TRMM/PRバージョン7プロダクトの強い雨

HEAVY RAIN ESTIMATES IN TRMM/PR STANDARD PRODUCT VERSION 7

瀬戸心太¹・井口俊夫²・内海信幸³・沖大幹⁴
Shinta SETO, Toshio IGUCHI, Nobuyuki UTSUMI, and Taikan OKI

¹正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²非会員 Ph.D (独)情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

³正会員 修士(工学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

⁴正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

The latest version of the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)/PR (Precipitation Radar) standard product (Version 7; V7) was recently released. This study focuses on heavy rain rate estimated in V7, which are more frequent than in the previous version (Version 6; V6). Surface reference technique is crucial for attenuation correction particularly of heavy rainfall, and becomes more reliable in V7, mainly because of ensemble of multiple SRT methods. Though the accuracy of clutter detection and the validity of Z-R relations are carefully examined, there are still possible rain estimates with extremely heavy rate of more than 300 mm/h. As hourly rain rate, 300 mm/h should be unexceptional, but the time scale of PR measurement may be shorter than 1 hour and these extremely heavy rain rate estimates should be investigated considering the time scale. Relations between heavy rain rates and surface temperature are analyzed with V7 and surface measurements. 99% rain rates in V7 generally increase with the increase of daily surface temperature, though daily rain amount by gauges tends to decrease when daily surface temperature becomes higher than 25 °C, which implies different time scales between PR and gauge measurements.

Key Words : heavy rain, time scale, precipitation radar (PR), surface reference technique, C-C relation

1. はじめに

2011年7月, 熱帯降雨観測衛星(TRMM)に搭載された降雨レーダ(PR)の標準アルゴリズムがバージョン7(V7)に更新された¹⁾. 1997年12月の観測開始以来のプロダクトもV7で再処理され公開済である. PRの観測期間は間もなく14年に達し(原稿執筆時点), 2013年に運用開始予定の後継センサである二周波降水レーダ(DPR)²⁾による観測期間に切れ目なくつながることも十分期待できる. 将来的には, 河川計画のための水文統計解析や気候変動影響評価など長期的なデータを要する実務・研究においても, 衛星観測が大きな役割を果たすことが期待される. そのためには, 観測精度のさらなる向上と, 衛星観測の特性を活かした利用法の検討が重要と考える.

降水強度について, PRによる推定値を雨量計による観測値と比較する際には, 時間スケールに注意する必要がある. PRの鉛直分解能は250mであり, 雨滴の代表的な落下速度を1~5 m/秒とすると, PRで観測された雨は, およそ1~5分程度かけて雨量計に蓄積されることになる. このことから, PRの降水強度推定の時間スケールは数

分のオーダーとみられる. ただし, PRと雨量計の観測範囲が異なるため(PRは直径約5km, 一般的な雨量計は直径20cm), PRの観測範囲内における雨の非一様性を考慮する必要がある. 単一の積雲の代表的な大きさはPRの観測範囲と同オーダーで, その寿命は1時間程度であることを考えると, PRの降水強度推定の時間スケールは1時間を超えないと考えられる.

近年, 社会的影響の大きい都市型水害においては, 強い雨の発生から河川・下水道の増水までの時間が短い. 短い時間スケールの降水強度の情報が得られるということは, 雨量計観測に対する衛星降水観測の利点であると言える. 長期間データを蓄積することで, 短時間降水強度の極値についての情報を得ることも可能となる.

本論文では, PR V7を上記のような目的に活用するために重要となる, 短い時間スケールにおける強い雨の推定精度について検討する. なお本論文では, 下水道の整備目標としてよく用いられる50mm/hを超える雨を「強い雨」として扱う. 以下の2章では, V7の概要を説明し, 3章ではアルゴリズムの妥当性という視点から, V7の強い雨を検証する. 4章では, V7を用いた強い雨の特性についての解析の一例を示す.

2. V7における降水強度推定

(1) 概要

PRの標準アルゴリズム³⁾は、図-1に示すように、レーダ反射因子の減衰補正と、降水強度への変換の二つからなる。減衰補正前のレーダ反射因子を Z_m 、減衰補正後のレーダ反射因子を Z_e と書く。減衰補正には、表面参照法⁴⁾とHitschfeld-Bordan(HB)法⁵⁾を組み合わせたハイブリッド法が採用されている。表面参照法は、降雨によるパス積算減衰量(PIA)の第一推定値として、降雨のあるピクセルと降雨のないピクセル群の地表面後方散乱断面積の差($\Delta\sigma^0$)を計算する。HB法は、減衰係数 k と Z_e の関係を、式(1)のべき乗則で与えることで、 Z_m から Z_e を解析的に得る。

$$k = \varepsilon \alpha_0 Z_e^\beta \quad (1)$$

ここで、 α_0 および β は、降水タイプ等に応じてあらかじめ決められている⁶⁾。 ε は鉛直一定な定数であり、HB法では固定値($\varepsilon=1$)だが、ハイブリッド法においては表面参照法の情報を加えて修正される。式(1)で得られた k をパス全体で積分するとPIAの最終推定値が得られる。表面参照法の信頼度が高い場合には、PIAの最終推定値は、表面参照法による第一推定値に近くなる。一般に強い雨の場合、表面参照法の信頼度は高い。

降水強度 R への変換には、式(2)の関係が用いられる。

$$R = a Z_e^b \quad (2)$$

係数 a, b は、降水タイプ等に依存するが⁶⁾、式(1)の $\alpha(\varepsilon \alpha_0), \beta$ と整合性を持つように修正される⁷⁾。すなわち、減衰補正の際に ε が変化すると、 a, b も変化する。対流性で 0°C の液体降水の場合、以下ようになる。

$$\log_{10}(a) = -1.43 + 0.86 \times \log_{10}(\varepsilon) - 1.12 \times \{\log_{10}(\varepsilon)\}^2 \quad (3)$$

$$\log_{10}(b) = -0.19 + 0.098 \times \log_{10}(\varepsilon) + 0.19 \times \{\log_{10}(\varepsilon)\}^2 \quad (4)$$

ε が通常取りうる範囲では、 a, b は、 ε の単調増加関数となる。すなわち、同じ Z_e に対して ε が大きくなるほど R も大きくなる。また、 Z_e が10dB増えると、 R は 10^6 倍になる($\varepsilon=1$ の場合、約4.4倍)。

(2) V7における変更点

V7の一つ前のバージョン6(V6)⁸⁾は2004年に公開されて以来、広く使われており、様々な検証が行われてきた⁹⁾。陸上では、降水量を過小評価しているという指摘が多くあり¹⁰⁾、V7でのアルゴリズム改良に反映された。特に、表面参照法について、大きな変更が加えられた。

表面参照法は、地表面状態に依存するため、陸上と海上で異なる手法が用いられている。以下、陸上の場合を説明する。V6では、空間参照法(Forward処理)と時間参照法の2種類の表面参照法があり、ピクセルごとに信頼度の高い手法を選ぶ¹¹⁾。特に時間参照法では、降水による表層土壌水分量増加の影響(土壌水分効果と呼ぶ)を考慮せずPIAを過小評価していること¹²⁾、また空間参照法

図-1 標準アルゴリズムの概略図

では土地被覆が大きく異なるピクセルを比較することによりPIAを極端に過大評価する場合があること¹³⁾が指摘されている。

V7での表面参照法は、空間参照法(Forward処理)、同(Backward処理)、時間参照法の3つがあり、それぞれの信頼度の重みをつけた平均によりPIAの第一推定値を求めている。前述の問題を軽減するため、空間参照法では一定以上距離の離れたピクセルは参照しないようにして、さらに、参照ピクセルを直前の観測から探すForward処理だけでなく直後の観測から探すBackward処理を加えた。土壌水分効果については、V7の表面参照法でも十分説明できていないと予想されたため、PIAの第一推定値に一律0.5dBを加えるという対策が行われている。

V7では、表面参照法以外にも、ピクセル内の非一様性の導入、固体降水・融解層における減衰量特性の鉛直プロファイルの修正などが行われている。

3. V7における強い雨

この章では、V7のプロダクトにおける強い雨について、V6のプロダクトとの比較により、アルゴリズムの改良の効果を検証する。本論文の主な関心は陸上にあるが、参考のために、表面参照法の精度が高いと考えられる海上での結果も示す。

なお、本章の結果は、V7の公開前検証において行われたものであり、2000年1年間を対象に、V7についてはOAT(Operational Algorithm Test)プロダクトを用いている。OATと公開されている標準プロダクトの差異は、非常に小さい。結果の一部は速報されているが¹⁴⁾、本論文では、100mm/hを超える非常に強い雨も含めて解析した結果を示す。入射角依存性の問題については、速報を参照されたい。

(1) 強い雨の寄与

降水強度の累積分布を、陸上および海上、V6および

V7について、それぞれ示す(図-2). 横軸の降水強度以下の雨のみから算出された平均降水量を縦軸に示している. なお, 降水強度推定値の上限は300mm/hである. 計算結果が300mm/hを超える場合は300mm/hに修正されている.

陸上の場合, 総降水量(300mm/hまでの累積値)では, V7の方がV6より高いが, 50mm/hまでの累積値では, V7とV6はほぼ等しい. したがって, V7では, 50mm/hを超える強い雨の寄与が大きい. 一方, 海上では, 総降水量だけでなく50mm/hまでの累積値でもV7がV6より高い. 50mm/hを超える強い雨の寄与分について, V7とV6の差の陸上での地域的分布を図-3に示す. もともと降水量の多い熱帯域を中心にV6よりV7で高くなっている. ただし, 島嶼部・沿岸部ではV6の方が高い地点も見られる.

(2) 強い雨の要因

2(1)での説明から分かるように, 強い雨には, Z_e が高い, および, ε が高い, の2つの要因が考えられる.

図-4に, 50mm/h~300mm/hまでの強い雨について, 10mm/hごとのビンに分類し, 地表面付近の Z_e (dB)の平均値を示す. ε が一定とすれば, Z_e (dB)の変化は, $\log R$ の変化に比例することから, 横軸は対数軸とした. 図中の斜めの直線は, 代表的な変化率(Z_e が10dB増えると R は4.4倍になる)に相当する. 陸上・海上ともに, V6に比べてV7の方の変化率が高く, V7では代表的な変化率に近い. V7では, 強い雨の要因は高い Z_e にあると言える.

図-5には, 図-4と同様の方法で, ε について示す. V6では, 強い雨ほど ε が高い傾向が見られるが, V7では, 降水強度と ε の間に明確な相関は見られない. V6での強い雨の要因は Z_e だけでなく ε にもある.

(3) 強い雨の減衰補正

V7での強い雨の要因である Z_e の妥当性, すなわち減衰補正の妥当性について検討する. V7での強い雨について, 3種類の表面参照法による $\Delta\sigma^0$ を図-6に示す. 少なくとも150mm/h付近までは, 3種類の $\Delta\sigma^0$ に大きな差は見られない. 図-7には, この3種類の $\Delta\sigma^0$ から作成されたPIAの第一推定値(青実線)とハイブリッド法の結果であるPIAの最終推定値(青鎖線)を示す. 最終推定値は, 第一推定値よりやや低くなる傾向にある. これは, HB法で仮定する k - Z 関係($\varepsilon=1$)が必ずしも強い雨には適切でないことを示唆している.

図-7には, 比較のために, V6におけるPIAの第一推定値(赤実線)と最終推定値(赤鎖線)も示してある. ただし, 図の横軸はV7における降水強度推定値である. すなわち, V6とV7を 픽セルごとにマッチアップして, V7の降水強度が50mm/h以上であった 픽セルでのV6の推定値について示している. 第一推定値は, V6とV7の間でほとんど変わらないが, 最終推定値は, V6ではV7よりも低くなっている. この理由として, V7では3種類の $\Delta\sigma^0$ を用いることにより, それらがよく一致する場合に

図-2 降水強度の累積分布. 青実線はV7陸上, 青点線はV7海上, 赤実線はV6陸上, 赤点線はV6海上.

図-3 50mm/h以上の強い雨による寄与分の変化(V7-V6).

図-4 50mm/h以上の強い雨における地表面付近の Z_e (dB). 横軸は降水強度を対数軸で示す(右端は300mm/h). 青実線はV7陸上, 青点線はV7海上, 赤実線はV6陸上, 赤点線はV6海上.

図-5 50mm/h以上の強い雨における ε . 横軸は降水強度を対数軸で示す(右端は300mm/h). 青実線はV7陸上, 青点線はV7海上, 赤実線はV6陸上, 赤点線はV6海上.

図-6 V7の強い雨に対する、各表面参照法による $\Delta\sigma^0$ 。時間参照法を×印、空間参照法(Forward処理)を■印、空間参照法(Backward処理)を□印で示す。

図-7 V7の強い雨に対するPIA推定値。V7第一推定値を青実線、V7最終推定値を青鎖線、V6第一推定値を赤実線、V6最終推定値を赤鎖線で示す。

は、表面参照法の信頼度を高く設定できるようになったためと説明できる。

次に、V6での強い雨について、同様の解析を図-8、図-9に示す。V6でも使われている空間参照法(Forward処理)が、他の2種類の手法に比べて高い $\Delta\sigma^0$ を示している。V6では、第一推定値は、空間参照法(Forward処理)の $\Delta\sigma^0$ に強く依存しており、V7での第一推定値より高くなっている。この差が、PIAの最終推定値および降水強度推定値にも影響しているとみられる。

図-3に示した沿岸域で強い雨がV6>V7となる現象は、これと似ており、表面参照法および最終的なPIA推定値もV6>V7となっている。沿岸域では、V6での時間参照法においてデータベースが海陸の影響を十分区別できていない問題があり、V7ではこれが改良された効果もあるとみられる。

以上のことから、強い雨における減衰補正の妥当性に

図-8 V6の強い雨に対する、各表面参照法による $\Delta\sigma^0$ 。時間参照法を×印、空間参照法(Forward処理)を■印、空間参照法(Backward処理)を□印で示す。

図-9 V6の強い雨に対するPIA推定値。V7第一推定値を青実線、V7最終推定値を青鎖線、V6第一推定値を赤実線、V6最終推定値を赤鎖線で示す。

関する考察をまとめると、V6での強い雨は、1種類の表面参照法に強く依存しており、過大評価されている可能性がある。一方、V7での強い雨は、3種類の表面参照法で推定されているという点で、V6より信頼できる。

(4) 300mm/hの雨

先に述べたように、標準プロダクトでは300mm/hを降水強度の上限としている。これは、データサイズの都合であるが、はたして300mm/h以上の強い雨は観測されないのだろうか。1時間降水量の世界最大値は401mm/h、日本最大値は187mm/hと報告されており¹⁵⁾、300mm/hを超えることは極めて稀と言える。しかし、1章で述べたように、PRで観測される降水強度の時間スケールは1時間より短いと考えられる。例えば、1分降水量の世界最大値は38mm/minであり、300mm/hに相当する5mm/minをはるかに超えている。

図-10 V7において、300mm/hを推定した地点を黒×・青●・赤●で示す。そのうち、青●・赤●は、クラッタ・減衰補正による過大評価がないとみられるもの。赤●は、 $Z=200R^{1.6}$ の関係式を用いても、300mm/hを超えるもの。

V7で、2000年の1年間に、300mm/hが推定された場所を図-10に示す。全部で154回あり、そのうち陸上が151回、海上が3回であった。これに対して、V6では300mm/hの推定値は陸上・海上ともにゼロであった。

V7で強い雨が aumentando いる一般的な理由は、3章で説明したが、特に強い雨の場合は、クラッタの誤判定が影響している可能性がある。V7では、地表面によるクラッタを降雨によるエコーから区別するための手法が変更されたが、より地表面近くまで雨をとらえられるようになったことの見返りに、クラッタを降雨エコーと誤判定することがV6よりも増えていることが指摘されている¹⁰。そこで、V6とV7のマッチアップにより、V6では降雨が観測されていないケース、および、V7でクラッタの推定位置がV6より地表面に近くなっているケースを除外した。その結果、92(陸上89、海上3)回の300mm/h推定値が残った。

次に、減衰補正による過大評価の可能性があると疑われるケースをできるだけ除外する。表面参照法が3種類揃っていないケース、および、3種類の表面参照法の $\Delta\sigma^0$ の最小値よりもPIAの最終推定値が大きいケースを除外した結果、19(陸上16、海上3)回の300mm/hの推定値が残った。この19回については、特定の場所に集中するなどの不自然な傾向は認められない。

最後に、 Z - R 関係の妥当性についての検証が必要だが、容易ではない。εで修正された Z - R 関係を使わずに、一般的な $Z=200R^{1.6}$ を用いるならば、 $R=300\text{mm/h}$ は $Z_c=62.6\text{dB}$ に相当する。地表面付近の Z_c がこの値を超えているのは、6回(いずれも陸上)であった。

4. V7を用いた強い雨の特性に関する解析例

本論文の最後に、V7を用いた強い雨の特性に関する解析例として、地表面気温との関係について示す。近年、地球温暖化への関心を背景として、地表面気温と強い雨の関係に関する考察が多く行われている¹⁷⁾。強い雨の指標として、地表面気温ビンごとの99%(上位1%)降水強度を用いることが多い。地表面気温の増加に対して、99%

降水強度の増加割合が、飽和水蒸気圧の増加割合(Clausius-Clapeyronの関係)とよく一致する例も報告されている¹⁷⁾。その一方で地域性も強く¹⁸⁾、熱帯域などでは、気温の増加に対して、99%降水強度は減少することも報告されている¹⁹⁾。多くの研究¹⁷⁾では、日単位の雨量データを用いているが、アメダス10分データを用いて行った研究¹⁹⁾では、南西諸島において、日降水量の99%降水強度は気温が約25℃を超えると減少するが、10分降水量や時間降水量では99%降水強度の減少は見られなかった。このことは、降水量データの時間スケールによる特性の違いを示している。

GHCN(Global Historical Climatology Network)による日降水量・日平均気温(日最高気温と日最低気温の平均)の観測データがある緯度1°×経度1°グリッドについて、V7の降水強度推定値の日最大値および日平均値を抽出した。また、GHCNの降水・気温データについては、グリッドに観測点が複数ある場合、その平均を用いる。このようにして準備したデータを、GHCNの日平均気温によりビン(平均して2℃幅、ただしビンごとのサンプル数が一定となるようにする)に分類し、ビンごとにV7の降水強度およびGHCNの日降水量の99%値を求めた。データが利用可能な陸上の全域に対する結果を図-11に示す。GHCNの日降水量は、25℃付近をピークとして、それより気温が高い場合には減少しているが、V7の降水強度には、そのような減少傾向は見られない。これらのことは、観測の時間スケールの違いを反映している。

5. まとめ

衛星観測される降水強度は、雨量計で観測される降水量と異なった特性を持っている。PRで推定される降水強度の時間スケールは、数分から長くても1時間程度と考えられる。一般的に利用可能な雨量計のデータよりも、短い時間スケールの降水強度情報を広域で利用できることが、衛星観測の利点である。

PRの最新の標準プロダクトV7では、陸上において強い雨が頻繁に推定されている。これらの強い雨は、 Z_c が

図-11 地表面気温と99%降水強度の関係。TRMMの1°グリッド最大値を青●、同平均値を青○、雨量計日降水量を黒●で示す。

高いことが主な要因であることが確認された。表面参照法がV6に比べて大きく改善されており、減衰補正も妥当に行われていると言える。Z-R関係の妥当性についてはさらなる検討が必要であるが、少なくとも年間数例のケースについては、300mm/hを超える極めて強い雨が観測された可能性がある。こうした強い雨について、観測の時間スケールの定量化とあわせて検討する必要がある。

DPRではPRと同等の観測を継続するとともに、二周波観測を活かして表面参照法²⁰⁾およびZ-R関係²¹⁾の精度についても向上することが期待できる。継続的なデータの蓄積および精度向上により、将来的には、河川計画の基礎となる計画降水量や、その気候変動影響の評価に、衛星観測が大きな役割を果たす時代が来ること期待している。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金・若手研究(B)「水分野における実利用に適した衛星降水マップの作成(代表：瀬戸心太)」および環境省環境研究総合推進費「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」(課題番号S-8)の一部である。

参考文献：

- 1) Iguchi, T., R. Meneghini, J. Awaka, T. Kozu, J. Kwiatkowski, N. Yoshida, S. Seto, and K. Okamoto: Version 7 algorithm for the TRMM Precipitation Radar, *35th Conference on Radar Meteorology*, Pittsburgh, Sep. 2011.
- 2) 宇宙航空研究開発機構：宇宙から見た雨2, P109, 2008.
- 3) Iguchi, T., T. Kozu, R. Meneghini, J. Awaka, and K. Okamoto: Rain-profiling algorithm for the TRMM Precipitation Radar, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 39, pp 2038-2052, 2000.
- 4) Meneghini, R., T. Iguchi, T. Kozu, L. Liao, K. Okamoto, J. A. Jones, and J. Kwiatkowski: Use of the surface reference technique for path attenuation estimates from the TRMM Precipitation Radar, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 39, pp 2053-2070, 2000.

- 5) Hitschfeld, W., and J. Bordan: Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *J. Meteor.*, Vol. 11, pp58-67, 1954.
- 6) Kozu, T., T. Iguchi, T. Shimomai, N. Kashiwagi: Raindrop size distribution modeling from a statistical rain parameter relation and its application to the TRMM Precipitation Radar rain retrieval algorithm, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, Vol. 48, pp716-724, 2009.
- 7) Kozu, T., T. Iguchi, T. Kubota, N. Yoshida, S. Seto, J. Kwiatkowski, Y. N. Takayabu: Feasibility of raindrop size distribution parameter estimation with TRMM Precipitation Radar, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 87A, pp53-66, 2009.
- 8) Iguchi, T., T. Kozu, J. Kwiatkowski, R. Meneghini, J. Awaka, and K. Okamoto: Uncertainties in the Rain Profiling Algorithm for the TRMM Precipitation Radar, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 87A, pp1-30, 2009.
- 9) Shige, S., H. Sasaki, K. Okamoto, and T. Iguchi: Validation of rainfall estimates from the TRMM precipitation radar and microwave imager using a radiative transfer model: 1. Comparison of the version-5 and -6 products, *Geo. Res. Let.*, Vol. 33 doi:10.1029/2006GL02630, 2006.
- 10) Kawamoto, N., R. Oki, S. Shimizu: Comparison between TRMM/PR and AMeDAS rain gauge network in terms of annual rainfall, *IGARSS*, Vancouver, July 2011.
- 11) Meneghini, R., J. A. Jones, T. Iguchi, K. Okamoto, and J. Kwiatkowski: A hybrid surface reference technique and its application to the TRMM Precipitation Radar, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 21, pp1645-1658, 2004.
- 12) Seto, S., and T. Iguchi: Rainfall-induced changes in actual surface backscattering cross sections and effects on rain-rate estimates by spaceborne precipitation radar, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 24, pp1693-1709, 2007.
- 13) Seto, S., T. Oki, and T. Iguchi: Evaluation and improvement of surface reference techniques for the TRMM PR, *IGARSS*, Boston, July 2008.
- 14) Seto, S., and T. Iguchi: Comparison of TRMM PR V6 and V7 focusing heavy rainfall, *IGARSS*, Vancouver, July 2011.
- 15) 木口雅司, 沖大幹：世界・日本における雨量極値記録, 水文・水資源学会誌, 第23巻, pp231-247, 2010.
- 16) 濱田篤, 高藪縁：TRMM V7_2A25データのextreme rain値に対するフィルタの作成, 日本気象学会秋季大会, 名古屋, 2011.
- 17) Allan, R. P., and B. J. Soden: Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes, *Science*, Vol. 321, pp1481-1484, 2008.
- 18) Lenderink, G., and E. van Meijgaard: Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes, *Nature Geoscience*, Vol. 1, pp511-514, 2008.
- 19) Utsumi, N., S. Seto, S. Kanae, E. Maeda, T. Oki: Does higher surface air temperature intensify extreme precipitation?, *Geo. Res. Let.*, Vol. 38, L16708, doi:10.1029/2011GL048426.
- 20) Meneghini, R., L. Liao, S. Tanelli, and S. L. Durden: Investigation of a dual-frequency surface reference technique for estimates of path-integrated attenuation, *Conference on Radar Meteorology*, Pittsburgh, Sep. 2011.
- 21) Seto, S., and T. Iguchi: Applicability of the iterative backward retrieval method for the GPM Dual-frequency Precipitation Radar, *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 49, pp 1827-1838, 2011.

(2011. 9. 30 受付)