

ポリイミド系多孔質断熱材料の構造解析 3D structural analysis of porous super thermal insulation polyimide materials

太刀川 純孝^a, 水谷 祐樹^b, 梶原 堅太郎^c, 大西 晃^a
Sumitaka Tachikawa^a, Yuki Mizutani^b, Kentaro Kajihara^c, and Akira Ohnishi^a

^a(独)宇宙航空研究開発機構, ^b慶応大, ^c(財)高輝度光科学研究センター
^aJAXA/ISAS, ^bKeio, ^cJASRI

本研究は、大気中、および真空中におけるポリイミドフォーム(Polyimide Foam: PI-F)のふく射・伝導伝熱挙動を実験的、理論的に明らかにし、宇宙機の断熱設計の技術の向上を図ることを最終目的としている[1]。PI-Fは空孔と固体部分から形成され、さらに固体部分は多面体を構築する繊維(フレーム)と、その内面のフィルムから成る。本稿では、X線CTによる3次元構造解析を行い、PI-F熱解析モデルの構築に必要な空孔径、空孔率、空孔分布等を明らかにする。

キーワード：断熱材、ポリイミドフォーム、X線CT、構造解析、ふく射・伝導伝熱

背景と研究目的：

宇宙空間を飛翔する宇宙機の断熱材は、太陽光の入熱と宇宙機自身からの放熱を制御する役割を担っている。したがって、断熱材の良否により宇宙機の寿命が左右される。これまでの断熱材は、最外層の裏面にAl蒸着を施した耐熱性高分子フィルム、内層には両面Al蒸着フィルムとネットを交互に10層程度重ねた多層構造のMLI(Multilayer thermal insulation)から成る。しかし、このMLIは、場所により断熱性能が一様でないこと、構成が複雑であること等考慮する点が残されている。惑星探査の宇宙機の熱設計では、太陽光の入熱量の大きな変化、惑星との熱ふく射交換等と過酷な熱環境に対応した優れた断熱技術が求められる。

本研究は、高耐熱性、耐宇宙環境性に優れたポリイミド樹脂(芳香族ジアミンUPILEX-S:宇部興産社製)を発泡させた多孔質材ポリイミドフォームに着目し、そのふく射、および伝導伝熱について実験的、理論的に明らかにし[2]、新たに宇宙機の断熱システムを提案する。その利点として、断熱性能の向上によるヒータ電力の削減、熱設計の信頼性の向上、軽量化等が挙げられる。ここでは、PI-Fの複雑な多孔質断熱材の伝熱現象を理解するため、密度の異なる4サンプルについて高空間分解能放射光のX線CTによる構造解析を行い、空孔率および空孔径の算出結果について報告する。

実験：

1) サンプル

図1は、PI-Fの写真を示す。表1に測定に使用した4サンプルの密度を示す。3次元画像データは、サンプルがキャピラリに納められた場合と、キャピラリを使用しないサンプル単体の場合について取得した。図2にサンプルホルダに設置されたa)キャピラリ使用サンプルと、b)サンプル単体の写真を示す。キャピラリはサンプルの回転軸の偏心を小さく抑えるために用いた。

測定用サンプルは、図1に示す寸法(30×30×5 mm)のサンプルから剃刀の刃で小さくカットした物を用いました。



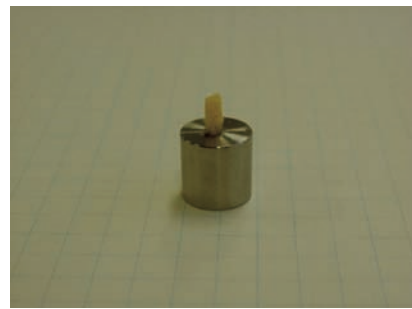
図1. ポリイミドフォーム.

表1. サンプルの密度.

サンプル	密度 (kg/m ³)
BP011	242.63
BP021	117.83
BP101	27.73
BF301	6.67



a) キャピラリ使用サンプル

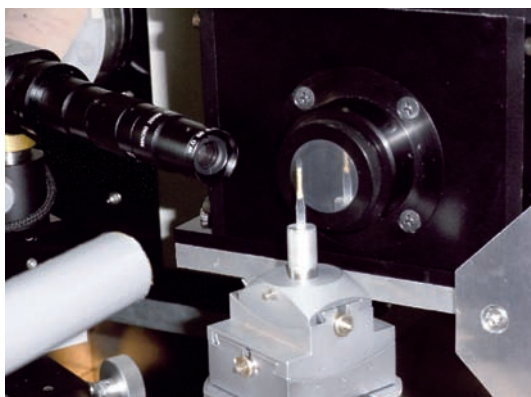


b) サンプル単体

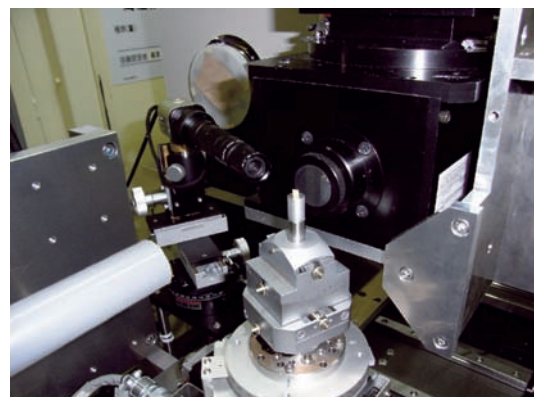
図2. サンプルホルダに設置されたサンプル.

2) 実験条件

本実験は、BL19B2 X 線ビームラインを使用して行った。図3はビームラインに設置された a) キャピラリ使用サンプルと、b) サンプル単体の写真を示す。X 線の放射エネルギーは 8 keV とし、分解能は 2.36 μm と 4.72 μm とした。表2に3次元画像データの取得条件を示す。X 線 CT の画像は、サンプルホルダを 0.2° 刻みで半回転させ、高さ方向のスライス像を 900 枚撮影した。



a) キャピラリ使用サンプル



b) サンプル単体

図3. BL19B2 X 線ビームラインに設置されたサンプル.

表 2. 3次元画像データの取得条件.

サンプル条件	分解能 [μm]	直径 ϕ [μm]	高さ [μm]
キャピラリ使用サンプル	2.36	2360	1540
サンプル単体	4.72	4720	3090

結果および考察：

3次元画像データは、1 サンプルの取得に約4時間を要し、4 サンプルについて7データを取得することができた。

図4、5にBF301、BP021の3次元画像 a)キャピラリ使用サンプルと、b)サンプル単体のデータをそれぞれ示す。キャピラリに納められたサンプルは回転軸の偏心が小さいため、サンプル単体に比べより鮮明な3次元画像データを得ることができた。

以下に、3次元画像データより取得された空孔率、空孔径の密度依存性を示す。

図6にキャピラリ使用サンプルとサンプル単体の空孔率の密度依存性を示す。

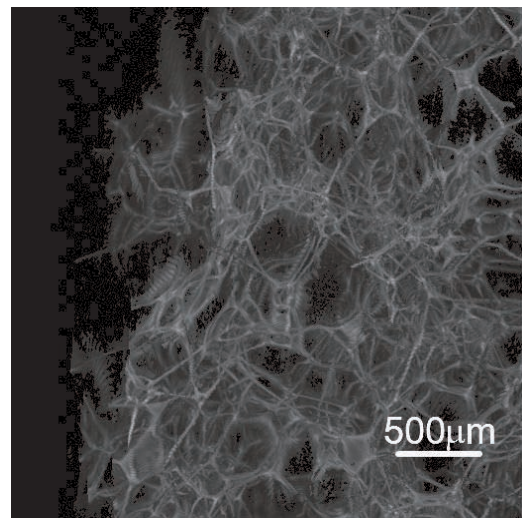
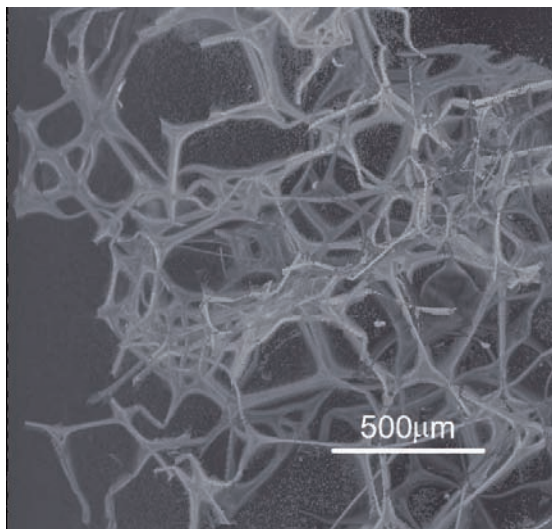
空孔率の密度依存性は、キャピラリ使用サンプルと単体サンプル共に、高密度になるに従い小さくなる傾向が示された。空孔率は、低密度ではキャピラリ使用サンプルと単体サンプルでは有意差は生じていないが、高密度ではキャピラリ使用が高めになることが確認された。

図7にキャピラリ使用サンプルとサンプル単体の垂直、および水平方向の空孔径の密度依存性を示す。

垂直、および水平方向の空孔径の密度依存性は、共に高密度になるに従い小さくなる傾向が示された。

サンプル単体の空孔径はキャピラリに納められたサンプルに比べ大きいことが確認された。また、水平方向の空孔径は垂直方向に比べ大きいことが確認された。これは、ポリイミドフォームの成型過程において、ポリイミド樹脂を発泡させた後、密度の調節のために垂直方向に圧縮するためである。

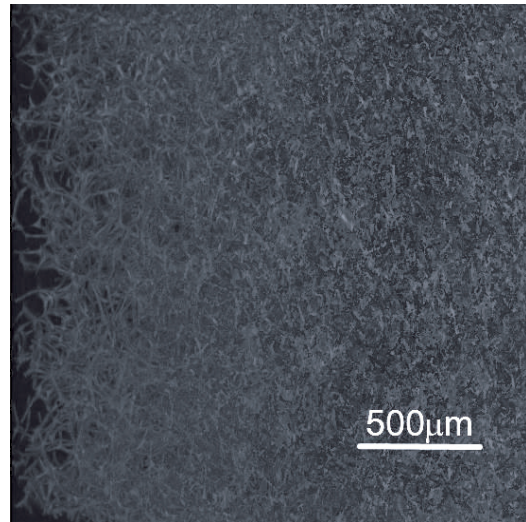
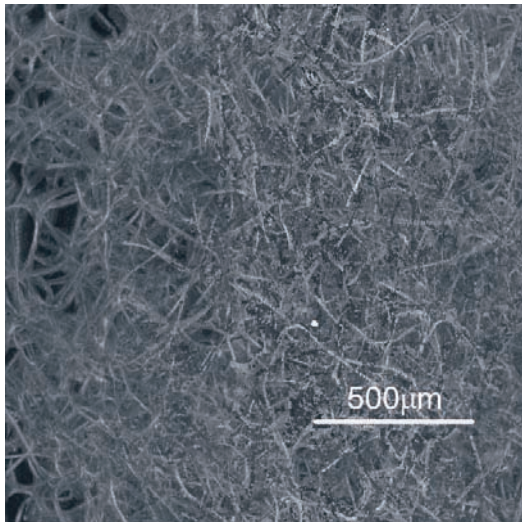
空孔率、および空孔径のデータは、キャピラリに収められたサンプルとサンプル単体では有意差が生じた。その要因の1つとして、サンプルカットによるサンプルの変形、キャピラリに納める時のサンプルの変形等が考えられる。



a) キャピラリ使用サンプル

b) サンプル単体

図4. BF301の3次元画像.



a) キャピラリ使用サンプル

b) サンプル単体

図 5. BP021 の 3 次元画像.

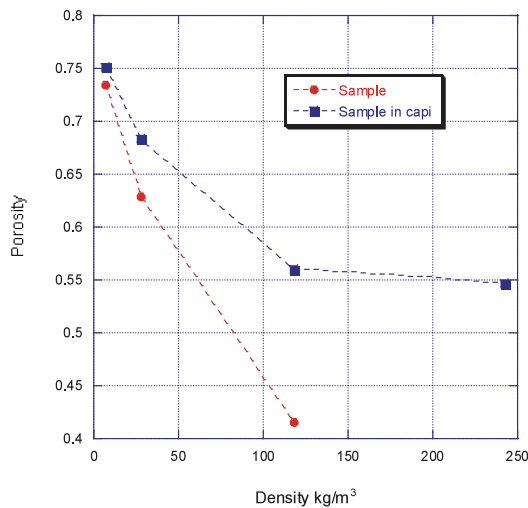


図 6. 空孔率の密度依存性.

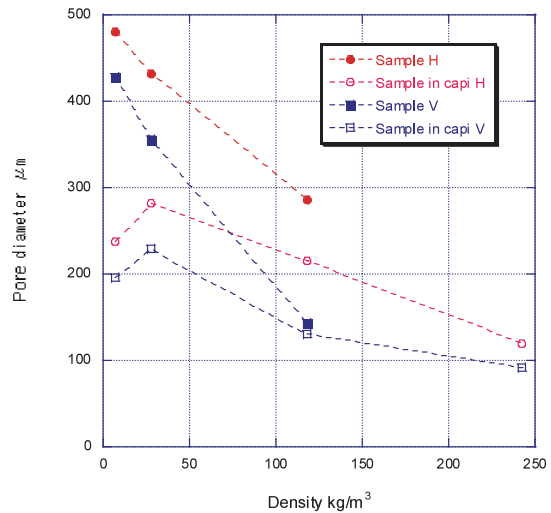


図 7. 垂直・水平方向の空孔径の密度依存性.

今後の課題：

PI-F のふく射・伝導伝熱挙動を解析するための詳細な構造解析はこれからになるが、PI-F の基本構造であり、また伝熱の主要因となるフレーム部の 3 次元画像データを取得することができた。その結果、PI-F の空孔率、および空孔径の密度依存性を明らかにすることができた。

今後の課題を以下に示す。

- 3 次元画像データの取得において、回転軸の偏心によるノイズの減少を図るため、サンプルの形状、および固定方法を検討する。
- 高密度(242.63 kg/m³)サンプルの場合、空孔密度、および空孔径等のデータを一部確認することができなかったため、X 線の放射エネルギー、および分解能についてさらに検討を加える。

参考文献：

- [1] Hiasa, Y., Tachikawa, S., Ohnishi, A. and Nagasaka, Y., *Japan Symposium on Thermophysical Properties*, **29** (2008) pp.208-210.
- [2] Sukop, M. C. and Thorne, D. T., *Lattice Boltzmann Modeling*, Springer, (2005).