

## 衛星画像を用いた千葉周辺における広域的エアロゾル光学特性の導出

朝 隈 康 司  
東京農業大学 生物産業学部  
北海道網走市八坂 196 (〒099-2493)

### Determination of aerosol optical properties over land in and around Chiba from satellite data

Koji Asakuma  
Faculty of Bioindustry, Tokyo University of Agriculture  
196 Yasaka, Abashiri 099-2493

Tel: 0152-48-3869, Fax: 0152-61-5111, E-mail: k-asakum@cp.bioindustry.nodai.ac.jp

#### 1. はじめに

可視、近赤外域の衛星リモートセンシングにおいて、高精度な地上観測をおこなうためには、地表面-衛星間に存在する大気（分子、浮遊物質（エアロゾル））による影響を取り除く必要がある。これを大気補正と呼ぶが、近年、センサの高解像度化、高波長分解能化が進んできており、とくに短波長域で周縁効果をおこすエアロゾルの補正が重要である。エアロゾルの補正をおこなうには、波長ごとのエアロゾル光学的厚さ(AOT)とその波長依存性(エアロゾルモデル、以下モデルと略す)を知る必要がある。これまで、衛星画像におけるエアロゾル光学特性に関する研究は、サンフォトメータやサンプリングなどのトゥールズデータ取得には、予算や人的資源が掛かることから、衛星画像1シーン中1つのエアロゾルモデルを仮定し、またAOTも一様と仮定することによりおこなわれてきた。しかしながら現実には、エアロゾルの性質は時間的、空間的に変化が激しく、正確な衛星観測をおこなうには各シーン中の各画素単位でエアロゾルの光学特性を知る必要がある。このため本研究は、衛星画像のみを用いてAOTとモデルを同時に決定するアルゴリズムを検討したものである。

#### 2. 解析方法

##### 2.1 エアロゾルモデルの作成

放射伝達コード 6S (second simulation of satellite signal in solar spectrum) で用いられるエアロゾルモデル (urban, continental (rural), maritime) は通常、対数正規分布で示される。各峰は WMO-WPC112 の構成要素 (dust, oceanic, water soluble, soot) が用いられ、6S 中で各モデルは、構成要素の中の 2~3 成分の存在比によって表現される。1997 年に実施された関東浮遊粒子状物質合同調査から得られた化学組成より

作成されたエアロゾルの光学特性は、大陸型と都市型の中間的なものであると報告がある(関東モデル)<sup>1)</sup>。Table.1 に WMO モデルの構成比を示す。Table を見ると、全てのモデルにおいて、water soluble の寄与が大きい。以上 2 つの点から、大陸型モデル中の water soluble の粒径  $R_M$  を  $1.0 \times 10^{-4} \mu\text{m}$  から  $1.0 \mu\text{m}$  まで変化させてモデルを作成する (Figure.1 参照)。

##### 2.2 参照アルベドについて

大気補正は、衛星等大気上端で観測された観測値と AOT、モデルから地表面反射率を算出する。一方、逆に地表面反射率と衛星観測値が既知であれば、AOT やモデルを推定することができる。このとき用いる広域の地表面反射率分布図を参照アルベドマップと呼ぶ<sup>2)</sup>。参照アルベドには、地上観測された AOT 値が非常に低く大気が清浄な衛星観測値を補正したものや<sup>3)</sup>、地上被覆分類により求められた物質の反射率を用いるものがある<sup>2)</sup>。本研究では前者を利用し、1999 年 1 月 14 日の Landsat/TM 画像を用いた。

##### 2.3 AOT 水平分布図の作成

2.2 で述べたアルベド分布図を用いて、大気補正の逆演算をすることにより AOT 水平分布図が求められる<sup>4)5)</sup>。本研究では、次の手順により 2.1 で作成したエアロゾルモデル毎に AOT 水平分布図を求めた。1) water soluble の粒子半径  $R_M$  を変化させ、各  $R_M$  毎に衛星画像のデジタルナンバー  $C_i$  ( $i$  は TM のチャンネル番号) と、6S にパラメータとして与える波長 550 nm の AOT  $\tau_{550}$  を用いて得られた大気補正後の地表面アルベド  $\rho_c^i$  を求める。2) このとき得られる TM のチャンネル  $i$  での AOT  $\tau_{ch,i}$  と大気補正で得られた  $\rho_c^i$  の関係をデータベースとして保存する。3) 2.2 で用意した参照アルベド  $\rho_c^i$  を用いて各  $R_M$  に対して、

Table.1. the number of particle density percentage for each aerosol model.

	dust	water soluble	oceanic	soot
continental	$2.27 \times 10^{-6}$	$9.38 \times 10^{-1}$	---	$6.17 \times 10^{-2}$
maritime	---	$9.99 \times 10^{-1}$	$4.21 \times 10^{-4}$	---
urban	$1.65 \times 10^{-7}$	$5.30 \times 10^{-1}$	---	$4.10 \times 10^{-1}$

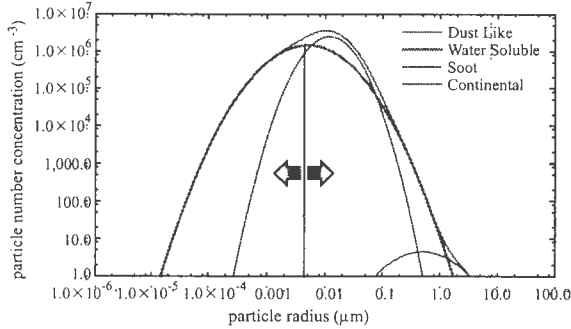


Figure. 1. Log normal size distribution of WMO-WCP continental aerosol model.

2)のデータベースから  $\rho_r^i = \rho_c^i$  となる  $\tau_{ch,i}$  マップを作成する。

### 2.4 エアロゾルモデルの決定

ある1画素に対して、 $\rho_r^i = \rho_c^i$ を満たす  $\tau_{ch,i}$  と  $R_M$  の組は多数存在するが、 $R_M$  で示される1つのエアロゾルモデルで AOT の波長依存性はただ1つ決まるはずである。 $R_M$  によって決定される6S中での各波長のAOTは、波長550nmのAOTで正規化されて表現される。ここで、2.3で得られた各チャンネルにおけるAOTを波長550nmでのAOTで正規化し、6S中で示されるAOT値との差の自乗和を、

$$\varepsilon(R_M) = \left\{ \tau_{485}^{cal}(R_M) / \tau_{550}^{cal}(R_M) - \alpha_{485}^{6S} \right\}^2 + \left\{ \tau_{560}^{cal}(R_M) / \tau_{550}^{cal}(R_M) - \alpha_{560}^{6S} \right\}^2$$

と書くとする。ここで  $\tau^{cal}$  は、2.3で求めたAOT、 $\alpha^{6S}$  は6S中で示される、波長550nmで正規化された消散係数の波長依存性である。このとき、 $\varepsilon(R_M)$  を最小にする  $R_M$  を見つけることによってエアロゾルモデルを決定する。

### 3. 解析結果

Figure 2に1998年12月13日のAOT水平分布図を示す。このFig.2から得られる、各チャンネルのAOT値を用いて、2.4の方法で得られたエアロゾル粒径分布図  $R_M$ -mapをFigure 3 a)に示す。b), c)はa)で示された  $R_M$  での各チャンネルのAOTである。Fig.3 a)から都市域で、 $R_M$ は小さくAOTが大きい傾向があった。今後、複素屈折率を考慮したモデルへの対応や、被覆分類を用いた参照アルベドマップの検討、6S以外の放射伝達コードを検討する予定である。

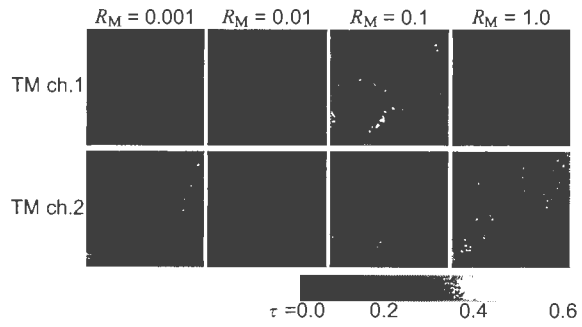


Figure. 2. AOT horizontally distribution with particle radius.

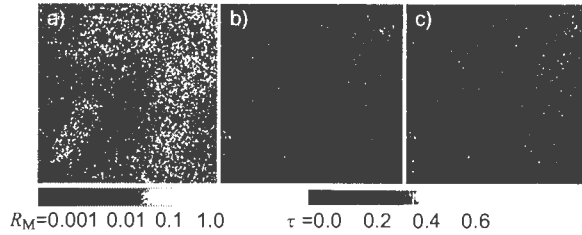


Figure. 3. a)  $R_M$ -map the particle radius distribution on December 13, 1998. b) AOT with  $R_M$ -map from TM ch.1 image. c) from ch.2 image.

### 参考文献

- 1) 矢吹, 内藤, 美濃村, 久世, 竹内, 1999. 化学組成測定から導出される大気エアロゾルパラメータと6Sへの応用, 千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用報告集第4号 "衛星データの大气補正の現状と問題点", pp. 53-56.
- 2) 美濃村, 久世, 竹内, 2004. MODTRAN4シミュレーション参照テーブルを用いたLandsat 7 ETM+画像データの大气補正およびエアロゾル光学的厚さの導出方法, (社)日本リモートセンシング学会第36回学術講演論文集, pp. 59-60.
- 3) Asakuma, K., M. Minomura, S. Otsutsumi, H. Kuze and N. Takeuchi, 2002. Estimation of aerosol optical thickness over land in Chiba area from AVHRR data, Advanced Space Research, Vol.29, No.11, pp.1747-1752.
- 4) 戸館, 美濃村, 久世, 竹内, 2005. LANDSAT-5/TMデータを利用した関東地域の大气補正とエアロゾル分布抽出法, (社)計測自動制御学会第12回リモートセンシングフォーラム, pp. 9-10.
- 5) Minomura M, Y. Todate, H. Kuze and N. Takeuchi, 2005. Retrieval of aerosol optical properties over Chiba land area from Landsat/TM imagery -Part I: Determination of spatial distribution of aerosol optical thickness, Proceedings of The CEReS International Symposium on Radiation Budget and Atmospheric Parameters Studied by Satellite and Ground Observation Data - Toward the Understanding of Long Term Trend in Asia, pp. 58-64.

# 衛星画像を用いた千葉周辺における 広域的エアロゾル光学特性の導出

## — Landsat/TM 画像を用いた エアロゾル粒径の空間分布導出 —

東京農業大学 生物産業学部

朝 隈 康 司

### 1. 研究目的

#### 1.1 背景

- ・ 衛星リモートセンシングにおいて、高精度な地上観測をおこなうには、地表面 - 衛星間の大気（分子、浮遊物質 [エアロゾル]）による影響を取り除く必要がある（大気補正）。
- ・ 近年、センサの高解像度化、高波長分解能化が進んできており、とくに短波長域で周縁効果（滲み）をおこすエアロゾルの補正が重要視されてきている。
- ・ 大気補正をおこなうには、各波長ごのとエアロゾル光学的厚さ（AOT）とその波長依存性（モデル）を知る必要がある。
- ・ エアロゾルは、大気分子と比較して時間的にも空間的にも変動が激しく、1つの衛星画像中でいくつものエアロゾルモデルを考慮する必要がある。⇒ 最大各画素ごと。
- ・ トゥルースデータ（サンフォトメータ、サンプリング）の収集は非常に困難なため、衛星画像そのものからAOTとモデルを概算する必要がある。

# 1. 研究目的

## 1.2 これまでの共同利用研究の流れ

### 第Ⅰ期：周縁効果を考慮した大気補正方法

- ⇒ ・衛星データの示すある広い領域を一様大気と仮定
- ・ライダーデータ（エアロゾル鉛直プロファイル）利用による、周縁効果を含めた大気補正（美濃村 2000 ← Richter 1990）

### 第Ⅱ期：衛星データのみからの AOT 導出

- ⇒ ・海を一様なダークターゲットと仮定  
(汝 2000 ← Kawata 1999, Wang & Gordon 1994)
- ・空間内挿による陸 AOT の推定（朝隈 大堤 2001）
- ・大気のテクスチャ解析（朝隈 2001 ← Christopher 1996）

### 第Ⅲ期：大気の不均質さの評価

- ⇒ ・陸域トゥルースデータ利用による  $\tau$ -map 作成の提案（木村, 根間 2002）
  - ・参照アルベド法による  $\tau$ -map の作成（美濃村 堀口 戸館 2004）
  - ・衛星からのエアロゾル粒径導出の検討（朝隈 2004）
- ⇒ エアロゾル粒径の空間分布導出（本研究 2005）

# 2. 解析方法

## 2.1 解析手順（解析対象：1998年12月13日 Landsat5/TM 画像）

### エアロゾルモデルの作成



・今回は、対数正規分布で示されたエアロゾル粒径分布の粒子半径を変化させて作成。

### $\rho$ -map（参照アルベドマップ）の作成



・大気清浄画像（経年を通じてよく晴れた  $\tau$  (AOT) の低い日の画像）を用いた（1999年1月14日）。

### $\tau$ - $\rho$ グラフの作成



・放射伝達コード（今回は 6S）を用いて、各モデルごとに  $\rho$ （大気補正された地上反射率）と  $\tau$  の関係を求める。

### エアロゾルモデルごとに $\tau$ -map を作成



・大気上端の反射率  $\rho^*$  と参照アルベド  $\rho_c$  から  $\tau$  を求める（大気補正の逆計算）。

### $\tau$ -map の波長依存性と一致するモデルの選択

## 2. 解析方法

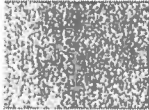
### 2.2 エアロゾルモデルについて

放射伝達計算に用いられるエアロゾルモデル (urban, continental(rural), maritime) は、通常、対数正規分布で示される。各峰は WMO-WPC112 の構成要素 (dust, oceanic, water soluble, soot) が用いられる。

table. Specification for the four basic components: the mean radius  $R_M$ , the standard deviation  $\sigma$ , number concentration  $dN/dV$ , refractive index  $n_r+i n_i$ .

	dust	water soluble	oceanic	soot
$R_M$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.50	$5.00 \times 10^{-3}$	0.30	$1.20 \times 10^{-2}$
$\sigma$	2.99	2.99	2.51	2.00
$dN/dV$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$5.47 \times 10^1$	$1.87 \times 10^6$	$2.76 \times 10^2$	$1.81 \times 10^6$
$n_r$ at 550nm	1.53	1.53	1.38	1.75
$n_i$ at 550nm	$8.00 \times 10^{-3}$	$6.00 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-9}$	$4.40 \times 10^{-1}$

table. The number of particle density percentage for each aerosol model.

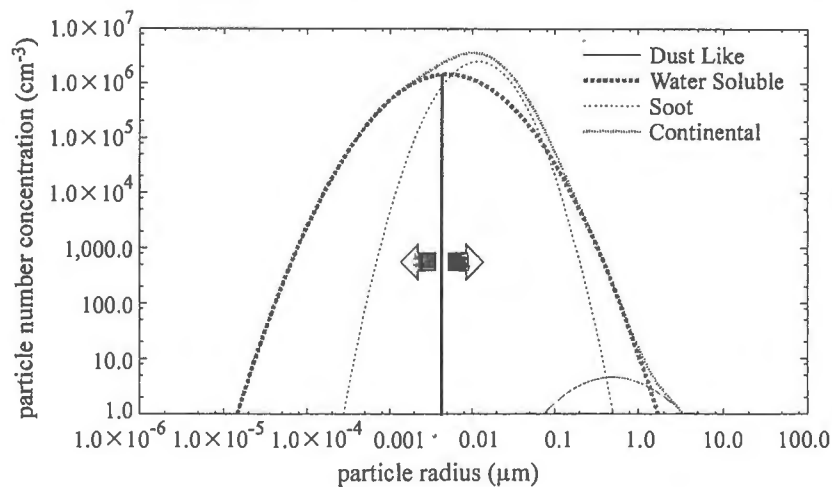
	dust	water soluble	oceanic	soot
continental	$2.27 \times 10^{-6}$		---	$6.17 \times 10^{-2}$
maritime	---		$4.21 \times 10^{-4}$	---
urban	$1.65 \times 10^{-7}$		---	$4.10 \times 10^{-1}$

## 2. 解析方法

### 2.3 エアロゾルモデルの作成

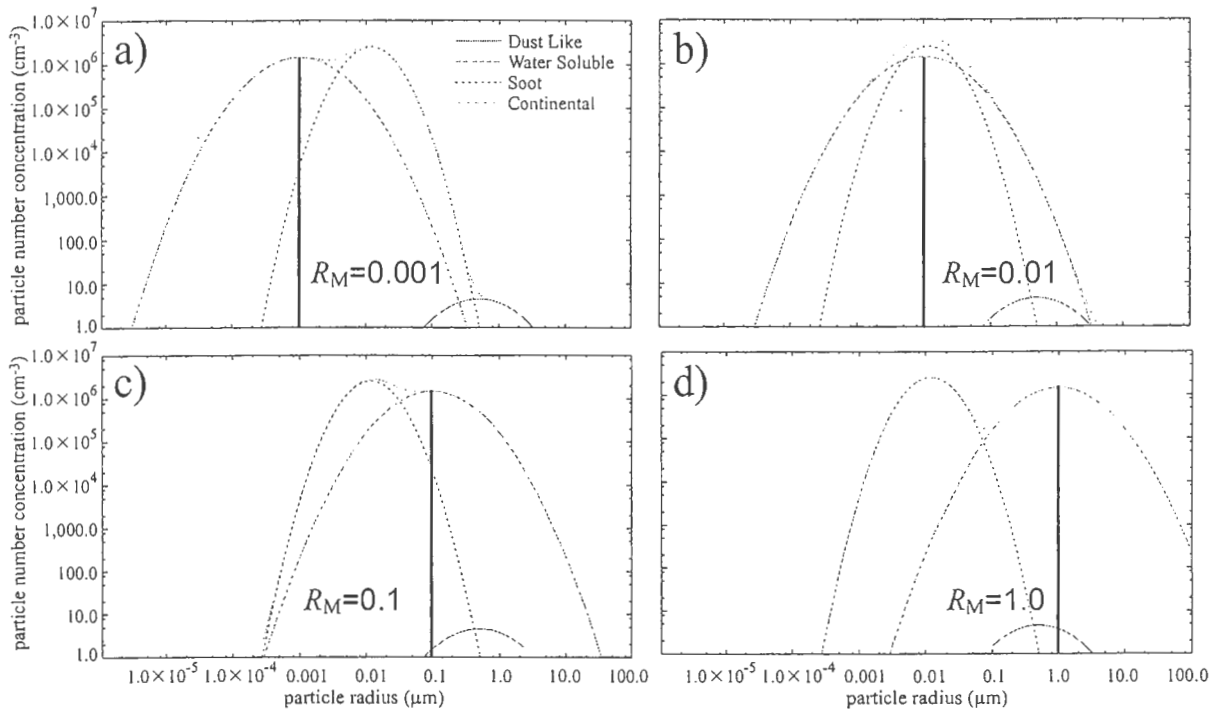
千葉周辺のサンプリングから得られた化学組成 (chemical mass balance) より作成されたエアロゾルの光学特性は大陸型と都市型の中間的なものであると報告がある (関東モデル: 矢吹 1999)。また、2.2 の WMO モデルでは大陸型、都市型モデル共に水溶性粒子 (water soluble) の寄与が大きい。

以上2点から、w.s. の粒径  $R_M$  を変化させパラメータとしてモデルを作成する。



## 2. 解析方法

### 2.4 エアロゾルモデルの例



## 2. 解析方法

### 2.5 参照アルベドマップについて

- ・  $\rho$ -map は、大気効果を受けていない地表面アルベドの水平分布
- ・ グラウンドトゥールズに基づくものが最も適してるが作成は困難
- ・ このため以下の方法で衛星画像から千葉周辺のアルベドマップを作成してきた

#### (1) 大気清浄画像

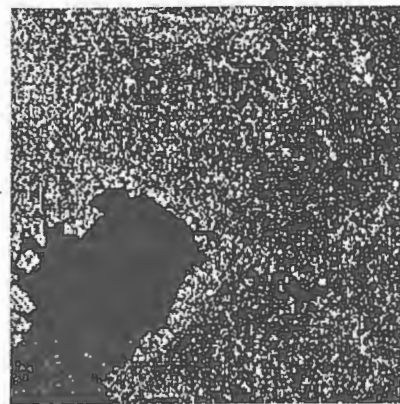
経年的に観測された衛星画像中、サンフォトメータなどで実測された AOT が最も小さいものを大気清浄画像として利用。レイリーのみ大気補正したものや、一様で小さな  $\tau$  を仮定して大気補正したものなど。

#### (2) 被覆分類によるもの

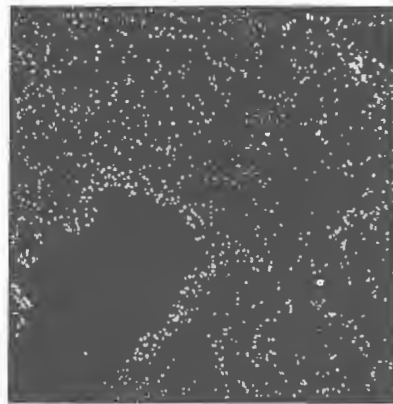
衛星画像や航空機写真を被覆分類し、分類されたアルベドの分布を記述したもの。被覆分類の対象として、これまでに ASTER spectral library (California Institute of Technology) で示される物質から、6 分類 (朝隈 2001)、30 分類 (戸館 2003)、100 分類 (美濃村 2004) などを利用してきた。

## 2. 解析方法

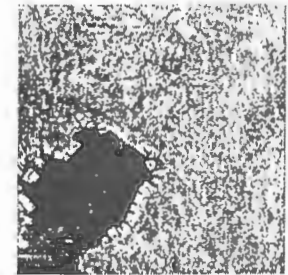
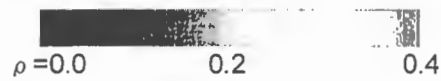
### 2.6 参照アルベドマップの例



1999年1月14日 Landsat/TM ch.1  
( $\tau_{ch1}=0.114$ )



Landsat/TM ch.2  
( $\tau_{ch2}=0.099$ )



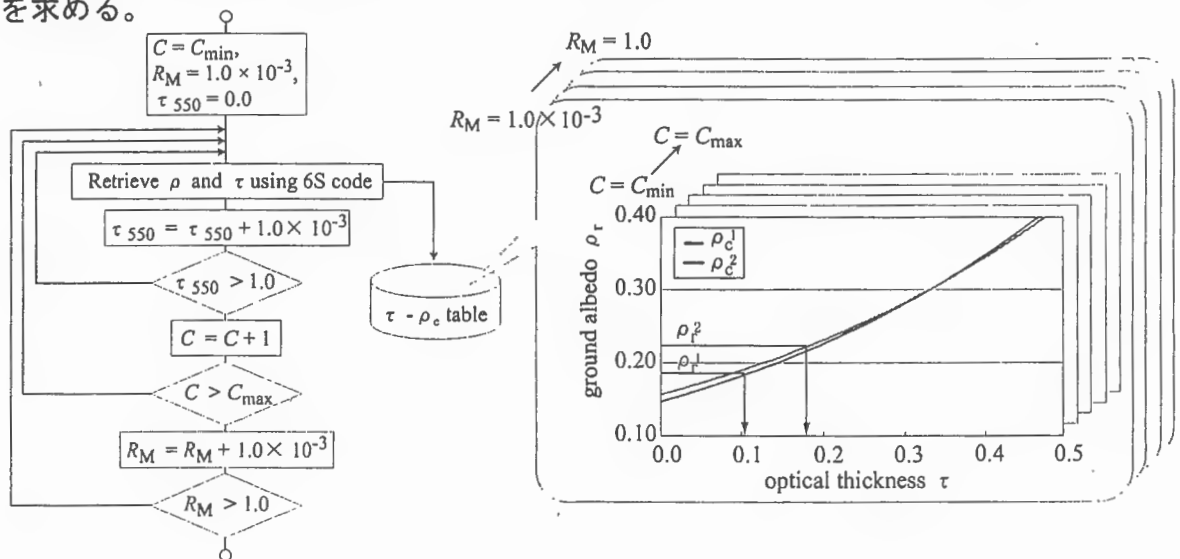
0.0 0.1 0.2

参考：  
2003年9月30日 Landsat7/ETM+ ch.1  
30分類アルベドマップ (戸館 2003)

## 2. 解析方法

### 2.7 $\tau - \rho_c$ グラフおよび $\tau$ -map の作成

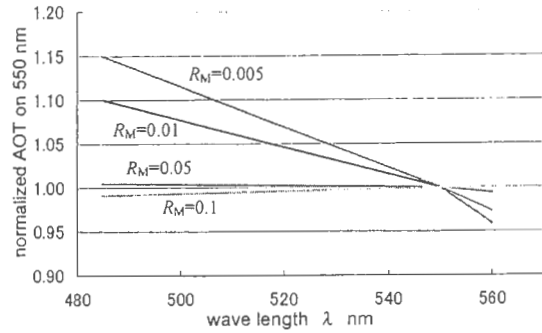
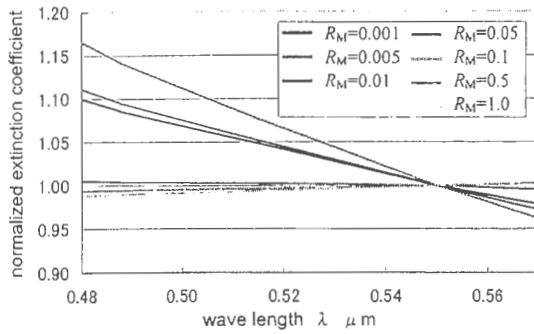
- ・W.S. の粒子半径  $R_M$  を変化させ、各  $R_M$  毎に  $\tau$  と各デジタルナンバー  $C_i$  から得られる大気補正された地表面アルベド  $\rho_c$  を求め  $\tau - \rho_c$  グラフを作成する。
- ・ $\tau - \rho_c$  グラフを用い参照アルベド map で示される  $\rho_r$  を用い、 $\rho_c = \rho_r$  を満たす  $\tau$  を求める。



## 2. 解析方法

### 2.8 エアロゾルモデルの決定

- ・ある1画素に対して、 $\rho_c = \rho_r$ を満たす $\tau$ と $R_M$ の組は波長別に多数存在する。
- ・1つのエアロゾルモデルは、1つの波長依存性を示す。
- ・つまり、2つ以上の波長で波長依存性を同時に満たすモデルは1つ決まる。

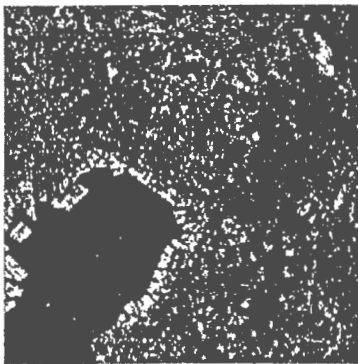


$$\varepsilon(R_M) = \left\{ \frac{\tau_{485}^{\text{cal}}(R_M)}{\tau_{550}^{\text{cal}}(R_M)} - \alpha_{485}^{6s}(R_M) \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_{560}^{\text{cal}}(R_M)}{\tau_{550}^{\text{cal}}(R_M)} - \alpha_{560}^{6s}(R_M) \right\}^2$$

としたとき、 $\min\{\varepsilon(R_M)\}$  となる  $R_M$  をみつける。

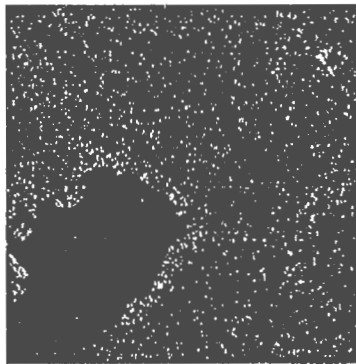
## 2. 解析方法

### 2.9 解析用画像

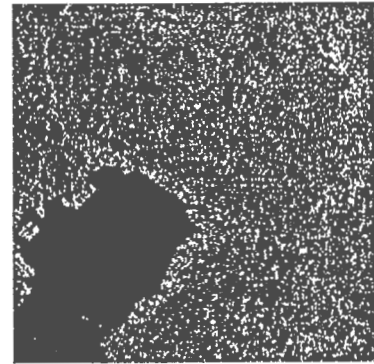


1998年12月13日

Landsat/TM True Color 合成画像



Landsat/TM ch.1



Landsat/TM ch.2

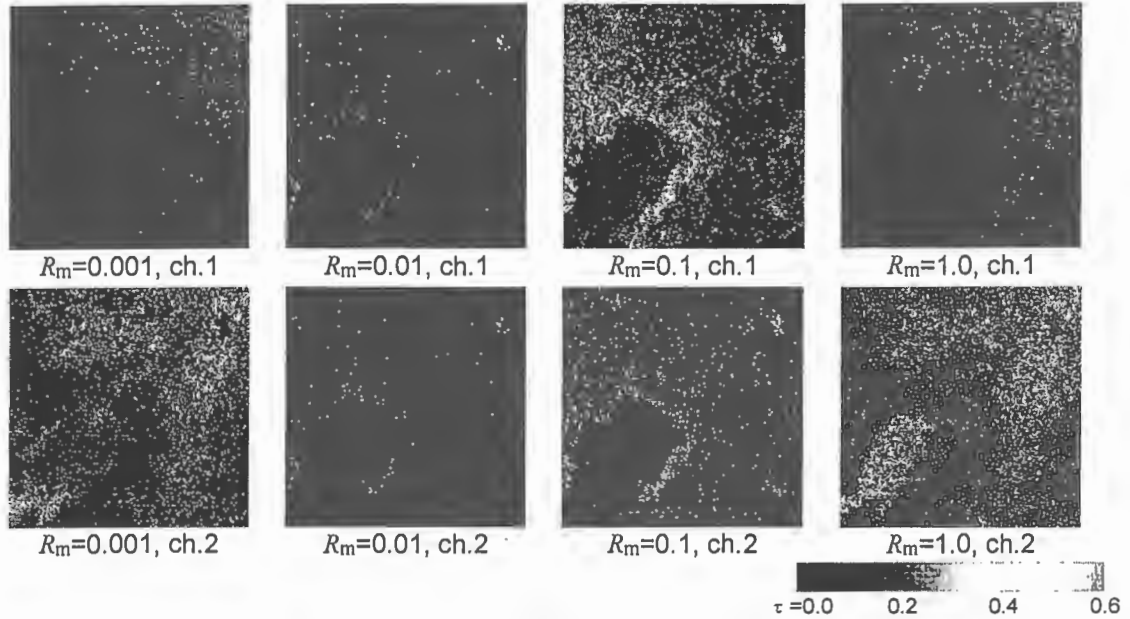




### 3. 解析結果

#### 3.1 粒径別 $\tau$ -map 導出結果

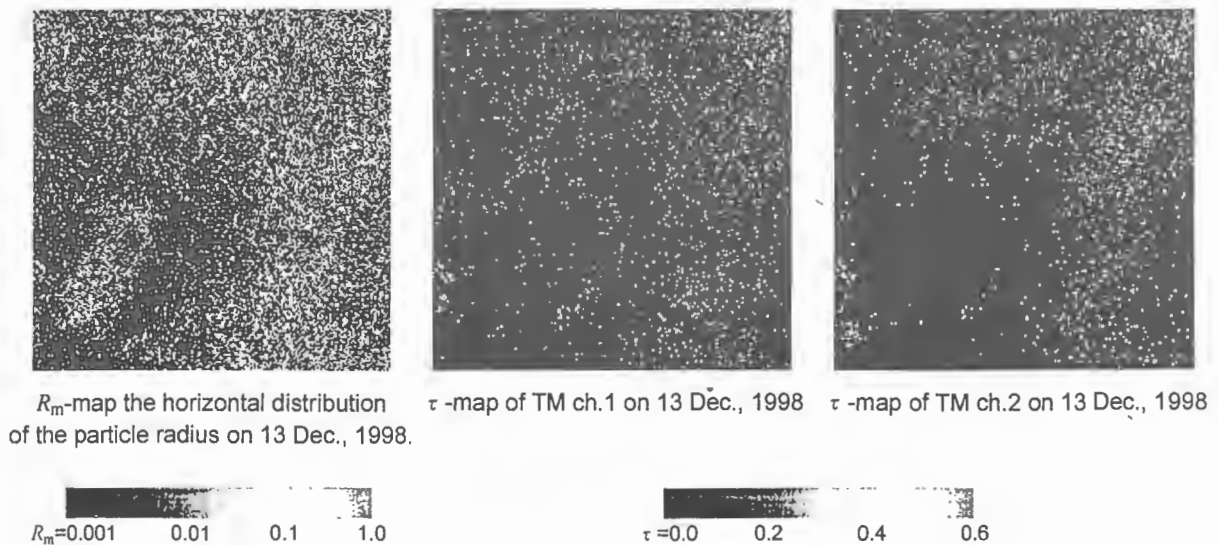
・ 2.6 の参照アルベドマップ (1999 年 1 月 14 日) と 2.9 の解析対象画像 (1998 年 12 月 13 日) から得られた粒径別  $\tau$ -map を示す。



### 3. 解析結果

#### 3.2 粒径分布図 $R_m$ -map 導出結果

・ 3.1 の粒径別  $\tau$ -map から、2.8 の方法を用いて算出した  $R_m$ -map を示す。



## 4. まとめ

### 4.1 結論

衛星画像のみを用いて、AOT とエアロゾルモデルの決定方法を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) エアロゾル粒径を変化させることにより多くのモデルと作成し、参照アルベド画像と衛星画像から AOT 水平分布を算出し、AOT の波長依存性を満足する粒径を導く事によって、AOT とエアロゾルモデル双方を同時に決定するアルゴリズムを提案した
- (2) その結果、千葉周辺のエアロゾルの光学特性は、都市部ほど粒径が小さく、AOT が大きい傾向があった

### 4.2 今後の課題

- (1) 複素屈折率を考慮したエアロゾルモデルへの対応
- (2) クラス分類による参照アルベドの導入と、その精度検証
- (3) 放射伝達コードの見直し：  
→ 今回は 6S を用いたが、MODTRAN やその他のコードの検討