

第4回 光応用電磁界計測研究会

PEM2021-01～03

2022年 1月27日 (木)

オンライン開催

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 (PEM)

共 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)
マイクロ波・ミリ波フォトリックス研究会 (MWP)

連 催：電気学会 電磁界理論技術委員会 (IEEJ-EMT)

第4回 光応用電磁界計測研究会 プログラム

2022年1月27日(木) 13:55-15:10

座長：佐々木 愛一郎 (近畿大)

- 13:55-14:20 [PEM2021-01]
(依頼講演) 皮下組織のテラヘルツ帯における誘電特性を模倣した生体ファントムの検討
○山崎 祥他 (NICT) ・ 富澤 鉄太 (青学大) ・ 水野 麻弥 (NICT) ・
須賀 良介 ・ 橋本 修 (青学大) ・ 長岡 智明 (NICT)
- 14:20-14:45 [PEM2021-02]
(依頼講演) 光電界センサを用いたFRPM管壁伝搬マイクロ波導波モードの測定
～パイプライン遠隔非破壊診断技術の開発へ向けて～
○奥田 忠弘 (三重大) ・ 松川 沙弥果 ・ 黒川 悟 (産総研) ・
吉田 光佑 ・ 村田 博司 (三重大)
- 14:45-15:10 [PEM2021-03]
電気光学センサシステムの低周波領域雑音解析
○富永 麻衣 ・ 山岸 茉由子 ・ 品川 満 (法政大) ・
勝山 純 ・ 松本 憲典 ・ 友定 伸浩 (横河電機)

会 場： オンライン開催

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

共 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)
マイクロ波・ミリ波フォトリックス研究会 (MWP)

連 催： 電気学会 電磁界理論技術委員会 (IEEEJ-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：2022 年 1 月 24 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] 皮膚組織のテラヘルツ帯における誘電特性を模倣した 生体ファントムの検討

山崎 祥他[†] 富澤 鉄太^{†‡} 水野 麻弥[†] 須賀 良介[‡] 橋本 修[‡] 長岡 智明[†]

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

[‡] 青山学院大学 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1

E-mail: [†] syamazaki@nict.go.jp

あらまし 本研究では、周波数 0.1 THz~1 THz におけるブタ皮膚の複素比誘電率を THz 時間領域分光(THz-TDS)と全反射減衰分光法(ATR)ユニットを組合わせた THz TD-ATR 法により測定した。その結果、皮膚を構成する表皮と真皮の各層で誘電特性が異なることを明らかにした。次に、超純水、グリセリン、寒天を材料とする生体ファントムを作製し、皮膚の誘電特性を再現できる可能性を検討した。その結果、グリセリンの濃度が高いほど THz 帯における生体ファントムの複素比誘電率が減少し、皮膚の値に近づくことを確認した。表皮と真皮のように生体の誘電特性は組織によって異なるが、グリセリンの濃度を調整することで THz 帯の複素比誘電率を再現した生体ファントムを作製できる見込みが得られた。

キーワード 皮膚組織, 生体ファントム, 複素比誘電率, THz TD-ATR

1. 研究の背景

次世代無線通信(B5G/6G)では THz 帯の電波利用が想定されており、同時に電波の安全性を確保するために、THz 帯の電波への人体ばく露量を評価する必要性が高まっている。しかしながら、THz 帯での高精度な電波ばく露量評価に必要となる、皮膚の誘電特性についての、組織内の層構造に由来するばらつきは考慮されておらず、その電気的特性を模倣した生体ファントムの作製方法についても十分な研究が行われていない。

そこで本研究では、ブタ皮膚から分画した表皮および真皮の2層を対象とし、周波数 0.1 THz~1 THz における複素比誘電率を THz 時間領域分光(THz-TDS)と全反射減衰分光法(ATR)ユニットを組合わせた THz TD-ATR 法により測定した。さらに、超純水、グリセリン、寒天を材料とする生体ファントムを作製し、表皮および真皮から得られた測定データと比較することで、皮膚組織の THz 帯における複素比誘電率を再現した生体ファントムの作製方法について検討した。

2. 複素比誘電率の測定方法

THz-TDS は、フェムト秒レーザーによって発生させた THz パルス波を試料に入射させ、透過または反射した後の電界の実時間波形 $E(t)$ を測定し、フーリエ変換することで各周波数成分の振幅 $E(\omega)$ と位相 $\phi(\omega)$ を得る分光法である。試料なしの電界をリファレンスと比較することで透過率 $T(\omega)$ および位相差 $\Delta\phi(\omega)$ が得られ、試料の複素比誘電率を得ることができる[1]。しかしながら、皮膚のような厚みがある生体試料では THz パルス波の吸収が大きく、透過配置の測定は困難となる。そこで本研究では、THz-TDS と ATR ユニットの

を組合わせた THz TD-ATR 法[2]を使用した。THz TD-ATR 法は、図 1 で示すようにシリコンプリズムへ臨界角度以上で THz パルス波を入射し、発生したエバネッセント波と試料の相互作用により減少した減衰全反射率と位相変化を測定することで複素比誘電率を導出できる。本研究では、この THz TD-ATR 法によってブタ皮膚と生体ファントムの複素比誘電率を測定した。

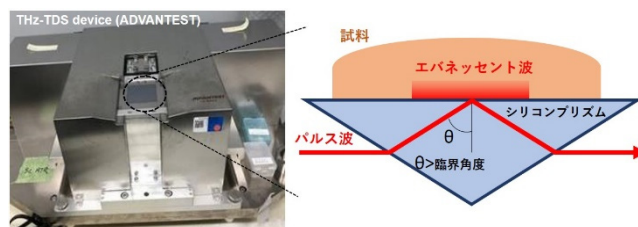


図 1. THz TD-ATR 装置の概要

3. 結果と考察

3.1. ブタ皮膚の複素比誘電率測定



図 2. ブタ皮膚から分画したの表皮と真皮

皮膚は表皮、真皮、皮下組織の3層から構成され、各層の厚さはヒト前腕部の例で 100 μm , 1 mm, 4 mm

程度である[3]. また、吸収係数を考えると、0.1 THz~1 THz の電波が到達する皮膚内部の距離は、表皮側から数 100 μm 程度となる. そこで本研究では、図 2 に示した THz 帯の電波が到達する表皮および真皮を対象とし、それぞれの複素比誘電率を測定した.

図 3 は表皮および真皮の複素比誘電率であり、データは 5 個の検体から得られた平均値と標準偏差を示す. 上段は実部 (ϵ')、下段は虚部 (ϵ'') であり、高周波帯ほど誘電率は減少する. また、グラフから分かるように、表皮と真皮の電気的特性が異なることが分かる.

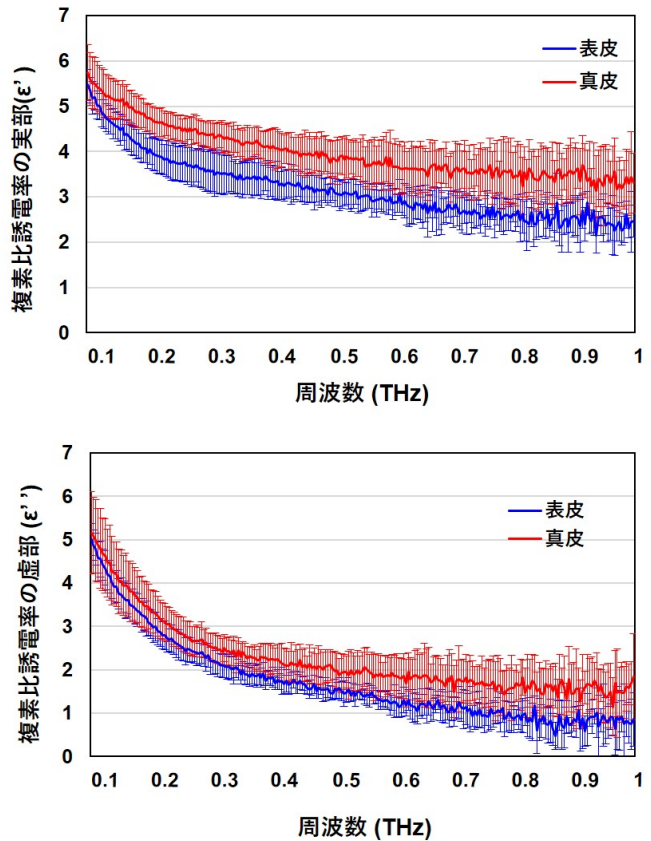


図 3. THz 帯における表皮と真皮の複素比誘電率

3.2. THz 帯の複素比誘電率と水分量の関係

電波の中でも THz 帯は特に水に強く吸収される性質を持つ. そのため、表皮と真皮の誘電特性の違いは含有する水分量に依存すると推測できる. そこで次に、各層の水分量をコルネオメータによって測定した. コルネオメータは、水の静電容量に対する相対値として試料の水分量を数値化できる. 図 4 は 5 個の検体から得られた表皮および真皮の水分量の平均値と標準偏差を示す. 真皮では表皮と比較して約 2 倍の水分を含有していることがグラフから分かり、少なくとも水分の含有量が表皮と真皮の誘電特性を決定する一因であることが分かる.

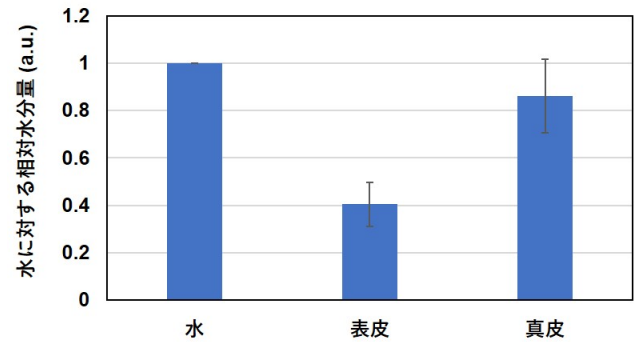


図 4. 表皮と真皮の含有水分量の比較

3.3. 生体ファントムの作製

次に、得られた表皮と真皮の複素比誘電率が生体ファントムで再現できるか検討した. 材料として、GHz 帯で生体ファントムの材料として使用されている超純水、グリセリン、寒天を用いた. ファントムの作製手順として、まず超純水とグリセリンをよく混合し、寒天を加え 500W の電子レンジで加熱した. この方法により、均一に溶液が加熱されることで、材料の濃度勾配がファントム内部で生じることを抑えることができる. 寒天が完全に溶けたことを確認し、プラスチック容器へ移した後、室温で 30 分間静置し、ファントムの完成とした.

0.1THz における超純水の複素比誘電率はおおよそ実部 (ϵ') =9、虚部 (ϵ'') =12 であるのに対し、グリセリンは実部 (ϵ') =4、虚部 (ϵ'') =0.4 と低い値を示す. したがって、ファントムを構成するグリセリンの濃度が高いほど複素比誘電率が減少すると推測できる. そこで、図 5 で示すようにグリセリン濃度が異なる 5 種類のファントムを作製し、複素比誘電率を測定した.

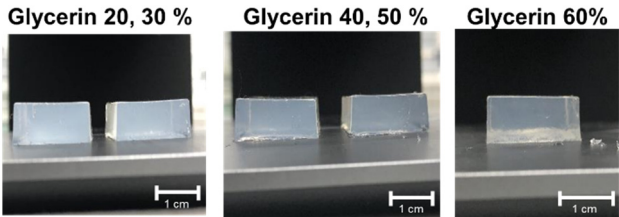


図 5. 生体ファントムの外形

3.4. 生体ファントムの複素比誘電率測定

表 1 に本研究で作製したファントムの組成を示す. 寒天はファントムの固形化および水分の蒸発を防ぐ目的で用いており、1.5%の濃度では複素比誘電率に影響

表 1. 生体ファントムの組成

材料名	濃度 (wt%)				
超純水	78.5%	68.5%	58.5%	48.5%	38.5%
グリセリン	20%	30%	40%	50%	60%
寒天	1.5%				

がないことを確認している。

図 6 は異なるファントム 9 個から得られた周波数 0.1 THz~1 THz における複素比誘電率の平均値と標準偏差を示す。横軸が周波数、縦軸が比誘電率を示しており、各グラフはグリセリンの濃度を変化させた場合の誘電特性を表している。図から、グリセリン濃度が増加すると実部、虚部ともに誘電率が減少することが分かる。したがって、グリセリンの濃度を調整することにより、少なくともデータの範囲内でファントムの複素比誘電率を任意の値に設定できる。比較のため、生体の誘電特性としてブタ皮膚の表皮と真皮の値を一部示した。実部、虚部ともに真皮の値のばらつきがファントムのデータ範囲と重複している。そのため、真皮のような水分量の多い組織であれば、グリセリン濃度を調整することで THz 帯の生体ファントムを作製できる可能性が高いと考えられる。

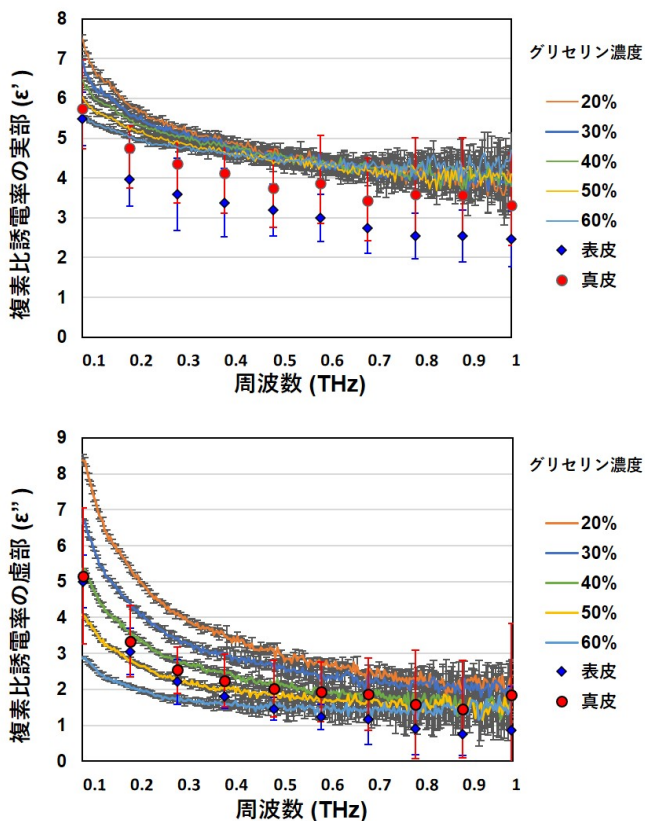


図 6. 複素比誘電率とグリセリン濃度の関係

4. あとがき

本研究では、ブタ皮膚から分画した表皮と真皮の THz 帯における複素比誘電率を THz TD-ATR 法によって測定した。その結果、THz 帯における複素比誘電率は表皮と真皮で異なっており、この違いが含有する水分量に起因していることを明らかにした。また、皮膚の誘電特性が生体ファントムで再現できるか検討したところ、少なくとも真皮のように水分含有量の多い組

織であれば、グリセリン濃度を調整することで THz 帯の低周波側では複素比誘電率を再現できる見込みを得た。

図 6 で示したように、グリセリンの濃度に対応した生体ファントムの誘電特性の変化は、複素比誘電率の実部よりも虚部で顕著であった。この理由の一つとして、0.1THz におけるグリセリンの複素比誘電率が実部では水の 40%程度であるのに対し、虚部では 3%程度とより離れた小さい値であることが原因であると考えられる。そこで今後は、生体ファントムの電気的特性をより生体組織に近づけるため、グリセリンよりも低い複素比誘電率を持つ材料の利用についても検討する予定である。

謝辞

本研究は総務省委託研究(JPMI10001)の支援により実施された。

文 献

- [1] Lee Y.-S. “Principles of Terahertz Science and Technology” (Springer, 2009).
- [2] Nagai M., Yada H., Arikawa T. and Tanaka K. Int. J. IRMMW 27, 505 (2006).
- [3] Sasaki K., Mizuno M., Wake K. and Watanabe S. Phys. Med. Biol. 62, 6993–7010, 2017.

[依頼講演] 光電界センサを用いた FRPM 管壁伝搬 マイクロ波導波モードの測定 —パイプライン遠隔非破壊診断技術の開発へ向けて—

奥田 忠弘^{†‡} 松川 沙弥果^{†††} 黒川 悟^{†††} 吉田 光佑[†] 村田 博司[†]

[†] 国立大学法人 三重大学 大学院工学研究科 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

[‡] 株式会社 栗本鐵工所 〒550-8580 大阪府大阪市西区北堀江 12-19

^{†††} 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 〒305-8580 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: [†] t_okuda@kurimoto.co.jp

あらまし 我々は、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、FRPM 管の非破壊検査方法を提案して開発を進めている。この非破壊検査方法のポイントは、FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波導波モードの伝搬特性（透過・反射・散乱）を光応用計測技術を用いて検出することである。これにより、埋設された FRPM 管の外面付近の異物やパイプの亀裂を遠隔で非破壊検査することが可能となる。本稿では、反射されたマイクロ波信号を光電界（EO）センサを用いて計測・時間領域解析した結果を報告する。EO センサを使用することで、ダイポールアンテナを使用した場合に比べて、高い S/N 比で信号を取得することが可能である。これにより、パイプライン診断のための鮮明な画像イメージを取得することができる。

キーワード マイクロ波、マイクロ波導波モード、時間領域解析、光電界センサ

Measurement of Reflected Microwave Guided-Mode Signal Propagating along FRPM Pipe-Wall Using Electro-Optic Sensor —Non-Destructive Remote Pipeline Inspection—

Tadahiro OKUDA^{†‡} Sayaka MATSUKAWA^{†††} Satoru KUROKAWA^{†††}

Kosuke YOSHIDA[†] and Hiroshi MURATA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Mie University 1577 Kurima-Machiya-Cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

[‡] Kurimoto, Ltd. 12-19 Kitahorie, Nishi-ku, Osaka, 550-8580 Japan

^{†††} AIST 1-1 Umesono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8568 Japan

E-mail: [†] t_okuda@kurimoto.co.jp

Abstract We have proposed and developed the non-destructive inspection method for buried fiberglass reinforced plastic mortar (FRPM) pipelines utilizing microwave guided-modes propagating along FRPM pipe walls. The key point of this method is to detect the microwave guided-mode signal reflected by a foreign object on the outer surface of the buried FRPM pipeline or a crack in the pipe wall, which enables us to have non-destructive inspection of underground pipelines remotely. In this paper, we report microwave time-domain analysis results of reflected microwave signals using an electro-optic (EO) sensor. Rather clear images of the reflected signals are obtained with a high signal-to-noise ratio compared to the results using a standard dipole antenna.

Keywords Non-destructive inspection, Microwave guided-mode, Time domain analysis, EO sensor

1. はじめに

強化プラスチック複合管（FRPM 管）は、軽量かつ高強度であり、耐食性にも優れていることから、農業用水用パイプラインや下水道管などで埋設管として利用されている。また、近年では標準耐用年数を超過した施設が年々増加傾向にある。このような、老朽化した施設に対して機能診断を実施し、補修や補強などを効率的に実施することで、事故リスクの低減および施設の長寿命化を図る取組みが進められている。しかし、埋設された FRPM 管を非破壊的に検査するための実践的な方法は確立されていない。したがって、埋設された FRPM 管の検査と診断を非破壊かつ遠隔で行う技術開発が求められている。

FRPM 管の非破壊検査方法としては、MRI、X 線、および超音波を使用する手法が考えられている[1]-[3]。しかし、MRI や X 線を使用した検査では、必要な設備が大型であるために、地下に埋設されたパイプラインの検査には適していない。また、超音波を使用する場合は、トランスデューサー等をパイプ壁面に密着させる方法が常套であり、検査は密着された一定範囲に限定される。したがって、長距離に渡るパイプラインの調査を行うことは容易ではない。

我々は、これまでの研究で、FRPM 管においては周波数 1~9 GHz のマイクロ波が導波モードとして FRPM 管の管壁に閉じ込められて伝搬すること、さらに、厚さ約 20mm の FRPM 管では伝搬損失が小さい（数 dB/m）ことを明らかにした。そこで、この特性を利用して、マイクロ波導波モードを用いた FRPM 管の非破壊検査法を提案している[4]-[7]。FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波導波モードの伝搬特性（透過・反射・散乱）を測定することで、埋設された FRPM 管の外面付近の異物や管壁表面・内部の亀裂を非破壊で検査することが可能となる。さらに、光電界（EO）センサや光ファイバーリンクなどのフォトン技術を活用することにより、FRPM パイプラインを非破壊かつリモートで検査することも可能である。

本稿では、反射したマイクロ波導波モード信号を EO センサを用いて測定した結果について報告する。反射されたマイクロ波導波モードの信号を EO センサで測定して時間領域解析を行うことにより、パイプライン診断のためのイメージング画像取得に成功した。

2. マイクロ波導波モードの伝搬特性

FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波導波モードの特性を確認するために、Fig.1 に示す実験を行った。マイクロ波は、ベクトルネットワークアナライザ（VNA）から供給し、送信アンテナおよび受信アンテナ

は市販のスリーブダイポールアンテナを使用した。Fig.1 (a) では長さ 1,000mm、内径 250 mm、厚さ 18mm の FRPM 管を用いて、FRPM 管の端面に送信アンテナを、FRPM 管の反対側の端面には受信アンテナを設置して、周波数 1~6 GHz におけるマイクロ波の透過信号を測定した。また、Fig.1 (b) では、FRPM 管を取り除いて、送信アンテナおよび受信アンテナのみを 1,000mm の間隔を開けて Fig.1 (a) と同じ位置関係となるように設置して、FRPM 管がない状態すなわち、空气中を伝搬するマイクロ波の信号を測定した。

測定結果を Fig.2 に示す。FRPM 管がある場合では、FRPM 管がない場合に比べてマイクロ波信号の透過信号レベルが 20~30 dB 高くなった。このことから、ダイポールアンテナを用いて、FRPM 管壁に沿って伝搬するマイクロ波導波モードを励振・検出できること、および管壁に沿って伝搬するマイクロ波導波モードの伝搬損失が小さいことがわかる。

さらに詳細な解析を行った結果、Fig. 1 (a) の実験では、マイクロ波は TE 導波モードとして FRPM 管壁近傍に強く閉じ込められて管壁に沿って伝搬すること、さらに、直進波、回転波として分かれて伝搬して受信アンテナに到達していることがわかった[4]。

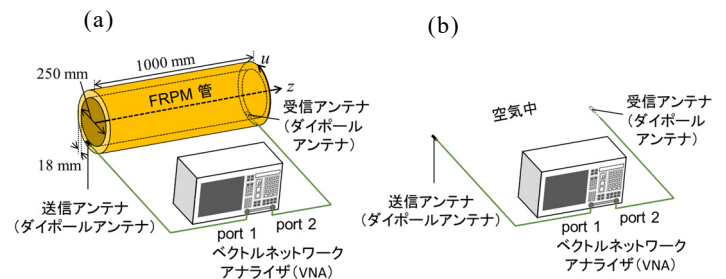


Fig. 1 Experimental set-up.

(a) FRPM pipe. (b) Air.

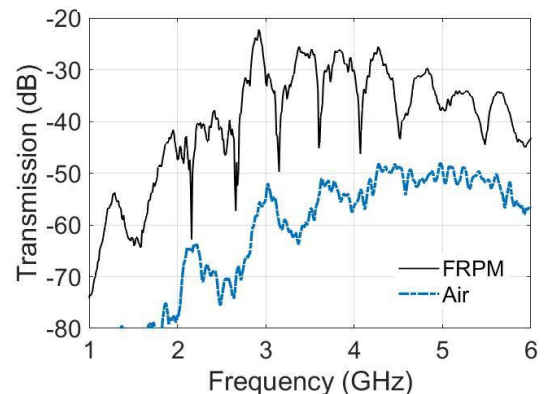


Fig. 2 Measured microwave transmission signal in the frequency domain.

3. EO センサを用いた異物イメージング実験

次に、Fig 3. に示す実験系を用いて、FRPM 管壁の表面に設置した異物の検出実験を行った。Fig. 1 の場合と同様に長さ 1,000 mm、内径 250 mm、厚さ 18 mm の FRPM 管を実験に使用した。なお、実験で使用した FRPM 管の実効誘電定数値は約 4.6 である。

TE 導波モードとして伝搬するマイクロ波を励振・伝搬させるために、ダイポールアンテナを管壁に沿って FRPM 管の端面に取り付けた。マイクロ波は、標準のマイクロ波増幅器を介してベクトルネットワークアナライザ（VNA）から供給した。予備実験では、マイクロ波が FRPM 管の管壁に強く閉じ込められており、FRPM 管に沿って伝搬したマイクロ波導波モードが入力とは反対側の管端面で反射されることを確認している[4]。また、FRPM 管壁の表面に異物が付着していると、異物によってマイクロ波が反射されるため、反射信号を正確に測定することで、FRPM 管の遠隔・非破壊検査が期待できる。

実験では、VNA からのマイクロ波信号の周波数を 1 ～ 9 GHz の範囲で掃引して、精工技研社製 EO センサ SH-10 を使用して反射信号を測定した。測定した信号をフーリエ変換を使用して時間領域に変換して時間領域応答を解析した。

光電界センサの位置を入射端の管壁に沿って移動させて各部分における時間領域信号を取得した。取得した時間領域信号をカラーマップとして表示したものを Fig. 4 (a) と (b) に示す。縦軸は入射端の管壁円周方向に沿って移動させた EO センサの位置に対応している。高い S/N 比で信号を取得するとともに、異物による明瞭な信号を確認することができた。

Fig. 4. (a) および (b) では遅延時間約 13 ns 付近で信号が観測されているが、これはマイクロ波を入力した側と反対側の管端面からの反射信号によるものである。Fig. 3 に示すように、管中央のパイプ壁表面に異物（コンクリートブロック）を設置して測定した場合には、遅延時間 8 ns 付近で信号が見られた。この遅延時間は、設置した異物の位置および予備実験で取得したマイクロ波導波モードの群速度から求めた遅延時間とよく一致した[4]-[6]。

これらの結果をダイポールアンテナを使用した場合の反射信号の時間領域解析結果と比較すると[5], EO センサを用いることにより、時間分解能および S/N 比が大幅に改善した。これは、反射信号取得のためにダイポールアンテナを使用した場合には、励振・入力用アンテナと検出用アンテナの結合・誘導が生じるために、両アンテナの結合による直接波が大幅に増加して励振マイクロ波分布が大きく変化してしまうためだと考えられる。

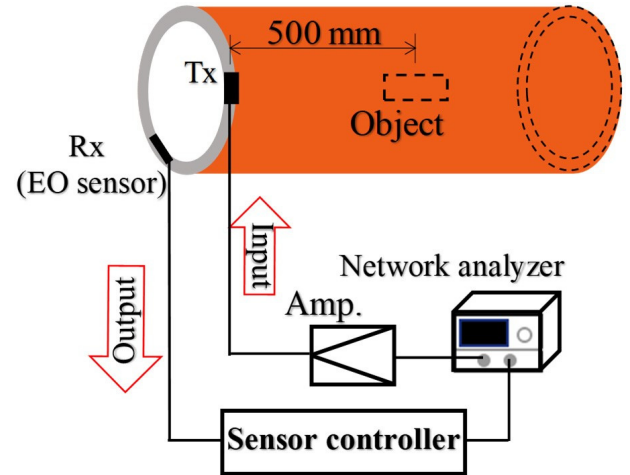


Fig. 3 Experimental set-up for the reflected microwave guide-mode signal using an EO sensor.

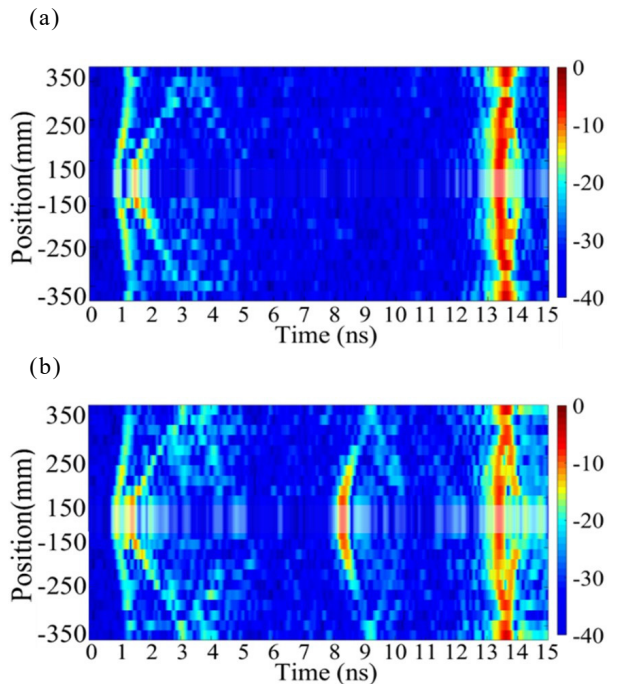


Fig. 4 Time domain responses of the reflected signals measured by use of the EO sensor.

(a) No object. (b) With an object (concrete block) at the center of the FRPM pipe.

4. むすび

EO センサを使用することにより、時間領域反射信号を高い分解能（～0.5 ns）と高い S/N 比（> 30 dB）で取得することができ、パイプライン診断のための鮮明な画像が得られた。これにより、FRPM 管を非破壊

かつ遠隔で行うことに利用できることがわかった。さらに、Radio-over-Fiber (RoF) 技術を用いて、励振用ダイポールアンテナにマイクロ波信号を供給すれば、光ファイバーリンクを用いた遠隔測定システムを構築することができる。光ファイバーの伝搬損失が非常に小さいので、長さ数 km を超える光ファイバーケーブルと RoF リンクを使用することができるので、埋設された長尺 FRPM パイプラインの遠隔検査に適していると考えている。

現在、この RoF リンクを使用した FRPM パイプの遠隔検査実験の準備を進めている。

文 献

- [1] E. Marfisi, C. J. Burgoyne, M. H. G. Amin, and L. D. Hall, "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 Con Fiber Crete Young Researcher Conference, June 2002, Corfu, Greece.
- [2] 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.
- [3] M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne, P. Cawley, "Defect detection in pipes using guided wave," *Ultrasonics*, **Vol. 36**, Issues 1-5, pp. 147-154, Feb. 1998.
- [4] S. Matsukawa, K. Yoshida, T. Okuda, M. Hazama, S. Kurokawa, and H. Murata, "Non-destructive inspection method for FRPM pipelines utilising time-domain responses of microwave guided-modes," *Electronics Letters*, **vol. 56**, no. 19, pp. 982-985, Sep. 2020.
- [5] K. Yoshida, S. Matsukawa, S. Kurokawa, T. Okuda, M. Hazama, and H. Murata, "Microwave Time-Domain Analysis for Non-Destructive Inspection of FRPM Pipelines Using Electro-Optic Sensor," *MWP 2020*, P.36, Nov. 2020, Matsue, Shimane, Japan.
- [6] S. Matsukawa, K. Yoshida, Y. Nishimura, T. Okuda, M. Hazama, S. Kurokawa, and H. Murata, "Time Domain Analysis of Microwave Signal Propagating along FRPM Pipe Walls and Application to Non-destructive Inspection," *EuMW 2019*, EuMC/EuRAD01-4, pp. 932-935, Oct. 2019.
- [7] S. Matsukawa, K. Yoshida, T. Okuda, M. Hazama, S. Kurokawa, and H. Murata, "Non-destructive Inspection for FRPM Pipeline Using Periodic Pattern of Microwave Guided-modes on Cylindrical Dielectric Waveguide," *Electronics Letters*, **vol. 57**, no. 24, pp.933-935, Nov. 2021.

電気光学センサシステムの低周波領域雑音解析

富永 麻衣[†] 山岸 茉由子[†] 品川 満[†] 勝山 純[‡] 松本 憲典[‡] 友定 伸浩[‡]

[†] 法政大学理工学研究科 〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

[‡] 横河電機株式会社マーケティング本部イノベーションセンター

〒180-8750 東京都武蔵野市中町 2-9-32

E-mail: [†] mai.tominaga.4b@stu.hosei.ac.jp, [‡] Jun.Katsuyama@yokogawa.com

あらまし 本論文では、電気光学 (EO) センサシステムの雑音解析について、実測およびシミュレーション結果に基づいて説明する。我々は、ジョーンズベクトルを用いて雑音を含む偏光シミュレータを開発した。実測では、レーザ光源の後のポラライザの有無で、レーザ偏波雑音の存在が実証されることを予想した。4 kHz より高帯域の実測結果の雑音特性は、シミュレーション結果と一致した。しかし、4 kHz 以下の雑音特性は、シミュレーション結果と一致しなかった。4 kHz 以下の雑音特性は、光強度のアンバランスが原因であることが分かった。

キーワード 雑音低減, ジョーンズベクトル, レーザ雑音, EO センサシステム, 差動検出, フーリエ変換

Low Frequency Noise Analysis of Electro-optic Sensor Systems

Mai TOMINAGA[†] Mayuko YAMAGISHI[†] Mitsuru SHINAGAWA[†]

Jun KATSUYAMA[‡] Yoshinori MATSUMOTO[‡] and Nobuhiro TOMOSADA[‡]

[†] Faculty of Science and Engineering, HOSEI University, 3-7-2, Kajino-cho, Koganei-shi,

Tokyo, 184-8584, Japan,

[‡] Innovation Center Marketing Headquarters, Yokogawa Electric Corporation 2-9-32,

Nakacho, Musashino-shi, Tokyo, 180-8750

E-mail: [†] mai.tominaga.4b@stu.hosei.ac.jp, [‡] Jun.Katsuyama@yokogawa.com

Abstract This paper describes the noise analysis of an electro-optic (EO) sensor system based on experimental and simulation results. We developed a polarization simulator with noises using the Jones vector. We expected that the existence of the laser polarization noise can be demonstrated by our experimental setup with and without the polarizer after the laser source. The noise characteristics of experimental results more than 4 kHz agreed with the simulation results. However, the noise characteristics less than 4 kHz did not agree with it. It was found that noise characteristics less than 4 kHz are caused by the light intensity unbalance.

Keywords Noise reduction, Jones vector, Laser noise, EO sensor system, Differential detection, Fast Fourier transform

1. はじめに

電気光学 (EO) センサシステム[1]は、レーザ光と EO 結晶を用いて電界を測定するシステムである。このシステムにより、大規模集積回路[2]、有機太陽電池デバイス[3]等の電界測定が可能になった。また EO センサシステムは人体通信にも応用されている[4]。図 1 は、被測定物の電界を測定するための EO センサシステムの構成を示したものである。EO センサシステムは、レーザ光とレシーバ雑音の影響を受ける。レシーバ雑音は、主にフォトダイオードのショット雑音と回路雑音があげられる。レーザ強度雑音については、従来研究[4][5]で既に検討されている。また差動検出法によってレーザ強度雑音は低減できるが、レシーバ雑音は低減

できないことが示されている。本研究では、レーザ強度雑音だけでなく、レーザ偏波雑音も含まれていると仮定した[6]。実測結果を分析することで、低周波帯のレーザ雑音の特性を調べた。まず、差動検出法を含む EO センサシステム[1-3]の構成について説明する。続いて、ジョーンズベクトルを用いた EO センサシステムの偏光シミュレータと、高速フーリエ変換(FFT)とフーザ図を用いたレーザ偏波雑音の解析について説明する。

最後に、レーザ偏波雑音を含んだレーザ雑音の特性に関する考察について述べる。

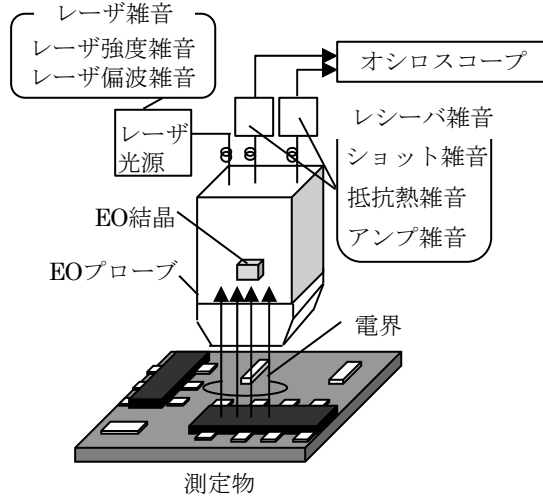


図 1. 電気光学センサシステムの構成と発生雑音

2. 電気光学センサシステム

図 2 に、差動検出を用いた EO センサシステムの構成を示す。

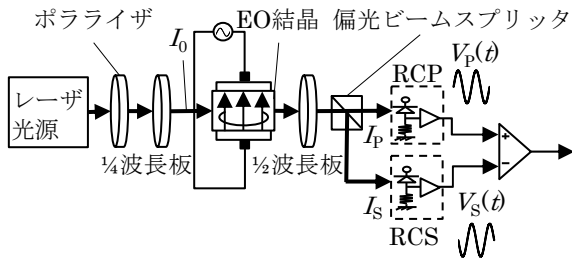


図 2. 差動検出を用いた EO センサシステムの構成

図 2 より EO センサシステムは様々な素子によって構成されている。レーザ光の偏光変化の流れについて記述する。レーザ光はポラライザを介して直線偏光に、1/4 波長板を介して円偏光になる。EO 結晶の複屈折率は、印加された電界の大きさによって変化するため、楕円偏光に変換される。偏光ビームスプリッタ通過後のレーザ光は P 波と S 波に分かれる。\$I_0\$ は EO 結晶への入射光パワーを示している。また \$I_P\$ と \$I_S\$ は P 波と S 波の光パワーである。レーザ光はそれぞれ P 偏光受光回路 (RCP) と S 偏光受光回路 (RCS) で受光される。RCP と RCS は、フォトダイオード、増幅器、負荷抵抗で構成されている。P 偏光と S 偏光の光は、フォトダイオードと負荷抵抗によって電圧に変換される。その後 P 波と S 波の電圧である \$V_P(t)\$ と \$V_S(t)\$ の差動バランスを調整し、差動検出法によって EO センサシステムの感度を向上させている。

図 3 は、EO センサシステムが透過する光の特性を示したものである[7]。ここで、P 偏光した光のパワーを \$I_P\$、S 偏光した光のパワーを \$I_S\$ とする。また検出信

号強度 \$T_P\$ と \$T_S\$ を(1)式と(2)式に示す。

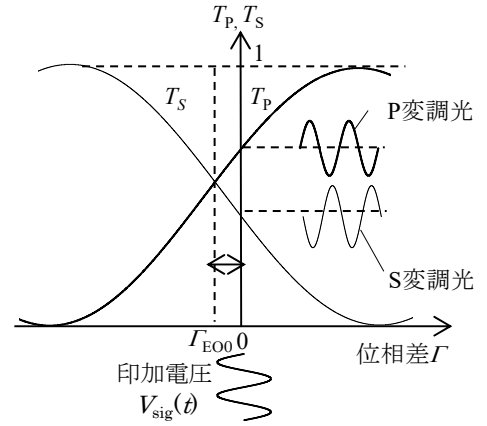


図 3. 光学的バイアスオフセットと結晶印加電圧

$$T_P = \frac{I_P}{I_0} = \frac{1}{2} [1 + \sin(\Gamma_{EO} + \Gamma_{EO0})] \quad (1)$$

$$T_S = \frac{I_S}{I_0} = \frac{1}{2} [1 - \sin(\Gamma_{EO} + \Gamma_{EO0})] \quad (2)$$

\$\Gamma_{EO}\$ は EO 結晶で発生する位相差、\$\Gamma_{EO0}\$ は波長板により発生する光バイアスオフセットを示している。位相差 \$\Gamma_{EO}\$ を(3)式に示す。

$$\Gamma_{EO} = \frac{\pi V_{sig}(t)}{V_\pi} \quad (3)$$

\$V_\pi\$ は半波長電圧、\$V_{sig}(t)\$ は EO 結晶に印加された電圧である。\$V_{sig}(t)\$ を(4)式に示す。

$$V_{sig}(t) = V_0 \sin(2\pi f_{sig} t) \quad (4)$$

\$V_0\$ と \$f_{sig}\$ はそれぞれ印加電圧の振幅と周波数、\$t\$ は時間である。P 変調光と S 変調光の位相差は \$\pi\$ に近似される。したがって EO 結晶に印加された電圧は差動検出することで増幅可能である。

3. シミュレーション

3.1. シミュレーション方法

本研究ではジョーンズベクトル[8][9]を用いて偏光シミュレータを開発した。部分直線偏光子のジョーンズマトリクス \$P_{p1, p2}\$ を(5)式に示す。

$$P_{p1, p2} = \begin{pmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

\$p_1, p_2\$ は透過係数である。方位角 \$T_\theta\$ は(6)式のように表される。

$$T_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

\$\Gamma\$ の位相差を持つ位相子 \$R_\Gamma\$ を(7)式に示す。

$$R_\Gamma = \begin{pmatrix} \exp(i\Gamma/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\Gamma/2) \end{pmatrix} \quad (7)$$

入力光のジョーンズベクトル J_{in} を(8)式に示す.

$$J_{in} = \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

E_0 は電界の振幅である. 出力光 J_{out} を(9)式に示す.

$$J_{out} = \begin{pmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{pmatrix} = P_{1,1} T_{\pi/8} R_{\pi} T_{-\pi/8} R_{\Gamma_{EO}} T_{\pi/4} R_{\pi/2} T_{-\pi/4} P_{1,0} J_{in} \quad (9)$$

EO センサシステムの透過光にレーザ強度雑音を加えたときの特性を図4に示す.

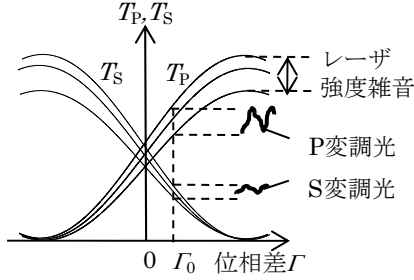


図4. レーザ強度雑音付加時の透過特性

P 変調光と S 変調光の雑音波形の位相差は, 0 rad に近似出来るため, 差動検出で低減することが可能である. 図5にレーザ偏波雑音を加えたときの特性を示す.

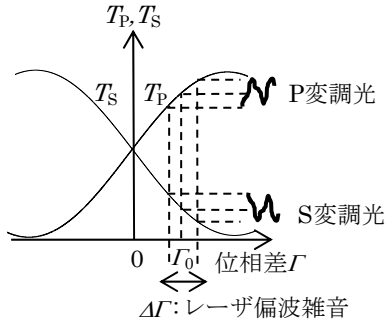


図5. レーザ偏波雑音付加時の透過特性

Γ_0 は光バイアスオフセットであり, レーザ偏波雑音 $\Delta\Gamma$ が生じている. レーザ偏波雑音によって変調された P 波-S 波間の位相差は π rad であるためレーザ偏波雑音を差動検出で低減出来ない. レーザ強度雑音が含まれた入力光のジョーンズベクトル J_{in} を(10)式に示す.

$$J_{in} = \begin{pmatrix} E_0 + E_{LD}^N \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

E_{LD}^N はレーザ強度雑音を示す. 私たちはレーザ偏波雑音を, 角度偏差と偏波偏差という2つの要素から構成されていると考えている. 図6は, 角度偏差 $\Delta\phi_N$ を, ポラライザを介してレーザ強度雑音 ΔE_N に変換する模式図である.

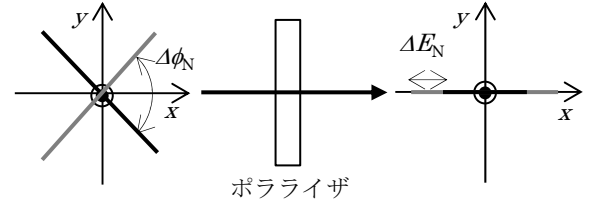


図6. 角度偏差のレーザ強度雑音変換

図7は, 偏波偏差 Γ_{LD}^N がポラライザによってレーザ強度雑音 ΔE_N に変換される模式図である.

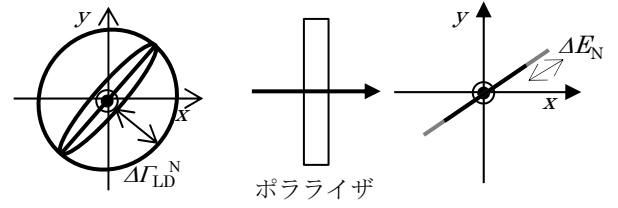


図7. 偏波偏差のレーザ強度雑音変換

今回はレーザ偏波雑音として偏波偏差のみをシミュレーションした. レーザ強度雑音と偏波偏差を含んだ入力光のジョーンズベクトル J_{in} を(11)式に示す.

$$J_{in} / E_0 = R_{\Gamma_{LB}} \left(1 + \frac{E_{LD}^N}{E_0} \right) \quad (11)$$

J_{in} は E_0 で正規化されている.

3.2. シミュレーション結果

P 偏光と S 偏光の解析は V_{sig} を 0 V, Γ_{EO0} を 0 rad に設定してフーリエ変換を行った. 負荷抵抗は 1 Ω, P 偏光と S 偏光のゲインアンプのゲインはともに 0 dB であった. レーザ強度雑音を(12)式に示す.

$$E_{LD}^N / E_0 = \alpha \sin(2\pi f_{LD}^N t) \quad (12)$$

f_{LD}^N はレーザ強度雑音の周波数, α は強度雑音量である. また, レーザ偏波雑音を(13)式に示す.

$$\Gamma_{LD}^N = \beta \sin(2\pi f_{PO}^N t) \quad (13)$$

f_{PO}^N はレーザ偏波雑音の周波数, β はレーザ偏波雑音量である. 図8にレーザ強度雑音付加時の(a)ポラライザを使用した場合と(b)使用しない場合の RCP の出力電圧のスペクトルを示す. $\alpha=0.002$, $\beta=0$, $f_{LD}^N=10$ kHz に設定した.

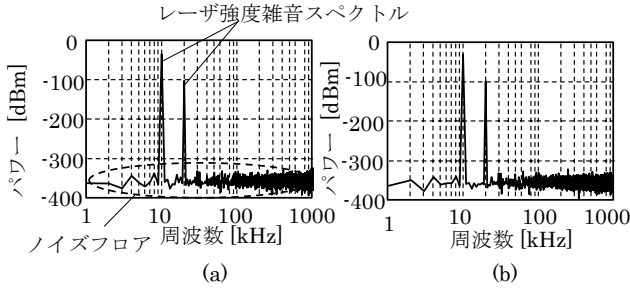


図 8. レーザ強度雑音のスペクトル
(a)ポラライザあり,(b)ポラライザなし

図 8 よりポラライザの有無によって雑音スペクトル
の特性に変化はない． P 偏光-S 偏光間のレーザ強度雑
音の位相差を表 1 に示す．

表 1. P 偏光-S 偏光間のレーザ強度雑音の位相差

	位相差 [rad]	
	f_{LD}^N	$2f_{LD}^N$
ポラライザ あり	0	0
ポラライザ なし	0	0

P 偏光と S 偏光の位相差は，ポラライザの有無に関
わらず 0 rad となった． 差動検出によってレーザ強度
雑音を低減可能である． 図 9 は，レーザ偏波雑音付加
時の(a)ポラライザを使用した場合と(b)使用しない場
合の RCP の出力電圧のスペクトルを示す． $\alpha=0, \beta=0.02$,
 $f_{PO}^N=10$ kHz に設定した．

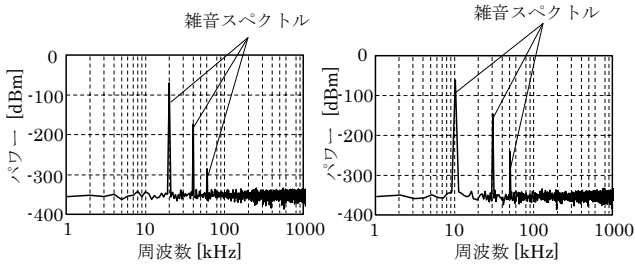


図 9. レーザ偏波雑音のスペクトル
(a)ポラライザあり (b)ポラライザなし

表 2 は， P 偏光-S 偏光間のレーザ偏波雑音の位相差
である． ポラライザありの場合， 偶数次の高調波が存
在する． P 偏光と S 偏光の位相差は 0 rad であり， 差
動検出により低減することが出来る． ポラライザなし
のスペクトルは， 奇数次の高調波が存在する． P 偏光
と S 偏光の位相差は π rad であり， 差動検出による低減
は不可能である． ポラライザの有無を比較することで
レーザ偏波雑音を確認可能であると考えている．

表 2. P 偏光-S 偏光間のレーザ偏波雑音の位相差

	位相差 [rad]					
	f_{PO}^N	$2f_{PO}^N$	$3f_{PO}^N$	$4f_{PO}^N$	$5f_{PO}^N$	$6f_{PO}^N$
ポラライザ あり		0		0		0
ポラライザ なし	π		π		π	

3.3. フェーザを用いた差動検出法

RCP と RCS の出力電圧をそれぞれ $V_P(t)$ と $V_S(t)$ とす
る． $V_P(t)$ と $V_S(t)$ は， FFT により A_n と B_n のフェーザ図
[10,11]を介して変換される． A_n と B_n ($n = 0 \sim N-1$) を
(14)式と(15)式に示す．

$$A_n = A_{n0}(\cos\theta_{An} + j\sin\theta_{An}) \quad (14)$$

$$B_n = B_{n0}(\cos\theta_{Bn} + j\sin\theta_{Bn}) \quad (15)$$

j は虚数単位, A_{n0} と θ_{An} はそれぞれ A_n の振幅と位相，
 B_{n0} と θ_{Bn} はそれぞれ B_n の振幅と位相を示す． 図 10 に，
フェーザ図による差動検出法を示す．

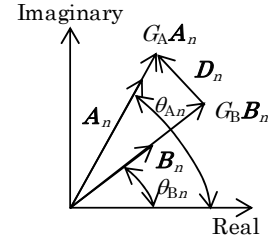


図 10. フェーザを用いた差動検出法

差動検出結果 D_n を(16)式に示す．

$$\begin{aligned} D_n &= G_A A_n - G_B B_n \\ &= (G_A A_{n0} \cos\theta_{An} - G_B B_{n0} \cos\theta_{Bn}) \\ &\quad + j(G_A A_{n0} \sin\theta_{An} - G_B B_{n0} \sin\theta_{Bn}) \end{aligned} \quad (16)$$

G_A と G_B は，それぞれ P 偏光と S 偏光の可変ゲイン
アンプのゲインである． ゲイン比 γ を(17)式に示す．

$$\gamma = \frac{G_B}{G_A} \quad (17)$$

D_n のパワー P_n を(18)式に示す．

$$P_n = [\text{Re}(D_n)]^2 + [\text{Im}(D_n)]^2 \quad (18)$$

f_1 から f_2 までのパワースペクトルの合計 $SP_T(f_1, f_2)$
を(19)式に示す．

$$SP_T(f_1, f_2) = \sum_{i=n_1}^{n_2} P_i \quad (19)$$

$f_1 = n_1 f_0$, $f_2 = n_2 f_0$, f_0 は $V_P(t)$ と $V_S(t)$ の基本周波数である．図 11 に差動検出の概略図を示す．

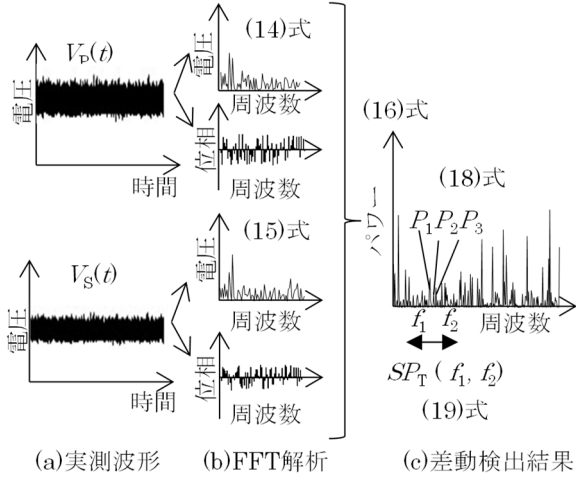


図 11. 差動検出の概略図

図 12 に(a) $V_P(t)=V_S(t)$ のときの同相雑音と(b) 0.5～1.5kHz の周波数範囲での SP_T の γ への依存性を示す．

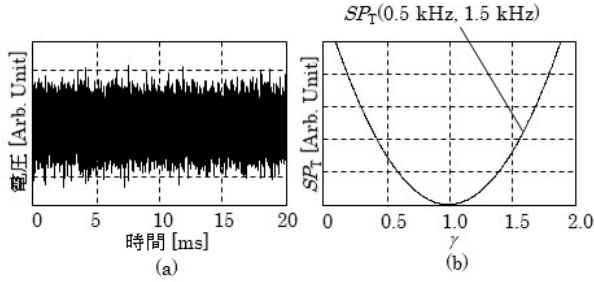


図 12. 同相雑音(a) $V_P(t)=V_S(t)$, (b) 0.5～1.5kHz の周波数領域における SP_T の γ 依存性

図 13 に(a) $V_P(t)$ と(b) $V_S(t)$ が異なる場合の(c) 0.5～1.5kHz の周波数範囲での SP_T の γ への依存性を示す．

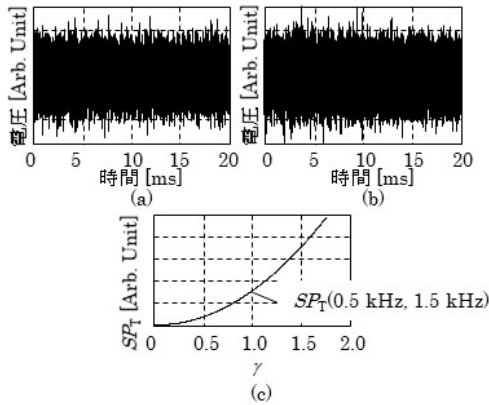


図 13. 差動検出結果(a) $V_P(t)$, (b) $V_S(t)$, (c) 0.5～1.5kHz の周波数領域における SP_T の γ 依存性

図 12(b)より SP_T は γ が 1.0 のとき極小値を持つ．図 13(c)より SP_T が単調に増加し，極小値を持たないことを示している．図 12 と図 13 より SP_T の γ 依存性を使用してレーザの雑音特性を調べることが可能である．

4. 考察

図 14 は，レーザ雑音を測定するために使用された実測装置のブロック図を示している．レーザ光源として 1310 nm DFB レーザダイオードを使用した．

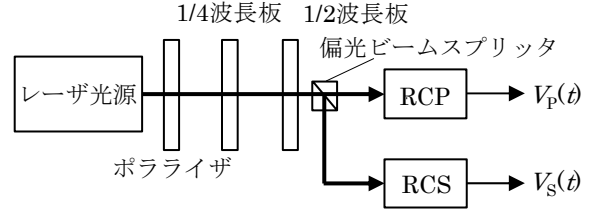


図 14. 実測環境

レーザ雑音について検討する．フォトダイオードによって生成される単位帯域幅あたりのショット雑音 V_{sh} を(20)式に示す． q は電気素量， I_{PD} は光電流， R は PD の負荷抵抗である．

$$V_{sh} = \sqrt{2qI_{PD}} \times R \quad (20)$$

V_{sh} は $8.76 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $I_{PD} = 0.24 \text{ mA}$, $R = 1\text{k}\Omega$)である．負荷抵抗によって発生する単位帯域幅あたりの熱雑音 V_{th} を(21)式に示す．

$$V_{th} = \sqrt{4k_B T R} \quad (21)$$

k_B はボルツマン定数， T は絶対温度である． V_{th} は $3.88 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $T = 273\text{K}$)である．単位帯域幅あたりの増幅器の入力電圧雑音 V_n を(22)式に示す．

$$V_n = \sqrt{(e_n^2 + (R \times i_n)^2)} \quad (22)$$

e_n は等価入力電圧雑音， i_n は等価入力電流雑音である．オペアンプ (AD8061, Analog Devices) のデータシートから V_n は $8.58 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($e_n = 8.50 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, $i_n = 1.20 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$)である．単位帯域幅あたりの総電圧雑音 V_{noise} を(23)式に示す．

$$V_{noise} = \sqrt{V_{sh}^2 + V_{th}^2 + V_n^2} \quad (23)$$

(20)(21)(22)式より， V_{noise} は $12.4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ である．実測に基づくレーザ雑音は $161 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった．よってレーザ雑音が支配的であると考えられる．図 15 に本研究で使用した受光回路図を示す．

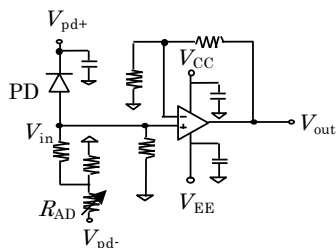


図 15. 受光回路図

R_{AD} を調整することにより V_{in} の DC 成分を抑制することが可能である．したがって低周波数領域を差動検出可能である． $V_P(t)$ および $V_S(t)$ の雑音スペクトルを図 16 と図 17 に示す．

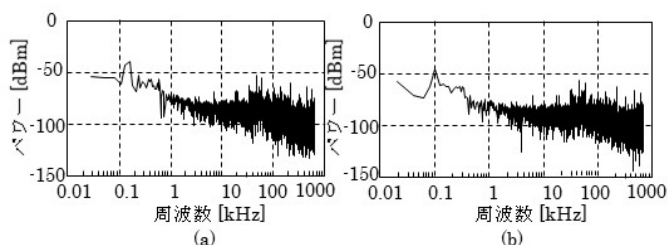


図 16. 測定波形の雑音スペクトル(ポラライザあり)
(a)P 波, (b)S 波

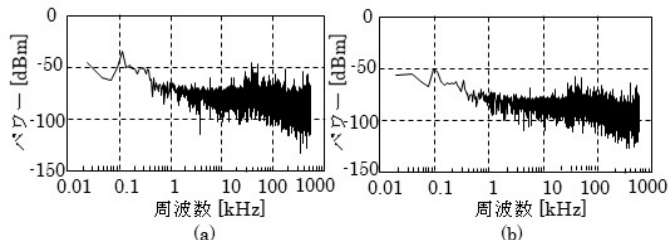


図 17. 測定波形の雑音スペクトル(ポラライザなし)
(a)P 波, (b)S 波

図 16 と図 17 よりポラライザの有無でスペクトルに変化がない．ポラライザの有無で比較した SP_T の γ 依存性を図 18 に示す．

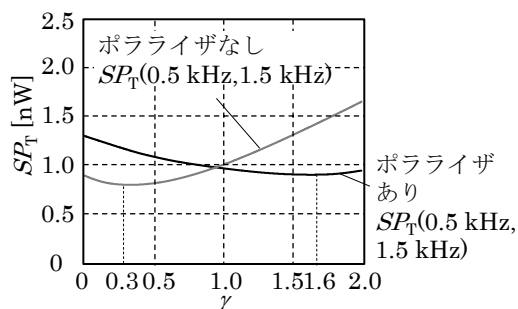


図 18. ポラライザの有無による SP_T と γ の関係性
(0.5 kHz~1.5 kHz)

ポラライザを使用する場合， SP_T が極小になる γ は 1.6 になる．ポラライザを使用しない場合は， SP_T が極小になる γ は 0.3 になる．したがって SP_T の γ 依存性は，ポラライザの有無によって異なる．この違いは偏波雑音の量が原因であると考えられる．中心周波数 f_c を図 19 に示す．

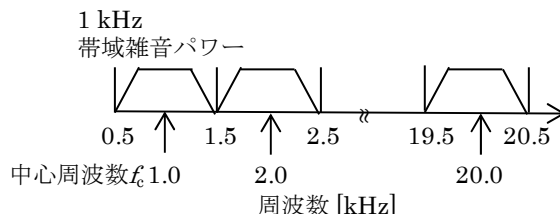


図 19. 中心周波数

1 kHz 間隔で 1~20 kHz の範囲の γ_{min} に対する f_c 依存性を図 20 に示す．

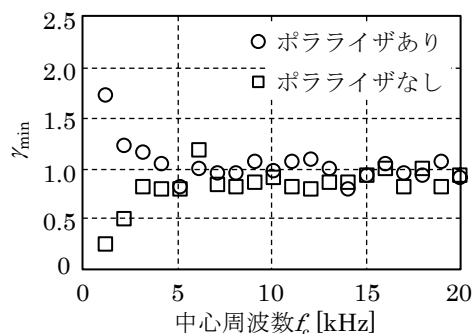


図 20. γ_{min} の中心周波数 f_c 依存性(1 kHz~20 kHz)

γ_{min} は， SP_T が極小になるときに対応する γ の値である．図 20 より 4 kHz 以下のとき，ポラライザの有無によって生じた差異が大きくなる．光強度比 I_P / I_S の中心周波数への依存性を図 21 に示す．

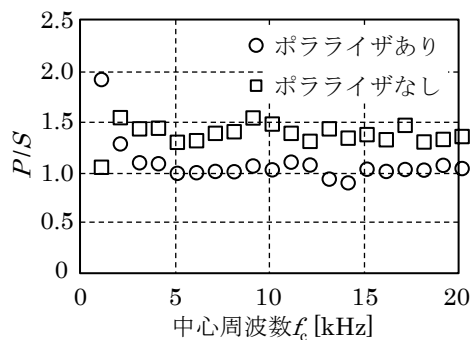


図 21. 光量比 P/S の中心周波数 f_c 依存性

図 21 の特性は図 20 の特性と一致している．図 20 の

特性は光強度比 I_P / I_S に起因することが分かった．図 22 はレーザ雑音をガウス雑音として定義したシミュレーション結果である．雑音はボックスミュラー法で作成した．雑音 M を(24)式に示す．

$$M = \sqrt{-2\log X} \sin 2\pi Y \quad (24)$$

ここで， X と Y は $[0,1]$ のランダムな値である．ガウス雑音としてのレーザ強度雑音 $E_{LD}^N(t)$ を(25)式に示す．

$$E_{LD}^N(t)/E_0 = M_1 \sigma_1 + \mu_1 \quad (25)$$

ガウス雑音としてのレーザ偏波雑音 $I_{LD}^N(t)$ を(26)式に示す．

$$I_{LD}^N(t) = M_2 \sigma_2 + \mu_2 \quad (26)$$

M_1 と M_2 は(24)式に基づいて生成される． σ_1 と σ_2 はレーザ雑音の標準偏差である． μ_1 と μ_2 はレーザ雑音の平均値である．パラメータを σ_1 と σ_2 を 0.02， μ_1 と μ_2 を 0 に設定する．図 22 に $\gamma_{\min}$ の P/S 依存性を示す．

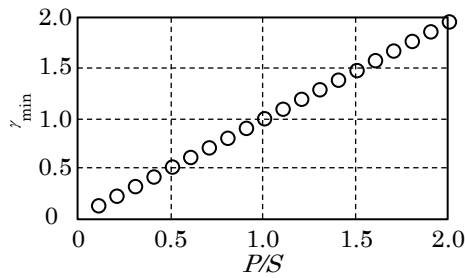


図 22. $\gamma_{\min}$ の P/S 依存性

図 22 より $\gamma_{\min}$ は P/S の増加に比例して増加することから，図 21 の特性が確認された．図 23 はレーザ雑音とレシーバ雑音を考慮したときの，中心周波数 f_c と $\gamma_{\min}$ の関係性を示したものである．RCP と RCS のレシーバ雑音は，それぞれ $V_{PCN}(t)$ と $V_{SCN}(t)$ とし，ガウス雑音として定義する． $V_{PCN}(t)$ と $V_{SCN}(t)$ を(27)式と(28)式に示す．

$$V_{PCN}(t) = M_3 \sigma_3 + \mu_3 \quad (27)$$

$$V_{SCN}(t) = M_4 \sigma_4 + \mu_4 \quad (28)$$

M_3 と M_4 は(24)式に基づいて生成される． σ_3 と σ_4 はレシーバ雑音の標準偏差である． μ_3 と μ_4 はレシーバ雑音の平均である． $V_{PCN}(t)$ と $V_{SCN}(t)$ は，(9)式の J_{out} によって得られる電圧信号に足し合わされる． σ_3 と σ_4 を 0.002 に設定する． μ_3 と μ_4 は 0 である．

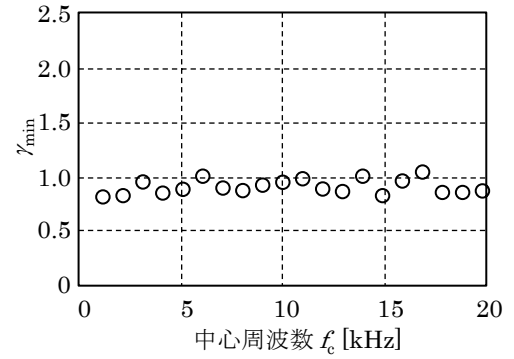


図 23. f_c に対する $\gamma_{\min}$ 依存性
(レーザ雑音とレシーバ雑音付加)

図 20 の特性は，4 kHz より大きい周波数帯で図 23 の特性と一致している．4 kHz より高い周波数帯域の雑音特性はレシーバ雑音によって引き起こされていることが分かった．

5. 結論

実測結果とジョーンズベクトルを用いたシミュレーションに基づいて，EO センサシステムの雑音解析について説明した．フェーザ図を使用して差動バランスを調整する方法を提案した．実測結果の特性は，4 kHz より高い周波数でのシミュレーション結果の特性と一致している．4 kHz 以下の雑音特性はシミュレーション結果と一致しなかった．4 kHz 以下の雑音特性は，システム内の P 偏光と S 偏光の間の光強度のアンバランスが原因であることが分かった．

文 献

- [1] J.A.Valdmanis, G.Mourou, and C.W.Gabel, "Two-layer organic photovoltaic cell," Appl. Phys. Lett. 48, 183 (1986)
- [2] M. Shinagawa and T. Nagatsuma, "An automated electro-optic probing system for ultra-high-speed IC's," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement vol.43, no.6, pp.843-847, Dec. 1994.
- [3] J. Katsuyama, K. Matsumoto, R. Sugiyama, S. Hasegawa, M. Shinagawa, and Y. Yanagisawa "Failure diagnosis of organic photovoltaic using electro-optic probe," Optical Review, vol.21, no.5, pp.621-627, Oct.2014.
- [4] M. Shinagawa, A. Sasaki, A. Furuya, H. Morimura, K. Aihara, "Compact electro-optic sensor module for intra-body communication using optical pickup technology," Jpn. J. Appl. Phys. 52, 09LA03 (2013)
- [5] M. Basharat, M. Ding, Y. Li, H. Cai, and J. Fang "Noise reduction and signal to noise ratio improvement in magneto-optical polarization rotation measurement," Chin. Opt. Lett. 16, 081201 (2018)
- [6] T. Nomura, M. Kishida, N. Hayashi, K. Iwasaki, H. Umezawa, "Carrier-to-noise ratio in magneto-optic transfer readout using magnetic garnet film," J. Magn.

Soc. Jpn. 33, 477 (2009)

- [7] M. Yada, Y. Ishihara, T. Naoe, M. Shinagawa, H. Sugino, H. Tanaka, J. Katsuyama, and Y. Matsumoto “Noise Reduction Method for Electro-Optic Measurement System Using Variable Gain Amplifier,” TENCON 2017–2017-IEEE Region 10 Conference, pp.1969–1972 (2017)
- [8] A. Sasaki, A. Furuya, A. Hirata, H. Morimura and J. Kodate, “Method for systematically designing polarization optics to maximize sensitivity of electrooptic sensors,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.56, no.95, pp.09NB01.1-6 , Sep.2017.
- [9] A. Sasaki and M. Shinagawa, “Polarization analysis of light propagating in electro-optic crystals with static birefringence and its application to sensor design,” Jpn. J. Appl. Phys. 47, 918 (2008)
- [10] T. Ogawa, R. Okada, M. Yada, M. Shinagawa, Y. Matsumoto, J. Katsuyama, H. Tanaka and Y. Tanaka, “Differential Detection for Reducing Laser Noise in Electro-Optic Sensor System,” 2018 12th International Conference on Sensing Technology, pp240-244, Limerick, Ireland, Dec.2018.
- [11] M. Okajima, T. Ogawa, M. Shinagawa, Y. Matsumoto, J. Katsuyama and Y. Matsumoto, “ Low-Frequency Effectiveness of Differential Detection for Electro-optic Sensor System,” TENCON IEEE Region 10 Conference (2019)

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	大西 輝夫	情報通信研究機構
副委員長	佐々木 愛一郎	近畿大学
	日景 隆	北海道大学
幹事	土屋 明久	神奈川県立産業技術総合研究所
	勝山 純	横河電機株式会社
幹事補佐	清水 悠斗	情報通信研究機構
専門委員	石井 望	新潟大学
	石山 和志	東北大学
	市川 潤一郎	住友大阪セメント株式会社
	一條 淳	株式会社精工技研
	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
	笹川 清隆	奈良先端科学技術大学院大学
	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	株式会社レスターコミュニケーションズ
	田上 周路	高知工科大学
	田島 公博	NTT アドバンステクノロジー株式会社
	羽賀 望	群馬大学
	東山 潤司	株式会社 NTT ドコモ
	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	黒川 悟	産業技術総合研究所
	陳 強	東北大学
	水野 麻弥	情報通信研究機構
	村田 博司	三重大学

☆ 技術報告書の販売

PEM 研究会では、技術報告書を販売しております。

技術報告書(サンプル) → https://www.ieice.org/~pem/link/TR_sample/TR_sample.pdf

ご購入を希望される方は幹事団アドレスまでご連絡ください。

幹事団アドレス: pem-info@mail.ieice.org

☆ 協賛展示・広告の募集

PEM 研究会では、協賛展示・広告を募集しております。

ご協賛頂ける場合には、以下のフォーマットに必要事項をご記入の上、幹事団宛てにご送付願います。

フォーマット → https://www.ieice.org/~pem/link/sponsorship/sponsorship_format.docx

幹事団アドレス: pem-info@mail.ieice.org

☆ Facebook “Pem 研究会（光で電波を測る）”

Facebook に PEM 研究会のページをつくりました。PEM 研究会の活動紹介や光応用電磁界計測の情報を発信しています。

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」を開設しています。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しています。

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/>

