

ひまわり 8 号データを用いた地表面温度算出式の検討

Consideration of Land Surface Temperature Calculation Formula Using Himawari-8

山本雄平・石川裕彦

Yuhei YAMAMOTO and Hirohiko ISHIKAWA

Synopsis

The purpose of this study is development of estimation method of the land surface temperature (LST) from Himawari-8 data. By utilizing the feature that Advanced Himawari Imager (AHI) onboard Himawari-8 has three thermal infrared (TIR) bands in 10-12.5 μm , we developed the non-linear three-band algorithm that can calculate LST using three TIR bands. we verified satellite zenith angle dependence and land surface emissivity dependence of estimation accuracy by using AHI observation data which were simulated by Rstar6b. As a result, it was shown that the non-linear three-band algorithm can calculate LST accurately with RMSE lower than 1.5 K for satellite zenith angle lower than 60° . Moreover, the result showed that this estimation accuracy is better than that of the non-linear split-window algorithm that was applied to the Meteosat Second Generation (MSG), the Multifunction Transport Satellite (MTSAT) and any other satellites.

キーワード： ひまわり 8 号，地表面温度，衛星リモートセンシング，放射

Keyword: Himawari-8, Land surface temperature, Satellite Remote Sensing, Radiation

1. はじめに

地表面温度は局所的なものから地球規模まで，様々なスケールにおける大気陸面相互作用のキーパラメータである．森林伐採や都市化による土地被覆変化は地表面温度の変化をもたらし，それが地表面フラックスの変化を介して砂漠化やヒートアイランド現象といった環境問題へ繋がっていく．このため，地表面温度の変化を把握することは重要である．地表面温度の観測方法は主に放射温度計を用いた地上観測と，赤外センサを搭載した人工衛星や航空機による観測に大別される．人工衛星観測や航空機観測は広域にわたって均質な精度の地表面温度データを得られることから，これらの地表面温度データは乾燥地帯における植生分布状況の調査や都市気候研究で用いられてきた (Sobrino

and Raissouni, 2000; Oku et al., 2007; Weng, 2009)．衛星の赤外センサを用いた地表面温度算出法は，これまでに the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS), the Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), the FengYun meteorological satellite instruments, the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) imager and Japanese Advanced Meteorological Imager (JAMI) のデータを用いた様々な手法が提案されている (Wan, 2014; Sobrino and Raissouni, 2000; Rozenstein et al., 2014; Akiter and Sobrino, 2009; Tang et al., 2008; Sun and Pinker, 2003; Takeuchi et al., 2012) ．

2014 年 10 月 7 日に打ち上げられた静止気象衛星 ひまわり 8 号は、2015 年 7 月 7 日より MTAT-2 (ひまわり 7 号) の後継機として運用が開始された。東経 140.7°の赤道上空 35786km の静止軌道に位置し、可視赤外放射計 AHI (Advanced Himawari Imager; 以下、AHI) を搭載している。AHI の有する波長帯は可視 3 バンド (0.47, 0.51, 0.64 μm)・赤外 13 バンド (0.86, 1.61, 2.25, 3.9, 6.2, 6.9, 7.3, 8.6, 9.6, 10.4, 11.2, 12.4, 13.3 μm) であり、MTSAT-2 に搭載されている JAMI に比べて可視で 2 バンド、赤外で 9 バンドが追加された。衛星直下点における水平分解能は可視 (Band 03) が 0.5 km、可視 (Band 1,2) と近赤外 (Band 4) が 1.0 km、赤外 12 バンド (Band 5~16) が 2.0 km であり、時間分解能は日本域観測で 2.5 分、全球観測で 10 分である。このように観測の時空間分解機能も MTSAT-2 より改善されており、現状、静止気象衛星の中で最も高精度な観測機能を有する物の一つとなっている。Himawari-8 による地表面温度観測が実現することで、従来困難であった都市域などの小スケール高頻度モニタリングが可能になると期待できる。

本研究ではひまわり 8 号に新たに追加された波長帯を有効に活用し、センサに最適な地表面温度算出式を考案することを目的とする。第 2 章では、地表面温度算出方法の基礎理論と比較検証を行う地表面温度算出式について述べる。第 3 章では、地表面温度算出式の精度検証に用いた放射伝達モデル Rstar6b のシミュレーション設定と精度検証方法について述べる。第 4 章では精度検証結果と最終的に選定された地表面温度算出式について述べる。

2. 地表面温度算出式

地表面と大気が局所熱力学平衡にあり、地表面—センサ間に雲が存在しない場合を仮定したとき、バンド i が観測する放射量 I_i は以下の放射伝達方程式で表される (例えば Li et al., 2013)。

$$I_i(\theta, \varphi) = R_i(\theta, \varphi)\tau_i(\theta, \varphi) + R_{at\uparrow}(\theta, \varphi) + R_{sl\uparrow}(\theta, \varphi) \quad (2.1)$$

ここで、 θ, φ はそれぞれ衛星天頂角、方位角である。 R_i は地表面からの放射量、 τ は地表面—センサ間の透過率である。右辺第一項は大気による減衰を受けた地表面からの放射量、第二項の $R_{at\uparrow}$ は大気からの上向き放射量、第三項の $R_{sl\uparrow}$ は大気による散乱を受けた太陽光の上向き放射量である。さらに、地表面からの放射量 R_i は 4 つの放射成分の総和、

$$R_i(\theta, \varphi) = \varepsilon_i(\theta, \varphi)B_i(T_s) + [1 - \varepsilon_i(\theta, \varphi)]R_{at\downarrow} + [1 - \varepsilon_i(\theta, \varphi)]R_{sl\downarrow} + \rho_{bi}(\theta, \varphi, \theta_s, \varphi_s)E_i \cos(\theta_s)\tau_i(\theta_s, \varphi_s) \quad (2.2)$$

で表される。 ε_i は地表面射出率、 T_s は地表面温度、 $B_i(T_s)$ は地表面温度 T_s におけるプランク関数である。右辺第一項は地表面からの直接的な放射量、第二項は大気の下向き放射量の反射成分、第三項は大気による散乱を受けた太陽光の下向き放射量の反射成分、第四項は太陽の直達光の反射成分である。

熱赤外域のような太陽放射の影響を受けない波長域の放射伝達方程式は、式 (2.1), (2.2) から太陽放射に関する項を除外し

$$I_{i\theta} = B_i(T_i) = \varepsilon_{i\theta}B_i(T_{sfc})\tau_{i\theta} + R_{at\theta\uparrow} + R_{refi}\tau_{i\theta} \quad (2.3)$$

となる。 T_i はバンド i で観測される輝度温度である。

R_{refi} は、

$$R_{refi} = [1 - \varepsilon_i(\theta, \varphi)]R_{at\downarrow} \quad (2.4)$$

と表される。式 (2.3) における τ , $R_{at\uparrow}$, $R_{at\downarrow}$ は大気分子の量により変動するパラメータである。つまり、大気による減衰・散乱・放射の影響と地表面射出率が既知であれば、バンド i で観測される放射量から地表面温度を推定することが可能である。

しかしながら、1 バンドのみの放射伝達方程式から大気による放射減衰の影響を推定することは困難である。そのため、熱赤外域における 2 バンドの輝度温度

差によって放射減衰の影響を考慮する Linear split-window algorithm が多くの研究で用いられてきた (Sobrino et al., 1996; Wan and Dozier, 1996). Linear split-window algorithm による推定式は以下のように表される.

$$T_{sfc} = a_0 + a_1 T_i + a_2 (T_i - T_j) \quad (2.5)$$

T_{sfc} は地表面温度, T_i, T_j は 10~12.5 μm の波長域にある 2 つのバンドの輝度温度である. 10~12.5 μm の波長域は地表面射出率の変化が小さく, 放射減衰の影響を及ぼす大気はほぼ水蒸気のみである. このため, $a_k (k = 0, 1, 2)$ はバンド i, j の応答関数 g_i, g_j , 地表面射出率 $\varepsilon_i, \varepsilon_j$, 水蒸気量 WV , 衛星天頂角 VZA に依存する値で,

$$a_k = f_k(g_i, g_j, \varepsilon_i, \varepsilon_j, WV, VZA) \quad (2.6)$$

と表すことができる. しかし, 式 (2.5) による地表面温度推定は, 水蒸気量の多い環境下で大きな誤差が生じてしまう (Li et al., 2013). そこで放射減衰の影響をより正確に考慮するため, 式 (2.5) に二次の項を加えた Non-linear split-window algorithm が提案された (Sobrino and Raissouni, 2000; Wan, 2014). 推定式は

$$T_{sfc} = b_0 + b_1 T_i + b_2 (T_i - T_j) + b_3 (T_i - T_j)^2 \quad (2.7)$$

となる. $b_k (k = 0, 1, 2)$ は式 (2.5) と同様にバンド i, j の応答関数 g_i, g_j , 地表面射出率 $\varepsilon_i, \varepsilon_j$, 水蒸気量, 衛星天頂角の関数として表される. さらに, 静止軌道衛星の The Meteosat Second Generation (MSG) や Multifunction Transport Satellite (MTSAT) データを用いた地表面温度算出では, Sobrino and Raissouni (2000) が提案した, b_k に地表面射出率, 可降水量, 衛星天頂角を考慮した以下の式

$$T_{sfc} = T_i + c_1 (T_i - T_j) + c_2 (T_i - T_j)^2 + c_3 (1 - \varepsilon) + c_4 \Delta\varepsilon + c_5 W(1 - \varepsilon) + c_6 W\Delta\varepsilon + c_7 \quad (2.8)$$

が適用されている (Akiter and Sobrino, 2009; Takeuchi et al., 2012). 上式の W は可降水量 (g/cm^2), $\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j$ である.

Sun and Pinker (2003) は GOES の近赤外 (3.9 μm) と赤外 2 バンド (11.0, 12.0 μm) を用いた, 夜間にのみ適用可能な Three-channel algorithm

$$T_{sfc} = d_0 + \left(d_1 + d_2 \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right) T_i + \left(d_3 + d_4 \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j}\right) T_j + \left(d_5 + d_6 \frac{1 - \varepsilon_{i1}}{\varepsilon_{i1}}\right) T_{i1} \quad (2.9)$$

を提案し, Linear split-window algorithm (Becker and Li, 1990; Wan and Dozier, 1996) よりも正確な大気減衰量の推定を可能にした.

さて, ひまわり 8 号のセンサ AHI は 10~12.5 μm の波長域で 3 バンドを有している (Fig. 1) ため, 式 (2.8) と式 (2.9) はともに適用可能である. また本研究では, より正確に放射減衰の影響を考慮するため, ひまわり 8 号の熱赤外 3 バンド全てを用いた以下の Non-linear three-band algorithm を新たに提案した.

$$T_{sfc} = e_0 + \left(e_1 + e_2 \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right) T_i + \left(e_3 + e_4 \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j}\right) T_j + \left(e_5 + e_6 \frac{1 - \varepsilon_{i1}}{\varepsilon_{i1}}\right) T_{i1} + e_7 (T_i - T_j)^2 \quad (2.10)$$

上式は, 式 (2.9) にスプリットウィンドウ 2 次の項を考慮した形となっている. 本研究では式 (2.8), (2.9), (2.10) で精度比較を行い, 最も地表面温度推定精度が優れているバンドの組み合わせを選定した. この選定にあたって, 式 (2.9) は中心波長が 3.9 μm の近赤外輝度温度を用いた手法であるが, 本研究では昼夜ともに適用可能な算出式の選定を目的として熱赤外 3 バンドを適用した.

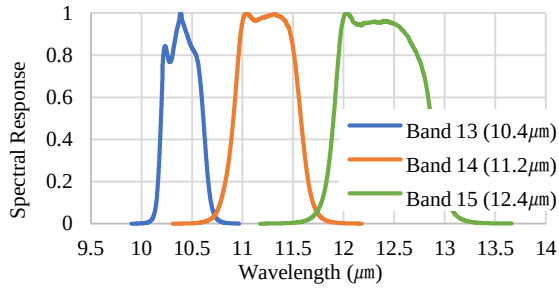


Fig. 1 Spectral response of AHI bands in 10~12.5 μm

3. AHI 熱赤外バンドのシミュレーション

上述の式 (2.8), (2.9), (2.10)の係数は、様々な地表面・大気の状態における輝度温度観測値から経験的に得られるものである。本研究では放射伝達モデル Rstar6b を用いて、様々な地表面・大気の状態において、境界条件として与える地表面温度と AHI で観測されるはずの輝度温度値の対を計算し、得られたデータセットに最適フィットするように式 (2.8), (2.9), (2.10)の係数を求めた。Rstar6b は Nakajima and Tanaka (1986,1988)の理論に基づき構築されたモデルで、太陽入射角や衛星天頂角、衛星の応答関数、地表面状態、大気分子量のプロファイルについて自由に設定でき、それらの設定情報をもとに各層の放射フラックスや放射輝度を計算することができる。本研究の実験設定を Table 1 に示す。センサーの応答関数は Fig. 1 で示した AHI の 3 バンド (Band 13,14,15)を用いた。衛星天頂角は $0\sim 70^\circ$ の範囲で 10° 毎に計算を行った。また、様々な気候の特徴をもつ地域を対象とした観測を想定し、6 つのモデル大気 (熱帯、中緯度夏季/冬季、高緯度夏季/冬季、米国標準

大気) を用いた。水蒸気量は各モデル大気の水蒸気プロファイルが飽和しないように 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 の倍率をかけて変化させ、30 種の水蒸気プロファイルを作成した。Fig. 2 にこれらの水蒸気プロファイルを示す。地表面温度は各モデル大気の下層温度 $T_0 - 5\text{K}$ から $T_0 + 25\text{K}$ まで 1K 間隔で 31 パターンを設定した。地表面温度の設定は計算コードの都合上、各モデル大気の下層温度を地表面温度とした。地表面射出率は MODIS UCSB Emissivity Library (<http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>)で公開されている 90 種類の地表面サンプル (土壌サンプル 70 種類、人工素材 13 種類、植生 1 種類、水 1 種類、氷 1 種類、雪 4 種類)の射出率データを用いて、AHI の Band 13, 14, 15 それぞれの平均射出率 ε_λ を

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\int \varepsilon_M(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{i=0}^k (S_i \varepsilon_i + S_{i+1} \varepsilon_{i+1}) \Delta\lambda}{\sum_{i=0}^k (S_i + S_{i+1}) \Delta\lambda} \quad (3.1)$$

として算出して設定した (Tahara, 2008)。 ε_i は物質の波長 $i\mu\text{m}$ における射出率、 S_i は波長 $i\mu\text{m}$ におけるセンサー応答関数である。Fig. 3 に 90 種類の地表面サンプルを平均した Band 13, 14, 15 それぞれの平均射出率を示す。また氷と雪の射出率に関しては、地表面温度が 273K 以下の場合にのみ適用し、計算を行った。以上の設定より、本研究では合計 79725 パターンの地表面・大気状態を仮定し、それらの状況下における Band 13,

Table 1 Simulation setting of AHI using Rstar6b

Run No.	1	2	3
Spectral response	Himawari-8 band 13	Himawari-8 band 14	Himawari-8 band 15
Satellite zenith angle	$0 \sim 70^\circ$ (8 angles)		
Land surface type	Lambertian surface		
Vertical layer	45 layers from land surface to altitude of 100 km		
Model atmosphere	Tropical, mid-latitude summer/winter, high-latitude summer/winter, US standard atmosphere		
Emissivity	90 emissivity spectra (70 soil, 13 manmade materials, 1 vegetation, 1 water, 1 ice, 4 snow)		
Land surface temperature	Temperature of the bottom layer $T_0 - 5\text{K} \sim +25\text{K}$ (31 LSTs)		
Water vapor	Water vapor profile of each model atmosphere $\times 0.8 \sim \times 1.2$ (5 water vapor profiles)		

14, 15の輝度温度観測値をシミュレートした。その後、シミュレーションによって得られた各波長の輝度温度を式 (2.8), (2.9), (2.10) に代入し、算出された地表面温度推定値がシミュレーションの入力値として仮定した地表面温度を最小誤差で近似できるようにレーベンバーグ・マーカート法によって係数を推定した。

各地表面温度算出式の係数を推定後、再び同様のシミュレーション設定によって得られたデータセットを用いて各算出式の精度検証を行った。この際の地表面温度の真値もシミュレーションの入力値として仮定した地表面温度とした。また式 (2.8) と式 (2.10) の非線形項に関しては、AHI の3バンドのうち最適な2バンドの組み合わせを選定する必要がある。したがって本研究ではこの検討も比較検証によって行った。

4. 結果

4.1 Non-linear three-band algorithm の改良

Fig. 4 は地表面温度算出式 (2.8), (2.9), (2.10) の衛星天頂角に対する RMSE の変化を表したもので、非線形

項を構成する波長の選び方により式 (2.8)と式 (2.10) に対応する曲線は3本描いてある。Fig. 4 より、衛星天頂角が $0\sim35^\circ$ あたりまでは、非線形項を Band 13 と Band 15 の差で表現した2波長スキームが最も精度良く地表面温度を表現するが、天頂角がそれよりも大きくなると式 (2.10)で非線形項に Band 13 と Band 14 の組み合わせを用いた3波長型の算出式 (赤の実線) が最も RMSE が小さい。さらに3波長型の算出式は衛星天頂角が 70° であっても RMSE が 1.5K 未満と安定している。式 (2.10)の非線形3波長スキームはいずれの場合も Three-band algorithm (紫の実線) より推定精度が高く、非線形項を加えたことの有効性が確認できる。

Fig. 5 は、非線形項に Band 13, 14 の組み合わせをもつ式 (2.10)と Band 13, 15 を用いた式(2.9)の、衛星天頂角 0° における地表面温度の推定値と真値の関係を示したものである。Fig. 5 より、Non-linear three-band algorithm は低温域で特に Non-linear split-window algorithm よりも推定精度が低くなっていることが分かる。この低温域での精度低下は、Three-band algorithm でもみられることが Sun and Pinker (2003)で指摘されている。

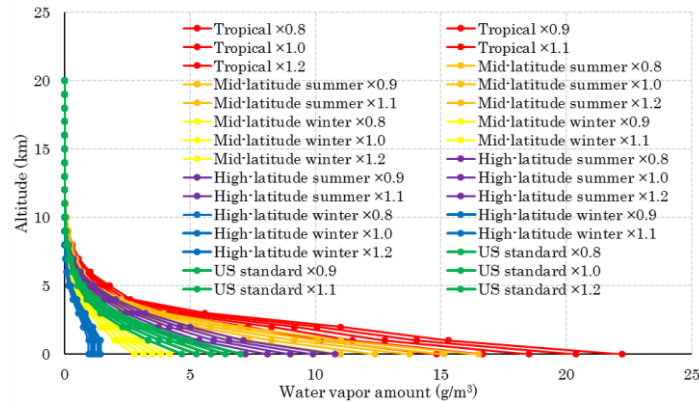


Fig. 2 Water vapor profiles for six model atmospheres.

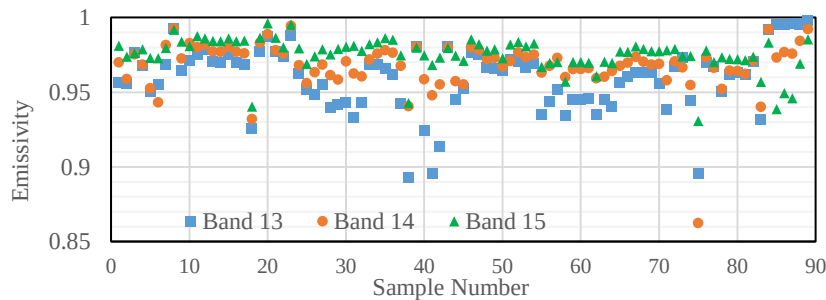


Fig. 3 Emissivity values of three AHI bands (13, 14 and 15) derived from 90 materials.

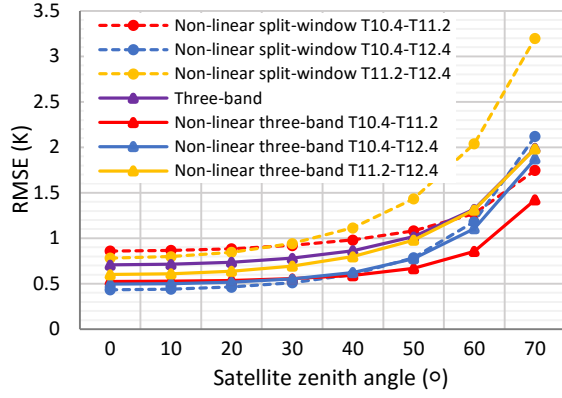


Fig. 4 RMSEs (K) of 7 LST algorithms for 8 satellite zenith angles.

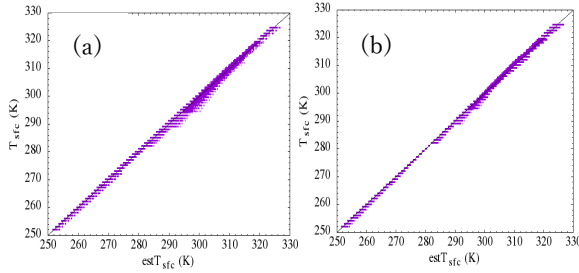


Fig. 5 Results of estimation from simulation data at satellite zenith angle of 0°. (a) non-linear three-band algorithm including quadratic term of band 13 and 14, (b) non-linear split-window algorithm using band 13 and 15

Sun and Pinker (2003)は、Three-band algorithm と Linear split-window algorithm との精度比較を行い、Three-band algorithm が地表面温度 285K 以下で推定精度が悪くなることを示し、中心波長が 11 μm の輝度温度 280K を閾

値として 2 つのカテゴリに分けて地表面温度算出式の係数を設定することで低温域の推定精度を向上させている。そこで本研究でも、Non-linear three-band algorithm に同様の閾値を設定することで推定精度の向上が見込めると考え、Band 13 が観測する輝度温度($T_{10.4}$)を閾値として用いた場合の精度評価を行った。ただし、本研究で使用するセンサや波長帯は Sun and Pinker (2003)の手法とは異なるため、閾値 $T_{10.4}$ を 270 K から 300 K までの範囲で 5 K ごとに変化させていき、7 パターンの推定精度を比較することで最適な閾値の大きさを調べた。Fig. 6 は各閾値における衛星天頂角毎の RMSE の変化を示したものである。Fig.6 より、非線形項に Band 13 と Band 14 の組み合わせを用いた算出式が最も推定精度が良く、さらにその算出式において閾値 $T_{10.4} = 290 \text{ K}$ としたときに最も推定精度が安定することが分かった。このときの RMSE は、Fig. 4 における赤の実線との比較から、衛星天頂角 0°で約 0.5 K から約 0.45 K、衛星天頂角 70°で約 1.4 K から約 1.2 K に向上していることが分かる。また Fig. 7 は、 $T_{10.4} = 290\text{K}$ を閾値としたときの衛星天頂角 0°における地表面温度の推定値と真値との関係を示したものである。Fig. 7 と Fig. 5 (a)との比較から、低温域の推定精度の改善がみられ、閾値を用いて 2 つの算出式の係数を設定することの有効性が示された。

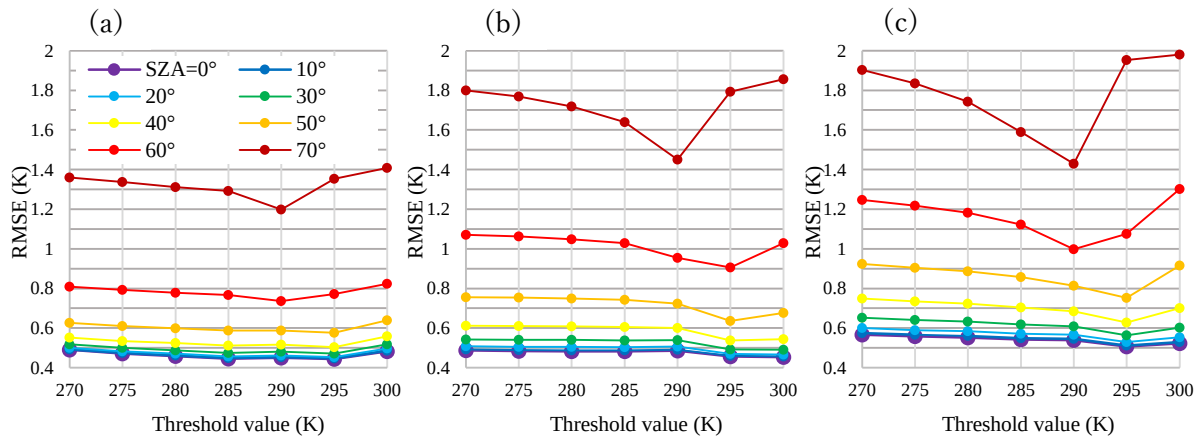


Fig. 6 RMSEs (K) of eq. (2.10) for 7 thresholds and for 8 satellite zenith angles.

(a) quadratic term of $T_{10.4} - T_{11.2}$, (b) quadratic term of $T_{10.4} - T_{12.4}$, (c) quadratic term of $T_{11.2} - T_{12.4}$

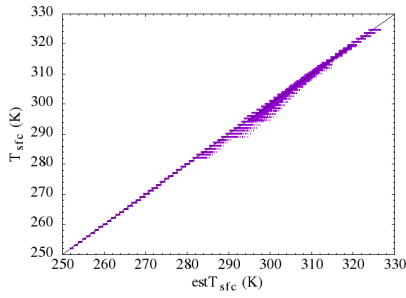
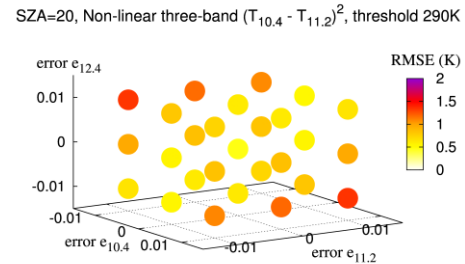
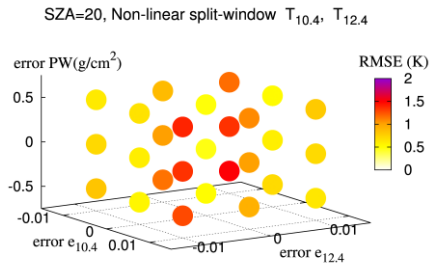
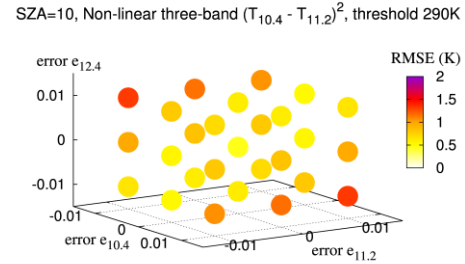
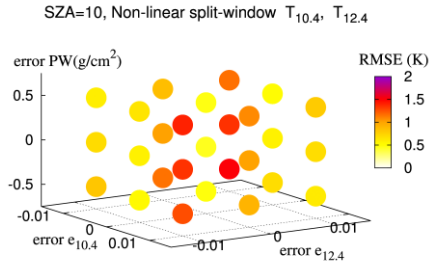
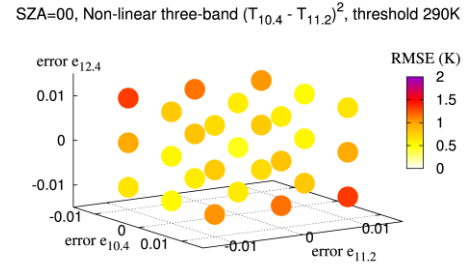
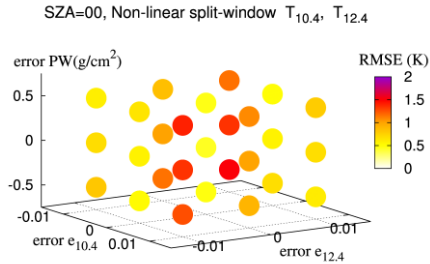


Fig. 7 Results of estimation of the non-linear three-band algorithm including quadratic term of band 13 and 14 with threshold of 290 K at satellite zenith angle of 0°

4.2 感度解析

以上の結果より，地表面温度算出式の入力データに誤差がない場合には，式 (2.10) の非線形項に Band 13,14 の組み合わせを使用し， $T_{10.4} = 290 \text{ K}$ として 2 つの係数を設定する手法が最も推定精度が高いことが示

された．しかし，実際に式 (2.10) を用いて地表面温度観測を行う際には，既知情報として与える地表面射出率に誤差が含まれ得るため，これによる推定精度の変動も見積もっておく必要がある．そこで本研究では，式 (2.8) と式 (2.10) でそれぞれ最も精度の良かったバンドの組み合わせを用いた手法に対し，地表面射出率 $\epsilon_\lambda \pm 0.01$ と可降水量 $PW \pm 0.5 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ のゆらぎを与えた時の算出結果のばらつきを調べた．Fig. 8 は式 (2.8) と式 (2.10) のそれぞれについて入力データのゆらぎに伴う算出結果の RMSE 分布を衛星天頂角別に示したものである．式 (2.8) に関しては Band 13, 15 の組み合わせを用いた手法の，式 (2.10) に関しては非線形項に Band 13, 14 の組み合わせを使用し， $T_{10.4} = 290\text{K}$ を閾値として 2 つの係数を設定した手法の精度評価を行っている．



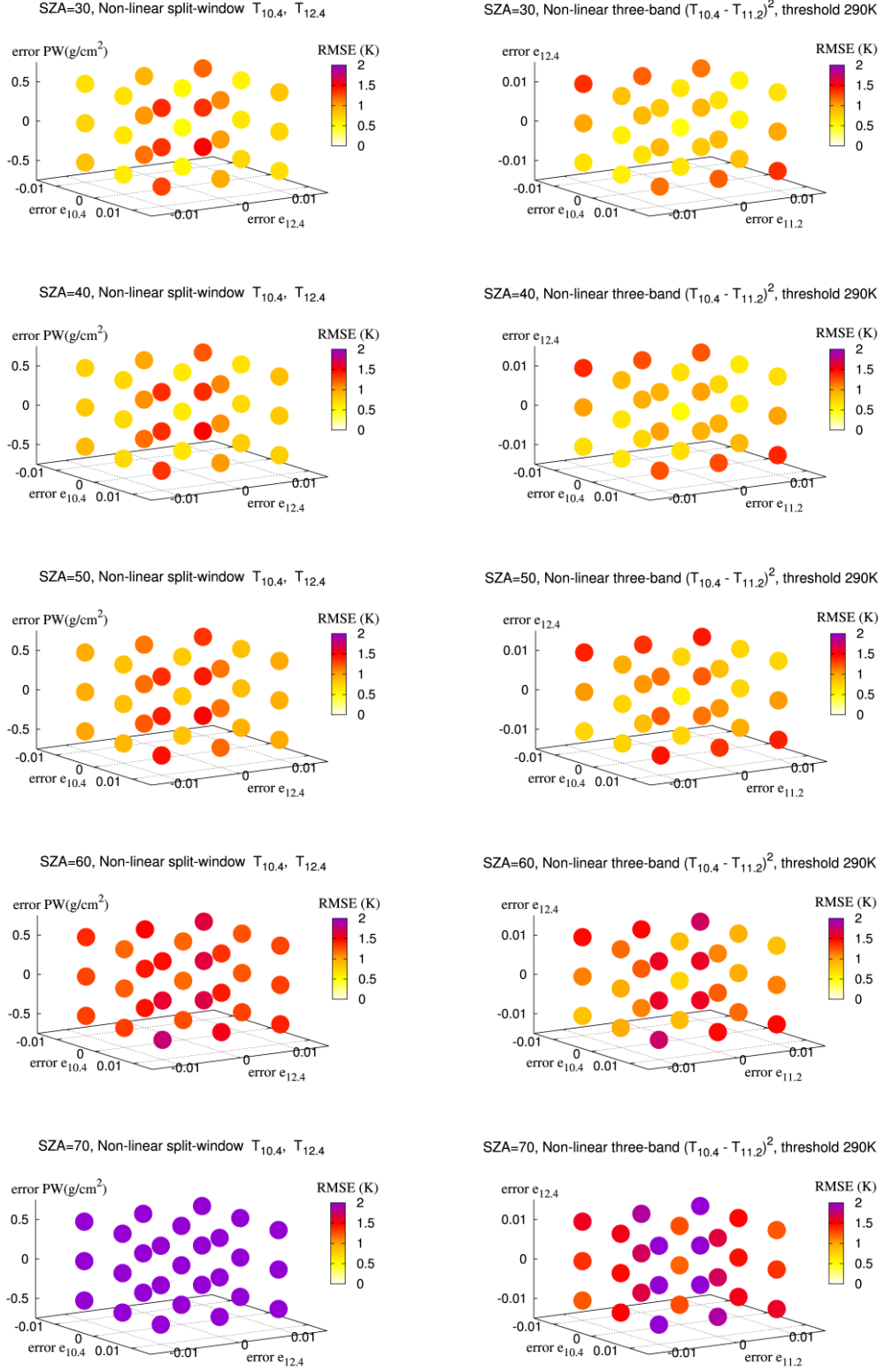


Fig. 8 RMSE distribution caused by errors of input data of LST calculation formula for 8 satellite zenith angles.

The left figures show RMSE distribution of eq. (2.8) using band 13 and 15, the right figures show RMSE distribution of eq. (2.10) including quadratic term of band 13 and 14 with threshold of 290 K.

Fig. 8 の衛星天頂角が小さいケース ($\text{SZA}=0\sim30^\circ$) に着目すると、式 (2.8) で評価した場合の RMSE は可降水量のゆらぎによる影響が小さく、地表面射出率のゆらぎによる影響が大きい。また、2 バンドの地表面射出率のゆらぎが等しく両射出率の差が変化しないような場合 (例えば $\varepsilon_{10.4}, \varepsilon_{12.4}$ ともに $+0.01$ のゆらぎ発生時) には RMSE が小さく、逆に両射出率の差に変化をもたらすようなゆらぎが生じる (例えば $\varepsilon_{10.4}$ で $+0.01$, $\varepsilon_{12.4}$ で -0.01 のゆらぎ発生時) と RMSE が大きくなる特徴がみられる。一方、式 (2.10) で評価した場合も式 (2.8) の結果と同様の特徴がみられ、3 バンドの射出率のゆらぎが等しい場合には RMSE が小さく、3 バンド間の射出率の関係に変化をもたらすようなゆらぎが生じる (例えば $\varepsilon_{10.4}$ で -0.01 , $\varepsilon_{11.2}$ で -0.01 , $\varepsilon_{12.4}$ で $+0.01$ の誤差発生時) と RMSE が大きくなる。しかし、式 (2.8) で評価した場合の RMSE は約 1.5 K を示す赤の丸が 5 例ほど ($\varepsilon_{10.4} + 0.01, \varepsilon_{12.4} - 0.01$ の 3 例と $\varepsilon_{10.4} - 0.01, \varepsilon_{12.4} + 0.01$ の 2 例) みられるのに対し、式 (2.10) で評価した場合では 2 例 ($\varepsilon_{10.4} - 0.01, \varepsilon_{11.2} - 0.01, \varepsilon_{12.4} + 0.01$ と $\varepsilon_{10.4} + 0.01, \varepsilon_{11.2} + 0.01, \varepsilon_{12.4} - 0.01$) と少なく、精度は式 (2.10) のほうが安定しているといえる。衛星天頂角がさらに大きくなると、この違いはほとんど見られなくなり、 $\text{SZA}=40\sim50^\circ$ においては推定精度に優劣をつけ難くなる。しかし衛星天頂角が 60° 以上になると両算出式の推定精度の違いが明瞭にみられるようになる。式 (2.8) で評価した場合の RMSE は衛星天頂角 60° でほぼ全ての例が赤の丸 (約 1.5 K 以上)、衛星天頂角 70° で全ての例が紫の丸 (2 K 以上) で示されているのに対し、式 (2.10) で評価した場合は衛星天頂角 60° で赤より薄い色の丸が多く、衛星天頂角 70° であってもほとんどの例が紫よりも薄い色で示されている。

以上の結果から、Non-linear three-band algorithm はひまわり 8 号のほとんどの観測範囲で精度の安定した地表面温度観測が可能であることが示され、この手法を実際に適用することで、地表面エネルギーフラックスの算出や都市気候などの小スケールの現象を対象とした研究 (Oku et al., 2007; Weng, 2009) への適用が期待される。

5. 結論

本研究では、ひまわり 8 号の 3 つの熱赤外バンドを用いた地表面温度算出式である、Non-linear three-band algorithm を考案した。考案した手法の精度を検証するため、様々な地表面・大気条件のシミュレーションデータを用いて推定精度の衛星天頂角による依存性や地表面射出率の誤差による依存性を評価したところ、衛星天頂角 60° 以下のほとんどのケースで 1.5 K 以下の精度が確認できた。これは静止軌道衛星の MSG と MTSAT で適用例のある Non-linear split-window algorithm よりも優れている精度であることから、実際に本手法を適用することでアジア・オセアニア諸国における都市気候などの小スケールの現象を対象とした研究への貢献が期待される。今後は、雲マスクプロダクトや地表面射出率プロダクトを本手法と組み合わせることで実際に地表面温度観測を行い、地上観測データとの比較により精度評価を行う予定である。

謝辞

ひまわり 8 号データは、気象庁の主催するひまわり 8 号 品質評価プログラムで NICT サイエンスクラウドより提供されたものです。

参考文献

- Atitar, M., & Sobrino, J. A. (2009): A split-window algorithm for estimating LST from Meteosat 9 data: Test and comparison with in situ data and MODIS LSTs. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6, pp. 122–126.
- Coll, C., & Caselles, V. (1997): A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research*, 102, pp. 16697–16713.
- Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J. A., & Valor, E. (1994): On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *International Journal of*

- Remote Sensing*, 15, pp. 105–122.
- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., & Sobrino, J. A. (2013): Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, pp. 131, 14–37.
- Li, Z.-L., Wu, H., Ning, W., Qiu, S., Sobrino, J. A., Wan, Z., Tang, B.-H., & Yan, G. (2013): Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10), pp. 3084-3127.
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994): Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 49, pp. 246-263.
- Nakajima, T., & Tanaka, M. (1986): Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 35, pp. 13-21.
- Nakajima, T., & Tanaka, M. (1988): Algorithms for radiative intensity calculation in moderately thick atmospheres using a truncation approximation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 40, pp. 51-69.
- Oku, Y., & Ishikawa, H. (2004): Estimation of land surface temperature over the Tibetan Plateau using GMS data. *Journal of Applied Meteorology*, 43, pp. 548–561.
- Oku, Y., Ishikawa, H., & Su, Z. (2007): Estimation of land surface heat fluxes over the Tibetan Plateau using GMS data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, pp. 183-195.
- Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., & Karnieli, A. (2014): Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm. *Sensors*, 14, pp. 5768-5780.
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz J. C., Soria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., & Martinez P. (2008): Land Surface Emissivity Retrieval from Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, pp. 316–327.
- Sobrino, J. A., Li, Z.-L., Stoll, M. P., & Becker, F. (1994): Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 32, pp. 243–253.
- Sobrino, J. A., Li, Z.-L., Stoll, M. P., & Becker, F. (1996): Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17, pp. 2089–2114.
- Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000): Toward remote sensing algorithms for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 353–366.
- Sobrino, J. A., & Romaguera, M. (2004): Land surface temperature retrieval from MSG1-SEVIRI data. *Remote Sensing of Environment*, 92, pp. 247–254.
- Sobrino, J. A., Oltra-C. R., Jiménez-M. J. C., Julien, Y., Soria, G., Franch, B., Mattar, C. (2012): Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, pp. 141-147.
- Sun, D., & Pinker, R. T. (2003): Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8). *Journal of Geophysical Research*, 108, p. 4326.
- Sun, D., & Pinker, R. T. (2007): Retrieval of surface temperature from the MSG-SEVIRI observations: part I . Algorithmology. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (23), pp. 5255-5272.
- Tahara, Y. (2008): Central wavelengths and wavenumbers and sensor plank functions of the GMS and MTSAT infrared channels. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 50, pp. 51-59 (In Japanese with English abstract).
- Takeuchi, W., Oyoshi, K., & Akatsuka, S. (2012): Super-resolution of MTSAT land surface temperature by blending MODIS and AVNIR2. *Asian Journal of Geoinformatics*, 12 (2).
- Tang, B., Bi, Y., Li, Z., & Xia, J. (2008): Generalized split-window algorithm for estimate of land surface

- temperature from Chinese geostationary FengYun meteorological satellite (TY-2C) data. *Sensors*, 8, pp. 933-951.
- Wan, Z. (2014): New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/ emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, pp. 36-45.
- Wan, Z., & Dozier, J. (1996): A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, pp. 892-905.
- Weng, Q. (2009): Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: algorithms, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, pp. 335-344.
- Xu, H., Yu, Y., Tarpley, D., Göttsche, F.-M., & Olesen, F.-S. (2014): Evaluation of GOES-R land surface temperature algorithm using SEVIRI satellite retrievals with in situ measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, pp. 3812-3822.

(論文受理日 : 2016 年 6 月 13 日)