

# Collaboration Projects

## 偏波安定化構成 MO プローブによる アンテナ電流分布の高精度測定

移動端末上における電流分布の高精度評価を目的として、MO 結晶を用いた磁界センサの偏波安定化構成の提案とその有効性の確認を行った。本研究は東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻 土屋 昌弘元助教（現在、(独)情報通信研究機構所属）、岸 真人助手との共同研究により実施した。

なかまつ しん やまぐち りょう うえばやし しんじ  
中松 慎 山口 良 上林 真司

### 1. まえがき

近年の電子技術の著しい発達に伴い、移動端末の基板回路細密化や電気信号の大幅な高速化が進んでいる。また、移動端末として効率の良い電波放射を実現するためには、アンテナ素子および筐体基板上における電流分布の振幅と位相の両方を高精度に評価・設計することが重要である。したがって、今後さらに進むと予想される細密化・高周波数化に対応できる高精度な電流分布測定技術が必要となる。

電流分布の評価は、測定対象物の極近傍における磁界測定により行われる。高精度な電流分布推定を実現するためには、「測定対象への高い近接性」、「高空間分解能」、「電磁界に対する低侵襲性<sup>\*1</sup>」の3つが要求される。これまで磁界センサとしてはループアンテナを使用したプローブが主に用いられてきたが、アンテナの構造上これら3つの要求を完全に満たすことは困難であった。特に侵襲性に関しては、高周波数化に伴い導体素子による影響がさらに顕著となる。

そこで本研究では、導体素子を含まない構成が可能である磁気光学（MO：Magneto-Optic）結晶および光ファイバを用いたプローブに着目[1]し、電磁両立性（EMC：Electro Magnetic Compatibility）<sup>\*2</sup>やアンテナ放射の観点から電流分布評価の高精度化を実現する技術の検討を行った。このようなプローブは、金属製アンテナのみからなるプロ

ーブと比較するとGHz帯の測定においても電磁界擾乱は極めて少ない。また、結晶内の光透過領域が有感度領域となるため、結晶への光入射や結晶サイズなどの調整により高近接性や高空間分解能を容易に実現できる[2]。一方、このようなファイバを用いた光学プローブは偏波状態<sup>\*3</sup>の不安定化が測定の不安定化につながるため、偏波の安定化が重要な課題となっている。この課題を解決するため、本研究ではMOプローブの偏波安定化構成を提案した。また、提案構成プローブを試作し、その効果を検証した。

### 2. MO プローブによる磁界測定

#### 2.1 測定原理

MO 結晶は、印加される磁界強度に応じて結晶内部を透過する光の偏波面を回転させる特徴を有する。MO プローブは、この特徴を用いて結晶透過後の光偏波回転角度を検出することにより磁界を測定する[3]。従来のMO プローブは、磁壁移動効果<sup>\*4</sup>による偏波回転を用いて磁界測定を行っていた。しかし、この磁壁移動効果は遅い反応であるため、測定可能周波数上限がMHz オーダであり、高周波には適応できないという問題があった。本研究では、移動端末などのRF（Radio Frequency）帯を使用する機器をターゲットとするため、より高速（10GHz級）にตอบสนองする回転磁化現象を用いた磁界測定を行った[4]。MO プローブ構成を図1に示す。磁界測定は、光ファイバによりMO 結晶の単一磁区領域へ一定状態の直線偏光<sup>\*5</sup>を入射し（図1①）、結晶への印加磁界強度に応じて光偏波面を回転させ（図1②）、直線偏光と直交配置した検光子（AL：Analyzer）により強度変調を行う（図1③）。その後、光信号をフォトダイオード（PD：Photo Diode）によりOE（Opto-Electric）変換し、スペクトラムアナライザ（SA：Spectrum Analyzer）やネットワークアナライザ（NA：Network Analyzer）により検出する（図1④）。

\*1 侵襲性：周囲の環境に対し影響を与える度合い。本稿では電磁界を乱す程度を表す。擾乱性ともいう。

\*2 電磁両立性：機器またはシステムが、その置かれた電磁環境内のいかなるものに対しても許容できないような電磁妨害を与えず、その環境内で

満足に機能する能力。

\*3 偏波状態：光や電磁波における電界ベクトルの状態を表す。垂直偏波や円偏波がある。

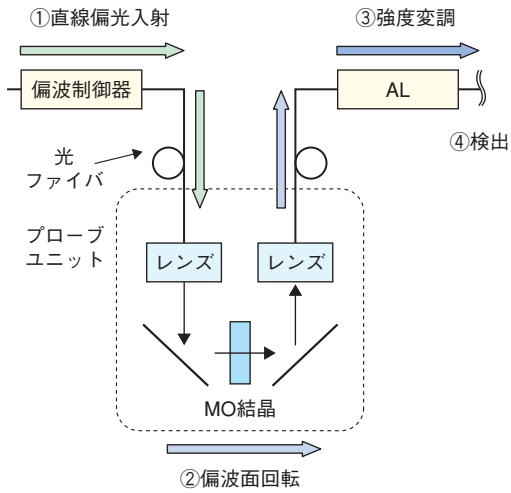


図1 MOプローブ構成

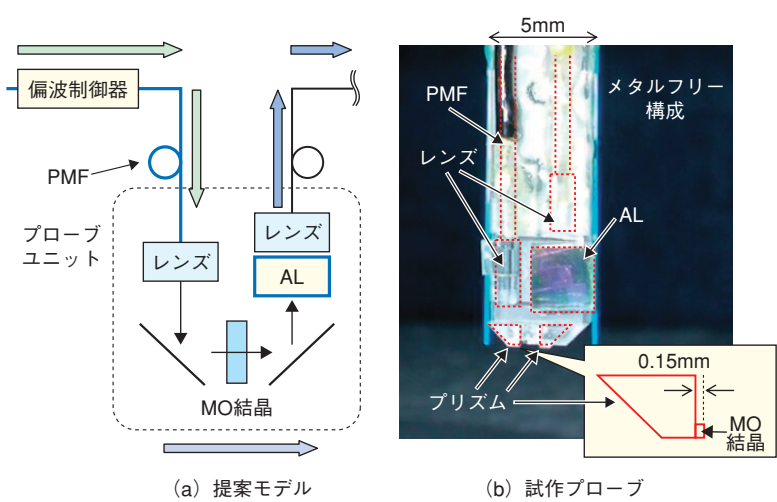


図2 提案MOプローブ構成

## 2.2 偏波安定化構成

MO結晶および光ファイバを用いた測定において、光の偏波状態のゆらぎは測定の不安定化につながるため、偏波安定化、偏波状態制御が重要な課題となる。偏波のゆらぎはファイバへのわずかな応力の変化（振動、屈折、温度変化）により生じ、偏波保持ファイバ（PMF：Polarization Maintaining Fiber）を用いることで、特定偏波面（slow軸、fast軸）に限り安定化できる。図1①では、偏波状態が一定であるためPMFによる安定化が可能であるが、図1②～③間のように偏波面が任意に回転する箇所では、PMFを用いても偏波を保持できず、測定不安定化の要因となっている。

そこで著者らは、結晶直近において検出した磁界情報を偏波情報から即座に強度変調する偏波安定化構成を提案した[5]。従来構成ではALはプローブユニットの外部に配置され、光ファイバを介して結晶と接続されていた。提案構成では小型ALを用いており、結晶直近に配置することにより、光ファイバを介さず磁界情報を強度変調する構造としている。提案プローブ構成を図2(a)に、試作したプローブの概観を図2(b)に示す。

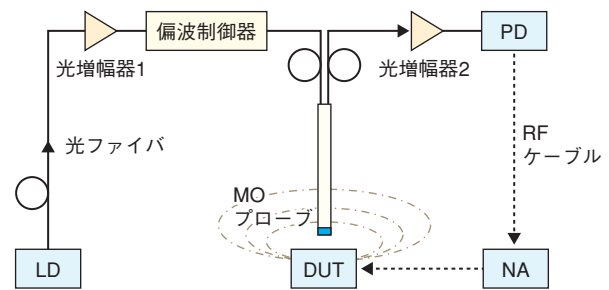


図3 MOプローブ測定構成

NA) およびDUT (Device Under the Test)<sup>\*6</sup>までがRF系となる。使用する光はLD光源から出力される連続光とし、波長は通信用途に広く用いられる1,550nmとした。この光は偏波制御器により直線偏光状態へ調整され、MOプローブへ入射される。プローブから出力される磁界強度を反映した光信号は、PDによりRF信号へと変換される。DUTの励振<sup>\*7</sup>は、振幅測定時には外部発信機、位相測定時にはNAからのテスト信号により行われる。PDにより変換されたRF信号はSAにより振幅、NAによりテスト信号との比較から位相が測定される。実験仕様を表1に示す。

## 3. 提案構成によるプローブの評価

### 3.1 測定構成

本提案構成の測定は、振幅にSA、位相にNAを用いて行った。例としてNAを用いた位相測定構成を図3に示す。測定構成はレーザーダイオード (LD：Laser Diode) からPDまでが光伝送系となっており、PDからSA（もしくは

### 3.2 提案構成によるプローブ偏波安定性の評価

提案構成の偏波安定性を確認するため、図3の光増幅器2直前における光強度測定を行った。AL透過後の光強度は偏波状態を反映しており、偏波状態が一定であれば光強度も一定となる。提案構成MOプローブとAL外部設置型である従来構成MOプローブについて、磁界非存在下の光強

\*4 磁壁移動効果：磁区間の境界（磁壁）が、外部磁界の変化に応じて移動する現象。  
\*5 直線偏光：電界が常に一定方向にのみ振動している偏波状態の光のこと。

\*6 DUT：評価対象となる装置。  
\*7 励振：他の物体に振動を与えること。本稿では装置やアンテナに給電し、電磁波を発生させることを示す。

表1 実験仕様

光強度	4.77dBm
光波長	1,550nm
測定対象	MSL, PIFA
入力電力	30dBm
周波数	2.0GHz
RF信号	CW
RBW (SA)	10Hz
IF (NA)	100Hz

CW (Continuous Wave)：変調されていない連続波。  
 IF (Intermediate Frequency)：中間周波数。  
 RBW (Resolution BandWidth)：分解能帯域幅。

度測定を行った。偏波安定性の比較結果を図4に示す。従来構成MOプローブの光強度は測定開始時において低い値で一定となっているが、時間経過とともに増加している。これは時間とともに偏波面が変動したことを示している。一方、提案構成においては、時間経過にかかわらず光強度が一定であった。これにより、本構成による偏波状態が安定化していることを確認した。

## 4. 実測結果

### 4.1 提案構成プローブによるMSL上磁界分布測定

本測定構成により磁界測定が可能であることを確認するため、振幅位相分布が明らかであるMSL (Micro Strip Line)<sup>\*8</sup>を対象とした測定を行った。測定時のMSLモデルを写真1に示す。測定は端部を短絡したMSL直上1mmにおいて基板の中心 ( $x=0\text{mm}$ ) から線路沿い給電部位方向に行った。この測定結果とFDTD法 (Finite Difference Time Domain method)<sup>\*9</sup>を用いた数値計算による磁界分布の比較を図5に示す。振幅に関しては、最大値を0dBとして規格化した分布であり、位相に関しては、最も安定している  $x=50\text{mm}$  付近を基準 ( $0^\circ$ ) とした分布である。この結果、振幅測定による線路上の定在分布は数値計算とよく一致していることを確認した。位相の測定結果は電流値最小部位 (節) における  $180^\circ$  変化を示しており数値計算と良好に一致している。これにより、MOプローブを用いた本測定構成より磁界の振幅および位相測定が良好に行えることを確認した。

### 4.2 簡易筐体上逆Fアンテナ電流分布推定

移動端末を模擬した簡易筐体モデルをDUTとし、提案構成のMOプローブと一般的に使用される微小ループプローブ

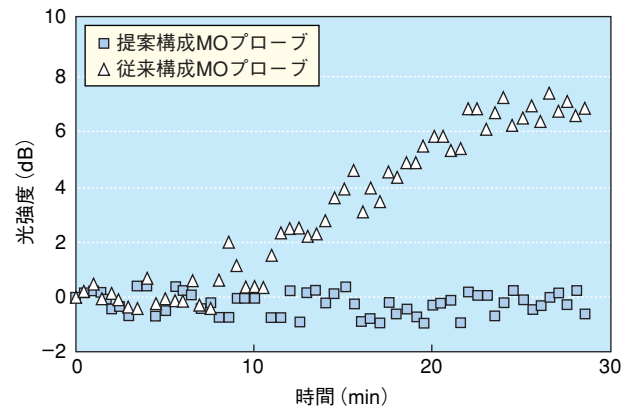


図4 偏波安定性の比較結果

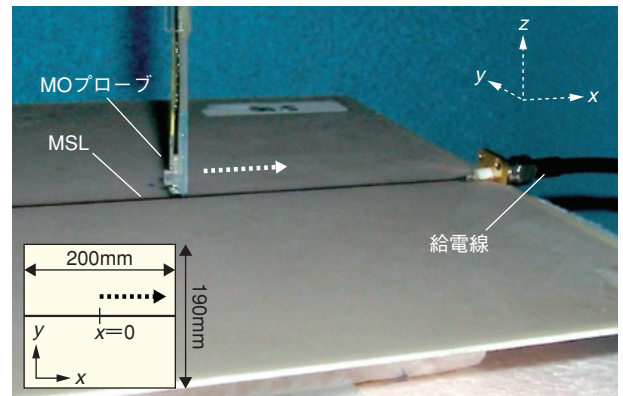


写真1 MSLモデル

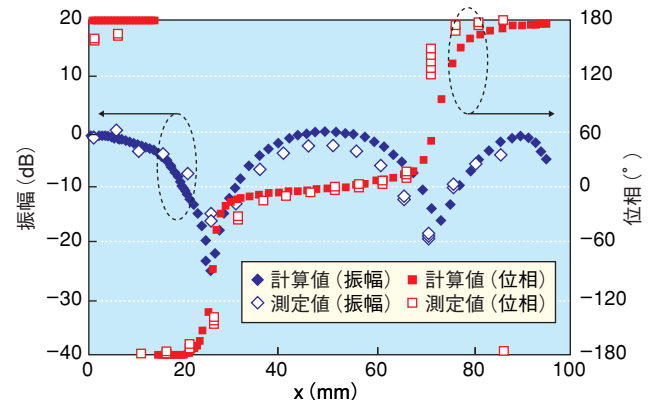


図5 MSL上磁界分布

ブによる電流分布推定の比較を行った。DUTモデルを図6に示す。アンテナ素子は多くの移動端末に搭載されており、動作が既知である逆Fアンテナ (PIFA: Planar Inverted-F Antenna)<sup>\*10</sup>を用いた。図6に示すように、測定対象上の観測領域はPIFA素子放射板の中央を長軸直交方向へ通過する直線上としている。各プローブはそれぞれDUTに対し最近

\*8 MSL：回路内において電気信号の伝送に用いられる線路。プリント基板を挟みグランド面と信号ラインを有する三層構造をとる。

\*9 FDTD法：電磁界解析を目的とした数値計算法の1つ。

\*10 (板状) 逆Fアンテナ：内蔵アンテナとして携帯端末に用いられてきたアンテナの1つ。放射板、短絡板、給電線、グランド板より構成される。



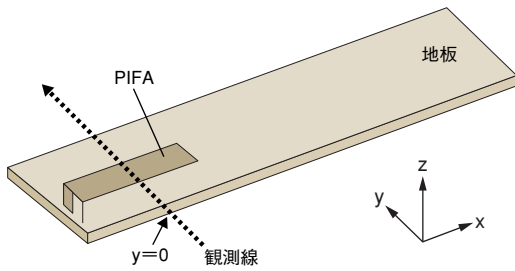


図6 DUTモデル

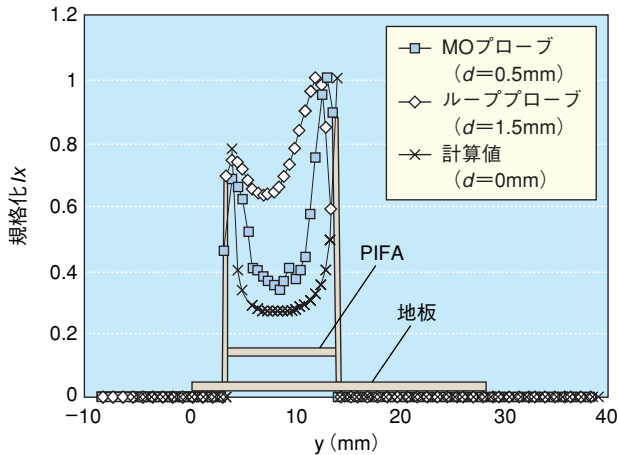


図7 電流分布推定結果

接配置とした。この時、ループアンテナ中央部もしくは結晶内の光透過部である測定点とDUTの距離  $d$  はループプローブで1.5mm、MOプローブで0.5mmである。電流分布評価は測定磁界の  $y$  方向成分  $H_y$  から電流の  $x$  方向成分  $I_x$  を推定し、分布の形状が明確となるようPIFAエッジ部位で規格化している。MOプローブおよび微小ループプローブによる電流分布推定結果およびFDTDによる電流分布計算結果を図7に示す。これにより、MOプローブによる推定は素子端部における急峻な電流分布の変化を確認しており、微小ループプローブと比較し、より高精度に電流分布評価ができることを示した。これは、MOプローブが持つ高い近接性、高空間分解能や低侵襲性によるものと考えられる。

## 5. あとがき

本稿では、移動端末上の電流分布を高精度に測定することを目的に、MO結晶を用いた高空間分解能、低侵襲性プローブの偏波安定化構成法を提案した。また実際にプローブを試作し、その効果の検証と移動端末内蔵アンテナなどを対象とした電流評価を行った。この結果、長時間にわた

る偏波安定特性および高精度な電流評価の実現を確認した。特に従来型磁界センサである微小ループプローブと比較しエッジ電流を含めたより詳細な電流分布評価を実現している。今後は本測定構成を用いた高性能アンテナ設計、高精度EMC評価への適用検討を進めていく予定である。

## 文献

- [1] E. Yamazaki, H. Park, S. Wakana, M. Kishi and M. Tsuchiya: "Fabrication of broad-band fiber-optic magnetic field probe and its application to intensity and phase distribution measurements of GHz-frequency magnetic field," International Topical Meeting Microwave Photonics, MWP2002, pp. 77-80, Awaji, Nov. 2002.
- [2] E. Yamazaki, S. Wakana, M. Kishi, M. Iwanami, S. Hoshino and M. Tsuchiya: "Three-dimensional magneto-optic near-field mapping over 10-50 $\mu$ m-scale line and space circuit patterns," Conference Proceedings-Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS, Vol. 1, pp. 318-319, 2001.
- [3] N. Itoh, H. Minemoto, D. Ishiko and S. Ishizuka: "Optical magnetic field sensors with high linearity using Bi-substituted rare earth iron garnets," IEEE Transactions, Vol. 31, issue 6, pp. 3191-3193, Nov. 1995.
- [4] E. Yamazaki, S. Wakana, M. Kishi and M. Tsuchiya: "10GHz-class magneto-optic field sensing with bi-substituted rare-earth ion garnet rotation magnetization employed," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 41, No. 2 A, pp. 904-907, 2002.
- [5] 中松 慎, 山口 良, 上林 真司, 岸 真人, 土屋 昌弘: "偏波安定化構成MOプローブによるアンテナ電流分布の高精度測定," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B, No. 9, pp. 1797-1805, 2006.