

静止気象衛星可視データの再較正技術の開発と改良

Development and Improvement of a Vicarious Calibration Technique for the Visible Channel of Geostationary Meteorological Satellites

高坂 裕貴*、奥山 新*、竹中 栄晶**、福田 悟***

KOSAKA Yuki*, OKUYAMA Arata*, TAKENAKA Hideaki** and FUKUDA Satoru***

Abstract

This report introduces the development of a vicarious calibration technique for the visible channel of geostationary meteorological satellites. This technique rebuilds the visible calibration table by matching geostationary satellite observation to radiative transfer calculation. Originally, this technique had been developed through the vicarious calibration of GMS-5, but it can also be applied to other geostationary satellites. We did so, applying this technique to MTSAT, GOES, METEOSAT and other geostationary satellite, and got consistent results. Currently, cloud-free ocean and land, and liquid water clouds are being focused on as targets for vicarious calibration. In addition to these targets, we are now developing a vicarious calibration technique that uses DCC (Deep Convective Cloud) targets, and introduce it below.

要旨

静止気象衛星可視データの再較正手法の応用と拡張について紹介する。本手法は、静止気象衛星の観測値を放射伝達計算を介して値付けを行うことにより較正テーブルの再作成を行うものである。本手法は、静止気象衛星ひまわり5号(GMS-5)の再較正を通して開発されたものであるが、原理上他の静止気象衛星についても適用することができる。MTSAT, GOES, METEOSAT等の静止気象衛星に対して適用したところ整合性のある結果が得られた。また現在、再較正のためのターゲットとしては晴天海面、晴天陸面、水雲の3種類を用いている。これらのターゲットに加えて、DCC (Deep Convective Cloud)をターゲットとした再較正手法を開発中である。その開発経過を報告する。

1. はじめに

静止気象衛星に搭載されているイメージャの可視チャンネルは、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。可視データを利用することにより、大気中のエアロゾル、雲、地表面アルベド、日射量といった、気候変動の解析において重要な物理量を算出することが可能となる。可

*気象衛星センターデータ処理部システム管理課

**千葉大学環境リモートセンシング研究センター

***東京大学大気海洋研究所

(2010年12月3日受領、2011年10月24日受理)

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、較正テーブル）が含まれているが、これは一般に打ち上げ前較正によって値付けされたものである。可視センサは、経年変化による劣化が存在することが良く知られており（栗原・徳野 2001）、較正テーブルは経年変化が考慮されなければならない。したがって、可視データを気候学的な解析に利用するには、較正テーブルの再較正が必須である。また、静止衛星を利用して全球を網羅的に観測するためには、複数の静止衛星観測データを利用することになる。よって静止軌道上に配置されている複数の衛星に搭載されたセンサの観測品質を均質に保たなければならない。これらを背景として、全球的な衛星データ較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較正システム(GSICS)が設立された。橋本ら(2008)は、GSICSの活動の一環として、東京大学気候システム研究センター(現東京大学大気海洋研究所)との共同研究において、GMS-5 可視データについての再較正手法を開発した。この手法は、晴天海面、晴天陸面、水雲域の3種類のターゲットにおける観測値を、放射伝達計算を介して値付けを行うことにより較正テーブルを再作成するものである。この手法は原理上、どのような衛星の可視センサにも適用することができる。試験的ではあるが、宇宙航空研究開発機構(JAXA)によって打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」搭載 CAI (Cloud Aerosol Imager)の較正にも本手法が応用されている。

本稿では、可視データ再較正手法の改良と拡張について報告する。はじめに、第2章で再較正手法の概要を説明する。第3章では再較正手法を GMS-5 以外の静止気象衛星へ適用した例として、MTSAT-1R 及び MTSAT-2 の再較正結果を示す。第4章では再較正手法の応用例として静止気象衛星の全球合成技術の開発について説明する。本開発は千葉大学環境リモートセンシング研究センターとの共同研究として実施されたもので、これを利用した放射プロダクトの公開が計画されている。第5章では再較正手法の拡張を提案する。DCC (Deep Convective Cloud)、すなわち氷粒子で構成された深い対流雲をターゲットとした再較正手法の開発経過について報告する。最後に第6章で可視再較正技術開発のまとめを行う。

2. 可視再較正手法の概要

本章では、可視データの再較正手法について概要を記述する。本手法は静止気象衛星可視データの観測値を放射伝達計算値で値付けすることにより、較正テーブルを再作成するものである（橋本ら、2008）。

可視再較正処理は、以下に示す手順で行われる。

- ① 再較正に使用可能なターゲットを選別する。
- ② ①で選択したターゲットにおける静止気象衛星可視データの観測値(DN = Digital Number)を取得する。
- ③ ①で選別したターゲットについて、放射伝達計算を行い、大気上端における放射輝度、即ち衛星搭載センサが観測する放射輝度を得る。
- ④ ②で得た衛星観測値 DN と③でシミュレートされた放射輝度の組み合わせから回帰直線を求めることで較正テーブルを再作成する。

はじめに①で再較正に使用するターゲットを選別する。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、海上の一般的な水雲域を採用している。晴天域、雲域の判別は、安田、白川(1999)の手法を参考にして決定している。また、ターゲット選別に際して、衛星搭載センサの観測するシグナルをシミュレートするための条件に適さないと考えられるものは除外する処理を行っている。有効ターゲットの条件については橋本ら(2008)の第3.4節を参照していただきたい。

次に②において、①で選別したターゲットにおける静止気象衛星可視データの観測値を取得する。

③では放射伝達計算を行い、大気上端における放射輝度を計算する。放射伝達計算に必要なパラメータは、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 のデータ、長期再解析 JRA-25 (Onogi et al., 2007)のデータなどを用いる。これらは、再較正処理の対象となる静止気象衛星の観測値とは独立したデータでなければならない。また、放射伝達モデルには RSTAR6B を使用した。RSTAR6B は Nakajima and Tanaka (1988)のアルゴリズムを用いており、衛星搭載センサの応答関数、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、 $0.2\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ における大気上端の

衛星観測シグナルをシミュレートすることが可能である。

③までで各ターゲットにおける観測値のDNと放射伝達計算によって計算された放射輝度の組み合わせが得られる。これらの組み合わせから④において回帰直線を求めることで、較正テーブルを再作成する。

3. 可視再較正手法のMTSAT-1R及びMTSAT-2への適用

3.1 目的

第2章で可視再較正手法について概説した。本手法はGMS-5可視データの再較正を通じて確立されたものであるが、放射伝達計算の入力値は処理対象とする静止気象衛星の観測値とは独立したデータであり、地表面と大気の光学的な物理量から衛星搭載センサのシグナルをシミュレートするという原理上、あらゆる衛星搭載センサの可視データに対して適用することができる。現在運用中の静止気象衛星に対して観測値の品質を保証するための再較正処理を行

うことは、現業利用の観点から必須である。そのため、本手法を現在運用されている運輸多目的衛星MTSAT-1R及びMTSAT-2（ひまわり6号・7号）に対して適用した。

3.2 再較正結果

再較正手法は第2章で述べた手順において、静止気象衛星可視データの観測値としてそれぞれMTSAT-1R及びMTSAT-2のものを使用する形で行った。図1は、MTSAT-1R及びMTSAT-2についての再較正結果である。横軸は、可視データ観測値から運用開始時に作成された較正テーブルを使って変換した反射率、縦軸は放射伝達モデルで計算した放射輝度を反射率に変換したものである。ここで、観測波長域における大気外太陽照度を $F_0(W/m^2/\mu m)$ 、可視センサが観測する放射輝度を $I(W/m^2/sr/\mu m)$ とする時、反射率 R は以下のように定義される。

$$R = \frac{I\pi}{F_0}$$

各点はそれぞれ晴天海面（青）、晴天陸面（緑）、水雲（赤）の3ターゲットによる計算結果を表して

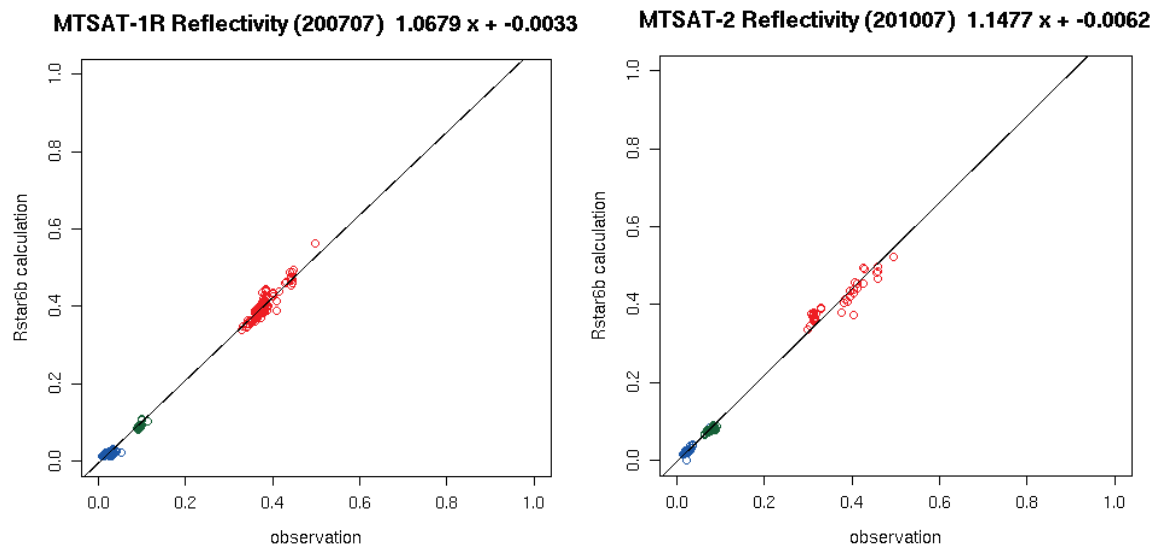


図1 MTSAT-1R及びMTSAT-2についての再較正結果 左がMTSAT-1Rの2007年7月、右がMTSAT-2の2010年7月の結果。横軸は観測値を運用開始時に作成された較正テーブルを使って変換した反射率、縦軸は放射伝達モデルによる反射率の計算値。青点が晴天海面、緑点が晴天陸面、赤点が水雲。実線は3種類のターゲットから求めた回帰直線。

いる。実線で示した回帰直線から、3ターゲットによる計算結果に整合性があることが分かる。また、運用開始時に作成された較正テーブルを使って変換した反射率と放射伝達モデルで計算した反射率とを比較すると、MTSAT-1R, MTSAT2 共に後者の方が値が大きくなっている。これは、可視センサの経年劣化が再較正により補正された結果と考えられる。以上の結果は GMS-5 の再較正結果と比較して矛盾がなく、妥当な結果といえる。

3.4 再較正結果の検証

再較正結果について、エアロゾルプロダクトを用いて検証を行った。検証は気象衛星センターで運用しているエアロゾルプロダクト（橋本、2006）をサンフォトメータによる地上観測データから算出したエアロゾルの光学的厚さ（Aerosol Optical Depth : AOD）と比較することで行った。地上エアロゾル観測所としては、気象庁の観測点である綾里、南鳥島、

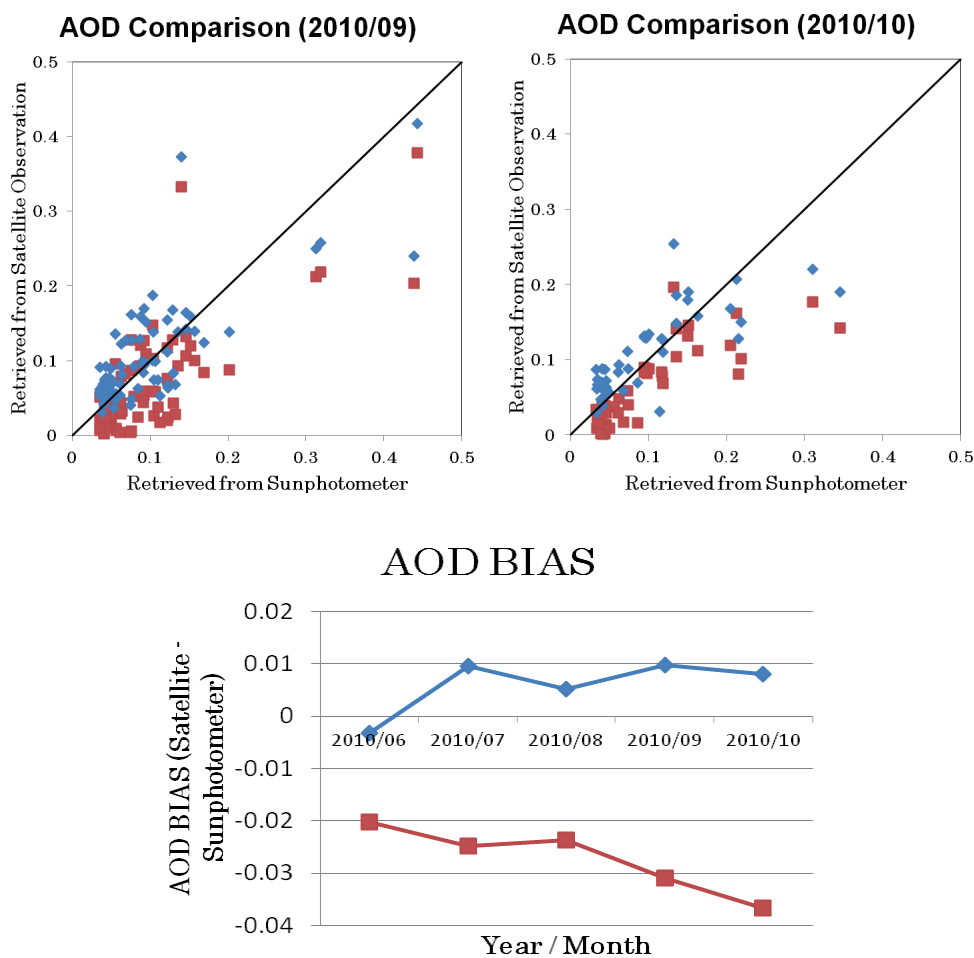


図2 エアロゾルプロダクトによる MTSAT-2 の再較正結果の検証 上段は 2010 年 9 月及び 10 月の検証結果で、横軸がサンフォトメータによる AOD、縦軸が MTSAT-2 から算出した AOD。赤点は運用開始時に作成された較正テーブルを使用したもの、青点は再較正後の較正テーブルを使用したもの。実線は $y=x$ の直線。下段は AOD の月平均バイアス（MTSAT-2 から算出－サンフォトメータ）の時系列で、赤線は運用開始時に作成された較正テーブルを使用したもの、青線は再較正後の較正テーブルを使用したもの。

与那国島の3地点を用いた。エアロゾルプロダクトは晴天海面の可視データを処理対象としているため、この検証により較正テーブルの低輝度域の精度検証を行うことができる。

検証方法の概要を以下に述べる。エアロゾルプロダクトとしては、各地上観測地点から最も近い海上の地点における値を用いた。また、地上観測データから算出したAODとしては、衛星観測時刻の前後計5分間のデータを平均したものをを用いた。ただし、5分間のうち1つでも算出値が欠けていた場合は比較対象から外した。以上のようにして得たエアロゾルプロダクトとサンフォトメータ地上観測データから算出したAODとを比較検証した。

図2にMTSAT-2の2010年9月、及び10月に対して行った検証結果を示す。赤点が運用開始時に作成された較正テーブル、即ち軌道上未較正のデータを使用して求めたAOD、青点が再較正後の較正テーブルを使用して求めたAODである。ここで0.1から0.2における清浄な大気状態におけるAODに着目するならば、9月、10月ともに過小評価が改善されていることを示している。基準となる清浄な状態のAODを精度よく見積もることは、ダストイベントの観測や大気の混濁状態を正確に知る上で重要な要素となる。図2の下段は2010年6月から10月

までのAODの月平均バイアス(MTSAT-2から算出サンフォトメータ)である。未較正では-0.02から-0.04の過小評価が見られるが、較正後は0.01から-0.01に抑えられており、較正の効果がAODの精度評価に現れていることが分かる。MTSAT-2はGMS-5よりもAODにおける改善の度合いが小さく見られるが、これは逆説的に非常に小さなバイアスにも有効であることを示している。しかしながら、データの分散からAODの推定精度には課題を残した。エアロゾル解析アルゴリズムの問題点との切り分けを含め今後も検証を続け、検証結果を踏まえて再較正手法の改良に取り組む予定である。

4. 静止気象衛星データの全球合成技術の開発

4.1 目的

第2章で述べたように、本再較正手法は原理上どのような衛星の可視データについても適用することができる。本手法の応用例として、静止気象衛星データの全球合成が挙げられる。これは、観測領域の異なる複数の静止気象衛星の可視データについてそれぞれ再較正処理を行い、それぞれの観測品質を均質に保つことで全球の統一的な解析を可能とする。作成されたデータセットは、全球規模の気候学的な

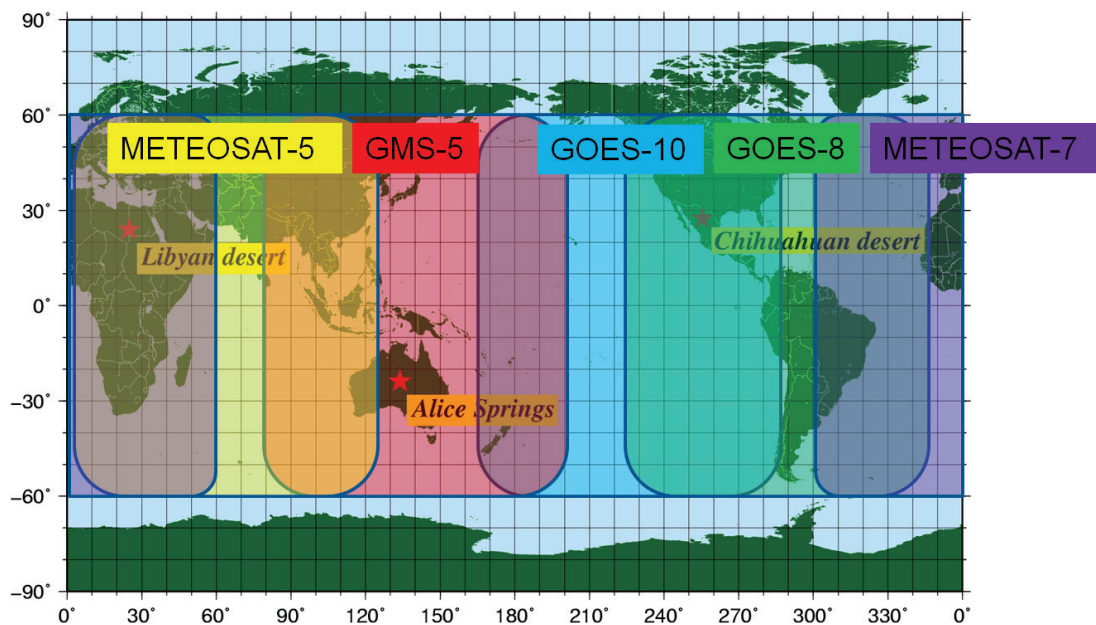


図3 5つの静止気象衛星の観測領域と晴天陸面ターゲット 2002年9月時点。

解析に利用することができる。本章では、全球合成技術の開発について記述する。なお本開発は、千葉大学環境リモートセンシング研究センターとの共同研究「静止衛星データの全球合成技術の開発」の一環として行われた。

4.2 方法

全球合成技術の確立のため、2002年9月について全球合成を試みた。再較正処理を行った静止気象衛星は次の5つである。

- GMS-5
- GOES-8
- GOES-10
- METEOSAT-5
- METEOSAT-7

これら5つの静止気象衛星の観測領域は2002年9月時点でそれぞれ図3のようになっており、これらを合成することにより全球データセットを得ることができる。なお、今回は例として上記5つの静止気象衛星の組み合わせから全球合成を行ったが、上記

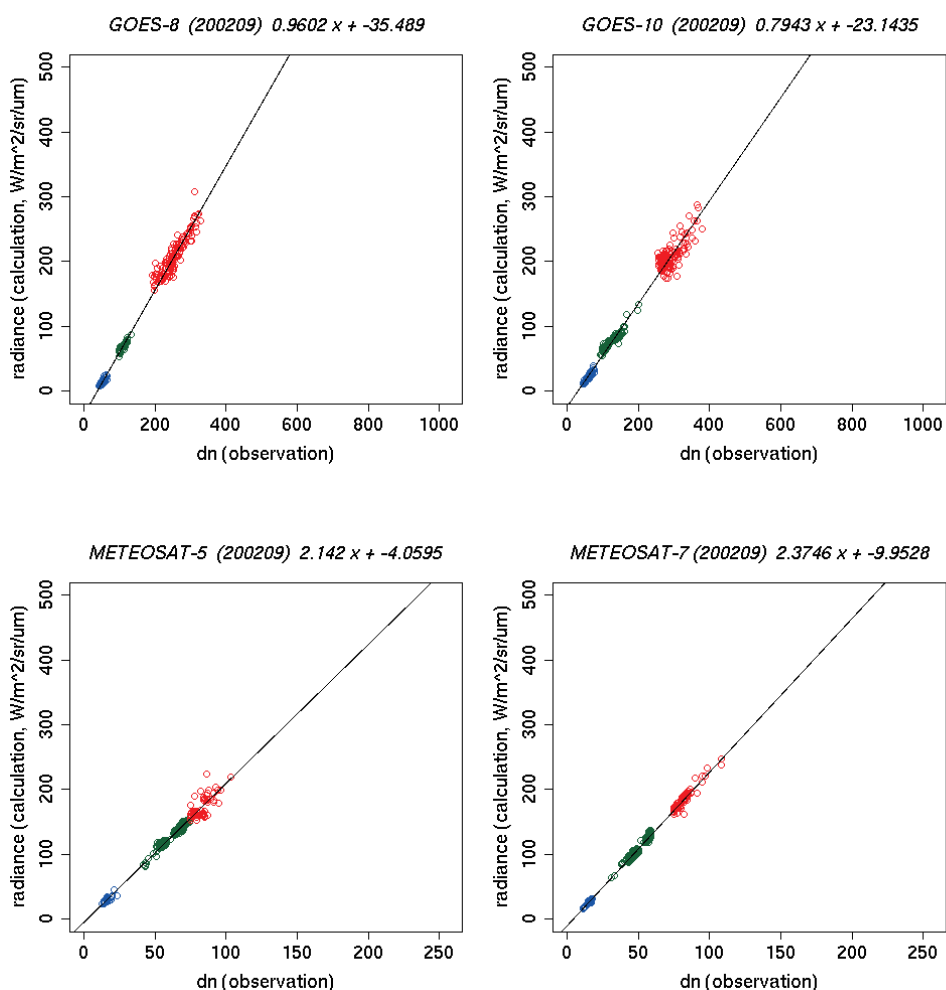


図4 GOES及びMETEOSATの再較正結果 左上がGOES-8、右上がGOES-10、左下がMETEOSAT-5、右下がMETEOSAT-7。横軸は観測値DN、縦軸は放射伝達計算により得た大気上端における放射輝度(W/m²/sr/μm)。青点、緑点、赤点はそれぞれ晴天海面、晴天陸面、水雲で、実線は回帰直線。2002年9月。

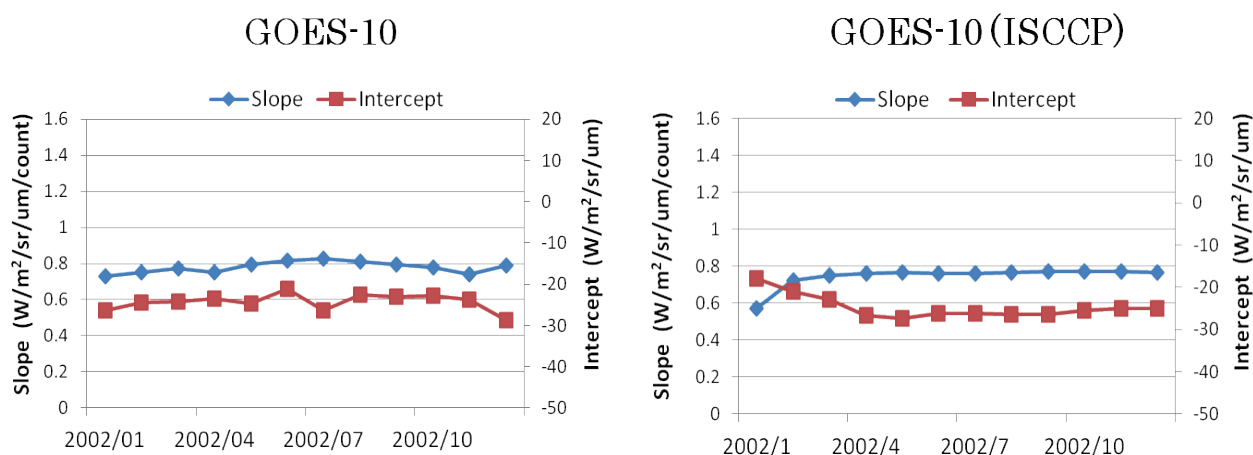


図5 GOES-10の較正係数の時系列 左が本再較正処理で得られた結果、右がISCCPによる結果。青線が傾き、赤線が切片。2002年の1年分を表示。

衛星が運用されていない期間についても他の静止気象衛星の組み合わせを用意することによりデータセットを作成することができる。これにより長期間のグローバルデータセットを得ることができ、気候学的な解析などに役立てることが可能である。

再較正手法は第2章で述べた手法を用いた。ただし、晴天陸面ターゲットとしてGMS-5で採用していたAlice Springs (24°S, 134°E)は、GMS-5以外の静止気象衛星では観測領域外にあり再較正に使用することができない。そのため、GMS-5以外の静止気象衛星について、晴天陸面ターゲットの選定を行った。RSTARで陸面の衛星観測シグナルをシミュレートする際、地表面アルベドが最も重要なパラメータとなる。RSTARでは地表面を等方散乱面と仮定しているが、現実には地表面アルベドは衛星と太陽の位置関係、及び地表面の散乱特性に依存する。この二方向性反射率の影響は植生域において顕著に表れる傾向があることから、晴天陸面ターゲットとしては植生の影響が少ない砂漠などを採用することが望ましい。そのため、NASAがMODISデータから作成したNDVI(植生指数)プロダクト(Huete et al. 1999)の値を参考にしてターゲットの選定を行い、GOES-8及びGOES-10はChihuahuan砂漠(27°N, 105°W)を、METEOSAT-5及びMETEOSAT-7は

Libyan砂漠(24°N, 25°E)をそれぞれ採用した。再較正処理については晴天陸面ターゲットの地点を変えた以外の変更はない。すなわち、地表面アルベドや大気プロファイルなどのデータから放射伝達計算を介して値付けする点はGMS-5の時に確立した再較正手法と同様である。

4.3 再較正及びデータ合成結果

2002年9月についての再較正結果を図4に示す。GOES-8, GOES-10, METEOSAT-5, METEOSAT-7の各衛星について、観測値と放射伝達計算値との関係を示している。いずれの衛星の結果についても晴天海面、晴天陸面、水雲の3種類のターゲットによる計算結果が回帰直線上にあり、各ターゲットの計算結果に整合性があることが分かる。これは、GMS-5や第3章のMTSAT-1R及びMTSAT-2の再較正結果に見られた傾向と比較して矛盾がない。

次に較正係数の季節変動をみるために、GOES-10について2002年1年分の再較正処理を行った。ここで較正係数とは、図4の回帰直線の傾き a 及び切片 b のことであり、観測値(DN)を x 、放射伝達計算により得た大気上端における放射輝度を y とすると、回帰直線は以下の式で表される。

$$y = ax + b$$

図5の左は本再較正手法により得られた較正係数の時系列である。青線が傾き、赤線が切片である。期間を通じて較正係数に大きな変動はなく、安定していることが分かる。

ここで参考として、国際衛星雲気候計画(ISCCP)による再較正結果を示す。ISCCPは雲気候解析に資する全球データセットの作成のために、独自の方法で再較正処理を行っている(Rossow et al., 1992 及び Brest et al., 1997)。図5の右はISCCPによるGOES-10の較正係数の時系列である。本再較正手法による結果と比較すると、2002年1月から3月にやや大きな差はあるものの、全体として傾き、切片共にほぼ同じ値になっており、ISCCPの再較正結果は本再較正手法による結果と大きな差はないことが分かる。

次に、再較正結果の検証結果について述べる。詳細な検証方法及び結果についてはTakenaka et al.(2011)、竹中ら(2011a, b)、及び坂下ら(2011)に説明があるため、ここでは概要を説明するにとどめる。検証は、衛星観測から算出した全天日射量を地上観測値と比較することで行われた。衛星観測データに基づく全天日射量の算出には、統合雲解析アルゴリズムCAPCOM(Nakajima and Nakajima, 1995)の出力とJRA-25再解析データセットの大気データから、放射伝達計算の関数近似によって作成されたニューラルネットによるソルバを用いた解析システムであるEXAM SYSTEM(Takenaka et al., 2011)によって算出された。また地上観測値としては、共に短波放射・長波放射の観測ネットワークであり、千葉大学を中心として観測を行っているSKYNET、及びWCRP(World Climate Research Programme)の一部であるGEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment)によるプロジェクトであるBSRN(Baseline Surface Radiation Network)のデータを用いた。GOES-8, GOES-10, METEOSAT-5, 及びMETEOSAT-7について検証した結果、いずれの衛星についても衛星観測から算出した全天日射量と地上観測値との対応がよく、良好な結果が得られたことが確認されている。地上検証の一例を図6に示す。これらは準リアルタイム解析システムによって継続的に解析と検証が進められており、詳細は別途発表される原稿に譲ることとする。

図7は全球合成データの例である。上述の5つの

静止気象衛星による観測を運用開始時に作成された較正テーブル、再較正後の較正テーブルのそれぞれを用いて反射率に変換した。再較正後の較正テーブルを用いて得た反射率は運用開始時に作成された較正テーブルを用いて得た反射率よりも全体的に値が大きくなっていることが分かる。また本例では、経度180°でGMS-5とGOES-10のデータを、経度105°WでGOES-10とGOES-8のデータをそれぞれつないでいるが、このうち経度105°Wの境界付近について緯度50°Sにおける東西断面図をみると、運用開始時に作成された較正テーブルを用いたものは不連続が明瞭であるのに対して、再較正後の較正テーブルを用いたものは軽減されている。これは、衛星ごとに経年劣化の度合いが異なるために生じていた不連続が再較正処理により補正された結果であると解釈することができる。

本開発の成果については、今後検証結果を踏まえた改良を行った後、千葉大学と連携し具体的な公開方法について検討していく予定である。

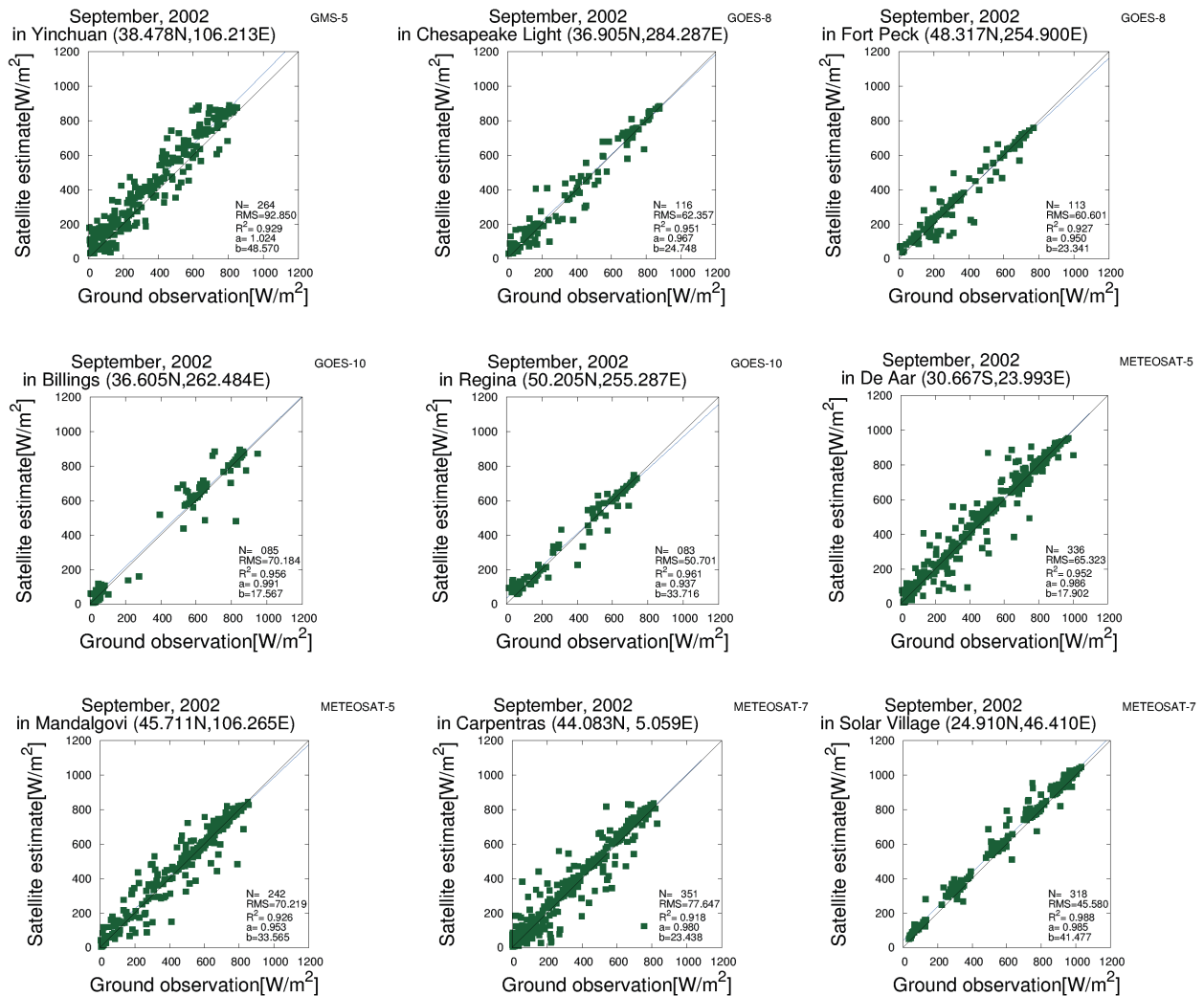


図6 地上検証の一例 GMS-5, GOES-8, GOES-10, METEOSAT-5, METEOSAT-7の各衛星について、地上観測で検証した結果を示している。横軸は地上観測による全天日射量(W/m²)、縦軸は衛星観測から算出した全天日射量(W/m²)。2002年9月。

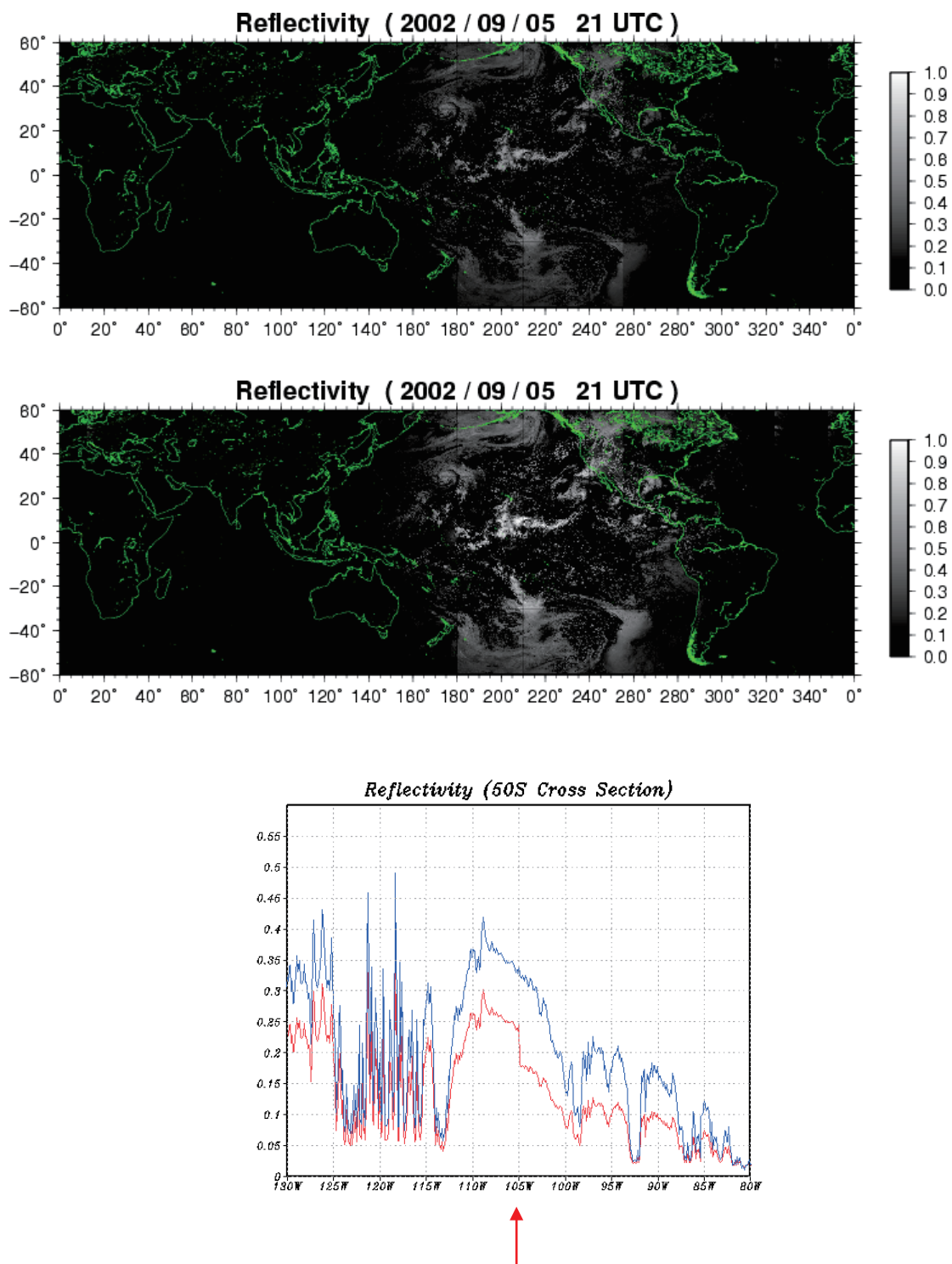


図7 全球合成データの例 上段が運用開始時に作成された較正テーブルを用いて変換した反射率、中段が再較正後の較正テーブルを用いて変換した反射率。下段は緯度 50°S における東西断面図で横軸は経度、縦軸は反射率、赤線が運用開始時に作成された較正テーブルを用いて変換した反射率、青線が再較正後の較正テーブルを用いて変換した反射率、赤矢印が衛星データの境界部分。2002年9月5日

5. DCC ターゲットによる再較正手法の開発

5.1 はじめに

前章までは、再較正手法の GMS-5 以外の静止気象衛星への適用結果とその応用例について説明した。本章では再較正手法の改良に向けた取り組みについて報告する。

前述のように本再較正手法では、ターゲットとして晴天海面、晴天陸面、一様な水雲の 3 種類を採用している。ここで、雲のターゲットとして水雲のみを対象とし氷雲を除外した理由としては、氷雲の粒子形状を正確に得ることができないことである。しかしながら、現在採用されている 3 ターゲットに加えて、氷粒子で構成された深い対流雲である DCC (Deep Convective Cloud) をターゲットとして新たに採用することにより、高輝度域においてもリファレンスが得られ、再較正精度が向上する可能性がある。そのため、DCC ターゲットによる再較正手法の拡張を検討する。なお本開発は、東京大学大気海洋研究所との共同研究「静止気象衛星の可視データを用いた東アジア地域の雲気候の解析」の一環として行われた。

5.2 DCC をターゲットとした再較正について

DCC は対流により雲頂が高く発達することから、水粒子は氷となり六角柱を代表とする非球形となる。しかしながら、現状では DCC の雲頂からリモートセンシング手法により非球形粒子の形状を得ることができないため、大きな不確実性となっている。ここでは非球形粒子の散乱問題を取り扱う先行研究に基づき、DCC ターゲットを用いた較正手法について模索する。DCC ターゲットにおける放射伝達計算を行うに当たり、以下に挙げるパラメータの設定、算出方法について決定する必要がある。

① 雲粒子の形状の設定

② 雲の光学的厚さ及び粒径の算出

このうち①については、水雲の場合は雲粒子の形状を球形として扱うことができたため、散乱特性は Mie 散乱の理論から得ることができた。一方 DCC の場合、雲粒子の形状は様々である。図 8 は Heymsfield (2002) による飛行機観測で採取した雲粒子の例である。図 8 から、氷粒子には六角柱、平板、

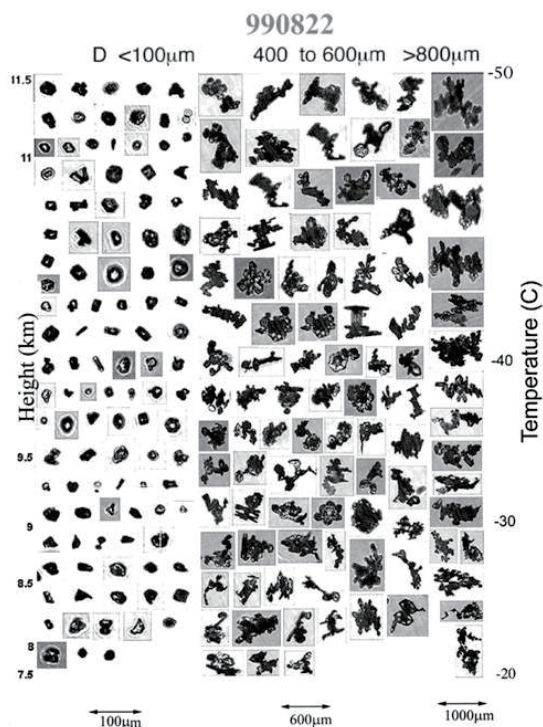


図 8 飛行機観測で採取した雲粒子の写真の一例 (Heymsfield (2002) より引用)

針状、樹枝状など様々な形状があることが分かる。粒子の形状ごとに散乱特性が異なるため、粒子の形状の設定の仕方によって放射伝達計算の結果が異なり、再較正精度に影響を与えることが予想される。また②については、水雲域をターゲットとした場合、雲の光学的厚さ及び粒径は MODIS L1B データから統合雲解析アルゴリズム CAPCOM を用いて計算していた。しかし DCC の場合、①の氷雲粒子の形状の多様性の問題に加えて極めて光学的厚さが大きいいため、原理的に雲の光学的厚さ及び粒径を十分な精度で推定することは困難である。これらの事項について次節で述べるような手法をとることにより、DCC をターゲットとした再較正手法の開発を行った。

5.3 DCC ターゲットの放射伝達計算におけるパラメータ設定

(1) 氷粒子の形状

はじめに氷粒子の形状による計算結果の違いを見

積もるために、六角柱と平板の氷粒子について LISAS_goa(Nakajima et al., 1997 及び Kokhanovsky and Nakajima, 1998)を用いて散乱特性を求め、様々な観測条件について放射伝達計算を行った。

LISAS_goa は非球形粒子の散乱について幾何光学近似を仮定して、モンテカルロ法によって計算する FORTRAN パッケージである。計算の結果、六角柱と平板との間に大気上端における放射輝度で最大で 10%程度の誤差を生じることが分かった。氷粒子の形状は DCC の放射伝達計算において重要なパラメータであることが分かる。

氷粒子の形状については、PingYang (2000)による調査が知られている。PingYang (2000)は様々な粒子の形状について、観測に基づいて平均的なアスペクト比を決定し、非球形散乱データベースの作成を行った。このデータベースは広く使用されている。DCC をターゲットとした再較正では PingYang (2000)による非球形散乱データベースを使用することとした。

(2) 雲の光学的厚さ及び粒径

雲の光学的厚さについては、大和田(2006)の手法に基づき数値予報値から算出した。算出方法を以下に記述する。

雲の光学的厚さの算出には数値予報値の雲水量及び雲氷量を用いる。水雲の光学的厚さを τ_l とすると、 τ_l は雲水量 $LWP(g/m^2)$ を用いて以下のように表せる。

$$\tau_l = LWP \left(a_{liq} + \frac{b_{liq}}{r_{ei}} \right)$$

ここで、 $a_{liq}(m^2/g)$, $b_{liq}(\mu m \cdot m^2/g)$ は係数であり、Slingo (1989)による。 $r_{ei}(\mu m)$ は水雲の粒の有効半径である。また、氷雲の光学的厚さ τ_i についても雲氷量 $IWP(g/m^2)$ を用いて、

$$\tau_i = IWP \left(a_{ice} + \frac{b_{ice}}{r_{ei}} \right)$$

と表せる。ここで、係数 $a_{ice}(m^2/g)$, $b_{ice}(\mu m \cdot m^2/g)$ は Ebert and Curry (1992)による。 $r_{ei}(\mu m)$ は氷雲の粒の有効半径である。雲の光学的厚さ τ_{cloud} は

$$\tau_{cloud} = \tau_l + \tau_i$$

により求める。

また粒径については、大和田(2006)の図 6.3 より

20~150 μm の値をとることが分かる。この値に基づき、粒径の値をいくつか設定して、様々な観測条件についての感度実験を行った。その結果、粒径の値による計算値の違いは小さいことが分かった。そのため、粒径については 20 μm を中心とした対数正規分布で固定して用いることとした。

5.4 雲粒子の形状の違いによる誤差の見積もり

雲粒子の形状の違いによる計算結果の違いを見積もるために、様々な条件を設定して放射伝達計算を行った。計算に用いた条件は表 1 のとおりである。

計算結果を図 9 に示す。図 9 において灰色点は表 1 の条件による全計算結果を示している。平均的にみて粒子の形状による差は小さいが、特定の条件の時に差が大きくなっていることが分かる。調査の結果、

- ・後方散乱角が 5 度未満
- ・光学的厚さが 150 未満

のいずれか一方を満たす時、雲粒子の形状による差が大きかったことが分かった。従って、この条件の時は再較正に使用しないこととした。この絞り込みを適用した後が図 9 の青点である。絞り込み後について両者の差を計算したところ、大気上端における放射輝度に平均で $2(W/m^2/sr/\mu m)$ 程度の差が生じることが分かった。これは、再較正処理における高輝度ターゲットにおいては許容範囲内の誤差であるといえる。

5.5 DCC ターゲットの条件

DCC ターゲットの条件は表 2 の通りである。水雲ターゲットの条件の一部を踏襲し、雲頂が平坦な雲域、太陽天頂角・衛星天頂角が共に 60 度以下、近隣に陸地がないという条件を設けた。これらの条件は雲の組成に関係がなく、DCC に対して適用することに問題はない。また、DCC 固有の条件として、赤外 1 チャンネルの輝度温度が 200K 以下であるという条件を付し、雲頂高度が十分に高いもののみを選択するようにした。また、第 5.4 節において、後方散乱角が 5 度未満、光学的厚さ 150 未満の時、粒子の形状による影響が大きかったことから、この条件の時は除くこととした。

5.6 DCC ターゲットによる再較正結果

DCC をターゲットとした再較正手法を評価するために、MTSAT-2 の 2010 年 7 月について再較正処理を行った。図 10 は DCC ターゲットによる再較正結果である。実線は DCC を含む 4 ターゲットから求めた回帰直線、灰色線は DCC を除く 3 ターゲットから求めた回帰直線である。DCC ターゲットによる計算結果は、他の 3 ターゲットから求めた回帰直線から予想される値と比較して大きな差はなく整合性のある結果となっている。詳細にみると、DCC ターゲットを加えた場合は DCC ターゲットを除い

た場合と比較して、回帰直線の傾きがやや大きくなっていることが分かるが、これは高輝度ターゲットによる較正值の変化として妥当かどうかは今後検討が必要になるだろう。DCC ターゲットを加える前後で再較正結果に僅かながらも違いがみられた。今後、検証を行い、DCC を追加することによる高輝度域の再較正精度への影響について調査していく予定である。

表 1 感度実験の際に使用した計算条件

太陽天頂角 (度)	0,5,10,15,30,45,50,55,60
衛星天頂角 (度)	0,5,10,15,30,45,50,55,60
太陽と衛星の相対方位角 (度)	0,15,30,60,90,120,150,165,180
光学的厚さ	10,20,30,50,70,100,130,160,200,250,300,500,1000
応答関数	MTSAT-2 の可視チャンネル

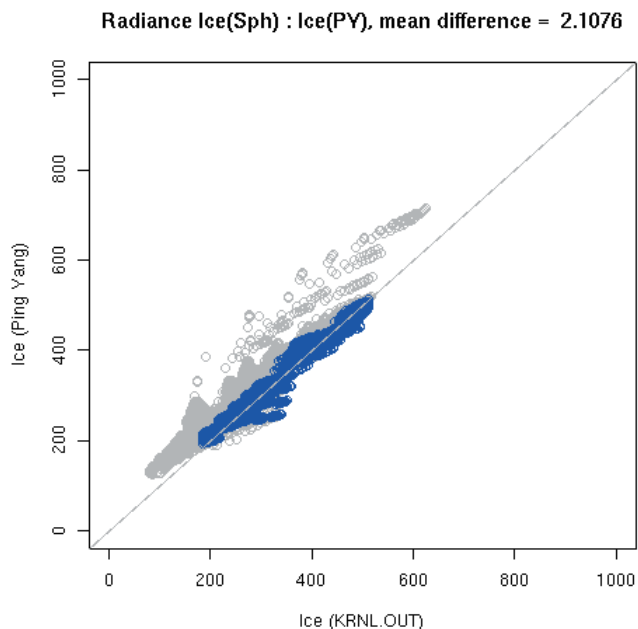


図 9 感度実験結果 横軸は球形粒子を仮定した場合の大気上端における放射輝度($W/m^2/sr/\mu m$)、縦軸は PingYang(2000)による粒子の形状を仮定した場合の大気上端における放射輝度。灰色の点は絞り込み前、青色の点は絞り込み後。

表 2 DCC ターゲットによる再較正手法

粒子の形状	PingYang (2000)を引用
光学的厚さ	数値予報値から大和田(2006)の方法により算出
粒径	20 μmを中心とした対数正規分布
有効ターゲットの条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 格子内が雲域 ・ 雲頂が平坦な氷雲 ・ 近隣に陸地がない ・ 雲頂温度が 200K 以下 ・ 太陽天頂角・衛星天頂角が共に 60 度以下 ・ 後方散乱角が 5 度以上 ・ 雲の光学的厚さが 150 以上

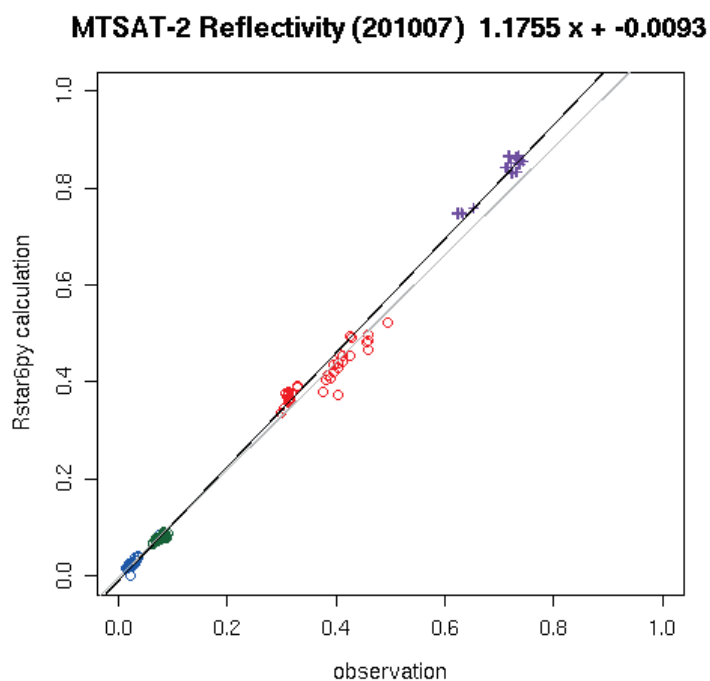


図 10 DCC ターゲットによる再較正結果 横軸は観測値を運用開始時に作成された較正テーブルを使って変換した反射率、縦軸は放射伝達モデルによる反射率の計算値。青点が晴天海面、緑点が晴天陸面、赤点が水雲、紫点が DCC。実線は 4 種類のターゲットから求めた回帰直線。灰色線は DCC を除く 3 種類のターゲットから求めた回帰直線。2010 年 7 月の MTSAT-2。

6. まとめ

静止気象衛星の可視データの再較正手法の開発と改良を行った。本手法は静止気象衛星の観測値を放射伝達計算を介して値付けを行うことで較正テーブルを再作成するものである。本手法はGMS-5の再較正処理を通して開発されたものであるが、MTSAT-1R及びMTSAT-2についても整合性のある結果が得られることが分かった。検証の結果、静止気象衛星から算出したAODの地上観測に対する過小評価が再較正により改善されることが分かった。

本手法の応用として全球合成技術の開発を行った。全球合成データを試験的に作成した結果、再較正により衛星間のデータの不連続が軽減されることが確認できた。

さらに、放射伝達計算を行うターゲットとして、晴天海面、晴天陸面、水雲に加え、新たにDCCをターゲットとした再較正手法の拡張を行った。得られた結果は従来の3種類のターゲットのみによる計算結果と比較して矛盾ないことが分かった。DCCを加えた再較正手法の検証は今後の課題である。

謝辞

再較正手法の開発にあたり、東京大学大気海洋研究所(AORI)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, LISAS_goaの利用にはそれぞれ東京海洋大学の関口美保准教授、東海大学の中島孝准教授よりご指導をいただいた。

ここに深く感謝いたします。

参考文献

大和田浩美、2006: 予想衛星画像、気象研究ノート第212号、105-120。
 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。

坂下太陽、竹中栄晶、高村民生: SKYNETおよびBSRN日射計観測データを用いた衛星推定全天日射量の地上検証, 気象学会春季大会., 2011.

竹中栄晶、福田悟、中島孝、日暮明子、関口美保、高村民雄、中島映至、奥山新、高坂裕貴、中山隆一郎、大和田浩美、大野智生、2011a: 第3世代「ひまわり」による放射収支の推定. 気象学会春季大会スペシャルセッション.

竹中栄晶、山本宗尚、早崎将光、樋口篤志、斎藤尚子、久世宏明、西尾文彦、高村民雄、福田悟、中島映至、奥山新、高坂裕貴、中山隆一郎、大和田浩美、大野智生、2011b: 4大学連携VL全球静止衛星データに基づく放射収支の推定. 日本地球惑星科学連合2011年大会, 地球環境関連データセット展覧会.

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.

橋本徹、奥山新、竹中栄晶、福田悟、2008: GMS-5/VISSR可視データについての再校正技術の開発、気象衛星センター技術報告第50号、61-74.

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.

Brest, C.L., W.B. Rossow, and M. Roiter, 1997: Update of Radiance Calibrations for ISCCP. *J. Atmos. Ocean Tech.*, 14, 1091-1109.

Ebert, E. and J.A. Curry, 1992: A parameterization of ice cloud optical properties for climate models, *J. Geophys. Res.*, 97, 3831-3836

Heymsfield, Andrew J., 2002: Observations and Parameterizations of Particle Size Distributions in Deep Tropical Cirrus and Stratiform Precipitating Clouds: Results from In Situ Observations in TRMM Field Campaigns, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 59, Issue 24, pp. 3457-3491

Kokhanovsky, A. A., and T. Y. Nakajima, 1998: The dependence of phase functions of large transparent

particles on their refractive index and shape, *J. Phys. D:Appl. Phys.*, 31,1329-1335

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.

Nakajima, T.Y., T. Nakajima, A.A.Kokhanovsky, 1997: Radiation transfer calculations with pahse functions of irregular ice particles obtained by geometric-optics approximation, *The European Symposium on Aerospace Remote Sensing (London, UK)*

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.

Ping Yang, et al., 2000: Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals, *JGR*, vol.105 D4, 4699-4718

Rossow, W.B., Y. Desormeaux, C.L. Brest and A. Walker, 1992: International Satellite Cloud Climatology Project(ISCCP) Radiance Calibration Report. WMO/TD - No. 520, World Climate Research Programme (ICSU andWMO), Geneva, December 1992, 104 pp.

Slingo, A., 1989: A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds, *J.Atmos. Sci.*, 46, 1419-1427

Takenaka.,H, T. Y. Nakajima, A. Higurashi, A. Higuchi, T. Takamura, R. T. Pinker, and T. Nakajima, 2011: Estimation of Solar radiation using a Neural Network based on Radiative Transfer, *J. Geophys. Res.*,doi:10.1029/2009JD013337..

参考 URL

Huete, A., C. Justice, W. V. Leeuwen and Team Member, 1999 :
 MODIS VEGETATION INDEX (MOD 13) ALGORITHM
 THEORETICAL BASIS DOCUMENT
 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>, accessed 2010-11-25)

付録 GMS-5の較正係数

橋本ら(2008)の方法により算出した GMS-5 可視データの較正係数を以下に示す。較正係数はディテクターごとに算出した。再較正前の較正テーブルを用

いて変換した反射率 $R_{nominal}$ と再較正後の較正テーブルを用いて変換した反射率 $R_{calibration}$ との間には傾き a と切片 b を用いて以下の関係がある。

$$R_{calibration} = a R_{nominal} + b$$

		Intercepts (b)				Slopes (a)			
Year	Month	Detector1	Detector2	Detector3	Detector4	Detector1	Detector2	Detector3	Detector4
2000	3	0.003	0.004	0.003	0.001	1.053	1.086	1.031	1.042
	4	0.001	0.003	0.002	0.000	1.066	1.099	1.044	1.055
	5	0.003	0.004	0.003	0.001	1.061	1.096	1.040	1.049
	6	0.001	0.003	0.002	-0.001	1.092	1.125	1.069	1.080
	7	0.003	0.004	0.003	0.000	1.090	1.126	1.069	1.076
	8	0.005	0.006	0.005	0.002	1.068	1.102	1.047	1.056
	9	0.004	0.005	0.004	0.002	1.100	1.140	1.078	1.092
	10	0.005	0.006	0.005	0.003	1.095	1.128	1.073	1.084
	11	0.005	0.006	0.005	0.003	1.107	1.139	1.086	1.097
	12	0.004	0.006	0.004	0.002	1.118	1.150	1.097	1.107
2001	1	0.004	0.006	0.004	0.002	1.075	1.105	1.055	1.065
	2	0.004	0.006	0.004	0.002	1.080	1.108	1.059	1.068
	3	0.002	0.004	0.002	0.000	1.113	1.149	1.091	1.104
	4	0.003	0.005	0.003	0.001	1.077	1.111	1.056	1.069
	5	0.004	0.005	0.004	0.001	1.101	1.135	1.079	1.091
	6	0.002	0.004	0.003	0.000	1.087	1.118	1.066	1.076
	7	0.004	0.004	0.004	0.002	1.088	1.135	1.079	1.081
	8	0.006	0.006	0.005	0.004	1.064	1.120	1.061	1.061
	9	0.007	0.007	0.007	0.005	1.079	1.140	1.076	1.079
	10	0.008	0.008	0.008	0.006	1.087	1.149	1.087	1.088
	11	0.007	0.007	0.006	0.005	1.077	1.128	1.072	1.075
	12	0.008	0.008	0.008	0.006	1.091	1.139	1.083	1.088
2002	1	0.007	0.007	0.007	0.004	1.091	1.135	1.080	1.087
	2	0.005	0.006	0.005	0.003	1.110	1.152	1.098	1.104
	3	0.004	0.004	0.004	0.002	1.064	1.124	1.062	1.066
	4	0.002	0.002	0.002	0.000	1.074	1.130	1.069	1.074
	5	0.004	0.004	0.003	0.001	1.094	1.146	1.087	1.091
	6	0.004	0.004	0.003	0.002	1.080	1.131	1.074	1.077
	7	0.004	0.004	0.004	0.002	1.085	1.134	1.077	1.080
	8	0.007	0.007	0.006	0.005	1.040	1.099	1.040	1.038
	9	0.005	0.005	0.005	0.003	1.112	1.178	1.112	1.112
	10	0.007	0.006	0.006	0.005	1.111	1.191	1.121	1.117
	11	0.008	0.007	0.007	0.005	1.092	1.152	1.091	1.093
	12	0.005	0.005	0.004	0.002	1.106	1.164	1.104	1.108
2003	1	0.005	0.006	0.005	0.003	1.121	1.167	1.111	1.117
	2	0.005	0.006	0.005	0.002	1.126	1.174	1.116	1.123
	3	0.005	0.005	0.004	0.002	1.096	1.155	1.093	1.097
	4	0.004	0.004	0.003	0.001	1.081	1.140	1.077	1.082