

TRMM/PR を用いた山岳域における地上降雨量分布推定

ESTIMATION OF THE GROUND SURFACE RAINFALL DISTRIBUTIONS IN MOUNTAINOUS REGIONS USING TRMM/PR

中川勝広¹・中北英一²・鈴木善晴³・大石 哲⁴・池淵周一⁵

Katsuhiko NAKAGAWA, Eiichi NAKAKITA, Yoshiharu SUZUKI, Satoru OISHI and Shuichi IKEBUCHI

1 正会員 博士 (工) 通信総合研究所 研究員 (〒901-2401 沖縄県中頭郡中城村字久場台城原 829-3)

2 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科 (〒611-0011 京都府京都市吉田本町)

3 学生会員 京都大学大学院工学研究科博士課程 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

4 正会員 博士 (工) 山梨大学助教授 工学部 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

5 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The purpose of this paper is to bridge the gap between the observations by surface rain gage and by ground based radar using TRMM/PR information, in order to extract qualitative information on surface rainfall distribution in mountainous regions as characteristics of horizontal rainfall distribution. First, TRMM/PR information was verified using a conventional radar and ground observations. Then, the horizontal distribution and the vertical profile of the radar reflectivity observed by TRMM/PR corresponded to the distributions of the ground based rainfall radar very well. Next, the vertical structural analysis of rainfall was performed using TRMM/PR. As a result, there is a linear relation to rainfall intensity and an altitude, and it was shown that the rainfall intensity in each altitude could be expressed with an advanced linear function.

Key Words : TRMM/PR, conventional radar, verification, vertical dependency of rainfall, field observation

1. 序論

陸域、特に山岳域における降雨分布の把握は、洪水解析や水資源賦存量の推定において極めて重要である。しかし現状では、地上の降雨観測網が高度に整備された領域においても、山岳域における降雨観測は、谷筋の限られた場所に設置された地上雨量計による点観測か、レーダビームが山頂はるか数 km 上空を通る地上設置降雨レーダによる面観測が限界であり、山岳域の降雨の空間分布を把握することは非常に困難である。そこで、本研究では世界で初めて降雨レーダを搭載した TRMM/PR を用いて^{1), 2)}、降雨の空間分布の把握が非常に困難である山岳域の降雨構造を明らかにし、地上降雨レーダを用いた TRMM/PR データ検証を行い、TRMM/PR を用いた地上雨量推定手法の開発を試みた。最終的には、地上レーダによる山岳地域の地上雨量推定手法を開発することを目的とする。

本研究では、山岳性豪雨で有名な紀伊半島の大台ヶ原を解析対象とし、地上の 2 地点に光学式雨量計

を設置し、TRMM/PR の検証用データとして連続観測を実施した。地上設置降雨レーダとしては、地上観測を実施した大台ヶ原周辺を観測領域とする降雨の 3 次元観測が可能な国土交通省深山レーダ雨量計を用いた。なお、本研究は TRMM/JRA (NASDA/NASA) 検証研究公募として採用された「山岳域での地上降雨量分布の推定と確率降雨分布モデルの開発」の一部として行った。

2. 地上降雨観測

平成 10 年度に TRMM/PR 検証研究として借り入れている光学式雨量計 (1 分間強度計) を図 1 に示す 2 地点;

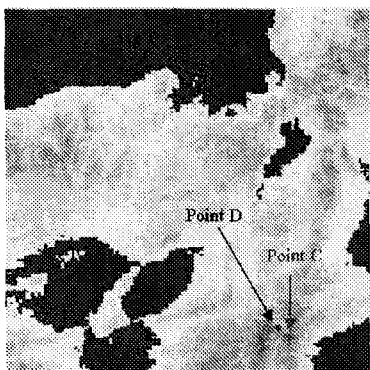
・ポイント C (大台ヶ原山頂付近の大台ヶ原教会横)

N34° 10'46.5", E136° 05'55.5", 標高 1639m

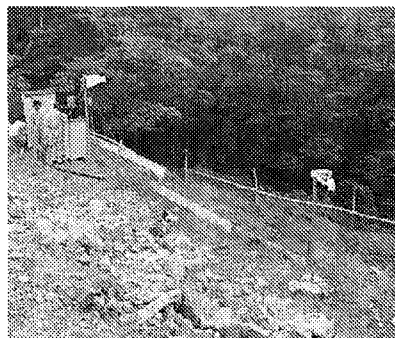
・ポイント D (大台ヶ原中腹のドライブイン横)

N34° 13'43.9", E136° 01'00.3", 標高 1080m

に設置し、連続観測を実施した。なお、山頂付近のポイント C は雲底より上層、中腹付近のポイント D は雲底より下層に位置する傾度が高い。同観測地点



図－１：光学式雨量計による地上観測地点



写真－１ 大台ヶ原山頂に設置した光学式雨量計，
(財) 気象協会関西本部の転倒マス式雨量計，霧観測装置，気温・湿度計

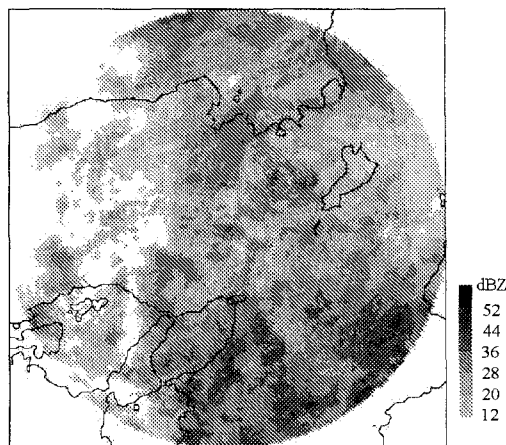
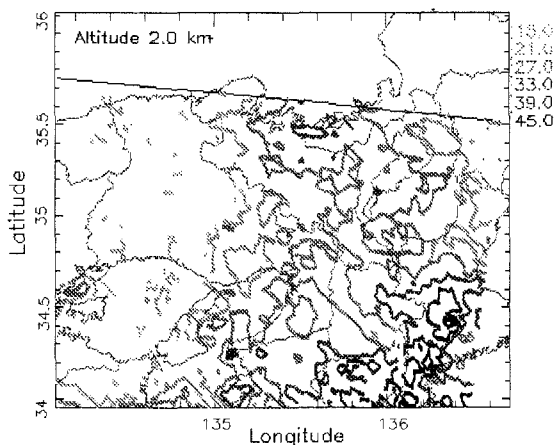
には(財)日本気象協会関西支部の転倒マス式雨量計、霧観測装置、気温・湿度計による同時観測(図2参照)を行っており、様々なキャリブレーションが行えるとともに、雲底より上に位置するか、下に位置するかの特定も可能である。解析対象期間は、地上観測を実施している光学式雨量計と TRMM/PR の両データが取得されている 1998 年 10 月の 1 ヶ月間に近畿地方周辺に TRMM 衛星が飛来した時刻に地上で降雨が観測された時刻を含む 1 日間とした。以上の結果、解析対象期間を 1998 年 10 月 7 日、16 日、27 日の 3 日間とした。地上観測を実施した光学式雨量計のデータは、(財)日本気象協会関西支部の転倒マス式雨量計データを用いて 10 分間雨量による精度評価を行い、0.5mm から 1.0mm 程度の差がみられるが、10 分間雨量はほぼ一致しており、TRMM/PR で瞬時に観測される降雨量の地上検証として用いる雨量としては、1 分間降雨強度が観測可能な光学式雨量計が有効であることを確認している^{3), 4)}。

3. 地上降雨レーダによる TRMM/PR 検証

国土交通省深山レーダ雨量計を用いて TRMM/PR データの検証を行った。解析に用いた

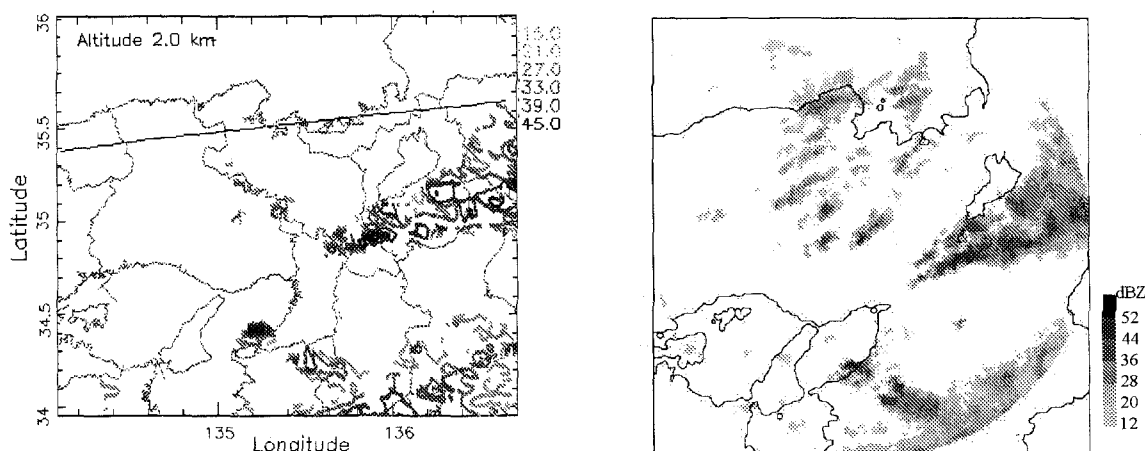
TRMM/PR データは、処理レベル 2A25 (PR Profile) を用いた。処理レベル 2A25 のデータは、入力データとして、1C21 (降雨減衰を補正していないレーダ反射因子)、2A21 (地表面の散乱係数 σ^0 の降雨減衰量及びその信頼性についてのパラメータ) 及び 2A23 (降雨タイプの分類結果、ブライトバンド高度) 等を用い、降雨減衰補正を施したレーダ反射因子を算出したものである。さらに、Z-R 関係を仮定して、降雨強度を算出したものである^{5), 6)}。

まず、TRMM/PR で観測された高度 2km での降雨減衰補正後のレーダ反射因子の水平分布を国土交通省深山レーダ雨量計の仰角固定モード (PPIf) で観測されたレーダ反射因子の水平分布を用いて定性的な検証を行った。TRMM/PR で観測された高度 2km での降雨減衰補正後のレーダ反射因子の水平分布を、図 2 (b) に 10 月 7 日 11 時 5 分から 10 分の国土交通省深山レーダ雨量計の仰角固定モード (PPIf) で観測されたレーダ反射因子の水平分布を示す。著者らが現在までに国土交通省深山レーダ雨量計で観測されたデータを数多く利用してきた中で、特に台風などの観測データにおいて図 2 (b) のように大台ヶ原周辺で非常にレーダ反射因子の値が大



(a) 降雨減衰補正後の TRMM/PR レーダ反射因子 (b) 深山レーダ雨量計のレーダ反射因子

図－２ 高度 2km における TRMM/PR 及び深山レーダ雨量計で観測された
レーダ反射因子 Z の水平分布の比較 (1998 年 10 月 7 日)



(a) 降雨減衰補正後の TRMM/PR レーダ反射因子 (b) 深山レーダ雨量計のレーダ反射因子

図-3 高度2kmにおける TRMM/PR 及び深山レーダ雨量計で観測されたレーダ反射因子 Z の水平分布の比較 (1998 年 10 月 16 日)

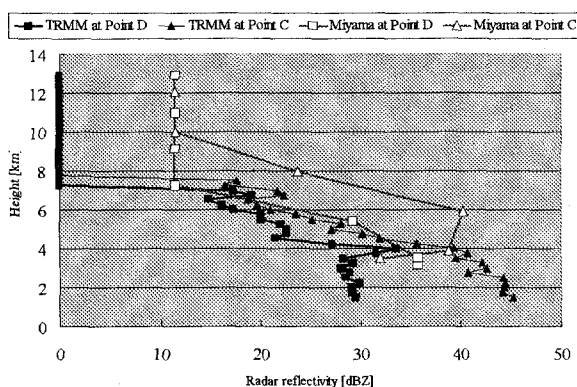


図-4 地上観測地点 2 地点上空の TRMM/PR 及び深山レーダ雨量計で観測されたレーダ反射因子の鉛直プロファイル (10 月 7 日)

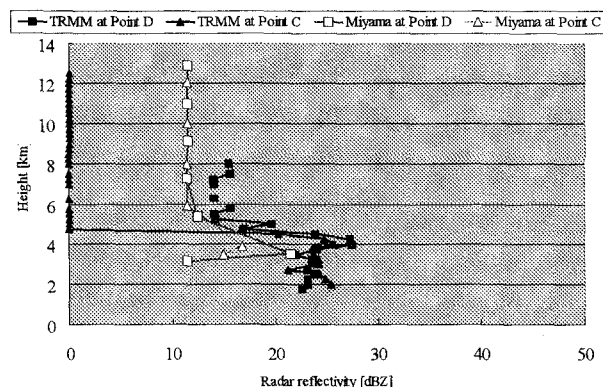
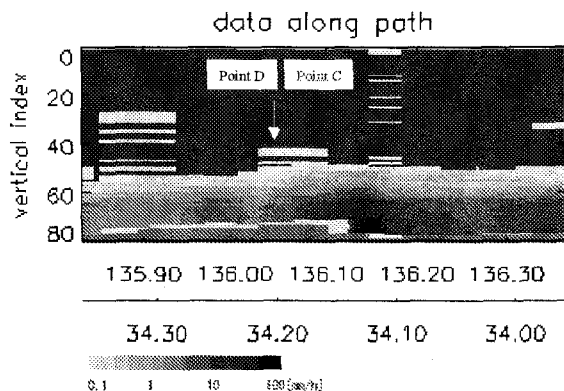


図-5 地上観測地点 2 地点上空の TRMM/PR 及び深山レーダ雨量計で観測されたレーダ反射因子の鉛直プロファイル (10 月 16 日)

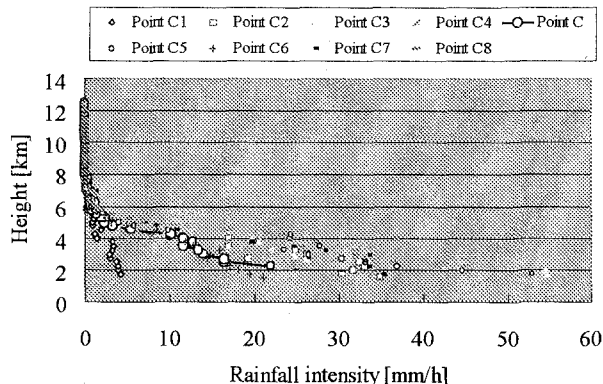
きくなっており、山地部にあたることからグランドクラッタの影響ではないかという推測をしていた^{8), 9)}。しかし今回、図 2 (a) に示したように TRMM/PR で上空から観測されたレーダ反射因子の水平分布においても大台ヶ原周辺で非常に大きな値になっており、グランドクラッタの影響でないことが明らかとなった。図 3 (a) に 10 月 16 日 5 時 14 分前後の TRMM/PR で観測された高度 2km での降雨減衰補正後のレーダ反射因子の水平分布を図 3 (b) に、10 月 16 日 5 時 10 分から 15 分の国土交通省深山レーダ雨量計の仰角固定モードで観測されたレーダ反射因子の水平分布を示す。地上観測を実施している大台ヶ原周辺での降雨は、レーダ反射因子の値が小さい領域が広がっており層状性降雨と考えられ、対流性、層状性の降雨に関して観測領域において定性的な対応関係も非常に良く、TRMM/PR によって上空から降雨を観測することの有効性が示されたと同時に、地上レーダの有効性についても示されたと考え、地上降雨レーダの利用性がさらに広がるもの

と考える。

次に、地上降雨観測を実施している 2 地点上空の TRMM/PR 及び深山レーダ雨量計で観測されたレーダ反射因子の鉛直プロファイルの比較を行った。なお、TRMM/PR については、鉛直方向空間分解能である 250m 間隔で、深山レーダ雨量計は、レーダビーム中心高度でのレーダ反射因子の値を示している。10 月 7 日の地上観測地点上空の TRMM/PR 及び深山レーダ雨量計のレーダ反射因子の鉛直プロファイルを図 4 に示す。ポイント D 上空では、深山レーダ雨量計で観測されたレーダ反射因子が TRMM/PR より 5 dBZ 程度大きくなっているが、鉛直プロファイルの変化はよく一致している。一方、ポイント C 上空では、深山レーダ雨量計の方が TRMM/PR のレーダ反射因子より 10dBZ 程度大きくなっているが、ほぼ一致している。図 5 に 10 月 16 日の地上観測地点上空における TRMM/PR 及び深山レーダ雨量計のレーダ反射因子の鉛直プロファイルを示す。それぞれの地点上空において、

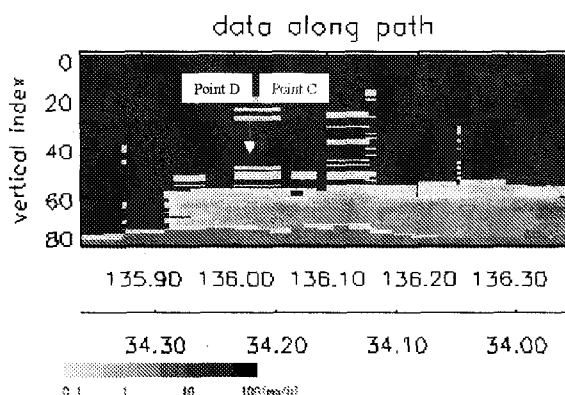


(a) 地上観測地点（ポイント C と D）を含む降雨強度の鉛直断面図

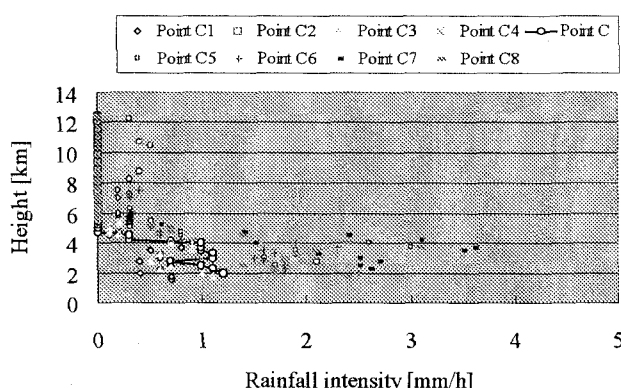


(b) ポイント C と隣接する 8 地点の降雨強度の鉛直分布図

図-6 TRMM/PR で観測された降雨強度の鉛直分布図（10月7日）



(a) 地上観測地点（ポイント C と D）を含む降雨強度の鉛直断面図



(b) ポイント C と隣接する 8 地点の降雨強度の鉛直分布図

図-7 TRMM/PR で観測された降雨強度の鉛直分布図（10月16日）

TRMM/PR と深山レーダ雨量計のレーダ反射因子は一致している。さらに、層状性降雨の特徴であるブライトバンドも高度 4km 前後でレーダ反射因子が大きく、TRMM/PR でも観測されていることが分かる。TRMM/PR の鉛直プロファイルは、連続的に変化しており実際の構造もこのようになっていたと推測される。TRMM/PR が降雨鉛直構造を把握するのに有効であることがわかる。

以上のことより、TRMM/PR を利用することにより、山岳域における地上レーダの遮蔽部の観測や鉛直高分解による降雨の詳細な鉛直構造が可能となり、ブライトバンドなどの実現象を正確に捉えていることから、TRMM/PR の有効性が示されたと考える。

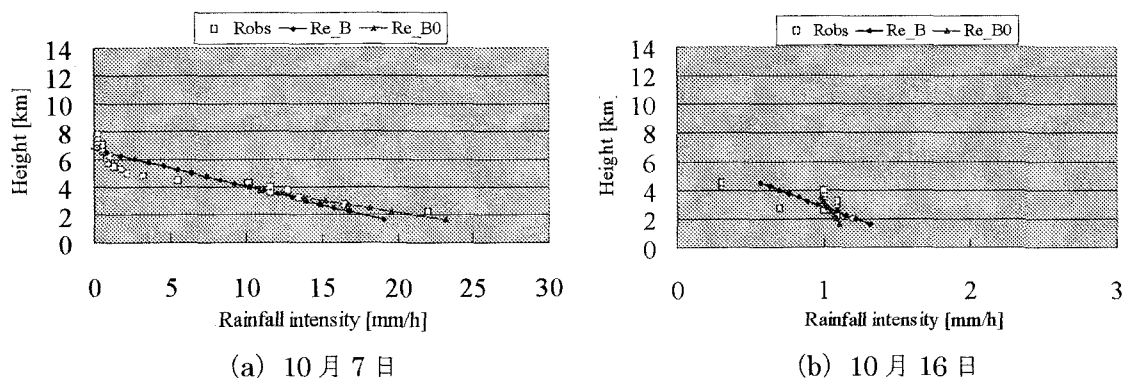
4. 山岳域における降雨の鉛直構造解析

TRMM/PR データを用いて、地上設置降雨レーダでは観測が困難な山岳域における降雨の鉛直構造解析を試みた。

10月7日の地上降雨観測を実施しているポイント C と D の 2 地点を含む降雨強度の鉛直断面図を図 6 (a) に、ポイント C とポイント C に隣接する 8

地点の降雨強度の鉛直分布図を図 6 (b) に示す。図 6 (a) の図中には、地上観測を実施している 2 地点の位置も示している。図 6 (a) より、北緯 34.10 度、東経 136.15 度付近に非常に強い対流性の降雨が観測されていることがわかる。この地点は、大台ヶ原の南東斜面に位置し、尾鷲市の沖から湿った空気が南東斜面に沿って一気に上昇し、大気不安定な状態になり降雨が発生する典型的な地形性の降雨である。一方、観測地点であるポイント C と D の地点では層状性の降雨が観測されており、10～20mm/h 程度の降雨強度である。図 6 (b) に着目すると、高度 4km 付近にブライトバンドが存在し、ブライトバンド高度以下の領域において降雨強度に差はあるが、全ての地点で降雨強度の鉛直分布には高度依存性があり、降雨強度と高度の間には線形関係が成立していると思われる。

次に、10月16日の地上降雨観測を実施しているポイント C と D の 2 地点を含む鉛直断面図を図 7 (a) に、ポイント C とポイント C に隣接する 8 地点の降雨強度の鉛直分布図を図 7 (b) に示す。図 7 (a) より、高度 4km 前後にブライトブライトバ



図－8 鉛直構造を考慮した回帰分析結果

表 1：地上雨量推定結果と観測雨量との比較

	'98 10/7	'98 10/16	'98 10/27
地上推定降雨強度 (Re_B)	19.02 [mm/h]	1.31 [mm/h]	－
地上推定降雨強度 (Re_B0)	23.11 [mm/h]	1.12 [mm/h]	0.45 [mm/h]
地上観測降雨強度 (Robs)	22.70 [mm/h]	1.03 [mm/h]	0.17 [mm/h]

ンドが存在しており、図中の右端の領域において 10mm/h の降雨が観測されている。この領域は海上である。地上観測地点上空では降雨は非常に弱く、降雨強度は数 mm/h 程度である。図 7 (b) に着目すると、図 6 (b) と同様にブライトバンド高度以下の領域において、全ての地点で降雨強度の鉛直分布には高度依存性があり、上空より高度が低くなり、地表面付近ほど降雨強度が強くなっている。降雨強度と高度の間には線形関係が成立していると思われる。数 km 上空より地表面付近の方が降雨強度強くなる現象は、筆者らが京都大学超高層電波研究センターの MU レーダ¹¹⁾を用いて行った雨滴粒径分布の鉛直構造解析の結果と一致しており¹²⁾、雨滴の落下にともなう雨滴生成過程に着目すると、湿潤な日本においては、雨滴の蒸発現象より雨滴の分裂・併合現象が卓越する。その結果、雨滴の直径 1mm 前後の個数が増加し、雨滴の最大粒径も大きくなり雨滴の総個数も増大するものと考えられる。

今回行った山岳域での降雨の鉛直構造解析は、TRMM/PR データを利用することにより初めて可能となった。今回の解析対象領域である大台ヶ原山頂付近は、地上設置降雨レーダの最低ビーム仰角を用いてもビーム高度が 3km 以上となり、山岳域における山腹斜面付近の降雨の構造解析は非常に困難であり、山地による遮蔽や地上設置レーダサイトから遠ざかるとビーム高度が高くなるような観測制限がある領域における降雨構造解析に、TRMM/PR は非常に有効であることが明らかになった。

5. 山岳域における地上降雨量分布推定

TRMM/PR データを用いた山岳域での降雨の鉛

直構造解析より、特に、ブライトバンド高度以下の領域において、降雨強度の鉛直分布には高度依存性があり、降雨強度と高度の間には線形関係が成立していることが明らかになった。そこで、降雨強度 R を高度の 1 次関数；

$$R(H) = a \cdot H + b \quad (1)$$

で表されると仮定し、TRMM/PR で観測された降雨強度の鉛直分布を用いて式 (1) のパラメータ a, b を回帰分析により同定する。なお、回帰分析は 2 通りの方法で行った。1 つは、ブライトバンド領域のデータも用いてパラメータを同定する場合 (以下、「ブライトバンドを含む場合」とする。)、もう 1 つは、ブライトバンド高度以下のデータを用いてパラメータ同定する場合 (以下、「ブライトバンド高度以下の場合」とする。) である。

図 8 (a)、(b) に各解析対象期間に適用した結果を示す。今回は光学式雨量計の 1 分間降雨強度が得られているポイント C のみに適用した。図中の Robs は TRMM/PR で観測された降雨強度、Re_B はブライトバンドを含む場合の回帰直線、Re_B0 はブライトバンド高度以下の場合の回帰直線である。図より、ブライトバンドを含む場合の回帰直線も観測された降雨強度の鉛直分布をある程度表現することは出来ているが、Re_B0 はブライトバンド高度以下の場合の回帰直線がより正確に表現していることがわかる。次に、回帰分析による同定される式 (1) を用いて地上における降雨強度を推定し、地上観測で得られた降雨強度と比較することにより、降雨強度の推定精度の評価を行った。解析は図に示した 2 事例に加えて 10 月 27 日の降雨事例についても行った。なお、

10月27日の降雨事例では、高度4km以上で降雨が観測されておらず、ブライトバンドも存在しないことから、ブライトバンドを含む場合の回帰直線は同定していない。地上雨量推定結果と観測雨量との比較した結果、ブライトバンド高度以下の場合の地上降雨量推定精度が良く、1mm/h以下の精度で推定出来ている。

以上のことから、今回の降雨事例に関して、ブライトバンド高度以下の領域において、降雨強度の高度依存性が顕著である。さらに、降雨強度と高度との関係には線形関係があり、式(1)に示すように各高度における降雨強度は、高度の一次関数で現すことができることが明らかになった。

6. 結論

本研究では、上空から降雨を観測することが可能なTRMM/PR、地上レーダ及び地上観測結果を比較することにより、TRMM/PR及び地上レーダの相互検証を行った。その結果、TRMM/PRの降雨減衰補正後のレーダ反射因子と地上レーダで観測されたレーダ反射因子の水平分布を比較すると、定性的に全期間において一致しており、TRMM/PRは降雨の水平分布の把握にも有効であることを示した。

山岳域における降雨の詳細な鉛直構造解析は、今回TRMM/PRを利用することにより初めて可能となった。降雨強度と高度との関係には線形関係があり、各高度における降雨強度は、高度の一次関数で現すことができることを示した。特に、大台ヶ原山頂周辺は、日本でも有数の豪雨地帯であるが、地上降雨レーダサイトから遠く、最低仰角のビーム高度でも3km以上と高く、地上降雨レーダの観測限界でもあった。これら現在の地上降雨観測網で観測に制限がある地域において、衛星搭載の降雨レーダが有効である。さらに、鉛直分解能が250mという高分解能も降雨の鉛直構造解析には非常に有効であると言える。

今後は、3年間で得られたTRMM/PRデータを用いて、降雨の鉛直構造特性を統計的に明らかにし、地上設置降雨レーダによる山岳域の地上雨量推定手法の構築を行っていく。

謝辞：本研究で用いたTRMM/PRデータは、TRMM/JRA(NASDA/NASA)検証研究として提供されたものであり、国土交通省深山レーダ雨量計データは、国土交通省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所に御提供頂きました。光学式雨量計の設置に際しては、(財)日本気象協会関西支部の方々に御協力頂きました。ここに深く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 古津年章, 黒岩博司, TRMM 搭載降雨レーダ, リモートセンシング学会誌, Vol.18, No.5, pp.28-39, 1998.
- 2) 田中 佐: TRMM 計画の概要, リモートセンシング学会誌, Vol.18, No.5, pp.5-12, 1998.
- 3) 中川勝広、中北 英一、鈴木 喜晴、大石 哲、池淵 周一: 地上降雨レーダによるTRMM/PR検証研究、第2回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ、2000年1月、pp.53-60.
- 4) 中川勝広、中北 英一、鈴木 喜晴、大石 哲、池淵 周一: 地上降雨レーダを用いたTRMM/PRデータ検証に関する研究、水文・水資源学会 2000年研究発表会、2000年8月、pp.138-139.
- 5) 岡本謙一, 石戸喜夫, Robert Meneghini, TRMM 降雨レーダアルゴリズム, リモートセンシング学会誌, Vol.18, No.5, pp.40-51, 1998.
- 6) T. Iguchi and R. Meneghini: Intercomparison of single-frequency methods for retrieving a vertical rain profile from airborne or spaceborne radar data, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol.11, pp.1507-1516, 1994.
- 7) 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤 亨・B. E. Vieux・高埴琢馬: 降雨の3次元構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築, 土木学会水工学論文集, Vol. 40, pp.297-302, 1996.
- 8) 中川勝広・中北英一・佐藤 亨・池淵周一: 降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータとその鉛直部分布, 土木学会水工学論文集, Vol. 41, pp.141-146, 1997.
- 9) 中川勝広・中北英一・佐藤 亨・池淵周一: 雨滴粒径分布の鉛直構造解析とレーダ雨量推定手法の構築, 土木学会水工学論文集, Vol. 42, pp.7-12, 1998.
- 10) 中川勝広、中北 英一、鈴木 喜晴、大石 哲、池淵 周一: TRMM/PRを用いた山岳域の鉛直構造解析と地上雨量分布推定、水文・水資源学会 2001年研究発表会、2000年8月、pp.180-181.
- 11) Fukao, S., K. Wakasugi, T. Sato, T. Tsuda, I. Hirota, I. Kimura and S. Kato: Direct Measurement of Air and Precipitation by Very High Frequency Doppler Radar, Nature, Vol.316, No.6030, pp.712-714, 1985.
- 12) 中川勝広、中北英一、佐藤 亨・池淵周一: 降雨成因を考慮した雨滴粒径分布の鉛直構造解析、京都大学防災年報、第40号、B-2、pp.263-274、1997.

(2001. 10. 1受付)