

アルベド推定におけるBRDFの影響

Ground Surface BRDF effects on the extraction of the albedo

土田 聡

Satoshi TSUCHIDA

工業技術院地質調査所, 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-3

Geological Survey of Japan, Higashi 1-1-3, Ibaraki 305-8567, Japan

satoshi@gsj.go.jp

Abstract: The most of natural surface seem to be not similar to lambertian surface. However, the bidirectional reflectance factor of the natural surface has been assumed to be lambertian in many cases of the albedo extraction from satellite data, even if it actually shows the departure from lambertian behavior. In this study, the bidirectional reflectance distribution functions (BRDFs) of four types of natural surface, i.e. soil, vegetation, snow and water, are simulated by radiative transfer model for atmosphere and surface, and the BRDF effects on the extraction of the albedo are then discussed.

Keywords: Bidirectional Reflectance Distribution Function, Albedo, Multiple scattering

1. はじめに

衛星解析において地球表面物質、特に陸域はしばしば等方散乱体として扱われる。しかし、等方散乱に比較的近い性質を持つと言われる砂漠域(特に乾燥湖)でさえ、等方散乱とはかなり異なった反射特性を示す。衛星データからのアルベド推定も地球環境変動解明の目的として期待されているが、この反射特性の問題は避けて通れない¹⁾。

本研究では、地表面を4つのタイプ(土壌、植生、雪面、水面)に分け、それぞれに適合するモデルを用い、大気モデルを組み合わせ、シミュレーションを行った。アルベド推定における二方向性反射分布関数 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) の影響について、このシミュレーション結果から考察を行う。

2. BRDFモデルおよびパラメータ設定

アルベド推定に対する地表面BRDFの影響評価を行うために、地表面および大気放射伝達モデルによるシミュレーションを行った。大気放射伝達の主な計算は加算増乘法²⁾により成され、具体的には Fig. 1 に示すような過程²⁾⁻⁴⁾を経て計算される(本アルゴリズムの詳細については引用文献に任せる)。また、大気モデルを利用せず、地表面モデル

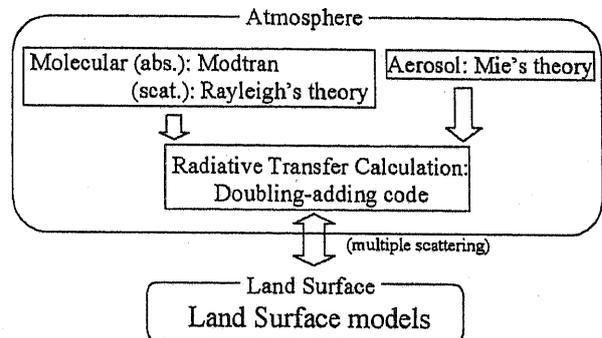


Fig.1 Calculation flow of the simulation of radiative transfer in atmosphere and Land surface

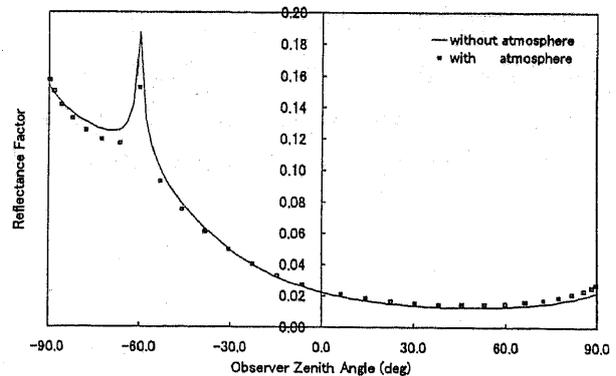


Fig.2 Simulated bidirectional reflectance distribution of vegetation (Clover Patch, $\omega=0.099$, $\gamma_1=0.115$, $2\tau\Lambda=0.277$, $\langle\cos\rangle=0.391$) in principle plane at the solar zenith angle = 60 degree with and without atmosphere of the Tsukuba area, in Japan.

Table 1 Selected models in each surface types for simulation of extracting the albedo from satellite data

Surface Type	Selected Model	Reference
Sand & Soil	Hapke's model	Hapke (1981)
Vegetation	Verstraete's model	Verstraete <i>et al.</i> (1990)
Snow	Doubling method	Hansen (1979)
Water	Cox & Munk model	Cox and Munk (1954)

だけでシミュレーションを行い、アルベド推定への影響評価を行うことも可能ではあるが、大気によるBRDFへの影響も比較的大きいため (Fig. 2 に一例を示す)、本研究では大気モデルと組み合わせ、大気-地表間の多重散乱を考慮した。

地表面については、土壌、植生、雪面、水面の4つのタイプに区分し、タイプごとにモデルを選択した (Table 1)。この4タイプは、全世界を砂漠域・植生域・雪氷域・海洋/陸水域に大区分できるとの仮定の上で選んでいる。都市域をこれらから区分した方がよいとの意見もあるが、都市域については一律的な扱いがまだ難しいため今回は対象から除外した。以下、この4タイプについて述べる。

2. 1 土壌モデル

土壌に対しては、Hapke モデル^{5), 6)}を採用した。土壌・砂礫・泥等を対象とした地表面BRDFモデルには多数のモデルが提案されているが、経験則や統計的な手法が多い。一方、Hapke モデルは放射伝達理論を基に提案 (ただし近似計算上の問題は残されている) され、検証データの積み重ねも多く、本モデルをベースにした改良モデルも多い。

シミュレーションを土壌モデルの代表地域である砂漠域の環境に近づけるため、入力パラメータの多くは、米国西部砂漠域において実測した値から得た⁷⁾⁻⁹⁾。実測で得られなかったパラメータについては適切な気候値モデル等のデータを用いた (US Standard モデル/Modtran³⁾)。Hapke モデルにおける基本的な入力パラメータは、砂漠域・乾燥湖 (表面の粒度はシルト~粘土) のBRDFをシミュレートすべく $\omega=0.8$, $S(0)=0.7$, $h=0.2$, $b=-0.3$, $c=-0.01$ とした。ここで、砂漠域で代表的な砂・砂漠ではなく、乾燥湖をシミュレートしたのは、地球表面上の自然物質の中で乾燥湖が最も等方散乱体に近いと考えられるためである。等方散乱体に近いと言うことは、最もBRDFの影響が小さいことが期待され、サンプル例として興味深い。

2. 2 植生モデル

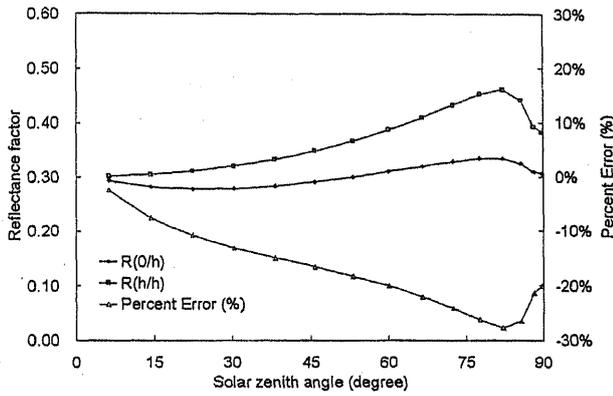
植生モデルに対しても各植生種ごとに多くのモ

デルが提案されているが、ここでは Verstraete モデル¹⁰⁾を採用した。このモデルの最も重要な応用目的に、リモートセンシングデータからのアルベド抽出^{1), 10)}があり、本研究の目的に合致しているためである。

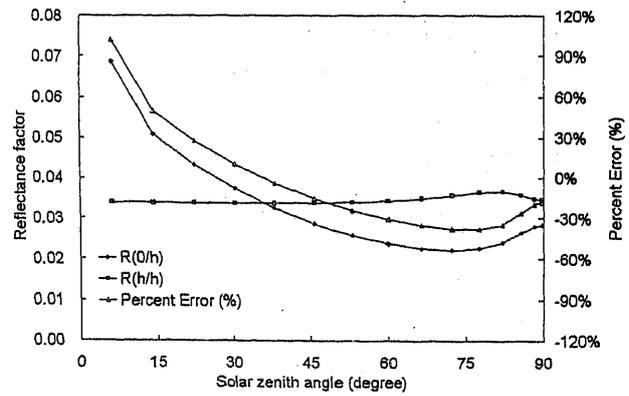
土壌モデルの場合と同様に、シミュレーションをなるべく実際の植生域環境に近づけるため、大気パラメータは、つくば地域・冬期晴天日に実測した値 (大気の光学的厚さ、ゾンデデータ、TOMS のオゾンデータ等) から取得し、実測で得られなかったパラメータについては適切な気候値モデルのデータを用いた (Mid-latitude-Winter モデル³⁾ および Water Soluble モデル¹¹⁾)。地表面パラメータについては大気観測と同期して、地表面のBRDF計測も広域な芝生地上において試みたが、現時点では十分な解析データが得られていないので、ここでは既に報告されているクローバ (Clover Patch) に関するBRDF¹²⁾ を利用した。このクローバのBRDFに関する各パラメータ値は $\omega=0.099$, $\chi=0.115$, $2rA=0.277$, $\langle \cos \theta \rangle = 0.391$ となっている¹³⁾。

2. 3 雪面モデル

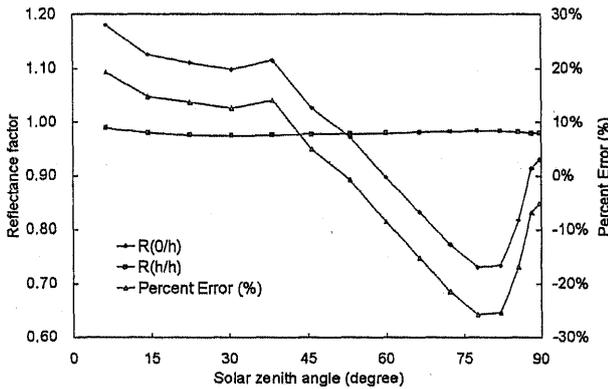
雪面のBRDF計算には Doubling Method (倍増法)¹⁴⁾ もしくは Discrete Ordinate Method¹⁵⁾ が適用している¹⁶⁾。よって、本研究では Doubling Method を用いた。入力パラメータには、シミュレーションをより現実近づけるため、北海道サロベツ地域の雪原 (新雪) で実験を行った際の実測値を用い⁴⁾、実測で得られなかった幾つかの大気パラメータについては、適切な気候値モデルのデータを用いた (Mid-latitude-Winter モデル³⁾ および Water Soluble-Oceanic の混合モデル¹¹⁾)。積雪には、光学的に十分な深さを持つ均質単層の新雪を仮定し、その複素屈折率には氷粒の値 (波長=560nm: $1.3106-i3.29E-9$)¹⁷⁾ を利用した。雪粒のサイズ分布にはガンマ型分布¹⁸⁾を採用し、新雪をシミュレートするため、その有効半径 (Effective Radius) を $50\mu\text{m}$ とした。なお、雪の位相関数は前方散乱が強いいため倍増法を適用するに当たっては、Grant



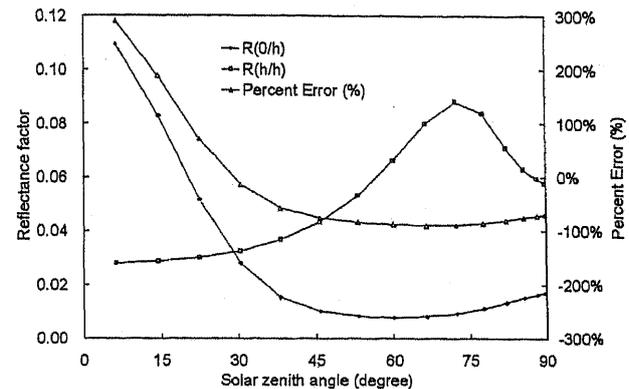
(a) Sand & Soil simulated by Hapke's model. Playa ($\omega=0.8$, $S(0)=0.7$, $h=0.2$, $b=-0.3$, $c=-0.01$) with atmosphere of the desert area, in USA.



(b) Vegetation simulated by Verstraete's model. Clover Patch ($\omega=0.099$, $\chi_l=0.115$, $2r\Lambda=0.277$, $\langle\cos\rangle=0.391$) with atmosphere of the Tsukuba area, in Japan.



(c) Snow simulated by doubling method. Infinite massive layer of new snow ($r_{\text{eff}}=50$, Complex refractive index= $1.3106-i3.29E-9$) with atmosphere of the Hokkaido area, in Japan.



(d) Water simulated by Cox & Munk's model. Ocean (Wind speed=5m/s, Complex refractive index= $1.339-i1.96E-9$) with the standard atmosphere over ocean (1023mb, Mid-latitude-Winter, Maritime).

Fig.3 Hemispherical-directional reflectance factors $R(d=0/h)$ ($d=0$: at the nadir of observer angle), Hemispherical-H. reflectances $R(h/h)$ and its differences (Percent Errors) as a function of the solar zenith angle. $R(0/h)$ and $R(h/h)$ correspond to the atmospherically corrected values from satellite data and spectral albedos respectively.

Method¹⁹⁾を用いて補正を行った。なお、その他細部のパラメータ設定の多くは青木らの研究²⁰⁾に従っている。

2. 4 水面モデル

水面は鏡面反射成分が強いため、これまでも等方散乱体として扱うことはほとんどなく、多くの場合、Cox and Munkによるサングリット (Sun Glitter) の計算手法²¹⁾⁻²³⁾等を利用している。本研究でも、このCox and Munkを利用した大気-海洋系放射計算アルゴリズム²⁴⁾をBRDF計算に採用した。ただし、海洋域等を考えた場合、より詳細には風向、Whitecap²⁵⁾やプランクトン²⁶⁾等も考慮すべきかもしれない。

本モデルの入力パラメータについては、残念ながら実測値の手持ちがないため、大気については海洋

域に適した気候値(1023mb, Mid-latitude-Winterモデル³⁾およびMARITIMEモデル¹¹⁾)を、水面についてはこれまで報告された海洋域における代表的な値^{24), 27), 28)}を利用した(波長550nm 塩分34.3%として、複素屈折率 $1.339-i1.96E-9$, 風速5m/s)。

3. アルベド推定におけるBRDFの影響

前項での設定パラメータを用いシミュレーションを行い、衛星からのアルベド推定におけるBRDFの影響評価を試みた。

Fig.3は、太陽同期軌道の地球観測衛星を対象としている。多くの場合、センサはほぼ直下方向を撮像しており、このセンサデータから大気補正を経て算出される地表反射係数の値は、地表面上での直上方向の反射係数 $R(d=0/h)$ (Hemispherical-

directional reflectance factor²⁹⁾。 d は方向, h は半球, $d=0$ は直上もしくは直下方向を意味する。 今後は $R(0/h)$ と示す)に”近値”し, しばしば, これをアルベドとして利用する場合が見られる(なお, 地表面に等方散乱体を仮定し衛星データから反射係数を導出した場合, $R(0/h)$ は正確には求まっていない。 よって, 上記において”近値”と強調している)。 一方, アルベドはある特定面への入射エネルギーに対する反射エネルギーの比と定義できる(アルベド定義は複数存在するが, 少なくとも本研究ではこれをアルベドの定義とする)ので, Hemispherical-H. reflectance $R(h/h)$ を(分光された)アルベドと考えることができる。 よって, Fig. 3において $R(0/h)$ と $R(h/h)$ の比較を行い, その両者の差 ($R(h/h)$ を真と仮定)を同図上に誤差 (Percent Error)として表し, これをアルベド推定におけるBRDFの影響度合いの指標とした。

Fig. 3(a)~(d)は, それぞれ, 土壌(乾燥湖), 植生(クローバ), 雪面(新雪)および水面(平常時の海洋)における結果である。 各図から, 地表面ごとの特徴が読みとれる。

乾燥湖や新雪における誤差は植生や海洋に比較してかなり小さい。 このことから, これまで乾燥湖や新雪が等方散乱体として扱われがちだったことは理解できる。 しかし, 誤差が小さいと言っても数10%程度があり, 等方散乱体として扱うには問題がある。

海洋は最も大きな誤差を示している。 また, 他の3種の地表面に比較し, $R(h/h)$ の太陽天頂角に対する変化も非常に大きい。

太陽天頂角に対する $R(0/h)$ の変化を見た場合, 乾燥湖の場合のみ安定し, 他のもは大きく変化している。 しかし, この安定性は, 一部の乾燥湖のみの特徴であり, 通常の土壌では他の地表面と同様な傾向を示す³⁰⁾。 このような $R(0/h)$ の特徴により, 乾燥湖が自然界で最も等方散乱体に近いものとしてしばしば位置づけられていたのであろう。

4. まとめ

以上の例は各区域の代表例とは必ずしもなっていない。 しかし, 少なくとも等方散乱体を地表に仮定し, 衛星から求めた反射係数を持ってアルベド値とするのは, かなり危険なことと言える。 今後, 様々な条件における例をさらに検討し, その影響の大きさ・特徴を確認する必要がある。

謝辞: 気象研究所の高島勉博士, 増田一彦博士および青木輝夫博士には, 放射伝達アルゴリズムについて多くの助言を頂いた。 ここに深謝いたします。

5. 引用文献

- 1) Dickinson R. E., Pinty, B. and Verstraete, M. M., Relating surface albedos in GCM to remotely sensed data. *Agri. Forest Meteor.*, **52**, 109-131, 1990
- 2) Hansen, J.M. and Travis, L.D., Light Scattering in Planetary Atmosphere, *Space Science Reviews*. **16**, 527-610, 1974.
- 3) Berk, A., Bernstein, L.S. and Robertson, D.C., MODTRAN: A Moderate Resolution Model for Lowtran 7. GL-TR-89-0122, 1989.
- 4) 土田聡・佐藤功・山口靖・新井康平・高島勉, 北海道・雪原域を用いた可視・近赤外域センサの Reflectance-Based Method による放射輝度軌道上絶対校正. 日本リモートセンシング学会誌, **18**(1), 12-31, 1998
- 5) Hapke, B., Bidirectional reflectance spectroscopy - 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, **86**(B4), 3039-3054, 1981.
- 6) Hapke, B., Bidirectional reflectance spectroscopy - 4. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, **67**, 264-280, 1986.
- 7) 土田聡・佐藤功, 米国 Rogers Dry Lake における AVNIR・OCTS 補正係数の相互検証. 日本リモートセンシング学会誌, **17**(5), 26-31, 1997.
- 8) 中正夫・佐藤功・土田聡・川田剛之・山崎明宏・今中誠・新井康平・寺山康教・中島祐介・中島康裕, ADEOS AVNIR センサーの CAL/VAL 研究の初期成果. 日本リモートセンシング学会誌, **17**(5),

- 32-40, 1997.
- 9) K. Thome, S. Schiller, J. Conel, K. Arai and S. Tsuchida, Results of 1996 Earth Observing System vicarious calibration joint campaign to Lunar Lake, Nevada. *Metrologia*, **35**, 631-638, 1998.
 - 10) Verstrate, M. M., Pinty, B., and Dickinson, R. E., A Physical Model of the Bidirectional Reflectance of Vegetation Canopies 1. Theory. *J. Geophys. Res.*, **95**(D8), 11755-11765, 1990.
 - 11) World Meteorological Organization, A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation, *World Climate Programme, WCP-112, WMO/TD-NO.24*, p.53, 1986.
 - 12) Woessner, P. and Hapke, B., Polarization of light scattered by clover, *Remote Sens. Environ.*, **21**, 243-261, 1987.
 - 13) Pinty, B., Verstraete, M. M. and Dickinson, R. E., A Physical Model of the Bidirectional Reflectance of Vegetation Canopies 2. Inversion and Validation. *J. Geophys. Res.*, **95**(D8), 11767-11775, 1990.
 - 14) Hansen, J. E., Radiative transfer by doubling very thin layers, *Astrophys. J.*, **155**, 565-573, 1969
 - 15) Stamnes, K. and Swanson, R. A., A new look at the discrete ordinates method for radiative transfer calculations in anisotropically scattering atmospheres, *J. Atmo. Sciences*, **38**, 387-399, 1981.
 - 16) Warren, S. G., Optical properties of snow, *Rev. Geophys, Space Phy.*, **20** (1), 67-89, 1982.
 - 17) Warren, S. G., Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave. *Applied Optics*, **23**(8), 1206-1225, 1984.
 - 18) Hansen, J. E., Multiple Scattering of Polarized Light in Planetary Atmospheres, Part II. Sunlight Reflected by Terrestrial Water Clouds, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1400-1426, 1971.
 - 19) Wiscombe, W. J., On initialization, error and flux conservation in the doubling method, *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer*, **16**, 637-658, 1976.
 - 20) Aoki, Teruo, Aoki, Tadao and Fukabori, M., Approximations of phase function in calculating the spectral albedo of snow surface with multiple scattering, *Papers in Meteorology and Geophysics*, **47**(3/4), 141-156, 1997.
 - 21) Cox, C. and Munk, W., Measurement of roughness of the sea surface from photographs of sun's glitter, *J. Opt. Soc. Am.*, **44**, 838-850, 1954
 - 22) Cox, C. and Munk, W., Statistics of the sea surface derived from sun glitter, *J. Marine Res.*, **13**, 198-227, 1954.
 - 23) Cox, C. and Munk, W., Some problems in optical oceanography, *J. Marine Res.*, **14**, 63-78, 1955.
 - 24) 高島勉・増田一彦, 多重散乱, 海面による乱反射・乱屈折を考慮した大気-海洋系上端からの放射アルゴリズム, *日本リモートセンシング学会誌*, **6**(1), 5-35, 1986.
 - 25) Koepke, P., Effective reflectance of oceanic whitecaps, *Applied Optics*, **23**(11), 1816-1824, 1984.
 - 26) Morel, A., Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I Water), *J. Geophys. Res.*, **93**(C9), 10749-10768, 1988.
 - 27) Hale, G. M. and Querry, M. R., Optical constants of water in the 200-nm to 200 μ m wavelength region. *Applied Optics*, **12**(3), 555-563, 1973.
 - 28) Friedman, D., Infrared Characteristics of Ocean Water (1.5-15 μ), *Applied Optics*, **8**(10), 2073-2078, 1969.
 - 29) O'Neill, N.T., Miller, J.R. and Freemantle, J.R., Atmospheric Correction of Airborne BRDF to Yield Surface BRDF: Nomenclature, Theory and Methods, *Canadian Journal of Remote Sensing*, **21**(3), 309-327, 1995.
 - 30) Pinty, B., Verstraete, M. M. and Dickinson, R. E., A physical model for predicting bidirectional reflectance over bare soil. *Remote Sens. Environ.* **27**, 273-288, 1989.