

氏 名 奥平 恭子

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 932 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Evaluation of Micrometeoroid Analogs Alteration on  
Capturing by Aerogel

論文審査委員 主 査 助教授 佐々木 進  
教授 藤原 顕  
助教授 田中 智  
助教授 野口 高明（茨城大学）  
教授 加藤 學（JAXA 宇宙科学研  
究本部）

## 論文内容の要旨

Silica aerogels are amorphous SiO<sub>2</sub> gelled solid. With their unique properties such as transparency and low bulk density (approximately 0.03 g/cm<sup>3</sup> in this study) as well as stability in vacuum and in a wide temperature range, many studies proved that they are excellent capture media for hypervelocity particles in space. Indeed, they have been used in several intact capture experiments in space more than 10 years. In planetary science field, collection of micrometeoroids has significance because they retain information of their parent bodies such as asteroids or comets which can be derived to decode the evolution of solid materials in the solar system.

However, aerogels are also excellent thermal insulators (thermal conductivity of 0.007 W/mK at 0.01-1 torr). Hence there is a possibility that heat converted from impact energy of a captured particle might alter itself. No one has evaluated the captured samples directly from this point of view so far. In the former studies, both experimental and theoretical works were based on the experimental data set of projectiles that were not good indicators for thermal alteration (e.g. glass, Al, aluminum oxide).

The scope of this study includes two objectives. One is to evaluate the thermal alteration of captured particles mineralogically. The second is to give a constraint on thermal fraction of energy partitioning of particle impact energy.

The author assesses physical alterations of microparticles on capturing by aerogel at hypervelocities up to 6 km/s, which is the flyby speed of *STARDUST* spacecraft with its target comet. Simulating the hypervelocity capture, the author fired analog microparticles (125 - 167 μm) into aerogel (0.026 - 0.030 g/cm<sup>3</sup>) with a shotgun method. With relatively low decomposition temperatures, serpentine (600 - 660 °C) and cronstedtite (470 °C) are suitable to evaluate thermal alteration during capture. After the shots, excavated particles are analyzed by several methods such as optical microscopy, SEM/EDS, SR-XRD, TEM and FE-SEM.

In order to assess the mass loss of a particle during capture, survivability of a particle volume  $S$  is defined as

$$S(\%) = \frac{(a'/f_{c2}) \times ((b'+c')/2f_{c3}) \times (d'/f_{c4})}{(d_{aerogel}/f_{c1})^3} \times 100.$$

Here,  $a'$ ,  $(b'+c')$ ,  $d'$  are three axes of the captured particle and  $d_{aerogel}$  is hole diameter of the penetration track of the particle measured on its digital images, while  $f_c$  represents correction factor for each parameter determined in this study. Thus the method of estimation of  $S$  is much improved compared to the previous work (Okudaira et al., 2004).

As a result, it is revealed that excavated grains measurably reduced their volumes during penetration into aerogel. Albeit wide variation in data, it is found that serpentine has survivability about 43 % (1σ 19) at 2 km/s, 38 % (1σ 20) at 3 km/s, 17 % (1σ 17) at 4 km/s and

that it drops to about 2 % ( $1\sigma$  5) at 6 km/s, while cronstedtite has 55 % ( $1\sigma$  29) at 2 km/s, 32 % ( $1\sigma$  17) at 3 km/s, 14 % ( $1\sigma$  49) at 4 km/s, and 10 % ( $1\sigma$  19) at 6 km/s. With these values and latent heat of vaporization of forsterite and fayalite, thermal fraction of energy partition is calculated. In the case of serpentine, it is estimated that nearly 100 % of the kinetic energy of a particle is consumed to ablate the particle at 2 km/s, assuming the mass loss is caused only by ablation (vaporization) of the particle. Similarly, 53 % is used at 3 km/s, 40 % at 4 km/s and 21 % at 6 km/s. As for cronstedtite, 55 % at 2 km/s, 32 % at 3 km/s, 27% at 4 km/s, and 12 % is used for ablation at 6 km/s. These values are maximum estimation because it is assumed that the mass loss is due to vaporization alone.

The analytical results of excavated particles show that both kinds of mineral grains have slightly melted textures at their surface at about 3 - 4 km/s and that they have greatly vesiculated texture as the impact velocity increases (6 km/s). Degree of effervescence is higher in cronstedtite that has lower decomposition temperature than serpentine at the similar velocity. However, the inner parts of remained grains are mineralogically intact even shot at 6 km/s. Applying the results to the *STARDUST* samples, they may well lose their original surface morphologies and nearly 90% of their volumes, but the original mineralogy can be retained in their interior.

## 論文の審査結果の要旨

主として小惑星・彗星を起源とする宇宙塵（宇宙空間を超高速で飛翔する固体微粒子）は、多くの場合起源天体の物質情報を保持している。そのため、宇宙塵を宇宙空間で捕獲し地上へ持ち帰って分析することは、太陽系進化の解明に大きな役割を果たすと期待されている。宇宙空間を超高速で飛翔する宇宙塵をできるだけ変性させず捕獲するため、従来から極低密度のシリカエアロジェル（アモルファス $\text{SiO}_2$ のゲル）が捕獲材として利用されている。実際本年1月に地球に無事帰還したNASAの宇宙塵採集探査機スターダストもエアロジェルを宇宙ダストの捕獲材として使用している。極低密度のエアロジェルは超高速の固体微粒子を捕獲するためのターゲットとして適しているが、捕獲時の熱の発生は原理的に不可避であり、熱に弱く分解し易い鉱物物質の場合は捕獲にともない熱変性や溶融、蒸発が引き起こされる。従来から熱変性温度の高い高速微粒子を用いた実験室でのエアロジェルによる捕獲実験は行われているが、熱的な影響を受けやすい鉱物微粒子についての捕獲実験はこれまで殆ど行われていないのが現状である。奥平さんの実験は、高速鉱物微粒子のエアロジェル（密度 $0.03\text{g/cm}^3$ ）による捕獲に伴う熱的影響の評価を目的とした初めての本格的な研究である。この研究では、宇宙塵の模擬物質として熱的な影響を比較的受けやすい含水層状ケイ酸塩鉱物（脱水分解温度 $600\text{--}660^\circ\text{C}$ のサーペンティンと脱水分解温度 $470^\circ\text{C}$ のクロンステダイトの二種類）の微粒子（直径 $125\mu\text{m}\text{--}167\mu\text{m}$ 、速度 $2\text{km/s}\text{--}6\text{km/s}$ ）を用いて、エアロジェルによる捕獲実験を行い、捕獲された微粒子の鉱物学的分析、捕獲に伴う体積の減少の見積もり、これらの実験結果に基づく熱的プロセスの推定を行っている。なお微粒子の加速は宇宙科学研究本部及び英国ケント大学の2段式軽ガス銃を使用した。本研究により以下のような新しい知見が得られている。

(1) 捕獲粒子の、走査型電顕、シンクロトロン放射光X線回折、透過型電顕を用いた鉱物学的分析から、低速捕獲（速度 $2\text{km/s}$ ）の場合は表面の熱変性は殆ど無いが、高速捕獲（速度 $6\text{km/s}$ ）の場合は最外層にアモルファス層、そのすぐ内側に発泡部が検出された。しかしそのさらに内側に残存する捕獲粒子の大部分を占める部分は捕獲前の結晶状態を保ったままである。

(2) 捕獲時の粒子の溶融、蒸発、フラグメンテーションによる欠損量の評価として、体積残存率（捕獲時の体積と捕獲前の体積の比）という指標を考案し、捕獲速度に対する体積残存率の依存性を明らかにした。この評価では球形ではない微粒子の体積をいかに正確に見積もるかが難しい点であったが、較正法の吟味を繰り返し立体画像解析ソフトを利用することにより、信頼できる体積残存率を求めることに成功した。その結果、低速（ $2\text{km/s}$ ）での体積残存率はまだ検討の余地は若干あるものの50%程度、高速（ $6\text{km/s}$ ）での体積残存率は数%~10%程度という数値が得られている。

奥平さんの得た上記の研究成果は、スターダストミッションで捕獲されたダスト（捕獲速度 $6\text{km/s}$ ）の分析に当たって、本実験とスターダストのエアロジェルの密度差は考慮すべきではあるが、回収された試料の組成と大きさから元の宇宙塵の鉱物組成と体積を推定するための重要な知見を与えると考えられる。

この研究の成果は、スターダストミッションへの適用のみにとどまらず、今後の探

査機を用いた宇宙塵回収と分析による太陽系科学の研究に重要な役割を果たすと考えられ、さらに異分野ではあるが地球周回軌道での宇宙デブリの回収研究にも応用することが期待されることから、総研大の学位を与えるに十分な内容であると判断した。