# 地表面温度推定アルゴリズムの開発

# 森山雅雄

# 地表面温度推定アルゴリズムの開発

Investigation of the land surface temperature estimation algorithm

### 森山雅雄 \* 本多嘉明

Masao Moriyama, Yoshiaki Honda

Abstract : For the land surface temperature estimation from satellite based TIR sensor, the attempts are made to modalize the spectral emissivity relationship and to formulate the key to the solution. From the numerical simulation, the retrieved temperature is stable and shows the possibility of the improvement

## 1 はじめに

衛星からの地表面温度推定は、NOAA/AVHRRなどで以 前から試行され、近年 TERRA/ASTER, MODIS などに より標準アルゴリズムとして提供されるようになった [1]。 従来までは陸面過程の解析には、衛星観測輝度温度が利 用されてきたが、時期、センサ、地表被覆の状態の相違に より変動するため、より一般的な地表面温度が求められ ている。現状利用可能なプロダクトは、前述したセンサ からの標準プロダクトであるが、長期にわたる解析には NOAA/AVHRRからの地表面温度が不可欠であるし、将 来的な始点からは ADEOS-II/GLI からの地表面温度も必 要となる。本研究は、8-12[µm] に二つ以上分光チャンネ ルをもつ熱赤外センサからの地表面温度推定アルゴリズム の確立を目標とし、解析的な推定アルゴリズムの開発とそ れによる誤差解析を紹介する。

### 2 地表面温度推定アルゴリズム

#### 2.1 基礎式

衛星で観測された熱赤外データを大気補正して、以下に示 す地表面での上向き輝度 $I_S$ と、地表面での下向き放射照 度Fが得られたとすると、 $I_S$ は以下の放射関係式で表さ れる。

$$I_S = \varepsilon B(T_S) + (1 - \varepsilon)F/\pi \tag{1}$$

ここで、 $T_S$ , B,  $\epsilon$ はそれぞれ、地表面温度、プランク関数、 放射率である。地表面温度推定は、式の数よりも未知数 がひとつだけ多い不静定問題であり、これを解くために、 いくつか近似手法が提案されているが、本研究では、松 木 [2] が提案し、ASTERの標準アルゴリズムとして用い られている、地表面放射率のバンド間関係を利用する手 法を参考にする。松永は、ASTER/TIRの5つのチャン ネルにおける地表構成物質の分光放射率の統計的関係(範 囲-最大値、標準偏差-平均)を利用した。この方法は、分 光放射率からの鉱物同定というASTERの目的に沿った 5チャンネルのセンサで始めて可能となっており、それ以 外の2,3 チャンネルのTIR センサでは適用できない。こ こでは、GLIを例にとって説明する。

GLI/chs. 34, 35, 36 の応答関数と、Spectral library[3] か ら求めたこれらのチャンネルの放射率の平均と標準偏差の 関係を Figure 1 に示す。GLI/TIR は ASTER と比較する と帯域幅が広く、3 チャンネルしかないため、分光放射率 間の明確な統計的関係は成立しない。このため、波長の近 接した chs. 35, 36 の分光放射率の関係を用いる。それを Figure 2 に示す。両者には、物質により灰色体 (放射率が 等しい)と非灰色体の関連が見い出せる。このため、これ らの関連を積極的に解法に導入する。

#### 2.2 解法

上記の二つのチャンネルの分光放射率の関係を導入した地 表面温度推定手法として、放射関係式を連立させ、一つの チャンネルの放射率を他のチャンネルの放射率の関数で表 し、未知数と式の数を等しくする方法を採用する。以下に 式を示す。

$$0 = \frac{\varepsilon_{35}B_{35}(T_S) + (1 - \varepsilon_{35})F_{35}/\pi}{I_{S35}} - 1$$
  
$$0 = \frac{f(\varepsilon_{35})B_{36}(T_S) + (1 - f(\varepsilon_{35}))F_{36}/\pi}{I_{S36}} - 1 \quad (2)$$

$$f(\varepsilon_{35}) = a\varepsilon_{35} + b \tag{3}$$

ここで、下付数字は、GLIの分光チャンネルを表す。上式 は非線形連立方程式であるため、Newton 法により解を求 めるが、解の拘束条件、収束判定など実装には留意すべき 点がある。本研究におけるそれらの解決策を以下に示す。

● 初期条件

多くの場合、輝度温度は地表面温度を越えることはない。 このため地表面温度の初期条件は輝度温度の最大値とし、 放射率の初期値は上限値とした。

● 拘束条件

温度、放射率とも非負であり、放射率の範囲は [0,1] であ る。反復法の解に制限のある場合には、変数変換、ペナル ティ関数などのいくつかの手法があるが、本研究では、あ る変数が上下限を越えた場合、その変数の値を上下限値に して、反復を繰り返すという Hemistetching 法 [4] を採用 した。

#### 収束判定

(2) 式の右辺は、輝度の実測値と計算値の相対誤差である ため、左辺値が大気補正誤差の実効値以下になれば収束し たと判定できる。しかし、放射率関係式(式(3))からのず れ、過大な誤差などの影響により収束条件を満足せず反復 計算を繰り返し、計算が終らないという事態になる可能性 もある。本研究では、反復回数の上限値を規定し、それを 越えた場合は、収束条件を緩和する手法を用いた。この場 合の収束条件として、輝度の相対誤差の平方和が、ある収 束半径以内であれば収束とし、収束半径を増加させること

<sup>\*</sup>長崎大学工学部,〒8528521 長崎市文教町 1-14,

tel.: 095-843-7194, Email: matsu@rsirc.cis.nagasaki-u.ac.jp

で、収束条件を緩和するという手法を採用した。このこと で、推定誤差の品質情報も同時に計算できるという利点が ある。

• 放射率関係式

Figure 2のように二つの分光チャンネルの放射率が、複数 の関係式で表せる場合、関係式毎に地表面温度推定を行な い、式(2)で表される相対誤差が最も小さくなる関係式で の解を推定値とする。

3 数値シミュレーション

#### 3.1 利用データ

地表面温度、下向き放射照度

地表面温度を 250 - 320 [K] まで 5[K] 毎に変動させ、NCEP 1990 月平均大気プロファイルから、地表面直上の気温が選 定した地表面温度と同様のプロファイルを選定し、MOD-TRAN によって下向き放射照度を計算した。但し、地表 面温度が 300[K] を越える場合は、300[K] と同じものを用 いた。

#### • 放射率関係式

JHU spectral library[3] より、堆積岩、火成岩、変成岩、 土壌、非金属の人造物、植生および雪氷、水の 194 種の分 光放射率を、GLI chs. 35, 36 の応答関数によって重み付 き積分して得られた放射率より、非灰色体の関係式として  $\epsilon_{36} = 0.429\epsilon_{35} + 0.560、灰色体の関係式として<math>\epsilon_{36} = \epsilon_{35}$ を採用した。

#### ● 誤差

地表面での上向き輝度には、大気補正により増幅された測 器誤差、および大気補正誤差が含まれる。GLIのNEAT は 300[K] で 0.1[K] であり輝度に変換すると約 0.1[%] とな る。今回は、大気補正による観測誤差の増幅の影響を確認 するため、標準偏差が 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0 [%] となる正規雑音を、上記の地表面温度、放射率、下向 き放射照度から計算した地表面での上向き輝度に加えた。

• 収束条件

収束半径を1.0[%]と定め、6回の反復で収束しない場合、 収束半径を2倍し、6回以内の反復で収束するまで繰り返 すという手順を採用した。

#### 3.2 結果

地表面温度推定値のバイアス誤差、RMS 誤差を Figure 3 に示す。また、収束条件を Figure 4 に示す。収束条件を 緩和する手法の採用により、収束性は確保されていること がわかる。また、バイアス、RMS 誤差は、放射率関係式 を固定したことによるものと推測され、今後、複数の放射 率関係式を用いた反復法を用いることで低減可能と考えら れる。

# References

- [1] http://www.terra.nasa.gov
- [2] 松永, 熱赤外分光放射率の平均及び最大、最小値の経験的関係を用いた温度-放射率分離手法,日本リモートセンシング学会誌, Vol. 14, No. 3, 230 241, 1994.
- [3] Salisbery, J. W., D. M. D'Aria, Emissivity of terrestrial materials in the 8 - 14 µm atmospheric window, Remote Sens. Environ., Vol. 42, No. 2 83 - 106, 1992.
- [4] 今野、山下、非線形計画法、日科技連



Figure 1: Spectral response (left) and Average and S.D. of the emissivity (right)



Figure 2: Relationship between the spectral emissivity of GLI 35 and 36



Figure 3: Bias and RMS error of the estimation