

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560430

研究課題名(和文)：衛星搭載レーダによる豪雨の立体構造推定のための多重散乱波解析

研究課題名(英文)：Multiple scattering analysis for estimating the structure of heavy rain using by the satellite radar

研究代表者

伊藤 繁夫 (ITO SHIGEO)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：30223150

## 研究成果の概要(和文)

本研究では、衛星搭載用降雨レーダの高性能化を目指し、ビーム波に対する降雨散乱の多重解析結果を総合的に検討することにより、降雨の構造を明らかにする事を目的とした。入射ビーム幅が散乱平均自由行程より小さければ、多重散乱効果は、平面波入射時と比較すると、かなり異なることがわかった。実際のレーダ散乱エコーは、多重散乱を含んでいるので、降雨の立体構造の評価において、多重散乱をすべて無視したときの単一散乱と多重散乱時のレーダエコーを比べると、多重散乱によりレーダエコーが大きくなるため、降雨量を過大評価する事を示した。

## 研究成果の概要(英文)

This research is aiming at the estimation of the structure of the heavy rain by examining the multiple scattering analysis for beam waves. For beam width smaller than the scattering mean free length, the multiple scattering effects differ greatly from those for the plane wave incidence. The actual radar echo including the higher scattering generally overestimates the real rain rate. In fact, the comparison of the radar echo between the single scattering the multiple scattering taken into account shows the stronger radar echo by the multiple scattering.

## 交付決定額

(金銭単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード： リモートセンシング、降雨レーダ、散乱、多重散乱、パルス

## 1. 研究開発当初の背景

地球規模での異常気象と言われる局地的な集中豪雨・雷雨が多発化し、各地で大きな災害が引き起こされている。このため、豪雨の空間立体構造、及びその移動を衛星から早期にレーダで探知することが望まれている。

(1)従来の解析法として用いられていた横方向に一様である平面波入射ではなく、ミリ波の狭ビーム幅でかつ任意パルス波形を仮定し、空間的ビーム幅と時間的パルス形状に依存する総合的な降雨の散乱特性を検討する。

(2)最新の観測された衛星データでは、3次以上の散乱プロセスを含んだ多重散乱が関与していると推定されるので、これらを考慮し得るための簡便な解析方法に対しても検討する。

## 2. 研究の目的

本研究では、ビーム形状のミリ波パルスを使って、降雨時におけるパルス散乱・伝搬特性を、従来の単一散乱理論ではなく、実体に即した散乱現象を解明するため、多重散乱理論に基づいて受信波形を求める。そのため、ごく一般的に解析法として用いられていた横方向に一様である平面波入射ではなく、新たにミリ波の波長における狭ビーム幅でかつ任意パルス波形を仮定し、空間的な入射ビーム幅となるフットプリント、時間的パルス幅、及びパルス形状に依存する総合的な降雨散乱依存性を解明する。

更に、本手法の直接的な応用を前提に、衛星搭載型レーダへの豪雨強度等の定性的かつ定量的評価として利用可能な新しい手法を考える。これらの手法により、より空間的分解能の高いパルスビーム波入射に対して、豪雨の空間の立体分布を推定するための散乱特性の基礎データ取得を目的とする。

## 3. 研究の方法

(1)横方向に一様な平面波入射に対する場合とビーム波入射による場合の解析上での相違点を明確化にして、空間的に不均一な入射波の散乱現象がどのように繰り返されるかを明らかにする。これにより、ビーム波もどの程度の幅を持っていれば、平面波入射とほぼ妥当な結果が得られるか、あるいはビーム波特有の結果が、どのように反映されるかどうかをチェックし、ビーム幅の有限による多重散乱特性を明らかにする。更に、必要に応じて、モンテカルロ法のような数値解法も検討する。

(2)2次散乱以上の散乱プロセスが豪雨内で生じているということが、衛星データからも推測されることから、3次以上でかつ散乱プロセスを把握しやすく、更に時間領域での分かりやすい解析手法を新たに開発する。そこでは、厳密性よりも簡便で実用性があり、多重散乱問題を取り扱えるベクトル時空間放射伝達方程式を時間領域で直接解析的に解くために有効な近似手法を新たに考案する。

上記の検討を基にし、有限ビーム幅に対する多重散乱特性の解析をしながら、単一散乱では正しく評価できなかった降雨の空間的立体構造を推定する新しい方法も随時検討する。

## 4. 研究成果

従来、一般的に解析法として用いられていた横方向に一様である平面波入射ではなく、ミリ波の波長において、新たに狭ビーム幅でかつ任意形状のパルス波形を仮定し、空間的な入射ビーム幅、パルス形状に依存する降雨散乱の定式化を検討した。横方向に空間分布のあるビーム波入射による場合の散乱解析を行うため、多重散乱を考慮している時空間輸送方程式を基本式として、ビーム波解析に対する解析手法を検討した。最初に、散乱

マトリックスを方位角方向にモードで展開することにより、ビーム波の解析に対しても、従来の方法に比べて、あまり複雑にならず、しかも時間・空間座標のまま、散乱過程を明示する形で解ける積分方程式を導出することが出来た。降雨からの受信強度は、空間的な入射ビーム幅に依存する形で求められ、その式から見いだされる定性的評価を行うため、ビームファクターを導入して議論を行い、次に具体的な数値計算を行った。

その結果、二次の散乱項に対する有限ビームサイズの影響は、平面波入射と異なり、ビーム径方向の入射強度の不均一さにより、散乱行列における方位角方向間において、モード間 ( $s'$  と  $s''$ ) の結合を引き起こすことがわかった。このモード結合の度合いは、図1に示すように、横方向の散乱距離  $T_{(1)}$ 、送信ビーム幅  $W_0$  と散乱自由行程  $\sigma_r$  に依存することが示された。

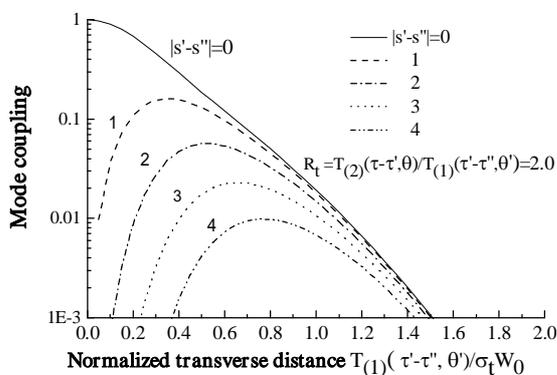


図1 ビーム波に対するモード結合の横方向距離に対する度合い

これにより、ビーム幅に相当する衛星レーダのフットプリントが平均自由行程より大きくなると、降雨からの散乱強度は、平面波入射の結果と同じになることが確かめられた。現実の衛星利用の場合でも、必ずしもフットプリントが、散乱自由行程より大きくなるとは限らないため、本研究成果により、フットプリントの多重散乱への依存性を示すことができた。

次に、一次散乱による入射波と同一偏波レーダエコー  $I_1^{co}$  と二次散乱を考慮した時の同一レーダエコー  $I_2^{co}$  と交差レーダエコー  $I_2^{cx}$  を、平面波入射時に対して図2に示す。ここで、降雨の領域は、光学距離 = 2 を仮定している。

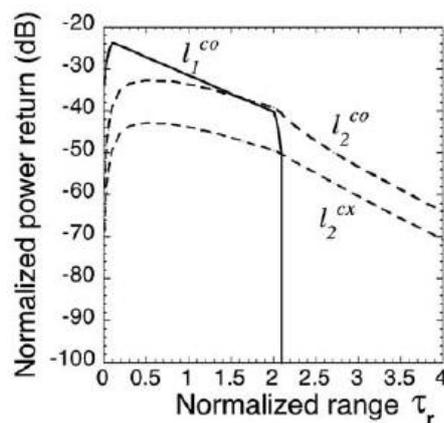


図2 光学距離に対する後方散乱強度(平面波入射)

この図より、1次と2次の散乱レーダエコーの和で shめされる全レーダ散乱エコーは、従来の一次散乱によるレーダエコーに比べ、増加することがわかる。

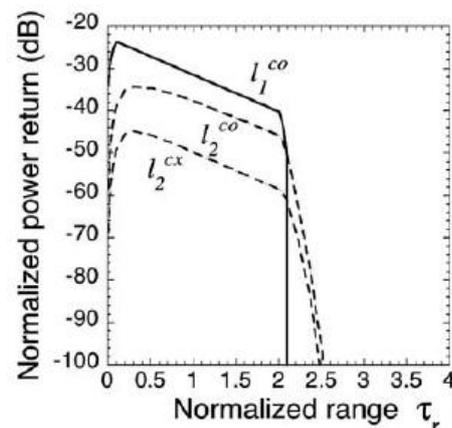


図3 光学距離に対する後方散乱強度(ビーム波入射)

図3には、ビーム波入射時に対して、同じく一次散乱と二次散乱を考慮した時のレーダエコーを示す。ビーム波に対しては、平面波と異なり、空間的にビームが限定されているために、横方向の積分が複雑になり、最終的には、平面波以上に数値計算を使う必要があ

てくることになった。ビーム波に対しては、横方向からの散乱された散乱波は、レーダーエコーに寄与するのが少なくなるため、図2の平面波に比べると、減少することがわかる。

更に、全レーダ散乱エコーにおける二次散乱エコーの割合 (SR) と二次散乱による交差偏波比 (LDR) の値を光学距離に対して示す。

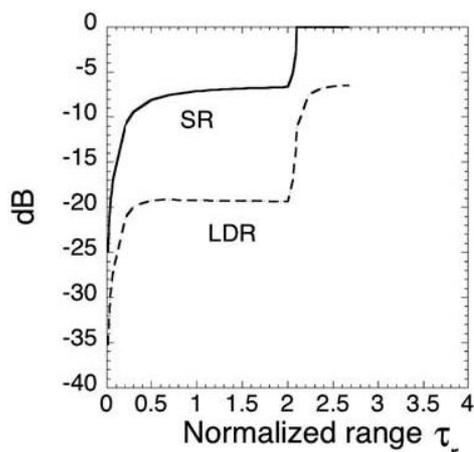


図4 全レーダエコーにおける二次散乱エコーの割合 (SR) と二次散乱による交差偏波比 (LDR) の値

これらの結果より、降雨の立体構造については、通常的一次散乱であれば、降雨量とレーダ強度が1対1に対応するので、レーダエコーから降雨強度を得られやすく、構造もわかりやすいが、現実には、従来無視されていた多重散乱が関与してくるため、その関係式は複雑になる。この場合、降雨を過大に評価しがちになる。実際、多重散乱をすべて無視したときの単一散乱と多重散乱時のレーダエコーを比べると、図2、図3より多重散乱時のレーダエコーが大きくなることがわかる。

また、降雨量、降雨層の厚さ、送信ビーム幅、送信パルス幅、パルス形状、および入射偏波に対するレーダエコーの依存性について検討を行なった。降雨量が増加すると、先に述べたように、多重散乱寄与が増してくるため、送信ビーム幅によっても異なるが、レーダエコーが増加することが示された。水平方向の降雨の空間分布において、降雨密度に大きな変化があった場合、それまで均一としてきた場合と比べて、ビーム幅のサイズの変化

で降雨量の推定にどのような変化が現れてくるかについては、やはり複雑であり、数値的以外に評価するのは困難であった。

更に、時間依存に対する新しい散乱理論に対しては、拡散近似理論を組み入れて解くことが、理論解析の上、簡易で有効であることが示された。

これまでの成果を基にし、地球環境問題、豪雨による災害の防止・軽減の観点からも、衛星搭載型レーダへの豪雨強度等の定性的かつ定量的評価として実用的に利用可能な方法について、更に検討を重ねたい。

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文] (計2件)

- M. Akiba, Ogawa, K. Wakamori, K. Kodate, S. Ito, Measurement and simulation of the effect of snowfall on free-space optical propagation, Applied Optics, 査読有, Vol.47, 2008, 5736-5743
- S. Kobayashi, S. Ito, S. Tanelli, T. Oguchi, and E. Im, A time-dependent multiple scattering theory for a pulsed radar with a finite beam width, Radio Science, 査読有, Vol.42, 2007, RS4001 (1-14)

### [学会発表] (計6件)

- 橋口孝聖、廣本宣久、伊藤繁夫、横山能周、ロックールの粒子識別法の研究、第56回応用物理学関係連合講演会、平成21年4月1日、筑波大学
- 野口直彦、伊藤繁夫、境界面付近の散乱体によるミリ波ビームパルスの散乱実験(II) - 理論値との比較 -、電子情報通信学会、2009年全国大会、平成21年3月19日、愛媛大学
- 橋口孝聖、廣本宣久、伊藤繁夫、横山能周、空気中繊維粒子リアルタイムモニタ(ARM)によるロックール粒子識別法の研究III、第69回応用物理学学会学術講演会、平成20年9月2日、中部大学

野口直彦、伊藤繁夫、境界面付近の散乱体によるミリ波ビームパルスの散乱実験 - 入射偏波特性 - 、電子情報通信学会 2008 年全国大会、平成 20 年 3 月 20 日、北九州市立大学

橋口孝聖、廣本宣久、伊藤繁夫、横山能周、空气中繊維粒子リアルタイムモニタ (ARM) によるロックウール粒子識別法の研究、2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会、平成 19 年 9 月、北海道大学

板部敏和、水谷耕平、横山能周、廣本宣久、伊藤繁夫、新関満、改良型アスベストリアルタイムモニターの開発、第 25 回レーザーセンシングシンポジウム、平成 19 年 9 月、秋田

[図書] (計 1 件)

伊藤繁夫、他、日新出版、基礎からの電磁波工学、2008、197

[その他]

ホームページ等

<http://www.eng.toyo.ac.jp/~ito/itohome.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 繁夫 (ITO SHIGEO)  
東洋大学・理工学部・教授  
研究者番号：30223150

(2) 研究分担者

(無)

(3) 連携研究者

(無)