

## 熱赤外域における放射伝達方程式の近似表現

森 山 雅 雄\*・網 木 陽 三\*\*  
石 松 隆 和\*The Simplified Expression of the Radiative  
Transfer Equation in the Thermal IR Spectrm.

by

Masao MORIYAMA\*, Youzo AMIKI\*\*  
and Takakazu ISHIMATSU\*

The simplified expression of the radiative transfer equation in the thermal IR spectrum are made for the fundamental formulation of the  $\epsilon$ -T separation through the multispectral thermal IR sensor such as ASTER onboard EOS-am1 will be launched at 1998. In the simplification, there are there approximations are made for the reduction of the unknown variables. The first approximation is the use of the spectrally integrated Planck function, transmittance and surface emissivity instead of the line-by-line radiative transfer process calculation. The second approximation is the reduction of the atmospheric radiation term into the product of total transmittance and the newly defined value named representative atmospheric radiation. And the third is the simplification of the total transmittance calculation on the basis of the assumption which water vapor is the only one absorber. From the numerical simulation based on the 4050 kinds of surface/atmosphere/observation conditions, the proposed simplified radiative transfer equation is sufficient for the  $\epsilon$ -T separation.

## 1. はじめに

熱赤外域におけるリモートセンシングは、人工衛星からの海面水温、各種気体量、気温垂直分布などの推定を可能とし、地球環境科学の分野で多くの貢献をしてきた<sup>1,2,3</sup>。これらはすべて放射伝達方程式とよばれる、地球からの熱放射が衛星に達する仮定を記述する式を、各問題向きの近似解法によって解き、対象となる物理量を推定する手法が使われている<sup>1,3</sup>。今後、熱赤外リモートセンシングに期待されるものとして、多重分光熱赤外データを用いた、地表面の温度および放射率を推定することが挙げられる。この技術は $\epsilon$ -T分離とよばれ、すでに各国で基礎研究が開始さ

れている<sup>4,5,6,7</sup>。 $\epsilon$ -T分離に限らず、宇宙空間からの地表面観測においては、大気の影響（熱赤外の場合であれば吸収及び再放射）を除去することが必要であり（大気補正

放射率が物質によらず一定)を用いているため、推定精度の劣化を招く原因ともなっている<sup>4,5,6</sup>。

筆者らは、放射伝達方程式に適当な近似を加えて解く手法による  $\epsilon$ - $T$  分離法を提案し、その手法が高精度推定を実現できる可能性を示した<sup>7</sup>。本研究では、その予備検討として、放射伝達方程式の近似表現の実現法について述べ、シミュレーションにより精度の検討を行なう。

## 2. 放射伝達方程式とその近似表現

晴天域で、大気による散乱効果および太陽放射を無視した場合の放射伝達方程式は以下の積分方程式で表される<sup>2,3,8,9</sup>。

$$I_\nu = \epsilon_\nu \cdot B_\nu(T_s) \cdot \tau_\nu(O, Z, \theta) + \int_0^Z B_\nu[T(z)] \frac{\partial \tau_\nu(z, Z, \theta)}{\partial z} dz - (1 - \epsilon_\nu) \cdot \tau_\nu(O, Z, \theta) \int_Z^O B_\nu[T(z)] \frac{\partial \tau_\nu(O, Z, \theta)}{\partial z} dz. \quad (1)$$

ここで、 $\nu$ ,  $I_\nu$ ,  $\epsilon_\nu$ ,  $B_\nu$ ,  $\tau_\nu(z_1, z_2, \theta)$ ,  $T_s$ ,  $Z$  および  $T(z)$  は、それぞれ、波数(波長の逆数:単位  $[\text{cm}^{-1}]$ )、波数  $\nu$

大気放射, 第  $i$  チャンネルの総透過率である。

代表大気放射が気温にのみ依存する量であるため, 各分光チャンネル間での代表大気放射の依存性は高いと考えられる。ここで, あるチャンネルの代表大気放射は特定のチャンネルのその既知関数で表されると仮定する。

$$BT_i = f(BT_k). \quad (6)$$

これらの仮定により, 気温を表す未知数はある分光チャンネルの代表大気放射:  $BT_k$  のみとなり, 大気放射項も積分項から総透過率と代表大気放射の積に簡略化される。

## 2.3 総透過率の近似表現

熱赤外領域においては, 多種の吸収物質により吸収/再放射が生じる。放射伝達の厳密な計算においてはこれらの吸収物質を高度別に入手して透過率を求める必要があるが, 大気の窓領域においては, 水蒸気による吸収が支配的であり, 他の物質 (炭酸ガス, エアロゾル等) の寄与は小さい (5%以下)<sup>3</sup>, このため本研究では吸収物質は水蒸気のみと仮定し, 水蒸気の総量と総透過率の関係式を作成する。ここで, 水蒸気の総量は, 大気中の鉛直方向の水蒸気量を降水量の単位 [ $\text{cm}$

率の谷はオゾンによる吸収帯であり、TIMS はここにも分光チャンネルを持つが(チャンネル4), ASTER による宇宙空間からの観測では、この波数帯を採用していないため、本研究ではこのチャンネルを考慮しない。

### 3.1 シミュレーション条件

ここでは、あらゆる大気条件(晴天域)に対応させるため、標準大気/地表モデルとよばれる6種の大気/地表状態を基に、4050種類の大気/地表/観測条件を設定し、総透過率および代表大気放射の回帰係数決定、近似誤差の検討を行なった。以下のシミュレーションで用いた大気/地表/観測条件をあげる。

- ・標準大気/地表モデル：6種  
Midlatitude Summer/winter, Subarctic summer/winter, Tropic, 1976 US standard.
- ・地表面温度の変動値：3種  
 $\pm 0, \pm 3, \pm 6$  [K].
- ・地表面放射率：3種  
1.0, 0.9, 0.8.
- ・相対湿度の変動値：5種  
x1, x1.1, x1.2, x0.8, x0.9 (0-10 [km]).
- ・気温の変動値：3種  
 $\pm 0, \pm 3$  [K] (0-10 [km]).
- ・観測天頂角：3種  
0, 30, 60 [deg.]

### 3.2 真値の計算および回帰係数の決定

輝度温度の推定値と真値の比較を表3, 図2に示す。

Table 3 The root mean square error of the brightness temperature estimation.

ch.	RMS[K]
1	2.22e-01
2	2.77e-01
3	3.64e-01
5	9.04e-02
6	2.20e-01

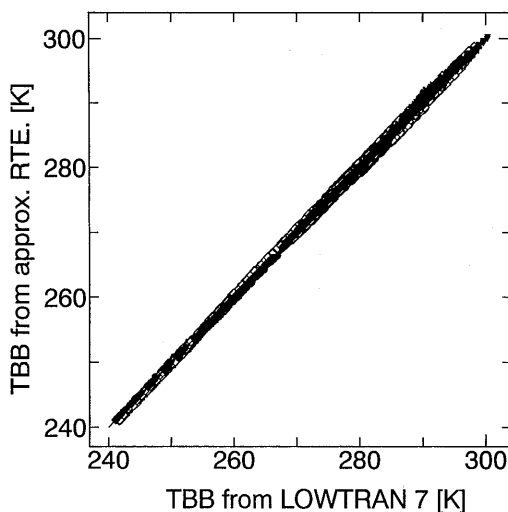


Fig 2 The comparison between the actual and estimated brightness temperature.

輝度温度の RMS 誤差は最大のチャンネル3でも 0.4 [K] 以下であり, ASTER の目標である1.0 [K] 以内の地表面温度推定には十分な精度であることが確認された。また, 誤差の原因のうち最も大きなものは他の吸収物質の影響であると考えられる。これは, オゾンの吸収帯にわずかにかかっているチャンネル3における誤差が最大であることから説明できる。この波数帯は ASTER において, オゾンの吸収を避けるように選択される予定である。

## 5. 結 論