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 Spectrum.

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 ε -T separation through the multispectral thermal IR sensor such as ASTER onboard EOS-aml 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 ε -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^{1,2,3}。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^{1,3}。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 ϵ -T 分離とよばれ、すでに各国で基礎研究が開始さ

平成5年9月30日受理 *機械システム工学科 **松下電器産業㈱ れている^{4,5,6,7}。 ϵ -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(大気補正とよぶ),加えて ϵ -T 分離の場合には,本質的に未知数が既知数よりも多い under-determine 問題であるため,精度向上のためにはこれらの点を考慮した解法を確立することが必要となる。現在までに提案されている ϵ -T 分離法のほとんどは,大気状態が既知であることを仮定しているため,ラジオゾンデなどで取得した大気の垂直プロフィルが必要となり,汎用性に欠け,また,放射率のスペクトル分布に過剰な仮定(ある波数における放射率,または最大

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^{4,5,6}。

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 ϵ -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⁷。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^{2,3,8,9}。

$$I_{\nu} = \varepsilon_{\nu} \cdot B_{\nu}(T_{s}) \cdot \tau_{\nu}(O, Z, \theta) + \int_{O}^{Z} B_{\nu} [T(z)] \frac{\partial \tau_{\nu}(z, Z, \theta)}{\partial z} dz.$$
(1)
$$- (1 - \varepsilon_{\nu}) \cdot \tau_{\nu}(O, Z, \theta) \int_{Z}^{O} B_{\nu} [T(z)] \frac{\partial \tau_{\nu}(O, Z, O)}{\partial z} dz.$$

ここで、 ν 、 I_{ν} 、 ε_{ν} 、 B_{ν} 、 τ_{ν} (z_1 , z_2 , θ)、 T_s 、Z お よび T(z) は, それぞれ, 波数(波長の逆数:単位 [cm⁻¹]), 波数 ν における衛星到達輝度, 地表面の 分光放射率,分光プランク関数,観測天頂角 θ(地心 方向が O) での高度 z₁から z₂ にかけての大気の分光 透過率,地表面温度,衛星高度,高度 z における気温 である。この式の各項はそれぞれ、地表面放射が大気 により吸収をうけ衛星に達する成分, 大気放射成分, 地表面で反射した大気放射成分である。この式から、 衛星に達する輝度を計算するためには各高度における 大気状態、および地表面温度/放射率を各波数毎に既 知としておく必要があることがわかる。言い換えれば, そのような量はリモートセンシングでは未知数となる ため、この式は無数の未知数を含むことになる。ここ で,以下の3種の仮定を用いてこれらの未知数を減少 させる。

2.1 スペクトル平均

人工衛星に搭載されている地表面観測用センサは, S/N 比向上のため,比較的広い帯域を持つ。このため, ある分光チャンネルで観測される情報は(2)式で表され る荷重平均輝度である。

$$I_i = \int_{\nu i 1}^{\nu i 2} I_{\nu} \cdot \Phi_i(\nu) d\nu$$

$$\int_{\nu i 1}^{\nu i 2} \Phi_i(\nu) d\nu = 1.$$
(2)

ここで、 I_i 、 Φ_i 、 ν_{i1} および ν_{i2} は、それぞれ分光チャ

ンネル i の観測輝度, 当該チャンネルの正規化された 応答関数, 当該チャンネルの下限/上限波数を表す。 このように, 波数別に分光輝度を求めて荷重平均を 行なう(line-by-line 計算という)理由は, 主に透過 率の波数依存性が大きな領域が存在するためである (例えば, 水蒸気, 炭酸ガスなどの吸収帯)¹。ここ で, 地表面観測用センサは, 大気の透過率が大きく, その波数依存性も小さい波数域(大気の窓領域)に感 度を持つことに着目し, line-by-line 計算の代わりに, 事前に応答関数により荷重平均されたプランク関数, 放射率, 透過率((3)式)を用いることで, line-by-line 計算が不要なチャンネル毎の放射伝達方程式を用いる ことにする。

$$\varepsilon_{i} = \int_{\nu i \, 1}^{\nu i \, 2} \varepsilon_{\nu} \cdot \Phi_{i}(\nu) \, d\nu$$
$$B_{i}(T) = \int_{\nu i \, 1}^{\nu i \, 2} B_{\nu}(T) \cdot \Phi_{i}(\nu) \, d\nu, \qquad (3)$$

$$\tau_i(z_1, \ z_2, \ \theta) = \int_{\nu i 1}^{\nu i 2} \tau_{\nu}(z_1, \ z_2, \ \theta) \Phi_i(\nu) d\nu.$$

$$I_{i} = \varepsilon_{i} \cdot B_{i}(T_{s}) \cdot \tau_{i}(O, Z, \theta)$$

$$+ \int_{O}^{Z} B_{i}[T(z)] \frac{\partial \tau_{i}(z, Z, \theta)}{\partial z} dz \qquad (4)$$

$$(1 - \varepsilon_{i}) \cdot \tau_{i}(O, Z, \theta) \int_{Z}^{O} B_{i}[T(z)] \frac{\partial \tau_{i}(O, z, O)}{\partial z} dz.$$

この式の採用により,分光波数毎に(1)式の放射伝達方 程式を計算する必要がなくなり,計算時間,および各 波数毎の吸収係数などの入手すべき既知数を減少させ ることができる。

2.2 大気放射量の近似表現

放射伝達方程式((4)式)中の大気放射項(積分項) を求める場合は、大気を鉛直方向に層別し、各層内で の気温分布は一定と仮定し、各層で透過率の偏微分項 を差分近似して、総和計算を行なう^{1.3}。この考え方 を拡張し、大気を吸収物質密度が一定で、等温である と仮定すれば、大気放射項は以下のように総透過率と 気温から決定される代表大気放射の積として表現され る。

$$\begin{bmatrix} 1 - \tau_i(\theta) \end{bmatrix} \cdot BT_i$$

$$\coloneqq \int_0^Z B_i [T(z)] \frac{\partial \tau_i(z, Z, \theta)}{\partial z} dz.$$
 (5)

ここで、 BT_i , τ_i は、それぞれ第 i チャンネルの代表

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れの既知関数で表されると 仮定する。

$$BT_i = f(BT_k). \tag{6}$$

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:BTk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 これらの吸収物質量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)³,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([cm])で表したもので**可降水量**とよばれる^{1,3}。

一般に、吸収物質量と透過率の関係は Lambert 則 とよばれる指数則で表されるが³、本研究で用いる総 透過率は(3)式で表されるスペクトル平均値であるた め、以下のような Lambert 則を拡張した式を用いる。

$$\tau_{i}(\theta) = (C_{1} + C_{2}m) \cdot exp[-(C_{3} + C_{4}m)u_{t}^{C5 + C6m}],$$

$$m = 1 / cos(\theta)$$
(7)

ここで u_t は可降水量であり、 $C_1 \sim C_6$ はパラメータで ある。この近似により、透過率計算に必要な未知数は 可降水量のみとなる。

2.4 放射伝達方程式の近似表現

以上3種の仮定から,衛星に到達する分光輝度を表 す放射伝達方程式((1)式)は,各分史チャンネル毎の 観測輝度を表す式として近似表現される。

$$I_{i} = \varepsilon_{i} \cdot B_{i}(T_{s}) \cdot \tau_{i}(\theta)$$

$$+ [1 - \tau_{i}(\theta)] \cdot f(BT_{k})$$

$$+ (1 - \varepsilon_{i}) \cdot \tau_{i}(\theta) \cdot [1 - \tau_{i}(O)] \cdot f(BT_{k}).$$

$$(8)$$

ここで,この近似式中の未知数について検討する。 ε-T 分離においては一つの画素に対応した放射伝達 方程式において,以下の未知数が存在する。

- (1) 地表面温度。
- (2) 各分光チャンネル毎の地表面放射率。
- (3) 可降水量
- (4) ある分光チャンネルの代表大気放射

このうち(3),(4)は大気状態を表す量であり,数km程度 の領域内では一定と仮定されるため,各画素の放射伝 達方程式を連立させることにより,大気状態を表す未 知数をこの2種に抑えることができる。また,(1),(2) は画素毎に異なるため,単純に連立させただけでは未 知数は減少しない。このため,地表面放射率を関数展 開し,その展開係数を未知数とすれば未知数が減少す る。

3. シュミレーションによる検証

上記で提案した近似放射伝達方程式を,地表面温度 観測用センサである TIMS について作成する。TIMS は熱赤外の窓領域に 5 つの分光チャンネルを持つセン サで,米国のジェット推進研究所で開発されたもので ある⁵。このセンサは,航空機搭載用として開発され たものであるが,ほぼ同様のセンサが,1998年打ち上 げ予定の EOS-am1衛星に ASTER という名称で搭 載される予定である⁴。このため本研究では,TIMS が宇宙空間に存在する場合の近似式を作成する。図1 にTIMS の各分光チャンネルの応答関数と,1976 US STANDARD ATMOSPHERE の分光総透過率を表 す。各分光チャンネルが,透過率が高く,そのほとん どが水蒸気の寄与であるような大気の窓領域に設定さ れていることが見て取れる。この図中の中央部の透過



Fig. 1 The Responce function of JPL/TIMS and the transmittance of 1976 US standard atmosphere.

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。

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

 ± 0 , ± 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

総透過率,代表大気放射の回帰係数の計算,および 近似誤差の検討のためには,衛星で観測される輝度, 総透過率,代表大気放射の真値を計算しなければなら ない。この際,前述のシミュレーション条件から,分 光放射輝度,分光総透過率をLOWTRAN 7とよばれ

Tabel 1The regression coefficients of the total
transmittance estimation.

ch	C ₁	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
1	. 941	769e-01	.480e-01	.987e-01	1.05	.402e-01
2	. 957	815e-01	.171e-01	.513e-01	1.27	.502e-01
3	. 961	861e-01	.856e-02	.408e-01	1.40	.439e-01
5	. 984	395e-01	.304e - 02	.552e-01	1.51	.234e-01
6	. 982	324e-01	.509e-02	.782e-01	1.51	.229e-01

る米国空軍地球科学研究所が開発した放射伝達計算ソ フトウェアを用いてそれらの真値を計算し、各分光チ ャンネルの応答関数を用いて荷重平均を行なった¹⁰。 また、各チャンネルの代表大気放射は第5チャンネル の代表大気放射:BT₅の一次式で表されるものとし た。

$$BT_{i} = b_{1i} + b_{2i} BT_{5} \tag{9}$$

また,代表大気放射の真値は以下の式から求めた, ここで上つき添字 LT は LOWTRAN 7 で分光値を求 め,その後応答関数により荷重平均したものを表す。

 $BT_{i} = \frac{I_{t}^{LT} - \varepsilon_{i} \cdot B_{i}[T_{s}] \cdot \tau_{t}^{LT}(\theta)}{[1 - \tau_{t}^{LT}(\theta)] + (1 - \varepsilon_{i}) \cdot \tau_{t}^{LT}(\theta) \cdot [1 - \tau_{t}^{LT}(O)]}$ (0)

3.3 回帰係数

回帰係数は真値と,それぞれの独立変数(総透過率 は可降水量と各測天頂角,代表大気放射の場合は第5 チャンネルの代表大気放射)の間で最小二乗法によっ て求めた。表1,2のこの手法で求めた総透過率,代 表大気放射の回帰係数を示し,図2,3に両者の真値 と推定値の比較を示す。両方の場合とも真値と推定値 はよい一致を見せており,大気の窓領域では大気状態 は2種のパラメータで表せることが示された。

4. 近似誤差の検討

近似誤差を検討する際には、衛星の各分光チャンネ ルで観測された輝度から、以下で定義される輝度温度 (見かけの温度):TB_iを計算し、それを比較するこ とが多い。輝度温度の誤差は、地表面が黒体の場合の 地表面温度推定誤差であると考えられるため、この近 似式を用いた場合の本質的な推定誤差の最低値である と考えられる。

$$B_i [TB_i] = I_i. \tag{1}$$

Tabel 2 The regression coefficients of the representative atmospheric radiation calculation.

ch	b ₁	b 2		
1	650e-06	.585e+00		
2	933e-06	.691e+00		
3	126e-05	.780e+00		
5	.000e-00	.100e+01		
6	.699e-06	.107e+01		

Table 3The root mean squere error of the
brightness tmperature 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

以上の結果から以下の結論が得られる。大気の窓領 域における放射伝達方程式を,スペクトル平均,代表 大気放射の導入による大気放射項の簡略化,吸収物質 を水蒸気のみとした総透過率の簡略化により,輝度温 度の推定精度が0.4 [K] 以内の近似表現を得ること ができ,高精度で拘束条件の少ない ε-T 分離の基礎 式を得ることができた。

辞

謝

日頃,ご討論いただく,帝京大学理工学部電気情報 工学科の土屋清教授,佐賀大学理工学部情報科学科の 新井康平教授に謝辞を表します。

参考文献

- 加藤,嘉納,宮内,内藤,気象の遠隔測定(II), 気象研究ノート第148号,日本気象学会,pp.177, 1983.
- 日本リモートセンシング研究会,図解リモートセンシング,日本測量協会,pp.307,1992.
- 3. 土屋,他,リモートセンシング概論,朝倉書店, pp.358,1990.
- 2. 津, EOS 計画と ASTER プロジェクト,日本リ モートセンシング学会第11回学術講演会論文集, 1-4,1991.
- Kahle, A. B., Surface emittance, temperature and themal inertia derived from Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) data for Death Valley, California, GEOPHYSICS, Vol.52, 858-874, 1987.
- 6. 松永,六川,石井,航空機搭載多バンド熱赤外センサによる地表面温度推定の基礎研究,日本リモートセンシング学会第11回学術講演会論文集,
- 9-12, 1991. 7. 松本,新井,多重分光熱赤外データを用いた大気
- パラメータ,地表面温度,分光放射率の推定,日 本リモートセンシング学会第12回学術講演会論文 集,23-26,1992.
- 8. 会田, 大気と放射過程, 東京堂出版, pp.280, 1982.
- Elachi C., Introduction to the physics and techniques of remote sensing, Wiley Interscience, pp. 413, 1987.
- Kenizeys, F. X., et al., Users' guide for LOWTRAN 7, AFGL/USAF, pp. 158, 1988.