

# GMS-5/VISSR可視データについての再校正技術の開発

## Calibration of GMS-5/VISSR VIS Band Using Radiative Transfer Calculation

橋本 徹<sup>1</sup>、奥山 新<sup>1</sup>、竹中 栄晶<sup>2</sup>、福田 悟<sup>3</sup>

HASHIMOTO Toru, OKUYAMA Arata, TAKENAKA Hideaki and FUKUDA Satoru

### Abstract

This report describes the methodology developed to calibrate GMS-5 visible channel data. This calibration method relies on calculated radiances over specific targets using a radiative transfer simulation package, RSTAR, based on the JRA-25 reanalysis data, ground observation, and MODIS data. The calibrated visible data improved the underestimated aerosol product and cloud optical thickness. Additionally, sun observation images are also effective for making and to verifying the calibrated data.

### 要 旨

静止気象衛星ひまわり5号（GMS-5）の可視データの再校正手法を開発した。本手法では、特定のターゲットに対するGMS-5の観測値と、独立したJRA-25全球大気再解析データ、地上観測値およびMODIS等の観測データに基づく放射伝達計算値とを比較することで、校正テーブルの再作成を行う。手法の初期評価として、再校正された可視データから、エアロゾル及び雲の光学的厚さを算出したところ、これまで過小であった算出値を改善することができた。また、GMS-5には可視データ校正のために、夜間に太陽を観測する機能が備わっていた。この太陽データが、校正テーブルの検証及び再作成に有効利用できることを確認した。

### 1. はじめに

衛星搭載イメージャの可視センサは、地表面や雲、エアロゾル等により反射・散乱された太陽光を観測する。観測データからは、大気中のエアロゾル及び雲の光学特性を表すパラメータ、地表に到達する日射量、地表面アルベドといった、気候変動の解析等において重要な物理量を算出することができる。これらを精度良く算出するためには、この可視データが精度良く校正されていることが前提となる。

静止気象衛星「ひまわり5号（GMS-5）」の諸元を表

1に示す。GMS-5に搭載された可視赤外走査放射計（VISSR）の可視チャンネルは、検出器としてシリコンフォトダイオードを用いている。光電子増倍管を利用していた「ひまわり4号（GMS-4）」以前と比較すると、感度特性は安定しているものの、経年変化による劣化が存在する（栗原、徳野、2000）。可視データには観測値を反射率に変換するための対応表（以下、校正テーブル）が含まれているが、このテーブ

表1 GMS-5の諸元

観測波長域	可視1チャンネル (0.55-0.90 μm)
	赤外3チャンネル (11 μm, 12 μm, 6.7 μm)
分解能	可視：1.25km (衛星直下)、64階調
	赤外：5km (衛星直下)、256階調
検出器数	可視：4 赤外：1
静止位置	東経140度
運用期間	1995年6月21日～2003年5月22日

<sup>1</sup> 気象衛星センターデータ処理部システム管理課

<sup>2</sup> 千葉大学環境リモートセンシング研究センター

<sup>3</sup> 東京大学気候システム研究センター

(2007年10月5日受領、2007年12月21日受理)

ルはGMS-5の定常運用開始時に作成された。校正テーブルの更新は行われておらず、検出器の経年変化を考慮していない。このため、GMS-5の可視データを気候学的な解析に利用するには、校正テーブルの再校正が必須である。

可視センサを搭載した衛星では、可視データの即時的な校正を目的として拡散板やプリズムで減光処置をおこなった太陽観測を利用することが多い。GMS-5にも、夜間に太陽を観測する機能が備わっていた。しかし運用期間中この観測データは校正に利用されていない。広く行われる可視センサの校正には、ターゲット観測を利用した手法が利用される。これは、特定の、海面・陸面・雲域等をターゲットとした観測値と、放射伝達計算による計算値や地上観測値との比較により、校正テーブルを補正する。この手法はどのような衛星の可視センサにも応用できるが、校正結果が放射伝達計算や地上観測の精度に左右されるため、その誤差見積もりが重要となる。

全球気候観測システム (GCOS) は、衛星による気候プロダクトの重要性及びプロダクト作成のためのデータ再校正の必要性を謳っている (GCOS, 2006)。このように、衛星データ校正の重要性が高まる中、全球的な衛星データ校正技術基盤確立のため、世界気象機関 (WMO) の主導により全球衛星搭載センサ相互校正システム (GSICS) が設立された。また、国際衛星雲

気候計画 (ISCCP) のように、再校正済の衛星データセットを組み合わせた、雲気候解析に資する全球データセットの作成も、永年行われてきた。(Schiffer, R.A., and Rossow, W.B.,1983)。可視センサ校正技術の開発及び再校正された高品質データセットを提供することは、これら国際プロジェクトへの貢献にもつながる。

本稿では新たに開発した、GMS-5可視チャンネルの再校正手法とその初期評価、及び夜間太陽データの再校正への利用について報告する。なお、この再校正手法の開発は、東京大学気候システム研究センター (CCSR) との共同研究「GMS可視データを用いた東アジア地域の雲気候の解析」の一環として実施された (操野ほか、2007)。

## 2. GMS-5可視データの校正テーブル

GMS-5の可視データは、0から63までの64階調の離散値 (以下、DN (Digital Number) 値) をとる。DN値は、校正テーブルによって反射率に変換される。観測波長域における大気外太陽照度を  $S_0 [W/m^2/\mu m]$ 、可視センサが観測する放射輝度を  $I [W/m^2/\mu m/str]$  とするとき、反射率  $A$  は次のように表される。

$$A = \frac{\pi I}{S_0} \quad (1)$$

表2 GMS-5運用時の可視データ校正テーブル。可視センサは4個の検出器で構成されるが、ここでは例として検出器2について示す。

DN値	反射率	DN値	反射率	DN値	反射率	DN値	反射率
0	0.0000	16	0.0638	32	0.2974	48	0.5898
1	0.0000	17	0.0748	33	0.3151	49	0.6252
2	0.0000	18	0.0859	34	0.3329	50	0.6606
3	0.0000	19	0.0970	35	0.3506	51	0.6961
4	0.0000	20	0.1081	36	0.3683	52	0.7315
5	0.0000	21	0.1191	37	0.3860	53	0.7669
6	0.0018	22	0.1302	38	0.4037	54	0.8024
7	0.0040	23	0.1413	39	0.4214	55	0.8378
8	0.0084	24	0.1557	40	0.4392	56	0.8732
9	0.0151	25	0.1734	41	0.4569	57	0.9087
10	0.0217	26	0.1911	42	0.4746	58	0.9441
11	0.0283	27	0.2088	43	0.4923	59	0.9795
12	0.0350	28	0.2266	44	0.5100	60	1.0000
13	0.0416	29	0.2443	45	0.5277	61	1.0000
14	0.0483	30	0.2620	46	0.5455	62	1.0000
15	0.0549	31	0.2797	47	0.5632	63	1.0000

表 2 に定常運用期間に利用した校正テーブルを示す。GMS-5の可視センサは4個の検出器で構成されるが、それぞれの感度はわずかに異なるため、校正テーブルも検出器ごとに作成された。本稿における再校正とは、これら 4 個の検出器それぞれについての校正テーブルを再作成することである。なお、中規模利用局 (MDUS) に配信されていたストレッチド-VISSR (SVISSR) データでは、検出器ごとの 4 つの校正テーブルを新たに設けた 1 つの標準校正テーブルで置き換えており (栗原、徳野、2000)、本稿で用いたデータとは異なる。SVISSRデータの詳細については文献 (気象衛星センター、1996) を参照されたい。

### 3. 再校正手法

再校正テーブルは、ターゲットとする特定の領域についての、放射伝達計算値と可視センサの観測値とを比較することで作成する。まず始めに、ターゲットを観測したときのDN値を取得し、扱いやすい電圧の単位に変換する。可視センサは複数の検出器で構成されており、それぞれわずかに感度が異なる。そのため次に、各検出器の感度差を補正する。そしてターゲットに対して放射伝達計算を行い、反射率を計算する。各ターゲットについて、それぞれ観測値に対応した計算

値が得られるので、これらを比較することで電圧値と反射率との関係を求め、再校正テーブルを作成する。以下ではそれぞれの処理の詳細と、具体的なターゲットの選定条件について述べる。

#### 3.1 観測値の変換

表 2 で示した校正テーブルは、図 1 (a) に示すような折れ線状の関数となる。再校正とは、図 1 (a) の関数形を新たに決定することであるが、このままでは作業が複雑になる。そこでこの関数を二つに分けて考え、関数形の決定処理を単純化する。

VISSRに入射した放射は、まずアナログ電圧値に変換され、出力される。次に、電圧値は64階調のDN値へと変換され、地上へと送信される。このとき入射光に対応する反射率と電圧値は、図 1 (b) のように単純な線形関係にあるが、電圧値とDN値は図 1 (c) のように折れ線状の関係にある。つまり図 1 (a) は、図 1 (b) と図 1 (c) の組み合わせとして表される。一般にセンサの劣化とは、反射率と電圧値との関係 (図 1 (b)) が変化することであり、電圧値とDN値の関係 (図 1 (c)) はほとんど変化しないとされている。従って再校正テーブルの作成は、図 1 (b) の単純な線形関数を求めればよい。そこで本稿では、DN値を一旦電圧値へ変換し、電圧値と放射伝達計算値との比較により再校正テーブルを作成する。

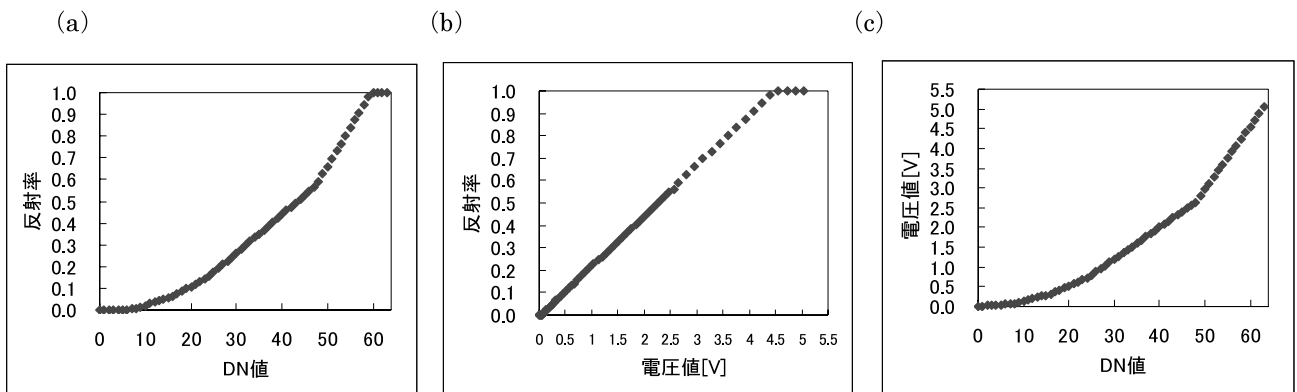


図 1 (a) VISSRにおけるDN値と反射率の関係 (検出器2)  
 (b) VISSRにおける電圧値と反射率の関係 (検出器2)  
 (c) VISSRにおけるDN値と電圧値の関係 (検出器2)

### 3.2 検出器間の感度差補正 (縞取り)

可視センサが持つ4個の検出器はそれぞれわずかに感度が異なる。そのため、放射伝達計算による再校正テーブルの作成を検出器ごとに行った場合、検出器の感度差が画像上に縞となって現れる可能性がある。そこでまず、特定の検出器 (基準検出器) を一つ決める。残り3個の検出器については、画像上の縞を除去するための補正係数を算出することで基準検出器との相関を求めておく。この作業を「縞取り」と呼ぶ。次に基準検出器についての再校正テーブルを作成する。そして縞取りで求めた補正係数をもとに、他の3個の検出器についても再校正テーブルを作成する。ここでは、地上試験時に最も安定しているとされた検出器2を基準検出器として選択する (栗原、徳野、2000)。

縞取りは次の3段階の処理に分けることができる。なお、以下に述べる手法はYoshida *et al.* (2005) をもとにしている。

- (1) 補正式の定義
- (2) 評価関数の定義と算出
- (3) 評価関数の最小化による補正係数の算出

補正式の選択には任意性があるが、ここでは式(2)のような1次関数で補正することとした。ここで、 $i$  は検出器番号、 $L^i$  は補正前の観測値、 $L^{*i}$  は補正後の観測値、 $a^i$ 、 $b^i$  は補正係数である。

$$L^{*i} = a^i L^i + b^i \quad (2)$$

補正係数は検出器ごとに1組 (2係数) 設定し、基準検出器においては  $a^i = 1$ 、 $b^i = 0$  とする。検出器は4個であるが、そのうち1個は補正係数を既知とした基準検出器であるから、未知の補正係数は全部で3個×2係数=6係数となる。

次に縞を定量的に評価する指標として、評価関数  $E^*$  を式(3)で定義する。ここで、 $l$  は画素のライン番号、 $p$  は画素のピクセル番号である。また、 $S_{flat}$  は画像上で一定サイズの領域内のDN値がほぼ同一となる領域を指し、1枚の画像上に複数とることができる。

$$E^* = \sum_{l,p} \left( L_{l,p}^{*i} - L_{l+1,p}^{*(i+1)} \right)^2, \quad (3)$$

where  $l, p \in S_{flat}$

$E^*$  は、 $S_{flat}$  内で、隣接する2画素の補正済み観測値の差の二乗和を意味する。実際の処理では21×21画素を領域  $S_{flat}$  1個のサイズとし、1ヶ月間の全ての可視画像について  $S_{flat}$  を抽出した。なお「DN値がほぼ同一」とは、21×21画素の領域内で観測されたDN値の最大値と最小値の差が2以下の場合とした。

補正係数  $a^i$ 、 $b^i$  は、式(3)で定義した評価関数を最小化するときの値として求めることができる。そのために式(4)を設けることで、 $a^i$ 、 $b^i$  についての6本の連立方程式を得る。式(4)を解くことで補正係数の値が求まる。

$$\frac{\partial E^*}{\partial a^i} = 0, \quad \frac{\partial E^*}{\partial b^i} = 0 \quad (4)$$

式(2)~(4)中の観測値  $L$  としては、反射率、電圧値、DN値、の3通りが選択可能であるが、本研究では電圧値を用いることとした。反射率を用いなかった理由は、電圧値と反射率との関係を更新するたびに検出器間の補正処理をしなければならず、処理が煩雑になるためである。またDN値を用いなかった理由は、検出器間の感度差は反射率から電圧値への変換に影響することから、DN値よりも電圧値を用いるのが適切であると判断したためである。

得られた結果の一例を図2に示す。補正前の画像に見られた縞が軽減されているのがわかる。また、補正前の観測値についての評価関数  $E_0$  を式(5)で定義し、 $E^*$  の値と比較することで縞取りの効果を定量的に評価した。結果としては  $E_0 > E^*$  であり、手順の妥当性を確認した。

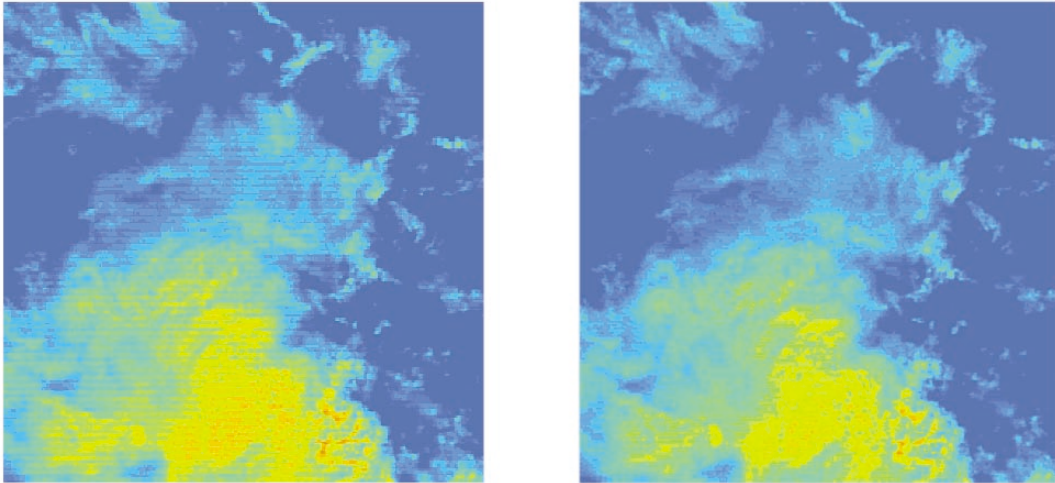


図2 縞取りの結果例。補正前画像（左）と補正後画像（右）。補正前画像に見られた縞が、補正後画像では軽減されている。

$$E_0 = \sum_{l,p} (L_{l,p}^i - L_{l+1,p}^{i+1})^2, \quad (5)$$

where  $l, p \in S_{flat}$

こうして得られた各検出器についての補正係数  $a^i$ ,  $b^i$  を用いて、基準検出器以外についても再校正テーブルを作成する。

### 3.3 放射伝達計算

放射伝達計算コードには、CCSRにて開発されたRSTARシリーズの最新版である、RSTAR 6を用いる。RSTAR 6はNakajima and Tanaka (1988) のアルゴリズムを用いており、衛星センサの応答関数、衛星と太陽の位置、地表面状態、大気状態を入力することにより、 $0.2 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$ における放射輝度を計算することができる。

大気中の気体による吸収過程の計算には、厳密なライン・バイ・ライン計算に準じる精度を持ちながら、高速な計算が可能なk-分布法を採用している。気体の吸収パラメータにはHITRAN2004 (Rothman *et al.*, 2004) を利用している。大気中の粒子による散乱・吸収パラメータにはd'Almeida *et al.* (1991) の値を利用している。地表が海面の場合、その反射率を海面風速に基づき計算するパッケージも含む。

可視域の放射伝達計算においては、エアロゾルと

雲を考慮する必要がある。特に、海上のエアロゾルデータ及び雲データは、地上観測が存在しないため、他の校正された衛星から算出する必要がある。これらデータの算出には、エアロゾル解析パッケージのREAP (Higurashi and Nakajima, 1999)、雲解析パッケージのCAPCOM (Nakajima and Nakajima, 1995) を用いる。REAPは衛星の可視及び近赤外の計2チャンネルのデータから、海上におけるエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数を算出する。CAPCOMは可視、近赤外、赤外の計3チャンネルのデータから、雲の光学的厚さと雲粒子有効半径、雲頂温度を算出する。

放射伝達計算精度向上のためには、RSTAR6で設定するエアロゾル及び雲の散乱・吸収のパラメータと、入力データ作成の際に仮定したパラメータを同じにする必要がある。REAPとCAPCOMにおける放射伝達計算は、RSTARと同じアルゴリズムを用いている。よって、これらのパッケージを利用することにより、入力データと放射伝達計算の整合をとるのが容易となる。

### 3.4 ターゲットの選定

放射伝達計算に際しては、低輝度域、中輝度域、高輝度域それぞれのターゲットとして、晴天海面、晴天陸面、海上の一般的な雲域を採用する。各ターゲットの選定条件を以下に記す。なお、晴天域と雲域の判別は、安田、白川 (1999) の手法を参考にした。

・晴天海面

晴天海面における放射伝達計算に必要な入力パラメータは、大気プロファイル、エアロゾルの光学特性、海面風速、オゾン全量である。このうち特に算出結果への影響が大きいのは、エアロゾルの光学特性と海面風速である。陸域の近くでは人為起源の汚染物質や黄砂などの鉱物粒子が存在し、陸域から離れた海上に比べるとエアロゾル量は多くなる。よって、放射伝達計算におけるエアロゾルの影響を軽減するため、陸面から離れた海域を選択するのが望ましい。海域でのエアロゾルの吸収・散乱特性及び粒径分布は、Higurashi and Nakajima (2002) による非吸収性エアロゾルの値を採用する。また、海上風が強くなると、白波の影響により海面の反射率が上昇する。この影響を軽減するために、海上風が強い海域を選択する必要がある。さらに、サングリント領域では、海面の反射率が海面風速によって大きく変化するため、放射伝達計算の誤差も大きくなることを見込まれる。よって、サングリント周辺はターゲットとしない。表3にターゲットの条件を示す。

表3 晴天海面ターゲットの条件。海面上の下記条件を満たすターゲットについて放射伝達計算を行った。

ターゲットの分解能	0.1度正方形
有効ターゲットの条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・格子内が晴天</li> <li>・海面風速10m/s以下</li> <li>・エアロゾルの光学的厚さ0.3以下</li> <li>・太陽天頂角、衛星天頂角がともに60度以下</li> <li>・コーンアングル* 30度以上</li> <li>・近隣に陸地がない</li> <li>・最頻のDN値が格子内の90%以上を占める</li> </ul>

\* 太陽光がターゲットで鏡面反射すると仮定した場合に、反射光を表す上向きベクトルと、ターゲットからVISSRへ向かうベクトルとのなす角。サングリントの領域や強度は海上風速にも依存するが、一般にコーンアングルが小さいと強度が増す。

・晴天陸面

晴天陸面における放射伝達計算に必要な入力パラメータは、大気プロファイル、エアロゾルの光学特性、地表面反射率、オゾン全量である。このうち、地表面反射率が最も重要なパラメータとなる。RSTARで陸面における放射伝達計算を行う場合、地表面を等方散乱面と仮定し、その反射率を設定する。現実には、地表面反射率は衛星と太陽の位置関係に依存する場合はあ

るため、一様な反射率を設定すると観測時刻によっては誤差が生じる可能性がある。このため、RSTARに入力する地表面反射率は、GMS-5と太陽の位置に応じた値を設定する必要がある。この地表面反射率の変化は双方向反射率分布関数 (BRDF) により表され、特に植生域では変化が顕著に現れる傾向にある。そのため、ターゲットには植生の影響が少ない地域を選択することが望ましい。例えば、欧州気象衛星機構 (EUMETSAT) では、サハラ砂漠をターゲットとした校正を行っている (M.Y.Govaerts *et al.*, 2004)。また、陸上においても海上と同様エアロゾルの光学特性は重要なパラメータである。衛星から算出される陸域のエアロゾルの光学特性は、地表面反射率の推定に伴う誤差が大きい。このため、ターゲット近隣にエアロゾル観測を行っている地上観測所が必要である。

これらの条件を考慮して、本稿では陸面のターゲットとして、オーストラリア大陸中央部の、オーストラリア気象局 (BoM) のエアロゾル観測所がある Alice SpringsとTennant Creek (図3) 周辺を採用した。ここでのエアロゾルは、主にバイオマス燃焼による炭素性エアロゾル及び砂漠からのダストエアロゾルが卓越する (Mitchell and Forgan, 2003)。これらエアロゾルの吸収・散乱特性及び粒径分布はDubovic *et al.* (2001) を参考に設定した。表4にターゲットの条件を示す。なお、ターゲットにおけるBRDFの効果についての考察を付録-1に記した。

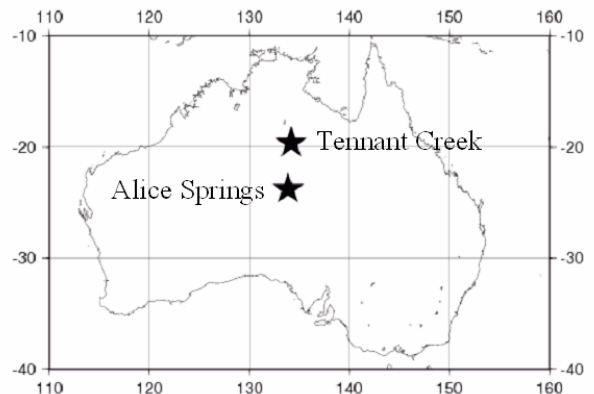


図3 Alice SpringsとTennant Creekの位置。

表4 晴天陸面ターゲットの条件。BoMのエーロゾル観測所がある、オーストラリアのAlice Springs及びTennant Creek周辺で、下記条件を満たすターゲットについて放射伝達計算を行った。

ターゲットの分解能	Alice Springs及びTennant Creek周辺の0.1度正方向格子
有効ターゲットの条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・格子内が晴天</li> <li>・エーロゾルの光学的厚さ0.3以下</li> <li>・最頻のDN値が格子内の80%以上を占める</li> </ul>

・海上の一様な雲

海上の雲域における放射伝達計算に必要な入力パラメータは、大気プロファイル、雲の光学特性、海面風速、オゾン全量である。計算結果は、雲粒子の光学特性に大きく左右される。雲は大きく水雲と氷雲に分類される。氷雲を放射伝達計算のターゲットとした場合、粒子の非球形性を考慮する必要があるため、計算結果に誤差が生じる可能性が高くなる。よって、雲域の放射伝達計算ターゲットは、雲頂が一様な水雲とする。雲頂が一様であるかどうかは、赤外データから得られる雲頂温度の空間的な均質性

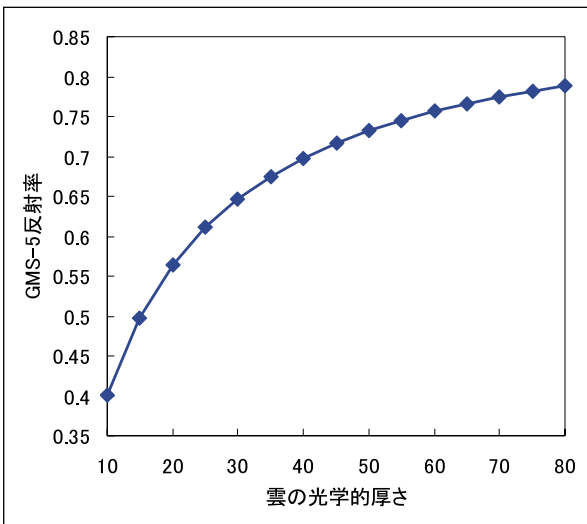


図4 水雲の光学的厚さに対する、観測される反射率の関係。例として太陽天頂角30度、衛星天頂角30度、太陽と衛星の相対方位角差150度とし、雲に対するGMS-5が観測する反射率をRSTAR6で求めた。光学的厚さが20から40では比較的傾きが大きく、雲に対する可視センサの感度が良好であることを示している。

により判断する。また、放射伝達計算による誤差を軽減するため、地表面の影響を受けないよう光学的に十分厚く、かつGMS-5の可視センサの感度が良好な、光学的厚さ20~40の海上の雲を選別する。図4に雲の光学的厚さと、GMS-5が観測する反射率のシミュレーション例を示す。さらに、晴天海面と同様、サングリント周辺の雲はターゲットとしない。表5にターゲットの条件を示す。晴天海面および晴天陸面と比べると、雲域ではDN値の分散が大きくなる傾向にある。そのためターゲットの選定条件は重要である。付録-2に、ターゲット領域についての考察を記した。

表5 表海上雲域ターゲットの条件。海面上の下記条件を満たすターゲットについて放射伝達計算を行った。

ターゲットの分解能	0.1度正方向格子
有効ターゲットの条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・格子内が雲域</li> <li>・雲頂が平坦な水雲</li> <li>・雲の光学的厚さ20以上40以下</li> <li>・太陽天頂角、衛星天頂角がともに60度以下</li> <li>・コーンアングル30度以上</li> <li>・近隣に陸地がない</li> <li>・最頻のDN値が格子内の60%以上を占める</li> </ul>

4. 再校正手法の検証

3節で示した再校正手法に基づいて、GMS-5運用末期である2001年4月、2003年4月の再校正テーブルを作成した。この再校正データから算出される物理量をもとに、手法の評価を行った。また、夜間の太陽データが再校正テーブルの検証に利用できるか調査を行った。

4.1 利用したデータ

放射伝達計算に利用した入力データを表6に示す。米国航空宇宙局 (NASA) の衛星Terraに搭載されているイメージャであるMODISには、太陽観測を利用した可視データ校正機能が備わっている。よって、Terra/MODISのデータから得られるエーロゾルと雲の光学特性、及び地表面反射率を放射伝達計算の入力とすることにより、再校正処理の精度向上が期待できる。

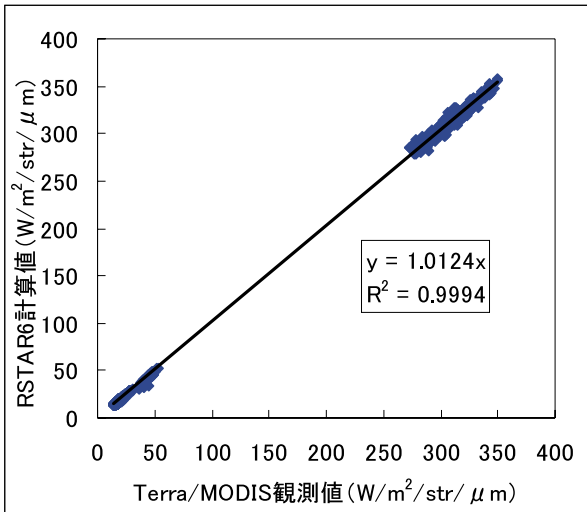


図5 Terra/MODISチャンネル1 (0.66 μm) の観測値と放射伝達計算値の比較。Terra/MODISが観測した放射輝度を横軸に、表6で示したデータをRSTAR6に入力して求めた放射輝度の計算値を縦軸に取っている。回帰直線を求めたところその傾きはほぼ1であり、良い精度で計算値が観測値を再現できている。

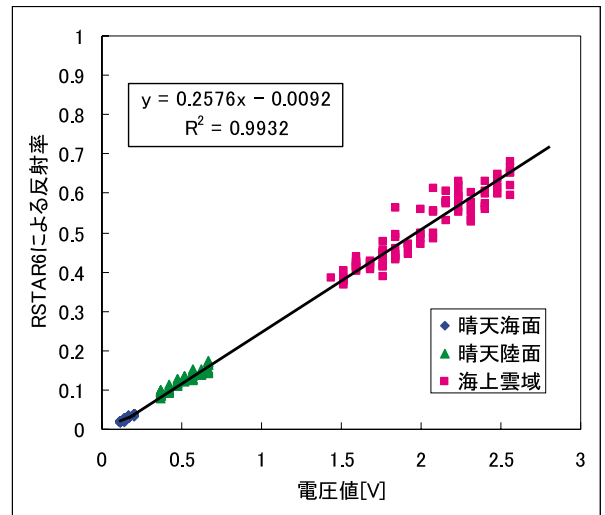


図6 電圧値と放射伝達計算結果の比較 (2001年4月)。横軸にGMS-5の観測値から決まる電圧値、縦軸に放射伝達計算から求まる反射率を取っている。晴天海面、晴天陸面、海上雲域の3ターゲットにおける計算値が一直線上に乗っており、電圧値と反射率の線形な関係を求めることができる。

4.2 放射伝達計算誤差の見積もり

放射伝達計算に起因する誤差を評価するため、表6に示したデータを入力としてTerra/MODISのチャンネル1 (0.66 μm) を対象とした放射伝達計算値と、Terra/MODISによる実際の観測値との比較を行った。チャンネル1はRSTARに入力するエアロゾル及び雲データの作成で用いたデータである。比較結果の例を図5に示す。ターゲットごとの放射伝達計算結果にはばらつきが見られるが、全体として誤差約1%と良い精度で観測値を再現できた。

4.3 再校正テーブルの作成

図6に2001年4月における、基準検出器の電圧値

と放射伝達計算結果の比較を示す。図1 (b) のように、電圧値と各ターゲットにおける放射伝達計算結果が線形関係にあることが確認できる。ただし、各ターゲットにおける放射伝達計算にはばらつきが見られ、特に雲域では目立っている。これは、図1で示したように、低輝度域に比べて高輝度域ではDN値1カウントに対応する反射率と電圧値の幅がともに大きくなっている影響である。

図6から求められる回帰直線をもとに作成した再校正テーブルを図7に示す。各DN値に対応する反射率の値を従来のテーブルと比較すると、再校正テーブルの方がより大きい値を出力するようになっている。この結果は、センサの劣化が補正されたためと

表6 放射伝達計算への入力データ。海域のエアロゾル及び雲についてのパラメータは、Terra/MODISデータからそれぞれREAP, CAPCOMを用いて算出した。

大気プロファイル 海面風速	JRA-25全球大気再解析データ (Oonogi <i>et al.</i> , 2007)
エアロゾルの光学的厚さ	Terra/MODISデータより算出 (海域)
エアロゾルのオンゲストローム指数	Alice Springs, Tennant Creekのサンフォトメータ観測データ (陸域)
雲の光学的厚さ 雲粒子の有効半径	Terra/MODISデータより算出
地表面反射率	Terra/MODISによるBRDFパラメータ (Lucht <i>et al.</i> , 2000)
オゾン全量	Earth Probe/TOMSによるオゾン全量データ



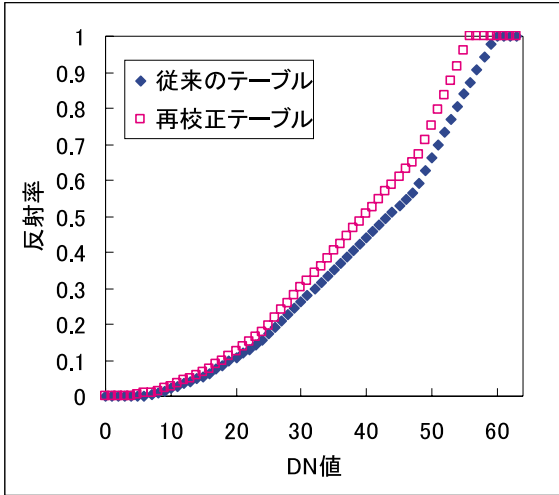


図7 再校正テーブルと従来の校正テーブルの比較。計算上、反射率が0以下となる場合は反射率=0、反射率が1以上となる場合は反射率=1としている。再校正によってセンサ劣化の影響が補正されている。ここでは、基準とした検出器-2について示す。

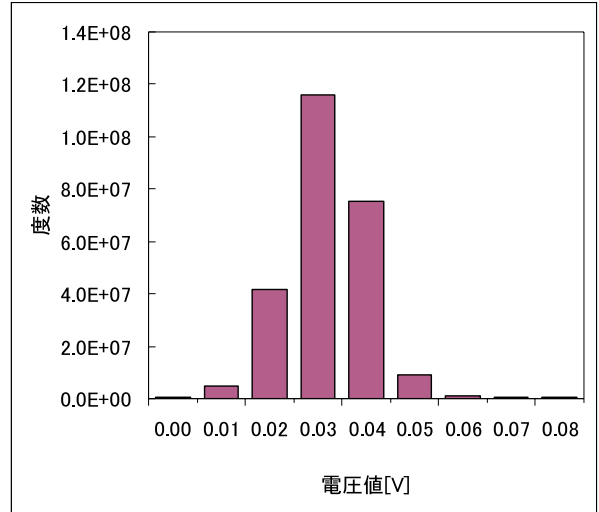


図8 宇宙空間を観測したときの電圧値のヒストグラム (2001年4月の03UTC)。センサへのノイズがあるため、宇宙空間を観測したときでもVISSRからは0V以上の電圧が出力される。図はその値が0.02V~0.04V程度の値に分布することを示している。

解釈できる。付録-3に、作成した再校正テーブルを掲載する。

また、図6の回帰直線から、反射率0における電圧値(ゼロ点)は、約0.032Vであることがわかる。このゼロ点と実際の観測値が矛盾していないか確認するため、宇宙空間を観測したときの電圧値の調査を行った。図8に電圧値のヒストグラムを示す。図8より、宇宙空間を観測したときの電圧値はおおむね0.02V~0.04Vを示すことがわかる。よって、図6の回帰直線から求められるゼロ点の値は妥当である。

#### 4.4 再校正テーブルの検証

##### 4.4.1 エーロゾルプロダクトによる検証

気象衛星センターでは、2002年12月より、静止気象衛星の可視データからエーロゾルの光学的厚さを算出する、エーロゾルプロダクトを運用している(橋本、2006)。エーロゾルプロダクトでは晴天海面の可視データが処理対象となることから、プロダクトの評価を行うことは再校正テーブルにおける低輝度域の精度検証につながる。

プロダクトの評価は地上エーロゾル観測との比較

により行う。図9に気象庁のエーロゾル観測地点を示す。ここでは雲の影響がないと判断できる時の、地上観測値と近隣の海域における算出値を比較する。図10に2003年4月の比較結果を示す。観測値との平均誤差が、従来のテーブルでは約-0.13であったのが、再校正により約-0.01となり、観測値に近い値に改善されている。

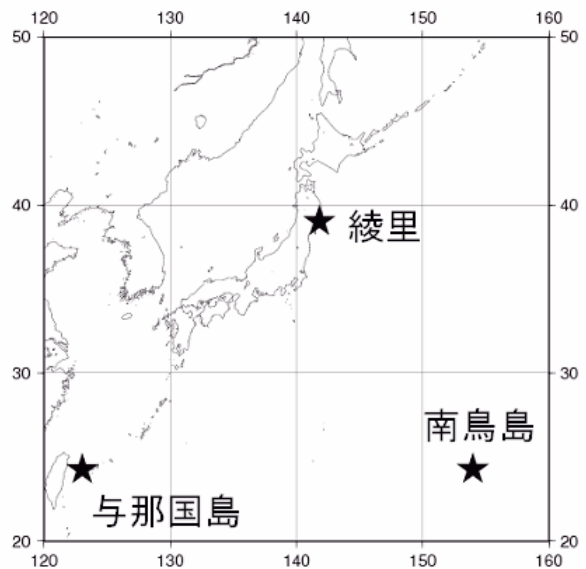


図9 気象庁のサンフォトメータによるエーロゾル観測地点の位置。

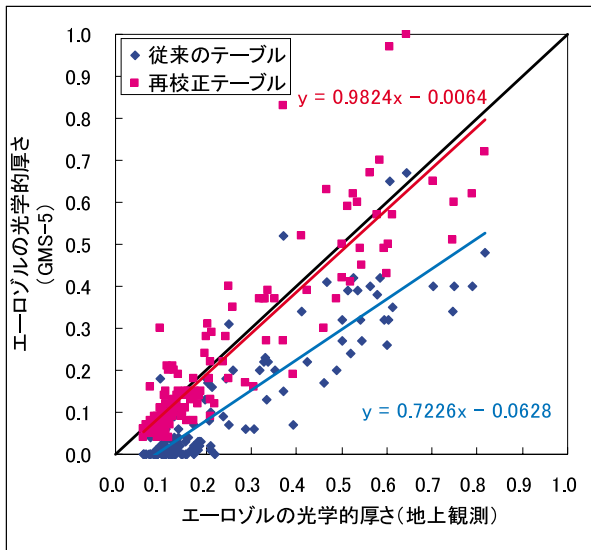


図10 エアロゾルプロダクトにより算出されるエアロゾルの光学的厚さと、地上観測値との比較 (2003年4月)。従来のテーブルに基づいて求めた光学的厚さは地上観測値よりも過小に評価する傾向にあったが、再校正テーブルに基づく算出値では改善されている。

4.4.2 雲の光学的厚さによる検証

再校正テーブルの高輝度域の精度検証は、雲の光学的厚さを用いて行う。そのために雲解析ツールCAPCOMを用いて再校正データから雲の光学的厚さを算出し、評価する。

評価はTerra/MODISデータより算出した雲の光学的厚さと、再校正データより算出した雲の光学的厚さとの比較により行う。比較対象はTerra/MODISとGMS-5の観測時刻差が15分以内で、Terra/MODISから算出した光学的厚さが20以上の水雲とする。比較結果を図11に示す。Terra/MODISとの平均誤差が、従来のテーブルでは約-9.95であったのが、再校正により+1.25となり、観測値に近い値に改善されている。

4.5 校正用太陽観測データの利用

GMS-5では可視センサ校正を目的として、太陽光の観測を1日1回、16UTCに実施していた。この観測ではプリズムによって太陽光を50±20%相当に減衰させてVISSRの光学系(走査鏡)に導くことにより、画像上にあたかも太陽が映っているようなデータが得

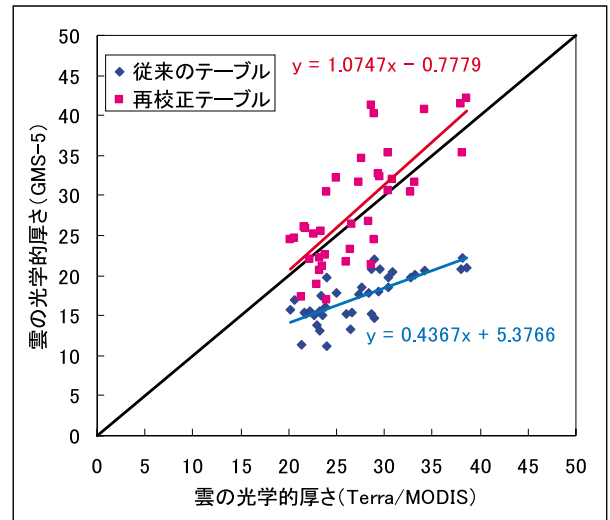


図11 Terra/MODISとGMS-5の観測値に基づいて算出した雲の光学的厚さの比較 (2001年4月)。CAPCOMを用いて算出した。従来のテーブルに基づいて求めた光学的厚さはTerra/MODISによる算出値よりも過小に評価する傾向にあったが、再校正テーブルでは改善されている。

られる (図12)。このとき入射する太陽光は地球大気の影響を受けていないため、可視センサ特性の経年変化を追跡する上で有効であると考えられる。

太陽観測データの経年変化を図13に示す。傾向として観測値は運用開始からの経過日数に応じてほぼ線形に減衰していくことがわかる。この減衰傾向をセンサ感度の劣化に起因するものとみなすと、センサ感度の変化率を見積もることができる。なお、太陽光を減衰させる際に3個のプリズムを組み合わせで使用している影響で、図13は複雑な季節変動を示している。そのため、見積もりには1個のプリズムを通る事例だけを選別し利用した。求めたセンサ感度の変化率をもとに、複数の再校正テーブルが互いに矛盾していないかを検証することができる。

検証のために、2001年4月と2003年4月の二つの再校正テーブルについて、あるDN値に対応する反射率の値がどの程度異なるかを算出した。結果を比で表すと、2001年4月：2003年4月=1：1.086であった。図13をもとに太陽観測データから同様の比を算出すると1：1.060となり、両者はほぼ一致した。従って、2001年4月及び2003年4月の二つの再校正テーブル

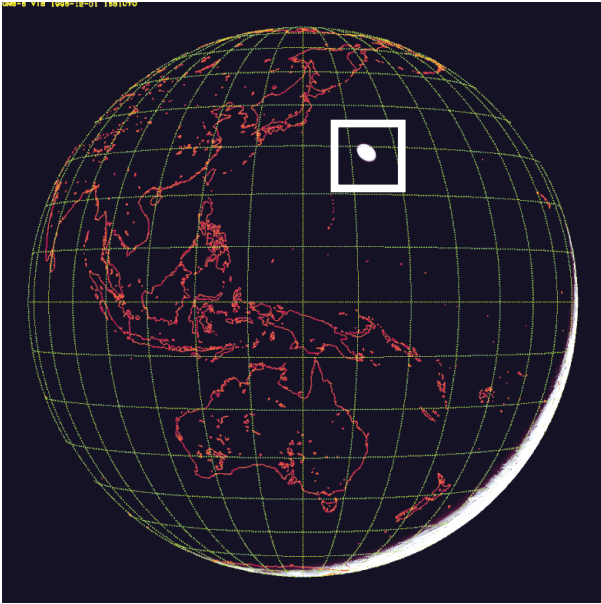


図12 太陽観測データの例（1995年12月1日16UTC）。実線の枠内に太陽が写っている。太陽光を減衰させてVISSRの光学系に導くことで、画像上にあたかも太陽が写っているような画像を得る。

は互いに矛盾していない。

また上記の結果は、太陽観測データより得られるセンサ感度変化率を用いることにより、一方の再校正テーブルから他方を導出し得ることを示唆している。太陽観測データが再校正に利用できれば、時間を要する放射伝達計算を減らすことができるため、処理の効率化につながる。具体的な利用方法については、今後検討すべき課題である。

## 5. まとめ

放射伝達計算を利用した、GMS-5/VISSR可視データの再校正手法を開発した。本手法では、晴天海面、晴天陸面、海上の一般的な雲域をそれぞれ放射伝達計算のターゲットとし、放射伝達計算結果を真として、観測値（DN）と反射率の関係を再構築する。これにより再校正された可視データから、エアロゾルの光学的厚さ、及び雲の光学的厚さを算出したところ、従来過小評価であった算出値を改善することができた。

また、夜間の太陽観測データについて調査を行ったところ、校正テーブルの検証及び再作成に有効利用できることが示された。太陽観測データの具体的な利用方法は、今後の検討課題である。

この可視データ再校正手法は、過去の静止気象衛星ひまわり1～4号、及び現在運用中のひまわり6号にも適用できる。気象衛星センターに累積されたこれらのデータの再校正を行うことで、気候学的な解析に資するデータセットを作成することが可能である。また、運用中の衛星の準リアルタイム校正に利用することも考えられる。気象衛星センターでは、この再校正手法を可視データ校正の技術基盤として、今後過去データの再校正、及び運用データの校正に利用していく計画である。

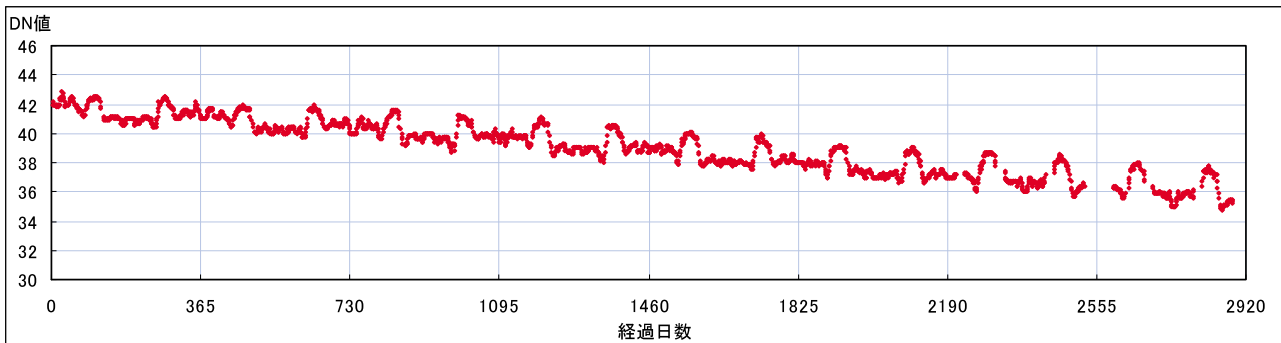


図13 太陽観測値の経年変化。横軸はGMS-5打ち上げからの経過日数、縦軸は太陽を含む領域内で最も明るい点のDN値。DN値については1週間の移動平均を取っている。太陽光を減衰させるためには3個のプリズムを組み合わせて使用している。そのため複雑な季節変動が見られるが、傾向として運用開始からの経過日数に応じてほぼ線形に減衰している。なお、運用末期には南半球の観測を制限したため、一部のデータが得られていない。

## 謝辞

再校正手法の開発にあたり、東京大学気候システム研究センター (CCSR) の中島映至教授、千葉大学環境リモートセンシング研究センター (CEReS) の高村民雄教授には多くのご指導をいただいた。RSTAR、REAP、CAPCOMの利用については、それぞれ東京海洋大学の関口美保准教授、国立環境研究所の日暮明子主任研究員、東海大学の中島孝准教授よりご指導いただいた。また、オーストラリアのエーロゾル観測データは、オーストラリア気象局のB.Forgan氏、気象庁のエーロゾル観測データは、気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付エーロゾル観測係より提供いただいた。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- d'Almeida, G. A., P. Koepke, and E. P. Shettle, 1991: Atmospheric aerosols. Global climatology and radiative characteristics., A. Deepak Publishing.
- Dubovik, O., B. Holben, T. Eck, A. Smirnov, Y. Kaufman, M.D. King, D. Tanre, and I. Slutsker, 2002: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations., *J. Atmos. Sci.*, 59, 590-608.
- GCOS, 2006: Systematic Observation Requirements for Satellite-Based Products for Climate, WMO-TD , 1338.
- Govaerts, Y.M., M. Crerici, and N. Clerbaux, 2004: Operational Calibration of the Meteosat Radiometer VIS Band., *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42, 1900-1914.
- Higurashi, A., and T. Nakajima, 1999: Development of a Two Channel Aerosol Retrieval Algorithm on Global Scale Using NOAA / AVHRR., *J. Atmos. Sci.*, 56, 924-941.
- Higurashi, A., and T. Nakajima, 2002: Detection of aerosol types over the East China sea near Japan from four-channel satellite data., *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1836-1839.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K.Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis., *J. Met. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- Rothmana, L.S., D. Jacquemarta, A. Barbeb, D. Chris Bennerc, M. Birkd, L.R. Browne, M.R. Carleerf, C. Chackerian Jr.g, K. Chancea, L.H. Couderth, V. Danai, V.M. Devic, J.M. Flaudh, R.R. Gamachej, A. Goldmank, J.M. Hartmannh., K.W. JucksI, A.G. Makim, J.Y. Mandini, S.T. Massien, J. Orphalh, A. Perrinh, C.P. Rinslando, M.A.H. Smitho, J. Tennysonp, R.N. Tolchenovp, R.A. Tothe, J. Vander Auweraf, P. Varanasiq, G. Wagnerd, 2005: The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database., *J. Quant. Spec. Rad. Trans.*, 96, 139-204.
- Lucht, W., C.B. Schaaf, and A.H. Strahler, 2000: An Algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models., *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38, 977-998.
- Mitchell, R.M., and Forgan, B.W., 2003: Aerosol measurement in the Australian Outback: Intercomparison of sun photometers., *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 20, 54-66.
- Yoshida, M., N. Sekio, Y. Mitomi, and GLI cal 4th group, 2005: RESTEC reports of GLI stripe noise correction in 2000-2004 (in Japanese) .
- Nakajima, T., and M. Tanaka, 1988: Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation., *J. Quant. Spec. Rad. Trans.*, 40, 51-69.
- Nakajima, T.Y., and T. Nakajima, 1995: Wide area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurement for FIRE and ASTEX region., *J. Atmos. Sci.*, 52, 4043-4059.
- Schiffer, R.A., and W.B. Rossow, 1983: The

International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) : The first project of the World Climate Research Programme. Bull. Amer. Meteor. Soc., 64, 779-784.

気象衛星センター、1996： 気象衛星資料利用の手引き

操野年之、太原芳彦、橋本徹、奥山新、2007： GMS可視データを用いた東アジア地域の雲気候の解析、平成18年度東京大学気候システム研究センター共同研究報告書、123-126.

栗原茂久、徳野正己、2001： GMS-5 VISSRキャリブレーションの現状、気象衛星センター技術報告38号、53-68.

橋本徹、2006： エーロゾルの光学的厚さ、気象衛星センター技術報告特別号、121-124.

安田宏明、白川嘉茂、1999： 静止気象衛星データを用いた海面水温算出方法の改良気象衛星センター技術報告第37号、19-33.

### 付録-1 陸面反射率の設定

ここでは、晴天陸面ターゲットにおけるBRDFの効果について考察する。

表6に示したとおり、MODISデータより算出される地表面反射率及び算出に利用するBRDFパラメータが、NASAより公開されている (Lucht *et al.*, 2000)。このBRDFパラメータを用いることにより、観測時刻に応じた地表面反射率をRSTARに入力することができる。図14に2001年4月における、晴天陸面での基準検出器の電圧値と放射伝達計算結果の比較を示す。BRDFの考慮の有無により、放射伝達計算結果に差が生じている。図14には晴天海面と海上の雲域の処理結果から求められる回帰直線をあわせて示す。回帰直線と比較すると、BRDFを考慮しない場合には電圧値が大きくなるにつれて回帰直線から外れる傾向にある。これに対して、BRDFを考慮した場合の計算結果は回帰直線上に乗っており、晴天海面および雲域の計算結果と整合が取れている。従って、地表面のBRDFを考慮し観測時刻に応じた地表面反射率を設定

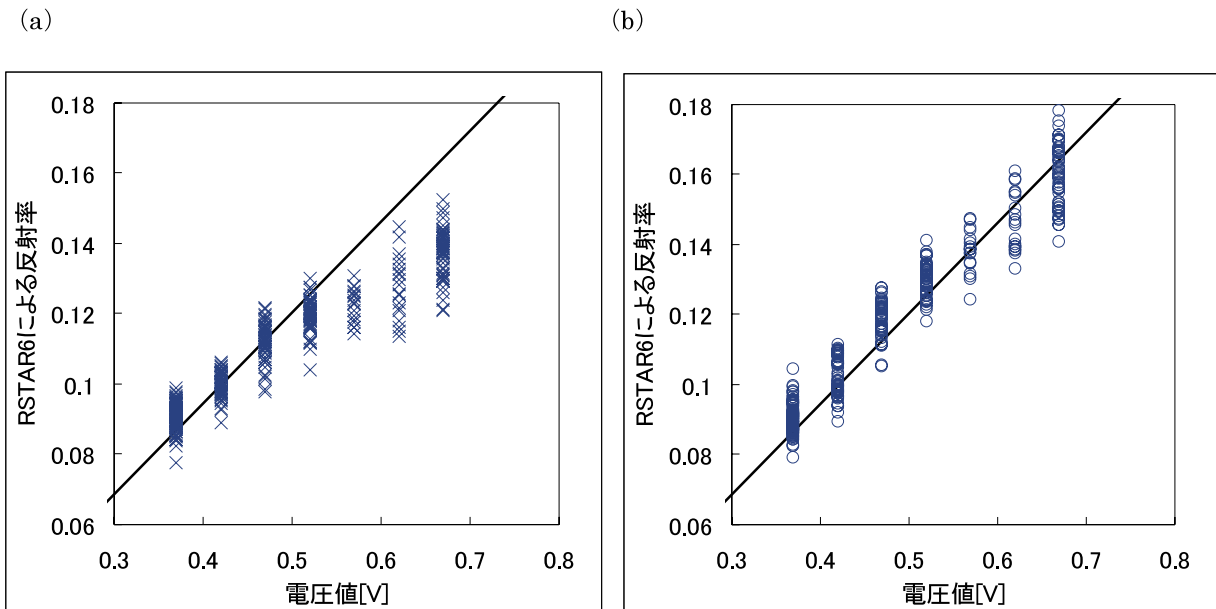


図14 晴天陸面における電圧値と放射伝達計算結果の比較に伴う、BRDFの影響 (2001年4月)。(a) 地表面のBRDFを考慮せず、各観測時刻で一定の地表面反射率をRSTARの入力とした場合、(b) 地表面のBRDFを考慮し、観測時刻に応じた地表面反射率をRSTARの入力とした場合。実線は晴天海面と海上の雲域の処理から得られる回帰直線。(b)では計算結果が回帰直線上に乗っていることから、地表面反射率を一定とした場合に生じた観測値との誤差が補正されている。

したことで、地表面反射率を一定とした場合に生じた観測値との誤差が補正できたことがわかる。

付録-2 海上雲域のターゲット領域

本稿では海上雲域のターゲットとして、0.1° 四方の正方格子を採用した。仮のこの条件を変更し、0.25° 正方格子をターゲットとしたとき、再校正テーブルの作成にどのような影響が現れるか考察する。

図15に、海上の雲域について0.25° 正方格子をターゲットとした場合の、基準検出器の電圧値と放射伝達計算結果の比較図を示す。0.1° 正方格子をターゲットとした場合の結果である図6と比較すると、0.1° 正方格子をターゲットとした場合の方が回帰直線からの分散が小さく、しかもより広範なDN値からターゲットを抽出できていることがわかる。これは、雲域のターゲット領域を広く取りすぎると、観測値の分散も大きくなることが多く、ターゲットを代表する観測値の抽出が困難になるためである。逆に、狭く取りすぎると雲頂の一様性判定が困難になる。以上を考慮し、本稿では海上雲域のターゲットに0.1° 正方格子を採用し、晴天海面、晴天陸面のターゲットもこれに合わせている。

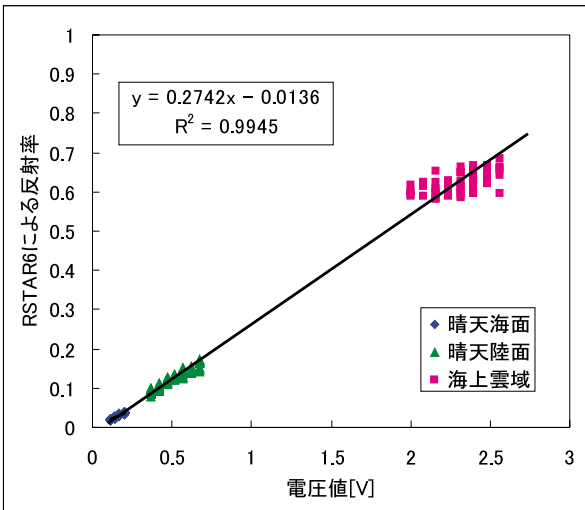


図15 海上の雲域のターゲットを0.25° 正方格子とした場合の、電圧値と放射伝達計算結果の比較 (2001年4月)。晴天海面と晴天陸面のデータは図6と同じである。図6との比較から、0.1° 正方格子をターゲットとした方が回帰直線との相関が良い。

付録-3 検出器ごとの再校正テーブル (2001年4月)。

数値は反射率を示す。図7では、表中の検出器-2について示した。

DN	検出器-1	検出器-2	検出器-3	検出器-4
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0008	0.0021	0.0010	0.0000
5	0.0033	0.0047	0.0034	0.0011
6	0.0057	0.0072	0.0058	0.0036
7	0.0082	0.0098	0.0083	0.0060
8	0.0107	0.0123	0.0107	0.0085
9	0.0181	0.0200	0.0179	0.0158
10	0.0255	0.0276	0.0252	0.0232
11	0.0329	0.0352	0.0325	0.0305
12	0.0403	0.0429	0.0397	0.0379
13	0.0477	0.0505	0.0470	0.0452
14	0.0551	0.0582	0.0543	0.0526
15	0.0625	0.0658	0.0615	0.0599
16	0.0699	0.0735	0.0688	0.0673
17	0.0823	0.0862	0.0809	0.0795
18	0.0946	0.0989	0.0930	0.0918
19	0.1069	0.1117	0.1051	0.1040
20	0.1193	0.1244	0.1172	0.1163
21	0.1316	0.1372	0.1293	0.1285
22	0.1440	0.1499	0.1414	0.1408
23	0.1563	0.1626	0.1535	0.1530
24	0.1687	0.1754	0.1656	0.1653
25	0.1884	0.1958	0.1850	0.1849
26	0.2082	0.2161	0.2043	0.2045
27	0.2279	0.2365	0.2237	0.2241
28	0.2477	0.2569	0.2430	0.2437
29	0.2674	0.2773	0.2624	0.2633
30	0.2872	0.2977	0.2818	0.2829
31	0.3069	0.3181	0.3011	0.3025
32	0.3267	0.3384	0.3205	0.3221
33	0.3464	0.3588	0.3399	0.3417
34	0.3662	0.3792	0.3592	0.3613
35	0.3859	0.3996	0.3786	0.3809
36	0.4057	0.4200	0.3980	0.4005
37	0.4254	0.4404	0.4173	0.4201
38	0.4452	0.4607	0.4367	0.4397
39	0.4649	0.4811	0.4561	0.4593
40	0.4847	0.5015	0.4754	0.4789
41	0.5044	0.5219	0.4948	0.4985
42	0.5242	0.5423	0.5141	0.5181
43	0.5439	0.5627	0.5335	0.5377
44	0.5637	0.5831	0.5529	0.5573
45	0.5834	0.6034	0.5722	0.5769
46	0.6032	0.6238	0.5916	0.5965
47	0.6229	0.6442	0.6110	0.6161
48	0.6427	0.6646	0.6303	0.6357
49	0.6822	0.7054	0.6690	0.6749
50	0.7217	0.7461	0.7078	0.7141
51	0.7612	0.7869	0.7465	0.7533
52	0.8007	0.8277	0.7852	0.7925
53	0.8402	0.8684	0.8240	0.8317
54	0.8797	0.9092	0.8627	0.8708
55	0.9192	0.9500	0.9014	0.9101
56	0.9587	0.9907	0.9401	0.9492
57	0.9982	1.0000	0.9789	0.9885
58	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
59	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
60	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
61	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
62	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
63	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000