ニチアス技術時報
2016年 1号 No.372

〈解説〉

応力・ひずみの視点から見た無機系断熱材

研究開発本部　浜松研究所長　　佐　藤　　清

1. はじめに

ロックウールや，グラスウール，けい酸カルシウムなどからなる無機系断熱材は，その優れた耐熱性と断熱性ゆえに，高温を扱う装置の構成材料として広く用いられている。しかし応力を積極的に担う構造材料ではないので，力学的性質，特に応力やひずみの観点で論じられることは少ない。だが無機系断熱材を構造材料の視点でみると，二つの興味深い課題がある。一つ目は，断熱性と力学的特性の本質的背反である。二つ目は，断熱材の破壊クライテリア（材料力学的な破壊判定基準）が未解明なことである。本稿ではこの二つの課題について整理し，その解決の展望について触れる。

2. 断熱性と力学的特性の背反

断熱材の開発とは何かと考えると以下の三つの要素がある。

①断熱材の本質である断熱性と耐熱性の向上
②付加的な機能付与
③利用技術としての熱設計や施工方法の開発

このうち②の付加的な機能付与には，耐火性，不燃性，耐食性に並ぶものとして力学的特性（強度，柔軟性，圧縮復元性など）がある。力学的特性，特に強度は断熱性と本質的に背反する特性である。断熱材においての強度の改善は，熱負荷や力学的負荷に対する耐力の向上以外に，部材の加工性やハンドリング性の向上などの価値を生み出す。

ここでは本質的な背反事象を説明するために，まず断熱材の物理として，応力の伝達様式と伝熱要素に関して説明し，次に背反問題へのアプローチについて説明する。

2.1　断熱材の物理
－応力の伝達様式と伝熱要素の解析－

2.1.1　断熱材における応力の伝達様式

まず無機系の実用断熱材を材料の構成要素と製造方法で分類しておく。材料の構成要素と製造方法によって断熱材の構造が変わり，それに応じて応力伝達の様式や伝熱要素の割合も変わるからである。本稿では無機系断熱材として，無機繊維からなる繊維質断熱材と，無機粒子からなる粒子系断熱材について説明する。

無機系断熱材について当社製品を代表例として大別すると次のようになる。

(1) ほぼ無機繊維のみで構成され，製繊工程に続く連続ラインで製造されるマット状の繊維質断熱材（TOMBO™ No.5615「ファインフレックスBIO™ブランケット」，「ホームマット®」など）
(2) 無機繊維を水中に分散させて必要に応じて粉体を混合し，スラリーを凝集させた後に吸引脱水成形することで得られる繊維質の成形製品（TOMBO™ No.5350「エコフレックス™」，各種ボードやモールド品など）

表１　応力伝達の形式による断熱材の分類

構造分類		応力伝達の主役	代表例	力学的な利用形態
繊維質	繊維間の接合なし	繊維の絡み合い	ブランケット	巻き付ける，敷き詰める，圧縮復元
	繊維間の接合あり	無機系材料による弱い接合	ボード製品 モールド成形品	加工，自立，耐熱応力
		無機系材料による強い接合	宇宙用耐熱タイル	加工，自立，耐熱応力
		有機系材料による接合	ロックウール	巻き付ける，敷き詰める，自立
粒子系※		粒子間の接合	けい酸カルシウム系ボード ナノ粒子系ボード	加工，自立，耐熱応力

※（少量の繊維が添加されたものを含む）

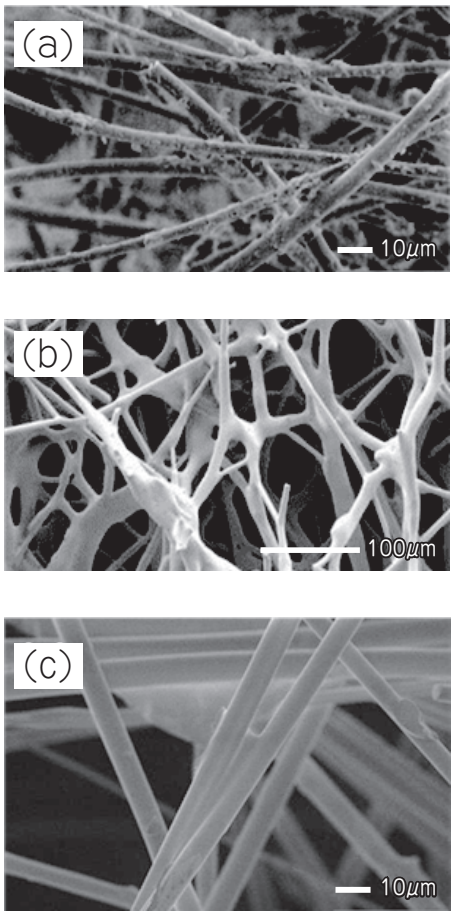
(3) 粉体が主成分であり必要に応じ繊維が添加され，粉体成形で得られる断熱材（TOMBO™ No.4350「ロスリム®ボードH/GH」など）

(4) 粉体が主成分であり必要に応じ繊維を添加し，抄造法などで湿式成形し，水熱反応など無機化合物の反応で結合させる断熱材（TOMBO™ No.6458「エコラックス®」などのけい酸カルシウム系断熱材）

これらの断熱材を応力の伝達様式に注目して整理したものが**表1**である。まず応力伝達の主役が繊維であるか否かで二分される。繊維が応力伝達の主役でない材料は粒子間の接合が応力の伝達経路である。前述の断熱材（3）および（4）がこれにあたる。

繊維が応力伝達の主役である場合，繊維間の接合状態で分類できる。まず繊維間の接合がない断熱材がある。この場合，繊維の絡み合いで応力が伝達する。断熱材（1）の一部，ブランケットがこれに相当する。ブランケットでは，マットに繰り返し鈎針を打ち込むことで繊維を絡ませるニードリングが施されている。このタイプの断熱材は断熱部材として自立できないので，巻き付けたり敷き詰めたりして使用される。

繊維間に接合がある材料は接合様式で三つに分類できる。その例を**図1**（a）～（c）に示す。



（a）無機系材料による弱い接合による断熱材
（断熱材（2）の一部；ボードやモールド）
（b）無機系材料による強い接合による断熱材
（断熱材（2）の一部；宇宙用耐熱タイル）
（c）有機系材料による接合による断熱材
（断熱材（1）の一部；ロックウールのロール品やボードなど）

図１　繊維系断熱材における繊維間接合様式の代表例

これらの断熱材は一部（ロックウールのロール品など）を除いて自立可能な断熱部材として利用することが可能であり，必要に応じて機械加工が施されて使用される。

後述の固体伝導伝熱の大小でこれらの接合様式を比較すると，最も熱抵抗の大きい（断熱性能が良い）ものは接合なし，熱抵抗の小さいものは無機材料による強い接合である。おおむね力学的特性の向上と断熱性の向上が背反となることは接合様式の整理からも理解できる。

2.1.2　断熱材の伝熱要素の解析

実用断熱材における伝熱要素は**図2**に示す四つの要素のうち，(1) 固体伝導伝熱，(2) 気体伝導伝熱，(4) ふく射伝熱（放射伝熱）の三つの要素に分解できる（**図2**）。(3) 対流伝熱は断熱材中の空隙サイズがミリメートルのオーダー以下であれば，空隙内の対流伝熱は無視できるため，通常は前述の三つの伝熱要素を考えればよい。

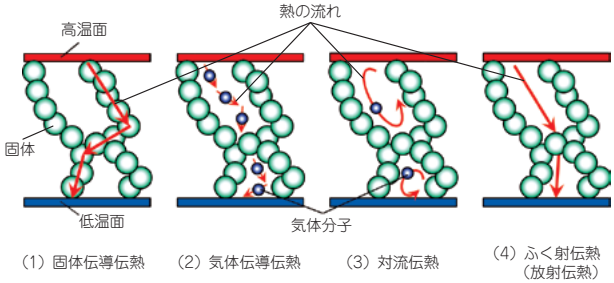


図2　断熱材における伝熱要素

この三つの伝熱要素において，固体伝導伝熱と応力伝達は伝達経路が同じ固体であることから，接合点を増やし機械的強度を高くすると，熱が伝わりやすくなる。したがって断熱と強度が背反するのはほぼ自明といえる。実際に主たる断熱材の曲げ強度と熱伝導率をプロットすると，両者は正の相関を持っている（**図3**）。必要な力学的強度を維持したまま，断熱性をあげるには，三つの伝熱要素の寄与を理解したうえで改善方策を考える必要がある。

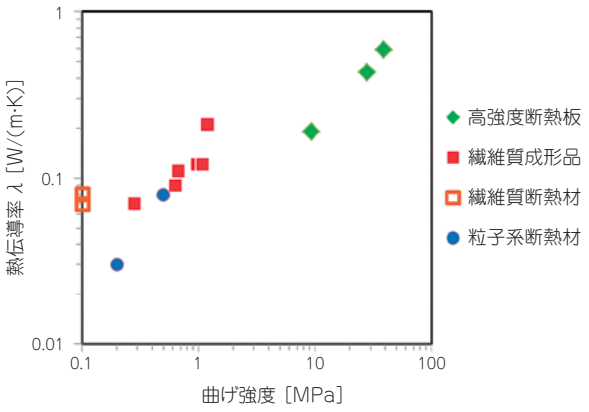


図3　実用断熱材の曲げ強度と熱伝導率の関係

熱伝導率は400℃における値，曲げ強度は常態強度。当社の主たる製品の代表値をプロット。繊維質断熱材は柔軟すぎるため曲げ強度を規定できず，便宜上，強度0.1MPaとした。

実用的に充分な伝熱モデルは，式（1）に示すように三つの伝熱要素が並列するというシンプルなモデルである。このモデルは断熱材の密度が充分に低く，空隙が事実上ほとんど開気孔であって，かつ気相が連続しているという断熱材で成立する。

$$\lambda = \lambda_{solid} + \lambda_{radiation} + \lambda_{gas} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで λ_{solid}，$\lambda_{radiation}$，λ_{gas} は，それぞれ断熱材の固体伝導伝熱成分，ふく射伝熱成分，気体伝導伝熱成分である。

またそれぞれの伝熱要素をかさ密度 ρ と温度 T の関数として表した式（2）は，無機系断熱材の熱伝導率測定結果をよく近似できる[1, 2]。

$$\lambda = A\rho + \frac{B}{\rho}T^3 + C \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここで A，B，C は断熱材の種類によって決まる定数で，かさ密度と温度を変えた熱伝導率の測定値とのフィッティングにより得られる。

文献[1, 2] に開示されているパラメータA，B，Cを用いて算出したロックウール断熱材およびナノ粒子系断熱材の熱伝導率の解析例を**図4**，**5**に示す。いずれも断熱材の三つの伝熱要素とかさ密度との関係を示している。

ロックウール断熱材の100℃における熱伝導率（**図4**）は，かさ密度160kg/m^{3}で最低値をとる。かさ密度が上昇したときの固体伝熱の増加と，ふく射伝熱の抑制がバランスするからである。ロックウール製品の主たるかさ密度は当社製住宅用ロックウール断熱材「ホームマット®」で30～50kg/m^3，ボード状製品で80～200kg/m^{3}である。固体伝熱成分の熱伝導率全体に対する割合は，「ホームマット®」（40kg/m^{3}の場合）で2%，ボード状製品（160kg/m^{3}の場合）で12%である。

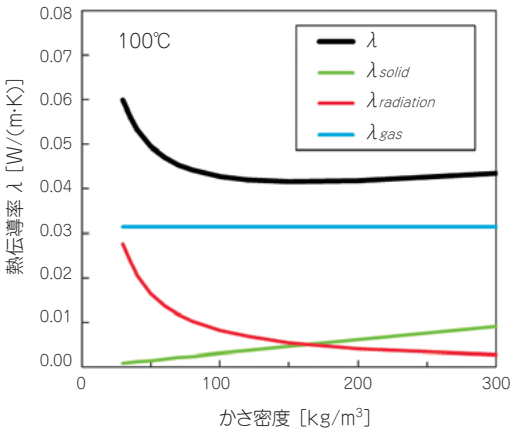


図4　かさ密度を変えたロックウール断熱材の熱伝導率の解析結果（測定温度100℃）

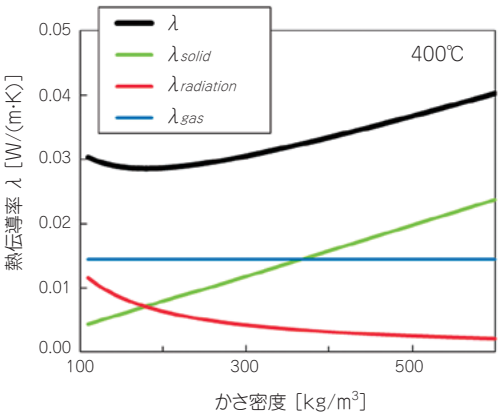


図5　かさ密度を変えたナノ粒子系断熱材の熱伝導率の解析結果（測定温度400℃）

ナノ粒子系断熱材の400℃における熱伝導率（**図5**）をみると，熱伝導率はかさ密度180kg/m^{3}で最低値をとる。ナノ粒子系断熱材の気体伝導伝熱成分は0.014W/(m·K) と，400℃における静止空気の熱伝導率0.05W/(m·K) の約1/4である。これはナノ粒子を使うことで，空隙サイズを空気の平均自由行程よりも小さくしていることによる。空隙サイズを小さくすることで，気体伝導伝熱が下がることは気体分子運動論をベースに導出可能である。式（3）に関係式[3]を示す。

$$\lambda_{gas} = \frac{\lambda_0}{1 + 2\beta K_n} \quad \cdots\cdots (3)$$

間隔がδの平行平板に閉じ込められた気体の熱伝導率の表現式である。ここでλ_0は静止気体の熱伝導率，βはほぼ気体の種類で決まり空気では1.63，K_nはクヌーセン数（$K_n = L_{gas}/\delta$；L_{gas}は気体分子の平均自由行程）。平板の間隔δが気体分子の平均自由行程と同程度になると，気体の熱伝導率は静止空気の熱伝導率の23%まで低減できることが，この式から読み取れる。

ナノ粒子系断熱材においては，空隙サイズをナノレベルにすることで気体伝導伝熱が下げられているから，結果として断熱材全体に対する固体伝導伝熱の占める割合は25%に達する。すなわち断熱性の極限を目指すナノ粒子系断熱材においては固体伝導伝熱の占める割合は無視できない。

2.2　ナノ粒子系断熱材における断熱性と力学的特性の背反の解決事例

ナノ粒子系断熱材において固体伝導伝熱の上昇を最小限に抑えるポイントは，ナノ粒子間の接合のコントロールにある。非金属材料では熱伝導の媒体はフォノン（格子振動）であるから，粒子間の接触がルーズであることが有利なのは自明である。一方，強度を得るには粒子間で応力伝達が必要であり，粒子間の接合が必要となる。

この背反を解決したナノ粒子系断熱材として当社が開発したTOMBO™ No.4350「ロスリム®ボードGH」がある。「ロスリム®ボードGH」は通常グレードの「ロスリム®ボードH」と比較して，熱伝導率をほぼ維持したまま（0.030W/（m·K）at 400℃），圧縮強度を約2倍に向上させた高強度品である（**図6**）[4]。

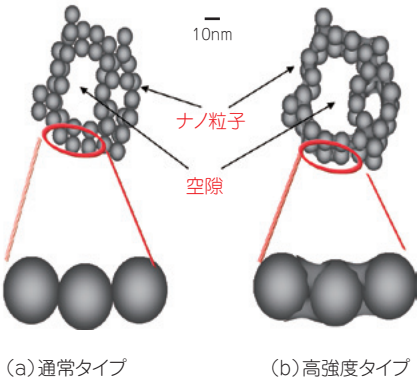


図6　ナノ粒子系断熱材における強度向上の模式図
ナノ粒子間の接合強度を特殊処理で高めることで強度を向上している。

「ロスリム®ボードGH」ではナノ粒子間の結合を向上させる特殊処理を施し，圧縮強度を改善することでハンドリング強度の向上のみならず，加工性の向上が実現できている。

3. 断熱材の破壊クライテリア

破壊クライテリアとは破壊の判定基準である。なぜ断熱材の破壊クライテリアについて考えているかといえば，それは断熱部材の力学的信頼性評価への取り組みのあるべき姿を整理したいからである。

構造材料の視点で整理すると，断熱部材の信頼性評価は，おおむね次のような流れとなる。はじめに断熱材の力学的特性を測定する。次に構造解析シミュレーションで使用環境下での発生応力（自重や力学的負荷による応力および熱応力など）を算出する。最後に断熱部材の破壊リスクを判断する。

この評価プロセスにおける主たる課題は，前半の応力予測値の妥当性と，後半の破壊リスクの見積りの2点である。前者の応力計算の妥当性問題には，断熱材の高温物性測定，繊維による力学的異方性の取り扱い方法などのハードルがある。しかし，これらは地道な評価試験や，安全側になるような計算の単純化などで解決ストーリーを描ける。しかし後者の破壊リスクの見積りはそうではない。材料の破壊挙動に応じた妥当な破壊判定の基準を採用しないと，大きな見誤りを引き起こす。

ガラスやセラミックスなどの脆性材料では引張応力（正確には最大主応力）が破壊判定の基準に使われる。金属など塑性材料ではせん断応力（正確にはミーゼス応力）が使われる。最大主応力やミーゼス応力は，引張りとせん断が組み合わさった応力下においても，簡便な破壊判定を可能にしてくれる指標である[5]。

しかし無機系断熱材の破壊に関する研究は少なく，破壊クライテリアは不確かである。無機系断熱材では，その構成材料から脆性材料の破壊判定基準を採用するのが妥当と思えるが，実際の破壊挙動は複雑である。最も単純な複合応力下での材料試験である曲げ試験においても，試験条件によっては引張破壊，せん断破壊あるいは圧縮破壊といった多様な破壊形態を見せる。また破壊の進行過程は脆性というより擬塑性破壊である。このような挙動は，かつて先進材料として盛んに研究され，最近は航空機エンジンのタービン翼への採用計画が話題になっている連続繊維強化セラミックスの破壊挙動[6]に近い。この連続繊維強化セラミックスでさえ破壊クライテリアはまだ解明の途上にある。

断熱材の破壊クライテリアに関しては，日本セラミックス協会第28回秋季シンポジウムの口頭発表で問題提起し，参考意見をいくつもいただいた。明快な方向性はまだ見いだせていないが，断熱材メーカーとして，断熱材の破壊挙動の評価とそれに基づく破壊リスクの推定は，継続的に検討すべき課題と考えている。

4. おわりに

応力とひずみをキーワードに，無機系断熱材を構造材料的視点で見た場合の課題と，当社の取り組み例を紹介させていただいた。断熱性と力学的特性の背反の解決方策，断熱部材の信頼性向上のための破壊挙動の把握，いずれも断熱材ユーザーのみなさま方のために検討をつづけていく所存である。

参考文献

1) T. Ohmura, J. Nyumura, K. Tsukahara: Study on Improvement of Reliability for Effective Thermal Conductivity of Thermal Insulation with Low BulkDensity, Proceedings of the 8th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC), Paper No.038 (2007).
2) 大村，阿部，伊藤，佐藤，阿部，内藤：ナノ粒子／繊維複合粒子による多孔質材料の作製とその特性評価，粉体工学会誌　Vol. 46，No.6，p57-62（2009）.
3) 伝熱ハンドブック，超断熱材から：ドイツ技術者協会，〈最新〉熱計算ハンドブック，日本能率協会マネジメントセンター，p Kf2（1996）.
4) 高性能超低熱伝導断熱材 TOMBO™ No.4350「ロスリム® ボード H/GH」，ニチアス技術時報，No.2，p16（2012）.
5) たとえば中沢，小泉，固体の力学，養賢堂，p236（1982）.
6) たとえば香川，八田，セラミックス基複合材料，アグネ承風社（1990）.

本稿は，日本セラミックス協会の第 28 回秋季シンポジウム（2015 年 9 月 16 日～ 18 日，富山大学）の合同セッション「応力・ひずみ⊗粉体プロセス→多孔体の機能発現と信頼性向上」にて，産業界からの話題提供として行った招待講演「無機系断熱材における応力・ひずみに関する課題」をベースに再整理したものである。

筆者紹介

佐藤　清
研究開発本部　浜松研究所長
兼 CAE 室長
博士（工学）
当社の研究開発の基礎的部門を中心にマネージメント
専門は無機繊維をはじめとする無機系材料の研究開発

＊「TOMBO」はニチアス㈱の登録商標または商標です。
＊「ホームマット」，「ロスリム」，「エコラックス」はニチアス㈱の登録商標です。
＊「ファインフレックスBIO」はニチアス㈱の商標です。
＊「エコフレックス」はSaffil Ltd.の商標です。
＊本稿の測定値は参考値であり保証値ではありません。