重回帰モデルと単時期の地表面反射率を用いた GCOM-C SGLI 陸域アルベドの推定

Estimation of land surface albedo from a single GCOM-C/SGLI surface reflectance by using multi-regression model

須崎 純一*・佐藤 啓明**・栗木 周*・梶原 康司***・本多 嘉明***

*Junichi SUSAKI, Hiroaki SATO, Amane KURIKI
Koji KAJIWARA and Yoshiaki HONDA*

Abstract: In this paper, we present an algorithm for estimating terrestrial albedo for the product of Global Change Observation Mission-Climate (GCOM-C)/Second generation Global Imager (SGLI), that was launched in Dec. 2017 by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Japan. The algorithm is composed of spectral albedo estimation, narrowband-to-broadband albedo conversion and multi-regression model estimation so that only a single-day reflectance observation is available. In estimating spectral albedo, we derive coefficients of kernel-driven bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model. The experiments by using in-situ data of bare soil and deciduous broadleaf forests show that the proposed method has potential to estimating albedos with acceptable accuracy of the root mean square of errors (RMSE) of 2.2×10^{-2} and 4.3×10^{-2} .

1. 序 論

温暖化等の気候変動を把握するために重要とされるパラメータの一つである陸域アルベドは、一定期間に観測された衛星データから推定できる。アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration: NASA) が打ち上げて運用している Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) の陸域アルベドプロダクトでは、半経験的手法である kernel-driven 二方向反射特性関数 (bidirectional reflectance distribution function: BRDF) モデルのパラメータが利用されている。kernel-driven BRDF モデルは、体積散乱体、幾何散乱体の反射を表す kernel 値の線形和によって反射率が表現され、様々な方向から観測した16日間の kernel 値および反射率データの中より有効な最小7枚を用いて、その係数と定数項が推定される (Lucht et al., 2000)。

安定的な陸域アルベドプロダクトの生成には誤差の

影響を緩和するために一定数の観測データが必要になるが、現実的には一定期間内に天候に恵まれたデータが確実に取得できる保証はない。特に被雲率の高い熱帯・亜熱帯気候地帯では有効な画像枚数が得られない状況が年間を通じて多々発生し、定常的な運用において意味のあるプロダクトが生成できない事態に繋がる。そのような問題を解決するために、Qu et al. (2014) は MODIS データの単時期の反射率データと放射伝達コードを用いて、陸域アルベドを推定する手法を提案している。

宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) は、地球全体の長期間の環境変動観測を目的とした Global Change Observation Mission (GCOM) を実施しており、Global Change Observation Mission-Climate (GCOM-C) が2017年12月に打ち上げられた。GCOM-C には the Second generation Global Imager (SGLI) が搭載され、SGLI の観測データからも陸域アルベドプロダクトの生成が計画されている。本研究では Qu et al. (2014) の手法を参考にして、SGLI の陸域アルベドプロダクト生成を念頭に置いて、特定の日に観測された単時期の複数バンドにおける反射率データから陸域アルベドを推定する手法を開発することを目的とする。今後は特に断

* 京都大学大学院工学研究科

** 京都大学工学部

***千葉大学環境リモートセンシングセンター

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 59, NO. 4, 2020

らない限り、「アルベド」とは陸域アルベドのことを指すものとする。本論文では、第2章でアルベドの定義と衛星データから推定する際の困難について述べ、第3章では提案手法を説明する。第4章では本研究で利用する衛星データや現地計測を行った対象地域とその特性を紹介し、第5章にて実験結果を示す。第6章で考察を述べた後、第7章にて本論文を締め括る。

2. 衛星データからのアルベド推定

衛星データからアルベドを求めるには、まず上向き、下向きの放射照度を求める必要がある。太陽天頂角を θ_i 、波長帯 $\Lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ ($\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$ は対象とする波長の上限值と下限値) とする時、下向きの放射照度 $F_{\text{down}}(\theta_i, \Lambda)$ は式(1)で表される。

$$F_{\text{down}}(\theta_i, \Lambda) = \iint_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_{\text{down}}(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) \cos \theta_v d\Omega d\lambda \quad (1)$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_{\text{down}}(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) \cos \theta_v \sin \theta_v d\theta d\phi d\lambda$$

ここで、 θ_i , θ_v および ϕ_i , ϕ_v θ_v および ϕ はセンサ天頂角及び太陽とセンサの相対方位角 (以下、相対方位角) であり、 ϕ は太陽方位角 ϕ_i 、センサ方位角 ϕ_v を使って、 $\phi = \phi_i - \phi_v$ と表される。また L_{down} は下向きの放射輝度を表す。式(1)と同様にして上向きの放射照度 $F_{\text{up}}(\theta_i, \Lambda)$ を求め、その両者の比率から波長帯 Λ における狭帯域アルベド $\alpha_{\text{narrow}}(\theta_i, \Lambda)$ が求められる (式(2))。

$$\alpha_{\text{narrow}}(\theta_i, \Lambda) = \frac{F_{\text{up}}(\theta_i, \Lambda)}{F_{\text{down}}(\theta_i, \Lambda)} \quad (2)$$

式(1)は L_{down} を半球上でセンサ天頂角方向、相対方位角方向に積分することを意味している。限られた数の衛星観測データから半球上の積分を実施することは困難である。そのため、複数の観測データから半球上の反射特性を反映している BRDF を求めることが多い。例えば、kernel-driven BRDF モデルの係数を用いて、近似的に $\alpha_{\text{narrow}}(\theta_i, \Lambda)$ が計算できる。この $\alpha_{\text{narrow}}(\theta_i, \Lambda)$ は太陽からの直達光成分が支配的なアルベドとみなし、 $\alpha_{\text{narrow,bs}}(\theta_i, \Lambda)$ と書けるとする。ここで「bs」は black-sky を表す。一方、直達光は考慮せず散乱光だけを考慮するアルベド $\alpha_{\text{narrow,ws}}(\Lambda)$ も別途考える。ここで「ws」は white-sky を表す。大気状態を表すパラメータを用いて両者の線形和を計算することで、太陽天頂角に依存しないアルベドを求めら

れる。

他方、波長方向で考える。本研究では広帯域アルベドを対象にしているが、例えば、 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ や $0.25 \sim 5.0 \mu\text{m}$ といった比較的幅の広い波長帯が広帯域アルベドとして利用される。センサに設計されたバンド単独では網羅することができないため、複数バンドで得られる狭帯域アルベドの線形和である Narrowband-to-broadband (NTB) 変換式を適用し、疑似的に広帯域アルベドを推定することになる。

このように広帯域アルベドの推定においては、半球上での積分と波長方向での積分とが必要であり、限られたデータから推定すると誤差が混入することになる。特に半球上の積分の代わりに BRDF モデルの係数を用いる際には複数時期の反射率が必要になる。この反射率にも観測時の天候の影響が含まれることがあり、推定される BRDF モデルパラメータにも誤差が混入する。したがって、このような誤差要因を極力排除するような陸域アルベド推定手法が望まれている。

3. 単時期の反射率データからのアルベド推定

本研究では、従来手法と異なり、単時期の反射率データからアルベドを推定する手法を提案する。図1にフローチャートを示す。まず、POLDER-3 の多方向観測反射率データを SGLI のバンドでの反射率に変換する。次に SGLI の多方向反射率データから BRDF モデルパラメータを推定し、真値は分からないものの当該データに対する狭帯域アルベドを計算する。そして、NTB 変換式を用いて、狭帯域アルベドから広帯域アルベドを計算する。最後に、各観測条件 (太陽天頂角、センサ天頂角、相対方位角) において SGLI の反射率を

図1. 本研究で提案する陸域アルベド推定手法

説明変数、広帯域アルベドを被説明変数とする重回帰式の係数を決定する。これにより、単時期の反射率データからアルベドを推定できるようになる。Qu et al. (2014)では、地上でのアルベド値に対して、大気上端 (Top-of-Atmosphere: TOA) での反射率を説明変数としていたが、本研究では大気補正済みの地表面反射率を説明変数とする点が異なる。

3.1 BRDF モデル

MODIS のアルベドプロダクトのように、近年は BRDF モデルの中でも kernel-driven BRDF モデルが広く利用されている (Wu, S., 2019; Hao et al., 2020)。式(3)のように、散乱体として草地等の水平方向に一樣な散乱体からの体積散乱と、樹木等の高さを有する離散的な散乱体からの幾何散乱の二種類の散乱を kernel と呼ばれる関数 K_{vol} , K_{geo} で表現し、等方散乱と併せて線形和で反射率 R を表現する (Wanner et al., 1995; Lucht et al., 2000)。

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi) = f_{iso} + f_{vol}K_{vol}(\theta_i, \theta_v, \phi) + f_{geo}K_{geo}(\theta_i, \theta_v, \phi) \quad (3)$$

ここで、 θ_i , θ_v および ϕ , ϕ_v θ_i , θ_v および ϕ , ϕ_v は太陽天頂角、センサ天頂角および太陽方位角、衛星方位角を表し、 ϕ は相対方位角を表す。また f_{iso} , f_{vol} , f_{geo} は等方散乱、体積散乱、幾何散乱の寄与を示す係数を表す。照射方向および観測方向より、 K_{vol} および K_{geo} を算出できる。未知数である f は、実際の衛星観測によって得られた反射率と式(3)との残差の二乗和を最小化することで推定される。

3.2 陸域アルベド

アルベドは、式(2)で示したように、特定の波長帯において、観測地点に入射する放射照度に対する反射する放射照度の割合として定義される。アルベドには、太陽からの直達光成分だけを考慮する black-sky albedo と、直達光は考えず散乱光だけを考慮する white-sky albedo が存在する。式(3)で推定したパラメータを用いて、black-sky albedo (α_{bs}) および white-sky albedo (α_{ws}) を推定する。実質アルベド値 $\alpha(\lambda)$ は式(4)で表され、波長 λ に依存する (Schaaf et al., 2002; Strahler et al., 1999)。white-sky albedo の占める割合を意味し、光学的厚さ $\tau(\lambda)$ および θ_i の関数である S を用いることで、 $\alpha(\lambda)$ を black-sky albedo と white-sky albedo の線形和で表現できる。

$$\alpha(\lambda) = S(\theta_i, \tau(\lambda))\alpha_{ws}(\lambda) + (1 - S(\theta_i, \tau(\lambda)))\alpha_{bs}(\theta_i, \lambda) \quad (4)$$

広域波長帯におけるアルベドは、各バンドにおける狭域波長帯アルベドの線形和によって表現され、NTB 変換式を用いて求められる (Liang, 2000; Liang, 2004)。NTB 変換式の係数は回帰分析によって求められる。

3.3 観測条件ごとの重回帰式の推定

以下、重回帰式の係数を決定する手順を記す。太陽天頂角、センサ天頂角および相対方位角に対し、一定の間隔 (例えば、太陽天頂角、センサ天頂角は 5 度や 10 度、相対方位角は 15 度や 30 度) を設ける。各々の観測条件に対し、別途反射率から推定された BRDF モデルパラメータを通じて、広帯域アルベドが推定できる。この反射率と広帯域アルベドのデータセットを当該観測条件において多数用意し、重回帰式を求める。

4. 使用データ

4.1 POLDER-3 データ

Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances-3 (POLDER-3) は、多方向の反射特性、偏光特性の観測を目的として、フランス国立宇宙研究センター (Centre National D'études Spatiales: CNES) が開発した衛星搭載型センサである。POLDER-3 は 2004 年に打ち上げられた衛星 Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar (PARASOL) に搭載されていた。得られたデータから同一地点の観測データが集約されて、多方向観測データセットとして整備されている。公開されているデータは 2008 年の 1 年間に渡るもので、地球圏・生物圏国際共同研究計画 (International Geosphere-Biosphere Programme: IGBP) が提唱している土地被覆 16 クラス別に提供されている (Lacaze et al., 2009)。本研究では、クラス 4 「落葉広葉樹林」とクラス 16 「裸地または疎な植生」のデータを利用した。表 1 に POLDER-3 のバンドのうち、データベースとして一般公開されているデータに含まれるバンドの中心波長を示す (Lacaze et al., 2009)。参考として、表 2 に SGLI のバンドの計測波長帯を示す。

表 1．データベースで利用可能な POLDER-3 /Parasol のバンドの中心波長 (nm) (Lacaze et al., 2009)

490	565	670	765	865	1020
-----	-----	-----	-----	-----	------

表 2．SGLI のバンドの計測波長帯 (nm) (JAXA, 2020)

バンド	波長	バンド	波長
VN1	375-385	VN9	757-769
VN2	407-412	VN10	858.5-878.5
VN3	438-448	VN11	858.5-878.5
VN4	485-495	SW1	1040-1060
VN5	520-540	SW2	1370-1390
VN6	555-575	SW3	1530-1730
VN7	663.5-683.5	SW4	2185-2235
VN8	663.5-683.5		

4.2 現地計測データ

研究対象地として、裸地と森林の 2 か所を選定した。裸地の対象としては、国内では比較的均質な裸地が広い範囲で存在する鳥取県の国立公園鳥取砂丘を選定した。一方、森林の対象としては、国立研究開発法人 森林研究・整備機構森林総合研究所関西支所山城水文試験地内における、26.5 m の高さを有する気象観測タワー周辺を選定した (Akata et al., 2014; 森林総合研究所, 2020)。

反射率とアルベドの計測においては、須崎ら (2019) と同様に実施した。詳細は須崎ら (2019) に譲るが、FieldSpec ver. 3 (ASD, 2020) を用いて、サンプル及び標準拡散板 (Labsphere Spectralon SRT-99) を対象に、350 nm から 2,500 nm の分光放射輝度を計測した。またアルベド計 (MR-60: 英弘精機 (2020)) を用いて、285~3,000 nm の波長帯における広域波長帯アルベドを計測した。観測地点の情報を表 3 に、観測日とアルベド値を表 4 に、観測地点周辺の様子を図 2 に示す。

表 3．観測地点の情報

土地被覆	場所	緯度, 経度
裸地	鳥取砂丘	35°32'42.0"N, 134°14'03.0"E
		35°32'44.8"N, 134°14'02.0"E
		35°32'43.4"N, 134°14'04.1"E
森林 (落葉広葉樹林)	森林総合研究所 関西支所 山城水文試験地	34°47'25.0"N, 135°50'27.3"E

表 4．観測データ。いずれの観測時間帯でも天候は晴または快晴であった。

(a) 裸地

観測日 (yyyy/mm/dd)	太陽天頂角 (度)・アルベド値
2016/09/27	(56.1, 0.2362) (51.8, 0.2438) (47.4, 0.2294) (39.4, 0.1678) (37.8, 0.2449)
2017/05/18	(40.0, 0.2015) (19.6, 0.1790) (33.4, 0.2264) (27.3, 0.1956)
2017/06/14	(47.8, 0.2121) (43.1, 0.2304) (40.8, 0.2385) (35.7, 0.2048) (19.8, 0.2235) (15.9, 0.1997)
2019/10/28	(63.2, 0.2055) (53.0, 0.2104) (58.2, 0.2502) (51.2, 0.2418) (55.2, 0.2275) (49.8, 0.2112)

(b) 森林

観測日 (yyyy/mm/dd)	太陽天頂角 (度)・アルベド値
2017/09/25	(53.8, 0.1759)
2018/03/29	(42.4, 0.1248)
2018/07/10	(33.1, 0.1483)
2019/05/30	(29.9, 0.1645)

(a)

(b)

図 2．観測サイトの様子。(a) 裸地 (2017/05/18)。(b) 森林 (2017/09/14)。気象観測タワーから別のタワーを撮影した。

5. 実 験

本研究では、第2.2節で記したように、285～3,000 nmの波長帯における広帯域アルベドを計測している。そのため、本研究での広帯域アルベドは285～3,000 nmの波長帯に対応するものとする。

5.1 POLDER-3 から SGLI バンドへの変換

地上計測した分光放射輝度より、POLDER-3 および SGLI バンドにおける反射率を計算した。具体的には、バンド i の反射率 $\rho(i)$ は式(5)に示すように表される。

$$\rho(i) = \frac{\int_{\lambda} L_{\text{sample}}(\lambda) \cdot RSR(i, \lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} L_{\text{reference}}(\lambda) \cdot RSR(i, \lambda) d\lambda} \quad (5)$$

ここで、 λ は波長、 $L_{\text{sample}}(\lambda)$ 、 $L_{\text{reference}}(\lambda)$ はサンプル及び標準白板の分光放射輝度、 $RSR(i, \lambda)$ はセンサの relative spectral response functions (RSR) を表す。

POLDER-3 については表1の6バンドを、SGLI については表2のバンド全てに対して、各センサの RSR を用いて算出した。その後、SGLI の各バンドの反射率を被説明変数、POLDER-3 の6バンドの反射率を説明変数とする重回帰式を推定し、SGLI のバンドにおける多方向反射率データへ変換した。図3に POLDER-3 データから推定された SGLI の反射率の例を示す。

5.2 NTB 変換式の決定

本研究では、体積散乱 kernel、幾何散乱 kernel として Ross-Thick kernel と Li-Sparse kernel (Lucht et al., 2000) を利用した。筆者らの研究グループが地上計測で収集してきた bidirectional reflectance factor (BRF) データ及びアルベドデータを用いて、SGLI 用の NTB 変換式の係数を決定した。広帯域アルベドを被説明変数とし、狭帯域アルベドデータを説明変数として、非負の係数を推定し、赤池情報規準 (Akaike's Information Criterion: AIC) (坂元ら, 1983) が最小となるときの回帰式を採用した(式(6))。但し、この変換式の係数決定の際に、VN6で計測される放射輝度は裸地では飽和する可能性があるため、VN6を計算の対象から外した。

$$\alpha_{\text{SW}} = 0.2233\alpha_{\text{VN8}} + 0.4005\alpha_{\text{VN11}} + 0.1463\alpha_{\text{SW3}} \quad (6)$$

図3. 地上観測データから算出された SGLI バンドの反射率と、POLDER-3 データから推定された SGLI の反射率。(a) VN8 (673.5 nm), (b) SW1 (1,050 nm)。

図4. SGLI 用 NTB 変換式(式(6))の散布図。「Calibration」は式(6)を決定する際に使用したデータ、「Validation」は検証データを表す。

α_{sw} は285～3,000 nm の波長帯における広域波長帯アルベドを、 α_i はバンド i における狭域波長帯アルベドを表す。

裸地（11点）、森林（3点）、水田（1点）を含む係数決定用データ15点に対する root mean square errors (RMSE) は0.010であった。別途用意した、裸地（9点）、森林（3点）、草地（2点）を含む検証データに対する RMSE は0.023であり、十分な精度を有することが判明した。図4にその散布図を示す。

5.3 重回帰式の決定及びアルベドの推定

NTB 変換で推定された広帯域アルベドに対し、各観測条件（太陽天頂角、センサ天頂角、相対方位角）において SGLI の反射率を説明変数とする重回帰式の係数を決定した。太陽天頂角、センサ天頂角に対しては5度、相対方位角に対しては15度の間隔を設けた。様々なバンドの組合せを検討した結果、「VN5, VN8, VN11, SW1」の反射率を含む重回帰式による推定精度が最も良かった。表5に角度ごとの RMSE を、図5に推定時の RMSE の散布図を示す。図5は表5の結果に対して kriging を用いて内挿したものである。全て

の角度を考慮した RMSE は、裸地で0.020、森林で0.044であった。また表5(b)の森林の RMSE においては、一部の計測角の結果が除外されている。これは異常に強い反射率が見られたためで、おそらく気象観測タワーの影響を受けていたと考えられる。

6. 考 察

6.1 重回帰式決定時の説明変数

本研究では、単時期の反射率データから、事前に多方向観測データから計算された角度別の重回帰式を適用して広帯域アルベドを推定する手法を提案した。重回帰式に用いる説明変数の数が多いほど一般的に説明能力が上がると考えられる。本研究でも、当初は水蒸気などによる大気の影響を受けにくいバンド、VN1, VN2, VN3, VN5, VN6, VN8, VN11, SW1, SW3, SW4の10バンドを説明変数に用いて重回帰式を推定してみた。10バンドを用いる回帰式は少なく、実際には6～7バンドを用いる重回帰式が得られることが多かった。ところが、地上計測データを用いて検証すると、推定精度が例えば裸地では RMSE が0.06等、表5

表5. 広帯域アルベド推定時の RMSE。(a) IGBP=16(裸地), (b) IGBP=4(落葉広葉樹)。vz はセンサ天頂角, az はセンサと太陽との相対方位角を表す。

vz (deg)	az (deg)	RMSE	sample
15	15	0.026	36
15	45	0.019	37
15	90	0.021	38
15	135	0.022	37
15	180	0.026	37
30	15	0.018	37
30	45	0.016	37
30	90	0.016	37
30	135	0.025	38
30	180	0.023	37
45	15	0.014	37
45	45	0.014	37
45	90	0.016	39
45	135	0.018	37
45	180	0.020	39
	Total	0.020	560

vz (deg)	az (deg)	RMSE	sample
15	15	0.058	8
15	45	0.055	8
15	135	0.046	8
15	180	0.040	8
30	15	0.037	8
30	45	0.031	8
30	135	0.058	8
30	180	0.060	8
45	15	0.020	8
45	45	0.042	8
45	135	0.030	8
45	180	0.025	8
	Total	0.044	96

図5．広帯域アルベド推定時のRMSE。(a) IGBP=16 (裸地), (b) IGBP=4 (落葉広葉樹)

で示す値よりも大幅に悪化していることが判明した。観測角度の変化に対して、得られた重回帰係数の絶対値が大きく変動したり、正負の符号が変化したりする挙動が見られた。これは、POLDER-3データの解像度が約6 kmと低いこと (Lacaze et al., 2009), またPOLDER-3の観測データから仮想的に生成されたアルベド値を使っていることが原因として考えられる。

POLDER-3データは2008年の1月から12月まで月単位に整備されており、重回帰式も月単位で求めることが可能である。実際に月ごとに求めた結果、上記の考察と同様に、却って推定精度が悪化する結果が確認された。季節ごとに植生指数が変化する植生ではBRDFも変化するため、重回帰式の時間変化も妥当な設定と考えられる。しかし、現実的には安定性を損なう推定結果に至っており、定常処理という観点では月

単位に分けることなく1年間を通じたデータを使った重回帰推定が妥当と判断した。

図5や表5が示すように、本研究で得られた結果は十分に実用的な精度を達成しており、提案手法は定常処理に活用できる可能性を十分に有すると判断できる。

6.2 重回帰式で用いる大気上端反射率と地表面反射率

Qu et al. (2014) では、地上でのアルベド値に対して、大気上端 (Top-of-Atmosphere: TOA) での反射率を説明変数としていたが、本研究では大気補正済みの地表面反射率を説明変数としている。TOA 反射率を用いると一見大気補正で生じる誤差の影響を受けずに済むように思える。しかしながら、Qu et al. (2014) では大気補正済みのPOLDER-3地表面反射率データをMODISのバンドに変換した上で、6S (Vermote et al., 1997) に組み込まれている様々な大気モデルおよびエアロソルパラメータを用いてMODISのTOA反射率を求めている。つまり、事前の処理において大気補正で使用されている大気パラメータを使用して、重回帰式が決定されている。これは、使用する大気パラメータと観測時の実際の大気との違いの影響が誤差として含まれる可能性を意味している。一旦、重回帰式が決定されるとそれに含まれる誤差の影響が、最終的に推定されるアルベドにも含まれる可能性が十分にある。

一方、本研究ではあくまでも地上レベルの反射率で重回帰式を求めている。SGLIのプロダクトとしてTOA反射率から地表面反射率に変換する際には大気補正が行われるが、その際にも誤差が含まれる可能性はある。しかし、重回帰式自体は地表面反射率と地上アルベドの関係式であり、選択する大気パラメータの誤差の影響は直接的には受けない。大気の状態は観測時により変わるものであり、その影響は観測時の大気プロダクト等を用いて適切に補正する方が、最終的には精度の高いアルベドが推定できると考えられる。Qu et al. (2014) の手法のようにTOA反射率と地上アルベド間での重回帰式を求めて厳密に検証したわけではないが、本提案手法の方が大気状態が日々または場所ごとに変化する中で定常的にアルベドプロダクトをする上では合理的であるといえる。

表 6. ASTER, MODIS の各バンドの波長帯 (μm)

センサ	バンド								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ASTER	0.52-0.60	0.63-0.69	0.78-0.86	1.6-1.7	2.15-2.18	2.18-2.22	2.23-2.28	2.29-2.36	2.36-2.43
MODIS	0.62-0.67	0.84-0.87	0.46-0.48	0.54-0.56	1.23-1.25	1.63-1.65	2.11-2.15	N/A	N/A

6.3 NTB 変換式の説明変数

式(6)では本研究で得られた SGLI 用の NTB 変換式を示しているが、ここではその変換式の妥当性を検討する。Liang (2004) では、 $0.25\sim 5.0\ \mu\text{m}$ の波長帯を対象にした広帯域アルベドを求める NTB 変換式が各衛星搭載型センサに対して提唱されている。その中で、Terra 衛星に搭載されているセンサである Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) と Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) については、下記の通り示されている。本研究では $0.3\sim 3.0\ \mu\text{m}$ の波長帯を対象としているが、上端、下端の違いは太陽放射の強さを考えると大きな影響を与えないと考えられる。

$$\text{ASTER: } \alpha_{sw} = 0.484\alpha_1 + 0.335\alpha_3 - 0.324\alpha_5 + 0.551\alpha_6 + 0.305\alpha_8 - 0.367\alpha_9 \quad (7)$$

$$\text{MODIS: } \alpha_{sw} = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 \quad (8)$$

式(7)・(8)の係数の絶対値を見ると、ASTER, MODIS 共に特定の波長帯の影響を強く受けておらず、幅広い波長帯からの狭帯域アルベドの線形和で広帯域アルベドが推定されていることが分かる。それを踏まえると、式(6)の係数においては極端に特定のバンドの係数が大きいわけではなく、妥当な係数が得られていると判断できる。

また式(7)での係数の一部は負の値を取っている。Liang (2004) で紹介されている他のセンサでの NTB 変換式でも負の係数を含むものも存在している。重回帰分析上は負の係数も推定されるものの、アルベドもまた大元の放射輝度や反射率も非負の値を取ることを考えると、本研究のように非負の係数に限定して推定する方針が適切であるといえる。

7. 結 論

本研究では、少数枚画像からアルベドを安定的に推

定するため、単時期の反射率データからアルベドを推定する手法を提案した。提案手法では POLDER-3 の多方向観測反射率データを活用し、SGLI のバンドでの反射率を疑似的に生成する。次に SGLI の多方向反射率データから BRDF モデルパラメータを推定し、SGLI の各バンドでの狭帯域アルベドを計算する。そして、NTB 変換式を用いて、狭帯域アルベドから広帯域アルベドを計算する。最後に、各観測条件において SGLI の反射率を説明変数、広帯域アルベドを被説明変数とする重回帰式の係数を決定する。観測データが得られたら、観測条件に合致する重回帰式を SGLI の反射率データに適用することで、アルベドが推定できるというものである。裸地と落葉広葉樹林帯で得られた計測データを用いた検証では、裸地及び落葉広葉樹林に対する推定アルベド値の RMSE は約 0.020, 0.044 と十分な精度を有することが判明した。よって、提案手法は、従来手法のように多数枚の観測データが必要としないものの、実用的な推定精度を実現でき、SGLI のアルベドプロダクトにおける安定的なアルゴリズムとして利用できると結論付けられる。

今後は、SGLI の実画像から検証地におけるアルベド値を推定し、検証する予定である。また先行研究でも示されているように、画像上の対象画素を裸地、植生域、雪氷とそれらの中間に分けた上で、各々の重回帰式を適用する処理を確立したい。

謝 辞

本研究は、JAXA 第 6 回 GCOM 共同研究及び第 2 回地球観測共同研究の支援を受けて実施された。本研究における森林での計測では、国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所関西支所の小南裕志氏、高梨聡氏の協力を得た。また SGLI のバンドの特性については、JAXA 第一宇宙技術部門 地球観測研究センターの村上浩氏に助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

(受付日 2020.3.12, 受理日 2020.7.8)

参考文献

- ASD, ASD FieldSpec range, <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range/index.html> (2020年3月9日閲覧).
- Ataka, M., Kominami, Y., Yoshimura, K., Miyama, T., Jomura, M. and Tani, M., 2014. In situ CO₂ Efflux from leaf litter layer showed large temporal variation induced by rapid wetting and drying cycle, *Pros One*, 9(10): e108404. doi: 10.1371/journal.pone.0108404.
- Hao, D., Wen, J., Xiao, Q., You, D. and Tang, Y., 2020. An Improved Topography-Coupled Kernel-Driven Model for Land Surface Anisotropic Reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4), 2833-2847.
- Lacaze, R., Fédèle, E., & Bréon, F.M., 2009. POLDER-3/PARASOL BRDF databases user manual. CEA/LSCE, CNES, Paris, France, Tech. Rep, 1. http://web.gps.caltech.edu/~vijay/pdf/POLDER-3_BRDF_UserManual-I1.10.pdf (2020年5月27日閲覧).
- Liang, S., 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I—Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76, 213-238.
- Liang, S., 2004. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New Jersey: John Wiley & Sons, 6-8.
- LI-COR, LAI-2200C Plant Canopy Analyzer, https://www.licor.com/env/products/leaf_area/LAI-2200C/ (2020年3月9日閲覧).
- Lucht, W., Schaaf, C.B. and Strahler, A.H., 2000. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 977-998.
- Qu, Y., Liu, Q., Liang, S., Wang, L., Liu, N., and Liu, S., 2014. Direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from MODIS Data. *IEEE Transactions and Geoscience and Remote Sensing*, 52(2), 907-919.
- Schaaf, C.B., Gao, F., Strahler, A.H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., Strugnell, N.C., Zhang, X., Jin, Y., Muller, J.-P., Lewis, P., Barnsley, M., Hobson, P., Disney, M., Roberts, G., Dunderdale, M., Doll, C. N.H., d'Entremont, R.P., Hu, B., Liang, S., Privette, J.L. and Roy, D., 2002. First operational BRDF, albedo and nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 83, 135-148.
- Strahler, A.H., Muller, J.-P., MODIS Science Team Members, 1999. MODIS BRDF/Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document Ver. 5.0, https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf (2020年5月27日閲覧).
- Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., and Morcrette, J.-J., 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3), 675-686.
- Wanner, W., Li, X. and Strahler, A.H., 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *J. Geophys. Res.*, 100, 21077-21090, 1995.
- Wu, S., Wen, J., Xiao, Q., Liu, Q., Hao, D., Lin, X., You, D., 2019. Derivation of kernel functions for kernel-driven reflectance model over sloping terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(2), 396-409.
- 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), SGLI の観測波長と主なプロダクト, https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/instruments/product_j.html (2020年3月9日閲覧).
- 英弘精機, 長短波放射計(4成分放射計/アルベドメータ)MR-60, http://eko.co.jp/meteorology/met_products/0027.html (2020年3月9日閲覧).
- 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎, 1983. 情報量統計学, 共立出版.
- 森林総合研究所フラックス観測ネットワーク観測サイト 山城水文試験地, http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/YMS_j.html (2020年3月9日閲覧).
- 須崎純一, 宮垣亮汰, 栗木 周, 金 晟業, 2019. 斜面の影響を考慮した BRDF モデルの開発と陸域アルベドの推定, 写真測量とリモートセンシング, 58 (1), 14-23.