

## Wバンド帯誘電率測定用レンズアンテナの特性評価

飴谷 充隆<sup>†</sup> 黒川 悟<sup>†</sup> 加藤 悠人<sup>†</sup> 堀部 雅弘<sup>†</sup>

<sup>†</sup>産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: <sup>†</sup> {m.ameya, satoru-kurokawa, y-katou, masahiro-horibe}@aist.go.jp

**あらまし** 集光レンズアンテナを用いた freespace 誘電率測定法は、非破壊に誘電率測定を行うことが可能であるため、数 GHz 以上のマイクロ波・ミリ波帯における誘電率測定法として広く使用されている。電磁波を集光するため、伝送ロスが比較的少なく、周囲反射の影響も少ないため、電波暗室を使用せずとも測定が可能である点で優れている。一方で、レンズや治具の設計によって、得られる誘電率の値が多少変化するため、freespace 法による誘電率計測の精度に関する議論はあまり進んでいない。特に、Wバンド帯におけるレンズアンテナについては、光学設計あるいは低い周波数帯での挙動からの推測によって設計されている場合が多く、測定によってレンズアンテナの近傍界性能を確認している例は少ない。レンズアンテナ性能の設計値からのズレは、測定された誘電率の不確かさに大きく寄与すると考えられるため、freespace 誘電率計測システムの不確かさを検討するためには、レンズアンテナの近傍界特性を実測によって定量的に評価する必要がある。本報告では、平面走査型近傍界測定法によりレンズアンテナから放射される近傍電界分布を測定し、得られた平面波スペクトルから任意断面の電界分布を再生することによって、Wバンド帯におけるレンズアンテナの近傍界特性を、実測によって明らかにした。また、測定時に問題となる多重反射波の除去法および影響について議論する。

**キーワード** freespace 誘電率測定, ミリ波, レンズアンテナ, 近傍界計測, 多重反射波, 光学的ミリ波発生

## Evaluation of Characteristics of Lens Antenna for Free-space Dielectric Measurement in W-band

Michitaka AMEYA<sup>†</sup> Satoru KUROKAWA<sup>†</sup> Yuto KATO<sup>†</sup> and Masahiro HORIBE<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Advanced Industrial Science and Technologies 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {m.ameya, satoru-kurokawa, y-katou, masahiro-horibe}@aist.go.jp

**Abstract** Free-space dielectric measurement using beam-focused lens antenna is widely used for dielectric property measurement of flat sample because of nondestructive testing. In mm-wave region, lens antennas are usually designed by light theory or scale model of lower frequency microwave measurement. The experimental evaluation of near-field characteristics of the lens antenna have not been reported so far. In this paper, the near-field characteristics of the lens antenna is experimentally evaluated by planar near-field measurement using OEWG probe and photonic mm-wave generation system.

**Keyword** Free-space dielectric measurement, Millimeter-wave, Lens antenna, Near-field measurement, Multiple reflection waves, photonic mm-wave generation

### 1. はじめに

集光レンズアンテナを用いた freespace 誘電率測定法は、非破壊に誘電率測定を行うことが可能であるため、数 GHz 以上のマイクロ波・ミリ波帯における誘電率測定法として広く使用されている[1]。電磁波を集光するため、伝送ロスが比較的少なく、周囲反射の影響も少ないため、電波暗室を使用せずとも測定が可能である点で優れている。一方で、レンズや治具の設計によって、得られる誘電率の値が多少変化するため、freespace 法による誘電率計測の精度に関する議論はあまり進んでいない。特に、Wバンド帯にお

けるレンズアンテナについては、光学設計あるいは低い周波数帯での挙動からの推測によって設計されている場合が多く、測定によってレンズアンテナの近傍界性能を確認している例は少ない[2]。レンズアンテナ性能の設計値からのズレは、測定された誘電率の不確かさに大きく寄与すると考えられるため、freespace 誘電率計測システムの不確かさを検討するためには、レンズアンテナの近傍界特性を実測によって定量的に評価する必要がある。

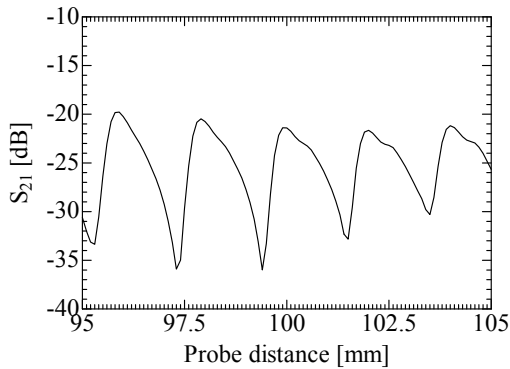
本報告では、まず、2.1節～2.3節において、平面近傍界計測と平面波スペクトルによる任意距離での電界



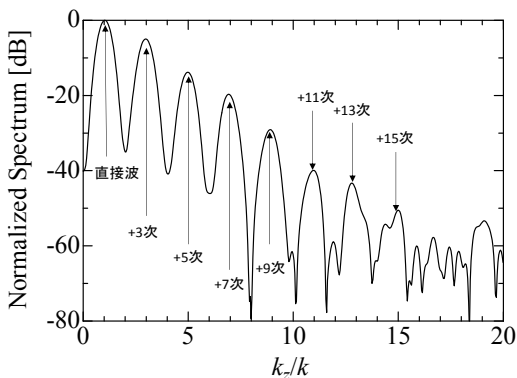
### 3. 多重反射波成分の低減と測定結果

#### 3.1. 多重反射量の評価

アンテナ間の多重反射を定量的に評価するために、受信プローブをレンズアンテナの中心に設置し、レンズアンテナと受信プローブの間隔を 95mm~105mm まで 0.1mm 間隔で移動させ、そのときの伝送特性  $S_{21}$  を測定した。図 4(a)に伝送特性の  $z$  方向分布の測定結果を示す。多重反射波成分の存在により、波形は大きくひずんでおり、多くの空間高調波成分を含んでいることが推測される。また、 $d=100$  mm 付近での最大最小差は 14.6dB 程度あり、受信プローブ位置によって伝送特性の測定結果は大きく異なる。空間高調波成分の大きさを定量的に把握するために FFT 解析を行う。図 4 (b) に FFT 後の空間周波数スペクトルを示す。横軸は波数の  $z$  方向成分  $k_z$  を波数の絶対値  $k$  で規格化しており、縦軸は最大値を 0 dB として規格化している。図からわかるとおり、式(3) で表されるように、空間周波数スペクトルは奇数次のみで発生している。また、3 次成分は 1 次成分 (= 直接波) から 5.0 dB 低い程度であり、15 次成分まで観測できてきていることから、高次の多重反射成分が大きく含まれていることが確認できる。



(a)  $z$  方向  $S_{21}$  強度分布



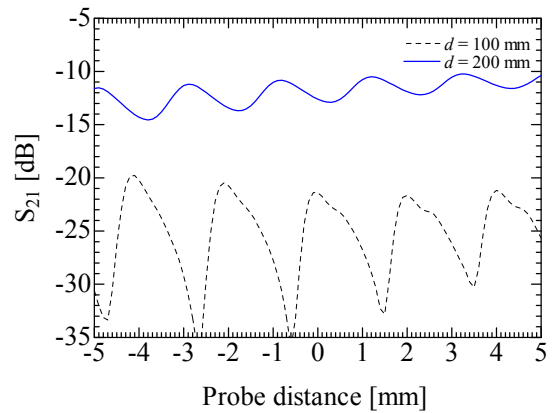
(b) 空間周波数スペクトル

図 4.  $d = 100$  mm における  $z$  方向  $S_{21}$  強度分布および空間周波数スペクトル

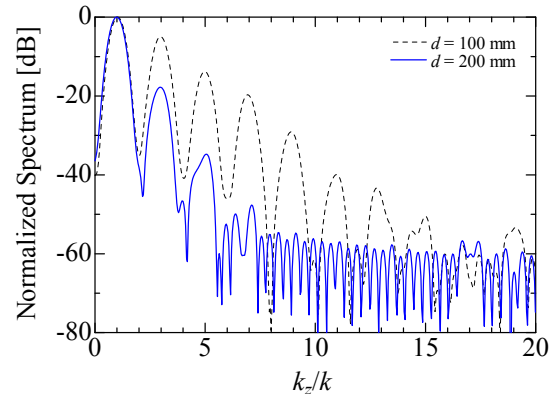
Fig. 4.  $S_{21}$  distribution along  $z$ -axis and spatial frequency spectrum at  $d = 100$  mm

#### 3.2. 距離による多重反射の低減

多重反射波を低減するために、アンテナ間距離を  $d=100$  mm から  $d=200$  mm へ変更して、再度、多重反射波の解析を行った。アンテナ間伝送特性の  $z$  方向分布および空間周波数スペクトルを図 5(a)および(b)に示す。図 5(b)より、空間周波数の高次の成分が低減していることがわかる。 $d = 100$  mm に比べて、3 次成分は 12.8 dB, 5 次成分は 21.0 dB 低下しており、距離を離れたことにより多重反射波の高調波成分を低減できたことがわかる。また、伝送特性の  $z$  方向分布は、 $d=100$ mm の場合に比べて、約 10 dB 程度増加している。これは測定位置が、焦点距離に近づいたため、集光され電界強度が上昇しているためであると考えられる。



(a)  $z$  方向  $S_{21}$  強度分布



(b) 空間周波数スペクトル

図 5.  $d = 200$  mm における  $z$  方向  $S_{21}$  強度分布および空間周波数スペクトル

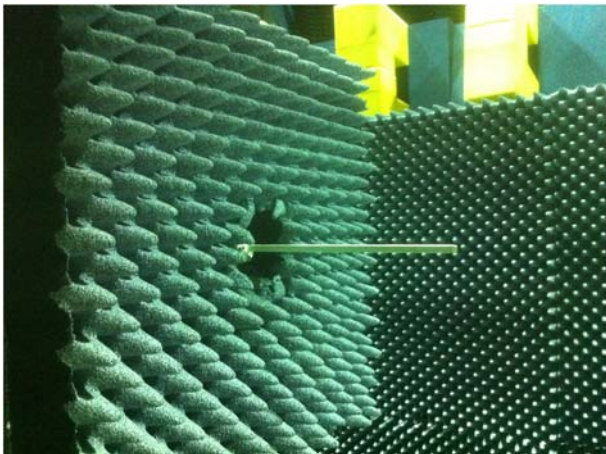
Fig. 5.  $S_{21}$  distribution along  $z$ -axis and spatial frequency spectrum at  $d = 200$  mm

#### 3.3. 吸収体装着による多重反射の低減

さらなる空間高調波成分の低減のため、受信プローブへ吸収体を装着することを検討した。図 6(a)に改良前の受信プローブの写真を示す。受信プローブ側には反射を低減するための 30cm × 30 cm の吸収体がすでに装着されているが、プローブを通すための 4cm × 4cm 角の穴が中央に空いており、その領域が反射を引き起

こしていると考えられるため、その部分を完全に埋めるように電波吸収体を追加した。改善後の受信プローブの写真を図 6(b)に示す。また電波吸収体追加後に前節と同様に多重反射波の評価を行った。その結果を図 7(a)および(b)に示す。

図 7(b)より、吸収体の追加によって、3次高調成分は 10.8 dB 低減し、5次高調成分はノイズフロア以下に低減できたことが確認できる。また図 7(a)の強度分布から周期的な振幅が低減しており、多重反射波の影響を小さく出来たことがわかる。



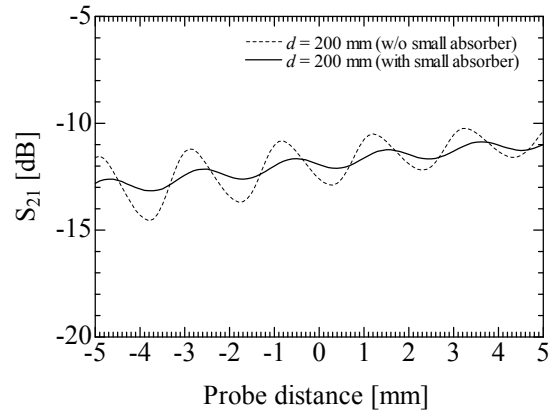
(a) 改良前の受信プローブ側吸収体の様子



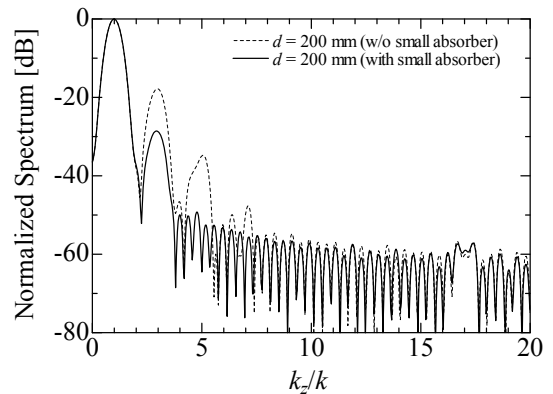
(b) 改良後の受信プローブ側吸収体の様子

図 6. 受信プローブ側吸収体追加の様子

Fig. 6. Small absorber with and without receiving probe



(a)  $z$  方向  $S_{21}$  強度分布



(b) 空間周波数スペクトル

図 7.  $d = 200$  mm における  $z$  方向  $S_{21}$  強度分布および空間周波数スペクトル (吸収体追加あり/なし)

Fig. 7.  $S_{21}$  distribution along  $z$ -axis and spatial frequency spectrum at  $d = 200$  mm

### 3.4. 平均化による多重反射の低減

さらに 3 次高調波成分を除去するために、平均化による高調波成分の除去を検討した。  $z$  方向の振幅変化が十分緩やかであるという仮定の下に、 $n$  次の波数成分をもつ平面波の位相差が  $\pm\beta$  となる 2 点間の平均値は次式で計算される。

$$\begin{aligned} & \frac{(A + \Delta A) \exp[-jn(kz + \beta)] + (A - \Delta A) \exp[-jn(kz - \beta)]}{2} \\ &= [A \cos(n\beta) - j\Delta A \sin(n\beta)] \cdot \exp(-jnkz) \\ &\approx A \cos(n\beta) \cdot \exp(-jnkz) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $A$  は振幅、 $\Delta A$  は振幅の距離変化分、 $k$  は波数、 $n$  は高調波の次数、 $\beta$  は位相シフト量を表す。 $\beta = 30^\circ$  すなわち  $\pm\lambda/12$  はなれた点の平均値は、式(1)に代入すると、直接波( $n=1$ )については、

$$\begin{aligned} & A \cos(30^\circ) \exp(-jkz) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} A \exp(-jkz) \end{aligned} \quad (5)$$

と近似でき、平均値計算前の値のおよそ $\sqrt{3/2}$ 倍になる。そのとき3次の高調波成分 ( $n=3$ ) については、 $\cos(90^\circ)$  が乗算されるため、その近似結果はほぼ0になる。また、5次高調波 ( $n=5$ ) については $\pm 150^\circ$ の点の平均になり、直接波と同様に $\sqrt{3/2}$ 倍と近似できる。したがって、 $\pm \lambda/12$  離れた点の相加平均を計算することにより、3次高調波成分のみを選択的に除去することが可能となる。

$\pm \lambda/12$  離れた点の平均化処理後の、 $z$  方向分布および空間周波数スペクトルを図 8(a)および(b)に示す。ただし、平均化処理後の振幅は、平均化によって $\sqrt{3/2}$ 減少した直接波の減少分 1.24dB を加算して表示している。図 8(a)から、さらに振幅変動が低減していることが確認できる。三次高調波成分は-28.6 dB から-41.2 dB へ低下しており、平均化処理によって約 12.6 dB 三次成分を低減できた。

以上の多重反射除去により、3.2 節の多重反射成分にくらべて、3次成分を 36.2 dB 低減し、5次成分をノイズフロア以下まで低減した。

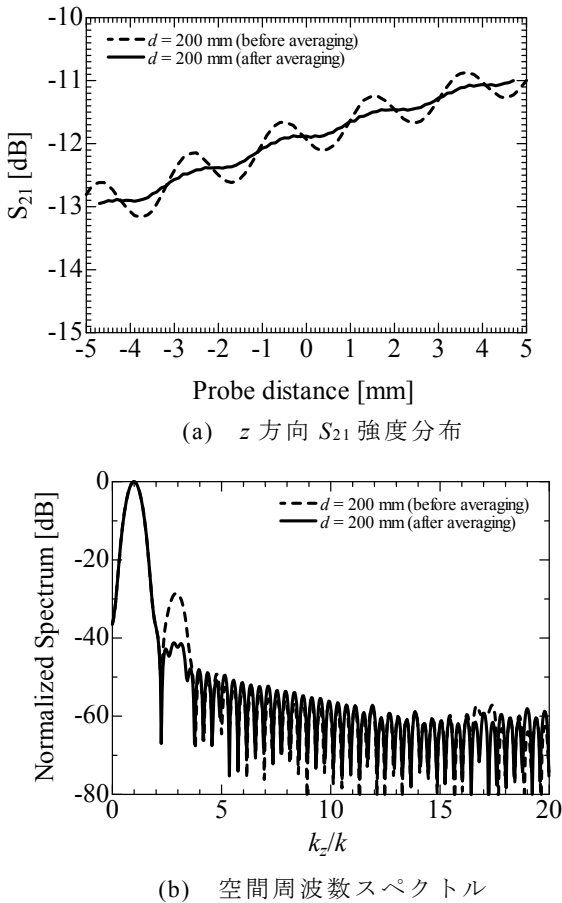


図 8.  $d = 200$  mm における  $z$  方向  $S_{21}$  強度分布および空間周波数スペクトル (平均化処理後)  
Fig. 8.  $S_{21}$  distribution along  $z$ -axis and spatial frequency spectrum at  $d = 200$  mm after averaging.

#### 4. 電界強度分布の測定結果とレンズパラメータの評価

プローブ距離を  $d = 200 \text{ mm} \pm \lambda/12$  の位置において、 $600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  の走査範囲で、 $S_{21}$  分布を測定し、3節の方法を用いて、多重反射を除去し、平面波スペクトル展開によって  $z$  方向の  $S_{21}$  分布を推定した。  $xy$  分布の測定結果および各種レンズパラメータの評価結果を示す。比較のため、多重反射を除去していない、 $d = 100$  mm における分布測定の結果も示す。ただし、 $d = 100$  mm の場合、走査範囲は  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  とした。また、測定間隔  $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ mm}$  とした。

##### 4.1. $xy$ 平面分布の測定結果

75 GHz における、多重反射除去前および除去後の  $xy$  平面における  $S_{21}$  の分布を図 9(a)および(b)に示す。図 9(a)と(b)ではアンテナ間距離が異なるため、単純な比較は難しいが、図(a)では中央付近で多重反射の影響によりディップが存在している。また、 $d = 200$  mm の方が焦点距離に近いため、電界分布が中心付近に収束していることが確認できる。

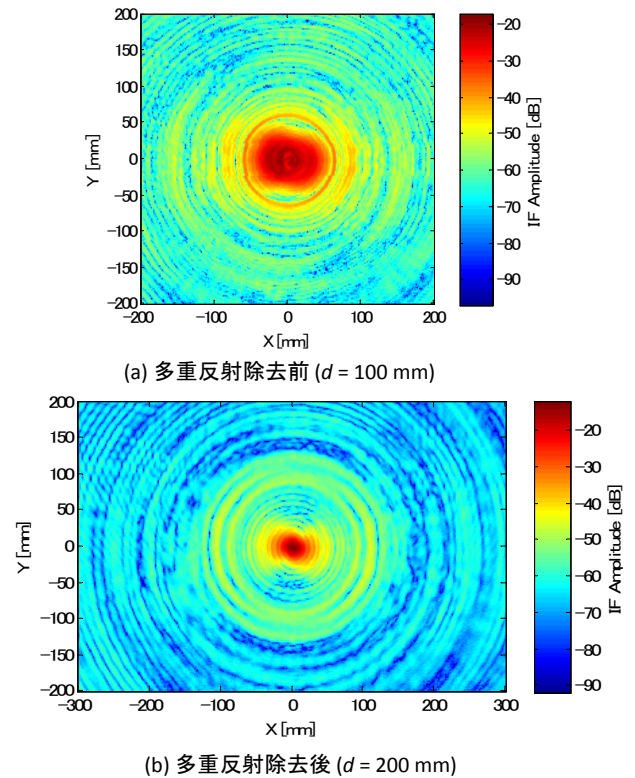


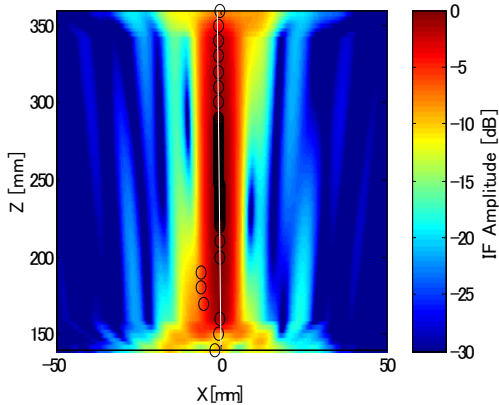
図 9.  $xy$  面における  $S_{21}$  強度分布  
Fig. 9.  $S_{21}$  distribution in  $xy$ -plane

##### 4.2. $xz$ 平面分布および $yz$ 平面分布の推定結果

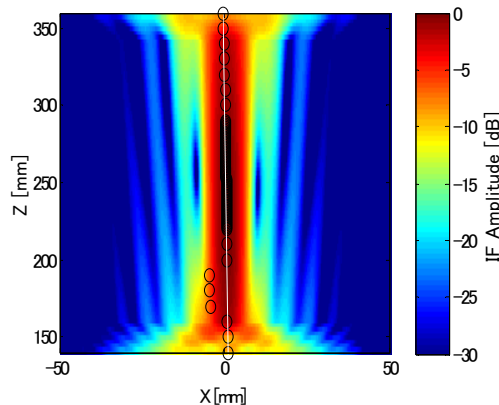
75 GHz における、多重反射除去前および除去後の  $xz$  平面および  $yz$  平面における  $S_{21}$  の推定分布を 10(a),(b) および図 11(a),(b)に示す。振幅分布は面内の最大値を 0 dB として規格化している。中央の円プロットは各  $z$

位置における  $xy$  面内の最大振幅の位置を表し、白い直線は、最大振幅の位置のデータから線形フィッティングにより推定される光軸を表す。

多重反射除去前と除去後の分布を比較すると、多重反射の除去によって、きれいな左右対称性が得られていることが確認できる。また  $yz$  分布に比べて  $xz$  分布は  $x$  方向に  $-20$  dB 程度のリップルが生じていることが確認できる。



(a) 多重反射除去前 ( $d = 100$  mm)



(b) 多重反射除去後 ( $d = 200$  mm)

図 10.  $xz$  面における  $S_{21}$  強度分布

Fig. 10.  $S_{21}$  distribution in  $xz$ -plane

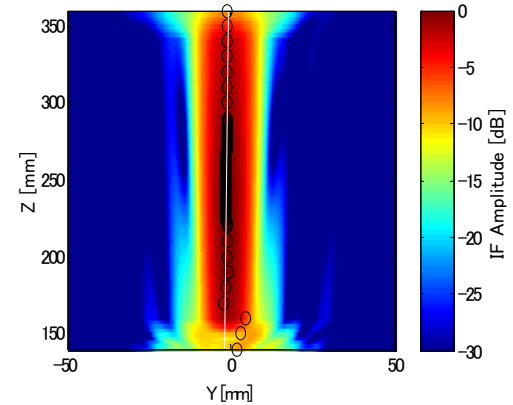
### 4.3. $S_{21}$ , ビームサイズの $z$ 方向分布および焦点距離, ビームサイズの周波数特性

各  $z$  位置における  $xy$  面内で最大となる  $S_{21}$  の  $75$  GHz における  $z$  方向分布を図 12 に示す。多重反射除去前と除去後で  $z$  方向分布に大きな違いは見られなかった。最大強度となる点を焦点距離と考えると、周波数  $75$  GHz では、多重反射除去前が  $d = 246$  mm, 多重反射除去後が  $d = 247$  mm となった。ただし、計算した  $z$  の最小間隔は  $1$  mm であるため、 $1$  mm より細かい差は確認していない。レンズアンテナの焦点距離の設計値は  $260$  mm であることから、設計値に比べて  $13$  mm 短いことが確認できる。

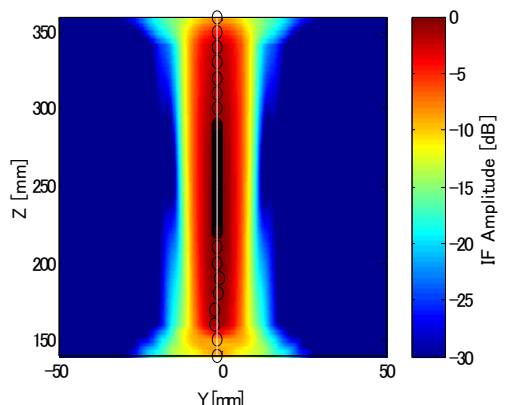
図 13 に焦点距離の周波数特性を示す。焦点距離は

周波数とともに上昇し、多重反射除去後の焦点距離は  $247$  mm ~  $253$  mm であった。多重反射除去前の焦点距離との差は最大  $4$  mm であり、多重反射の影響により焦点距離が若干短く観測されることがわかる。

図 14 に焦点位置前後における  $10$  dB ビーム幅の  $z$  方向依存性を示す。多重反射波の影響はあまり目立たないが、どちらの場合も焦点位置においては、 $x$  方向のビーム幅が  $y$  方向のビーム幅より短いことが確認できる。



(a) 多重反射除去前 ( $d = 100$  mm)



(b) 多重反射除去後 ( $d = 200$  mm)

図 11.  $yz$  面における  $S_{21}$  強度分布

Fig. 11.  $S_{21}$  distribution in  $yz$ -plane

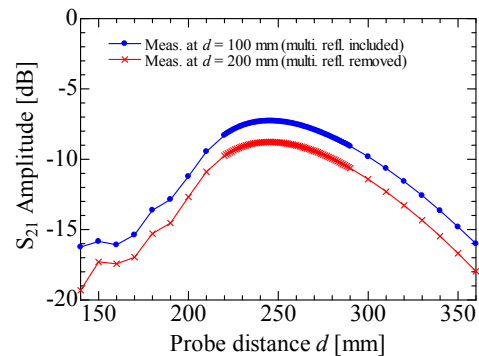


図 12. 伝送特性  $S_{21}$  の  $xy$  面内最大値の分布

Fig. 12. Antenna-lens distance v.s. maximum transmission loss  $S_{21}$  in each  $xy$ -plane.

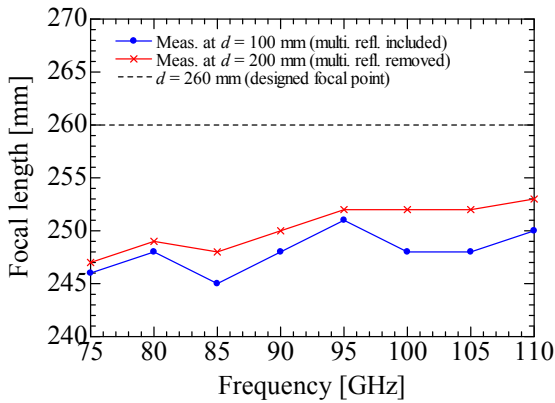


図 13. 焦点距離の周波数特性

Fig. 13. Focal length v.s. frequency.

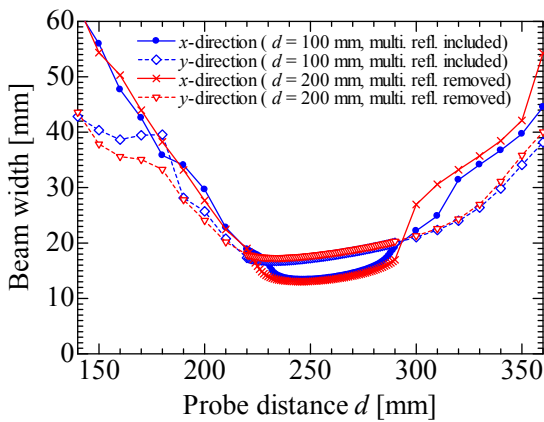


図 14. ビーム幅の  $z$  方向分布

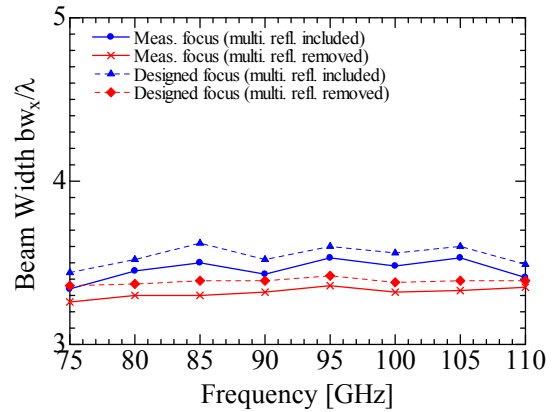
Fig. 14. Antenna-lens distance v.s. beam-width

図 15(a)および(b)に設計焦点位置( $d = 260$  mm) ならびに測定された焦点位置における  $x$  方向および  $y$  方向のビーム幅の周波数特性を示す. 図の縦軸は波長で規格化している. ビーム幅の周波数依存性は少なく, 測定した焦点位置では  $x$  方向で約  $3.3\lambda$ ,  $y$  方向で約  $4.5\lambda$  であり, 楕円形状であることがわかる. 設計された焦点距離でのビーム幅は  $0.1\lambda$  程度広い程度であり, 差は小さい. また多重反射波除去前は周波数による変化が大きいことを確認した. よって変化しており, 焦点位置前後における  $10$  dB ビーム幅の  $z$  方向依存性を示す. 多重反射波の影響はあまり目立たないが, どちらの場合も焦点位置においては,  $x$  方向のビーム幅が  $y$  方向のビーム幅より短いことが確認できる.

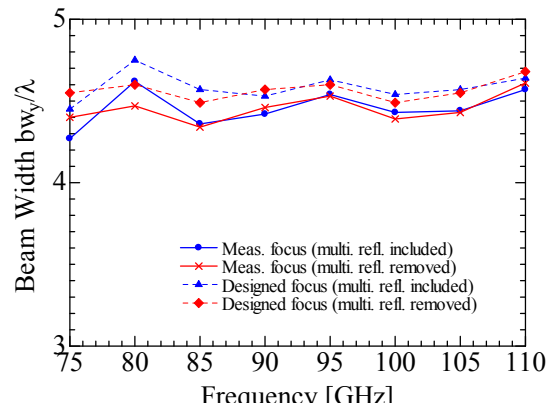
#### 4.4. 光軸と焦点位置での振幅・位相分布

4.2 節でも説明したとおり, 各  $z$  位置における  $xy$  面内の最大振幅位置の線形フィッティングを行い, 光軸の方向を推定した. 推定された光軸の測定平面からの  $x$  方向のチルト角を図 16 に示す.

多重反射除去前にはチルト角は  $0.4^\circ \sim 1.0^\circ$  まで変化しており, 周波数による変化が大きい. それに対し



(a)  $x$  方向のビーム幅



(b)  $y$  方向のビーム幅

図 15. ビーム幅の周波数特性

Fig. 15. Beam-width v.s. frequency.

て, 多重反射除去後は, チルト角は周波数によらずほぼ  $0.4^\circ$  であった. 実際の光軸方向に周波数依存性は少ないと考えられることから, 多重反射除去後のチルト角が正しい結果であると考えられ, 光軸の方向評価のためには多重反射波の除去が必須であることがわかった.

光軸の正確な評価が重要となる一例としてビームスポットにおける位相分布挙げられる.  $85$  GHz における焦点位置におけるビームスポット付近の位相分布を図 17(a)および(b)に示す. 図中の斜めの直線は, 光軸のチルト角から推定される平面波の等位相面 (光軸と垂直な方向) を表している. 多重反射除去前は, 測定された焦点距離における位相分布も設計された焦点距離における位相分布も同程度に湾曲しており, どちらの方が良好な位相フラットネス性を有しているかを判断することが難しい. それに対して, 多重反射除去後は, 光軸の方向を正しく推定できているため, 等位相面の推定結果も正しく, 測定された焦点距離における位相分布は  $10$  dB ビーム幅の中心付近では, ほぼ等位相面と平行であり, 設計された焦点距離における位相分布よりも, 位相フラットネスが良好であることが判断できる. 以上のことから, 位相フラットネスの評価に

は、光軸の正確な推定が必要であり、そのためには多重反射を除去した平面波近傍界測定が重要であることを示した。

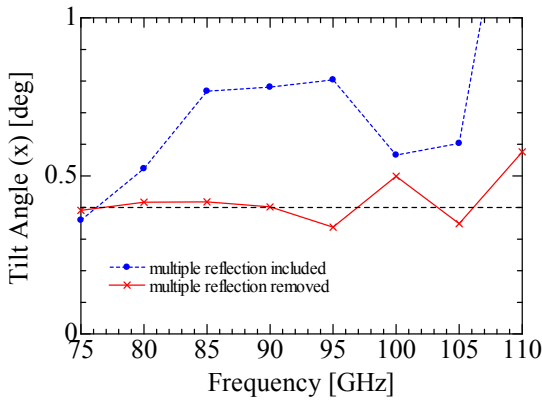
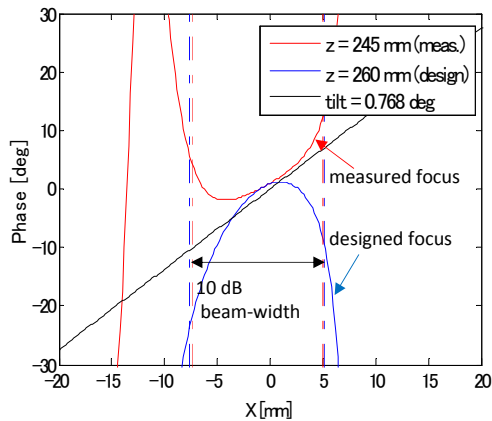
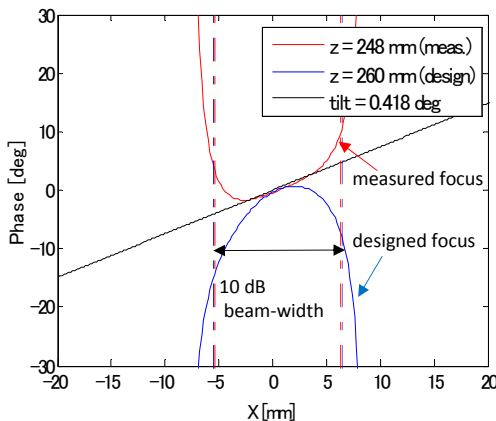


図 16. 光軸チルト角の周波数特性

Fig. 16. Tilt angle of optic axis v.s. frequency



(a) with multiple reflections



(b) without multiple reflections

図 17. ビームスポット付近での位相分布

Fig. 17. Phase distribution around focal point

## 5. まとめ

本報告では、フリースペース法誘電率測定装置に使用されるレンズアンテナの W バンド帯における性能評価を平面走査近傍界測定により実施した。はじめに、多重反射波の低減方法について解説し、多重反射低減後の電界強度分布の測定結果から、平面波スペクトルによって任意の z 位置における電界強度分布を推定し、焦点距離、焦点位置におけるビーム幅、光軸のチルト角を解析できることを示した。焦点距離の測定結果より、今回使用したレンズアンテナの焦点距離は設計値に比べて十数 mm 短いことを確認した。また、ビーム幅は x 方向にくらべて y 方向が広く、焦点位置でのビームスポットは楕円形状であることを示した。また、多重反射の除去によって、光軸のチルト角が正しく評価できることを示し、正確な光軸評価によって等位相面の推定ができ、焦点位置における位相フラットネスの善し悪しを判断することが可能になった。

今後は、これらレンズアンテナ特性の設計値からのズレが誘電率測定の結果に与える影響を解析し、測定値の不確かさ積算を検討する。またさらなる性能向上を目指したレンズ構成についても検討を行う予定である。

## 謝 辞

本研究は、産総研戦略予算「グラフェン系材料の電磁波対策分野への応用」により行われた。

## 文 献

- [1] G.L. Friedsam and E.M. Biebl, "A Broadband Free-Space Dielectric Properties Measurement System at Millimeter Wavelengths", IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol.46, no.2, april.1997.
- [2] 香西 将樹 ら他 3 名, "生体曝露実験用 60GHz ミリ波レンズアンテナによる集束ビームの解析", 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J93-B, pp.90-100, Jan.2010.
- [3] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [4] & Sons, New York, 2005. T.Ishibashi, F. Hiroshi, H. Ito, T. Furuta, "High power uni-traveling-carrier photodiodes," International Topical Meeting on Microwave Photonics 1999, pp.75-78, 1999.
- [5] H. Kikuchi, T. Kawanishi, M. Yamada, T. Sakamoto, M. Tsuchiya, J. Amagai, and M. Izutsu, "High Extinction Ratio Mach-Zehnder Modulator Applied to a Highly Stable Optical Signal Generator", IEEE Trans. on Micro. Theory and Tech., Vol.55, No.9, 2007, pp. 1964-1972, 2007.
- [6] Michitaka Ameya, et al., "Cylindrical near-field antenna measurement system using photonic mm-wave generation with UTC-PD", Proceedings of AMTA2013, A13-0070, Oct.2013.
- [7] 飴谷充隆他, "フォトミキシングミリ波生成技術を用いた円筒面近傍界遠方界変換によるミリ波帯アンテナパターン計測システムの開発", IEICE 第五回 PEM 研究会, Aug. 2013.