

より正確な電界計測を可能にする 電気光学プローブ

ユビキタス社会の進展に伴い、通信やセンシングなどの分野でさまざまな電波が利用されるようになり、電子機器どうしの電波干渉や人体での吸収を評価することが重要となっています。本稿では、電気光学効果を用いた電界プローブによって正確な評価を可能にする電界計測技術について紹介します。

とごう ひろよし しみず なおふみ
都甲 浩芳 / 清水 直文
ながつま ただお
永妻 忠夫

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所

電界計測の必要性

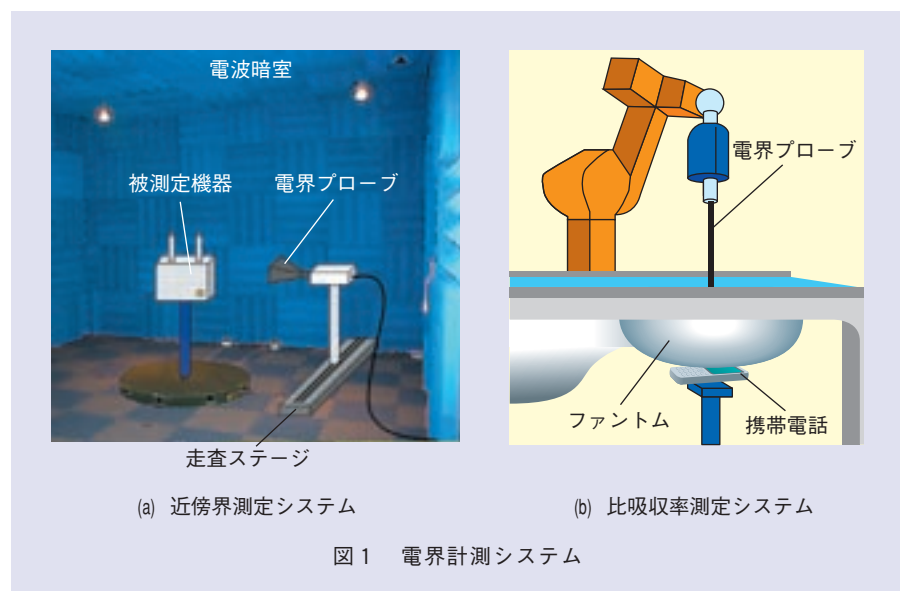
ユビキタス社会の進展に伴って、さまざまな電波が通信やセンシングに利用されています。このように電波の混在する環境において、放射される電波による電子機器どうしの干渉や人体への電波の吸収が懸念されています。電子機器が正常に動作することのできる電波環境を確保するため、国際電気標準会議（IEC: International Electrotechnical Commission）や国際無線障害特別委員会（CISPR: Comite International Special des Perturbations Radioelectriques）などの機関では電子機器から放射される電波の許容強度や測定方法について規格を定めています。また人体近傍における健全な電波利用を目指し、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection）は人体へ暴露される電波の基準値と測定方法についてガイドラインを示しています。このように、ユビキタス社会において使用する電波の安全性を高めるために、正確に電波を評価するための電界測定技術が求められています。

標準的な電界計測

電界を測定する方法は周波数や電波の利用形態によって異なります。実際の使用条件における機器どうしの干渉を評価するには、広い電波暗室内に測定対象の機器を配置し、電界を測定しなければなりません。この方法は干渉状態を直接評価できる利点がありますが、広大な空間に電波シールドや壁面からの反射を除去する構造を設けなければならないため費用負担が大きくなります。これに対して、被測定機器から放射される近傍界を測定し、その

測定値から遠方界を推定する方法があります。本方法では図1(a)のように機器の近傍で電界プローブを2次元走査して近傍界を測定します。測定領域が小さいため、大きな空間は必要ありませんが、数値計算により近傍界から遠方界を推定するため、高い空間分解能で電界の強度と位相を測定する必要があります。

人体へ吸収される電波の量は人体内の電界から算出される比吸収率（SAR: Specific Absorption Rate）を用いて評価されます。図1(b)のように人体と等しい電気特性を持つファン



トム*内で電界プローブを3次元的に走査することにより電界強度の分布を測定しています⁽¹⁾。

これらの測定には電界プローブとしてホーンアンテナやダイポールアンテナなどの金属素子から構成されるアンテナを用いるため、電界プローブからの散乱によって電波に擾乱を与えています。また電界プローブと被測定機器との距離が近いときは電気的な結合が大きくなるため、正確に電界を測定できなくなります。これらの擾乱や電気的結合を推定して測定値を補正する方法もありますが、得られた値は推定誤差を含んでしまいます。より正確な電界を得るために、擾乱や電気的結合を生じない電界プローブが求められています。

電気光学プローブ

従来の電界プローブにおいて課題であった被測定電界への擾乱や電気的結合を生じさせないため、センサ部から金属素子を排除した電界プローブを開発しました。開発した電界プローブは印加された電界に線形比例して屈折率が変化する1次の電気光学（EO: ElectroOptic）効果（ポッケルス効果：Pockels effect）を有するEO結晶を用いています。EO結晶を用いた電界計測の原理を説明します（図2）。電界が印加されていないとき、EO結晶へ入射した光は偏光状態を保ったまま誘電体反射膜により反射され戻ってきます。電界が印加されると、光を入射する結晶面や偏光状態によって屈折

率が変化し、偏光状態が変化して戻ってきます。偏光状態の変化を検光子などにより光の強度変化に変換した後、電気信号に変換することにより電界強度に比例した信号を得ることができます。図3(a)にEOプローブの先端部を示します。EOプローブの先端部はEO結晶、誘電体反射膜、コリメータレンズ、フェルール、光ファイバから構成されています。EO結晶は1mm角です。この寸法は従来のダイポールアン

テナを用いた電界プローブ（アンテナ長さ：数cm～10数cm）に比べて小さく、より低擾乱、かつ、微細な部位の測定が可能となることが期待されます。図3(b)に示すように先端部をガラス管の片端に固定し、ガラス管内を通した光ファイバのコネクタをもう一方の端に固定しています。偏光変化を強度変化へ変換する偏光処理モジュールに光ファイバコネクタを接続して使用します。

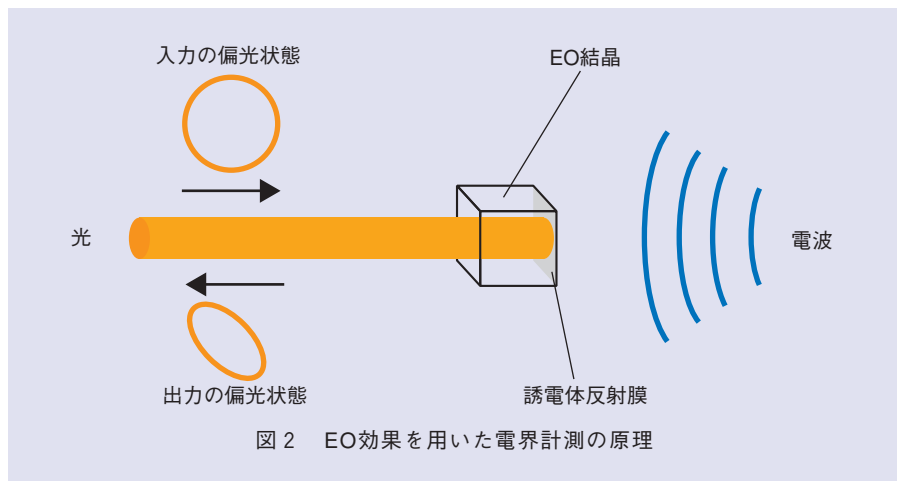


図2 EO効果を用いた電界計測の原理

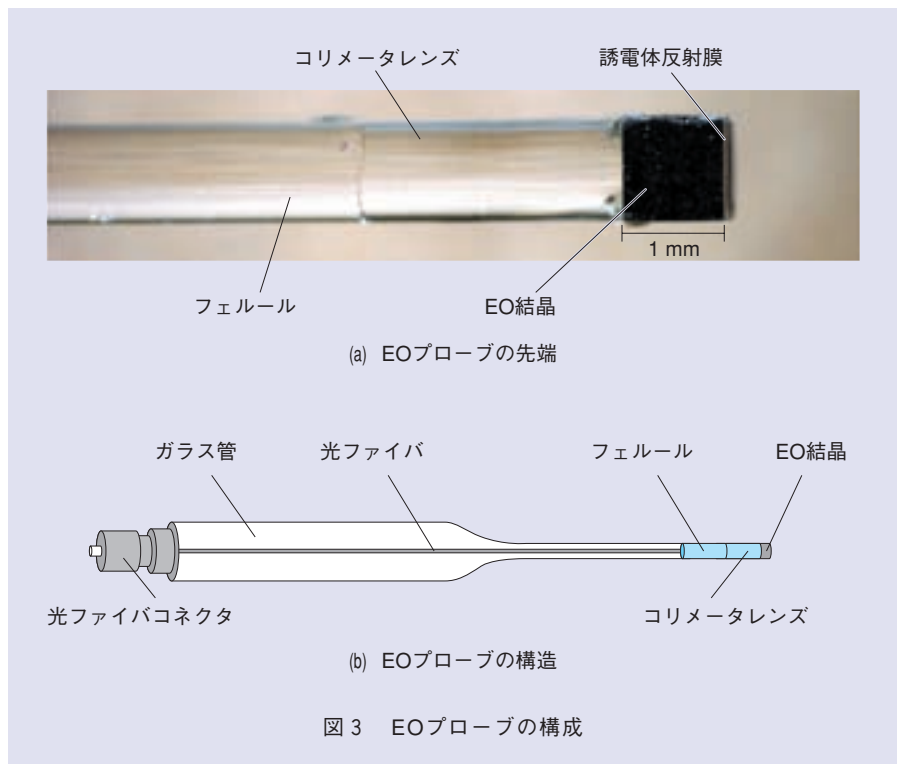


図3 EOプローブの構成

* ファントム：携帯電話から放射される電波の吸収量を測定するためのもので、人体の電気的特性（誘電率、透磁率）や物理的特性（密度）を模擬した人体電磁ファントムです。人体電磁ファントムには、人体の形状を模擬した固体ファントムやファントム内部の状態を測定するための液体ファントムなどがあります。

電界計測システム

図 4 (a)にEOプローブを用いた電界計測システムの構成を示します。本システムはEOプローブ、偏光処理モジュール、信号処理ユニット（光源、レーザー、信号発生器、ロックインアンプもしくはスペクトルアナライザ）、2次元走査ステージから構成されてい

ます。光源は直線偏光を生成しており、生成された直線偏光は偏波保持ファイバにより偏光処理モジュールを経由してEOプローブへ伝搬されます。誘電体反射膜で反射されて戻された光は互いに直交する2つの直線偏光に分離され、レーザーに伝搬されます。レーザーに伝搬された光をフォトダイオードで電気信号に変換した後、差動

アンプにより増幅して出力します。出力される電気信号の強度は偏光変化に比例しており、ロックインアンプもしくはスペクトルアナライザによりその振幅もしくは位相を測定することで電界の強度、位相を導出します。

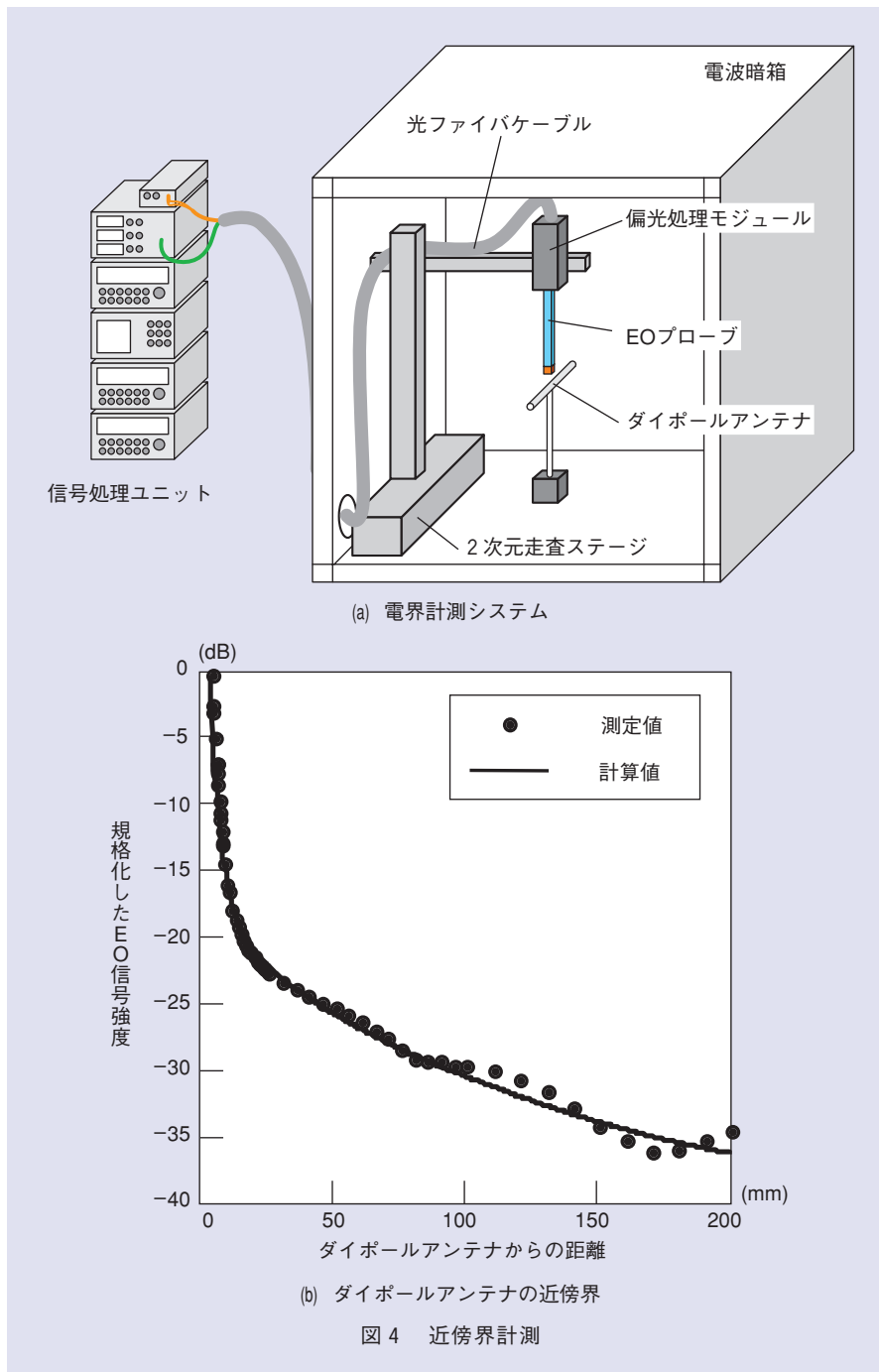
感度特性

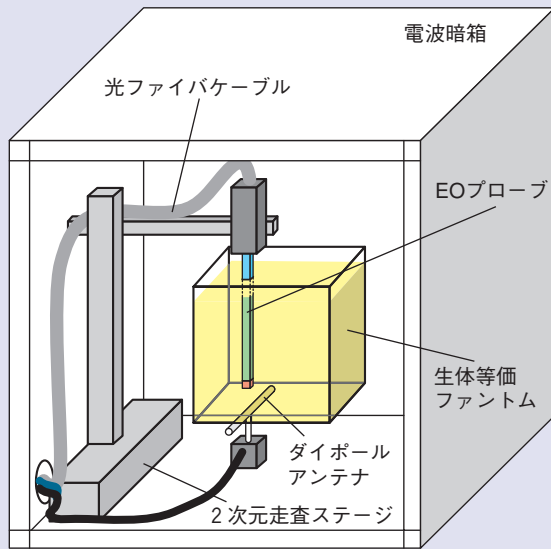
開発した電界計測システムは35 dB以上のダイナミックレンジを有し、0.6 V/m以下の電界を検出可能です。実験的に1.95~20 GHzの帯域において平坦な感度特性が確認されており、原理的にはTHz帯まで感度を有します。感度の指向性はダイポールアンテナと同じであり、直交軸間の感度の消光比は45 dB以上です。

ダイポールアンテナ近傍界計測

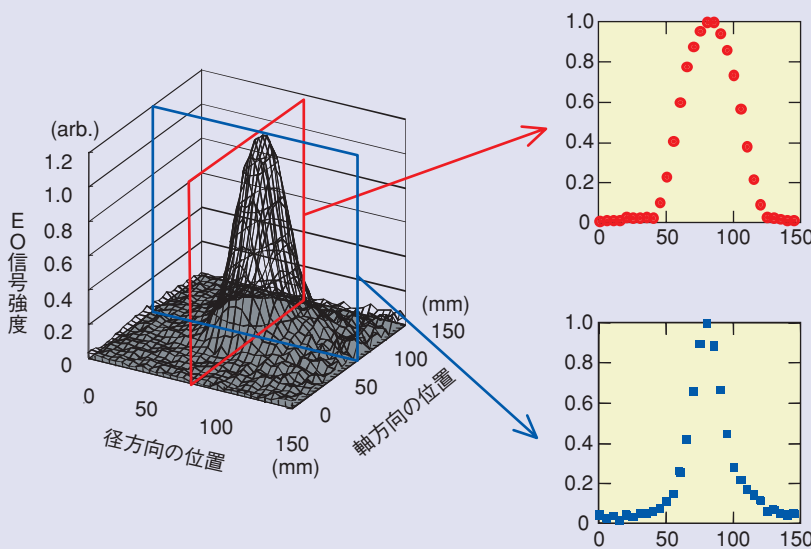
図 4 (a)に示した電界計測システムを用いて2.45 GHz帯の半波長ダイポールアンテナの近傍界を計測しました。内寸900 mm×900 mm×900 mmの電波暗箱内にダイポールアンテナ、EOプローブ、偏光処理モジュールおよび2次元走査ステージを配置しました。信号発生器からダイポールアンテナへ17 dBmの正弦波を入力した状態で、縦電界検出プローブをダイポールアンテナの径方向に走査しました。

図 4 (b)にダイポールアンテナからの距離とスペクトルアナライザで測定されるEO信号強度の関係を示します。黒丸印は測定値、実線は有限積分法を用いて計算した電界強度であり、最大値で規格化されています。静電結合や誘導電磁結合が優勢となる極近傍領域（～数mm）においても測定値は計算値とよく一致しています。この結果はダイポールアンテナの極近傍の電界を正確に測定できることを示しています。またダイポールアンテナからの距





(a) 生体等価ファントム内の電界計測システム



(b) 容器底面から 5 mm 離れた平面の電界分布

図 5 生体等価ファントム内における電界計測

離が100 mm以上の位置において観測された電界強度の振動は電波暗箱の壁面での電波反射による定在波の存在を示していると考えられます。以上の結果から、従来の電界プローブにおいて課題であったアンテナの極近傍における電氣的結合を生じることなく、正確な電界を計測することが可能であることを確認しました。

生体等価ファントム内の電界計測

次に、SAR測定で行う生体等価ファントム内での電界計測を行いました。図5(a)に示すように1辺200 mmの立方体のアクリル容器に生体等価ファントムを満ちし、容器底面から5 mm離れた位置に2.45 GHz帯の半波長ダイポールアンテナを配置します。

信号発生器からダイポールアンテナへ17 dBmの正弦波を入力した状態で、EOプローブを走査しました。図5(b)に底面から5 mm離れた平面の電界分布を示します。測定された電界強度から算出されたSARは理論値とよく一致しており、EOプローブを用いた電界計測システムがSAR計測に有用であることを確認しました。

今後の展開

今回紹介したようにEOプローブを用いることによって被測定電界に擾乱を与えることなく、正確な電界計測が可能となりました。しかしながら、単一のプローブを2次元もしくは3次的に走査するため、必要な電界分布を得るのに相当な時間を要します。今後、EOプローブの低擾乱性を生かし、プローブをアレイ化して電界を一括計測することにより、測定時間を短縮する技術の開発を図ります。

参考文献

- (1) H. Togo, N. Shimizu, and T. Nagatsuma : "Tip-on-fiber Electro-optic Probe for Near-field Measurement," NTT Technical Review, Vol.4, No.1, pp.12-20, 2006.



(左から) 永妻 忠夫/ 都甲 浩芳/
清水 直文

ユビキタス社会を推進する基盤技術について、戦略的かつ挑戦的に研究開発を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所
スマートデバイス研究部
TEL 046-240-2070
FAX 046-240-4041
E-mail togo@aecl.ntt.co.jp