

フラクタル形状 biomass burning エアロゾルの光散乱特性の研究

岡田 靖彦⁽¹⁾, 向井 正⁽¹⁾, イングリッド マン⁽¹⁾, 佐野 到⁽²⁾, 向井 苑生⁽²⁾

1 : 神戸大学 大学院自然科学研究科 2 : 近畿大学 理工学部 情報学科

e-mail: yasokada@gmail.com

研究の背景・目的



Forest Fire

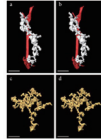
森林火災などで生じるエアロゾル粒子の光散乱および吸収特性は数値シミュレーションにおいていまだ十分に研究がされていない。その理由として、**粒子が非球形である点、およびその非球形粒子の吸収特性を計算する手法の確立がいまだ十分なされていない点**があげられる。

Biomass burning エアロゾルの粒子形状に関しては van Poppel ら (2005) の研究により粒子形状の 3D 形状が研究され、それは**構成粒子数が数千までであるフラクタル次元が 2 程度のフラクタル形状としてモデル化**される。

Mackowski and Mishchenko(1996) は球の光散乱計算手法を拡張することにより、クラスター形状の光散乱計算の手法 (**Cluster T-matrix 法**) を開発した。

Li and Mishchenko(2005) は Cluster T-matrix 法を用いて**計算資源の制約より構成粒子数 400 程度までの soot 粒子の光散乱特性を計算しているが、実際のエアロゾルの構成粒子数の対して十分な数ではないと考えられる。**

本研究では Okada et al. (投稿中) による手法で**構成粒子数数千まで取り扱ったより現実的な soot 粒子の光散乱特性について調査した。**



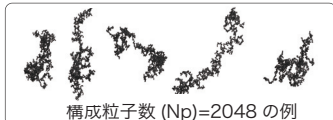
3D visualization of soot nanoparticle aggregate determined from TEM image (Fig.2 of van Poppel et al. 2005)

soot エアロゾルモデル

形状: BCCA

小サイズのクラスター
同士による衝突成長

フラクタル次元
1.93+0.07



構成粒子数 (Np)=2048 の例

各構成粒子数 (Np) に対して 25 種類の形状を調査

光学定数: m @ 波長 $\lambda=0.628 \mu\text{m}$

a) $m=2.0+i$ (soot G model from Fuller et al. [1999])

b) $m=1.75+0.435i$ (soot from d' Almeida et al. [1991])

サイズパラメータ: X

$$x=2\pi r/\lambda$$

r: 粒径 λ : 波長

波長 $0.628\mu\text{m}$, 構成粒子半径 $0.02\mu\text{m}$ の場合

構成粒子のサイズパラメータ (X_m) は 0.2 程度

クラスター状粒子の光散乱計算

-) CTMT (Cluster T-matrix method)



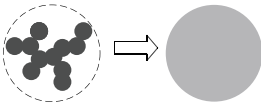
Mie 理論を拡張し個々の粒子による散乱成分の重ね合わせにより、cluster 状粒子の散乱特性を厳密に計算する方法 (Mackowski and Mishchenko, 1996)

粒子数の増加、粒子サイズの増大に対して散乱関数の展開項を増やすため計算資源により制限が生じる

$X_m=0.5$ の場合 $N_p=512$ まで

a) MG-Mie (Maxwell-Garnett + Mie)

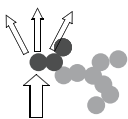
(Mukai et al. 1992)



非球形粒子を有効な屈折率を持つ球に置き換え、Mie 理論で計算

構成粒子の前方散乱が微小となる小粒子に対して精度がよい

b) CTMT+GAM (Grouping and Adding)



構成粒子の前方散乱特性を考慮することにより同時に計算する構成粒子数をおさえる手法

(Y.Okada et al., submitted to JQSRT)

上記により CTMT 法の計算における線形方程式の数を減らすことにより、計算メモリ制限、方程式の解法の不安定性を抑える

構成粒子の前方散乱が優勢となる場合に精度がよい
→ 粒子サイズの増加に対して有利

参考文献

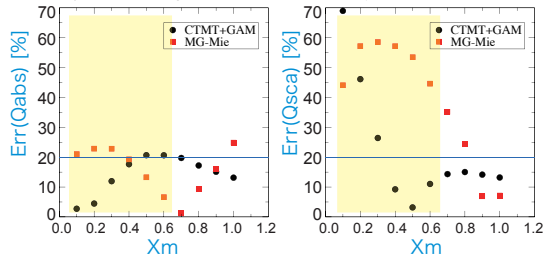
- Mackowski and Mishchenko, J. Opt. Soc. Am. A., 2266-, 1996.
- Liu and Mishchenko, JGR, doi:10.129/2004JD005649, 2005
- van Poppel, GRL, 2005.
- Fuller et al., JGR, 15941-, 1999.
- T.Mukai et al., A & A, 315-, 1992.
- Y. Okada, T.Mukai, I.Mann, H. Nomura, T. Takeuchi, I.Sano, S. Mukai (submitted to JQSRT)
- d' Almeida et al., Deepak. Hampton, Va., 1991.

計算誤差

a) MG-Mie, b) CTMT+GAM にて計算した

結果に関して CTMT の厳密解より誤差を評価 ($m=2.0+i$, $N_p=512$ に対して計算)

$$\text{Error}(\%) = \frac{|Q - Q_{\text{CTMT}}|}{Q_{\text{CTMT}}} \times 100$$



- EMT: Qabs は誤差 20% 程度、Qsca 誤差 40% 以上 ($X_m < 0.6$)

- CTMT+GAM: Qabs, Qsca ともに誤差 20% 程度 ($X_m > 0.3$)

CTMT+GAM により上図の誤差内で同時に扱う構成粒子数を減らし、CTMT 単体よりも多くの粒子 ($N_p=8192$) からなるクラスター形状粒子の光散乱が可能となる。

以下においては、 $X_m=0.5$ の粒子において $N_p=1024$ の粒子の計算を CTMT+GAM にて行った

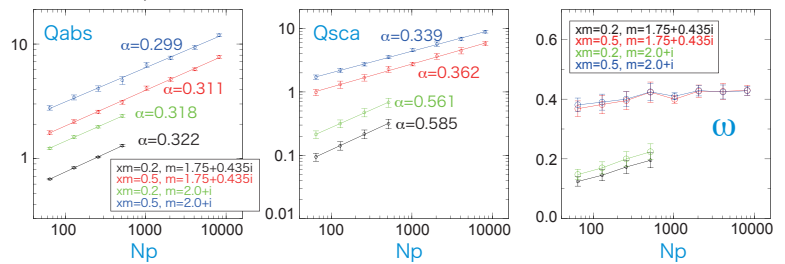
結果

$X_m=0.2, 0.5$ (構成粒子半径 $r_m=0.02\mu\text{m}, 0.05\mu\text{m}$ に対応)

$N_p=64, 128, \dots, 4096, 8192$ のクラスター形状粒子について調査

a) 吸収係数^{*}、散乱係数^{*}、単散乱アルベド

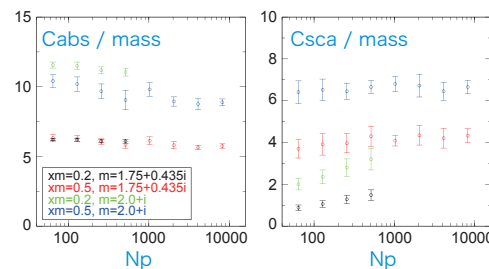
(*: 同質量の球の断面積で規格化した値)



$Q_{\text{abs, sca}} \propto N_p^\alpha$ の関係が見られる

$X_m=0.5$ において、 ω の粒子数依存性が弱くなる

b) 質量吸収係数、質量散乱係数



吸収断面積

$$\frac{C_{\text{abs}}}{\text{mass}} = \frac{\pi (N_p^{1/3} r_m)^2 Q_{\text{abs}}}{4/3 \pi r_m^2 N_p \rho}$$

体積 密度

$Q_{\text{abs}} \propto N_p^\alpha$ の上記結果より

$$\frac{C_{\text{abs}}}{\text{mass}} \propto N_p^{(2/3)-1+\alpha}$$

$\alpha=0.30$ の場合、質量吸収係数の N_p への依存性 (指数係数) は -0.03

まとめ

- soot エアロゾルに対して MG-Mie(EMT) は Q_s の誤差が 40% を超える
- CTMT+GAM は $x_m=0.5$ に対して Q_s の誤差が 20% 程度となる
- $Q_{\text{abs}}, Q_{\text{sca}}$ に関して N_p に対する指数関係が見られた
- $C_{\text{abs}}/m, C_{\text{sca}}/m$ では N_p に対して弱い依存性 (指数係数 0.0*) を示した
- ω : N_p への依存性は弱い

今後

- $x_m=0.2, N_p > 1024$ での光散乱特性計算の検討 (e.g. FFT なし DDA, Rayleigh-Gans)
- 散乱強度角度依存性 (位相関数、散乱行列、アсимメトリパラメータ) 計算手法の検討

謝辞

本研究は日本文部科学省補助による神戸大学 大学院自然科学研究科 21 世紀 COE プログラム 「惑星系の起源と進化」 によりサポートされました。ここに謝意を表します。