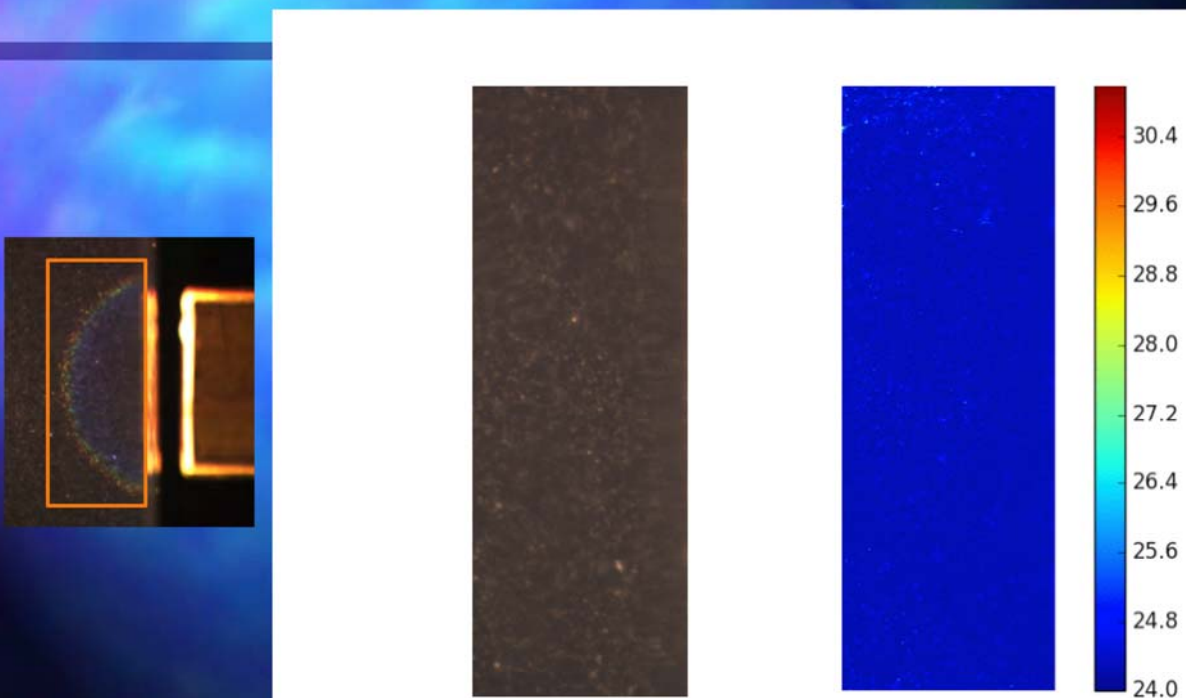
Result of quantification by NN



We can obtain quantified 2D temperature distribution within phantom with this method.

27

Time depending image of MTLC visualization and NN quantification



Conclusion

- Exposure experiment are performed for the transparent phantom with MTLC @40GHz MMW.
 - Power absorption pattern of small area is visualized clearly.
- Quantification of 2D temperature distribution are examined with feed forward NN.
 - Predicted temperature values show good correlation with measured temperature in NN training.
 - Consequently, 2D time depending temperature distribution is obtained with this method.

FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波の散乱・反射と 非破壊検査・診断技術への応用

東 良幸[†] 佐々木 博礼[†] 村田 博司[†] 奥田 忠弘[‡] 裕 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 我々は、地中に埋設された Fiberglass-Reinforced Plastic Mortar (FRPM)管を、非破壊で効率的に検査・診断する方法として、FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波の散乱・反射現象を利用する新しい計測法を提案している。これは、埋設環境下にある FRPM 管が、埋設土/FRPM 管/空気からなる 3 層構造のマイクロ波誘電体円筒導波路になることを利用して、FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波の振る舞いを精密に計測して、管壁や管の内側・外側の異常を検査・診断するものである。これまでの研究により、FRPM 管（厚さ~20mm）の周囲に規定の埋設土がある場合には、周波数 2~6 GHz のマイクロ波が比較的 low-loss（伝搬損失~ dB/m）で FRPM 管壁に沿って伝搬すること、管路の途中に亀裂等の欠陥や異物がある場合には、マイクロ波が欠陥や異物により散乱・反射されて、マイクロ波の伝搬損失や散乱波が増加することを確認している。特に、欠陥・異物が管の外側表面にある場合であっても、管の内側にもマイクロ波が散乱・放射されるために、外側の欠陥・異物の情報を内側から非破壊で取得できることを実証している。本報告では、マイクロ波の反射を利用した診断方法を中心に述べる。

キーワード 導波モード, 誘電体導波路, FRPM, 光電界センサ, 非破壊検査, TDR

Scattering and Reflection of Microwaves Propagating along Fiber-Reinforced Plastic Mortar Pipe Walls and Applications to Nondestructive Measurement

Yoshiyuki AZUMA[†] Hironori SASAKI[†] Hiroshi MURATA[†] Tadahiro OKUDA[†]
and Masaya HAZAMA[‡]

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

[‡] Kurimoto Ltd. 1 Koyagi, Higashi-ohmi, Shiga 527-0108 Japan

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

Abstract We have proposed a new nondestructive inspection method for fiberglass-reinforced plastic mortar (FRPM) pipelines by utilizing microwave guided-modes propagating along a FRPM pipe wall. This method is based on the precise measurement of the transmission and scattering of microwave guided-modes along a cylindrical dielectric waveguide composed of a FRPM pipe wall (core region), outer sand, and inner air region. In the preliminary experiments, we have verified the microwave guided-mode propagation with a relatively low-loss (~ dB/m) from 2 to 6 GHz along the buried FRPM pipeline with a wall thickness of ~20 mm surrounded by standardized grade sand. In addition, we have also verified microwave scattering and radiation into the inner region of a pipe (air) caused by a crack or foreign object although a crack or object is located at the outer surface of the FRPM. Therefore, by adopting the precise microwave measurement techniques with an electro-optic (EO) sensor, we can detect and identify the position and size of the crack or object nondestructively. In this paper, the experimental results using microwave reflection are mainly discussed.

Keyword Guided Mode, Dielectric Waveguide, FRPM, Electro-Optic Sensor, Nondestructive Inspection, TDR

1. はじめに

現代の ICT 社会は、無線・有線の情報通信ネットワークと、それを支えるさまざまなインフラストラクチャー（エネルギー・交通・上下水道・工業／農業用水）から構成されている。これらのインフラは、高度経済成長期に整備が始められたものが多く、検査・診断の時期を迎えつつある。実運用されているインフラの検査・診断には、非破壊で短時間、低コストであることが求められる[1]-[6]。

非破壊検査法が確立されていないインフラの 1 つに FRPM (Fiberglass Reinforced Plastic Mortar) 管を用いたパイプラインがある。FRPM 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材料であり、これを用いた FRPM 管は、コンクリート管や鉄管と比べ軽量で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がある。それゆえ、下水道管や電力ケーブル保護管、農業用水管などに多用されている。特に、農業用水管は、日本国内の総敷設距離が数万 km にも達している。最近では、安全性を確保するために、従来の開渠の農業用水路を地中埋設パイプラインに変更する取り組みも進んでいる。

FRPM 管は、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が可能である。特に、地中に埋設された FRPM パイプラインの長寿命化は重要課題であり、埋設パイプラインを非掘削・非破壊で効率良く検査・診断する技術が求められている。

従来のパイプライン検査法としては、超音波を用いるもの [3], [4] があるが、超音波の伝搬速度は、通常、管路内（空気または液体）よりも管壁（固体）内部の方が速い。したがって、超音波のエネルギーが管路内部に溜まりやすいため、管壁や管路外側の情報を選択的に取得することは、容易ではない。漏水が生じている状況では、漏水音による診断は有効ではあるが、漏れ等がない場合に管の劣化や漏水可能性を事前に検出することは難しい。また、X 線や MRI を用いた非破壊検査法[5] も考えられるが、これらは、地中埋設管への適用のハードルはかなり高い。

これに対して、我々は、FRPM 管が周波数 1~10 GHz マイクロ波に対して比較的損失な誘電体（誘電率 $\epsilon_r \sim 10$, 誘電損 $\tan\delta \sim 0.01$ ）であることに着目した新しい検査方法を提案している[7]-[11]。これは、FRPM 管がマイクロ波に対して円筒形誘電体導波路になることを利用して、マイクロ波を管壁に沿って伝搬させて、透過率の変化や散乱波の分布を計測するものである。

マイクロ波に対する誘電率は、FRPM : $\epsilon_r \sim 10$, 空気 : $\epsilon_r \sim 1$, 土砂（乾燥） : $\epsilon_r \sim 4$ であり、FRPM 管壁中のマイクロ波の伝搬速度は、空気・土砂中よりも遅い[12], [13]。したがって、マイクロ波のエネルギーが

FRPM 管壁とその近傍に閉じ込められて伝搬する状況を容易に実現できる。FRPM 管の内部や表面に欠陥や異物があると、伝搬が妨げられてマイクロ波が散乱される。したがって、欠陥や異物のある配管と欠陥・異物がない健全な配管では、伝搬特性や透過特性に差が生じる。伝搬特性の変化や散乱波の分布は、小型アンテナや光電界（EO）センサ[14],[15]を用いて精密に計測することができる。

通常の農業用水用の FRPM 管は、1本の定尺が 4 m あるいは 6 m であり、これを接続用配管で順次接続してパイプラインとして敷設されている。このため、定尺 FRPM 管のマイクロ波透過率の比較による診断・検査が有効と考えられる。また、農閑期には送水を止めて配管内を中空にできるので、比較的容易に検査・診断を行うことができる。さらに、マイクロ波信号を光信号に変換して光ファイバーを用いて計測を行えば、地上からのリモート計測・診断も可能と考えられる。

本報告では、我々が提案している検査・診断方法の概要と、マイクロ波の透過・反射特性、特に時間領域での応答を利用した新しい検査方式について述べる。

2. マイクロ波を用いたパイプライン診断

図 1 に我々が提案している FRPM パイプラインの検査・診断方法の概略図を示す。この方法は、FRPM 管をマイクロ波に対する円筒形の伝送線路として利用するものである。測定原理の概略を以下に述べる。

適切な励振アンテナ（例えば、小型ダイポールアンテナ）を用いて、周波数が 1~6 GHz 程度のマイクロ波導波モードを励振して、FRPM 管に沿ってマイクロ波を導波・伝搬させる。FRPM パイプラインは、定尺の FRPM 管を接続用の配管で縦続に接続した構成（図 1）となっており、通常、接続部には数 mm 程度の隙間がある。この隙間に励振アンテナと検出用アンテナ・EO センサを設置することができる。

励振されたマイクロ波は、管壁中および管の表面に沿って伝搬する。管壁およびその表面近傍（表面からの距離が 10 mm 程度）に欠陥や異物等の異常があると、伝搬が阻害されて、マイクロ波が反射・散乱され、管の他方の接続部に到達するマイクロ波信号強度が低下する。それゆえ、適切な場所に検出用アンテナあるいは光電界センサを設置することで異常の有無を検知することができる。反射波・散乱波の時間応答を検出すれば、欠陥・異物の位置を推定することもできる。

また、マイクロ波の散乱は欠陥や異物のある部分にのみ生じ、その散乱波の分布は欠陥や異物の大きさ・誘電率・形状に強く依存する。ここで重要なことは、欠陥等が壁面内部や管の外側にあるときでも、管路の内側にマイクロ波が散乱されて分布を生じることであ

る。したがって、低擾乱な EO センサ等で散乱波の分布を精密に計測することにより、欠陥や異物の大きさや材質の情報を取得することができる。これまでの実験では、FRPM 管壁の外表面の傷（深さ・幅 1mm 程度）の検出・同定に成功している [9]-[11].

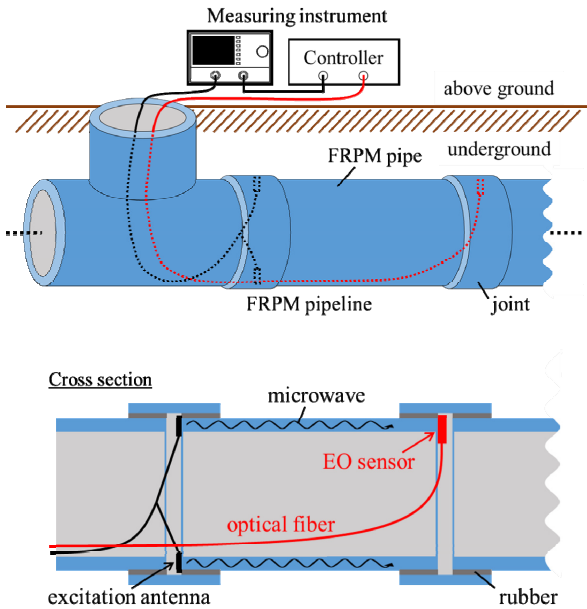


図 1 マイクロ波伝搬を用いた検査・診断法 (上：概略図，下：配管長手方向断面図)

3. FRPM 管の外側にある異物の検出

FRPM パイプラインの外側にある異物を検出するための実験系を図 2 に示す。乾燥した土を入れたアクリルケースに FRPM 管を設置して、FRPM 管の下半分が埋設された環境を構築した。測定には、全長 1,000 mm、内径 250 mm、管厚 18 mm の FRPM 管を用いた。この FRPM 管の外側に埋設土がある場合（内側は空気）には、図 3 のような TE 導波モードが存在することがわかっている。

FRPM 管の管底の両端には、マイクロ波信号励振用ダイポールアンテナと検出用 EO センサを設置した。ネットワークアナライザからのマイクロ波信号を約 20dB 増幅した後、ダイポールアンテナを用いて TE モードとして伝搬させた。これまでの実験より、励振される主モードは TE_{00} モードであることがわかっている。そして、他端に到達したマイクロ波信号を EO センサで検出して透過特性を測定した。

FRPM 管の下にいくつかの異物を設置して、透過特性を評価した。異物としては、発泡スチロール、木材、コンクリートを用いた。発泡スチロールはマイクロ波に対して空気とほぼ等価であり、管壁の外側に空間(空隙)がある状態に相当する。異物の大きさは $43 \times 60 \times 200$ mm とした。

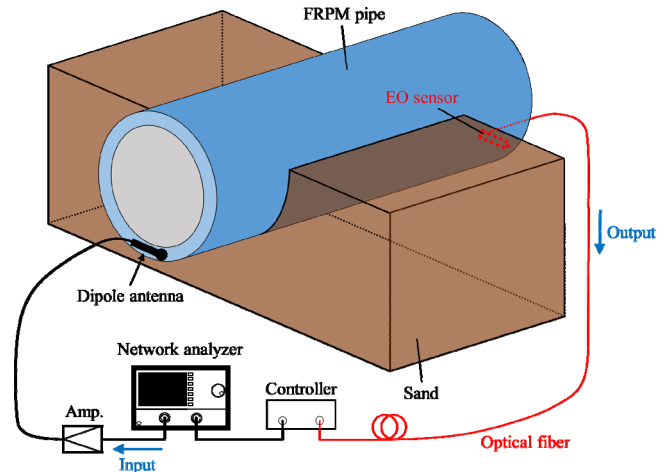


図 2 埋設された FRPM 管と外部に異物がある状況を模擬した実験系

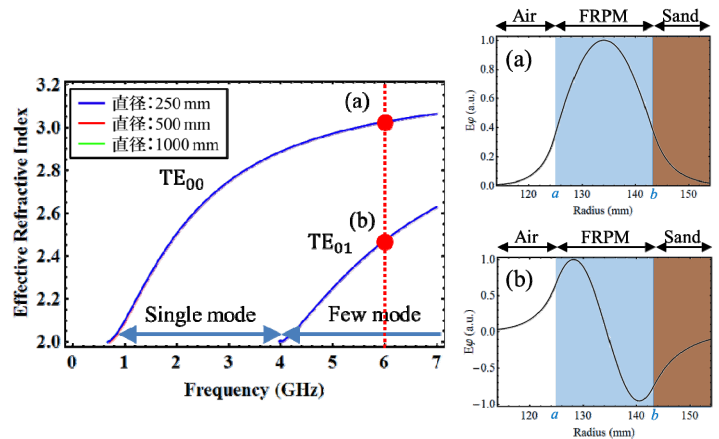


図 3 埋設 FRPM パイプラインの管壁に沿って伝搬する TE 導波モードの分散特性と電界分布 ($\epsilon_1=1, \epsilon_2=10, \epsilon_3=4$, 内径: 250mm, 管厚 18mm)

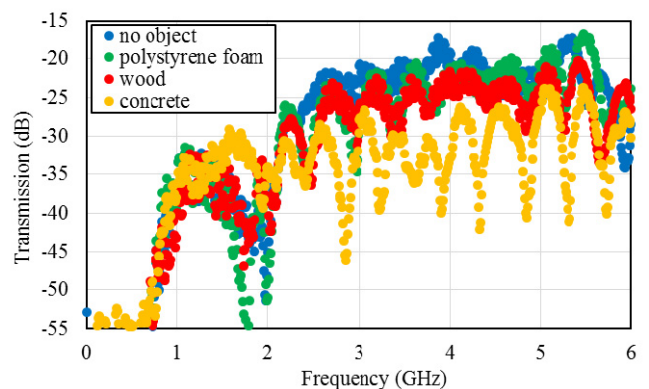


図 4 図 2 の実験系におけるマイクロ波透過特性

測定した透過特性を図 4 に示す。いずれの異物の場合でも、透過特性に一定の変化が現れている。予想通り、異物があると透過特性が低くなる結果となった。これより、FRPM 管の外側表面付近に存在する異物を検出可能であることを確認した。

さらに、FRPM 管の内側の表面を EO センサで走査して、外側の異物の情報を取得することを試みた。管の内側表面の電界分布の測定結果を図 5 に示す。図 5 は、周波数 3~5 GHz のマイクロ波の平均強度をプロットしたものである。また、破線で囲まれた位置に異物がある。異物を設置した場合は明瞭な変化が見られた。変化の様子は、異物と FRPM との比誘電率の大小関係に依存する傾向を示した。

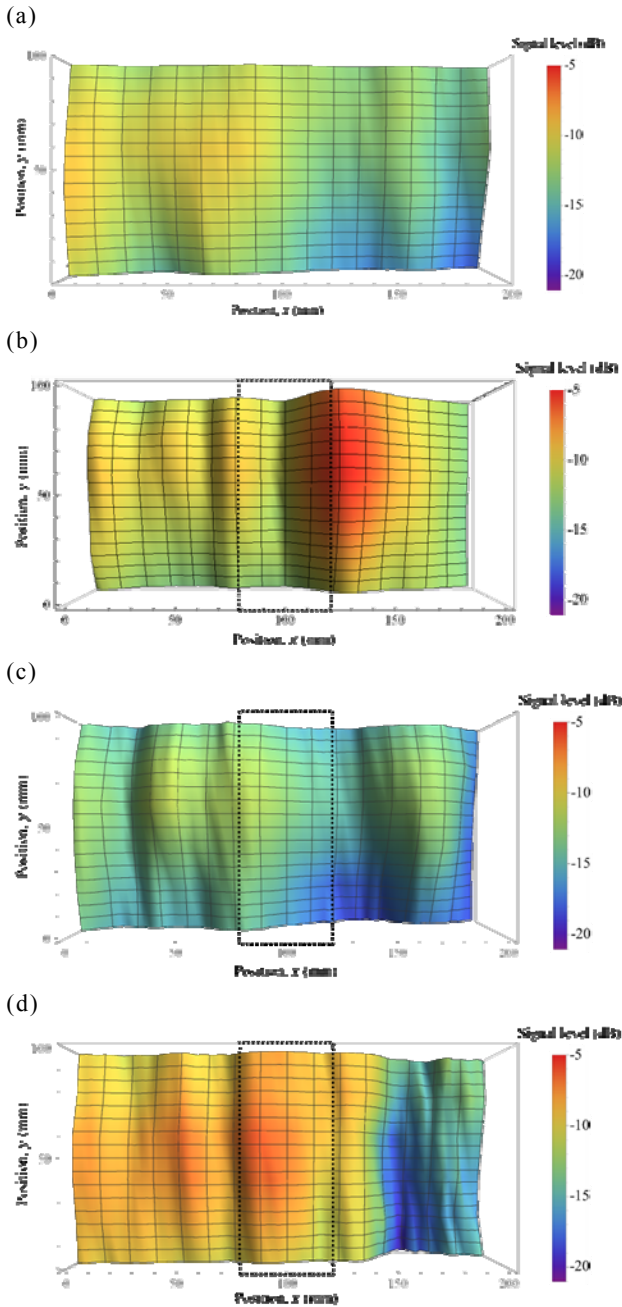


図 5 FRPM 管内表面のマイクロ波電界強度分布
 (a) 異物なし (b) 発泡スチロール ($\epsilon_r \sim 1$)
 (c) 木材 ($\epsilon_r = 2 \sim 6$) (d) コンクリート ($\epsilon_r \sim 6$)

4. 時間領域応答を用いた計測

これまでの実験結果から、FRPM 管を用いたパイプラインは、円筒形状のマイクロ波伝送線路であると考えられることができる。地中埋設環境においても、マイクロ波の伝搬損失は数 dB/m 程度である。そこで、マイクロ波信号の時間領域応答、特に TDR/TDT 法 (Time Domain Reflectometry/Transmission) を適用することを検討した。TDR/TDT 法を用いることができれば、パイプラインの欠陥や異物の検出・特定が簡単になり、検査時間を大幅に短縮することが期待できる。

4-1. 予備実験

ダイナミックレンジと S/N 比を確保するために、送信・受信のアンテナを分離して TDT (Time Domain Transmission) 構成で予備実験を行った (図 6)。FRPM 管の片側端面に設置したダイポールアンテナ 1 を用いて、ネットワークアナライザからのマイクロ波信号を FRPM 管に入力した。そして、ダイポールアンテナ 2 を図のようにアンテナ 1 の近傍から管壁に沿って順次遠ざけながら、各位置におけるマイクロ波信号を測定した。

測定結果を図 7 に示す。送受信アンテナ間の距離に対応する時刻に明瞭なパルス信号が得られた。この応答からマイクロ波の群速度 v_g は $v_g \sim 1.4 \times 10^8$ m/s と求められ、モード解析より予想される値とほぼ一致した。

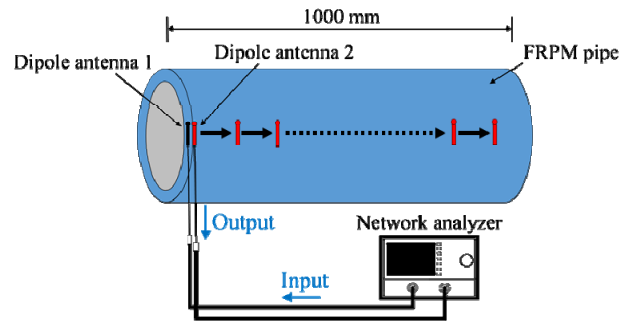


図 6 TDT 測定系

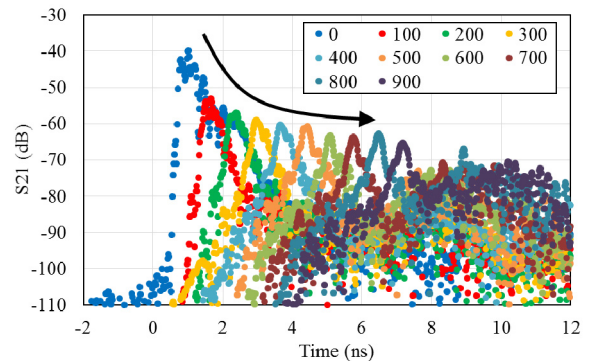


図 7 TDT における時間領域応答

4-2. 周回マイクロ波信号の利用

時間領域応答の実験・考察において、周回方向に回転しながら伝搬するマイクロ波信号が観測されていることに気が付いた。これを利用すれば、パイプラインの新たな診断技術を開発できる可能性がある。

実験系を図 8 に示す。4 ポートのネットワークアナライザを用いて、透過率 S_{31} , S_{41} を同時に計測して時間応答を求めたところ、非常に面白い信号が得られた。

実験に用いた FRPM 管の長さは 1,000 mm であり、 S_{31} の時間応答において、群速度から予想される信号到達時刻は約 8 ns である。予想通り、 S_{31} には 8 ns 付近に明瞭なピーク（図中 A）が見られた。 S_{41} ではやや遅れてピークが見られる（図中 A'）がこれも想定内であった。しかし、その後の時間応答は非常に興味深いものとなった。当初は、両端での多重反射信号が観測されのみと想定していたが、多重反射の信号が到達する前に、いくつかの明瞭なピーク（B, B', C, ...）が観測された。これらの到達時刻とマイクロ波群速度から、複数のピークが生じた理由について考察したところ、図 10 に示す経路を伝搬して受信アンテナに到達した可能性があることを見出した。つまり、これらの信号は FRPM 管を周回しながら管路に沿って伝搬して受信アンテナに到達した信号であると考えられる。

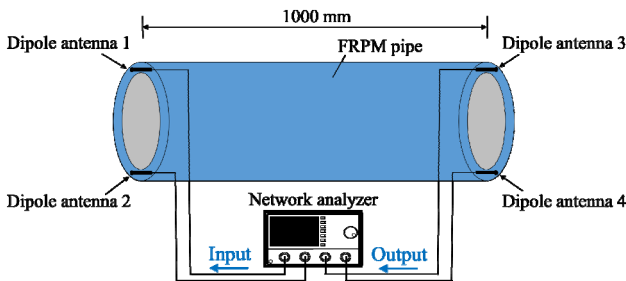


図 8 4 ポートネットワークアナライザを用いた測定

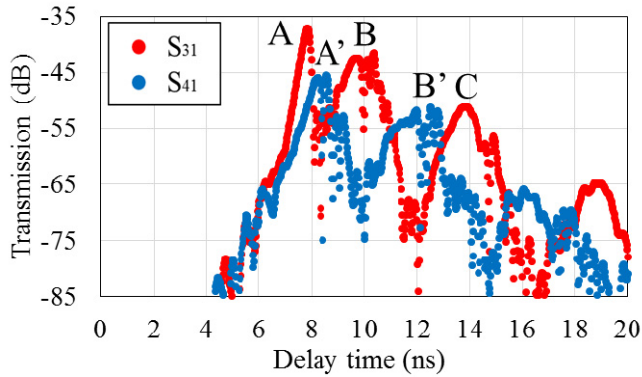


図 9 4 ポート計測における時間領域応答

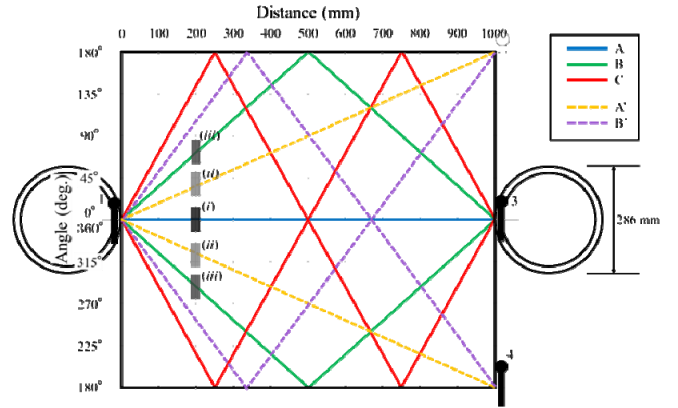


図 10 マイクロ波信号の伝搬経路の推定図 (FRPM 管の平面展開図)

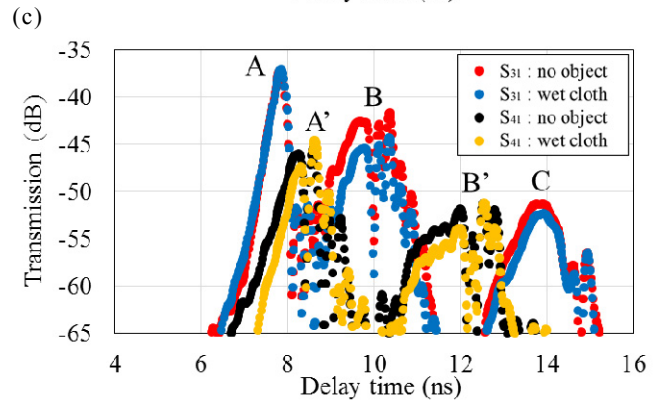
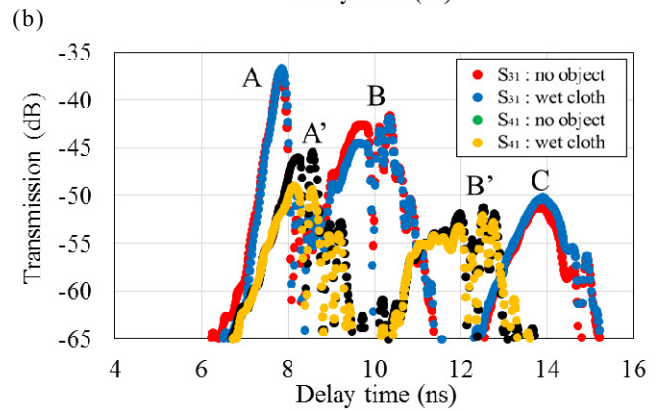
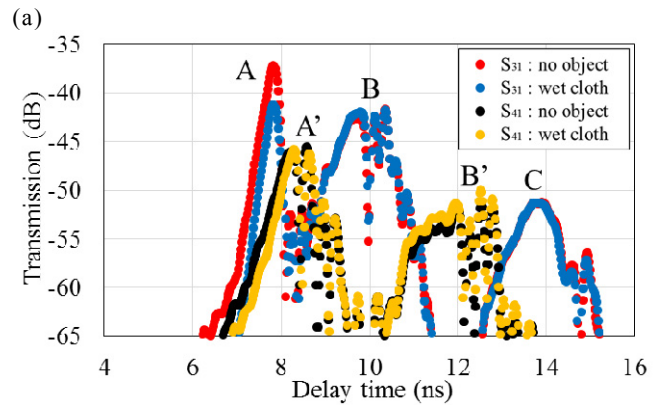


図 11 マイクロ波吸収体を設置した時間領域応答
(a) 図 10 の(i)の場所に吸収体を設置
(b) 図 10 の(ii)の場所に吸収体を設置
(c) 図 10 の(iii)の場所に吸収体を設置

マイクロ波信号が図 10 に示した周回経路を伝搬したどうかを確かめるために、当該経路の途中にマイクロ波吸収体を置いた実験を行った。吸収体としては一定量の水を含ませた布 (25×50×3mm) を用いた。吸収体を図 10 の(i), (ii), (iii)の位置に設置してマイクロ波の透過特性の測定を行った。測定結果を図 11 に示す。

図 11 (a) は、(i)の位置に減衰体を設置した場合である。このときは A のピークのみが減衰して他のピークにはほとんど変化がない。一方、図 11 (b)では、A' のピークのみが減衰しており、図 11(c)の場合は、B のピークのみ減衰している。以上の結果より、マイクロ波の周回経路伝搬が確かめられた。これより、通常の TDR/TDT における線路方向の位置だけでなく、円周方向の位置も特定できる可能性がある。長尺パイプラインにおける異常箇所的位置をかなり正確に同定できる可能性があり、検査時間の大幅な短縮が期待できる。

今回の実験では、送受信のアンテナを対称な位置に設置したために、図 10 において右回り・左回りの 2 通りの周回経路を伝搬した信号が重畳されたものが観測された。これら 2 つの信号を分離して測定を行うためには、送受信のアンテナを対称な位置からずらせて設置すれば良い。受信アンテナの位置を変えて複数回測定を行えば異常箇所検出の位置精度を高めることも可能と考えられる。

5. むすび

FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波導波モードを利用した、地中埋設 FRPM パイプラインの診断・計測技術について述べた。FRPM 管は、地中埋設環境下においても、マイクロ波に対して比較的 low 損失な導波路としての特性を示す。これを利用することで埋設配管を非破壊で効率良く診断・計測できる可能性がある。管路の内部から管の外側の情報を取得できることが大きな利点である。さらに、本稿で紹介した時間領域計測技術を併用すれば、管路の診断の省力化・短時間化が期待できる。

謝 辞

電磁界解析および評価実験において、貴重なご意見を頂いた大阪大学・岡村康行名誉教授、真田篤志教授、塩見英久博士、井上敏之博士（現在、滋賀県立大学）、産業技術総合研究所・黒川悟博士と廣瀬雅信博士に感謝します。また、EO センサをご提供頂いた株式会社精工技研・鳥羽良和博士にも感謝します。

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, 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, vol.36, pp. 147-154, 1998.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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, 2011.
- [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, 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, 2015.
- [9] 上野文聖, 東良幸, 村田博司, 岡村康行, 奥田忠弘, 裕昌也, "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", 光応用電磁界計測研究会, vol.4, no.2, PEM2015-12, pp.29-35, 2016.
- [10] 東良幸, 上野文聖, 村田博司, 奥田忠弘, 裕昌也, 岡村康行, "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" 光応用電磁界計測研究会, vol.5, no.1, PEM2016-6, pp.33-38, 2016.
- [11] 村田博司, 東良幸, 上野文聖, 奥田忠弘, 裕昌也, "埋設 FRPM 管におけるマイクロ波伝搬特性と非破壊診断への応用", 光応用電磁界計測研究会, vol.5, no.3, PEM2016-16, pp.36-40, 2017.
- [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, 1999.
- [13] 伊藤実, "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, 1965.
- [14] H. Togo, S. Mochizuki, and N. Kukutsu. "Optical fiber electric field sensor for antenna measurement," NTT Technical Review, vol.7, no.3, 2009.
- [15] H. Togo, N. Shimizu, and T. Nagatsuma, "Tip-on-fiber electro-optic probe for nearfield measurement," NTT Technical Review, vol.4, no.1, 2006.

光応用電磁界計測技術を用いた広帯域ホーンアンテナ用 アンテナ係数測定システム

黒川 悟 廣瀬 雅信

†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

E-mail: † { satoru-kurokawa, masa-hirose }@aist.go.jp

あらまし 各種機器から放射される不要電磁波に関する規制として、米国では 18 GHz までの放射電磁波に関する規制が実施されている。測定には、各種広帯域アンテナが用いられ、1 GHz 以上では、ダブルリッジドガイドホーンが用いられる。そこで我々は、これらの測定に利用可能なシステムとして、29 GHz 程度まで利用可能な光デバイスと光ファイバを用いたマイクロ波受信可能システムをすでに提案した。本報告では、開発システムを用いて、ダブルリッジドガイドホーンアンテナのアンテナ係数測定を試みたので、その結果を報告する。

キーワード アンテナ測定, マイクロ波測定, 光ファイバ無線, ダブルリッジドガイドホーンアンテナ, 光応用電磁界計測, フォトダイオード, EA 変調器, 光ファイバ

Antenna Factor Measurement for EMI broadband Horn Antenna Using Photonics Applied Electromagnetic Measurement Technology

Satoru KUROKAWA and Masanobu HIROSE

†National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1

Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

E-mail: { satoru-kurokawa, masa-hirose, yuanfeng.she }@aist.go.jp

Abstract We have already proposed a simple optical fiber link microwave measurement system using zero biased optical reflection type electro absorptive intensity modulator with microwave amplifier and optical fiber. Our proposed system can measure microwave signal using optical fiber up to 29 GHz. We show experimental results of far field antenna factor measurement for double ridged guide horn antenna (DRGH) by our proposed optical link system up to 18 GHz. It is proved that our proposed optical system can be used to evaluate the antenna factor.

Keyword Antenna measurement, microwave measurement, optical fiber link, double ridged guide horn antenna, photonics applied electromagnetic measurement, photodiode, electro absorption modulator, optical fiber

1. はじめに

不要電磁波規制が世界的に実施されており、空間に放射する不要電磁波規制(放射 EMI (Radiated electromagnetic interference))は、CISPR(Comité international spécial des perturbations radioélectriques)では 6 GHz(米国では 18 GHz)までの周波数で規制が実施されている。30 MHz 以上の放射 EMI 規制では、測定に広帯域アンテナが利用され、それぞれのアンテナには、国家標準にトレーサブルな自由空間アンテナ係数の校正が必須となっている[1]。

特に 1 GHz 以上の測定では、測定に用いる同軸ケーブルでの信号減衰が顕著となることから、測定器を電波暗室内に設置して測定が実施されることが多い。このため我々は、信号減衰や金属同軸ケーブルでの反射などの影響を低減することが可能な、光デバイスと光ファイバを用いた受信システムを提案した[2][3]。

本報告では、光デバイスと光ファイバで構成されるマイクロ波受信システムを用いたダブルリッジドガイドホーンアンテナ[4]のアンテナ係数測定結果を示す。

2. 光反射型電界吸収光強度変調器を用いたマイクロ波受信システム [2]

マイクロ波信号を光デバイスを用いて強度変調光として光ファイバを用いて伝送し、フォトダイオード(PD)を用いて電気信号に変換し、スペクトラムアナライザやベクトルネットワークアナライザ等の測定器に入力し測定する。光強度変調器としては、スーパーミネッセントダイオード(Super Luminescent Diode)光源で駆動する光反射型電界吸収型光強度変調器(EA 変調器)を用いており、DC バイアスと温度安定回路を必要としないシステムである。フォトダイオード(PD)は、UTC-PD(Uni-Traveling Carrier Photo Diode)[5]を用い、マイクロ波増幅器 Keysight 8348A(2 - 26.5GHz 用)を用いて増幅して測定器に入力する。システム概念図を図 1 に示し、ベクトルネットワークアナライザを用いて測定した周波数特性測定結果を図 2 に示す。図中、[PD]は、マイクロ波増幅器を用いない場合の測定結果を示し、[PD+AMP]は、マイクロ波増幅器を PD と測定器の間に挿入した場合の測定結果を示す。[AMP noise]は、増幅器への入力信号がない場合の測定結果であり、測定のノイズフロアを示している。EA 変調器と PD 単体での測定結果は、提案システムが 40 GHz 程度までマイクロ波信号を $S_{21} > -70$ dB で受信可能であることを示している。PD と測定器の間にマイクロ波増幅器を挿入することで、26.5 GHz 程度まで $S_{21} > -30$ dB で測定可能であることがわかる。

広帯域アンテナの特性測定では、被測定周波数範囲での受信レベルとそのレベルでの安定性を測定不確かさに含めて評価することが必要である。図 3 にシステムのダイナミックレンジ測定概念図を示す。図 4、図 5 それぞれに、EA 変調器-PD システム、EA 変調器-PD+増幅器システムのダイナミックレンジ測定結果を示す。測定結果は、EA 変調器-PD システムでは、18GHz までは 40 dB 程度のダイナミックレンジを確保した測定が可能であることを示し、EA 変調器-PD+増幅器システムでは、18GHz までは 60 dB 程度のダイナミックレンジを確保した測定が可能であることを示している。ダブルリッジガイドホーンアンテナのアンテナ係数測定では、アンテナ開口面距離 3 m 程度では、50 dB 程度のダイナミックレンジが必要であるため、EA 変調器-PD+増幅器システムを用いて測定を実施する。

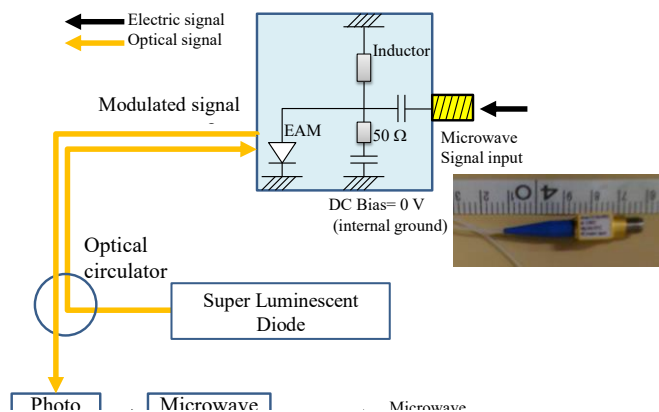


図 1 光反射型 EA 変調器を用いたマイクロ波受信システム概念図

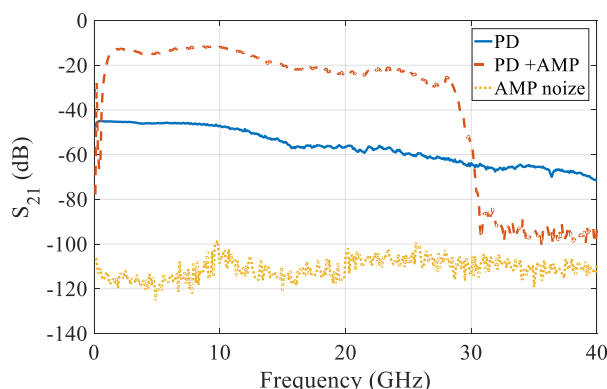


図 2 光反射型 EA 変調器を用いたマイクロ波受信システムの周波数特性測定結果

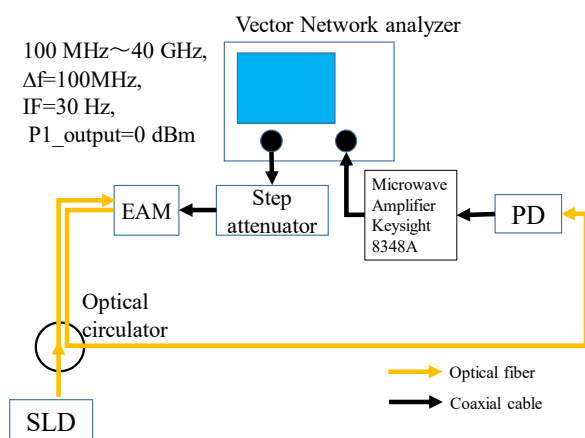


図 3 提案システムのダイナミックレンジ測定概念図

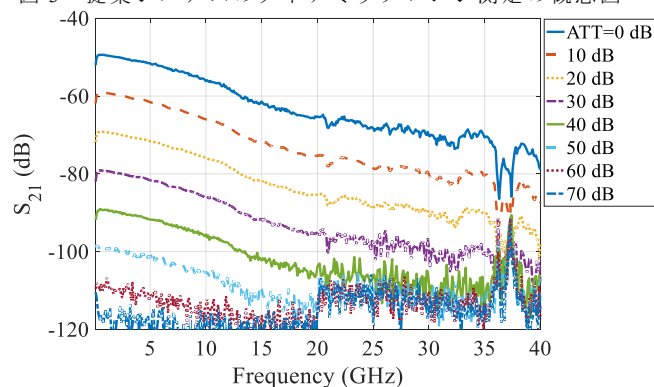


図 4 EA 変調器-PD システムのダイナミックレンジ測定結果

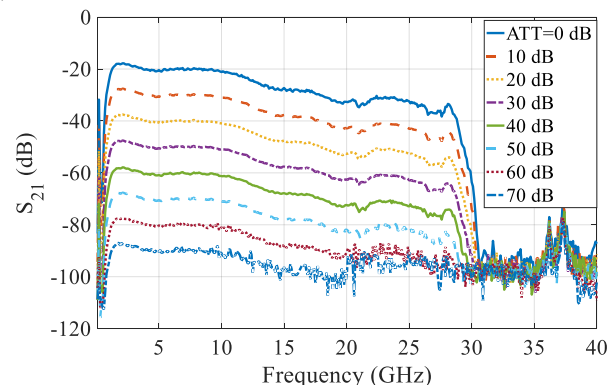


図 5 EA 変調器-PD+AMP システムのダイナミックレンジ測定結果

3. ダブルリッジドガイドホーンアンテナのアンテナ係数測定

3.1 位相中心を考慮した遠方界アンテナ係数算出式[6]-[9]

比較的近距離に送信アンテナと受信アンテナを設置して遠方界アンテナ係数を算出する場合、(1)式に示す各アンテナの位相中心を考慮したアンテナ間距離を用いることにより、遠方界アンテナ係数を算出することが可能である[6]-[9]。送信アンテナ、受信アンテナそれぞれのアンテナ開口目から位相中心までの距離をそれぞれ $d_1(\omega)$ 、 $d_2(\omega)$ 、遠方界アンテナ係数 $af_{1_far}(\omega)$ 、 $af_{2_far}(\omega)$ を用いて $s_{21}(\omega)$ は次式となる。

$$|s_{21}(\omega, z)| = \frac{\eta_0 \cdot k_0}{Z_0} \frac{1}{af_{1_far}(\omega)} \frac{1}{af_{2_far}(\omega)} \frac{1}{z + d_1(\omega) + d_2(\omega)} \quad (1)$$

アンテナ間距離を変えて $z=z_1$ 、 $z=z_2$ として、各距離で $S_{21}(\omega, z_1)$ 、 $S_{21}(\omega, z_2)$ を測定し、(1)式から $d_1(\omega) + d_2(\omega)$ を削除し、(2)式を得る。

$$\frac{af_{1_far}(\omega) \cdot af_{2_far}(\omega)}{= \frac{\eta_0 \cdot k_0}{Z_0} \left(\frac{1}{|s_{21}(\omega, z_1)|} - \frac{1}{|s_{21}(\omega, z_2)|} \right) \frac{1}{z_1 - z_2}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & AF_{1_far}(\omega) + AF_{2_far}(\omega) \\ & = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{|S_{21}(\omega, z_1)|} - \frac{1}{|S_{21}(\omega, z_2)|} \right) \\ & - 20 \log_{10}(z_1 - z_2) + 20 \log_{10} \left\{ (\eta_0 \cdot k_0) / Z_0 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

(2)式、(3)式は、遠方界アンテナ係数がアンテナ間距離を変えた2回の測定結果から算出可能であることを示している。ただし $AF_{1_far}(\omega) = 20 \log_{10}(af_{1_far}(\omega))$ 、 $AF_{2_far}(\omega) = 20 \log_{10}(af_{2_far}(\omega))$ である。

3.2 ダブルリッジドガイドホーンアンテナの自由空間アンテナ係数測定

2本のダブルリッジドガイドホーンアンテナを同一偏波として対向させて設置し、アンテナ間距離を1.5 m~3 mまで、0.5 m 間隔に移動させて伝送特性(S_{21})特性を各アンテナ間距離で5回の測定を実施した。測定は、送信アンテナは、ベクトルネットワークアナライザと同軸ケーブルを用いて接続し、受信アンテナは、EA変調器を用いた提案光システムに接続して実施した。図6に測定概念図と測定セットアップの写真を示す。図7に、各アンテナ間距離での S_{21} 特性の5回測定の平均値を示し、図8、9に振幅特性の5回測定の標準偏差、位相特性の5回測定の標準偏差を示す。アンテナ間距離1.5 m以下では、18 GHz以下で、 S_{21} 振幅特性測定結果の標準偏差は、0.5 dB以下、 S_{21} 位相特性測定結果の標準偏差は4°以下で測定可能であり、アンテナ間距離3 m以下では、18 GHz以下では、 S_{21} 振幅特性測定結果の標準偏差は、1 dB以下、 S_{21} 位相特性測定結果の標準偏差は8°以下で測定可能であることがわかる。今回の測定では、アンテナをEA変調器に直結して測定を実施した。今後、測定結果の安定性を向上するため、アンテナとEA変調器の間にプリアンプを挿入した測定の実施を検討したい。ダブルリッジドガイドホーンアンテナの遠方界アンテナ係数を算出するため、3本のダブルリッジドガイドホーンアンテナを用いて、3通りの組み合わせ

により $S_{21}(\omega)$ 測定を $z=1.5$ mと $z=3.0$ mで実施し、(3)式を用いて、各アンテナの遠方界アンテナ係数を算出した。アンテナ係数算出結果を図10に示す。今後、測定結果の妥当性等の検証を送信・受信共に同軸ケーブルを用いたシステムなどを用いた測定結果と比較して実施したい。

4. まとめ

本報告では、1 GHz超の放射EMI測定に利用することを目標とした光デバイスと光ファイバを用いたマイクロ波受信システムについて、その概要を報告し、18 GHzまでは60 dB程度のダイナミックレンジを確保した測定が可能であることを示した。さらに、開発システムを用いて、1 GHz超の放射EMI測定に用いるダブルリッジドガイドホーンアンテナのアンテナ係数測定結果を示した。測定結果は、周波数が高くなるほど、測定標準偏差が劣化し、アンテナ開口面間距離3 m、18 GHz以下で S_{21} 振幅特性測定結果の標準偏差1 dB以下、 S_{21} 位相特性測定結果の標準偏差8°以下で測定可能であることを示した。今後、測定不確かさの向上のため、受信アンテナとEA変調器の間にプリアンプを挿入した測定を実施することで、測定安定度の向上を目指すこととしたい。

さらに今後は、アンテナの反射係数も伝送特性と同時に測定可能な光デバイスを用いたシステムを構築し、アンテナ利得計測を可能としたい。

文 献

- [1] CISPR 16-1-4:2010 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements
- [2] S. Kurokawa and H. Hirose, "Optical Fiber Link Microwave measurement system using zero biased optical devices," in Proc. 2017 IEEE ICCEM, March, 2017.
- [3] S. Kurokawa and H. Hirose, "Precision antenna measurement using optical fiber link technologies," in Proc. 2015 IEEE CAMA, Nov., 2015.
- [4] Double-Ridged Guide Antenna, ETS-lindgren Inc., <http://www.ets-lindgren.com/3115>
- [5] T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, and T. Furuta, Tech., Dig. Ultrafast Electron. And Optoelectron, pp.166-169 (1997).
- [6] S. Kurokawa and H. Hirose, "Measurement uncertainty of free space antenna factor for super broadband antenna using amplitude center modified equation," in Proc. IEEE CPPEM2016, July., 2016.
- [7] K. Harima, "Accurate gain determination of LPDA by considering the phase center," IEICE Electronics Express, vol.7, no.23, 1760-1765, Oct. 2010.
- [8] 廣瀬雅信, 飴谷充隆, 黒川悟, "位相中心を用いた近傍界利得と遠方界利得の関係の理論的検討," 信学技報, AMT2012-02, June, 2012.
- [9] S. Kurokawa, M. Ameya, and M. Hirose, "Far field gain estimation method for Japanese broadband antenna standard using time-frequency analysis," Proc. PIERS 2013 Stockholm, pp. 838-842, Stockholm, Sweden, Aug. 2013.

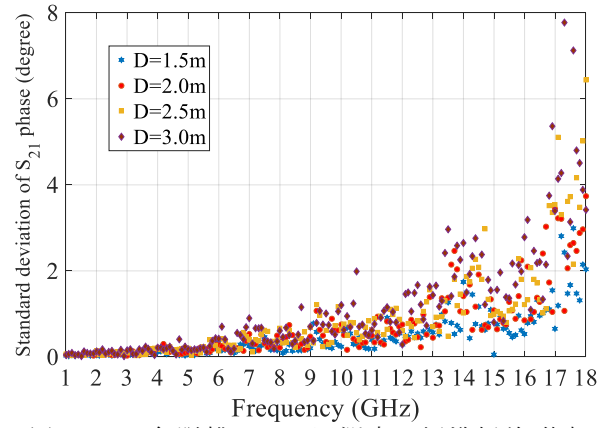
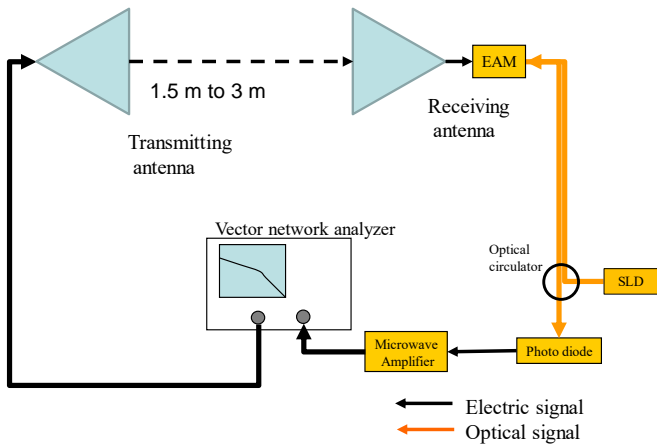


図9 S_{21} の各距離での5回測定標準偏差(位相)

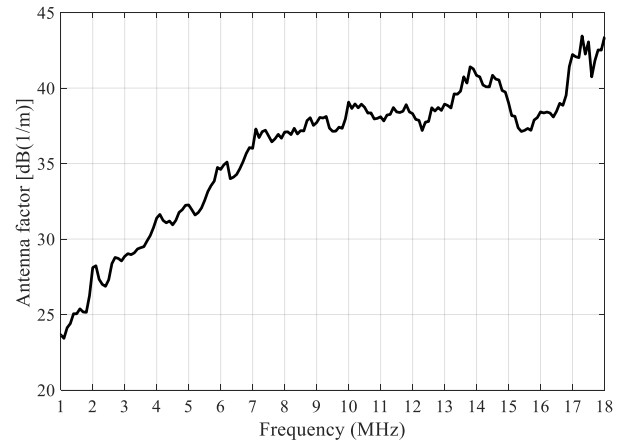


図10 ダブルリッジガイドホーンアンテナのアンテナ係数算出結果

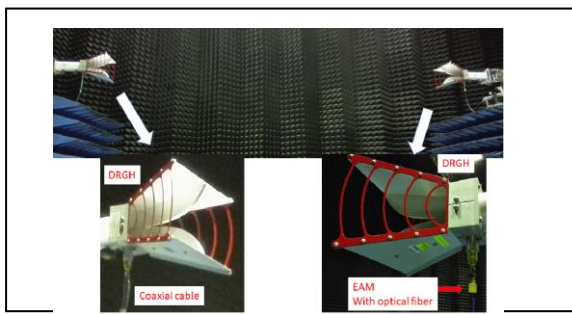


図6 電波暗室内でのアンテナ測定の様子

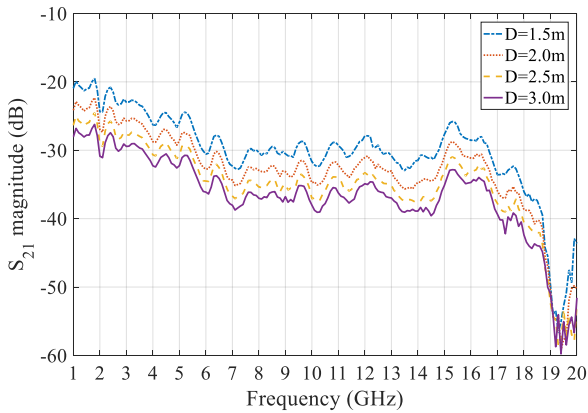


図7 S_{21} の各距離での測定結果 (5回測定の平均値)

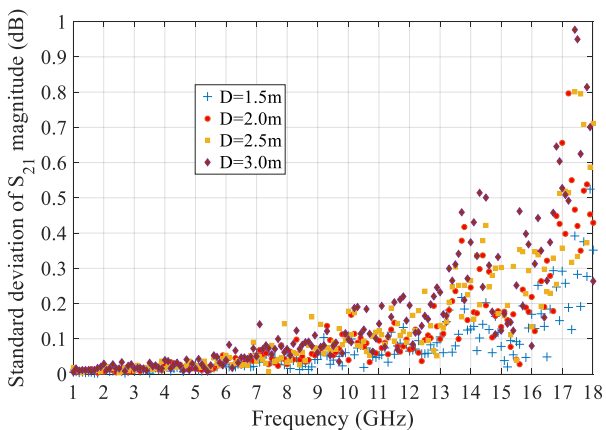


図8 S_{21} の各距離での5回測定の標準偏差(振幅)

光電界センサを用いた電界計測システムの国際標準化の現状

飴谷 充隆[†] 黒川 悟[†] 鳥羽 良和[‡] 今莊 義弘^{*} 植松 浩司^{*}

[†]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

[‡]株式会社精工技研 機器事業部 〒270-2214 千葉県松戸市松飛台 296-1

^{*}スタック電子株式会社 北海道テクニカルセンタ 〒061-1374 北海道恵庭市恵み野北 3-1-1 恵庭 RB パークビル E-212

E-mail: [†] {m.ameya, satoru-kurokawa}@aist.go.jp, [‡] yoshikazu.toba@seikoh-giken.co.jp,
^{*} {imajo, uematsu}@stack-elec.co.jp

あらまし 現在, IEC TC103/WG6 国内委員会では, 光電界センサを用いた電界計測システムの国際テクニカルレポートのドラフト文書作成を行っており, 2018 年の 10 月頃開催予定の国際標準化会合にて提案予定である. 本稿では, IEC TC103/WG6 における国際標準化の概要および光電界センサを用いた電界計測システムのテクニカルレポートの内容について報告する.

キーワード IEC TC103, 国際標準化, 光電界センサ, 電界計測

Current Status of International Standardization of Electric-field Measurement System Using Optical Electric-field Sensor

Michitaka AMEYA[†] Satoru KUROKAWA[†] Yoshikazu TOBA[‡] Yoshihiro IMAJO^{*} and Koji UEMATSU^{*}

[†] AIST, Research Institute for Physical Measurement 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

[‡] SEIKOH GIKEN Co., Ltd., Instrumental Business Division 296-1 Matsuhidai, Matsudo, Ibaraki, 270-2214 Japan

[‡] STACK ELECTRONICS Co., Ltd., Hokkaido Technical Center Eniwa RB Park building E-212, 3-1-1 North Megumino, Eniwa, Hokkaido, 061-1374 Japan

E-mail: [†] {m.ameya, satoru-kurokawa}@aist.go.jp, [‡] yoshikazu.toba@seikoh-giken.co.jp,
^{*} {imajo, uematsu}@stack-elec.co.jp

Abstract In the IEC TC103/WG6 Japan National Committee, the draft version of the technical report of electric-field measurement system using optical electric-field sensing is now discussing and will be proposed to IEC T103/WG6 International Standardization meeting held in October 2018. In this paper, we provide an overview of the standardization activity of IEC TC103/WG6 and the brief summary of the technical report of electric-field measurement system using optical electric-field sensing.

Keyword IEC TC103, International standardization, Optical electric-field sensor, Electric-field measurement

1. IEC TC103/WG6 の概要

IEC TC103 は無線通信用送信装置およびそれらを用いた電子デバイスおよび光学デバイスに関する国際標準化を担当する国際標準化委員会であり, WG6 は Radio on fibre Transmitter に関する作業グループとなっており, RoF(Radio over Fiber)の国際標準を作成するための標準化グループである. IEC TC103/WG6 国内委員会では, これまでに 6 件の国際標準および 5 件のテクニカルレポートの提案を行い, 2 件の国際標準 [1][2]と 3 件のテクニカルレポート [3-5]の発行を完了している. 国際標準化が完了した文書および現在作成

中の文書を表 1 に示す. 光電界センサを用いた電界計測システムのテクニカルレポートに関しては, IEC TR 63099-2 ed. 1.0 ”Radio-over fibre technologies for electromagnetic-field measurement - Part 2: Radio-over-fibre technologies for electric-field sensing”というタイトルで, 昨年のドイツマインツで行われた TC103 国際標準化会合で予備段階提案 (PWI) を行っており, 2018 年 10 月ごろに開催予定の次回会合までにドラフト文書を完成させる予定である. 次節以降では, 電界センサに関するテクニカルレポートである IEC TR 63099-2 に記載予定の内容について説明する.

表 1. IEC TC103/WG6 国内委員会で提案を行った国際標準の一覧

規格番号 管理番号	規格 種別	審議 状況	発行日	タイトル
IEC62803 ed. 1.0[1]	IS	発行済	2016年 7月	Frequency response of optical-to-electric conversion device in high-frequency radio over fibre systems - Measurement method
IEC62802 ed.1.0[2]	IS	発行済	2017年 7月	Measurement method of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder optical modulator in high-frequency radio on fibre (RoF) systems
IEC TR 63098 ed. 1.0[3]	TR	発行済	2017年 9月	Radio-over-fibre technologies and their performance standard - Part 1: System applications of radio over fibre technology
IEC TR 63099 ed. 1.0[4]	TR	発行済	2017年 8月	Radio-over fibre technologies for electromagnetic-field measurement - Part 1: Radio-over-fibre technologies for antenna measurement
IEC TR 63100 Ed. 1.0[5]	TR	発行済	2017年 7月	Radio-over-fibre technologies for spectrum measurement - 100-GHz spectrum measurement equipment
IEC PNW 103-164 (規格番号未定)	IS	PNW 審議中	2019年 12月	Radio-over-fibre technologies and their performance standard - Part 2: Radio over fibre fronthaul network for train communication network
IEC PNW 103-166 (規格番号未定)	IS	PNW 審議中	2020年 7月	Radio-over-fibre technologies and their performance standard - Part 3: Foreign object and debris (FOD) detection radar system
IEC62803-2 ed. 1.0	IS	PNW 提案済	2021年	Frequency Response of Optical-to-Electric Conversion Device in High-Frequency Radio over Fibre Systems - Part 2 Measurement method of common-mode rejection ratio of optical coherent receiver
IEC 62803-3 Ed. 1.0	IS	PWI 提案済	2022年	Frequency response of optical-to-electric conversion device in high-frequency radio over fibre systems - Part 3 Measurement method of nonlinear response of optical-to-electric converter
IEC TR 63099-2 ed. 1.0	TR	PWI 提案済	2019年	Radio-over fibre technologies for electromagnetic-field measurement - Part 2: Radio-over-fibre technologies for electric-field sensing
規格番号未定	TR	PWI 提案済	2019年	Radio over Fibre Technology for 300-GHz Spectrum Measurement – Part1 Spectrum analysis

*IS: International Standard, TR: Technical Report, PNW: New Work Item Proposal, PWI: Preliminary Work Item

2. 光電界センサを用いた電界計測システムの国際標準化

2.1. 文書構成

IEC TR 63099 Part2 の文書構成は以下の通りである。

1. Scope
2. Normative references
3. Terms and definitions
4. Configuration example of optical electric-field sensor
5. Calibration method of optical electric-field sensor

第1章 Scope～第3章 Terms and definitions までは、すでに発行されている RoF 技術を用いたアンテナ計測

に関する TR 63099 Part 1[4]の内容を踏襲した。第4章では、”Configuration example of optical electric-field sensor”と題して、国内ですでに製品化されている光電界センサの代表的な構成例を記載する。具体的には LiNbO₃ 結晶と微小電極を用いた構成例と ZnTe のバルク結晶を用いた構成例について記載予定である。第5章では”Calibration method of optical electric-field sensor”と題して、光電界センサの校正方法について記載を行う予定である。

2.2. LiNbO₃ 結晶と微小電極を用いた光電界センサ(3軸)の構成例

LiNbO₃ 結晶と微小電極を用いた光電界センサ(3軸)の構成を図1に仕様例を表2に示す。反射型 Mach-

Zehnder 型光変調器を三角柱の3面に配置し、光導波路近傍に形成した変調電極に微小ダイポールを配置することにより、外部印可電界により振幅変調が行われ、戻ってきた変調光を光サーキュレーターで O/E Converter に入力することで、印可電界に比例した電圧変化を得ることによって電界センサとして動作する。微小ダイポール電極は三角柱の鉛直方向に対して 54.7° 傾けることにより、3つの電極が直交した3軸の電界センサを実現している。

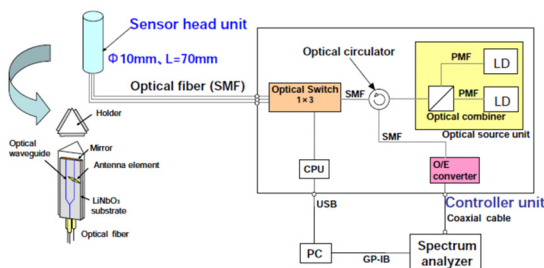


図1 LiNbO3結晶と微小電極を用いた光電界センサ（3軸）の構成例

表2 LiNbO3結晶と微小電極を用いた光電界センサ（3軸）の仕様例（型式SH-03EXおよびSH-10EX）

Item	Specification			Remarks	
	Min.	Max.	Unit		
Frequency range	SH-03EX SH-10EX	0.1 0.1	3,000 10,000	MHz	
Measurable E-field strength	SH-03EX	<300 MHz ≧300 MHz	0.06 0.002	100 500	S/N when minimum input: ≧6 dB@301 MHz (RBW:10 Hz, VBW:1 Hz) When maximum input: Design certification
	SH-10EX	<300 MHz ≧300 MHz	0.3 0.01		
Isotropy	SH-03EX SH-10EX		±1	dB	Impressed E-field strength: 6 V/m@301 MHz
Number of Optical fiber	3				
Optical I/O connector	SC/APC				
Optical fiber length	1.0±0.1 m			Φ2mm	
Case material	ROHACELL 71HF			High close PMI Foam material	

2.3. ZnTe 結晶を用いたバルク型光電界センサ（1軸）の構成例

ZnTe 結晶を用いたバルク型光電界センサ（1軸）の構成を図2に仕様例を表3に示す。片面に高反射膜をコーティングした ZnTe バルク結晶に SG で変調した光信号を入力し、ZnTe バルク結晶に電界が印加されると ZnTe 結晶の中で混変調が発生し、SG 周波数と印加電界周波数の差周波成分が光信号内に発生する（光ヘテロダイン）。その差周波が 1MHz となるように SG 周波数を調整することで、それをフォトダイオードに入力し、差動増幅器と BPF を通すことで、印加電界強度に比例した 1MHz の信号を得ることができるため、電界センサとして動作させることが可能となる。レシーバは 1MHz の信号のみを受信できればよいので、受信機側は安価な構成が可能である。ただし、差周波を作り出すためのローカル信号となる SG とそれを変調す

る光デバイスが必要となる。

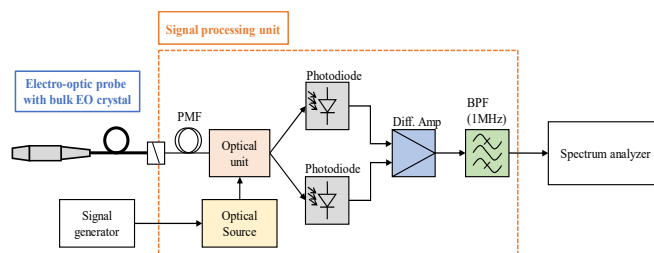


図2 ZnTe結晶を用いたバルク型光電界センサ（1軸）の構成例

表3 ZnTe結晶を用いたバルク型光電界センサ（1軸）の仕様例

Items	Specifications	
Electric Field Detection	Optical Heterodyne Detection (IF = 1MHz)	
Frequency Range	60MHz ~ 7GHz	
Direction of Electric Field	Transverse Type (Vertical to the probe axis)	
	Longitudinal Type (Parallel to the probe axis)	
Optical source	Laser diode	
Optical wavelength	1310nm or 1550nm	
Diameter of Probe	Standard Type	10mm
	Slim Type	1.6mm
Optical Fiber Length	2.0m	

3. 光電界センサの校正方法

電界センサの校正方法は IEEE の国際標準[6]およびテクニカルレポート[7]に詳しく記載されている。光電界センサについても、従来の電界センサの校正方法と大きく異なるものではないため、ここでは産総研においてシステムを構築した電界センサの校正方法について、周波数帯を MHz 帯と GHz 帯に分けて解説する。

校正量目としては、電界強度補正係数、周波数応答、等方性、応答時間、時定数、変調応答などが挙げられるが、本稿では電界強度補正係数とその周波数応答および等方性の校正法について解説する。電界強度補正係数 C は印可電界 E_{app} (V/m) と表示電界強度 E_{ind} (V/m) の比で表され、次式で定義される。

$$C(f) = \frac{E_{app}(f)}{E_{ind}(f)} \quad (1)$$

市販の光電界センサの場合、スペクトラムアナライザ等の受信機と組み合わせて使用するタイプが多いため、必ずしも電界強度表示機能が備わっていない。その場合は、 E_{ind} の代わりにスペクトラムアナライザの受信電圧強度を用いる。

3.1. MHz 帯電界センサ校正システム

MHz 帯の電界センサの校正に使用される標準電界発生装置として主に TEM-CELL, 切離導波管, G-TEM を利用することが多いが、産総研では、TEM-CELL と

G-TEM の両方を利用しており、トランスファー用電界センサの校正に TEM-CELL を、一般ユーザーの電界センサ校正に G-TEM を利用している。これは TEM-CELL は校正可能なセンサの寸法が TEM-CELL の天板からセプタムの距離の 1/3 以下にする必要があり、一方 G-TEM はそれに比べて寸法の制限が少ないため、いろいろなサイズの電界センサの校正に対応可能なためである。TEM-CELL を一次標準として利用し、光電界センサをトランスファープローブとして TEM-CELL で校正し、その校正された光電界センサを用いて G-TEM を校正することで計測トレーサビリティを確保する。TEM-CELL および G-TEM の一般的な構造を図 3 および図 4 に示す。TEM-CELL 内の電界強度は次式により計算することが可能である。

$$E = \frac{V}{b} = \frac{\sqrt{P_{\text{net}} Z_0}}{b} \quad (2)$$

ただし、 P_{net} は TEM-CELL への入力電力、 Z_0 は TEM-CELL の特性インピーダンスの実部、 b は TEM-CELL の天井面とセプタム (= 中心導体) の距離、 V は TEM-CELL の入力電圧を表す。

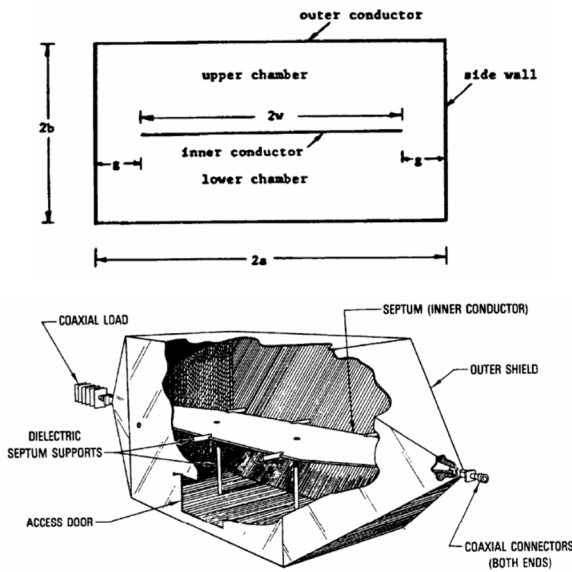


図 3 TEM-CELL の構造 (文献[6]図 A.3 より抜粋)

また TEM-CELL の特性インピーダンス Z_0 は、次式により計算可能である。

$$Z_0 = \frac{94.2}{\frac{w}{b} + \frac{2}{\pi} \ln \left[1 + \coth \left(\frac{\pi g}{2b} \right) \right]} \quad (3)$$

ただし、 w はセプタムの幅の 1/2、 g はセプタムと側壁との距離を表している。

一方、G-TEM 内の電界強度は、数式などで精度よく導出することが難しいため、通常は別の装置で校正されたトランスファー標準との比較校正のために用いら

れる。

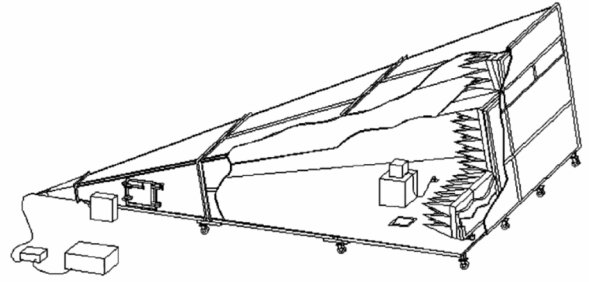


図 4 G-TEM の構造 (文献[6]図 A.6 より抜粋)

3.2. GHz 帯電界センサ校正システム

GHz 帯の電界センサの校正には、アンテナ利得が校正されたアンテナを用いることが多い[6]。アンテナとしてはダイポールアンテナ、ダブルリッジドガイドホーンアンテナ、標準利得ホーンアンテナなどが考えられるが、筆者らが担当している 4 GHz 以上の周波数帯では標準利得ホーンアンテナを利用している。アンテナ利得 G のアンテナから距離 d (m) の位置における電界強度は次式により計算可能である。

$$E = \frac{\sqrt{30 P_{\text{ant}} G}}{d} \quad (4)$$

ただし、 P_{ant} はアンテナへの入力電力(W)である。

産総研における、4 GHz~6 GHz の電界センサ校正の様子を図 5 に示す。

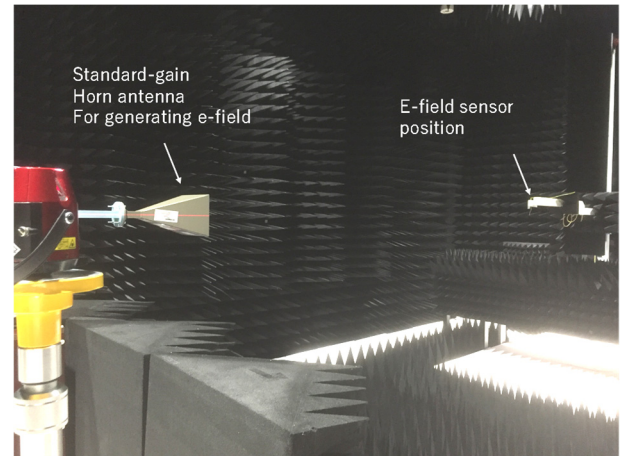


図 5 産総研における標準利得ホーンアンテナを用いた電界センサ校正の例

3.3. 従来型電界センサの特性評価結果

4 GHz~6 GHz の周波帯における、電界センサの電界強度補正係数の校正結果を図 6 に示す。校正した電界センサはそれぞれ、ETS-Lindgren 社製 HI-6005、Narda 社製 PMM EP-600、および Lumiloop 社 LS-Probe 1.2 の z 軸である。

図 6 より、電界強度補正係数は電界センサにより異なる値を有しているがおよそ 0.7~1.4 の間に分布していることがわかる。本校正の拡張不確かさ ($k = 2$) はお

よそ 8.5%である。

等方性の評価方法としては、3軸センサの場合、3軸方向の単位ベクトルがつくる立方体の対角線を軸として回転させる方法が主流であるが、今回はz軸を中心に回転させてセンサの受信パターンを計測することで、z軸のH面指向性ならびにx軸およびy軸のE面指向性の測定を実施した。図7および図8にz軸H面指向性およびx軸E面指向性の周波数4GHz、5GHz、6GHzにおける評価結果を示す。指向性は最大値を0dBに規格化して表示している。

図7(a)~(c)のH面指向性の評価結果より、どの電界センサでも4,5,6GHzでは、最小レベルは-2dBを下回らない。したがって、等方性は±1dB以内に収まっている。図8(d)にパターン内最小レベルの周波数特性を示す。どのセンサもおおむね最小値は-2dB以上すなわち±1dB以内の等方性を有しているが、ETS HI6005およびLumiloop LS-probeの電界センサは周波数によっては±1dBを超える偏移が観測された。(LS-probeの4800MHzや、HI-6005の5600MHzなど)

図8のE面指向性の評価結果より、周波数が上昇するにつれてHI-6005やLS-probeの指向性の最大方向は+90°および270°方向から前後にシフトすることが確認できる。周波数5GHzあるいは6GHzでは最大30°~40°程度シフトしていることがわかる。これは、HI-6005やLS-probeがモノポール型のセンサであることに起因している。波源から近い距離で電界分布測定を行う場合、この最大受信方向のズレが分布の測定結果に影響するため、電界センサの受信パターンの最大方向は可能な限り正面(90°あるいは270°)を向いていることが望ましい。

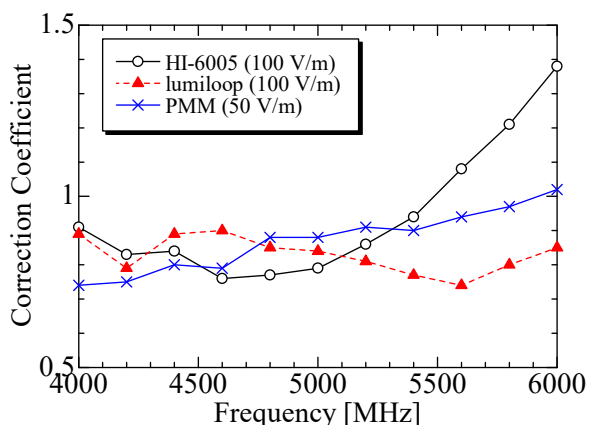
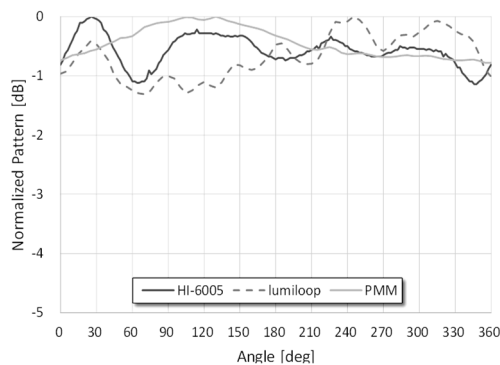
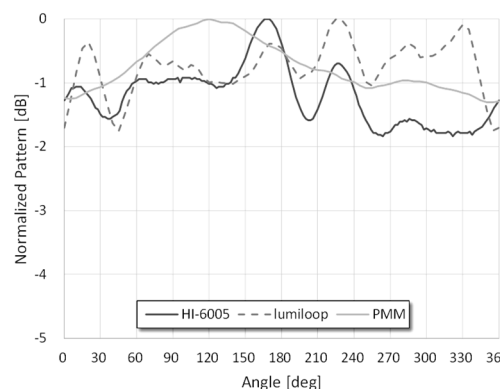


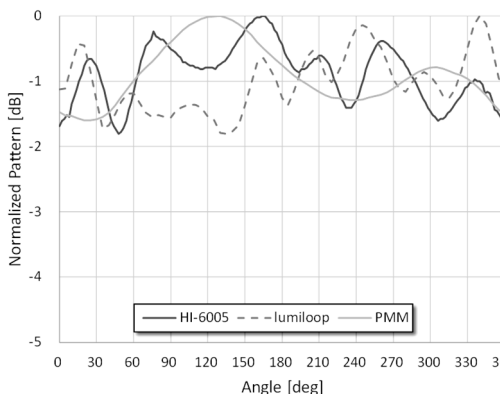
図6 従来型電界センサの電界強度補正係数の校正結果



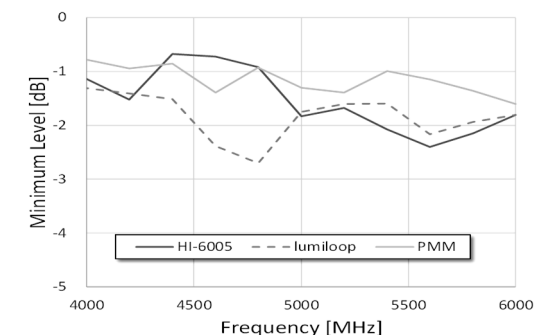
(a) 周波数 4 GHz



(b) 周波数 5 GHz

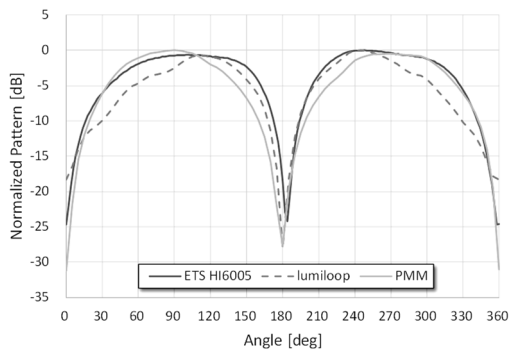


(c) 周波数 6 GHz

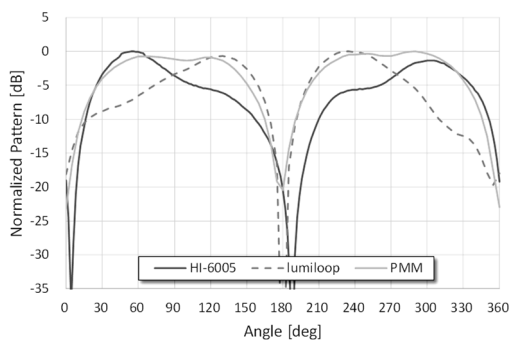


(d) パターン内最小レベルの周波数特性

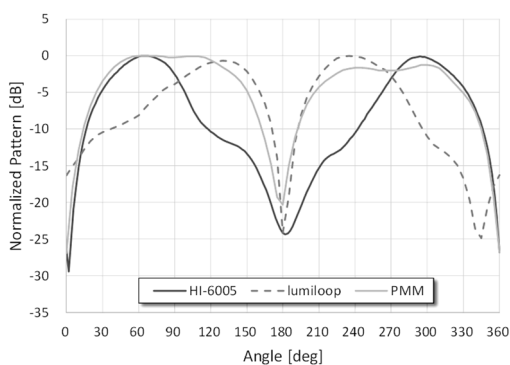
図7 従来型電界センサのz軸H面の受信指向性パターンの評価結果



(a) 周波数 4 GHz



(b) 周波数 5 GHz



(c) 周波数 6 GHz

図8 従来型電界センサのx軸E面の受信指向性パターンの評価結果

3.4. 光電界センサの特性評価結果

光電界センサの特性評価結果については、口頭発表時に詳細を報告する予定である。

4. まとめと今後の課題

本稿では、今後発行予定の光電界センサに関する国際標準テクニカルレポート IEC TR 63099 Part2 の記載内容について解説した。具体的には市販の光電界センサの構成について紹介するとともに、光電界センサを含めた一般的な電界センサの校正方法について解説を行った。記載内容については今後 IEC TC103/WG6 国内員会において議論を行い 2018 年 10 月ごろ開催の次回会合にてドラフト版を提案予定であるので、本標準化文書の作成に興味のある方からのご意見をいただければ幸いである。

現時点では市販の光電界センサはレシーバを別に用意しないタイプが主流であるため、すぐに電界強度を知ることが難しく、従来の電界センサに比べて使い勝手が悪い。光電界センサは、電界とのインタラクションする部分が波長に比べて小さいため、高い周波数でも微小ダイポールに近似することが可能であり、等方性の観点からは、従来型の電界センサより優れていることが予想される。また、応答速度も速いため、周波数弁別が容易であり、変調信号にも対応可能であるなど、従来型の電界センサよりも優れている点が多い。今後は、光電界センサのさらなる実用化と高信頼化に向けて、電界強度の即時計測や現場校正装置の開発に注力したいと考えている。

文 献

- [1] IEC 62803:2016, "Transmitting equipment for radiocommunication - Frequency response of optical-to-electric conversion device in high-frequency radio over fibre systems - Measurement method", edition 1.0, 2016.
- [2] IEC 62802:2017, "Measurement method of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder optical modulator in high-frequency radio on fibre (RoF) systems", edition 1.0, 2017.
- [3] IEC TR 63098-1:2017, "Transmitting equipment for radiocommunication - Radio-over-fibre technologies and their performance standard - Part 1: System applications of radio over fibre technology", edition 1.0, 2017.
- [4] IEC TR 63099-1:2017, "Transmitting equipment for radiocommunication - Radio-over fibre technologies for electromagnetic-field measurement - Part 1: Radio-over-fibre technologies for antenna measurement", edition 1.0, 2017.
- [5] IEC TR 63100:2017, "Transmitting equipment for radiocommunication - Radio-over-fibre technologies for spectrum measurement - 100-GHz spectrum measurement equipment", edition 1.0, 2017.
- [6] IEEE Std 1309-2013, "IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz", 2013.
- [7] IEEE Std C95.3™-2002 (R2008), "IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz", 2008.

変調レーザを用いた高周波磁界計測

石山 和志

東北大学電気通信研究所 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

E-mail: ishiyama@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 近傍磁界を低い侵襲性で計測することが環境電磁対策問題から望まれている。そこで、磁気光学結晶を利用した金属を用いない低侵襲な計測手法に着目し、その測定感度を向上させるために短パルスレーザを用いてストロボ法を使った手法が提案されている。本報告ではパルスレーザをバースト変調させて高感度に計測する手法について紹介する。

キーワード 磁気光学効果, 電磁両立性, 磁界測定

High Frequency Magnetic Near Field Measurement using Modulated LASER

Kazushi ISHIYAMA

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University 2-1-1 Katahira Aoba Sendai 980-8577 Japan

E-mail: ishiyama@riec.tohoku.ac.jp

Abstract Electromagnetic interference (EMI) is a serious problem in integrated circuits. To overcome this problem, it requires the low-invasive measuring system for the near-field estimation. We proposed a magneto-optical measurement system that uses short laser pulses and a stroboscopic method and measurement of magnetic-field waveforms. In this report, I discuss about the new system using modulated LASER to improve the sensitivity..

Keywords magneto-optical effect, electromagnetic compatibility, magnetic field measurement

1. はじめに

近年、電子機器の高性能化に伴う集積回路やプリント配線版の高密度化や、低消費電力を目指した低電圧駆動による電磁耐性の低下により、EMI (Electromagnetic interference) による影響を受けやすく、誤作動等を引き起こしてしまうという問題が懸念されている⁽¹⁾。この問題を解決するため、漏洩電磁波の発生源を特定し防止する必要がある、微弱な近傍磁界を正確に測定する技術が求められている。

高周波近傍磁界測定ではプローブとして一般的にループアンテナを用いた測定⁽²⁾⁽³⁾が行われているが、金属製であるため本来の磁界分布を乱してしまう⁽⁴⁾。そのため我々は、比較的磁界を乱しにくい磁気光学結晶であるガーネットと、パルスレーザを用いたストロボ法により交流磁界の位相情報を含んだ低侵襲な高周波磁界分布測定システム⁽⁵⁾について検討を行っている。

これまで測定システムの原理検証にあたり、マイクロストリップ線路などを用いて被測定磁界をバースト変調させることで高感度な測定を行ってきたが⁽⁶⁾、実際の集積回路等が測定対象の場合、この方法は適応困難である。そのためパルスレーザ側をバースト変調させる必要があるが、長時間の測定のため発生する機器のドリフトや、ガーネットの表面形状等の影響によ

り、磁界バーストと同等の明瞭な磁界分布像を得ることが困難であった。

そこで我々は、被測定磁界の基準とする位相と基準とする位相から 180 度ずれた位相における検出値の差分を測定することにより、パルスレーザバースト変調方式で問題であった磁区や表面形状の影響を除去し、ドリフトの影響を抑え、発生磁界分のみを検出する磁界分布測定手法を新たに提案し、その結果を報告する。

2. 計測方法

2.1. 測定システム

図 1 に本報告におけるパルスレーザバースト変調方式での磁界測定装置の構成を示す。磁界発生源として磁界分布の推測が容易なマイクロストリップ線路 (線路幅 430 μ m) を用い、その近傍に磁性ガーネット薄膜を配置した。ガーネット薄膜には、GGG (100) 基板上に金属有機化合物分解法 (MOD 法) により成膜した面内方向に異方性を有する厚さ 600nm の $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ 膜を用いた⁽⁷⁾。

ガーネット膜表面には Ag の反射膜がコーティングされており、対物レンズを通し集光したレーザ光をガーネットに対し垂直に入射し、その反射光を検出する。反射光はガーネットを透過する際に磁気光学効果によ

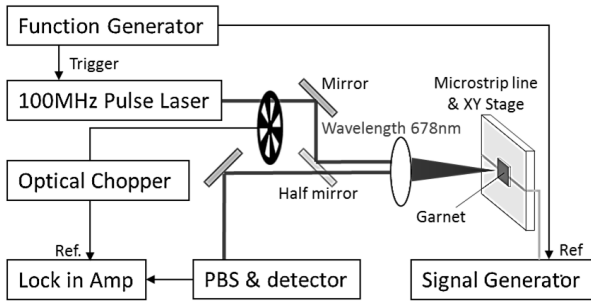


図1 磁界測定システムの構成
Fig.1 Schematic structure of magnetic field measurement system

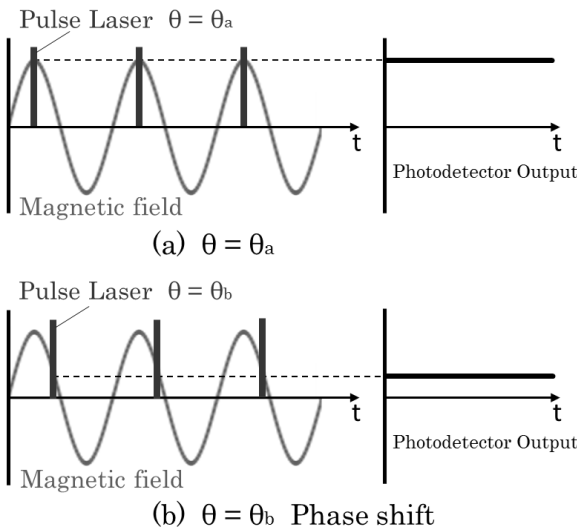
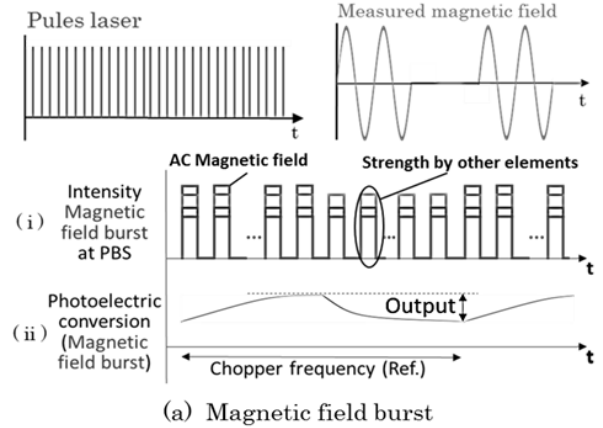


図2 ストロボ法とフォトディテクタでの出力
Fig.2 Stroboscopic method and photodetector output

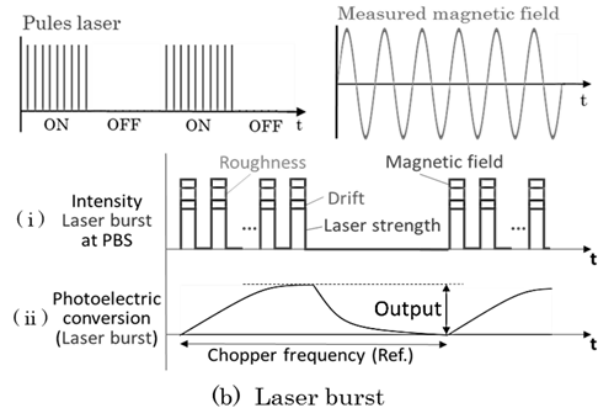
り磁界強度に依存した偏光状態の変化が起こるため、その変化量をフォトディテクタを用いて差動検出することで垂直方向成分の磁界強度が測定可能である⁽⁸⁾。空間分解能はガーネットの膜厚や対物レンズの倍率などにより決まり、本測定条件下では $2\mu\text{m}$ 程度である⁽⁹⁾。また、本報告で使用したパルスレーザは、外部トリガにより発光タイミングが制御可能な半導体レーザであり、波長 678.8nm 、 100MHz 発振時の平均時間出力は $886\mu\text{W}$ 、パルス幅は 31ps 、ジッタは 1.9ps である。ストロボ法を用いた磁界検出はレーザのパルス幅が磁界の測定上限周波数を決定する要因であり、このシステムでの測定上限周波数は約 11.8GHz である。

2.2. ストロボ法

本測定システムでは、シグナルジェネレータと同期させたファンクションジェネレータよりパルスレーザに外部トリガを与え、パルスレーザと被測定磁界を同期させることで、図2に示すようなストロボ法を用い



(a) Magnetic field burst



(b) Laser burst

図3 偏光面回転の要因を示した模式図
Fig.3 Schematic diagram showing factors of polarization plane rotation

た測定を行っている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。被測定磁界がパルスレーザ発振周波数の整数倍の場合、図2(a)のように特定位相でのみレーザが発光するため、特定位相での磁界強度をロックインアンプによりDCで取り出すことができる。また、図2(b)のようにレーザ発振のタイミングと被測定磁界の位相をずらすことで、任意位相の磁界強度を測定することができる。これにより磁界の位相情報、強度、周波数の測定が可能となっている。

2.3. パースト変調

EMIの測定には集積回路等から漏れる磁界が微弱なため高い感度が要求される。本測定システムでは、磁気光学効果により偏光面が回転したレーザ光を光電変換し磁界強度を検出しているが、フォトディテクタの光電変換効率は周波数応答性とトレードオフの関係にあることや、ストロボ法を用いた各パルス光の光強度は微弱であることから、パルス光を個々に検出することは感度の面で現実的ではない。これより本測定システムでは、高い光電変換効率を有する周波数応答性の低いフォトディテクタを使用し、複数のパルス光を

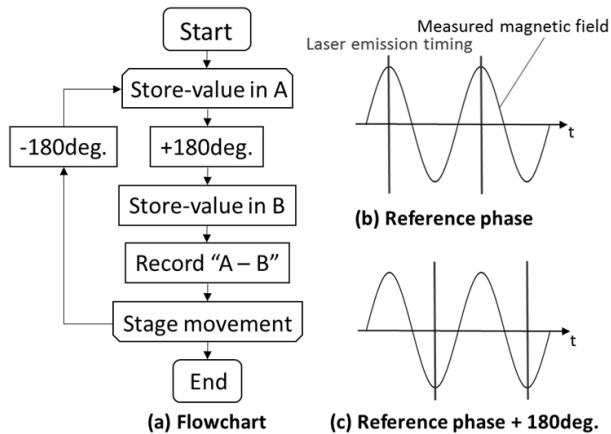


図 4 位相変化差分測定手法
Fig.4 Phase shift difference measurement method

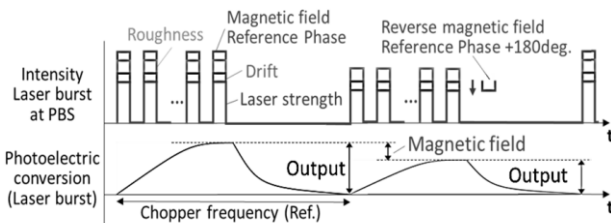


図 5 光電変換後の出力電圧のイメージ
Fig.5 Image of output voltage after photoelectric conversion

積算して出力している。さらにレーザ発振周波数より低い周期で、被測定磁界あるいはパルスレーザをバースト変調し ON/OFF することで、フォトディテクタからの出力が周期的なものとなり、その周期的な電圧差をロックインアンプを用いて検出している。

3. パルスレーザバースト変調での磁界分布測定

3.1. パルスレーザバースト変調における課題

近傍磁界分布測定において被測定磁界側をバースト変調した際は、図 3 (a)-(i) に示すように被測定磁界の ON/OFF により磁界変化分のみが交流成分となり、測定対象から発生する磁界のみを検出できていた (図 3 (a)-(ii)). しかし、被測定磁界側をバースト変調することは現実的ではない。従ってパルスレーザ側をバースト変調させる必要があるが、図 3 (b)-(i) に示すように、レーザの ON/OFF によりガーネットの表面形状による偏光面の回転、測定機器のドリフトによる値も交流成分に含まれてしまい、本来検出したい測定対象からの発生磁界が埋もれてしまうという課題があった (図 3 (b)-(ii)).

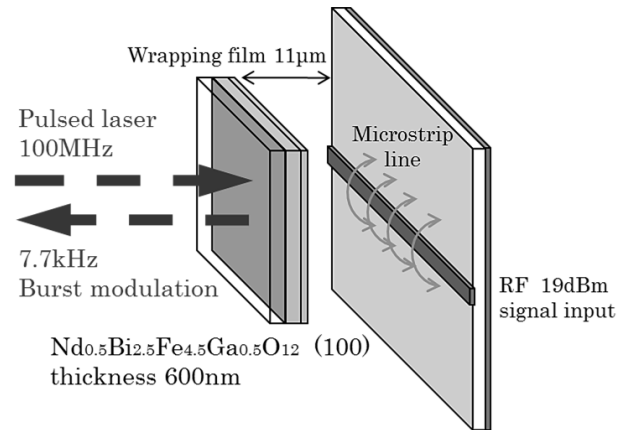


図 6 ガーネット(プローブ)とマイクロストリップ線路(被測定対象)
Fig.6 Garnet (probe) and MSL (DUT)

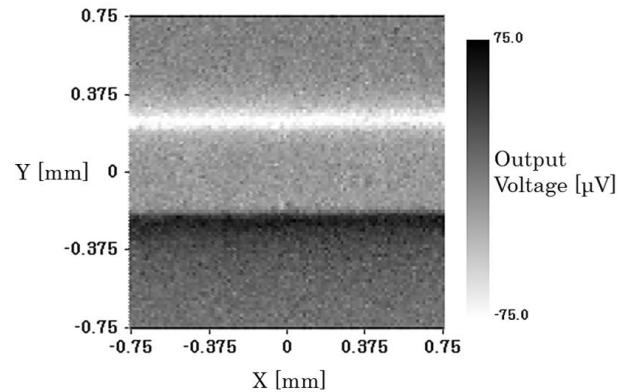


図 7 磁界分布測定結果
Fig.7 Magnetic field distribution measurement result

3.2. 位相シフト差分測定手法

表面形状等の影響を打ち消すために、磁界発生時と発生磁界無しのバックグラウンドでそれぞれ磁界分布測定を行い、二つの測定結果を差分するという方法が考えられるが、時間経過に伴うドリフトの影響が色濃く表れてしまい、発生磁界が埋もれ S/N が非常に悪くなってしまふ。

そこで本報告で新たに提案する測定手法は、図 4 (a) に示すように磁界分布を測定していく過程の一点一点で、基準位相の磁界検出値と基準位相から 180 度ずれた点における磁界検出値を測定し、両者の差分を分布上のある一点の値としてプロットしていく手法である。仮に、図 4 (b) のようにパルスレーザ発振のタイミングを被測定磁界の正方向に最大となる位相に合わせると、差分対象となる位相は図 4 (c) のように負方向に最大となる位相になる。よって図 5 に示すように光電変換後の出力電圧は、正方向磁界により増大した値と負方向磁界により減少した値が得られ、両者を差分することで発生している磁界分のみを検出が可能である。

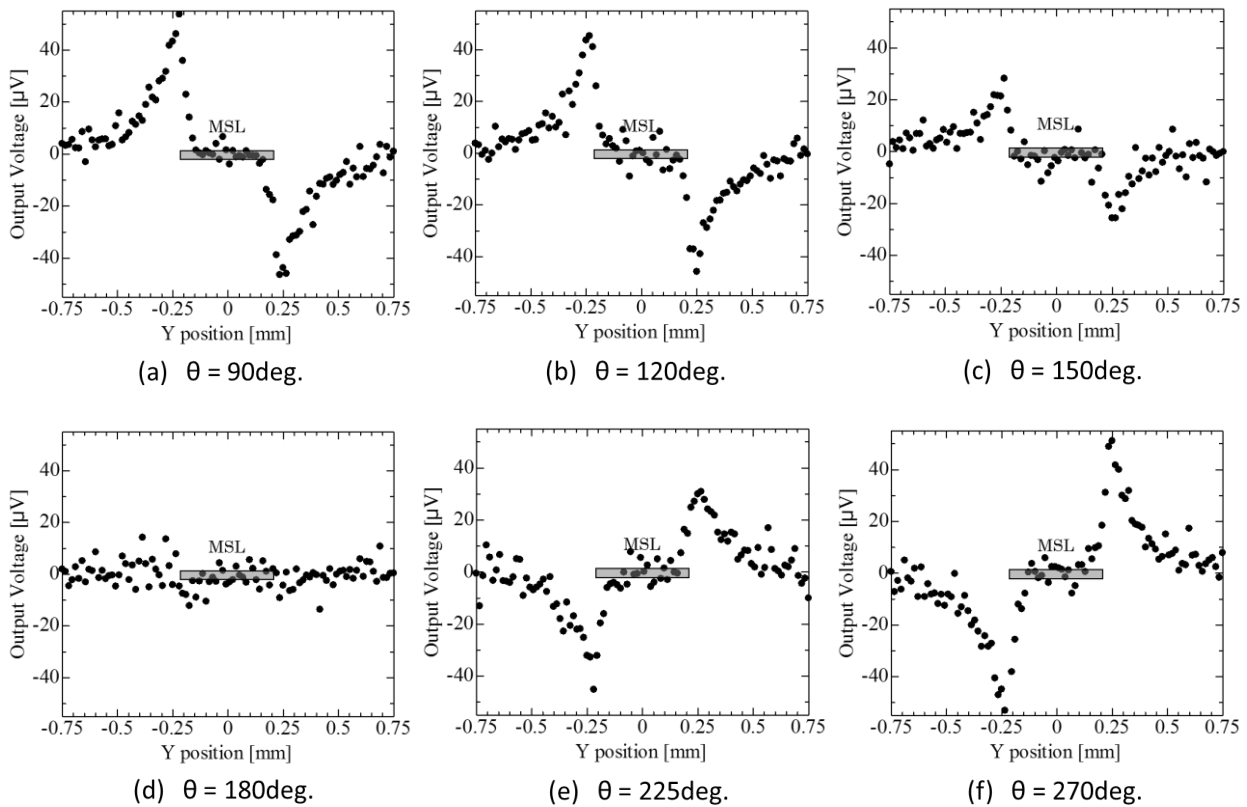


図 8 被測定磁界（100MHz）の位相変化の様子
 Fig.8 Phase shift of the measured AC 100MHz magnetic field

さらに機器のドリフトの影響も位相変化に要するごく短い時間分に抑えることができ、S/N の良い測定が可能である。また、基準とするレーザ発振タイミングの位相を連続的に変化させることで、従来通りのストロボ法の利点を生かした、磁界の位相情報、強度、周波数の測定が可能となっている。

4. 測定結果

4.1. MSL 近傍の磁界分布

光路に機械式チョッパーを挿入し、物理的にレーザ光を ON/OFF させパルスレーザをバースト変調させた。また図 6 のように MSL 近傍にガーネットを配置し、ガーネット上をスキャンしていく形式で測定を行った。レーザを 100MHz で発振、機械式チョッパーを 7.7kHz で回転させ、MSL に 19dBm、1.0GHz の RF 信号を入力したときの、MSL 近傍 1.5mm 四方の磁界分布を 100 点×100 点で測定した結果を図 7 に示す。MSL（線路幅 430 μm）は図 7 の Y=0 のラインを中心に紙面横方向に配置しており、エッジ付近に強い垂直方向成分磁界を検出していることから、発生磁界のみを計測できていると考えられる。

4.2. 特定位相での磁界分布

レーザ発振のタイミングと被測定磁界が図 4 (b) の位相関係のときを 90 度とし、90 度～270 度の間で基準位相を変化させたときの図 7 における X = 0 の断面の磁界分布を図 8 に示す。交流磁界の位相変化の様子が確認でき、本報告で提案した手法の妥当性が確認できた。

4.3. パワーアンプ素子近傍の高周波磁界計測

回路基板上の高周波パワーアンプ近傍の次回分布計測を行った。用いた測定システムは前述の MSL 近傍磁界計測に使用したものと同一である。測定対象とした回路写真を図 9 に示す。1GHz、10dBm の RF 信号を入力した際にアンプ素子近傍から発生する磁界の計測を行った。素子に 5mm×5mm のガーネット素子を載せ、ガーネット上をレーザでスキャンしながら計測することで可視化した。

図 10 はその計測結果である。増幅後の出力端に大電流が流れていることが了解される磁界分布が計測された。これにより、この素子が発する高周波電磁ノイズが周辺環境に悪影響を及ぼす際に、それを防ぐシールドを配置すべき位置が明らかとなった。

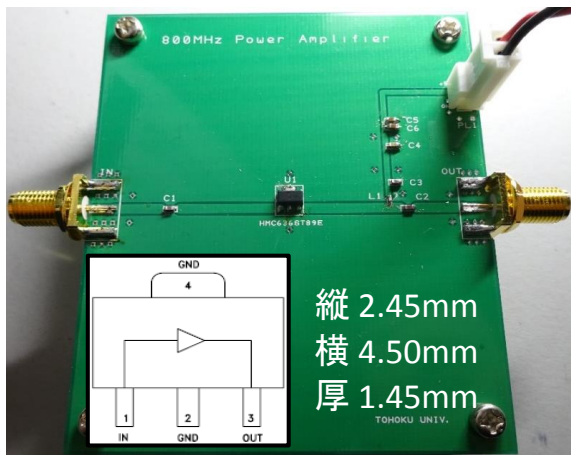


図 9 被測定回路 (中央部 RF アンプ素子)
Fig.9 RF amplifier circuit to be measured

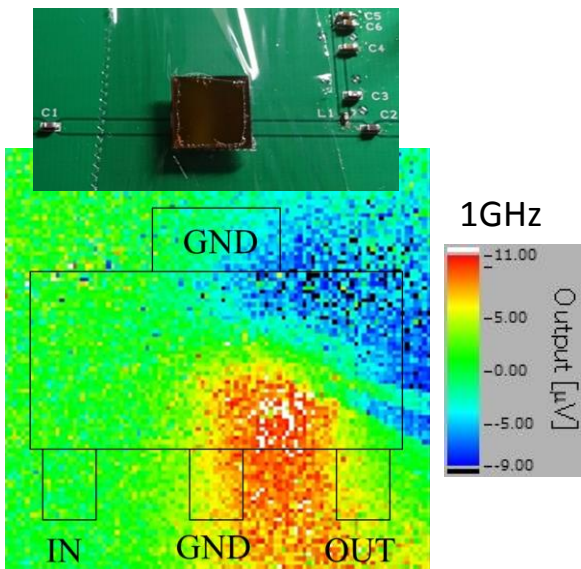


図 10 1GHz の近傍磁界計測結果
Fig.10 Measured result of 1GHz magnetic field measurement

今後は、機械式チョッパに起因する変調周波数の揺らぎなどによるノイズの低減などによりさらなる高感度化を目指す。

5. まとめ

本報告では、パルスレーザーバースト変調時の磁界測定におけるノイズ等の課題に対し、被測定磁界の二つの特定位相による検出値の差分を取る手法を提案し、実際の測定結果より本手法の妥当性が確認された。従って本手法を用いることで、測定対象をバースト駆動させずに測定することが可能となり、実際の集積回路等の磁界分布測定への適用が期待できる。

今後は、集積回路等から発生する微弱な磁界をより高感度に検出すべく、ガーネットの高周波特性やパル

スレーザバースト変調時のノイズ低減について検討を行う予定である。

文 献

- [1] R. Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility 2nd edition, p. 10-11, John Wiley, NewYork (2006).
- [2] J. D. Dyson: "Measurement of near field of antennas and scatterers", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. AP-21, pp. 446-460 (1973).
- [3] N. Tamaki et al: "A Miniature Thin-Film Shielded-Loop Probe with a Flip-Chip Bonding for Magnetic Near field Measurement", IEICE Trans. Electron., vol. J87-C, No. 3, pp. 335-342 (2004).
- [4] M. Takahashi, H. Ota, K. I. Arai and R. Sato: "Magnetic Near-Field Distribution Measurement above a Patch Antenna by Using an Optical Waveguide Probe", IEICE Trans. Commun., E88-B, pp. 3140-3145 (2005).
- [5] H. Nasuno, S. Hashi, K. Ishiyama: "Stroboscopic technique for measuring magnetic-field waveforms utilizing magneto-optical effect", IEEE Trans. Magn., vol. 47, pp.4011-4013 (2011).
- [6] J. Takahashi, H. Nasuno, S. Hashi, K. Ishiyama: "Magnetic field waveform measurement of microstrip line using pulsed laser", Digests of the 35th Annual Conference on Magnetism in Japan, p. 58 (2011).
- [7] M. Sasaki, G. Lou, T. Hashinaka, A. Meguro, M. Ninomiya, T. Ishibashi, T. Taniyama: "Strain-controlled MO effect on highly Bi-substituted Neodymium Iron Gallium Garnet thin films", 20th ICM, vol. 75, pp. 1370-1375 (2015).
- [8] Anjan Barman, T. Kimura, Y. Otani, Y. Fukuma, K. Akahane, S. Meguro: "Benchtop time-resolved magneto-optical Kerr magnetometer", AIP Rev. Sci. Instrum. 79, 123905 (2008).
- [9] J. Takahashi, S. Hashi, K. Ishiyama: "Measurement of Magnetic-field Distribution Using Pulsed Laser with Magneto-optical Effect", J. Magn. Soc. Jpn., vol. 37, No. 2, pp 24-28 (2013).
- [10] S. Tamarua, J. A. Bain, R. J. M. van de Veerdonk, T. M. Crawford, M. Covington, M. H. Kryder: "Imaging of quantized magnetostatic modes using spatially resolved ferromagnetic resonance", J. Appl. Phys., vol. 91, No. 10, pp 8034-8036 (2002).

光応用電磁界計測（PEM）特別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）特別研究専門委員会は、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	岐阜大学
	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

☆ 今後の PEM 研究会のご案内

電子情報通信学会総合大会（2018年3月20日～23日 於：東京電機大学・東京千住キャンパス）においてシンポジウムを開催します！

大会3日目 3月21日（水）13時～17時 シンポジウム企画（共催）

「テラヘルツ技術とそのシステム応用に関する動向と進展」

また、新年度より水野新委員長（4月就任予定）を中心に第4期 PEM 研の活動を進めます。新年度は4回の研究会を開催する予定です。ご期待下さい。

（詳細は、PEM 研究会のホームページをご覧ください）

☆ PEM 研究会の海外進出は大成功！

PEM 研究会の新しい試みとして、ワークショップをスイス・チューリッヒで開催しました。（PEM2017 in Zurich）基調講演・招待講演・一般講演・ポスター講演に加えて、ラボツアー、エクスカージョンのアルプスハイキング（筆者は道に迷い遭難するところでした）、山小屋でのチーズフォンデュパーティ等、大いに盛り上がりました。詳細は本冊子冒頭の水野副委員長の会議報告をご覧ください。



☆ 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！」をよろしくお願いします。



☆ 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/>

