

佐賀におけるエアロゾル光学特性の長期観測結果に基づく ASTER/VNIR センサの代替校正

新井康平*

Vicarious Calibration of ASTER/VNIR Onboard Terra Satellite Based on Measurements
and Characterization of Aerosol Refractive Index and Size Distribution

Kohei ARAI*

Abstract

A method for the after-launch verification of the linearity of the satellite based visible near-infrared radiometer using two or more earth surfaces where reflection factors differ is proposed. Through the check by experiment were performed and confirmed validity. Moreover, validity of the empirical refractive index for vicarious calibration determined from our four year observation data of the solar direct, diffuse and aureole was checked through a comparison to the vicarious calibration with the directly measured refractive index using solar direct and diffuse irradiance measurement data. As a result of applying the aforementioned empirical aerosol parameters to vicarious calibration of ASTER/VNIR, validity of the empirical aerosol parameters are confirmed for 7.5 years of ASTER/VNIR data. It is also found that linearity of VNIR response (input to output characteristic) is confirmed.

Keywords : Vicarious calibration, Refractive index, Size distribution, Linearity, Solar reflectance wavelength channels

1. ま え が き

フィールド実験を伴う代替校正は殆どの衛星搭載可視近赤外放射計に対して実施されている。例えば、ランドサット MSS, TM, ETM+では Barker 達¹⁾が、SeaWiFS では Barnes 達²⁾が、SPOT/HRV, HRVIR では Gellman 達³⁾が、そして、MODIS, 等 Earth Observing System 計画におけるミッション機器の代替校正では Thome 達⁴⁾が砂漠等の反射率の高い地表面を用いた代替校正の方法を提案し、その代替校正結果を報告している。それらの方法は地表面反射率（直下視でない場合は Bi-Directional Reflectance Distribution Function : BRDF⁵⁾）の計測およびこの波長帯において消散に寄与する水蒸気, エアロゾル, オゾン, 空気分子の光学的厚さの計測を行い、これらを基に放射伝達式を解いて大気上端放射輝度を推定し、衛星搭載可視近赤外放射計データと比較することによって校正する「反射率に基づく代替校正」が殆どである⁶⁾。また、大気の影響を考慮しなくても済む「月」を校正源とした代替校正も実施されている²⁾⁷⁾。さらに、同じ、または、他の衛星に搭載された観測波長のオーバーラップしている同種のセンサデータの相互比較による校正等も行われている⁸⁾⁹⁾。

反射率に基づく代替校正においてエアロゾルの複素屈折率は実測値よりも経験的な値を用いることが多かった。エアロゾルの複素屈折率の推定には太陽の直達, 散乱, 周縁光の計測が必要であり¹⁰⁾, これには少なからず規模の大きな, 携行が困難な装置が必要であることから経験値にて実測値を代用していた。しかし, 一般に実測値が経験値よりもより現実に近く, 複素屈折率が代替校正精度に及ぼす影響¹¹⁾は少なくないことも事実である。したがって, 本研究では, まず, 複素屈折率の経験値を代替校正に用いることの影響を MODerate resolution atmospheric TRANsmission : MODTRAN¹²⁾によって明らかにし, 次に ASTER/VNIR (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer / Visible and Near-Infrared Radiometer)¹³⁾¹⁴⁾の代替校正における実測値と経験値の差として評価した¹⁵⁾。この時, 4年間にわたる佐賀大学周辺のエアロゾルの太陽直達および散乱光の観測を通じたエアロゾルパラメータの特性化を行った結果としてエアロゾル複素屈折率の経験値を導出し¹⁶⁾, 用いた。複素屈折率の実測値および経験値を用いた場合の代替校正を行い, 両者を比較することによりこの影響を定量的に明らかにした。

衛星搭載可視近赤外放射計の軌道上でのセンサ特性の評価のひとつに線形性の評価がある。また, 信号対雑音特

(2007. 5. 17 受付, 2008. 1. 28 改訂受理)

* 佐賀大学

〒840-8502 佐賀市本庄1番地

* Saga University, 1 Honjo, Saga, 840-8502, Japan

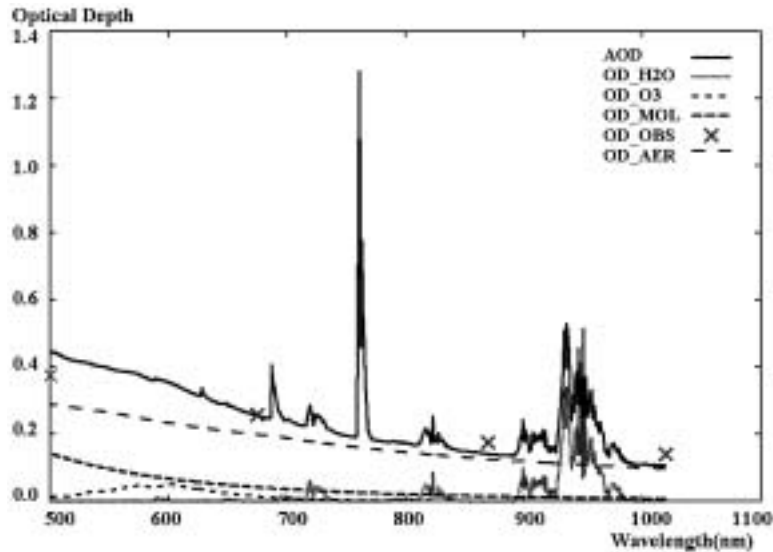


Fig. 1 Parameterization of optical depth of total atmosphere, water vapor, ozone, molecule and aerosol with the observed optical depth (cross mark).

AOD : Atmospheric optical depth, OD_H₂O : Optical depth of water vapor, OD_O₃ : Optical depth of ozone, OD_MOL : Optical depth of molecule, OD_OBS : Observed atmospheric optical depth, OD_AER : Optical depth of aerosol

性¹⁷⁾や校正精度は入力放射輝度に依存する。特に後者を評価するため、本研究では反射率の異なる複数の地表被覆物を用いて代替校正を行う方法を提案する。この方法を ASTER/VNIR に適用し、妥当性を確認したのでここに報告する。

2. エアロゾル複素屈折率および粒径分布の実測に基づく代替校正法

2.1 代替校正法

代替校正では、まず、衛星に同期した地上実験を行う。地上実験では、(1) 地表面反射率計測 (Spectra Vista Co. 社製 GER-2600 および英弘精機社製 MS-720)、(2) 太陽直達光、散乱光、周縁光 (プリード社製 POM-I) および偏光 (オプトリサーチ社製 PSR-1000) の観測を行う。太陽直達光観測では MICROTOPS-II (オゾン・水蒸気チャンネル仕様) によるオゾン吸収、水蒸気吸収を用いたオゾン全量、全気柱水蒸気の計測も行う。これらオゾンと水蒸気の吸収特性は既知であり、オゾン全量および水蒸気量の計測値を与えてこれらの光学の厚さを推定する。また、別仕様の MICROTOPS-II (光学の厚さ計測仕様) による (368, 500, 675, 778, 862, 1020 nm の波長における) 全大気的光学厚さの計測も同時に行う。これらは大気組成分子の吸収が少ない波長である。これらの波長における光学の厚さを MODTRAN 4.0 の中緯度夏期および冬期 (観測時期に合わせる) の標準大気における光学の厚さに、最小二乗の意味で最良となるようにフィッとさせ、オゾン、水分子以外の大気組成分子の光学の厚さを推定する。Fig. 1 に離散的な波長における光学の厚さの計測値 (図中 x 印) から連続波長における光学の厚さを推定した結果を示す。ここで AOD, OD_H₂O,

OD_O₃, OD_AER はそれぞれ、MODTRAN によって推定した全大気、水分子、オゾン、エアロゾルの光学の厚さ、OD_OBS は離散波長で観測した全大気的光学の厚さを示す。この時、空気分子による散乱 (レイリー散乱寄与成分) は気圧 (大気空気密度) と波長の関数として推定し、全大気的光学の厚さからこれらを差し引くことにより、エアロゾルのみの光学の厚さを求める。さらに、太陽直達、散乱、周縁光および偏光の観測データを用い、エアロゾルの複素屈折率および粒径分布を同時推定法¹⁸⁾に基づき推定する。これら推定大気パラメータおよび地表面反射率から多重散乱を考慮した放射伝達式の解法である MODTRAN, 6S, ガウスザイデルモデル⁵⁾等にて大気上端放射輝度を推定する。これを衛星搭載可視近赤外放射計の入力放射輝度と比較することにより代替校正による校正係数とする。

2.2 佐賀大学周辺のエアロゾル複素屈折率と粒径分布の推定

粒径分布は光学の厚さの波長特性からオングストローム指数+2により推定することができるが¹⁹⁾、エアロゾル複素屈折率は光学の厚さのみの計測では推定できない。代替校正に用いるエアロゾル複素屈折率は、太陽直達、散乱、周縁光の計測を直接行い、これらに基づき推定することが望ましいが、これらの特性化を行って経験値を導出して用いる方法もある。本研究は、経験値の妥当性を評価することを目的としている。すなわち、経験値を導出するために用いた太陽直達、散乱、周縁光の計測期間が経験値の信頼性に及ぼす影響を評価する。大気状態は時々刻々変化しているので直接計測することが最良である。しかし、太陽直達、散乱、周縁光の計測を可能にする計測器は重量、形状の観点から代替校正のためのテストサイトに展開すること

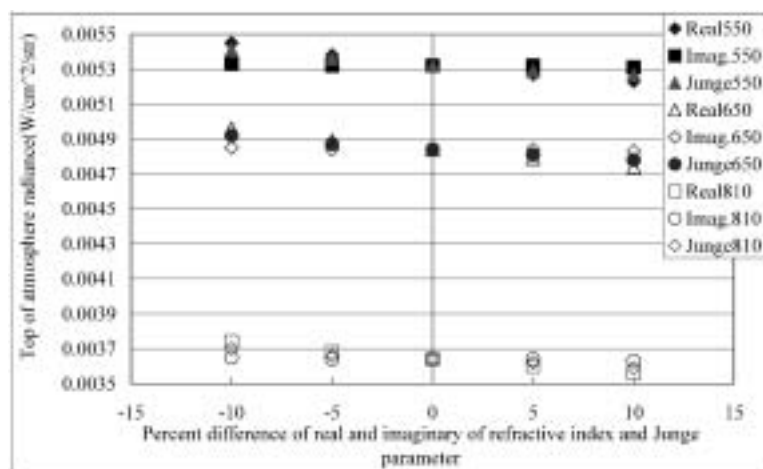


Fig. 2 Changes in Top Of the Atmosphere : (TOA) radiance when ± 5 and 10% of errors are added to the estimated real and imaginary parts of refractive index and the Junge parameter of aerosol size distribution for the data observed at Saga university on December 13 2003.

が困難な場合がある。

一方, AERONET^{*1}, SKYNET^{*2}等によりエアロゾル複素屈折率, 粒径分布の時間・空間分布が全球規模にて取得されているが, 代替校正のためのテストサイトのエアロゾル局所性には必ずしも対処できない。したがって, 長期間にわたる太陽直達, 散乱, 周縁光の計測に基づき, 複素屈折率の経験値を導出し, 代替校正に用いることがよく行われている。この経験値の良否は, 当然, 代替校正精度に影響を与える。たとえば, 複素屈折率の実部, 虚部および粒径分布を表すユンゲパラメータに故意に誤差を重畳させた場合の大気上端放射輝度推定値の変化を Fig. 2 に示す。これは, 2003 年 12 月 13 日に佐賀テストサイトにおいて測定した大気の光学的厚さ, 太陽直達, 散乱, 周縁光等より推定したエアロゾル複素屈折率と粒径分布をユンゲ分布と仮定したときのパラメータに基づき, MODTRAN (中緯度冬期モデル) を用いて ASTER/VNIR バンド 1 (550 nm), バンド 2 (650 nm), バンド 3 (810 nm) に対する大気上端放射輝度を求めたものに基づいている。複素屈折率およびユンゲパラメータに故意に ± 5 および 10% の誤差を与えて感度解析を行った結果, 複素屈折率の実部が $\pm 10\%$ 変化すると, 大気上端放射輝度は Fig. 2 に示すように -1.7 から 2.8% 変化しており, これと同様の虚部の変化に対しては -0.19 から 0.28% に相当しており, また, この変化はユンゲパラメータに対しては -0.94 から 1.7% の変化である。

経験値の良否はこの推定に用いる太陽直達, 散乱, 周縁光の計測期間に依存すると考えられる。そのため, 本研究は 2003 年から 2007 年までの 4 年間の佐賀大学周辺における太陽直達, 散乱, 周縁光の計測に基づき, エアロゾル複素屈折率および粒径分布の特性化を行い, それらの経験値を導出し, 代替校正に用いる場合と実測値から直接推定した場合とを比較することによって, 経験値の良否を評価す

*1 <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/aeronet/>

*2 <http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>

ることとした。

2.3 反射率の異なる複数テストサイトを用いた可視近赤外放射計の線形性の代替評価

反射率の異なる地表被覆物を観測した可視近赤外放射計データから放射計の線形性を評価することができる。この時, 大気の影響を考慮した大気上端放射輝度によって評価する。

3. 実験結果

3.1 代替校正係数のトレンド解析

ASTER/VNIR は校正光源 (ハロゲン球), 校正光源の光量モニタ (シリコンフォトダイオード) および校正光学系を 2 系統搭載している。この搭載校正系によって 17 日に 1 回の頻度で取得される校正データに基づきラジオメトリック校正係数 (Radiometric Calibration Coefficient : RCC) を算出している²⁰⁾。この係数は打ち上げ前校正データ (地上試験により定点黒体によって値付けられた積分球を光源とした校正光に基づき, VNIR の校正系の出力との関係から導出した校正データ) との比を示しており, VNIR のゲインの打ち上げ前試験時点からの劣化を表している。

Fig. 3 に搭載校正系による RCC (搭載校正 RCC) のトレンドを破線によって示す。打ち上げに伴う諸現象 (真空シフト等による校正光量の変化等の影響) により, 打ち上げ直後の搭載校正 RCC は 2.5% 程度変化している。その後の経過はほぼ負の指数関数にしたがって変化し続けている。このような指数関数的変化は, 光学系前面に微小粒子 (例えば, 軌道・姿勢制御のためのヒドラジン等の燃料) が時空間的にランダムに付着するような場合や, 太陽フレアの高エネルギー粒子が光学系の透過率を減少させるような場合等に相当するが, 原因は特定できていない。同図には, また, 代替校正によって求めた RCC (代替校正 RCC) をプロットしてある。代替校正に伴う地上実験は米国ネバダ

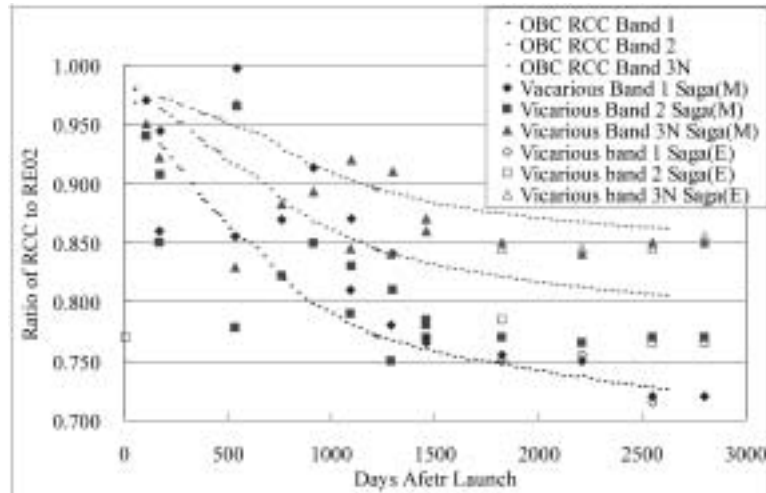


Fig. 3 Trend of the ASTER/VNIR Radiometric Calibration Coefficients (RCC) for 7.5 years since launch (Three vicarious RCC are estimated for the data acquired on December 15 2004, January 3 2006 and January 22 2007). OBC stands for Onboard Calibration Coefficient, Saga (E) and Saga (M) denote Vicarious calibration coefficient with field data measured at Saga with empirical refractive index and those with directly measured refractive index.

州とカリフォルニア州の境に位置する Ivanpah プラヤ (IV) およびネバダ州に位置する Railroad Valley プラヤ (RRV) において実施した。これらテストサイトは比較的大気が薄く(高地に存在), 地表被覆が広域にわたり一様であることを条件に選定した。Fig. 4 (a), (b) にこれらテストサイトの位置を示す。

打ち上げ後2年程度までの期間は, 地表面反射率計測のために使用した分光放射計の種類が異なり, 反射率計測のばらつきが主な原因となって代替校正 RCC がばらついている。後半は分光放射計を MS-720 に統一し, 反射率計測が安定して行えるようになり, 代替校正 RCC のばらつきが減少している。2003年12月13日, 2004年12月15日, 2006年1月3日および2007年1月22日に佐賀テストサイト (Fig. 4 (c)) において地上実験を行った。2003年12月13日の衛星通過時刻においてうろこ雲の影響があったがテストサイトにおいては観測データが得られた。その結果, Fig. 3 に示すように代替校正 RCC を求めることができた。代替校正 RCC は (E) および (M) の2種類がある。前者は経験的複素屈折率を用いる場合であり, 後者は実測値から推定した複素屈折率を用いる場合である。両者とも傾向を同じくするが, 経験的複素屈折率は4年間における平均的な値であるので観測日による気象条件等が変動の影響により, 実測に基づく複素屈折率と異なる。そのため, 経験的複素屈折率を用いる代替校正 RCC はばらついている。各観測日における複素屈折率は, (1) 2003年: $1.521-0.022i$, (2) 2004年: $1.488-0.018i$, (3) 2006年: $1.493-0.019i$, (4) 2007年: $1.542-0.023i$ であった。Fig. 3 の代替校正 RCC はそれらを反映した結果となっている。

以上のことから, 適切な期間にわたってエアロゾルパラメータの特性化を行って求めた複素屈折率の経験値ならば, 実測値からさほど乖離せずに代替校正に用いることが

できるといえる。

3.2 佐賀テストサイトにおけるエアロゾルの特性評価

佐賀大学運動グラウンド (Fig. 4 (c)) を主なテストサイトとし, エアロゾルの特性化を試みた。2003年から2007年までの4年間の太陽直達, 散乱, 周縁光の観測に基づき, 波長 550 nm におけるエアロゾルの光学的厚さ, 複素屈折率の実部および虚部, 非対称性因子, 単散乱アルベドを推定した。それらの月平均値の4年間にわたる変動, 四季それぞれの日変化を調べた。日変化は毎正時±30分における平均値を毎正時の値として図示している。また, エアロゾルの粒径分布は四季それぞれの時間平均値としてその変化を調べた。これらの結果を Fig. 5, 6, 7 にそれぞれ示す。Fig. 5 (a) から, 光学的厚さは季節の移り変わりによって大きく傾向を異にすることが分かる。すなわち, 春, 秋, 冬の光学的厚さは時刻とともに漸増傾向にあり, 0.1 から 0.35 程度で推移しているが, 夏のそれは7から9時頃と16から18時頃にピークが見られる。これらは陸風海風に伴う有明海からの潮風の影響と考えられる。Fig. 5 (b) の単散乱アルベドの変化は0.72から0.95程度であり, 朝晩が比較的大きく, 南中時付近で小さくなる傾向が見られる。したがって, 日中は散乱に寄与する成分よりも吸収に寄与する成分が大きくなっていることが分かる。Fig. 5 (c) の非対称性因子は単散乱アルベドと同様な傾向を示しており, 0.62から0.8程度を推移しているが, 全体に時刻とともに漸減傾向にある。これは粒径が大きくなるほどミー散乱による前方散乱が卓越することに起因していると考えられる。Fig. 5 (d) の複素屈折率の実部は1.4から1.63程度で変化しており, 漸増傾向にある。また, 朝晩に比べ南中時付近において大きくなる。Fig. 5 (e) の複素屈折率の虚部は0.002から0.058と比較的大きく変化し, 実部の変化と傾向を同じくしている。

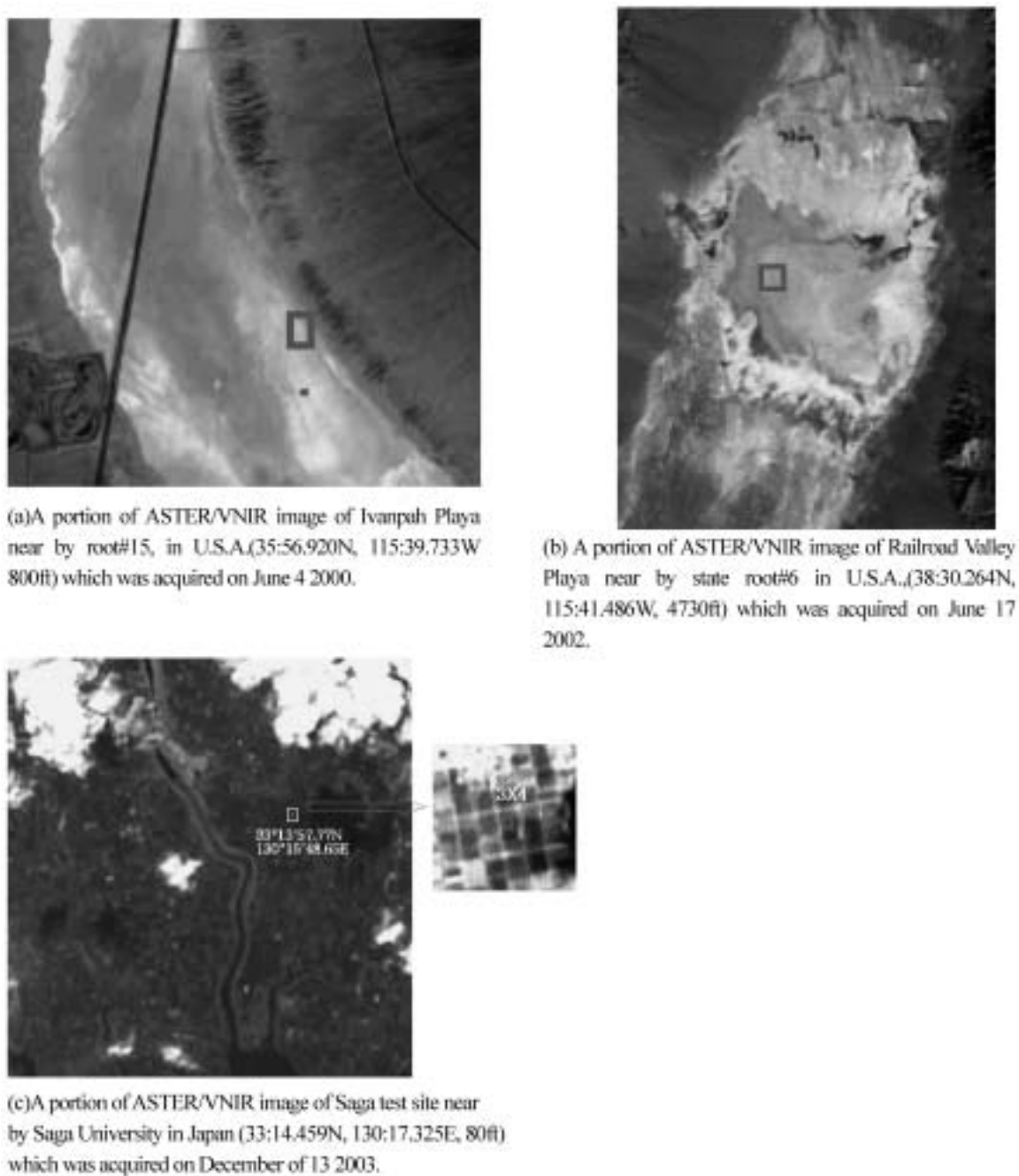


Fig. 4 Three designated test sites for vicarious calibration of ASTER/VNIR.

Fig. 6 から月平均値の推移を見ると, Fig. 6 (a) の光学的厚さは 0.22 から 0.42 の間で変化し, 8 月をピークに単峰特性を呈している。Fig. 6 (b) の単散乱アルベドは 7, 9 月をピークとした双峰特性であり, 0.815 から 0.885 の間で変化している。また, 同図 (c) の非対称性因子は 7 月をピークにした単峰特性であり, 0.665 から 0.722 の間で変化している。同図 (d), (e) の複素屈折率実部および虚部はそれぞれ 7 月および 9 月を極小値とする下に凸の特性を示し, 前者が 1.38 から 1.54, 後者が 0.012 から 0.035 の間で推移している。

Fig. 7 に示した季節別の粒径分布に特徴的なことは, 季

節を問わず, 双峰特性となっていることにある。最初のピークは $0.2\mu\text{m}$, 二つ目のピークは 2 から $3\mu\text{m}$ にある。夏, 春, 冬, 秋の順にエアロゾルの体積粒径分布が大きい。佐賀平野においては冬の季節風を遮るほどの高山がなく, 湿度の高い風が平野を吹き抜けるため, 冬におけるエアロゾル量が大きくなる。また, この粒径分布からエアロゾル組成は比較的粒径の大きな海塩粒子および比較的粒径が小さい水溶性粒子性エアロゾルの混合であることも分かる。さらに, 海塩粒子および水溶性粒子性エアロゾルの複素屈折率は $1.381-0.0000000042i$ および $1.55-0.006i$ であり, 煤性エアロゾルは $1.75-0.44i$ であることから²¹⁾ Maxwell Garnet

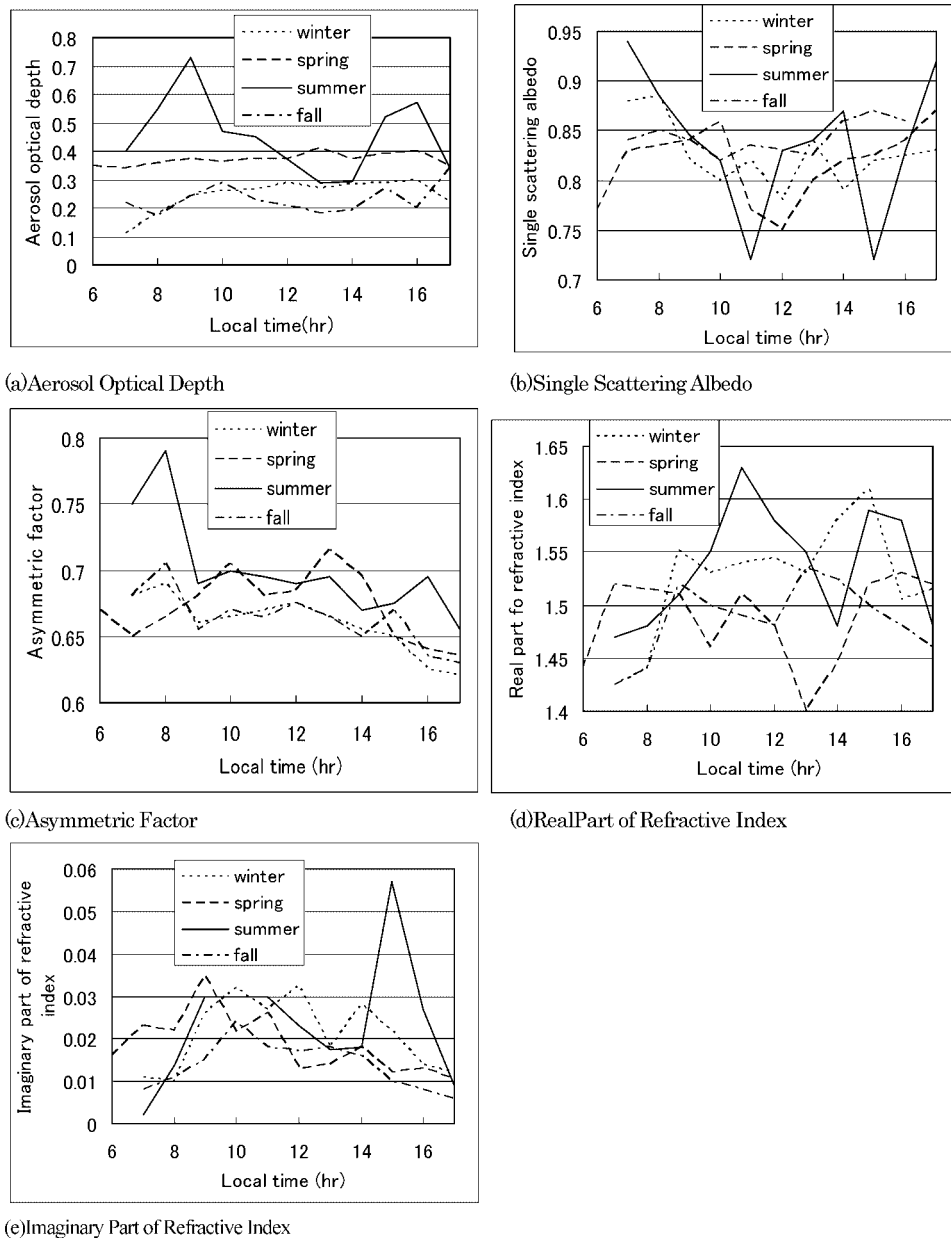


Fig. 5 Diurnal change of (a) Aerosol Optical Depth, (b) Single Scattering Albedo, (c) Asymmetric Factor, (d) Real Part, and (e) Imaginary Part of the Refractive Index of aerosol.

エアロゾル混合モデル²²⁾を用いて解析すると、海塩粒子が29%、水溶性粒子性エアロゾルが71%に多少の煤性エアロゾルが混合されたものであると考えられる。

3.3 ASTER/VNIRの線形性の検証

2007年1月22日に、佐賀大学グランド周辺で7箇所の地表面反射率の異なる裸地をテストサイトとして代替校正を実施し、実験値から推定した大気上端放射輝度とASTER/VNIRデータから導出した輝度値とを比較した。このテストサイトは、地表面反射率が比較的低いので代替校正には不利であるが、大気状態が比較的安定している冬期に実施した。衛星通過時刻付近(地方降交時11時)におけるエアロゾル複素屈折率の2003-2007年の観測期間の平均値(実

部:1.5, 虚部:0.02)を経験値として用いることとした。また、この経験値に基づき代替校正係数(RCC)を求め、直接計測した複素屈折率を用いて求めた代替校正係数RCCと比較することによって、経験値の不確定性を評価した。

Fig. 8 (a), (b), (c)にそれぞれ、実測地表面反射率と推定大気上端放射輝度との関係、推定大気上端放射輝度とVNIRデータから求めた放射輝度との関係および両者間のパーセント偏差と地表面反射率の関係を示す。線形回帰分析により回帰係数を求めてみると、Table 2に示すスロープとバイアスであることが分かった。また、同表には両者の相関係数も示す。Fig. 8 (b)とTable 2から、ASTER/

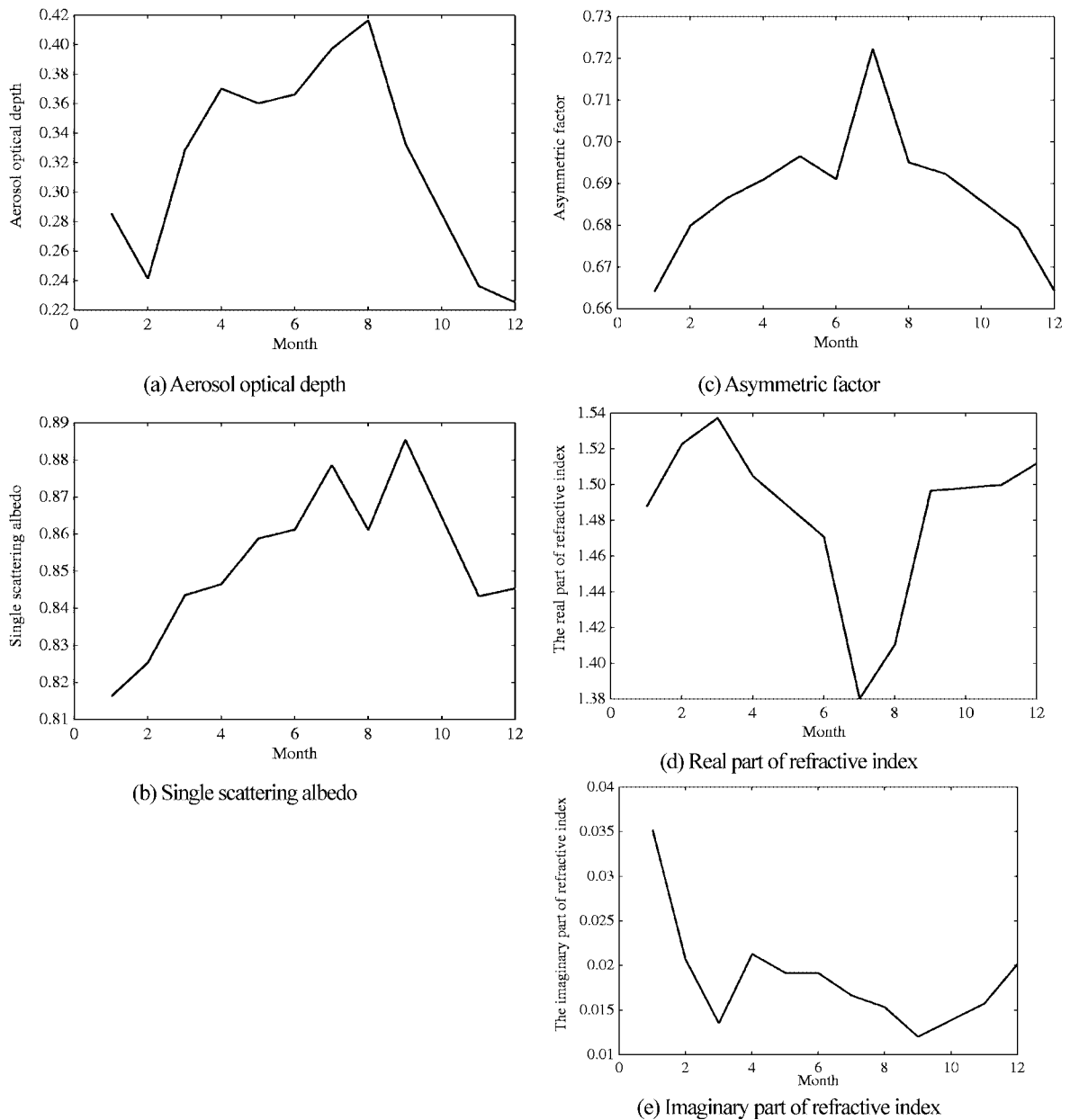


Fig. 6 Monthly change of (a) the aerosol optical depth, (b) Single scattering albedo, (c) asymmetric factor, (d) real part and (e) imaginary part of the refractive index.

VNIR の各バンドのリニアリティは極めて良好であることが確認できた。さらに、Table 1 には Fig. 3 の搭載校正 RCC と代替校正 RCC との間の 2007 年 1 月 22 日時点におけるゲインとオフセットも併せて示した。これらゲインとオフセットを、線形性を検証するために求めたスロープとバイアスと比較すると、Fig. 9 となっている。同図では、スロープの変化をバイアスのオーダーに合わせるため、ゲインとスロープを 10 倍にして示している。ゲインとスロープ、オフセットとバイアスの傾向は、それぞれ、極めてよく一致しており、提案手法の有効性が改めて確認できた。

4. あとがき

本論文は、特定地域（佐賀大学周辺）におけるエアロゾル複素屈折率および粒径分布を長期にわたる太陽直達、散乱、周縁光および大気光学的厚さの計測から特性化し、それらの経験値を導出することができることを示した。また、経験値および実測値を用いた代替校正結果を比較し、次に示す知見を得た。

- (1) 十分な期間にわたってエアロゾルパラメータの特性化を行って求めた複素屈折率の経験値は、実測値からさほど乖離せずに代替校正に用いることができる。

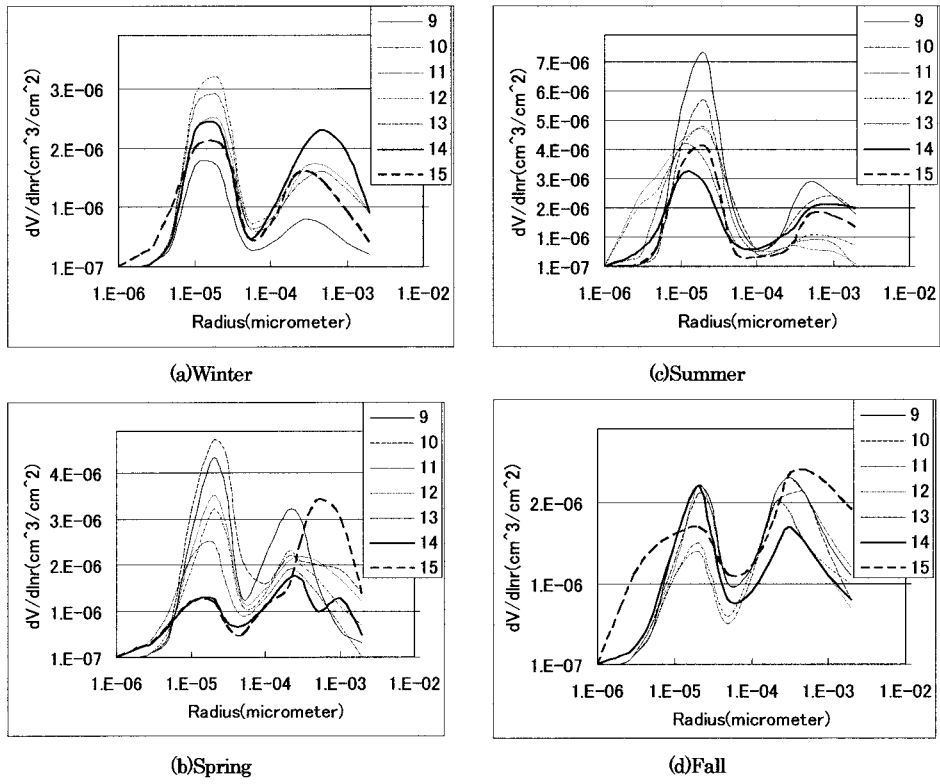


Fig. 7 Volume spectra (Diurnal change of the aerosol size distribution) in (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) fall seasons.

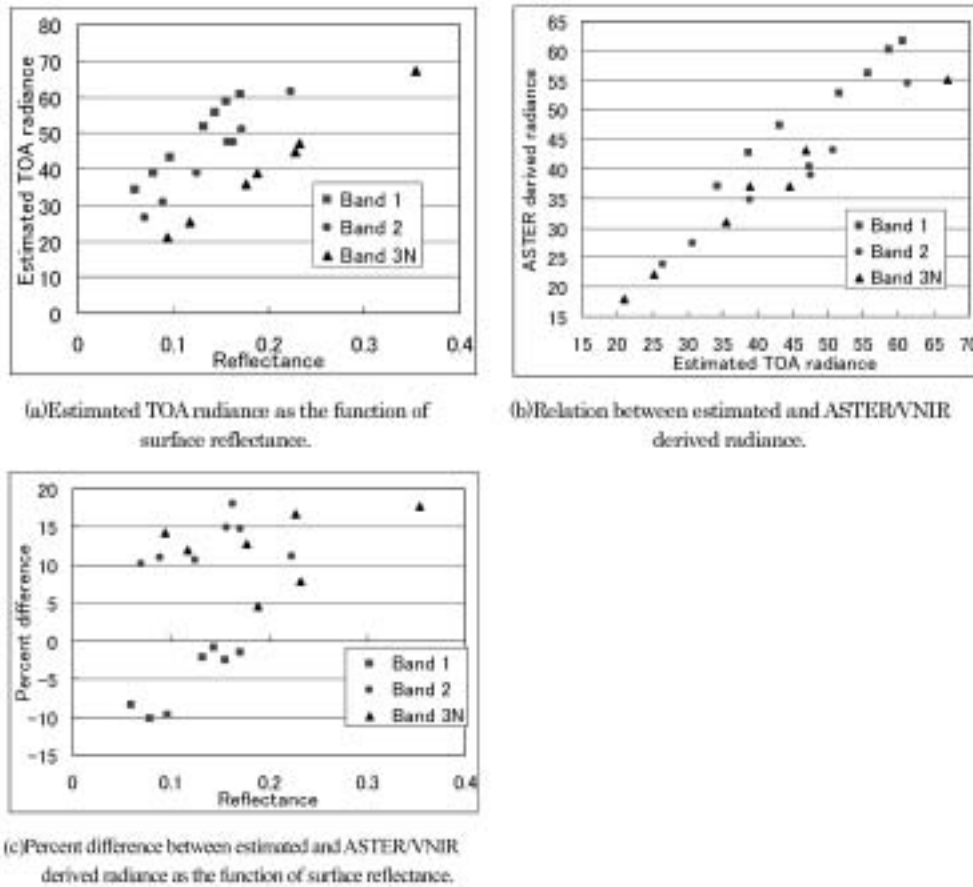


Fig. 8 ASTER/VNIR linearity validation results with the different surface reflectance of the bare soil fields measured at Saga University on January 22 2007.

Table 1 Estimated and ASTER/VNIR data derived radiance and their percent difference for the different surface reflectance (Ref) of seven test sites in the vicinity of Saga University.

B1				B2				B3N			
Ref	%Dif	TOA	ASTER	Ref	%Dif	TOA	ASTER	Ref	%Dif	TOA	ASTER
0.17	-1.6	60.7	61.67	0.22	11.2	61.4	54.52	0.35	17.7	67.0	55.14
0.097	-9.8	43.1	47.32	0.13	10.6	38.8	34.69	0.18	12.8	35.6	31.04
0.13	-2.2	51.6	52.74	0.16	18	47.5	38.95	0.23	16.7	44.5	37.07
0.14	-0.9	55.6	56.10	0.16	14.9	47.4	40.34	0.19	4.5	38.8	37.05
0.16	-2.5	58.7	60.17	0.17	14.8	50.7	43.20	0.23	7.9	46.8	43.10
0.079	-10.2	38.7	42.65	0.089	10.9	30.7	27.35	0.12	12	25.2	22.18
0.060	-8.4	34.2	37.07	0.071	10.1	26.5	23.82	0.094	14.3	21.0	18.00

Ref: Surface reflectance, %Diff.: percent difference between estimated TOA: Top of Atmosphere radiance and ASTER/VNIR data derived radiance(ASTER) in unit of $W/cm^2/str$ for both radiances

Table 2 Gain, offset of the VNIR band 1,2,3N and correlation, bias and slope of the relation between estimated and VNIR data derived radiance.

	Band 1	Band 2	Band 3N
Slope	1.12	1.17	1.2
Bias(%)	-8.42	-0.7	-1.8
Correlation	0.995	0.992	0.987
Gain	0.73	0.78	0.85
Offset(%)	-1.0	5.0	2.5

- (2) 搭載校正系データによる校正係数と代替校正による値とのトレンド解析を行い、両者は傾向を同じくしているが、バイアスの偏差があることを確認した。
- (3) 反射率の異なる複数地表面を用いた代替校正を通じて ASTER/VNIR の線形性を評価し、極めて良好な線形性が確認できた。

VNIR バンド 1, 2, 3N のそれぞれの搭載校正 RCC と代替校正 RCC との間の -1.0, 5.0, 2.5 (%) の偏差が生じている原因については特定できていない。代替校正は筆者の他、筆者が客員教授を務めているアリゾナ大学光科学研究センター、(独)産業技術総合研究所においても同じ時期、場所において実施しており、同様の結果を得ている。この偏差の原因究明は今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究は(独)産業総合技術研究所および(財)資源・環境観測解析センター殿との共同研究によって得られた成果の一部から派生しており、また、衛星搭載校正系によるラジオメトリック校正係数は(財)資源探査用観測システム・宇宙環境利用研究開発機構殿より提供を受けた。当該団体の関係各位のご支援に感謝いたします。

筆者がリーダーを務めている ASTER サイエンスチーム/ラジオメトリックキャリブレーションチームの構成メンバー、特に、アリゾナ大学光科学研究センターの Stuart Biggar, Kurtis Thome 両博士、(独)産業総合技術研究所土田 聡、亀井秋秀両博士に日頃のご討論、ご助言に対し、深謝いたします。さらに、スカイラジオメータによる計測、エアロゾルの複素屈折率および粒径分布推定においてご助言を頂戴した東京大学気候システム研究センター中島映至

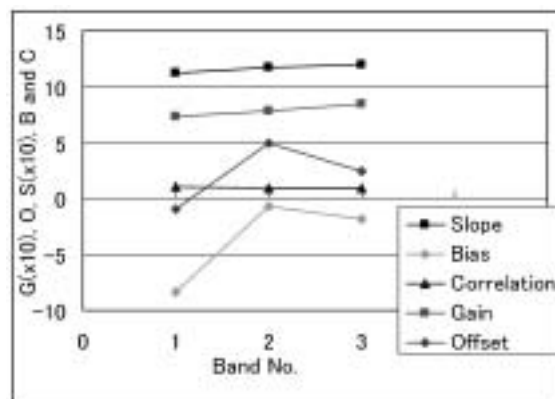


Fig. 9 Gain (x10) : G, offset : O of the VNIR band 1,2,3N and correlation : C, bias : B and slope (x10) : S of the relation between estimated and VNIR data derived radiance.

教授および実験に協力して貰った梁 興明 (現 NOAA/NESDIS), 陳 華慧両博士, 寺山康助教, 丁 雅柳博士を始めとする佐賀大学新井研究室の学生に深甚なる感謝の意を表します。

引用文献

- 1) J. L. Barker, S. K. Dolan, K. Sabelhaus, A. Phillip, D. L. Williams, J. R. Irons, B. L. Markham, J. T. Bolek, T. Joseph, S. S. Scott, Landsat-7 mission and early results, Proceedings of SPIE, 3870, 299-311, 1999.
- 2) R. A. Barnes, E. E. Eplee, F. S. Patt and C. R. McClain, Changes in the radiometric sensitivity of SeaWiFS determined from lunar and solar-based measurements, Appl.Opt., 38, 4649-4664, 1999.
- 3) D. I. Gellman, S. F. Biggar, M. C. Dinguirard, P. J. Henry, K. J. Thome, P. Slater, Review of SPOT-1 an d-2 calibration at White Sands from launch to the present, Proc.,SPIE Conf. #1938, 118-125, 1993.
- 4) K. J. Thome, S. Schiller, J. Conel, K. Arai and S. Tsuchida, Results of the 1996 Earth Observing System vicarious

- calibration campaign at Lunar lake playa, Nevada (USA), *Metrologia*, 35, 631-638, 1998.
- 5) 新井康平, 独習リモートセンシング, 森北出版, 2001.
 - 6) P. N. Slater, S. F. Biggar, R. G. Holm, R. D. Jackson, Y. Mao, M. S. Moran, J. M. Palmer and B. Yuan, Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors, *Remote Sensing of Environment*, 22, 11-37, 1987.
 - 7) H. H. Kieffer and R. L. Wildey, Establishing the moon as a spectral radiance standard, *J. Atmosphere and Oceanic Technologies*, 13, 360-375, 1996.
 - 8) K. Arai, Atmospheric Correction and Residual Errors in Vicarious Cross-Calibration of AVNIR and OCTS Both Onboard ADEOS, *Advances in Space Research*, 25, 5, 1055-1058, 1999.
 - 9) J. I. Liu ; Z. Li, Y.-L. Qiao, Y.-J. Liu, and Y.-X. Zhang, A new method for cross-calibration of two satellite sensors, *Int. J. of Remote Sensing*, 25, 23 5267-5281, 2004.
 - 10) 新井康平, 梁 興明, 上向き, 下向き放射輝度の偏光を考慮した大気上端放射輝度の推定方法, *日本写真測量学会誌*, 44, 3, 4-12, 2005.
 - 11) 新井康平, K. J. Thome, 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, *日本写真測量学会誌*, 39, 2, 99-105, 2000.
 - 12) A. Berk, G. P. Anderson, P. K. Acharya, L. S. Bernstein, L. Muratov, J. Lee, M. Fox, S. M. Adler-Golden, J. H. Chetwynd, Jr., L. Hoke, R. B. Lockwood, J. A. Gardner, T. W. Cooley, C. C. Borel, P. E. Lewis, E. P. Shettle, MODTRAN5 : update, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XII. Edited by Shen, Sylvia S. ; Lewis, Paul E. *Proceedings of the SPIE*, 6233, 62331, 2006.
 - 13) P. Slater, K. J. Thome, A. Ono, F. Sakuma, K. Arai, F. Palluconi, H. Fujisada, Y. Yamaguchi and H. Kieffer, Radiometric Calibration of ASTER Data, *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, Vol. 15, No. 2, pp. 16-23, Jun. 1994.
 - 14) A. Ono, F. Sakuma, K. Arai, Y. Yamaguchi, H. Fujisada, P. Slater, K. Thome, F. Palluconi and H. Kieffer, Pre-flight and In-flight Calibration Plan for ASTER, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 321-335, Apr. 1995.
 - 15) K. Arai and X. Liang, Characterization of aerosols in Saga city areas, Japan with direct and diffuse solar irradiance and aureole observations, *Advances in Space Research*, 39, 1, 23-27, 2006.
 - 16) K. Arai, Vicarious calibration for solar reflection channels of radiometers onboard satellites with deserted area of data, *Advances in Space Research*, 39, 1, 13-19, 2006.
 - 17) K. Arai and H. Tonooka, Radiometric performance evaluation of ASTER/VNIR, SWIR and TIR, *IEEE Trans. on GeoScience and Remote Sensing*, 43, 12, 2725-2732, 2005.
 - 18) 梁 興明, 新井康平, 太陽直達光, 散乱光, 周縁光及び偏光の地上観測によるエアロゾルの複素屈折率及び粒径分布の同時推定法, *日本リモートセンシング学会誌*, 25, 4, 357-366, 2005.
 - 19) T. Nakajima, M. Tanaka and T. Yamauchi, Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data, *Applied Optics*, 22, 19, 2951-2959, 1983.
 - 20) ASTER Science Team (K. Arai, et.al.), Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Level 1 Data Processing (Ver 3.0), ERSDAC, 1996.
 - 21) J. Lenoble, Edt. Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres : Standard computational procedures, A. Deepak Publishing Co., Ltd.,
 - 22) V. N. Bringi and V. Chandrasekar, Polarimetric Doppler Weather Radar : Principles and Applications, Cambridge University Press 0521623847, 2001.

[著者紹介]

●新井 康平 (アライ コウヘイ)



1949年生。1974年日本大学大学院理工学研究科修士課程修了1982年工学博士。1974-78年東京大学生産技術研究所, 1979-90年宇宙開発事業団(現JAXA), 1985-87年カナダ政府給費留学生, 90年から現職佐賀大学教授。1998-2000年科学技術庁航空電子等技術審議会委員, 1998年からアリゾナ大学客員教授, 当学会地球環境研究会幹事, 1998-2003年当学会九州支部長, 2003-04年当学会理事等歴任。受賞歴: 当学会論文賞2回(1991, 1999年)等受賞
著書: 新井「独習リモートセンシング」森北出版(単著)等24編
E-mail : arai@is.saga-u.ac.jp