

# 6 光走査型プローブを用いた電磁界分布の測定

## 6 *Electromagnetic Field Distribution Measurements using an Optically Scanning Probe System*

高橋正慎 太田博康 荒井賢一

TAKAHASHI Masanori, OTA Hiroyasu, and ARAI Ken Ichi

### 要旨

GHz帯における高速かつ低侵襲な電磁界分布測定を目指して、光技術を応用した光走査型プローブの開発を進めている。本プローブでは、測定位置の指定に光ビームの高速な平面走査が可能なガルバノスキャナを、電界や磁界の検出に電気光学効果や磁気光学効果を示す材料の結晶薄板をそれぞれ使用する。本プローブによる電磁界検出の概要と、電気光学効果結晶としてLiNbO<sub>3</sub>とCdTeを用いた電界分布の測定例について述べる。また、GHz帯での高速な磁界検出を目指した光磁界プローブアレイによる磁界分布測定例について報告する。

An optically scanning electromagnetic field probe system consisting of an electro-optic or magneto-optic crystal substrate and a galvano scanner has been developed for high-speed and low-invasive electromagnetic field distribution measurements. In this report, we introduce some of the examples of measuring the electric field distribution using LiNbO<sub>3</sub> or CdTe crystal substrate and the probe system. Furthermore, we have developed an optical magnetic field probe array for detecting magnetic fields in the gigahertz range. Using the probe array, we also measured the magnetic field distributions above a patch antenna working at 2.49 GHz.

### 【キーワード】

プローブ, 電磁界, 電気光学効果, 磁気光学効果, ガルバノスキャナ

Probe, Electromagnetic field, Electro-optic effect, Magneto-optic effect, Galvano scanner

## 1 まえがき

近年、携帯電話やPCといった情報通信機器の使用範囲が拡大し続けている。それに伴い電子機器から意図せずに放射される電磁波(漏洩電磁波)が、他の機器の動作に影響し、機能を低下させることが懸念されている。また電子機器内部でも、自らが発する漏洩電磁波の影響で自身の動作に支障をきたす場合も見受けられる。このような電子機器等からの漏洩電磁波を抑圧する技術の研究は従来から進められているが、電子機器近傍の電磁界分布の測定から漏洩電磁波源を特定し、対策を施すことが有効な手法の一つである。

一方、電子機器の動作周波数は、機器の高性能

化に伴い、年々上昇している。漏洩電磁波対策においても、より高い周波数における測定技術の開発が必要である。

電子機器の近傍電磁界を測定するために、従来からダイポールアンテナやループアンテナを小型化し空間分解能を高めた電磁界プローブが使用されてきた。これらの電磁界プローブでは、検出信号を測定器まで伝送するのに、同軸ケーブル等の金属製の伝送線路が用いられているが、これらの金属部品が測定対象となる電磁界分布を乱してしまうという問題がある。また、検出信号を伝送するための伝送線路自体も直接電磁界と結合するため、本来測定したい信号とは別の信号が混入してしまう問題がある。これらの結果として起こる測

定精度の劣化が問題となっていた[1][2]。

この問題を解決するために、光技術を利用した電磁界計測技術の開発が進められている[3][4]。光技術を利用することで、測定対象に及ぼす影響を抑えた測定が可能である。

ここでは、高精度に加えて高速に電磁界分布を測定する目的で現在開発を進めている、光ビームを平面内で高速に走査して電子機器近傍の電磁界強度分布を測定する光走査型プローブ[5]について、その概要を述べ、本プローブを用いた電磁界分布の測定例を報告する。

## 2 光走査型プローブ

図1に光走査型プローブの概略図を示す[5]。本プローブは主に、レーザー光源、ガルバノスキャナ、 $f\theta$  レンズ、光学結晶薄板、偏光解析部、フォトレシーバ、スペクトルアナライザから構成される。

レーザー光源から 1342 nm のレーザー光を、光サーキュレータを介して、ガルバノスキャナへと入射する。ガルバノスキャナ部には、PC 制御の高速で動く 2 枚の反射鏡があり、これにより入射したレーザー光の進行方向を制御し、レーザー光を走査する。この機能を利用して、下部に設置した光学結晶へのレーザー光の入射位置を高速で切り替えることが可能となる。したがって、光学結晶が配置された範囲で測定位置を高速に移動させながら、レーザー光の入射位置での電磁界強度を測定できる。

ガルバノスキャナを通過したレーザー光は、その下部に設置された  $f\theta$  レンズに入射される。 $f\theta$  レンズは、レーザー光を小さいスポットに集光させる

役割を持つと同時に、平面に広範囲で垂直にレーザー光を入射させる役割を持つ。本プローブでは、焦点距離の平面上で、50×50 mm の範囲でレーザー光を垂直に入射することが可能である。また、焦点距離の平面上でのレーザー光のビーム径は約 50  $\mu\text{m}$  である。 $f\theta$  レンズの焦点距離の位置に光学結晶を配置し、さらにその下部に測定対象を配置する。図2に測定対象(ここではマイクロストリップライン：以下、「MSL」という。)上に直接搭載された  $\text{LiNbO}_3$  の結晶基板の写真を示す。また、ガルバノスキャナから光学結晶までは、レーザー光を空間中で伝送させている。

測定対象上部に発生した電磁界強度に応じて、光学結晶内部に入射したレーザー光の偏光状態が変化する。光学結晶の底面には反射膜を設けてあり、偏光状態が変化したレーザー光が同じ経路をたどって偏光解析部に導かれる。

偏光解析部は、波長板及び検光子から構成され、ここでレーザー光の偏光状態の変化は光強度変化に変換される。さらに、フォトレシーバで電気信号へと変換され、最終的にスペクトルアナライザで測定される。

## 3 電気光学結晶による電界分布測定

### 3.1 $\text{LiNbO}_3$ 結晶薄板によるマイクロストリップラインフィルタ上の電界分布

本プローブを利用して、マイクロストリップラインフィルタ上の電界分布を測定した。電界検出には、40×40×1 mm の  $\text{LiNbO}_3$  結晶薄板を用いた。測定に使用したフィルタのパターンを図3に示す。フィルタは基板厚さ 1.6 mm のガラスエポ

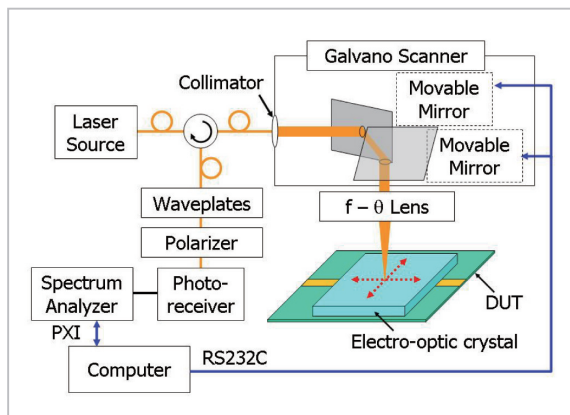


図1 光走査型プローブ

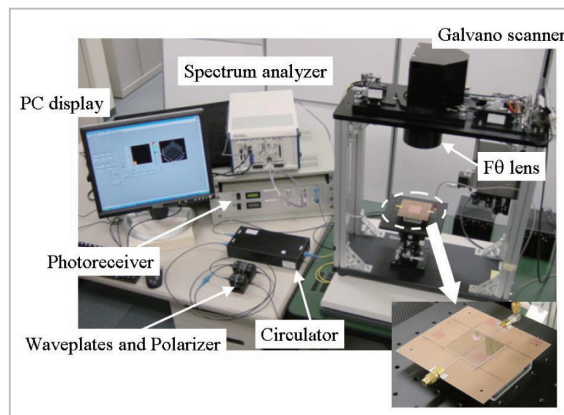


図2 光走査型プローブ概観

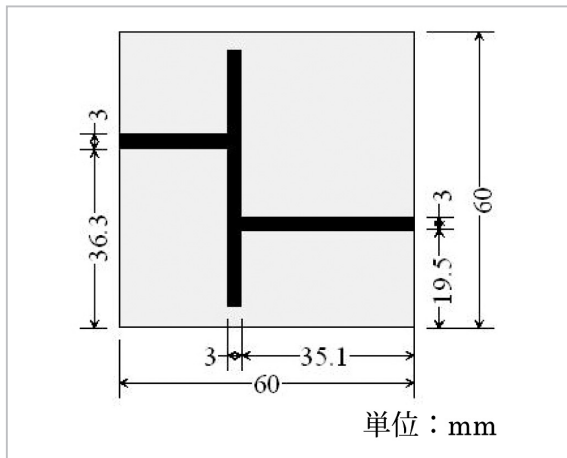


図3 マイクロストリップラインフィルタ

キシ基板を用いて作製した。基板外形は  $60 \times 60$  mm である。このフィルタ表面の  $0.5$  mm 上部に  $\text{LiNbO}_3$  結晶薄板を配置し測定した。このフィルタの伝送特性をベクトルネットワークアナライザで測定した結果を図4に示す。実験では、通過帯域である  $1.2$  GHz と阻止帯域である  $2.1$  GHz での分布を測定した。また、図5に示すように、 $\text{LiNbO}_3$  結晶薄板の光学軸を、 $x$  方向と  $y$  方向に配置した状態で測定した。実験時には、レーザー光源から  $17$  dBm を出力し、フィルタにはシグナルジェネレータより  $10$  dBm の正弦波信号を入力した。レーザー光を  $0.2$  mm 間隔で移動させながら、 $40 \times 40$  mm の領域を走査して各位置における電界強度を測定した。このときの測定点数は  $40,401$  となるが、この測定に要した時間は約  $3$  分であり、一点当たりの測定時間は約  $4$  ミリ秒と、非常に高速な測定が可能である。

図6(a)、(b)に  $1.2$  GHz での電界分布測定結果を示す。図6(a)が  $y$  方向の電界成分、図6(b)が

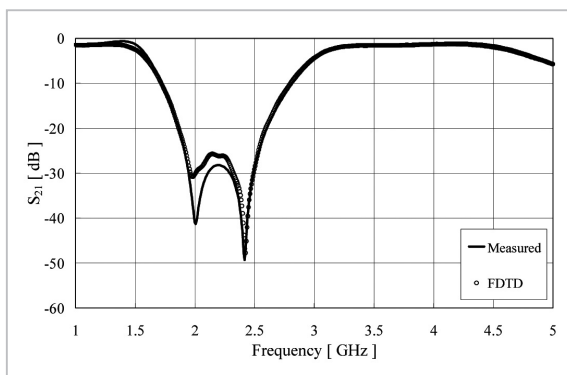


図4 伝送特性

$x$  方向の電界成分を示している。フィルタの導体パターンの端部に沿って、電界強度の大きい部分が観測されている。また、出力側にも電界強度の大きい部分が見られるため、入力信号が出力側まで伝送していることが確認できる。

図7(a)、(b)に  $2.1$  GHz での電界分布測定結果を示す。図7(a)が  $y$  方向、図7(b)が  $x$  方向成分にそれぞれ対応している。これらの結果では、出力側付近には電界強度の大きい部分が観測されておらず、この周波数においては入力信号を阻止して出力側へ伝送させない様子が分布測定からも確認できる。

本プローブによる分布測定結果との比較のため、FDTD (Finite difference Time domain) 法によるフィルタ上部の電界分布を計算した。その結果を図8(a)、(b)及び図9(a)、(b)に示す。図8(a)、(b)は  $1.2$  GHz での計算結果を示し、図8(a)は  $y$  方向、図8(b)は  $x$  方向成分の結果をそれぞれ示す。また、図9(a)、(b)は  $2.1$  GHz での計算結果を示し、図9(a)は  $y$  方向、図9(b)は  $x$  方向成分の結果を示す。計算結果と本プローブでの測定結果とは非常に良い一致を示している。

### 3.2 CdTe 結晶薄板による 5 分岐伝送線路上部の電界分布測定

本プローブの空間分解能は光学結晶に入射するレーザー光のビーム径及び光学結晶の厚さにより決まる。本プローブの空間分解能を評価するための一手法として、5分岐伝送線路上部に発生する電界分布を測定した。測定に使用した評価基板のパターンを図10に示す。厚さ  $0.6$  mm ガラスエポキシ基板上にパターン幅  $0.2$  mm の導体を5本並べ、その間隔を  $0.4$  mm から  $0.1$  mm まで変化さ

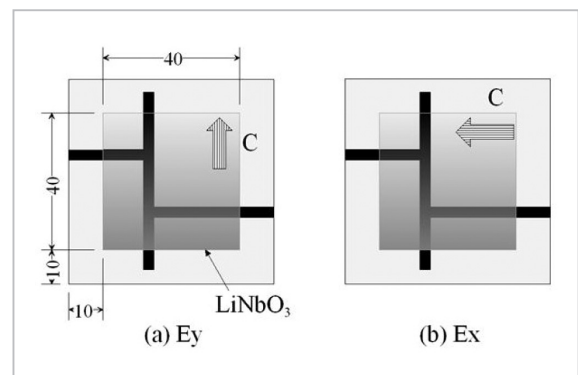


図5  $\text{LiNbO}_3$  の光学軸の配置

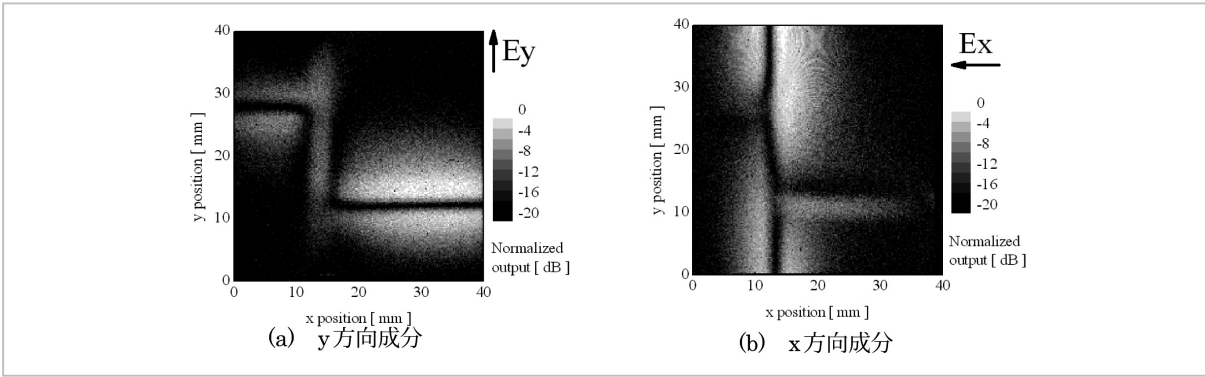


図6 マイクロストリップラインフィルタ上の電界分布測定結果 (1.2 GHz)

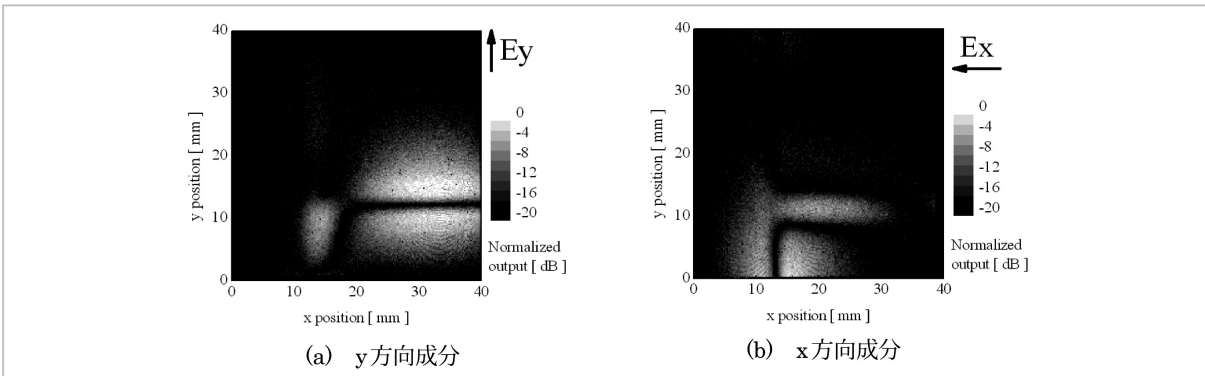


図7 マイクロストリップラインフィルタ上の電界分布測定結果 (2.1 GHz)

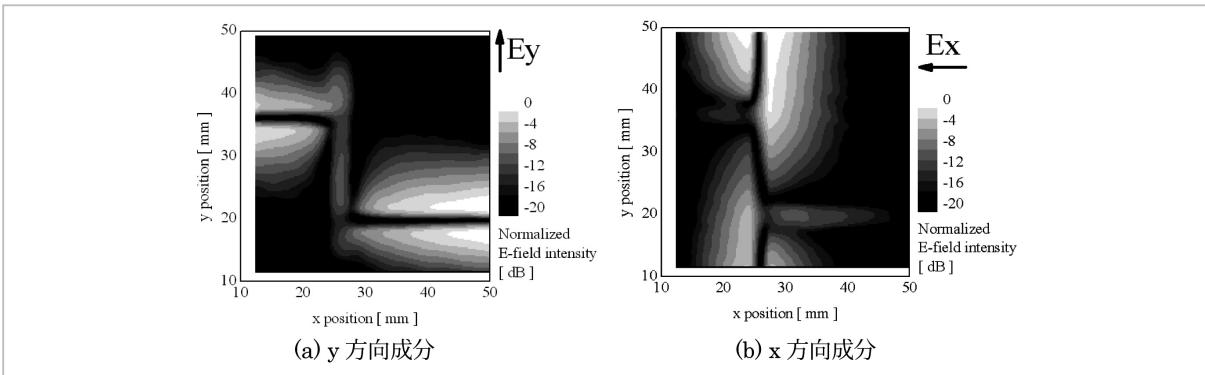


図8 FDTD法によるフィルタ上の電界分布計算結果 (1.2 GHz)

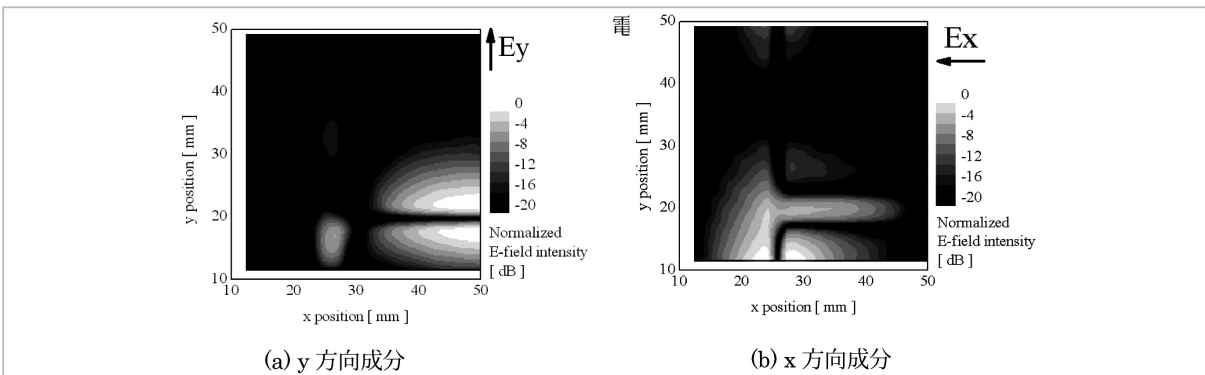


図9 FDTD法によるフィルタ上の電界分布計算結果 (2.1 GHz)

せたパターンを作製した。この評価基板に 1 GHz の高周波信号を入力した状態で電界分布を測定した。電界検出には、 $10 \times 10 \times 1$  mm の CdTe 結晶薄板を用いた。CdTe では、LiNbO<sub>3</sub> と異なり、評価基板表面に垂直な電界成分が測定できる。

図 11 に分布測定結果を示す。隣接する導体の間隔が 0.4 mm の部分では、5 本の線路上部で電界の強い部分が観測され、その間では強度が小さくなっていることが確認できる。

線路間隔が段段と狭くなる様子も確認でき、間隔が 0.1 mm になる領域においても 5 本の線が確認できる。

## 4 光磁界プローブアレイによる磁界分布測定

### 4.1 光磁界プローブアレイの構造

磁気光学結晶を使った磁界分布測定にも本プローブは使用することができる。しかしながら電気光学結晶と比較し、一般に磁性ガーネット等の磁気光学結晶は GHz 帯以上の高周波になると検出感度が低下する。

GHz 帯での磁界分布測定を目的に、高周波帯でも磁界測定が可能な光磁界プローブ [6] を 2 次元的に配列したプローブアレイを開発した。その構造を図 12 に示す。

光磁界プローブアレイは、主として三つの部分から構成されている。ループエレメントが複数パターンニングされたガラスエポキシ基板、微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶及びそれらを保持するための石英基板である。石英基板は微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶及びルー

プエレメントをパターンニングしたガラスエポキシ基板の位置を固定するために用いられる。実際の作製時には石英基板上に同じ広さの LiNbO<sub>3</sub> 結晶基板を張り合わせておき、その状態から光磁界プローブに必要な部分のみを残すように LiNbO<sub>3</sub> 結晶基板のみを精密カッターで切削加工をする。この結果、石英基板上に微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶が多数配列された状態が得られる。一方、ガラスエポキシ基板上のループエレメントには、その上部に微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶を挿入するためのギャップを設けている。その位置に石英基板の微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶が収まるようにガラスエポキシ基板を設置し、各位置の微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶とループエレメントを導電性接着剤で接続する。ガラスエポキシ基板には、ループ導体幅が 0.1 mm、ループ開口が  $1.5 \times 1.5$  mm のループエレメントが 3.2 mm の間隔で、横一列に 16 個並べられている。これを x 方向、y 方向ともに 16 列を井桁状に組み合わせてプローブアレイを構成している。

実際の測定時には、ループエレメントがある側を測定対象に近づけ、石英基板側からレーザー光を照射し、微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶に入射して、磁界分布を測定する。

図 13 に光磁界プローブアレイからの反射光強度分布を示す。微小 LiNbO<sub>3</sub> 結晶から反射光が戻ってきている様子が確認できる。プローブアレイの中心部から離れると反射光強度が最大で 6dB 程度減少している。これは  $f\theta$  レンズの精度等の限界によるものと考えられ、この反射光強度低下分を補正した測定を行っている。

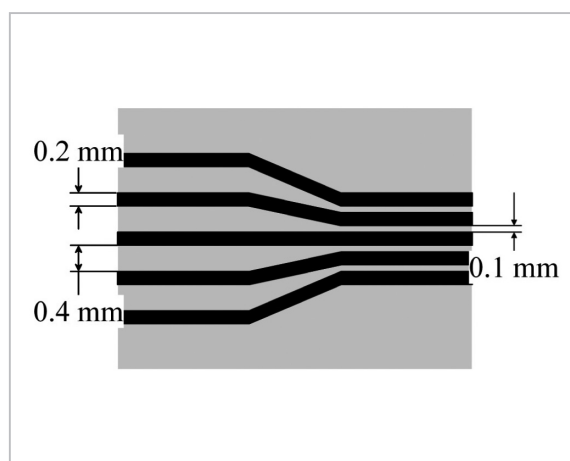


図10 5分岐伝送線路

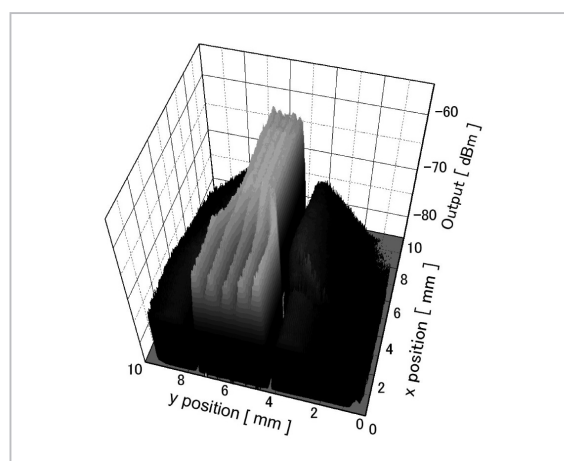


図11 5分岐伝送線路上部の電界分布

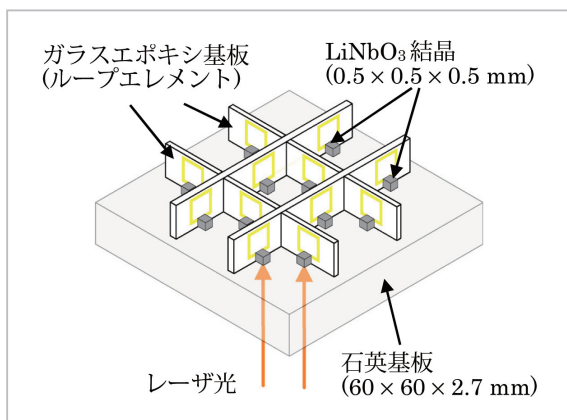


図12 光磁界プローブアレイの構造

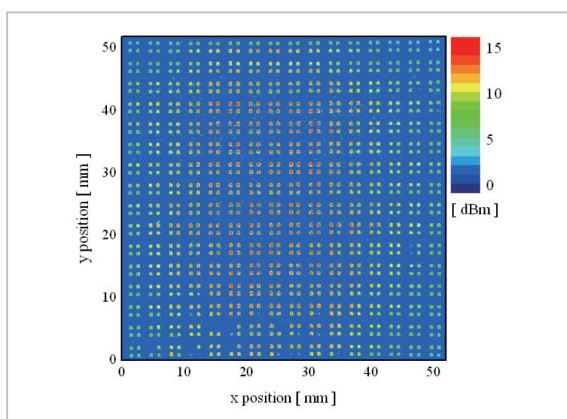


図13 光磁界プローブアレイの反射光強度分布

#### 4.2 光磁界プローブアレイによるパッチアンテナ上部の磁界分布測定

光磁界プローブアレイを本プローブに適用して、パッチアンテナ上部の磁界分布を測定した。図14に測定に使用したパッチアンテナを示す。このパッチアンテナに周波数2.49 GHzの正弦波信号を入力し、励振した状態で上部に発生する磁界分布を測定した。その結果を図15及び16に示す。図15はy方向成分、図16はx方向成分をそれぞれ表している。両方向成分合わせて512点の磁界強度の測定に要する時間は約4秒であり、緩やかな時間変動のある回路の測定にも対応可能である。

### 5 まとめ

高速な電磁界分布測定を目指した光走査型プローブの開発の概要について述べた。レーザー光の走査機構とLiNbO<sub>3</sub>やCdTe結晶薄板を用いて電子

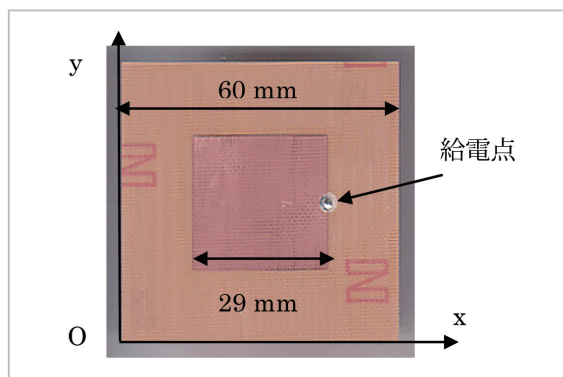


図14 パッチアンテナ写真

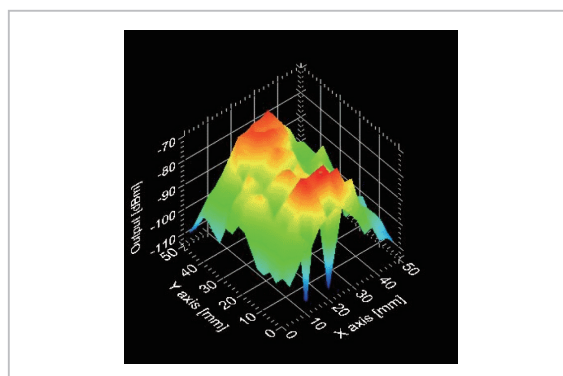


図15 パッチアンテナ上部の磁界分布 (y方向成分)

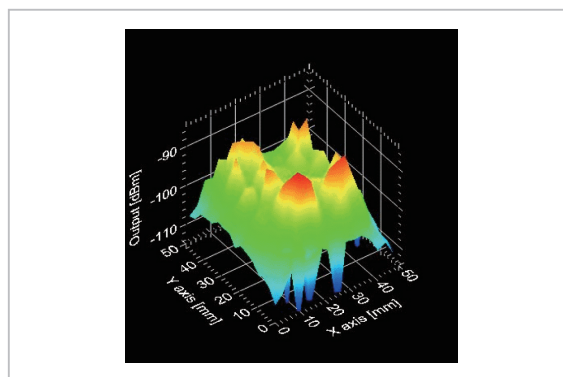


図16 パッチアンテナ上部の磁界分布 (x方向成分)

回路基板上の電界分布の高速な測定が可能になることを示した。また、電気光学結晶と微小ループエレメントを多数配列した光磁界プローブアレイの構造と、パッチアンテナ上部のGHz帯の磁界分布の測定例について紹介した。今後は更なる測定の高精度化、高速化を目指した測定システムの開発と、磁気光学結晶を利用した磁界分布測定の高周波化の検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1 S.Arakawa, E.Suzuki, H.Ota, K.I.Arai, and R.Sato, "Invasiveness of optical magnetic field probes with a loop antenna element", Proc. EMC'04/Sendai, Sendai, Japan, Vol.1, pp.149-152, June 2004.
- 2 M.Takahashi, H.Ota, K.I.Arai, and R.Sato, "Magnetic near-field distribution measurements above a patch antenna by using an optical waveguide probe", IEICE Trans. Commun., Vol.E88-B, No.8, pp.3140-3145, 2005.
- 3 E.Yamazaki, S.Wakana, H.Park, M.Kishi, and M.Tsuchiya, "High-frequency magneto-optic probe based on BiRIG rotation magnetization", IEICE Trans. Electron., Vol.E86-C, No.7, pp.1338-1344, 2003.
- 4 A.Sasaki and T.Nagatsuma, "Electric-field scanning system using electro-optic sensor", IEICE Trans. Electron., Vol.E86-C, No.7, pp.1345-1351, 2003.
- 5 E.Suzuki, S.Arakawa, H.Ota, K.I.Arai, and R.Sato, "Optically scanning electric field probe system", Proc. 2004 IEEE International Symposium on EMC, pp.182-185, 2004.
- 6 E.Suzuki, S.Arakawa, H.Ota, K.I.Arai, and R.Sato, "Optical magnetic field probe with a loop antenna element doubly loaded with LiNbO<sub>3</sub> Crystals", IEICE Trans. Electron., Vol.E87-C, No.11, pp.1989-1996, 2004.

たかはし まさひろ  
高橋正慎

拠点研究推進部門仙台高感度電磁波測定技術リサーチセンター特別研究員高周波計測

おおた ひろやす  
太田博康

拠点研究推進部門仙台高感度電磁波測定技術リサーチセンター専攻研究員高周波計測

あらい けんいち  
荒井賢一

拠点研究推進部門仙台高感度電磁波測定技術リサーチセンタープロジェクトリーダー 博士(工学)  
電子通信材料、高周波計測