

レーダー・アメダス解析雨量を用いた 太陽同期衛星群 5 機並びに TRMM 衛星による 降雨推定のためのサンプリングシミュレーション

飯田 泰久*・岡本 謙一*・牛尾 知雄*・沖 理子**

要 旨

レーダー・アメダス解析雨量を用いて、日本付近に定められた10か所の $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ の検証エリアにおける、1か月の平均降水強度のサンプリング誤差を2003年10月現在運用中の太陽同期衛星群5機(Aqua, ADEOS-II, DMSP-F13, DMSP-F14, DMSP-F15)及びTRMM衛星の6機の軌道シミュレーションによって推定した。この結果、5機、6機でのサンプリング誤差は、これらの衛星に搭載されたマイクロ波放射計を用いたとき、全検証エリアで平均してそれぞれ約8%、7%と推定された。さらに、サンプリング誤差をエリアに対して80%以上のカバレッジのある飛来時間間隔の関数として定式化した。

1. はじめに

全球の降水をモニタリングすることは全球での気象現象の予測・解明、地球規模での水循環の理解、気候システムの解明などのためには極めて重要であり、さらには予報の精度向上や洪水予測などにもつながる。このため全球で降水を観測する全球降水観測計画(Global Precipitation Measurement: GPM)がNASAによって提案されている。GPMでは日米を軸とした国際協力によって8機程度の低周回極軌道衛星を打ち上げ、約3時間間隔で全球での降水のサンプリングを実施することが検討されている。このGPM計画ではマイクロ波放射計により降水量を推定するため、マイクロ波放射計を搭載した複数の衛星群に対するサンプリング誤差を推定することが重要な研究課題となっている。これらの低周回極軌道衛星では衛星軌道や観測機器の形状(i.e. 走査幅)によってサンプリングは時間空間的な制約をうける。この時間空間的な制

約によって時間空間的に不連続なサンプリングが生じ、衛星観測に基づく推定降水量には不確かさ、すなわちサンプリング誤差が生じる。このサンプリング誤差は最終的なプロダクトである降水マップに含まれるため、この誤差を事前に正確に評価しておくことは、計画そのものの策定、アルゴリズム開発のみならず、ユーザにとっても重要な情報となる。

こうした複数衛星群のサンプリング誤差に関する研究はこれまでにLaughlin (1981), Shin and North (1988), Bell and Kundu (2000), Steiner *et al.* (2003)などによって実施されているが、こうした複数衛星群のサンプリング誤差は現実的な推定ではない。例えばSteiner *et al.* (2003)は3時間間隔でデータ時系列の降水をサンプリングすることによってサンプリング誤差を推定した。彼らは空間スケール、時間スケール、降水強度、サンプリング時間間隔をパラメータとしてサンプリング誤差を推定しており、サンプリング時間間隔を一律に3時間と仮定してサンプリング誤差を議論した。しかし、彼らは衛星のフライトパターンやマイクロ波放射計の走査幅を考慮していないのでGPMの実現可能性を事前に検討するためにはこれらを考慮することは必要である。さらに本研究や彼らのように、地上レーダーや雨量計といった生データの時系列をサ

* 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野
iida@aero.osakafu-u.ac.jp

** 宇宙航空研究開発機構・地球観測利用推進センター
—2004年3月30日受領—
—2005年1月14日受理—

第1表 6機の衛星軌道の特徴.

Satellite	Altitude	Inclination	Ascending Time	Microwave Radiometer (MWR)	Swath width of MWR
Aqua	705 km	98.2°	13:30	AMS-R-E	1500 km
ADEOS-II	803 km	98.6°	10:30	AMS-R	1600 km
DMSP-F13	830 km	98.73°	21:30	SSM/I	1500 km
DMSP-F14	830 km	98.73°	20:21	SSM/I	1500 km
DMSP-F15	830 km	98.73°	18:15	SSM/I	1500 km
TRMM	350 km	35°	non SSO	TMI	700 km

ンプリングしてサンプリング誤差を推定する手法では、用いた生データ自身の精度の良さが、推定されたサンプリング誤差の信頼性を左右するといっても過言ではない。彼らは地上レーダーデータを使っているため長期間、広範囲であるものの雨量計のデータに比べて誤差が大きいと考えられる。そこで、本研究ではマイクロ波放射計を搭載した複数の衛星群のフライトパターンやマイクロ波放射計の走査幅を考慮し、実際の降水の特徴をより正確に表すデータを用いることによってサンプリング誤差を推定する。

本研究では現在運用中のマイクロ波放射計を搭載した6機の衛星(Aqua, ADEOS-II, DMSP-F13, F14, F15, TRMM)の軌道を用いて降水観測シミュレーションを行い、 $5^\circ \times 5^\circ$ の空間スケール、1か月の時間スケールのエリア平均降水強度に対するサンプリング誤差を推定する。その際、真値として日本付近に定める10か所にわたる $5^\circ \times 5^\circ$ の領域のレーダー・アメダス解析雨量(1998年1月~2000年12月)を用いる。

最後に、サンプリング誤差は観測時間間隔に強く影響を受けることから、サンプリング誤差を観測時間間隔の関数として定式化する。

2. サンプリングシミュレーション手法

まず推定のために用いた6機の衛星軌道とレーダー・アメダス解析雨量について示し、最後に推定手順を述べる。

2.1 6機の衛星軌道

6機の衛星軌道の特徴(衛星名, 衛星高度, 軌道傾斜角, 昇交点通過時刻, マイクロ波放射計名, マイクロ波放射計の走査幅)を第1表に示す。これらの軌道にあわせて、6機の衛星の軌道計算を行い、サンプリングシミュレーションを実施する。衛星の軌道計算においては、軌道の離心率 e はゼロとみなし、J2項までの摂動を考慮している。また、以下では太陽同期軌道(SSO: Sun Synchronous Orbit)衛星群5機(Aqua,

ADEOS-II, DMSP-F13, F14, F15)をSSO5と略し、SSO5にTRMM衛星を加えた衛星群6機をSSO5+TRMMと略す。

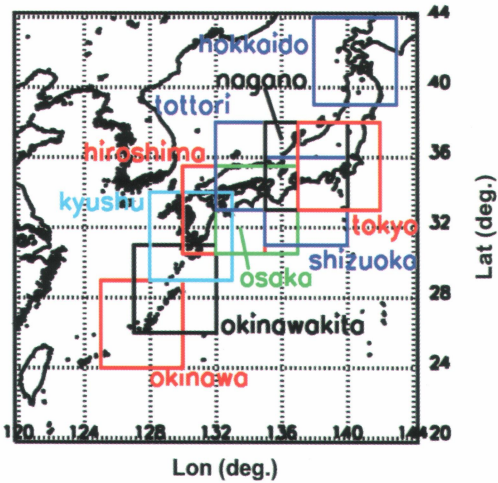
2.2 レーダー・アメダス解析雨量

降水強度の真値としてレーダー・アメダス解析雨量の3年(1998年1月~2000年12月)の時系列データを用いる。レーダー・アメダス解析雨量は通常、緯度経度座標系から成っており、日本付近(~1000 km)をカバーするように、 250×660 個の格子点から構成される。各格子点間の距離は約5 kmであり、各格子点には1時間毎の降水強度データが格納されている。なお、緯度経度座標系の解析雨量は、元データから緯度経度座標への変換の際、データにひずみが生じる場合がある。本研究では、それを避けるため、座標変換前の斜軸ランベルト座標系のものをもちいた。レーダー・アメダス解析雨量の詳しい説明はOki and Sumi (1994)にある。レーダー・アメダス解析雨量がカバーする領域の中に $5^\circ \times 5^\circ$ の検証エリアを10箇所(沖縄, 沖縄北, 九州, 広島, 大阪, 静岡, 鳥取, 長野, 東京, 北海道)定め、第1図に示す。さらにエリア特性としてエリア中心緯度, エリア格子点数, 36か月にわたって平均したエリア平均降水強度 R (mm/h)を第2表に示す。ただし、エリア中心緯度は検証エリアの中心位置における緯度を表し、エリア格子点数は検証エリアにおけるレーダー・アメダス解析雨量の格子点数を表す。

2.3 サンプリング誤差の定義と推定手順

本研究ではサンプリング誤差の推定を行うことを目的とするため、センサ自身の観測誤差, センサデータより降水強度を算出するアルゴリズムのリトリバル誤差については考慮していない。

衛星によるサンプリングは次のようにしてシミュレートされる。いま N 個の衛星($i=1, \dots, N$)が飛行しているものとする。 N 個の衛星群に搭載されたマイクロ波放射計の走査幅が $5^\circ \times 5^\circ$ の検証エリアを通過するとき、その検証エリアにおいて走査幅に覆われた



第1図 レーダー・アメダス解析雨量がカバーしている5°×5°の検証エリア。

部分に存在する当該時刻のレーダー・アメダス解析雨量格子点データをサンプリングする。本研究では、走査幅が検証エリアのすべてを観測する場合だけでなく、走査幅が検証エリアの一部を観測する場合も考慮している。また、検証エリアでの衛星通過は瞬時であるが、本研究ではこのように検証エリアの通過時刻に対応してサンプリングされたレーダー・アメダス解析雨量格子点の1時間データを、その格子点での衛星による瞬時観測値とみなす。このレーダー・アメダス解析雨量データの1時間値はmm/hで表され、レーダー値の1時間積算平均値を10分ごとに得られる雨量計値の1時間積算平均値でキャリブレーションして得られたものである。

衛星*i*に搭載されたマイクロ波放射計の走査幅がその検証エリアを*I*回目に通過するとき（以下ではこれを観測パス*I*と呼ぶことにする。）、その走査幅がサンプリングした、その検証エリア内の、当該時刻のレーダー・アメダス解析雨量データを集計して、通過格子点数 $n_i(I)$ と通過格子点総降水量データ $p_i(I)$ とする。この衛星*i*の走査幅が各月 m ($m=1, \dots, 36$) において1か月間に検証エリアを通過した全観測パスに対する総通過格子点数と通過格子点総降水量データの総和はそれぞれ、

$$N_i(m) = \sum_{I=1}^{LP(i,m)} n_i(I) \quad (1)$$

$$P_i(m) = \sum_{I=1}^{LP(i,m)} p_i(I) \quad (2)$$

第2表 各検証エリアの特徴。

検証エリア	エリア中心緯度	エリア格子点数	エリア平均降雨強度 R (mm/h)
okinawa	26.5	11078	0.34
okinawakita	28.5	10874	0.26
kyushu	31.5	10540	0.27
hiroshima	33.0	10384	0.27
osaka	33.0	10360	0.24
shizuoka	33.5	10306	0.19
tottori	35.5	10077	0.25
nagano	35.5	10047	0.25
tokyo	35.5	10077	0.21
hokkaido	41.5	9272	0.15

と求められる。ここで、 m は各月 $m=1, \dots, 36$ を表す。 $LP(i, m)$ は衛星*i*の各月 m に対する全観測パス数を表す。この作業を全衛星 ($i=1, \dots, N$) について行った。 N 個の衛星群が各月の間に検証エリアを観測した総通過格子点数 $N_{au}(m)$ と観測した通過格子点総降水量データの総和 $P_{au}(m)$ は (1), (2) 式をそれぞれ衛星毎に集計して、

$$N_{au}(m) = \sum_{i=1}^N N_i(m) \quad (3)$$

$$P_{au}(m) = \sum_{i=1}^N P_i(m) \quad (4)$$

となる。ここで衛星同士の軌道・時刻の重複は考慮している。TRMMの軌道は非太陽同期軌道のため観測時刻が少しずつ変化する。そのため、TRMMは他の太陽同期衛星が観測する時間と同じ時間の降水を観測することがある。そのとき、本論文ではその時間の降水を重複して積算する処理を行う。したがって、各衛星及び衛星群によるサンプリングの結果得られたエリア月平均降水強度（観測値）はそれぞれ、

$$\frac{P_i(m)}{N_i(m)} (\text{mm/h}) \quad (5)$$

$$\frac{P_{au}(m)}{N_{au}(m)} (\text{mm/h}) \quad (6)$$

と求められる。

それに対して真値は、

$$\frac{P_{true}(m)}{N_{true}(m)} (\text{mm/h}) \quad (7)$$

と求められる。ここで $P_{true}(m)$ は m 番目の月において検証エリアにおけるレーダー・アメダス解析雨量の全格子点の総降水強度を毎時間積算して得られたものである。 $N_{true}(m)$ は m 番目の月において検証エリア

第3表 各衛星による5°×5°の各検証エリアにおける1か月のサンプリング誤差.

area	Aqua	ADEOS-II	DMSP-F13	DMSP-F14	DMSP-F15	TRMM
okinawa	14.09%	16.21%	17.81%	15.83%	21.08%	14.82%
okinawakita	15.44%	14.92%	18.31%	18.54%	22.01%	14.45%
kyushu	14.16%	14.71%	24.93%	17.19%	22.33%	17.16%
hiroshima	13.57%	17.34%	24.70%	18.80%	23.88%	18.45%
osaka	14.04%	17.97%	22.15%	22.42%	25.00%	17.30%
shizuoka	16.41%	20.46%	22.97%	23.10%	27.77%	13.98%
tottori	15.15%	17.22%	18.95%	19.61%	23.56%	17.60%
nagano	13.34%	19.12%	23.16%	18.45%	24.40%	17.86%
tokyo	15.27%	17.28%	21.24%	21.15%	24.14%	19.69%
hokkaido	17.85%	12.49%	14.25%	20.04%	17.01%	
average	14.93%	16.77%	20.85%	19.51%	23.12%	16.81%

におけるレーダー・アメダス解析雨量の総格子数を毎時間積算して得られたものである。衛星群による観測値と真値を比較して各月ごとの衛星群の残差 $Z_{au}(m)$ を求めた。

$$Z_{au}(m) = \frac{P_{au}(m)}{N_{au}(m)} - \frac{P_{true}(m)}{N_{true}(m)} \quad (8)$$

全月 ($m=1, \dots, 36$) に対して2乗平均平方根誤差 (root mean square error: $rmse$) を求め、これを検証エリアにおける36か月間のエリア平均降水強度 R (mm/h) で割ってサンプリング誤差 (%) を求めた。

$$\text{Sampling Error}(\%) = \frac{rmse}{R} \times 100 \quad (9)$$

ここで

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{36} Z_{au}^2(m)}{36}} \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum_{m=1}^{36} P_{true}(m)}{\sum_{m=1}^{36} N_{true}(m)} \quad (11)$$

とした。

3. 結果

3.1 1機ごとのサンプリング誤差

5機のSSO衛星とTRMM衛星の場合について、レーダー・アメダス解析雨量の36か月(1998年~2000年)の時系列データを使って、第1図に示した検証エリアにおいて、衛星1機ごとのサンプリング誤差を推定した。その結果を第3表に示す。また全検証エリアの平均サンプリング誤差も衛星1機ごとに第3表の底に示す。TRMM衛星のサンプリング誤差は約17%で

あり、以前にOki and Sumi (1994) によって行われた結果と一致した。

平均してAqua衛星の方がDMSP衛星(F13, F14, F15)よりも約6%もサンプリング誤差が小さいが、これはAqua衛星とDMSP衛星の間にみられる昇交点通過時刻の違い、並びに衛星高度の差が原因ではないかと考えられる。衛星高度の差が原因ではないかと考えたのは、衛星高度により、回帰間隔が変わり、サンプリング誤差に影響すると思われるからである。衛星高度と走査幅が同じDMSP衛星間ではサンプリング誤差に3%程度の違いがある。これはDMSP衛星の昇交点通過時刻の違いによる。Aqua衛星よりもADEOS-II衛星の高度は約100km高いにもかかわらず平均サンプリング誤差はADEOS-II衛星のほうがわずかに小さかった。これはAqua衛星とADEOS-II衛星間の昇交点通過時刻が違うこと、並びにADEOS-II衛星の走査幅がAqua衛星よりも100km広いことが理由として考えられる。

3.2 SSO5, SSO5+TRMMのサンプリング誤差

SSO5, SSO5+TRMMによる各検証エリアにおけるサンプリング誤差、全検証エリアに対する平均サンプリング誤差を第4表に示す。全検証エリアの平均サンプリング誤差はSSO5では約8%、SSO5+TRMMでは約7%であった。SSO5, SSO5+TRMMを運用した場合、サンプリング誤差はTRMM1機を運用した場合に比べてそれぞれ約51%、約57%改善されることが示されている。またSSO5+TRMMを運用した場合サンプリング誤差はSSO5を運用した場合に比べて平均して約13%改善が見られた。

第3表及び第4表に示されたサンプリング誤差は

Bell and Kundu (2000) と比較して、より現実的に即した推定法によって求められている。Bell and Kundu (2000) によるとサンプリング誤差は観測サンプル数の平方根の逆数に比例する。そこで、第3表で得られた TRMM 衛星1機の結果をこの関係を用いて SSO5, SSO5+TRMM に換算して、第4表の結果と比較検討する。ここで TRMM 衛星1機の結果を用いるのは3.1節で妥当性が示されているからである。TRMM 衛星1機のサンプリング誤差は3.1節の第3表より、全検証エリア平均して約17%と推定されている。日本域の観測サンプル数は、全検証エリア平均で、SSO5で TRMM 衛星1機に比べて約3.5倍、SSO5+TRMM で約4.5倍になるので、平均サンプリング誤差は SSO5 で約9.0%、SSO5+TRMM で約7.9%と換算できる。これらの換算値は第4表における平均サンプリング誤差結果の8.25, 7.18という値と矛盾しないことがわかる。同様にして各検証エリアにおける第3表の TRMM 衛星1機の結果を TRMM 衛星1機の観測サンプル数と SSO5及び SSO5+TRMM のそれを比較することで SSO5, SSO5+TRMM に換算した値は、第4表における各検証エリアの結果と矛盾しない値であることも判断できる。

SSO5及び SSO5+TRMM を運用した場合、サンプリング誤差は検証エリアによって異なり、最小の okinawa と最大の shizuoka の間に、SSO5では3%程度、SSO5+TRMM では5%程度の差が存在する。これは TRMM の観測サンプル数並びにエリア平均降水強度が検証エリアによって異なるためである。サンプリング誤差は観測サンプル数と同様に、エリア平均降水強度が多いと小さくなる。(e.g., Oki and Sumi, 1994; Bell and Kundu, 2000; Steiner *et al.*, 2003) これは次のような理由によるものと考えられる。検証エリアにおいて時間的にも空間的にも降水が起こる頻度が多いとエリア平均降水強度が大きくなるので、衛星が降水を観測する頻度が増加する。したがって平均降水強度が大きいときにはサンプリング誤差そのものが小さくなる。このことは Bell and Kundu (2000) などの研究でも明らかにされている。したがって、okinawa ではエリア平均降水強度は、全検証エリアのうち最も大きく、最小の shizuoka に比べて約2倍もあるから、サンプリング誤差が最小になるものと考えられる。また両検証エリアにおけるサンプリング誤差の差について SSO5+TRMM が SSO5に比べて2%程度大きいのは、shizuoka では TRMM の観測サンプル数

第4表 SSO5と SSO5+TRMM による $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ の各検証エリアにおける1か月のサンプリング誤差。

area	SSO5	SSO5+TRMM
okinawa	6.53%	4.91%
okinawakita	6.92%	5.86%
kyushu	6.55%	6.19%
hiroshima	8.59%	6.80%
osaka	10.13%	8.10%
shizuoka	10.17%	9.53%
tottori	9.30%	8.70%
nagano	8.73%	7.55%
tokyo	7.93%	6.69%
hokkaido	7.67%	
average	8.25%	7.18%

が okinawa の約1.5倍あるのでエリア平均降水強度の他に観測サンプル数も効いているためと考えられる。SSO5+TRMM を運用した場合、TRMM 1機を運用した場合に比べて okinawa では最大の約67%、shizuoka では最小の約32%改善されている。また SSO5+TRMM を運用した場合サンプリング誤差は SSO5を運用した場合に比べて okinawa では最大の約25%改善されている。検証エリアによって改善の度合いが異なるのは TRMM の観測サンプル数並びにエリア平均降水強度が検証エリアによって異なるためである。TRMM の観測サンプル数が全検証エリアのうち最も少ない okinawa では、SSO5の観測サンプル数がどの検証エリアでもほとんど変わらないことから、SSO5を TRMM に加えることによる効果が最も大きい。さらに okinawa では、エリア平均降水強度の効果も最大である。

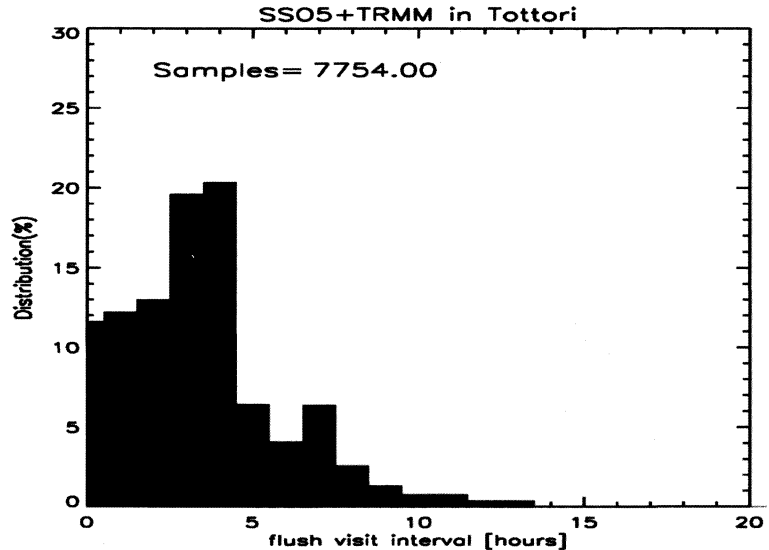
3.3 サンプリングの時間間隔による定式化

サンプリング誤差に影響すると思われる様々な要因のうち、最も強く効いてくるとされるサンプリングの時間間隔とサンプリング誤差との関係を抽出する。過去の研究においてサンプリング誤差はサンプリングの時間間隔に強く依存することが示されている。(e.g., Laughlin (1981), Steiner *et al.* (2003)) しかし、彼らの推定では衛星群が等時間間隔に検証エリアの全部を観測するという仮想的な軌道を用いており、実際の軌道を考慮していない。それに対して本研究では、複数衛星群の軌道をシミュレーションしているので、さまざまな時間間隔のサンプリングが生じる。というのは太陽同期や非太陽同期衛星1機に対して昇交軌道と

降交軌道による観測があり、1日に昇交軌道と降交軌道の両方による観測がある場合とそのどちらか一方しかない場合やどちらも起こらない場合があるからである。これは衛星高度や走査幅といった軌道要素だけでなくエリアのサイズやエリアの中心緯度によっても決まる。これらの要因が複雑に絡み合っただけでなく、衛星群では様々なサンプリングの時間間隔が生じる。その例として第2図を示す。この第2図は、SSO5+TRMM について衛星の走査幅が検証エリアを80%以上覆う各サンプリング（本論文ではこれを

flush visit と定義する。）のみを時系列の順に抜き出し、その時間間隔(hours)を、縦軸にその相対頻度(%)をとってヒストグラムで表したものである。図中の Samples は抜き出した flush visit の時間間隔の総数を表す。以下では、この様々な flush visit の時間間隔の平均値とサンプリング誤差には比較的強い相関があることを示し、サンプリング誤差を、この時間間隔の平均値の関数として定式化する。

サンプリング誤差はエリア平均降水強度にも強く依存することが Bell and Kundu (2000) らによって示されている。第2表に示した検証エリアでは様々なエリア平均降水強度が存在するので、時間間隔に対するサンプリング誤差の関係を抽出するためには、サンプリング誤差からエリア平均降水強度の影響を取り除く必要がある。そこで Bell and Kundu (2000) の関係式 $\text{Sampling Error (\%)} = k \times R^{-0.5}$ (R : エリア平均降水強度) を用いて、サンプリング誤差に関して次のような補正を実施する。仮に、ある検証エリア（例えば okinawa）で基準とする検証エリアと同じエリア平均降水強度の降水があったとき、サンプリング誤差はどれぐらいになるかを考える。まず基準とする検証エリアとして、エリア平均降水強度の全検証エリア平均値 0.243 (mm/h) に最も近いエリア平均降水強度 0.24 (mm/h) をもつ osaka を選ぶ。次に各検証エリアである一定の k をもたせて、osaka と同じエリア平

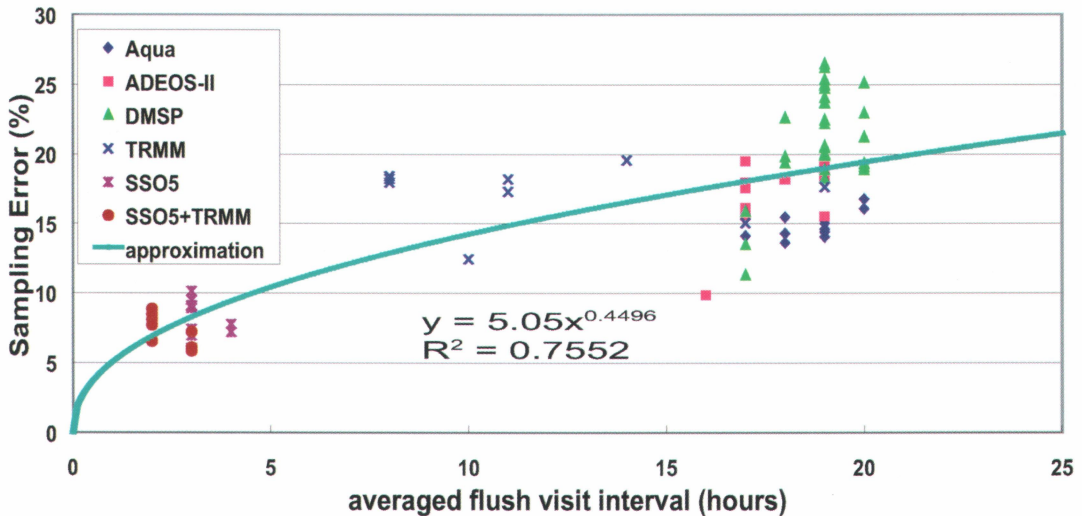


第2図 エリア鳥取における SSO5+TRMM の flush visit の時間間隔のヒストグラム。

均降水強度にした場合のサンプリング誤差を求める。以後、このサンプリング誤差を補正後のサンプリング誤差と呼ぶ。例えば、okinawa での Aqua 衛星の補正前におけるサンプリング誤差は14.09%であるが、補正後のサンプリング誤差は $14.09 \times (0.34/0.24)^{0.5} = 16.77\%$ である。

第1表の全衛星に対して flush visit の時間間隔の平均値 ΔT_{av} と補正後のサンプリング誤差 SE_c の関係を各検証エリアについて調べ、第3図に示す。ただし、DMSP 衛星に関しては F13, F14, F15 の3機あるので、全検証エリア数の3倍だけのプロット数がある。相関係数(相関を表す R^2 値)は 0.7552 である。これらの結果も第3図と一緒に示す。flush visit の時間間隔の平均値と補正後のサンプリング誤差には比較的良い相関があることがわかる。エリア平均降水強度以外の要因は取り除いていないので両者の関係をグラフで示したとき当然ばらつきとしてでてくるが、相関係数 0.76 は両者の間に定式化するのに有意な相関があることを示していると考えられる。

次に、サンプリング誤差を flush visit 時間間隔の平均値の関数として定式化することを考える。第3図において $SE_c = C_0 \times \Delta T_{av}^{C_1}$ の関数型を仮定し、最小二乗法で累乗近似して C_0, C_1 を決定すると、 $C_0 = 5.050$, $C_1 = 0.4496$ が得られた。このようにして得られた式 $SE_c = C_0 \times \Delta T_{av}^{C_1}$ から予想される値を第3図に C_0 ,



第3図 全衛星に対する補正後のサンプリング誤差と flush visit の時間間隔の加重平均値との関係（菱形が Aqua 衛星，四角が ADEOS-II 衛星，三角が DMSP 衛星，×印が TRMM 衛星，米印が SSO5，丸印が SSO5+TRMM を表す.）.

CI の値とともに表示した。補正後のサンプリング誤差を累乗近似した結果は flush visit 時間間隔の平均値 ΔT_{av} の 0.5 乗に近くなるのがわかる。補正前のサンプリング誤差 SE と補正後のサンプリング誤差 SE_c には $SE_c = SE \times (R/0.24)^{0.5}$ の関係があるから、補正前のサンプリング誤差 SE はエリア平均降水強度 R と flush visit 時間間隔の平均値 ΔT_{av} の関数として $SE = 2.47 \times R^{-0.5} \times \Delta T_{av}^{0.45}$ と定式化できる。

4. まとめと結論

レーダー・アメダス解析雨量を用いて、現在運用中の太陽同期衛星群5機とそれに TRMM 衛星を加えた6機による日本付近の $5^\circ \times 5^\circ$ の領域における、1か月のサンプリング誤差を推定した。本研究は過去の研究に比べて少なくとも次の3点でユニークな特徴を持つ。(1) GPM の実現可能性を事前に検討するためのサンプリング誤差推定を主目的とするため、現在運用中のマイクロ波放射計を搭載した衛星群6機 (Aqua, ADEOS-II, DMSP-F13, F14, F15, TRMM) のフライトパターンを考慮した。(2) 地上レーダーのみではなく、密な雨量計のデータをもとに地上レーダーをキャリブレーションして得られた時間分解能、距離分解能の優れた長期間 (~3年)、広範囲 (~1000 km) にわたる生の降水量データ (レーダー・アメダス解析雨量) を用いた。(3) TRMM 衛星の観測サンプル

数が熱帯に比べて約4倍である中緯度に位置する日本で実施した。SSO5及びSSO5+TRMMに搭載されたマイクロ波放射計による推定降水量に含まれるサンプリング誤差は、日本のエリアでそれぞれ約8%、7%と結論できる。

また同期間、同エリアにおける各衛星 (Aqua, ADEOS-II, DMSP-F13, DMSP-F14, DMSP-F15, TRMM) のサンプリング誤差も同様なシミュレーションによって推定し、全検証エリア平均してそれぞれ約15%、17%、21%、20%、23%、17%であった。したがって、現在運用されている6機のマイクロ波放射計を搭載した衛星群を用いた今回のシミュレーションによって、仮にGPM計画でこれら6機の衛星を用いた降水量推定を行う場合には、現在運用されているTRMM衛星に比べてサンプリング誤差は $5^\circ \times 5^\circ$ の空間スケール、1か月の時間スケールで少なくとも約57%改善されるものと期待できることがわかった。

本研究では複数衛星の軌道を考慮したときのサンプリングの時間間隔とサンプリング誤差には比較的良い相関があることを示し、サンプリング誤差との関係の定式化を試みた。サンプリングの時間間隔として flush visit の時間間隔での平均値 ΔT_{av} を考え、エリア平均降水強度 R の影響を補正したサンプリング誤差 SE_c との間に $5^\circ \times 5^\circ$ の空間スケール、1か月の時間スケールでは $SE_c = 5.05 \times \Delta T_{av}^{0.45}$ の関係があることを

最小2乗法によって導出した。相関係数(相関を表す R^2 値)は0.76と比較的良好な相関であったが、ばらつきの原因の一つとして今回考慮しなかった、軌道による他の誤差要因によるものと考えられる。もう一つは検証エリアによって異なる降水の日周期特性と関連して太陽同期衛星の昇交点通過時刻によって異なる降水量を観測することによって生じたものと考えられる。

またそれ以外のサンプリング誤差要因として降水の特徴を示す降水時で平均した降水強度や降水タイプ(降水の相関時間、降水セルの数や大きさなど)が考えられるが、本論文で用いた平均降水強度は強さでなく1時間雨量なので、今後より時間分解能のよい地上レーダーや雨量計データを用いて積算時間降水量だけでなく、降水時で平均した降水強度や降水タイプとサンプリング誤差の関係を考慮していく予定である。

本論文は日本域の結果であるが、全球のサンプリング誤差を推定することが望ましい。そのために今後降水の日周期特性、降水時で平均した降水強度や降水タイプを表すパラメータとサンプリング誤差の関係を明らかにし、定式化していく必要がある。今後、地上データのみならず衛星データも用いることを視野に入れて全球の様々な大きさのエリアにおける様々なタイプの降水に対して同様のシミュレーションとサンプリング誤差の定式化を実施する予定である。

謝 辞

本研究に対して、有益な議論とご助言を戴いた通信

総合研究所(現情報通信研究機構)の井口俊夫氏、高橋暢宏氏、花土 弘氏、また、宇宙航空研究開発機構の佐藤晋介氏に心より感謝いたします。また査読、編集委員各氏には、懇切丁寧なご指導、アドバイスをいただいた。なお、斜軸ランベルト座標系の解析雨量データについては、気象庁から特に提供していただいた。この場を借りて御礼申し上げます。

参 考 文 献

- Bell, T. L. and P. K. Kundu, 2000 : Dependence of satellite sampling error on monthly averaged rain rates : Comparison of simple models and recent studies, *J. Climate*, **13**, 449-462.
- Laughlin, C. R., 1981 : 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.
- Oki, R. and A. Sumi, 1994 : Sampling simulation of TRMM rainfall estimation using radar-AMeDAS composites, *J. Appl. Meteor.*, **33**, 1597-1608.
- Shin, K.-S. and G. R. North, 1988 : Sampling error study for rainfall estimate by satellite using a stochastic model, *J. Appl. Meteor.*, **27**, 1218-1231.
- Steiner, M., T. L. Bell, Y. Zhang and E. F. Wood, 2003 : Comparison of two methods for estimating the sampling-related uncertainty of satellite rainfall averages based on a large radar dataset, *J. Climate*, **16**, 3759-3778.

Sampling Simulation of Rainfall Estimation by Five Sun-Synchronous-Orbit Satellites and TRMM using radar-AMeDAS composites

Yasuhisa IIDA*, Ken'ichi OKAMOTO*, Tomoo USHIO* and Riko OKI**

* (Corresponding author) Osaka Prefecture University, Gakuencho 1-1, Sakai, Osaka, 599-8531, Japan.

** Japan Aerospace Exploration Agency.

(Received 30 March 2004 ; Accepted 14 January 2005)
