

気象衛星ひまわりデータ及び可降水量データを用いた地表面温度分布推定

近藤 宇宙

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

近年、ヒートアイランド現象の深刻化に伴い、都市の熱環境を面的かつ時間的に把握する手段として衛星リモートセンシングによる地表面温度 (LST) 推定の重要性が高まっている。しかし、衛星による LST 観測は、大気中の水蒸気による吸収や放射の影響を受けるため、その影響を適切に補正することが不可欠である。本研究では、衛星データ以外から得られた大気中の水蒸気量分布情報を用いて、気象衛星ひまわりの観測データから LST を推定した。その結果、衛星データのみから推定した LST と比較して、夏季には相関が低下し、LST 差と可降水量との間に、標高の低い地点で強い正の相関が認められた。大気水蒸気量の取り扱いの違いが LST 推定に大きな影響を及ぼすことが示唆され、標高に応じた可降水量を考慮した大気補正の重要性が明らかとなった。

Key Words: atmospheric correction, atmospheric water vapor, heat island, split-window, thermal infrared

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う気温上昇に加え、都市化の進展により、都市の気温が周辺地域よりも高くなる「ヒートアイランド現象」が深刻化している。ヒートアイランド現象は、熱中症の増加のみならず、エネルギー消費の悪循環、大気汚染の悪化、さらには生態系への影響といった様々な社会問題を引き起こしている。こうした問題を解決するためには、都市の熱環境を面的かつ時間的に把握する必要がある。そのための有効な手段の一つが、衛星リモートセンシングによる地表面温度 (Land Surface Temperature: 以下、LST) の推定である。

衛星による LST 観測は、地表面から放射される熱赤外放射をセンサで観測し、得られた輝度温度から LST を推定するものである。しかし、衛星で観測される熱赤外放射は、地表面とセンサの間に存在する大気による吸収・放射の影響を受けている。そのため、これらの大気の影響を適切に補正する必要がある。特に熱赤外域においては、大気中の水蒸気が強い吸収特性を有しており、影響を大きく受ける。このような背景から、熱赤外域の 2 バンドの輝度温度差を利用して大気の影響を低減する Split-Window 法が LST 推定に広く用いられている。

Atitar and Sobrino による研究¹⁾では、欧州の静止軌道衛星 Meteosat-9 に搭載された SEVIRI センサのデータ (空間分解能 3 km, 時間分解能 15 分) を用い、輝度温度差から大気中の水蒸気量を推定²⁾し、その情報を用いて LST

を算出した。この手法は、大気中の水蒸気量を明示的に考慮できる点で有効である一方、衛星観測に依存する。これに対し、Yamamoto *et al.*による研究³⁾では、日本の静止気象衛星ひまわり 8 号に搭載された AHI センサのデータ (空間分解能 2 km, 時間分解能 10 分) を用いて、大気中の水蒸気量を衛星データから直接推定することなく、LST を推定する手法を開発するとともに、複数の推定式の精度比較を行った。この手法は、高時間分解能を活かした安定的な LST 推定を可能とする一方で、大気中の水蒸気量の影響は間接的に扱われている。

本研究では、衛星データ以外から得られた大気中の水蒸気量分布情報を用いて、気象衛星ひまわりの観測データから LST を推定する手法の構築を目的とする。さらに、本手法による LST 推定結果を、山本手法と比較することで、大気水蒸気量の取り扱いの違いが推定結果に与える影響について考察する。

2. 手法

(1) 対象地域及び使用データ

本研究の対象地域は、四国域を含む東経 131.5 度～135.0 度、北緯 32.5 度～34.5 度とした。使用データは、2024 年の気象衛星ひまわりデータの Band 3～5 及び 13～15、JAXA 高解像度土地利用土地被覆図、可降水量データである。また、解析には、山本が推定した LST デー

タを使用した。

a) 気象衛星ひまわりデータ

千葉大学環境リモートセンシング研究センターが公開している緯度経度直交座標系精密幾何補正済データを利用した⁴⁾。

b) JAXA 高解像度土地利用土地被覆図

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 地球観測研究センター (EORC) が作成し公開している日本域 10m 解像度土地利用土地被覆図 (2024JPN_v25.04) を利用した⁵⁾。

c) 可降水量データ

衛星データ以外から得られる大気中の水蒸気量分布情報として、地表面から大気上端までに含まれる水蒸気量を表す可降水量データを用いた⁶⁾。

d) 山本が推定した LST データ

山本が <ftp://modis.cr.chiba-u.ac.jp/yyamamoto/AHILST/v0/>にて公開している 2024 年の LST データを利用した⁷⁾。

(2) LST 推定

本研究の LST 推定の流れを図-1 に示す。

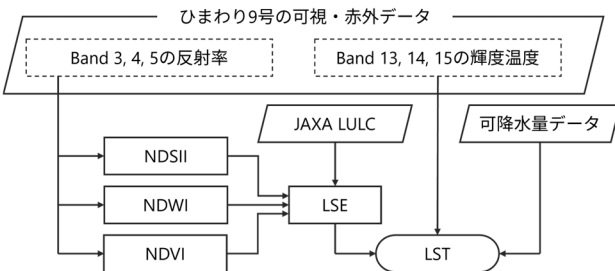


図-1 LST 推定の流れ

Atitar and Sobrino¹⁾の提案する Split-Window 法(式(1))及び Yamamoto *et al.*³⁾に基づき、0.02 度(約 2km) 格子、1 時間毎に LST (T_s) を推定した。

$$T_s = T_i + a_1(T_i - T_j) + a_2(T_i - T_j)^2 + a_3(1 - \varepsilon) + a_4\Delta\varepsilon + a_5PW(1 - \varepsilon) + a_6PW\Delta\varepsilon + a_7 \quad (1)$$

ここで、 T_i 及び T_j は 10~12.5 μm における 2 バンドの輝度温度、 PW は可降水量[g/cm^2]、 ε は地表面放射率 (Land Surface Emissivity: 以下、LSE) の平均 ($\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$)、 $\Delta\varepsilon$ は LSE の差 ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j$)、 a_k ($k = 1,2,3,4,5,6,7$)は係数である。なお、各バンドの LSE は、次節で推定した値を用いた。また、係数 a_k は衛星天頂角ごとに Yamamoto *et al.*³⁾により算出された結果に基づき、対象画素の衛星天頂角に対応する値を線形補間により求めた。

(3) LSE 推定

各バンドの LSE は、Yamamoto and Ishikawa⁸⁾が改良した NDVI thresholds method に基づき以下の式(2)により推定した。

$$LSE = \varepsilon_{iv}FVC + \varepsilon_{ig}(1 - FVC) + d\varepsilon_i \quad (2)$$

ここで、 ε_{iv} は植生面の放射率、 ε_{ig} は非植生面の放射率、 $d\varepsilon_i$ は植生キャノピー内の cavity effect を表す項、 FVC は植生被覆率であり、以下の式(3)で算出される。Yamamoto and Ishikawa⁸⁾が算出した ε_{iv} 、 ε_{ig} は、各バンド・各土地被覆クラスの値である。Yamamoto and Ishikawa⁸⁾が用いた土地被覆情報は 500 m 解像度の GLCNMO 2013 であるが、本研究では JAXA 高解像度土地利用土地被覆図を用いた。

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_g}{NDVI_v - NDVI_g} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 $NDVI_v$ と $NDVI_g$ は、それぞれ植生と非植生で占められる地域で観測される NDVI の統計量である。Yamamoto and Ishikawa⁸⁾では、 $NDVI_v = 0.5$ 及び $NDVI_g = 0.2$ とされており、本研究でも同じ値を使用した。また、 $NDVI$ は以下の式(4)で算出される。

$$NDVI = (R_{0.8} - R_{0.6}) / (R_{0.8} + R_{0.6}) \quad (4)$$

ここで、 $R_{0.6}$ と $R_{0.8}$ はそれぞれひまわり 9 号の Band 3 と Band 4 の反射率である。なお、前 14 日間の 11 時~13 時に観測された NDVI の最大値を晴天時の NDVI とした。

3. 結果と考察

(1) LST 推定

本手法で推定した LST の一例として、Band 13-15 を用いた 8 月 8 日 9 時の LST 分布を図-2 に示す。推定した LST 分布から、平野部を中心として比較的高い LST が分布する一方、沿岸部及び山地では低い LST が分布する傾向が認められた。また、使用するバンドの組み合わせによって LST の分布には差異が認められた。特に、Band 13-14 による推定では、沿岸部がより低く推定された。

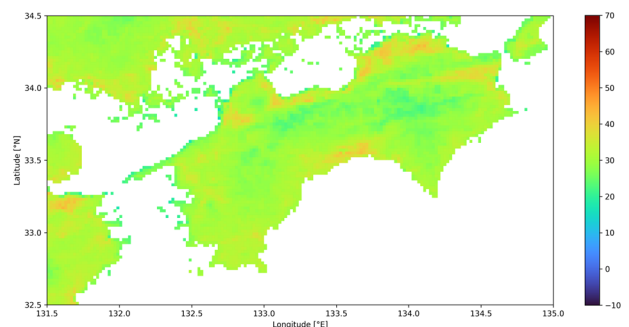


図-2 Band 13-15 を用いた 8 月 8 日 9 時の LST 分布

(2) LST の精度検証

本手法で推定した LST の精度を検証するため、山本手法による LST との相関係数を算出した。2024 年における月別・バンド別の LST について、相関係数の結果を表-1 に示す。その結果、Band 13-15 の輝度温度を用いて推定した LST は、全ての月において、他のバンドの組み合わせと比較して最も高い相関係数を示した。これは、2 バ

バンド間の中心波長の差が大きいほど輝度温度差が増大し、大気の影響をより適切に補正できるためであり、Yamamoto *et al.*³⁾においても指摘されている。一例として、Band 13-15 を用いた推定結果のうち、相関係数が最も高かった3月と、最も低かった7月の比較散布図を図-3に示す。また、相関係数は冬季から春季にかけて高い値を示す一方、夏季から秋季にかけて低い値となる傾向が確認された。

さらに、2024年における、月別の昼間及び夜間のLSTについて、相関係数の結果を表-2に示す。その結果、相関係数は夜間よりも昼間の方が高い値を示すことが確認された。

表-1 2024年における本手法と山本手法によるLST推定値の月別・バンド別相関係数

月	Band 13-14	Band 13-15	Band 14-15
1	0.932	0.987	0.985
2	0.911	0.986	0.983
3	0.922	0.988	0.982
4	0.826	0.978	0.965
5	0.875	0.983	0.969
6	0.774	0.968	0.935
7	0.439	0.920	0.767
8	0.529	0.940	0.805
9	0.556	0.952	0.834
10	0.749	0.967	0.916
11	0.867	0.977	0.966
12	0.944	0.985	0.983

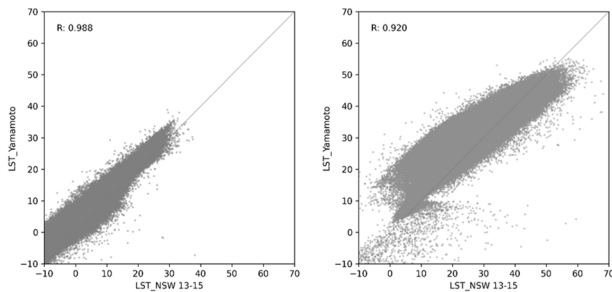


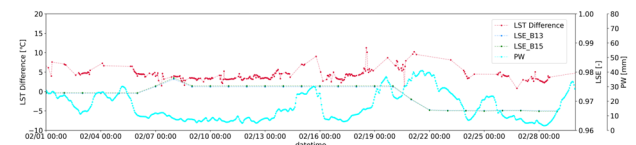
図-3 本手法と山本手法によるLSTとの比較散布図

表-2 2024年における本手法と山本手法によるLST推定値の月別・昼夜別相関係数

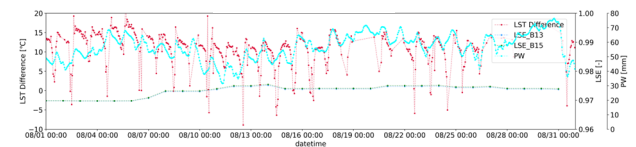
月	昼間 (6~17時)	夜間 (18~5時)
1	0.988	0.980
2	0.986	0.983
3	0.987	0.981
4	0.981	0.953
5	0.983	0.963
6	0.971	0.948
7	0.927	0.847
8	0.942	0.881
9	0.954	0.922
10	0.969	0.956
11	0.975	0.977
12	0.986	0.981

(3) LSE・可降水量との比較

相関係数が冬季から春季にかけて高く、夏季から秋季にかけて低下する要因を検討するため、アメダス観測所を含む画素における、山本手法によるLSTと本手法によるLSTの差とLSE、可降水量との比較を行った。一例として、高知における2月と8月の月変動を図-4に、本山における月変動を図-5に示す。その結果、高知では、本手法により推定したLSTは、山本手法によるLSTと比較して全体的に低い値を示した。特に夜間においてその差が顕著であり、2月と比較して8月では10℃以上の差が確認された。2月は可降水量の値が小さく大気の影響が弱いため、可降水量の取り扱いが異なる山本手法と本手法の間で推定されるLSTの差は小さくなった。その結果、両手法の相関係数は冬季から春季にかけて高い値を示したと考えられる。一方、8月は可降水量の値が大きく大気の影響が強まるため、可降水量の取り扱いの違いがLST推定結果に反映されやすく、夏季から秋季にかけて相関係数が低下したと考えられる。LSEについては、一定の変動が認められるものの、LST差の大きな変動と必ずしも対応していない。これらの傾向は、松山、高松、徳島においても確認された。



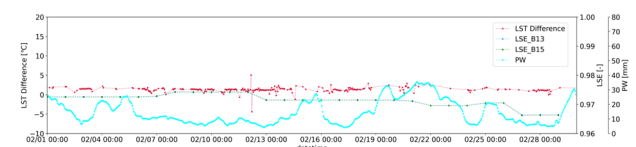
(a) 2月



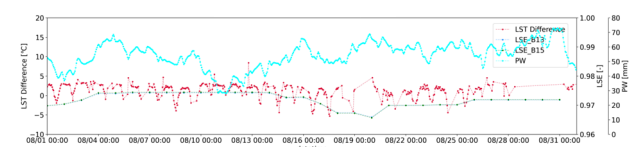
(b) 8月

図-4 高知におけるLST差・LSE・可降水量の月変動

また、本山においても高知と同様に、本手法で推定したLSTは山本手法による推定値よりも低い値を示した。ただし、LST差は高知ほど大きくはなく、8月においても3℃程度にとどまった。さらに、可降水量やLSEの変動に対して、LST差が明確に追従する挙動は確認されなかった。



(a) 2月



(b) 8月

図-5 本山におけるLST差・LSE・可降水量の月変動

LST 差と可降水量との関係を明らかにするため、2024年の全日時を対象として集計し、相関係数を算出した。高知と本山における散布図をそれぞれ図-6、図-7に示す。その結果、高知ではLST差と可降水量との間に相関係数0.793を示し、可降水量の値が大きくなるとLST差も大きくなり、そのばらつきも大きくなる傾向が確認された。一方、本山では相関係数が0.037となり、可降水量の大小に関わらずLST差がほぼ一定を示す傾向が見られた。

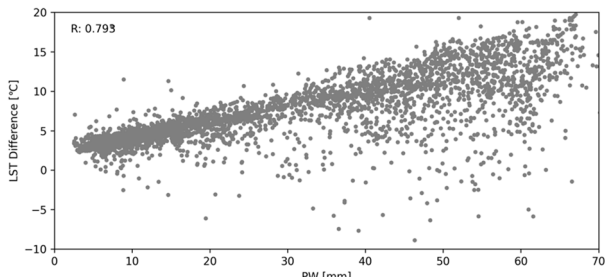


図-6 高知におけるLST差と可降水量の散布図

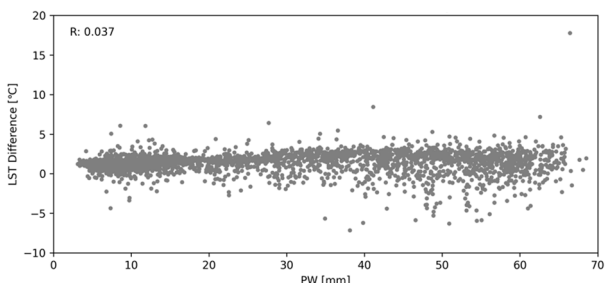


図-7 本山におけるLST差と可降水量の散布図

これらの結果は、大気水蒸気量の取り扱いの違いがLST推定結果に大きな影響を及ぼすことを示唆している。間接的に大気の影響を補正する山本手法では、特に夏季のように可降水量が多い条件下において、大気補正が一律に適用されることで、標高による可降水量の違いを十分に反映できず、大気の影響が過小評価され、結果としてLSTが高く推定された可能性がある。これに対し、本手法で用いた衛星データ以外の情報から推定した可降水量分布は、標高を考慮しているため、標高による可降水量の違いを反映した大気補正が可能となり、LST推定結果に差異が生じたと解釈できる。

4. まとめ

本研究では、衛星データ以外から得られた大気中の水蒸気量分布情報を用いて、気象衛星ひまわりの観測データからLSTを推定する手法を構築し、四国域を対象として、衛星データのみを用いた山本手法との比較を行った。その結果、使用するバンドの組み合わせによってLST分布に差異が生じ、Band 13-15を用いた推定が最も高い相関を示した。本手法によるLSTは、年間を通じて山本手

法によるLSTと高い相関を示したが、相関係数は季節及び昼夜によって変動する傾向が認められた。特に冬季から春季にかけて高く、夏季から秋季にかけて低下する傾向が認められ、可降水量の影響が示された。

さらに、LST差と可降水量及びLSEとの関係を解析した結果、LST差はLSEよりも、可降水量との関係が強く、標高が低い地点ではLST差と可降水量の間に強い正の相関が確認された。一方、標高の高い地点では、明瞭な相関は認められなかった。この結果から、標高に伴う大気水蒸気量の違いがLST推定に影響を与えることが示唆された。したがって、衛星データのみを用いて標高の違いを考慮せず一律に大気の影響を補正するLST推定手法よりも、標高に応じた大気水蒸気量の違いを反映したデータを用いて補正する手法の方が、LST推定に適している可能性が示された。

以上より、本研究で構築したLST推定手法は、時間分解能に優れた静止気象衛星データを活用し、大気の影響、とりわけ水蒸気量を考慮した熱環境評価を可能とする手法であるといえる。今後は、気温などの気象要素との比較検討に加え、LSTを用いた気温推定、さらには都市スケールでの人工排熱推定への活用を通じて、都市の熱環境解析やヒートアイランド対策への発展が期待される。

参考文献

- 1) Atitar, M., and J. A. Sobrino: A split-window algorithm for estimating LST from meteosat 9 data: Test and comparison with in situ data and MODIS LSTs, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol.6, No.1, pp.122-126, 2009.
- 2) Sobrino, J. A., and M. Romaguera: Water-vapour retrieval from Meteosat 8/SEVIRI observations, *Int. J. Remote Sens.*, Vol.29, No.3, pp.741-754, 2008.
- 3) Yamamoto, Y., H. Ishikawa, Y. Oku, and Z. Hu: An algorithm for land surface temperature retrieval using three thermal infrared bands of Himawari-8, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.96B, pp.59-76, 2018.
- 4) 千葉大学環境リモートセンシング研究センター：ひまわり8/9号フルディスク(FD)gridded data(緯度経度直交座標系精密幾何補正済データ) Version 02 (V20190123)公開について、<https://www.cr.chiba-u.jp/databases/GEO/H8_9/FD/index_jp.html>.
- 5) 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター：高解像度土地利用土地被覆図、<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/data_set/lulc_j.htm>.
- 6) Akatsuka, S.: Reproducing high spatiotemporal resolution precipitable water distributions using numerical prediction data, *Atmosphere*, Vol.14, No.7, 1177, 2023.
- 7) 千葉大学環境リモートセンシング研究センター：ひまわり8号の地表面温度推定システムをアップデート～より正確な「地球の熱症状」の診断が可能に～(山本雄平特任助教)、<<https://ceres.chiba-u.jp/3609/>>.
- 8) Yamamoto, Y., and H. Ishikawa: Thermal land surface emissivity for retrieving land surface temperature from Himawari-8, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.96B, pp.43-58, 2018.