

サーマルマネジメント材料

Thermal Management Materials

稲田 禎一 *Teiichi Inada*
新事業本部 筑波総合研究所

地球温暖化から電子機器の発熱、電力不足下の今夏の過ごし方まで、熱エネルギーに関わる難問が山積している。当社は数多くのサーマルマネジメント材料をラインナップしているが、これらを組み合わせて適用することで、これらの問題解決に寄与できないだろうか。本稿では、1)最近の小型電子機器やハイブリッド車で重要になっている放熱材料、2)冷房、暖房などに費やす電力を抑えるために重要な断熱材料、3)廃熱のエネルギーを電気エネルギーに変換する熱電変換モジュールなど、当社の技術を融合したサーマルマネジメント材料の機能、特長について述べ、熱問題解決への取り組みについて論じる。

There are a lot of difficult problems related to thermal energy when trying to solve global warming, heat dissipation from electronic devices, and the shortage of electricity during summer 2011. The integrated thermal management materials of Hitachi Chemical are applicable to solving these problems. In this paper, the features and applications of thermal management materials, such as those used in thermally conductive materials, thermally insulating materials, and thermoelectric modules and devices, are explained. Finally, our approach to the environmental thermal problem is discussed.

1 緒言

熱はいうまでもなく、位置エネルギー、電気エネルギーなどと並ぶエネルギーの一形態である。熱に関する学問、熱力学はワットの蒸気機関を緒にして、「熱エネルギーとはなにか」、「どうすれば最大限活用できるか」との問いかけから20世紀初頭に完成した^{1,2)}。熱力学の法則は、孤立系のエネルギーの総和が一定であることや、不可逆変化の場合、エントロピーが必ず増大することを明確に示しているが、系内の熱の移動速度やエントロピー増大の速度までは規定しない。当社は系の大きさ、構造、使用する素材などを変えることにより、熱流の速度、エントロピー増大の速度を、ある程度自由にコントロールすることができる。本稿の主題であるサーマルマネジメント材料は、この自由度を適切に利用して、種々の効用を与える材料である。当社が研究対象にするのは、主に電子機器、自動車、住宅などに関わる熱問題と材料である。発熱密度が比較的小さいため、サーマルマネジメント材料により熱流を制御しやすい。本稿では、これらの熱制御に役立っている当社の材料の機能、特長を概説する。

一方、昨今の都市部のヒートアイランド現象、地球温暖化の問題、震災による原子力発電所の事故と電力不足の問題など、極めて大きな熱エネルギーを前にすると、熱を制御することの難しさを感じざるを得ない。これらの前になすすべなく立ちすくむのではなく、非力ながらも貢献したいとの気持ちはある。それらの取り組みについても少し論じてみたい。

2 放熱材料

熱の流れをコントロールする材料として、まず、放熱材料について説明する。放熱材料は最近の小型電子機器やハイブリッド車で極めて重要になっている。これはプロセッサやパワー半導体が発する熱を効率よく分散させ、一定以下の温度に抑制することが必須だからである。当社は放熱材料の技術として、**図1**に示すように、1)ナノ構造制御技術(メソゲン骨格を有するエポキシ樹脂の分子設計)、2)配向制御技術を有する。

メソゲン骨格を有する高熱伝導エポキシ樹脂は日立製作所と共同で開発した^{3,4)}。この樹脂と当社独自の硬化剤技術、セラミックス系フィラーの高充填技術を組み合わせ、熱伝導率が5~10 W/mKに達する絶縁接着シートを開発した^{5,7)}。代表的な特性を表1に示す。優れた熱伝導性だけでなく、高い耐熱性、接着力を示す。これらの技術の詳細については本誌前号⁶⁾に詳しく述べられているので、ここでは省略するが、現在、量産化を開始し、パワーモジュールやLED照明などの用途に適用され始めた。

図1 b)の配向制御技術は、黒鉛粒子を膜厚150~500 μm のシートの上下方向に配向させる当社独自の材料・プロセス技術である。**図2**に示す独自開発した薄片状で高い熱伝導率を有する黒鉛粒子と柔軟樹脂を用い、新規開発したプロセスにより黒鉛粒子をシートの上下方向に配向させた。その結果、黒鉛を上下方向に配向させたシートは、従来の球状黒鉛粒子を用いた場合や鱗片状粒子が横配向した場合に比べて、数十倍の熱伝導性を発現する^{8,9)}。現在、高性能サーバのCPU(Central Processing

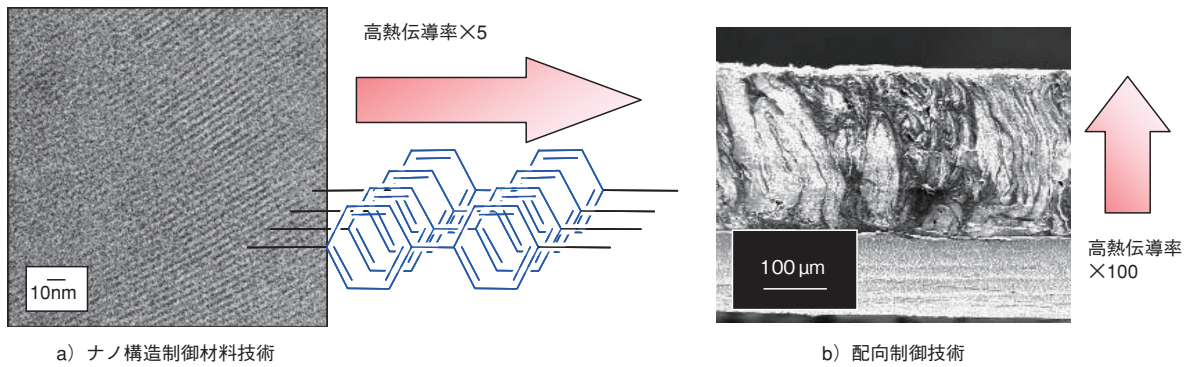


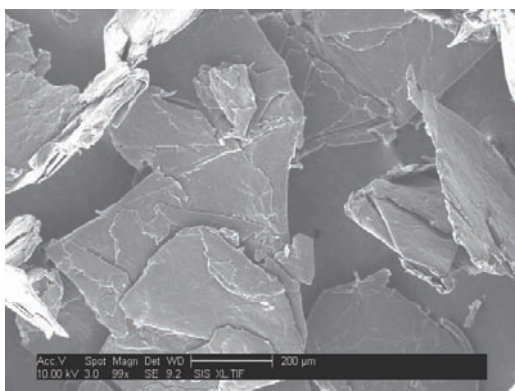
図1 当社の高熱伝導化の技術
分子設計・合成技術を駆使したナノ構造制御材料技術ならびにコンポジット内の粒子の配向制御技術が当社の高熱伝導化技術の柱である。

Fig. 1 Hitachi Chemical's technologies for high thermal conductivity
Nanostructure controlled materials and particle orientation are our company's base technologies.

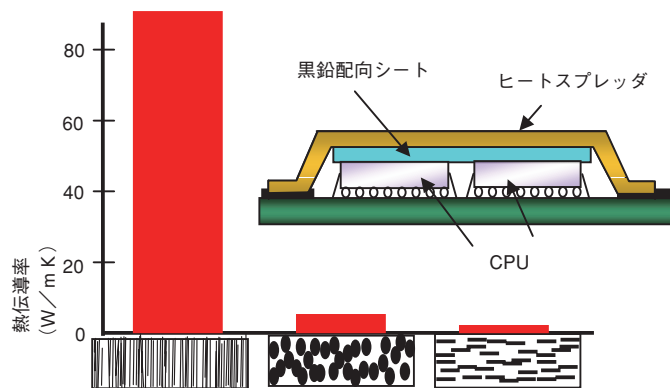
表1 高熱伝導絶縁フィルム的一般特性
優れた熱伝導率を示すほか、耐熱性、接着性なども高いレベルにある。

Table 1 General properties of thermally conductive film
Thermally conductive film shows high thermal conductivity and excellent thermal stability and adhesion strength.

特性	単位	5 Wグレード	10 Wグレード	15 Wグレード (開発品)
熱伝導率 Xeフラッシュ法	W/m K	5.0	8~10	12~15
ガラス転移温度 DMA法	℃	170~180	165~175	175~200
線膨張係数 α_1	ppm/℃	20~22	16~17	16~17
はんだ耐熱性	—	>280℃5分	>280℃5分	>280℃5分
耐電圧	kV/200µm	>7	>7	>7
弾性率	GPa	9~10	10~12	9~10
ピール強度	kN/m	1.2 (Cu35µm)	1.2 (Cu35µm)	0.5~0.9 (Cu35µm)
屈曲性	mm	Φ50-OK	Φ50-OK	Φ50-OK



a) 黒鉛粒子の形状



b) 黒鉛粒子の形状、配向状態と熱伝導率、およびシート適用箇所

図2 黒鉛粒子形状と熱伝導率、シートの適用例
黒鉛粒子の形状と配向状態により熱伝導率は大きく異なる。

Fig. 2 Graphite particles, the thermal conductivity of a sheet, and an example of application
The thermal conductivity of a sheet strongly depends on graphite particle shape and orientation.

Unit)からの熱放散に適用されているほか、後述する熱電変換モジュールの熱抵抗低減用途にも応用されている。

ほかにも、当社独自の材料技術を組み合わせ、種々の熱伝導性材料を開発上市している。それらに共通するのは、放熱性に加えたプラスアルファの機能である。いくつかの材料について、簡単に紹介したい。

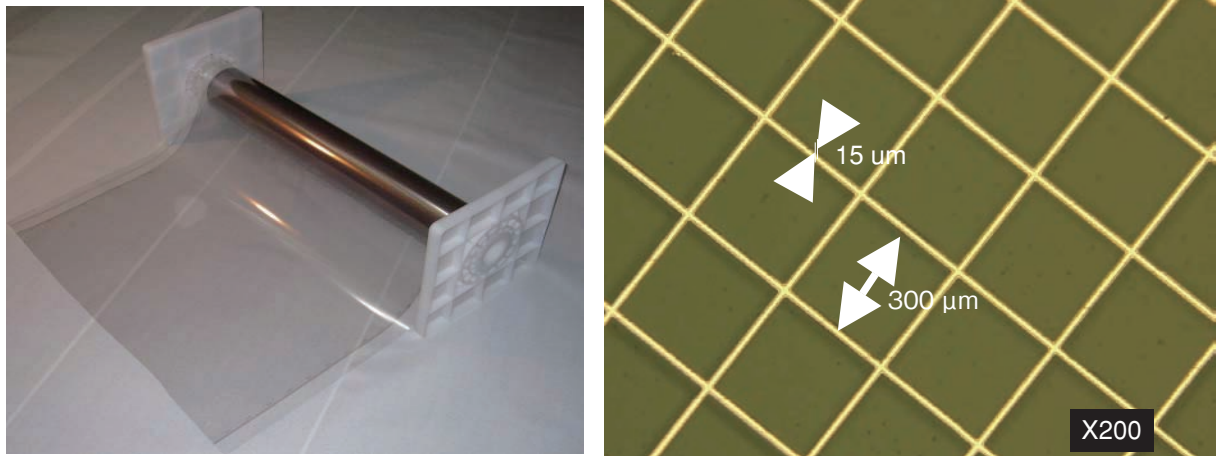


図3 透明ダイボンディングフィルムの外観とパターンの拡大写真図
 微細な銅の格子パターンを形成しているため、外観はほぼ透明で、熱伝導率が高い。
 Fig. 3 Picture and pattern of transparent thermally conductive film
 Because of the fine Cu pattern, the film is transparent and thermally conductive.

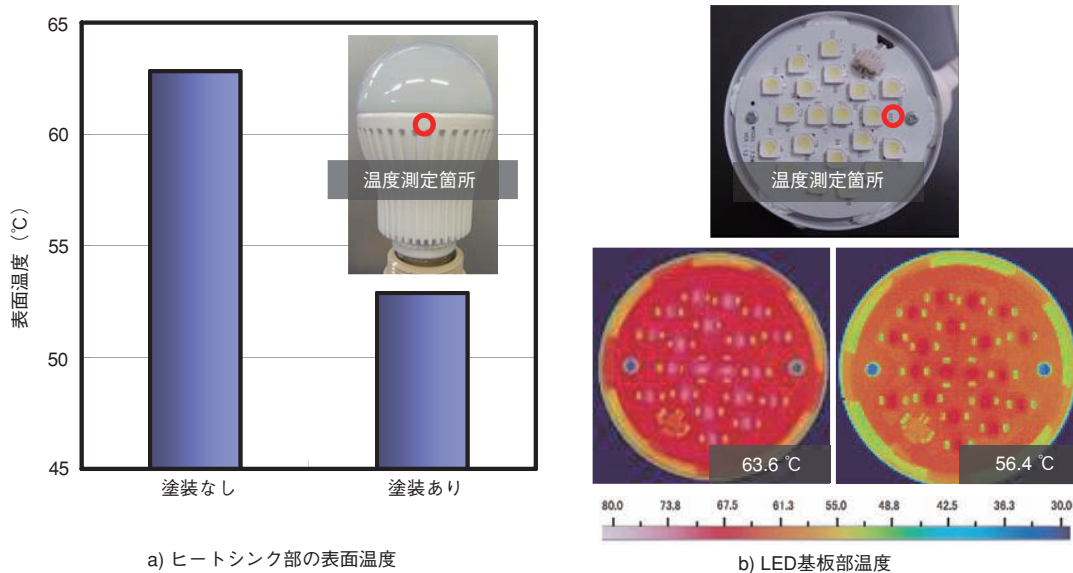


図4 HC-001塗布によるLED電球の熱放散性向上効果
 ヒートシンク部で約10℃、基板部で7℃の温度低減効果が得られた。
 Fig. 4 Effect of temperature decrease by HC-001 coating on an LED light bulb
 Temperature decreasing effects of about 10℃ at the heat sink and about 7℃ at the substrate were achieved.

昨今の省エネルギー化の要請から白熱灯、蛍光灯からLED照明への流れが加速している。LED照明に適用可能な放熱部材としては、前述の高熱伝導エポキシ樹脂を用いた金属ベース基板HT-5100M、薄く放熱性・加工性に優れるフレキシブル放熱基板MCF-5000Iが挙げられる。いずれも本号の技術紹介に取り上げられている。これらのプラスアルファ機能は、基板が薄いことにより製品を薄型化できる、軽量化できるなど数多くある。また、MCF-5000Iに予め耐熱粘着層をラミネートしたフレキシブル放熱基板 (HT-9000ITM) は、従来のように個片化した基板に粘着層を貼付する手間がなく、基板製造プロセスを簡略化できる。これらは基板材料の用途はLED照明だけでなく、小型電源用、車載用、曲面追従性を活かした被服用途など数限りない。

また、フレキシブルで透明な熱伝導シートも新規に開発した。このシートは当社独自のパターンめっき転写法¹⁰⁾を用いて製造され、可視光透過率90%と高い透明性を有する。また、図3に示すように柔軟なポリマーフィルム上に微細な銅メッシュ配線を有するため、フィルムの横方向への熱伝導率は通常の樹脂シートの30倍の6 W/mKでありながら、通常のポリマーフィルムと同等のフレキシビリティを示す。この製品のプラスアルファ機能はLEDなどの照明面にも適用可能な透明性、電磁波シールド機能などである。現在、高い光透過率と熱伝導率の両立が期待される分野へ適用検討中である。

ほかにも、熱伝導率が高いうえ、プラスアルファの機能として柔軟性を付与したメタルベース基板¹¹⁾は、実装部品のはんだ

接続部にかかる応力を低減できるため、車載用基板として10年以上の実績を有する。この柔軟樹脂の技術は、熱膨張係数の異なる材料を貼り付ける用途に広く応用されており、ダイボンディングフィルム¹²⁾、封止フィルム¹³⁾など幅広く応用展開されている。

以上、用途にあわせて、さまざまな放熱材料を提案している。しかし、最近の小型電子機器やLED照明器具では、材料を伝わった熱が機器の外部に逃げにくく、最終的に機器全体が熱くなってしまうとの問題が見られるようになった。

そのような場合、筐体から放射により熱を放散することが必要になる。熱放射はステファン・ボルツマンの式に従うため、高温体の表面を放射率の高い材料(熱放射塗料)でコーティングすることが好ましい。日立化成工材(株)と当社は、放射率、耐熱性に優れ、かつ環境にやさしい水系コーティング材HC-001を開発した。この材料はスプレー塗装などで凹凸ある表面にもコートすることができ、その後乾燥することで、強固な塗膜を形成できる。LED電球のヒートシンク部にHC-001塗布した例を図4に図に示す。塗布により、ヒートシンク部で約10℃の温度低減、LED実装基板部で約7℃の温度低減が見られており、製品寿命の大幅な改善が見込まれる。

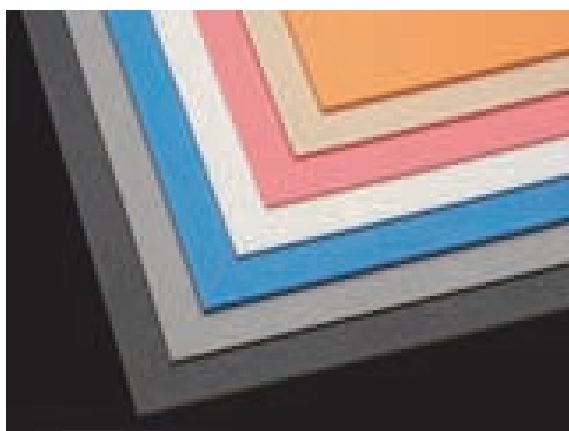
このように今後は高熱伝導材料だけでなく、さまざまな材料を組み合わせ熱の放散経路を確保することが必要になると思われる。そのためには、材料だけでなく、熱に関する基礎物性の測定技術、これをベースにしたシミュレーション技術、組み合わせ設計技術が欠かせない。当社は長年培ってきた実装材料のMaterial System Solution (MSS)技術¹⁴⁾をサーマルマネジメント材料へ展開し、材料の最適な組み合わせ提案を始めている。種々の電子機器において適切な提案をすることで、短期間に材料選定を行うことが可能になると考える。

3 断熱材：エントロピー増大を抑える材料群

これまでの述べた放熱とは全く逆の特性である断熱について論じたい。冷房、暖房などに費やす電力を抑えることは、最重要課題である。しばしば「省エネ」という言葉が使用されるが、熱力学の第一法則から、孤立系の総エネルギーは常に一定であるので、エネルギーを省くことはできない。「省エネ」の本質は、熱力学的には異なる系間の熱流入、流出を抑え、エントロピー増大を抑制することにある。当社は樹脂加工技術をベースにした、断熱材などのエントロピー抑制に寄与する材料群を有する。これらについていくつか紹介する。

系間の熱流入、流出を抑えるには、熱伝導、対流、放射による伝熱を抑制すること、すなわち断熱が必要である。当社は、図5に示す架橋化ポリエチレンフォーム「ハイエチレンS」を有する¹⁵⁾。「ハイエチレンS」の発泡倍率は10~40倍まであり、発泡倍率を選定することで、用途にあわせた最適な断熱性や緩衝性を選択できるほか、一般品に加え難燃品や、耐熱品など種々のラインナップを有する。また、表面に抗菌・防虫機能付の不織布をラミネート加工した「マイルディ」シートは災害緊急避難時のマットとして、体育館など避難所の木質床やコンクリート床からの硬さや底冷えを抑え、居住性の改善に役立つため、東日本大震災を契機に防災用品として再注目されている。

また、断熱塗料¹⁶⁾は塗膜中に断熱作用のある粒子を多く含有するため、通常の塗料の2倍程度の断熱性能を示す。水系エポキシ塗料であるため、室温乾燥するだけで優れた断熱層を形成できる。建築用途だけでなく、スマートフォンなどの小型機器



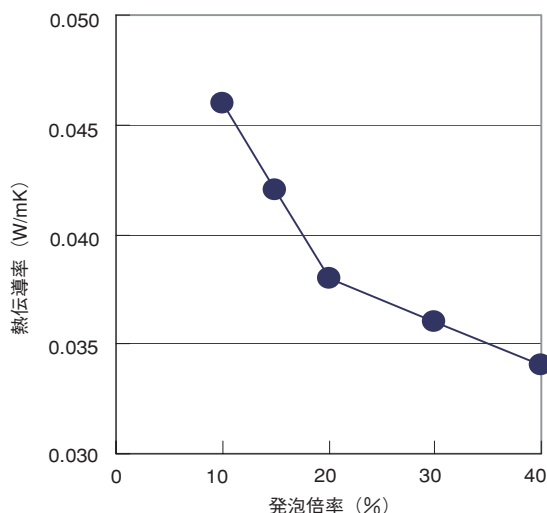
ハイエチレンSの外観

図5 発泡架橋ポリエチレン

ハイエチレンSの外観と熱伝導率発泡率の制御により熱伝導、硬度をコントロール

Fig. 5 Picture and thermal conductivity of cross-linked polyethylene foam Hiethylene S

By changing the foam rate, the hardness and thermal conductivity of the foam are controlled.



の断熱にも適用が期待されている。

上述の材料群は、フーリエの法則(熱流束は温度勾配に比例するとの法則)に従い熱の流れを抑制する。優れた断熱機能を有するが、熱流をコントロールして、室内を一定の温度に保つような機能はない。当社には熱の流入量をコントロールでき、系の温度を制御するインテリジェント材料がある。調光フィルム¹⁷⁾はマイクロカプセル中の異形粒子の配向を制御することにより、色調を濃青色から透明に可逆的に変えることができる。室内に入る入射光を調節することで、同時に流入する熱量もコントロールすることができる(図6)。つまり、調光フィルムは光のコントロールにより快適な空間を提案する製品である。ガラスやポリカーボネート板に調光フィルムをラミネートした調光ガラスや調光パネルがすでに建物や航空機などの窓ガラスに採用されている。意匠性が高く、温度制御にも有効であるため、今後は自動車、船舶、鉄道など多方面への採用が期待される¹⁸⁾。

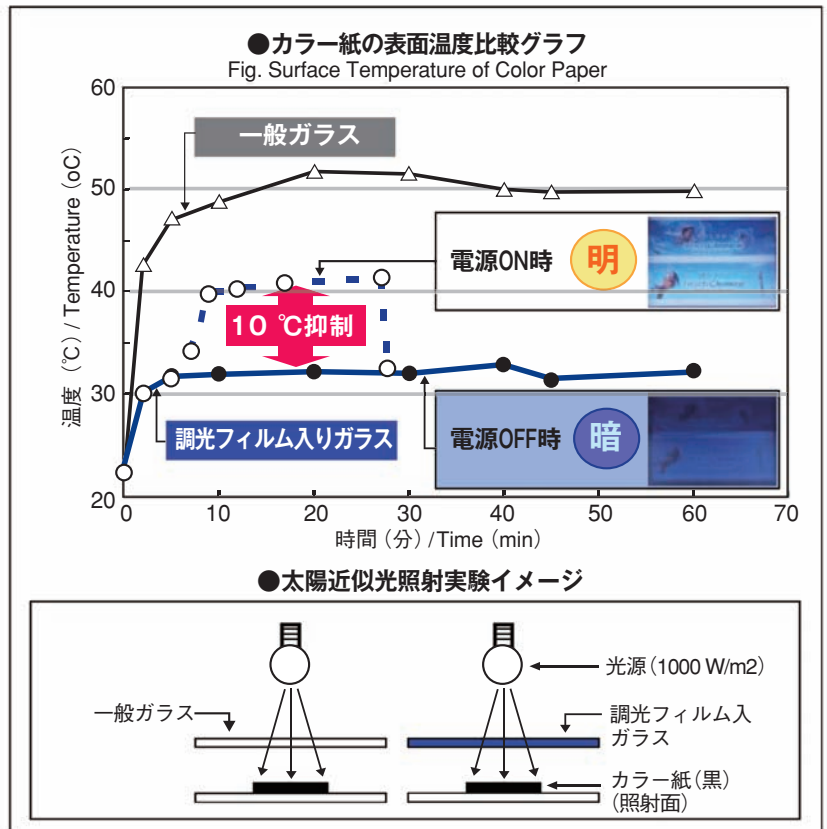


図6 調光ガラス用フィルムの熱制御特性

青色から透明へ色の濃度を切り替え、光の透過率制御により、快適な空間を提案。

Fig. 6 Temperature controllability of active light control film

The active light control film can control room temperature and keep the room comfortable by having the color of its film changed from blue to clear.

4 熱エネルギーの変換に関する材料群

上記の材料群は熱流量を幅広くコントロールすることができるが、最終的に熱エネルギーを再利用することなく、別の低温系に移動している、いわば何ら利用可能なエネルギーを得ることなく、エントロピーを増大させているに過ぎない。今後は熱エネルギーを低温側に移動する際に生じる温度差を利用し、電気エネルギーに変換し再利用することが必要になる。

当社、日立粉末冶金(株)と(財)電力中央研究所は、ベース技術である粉末冶金技術を応用した気密ケース入り高温用熱電変換モジュールを開発してきた^{19,20)}。

図7にその一例を示す。熱源温度600~1000℃で優れた発電性能を示すSiGe系(8.4 W@ΔT=630℃)のほか、汎用元素を用いながらも300~600℃程度ではSiGeよりも優れた性能を示すMg₂Si系などのモジュールを開発している。熱電変換モジュールは深宇宙探査機の電源として利用されてきた信頼性の高い発電装置であるが、今後、自動車や家庭で使用するためには、さらなる高性能化に加え、低コスト化や設置方法の工夫が必要である。熱電変換素子は温度差で発電量が決まるため、熱源とモジュールの間の熱抵抗は小さく、モジュール

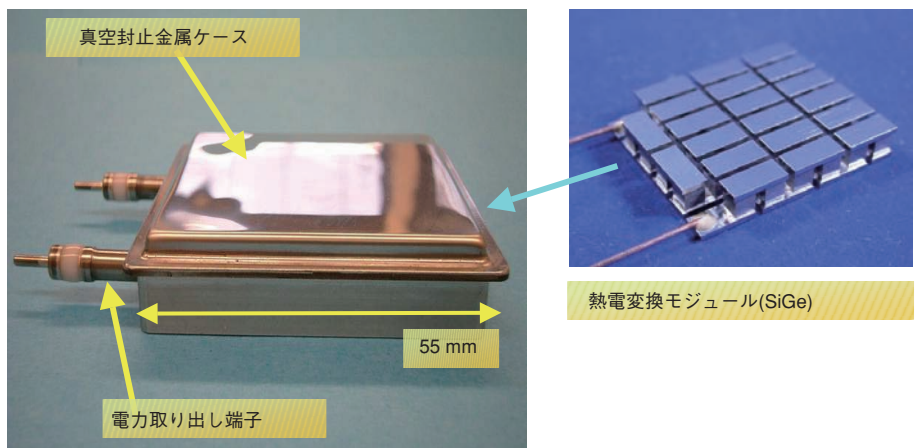


図7 熱電変換素子およびモジュールの外観

独自の真空封止モジュールは、気密性、信頼性に優れる。

Fig. 7 Encapsulated thermoelectric module and device

A thermoelectric module in a vacuum metal case has excellent reliability.

ル内部の熱抵抗は大きくすることが肝要である。熱源に直接接触する受熱方式のモジュールでは、前述の柔軟な黒鉛配向シートを間に挟み接触熱抵抗を下げる方法が実用化されている。今後はモジュールを形成する材料の低熱伝導率化により、モジュール内部のさらなる熱抵抗増大をはかる予定である。

5 環境問題への取り組み

これまで、電子機器用途を中心に、当社のサーマルマネジメント材料について概説してきた。最後に、微力ながら、CO₂ガス削減、地球温暖化の問題へ当社材料が貢献するすべがないかについて述べたい。

環境対応のサーマルマネジメント材料としては、屋根用の太陽熱反射塗料がある。太陽からの放射エネルギーの半分は赤外線領域の光であり、赤外線を反射することで、室内温度上昇を抑えられることは、従来から知られている。日立化成建材(株)の太陽熱反射塗料ハイスター遮太郎²¹⁾は赤外線を反射する特殊な顔料を含有するため、90%以上の赤外線反射率を実現している。この塗料は水系塗料であり環境にもやさしく、乾燥時間も30分程度と短いため施工性も良い。太陽熱反射塗料の効果を図8に示す。一般塗料に比べて赤外線領域の反射率が3割程度高い。そのため、夏期の太陽光照射を模した試験の結果、塗装なしに比べて25℃、一般塗料に比べて20℃、塗装表面温度を低減することができた。前述の断熱塗料やポリエチレンフォームと組み合わせると、屋根からの熱流入をさらに抑えることも可能である。

さらに、当社は放熱材料を含め配線板材料、封止材、ダイボンディングフィルムなど数多くの電子機器用材料を上市している²²⁾。電子機器、情報通信技術の発展は、

- 1) ペーパーレス, 電子商取引, 電子マネーの脱物質化
- 2) 高度交通システム, 燃費向上, 電子タグなどの流通システムの効率化

により、2020年に5%のCO₂削減効果(2000年度比、CO₂削減量として、8600万トン)をもたらすと予想されている²³⁾。これだけでは日本政府の削減目標(2020年までに25%削減、1990年比)には及ばないが、25%に対する5%は大きな比率である。サーマルマネジメント材料を含む実装材料は、直接的には地球温暖化への寄与は小さいかもしれないが、間接的に大きく寄与しているのである。このように、当社材料が直接的、間接的に地球温暖化対策に役立つ点は少なくない²³⁾。

一方で材料開発、製造に関わる企業活動自体は、当然、熱、CO₂、廃棄物の発生を伴う。これらの点まで考慮して環境に役立っているかを考える時代に来ている。企業の経済活動と環境負荷については産業連関表(レオンチェフモデル)²⁴⁾を応用して定量的に把握することができる²⁵⁾。材料設計時に適用時の効果と環境負荷を同時にシミュレートし、製品化の是非を早期に判断するシステムについて、筆者は組み合わせ線形計画法などを考案して検討している²⁶⁻²⁸⁾。この研究・開発はまだ、緒についたばかりであるが、真に熱問題に貢献するためには欠かせない観点と思われる。

地球温暖化などの地球規模の熱問題を定量的に把握するための基礎学問は、熱力学に他ならない。温暖化などの環境問題に対して様々な論争があるが、熱力学に基づき精密で客観的な議論をすべき時期に来ている。当社は、熱力学の環境問題への貢献をテーマに昨年行われた国際純正・応用化学連合第21回化学熱力学国際会議²⁹⁾に協賛するなど、環境熱力学の確立に微力ながら貢献している。天皇皇后両陛下ご臨席のもと行われた本会議レセプションには当社のサーマルマネジメント材料を展示した。会議中の国内外研究者とのディスカッションをきっかけに共同研究も進んでいる。

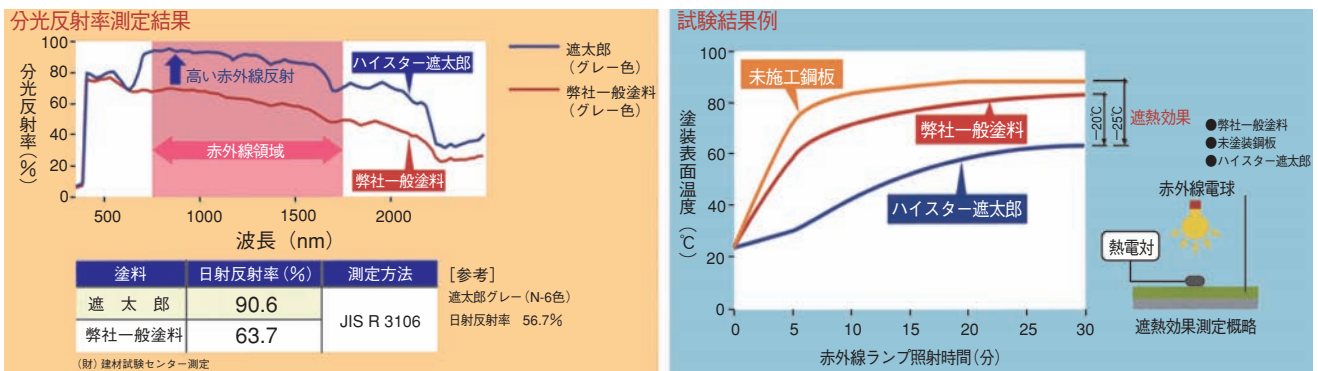


図8 太陽光反射塗料ハイスター遮太郎の遮熱効果
水系塗料に特殊フィラを適用することで、太陽光線(赤外線)を反射して表面温度上昇を抑制できる。

Fig. 8 Thermal insulation property of Hi-star ShataroTM
Paint with special filler is effective in decreasing the temperature of coated board surface.

6 結 言

前述の国際会議でチェアマンを務めた阿竹徹東京工業大学名誉教授は、エレクトロニクスなどのハイエネルギーの20世紀に対して21世紀はサーマルエネルギーの時代になるに違いないと指摘している³⁰⁾。変換と輸送が容易で電池などで貯蓄も可能な電気エネルギーはハイエネルギーと呼ばれる。それに対して変換効率が悪く、貯蓄も難しいサーマルエネルギーはローエネルギーと呼ばれる。使いにくいエネルギーである熱を無駄なく利用すること、熱の放散、保持を上手く行うことが必要な時代になった。このような時代に役立つサーマルマネジメント材料の一つでも多く提案してゆきたい。また、直接的、間接的にエネルギー問題、地球温暖化をはじめとする環境問題に寄与していきたい。

[環境熱力学, サーマルマネジメント材料についてご指導いただきました阿竹徹先生は本年8月31日にご逝去されました。謹んでご冥福をお祈りいたします。]

【参考文献】

- 1) 富永昭：誕生と変遷に学ぶ熱力学の基礎，内田老鶴圃(2003)
- 2) 山口喬：入門化学熱力学改訂版，培風館(1991)
- 3) 赤塚正樹，竹澤由高，C. Farren：放熱性の優れた高次構造制御エポキシ樹脂の開発，電気学会論文誌A，123(7)，pp.687-692(2003)
- 4) M. Akatsuka, Y. Takezawa：Study of high thermal conductive epoxy resins containing controlled high-order structures，J.appl. Polym. Sci.，89(9)，pp.2464-2467(2003)
- 5) 竹澤由高：絶縁エポキシ樹脂のランダム自己配列型高次構造制御による高熱伝導化，高分子 59(2) pp.81-84(2010)
- 6) 竹澤由高：自己配列によって高次構造を制御した高熱伝導エポキシ樹脂，絶縁性と高熱伝導性を両立したコンポジット材料と放熱材料テクノロジー，日立化成テクニカルレポート，53，pp.5-10(2009-10)
- 7) 宮崎靖夫，福島敬二，片桐純一，西山智雄，高橋裕之，竹澤由高：高次構造制御エポキシ樹脂を用いた高熱伝導コンポジット，ネットワークポリマー，29(4)，pp.216-221(2008)
- 8) 山本礼，吉田優香，吉川徹，矢嶋倫明，関智憲，“黒鉛粒子配向制御によるフレキシブル高熱伝導シート”，日立化成テクニカルレポート，53，pp.11-16(2009-10)
- 9) 山本礼，吉田優香，吉川徹，矢嶋倫明，関智憲：黒鉛粒子配向制御によるコンポジットシートの高熱伝導化，エレクトロニクス実装学会誌，Vol. 13，No. 6 (2010)，pp. 462-468.
- 10) 上原寿茂，登坂実，鈴木恭介，直之進，根岸正実，菊原得仁：パターンめっき転写法による導電性微細パターン形成技術，日立化成テクニカルレポート，53，pp.17-22(2009-10)
- 11) 小畑和仁，長尾賢一，三森誠司，島田靖，稲田禎一：熱伝導性絶縁接着フィルム，日立化成テクニカルレポート，31，pp.33-36(1998-7)
- 12) 稲田禎一：反応誘起型相分離材料を用いたダイボンディングフィルム，高機能デバイス封止技術と最先端材料，(株)シーエムシー出版刊pp.76-89 (2009)
- 13) 岩倉哲郎，稲田禎一：封止フィルムの機能と用途，高機能デバイス封止技術と最先端材料，(株)シーエムシー出版刊pp.90-100 (2009)
- 14) 安田雅昭：電子機器用実装材料システム，日立化成テクニカルレポート，40，pp.7-12 (2003-1)
- 15) 当社H.P.：http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/products/ppcm/016.html
- 16) 水系断熱塗料ハイスター断平，日立化成テクニカルレポート製品紹介，47，pp.35(2006-7)
- 17) 東田修，後藤達志，山崎仁，小川道夫：アクティブ型調光ガラス用フィルム，日立化成テクニカルレポート，49，pp.7-10(2007-7)
- 18) 当社H.P.：http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/products/arp/018.html
- 19) 石井啓：粉末冶金の環境対応への取り組み，日立粉末冶金テクニカルレポート，8，pp.3-8(2009)
- 20) 地主孝広，石島 善三，神戸 満：高温用高性能気密ケース入り熱電変換モジュールの開発，日立粉末冶金テクニカルレポート，8，pp.18-22(2009)
- 21) 水系太陽熱反射塗料ハイスター遮太郎，日立化成テクニカルレポート製品紹介，47，pp.35(2006-7)
- 22) 山本和徳：電子部品とソフトマテリアル，日本ゴム協会誌，79，pp.35-41 (2006)
- 23) 西岡秀三編著：日本低炭素社会のシナリオ 日刊工業新聞社(2008)
- 24) W. Leontief，新飯田宏訳：産業連関分析 岩波書店(1969)
- 25) 吉岡 完治，早見 均，松橋 隆治，大平 純彦著：環境の産業連関分析，日本評論社(2003)
- 26) 稲田禎一，松尾徳朗：弱条件組合せ線形計画法による熱硬化系接着フィルムの特性予測：ネットワークポリマー，36，pp.2-10(2010)
- 27) 稲田禎一：環境に優しいIT機器を支える熱力学と有機材料，環境熱力学ワークショップ「生命，環境，社会 熱力学からの貢献」(熱測定学会)(2010/3/10)
- 28) 稲田禎一，松尾徳朗：Property Optimization of Reaction-induced Polymer Alloy Film by Weak Conditioned Combinatorial Linear Programming Method，国際純正・応用化学連合 第21回化学熱力学国際会議 (2010/8/3)
- 29) 国際純正・応用化学連合第21回化学熱力学国際会議の予稿集，会議報告書など(2010)
- 30) 阿竹徹：熱測定ニューミレニアム，熱測定 27(5) pp.225(2000)