

宇宙塵の3次元構造

大阪大学大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 土山 明、岡崎 隆秀、村田 和樹
産業技術総合研究所 地質情報研究部門 (AIST/GSJ) 中野 司
金沢大学自然科学研究科 地球環境学専攻 遠藤徳孝
高輝度光科学研究センター (JASRI/SPring-8) 上杉 健太郎
茨城大学理学部 自然機能科学科 野口 高明
九州大学大学院理学院 地球惑星科学部門 中村 智樹

1. はじめに

宇宙空間から地球に落下する固体物質は、1 mm 以上の隕石と 1 mm 未満の宇宙塵に分けられる [1]。隕石は例外（火星あるいは月起源）を除いて小惑星を起源とし、太陽系の物質研究で極めて重要な存在である。一方、微小な宇宙塵は隕石に比べて研究が遅れていたが、近年の分析装置の発展により研究が進み、小惑星だけでなく彗星を起源とするものが存在することが指摘されている（無水宇宙塵）。彗星は太陽系が形成時にその外縁部の低温領域で作られた最も始原的な天体であり、最近の Stardust 計画によって彗星から持ち帰られたサンプルの分析により、無水宇宙塵の彗星起源説はますます強固なものとなった [2]。

太陽系の固体原材料物質は、珪酸塩・金属・硫化物・有機物・氷からなるサブミクロンの星間粒子であると考えられている。太陽系形成シナリオでは、星間粒子が衝突により合体成長を繰り返して~1km サイズの微惑星となり、これらの微惑星が合体・成長して現在見られる惑星が形成されたと考えられている。彗星は、太陽系起源論で中心的な役割を果たしている微惑星そのものであるといえる。一方、赤外線天文観測や理論的な研究により、星間粒子の付着成長のメカニズムが議論され、原始太陽系星雲で最初に形成されたダストはフラクタル的な形状をもつ“ふわふわ”としたものであると考えられている（星間粒子が弾道的に衝突して付着成長したクラスター同士がさらに弾道的に衝突して付着成長した BCCA(Ballistic Cluster-Cluster Aggregate)(図 1)がモデル物質である) [3]。宇宙塵は、このようなダストが微惑星（彗星）への集積過程で変形を受け、天体（彗星）上やさらに彗星を離脱して地球大気圏突入時などに変成を受けた最終産物であり、宇宙塵の構造を調べることにより、ダストの生成とその初期進化過程の情報が得られることが期待される。

本研究では、宇宙塵の3次元構造を CT 法により明らかにし、3次元構造の定量的な評価をおこなうための解析法を開発し、結果を原始太陽系ダストモデル物質と比較した。通常はサンプルの2次元断面を電子顕微鏡 (SEM,TEM) などで観察・分析するが、サンプルは壊れやすく、切断時の構成粒子の脱落を考えると CT 法による研究が有効である。

2. 実験および画像解析

CT 撮影実験は、大型放射光施設である SPring-8 のビームライン BL47XU および BL20XU においておこなった[4]。サンプルは、南極の雪あるいは氷を融かして取り出した、彗星起源と思われるものを含む比較的大きな宇宙塵（ $\sim 100\mu\text{m}$ ）49 個である。用いた X 線のエネルギーは 10keV、有効空間分解能は約 $0.5\mu\text{m}$ （画素サイズ： $0.195 \times 0.195 \times 0.195\mu\text{m}^3$ ）である。連続的なスライス像（CT 像）を積み重ねることにより 3 次元構造を得た。

宇宙塵の多くは多孔質であった。得られた CT 像では有機物と空隙とを区別できないため、有機物を除いた珪酸塩・金属・硫化物から成る部分を物体として認識し、2 値画像を得たところ、空隙のほとんどは 3 次元的に外部に繋がっていた（開いた空隙）（図 2）。このような開いた空隙を 3 次元的に認識する方法は、我々が知る限りないので、その認識法を今回新たに開発し、空隙率などのパラメータを定量的に求めた。また、3 次元形状のマルチフラクタル解析をおこなうためのソフトウェア開発も今回新たにおこなった。

3. 解析法の開発

3.1 3 次元における開いた空隙の認識（風呂敷法）

2 値化画像について、まず 3 次元的に孤立している閉じた空隙を認識し、その空隙率 p_0 、および物体の体積 V_0 を求めた。次に、開いた空隙を認識するために、(1) 物体について N 層の dilation/erosion (D/L) 操作を 3 次元的に行い、開いた空隙のうち $2N$ より狭い入り口を閉じ、(2) (1) によって孤立した空隙を含む全体の物体を抽出し（体積 V ）、(3) これを元画像と比較することにより開いた空隙を認識し、開いた空隙率 $p = [V - V_0]/V$ を求めた。最終的には、D/E 操作を行っても物体の形がほぼ変形しない範囲で N を変化させて、 $p(N)$ を得た（図 3）。 $p-N$ はシグモイダルな関係を示すので、次のシグモイダル曲線を表す関数

$$p = (p_\infty - p_0) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{R} \right)^n \right] \right\} + p_0 \quad (1)$$

でフィッティングして、 $N \rightarrow \infty$ に対応する開いた空隙率 p_∞ を求めた（図 4）。ここで R は曲線が立ち上がるおおよその N の値を示すパラメータで、開いた空隙の入り口サイズの目安は $2R$ 程度となる。一方、 n は曲線の立ち上がり方の程度を示すパラメータで、 n が大きいほど鋭く立ち上がり、開いた空隙の入り口のサイズが均一なものに対応している。なおここでおこなった 3 次元画像処理解析には、3 次元解析ソフト Slice[5] を用いた。

2.1 マルチフラクタル解析

3 次元画像について構造関数法[6]を用いたソフトを開発した。与えられた物理量の空間分布 $\phi(r)$ からその確率測度 $P_i(\varepsilon) = \int_{V_i} \phi(r) dr / \int_V \phi(r) dr$ を求め、この確率測度の集合の特徴を

抽出するために分配関数 $Z_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \{P_i(\varepsilon)\}^q$ を定義し、任意の実数 q をパラメータとして、マルチフラクタルスペクトル $f(\alpha)$ を求めた (α は特異性指数)。ここで、 $q=0$ のときの $f(\alpha)$ はボックスカウンティング法におけるフラクタル次元 f_b に一致する。なお、作成したソフトを de Wijs のモデルに適用して、正しい $f(\alpha)$ が得られることを確認した。

4. 結果と考察

閉じた空隙率 p_0 と開いた空隙率 p_∞ との関係を図 5 A に示した。またこの図には、原始太陽系モデル粒子 (BCCA とともに BPCA (Ballistic-Particle-Cluster-Aggregate) も) だけでなく、多孔質な薬剤顆粒や Stardust 粒子 (破碎された彗星塵粒子と融けたエアロジェルとの多孔質混合物) のデータもプロットした。宇宙塵では、多孔質になるほど空隙は開いており、その延長に BCCA がある。また、 p_∞ とその開口径の均一度 n との関係を図 5 B に示した。宇宙塵ではおおまかには n と p_∞ との間に一定の関係がみられるが、BCCA はその延長線上にはなく、BCCA から宇宙塵に至る経路は単純ではないことを示唆している。

宇宙塵や BCCA, BPCA について得られたすべてのマルチフラクタルスペクトルは、上に凸な物理的意味を持つものとはならなかった (図 6)。このことは、今回解析した宇宙塵や BCCA, BPCA の画像にはマルチフラクタル性がないことを示している。一方、 $q=0$ より求めたフラクタル次元 f_b と開いた空隙率 p_∞ との関係を求めた (図 7)。この図では、フィッティングのよい f_b をもつ宇宙塵についてのみプロットした (また複合構造をもつものについても除外してある)。 f_b と p_∞ には負の相関が認められ、より多孔質な宇宙塵はよりフラクタル的であることが今回始めて示された。また、この図には BCCA だけでなく、BCCA 同士の衝突シミュレーションによって合体した粒子 (和田: 本集録) もプロットしてあり、BCCA が衝突により宇宙塵粒子の形態に近づいていくことがわかる。一方、フラクタル物体である 3 次元シェルピンスキースポンジは異なった領域にプロットされている。

実際の宇宙塵は単純な BCCA 粒子の合体産物ではない。今後は様々な 3 次元構造の性質の定量的な表現 (例えば、空隙形状とサイズ分布) を含む多次元的な空間において、進化を議論することが必要である。また宇宙塵におけるフラクタル次元の起源など、パラメータと成因的な特徴を関連付けることが重要となる。

謝辞

薬剤顆粒のデータを提供していただいた田辺製薬の山原博士、森田博士に感謝します。

参考文献

- [1] 土山明, 科学 77 (2007), 183.
- [2] Brownlee D. et al., Science 314 (2006), 1711.

- [3] 木村宏, 遊星人 15 (2006) 58.
- [4] Uesugi et al., Journal de Physique. IV France 104 (2003), 45.
- [5] 中野司ら, (2006), <http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/>
- [6] 松下貢, フラクタルの物理 (II) 裳華房, (2004) pp.163.

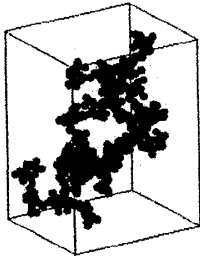


図1 BCCA 粒子

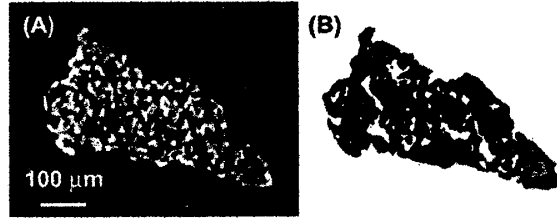


図2 宇宙塵の CT 像 (A) と 2 値化像 (B)。
灰色の部分は 3 次的に孤立している空隙。



図3 宇宙塵 2 値化像の dilation/erosion 操作 (3 次元) による変化。

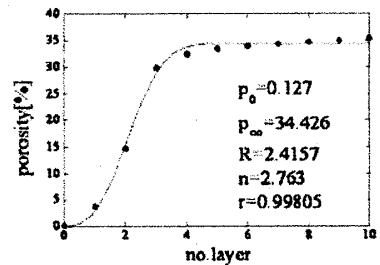


図4 空隙率を求めるためのフィッティング。

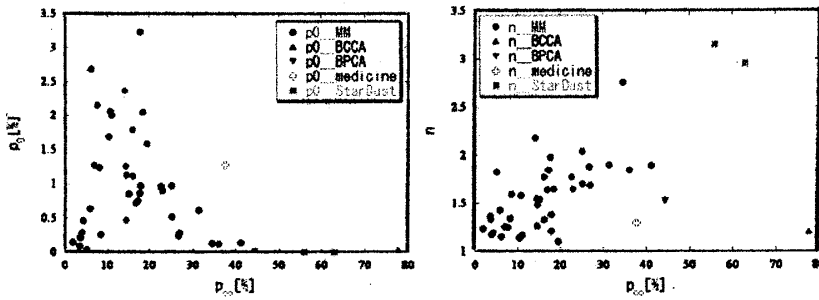


図5 宇宙塵の定量的な空隙 3 次元形状。(A) p_0 - p_∞ プロット。(B) n - p_∞ プロット。ダストモデル BCCA, BPCA、薬剤顆粒、Stardust サンプルもプロットしてある。

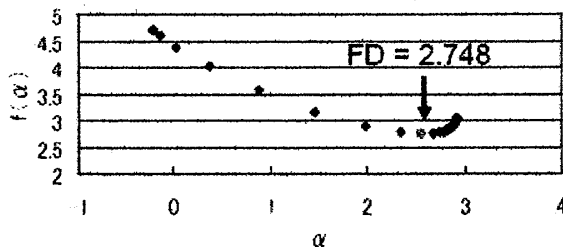


図6 宇宙塵 (D031B04) のマルチフラクタルスペクトル。

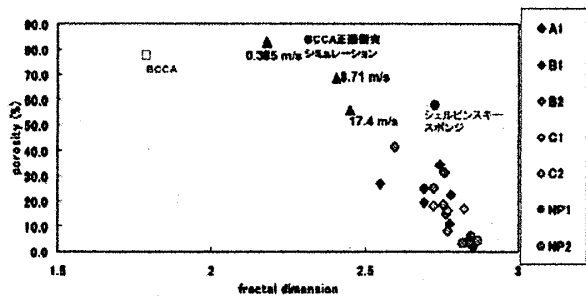


図7 宇宙塵の p_∞ - fd プロット (A1-NP2)。BCCA とその衝突合体粒子、Sierpiński sponge もプロットしてある。