衛星搭載降水レーダによる二周波観測を活用した 降雪微物理特性の推定に関する研究

秋山 静佳

第1章 序論

降雪は、冬季の中高緯度帯では積雪となって私たちの生活に貴重な水資源となるほか、熱帯でも 0°C 高度より上空に降雪粒子が分布し、落下とともに融解して降雨となることから、地球全体の降水過程に寄与している。このような降雪の、数濃度、粒径、粒子の形状といった微物理的特性は、降水の生成・成長過程に観測的な知見を与える重要な要素である。これまで地上観測や航空機観測によって降雪微物理特性が調べられており、地域、高度、気温、温帯低気圧との位置関係によって異なることが報告されてきた。全球水循環の理解には、このような降雪微物理特性を衛星観測に基づいて解明する必要がある。

2014年2月に打ち上げられた全球降水観測計画（GPM）主衛星に搭載されている二周波降水レーダ（DPR）は、前身である熱帯降雨観測（TRMM）衛星にも搭載されていた Ku 帯（13.6GHz）のレーダ（KuPR）と、新たに導入された Ka 帯（35.5GHz）のレーダ（KaPR）で構成されており、宇宙から二周波レーダ観測を行う唯一の測器である。GPM 主衛星の観測範囲は南緯 65°から北緯 65°に設定され、熱帯域上空に分布する降雪から中高緯度域の地表に到達する降雪まで、全球的な降水特性を捉えることが可能になった。しかしながら、KaPR の観測感度が期待ほど良くなかったこと、二周波観測が降雨微物理特性の解明にあまり貢献しないことを理由に、現状の降水量推定は KuPR の活用が主である。降雪に関しては、粒子の形状が雨よりも複雑なために開発が進んでいなかったが、近年、複雑な形状を計算機上で再現した雪粒子モデルの散乱特性のデータベース化が進み、雪の複雑な散乱データを容易に使用できるようになってきた。このような背景から、本研究では DPR の二周波観測を活用した降雪微物理特性の推定を目的にする。

Ku 帯と Ka 帯の二周波のレーダ反射強度の比（DFR）は、降雪の平均粒径と一対一に対応するという散乱特性がある。この利点を活かして、現在の DPR 標準アルゴリズムには、DFR を参照して粒径の大きな固体降水（HIP）を検出する降水タイプ判別（Iguchi et al., 2018）が導入されている。HIP は雹や霰、大きな雪片が存在する場合に検出されるもので、特に大きな雪片は、従来の一周波のレーダー観測では検出することができな

かった特徴である。そこで第 2 章ではこの HIP の検出に着目して、衛星降水観測の観点ではまだ知見の蓄積が少ない、温帯低気圧に伴う降雪事例を調べることとする。北西大西洋上で発達する温帯低気圧の降水を DPR が観測した事例について、HIP の分布を調べた結果、HIP がバンド状に連なる構造を検出した。そこで、この特徴的な構造に対応する大気構造と、バンド内の降雪微物理特性を調査する。次の第 3 章では、降雪微物理特性の定量的な理解を目指し、DFR を用いて降雪粒径分布と降雪量を推定する手法を開発する。開発した手法には、DFR に加えて、複雑な形状をもつ雪粒子モデルの散乱特性データベースを活用する。手法の検証を行うために、DPR 観測と同時同地点で航空機による粒径分布観測を実施することに成功した事例を対象に、開発した手法を適用する。

第 2 章 二周波観測に基づいた降雪バンドの解析

現在の DPR 標準プロダクトに導入されている HIP フラグによって、新たに大きな雪片を検出することが可能になった。そこで本章では、まだ衛星降水観測で知見の少ない温帯低気圧に伴う降雪に着目し、HIP の分布を調べた。海上の発達する温帯低気圧の降水を DPR が観測した事例について調べたところ、HIP がバンド状に分布する特徴的な構造（以降、HIP バンド）を検出した。大気再解析データやレーダ反射強度、DFR のプロファイルの解析を行い、この HIP バンドが関係する大気場の構造、および HIP バンド自体の降水微物理構造を調べた。

HIP バンドの長さは DPR の二周波観測の観測幅 125km よりも長い構造であった。大気再解析データで解析される前線と降水の位置関係を調べたところ、HIP バンドは温帯低気圧の温暖前線の北側に見られ、HIP バンドのエコー頂高度付近である 600hPa 面では、上昇流の極大域が HIP バンドに沿って分布していた。また、HIP バンドの水平位置やエコー頂高度は、強い前線形成関数周辺の上昇流域と条件付き対称不安定の領域とが重なった領域とも対応した。このような大気構造は、アメリカ北東部の豪雪をもたらす降雪バンドが発生する大気構造 (Novak et al., 2010) と類似していることから、HIP バンドは降雪バンドに類する構造と言える。

次に HIP バンドの降雪微物理的特徴について降水エコーから考察した。エコー頂付近の層では、DFR が高度によらずあまり変化しない一方で、Ku 帯レーダ反射強度は下層に向かって増加傾向であった。ここでは降水粒子の平均的な大きさが高度によらず変化していないことから、条件付き対称不安定の解消に伴う生成セルによって粒子の生成・昇華成長が卓越していることが示唆された。その下層では、DFR の値が下層に向かって急激に増加していることから、上空で生成された降水粒子が、落下に伴い他の粒子と衝突して凝集成長していることが推測された。

メソスケールな降雪バンドは、アメリカ北東部で豪雪をもたらす現象として有名であ

るが、海上の事例については報告がなく、また、降雪バンド自体の降雪微物理的な理解はあまり進んでいなかった。本章では、降雪バンドが北西大西洋上にも分布することを新たに示し、二周波レーダ観測値を活用して、降雪バンドの降雪微物理的特徴を明らかにした。

第3章 二周波観測を用いた降雪微物理特性推定手法の開発

本章では、降雪の平均粒径の指標となる DFR を用いて、降雪の粒径分布および降雪量を推定する手法（以降、二周波法）を開発した。本手法の粒子モデルには、雲粒捕捉や雪片の凝集過程を再現した Leinonen and Szyrmer（2015、以降 LS15）の雪粒子モデルを用いた。開発した二周波法の精度検証を行うために、オリンピック山の降水集中観測（OLYMPEX；Houze et al., 2017）の期間中、DPR とほぼ同時同地点で航空機による粒径分布観測に成功した事例を対象に、二周波法を適用した。様々な粒子モデルを仮定して二周波法の検証を行い、どのような粒子モデルが妥当であるか調査した。

DPR の標準アルゴリズムでは、航空機観測で見られた平均粒径や粒子数濃度の高度による違いを再現できていなかったが、二周波法を用いることでこの違いをよく再現できるようになった。次に、様々な雲粒補足量の LS15 の粒子モデルを用いて、DPR 推定値と航空機観測データとの回帰分析を行った。平均粒径の回帰直線の傾きやバイアスは、雲粒捕捉量が少量から中程度の範囲ではほとんど変わらないことがわかった。一方で、数濃度や降雪量は、仮定する雪粒子モデルの雲粒捕捉量によって値が大きく異なった。今回対称とした層状性降水の事例では、少量の雲粒補足量の雪粒子モデルを仮定した場合に、航空機観測の数濃度、および地上レーダの推定降雪量と最も整合する結果となった。

また、複雑な雪粒子の形状を再現した雪粒子モデルの必要性を調べるために、従来の研究で用いられていた単純な回転楕円体の粒子モデルに対しても二周波法を適用した。DPR 標準アルゴリズムと同じ、単純な球の粒子モデルを用いて二周波法を適用した場合は、降雪量推定が過大となることがわかった。また、この事例で最適であった雪粒子モデルに質量・アスペクト比が等価な回転楕円体を仮定した場合でも、二周波法を用いた降雪量推定は過大評価となった。

本章の研究から、二周波法を適用した降雪推定は、粒径分布の高度による変化を再現できることが明らかになった。また、雲粒捕捉過程を考慮した雪粒子モデルを用いることで、航空機観測や地上レーダ観測と整合する値を推定できることを示した。

第4章 結論

熱帯上空や冬季の中高緯度で見られる降雪の微物理特性は、気象状況や地域によって異なっており、全球の普遍的な特性や地域差を知るためには、衛星レーダ観測が必要である。GPM 主衛星搭載の DPR は、Ku 帯のレーダ KuPR と、Ka 帯のレーダ KaPR の二周波で構成されており、この二周波観測を活用した降雪微物理特性の理解が期待されてきた。しかしながら、現在の DPR 標準アルゴリズムによる降水量推定には二周波観測があまり活用されていない。そこで本研究では、DPR の二周波観測値を活用して、降雪微物理特性の推定を行った。

現在の DPR 標準アルゴリズムには、DFR に着目した、粒径の大きな固体降水 (HIP) の検出手法が導入されている。そこで、衛星降水観測の観点でまだ知見の蓄積が少ない、冬の温帯低気圧に伴う降雪事例で HIP の分布を確認すると、HIP が長さ 125km を超えてバンド状に連なる構造 (HIP バンド) が見つかった。このバンドの位置は、対流圏中層の強い前線形成や条件付き対称不安定領域と対応していた。このような大気場は、アメリカ北東部に豪雪をもたらすことで知られる降雪バンドの大気構造と類似しており、HIP バンドは降雪バンドと類似した現象であると考えられることができる。また、HIP バンド自体の降雪微物理的な特徴について、二周波観測値のプロファイルから考察した。HIP バンドのエコー頂付近で、条件付き対称不安定の解消に伴う生成セルによる降水粒子の生成や昇華成長、その下層では降水粒子の凝集成長が起こっていることを示唆した。

次に、降雪微物理特性の定量的な理解を目指し、DFR を用いて、降雪の粒径分布および降雪量の推定手法 (二周波法) を開発した。二周波法で仮定している粒子モデルには、LS15 の雲粒捕捉過程を再現した雪粒子モデルを用いた。開発した手法による推定値は、航空機観測値や地上レーダ観測による推定値と比較検証した。その結果、従来の手法では再現できていない降雪微物理特性の高度依存性を、航空機観測で確認されたものと同様に、二周波法で再現できることを示した。また、様々な雲粒捕捉量の雪粒子モデルを仮定して二周波法を適用したところ、対象事例では少量の雲粒補足量を仮定した場合の微物理パラメータや降雪量推定値が、航空機観測値や地上レーダ推定値とよく一致した。このように、二周波法を用いることで、降雪の粒径分布を定量的に推定し、降雪量推定を改善できることを示した。

二周波法は、仮定する雲粒捕捉量に応じて粒子数濃度や降雪量の推定に変化が生じるものの、多量の雲粒捕捉が発生する激しい対流雲でなければ、仮定する雲粒捕捉量に粒子の大きさの推定値はあまり依存しない。このことは、第2章で示したような、粒径の高度依存性について、二周波法を用いることで定量的な議論が可能であることを意味する。本研究で開発した手法のように二周波観測を活用することで、DPR 観測が行われている熱帯上空から高緯度の地表付近まで、多様な降雪現象における降雪微物理特性の理

解が進むことが期待できる。

現在 GPM 主衛星の後継機となる降水観測衛星の打ち上げが計画されており、TRMM 衛星から GPM 主衛星へと引き継がれた宇宙からの降水レーダ観測が今後も展開されていく。しかし、DPR の二周波レーダ観測の活躍が現状限定的であることを受けて、後継の衛星にはドップラー計測機能付き Ku 帯の一周波降水レーダが搭載される予定である。本研究では、この潮流に反して、二周波観測でしか得られない降雪の微物理的な特性に着目し、その有用性を明らかにした。DPR 観測期間中に蓄積される二周波観測値を活用し、全球的な降雪微物理特性を明らかにすることで、全球水循環の理解が進むとともに、将来の新しい衛星降水レーダの計画や開発に貢献することが期待できる。