

大気上端反射率の方向性関数を用いた AVNIR-2 と MODIS の相互輝度校正

村上 浩*・田殿武雄*・島田政信*

Radiometric Cross Calibration of AVNIR-2 and MODIS Using
Directional Functions of Top-of-Atmosphere Reflectance

Hiroshi MURAKAMI*, Takeo TADONO* and Masanobu SHIMADA*

Abstract

An effective cross-calibration scheme is proposed and used for evaluation of AVNIR-2 radiometric accuracy. The scheme uses top-of-atmosphere reflectance functions of satellite zenith angle at each sample point. Each function was made using MODIS 500 m observations at temporally and spatially stable ground sites over 16 days which includes an AVNIR-2 observation date. As the result, radiances of AVNIR-2 channels 1 (463 nm), 2 (560 nm) and 3 (652 nm) agreed well to the radiances of Aqua and Terra MODIS channels 3 (466 nm), 4 (554 nm) and 1 (646 nm) respectively within 5% accuracy. AVNIR-2 Channel 4 (821 nm) radiance was evaluated lower than that of MODIS channel 2 (856 nm) about 15% on average. If we considered influences of atmospheric absorption and spectral slope of the ground sites, the AVNIR-2 channel-4 difference against MODIS was estimated to be less than half of the 15%. This cross-calibration scheme among similar orbit satellite sensors can provide many samples which enable us to analyze sensor response dependency on different observation conditions such as sensor-pointing angles.

Keywords : ALOS, AVNIR-2, radiometric calibration, MODIS

1. はじめに

種子島宇宙センターから 2006 年 1 月 24 日に H-II A ロケットで打ち上げられた陸域観測技術衛星 (ALOS) は、地図作成、地域の環境と土地利用の観測、災害状況の把握、資源探査等への貢献を図ることを目的とし、高精度で標高抽出を行うためのパンクロマチック立体視センサ (PRISM)、土地被覆の観測を高精度に行うための高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)、および昼夜や天候によらず陸域観測が可能なフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PALSAR) の 3 つの地球観測センサを搭載している。このうち AVNIR-2 は、青から近赤外域の波長域の 4 つのチャンネル、空間解像度 10 m、観測幅 70 km (ポインティング 0° の時)、ポインティングミラーによる衛星軌道直交方向に ±44° のポインティング機能を持ち、用途に応じた観測要求に従って運用される。AVNIR-2 の目的である土地被覆や土地利用の分類図などの作成や災害状況の把握などの解析のためには、画像としてのパターンだけでなく輝度値が正確であることが求められる。AVNIR-2 の輝度の精

度目標は絶対精度 10%、相対精度 5% と設定されている¹⁾。

この精度を達成するための輝度校正の手段としては、打ち上げ前に行う地上校正 (輝度の値付け)、打ち上げ後に行う衛星センサ内部の光源などを用いた軌道上校正²⁾、複数衛星センサの地球観測データを用いた相互校正^{3)~5)} や、地上における輝度や反射率の観測値から大気上端輝度をシミュレーションして行う代替校正⁶⁾ がある。地上校正や軌道上校正ではセンサ視野に直接校正光を入れて直接的に感度を評価できる。しかし、打ち上げ後のセンサ特性の変動、内部光源の光量変化などで誤差を生じる可能性がある。一方、地球観測データを用いた校正では、様々な観測条件のサンプルを評価できるが、地表や大気の影響の見積もりで誤差が生じうる。このように、それぞれの手法には長所と短所があるため、校正結果を導くためにはこれら複数の手段を実施し、相補的に解析することが必要である。これらの中、本論文では相互校正を扱う。

通常の相互校正では、対象センサと太陽・衛星幾何条件と観測日時が一致する他衛星データを抽出して比較^{3)~5)}、あるいは他衛星データとエアロゾルなどの大気観測データを用いて対象とするセンサの観測幾何条件における大気上

(2007. 4. 9 受付, 2007. 8. 2 改訂受理)

* 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1 筑波宇宙センター内

* Japan Aerospace Exploration Agency, Earth Observation Research Center, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

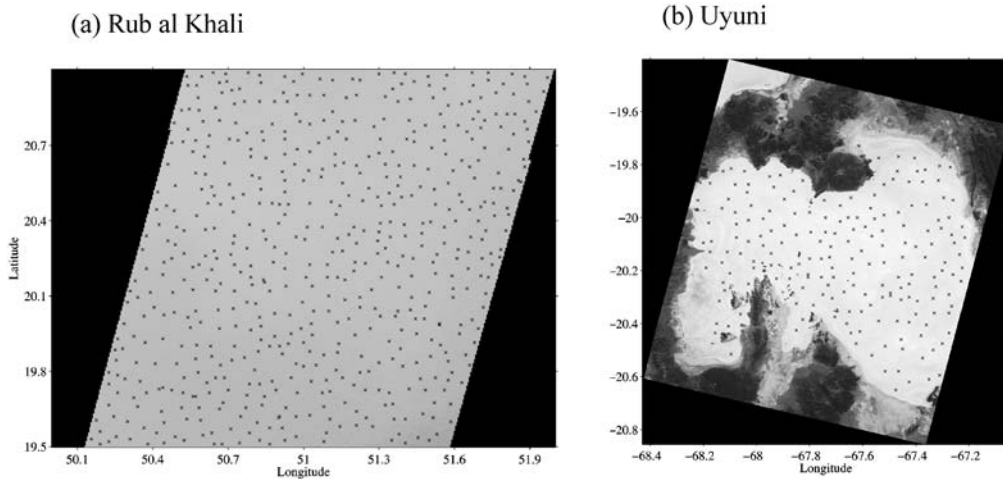


Fig. 1 Sample images of (a) Rub' al Khali on 21 May 2006 and (b) Sala de Uyuni on 21 Aug. 2006. Marks × show grids selected by the criteria (ii) in this text.

端 (TOA) の輝度 (L_{TOA}) を放射伝達モデルで推定して比較を行なう⁷⁾。しかし、前者の場合、全ての条件が一致するデータが少なく、センサ特性を把握するのに十分なサンプル数が取りにくい。また、後者の場合も、地上エアロゾル観測などが必要となる上に、必ずしも地上反射率の変動 (時間・空間) が小さい場所に地上観測点が設置されているわけではない。そこで本論文では、MODISのような高頻度衛星センサデータを用いて、季節変化が無視できる程度の期間中に大気上端反射率が目標とする校正精度に比べて十分安定している地点を選択し、大気上端反射率の衛星天頂角に対する関数 (地表面での方向性反射係数に相当) を求め、その関数によって目的とするセンサ感度を評価するという手法を提案する。さらにMODIS (高頻度センサ) とAVNIR-2 (目的とするセンサ) に対して実際にこの手法を適用した。

以下では、提案する手法の説明を2章に、MODIS (Aqua衛星とTerra衛星の両方のMODISを使用) とAVNIR-2との相互校正への適用における手法の有用性の評価を3章に、実際にこの手法を適用した結果を4章に示し、最後にまとめと考察を5章に記す。

2. 大気上端反射率関数による相互校正手法

2.1 手法の概要

ここで提案する手法は、観測地方時、観測緯度と軌道傾斜角によって決まる太陽天頂角 (θ_0)、相対方位角 (ϕ) といった観測幾何的条件が似ている衛星センサ間に適用できる手法である。この手法は時間的に安定した地上ターゲットを用いることによって、時間方向のずれをある程度許容する代わりに、衛星天頂角 (θ) の違いを関数で補正するものである。この手法のメリットは、地表面や大気の現場観測を用いずに様々な衛星天頂角 (あるいはセンサ走査角) 条件において多くのサンプルを得ることができることである。

2.2 解析手順

具体的には以下の手順をとる。

(i) 短期間で変動する大気の寄与が L_{TOA} に対して相対的に少ないと期待される高反射率の地表で、さらに幾何補正精度の影響を受けにくい、時空間的に安定した領域 (例えば大規模な沙漠や雪氷域) を選択する。

(ii) 上記の領域中で取得された晴天のAVNIR-2のシーンの中で、さらに空間的に安定した画素を下のii-1~ii-3の基準で自動抽出する。この中で参照衛星センサの画素サイズ (ここではMODISの500m) に平均化する (抽出例をFig. 1に示す)。

(ii-1: 比較画素内安定性)

MODIS陸チャンネルのグリッドサイズである500m×500m内のAVNIR-2 (空間分解能10m×10m) 輝度 L_{TOA} の分散 (s_{sub}) の平方根を同領域内の平均値 (m_{sub}) で割った値 (rs_{sub}) が0.03未満であること (式(1)) を4チャンネル全てで満たすこと

$$rs_{sub} = \sqrt{s_{sub}} / m_{sub} < 0.03 \quad (1)$$

(ii-2: 周辺画素空間一様性)

500mに平均化したAVNIR-2画素の2.5km×2.5km内 (5×5画素) の分散 (s_{around}) の平方根を同領域内の平均値 (m_{around}) で割った値 (rs_{around}) が0.01未満 (式(2a)), あるいは s_{around} が $1 (W/m^2/sr/mm)^2$ 未満 (式(2b)) であることを、4チャンネル全てで満たすこと

$$rs_{around} = \sqrt{s_{around}} / m_{around} < 0.01 \quad (2a)$$

$$s_{around} < 1 (W/m^2/sr/\mu m)^2 \quad (2b)$$

(ii-3: 選択画素の空間的偏り回避)

AVNIR-2シーン中の5km毎の領域で、4チャンネル内の最大の s_{around} が最小である画素を選択する

(iii) 上記(ii)のAVNIR-2シーンを含むある期間 (こ

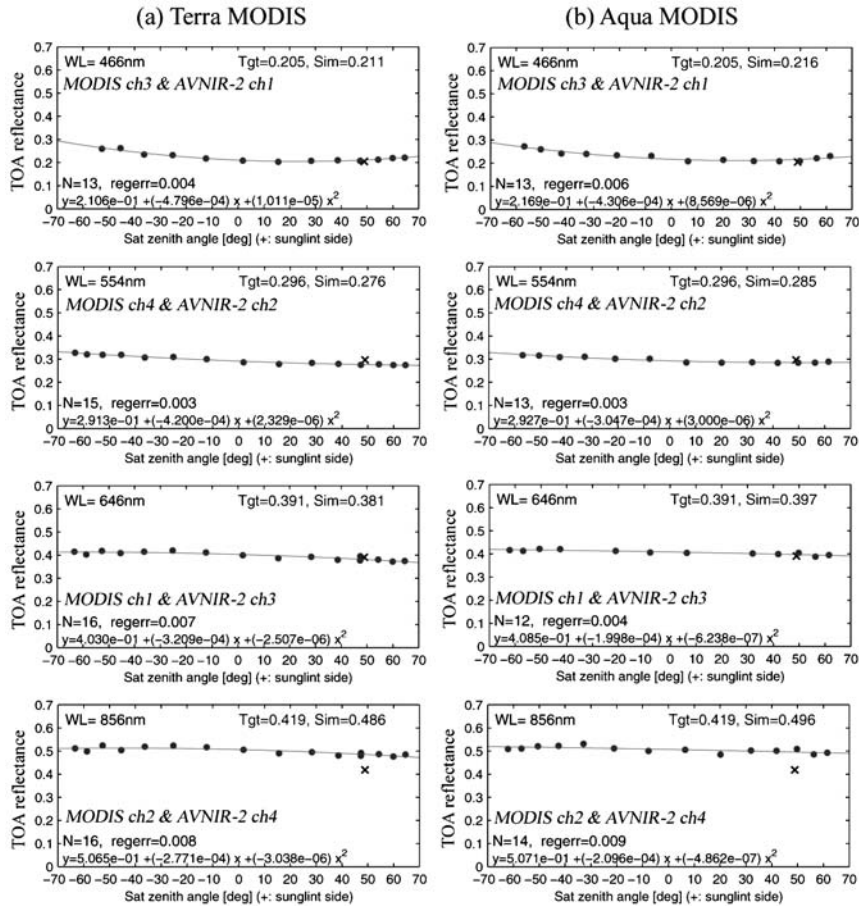


Fig. 2 Examples of site-wise $\rho_{TOA}(\theta)$ (see (v) in the text) using (a) Terra and (b) Aqua MODIS reflectance (black curve) at $51.45^\circ E$ $20.70^\circ N$ in the Rub' al Khali. MODIS (14–30 Aug. 2006) and AVNIR-2 (21 Aug. 2006) observed reflectance are overlaid by dots and crosses, respectively. WL indicates AVNIR-2 center wavelength, Tgt, AVNIR-2 TOA reflectance, Sim, TOA reflectance simulated by the $\rho_{TOA}(\theta)$, N, number of samples used in the regression, regerr, regression residual error, and $y = \dots$, regression equations $\rho_{TOA}(\theta)$.

ここでは MODIS の回帰日数 16 日間とした) の MODIS 輝度データ (L_{TOA}^{MODIS} ; ここでは 500 m 解像度 Level-1B データ) を全て取得する。

(iv) 上記 (ii) で選択した AVNIR-2 の各画素と同じ地点の MODIS 画素を抽出し、太陽天頂角 (θ_0^{MODIS}) と MODIS の波長応答によって重み付けした Thuillier < 2003⁸⁾ 分光太陽照度 F_0^{MODIS} を用いて式 (3) で TOA 反射率 (ρ_{TOA}^{MODIS}) に変換する。

$$\rho_{TOA}^{MODIS} = \frac{L_{TOA}^{MODIS} \times \pi \times d^2}{F_0^{MODIS} \times \cos(\theta_0)} \quad (3)$$

ここで d は太陽地球間距離 AU。

(v) ある期間 (16 日間) 中の ρ_{TOA}^{MODIS} から回帰 (ここでは 2 次とした) によって、抽出画素毎に θ を変数とする関数 ($\rho_{TOA}(\theta)$) を作る (ルブアルハリ砂漠における一例を Fig. 2 に示す)。ここで用いる θ は画角の東西方向を区別するため、サングリントが生じる方向をプラス (+) とと

た値とする。

また、雲などの影響を受けたサンプルを除外するため、回帰曲線からの残差が 2σ 以上外れたサンプルを除外し、残ったサンプルで再度 2 次曲線回帰を作った。さらに 2 度目の回帰での残差が平均反射率に対して 3% 以上、あるいは用いたサンプルの数が 5 以下の地点を除外した。

(vi) AVNIR-2 が実際に観測した衛星天頂角 θ^{AVNIR2} における反射率を (v) で求めた関数から計算し ($\rho(\theta^{AVNIR2})$)、式 (4) のように、AVNIR-2 の波長応答によって重み付けした分光太陽照度 F_0^{AVNIR2} と AVNIR-2 の太陽天頂角 (θ_0^{AVNIR2}) を用いて大気上端放射輝度 L_{TOA}^{sim} に変換する。

$$L_{TOA}^{sim} = \frac{\rho(\theta^{AVNIR2}) \times F_0^{AVNIR2} \times \cos(\theta_0^{AVNIR2})}{\pi \times d^2} \quad (4)$$

(vii) この L_{TOA}^{sim} と L_{TOA}^{AVNIR2} を比較することで、AVNIR-2 の輝度精度を評価する。

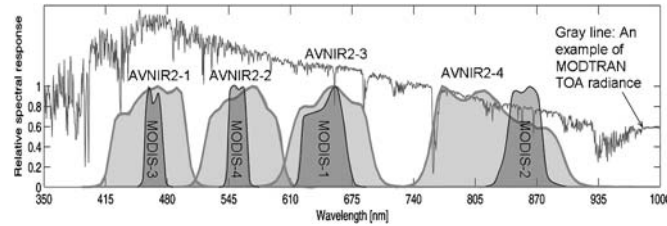


Fig. 3 Relative spectral response of AVNIR-2 channels 1, 2, 3 and 4, and MODIS channels 3, 4, 1 and 2. An example of TOA radiance spectrum is overlaid for reference of atmospheric absorption in the AVNIR-2 channel 4. AVNIR-2 ch4 includes O₂ absorption around 763 nm and H₂O absorption around 820nm.

3. 手法の適用性の確認

3.1 手法の適用条件

この手法の適用条件は以下である。

- ・参照とする衛星センサ（ここでは MODIS）の校正精度がある程度確認されていること。
- ・対象とする衛星センサと参照する衛星センサのチャンネルの波長応答特性の違いによる影響が目標とする精度よりも小さいこと
- ・対象とする衛星センサのとりうる太陽・衛星の角度条件が参照するセンサの角度条件の範囲内にあること。また、参照するセンサは時間変化が少ないとみなせるくらいの期間に複数の衛星天頂角における同一地点の観測が行えること
- ・晴天時のサンプル地点の地表反射率やエアロゾルや気圧の変動による L_{TOA} 変動が関数作成に用いる期間内で目標精度を十分に下回ること

以下ではこれらを確認する。

3.2 MODIS 観測輝度の精度について

MODIS は、1999 年 12 月と 2002 年 5 月に打ち上げられた NASA の 2 つの地球観測衛星 Terra と Aqua に搭載されている、可視～短波長赤外に 20 チャンネル、熱赤外に 16 チャンネル持つ多波長光学放射計である。高輝度の陸域をカバーする可視～近赤外波長帯のチャンネルには、短波長側から順にチャンネル 3, 4, 1, 2 がある。MODIS 観測輝度の精度評価は、NASA の MODIS Characterization Support Team (MCST) を中心に、高精度の軌道上校正システムや月面を用いた感度変動評価など、センサ特性評価と校正が継続的に行われており、輝度で 5%・反射率で 2% の要求精度を十分に維持していると考えられる^{9)~13)}。

3.3 AVNIR-2 と MODIS のチャンネル波長応答

Fig. 3 と Table 1 に、AVNIR-2 の各チャンネル 1, 2, 3, 4 とそれに対応する MODIS の陸ゲインチャンネル 3, 4, 1, 2 の波長応答と中心波長 λ_c ・波長応答重み付け分光太陽照度 F_0 を示す。 λ_c と F_0 は、各センサのチャンネル毎に波長応答 $R(\lambda)$ を用いて以下の式で算出した。

$$\lambda_c = \int R(\lambda) \cdot \lambda d\lambda / \int R(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$F_0 = \int R(\lambda) \cdot E_0(\lambda) d\lambda / \int R(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Table 1 Center wavelength λ_c and Solar irradiance F_0 of ANVIR-2 and MODIS channels.

AVNIR-2 λ_c [nm] (ch)	F_0 [W/m ² /μm]	MODIS λ_c [nm] (ch)	F_0 [W/m ² /μm]
463.0 (1)	1943.3	465.8 (3)	2058.6
560.0 (2)	1813.7	553.8 (4)	1840.0
652.1 (3)	1562.3	646.4 (1)	1581.2
820.6 (4)	1076.5	856.4 (2)	971.1

Table 2 MODTRAN4 simulation.

	atmosphere model	MODTRAN simulation condition						Simulated AVNIR-2/MODIS ratio				
		θ [deg]	θ_0 [deg]	ϕ [deg]	water vapor [mm]	aerosol type	surface height [m]	surface spectral reflectance	1*	2*	3*	4*
I	US Standard	0	30	90	14.16	No aerosol	0	(a) Rub al Khali	0.998	1.016	0.994	0.897
								(b) Uyuni	0.997	0.994	0.994	0.929
II	US Standard	0	30	90	14.16	Rural Vis=23	0	(a) Rub al Khali	0.996	1.019	0.993	0.893
								(b) Uyuni	0.997	0.994	0.993	0.925
III	Tropical	0	30	90	41.15	Rural Vis=23	0	(a) Rub al Khali	1.001	1.004	0.994	0.865
								(b) Uyuni	0.997	0.984	0.995	0.895
IV	US Standard	40	45	60	2.38	Rural Vis=23	3624	(a) Rub al Khali	0.994	1.023	0.996	0.924
								(b) Uyuni	0.997	0.998	0.995	0.957

*1 Channel number of AVNIR-2. See corresponding MODIS channel numbers in Table 1.

ここで分光太陽照度 $E_0(\lambda)$ は Thuillier 2003⁸⁾ を用いた。

太陽照度の波長分布による AVNIR-2 と MODIS チャンネルの波長応答の違いの影響は、大気上端の反射率を介して比較することにより考慮することになる。しかし、各チャンネルの応答波長範囲内で観測対象（地表+大気）の反射率が波長勾配や吸収特性などを持つ場合は、Fig. 3 で示したチャンネル波長応答の形に依存して比較結果が変化しうる。そこで、黄褐色（波長に対して反射率が増加）のルブアルハリ沙漠と白い（波長に対して反射率がほぼ一定）ウユニ塩湖の 2 つの地表面反射率スペクトルと 4 つの大気条件における AVNIR-2 と MODIS の TOA 反射率の比率を、MODTRAN4 を用いてシミュレーションした (Table 2)。シミュレーションで用いた大気条件 I と II はエアロゾルの有無を、II と III はカラム水蒸気量による違い（ここで図示しないが、ルブアルハリ沙漠の対象領域における晴天時カラム水蒸気量の季節変化は MODIS Level-2 プロダクトや MERIS level 3 プロダクトによると 15 mm ~ 30 mm 程度である）を、II と IV はウユニ塩湖周辺の標高 (3,624 m) による違いを表したものである。地表反射率スペクトルには、(a) 2006 年 9 月 4 日のルブアルハリ沙漠と (b) 2006 年 8 月 21 日のウユニ塩湖の MODIS の各チャンネルの観測反射率がシミュレーション値に一致するように推定した値を用いた。

Table 3 Orbits of AVNIR-2 and Terra/Aqua MODIS.

	ALOS AVNIR-2	Terra MODIS	Aqua MODIS
Orbit	Sun-Synchronous Descending 10:30	Sun-Synchronous Descending 10:30	Sun-Synchronous Ascending 13:30
Repeat Cycle	Repeat Cycle: 46 days Sub Cycle: 2 days	Repeat Cycle: 16 days Sub Cycle: 2 days	
Altitude	691.65 km	705km	
Inclination	98.16 deg	98.2 deg	
Satellite zenith	-44~+44 deg (pointing and detectors)	-65~+65 deg (mirror scanning)	

MODTRAN4 シミュレーションの結果から分かることは以下である。AVNIR-2 のチャンネル 1 と MODIS チャンネル 3, 及び AVNIR-2 のチャンネル 3 と MODIS チャンネル 1 の反射率の比は, エアロゾルや水蒸気量などいずれの大気条件においても 2 つの地表面反射率スペクトルの間で 0.1~0.4% しか変わらない。AVNIR-2 チャンネル 2 は長波長側の反射率が高い場合 (ルブアルハリ沙漠の場合) は MODIS チャンネル 4 に比べて 2% 程度高くなりうる。AVNIR-2 チャンネル 4 は, 長波長側の反射率が高い場合は MODIS チャンネル 2 に比べて 3~4% 程度小さくなる。さらに AVNIR-2 のチャンネル 4 は 820 nm 近辺の水蒸気の吸収や 763 nm 近辺の酸素の吸収の影響を受け, カラム水蒸気量の増加に対し 3% 程度の低下, 標高の増加に対し 3% 程度の増加を示している。これらにより, ルブアルハリ沙漠に相当する地表面スペクトルと大気モデル (II と III の条件の間と考えられる) の場合, MODIS チャンネル 2 に対する AVNIR-2 のチャンネル 4 の反射率の比は 0.9 以下になる。

以上から, 波長応答特性の違いによる TOA 反射率への影響は AVNIR-2 チャンネル 1 と 3 では 1% 未満, チャンネル 2 では 2% 程度と予想され, チャンネル 4 は地表面反射率スペクトルによる違いは 3% 程度であるが, さらに大気の吸収を考慮すると, 対応する MODIS チャンネルより 10% 以上小さくなりうる事がわかる。

3.4 AVNIR-2 と MODIS の太陽・衛星角度条件

ALOS/AVNIR-2 と Terra/MODIS の軌道傾斜角や軌道高度は良く似ており, MODIS の回帰周期 16 日間の時間幅を許容すれば, AVNIR-2 に該当する角度条件をカバーすることができる (Table 3)。また, Aqua MODIS についても, 観測地方時の正午からの時間差 (つまり太陽との位置関係) は Terra/MODIS や AVNIR-2 と同じ 1 時間半であり, 地表の二方向性反射係数が東西で対称であるとすれば, Aqua/MODIS でも大気と陸面両方で同様な (子午線に対して対称な) 観測角度条件が得られる。また, MODIS は回帰日数 16 日なので, TOA 反射率関数を求めるのに十分な数の θ (すなわち最大 16 方向) が得られる。

以上から, AVNIR-2 と Terra と Aqua MODIS の観測角度条件 (θ_0, ϕ, θ) は類似しており, MODIS の 16 日回帰の間に AVNIR-2 の θ を挟み込むような MODIS の θ が存在するので, MODIS 観測で作る関数を介した AVNIR-2 データとの比較が可能である。

3.5 L_{TOA} 変動評価

AVNIR-2 の観測が計画されている輝度校正サイトと, いくつかの乾燥地の高輝度サイトについて, MODIS Level

Table 4 Ratio (rs_{reg}^*) of standard deviation of prediction by the TOA-function curve to the average TOA reflectance at AVNIR-2 test sites.

Name	latitude	longitude	Terra Apr. 01-16, 2003				Aqua Jan. 01-16, 2005			
			466nm	554nm	646nm	856nm	466nm	554nm	646nm	856nm
Australia-1	-23.70	133.80	0.082	0.105	0.093	0.125	0.082	0.139	0.139	0.138
Australia-2	-25.21	131.02	0.028	0.030	0.064	0.058	0.053	0.066	0.153	0.130
Lake Frome	-30.75	139.833	0.067	0.076	0.075	0.061	0.048	0.050	0.047	0.048
Tinga Tingana	-29.00	139.75	0.052	0.066	0.074	0.056	0.041	0.030	0.026	0.027
Sahara-1	19.12	-4.85	0.040	0.021	0.013	0.013	0.074	0.118	0.061	0.030
Sahara-2	18.00	12.00	0.012	0.016	0.023	0.022	0.024	0.021	0.022	0.025
Lybie	28.90	23.75	0.024	0.020	0.019	0.020	0.080	0.048	0.032	0.030
Rub Al Khali	52.00	21.00	0.019	0.025	0.018	0.028	0.031	0.013	0.014	0.013
White Sands	32.50	-106.20	0.166	0.139	0.088	0.056	0.194	0.189	0.144	0.120
Arizaro	-24.572	-67.70	0.030	0.061	0.073	0.066	0.258	0.266	0.230	0.215
Barrow	71.00	-156.50	0.025	0.024	0.027	0.041	NA	NA	NA	NA
Greenland	70.00	-40.00	0.035	0.050	0.045	0.043	NA	NA	NA	NA
Antarctica	-80.00	40.00	NA	NA	NA	NA	0.007	0.009	0.010	0.010

* See equation (7) in this text.
 rs_{reg} less than 0.04 (4%) are shaded.

1B Subsampled Calibrated Radiance 5 km データ (2003 年 4 月 1 日~16 日と, 2005 年 1 月 1 日~16 日) を用いて ρ_{TOA}^{MODIS} の回帰式 $\rho_{TOA}^{reg}(\theta)$ を作り, その回帰残差の標準偏差の TOA 反射率平均値に対する比率 (rs_{reg} , 式 (7)) を用いて ρ_{TOA} の安定性を評価した (Table 4)。

$$rs_{reg} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N ((\rho_{TOA}^{MODIS})_i - \rho_{TOA}^{reg}(\theta_i))^2 / N}}{\sum_{i=1}^N (\rho_{TOA}^{MODIS})_i / N} \quad (7)$$

ここで, i は各 MODIS 観測サンプル, θ_i は各サンプルにおける MODIS 衛星天頂角, N はサンプル数を表す。

4 月のデータではサハラとバロー, グリーンランドが安定, Australia-2 は輝度が低いと比較的安定, 1 月のデータでは Tinga Tingana, サハラ, アラスカ・バロー, 南極が安定していた。4 月と 1 月共に, Australia-1 と White Sands と Arizaro は比較的時間変動が激しかった。

ここでの評価は 5 km リサンプリングデータを用いたことによる位置誤差も含まれている。空間分解能の高い 500 m データを使えばさらに精度が上がる可能性がある。今回用いたサイトの多くでは, θ の関数で表せる変化よりもそれ以外の時間変化の方が小さかった。これは観測角度によるモデル化によって, 任意の輝度を推定するという本論文の手法が効果的なアプローチであることを示している。

以上から, 条件の良いサイト (例えばサハラやルブアルハリ沙漠など) の反射率は, 16 日間の θ に対する回帰式から 2%~5% の範囲内で安定しているといえる。また同時に, これらの適切な地点を選択することによって, 同様な精度範囲内で MODIS と AVNIR-2 を比較することが可能であるといえる。

4. 適用結果

4.1 処理領域

時空間的に安定している高輝度・乾燥領域について, ALOS の初期校正検証運用フェーズにおける AVNIR-2 データを取得した。取得と解析を行った領域とそれぞれのシーン数を Table 5 に示す。これらのシーンを含む 16 日間

Table 5 Sample area and date.

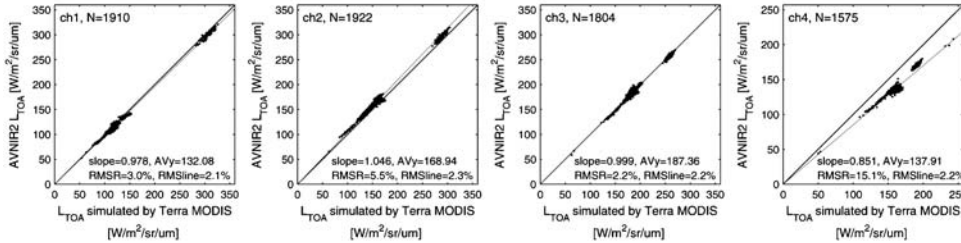
Area	Date	Longitude E		Latitude N		Number of scenes
		min	max	min	max	
Sahara	Mar. 19, 2006	-6.0	-3.0	16.0	22.0	6
Arizaro	Apr. 25–May 02, 2006	-68.2	-67.0	-25.4	-24.0	4
White Sands	Jun. 1, 2006	-107.0	-105.6	32.4	33.6	1
Uyuni	Aug. 21, 2006	-69.0	-66.0	-21.0	-19.0	2
Rub Al Khali	May–Sep. 2006	50.3	51.7	20.5	21.5	38

Table 6 Statistics of comparison between AVNIR-2 and MODIS radiance.

	Number of samples				AVNIR2/MODIS ratio				RMS line*			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
AVNIR-2 channel	1910	1922	1804	1575	0.978	1.046	0.999	0.851	0.021	0.023	0.022	0.022
Terra MODIS	1727	1732	1718	1449	0.962	1.035	0.978	0.844	0.024	0.020	0.020	0.021
Aqua MODIS												

* RMS line: Root mean square of (ratio - average ratio)

(a) AVNIR-2 and Terra MODIS



(b) AVNIR-2 and Aqua MODIS

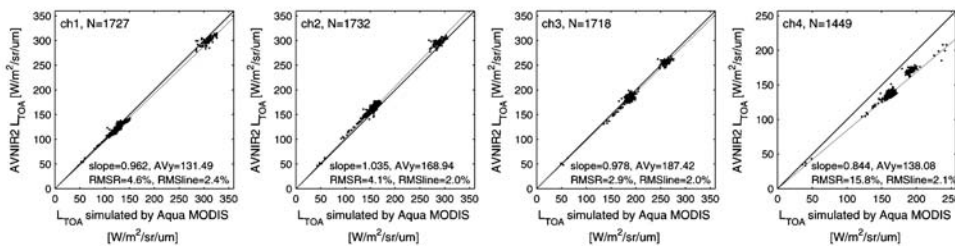


Fig. 4 Scatter plots of observed and simulated AVNIR-2 radiances.

X-axes of (a) and (b) are simulated radiance by $\rho_{TOA}(\theta)$ made by Aqua MODIS and Terra MODIS observations.

Ch# shows AVNIR-2 channel number ; N, number of samples ; slope, average ratio of AVNIR-2/MODIS radiance ; AVy, average of AVNIR-2 radiance in W/m²/sr/ μ m ; RMSR, RMS of (ratio-1) ; and RMSline, RMS of (ratios minus the slope).

の Terra および Aqua の MODIS 500m Level-1B データ (バージョンは Collection-5) を NASA Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) から取得し、TOA 反射率の関数を使った手法によって AVNIR-2 と Terra および Aqua MODIS との比較を行った。

4.2 比較結果

Fig. 4 は Terra と Aqua それぞれから推定した AVNIR-2 大気上端輝度に対する AVNIR-2 実測輝度の散布図、Table 6 はその統計結果のまとめである。散布図の回帰直線からの残差の二乗平均平方根 (RMS_{line}) のサンプル平均に対する比率は 2% 程度と小さく、非常に安定した比率が得られており、この手法による比較の有効性を示している。Terra と Aqua の差はおおよそ 2% 以下と報告されているが³⁾⁴⁾、ここでの結果も AVNIR-2 との比較における Terra と Aqua の違いは 1% 程度でおおよそ一致している。チャンネル毎に見ると、AVNIR-2 のチャンネル 2 については、MODIS より 4% 程度高く、チャンネル 4 については MODIS より 15% 程度低い。

Table 7 は各サイトにおける比較結果である。AVNIR-2/MODIS 輝度比率のサイト毎の違いはチャンネル 1~3 で

Table 7 Statistics of comparison between AVNIR-2 and MODIS radiance at each test site.

Site	Date	MODIS	AVNIR-2/MODIS ratio				Number of samples				AVNIR-2 gain*			
			ch1	ch2	ch3	ch4	ch1	ch2	ch3	ch4	ch1	ch2	ch3	ch4
Sahara	Mar. 19, 2006	Terra	0.989	1.067	0.993	0.870	330	330	210	121	3	3	3	3
		Aqua	0.986	1.063	0.968	0.857	41	45	28	18				
Arizaro	Apr. 25–May 02, 2006	Terra	1.002	1.032	0.961	0.881	2	2	2	2	3	3	3	3
		Aqua	0.994	1.056	0.990	0.913	5	5	5	5				
White Sands	Jun. 1, 2006	Terra	NA	NA	NA	0.850	0	0	0	3	3	3	3	4
		Aqua	NA	NA	NA	0.843	0	0	0	6				
Uyuni	Aug. 21, 2006	Terra	0.982	1.029	0.993	0.895	118	118	118	118	4	4	4	4
		Aqua	0.974	1.029	0.984	0.891	79	79	79	79				
Rub al Khali	May 01 – Sep. 19, 2006	Terra	0.985	1.052	0.994	0.860	410	423	423	331	3	3	3	3
		Aqua	0.964	1.044	0.979	0.837	502	505	506	493				
	May 01 – Sep. 19, 2006	Terra	0.972	1.045	1.004	0.840	1050	1049	1051	1000	4	4	4	4
		Aqua	0.956	1.032	0.978	0.842	1100	1098	1100	848				

* 3: normal gain, 4: low gain

1%~1.5%, チャンネル 4 で 2%~3% であり、この手法が安定していると共に、AVNIR-2 感度応答自体も安定していることを示している (ここでは示さないが、各日付・サイトのサンプルを別々に扱った場合の違いも 2% 程度である)。また、MODTRAN4 のシミュレーションで予測されたように、チャンネル 2 では、ほぼ白色のウユニ塩湖における値よりも黄色~赤褐色の沙漠の方が数%高い値を示しており、チャンネル 4 では標高が高く水蒸気や大気分子に

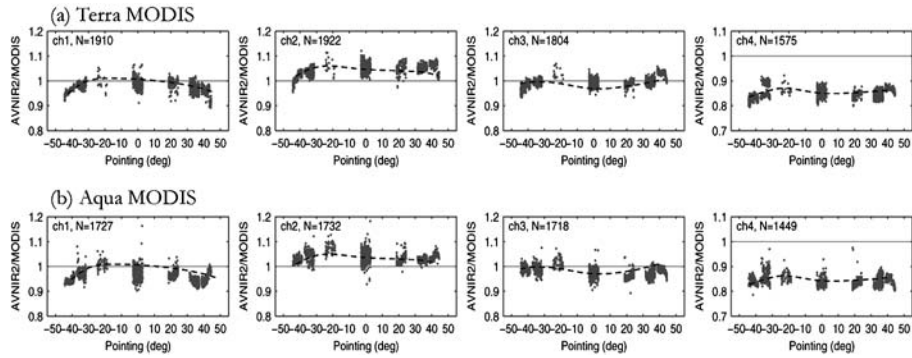


Fig. 5 Comparison between AVNIR-2 and MODIS ((a) Terra MODIS, and (b) Aqua MODIS) on the pointing angle of AVNIR-2.

Image pixel numbers in a scene were also converted into an equivalent for a pointing angle. Dashed curves show tendencies commonly seen in the comparisons to Terra and Aqua MODIS. Ch# shows channel number of AVNIR-2, and N, number of samples.

よる吸収が少ないウユニ塩湖や Arizaro (標高 3,600 m ~ 4,000 m 程度) で他のサイトより高い値を示している。

5. まとめと考察

5.1 適用結果のまとめ

観測幾何的条件 θ_0 , ϕ と θ の範囲が似ている衛星センサ間に適用できる相互校正手法を提案した。この手法は、時間的に安定した地上ターゲットを用いることによって時間方向のずれをある程度許容する代わりに、衛星天頂角の違いを関数で補正するものである。

AVNIR-2 観測データで時間空間的に輝度が安定した地上ターゲットを選び出し、その観測日付を含む 16 日間の Terra と Aqua MODIS のデータで TOA 反射率を衛星天頂角の関数として表し、実際の AVNIR-2 観測値の評価を行った。その結果、AVNIR-2 のチャンネル 1, 2, 3 で AVNIR-2 と TOA 関数を介した MODIS 輝度の差は 5% 以下となった。AVNIR-2 のチャンネル 4 については MODIS のチャンネル 2 より 15% 程度低いという結果となった。

5.2 AVNIR-2 と MODIS の波長応答による違いの考慮

太陽照度に対する波長応答による違いは TOA の反射率を介することで考慮している。しかし地表面の反射率スペクトルに勾配がある場合や大気吸収がある場合には波長応答の形によって差が生じる。MODTRAN4 によるシミュレーションを行った結果では、沙漠(黄褐色)のターゲットだと塩湖(白い)のターゲットに比べ、チャンネル 2 で 2% 程度大きく、チャンネル 4 では 3% 程度小さく見積もられることが予想される。今回のサンプルの多くがルブアルハリ沙漠であることを考慮すると、今回の結果 (Table 6) からこれらの影響を引き、チャンネル 2 における 4% の違いの約半分はこの影響と見ることが妥当だと考えられる。

チャンネル 4 では、ターゲットのスペクトル勾配に加えて、大気吸収の影響によっても大きく影響される。

MODTRAN 4 による AVNIR-2 チャンネル 4 のシミュレーション (Table 2) によると、AVNIR-2 観測/MODIS からの推定値比率は、ルブアルハリ沙漠 (実際の観測条件に近い大気条件 II ~ III, 地表面スペクトル a) で 0.87 ~ 0.89, 乾燥した高地であるウユニ塩湖 (実際の観測条件に近い大気・標高条件 IV, 地表面スペクトル b) では 0.96 となった。これに対して、実観測データの結果は、ルブアルハリ沙漠で 0.84 ~ 0.86 (Table 7), ウユニ塩湖で 0.89 ~ 0.90 (Table 7), 全サンプル (ルブアルハリ沙漠のサンプル数が 8 割以上を占める) 平均の比率は 0.84 ~ 0.85 (Table 6) であり、5.1 節で述べた 15% 程度の差の半分以上が AVNIR チャンネル 4 と MODIS チャンネル 2 の波長応答の違いに起因すると考えられる。

以上から、波長応答に起因した AVNIR-2 と MODIS の違いと、MODIS の絶対校正精度が 5% より良いとの報告^{9)~13)} を考え合わせれば、AVNIR-2 の現在の校正精度 (打ち上げ時の輝度校正係数から変更していない) は、4 チャンネル全てにおいて目標精度の 10% より良い結果となっていると考えられる。

5.3 ポインティング角度毎の比較

この手法の利点である短期間に多くのサンプルが取得できることを利用し、AVNIR-2 のポインティング角毎の評価を試みた。この方法だと、MODIS の走査鏡反射率の走査角依存 (Response Versus Scan, RVS) 特性が比較結果に直接影響することになる。しかし、MODIS データは軌道上校正結果を用いた RVS 偏差補正が実施されており^{11)~13)}、誤差は軽減されていると期待される。また、Terra と Aqua MODIS の両方で同様な傾向が現れれば、より確実に AVNIR-2 のポインティングミラー反射率の特性と考えられるかもしれない。Fig. 5 を見ると MODIS の Terra と Aqua MODIS の両方で同様な傾向 (図中に破線で示す) が認められる。しかし、この曲線の変動幅はおおよそ 5% 以内であり、もし AVNIR-2 のポインティング角依存感度特性があったとしてもこの範囲内であると考えられる。

以上のように、この手法で得られる多くのサンプルを用いて、さらに詳細なセンサ感度特性（観測条件に対する依存性や時間変化など）を評価するできる可能性はあるが、そのためには誤差要因（チャンネル波長応答による違いや異常データや MODIS の精度など）をより詳細に考慮する必要がある。今後これらを整理し、さらに内部光源校正の結果や他の衛星センサなどとの比較結果と合わせて解析し、継続的に AVNIR-2 の精度の評価・維持につなげる必要がある。

謝辞：本研究は JAXA EORC ALOS 校正検証チームの活動として行いました。チームメンバーのサポートに感謝いたします。また MODIS データは NASA Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC) Distributed Active Archive Center (DAAC) から提供されたものです。

引用文献

- 1) T. Tadono, M. Shimada, H. Murakami, T. Hashimoto, J. Takaku, A. Mukaida and S. Kawamoto : Initial Results of Calibration and Validation For PRISM and AVNIR-2, *Asian Journal of Geoinformatics* 6 (4), pp. 11–20, 2006.
- 2) K. Tanaka, S. Kurihara and Y. Okamura : The Sensor Characterization of Global Imager (GLI) on ADEOS-II Satellite, *The IEICE Transactions on Communications*, J88-B (1), pp. 151–157, 2005 (in Japanese)
- 3) A. Wu, X. Xiong, H. Murakami and W.L. Barnes : Inter-comparison of Aqua and Terra MODIS Using ADEOS-II GLI Orbital Intersections, *Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems X*, San Diego, USA, 5882, pp. 317–325, July - August 2005.
- 4) X. Xiong, A. Wu, J. Sun and B. Wenny : An overview of inter-comparison methodologies for Terra and Aqua MODIS calibration, *Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems XI*, USA, 6296, 62960C, September, 2006.
- 5) J. Nieke, M. Hori, T. Aoki, T. Tanikawa, H. Motoyoshi and Y. Nakajima : Satellite sensor inter-calibration over snow fields, *Earth Observing Systems VIII, Calibration and Characterization of Remote Sensing Systems*, *Proceedings of SPIE*, San Diego, California USA, 5151-46, August, 2003.
- 6) K. Thome, S. Biggar and H.J. Choi : Vicarious Calibration of TERRA ASTER, MISR and MODIS, *Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems IX*, Denver, USA, 5542, pp. 290–299, August, 2004.
- 7) H. Murakami, M. Yoshida, K. Tanaka, H. Fukushima, M. Toratani, A. Tanaka and Y. Senga : Vicarious Calibration of ADEOS-2 GLI Visible to Shortwave Infrared Bands Using GLObal Datasets, *IEEE Trans. Geosci. and Remote. Sens.* 43 (7), pp. 1571–1584, 2005.
- 8) G. Thuillier, M. Hers, P.C. Simon, D. Labs, H. Mandel, D. Gillotay and T. Foujols : The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the solspec spectrometer from the atlas and eureka missions, *Solar Phys.*, 214 (1), pp. 1–22, 2003.
- 9) W.L. Barnes X. Xiong and V.V. Salomonson : Status of Terra MODIS and Aqua MODIS, *J. of Advances in Space Research*, 32 (11), pp. 2099–2106, 2003.
- 10) J. Esposito, X. Xiong, A. Wu, J. Sun and W.L. Barnes : MODIS Reflective Solar Bands Calibration Uncertainty Analysis, *Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems IX*, Denver, USA., 5542, pp. 448–456, August, 2004.
- 11) X. Xiong, K. Chiang, J. Esposito, B. Guenther and W.L. Barnes : MODIS On-orbit Calibration and Characterization, *Metrologia* 40, pp. 89–92, 2003.
- 12) X. Xiong, J. Sun, K. Chiang, S. Xiong and W.L. Barnes : MODIS On-orbit Characterization Using the Moon, *Proceedings of SPIE, Sensors, Systems, and Next Generation Satellite VI*, Agia Pelagia, Greece, 4881, pp. 299–307, September, 2003.
- 13) X. Xiong and W.L. Barnes : An Overview of MODIS Radiometric Calibration and Characterization, *Advances in Atmospheric Sciences*, 23, (1), pp. 69–79, 2006.

〔著者紹介〕

●村上 浩（ムラカミ ヒロシ）



東北大学大学院理学研究科で地球物理修士・博士号を1997・2002年に取得。1997年から宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター（現宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター）でADEOS OCTS, ADEOS-II GLI および GCOM SGLI の海洋分野プロダクトのアルゴリズム開発と精度検証, および上記センサの輝度校正を行っている。日本海洋学会会員である。

E-mail : murakami.hiroshi.eo@jaxa.jp

●田殿 武雄（タドノ タケオ）



1995年長岡技術科学大学大学院修士課程建設工学専攻, 1998年同大学博士後期課程エネルギー・環境工学専攻修了（博士（工学））。1999年から宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター（現宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター）にてJERS-1/ALOS 解析研究プロジェクトに在籍。2001年から同事業団開発部員, 2006年より現所属研究員。主にALOS 光学センサの校正検証を担当し, またマイクロ波リモートセンシングを用いた物理量推定アルゴリズム開発を実施。IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 日本リモートセンシング学会, 土木学会, 水文・水資源学会, 日本雪氷学会に所属。

E-mail : tadono.takeo@jaxa.jp

●島田 政信（シマダ マサノブ）



京都大学工学研究科航空工学科で工学学士, 修士を1977年, 1979年に取得。東京大学工学部から工学博士号を1999年に取得。1979年から宇宙開発事業団勤務。現宇宙航空研究開発機構地球観測研究センターでALOSのサイエンスマネージャーとして, ALOS/PALSAR, JERS-1/SAR, Pi-SAR の校正検証を始め, 高次成果物としてオルソ画像, 干渉SARによるDEM作成, 試作成果物として森林モザイク, 地殻変動マップを作成中である。主として, SAR全般にわたる映像化処理, 誤差解析, 干渉SARによる地殻変動解析, ポラリメトリックSARの解析をおこなう。IEEE Geoscience and remote sensing学会, AGU学会, 日本リモートセンシング学会, 日本測地学会, 会員である。

E-mail : shimada.masanobu@jaxa.jp