

## 鏡像法を用いたランダム粒子によるミリ波後方強調散乱の測定

井原 俊夫, 小口 知宏, 田崎 民生, 高橋 伸和, 加藤 大輔, 岩瀬 真志  
( 関東学院大学 )

### 1. はじめに

次世代衛星搭載用降雨レーダとして、その観測機能の高度化や降雨観測精度の向上のため、マイクロ波帯とミリ波帯の 2 波を用いる 2 周波数レーダの利用可能性が検討されつつある[1]。しかし、ミリ波帯においては、雨滴による多重散乱が有意になり [2]、特に、送受信アンテナを共用するモノスタティックなレーダでは後方強調散乱の影響を受ける可能性がある [3,4]。このことは、ミリ波レーダ用いる降雨測定においては、後方強調散乱がその測定精度に影響を及ぼす可能性のあることを意味している。従って、ミリ波帯における降雨による後方強調散乱特性についての定量的理解が必要とされている。従来、主として光波帯においては、理論、実験の両面からランダム粒子や不規則表面による後方強調散乱の研究が行われてきているが[5,6]、ミリ波帯におけるランダム粒子による後方強調散乱の研究は殆ど見当たらないようである。このような背景から、筆者等は、この特性を明らかにするため、理論[7]、及び実験の両面から研究を進めつつある。

本稿は、鏡像法を用いて実施したランダム粒子による 30GHz 帯の後方散乱特性の測定の概要と、得られた散乱実験データの初期的解析結果について報告するものである。

### 2. 鏡像法を用いた実験系の構成

実験系を構成するにあたり、後方強調散乱が生じるであろう散乱角  $0^\circ$  近傍の測定が可能と考えられる鏡像法を用いることとした。ここで、散乱角は散乱体への入射波の方向と散乱波の観測方向がなす角であり、完全な後方散乱の方向は散乱角  $0^\circ$  に対応する。鏡像法の基本的なアイデアは、実験系の送信アンテナと受信アンテナをミリ波帯のハーフミラーに対して互いに鏡像の位置関係に置くことである。

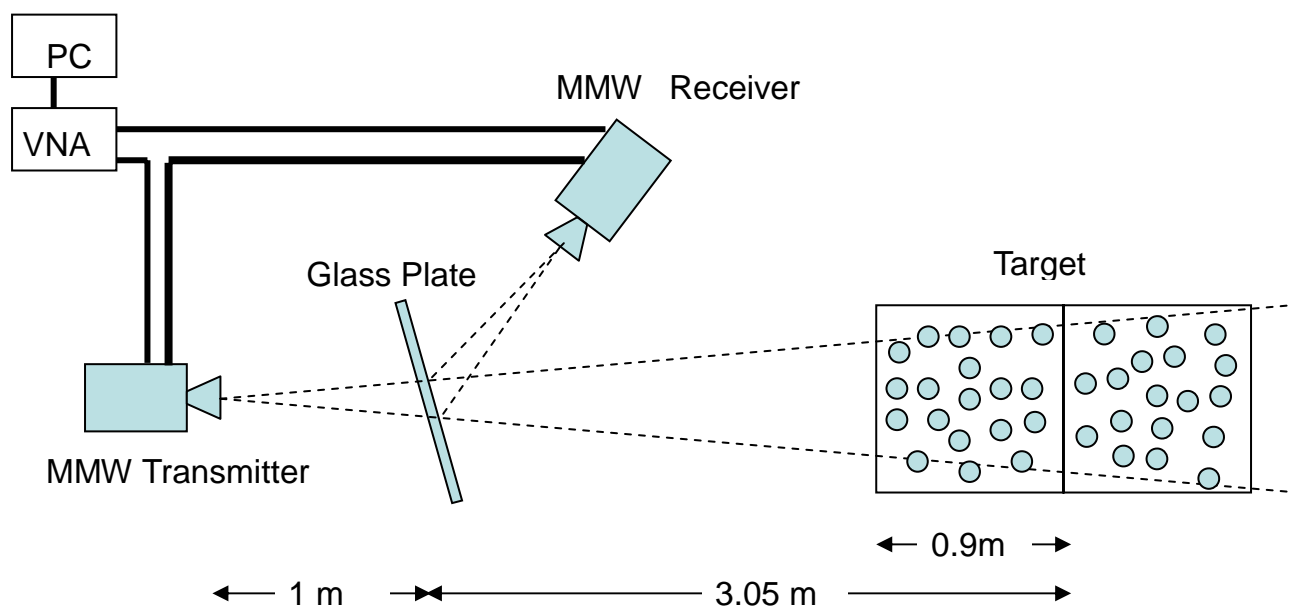


図 1 鏡像法を用いた散乱実験系の較正

本実験では、ハーフミラーとしてソーダライムガラスを用いた。実験系の配置を図 1 に示す。実験系はマイクロ波帯のベクトルネットワークアナライザ (VNA)、ミリ波帯の送信機、ミリ波帯の受信機、データ収集用のパーソナルコンピュータ、回転架台上に設置したガラス板で構成されている。VNA は 5GHz から 6GHz の周波数帯でステップ状に周波数を変えながら送信 IF 信号を発生する。ミリ波帯送信機は、IF 信号と 34.5GHz 帯の局発信号を混合し、28.5GHz から 29.5GHz の周波数帯の送信 RF 信号を発生し、ビーム幅 10° のアンテナから送信する。送信偏波は、水平、垂直を切り替え可能である。

ガラス板は厚さが 2.79mm、幅が 1000mm、高さが 914mm である。送信アンテナから放射された波は、ガラス板を透過した後、ランダムに分布した球状粒子からなる散乱体を照射する。球状粒子により後方へ散乱された波はガラス板で反射された後、受信アンテナに到達する。この受信信号は、送信機からミリ波帯誘電体線路を介して供給された 34.5GHz 帯の局発信号と混合され 5GHz から 6GHz 帯の IF 信号に変換される。局発信号は送信、受信に共通であるので、受信 IF 信号は送信 IF 信号とコヒーレントであり、VNA によって送信 IF 信号を基準にして受信 IF 信号の複素振幅が測定される。受信アンテナのビーム幅は 10° で、受信偏波は水平と垂直を切り替え可能である。

### 3. ガラス板の影響

以上述べた実験系は、散乱角 0° ででの測定を可能とする長所を有する。しかし、ハーフミラーの使用は、散乱測定において送信時の透過損、受信時の反射損による付加的損失を生じる。この損失は、入射角、偏波、電波の周波数、ガラスの複素屈折率などに依存する。従って、その影響を予め評価しておくことが、完全後方散乱方向に該当する入射角などの実験配置に関するパラメータを適切に決めるために必要である。また、ガラス板による付加損失は、後に、散乱実験データの解析を行う際に補正する必要がある。

図 2 に、実験に用いたガラス板の、0° から 89° の入射角に対する 29GHz の付加損失の計算例を示す。計算には以下に示す、平行平板誘電体の反射係数  $R$ 、透過係数  $T$  の理論式を用いた。

$$R = \frac{1 - \exp(-j2\delta)}{1 - R'^2 \exp(-j2\delta)} R'$$

$$T = \frac{(1 - R'^2) \exp(-j(\delta - k_0 d \cos \theta))}{1 - R'^2 \exp(-j2\delta)} \quad (1)$$

ただし、 $d$  はガラスの厚さ、 $\delta = (2\pi d / \lambda) \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$ 、 $n$  はガラスの複素屈折率、 $k_0 = 2\pi / \lambda$ 、 $\lambda$  は自由空間における電波の波長、 $\theta$  は入射角、 $R'$  は複素屈折率  $n$  の半無限媒質のフレネルの反射係数である。

計算においては、本実験に用いたガラス板について別途透過法で測定した複素屈折率 [8]、 $2.60 - j0.035$  を用いた。図 2 で VV、VH は送受信偏波の組み合わせを示す。この計算結果を考慮して、完全後方散乱に対応したガラス板への入射角を 25° に設定することとした。この決定においては、2つの相反する要素を考慮した。一つは、散乱実験で測定を行う予定の  $\pm 3^\circ$  の散乱角の範囲におけるガラス板の付加損失の大きさと角度変動の幅である。もう一つの要素は、送受信アンテナのサイドローブ結合の影響である。前者の影響は、入射角が小さいほど小さくなるのに対して、後者の影響は入射角が小さくなるほど大きくなる。実験に用いることとした入射角 25° の選択は、これらの要素を考慮した現実的な妥協の結果である。

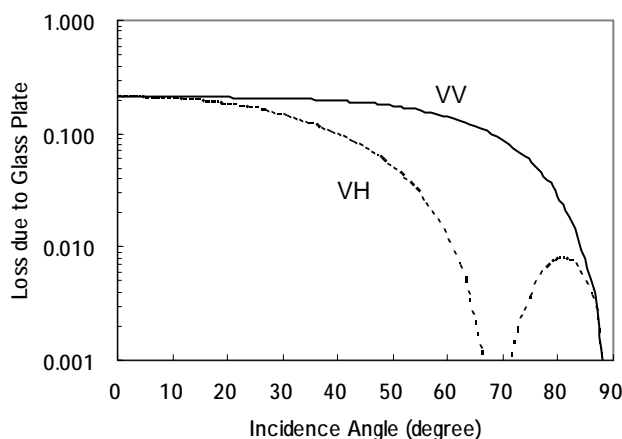


図 2 ガラス板の付加損失

## 4. ランダム粒子による散乱特性の測定

散乱体積内に不規則に分布した球状粒子による散乱波の複素振幅の測定を、図 1 に示した実験系で、 $-3^\circ$  から  $+3^\circ$  の散乱角の範囲で 28.5GHz から 29.5GHz の周波数帯で行った。測定を行った送受信偏波は VV と VH である。散乱角はガラス板の鉛直軸の周りの回転角と、受信アンテナの方位角を調整することにより変化させた。その際、送信アンテナビームと受信アンテナビームの中心が散乱体積の中心を常に指向するように調整した。

球状粒子は直径 25mm で厚さ 0.2mm のポリスチレン製球殻内に蒸留水を満たしたものである。球状粒子を角型のポリスチレンフォーム板の中にランダムに埋め込み、そのポリスチレンフォーム板を積み上げて、一辺 0.9m の立方体ブロックを作成した。最終的には、異なった粒子分布を有する同サイズの 2 つの立方体ブロックを作成し、これを送信波の進行方向に沿って並べて散乱体積として用いた。1 個の立方体ブロックには、868 個の球状粒子が埋め込まれているので、全体として散乱体は 1736 個の球状粒子を含んでいる。散乱測定では、2 つの立方体ブロックの角度を鉛直軸を中心に  $90^\circ$  刻みで回転させ、各測定散乱角に対して独立とみなせる散乱体積サンプルを  $4 \times 4 (=16)$  通り得た。

## 5. 実験データの解析

### 5.1 タイムドメイン解析

本散乱実験で得られる一次的データは、各散乱角ごと、各散乱体積サンプルごとに 28.5GHz から 29.5GHz の 1GHz の帯域幅にわたって測定された受信波の複素振幅データである。この周波数ドメインの測定データを、まず、離散逆フーリエ変換により、タイムドメインのデータに変換した。その例を図 3 に示す。散乱体積からの散乱波信号は遅延時間軸上で大よそ 26ns から 43ns の範囲に観測されている。このタイムドメインデータに対して、散乱波信号の位置している時間間隔の矩形窓を施し、不要波を抑圧した後、離散フーリエ変換を行い、散乱体積からの散乱波のみの情報を有する周波数ドメインデータを求めた。同様の処理を全ての実験データに対して行った。

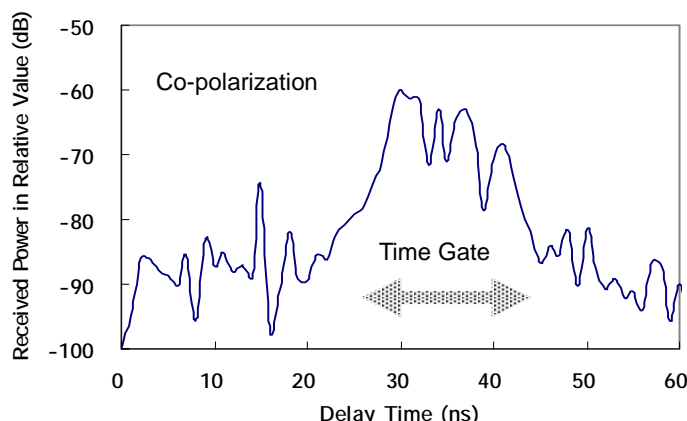


図 3 散乱実験データのタイムドメイン解析例

### 5.2 金属球による較正

散乱実験は時間を要する作業であり、本稿で報告する実験データを得るのに数日を要した。本実験系の電気的特性は周囲温度の変動に対して完全には安定化されていないため、数日にわたる測定期間中に、緩やかな時間変化を示した。実験期間中におけるこの変化を定量的にトレースするため、直径 12cm の金属導体球を用いた較正実験を適宜挿入した。較正実験は、散乱体積ブロックを測定空間から取り除いた後、その散乱体積の中心位置に金属球を置くことにより行った。実験系の電気的特性の緩やかな変動は、上述の金属球による較正データを用いることにより補正することとした。較正に用いた金属球のレーダ断面積は Mie 散乱理論による計算によると、28.5GHz から 29.5GHz の周波数帯で  $-19.47\text{dBm}^2 \pm 0.06\text{dB}$  であり、平均値である  $-19.47\text{dBm}^2$  をデータ解析に用いた。

### 5.3 ガラス板の損失の補正

前述したように、ガラス板は散乱実験において付加損失を生じ、その大きさは入射角、偏波などに依存して変化する。しかし、付加損失の大きさは(1)式により理論的に計算できるので補正可能である。本実験の散乱実験データ解析においては、この補正を行った。なお、送受信アンテナは有限のビーム幅  $10^\circ$  を持っているが、ビームの広がりの影響を無視して、ビーム中心方向に対して計算された付加損失を補正することとした。

### 5.4 独立な散乱体積サンプル及び周波数ドメインでの平均化

前述のように、本実験では 16 個の独立な散乱体積サンプルに対して散乱測定を行った。第 5.1-5.3 節で述べた方法で前処理した 16 個の独立な散乱体積サンプルに対する周波数ドメインデータを、各散乱角ごとにグループ化し、散乱角ごとに独立サンプル平均を行った。しかし、独立な散乱体積サンプル数がかならずしも十分大きくないため、ランダム粒子による散乱電力の統計的変動によるスペックルが十分に低減するに至らなかった。この様子を図 4 に示す。実線は、散乱角  $0^\circ$  の場合、破線は散乱角  $-3^\circ$  の場合である。独立な散乱体積サンプルに関する平均化のみでは、スペックルの抑圧が必ずしも十分ではないため、さらに周波数軸上での平均化を行い、スペックルの影響をさらに低減することとした。周波数軸上での平均化においては、離散フーリエ変換を用いたデータ前処理段階で生じていると考えられる周波数帯域の両端付近における信号処理上のエッジ効果を避けるため、両端付近それぞれ  $0.1\text{GHz}$  のデータを捨て、 $28.6\text{GHz}$  から  $29.4\text{GHz}$  の周波数帯のデータのみを用いた。

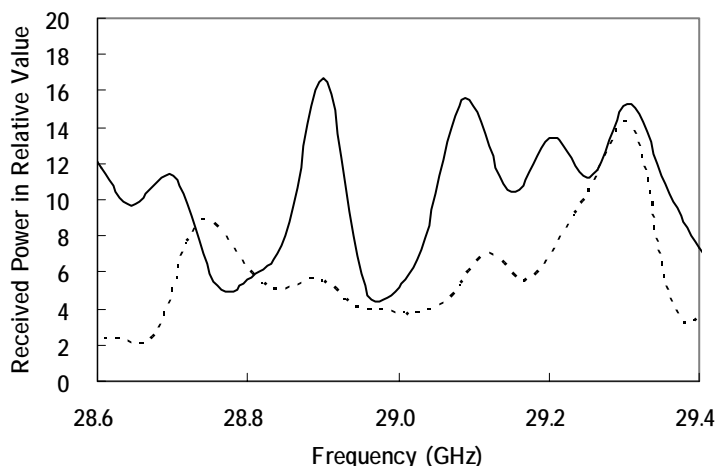


図 4 16 独立サンプル平均された周波数ドメインデータの例  
実線：散乱角  $0^\circ$ 、破線：散乱角  $-3^\circ$ 。

### 5.5 散乱波電力の散乱角特性

VV 偏波（同一偏波）、VH 偏波（交差偏波）に対する散乱波電力の散乱角依存性を、それぞれ図 5、図 6 に示す。散乱角が  $\pm 1^\circ$  以内は  $0.2^\circ$  刻みで、さらに散乱角が  $\pm 3^\circ$  までは  $0.5^\circ$  刻みで測定した結果である。縦軸の値は、散乱体積の中心に置いた較正用金属球による VV 偏波の散乱波電力に対する比として示してある。

同一偏波、交差偏波のいずれの場合にも、散乱角  $0^\circ$  近傍に後方強調散乱の影響と考えられる明瞭なピークが認められる。同一偏波の場合には、ピークは散乱角  $\pm 1^\circ$  の範囲をわずかに超える広がりを持っている。一方、交差偏波のピークは、散乱角が  $\pm 1^\circ$  の範囲に収まっている。同一偏波の散乱電力の大きさは交差偏波と比べて大よそ一桁程度大きい。このことは、今回の実験におけるランダム粒子による後方への多重散乱波の電力が、主として同一偏波成分に現れていることを示唆している。ピーク値はオフピーク値の 2 倍近くの値になっているのは、同一偏波、交差偏波に共通である。両方の偏波に対して、ピークの形状が散乱角  $0^\circ$  に対して若干非対称になっていること、またピーク中心が  $0^\circ$  から若干偏移していることが認められる。この原因の一つとしては、測定に用いた独立な散乱体積サンプル数が不十分であったことなどが考えられるが、その点を明確にするには、今後さらに検討が必要であろう。

同一偏波の場合について見てみると、散乱角  $0^\circ$  に対して単一散乱モデルに基づく通常のレーダ方程式で見積もった散乱体積からの散乱電力は、校正実験に用いた金属球による散乱電力の約 3.8 倍である。同一偏波に対する散乱体積からの散乱波電力は、オフピークの散乱角で金属球による散乱電力の約 6 倍になっており、従って、通常のレーダ方程式による見積り約 1.6 倍になっている。

## 6. まとめ

不規則に分布した球状粒子の散乱特性を、鏡像法を用いて 28.5GHz から 29.5GHz の周波数帯で  $0^\circ$  近傍の散乱角で測定した。測定データを解析し、同一偏波 (V) と交差偏波 (VH) の場合について散乱波電力の散乱角依存性として示した。両偏波ともに、散乱波電力の明瞭なピークが散乱角  $0^\circ$  近傍に認められた。同一偏波のピークは散乱角  $\pm 1^\circ$  の範囲をわずかに超える程度の幅を持っているのに対して、交差偏波のピークは散乱角  $\pm 1^\circ$  の範囲に収まっている。両偏波ともに、ピーク値はオフピーク値の 2 倍近くの値である。同一偏波に対する散乱波電力は交差偏波の場合に比べて大よそ 10 倍程度である。これらは、ミリ波帯においてランダム粒子による後方強調散乱について実験的に得られた最初の定量的結果と考えられる。これらの実験結果は、降水粒子のようなランダム粒子によるミリ波帯後方強調散乱特性の理論的モデル化のための基礎的データとして有用と考えられる。

## 参考文献

- [1] [http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/gpm/index\\_j.htm](http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/gpm/index_j.htm)
- [2] T. Tazaki, H. Tabuchi, K. Ikeda, T. Oguchi, S. Ito, "Laboratory measurements of polarimetric radar signatures of randomly distributed spherical and spheroidal scatterers at 30 GHz", *IEE Proc. Microw. Antennas Propagat.*, vol.147, pp.8-12, 2000.
- [3] Yu. N. Barabanenkov, Yu. A. Kravtsov, V. D. Ozrin, A. I. Saichev, "Enhanced backscattering: The universal wave phenomena", *Proc. IEEE*, vol.79, pp.1367-1370 Oct. 1991.
- [4] A. Ishimaru, "Backscattering enhancement: From radar cross sections to electron and light localizations to rough surface scattering", *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol.33, pp.7-11, Oct. 1991.
- [5] M. I. Mishchenko, "Enhanced backscattering of polarized light from discrete random media: calculations in exactly the backscattering direction", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol.9, pp.978-982, June 1992.

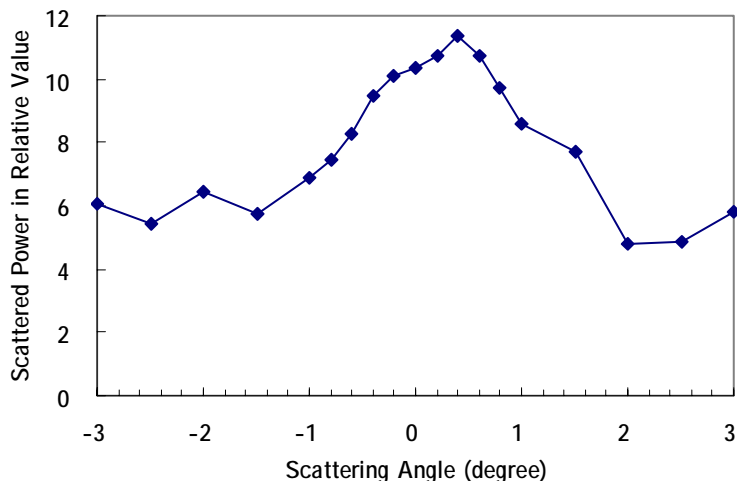


図 5 散乱波電力の散乱角依存性 (同一偏波)

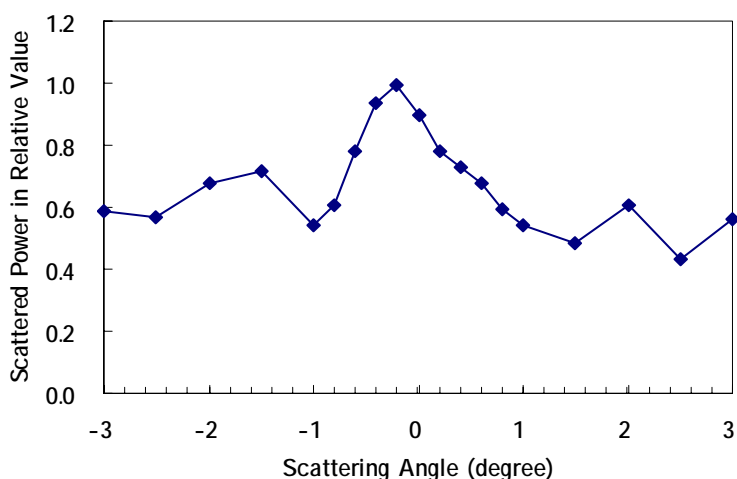


図 6 散乱波電力の散乱角依存性 (交差偏波)

- [6] Y. Kuga, L. Tsang, A. Ishimaru, “Depolarization effects of the enhanced retroreflectance from a dense distribution of spherical particles”, *JOSA Communications*, vol.2, pp.616-618, 1985.
- [7] 小口知宏、井原俊夫、“模擬降水粒子によるミリ波後方強調散乱の計算機シミュレーション”、第 480 回電波研連 F 分科会、2003 年 12 月 .
- [8] T. Ihara, M. Iwase, D. Kato, N. Takahashi, T. Oguchi, and T. Tazaki, “Measurement of Complex Refractive Index of Soda-Lime Glass at 30-GHz by Transmission Method”, *Tech. Digest TSMMW2004*, Yokosuka, Japan, pp.122-125, Feb. 2004.