

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

Near-real time LST monitoring system with MTSAT data over Asian megacities

大吉 慶*・赤塚 慎**・竹内 渉***・田村 正行*
*Kei OYOSHI, Shin AKATSUKA, Wataru TAKEUCHI
and Masayuki TAMURA*

Abstract : Population and economic growth are expected to continue with high rate in Asian countries, and urban structure can be transformed dramatically. Urbanization and increase in anthropogenic energy consumption cause urban heat island effect that means higher temperature in urban areas. In this research, we have developed a monitoring system for Land Surface Temperature (LST) over Asian megacities with Japanese geostationary satellite, namely Multi-functional Transport Satellite (MTSAT). MTSAT covers the Asia-Oceania region and it can retrieve hourly LST by its excellent temporal sampling. The developed system is open to the public on the WWW (<http://webgms.iis.u-tokyo.ac.jp/LST/index.php>) and provides latest LST images in the delay of approximately 3 hours. The system also allows users to search previous LST images by selecting arbitrary date and hour on GUI. Finally, we have demonstrated the monitoring of heat island effect by the system and it was found that it is effective to quantify the detailed time-series changes of heat island effect.

1. はじめに

国連統計によると現在の都市人口比率は50%に達しており、2050年には70%近くになるとされている。特にアジアやアフリカにおける増加は顕著であり、2025年までに出現する29のメガシティ(人口1000万人以上)の約半分に相当する15のメガシティがアジアに位置すると予測されている(United Nations, 2010)。都市化と人口増加によるエネルギー消費量の増大はヒートアイランド現象を引き起こし、熱中症などの健康被害、生態系への影響、電力消費量の増大などが懸念されている(Oke *et al.*, 1997)。したがって緩和策の立案や評価を行うためにヒートアイランド現象の実態を監視し続けていくことは重要である。リモートセンシングは熱赤外データを利用することでヒートアイランド現

象の広がりや都心部と郊外の温度差などの実態を観測するのに有用である。これまで、LandsatやMODISといった極軌道衛星による地表面温度(Land Surface Temperature: LST)が利用されてきたが(例えばHung *et al.*, 2006)、これらの衛星では多くとも1日に昼と夜の2回の観測であり、日変化を捉えることはできない。しかしながら、地表面温度は一般的に日変化が大きく、気候や水文分野等で利用する際には観測頻度が不十分となることがある(Prata *et al.*, 1999)。一方、主として雲などの気象観測に用いられてきた静止衛星は、空間分解能は粗いものの1時間以下の観測時間分解能を有する。静止衛星は近年のセンサ性能の向上により、本来の気象業務のみならず森林火災の監視や地表面温度観測などその応用範囲が広がっており、陸域観測への期待が高まっている(竹内ら, 2007)。

そこで本研究では、運輸多目的衛星MTSAT(Multi-functional Transport Satellite)を利用し、MTSATの高頻度観測を活かしたアジアメガシティのヒートアイランド現象観測のための準実時間地表面温度監視システムの構築を行う。MTSATの観測域はアジアオセアニア域のほぼ全域を含んでいるため、大多数のアジ

* 京都大学大学院工学研究科

** 山梨県環境科学研究所

*** 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. 50, NO. 3, 2011

アメガシティの地表面温度をほぼ実時間で監視することができる。また、日変動を捉えることができるため、地表面の熱収支や熱特性に対する理解の深化やモデルパラメータとしての利用が期待できる。

2. 地表面温度の推定手法

2.1 MTSAT について

MTSAT-1R (ひまわり 6 号) 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。東経 140 度の赤道上 35,800 km の静止軌道に位置してアジアオセアニア域のほぼ全域を観測範囲としている。観測範囲および各地域における衛星天頂角は図 1、センサ性能は表 1 の通りである。可視 1 バンド、赤外 4 バンドの 10 bit に量子化されたデータを北半球で 30 分、全球で 1 時間ごとに取得することができる。本研究では IR1, IR2 バンドの観測データを地表面温度推定のために利用した。

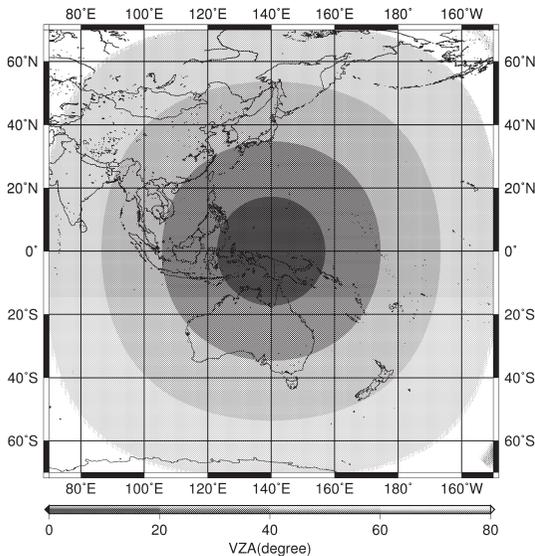


図 1 MTSAT の観測範囲および衛星天頂角。

表 1 MTSAT の観測波長帯および空間分解能。

Band	Wavelength (μm)	Spatial Res. (km)	Quantization (bit)
VIS	0.55-0.90	1	10
IR1	10.3-11.3	4	10
IR2	11.5-12.5	4	10
IR3	6.5-7.0	4	10
IR4	3.5-4.0	4	10

2.2 地表面温度推定アルゴリズム

地表面温度の推定には AVHRR や MODIS データ処理用に開発された次の Generalized Split-Window (GSW) 法 (Wan *et al.*, 1996) を利用した。GSW は全球の LST データとしてよく利用される MODIS LST プロダクトに適用されているアルゴリズムである。衛星観測角や大気中の水蒸気量ごとにパラメータを最適化することで、MODIS においては 1 K の精度を実現することが可能である (Wan, 1999)。

$$LST = \left(a_1 + a_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + a_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{IR1 + IR2}{2} + \left(b_1 + b_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{IR1 - IR2}{2} + c \quad (1)$$

ここで、 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 バンドの放射率であり、 $\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2$ 、 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ である。また、 a_i 、 b_i 、 $c_{(i=1,2,3)}$ は各係数である。GSW 法では 7 つの係数が必要となり、これらは熱赤外 2 バンドの応答関数に依存した値となる。大吉ら (2010) と同様に MODTRAN4 (Berk *et al.*, 2003) による放射伝達シミュレーション結果から各係数の最適化を行った。係数は衛星天頂角に対する依存性があるため 20 度ごとに求め、実際のデータに適用するには各画素の衛星天頂角における係数を線形内挿により求めた。各衛星天頂角における地表面温度の推定精度は表 2 の通りである (大吉ら, 2010)。

2.3 放射率分布図の作成

GSW 法により地表面温度を推定するには IR1, IR2 バンドの放射率が必要となる。放射率は地表面温度推定精度に大きな影響を与える。しかしながら、地表面放射率は水分状態や構成物質などの地表面特性に依存しており時空間変動が大きいため、特定の時期・場所において推定することは困難である。MTSAT はバンド数が少なく観測データから放射率を推定することは困難であるため、本研究では MODIS LST プロダクトの放射率分布図 (MOD11C3, Collection-5) を利用し

表 2 各衛星天頂角 (VZA) に対する地表面温度推定式の精度。

VZA (deg)	0°	20°	40°	60°
RMSE (K)	0.86	0.90	1.09	1.73

た。本プロダクトは複数の熱赤外バンドから LST と放射率を同時推定する Day/Night LST algorithm (Wan *et al.*, 1997) により作成されている。なお、あらかじめ MODIS と MTSAT の応答関数の相違が放射率へ与える影響を ASTER Spectral Library のスペクトルデータを利用して評価した。その結果、両者の平均二乗誤差が 0.005 以下であることから、本プロダクトが利用可能であると判断した。空間分解能は 0.05° であるため、bi-linear 法により MTSAT と同じ 4 km に空間内挿を行った。また、月単位でのプロダクトであり数ヶ月遅れでの提供となっているため、本研究では 2007-2009 年の 3 年間の月ごとの平均値を計算し、対応する月の放射率を計算に利用した。

3. 準実時間地表面温度監視システム

3.1 システム概要

前述した地表面温度推定手法を適用して最新の MTSAT データから即時に地表面温度を推定し、WWW 上で公開するシステムの開発を行った。システムの概要は図 2 の通りであり、下記の処理を毎時行っている。なお、MTSAT データは東京大学の地震研究所で受信され、生産技術研究所でアーカイブされてい

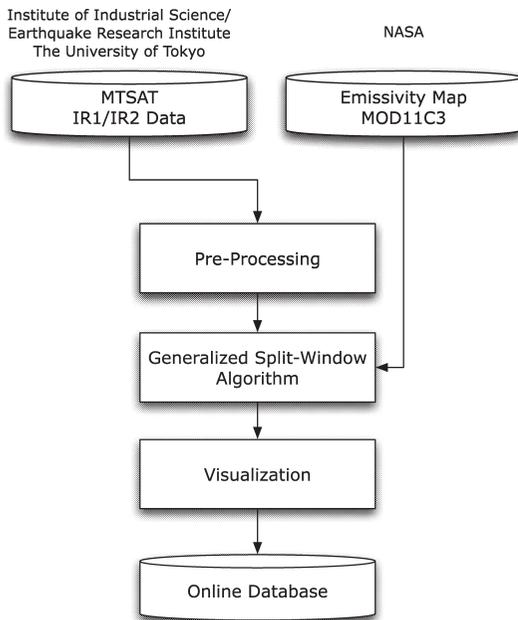


図 2 準実時間地表面温度監視システムの構成。一連の処理を毎時行うことで WWW 上で常に最新の地表面温度画像が閲覧できる。

るデータを利用している。

1. 最新の MTSAT IR1, IR2 データの取得。
2. 放射量補正および幾何補正処理。
3. GSW 法による地表面温度の推定。
4. 地表面温度の可視化処理 (東京, 大阪, 北京, 上海, ハノイ, ジャカルタ, マニラ, バンコクの 8 都市)。
5. 可視化した最新の地表面温度データを WWW 上にアップロード。

最新の各アジアメガシティの地表面温度画像は WWW 上 (<http://webgms.iis.u-tokyo.ac.jp/LST/index.php>) で 3 時間程度の遅れで閲覧することができる。また、全ての地表面温度画像はサーバ上に保存してデータベース化しており、任意の日時を GUI 上で指定することで過去のデータを閲覧することが可能である。

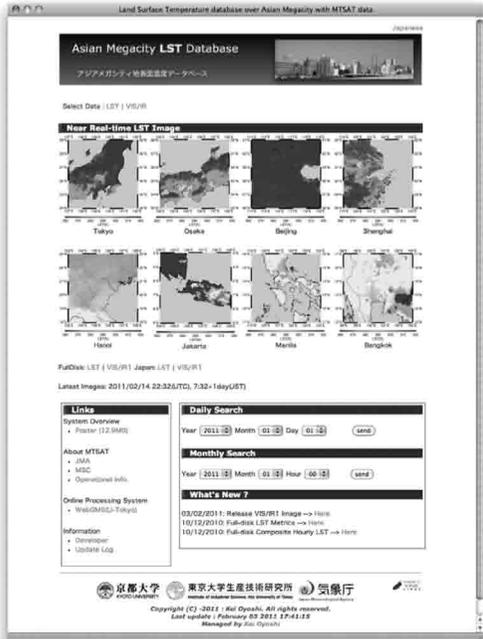
3.2 WWW 上のユーザーインターフェイス

図 3 は本システムの WWW 上のユーザーインターフェイスである。トップページ (図 3-a) には各都市の最新の地表面温度画像を表示している。また、トップページからは過去データの検索をすることができ、任意の年, 月, 日, 時を入力することでデータを閲覧することができる。図 3-b にデータの検索結果を示す。入力条件を満たす画像が都市ごとに時系列で一覧表示され、大量のデータを視覚的に把握することが可能である。一覧中の画像をクリックすると拡大画像が表示される。

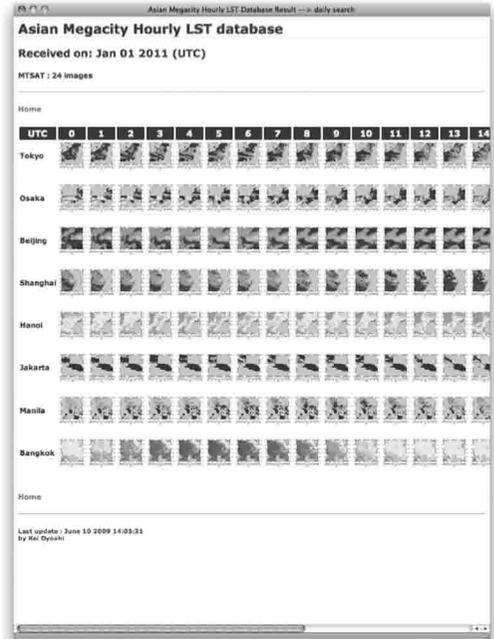
なお、地表面温度の推定においては、対象領域が雲や薄雲に覆われていると地表面温度を正確に推定することが困難となる。現時点では雲被覆の影響による推定の不確かさの評価を行っていないが、将来的には MTSAT データによる雲マスクデータベース (山田ら, 2009) と連携し、信頼性評価を可能にしたいと考えている。さらに、現在は jpg 形式の画像の閲覧のみであるが、将来的にはストレージを増強することで画像解析に利用可能なフォーマットでの配布を検討している。

3.3 ヒートアイランド現象の観測

最後に本システムによるヒートアイランド現象の観測例を示す。東京都心と郊外の都市部との 1 時間ごとの地表面温度の比較を行った。図 4 は、東京都千代田



(a) トップページ



(b) データ検索結果

図3 アジアメガシティの地表面温度監視システム。(http://webgms.iis.u-tokyo.ac.jp/LST/index.php)

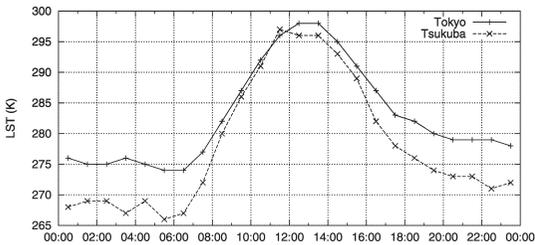


図4 2007年3月1日00:30から23:30 (JST) における東京都心部と茨城県つくば市中心部における地表面温度の日変化の比較。

区大手町周辺(北緯35.69度, 東経139.76度)と茨城県つくば市中心部周辺(北緯36.06度, 東経140.13度)の2007年3月1日00:30から23:30(JST)までの地表面温度変化を示している。深夜から朝方にかけて両者の地表面温度差は大きい, 日中にはほぼ同等となり, 16:00頃から両者の温度差が再び大きくなっている。東京都心は高層建築物が多いため日中の蓄熱が大きくかつ夜間の放射冷却が弱いが, つくば市では放射冷却が大きく温度低下が相対的に大きいため温度差が大きくなっていると考えられる。また, 東京とつくばの地表面温度が11:30に逆転しているが, 熱容量が小さいつくばの方が日中の地表面温度が高くなったと考えられる。実際, 対応する場所・日時の気象庁気象観

測所の気温を比較しても14:00から15:00に限ってはつくばの気温の方が高くなっていた。

次に2007年3月1日の09:30から18:30(JST)までの関東周辺の地表面温度の時空間変動を示す(図5)。関東地方全体の空間分布を見ると都市域は周縁部と比較すると温度上昇が顕著であり, 3月の日中でもヒートアイランド現象が確認できる。

このように MTSAT は地表面温度の詳細な時間変動を捉えることが可能である。さらに, MTSAT は雲被覆の影響により日変動の観測が困難であっても, 極軌道衛星と比較すると観測頻度が高いため1日の間には晴天画像を観測できる可能性が高く, 日単位で考えた場合に欠損値を減少させられるという利点もある。欠点としては極軌道衛星と比較すると空間分解能は衛星直下で4 kmと粗いため, 詳細な空間スケールで都市の熱環境を観測することが困難な点が挙げられる。そのためには空間分解能が高い衛星データとの融合利用や超解像技術による MTSAT データの高空間分解能化が必要となる (Takeuchi *et al.*, 2010)。しかしながら, 2014 年に打ち上げが予定されている次期 MTSAT では時間・波長・空間分解能を向上して陸域観測機能を強化し, 静止地球環境観測衛星として運用することが計画されているため(宇宙開発戦略本部,

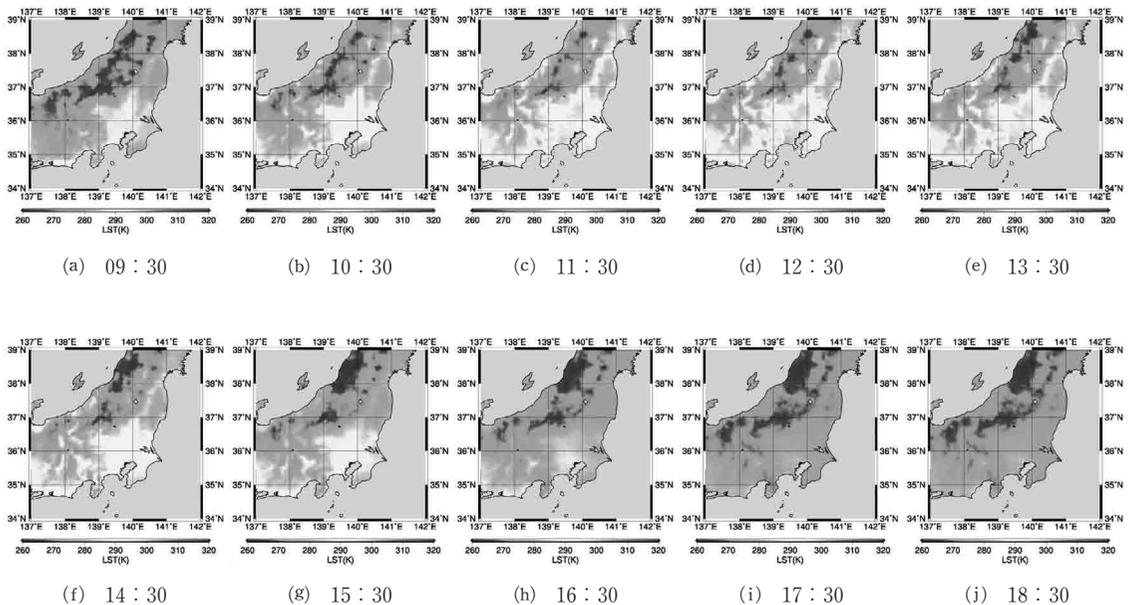


図5 MTSAT データから推定した関東周辺における毎時の地表面温度分布図。2007年3月1日の09:30から18:30(JST)までの毎時変化を示している。

2009), 静止衛星による陸域観測の重要性は今後増大していくと予測される。

ものである, ここで改めて関係各位に深謝する。

(受付日2011.3.11, 受理日2011.5.13)

4. まとめ

本研究の成果は以下のようにまとめられる。

- GSW 法の係数を MTSAT 用に最適化し, MODIS の放射率プロダクトを利用することで毎時の地表面温度推定を可能とした。
- MTSAT データを利用した準実時間でのアジアメガシティの地表面温度監視システムを構築した。本システムにより数時間遅れでの最新画像および過去の LST 画像を WWW 上で閲覧することが可能となった。
- 都心部と郊外都市, 都市域とその周縁部におけるヒートアイランド現象の詳細な時間変動を観測した。

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

参考文献

- 1) 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.
- 2) Hung, T., Uchihama, D., Ochi, S. and Yasuoka, Y., 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 8, pp.34-48.
- 3) Oke, R.T., 1997. Urban climate and global environmental change, Applied climatology (Eds. Thompson, D.R., and Perry, A.), pp.273-287, Routledge, Oxon.
- 4) 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.
- 5) Takeuchi, W, Oyoshi, K. and Akatsuka, S., 2010. Super-resolution of MTSAT land surface

- temperature by blending MODIS and AVNIR2. Proceedings of International Symposium on Remote Sensing, Jeju, Korea.
- 6) United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2010. World Urbanization Prospects. The 2009 Revision.
 - 7) 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.
 - 8) Wan, Z. and Li, Z.L., 1997. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 35(4), pp.980-996.
 - 9) Wan, Z., 1999. MODIS Land-surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) Version 3.3.
 - 10) 宇宙開発戦略本部, 2009. 宇宙基本計画, pp18.
 - 11) 大吉 慶, 竹内 渉, 田村正行, 2010. 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.
 - 12) 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.
 - 13) 山田洋平, 大吉 慶, 田村正行, 2009. 静止気象衛星 MTSAT 画像による日本を対象とした晴天画像検索システムの構築. 写真測量とリモートセンシング, 48(6), pp.367-373.