衛星データを対象とした BRDF モデルを用いた 草地植生の草丈算出に関する研究

A Study on Estimation of Grass Height based on BRDF Model using Satellite Data

近田 朝子*・山本 浩万**・梶原 康司***・本多 嘉明***

*Asako KONDA, Hirokazu YAMAMOTO,
Koji Kajiwara, Yoshiaki HONDA*

Abstract : It is important that understand BRDF (Bi-directional Reflectance Factor) effect of ground reflectance for vegetation monitoring. BRDF model proposed by Watanabe et al. (1996) has the characteristics of expression by ground based data and Sun-Target-Sensor geometry. Therefore, it may be able to estimate grass height by using multi-channel satellite sensor data, which has wide swath (ex. ADEOS OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner), EOS-AM1 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)). The aim of this study is to develop the algorithm of estimation of grass height by using BRDF model, which is expressed by polynomial equation. The results show that vegetation height estimated by BRDF model has high accuracy, and also we confirmed that our proposed algorithm is useful for estimating vegetation height.

1. はじめに

地球温暖化, 砂漠化などの環境問題を解決する上で, 陸上のバイオマス, 植物生態系を把握することは重要である。山本等¹⁾は, NOAA AVHRR LAC データを用いて, モンゴル草原におけるバイオマス推定を正規化植生指数 (NDVI: Normalized Differentiate Vegetation Index), 植生被覆率を用いて行い, 精度の高い結果を得ている。また栗田等²⁾は, このバイオマス推定に植物の草丈を考慮すると, バイオマス推定が高精度にできることを報告している。

衛星観測データには, 植物の草丈のような三次元構造等を要因とする二方向性反射効果が含まれる。これより, 衛星データの二方向性反射の効果を抽出するこ

とができれば, 草丈の観測が可能であると考えられる。二方向性反射の効果は, 地表面の sun-target-sensor geometry に依存しており, 波長依存性をもっている。そこで, ADEOS OCTS (1996), EOS-AM1 MODIS (1999) のように広い観測幅をもち, 多くのチャンネルを持つようなセンサならば二方向性反射効果を把握することは可能と考えられる。

そこで本研究では, 草地植生を対象としたモンゴル草原で取得された OCTS のデータの二方向性反射効果を利用して, 草丈算出の手法を提案し, 検証することを目的とする。

2. 研究の流れ

二方向性反射効果を定量化するために多くの BRDF (Bi-directional Reflectance Factor) モデルが提案されている。本研究では, 二方向性反射効果を利用するために, BRDF の円柱モデルを用いて研究を行った。研究の流れを次の 1) から 4) に示す。

- 1) 円柱モデルを用いた二方向性反射のシミュレーションをモンゴル草原の条件下で実施する。
- 2) シミュレーションした値と実測値を比較することにより円柱モデルを実証する。

* 科学技術振興事業団

Japan Science and Technology Corporation (JST)

** 宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan (NASDA)

*** 千葉大学環境リモートセンシング研究センター

Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 40, NO. 6, 2001

- 3) 円柱モデルによる二方向性反射を用いた草丈算出手法を提案する。
- 4) 円柱モデルによる二方向性反射を用いた草丈算出結果と実測値を比較し有効性を実証する。

2.1 BRF モデル

本研究で使用した渡辺等³⁾の BRF モデルは、モンゴル草原のような群落の構造が単純で、地表面状態は均質かつフラットな地域を対象として構築されたものである。そのため、従来のモデルのように、群落構造を表すために、葉の分布関数などの複雑なパラメータを必要とせず、植生被覆率、草丈のように簡易に計測できるパラメータのみを用いている。

図 1 に示すようにこのモデルは、Suits⁶⁾ 4 フラック

ス理論を基本としている。(補足 A-1 参照)

また対象の草は、芝生のように平均的に葉が密に生い茂っているようなものではなく、疎で固まって点にしているものとしているので、植生被覆率 (VCR) に丈 (H : 平均) の草が生えている草地の光学的性質が図 2 に示すような円柱が単位面積あたり N 本分布するモデルが用いられている(補足 A-2 参照)。このモデルを簡易に示したのが式(1)である。

$$R_B(\theta_s, S) = f(VCR, N, H, R_s, \theta_s, R_g, \tau, S) \quad (1)$$

R_B : 衛星観測で得られる反射率

VCR : 植生被覆率

N : 草本の数

H : 草丈

R_s : 土壌の反射率

θ_s : 太陽天頂角

R_g : 対象物 Nadir 方向の反射率

τ : 透過率

S : センサージオメトリ

2.2 BRF モデルによるシミュレーション

BRF モデルの精度検証をするために渡辺等の円柱モデルを利用して、衛星観測のシミュレーションデータを作成する。

シミュレーションで用いたパラメータは、1998年8月9日にモンゴル草原において実測したものを用いる。

VCR , N は観測で得られた画像より求める。 H は、測定値の平均を用い、対象物 Nadir 方向の反射率、土壌の反射率はそれぞれ実測値を用いる。太陽の方位角を 0 deg に設定しセンサ方位角は $0 \sim 330 \text{ deg}$ で 30 deg 毎、スキャン角は $0 \sim 60 \text{ deg}$ まで 5 deg の条件で行った。透過率は、補足 A-3 より $\tau=0$ を代入した。

シミュレーション対象とする衛星センサは OCTS とし、チャンネルは植生観測に用いられる Band 5, 6, 7, 8 とした。表 1 に OCTS の可視近赤外チャンネルについての波長帯と、図 3 に各チャンネルの分光感度特性を示す。

表 2 の条件においてシミュレーションした結果を図 4 に示す。比較のため、同条件で現地観測にて得られた反射率を図 5 に示す。これらのシミュレーション結果の座標系は、 $-y$ 軸方向が太陽方向 (Forward scan), $+y$ 軸方向が逆方向 (Backward scan) を表しており、 $x-y$ 平面における原点からの距離が観測角

図 1 レイヤーモデルの座標系

図 2 円柱モデル

表1 OCTS 波長帯 (可視近赤外チャンネル)

バンド	波長帯 μm
CH 1	0.402~0.422
CH 2	0.433~0.453
CH 3	0.480~0.500
CH 4	0.510~0.530
CH 5	0.555~0.575
CH 6	0.655~0.675
CH 7	0.745~0.785
CH 8	0.845~0.885

図3 OCTS 分光感度特性 (可視近赤外チャンネル)

表2 衛星観測データシミュレーションのためのパラメータ

1998/8/9 10:07 Lat:46:01.466 Lon:106:19.910			
植生被覆率	0.1	Band 5 実測反射率	0.12
草本の株数	50	Band 6 実測反射率	0.14
草丈(平均)	0.09m	Band 7 実測反射率	0.21
Band 5 透過率	0	Band 8 実測反射率	0.23
Band 6 透過率	0	Band 5 土壌反射率	0.11
Band 7 透過率	0	Band 6 土壌反射率	0.13
Band 8 透過率	0	Band 7 土壌反射率	0.16
		Band 8 土壌反射率	0.17

を表している。 x 軸, y 軸が示す太陽方位角, 太陽天頂角を式(2), (3)に示す。

センサー方位角=太陽方位角+ $\tan^{-1}(-x/y)$ (2)

センサー天頂角= $\sqrt{x^2+y^2}$ (3)

現地観測反射率を真値としたときのモデルの RMS

a) ADEOS OCTS Band 5 (555-575nm)

b) ADEOS OCTS Band 6 (655-675nm)

c) ADEOS OCTS Band 7 (745-785nm)

d) ADEOS OCTS Band 8 (845-885nm)

図4 BRDF モデルによるシミュレーション

a) ADEOS OCTS Band 5 (555-575nm)

b) ADEOS OCTS Band 6 (655-675nm)

c) ADEOS OCTS Band 7 (745-785nm)

d) ADEOS OCTS Band 8 (845-885nm)

図5 BRDF 現地観測データ

表3 円柱モデルの観測値に対する RMS 誤差

チャンネル	RMS 誤差
Band 5	0.064152
Band 6	0.080343
Band 7	0.111143
Band 8	0.122391

表4 衛星観測可能なパラメータの分類

R_B : 衛星観測で得られる反射率	可
VCR : 植生被覆率	不可
N : 草本の数	不可
H : 草丈	不可
R_s : 土壌の反射率	可
θ_s : 太陽天頂角	可
R_θ : 対象物 Nadir 方向の実測値	可
τ : 透過率	不可
$Scan$: センサ位置情報	可

誤差を表3に示す。表3より円柱モデルを用いたシミュレーションは、実測値に近い値を導出でき、本研究での利用において十分な精度を持つことがわかる。

2.3 草丈の算出手法

円柱モデルのパラメータの中で、衛星観測が可能なものと不可能なものがある。表4に示すように植生被覆率、草本の株数、草丈は観測することができない。土壌の反射率は、一年中変化しないと仮定し、植物の覆っていない冬期の衛星観測データを用いる。対象物 Nadir 方向の反射率は、衛星観測においてスキャン角が0度付近のデータを用いる。衛星観測で得られる反射率は、植物の覆っているときのデータで、衛星観測スキャン角が大きいときの反射率である。植生被覆率は、NDVIから算出することが可能であるが、直接に観測できるものではないので、ここでは観測が行えないものとして取り扱う。

表4より衛星観測可能なパラメータを円柱モデルに代入すると、式(1)は VCR , N , H を変数とする多項式が得られる。 R_s , R_θ , R_{BRDF} の値を衛星の各チャンネルデータを代入することにより、使用する衛星のチャンネル数の多項式を得ることができ、 VCR , N , H に対する連立多項式を得ることができる。式(4)は、OCTSのチャンネル Band 5, 6, 7 を代入して算出する場合の連立多項式を示す。

表5 草丈算出の解の範囲

植生被覆率 VCR	0～100%
草本の株数 N	0～100本
草丈 H	0～1 m

表6 草丈算出連立多項式のパラメータ

1998/8/9 10:07 Lat:46:01.466 Lon:106:19.910			
Band 5	実測反射率	0.12	Band 5 土壌反射率 0.11
Band 6	実測反射率	0.14	Band 6 土壌反射率 0.13
Band 7	実測反射率	0.21	Band 7 土壌反射率 0.16
Band 8	実測反射率	0.23	Band 8 土壌反射率 0.17

確認できれば、NOAA AVHRR 等チャンネル数が少ないセンサにも対応できると考えられる。

3. 結 果

円柱モデルを利用した草丈算出連立多項式を、モンゴル草原で実際測定された反射率 R_{BRDF} を用いて算出し、実測で得られた VCR , N , H と比較、検証を行った。

算出に使用したチャンネルは、ADEOS OCTS のチャンネル Band 5～8 を利用した。用いたパラメータ、センサジオメトリィを表6に示す。太陽の方位角を 0 deg に設定し、センサ方位角は100deg、スキャン角は40deg の条件で行った。連立多項式は、チャンネルを 1～4 つ用いた場合をそれぞれのチャンネルの組み合わせで行った。表7に導出された解の結果を示す。

$$\begin{aligned}
 R_{Bch5}(\theta_s, S) &= f(VCR, N, H, R_{sch5}, \theta_s, R_{gch5}, \tau, S) \\
 R_{Bch6}(\theta_s, S) &= f(VCR, N, H, R_{sch6}, \theta_s, R_{gch6}, \tau, S) \\
 R_{Bch6}(\theta_s, S) &= f(VCR, N, H, R_{sch7}, \theta_s, R_{gch7}, \tau, S) \quad (4)
 \end{aligned}$$

$R_{Bch\ n}$: Band n 衛星観測反射率
 $R_{sch\ n}$: Band n における土壌の反射率
 $R_{gch\ n}$: Band n における対象物の Nadir 方向の反射率

透過率は、シミュレーションにより $\tau=0$ で、実測値に近い値を導出できていることより、連立多項式にも $\tau=0$ を代入する。

円柱モデルを利用した連立多項式の解は複数持つため、本研究では、 VCR , N , H を表5で示す範囲内で式(4)に代入し、解とした。代入する値は、 VCR は1%, N は1本、草丈は0.01m 間隔で代入した。

この手法でチャンネルを2つ使用して解を求めるが

表7 円柱モデルによる連立多項式から得られた VCR , N , H

チャンネル数	使用チャンネル	VCR	N	H [m]	解の数
1	Band 5	0.02～0.81	1～100	0.02～0.99	4452
1	Band 6	0.02～0.83	1～100	0.03～0.99	3752
1	Band 7	0.08～0.51	1～100	0.06～0.99	2627
1	Band 8	0.10～0.49	1～100	0.07～0.99	2392
2	Band 5, 6	0.08～0.11	2～99	0.07～0.75	19
2	Band 5, 7	0.08～0.11	2～99	0.06～0.45	21
2	Band 5, 8	0.10～0.12	2～93	0.07～0.45	14
2	Band 6, 7	0.08～0.11	2～99	0.06～0.45	14
2	Band 6, 8	0.10～0.11	2～99	0.08～0.45	9
2	Band 7, 8	0.10～0.11	1～99	0.07～0.75	59
3	Band 5, 6, 7	0.08～0.11	2～99	0.06～0.45	13
3	Band 5, 6, 8	0.10～0.11	2～71	0.08～0.45	9
3	Band 5, 7, 8	0.10～0.11	2～93	0.07～0.45	10
3	Band 6, 7, 8	0.10～0.11	2～71	0.08～0.45	7
4	Band 5, 6, 7, 8	0.10～0.11	2～71	0.08～0.45	7

図6 チャンネル1つ用いた場合
(使用チャンネル OCTS Band 5)

図7 チャンネル2つ用いた場合
(使用チャンネル OCTS Band 6, 7)

表7の結果より、使用するチャンネルが1つのとき、すなわち多項式が1つのとき導出される解は2392～4452と多いことがわかる。また、 VCR 、 N 、 H それぞれの値の範囲が大きくなり、限定するのが困難である。図6にBand5のみを利用した場合を示す。

チャンネルを2つ使用した場合、導出される解は9～59と1つのときと比べて少なくなる。特に、Band6とBand8を用いた場合解は、9つと一番少ない数値を示している。また、 VCR 、 N 、 H の値の範囲も小さくなる。特に、 VCR については0.10～0.11とほぼ限定されたといえる。図7にBand6, 7を利用したときの結果を示す。

チャンネルを3つ用いた場合、導出される解は7～13と2つ用いられる場合に比べさらに少なくなることがわかる。このとき一番少ない解を導出するのは、Band6, 7, 8の組み合わせである。しかし VCR については範囲が限定されるが、 N 、 H の範囲については大きくて限定するには至らない。図8にBand6, 7, 8を利用したときの結果を示す。

図8 チャンネル3つ用いた場合
(使用チャンネル OCTS Band 6, 7, 8)

図9 チャンネル4つ用いた場合
(使用チャンネル OCTS Band 5, 6, 7, 8)

チャンネルを4つ用いた場合、導出される解は7つである。解の範囲の限定は、チャンネルを3つ用いるときと同様、 VCR は限定できるが、 N 、 H については限定できない。また、このとき得られる結果は、Band6, 7, 8と同じであった。原則としては、Band5とBand6が類似したBRF特性をもつこと(図4, 5参照)より、得られる解が同じになると考えられる。図9にBand5, 6, 7, 8を利用したときの結果を示す。

この結果より、連立多項式にはチャンネルを多く利用したほうが、得られる解が少なくなることがいえる。

また、チャンネルを3つ利用したときの結果と、チャンネルを4つ利用したときの結果が同じであったことより、BRFの特性が類似したチャンネルを連立多項式に用いらないほうがよいことがわかった。しかし、 N 、 H を求めるには、連立多項式だけでは求められないことがわかる。

以上の結果より、草丈算出のために円柱モデルを用

表 8 現地観測で実測された変数

植生被覆率	0.1
草本の株数	50
平均草丈(mm)	0.090

表 9 円柱モデルを用いた連立多項式の結果
(植物学的理論を考慮)

変数	算出範囲	平均値(mm)
植生被覆率	0.10～0.11	0.105
草本の株数	50～71	60.5
草丈(平均)	0.08～0.09	0.085

いた連立多項式を組み立てるには、

band 6, 7, 8

を用いるのが適切であることがわかった。

次に算出結果を実測値(表 8)との比較、検証を行った。円柱モデルの連立多項式は、band 6, 7, 8 のチャンネルを用いて計算を行った結果と比較する。草丈が高く、株数が少ないものは植物生態学上存在しない。したがって、このような条件の解を、解とみなさないとする。よって band 6, 7, 8 から得られる解は、 H が 0.08～0.09 に範囲を限定することができる(表 9)。この結果は、現地観測に近い値を算出することができた。

4. 考 察

本研究では、衛星データを用いて草丈算出する手法を提案することができた。また、この提案方法を現地観測で実測された反射率に適応したところ、衛星より草丈を算出することが可能であることいえた。

しかし、 N 、 H を求めるには、連立多項式だけでは求められないことがわかった。これは、円柱モデル(A-2)において、常に円柱の半径 r と本数 n が組 (rn) になって、式中に表れることより

$$rn = \left(\frac{VCR * N}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

となり、3 変数のうち、 VCR と N の値は、

$VCR * N$

という値で特定できるのみである。 VCR と N を求めるには植物学的理論を用いなければならない。しかし、 $VCR * N$ を 1 変数で扱うことができれば、2 変数を求めればよいことがわかるので、NOAA AVHRR

等のセンサのチャンネルでも算出することができることがわかる。また、3 変数として求めた本研究において、チャンネル数が少なくても解が求められていることがわかった。ゆえに、今後チャンネル数の少ないセンサでも算出する手法について検討する必要性があると考えられる。

しかし、今回の提案した手法には、土壌における BRDF が考慮されていない。今回対象とした植生の疎の地域では、土壌による BRDF の影響は大きいといわれている。今後、土壌の BRDF を考慮してこの手法を考え直す必要があると考えられる。

今後上記にあげた問題点を考慮しつつ、算出制度の向上に努める必要がある。また発展として、この手法を衛星データに適応し検証を行い、精度の高いバイオマス推定に用いる研究を行っていく。

5. 謝 辞

本研究は、日本科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業「地球変動のメカニズム」研究領域「衛星観測による植物生産量推定手法の開発」の補助を受けて実施されたものである。

(受付日 2000.9.11, 受理日 2001.11.14)

参考文献

- 1) 山本浩万:「衛星データと現地観測データ併用による広域バイオマスマッピングに関する研究」, 2000 年千葉大学大学院自然科学研究科人工システム科学専攻電気・光システム講座博士論文 (1999)
- 2) 栗田圭人・山本浩万・梶原康司・橋本俊昭・本多嘉明:「現地観測データを用いた広域草地バイオマス推定の検証方法に関する研究」, 日本写真測量学会, 写真測量学会平成 11 年度年次学術講演会発表論文集 (1999), p.15-18
- 3) 渡辺千洋, 梶原康司, 本多嘉明, 河合毅治:「草地における方向反射率特性のモデル化に関する研究」, 日本写真測量学会, 平成 9 年度年次学術講演会発表論文集 (1996), 195-198
- 4) 渡辺千洋, 梶原康司, 本多嘉明:「モンゴル草原における BRDF 計測」, 日本写真測量学会, 平成 9 年度年次学術講演会発表論文集 (1997), 121-124
- 5) 渡辺千洋:「草地における BRDF に関する研究」, 平成 10 年度千葉大学自然科学研究科像科学専攻修士

論文 (1997)

- 6) Suits, G.H.: “The Calculation of the Directional Reflectance of Vegetative Canopy”, Remote Sensing of Environment, 2, 117-125 (1972)
- 7) Verhoef W.: “Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model”, Remote Sensing of Environment, 125-141 (1984)

補足 A BRF モデル

A-1 4 フラックス理論

本研究においては Suits⁶⁾によるモデルを基本としている。まず図 1 に示すような地表面に水平な微小な層 dx を考えたとき、太陽直達束 E_s の変化量 dE_s は、 $dE_s = kE_s dx$

であり、消散係数 k で変化する。下方拡散束 E_- の変化量 dE_- は、

$$dE_- = -c'E_s dx + aE_- dx - bE_+ dx$$

であり、直達束の前方散乱係数 c' 、拡散束の減衰係数 a 、散乱係数 b で変化する。同様に、上方拡散束 E_+ の変化量 dE_+ は、

$$dE_+ = cE_s dx + bE_- dx - aE_+ dx$$

直達束の後方散乱係数 c 、 a 、 b で変化する。また、センサへの放射束 E_0 の変化量 dE_0 は、

$$dE_0 = wE_s dx + vE_- dx + uE_+ dx - KE_0 dx$$

であり、直達束 E_s の一次散乱係数 w 、拡散束のセンサ方向への散乱係数 u 、 v 、センサ方向への消散係数 K で変化する。ゆえにこの系は、太陽直達束 E_s 、下方拡散束 E_- 、上方拡散束 E_+ 、センサへの放射束 E_0 に関する以下の 4 つの微分方程式により記述される。

$$\frac{dE_s}{dx} = kE_s \quad (6)$$

$$\frac{dE_+}{dx} = -aE_+ + bE_- + cE_s \quad (7)$$

$$\frac{dE_-}{dx} = +aE_- - bE_+ - c'E_s \quad (8)$$

$$\frac{dE_0}{dx} = wE_s + vE_- + uE_+ - KE_0 \quad (9)$$

太陽直達束 E_s に関する式(6)の解は、

$$E_s = E_s(0)\exp(kx) \quad (10)$$

である。この式(10)を用いて式(7)(8)から E_s を消去する。

式(8)を E_+ に関して解き、結果を式(7)に代入すれば、

$$\frac{d^2 E_+}{dx^2} - g^2 E_+ = [c(k-a) - c'b]E_s(0)\exp(kx) \quad (11)$$

を得る。ここで、

$$g^2 = a^2 - b^2$$

同様の手順によって E_- に関しても、

$$\frac{d^2 E_-}{dx^2} - g^2 E_- = -[c'(k+a) + cb]E_s(0)\exp(kx) \quad (12)$$

を得る。

式(11)(12)を解くと、 E_+ 、 E_- に関する解は、

$$E_+ = A(1-f)\exp(gx) + B(1+f)\exp(-gx) + C\exp(kx) \quad (13)$$

$$E_- = A(1+f)\exp(gx) + B(1-f)\exp(-gx) + D\exp(kx) \quad (14)$$

となる。係数 A 、 B は任意定数で境界条件を与えてやることにより求められる。ここで、

$$C = \frac{c'(k-a) - cb}{k^2 - g^2} E_s(0) \quad (15)$$

$$D = \frac{c(k+a) - c'b}{k^2 - g^2} E_s(0) \quad (16)$$

$$f = \left(\frac{a-b}{a+b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

である。また、 E_0 の層上端 ($x=0$) での解は、

$$E_0 = \left\{ A[u(1-f) + v(1+f)] \frac{1 - \exp[h(K+g)]}{K+g} + B[u(1+f) + v(1-f)] \frac{1 - \exp[h(K-k)]}{K-g} + [uC + vD + w] \frac{1 - \exp[h(K+k)]}{K+k} + \exp(Kh)[A(1-f)\exp(gx) + B(1+f)\exp(-gx) - C\exp(kx)] \right\} \quad (18)$$

となる。ただし、(18)式では $E_s(0)$ で単純化している。 $(E_s(0)=1)$

A-2 円柱モデル

対象とする草地は水平方向に十分に広がり均質である。

また草は芝生や牧草のように葉が密にランダムに生い茂っているようなものではなく、非常に粗に固まって点在しているものを対象としている。

このことから、植物の被覆率 vcr に (平均) 丈 h の草が生えている草地の光学的性質が図 2 に示すような円柱がランダムに n 本分布するモデルに等価であると

仮定する。 vcr , h , n は、それぞれ本文(4)式の VCR , H , N にあたる。この円柱の面は、ランバート面とし、反射率 ρ , 透過率 τ とする。このように仮定することによって、葉面積指数や葉傾斜分布関数を用いることなく SAIL モデルと同様な方法によって消散係数・散乱係数を求めることができる。

まず対象物の画像を用いて円柱の大きさを決定する。被覆率 vcr と円柱の数 n が与えられれば円柱の(平均)半径 r は、

$$r = \sqrt{\frac{vcr}{\pi \cdot n}} \quad (19)$$

となる。消散係数 k は、以下の手順で求められる。微小な層 dx の中に存在する円柱表面の微小面 dw を考える。単位面積当たりに垂直な微小面積 dw のみが存在し、太陽直達束 E_s が太陽天頂角 θ_s で入射するとき、消散係数 k は直達束を遮る効率で定義されるので、

$$dk = n \cdot dW \cos \zeta \tan \theta_s / dx$$

となる。ここで、 ζ は微小面積 dw の法線の方位角である。円柱の場合、

$$dW = r d\theta dx$$

である。 $d\theta$ は dw が占める円柱の中心角である。これより消散係数 k は、太陽直達束が照射されている面に関して積分することにより、

$$k = rn \tan \theta_s \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos \zeta d\theta = 2rn \tan \theta_s \quad (20)$$

となる。同様な手法によって、各パラメータの値を決定する。

単位面積当たりに垂直な微小面積 dW のみが存在し、センサへの放射束 E_0 が観測角 θ_0 方向へ放射するとき、消散係数 K は放射束を遮る効率で定義されるので、

$$dK = n \cdot dW \cos \zeta \tan \theta_0 / dx$$

となる。ゆえに消散係数 K は、放射束を放射する面に関して積分することにより、

$$K = n \tan \theta_0 \int_{\phi - \frac{\pi}{2}}^{\phi + \frac{\pi}{2}} \cos(\zeta - \phi) dW = 2rn \tan \theta_0 \quad (21)$$

となる。拡散束の散乱(多重散乱)を表す散乱係数 a , b は、単位面積当たりに垂直な微小面積 dW のみが存在するとき、

$$da = \cos \zeta dW \left(1 - \frac{\rho + \tau}{2}\right) / dx$$

$$db = \cos \zeta dW \frac{\rho + \tau}{2} / dx$$

である。ゆえに散乱係数 a , b は、散乱面である円柱外側の面に関して積分することにより、

$$a = n \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \zeta dW \left(1 - \frac{\rho + \tau}{2}\right) = 2rn \left(1 - \frac{\rho + \tau}{2}\right) \quad (22)$$

$$b = n \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \zeta dW \frac{\rho + \tau}{2} = 2rn \frac{\rho + \tau}{2} \quad (23)$$

となる。散乱係数 c は、消散係数 k で消散した太陽直達束の散乱成分によって表される。単位面積当たりに垂直な微小面積 dW のみが存在するとき、太陽直達束の散乱成分は、

$$dc = dc' = \cos \zeta dW \frac{\rho + \tau}{2} \tan \theta_s / dx$$

となり、散乱係数 c は、太陽直達束が散乱(消散)される面に関して積分することにより、

$$\begin{aligned} c = c' &= n \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \zeta dW \frac{\rho + \tau}{2} \tan \theta_s \\ &= 2rn \frac{\rho + \tau}{2} \tan \theta_s \end{aligned} \quad (24)$$

となる。散乱係数 u は、拡散束の観測角 θ_0 方向への散乱成分によって表される。単位面積当たりに垂直な微小面積 dW のみが存在するとき、拡散束の観測角 θ_0 方向への散乱成分は、

$$du = dv = \cos(\zeta - \phi) dW \frac{\rho + \tau}{2} \tan \theta_0 / dx$$

である。これより消散係数 u は、観測範囲に関して積分することにより、

$$\begin{aligned} u = v &= n \int_{\phi - \frac{\pi}{2}}^{\phi + \frac{\pi}{2}} \cos(\zeta - \phi) dW \frac{\rho + \tau}{2} \tan \theta_0 \\ &= 2rn \frac{\rho + \tau}{2} \tan \theta_0 \end{aligned} \quad (25)$$

となる。散乱係数 w は、太陽直達束が太陽天頂角 θ_s で入射したときの観測角 θ_0 方向への散乱成分によって表される。単位面積当たりに垂直な微小面積 dW のみが存在するとき、散乱係数 w 方向は、

$$\begin{aligned} dw &= (\cos \zeta \cos(\zeta - \phi) dW \rho \\ &\quad + \cos \zeta \cos(\zeta - \phi) dW \tau) \tan \theta_0 \tan \theta_s / dx \end{aligned}$$

となる。これより、太陽直達束が太陽天頂角 θ_s で入射し観測角 θ_0 方向への散乱される範囲に関して積分することにより、

$$\begin{aligned}
w &= \left(n \int_{\frac{\pi}{2}}^{\phi} \cos \zeta \cos(\zeta - \phi) dW \rho \right. \\
&\quad \left. + n \int_{\frac{\pi}{2}}^{\phi + \frac{3\pi}{2}} \cos \zeta \cos(\zeta - \phi) dW \tau \right) \tan \theta_o \tan \theta_s \\
&= rn \{ [\sin \phi + (\pi - \phi) \cos \phi] \rho + [\sin \phi \\
&\quad - \phi \cos \phi] \tau \} \tan \theta_o \tan \theta_s
\end{aligned} \tag{26}$$

となる。ここで ϕ は太陽からセンサへの方角で、太陽方向が 0、観測方向が ϕ である。また境界条件及び初期値は、

$$E_s(0) = (1 - v)E_{s0} \tag{27}$$

$$E_-(0) = v\tau E_{s0} + E_{d0} \tag{28}$$

$$E_+(h) = \rho_{soil}(E_- - E_s) \tag{29}$$

$$E_o(h) = E_+(h) \tag{30}$$

である。ここで、 E_{d0} は太陽の天空光成分である。

太陽直達束 E_s は、層の上面で円柱の上面によって消散する。ここで消散した光束は、拡散束となる。

この拡散束の処理は、透過した面の面積を求めて各高さでの上向き下向きの拡散束として処理すべきだが、ここでは円柱上面で透過された太陽直達束は円柱上面において全て下向きの拡散束になるものとしている（式(28)）。

図10 透過率の違いによる
BRDF モデルシミュレーション結果

A-3 透過率

衛星が観測方位角は、太陽の入射方向の垂直方向である。そこで、垂直方向でBRFモデルシミュレーションを行った。モデルのパラメータは、表2を使用した。このとき、透過率 τ を 0、5、10、15% に変化させて計算を行った。その結果を図10に示す。 $\tau=0$ と各 τ の誤差の差分を計算した結果、最大で0.0004であることがわかった。