

4 波長ライダーによる大気エアロゾル計測と 衛星データ大気補正への応用

Aerosol Measurement using a Four-wavelength Lidar and its Application to Atmospheric Correction of Satellite Data

久世宏明 金城秀樹 上園哲司 竹内延夫
H. Kuze, H. Kinjo, T. Uezono, N. Takeuchi
千葉大環境リモートセンシング研究センター
CEReS (Center for Environmental Remote Sensing)

Abstract: Spaceborne optical sensors for the visible and near infrared spectrum range receive solar radiation reflected from the Earth's surface and influenced by the atmosphere. We simulate this atmospheric effect using MODTRAN-3 code, taking ground visibility and ground reflectance as main parameters. We measure and evaluate the distribution above Chiba city with the data obtained from our four-wavelength (355, 532, 756, 1064nm) lidar system.

1. はじめに

人工衛星のリモートセンシングデータは、センサーの感度特性に起因する偏りのほか、光の伝播過程において大気から受ける様々な歪みを含んでいる。大気の影響に関しては、エアロゾルによる散乱(可視近赤外域)や水蒸気による吸収(熱赤外域)が支配的である。そのため、測定値から輝度温度、地表面の反射率などの物理量に変換する際、エアロゾル(直径約 10 μ m以下の粒子)の濃度や水蒸気量を推定し、補正を行う必要がある。本研究では、LANDSAT の TM(Thematic Mapper) データに対する対流圏エアロゾルの影響をシミュレーションにより調べるとともに、4 波長(355, 532, 756, 1064nm)ライダーにより、実際に千葉大学上空で得られた、エアロゾル消散係数分布及び光学的厚さの観測結果について報告する。

2. 対流圏エアロゾル

LOWTRAN7 コードにおける都市域、春・夏(Urban Spring-Summer)モデルにおける対流圏での波長 532nm の消散係数分布を Fig.1 に示す(改良型の MODTRAN3 でも同じモデルが採用されている)。エアロゾル分布は地上から 2000m 付近まで高濃度で分布しているが、その後は、高度とともに急激に減少してゆく。したがって、火山活動などによって成層圏に一時的に増加するエアロゾルがない場合、可視・近赤外域における光の減衰は、地上から高度 10000m 付近までの対流圏エアロゾルによって決まるとしてよい。LOWTRAN7 において、地上視程が光学的厚さ(地上から高度 20000m まで)と透過率に及ぼす影響を Fig.2 に示す。このモデルでは、地上視程が大気中のエアロゾル量を記述する重要なパラメーターとなっていることがわかる。

3. TM 画像における大気補正の影響

センサーに入射する光には、太陽光が対象物以外の大気によって散乱された光路放射と、地面で反射された直達放射がある(Fig.3)。前者は、一回の散乱過程で到達する単散乱成分 L_{PS} と二回以上の散乱過程を経て到達する多重散乱 L_{PM} があり、後者は、センサーが対象としている物体からの直達光成分 L_{GD} と対象以外の地面から直達光の光路に入ってくる成分 L_{GI} がある。したがって、センサーに入射する全放射量 L は $L = L_{PM} + L_{PS} + L_{GI} + L_{GD}$ で表される。地表面からの直達光成分は次式により計算される。

$$L_{GD} = (E_{EXT} / \pi) T T' \rho \cos \theta z$$

ρ : 地表面アルベド E_{EXT} : 大気圏外における放射照度 T : 鉛直方向光路の透過率

T : 天頂角 θ_z 方向光路の透過率

よって、センサーで得られた L から L_{GD} の正確な抽出を行うことにより、本研究の最終目的である衛星画像における各ピクセル毎の地表面アルベド推定が可能である。

Fig.1 で示したが、LOWTRAN7 モデルでは地上視程が高度約 2000m までの消散係数分布を決定し、その領域での光学的厚さ τ により、ほぼ、センサーで得られる可視域における光の強度が決まる。 $\rho=0.2$ とした場合の地上視程に対する LANDSAT 衛星の TM Band3、Band4 の各成分値を MODTRAN3 により算出した(Fig.4)。図中において、各成分強度は Digital Number で表されている。TM Band3 において、視程が 8 km 以下の場合には L_{GD} は L_{PM} の強度より小さくなり、同様に、Band4 においても視程 5km 以下で L_{GD} と L_{PM} の逆転が起こる。これらの結果は、各成分値の地上視程に対する高い依存性を表している。言い換えれば、地表面アルベドの推定を行うためには、衛星の通過時刻に同期した、地上からの大気観測が必要不可欠である。また、 ρ の増大の影響は必然的に L_{GI} 、 L_{GD} の増加につながる。地上視程を一定(10km)とした場合、 ρ に対する各成分値の変動を Fig.5 に示す。

4. 4 波長ライダーによる大気モニタリング

本研究で使用するライダーは、Table 1 のような仕様になっている。対流圏エアロゾルの基礎データ収集を目的とし、NOAA12、14 の千葉地域上空通過時刻に定時観測を行っている。

ライダーによって得られたデータから、消散係数 α や光学的厚さ τ といった物理量を抽出するには、大気中のエアロゾル分布に距離依存性がある場合は Klett、Fernald 法が使用される。これらの解法では、ライダー方程式において含まれる 2 変数、後方散乱係数 β と消散係数 α の間に線形関係を仮定し解を求める。このとき、線形関係は高度によらず一定としている。Klett 法は、大気が混濁し、光の減衰はエアロゾルのみに起因するとの仮定のもとでの解であるのに対し、Fernald 法は空気分子によるレイリー散乱も考慮した解である。しかし、それらは共に遠方に境界条件を置いて解く手法であるため、必然的に初期値に誤差を含むことになり、ライダーのデータ単独で消散係数の真値を導出することは困難である。さらに、実際の大気においては、 α 、 β 間の線形関係に距離依存性があることも消散係数の不確定性の要因となる。そのため、導出された消散係数の検定として、大気に雲がない場合、サンフォトメーターで観測された τ との比較が行われる(これに関しては、本シンポジウムにて汝剣飛(千葉大、CEReS)が講演)。これらの手順を経た後、層状大気モデルにもとづく MODTRAN など実際のエアロゾルデータを代入することで大気補正の計算が行われる。ライダー観測の一例として、千葉大学上空で得られた A-scope 信号と Fernald 法により導出された消散係数分布と光学的厚さを Fig.6 に示す。

5. おわりに

LOWTRAN7 および MODTRAN3 を使用したシミュレーションにより、衛星の可視域データには対流圏エアロゾルが深く関与していることが示された。また、Fig.6 で示されたように消散係数は高度依存性が高く、層状大気モデルを用いて大気補正を行うにはライダーによる大気情報収集が有効であることが示された。

地表面アルベドを算出するためのアルゴリズムの開発及び、ライダーで得られた消散係数の検定が今後の課題となる。

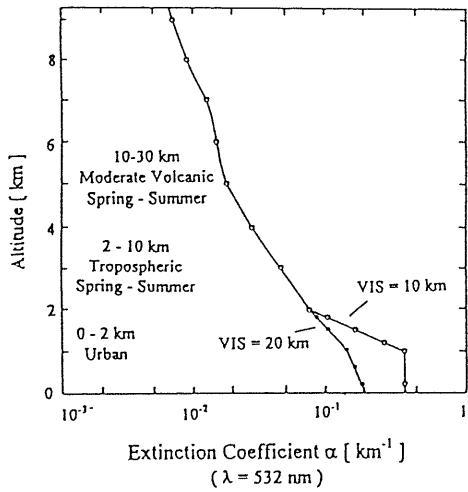


Fig.1 Effect on Extinction Coefficient of Ground Visibility (LOWTRAN-7)

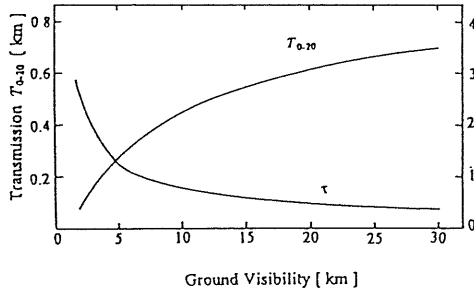


Fig.2 Variation of Transmission and Optical thickness with the Ground Visibility (LOWTRAN-7 Simulation for TM Band2 0.53 - 0.61μm)

$$L = L_{PM} + L_{PS} + L_{GI} + L_{GD}$$

$$L_{GD} = (E_{ext}/\pi) T T' \rho \cos \theta_z$$

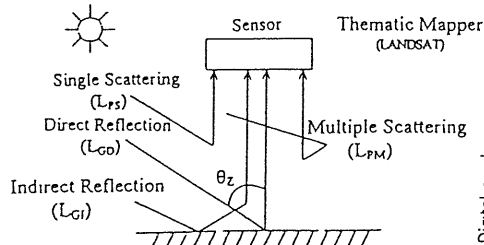


Fig.3 Four Components of the Sensor Signal

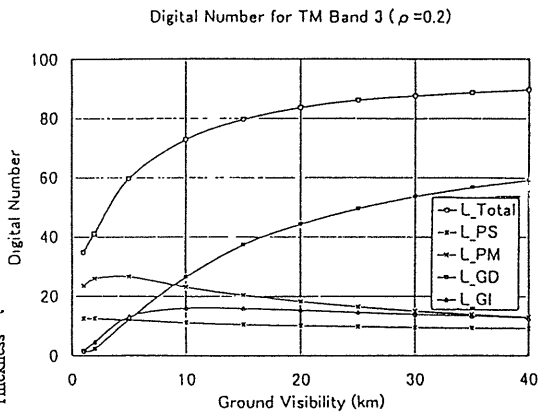
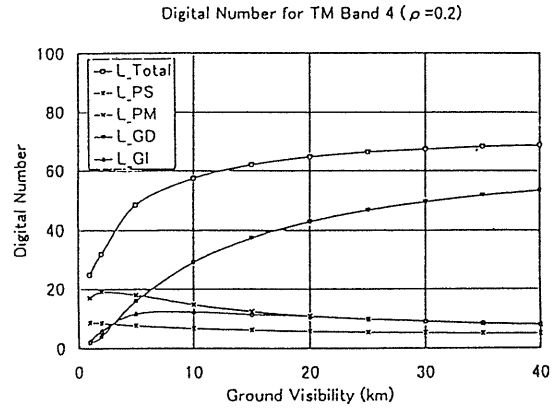
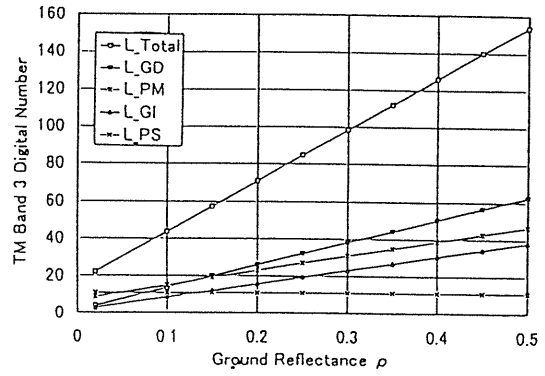


Fig.4 Effect on Four Component of the Sensor Signal of Ground Visibility

Radiance vs Ground Reflectance (TM Band 3: VIS = 10 km)



Radiance vs Ground Reflectance (TM Band 4: VIS = 10 km)

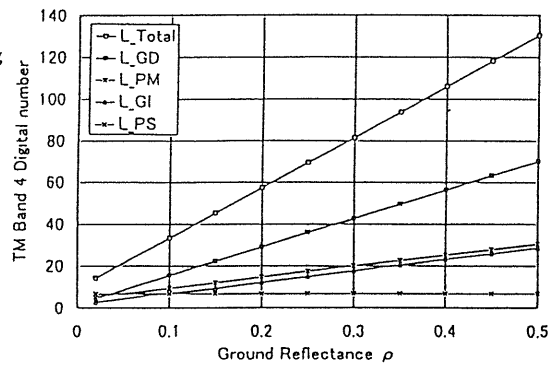


Fig.5 Effect on Four Component of the Sensor Signal of Ground Reflectance

Table 1 Specification of Four-wavelength lidar

LASER	Fundamental, second harmonic, and third harmonic frequency of a Nd:YAG laser, Ti:Al ₂ O ₃ laser pumped by a Nd:YAG laser (SH)			
WAVELENGTH(nm)	1064	756	532	355
LASER	Nd:YAG	Ti:Al ₂ O ₃	Nd:YAG(SH)	Nd:YAG(TH)
Repetition Rate	10Hz			
Pulse Energy(mJ)	500	120	300	160
Beam Divergence	<0.5mrad			
Output Stability	Better than 5% (RMS)			
Polarization Accuracy	Horizontal / Purity : better than 99%			
Pointing Accuracy	<0.1mrad / Remote Control			
TELESCOPE	Newtonian; Vertical Looking			
Diameter	0.8 m	Effective mirror area		0.47 m ²
FOV	0.5 - 10 mrad 2mrad: standard			
Scanning.	Separate scanner with an effective area of 0.2 m ²			
EFFICIENCY of OPTICS	0.3			
DETECTOR	APD	PMT	PMT	PMT

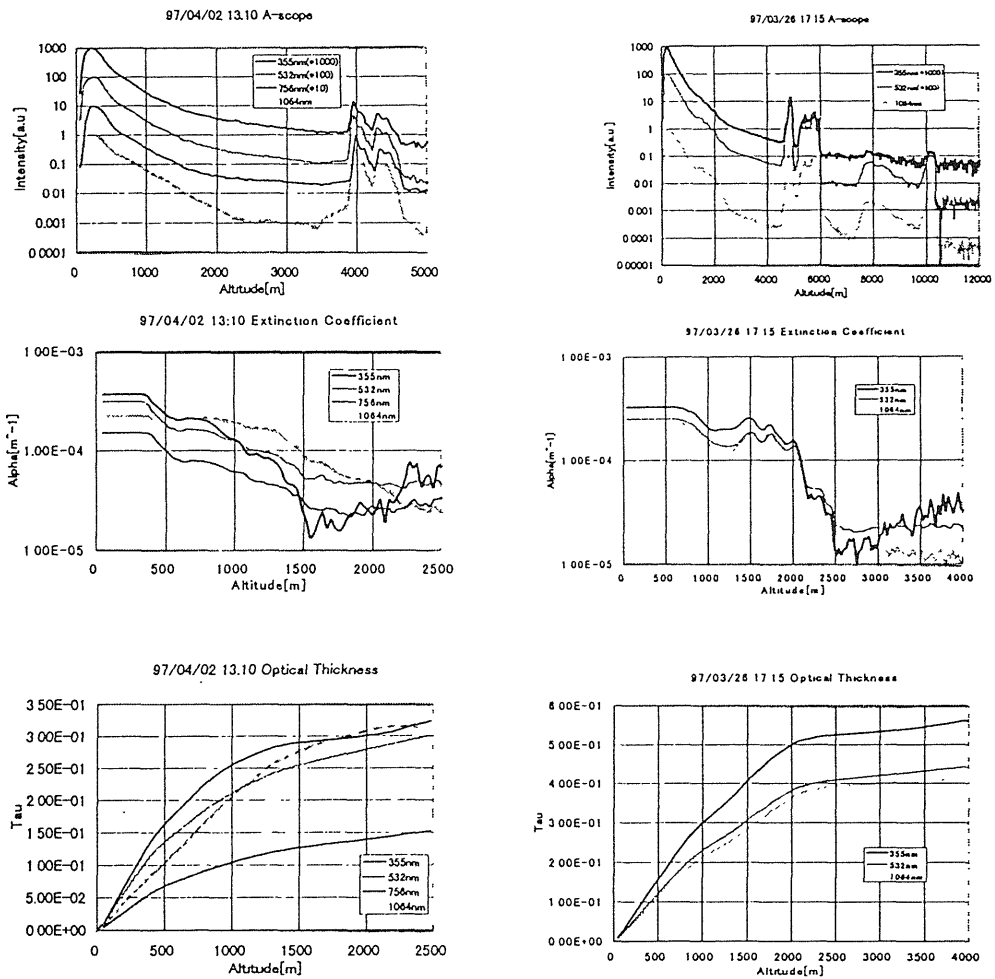


Fig.6 Lidar signals measured with multi-wavelength lidar on 2 April 1997 and on 26 March in Chiba, Japan. Each signal is an average of 4000 shots. Fernald's inversion method is used to derive the extinction coefficient. The extinction/backscattering ratio is 30.