自由空間法におけるサンプルサイズの影響について

小　山　洋　太*1
鴨　井　　督*1
坪　井　瑞　輝*2
水　上　莉　沙*3

［要　　旨］

本研究ではミリ波帯の材料評価で用いている自由空間法において、その試料面のビームサイズの影響について調査を実施し、測定に必要な最小サンプルサイズ及び斜入射測定における最大角度を示した。また、誘電率測定のおける最小サンプルサイズについても調査した。

１　はじめに

現在、電磁波を用いた無線技術は非常に重要なものとなっており、昨今では車載のミリ波レーダや 5G 移動体通信など、多くの技術的進展及び実装がなされている。

このような状況のところ、当センターではフリースペース法を導入し、ミリ波帯における材料の遮蔽、反射性能などのミリ波性能評価の他、誘電率及び透磁率の物性値評価を実施しており、これまでに各種調査研究を実施してきた[1-4]。しかしながら、対象とするサンプルのサイズを十分に大きいもので準備することが難しい場合などがある一方で、どの程度のサンプルまでが測定として許されるかについては不明瞭な点がある。また、吸収性能評価において重要となる斜入射特性評価において、どの程度まで入射角が許容されるかについても判じ切れていない。

そこで本研究では、当センターが保有するフリースペース法装置において、そのサンプルサイズの影響や許容される入射角度の検討を実施した。

＊１　応用技術課　主任研究員
＊２　応用技術課　副主査
＊３　応用技術課　技師

２　当センター設備

当センターで保有しているフリースペース法装置を図１に示す。こちらは Keycom 社の DPS10-MD01 であり、当センターでは以下５つの帯域に分けて測定を実施している。

- K バンド（WR-42）：　18GHz～26.5GHz
- Ka バンド（WR-28）：　26.5GHz～40GHz
- U バンド（WR-19）：　40GHz～60GHz
- E バンド（WR-12）：　60GHz～90GHz
- W バンド（WR-10）：　75GHz～110GHz

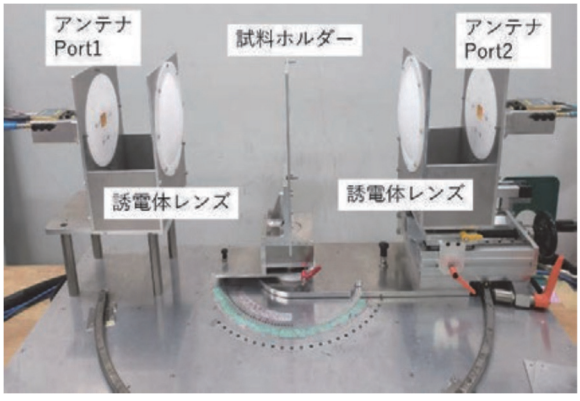

図１　フリースペース法装置

なお、フリースペース法においては、平行法（電波をコリメートな状態にして試料に照射する方法）と集束法（電波を絞り、焦点位置にて試料に照射する方法）があるが、当センター保有の装置は平行法となっている。[5]

３　ミリ波性能評価について

３．１　測定内容

まず初めに、ミリ波性能評価におけるサンプルサイズの影響を調べるべく、図２のようなマスクを作成した。マスクは 0.08㎜ の銅箔を 0.5㎜ の厚紙に張り付けたものであり、直径 10㎝ から 1㎝ ごとに縮小した円形開口を設けた 10 枚のマスクである。これらを図３のように設置した際に、透過電波がどのようになるかを各バンドで計測した。

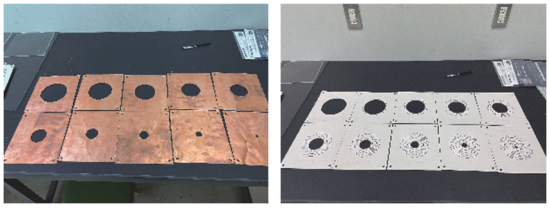

図２　作成マスク（左:表面、右：裏面）

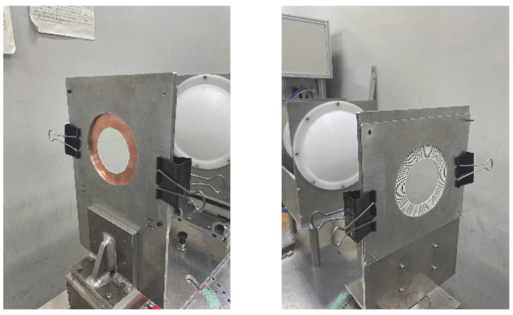

図３　設置状況（左:Port1 側、右：Port2 側）

３．２　測定結果

図４に測定結果を示す。縦軸は透過性能（単位：dB）であり、低いほど透過できていないことを示し、0dB で完全透過を示す。横軸は周波数であり、各帯域の範囲を両矢印で示す。各帯域では高周波側になるにつれて透過性能の上昇が見られた。これは周波数が高くになるにつれ、アンテナから発出されるビームが絞られたためと推察される。

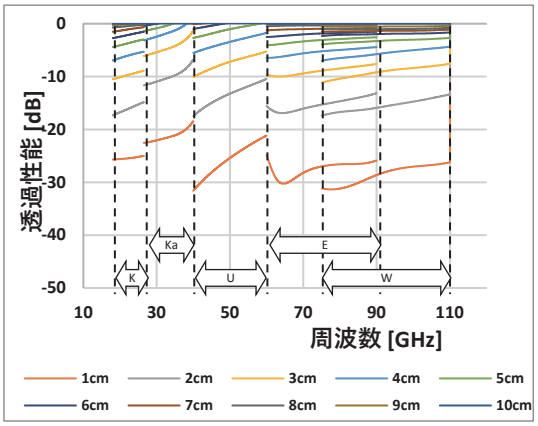

図４　各帯域・マスクごとの透過性能

また、どの帯域も、1㎝ のマスクでも少なくとも -30dB 程度の透過は認められる。なお、当センター装置では、完全に遮蔽された際はおよそ-60～70dB の値となる。

図４のデータから、電波において１つの指針となる「-3dB（電力比で 1/2 倍）」を基準とし、その電波が透過できる最小開口径を求めた結果が図５である。

ここで縦軸が-3dB 強度の電波が透過できる最小開口径であり、横軸は周波数である。この結果より、-3dB の透過を１つの条件とすると、どの周波数帯域でも測定が許される最小の試料サイズとして、6㎝ 直径であることが分かった。

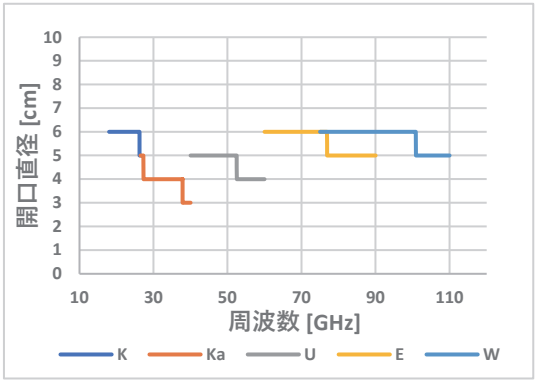

図５　-3dB 電波を通すために必要な最小開口直径

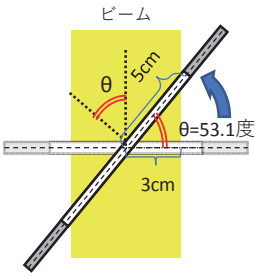

図６　斜入射測定の角度限界

３．３　斜入射測定に対する考察

以上より、測定において許容される最小のサンプルサイズとしは、6cm（半径 3cm）であると示され、これはアンテナから到来する電波のビーム幅に対応する。このことから以下のように斜入射測定における角度を考察した。

当センターで現在運用している試料を固定するための穴あき板（図３右図にて、作製マスクを押さえている金属板）は 10cm（半径 5cm）である。試料がこの開口を覆うとした際に、サンプルホルダに角度をつけていくと、試料が電波方向に対して斜めになり、ビームに対する見込みの幅が小さくなる。これを斜入射の限界として考える。即ち、図６のような状況を考えると、これは斜辺が 5cm、底辺が 3cm（残りの辺は即ち 4cm）の直角三角形を考えることになる。この三角形の 5cm と 3cm の辺のなす角は 53.1 度となる。これが斜入射の限界となり、結果、入射角 50 度強（アンテナのなす角が 110 度弱）が斜入射測定の限界と考えられる。

４　物性値評価について

次に誘電率などの物性値測定におけるサンプルサイズの検討を行うため、当センターで保有する PVC（ポリ塩化ビニル）の板に対して、「３　ミリ波性能評価」で使用したマスクを用いて比誘電率評価を実施した。

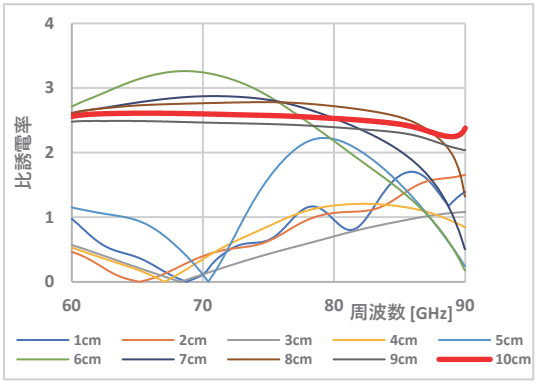

図７　斜入射測定の角度限界

結果を図７に示す。縦軸は誘電率であり、横軸が周波数である。ここでは E バンド（60GHz～90GHz）にて測定を実施した。また、基本となる 10cm（マスクがない時と同義）の赤色太線で示している。

この結果より、6cm までは 10cm の結果と似たような振る舞いをしているが、5cm にて異なる振る舞いが認められる。この理由を確認するために、元となるＳパラメータの状況を確認した。結果を図８に示す。

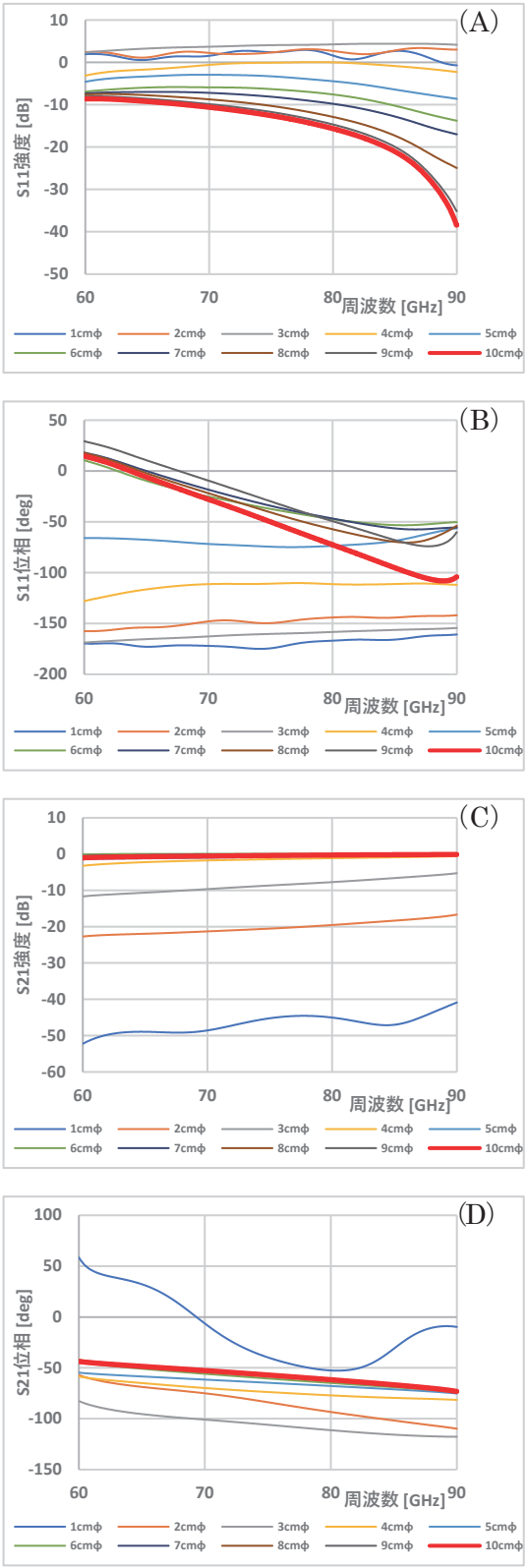

図８　Ｓパラメータの状況
（S_{11}の強度（A）と位相(B)、
及びS_{21}の強度（C）と位相(D)）

図８の横軸は周波数、縦軸がS_{11}の強度（A）と位相(B)、及びS_{21}の強度（C）と位相(D)であり、このうち強度については、マスクサイズに対して連続的に変化していることが認められる。他方、位相については、S_{11}において、周波数依存性（分散）が、5cm以下のマスクでは認められなくなっている。これが比誘電率の結果が5cm付近で破綻した原因と推察される。

このことから、物性値評価においても6cm程度のサンプルサイズが必要なことが示唆された。

５　まとめ

本研究では、当センター保有のフリースペース法（平行法）におけるサンプルサイズについて検討を行った。まずミリ波性能評価においては、-3dBの透過を保証するサイズとして、6cm直径は必要であることが確認できた。また、その結果より斜入射の最大角を考察した結果、現在のセットアップでは、入射角50度が最大であると示唆された。一方、物性値評価においても6cmとの結果が示されたが、これは反射シグナルであるS_{11}の分散が見えなくなってしまうことに起因すると考えられる。

（参考文献）

1）坪井瑞輝，他：京都府中小企業技術センター技報，No.49, p32（2021）
2）坪井瑞輝，他：京都府中小企業技術センター技報，No.50, p28（2022）
3）坪井瑞輝，他：京都府中小企業技術センター技報，No.51, p24（2023）
4）小山洋太，他：京都府中小企業技術センター技報，No.52, p9（2024）
5）JIS R 1679:2007「電波吸収体のミリ波帯における電波吸収特性測定方法」