

衛星観測を用いた瞬時降雨量の時間相関長さ の全球分布推定

GLOBAL DISTRIBUTION OF TEMPORAL CORRELATION LENGTH
ESTIMATED FROM SATELLITE OBSERVATION

中北英一¹・木島梨沙子²
Eiichi NAKAKITA and Lisako KONOSHIMA

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 工修 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

This paper aims at estimating a global distribution of temporal correlation length of instantaneous rainfall, only from a low frequent satellite data. In a previous research, a method was developed to correct the sample variance of monthly rainfall and to estimate a stochastic parameter of temporal correlation of instantaneous rainfall from a low frequent observation of TRMM. However, the estimates were possible only in the middle latitude, and also its spatial resolutions were limited. This research seeks a better method for estimating parameters by considering actual TRMM observation time intervals, and also changing the estimation method to a point-to-point estimation. As a result, finer results were obtained in all latitudes and a global distribution of temporal correlation lengths of instantaneous rainfall is explored.

Key Words : TRMM/TMI, temporal correlation length, precipitation field, low frequent observation, sample variance

1. 序論

近年,世界各地で様々な豪雨災害が頻発しており,各地における降雨現象の時空間分布特性の解明は緊急な課題といえる. その一方で,世界的に見ると高密度な降雨観測が行われている地域は限られており,地球規模での降雨統計量の把握には,衛星観測が欠かせない.

TRMM(熱帯降雨観測衛星: Tropical Rainfall Measuring Mission)は,北緯35度から南緯35度の全域をPR(降水レーダ: Precipitation Radar)とTMI(TRMMマイクロ波観測装置: TRMM Microwave Imager)で精度の高い降雨観測を行っている. とくにTRMMによる観測は降水の日周変化を捉えるために地方観測時刻を変化させており,熱帯域を中心として全球の降雨特性の把握は飛躍的に向上した. しかしその反面,衛星観測であるために時間間欠的であるという欠点を免れることはできず,TRMM観測によって算定される気候値には,標本誤差(サンプリングエラー)が多く含まれる.

このTRMMによって推定される降雨量に含まれるサンプリングエラーについては,TRMM打ち上げ以前から現在までさまざまな検討がなされている. 例えば, Bell¹⁾

やLaughlin²⁾らはTRMM打ち上げ前のレーダによる特別観測情報を用いて海洋上での領域平均月降雨量の推定精度の検証を行い, Oki and Sumi³⁾は気象庁のレーダーアメダスを用いて領域平均月降雨量の推定精度の検証を行っている. またIkebuchi *et al.*⁴⁾は,ゴビ砂漠上と我が国での精度比較を行っている. さらに, Steiner⁵⁾は,領域平均降雨量の推定精度が,観測時間間隔,降雨強度,領域の大きさおよび積算時間に依存することに着目し,これらをパラメータとして変化させた際の標本誤差の推定精度を検証している. しかし,これらの既往研究では,TRMMによる領域平均月降雨量の推定値の精度を評価する際に,降雨場に関する気候値としての確率パラメータである時間相関長さ等を既存のレーダやアメダスといった長期観測情報から予め算定して用いている. もちろん,過去の長期情報が存在する地域では問題ないが,TRMMの観測範囲はそのような情報が存在しない領域の方が大きい. また,いずれも標本誤差の推定にとどまり,実際の降雨統計量を補正するまでには至っていないものが多い.

一方,中北ら⁶⁾では,時間・空間平均降雨量を推定し精度評価する際に,打ち上げ以来蓄積されたTRMM/PR情報のみから標本値としての確率パラメータを推定している. そしてこれらの標本推定値がTRMM/PRの観測頻

度に依存することから、観測頻度をパラメータとした補正が可能であることを定性的に示した。

これを受け、中北・岡根⁷⁾は、地点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、TRMM/PR観測情報から得られる推定値の定量的な補正方法を提案した。そして推定された母分散ならびに同時に得られた瞬時降雨量の時間相関パラメータの値が、地上レーダの連続的な観測から得られた値とほぼ一致することを確認した。すなわち、ここで開発された手法により、月降雨量の標本分散が補正可能となっただけでなく、低頻度の衛星情報を用いて算定した月降雨量から、瞬時の降雨量の時空間分布特性として重要な瞬時降雨量の時間相関長さの抽出も可能となった。この推定手法については第2章で詳述する。

しかし上記の手法では、観測頻度の比較的高い中緯度では瞬時降雨量の時間相関パラメータの推定ができたものの、TRMMの観測頻度が少なくなる低緯度では推定が不可能であった。そこでNakakita *et al.*⁸⁾、Nakakita and Konoshima⁹⁾では、瞬時降雨量の空間相関をモデルに取り込み、瞬時降雨量の領域平均値を用いることで、観測頻度の問題を解決し、低緯度での推定を試みている。しかしこの方法では、狭い観測面積の情報を空間平均することによる精度低下に加え、空間平均値をとることにより標本数が減少し、パラメータ推定の精度が著しく低下したため、なお全球規模の推定に問題が残った。

そこで、本研究では、観測頻度の少ない低緯度においても時間相関パラメータを推定可能にし、降雨場確率パラメータの全球推定を行うことに焦点を置く。観測情報としてはPRよりも観測頻度の高いTMIを用い、さらに、少ない観測頻度での推定精度を上げるために、TRMMの実際の観測時間間隔を考慮する推定手法を新たに開発した。この推定手法により本研究で初めて、瞬時降雨量の時間相関長さの全球分布が推定可能となった。

本研究で得られた結果は、観測時間間隔、ひと月の観測頻度、観測月数に依存した標本期待値を表すことから、TRMMの観測頻度ならびに長期観測の有効性を示す貴重な指標となるだけでなく、TRMMの後継・拡張ミッション計画である、次世代衛星GPM (全球降水観測計画: Global Precipitation Measurement) における打ち上げの前情報としても重要な成果になると考えられる。

2. 既往研究における観測頻度に依存した月降雨量の標本分散補正式

(1) 標本分散と観測頻度の関係

TRMMの観測頻度は緯度ごとに異なる。そのため、TRMM観測情報から算定する地点月降雨量の分散値は、観測頻度の多い中緯度地域に比べ、頻度の少ない低緯度

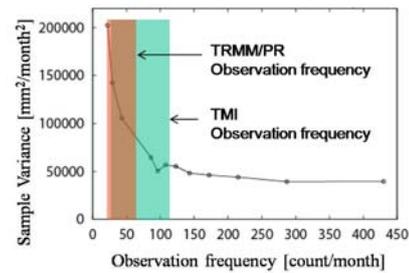


図-1 月降雨量の標本分散値と観測頻度の関係

地域では過大に推定される⁶⁾。これは、月降雨量を推定する際のひと月の標本数が異なるために、大数の法則に従って、少ない標本数から計算する低緯度標本分散値は標本誤差を多く含み、真の分散値よりも過大な値を算出するためである。

この関係は地上レーダを用いても明らかにされている。図-1は地上レーダの5分毎の観測情報を、時間間隔が等間隔になるように間引いて観測頻度を操作することで得られた、さまざまな観測頻度での標本分散値をプロットしたものである。図-1から、TRMMのPRおよびTMIのような観測頻度の少ない範囲では標本分散期待値が過大に推定されることがわかる。また、観測頻度が増加するに従い、不偏推定値(母分散)に収束していく様子が見て取れる。そこで、中北・岡根⁷⁾では、この観測頻度と月降雨量の標本分散の関係を理論的に導き、TRMMの低頻度観測から得られる標本分散の分散補正式を開発した。

(2) 時間相関を考慮した分散補正式

瞬時の地点降雨強度を確率変量とみなして、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頻度の関係は以下のように導出できる⁷⁾。

TRMMの離散的な観測情報から得られるある地点 x の j 月の標本月降雨量 $H_{j,n}(x)$ は、TRMMのひと月の観測回数を n とすると、

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

と表わされる。ここで、 T はひと月の総時間数、 $t_{i,j}$ は j 月の第 i 番目観測の時刻、 $P(x, t_{i,j})$ はその時刻の瞬時の降雨強度である。TRMM観測情報から算定される月降雨量の標本分散の期待値 $E[S_{n,m}^2]$ は、標本月降雨量の m ヶ月平均値を用い、

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

と表される。ここで、以下の瞬時降雨強度の共分散関数^{10),11)}を導入する。

$$c(\tau) = \mu_2 e^{-|\tau|} - \mu_1^2 \quad (3)$$

ここで μ_1 は瞬時降雨強度の期待値、 μ_2 は瞬時降雨強度の二乗期待値である。(2) 式を (3) 式を用いて展開す

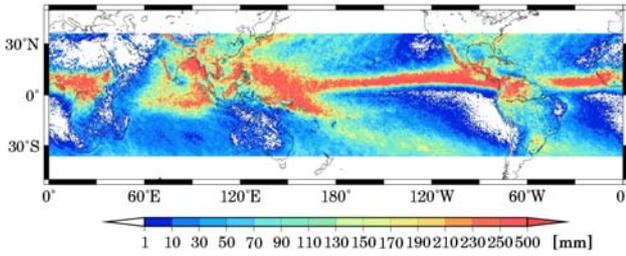


図-2 TMIから算定した月平均降雨量(30ヶ月平均値)

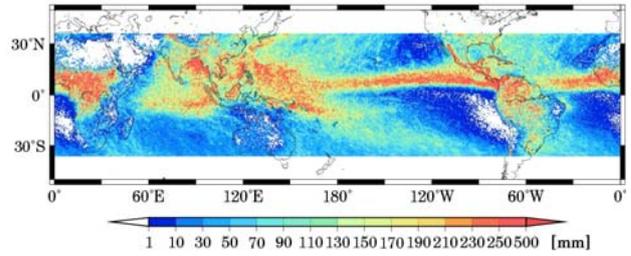


図-3 TMIから算定した月降雨量の標本標準偏差

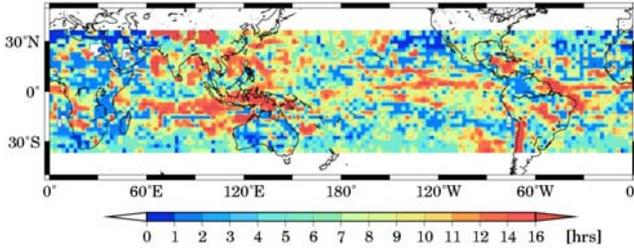


図-4 既往手法による瞬時降雨量の時間相関長さの推定値

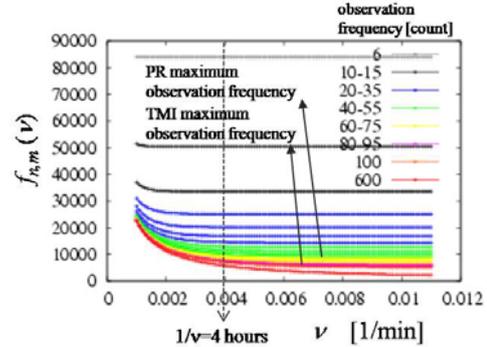


図-5 パラメータと時間相関の項の変化

ると、月降雨量の標本分散の期待値と観測回数 n 及び月数 m の関係として、

$$E[S_{n,m}^2] = \mu_{i2} \left\{ \frac{1}{m} \frac{T^2}{n^2} \sum_{j=1}^m \sum_{i_j=1}^n \sum_{k_j=1}^n e^{-\nu(k_j-i_j)\Delta T} - \frac{1}{m^2} \frac{T^2}{n^2} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{i_j=1}^n \sum_{k_l=1}^n e^{-\nu(l-j)T + (k_l-i_j)\Delta T} \right\} \quad (4)$$

が導かれる。ここで、TRMMの観測時間間隔は $\Delta T = T/n$ とし、ひと月で一定であると仮定している。(4)式は、さらに、観測頻度 n 、月数 m を無限大にすることで以下の月降雨量の母分散の値に収束する。

$$\lim_{n \rightarrow \infty, m \rightarrow \infty} E[S_{n,m}^2]_{(x)} = \frac{2\mu_{i2}}{\nu} \left(T + \frac{e^{-\nu T}}{\nu} - \frac{1}{\nu} \right) \quad (5)$$

(4)式から、標本値として算定される月降雨量の標本分散の期待値 ((2) 式) は、ひと月の観測回数 n と月降雨量のサンプル数に対応する月数 m 、ならびに時間相関パラメータ ν に依存することがわかる。なおこの ν の逆数が瞬時降雨量の時間相関長さである。適用期間内の ν の期待値を推定するには、全ての n, m (ただし標本値として信頼性の低い月数15ヶ月以下は除外する) を通して、衛星観測情報から直接算定される標本分散の期待値 ((2) 式) とモデル値 ((4) 式) との差の最小二乗和を求めればよい⁷⁾。その際、 ν は領域平均値として推定し、(2) 式における観測回数 n の期待値操作は、TRMMの観測頻度が緯度毎に異なることを利用して、空間平均で以って代用する。すなわち、経度方向に幅をもたせて緯度毎に観測回数が等しいもの同士で平均値をとるという空間平均操作によって異なる観測頻度の標本期待値を得る⁷⁾。

3. 全球への適用

(1) TMI観測情報の標本分散補正式への適用

本研究では、先ず、第2章で述べた既往研究における推定手法を用いて、PRより観測頻度の多いTMIの観測情報から瞬時降雨量の時間相関長さの全球推定を試みた。利用したデータは TMI 2A12 の near Surface Rain である。推定期間はアジアモンスーン域において南西モンスーンの卓越する6月から10月とした。用いたデータのサンプル数は2002年から2007年までの30ヶ月である。この期間のTMI情報から直接算定した月平均降雨量ならびに月降雨量の標本標準偏差を図-2、図-3に示す。

時間相関パラメータ推定の際の空間分解能は 2.5度 × 2.5度領域とし、(2) 式の期待値算定には、2.2で述べた期待値操作を用いた。推定された瞬時降雨量の時間相関長さの全球分布を図-4に示す。図-4では、推定された時間相関長さは全域で非常にばらついており、パラメータ ν が適切に求められていないと考えられる。

そこで、その原因を次節で探り、既往のモデル式でパラメータ ν を推定する際の問題を明らかにする。

(2) 時間相関モデル式の検証

第2章において導いた分散補正式である(4) 式を、

$$\frac{E[S_{n,m}^2]}{\mu_{i2}} = f_{n,m}(\nu) = \frac{1}{m} \frac{T^2}{n^2} \sum_{j=1}^m \sum_{i_j=1}^n \sum_{k_j=1}^n e^{-\nu(k_j-i_j)\Delta T} - \frac{1}{m^2} \frac{T^2}{n^2} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{i_j=1}^n \sum_{k_l=1}^n e^{-\nu(l-j)T + (k_l-i_j)\Delta T} \quad (6)$$

と変形すると、左辺はTRMM観測から直接算定する項である。また、 $\Delta T = T/n$ と仮定しているため、右辺は、パラメータ n (観測頻度)、 m (月数)、 ν (時間相関パラメータ) で変化する時間相関の項である。この右辺の値、

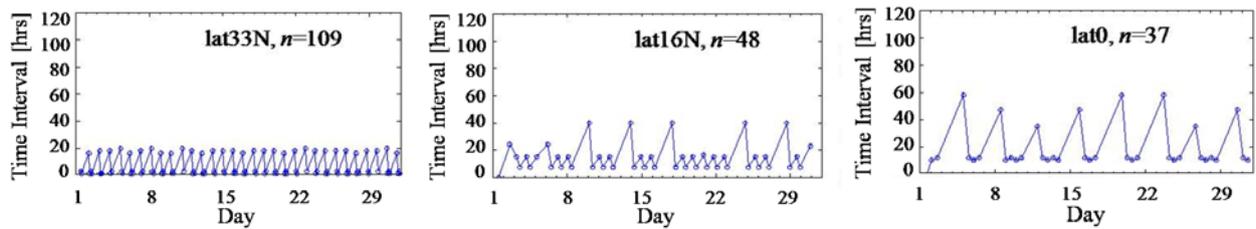


図-6 ひと月の観測時間間隔の時系列

すなわち時間相関の和の値を縦軸にとり、横軸に時間相関パラメータ v をとったときの変化を、様々な観測頻度 n について色分けして図-5に示した。図-5を見ると、右辺の値は各観測頻度に依存してある範囲内で変化しているが、少ない観測頻度では、パラメータ v による時間相関の項の変化が少なく、パラメータ v が大きいところではほぼ一定の値をとっている。これらのことより次のことがわかる。まず、各観測頻度において、TRMMにより直接算定される左辺の値が、右辺の時間相関の和の値がとる範囲に存在しない場合には、モデル式が観測値を表現しないため、パラメータ v は不定となり最適解をもたない。さらに、時間相関の項は観測頻度に応じてある v の範囲でしか感度を持っていない。TMIの観測頻度の範囲では、パラメータ v が 0.004 以上、すなわち時間相関長さ4時間以下の範囲では、パラメータ v による時間相関の項が変化しないので、4時間よりも短い時間相関長さの決定は不可能である。

以上の解析結果を踏まえて、ここで、(4)式で上記のような感度の限界がある理由を、モデルの原点に立ち返って考えてみる。瞬時降雨量の時間相関は(3)式のように指数関数的に変化するため、時間間隔 τ が長くなると、時間相関 $e^{-v\tau}$ の値は急激に減少し、特に v が大きいときに減少が著しい。一方、TMIの観測頻度 n を用いて、 ΔT を T/n として一定と仮定したとき、 ΔT がとり得る範囲は、 n が 30回で $\Delta T = 24$ 時間、 n が 60回で $\Delta T = 12$ 時間、 n が 100回でも $\Delta T = 7$ 時間程度である。このような観測時間間隔では、 v の値が大きい範囲では時間相関 $e^{-v\tau}$ がすべて 0 となり、右辺の値は変化しない。これが (6)式の右辺の値がパラメータ v に実質的に依存しなくなる理由である。実際、短い時間相関をもつ瞬時降雨量の時間相関長さを推定する際、観測時間間隔が長ければ、それより短いスケールの時間相関を同定するのは困難であるといえる。

このように中北・岡根⁷⁾での推定式では観測時間間隔を T/n として一定と仮定していたため、観測頻度の低いTMI観測ではパラメータ v の同定に限界があった。

しかし、もともと実際のTRMMの観測時間間隔は $\Delta T = T/n$ と一定ではなく、TRMMの軌道特性から短い時間間隔と長い時間間隔を交互に繰り返している。そこで次章ではTRMMの実際の観測時間間隔を取り入れることを検討し、短い時間相関をもつ降雨を考慮できるように

推定手法を再検討する。

4. TRMMの観測時間間隔を考慮した月降雨量の標本分散補正式

(1) TMIの観測時間間隔

TMIは地表面で約 848 kmの観測幅を持つために、TRMMが地球を一周して巡ってくる度に、何度か重複して同じ地点を観測する。そのため、TMIの観測時系列では、全ての緯度において短い観測時間間隔が連続的に現れ、さらに軌道が東西方向となる中緯度地域においてはそれよりもさらに短い観測時間間隔が多く存在する。

TMI観測によるある地点のひと月(2007年7月)の観測時間間隔の時系列を緯度ごとに図-6に示した。各図の右上に、その領域の緯度およびひと月の観測頻度を記してある。ひと月の観測頻度が最大(109回)の中緯度では、1.5 ~ 3時間という短い観測時間間隔が連続的に現れている。また、緯度が低下するに従って観測時間間隔は長くなるものの、ひと月の観測頻度が30回程度の赤道付近においても、6 ~ 7時間という観測時間間隔がある。すなわち前節で述べた、 $\Delta T = T/n$ と一定に仮定した場合よりも、実際には全ての緯度ではかたに短い観測時間間隔がある。このTMIの実際の観測でとり得ている、1.5 ~ 6時間という観測時間間隔では、 v によって時間相関 $e^{-v\tau}$ の値が大きく変化する。そのため、 v の値が大きい範囲、すなわち時間相関長さが4時間以下の範囲であっても、時間相関の和の値((6)式の右辺の値)は変化する。したがって、実際のTRMMの観測時間間隔を(4)式に取り込めば、 v を推定する際のモデル式の感度は向上し、 v を正確に求めることができると考えられる。次節でTMIの軌道情報からTRMMの実際の観測時間をモデル式に取り込んだ新しい推定手法を考案する。

(2) TRMMの地点観測時間間隔を考慮した時間相関パラメータ推定手法

TRMMの観測周期は一定であるものの、大気の摩擦がもたらす軌道のずれによって観測時間や観測の有無が変化する。さらに、TMI観測では地点ごとに観測時刻の異なるフットプリントをもつ。そのため、各地点における

正確なTMIの観測時間間隔を得るには、地点ごとの全期間のTMIの観測軌道情報を用いる必要がある。地点 x の観測時刻の時系列を $\Delta(x)$ と表記すると、(4) 式は、

$$f(x)_{\Delta(x),n,m} = \mu_{12} \left\{ \frac{1}{m} \frac{T^2}{n^2} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n e^{(-v)(t_k - t_i)} - \frac{1}{m^2} \frac{T^2}{n^2} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n e^{(-v)(l-j)T + (t_k - t_i)} \right\} \quad (7)$$

と表わされる。ここで t_i は地点 x をTRMMが観測した時刻であり、TMIの観測軌道情報から得られる。

(6)式からは地点 x ごとに標本期待値が得られるので、時間相関パラメータ v を推定する際は、推定領域に含まれる全ての地点 x における標本分散と標本分散の期待値(モデル式)の差の最小自乗和を求める。すなわち、 v は次の評価式を最小にする値として求められる。

$$s'^2 = \sum_{B_R} \sum_m \left\{ S_{n,m,\Delta(x)}^2 - f(x)_{\Delta(x),n,m} \right\}^2 \quad (8)$$

ここで、 B_R は推定するパラメータ v および月降雨量の母分散の空間分解能であり、この領域内では推定値を一樣と仮定する。

第2章の(4)式による推定方法では、観測値から(2)式の値(直接算定値)を求める際に期待値を算定する必要があったため、領域内において空間平均することで期待値操作を代行した。一方、本章で提案する手法では、観測値から直接算定する標本分散値は、期待値ではなく、あくまで標本値としたので、空間平均による期待値操作の代行は不要となった。この新しい推定方法は以下のような利点がある。すなわち、(7)式から地点ごとに標本期待値を計算するため、(8)式の最小自乗和を求める際の標本数が増え、空間分解能 B_R も以前のように標本値の数の制約にとらわれず自由に設定できるようになった。この点は、非常に重要であり、第5章でその推定可能な空間分解能について考察する。すなわち、本推定手法によって、様々な分解能での算定が可能となった。

5. 推定結果と考察

第4章で提案した推定手法を用いて、TMIの観測情報から瞬時降雨量の時間相関長さおよび月降雨量の母分散の推定を行う。用いたのは第3章と同じデータである。

まずは推定可能な空間分解能を調べるために、東経120度-東経150度の領域において、様々な大きさの空間領域で時間相関パラメータ v を推定した。用いた空間領域は、 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 、 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 、 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 、そして第3章で空間分解能とした $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (約 $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$)の領域である。これらの空間分解能で推定された時間相関長さの分布を図-7に示す。図-7を見ると、 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 分解能ではノイズが多く、分布のばらつきが目立つ一方、 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 分解能になると

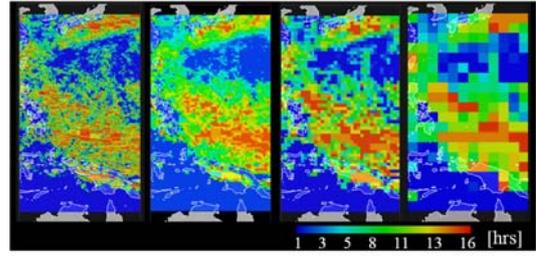


図-7 120° E-150° E領域において様々な空間分解能で推定した時間相関長さ(左から、 $B_R = 20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 、 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 、 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 、 $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$)

ノイズが減少し、時間相関長さの分布としてのまとまりが明確に表れていることが見てとれる。

一方、時間相関パラメータを同定する際の空間分解能において考慮すべきことは、TMIの観測空間分解能(フットプリント)と、少ないサンプル数から得られる標本期待値の精度を十分にあげるための空間分解能である。第3章で示した既往手法では期待値操作が必要であったために、後者が大きな問題となり、広い $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ の分解能で推定していたが、本手法では期待値操作の必要がないため、前者の観測空間分解能のみを考慮すればいいことになる。TMIによる降雨量推定の際に観測上の水平空間分解能が $5.5 \sim 38.3 \text{ km}$ であることを考えれば、解析上の空間分解能として $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ は妥当な値であるといえる。そこで、本研究では、空間分解能として、 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ を採用し、全球での瞬時降雨量の時間相関長さ及び月降雨量の母標準偏差の推定を行った。結果を、図-8、図-9に示す。

図-8で推定された瞬時降雨量の時間相関長さは、主に海洋で長く、陸域で短くなり、これまでの一般的な知見と一致している。またその分布は実際の降雨現象の特性を捉えていると考えられる。例えば、海洋では、日本の沿岸に梅雨前線の影響と見られる12時間以上の長い時間相関長さのある帯状の分布が表れている。また熱帯域で積雲対流が活発な赤道付近において、時間相関長さが長く $10 \sim 16$ 時間と推定されている。一方、陸域では山岳域で16時間程度と推定されており、これは地形性降雨の影響が表れていると考えられる。総じて、モデル式に実際の観測で得られる短い時間間隔を取り入れたことによって、短時間スケールの降雨現象の時間相関も捉えられるようになり、実際の降雨特性をうまく推定できるようになったと考えられる。また、第3章で既往手法を用いて推定した結果(図-4)と比べても、4時間以下の短い時間相関長さが推定できるようになっただけでなく、全球で適切な時間相関長さの分布が得られるようになったことがわかる。

しかしその一方、本手法による推定結果の定量的な評価に関しては、今後の検証が必要である。その一考察として、日本の地上レーダの5分間隔のデータをTMIの観測時間間隔に間引くことで、TMIの観測頻度を用いて得

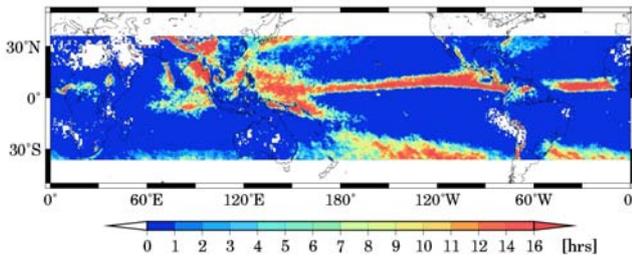


図-8 推定された瞬時降雨量の時間相関長さ

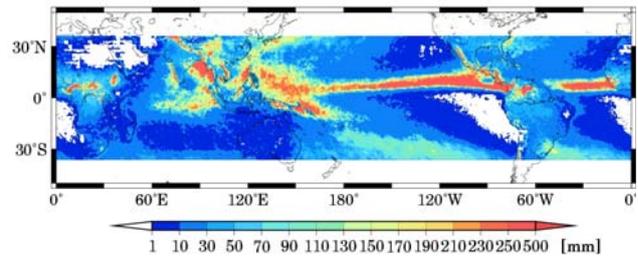


図-9 推定された月降雨量の母標準偏差

られた本推定結果が、連続情報から得られる時間相関長さとの程度合致しているかを模擬的に調べた。図は省略するが、その結果、正しく推定されている割合は、全緯度を通じて80%~90%であった。しかし、全球での定量的な検証には今後、地上雨量計のある地域で取得可能な降雨の連続情報を用いてさらに評価する必要がある。

6. 結論

本研究は、TRMMの低頻度観測から得られる時間間欠的な観測情報を用いて、瞬時降雨量の時空間分布特性として重要な瞬時降雨量の時間相関長さを推定することを目的とした。特に、本研究では、中北・岡根⁷⁾より得られた月降雨量の分散補正式をもとに、新たにTRMMの観測時間間隔を考慮し、加えてより高い空間分解能で推定できる新しい手法を提案することで、これまで推定の難しかった低緯度も含めた全球での推定手法の開発を行った。本研究においてモデル式の推定精度が向上した点を以下に挙げる。

- TRMM の実際の観測時系列を取り入れたことで、短時間スケールの降雨の時間相関を捉えることが可能になり、時間相関パラメータの推定精度が向上した。
- その結果、低緯度でも時間相関パラメータの推定が可能になり、全球推定が可能となった。
- 新しく提案した手法では、空間平均による期待値操作が不要となった。これによって標本数が増え、空間分解能が大幅に向上した。

また、本研究で開発した新しい手法を用いて、TMI観測情報から瞬時降雨量の時間相関長さを推定した結果、全球で実際の降雨特性をよく表現していると考えられる時間相関長さの分布を得ることができた。ただし、推定結果の定量的な精度検証は、今後、取得可能な地上雨量計を用いて、全球的に評価する必要がある。

今後は分散補正式に空間相関関数を導入して瞬時降雨量の空間相関長さも推定可能にする予定である。さらに、本結果は全球気候モデルGCMで得られる降雨統計量の検証にも用いられると考えられ、現在検討を進めている。

謝辞：本研究で用いたTRMM/TMI観測情報は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) に提供いただいた。ここに記

して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Bell, T. L.: A Space-Time Stochastic Model of Rainfall for Satellite Remote Sensing Study, *J. Geophys. Res.*, Vol.92, pp.9631-9643, 1987.
- 2) Laughlin, C. R.: On the Effect of Temporal Sampling on the Observation of Mean Rainfall, *Precipitation Measurements from Space, Workshop Report*, NASA Goddard Space Flight Center, D5-D66, 1989.
- 3) Oki, R. and Sumi, A.: Sampling Simulation of TRMM Rainfall Estimation Using Radar-AMeDAS Composites, *J. Applied Meteorology*, Vol. 33, No.12, pp.1597-1608, 1994.
- 4) Ikebuchi, S., Nakakita, E., Kakimi K., and Adachi T.: Accuracy of space and time average estimation on precipitation by using satellite data, *Proc. of International Symposium on HEIFE*, pp.216-226, 1993.
- 5) Steiner, M., Bell, T., Zhang, Y., and Wood, E.F. :Comparison of Two Methods for Estimating the Sampling-Related Uncertainty of Satellite Rainfall Average Based on a Large Radar Dataset, *J. Climate*, Vol.16, pp.3750-3778, 2003.
- 6) 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, 土木学会水工学論文集, 第46巻, pp. 25-30, 2002.
- 7) 中北英一・岡根俊介：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, 土木学会水工学論文集, 第50巻, CD-ROM, 6pp, 2006.
- 8) Nakakita, E., Okane, S. and Konoshima L.: Method of Correcting Variance of Point Monthly Rainfall Directly Estimated Using Low Frequent Observations From Space, *Advances in Geosciences 2006*, Vol.6, pp.35-45, 2007.
- 9) Nakakita, E. and Konoshima L.: Temporal and Spatial Correlation Length of Instantaneous Rainfall in Asian Monsoon Regions Estimated from Satellite Observation, *Advances in Geosciences 2007*, (in printing).
- 10) Cox, D.R., F.R.S., and Isham, V.: A simple spatial-temporal model of rainfall, *Poc.R.Soc.Lond.*, A415, pp.317-328, 1988.
- 11) Rodriguez-Iturbe, I., Marani, N., D'Odorico, P., and Rinaldo, A.: On space-time scaling of cumulated rainfall fields, *Water Resources Research*, Vol.34, No.12, pp.3461-3469, 1998.

(2008. 9. 30受付)