

衛星搭載降水レーダによる 背の低い雲に伴う降水の検出手法の開発

清水 陸

第1章 序論

背の高い雲に伴う降水は比較的強く、全球降水の大部分を占める一方で、背の低い雲に伴う降水（背の低い降水）は比較的弱い。しかし、特に亜熱帯海上の背の低い降水は、太陽からの短波放射を反射する層積雲を消滅させるプロセスとして放射収支に大きく影響を与える。また、山岳域では背の低い雲に伴って強い降水がもたらされることもある。衛星搭載降水レーダは地上観測の難しい海上や山岳域で背の低い降水を捉えているが、地上付近において地表面クラッターが混入するために降水を観測できない領域があるため（ブラインドゾーン）、背の低い降水の検出に課題が残っている。ブラインドゾーンの高さは衛星搭載降水レーダが衛星進行方向と直交してビームを走査する方向（走査角）に依存する。衛星直下付近の小さい走査角ではブラインドゾーンが低い、大きい走査角ではブラインドゾーンが高くなる。また、ブラインドゾーンの高さは地形にも依存し、標高が高く地形が複雑な山岳域ではより高い高度まで広がる。

衛星搭載降水レーダの標準アルゴリズムはブラインドゾーンに含まれない最低高度である Clutter Free Bottom (CFB) を推定し、CFB 以上の高度で降水を推定している。既存研究は標準アルゴリズムの推定する CFB を所与のものとし、CFB より下層のブラインドゾーン内の降水検出や降水量推定を改良する様々な試みを行っていた。しかし、全球降水観測計画 (GPM) 主衛星搭載二周波降水レーダ (DPR) の標準アルゴリズムによる CFB 推定手法は、前世代の熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 降雨レーダ (PR) の標準アルゴリズムから大きく変わっておらず改良の余地がある。そこで、本研究は CFB を可能な限り下げ、標準アルゴリズムがブラインドゾーンとして破棄してきたデータを利用することで、背の低い降水の検出を行った。

第 2 章では使用したデータの詳細について説明する。地形の影響を受けない海上では、同一走査角のブラインドゾーンがほぼ一定の高度まで広がる。そこで、第 3 章では、統計的な手法を用いて走査角毎に一定に CFB を推定し、海上における背の低い降水の検出の改良を行う。一方、山岳域のブラインドゾーンは地形の影響を受け CFB が変動するため、海上のように統計的な手法で CFB を推定することは難しい。そこで、第 4 章

では KuPR と KaPR の二周波を活用して CFB の推定を行うことで、標準アルゴリズムが見逃している山岳域の背の低い降水検出の改良を行う。第 5 章では全体の結論を述べる。

第2章 データと手法

本研究では衛星搭載降水レーダとして全球降水観測計画(GPM)主衛星搭載二周波降水レーダ(DPR)のデータを用いた。GPM DPR は Ku 帯レーダ(KuPR; 13.6 GHz)と Ka 帯レーダ(KaPR; 35.5 GHz)の二周波のレーダで構成されている。KuPR とフットプリントが一致する KaPR MS モード(Match-up scanning; MS)観測の降水への感度は KuPR よりも低く、より降水への感度が高い KaPR HS モード(high-sensitivity scanning; HS)の観測でも、KuPR と同程度の降水捕捉率である(Toyoshima et al. 2015)ため、本研究では KuPR の降水検出改善を行った。

GPM 主衛星搭載マイクロ波放射計(GMI) の降水量推定アルゴリズム(GPROF)は輝度温度の観測値と最も整合する放射伝達モデル計算値を与えるような、最適な降水強度分布を求めることで降水強度を算出しており、背景放射の小さい海上での降水観測を得意としている。また、CloudSat 衛星搭載雲レーダ (CPR) のレーダ周波数は KuPR よりも高い W 帯(94 GHz)であり、強い降水の観測には不向きである一方、散乱強度の小さい弱い降水を観測可能である。第 3 章では KuPR の海上降水の観測データを、GPROF 及び CloudSat CPR と比較した。

台湾北部の Da-Tun 山では、山岳域で世界に類例のない稠密な雨量計観測網[Da-Tun rain gauge network (DTRGN)]が展開されている。DTRGN 及び Da-Tun 山南東部の Wu-Fen-San(WFS)に設置された S 帯ドップラーレーダ (WSR-88D)が GPM DPR の検証に有用であると考え、第 4 章では山岳域を代表して台湾北部 Da-Tun 山とその周辺地域(25.078–25.348N, 121.438–121.738E)において GPM DPR の背の低い降水検出改良を行った。

第3章 背の低い海上降水の検出改良

海上の背の低い降水は背の高い雲に伴う降水と比較すると弱い、亜熱帯海上における背の低い降水は層積雲が雨水に変換されることで短波放射が地表面に到達するプロセスとして放射収支に大きく影響することからも、正確な観測が必要である。しかし、現行の GPM DPR のアルゴリズムは CFB を高めに推定しているのに加え、組織的なメソ対流系の降水を想定して降水を判定しているため、背の低い降水の検出には不向きである。そこで本研究では、KuPR の CFB 推定アルゴリズムと降水判定アルゴリズムを改良することで海上の背の低い降水の検出を行った。

海上では地形の高低差による影響が無い場合、ブラインドゾーンは同じ走査角であればほぼ一定の高度になる。そこで、本研究では統計的手法で走査角ごとに一定に CFB を推定した。ただし、CFB はジオイド面高度偏差に依存して地域差があるため、緯度経度 $1^\circ \times 1^\circ$ のグリッドごとに上記の手法で CFB を推定し CFB の Look Up Table を作成した。

また、現行の KuPR 降水判定アルゴリズムでは組織的なメソ対流系の降水を想定した条件として、鉛直方向に 5 レンジビン以上、或いは鉛直、水平方向に 10 レンジビン以上の連続したエコーがある場合に降水ありと判定している。しかし、特に亜熱帯で起こる孤立した背の低い降水の水平スケールは、KuPR のフットプリントの解像度と同じ 5 km で、降水頂も 1000 m 程度であるため、現行のアルゴリズムの条件で捉えることが難しい。そこで本研究では、鉛直方向に 3 レンジビン以上のエコーがある場合降水ありと判定した。

2014 年 3 月-2020 年 2 月の期間において、標準アルゴリズムと改良アルゴリズムを用いて全球降水頻度(F(ORG), F(LUT))を計算した結果、背の低い降水の多い高緯度全域で 10%以上降水頻度が増加した。また、亜熱帯のペルー沖やアフリカ西海岸沖では局所的に 100%以上降水頻度が増加した。

降水頻度が 100%以上増加した亜熱帯ペルー沖の領域(西経 73° - 77° 、南緯 20° - 25°)において、降水頻度の日周変動について解析した。12-2 月(DJF)と 3-5 月(MAM)では、F(ORG)と F(LUT)ともに日付が変わる深夜と日中に降水頻度のピークを捉えているが、どちらの時刻でも降水頻度は F(LUT)の方が大きくなった。一方、6-8 月(JJA)と 9-11 月(SON)では、標準アルゴリズムが見逃している日中 10 時以降の降水頻度のピークを明瞭に捉えることに成功した。これは、標準アルゴリズムが夜間と比較してさらに背の低い日中の層積雲に伴う降水を多く見逃しているためだと推定できる。

第4章 背の低い山岳域降水の検出改良

山岳域では湿潤な下層の大気が地形により強制的に持ち上げられ、背の低い豪雨をもたらすことが知られている。しかし、山岳域ではブラインドゾーンが高くまで広がるため、背の低い降水検出の障害となっている。本研究では山岳域を代表して台湾北部 Da-Tun 山とその周辺地域を解析領域として、KuPR と KaPR の両レーダを用いて CFB 推定アルゴリズムを改良することで背の低い降水の検出改良を行った。

本研究では、台湾北部 Da-Tun 山で KuPR 標準アルゴリズムが 10 mm h^{-1} 以上の降水を見逃していた事例を 2014 年 3 月から 2020 年 2 月の期間で 12 事例発見した。その内の 5 事例では KuPR はブラインドゾーンの狭い衛星直下付近でも背の低い降水を見逃していた。このような背の低い降水の見逃しは KuPR の標準アルゴリズムが降水エコーを地表クラッターと誤判定することで、実際の地表面クラッターを受信しない最低高度よ

りも高く CFB を推定していたためであった。

ブラインドゾーンが大きく変動する山岳域では、海上で適用した統計的な手法による CFB の推定が難しい。そこで、地表面散乱と降水粒子による散乱では後方散乱断面積の波長依存性に差がある性質を利用して、DPR を構成する KuPR と KaPR の受信電力差 (DFRP) が地表面クラッターを受信して急激に増加する高度を CFB として推定した。CFB 推定アルゴリズムを改良することで、KuPR 標準アルゴリズムが降水を見逃していた山岳域では CFB が約 500 m 下がり、一部地域では地上レーダの CFB よりも低い高度になった。DFRP アルゴリズムによって標準アルゴリズムが見逃していた背の低い降水の検出に成功し、降水推定の過小評価が軽減した。

KuPR と KaPR の両レーダが Da-Tun 山を観測していた 216 事例について、DFRP CFB と標準アルゴリズムの推定する CFB のそれぞれを用いた KuPR の降水検出及び降水強度を地上レーダと比較した。地上レーダが降水を捉えていないが DFRP アルゴリズムを用いた KuPR が強い降水を捉えていた事例の解析から、DFRP アルゴリズムが CFB を低く推定しすぎたために、地表面クラッターを降水エコーと誤判定していた事例が無いことを確認した。一方、KuPR V06 及び V07 の標準アルゴリズムでサイドローブクラッターを降水エコーと誤判定し、強い降水を誤検出した事例を発見した。この事例でも DFRP アルゴリズムは強い降水の誤検出を生じない。

第5章 まとめ

GPM DPR の標準アルゴリズムはブラインドゾーンに含まれない最低高度である Clutter Free Bottom (CFB) を推定し、CFB 以上のデータを用いて降水推定を行っている。この CFB 推定アルゴリズムは前世代の TRMM PR のものから大きく変わっておらず改良の余地がある。しかし、GPM DPR の降水検出を改良した既存研究は、標準アルゴリズムの推定する CFB を所与のものとして CFB より下層のブラインドゾーン内の降水検出や降水量推定を改良する様々な試みを行っており、CFB 以下のブラインドゾーン内のデータを用いていなかった。これに対し、本研究は DPR の CFB を可能な限り下げ、標準アルゴリズムがブラインドゾーンと判定して使用していなかったデータを用いることで降水検出の改良を行った。

海上では地形の高低差が無いため、同じ観測走査角のブラインドゾーンは場所に依存せずほぼ一定の高度まで広がることを利用して、統計的手法で走査角ごとに一定の CFB を推定した。これにより特に背の低い降水が卓越する亜熱帯や高緯度の海上で降水頻度が増加し、特にペルー沖やアフリカ西海岸沖では、降水頻度が標準アルゴリズムの2倍以上になった。ペルー沖で特に降水頻度が大きく増加した領域について降水頻度の日周変動の解析を行ったところ、6-8月や9-11月には標準アルゴリズムでは捉えられていなかった昼間の降水頻度ピークを捉えることに成功した。太陽同期軌道のため、同じ地点

を複数の異なる時刻で観測できない CloudSat CPR のデータや、数年間の統計的な降水頻度しか補正できない先行研究の降水頻度補正手法では、降水頻度の日周変動の解析は出来ないことから本手法の優位性を示す結果であるといえる。

高密度雨量計網が展開されている台湾山岳域において、KuPR が 10 mmh^{-1} 以上の強い降水を見逃している事例を 2014 年 3 月から 2020 年 2 月の期間で 12 事例発見し、そのうち 5 事例はブラインドゾーンの狭い衛星直下付近で背の低い降水を見逃していた。特に、KuPR が降水を完全に見逃していた事例では KuPR が降水エコーを地表面クラッターと誤判定することで CFB が高めに推定されていた。そこで、地表面散乱と降水粒子による散乱では後方散乱断面積の波長依存性に差がある性質を利用して、KuPR と KaPR の受信電力差(DFRP)が地表面クラッターを受信して急激に増加する高度を新たに CFB として推定した。この手法を用いることで、CFB が約 500m 下がり、標準アルゴリズムが見逃していた背の低い降水の検出に成功した。

本研究において、DFRP を用いた CFB 推定アルゴリズムの改良は台湾北部 Da-Tun 山付近の領域のみに適用していたが、今後リリースされる予定の GPM DPR V08 の標準アルゴリズムは、全球で本研究の手法が適用され降水推定が改良される。また、海上での統計的な CFB 推定手法も今後標準アルゴリズムに適用されることが検討されている。これらのアルゴリズムが全球に適用されることで降水頻度や降水量が見直され、水収支や放射収支の推定が改良されることが期待できる。

本研究で開発した海上の CFB 推定アルゴリズムは KuPR 一周波のみのデータを用いていたため、同じ統計的手法が前世代の TRMM PR の CFB 推定アルゴリズムにも適用が可能である。また、山岳域における DFRP を用いた CFB 推定アルゴリズムは、二周波のレーダのデータが必要であるが、DFRP CFB を教師データとして機械学習により KuPR の一周波のみの受信電力データから CFB の推定を行うことが可能である。さらに、KuPR 一周波のみで山岳域の CFB が推定できれば、周波数の同じ TRMM PR でも KuPR と同様の手法で CFB 推定が可能になると考えられる。TRMM PR は GPM KuPR よりも降水への感度が弱く背の低い弱い降水を捉えられないことから、KuPR ほどの降水頻度の改良は難しいが、TRMM PR が観測を開始した 1998 年から現在までの約 26 年間のデータで降水頻度の改良ができれば、降水強度が小さくあまり研究されてこなかった亜熱帯などでの、長期間の観測データが必要な降水日周変動の解析が期待できる。