

PEM

第2回光応用電磁界計測研究会

— 光応用電磁界計測と環境電磁工学 —

PEM2012-06～10

2013年 1月11日(金)

於： 長崎大学 文教キャンパス 工学部
サイエンス&テクノラボ2F セミナー室2

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

併 催： 電子情報通信学会
環境電磁工学研究会

協 賛： PTT株式会社

第2回 光応用電磁界計測研究会プログラム

テーマ：「 光応用電磁界計測と環境電磁工学 」

2013年 1月 10日 (木)

10:00-17:15 環境電磁工学研究会

2013年 1月 11日 (金)

9:00- 9:05 委員長開会あいさつ 陳 強 (東北大)

[セッション PEM-1]

座長：村田博司 (阪大)

9:05-10:05 PEM2012-06 [特別講演] 光電界センサを利用したイメージングレーダ
佐藤源之 (東北大)

10:05-10:30 PEM2012-07 [一般講演] 標準電界強度の生成手法と不確かさ
森岡健浩 (産総研)

休憩 (10:30-10:40)

[セッション PEM-2]

座長：都甲浩芳 (NTT)

10:40-11:05 PEM2012-08 [一般講演] 光給電バイコニカルアンテナを用いた1GHz超放射妨害波測定
の試験所間比較
飴谷充隆 (産総研)

11:05-11:30 PEM2012-09 [一般講演] 超短パルスレーザー生成プラズマを用いた大気中における
電場の遠隔計測技術
藤井 隆 (電中研)

11:30-11:55 PEM2012-10 [一般講演] LD実装電界プローブを用いたTDS計測
染野 薫 (PTT)

昼食休憩 (11:55~12:55)

12:55-17:15 環境電磁工学研究会

場 所： 長崎大学 文教キャンパス工学部 サイエンス&テクノラボ 2F セミナー室 2

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/>)

併 催： 電子情報通信学会 環境電磁工学研究会

協 賛： PTT 株式会社

本予稿集に掲載された論文等の著作権は著者に帰属します。
本時限研専ならびに研究会は（財）テレコムエンジニアリングセンター
公益的調査研究助成の支援を受けています。

発行年月日：2013年 1月 10日

発行所：（社）電子情報通信学会 通信ソサイエティ

光応用電磁界計測(PEM)時限研究専門委員会

光電界センサを利用したイメージングレーダ

佐藤 源之[†]

東北大学東北アジア研究センター 〒980-8576 仙台市青葉区川内 41

E-mail: sato@cneas.tohoku.ac.jp

あらまし 我々は光電界センサを利用した電磁界計測手法，特にイメージングレーダへの応用について研究を進めてきた．本報告ではこれまでの研究のうち，ボアホールレーダを利用した3次元環境計測への利用とバイスタティックレーダによる地中埋設物検知への利用について説明する．ボアホールレーダでは近接するアレイアンテナの相互干渉や，近接した金属体によるアンテナパターンの歪を防ぐこと，また電力供給を行わずに計測ができる利点がある．50m程度の深さのボアホールにおいて3次的に地下水分布を計測できた例を示す．一方，バイスタティックレーダでは，受信アンテナに光電界センサを利用することで，小型・軽量の装置による計測ができることを示し，また地雷を模擬した砂に埋設した10cm程度の大きさの物体を合成開口処理によって可視化できることを示した．

キーワード 光電界センサ，イメージングレーダ，ボアホールレーダ，バイスタティックレーダ，地中レーダ

Optical Electric Field Sensors Applied to Imaging Radar

Motoyuki SATO[†]

Center for Northeast Asia Studies, Tohoku University 41 Kawauchi, Sendai 980-8576 Japan

E-mail: Sato@cneas.tohoku.ac.jp

Abstract We have investigated to use the optical electric field sensor for radar imaging. In this report, we introduce the examples for 3-dimensional environment survey by borehole radar and subsurface sensing by bistatic radar. Mutual coupling between array antenna elements and effect of metallic objects near the antenna can be avoided by using the optical electric field sensors. It also has an advantage in the no need for power supply for the use in a borehole. We demonstrate that our radar system can image the 3-dimensional distribution of ground water around the borehole up to 50m. Then we demonstrate that by using the optical electric field sensor, we can make small bistatic radar systems for detection of buried objects. We show examples of imaging of buried 10cm object in sand by this system.

Keyword Optical electric field sensor, Imaging radar, Borehole radar, Bistatic radar, Ground Penetrating Radar

1. はじめに

光電界センサは無給電で可動し，センサ自体が小型で金属部材が少ない，センサへの接続に金属を使う必要がないという特徴がある．加えて，極めて広帯域なシステムを入手可能である．また受信光強度の送信電力へのフィードバック機能により，非常に安定した計測が可能となっている．こうした特徴は，レーダを利用したイメージングに重要である．我々の研究グループではレーダを利用した各種環境計測技術を開発しているが，その中でも特に地中レーダ(Ground Penetrating Radar: GPR)へ利用することで，多くの特長が発揮できる．

2. ボアホールレーダ

ボアホールレーダは直径10cm程度の掘削したボアホールに耐水性ゾンデに収納したレーダー装置を降下させ，ボアホール周囲の地下き裂の分布計測に用いられる．我々はアンテナをボアホールの周方向にアレイ配置することで

指向性を持たせ、地下水の流路である地下き裂を 3 次元的に可視化するシステム開発を行ってきた[1]-[6]。近接したアレイアンテナ素子の相互結合は指向性合成に悪影響を及ぼすが、光電界センサを利用することでアンテナ素子以外の金属部材を減らすことができ、理想に近い指向性を得ることができた。また、深度 50m 以上のボアホールにおける計測では、電源供給に金属製ケーブルを利用することが一般的であるが、アンテナに近接した金属ケーブルもアンテナ指向性を著しく歪める原因となる。光電界センサの利用でこの問題も解決できた。

我々は試作した直径 9cm, 長さ 4m の指向性ボアホールレーダを利用し、地下き裂を 3 次元的に可視化できることを示した。地下き裂を通じて地下水流動が起こるが、地下利用において、地下水計測を行う手法として、ボアホールレーダがきわめて有効なことを示した。

3. バイスタティックレーダ

地中レーダは埋設物検知に広く利用されている。我々は送信機を受信機を個別に位置させるバイスタティックレーダを利用した埋設物検知レーダを開発している[7,8]。我々は、現在カンボジアにおいて地中レーダによる人道的地雷検知を実践的に行っているが、次世代の地雷検知用レーダとして、バイスタティックレーダが有効であると考えている。ここでは送信アンテナを固定し、埋設物を検知する領域へ電波を照射する。受信アンテナに光電界センサを利用し、アンテナ素子と光電界センサを結合した小型受信機のみを計測対象領域の上で走査を行う。計測したデータは合成開口処理を行うことで、地中の 3 次元的可視化を行う。本システムでは、受信機は地中からの微弱な反射波を捉えなければならないが、送信アンテナからの電磁界が遥かに強く、またほぼ同時刻に到来するため、2つの波の分離が難しい。まず光電界センサを利用することで、送信波がアンテナ自身によって散乱されることを最小限に抑えることができる。また小型センサは地雷が埋まっている地面で走査する場合、小型であるので危険性が少ない。我々は、送信波と反射波の到来方向の違いを利用し、空間フィルタ(F-K フィルタ)を利用することで2波の分離が行え、埋設物のイメージングが可能であることを実験的に示した。

3. まとめ

光電界センサがもつ数々の特長が地中レーダへの利用で活かされた例を示した。

謝辞

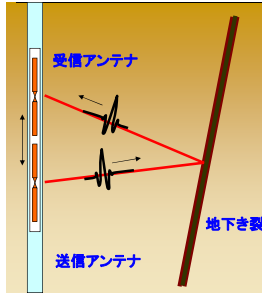
本稿の内容は佐藤研究室卒業生高山卓也君、林直樹君の研究の成果によるところが大きい。ここに両名へ感謝の意を表する。

文献

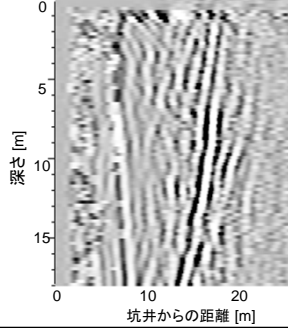
- [1] T.Takayama and M. Sato, "A New DoA Estimation Algorithm for Directional Borehole Radar", 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 19-22, 2006, Columbus, Ohio, USA
- [2] T.Takayama and M. Sato, "Analysis of Directional Borehole Radar Measurement Data," 4th International Symposium on Ground Penetrating Radar, Naples, Italy, June 27-29, 2007
- [3] T.Takayama and M.Sato, "A Field Measurement with an Array-type Directional Borehole Radar System, " The 9th Workshop on Subsurface Electromagnetic Measurement, 25th and 26th Oct 2007
- [4] 高山卓也, 佐藤源之: 共振周波数可変型ダイポールアンテナアレイによる指向性ボアホールレーダの広帯域化, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2008-81, 37-42 (2008)
- [5] M.Sato and T. Takayama, "A Novel Directional Borehole Radar System Using Optical Electric Field Sensors", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 45, Issue 8, pp.2529 - 2535, Aug.2007.
- [6] T.Takayama and M. Sato, "A Novel Direction-Finding Algorithm for Directional Borehole Radar", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 45, Issue 8, pp.2520 - 2528, Aug 2007.
- [7] 林 直樹, 佐藤 源之, "光電界センサ用アンテナ素子の最適化によるレーダイメージの分解能の向上", 信学論 Vol.J91-B, No.3, pp.281-290, Mar.2008.
- [8] Naoki Hayashi, and Motoyuki Sato, "F-k filter designs to suppress direct wave for bistatic ground penetrating radar," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.48, no.3, pp.1433 - 1444, Mar. 2010.

ボアホールレーダとは

シングルホール計測



二次元レーダ画像

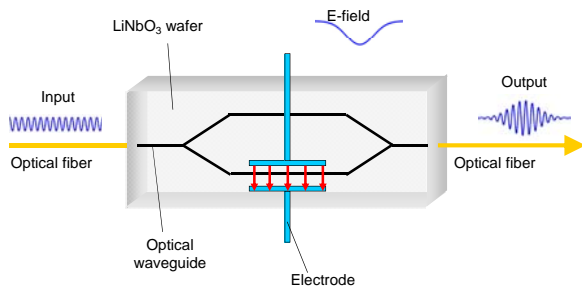


Optical Electric Field Sensor

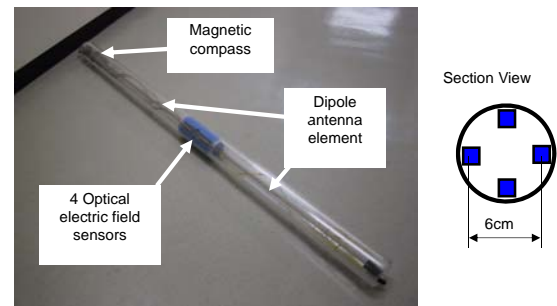


- Small size (1cmx1cmx10cm)
- No need for Electric power supply at the receiving point
- Optical transmission
- Include less metal parts

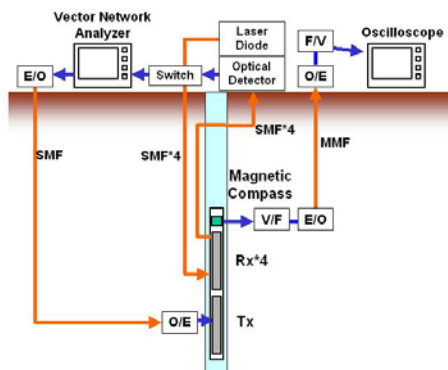
Optical Electric Field Sensor



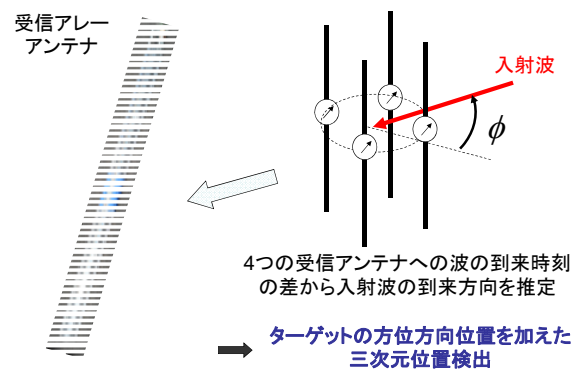
Receiving Antenna Array



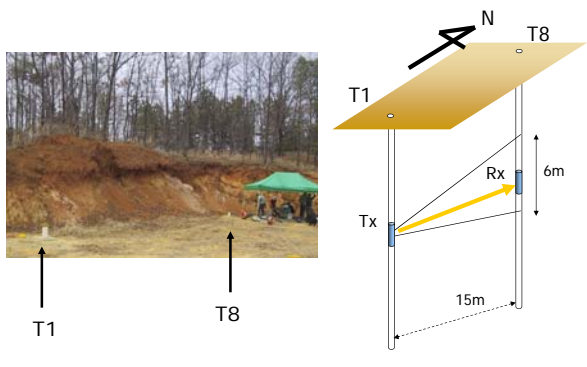
System Configuration



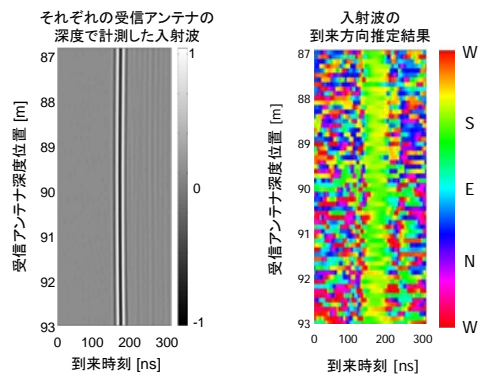
受信アレーアンテナの使用



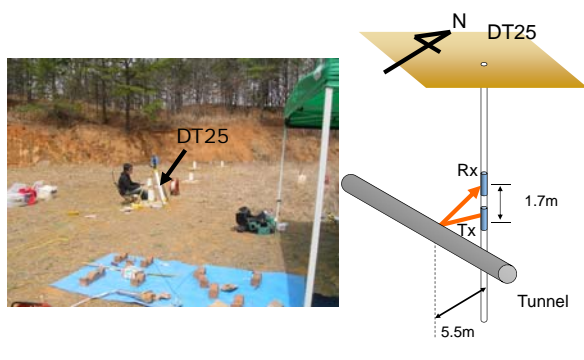
方向推定検証実験



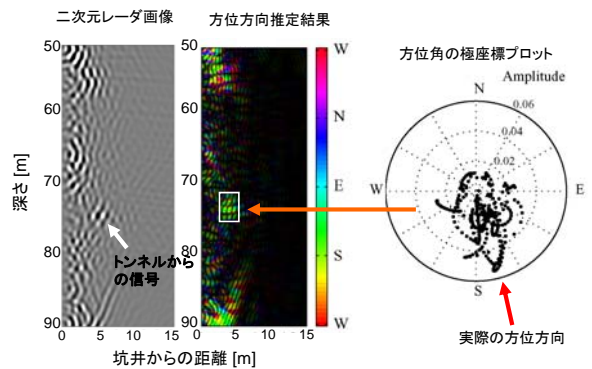
入射波の到来方向推定結果



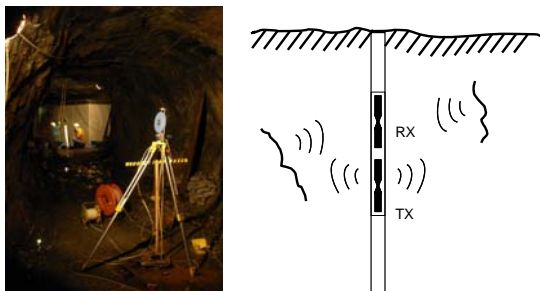
地下トンネルの三次元位置推定



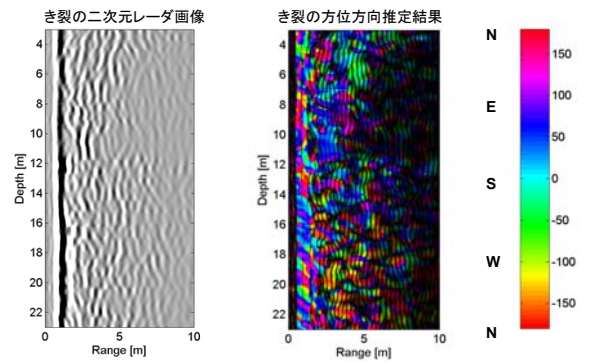
地下トンネルの三次元位置推定

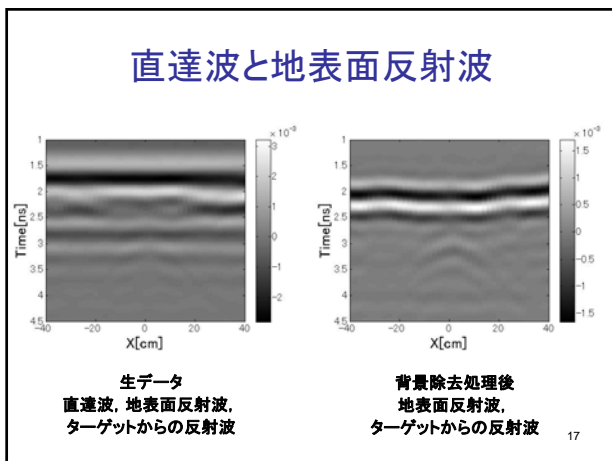
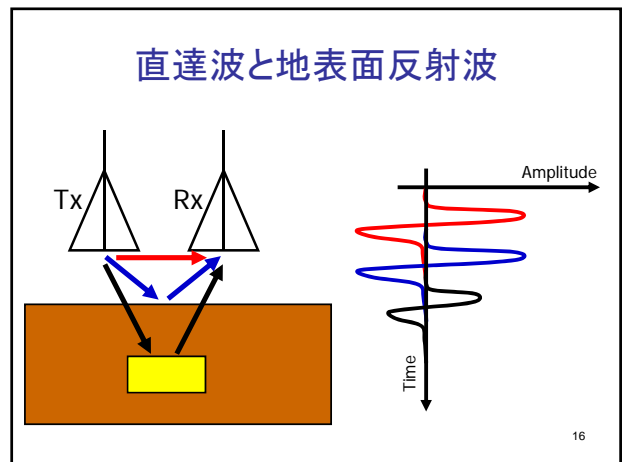
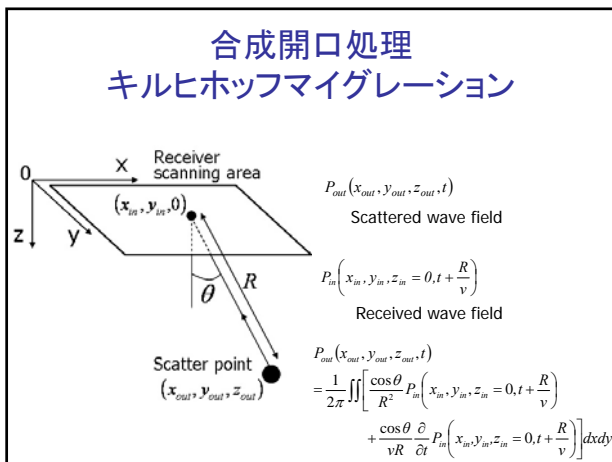
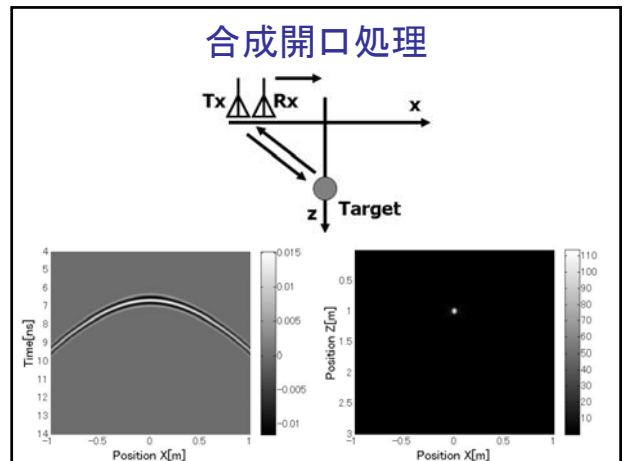
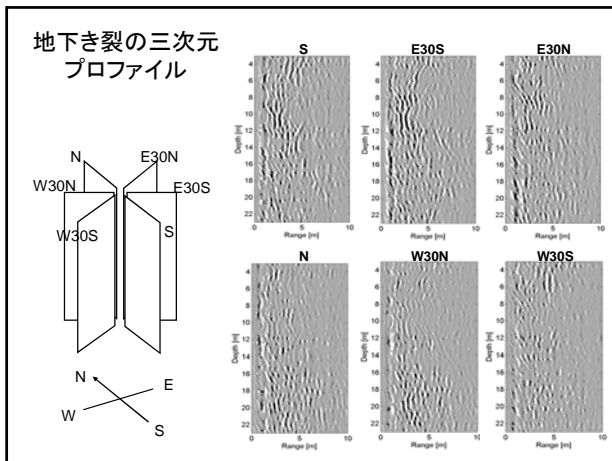


地下き裂の三次元位置推定

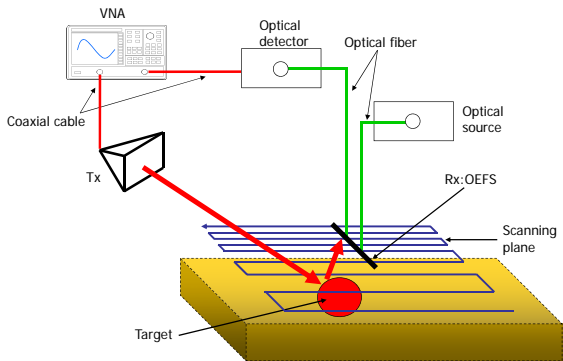


地下き裂の三次元位置推定

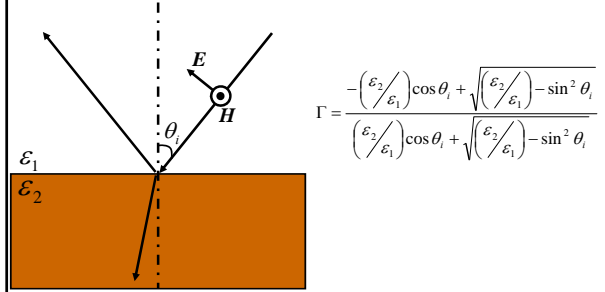




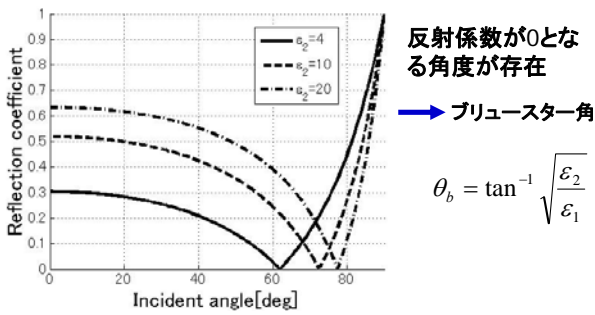
バイスタティック地中レーダシステム



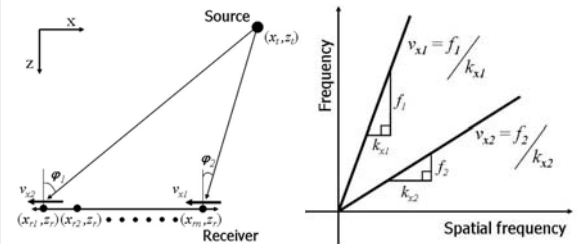
地表面反射波の抑圧 ブリュースター角 TM波の反射係数



地表面反射波の抑圧 ブリュースター角

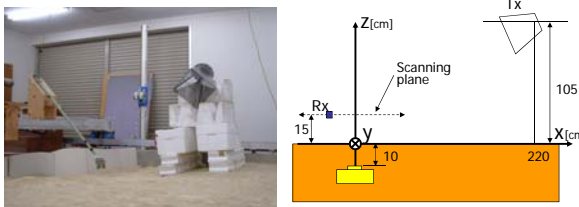


直達波除去 FKフィルタ



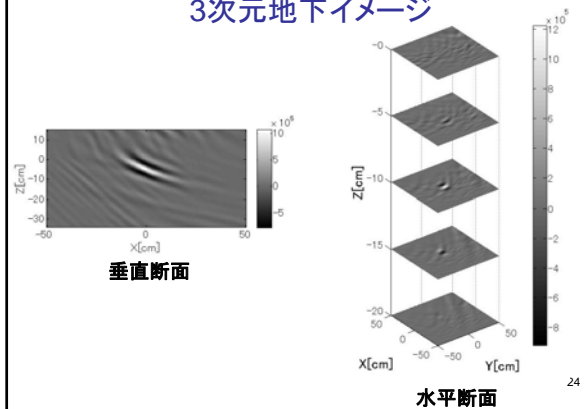
受信アンテナ走査線上での見かけ速度が、FKスペクトルの傾きに相当することを利用。
送受信アンテナの位置情報からFK領域でのフィルタ形状を決定する。

埋設物検知実験



比誘電率4.0 (TDRで測定) → - TM波を使用
- 入射角を約60度に設定

埋設物検知実験 3次元地下イメージ



標準電界強度の一生成手法と不確かさ

森岡 健浩[†] 一條 淳[‡] 鳥羽 良和[‡]

[†](独)産業技術総合研究所 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

[‡]株式会社精工技研 〒270-2214 千葉県松戸市松飛台 296-1

E-mail: [†] t-morioka@aist.go.jp, [‡] {jun.ichijo, yoshikazu.toba}@seikoh-giken.co.jp

あらまし 電界強度の計測は補正係数が既知の電界プローブを用いて行われ、補正係数は標準電界強度に対するプローブの応答として校正される。一般に、標準電界は電波暗室や TEM(transverse electromagnetic)セル内に生成されるが、使用可能周波数の制限や大型のシステム構成になることから、主に一次標準の電界強度生成システムとして用いられる。そこで、通常の電界プローブ校正には G-TEM(gigahertz-TEM)セルを用いることにより、コンパクトで広帯域のプローブ校正を行うことが可能となる。しかし、G-TEM セル内部の電界強度の校正には電界トランスファープローブが必要である。ここでは、G-TEM セルを用いたプローブの校正方法とそれに伴う不確かさについて検討する。

キーワード 電磁界計測, 電界プローブ, 標準電界, G-TEM セル, 不確かさ

A Standard *E*-field Generation Method and Uncertainty

Takehiro MORIOKA[†] Jun ICHIJO[‡] and Yoshikazu TOBA[‡]

[†]National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

[‡]Seikoh Giken Co., Ltd. 296-1 Matsuhidai, Matsudo-shi, Chiba, 270-2214 Japan

E-mail: [†] t-morioka@aist.go.jp, [‡] {jun.ichijo, yoshikazu.toba}@seikoh-giken.co.jp

Abstract The *E*-field strength is measured by using a field probe whose correction factor is already calibrated against the standard *E*-field. The standard *E*-field is ordinary generated in an anechoic chamber or a TEM (transverse electromagnetic) cell. Since the higher-order modes of the TEM cell and the imperfect absorbing material of the anechoic chamber limit the usable frequency of the system, these methods are usually used for the primary standard field generation. In contrast to these methods, a gigahertz-TEM (G-TEM) cell can realize a compact and wide frequency band *E*-field generation system. However, a field transfer probe is necessary for the *E*-field strength calibration of the G-TEM cell. In the present paper, the probe calibration using the G-TEM cell and uncertainty analysis are performed.

Keyword Electromagnetic field measurement, *E*-field probe, Standard *E*-field, G-TEM cell, Uncertainty

1. はじめに

電磁干渉(electromagnetic interference: EMI)に対する耐性試験の信頼性を確保する観点から、電界強度計測の重要性が増している。EMI 試験は、電界プローブによって一定強度に校正された電界を被試験器に照射し、機器の安定な動作を確認するものである。個々の電界プローブの指示値 E_{ind} は、構成部品の個体差などからプローブ毎にばらつきが生じ、実際の電界強度 $|E_{act}|$ からの偏差を持つことがある。そこで、プローブの応答を既知の電界(標準電界)強度に対して補正することにより、信頼性の高い電界強度計測が可能となる。この補正係数 C は、 E_{ind} に対する照射した標準電界強度 $|E_{std}|$ の比として、次のように定義される。

$$C = |E_{std}|/|E_{ind}| \quad (1)$$

これにより、 $|E_{ind}|$ に C を乗ずることによって、簡単に $|E_{act}|$ が得られる。通常のプローブは $C = 1$ となる様に設計されている。

標準電界生成装置の一つに TEM(transverse electromagnetic)セルがある。セル中央の電界強度は、セルのサイズとセルを透過する電力を用いた簡単な式から求まるが、セルのサイズと使用可能上限周波数はトレードオフの関係にあり、測定周波数が高くなると、高次モードによって標準電界の生成が困難になる[1]-[3]。これ以外にも電波暗室内で送信アンテナの利得を用いる方法があるが、電波暗室の大きさや吸収体特性により、今度は低周波帯域において自由空間特性

が維持できなくなる。

広帯域という点では G-TEM(gigahertz-TEM)セルが電界生成装置として利用可能である。G-TEM セルは完全に外部と隔離された試験空間を持つため、強電界を生成した場合でも外部に影響を与えず、微弱な電界計測においても、外乱の影響を受けにくい。さらに、強電界を生成する際に必要となる信号増幅器の利得も、電波暗室で同レベルの電界強度生成に必要な利得に比べて低くすむ。このような点を考慮すると、G-TEM セルを日常のプローブ校正に用いることは、システムのコンパクト化という点からも有利である。しかし、G-TEM セル内の電界強度を理論的に精度良く求めることは難しい。そこで、本稿では G-TEM セルを用いた電界プローブの C を校正する手法を、以下の3段階の測定手順によって実現する。手順 1: 電界伝送プローブを採用し、その C を標準電界によって校正する。手順 2: G-TEM 内部の電界強度を電界伝送プローブによって校正する。手順 3: 校正対象である電界プローブを手順 2 の電界強度によって校正する。

一つの電界伝送プローブの C を、低い周波数では TEM セル内に生成した標準電界を用い、高い周波数ではダイポールアンテナ係数(AF)を基準として生成した標準電界[4]を用いて校正することにより、G-TEM セルの電界強度を広帯域で校正することが可能になる。本稿では、1 GHz における電界プローブ校正を取り上げるため、手順 1 の標準電界は電波暗室において生成する。

2. 測定手法と測定結果

2.1. 電界トランスファープローブの校正(手順 1)

図 1 は 0.7 GHz 以上の周波数において、ダイポールアンテナの AF により、エレメント位置での電界強度を校正するシステムの概念図である。アンテナエレメントに電界強度 $|E|$ が入射した時、ダイポールアンテナ端子に接続したパワーセンサで計測される受信電力 P_r は次のようになる。

$$P_r = |E/AF|^2/Z_0 \quad (2)$$

ここで、 Z_0 はパワーセンサを見込むインピーダンスであり、 $Z_0 = 50 \Omega$ である。

P_r をモニタリングしながら(2)によって所望の電界強度 $|E_{tgt}|$ を生成する。 $|E_{tgt}|$ に対する P_{tgt} が得られた時、双方向結合器の結合端子で計測される入射電力と反射電力に対応した電力、 P_{fwd} と P_{ref} を、それぞれ P_{fwd-R} と P_{ref-R} として記録する。次にダイポールアンテナを電界伝送プローブ (ここでは ETS-LINDGREN HI6005 を用いた) の校正対象軸がダイポールエレメント軸と一致するように置き換える。次に P_{fwd} が $P_{fwd-R} \pm 0.02$ dB

となる様に信号源出力を調整し、プローブに $|E_{tgt}|$ を照射する。ここで電界強度の校正に用いたダイポールアンテナの AF は、1 GHz において $AF = 40.289$ 1/m (dB) であり、その不確かさは包含係数 $k = 1$ の時、0.2 dB である[5]。信号増幅器の利得などの制限から、今回のセットアップで生成可能な $|E_{tgt}|$ は 30 V/m 以下である。ここでは電界伝送プローブの C を 10 V/m、30 V/m の電界強度において校正した。

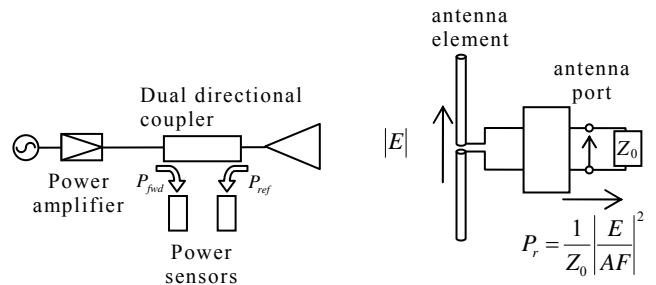


図 1 ダイポールアンテナ係数による電界校正

2.2. G-TEM セルの電界強度校正(手順 2)とプローブ校正(手順 3)

C が校正された電界伝送プローブを用いて G-TEM セル内の電界強度を校正することができる。図 2 は G-TEM セルを用いた被校正プローブの C の校正手法概念図である。

始めに伝送プローブを G-TEM セル内の電界校正位置に設置し、(1)を用いて $|E_{act}|$ が所望の電界強度 $|E_{tgt}|$ となるように信号源出力を調整する。 $|E_{tgt}|$ が得られた時、2.1 と同様に P_{fwd} と P_{ref} を記録する。次に伝送プローブと同じ位置に被校正プローブを配置し、再び P_{fwd-R} とすることによって $|E_{tgt}|$ を再現する。これにより、被校正プローブの C を容易に求めることが可能となる。ここでは 10 V/m、30 V/m と 100 V/m の電界強度において C の校正を行った。

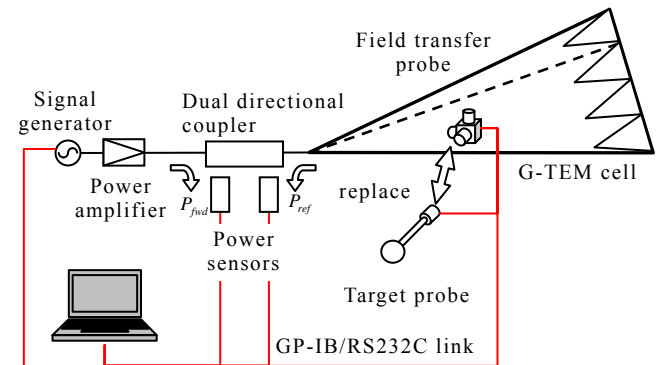


図 2 G-TEM セル測定系

2.3. 測定結果

表 I は 1.0 GHz における被校正プローブ (AR FL7018) の C を G-TEM セル内に生成した電界によって校正した結果である。表は、G-TEM 内の電界強度の校正の際に、電界伝送プローブの C を用いた場合と、用いなかった場合の結果を含む。平均値と標準偏差は 10 回の繰り返し測定によって得られたデータを基に算出した。補正を行った場合と行わない場合では非常に大きな差が生じていることがわかる。10 V/m と 30 V/m は電波暗室で生成することができるため、被校正プローブの C は G-TEM セル内のみでなく、電界伝送プローブを校正する時と同様の手法を用いて自由空間でも求め、これらの結果も比較のために同表中に示した。G-TEM で校正された FL7018 の C は、自由空間で直接標準電界によって校正された C と非常によく一致していることが確認できる。これにより、適切に C が校正された電界伝送プローブを用いることにより、G-TEM セル内部においても自由空間と同等のプローブの C 校正値が得られることが分かった。

		Correction factor C		
		Ave.	STDEV%	Chamber
10 V/m	Raw data	1.00	0.930	1.07
	Corrected	1.07	0.969	
30 V/m	Raw data	1.06	0.675	1.10
	Corrected	1.11	0.704	
100 V/m	Raw data	1.05	0.736	-
	Corrected	1.11	0.769	

表 I G-TEM セル内での FL7018 補正係数

3. 不確かさ解析

不確かさは、測定結果が取り得るばらつきを示すパラメータであり、不確かさ解析は校正において非常に重要である。ここでは、G-TEM セル内で電界プローブの C を校正する不確かさ解析を行う。不確かさ解析の一般的な手順は [6] に詳しい。ここでは、G-TEM セル内部の電界強度の校正に必要な電界移送プローブの C の校正と、G-TEM セルを用いた被校正電界プローブの C の測定の 2 段階に分けて不確かさの解析を行う。

3.1. 電界伝送プローブ校正

ダイポール AF を基準として生成した電界によって電界移送プローブの C を校正する場合、 C に影響を与える要因は以下のように考えられる。

- (1-1) ダイポールアンテナの AF 校正
- (1-2) ダイポールアンテナ端子における P_r 測定
- (1-3) E_{igt} の再現
- (1-4) 送信アンテナとの結合

- (1-5) ダイポールアンテナとプローブの位置のずれ
- (1-6) プローブ指示値の安定性
- (1-7) データのばらつき

これらの内、不確かさの主要因はダイポールアンテナの AF 校正に伴うものであり、その不確かさは C の校正値に対し 2.33 % と見積もられる。これは入射電界によってアンテナの付属回路が損傷しない範囲では、電界強度に関係なくほぼ一定である。 P_r 計測に伴う不確かさは、端子の不整合と受信電力 (P_{igt}) に依存するため、ダイポールアンテナの反射損をネットワークアナライザによって精密に測定し、[7] を用いて P_r 測定の不確かさを見積もった。ダイポールアンテナによって校正された $|E_{igt}|$ を電界移送プローブに再照射するため、 P_{fwd-R} に対して ± 0.02 dB となる様に信号源出力を調整する。この不確かさは、アンテナへの入射電力が最大 ± 0.02 dB ずれた時、電界測定位置で生じる電界強度の偏差から積算する。これ以外に、有限距離の測定ではダイポールアンテナの有無によって P_{ref} が変化する。この影響を小さくするため、アンテナ位置を送信アンテナ (ETS-LINDGREN 3115) の開口面から 1.7 m 離し、ダイポールエレメントの有無で P_{ref} の変動が 0.1 dB 以下となるようにした。ダイポールエレメントとプローブの距離方向の位置のずれは、ダイポールエレメント位置から ± 0.02 m として検討している。

合成標準不確かさは、各標準不確かさとその感度係数の積の二乗和平方根を取ることで次のように得ることができる。

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right\}^2 u^2(x_i)} \quad (3)$$

ここで、 x_i は測定量であり、 $\partial g / \partial x_i$ は x_i の感度係数である。

これらの不確かさ要因を積算したものが表 II の上段の通りであり、電界伝送プローブの C の校正に伴う合成不確かさは、 $k = 1$ で 2.88 % (0.25 dB) とみつめられる。

3.2. G-TEM 内でのプローブ校正

G-TEM セルを用いた C の校正であっても、基本的には標準となる電界強度を生成し、それに対して被校正プローブの応答を計測して C を求める。先の電界伝送プローブの校正ではダイポール AF を基準として標準電界を生成したが、G-TEM 内では校正された C を持つ電界伝送プローブによって標準電界が生成される。従って、G-TEM セルを用いた校正では、3.1 において積算した伝送プローブの C 校正に伴う不確かさ等、以下の要因を考慮する必要がある。

- (2-1) 伝送プローブ校正

- (2-2)伝送プローブの読出し値の安定性
- (2-3)伝送プローブの線形性
- (2-4)入力電力の再現
- (2-5)被校正プローブの読出し値の安定性
- (2-6)プローブの位置のずれ
- (2-7)データのバラつき

ここで挙げた不確かさ要因(2-1)は 3.1 で積算した合成標準不確かさと同一のものである。

3.3. 不確かさ積算手法の具体例

電界伝送プローブの C は 10 V/m と 30 V/m に対して校正されている。被校正プローブの C がこれらの電界強度と同じレベルの電界に対して校正される時、電界伝送プローブの非線形性による影響は無視できる程度に小さいと考えられる。しかし 100 V/m に対する C を校正する場合、非線形性が不確かさの主要因となることが考えられる。

プローブ位置における $|E|^2$ は G-TEM セルへ入射する電力 P_{in} に比例し、かつ P_{in} は単純に信号源出力 P_{SG} に比例することから、次の様な関係が存在する。

$$A = |E|^2 / P_{SG} \quad (4)$$

ここで A は定数である。したがって、電界強度に対するプローブの非線形性は(4)の A の変動として求めることができる。非線形性の評価のために、 A の具体的な値は求める必要はない。

図 3 は 3 つのプローブの非線形性を示している。全ての結果は、用いた測定システムにおいて約 30 V/m の電界強度がプローブに対して照射されている $P_{SG} = -10$ dBm での応答を基準(0 dB)として規格化されている。実線(a)は本稿で電界伝送プローブとして用いたプローブの非線形性を、3 回の繰り返し測定の平均値で示している。電界伝送プローブの C が実際に校正された 10 V/m と 30 V/m と同じ電界強度をこのプローブによって生成する場合、電界強度に対する非線形性は無視できる程度に小さいが、これらから大きく離れた 100 V/m の電界強度の校正では電界トランスファプローブの非線形性を考慮する必要がある。今回は、100 V/m の電界強度の校正を 30 V/m で校正された C によって行っているため、その非線形性は 0.17 dB 程度と見積もることができる。しかし、 C が 10 V/m で校正されていた場合には約 0.6 dB になる。破線(b)は(a)と同じタイプのプローブである。30 V/m から 100 V/m の非線形性は 0.3 dB 程度と大きい。

同様に、光電界センサの電界強度に対する非線形性を破線(c)に示す。(a)と(b)に比べ、100 V/m まで非常に良い線形性を保っていることがわかる。このような特性を持つプローブを電界トランスファプローブとして用いることにより、非線形性による不確かさの著しい

改善が達成できると考えられる。

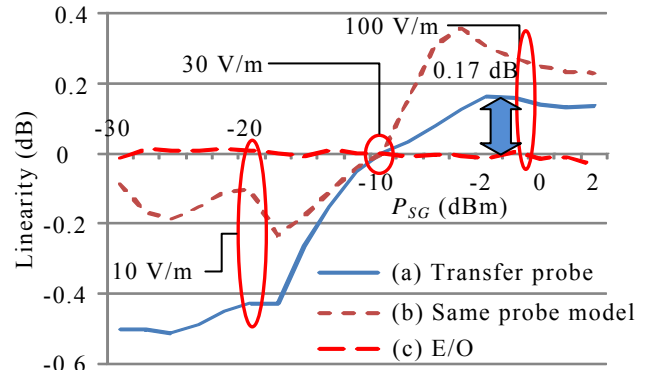


図 3 プローブの電界強度に対する非線形性

G-TEM セル内部では入端子から遠ざかるに従って、電界強度が小さくなる。従って、電界伝送プローブと、被校正プローブ位置が異なる場合、電界校正時と同じ P_{in} を実現しても、プローブに照射される電界強度は異なる。このプローブの位置ずれによる影響は、図 4 に示す G-TEM セルのディメンションによって見積もることができる。内部の電界強度は単純に、セプタム高に反比例すると考えられるので、電界強度 E を校正した位置(基準位置)のセプタム高を h とし、被校正プローブが実際に置かれた位置のセプタム高を h' とすれば、被校正プローブに照射される電界強度 E' との関係は $E'/E = h/h'$ と表すことができる。

ここで用いた電界伝送プローブと被校正プローブは、その大きさにより空間分解能が良くなく、両者の中心位置の決定にもある程度の不確かさが含まれる。そこで、被校正プローブが基準位置から G-TEM セルの中心軸上で最大で ± 10 mm ずれる場合を仮定して不確かさの積算を行うことにする。この場合、位置ずれによる不確かさは 0.41 % 程度と見積もることができる。ここで用いた市販の電界プローブに対し、光電界センサは一軸の微小なセンサを作製できるため、これを電界伝送プローブとして用いることにより、空間分解能や測定基準位置の精度向上が見込める。

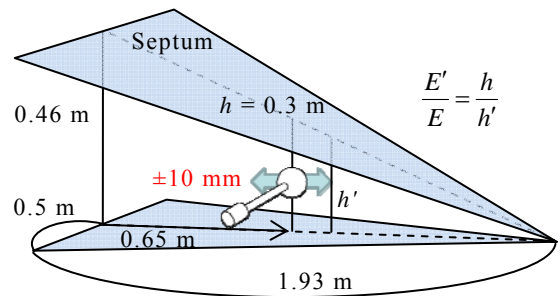


図 4 プローブの位置ずれによる影響

これらを含んだ不確かさ積算結果は表 II の下段の通りである。これにより、G-TEM セル内で 1 GHz において 100 V/m の電界強度に対する電界プローブの校正を行った場合、測定結果に影響を与える主要因は、電界

トランスファープローブの補正係数校正とその非線形性であることがわかる。積算の結果、合成標準不確かさ ($k = 1$) は 4.16 % (0.37 dB) となる。

Uncertainty budget of the E -field transfer probe (HI6005) calibration against 30 V/m in anechoic chamber

Source of uncertainty	Value (%)	Distribution	Divider	Sens. Coeff.	Contribution	Degrees of freedom	Notes
1 AF cal	2.3293	Normal	1.0000	1.0000	2.3293	27	1
2 Power meas.	1.9500	Normal	1.0000	0.5000	0.9750	999	2
3 Reproduction of E_{tgt}	0.4616	Rectangular	1.7321	0.5000	0.1332	999	3
4 Dipole coupling effect	2.3293	Rectangular	1.7321	0.5000	0.6724	999	4
5 Alignment	1.1905	Rectangular	1.7321	1.0000	0.6873	999	5
6 Probe readout stability	0.3410	Normal	1.0000	1.0000	0.3410	99	6
7 Data variation	0.9260	Normal	1.0000	1.0000	0.9260	4	7
Combined uncertainty ($k = 1$)					2.8796	53.91	
					0.2466 dB		

Uncertainty budget of the E -field transfer probe (FL7018) calibration against 100 V/m in a G-TEM cell

Source of uncertainty	Value (%)	Distribution	Divider	Sens. Coeff.	Contribution	Degrees of freedom	Notes
1 Transfer probe cal	2.8796	Normal	1.0000	1.0000	2.8796	53.91	8
2 Linearity of the field transfer probe	3.9920	Rectangular	1.7321	1.0000	2.3048	999	14
3 Transfer probe readout stability	0.4810	Normal	1.0000	1.0000	0.4810	99	9
4 Input Power reproduction	0.4616	Rectangular	1.7321	0.5000	0.1332	999	10
5 Probe under cal. Readout stability	0.0335	Normal	1.0000	1.0000	0.0335	9	11
6 Probe alignment	0.8305	Rectangular	1.7321	1.0000	0.4795	999	12
7 Data variation	1.8022	Normal	1.0000	1.0000	1.8022	9	13
Combined uncertainty ($k = 1$)					4.1632	121.30	
					0.3694 dB		

Notes

1. Dipole AF calibration uncertainty: AF = 40.289 m^{-1} (dB) with uncertainty of 0.2 dB ($k = 1$) @ 1 GHz
2. Uncertainty calculator provided by Agilent Technology: Dipole antenna port reflection coefficient; -16.2811 dB (VSWR: 1.363) @ 1 GHz and the target power; -7.229 dBm for 10 Vm^{-1} , 2.314 dBm for 30 Vm^{-1} .
3. Input power of the transmitting antenna is adjusted to be within 0.02 dB from that when E_{tgt} is obtained.
4. Reflected power from the transmitting antenna in the absence of the dipole element deviates by 0.1 dB (maximum) from that when E_{tgt} is obtained.
5. The dipole antenna and probes are located at 1.7 m from the DRGH aperture. The misalignment is assumed to be within ± 0.02 m.
6. Standard deviation of the probe response with 100 repeated readout. 0.275 % for 10 Vm^{-1} , 0.341 % for 30 Vm^{-1} and 0.481 % for 100 Vm^{-1} .
7. Standard deviation of the C measurement for E -field transfer probe.
8. This is identical to the E -field transfer probe calibration uncertainty.
9. E -field at a location of the G-TEM cell is calibrated by using a field transfer probe (ETS-Lindgren HI6005).
10. Forward power to the G-TEM cell is adjusted to be within 0.02 dB from that when E_{ind} is obtained.
11. Estimated by the standard deviation of the probe response
12. The probe center is at 0.15 m above the cell floor and the septum height is 0.30 m. The misalignment is assumed to be within ± 0.01 m.
13. Standard deviation of the C measurement data
14. Linearity of the field transfer probe from 30 Vm^{-1} to 100 Vm^{-1} is estimated by ± 0.17 dB.

表 II. 電界プローブの補正係数校正に伴う不確かさ積算表(電界強度 : 100 V/m、周波数 : 1 GHz)

4. まとめ

G-TEM セル内部に 10 V/m、30 V/m と 100 V/m の電界を生成し、電界プローブの補正係数の校正を 1 GHz において行った。次に、不確かさ要因のうち、非線形性とプローブ配置に伴う不確かさを取り上げ、積算手法を示した。最後に 100 V/m における校生の不確かさ積算表を示し、測定結果に影響を与える主要因は、電界トランスファープローブの補正係数校正とその非線形性であることを指摘した。

ここでは市販の電界プローブをトランスファープローブとして用いたが、光電界センサの線形性とその

サイズは電界伝送プローブとして大きな利点である。今後の安定性や感度の改良によって、伝送プローブに起因する不確かさの著しい改善が期待できる。

文 献

- [1] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Simple approximate expressions for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM cells," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-28, no. 3, pp. 125-130, Aug. 1986.
- [2] S. K. Das and B. K. Sinha, "Numerical solution of higher order mode cutoff frequencies in Symmetric TEM cells using finite element method," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-32, no. 4, pp.

264-268, Nov. 1990.

- [3] Electromagnetic Compatibility (EMC)—part 4-20; Testing and Measurement Techniques—Emission and Immunity Testing in Transverse Electromagnetic (TEM) Waveguides, IEC 61000-4-20 Ed. 1.1, 2007.IEC
- [4] T. Morioka, "Tracing *E*-field probe responses to the dipole antenna factor," in *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 1-5, Long Beach, CA., USA, Aug. 2011.
- [5] T. Morioka, "Uncertainty of free space dipole antenna factor from 1 GHz to 2 GHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 4, pp. 1135-1140, Apr. 2009.
- [6] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Int. Stand. Org., Geneva, Switzerland, 1995.
- [7] *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 3)*, Agilent Application Note 1449-3.

光給電バイコニカルアンテナを用いた 1GHz 超放射妨害波測定の実験所間比較

飴谷 充隆 黒川 悟 廣瀬 雅信

産業技術総合研究所 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

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

あらまし 同一 EUT の放射妨害波測定を異なるサイトで実施した場合、本来その測定結果はサイトに依らず同一の結果となるはずであるが、実際の妨害波試験においては、サイトにおける電波暗室の反射環境の違いや受信アンテナおよび受信機等の測定機器の違いにより、放射妨害波試験の測定結果に差異が生じる。それらの差異を定量的に評価するために、共通の EUT を用いた試験所間比較が行われる。産総研では、共通 EUT として光給電バイコニカルアンテナを開発し、1GHz 超の放射妨害波測定の実験所間比較を、広域関東圏に属する 11 都県の公設試験研究所間において実施している。本稿では、実施内容の詳細および測定結果について報告する。

キーワード 光給電バイコニカルアンテナ, 1GHz 超放射妨害波試験, SVSWR, 試験所間比較

Interlaboratory Comparisons of Radiated Emission Test above 1GHz Using Optical Feeding Biconical Antenna

Michitaka AMEYA, Satoru KUROKAWA and Masanobu HIROSE

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

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

Abstract EMI Test Results for a same EUT should be same regardless of test sites. In practice, the EMI test results are different for each site due to the difference of site performance and difference of the measurement equipment. To evaluate the difference of EMI test results quantitatively, interlaboratory comparisons for EMI test using a reference EUT are widely conducted. We developed the optical biconical antenna as a reference EUT. The interlaboratory comparisons for EMI test above 1 GHz have been conducted among 11 Public Testing and Research laboratories in Kanto-Area in Japan. In this paper, the protocols and method of the interlaboratory comparisons are explained and the interim report is presented.

Keyword Optical Feeding Biconical Antenna, Radiated Emission Test above 1GHz, SVSWR, Interlaboratory Comparison

1. まえがき

2010 年より、EU および国内 VCCI において情報技術機器の 1GHz~6 GHz の放射妨害波測定が義務化された[1]。1GHz を超える周波数帯における放射妨害波測定サイトは自由空間を理想としているため 6 面の電波暗室あるいは 5 面の電波暗室の床面に吸収体を設置して試験を実施する。1GHz 超のサイト性能の評価法として CISPR16-1-4 において SVSWR 法[2]が規定されている。SVSWR 法では空間定在波比が 2 以下 (6 dB 以下) であれば、そのサイトは 1GHz 超の放射妨害波試験サイトとして適合していると判定される。

SVSWR 法はターンテーブル上の 4 つの基準点 (Front, Left, Right, Center) から受信アンテナに向かって 40cm の直線範囲における 6 箇所 (0, 2, 10, 18, 30, 40 cm) において電界強度を測定し、その 6 点の電界強度の最大最小差から空間定在波比を測定することによって、サイトに存在する反射波の量を検証する手法である。6 箇所の測定ポイントはサンプリング定理を満たしていないため、空間周波数に関してはアンダーサンプリングとなり、かならずしも電界強度空間分布の最大点および最小点を測定していない。その代わりに離散周波数間隔を 50 MHz 以下に細かくして測定することで、周波数

軸でのオーバーサンプリングを行い、1 GHz～6 GHz の中のいくつかの周波数において最大点および最小点を観測することを可能にしている。そのため、SVSWR 法による測定結果は周波数ごとの性能を表しておらず、あくまで 1 GHz～6 GHz の帯域におけるサイト性能を表している。したがって、ある周波数において SVSWR が 2 以下であっても、隣接する他の周波数で SVSWR が 2 以上であれば、その周波数でも実際の SVSWR は 2 以上である可能性が有る。

以上の理由から、SVSWR 法はサイトの適否を判定する方法としては適しているが、周波数毎の測定誤差の指標とはならない。SVSWR が 2 以下であるサイトでの放射妨害波試験の測定結果は、1 GHz～6 GHz の周波数範囲での反射波の影響が±3 dB 以内に収まると予想できるが、周波数毎の測定結果に含まれる誤差を定量的に評価するためには、出力が既知の EUT を用いた放射妨害波試験の比較試験が必要となる。

30 MHz～1GHz 以下の周波数帯では、コムジェネレータ[3]とよばれる楕円スペクトルを有する基準信号発生器が基準 EUT として使用される[4]。オープンエリアテストサイト（以降、OATS と略する）での測定結果との自サイトでの測定結果を比較することによって、サイトの周波数毎の試験結果の差異を検証する。GHz 帯でも数種類のコムジェネレータがすでに市販されており、比較試験に使用することが可能である。

コムジェネレータはパルス波形を一定の繰り返し間隔で発生させるため、尖頭値電圧が高く、プリアンプなどを使用している場合は、プリアンプが飽和していないことを確認して使用する必要がある。産総研では、パルス波形を発生するコムジェネレータを利用する代わりに、CW 信号源による基準信号発生源による試験を考えた。SG からの出力を同軸ケーブルによって基準 EUT 用アンテナに給電すれば良いが、同軸ケーブルが放射体あるいは散乱体となる可能性があるため、各サイトにおける同軸ケーブルの配置が異なることにより試験結果が異なる可能性が高い。したがって、同軸ケーブルは使用せず E/O、O/E 変換を用いた光ファイバ伝送による CW 信号の伝送を利用した。本システムは CW 信号を送信するため、受信機には通常の EMI レシーバおよびスペクトラムアナライザはもちろん、ネットワークアナライザを受信機として利用することができる。ネットワークアナライザの利用により、位相情報が取得できるため、FFT を用いたタイムドメイン解析

も可能となる点でメリットがある[5]。

本稿では、第二節において光給電バイコニカルアンテナを用いた基準 EUT の構造と、基準 EUT の基本特性として、入力反射係数、伝送特性、放射パターン、信号安定度を示す。つづいて、第三節では、現在までに測定を終えた 6 機関における測定結果を示し、その平均値、標準偏差、および Z-score を示す。最後に第四節で結論を述べる。

2. 基準 EUT の構造と基本特性

2.1. 基準 EUT の構造

開発した光給電バイコニカルアンテナの写真を図 1 に示す。アンテナは開き角 105° の円錐を向かい合わせに接続した構造である。給電コネクタは下側の円錐の中にあり、同軸コネクタの中心導体と上側の円錐、外部導体と下側の円錐を接続することにより同軸コネクタによる給電を可能としている。水平偏波時と垂直偏波時の給電部の高さが同じになるように、アンテナの全高および全幅を同一寸法の 230 mm にした。上側の円錐を支持するために直径 6cm、高さ 4cm の誘電体サポートを使用している。

給電部の同軸コネクタにフォトバイアス型のフォトダイオード（以降 PD と略する）を接続し、計測室において SG から出力される CW 信号と直接変調型レーザダイオードにより光信号を RF 周波数で変調し、光ファイバでフォトダイオードまで伝送した後に、変調された光信号をフォトダイオードによって電気信号に復調し、アンテナより CW 信号を放射する。フォトバイアス型 PD のため PD を駆動するためのバイアス電圧も光信号によって発生させる。そのため、EUT に接続されるのは変調光伝送用とバイアス光伝送用の光ファイバ 2 本のみとなる。

2.2. 基準 EUT の入力反射係数および伝送特性、出力安定度

光給電バイコニカルアンテナの入力反射係数を図 2 に示す。770 MHz から 6 GHz の周波数帯で反射係数は -10 dB 以下であり 50 Ω への整合が十分にとれていることが確認できる。図 3 にアンテナ間の伝送特性を示す。受信アンテナには ETS-Lindgren の ETS3117 ダブルリッジガイドホーンアンテナ[6]を用い、アンテナ間距離は 4m とした。伝送特性より、本アンテナは 1 GHz～6 GHz まで連続的に放射していることが確認できる。図 3 の右軸は、基準 EUT の出力安定度を調査するために 720 分間 1 分おきに測定した伝送特性の標準偏差

を表している。出力安定度は標準偏差にして 0.17 dB ~0.26 dB であった。

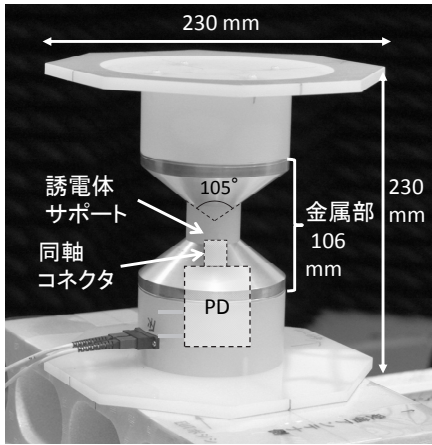


図 1. 光給電バイコニカルアンテナ
Fig. 1. Optical Feeding Biconical Antenna

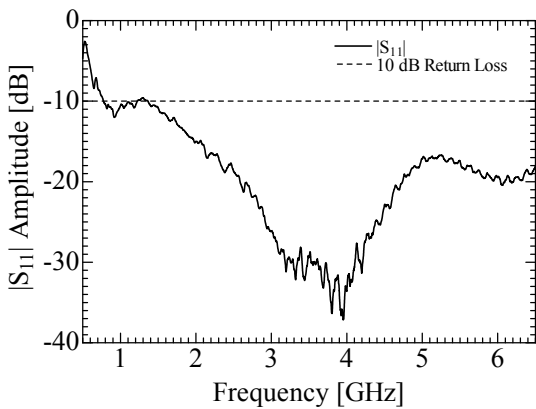


図 2. バイコニカルアンテナの入力反射係数
Fig. 2 Reflection Coefficient of Biconical Antenna

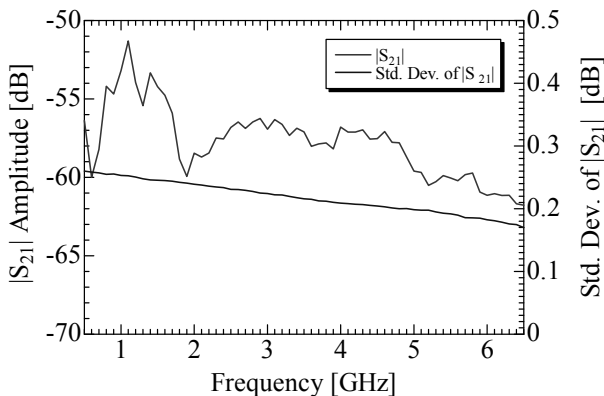


図 3. バイコニカルアンテナとダブルリッジガイドホーンアンテナの伝送特性と S21 の安定度
Fig. 3 Transmission Response of Biconical Antenna and double ridged-guide horn antenna and S21 stability

2.3. 基準 EUT の放射パターン

図 4 および図 5 にバイコニカルアンテナの H 面および E 面における放射パターンを示す。H 面においては、アンテナの構造からも推測されるとおり、どの周波数帯においても無指向性の放射パターンを有していることが確認できる。また、モーメント法(MoM)による計算結果と測定結果はほぼ一致した。MoM の計算には電磁界解析ソフトウェア FEKO Suite 6.2[6]を使用した。

E 面パターンは 1 GHz 付近ではダイポールアンテナと同様の八の字指向性を示すが、2 GHz より上の周波数帯では、±90° 方向に徐々にサイドローブが発生する。2 GHz で伝送特性が落ち込むのは、2 GHz の E 面パターンの 0° 方向の利得が減少するためであることが図 5(b)からわかる。

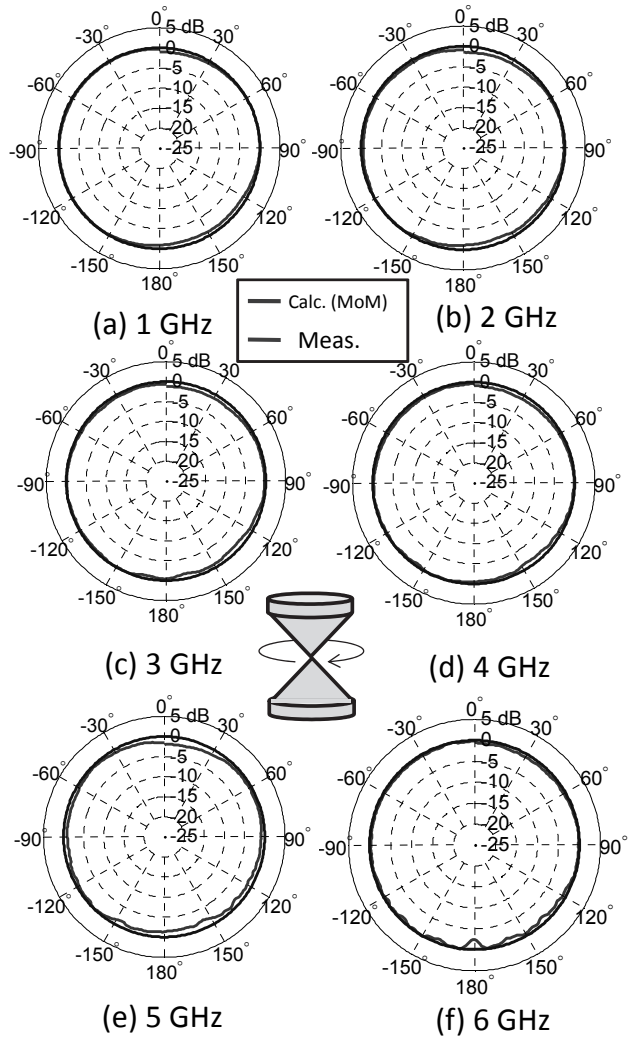


図 4. バイコニカルアンテナの H 面放射パターン
Fig. 4 H-plane Radiation Pattern of Biconical Antenna

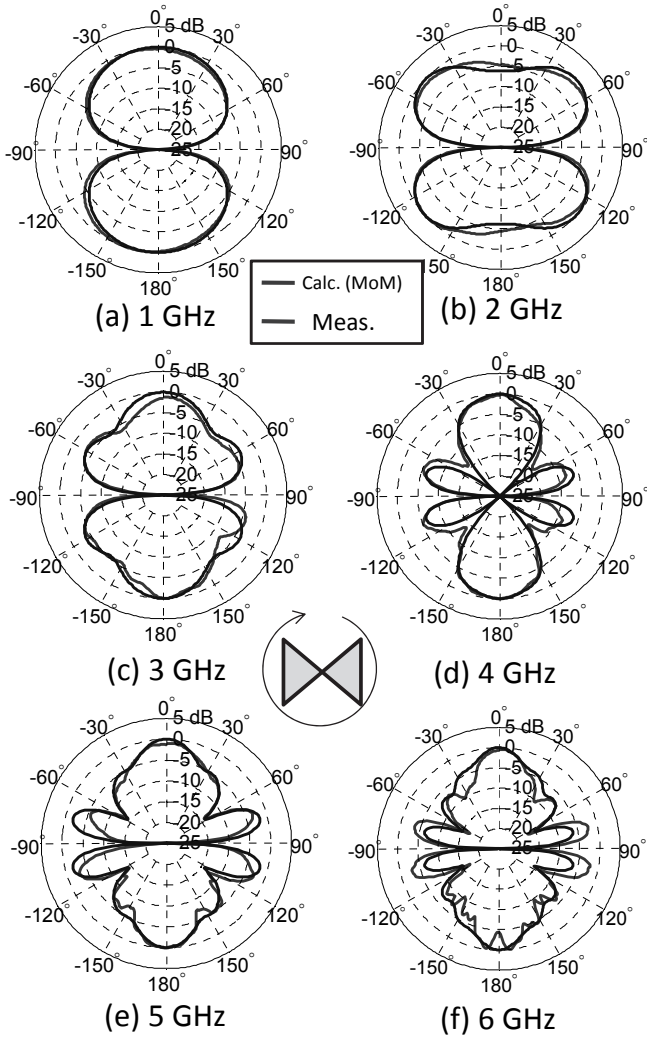


図5. バイコニカルアンテナのE面放射パターン
Fig. 5 E-plane Radiation Pattern of Biconical Antenna

3. 比較試験の実施内容と各サイトにおける放射妨害波測定結果

3.1. 比較試験の実施内容

光給電バイコニカルアンテナによる放射妨害波測定時の機器配置を図6に示す。VNAを用いてCW信号発生し、計測室に設置した直接変調型のレーザダイオードを内蔵したE/O変換ボックスにCW信号を入力する。CW信号によって変調された光信号が30mの光ファイバを通して、EUTに接続したPDまで伝送され、O/E変換され電磁波として出力される。1GHz、2GHz、3GHz、4GHz、5GHz、6GHzの6周波数の信号をPCにより切り替えて発生させ、それぞれの周波数における妨害波電界強度を測定する。受信アンテナおよび受信機（スペクトルアナライザ or EMIレシーバ）は各サイトの測定器を用いた。

図7に示すようにEUTをテーブル中心およびテーブルエッジ（テーブル中心から385mm受信アンテナ側位置に近づいた位置）に配置し、垂直偏波および水平偏波における放射妨害波測定を実施した。

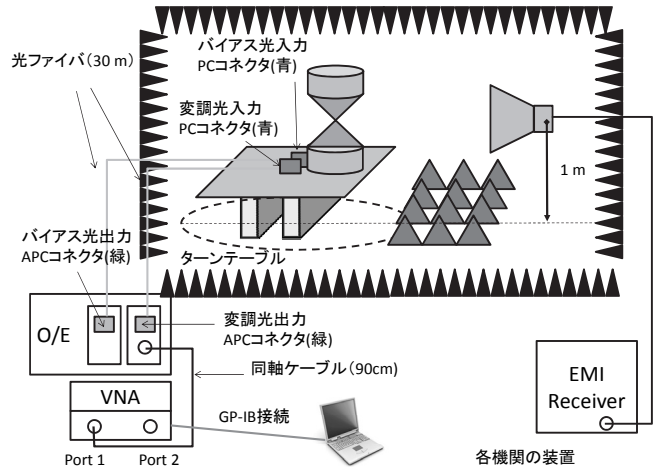


図6. Measurement Equipment of Radiated EMI Test using optical feeding biconical antenna

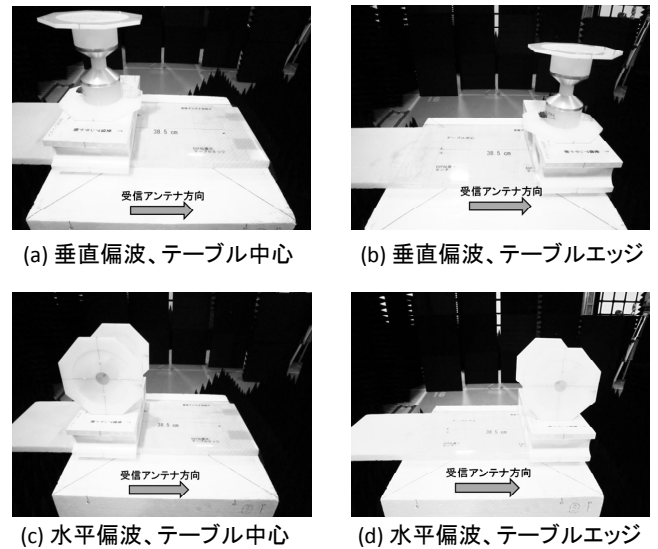


図7. EUT 配置

Fig. 7 EUT arrangement

3.2. 各サイトにおける測定結果

これまでに6機関での測定を実施した。測定結果を図8(a)~(d)に、配置毎の6機関の標準偏差を図9に示す。図8には6機関の平均値を黒色の実線で示している。自由空間が理想

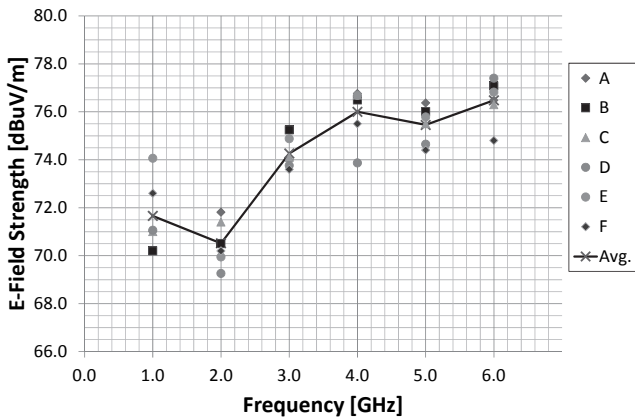
サイトと考えられるため、垂直偏波と水平偏波の測定結果は本来一致するはずであるが、図 8(a)と図 8(c)を比較すると、垂直偏波（テーブル中心）の場合、1 GHz の測定結果が他の配置に比べて低くなっている。垂直偏波（テーブル中心）における 1 GHz の標準偏差は 1.4 dB であり、1 GHz の他の配置に比べて大きな標準偏差を示している。3 GHz、5 GHz は他の周波数に比べてばらつきが小さく、標準偏差は 1 dB 以下であった。4 GHz における標準偏差は、他の周波数に比べて大きく、どの EUT 配置においても 4 GHz における標準偏差は 1.1 dB~1.5 dB であった。

図 10 にサイト B およびサイト D における測定結果の Z-score を示す。Z-score は次式(1)によって計算される。

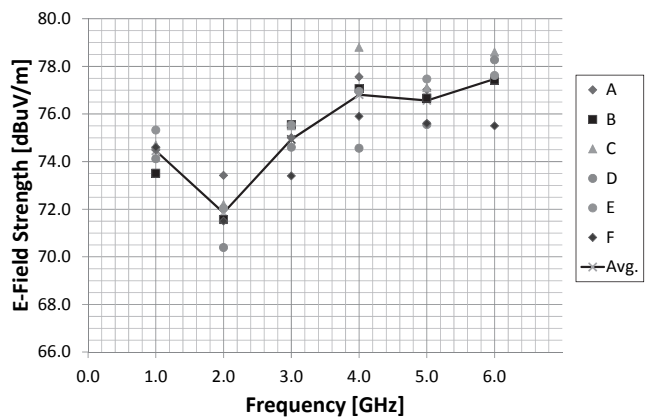
$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

ただし、 x は各機関における測定値、 \bar{x} は各機関測定値の平均値、 σ は各機関測定値の標準偏差を表す。

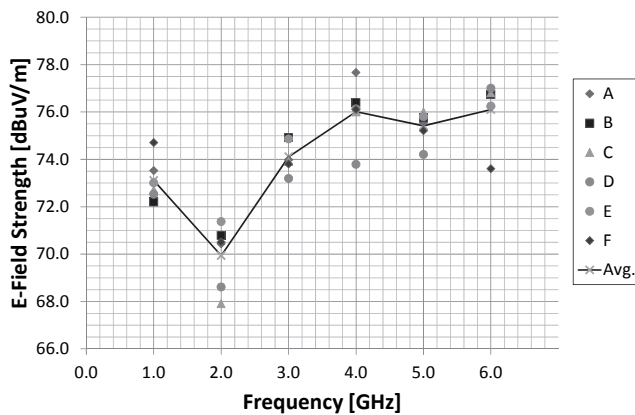
Z-score は測定結果と全機関の平均値との差が、全機関の標準偏差にしていくつ分であるかを示す指標である[8]。Z-score が 2 以内であれば、その測定結果は十分起こりうる結果であると判定され、Z-score が 3 以上である場合は測定結果に疑義が生じる。これまでの 6 機関での測定では、Z-score は最大 2 であり、2 を超える Z-score を有する機関は無かった。サイト B の Z-score は 1GHz で-1.0、3GHz で+1.5 であり、EUT 配置および偏波に依らず同じ傾向が得られた。また、サイト D の Z-score は 6 GHz 以外は全体的に低く、配置に依らず-1.0~-1.9 となった。



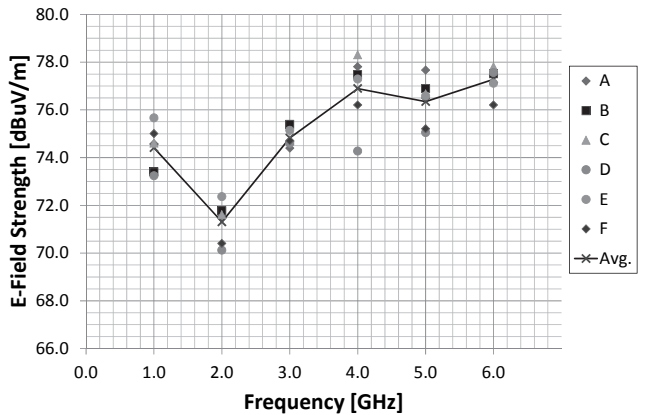
(a) 垂直偏波，テーブル中心



(b) 垂直偏波，テーブルエッジ



(c) 水平偏波，テーブル中心



(d) 水平偏波，テーブルエッジ

図 8. 電界強度測定結果（6 機関分）

Fig. 8. Measured Electric Field Strength

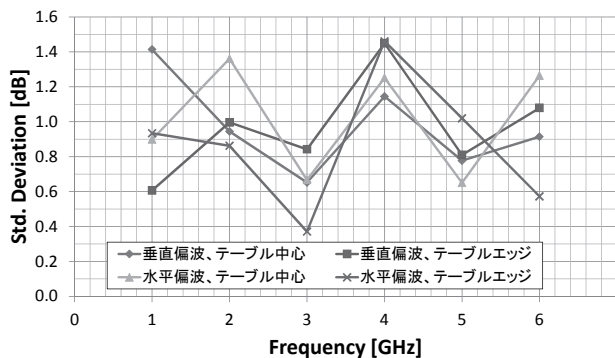
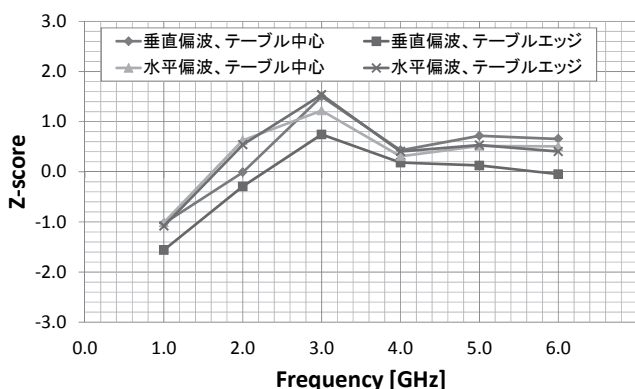
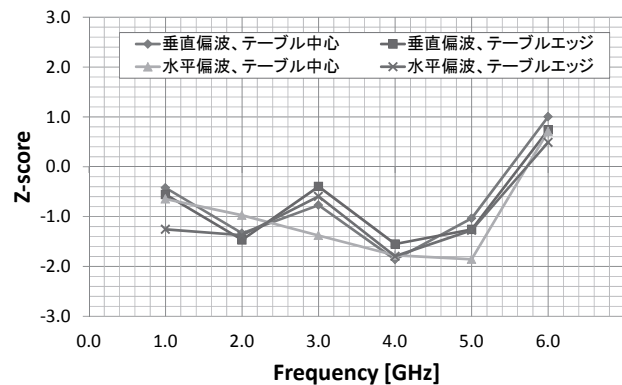


図9. 標準偏差 (6 機関分)
Fig. 9. Standard Deviation



(a) サイト B



(b) サイト D

図10. サイト B およびサイト D の Z-score
Fig. 10. Z-score of Site B and Site D

4. まとめ

本稿では光給電バイコンカルアンテナを用いた 1GHz 超の放射妨害波試験を提案した。また、広域関東圏の 6 機関で測定した放射妨害波試験の結果を報告した。

6 機関の標準偏差は最大で 1.5 dB であり、各機関の Z-score は全ての EUT 配置および偏波において 2.0 以下であった。また Z-score の周波数特性は配置や偏波によらず類似の傾向が

あり、サイトの特徴を表す指標として利用できると思われる。

Z-score は平均値からのずれを示す指標であるが、平均値が正しい値を示しているかどうかは不明であるため、必ずしも Z-score が低いからと言って測定結果が正しいとは言えない。今後はリファレンスとなる測定データを OATS にて取得し、測定結果の比較を行う予定である。

文 献

- [1] 一般財団法人 VCCI 協会, VCCI 規定集 V-3/2012.04 付則 1 技術基準, 2012.
- [2] CISPR 16-1-4, "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods -Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Ancillary equipment -Radiated disturbances", Edition 2.1, 2008-01.
- [3] W. Mullner, A. Kriz, and P. Preiner, "Comb generator measurement techniques," 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility 2008 (INCEMIC 2008), pp.291-295, Nov.2008.
- [4] S. Baisakhiya, A. Albin and B. Subbarao, "Interlaboratory comparison of radiated emission measurements," 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility 2008 (INCEMIC 2008), pp.283-285, Nov.2008.
- [5] Michitaka Ameya and Satoru Kurokawa, "Pseudo EMI Measurement Using VNA and Optical Feeding Antenna for Site Performance Comparison among Public Testing Laboratories in Kanto-area in Japan", Proceedings of ISAP 2012, P0452, Nov. 2012.
- [6] V. Rodriguez, "New broadband EMC double-ridged guide horn antenna," RF Design., pp. 44-47, 2004.
- [7] FEKO Suite 6.2, EM Software and Systems, www.feko.info, 2012
- [8] ISO 13528, Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons.

超短パルスレーザー生成プラズマを用いた大気中における 電場の遠隔計測技術

藤井 隆

電力中央研究所 電力技術研究所 〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1

E-mail: fujii@criepi.denken.or.jp

あらまし 超短パルス高強度レーザーにより生成されるフィラメントプラズマは、様々な大気観測への応用が期待されている。その中の一つである大気中の電場計測は、雷現象等地球物理の研究や、電気設備の設計、診断、保護技術の開発において重要な手法になると考えられる。電子衝突による分子励起は外部電場強度に依存するため、それに伴う紫外領域での分子発光も電場強度に依存すると考えられる。従って、フィラメントプラズマ中の分子の紫外発光は電場の遠隔計測に有用である。我々は、大気中において、窒素分子の発光が外部電場に対して指数関数的に増加することを示した。フィラメントは数百メートル以上の長距離に渡って生成するため、本手法は電場の遠隔計測への応用が期待される。

キーワード 電場, 遠隔計測, 超短パルスレーザー, フィラメントプラズマ, 窒素分子, 分光

Remote Sensing of Electric Field in Air Using Plasma Produced by Ultrashort Laser Pulses

Takashi FUJII

Electric Power Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-0196 Japan

E-mail: fujii@criepi.denken.or.jp

Abstract The filament plasma, produced by intense ultra-short laser pulses, has attracted interest in various applications of atmospheric monitoring such as the electric field measurement. The electric field measurements with the laser filament plasma may become an important instrument for geophysical researches and for the diagnostics of electrical facilities. Since an excitation of molecules, caused by electron collisions, in an external electric field depends on the field strength, a corresponding radiation of molecules in the ultraviolet range is expected to be sensitive to the field strength. Therefore, the ultraviolet fluorescence of molecules in the filament plasma can be useful for the remote measurement of electric field. We have demonstrated the exponential dependence of the fluorescence of nitrogen molecules (N_2) on external electric field in air. Since the filament can be generated for a long distance over several hundred meters, this method is promising for the remote electric field measurement.

Keyword Electric field, Remote sensing, Ultrashort pulse laser, Filament plasma, Nitrogen molecule, Spectroscopy

研究の背景と目的

大気中における電場分布を、遠隔において非破壊で時間分解計測することができれば、雷現象等地球物理の研究や、電気設備の設計、診断、保護技術は一層発展すると考えられる。

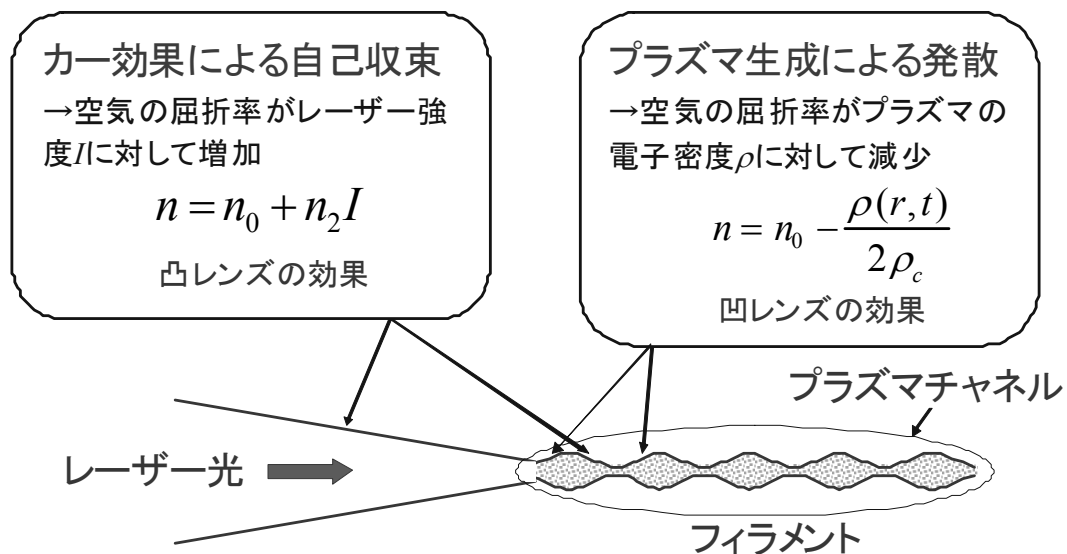
外部電場中において大気プラズマの発光は電場強度に依存する。超短パルスレーザーにより生成するフィラメントプラズマは、長距離に渡って生成するため、電場の遠隔計測への適用が期待される。

(研究の目的)

フィラメントプラズマを用いた、大気中における電場の遠隔計測技術を開発する。

© CRIEPI

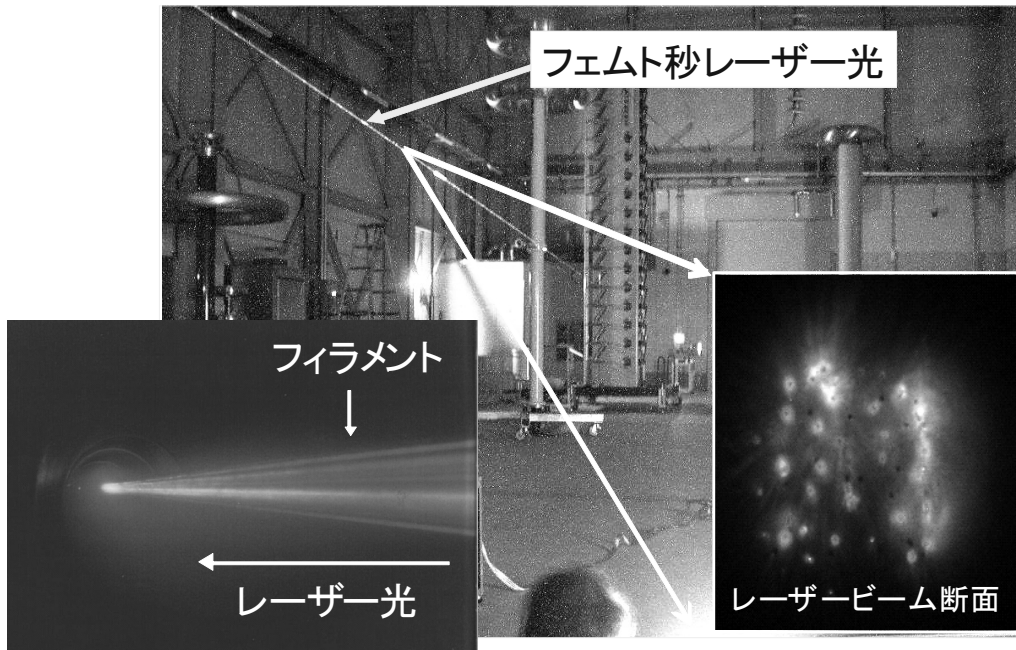
超短パルスレーザーによるフィラメントの生成



カー効果による自己収束とプラズマ生成による発散が平衡
→長距離(数100m以上)に渡るプラズマチャネルの生成

© CRIEPI

マルチフィラメントの生成



© CRIEPI

外部電場中における大気プラズマの物理

$$\frac{dN_e}{dt} = \underbrace{\alpha_{ion}(E/N_X)N_eN_X}_{\text{第1項}} + \pi_{Penning}N_{X^*}^2 + \sigma N_XN_{X\gamma} - \beta_{Disrecomb}N_{X^+}N_e - \nu_{Attachment}N_XN_e$$

第1項: 電子衝突による大気中分子の励起とイオン化→外部電場に依存

第2項: 準安定状態における励起分子間の衝突によるペニングイオン化

第3項: 光イオン化

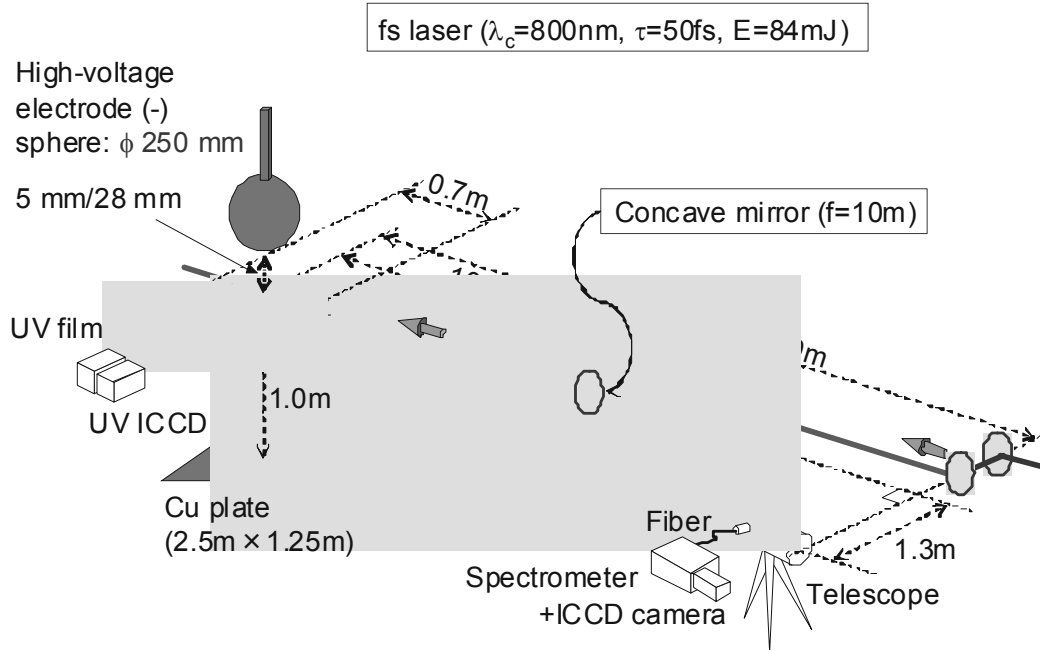
第4項: 正負イオンによる解離性再結合

第5項: 酸素負イオンの生成に関与する電子付着

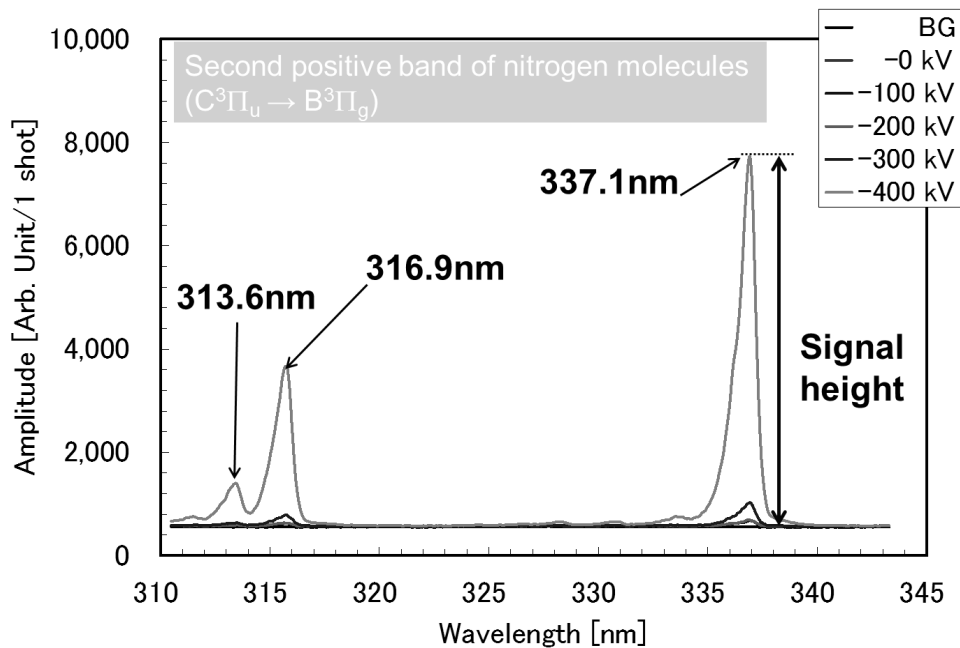
外部電界中にフィラメントプラズマが存在すると、分子のイオン化や励起が促進される。一方、プラズマの再結合は緩和される。電子衝突によりプラズマは加熱され、プラズマからの紫外発光の強度と寿命は増加する。

© CRIEPI

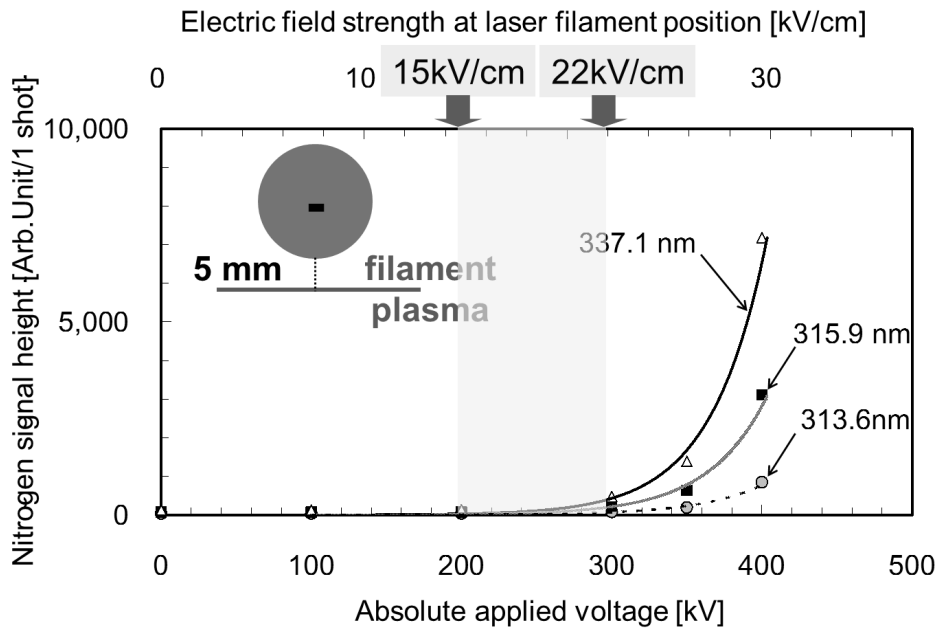
実験系



窒素分子の発光スペクトル



窒素分子発光の外部電場依存性



まとめ

1. 電場の遠隔計測技術の開発を目的とし、超短パルスレーザーにより誘起されるフィラメントプラズマを外部電場中に生成し、プラズマの発光スペクトルの特性を測定した。
2. 窒素分子 (N_2) の発光強度 (337.1nm) は外部電場に対して指数関数的に増加した。
3. 超短パルスレーザーにより誘起されるフィラメントプラズマは、長距離に渡って生成するため、電場の遠隔計測への応用が期待される。

参考文献

1. K. Sugiyama, T. Fujii, M. Miki, M. Yamaguchi, A. Zhidkov, E. Hotta and K. Nemoto, "Laser-filament-induced corona discharges and remote measurements of electric fields," *Opt. Lett.* **34**, 2964-2966 (2009).
2. K. Sugiyama, T. Fujii, M. Miki, A. Zhidkov, M. Yamaguchi, E. Hotta and K. Nemoto, "Submicrosecond laser-filament-assisted corona bursts near a high-voltage electrode," *Phys. Plasmas* **17**, 043108 (2010).
3. 藤井 隆, 杉山 精博, 三木 恵, ジドコフ アレクセイ, 堀田 栄喜, 根本 孝七, "超短パルスレーザー生成フィラメントプラズマによる電場センシング", *プラズマ・核融合学会誌*, **86**, 669-677 (2010).
4. 藤井 隆, "フェムト秒レーザーを用いた電場の遠隔計測技術", *光学*, **41**, 21-27 (2012).

LD 実装電界プローブを用いた TDS 計測

染野 薫[†]

[†] P T T 株式会社 計測分社 計測グループ S&P チーム
〒140-0001 東京都品川区北品川 2 丁目 3 2 番 3 号
E-mail: [†] someno.kaoru@pttco.co.jp

あらまし 弊社は、Schmid & Partner Engineering AG 社(スイス)の日本総代理店です。本稿では、Schmid & Partner Engineering AG 社製、TDS プローブ(LD 実装の電界又は磁界タイムドメインプローブ)の製品概要、技術内容をご紹介致します。TDS プローブは、先端アンテナ部の小型化と効率のバランスを図りながら、レーザーダイオードを取り扱う試験者の安全性も考慮されたシステムです。TDS プローブを搭載した、ノイズスキャナシステムと、同社製電磁界シミュレーションソフト SEMCAD X を併用した解析利用法も合わせてご紹介致します。また、次期リリース予定の製品についてもご案内致します。(SAR 測定用 TDS プローブなど)

キーワード Speag, TDS, SEMCAD, プローブ, レーザーダイオード, LD 技術, SAR

TDS measurement that uses LD mounting electric field probe

Kaoru Someno[†]

[†] PTT Company Limited, Speag Team, Measuring Group
2-32-3, Kitashinagawa, Shinagawaku, Tokyo 140-0001 Japan
E-mail: [†] someno.kaoru@pttco.co.jp

Abstract Our company is a Japanese sole agency of the Schmid & Partner Engineering AG Co. (Switzerland). In this text, I will introduce made by the Schmid & Partner Engineering AG company, the outline of the TDS probe(electric field or magnetic field Time Domain Probe of LD mounting), and the technology. The TDS probe is a system from which the safeties of those who examine it by the handling of the laser diode attempting the balance of the miniaturization and the efficiency of an up-to-date antenna were considered. I will also match the analysis that uses the noise scanner system equipped with the TDS probe together with electromagnetic field simulation software SEMCAD X and introduce it. Moreover, I will guide the product of the release schedule for the next term. (TDS probe for SAR measurement etc.)

Keywords Speag, TDS, SEMCAD, Probe, Laser Diode (LD), LD Technology, SAR

光応用電磁界計測（PEM）時限研究専門委員会について

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

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

< 委員名簿 >

委員長	陳 強	東北大学
副委員長	黒川 悟	産業技術総合研究所
	大西 輝夫	株式会社 NTT ドコモ
幹事（研究会運営）	村田 博司	大阪大学
幹事（財務）	都甲 浩芳	日本電信電話株式会社
幹事補佐	水野 麻弥	情報通信研究機構
専門委員	石井 望	新潟大学
	岩波 瑞樹	NEC
	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
	鈴木 敬久	首都大学東京
	セツト・ジ・イヨン	株式会社アルネアラボラトリ
	田島 公博	日本電信電話株式会社
	鳥羽 良和	精工技研株式会社
	日景 隆	北海道大学
	日高 直美	神奈川県産業技術センター
	平田 晃正	名古屋工業大学
	深沢 徹	三菱電機株式会社
	藤井 隆	電力中央研究所
	日隈 薫	住友大阪セメント株式会社
	柳澤 幸樹	横河電機株式会社
	山本 温	パナソニック株式会社

☆ 次回（第3回）PEM研究会のご案内

第3回 PEM 研究会は、電子情報通信学会総合大会（3/19-22, 岐阜大）においてシンポジウムとして開催します。プログラムは下記の通りです。奮ってご参加下さい。

第3回 PEM 研究会・シンポジウム 「 光応用電磁界計測技術の新展開 」

日 時： 2013 年 3 月 21 日（木） 9:30～12:00 （予定）

場 所： 岐阜大学（信学会総合大会でのシンポジウムとして開催します）

<プログラム>

講演 1 「 バルク型光電界センサ 」

都甲浩芳（NTT マイクロシステムインテグレーション研究所）

講演 2 「 光技術による理想のアンテナ測定に向けて

－光電界センサによる近傍界測定と光ファイバリンク VNA の実現－ 」

広瀬雅信（独立行政法人産業技術総合研究所）

講演 3 「 光ファイバーを利用した小型アンテナの測定とその課題 」

林 大介（株式会社光電製作所）

講演 4 「 電磁界ばく露評価への光応用 」

大西輝夫（株式会社 NTT ドコモ）

☆ PEM 研究会の今後の予定

第3回研究会 2013 年 3 月 21 日・岐阜大 （総合大会シンポジウム）

第4回研究会 2013 年 6 月・愛媛大 （電気学会計測研究会との共催の予定）

第5回研究会 2013 年 10 月・金沢大 （AP 研・AMT 研との併催の予定）

☆ 「光応用電磁界計測技術の最新動向小特集」（和文論文誌B）論文募集

電子情報通信学会和文論文誌Bでは、最新の光応用電磁界計測の理論や光応用電磁界技術を用いた計測に関する小特集を企画しています。皆様の積極的な御投稿をお願いします。

投稿締切：平成 25 年 6 月 10 日

発行月：平成 26 年 3 月号

問合せ先：大西 輝夫（NTT ドコモ）E-mail: teruo.onishi@m.ieice.org

詳細は HP (<http://www.ieice.org/~pem/>) をご覧下さい。