

次世代 EMC 試験に適用可能な光伝送システムの開発

菅間 秀晃、土屋 明久（電子技術部 電磁環境グループ）

柳澤 幸樹、諏訪部 豊（株式会社多摩川電子）

橋本 修、須賀 良介（青山学院大学）

1. はじめに

EV（電気自動車）やIoT（モノのインターネット）の技術開発において必須なEMC計測（電磁ノイズ計測）および電波計測に適用可能な光給電RoF（Radio on Fiber；光ファイバ無線）システム¹⁾²⁾を開発した。本研究は、青山学院大学の電磁波評価技術と当所のEMC試験技術を活用して株式会社多摩川電子が製品化を行った。

自動車産業では、自動車の電動化（EV、HEVなど）、コネクティッドカーや自動運転技術、ワイヤレス充電など、電気・電子化が急速に進んでおり、安全性を確保する上で高精度なEMC計測が今後重要になる。しかし、モーターやインバータから高電圧（数千V）・大電流（数千A）のスイッチングノイズが発生している劣悪な電磁環境下で、高精度にEMC計測を行うためには、従来の金属製同軸ケーブルでは外来ノイズの混入を防ぐことが困難である。そこで開発した光給電RoFシステムは、光ファイバの高絶縁性や広帯域低損失といった特徴を活かした高精度なEMC計測を実現する有効な技術である。さらにIoTや5G（第5世代移動通信システム）開発でのアンテナ評価にも活用が期待できる。

2. 光給電RoFシステム

光給電RoFシステムは、図1に示すように電気信号を光信号に変換して光ファイバで伝送するだけでなく、センサヘッド内の電子回路への給電も光ファイバで行うため、長時間の測定も可能である。開発した光伝送システムは、図2に示すように光給電RoFレシーバシステム（センサヘッド+制御コントローラ）および光給電RoFトランスミッタシステム（センサヘッド+制御コントローラ）から構成される。

光給電RoFシステムの伝送特性は、周波数10kHz～10MHzをトラッキングジェネレータ（TG）内蔵のスペクトラム・アナライザ（SA；E4407B）で測定し、周波数10MHz～20GHzをベクトル・ネットワーク・アナライザ（VNA；E8363B）で測定した。光給電RoFレシーバシステムは、図3に示すように周波数10kHz～6GHzをカバーしており、伝送ケーブルとしては約8dB（一定）の減衰量となっている。また、光給電RoFトランスミッタシステムは、図4に示すように周波数100kHz～10GHzをカバーしており、伝送ケーブルとしては約8dB（一定）の減衰量となっている。このため、低周波領域や10m以下の信号伝送においては同軸ケーブルに比べ減衰量が大きいので、不利な面もあるが、光ファイバの軽量、優れた屈曲性及び高い絶縁性

といった利点を活かせる分野での活用が期待できる。

光給電RoFレシーバシステムは、EMI測定において、放射妨害波測定（30MHz～1GHz）、1GHz超の放射妨害波測定（1GHz～6GHz）などでの利用が期待できる。これらの測定では、同軸ケーブルで10mを超える長距離の信号伝送を行っており、シールド性能不足のため外来ノイズの影響を受ける可能性がある。一般的な電波暗室の配線ピット内は、図5に示すように、計測用同軸ケーブル、アンテナマストとターンテーブルの駆動用電力ケーブル、EUT

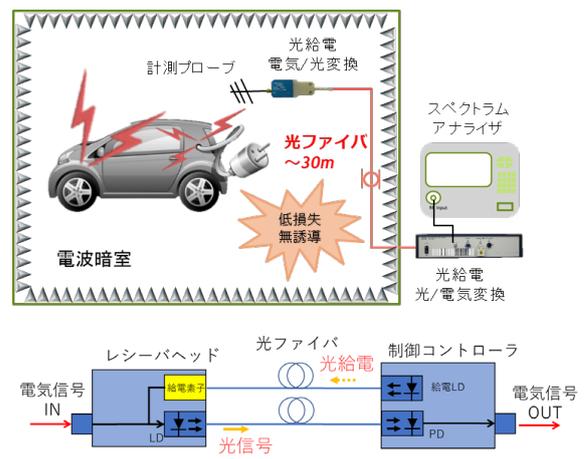


図1 光給電RoFシステムの原理（レシーバ）

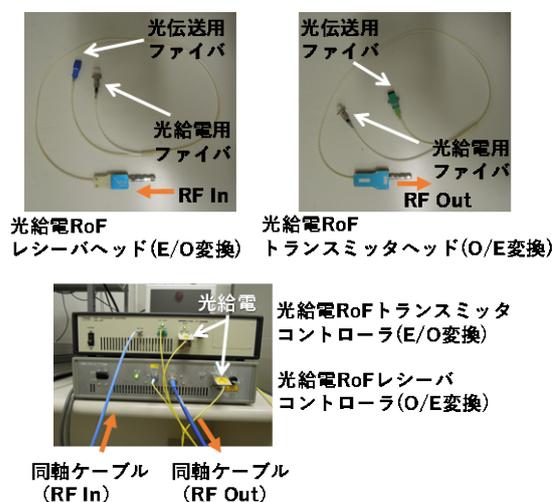
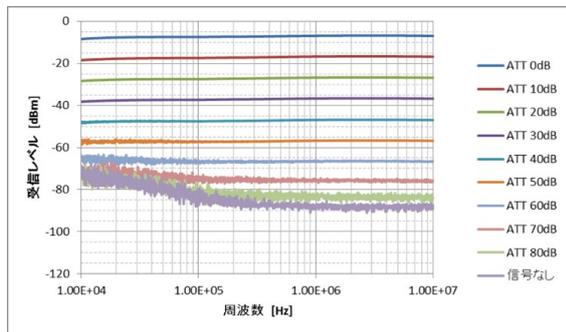
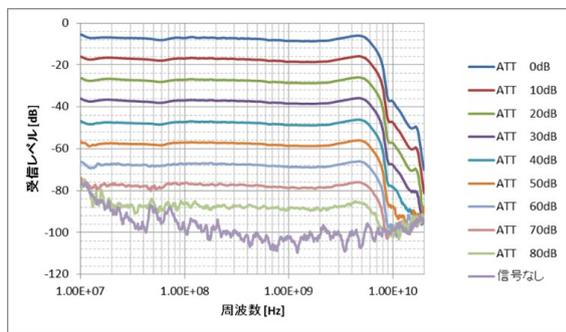


図2 光給電RoFレシーバシステムと光給電RoFトランスミッタシステム

と対向機の接続ケーブルなど様々なケーブルを設置しているため、測定中に原因不明のノイズにより再測定が必要

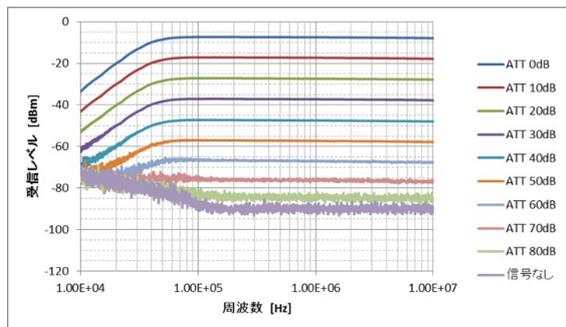


(a) 10kHz~10MHz (SA+TG)

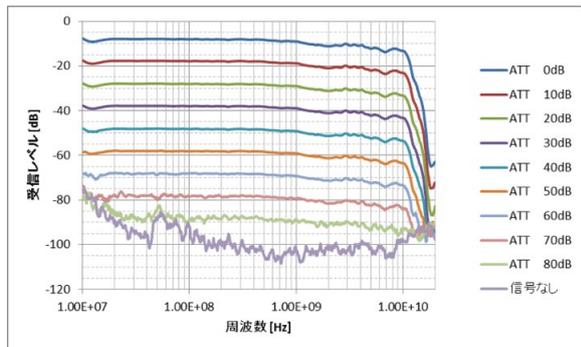


(b) 10MHz~20GHz (VNA)

図3 光給電 RoF 給電レーザシステムの伝送特性



(a) 10kHz~10MHz (SA+TG)



(b) 10MHz~20GHz (VNA)

図4 光給電 RoF トランスミッタシステムの伝送特性

になる場合もある。また、アンテナ等を移動させて測定するような場合は、同軸ケーブルの屈曲や金属床面との接触などにより伝送特性が変化して測定値が変動する恐れがある。光給電 RoF レーザシステムは屈曲性に優れた光ファイバで信号伝送を行うため、外来ノイズの混入や金属床面等の影響を受けることがないため、高精度な EMI 測定が可能となる。

光給電 RoF トランスミッタシステムは、電波暗室の特性評価である正規化サイトアッテネーション測定 (NSA 測定) やサイト VSWR 測定 (SVSWR 測定) において送信アンテナ側に用いることで、同軸ケーブルからの電磁放射や反射波の影響を除去する手法として期待できる。また、小型アンテナ等の指向性測定においても同軸ケーブルの影響を除去する手法として期待できる。

3. 実験方法

EMC に関する試験計測は、電子機器の種類や電子材料の用途等により試験方法や周波数範囲が大きく異なる。一般的な電子機器、HEV (ハイブリッド車) や EV (電気自動車) などに搭載させる電子機器 (車載機器)、ノイズ対策部品・材料などにおいて、光伝送システムが有効と考えられる試験方法について検討を行った。

3. 1 低周波領域での電磁波シールド材評価

電磁波シールド効果 (磁界シールド) は、図6の(a)に示すように VNA と KEC 法治具により周波数 100kHz~1GHz で測定を行うことができる。しかし、図6の(b)に示すように、KEC 法はその構造上、VNA を使用すると同軸ケーブルの外部導体によるグラドループを形成してしまう。周波数 1MHz 以下では同軸ケーブルのシールド性能が低いいため、送信側の信号の一部がグラドループを介して受信側の同軸ケーブル内に混入してしまい、測定ダイナミックレンジが大きく低下する。そのため高い絶縁性を有する光ファイバによる光伝送システムの活用が期待できる。そこで、周波数 100kHz において測定ダイナミックレンジ 60dB 以上を達成することを目標に光伝送システムを用いたシールド効果測定システムを検討した。

3. 2 マイクロ波帯域の電波吸収材評価

IoT や 5G の普及により、周波数 1GHz~6GHz の領域で

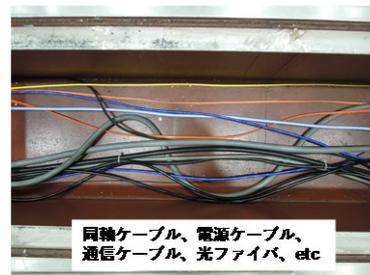
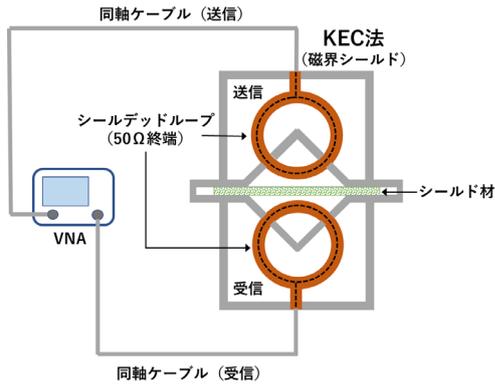
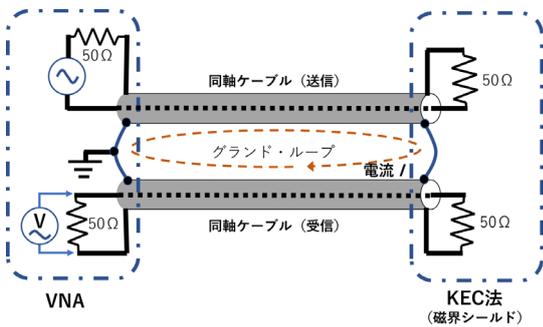


図5 電波暗室の配線ピット



(a) KEC法による磁界シールド効果測定



(b) KEC法とVNAを接続した場合の等価回路モデル

図6 低周波領域での電磁波シールド効果測定

利用される無線通信システムによる電磁環境問題が多数発生する可能性がある。現在、電波を吸収するシートや塗料などの電波吸収材を壁、床、天井などに施工することで電波の伝搬特性を改善することができるが、高価であるため、低コストで作製できる電波吸収材を開発するニーズがある。

周波数1GHz以上のマイクロ波帯において電波吸収率は、図7に示すようにホーンアンテナによる自由空間法で測定できる³⁾。電波吸収材は、電波の入射角度によって電波吸収率が変化するので、送受信アンテナの角度を可変する必要がある。しかし、屈曲性に乏しい同軸ケーブルも一緒に動かす必要があるため、測定の再現性が乏しい。そのため光ファイバの高い屈曲性能を有する光伝送システムの活用が期待できる。

3.3 ノイズ抑制シートの輻射抑制率評価

主に周波数500MHz以上のEMI対策には、回路基板や金属筐体に貼り付けるだけでノイズの電磁エネルギーを吸収する効果をもつノイズ抑制シート(NSS)が用いられている。NSSの評価方法の一つに図8に示す輻射抑制率測定がある⁴⁾。この測定では、ノイズの放射源にマイクロストリップライン(MSL)を形成したプリント基板が用いられる。しかし、末端されたMSLからの電磁放射のレベルは非常に低いため、MSL基板に接続した同軸ケーブルからの電磁放射の影響が無視できない。そこで、送信側に光

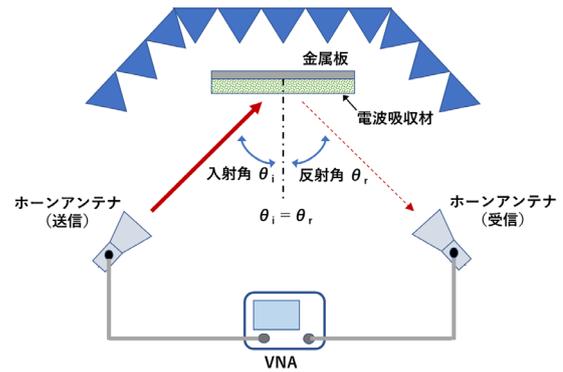


図7 マイクロ波帯の電波吸収率測定

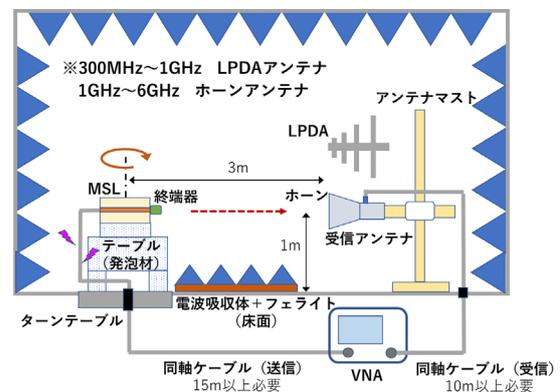


図8 ノイズ抑制シートの輻射抑制率測定

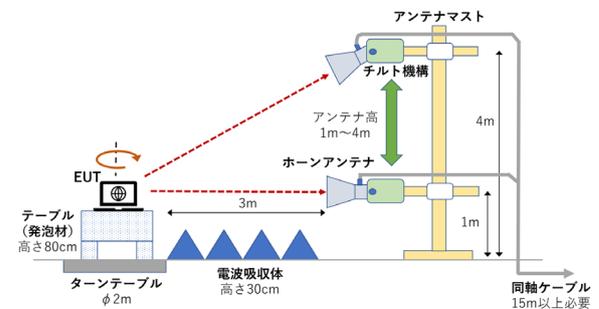


図9 ボアサイトによるEMI測定

RoFトランスミッタシステムを使用することで、同軸ケーブルを使用した場合に比べて正確な測定が可能となる。

3.4 ボアサイトによるEMI測定

米国のFCC(連邦通信委員会)Part15で規定する1GHz超のEMI測定(1GHz~6GHz)では、図9に示すように受信アンテナの高さを1m~4mの範囲でスキャンし、かつアンテナのメインローブが常にEUTの方向になるようにチルト機構を追加してボアサイト測定することになっている⁵⁾。しかし、国際規格のCISPR(国際無線障害特別委員会)Pub.32では、1m立方以内の小型EUTは、受信アンテナは高さ1mに固定して測定することになっており、両者の測定結果に差異が生じる可能性がある。しかし、FCC

の方法で測定するために、同軸ケーブルは太くて屈曲性に乏しい低損失タイプ (SUCOFLEX 106 など) を使用し、長さは 15m 以上必要となる。このため、光給電 RoF レシーバシステムを利用すると、細くて屈曲性に優れた低損失の光ファイバの有効性が十分活かせると考えられる。

4. 結果及び考察

4.1 KEC 法による磁界シールド効果測定

図 10 にスペクトラム・アナライザ (TG 内蔵) と KEC 法 (磁界シールド) を同軸ケーブルで接続して測定したスルー特性 (基準) 及び銅板 (厚さ 2mm) を挿入したときの伝送特性を示す。これらの差分がシールド効果となるが、グラウンドループの影響により 1MHz 以下でダイナミックレンジが低下している。そこで、図 11 に示すように送信側に光給電 RoF トランスミッタを用いて磁界シールド測定システムを構築した。その結果、図 12 に示すように 100kHz において約 60dB のダイナミックレンジを達成することができた。このため、EV のワイヤレス充電 (85kHz) などに使用される高いシールド性能を要求されるシールド材の磁界シールド評価に利用できると考える。

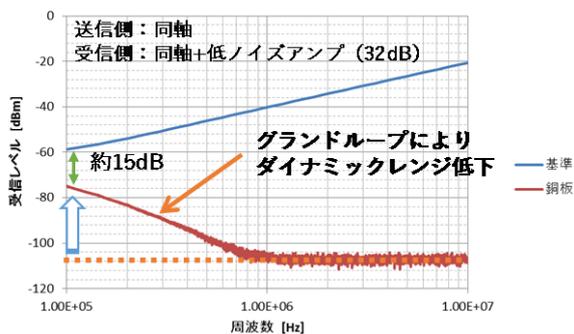


図 10 同軸系におけるグラウンドループの影響

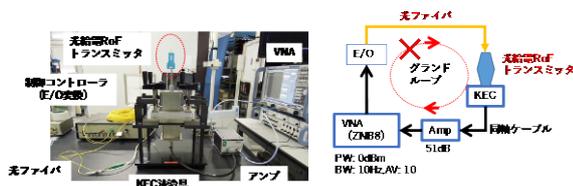


図 11 光伝送システムを用いた磁界シールド測定

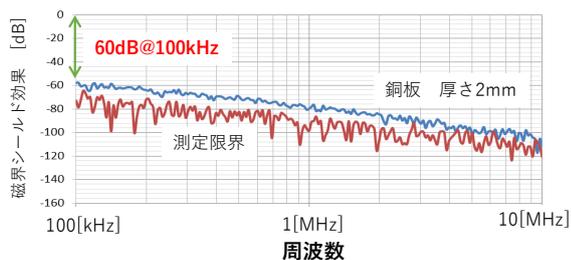


図 12 磁界シールド効果の測定結果

4.2 自由空間法による電波吸収率測定

図 13 に示すように送信アンテナの同軸ケーブルを光給電 RoF トランスミッタシステム、受信アンテナの同軸ケーブルを光給電 RoF レシーバシステムにそれぞれ置き換えて電波吸収率の角度依存性を測定した。送受信に標準ゲインホーンアンテナを用いて 5GHz~8GHz において測定を行った。VNA のタイムドメイン機能により、壁、床、天井などからの不要な反射波を除去することで測定ダイナミックレンジの拡大を図っている。今回の評価サンプルは、ETC 用の 5.8GHz 帯で電波吸収特性を有する厚さ約 2mm のゴムシートとした。

図 14 に測定結果を示す。入射角度 30° の場合に最大の電波吸収率 (約 50dB) であることが確認できた。

4.3 ノイズ抑制シートの放射抑制率測定

図 15 に示すように光給電 RoF トランスミッタシステムを用いて放射抑制率測定システムを構築した。評価用 MSL 基板 (10cm×5cm) のライン上に厚みの異なる NSS を貼りつけた場合と無い場合における放射電界強度 (dB μ V/m) を 300MHz~1GHz で測定し、それらの差分が放射抑制率となる。同軸ケーブルを用いた場合と比較した結果を図 16 に示す。同軸ケーブルで給電した場合は、ケーブルからの直接放射レベルが高いため、放射抑制率が負の値になる領域もあるが、光給電 RoF トランスミッタシステムを使用すると放射抑制率が正の値となり、予想される結果となった。

4.4 ポアサイトによる EMI 測定

図 17 に示すように光給電 RoF レシーバシステムを用いてポアサイトによる 1GHz 超の EMI 測定を行った。放射

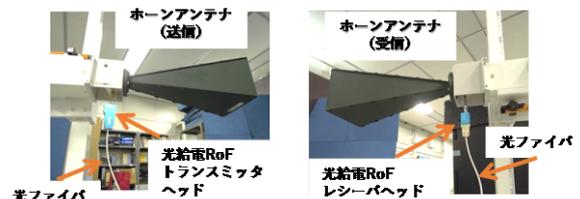


図 13 光伝送システムを用いた電波吸収率測定

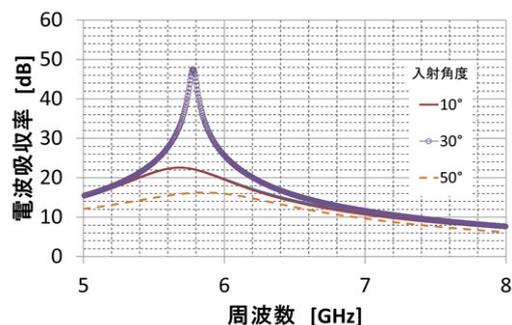


図 14 電波吸収率の測定結果

源にはコムジェネレータ（CGE01R）を使用した。図 18 は周波数 3GHz におけるハイトパターンを示す。ポアサイトでは正確な最大値を得ることができている。この結果からポアサイト測定の有効性は確認できたが、光伝送システムと同軸ケーブルとの差異は確認できなかった。しかし、今後 6GHz 以上の EMI 測定規制が施行された場合は、低

損失な光ファイバの特性を十分活用できるため、光給電 RoF レシーバシステムは 18GHz まで対応できるように改良する必要がある。

5. 今後の展開

EV などの車載用電子機器の誤動作を誘発する電磁ノイズを正確に測定することが求められている。電気信号を光信号に変換し、光ファイバによる信号伝送と電力供給を光で行うことによって、外来ノイズの影響を受けずに正確な EMC 計測が行えるメリットを最大限に発揮するために、さらに小型・広帯域・高感度な電磁波計測システムの開発を目指す。

※本研究は、平成 29 年度～30 年度の産学公連携事業化促進研究で実施したものである。

【参考文献】

1. 大西, 石原, 東山; “直接変調電気/光(EO)変換器を用いた電磁界計測”, 信学技報, PEM2014-15(2015).
2. 西岡, 原口, 安藤, 山浦, 深沢; “光給電 RoF 技術を用いた高絶縁・小型な光送受信モジュール”, 信学技報, PN2014-48(2015).
3. 橋本修; “高周波領域における材料定数測定法”, 森北出版 (2003).
4. 平塚信之; “ノイズ抑制用軟磁性材料とその応用”, 三松出版(2008).
5. 佐藤智典; “デジタル・デバイスの FCC 規制への対応”, 科学情報出版, EMC, 373, 65-82(2019).

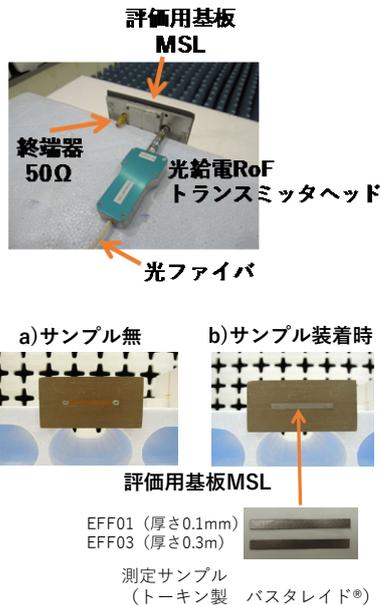
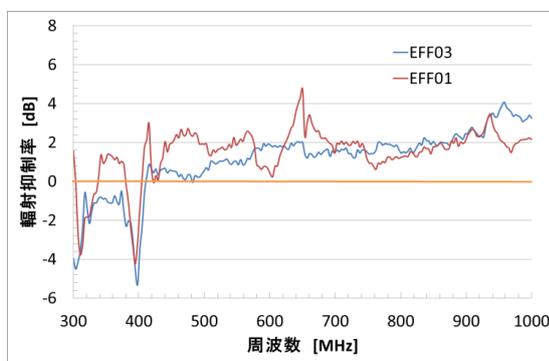
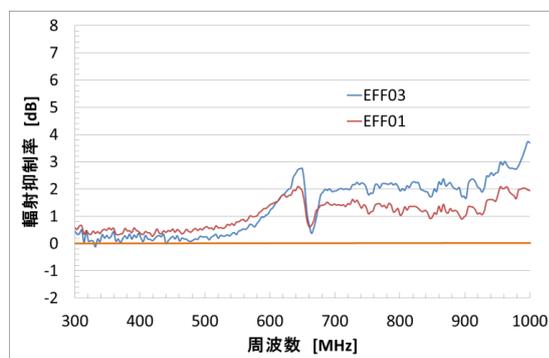


図 15 光伝送システムを用いた輻射抑制率測定



a) 同軸ケーブル



b) 光伝送システム

図 16 NSS の輻射抑制率測定

【外部発表】 口頭発表 1 件

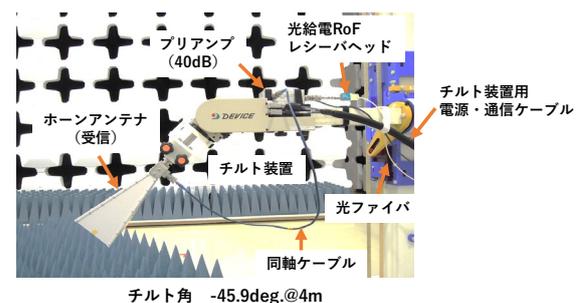


図 17 光伝送システムを用いたポアサイト測定

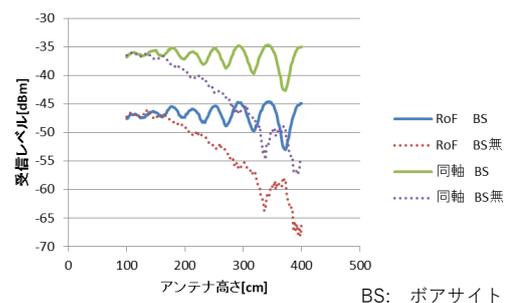


図 18 ハイトパターン測定 (水平偏波 3GHz)