

PEM

第3回 光応用電磁界計測研究会

— RoF技術のEMC, アンテナ計測への応用 ・ 一般 —

PEM2018-8~11

2018年 11月19日(月)

於：機械振興会館

主 催：電子情報通信学会
光応用電磁界計測特別研究専門委員会
併 催：電子情報通信学会
無線電力伝送研究会 (WPT)

第3回 光応用電磁界計測研究会

プログラム

テーマ：「RoF技術のEMC, アンテナ計測への応用・一般」

2018年 11月 19日（月） 10時30分～16時40分

10:30-10:40 開会の挨拶

10:40-11:05 PEM2018-8

〔一般講演〕 環境磁界測定を目的とした光学素子一体型一軸磁気光学プローブの試作

加藤 佳仁(鉄道総研)・和氣 加奈子(NICT)・鈴木 敬久(首都大東京)

11:05-11:30 PEM2018-9

〔一般講演〕 短縮モノポールアンテナを用いた標準電界法による

光電界プローブ校正の一検討

チャカロタイ ジェドヴィスノブ・藤井 勝巳

和氣 加奈子・呉 奕鋒・渡辺 聡一(NICT)

15:00-15:50 PEM2018-10

〔依頼講演〕 樹脂筐体光プローブヘッドの開発と小型アンテナ測定

嶋原 亮・四方 勝(アルプス電気)

15:50-16:40 PEM2018-11

〔招待講演〕 光給電 RoF システムを用いた低周波ノイズ測定

土屋 明久・菅間 秀晃(KISTEC)・柳澤 幸樹(多摩川電子)

須賀 良介・橋本 修(青学大)

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
無線電力伝送研究会 (WPT)

本予稿集に掲載された論文等の著作権は著者に帰属します。

発行年月日：2018年 11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

環境磁界測定を目的とした光学素子一体型一軸 磁気光学プローブの試作

加藤 佳仁[†] 和氣 加奈子[‡] 鈴木 敬久[§]

[†] 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

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

[§] 首都大学東京 システムデザイン研究科 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

E-mail: [†] kato.yoshihito.23@rtri.or.jp, [‡] kana@nict.go.jp, [§] y_suzuki@tmu.ac.jp

あらまし 低周波数帯, 中間周波数帯の環境磁界測定を用途として, ファラデー効果を利用した磁気光学プローブを試作した. 本プローブは光ファイバーの曲げ等によって生じる測定値の変動を避けるために, 偏光子, 検光子という光学素子を一軸のファラデー回転子と一体化したものである. プローブヘッドと光ファイバーを移動させながら 50Hz, 300Hz, 500Hz の周波数の正弦波磁界を印加したところ, 安定した出力信号が得られることを確認した.

キーワード ファラデー効果, 磁気光学プローブ, 低周波磁界, 中間周波数帯磁界

Development of the single-axis magneto-optical probe incorporating optical elements for environmental magnetic field measurement

Yoshihito KATO[†] Kanako WAKE[‡] and Yukihsa SUZUKI[§]

[†] Maglev Systems Technology Division, Railway Technical Research Institute 2-8-38 Hkari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540 Japan

[‡] Applied Electromagnetic Research Institute, The National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukuikitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-8795 Japan

[§] Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University 1-1 Minamiohsawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397 Japan

E-mail: [†] kato.yoshihito.23@rtri.or.jp, [‡] kana@nict.go.jp, [§] y_suzuki@tmu.ac.jp

Abstract A prototype of the magneto-optical probe applying the Faraday effect has been developed to measure and evaluate environmental magnetic fields from the low frequency to the intermediate frequency. This probe is fabricated with single Faraday rotator by incorporating optical elements, i.e. a polarizer and an analyzer to avoid the fluctuation of measurement value caused by movement of optical fibers. Consequently, stable output signal from the developed probe is observed whenever the probe head and optical fibers are moved under applying the sinusoidal magnetic fields with the frequency of 50, 300, or 500Hz.

Keyword Faraday Effect, Magneto-optical probe, Low frequency magnetic fields, Intermediate frequency band magnetic fields

環境磁界測定を目的とした光学素子一体型一軸 磁気光学プローブの試作

Development of the single-axis magneto-optical probe incorporating
optical elements for environmental magnetic field measurement

加藤 佳仁(鉄道総合技術研究所)
和氣加奈子(情報通信研究機構)
鈴木 敬久(首都大学東京)

1

発表の内容

1. 研究の背景・目的
2. 従来のプローブにおける課題
3. 光学素子一体型磁気光学プローブの試作
4. 今後の予定、まとめ等

2

研究の背景

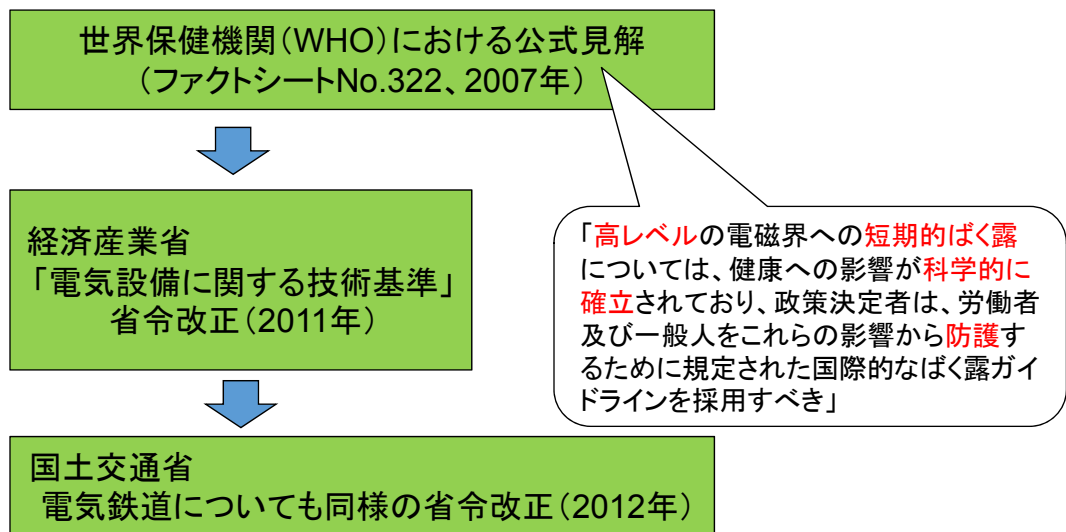
○低周波数帯(DC~100kHz)、中間周波数帯(300Hz~10MHz)の磁界を利用した機器類の開発(非接触給電等)

○これらの周波数帯の磁界に対する規制、規格の策定

→ 国際規格の発行等の国際的な関心

3

国内の低周波磁界に対する規制、規格の近年の動き



→ 鉄道の地上電力設備も対象に

4

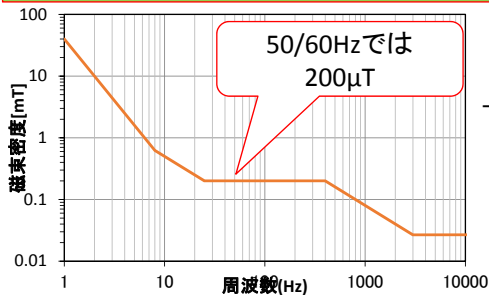
鉄道地上電力設備に対する規制

【地上設備・商用周波数に対する規制化】

2012年8月1日 国土交通省令 第69号

「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の一部を改正する省令」
第51条の2（電磁誘導作用による人の健康に及ぼす影響の防止）

一般公衆が立ち入らないように施設した柵等から
水平方向に0.2 mの地点で、**200 μ T** (商用周波数)



→電磁界の国際ガイドラインである
ICNIRPガイドラインに基づいた規制値

ICNIRP (国際非電離放射線防護委員会)
ガイドラインの参考レベル

5

低周波磁界の測定に関する主な国際規格等

名称	種別	内容	発行年
IEC 61786	「水平規格」	人体ばく露に関する低周波磁界及び電界の測定 — 測定器の特別要求事項及び測定の手引き	1998年
IEC 62233		家庭用電気機器及び類似機器からの 人体ばく露に関する電磁界の測定方法	2005年
IEC 62110	「垂直規格」	交流電力システムから発生する磁界及び電界の強さ — 公衆の人体ばく露を考慮した測定手順	2009年
IEC/TS 62597		鉄道施設の磁界の測定に関する技術仕様	2011年

鉄道に関しても2011年に技術仕様が発行

6

直流磁界に関する規格等

厚生労働省「植込み型心臓ペースメーカー等承認基準」
ISO 14708

「1mT 以下の直流磁界に対し誤動作の無いこと」

⇒1mT以上の直流磁界に対しては誤動作の可能性

本研究の目的

・環境磁界測定を用途とし、**広帯域**での測定が可能であると考えられる**ファラデー効果**を利用する**磁気光学プローブ**を試作し、直流磁界から数百kHz程度までの磁界検出の特性を把握する。

環境磁界測定(主に鉄道環境)に必要な要件

○周波数:

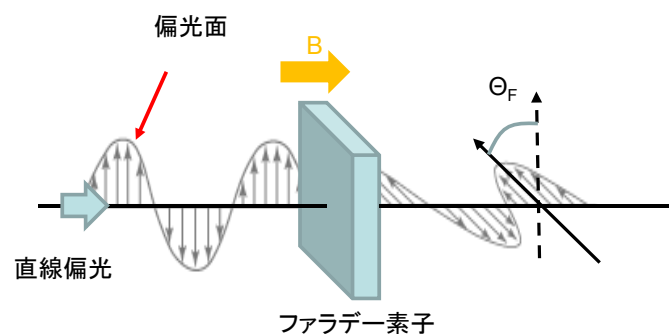
鉄道環境の磁界測定規格IEC/TS 62597, JIS E4018の対象周波数をカバーし(直流~20kHz)、さらに今後の新たな機器類の開発(WPT等)、規格改定等を見据えて、**直流~数100kHz程度**を対象とする。

○強度: 直流磁界は**1mT**がひとつの基準

→ この基準値より一桁高い10mT程度まで測定できることが望ましい

9

ファラデー効果



⇒ファラデー素子により磁場中では偏光面が回転する性質を利用

$$\theta_F = VB\ell$$

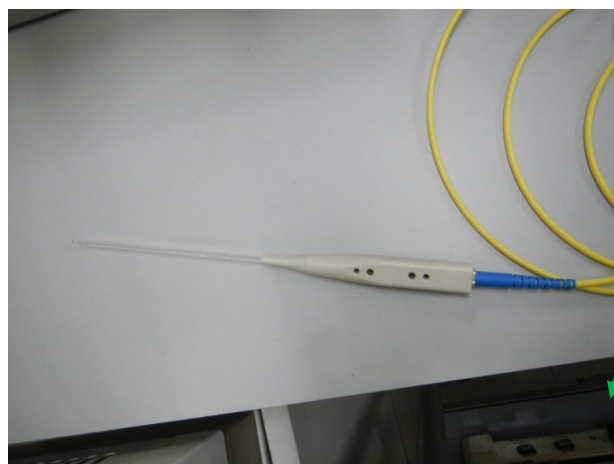
θ_F [rad]: ファラデー回転角

V [rad/(T·m)]: 物質固有の定数(ヴェルデ定数)、 B [T]: 磁束密度、

ℓ [m]: ファラデー素子の厚さ

→ 原理的に**広帯域**(周波数・ダイナミックレンジともに)での活用の可能性

ファラデー効果を利用した磁気光学プローブ



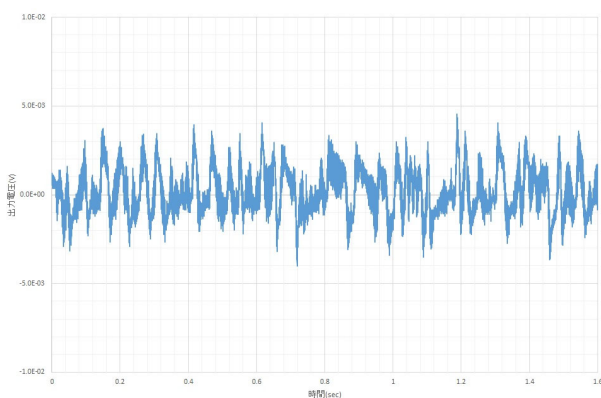
森田テック(株)製

→ 高周波で実績のあるプローブについて
所望する帯域の磁界で基礎的な測定を行った



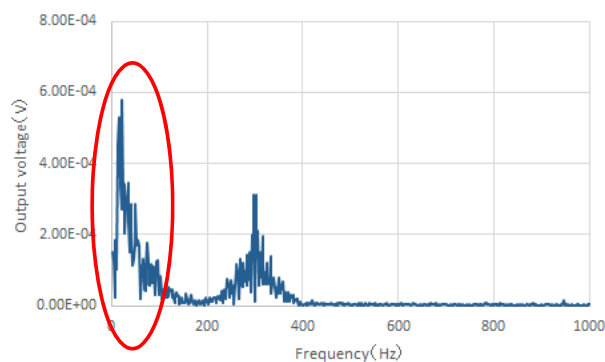
課題①極低周波域にノイズが重畳

時間波形例



低周波で大きく揺らいでいる

出力電圧の周波数解析例



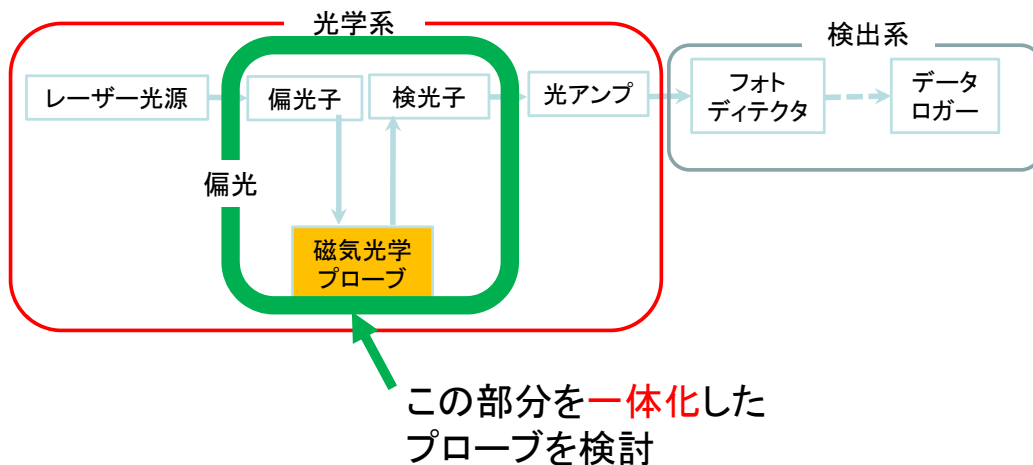
約100Hz以下でノイズが増大



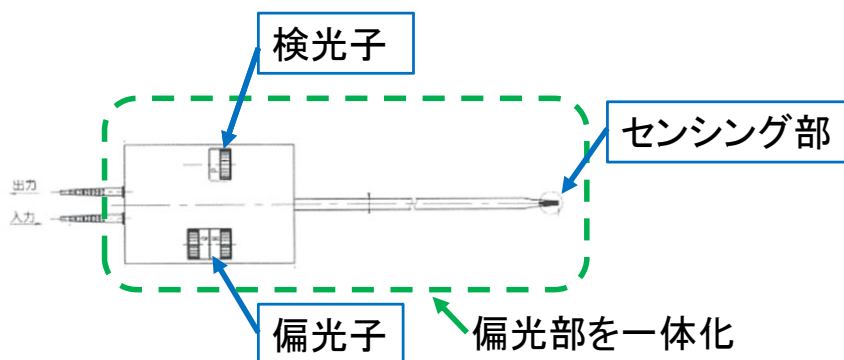
課題②偏光が通過する光ファイバー一部の曲げによる出力変動

- 当プローブは元々電子基盤等から発するノイズの測定等に活用
→測定対象側(電子基盤等)を移動させて測定を行う
⇒環境磁界測定を用途とするとこの部分の固定等が必要

測定系統図



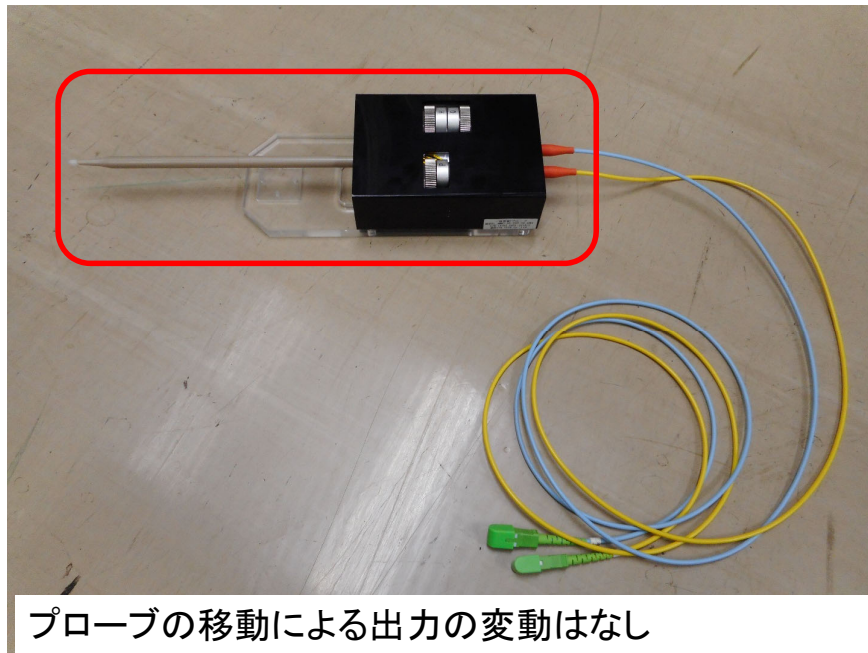
環境磁界測定を用途とする 偏光子～検光子間を一体化した磁気光学プローブの試作



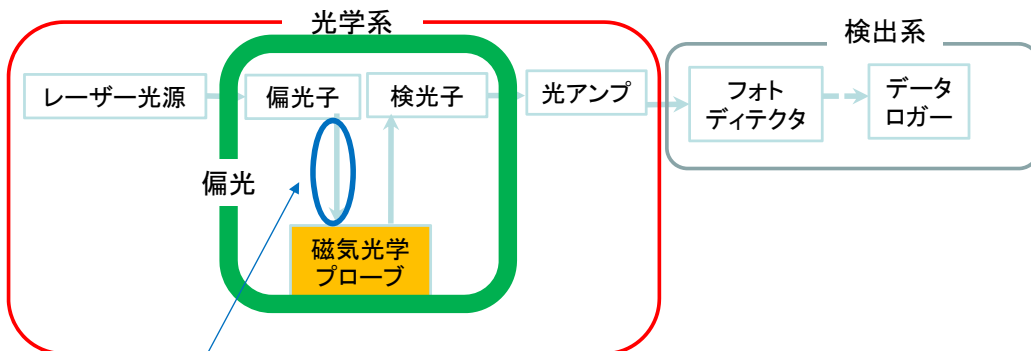
偏光部を一体化することで可搬性が向上



環境磁界測定用 一体型磁気光学プローブ



磁気光学プローブの一体化に伴う 偏光部の光ファイバーの変更



偏光子からプローブへの光ファイバーケーブルを
シングルモードファイバーから**偏波保持ファイバー**に変更



一体型磁気光学プローブによる測定試験

測定系の主な装置

機器	製品名
レーザー光源	Alnair Labs TLG-200
フォトディテクタ	Thorlabs DET01CFC
光アンプ	Alnair Labs LNA-220C-40-SM-S
データロガー(メモリハイコーダ)	HIOKI 8847

装置類の主な仕様

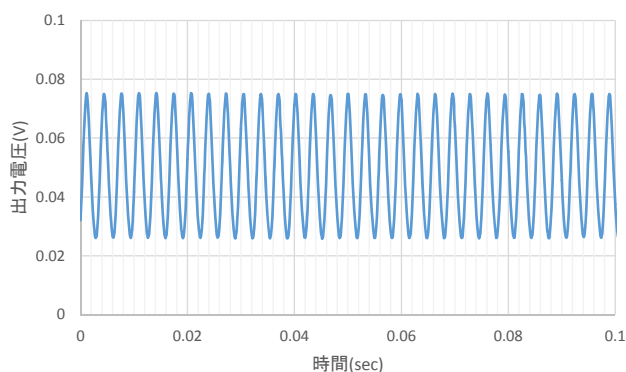
項目	仕様等
レーザー出力	20~25mW
レーザー波長	1550nm
センサ結晶	磁気光学結晶(ビスマス置換型磁性ガーネット結晶)
結晶サイズ	0.3×0.3×0.3mm



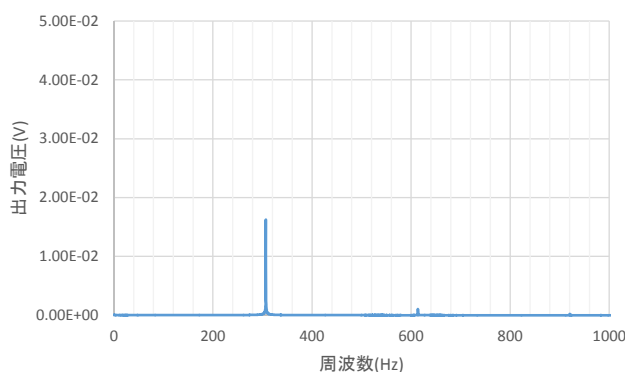
一体型磁気光学プローブによる測定試験

300Hzの正弦波磁界の測定例

出力電圧の時間波形例



出力電圧の周波数解析例

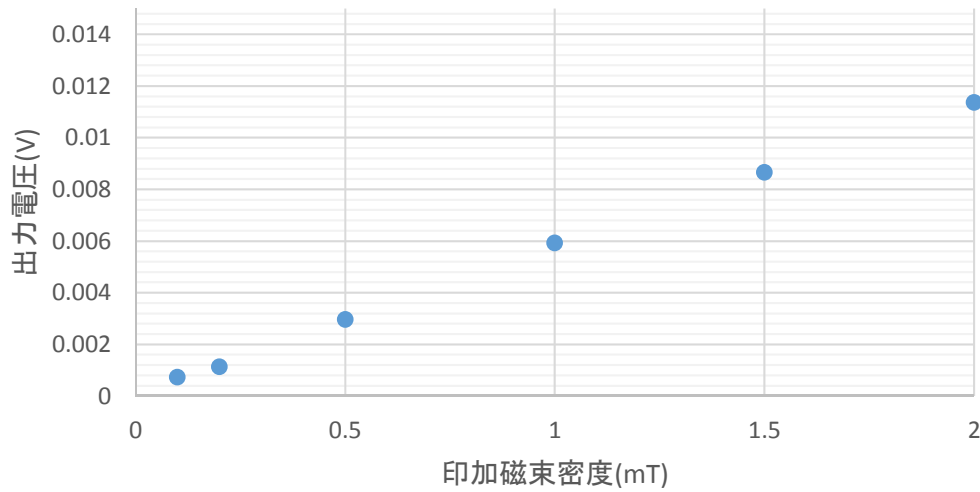


低周波のノイズが発生しないことを確認



一体型磁気光学プローブによる測定試験

印加磁束密度 (300Hz) と出力電圧の関係

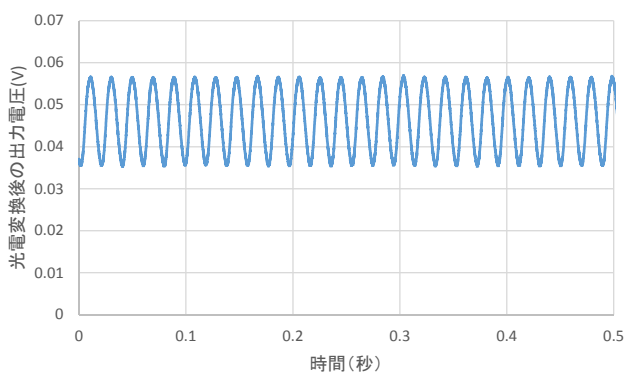


Railway Technical Research Institute

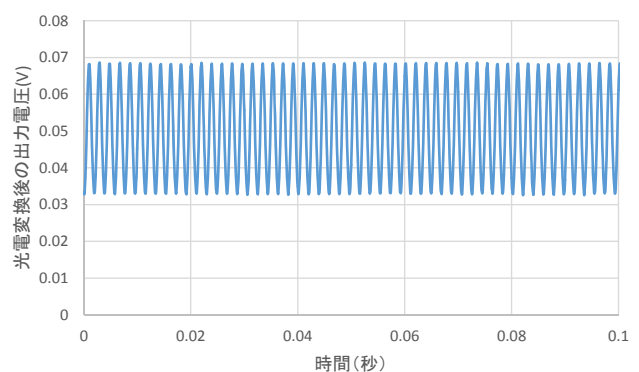
一体型プローブによる測定

出力電圧の時間波形例

50Hzの正弦波磁界



500Hzの正弦波磁界



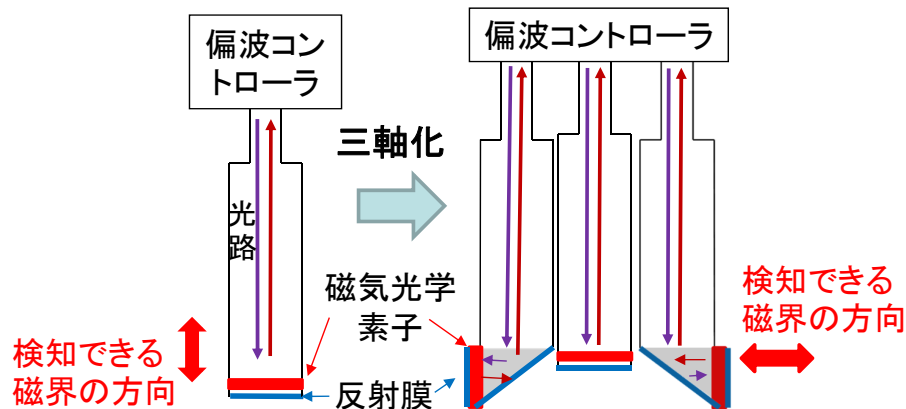
・これまで測定できなかった**100Hz以下の帯域で直流磁界を含めて測定が可能となった**



Railway Technical Research Institute

今後の予定

- 1kHz以上の周波数帯での特性把握
- 三軸化の検討



- ・環境磁界測定用としてコンパクトなサイズでの実現を目指す



まとめ

- ・低周波、中間周波数帯の環境磁界測定を目的として、ファラデー効果を利用した磁気光学プローブについて、偏光子から検光子までを一体化したプローブを試作した。
- ・プローブの移動(光ファイバーの曲げ等)によって出力が変動しないことを確認した。
- ・偏光子からプローブまでの光ファイバーを汎用の高周波用プローブで使用していたシングルモードファイバーから偏波保持ファイバーに置き換えたところ、高周波用プローブで見られた極低周波域におけるノイズ成分がみられなくなり、直流磁界までの測定が可能となった。



謝 辞

本研究の一部は総務省の研究費を受けて実施しました。



短縮モノポールアンテナを用いた標準電界法による光電界プローブ 校正の一検討

チャカロタイ ジェドヴィスノブ 藤井 勝巳 和氣 加奈子 呉 奕鋒 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

E-mail: {jerd, katsumi, kana, ifong, wata}@nict.go.jp

あらまし 中間周波数帯(300Hz~10MHz)を用いる無線電力伝送システムに対して、各種適合性確認のためにWPTシステム近傍電界を測定する必要がある。本報告では、電界強度測定用の光電界プローブを、短縮モノポールアンテナから生じる近傍電界を使って校正するシステムを開発し、市販の光電界プローブを校正した。また同様にTEMセル内で光電界プローブを校正した結果と比較を行い、本提案の校正システムの妥当性を示した。その結果、TEMセルで校正した結果との差異は10 kHz~3 MHzにおいて2 dB以下となることが示された。最後に、製作した水平成分及び垂直成分一軸光電界プローブの校正を行い、各装置の組み合わせでの校正係数を求めた。

キーワード モノポールアンテナ, 標準電界法, 光電界プローブ, プローブ校正

Calibration of Opto-Electrical Probes by Standard Electric Field Method Using Shortened Monopole Antenna

Jerdvisanop CHAKAROTHAI Katsumi Fujii Kanako Wake Ifong Wu and Soichi Watanabe

National Institute of Information and Communications Technology

4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

E-mail: {jerd, katsumi, kana, ifong, wata}@nict.go.jp

Abstract It is necessary to measure electric field near wireless power transfer (WPT) systems in order to check their compliance against international standards to assure electromagnetic (EM) emission and human exposure levels. In this study, we develop a calibration system for electric-field probes using a shortened monopole antenna as a standard field source. We calibrate commercially available three-axis opto-electrical probes using the developed system and compare their results with those obtained by using the TEM-cell method. Differences in the antenna factor derived by two different method of the standard field method and TEM-cell method was less than 2 dB for a frequency range from 10 kHz to 3 MHz. Finally, we have calibrated 2 types of fabricated opto-electrical probe for measuring horizontal and vertical electric-field component and determined calibration factor for each combination of optical controllers and opto-electrical probes.

Keyword Monopole antenna, standard electric field method, opto-electrical probe, probe calibration

1. はじめに

近年、無線電力伝送システム、RFIDやIH調理器等の中間周波数帯における電波利用が進んでおり、これらの機器は人体近傍で使われる場面が多くなる。特に電気自動車を無線で充電する目的として急速に開発が進められている無線電力伝送システムは、従来の無線通信機器に使用されている電力よりも大きな電力(数kW)を取扱うため、システム近傍に比較的強い電磁界強度が生じる[1]。そのため、人体に対する電波安全性の観点より国際ガイドラインや電波防護指針に対する適合性評価を行う必要がある。これらの国際電離放射防護委員会(ICNIRP)[2, 3]やIEEE[4]などのガイドラインまたは我が国の電波防護指針[5, 6]には、基本制限値として、10 MHz までは刺激作用を考慮して体内にお

ける誘導電界強度、100 kHz 以上では熱作用を考慮して比吸収率の制限値が定められている。しかしながら、体内での誘導量は実測が困難なため、実際に測定が容易である外部の電磁界強度に対する制限値(参考レベル)も合わせて定められている。従って、正確な適合性評価を行うためには、電磁界強度を高精度に測定することが求められる。

これらの周波数帯における電界強度の測定には、「電界プローブ」が広く利用されている。電界強度を電界プローブにより正確に測定するためには、電界強度に対するプローブの出力や周波数特性といった受信特性を予め校正しておく必要がある。電界プローブの校正には、これまでTEMセルや平行平板などを用い、標準電界を発生させて校正を行う手法が挙げられる[7,

8]. しかしながら、これらの校正装置は電界を生じさせると同時に磁界も発生することや、装置内に置かれた電界プローブが標準電界を乱し、校正結果に影響を与えてしまう問題がある. 加えて、TEM セルや平行平板を用いた較正法では、校正対象物の最大寸法が制限されることや、校正できる電界プローブの成分が限定されることも欠点として挙げられる.

本研究では、これらの問題を解決できる標準電界発生装置として、短縮モノポールアンテナを用いる[9-12]. 実際に校正システムを構築し、市販の光電界プローブを校正し、TEMセル内で校正した結果との比較を行うことで、提案校正法の妥当性を検討した. 最後に、本校正法を用い、独自に開発し、製作した一軸の光電界プローブを校正し、電界測定のための校正係数を求めた.

2. 標準電界法による校正

標準電界法とは、送信アンテナから理論通りの電界を発生させ、その電界中に置かれた電界プローブ等を校正する方法である. 送信アンテナに入射する電力や電圧、電流を測定することができれば、電界プローブなどを設置した任意の場所の電界強度 E_i が決定できるため、電界プローブに接続した受信機の電圧値 V_i を読み、以下の式に代入すれば校正係数を求めることができる.

$$F_i = \frac{E_i}{V_i} \quad (1)$$

ただし、 i は直交する 3 軸を意味する添え字であり、直交座標系であれば、 $i = \{x, y, z\}$ である.

2.1. 短縮モノポールアンテナを用いた校正

図 1 に示すように、無限に大きな寸法の金属床面上にて、波長 λ に比べて十分短い長さ l 、半径 a の短縮モノポールアンテナを送信アンテナとして用いる. 給電部を座標原点に配置し、エレメント上に流れる電流が区分正弦波状に分布するとき、アンテナへの入射電力 P_{in} に対して、観測点 $O(\rho, z)$ に生じる電界強度は、次式を用いて計算できる[11].

$$|E_z(\rho, z)| = \frac{30\lambda}{\pi l} \left| \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{2}{r_0} \right| \frac{\sqrt{Z_0 P_{in}}}{|Z_0 + Z_a|} \quad (2)$$

$$|E_z(\rho, z)| = \frac{30\lambda}{\pi \rho l} \left| \frac{z-l}{r_1} + \frac{z+l}{r_2} - \frac{2z}{r_0} \right| \frac{\sqrt{Z_0 P_{in}}}{|Z_0 + Z_a|} \quad (3)$$

ただし、

$$r_0 = \sqrt{\rho^2 + z^2}, r_1 = \sqrt{\rho^2 + (z-l)^2},$$

$$r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z+l)^2}, \rho = \sqrt{x^2 + y^2},$$

Z_0 は給電線路の特性インピーダンス [Ω] である. また $Z_a (= R_a + j X_a)$ は短縮モノポールアンテナの入力インピーダンスであり、波長に比べてエレメント長が短い場合、文献[13],[14]より次式を用いて計算できる.

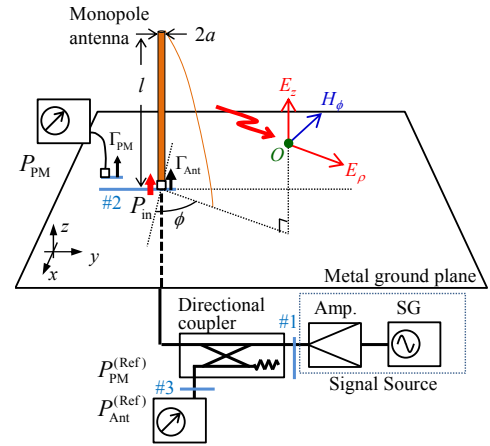


図 1 短縮モノポールアンテナを用いた標準電界法

$$Z_a \approx 10(kl)^2 - j \frac{60}{kl} \left(\ln \frac{l}{a} - 1 \right). \quad (4)$$

また文献[15]-[17]では、実部 R_a 及び虚部 X_a について \tan の項を追加して、

$$R_a = 40 \left\{ \frac{1 - \cos kl}{\sin kl} \right\}^2 = 40 \tan^2 \left(\frac{kl}{2} \right) \quad (5)$$

$$X_a = -\frac{1}{\omega C_a} = -\frac{60}{\tan(kl)} \left(\ln \frac{l}{a} - 1 \right) \quad (6)$$

と与えている. なお、理論上、 $|E_\phi(\rho, z)| = |H_\rho(\rho, z)| = |H_z(\rho, z)| = 0$ である. また波長に比べて十分短いアンテナの場合には、 $|H_\phi(\rho, z)| = 0$ であり、短縮モノポールアンテナ近傍に発生する磁界強度は非常に小さい. 従って、短縮モノポールアンテナを用いた標準電界発生法は、平行平板や TEM セルを用いて発生させた電界が $(120\pi)^{-1}$ 倍の強度の磁界を伴うのに対し、電界だけを発生させることができるという特徴を有する. また入射電力が一定であれば、周波数によらずに強度一定の電界を発生させることができる. 起電力法を用いて電界強度を求め結果、 $P_{inc} = 1 \text{ W}$ のとき、モノポールアンテナの長さが $l/(\lambda/4) = 0.1$ までであれば、 E_ρ 及び E_z はほぼ一定であることが分かった. また $l/(\lambda/4) = 0.2$ 以下であれば電界強度は 5%未滿で式(2),(3)で求めた結果と一致する結果が得られた[12].

短縮モノポールアンテナから生じる電界は金属床面上 ($z = 0$) では、 E_ρ 成分は常にゼロであり E_z 成分だけが存在するが、金属床面から離れるにつれ、 E_ρ 成分を持つようになり、その強度は E_z 成分よりも強くなる. もし E_z 成分がゼロになる領域が存在するのであれば、 E_ρ 成分だけを用い、電界プローブの校正を行うことが可能となる. 文献[12]では金属床面からの高さ $z/l = 0.6 \sim 0.7$ 付近で E_z 成分がゼロになる領域が存在することが報告されている. 従って、この領域に電界プローブを設置すれば、 E_ρ 成分だけを用いた校正ができる.

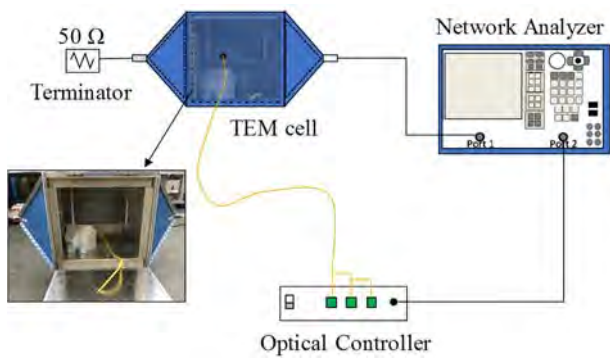


図 2 TEM セルを用いた校正

2.2. TEM セルを用いた校正

TEM セルは中に標準電界を作ることができる装置である。図 2 に示すように TEM セルは同軸ケーブルを両サイドからギュッと圧縮した形を有しており、主要部分の寸法比率を保つことにより 50 Ωインピーダンスの同軸線路を構成していることから、直接測定器や増幅器と接続できる。TEM セルの入力電力 P_{in} としたとき、TEM セル内部に生じる電界強度は次式によって求めることができる。

$$E = \frac{\sqrt{50P_{in}}}{h} \quad (7)$$

ここで h はセプタムの高さである。本研究で用いた TEM セルは $h = 0.15$ m である。校正を行うときは、TEM セルの中に電界プローブを設置し、入射電力 $|a_1|^2$ 、反射電力 $|b_1|^2$ 及び S_{21} の測定をベクトルアナライザによって行い、以下の式によって校正係数 AF を求める。

$$AF \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] = E \left[\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right] - P_{in}[\text{dBm}] - |S_{21}|[\text{dB}] - 107 \quad (8)$$

ここで $P_{in} = |a_1|^2 - |b_1|^2$ である。 a_1 及び b_1 は S パラメータにおける入力方向に進む入射波及び入力から戻ってくる反射波である。

3. 校正システム及び電界プローブ

まず図 2 に示すモノポールアンテナによる校正システムを構築した。システムには、信号発生器、高出力アンプ、減衰器、双方向性結合器、電力計及び長さ 2.5 m のモノポールアンテナからなる。実験で使った各装置は表 1 に示す。

上記で述べたようにモノポールアンテナ近傍における E_z 成分がゼロとなる領域が存在している。そこでまず近傍電界強度を測定し、そのゼロとなる領域を確認した。図 3 には 100 kHz のときのモノポールアンテナ近傍の $0.2 \text{ m} \leq \rho \leq 1.0 \text{ m}$ 、 $1.0 \text{ m} \leq z \leq 2.0 \text{ m}$ の領域における電界分布の各成分を示す。入射電力は $P_{inc} = 10$ W である。図 2(b) から分かるように、モノポールアンテナ近傍の E_z 成分は金属床からの高さ 1.3 m~1.7 m の間で極小となり、同じ位置での E_z 成分を比較すると、

表 1 実験で使った装置

アンテナ	自作 $l = 2.5 \text{ m}$, $a = 7 \text{ mm}$, ステンレス製
信号発生器	Keysight, 5080A 9 kHz~9 GHz
高出力アンプ	Bonn Elektronik, BSA0100-100 9 kHz~100 MHz, 出力 100 W
減衰器	NARDA, 769-10 減衰量 10 dB, 耐入力電力 150 W
方向性結合器	WELLATONE, C6422-10 結合度 30 dB, 耐入力電力 100 W
参照用電力計	Agilent Technologies 本体 E4413B, センサ E9304A
標準電力計	Agilent Technologies 本体 E4413A, センサ E9304A
3 軸スキャナ	デバイス, (上下/左右) M3420AV1/O-YZ (前後) DM3531AV1/O-X

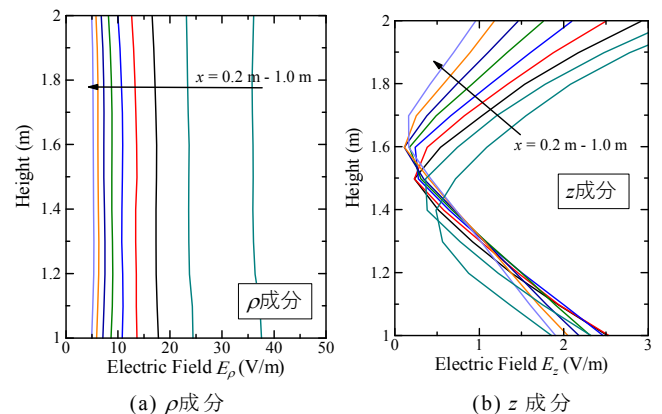


図 3 100 kHz における近傍電界分布 ($P_{inc} = 10$ W)

約 72 倍の差であることから、この場所でほぼ一成分のみ電界プローブを校正することが可能である。

図 4 には、本研究で校正に用いる電界プローブを示す。図 4(a) 及び (b) はそれぞれ精工技研の三軸光電界プローブ SH-03EX (100 kHz~3 GHz) 及び SH-10EX (100 kHz~10 GHz) である。また図 4(c) 及び (d) には、水平及び垂直に配置したダイポール型一軸光電界プローブを示す。三軸電界プローブには製造元から Narda 社製の電界プローブとの比較法により求めた校正係数が提供された。また光コントローラは精工技研製の高周波用 C3-1055 及び低周波帯におけるノイズを抑制したタイプ C5-A11-1 の 2 種類を用いた。

4. 実験結果

モノポールアンテナによる校正を行うためには、式 (2), (3) に示すように、入射電力を測定する必要がある。しかしながら、短縮モノポールアンテナの反射係数は



(a) SH-03 EX

(b) SH-10EX



(c) CS-1067

(d) CS-1068

図4 校正に用いる(a)三軸電界プローブ SH-03EX, (b)SH-10EX, (c)一軸光電界プローブ CS-1067(水平)及び(d)一軸光電界プローブ CS-1068(垂直)

周波数が低くなるにつれて全反射（開放状態）となるため、短縮モノポールアンテナと信号源との間で生じる多重反射によって校正結果が影響を受けてしまう。この影響は反射係数を正確に測定すれば補正可能であるが、一般的に信号源（特に高出力アンプ）が信号を出力している状態における反射係数を知ることは困難である。また、信号源の状態が電力計の接続時とアンテナ接続時で変化してしまったり、時間経過や温度上昇によって出力変動が生じてしまったりする可能性がある。そこで、本研究では、上記の問題を解決するために、方向性結合器を用いて、文献[9]に示す手順により入射電力の測定を行う方法を用いた。

図4(a)に示す三軸光電界プローブ SH-03EX の校正を行った。電界センサは、 E_z 成分が概ねゼロとなる $\rho = 0.5$ m, $z = 1.6$ m の位置に置き、 E_ρ 成分だけが電界プローブに入射するようにした。その際、電界プローブが持つ3つのエレメントのうち1つのエレメントが E_ρ 成分と平行になるように配置した。アンテナへの入力電力 P_{inc} は約 1 W となるように信号源の出力を調整した。式(2),(3)が 5%未満の精度で成り立つ周波数 6 MHz 以下において、電界プローブに入射する電界強度は、約 5.2 V/m となる。この位置において電界プローブ SH-03EX と光コントローラ CS-1055 の CH3 入力で組み合わせた校正結果を図5に示す。横軸は周波数、縦軸は校正係数 F_i である。○印は短縮モノポールアンテナを用いた校正結果で、黒い実線は TEM セルによる校正結果、そして□印は製造元から提供された参考値であ

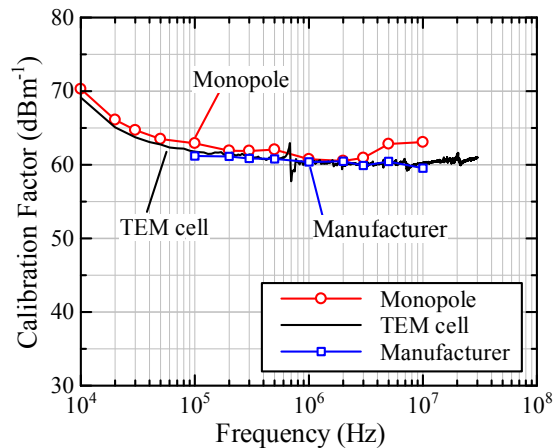


図5 電界プローブ SH-03EX と光コントローラ CS-1055 の CH3 との組み合わせでの校正結果

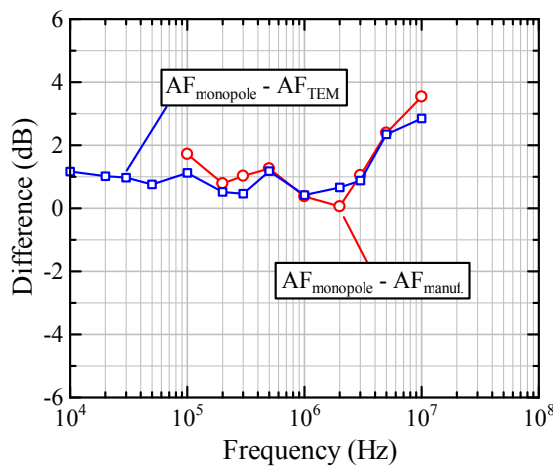


図6 それぞれの校正法による校正結果の差異

る。両者を比較すると、100 kHz ~ 3 MHz では良く一致しているが、それ以上の周波数帯では、校正係数が大きくなる傾向が確認できた。また製造元の仕様では、100 kHz 以上となっているが、図5に示すように 100 kHz 以下においては、校正係数の値が大きくなるものの 10 kHz からでも使えることが分かった。図6には、それぞれの手法で校正を行った結果との差異を示しており、3 MHz 以下の周波数帯では、いずれも 2 dB 以下の差異であることが分かった。

同様な校正システムを用いて、三軸光電界プローブ SH-03EX と光コントローラ C5-A11-1 の CH3 入力で組み合わせた校正結果及び各手法の差異を図7及び図8に示す。本組み合わせによる校正係数は製造元から値が提供されていないため、図7には短縮モノポールアンテナによる校正結果及び TEM セルによる校正結果のみを示している。図7に示すように短縮モノポールアンテナを用い、校正係数を求めた結果は 10 kHz ~ 3 MHz までの周波数帯において、TEM セルを用いた校正係数とほぼ一致していることが、本手法の妥当性を

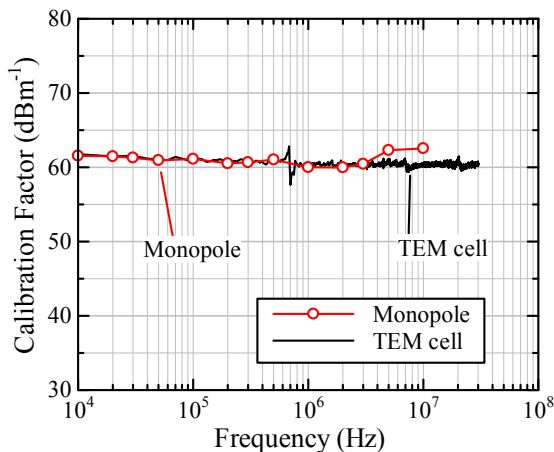


図7 電界プローブ SH-03EX と光コントローラ C5-A11-1 の CH3 の組み合わせでの校正結果

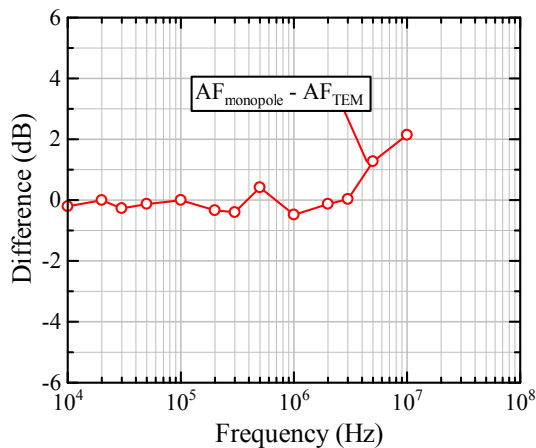


図8 短縮モノポールアンテナによる校正結果と TEM セルによる校正結果との差異

確認した。また図5と図7を比較すると、光コントローラ C5-1055 との組み合わせによる校正係数は周波数が低くなるにつれ、高くなるが、C5-A11-1 との組み合わせの場合、校正係数は低周波帯においてほぼ一定であることが分かった。これは低周波用に作られた光コントローラ C5-A11-1 内部に備えているアンプの性能によるものであると考えられる。そして図8には両者の結果の差異を示しており、3 MHz までは 1 dB 以下、5 MHz までは 2 dB 以下であることが分かった。

最後に、図4(c)及び(d)に示す一軸光電界プローブの校正を行った。本光電界プローブは液剤中の電界強度を測定するために作られたものであるが、空中においても電界を測定することができる。プローブの長さが 30 cm 以上であり、本研究で用いた TEM セルの中に入り切らないため、TEM セルでの校正は不可能である。従って、短縮モノポールアンテナによる校正のみを行った。図9にはそれぞれ垂直成分を測定できる光電界プローブ CS-1068 の校正時の様子を示す。

図10に CS-1067, CS-1068, CS-1055 及び C5-A11-1 の

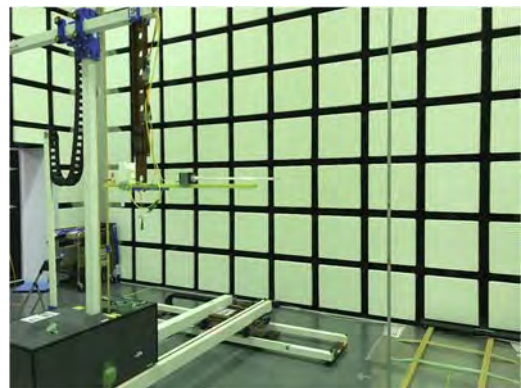


図9 CS-1068 の校正時の実験様子

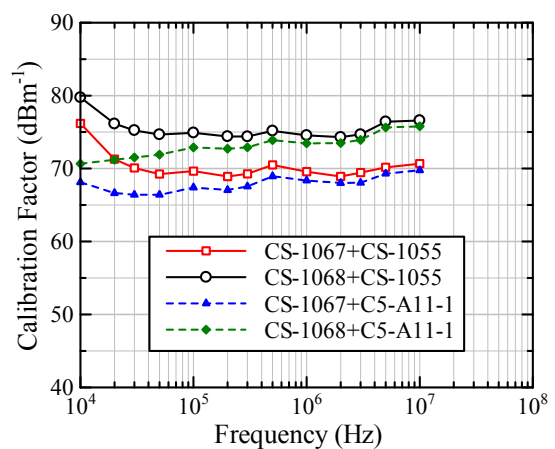


図10 一軸光電界プローブ CS-1067 及び CS-1068 の各組合せで得られた校正係数

すべての組み合わせで校正係数を求めた結果を示す。図10に示すように CS-1055 との組み合わせでは、周波数が低くなるにつれ、校正係数が高くなる傾向が見られる一方、C5-A11-1 との組み合わせでは、その傾向が見られない。校正して得られた校正係数は 65~80 dB/m の範囲内にある。図10から分かるように、校正係数は用いる装置が異なれば、異なる値を持つことから、実際の測定の際には、校正時と同じ装置を用いることが必要である。

5. まとめ

本研究では、電界強度測定用の光電界プローブを、短縮モノポールアンテナから生じる近傍電界を使って校正するシステムを開発し、市販の光電界プローブ及び製作した一軸光電界プローブの2種類を校正した。また TEM セル内で光電界プローブを校正した結果と比較を行い、本提案の校正システムの妥当性を示した。その結果、TEM セルで校正した結果との差異は 10 kHz ~ 5 MHz において 2 dB 以下となることが示された。最後に、製作した一軸の光電界プローブの校正を行い、各装置の組み合わせでの校正係数を求めた。

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。

文 献

- [1] N. Shinohara, "Power without wires," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 12, no. 7, pp. S64-S73, 2011.
- [2] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Phys*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, Apr. 1998.
- [3] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," *Health Phys*, vol. 99, no. 6, pp. 818-36, Dec 2010.
- [4] IEEE-C95.1, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," pp. 1-238, 2006.
- [5] 電気通信技術審議会答申, 諮問第 89 号, 「電波利用における人体防護の在り方」, 1997.
- [6] 情報通信審議会答申, 諮問第 2035 号, 「電波防護指針の在り方」のうち「低周波領域 (10kHz 以上 10MHz 以下) における電波防護指針の在り方」 2015.
- [7] 末武国弘, 林周一, マイクロ波回路. オーム社, 1958.
- [8] 山田和謙, 池上利寛, 佐野秀文, *EMC 入門講座*. 電波新聞社, 2008, pp. 179-180.
- [9] 藤井勝巳, 岩谷祥来, 和氣加奈子, チャカロタイジェドヴィスノブ, 渡辺聡一, 須賀良介, 橋本修, "短縮モノポールアンテナを用いた標準電界法における不確かさの低減," 信学総大, B-4-15, p. 335, Mar. 2016.
- [10] 岩谷祥来, 藤井勝巳, 和氣加奈子, チャカロタイジェドヴィスノブ, 渡辺聡一, 須賀良介, 橋本修, "短縮モノポールアンテナ近傍に配置された物体による放射電界への影響," 信学総大, B-4-14, p. 334, Mar. 2016.
- [11] 岩谷祥来, 藤井勝巳, 和氣加奈子, チャカロタイジェドヴィスノブ, 渡辺聡一, 須賀良介, 橋本修, "短縮モノポールアンテナの近傍界評価とばく露評価への適用," 信学技報, vol. 115, no. 427, EMCJ2015-111, pp. 43-48, Jan. 2016.
- [12] 岩谷祥来, 藤井勝巳, 和氣加奈子, チャカロタイジェドヴィスノブ, 渡辺聡一, 須賀良介, 橋本修, "短縮モノポールアンテナを用いた電界プローブの校正システムの基礎検討," 信学技報, vol. 117, no. 384, pp. 83-88, EMCJ2017-102, Jan. 2018.
- [13] 安達三郎, 電磁波工学. コロナ社, 1983.
- [14] W. L. Stutzman, et al., *Antenna Theory and Design*, 2nd, pp. 46-47, 1997.
- [15] IEC/CISPR 16-1-6 Ed. 1:2017(b), Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration, p27, 2017.
- [16] D. A. Knight, et al., "Comparison of calibration methods for monopole antennas, with some analysis of the capacitance substitution method," NPL Report, DEM-EM 005, p.4, 2004.
- [17] 藤井勝巳, "短縮モノポールアンテナの入力インピーダンスの近似式," 信学総大, B-4-4, pp. 253, Mar. 2018.

樹脂筐体光プローブヘッドの開発と小型アンテナ測定

嶋原 亮 四方 勝

アルプス電気株式会社 技術本部 EMC 評価センター 〒989-6181 宮城県大崎市古川中里 6-3-36

E-mail: makoto.shigihara@jp.alps.com

あらまし アンテナの放射パターンや利得等の放射特性測定は、被測定アンテナに同軸ケーブルを接続して行われることが多いが、小型アンテナの放射特性を高精度に測定する方法として、同軸ケーブルの代わりに RoF (Radio on Fiber) 技術を用いることが有効である。特に光導波路を利用した光プローブヘッドは、小型かつ無電源で動作する特長があり有用である。しかし、最近の IoT 機器内蔵のアンテナは極めて小型であるため、光プローブヘッドの金属筐体や SMA コネクタの影響が無視できなくなっている。そこで、筐体を樹脂化し、更に小型同軸コネクタで被測定アンテナと RF 接続が可能な「樹脂筐体光プローブヘッド」を開発した。本発表では、樹脂筐体光プローブヘッドの開発概要および小型アンテナの測定結果から、本光プローブヘッドの優位性について報告する。更に、人体ファントムや実人体に装着した小型アンテナの測定結果についても紹介する。

キーワード 小形アンテナ, 樹脂筐体光プローブヘッド, 小型同軸コネクタ, 人体ファントム

Development of resin cased optical probe head and measurement of Electrically Small Antennas

Makoto SHIGIHARA Masaru SHIKATA

EMC Test Lab., Engineering Headquarters, ALPS ELECTRIC CO., LTD,

6-3-36 Furukawanakazato, Osaki-shi, Miyagi, 989-6181, Japan

E-mail: makoto.shigihara@jp.alps.com

Abstract In general, coaxial cables are used to measure radiation characteristics such as radiation patterns and gains of antennas, but in measurement of electrically small antennas, it is effective to use RoF (Radio on Fiber) technology instead of coaxial cable. In particular, the optical probe head using the optical waveguide has advantages of being compact and operating with no power supply and is useful. However, since the antenna built in IoT equipment is extremely compact, the influence of metal case and SMA connector of the optical probe head can not be ignored. Therefore, we developed the "resin cased optical probe head". This new optical probe head also has the feature that RF connection with the AUT (Antenna Under Test) is possible with a micro coaxial connector. In this presentation, we introduce the development outline of the resin cased optical probe head and the superiority of this optical probe head from the electrically small antenna measurement result. In addition, we will also introduce measurement results of electrically small antenna installed in human body phantom and real human body.

Keyword Electrically small antennas, Resin cased optical probe head, Micro coaxial connector, Human body phantom

1. 小型アンテナ測定における問題点と樹脂筐体光プローブヘッドの開発

小型アンテナ測定における問題点と解決方法

◆同軸ケーブルを使用した測定系

◆解決方法(1)：不平衡電流を抑制する

同軸ケーブルに、フェライト等の磁性体を装着し、不平衡電流を抑制する。
(例: アイソレーティングケーブル 御幸キャビタックスシステムズ製)

◆解決方法(2)：伝送線路を非金属材料化する

RoF (Radio on Fiber) 技術を用い、同軸ケーブルの代わりに、**光ファイバ**で高周波伝送する。

① LD/POを用いた測定系
主に被測定アンテナを送信側に配置する測定系。
(例: 山浦他, "小型PDモジュールを用いた高精度アンテナ測定", 電子技術 AMT2015-01)

②「光プローブヘッド」を用いた測定系
「光プローブヘッド」は、反射型LN変調器から成り、小型かつ単電源でRF-光変換ができる有用なデバイス。
被測定アンテナを受信側に配置する測定系。
(※ LN変調器: LiNbO₃光強度変調器)

◆同軸ケーブル測定系の問題点

同軸ケーブルの外導体の外側に流れる不平衡電流の影響により、同軸ケーブルもアンテナの一部として見えてしまうため、放射パターンや入力インピーダンスが、アンテナ自体の特性とは異なってしまう。

小型アンテナ測定に適する光プローブヘッド

◆光プローブヘッドの課題

IoT機器に内蔵されるBluetooth® Low Energy等の小型アンテナの測定では、
・光プローブヘッド自体の金属部
・RF入力部(SMAレセプタクルとSMA-UFLアダプタ)の金属部
が相対的に大きい影響で、被測定アンテナの放射特性に与える影響が無視できない場合がある。

◆小型アンテナ測定に適する光プローブヘッドの開発方針(目標)

- 金属部の最小化
・光プローブヘッド筐体を樹脂化する。金属部を必要最低限にすることで、被測定アンテナとの電磁結合を最小化する。
- RF入力構造
・RF入力端子は、小型同軸レセプタクル(化ロセ電機製UFLまたは同等品)とする。
・小型同軸レセプタクルが実装した場合は、レセプタクル実装基板の交換が可能。
・小型同軸レセプタクル実装基板は、光プローブヘッドの樹脂筐体に機械的に固定が可能。
- 電氣的特性
・S21(伝送特性)は、周波数特性が6GHzまで、ほぼフラット。
・S11(反射特性)は、RL≧15dBが確保されている。
・光プローブヘッド自体がアンテナになる問題を、磁性体シート装着により低減する。

化ロセ電機製 UFLコネクタ

線径: 銅線径規格
・接触抵抗: 25mΩ以下(中心) 15mΩ以下(外部)
・条件: 挿抜30回

樹脂筐体光プローブの電磁シミュレーション

◆樹脂筐体を含むシミュレーション

ケース外寸 W50×D12×H10mm (光ファイバ固定部を除く)

上ケースにU基板を樹脂糊して固定

30回程度使用して、小型同軸レセプタクルが傷んだら、U基板を交換する

上ケースをわけて固定(ねじのモデルは省略)

光ファイバ (シミュレーションでは省略)

下ケースにLN基板とL基板(3連ピン付)を固定

3連ピン 1.27mmピッチ

3連コネクタ 1.27mmピッチ

ATT5dB

Port1 50Ω 小型同軸レセプタクル

U基板

Port2 25kΩ

LN基板

L基板

3連コネクタ部(平衡3線)

$$Z_0 = 69 \log \frac{4D}{d^2}$$

誘電体が空気の場合

1.27mmピッチの3連コネクタ $d = 0.97\text{mm}$, $D = 1.27\text{mm}$

$$Z_0 = 69 \log \frac{8.19}{0.91} = 66 \Omega$$

PCB樹脂のインシュレータが部分的に入っているため、Z₀は低下する。**30Ω系で伝送可能**

樹脂筐体光プローブヘッドの構造

◆樹脂筐体光プローブヘッドの完成品

・3GHz対応高感度版
型番: CS-1602 (LN変調器が2分割電極)

・6GHz対応広帯域版
型番: CS-1603 (LN変調器が6分割電極)

※樹脂筐体寸法 W54×D12×H10mm

光ファイバ 樹脂筐体 小型同軸レセプタクル U基板を外した状態

U基板は多数準備しておき、30回程度使用して、小型同軸レセプタクルが傷んだら、U基板を交換する。

このうち、1枚は基準として残り、初期値との変化確認用として使用する。

樹脂筐体光プローブヘッドの特性 Sパラメータ

◆樹脂筐体光プローブ 6GHz対応広帯域版のS11,S21 シミュレーションと実測の比較

S11 (dB) vs Frequency (GHz)

S21 (dB) vs Frequency (GHz)

Vector Network Analyzer

光ファイバ

3連ケーブル

精工技研製 コントローラ A_{opt}1500mm

・シミュレーション 樹脂筐体光プローブヘッド部分のみ

・実測 樹脂筐体光プローブヘッドとコントローラの総合特性

S21は、ほぼシミュレーション通りの広帯域性を示しており、6GHzまで使用可能

樹脂筐体光プローブヘッドの特性 Sパラメータ U基板交換

3GHz対応高感度版 樹脂筐体光プローブヘッド CS-1602

S11 (dB) vs Frequency (GHz)

U基板を交換しても、S11はほとんど同じ、RL≧15dB(4.5GHz)

6GHz対応広帯域版 樹脂筐体光プローブヘッド CS-1603

S11 (dB) vs Frequency (GHz)

U基板を交換しても、S11はほとんど同じ、RL≧15dB(4.5GHz)

S21 (dB) vs Frequency (GHz)

U基板を交換しても、S21はほとんど同じ、3GHzまでの高感度特性が確認できた。

U基板を交換しても、S21はほとんど同じ、8.5GHzまでの広帯域特性が確認できた。

2. 樹脂筐体光プローブヘッド特有の問題点と解決方法

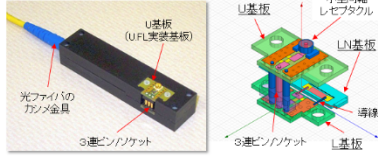
樹脂筐体光プローブヘッド特有の問題点と解決方法 ALPS

◆樹脂筐体光プローブヘッド自体がアンテナになる問題

樹脂筐体光プローブヘッドの金属要素がアンテナとなり、電波を受信し、LN調整器で光信号にRF変調をかけてしまう可能性がある。
(光電変換センサーが動作)

◆金属要素

- LN調整器の実装用電極
- LN調整器の基板を接続する導線
- L基板の銅箔やATT
- ③差ピンノケット
- L基板の銅箔、ATT、小型同軸レセプタクル
- 光ファイバのカンパシユ



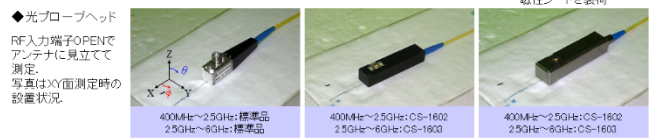
◆解決方法

樹脂筐体に磁性シートを装着(磁性シートを全体を抜く)することが有効であることを、実験的に確認。(樹脂筐体は、予備実験を通して、磁性シートを巻きやすいように、予め直方体形状に設計。)



光プローブヘッド自体をアンテナに見立てて利得を測定 ALPS

◆実測の様子



◆標準(利得基準)アンテナ

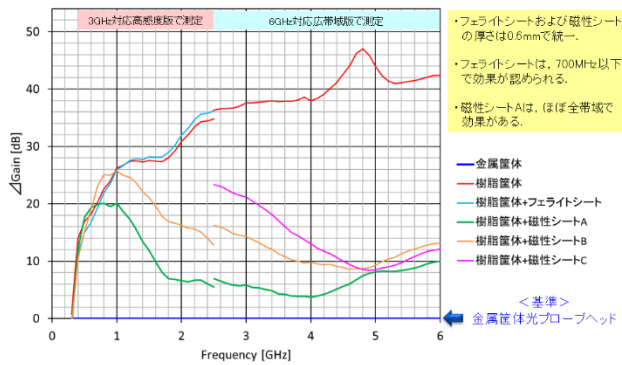
ログペリオディックアンテナ	標準ゲインホーン	標準ゲインホーン	標準ゲインホーン	標準ゲインホーン
Schwarzbeck UHALP9108A 300MHz~1GHz	NSI NSI-RF-SG600 1GHz~1.7GHz	M4 12-17 1.7GHz~2.6GHz	M4 12-2.6 2.6GHz~4.0GHz	M4 SGH395 4.0GHz~6.0GHz



- ◆測定方法 ① それぞれの光プローブヘッドをX, Y, Z, XYの3カット面で放射パターン(θ成分とφ成分)を測定する。
② 利得基準アンテナに、それぞれの光プローブヘッドを接続して、ホアサイト方向での最大受信レベルを測定する。
③ ②の結果から、それぞれの光プローブヘッドの各カット面におけるパターン平均利得 G_{θ} , G_{ϕ} を計算する。
④ 次式で全平均利得を計算し、最後にdBに交換する。
$$G_{total} = 10 \log_{10} [(G_{\theta} + G_{\phi})_{XZ} + (G_{\theta} + G_{\phi})_{YZ} + (G_{\theta} + G_{\phi})_{XY}]$$

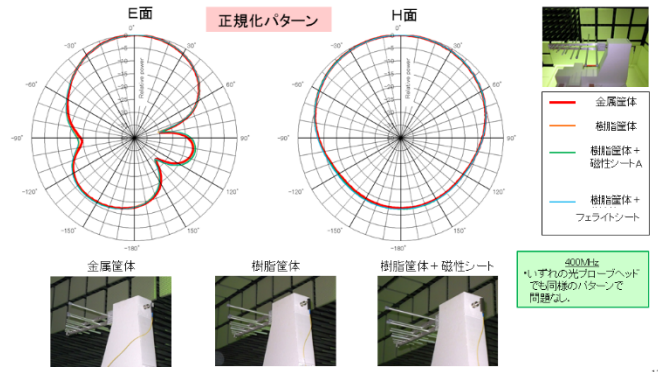
磁性シートの効果 ALPS

樹脂筐体光プローブヘッド 磁性シートの効果 基準=金属筐体光プローブヘッド



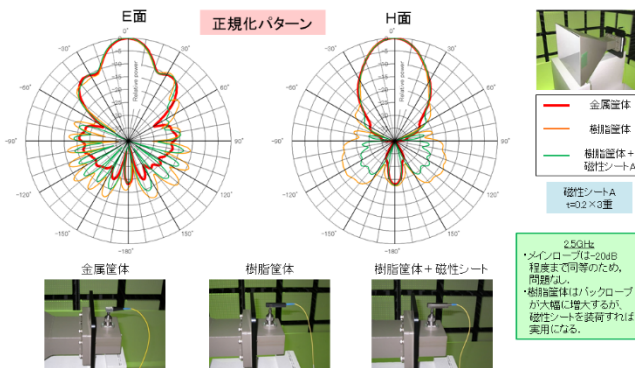
ログペリオディックアンテナ 放射パターン $f = 400\text{MHz}$ ALPS

◆アンテナ: UHALP9108A 金属/樹脂筐体光プローブヘッド 磁性シート効果



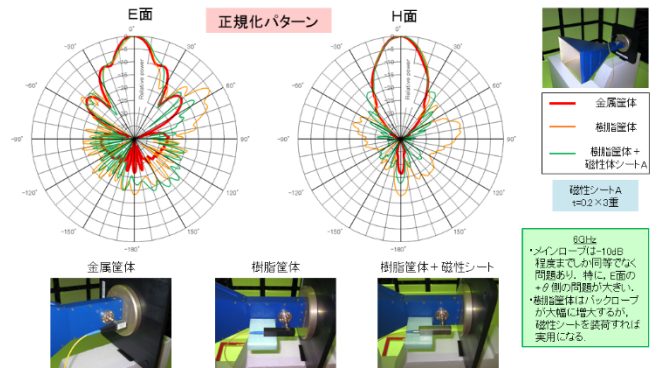
標準ゲインホーンアンテナ 放射パターン $f = 2.5\text{GHz}$ ALPS

◆アンテナ: M12-1.7 金属/樹脂筐体光プローブヘッド 磁性シート効果



標準ゲインホーンアンテナ 放射パターン $f = 6.0\text{GHz}$ ALPS

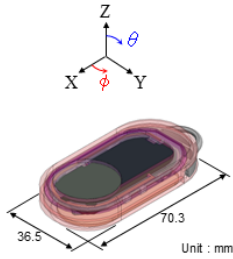
◆アンテナ: MVG SGH395 金属/樹脂筐体光プローブヘッド 磁性シート効果



3. 樹脂筐体光プローブヘッドを使用したアンテナ測定例

遠隔操作用FOBアンテナ測定 $f = 313.85\text{MHz}$ ALPS

シミュレーション
モデル

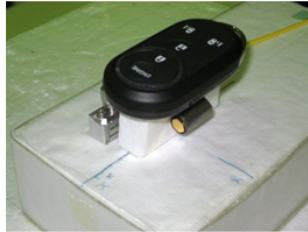


※ 922MHz側端子は、
50Ω終端

※ 実測で、φ08同軸には、
磁性体シートを巻いて
いげない。

光プローブヘッドの違い/磁性シートの有無

金属筐体光プローブヘッド
標準品



樹脂筐体光プローブヘッド
CS-1602



樹脂筐体光プローブヘッド
CS-1602
磁性シートA装荷

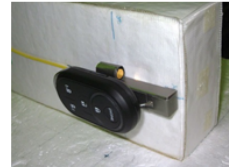


樹脂筐体光プローブヘッド
CS-1602
フェライトシート装荷



3カット面の測定

ZX面



ZY面



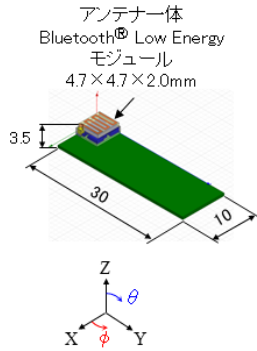
XY面



遠隔操作用FOBアンテナ測定結果 $f = 313.85\text{MHz}$ ALPS

	シミュレーション	金属筐体光プローブ 標準品 ▲	樹脂筐体光プローブ CS-1602 ●	樹脂筐体光プローブ CS-1602 磁性シートA装荷 ○	樹脂筐体光プローブ CS-1602 フェライトシート装荷 ◎
Gavg	-26.8dBi	-25.7dBi	-26.1dBi	-25.7dBi	-25.7dBi
ZX面					
ZY面					
XY面					

シミュレーションモデル

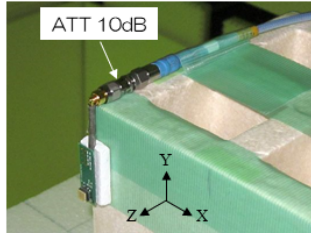


- ・アンテナはメアンダライン構造。
- ・インピーダンスマッチングは、外付けLCで行っている。

※ 実測では、Bluetooth®アンテナからφ1.13mm同軸ケーブル(長さ50mm)を出し、磁性体シートを巻いている。

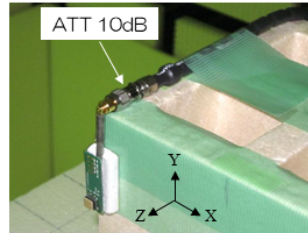
実測：同軸ケーブル/光プローブヘッド

同軸ケーブル
HUBER+SUHNER 製
SUCOFLEX 102

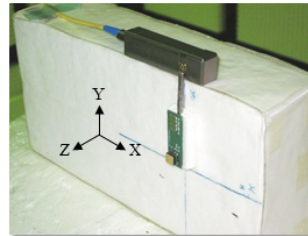
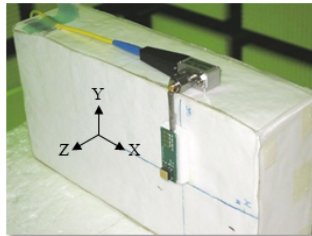


金属筐体光プローブヘッド
標準品

アイソレーティングケーブル
キャンドックスシステムズ製
5B-006-23-23-xxxFBS

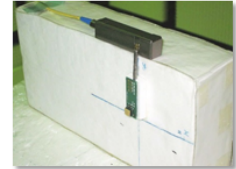


樹脂筐体光プローブヘッド
CS-1602
磁性シートA装荷

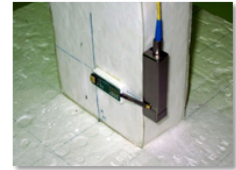


3カット面の測定

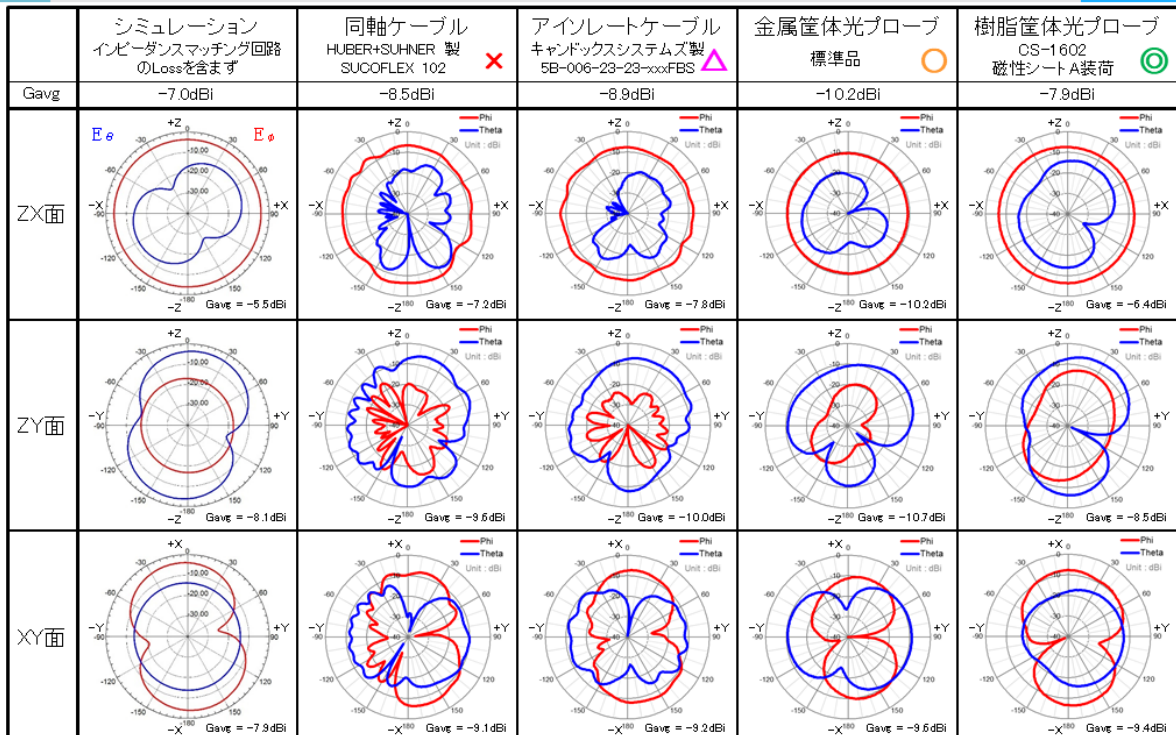
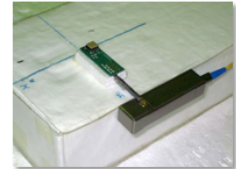
ZX面



ZY面

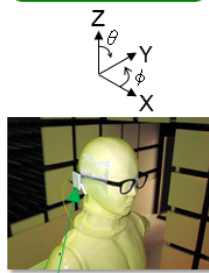


XY面



めがね内蔵Bluetooth® Low Energy アンテナの測定例

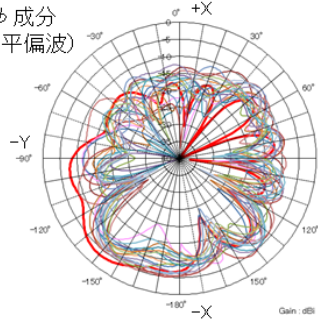
ALPS



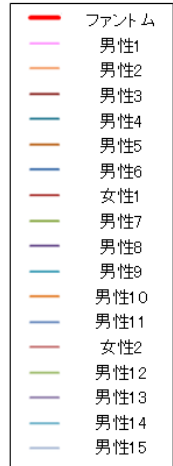
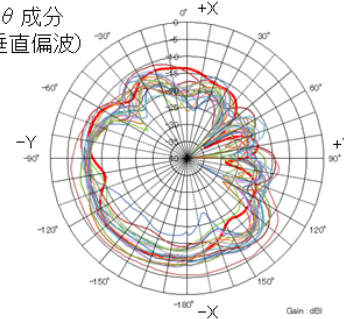
◆ファントムおよび17名個々

$f = 2.442$ [GHz]

ϕ 成分
(水平偏波)



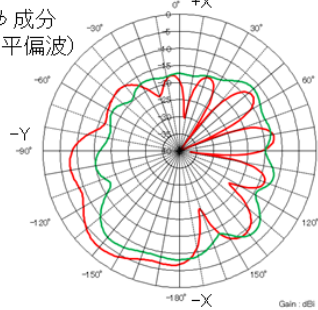
θ 成分
(垂直偏波)



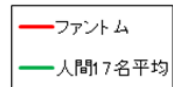
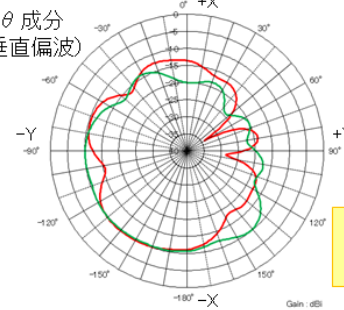
◆ファントムおよび17名の平均値

$f = 2.442$ [GHz]

ϕ 成分
(水平偏波)



θ 成分
(垂直偏波)

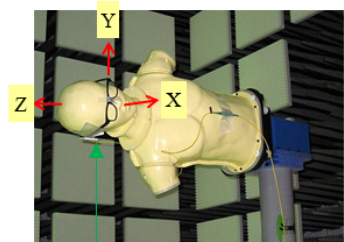
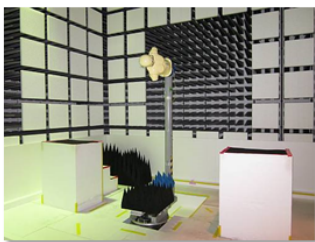


17名の平均値は、ファントム上半身の結果と概ね合っている。

めがね内蔵 Bluetooth® Low Energy アンテナの測定例

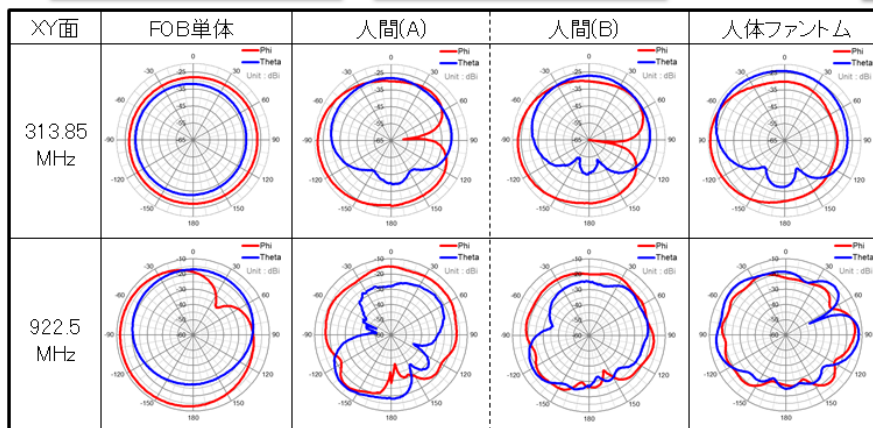
ALPS

◆人体ファントムによる3Dパターン測定例



2.442GHz	$\phi = +45^\circ$	$\phi = -45^\circ$	真上から	
E_ϕ 成分				Gain [dBi]
E_θ 成分				

◆FOBには、314MHz帯と920MHz帯のアンテナが内蔵されている。



ここで使用した人体ファントムは10MHz～400MHzで ϵ_r や σ がICIA基準値とほぼ同様であり、314MHz帯では問題なく使用可能で、放射パターンも実人体に近い。
920MHz帯では特性値が異なるため、放射パターンは実人体と異なっている。
光プローブヘッドは軽量であるため、実人体や人体ファントムを用いたアンテナ測定では非常に有用である。

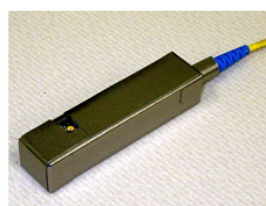
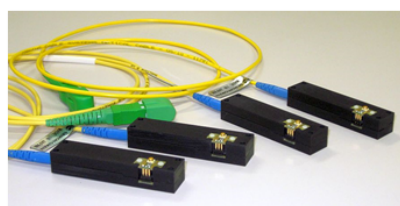
まとめ

■小型アンテナ測定に適した「樹脂筐体光プローブヘッド」を開発

- 筐体の樹脂化により、被測定アンテナとの電磁結合を最小化
- 被測定アンテナとのRF接続は小型同軸コネクタで直結可能
⇒ 小型同軸コネクタが劣化した場合は、基板ごと交換することで対応
- 6GHz まで使用可能
- 磁性体シートの装荷により、光プローブヘッド自体がアンテナになる問題を解決

■実際のアンテナ測定で、「樹脂筐体光プローブヘッド」の優位性を確認

- 300MHz帯～5GHz帯の各種小型アンテナ測定を行い、「樹脂筐体光プローブヘッド」の優位性を確認した。
- 樹脂筐体光プローブヘッドは軽量であり、光ファイバの取り回しも容易であるため、実人体や人体ファントムに装着した小型アンテナの測定に非常に有用である。



光給電 RoF システムを用いた低周波ノイズ測定

土屋 明久[†] 菅間 秀晃[†] 柳澤 幸樹^{††} 須賀 良介^{†††} 橋本 修^{†††}

[†] 神奈川県立産業技術総合研究所 〒243-0435 神奈川県海老名市下今泉 705-1

^{††} 株式会社多摩川電子 〒252-1113 神奈川県綾瀬市上土棚中 3-11-23

^{†††} 青山学院大学理工学部 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1

E-mail: [†] tsuchiya@kanagawa-iri.jp

あらまし 近年、電力利用の多様化に伴い IGBT や MOSFET など電力系半導体によるスイッチング動作による影響により周波数 10 kHz 以上において強く、広帯域な電磁ノイズが増加している。これらの低周波ノイズはグラウンドを介してコモンモードノイズとなり、EMC 計測などの正確なノイズ測定に影響を及ぼす可能性がある。これに対し、電気信号を光に変換して伝搬する Radio over Fiber (RoF) システムは高い絶縁性により周囲環境からのノイズによる影響を受けることなく正確な測定が可能である。そこで、本研究では EMC 計測に光給電 RoF システムを用いることによる有効性について検討した。今回使用した光給電 RoF システムは受光素子部分を光給電とすることで従来の RoF システムに比べ高い絶縁性を確保することができ、更に電池が不要なため長時間動作を可能としている。この光給電 RoF システムを用いて EMC 計測を行った結果、低周波から高周波帯域においてコモンモードノイズによる影響を受けずに正確なノイズ測定をすることができ、EMC 計測に利用可能であることを確認した。

キーワード 光給電 RoF, EMC, コモンモードノイズ, 低周波

Precise Low-frequency Noise Measurement with Optical Feeding RoF System

Akihisa TSUCHIYA[†] Hideaki SUGAMA[†] Yoshiki YANAGISAWA^{††}

Ryosuke SUGA^{†††} and Osamu HASHIMOTO^{†††}

[†] Kanagawa Institute of Industrial Science and technology

705-1 Shimoimaizumi, Ebina-shi, Kanagawa, 243-0435 Japan

^{††} Tamagawa Electronics Co.,LTD

3-11-23, Kamitsutidana-naka, Ayase-shi, Kanagawa, 252-1113 Japan

^{†††} Department of Electrical and Electronics Engineering, Aoyama Gakuin University,

5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa 252-5258, Japan

E-mail: [†] tsuchiya@kanagawa-iri.jp

Abstract Optical feeding Radio over Fiber (RoF) system is proposed for precisely low frequency noise measurement such as EMC testing. A RoF system can be reduced sensitivity to noise and electromagnetic interference compared to signal transmission on a coaxial cable. Optical feeding RoF system has higher insulation than conventional RoF system because the light receiving element operates with optical power supply. Actually EMC testing was measured by using Optical feeding RoF system and it could measure noise from equipment under test precisely without affecting by common mode noise by ground loop in the low frequency.

Keywords Optical feeding Radio over Fiber , EMC, Common mode noise, Low-Frequency

光給電RoFによる低周波ノイズ測定

土屋明久 菅間秀晃 (KISTEC)
 柳澤幸樹 (多摩川電子)
 須賀良介 橋本修 (青山学院大学)

研究背景: 電力利用の多様化



電気自動車 (EV)



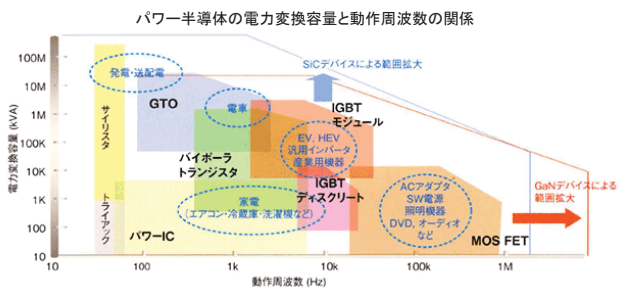
スマートフォンとモバイルバッテリー



出典
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/smart_community/

パワー半導体の技術動向

電力利用の多様化に伴い、インバータ、コンバータの利用が拡大



出典: JEITA

電力変換容量の増大、動作周波数の上昇

自動車関連と周波数の関係

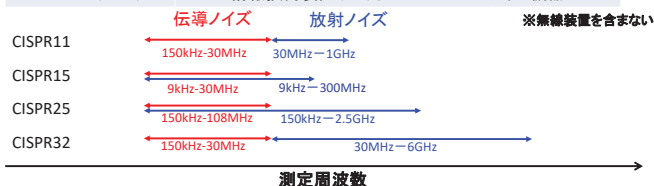


転送速度10Mbps以下の周波数を利用したシステムが複数混在

研究背景 (EMI試験)

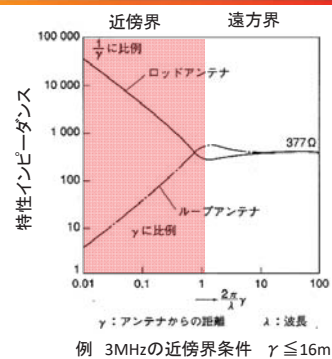
主なエミッション規格

規格名	対象機器
CISPR11	医療機器、計測用機器
CISPR15	電気照明機器
CISPR25	車載機器
CISPR32 (VCCI)	情報技術装置 (ITE) およびマルチメディア機器



低周波領域のノイズに関してはほとんどの装置について試験必須

低周波帯域における電気特性①

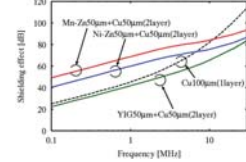
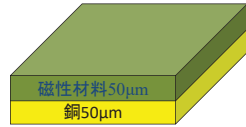
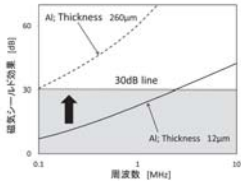


低周波帯域での電気特性は近傍界条件が支配的

低周波領域における電気特性②

積層遮蔽材料の磁気シールド効果

金属の磁気シールド特性 (KEC法)

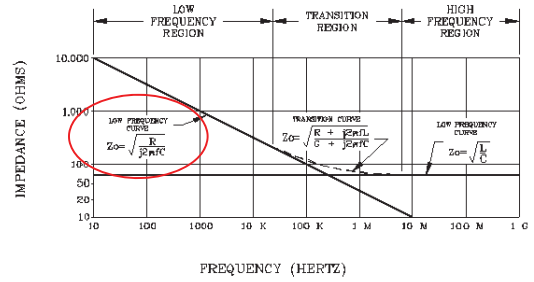


低周波領域における金属材料の磁気シールド効果が減少

D. Sakamoto, A. Tsuchiya, R. Suga, H. Sugama, O. Hashimoto, "Wideband shielding effectiveness of laminated sheet using copper and magnetic materials," IEICE Communications Express, Vol.7, No.3, 95-100

低周波領域における電気特性③

同軸ケーブルの特性インピーダンス

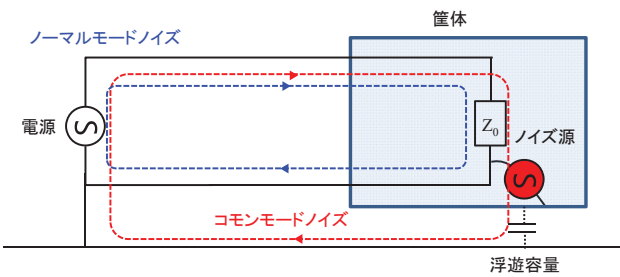


Ref. URL ; <http://home.mira.net/~marcop/index.htm>

低周波における同軸ケーブルの特性インピーダンスは高周波と異なる

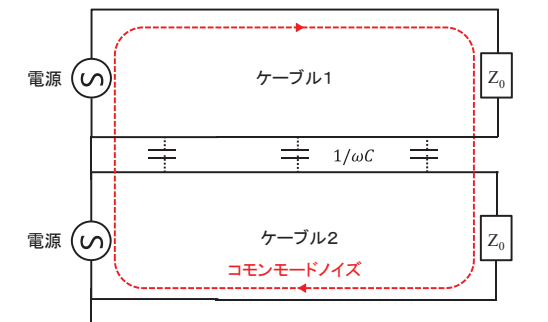
電磁界ノイズ

ノーマルモードとコモンモードノイズ



コモンモードノイズによる影響が問題

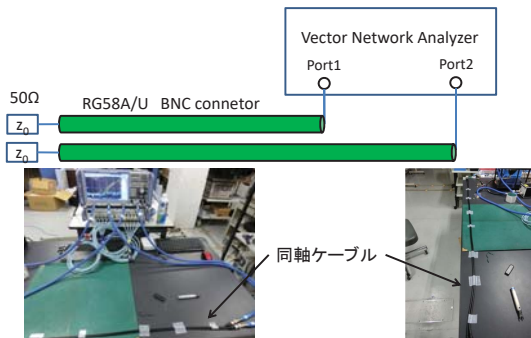
同軸ケーブル間のコモンモードノイズ



ケーブル間の容量性結合により信号が重畳

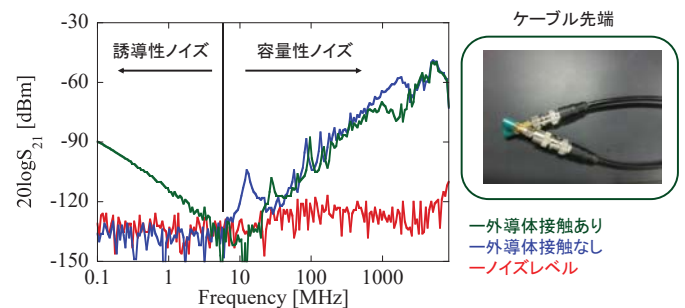
同軸ケーブルのコモンモードノイズ測定

同軸ケーブル間に生じるコモンモード信号 S_{21} を測定



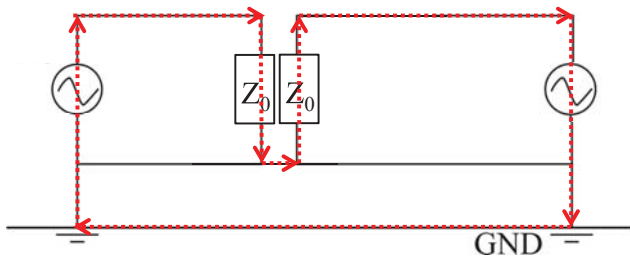
ケーブルを束ねるように配置

コモンモード測定結果



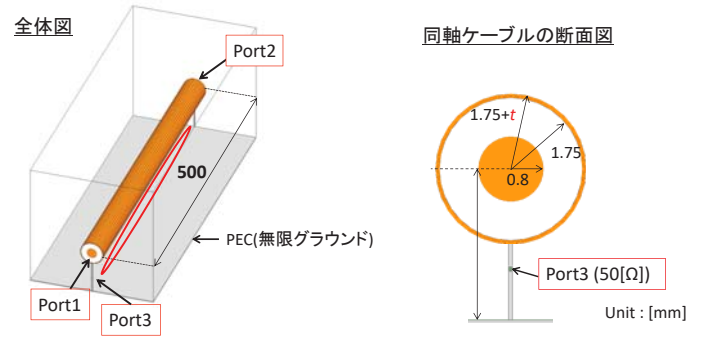
同軸ケーブルの外導体を接触させると、ノイズが印加

低周波の場合



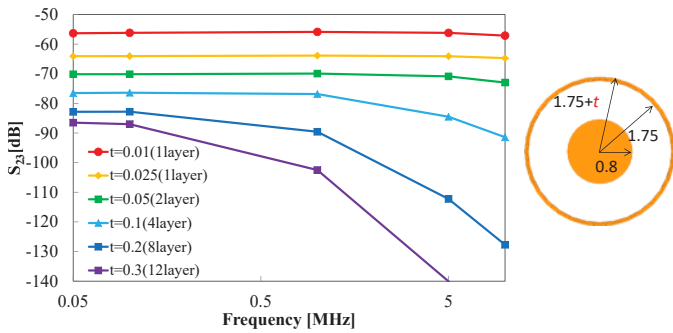
グラドループを介して信号が重畳

グラドループによる影響について解析



グラウンドと同軸ケーブルの外導体間に信号を印加

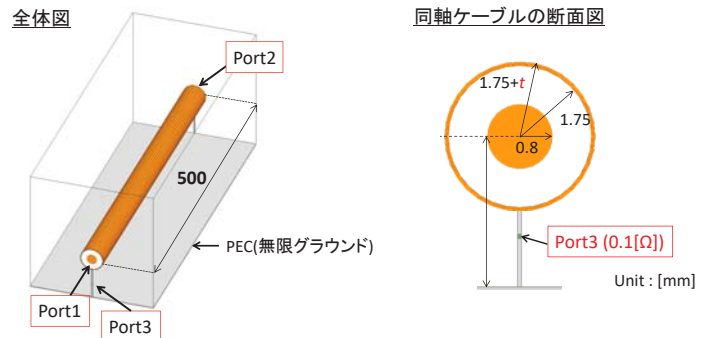
外導体の厚み変化時の周波数に対する透過特性 S_{23}



外導体の厚みが増加すると重畳される信号は減少

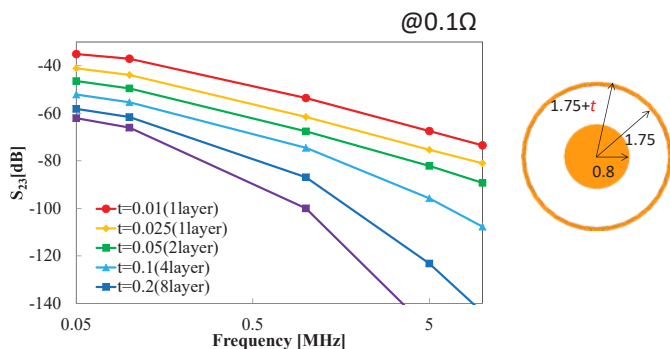
電磁界解析モデル

全体図 同軸ケーブルの断面図



重畳される信号の入カインピーダンスを0.1Ωとした

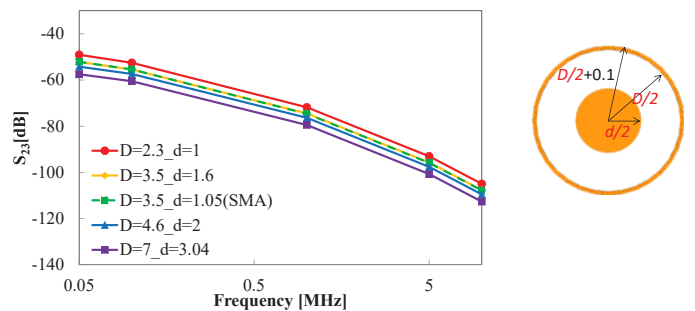
外導体の厚み変化時の周波数に対する透過特性 S_{23}



入カインピーダンスを下げると印加信号は増加

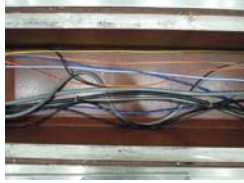
線路外径を変化させた際の周波数に対する透過特性 S_{23}

外導体の厚みを0.1mmとして固定



外導体の厚みによる影響に比べ、線径による影響は少ない

当所の電波暗室の配線ピット内



- ▶ 同軸ケーブル
 - 磁界・電界測定用(30MHz以下)、EMI用(30MHz~1GHz、1GHz超)、アンテナ指向性測定用など
- ▶ 電源ケーブル
 - ターンテーブル、アンテナマスの電源ケーブル(200V系)、一般コンセント用電源ケーブル
- ▶ 供試体と対向機との通信ケーブル
 - LANケーブル、RS-232Cケーブル、映像用同軸ケーブルなど

多数のケーブルが設置され、電磁誘導や容量性結合により、微小信号測定においてノイズの影響を受ける可能性大

RoF(Radio On Fiber) → 光ファイバ無線

電気信号を光信号に変えて伝送するシステム



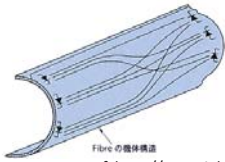
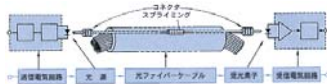
- 光で伝送するので外来ノイズに強い→高い絶縁性
- 高周波領域での長距離伝送に優位(光ファイバの伝送損失:0.1419dB/km)

用途

- テレビやラジオなどの公共放送や携帯電話の信号の長距離伝送システム
- Fly-By-Light (飛行機用の制御システム)

Fly-By-Light

フライ・バイ・ライトとは、パイロットの操縦を光学的なセンサーで検知し、この検知された信号と航空機の運動をモニターしている別の光学的センサーとの信号をコンピューターで処理し、光信号により航空機の操縦翼面を制御する技術である。FBLに用いられる光ファイバーケーブルは光信号によって情報を伝送することができるため、(1)電磁干渉に強い、(2)高速大容量の伝送が可能、(3)小型/軽量、(4)防火性に優れる、などの特徴があり、将来の航空機に新しく採用すべく現在研究中の新技術である。



Ref. http://www.jal.com/ja/jiten/dict/g_page/g216.html

光給電RoF

多摩川電子(株)
光給電RoFレーザーシステム
(第33回神奈川県工業技術開発大賞(奨励賞)を受賞)



主な特徴

- 広帯域な周波数特性(100kHz-6GHz)
- ヘッド部分を光で給電するため電池不要で長時間動作可能
- 低入力雑音(145dBm/Hz)@1GHz
- Transmitterとしても動作可能(※別システム)

研究目的

- 低周波におけるコモンモードノイズに対する光給電RoFの有効性を検討
- 低周波を含むEMI測定における光給電RoFの有効性を検討

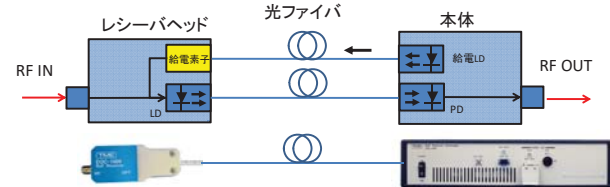
KISTEC 平成30年度産学公連携事業化促進研究



青山学院大学、多摩川電子との共同研究事業として実施

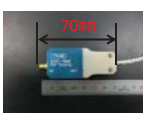
光給電RoFの構成

光給電RoFの構成



※入力側と出力側を入れ替えることでTransmitterとして動作可能

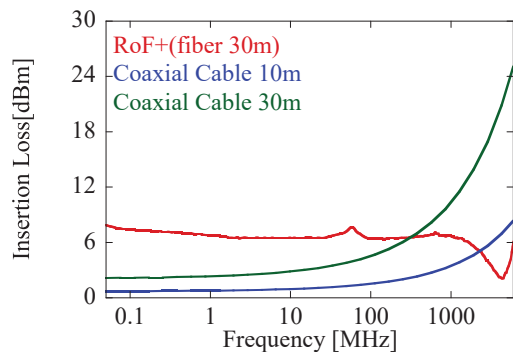
光給電レーザーヘッド



光伝送用ファイバ



伝送損失の比較

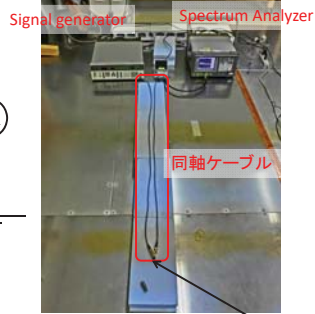
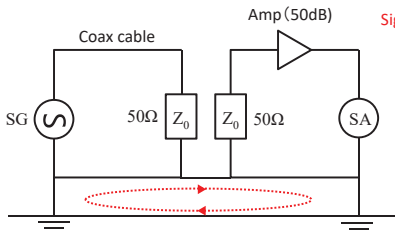


高い周波数で長距離伝送する場合には有効

コモンモードノイズ測定

測定系

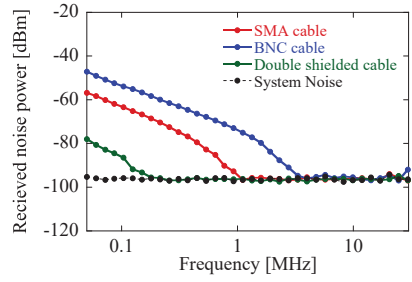
測定の写真



グラウンドループができるように同軸ケーブルを並べて配置

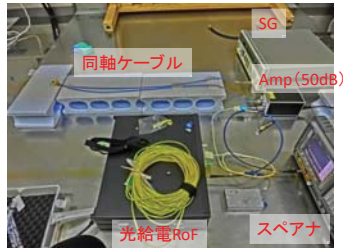
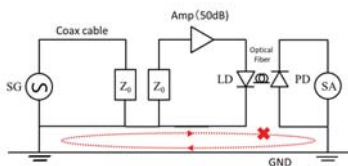
先端を接続

測定結果(同軸ケーブル)



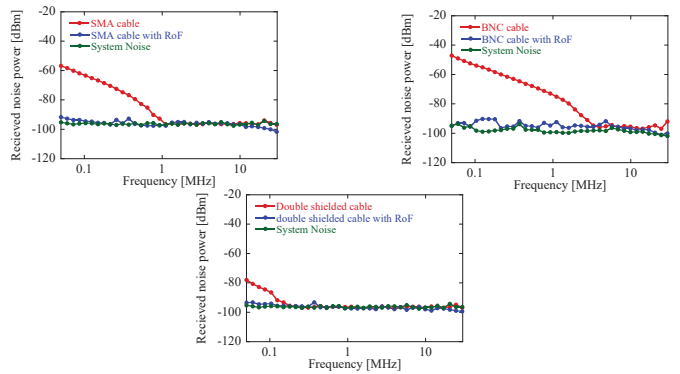
10MHz以下でコモンモードノイズによる影響を確認

光給電RoFを使用した測定系



片側に光給電RoFレシーバを接続

測定結果(光給電RoF)

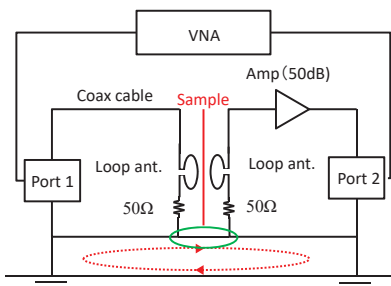
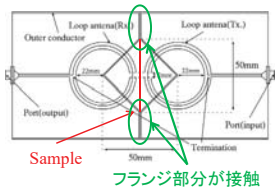


光給電RoFを用いることでコモンモードノイズは除去

磁界シールド効果測定(KEC法)

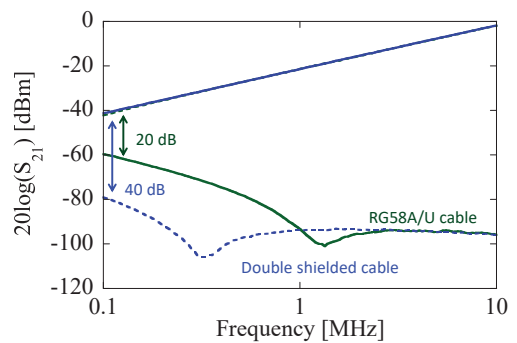
測定治具の断面図

回路モデル



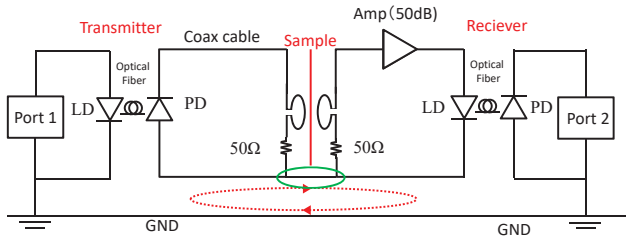
測定治具のアンテナ部分

測定系のダイナミックレンジ



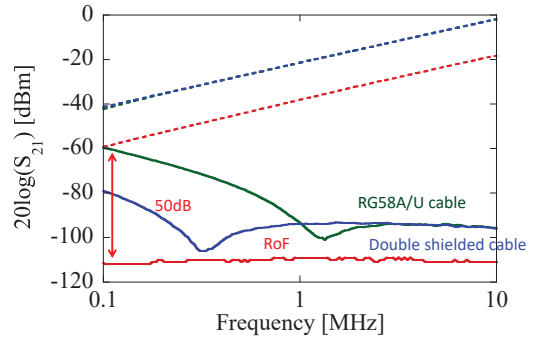
グラウンドループによる影響により低周波側のダイナミックレンジが減少

光給電RoFを用いた測定系



TxとRxの両側に用いることで電氣的に完全にフローティングとなる系を実現

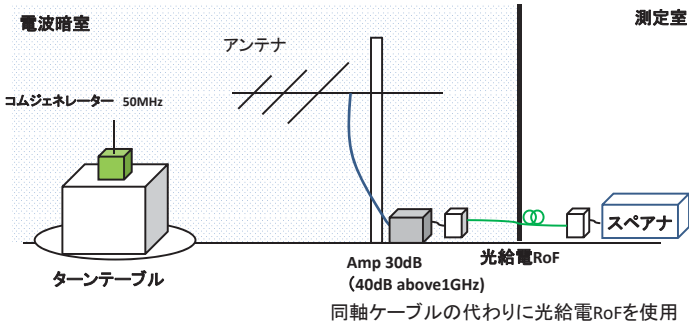
測定系のダイナミックレンジ



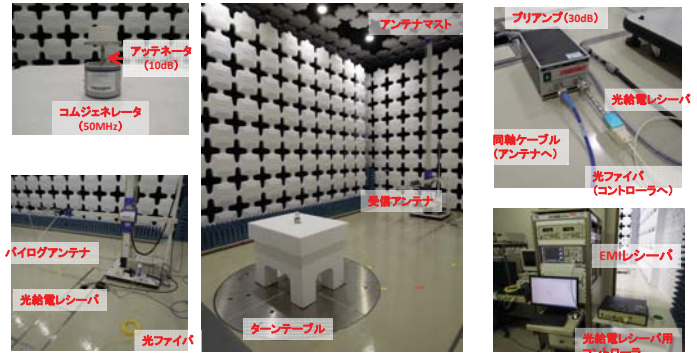
光給電RoFを用いることでダイナミックレンジが改善

放射電磁界強度測定

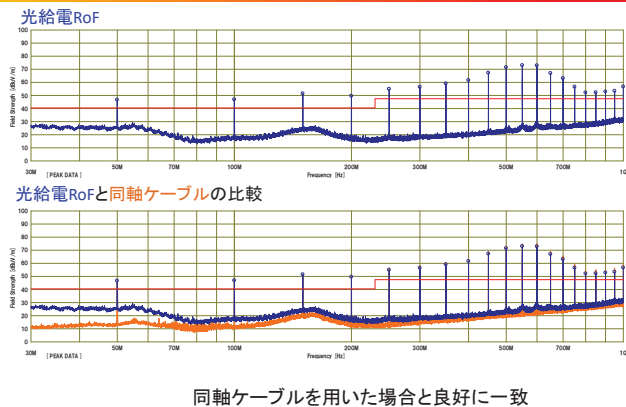
コムジェネレータをEUTとしてCISPR32 (VCCI) のEMI測定を実施



放射電磁界強度測定

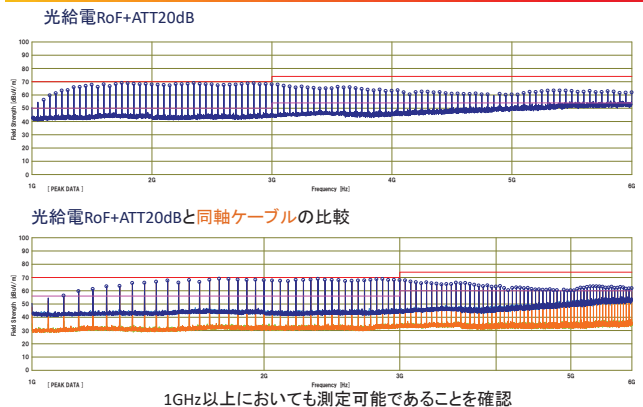


放射電磁界強度測定 (1GHz以下)



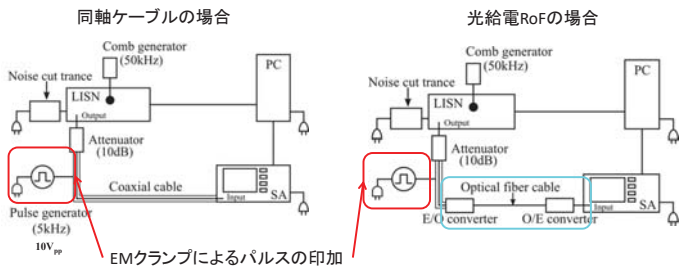
同軸ケーブルを用いた場合と良好に一致

放射電磁界強度測定 (1GHz超)

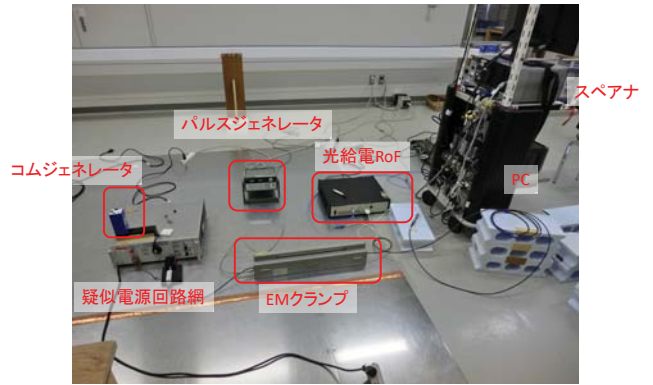


1GHz以上においても測定可能であることを確認

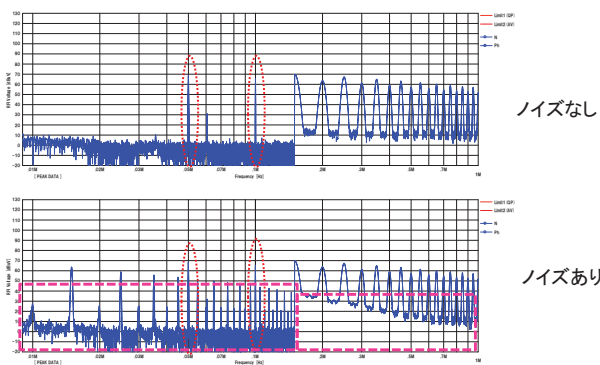
同軸ケーブルにコモンモードノイズを印加した状態で測定



同軸ケーブルを光給電RoFに置き換えて測定

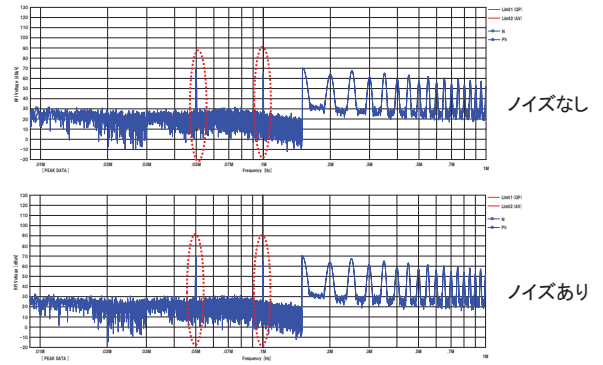


測定結果(同軸ケーブルの場合)



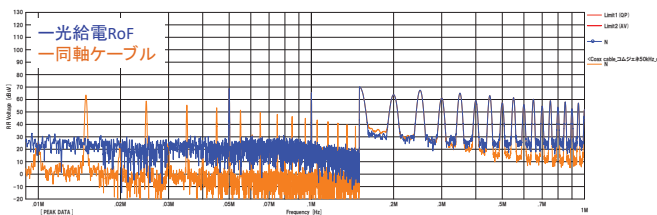
PGからのノイズが重畳されていることを確認

測定結果(光給電RoFの場合)



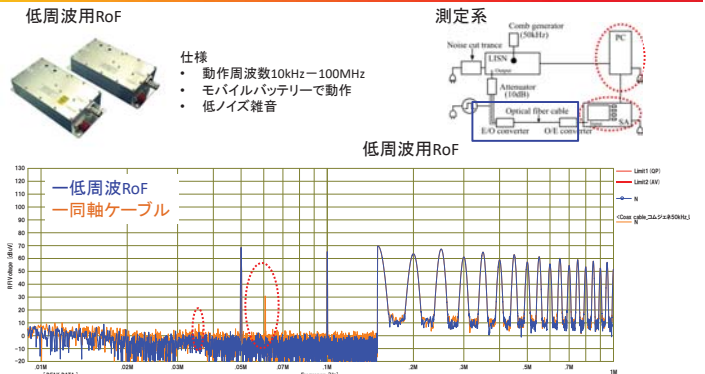
PGからのノイズは検波されなかった

測定結果(光給電RoFと同軸ケーブルの比較)



光給電RoFによってEMクランプより注入したノイズを除去

測定結果(低周波用RoFと同軸ケーブルの比較)



PC 及びスペアナの電源ノイズを除去

- 低周波におけるコモンモードノイズに対する光給電RoFの有効性を検証

光給電RoFによって低周波におけるグラドループによる影響を遮断できることを確認

KEC法の磁気シールド効果測定におけるダイナミックレンジを改善

- 光給電RoFのEMC試験における有効性について検証

放射エミッション測定(6GHz以下)において利用可能であることを確認

雑音端子電圧測定において外部からのノイズによる影響を受けずに測定可能

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
	今莊 義弘	スタック電子株式会社
	菅野 敦史	情報通信研究機構
	近藤 順悟	日本ガイシ株式会社
	齊藤 一幸	千葉大学
	佐藤 源之	東北大学
	余 元峰	産業技術総合研究所
	セツト ジイヨン	東京大学
	染野 薫	バイテックグローバルエレクトロニクス株式会社
	田上 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
	柳澤 幸樹	株式会社多摩川電子
顧問	大西 輝夫	株式会社 NTT ドコモ
	黒川 悟	産業技術総合研究所
	村田 博司	三重大学
	陳 強	東北大学

PEM

☆ 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/>

