

称号及び氏名 博士（工学） 飯田 泰久

学位授与の日付 2007年6月30日

論文名 「Simulation of Sampling Error of Average Rainfall Rates  
in Space and Time for the Future Precipitation  
Observation Multi-Satellites」  
(将来の降水観測衛星群のための時間・空間平均降雨強度の  
サンプリングエラーのシミュレーション)

論文審査委員 主査 岡本 謙一  
副査 大久保 博志  
副査 辻川 吉春

## 論文要旨

降雨は地球的な規模の気候変動を支配する重要な物理量である。降雨は地上の雨量計やレーダーで観測されているが、地上雨量計網等は主に北半球先進国に偏在し、また海上の雨量計網等は皆無に等しい。このため、雨量計等で地球的な規模の降雨観測を行うことは不可能である。そこで全球的な降雨分布を得るためには、低周回軌道衛星搭載の降雨レーダーやマイクロ波放射計による降雨観測がほぼ唯一の手段になる。例えば熱帯降雨観測衛星（TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission）が1997年に打ち上げられ、現在も運用されている。またそれを継承する全球降水観測計画（GPM: Global Precipitation Measurement）衛星も2013年頃の打ち上げを目指して開発が進められている。これらの衛星からの降雨観測においては、衛星が観測地点上空を通過したときのみ降雨観測が可能であり、連続的な観測はできない。こうした観測上の制約のために、衛星搭載の降雨観測装置で観測した降雨強度を時間・空間的に平均すると、サンプリングエラーと呼ばれる誤差が生じる。衛星からの降雨観測に

においてはこのサンプリングエラーは不可避な問題であるので、その大きさを定量的に評価することは衛星観測データを利用するために重要なことである。また、衛星の数を増やすなどしてそのサンプリングエラーを軽減する方法を検討することが重要な問題となってくる。特に、GPM 計画は、TRMM の成功を受けてアメリカ航空宇宙局 (NASA) によって提案され、日米を軸とした国際協力によって多数の衛星を打ち上げ、準リアルタイムでの全地球規模の降水観測を行うことを目的としており、このサンプリングエラーを事前に推定評価することが急務となっている。

本論文は、多数の人工衛星の軌道をシミュレートし、それらの衛星による降雨観測のサンプリングエラーを推定評価し、GPM 計画並びにそれ以後の衛星ミッションにおける降雨観測のサンプリングエラーの評価に貢献することを目的としている。本論文では、GPM 計画並びにそれ以後の降雨観測ミッションにおいてマイクロ波放射計を搭載した多数の衛星群からなる衛星観測システムによって観測される時間・空間平均降雨強度のサンプリングエラーを日本域に分布するレーダー・アメダス解析雨量のデータセットを真値として用いて推定評価し、GPM 計画に向けたサンプリングエラーの検討を世界に先駆けて日本域で行った。

第 1 章では、本論文の背景、目的および概要について述べる。

第 2 章では、緯経度 5 度四方の領域において 1 ヶ月間に観測される降雨強度の時間・空間平均値に含まれるサンプリングエラーを対象としており、日本域に定めた 10 箇所の領域における 3 年間のレーダー・アメダス降雨データセットを真値として用いてその推定を行った。サンプリングエラー推定の際には、各々の領域における 3 年間の降雨データセットを、6 機の衛星 (Aqua、ADEOS-II、DMSP-F13、F14、F15、TRMM) によって直接サンプリングするシミュレーションを行った。その結果、この時間・空間スケール (5 度×5 度、1 ヶ月) で平均した降雨強度のサンプリングエラーは 6 機の衛星群に対して日本域で定めた 10 箇所を平均して約 7% と推定された。これは、TRMM の目標値であったサンプリングエラー 10% をクリアしている。TRMM 1 機の場合のサンプリングエラーは約 17% であり、TRMM 1 機と比べるとサンプリングエラーは約 39% に減少することがわかった。さらに、これら 6 機の中の幾つかの衛星群の組合せに対しても同様な推定を行い、各領域における 3 年間の平均降雨強度  $R$  と各領域における衛星群による 1 ヶ月の観測回数 (サンプリング頻度)  $S$  のベキ乗則の関数としてこのサンプリングエラーを定式化することも試みた。その結果、サンプリングエラーは降雨強度  $R^{0.5}$  とサンプリング頻度  $S^{0.5}$  のベキ乗則に良く従うことがわかった。TRMM に対して行われた熱帯大西洋における同様の研究結果では、同様に  $R^{0.5} \times S^{0.5}$  のベキ乗則に従うが、その比例定数は日本

と熱帯大西洋の地域によって異なっていることがわかった。また、この定式化の精度を定量化する試みも行った。最後に、このベキ乗則の式を用いて、GPM計画の検討を行った。その結果、1ヶ月の時間スケール並びに5度×5度の空間スケールでの時間・空間平均降雨強度を10%のサンプリングエラーで観測するためには、日本域で平均的な降雨強度0.25mm/hに対して、1ヶ月におよそ120回のサンプリング頻度が必要であることがわかった。これは、衛星3機程度運用すればよいことに相当する。

第3章は、日本域11箇所の3年間のレーダー・アメダス降雨データセットに対して平均的なサンプリングエラーを様々な時間スケール並びに領域サイズに対して推定した。時間スケール $T$ として降雨を平均する期間(日)、領域サイズ $\phi$ として降雨を平均する領域の緯度経度方向の大きさ(度)をとっている。手法は基本的には第2章と同じであるが、サンプリングエラーの統計の取り方、衛星システムの構成メンバーとして第2章の衛星群の他に新たにGPMで運用が想定される8機の衛星群(GPM8: EGPM、NASA-C、NPOESS-C1、C2、DMSP、GCOM-W、FY3、GPMcore)を加えた点、および時間スケール $T$ を1日から30日までに、領域サイズ $\phi$ を0.1度から5度までに拡張している点が大きく異なる。その結果、日本域の平均的なサンプリングエラーは時間スケール $T$ 並びに領域サイズ $\phi$ に依存することがわかった。そこで、空間スケール $L$ として領域サイズ $\phi$ の領域の経度方向の長さ(km)の平均値をとり、日本域の平均的なサンプリングエラーを時間スケール $T$ 並びに空間スケール $L$ のベキ乗則の関数として定式化した。このベキ乗の式の精度評価も定量的に行った。サンプリングエラーは時間スケール $T$ に対する-0.5乗則に近い依存性を示し、空間スケール $L$ については、94kmから470kmの範囲では、空間スケール $L$ に対する-0.5乗則に近い依存性を示すが、空間スケール $L$ が94km以下の範囲では、空間スケール $L$ に対する-0.25乗則に近い依存性を示すことがわかった。さらに、このベキ乗則の式を用いて、GPM計画のサンプリングエラーの検討を行った。その結果、1ヶ月の時間スケールにおいて、TRMM 1機では空間スケール $L$ が470km以下の範囲においてサンプリングエラー10%を達成できないが、GPM8では130km以上の空間スケールでこの目標を達成することがわかり、GPMの有効性を示すことができた。ただし、この検討結果は日本域の平均的なものであるため、様々な地域や季節におけるサンプリングエラーを求めるためには、降雨特性を考慮する必要がある。

第4章では、第3章で用いた11箇所の3年間のレーダー・アメダス降雨データセットに対し、第3章と同じ様々な時間スケール $T$ 、領域サイズ $\phi$ において、時間・空間平均降雨強度 $r$ ごとにサンプリングエラーを評価することを試みた。こうして求めた時間・空間平均降雨強度ごとのサンプリングエラーを時間スケ

ール  $T$ 、空間スケール  $L$ 、時間・空間平均降雨強度  $r$  のべき乗則の関数として定式化した。その精度評価も定量的に行った。空間スケール  $L$  の定義は第 3 章と同じである。複数衛星群に対し、サンプリングエラーは  $T^{0.35} \times r^{0.2}$  のべき乗則に比例し、空間スケール  $L$  については、94km から 470km の範囲では、空間スケール  $L$  に対する  $-0.5$  乗則に近い依存性を示すが、空間スケール  $L$  が 94km 以下の範囲では、空間スケール  $L$  に対する  $-0.25$  乗則に近い依存性を示すことがわかった。具体的な応用として、まず短い時間スケール  $T$  で強い雨が降る洪水予測に観測データを用いる場合について 470km 以下の空間スケール  $L$  の範囲において GPM8 のサンプリングエラーを検討した。1 日の時間スケール  $T$  において降雨強度 5.0mm/h の強い雨に対しては、100km 以上の空間スケール  $L$  の範囲で 20% のサンプリングエラーが達成できることがわかった。これに対し TRMM 1 機ではこの空間スケールの範囲でこの目標を達成できないことがわかった。次に、気候変動の解析のために、長い時間スケール  $T$  で比較的弱い降雨強度をもつ観測データを用いる場合について 470km 以下の空間スケール  $L$  の範囲において GPM8 のサンプリングエラーを検討した。1 ヶ月の時間スケール  $T$  において降雨強度 0.1mm/h の弱い雨に対しては、170km 以上の空間スケール  $L$  の範囲で 10% のサンプリングエラーが達成できることがわかった。これに対し TRMM 1 機ではこの空間スケールの範囲でこの目標を達成できないことがわかった。こうして GPM8 のサンプリングエラーを TRMM 1 機と比較することにより、GPM の有効性を日本域で実証することができた。また、こうした降雨強度に従った分類によるサンプリングエラーの定義は有効であることがわかった。

第 5 章では、本論文で得られた結果を総括し、今後の展望を述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、GPM 計画並びにそれ以後の降雨観測ミッションにおいて多数の衛星群の軌道をシミュレートし、衛星群によって観測される時間・空間平均降雨強度のサンプリングエラーを日本域に分布する 3 年間のレーダー・アメダス解析雨量のデータセットを真値として用いて推定評価し、GPM 計画に向けたサンプリングエラーの検討を世界に先駆けて日本域で行うことを目的としたものである。得られた主な成果は、以下の項目に要約できる。

(1) 6 機の衛星 (Aqua、ADEOS-II、DMSP-F13、F14、F15、TRMM) 等によって、日本の 10 箇所の緯経度 5 度四方の領域において 1 ヶ月間に観測される降雨強度の時間・空間平均値に含まれるサンプリングエラーを推定した。6 機の場合のサ

ンプリングエラーは、平均約 7%であった。また、サンプリングエラーを各領域の平均降雨強度とサンプリング頻度のベキ乗則で表現し、日本周辺において、1 ヶ月の時間スケール、緯経度 5 度×5 度の空間スケールで、10%のサンプリングエラーを達成するには、3 機の衛星が必要なことを示した。

(2) GPM で運用が想定される 8 機の衛星群 (GPM8: EGPM、NASA-C、NPOESS-C1、C2、DMSF、GCOM-W、FY3、GPMcore) 等によって日本の 11 箇所の領域に対して平均的なサンプリングエラーを様々な時間スケール(1 日から 30 日まで)並びに領域サイズ(緯経度 0.1 度から 5 度まで)に対して推定した。その結果、サンプリングエラーを時間スケールと領域サイズから求められる空間スケールのベキ乗則で表現し、GPM 計画のサンプリングエラーの検討に用いた。

(3) GPM で運用が想定される 8 機の衛星群等によって日本の 11 箇所の領域に対して様々な時間スケール並びに領域サイズにおいて時間・空間平均降雨強度ごとに平均的なサンプリングエラーを推定した。その結果、サンプリングエラーを時間スケールと領域サイズから求められる空間スケールならびに時間・空間平均降雨強度のベキ乗則で表現し、GPM 計画のサンプリングエラーの検討に用いた。GPM8 の衛星群では、1 日の時間スケールにおいて降雨強度 5.0mm/h の強い雨に対しては、100km 以上の空間スケールの範囲で 20%のサンプリングエラーが達成できることがわかった。また、1 ヶ月の時間スケールにおいて降雨強度 0.1mm/h の弱い雨に対しては、170km 以上の空間スケールの範囲で 10%のサンプリングエラーが達成できることがわかった。こうして GPM の有効性を日本域で実証することができた。

これらのことから、将来の衛星群によるサンプリングエラーを低減するために必要な衛星数、軌道の組み合わせに対する知見を得た。

以上の諸成果は、この分野の学術と技術の発展に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。