

ミリ波帯誘電率測定システムの開発

○坂井了、Alvaro Gonzalez、金子慶子、小嶋崇文、鵜澤佳徳（国立天文台）

概要(Abstract)

電波望遠鏡の受信機開発において、光学系の設計精度が受信機性能に大きな影響を及ぼす。誘電体レンズを用いた光学系の場合、設計帯域におけるレンズ材料の精確な誘電率が、レンズ形状や反射防止膜の設計において必要である。国立天文台では、受信機光学系の設計精度の向上を目的として、ミリ波帯における誘電率測定システムの開発を進めている。本稿では、開発した測定システムとそれを用いた評価例を紹介する。

1. 開発の背景

高感度な電波望遠鏡受信機の開発において、初段のサブシステムである光学系の高精度な設計が重要である。誘電体レンズを用いた光学系では、設計帯域のレンズ材料の精確な誘電特性を用いてレンズ形状・厚みや反射防止膜を設計することで、光学系で生じる損失を可能な限り低減する必要がある。例えば、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) 望遠鏡の Band 2 受信機（動作帯域 67-116 GHz）では誘電体レンズ材料の候補として超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)が挙げられている[1]。同じ UHMWPE でも分子量・密度や添加剤等により誘電率に違いが生じる可能性から、実測により使用する光学材料の誘電特性を調べる必要がある[2]。上述した理由から、我々は受信機光学系の設計精度向上を目的としてミリ波帯における誘電率の高精度な測定手法を開発している。

2. ミリ波帯における誘電率測定手法

ミリ波サブミリ波帯における誘電率測定手法は共振器法と透過・反射法の2つに大別される。透過・反射法は広帯域で連続的な測定が可能、伝送線路の形態によっては試料加工が比較的容易などの利点がある。しかしながら、UHMWPEのような低損失材料の測定においてはベクトルネットワークアナライザ(VNA)のポートマッチ特性の影響が大きく現れるため、誘電正接の高精度な測定が困難である。共振器法は高いQ値から低損失材料の測定に適している。一般的に共振器法は低損失材料を高確度に測定でき、様々な種類の共振器法が研究されている[3]。一方で、空洞共振器では試料を治具に応じた薄い、または小さい形状に高精度に加工する必要がある。測定手法によって測定条件や測定試験片に求められる形状・寸法誤差等が様々であり、一つの測定システムで全てをカバーすることは困難である。したがって、目的、用途や測定対象に応じて各測定手法の長短を考慮して使い分ける必要がある。本研究ではフリースペース法と共振器法の一つであるファブリペロー開放型共振器法(FPOR)の解析手法の開発を実施した。本稿ではフリースペース法について紹介する。最後に開発した測定システムの妥当性検証として、FPORと平衡型円板共振器法(BCDR)の測定結果との比較を示す。

3. フリースペース法測定システムの概要

図 1 に本測定システムの概略図を示す．本測定システムは VNA と光学系で構成される．ホーンアンテナを介して送信機より放射された電波は測定試料を透過（または反射）した後に受信される．ホーンアンテナから放射されたビームは対向する楕円面ミラーで 90 度の向きに反射され，試料位置に焦点面を持つ．また，試料への入射ビーム径は測定波長に対して十分に大きく設計されており，試料への入射波を平面波と近似できる．したがって，垂直入射の場合のフレネル係数と誘電体による光路長差の位相を用いて透過・反射特性を単純なモデル式で表せる．透過・反射特性モデル式に測定結果をフィッティングすることで誘電率を導出する．図 2 に開発したフリースペース法測定システムの写真を示す．測定周波数は 67-116 GHz である．測定項目は試料を設置しない場合 (Thru), 金属板を設置した場合(Short) と試料を設置した場合 (MUT) の 3 項目である．MUT の透過・反射特性の測定値を各々, Thru と Short で除することで測定データを得る．誘電率の導出に用いたアルゴリズムの詳細は[4]を参照されたい．

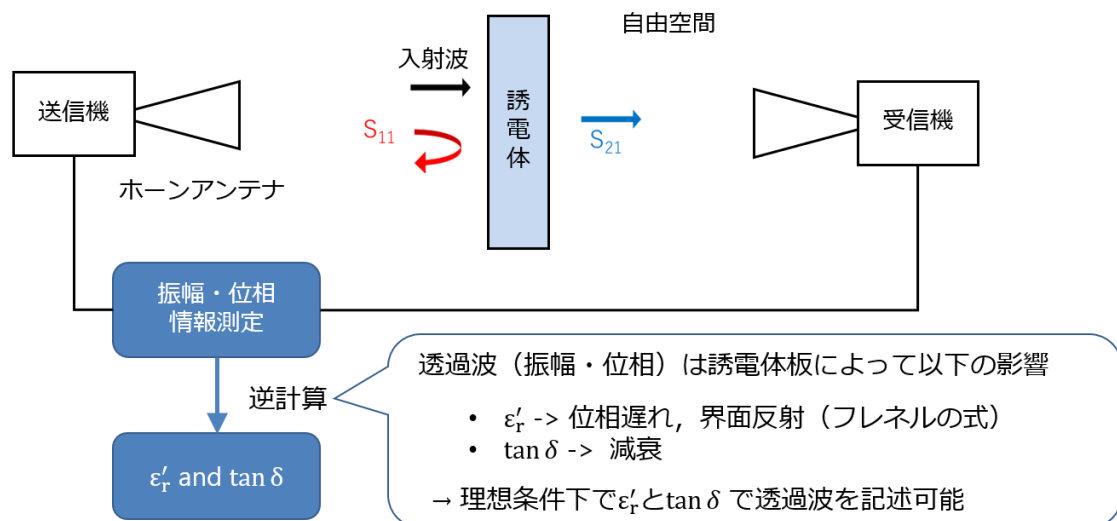


図 1. フリースペース法測定システムの概略図．簡単のため楕円面ミラーは省略してある．

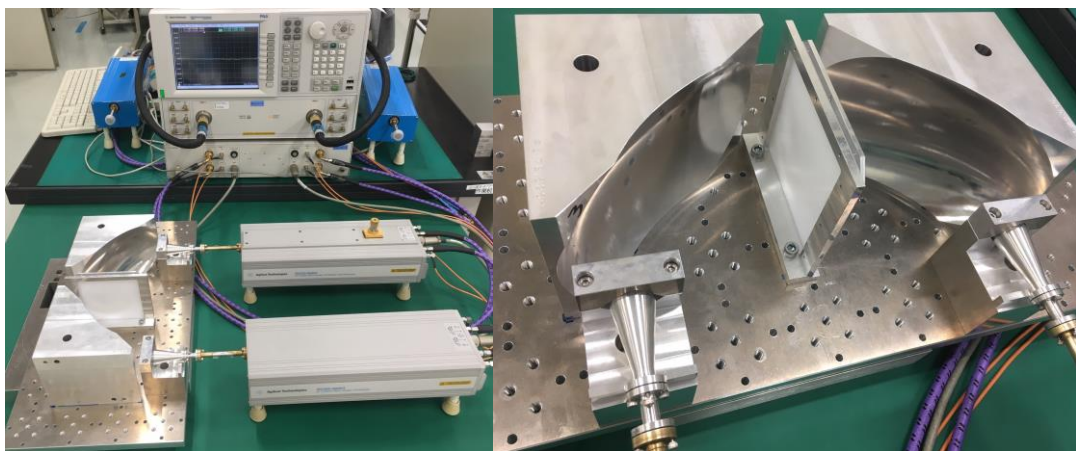


図 2. 開発したフリースペース法測定システムの全体（左）と光学系（右）の写真．

4. 測定例

測定対象は先述した UHMWPE である．測定試験片は 100mm 角，厚み 12mm の板材である．厚みはマイクロメーターで測定し，試験片周囲 8 点の平均値を誘電率の計算に用いた．図 3 にフリースペース法，FPOR と BCDR 法による測定結果を各々示す．誘電率は 91GHz における測定値で，フリースペース法が 2.307 ± 0.015 ，FPOR が 2.31，BCDR が 2.315 ± 0.012 であった．誘電正接はファブリペロー開放型共振器法が 1.1×10^{-4} (52 GHz)，BCDR が $1.6 \times 10^{-4} \pm 1.1 \times 10^{-4}$ (91 GHz) であった．各測定手法による測定結果は不確かさの範囲内で一致しており，開発した測定系の妥当性を実証した．

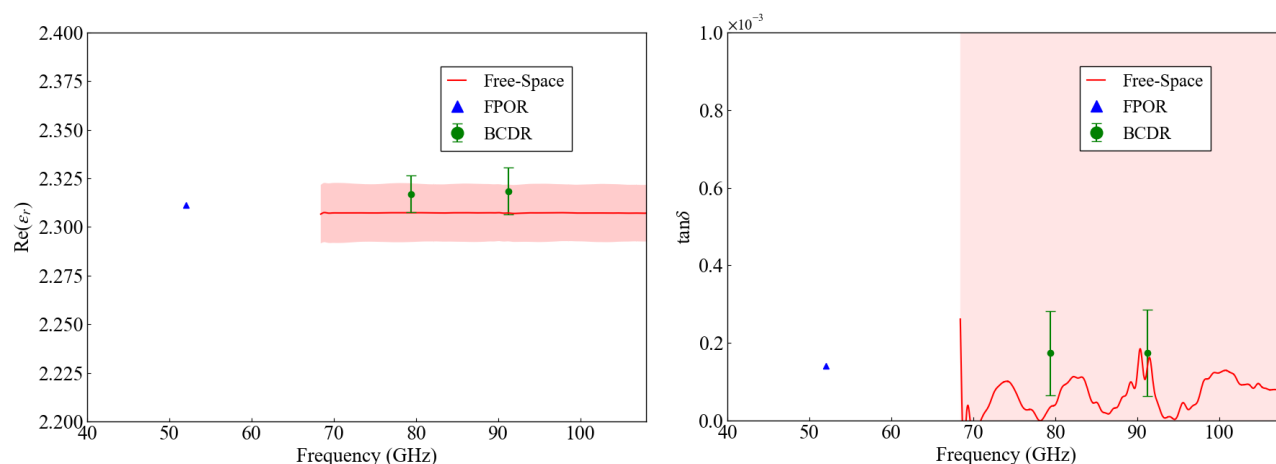


図 3. UHMWPE の誘電率（左）と誘電正接（右）の測定結果．赤線がフリースペース法，青と緑のプロットが各々，FPOR と BCDR による測定結果である．影部とエラーバーは拡張不確かさ($k=2$)を示す．

5. まとめ

本稿では，誘電率測定システムの概要と測定例について紹介した．3 つの測定手法により得られた測定結果は良好に一致しており，開発した測定システムの妥当性を実証した．ALMA Band2 では，本システムの測定結果を用いて設計性能を満たすレンズの開発に成功している．また国立天文台先端技術センターでは，本稿で述べた 67-116 GHz 帯に限らず，より高周波帯の測定システムの開発も実施している．本研究が今後の電波望遠鏡受信機，その他の応用先（無線通信やリモートセンシング等）の研究開発に貢献することを期待している．

参考文献

- [1] P. Yagoubov, et al., “Astrophysics Wideband 67 – 116 GHz receiver development for ALMA Band 2,” vol. 46, 2020.
- [2] C. Y. E. Tong, K. Carter, and J. Connors, “Quasi-optical characterization of low-loss polymers at 300 GHz for vacuum window applications,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 713–720, 2020, doi: 10.1109/TTHZ.2020.3021352.
- [3] Y. Kato and M. Horibe, “Broadband Permittivity Measurements up to 170-GHz Using Balanced-Type Circular-Disk Resonator Excited by 0.8-mm Coaxial Line,” *IEEE Trans.*

Instrum. Meas., vol. 68, no. 6, pp. 1796–1805, 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2886864.

- [4] J. Baker-Jarvis, E. J. Vanzura, and W. A. Kissick, “Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 8, pp. 1096–1103, 1990, doi: 10.1109/22.57336.