

第6回 光応用電磁界計測研究会

—広帯域電磁界センシング技術と
ノイズ計測への応用・一般—

PEM2019-1~3

2019年 7月19日 (金)

於：機械振興会館

- 主 催：電子情報通信学会 通信ソサイエティ
光応用電磁界計測特別研究専門委員会
- 併 催：電子情報通信学会 通信ソサイエティ
環境電磁工学研究専門委員会, 無線電力伝送研究専門
委員会
- 共 催：電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ
機構デバイス研究専門委員会

第6回 光応用電磁界計測研究会

プログラム

テーマ：「広帯域電磁界センシング技術とノイズ計測への応用・一般」

2019年 7月 19日（金） 10時35分～12時15分

10:35-11:25 PEM2019-1

〔招待講演〕 広帯域光電界センサを用いた球電極間 ESD による過渡電界の測定
石上 忍・川又 憲・嶺岸 茂樹（東北学院大学）・藤原 修（電気通信大学）

11:25-11:50 PEM2019-2

〔依頼講演〕 光変調散乱技術を用いた高周波電界センサの開発と EMC スキャナへの応用
黒澤 孝裕（秋田県産業技術センター）
駒木根 隆士（秋田工業高等専門学校）

11:50-12:15 PEM2019-3

〔一般講演〕 シース付ダイポールアンテナによる液剤中光電界プローブの較正
チャカロタイ ジェドヴィスノブ（NICT）・石井 望（新潟大学）
和氣 加奈子・藤井 勝巳・渡辺 聡一（NICT）

場 所： 機械振興会館

主 催： 電子情報通信学会 光応用電界計測特別研究専門委員会
（<http://www.ieice.org/~pem/>）

併 催： 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
環境電磁工学研究専門委員会，無線電力伝送研究専門委員会

共 催： 電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ
機構デバイス研究専門委員会

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： 2019年 7月 19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

広帯域光電界センサを用いた球電極間 ESD による過渡電界の測定

石上 忍[†] 川又 憲[†] 嶺岸茂樹[†] 藤原 修[‡]

[†] 東北学院大学工学部 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

[‡] 電気通信大学産学官連携センター 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†] {shinobu, kawamata, smine}@mail.tohoku-gakuin.ac.jp, [‡] fujiwara@nitech.ac.jp

あらまし 充電物体との衝突や接触によって静電気放電 (ESD: electrostatic discharge) が発生し、インパルス性の過渡電圧変動が生じる。このインパルス性の電磁雑音は、デジタル化が進む情報通信機器・システムに対し情報信号の誤処理を誘発し、システムの正常な動作の妨げとなる。一方、情報通信機器・システム内部では、電子回路の高密度化、情報伝達信号の低電圧化、及び高速化が進み、外来電磁雑音、特に ESD などのインパルス性の雑音による影響を受けやすい傾向にあり、電磁両立性 (EMC: electromagnetic compatibility) 上の重要な問題となっている。ESD による電気電子機器の障害に対する対策を図るには、ESD 現象と発生する電磁雑音特性の関係を明らかにする必要がある。しかし、ESD による放射電磁波の電磁雑音特性は放電事象の複数のパラメータと関係するため、現象の究明は容易ではない。このような背景において、ESD によって発生する過渡放射電磁界の特異性と電磁界のレベル限界について理論的な検討がなされており、金属球間の直流による空気中の絶縁破壊による特異性や放射電界のレベル限界値が予測されている。またこの特異性に関連し、石上らは2つの電極に蓄積された電荷が放電時に電流となる「初期放電電流」によるものと、初期放電後に電極に流れる電流によるものの2つの ESD 電磁波源があることを示している。これらは、点電荷間で発生する放電経路をダイポールモデルとして考え、放射特性を検討したものである。実際の放射では、充電電荷を構成する電極ボリュームや電荷の移動範囲など、さらなる条件を実験により検証する必要がある。しかし、電極近傍での電磁界測定はシステムの構成上難しく、十分な検証が行われていないのが現状である。そこで本論文では、上述の過渡電磁界の放射特性を測定により検討するため、低侵襲性の光電界センサを用いて、放電電極近傍における過渡電界波形の測定を行った。放電電極に球電極を用い、マイクロギャップ ESD に伴う過渡電界波形の距離特性とその特徴について調べ、これまで予想されてきた ESD によって発生する電磁界について、ダイポール放射モデルの妥当性について検証する。

キーワード 静電気放電(ESD)、過渡電磁界、光電界センサ、準静電界、誘導界、放射界

Measurement of transient electric-fields emitted from ESD in spherical electrodes by using broadband optical electric-field sensor

Shinobu ISHIGAMI[†] Ken KAWAMATA[†] Shigeki MINEGISHI[†] and Osamu FUJIWARA[‡]

[†] Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University 1-13-1 Chuo, Tagajo, Miyagi 985-8537 Japan

[‡] Center for Industrial and Governmental Relations, University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585 Japan

E-mail: [†] {shinobu, kawamata, smine}@mail.tohoku-gakuin.ac.jp, [‡] fujiwara@nitech.ac.jp

Abstract A fast-transient electromagnetic field is emitted by an electrostatic discharge (ESD) event. The field caused by an ESD often gives a serious impact on electric/electronic equipment/facilities. Especially, a micro-gap discharge below 1 kV produces broadband electromagnetic noises of which frequency is more than several gigahertz. Therefore, we investigate an emission mechanism of transient electromagnetic fields due to the ESD event by using spherical electrodes. In this paper, the electric-field waveforms were measured using an optical electric-field sensor to elucidate the mechanism of the ESD event. As a result, we concluded that the measured electric field represent a feature of as including a quasi-static field, an inductive field, and a radiation field. It was confirmed that the mechanism of electromagnetic emission caused by the ESD in spherical electrodes could be explained as a dipole-radiation model.

Keyword electrostatic discharge (ESD), transient electromagnetic field, optical electric-field sensor, quasi-static field, induction field, radiation field

広帯域光電界センサを用いた 球電極間ESDによる過渡電界の測定

MEASUREMENT OF TRANSIENT ELECTRIC-FIELDS
EMITTED FROM ESD IN SPHERICAL ELECTRODES
BY USING BROADBAND OPTICAL ELECTRIC-FIELD SENSOR

石上 忍・川又 憲・嶺岸茂樹（東北学院大学）
藤原 修（電気通信大学）



PEM研究会
2019年7月19日 機械振興会館

ESDに伴うインパルス性電磁ノイズの発生

- ・充電物体との接触や衝突
 - ・デバイス実装時の電位差
 - ・機器操作時の人体行動
- ESD(静電気放電)が発生

ESDの過渡変動は非常に急峻かつ複雑

広帯域なインパルス性の電磁雑音源となる

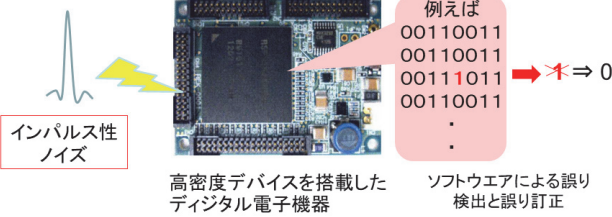
- ・変動成分が直接機器やデバイスに入り込む **伝導性ノイズ**
- ・変動成分の伝導により周辺の回路に結合混入 **結合性ノイズ**
- ・変動成分の伝導過程で電磁波として周囲に放射 **放射性ノイズ**

EMCの観点から多くの研究が古くからなされている

デジタル電子機器の免疫性とインパルス性雑音

- ・システム内信号レベルの低電圧化
- ・プリント配線等の高密度化
- ・内部クロック信号の高速化

→ インパルス性電磁雑音の影響を受けやすい傾向にある



→ ESDなどに起因するインパルス性電磁雑音に対する機器の免疫性を確保するため、ノイズの混入から障害発生までのメカニズムを正確に把握する必要がある

マイクロギャップESDによる放射電磁波の特異性

低い電圧による放電の方が電磁干渉レベルが高い場合がある

電磁雑音の周波数成分がマイクロ波帯域に及ぶことがある

特に1kV以下の放電に伴う絶縁破壊時の電極間における電位傾度は80MV/mに達する

特に1kV以下の放電に伴う過渡変動の立ち上がり時間は30ps以下、12GHz以上におよぶ。

1kV以下のマイクロギャップESDに着目し、放電パラメータ(放電電圧・電極サイズ)と電磁波放射特性について検討

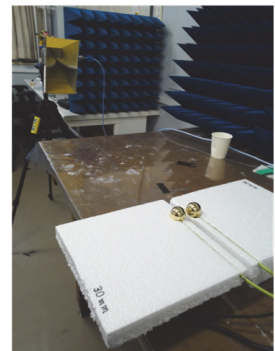
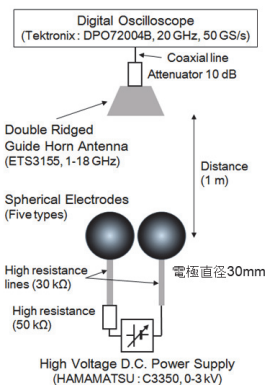
ESDによる電磁波放射のEMCモデル化

ESDによる電磁波放射のメカニズムと励振要素

- ①絶縁破壊時の電位傾度→②放電電流の過渡特性・様相→
- ③放電継続時間→④放電電流の経路長→⑤放射電磁波特性

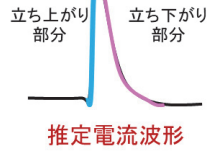
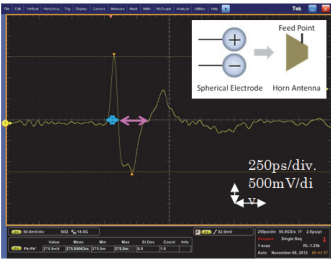
放電電極の規範モデルとしての球電極対を用いて、放電による放射電磁波の電界波形について測定した。

- ①ホーンアンテナによる遠方電磁界波形
- ②光電界センサによる極近傍電界波形
- ③近傍電界から遠方電界への波形の距離特性

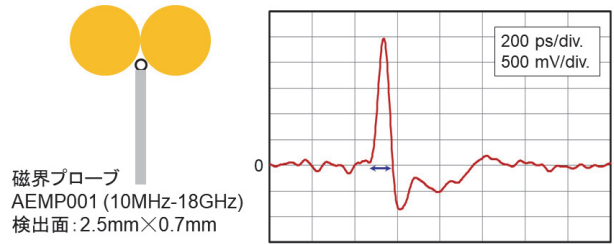


1-18 GHz 電磁波放射特性の実験システム

電磁波の放射強度は受信電圧波形の peak to peak値で測定(相対値)



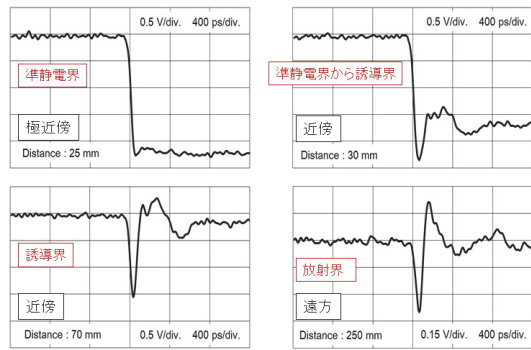
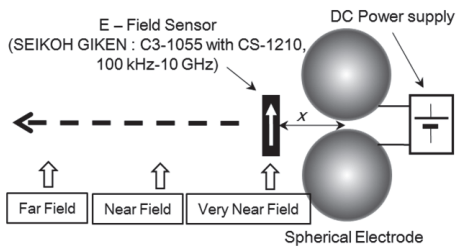
正の半サイクルは電流の立ち上がりにより
負の半サイクルは電流の立ち下がりにより



・立ち上がり時間約36ps, インパルス電流の過渡時間約100ps
・受信電圧波形の初期の半周期のパルス幅と概ね一致

球電極放電によって放射された電磁波の 受信電圧波形例(30mm電極, 400V)

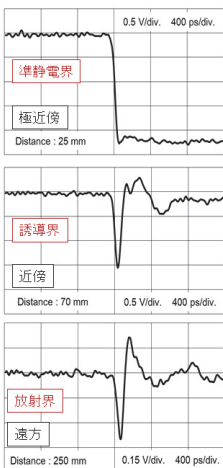
磁界プローブによる電流波形の測定例 (球電極直径30mm, 放電電圧600V)



電極直径30mm, 充電電圧500V

光電界センサによる電界波形測定

電界波形の測定結果

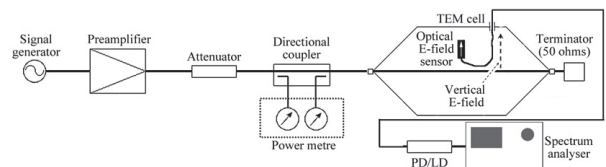


$$E_c(t) = -\frac{\mu_0 d_s}{4\pi} \left\{ \frac{c^2}{x^3} \int_0^t i_c(t_x) dt + \frac{c}{x^2} i_c(t_x) + \frac{1}{x} \frac{\partial i_c(t_x)}{\partial t} \right\}$$

$$t_x = t - \frac{x}{c}$$

式右側の{ }内において,
第1項: 準静電界を表現, 距離の3乗に反比例, 電流の過渡変化の時間積分, すなわち放電に寄与する電荷量に比例
第2項: 誘導電界を表現, 距離の2乗に反比例, 電流の過渡変化に比例
第3項: 放射電界を表現, 距離に反比例, 電流の過渡変化の時間微分に比例

初期放電電磁界の ダイポールモデル



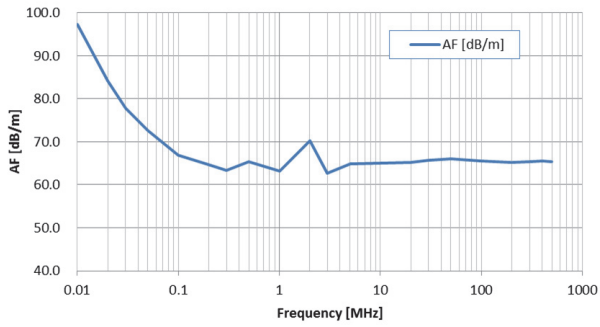
TEMセルにおける校正中心の電界 E_{T1} $E_{T1} = \frac{\sqrt{Z_0 P_{net}}}{d}$

TEMセルに入力される正味の電力 P_{net} $P_{net} = P_{fwd} - P_{rev}$

アンテナ係数 F_S $F_S = 20 \log_{10} \left(\frac{E_{T1}}{V_M} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{Z_0 P_{net}}}{V_M d} \right)$

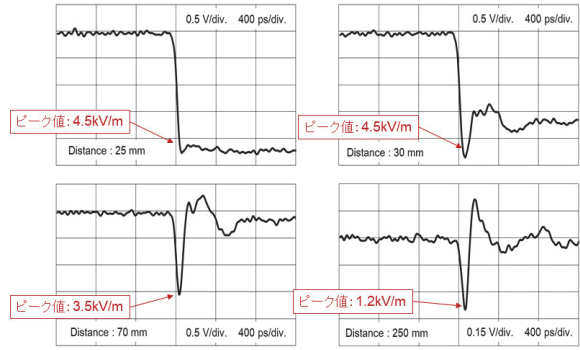


TEMセルを用いた光電界センサの アンテナ係数校正方法



使用した光電界センサのアンテナ係数

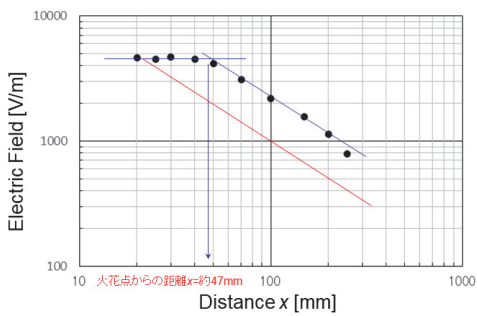
13



電極直径30mm, 充電電圧500V

電界強度のピーク値 (アンテナファクタ66dBフラットと仮定)

14



電極直径30mm, 充電電圧500V

近傍から遠方へのピーク電界値の変化

(1) 藤原修, 静電気放電 (ESD) に伴う過渡電磁界と特異特性, 静電気学会誌, 39, 2, pp.48-53 (2015)
 (2) 川文他, 球電極の低電圧ESDに伴うインパルス性放射電磁波の過渡特性と周波数スペクトル, 電気学会論文誌A, Vol.135, no.5, pp.265-270 (2015)

15

文献(1)では, $x > ct$ で放射が優勢

ここで,
 c = 光速
 t = 放電の継続時間

今回, 放電の継続時間として, 電極表面の電流経路長の伝搬時間と考えると, 直径30mm電極で $t = 157.3$ ps と推定 (文献(2))

以上から, 放射界の領域は $x > ct = 47$ mm と算出

まとめ

低侵襲性の広帯域光電界センサを用いて, 球電極マイクロギャップESDによる過渡電界波形の測定を行った。

- (1) 電極からの距離により, 極近傍で静電界波形, 近傍では誘導界波形, さらに遠方では放射界波形への変化が観測された。
- (2) この変化から, ESDによる電磁波放射は, これまでの想定どおりダイポールモデルからの放射メカニズムであると考えられる。
- (3) 界レベルについては, これまでの理論的考察結果との差異が見られ, 放射エレメントの定義等, 今後検討の必要がある。

謝辞: 光電界センサの借用に際して, 精工技研大沢氏に深謝いたします。

16

[依頼講演] 光変調散乱技術を用いた高周波電界センサ の開発と EMC スキャナへの応用

黒澤 孝裕[†] 駒木根 隆士[‡]

[†] 秋田県産業技術センター 〒010-1623 秋田市新屋町字砂奴寄 4-21

[‡] 秋田工業高等専門学校 〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町 1-1

E-mail: [†] kurosawa@ait.pref.akita.jp, [‡] komakine@akita-nct.ac.jp

あらまし 高周波電界中に設置した半導体からの散乱波を光変調して遠方に伝播させ、これを受信して散乱体位置の電界強度を測定する、光変調散乱技術を用いた高周波電界センサを開発した。アンドープゲルマニウム基板を散乱体に用い、1-18 GHz の周波数範囲で電界計測を可能とした。また、開放終端マイクロストリップラインの近傍界計測では、2 GHz において定在波の振幅および位相分布を計測できた。このセンサを EMC ノイズスキャナに応用し、電子機器から生じる放射電磁雑音を機器近傍から遠方まで評価可能とした。市販ギガビットイーサネットハブ回路基板の近傍電界分布を計測し、周波数により分布が異なることを明らかとした。

キーワード 電界計測, 変調散乱, 半導体散乱体, 光変調, 電磁環境両立性

[Invited Lecture] Development of High Frequency Electric Field Sensor with Optically Modulated Scattering Technique and its Application to EMC Noise Scanner

Takahiro KUROSAWA[†] and Takashi KOMAKINE[‡]

[†] Akita Industrial Technology Center, 4-21 Sanuki, Araya, Akita, 010-1623, Japan

[‡] National Institute of Technology, Akita College, 1-1 Iijima-Bunkyo-cho, Akita, 011-8511, Japan

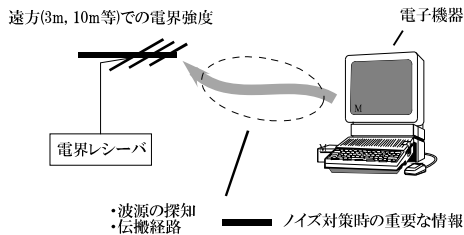
E-mail: [†] kurosawa@ait.pref.akita.jp, [‡] komakine@akita-nct.ac.jp

Abstract Electric field measurement sensor based on the modulated scattering technique with optically modulated scatterer had developed. The scattered wave by the semiconductor scatterer was modulated with the light which has higher energy than the band-gap energy of the semiconductor. By using germanium disk as the scatterer, microwave field could be detected in the frequency range of 1-18 GHz. On near field measurements, distribution of the in-plane field component on the microstrip line and the patch antenna could be measured. This sensor was adopted to the EMC scanner, which could measure the microwave electric field distribution on electric equipment. Measurement of the field distribution on the giga-bit ethernet switching hub was demonstrated.

Keywords electric field measurement, modulated scattering, semiconductor scatterer, microwave field, EMC scanner

背景

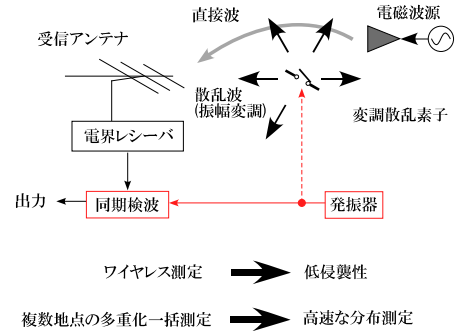
電子機器から放射される電磁妨害波…許容値、試験法が規定されている



電界センサに求められる特性
 ・十分な感度、周波数特性、空間分解能
 ・ケーブル等の金属による電界の乱れを抑える → 誘電体散乱を利用した電界計測

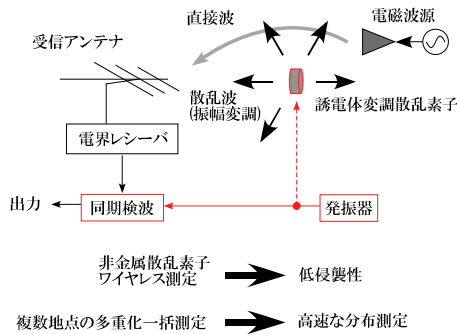
変調散乱手法による電界計測

交流電界中に散乱効率可変の散乱素子を設置
 直接波+散乱波を遠方で観測し、同期検波で散乱波強度を抽出
 → 散乱体位置の電界強度がわかる



誘電体散乱を利用した電界計測

交流電界中の誘電体…分極し、電磁波の再放射(散乱)を起こす
 散乱される電磁波を遠方で観測する…散乱体位置の電界強度がわかる



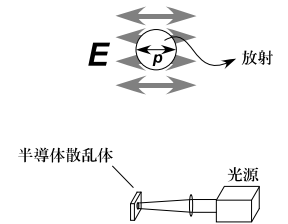
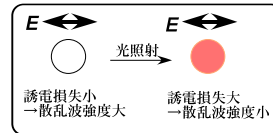
散乱波の光変調

・半導体にバンドギャップより大きなフォトンエネルギーの光を照射
 → 導電率(誘電率の虚部)が増加

$$\epsilon = \epsilon' + j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

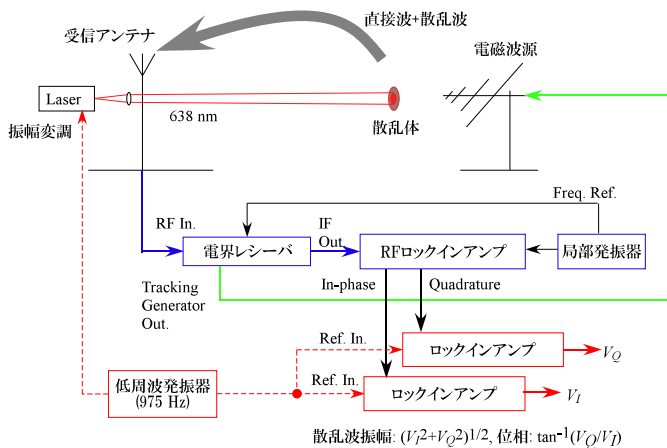
σ : 導電率
 ω : 角周波数
 ϵ_0 : 真空の誘電率

から誘電正接 $\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon' \epsilon_0}$ となり、

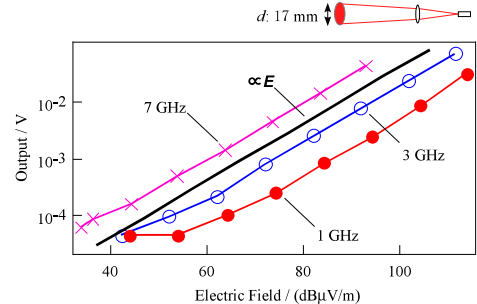


照射光強度を変調することで、散乱波を振幅変調できる

遠方界計測システムのブロック図

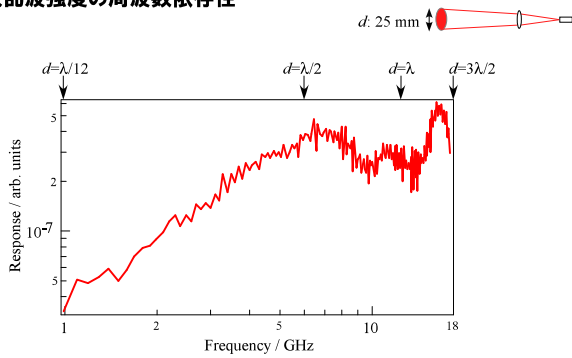


散乱波強度の電界強度依存性



- ・良好な直線性
- ・ダイナミックレンジ40dB以上
- ・周波数大 → 散乱波強度大
- ・感度 65 dBμV/m (1 GHz)

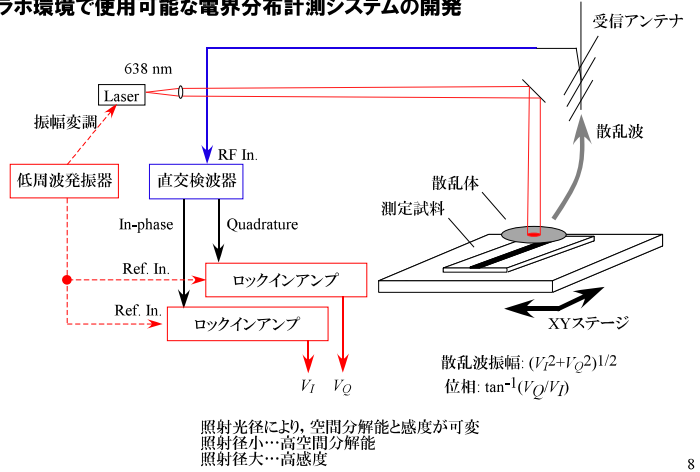
前方散乱波強度の周波数依存性



- 1 GHz-18GHzで散乱波を検出
- 微小散乱体 ($d \ll \lambda$) ~ 波長と同程度の散乱体 ($d \sim \lambda$) で電界計測可能
- $d < \lambda/2$ では周波数大→出力大
- $d = \lambda/2$ を超える周波数で飽和, うねりを生じる

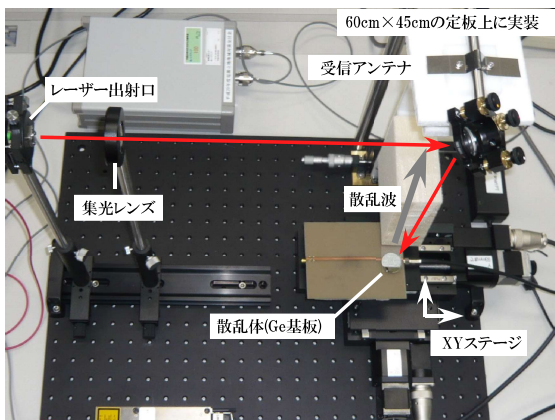
7

ラボ環境で使用可能な電界分布計測システムの開発



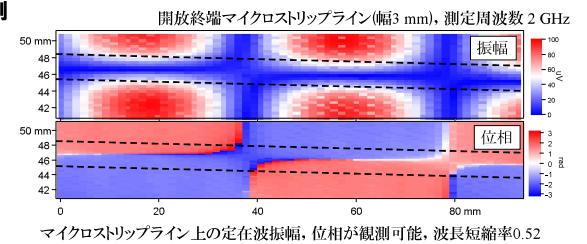
8

実証試験機の外観



9

計測例



10

EMCスキャナへの応用

あきたイノベーション創出研究開発事業に採択
 ...秋田県内企業2社以上・県内大学・公設試で構成
 事業期間...3か年
 研究代表者: 黒澤 孝裕

株式会社三栄機械 (秋田県由利本荘市)

- 管理法人
運営管理, 資金管理, 調整
- 研究実施機関
プローブ開発
機械設計, 製作
展示等の販促活動

株式会社アイ・クエスト(東京都千代田区)

- 販促活動
営業パートナー

株式会社ケーエンジニアリング(秋田県秋田市)

- 研究実施機関
電気, 信号処理設計, 開発
計測ソフトウェア開発

秋田県産業技術センター(秋田県秋田市)

- 研究実施機関
EMCスキャナの技術指導
関連技術の移転
知的財産調査
性能評価

11

EMCスキャナへの応用...電磁波源周辺の電界分布を計測

不要輻射対策の際の波源探知
 アンテナ開発時の近傍界測定

- スキャン範囲: 300 mm x 200 mm x 50 mm
- 周波数範囲: 800 MHz ~ 6 GHz
- 空間分解能: 最小1mm 以下, 可変

- 試料外観と電界分布との重ね合わせ表示
...容易な波源探知
- 試料高さ計測用の距離計装備
...測定高の簡便な決定
- 卓上設置, 持ち運び可能

EMCスキャナ 外観



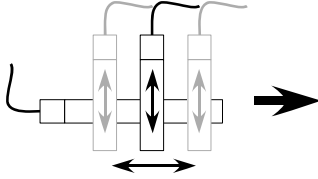
12

計測システムのノイズ低減

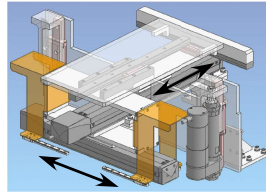
駆動アクチュエータを固定したXYスキャン機構の開発

- ・動力線が固定可能
- ・メンテナンスが容易、アクチュエータからのノイズ低減
- ・各軸の負荷がほぼ均等
- 両軸とも高速移動可能

2段階積層型



アクチュエータ固定型



13

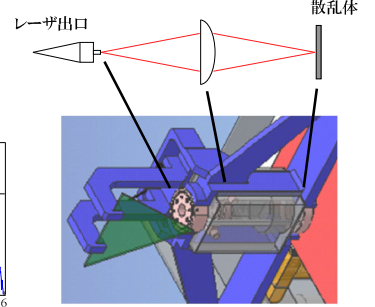
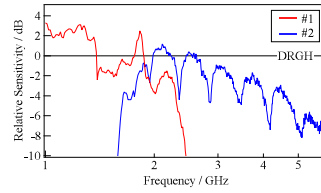
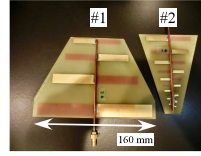
センサープローブの開発

散乱波受信アンテナ

- ・軽量、低姿勢なアンテナを設計・試作
- ・プリント基板上に作成し、薄型・高機械的強度
- ・使用帯域内でダブルリジッドコイルホーン(DRGH)アンテナと同程度の感度を確保

プローブ光学系

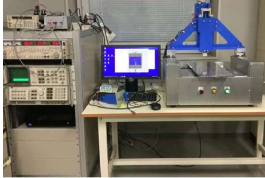
- ・全部材を非金属化
- ・プローブ、フレームの一体化による高剛性構造
- ・レーザー安全基準を満たす筐体



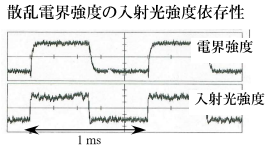
14

信号処理系の改良

スペクトラムアナライザ+ロックインアンプ

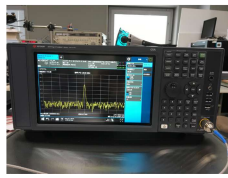


時間軸での信号処理

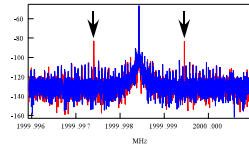


入射光強度に対応した電界強度の周期的な変化を検出

スペクトラムアナライザのみ



周波数軸での信号処理

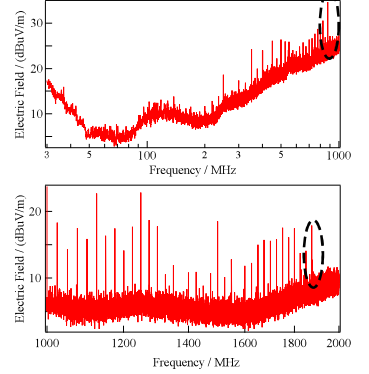


振幅変調による側帯波を検出

15

計測例：市販ギガビットイーサネットハブ

放射電界強度(水平偏波, 測定距離3m)



基板外観

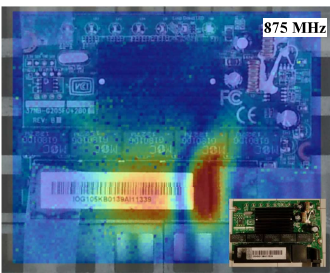


外寸: 100 mm × 65 mm

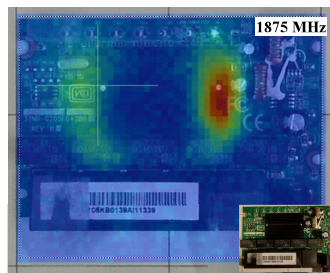
25 MHz間隔で生じる放射のうち、875 MHz、1875 MHzの電界強度分布を計測

16

計測例：市販ギガビットイーサネットハブ



コネクタ部分が強い



放熱器両端が強い

1/4λ共振による放射効率の上昇を示唆

電界分布計測により

- ・電磁波源の位置が異なることが明らか
- ・放射メカニズムが異なることを示唆

17

結び

半導体を散乱体に用い、その複素誘電率を光変調することによって散乱波を光変調する光変調散乱素子を作成し、高周波電界を計測した

- ・遠方界での感度: 65 dBuV/m (1 GHz)
- ・少なくとも1-18 GHzの範囲で電界計測可能
- ・電界の振幅, 位相分布を計測可能

光変調散乱素子を用いた高周波電界センサの応用として、

電子機器近傍のマイクロ波電界分布を計測するEMCスキャナを開発した

- ・周波数範囲 800 MHz-6 GHz
- ・スキャン 範囲 300 mm × 200 mm
- ・空間分解能 1 mm以下

市販電子機器の回路基板上的電界分布を計測

- ・周波数により電界分布が異なる
- 放射メカニズムが異なることを示唆

謝辞

本研究の一部は、科学研究費助成事業(23560430, 15K06124)の助成を受けて実施したEMCスキャナの開発に当たり、あきたイノベーション創出研究開発事業の助成を受けた

18

シース付ダイポールアンテナによる液剤中光電界プローブの較正

チャカロタイ ジェドヴィスノブ[†] 石井 望^{†,‡} 和氣 加奈子[†] 藤井勝巳[†] 渡辺 聡一[†]

[†] 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

[‡] 新潟大学工学部 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地

E-mail: [†] {jerd, kana, wata}@nict.go.jp, [‡] nishii@eng.niigata-u.ac.jp

あらまし これまで、著者らは MHz 帯無線電力伝送システムに対するばく露評価のために用いる生体組織等価液剤ファントム内電界プローブに対して、シース付ダイポールアンテナを用いたプローブ較正法を提案してきた。その原理として、電力伝送公式を利用して、2 アンテナ法によりシース付ダイポールアンテナの送信アンテナ係数を距離の関数として決定することで、シース付ダイポールアンテナが液剤中に発する平均電界強度の距離特性を推定することができることを示した。本研究では、光電界プローブのための較正システムを構築し、これまで提案した較正法を用いて、濃度 0.074 mol/l の液剤ファントム内の光電界プローブに対して 100 kHz 及び 6.8 MHz において、較正係数を決定した。

キーワード 無線電力伝送, 光電界プローブ, ダイポールアンテナ

Calibration of Optical Electric-Field Probe in Liquid Phantom Using Sheathed Dipole Antenna

Jerdvisanop CHAKAROTHAI[†] Nozomu ISHII^{†,‡} Kanako WAKE[‡] Katsumi FUJII
and Soichi WATANABE[‡]

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

[‡] Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-nocho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 Japan

E-mail: [†] {jerd, kana, wata}@nict.go.jp, [‡] nishii@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract In order to check compliance for MHz-band wireless power transfer systems, we have proposed a calibration method for electric-field probe immersed inside a liquid phantom simulating a biological tissue by using a sheathed dipole antenna. We use the proposed method to determine the distance characteristics of transmitting antenna factor of the sheathed dipole antenna by using two-antenna method via the power transmission formula and, then, estimate the distance characteristics of average electric-field strength created by the sheathed dipole antenna in the liquid phantom. In this paper, we construct a calibration system for an opto-electric probe immersed inside the liquid phantom with a concentration of 0.074 mol/l and calculate the conversion factor for the probe at 100 kHz and 6.8 MHz.

Keyword Wireless power transfer, optical electric-field probe, dipole antenna

1. まえがき

無線電力伝送をはじめとする MHz 帯を利用する電波利用機器の普及に伴い、それらの機器に対する電波の安全性を評価するための指標である比吸収率 (Specific Absorption Rate, SAR) を測定する必要がある [1]. 比吸収率の測定においては、液剤ファントム内の電界強度を測定するために、電界プローブが用いられる。この電界プローブ先端における正確な電界強度を知るためには、電界強度とプローブ出力電圧を関連付ける必要がある。この作業をプローブ較正という [2].

これまで液剤ファントム内電界プローブの較正はマイクロ波帯において行われてきた。例えば、文献 [3-8] では、液剤中ダイポールアンテナ又は導波管から発生した電磁界のエネルギー吸収によって生じる温度上昇を計測し、その温度上昇から測定電界を推定し、出力電圧と関連付ける手法が用いられた [4-6]。しかしながら、MHz 帯において、ダイポールアンテナ及び導波管のサイズが大きすぎるため、実用上適用困難である。近年では、MHz 帯プローブ較正のために、同軸型較正システムが開発されたが、損失を有する液剤の温度を上昇

させるために、大きな電力が必要になる問題がある[7].

これらの問題を解決するために、著者らはこれまで液剤ファントム内において既知の電界強度を発生させる「標準アンテナ法」について検討を行ってきた[9]. 一般に、遠方界領域で考えることができる際は、標準アンテナによる電界強度はその利得から見積もることができる. しかしながら、減衰の大きい液剤中では、遠方界領域での測定は困難である. このため、著者らは、利得を距離の関数である近傍界利得に置き換え、アンテナ近傍における測定から電界強度を推定する方法を確立した.

MHz帯における液剤ファントム内では、電磁波の実効波長が実験室内に設置可能な水槽の寸法よりも大きく、水槽内での近傍界利得の推定が難しい. この問題を解決するために、著者らはダイポールアンテナの電界強度のみに着目するプローブ較正法について検討している[10]. 自由空間における微小ダイポールアンテナもしくはモノポールアンテナのアンテナ係数に関する検討が行われている[11, 12]. 著者らは、送信アンテナ係数を用いて自由空間における定式化を一様損失媒質に拡張することを試み、モーメント法により、電界強度推定の実現性を確認した[13]. また著者らは、電力伝送係数の公式に含まれるリアクション積分に基づき、ダイポールアンテナに生じる電流分布の形を重みとするような平均電界強度を導入することで、標準電界を推定するための定式化を更新した. これまでこの較正法を適用するために MHz帯プローブ較正システムを実際に構築し、送信アンテナ係数の距離特性の測定値より定式化の妥当性を確認した. そして実際に SARプローブの較正係数の算出事例を示すと共に、較正法に関わる不確かさを明らかにした[13].

本論文では、同様な較正法で液剤中光電界プローブの較正を行うために、新たに較正システムを構築し、光電界プローブの較正係数を求めることを目的とする. 光電界プローブを用いることのメリットとして、通常の SARプローブよりも感度良く小さな電界強度を測定できる. また発生源から生じる電磁界の時間的な変化をとらえることができる.

2. 較正手順及び較正システム

本節では、シース付ダイポールアンテナの送信アンテナ係数やアンテナからの放射電磁界等の細かい数式の導出は参考文献[13]に参照するとし、実際の較正手順及び較正システムについて説明する. 本較正法では、液剤ファントム内の電界プローブや光電界プローブの較正のために、以下の Step 1-3を行う[13].

Step 1: 伝送特性の測定／液剤ファントム内に特性が同じであるとみなせるシース付ダイポールアンテナを対向させ、 S パラメータの距離特性を求めてから、送

信アンテナ係数の距離特性を求める.

Step 2: 受信電圧の測定／送信アンテナ係数の距離特性が平坦となるプローブの較正位置を決定し、受信用ダイポールアンテナを電界プローブ又は光電界プローブに置き換え、受信電圧 V_m を測定する.

Step 3: 較正係数の算出／シース付ダイポールアンテナから生じる較正位置での標準電界強度 E_m^0 を送信アンテナ係数を用いて算出し、受信電圧 V_m との比を取ることによって較正係数(Conversion Factor) K を決定する. 以下、本較正法で用いたダイポールアンテナ及び構築した測定システムについて概説する.

2.1 液剤中シース付ダイポールアンテナ

プローブ較正に使用するシース付ダイポールアンテナの概略図を図1に示す. 平衡給電を行うために、180度ハイブリッド結合器を利用する. ハイブリッド結合器の0°と180°ポートにセミリジッドケーブルを接続し、2つの外導体を短絡場所において半田付けする. セミリジッドケーブルの終端で、内導体を折り曲げることでダイポールアンテナを形成する. ハイブリッド結合器のアイソレーションポートにはダミー抵抗を接続する. さらに、外部損失媒質への導電電流による電力損失を防ぐために、内導体の折り曲げ部分である給電箇所を低損失誘電体で覆う[14]. ダイポールアンテナの長さは $l = 100$ mm である.

送受信用シース付ダイポールアンテナには、Werlatone社製180°ハイブリッド結合器(Model: 6287-12, 100 kHz-50 MHz, 500 W)が取り付けられている. これらの180°ハイブリッド結合器は同一の特性を持つと仮定し、かつ、ダイポールアンテナの特性に180°ハイブリッド結合器による効果を含めて取り扱うものとする.

2.2 伝送特性測定及び送信アンテナ係数の算出 (Step 1)

Step 1で用いる測定システムの概要図及び実際に構築したシステムを図2に示す. 測定システムには、ベクトルネットワークアナライザ(Agilent, E5071C)、水槽及び送受信用シース付ダイポールアンテナ(ハイブリッド結合器を含む)から構成されている. ベクトルネットワークアナライザからダイポールアンテナに接続されている180°ハイブリッド結合器までのケーブルに、コモンモード電流を低減させるためのフェライトコアを複数個取り付けている. 水槽の寸法は、底面が 470×470 mm² であり、高さが390 mm である. その内、300 mmの高さまで濃度0.074 mol/lの食塩水で満たす. 食塩水の電気的特性は、実測から MHz無線電力伝送システムに用いられる6.8 MHzにおいて、比誘電率の実部 $\epsilon_r = 92.99$, 導電率 $\sigma = 0.907$ S/mであった. 図2に示すように、水槽底面中央より150 mmの位置にセミ

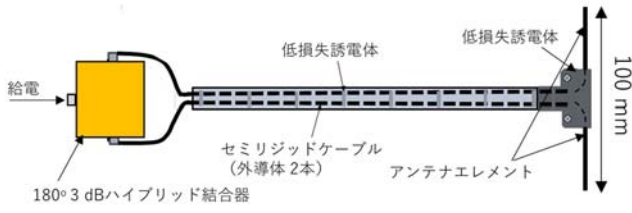


図 1 シース付ダイポールアンテナの概略図

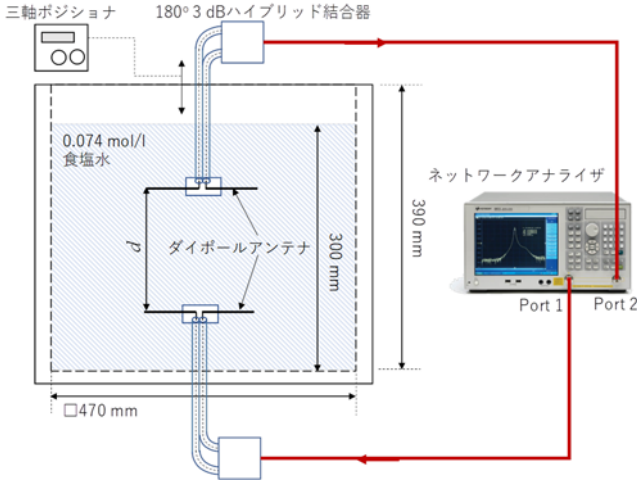


図 2 伝送特性の測定システム

リジッドケーブルを介して給電されたシース付ダイポールアンテナを設置する．もう一方のダイポールアンテナは，水槽上部より，下方固定ダイポールアンテナと対向するように設置する．ダイポールアンテナ間の距離は三軸ポジショナ(Device 社製)によって変化させた．ここで，ダイポールアンテナ間の距離 d は送受信用ダイポールのエレメント間距離とする．

上記の測定システムを用いて，シース付ダイポールアンテナ間の S パラメータから電力伝達係数 ξ を以下の式によって求めることができる．

$$\xi(d) = \frac{|S_{21}(d)|^2}{\{1 - |S_{11}(d)|^2\}\{1 - |S_{22}(d)|^2\}} \quad (1)$$

ただし， d はダイポールアンテナ間の距離である．一方，送受信用ダイポールアンテナが同じ特性であるという条件が満足すれば，送信アンテナ係数は以下の式によって算出することができる[13]．

$$|F^e| = \left(\frac{\sqrt{\xi(d)}}{|\kappa(d)|} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで，

$$\kappa(d) = \frac{1}{16\pi} \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon}}{\left\{ l^e \sinh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \right\}^2} \int_{-l/2}^{l/2} \left\{ \frac{e^{-\gamma R_1}}{R_1} + \frac{e^{-\gamma R_2}}{R_2} - 2 \cosh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \frac{e^{-\gamma R_0}}{R_0} \right\} \sinh\left\{ \gamma \left(\frac{l}{2} - |z| \right) \right\} dz. \quad (3)$$

$\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon} = \alpha + j\beta$ ， α 及び β はそれぞれ媒質の減衰定数及び位相定数で， ω は角周波数である． μ_0 及び ϵ はそれぞれ透磁率及び媒質の複素誘電率である． l はアンテナ長であり， l^e はダイポールアンテナの実行長で，以下の式で求めることができる．

$$l^e = \frac{2 \cosh(\gamma l/2) - 1}{\gamma \sinh(\gamma l/2)} \quad (4)$$

R_0 ， R_1 及び R_2 は以下の式で求めることができる．

$$R_0 = \sqrt{d^2 + z^2}, \quad (5)$$

$$R_1 = \sqrt{d^2 + (z - l/2)^2}, \quad (6)$$

$$R_2 = \sqrt{d^2 + (z + l/2)^2}, \quad (7)$$

2.3 プローブ較正システム及び較正係数の算出 (Step 2 及び Step 3)

Step 2 でのプローブを構成するためのシステムの概要図及び実際のシステムを図 3 及び図 4 に示す．図 3 に示されているように，較正システムには，任意信号発生器(Agilent, 33210A)，増幅器(BONN Elektronik, BSA0110-100)，双方向性結合器(Werlatone, C6442-10, 10 kHz-400 MHz, 100 W)，減衰器(Narda, 150 W)，パワーセンサ(Agilent, E8304A)，パワーメータ(Agilent, E4417A)，水槽，送信用シース付ダイポールアンテナ，180°ハイブリッド結合器(Werlatone, H6287-12)，光電界プローブ(精工技研, CS-1607)，光コントローラ(精工技研, C5-A11-1)，低ノイズ増幅器(SONOMA, 50 dB, 10 kHz-1 GHz)，オシロスコープ(Rohde & Schwarz, RTO 1004, 10 GSa/s, 帯域 600 MHz)，三軸ポジショナ(Device 社製)から構成されている．図 4 に示すように，上方のダイポールアンテナを光電界プローブに置き換えた較正となっている．アンテナに供給される正味の入力電力 P_a はパワーセンサを用いて測定する．このシース付ダイポールアンテナから発した電界を光電界プローブ先端で受信し，受信した信号は光変調器により光に変換され，ファイバを通して光コントローラで電気信号に戻される．この電気信号をオシロスコープで受信し，フーリエ変換によって受信電力及び受信電圧を求めることができる．そしてシース付ダイポールアンテナから生じる標準電界強度を以下の式によって求める．

$$|E_z^m(d)| = 2\sqrt{2}\sqrt{P_a}|F^e||\kappa(d)| \quad (8)$$

得られた標準電界強度 E_z^m と光電界プローブによる受信電圧と関連付けることによって較正係数を求めることができる．従って較正係数は

$$K = \frac{|E_z^m|}{V_m} \quad (9)$$

で表される．文献[13]では，較正係数がプローブに用いるダイオードの二乗検波特性から電界強度と受信電圧の二乗との関係で表されているが，本研究では，光電

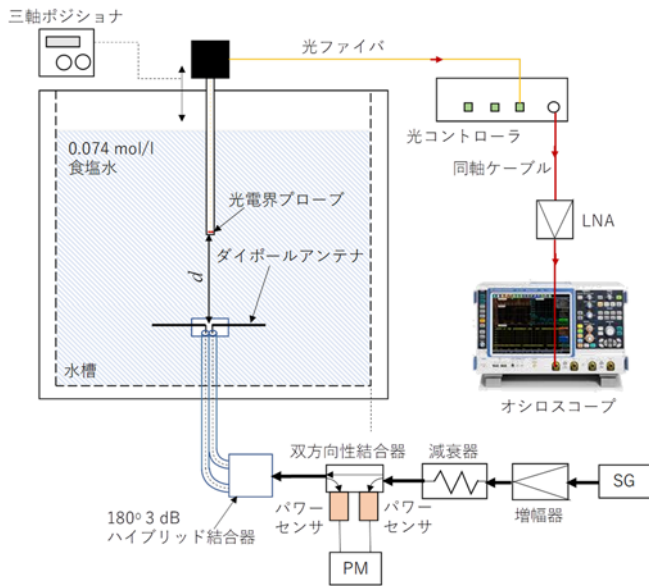


図3 プロブ校正システム

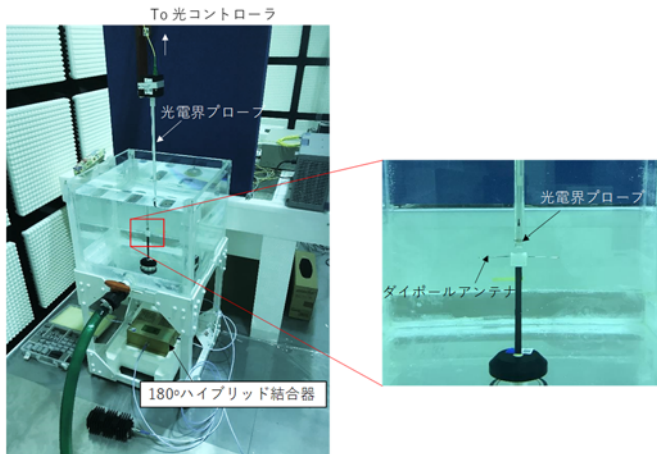


図4 実際のプロブ校正システム

界プローブを用いているため、電界強度と受信電圧との関係は比例関係となっている。従って、校正係数は式(9)に示されているように、電界強度と受信電圧との単純な比で表される。

3. 光電界プローブの校正

光電界プローブの校正係数を算出するために、上記の Step1-3 に従って校正を実施する。まず Step1 において、図2に示されている測定システムを用い、Sパラメータを測定する。式(2)よりSパラメータから送信アンテナ係数 F^e を求めた結果を図5に示す。文献[13]から送信アンテナ係数はほぼフラットの特性を有するが、本検討では、アンテナ間距離が大きくなるにつれ、送信アンテナ係数も少しずつ大きくなる傾向が見取れる。著者らのこれまでの検討[13]において、アンテナ距離間が 80 mm-100 mm のときに理論値と良く合うということから、80 mm-100 mm のときの送信アンテナ係数の平均値を用いて、Step 2 における光電界プロ

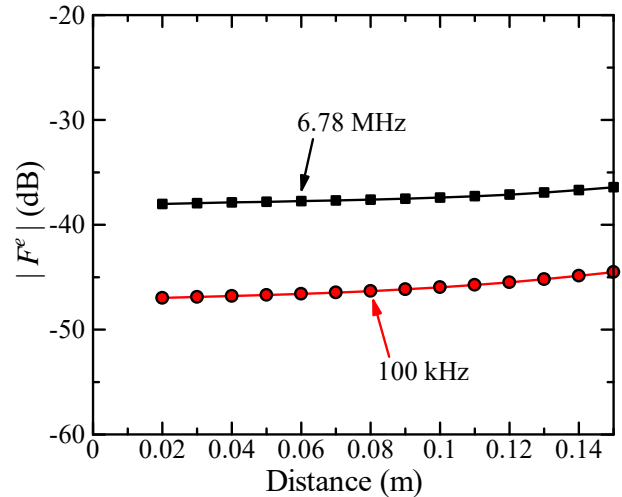


図5 ダイポールアンテナの送信アンテナ係数

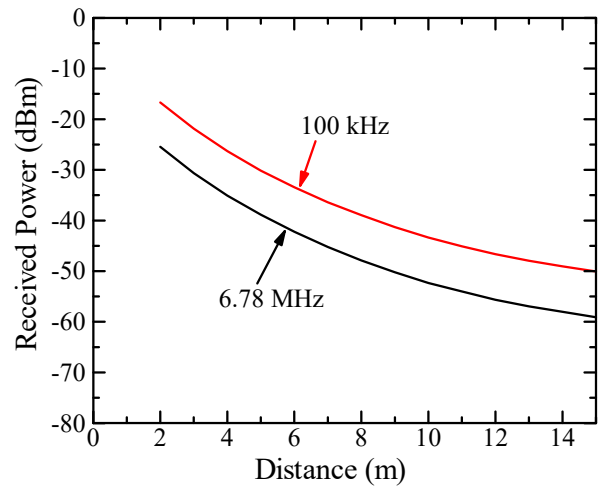


図6 光電界プローブの受信電力の距離特性

ブの校正に進むことにする。6.78 MHz 及び 100 kHz における送信アンテナ係数 F^e はそれぞれ -37.5 dB 及び -46.1 dB と求められた。

次に、受信ダイポールアンテナを光電界プローブに置き換え、Step 2 に示す校正システムを用い、光電界プローブから出力電圧を計測する。本研究では、6.78 MHz における送信アンテナへの入力電力が 11.16 W で、100 kHz の入力電力は 1.014 W である。それぞれの周波数で受信電力の距離特性を図6に示す。ここで注意しなければならないことは、図3に示すように、本校正システムでは、光コントローラからの出力を 50 dB の低ノイズ増幅器を通してからオシロスコープに入力していることである。従って、校正係数にはこの 50 dB の低ノイズ増幅器の効果が含まれており、実際の電界測定を行うときに正しく電界強度を変換するためには図3と同じ構成で測定システムを構築しなければならない。

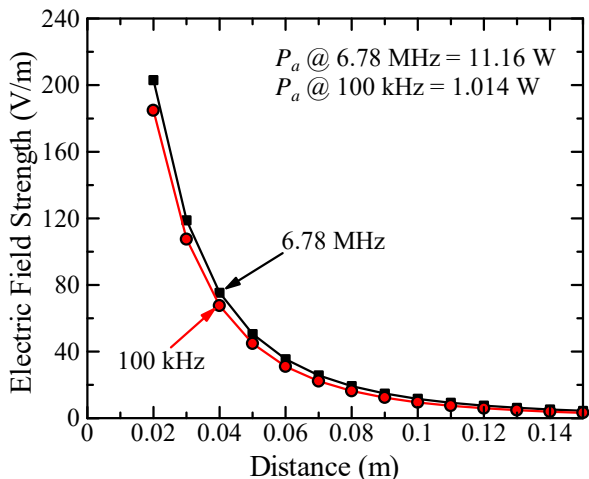


図7 送信アンテナ係数から求めた平均電界強度の距離特性

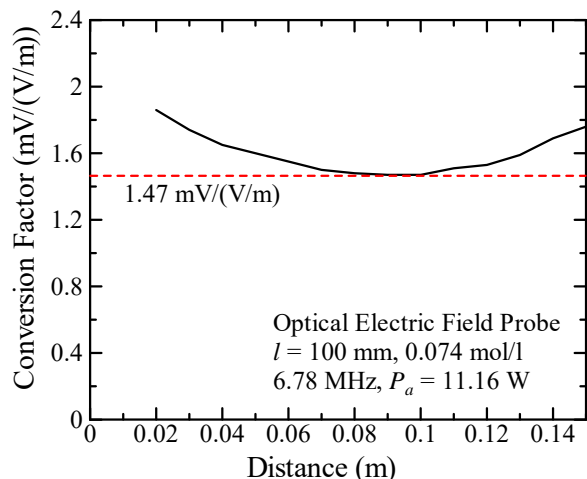


図8 6.78 MHzにおける光電界プローブの較正係数

最後に Step3 における較正係数を算出する。図6の受信電力の結果から、 50Ω 終端のときに生じた受信電圧を求め、Step1 で求めた送信アンテナ係数から電界強度を算出し、式(9)に示すように、受信電圧と電界強度との比を取ることで、較正係数を求めることができる。図7には送信アンテナ係数から求めた平均電界強度の距離特性を示している。この平均電界強度と受信電圧と関連付けた較正係数を算出した結果を図8及び図9に示す。較正係数の値は小さくなってから100 mm以降にまだ大きくなることが分かった。100 mm以降の較正係数が大きくなる理由としては、光電界プローブが液面に近づくとつれ、液面からの影響が大きくなることが考えられる。また図8及び図9を比較すると、周波数が低い100 kHzの方が液面の影響が強く出ていることも見て取れる。本研究では、アンテナからプローブまでの距離 $d = 80\text{ mm}-100\text{ mm}$ の値の平均値を較正係数として算出した。その結果、6.78 MHz及び100 kHzにおける較正係数は $1.47\text{ mV}/(\text{V}/\text{m})$ 及び 4.97

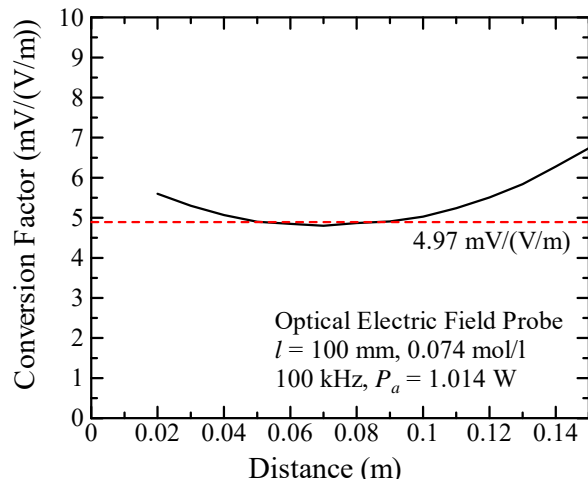


図9 100 kHzにおける光電界プローブの較正係数

$\text{mV}/(\text{V}/\text{m})$ と求められた。従って、著者らが提案した較正システムを用いることで、光電界プローブの較正係数を求めることができることを示した。今後、求めた較正係数の妥当性を検討していくことが考えられる。

4. 結言

本研究では、新たに光電界プローブのための較正システムを構築し、これまで著者らが提案した較正法を用いて、濃度 $0.074\text{ mol}/\text{l}$ の液剤ファントム内の光電界プローブに対して100 kHz及び6.8 MHzにおいて、較正係数を決定した。その結果、6.78 MHz及び100 kHzにおける較正係数は $1.47\text{ mV}/(\text{V}/\text{m})$ 及び $4.97\text{ mV}/(\text{V}/\text{m})$ と求められた。今後較正した光電界プローブを用い、標準波源近傍の電界分布等を測定した結果及びシミュレーションした結果との比較を行い、本較正法による較正結果の妥当性を検証していくことが考えられる。

謝辞 本研究は総務省受託研究「電波の安全性に関する評価技術研究」により実施されたものである。また情報通信研究機構の研究者である清水悠斗氏及び研修生として実験を手伝ってくださった於保英志氏に感謝する。

文 献

- [1] S. Shimoyama, J. Chakarothai, K. Wake, T. Arima, S. Watanabe, and T. Uno, "A new extrapolation expression for exposure evaluation inside a human-equivalent liquid phantom in the vicinity of wireless power transfer systems," *Annals of Telecommunications*, vol. 74, pp. 53-65, 2019.
- [2] IEC62209-1, "Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communications devices - Human models, instrumentation, and procedures," in *Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz)*, ed. Geneva: IEC, 2005.

- [3] D. A. Hill, "Waveguide Technique for the Calibration of Miniature Implantable Electric-Field Probes for Use in Microwave-Bioeffects Studies," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 30, pp. 92-99, 1982.
- [4] K. Meier, M. Burkhardt, T. Schmid, and N. Kuster, "Broadband calibration of E-field probes in lossy media [mobile telephone safety application]," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 44, pp. 1954-1962, 1996.
- [5] K. Jokela, P. Hyysalo, and L. Puranen, "Calibration of specific absorption rate (SAR) probes in waveguide at 900 MHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, pp. 432-438, 1998.
- [6] B. M. Hakim, B. B. Beard, and C. C. Davis, "Precise dielectric property measurements and E-field probe calibration for specific absorption rate measurements using a rectangular waveguide," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, Feb 19 2009.
- [7] B. G. Loader, A. G. Gregory, and D. Bownds, "Coaxial artefact standard for specific absorption rate 100 kHz to 400 MHz," in *PIERS Proceedings*, Beijing, China, 2009.
- [8] B. Loader, L. Hamada, S. Watanabe, and D. Bownds, "SAR probe calibration: the results of an inter-comparison study," in *EMC'09*, Kyoto, Japan, 2009, pp. 81-83.
- [9] N. Ishii, Y. Miyota, K.-i. Sato, L. Hamada, and S. Watanabe, "SAR-Probe Calibration System Using Reference Dipole Antenna in Tissue-Equivalent Liquid," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E95.B, pp. 60-68, 2012.
- [10] N. Ishii, J. Chakarothai, K. Wake, L. Hamada, and S. Watanabe, "Near-field measurement of transmit antenna factor of small dipole antenna in saline solution," in *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2017, pp. 1-2.
- [11] M. Kanda, "Standard antennas for electromagnetic interference measurements and methods to calibrate them," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 36, pp. 261-273, 1994.
- [12] M. Ishii and Y. Shimada, "A reference antenna method for non-resonant electrically short monopole antennas," in *2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2010, pp. 56-61.
- [13] N. Ishii, J. Chakarothai, K. Wake, and S. Watanabe, "A probe calibration in a liquid phantom using small dipole antennas for SAR measurements in MHz band," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, June 2019. (Accepted to published)
- [14] H. Sato, N. Fujii, Q. Chen, N. Ishii, M. Takahashi, R. Suga, K. Uesaka, and H. Yoshida, "Dipole antenna with sheathed-cover for seawater use," *Proc. 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017)*, POS1, 1376, Phuket, Thailand, Oct. 2017.

光応用電磁界計測（PEM）特別研究専門委員会について

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

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

<委員名簿>

委員長	水野 麻弥	情報通信研究機構
副委員長	鈴木 敬久	首都大学東京
幹事（研究会運営）	久武 信太郎	岐阜大学
幹事（財務）	笹川 清隆	奈良先端科学技術大学院大学
幹事（総務）	佐々木 愛一郎	近畿大学
幹事補佐	チャカロタイ ジェドヴィスノブ	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
	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
	膏藤 一幸	千葉大学
	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	共信コミュニケーション株式会社
	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
	土屋 明久	神奈川県立産業技術総合研究所
	鳥羽 良和	株式会社精工技研
	羽賀 望	群馬大学
	日景 隆	北海道大学
	平田 晃正	名古屋工業大学
	深沢 徹	三菱電機株式会社
	柳津 幸樹	株式会社多摩川電子
顧問	大西 輝夫	株式会社NTTドコモ
	黒川 悟	産業技術総合研究所
	村田 博司	三重大学
	陳 強	東北大学

* Facebook “Pem 研究会（光で電波を測る）”

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



* PEM 研究会コミュニティサイト “PEM-com”

PEM 研究会のコミュニティサイト「PEM-com」を開設しました。
このサイトは、PEM 分野の技術交流活性化のための
様々な情報発信に活用する予定です。現在、チュート
リアル記事等を公開しています。

URL : <http://pem.main.jp/>

