

7 熱赤外域の温度-放射率分離における大気の下向き放射の除去

Removal of Downwelling Sky Irradiance in Temperature-Emissivity Separation in the Thermal Infrared Region

松永恒雄 (東京工業大学) 外岡秀行 (茨城大学)
森山雅雄 (長崎大学) 六川修一 (東京大学)

Tsuneo Matsunaga (Tokyo Institute of Technology) Hideyuki Tonooka (Ibaraki University)
Masao Moriyama (Nagasaki University) Shuichi Rokugawa (University of Tokyo)

Contact : Tsuneo Matsunaga TEL 045-924-5552 FAX 045-924-5553
e-mail matsunag@depe.titech.ac.jp

1. EOS-AM1 ASTERと地表面放射率マッピング

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) は通商産業省が米国NASAの地球観測衛星EOS-AM1用に開発した高空間分解能多重分光画像センサである。EOS-AM1にはASTERのほか、Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR), Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS), Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT)といった観測機器が搭載され、1999年に打ち上げられる予定である。

ASTERは可視近赤外域 (VNIR), 短波長赤外域 (SWIR), 熱赤外域 (TIR) の3つの独立したサブシステムから構成される。TIRの諸元をTable 1に示す。TIRの最大の特徴は、熱赤外域を複数のバンドに分割した初の宇宙用高空間分解能イメージャであることである。これにより地表面物質の熱赤外分光放射率 (Fig.1) のマッピングが可能になり、地質リモートセンシングの新たな領域を切り開くものとして期待されている。

Table 1. Basic specifications of ASTER TIR.

Band No.	Spectral Range(μm)	Radiometric Resolution	Absolute Accuracy	Spatial Resolution	Signal Quantization Levels
10	8.125 - 8.475	0.3K	1K - 3K	90 m	12 bits
11	8.475 - 8.825				
12	8.925 - 9.275				
13	10.25 - 10.95				
14	10.95 - 11.65				

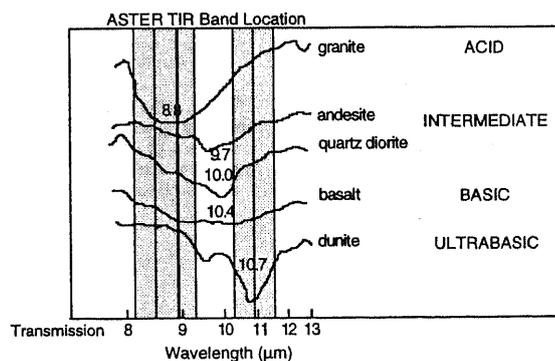


Fig. 1. TIR spectral characteristics of typical igneous rocks.

2 熱赤外多バンド温度-放射率分離

ASTER等の熱赤外多バンドセンサで観測される放射輝度は式1のような形で表現される。

$$I_{observed\lambda}(Z_1) = I_{surface\lambda}\tau_\lambda(Z_0, Z_1) + I_{atm\uparrow\lambda}(Z_1) \quad (1)$$

ここで Z_0 は地表面の標高, Z_1 は衛星高度, λ は波長, τ は大気透過率, $I_{observed}$ はセンサで観測された放射輝度, $I_{surface}$ は地表面での上向き放射輝度, $I_{atm\uparrow\lambda}$ は大気自身の上向き放射輝度を表す。ただしASTER TIRのスキャン角は比較的小さい(約 $\pm 8.6^\circ$)ため, 衛星直下方向のみの観測を考慮している。

いわゆる「大気補正」は, 式1で表される観測値 $I_{observed}$ から $I_{surface}$ を求める処理で, 各バンド毎に τ と $I_{atm\uparrow}$ を求め, 式2に代入することによって実現される。

$$I_{surface\lambda} = \{I_{observed\lambda}(Z_1) - I_{atm\uparrow\lambda}(Z_1)\} / \tau_\lambda(Z_0, Z_1) \quad (2)$$

一方大気補正後の $I_{surface}$ は式3で表される。

$$I_{surface\lambda} = \epsilon_\lambda B_\lambda(T_k) + (1 - \epsilon_\lambda) F_{d\lambda} / \pi \quad (3)$$

ここで ϵ は地表面放射率, B はプランク関数, T_k は地表面温度, F_d は大気及び周辺地形等からの下向き放射照度である。また地表面ではキルヒホッフの法則が成り立つと仮定している。式3より分かるように「大気補正」後の $I_{surface}$ であっても大気の情報 F_d をまだ含んでいる。またASTER TIRの場合には, 5バンド分の式3からなる連立方程式が得られるが, 未知数は $\epsilon_i(i=10..14)$ はASTER TIRのバンド番号を表す。)と T_k の6個であり, 連立方程式数より未知数の方が多い。従ってこのままでは解を一義的を求めることはできない(F_d は大気補正の過程で求められる)。

この問題は「温度-放射率分離 (Temperature-Emissivity Separation)」と呼ばれ, 今までに様々な解法が提案されてきた。ASTERの標準プロダクト用には, 松永の提案したMMD法(松永, 1994)を基礎とするアルゴリズム(Gillespie et al., 1996; Gillespie et al., 1998)が開発され, NASA内部における数度のpeer-reviewを経た後, 正式に採用された。同アルゴリズムは現在日米両国の地上データ処理システムにインプリメントされ, また航空機データへの適用も進んでいる(例えばSchmugge et al., 1998)。MMD法では, 上記の連立方程式に経験式4を加え, 方程式数と未知数を等しくすることにより, 解を求める。

$$\epsilon_{mean} = a(\epsilon_{max} - \epsilon_{min}) + b \quad (4)$$

ここで ϵ_{mean} は $\epsilon_i(i=10..14)$ の平均値, ϵ_{max} 及び ϵ_{min} は ϵ_i の最大値及び最小値である。 $\epsilon_{max} - \epsilon_{min}$ はMin-Max Difference(MMD)と呼ばれる。式4の係数 a , b はFig. 2のように様々な地表面物質の室内分光測定結果の回帰分析によって決定される。

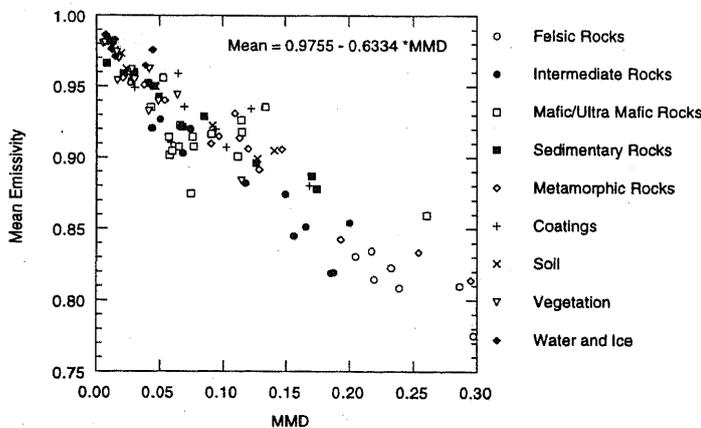


Fig. 2. The relationship between the mean and the MMD of emissivity spectra of various earth surface materials after Salisbury et al.(1988) and Salisbury and D'Aria(1992).

3. 熱赤外多バンドセンサデータの温度-放射率分離処理における下向き大気照度の除去

式3右辺第2項には大気の影響が含まれており、 $I_{surface}$ から地表面のみの情報である ε_i や T_i を求めるためには、これを取り除く必要がある。ただしこの項には未知数である ε_i も含まれており、本来は温度-放射率分離と同時にこななければいけない。

航空機熱赤外多バンドセンサTIMSを有する米国カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所の研究グループでは、従来は式3右辺第2項を温度-放射率分離処理の前に除去していた。その際の ε_i には0.95等の値を全波長/全画素について適用していた (F_d を除去しすぎること防ぐため、この放射率値は全波長/全画素の分光放射率の最大値 ε_{max} に近い。)。この方法では、波長や地表面物質による分光放射率の違いを考慮することができず、1画像内に多様な物質が混在する場合や顕著な分光特徴を持つ物質が存在する場合には不適である。

一方MMD法やASTER標準プロダクト用アルゴリズムでは「反復式除去」と呼ばれる除去法を採用している。この方法では、ある分光放射率初期値（最終計算結果に初期値依存性がほとんどないことが確認されている）を用いて F_d を $I_{surface}$ から除去し、その結果に対し温度-放射率分離処理を適用する。その結果得られた ε_i を用いて再度 F_d を $I_{surface}$ から除去し直し、温度-放射率分離処理を再適用する。これを解が収束するまで反復する。本手法の概略フローチャートをFig. 3に示す。

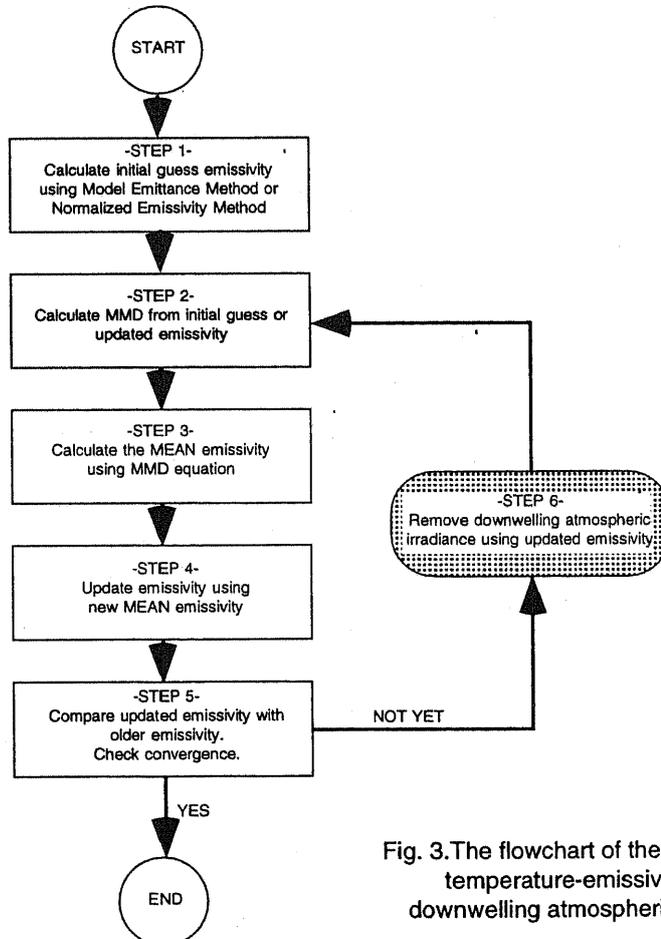


Fig. 3. The flowchart of the iterative procedures for temperature-emissivity separation and downwelling atmospheric irradiance removal.

4. シミュレーションデータセットによる F_d 除去の有効性の検証

F_d 除去法と温度-放射率分離精度の関係を調べるため、ASTER TIRシミュレーションデータに対して温度-放射率分離処理を適用し、その結果を真値と比較した。温度-放射率分離法としてMMD法及び正規化法 (Normalized Emissivity Method, NEM (Realmuto, 1990)) を用いた。シミュレーションデータセットの概要は以下の通りである (総数: 666)。

地表面物質の分光特性: 37種類 (各種岩石, 土壌, 植物, 水, 雪氷)

F_d 計算用大気モデル: 3種類 (熱帯, 中緯度夏, 1976年米国標準)

地表面温度: 上記大気モデルの最下層気温 -5°C , $\pm 0^{\circ}\text{C}$, $+5^{\circ}\text{C}$, $+10^{\circ}\text{C}$, $+15^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$

Table 2に F_d 除去法/温度-放射率分離法毎の地表面温度推定結果誤差の平均値と標準偏差を示す。

NEMでは F_d 除去により誤差の平均値が大幅に減少することが分かる。ただし温度は最大放射率のバンドで決定されるため、 ϵ_{\max} を用いた F_d 除去と反復式 F_d 除去では結果は等しい。一方MMD法では誤差平均値は反復式 F_d 除去が最も小さい。また F_d 除去法に関わらずNEMよりMMDの方が誤差のばらつきが小さいことが分かる。

Table 2. Averages and standard deviations of the errors of estimated surface temperature through temperature-emissivity separation with different sky irradiance correction methods:

NEM = Normalized Emissivity Method, MMD = MMD Method.

E_MAX and coefficients of MMD equations are all optimized to the simulation data.

[$^{\circ}\text{C}$]	NO SKY		E_MAX SKY		ITERATIVE SKY	
NEM	AVG	-0.91	AVG	0.08	AVG	0.08
	STD	0.89	STD	0.80	STD	0.80
MMD	AVG	-0.73	AVG	0.24	AVG	0.01
	STD	0.69	STD	0.60	STD	0.60

次に F_d 除去法の違いによる分光放射率推定値の違いを検討する。シミュレーションデータから顕著な分光特徴を持つ例として「GRANITE1 (花崗岩)」, 持たない例として「SPODOSOL (土壌)」を選び、その分光放射率推定結果をFig. 4, 5に示す。各グラフには18通りの計算結果 (3種類の大气下向き照度と6種類の地表面温度, 実線) と真値 (白丸) を示してある。

GRANITE1の場合、 F_d 除去をしない場合または ϵ_{\max} による F_d 除去では計算結果間のばらつきが大きい。このばらつきは、地表面温度の大小関係により F_d の放射率推定結果への影響が変化することによる。しかし反復式除去を適用した場合には、計算結果のばらつきが小さくなり、かつ真値に近づいている。

一方SPODOSOLの場合には、計算結果間のばらつきはGRANITE1に比べて小さく、また F_d を除去しても減少しない。これはSPODOSOLの場合には $1-\epsilon_i$ がそもそも小さく、 F_d の影響は小さいためと考えられる。またMMDと比べNEMでは計算結果が真値より0.01~0.02ほど小さいが、これは ϵ_{\max} 仮定値 (今回は0.964) の誤差によるものと考えられる。

以上より温度-放射率分離による地表面温度推定誤差の平均値を小さくするためには少なくとも ϵ_{\max} による F_d 除去を行う必要があり、また分光放射率を正しく求めるためには反復式補正を適用する必要があることが分かる。

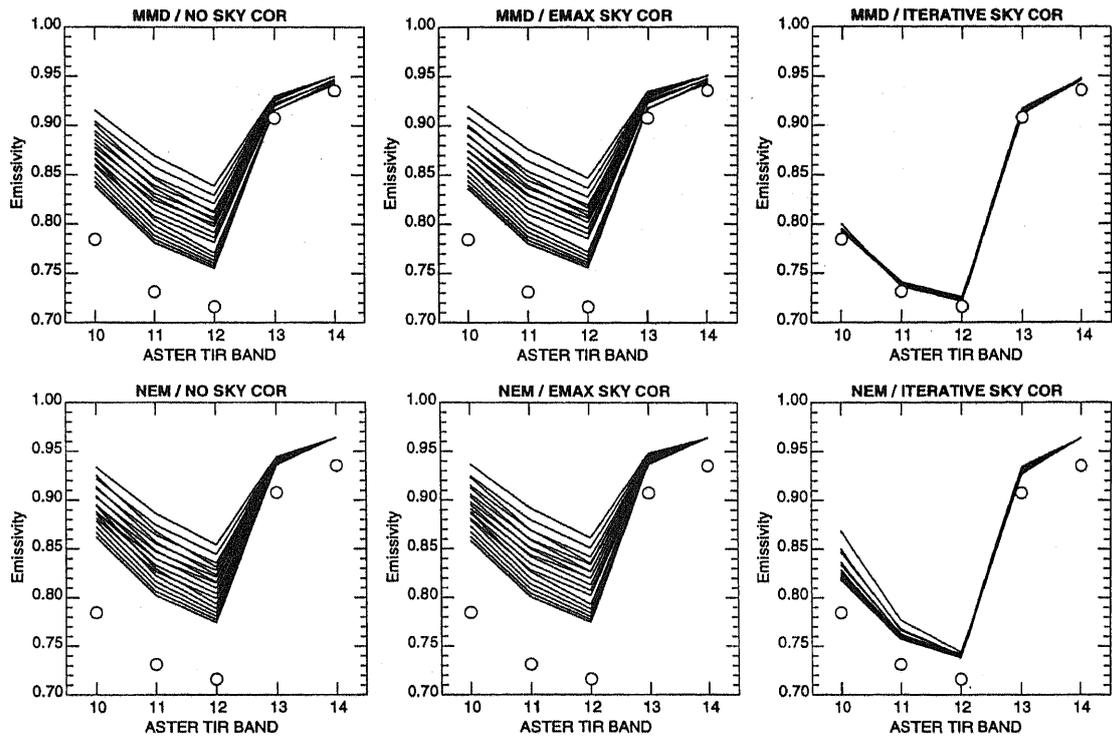


Fig. 4. Results of temperature-emissivity separation of simulated "GRANITE1" ASTER data: (upper left) MMD, no sky correction, (upper center) MMD, sky correction using ϵ_{\max} , (upper right) MMD, iterative sky correction, (lower left) NEM, no sky correction, (lower center) NEM, sky correction using ϵ_{\max} , (lower right) NEM, iterative sky correction. Open circles show the true emissivity spectrum.

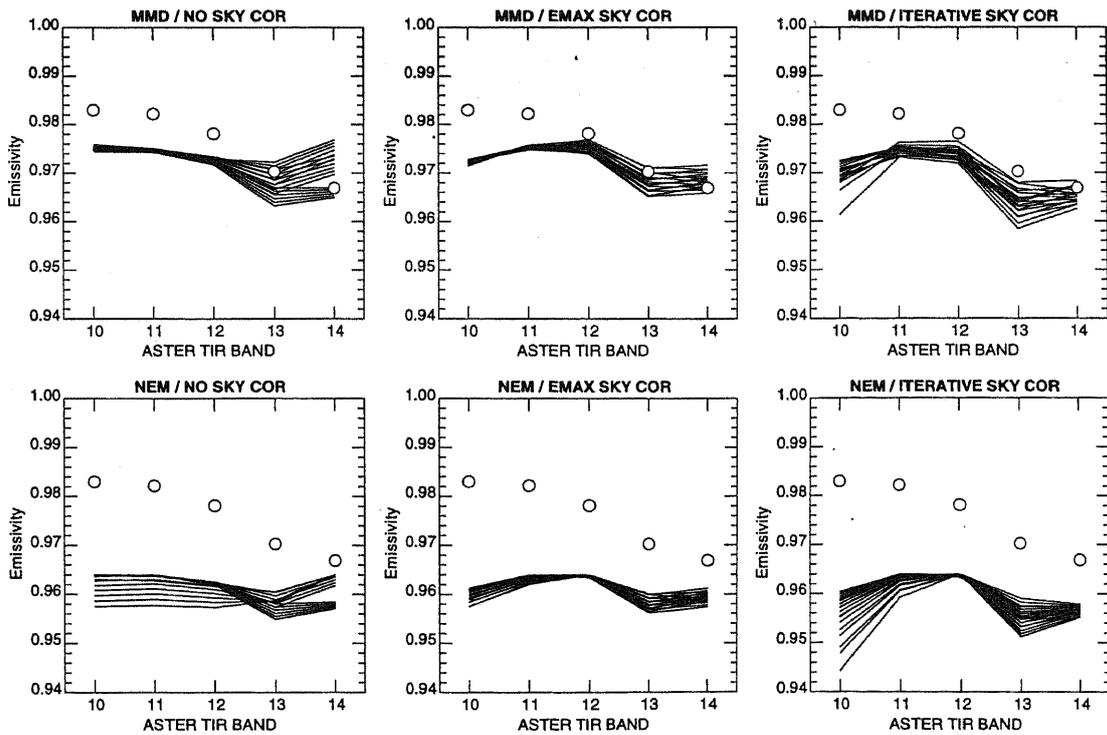


Fig. 5. Results of temperature-emissivity separation of simulated "SPODOSOL" ASTER data.

5. まとめ

本論では、熱赤外多バンドセンサデータの温度-放射率分離処理時に必要な大気及び周辺地形からの下向き放射 F_d の除去法とその有効性について述べた。

実際には $I_{surface}$ を求める「大気補正」段階で加わる誤差や F_d の推定誤差が加わるため、最終的な地表分光放射率 ϵ_i 及び地表温度 T_i の推定精度を評価する際には、センサ校正から大気補正、温度-放射率分離までのデータ処理フロー全てに渡る詳細な解析が必要である。またより高精度なアルゴリズムの開発に置いては、最終的な科学目標と工学的アプローチの整合性を取ることにも注意しなければならない。

参考文献

- Gillespie, A. R., S. Rokugawa, T. Matsunaga, J. S. Cothorn, S. Hook, and A. Kahle, A temperature-emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflected Radiometer (ASTER) images, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 4, pp. 1113-1126, 1998.
- Gillespie, A. R., S. Rokugawa, S. J. Hook, T. Matsunaga, and A. B. Kahle, Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.3, NASA Mission to Planet Earth (MTPE)/Earth observing System (EOS) Publications ATBD-AST-03, pp. 62, 1996.
- 松永恒雄：熱赤外分光放射率の平均及び最大、最小値の経験的關係を用いた温度-放射率分離手法，日本リモートセンシング学会誌，第14巻，第3号，pp. 28-39，1994.
- Realmuto, V. J., Separating the effects of temperature and emissivity: Emissivity spectrum normalization, Proceedings of the Second Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) Workshop, JPL Publication 90-55, pp. 31-35, 1990.
- Salisbury, J. W., and D. M. D'Aria, Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μ m atmospheric window, Remote Sensing of Environment, Vol. 42, pp. 83-106, 1992.
- Salisbury, J. W., L. S. Walter, and D. M. D'Aria, Midinfrared (2.5 to 13.5 μ m) spectra of igneous rocks, USGS Open File Report 88-686, Reston, VA, p. 126, 1988.
- Schmugge, T., S. J. Hook, and C. Coll, Recovering surface temperature and emissivity from thermal infrared multispectral data, Remote Sensing of Environment, 65, 121-131, 1998.