

人工衛星による低頻度観測情報から 直接算定される地点月降雨量分散値の補正手法

METHOD OF CORRECTING VARIANCE OF POINT MONTHLY RAINFALL
DIRECTLY ESTIMATED USING LOW FREQUENT OBSERVATIONS FROM
SPACE

中北英一¹・岡根俊介²

Eiichi NAKAKITA and Shunsuke OKANE

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²学生会員 工学士 京都大学修士課程 工学研究科 (〒606-8509 京都市左京区吉田本町)

This paper proposes a method of correcting variance of point monthly rainfall directly estimated as sample value with low frequent observations from space. First, expectation of sample variance of monthly rainfall is formulated as a function of frequency and length of observation. In the formulation, key parameter is correlation time length. Second, the formulation is validated using high frequent observations by a ground-based weather radar. Third, a method identifying the parameter when only low frequent observations are available. As a result from application to TRMM/PR observations, it is shown that the formulation and the method of identification work well and importance of incorporating spatial correlation in further correcting sample variance of areal mean monthly rainfall.

Key Words : spaceborn radar, TRMM, precipitation field, rainfall, monthly rainfall, sample variance, low frequent observation

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の把握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(Precipitation Radar)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気候値としての確率パラメータ(地点月降雨量の分散、時間相関長さ、空間相関長さ等)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標本値として推定し、その標本値としての推定値が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の補正方法が開発されれば、TRMM観測情報から算出される降雨特性の気候値としての確率パラメータの精度が向上するばかりか、領域平均月降雨量の推定の精度等の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標本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と月降雨量の分散値の補正の可能性

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(軌道面と地球の赤道面の角度)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、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分毎時)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地点月降雨量の分散の空間平均値と観測回数との関係を中北ら⁵⁾が示したのが図-1である。ただし、1998年7月~10月、1999年6~10月のデータを用い、ひと月で5分毎時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、 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 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標本分散を $240\text{km} \times 240\text{km}$ 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、頻度の小さい観測値から計算した標本分散の空間平均値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より地点月降雨量の標本分散の空間平均値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つていることがわかる。

以上より、地点月降雨量の標本分散の空間平均値と観測回数と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補正が可能であることがわかる。

3. 月降雨量の標本分散と観測回数との関係

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標本分散の期待値と観測回数との関係を導出した。以下にその導出過程を示す。

まず、地点 x の j 月の標本月降雨量 $H_{j,n}(x)$ は、

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

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_{i_j} は j 月の第 i 番目観測の時刻、 $P(x, t_{i_j})$ は瞬時の降雨強度である。

次に、標本月降雨量の m ヶ月平均は(1.1)式より、

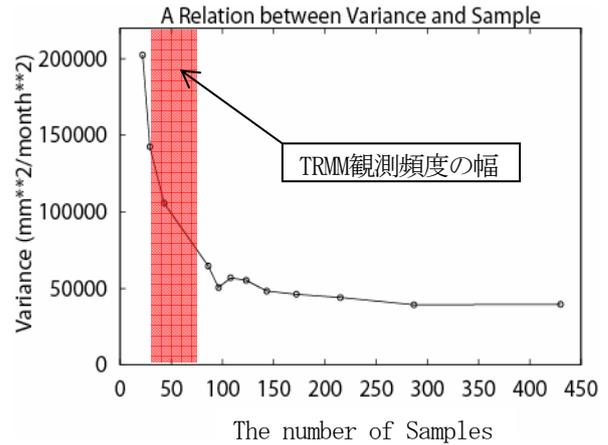


図-1 月降雨量の標本分散の空間平均値と観測回数との関係

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

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

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

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 $e^{-v|\tau|}$ で近似すると、共分散関数は、

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

となる。ただし、 μ_{i_1} は瞬時降雨強度の期待値、 μ_{i_2} 瞬時降雨強度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、月降雨量の標本分散の期待値と観測回数 n の、月数 m の関係として、

$$E[S_{n,m}^2] = \mu_{i_2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n e^{-v(k-i)\Delta T} \Delta T \Delta T - \frac{\mu_{i_1}^2}{m^2} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{i_j=1}^n \sum_{k_j=1}^n e^{-v(l-j)T + (k_j-i_j)\Delta T} \Delta T \Delta T \quad (1.5)$$

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。ここで、 $n \rightarrow \infty$ 、 $m \rightarrow \infty$ とすることで月降雨量の分散の不偏推定値は、

$$\lim_{n \rightarrow \infty, m \rightarrow \infty} E[S_{n,m}^2] = \frac{\mu_{i_2}}{T^2} \int_0^T \int_0^T e^{-v|t-t'|} dt dt' \quad (1.6)$$

となり、分散はある値に収束していく。

以上より、月降雨量の標本分散の期待値と観測回数と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標本分散の期待値が、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 ν にも依存しており、もし(1.5)式が月降雨量の標本分散の期待値の 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 ν が推定できるかにかかっている。

4. 標本分散のモデル式の検証

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を操作し、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3ヶ月分(1988~1994年の6~10月(1991年8月は除く))を用いた。ここで、6~10月の雨は同じ降り方をすると仮定する。また、事前情報として必要であるモデル式中の μ_{i2} は上記のデータより算出した。さらに、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。月数の変化のさせ方は用いるデータの最新のデータから順をおって変化させた。例えば、5ヶ月なら1994年6~10月、7ヶ月なら1994年6~10月と1993年10月と9月を用いた。

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 ν 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 ν 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、6~10月では同じ降り方を仮定しているため、ある領域における時間相関に関するパラメータ ν は共通の値(月毎に変化しない)であるべきことから、 ν を自動同定しなければならない。

5. モデルパラメータ ν の同定方法

モデルパラメータ ν の同定方法として、月数 m 毎に標本値とモデル値の差の最小二乗和をとると安定した ν 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 を通し観測回数での標本値とモデル値の差の二乗和が最小となる

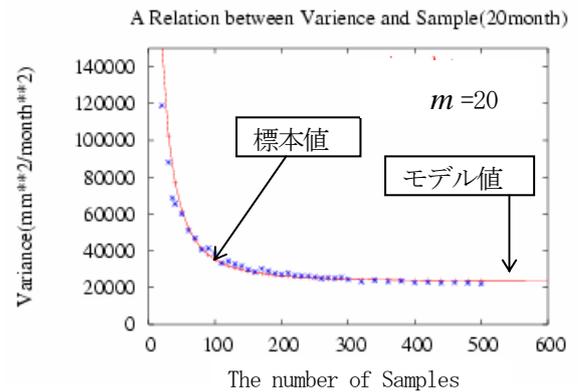
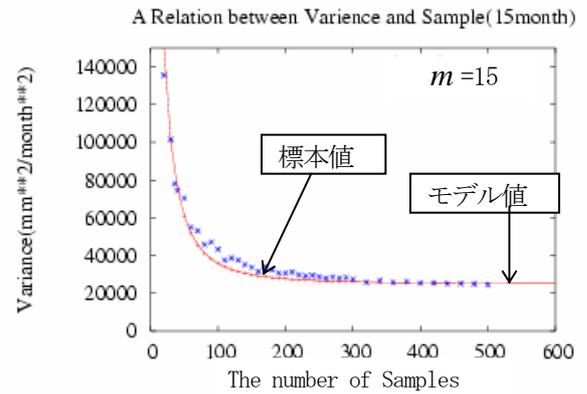


図-2 深山観測情報標本値とモデル値の比較

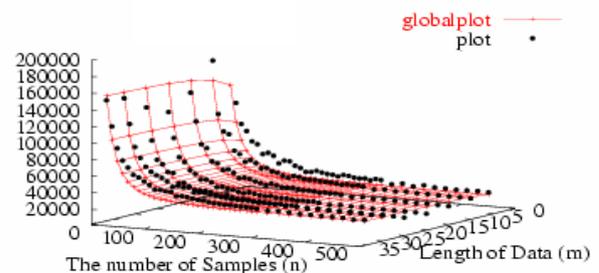


図-3 グローバル推定と標本値の比較(点は標本値、線は同定されたモデル式による推定値)

ものを最適な ν 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、観測頻度の種類が少なくなるTRMM観測の場合でも異なる月数 m を多種類とるために標本値が多く得られることになる。したがって、安定した ν が得られるものと考えられる。一方、月数 m が小さい場合は、月降雨量の分散標本値の分散が当然大きくなり、たまたま算定される分散標本値は期待値から大きくずれる危険性が高い。幸いTRMMはすでに6年間以上のデータを蓄積しているため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 ν の同定方法として有用な方法を提案できたといえる。

6. TRMM/PRによる観測頻度を想定したモデルパラメータ ν の推定方法

5. では、幅の広い様々な観測回数 n を用いて ν を同定した。次に、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)を想定した場合でも ν がうまく同定できるかどうかを検証した。

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 n 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いため、モデルのグラフがわずかに左右にシフトするだけで、標本値とモデル値との差が格段に大きくなったりするので、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。5. で述べた理由から、月数 m が少ない範囲では、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 ν 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

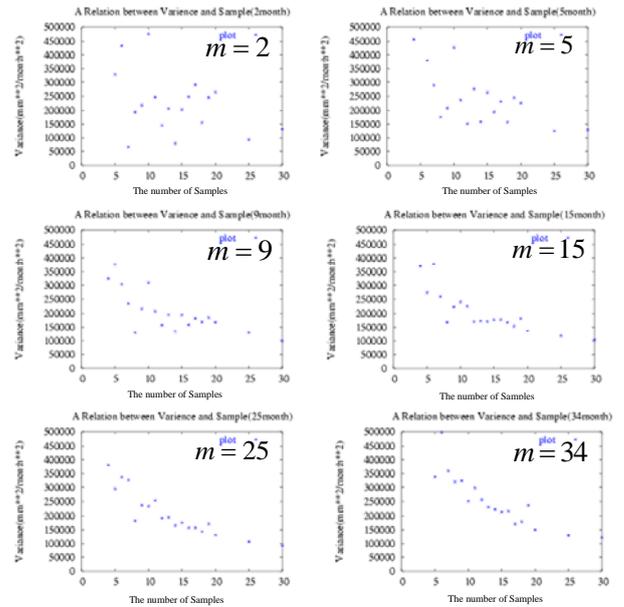


図-4 月降雨量の標本分散期待値と観測回数(30回以下)の関係

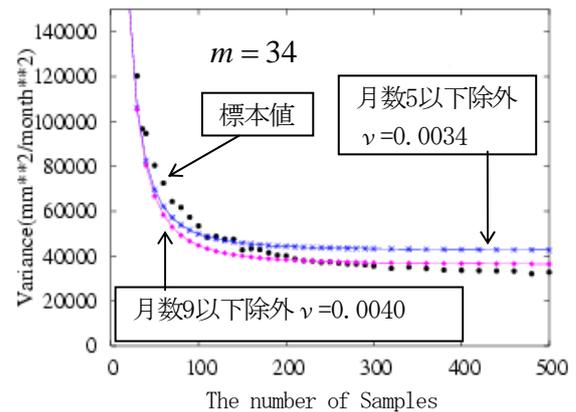


図-5 高緯度地域 (最大観測回数60回)

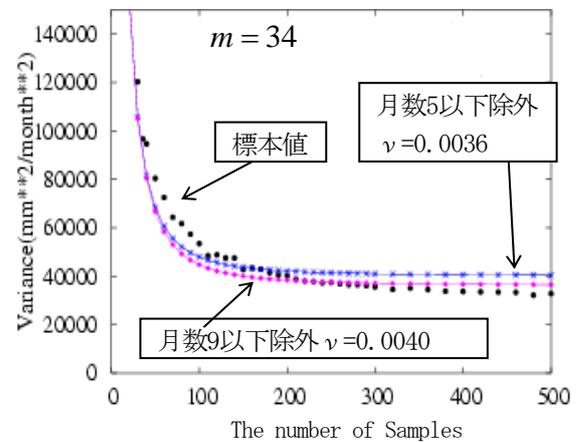


図-6 低緯度地域 (最大観測回数40回)

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。

ここで、(1.4)式にならい深山観測情報から直接算定した ν は $\nu=0.0036$ であり、**図-5**、**図-6**での値と比較するとパラメータ推定における本手法の有効性は高いものと言える。

7. TRMM/PRによる観測情報への適用と考察

最後に、実際にTRMM観測情報から得られるデータを用いて3.の(1.1)式にしたがってTRMM観測情報から直接算定される地点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。

(1) 適用方法

まず、深山データの観測回数を操作することでTRMM観測情報とみたてた6.での検証との違いをあげると次の通りある。すなわち6.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多くなっ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、6.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。

そこで、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経度方向に等しいことがわかる。そこで、経度方向に幅をもたせ観測回数がほぼ等しいもの同士(観測回数が31~35, 36~40, 41~45等)を抽出し、それぞれで空間平均を取ることにより期待値操作とした。すなわち、各地点ごとに算定した月降雨量の標本分散を経度方向に平均をとることにより期待値操作とした。

このように、観測頻度が異なる領域ごとに空間平均をして期待値操作とすることで、異なる観測頻度の標本値が得られることになり、6.のように最大観測回数 N 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しなくても、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。

また、事前情報として必要である地点瞬時降雨強度の1次ならびに2次のモーメントは μ_{i1} 、 μ_{i2} はTRMM観

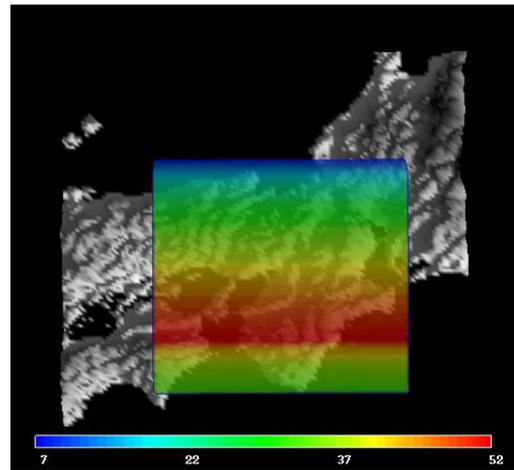


図-7 ひと月分の観測回数(20ヶ月平均)
(対象領域：近畿地方)

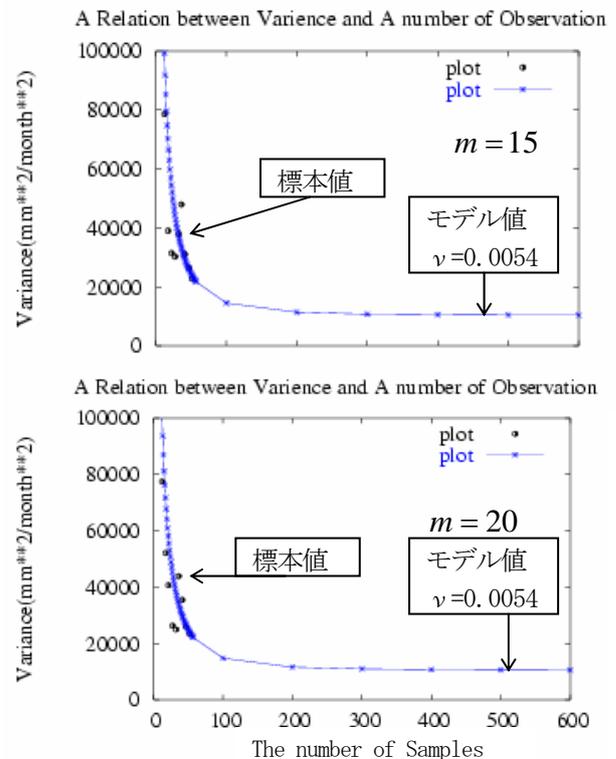


図-8 補正結果($m=15, m=20$)

測情報のみから算出する。

(2) 結果および考察

以上を踏まえ、20ヶ月分のTRMM観測データのみを用いて6.と同様にグローバル推定を行なった結果は**図-8**である。ここでも6.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の両図とも、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 ν 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小さい値となっている。この差異の原因として、図-8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

- (1) TRMM観測と地上レーダ観測のフットプリント(観測面積)の違い、
 - (2) TRMM観測と地上レーダ間の観測値の差(Bias)
 - (3) 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にもかかわらずモデル式上等間隔として適用している、
- の3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、本研究においてTRMM観測情報と深山レーダー情報ともに地点情報と仮定してきたことになる。しかし、実際は観測フットプリント内の平均量である。また、瞬時降雨強度に空間相関がないとすれば、面積平均降雨強度の標本分散の期待値は平均面積の2乗に反比例する。フットプリントの面積を粗く見積もって、TRMMが4km×4km、深山レーダーが3km×3kmとすれば、その比は約3となるはずであり、空間相関があればその比率がさらに異なる。図-6、図-8の比較から、収束値の比は約4であり、そこそこ説明付けていることになる。したがって、次ステップとしては、空間相関も考慮した面積雨量としてのモデル式として再誘導して検証する必要がある。

第2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3の推定原因に関しては、TRMM/PRの実際の観測間隔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、両観測におけるフットプリントの違い、また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 ν の推定方法の有効性を示すとともに、気候値として、地点瞬時降雨量の時間相関長さや地点月降雨量の分散の世界分布推定の可能性を示せたと考えている。

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「月降雨量の分散の期待値」の補正手法を開発し、地上レーダ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の検証を行った。

地上レーダ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観測と地上レーダ観測のフットプリントの違いや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期待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 ν の推定方法が有効であることを示した。

謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)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 Satelite 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, 2002.
- 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.