

# TRMM/PR降雨強度推定アルゴリズムの再検討 -表面参照法に起因するバイアス-

## A REVIEW OF TRMM/PR RAIN RATE RETRIEVAL ALGORITHM BIASES CAUSED BY SURFACE REFERENCE TECHNIQUE

瀬戸心太<sup>1</sup>  
Shinta SETO

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) (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)

The standard rain rate retrieval algorithm for TRMM/PR applies hybrid method with surface reference technique (SRT) and Hitschfeld-Bordan method. Path integrated attenuation (PIA) estimated by the SRT of the standard algorithm is sometimes negatively biased because surface backscattering cross section increases during rainfall. This is called “soil moisture effect” in this paper and it is not explicitly considered in the SRT of the standard algorithm. Temporal reference method does not follow this effect at all and spatial reference method partly follows this effect, but fails in some area such as the Sahel. The negative bias in PIA leads to the negative bias in the rain rate estimates especially for heavy rain.

**Key Words :** precipitation, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), surface reference technique, soil moisture.

### 1. 序論

世界初の衛星搭載降雨レーダであるTRMM/PRは、マイクロ波放射計や可視・赤外放射計などの従来の衛星搭載センサでは精度が低かった陸上での降雨強度推定に、とくに威力を発揮している。TRMM/PRの標準アルゴリズム<sup>1)</sup>による降雨強度推定プロダクトは特に気象学の研究で広く使われており、マイクロ波放射計や可視・赤外放射計による降雨強度推定アルゴリズム開発においてはTRMM/PRによる結果が教師役として使われることもある。GPM(全球降水観測計画)のもとでは、DPR(2周波の降水レーダ)をメインとして、3時間間隔での観測が計画されており、時間分解能の向上により、水循環・水資源研究にも直接使えるようになることが期待されている。そのためには、リトリバル精度のさらなる向上が欠かせない。TRMM/PRの標準アルゴリズムは、これまでに改良を重ね現在Version6 (V6)が使われているが、雨滴粒径分布・表面参照法・降雨の非一様性・雲水など降雨以外による減衰などが無視できない誤差の原因となりうるため、さらなる改良に向けた検討が必要である<sup>2)</sup>。本研究では、陸上の降雨強度推定における表面参照法の影響に着目した。

本研究での解析には、標準アルゴリズム (Version6) により計算されNASAおよびJAXAから公開されているプロダクト (2A21, 2A25 と呼ばれる) を用いる。特に条件を断らない限り、2001年7月の全データを用いた結果である。

### 2. TRMM/PR 降雨強度推定標準アルゴリズム

TRMM/PRの標準アルゴリズム (V6) の概略を以下に示す (図-1参照)。TRMM/PRで観測される受信電力から、観測レーダ反射因子  $Z_m(r)$  の鉛直プロファイルが得られる。 $r$  はビーム方向に測った距離であり、降雨上端で0、地表面で  $r_s$  とする。アルゴリズムの第一段階は、 $Z_m(r)$  から降雨による減衰を補正して真のレーダ反射因子  $Z_e(r)$  を推定することであり、第二段階は  $Z_e(r)$  を降雨強度  $R(r)$  に変換することである。 $Z_m(r)$  と  $Z_e(r)$  の関係は式(1)で示される。

$$Z_m(r) = Z_e(r) \exp \left[ -0.2 \ln(10) \int_0^r k(s) ds \right] \quad (1)$$

ここで、 $k(x)$  は単位距離あたりの降雨による減衰量であり、 $Z_e(x)$  の関数として、 $k(x) = \alpha(x) Z_e(x)^{\beta(x)}$  の形で表現される。 $\alpha(x)$ 、 $\beta(x)$  は粒径分布に依存する。

古典的なHitschfeld and Bordanの方法 (HB法) では、

$\alpha(r)=\alpha_0(r)$ ,  $\beta(r)=\beta_0$  ( $\beta_0$ は $r$ に依存しない)と固定することで、式(1)を解析的に解く。地表面における $Z_e$ は式(2)のように求まる。

$$Z_e(r_s)=Z_m(r_s)/(1-\zeta)^{1/\beta_0} \quad (2)$$

ただし、 $\zeta=0.2\beta_0 \ln(10) \int_0^{r_s} \alpha_0(s)Z_m(s)^{\beta_0} ds$ である。

仮定した $\alpha_0(r)$ ,  $\beta_0$ の値が不適切であると、 $\zeta$ が1を超えて、解が存在しない場合がある。

衛星搭載降雨レーダの場合、 $Z_m$ に加えて、地表面後方散乱断面積の観測値[dB] $\sigma_m^0$ が利用できる。 $\sigma_m^0$ も降雨時には式(3)に示すように降雨減衰の影響を受けている。

$$\sigma_m^0=\sigma_e^0-2\int_0^{r_s} k(s)ds \quad (3)$$

ただし、 $\sigma_e^0$ は真の地表面後方散乱断面積[dB]である。

また、 $2\int_0^{r_s} k(s)ds$ は、地表面までの積算減衰量[dB]であり、これをPIAと呼ぶ。

表面参照法とは降雨時の $\sigma_e^0$ を推定する方法のことであり、その推定値を $\sigma_{ref}^0$ と表す。降雨時に観測された $\sigma_m^0$  (降雨時であることを明示するため $\sigma_R^0$ と書き直す)と $\sigma_{ref}^0$ を用いて、PIAの推定値 $PIA_{ref}$ が得られる。

$$PIA_{ref}=\sigma_{ref}^0-\sigma_R^0 \quad (4)$$

一方、HB法から計算されるPIAは、式のようになる。

$$PIA_{HB}=-\frac{10}{\beta_0} \log_{10}(1-\zeta) \quad (5)$$

通常、 $PIA_{ref}$ と $PIA_{HB}$ は一致しない。 $\alpha(r)=\varepsilon \times \alpha_0(r)$ として修正するとPIAは次のようになる。

$$PIA(\varepsilon)=-\frac{10}{\beta_0} \log_{10}(1-\varepsilon\zeta) \quad (6)$$

ここで、 $PIA_{ref}=PIA(\varepsilon)$ となるように $\varepsilon$ を決めるのが $\alpha$ 修正法である。これは、表面参照法を完全に信用する方法である<sup>3)</sup>。これに対して、標準アルゴリズムでは $PIA_{ref}$ の推定誤差を考慮して、確率的取り扱いをする。ある $PIA(\varepsilon)$ が実現する確率 $Pb(\varepsilon)$ は、 $PIA_{ref}$ が $PIA(\varepsilon)$ の周りに正規分布するとし、また $\log(\varepsilon)$ が1の周りに正規分布すると計算される。

PIAが決まると、 $Z_e(r_s)$ [dB]= $Z_m(r_s)$ [dB]+PIAとして、 $Z_e(r_s)$ が求まるから、これを降雨強度 $R(r_s)$ に変換する。ここで、 $R=aZ_e^b$ の関係を使うが、 $a$ ,  $b$ も粒径分布に依存する。このため、 $\varepsilon$ によって $a$ ,  $b$ も変わることになる。標準アルゴリズムの場合は、各 $PIA(\varepsilon)$ に対して降雨強度 $R(r_s; \varepsilon)$ を計算し、実現確率 $Pb(\varepsilon)$ の重みをつけて平均したものが最終的な降雨強度推定値となる。ただし、 $\zeta < 0.1$ の場合には、降雨減衰がほとんどなく、表面参照法が信頼できないため、利用されない。この場合には、HB法とほとんど同じ解となる。

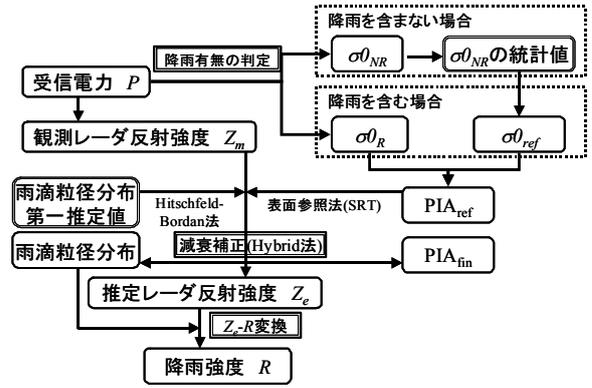


図-1 TRMM/PR降雨強度推定アルゴリズムの概略図。

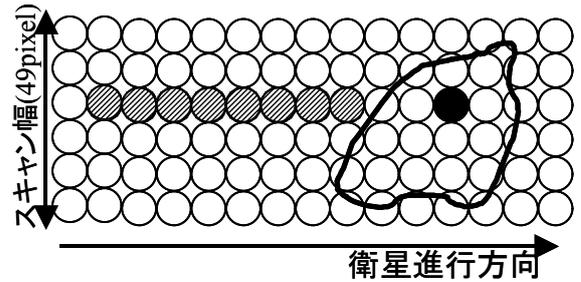


図-2 空間参照法の説明。太線内を降雨域とする。黒塗り以示した対象ピクセルに空間参照法を適用する場合、ハッチをかけた8つのピクセルを利用する。

### 3. 表面参照法とそのバイアス

表面参照法は、衛星搭載レーダの利点であり、一般に未知である粒径分布についての情報を与える貴重な役割を果たす。本節では、表面参照法について詳しく述べる。

#### (1) 標準アルゴリズムで用いられる表面参照法

表面参照法の良し悪しは、 $\sigma_e^0$ を如何に推定するかにかかっている。標準アルゴリズムでは、降雨の有無によって $\sigma_e^0$ は変化しないと仮定している。表面参照法は、陸上と海上で違いがあるが、本論文では陸上についてのみ述べることとする。陸上では、空間参照法と時間参照法が併用されている。空間参照法は、図-2に示すように、降雨減衰補正の対象となるピクセル(対象ピクセル)と同じアングルピンであり、同じ地表面タイプ(陸)をもつ無降雨のピクセルを、直前から8つ選択する。TRMMは西から東の方向へと移動しながら観測するため、対象ピクセルの西側からサンプリングされることになる。時間参照法は、対象ピクセルと同じグリッド(緯度経度 $1^\circ$ の格子)、同じ入射角で、前の月に観測された無降雨のピクセルを全て利用する。各方法で選択されたピクセルの $\sigma_m^0$ から、それぞれ平均と標準偏差を計算し、標準偏差が小さい方法を採用し、その平均を $\sigma_{ref}^0$ とする<sup>4)</sup>。

## (2) 表面参照法のバイアス

PIAはその定義から、正の値でなくてはならない。しかしながら、表面参照法で推定された $PIA_{ref}$ は負の値をとりうる。比較的弱い降雨である $\zeta < 0.1$ の場合について、 $PIA_{ref}$ の平均値を図-3に示す。時間参照法が採用された場合には、サヘル・インド・オーストラリア・中国北部・北米南西部などで、 $PIA_{ref} < 0$ となっており、明らかに過小評価している。空間参照法が採用された場合には、時間参照法の場合に比べて程度は弱いが $PIA_{ref} < 0$ となる地域が残っている。サヘルでは空間参照法でも比較的強い過小評価となっている<sup>5)</sup>。

## (3) 土壌水分効果

PIAを過小評価している、すなわち $\sigma_e$ を過小評価していることから、降雨の有無によって $\sigma_e$ は変化しないという仮定を再検討する必要がある。ここで、定式化のために、無降雨時の $\sigma_m$ について、グリッド（緯度経度 $1^\circ$ ）、各月、入射角別に平均値を求め、その値を $\langle \sigma_m \rangle$ とする。 $\sigma_m$ 、 $\sigma_R$ 、 $\sigma_e$ 、 $\sigma_{ref}$ などについて(表-1参照)、対応する $\langle \sigma_m \rangle$ からのアノマリーをとったものを、 $\Delta$ をつけて表す。例えば、 $\Delta \sigma_e = \sigma_e - \langle \sigma_m \rangle$ である。すると、上記の仮定とは $\Delta \sigma_e = 0$ と表現できる。

無降雨ピクセルのうち、降雨に近いピクセルを選択して、 $\Delta \sigma_m$ を計算する。ここで、降雨との距離を同一アングルビン内のもっとも近い降雨ピクセルまでのピクセル数で表現する。また、もっとも近い降雨域からみて西側か東側かでも分類する。図-4に、降雨域に対する位置と降雨域からの距離別の $\Delta \sigma_m$ の平均値を示す。降雨に近いほど $\Delta \sigma_m$ は高い。10ピクセル(約40km)離れても、 $\Delta \sigma_m > 0$ であり、一般の無降雨域よりは高い $\sigma_m$ を持つ。これは、降雨域の近くでは、直前に降雨があった可能性が比較的高く、降雨域と似た地表面状態にあると考えられるからである。無降雨域については、 $\sigma_m = \sigma_e$ であるから、降雨域に近づくほど $\Delta \sigma_e > 0$ となっていることになる。このことから、降雨域では $\Delta \sigma_e > 0$ が成り立つことが予想される。

次に、 $\zeta < 0.1$ の場合の降雨ピクセルについて $\Delta \sigma_R$ を計算する。その結果(図-5)をみると、 $PIA_{ref}$ の過小評価が見られた地域で $\Delta \sigma_R > 0$ となっている。 $\Delta \sigma_R < \Delta \sigma_e$ であるから、少なくとも $\zeta < 0.1$ の弱い降雨の際には $\Delta \sigma_e > 0$ となることが確認できる。

以上のことから、表面参照法の仮定は正しくなく、降雨により $\sigma_e$ は増加することが強く示唆される。このことは、比較的植生の少ない地域でよく見られる。それでは、なぜ $\sigma_e$ が増加するのだろうか。一つの原因としては、降雨による土壌水分量の増加を挙げることができる。L,C帯の比較的低い周波数のレーダについては、土壌面での地表面後方散乱断面積は土壌水分量に正の依存性を持つことが、実験・理論の両面から示されており(例えば<sup>6)</sup>)、Ku帯でも成り立つことが予想される。このことか

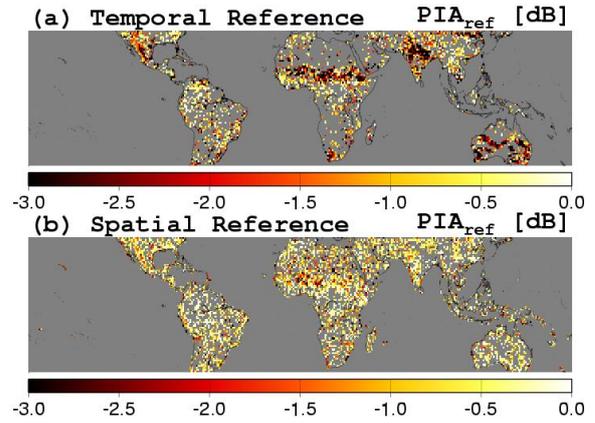


図-3  $\zeta < 0.1$ の場合の $PIA_{ref}$ のグリッドごとの平均値。 $PIA_{ref}$ が負の場合のみ表示。(a)は時間参照法、(b)は空間参照法の場合。

表-1 地表面後方散乱断面積( $\sigma$ )に関する本論文での表記とその意味。

表記	意味
$\sigma_m$	$\sigma$ の観測値
$\sigma_R$	降雨時の $\sigma_m$
$\sigma_{NR}$	無降雨時の $\sigma_m$
$\sigma_e$	降雨減衰がないとした場合の $\sigma$
$\sigma_{ref}$	表面参照法による $\sigma_e$ の推定値
$\sigma_{fin}$	標準アルゴリズムで最終的に求められるPIAから逆算される $\sigma_e$ の推定値

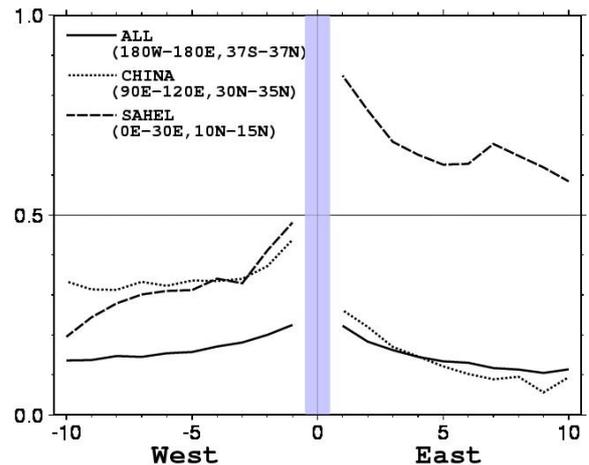


図-4 降雨域からの距離別の $\Delta \sigma_m$ 平均値。

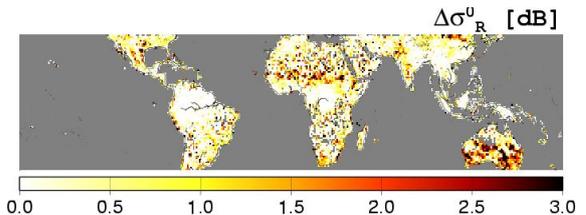


図-5  $\zeta < 0.1$ の場合の $\Delta \sigma_R$ のグリッドごとの平均値。 $\Delta \sigma_R > 0$ の場合のみ表示。

ら、陸上で $\Delta\sigma_e > 0$ となる現象を、本論文では、土壤水分効果と呼ぶことにする。

標準アルゴリズムで使われる表面参照法のうち、空間参照法では、降雨域の近くからサンプリングするため、土壤水分効果を部分的に説明できるが、時間参照法は、無降雨域を選別することなく使うために、土壤水分効果を説明できないと言える。サヘル域では、空間参照法を使っても $PIA_{ref}$ が過小評価となっている。図-4に示すように、サヘル域では西側よりも東側で $\Delta\sigma_m$ が高いが、標準アルゴリズムでは常に西側を参照するため、他の地域に比べて空間参照法がうまく働かないと説明できる。

#### 4. 表面参照法が降雨強度に与える定量的影響

前節で述べたように、標準アルゴリズムの表面参照法の問題として、時間参照法を使うこと、空間参照法で常に西側からサンプリングすること、の2つが挙げられる。本節では、これらのバイアスが降雨強度推定に与える影響を調べる。このために、標準アルゴリズムのうち表面参照法の部分のみを変更して、降雨強度推定を行った。1つは、空間参照法をつねに利用するものであり、このプロダクトをS8Wと呼ぶ。もう1つは、空間参照法だが、降雨域の西側ではなく東側からサンプリングを行う。このプロダクトをS8Eと呼ぶ。なお、標準のままのプロダクトをORGと呼ぶ。

##### (1) 時間参照法によるバイアスの影響

標準アルゴリズムで時間参照法が使われている場合を、空間参照法で置き換えた。すなわち、ORGで時間参照法が使われている場合について、ORGとS8Wの結果を比較した。ORGは、図-3に示すように $PIA_{ref}$ の過小評価が強いが、S8Wは、ORGに比べて $PIA_{ref}$ が全般的に高くなっている(図-6上)。とくに、土壤水分効果の現れるサヘル・インド・中国北部・オーストラリアなどでこの傾向が顕著である。中程度から強い降雨とみられる $\zeta \geq 0.1$ の場合についても、S8Wの方が高い $PIA_{ref}$ を示す(図-6中)。表面参照法が影響する $\zeta \geq 0.1$ の場合に、 $PIA_{ref}$ が高くなれば、高いPIAが選択されやすくなり、 $Z_e(r_e)$ が高く、降雨強度は強くなることになる。実際に、図-6下に示すように、 $PIA_{ref}$ の変化に対応して降雨強度も高くなっていることが確認される。

図-7に $\zeta$ のクラスごとに、全域平均した $PIA_{ref}$ と降雨強度の変化率を示す。 $PIA_{ref}$ は、いずれの $\zeta$ のクラスに対しても、ORGよりS8Wの方が0.5-1.0dB程度高くなっている。なお、 $\zeta$ が大きいくほど増加率が小さいようにも見られるが、これは大きな $\zeta$ (強い雨に対応する)は、土壤水分効果の弱い熱帯雨林などで多く見られるためであろう。降雨強度についてみると、 $\zeta \geq 0.4$ の場合には、S8Wの方

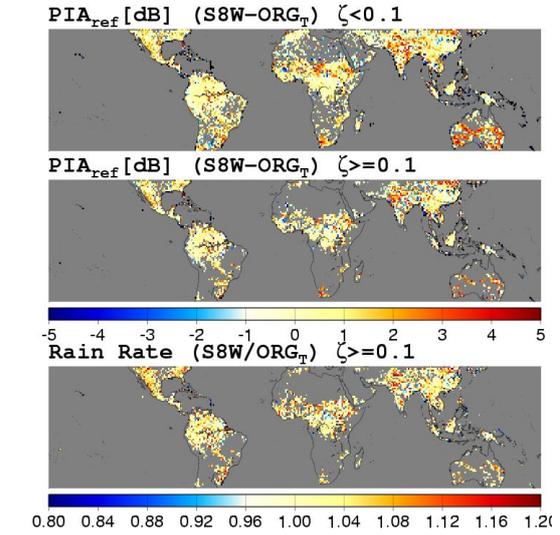


図-6 ORGの時間参照法をS8W(空間参照法)に変えた場合の変化。(上) $\zeta < 0.1$ の場合の $PIA_{ref}$ の増加。(中) $\zeta \geq 0.1$ の場合の $PIA_{ref}$ の増加。(下)降雨強度の増加率。

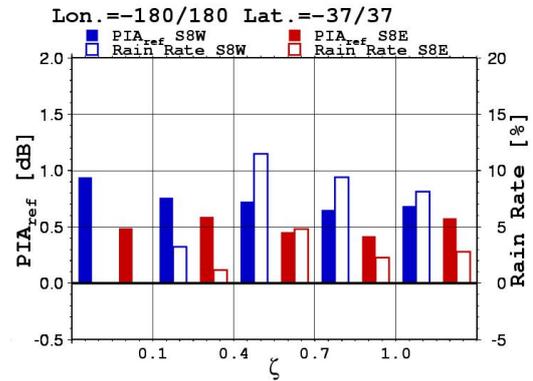


図-7 陸上全域における $PIA_{ref}$ および降雨強度の変化。ORGの時間参照法をS8WとS8Eにそれぞれ変えた場合。

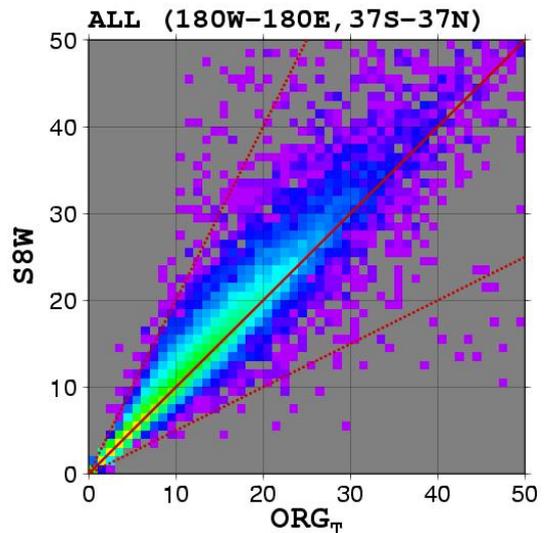


図-8 ORGの時間参照法とS8W(空間参照法)による降雨強度[mm/h]の比較。2次元ヒストグラムで表示。暖色系は高い頻度を示す。

が10%程度高い降雨強度を与えている。

図-8に1ピクセルごとの降雨強度の比較を、2次元ヒストグラムとして示している。S8Wの方が低い降雨強度を与える場合もあるが、全体として、S8Wの方が高い傾向は確認できる。一方の降雨強度が、他方の2倍以上となるケースは稀である。

### (2) 降雨域の東西の違いによる影響

次に、標準的空間参照法がつねに西側のみをサンプリングしている影響を調べるために、S8WとS8Eを全てのピクセルについて比較する。PIA<sub>ref</sub>については、S8Wが高い場合も、逆にS8Eが高い場合もある。前者は特にオーストラリアで顕著であり、後者は特にサヘルで顕著である(図-9上・中)。降雨強度への影響もこれに対応しており、オーストラリアではS8Wの方が高く、サヘルではS8Eの方が高い(図-9下)。

サヘルについての統計を図-10に示す。ORGやS8Wに比べて、S8EではPIA<sub>ref</sub>が1.0dB程度高い。降雨強度でみると、 $\zeta \geq 0.4$ の場合に、S8EはS8Wより10%以上強い降雨強度を与えることとなる。図-11にサヘルについてのS8WとS8Eの1ピクセルごとの比較を2次元ヒストグラムで示す。この図からもS8Eの方がS8Wより高い降雨強度を与えることが確認されるが、2倍を超えることは少ない。

### (3) 総降雨量への影響

以上2つのケースは、標準アルゴリズムでは、表面参照法がPIA<sub>ref</sub>を過小評価し、その結果降雨強度を過小評価していることを示すものである。ただし、これに該当するケースは限られている。2001年7月について、陸上全体の平均降雨量は、ORGでは60.7mmであった。これに対して、S8WおよびS8Eではそれぞれ61.1mmと61.3mmであり、その差はわずかである。

## 5. 議論

$\zeta$ が0.1より小さい場合には、 $\Delta\sigma_e > 0$ となる土壌水分効果が存在し、表面参照法を適切に使うことでそれに対応できることが確認された(3.(3))。それでは、 $\zeta$ が0.1より大きい場合について、 $\Delta\sigma_e$ はどのような性質を持つのだろうか。

PIA( $\theta$ )の期待値をPIA<sub>fin</sub>と書くことにする。PIA<sub>ref</sub>の場合と同様に、 $\sigma_{fin}^o = \sigma_R^o + \text{PIA}_{fin}$ とすると、 $\sigma_{fin}^o$ は $\sigma_e^o$ の最終的な推定値である。 $\sigma_{ref}^o$ と同様に、 $\langle \sigma_{NR}^o \rangle$ からのアノマリーを取り、 $\Delta\sigma_{fin}^o$ と表す。以下、 $\Delta\sigma_{fin}^o$ の傾向について述べる。

陸上全域において、S8WとS8Eを使った場合の $\Delta\sigma_{ref}^o$ と $\Delta\sigma_{fin}^o$ の比較を図-12に示す。 $\Delta\sigma_{ref}^o$ は、 $\zeta$ にほとんど依存していないのに対して、 $\Delta\sigma_{fin}^o$ は、 $\zeta$ が大きくなるほど、高くなる傾向を示している。この結果を見ると、

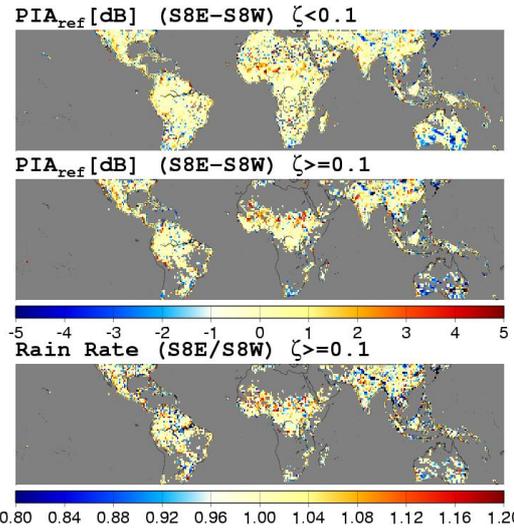


図-9 S8WをS8Eに変えた場合の変化。(上) $\zeta < 0.1$ の場合のPIA<sub>ref</sub>の増加。(中) $\zeta \geq 0.1$ の場合のPIA<sub>ref</sub>の増加。(下)降雨強度の増加率。

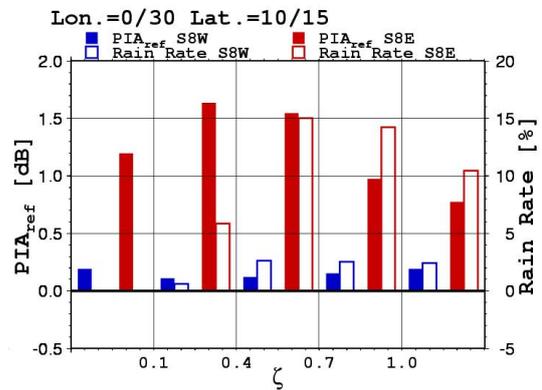


図-10 サヘル(0-30E, 10-15N)におけるPIA<sub>ref</sub>および降雨強度。S8WとS8Eの場合のORGに対する変化で表示。

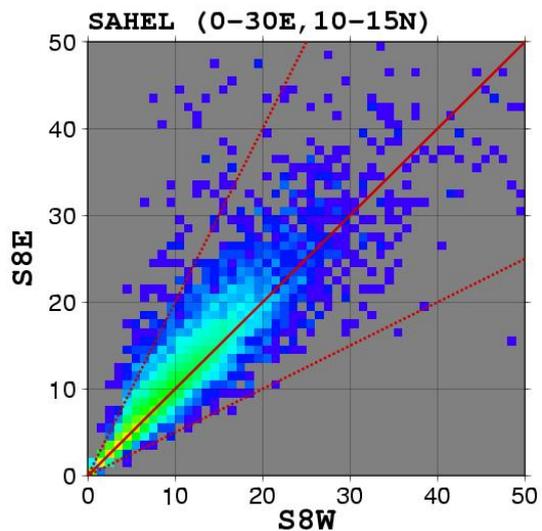


図-11 S8WとS8Eによる降雨強度[mm/h]の比較。2次元ヒストグラムで表示。

$\zeta < 0.1$ の範囲では表面参照法は土壌水分効果を説明できているが、 $\zeta \geq 0.1$ の範囲では土壌水分効果がさらに強く表面参照法では説明できていないのではないかと、との疑問が生じる。 $\zeta$ が大きい強い雨の場合には、土壌水分量の増加が大きく、 $\sigma_o^o$ が高くなるからだろうか。

$\Delta\sigma_{ref}^o$ と $\Delta\sigma_{fin}^o$ の不一致は必ずしも表面参照法が原因ではない。一つの理由は、粒径分布の初期値( $\alpha_o(x), \beta_o$ )に対応する粒径分布が、適切でなく、HB法から推定されるPIAが過大となる傾向があるためである。しかしながら、 $\zeta$ が大きくなるほど $\Delta\sigma_{ref}^o$ と $\Delta\sigma_{fin}^o$ の乖離が大きくなることはうまく説明できない。

もう一つの理由としては、ビーム内の降雨の非一様性の影響が考えられる。標準アルゴリズムV6では、非一様性については考慮しておらず、本研究でも前節までの解析で一切考慮していない。実際には、非一様性がある場合に、一様と仮定してHB法を適用するとPIAを過大に評価することが知られており<sup>7)</sup>、非一様性の考慮なしに、表面参照法とHB法を組み合わせるのは本来適切でない。このため、以前使われていた標準アルゴリズムVersion5では、PIA<sub>ref</sub>に非一様性の程度に応じた補正係数C<sub>SR</sub>(C<sub>SR</sub> ≥ 1)をかけることで対応していた。これに習い、PIA<sub>ref</sub>にC<sub>SR</sub>をかけて $\Delta\sigma_{ref}^o$ を求めたものを図-12にあわせて示している。 $\zeta$ が大きい部分で非一様性の補正をした $\Delta\sigma_{ref}^o$ は $\Delta\sigma_{fin}^o$ に近づいている。

よって、図-12に示されるような結果からは、 $\zeta < 0.1$ と $\zeta \geq 0.1$ において、 $\Delta\sigma_o^o$ に本質的な違いがあるとは認められない。 $\zeta \geq 0.1$ の場合の $\Delta\sigma_o^o$ の特性については、より直接的な検証が必要である。

## 6. まとめ

TRMM/PRの降雨強度推定標準アルゴリズムでは表面参照法として時間参照法または空間参照法が使われているが、いずれも降雨による土壌水分増加の影響を直接的には考慮していない。このため、PIAを過小評価する傾向がとくに時間参照法の場合に強い。空間参照法はつねに降雨域の西側をサンプリングするため、雨域が東から移動すると考えられるサヘル域などではPIAを過小評価する。表面参照法が完全に信用されるならば、PIAの過小評価は、降雨強度推定値の過小評価につながるが、現在の標準アルゴリズムは表面参照法にあまり依存しないように設計されているため、表面参照法のバイアスが降雨強度推定値に大きな影響を与えることはない。しかしながら、これは衛星搭載降雨レーダの利点である表面参照法を十分に生かしていないことの裏返しである。今後、本研究で指摘したバイアスの問題に注意しながらより精度の高い表面参照法を開発していくことが、陸上における降雨強度推定精度の向上のため、とくに重要である。

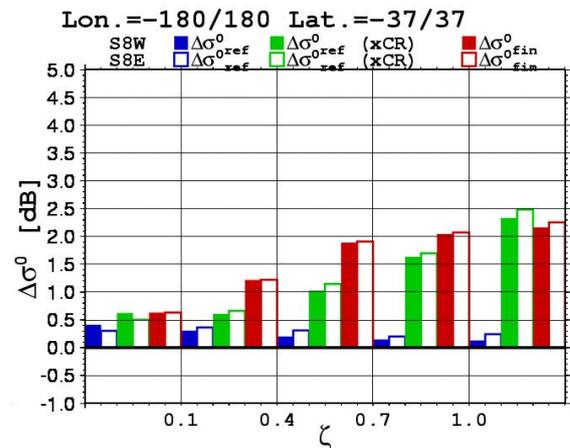


図-12  $\Delta\sigma_{ref}^o$ 、非一様性の補正を考慮して計算した $\Delta\sigma_{ref}^o$ 、 $\Delta\sigma_{fin}^o$ の比較。S8WおよびS8Eの陸上全体について平均値。

謝辞：本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成（代表：岡本謙一）」の成果の一部である。情報通信研究機構の井口俊夫博士からは、特に有益な指摘を多くいただきましたことに深く感謝いたします。

## 参考文献：

- 1) Iguchi, T., T. Kozu, R. Meneghini, J. Awaka, and K. Okamoto: Rain-profiling algorithms for the TRMM precipitation radar, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 39, pp2038-2052, 2000.
- 2) 井口俊夫, 瀬戸心太, R. Meneghini: 衛星搭載降雨レーダによる降雨推定の原理と推定誤差, 日本気象学会2005年度春季大会.
- 3) Iguchi, T., and R. Meneghini: Intercomparison of single-frequency methods for retrieving a vertical rain profile from airborne or spaceborne radar data, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.11, pp1507-1516, 1994.
- 4) Meneghini, R., J.A. Jones, T. Iguchi, K. Okamoto, J. Kwiatkowski: A hybrid surface reference technique and its application to the TRMM Precipitation Radar, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.21, pp1645-1658, 2004.
- 5) Seto, S., and T. Iguchi: Biases in the surface reference estimates by the TRMM standard algorithm. The 32<sup>nd</sup> Conference Radar Meteorology, Albuquerque, 2005.
- 6) Ulaby, F.T., P.P. Batlivala, M.C. Dobson: Microwave backscattering dependence on the surface roughness, soil moisture, and soil texture. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 16, pp286-295, 1978.
- 7) Nakamura, K: Biases of rain retrieval algorithms for spaceborne radar caused by nonuniformity of rain, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.8, pp363-373, 1991.

(2005. 9. 30 受付)