

論文

運輸多目的衛星 MTSAT 観測による可降水量推定手法の開発

赤塚 慎^{*1}・大吉 慶^{*2}・竹内 渉^{*3}

Development of a Precipitable Water Estimation Method Using MTSAT Measurement

Shin AKATSUKA^{*1}, Kei OYOSHI^{*2} and Wataru TAKEUCHI^{*3}**Abstract**

Japanese geostationary meteorological satellite, Multi-functional Transport Satellite (MTSAT), was launched in February 2005 and the algorithms for land surface temperature (LST) retrieval from MTSAT were developed for the monitoring of urban heat island and the other phenomenon¹⁾²⁾. In order to improve the accuracy of LST retrieval from satellite remote sensing data, the information of atmospheric condition, especially atmospheric water vapor content, is absolutely imperative. In addition, since atmospheric water vapor is one of the dominant greenhouse gases and it influences the process of partitioning of incoming solar radiation into sensible and latent heats, the atmospheric water vapor content is one of the key parameters for the analysis of global environmental changes. However, the products of water vapor content are not offered except for radiosonde data and reanalysis products.

Precipitable water (PW) is one of the physical quantities which represents the atmospheric water vapor content. This study aims to produce the hourly precipitable water maps using MTSAT data. A set of precipitable water estimating equations were derived and demonstrated for mapping of hourly PW distribution in clear sky condition using MTSAT data and reanalysis products. These equations were derived by a multiple regression analysis between brightness temperature of MTSAT infrared channels and temperature at 700 hPa from reanalysis products, and PW derived from radiosonde data. The monthly root mean square errors ranged approximately from 6.5 to 11.5 mm. It was revealed that the PW estimating equations could estimate PW with relatively high accuracy from July to September, but it could not in January and February.

Keywords : geostationary satellite, radiosonde data, reanalysis products, split-window

1. はじめに

1.1 本研究の背景

運輸多目的衛星 MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) は、GMS-5 の後継機として 2005 年に打ち上げられた静止衛星であり、センサ性能の向上により陸域環境観測への利用も期待できるようになってきている³⁾。その一つとして、大吉らは MTSAT データによる地表面温度推定手法の開発・評価を行っているが¹⁾²⁾、地表面温度を精度良く推定するためには大気中の水蒸気量に関する情報が必要である。MTSAT はアジア太平洋地域の 1 時間毎の地表面状態を観測することが可能であるが、MTSAT の観測範囲に応じた水蒸気量の情報はラジオゾンデデータ及び再解析プロダクトに限られ、その時間分解能はそれぞれ 12 時間と

6 時間である。従って、毎時の MTSAT データによる地表面温度推定の精度を向上させるためには、それに対応した毎時の大気水蒸気量プロダクトが望まれている。

一方、大気中の水蒸気は地球へ届く太陽放射エネルギーの分配と輸送に重要な役割を担っている。また、水蒸気は波長の長い地球放射をほとんど吸収し、かつ大気中に最も豊富に存在する微量気体成分であるため、最大の温室効果を持つ気体である。水蒸気の変動はほとんどが自然の水循環に伴うもので、人間活動が一方的に大気中の水蒸気量を変化させることはまずないことから、それ自身が原因となっていわゆる地球温暖化を引き起こすことはないと考えられているが⁴⁾、他の温室効果ガスによって引き起こされる温暖化に対して水蒸気は強い正のフィードバック作用があるため⁵⁾、気候変動を監視する上で大気中の水蒸気量をモニタリングすることは重要である⁶⁾。さらに、定期的に決

(2011. 7. 8 受付, 2011. 10. 5 改訂受理)

*¹ 山梨県環境科学研究所

〒403-0005 山梨県富士吉田市上吉田字剣丸尾 5597-1

*² 宇宙航空研究開発機構

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

*³ 東京大学生産技術研究所

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

*¹ Yamanashi Institute of Environmental Sciences, 5597-1, Kenmarubi, Kamiyoshida, Fujiyoshida, Yamanashi 403-005, Japan

*² Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

*³ Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

また範囲の水蒸気分布が観測できれば、数値予報などの利用者に提供することも可能であり、非常に有用である⁷⁾。

大気中の水蒸気量を表す物理量の一つとして可降水量があり、地上の単位面積に立てた鉛直気柱内に含まれる全水蒸気量と定義される。本研究では1時間毎の大気水蒸気量プロダクトとして可降水量分布図の作成を目指し、MTSATデータを用いた可降水量推定手法の開発を行う。

これまで、MTSATの前衛機であるGMS-5では、赤外スプリットウィンドウチャンネルを用いた可降水量推定アルゴリズムにより北緯60度～南緯60度、東経80度～西経160度の領域において3時間ごとに可降水量が推定され、6時間ごとの1日4回のデータが気象庁本庁の予報業務に利用されていた⁸⁾。また、その他の静止衛星を用いた可降水量の推定例は、GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) に搭載された大気サウンダー VAS (Visible-Infrared Spin Scan Radiometer) Atomospheric Sounder) による推定^{9)～11)}や、MSG-SEVIRI (Meteosat Second Generation-Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) による推定¹²⁾が行われている。GMS-5やMTSATと同じ可視赤外イメージであるMSG-SEVIRIを用いた可降水量推定では、KleespiesとMcMillinが提案したスプリットウィンドウアルゴリズム¹³⁾と地表面温度の日変化とを利用して毎日の可降水量を推定している。この手法は大気温度等の補助データが必要ないため準実時間で可降水量の推定が可能であるが、各画素において1日の中で地表面温度が約5K以上変化し、その間大気状態は変化しないという前提条件が必要となる。MSG-SEVIRIは15分という高い時間分解能を持つため、この推定手法を可能にしているが、MTSATの全球時間分解能は1時間であるため、大気状態の不变条件を満足することは現実的には困難であると考えられる。

さらに、スプリットウィンドウアルゴリズムによる可降水量の推定は雲があるエリアには適用できないため、日単位の可降水量データを作成する場合にも、毎時のデータに適用可能な推定手法を用いることで可降水量データの取得頻度を増加させる必要があると考えられる。

1.2 本研究の目的

そこで本研究では、現時点では提供されていない1時間毎の可降水量分布図の作成を目指し、気象庁の予報業務で利用されていたGMS-5の可降水量推定手法を応用することで、毎時のMTSAT赤外チャンネルを用いた可降水量推定手法の開発を行うことを目的とする。MSG-SEVIRIを用いた可降水量の推定¹²⁾では、バイアスが小さくRMSEで10mm以下を目標精度としている。これは可降水量をアルベド推定の際の大気補正に用いる場合には10mm以下の精度が必要であるとの指摘に基づいている。また、大吉らの研究²⁾により誤差が10mm程度の水蒸気量分布図があれば地表面温度の推定精度が向上することが明らかになっているため、本研究でもバイアスが小さくRMSEで10mm以下を目標精度とする。

2. 解析手法

2.1 赤外チャンネルを用いた可降水量推定の原理

GMS-5の赤外スプリットウィンドウチャンネルを用いた可降水量推定アルゴリズムでは、水蒸気による赤外放射の吸収の差に起因するIR1チャンネル(10.5～11.5μm)とIR2チャンネル(11.5～12.5μm)との間にある輝度温度差を利用して水蒸気量の推定を行う⁷⁾。この推定式は1層の等温大気と黒体放射を仮定した場合の大気温度と衛星による観測輝度温度との関係式¹⁴⁾を基にしている。

ここで、ある波長帯λのセンサが観測する輝度温度を T_o 、地表面温度を T_s 、大気温度を T_A 、大気の透過率を τ_λ とするとき、

$$T_o = \tau_\lambda T_s + (1 - \tau_\lambda) T_A \quad (1)$$

と書くことができる。従って、IR1、IR2チャンネルで観測される観測輝度温度 $T_{o,IR1}$ 、 $T_{o,IR2}$ はそれぞれ次のように表せる。

$$T_{o,IR1} = \tau_{11} T_s + (1 - \tau_{11}) T_A \quad (2)$$

$$T_{o,IR2} = \tau_{12} T_s + (1 - \tau_{12}) T_A \quad (3)$$

式(2)と(3)から T_s を消去すると

$$\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}} = \frac{T_{o,IR1} - T_A}{T_{o,IR2} - T_A} \quad (4)$$

式(4)に示す関係式を得る。ここで、Wを温度 T_A のモデル大気層に含まれる水蒸気量、 κ_ν と α_ν をそれぞれある波長帯 ν における二酸化炭素の吸収係数と水蒸気吸収係数とし、θを衛星天頂角とすると、このモデル大気層の波長帯 ν における透過率 τ_ν は

$$\tau_\nu = \exp(-(\kappa_\nu - \alpha_\nu W) \sec \theta) \quad (5)$$

と近似でき、式(4)は以下のように表せる。

$$\frac{T_{o,IR1} - T_A}{T_{o,IR2} - T_A} = \exp(-(\Delta \kappa - \Delta \alpha W) \sec \theta) \quad (6)$$

$$\Delta \kappa = \kappa_{11} - \kappa_{12} \quad (7)$$

$$\Delta \alpha = \alpha_{11} - \alpha_{12} \quad (8)$$

さらに式(6)を変形すると、

$$W = -\frac{1}{\Delta \alpha} \left(\frac{1}{\sec \theta} \ln \left(\frac{T_{o,IR1} - T_A}{T_{o,IR2} - T_A} \right) + \Delta \kappa \right) \quad (9)$$

となる。式(9)は、実際の大気放射を代表する温度 T_A が既知の場合に、IR1、IR2チャンネルで観測される観測輝度温度 $T_{o,IR1}$ 、 $T_{o,IR2}$ から、水蒸気量 W を見積もることができることを示している。GMS-5の可降水量推定式はこの式を基に、さらに推定精度を向上させるために経験的にいくつかの項を加えて導出されたものであり⁷⁾、これをMTSATデータに適用した場合、MTSATの可降水量推定

式は式(10)のようになる。

$$\begin{aligned} PW = & a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 (IR1 - IR2) + a_3 (IR1 - IR2) \cos \theta \\ & + a_4 \ln (IR1 - T_{700}) + a_5 \ln (IR1 - T_{700}) \cos \theta \\ & + a_6 \ln (IR2 - T_{700}) + a_7 \ln (IR2 - T_{700}) \cos \theta \quad (10) \end{aligned}$$

ここで PW は可降水量 (mm), $IR1$, $IR2$ は MTSAT の $IR1$ チャンネル ($10.3\sim11.3\mu\text{m}$) 及び $IR2$ チャンネル ($11.5\sim12.5\mu\text{m}$) でそれぞれ観測された輝度温度 (K), T_{700} は 700 hPa における大気温度 (K), θ は衛星天頂角 (rad) である。また、係数 $a_0\sim a_7$ は MTSAT による観測値とラジオゾンデ観測による可降水量、さらに 700 hPa における大気温度データをそれぞれ利用し、最小二乗法を用いた回帰分析により求める。

2.2 使用データ

東京大学生産技術研究所にアーカイブされている 2007 年の MTSAT データに放射量補正及び幾何補正処理を行った後、解析に使用した。放射量補正是、気象衛星センターが公開している MTSAT User's Guide (<http://mscweb.kishou.go.jp/support/index.htm>) に掲載されているキャリブレーションテーブルを用いて IR チャンネルは大気上端の輝度温度に変換した。また、幾何補正是システム情報を基にしたものであり、MTSAT HRIT 画像の座標系である Normalized Geostational Projection から等緯度経度座標系へ変換した³⁾。

ラジオゾンデデータは米国ワイオミング大学工学部大気科学科の Weather Web (<http://weather.uwyo.edu/>) からダウンロードし、Fig. 1において星印 (★) で示す 25 地点

のラジオゾンデ観測点において観測された可降水量データを可降水量推定式の導出に、丸印 (●) で示す 14 地点のラジオゾンデ観測点における可降水量データを導出された可降水量推定式の精度検証にそれぞれ使用した。ラジオゾンデによる観測は 1 日 2 回 (00 : 00UTC, 12 : 00UTC) 行われている。また、NOAA が公開している NCEP/NCAR 再解析プロダクト¹⁵⁾の 700 hPa 大気温度データをダウンロードして使用した。再解析プロダクトは 1 日 4 時刻 (00 : 00 UTC, 06 : 00UTC, 12 : 00UTC, 18 : 00UTC) あり、空間解像度は 2.5 度である。

2.3 解析の手順

MTSAT データを用いた可降水量推定式導出の流れを Fig. 2 に示す。このとき、可降水量推定式 (10) は雲がある場合には利用できないため、雲マスクを用いて雲の無いエリアのデータのみを抽出し、最小二乗法により係数 $a_0\sim a_7$ を求める。なお、雲マスクは雲なし合成 $IR1$ 画像と毎時の $IR1$ 画像との輝度温度差、雲なし合成 $IR1$ 画像の輝度温度、赤外差分 ($IR1-IR2$) 画像の 3 つを特徴量とし、MODIS の雲マスクプロダクト (MOD35) を教師データとした線形判別分析による雲検知アルゴリズムを用いて作成した¹⁶⁾。

再解析プロダクトは 2.5 度解像度のデータであるため、可降水量推定式 (10) の係数 $a_0\sim a_7$ を求める場合には空間代表性を考慮するとラジオゾンデで観測した 700 hPa 大気温度を用いた方がより精度の高い可降水量推定式を導出することが可能であると考えられる。しかし、導出した推定式を用いて毎時の可降水量分布を推定する際には 1 時間毎の 700 hPa 大気温度分布が必要となるため、時間内挿で毎

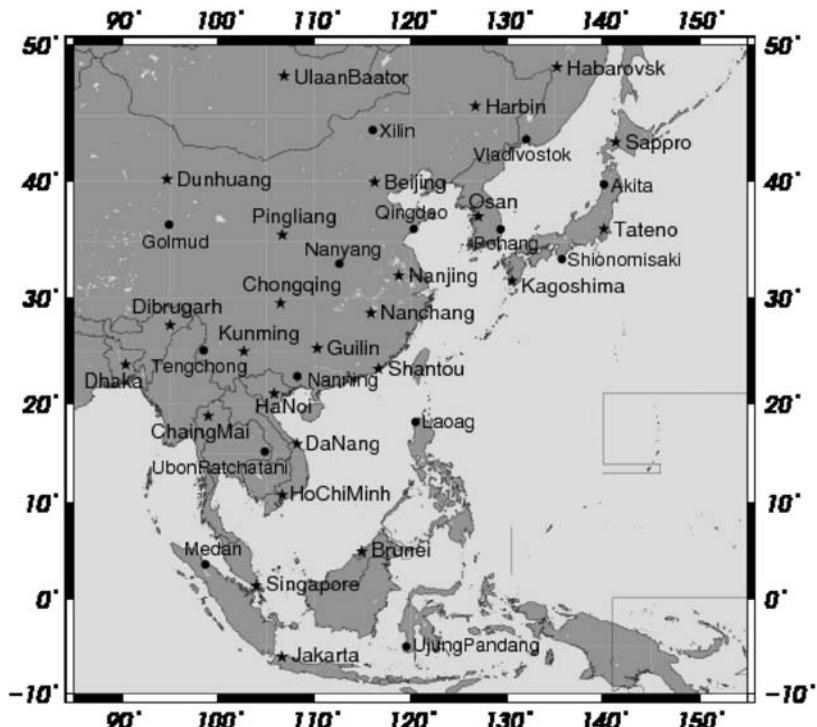


Fig. 1 The geographical location of radiosonde stations for the analysis. Stars represent the radiosonde stations for deriving PW estimating equation, and circles represent those for validation of it.

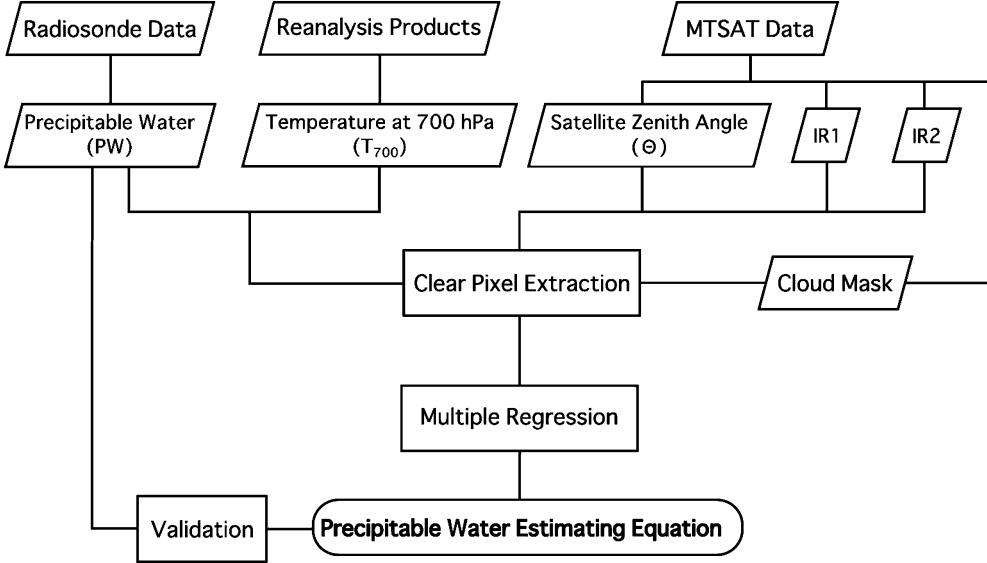


Fig. 2 Flow chart of deriving PW estimating equation.

時の 700 hPa 大気温度分布を作成しなければならない。その場合、ラジオゾンデ観測による 1 日 2 回の 700 hPa 大気温度に対して時間内挿及び空間補間を行うことで毎時の 700 hPa 大気温度分布を作成する方法と、4 時刻の再解析プロダクトの 700 hPa における大気温度分布を時間内挿することで作成する方法が考えられる。ラジオゾンデ観測データの値と再解析プロダクトの値に違いがほとんどなければ、1 日 4 時刻の 700 hPa 大気温度データが得られる再解析プロダクトを用いて時間内挿を行う方がラジオゾンデデータよりも詳細に 700 hPa 大気温度の時間変動を捉えることができるため、より精度の高い毎時の 700 hPa 大気温度分布を得られる可能性が高い。そこで、まず 2.5 度解像度の再解析プロダクトとラジオゾンデ観測データとの間にどの程度の違いがあるのかを把握するために、それぞれの可降水量と 700 hPa 大気温度の誤差評価を行うこととした。次に、MTSAT データを用いた可降水量推定式を導出し、その後、導出した推定式の精度評価を行う。

3. 解析結果

3.1 ラジオゾンデデータと再解析プロダクトの誤差評価

ラジオゾンデ観測データと再解析プロダクトとの間にどの程度の違いがあるのかを把握するために、可降水量と 700 hPa 大気温度の誤差評価をそれぞれ行った。このとき、ラジオゾンデによる観測データを真値とした。Fig. 1 において星印で示した 25 のラジオゾンデ観測点における 2007 年の 1 年間の全データと、ラジオゾンデ観測点に対応するグリッドの再解析プロダクトを利用した。ただし、MTSAT の雲マスクを用いてラジオゾンデ観測点が雲に覆われている場合のデータは除外している。Fig. 3 に可降水量及び 700 hPa 大気温度の散布図を示し、Table 1 に可降水量及び 700 hPa 大気温度のバイアスと RMSE をそれ

ぞれ示す。これらの結果から、再解析プロダクトは 2.5 度解像度のデータではあるが、700 hPa 大気温度に関してはラジオゾンデによる観測データとの誤差がバイアスで 0.27~0.64K、RMSE で 1.11~1.88K となり、充分小さいと判定される。従って、再解析プロダクトを用いて時間内挿する方がより精度の高い毎時の 700 hPa 大気温度分布を得られると考えた。一方、可降水量に関しては RMSE で 3.5~7 mm 程度の違いが見られたため、各ラジオゾンデ観測点における可降水量のバイアスと RMSE を計算した (Table 2)。Table 2 から、一部のラジオゾンデ観測点ではバイアスが大きく、許容範囲 10 mm より大きい誤差が見られたため、RMSE が 7 mm 以上である 4 地点 (Chongqing, DaNang, Dibrugarh, Hanoi) を以下の解析から除外した。

次にラジオゾンデ観測による 700 hPa 大気温度を用いて可降水量推定式を導出する場合と、再解析プロダクトの 700 hPa 大気温度を用いて可降水量推定式を導出する場合とで、そのバイアスと RMSE をそれぞれ求めた (Table 3)。このとき、ラジオゾンデ観測点 21 地点における 2007 年の全データを用い、雲マスクで晴天域のデータのみを抽出し、可降水量推定式を導出した。その後、各月のデータをそれぞれ用いて可降水量を推定し、そのバイアスと RMSE を求めた。Table 3 から、年間のバイアスはラジオゾンデデータを用いた場合と再解析データを用いた場合でともに 0 mm、RMSE はそれぞれ 9.83 mm と 9.81 mm であった。従って、2.5 度解像度の再解析プロダクトを用いても、ラジオゾンデデータを用いる場合と同程度の精度で可降水量の推定が可能であることがわかる。また、ラジオゾンデ観測による 700 hPa 大気温度を用いて導出した可降水量推定式と再解析プロダクト 700 hPa 大気温度を用いて導出した可降水量推定式には、1 月~4 月と 10 月~12 月には過大推定の傾向があり、5 月~9 月には過小推定の傾向にあること

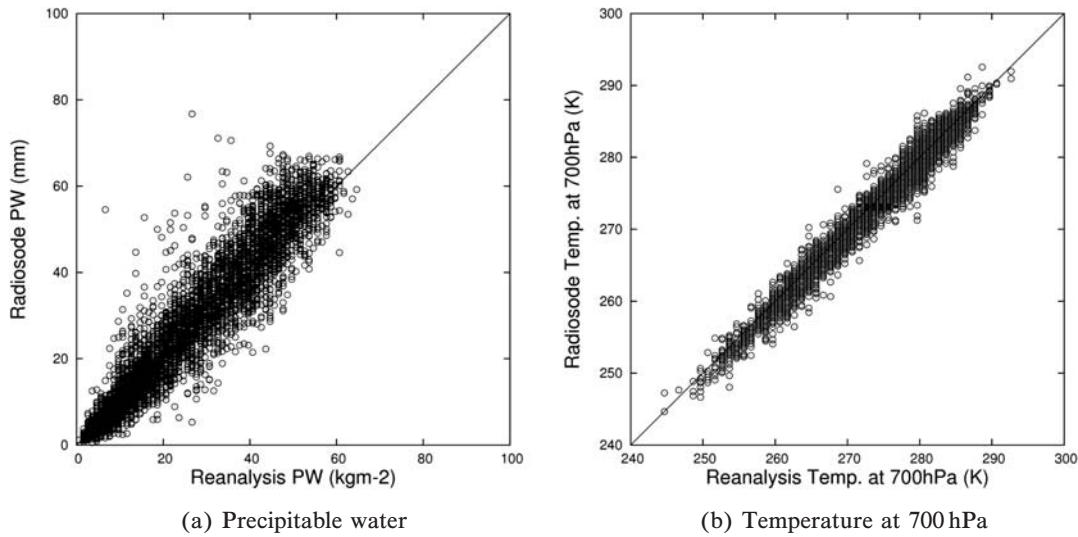


Fig. 3 Scatter plots between radiosonde data and reanalysis data ; (a) Precipitable water, (b) Temperature at 700 hPa.

Table 1 Bias and RMSE of PW and temperature at 700 hPa, respectively. N represents the number of samples.

Month	Precipitable Water			Temperature at 700 hPa		
	Bias(mm)	RMSE(mm)	N	Bias(K)	RMSE(K)	N
Jan	-0.16	3.59	534	0.64	1.86	534
Feb	-1.13	4.34	636	0.55	1.49	636
Mar	-1.13	4.30	492	0.43	1.62	492
Apr	-1.21	5.35	474	0.43	1.32	474
May	-1.63	6.75	614	0.34	1.41	617
Jun	-2.25	6.44	464	0.27	1.13	465
Jul	-2.63	6.73	446	0.43	1.11	446
Aug	-2.84	6.73	491	0.39	1.11	492
Sep	-1.51	6.12	576	0.38	1.21	578
Oct	-1.49	6.17	599	0.48	1.31	599
Nov	-0.15	4.67	577	0.56	1.54	577
Dec	-0.99	4.48	471	0.60	1.88	472
Annual	-1.39	5.57	6374	0.46	1.44	6382

が明らかになった。

3.2 MTSAT データを用いた可降水量の推定結果

ラジオゾンデ観測による 700 hPa 大気温度を用いて導出した可降水量推定式と再解析プロダクトの 700 hPa 大気温度を用いた可降水量推定式の精度は同程度であるため、1 時間毎の可降水量推定には時間分解能がより高い再解析プロダクトを用いた可降水量推定式を用いることとした。しかし、2007 年の 1 年間の全データを用いて導出した可降水量推定式には 1 月～4 月と 10 月～12 月には過大推定の傾向があり、5 月～9 月には過小推定の傾向があった。

そこで、各月のデータから月毎の可降水量推定式を導出し、その精度を評価した。このとき、3.1 節で用いた 21 のラジオゾンデ観測点において観測された可降水量データから最小二乗法により係数 $a_0 \sim a_7$ を求めた。

Fig. 4 に (a) 2007 年の全データから導出した可降水量推定式を用いて推定した可降水量とラジオゾンデ観測による

Table 2 Bias and RMSE of PW at each radiosonde station. N represents the number of samples.

Radiosonde Station	Bias(mm)	RMSE(mm)	N
Beijing	-1.45	4.07	408
Brunei	-5.62	6.60	156
ChiangMai	-2.80	6.42	151
Chongqing	-6.26	7.95	202
DaNang	-6.96	8.00	275
Dhaka	0.19	5.67	62
Dibrugarh	-14.57	17.40	117
Dunhuang	-0.99	3.02	170
Guilin	-3.59	6.87	242
Habarovsk	-0.58	3.26	237
Hanoi	-6.22	8.61	306
Harbin	0.64	2.81	312
HoChiMinh	-2.27	4.85	253
Jakarta	2.51	4.85	252
Kagoshima	-0.46	3.62	384
Kunming	0.61	2.66	224
Nanchang	-0.96	6.12	275
Nanjing	-0.92	3.73	345
Osan	-0.31	2.60	365
Pingliang	1.89	3.64	221
Sapro	0.33	2.85	307
Shantou	-3.67	6.87	373
Singapore	-0.85	3.60	223
Tateno	-0.66	3.74	336
UlaanBaator	-0.10	3.97	178

可降水量との散布図と (b) 各月のデータから導出した月毎の可降水量推定式を用いて推定した可降水量とラジオゾンデ観測による可降水量との散布図をそれぞれ示す。また、

Table 3 Bias and RMSE of PW estimated using PW estimating equation and temperature at 700 hPa from either radiosonde or reanalysis. N represents the number of samples.

Month	Radiosonde 700 hPa Temp.		Reanalysis 700 hPa Temp.		N
	Bias(mm)	RMSE(mm)	Bias(K)	RMSE(K)	
Jan	3.30	8.81	3.54	8.88	437
Feb	1.18	8.96	1.16	9.04	513
Mar	1.71	9.03	1.97	8.77	412
Apr	2.21	10.20	1.93	10.13	414
May	-0.90	10.82	-0.92	10.99	520
Jun	-5.22	10.18	-5.20	10.42	396
Jul	-4.87	10.96	-4.94	10.58	387
Aug	-6.55	11.53	-6.62	11.68	439
Sep	-2.43	9.63	-2.62	9.92	501
Oct	1.33	8.73	1.42	8.37	515
Nov	4.61	9.00	4.61	8.87	476
Dec	5.06	10.03	5.14	9.86	387
Annual	0.00	9.83	0.00	9.81	5397

Table 4 The coefficients of monthly PW estimating equations and the bias and RMSE of PW estimated using them. N represents the number of samples.

Month	Coefficients								Bias(mm)	RMSE(mm)	N
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7			
Jan	-36.11	71.36	-3.84	22.38	-8.64	4.54	24.04	-28.32	0.00	7.52	437
Feb	-32.46	69.27	1.34	16.08	6.82	-17.19	6.39	-3.60	0.00	7.93	513
Mar	-26.25	68.13	-7.61	26.13	7.14	-19.90	2.81	-0.55	0.00	8.01	412
Apr	-0.11	27.56	-7.72	28.29	20.67	-38.71	-21.12	33.47	0.00	8.96	414
May	-19.05	64.91	-25.26	44.69	93.20	-121.12	-87.40	106.36	0.00	10.23	520
Jun	-39.08	111.41	-2.48	13.17	12.42	-28.12	0.36	-0.20	0.00	7.30	396
Jul	-37.31	112.01	-7.07	20.73	22.70	-46.86	-9.37	15.48	0.00	8.07	387
Aug	-44.50	134.43	6.57	1.98	16.19	-43.71	-4.18	10.15	0.00	7.55	439
Sep	-43.68	113.89	-8.07	21.76	15.62	-37.13	-1.32	6.77	0.00	8.25	501
Oct	-20.83	67.24	1.65	11.24	12.62	-31.20	-5.65	13.31	0.00	7.06	515
Nov	-24.04	61.30	9.15	1.35	14.22	-31.00	1.11	3.58	0.00	6.39	476
Dec	-51.34	100.94	-10.39	26.49	22.91	-38.33	-0.71	0.04	0.00	7.93	387

Table 4 に各月のデータから導出した可降水量推定式の係数 $a_0 \sim a_7$ 及び、そのバイアスと RMSE をそれぞれ示す。Fig. 4 から、各月のデータから導出した月毎の可降水量推定式を用いて推定するとより多くの点が 1 : 1 の直線上に分布することがわかる。Table 3 と Table 4 とを比較すると、月毎に可降水量推定式を導出することで、バイアスは小さくなり、RMSE も 0.7 mm～4.1 mm 程度小さくなつたことがわかる。以上から、各月のデータから月毎の可降水量推定式を導出することで推定精度も向上することが明らかになった。さらに、Table 4において可降水量推定式の係数 $a_0 \sim a_7$ が月毎に大きく異なっている。この理由として、推定式の導出に用いたラジオゾンデデータの雲被覆による地域的な偏りや、本研究で黒体放射と仮定した地表面放射率が、実際には場所や季節により変動しているためである

と考えられる。

3.3 MTSAT データを用いた可降水量推定式の精度検証と評価

3.2 節で導出した月毎の可降水量推定式を用いて 2007 年の 1 年間の毎日の 00 : 00 (UTC) と 12 : 00 (UTC) における可降水量を推定し、Fig. 1 で示したラジオゾンデ観測点において観測された可降水量データと比較することで可降水量推定式の精度検証を行った。Fig. 1 において星印で示した 21 地点のラジオゾンデ観測点におけるバイアスと RMSE は Table 4 の通りであり、各月の RMSE は 6.5～10.5 mm 程度であった。一方、Fig. 1 において丸印で示した精度検証用のラジオゾンデ観測点におけるバイアスと RMSE を Table 5 に示す。このとき、3.1 節と同様にラジオゾンデ観測による可降水量と再解析プロダクトの可降水量

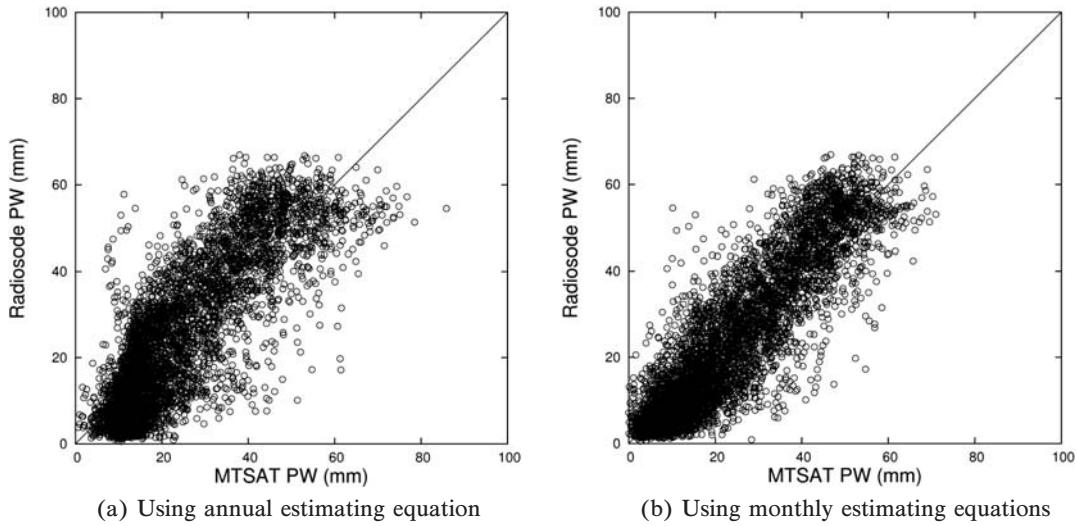


Fig. 4 Scatter plots between radiosonde PW and PW estimated from MTSAT data ; (a) MTSAT PW was estimated using the equation derived from annual data, (b) MTSAT PW was estimated using the monthly equations.

との RMSE が 7 mm 以上である 3 地点 (Lapoag, Medan, UjangPandang) を除き、11 地点のラジオゾンデ観測点において推定した可降水量のバイアスと RMSE である。Table 5 より、可降水量推定式の導出に使用したラジオゾンデ観測点以外のエリアでは 7 月から 9 月はバイアスが小さく RMSE も 9 mm 以下で可降水量を推定可能であり、目標精度を満たしていることがわかる。一方、それ以外の月ではバイアスが大きく過大推定の傾向が見られ、特に 1, 2 月は RMSE で 11 mm 以上の誤差が生じ、精度が低下することが明らかになった。

この理由の一つとして、ラジオゾンデ観測は低温条件では湿度センサの感度が低いことが指摘されており¹⁷⁾、冬季のラジオゾンデ観測による可降水量の値は実際の値よりも小さくなっている可能性がある。従って、冬季には MTSAT データを用いた推定値は過大推定となると考えられる。また、雲マスクの精度、大気温度の空間代表性、地表面放射率の影響も誤差要因として考えられる。本研究で用いた雲マスク作成手法では、積雪と雲の分離が困難であるため、冬季の高緯度地方の雲マスクの精度は低くなっている。また、本研究では 1 層の等温大気を仮定し、その温度を操野の研究⁷⁾と同様に 700 hPa における大気温度で代表できるものとみなした。一方、Chester らの研究¹⁸⁾では 700 hPa と 920 hPa との間の層厚値から求めた大気温度を用いていることから、大気温度の空間代表性についてはさらなる検討が必要である。さらに、地表面の黒体放射を仮定しているが、実際の陸域では放射率が多様であり、放射率の場所や季節による違いが推定式の精度にも影響を与えていることが考えられる。これらについては今後の課題としたい。

3.4 MTSAT データを用いた可降水量分布図の作成

3.2 節で導出した月毎の可降水量推定式を用いて、1 時間毎の可降水量分布図の作成を行った。Fig. 5 に 2007 年 8

Table 5 Bias and RMSE of PW estimated using monthly PW estimating equations. N represents the number of samples.

Month	Bias(mm)	RMSE(mm)	N
Jan	5.95	11.38	301
Feb	4.66	11.42	277
Mar	3.49	9.91	251
Apr	3.88	9.75	199
May	3.33	8.37	272
Jun	4.53	9.10	190
Jul	-0.31	8.44	195
Aug	-0.75	8.35	204
Sep	0.90	8.10	245
Oct	1.09	8.66	272
Nov	3.36	7.19	318
Dec	1.83	7.82	241

月 15 日の 00 : 00 (UTC) から 05 : 00 (UTC) のまでの可降水量分布図を示す。このとき、各時刻の 700 hPa における大気温度は 1 日 4 時刻ある再解析データを線形内挿することにより求めた。

4. まとめ

4.1 結論

本研究では、GMS-5 用に開発された赤外スピリットウインドウチャンネルを用いた可降水量推定アルゴリズムを MTSAT データに適用し、MTSAT データ用の可降水量推定手法の開発を行った。本手法では、月毎に可降水量推定

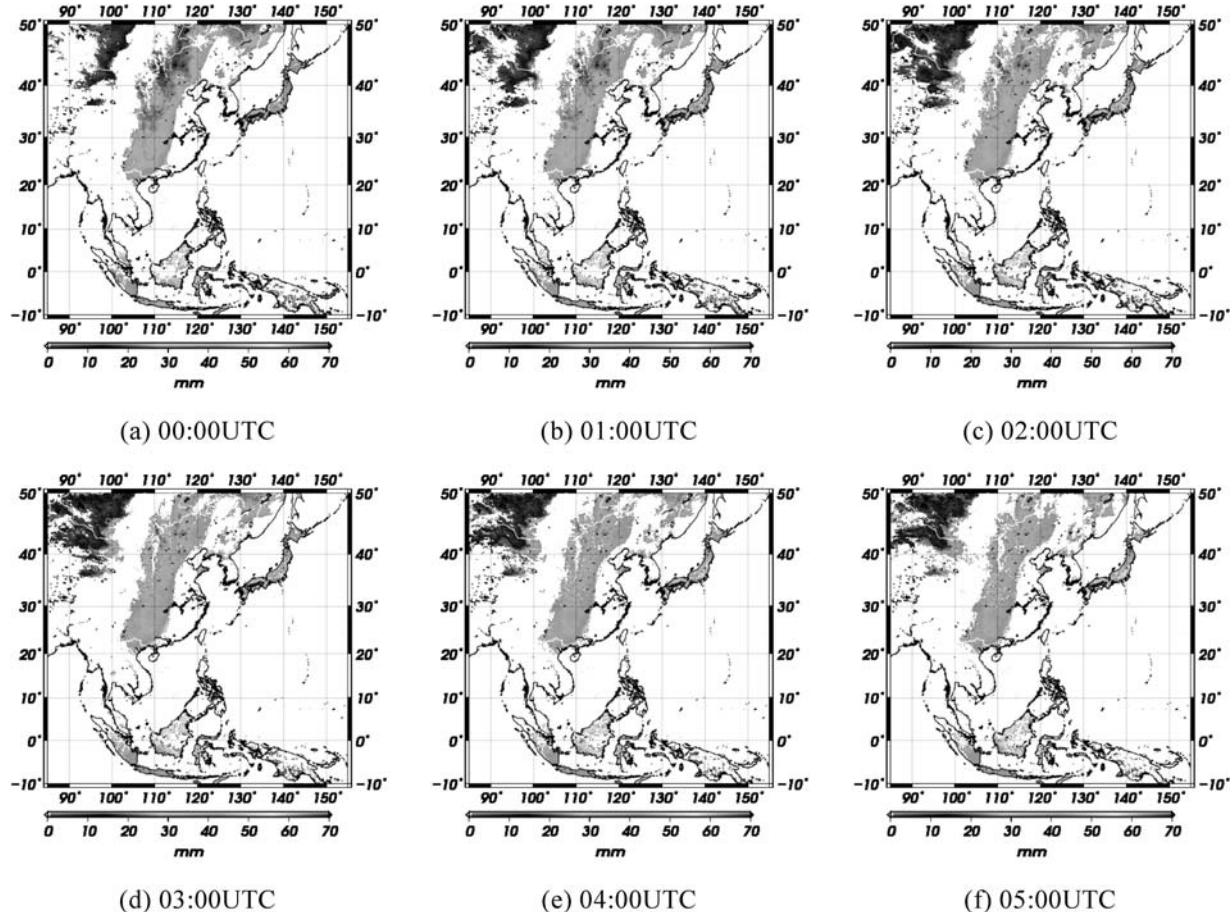


Fig. 5 Hourly precipitable water maps in August 15, 2007. White area represents the cloud-contaminated area.

式を導出し、その RMSE は 6.5 mm~10.5 mm 程度であった。可降水量推定式の導出に用いなかったラジオゾンデ観測点のデータを用いて精度検証を行ったところ、7月から9月はバイアスが小さく RMSE も 9 mm 以下で可降水量を推定可能であるが、それ以外の月では過大推定の傾向が見られ、特に 1, 2 月は RMSE で 11 mm 以上の誤差が生じ、精度が低下することが明らかになった。以上から、本研究で導出した可降水量推定式から MTSAT データを用いて可降水量を推定する場合、可降水量が多い 7 月から 9 月は十分な精度で可降水量を推定可能であるが、可降水量が少ない 1, 2 月における推定に関しては更なる検討が必要である。しかしながら、大気中の水蒸気量が少なければ、大気効果は小さく地表面温度推定に与える影響は小さいと考えられる。本研究では、大気中の水蒸気量が多く大気効果が大きいと考えられる 7 月から 9 月において目標精度とした RMSE10 mm 以下を満たしている。従って、本手法を用いて MTSAT データから推定した可降水量を地表面温度推定に利用することで、地表面温度の推定精度向上には十分寄与することが期待できる。

4.2 今後の課題

今後は、推定精度に影響を与えていていると考えられる雲マスクの精度、大気温度の時空間代表性、地表面放射率の影

響について検討を行い、可降水量推定式の更なる精度向上を目指す。

謝辞：本研究の成果の一部は、東京大学生産技術研究所地球環境工学研究グループ「ひまわり研究会」の支援を受けて実施された。

引用文献

- 1) 大吉 慶, 竹内 渉, 田村正行 : 運輸多目的衛星 MTSAT データによる地表面温度推定手法の評価, 写真測量とリモートセンシング, 49 (4), pp. 251-259, 2010.
- 2) 大吉 慶, 赤塚 優, 竹内 渉, 田村正行 : MTSAT データによるアジアメガシティの準実時間地表面温度監視システムの構築, 写真測量とリモートセンシング, 50 (3), pp. 139-144, 2011.
- 3) 竹内 渉, 根本利弘, 金子隆之, 安岡善文 : WWW を利用した MTSAT データ処理・可視化・配信システムの構築, 写真測量とリモートセンシング, 46 (6), pp. 42-48, 2007.
- 4) 北海道大学大学院環境科学院（編）：地球温暖化の科学, 北海道大学図書刊行会, 札幌, 2007.
- 5) D.J. ジェイコブ : 大気化学入門, 東京大学出版会, 東京, 2002.

- 6) A. Dai : Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity, *Journal of Climate*, 19, pp. 3589–3606, 2006.
- 7) 操野年之：可降水量，気象衛星センター技術報告特別号, pp. 89–94, 1996.
- 8) 新田 尚, 野瀬純一, 伊藤朋之, 住 明正 (編) : 第18章 宇宙からの気象観測, 気象ハンドブック, pp.294-319, 朝倉書店, 東京, 2005.
- 9) A.R. Guillory, G.J. Jedlovec and H.E. Fuelberg : A technique for deriving column-integrated water content using VAS split-window data, *Journal of Applied Meteorology*, 32, pp. 1226–1241, 1993.
- 10) C.M. Hyden and G.S. Wade : Derived product imagery from GOES-8, *Journal of Applied Meteorology*, 35, pp. 153–162, 1996.
- 11) J.F. Dostalek and T.J. Schemit : Total precipitable water measurements from GEOS Sounder derived product imagery, *Weather and Forecasting*, 16, pp.573-587 , 2001.
- 12) M. Schroedter-Homscheidt, A. Drews and S. Heise : Total water vapor column retrieval from MSG-SEVIRI split window measurements exploiting the daily cycle of land surface temperatures, *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 249–258, 2008.
- 13) J.T. Kleespies and L.M. McMillin : Retrieval of precipitable water from observations in the Split Window over varying surface temperatures, *Journal of Applied Meteorology*, 29, pp.851–862, 1990.
- 14) D. Chester, W.D. Robinson and L.W. Uccellini : Optimized retrievals of precipitable water from the VAS “Split Window”, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, pp. 1059–1066, 1987.
- 15) E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Wollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne and D. Joseph : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, pp.437–470, 2007.
- 16) Y.S. Choi and C.H. Ho : Validation of cloud property retrieval from MTSAT-1R imagery using MODIS observations, *International Journal of Remote Sensing*, 30 (22), pp. 5935–5958, 2009.
- 17) K.E. Trenberth, F. Fasullo and L. Smith : Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor, *Climate Dynamics*, 24, pp. 741–758, 2005.
- 18) D. Chester and L.W. Uccellini : Low-level water vapor fields from the VISSR Atmospheric Sounder (VAS) “Split Window” channels, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, pp. 725–743, 1983.

[著者紹介]

●赤塚 慎 (アカツカ シン)

2007年12月東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻博士課程修了, 博士(工学)。2008年1月東京大学生産技術研究所入所, 特任研究員を経て2010年4月より山梨県環境科学研究所環境健康研究部生気象学研究室研究員。現在はヒートアイランド現象に関する研究に従事。日本リモートセンシング学会平成19年優秀論文発表賞, 日本写真測量学会平成19年度秋季学術講演会論文賞, The 30th Asian conference on Remote Sensing Best Paper Award をそれぞれ受賞。日本リモートセンシング学会, 日本写真測量学会, 日本ヒートアイランド学会等の会員

E-mail : akats@yies.pref.yamanashi.jp

●大吉 慶 (オオヨシ ケイ)

2002年筑波大学第三学群社会工学類卒業。2007年東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻博士課程修了, 博士(環境学)。同年東京大学生産技術研究所特任研究員, 2008年京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教を経て, 2011年4月より独立行政法人宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター招聘研究員。現在は, 衛星データの利用推進に関わる業務および研究に従事。日本写真測量学会学術講演会論文賞受賞(2004年, 2005年)。日本リモートセンシング学会, 日本写真測量学会, 米国地球物理学連合等の会員

E-mail : ohyoshi.kei@jaxa.jp

●竹内 渉 (タケウチ ウタル)

1999年東京大学工学部土木工学科卒業。2004年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(社会基盤工学専攻, 博士(工学))。同年東京大学生産技術研究所入所, 特任研究員, 特任助手, 講師を経て2010年より人間・社会系部門准教授。2007-2009年アジア工科大学院(AIT, タイ王国)客員講師, JICA専門家として派遣。2010-2012年(独)日本学術振興会(JSPS)パンコク研究連絡センター長(兼務)。専門は環境・災害リモートセンシング。計測自動制御学会論文奨励賞, 日本写真測量学会学術講演会論文賞, 学会奨励賞, 日本リモートセンシング学会論文奨励賞をそれぞれ受賞。日本リモートセンシング学会, 米国地球物理学連合(AGU), 日本写真測量学会の各会員
E-mail : wataru@iis.u-tokyo.ac.jp