

人工衛星による低頻度観測情報から算定される 降雨場確率パラメータの補正手法の開発

METHOD FOR CORRECTING VARIANCE OF MONTHLY RAINFALL
DIRECTLY ESTIMATED AS SAMPLE VALUE FROM LOW FREQUENT
SNAPSHOT OBSERVATIONS WITH SPACEBORNE RADAR

中北英一¹・岡根俊介²

Eiichi NAKAKITA and Shunsuke OKANE

¹工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²工学士 京都大学修士課程 都市環境工学専攻 (〒606-8509 京都市左京区吉田本町)

TRMM観測情報を用いて時間・空間平均降雨量を推定し精度評価するにあたり、降雨場の確率パラメータはあらかじめ算定しておかなければならない。地上レーダなどの長期観測情報が存在するところでは問題ないが、TRMMの観測範囲を考えるとそうでない範囲が多い。そこで、確率パラメータのうち定性的に補正の可能性が示された月降雨量の分散に焦点をあて補正手法を開発し、まずは、地上レーダを用いてそのモデル式の検証を行った。また、実際にTRMM観測データのみを用いてそのモデル式で補正が可能であるかについて検討し、その有効性を示した。

Key Words : TRMM , 降雨場, 月降雨量

1. 研究の背景と目的

地球規模の気候変動の原因を知るためには、熱帯地域の降雨を計測することが重要であると言われている。我が国の雨量計ネットワークを見れば質・量ともに世界的に最高レベルにあるものの、世界各地に目を移せば、観測設備の整っていない地域や海洋上など、雨量の計測が行われていない地域は多い。そこで提唱されたのが降雨レーダを搭載するTRMM(熱帯降雨観測衛星)であり、これにより熱帯地域の気候値を求めることができる。TRMMでは上記気候値を抽出するために緯度5°×経度5°の領域平均降雨量の推移が大きな目的として掲げられ、計画の段階からそのフィージビリティの検討のため、海洋上での推定精度の検討¹⁾やゴビ砂漠と我が国での推定精度の比較²⁾³⁾を行っている。一方、TRMM打ち上げ後では、中北ら⁴⁾が降雨の標高依存直線を考慮した方法を提案している。

さて、これらの研究では、TRMM/PRによる領域平均月降雨量の推定の精度評価にあたり、既存のレーダ情報

やアメダスといった長期観測情報から降雨場に関する確率パラメータ(地点月降雨量の分散等)をあらかじめ算定して利用している。もちろん、過去の長期情報が存在するところでは問題ないが、TRMM/PRの観測範囲はそうでない領域の方が大きい。

そこで、中北ら⁵⁾は時間・空間平均降雨量を推定し精度評価する際、打ち上げ以来数年間蓄積されたTRMM/PR情報のみから得られる降雨場における確率パラメータを推定し、その推定値がTRMM/PRの観測頻度に依存することを示すとともに、さらには観測頻度をパラメータとしてその推定値の補正の可能性を定性的に示した。

そこで、あらゆる降雨場確率パラメータ(月降雨量の分散、時間相関係数、空間相関係数等)の補正方法が開発されれば、TRMM観測情報から算出される確率パラメータの精度が向上し、あらゆる指標の精度向上に繋がると考えられることから、本研究では、特に月降雨量の分散に焦点をあて、観測頻度に応じて算定される分散の確率モデルを開発し、推定値の定量的な補正方法を提案する。

2. TRMMと月降雨量の分散の補正の可能性

TRMMは熱帯地域の降雨量の気候値を求めることを第一の目的としているため、他の多くの地球観測衛星とは異なり、軌道傾斜角35度で熱帯域を中心に観測し、 $5^\circ \times 5^\circ$ の領域の1ヶ月毎の総降雨量を測定することに重きを置いている。また、降雨レーダを搭載しており、降雨の三次元構造を解明することができる。また、低緯度(20度以下)では、ひと月の観測回数は30回前後、高緯度(33度以上)でも、60回前後と非常に時間間欠的な観測である。

ここで、ほぼ連続観測(5分毎)とみなせる国土交通省の深山レーダ雨量計情報から算定される月降雨量の分散と観測回数の関係を中北ら⁵⁾が示したのが図-1である。ただし、ひと月で5分毎に得られる情報を時間間隔が等間隔になるように間引くことによって観測回数を操作している。また、 $3\text{km} \times 3\text{km}$ サイズのメッシュサイズでの平均値を地点降雨量とし、各地点の月降雨量の分散を $240\text{km} \times 240\text{km}$ の領域で平均した算定値を示している。大数の法則により、少ない観測回数から計算した分散は大きな値を示している。TRMMの観測頻度がひと月に30~60回前後であることを考えると、非常に大きな値を算出してしまふことがわかる。また、図1より月降雨量の分散と観測回数の間には何らかの関係があり観測回数を多くしていくとある一定の値に収束していていることがわかる。

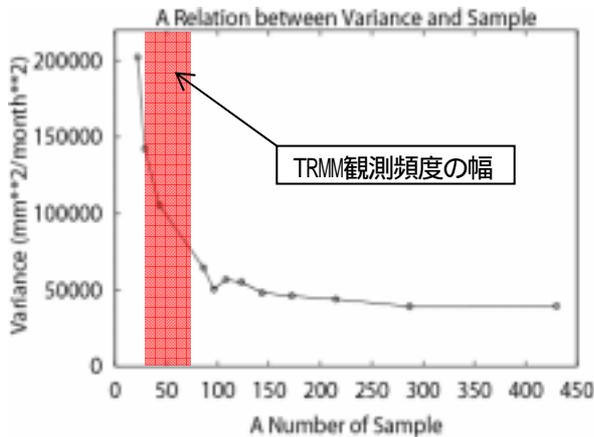


図-1 月降雨量の標本分散と観測回数の関係

以上より、月降雨量の分散と観測回数の関係を表す関係式を開発することができれば、TRMMという低頻度観測情報から算定される降雨場確率パラメータのおよその補正が可能であることがわかる。

3. 月降雨量の分散と観測回数の関係

瞬時の地点降雨強度を確率変数とみなして、時間相関を組み込むことにより月降雨量の分散と観測回数の関係を導出した。以下にその導出過程を示す。

まず、地点 x の j 月の月降雨量 $H_{j,n}(x)$ は、

$$H_{j,n}(x) = \frac{T}{n} \sum_{i=1}^n P(x, t_{ij}) \quad (1.1)$$

と表わされる。ここで、 T はひと月という期間の長さを文字変数で表現したもの、 n はひと月の観測回数、 t_{ij} は j 月の第 i 番目観測の時刻、 $P(x, t_{ij})$ は瞬時の降雨強度である。

次に、月降雨量の m ヶ月平均は(1.1)式より、

$$\mu_{n,m}(x) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_{j,n}(x) \quad (1.2)$$

と表わされる。したがって、月降雨量の分散の期待値 $E[\sigma_{n,m}^2]$ は、

$$E[\sigma_{n,m}^2] = E\left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \{H_{j,n}(x) - \mu_{n,m}(x)\}^2\right] \quad (1.3)$$

と表わすことができる。

ここで、互いに τ 時間離れた瞬時降雨強度の時間相関を指数関数 $e^{-\nu|\tau|}$ で近似すると、共分散関数は、

$$c(\tau) = \mu_{i_2} e^{-\nu|\tau|} - \mu_{i_1}^2 \quad (1.4)$$

となる。ただし、 μ_{i_1} は瞬時降雨量の期待値、 μ_{i_2} 瞬時降雨量の二乗期待値である。(1.3)式の展開にあたり(1.4)式を用いると、月降雨量の分散の期待値と観測回数 n の関係として、

$$E[\sigma_{n,m}^2] = \mu_{i_2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n e^{-\nu|(k-i)\Delta T|} \Delta T \Delta T - \frac{\mu_{i_2}^2}{m^2} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{i_j=1}^n \sum_{k_l=1}^n e^{-\nu|(l-j)T + (k_l - i_j)\Delta T|} \Delta T \Delta T \quad (1.5)$$

が導かれる。ただし、観測時間間隔は $\Delta T = T/n$ で一定であるとしている。

以上より、月降雨量の分散期待値と観測回数の関係を表したモデル式(1.5)を開発した。ここで、注意すべきことは、(1.1)式を用いて標本として算定される月降

雨量の分散の期待値が、ひと月の観測回数 n に依存していることを(1.5)式は表現していることに注意すべきである、さらには、月降雨量のサンプル数に対応する月数 m にも依存している。勿論、時間相関に関するパラメータにも依存しており、もし(1.5)式が月降雨量の分散の期待値の n, m への依存性を表わす適当なモデルとあるとすれば、いかに精度良く月降雨量の分散の補正値が推定されるかは、衛星による低頻度観測情報から如何にうまくモデルパラメータが推定できるかにかかっている。

4. モデル式の検証

まず、中北ら⁵⁾同様、モデル式そのものの検証に際しては、深山レーダ雨量計情報から得られたデータを時間間隔が等間隔になるように間引いて観測回数进行操作し、その観測回数ごとに求まる標本分散を地点毎に算出し、その上で期待値操作として深山観測領域 80×80 メッシュ範囲で空間平均をとった(標本値)。深山観測データとしては降雨期34ヶ月分(1988~1994年の6~10月(1991年8月は除く))を用いた。また、モデル式は月数 m にも依存していることから月数を変化させることによる検証も行った。

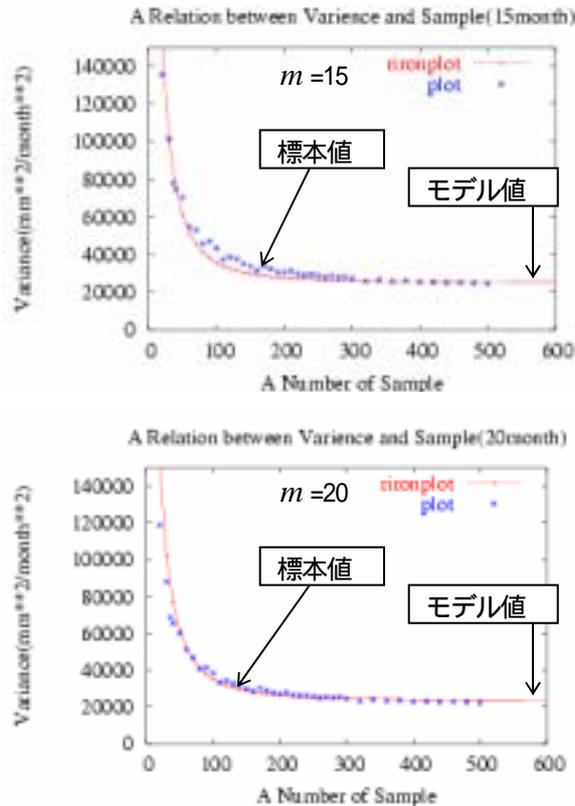


図-2 深山観測情報標本値とモデル値の比較

図-2は、 $m=15, m=20$ の場合の標本値(点)とモデル値(実線)の比較である。ここで、モデル式のパラメータに関しては、標本値とモデル値ができるだけ適合するように試行錯誤し決定したものであり、月数 m により の値は違う。しかし、モデル式はかなり標本値を説明づけていることから、このモデル式の有用性が大きいことがわかる。ただし、ある領域における時間相関に関するパラメータは共通の値(月毎に変化しない)であるべきことから、を自動同定しなければならない。

5. モデルパラメータの同定方法

モデルパラメータの同定方法として、月数 m 毎に標本値とモデル値の最小二乗和をとると安定した が得られなかった。また、最小値が出てこない月数もあった。そこで、モデル式は観測回数 n と月数 m に依存していることから、すべての n, m を通し標本値とモデル値の差の二乗和が最小となるものを最適な とする方法をとった。以下ではこの方法をグローバル推定と呼ぶことにする。

グローバル推定では、図-3のように面的に最小二乗和をとるため、標本値が少なくなるTRMM観測の場合でも月数を多くとるため標本値が多く得られることになる、そこで、安定した が得られるものと考えられる。また、TRMMはすでに6年間以上のデータを蓄積しているので年内の月毎に別々に分散の標本値を求める場合でも月数としては6ヶ月以上を用いることができることから標本値として信頼性の低い月数2~5を除外した。

図-3がグローバル推定した結果であるが、標本値とモデル値の収束先はほぼ同じであり、モデルパラメータの同定方法として有用な方法を提案できたといえる。

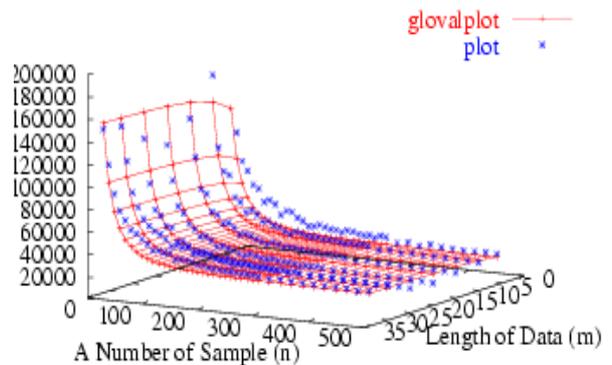


図-3 グローバル推定と標本地の比較(点は標本値、線は同定されたモデル式による推定値)

6. TRMM/PRによる観測頻度を想定したモデルパラ

メータの推定方法

第5章では、様々なひと月の観測回数 n を用いても出るパラメータTRMM観測頻度、高緯度地域(33~35度:ひと月の観測回数60回)と低・中緯度地域(33度以下:ひと月の観測回数40回)を想定しモデル式の検証を行った。

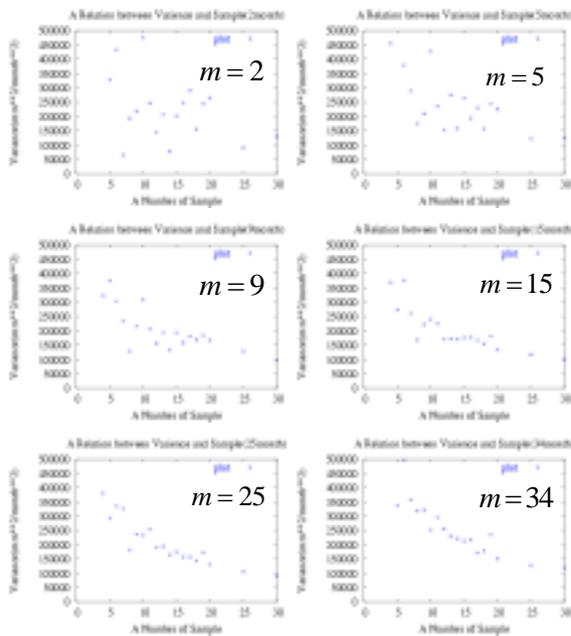


図-4 月降雨量の分散と観測回数(30回以下)の関係

まず、検証条件として、TRMM観測情報は等時間間隔で得られるものと仮定した。さらに、TRMMの最大観測回数 n の情報から等時間間隔にデータを間引くことによって複数の観測頻度に応じた標本分散を算定できることを利用し、複数の観測回数を用いてグローバル推定をした。また、グローバル推定では標本値とモデル値の対数値をとることにより最小二乗和をとった。対数値を用いたのは観測回数が少ない範囲では、モデルのグラフの勾配が極めて大きく、同観測回数が小さく異なる場合でも標本値とモデル値の差が大きくなるので、その影響を小さくするためである。また、ここではTRMM観測の実際のデータを用いることはせずに、深山観測情報の観測回数を操作することによりTRMMの観測情報とした。また、最大観測回数 n としては、高緯度観測に対応する値として60回、低緯度観測に対応するものとして40回を選び、それぞれにおいてモデルパラメータ推定の妥当性を検証した。

さて、図-4は観測回数が30回以下の時の観測回数と標本値の関係を見たものである。月数 m が少ない範囲では、ひとつきの観測回数 n が少ない場合、標本値のばら

つきが大きいことがわかる。そこで、グローバル推定をする際には、この標本値のばらつきの影響を小さくするため月数5ならびに9以下を除外した結果を示す。

図-5が高緯度地域を想定した検証結果である($m=34$)。実線を伴ったプロットがパラメータ同定されたモデル式によるもの、実線がないプロットが標本値である。収束状況がわかるように、観測回数 n が多い場合も含めてすべての標本値をプロットしているが、パラメータの推定に実際に用いたのは横軸の観測回数が60回以下の標本値のみである。月数9以下を除外することによって得られたモデル値の収束先は標本値の収束先とかなり近い値を示していることがわかる。また、同様に図-6は低・中緯度地域を想定した検証結果である($m=34$)。高緯度地域とほぼ同様の精度でモデル値の収束値は標本値の収束値に近づいていることがわかる。

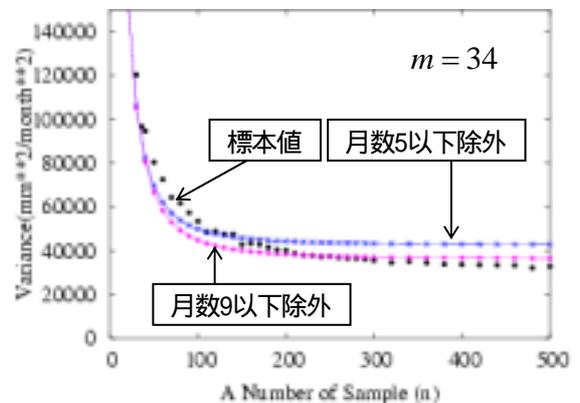


図-5 高緯度地域(最大観測回数60回)

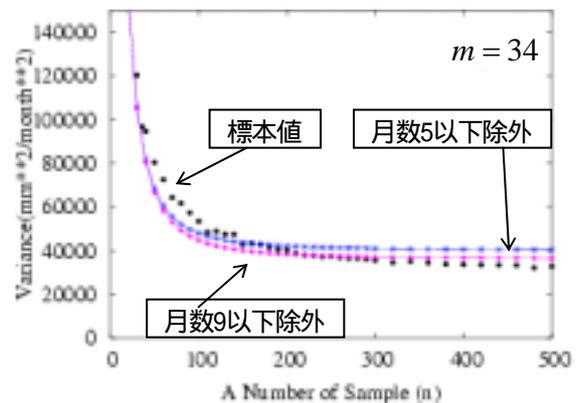


図-6 低緯度地域(最大観測回数40回)

7. TRMM/PRによる観測情報への適用

ここでは、実際にTRMM観測情報から得られるデータを用いて第3章の(1.1)式にならいうTRMM観測情報が

ら算定される降雨場確率パラメータである月降雨量の分散を補正する．対象領域は近畿地方 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (75×75 メッシュ)，用いたデータはTRMM/PRによる2A25プロダクトであり，期間は1998，1999，2000，2003年の6～10月に観測されたものである．

TRMMへの適用の前に，まず，深山データの観測回数を操作することでTRMM観測情報とみためた第6章での検証との違いをあげると次の通りある．すなわち第6章では，モデル式に従って，各地点 x での標本分散をまず求め，その上で期待値操作として深山観測領域 80×80 メッシュ範囲で空間平均をとった．すなわち，ひと月の観測回数 n が対象領域内のどこでも同じであるとして検証を行ってきた．しかし，TRMM観測の場合，対象領域内で観測回数 n が異なる．この点がこれまでの深山レーダ雨量計情報を用いた場合と大きく異なる点である．図-7は近畿地方のひと月の観測回数を示したものである．緯度によって観測回数が大きく違っており， 34° 付近で最も観測回数が増えていることがわかる．したがって，期待値操作に対応するものとして，第6章と同様に領域全体の空間平均をとることは適当ではない．

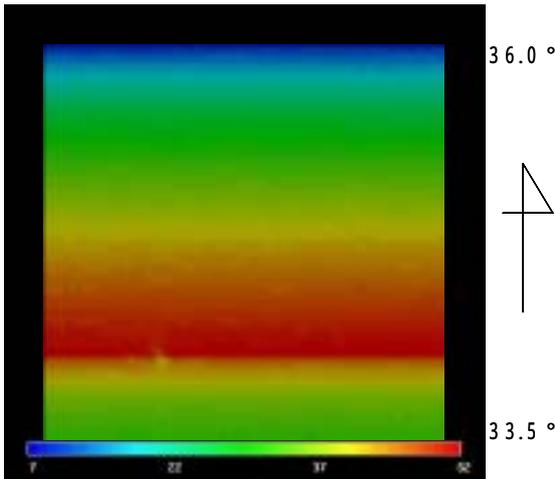


図-7 ひと月分の観測回数(20ヶ月平均)
(対象領域：近畿地方)

そこで，本研究では期待値操作としての空間平均を以下のように行った．図-7より，ひと月の観測回数は横方向つまり経度方向に等しいことがわかる．そこで，緯度方向に幅をもたせ観測回数がほぼ等しいもの同士を抽出し，それらを期待値操作として空間平均をとった．すなわち，各地点ごとに算定した月降雨量の分散を緯度方向に平均をとることにより期待値操作とした．

上記のように期待値操作としての空間平均をとることで，第6章とは違い最大観測回数から時間間隔が等間隔になるようにサンプリングし観測回数を操作する必要がなくなる．すなわち，観測回数を操作しなくても上記のように空間平均をとることでパラメータの同

定に必要な複数の観測回数での標本値が得られる．

以上を踏まえ，20ヶ月分のTRMM観測データのみを用いて第6章と同様にグローバル推定を行い算出した補正結果図-7である．ここでも第6章と同様に，標本値のばらつきが大きい月数 m を定性的に判断して月数11以下は除外して算定した．

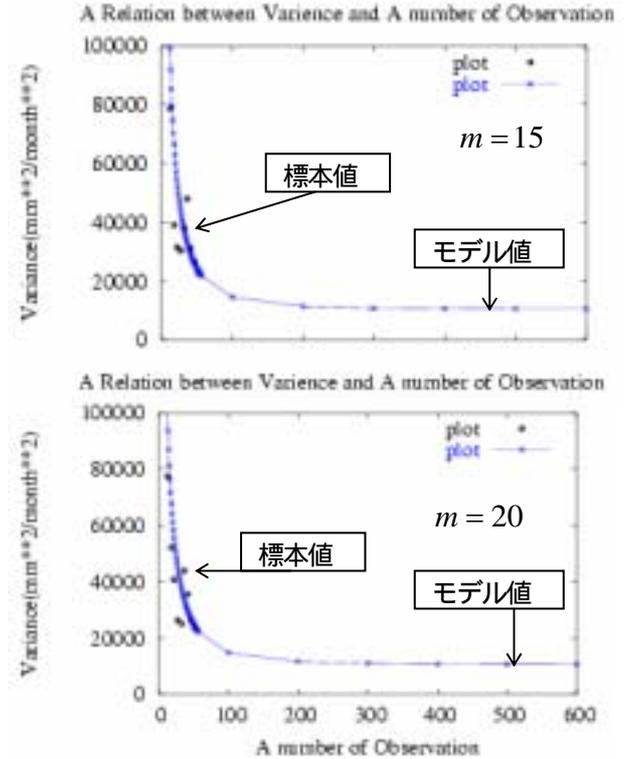


図-8 補正結果($m = 15, m = 20$)

図-8の量図とも，同定されたモデル値は，TRMM/PR情報から直接算定される月降雨量の分散の標本値の観測回数 n による違いをかなり良好に表現していることから，本研究で展開したモデル式(1.5)，ならびにモデルパラメータの推定方法の有効性を示している．

ただし，さらに精密な検証を目指すこと考える場合，見逃してはならない点もある．すなわち，深山レーダ雨量計情報による検証結果である図-2の標本値の収束値と，実際にTRMM/PR情報のみを用いた結果である図-8のモデル値の収束値を比較すると，図-8のモデル値の収束値が図-2の標本の収束値より若干小さい値となっている．この差異の原因として，深山レーダ雨量計情報を用いた場合の対象領域は $240\text{km} \times 240\text{km}$ であるのに対して，RMM/PR情報のみを用いた場合の対象領域は $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ であり，図-7の方が若干対象範囲が広いことや，対象期間の違いが考えられる．しかし，大きな原因としては

- TRMM観測と地上レーダ間の観測値の差（バイアス）。
- 7章でTRMM観測情報をモデル式に適用する際、実際TRMMの観測時間間隔は等間隔ではないがモデル式上等間隔とみなして適用している。すなわち、観測時間間隔を一律に平均的にとっているため、TRMM観測情報を直接モデル式に適用する際、モデル式中の $\Delta T = T/n$ の部分によって、TRMM/PR観測の実情を適当に表現しきれていない。

の2つが考えられ、今後の検証が必要とされる。第1の推定原因に関しては、TRMM観測と地上レーダ間のバイアスを検証する必要がある。第2の推定原因に関しては、TRMM/PRの実際の観測感を用いたモデル式を再誘導して検証する必要がある。

しかし、主な原因は、両観測間のバイアスにあると推定している。したがって、本研究で展開したモデル式(1.5)、ならびにモデルパラメータの推定方法の有効性を示すことができたと考えている。

8. 結論

以上、TRMM低頻度観測情報から算定される降雨場確率パラメータの一つとして「月降雨量の分散」の補正手法を開発し、地上レーダーである深山レーダ雨量計による高頻度観測情報を用いた検証、さらにはTRMM観測情報のみを用いてモデル式に適用可能な検証を行った。

地上レーダーを用いたモデル式の検証では、利用できるデータ長（月数 m ）が小さい場合を除き、モデル式は良好に現象を表現していることを示すとともに、TRMM/PRによる観測は十分な月数を有することから問題が無いことを示した。また、観測データ長が短い場合を除外すれば、様々なデータ長、観測頻度による標本推定値を用いることにより、TRMM/PRによる観測頻度においてもモデルパラメータを良好に推定できることも示した。

さらには、実際のTRMM/PR観測情報を用いた「月降雨量の分散」の推定を試み、より高い精度の高い検証を求める場合は、TRMM観測と地上レーダ間の観測値の

差（バイアス）を検証する必要があるものの、同定されたモデル値は、TRMM/PR情報から直接算定される月降雨量の分散の標本値の観測回数による違いをかなり良好に表現しており、したがって、本研究で展開したモデル式、ならびにモデルパラメータの推定方法が有効であることを示した。

謝辞

本研究は、宇宙開発事業団（現宇宙航空研究開発機構）との共同研究として進め、TRMM/PR観測情報の提供いただいた。また、深山レーダ雨量計情報は国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所から、研究用として提供いただいた。ここに、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Thomas L.Bell: A Space-Time Stochastic Model of Rainfall for Satellite Remote Sensing Studies, Jour. Geophys. Res. Vol.92, pp.9631-9643, 1987.
- 2) 垣見庸介:広域降雨場モデルを用いた衛星観測取得情報の評価精度に関する研究, 京都大学大学院修士論文, 1993.
- 3) Ikebuchi,S.,E.Nakakita,K.kakimi and T.Adachi:Accuracy of Space and Time Average Estimation on Precipitation by Using Satellite Data,Proc.of International Symposium on HEIFE, pp.216-226, 1993.
- 4) 中北英一・沖村俊郎・鈴木善晴・池淵周一:降雨の標高依存特性を導入したTRMM/PRによる時間・空間平均降雨量の推定. 水工学論文集, 第46巻, pp25-30.
- 5) 中北英一・沖村俊郎・鈴木善晴・池淵周一:降雨の標高依存直線を考慮したTRMM/PR長期観測情報の有効利用, 京都大学防災研究所年報, No.45 B, pp.687-703, 2002.

(2004年10月30日 受理)
