赤外線2次元ロックインアンプを用いた回路近傍電磁界強度分布測定法の提案

千代 憲隆*, 小峯 祐司*, 田中 康寛*, 西方 敦博**, 平野 拓一**, 前野 恭* ***

Proposal of Measurement Method of Electromagnetic Field Intensity Distribution near Circuit Using Infrared 2-D Lock-in Amplifier

Noritaka CHIYO*, Yuji KOMINE*, Yasuhiro TANAKA*, Atsuhiko NISHIKATA**, Takuichi HIRANO**,
and Takashi MAENO* ***

* 東京都市大学 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

** 東京工業大学 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

*** 情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

* Tokyo City University (1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557)

** Tokyo Institute of Technology (2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550)

*** National Institute of Information and Communications Technology (4-2-1 Nukukita, Koganei-shi, Tokyo 184-8795)

概要 電磁波を吸収・発熱する電磁波吸収幕を用いた電磁界強度分布測定装置を開発した。電磁界の強度に応じて生じる幕の温度上昇を赤外線カメラで測定することで、2次元電磁界強度分布を、測定対象電磁界を乱すことは少なく測定できる。そこで、本論文では、開発した装置により回路近傍の電磁界を測定した。AC-DC変換器近傍の3次元電磁界強度パターン、および、高周波回路に生じる定在波により形成される電磁界や、実装したフィルタ素子の周辺の電磁界分布を観測した。このような情報は回路の設計・評価に有用であり、開発した装置は回路の電磁環境調査に有効であることを示す結果が得られた。

Abstract

We have developed an electromagnetic field intensity distribution measurement system. In this system, a very small temperature change distribution on the electromagnetic absorption screen is measured using an infrared camera. It is expected that this system will be very useful for the evaluation of the electromagnetic fields around electric devices. In this paper, a measurement of the electromagnetic field intensity distribution near an AC-DC converter is described. We could get a 3-D image of the electromagnetic field intensity distribution as a temperature change distribution on the screen. Furthermore, by measuring the near field of a micro strip line and a high frequency balance filter, the enhanced electromagnetic fields near these devices were clearly observed.

Key Words: Measurement of Electromagnetic Field Distribution, Near Field of Circuit Board, 2-D Lock-in Amplifier, Infrared Camera, Visualization

1. 緒言

近年、無線通信の需要が拡大する一方、電子機器の高周波化によって機器の不要な電磁輻射も増加しており、機器から放射される不要な電磁波による通信障害や、電磁波が生体に与える影響、電磁波による機器の誤作動などの問題が懸念され、環境電磁工学に関する数多くの研究がなされている¹⁾。不要な電磁輻射対策には、機器や回路近傍の電磁界の測定評価が有用であると考えられるが、アンテナを用いた測定法では機器近傍、または、回路近傍の詳細な電磁界分布を観測することは困難である場合が多い。このような調査のために電磁界シミュレーションが行われる場合も多いが、高密度に部品が実装された回路ではモデリングや計算に時間を要することが欠点となる場合もある。そこで、手間や時間を要せずに機器や回路近傍の電磁界分布を測定する技術は有用であると考えられる。また、電磁輻射を抑制するためには、機器や回路へのノイズ対策部品の設置が有効であるが、これらの部品は装着する位置によって

その効果は変化する²⁾。このため、部品装着位置とノイズ抑圧効果の関係を調査する場合においても、近傍電磁界分布は有用な指標となると考えられる。

一方、筆者らはアンテナではなく電磁波を吸収して発熱する幕（電磁波吸収幕）を用いた電磁界強度分布測定装置を開発している^{3)~5)}。この装置では、赤外線カメラを用いて幕の温度分布を観測することにより、幕を設置した位置の電磁界強度分布を幕の2次元温度分布として観測することができる。また、用いる電磁波吸収幕が測定対象である電磁界を乱すことは少ない⁵⁾ため、波源近傍であっても測定が可能である。さらに、空間的な分解能はアンテナを用いた手法に比べ非常に高く、周波数依存性も低い⁴⁾。電磁波吸収幕には、電界強度分布を観測する場合は静電気防止の目的で電子素子などのパッケージに使用されるカーボンを添加した高分子フィルム⁵⁾（50 μ m厚、以下、電界測定用フィルムと記述）を用い、磁界強度分布を観測する場合は電磁ノイズ抑制のために用いられる磁性体が添加されたフィルム⁵⁾（ニッタ製、FN3、35 μ m厚、以下、磁界測

定用フィルムと記述)を用いる。前者は幕に平行な電界成分に応じて発熱し、後者は幕に平行な磁界成分に応じて発熱するため、それぞれの幕を用いた測定により、電界強度分布と磁界強度分布を区別して観測できることが確認されている⁵⁾。また、文献5)では、マイクロ波帯(2.45 GHz)において、観測された幕温度変化分布を電界/磁界強度分布に校正するための、電界幕温度変化と電界/磁界強度の関係も調査されている。

上記の電磁波吸収幕のような薄いフィルムで電磁波を効率よく吸収することは困難であるが、開発した装置では幕への電磁波照射を周期的にON/OFFさせ、幕に電磁波が照射されたときの加熱画像と、電磁波が照射されていないときの画像(冷却画像)を取得し、両者の差を平均化する2次元ロックインアンプ処理⁶⁾を行うことで、わずか5mK程度の幕の微小温度変化も観測可能であることが検証されている³⁾。したがって、幕でのわずかな電磁波の吸収・発熱があれば測定が可能である。

以上のように、筆者らは、電磁界強度分布測定装置を開発し、これまでに、マイクロ波放射アンテナなどの近傍電磁界強度分布の測定結果を報告している。一方、本論文では、開発した装置を用いて回路近傍の測定を行った結果を示す。ここでは、回路から周囲の空間に電磁ノイズとして放射される電磁波ではなく、回路近傍に形成される電磁界を、幕の発熱として直接観測した。回路近傍の3次元電磁界強度パターンや、伝送線路の定在波によって形成される電磁界、および、回路に実装された素子付近に形成される、比較的強度の高い電磁界が観測可能であった。幕の発熱から電磁界の周波数を特定することはできないが、電磁界強度が高い領域を特定できる電磁界強度パターンは、回路の電磁環境評価に有用であると考えられる。

上記のような回路近傍の電磁界分布可視化手法としては、微小磁界プローブを用いた磁界分布測定手法⁷⁾や、電気光学結晶を用いた電界分布測定手法⁸⁾なども提案されているが、開発した装置では、回路の近傍に電磁界を乱すことは少ない幕を設置するのみで測定が可能となるため、測定が容易であり、さまざまな回路近傍の測定に適用が可能であるという大きな利点がある。

2. AC-DC変換器近傍の電磁界強度パターン測定

ノート型パソコンの電源給電用AC-DC変換器(入力:交流100~240V, 50~60Hz, 出力:直流20V)近傍に設置した電磁波吸収幕の温度変化分布を観測した。測定システムの構成をFig. 1に示す。AC-DC変換器には100V, 50Hzを給電し、出力は5Ωの抵抗に接続した。今回は製品パッケージから漏れる電磁波ではなく、AC-DC変換器回路板近傍の電磁界強度パターンの観測を目的としたため、AC-DC変換器のプラスチックカバー、および、電磁波遮蔽用の導体板を取り除き測定を行った。測定対象である

Fig. 1 Measurement near the AC-DC converter

AC-DC変換器をFig. 2(267頁参照)に示す。ただし、同図の(b)裏面は後に示す測定結果に合わせて左右を反転して表示している。AC-DC変換器のFig. 2に示した面と平行に電磁波吸収幕を設置して、幕の温度分布を赤外線カメラ(日本アビオニクス社製、検出波長:8~14μm, 分解能:0.08K)により観測した。なお、幕の微小な温度変化を観測するために、AC-DC変換器への給電ON:2sec, OFF:2secを100回繰り返し、給電時の温度分布とOFF時の温度分布の差画像を平均化する2次元ロックインアンプ処理を行っている。

AC-DC変換器近傍に設置した電界測定用フィルムの温度変化分布測定結果をFig. 3(268頁参照)に示す。図中の白破線はAC-DC変換器の位置を示している。左列はFig. 2(a)に示した表面の近傍に幕を設置したとき、右列は(b)裏面の近傍に幕を設置したときの測定結果であり、AC-DC変換器と幕の距離はそれぞれ(1) $d=1$ mm, (2) $d=3$ mm, (3) $d=5$ mmとした。ただし、(b)裏面の分布は(a)表面の分布との比較を容易にするために、Fig. 2(b)同様に左右反転して表示している。それぞれの温度変化分布において、局所的に高い強度を示す領域が観測されており、この領域の幕に平行な電界成分の強度は比較的高いと考えられる。また、このような強度パターンはAC-DC変換器からの距離によっても異なる。(a)表面と(b)裏面の結果を比較すると、(1) $d=1$ mmでは最も高い強度を示す領域はほぼ一致しているが、(2) $d=3$ mm, (3) $d=5$ mmではそれぞれ異なるパターンとなっている。一方、同様にAC-DC変換器近傍に設置した磁界測定用フィルムの温度変化分布測定結果をFig. 4(268頁参照)に示す。ただし、Fig. 4の(b)裏面の結果もFig. 3同様に左右を反転して表示している。同図をFig. 3の結果と比較すると、同じ位置に幕を設置した場合でも、磁界測定用フィルムの温度変化分布は電界測定用フィルムの温度変化分布と異なるパターンとなることがわかる。

次に、Fig. 2 (a) に示すAC-DC変換器表面から1～6 mmの範囲において、1mm間隔で幕を走査して同様の測定を行い、測定結果を合成することでAC-DC変換器近傍の3次元強度分布を得た。得られた3次元分布における(a) 水平な断面、(b) 垂直な断面の温度変化分布をFig. 5 (268頁参照)、および、Fig. 6 (268頁参照) に示す。

Fig. 5は電界測定用フィルムを用いて測定した電界強度パターンであり、Fig. 6は磁界測定用フィルムを用いて測定した磁界強度パターンである。得られた断面画像の横方向画素は6列であるが、Fig. 5、Fig. 6では各列間に5列の画素を挿入し、補間を行って表示している。なお、Fig. 5 (a) の分布はFig. 3 (a-1) 中に示す横の赤破線に直交する面、Fig. 5 (b) の分布はFig. 3 (a-1) 中に示す縦の赤破線に直交する面の強度パターンを示している。電界強度は基盤近傍で強い値となっている。また、Fig. 6 (a)、(b) の分布は同様にFig. 4 (a-1) 中に示す横、縦の赤破線に直交する面のパターンを示している。この結果から、基板直近よりも3～4mm離れた位置に磁界の極大領域があることがわかった。このように、本装置では幕を1方向に走査するのみで3次元分布が得られる。

3. 高周波回路板近傍の電磁界強度分布測定

本装置を用いて、回路基板のごく近傍に形成される高周波電界強度分布の測定を試みた。

3.1 2.45 GHzマイクロストリップライン

測定のために試作したマイクロストリップライン (MSL) をFig. 7に示す。基板として用いた誘電体 (ガラスエポキシ) の厚さは1.6mm、比誘電率 ϵ_r は4.6～4.8 (1MHz) である。MSLの信号線幅は3mmであり、特性インピーダンスはおおよそ50Ωである。MSLの両端には裏面のグラウンド面側からSMAコネクタの内部導体ピンが接続されており、それぞれ同軸ケーブルを介して片側のコネクタは2.45 GHz、30 dBmの信号源に、もう一方のコネクタは50Ωの終端抵抗に接続されている。Fig. 7に示した基板のMSL側表面から3mmの距離において電磁波吸収幕 (前節で用いた電界測定用フィルム、または、磁界測定用

Fig. 7 Micro strip line

フィルム) を設置し、測定を行った。なお、MSLへの信号入力ON: 1sec, OFF: 1secを200回繰り返す、幕の温度変化分布を求めた。

電界測定用フィルムを用いた測定の結果と幕温度変化-電界強度の関係⁵⁾ から求めたMSLから3mm離れた平面の電界 (幕に平行な成分) の強度分布をFig. 8 (269頁参照) に示す。Fig. 8に示すようにMSLの縁付近で電界が高くなる様子が観測された。特に、MSL右側の端付近の強度が高い。次に、磁界測定用フィルムを用いた測定の結果と幕温度変化-磁界強度の関係⁵⁾ から求めた磁界 (幕に平行な成分) の強度分布をFig. 9 (269頁参照) に示す。Fig. 9においてもMSLの付近で磁界が高くなる様子が観測されたが、電界強度分布とは異なりMSLの縁付近よりも導体部分の強度が高い。また、Fig. 8とは対称的に、Fig. 9ではMSL左側の端付近で強度が高くなる様子が観測された。この結果から、今回試作した回路はインピーダンスの不整合のためSMAコネクタ接続部や終端抵抗での信号の反射が生じ、回路全体に定在波が生じていると考えられる。回路のごく近傍では、局所的に、電界強度は最大1,000 V/m程度、磁界強度では最大1.5 A/m程度の、比較的高い強度の電磁界が形成されている様子が観測された。

3.2 バランスフィルタを実装した回路

3.2.1 適切なフィルタ実装回路

Fig. 10に示すような高周波バランスフィルタ (双信電機製、DBF81F001-T) を実装した回路を試作し、近傍に設置した電磁波吸収幕の温度変化分布を観測した。

回路板の基板にはガラスエポキシ (0.3mm厚) を用いており、裏面はグラウンド面となっている。線路は信号線幅0.35mm、左右のグラウンドとの距離0.2mmのコプレーナラインであり、線路のインピーダンスはおおよそ50Ωである。実装したバランスフィルタは平衡・不平衡変換器とバンドパスフィルタが一体となったものであり、通過帯域は2.4～2.5 GHzである。Fig. 10における左側のSMAコネクタが入力ポート、右側2つのSMAコネクタが出力ポートとなっており、2つの出力には180°の位相差が生じる。なお、ネットワークアナライザを用いて、2～4 GHzにおけるこの回路板の信号減衰特性を調査したとこ

Fig. 10 Balance filter circuit (Coplanar line)

ろ、SMA コネクタやその付近での信号の反射などを考えれば、ほぼフィルタ素子の仕様どおりのバンドパスフィルタの特性が得られることが確認された。

この回路板に 30 dBm (2.2 GHz, 2.5 GHz, 3.8 GHz) の信号を入力し (ON: 1 sec, OFF: 1 sec, 200 回), それぞれの出力に 50 Ω の終端抵抗を接続して、回路の信号線から 2 mm 離れた位置に幕を設置し測定を行った。測定結果を Fig. 11 (270 頁参照) に示す。観測範囲は Fig. 10 中の白破線に示す範囲である。なお、ここで用いた電磁波吸収幕 (電界測定用フィルム, 磁界測定用フィルム) と, ON/OFF 各 1 sec を 200 回繰り返す測定は, 文献 5) で調査された電磁波吸収幕の温度変化と電磁界強度の関係を適用できる条件に一致する。文献 5) で示された温度変化-電磁界強度の関係式は 2.45 GHz において調査されたものであるが, 用いた電磁波吸収幕は, 2.45 GHz において特別に感度良く発熱するものではなく, 今回測定対象とした 2.2 GHz, 2.5 GHz, 3.8 GHz では, 顕著な幕の発熱感度の変化は見られなかった。そこで, Fig. 11 では, 測定された温度変化分布を, 2.45 GHz における校正式⁵⁾を用いて, 電界, または, 磁界強度に校正して表示した。このとき, 電界 1,000 V/m に値する幕温度変化量は 119 mK, 磁界 2 A/m に値する温度変化量は 82 mK であり, 一方, 測定装置では 5 mK 程度の幕の微小な温度変化も検出が可能であるため³⁾, Fig. 11 において比較的強度の高い領域では, 観測に十分な S/N 比が得られている。

Fig. 11 の左列が (a) 電界測定用フィルムを設置して測定した電界強度分布, 右列が (b) 磁界測定用フィルムを設置して測定した磁界強度分布であり, (1) 上段は 2.2 GHz, (2) 中段は 2.5 GHz, (3) 下段は 3.8 GHz の信号を入力したときの結果である。なお, (2) 2.5 GHz はバンドパスフィルタの通過帯域であり, (1) 2.2 GHz, および, (3) 3.8 GHz は通過帯域外である。Fig. 11 中の白破線は信号線の位置を示しており, この回路板に 30 dBm の信号を入力したときにスペクトラムアナライザを用いて測定した SMA コネクタから出力される信号強度も同図中にあわせて示した。

いずれの結果においても, 画像中心のフィルタ素子付近で高い強度を示している。また, (1) 2.2 GHz, および, (3) 3.8 GHz の信号を入力した場合では, フィルタ素子左側 (フィルタ通過前) の線路付近の強度が比較的高い。一方, 通過帯域の (2) 2.5 GHz の信号を入力した場合では, フィルタ素子右側 (フィルタ通過後) の線路付近でも周囲より高い強度が観測される。また, この平均電磁界強度を表す測定結果において, フィルタ素子左側 (フィルタ通過前) の線路付近で観測される, 局所的に高い強度となる電磁界分布は, 線路に生じる定在波により形成されたと考えられる。

Fig. 12 Balance filter circuit (Micro strip line)

3.2.2 最適化されていないフィルタ実装回路

次に, 前節と同じフィルタ素子を用いて, 異なる配線パターンの回路板を試作した。ただし, 本節で試作した回路は線路に不連続部分が多く, 信号の反射などにより前節の回路とは通過特性が異なるものとなっている。この回路に対して前節と同様の測定を行った。

試作したフィルタ素子を実装した回路板を Fig. 12 に示す。基板にはガラスエポキシ (1.6 mm 厚) を用い, 線路は信号線幅 3 mm のマイクロストリップ線路とした。線路のインピーダンスはおよそ 50 Ω である。回路板の裏面はグラウンド面となっており, 信号線の端には裏面から SMA コネクタの内部導体ピンが接続されている。この回路では, 線路の屈曲部やフィルタ素子, SMA コネクタの接続部で信号の反射が生じると考えられる。

前節同様に回路の信号線から 2 mm 離れた位置に幕を設置して測定を行った結果を Fig. 13 (269 頁参照) に示す。図中の白破線は信号線の位置を示す。また, この回路板に 30 dBm の信号を入力したときにスペクトラムアナライザを用いて測定した SMA コネクタから出力される信号強度も Fig. 13 中にあわせて示した。いずれの周波数においても, 2 つの出力ポートから出力される信号強度は異なっており, フィルタの仕様とは異なっている。フィルタの通過帯域外の (1) 2.2 GHz, および, (3) 3.8 GHz においては, フィルタ通過前の線路で定在波により生じる電磁界パターンが観測される。また, (3) 3.8 GHz では, フィルタ素子付近で, 電界 3,000 V/m 以上, 磁界 3.2 A/m 以上の, 高い強度の電磁界が形成されることがわかった。このように, 同じフィルタ素子を実装した回路であっても, 配線パターンの違いにより, 近傍に形成される電磁界強度分布が異なる様子を観測することができた。本装置を用いれば, 素子近傍の強調された電磁界や線路の定在波の様子を観測することができるため, 本装置はノイズ対策部品を回路に挿入した場合の評価などにも有用であると考えられる。

4. 結 論

筆者らが開発した電磁界強度分布測定装置により, AC-DC 変換器近傍, および, 高周波回路基板近傍の電磁界強

度分布を観測した例を示した。この装置では、幕を1方向に走査するのみで3次元電磁界強度分布が得られる。AC-DC変換器近傍では、基板から数mm離れた位置に磁界の極大領域がある様子が観測された。また、高周波伝送線路近傍の測定では、幅3mmの信号線付近に形成される電界、磁界強度も区別して観測でき、定在波により形成される電磁界や、小さなフィルタ素子 ($2 \times 1.25 \times 0.8$ mm) 近傍に形成される電磁界の強度分布も観測可能であった。さらに、電磁界シミュレーションでは時間を要するような複雑な構造をもつ回路であっても同様の測定が可能である。

可視光の電磁界³⁾やGHz帯の高周波電磁界^{4),5)}に加えて、今回、商用周波数が給電された回路近傍の電磁界の強度分布測定に対しても、この装置の適応が可能であることが確認された。GHz帯の高周波回路近傍の測定結果に対しては、2.45GHzにおける幕温度変化と電磁界強度の関係を基に、測定分布の電磁界強度の目安を示したが、この帯域以外での正確な電磁界強度を測定するためには、周波数に対する幕の発熱感度の変化を調査する必要がある。一方、本論文では、観測された電磁界分布の、特に高い強度を示す領域に着目して議論を行った。このような電磁界強度パターンの観測は、機器の不要な電磁波輻射の評価や、実装した電子部品、ノイズ対策部品の評価に有用であると考えられ、また、さまざまな回路近傍に形成される強度パターンの観測にも適用が容易であることが、この装置の大きな利点である。この測定法では、幕の微小な温度変化を観測するために測定対象の電磁界を変調する必要があるが、機器や回路などの電源をON/OFFするのみで測定が可能となる。また、電磁界強度の測定感度はアンテナを用いた手法に比べ大きく劣るが、測定対象電磁界の強度が本装置の測定感度以下であった場合でも、3章に示した測定例のように、試験的に回路に高い強度の信号を入力すれば、電磁界強度のパターンを観測することができる。

謝 辞

本論文の測定で用いたバランスフィルタを提供していただきました双信電機株式会社、ならびに、このような測定の機会を与えてくださった今井悟史氏に深く感謝いたします。

また、第一著者は日本学術振興会特別研究員 (DC2) であり、本研究は平成23年度科学研究費 (23・11241) の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

(2011.11.10-受理)

文 献

- 1) 古河隆治：“日本におけるEMC技術の進歩発展と将来展望,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol. **J90-B**, No. 11, pp. 1083-1088, 2007年11月
- 2) 山本秀俊, 篠原慎一, 佐藤利三郎：“プリント配線より放射される電磁ノイズに対する対策部品のノイズ抑圧効果の推定に関する検討,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol. **J85-B**, No. 4, pp. 529-537, 2002年4月
- 3) 前野 恭, 千代憲隆, 田中康寛：“赤外線2次元ロックインアンプによる3次元電磁界強度分布測定,” 電気学会論文誌A, Vol. **127**, No. 10, pp. 656-657, 2007年10月
- 4) 千代憲隆, 荒井瑞樹, 田中康寛, 西方敦博, 前野 恭：“赤外線2次元ロックインアンプによるマイクロ波イメージング,” 電気学会論文誌A, Vol. **129**, No. 11, pp. 785-790, 2009年11月
- 5) 千代憲隆, 荒井瑞樹, 田中康寛, 西方敦博, 平野拓一, 前野 恭：“赤外線2次元ロックインアンプを用いたダイポールアンテナ近傍の電磁界強度分布測定と校正法の提案,” 電子情報通信学会論文誌C, Vol. **J94-C**, No. 5, pp. 127-135, 2011年5月
- 6) 田下貴久, 田中康寛, 高田達雄, 前野 恭：“赤外線2次元ロックインアンプによる高分子材内部の欠陥検出,” 電気学会論文誌E, Vol. **117**, No. 12, pp. 600-606, 1997年12月
- 7) T. Harada, N. Masuda, and M. Yamaguchi: “Near-Field Magnetic Measurements and Their Application to EMC of Digital Equipment,” IEICE Trans. Electron., Vol. **E89-C**, No. 1, pp. 9-15, 2006
- 8) K. Sasagawa, A. Kanno, T. Kawanishi, and M. Tsuchiya: “Live Electrooptic Imaging System Based on Ultraparallel Photonic Heterodyne for Microwave Near-Fields,” IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. **55**, No. 12, pp. 2782-2790, 2007

Fig. 2 Picture of the AC-DC converter

Fig. 3 Measurement result of the temperature change distribution on the electric field measurement film putting near the converter

Fig. 4 Measurement result of the temperature change distribution on the magnetic field measurement film putting near the converter

Fig. 5 Cross section of the 3-D temperature change distribution on the electric field measurement film

Fig. 6 Cross section of the 3-D temperature change distribution on the magnetic field measurement film

Fig. 8 Measurement result of electric field intensity distribution on the film at 3 mm apart from the MSL

Fig. 9 Measurement result of magnetic field intensity distribution on the film at 3 mm apart from the MSL

(a) Electric field intensity distribution measured with the electric field measurement film

(b) Magnetic field intensity distribution measured with the magnetic field measurement film

Fig. 13 Measurement results of the electromagnetic field intensity distributions on the film 2 mm apart from the circuit board shown in Fig. 12

Fig. 11 Measurement results of the electromagnetic field intensity distribution on the film 2 mm apart from the circuit board shown in Fig. 10

著者紹介

千代憲隆 (ちよ のりたか)

1984年5月31日生まれ。2007年3月武蔵工業大学工学部機械システム工学科卒業。2009年3月同大学大学院工学研究科機械システム工学専攻修士課程修了。2012年3月同大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)

西方敦博 (にしきた あつひろ)

昭和59年東京工業大学理学部物理学科卒。昭和61年同大学院電気電子工学専攻修士課程了。平元同博士課程了。同年郵政省通信総合研究所入所。平成5年東工大助手。平成7年同大教育工学開発センター助教授。現在、同准教授。平16より(独)情報通信研究機構短時間研究員兼任。工博。環境電磁工学、教育工学の研究に従事。電子情報通信学会、IEEE、日本教育工学会各会員。

小峯裕司 (こみね ゆうじ)

1988年9月28日生まれ。2011年3月武蔵工業大学工学部機械システム工学科卒業。2011年4月東京都市大学(旧武蔵工業大学)大学院工学研究科入学。現在に至る。

平野拓一 (ひらの たくいち)

1998年名古屋工業大学電気情報工学科卒。2000年東京工業大学大学院電気電子工学専攻修士課程了。2002年～2007年東京工業大学大学院国際開発工学専攻助手。2007年4月より東京工業大学大学院国際開発工学専攻助教。工学博士(東工大)。電磁界解析、アンテナ工学、導波管スロットアレーアンテナの研究に従事。

田中康寛 (たなか やすひろ)

1961年9月10日生まれ。1991年3月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。1990年4月同大学理工学部助手属任。1992年4月武蔵工業大学機械工学科専任講師。1998年4月同大学機械システム工学科助教授着任。2004年同教授。現在に至る。工学博士。主として有機高分子材料の高電界特性、特に空間電荷分布測定の研究に従事。

前野 恭 (まえの たかし)

1957年8月28日生まれ。1989年3月武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在、情報通信研究機構電磁波計測研究所、センシング基盤研究室所属。工学博士。主として誘電体中の空間電荷分布、電界分布の計測およびレーザ応用研究に従事。2007年より武蔵工業大学(現東京都市大学)連携大学院教授。