ADEOS/OCTS 画像上の光学系内の散乱に基づくと思われる現象 およびそれを考慮したエアロゾルモデルの推定法

Ghost-like image defect which is most likely caused by an internal scattering Observed in ADEOS/OCTS imagery data and its influence on aerosol model estimations

新井 康平*・福島 甫**

Kohei Arai and Hajime Fukushima

Abstract: An analysis was made for “a ghost-like image defect” which was found in the specific OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner onboard ADEOS: Advanced Earth Observing Satellite) data. It is found that the influences of the defect is around 10 [%] in terms of the radiance of the surrounding normal pixels. It is also found that the most possible reason for this is caused by the beam splitter No. 2 of OCTS optics. Due to the fact that the defect of OCTS band 7 is occurred at almost same location compared to the defect of band 8 while those of band 6 and 8 are occurred at a different location so that it is better to use the ratio of the upwelling radiance of aerosol particles between bands 7 and 8 rather than bands 6 and 8, the effectiveness of the aerosol model estimation of the bands 6 and 8 is better than that of bands 7 and 8 though.

1. はじめに

OCTS の校正および検証が宇宙開発事業団を中心として進められ、成果が公表されている^{1)~7)}。また、このデータを受信処理解析している NASA から幾何学的、ラジオメトリック校正および検証の結果が報告されている^{8),9)}。さらに、光学系内の散乱に基づくと思われる現象について Arai K. and Fukushima H.¹⁰⁾, Gregg W.W. et al.⁹⁾から報告されている。同様の光学系内の散乱に基づくと思われる現象については殆どの地球観測光学センサーに発生している。たとえば, SeaWiFS については Barnes R.A. et al.¹¹⁾から報告されている。SeaWiFS では、打ち上げ前に、主鏡、偏光解

消フィルター等の設計変更を行い、光学系内の散乱に起因するゴースト（主な結像以外に、わずかな結像が主な結像周辺に生じる現象）を軽減する対策が採られている。

ここでは、OCTS 画像上に現れる光学系内の散乱に基づくと思われる現象の一例を紹介するとともにこの現象がエアロゾルモデルの推定に及ぼす影響を解明する。また、この影響を回避するエアロゾルモデルの推定法についても言及することにする。

2. 光学系内の散乱に基づくと思われる現象

2.1 ADEOS/OCTS

OCTS は可視から近赤外波長域に 8 バンド (412, 443, 490, 520, 565, 670, 765, 865[nm]), 短波長から熱赤外波長域に 4 バンド (3.715, 8.515, 10.85, 12.05 [μm]) の分光チャンネルを有するセンサーである。瞬時視野は 700m×700m であり、観測幅は 1500km である。これら 12 バンドのデータから大気補正を伴う海面温度やクロロフィル濃度の推定が可能である。

* 佐賀大学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

** 東海大学工学部開発工学科
School of High-Technology for Human Welfare,
Tokai University
〒410-0395 沼津市西野 317
317 Nishino, Numazu, 410-0395 Japan

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 39, NO. 3, 2000

2.2 ゴーストラシキ現象

光学系内の散乱に基づくと思われる現象の生じている OCTS 画像の一例(部分画像)を Figure 1 に示す。OCTS 画像の全体は Figure 2 に示す ADEOS 軌道に沿った観測領域で示す通りである。この部分画像は北海道北部、樺太、国後、択捉、歯舞を含む OCTS レベル 1 B 画像であり、1997 年 4 月 26 日に取得されたものである。島の沿岸地形に沿ってゴーストラシキものが見て取れるが、これらがここで定義する「光学系内の散乱に基づくと思われる現象」である。この現象はディジタルカウント値で数10カウントにも達しており、この現象の生じていない海域のその約10 [%] にも達しており、決して無視できない。Wilson A.¹²⁾によれば、Turbid Case 2 海水を対象とした場合、OCTS バンド 1, 2, 3 では $2.5, 3.3, 3.5 [\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}]$ 程度であり、バンド 4, 5 では $3.3 [\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}]$ 程度、バンド 6, 7, 8 では $1.3, 0.8, 0.5 [\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}]$ 程度である。これらに対し、この現象の生じている海

域ではその約10 [%] 程度の輝度が重畳しており、決して無視できない。

一般にゴーストとは、ある地表対象物からの放射輝度が、本来の焦点面における位置(検知素子)以外の位置にも到達してしまうものと定義できる。その結果、本来の焦点面に結像するもの以外に、それと同じような像が別の位置に現れる現象である。Figure 1 のなかで最もこのゴーストが明瞭に現れているところは国後、歯舞、色丹、択捉島付近である。Figure 1 (h)においては島の西側に本来の島の位置から40—50km ほど離れた場所にゴーストが現れている。同図(g), (f)でも同様にゴーストは現れているが、発生場所は(h), (g), (f)の順に島に近づいており、同図(e)ではゴーストが見えなくなっているか、または、現れているかもしれないが、本来の結像の位置(島の位置)に一致している。また、同図(d)にもほぼ同図(h)に匹敵するゴーストが現れている。さらに、(a), (b), (c)にも同様にゴーストが現れているが、それらの発生場所は(d), (c), (a)の順に

Figure 1 Ghost like image defect on OCTS image acquired on 26 April 1997.

Figure 2 OCTS coverage along with the orbit of ADEOS satellite on April 26 1997.

Table 1 The situation of the ghosting in each OCTS band of the imagery data

Band No.	Location of the ghost Distance from the coastal line [pixel]	Direction of the ghost	Remarks
1	10-20	West	
2	10-20	East	
3	30-40	West	
4	40-50	West	
5	—	—	Not appeared
6	10-20	West	
7	30-40	West	
8	40-50	West	

島に近づいており、同図(b)に至っては島の反対側、すなわち、東側に発生している。

これらの発生する場所(ゴーストラシきものと島の沿岸までの距離)およびその方向を Table 1 にまとめる。この現象の走査角依存性はなく、観測幅全体にわたり一様に発生していることを確認した。すなわち、ゴーストの現れる位置も、重畳する輝度も走査角度に関係なく一様であり、どの場所でも同じゴーストが現れていることが判った。

3. 現象の発生メカニズムの解明

OCTS の光学系を Figure 3 に示す。集光鏡からの入射光はビームスプリッターによって赤外と可視近赤外に分光され、可視近赤外は、また、その後段のビームスプリッターによって可視のみとそれよりも長い波長の可視および近赤外とに分光される。分光後は赤外、可視のみのリレー光学系および可視近赤外のリレー光学系を個別に通り、それぞれの焦点面に結像される。この焦点面における結像のようすを地表面に対応して図示すると Figure 4 のように表わすことができる。

焦点面の配置および各バンドの検知器の配列とを考

Figure 3 Optical system for the OCTS instrument

Figure 4 Detector Alignment on the Focal Plane

慮すると、以下のことが推察できる。

- (1) OCTS バンド 1, 2, 3, 4 とバンド 5, 6, 7, 8 は異なる焦点面に検知器が配列されているので光学系内の散乱に基づくと思われる現象が異なる可能性がある。
- (2) 光学系内の散乱に基づくと思われる現象の発生原因となる散乱個所が同じところにあるならば、その発生位置は、焦点面における検知器の配列の通りになっているはずである (OCTS バンド 2, 1, 3, 4 および OCTS バンド 5, 6, 7, 8 の順になっている)。
- (3) 可視のみおよび可視近赤外の異なる焦点面に同じように光学系内の散乱に基づくと思われる現象が現れていることから、それらに共通した光学系 (Figure 3 に 2 重矩形で囲ったビームスプリッター, または, 集光鏡による内部散乱光の可能性があるので) に関係して現象が発生している可能性がある。

4. エアロゾルモデルの推定

4.1 エアロゾルモデルの推定に及ぼす影響

光学系内の散乱に基づくと思われる現象により, 当該領域の海面射出放射輝度の推定および大気補正に多大な影響を及ぼすことになる。

海面からの射出放射輝度推定に影響を及ぼす大気からの寄与は, レイリー散乱, エアロゾル散乱(または, ミー散乱)および空気分子による吸収に分けることができる。このうちもっとも推定が困難であるのがエア

ロゾル散乱の寄与であり, 特に, エアロゾルモデルの推定は簡単でない。通常, これは, 次式で示されるエアロゾルの散乱による上向き放射輝度のバンド比 $\epsilon(\lambda, 865)$ を用いて行われる。参考文献 4) ではエアロゾル透過率ののバンド間の比を用いてエアロゾルモデルの推定を行っているが, 結果に差がほとんど見られないため, ここでは式(1)を用いた。

$$\epsilon(\lambda, 865) = \frac{\omega(\lambda)P(\Psi, \lambda)\tau(\lambda)}{\{\omega(865)P(\Psi, 865)\tau(865)\}} \quad (1)$$

ここで, λ は波長であり, $\omega, \tau, P(\Psi, \lambda), \Psi$ は, それぞれ, 単散乱アルベド, エアロゾル散乱の光学的厚さ, 散乱位相関数および散乱角である。また, 865 とは OCTS バンド 8 の中心波長 865 [nm] を表わす。この時, 式(1)のエアロゾル散乱の上向き放射輝度のバンド比は観測天頂角, 太陽天頂角にも依存するが, ここでは前者を 0 度, 後者を 45 度として計算している。また, OCTS バンド 8 の波長における放射輝度は, 海面からの射出放射輝度の寄与が無視できるので, 大気の寄与のみと仮定している。さらに, OCTS の場合, この λ としてバンド 6 の 670 [nm] が用いられている。しかし, 前述のようにこのバンドには光学系内の散乱に基づくと思われる現象による影響が現れるため, ここではこれに代わる方法を提案する。

4.2 エアロゾルモデルの推定方法の提案

670-865[nm]の波長域における海面の反射率は無視し得るので, 大気全体の反射率からレーリー散乱に起因する反射率を差し引くと, エアロゾルおよびエアロ

ゾルとレーリー散乱寄与分子の相互作用に起因する反射率を加えたものが計算できる。参考文献13)と同様に、670-865[nm]の波長域における2バンドのエアロゾルの光学的厚さと比から、可視波長域におけるエアロゾルおよびエアロゾルとレーリー散乱寄与分子との相互作用に起因する反射率を加えたものを推定する。この時、エアロゾルの光学的厚さとこの反射率との関係はエアロゾルモデルによって異なるため、事前にそれらの関係を調べておく必要がある。ここでは、相対湿度を50, 80, 90 [%] に設定した、対流圏エアロゾル (Tropospheric)、相対湿度を50, 80, 99 [%] に設定した沿岸海域エアロゾル (Coastal) および相対湿度を50, 80, 99 [%] に設定した海洋性エアロゾル (Maritime) の3つのタイプ、9種類のモデルについて、式(1)のエアロゾルの光学的厚さのバンド間の比を求めた。これらのエアロゾルモデルの設定は参考文献14)にならったものであり、沿岸海域エアロゾル (Coastal) は、99.5 [%] の対流圏エアロゾル (Tropospheric) と0.5 [%] の海洋性エアロゾル (Oceanic) を合成したものである。また、海洋性エアロゾル (Maritime) は、99.5 [%] の海洋性エアロゾル (Oceanic) と0.5 [%] の溶存性エアロゾル (Water Soluble) を合成したものである。

このエアロゾルの光学的厚さのバンド間の比は太陽天頂角、衛星天頂角、太陽と衛星のなすアジマス角によって決まる幾何学的関係によっても異なる。その典型的な例として、それぞれが、60[度]、45[度]、90[度]の場合について示すと、Figure 5 となる。この図から以下のことが判る。

- (1) $\epsilon(\lambda, 865)$ は波長が短くなるにしたがって大きくなる。
- (2) $\epsilon(\lambda, 865)$ はエアロゾルの光学的厚さが薄くなるにしたがって大きくなる。
- (3) $\epsilon(\lambda, 865)$ は、たとえエアロゾルタイプが同じであっても相対湿度が低くなるにしたがって大きくなる(相対湿度が高くなるとエアロゾル粒径が大きくなり、光学的厚さが厚くなる)。
- (4) $\epsilon(\lambda, 865)$ の分光特性は十分に滑らかであり、エアロゾルモデルの相違による交差は生じていない。そのため、エアロゾルモデルの推定を行うことができる。

670-865[nm]の波長域における海面からの射出輝度は無視し得るのでこの波長範囲における $\epsilon(\lambda, 865)$ を

Figure 5 Spectral dependency of $\epsilon(\lambda, 865)$ for the aerosol models used in OCTS atmospheric correction algorithm.

用いてエアロゾルモデルの推定を行うことが望ましい(海面からの射出輝度の推定が精度よく行える場合はこの限りではないが、一般にこの海面からの射出輝度を推定するために大気補正を行っているので本末転倒の議論になる危険性がある)。このことを考慮すると、 $\epsilon(670, 865)$ 、または、 $\epsilon(65, 865)$ を用いたエアロゾルモデルの推定が可能といえる。

Figure 5 から両者を比較すると、 $\epsilon(765, 865)$ よりも $\epsilon(670, 865)$ の方が14.29 [%] だけ大きく、その分、エアロゾルモデルの推定を精度よく行うことができる。しかし、ゴーストの発生している領域は $\epsilon(670, 865)$ の方が $\epsilon(765, 865)$ よりも20 [%] 程度も大きく(前者のゴーストは40-50 [km] の幅で発生しているが、後者のそれは30-40[km]の幅で発生している)、なおかつ、そのゴーストの程度も、Figure 6 に示すように、10 [%] ほど大きい(前者のゴーストの発生している場所とその周辺海域の $\epsilon(\lambda, 865)$ との比は、後者のそれに比べて約1割程度小さい)ので、これらの影響を考慮すると、かえって、 $\epsilon(675, 865)$ よりも $\epsilon(765, 865)$ の方がエアロゾルモデルの推定を精度よく行うことができる。なお、Figure 6 (a)の範囲は1から3.8、(b)の範囲は1.1から1.9であり、これらに相当する Figure 5

(a) $\epsilon(670, 865)$

(b) $\epsilon(765, 865)$

Figure 6 A comparison the images for the $\epsilon(\lambda, 865)$ between $\lambda=670$ [nm] and 765 [nm].

の範囲は、それぞれ、1から1.5および1から1.3程度であるが、両図の間には衛星・太陽・海面の幾何学的関係が異なり、これらの差を生じている。太陽天頂角、衛星天頂角、太陽と衛星のなすアジマス角のうち、太陽天頂角が $\epsilon(\lambda, 865)$ に最も大きく影響するが、観測地点の緯度を35 [度] とすると、南中時が11:39、太陽赤緯が13.5 [度] であるので太陽天頂角が26.46 [度] となる。Figure 5の想定している太陽天頂角は、高緯度冬期の場合であり、60 [度] であるが、Figure 6の場合は、太陽高度角が高く、海面における下向き放射輝度が約1.79倍も高いので $\epsilon(\lambda, 865)$ は大きな値になる。そのため、 $\epsilon(765, 865)$ 、 $\epsilon(675, 865)$ が1.5から2.5倍に達していることが理解できる。

このエアロゾルモデルの推定を行うことにより、モデルで仮定しているエアロゾルの複素屈折率が利用でき、OCTSバンド8 (865 [nm]) データから計算する上向き放射輝度から光学的厚さも推定でき、これらから平行平板大気モデルに基づく放射伝達式を解くことによって大気補正が可能になる⁴⁾。

5. おわりに

OCTS画像に現れる「光学系内の散乱に基づくと思われる現象」の原因は、まだ、判然としないが、原因と思しき光学系の個所は特定できた。また、その放射輝度換算の影響、発生場所、領域等を明らかにした。さらに、エアロゾルモデル推定における影響を明らかにし、なおかつ、その影響を軽減するエアロゾルモデルの推定方法を提案した。今後、さらに、光線追跡等を実施して原因究明を行い、OCTSと同様の次期センサー (SGLI 等) の設計開発に反映したい。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、日頃御討論戴っている東京大学気候システム研究センターの中島先生および御議論頂き、また、データを提供して頂いた、宇宙開発事業団の島田政信、大阿久裕美両氏、RESTECの見富恭氏の方々に深謝の意を表します。

(受付日1999.11.19, 受理日2000.5.11)

参考文献

1) National Space Development Agency of Japan, (1997) ADEOS to ground station interface docu-

ment.

- 2) Shimada M., H. Oaku, Y. Mitomi, and A. Mukaida, OCTS program report: OCTS CAL/VAL, (1997) Proceedings of the second ADEOS Symposium, 139-161.
- 3) Shimada M., H. Oaku, Y. Mitomi, H. Murakami, A. Mukaida, Y. Nakamura, J. Iisaka, H. Kawamura, T. Tanaka, M. Kishino, and H. Fukushima (1998), Calibration and validation of the ocean color version 3 product from the ADEOS OCTS, Journal of Oceanography, 54, 401-416.
- 4) Fukushima H., A. Higurashi, Y. Mitomi, T. Nakajima, T. Noguchi, T. Tanaka and M. Toratani (1998), Correction of atmospheric effect on ADEOS/OCTS ocean color data: Algorithm description and evaluation of performance, Journal of Oceanography, 54, 417-430.
- 5) Arai K. (1994), Interactive Calibration Between SeaWiFS and ADEOS/OCTS, Proceedings of the 4th Annual Japan-US Workshop on Ocean Color, p. 6.
- 6) Arai K. (1998(c)), Radiometric cross calibration between AVNIR and OCTS at Ivanpah Playa, Proceedings of the third ADEOS Symposium, p. 555.
- 7) Arai K. (1999(a)), Error budget analysis of cross calibration method between ADEOS/AVNIR and OCTS, Advances in Space Research, 23, 8, 1385-1388.
- 8) Gregg W.W. (1999(a)), Initial analysis of ocean color data from the ocean color and temperature scanner, I. Imagery analysis, Applied Optics, 38, 20, 476-485.
- 9) Gregg W.W., F.S. Patt and W.E. Esaias (1999(b)), Initial analysis of ocean color data from the ocean color and temperature scanner, II. Geometric and radiometric analysis, Applied Optics, 38, 27, 5692-5702.
- 10) Arai K. and H. Fukushima (1998(a)), Stray light effect found in ADEOS/OCTS data: Description of the problem and its effect on estimated chlorophyll-a concentration, Proceedings of the 16th Ocean Optics Symposium.
- 11) Barnes A.B., A.W. Holmes, and W.E. Esaias

- (1995), Stray Light in the SeaWiFS Radiometer, NASA Technical Memorandum 104566, 31.
- 12) Wilson A. (1996), Atmospheric correction of SeaWiFS data ; An algorithm and validation for case-2 waters, NASA Technical Memorandum 104566, 31.
- 13) Gordon H.R. and M. Wang (1994), Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS : a preliminary algorithm, *Applied Optics*, 33, 3, 443-452.
- 14) Shettle E.P. and R.W. Fenn (1979), Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties, AFGL-TR-79-0214, 675, 94.