

# 自由空間中における光電界センサの指向特性

自動車安全研究領域      ※長谷川 智紀      伊藤 紳一郎      松村 英樹

## 1. はじめに

これまで、電磁波測定で用いるアンテナには、ダイポールアンテナやログペリアンテナ等の線状アンテナ<sup>1)</sup>、ホーンアンテナ等の開口面アンテナ<sup>2)</sup>等がある。しかし、これらのアンテナは、アンテナエレメントにより電界を電圧に変換した後、測定器までの伝送路を同軸線路に代表される金属線路を用いているため、測定場の電磁界を乱すことが懸念されてきた。

近年では、アンテナ～測定器間を光ファイバを利用した電界センサが利用されるようになり、図1に示すような電界センサが用いられるようになった。しかし、これらの電界センサは、ある程度の大きさを持っており、電界測定における空間分解能があまり高くない。また、電池での駆動を行っているため、測定可能時間に制限がある。

そこで、図1に示す電界センサに加え、図2に示す光電界センサ<sup>3)</sup>が開発された。当研究所においても、図2に示す光電界センサを用いて自動車のEMCに関連する測定・研究を行っている。

本報告では、この光電界センサを用いた電界分布測定し、その際に問題となった電界分布の偏りについて指向性測定を行うことにより検討する。

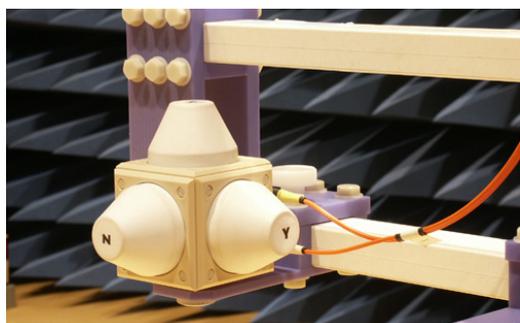


図1 電界センサ

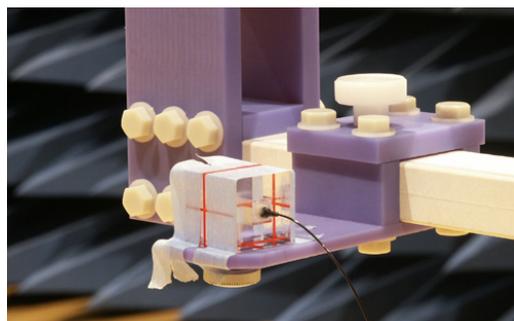


図2 光電界センサ

## 2. 光電界センサ

図3に今回の測定に用いた光電界センサの概略図を示す。この光電界センサは、ニオブ酸リチウム ( $\text{LiNbO}_3$ ) の結晶上にチタン (Ti) を拡散することにより、マッハツェンダ型光干渉計を形成したものである。2つに分岐した光波路のうち一方の光波路には、電界検出部として長さ 2mm、幅 1mm の二等辺三角形の形状をした 2 つのエレメントから構成される微小ダイポールを光波路を挟むように設置する。もう片方の光波路にはエレメントは設置しない。それぞれの光波路の末端はミラーにより終端する。

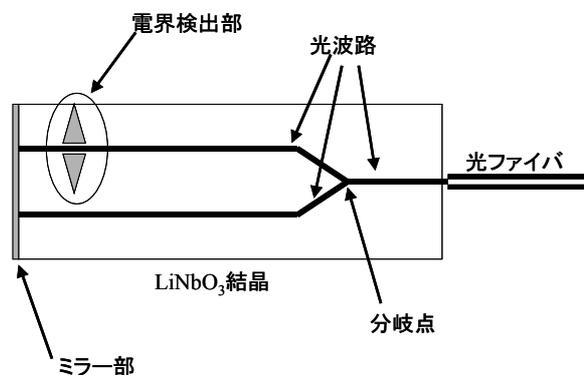


図3 光電界センサ概略図

動作原理としては、光電界センサが電界中に曝されたとき、電界検出部のエレメント間に電圧が生じる。このとき、ポッケルス効果により、エレメント間を通

過するレーザー光は伝搬速度が低下し、位相遅れが生じる。その結果、2つの光波路間に位相差が生じ、分岐点においてレーザー光の反射波は振幅変調される。この変調度を測定することにより、電界強度を測定する。

この光電界センサの特徴として、電界検出部が微小ダイポールアンテナであるため、受信周波数特性が広帯域にわたってフラットであり、広帯域にわたる測定が可能である。また、長さ2mm、幅1mmのエレメントを用いているため、空間分解能が非常に高い。さらに、金属を使用している部分がエレメントとミラー部のみで、そのほかは光ファイバやアクリル等の非金属材料であるため、測定場の乱れを最低限に抑えることができる。

また、今回用いた光電界センサのエレメント位置の校正には、表面電流発生装置の端辺部分で電界が約45度上方に発生している部分において設定を行った<sup>4)</sup>。

### 3. 電波暗室内における電界の空間分布の測定

#### 3. 1. 測定方法

詳しい測定方法等は参考文献5)を参照してもらうことにし、ここでは測定の概略を示す。

電波暗室内において、電界分布測定を図4に示す構成において行った。測定周波数は100、200、300、400、500、600、800、1000MHzにおいて行い、送信アンテナとしては対数周期ダイポールアンテナを用い、偏波は水平偏波とした。

比較対照として、Holaday HI-4421 (図1参照、以後「基準電界センサ」と呼ぶ)を用い、3軸の合成電界の測定を行った。

光電界センサは、図3に示したとおり微小ダイポールアンテナと等価であり、1軸の感度特性があるため、送信アンテナと同様に水平偏波とした。

図4に示す構成において、送信アンテナを高さ1.5mの位置に配置し、電界センサを送信アンテナの先端から約2.8m離れた位置において、高さ0.25~3.25m、アンテナ位置を中心に幅±1.6mの範囲を0.2m間隔で電界分布の測定を行った。

#### 3. 2. 測定結果

400MHzにおける電界分布の測定結果として、基準電界センサと光電界センサの偏差を図5に示す。図5に示すように、左右の偏差分布に偏りがあることがわ

かる。基準電界センサの指向性は各軸の合成電界を用いていることから、等方性である。そのため、光電界センサの指向性に原因があると考えられる。

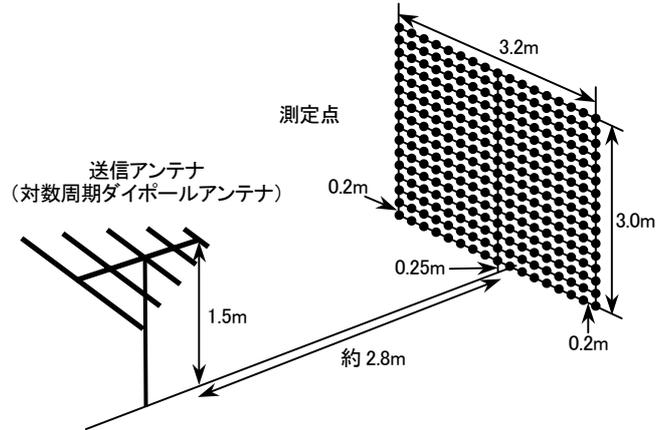


図4 電界分布の測定構成

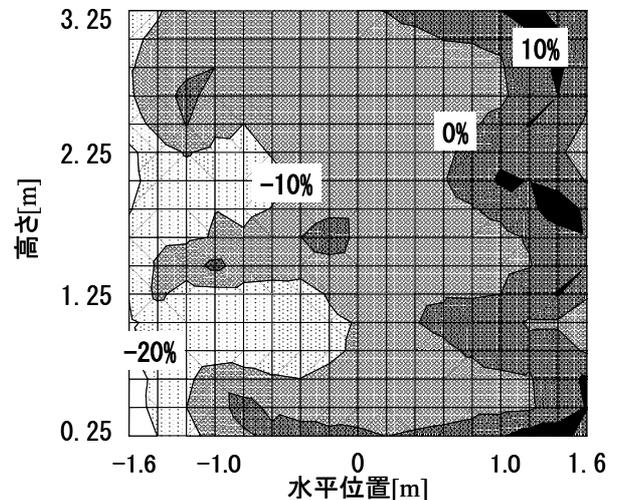


図5 基準電界センサと光電界センサとの偏差 (400MHz)

### 4. 光電界センサの指向性測定

#### 4. 1. 測定方法

そこで、光電界センサの指向性を図6に示す構成において測定を行った。測定環境は5面電波暗室内で行い、床面に電波吸収体を敷き詰め、床面における反射を無くした自由空間の状態を作り出した。また、電波吸収体における反射の影響を極力避けるため、床面から2mの高さの発泡スチロール台の上に対数周期ダイポールアンテナ及び光電界センサを配置した。対数周期ダイポールアンテナの先端と光電界センサとの距離は3mとした。また、図7に示すように光電界センサの軸を取った場合、各軸の矢印を上に向け、上を向いた軸を中心にアンテナを回転させた。各軸を中心にアンテナを回転させた時に、100,200,300,400MHzに

おける測定を行った。この場合、X 軸を中心に回転させて測定した結果が交差偏波の指向特性、Y 及び Z 軸を中心に回転させた場合が通常の指向特性となる。

また、各軸の 0 度は、X 及び Y 軸を中心に回転させる場合は Z 軸の負の向き、Z 軸を中心に回転させる場合は、Y 軸の正の向きを 0 度とし、右回りに回転させた。

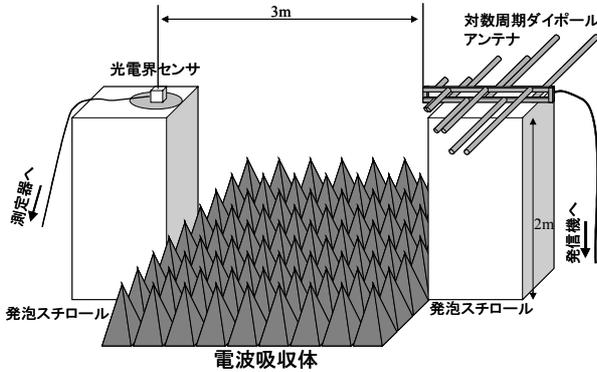


図 6 指向性測定の構成

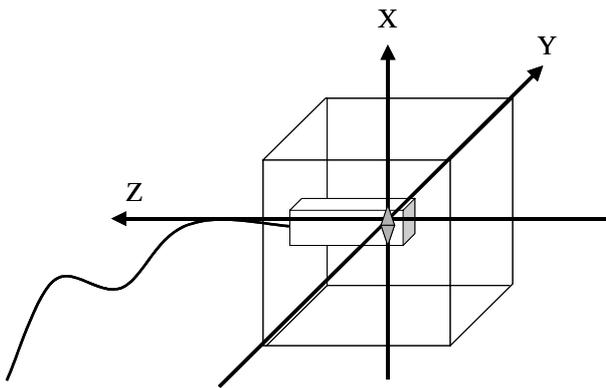


図 7 光電界センサの座標系

#### 4. 2. 測定結果

各周波数における指向性の測定結果を図 8~10 に示す。図 8~10 において、各周波数の最大値を基準にし、正規化を行った。

各周波数において指向性の変化がほとんど見られない。これは、指向性の周波数特性の変化が少ないためである。

軸毎に見ていくと、図 9 に示すように Y 軸を中心に回転させて測定した結果に 10 度程度の傾きがあった。また、図 8 に示すように、理論上測定されるはずのない X 軸を中心に回転させて測定した結果には 8 の字特性が表れている。図 10 の Z 軸を中心に回転させた測定結果は指向性に傾きは見られなかった。

また、今回の測定における交差偏波特性は約 15dB となった。

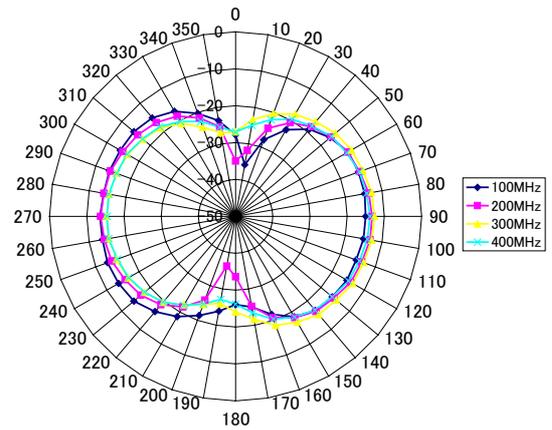


図 8 X 軸を中心に回転させた場合の指向性 (単位: dB)

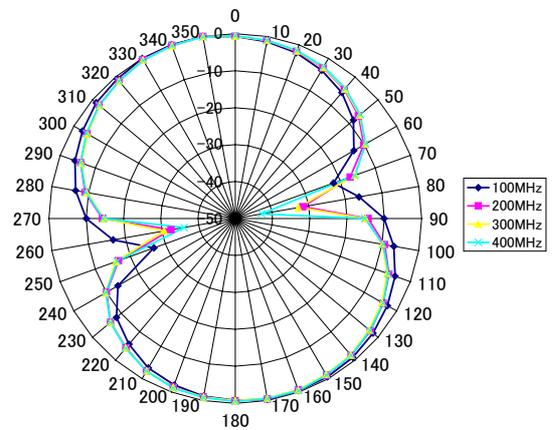


図 9 Y 軸を中心に回転させた場合の指向性 (単位: dB)

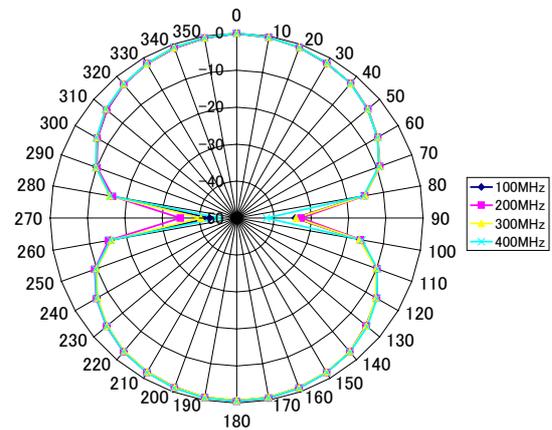


図 10 Z 軸を中心に回転させた場合の指向性 (単位: dB)

#### 5. エレメントの傾きの推定

光電界センサの指向性測定の結果を踏まえて、エレメントがどちらの方向にどの程度傾いているかをシミュレーションを用いて推定を行った。光電界センサ

の電界検出部分は微小ダイポールアンテナとなっているため、理論的には次の式が適用される<sup>6)</sup>。

$$E_r = \frac{I l e^{-jkr}}{j2\pi\omega\epsilon} \left( \frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2} \right) \cos\theta \quad (1)$$

$$E_\theta = \frac{I l e^{-jkr}}{j4\pi\omega\epsilon} \left( \frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \sin\theta \quad (2)$$

$$H_\phi = \frac{I l e^{-jkr}}{j4\pi} \left( \frac{1}{r^2} + \frac{jk}{r} \right) \sin\theta \quad (3)$$

$$E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \quad (4)$$

ただし、 $I$ はエレメントに流れる電流、 $l$ はエレメントの長さ、 $\epsilon$ は誘電率、 $k$ は波数、 $\omega$ は角周波数である。また、 $r, \theta, \phi$ は図11に示す座標系である。今回の測定では、 $E_\theta$ を測定することになるため、式(2)について考える。

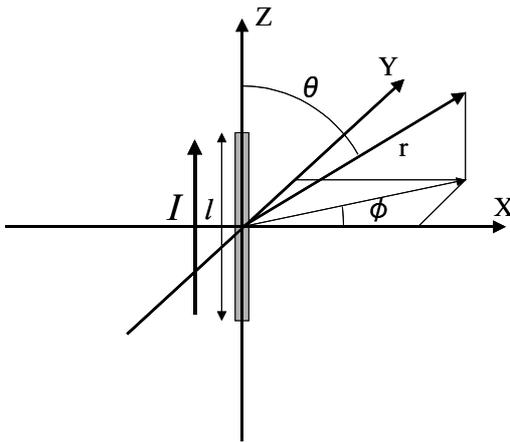


図11 微小ダイポールアンテナの座標系

$E_\theta$ は十分距離が離れていれば、式(2)カッコ内の第1項、第2項は無視でき、次式のように表される。

$$E_\theta = -\frac{I l e^{-jkr}}{j4\pi\omega\epsilon} \frac{k^2}{r} \sin\theta \quad (4)$$

距離、周波数を固定し、 $\sin\theta$ の項以外を定数とみなし、次式と置く。

$$A = -\frac{I l e^{-jkr}}{j4\pi\omega\epsilon} \frac{k^2}{r} \quad (5)$$

以上の準備の後に、アンテナに傾きが生じているときの指向性特性について考える。

アンテナの回転角を図12に示すように、X軸を中心に回した時を $\alpha$ 、Y軸を中心に回した時を $\beta$ 、Z

軸を中心に回した時を $\gamma$ とし、アンテナの傾き角をY軸中心に回転する方向の傾き角を $\beta'$ とすると、各軸を中心に回転させたときの指向特性は次式で表される。

$$E_x^{cross}(\alpha) = A \sin\beta' \sin\alpha \quad (6)$$

$$E_y^{parallel}(\beta) = A \cos(\beta + \beta') \quad (7)$$

$$E_z^{parallel}(\gamma) = A \cos\beta' \cos\gamma \quad (8)$$

ただし、 $E_x^{cross}$ はX軸を中心に回転させたときの指向

性、 $E_y^{parallel}$ はY軸を中心に回転させたときの指向性

$E_z^{parallel}$ はZ軸を中心に回転させたときの指向性を表す。

ここで、測定においてY軸を中心に回転させた指向性で10度の傾きが考えられるため、 $\beta' = 10[\text{deg}]$ として指向性を計算した結果を、図13~15に示す。

図14に示すように、10度の8の字特性の傾きが見られる。また、図13をみると、図8に示す測定時と同様に、交差偏波においても受信感度が得られていることが分かる。

計算結果における交差偏波特性は15.2dBとなり、交差偏波特性においても測定結果と同様の結果が得られた。

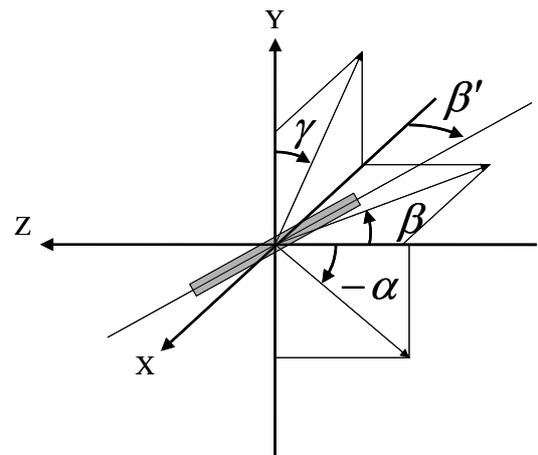


図12 シミュレーションにおける座標系

## 6. おわりに

表面電流発生装置であるストリップ線路を用いて位置特性の向上を図った光電界センサによる、電波暗

室内における電界分布の測定を行った。その際、基準電界センサと光電界センサの偏差分布に明らかな偏りが見られた。

そこで、光電界センサの指向特性を自由空間中において測定した結果、Y 軸を中心に回転させた場合約 10 度の傾きが見られ、また、本来測定されない交差偏波において 8 の字特性の指向性が得られた。

測定結果をもとに、エレメントの傾きをシミュレーションによって再現を行った結果、Y 軸を中心に回転させる指向性特性に 10 度の傾きが得られ、かつ X 軸を中心に回転させたときの指向性においても測定時と同様の指向性が得られた。これらの結果から、今回用いた光電界センサは、Y 軸を中心に右側に約 10 度傾いていることがわかった。

また、交差偏波特性では、測定・シミュレーションともに 15dB と同様の結果が得られた。

今回使用した光電界センサはエレメントが非常に小さいため空間分解能の高いものではあるが、これらの結果から、光電界センサの設置に高い精度が要求されることがわかった。

### 参考文献

- 1) 新井宏之:”新アンテナ工学”,pp.37-66,総合電子出版,1996
- 2) Warren L.Stutzman el.:”Antenna Theory and Design Second Edtion”,pp.275-364,WILEY,1998
- 3) 戸叶ほか:”LiNbO<sub>3</sub> 導波路型光変調器を用いた光電界センサ”,TOKIN TECH. REV. Vol.20,1994
- 4) 伊藤ほか:”車体表面の表面電流の測定に関する研究 (第 2 報) —光電界センサの位置決め精度の向上について—”, (社) 自動車技術会 2002 年秋季学術講演会前刷集,No.117-02,pp.1-4,2002
- 5) 伊藤ほか:”光電界センサによる自動車近傍の電界測定”, (社) 自動車技術会 2003 年秋季学術講演会前刷集,No.86-03,pp.25-28,2003
- 6) 徳丸仁:基礎電磁波, pp.85-87,森北出版,1992

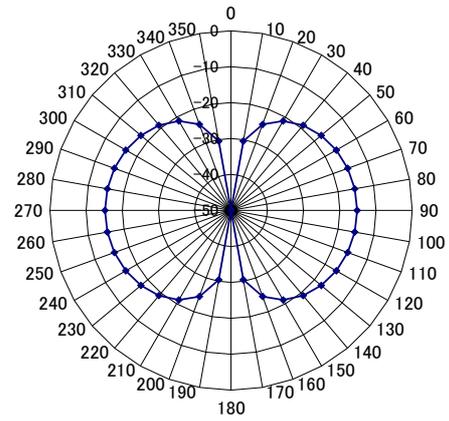


図 1.3 シミュレーションによる X 軸を中心に回転させた場合の指向性 (単位 : dB)

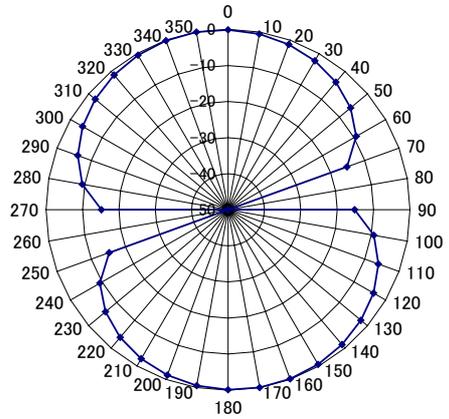


図 1.4 シミュレーションによる Y 軸を中心に回転させた場合の指向性 (単位 : dB)

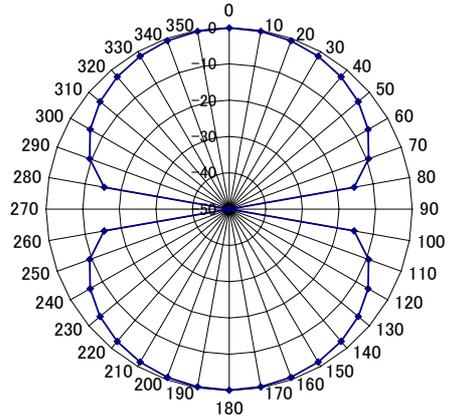


図 1.5 シミュレーションによる Z 軸を中心に回転させた場合の指向性 (単位 : dB)