

大気エアロゾルのサイズ分布モデル

横前 拓磨, 中田 真木子, 佐野 到, 向井 苑生

Size Distribution Model for Aerosols

Takuma YOKOMAE, Makiko NAKATA, Itaru SANO and Sonoyo MUKAI

◆ Abstract

Atmospheric aerosols play an important role in the global climate change. However, the characteristics of aerosols as amount, size, composition and shape vary with time and place. Hence estimation of aerosol characteristics from space and/or ground measurements still urgent problems. In this paper, we propose a size distribution function of atmospheric aerosols available for global aerosol models which are derived from the clustering technique with the world-wide AERONET data.

keywords : AERONET, bi-modal size distribution, fine mode ratio, aerosol clustering

◆ 1. はじめに

大気エアロゾルは極微小な粒子であるにもかかわらず、地球規模の気候変動や放射収支に大きな影響を与える。さらに、大気エアロゾルが大量に発生する黄砂現象のようなエアロゾルイベントが起こると、大気環境のみならず社会生活や人間活動、人体健康にまで影響を及ぼす。大気エアロゾルの実体把握は非常に重要な課題といえる。しかし、大気エアロゾルの量や形や組成は、時により場所により大きく変化する。大気エアロゾル特性を把握するためには、広範囲にわたり継続的に観測する必要がある。今日では、観測機器の改良や計算速度・精度の向上、導出手法の精密化により、世界規模で大気エアロゾルの高精度データが蓄積されている¹⁾。また衛星搭載放射計による遠隔観測も実施されている。

衛星リモートセンシングでは、通常太陽を光源として大気(雲, エアロゾル, 分子) 散乱や地球表面反射, あるいは吸収過程を繰り返した光を衛星搭載センサが観測する²⁾。従って、エアロゾルの大きさや化学組成, 量や形状といった特性を組み合わせた粒子モデルを含む地球大気モデルにおいて多重散乱光シミュレーションを実施し, 衛星取得データと比較照合して最適なエアロゾルモデルを導出する³⁾。これをエアロゾル・リモートセンシング或いはエアロゾル・リトリーバルとも言う⁴⁾。

大気エアロゾル特性は季節, 場所により大きく変化するため, 高精度なエアロゾル・リトリーバルを実現するのは難しい。このため, 偏光データの活用⁵⁾ や, エアロゾルタイプを大きく分類しておいて, タイプ別にあらかじめ予想可能な特性モデルを用意する方法⁶⁾ 等, 様々な工夫が凝らされている。本研究では, このタイプ分類法に基づいて大気エアロゾル特性のうち大きさに焦点を当てて, エアロゾル・リトリーバルの効率向上に

有効なサイズ分布モデルを提案する。

◆ 2. 大気エアロゾルの分類

NASA/GSFC が中心となり地球規模で展開している大気エアロゾルの自動観測網 (AERONET: AERosol RObotic NETwork) では, 標準化された観測機器, 校正方法, 導出アルゴリズムを用いて, 1998 年から継続して大気放射観測を実施している¹⁾。

本節は Omar et al が実施した, AERONET データに基づく大気エアロゾル分類について紹介する⁷⁾。Omar et al は 1998 年から 2005 年までの AERONET データから導出した 26 種類のエアロゾル光学 / 物理的特性を用いて k-means 法クラスタ分析を行い, 全世界の大気エアロゾルを 6 種類に大分類した。使用したパラメータは, 波長 0.441, 0.673, 0.873, 1.022 μ m における屈折率と吸収率, ミー散乱計算^{8,9)} から算出したアルビド, 非対称性, 消散 / 散乱係数の比, さらにサイズ分布モデルを構成するモード半径, 標準偏差, モード体積である。サイズ分布には AERONET データと最もよくフィットするバイモーダル対数正規分布を採用している。即ち, 小粒子 (fine) モードと大粒子 (coarse) モードを持ち, それぞれのモードは 3 種類のパラメータで定義されている。サイズ分布に関する詳細な説明は次節に譲る。

クラスタ分析法では, これら 26 種類の特性パラメータから性質の似たデータをまとめた部分集合 (クラスタ) を形成する。形成されたクラスタそれぞれを 1 つの分類カテゴリとし, カテゴリを代表する特性値はクラスタに所属するデータすべての特性ごとの平均値が用いられ, クラスタ中心とも呼ばれる。クラスタ分析を実施する前に, AERONET 全データの平均値 (m) と標準偏差 (σ) を求め, 平均値から大きく外れたデータは対象外として除外している。また初期クラスタ中心は $\{m - \sigma$ と $m + \sigma\}$ の間からランダムに選んでいる。クラスタの形成には k-means 法が用いられている。この手法では, データの分類とクラスタ中心の更新という 2 つの工程を繰り返すことでクラスタを形成する。ここでは, あるクラスタ (j) の特性 (i) の平均を $c_j(i)$, 標準偏差を $\sigma_j(i)$ と表現する。データの分類では, 次式で表されるクラスタ中心と各データのユークリッド距離 (d_j) を求める。

$$d_j = \sum_{i=1}^{26} \frac{\text{data record}(i) - c_j(i)}{\sigma_j(i)^2}, \quad j = 1, k \quad (1)$$

k はあらかじめ決めておいたクラスタ数である。そして d_j が最も小さいクラスタにデータが分類される。こうして性質の似通

ったデータが集められる。新たに形成されたクラスタ中心と旧クラスタ中心の差が指定した収束条件を満たすまでデータ分類を繰り返す。

収束条件を0.1%とし、クラスタの数を変えて分類を繰り返した結果、k=6が最適となった。すなわち、AERONETが網羅する大気エアロゾルデータは6カテゴリに分類された事になる。さらに、各カテゴリの特性値から desert-dust, biomass burning, rural/background, polluted continental, polluted marine, dirty pollution の6種類のエアロゾルタイプが対応付けられている (Table1 参照)。カテゴリ1が desert-dust タイプに対応付けられた根拠として、①粒径の大きな粒子が多い、②カテゴリ1に分類されたデータを30%以上含む観測サイトが砂漠付近に集中している、③複素屈折率データの値¹⁰⁾が挙げられている。

次節では、この分類結果を基としたエアロゾルサイズ分布について考察する。

◆ 3. エアロゾルのサイズ分布

◆ 3.1 サイズ分布関数

大気エアロゾル解析の基本量である一回光散乱位相関数の計算には、粒子サイズを指定しなければならない。現実の大気エアロゾルの大きさは変幻自在で様様ではないため、一般に大気エアロゾルのサイズは正規分布やガンマ分布、指数分布などの確率分布関数を用いて表現する。エアロゾルの一回光散乱位相関数の計算には単位体積当たりの粒子数(N)のサイズ(半径:r)分布が使われる¹¹⁾。小粒子から大粒子まで幅広く分布する大気エアロゾルのサイズ分布を表現するには、次式で表される対数正規分布が有用である。

$$\frac{dN}{d \ln r} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right] \quad (2)$$

変数 N_0 , r_g , σ_g は対数正規分布の形状を決めるパラメータでモードの高さ、モード半径、標準偏差を表す。このモデルは、モード半径値に集中する分布を表現するのに適している。また、モード数を増やすことで複雑なサイズ分布も表現することができる。但し、小さな粒子と大きな粒子が混じり合っている分布を表現する場合、個数分布を用いると小粒子ばかりが強調されてしまう。そこで、通常は個数分布ではなく次の体積(V)分布関数表示を用いる事が多い¹²⁾。

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{V_0}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right] \quad (3)$$

V_0 , r_m , σ_g は、モード体積、モード半径、標準偏差を表す。個数分布関数と体積分布関数は次の関係にある¹²⁾。

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{4}{3} \pi r_g^3 \frac{dN}{d \ln r} \quad (4)$$

このとき平均半径(r_m)とモード半径(r_g)は

$$r_g = r_m \exp \left[-\frac{3 \ln^2 \sigma_g}{2} \right] \quad (5)$$

で表される。またモード体積(V_0)と個数(N_0)は次の関係で表される。

$$V_0 = \frac{4N_0\pi}{3} r_g^3 \exp \left[\frac{9 \ln^2 \sigma_g}{2} \right] \quad (6)$$

◆ 3.2 サイズ分布の近似モデル

2節で紹介したAERONETデータから6分類された大気エアロゾルタイプのサイズは、いずれも2つ山のバイモーダル対数正規分布に従う。サイズ分布は小粒子(fine)と大粒子(coarse)の2ヶ所にモードを持ち、6つのパラメータで記述される (Table 1 参照)。

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{V_f}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_f} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_f)^2}{2 \ln^2 \sigma_f} \right] + \frac{V_c}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_c} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_c)^2}{2 \ln^2 \sigma_c} \right] \quad (7)$$

V_f , r_f , σ_f , V_c , r_c , σ_c はそれぞれ、小粒子モードと大粒子モードのモード体積、モード半径、標準偏差を表している。ここで提案する近似的エアロゾルサイズ分布モデルもAERONET分類に従い、2つ山対数正規分布を仮定する。ただし、衛星からのエアロゾル・リトリバルを想定して、できうる限り簡潔な記述を目指す。そのために2つ山それぞれのモード半径と標準偏差を固定する。モード半径は6カテゴリそれぞれのモード半径の平均値(r_f, r_c)=(0.143 μ m, 3.421 μ m)を採用し、標準偏差は最大範囲をカバーする(σ_f, σ_c)=(1.861 μ m, 2.339 μ m)とする。Table1の最下段にこの近似分布のモード半径および標準偏差を示す。サイズ分布は小粒子比率(f)を用いると(V_f, V_c)=(f, 1-f)と表わせる。これより大気エアロゾルのサイズ分布モデルは小粒子比率(f)のみを用いて

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{f}{\sqrt{2\pi} \ln 1.861} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln 0.143)^2}{2 \ln^2 1.861} \right] + \frac{(1-f)}{\sqrt{2\pi} \ln 2.339} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln 3.421)^2}{2 \ln^2 2.339} \right] \quad (8)$$

と表現できる。

◆ 3.3 比較および考察

前節の式 (8) で提案したモデルは、小粒子比率 (f) のみを用いて大気エアロゾルのサイズ分布を表現するものである。本近似モデルの基となったのは、AERONET データを分類処理して導出した 6 種類のエアロゾルタイプのサイズ特性である。従って近似サイズ分布 (8) 式は、基となった 6 種類のエアロゾルサイズ分布それぞれの代表として充分よく代替表現できなくてはならない。両者のサイズ分布を比較するにあたり、パラメタとして小粒子比率 f を 0.00 から 1.00 まで 0.02 の間隔で変化させた。各エアロゾルカテゴリと最適一致した f の値は、desert dust = 0.20, biomass burning = 0.32, background / rural = 0.38, polluted continental = 0.50, polluted marine = 0.24, dirty pollution = 0.48 であった。Fig.1 に各カテゴリのサイズ分布 (実線) とそれぞれにフィットする f 値を用いた近似サイズモデル分布 (点線) を示す。グラフ表記に当たり、小粒子モードをそろえて表現している。

◆ 4. まとめ

ここでは、大気エアロゾルのサイズ分布としてバイモーダル対数正規分布を採用し、エアロゾル・リトリバーの効率向上を想定して、できうる限り簡潔な表現を試みた。地球規模の大気エアロゾルを、AERONET データの統計処理に基づいて 6 種類に分類した Omar et al.⁷⁾ の大気エアロゾルタイプに準拠して、2 つ山それぞれのモード半径と標準偏差を決定し、小粒子比率 (f) をパラメタとするサイズ分布関数 (8) を提案した。また、逆に式 (8) を採用する事で、大気エアロゾルのサイズ分布を小粒子比率 (f) のみで近似的に表現できる事を示した。

本サイズ分布関数を採用する事によって、地球大気モデルにおいて膨大な多重散乱光計算を要する黄砂イベント時における衛星からのエアロゾル・リトリバーを効率的に実施できた¹³⁾。

謝辞: 地上観測データは NASA/AERONET チームより提供されたものです。本研究の一部は平成 23 年度宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の受託研究 (JX-PSPC-335638) ならびに科研費新学術領域研究「粒子人間植物影響」(no. 23120708) の助成を受けました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, and A. Smirnov: AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, Remote Sensing of Environment., 66(1), pp.1-16, 1998.
- 2) 竹内延夫 (編): 地球大気分光リモートセンシング, 学会出版センター, 東京, 2001.
- 3) S. Mukai, I. Sano, K. Masuda and T. Takashima: Atmospheric correction for ocean color remote sensing: Optical properties of aerosols derived from CZCS imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30 (4), pp. 818-824, 1992.
- 4) Y. J. Kaufman and D. Tanré: Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS, Algorithm Theoretical Basis Documents (ATBD-MOD-02), pp.1-85, 1998.
- 5) 向井 苑生, 佐野 到, 高島 勉, 増田一彦: POLDER データを用いたエアロゾル特性の導出 2.OCTS データとの複合利用, 日本リモートセンシング学会誌, 17(5), pp.47-52, 1997.
- 6) O. Dubovik, B. N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré and I. Slutsker: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, Journal of the Atmospheric Sciences, 59 (3), pp. 590-608, 2002.
- 7) A. H. Omar, J. G. Won, D. M. Winker, S. C. Yoon, O. Dubovik and M. P. McCormick: Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements, Journal of Geophysical Research, 110 (10), pp. 1-14, 2005.
- 8) H. C. Hulst: Light scattering by small particles, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1957.
- 9) C. F. Bohren and D. R. Huffman: Absorption and scattering of light by small particles, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1983.
- 10) E. P. Shettle and R. W. Fenn: Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties, AFGL-TR-79-0214, Air Force Geophysics Laboratory Hanscom AFB MA, 1979.
- 11) J. E. Hansen and L. D. Travis: Light scattering in planetary atmospheres, Space Science Reviews, 16 (4), pp. 527-610, 1974.
- 12) L. A. Remer and Y. J. Kaufman: Dynamic aerosol model: Urban/industrial aerosol, Journal of Geophysical Research, 103 (12), pp. 13859-13871, 1998.
- 13) S. Mukai, T. Yokomae, I. Sano and M. Nakata: Multiple scattering in a dense aerosol atmosphere, Atmospheric Measurement Techniques (in press).

Category	Aerosol Type	fine		coarse	
		r_m (μm)	σ	r_m (μm)	σ
C-1	desert dust	0.117	1.482	2.834	1.908
C-2	biomass burning	0.144	1.562	3.733	2.144
C-3	background/rural	0.133	1.502	3.590	2.104
C-4	polluted continental	0.158	1.526	3.547	2.065
C-5	polluted marine	0.165	1.611	3.268	1.995
C-6	dirty pollution	0.140	1.540	3.556	2.134
approximate-form		0.143	1.861	3.421	2.339

Table 1 Size distribution parameters of each aerosol category derived from AERONET (refer to Omar et al.⁷⁾ data.

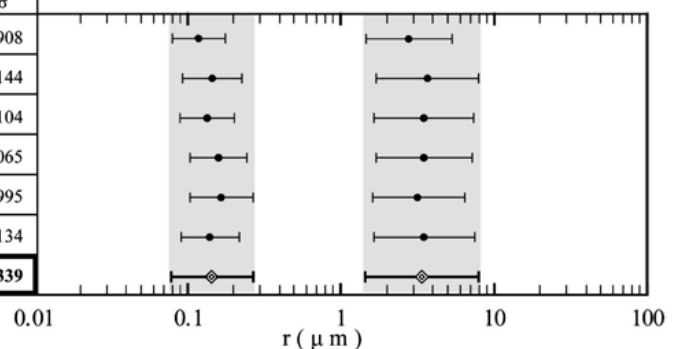
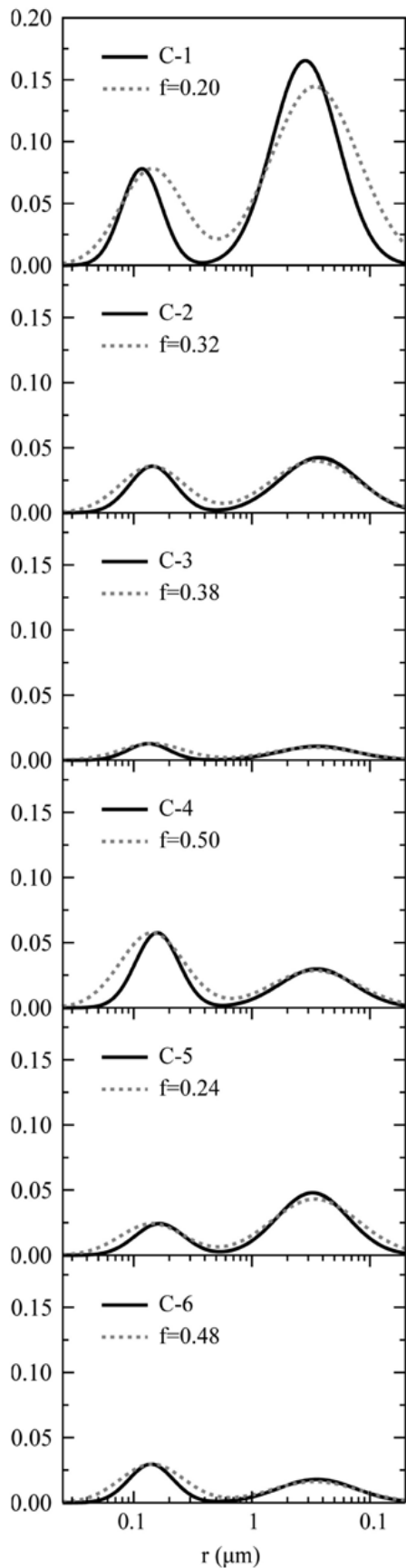


Fig.1 Same as Table 1 but for volume distribution function, where the solid and dotted curves represent aerosol category by Omar et al.7) and the approximate form, respectively.



横前 琢磨
Yokomae Takuma

近畿大学大学院総合理工学研究科博士後期課程在学 修士 (工学)。情報学会会員。

中田 真木子
Nakata Makiko

近畿大学総合社会学部講師。東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修了, 博士 (理学)。元 東京大学気候システム研究センター, 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 研究員。これまで, 大気環境解析, 数値モデルシミュレーションの研究に従事。

佐野 到
Sano Itaru

近畿大学理工学部情報学科教授, 博士 (工学)。衛星データ解析, 大気環境モニタリングの研究に従事。日本リモートセンシング学会, 米国 IEEE/GRSS, JAXA/GCOM-C/SGLI-WG, NIES/GOSAT/CAI-WG 各委員。

向井 苑生
mukai sonoyo

近畿大学理学部教授。京都大学大学院博士課程修了。理学博士。金沢工業大学助教授, 教授を歴任。