

SUFA : 透明断熱材

ティエムファクトリ(株)

會澤 守

SUFA : transparent thermal insulator

Mamoru Aizawa

R&D Department, tiem factory Inc.

1. SUFA

SUFA は常圧乾燥法で作製した PMSQ 有機-無機ハイブリッド透明断熱材である - 図 1。京都大学大学院理学研究科の中西先生、金森先生との共同研究で開発された [1]。現在使われている断熱材料の多く (例えばグラスウールや発泡ポリマーなど) は透明ではない。そのため、建物や自動車の窓といった透明でなければならない部分には断熱材を使うことができず、そこからの熱損失は、低エネルギー消費社会を実現して行く上で大きな課題となっている。

*SUFA は Super Functional Air のアクロニム。

2. エアロゲルの定義

エアロゲルは 1931 年に Steven Kistler が初めて作製した。Kistler は水ガラスから作ったシ



図 1

リカの湿潤ゲルを超臨界条件でゲルの構造を破壊することなく乾燥させることに成功し、その成果を Nature に発表している [2]。Brinker と Scherer の著書 [3] では超臨界乾燥条件で作製した乾燥ゲルがエアロゲルであるとして定義している。

一方で、非超臨界条件で作製した乾燥ゲルであっても超臨界乾燥条件で作製したエアロゲルと同様の特性を有していればそれもエアロゲル

であるという Hüsing と Schubert の定義もあり [4]、本稿では後者の定義を採用する。

3. 常圧乾燥法と超臨界乾燥法

エアロゲルはその透明性と断熱性から理想的な断熱材として、例えば、建築分野では Holy Grail (聖杯) と評される [5] などして高い評価を受けている。また、EU では 1998 年から 2005 年にかけて DNK, DEU, FRA, SWE, NOR から 8 つの機関が参加して、エアロゲルを窓ガラスに適用するためのプロジェクト HILIT* および HILIT+ プロジェクトを実施した。しかし、プロジェクトが終了して 10 年以上が経過しているにも拘らずエアロゲルウィンドウが市場に現れる兆しはない。また建築分野でエアロゲルが広く用いられているという状況でもない。その原因は、超臨界乾燥法で作るエアロゲルが高価すぎたためと考えられる。

超臨界乾燥法は高温高压の製法であり高価な製造装置を必要とする。作製されるエアロゲルの価格は 1m^2 (10mm 厚さとして) のモノリスでおよそ 100 万円になる (例えば SWE の AirGlass 社から購入するとおよそ 1 万 €)。

これに対し、常圧乾燥法は常温常圧で汎用装置を用いて作製できるので、SUFA の製造コストは超臨界乾燥法に比べほぼ 2 桁低くなっている。

4. エアロゲル作成時の課題 —毛細管力との対峙—

湿潤ゲルから溶媒を蒸発により取り除こうとすると、問題になるのは毛細管力であり、次式 (1) で表される。

$$P_c = -4\gamma_{LV}\cos(\theta)/a \quad (1)$$

ここで a は湿潤ゲルの細孔径、 γ_{LV} は溶媒の表面張力、 θ は細孔内壁に対する溶媒の接触角である。例えば細孔径が 50nm、溶媒にヘキサン、接触角が 15° とすると毛細管力 P_c は 12.5MPa となる。

では、密度が $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度のシリカ系ゲルの

破壊応力はどれくらいなのであろうか。神戸製鋼所の川上と上原は、エアロゲルの構造を柱状の梁構造にモデル化して脆性圧壊機構により破壊応力を求めた [6]。彼らのモデルに基づいて計算すると密度 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度のシリカ系ゲルの破壊応力は 0.5MPa 程度となる。

通常のシリカ系湿潤ゲルは、常圧乾燥時の毛細管力に全く耐えることができない。従って、シリカ系のゲルをエアロゲル化するには高価であっても超臨界乾燥法を採用せざるを得ない。

PMSQ 有機-無機ハイブリッドエアロゲルは、常圧乾燥時の毛細管力に拮抗できる、10MPa を超える破壊応力を有するので常圧乾燥法で安価に作製することが可能となる。

5. SUFA の特性

SUFA は空気のように軽く透明な高性能の断熱材である。炎に触れても燃えることはない。SUFA が示す超撥水性は分子骨格中に結合する有機の親油性官能基に起因するもので、仮にクラックが発生したとしても新たに発生する界面は従前と変わらぬ超撥水性を示す。

* SUFA の構造的な特性を表 1 にまとめて示す。

6. SUFA のアプリケーション

SUFA はモノリスの他に、パウダー (グラニュール) - (図 2)

或いは他のマトリックスと複合化させてブランケットや断熱塗料などに仕上げるができる。

モノリスであれば窓や集熱パネル、パウダーであれば半透明壁ユニットが開発のアイテムとなる。窓に関していえば、HILIT・HILIT+ でその有用性がすでに確認されているので、現在 30cm 角まで大型化できているモノリスのサイズをメートル角にまで拡大する検討を進めている - (図 3)。また、独自に開発したエアロゲルの透明接合技術を用いて小サイズのモノリスの集積による大型化検討も行っている。

パウダーはモノリスよりも汎用性の高い素材



図2

なので製造コストの低減がより求められる。既存の乾燥法にとらわれない乾燥技術の確立が必要となる。

複合材料は弊社がその製法や使い方を提案するというよりは、お客様が保有する基材に対してお客様と協働でエアロゲル化するための検討を進めさせていただいている。

SUFA のアプリケーションとして、SUFA の持つ機能的特性ではなく芸術的な側面を活かす共同研究も行っている。共同研究相手は、エアロゲルを用いた彫刻で著名な Dr.Ioannis Michaloudis, である。Dr.Michaloudis は現在、オーストラリアの Charles Darwin University に在籍して活動を続けている。将来的な計画ではあるが、複数のエアロゲルピースを透明接合技術を用いて組み上げ、イカロスの像を作製する予定である。

7. エアロゲルの欠点の解消

エアロゲルは2つの欠点の存在が指摘されることが多い。その一つは脆性で、もう一つは透明性（ヘイズ）である。前者に関して、エアロゲル本来の特性を損なうことなくフィルムなどで補強することが可能である。また、脆性はモノリスの大型化を妨げているようにも考えられるが、乾燥条件などの正しい制御である程度は改良できる。とはいえ、ストレスフリーで乾燥を行おうとすると、やはり脆性は改善すること

が望ましい。弊社では分子骨格構造に一部手を加えることで従来品のSUFAよりも脆性の改善されたエアロゲルを作製できるようになった。20cm角のモノリスと比較した場合、補強していない従来品SUFAは少し曲げただけでも簡単に割れてしまうのに対し、改良品は曲率半径10cmを示すまで脆性が改善された（図4）。

透明性はエアロゲルの微細構造の均質性に依るところが大きいと考えている。SUFAはメソスコピック領域での相分離構造を界面活性剤の添加によって制御することで、平均細孔径50nmの均質な3次元ネットワーク構造を実現している。相分離構造は、Si原料の種類と使用する界面活性剤の組み合わせで最適化され、より高い透明性が得られると考えている。標準的なSUFAの透明性は、透過率90% 10mmt@550nmである。

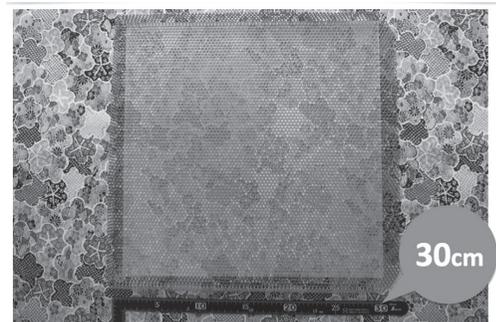


図3

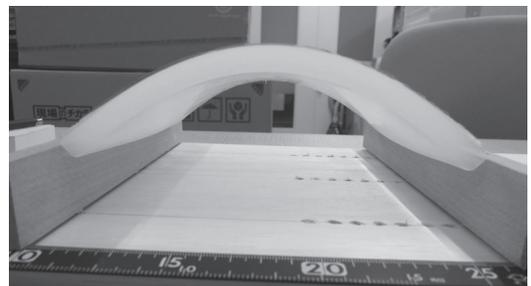


図4

表1 シリカ系エアロゲルの特性

Id		Range	Typical Value	SUFA
バルク密度	[g cm ⁻³]	0.003-0.500	0.10	0.11
]bp	[%]	80-99.8		92
平均細孔径	[nm]	20-150		50
屈折率		1.007-1.24	1.02	1.05
熱伝導率 (大気中@300K)	[Wm ⁻¹ 2 ⁻¹]	0.017-0.021		0.012
弾性率 E	[Mpa]	0.002-100	1	0.72

N.Huesing and U.Schubert, Angew.Chem. Int. Ed. **1998**, 37, 22-45

8. まとめ

エアロゲルは、地球上で最も断熱性能の高い素材である。そのため世界各国で国家プロジェクトが推進されており、市場の年平均成長率も30%台と非常に高く、大きな注目を集めている新素材である。今後様々な分野において標準的に使われるようになることは確実であると言われており、弊社はその中で世界最大のエアロゲルメーカーとなるべく、量産化を実現させていく。

文献

- [1] K.Kanamori, NEW GLASS.31, No.117, 19-23 (2016)
- [2] S.S.Kistler, Nature.127, 741 (1931)
- [3] C.J.Brinker, G.W.Scherer, in Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel-Processing, Academic Press, San Diego (1990)
- [4] N.Hüsing, U.Schubert, Angew.Chem.Int. Ed.37,22-45 (1998)
- [5] M.Dowson, International Journal of Smart and Nano Materials.5, 284-303 (2014)
- [6] N.Kawakami, K.Uehara, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS.52, 39-44 (2002)