

MODIS と ASTER のスペクトル分解による地表面 温度分布図の作成

竹内 渉^{a,1,*}, 越智士郎^b, 安岡善文^a

^a 東京大学生産技術研究所

^b 近畿大学農学部

Abstract

Land surface temperature map based on spectral mixture analysis between MODIS and ASTER

A method to retrieve land surface temperature(LST) is proposed in the thermal infrared (8-12 μm) from MODIS and ASTER data. Firstly, spectral mixture analysis was conducted between MODIS and ASTER VNIR channels and the result showed that the overall accuracy was about 5 %. Secondly, the band average emissivities are calculated using spectral response function of MODIS sensor and published spectral data of terrestrial materials in wide ranges of atmospheric and surface temperature conditions. Thirdly, LST is calculated using generalized split-window algorithm using the coefficients from regression analysis of radiative transfer simulations proposed by Z.Wan[Wan, 1996]. Comprehensive validation and error analysis has been made to evaluate the performance of the new LST algorithm using NASA/MODIS LST product (MOD11) and AMEDAS data. The maximum error in retrieved LST values are 1K. Results show that the new approach used with MODIS and ASTER data offers an improved retrieval of LST.

Key words:

Terra MODIS & ASTER, Emissivity, Land Surface Temperature, Spectral Mixture Analysis

* 連絡先

Email address: wataru@iis.u-tokyo.ac.jp (竹内 渉).

¹ 現住所: 153-8505 東京都目黒区駒場 4 丁目 6 番 1 号

1 はじめに

地表面温度 (LST) は地表面における熱エネルギーの交換, それに伴う水の移動を支配しているため, 地球規模での環境を評価するために重要なパラメタである. そのため, 広域の観測は気候学, 水文学, 生態学, 地球科学などの幅広い分野からの期待も大きい [Schmugge, 1991]. 大陸レベルでの環境モニタリングを行うためには, 可視から熱赤外の波長帯を 36 のチャンネルで, 同一地点を毎日観測できる MODIS の利用が有効である [Petitcolin, 2002]. しかし, 空間分解能が 250-1000m と比較的低いことから, 地表面の複雑な状態を正確に捉えることができない. 一方で, 同じく Terra に搭載されている ASTER は, 可視から熱赤外の波長帯を 15-90m の空間分解能で観測できるが, 17 日に一度しか同一地点を観測できないため, 雲に覆われていない良好なシーンの取得が困難である. 特にアジアのように湿潤な気候帯においては, 処理すべきデータ容量を考へても長期的なモニタリングという観点からは単独での利用は難しい. 従って, 時間分解能・空間分解能の 2 点においてトレードオフの関係にある MODIS と ASTER を補完的に用いることは, アジア地域の地表面温度モニタリングにおいて有効である. 陸域観測に適した可視近赤外と熱赤外のチャンネルの諸元を Table 1 に示す. MODIS は可視近赤外の 2 チャンネルで 250m の空間分解能を持つ. 一方, 熱赤外のうち 8-12 μm の大気窓と呼ばれる領域は, 比較的水蒸気による吸収が少なく, 9.75 μm 付近のオゾンの吸収によって 2 つの領域に分けられる. チャンネル 29 は 8-9 μm 窓を観測し, チャンネル 31 と 32 は 10-12 μm 窓を観測している.

Table 1

Comparison of technical specifications between Terra MODIS and ASTER in channels suitable for land surface monitoring. Bandwidth is in micrometers.

MODIS			ASTER		
Band	Bandwidth	IFOV	Band	Bandwidth	IFOV
4	0.545 - 0.565	500m	1	0.520 - 0.600	15m
1	0.620 - 0.670	250m	2	0.630 - 0.690	15m
2	0.841 - 0.876	250m	3	0.760 - 0.860	15m
6	1.628 - 1.652	500m	4	1.600 - 1.700	30m
7	2.105 - 2.155	500m	5	2.145 - 2.185	30m
20	3.660 - 3.840	1km			
29	8.400 - 8.700	1km	11	8.475 - 8.825	90m
31	10.780 - 11.280	1km	13	10.25 - 10.95	90m
32	11.770 - 12.270	1km	14	10.95 - 11.65	90m

海水面温度 (SST) や LST を宇宙で観測した分光放射輝度から推定するために

は、大気効果と地表面の放射率を考える必要がある。大気効果とは地表面から衛星観測点までの間に存在する大気構成物質により引き起こされる現象で、水蒸気およびオゾンによる吸収、エアロゾルによる散乱、空気分子によるレイリー散乱などがある。放射率とは、黒体に対する観測物体の放射の割合と定義され、物体の誘電率、表面の粗さ、温度、波長、観測角によって変化し、0から1の間の値をとる [Labeled, 1991].

SST や LST の推定に必要となる大気補正は 10-12 μm 窓の単チャンネルならびに 2 チャンネルによる split-window 法を用いて行うことができ、AVHRR や MODIS をはじめとするセンサについて種々のアルゴリズムが開発されてきた。単チャンネルによる推定には大気補正のために放射伝達モデルや大気プロファイルが必要になる。一方、2 チャンネルによる推定では大気の吸収率の違いを利用して大気補正効果を得ることができる [Becker, 1990][Ottle, 1993]. SST の観測対象である海は、表面がほぼ均一な水であり、放射率がほぼ 1 に等しく、観測角依存性がほとんどないと仮定できる [Rees, 1992]. 従って、split-window 法を用いた手法による大気補正のみで良い結果が報告されており、おおむね 0.5 度以内の精度が保証されている [Quin, 1999]. 一方、陸域における大気補正は、Wan らが MODTRAN を用いた放射伝達シミュレーションを行い、split-window 法の係数を水蒸気・地表面気温・観測角の各条件に応じてデータベース化している。特定の観測角の大気中の積算水蒸気量で最適化された補正係数を用いる条件の下で 1 度以内の精度を確認している [Wan, 1997]. しかし、陸域における地表面は海洋に比べると非均一性が高く波長によって異なる放射特性を持つと考えられるため、放射率の補正精度が LST の推定に重大な影響を及ぼす。

LST の推定に必要となる放射率の算出に関しては、主に二つのアプローチが考えられている。一つは、中間赤外と呼ばれる 3-5 μm 窓のチャンネルを用いて放射と反射の寄与率を算出する試み (Day/Night algorithm) である [Roger, 1998][Nerry, 1998]. 例えば、Li らは昼夜の AVHRR 画像を用いて放射率と LST を同時に求める方法を提案している [Li, 1993]. TISI と呼ばれるこの手法では画素毎に放射率を求めることができるという利点があるものの、熱赤外の二方向性反射特性関数 (BRDF) と大気プロファイルが必要であり、実際の適用に際しては必ずしもこうした情報が得られないことが問題である。もう一つは、あらかじめ実験室レベルで測定されたスペクトルライブラリを利用し、土地被覆分類カテゴリ毎にそれらを割り振るというやり方 (Generalized split window algorithm) である [Kerr, 1992][Snyder, 1998]. この方法では、あらかじめ対象エリア毎に土地被覆分類情報が得られなくてはならない。ところが、現在データ提供範囲・時期・精度において最も広く用いられている NASA の MODIS/LST プロダクト (以下 MOD11 と呼ぶ) で用いられている土地被覆分類情報でさえ 1km の解像度であり、ミクセルとなっていることが考慮されていない [Wan, 2002]. また、MOD11 では上記 2 つの手法によって求められた放射率のデータが納められているが、これら 2 つの整合性が取れていないことから、放射率補正に関しては未だ不十分であると言わざるを得ない。

本研究では、MODIS データ (広域高頻度観測性) と ASTER データ (高空間分

解能)を組み合わせて使用することにより、空間分解能の改善と放射率の補正を同時に行い、地表面温度を推定する簡便な手法を検討する。まず、最も空間分解能の高い可視近赤外の2チャンネル(MODISのband1,2およびASTERのband2,3)を用いてミクセル分解を行い、植生・土壌・水分布図(空間分解能250m)を作成する。次に、それぞれの土地被覆(植生・土壌・水)に対応する放射率をスペクトルライブラリから算出し、分類図と組み合わせることにより、熱赤外のチャンネルにおける放射率分布図(250m)を作成する。次に、Wanらが求めたgeneralized split window法の大気補正パラメタを利用してLSTの推定を行う。最後に、作成した放射率およびLSTとMOD11との比較ならびに本手法の妥当性を検証する。

2 地表面温度推定法

2.1 スペクトル分解

2.1.1 線形ミクセルモデル

MODISの可視近赤外チャンネルの空間分解能は250mと比較的低いため、ほとんどの画素はミクセルであると考えてよく、スペクトル分解が不可欠である[Bateson, 2000]。250mの空間分解能を持つチャンネルは二つであるため、構成要素(エンドメンバー)として土地被覆の最小基本構成要素である植生・土壌・水(以下VSW)の三つを考え、スペクトル分解を行うことができる。線形ミクセルモデルを仮定すると、MODISの反射スペクトルを各エンドメンバーの反射スペクトルの関数として次のように定式化できる。

$$MODIS_{Ch1} = a_{11} V + a_{12} S + a_{13} W \quad (1)$$

$$MODIS_{Ch2} = a_{21} V + a_{22} S + a_{23} W \quad (2)$$

$$V + S + W = 1 \quad (3)$$

$$0 \leq a_{ij} \leq 1 \quad (4)$$

ここで、 $MODIS_{Ch1}$ 、 $MODIS_{Ch2}$ はMODISのチャンネル1、2の反射スペクトルを、 V 、 S 、 W はMODISの各画素における植生・土壌・水の面積比率をそれぞれ表している。 a_{ij} は各カテゴリのピュアピクセルの反射スペクトル(エンドメンバー)であり、条件式(4)に表されるように、0から1の値を持つ。

MODISのスペクトル分解は、幾何補正によって重ね合わせたASTERデータを用いて次の手順で行う。なお、幾何補正の手順についてはあとで詳しく述べる。1) ASTERデータのチャンネル2および3の散布図から、あとで述べる方法によりVSWのエンドメンバーを求め、線形ミクセルモデルを解くことによりASTERの1画素に対応するVSW画素内面積比率を算出する。2) MODISの1画素に対応するASTERの16x16画素ブロック領域を考え、相加平均を

取ることにより、MODISの1画素に対応するVSW画素内面積比率を算出する。3)式(1)および(2)においてMODISの反射スペクトルと画素内面積比率(V, S, W)とを既知として、最小二乗法により未知数である各エンドメンバーの反射スペクトル a_{ij} を決定する。

次にこれを広域(MODISの解析範囲)に適用するには、VSWの各カテゴリの画素内面積比率に関する条件式(3)と式(1)および(2)の3式を連立することにより、重複領域以外においてもMODISの反射スペクトルの値のみから、未知数である各カテゴリの画素内面積比率 V, S, W が一意に決定できる。しかし、例外的なスペクトルやノイズによって他の画素値より著しく離れた点が存在する場合、それらの画素から算出したVSWの画素内面積比率は負になる可能性がある。それらの画素については、非線形最適化手法のひとつである二次計画法を用い[Floudas, 1995]、条件式(4)を満たすようなVSWの組み合わせを算出することとする。

2.1.2 エンドメンバー推定法

スペクトル分解においては、エンドメンバーの決定がモデルの精度および結果に大きく影響を与える。エンドメンバーの決定法は目視によりいくつかの教師データを選定する方法が多く行われているが、主観に依存するため再現性に乏しい[Bateson, 2000]。大量データ処理を行うためには、なるべくロバストな決定法の採用が望ましい。そこで、可視近赤外の散布図をとると三角形分布をなすというスペクトルの性質を利用し、その3頂点(エンドメンバー)を一意にかつ安定的に決定するために、次のように考える[Yamagata, 1997]。このアルゴリズムは、すべての散布点を含む凸閉包(散布点の内点をすべて内包し、かつ最小周囲長をもつ多角形)を考え、例外的なスペクトルやノイズを含んだ画素を排除するために、閾値以上の頻度の画素数が全画素の95%となるように三角形を決定するものである。閾値を95%としているのは、画素の分布が正規分布に従うものとし、その平均値から標準偏差の範囲内にある画素のみを解析の対象とするためである。これら3頂点のうち、可視・近赤外の反射率が最も小さい値をとる点が水のエンドメンバー、可視の反射率が最も大きい値をとる点が土壌のエンドメンバー、近赤外の反射率が最も大きい値をとる点が植生のエンドメンバーであると定義する(Figure 1)。

2.2 放射率補正

均一な温度 T_s の地表面においては、平均放射率 $\bar{\epsilon}$ を物質毎の放射率スペクトルと $\epsilon(\lambda)$ とセンサの正規化応答関数 $\Psi(\lambda)$ を用いて次のように定義することができる。

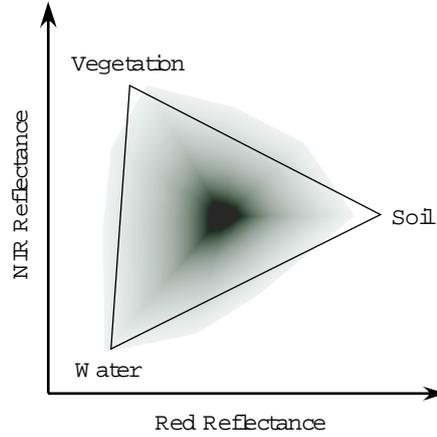


Fig. 1. Definition of endmembers based on triangle estimation including 95% of convex hull.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda) \epsilon(\lambda) B(\lambda, T_s) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda) B(\lambda, T_s) d\lambda} \quad (5)$$

$$= \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda) \epsilon(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

平均放射率は地表面温度の関数である。 λ_1, λ_2 は応答関数の上下端を、 $B(\lambda, T_s)$ はプランク関数をそれぞれ表している。一方で、地球を構成する物質においては、放射率の温度依存性は熱赤外の $8\text{-}12\mu\text{m}$ 窓においては非常に低く、ほとんどの物質が 0.94 以上の放射率を持ち、 $240\text{-}320\text{K}$ の温度変化と 60 度までの観測角変化に対して高々 0.004 程度 (0.4% の誤差) の変化しかもたないことが実験室レベルの計測によって検証されている [Salisbury, 1992]。従って、式 (5) においてプランク関数 $B(\lambda, T_s)$ を一定と見なしても重大な誤差を及ぼさないと考えることができる。この仮定を用いれば、式 (6) に示すように、物質毎の放射率スペクトルとセンサの応答関数のみから平均放射率を簡便に算出できる。

これを非均一な地表面 (ミクセル) に適用するために次の 2 つの仮定を行う。 1) 地表面構成物質の物理的組成は温度変化に関わらず一定である、 2) 地表物質からの放射は互いに独立である。これらの仮定の下、ミクセルにおける平均放射率は植生・土壌・水の画素内面積比率を係数とした線形和として以下のように定義することができる。

$$\begin{aligned}
\bar{\epsilon}^i &= \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{V\Psi(\lambda)\epsilon_v(\lambda) + S\Psi(\lambda)\epsilon_s(\lambda) + W\Psi(\lambda)\epsilon_w(\lambda)\}d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda)d\lambda} \\
&= \frac{V \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda)\epsilon_v(\lambda)d\lambda + S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda)\epsilon_s(\lambda)d\lambda + W \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda)\epsilon_w(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(\lambda)d\lambda} \\
&= V\bar{\epsilon}_v^i + S\bar{\epsilon}_s^i + W\bar{\epsilon}_w^i \tag{7}
\end{aligned}$$

ここで、 $\Psi(\lambda)$ は MODIS の正規化応答関数を、 $\epsilon_v(\lambda), \epsilon_s(\lambda), \epsilon_w(\lambda)$ は植生・土壌・水の放射率をそれぞれ表している。植生・土壌・水の放射率データは、それぞれに対応する放射率のデータをスペクトルライブラリから入手した²。なお、植生・土壌・水のスペクトルにとスペクトルライブラリとの対応関係は後に示す。スペクトルの波長間隔にあわせてリサンプリングを行い、各チャンネル毎の植生・土壌・水の平均放射率 $\bar{\epsilon}_v^i, \bar{\epsilon}_s^i, \bar{\epsilon}_w^i$ を算出する。

2.3 地表面温度推定

地表面温度推定には Wan らが報告している generalized split window 法を用いる [Wan, 1996]。これによると地表面温度 T_s は以下のように与えられる。

$$T_s = C + (A_1 + A_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + A_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + (B_1 + B_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + B_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \frac{T_{31} - T_{32}}{2} \tag{8}$$

ここで、 A_i および C は大気中の積算水蒸気量によって定まる係数を、 $\epsilon = 0.5(\bar{\epsilon}_{31} + \bar{\epsilon}_{32})$ ならびに $\Delta\epsilon = \bar{\epsilon}_{31} - \bar{\epsilon}_{32}$ で、 $\epsilon_{31}, \epsilon_{32}$ はチャンネル 31 および 32 の平均放射率を、 T_{31}, T_{32} はチャンネル 31 および 32 の輝度温度値 (K) を表している。この式は基本的には NOAA/AVHRR で得られている SST の推定方法を陸域に応用したものである。具体的には、Becker らが開発した split-window 法に改良を加えたものであり、 A_1 が 1 ではない係数になっていることが特徴である。従来の係数では観測角が 46 度までしか適用できないのに比べ、係数を一つ追加したことにより、観測角 69 度までの条件のもとで 1 度以内の精度を保証している [Wan, 1996]。実際の計算に当たっては計算時間の短縮を計るため、観測角 (0 から 63 度まで 9 段階) 積算水蒸気量 (0 から 6.0cm まで 0.5cm 間隔)・地表面気温 (273-304K まで 8K 間隔) の各条件ごとにあらかじめ係数を

² MODIS spectral library <http://www.ices.ucs.berkeley.edu/modis/EMIS/html/em.html>

求めてルックアップテーブル (LUT) を作成しておき、内挿補間によって画素ごとに各係数を求めるという方法を採用する。なお、この係数を算出する C 言語プログラムはインターネットを通じて公開されており、Dr. Wan から直接入手した³。

3 使用したデータおよび前処理

3.1 衛星データ

解析に使用した衛星データは、2001年6月4日午前10時49分(現地時間)に撮影されたMODISおよびASTERデータである。MODISは東日本ほぼ全域を含み、ASTERは東京湾を中心とした範囲を撮影しており、MODISの撮影範囲のほぼ直下に位置している (Figure 2)。

MODISデータは、東京大学生産技術研究所で受信された生データをIMAPP(International MODIS/Airs Processing Package)ソフトウェア⁴により処理したレベル1bデータを使用した。まず、走査角の大きな画素に見られるbow-tieと呼ばれる画素の補正を行った。次にレベル1bデータ内に含まれるシステム情報を用いて、チャンネル1,2はラジアン ($W/m^2-\mu m\text{-str}$) に、チャンネル29,31,32は輝度温度値 (K) に変換した。最後に、10kmライン毎に得られる内部の位置情報を用いて、最近隣法によるリサンプリングを行い、等緯度経度座標系に幾何補正した。地図座標系との対応関係を確認したところ x, y 方向共に北西方向に1画素のずれが見られたので、オフセット補正を行った。なお、これら一連の作業は東大生研が提供するウェブサービスにて行うことができる⁵。

ASTERデータはERSDAC⁶において配布されているレベル1bプロダクト(放射量補正, 幾何補正済)を用い、システム情報を用いてチャンネル2,3はラジアン ($W/m^2-\mu m\text{-str}$) に変換した [ERSDAC, 2001]。次に、MODISと同様の方法を用いて、内部の位置情報を用いて幾何補正を行った。次に、正規化植生指数 (NDVI) 画像を用いてASTER画像とMODIS画像との間でパターンマッチングを行い、最も相関の高くなる位置を算出した。その結果、位置合わせ誤差はASTERの画素数で、x方向に15画素、y方向に18画素、北西方向に見られたので、オフセット補正を行い、MODISとの対応領域 (1600x1600画素) を切り出した。切り出し範囲の選択にあたっては、森林、水田、畑、都市域、湖沼、河川、裸地といった、通常陸域に存在すると考えられるほとんどの土地被覆および海域を含むように注意した。

³ Dr. Z. Wan のメールアドレス wan@icess.ucsb.edu

⁴ Wisconsin 大学のホームページ <http://cimss.ssec.wisc.edu/>

⁵ WebMODIS <http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/>

⁶ ASTER GDS <http://aster.ersdac.or.jp/>

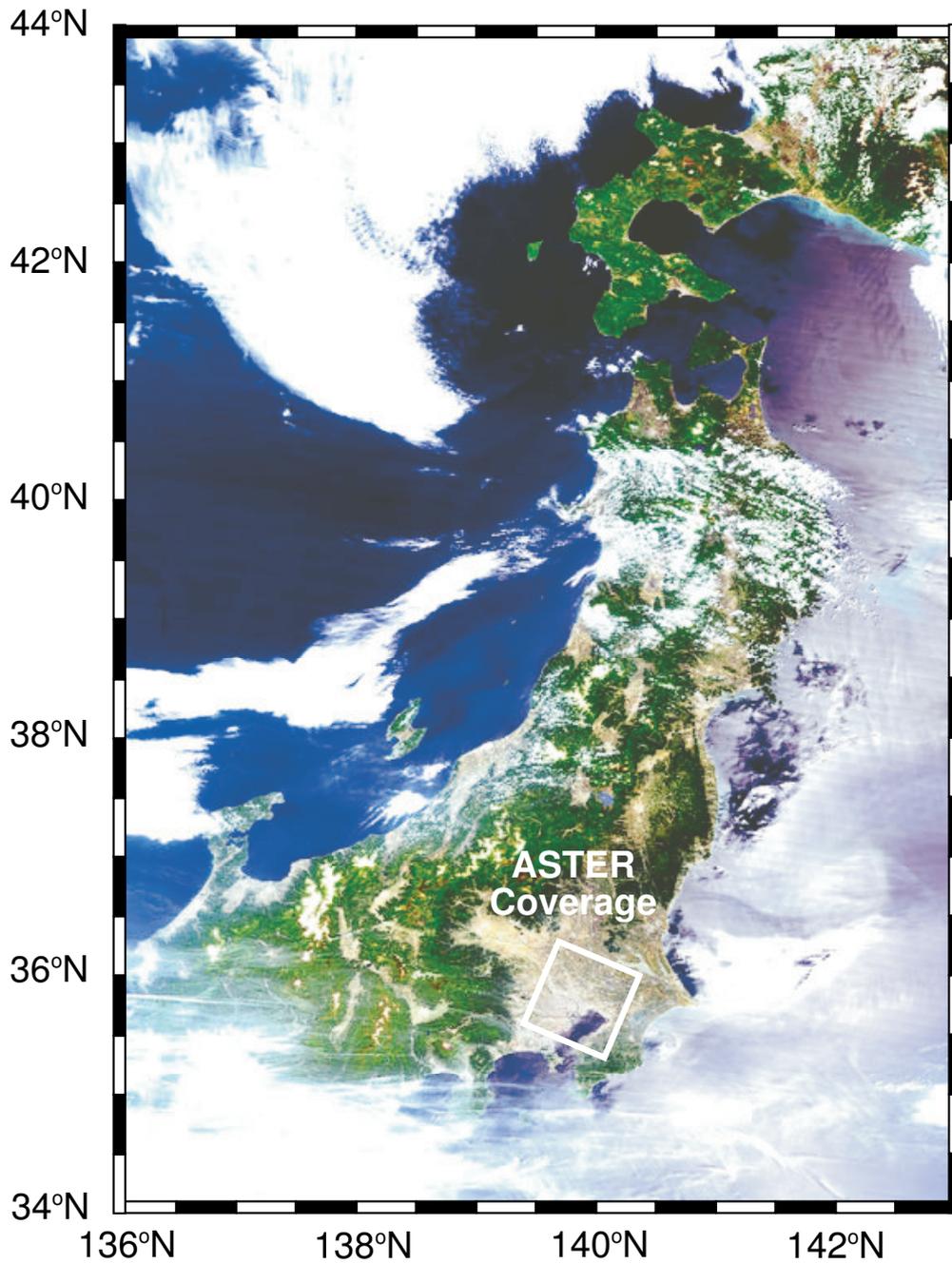


Fig. 2. Terra MODIS image over east part of Japan main island acquired at 10:49 (JST) on June 4 2001. The rectangular area shows the ASTER coverage observed at the same time.

3.2 検証データおよび気象データ

地表面温度の検証データとしてNASAのMODIS/LANDサイエンスチーム作成の地表面温度プロダクト (MOD11) を入手した⁷。HDF-EOSフォーマット

⁷ NASA/GSFC <http://redhook.gsfc.nasa.gov/imswww/pub/imswelcome/>

内に格納されている複数のデータのうち地表面温度、チャンネル 31 および 32 の放射率のデータを抜き出し、sinusoidal 図法から等緯度経度座標系に座標変換した。気象データ(地表面気温・相対湿度)として、MODIS の解析範囲に含まれる県庁所在地の午前 11 時の気温・相対湿度データを気象庁のアメダスより入手した。

4 解析結果および考察

4.1 スペクトル分解の結果

4.1.1 MODIS のエンドメンバーの算出

まず、ASTER データのチャンネル 2 および 3 の散布図から、先に示した手法を用いて VSW のエンドメンバーを求め、ASTER の 1 画素に対応する VSW 画素内面積比率(以下 VSW 画像)を算出した。次に、ASTER の VSW 画像を、16x16 のブロックサイズごとに相加平均をとることにより、対応する MODIS の 1 画素に対応する VSW 画像とした。これと MODIS のチャンネル 1, 2 との間に最小二乗法を適用することによりエンドメンバーを算出した(式(9), (10))。

$$MOD_{Ch.1} = 24.0 V + 102.4 S + 27.5 W \quad (r = 0.81) \quad (9)$$

$$MOD_{Ch.2} = 122.1 V + 75.4 S + 8.1 W \quad (r = 0.89) \quad (10)$$

式(9), (10)において相関係数(r)はそれぞれ0.81, 0.89であり(画素数40000点)、高い正の相関関係が得られた。エンドメンバーが作る三角形をMODISデータの分布図に当てはめてみると、Figure 3のようになった。MODISデータの画素の分布は、ASTERを用いたミクセル分解によって算出された三角形よりも内側に位置していることがわかる。これはMODISの画素に多数ミクセルが存在しているという仮定を裏付ける結果である。また、三角形の外側にも画素が多数存在しているように見えるが、散布図のコンターは各画素が現れる頻度を示しているため、外側に存在する点は40000点のうち高々100点程度である。

ミクセル分解を行う上での注意点は、1) V, S, Wそれぞれのピュアピクセルを含む、2) 解析範囲に雲を含んでいない、3) 特に起伏の激しい地域において陰影を含んでいない、の3点を満たすようにASTERの解析範囲を選定する必要がある。なぜならば、雲の反射率は可視近赤外において非常に高いので、雲を多数含んでいる画像においては土壌のエンドメンバーの反射スペクトルが過大評価される。また、陰影の反射率は非常に低いので、暗く見える部分には、本来は植生であるはずなのに水域として抽出されてしまう画素が見られる。また、解析範囲によってVSWのエンドメンバーの定義が異なる。本研究で解析している範囲においては、スペクトルライブラリとの比較の結果、解

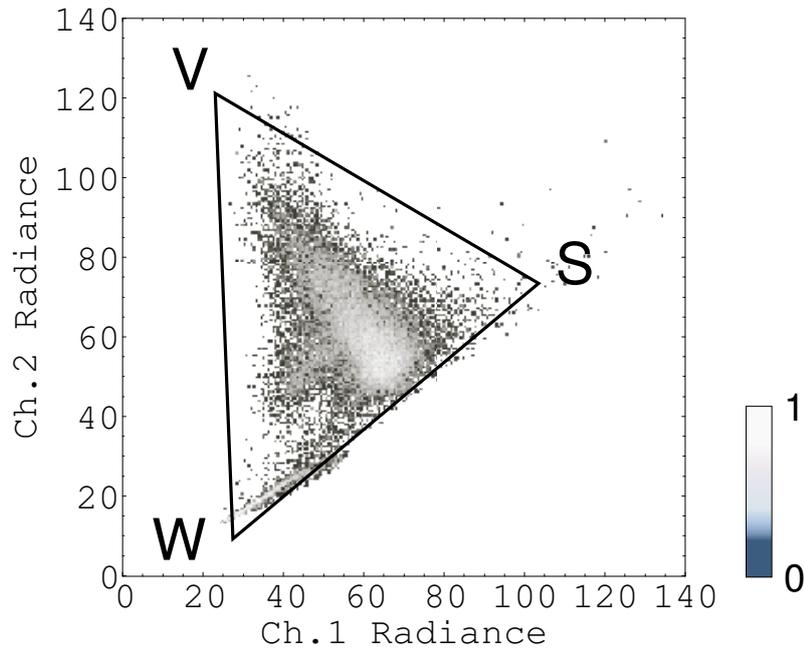


Fig. 3. Endmember triangle on scatter plot between MODIS channel 1 and 2. Bright values show the high frequency abundance of that pixel.

析で得られた植生のエンドメンバーは森林 (広葉樹, 針葉樹を含む) に, 土壌のエンドメンバーはコンクリートに, 水のエンドメンバーは水に各々対応することが明らかとなった. 以下, エンドメンバーについては, 植生は森林, 土壌はコンクリートのことを意味するものとする.

4.1.2 エンドメンバーの検証

算出されたエンドメンバーの妥当性を検証するために, MODIS と ASTER の重複領域において, カテゴリごとの誤差率と相関係数を算出した (Table 2). 誤差率は, ASTER から作成した VSW 画像と, 求めたモデルから MODIS データを用いて作成した VSW 画像との間で, 差の二乗平均値 (RMSE) を求めた. 水域の誤差率が最も低く, 植生と土壌がほぼ同じであり, 全体としての誤差は 4.5% 前後, 相関係数が 0.95 程度となった. 空間分解能が高い MODIS と ASTER を組み合わせて用いることにより, 高い精度のモデルが構築可能であることが確認できた.

Table 2

Evaluation of classification accuracy by simple percent agreement value.

Category	RMSE (%)	Correlation coefficient (r)
Vegetation	4.98	0.956
Soil	4.79	0.946
Water	4.28	0.958

4.1.3 MODISのVSW画像の作成

次に式(9), (10)と各カテゴリの画素内面積比率に関する条件式(2)とを連立することにより, MODISの解析範囲全体におけるVSW画像を作成した(Figure 4).

植生図では, 雲域が除去されて植生のみが鮮明に抽出されていることがわかる. 雲域やサングリントやノイズといった大きい反射を示す成分はすべて土壌の成分として抽出されてしまうので, 残りの水域も精度よく推定できていると考えられる. 一方で, 起伏の激しい山岳地帯においては250m分解能では陰影の影響を避けることはできず, 暗く見える部分には, 本来は植生であるはずなのに水域として抽出されてしまう画素が見られる. これには, 太陽・地表面・センサ間の幾何学的変異を考慮した地形効果の補正を検討すべきである [Sandmeier, 1997].

4.2 地表面温度分布図の作成

4.2.1 平均放射率の算出

植生(森林)・土壌(コンクリート)・水について得られた放射率スペクトルおよびMODISの応答関数は図5に示すようになった. 応答関数を放射率スペクトルにあわせてリサンプリングを行い, チャンネル29, 31, 32のそれぞれについて植生・土壌・水の平均放射率 $\bar{\epsilon}_v, \bar{\epsilon}_s, \bar{\epsilon}_w$ を算出した(Table 3).

平均放射率は植生が0.98前後, 水が0.99前後となった. 土壌の平均放射率はやや低く0.95から0.97程度となった. 放射率をすべてのカテゴリにおいて1と仮定することは, 密な植生や水面においては比較的妥当であると言えるが, 土壌の面積比率が大きいカテゴリ(草地, 畑, 都市域)については重大な推定誤差が生じることを示唆している.

Table 3

Result of band average emissivities for vegetation, soil and water.

Category	Channel 29	Channel 31	Channel 32
Vegetation	0.9843	0.9807	0.9784
Soil	0.9477	0.9697	0.9783
Water	0.9849	0.9928	0.9880

次に式(7)に示すように, 植生・土壌・水の面積比率に平均放射率を掛け合わせるにより, MODISのチャンネル29, 31, 32における放射率画像を作成した. チャンネル29, 31, 32画像を放射率画像でそれぞれわり算することにより, 放射率補正を行った. 作成した放射率画像とMOD11の放射率画像のうちチャンネル31の関東平野を含む部分を示す(Figure 6).

MOD11では雲域および水域にマスクをかけてあるので、放射率は0(黒色)と表示されている。本研究で用いた手法により求めた放射率画像は250mの空間分解能であり、地表の土地被覆状態を詳細に反映した結果が得られている。一方で、MOD11による放射率画像では、1kmの空間分解能であり粗い情報しか得られていない。目視による判読から判断する限りでは、本研究で提案する方法を用いて、より詳細な放射率画像を作成することができる。

4.2.2 地表面温度分布の推定

split-window法を適用するに当たり、水蒸気データおよび地表面気温としてアメダスの湿度および地表面気温を利用した。各ポイントデータをMODISの解像度にあわせて最近隣法により内挿補完して用いた。Wanらによると地表面温度とは地表面から5cm程度の温度を指すとされるが、現地取得データがないため、地表面からおよそ1.5mで観測されたアメダスデータを代用した。split-window法に用いた各係数は、観測角10度毎に離散化してあらかじめ作成したLUTを用いたが、容量が大きすぎるため表示を省略する。なお、雲除去処理は行っていない。最終的に得られた地表面温度分布図を示す(Figure 7)。

4.2.3 地表面温度推定結果の検証

作成した放射量補正済みチャンネル29, 31, 32をMODIS LSTプロダクトと比較した(Figure 8)。検証に用いた地点はASTERとの対応領域に含まれる200×200画素であり、森林、畑、水田、都市域、河川、海域といった多様なカテゴリを含む領域である。

v 放射率補正の結果をMODIS LSTプロダクトと比較してみると、チャンネル29は5度程度高めに、チャンネル31は2度程度高めに、チャンネル32は2度程度低めに推定する結果となった。いずれのチャンネルも地表面温度と正の相関をもつことが確認できるが、簡便なオフセット補正を行ったとしても、グラフから読みとれるように4度程度の誤差が生じる。これらの誤差を補正し、単チャンネルデータから地表面温度を推定するためには、放射伝達シミュレーションを用いた大気補正が必要となる。

次に、split-window法を用いて推定した地表面温度の検証を行う。都市域は植生や水域に比べて放射率が低いため、放射率補正の効果が顕著に現れると考えられる。そこで、MODISの解析範囲に含まれる21の県庁所在地のうち、雲に覆われていない13地点の地表面温度および地表面気温とMODIS LSTプロダクトとの比較を行った(Figure 9)。いずれの地点においても地表面温度の誤差は1度以内であり、split-window法の有効性を確認することができる。なお、地表面気温と地表面温度との間にはゆるい指数関数による近似が見られたが、有意に推定できるほどの相関は見られなかった。Wanらが提示している放射伝達理論計算に基づいたデータベースを利用すれば、本研究で示したように比較的簡便な放射率補正を行うだけで高い精度で地表面温度を推定することが可能である。今回用いたスペクトルライブラリは植生の活動が最も高い時

期に測定されたデータであるので、一時期のみに適用した。季節変化については植生のエンドメンバーと共に、さらなる解析が必要である。また、可視近赤外画像を用いた閾値処理による雲除去処理を行ったが、明らかに雲ではないと見られる画素がMODIS LSTでは雲と認識されていた (Figure 7の右下)。そこで、雲除去処理についてはさらなる検討が必要と考え、今後の課題としたい。

5 まとめ

本研究では、MODISとASTERの可視近赤外データを用いてスペクトル分解を行い、植生・土壌・水の面積比率分布図を作成し、精度の検証を行った。その結果5%程度の誤差で推定できた。土壌の成分には雲やノイズの影響が抽出されてしまう一方、植生と水域については比較的それらの影響を受けにくいということが明らかとなった。つぎに、スペクトルライブラリを利用して熱赤外のチャンネル29, 31, 32に対して平均放射率を算出し、放射率補正を行った。算出された放射量は植生が0.98, 土壌が0.95-0.97, 水が0.99程度となった。都市域、畑、草地など植生が粗なカテゴリにおいては放射率補正の影響が顕著に表れた。最後に、split-window法を用いて地表面温度を推定した。係数は放射伝達モデルによって求められたもので、あらかじめ離散化したLUTを作成しておき、計算の効率化を図った。これらをMODIS LSTプロダクトと比較したところ、推定精度は1度以内であった。本研究で示した方法を用いれば、比較的簡便な方法で地表面温度を推定することが可能である。今後は、季節変化に対する本手法の妥当性の検証、地形効果の補正、雲除去手法の検討について研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、科学技術振興調整費「環境・災害監視のためのアジア衛星観測ネットワークの構築」プロジェクトの一環として実施したものである。関係各位に感謝の意を表する。

References

- [Bateson, 2000] Bateson, C.A., Asner, B.P. & Wessman, C.A. (2000). Endmember Bundles: A New Approach to Incorporating Endmember Variability into Spectral Mixture Analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 38, 1083-1094.
- [Becker, 1990] Becker, F. & Li, Z. (1990). Toward a local split window method over land surface. *Int. J. Remote Sensing*, 11, 19-34.

- [ERSDAC, 2001] ERSDAC (2001). ASTER Users Guide for Level 1b Product Ver. 3.1, 32-36.
- [Floudas, 1995] Floudas, C.A. & Visweswaran V. Eds. (1995). Quadratic optimization. *Klumer Academic Publishers*, 217-269.
- [Goita, 1997] Goita, K. & Royer, A. (1997). Surface temperature and emissivity separability over land surface from combined TIR and SWIR AVHRR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35, 718-733.
- [Kerr, 1992] Kerr, Y.H., Lagouarde, J.P. & Imbernon, J. (1992). Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. *Remote Sensing Environ.*, 41, 197-209.
- [Labeled, 1991] Labeled, J. & Stoll, M.P. (1991). Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: Laboratory investigations on bare soils. *Int. J. Remote Sensing*, 12, 2299-2310.
- [Li, 1993] Li, Z. & Becker, F. (1993). Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. *Remote Sensing Environ.*, 43, 67-85.
- [Nerry, 1998] Nerry, F., Petitcolin, F. & Stoll, M.P. (1998). Bidirectional reflectivity in AVHRR channel 3: application to a region in northern Africa. *Remote Sensing Environ.*, 66, 298-316.
- [Ottle, 1993] Ottle, C. & Stoll, M.P. (1993). Effect of atmospheric absorption and surface emissivity on the determination of land temperature from infrared satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, 14, 2025-2037.
- [Petitcolin, 2002] Petitcolin, F. & Vermote, E. (2002). Land surface reflectance, emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data. *Remote Sensing Environ.*, 83, 112-134.
- [Quin, 1999] Quin, Z. & Karnidli, A. (1999). Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR. *Int. J. Remote Sensing*, 20, 2367-2393.
- [Rees, 1992] Rees, W.G. & James, S.P. (1992). Angular variation of the infrared emissivity of ice and water surfaces. *Int. J. Remote Sensing*, 13, 2873-2886.
- [Roger, 1998] Roger, J.C. & Vermote, E. (1998). A method to retrieve the reflectivity signature at 3.75 μm from AVHRR data. *Remote Sensing Environ.*, 64, 103-114.
- [Salisbury, 1992] Salisbury, J.W. & D'Aria, D.M. (1992). Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window, *Remote Sensing Environ.*, 42, 83-106.
- [Sandmeier, 1997] Sandmeier, S. & Itten, K.I. (1997). A Physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35, 708-717.

- [Schmugge, 1991] Schmugge, T.J. & Andre, J.C. Eds. (1991) Land Surface Evaporation: Measurements and Parameterization. *New York: Springer-Verlag.*
- [Snyder, 1998] Snyder, W.C., Wan, Z., Zhang, Y. & Feng, Y. (1998). Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *Int. J. Remote Sensing*, 19, 2753-2774.
- [Wan, 1996] Wan, Z. & Dozier, J. (1996). A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 34, 892-905.
- [Wan, 1997] Wan, Z. and Li, Z. (1997). A Physics-Based Algorithm for Retrieving Land-Surface Emissivity and Temperature from EOS/MODIS Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35, 980-996.
- [Wan, 2002] Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. and Li, Z. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing Environ.*, 83, 163-180.
- [Yamagata, 1997] Yamagata, Y., Sugita, M. & Yasuoka, Y. (1997). Development of VSW index and application (in Japanese). *J. Remote Sensing Society of Japan*, 17, 54-63.

List of Figures

1	Definition of endmembers based on triangle estimation including 95% of convex hull.	6
2	Terra MODIS image over east part of Japan main island acquired at 10:49 (JST) on June 4 2001. The rectangular area shows the ASTER coverage observed at the same time.	9
3	Endmember triangle on scatter plot between MODIS channel 1 and 2. Bright values show the high frequency abundance of that pixel.	11
4	Fractional coverages of vegetation, soil and water classes as a result of spectral mixture analysis. Bright values indicate areas of high fractional abundance of that endmember.	19
5	Emissivity spectral of vegetation, soil and water, and spectral response function of MODIS channel 29, 31 and 32.	20
6	Comparison of land surface emissivity of MODIS channel 31 between proposed method and MOD11 product. Bright colors show the high emissivity value of that pixel.	21
7	Land surface temperature using split-window algorithm in MODIS channel 31 and 32 of east part of Japan main island at 10:49 (JST) on June 4 2001.	22
8	Emissivity corrected land surface temperature of channel 29, 31 and 32 versus MODIS LST product.	23
9	Computed land surface temperature and surface air temperature versus MODIS LST product.	24

List of Tables

1	Comparison of technical specifications between Terra MODIS and ASTER in channels suitable for land surface monitoring. Bandwidth is in micrometers.	2
2	Evaluation of classification accuracy by simple percent agreement value.	11
3	Result of band average emissivities for vegetation, soil and water.	12

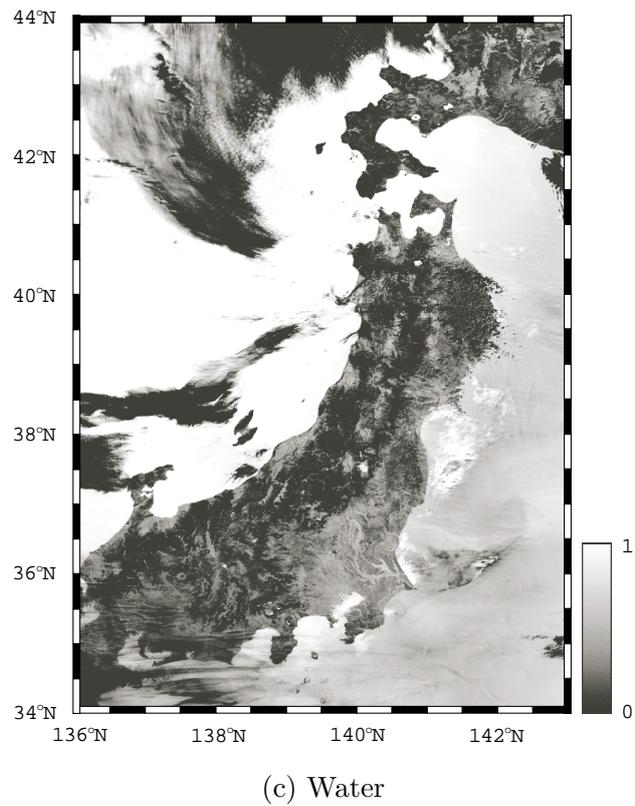
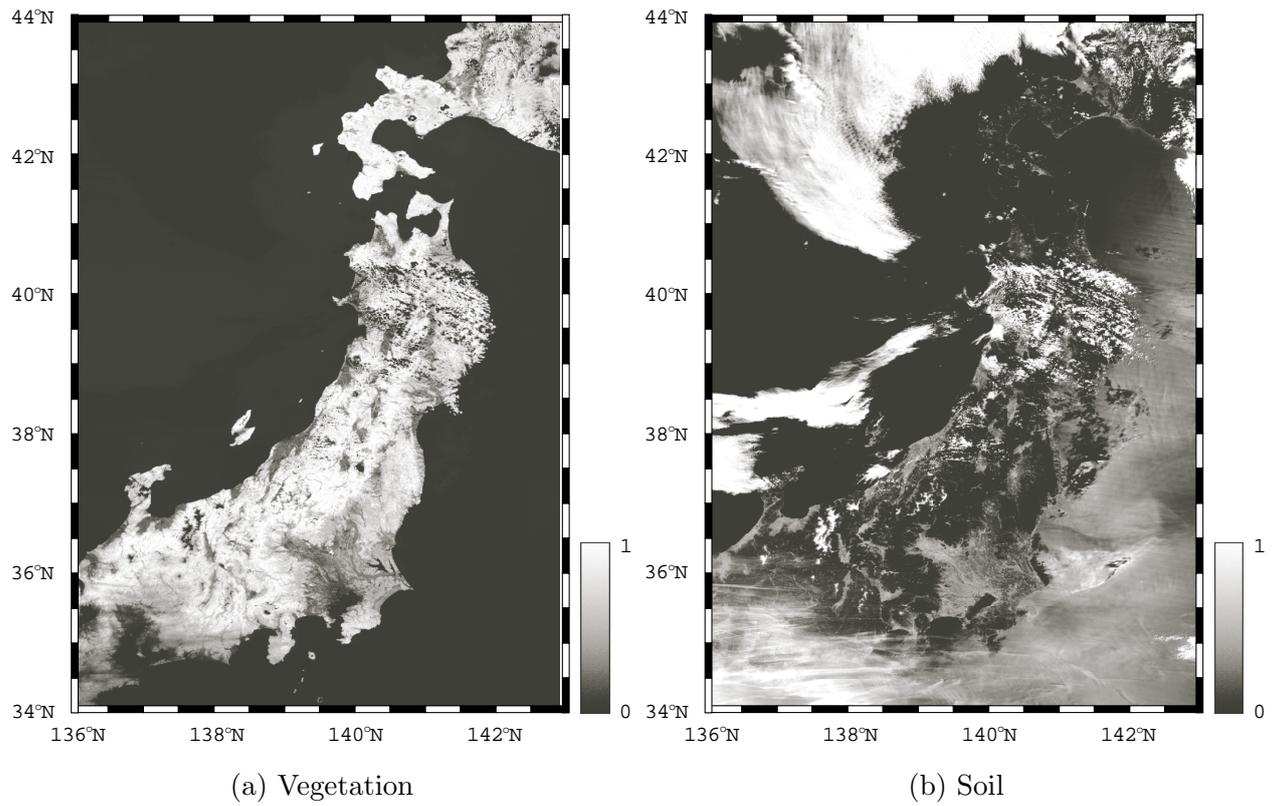
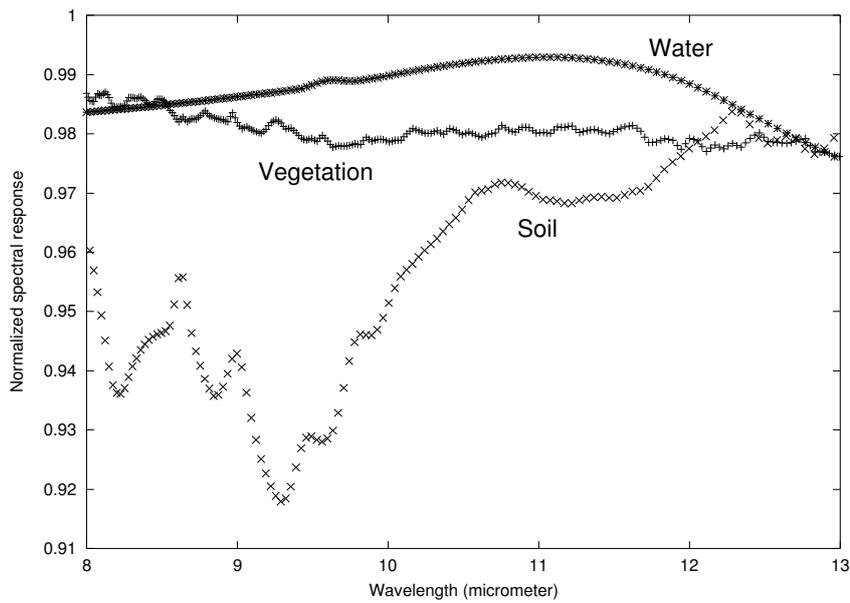
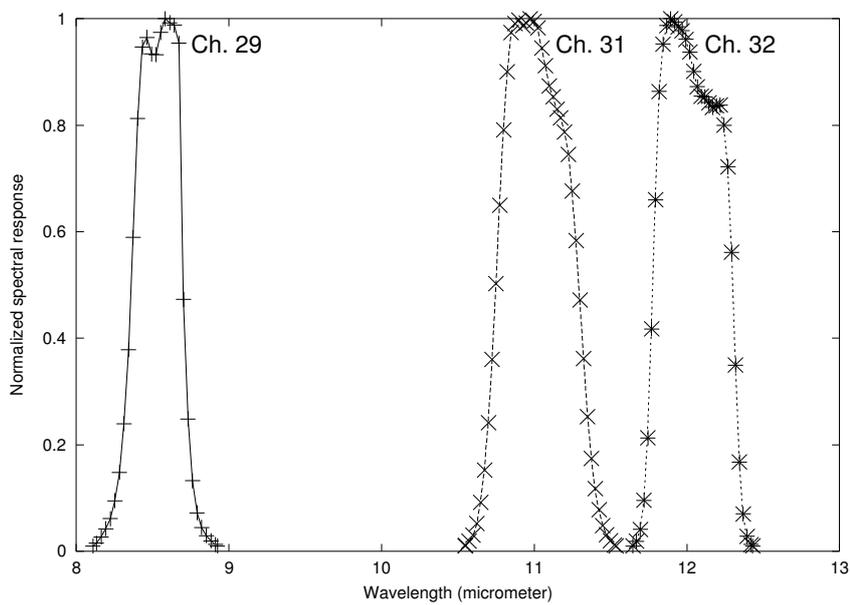


Fig. 4. Fractional coverages of vegetation, soil and water classes as a result of spectral mixture analysis. Bright values indicate areas of high fractional abundance of that endmember.



(a) Emissivity spectral



(b) Spectral response function of MODIS

Fig. 5. Emissivity spectral of vegetation, soil and water, and spectral response function of MODIS channel 29, 31 and 32.

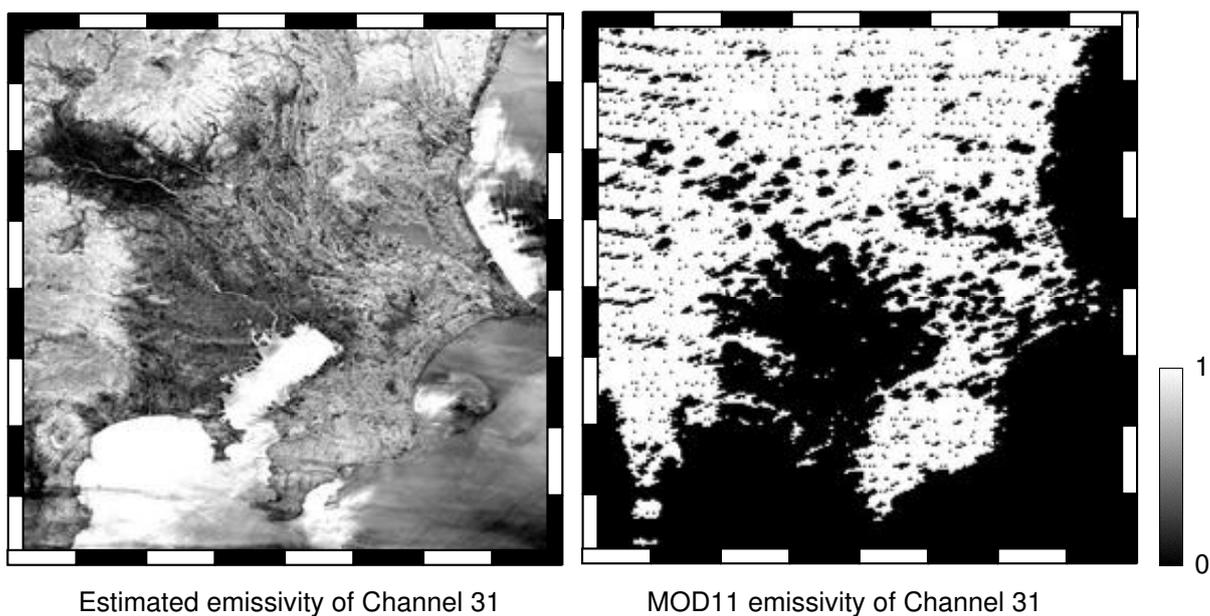


Fig. 6. Comparison of land surface emissivity of MODIS channel 31 between proposed method and MOD11 product. Bright colors show the high emissivity value of that pixel.

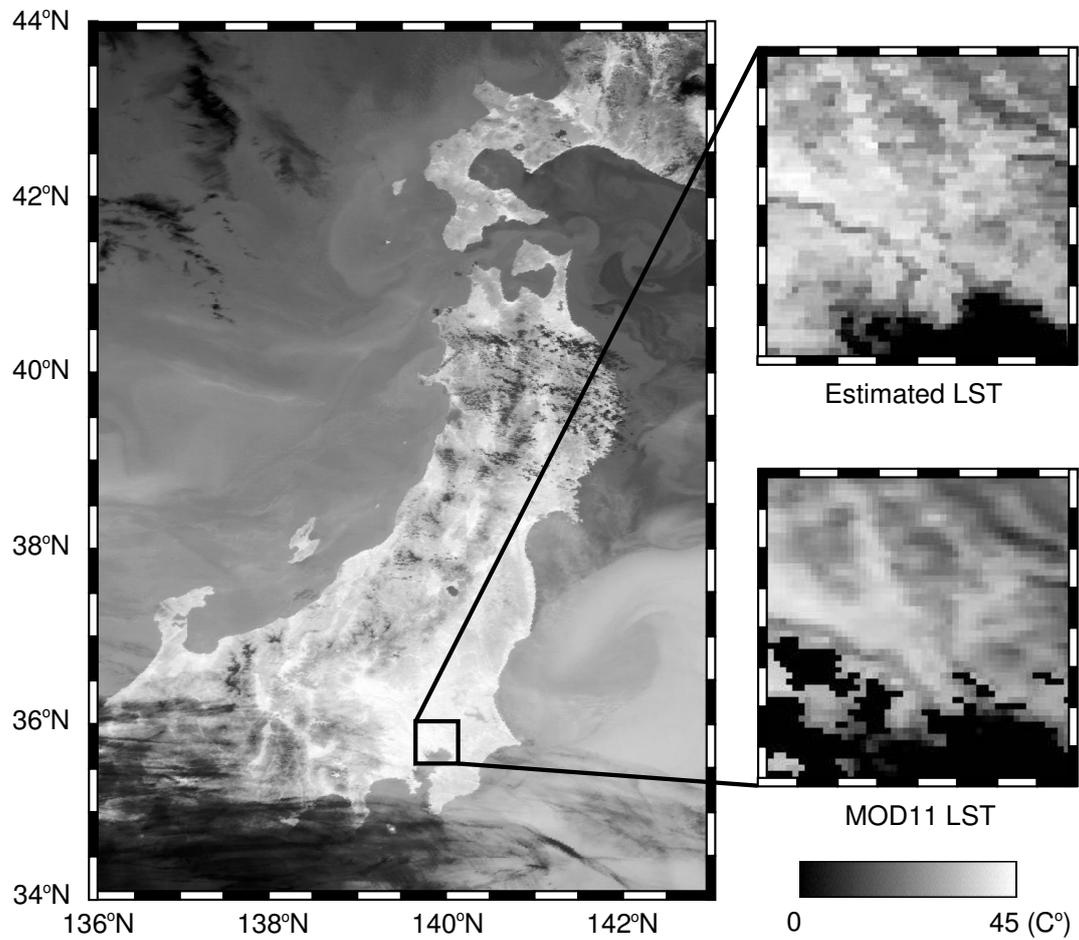
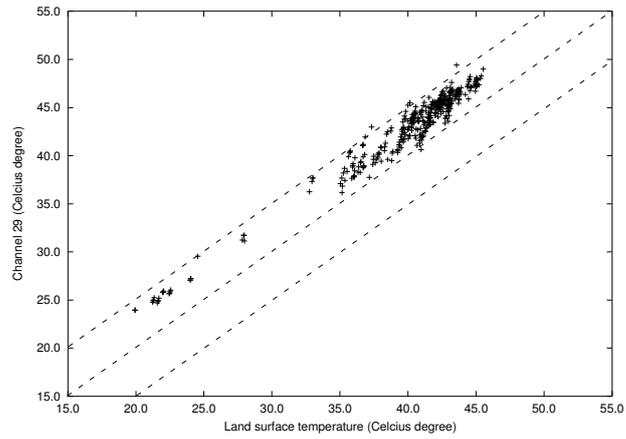
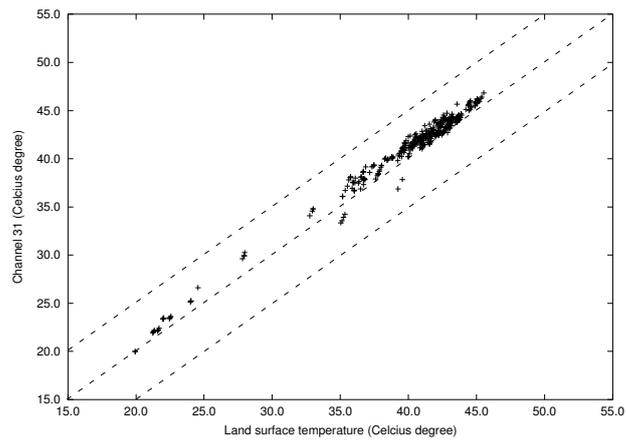


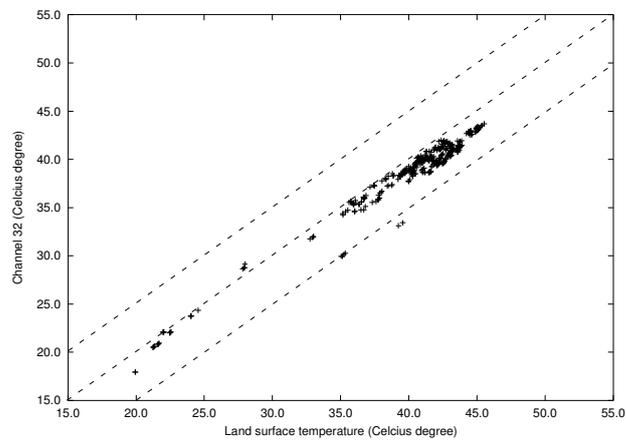
Fig. 7. Land surface temperature using split-window algorithm in MODIS channel 31 and 32 of east part of Japan main island at 10:49 (JST) on June 4 2001.



(a) Channel 29

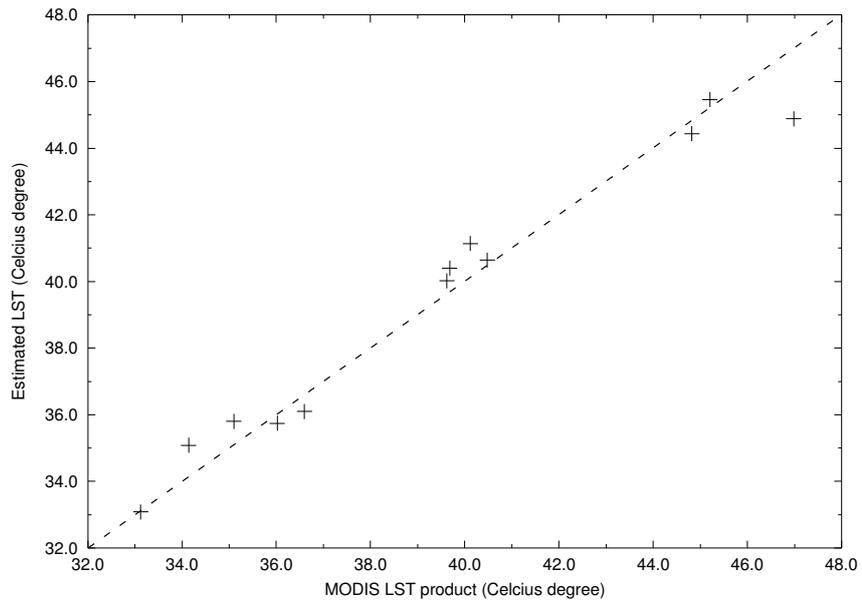


(b) Channel 31

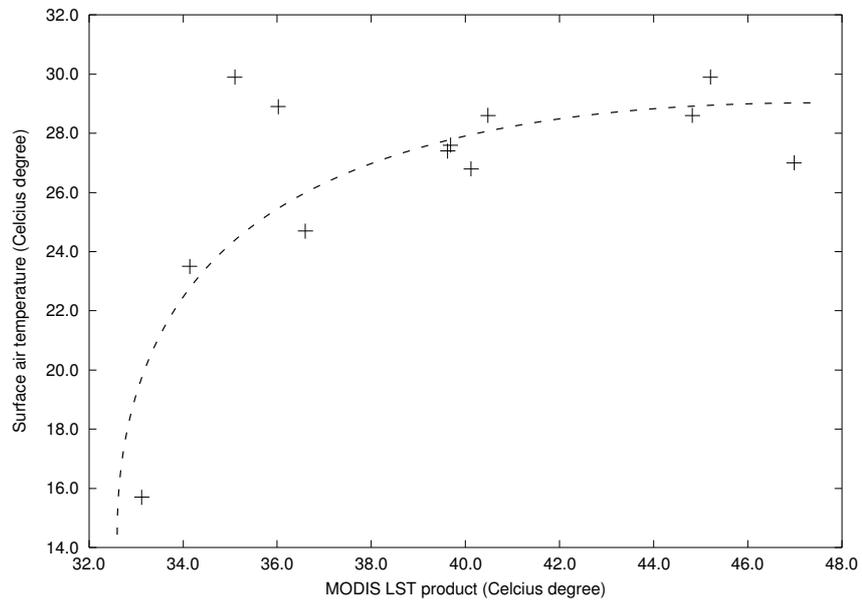


(c) Channel 32

Fig. 8. Emissivity corrected land surface temperature of channel 29, 31 and 32 versus MODIS LST product.



(a) Land surface temperature



(b) Surface air temperature

Fig. 9. Computed land surface temperature and surface air temperature versus MODIS LST product.