

降雨による地表面の変化を考慮した表面参照法の改良

瀬戸 心太 (独立行政法人 情報通信研究機構) seto@nict.go.jp
井口 俊夫 (独立行政法人 情報通信研究機構) iguchi@nict.go.jp

ABSTRACT

衛星搭載降雨レーダTRMM/PRの降雨強度推定標準アルゴリズムでは、降雨時と無降雨時の観測地表面後方散乱断面積(σ_m^o)の差から、降雨による積算減衰量(PIA)を推定する表面参照法を採用している。陸上の多くの地域について、真の地表面後方散乱断面積(σ_e^o)は、降雨時に高くなることを示唆する結果が得られた。その原因として、降雨による表層土壌水分量の増加が考えられる。標準アルゴリズムの表面参照法には、こうした降雨による地表面の変化が考慮されていないため、PIAを過小評価する傾向にある。標準アルゴリズムによる降雨強度推定値の表面参照法に対する感度を調べた。時間参照法を用いる場合と空間参照法を用いる場合では、陸上全観測域平均で月降雨量が1%程度異なる。サヘル域(10-15N,0-30E)では、空間参照法が他の地域に比べて機能しておらず、10%近い過小評価が生じているとみられる。

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¹⁾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²⁾。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。3節では2000年1-12月のデータを、4節では2001年7月のデータを対象としている。

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

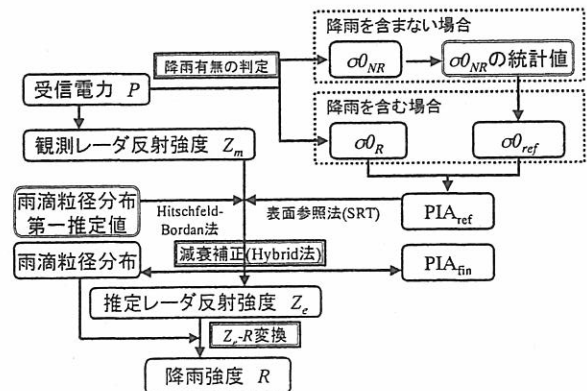


図-1 TRMM/PR降雨強度推定アルゴリズムの概略図。

古典的なHitschfeld and Bordanの方法(HB法)では、 $\alpha(r)=\alpha_0(r)$ 、 $\beta(r)=\beta_0$ (β_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。

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

ただし、 $\xi = 0.2\beta_0 \ln(10) \int_0^{r_s} \alpha_0(s) Z_m(s)^{\beta_0} ds$ である。仮定した $\alpha_0(r)$ 、 β_0 の値が不適切であると、 ξ 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] σ_m^0 が利用できる。 σ_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、 σ_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 σ_e^0 を推定する方法のことであり、その推定値を σ_{ref}^0 と表す。降雨時に観測された σ_m^0 と σ_{ref}^0 を用いて、PIAの推定値PIA_{ref}が得られる。

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

一方、HB法から計算されるPIAは、次のようになる。

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

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。

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

ここで、PIA_{ref}=PIA(ε)となるように ε を決めるのが α 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³⁾。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(ε)が実現する確率 $Pb(\varepsilon)$ は、PIA_{ref}がPIA(ε)の周りに正規分布するとし、また ε が1の周りに対数正規分布するとして計算される。

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、 ε 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、各PIA(ε)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。

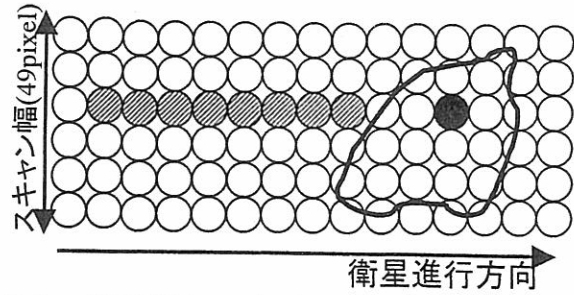


図-2 空間参照法の説明。太線内を降雨域とする。黒塗りで示した対象ピクセルに空間参照法を適用する場合、ハッチをかけた8つのピクセルを利用する。

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、降雨時の σ_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 σ_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にする。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°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無降雨ピクセルの σ_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 σ_{ref}^0 とする⁴⁾。

(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 $\xi < 0.1$ 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る⁵⁾。

(3) 降雨時の σ_e

PIAを過小評価している、すなわち降雨時の σ_e を過小評価していることから、降雨の有無によって σ_e は変化しないという仮定を再検討する必要がある。

降雨時の σ_e を直接計測することはできないため、弱い降雨時の σ_e について解析する。解析の前に、グリッド(緯度経度 1°)、各月、入射角別に無降雨時の σ_e を平均した値($\langle\sigma_e(NR)\rangle$ と書く)を求めておく。 $\sigma_e(R)$ から対応する $\langle\sigma_e(NR)\rangle$ を引いたものを $\Delta\sigma_e(R)$ とする。図-4に、 $\zeta < 0.1$ の場合の $\Delta\sigma_e(R)$ を示す。サヘル・インド・オーストラリアなど、図-3において表面参照法が過小評価を見せる地域とほぼ対応して、 $\Delta\sigma_e(R) > 0$ となっている。 $\sigma_e(R) > \sigma_e(NR)$ であるから、 $\sigma_e(R) > \langle\sigma_e(NR)\rangle$ となり、降雨時の方が無降雨時よりも σ_e が高くなっていることが示される。

次に、降雨域に隣接する無降雨域(NR*で表す)での σ_e を解析する。ここで、降雨域に隣接するというのは、同じアングルピン上の降雨ピクセルに隣接していることを言う。また、降雨ピクセルより直前(直後)に観測された場合は、降雨域の西側(東側)に位置する。降雨減衰がないため、 $\sigma_e(NR^*) = \sigma_e(NR)$ が成り立つが、降雨域に空間的に近いことから、直前に降雨域が通過したなどの理由で、降雨域と似た地表状態を示すことが期待される。前段落の解析と同様にして、 $\sigma_e(NR^*)$ から対応する $\langle\sigma_e(NR)\rangle$ を引いたものを $\Delta\sigma_e(NR^*)$ とする。図-5に $\Delta\sigma_e(NR^*)$ の地域分布を示す。降雨域の西側・東側に共通して、サヘル・オーストラリアなどで、 $\Delta\sigma_e(NR^*) > 0$ となっている。これらの地域では、 $\Delta\sigma_e(R) > 0$ が成り立つことが十分に予想される。また、降雨域の西側と東側の $\Delta\sigma_e(NR^*)$ を比較すると、中緯度(30N以北, 30S以南)では、西側の方が高い傾向にあり、低緯度に存在するサヘル(10-15N付近)では、東側の方が高い傾向にあるという、明瞭な違いが見られた。

(4) 土壌水分効果

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 σ_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 σ_e が増加するのだろうか。一つの原因としては、降雨による表層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¹⁰⁾、Ku帯でも成り立つことが予想される。このことから、陸上で $\Delta\sigma_e(R) > 0$ となる現象を、本論文では、土壌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

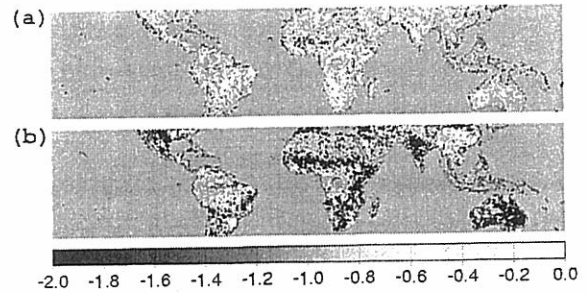


図-3 $\zeta < 0.1$ の場合の PIA_{ref} のグリッドごとの平均値。 PIA_{ref} が負の場合のみ表示。(a)は空間参照法、(b)は時間参照法の場合。

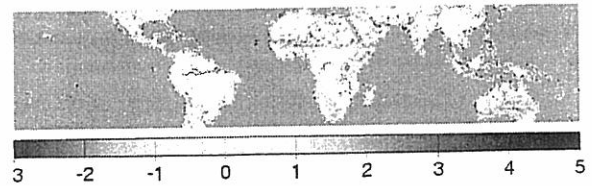


図-4 $\zeta < 0.1$ の場合の $\Delta\sigma_e(R)$ のグリッドごとの平均値。

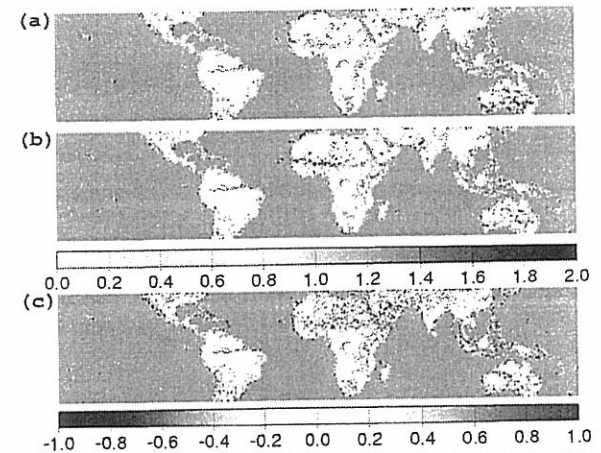


図-5 降雨域に隣接した無降雨ピクセルについての $\Delta\sigma_e(NR^*)$ のグリッドごとの平均値。(a)は降雨域の西側の場合、(b)は降雨域の東側の場合、(c)は(b)-(a)の値を示す。

表-1 標準アルゴリズムで異なる表面参照法による降雨強度推定結果。2001年7月の月降雨量(mm)で比較。陸上全体は、陸上の全観測域(37S-37N, 180W-180E)を、サヘルは(10-15N, 0-30E)の範囲を示す。 $\zeta \geq 0.1$ の場合にのみ、表面参照法が利用される。括弧内の数字は、ORGの推定値を基準とした場合の変化率である。

	ORG	S8W	S8E
陸上全体	63.45 (0.0)	63.89 (0.7)	64.02 (0.9)
$\zeta \geq 0.1$	44.80 (0.0)	45.24 (1.0)	45.38 (1.3)
サヘル	42.68 (0.0)	43.24 (1.3)	46.02 (7.8)
$\zeta \geq 0.1$	34.50 (0.0)	35.06 (1.6)	37.84 (9.7)

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-5に示すように、サヘル域では西側よりも東側で $\Delta\sigma_{\beta}$ 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。対象期間は、2001年7月とした。

各方法による月降雨量の比較を表-1に示す。陸上の観測域全体を平均した月降雨量(地表面レベルでの降雨強度推定値を集計したものは、ORGでは63.45(mm)であったが、S8Wでは63.89(mm)、S8Eでは64.02(mm)とわずかに高くなる。ORGを基準とした変化率で見ると、S8WとS8Eはそれぞれ0.7%と0.9%の増加となる。なお、 ≤ 0.1 の場合には表面参照法が無視されることから、この部分(月降雨量19.65mmに相当)を除くと、変化率はS8Wが1.0%であり、S8Eが1.3%となった。

土壤水分効果が強く現れており、また空間参照法でもPIAの過小評価が強いサヘル域(10-15N, 0-30E)では、ORGでの月降雨量推定値が42.68mmであるのに対して、S8Wでは43.24mm、S8Eでは46.02mmとなった。S8Wは1.3%(≤ 0.1 の部分では1.6%)、S8Eは7.8%(≤ 0.1 の部分では9.7%)、それぞれORGに比べて高い降雨量を算出している。

PIA_{ref}が過小評価されると、地表面レベルでの $Z_e(r_s)$ が低くなり、地表面降雨強度 $R(r_s)$ も弱くなる。これが、一般に成り立つ。時間参照法、サヘル域での空間参照法ではPIA_{ref}を過小評価しており、その結果、降雨強度も過小評価していることが示唆される。

以上の実験結果が示す降雨強度推定値の表面参照法に対する感度は、サヘル域など一部を除いて、それほど大きくはない。これは、標準アルゴリズムでは ≤ 0.1 の場合に表面参照法を無視するなど、表面参照法にあまり依存していないためである。より表

面参照法に依存した方法であれば(例えば α 修正法)、表面参照法の過小評価バイアスは、より明確に降雨強度推定値に反映されるようになるはずである。

5. まとめ

TRMM/PRの降雨強度推定標準アルゴリズムで使われている表面参照法は、降雨による地表面状態の変化を考慮していないため、PIAを過小評価しており、その結果降雨強度を過小評価している。表面参照法を変更した感度実験の結果、陸上観測域全体で1%程度、サヘル域では10%近い降雨強度の違いが見られた。表面参照法への依存度の高いアルゴリズムを使うならば、この差はさらに拡大するため、表面参照法のバイアスは看過できない問題である。

なお、本稿は、第一著者による土木学会水工学論文第50巻掲載の論文「TRMM/PR降雨強度推定アルゴリズムの再検討ー表面参照法に起因するバイアスー」を加筆修正したものである。

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。

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 32nd 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.