

PEM

第3回 光応用電磁界計測研究会

— ミリ波・THz波計測の最新技術と生体・視覚応用技術 —

PEM2016-11～16

2017年 2月16日(木), 17日(金)

於： 地方職員共済組合有馬保養所 瑞宝園

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

連 催： 電気学会 光応用・視覚技術委員会
電気学会 計測技術委員会

協 賛： 株式会社 多摩川電子

第2回 光応用電磁界計測研究会

(電気学会 光応用・視覚技術委員会, 計測技術委員会 連催)

プログラム

テーマ : 「 ミリ波・THz 波計測の最新技術と生体・視覚応用技術 」

2017年 2月 16日 (木) [セッション PEM-1] 16:10 ~ 16:55

PEM2016-11 [依頼講演] 電気光学プローブによるミリ波・テラヘルツ波の精密計測

久武 信太郎 (大阪大)

2017年 2月 17日 (金) [セッション PEM-2] 14:05 ~ 15:20

PEM2016-12 [一般講演] 生体へのミリ波・THz 帯電磁波ばく露とばく露評価

鈴木 敬久, 多氣昌生 (首都大), 小島正美 (金沢医科大)

PEM2016-13 [一般講演] THz 帯における高精度な複素誘電率測定のための分光システム評価

水野麻弥 (NICT), 飯田仁志, 木下基 (産総研), 福永香 (NICT),
島田洋蔵 (産総研), 大谷知行 (理研)

PEM2016-14 [一般講演] ボディスキヤナの最新技術動向

～ ボディスキヤナの技術情報から、具体的な運用事例まで ～

関野敏正 (ローデ・シュワルツ・ジャパン)

2017年 2月 17日 (金) [セッション PEM-3] 15:30 ~ 16:20

PEM2016-15 [一般講演] 生体イメージングに向けた埋植型高実効 SNR イメージセンサ

笹川清隆, 山口貴大, 春田牧人, 太田安美, 野田俊彦, 徳田崇, 太田淳 (奈良先端大)

PEM2016-16 [一般講演] 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

村田博司, 東良幸, 上野文聖 (阪大), 奥田忠弘, 裕昌也 (栗本鐵工)

場 所 : 地方職員共済組合有馬保養所 瑞宝園

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 : 株式会社 多摩川電子

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：2017年2月16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

電気光学プローブによるミリ波・テラヘルツ波の精密計測

久武 信太郎

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

E-mail: hisatake@ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 電気光学プローブを用いるミリ波・テラヘルツ波計測に関する最近の我々の研究成果について紹介する。従来手法は、被検出電磁界によりプローブ光に誘起される偏光変調に基づいていたため、環境変動によるプローブ光の偏光状態変動が検出感度の変動を引き起こす問題を有していた。一方、我々が提案する手法は、被検出電磁界によりプローブ光に生成される変調サイドバンドのコヒーレント検波を電界検出の原理としており、環境に対してロバストである。本講演では、我々の計測手法の再現性と計測精度について議論した後に、アンテナ評価など、本計測手法を応用する最近の試みについて紹介する。

キーワード 電気光学効果, 電磁界計測, 電界センシング, 電気光学プローブ, 振幅分布, 位相分布, 可視化, アンテナ評価, 伝搬路解析, レーザ, マイクロ波, ミリ波, テラヘルツ波

1. はじめに

電気光学(Electro-Optic: EO)効果に基づく電磁界計測の歴史は、1980年代から今日まで、30年間以上に亘っている。計測の原理はごく最近まで基本的には変わっておらず、主に応用研究が進められてきた。息の長い技術となったその最大の要因は、EO効果の広帯域性にある。マイクロ波からミリ波(30 GHz~300 GHz)、そしてテラヘルツ波(0.1 THz~10 THz)へと続く電磁波開拓の歴史と周波数利用技術の進展の各時代において、EO計測には新たな測定ニーズと測定対象が存在していたようである。

2000年頃には、シングルモード光ファイバの先端にEO結晶を装荷したEOプローブが提案された[1, 2]。EO結晶にアンテナ構造などを設けず信号伝送を光ファイバで行うEOプローブは、全誘電体で構成されるため、同軸ケーブルで信号を運ぶ電氣的プローブと比べて被検出電磁界への擾乱が圧倒的に小さいという特長を持つ。加えて操作性が高く、EOプローブをメカニカルステージに固定し、測定点ごとにこれを移動させることで、電磁界の空間分布の可視化が可能となる。ところが、従来のEO検出の原理は、被検出電磁界によるプローブ光の偏光変調に基づいており、周囲温度変化や、EOプローブの位置決めに伴う光ファイバの捻じれ等により、容易にプローブ光の偏光状態が変動し、これが感度変動を引き起こすという問題があった。この問題を解決するために、2000年台後半には、負帰還制御を併用する手法[3]やファラデー回転子と偏波保持ファイバを用いる手法[4]が提案されている。

本講演では、我々が最近提案した新しいEO計

測に基づくミリ波・テラヘルツ波の精密計測について紹介する。提案の手法は、被検出電磁界によりプローブ光に生成された変調サイドバンドの光領域でのコヒーレント検波に基づいている[5, 6]。本手法では、特別な処置を施さずとも、再現性が高く高精度な計測が可能となる。自己ヘテロダイン法と組み合わせた同期型計測(ネットワーク・アナライザタイプの計測)と非同期型計測(スペクトラム・アナライザタイプの計測)について紹介する。

2. 非偏光変調方式によるEO計測

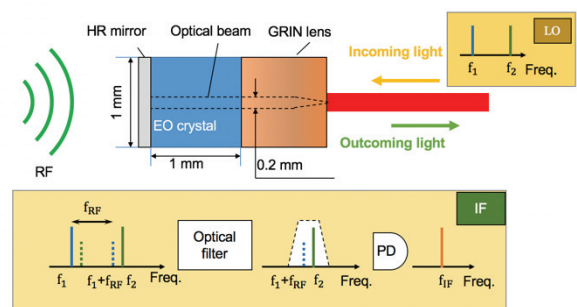


図 1. EO プローブの構成と検出原理。

図 1 に EO プローブの構成と検出の原理を示す。EO プローブは偏波保持ファイバの先端に GRIN レンズと EO 結晶が装荷されている構成となっている。二波長光源からのプローブ光は、EO 結晶中で被検出電界と相互作用し、変調サイドバンドが生成される。被検出電界の周波数を f_{RF} とすると、 f_1 キャリアの上側サイドバンド成分は f_1+f_{RF} 、 f_2 キャリアの下側サイドバンド成分は f_2-f_{RF} となる。HR ミラーにより反射されたプローブ光は、光フィルタによりどちらか一方のキャ

リア・サイドバンドペアが選択され、フォトダイオードにて受光される。被検出電磁界の情報がコヒーレントに転写され変調サイドバンドを高強度なキャリア成分でコヒーレント検出することが電磁界検出の基本原則となる。

3. 同期計測と非同期計測

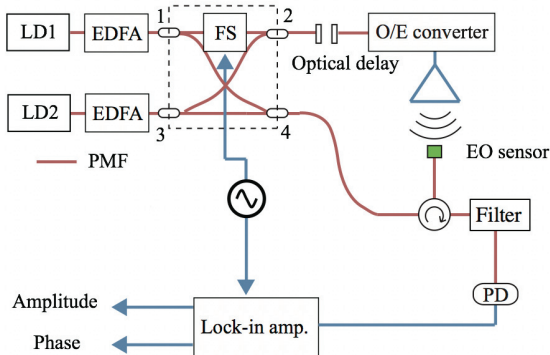


図 2. 同期型計測システムの構成例.

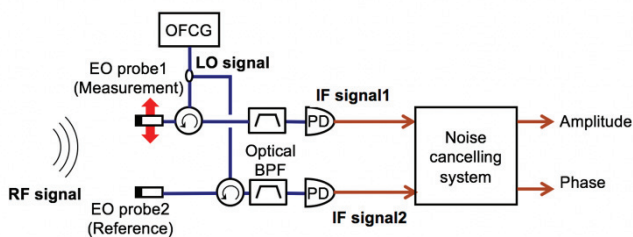


図 3. 非同期型計測システムの構成例.

我々は、同期型計測システムと非同期型計測システムの2種類のシステムを開発している。それぞれのシステムの概略を図2、図3に示す。

図2に示す同期型計測システムでは、自己ヘテロダイン法に基づき2波長光源からコヒーレントなRF信号とLO信号を得ている。RF信号とLO信号の周波数変動は同一であるが、それぞれの周波数間には光周波数シフタの動作周波数分だけオフセットがあり、コヒーレントなヘテロダイン受信が可能となっている。本システムでは、二波長光源の周波数差によりRF周波数を設定可能である。フリーランニングレーザをその光源として用いても、光源由来の雑音はキャンセルされるため、広い周波数同調性と高感度な計測が両立される点に特長がある。

図3に示す非同期型計測システムでは、自励発振デバイスなどから放射されるRF信号の位相ゆらぎを空間の参照点に固定された参照用のEOプローブによる計測値を用いてキャンセルすることで、相対位相の空間分布を可視化する。

4. 計測の再現性と精度

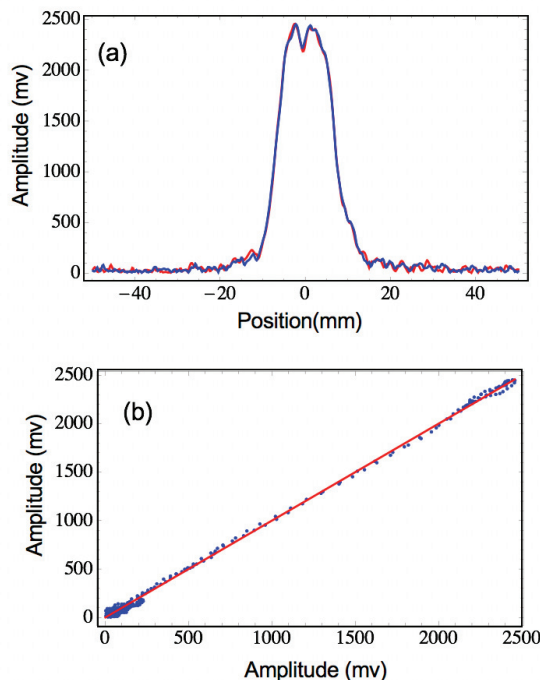


図 4. 電界分布計測の再現性評価. (a)近傍界分布, (b)異なる2回の測定間の相関図.

図4(a)に測定されたホーンアンテナ近傍界分布(1次元)を示す。図は2回の測定結果を重ね合わせているが、ほとんど同一の分布が得られている事がわかる。これら独立の2回の測定で得られた電界分布の相関を図4(b)に示す。傾き1の直線上にデータが分布しており、高い相関性を示している。16回の計測, 8セットのデータから求めた異なる2回の計測値の誤差の標準偏差は、振幅データにおいて $43 \pm 8 \text{ mV}$ 、位相データにおいて $80 \pm 5 \text{ mrad}$ であった。EOプローブを移動させず、ある固定点で計測した振幅計測、位相計測の標準偏差はそれぞれ 40 mV 、 80 mrad であった。EOプローブを移動させて計測した異なるデータ間の誤差の標準偏差は、プローブを動かさない場合の標準偏差と一致しており、我々の計測の再現性の高さが示された。

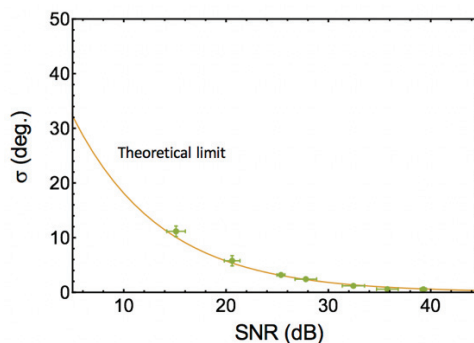


図 5. 位相計測の標準偏差.

図 5 に自励発振デバイスである Gunn 発振器から放射された電界(77 GHz)に対する相対位相計測の標準偏差を示す。被計測電磁界は±300 kHz の短期的周波数雑音を有しているが、得られた位相計測の標準偏差は、振幅計測の信号対雑音比で制限される理論限界値とよく一致している。被測定電磁界に周波数揺らぎが重畳されていても、理論限界感度での位相計測が可能であることが示された。

5. 計測例

非同期計測システムで可視化したミリ波電界の振幅と位相分布を図 6 に示す。周波数揺らぎを有する Gunn 発振器で発生され、ホーンアンテナから放射されたミリ波の分布は、シミュレーション結果とよく一致している。

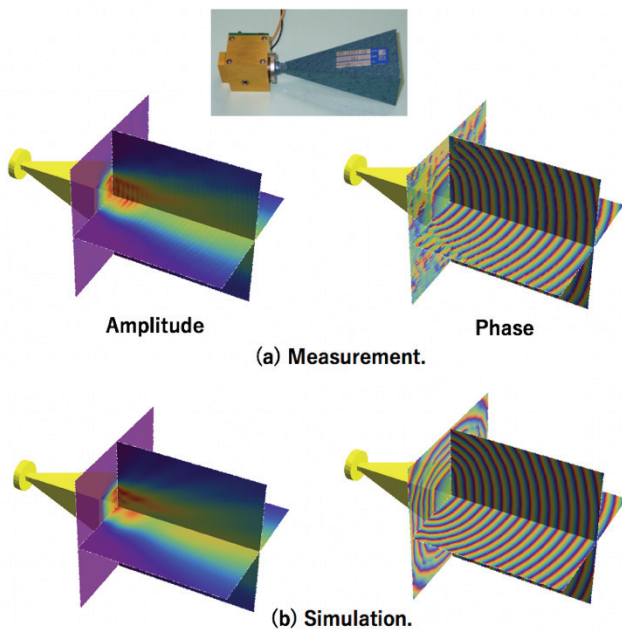


図 6. Gunn 発振器で発生されたミリ波(77 GHz)の放射電界分布。被計測電磁界には±300 kHz の短期的周波数揺らぎが存在している。

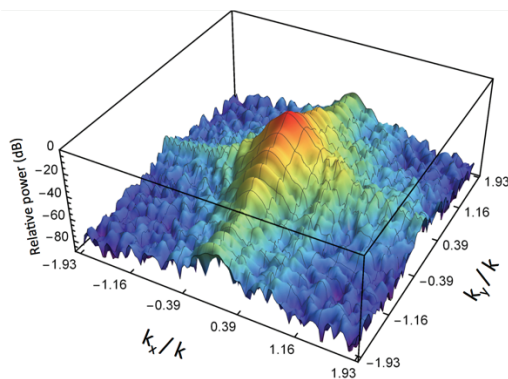


図 7. 測定された近傍界から計算により求めたアンテナ放射パターン。

図 7 は、実測された近傍界から計算により求めたアンテナ放射パターンである。得られた結果は、シミュレーション結果と良い一致を示した。

まとめ

被検出電磁界によりプローブ光に誘起される変調サイドバンドのコヒーレント検波に基づく新しい EO 計測の手法について述べた。本手法では、ファイバを動かしたり捻ったりしても再現性の高い測定値が得られる。我々のシステムで得られる位相計測の標準偏差は、振幅計測の信号対雑音比から求まる理論限界値にまで達する。EO プローブの高い操作性と低擾乱性に加えて、従来手法では問題となっていた再現性と精密性が確保された本システムは、アンテナ計測のみならず電磁波伝搬路解析など様々な分野に応用可能であると期待している。

6. 謝辞

普段からご指導・ご議論頂く永妻忠夫教授、ともに研究を進めてくれる本学学生 Hai-Huy Nguyen Pham 氏、中島滉氏、山口航輝氏に感謝する。

本研究の一部は JST 先端と科研費によるサポートを受けた。

文 献

- [1] 大原拓也, 並木亮介, 五十嵐浩司, 若菜伸一, 土屋昌弘, “ファイバ端 EO センサヘッドの提案,” 信学技報, vol. 99, pp. 55-60, 1999.
- [2] K. Yang, L. P. B. Katehi, and J. F. Whitaker, “Microwave-field imaging with a fiber-based electro-optic probe,” Proc. Annual Meeting of Laser and Electro-Optics Society, TuFF3, pp. 388-389, Puerto Rico, Nov. 2000.
- [3] A. Garzarella, S. B. Qadri, D. H. Wu, and R. J. Hinton, “Responsivity optimization and stabilization in electro-optic field sensors,” Appl. Opt., Vol. 46, 6636, 2007.
- [4] H. Togo, N. Kukutsu, N. Shimizu, and T. Nagatsuma, “Fiber-mounted electro-optic probe with highly stable sensitivity,” J. Lightwave Technol., Vol. 26, pp. 2700-2705, 2008.
- [5] S. Hisatake and T. Nagatsuma, “Nonpolarimetric Technique for Homodyne-Type Electrooptic Field Detection,” Applied Physics Express, Vol. 5, 012701, 2012.
- [6] S. Hisatake, H. H. Nguyen Pham, and T. Nagatsuma, “Visualization of the spatial-temporal evolution of continuous electromagnetic waves in the terahertz range based on photonics technology,” Optica, Vol. 1, pp. 365-371, 2014.

生体へのミリ波・THz 帯電磁波ばく露とばく露評価

鈴木 敬久[†] 多氣 昌生[†] 小島 正美[‡]

[†] 首都大学東京 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

[‡] 金沢医科大学 〒920-0293 石川県河北郡内灘町大学 1-1

E-mail: [†] y_suzuk@tmu.ac.jp

あらまし 近い将来, ミリ波帯電磁波を利用した第5世代無線通信システムやワイヤレスギガビット無線通信規格などの新しい技術が広く普及されると考えられる. このような新しい技術で用いられるミリ波やTHz帯電磁波の安全な利用に関して関心が持たれてる. しかし, ミリ波やTHz帯の電磁波が体表面の眼球組織に障害を与える電力密度の閾値に関しての過去の知見は少ない. このような背景から我々はミリ波/THz帯の電磁波が眼球へばく露される時の障害域値に関しての定量化を実験とシミュレーションで試みている. 比較的強いレベルのミリ波ばく露による生体組織の温度上昇により眼球組織に障害が生じることが知られている. この温度上昇は前眼部の複雑な構造に影響を受けるので, このような構造を考えた上での熱輸送メカニズムについて検討する必要がある. 本研究では実験及びシミュレーションによるばく露評価に基づいてミリ波・THz帯電磁界ばく露による眼部の熱輸送メカニズムについて明らかにすることを目的としている. 本稿では前眼部熱輸送に関して, 入射電磁界の周波数及び電力密度依存性を考察している. また障害域値を推測するための数理モデル構築についても述べる.

キーワード ミリ波, THz, ばく露評価, 感温液晶マイクロカプセル, 電磁界解析, 熱輸送解析

Physics of Biological Exposure to Millimeter-wave / THz Electromagnetic Field and Its Dosimetry

Yukihisa SUZUKI[†] Masao TAKI[†] and Masami KOJIMA[‡]

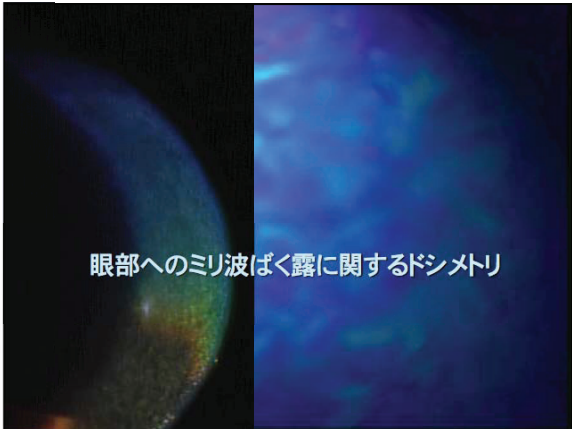
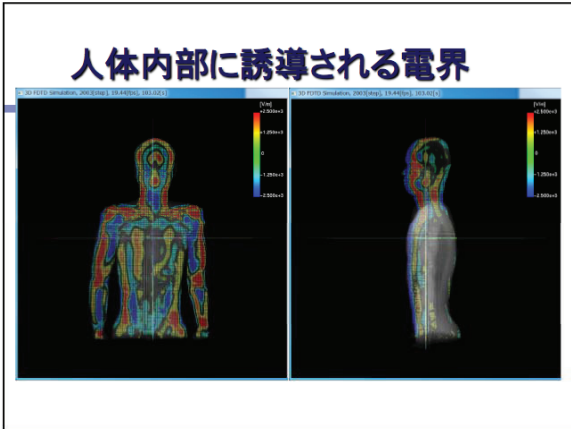
[†] Tokyo Metropolitan University 1-1 Minamiosawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

[‡] Kanazawa Medical University 1-1 Daigaku, Uchinada, Kahoku, Ishikawa 920-0293, Japan

E-mail: [†] y_suzuk@tmu.ac.jp

Abstract It is expected that new millimeter-wave (MMW) technologies, e.g. the 5th generation (5G) wireless systems, the Wireless Gigabit (WiGig) systems and so on, will be in wide spread use in near the future. Therefore, it is becoming public concern to consider the safety of the use of MMW / THz technologies. However, a few studies for corneal damage thresholds by MMW / THz exposure have been performed. Against this background, we conduct the study to estimate the threshold levels of ocular damage, especially within corneal region, under the MMW / THz exposure. The temperature elevation by relatively high power MMW exposure occurs the ocular injures. The characteristics of the temperature elevation may be influenced by the complicated structure in the front region of the ocular tissues. Therefore, it is required to investigate the heat transport mechanism considering the structure of ocular tissues and characteristics of energy absorption by MMW exposure. The purpose of this study is to investigate the temperature transport mechanism caused by the MMW exposure for the eye through the experiment and the computer simulation with the anatomical eye model. We discuss the dependence of heat transport mechanism on the incident MMW frequency and power density by comparing experimental results with the numerical results.

Keyword millimeter-wave, THz, Dosimetry, Micro-Encapsulated Thermo-chromic liquid Crystal, Electromagnetic field analysis, Heat transport analysis



ミリ波ばく露による角膜の障害閾値の探索

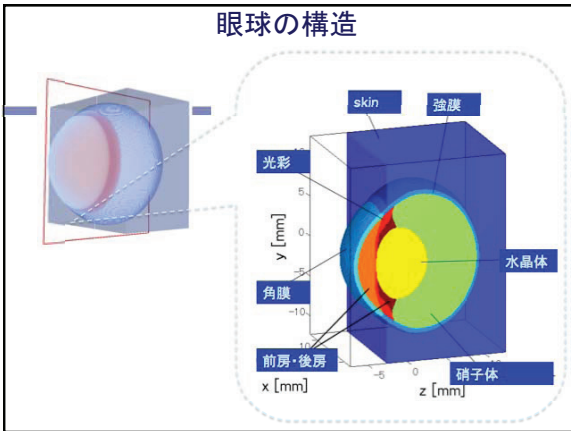
- 眼部は熱影響を受け易い組織であり、特に考慮する必要がある。
 - 動物実験により閾値を検証→ガイドラインへの反映
 - ICNIRP (国際非電離放射線防護委員会ガイドライン)
 - 総務省防護指針

ミリ波帯の防護指針

- 総務省防護指針
 - 補助指針: 不均一または局所的にさらされる場合
 - 一般環境
 - 体表面の入射電力密度: 10mW/cm²以下
 - 眼への入射電力密度: 2mW/cm²以下

30GHz-300GHz (~3THz)の帯域における眼組織への電磁波ばく露のガイドラインに関しては根拠になる研究データが少ないのが現状であり、データの蓄積が望まれている。

注: 本研究で扱っている電力密度は一般環境下のガイドラインの数から数百倍である。



家兎による閾値探索

房水の流れ
ミリ波ばく露

前房水
水晶体

光軸
レンズアンテナ
CCDカメラ

眼球組織へのミリ波曝露 ～複雑な熱輸送～

- ミリ波による曝露→局所的なエネルギー吸収が特徴的

曝露により生じる流れ

角膜
ミドリ波曝露
前房水
水晶体

局所的なエネルギー吸収

- 眼球組織前部は複雑な構造である。
- 入射されたエネルギーのほとんどが角膜で吸収
- 角膜の温度上昇により、前房水が熱対流を起こす場合がある。
- 水晶体、虹彩の温度上昇は対流のパターンに依存？
- 対流による熱輸送現象が眼球における温度上昇の評価を困難にしている。

感温液晶

- コレステリック液晶を温度センサーとして使用

コレステリック液晶の構造[3]

Pitch length $P = \frac{360^\circ}{\text{rotation of director } \theta}$

Incident light, reflected light, p:1-pitch, liquid crystal

入射光はX線のブラッグ反射と同様の原理で散乱される。

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

λ: 散乱光の波長
p: 液晶のピッチ

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

液晶の温度が変化すると、液晶のピッチ p が変化する。

感温液晶マイクロカプセル

20~30μm

入射光 → 感温液晶 → 散乱光

尿素樹脂やゼラチン

散乱光の波長が温度に依存

感温液晶カプセル (日本カプセルプロダクツ製)

- 温度プローブとトレーサー粒子の2つの機能を持つ
- 時間分解能(33μs), 空間分解能(19x19μm²), 温度分解能(0.1°C)
- 尿素樹脂またはゼラチンでカプセル化
- 直径 20~30 μm
- 比重 約1.01g/cm³

家兎眼に対するミリ波曝露実験

Rabbit's eye
Focal length 13cm
CCD camera
Lights
Lens antenna

実験条件

周波数	75.4 GHz
入射電力密度 (空間平均)	50, 100, 150 mW/cm ²
MTLCの分散濃度	約 0.07 %
MTLCの呈色範囲	35 - 45 °C
アンテナの形状	レンズアンテナ

45°C
42.5°C
40°C
37.5°C
35°C

- 実験においてMTLCを前房水中に分散
 - 家兎には麻酔を施している
- 角膜表面にレンズアンテナの焦点がくるようにレンズアンテナと家兎眼の位置を調整
- 温度分布、流速分布はCCDカメラで計測

房水温度の定量化

Time (s)

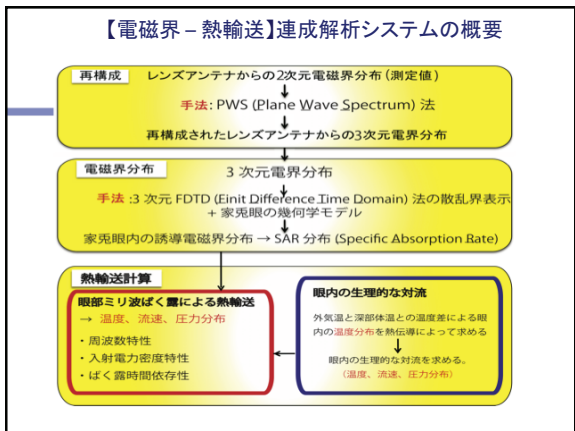
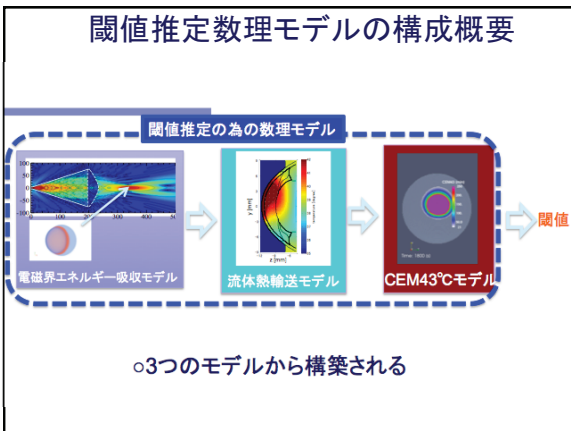
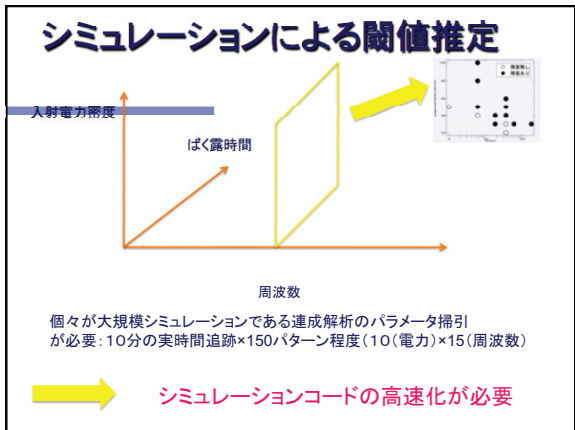
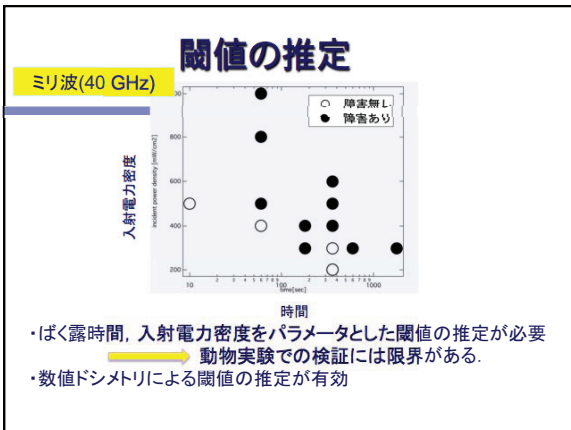
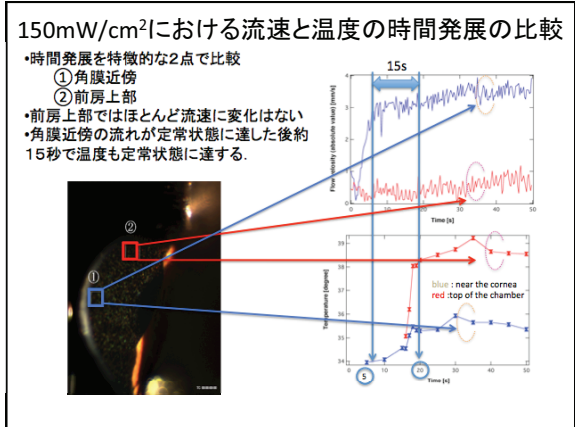
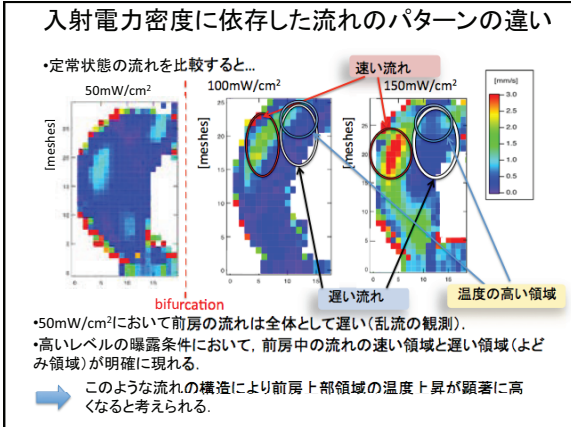
Temperature (°C)

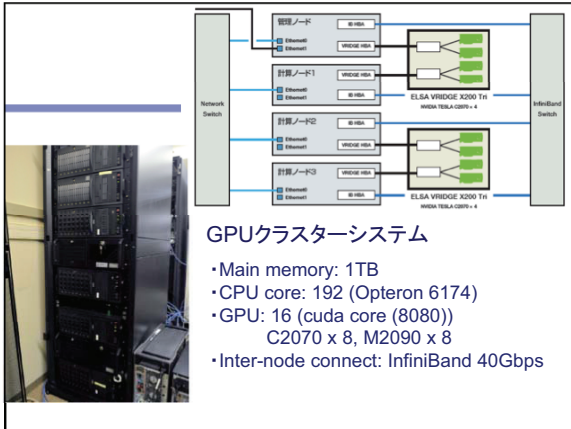
①表面部 ②上部 ③中央部

家兎眼において①表面部②上部③中央部の温度変化グラフ

曝露周波数75.4GHz、入射電力密度150mW/cm²時の温度の定量化

1ピクセル辺り約20μmの高分解能で家兎眼内部の温度分布測定が可能である



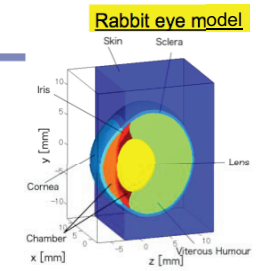


GPUクラスターシステム

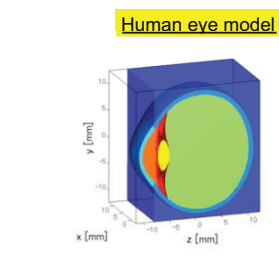
- Main memory: 1TB
- CPU core: 192 (Opteron 6174)
- GPU: 16 (cuda core (8080))
C2070 x 8, M2090 x 8
- Inter-node connect: InfiniBand 40Gbps

Voxel models for rabbit and human

Rabbit eye model



Human eye model



○ Mesh size is 50 μ m (100-200million cell)
○ These models are consists of 7 tissues, cornea, aqueous humor, iris, lens, vitreous humor, sclera, and skin.

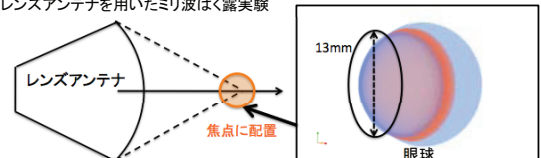
電磁界解析の計算条件

レンズアンテナ 家兎

- レンズアンテナ使用
- 焦点距離は135mm
- 焦点付近に角膜表面中央を配置

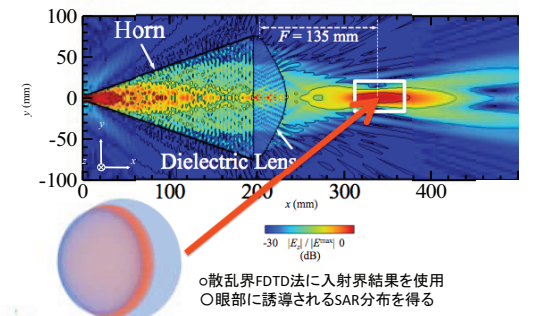
入射電力密度
下図の直径13mmの円の面積上の電力の空間平均

レンズアンテナを用いたミリ波ばく露実験



ミリ波ばく露実験を想定したコンピュータシミュレーションでの概略図

レンズアンテナの放射界と眼部の配置

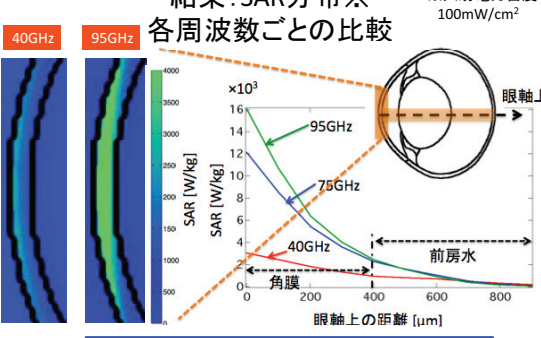


○ 散乱界FDTD法に入射界結果を使用
○ 眼部に誘導されるSAR分布を得る

FDTD : Finite Difference Time Domain method

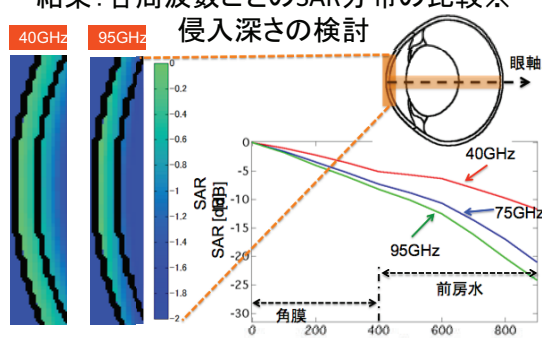
結果: SAR分布※ 各周波数ごとの比較

※ 入射電力密度 100mW/cm²



○ 周波数: 40GHz → 反射: 大、周波数: 95GHz → 反射: 小
○ 周波数が高くなるにつれて、SAR値はおおきくなる

結果: 各周波数ごとのSAR分布の比較※ 侵入深さの検討



※ 最大値で規格化した

○ 40GHzの方が95GHzより角膜と前房水内での侵入深さが長い

熱輸送シミュレーションの支配方程式

•非圧縮性の流れ: 多くの流れのように流体が縮まない場合を想定
 •流体計算にはSMAC (Simplified marker and cell) 法^[7]を用いた。

物理定数

- 密度: ρ [kg/m³]
- 動粘性係数: ν
- 比熱: C_p [J/kg·K]
- 熱伝導率: K [W/m·K]
- 代謝による産熱: A_0 [W/m³]
- 血流定数: B [W/m³·K]
- 熱源: Q [W/m³]
- 重力: g [m/s²]

連続の式
 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$

Navier-stokes方程式
 $\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{V} + \vec{g}$

生体熱輸送方程式
 $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (K \nabla T) + A_0 - B(T - T_{blood}) + Q$

圧力計算
 $Q = \rho SAR$

変数
 •速度ベクトル: V [m/s]
 •温度: T [°C]
 •圧力: p [kg/m²]

Navier-stokes方程式から求めた仮速度
 $\Delta p' = \frac{\rho}{dt} \nabla \vec{V}'$

[7] A. A. Amsden and F. H. Harlow, Journal of Computational Physics, vol. 6, no. 2, pp. 322-325, 1970

Comparison of heat transport mechanism

75GHz 150mW/cm²

Heat Conduction only

Considering Heat Convection

■ Temperature distribution is highly influenced by aqueous humor flow.

計算結果: 眼内の温度分布と前房水の流れ

周波数95GHz 入射電力密度50、200mW/cm²

入射電力密度50mW/cm²

入射電力密度200mW/cm²

※時間 t = 360s [mm]

40GHz 200mW/cm²

t=0s

95GHz 200mW/cm²

t=0s

CEM43°C指標^[8-10]の導入

※CEM43°C: The cumulative equivalent minutes at 43°C

- 等価的な熱ドーズの指標として導入
 - 組織が43度の温度に何分間ばく露されたかに等価変換

$$CEM43^\circ C = tR^{(43-T)}$$

- CEM 43°C: 等価的に43°Cに曝された時間
- t: ばく露時間 [min]
- T: t分間の平均温度 [°C]
- R: 等価な時間への変換係数 (T<43°CでR=0.25、T>43°CでR=0.5)

- 角膜組織において
 - 21 < CEM43°C < 40 min: 軽度障害
 - 41 < CEM43°C < 22000 min: 中程度の障害
 - 22000 < CEM43°C: 重度障害

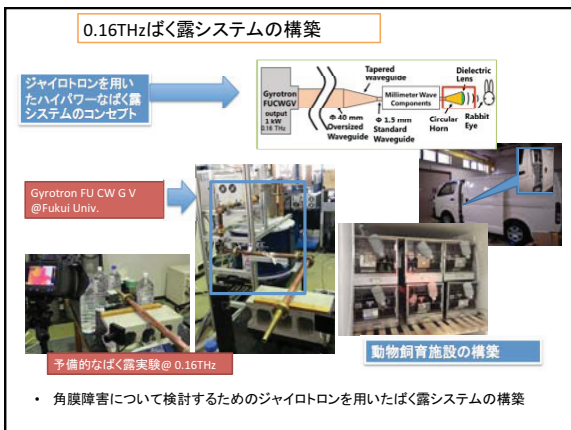
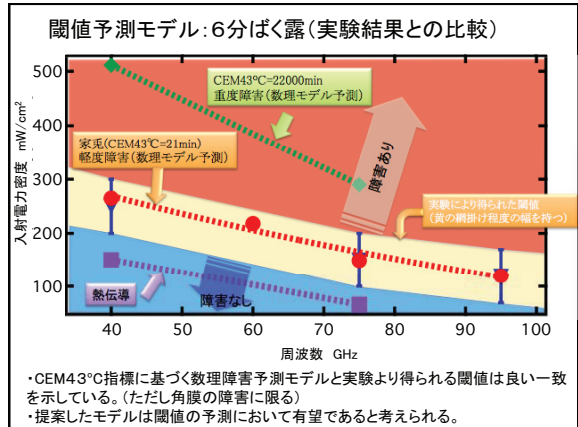
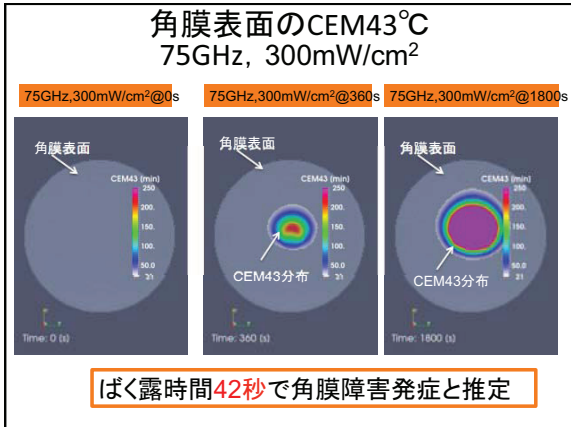
[8] Sapareto SA, Dewey WC, Int J Radiat Oncol Biol Phys 1984; 10: 787-800.
 [9] Dewhirst MW et al, Int J Hyperthermia. 2003; 19:267-294.
 [10] Yarmolenko PS et al, Int J Hyperthermia. 2011;27(4):320-43.

CEM43°Cによる閾値の推定

Thermal doseの計算

$$CEM43^\circ C(\vec{r}, t) = \int_0^t R^{(43-T(\vec{r}, t'))} dt' \text{ [min]}$$

- 熱輸送のシミュレーション結果を利用し上式よりCEM43°Cの時空間分布を算出
- 軽度障害となる熱ドーズ(21 min)を基準にして6分間ばく露時の閾値を推定



まとめ

- 眼部へのミリ波ばく露に関わるばく露評価(ドシメトリ)について実験による評価,数値シミュレーションによる評価を紹介した。
- 眼部での熱輸送は前房における房水による対流を考慮する必要がある。
- 実験とシミュレーションの両方から構築されたモデルにより30GHz-100GHzまでの閾値の推定が行えた。
 - 実験による閾値の検索と概ね一致
- 今後100GHz超(～THz帯)の実験が閾値推定モデルの作成に必要である。

THz 帯における高精度な複素誘電率測定のための分光システム評価

水野 麻弥[†] 飯田 仁志^{††} 木下 基^{††}
福永 香[†] 島田 洋蔵^{††} 大谷 知行^{†††}

[†]国立研究開発法人情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

^{††}国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央 3

^{†††}国立研究開発法人理化学研究所 〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 519-1399

E-mail: [†] mmizuno@nict.go.jp

あらまし テラヘルツ時間領域分光測定法の標準化に向けた取り組みの一環として、各機関が所有する透過型テラヘルツ時間領域分光システムの比較試験を実施した。試料として薄膜減衰器および藍銅鉱/ポリエチレン混合ペレット、高抵抗シリコン板を準備し、同一試料を各機関に巡回させて測るラウンドロビン方式により得られたデータを比較した。本発表では、振幅データに着目し、各種システムの光学系が測定精度に影響を及ぼす要因を考察した結果と、システムの分類について述べる。

キーワード テラヘルツ時間領域分光法, システム評価, 光伝導アンテナ

Evaluation of Spectrometers for the Precise Measurements of Dielectric Constants in Terahertz Band

Maya Mizuno[†] Hitoshi Iida^{††} and Moto Kinoshita^{††}
Kaori Fukunaga[†] Yoza Shimada^{††} and Chiko Otani^{†††}

[†] National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

^{††}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8560

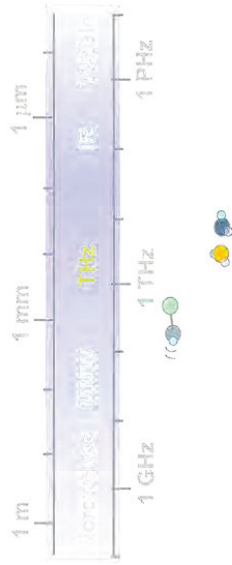
^{†††}RIKEN 519-1399 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0845

E-mail: [†] mmizuno@nict.go.jp

Abstract We carried out internal comparison of spectral data measured using transmission-type terahertz time-domain spectrometer. The comparison were performed among three institutes to verify the effects of the specifications of each system on the transmittance measurement uncertainty, which affects the calculation of the relative complex permittivity. As samples, we prepared thin-film attenuators, polyethylen pellets with and without azurite powder, and high-resistivity silicon plate. These samples were circulated around the the participating institutions. On the basis of the components of variations in the study data, we examined whether optical conditions can be classified.

Keyword Terahertz time-domain spectroscopy, System evaluation, Photoconductive antenna

THz帯における高精度な複素誘電率測定のための分光システム評価



水野麻弥 (NICT), 飯田仁志 (産総研), 木下基 (産総研)
 福永香 (NICT), 島田洋蔵 (産総研), 大谷知行 (RIKEN)

THz帯の計測システムの進歩

電力

量子カスケードレーザー
 後進波管
 差周波発生
 共鳴トンネルダイオード

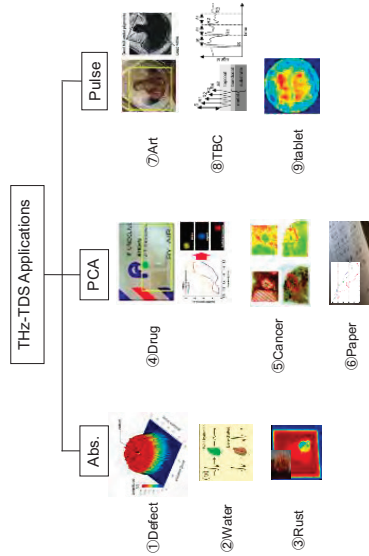
光伝導アンテナ
 高圧水銀灯

分光・イメージングシステム

安定した光源が開発され
 テラヘルツ帯の計測技術が進歩
 ⇒小型化, 高速化

2

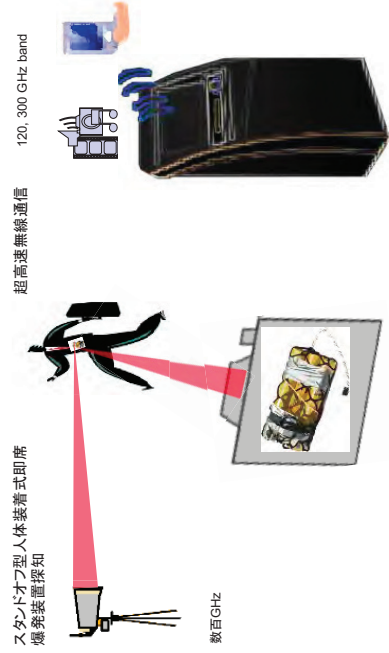
テラヘルツ時間領域分光装置 (THz-TDS) の非破壊検査への応用



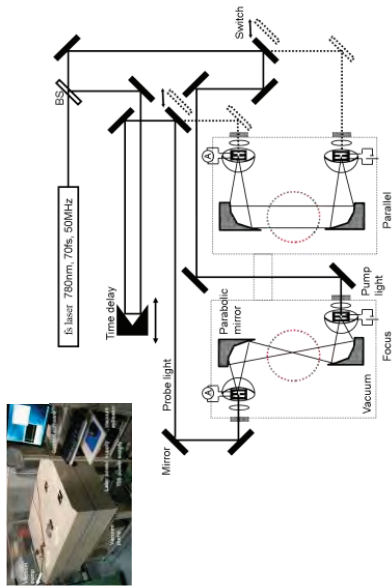
① IEEE Trans. IM, 132, p. 864 (2012)
 ② Scientific Reports, 3, 2910 (2013)
 ③ IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 2, p. 242 (2012)
 ④ Optics and Photonics News, 15, p.34 (2004)
 ⑤ Appl. Phys. Lett., 90, 041102 (2007)
 ⑥ Appl. Phys. A, 111, p.83 (2013)
 ⑦ Appl. Phys. A, 100, p. 591 (2010)
 ⑧ J. Pharm. Innov. 7, p. 87 (2012)
 ⑨ Electrical Engineering in Japan, 183, No. 4, p.1 (2013)
 参照

THz帯における複素誘電率測定法の評価の必要性

電波の安全性調査スタート⇒ばく露評価, 電波伝搬シミュレーションの実施
 ⇒正確な複素誘電率測定が必要⇒測定法の評価



透過型TDS装置(光学系の例)

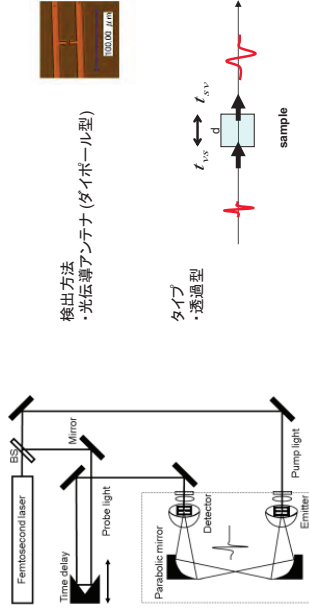


集光光学系・平行光学系が存在する

9

国内比較試験における主な対象装置

テラヘルツ時間領域分光装置 (THz-TDS)



検出方法
・光伝導アンテナ (ダイポール型)

タイプ
・透過型

10

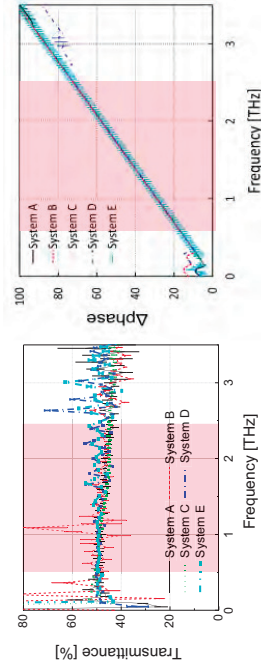
国内比較試験で使用したTDS装置と試料

TDS system	Generation device	Detection device	Optical system	Sample chamber (or experimental room)		
				Purging	Humidity	Temperature
A	PCA	PCA	Focusing	Dry air	< 2%	24.8~26.7°C
B	DAST	PCA	Focusing	Dry air	< 2%	24.9~27.0°C
C	PCA	PCA	Focusing	Vacuum	-	25.2~26.6°C
D	PCA	PCA	Parallel	-	28~38%	25.2~26.6°C
E	PCA	PCA	Focusing	-	23~32%	24.8~25.9°C

- サンプル1 薄膜減衰器
- サンプル2 ポリエチレンベレット
- サンプル3 シリコン板

11

位相・振幅データ例 (0.5mm厚シリコン板)



S/N比が十分な周波数範囲において、振幅については偏差が生じる
⇒振幅について議論

12

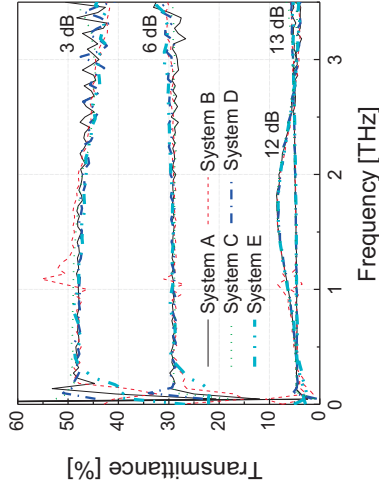
サンプル1 ー減衰器ー



薄膜減衰器・・・4個
 サイズ(試料ホルダ): φ25 mm, t=5 mm
 試料厚, 減衰量: 25 μm, 3 dBと12 dB
 6 μm, 6 dBと13 dB
 PETフィルムに金属膜(インコネル)を蒸着して透過率を制御した2層薄膜を
 金属製のホルダで固定した試料
 作製機関: 産業技術総合研究所
 比較パラメータ: 透過率

13

減衰器の測定 ー透過率ー



5回測定を行った場合の標準偏差は±2%以内 (f=2 THz)

14

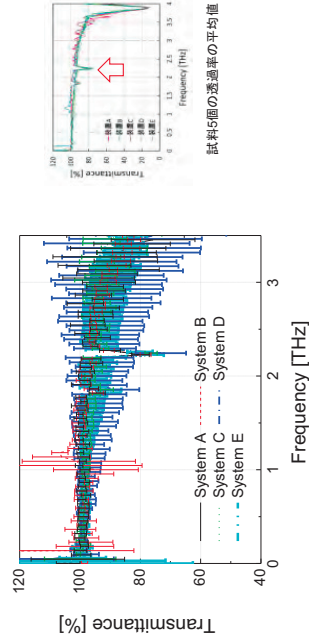
サンプル2 ーポリエチレンペレットー



Azuriteペレット・・・リファレンスペレット 1個, 試料5個
 サイズ: φ 13 mm, t ~1.6 mm
 混合比(重量比): Azurite/PE=0.02
 粒径: <20 μm
 加圧: 15 kN, 10 min
 (C₂H₄(CO₂)(OH))結晶の粉末を
 高密度ポリエチレン(HDPE)粉末で希釈し
 ペレット状に成型した試料
 作製機関: NIOT
 比較パラメータ: 透過率, 吸収ピーク周波数

15

アズライトペレットの測定 ー透過率ー



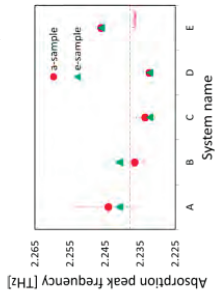
標準偏差の大きさが異なる

16

アズライトペレットの測定 ー吸収ピーク周波数ー

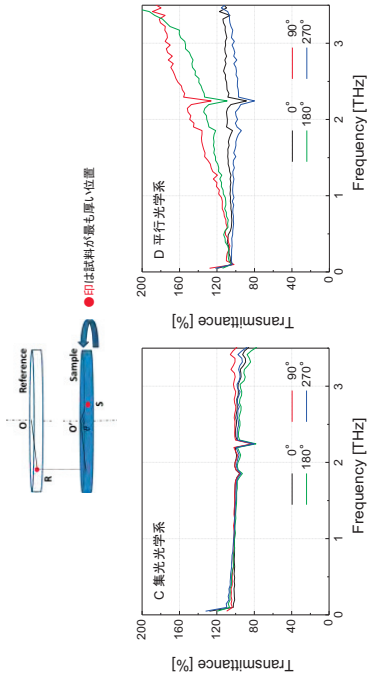
System	resolution [THz]	Absorption peak frequency [THz]					Mean value [THz]	1σ [THz]
		1	2	3	4	5		
A	0.0075	2.2350	2.2350	2.2425	2.2500	2.2375	2.2440	0.0036
B	0.0075	2.2350	2.2350	2.2425	2.2500	2.2425	2.2395	0.0036
C	0.0061	2.2320	2.2320	2.2320	2.2384	2.2320	2.2395	0.0027
D	0.0061	2.2320	2.2320	2.2320	2.2320	2.2320	2.2320	0.0000
E	0.0044	2.2461	2.2461	2.2461	2.2461	2.2461	2.2461	0.0000

5個の装置で測定した透過率の平均値



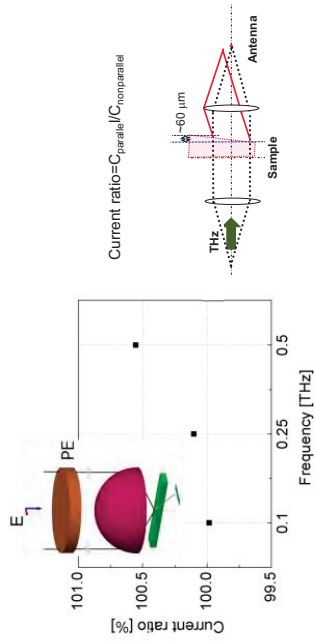
ピーク周波数については
小数点以下第1位まで一致

アズライトペレットの測定結果 ー光学系別ー



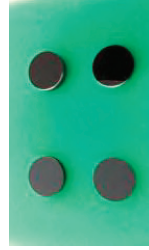
平行光学系では測定結果のばらつきが大きい

ポリエチレンペレットの計算結果 ー形状の影響ー



微小ダイポールアンテナに流れる電流の大きさがポリエチレンペレットの形状に依存
⇒平行度の低い試料を設置する際は検出電力の変化に注意が必要

サンプル3 ーシリコン板ー

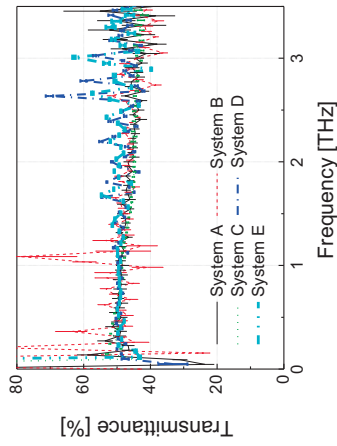


高抵抗シリコン板・・・4個
サイズ:φ 15 mm, t=0.5, 1.0, 2.0, 3.0 mm±0.1 mm
抵抗率: >10kΩ・cm
単結晶成長法:フローティングゾーン (FZ) 法

高誘電率・低損失であり、各試料内の厚さが均一な工業製品で
環境による物理定数の変化が少ない

比較ハラメータ:透過率

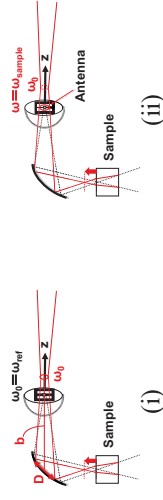
シリコン板の測定 一透過率一



1 THz以上において偏差が大きくなる

測定値が異なる要因

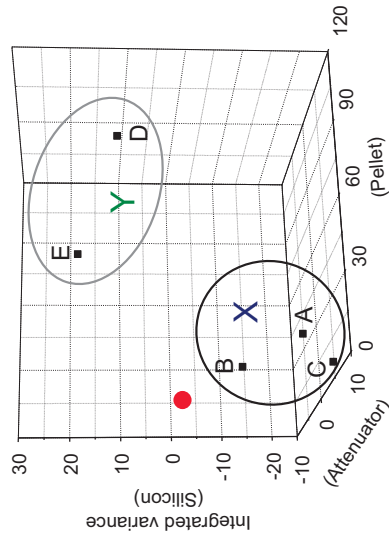
受信電力: $P = AW = \frac{AI}{\pi\omega^2}$
 A: アンテナ実行面積(一定), W: 電力密度, I: テラヘルツ強度(一定)



(i) $\omega_0 \sim \frac{2\lambda b}{\pi D}$
 (ii) $\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{2z}{\pi\omega_0 f} \right)^2 \right]$

屈折率が深く、厚い試料を設置したときの焦点位置のずれにより、受信アンテナに照射されるテラヘルツ波のビーム径が大きくなり、受信電力が小さくなる
 → 見かけ上吸収が大きくなる

TDS装置の分類結果



偏差の大きからシステムを分類可能
 ⇒ 標準試料があれば、所有するシステムの特性をユーザーが把握できる

まとめと今後の課題

- <まとめ>
 ・真光と平行光学系では、試料の形状により得られるデータが異なる場合がある
 ・標準試料を用いることで、ユーザーが所有のTDS装置の特性を区別することが可能である
 <今後の課題>
 ・検出器が異なるシステム間の比較

<参考文献>
 Maya Mizuno, Hitoshi Iida, Moto Kinoshita, Kaori Fukunaga, Yoza Shimada, Chiko Otani,
 "Classification of terahertz spectrometer for transmittance measurements of refractive materials,"
 IEICE Electronics Express, 20160532.

ボディスキヤナの最新技術動向

— ボディスキヤナの技術情報から、具体的な運用事例まで —

関野 敏正[†]

† ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1 住友不動産西新宿ビル 27 階

E-mail: † Toshimasa.Sekino@rohde-schwarz.com

あらまし テロの脅威に備えて国土交通省を中心に普及が進むボディスキヤナ。ボディスキヤナとは空港や、原子力発電所等の入出ゲートで、全身をスキャンできる検査機器である。このセッションでは、ミリ波を使用した最新のボディスキヤナについて、技術的内容と合わせて具体的な実用化に向けた取り組みについてご紹介する。

キーワード ボディスキヤナ, ミリ波, イメージング技術

The latest technology trend of body scanner

— From technical information of body scanner to concrete operation examples —

Toshimasa SEKINO[†]

† Rohde & Schwarz Japan Sumitomo Fudosan Nishi-Shinjuku Bldg., 27F, 7-20-1,

Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 160-0023 Japan

E-mail: † Toshimasa.Sekino@rohde-schwarz.com

Abstract A body scanner introduction has been started by the ministry of Land, Infrastructure and Transport in preparation for taking measures against the threat of terrorism. The body scanner is an inspection device that can scan the whole body at airport, nuclear power plant gate and so on. In this session, we will introduce about the latest body scanner using millimeter waves, together with technical contents, specific efforts toward practical application.

Keyword Body scanner, mm-wave, imaging technology

ボディスキャナの最新技術動向

- ボディスキャナの技術情報から、具体的な運用事例まで -

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社
マーケティング部 統括部長
関野 敏正
Toshimasa.Sekino@rohde-Schwarz.com



 ROHDE & SCHWARZ



ボディスキャナ需要の高まり

■ 従来の金属探知器では検出不能な危険物によるテロへの対策が不可欠

- ・ プラスチック
- ・ セラミック
- ・ 爆発物
- ・ 液体・ ジェル
- ・ 粉類
- ・ 紙幣
- ・ その他

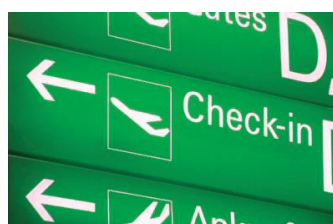
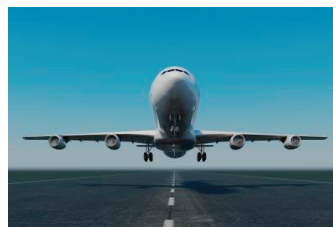


 ROHDE & SCHWARZ

2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキャナの最新技術動向

ボディスキヤナに求められる技術

- 空港をはじめとする、重要な施設において、迅速なセキュリティ検査が可能なこと
- 健康への影響がないこと
- 危険物を検出する能力に優れること



2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキヤナの最新技術動向



R&S QPS200 ボディスキヤナ

- データ取得時間
 - QPS100 : < 16 ms x 2
 - QPS200 : < 32 ms x 2
- 周波数 70 GHz ~ 80 GHz
- 高分解能 < 2 mm
- 演算時間
 - QPS100: 10 秒
 - QPS200: 7 秒
- 定格電流:
 - QPS100: 16A
 - QPS200: 32A



2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキヤナの最新技術動向



ボディスキャナに求められる技術

■ 空港をはじめとする、重要な施設において、迅速なセキュリティ検査が可能なこと

- スキャン速度：
 - R&S QPS200 (< 32 ms x 2) / QPS100 (< 16 ms x 2)
- 演算速度：約7秒 / 約10秒

高速なスキャン速度 & 演算速度により、迅速なセキュリティ検査を実現しています！

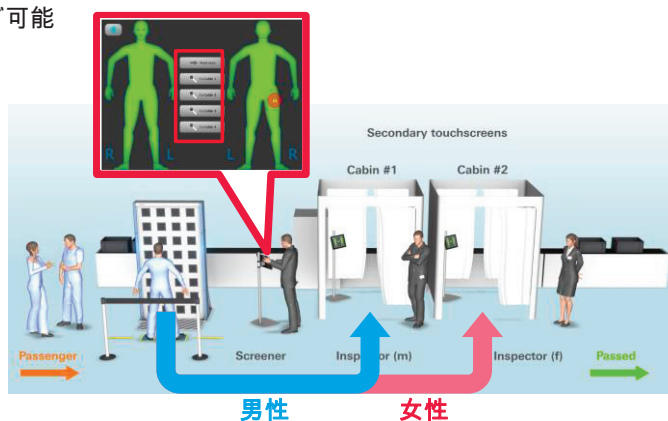


ボディスキャナに求められる技術

■ 空港をはじめとする、重要な施設において、迅速なセキュリティ検査が可能なこと

- キャビンの数を最大4台まで増設が可能

キャビン増設による検査対象者(男女など)の効率的な振り分けが可能となり、スループットが飛躍的に向上！



ボディスキャナに求められる技術

健康への影響がないこと

- 両手を挙げた姿勢は不要なため、検査を受ける方への負担を最小限に抑えられます

身体障害者の方や、お年寄り、
お子様、夏場の薄着女性、そ
して宗教上の理由で両手を上
げられない場合にも実施可能



 **ROHDE & SCHWARZ**

2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキャナの最新技術動向

ボディスキャナに求められる技術

健康への影響がないこと

- QPSの平均電力密度はICNIRP (ICNIRP = International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) で規定されているガイドラインの**1/40,000**程度
- QPSの送信パワーは、携帯電話の**1/300 - 1/1000**程度

国内では微弱無線
局として証明書を
取得済みです



 **ROHDE & SCHWARZ**

2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキャナの最新技術動向

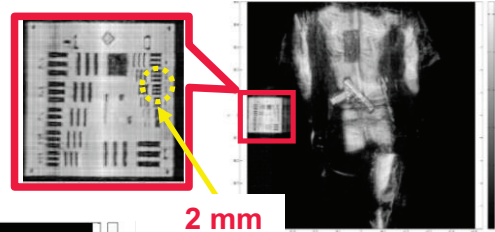
ボデイスキャナに求められる技術

危険物を検出する能力に優れること

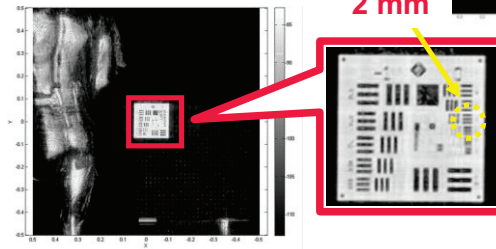
- 70 GHz ~ 80 GHz のミリ波を使用



サイズの異なる線が描かれた基準パネルを R&S QPS の中心付近および遠方に設置し、それぞれの分解能力を確認しました。この評価では**最高分解能として 2 mm が得られています。**

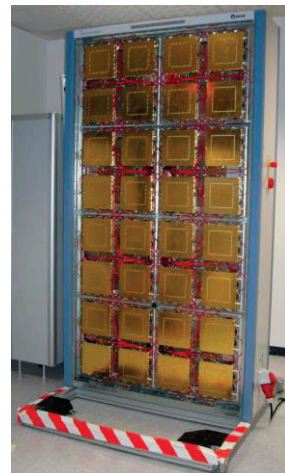
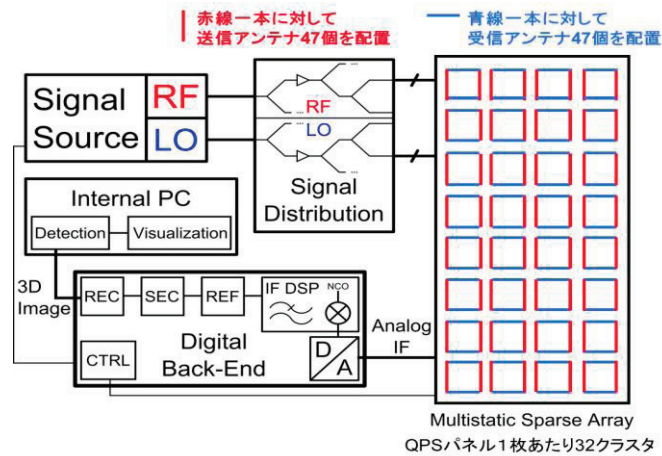


ミリ波の使用により距離分解能 2 mm を実現し、危険物の検出能力に優れています！



2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボデイスキャナの最新技術動向

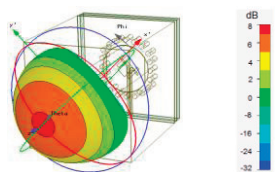
ボデイスキャナの最新技術



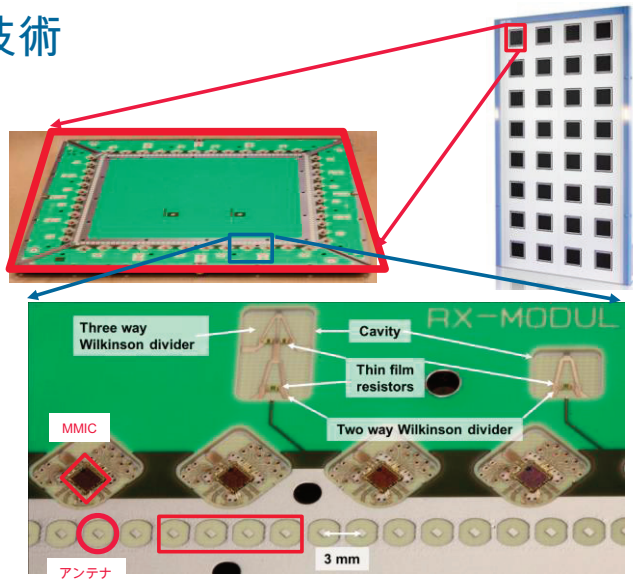
2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボデイスキャナの最新技術動向

ボデイスキャナの最新技術

- 1枚のクラスタにTx/Rxそれぞれ94個のアンテナ (各合計3008個)でスキャンを行っています。
- 各クラスタには安定した位相情報を取り出すためのリファレンス・チャンネル (2個/クラスタ)が設けられています。
- 自動車に搭載されている衝突回避レーダ用デバイスを使用しているので高品質かつ高い堅牢性を誇ります

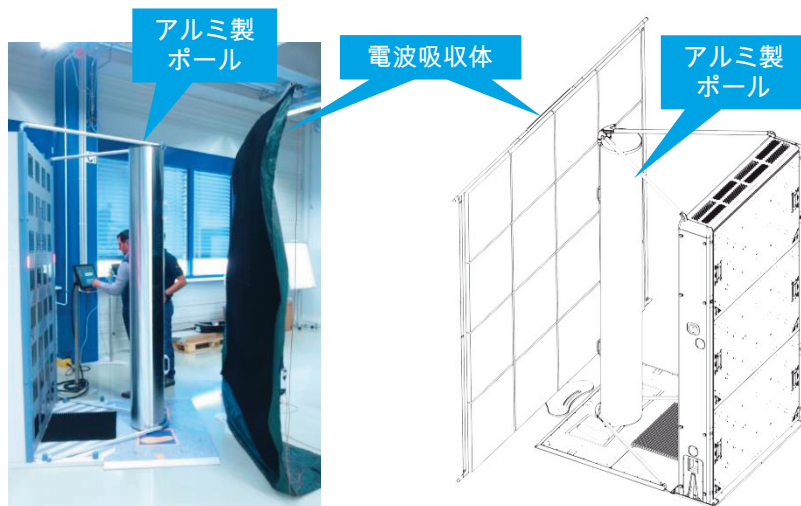


アンテナの放射パターン



ボデイスキャナの最新技術

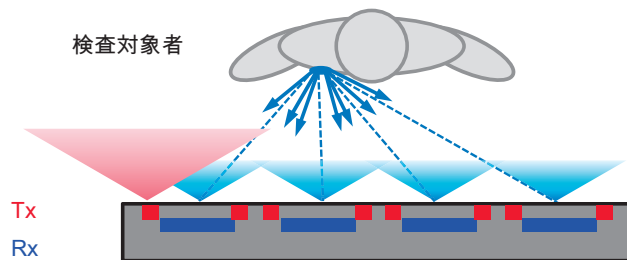
- R&S QPSの校正例



ボディスキヤナの最新技術

1台の送信アンテナからミリ波
(70 GHz ~ 80 GHz : 128 周波数)
が順次照射されます

3008個の受信アンテナで
全ての反射信号を受信します



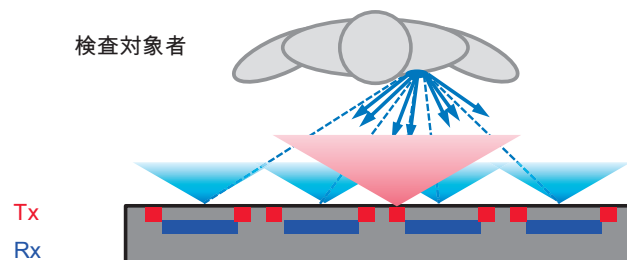
 **ROHDE & SCHWARZ**

2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキヤナの最新技術動向



ボディスキヤナの最新技術

その後、3008個の送信アンテナ
から連続してミリ波が順次照射されます

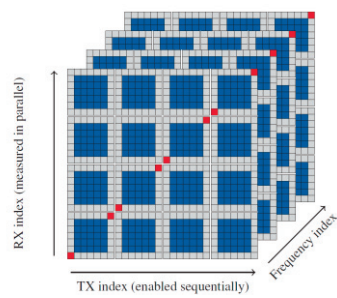
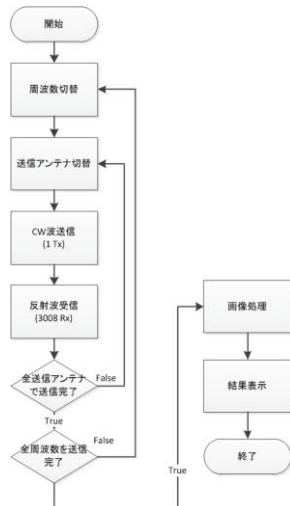


 **ROHDE & SCHWARZ**

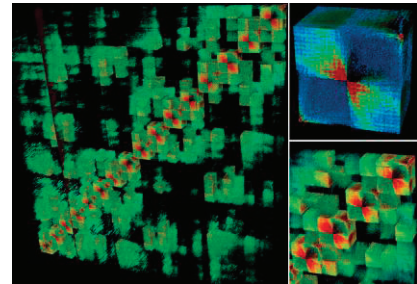
2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキヤナの最新技術動向



ボディスキャナの最新技術



■ : 測定データ
 ■ : リファレンスデータ
 ■ : Invalidデータ



測定データの3D化

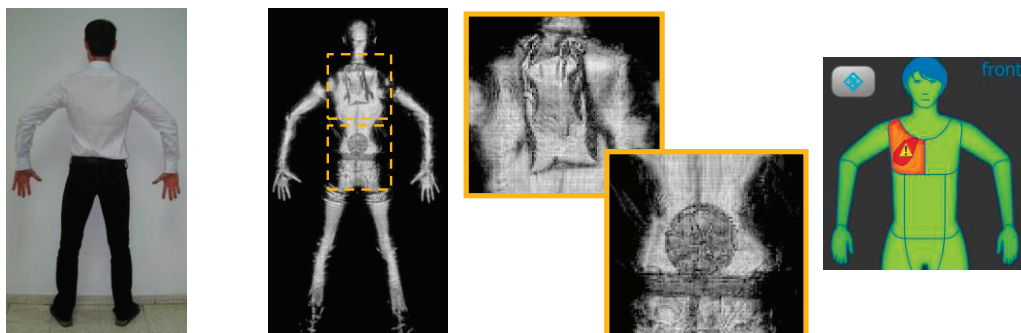


2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキャナの最新技術動向

ボディスキャナの最新技術

- 検査対象者からの反射信号をデジタル処理して3Dのイメージ画像を形成し、危険物の有無を判断します

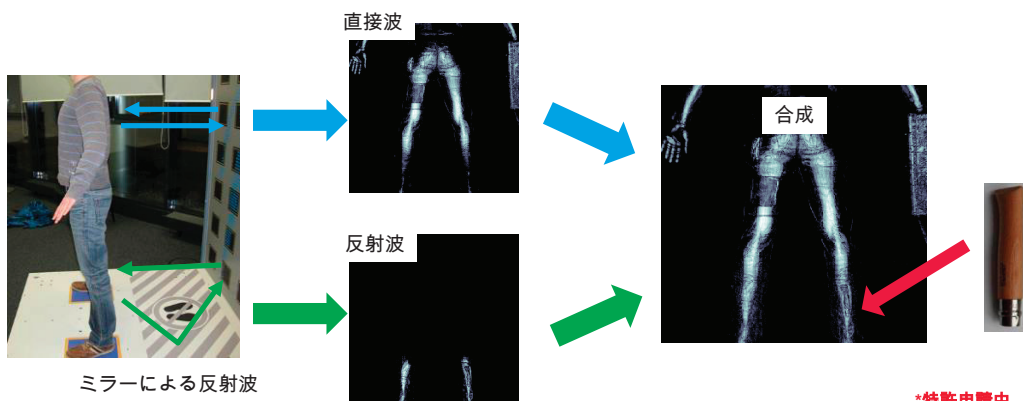
*スライドではスケルトン表示をしていますが、実際はアバターを使用するため、こうした透けるような画像にはなりません



2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキャナの最新技術動向

ボデイスキャナの最新技術

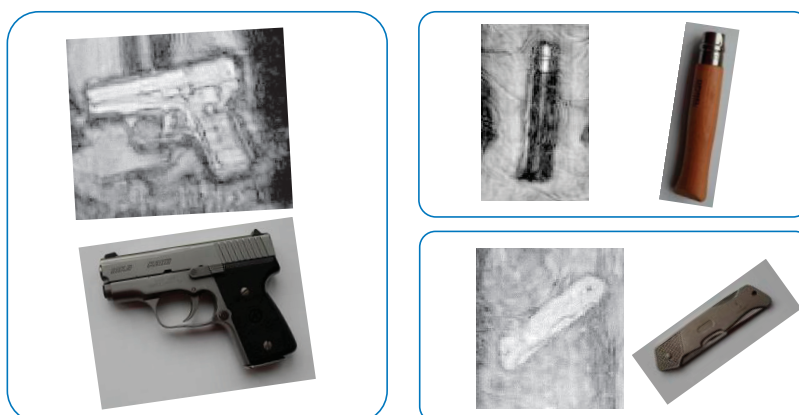
- 足元の分解能を向上させるために反射波を利用しています*



2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボデイスキャナの最新技術動向

ボデイスキャナの最新技術

- 3Dイメージの品質



2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボデイスキャナの最新技術動向

ボディスキヤナの運用事例

- ドイツ Hannover 空港
 - ・ ドイツ連邦警察による導入例

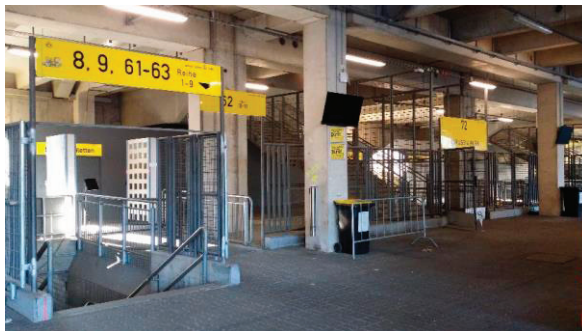


 **ROHDE & SCHWARZ**

2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキヤナの最新技術動向

ボディスキヤナの運用事例

- 海外空港以外
 - ・ ドイツのドルトムント・スタジアムでの運用評価実績



 **ROHDE & SCHWARZ**

2017/02/17 光応用電磁界計測研究会 ボディスキヤナの最新技術動向

生体イメージングに向けた埋植型高実効 SNR イメージセンサ

笹川 清隆[†] 山口 貴大[†] 春田 牧人[†] 太田 安美[†]
野田 俊彦[†] 徳田 崇[†] 太田 淳[†]

[†]奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科
〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5
E-mail: [†] sasagawa@ms.naist.jp

あらまし 生体の機能解明をする上で光学イメージングは重要な手法である。広く用いられている光学顕微鏡の代わりに埋植可能な超小型イメージセンサは、従来では観察が困難な行動に伴う神経活動や病態の進行、回復などに適用することにより新たな手法として有用になるものと考えられる。本研究では、特に生体内の血流変化に伴う透過光の輝度変化など、オフセットが大きく、微弱信号の計測が可能な高い実効 SNR を持つ埋植型イメージングデバイスの開発を行った。画素には、飽和を避けるための自己リセット回路を搭載し、通常画素の光フォトンショットノイズ限界を超える実効 SNR を実現した。また、試作デバイスを用いて血流観察実験を行い、血流が明確に観察できることを確認した。

キーワード CMOS イメージセンサ, 自己リセット画素, 生体イメージング, 生体埋植デバイス, 高実効 SNR

An Implantable High Effective SNR Image Sensor for Bio-Imaging

Kiyotaka SASAGAWA[†] Takahiro YAMAGUCHI[†] Makito HARUTA[†] Yasumi OHTA[†]
Toshihiko NODA[†] Takashi TOKUDA[†] and Jun OHTA[†]

[†] Graduate School of Materials Science, Nara Institute of Science and Technology
8916-5 Takayama, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan
E-mail: [†] sasagawa@ms.naist.jp

Abstract Optical imaging is one of the important methods for elucidating functions of a living body. Implantable ultra-small image sensors are useful as a new tool for observations of neural activities under freely moving conditions, progresses of disease or recovery, where it is difficult to use a conventional optical microscope. In this study, we developed an implantable imaging device with high effective SNR, which can measure a weak signal with a relatively high offset such as the intensity signal of transmitted light as a result of blood flow change. In the image sensor pixel, a self-reset circuit is implemented in order to avoid pixel saturation. The effective SNR is higher than photon shot noise limit of a normal image sensor pixel architecture. We performed a blood flow imaging experiment by using the fabricated device and demonstrated a function of clear blood flow imaging.

Keywords CMOS image sensor, self-reset pixel, living body imaging, Implantable device, High effective SNR

1. はじめに

光学的なイメージング技術は、その時間的および空間的な分解能の高さ、および、特定の組織における染色や蛍光タンパク質等の発現が可能であることからバイオメディカル分野において非常に重要なツールとなっている。[1]. 蛍光を用いたイメージングでは多くの場合、使用するイメージセンサには高い感度が求められる。しかし、例えば、血流計測や電位感受性色素(Voltage sensitive dye; VSD)を用いた神経活動のイメージングにおいては、光信号のオフセットよりも変化量がかなり小さい計測を行う必要がある[2, 3]。このような場合は、高い信号雑音比 (signal-to-noise ratio ; SNR) が求められる。

また、生体機能観察においては、生体の行動に伴う観察や疾患の進行、損傷の治癒や学習等による変化の観察のため、埋植可能なデバイスの実現が重要な過大の一つとなる。我々は、この課題に対して微小な CMOS イメージセンサを専用設計することで解決を図っている。センサ微小化によって、観察対象付近に直接埋植が可能となり、生体に対する侵襲性を低減できる。この際、レンズは光学系を大型化してしまうためレンズレス構成を取る。そのため、空間分解能は画素寸法と観察対象領域の距離によって決定される。

生体埋植イメージセンサにおいて、高い SNR と高空間分解能を両立する手法として、我々は自己リセット画素を搭載する手法を提案している [4]。自己リセット画素については、従来から報告例があったが、それらはダイナミックレンジの拡張を主眼としていた。そのため、画素内に自己リセット回数を計数する回路が搭載されており、結果として画素寸法が非常に大きかった。これに対し、我々は、血流変化や電位感受性色素計測といった生体内での微弱な輝度変化を観察することに特化し、計数回路等を排除することで高空間分解能 (画素寸法 15 μm) と高い実効 SNR を同時に達成することに成功した[5,6]。このセンサは、我々がこれまでに開発してきた生体埋植用イメージセンサとほぼ同じ寸法であり、同様の手法で生体に埋植し、イメージングを行うことができる [7-9]。我々の最初の試作センサでは、実効 SNR 約 59 dB を達成した。しかし、自己リセットによってノイズレベルが 8 dB 増大し、SNR の改善効率が低いという課題があった。また、リセット判定を行うための比較器の消費電力が高いため、チップが高熱を発生し、動作が不安定化するとともに生体に熱的な影響を与えてしまうという問題もあった。

これらの課題を改善するため、我々は、低電圧駆動のシュミットトリガインバータを自己リセット判定回路に用いることを提案した [10]。これにより、実効

SNR は約 64 dB にまで改善された。本稿では、改善結果について詳述するとともに、これを用いた血流イメージング結果を示す。

2. 自己リセット方式による高実効 SNR イメージセンサ

2.1. 自己リセット判定回路

提案する自己リセット画素回路では、画素飽和の判定回路として低電圧駆動のシュミットトリガインバータを用いる。この回路は 4 つのトランジスタのみで構成されており、差動増幅器を用いた判定回路と比較すると、非常に少ない面積で実装することができる。

Active Pixel Sensor と呼ばれる CMOS イメージセンサでは一般的な画素回路において、画素に光が照射されると受光素子である画素内のフォトダイオードに電流が流れ、容量に電荷が蓄積されることで電位が低下して行く。提案が軸は、この電位が自己リセット判定回路であるシュミットトリガインバータの反転閾値に到達すると自己リセットがかかる。通常のインバータ回路ではなく、シュミットトリガインバータを用いることで、意図しない中間点で収束して動作が止まることを防ぎ、安定的な自己リセット動作を実現している。この画素回路の基本構成は以前の試作センサと同じものであり [4]、出力波形もほぼ同等である。しかし、以前の回路では、画素容量の電位が低下するとともに電流量が増大しており、これにより、画素が過熱しノイズレベルの増大や生体への熱による影響と言った問題が発生していた。しかし、生体埋植用イメージセンサでは画素寸法を小さくし、空間分解能を高くすることが求められるため、電流制御用のトランジスタ等の追加をせずに対策をすることが必要であった。

そのため、改善版のセンサではシュミットトリガインバータのみを低電圧化することにより、電力消費を低減した。電源ラインは、画素内の他の回路とは別に配線し、独立して電圧を与えることができる。

2.2. 画素回路

図 1 は、画素全体の回路図である。画素は、一般的な 3-Tr Active Pixel Sensor に自己リセット判定回路を組み合わせた構成となっており、画素内のトランジスタ数は 11 となっている。ただし、通常の画素は n 型のトランジスタのみで構成されるが、このセンサ画素は、低電圧駆動シュミットトリガインバータの動作電圧範

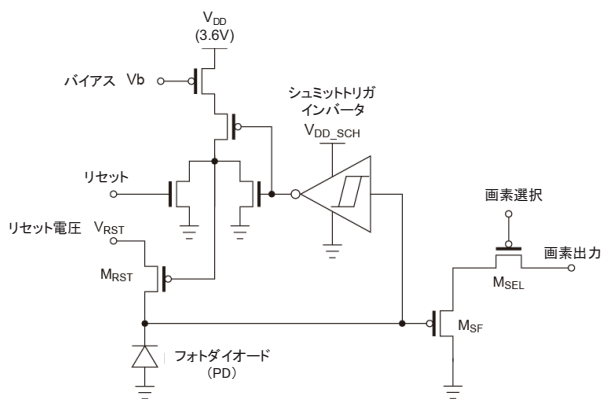


図1 自己リセット画素回路。自己リセットの判定にはシュミットトリガインバータを用いている。

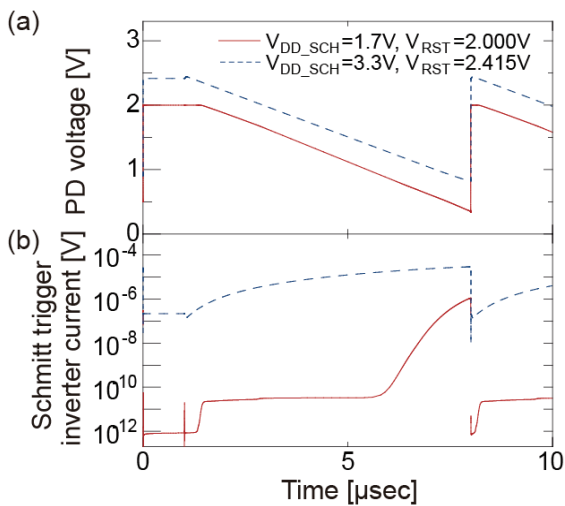


図2 自己リセット画素シミュレーション結果。(a) 画素容量 (PD 容量) 電圧。(b)シュミットトリガインバータ電流。

図が低いことに合わせ、画素容量の電位を読み出すためのソースフォロワを p 型のトランジスタで構成している。また、画素選択用のスイッチもこれに応じて p 型トランジスタを用いている。

シュミットトリガインバータの HIGH レベルは、その電源電圧となるため、本センサでは、1.7V ということになる。この値は、今回使用するプロセスの n 型トランジスタの閾値より十分高い電圧である。そのため、低電圧駆動時にも自己リセット動作が特に不安定になることはない。

図2はシミュレーションによる過渡解析の結果を示している。P チャネルのソースフォロワにおける線形応答領域を利用するためリセット電圧 V_{RST} は 2.0V に設定されている。今回の画素においても前回 ($V_{DD_SCH}=3.3V$) と類似した波形が得られた[4]。この結果から自己リセット回路は、シュミットトリガインバータの電源電圧を 1.7V まで低減しても問題なく動作することがわかる。同図下の波形は、インバータの

表1. 試作自己リセットセンサ仕様

プロセス	AMS 0.35- μ m 2-poly 4-metal 標準 CMOS
電源電圧	3.6 V / 1.7 V
チップ寸法	1.1 mm \times 2.5 mm
画素数	60 ^H \times 120 ^V
画素タイプ	3-Tr active pixel sensor (自己リセット回路搭載)
自己リセット判定回路	4-Tr シュミットトリガインバータ
画素寸法	15 μ m \times 15 μ m
フォトダイオード	n-well / p-sub
画素あたりのトランジスタ数	11
開口率	29%

電流を示している。縦軸は対数表示となっている。従来の画素 (破線) では、数 μ A から数十 μ A の電流が流れている。画素数は 60 \times 120 程度であるが、画素アレイ全体で数十 mA から数百 mA の電流が流れると見積もられる。これは、1.0 mm \times 2.5 mm 程度のチップ寸法を考えると非常に大きな電力であり、発熱が問題となる。今回の画素の電流量は、自己リセットが開始するまでは数十 pA、開始後も最大で 1.1 μ A であり、このシミュレーションの自己リセット頻度では、電力消費が 0.11 μ W と見積もられる。これは従来画素の 0.22% であり、電力消費の大幅低減と発熱問題の改善ができる。

2.3. 自己リセットイメージセンサ

提案した画素回路を用いて実際にイメージセンサを設計、試作した。仕様を表1に示す。試作には AMS 社 0.35- μ m 2-poly 4-metal standard CMOS process を用いた。画素寸法は 15 μ m \times 15 μ m、画素開口率は 29% である。開口率は前回の画素よりも僅かに低くなっている。[4]

より微細なプロセスを用いることによって、画素寸法の低減や開口率の向上が可能である。また、画素上のマイクロレンズアレイ形成技術を用いることで、受光効率を改善することも可能である。しかし、コンタクトイメージングを行う埋植用デバイスにおいては、通常のカメラとことなり観察対象の光が様々な角度で入射するため、改善効果は限定的となる。

3. イメージセンサ特性評価

3.1. 自己リセット画素におけるノイズ源

一般的にイメージセンサにおける時間ノイズは、読み出し回路の熱ノイズ σ_T 、画素リセットノイズ

(σ_{RST}) および、光ショットノイズ (σ_{SN}) などが挙げられる。光ショットノイズは、画素への光入射によって生成される電子数の平方根に比例する。また、他にも $1/f$ ノイズやランダムテレグラフノイズも発生するが、これらは、比較的微弱であるため、高感度センサでは問題となるが、今回のように高強度の光照射を行うセンサでは、殆ど問題とならない。これらを見捨てると、イメージセンサ全体でのノイズ量 σ_{NORMAL} は以下で与えられる。

$$\sigma_{NORMAL} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_{RST}^2 + \sigma_{SN}^2}. \quad (1)$$

自己リセットセンサでは、自己リセット毎にリセットノイズが信号に加えられる。この自己リセットノイズは、理想的には外部リセットノイズと同様になると考えられる。 N 回の自己リセット後のノイズ量は、

$$\sigma_{SELRST} = \sqrt{\sigma_T^2 + (N+1)\sigma_{RST}^2 + \sigma_{SN}^2}. \quad (2)$$

となる。

入射光量が十分に大きい場合、 N は近似的に

$$N \cong N_{ph}/FWC = \sigma_{SN}^2/FWC, \quad (3)$$

となる。ここで FWC は画素内容量に蓄積可能な電子数 full-well capacity である。さらに、熱ノイズの項は相対的に小さいことから、これを省略すると、全ノイズは近似的に

$$\begin{aligned} \sigma_{SELRST} &\cong \sqrt{(\sigma_{SN}^2/FWC + 1)\sigma_{RST}^2 + \sigma_{SN}^2} \\ &\cong \sigma_{SN}\sqrt{\sigma_{RST}^2/FWC + 1}. \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる。式(4)から、ノイズレベルは、光ショットノイズの $\sqrt{\sigma_{RST}^2/FWC + 1}$ 倍に漸近することがわかる。このことから、リセットノイズが十分小さければ、自己リセットによる影響は殆ど無いと考えられる。

3.2. 測定結果

試作したセンサチップを用いて画素特性の評価を行った。光源には発光中心波長 525 nm の緑色 LED を用いた。照射光を一様とするため拡散板を挿入している。バイアス電圧 V_b とリセット電圧 V_{RST} はそれぞれ、2.6V と 2.0V に設定した。また、フレームレートは 11.25 frames/s とした。

図 3(a)に、入射光強度に対する出力信号値の測定結果を示す。また、同図に画素出力に自己リセット回数と出力信号値の最大幅をかけたものを加算し、実効的な絶対画素出力値を求めたものを示す。本自己リセットセンサには画素内にリセット回数を計数する機構を持たないが、照射光量を徐々に上げる、露光時間を変化させて複数のデータを取る等の手法によって、リセット回数を推定することができる。図の結果から、再構成されたデータは光強度に比例していることがわかる。

図 3(b)は、ノイズレベルとして画素出力値の時間変

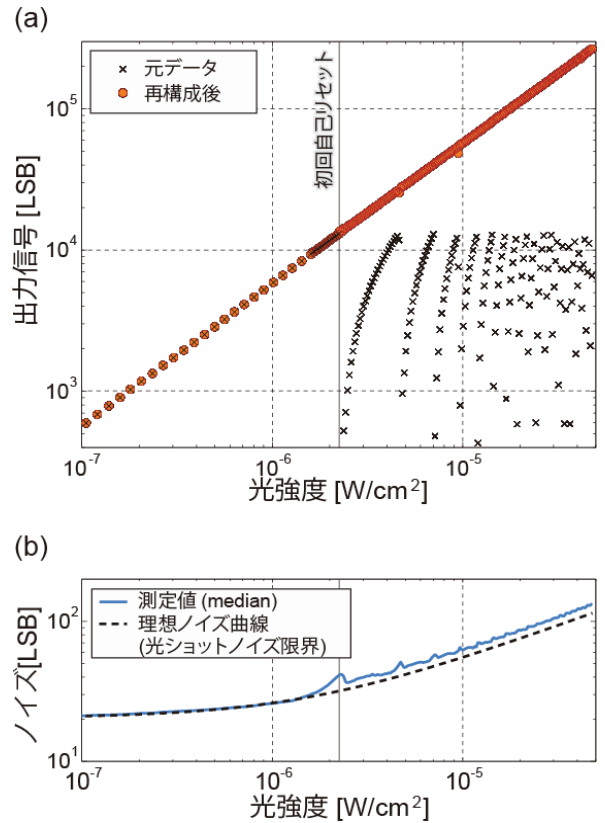


図 3 画素特性測定結果。(a)出力信号強度、(b)ノイズ。

化の標準偏差を示したものである。画素アレイ中には多数の画素が存在するがその中間値を選択している。この結果から測定範囲内の最大実効 SNR は 64dB と見積もられる。光強度が弱い領域では、ノイズレベルはほぼ一定であり、この領域においては、画素の読み出し回路からの支配的である。このノイズレベルは、現在の一般的な CMOS イメージセンサよりも大きい。これは、本センサは、微弱光計測を目的としておらず、相関 2 重サンプリングのようなノイズ低減機構を搭載していないためである [12]。光量が増えてくると、ノイズレベルは光量とともに増加する領域に入る。この領域では光ショットノイズが支配的であり、ノイズは光量の平方根に比例する。初回の自己リセットが起こるのは、照射光量が $2.3 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ となる点である。この実験では、自己リセットによるノイズ増加は約 1.5 dB であった。前節で仮定したように自己リセットにおけるノイズ増加が外部リセットと同程度とすると、この値は想定よりも大きい。その原因として、自己リセットは数 ns 程度の短時間でリセットを完了しなければならないことが考えられる。画素リセット時には、低下した画素内容量をリセット電位に戻す必要がある。瞬間的に流れる電流は比較的大きく、瞬間的に V_{RST} が低下する。この測定では、 V_{RST} の安定対策をとっ

ていないが、その後の実験により EMI フィルタ等により改善が見込まれることがわかった。

4. 血流観察実験

4.1. 小型自己リセットデバイス

マウス脳表の血流を観察することを目的として小型デバイスを試作した。これまで、我々の生体埋植用イメージングデバイスは、小型化を優先してフレキシブル基板上にセンサを固定していたが、本デバイスでは、動作安定性とノイズ低減を重視し、リジッド基板の PCB 上へセンサを実装した。図 5 に作成したデバイスの写真を示す。基板からの意図しない反射光や蛍光を低減するため、レジストは艶のない黒色のものを選択している。電源やリセット電位等の外部から定電圧を与える配線については、EMI フィルタを搭載し、自己リセット時の瞬間的な電位変動の低減を図っている。

4.2. 小型自己リセットデバイスによる血流観察

試作したデバイスを用いてマウス脳表の血流観察実験を行った。尚、本研究における動物実験は、奈良先端科学技術大学院大学の倫理規定に従って実施された。図 5 に実験の模式図を示す。デバイスは、レンズを用いず、開頭マウスの脳表に接触配置した。デバイス上には LED 光源を配置可能であるが、光源には外部の青色 LED 光源(Thorlabs, M470L3)を用いた。これにより、観察像には強度勾配が現れ、自己リセットの効果が明確に観察される。

図 6 に撮像結果を示す。本実験では、フレームレートを 69 fps に設定した。光は図中左側より照射されているため、左側により高強度の光が入射している。自己リセットの効果により 折り返しパターンが確認できる (Fig. 6a)。リセット回数の増加に伴い、血管のコントラストが大きくなっている。

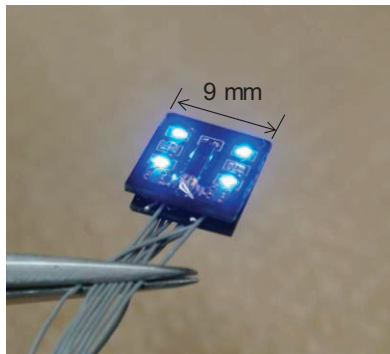


図 4 小型自己リセットセンサデバイス外観。

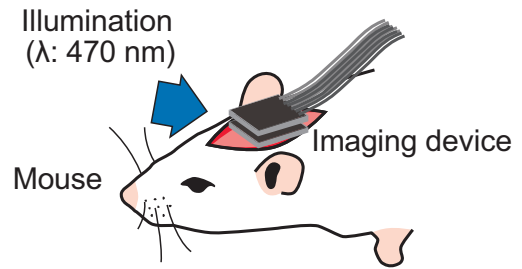


図 5 脳表血流観察実験構成。

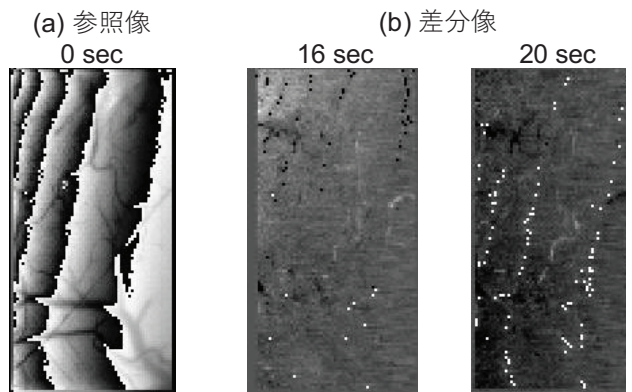


図 6 小型自己リセットセンサデバイスによるマウス脳表撮像結果。

基準フレームとの差分像 (Fig. 6b) には血管中の赤血球量の変化が現れており、血管の明暗が変化していることがわかる。自己リセット回数の境界には白点や黒点が見られるが、フレーム間の輝度変化により自己リセット回数が変わる場合であり、微弱変化を観察する場合には、画像処理により比較的容易に補正できるものと考えられる[4]。EMI フィルタを用いない場合には、リセット回数増加に伴いノイズ増加が画像からも明確に確認されていたが、この結果では、自己リセット境界前後でのノイズ差が僅かであることが確認できる。

5. まとめ

高い実効 SNR を実現する自己リセットイメージセンサについて、設計、試作を行い、マウス脳表の血流観察結果を示した。本デバイスは、生体のみならずオフセットが大きく信号変化量の小さい他の現象をイメージングするためにも有用であると考えられる。その例としては、例えば電気・磁気光学効果を応用した電磁界イメージング[13]や光コヒーレンストモグラフィ等が挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金(26249051 および 15K01289)のによって実施されたものである。また、回路設計は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、日本ケイデンス株式会社、メンター株式会社の協力で行われたものである。

文 献

- [1] Y. Wang, J. Y.-J. Shyy, and S. Chien, "Fluorescence proteins, live-cell imaging, and mechanobiology: seeing is believing," *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 10, pp. 1–38, Mar. 2008.
- [2] A. Grinvald and R. Hildesheim, "VSDI: a new era in functional imaging of cortical dynamics," *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 5, no. 11, pp. 874–885, Nov. 2004.
- [3] M. B. Bouchard, B. R. Chen, S. A. Burgess, and E. M. C. Hillman, "Ultra-fast multispectral optical imaging of cortical oxygenation, blood flow, and intracellular calcium dynamics," *Opt. Express*, vol. 17, no. 18, pp. 15 670–15 678, Aug. 2009.
- [4] K. Sasagawa, T. Yamaguchi, M. Haruta, Y. Sunaga, H. Takehara, H. Takehara, T. Noda, T. Tokuda, J. Ohta, "An implantable CMOS image sensor with self-reset pixels for functional brain imaging," *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 63, no. 1, pp. 215–222, Jan. 2016.
- [5] A. Bermak, A. Bouzerdoun, and K. Eshraghian, "A vision sensor with on-pixel ADC and in-built light adaptation mechanism," *Microelectron. J.*, vol. 33, no. 12, pp. 1091–1096, Dec. 2002.
- [6] S. Koppa, D. Park, Y. Joo, and S. Jung, "A 105.6 dB DR and 65dB peak SNR self-reset CMOS image sensor using a Schmitt trigger circuit," in 2011 IEEE 54th Int. Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Aug. 2011.
- [7] D. C. Ng, T. Tokuda, A. Yamamoto, M. Matsuo, M. Nunoshita, H. Tamura, Y. Ishikawa, S. Shiosaka, and J. Ohta, "On-chip bio-fluorescence imaging inside a brain tissue phantom using a CMOS image sensor for in vivo brain imaging verification," *Sens. Actuators B: Chemical*, vol. 119, no. 1, pp. 262–274, Nov. 2006.
- [8] H. Tamura, D. C. Ng, T. Tokuda, H. Naoki, T. Nakagawa, T. Mizuno, Y. Hatanaka, Y. Ishikawa, J. Ohta, and S. Shiosaka, "One-chip sensing device (biomedical photonic LSI) enabled to assess hippocampal steep and gradual up-regulated proteolytic activities," *J. Neurosci. Methods*, vol. 173, no. 1, pp. 114–120, Aug. 2008.
- [9] M. Haruta, C. Kitsumoto, Y. Sunaga, H. Takehara, T. Noda, K. Sasagawa, T. Tokuda, and J. Ohta, "An implantable CMOS device for blood-flow imaging during experiments on freely moving rats," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 4S, 04EL05, Apr. 2014.
- [10] T. Yamaguchi, H. Takehara, Y. Sunaga, M. Haruta, M. Motoyama, Y. Ohta, T. Noda, K. Sasagawa, T. Tokuda and J. Ohta, "Implantable self-reset CMOS image sensor and its application to hemodynamic response detection in living mouse brain," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 4S, 04EM02, Mar. 2016.
- [11] J. Ohta, *Smart CMOS image sensors and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.
- [12] H. Ojima, M. Takayanagi, D. Potapov, and R. Homma, "Isosfrequency band-like zones of activation revealed by optical imaging of intrinsic signals in the cat primary auditory cortex," *Cereb. Cortex*, vol. 15, no. 10, pp. 1497–1509, 2005.
- [13] K. Sasagawa, A. Kanno, T. Kawanishi, and M. Tsuchiya, "Live electro-optic imaging system based on ultra-parallel photonic heterodyne for microwave near-fields," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 55, no. 12, pp. 2782–2791, Dec. 2007.
- [14] M. Tsuchiya, K. Sasagawa, A. Kanno, T. Shiozawa, "Live Electrooptic Imaging of W-Band Waves," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 58, no. 11, pp. 3011–3021, Nov. 2010.

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

村田 博司[†] 東 良幸[†] 上野 文聖[†] 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（管の内側）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 管壁部に閉じ込められて伝搬するマイクロ波の振る舞いを精密に計測して、管路の異常を診断・特定するものである。予備的検討により、埋設土・FRPM 管（厚さ～20mm）・空気（配管内部の空洞）からなる 3 層誘電体円筒導波路は、周波数 2～6 GHz のマイクロ波に対して比較的低損失（伝搬損失～ dB/m）であること、管路の途中で FRPM 部に亀裂等の欠陥や内表面・外表面に異物があると、マイクロ波が欠陥・異物により散乱・放射されて、マイクロ波の強度が低下することを確かめている。このとき、欠陥や異物が管の外側表面にある場合においても、管の内側にマイクロ波が散乱・放射される。したがって、管壁内表面におけるマイクロ波を EO センサ等で精密に測定することにより、管の外側の欠陥・異物等の情報を、管路の内部から非破壊で計測・診断することができる。本報告では、実際に地中に埋設されている FRPM 管における測定実験結果を中心に述べる。

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

Microwave Propagation Characteristics along Buried FRPM Pipes and their Applications to Nondestructive Diagnosis

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

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

[‡] Kurimoto Ltd. 1 Koyagi, Higashiohmi, 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 for the buried agricultural pipelines are reported.

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

1. はじめに

現代の ICT 社会は、光ファイバーや無線・有線の情報通信ネットワークと、それを支えている電気・ガス・水道・交通・工業／農業用水などのさまざまなインフラストラクチャから構成されている。これらのインフラは、高度成長期に整備が始められたものが多く、順次、検査・診断の時期を迎えている。特に、実運用されているインフラの検査・診断には、非破壊でなるべく短時間、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鋳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、農業用水管では、日本国内の総敷設距離が 5 万 km にも達している。

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な課題であり、地中埋設 FRPM 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。

配管の非破壊検査法としては、超音波を用いるものがある[3], [4]。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に、管壁部や管の外側の情報を選択的に取得することは、あまり容易ではない。漏水がある状況下では、超音波・音波による検査（漏水音の検出）は有効であるが、漏れ等がない状況では、管の劣化や異常を未然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、地中埋設管の実現場での使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低損失な誘電体（誘電率 $\epsilon_r = 4 \sim 16$, 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]-[10]。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。

FRPM と空気、土砂の誘電率の大小関係のために、通常、マイクロ波の伝搬速度は、空気・土砂中の方が FRPM 管壁内よりも速くなる[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 管壁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それ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 管は定尺が 4 m あるいは 6 m であり、これを接続用配管で順に接続してパイプラインとして敷設されているため、定尺管毎の透過率の比較・診断による検査が有効である。また、農閑期には送水を止めて配管内を中空にすることができるので、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、実際に地中に埋設されている農業用水管における測定実験結果を中心に述べる。

2. マイクロ波を用いた検査・診断法

図 1 に我々が提案している検査・診断方法の概略図を示す。先に述べたように、この検査法では、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。測定方法の概略を以下に述べる。

まず、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 管壁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。そこで、他端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。

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・形状・材質に強く依存する。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、管路の内側にもマイクロ波が散乱されて分布が生じることである。したがって、低擾乱な EO センサ等で散乱波を精密に計測することで、欠陥や異物の大きさ・形状・材質を特定することができる。これまでの実験で、深さ・幅が 1mm 程度の欠陥の検出に成功している[9], [10]。

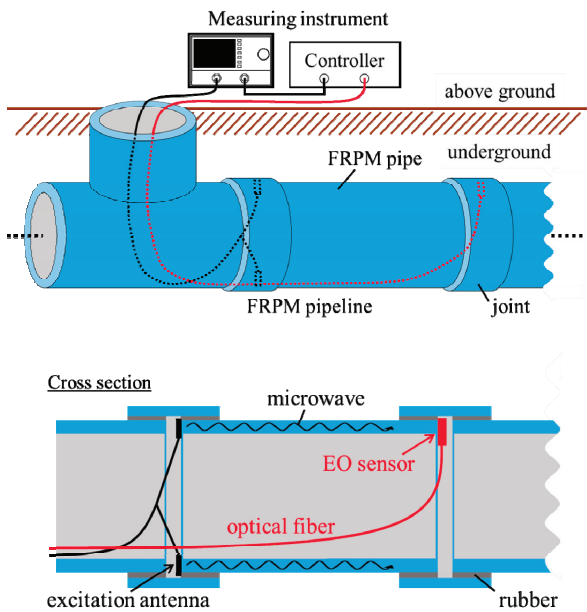


図1 マイクロ波伝搬を用いた検査・診断法
(上：概略図，下：配管長手方向断面図)

3. FRPM 管壁に沿って伝搬する導波モード

内側が空気，外側が規定の砂（標準施工条件）である FRPM 管を考える．この場合では，マイクロ波に対する誘電率は，内側（空気）および外側（砂）に比べて FRPM 管壁部の方が高くなる．したがって，埋設された FRPM 管は，マイクロ波に対して，図2に示す円筒形誘電体導波路になり，マイクロ波のエネルギーは管壁の内部とその近傍に，導波モードとして閉じ込められる．その詳細な特性は，特殊関数（ベッセル関数）を用いて解析的に求めることができる[7]，[8]．

導波モードの分散特性の例を 図3に示す．FRPM 管の管壁の厚さが 20 mm 程度の場合には，周波数 1~4 GHz において，TE₀₀モードが基本モードであることがわかる．また，この程度の厚さの場合には，モードの分散特性は直径を変えてもほとんど変わらない．これは，マイクロ波が FRPM 壁の近傍に強く閉じ込められていることを意味している．

図4には導波モードの電界分布の例を示す．誘電体導波路は，開放型の線路であり，マイクロ波のエネルギーは，コアとなる FRPM 壁内部だけでなく，コアを挟む内側（空気），外側（砂）の領域にも滲みだして（エバネッセント波）伝搬する．したがって，コアとなる FRPM 管壁の内部や表面だけでなく，管の外側の近傍（~10 mm 程度）に異物等がある場合でも，伝搬特性が乱されて散乱波が生じる．この散乱波を，低擾乱な光電界（EO）センサを用いて精密に計測することで，

管壁の異常や管の外側の異物等を非破壊・非接触で検出することが可能である．

図5には長さ 1m の試験用 FRPM 管での透過特性の測定結果を示す．透過信号が，管壁表面の欠陥（crack）によって変化することを示している．

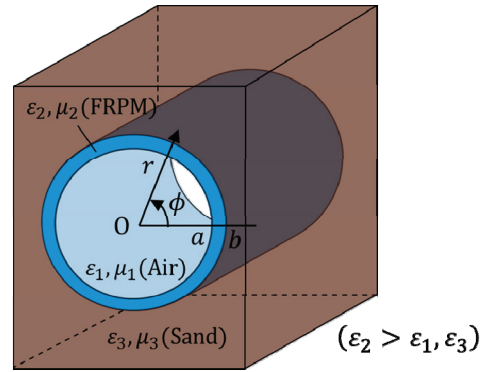


図2 FRPM パイプラインの誘電体円筒導波路モデル

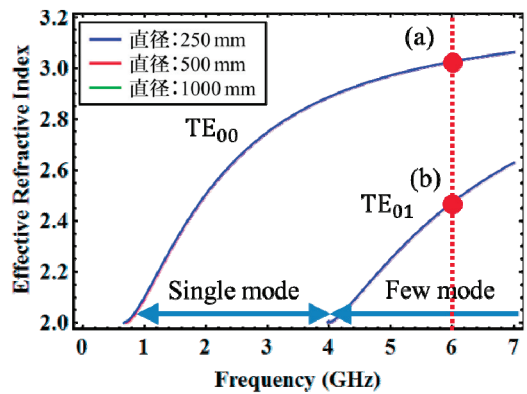


図3 FRPM 管誘電体円筒導波路の分散特性
($\epsilon_1=1, \epsilon_2=10, \epsilon_3=4, W=b-a=18\text{mm}$)

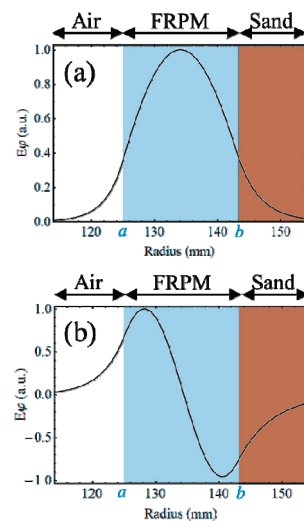


図4 導波モードの電界分布

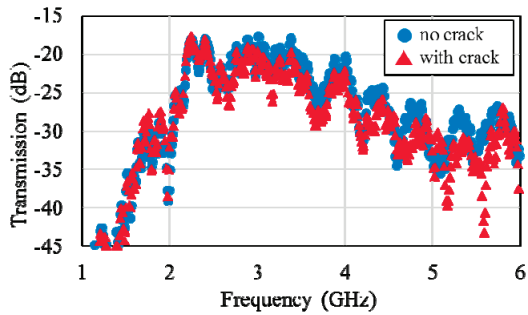


図5 マイクロ波透過特性の測定例（長さ1m）

4. 埋設管での診断実験

実験室およびFRPM管製造工場敷地内での実験では、FRPM管壁に沿ってマイクロ波が10m以上にわたって伝搬すること、および管壁内・管壁表面の欠陥によって伝搬特性が大きく散乱されることを確認した[14], [15]. そこで、実際に地中に埋設されている農業用水パイプラインにおいて、マイクロ波伝搬を利用した非破壊診断実験に挑戦した。

実験を行ったのは、一般道の地下約2mの深さに埋設されているFRPMパイプラインである。(図6参照) 農業用水として、全長数kmにわたって敷設されているパイプラインの300m程の区間について、10本程度のパイプを選び、検査・診断を試みた。農業用水の基幹水路であるために、農閑期(冬季)には送水を止めてメンテナンスが行われる。この農閑期に評価を行ったために、配管内はほとんど水が無い状態であり、マイクロ波を用いた計測には好都合であった。

敷設されているFRPM管の内径は1,350mm、管壁の厚さは18mmで、約4,000mm毎に、若干径の大きい接続用FRPM管を用いて接続されている。接続部では、FRPM管同士に数mm程度の隙間があり、この隙間に小型のダイポールアンテナを挿入してマイクロ波導波モードを励振・伝搬させることを試みた。

実際に計測したFRPM管(長さ4m)におけるマイクロ波透過率を図7に示す。実運用されている地中埋設FRPM管においても、マイクロ波が伝搬して明瞭な透過信号が得られることを確認した。透過率は、配管毎にやや異なる傾向を示した。

さらに、透過率が他の管よりも低く、測定中の変動がやや大きい2本のFRPM管について、内表面でのマイクロ波2次元強度分布を精密に測定した。この結果を図8に示す。測定した2本の管の内側はいずれも平滑で傷等は見られなかったが、マイクロ波を伝搬させたときの強度分布には最大で7dB程度の明瞭な変動が見られた。(異物等が無いと考えられる管では変動は1dB以下) 図8のFRPM管の外側には、何らかの異物があると推定される。また、図8の強度分布は、別途

測定した管壁の局所的な機械的ひずみと良い相関を示すことも確認した。



図6 測定した実際の農業用水管
(上：地上の写真，中：アクセス用マンホール，
下：管内の写真（内径1,350mm，定尺4,000mm））

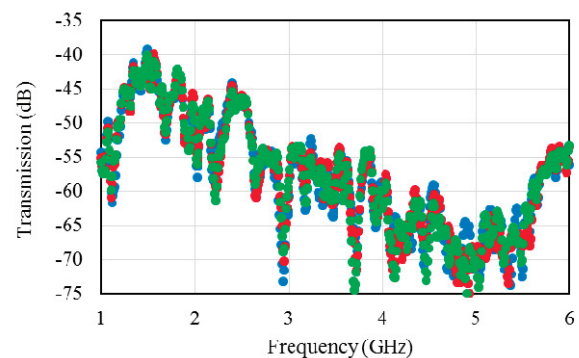


図7 地中埋設FRPM管におけるマイクロ波透過特性の測定例（同条件で3回計測）

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, Sept. 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, 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, Aug. 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, 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] 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] 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.
- [12] 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.
- [13] H. Togo, S. Mochizuki, and N. Kukutsu. "Optical fiber electric field sensor for antenna measurement," *NTT Technical Review*, vol.7, no.3, March 2009.
- [14] 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.

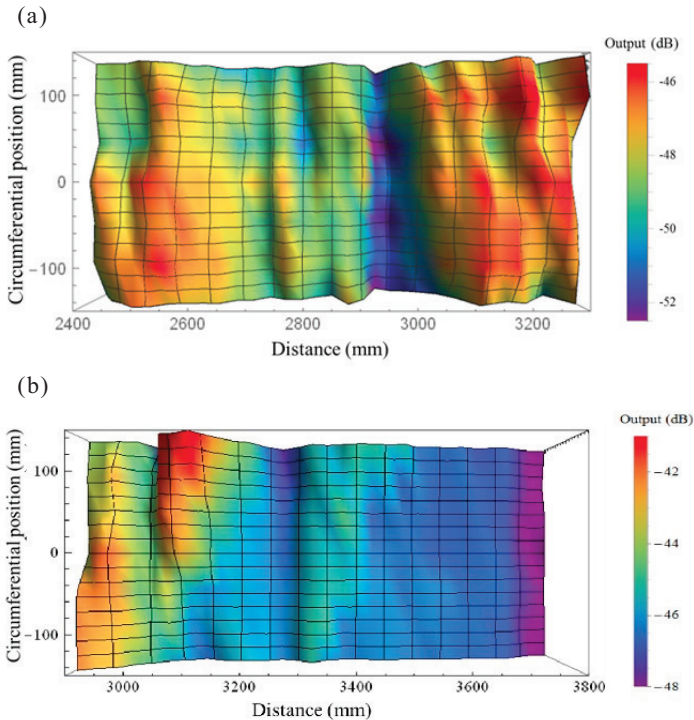


図 8 実際の農業用水管の内表面で取得したマイクロ波の 2 次元強度分布
(a), (b) は測定した管が異なる)

5. むすび

マイクロ波導波モードと電磁界の精密計測技術を応用した、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、マイクロ波に対する良好な導波路であると言える。この特性を利用することで埋設配管の有効な非破壊診断計測技術を構築できる可能性がある。光応用計測技術、時間領域計測技術を利用することで、さらなる高機能化、省力化も期待できる。農業用水以外のパイプラインへの応用も考えられる。

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、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。大阪大学基礎工学研究科の大学院生 綾拓範君、林勇太君には、地中埋設管での測定の際に多大なるご協力を頂きました。深く感謝します。また、EO センサをご提供頂いた精工技研・鳥羽良和博士にも深く感謝します。