反射率に基づく衛星搭載可視近赤外放射計の代替校正の誤差解析

An error budget analysis of the vicarious calibration for visible to near infrared radiometers onboard satellites based on the reflectance based method

新井康平*・Kurtis Thome**
Kohei ARAI and Kurtis THOME

Abstract: An error budget analysis for the reflectance based vicarious calibration method is conducted. BRDF of the standard plaque for the reference of the surface BRDF measurement is measured and corrected in the calculation of Top of Atmosphere (TOA) radiance in the method. Sunphotometer for optical depth measurement is calibrated and corrected in the calculation of TOA radiance. It is found that approximately 3.9% of root sum square error can be achieved for the reflectance based vicarious calibration method.

1. まえがき

地球観測衛星に搭載された可視近赤外放射計の軌道上校正の方法に

1. 搭載校正系（太陽光、校正用光源等）によるオンボード校正¹⁾
2. テストサイトにおける地表面および大気の観測データを用いる代替校正²⁾
3. 観測波長域の重なる同種の放射計同士の相互校正³⁾

がある。代替校正は、地表面の分光双方向反射率特性 (Bi-directional Reflectance Distribution Function: BRDF) を実測値、太陽光の直達および散乱光の計測値等から放射伝達モデルに基づき大気上端（衛星高度）の分光放射輝度を求め、衛星搭載の放射計から得られる放射輝度と比較することによってなされる。これを

反射率に基づく代替校正法 (Reflectance Based Method) と呼んでいる。また、航空機搭載の同種の放射計によって計測される航空機高度の放射輝度を用いて、大気上端における放射輝度を補正する方法もある。これは、放射輝度に基づく代替校正 (Radiance Based Method) と呼ばれている。また、これ以外に太陽光の大気圏外放射照度に基づく代替校正手法も提案されている⁴⁾。これらの内、高価な航空機データを必要としない反射率に基づく代替校正手法について特性の良く判っているシーンを使う方法⁵⁾、太陽の直達光を異なる波長で観測し、それらの比から全水蒸気量を推定して大気中の水分子による光学的厚さを推定する方法⁶⁾、大気による放射伝達を太陽のオレオール（周縁光）と光学的厚さの観測値からインバージョン（逆問題解法）により求める方法⁷⁾、以上を総合して代替校正における誤差解析を行った結果の報告²⁾等がなされている。また、地表面反射率の計測の際に用いる標準白色板の BRDF を考慮する方法⁸⁾、その標準白色板に Spectralon (Labsphere 社の商品名) を用いる提案⁹⁾、Spectralon や硫酸バリウムを用いた場合の BRDF の比較¹⁰⁾、Spectralon の紫外波長領域での安定性や経時的な汚れの解析を行って代替校正精度を向上する方法の提案¹¹⁾等がなされている。さらに、太陽の直達光を測定するサンフォトメータの校正を大気の光学的厚さの薄いサイトにおいて実施し、光学的厚さの推定精度を向上させる方法も一般に採られている。

* 佐賀大学 理工学部 知能情報システム学科
Dept. of Information Science, Saga University
840-8502佐賀市本庄 1/1 Honjo, Saga 840-8502 Japan

**アリゾナ大学光科学研究センター
Optical Sciences Center, The University of Arizona
1630 E university Blvd, Tucson, Arizona 85721-0094
USA

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 39, NO. 2, 2000

本小文は反射率に基づく代替校正において、(1)地表面の BRDF のみならず、標準白色板の BRDF をも考慮して大気上端における放射輝度を推定する際に補正する、(2)太陽の直達光を測定するサンフォトメータの校正を精度良く行うことによって、さらに精度の向上を図った代替校正手法を提案し、併せて、その精度を明らかにすべく行った誤差解析の結果について述べるものである。

2. 反射率に基づく代替校正手法

2.1 代替校正手法の概要

代替校正手法を Fig. 1 に模式的に示す。テストサイトには

1. 高放射輝度を呈する
2. 瞬時視野よりも広い範囲で様な地表被覆物
3. 大気の光学的厚さの薄い

場所(標高の高い広大な砂漠等)が一般に良く用いられている。地表面の BRDF は瞬時視野内をサンプル的に計測し、平均を求める。この時、分光反射率の基準とすべき、標準白色板の BRDF も同時に計測する。大気の光学的厚さは、大気組成分子の吸収の比較的小さい波長域(図の場合、368-862nm の5バンド)において計測する。この計測に用いる放射計をサンフォトメータと呼ぶ。これは清澄な大気における Langley Plot¹²⁾を取得し、校正しておく必要がある。光学的厚さの観測データおよび気圧から計算するレイリー散乱の光学的厚さ、位相関数、エアロゾルのタイプ(複素屈折率)、粒径分布から求めるミー散乱の位相関数、それらから計算する平行平板大気の各層における多重散乱、地表面と大気間の多重反射の影響を考慮して太陽光の大気圏外放射輝度から下向き、上向きの放射輝度を

Fig. 1 Illustrative view of the Reflectance Based Method of vicarious calibration

を計算し、地表での直達、散乱を放射伝達式を解くことによって求め、さらに、上向きの放射輝度を同様に大気上端まで伝達し、大気上端における放射輝度を推定する。この放射伝達モデルには多くの提案がなされている¹³⁾。光学的に薄い大気で場所も特定(筆者達は通常米国ネバダ州の Lunar Lake, または, Railroad Valley Playa をテストサイトに用いている)しているのでエアロゾルの種類や分布もある程度推測が可能である。そのため、比較的計算負荷が少なく精度の高い、「平行平板大気モデルに基づく、逐次近似法による多重散乱の計算を伴う方法」を用いている。この他、球面モデルもあり、倍加法、モンテカルロ法等の多重散乱の計算方法もあるが、これら相互の比較については文献13)に詳細(これらの相互の大気上端の放射輝度の推定偏差は大気パラメータによるので一概に云えないが、文献13)によれば、ほぼ、1%以内に収まっている)があるのでここでは省略する。

2.2 誤差要因

代替校正精度に影響を及ぼす因子として以下のものが考えられる。

1. 大気の光学的厚さの計測
 - (a) サンフォトメータの校正精度
2. 地表面 BRDF 計測
 - (b) BRDF 計測器(分光放射計)の校正精度
 - (c) 標準白色板の BRDF
 - (d) 平均化に伴う誤差
3. 放射伝達式
 - (e) エアロゾルの複素屈折率
 - (f) エアロゾルの粒径分布
 - (g) 伝達式ソフトウェアコードの誤差(分光感度特性との畳み込み積分における誤差、打ち切り、丸め誤差等)
4. 衛星搭載放射計との比較
 - (h) 衛星搭載放射計データからテストサイトを同定する際の誤差

が考えられる。これらの誤差要因のうち、(a)、(b)、(c)、(e)、(f)は相対的に大きい¹²⁾。このうち(a)は、サンフォトメータの観測精度が直接大気の光学的厚さの観測精度に直結するので細心の注意を払う必要がある。通常は、テストサイトにおける Langley Plot を、可能な限り連続する複数日にわたって取得し、それらからサンフォトメータを校正するが、連続して清澄な

大気条件が得がたいことや大気組成分子の条件が一定していないことなどの理由からこの校正精度には限界がある。ここではサンフォトメータをマウナロア山頂の様な光学的厚さの薄い大気条件における Langley Plotを行い、校正する。また、テストサイトにおいても Langley Plot を、可能な限り連続する複数日にわたって取得し、校正係数を検証する。また、通常地表面の BRDF を測定し、放射伝達モデルの地表面モデルに入力してこの大気上端放射輝度計算上の影響を考慮するが、反射率に基づく代替校正において最も重要な地表面反射率計測における比較対象である標準白色板についてはあまり意が払われていない場合もある。ここでは、実験室における標準白色板の BRDF¹⁴⁾の計測およびそれを考慮した地表面 BRDF を用いた大気上端における放射輝度の推定を行い補正する効果を確認している。

3. 誤差見積り

3.1 光学的厚さの推定精度

(a)は太陽光の大気圏放射照度の計測値が公表¹⁵⁾されている。それを参照してサンフォトメータを3年間(1995-1997年)にわたり校正した。Fig. 2に1995-97年に実施したサンフォトメータの校正実験の結果から得られた校正係数サンフォトメータの経年変化を示す。これらデータは、米国ハワイ州マウナロア山頂付近における Langley Plot を1回当たり3連続日の観測を行い、それらの平均を図示したものである。Langley Plot の一例を Fig. 3に示す。この回帰直線からの偏差はエアロゾル、水蒸気等の時間的な変化によって生じるが、マウナロアにおける偏差が極めて少ないことが良く判る。これらから校正精度は1%以内に収まることを確認した。テストサイトにおける Langley Plot からのサンフォトメータの校正精度は、大気条件によるので一概に云えないが、少なくともマウナロア山頂付近におけるそれよりも悪く、1.5%程度である¹¹⁾。

3.2 地表面 BRDF 推定精度

(b)および(c)についてはこの方法のもっと大きな要因と考えられ、実験室レベルで光積分球等を用いて校正し、現地で標準白色板の分光反射率が変化しないものとして BRDF をより精度良く計測することに努めているが、実験室レベルにおける分光放射計の校

Fig. 2 The results from the calibration of the sun-photometer used (Parameter: Wavelength of 368, 500, 675, 778 and 862[nm])

Fig. 3 An example of Langley Plot at the top of Mt. Mauna-Loa in Hawaii on 7 November 1997.

正精度は、積分球の面内一様性、時間変動、定点黒体炉からの値付けの誤差、放射源の面積効果、分光放射計自体の反射が積分球に戻ることに影響（ローディング効果）を最小に押さえたとしても実験室からテストサイトへの移動に伴う変動等を考慮すると2%程度が限界である。また、標準白色板自体の BRDF が一様でないことに起因する誤差も少なくない。この誤差は用いる標準白色板の BRDF に依存するが、比較的広範囲な波長にわたって分光反射率が一定との定評の高い Labsphere 社製の Spectralon（この標準白色板のスタンダードサンプル ID は SRT-99-100であり、0.25-2.5[μm] の波長帯を50[nm] 間隔で反射率を計測している。また、NIST(National Institute of Standards and Technology) の SRS-99-020-M99 にトレーサブルである。この計測時の不確定性は0.3-2.2[μm]の範囲で0.5%, 0.25-2.5[μm]では2%である。具体的な計測コンフィギュレーションは暗室にコリメータおよびモノクロメータを配置し、その間

Fig. 4 The measured BRDF of the Spectralon provided by Labsphere at the laboratory of the University of Arizona

に試供体の標準白色板を置き、ゴニオメータにて試供体の角度を変えて分光反射率を計測する方法である。この標準白色板のBRDF特性は、別のロットの製品(SRT-50-100, SRT-02-100)でも同様である。また、他社製品でも同様であり、硫酸バリウムを塗付したものはSpectralonよりもBRDFが角度とともに急激に変化している。) できえも Fig. 4 に示すようにBRDFが一様ではない。図中の波長軸の数字、0から7は、455, 502, 554, 647, 699, 757, 860, 948 (nm) にそれぞれ相当する。また、角度は10度から85度までを5度間隔にて測定した。太陽天頂角が大きい場合にはこの影響が大きく、10度と85度の反射率は最大28%もの偏差がある。衛星通過時の太陽天頂角に相当する45度と10度の反射率とを比較すると、約4.6%に達していることが判る。すなわち、標準白色板のBRDFを考慮しない場合、この程度の誤差を生じることになる。この影響を軽減するため、筆者たちは事前にこのBRDFを実験室レベルで計測し、地表面BRDF推定の際に補正している。このことにより、4.6%程度の影響がBRDFの計測誤差程度(1%)に軽減できる。(d)のBRDFの平均化に伴う誤差として、地表面BRDFの瞬時視野内一様性、または、標準偏差が目安になる。すなわち、瞬時視野内を十分に密に標準化してBRDFを計測するが、通常テストサイトに用いている Lunar Lake, Railroad Valley Playa の標準偏差は前者が約1.5%、後者は2%以上に達している場所もある。ただし、不偏推定量であるBRDFの平均値はほとんど誤差なしに推定が可能と考える。

3.3 ミー散乱

空気分子によるレーリー散乱、オゾン、分子吸収の影響の推定誤差については無視できる程、精度良く行えると考えている。

過去のデータの蓄積からこのテストサイト周辺のエアロゾルの複素屈折率は、 $1.44-i0.005$ としている。これは、海岸から200km程度内陸の海塩粒子、有機物溶存粒子のMaxwell-Garnett混合則によるものであり¹⁶⁾、前者が $1.381-i0.0000000426$ 、後者が $1.53-i0.006$ である複素屈折率を混合比を0.4にて混合したものである。また、複素屈折率の虚部については、このテストサイトがシリカ系の粘土層で覆われていることを考慮し、ダスト系のエアロゾルを加えて結果として $1.44-i0.005$ とした。ここでは、この虚部に ± 0.0025 の

Fig. 5 Percent change in Top of Atmosphere (TOA) radiance for the uncertainty due to 0.0025 changes in imaginary index (As a function of Aerosol Optical Depth)

Fig. 6 Percent change in Top of Atmosphere (TOA) radiance for the uncertainty due to 0.0025 changes in imaginary index (As a function of Surface Reflectance)

誤差, すなわち $\pm 50\%$ の誤差を故意に重畳し, その大気上端の放射輝度推定における影響を調べることにする。太陽天頂角: 45度, 観測天頂角: 10度, 波長550nmにおける空気分子の光学的厚さ: 0.12, 地表面反射率: 0.5としてエアロゾルの光学的厚さの関数としてエアロゾルの複素屈折率の虚部をパラメータとして大気上端における放射輝度の変動を調べた結果, Fig. 5となった。通常, テストサイトの6, 7月におけるエアロゾルの光学的厚さは0.1から0.3程度であることから Fig. 5によれば, 複素屈折率の虚部が50%変化したとしても大気上端における放射輝度の変動は2%以内に収まっていることが判る。また, 地表面反射率を変化させた場合も同様に調べたところ, Fig. 6に示すよ

Fig. 7 Percent change in Top of Atmosphere (TOA) radiance for the uncertainty due to 0.5 changes in Junge parameter (As a function of Aerosol Optical Depth)

Fig. 8 Percent change in Top of Atmosphere (TOA) radiance for the uncertainty due to 0.5 changes in Junge parameter (As a function of Surface Reflectance)

Fig. 9 Percent change in Top of Atmosphere (TOA) radiance for the uncertainty due to 2.5 percent changes in aerosol optical depth (As a function of Aerosol Optical Depth)

うに, 複素屈折率の虚部が50%変化したとしても大気上端における放射輝度の変動は2%以内に収まっていることが判った。エアロゾルの粒径分布モデルについては Log-Normal, Modified Gamma 等が良く知られているが¹³⁾, ここでは最も古典的なユンゲ分布を仮定している。このユンゲパラメータの大気上端放射輝度推定誤差に及ぼす影響について調べる。このユンゲパラメータはエアロゾル粒径の対数の間隔ごとの単位容積当たりのエアロゾルの個数は粒径と逆比例の関係にある時の比例定数¹⁷⁾のことであり, 通常, テストサイトの6, 7月におけるそれは3程度である。これに故意に0.5(約16.7%)の誤差を重畳した場合の計算結果を Fig. 7, 8に示す。これらは, それぞれ光学的厚さと地表面反射率に対する, 大気上端における放射輝度の推定誤差である。両者の影響は約2%と換算できる。また, エアロゾルの光学的厚さの計測および推定誤差を2.5%見込むと, Fig. 9に示すように $\pm 1\%$ 以内に収まっていることが判る。

3.4 その他の要因

(g), (h)の放射伝達コードの誤差および衛星画像からテストサイトを同定する際の誤差は1%と見積もった。前者の支配的なものは大気上端放射輝度の衛星搭載放射計の分光感度特性にわたる積分と考えられるが, ここでは, 経験的に1%を越えることはないと考えた。また, 後者はテストサイトのBRDFの均一性に依存しており, 十分に様な場所を選定することにより, この影響を1%以内に押えられると考えた。以

Table 1 Error budget for the proposed method and the vicarious calibration method without BRDF correction and sun-photometer calibration at Mt. Mauna-Loa which is referred to the old method

Error source	Error(%)	
	The Old	Proposed
Calibration of sun-photometer	1.5	1.0
Calibration of spectro-radiometer	2.0	2.0
BRDF of standard plaque	4.6	1.0
Averaging error	0.0	0.0
Aerosol refractive index	1.8	1.8
Aerosol size distribution	2.0	2.0
Radiative transfer code	1.0	1.0
Mis-Registration error	1.0	1.0
Root Sum Square error	6.05	3.90

上から、Table 1 の誤差見積りの結果が導かれる。同表には参考として、標準白色板の BRDF を考慮せず、サンフォトメータの大気的光学的厚さの薄いサイトにおいて校正せず、テストサイトにおいて十分に Langley Plot を取得できなかった場合の代替校正を The Old Method として誤差の見積りを示した。提案手法は、結果として約3.9%の代替校正精度を達成できることが判った。また、これを The Old Method と比較すると、42.15%もの精度向上に結び付くことも明らかになった。

4. あとがき

標準白色板の BRDF を考慮した地表面 BRDF の計測により、衛星搭載可視近赤外放射計の代替校正精度が、ほぼ3.9%の代替校正精度が達成できることも判った。また、これを標準白色板の BRDF を考慮せず、サンフォトメータの大気的光学的厚さの薄いサイトにおいて校正せず、テストサイトにおいて十分に Langley Plot を取得できなかった場合の代替校正と比較すると、35.5%もの精度向上に結び付くことも明らかになった。この方法による代替校正の現実の衛星搭載放射計に対する適用結果については機会を改めて報告する予定である。

謝 辞

日頃御討論戴く、気象研究所、高島、増田両氏、地質調査所、土田氏、近畿大学、向井、佐野先生、金沢工業大学、川田先生、アリゾナ大学、Dr. Phillippe

Slater, Dr. Stuart Biggar の皆様に深謝いたします。
(受付日2000.1.6, 受理日2000.3.21)

参考文献

- 1) Nianzeng, C., B. G. Grant, D. E. Flittner, P. N. Slater, S. F. Jackson, M. S. Moran, Results of calibrations of the NOAA-11 AVHRR made by reference to calibrated SPOT imagery at White Sands, N. M., Proceedings of the SPIE, pp.182-194, 1991.
- 2) Biggar S. F., P. N. Slater, D. L. Gellman, Uncertainty in the inflight calibration of sensors with reference to measured ground site in the 0.4 to 1.1 μm range. Remote Sensing of Environment, Vol. 48, pp.25-252, 1994.
- 3) Arai K., Inflight test site cross calibration between mission instruments onboard the same platform, Advances in Space Research, Vol. 19, No. 9, pp.1317-1324, 1997.
- 4) Biggar, S. F., P. N. Slater, K. J. Thome, A. W. Holmes, and R. A. Barnes, Preflight solar-based calibration of SeaWiFS, Proceedings of the SPIE, Vol. 1939, No. 23, Orlando, Florida, pp.12-16, 1993.
- 5) Slater, P. N., S. F. Biggar, K. J. Thome, D. I. Gellman and P. R. Spyak, The in-flight radiometric calibration of ASTER by reference to well-characterized scenes, Proceedings of the EOS/SPIE, Vol. 2317, No. 6, pp.49-60, 1994.
- 6) Reagan, J. A., K. J. Thome and B. M. Herman,

- A simple instrument and technique for measuring columnar water vapor via near-infrared differential solar transmission measurements, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 4, pp.825-831, 1992.
- 7) Grotbeck, C. L., R. P. Santer, S. F. Biggar and P. N. Slater, Solar aureole and optical depth inversion techniques for atmospheric radiative transfer calculations, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993.
 - 8) Brugge C. J., A. E. Steigman, R. A. Rainen and A. W. Sprigsteen, Use of Spectralon as a diffuse standard for inflight calibration of Earth-orbiting sensors, *Optical Engineering*, Vol. 32, pp.805-814, 1993.
 - 9) Jackson, R. D., M. S. Moran, P. N. Slater, and S. F. Biggar, Field calibration of reference reflectance panels, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 22, pp.145-158, 1987.
 - 10) Steigman A. E., C. J. Brugge and A. W. Sprigsteen, UV stability and contamination analysis of Spectralon diffuse reflectance materials, *Optical Engineering*, Vol. 32, pp.799-804, 1993.
 - 11) Jackson R. D., T. R. Clarke and M. S. Moran, Bidirectional calibration results for 11 Spectralon and 16 barium sulfate reference reflectance panels, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 40, pp.231-239, 1992.
 - 12) Thome, K. S. Schiller, J. Conel, K. Arai and S. Tasuchida, Results of the 1996 EOS vicarious calibration joint campaign at Lunar Lake Playa, Nevada (USA), *Metrologia*, Vol. 35, pp.631-638, 1999.
 - 13) Lenoble J. ed., *Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: Standard computational procedures*, A Deepak Publishing, 1985.
 - 14) Johnson, B. C., S. S. Bruce, E. A. Early, J. M. Houston, T. R. O'Brian, A. Thompson, S. B. Hooker and J. L. Mueller, The fourth SeaWiFS intercalibration round-robin experiment (SIR-REX-4), May 1995, NASA Technical Memorandum 104566, Vol. 37, 1996.
 - 15) <http://climate.gsfc.nasa.gov/cahalan/Radiation/SolarIrrVblackbody.html> Solar Irradiance vs Blackbody Spectra The red line gives the best post-1992 Solar spectrum estimate, and the yellow line shows the spectrum of a blackbody having temperature 5780 degrees Kelvin, which is the temperature needed to give the same total
 - 16) Sano, I, S. Mukai, and T. Takashima, Polarimetric properties of atmospheric aerosols, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 3439, pp.462-469, 1997.
 - 17) 山本義一, 新版気象学概論, 朝倉書店, 1976.