

称号及び氏名 博士（工学） 田川 哲也

学位授与の日付 2006年9月30日

論文名 「人工衛星搭載降雨レーダによる降雨観測に及ぼす地表面クラッタの影響に関する研究」

論文審査委員 主査 岡本 謙一  
副査 大久保 博志  
副査 真鍋 武嗣

## 論文要旨

1997年11月に打ち上げられた TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, 熱帯降雨観測衛星) は現在に至るまで順調に動作し、多くの降雨データを収集している。TRMM 衛星は日本で研究開発された世界初の降雨レーダを搭載し、同衛星搭載の他の観測センサと共に多くの研究成果を挙げている。TRMM 衛星搭載降雨レーダの成功により、それを発展させる GPM (Global Precipitation Measurement, 全球降水観測計画) 衛星が 2010 年 12 月頃の打ち上げを目指した日米共同プロジェクトとして計画されている。GPM 主衛星には 13.6 GHz と 35.5 GHz の二周波を用いる二周波降水レーダ (Dual-frequency Precipitation Radar, DPR) が搭載される。DPR によって TRMM の 13.8 GHz の一周波降雨レーダ (Precipitation Radar, PR) のみによる観測では難しかった、固体の降水 (雪、雹など) と降雨の識別、雨滴粒径分布の推定に伴う降雨強度推定の高精度化、および降雨強度 0.3 mm/h 以下の弱い降雨からのエコーを観測することが可能になるものと考えられている。

衛星搭載降水レーダによる降雨観測における問題の一つは、レーダが地球表面に降る降雨を観測するとき、地球表面を背景に降雨を観測するため、地表面クラッタと呼ばれる地表面からの強いエコーと雨からのエコーを同時に受信することが生じる点である。

TRMM/PR の開発では、同レーダのアンテナ設計値に基づくアンテナパターンを計算し、アンテナメインローブ並びにサイドローブによる地表面クラッタの干渉が降雨観測において問題となることが示された。

アンテナサイドローブが地表面の規格化後方散乱断面積(以下散乱係数  $\sigma^0$  と呼ぶ)の大きい衛星直下方向を照射するとき、強いサイドローブクラッタが発生し、メインローブが観測する降雨エコーに混入する。また、地表面近傍ではアンテナメインローブを通して降雨エコーに混入するメインローブクラッタが発生する。TRMM/PRではアンテナサイドローブレベルを-35 dBに設計することで、サイドローブクラッタの干渉をできる限り抑えているが、弱い雨を観測している場合にはサイドローブクラッタが無視できない影響として現実に観測されている。GPMに新たに搭載される35.5 GHzレーダは降雨強度 0.3 mm/h以下の弱い雨や降雪のような弱い降水エコーを観測することを目標としており、地表面クラッタの影響を低減することで高感度に降水エコーを検出することが求められている。

本研究は降水観測に及ぼす地表面クラッタの影響を評価し、その低減方法を検討すること、ならびにクラッタの影響評価に必要な地表面の散乱係数  $\sigma^0$  を測定することを目的としている。

本論文は全7章より構成され、以下に各章の概要を述べる。

**第1章**では、衛星搭載降水レーダによる降雨観測における地表面クラッタの影響について本研究の位置づけを明確にし、次いで本論文の目的と概要について述べた。

**第2章**では、GPM主衛星搭載35.5 GHz降水レーダを対象として、地表面クラッタの低減方法の検討を行った。本研究のクラッタ低減方法はアンテナビームを衛星進行方向に数度傾ける事によりサイドローブクラッタ(アンテナサイドローブからの地表面クラッタ)の低減化をはかるというものである。これはアンテナビームを衛星進行方向と衛星直下方向を含む面内で傾ける事によって、アンテナのサイドローブレベルの高い角度域が衛星直下方向を指向せず、衛星直下方向からの強い地表面エコーを抑制す

るという考え方である。実際に GPM 主衛星搭載降水レーダで新たに使用される 35.5 GHz レーダによる降雨観測を想定し、同レーダで予定されている導波管スロットフェーズドアレイアンテナのアンテナパターンと、降水モデルおよび地表面散乱モデルを元に定量的な検討を行った。この検討において、アンテナビームの傾き角をパラメータとし、サイドローブクラッタの低減化とメインローブクラッタ(アンテナメインローブからの地表面クラッタ)の影響のトレードオフを行い、ビーム傾き角を最適化した。

その結果、ビームを衛星直下方向から 2 度傾けることにより、効果的に地表面からのサイドローブクラッタを低減できることがわかった。これはアンテナサイドローブの高い領域が斜め方向を指向することで、地表面の散乱係数  $\sigma^0$  の値が大きい角度域にあたる衛星直下方向からの地表面エコーを強く抑制できるためである。また、同時に、アンテナメインローブが地表面の散乱係数  $\sigma^0$  の値の比較的小さい角度域を照射するため、メインローブからの地表面エコーを小さく押さえることが可能という計算結果が得られている。

第 3 章では、TRMM 衛星が軌道高度を変更した際に衛星姿勢が傾き、レーダのアンテナビームが衛星直下点より傾いたときの降雨レーダによる観測データを解析することで、第 2 章で検討したクラッタ低減方法の妥当性を示す。TRMM 衛星の軌道高度の変更は、衛星運用期間の延長を目的として、2001 年 8 月に実施され、衛星の軌道高度を 350km から 402.5km にまで上昇させるというものであった。このとき、衛星の姿勢は通常の状態(roll= 0 度, pitch= 0 度, yaw= 0 または 180 度)から様々な状態に変化した。本章では軌道変更時に人為的にアンテナビームが衛星直下点からずれた方向を指向したことを利用して、TRMM 衛星搭載降水レーダにより観測された受信電力値のデータを用いて、アンテナビーム傾き角の効果を実証する。

GPM 主衛星の運用時には、無降雨時に於いて同衛星搭載の二周波降水レーダ(DPR)を散乱計として使い、陸面上では土壌含水率、植生分布、海面上では海上風速などを観測できる可能性がある。これらの物理量は地表面の散乱係数  $\sigma^0$  データの解析の結果として得られるが、35.5 GHz 帯ではこれらの物理量と散乱係数  $\sigma^0$  を結びつける実験データは非常に少ないのが現状である。本研究では GPM 主衛星搭載の 35.5 GHz 帯降水レーダによる降雨観測に影響を与える地表面からのクラッタの影響を評価するためのデータならびに散乱係数  $\sigma^0$  と地表面物理量の関係を実験的に求め

るデータを取得するために 35.5 GHz帯散乱計を開発し地表面の散乱係数  $\sigma^0$  の値を測定した. 35.5 GHz帯偏波散乱計は, 35.5 GHz帯電波を水平・垂直偏波の任意の組み合わせで送信及び受信し, 地表面の偏波散乱特性を測定することができる装置である. この実験装置ではベクトルネットワークアナライザ(VNA)を 35.5 GHz帯電波の発信源, 及び受信系で受信した電波を解析する装置として利用している. 具体的には, 最大バンド幅 800MHzを掃引するステップ周波数レーダとしてVNAから出力した 35.5 GHz帯電波を送信系に入力し, ターンテーブルに盛られた土壌表面での後方散乱過程を経て受信系を通して再びVNAで受信する.

第4章では, 35.5 GHz帯電波の地表面の散乱の特性を明らかにすることを目的として, 土壌の散乱係数  $\sigma^0$  の土壌表面粗さならびに土壌含水率依存性を測定した. 電波の土壌による散乱の強さを左右する主な要因は土壌の表面粗さと土壌含水率である. この2つをパラメータとして土壌散乱の実験をした他の周波数の例では, 4.5 GHz帯において入射角 10 度では散乱係数  $\sigma^0$  の値は表面粗さにはあまり依存せず, 含水率に比例して大きくなることが示されている.

本実験では, 35.5 GHz帯電波の散乱係数  $\sigma^0$  の土壌表面粗さと, 土壌水分に対する依存性, ならびに入射角依存性について測定した. 土壌表面粗さを 0.73 mm, 1.52 mm, 2.13 mmと細かいオーダで増加させることにより, 35.5 GHz帯電波の散乱への寄与が鏡面反射成分から拡散成分へ変化することを明らかにした. また入射角 10 度では散乱係数  $\sigma^0$  は地面の粗さにはあまり依存せず, 含水率に比例して増加することが確かめられた. また, 理論式ならびに経験式から散乱係数  $\sigma^0$  を計算し, 実験結果と比較し, よい一致を得た.

第5章では, 常緑広葉樹の一種であるクチナンを用いて実験室内に森林のミニチュアモデルを製作し, 35.5 GHz帯に於ける植生でのフェージング特性や散乱係数  $\sigma^0$  の葉面積指数に対する依存性を測定した. その結果, フェージング特性については, フェージングの影響の強弱が, 散乱計のレンジ分解能で分割される植生の各層の植生量に依存することが明らかになった. 追加的な実験として シャワー状の疑似降雨を発生させ, 降雨時を想定した植生の散乱係数  $\sigma^0$  を測定し, 無降雨時の  $\sigma^0$  と比較, および評価をした.

第6章では, 散乱係数  $\sigma^0$  データと海面風速を結びつける基礎的なデータを取得す

ることを目的として水面の散乱係数  $\sigma^0$  を測定した。入射角 0 度付近では風速が大きくなるほど  $\sigma^0$  の値は小さくなること、また入射角が 10 度を超える場合では風速が強くなると  $\sigma^0$  の値はやや大きくなることが確かめられた。また本実験による測定データをこれまで報告されている結果と比較した。

第 7 章では本研究を総括し、今後の展望を述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、人工衛星搭載降雨レーダによる降雨観測に影響を及ぼす地表面クラッタの影響を評価し、これを低減する方法を理論的に検討し提案すること、ならびに地表面クラッタの影響評価に必要な地表面の散乱係数  $\sigma^0$  を実験的に測定することを目的としたものである。得られた主な成果は、以下の項目に要約できる。

(1) 熱帯降雨観測衛星 (TRMM) を継承する全球降水観測計画 (GPM) 衛星に搭載される予定の 35.5 GHz 帯降水レーダによる降雨観測における地表面クラッタの影響を評価し、その低減方法について検討した。アンテナサイドローブクラッタの低減化の新しい方法として、アンテナビームを衛星の進行方向に傾けることを提案し、2 度傾けることによって効果的に地表面からのサイドローブクラッタを低減できることを示した。

(2) TRMM 衛星の軌道高度変更時に衛星姿勢が進行方向に傾いたときの降雨レーダの地表面エコー観測データを解析することによって、アンテナビーム傾き角による地表面クラッタの低減効果の有効性を実証した。

(3) 35.5 GHz 帯電波の地表面散乱特性を明らかにすることを目的とし、偏波散乱計を用いて土壌の散乱係数  $\sigma^0$  の入射角特性を土壌の表面粗さと体積含水率を変化させて測定した。入射角 10° では、散乱係数  $\sigma^0$  の値は土壌の表面粗さにはあまり依存せず、含水率に比例して増加することが確認された。また、理論式並びに経験式から散乱係数  $\sigma^0$  を計算し、実験結果と比較し、よい一致を得た。

(4) 常緑広葉樹のクチナシを用いて、35.5 GHz 帯電波の植生による散乱係数

$\sigma^0$ 測定実験ならびに植生による地表面エコーの減衰特性測定実験を葉面積指数を変化させて実施した。また擬似降雨を用いて降雨前後の散乱係数 $\sigma^0$ を測定し、雨滴の寄与によって植生からの散乱が強まることを確認した。

(5) 水面の散乱実験を行い、散乱係数 $\sigma^0$ の入射角依存性と風速の関係を求めた。入射角 $0^\circ$ 付近では風速が強くなるほど $\sigma^0$ の値は小さく、入射角が $10^\circ$ 以上では、風速が強くなると $\sigma^0$ の値がやや大きくなることが確かめられた。

以上の諸成果は、この分野の学術と技術の発展に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。