

リトリバーブル誤差と降雨判定誤差 -TRMM/TMI とPRの月降水量推定値の比較-

RETRIEVAL ERROR AND RAIN/NO-RAIN CLASSIFICATION ERROR:
COMPARISON OF MONTHLY RAINFALL ESTIMATES BY TRMM/TMI AND PR

瀬戸心太¹
Shinta SETO

¹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)

Monthly rainfall estimates by two spaceborne microwave sensors TRMM/TMI and TRMM/PR are compared. The originality of this study is that the difference between them is decomposed into retrieval error and rain/no-rain classification (RNC) error. Overestimation by the standard algorithm for TRMM/TMI against the standard algorithm for TRMM/PR has been known, but the difference decreased after the version-up of both algorithms. Still, it should be noted that retrieval error shows larger overestimation than total difference. Our developed RNC methods can replace the original RNC method of the standard algorithm for TMI. It is discussed how to set the global parameter k_0 in our methods.

Key Words : precipitation, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), TRMM Microwave Imager (TMI), retrieval, rain/no-rain classification.

1. 背景と目的

降水量データは、水循環・水資源研究にもっとも基本的で不可欠なデータであるといっても過言ではない。とくに長期の水循環変動研究・グローバルな水資源評価などのためには時間的・空間的に均質なデータが必要である。このために、衛星リモートセンシングにかかる期待は大きい。

定量的な降水強度の観測に利用できるセンサとして、マイクロ波放射計と降水レーダがある。1997年打ち上げのTRMM(熱帯降雨観測衛星)にはPRと呼ばれる降水レーダと、TMIと呼ばれるマイクロ波放射計が搭載されている。PRとTMIからは、それぞれ、標準アルゴリズムに基づき降水強度が推定され、標準プロダクトとして公開されている。1998年9月に最初に公開されたプロダクトはバージョン4(V4)であり、その後改良が進められ、1999年10月からはバージョン5(V5)による公開が始まり、2004年4月からはバージョン6(V6)による公開が始まっている。

PRとTMIはほぼ同時に同じ場所を観測しているが、両者から推定される降水強度は必ずしも一致しない。一般には、TMIから見積もられる降水強度の方が、PRからの降水強度より高い傾向があることが指摘されており、そ

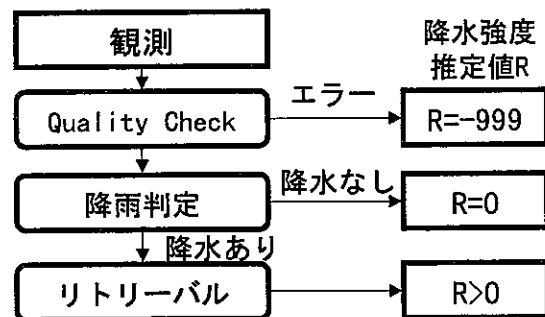


図-1 一般的な降水強度推定アルゴリズムの構成の概略

の理由について様々な検討が行われている^{1),2)}。

PRとTMIの標準アルゴリズムは、どちらも、降雨判定とリトリバーブルの2つの部分に分けることができる(図-1)。降雨判定とは、観測のフットプリント毎に、降水の有り無しを判定する作業であり、原則として、「降水あり」または「降水なし」のいずれかのフラグ(降雨フラグ)を決定論的に与える。リトリバーブルは、降雨判定で「降水あり」のフラグを得たフットプリントに対してのみ行われ、降水強度の鉛直プロファイル等を算出する。「降水なし」のフラグが与えられたフットプリントの降水強度はつねにゼロとなる。

本論文では、降雨判定とリトリーバルが与える影響を分離して、陸上におけるTMIとPRによる降水強度の差を評価する。2節および3節で、TMIとPRの標準アルゴリズムについて概略を説明する。4節では、降雨判定とリトリーバルの影響を分離する手法について説明する。この準備の上で、5節では、標準アルゴリズムの場合について比較を示す。6節では、TMIの標準アルゴリズムにおいて、降雨判定を著者が以前開発した手法に変更して、TMIとPRの比較を示す。7節、8節で、議論およびまとめを行う。

2. TMIの降水強度推定標準アルゴリズム³⁾

TMIによる観測量は、9つのチャンネル(10GHz, 19GHz, 22GHz, 37GHz, 85GHz)の5つの周波数、22GHzは垂直偏波のみ、ほかは垂直・水平両偏波)での輝度温度[K]である。以下、周波数と偏波(垂直はV, 水平はH)を組み合わせでチャンネルを表現する。例えば、85Vは85GHzの垂直偏波を表す。また、輝度温度をTBで表し、TB(85V)は、チャンネル85Vで観測された輝度温度を表すとす。

TMIによる降水強度推定の標準アルゴリズムは、GPROF(Goddard Profiling Algorithm)と呼ばれる。ここでは、GPROFのV5およびV6の陸上における降雨判定・リトリーバルの概略をそれぞれ紹介する。

(1) 降雨判定

a) V5

降雨判定は、TB(85V)が降水粒子による散乱の結果減少することを利用して、具体的には、 $SI = TB(22V) - TB(85V)$ で計算されるSIを散乱の指標とする。22Vは、周波数が低いために85Vに比べて散乱の影響を受けにくいので、降水強度が強く散乱が大きいくほどSIも大きくなる。このSIが8[K]より大きい場合には、降水あり、それ以外は降水なしと判定される。ただし、砂漠や積雪域においては、この方法が使えない。地表面での乾燥した砂粒子・雪粒子が降水粒子と同様に散乱を起こすためである。このため、砂漠域・積雪域に該当するかを別途判定し、該当する場合にはSIによる判定を行わず、つねに降水なしのフラグを与えている。砂漠域・積雪域の判定は、低周波数のチャンネルを利用してフットプリント毎に行った後に、周辺のフットプリントとの整合性をあわせるよう行われている。積雪域・砂漠域が否かを判定しきれず、さらに散乱条件をみたまつ場合に"ambiguous"(降水可能性)のフラグがたつ。

b) V6

基本的な構造はV6でも同様である。V5からV6での変更点としては、i)降水ありの条件として、 $TB(85H) < 270[K]$ を $SI > 8[K]$ と同時にみたまつ必要がある、ii)周辺との整合性チェックに変更が加えられた、の2点である。V6では

表-1 本研究で作成するTMIの降水強度プロダクトと、それに用いる降雨判定とリトリーバルの組み合わせ(降雨判定のM1, M2は6節で説明)

プロダクト	降雨判定	リトリーバル
A(標準プロダクトV5)	GPROF V5	GPROF V5
B(標準プロダクトV6)	GPROF V6	GPROF V6
C	GPROF V6	GPROF V5
D	M1	GPROF V5
E	M2	GPROF V5
F	M1	GPROF V6
G	M2	GPROF V6

V5に比べて、「降水なし」が増加している。また、「降水可能性」も大幅に増加しており、「降水あり」が減少している。降水なしの増加はi)の影響、降水可能性の増加はii)の影響である。「降水あり」だけでなく「降水可能性」についても、リトリーバルが行われる。

(2) リトリーバル

a) V5

GPROFのリトリーバルは、いわゆる統計論的なアルゴリズムに属する。雲解像モデルを利用してシミュレーションされた降水システムと、放射伝達モデルで計算した輝度温度の組み合わせをデータベースとして持つ。ベイジアン的な方法で、実際の観測輝度温度に近い降水システムをデータベースから選ぶ。データベースにどのような降水システムのシミュレーションを含むかは、リトリーバル結果に大きな影響を与えるが、その選択理由は明文化されていない。V5では、全部で28のプロファイルが用意されている。この数は、海上用と比べて極端に少ない。

b) V6

V6では、データベースの拡充が行われ陸上用に135のプロファイルが準備されている。さらに、降水システムが対流性であるか層状性であるかの区別が導入されている。

3. PRの降水強度推定標準アルゴリズム⁴⁾

PRは、13.8GHzの一周波レーダであり、鉛直250mごとのレーダ反射因子 Z_m および地表面散乱断面積から、降水強度 R を推定することを目的とする。降雨判定は、低次の標準アルゴリズムにより行われ、フットプリント毎に、「降水あり」、「降水可能性」、「降水なし」を与える。ここで、「降水あり」はクラッターの影響でないレンジに閾値を超える強度の反射エコーがある場合である。

「降水可能性」は反射エコーがあるが、クラッターの影響と考えられる場合などを含む。降水強度推定の標準ア

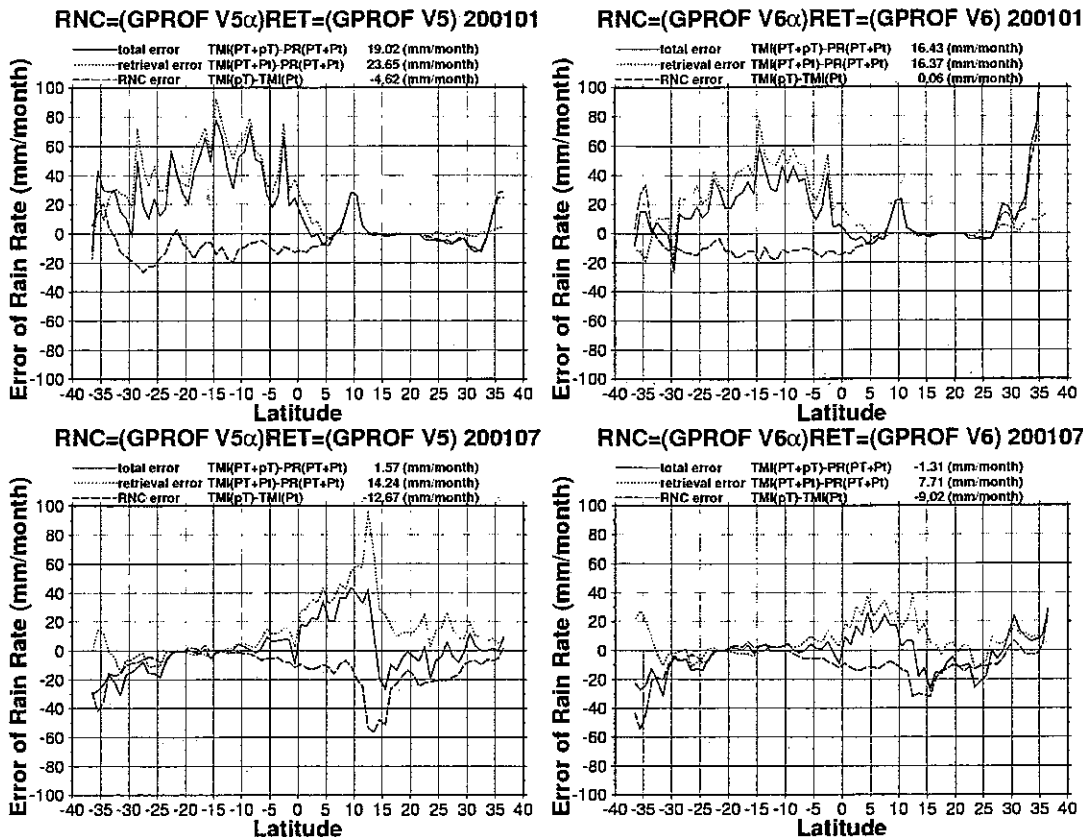


図-2 標準プロダクトの緯度別の全誤差(実線)・リトリーバル誤差(点線)・降雨判定誤差(破線)。左の列はV5, 右の列はV6。上の段は2001年1月, 下の段は2001年7月。

ルゴリズムではV5以降, 「降水あり」のみをリトリーバルの対象としている。

4. リトリーバル誤差と降雨判定誤差

前節までに説明した標準アルゴリズムによりPRとTMIからそれぞれ推定された降水強度を月平均降水量に変換して, 両者の比較を行う。

具体的な手順として, まずフットプリントをTMIの85GHzでの大きさにあわせる。TMIの85GHzのフットプリントの中に, 中心が含まれるPRのフットプリントについて降水強度の単純平均をとり, これをPRの降水強度とする。降雨フラグは, 降水ありのフットプリントを少なくとも一つ含む場合に, 降水ありとする。TMIについては, リトリーバルされた降水強度と降雨フラグをそのまま利用する。なお本論文では, 降水強度とは, 地表面付近降水強度を意味するものとする。

時空間平均は基本的に単純平均とする。ただし, 複数の緯度帯の平均を見る場合には, サンプリングの偏りをなくすために, 緯度1°毎に単純平均を計算し, その結果を $\cos(\phi)$ の重みをつけて平均する[ϕ は緯度]。

TMIとPRの差が, 降雨判定によるものか, リトリーバ

ルによるものかを分離する。TMIとPRから求める時空間平均降水量は, 降雨フラグを使って, それぞれ次のように分離して書ける。

$$RR_TMI(total) = RR_TMI(PT) + RR_TMI(pT) \quad (1)$$

$$RR_PR(total) = RR_PR(PT) + RR_PR(Pt) \quad (2)$$

RR_TMI, RR_PRはそれぞれTMI, PRによる降水量推定値を示す。()の中は降雨フラグの組み合わせを示す。大文字のPはPRによる降水あり, 小文字のpはPRによる降水なしのフラグを意味する。大文字のTは, TMIによる降水あり, 小文字のtはTMIによる降水なしのフラグを意味する。式(1), (2)を比較して, 次のように展開する。

$$\begin{aligned} [\text{全誤差}] &= RR_TMI(total) - RR_PR(total) \\ &= \{RR_TMI(PT) - RR_PR(PT)\} + \{RR_TMI(pT) - RR_PR(Pt)\} \\ &= [\text{リトリーバル誤差}] + [\text{降雨判定誤差}] \end{aligned} \quad (3)$$

一つの案として, $RR_TMI(PT) - RR_PR(PT)$ をリトリーバルによる誤差, $RR_TMI(pT) - RR_PR(Pt)$ を降雨判定による誤差と考えることができる。2つの誤差の和は全誤差となる。式をさらに変形すると次のようになる。

$$\begin{aligned} [\text{全誤差}] &= \{RR_TMI(PT) - RR_PR(PT)\} + \{RR_TMI(pT) - RR_PR(Pt)\} \\ &= \{RR_TMI(PT) + RR_TMI*(Pt) - RR_PR(PT) - RR_PR(Pt)\} \\ &= \{RR_TMI(PT) + RR_TMI*(Pt) - RR_PR(PT) - RR_PR(Pt)\} \\ &= [\text{リトリーバル誤差}] + [\text{降雨判定誤差}] \end{aligned} \quad (4)$$

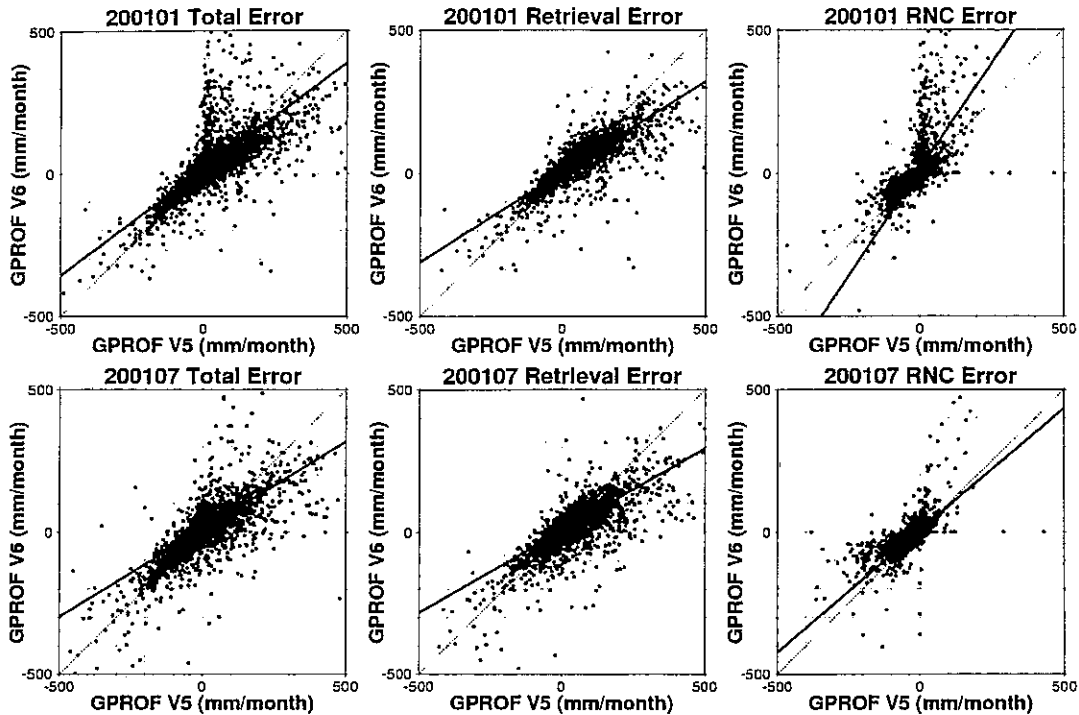


図-3 標準プロダクトの各1°グリッドにおける全誤差(左)・リトリバル誤差(中)・降雨判定誤差(右)について、V5とV6の散布図。上の段は、2001年1月。下の段は2001年7月。

ここで、 $RR_TMI*(Pt)$ は、PRが降水ありTMIが降水なしと判定した場合について、実際の降雨判定に反してTMIのリトリバルアルゴリズムを動かして計算した降水量である。この項を導入して、リトリバル誤差を $RR_TMI(Pt)+RR_TMI*(Pt)-RR_PR(Pt)-RR_PR(Pt)$ 、降雨判定誤差を $RR_TMI(pT)-RR_TMI*(Pt)$ と定義し直す。リトリバル誤差について、最初の定義であればTMIが「正しく」降雨判定した部分しか対象にされておらず、降雨判定が変わればリトリバル誤差も変わる問題点がある。極端に言えば、TMIが全て降水なしと降雨判定すれば、リトリバル誤差は0になる。しかし、この定義では、PRが「降水あり」と判定した場合を全て対象としており、TMIの降雨判定には依存しない。このため、降雨判定の影響はすべて降雨判定誤差に含まれることになる。

以下では、PRはつねにV5の標準プロダクト2A25をそのまま利用する。TMIについては、表-1に示すような降雨判定とリトリバルの組み合わせを用いる。標準アルゴリズムそのものの場合も含めいずれの場合も、リトリバル誤差・降雨判定誤差を計算するためには、 $RR_TMI*(Pt)$ の計算が必要である。このため、GPROFのソースコードを改変してリトリバルを行う条件を変更し、標準プロダクト1B11で与えられる輝度温度観測値を入力として、降水強度プロダクト(標準プロダクト2A12に対応)を作成したうえで利用している。

5. 標準プロダクトによる比較

標準プロダクトについて、全誤差・リトリバル誤差・降雨判定誤差を評価する。図-2に、2001年1月と7月のTMI標準プロダクトV5およびV6についてPRの標準プロダクトV5に対する各誤差を緯度別のグラフおよび全観測範囲の平均値として示した。V5からV6へのバージョンアップによって、全観測範囲平均の全誤差は、1月の場合、19.02mmから16.43mmに、7月の場合、1.57mmから-1.31mmに減少している。とくに7月については、過大評価から過小評価になっている。これを、リトリバル誤差と降雨判定誤差に分けると、1月の場合、リトリバル誤差は23.65mmから16.37mmへ7.28mm減少したが、降雨判定誤差は-4.62mmから0.06mmへと4.68mm増加し、両者の変化が打ち消しあっていることが分かる。7月の場合、リトリバル誤差は14.24mmから7.71mmへ6.53mm減少し、降雨判定誤差は-12.67mmから-9.02mmへ3.65mm増加している。リトリバル誤差でみるとV6でも依然として過大評価が残っている。このように、リトリバル誤差は正でTMIの過大評価となり、降雨判定誤差は負でTMIの過小評価となるが、絶対値をみるとリトリバル誤差の影響が大きいために、全誤差は正でTMIの過大評価となる傾向にある。

図-3には、各誤差について、V5とV6の散布図を示している。ここで、1つの点は緯度経度1°×1°のグリッドに対応する。実線は線形回帰式である。リトリバル誤差について、V5でTMIが過大評価されていた点は、V6では過大評価が解消される傾向にあり、またV5でTMIが

過小評価されていた点は、V6でTMIの推定値が増加する傾向にある。V5→V6で、必ずしもTMIの降水量が減少しているわけではない。

降雨判定誤差には、降雨判定とリトリバルの両方の変更による影響が含まれている。そこで、降雨判定をV6、リトリバルをV5とした場合の降雨判定誤差を算出すると(表-1のプロダクトC)、1月は-5.5mm、7月は-12.65mmであった。この結果は標準プロダクトV5の場合に近い。このことから、標準アルゴリズムのV5→V6による降雨判定誤差の変化は、降雨判定の変更よりも、リトリバルの変更によってもたらされていると言える。

6. 降雨判定手法の変更

次に、GPROFの降雨判定を、著者らが以前開発した手法に置き換えた場合について述べる。著者らの降雨判定手法は、M1⁵⁾、M2⁶⁾の2つある。その概要を以下にまとめる。GPROFの降雨判定では、 $SI=TB(22V)-TB(85V)$ と定義したが、M1およびM2では、 $SI=TB*(85V)-TB(85V)$ と定義する。ここで、 $TB*(85V)$ は無降水時の $TB(85V)$ の推定値である。過去の年の同じ月における無降水時の観測から作成した緯度経度 $1^\circ \times 1^\circ$ のデータベースから $TB*(85V)$ を統計的に求める。M1では、 $TB(85V)$ の平均値 μ と標準偏差 σ についてのデータベースをもとに、 $TB*(85V)=\mu$ とする。また、M2では、回帰式 $TB(85V)=a+b \times TB(22V)$ とその際の残差の標準偏差 σ_e を求めたデータベースをもとにして、 $TB*(85V)=a+b \times TB(22V)_{obs}$ とする。ここで、 $TB(22V)_{obs}$ は降雨判定を行う際の観測値である。M1では、 $SI > k_0 \times \sigma$ なら降水あり、M2では、 $SI > k_0 \times \sigma_e$ なら降水ありと判定する。 k_0 は、時間空間によらない定数とする。

これらの方法による降雨判定精度は図-4のように評価される。ここで、縦軸RTDA、横軸RFAOは、次の式で定義される。

$$RTDA = \frac{RR_PR(PT)}{\{RR_PR(PT) + RR_PR(Pt)\}} \quad (5)$$

$$RFAO = \frac{N(pT)}{\{N(pT) + N(pt)\}} \quad (6)$$

ただし、Nは観測回数である(そのほかの記号の意味は、4節を参照)。RTDAが高く、かつRFAOが低ければ良い判定である。図-4に示されるように、M1およびM2は、GPROFの降雨判定手法よりも優れている。また、M2の方がM1より判定精度が良い。

ここで、問題となるのは、M1およびM2で、 k_0 をどう決めるかである。 k_0 を変えた場合の優劣は図-4だけでは判断できない。 k_0 を小さくするとRTDA、RFAOともに高くなり、 k_0 を大きくするとRTDA、RFAOともに低くなるためであり、別の判断基準が必要である。

そこで、GPROFのリトリバルと組み合わせた場合の降雨判定誤差を計算する(表-1のプロダクトD,E,F,G)。図-5には、M2で k_0 2.0から5.0まで0.5ステップでかえた

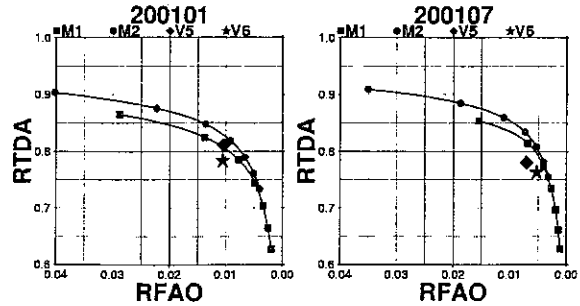


図-4 降雨判定手法(GPROFオリジナル,M1,M2)の評価。左は2001年1月。右は2001年7月。M1およびM2は、 k_0 2.0から5.0まで(0.5きざみ)の場合を表示。 k_0 が小さいほど図の左上に位置する。

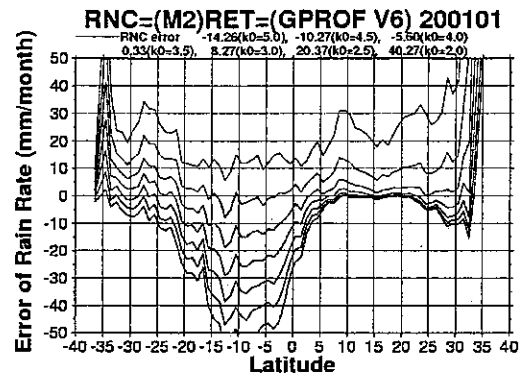


図-5 降雨判定手法にM2を使った場合の緯度別の降雨判定誤差。リトリバルアルゴリズムはGPROF V6。2001年1月。 k_0 2.0から5.0まで(0.5きざみ)の場合を表示。 k_0 が小さいほど降雨判定誤差が大きくなる。

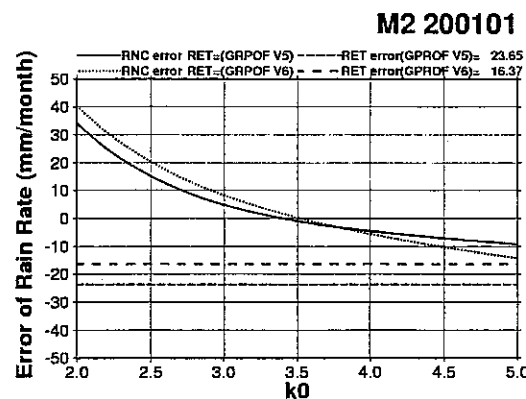


図-6 降雨判定手法M2のパラメータ k_0 を変化させた場合の全観測平均の降雨判定誤差の変化。2001年1月。

場合に得られる降雨判定誤差を緯度別に示してある。1月の北緯 30° 以北では、降雨判定誤差による過大評価が大きくなるが、これは、積雪域の誤判定によるものであり、標準プロダクトでも見られる(図-2)。また、図-6には、全緯度平均した降雨判定誤差が k_0 によってどう変わるかを示している。同じ降雨判定手法と k_0 でも、リトリバルの違いで、降雨判定誤差が多少異なる。 k_0 が小

さい場合には、リトリーバルがV6の方が降雨判定誤差が大きい。 k_0 が大きくなると、リトリーバルがV6の方が降雨判定誤差が小さくなる。

降雨判定誤差をゼロにすることを基準として考えると、M1では、 $k_0=2.8$ (1月, V5), 2.9 (1月, V6), 2.2 (7月, V5), 2.4 (7月, V6)にすればよく、M2では、 $k_0=3.3$ (1月, V5), 3.5 (1月, V6), 2.9 (7月, V5), 3.2 (7月, V6)とすればよい。手法ごとに、適切な k_0 の値が、季節やリトリーバルにあまり依存せず安定しているといえる。

しかし、全誤差をゼロにするように、 k_0 を決めるとすると、M1では、 $k_0=5.0$ 以上(1月, V5), 4.0 (1月, V6), 4.0 (7月, V5), 3.0 (7月, V6), M2では、 $k_0=5.0$ 以上(1月, V5), 5.0 以上(1月, V6), 5.0 以上(7月, V5), 4.3 (7月, V6)となり、 k_0 を相当に大きく取る必要があり、また季節やリトリーバルにも大きく依存する。

7. 議論

k_0 の変更を含め、降雨判定手法の変更は、リトリーバル誤差には影響せず、降雨判定誤差と全誤差に影響する。降雨判定手法は、降雨判定誤差をできるだけゼロに近づけることを目指すべきであると考え。そのためには、判定精度を上げることであり、すなわちRTDAを高くし、RFAOを低くすることである。これは本質的な改良である。しかし、実際には当然限界があり、RTDA=1, RFAO=0という状態は実現しない。その際、できるだけ降雨判定誤差が小さくなるように、パラメータ(M1, M2の場合 k_0)のチューニングを行うべきであろう。本論文では、2種類のリトリーバルと、夏冬2ヶ月分しか試していないが、このために適切な k_0 の値は比較的一定している。M1については2.5, M2については3.0を一つの目安としてあげることができる。

しかし、 k_0 を調節する際に降雨判定誤差をゼロにすることが必ずしも望ましいとは限らない。推定された降水強度プロダクトが洪水監視に使われることを考えると、少しでも可能性のある降水はすべてリトリーバルしておくほうが「安全側」となる。また、最小水資源量を算出するための基礎資料として使われるならば、確実な降水のみリトリーバルするほうが「安全側」になる。前者ならば、 k_0 は小さく、後者ならば k_0 は大きく設定するべきである。最終的な判断は、プロダクトの利用者の目的に応じて変更できるようにするのが望ましいともいえる。

8. まとめ

TMIとPRの降水強度推定値の誤差は、リトリーバル誤差と降雨判定誤差に分離できる。通常、リトリーバル誤差は正、降雨判定誤差は負であるが、絶対値で見ると

リトリーバル誤差の影響が強く、全体としてTMIの過大評価となっている。リトリーバルアルゴリズムの評価のためには、全誤差ではなく、リトリーバル誤差をみるべきである。

著者らが以前提案した降雨判定手法M1およびM2のパラメータ k_0 をどう決めるべきかについて議論した。M1では、 $k_0=2.5$ 程度、M2では $k_0=3.0$ 程度にとれば、降雨判定誤差をゼロに近づけることができる。しかし、最適な k_0 は、リトリーバル・季節・地域に依存性を持っており、さらにはプロダクトの利用目的にも影響されるものである。

本論文では、あたかもPRの降雨判定および降水強度推定値を真値であるかのように扱っている。これは、TMIと比較した場合、鉛直分解能を持つPRの判定の方が信頼性があり、とくに陸上ではTMIの使用周波数が限定されることもあり、相対的にはTMIよりPRのほうが精度が高いとみなせるためである。しかしながら、PRの推定にも粒径分布など多くの不確実性があり、開発途上にある。このため実際には、PRとTMIの双方の原因による誤差を同時に考える必要があり、今後の課題としたい。

謝辞：本研究は、科学技術振興事業団 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。同プロジェクトの参加者の皆様からは有益な指摘を多くいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) Masunaga, H., T. Iguchi, R. Oki, and M. Kachi.: Comparison of rainfall products derived from TRMM microwave imager and precipitation radar, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.41, pp849-862, 2002.
- 2) Furuzawa, F. A., K. Nakamura, and M. Yamamoto: Differences of rainfall estimates and diurnal variations by TRMM PR and TMI, *The 2nd TRMM International Science Conference*, p24, 2004.
- 3) Kummerow, C., and Coauthors: The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.40, pp1801-1820, 2001.
- 4) 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.
- 5) 瀬戸心太, 井口俊夫: 陸面輝度温度変動を考慮したマイクロ波放射計による陸上降水有無判定, *水工学論文集*, Vol. 48, pp253-258, 2004.
- 6) Seto, S., N. Takahashi, and T. Iguchi: Comparison of Rain/No-rain Classification Methods over Land for TRMM Microwave Imager, *The 2nd TRMM International Science Conference*, p51, 2004.

(2004. 9. 30 受付)