

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

Evaluation of the algorithms for land surface temperature retrieval from MTSAT data

大吉 慶*・竹内 渉**・田村 正行*

Kei OYOSHI, Wataru TAKEUCHI and Masayuki TAMURA

Abstract : Multi-functional Transport Satellite (MTSAT) is a Japanese geostationary satellite launched in 2005 and provides hourly data with 5 bands including two thermal infrared bands in the 10.5-12.5 μ m region. Hourly LST data enables us to improve our understanding of surface energy balance. In this research, we have evaluated split-window equations to retrieve hourly Land Surface Temperature (LST) from thermal infrared data of MTSAT. Radiative transfer code was used to simulate brightness temperatures measured at sensor on MTSAT, and the coefficients of split-window equations were derived from the simulation results with a statistical regression method. As a result, though surface emissivity or atmospheric water vapor that are input parameters to estimate LST contain errors, the accuracy of the split-window equation which requires both parameters have been higher than that of the equation which require only surface emissivity. These split-window equations are able to estimate LST with the RMSE less than or equal to 0.7K and 1.09K, respectively, in the case of viewing zenith angle lower than 40 degree and no atmospheric water vapor and surface emissivity errors.

1. はじめに

地表面温度は地域から地球規模での陸面過程を説明する重要なパラメータの一つであり、地表面と大気の相互作用によるエネルギー移動の理解に有用である。そのため、地表面温度は気候学や水文学、生態学等の分野において様々な現象を説明するパラメータとして広く利用されている (Running *et al.*, 1994)。広域の地表面温度推定には人工衛星による熱赤外リモートセンシングが有効であるが、人工衛星で観測される放射エネルギーはセンサと地表面の間に存在する大気による散乱、吸収、放射の影響を受けている。そのために地表面温度の推定には、10.5-12.5 μ m 帯の熱赤外 2 バンドにおける大気の透過率の差を利用することで、大気の影響を除去して地表面温度を推定する split-window 法が広く用いられている (Liang, 2004)。放射伝

達式を解く際の仮定条件により、様々な split-window 式がこれまでに提案されている (Ouaidrari *et al.*, 2002)。

一方、運輸多目的衛星 Multi-functional Transport Satellite (MTSAT) は、GMS-5 の後継機として 2005 年に H2A ロケットにて打ち上げられた日本の静止衛星である。アジア太平洋各国の安心・安全な国民生活に不可欠な気象情報を提供している国際貢献度の高い衛星であり、これまで主として気象業務に利用されてきたが、近年の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た (竹内ら, 2007)。陸域環境観測の観点から見ると、静止衛星は高い観測時間分解能を有するため、観測のリアルタイム性が増すことや毎時変化するパラメータを観測できるという利点がある。さらに、毎時データが取得できることで観測データが増加するために雲被覆の影響を軽減できる可能性がある。次期 MTSAT については、さらなる陸域観測機能の向上が計画されており、静止地球環境観測衛星と位置づけて運用することが計画されている (宇宙開発戦略本部, 2009)。欧州では既に陸域観測機能を向上させた静止気象衛星を運用している。

* 京都大学大学院工学研究科

** 東京大学生産技術研究所

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 49, NO. 4, 2010

静止気象衛星 Meteosat に搭載された Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI) は 12 の観測波長帯を有しているために様々な陸域パラメータが観測可能であり、植生観測 (Fensholt *et al.*, 2006) や積雪観測 (Wildt *et al.*, 2007)、地表面温度観測 (Sobrino *et al.*, 2004) などに利用され、静止衛星による陸域環境観測の有用性が示されつつある。

MTSAT は SEVIRI と比較すると陸域観測性能は劣るが、熱赤外 2 バンドを有するために地表面温度の観測が可能である。MTSAT データによる地表面温度推定手法を確立することができれば、1 時間ごとのアジア太平洋西部の地表面温度観測が可能となり、地表面の熱特性に関する理解の深化や各種モデルへの入力パラメータとしての利用が期待できる。しかしながら、MTSAT データによる地表面温度推定手法はこれまでに検討されておらず、GMS-5 を利用した研究がいくつか報告されているが、対象範囲は限定されており、広域観測をする際に問題となる衛星天頂角の影響等が考慮されていない (Prata *et al.*, 1999, Oku *et al.*, 2004)。また、GMS-5 用に提案された手法をセンサ応答関数が異なる MTSAT にそのまま適用することはできない。

そこで本研究では MTSAT の熱赤外データから地表面温度を推定することを目的とし、MTSAT に適した地表面温度推定手法の検討を行った。放射伝達モデルを利用して様々な条件における MTSAT データの熱赤外バンドの観測値をシミュレートし、代表的な split-window 式の MTSAT への適用可能性を評価した。MTSAT は静止衛星であり観測範囲が広いので衛星天頂角が常に大きくなる地域が必然的に含まれ、例えば日本周辺では衛星天頂角が 30-50 度程度である。衛星天頂角が大きくなり光路長が長くなると地表面の放射率や大気中の水蒸気量の影響を強く受けるために、特にこれらの影響を考慮して地表面温度推定式を選択する必要がある。したがって、衛星天頂角への依存性、放射率や水蒸気量に誤差が含まれる場合の地表面温度推定精度への影響に着目して評価を行った。

2. 研究手法

2.1 MTSAT のセンサ特性

MTSAT は東経 140 度の赤道上 35,800 km の静止軌道に位置しており、観測範囲および衛星天頂角は図 1、

センサ性能は表 1 の通りである。GMS-5 と比較すると空間・波長・時間分解能のいずれの面でもセンサ性能が向上し、空間分解能は可視が 1.25 km から 1.0 km、赤外は 5 km から 4 km となった。また、夜間の薄い上層雲や下層雲の検出に有効とされる IR4 バンドが追加され、量子化ビット数も可視、赤外が 6 bit, 8 bit から両方とも 10 bit に向上した。応答関数についても図 2 に示すように、IR2 のピークは GMS-5 では 11.5 μm 付近であったのが、MTSAT では 12 μm 付近になっており、IR1 と IR2 バンドの分離度が高くなっている。さらに、衛星の姿勢制御も 3 軸制御方式になり、衛星が常に地球の方向を向いているため観測時間分解能も向上し、全球で 1 時間、北半球で 30 分の観測時間分解能を持つ (気象衛星センター, 2000)。本研究では MTSAT の IR1 と IR2 バンドを利用した地表面温度推定手法の検討を行う。

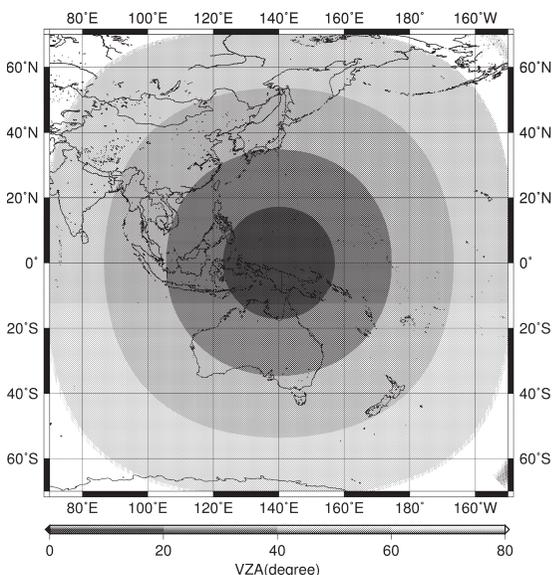


図 1. MTSAT の観測範囲および衛星天頂角

表 1. MTSAT の観測波長帯および空間分解能

Band	Wavelength (μm)	Spatial Res. (km)
VIS	0.55-0.90	1
IR1	10.3-11.3	4
IR2	11.5-12.5	4
IR3	6.5-7.0	4
IR4	3.5-4.0	4

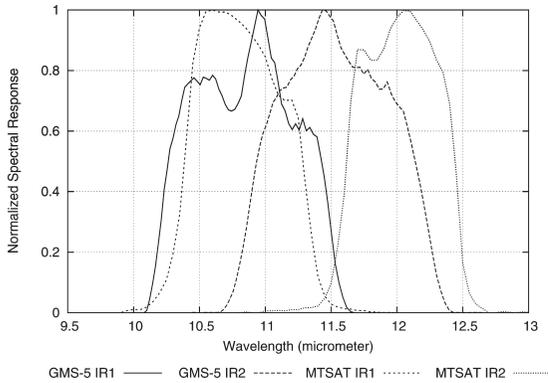


図2. MTSAT および GMS-5 の赤外 1, 2 バンドの応答関数

2.2 split-window 法による地表面温度推定

地表面温度を推定するには地表面とセンサの間に存在する大気の影響を取り除く必要がある。split-window 法では熱赤外 2 バンドの大気の透過率の違いを利用して大気の影響を除去することで地表面温度を推定する。本研究ではこれまでに提案された代表的な split-window 法を MTSAT データに適用した場合の精度を評価する。対象としたアルゴリズムは表 2 の通りである。最も単純な McClain *et al.* (1985) の式は放射率がほぼ一定と考えられる海面温度を対象として考案された。入力パラメータは赤外 2 バンドのみで放射率も水蒸気も必要としないため適用が容易である。Price *et al.* (1984), Ulivieri *et al.* (1994), Wan *et al.* (1996) の式は赤外 2 バンドとそれぞれのバンドの放射率を必要とし、Sobrino *et al.* (2004) の式は放射率に加えて大気中の水蒸気量を必要とする。放射率や水蒸気量を入力パラメータとして利用した方が大気中の放射伝達過程を正確に再現できるために推定精度

は向上すると考えられるが、一般に放射率や水蒸気量は空間的なばらつきが大きく推定が困難であるため、これらに含まれる誤差の影響を評価する必要がある。

2.3 放射伝達モデルによる熱赤外放射のシミュレーション

表 2 の各式から地表面温度を推定するには各係数を推定する必要がある。係数の推定には衛星と同期観測された地上での実測値を用いる手法と放射伝達シミュレーションによって計算される衛星観測値を用いる手法がある。本研究では広範囲に適用可能な汎用的な手法の開発を目的としているため、様々な観測条件下におけるシミュレーションが可能な放射伝達シミュレーションを利用した手法を採用した。

放射伝達シミュレーションには代表的な放射伝達コードである MODTRAN Version 3 Revision 1 (Berk *et al.*, 2003) を使用した。MTSAT の IR1, IR2 バンドの応答関数 (図 2) を利用することで、様々な観測条件において各バンドで観測される放射輝度を計算することができる。MODTRAN の実行条件は表 3 の通りである。本研究では MODTRAN であらかじめ用意されている 5 つの大気モデル (熱帯, 中緯度夏, 中緯度冬, 亜寒帯夏, 亜寒帯冬) を用いて計算を行った。水蒸気量は Ouadrari *et al.* (2002) による NASA DAO の再解析データによる水蒸気量の解析を参考にし、各大気モデルの水蒸気量が飽和しない範囲において 0.50-5.00g/cm² の範囲で計算を行った。放射率は IR1 と IR2 バンドの放射率 (ϵ_1, ϵ_2) についてそれぞれ 0.94-1.00 の範囲で計算を行った。ただし、MTSAT の応答関数と放射率ライブラリ*1を利用して代表的な地表面構成物である植物 (Dry Grass, Leaf of Maple,

表 2. 本研究で対象とした split-window 法

Split-window Algorithms	Authors
$LST = a_1 IR1 + a_2 (IR1 - IR2) + a_3$	McClain <i>et al.</i> , 1985
$LST = (IR1 + a_1 (IR1 - IR2)) \frac{a_2 + \epsilon_1}{a_3} + a_4 IR2 \Delta \epsilon$	Price <i>et al.</i> , 1984
$LST = IR1 + a_1 (IR1 - IR2) + a_2 (1 - \epsilon) + a_3 (\Delta \epsilon)$	Ulivieri <i>et al.</i> , 1994
$LST = \left(a_1 + a_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + a_3 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{IR1 + IR2}{2} + \left(b_1 + b_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + b_3 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{IR1 - IR2}{2} + c$	Wan <i>et al.</i> , 1996
$LST = IR1 + a_1 (IR1 - IR2) + a_2 (IR1 - IR2)^2 + a_3 (1 - \epsilon) + a_4 W (1 - \epsilon) + a_5 \Delta \epsilon + a_6 W \Delta \epsilon + a_0$	Sobrino <i>et al.</i> , 2004

ただし、 LST , $IR1$, $IR2$ はそれぞれ地表面温度 (K), MTSAT の IR1 および IR2 バンドの輝度温度 (K), ϵ_1 , ϵ_2 は IR1 および IR2 の放射率, $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2$, $\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$, a_i , b_i , c は各係数である。

*1 MODIS UCSB Emissivity Library <http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>

Oak, Pine), 水 (Seawater, Distilled Water, Ice Snow), 土壌 (Soil 90P_476S from Nebraska soil lab, Soil Sample 1 from Death Valley, s88p2535 from Salisbury, Soil Sample 1 from Page), 人工構造物 (Asphalt, Cobblestone Pavement, Life Concrete Tile)の放射率を計算したところ、ほぼ1:1の直線上に分布したため(図3), 赤外2バンドの放射率の差($\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$)が $-0.02 \leq \Delta\varepsilon \leq 0.02$ となる範囲でシミュレーションを行った。衛星天頂角は0, 20, 40, 60度, 地表面温度は既往研究を参考にし(Wan *et al.*, 1999, Ouaidrari *et al.*, 2002, Sobrino *et al.*, 2004), 各大気モデルについて大気最下層気温-5Kから+15Kの範囲で計算を行った。

MODTRANによりシミュレートされたMTSATの各バンドの放射輝度は、温度について解いたプランク式(式1)により輝度温度に変換した。

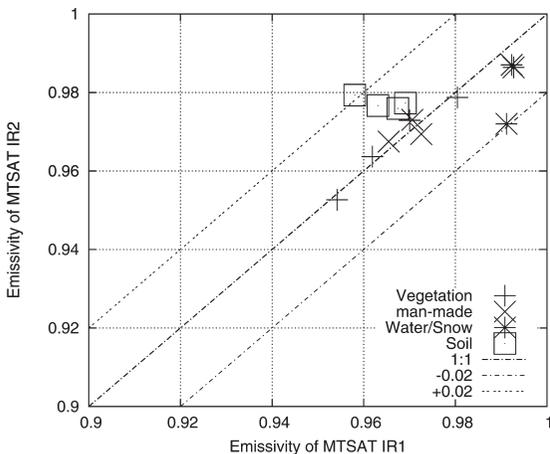


図3. MTSATの赤外1, 2バンドにおける各物質の放射率。1:1線の上下の線はそれぞれ+0.02, -0.02の直線を示している。植物, 人工構造物, 水, 土壌のスペクトルとMTSATの応答関数を利用して計算した

$$BT = \frac{hc/\lambda'k}{\ln\left(\frac{2hc^2}{B_{\lambda'}(T)}\lambda'^5 + 1\right)} \quad (1)$$

ここで, BT は輝度温度(K), h はプランク定数, c は光速, λ' は中心波長(μm), k はボルツマン定数, $B_{\lambda'}(T)$ は黒体温度 T における放射輝度($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)である。なお, 各バンドの中心波長 λ' は, MTSATの応答関数から次式により計算した。

$$\lambda' = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda)\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

ここで, λ_{\min} , λ_{\max} は各バンドの最小, 最大観測波長, $f(\lambda)$ は各バンドの応答関数である。

2.4 split-window 式の評価手法

シミュレーションによって計算された大気上端での輝度温度とシミュレーション条件のデータセットから非線形最小二乗法(ガウス・ニュートン法)によって表2の各式の係数を推定した。そして, 次式の平均二乗誤差(RMSE)を比較することで各split-window式の精度評価を行った。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (LST_{estimate} - LST)^2} \quad (3)$$

ここで, $LST_{estimate}$ はsplit-window式により推定された地表面温度(K), LST は地表面温度(K), n は標本数である。また, 放射率や大気中の水蒸気量に誤差が含まれる場合の推定精度への影響は平均二乗誤差(式3)に加えてバイアス誤差(式4)により評価した。

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (LST_{estimate} - LST) \quad (4)$$

なお, MTSATの観測範囲であるアジア太平洋西側の広範な地域を観測対象とする場合, 衛星天頂角が大きくなる地域も含まれるため, 衛星天頂角に対する頑健性についても検討した。

表3. MODTRANによる放射伝達シミュレーションの実行条件

Parameter	Range	Interval
Atmosphere Model	Tropical, Mid-Latitude Summer/Winter Sub-Arctic Summer/Winter	-
Water Vapor (WV)	0.5-5.0 (g/cm^2)	0.50
Emissivity ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$)	0.94-1.00	0.02
Viewing Zenith Angle (VZA)	0-60 (degree)	20
Land Surface Temperature (LST)	$T_{air} - 5 - T_{air} + 15$ (K)	2

3. 結果および考察

3.1 地表面温度推定精度の評価

表4は各 split-window 式の地表面温度推定誤差を示している。McClain *et al.* の手法は衛星天頂角が60度の時に有意な推定が行えなかったため除外してある。この手法は放射率を一様と仮定できる海面温度を推定するための手法であるため、放射率のばらつきが大きい本研究のような場合への適用は困難であったと考えられる。それ以外の手法についてはいずれも有意水準5%で有意な split-window 式が導出できた。Sobrino *et al.* の手法が最も精度が良く、衛星直下で0.51K、60度で1.34KのRMSEであった。この手法では放射率に加えて水蒸気量も入力パラメータとして用いるために、放射伝達過程をより正確に計算することができ、最も精度が高くなったと考えられる。次に、Wan *et al.* の精度がわずかに良く、衛星直下で0.86K、60度で1.73KのRMSEであった。Ulivieri *et al.*、Price *et al.* についてはほぼ同等で、衛星直下で0.98K、60度で1.87KのRMSEであった。放射率のみを必要とするこれら3つの手法はSobrino *et al.* の手法より精度は劣るものの、地表面温度を推定する際に大気中の水蒸気量が不要であるという利点がある。Sobrino *et al.* とWan *et al.* の手法については衛星天頂角が40度以下であれば1K前後の精度で地表面温度を推定できるが、60度になると推定精度が急激に低下する。衛星天頂角が大きくなると光路長が長くなり、条件によって透過率の減少が大きく異なるために split-window 式による推定誤差が大きくなったと考えられる。

3.2 放射率誤差による影響

次に、放射率誤差の split-window 式への影響を評価した。平均放射率 ϵ もしくは IR1の放射率 ϵ_1 のみ

表4. 衛星天頂角に対する各 split-window 式の地表面温度推定誤差 (K)

Algorithms	VZA			
	0°	20°	40°	60°
Price <i>et al.</i>	0.98	1.03	1.22	1.87
Ulivieri <i>et al.</i>	0.98	1.03	1.22	1.87
Wan <i>et al.</i>	0.86	0.90	1.09	1.73
Sobrino <i>et al.</i>	0.51	0.54	0.70	1.34

に-0.02から0.02までの誤差を与えた時の地表面温度推定誤差を計算した。誤差付与後の放射率が1.00を超えるデータを除き、放射伝達シミュレーションで得られた全てのデータセットを使用した。表5, 6は衛星天頂角が0度と60度の場合におけるRMSEとバイアス誤差を示している。 ϵ と ϵ_1 のどちらに誤差が含まれる場合においてもSobrino *et al.* の手法の精度が最も高く、衛星天頂角が60度で ϵ_1 に ± 0.02 の誤差が含まれる最もRMSEが大きくなる場合で2.7K程度のRMSEであった。 ϵ と ϵ_1 の誤差が大きくなるにつれて、全ての手法とも誤差が大きくなるが、 ϵ_1 に誤差が含まれ $\Delta\epsilon$ が変化すると、いずれの手法においても精度低下が顕著であった。放射率のみを必要とするSobrino *et al.* 以外の3つの手法に関しては、 ϵ に誤差が含まれる場合はWan *et al.* の手法がSobrino *et al.* の手法に次いでRMSEが小さかったが、 ϵ_1 に誤差が含まれ $\Delta\epsilon$ が変化する場合はいずれの衛星天頂角においても誤差が ± 0.01 程度以下でないとPrice *et al.*、Ulivieri *et al.* の手法よりもRMSEが大きくなった。Wan *et al.* の手法は正確な $\Delta\epsilon$ が利用できる場合は精度良く推定することが可能であるが、 $\Delta\epsilon$ の誤差に対しては脆弱であると言える。また、これら3つの手法は、 ϵ_1 に ± 0.02 の誤差が含まれると衛星天頂角が0度の場合には2.5K程度、60度の場合には3K以上の誤差が生じた。バイアス誤差についてはいずれの手法ともRMSEと同様に ϵ と ϵ_1 の誤差に応じて大きくなり精度に大きな影響を与えた。放射率誤差が負の時は正のバイアス誤差が生じており、本来よりも低い放射率を用いると地表面温度を過大推定することになる。

3.3 水蒸気量誤差による影響

ここでは大気中の水蒸気量誤差がSobrino *et al.* の手法に与える影響を評価する。前項と同様のデータセットに対して水蒸気量WVに-2.0から2.0g/cm²の誤差を与え、誤差を与えた後に水蒸気量が0より大きくなるデータのみを対象として誤差の評価を行った。表7は衛星天頂角が0度と60度の場合におけるRMSEとバイアス誤差を示している。衛星天頂角が0度と60度の場合について、水蒸気誤差の絶対値が大きくなるにつれてそれぞれRMSEが0.51Kから0.95K、1.34Kから1.56Kまで大きくなった。バイアス誤差の絶対値も同様に大きくなる傾向が見られたが、0度と60度の場合について符号が反対となっている。これは

表 5 . 放射率誤差を与えた場合の地表面温度推定誤差 (K) (VZA=0°)

Algorithms		Emissivity Error				
		-0.02	-0.01	0.00	0.01	0.02
<i>Price et al.</i>						
ϵ	RMSE	1.35	1.08	0.98	1.07	1.34
	Bias	0.93	0.47	0.00	-0.47	-0.93
ϵ_1	RMSE	2.48	1.50	0.98	1.49	2.48
	Bias	2.28	1.14	0.00	-1.14	-2.28
<i>Ulivieri et al.</i>						
ϵ	RMSE	1.38	1.08	0.98	1.09	1.40
	Bias	0.97	0.46	-0.04	-0.51	-1.01
ϵ_1	RMSE	2.53	1.51	0.98	1.55	2.58
	Bias	2.33	1.15	-0.04	-1.20	-2.39
<i>Wan et al.</i>						
ϵ	RMSE	1.30	0.98	0.86	0.98	1.28
	Bias	0.97	0.48	0.00	-0.49	-0.96
ϵ_1	RMSE	2.67	1.52	0.86	1.54	2.67
	Bias	2.43	1.20	0.00	-1.24	-2.44
<i>Sobrino et al.</i>						
ϵ	RMSE	1.10	0.70	0.51	0.69	1.10
	Bias	0.97	0.48	0.00	-0.49	-0.97
ϵ_1	RMSE	2.44	1.30	0.51	1.28	2.42
	Bias	2.27	1.13	0.00	-1.13	-2.27

表 6 . 放射率誤差を与えた場合の地表面温度推定誤差 (K) (VZA=60°)

Algorithms		Emissivity Error				
		-0.02	-0.01	0.00	0.01	0.02
<i>Price et al.</i>						
ϵ	RMSE	2.07	1.92	1.87	1.87	2.03
	Bias	0.90	0.45	0.00	-0.45	-0.90
ϵ_1	RMSE	3.09	2.24	1.87	2.20	3.06
	Bias	2.45	1.22	0.00	-1.23	-2.45
<i>Ulivieri et al.</i>						
ϵ	RMSE	2.09	1.92	1.87	1.89	2.08
	Bias	0.95	0.45	-0.05	-0.51	-1.01
ϵ_1	RMSE	3.12	2.23	1.87	2.25	3.16
	Bias	2.50	1.22	-0.05	-1.30	-2.57
<i>Wan et al.</i>						
ϵ	RMSE	1.98	1.80	1.73	1.75	1.93
	Bias	0.94	0.47	0.00	-0.48	-0.94
ϵ_1	RMSE	3.30	2.22	1.73	2.22	3.29
	Bias	2.62	1.30	0.00	-1.34	-2.64
<i>Sobrino et al.</i>						
ϵ	RMSE	1.63	1.42	1.34	1.36	1.59
	Bias	0.94	0.47	0.00	-0.48	-0.95
ϵ_1	RMSE	2.69	1.79	1.34	1.70	2.60
	Bias	2.18	1.09	0.00	-1.09	-2.18

表7. Sobrino et al. (2004) の手法に水蒸気量誤差を与えた場合の地表面温度推定誤差 (K)

VZA	Water Vapor Error (g/cm ²)					
	-2.0	-1.0	0.00	1.0	2.0	
0°	RMSE	0.95	0.64	0.51	0.64	0.95
	Bias	0.30	0.15	0.00	-0.15	-0.30
60°	RMSE	1.56	1.40	1.34	1.40	1.56
	Bias	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10

split-window 式の水蒸気が含まれる項の符号が0度と60度の場合において逆になったためである。また、衛星天頂角が60度の方がバイアス誤差が小さくなっているが、大気中を通過する距離が長いために推定式自体のばらつきが大きくなり、水蒸気誤差によるバイアス誤差への影響が相対的に小さくなっていると考えられる。

衛星直下の場合、放射率のみを必要とする Wan et al. の手法の精度が0.86K (表5) であることを考慮すると、水蒸気量誤差が2.0g/cm²となると Sobrino et al. の手法よりも Wan et al. の手法の方が誤差が小さくなる。しかしながら、衛星天頂角が60度の場合、水蒸気量誤差が2.0g/cm²であっても Sobrino et al. の手法はより高精度で地表面温度を推定すること可能であった。

3.4 MTSAT に適した手法の検討

以上をまとめると、放射率や水蒸気量が誤差が含まれる場合であっても衛星天頂角が60度の場合 Sobrino et al. の手法が最も高精度で地表面温度を推定することができた。衛星天頂角が0度の場合においても水蒸気量誤差が1.0g/cm²程度であれば Sobrino et al. の手法の方が精度が高くなる。したがって、誤差が1.0g/cm²程度の水蒸気量分布図が利用可能であれば、いずれの場合においても Sobrino et al. の手法が最も精度良く地表面温度を推定できる。衛星データによる水蒸気量推定については、NOAA AVHRR の熱赤外2バンドを利用することで1.0g/cm²以下の精度で日本周辺の水蒸気量分布図が作成できることが報告されている (赤塚ら, 2008)。しかしながら、MTSAT の観測範囲であるアジア太平洋の西側領域全体を網羅した毎時の水蒸気量データベースは存在しないため、Sobrino et al. の手法を適用するには独自にデータベ

スを構築する必要がある。一方、放射率のみを利用する手法としては、放射率(ϵ_1) 誤差が ± 0.01 よりも小さい場合は Wan et al. の手法が最も精度良く推定できた。したがって、水蒸気量分布図および放射率分布図の有無と精度に応じて split-window 式を選択すべきである。

本研究で行ったシミュレーション条件の範囲では放射率および水蒸気量に誤差が含まれない場合、衛星天頂角が40度以下であると地表面温度の推定精度は Sobrino et al. の手法では0.70K, Wan et al. の手法でも1.00K 程度であった。これは地表付近のエネルギー循環に関する評価をはじめとして様々な応用分野で利用するために十分な精度であると考えられる (Wan et al., 1996, Sobrino et al., 2004)。本研究では衛星天頂角による依存性を考慮して衛星天頂角ごとに split-window 式の係数を求めたが、地表面温度推定の精度をより向上させるためには、さらに放射率や水蒸気量、大気モデルに応じて split-window 式の係数を導出することが考えられる。実際、MODIS の LST プロダクト (MOD11) では大気中の気温や水蒸気量のプロファイルごとに split-window 式の係数の Look-Up Table (LUT) を作成し、LST の推定誤差を軽減している (Wan et al., 1999)。しかしながら、このような LUT を利用した地表面温度推定手法を実現するためには、MTSAT もしくは他の補助的なデータを利用することにより、大気中の気温や水蒸気量のプロファイルを毎時かつ広域にわたって推定する必要がある。

4. 結 論

本研究では MTSAT の熱赤外バンドから高時間分解能の地表面温度データを作成することを目的とし、MTSAT データに各 split-window 手法を適用した場合の精度評価を放射伝達シミュレーションを利用して行った。MTSAT は静止軌道に位置し観測範囲が広いために衛星天頂角が常に大きくなる地域が必然的に含まれる。光路長が長くなると水蒸気量誤差や放射率誤差の影響を強く受けるため、これらの影響を考慮して各式を評価する必要がある。その結果、地表面温度推定に放射率と水蒸気量を必要とする Sobrino et al. の手法が最も精度が高く、次に放射率のみを必要とする Wan et al. の精度が高かった。観測角が40度以下で放射率および大気中の水蒸気量に誤差がない場合、So-

brino *et al.* の手法であると0.70K, Wan *et al.* の手法では1.09Kの精度で地表面温度を推定することができたため, 地表付近のエネルギー循環に関する研究やその他の様々な応用分野への利用が期待できる。地表面放射率や大気中の水蒸気量に誤差が含まれる場合においても Sobrino *et al.* の手法がより精度良く地表面温度を推定することができたが, 実用上は毎時の水蒸気量分布図が利用可能であるかを考慮する必要がある。また, Wan *et al.* の手法についても放射率誤差に対して脆弱であったため, 精度の高い放射率分布図が利用可能であるかを考慮する必要がある。

本研究は放射伝達シミュレーション結果により評価を行っているため, 今後は本研究の結果を MTSAT の実データに適用し, 他の地表面温度プロダクトとの相互評価や地上観測値による精度評価を行う予定である。実データへの適用のためには放射率分布図や大気中の水蒸気量分布図が必要であり, 両者とも時間変動を有するためにこれらのデータ構築手法を開発することが今後の課題である。特に水蒸気量は時間変動の大きいパラメータであるため, MTSAT の観測頻度と同等の毎時のデータセットが必要となる。

(受付日2010.2.26, 受理日2010.7.9)

謝 辞

本研究は文部科学省によるグローバル COE プログラム「アジア・メガシティの人間安全保障工学拠点」(代表: 松岡 譲京都大学教授)の一環として行われたものである。ここで改めて関係各位に深謝する。

参考文献

Berk, A., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Hoke, M. L., Chetwynd, J.H., Bernstein, L.S., Shettle, E.P., Matthew, M.W. and Alder-Golden, S.M., 2003. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's Manual. Air Force Research Laboratory.

Fensholt, R., Sandholt, I., Stisen, S. and Tucker, C., 2006. Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteorological second generation SEVIRI sensor. *Remote Sensing of Environment*, 101, pp.212-229.

Liang, S., 2004. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. Wiley-Interscience, pp.366-368.

McClain, E.P., Pichel, W.G. and Walton, C.C., 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6), pp.11,587-11,601.

Oku, U. and Ishikawa, H., 2004. Estimation of land surface temperature over the Tibetan Plateau using GMS data. *Journal Applied Meteorology*, 43, pp.548-561.

Ouaidrari, H., Goward, S.N., Czajkowski, K.P, Sobrino, J.A. and Vermote E., 2002. Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements An assessment for the AVHRR Land Pathfinder II data set. *Remote sensing of Environment*, 81, pp.114-128.

Prata, A.J. and Cechet, R.P. 1999. An assessment of the accuracy of land surface temperature determination from the GMS-5 VISSR. *Remote sensing of Environment*, 67, pp.1-14.

Price, J.C., 1984. Land surface measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 89(D5), pp.231-7237.

Running, S.W., Justice, C.O., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufmann, Y.J., Strahler, A.H., Huete, A.R., Muller, J.P., Vanderbilt, V., Wan, Z. M., Teillet, P. and Carneggie, D., 1994. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International Journal of Remote sensing*, 15(17), pp.3587-3620.

Sobrino, J.A. and Romaguera, M., 2004. Land surface temperature retrieval from MSG1-SEVIRI data. *Remote sensing of Environment*, 92, pp.247-254.

Ulivieri, C., Castronuovo, M., Francioni, R. and Cardillo, A., 1994. A split window algorithm for estimating land surface temperature from space. *Advances in Space Research*, 14(3), pp.59-65.

Wan, Z. and Dozier, J., 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 34(4), pp.892-905.

Wan, Z., 1999. MODIS Land-surface Temperature

- Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) Version 3.3.
- Wildt, M., Seiz, G. and Gruen, A., 2007. Operational snow mapping using multitemporal Meteosat SEVIRI imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109, pp.29-41.
- 赤塚 慎, 大吉 慶, 竹内 渉, 沢田治雄, 安岡善文, 2008. NOAA AVHRR を用いた日本の陸域可降水量分布図の作成. *写真測量とリモートセンシング*, 47(4), pp.29-41.
- 宇宙開発戦略本部, 2009. 宇宙基本計画, pp.18.
- 気象衛星センター編, 2000. 気象衛星画像の解析と利用, 気象業務支援センター, pp. 4 - 5.
- 竹内 渉, 根本利弘, 金子隆之, 安岡善文, 2007. 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.