パワーデバイスにも期待される 放熱性高分子材料の設計指針

上利 泰幸*

Guide to Design Highly Thermal Conductive Polymer Materials Expected in Power Devices

Yasuyuki AGARI*

* 地方独立行政法人大阪市立工業研究所環境技術研究部 (〒536-8553 大阪市城東区森之宮 1-6-50)

* Osaka Municipal Technical Research Institute, Environmental Technology Research Division (1-6-50, Morinomiya, Joto-ku, Osaka 536-8553)

1. パワーデバイスでの期待

環境・エネルギー問題が深刻化する中、電気・ハイブリッド車など自動車の普及や風力・太陽光発電などの再生可能エネルギーの利用をはじめ、家電・産業機器の効率化によって、2050年には全世界の二酸化炭素排出量の70%の削減を目指している。その約50%の分野でパワーデバイスが活躍することが期待されている。そこで、SiC基板のパワーデバイスが利用され始めている。そのため、それを推進するために用いる高分子材料の耐熱化・高熱伝導化・低熱膨張化が強く望まれている。しかし、耐熱化は高分子自身の寄与が非常に大きい、高熱伝導化や低熱膨張化は種々の無機フィラーの複合化を工夫することで達成できることが期待される。特に第1世代、第2世代、第3世代ではパワー密度が、10、25、50 W/cm³と増大し、未来世代ではパワー密度が100 W/cm³になると考えられ、放熱はますます必要とされている。すなわち、電気絶縁性で15 W/(m K)以上の熱伝導率を持つ高分子材料の開発が望まれている。

2. 高放熱性高分子材料への期待

高分子の熱伝導率は金属やセラミックに比べ、一般的に非常に低い(図1; 0.15~0.3 W/m・K)。そのため元来、高分子は気体を複合し、断熱材として種々の分野で利用されてきたが、20年ぐらい前から、エレクトロニクス分野を中心に放熱性を向上させるため、成形性に優れる高分子材料の高熱伝導化が望まれるようになった¹⁾。しかし、高分子

自身の高熱伝導化には限界があった^{2)~4)}。そのため、高熱伝導性フィラーを複合することによって、高分子材料を高熱伝導化することが行なわれている。すなわち、金属やセラミックとの合せ面や電子部品の取り付け部の接触熱抵抗を低く抑えるために、複合高分子材料を用い、熱伝導性グリスや熱伝導性接着剤、熱伝導シートなどの開発が行なわれた。導熱グリスは熱交換器などの金属部品の繋ぎ目に用い熱伝導を助け、熱伝導性接着剤は冷却フィンと本体の金属を繋ぐ接着に用いられ、また熱伝導性導熱シートはパワートランジスタと基板との間に挟み、放熱を促進する分野に利用されてきた。最近ではノート型パソコンや携帯電話のように、さらに高集積化し高出力になっている基板を、ますます小型化する機器に搭載され、放熱性の問題がさらにクローズアップされるようになってきた⁵⁾。

さらに、自動車のエレクトロニクス化が進む中、種々の高熱伝導性高分子材料は、まずECU[†]付近や自動車に搭載されたカーナビなどのDVDの放熱を行うため用いられてきたが、次にLED照明周りの放熱にも用いられ、最近ではハイブリッド車や電気自動車のモータや電池部の放熱への利用が注目されている。

さらに最近では、パワーデバイスがシリコンタイプからSiCタイプへ変化し、パワー密度が増大し、放熱の問題がますますクローズアップされている。

前述したように、高分子の熱伝導率は金属やセラミックに比べ、一般的に非常に低い、ポリエチレンなどを延伸したときには、配向方向には炭素同士の共有結合が数多く存在するので、大きく増大することが知られている。その効果は延伸が進むにしたがい大きくなり、高い熱伝導率を得ることができる。また、同様にベンゼン環構造が配向方向に並びやすい液晶高分子の熱伝導率も比較的大きいことも報告されている。また、液晶構造の配向方向だけでなく、すべての方向で熱伝導率が向上するエポキシ樹脂などの研究も報告されている^{3)~5)}。この樹脂はガラス並みの熱伝導率を示し、さらなる高熱伝導化が大きく期待されている。また、熱は電子を伝播体として移動することも知られ

図1. 各種材料の熱伝導率

ている。そのため、電気伝導性の大きな銅や銀などは熱伝導率也非常に大きい。そのため、ポリアセチレンも高い熱伝導率 ($7.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) をもつと報告されているが、研究はあまり進んでいない。このように、高分子自身の高熱伝導化の研究も少しずつ行われるようになってきた。しかし、価格面の問題もあり、実用化されているのは複合高分子材料が多い。

一方、2000年代までは高熱伝導化一辺倒で進んできた高放熱高分子材料も、高分子の持つ柔軟性や加工性のよさを生かす、高熱伝導化と相反する機能の向上の研究も多く行われるようになってきた。また、放熱は熱伝導化だけでなく、対流や熱輻射全体の効果も重要となっているが、これまで放熱塗料は黒色が主流であり意匠性などで大きな問題があった。そのため、白色放熱塗料や透明放熱塗料が開発されている。

ここでは、高熱伝導性高分子材料の設計を行うための一般的方法および注意点を示した後、最近、検討されている相反解消機能の例や放熱塗料の現状などを示す。さらに複合高分子材料の熱伝導率やその放熱効果に関する種々の方法について説明した後、将来的展望についても述べる。

3. 高分子材料の複合化による熱伝導率の向上

3.1 粒子分散複合材料の熱伝導率に与える影響^{6)~11)}

複合高分子材料の熱伝導率に与える影響因子は表1に示す8つである。

3.2 影響因子を踏まえた高熱伝導化方法

前記した熱伝導率の8つの影響因子に対応した高熱伝導化の方法を、表1に示す。

このように6通りの高熱伝導化方法が検討されてきたが、(b)と(c)は1980年代から一般的に行われてきた方法であり、近年、(d)、(e)、(f)に示す複合方法の検討だけでなく、(a)に対するセラミックメーカーの努力も加わり、後述するように大きな進歩を得ることができている。ここでは、従来の方法を示した後、近年、検討されている方法および成果について述べた。

表1. 各種の影響因子に対応した高熱伝導化の方法

	影響因子	高熱伝導化の方法
1	高分子と充填材の熱伝導率	(a) 充填材の熱伝導率の増大
2	複合高分子材料中に占める充填材の容積率	
3	充填材の形状およびサイズの効果	(b) ファイバー状および板状の充填材の使用 (c) 充填材の粒度分布の工夫
4	近接充填材間の温度分布の影響	
5	充填材の分散状態	(d) 充填材の連続体形成量の増大 (e) 充填材を連続相に
6	高分子と充填材の界面の効果	
7	充填材の配向度	(b) ファイバー状および板状の充填材の使用
8	充填材間の界面の効果	(f) 充填材の接触面を増大し、完全な連続相に

3.2.1 従来から行われている改善方法

(i) ファイバー状および板状の充填材の使用

粒子形状も熱伝導率に大きく影響を与える。特に、ファイバー状の充填粒子を用いた場合（カーボンファイバー複合ポリエチレン）、ファイバー径に対するファイバー長の割合 (L/D) が大きくなるに従い熱伝導率が大きく増大した¹²⁾。

異方性の効果はファイバー状の効果と相乗的作用する場合も多い。例えば、黒鉛粉また、充填材の熱伝導率に異方性があり、形は板状であり、板面と平行方向の熱伝導率は面と垂直な方向に比べて、10倍以上であることが知られている。そのため、配向の影響を強く受け、球状黒鉛粉を用いたときのシート厚み方向の熱伝導率は平板状黒鉛粉の場合よりも2割ほど大きく、異方性の強い影響を受けることがわかる。また、黒鉛粉を充填したPP板の厚み方向の熱伝導率に比べ、面方向の熱伝導率は非常に大きく、その比を調べると、平板状黒鉛粉を用いた場合に大きく異方性が現れ (図2)¹³⁾、この異方性を利用することで高熱伝導化を得ることがわかった。そこで最近ではこの効果を利用し厚み方向の熱伝導率をさらに高めるため、電場や磁場、せん断力を利用し、導電系では樹脂の中で黒鉛粉を厚み方向に配向し、40~90 W/mKの熱伝導率を、電気絶縁系では、BN粉を厚み方向に配向し10~20 W/mKの熱伝導率を得ている。

(ii) 充填材の粒度分布の工夫¹⁴⁾

実用的に利用される高熱伝導性高分子材料は、高充填化によって得た場合がほとんどである。複合高分子材料の複合形態は充填量の変化によって3つの領域に分類される。第1領域は充填粒子が試料の一端から他端までの連続体を形成し始める濃度（パーコレーション[†]濃度、10~25容量%）までの領域、第2領域は、充填粒子が単独で空気中に存在したとき空気に占める割合に相当する濃度までの領域、第3領域はその濃度以後の領域で、充填粒子のパッキング性と深くかわる。電気伝導率は第1領域でMaxwellの式に従うが、第2領域になると、予測値より大きく外れ

図2. 黒鉛粉充填ポリプロピレンの熱伝導率比

ることが知られているが、熱伝導率は電気伝導率ほど顕著に増大しない。そのため、高充填される場合が多いが、通常の充填材では空隙が大きいため充填量が増大しても熱伝導率が向上しない（図3の白丸と点線）。そこで、大粒子と小粒子を8対2で混合してシリカ粉やアルミナ粉を用いると85容量%まで高充填できる能力を持ち（図4）、さらに高熱伝導率を得ることができた（図4の黒丸と実線）。

実用的なエポキシ樹脂では、電気絶縁性でかつ高熱伝導性である材料が求められ、アルミナ粉(Al_2O_3)、窒化アルミ(AlN)、窒化ホウ素などによる高充填化が行なわれている。最近では潮解しやすい欠点を改良した酸化マグネシウム(MgO)、酸化亜鉛(ZnO)も用いられている。それらの熱伝導率を表2に示す。

また図3で示したように高熱伝導率を得るには高充填化が必要なため、球状粒子を用いたり、粒子径の異なる充填材を混合し粒度分布を工夫することが行われている。まず、低熱膨張化の効果も兼ねてシリカ粒子を充填し、高熱

図3. 種々の石英粉を複合したポリエチレンの熱伝導率

図4. 種々の割合で混合した大粒子／小粒子混合石英粉の空隙率および臨界充填濃度

表2. 電気絶縁性で高熱伝導性な複合樹脂を得るために使用される充填材

材 料	熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	材 料	熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
非晶性シリカ (SiO_2)	1.4	窒化アルミ (AlN)	180
結晶性シリカ (SiO_2)	6.2	窒化ホウ素 (BN: 面方向)	150–200
アルミナ (Al_2O_3)	36	(BN: 厚み方向)	1.5–3
酸化マグネシウム (MgO)	60	酸化亜鉛 (ZnO)	54

伝導化をはかっていたが、アルミナ粒子を充填した系が最も一般的である。最近では、耐水性を高めた酸化マグネシウムや、さらに結晶性を改善し高熱伝導化したアルミナも開発され、5 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上の熱伝導率を得ている場合もある（図4）¹⁴⁾。さらに、窒化ホウ素粉や窒化アルミ粉についても複合化方法を工夫している。

3.2.2 最近開発された改善方法

(i) 充填材の連続体形成量の増大

粒子の分散状態は試料の作り方や充填粒子や高分子の性質によって大きく変動する。巨視的に見て異方性がなく、ランダムに粒子が分散している場合でも、試料の作り方や連続媒体の性質の違いによって粒子が種々の近距離秩序を持ち、異なった分散状態を示すことがある。そのため、理論計算では分散粒子のパーコレーション濃度が30容量%付近であるにもかかわらず、電気伝導率測定から求めた、種々の粒子分散複合材料系におけるパーコレーション濃度は5容量%から30容量%まで多種多様の値を示すことが知られている。この分散状態の違いが有効熱伝導率にも影響を与える。一方、通常理論式では均一にまたは完全に分散した状態の熱伝導率であると仮定し分散状態についての影響因子を用意していない。そのため、同様な複合系であるのに大きく熱伝導率が異なる場合が多く、例えば、同一の組成の黒鉛（18容量%）複合ポリエチレンであるのに、分散状態が変化し、パーコレーション濃度が元の値の1/3になると、熱伝導率は約2倍となった（図6）¹⁵⁾。また、これらの電気伝導率を調べると、CVF値（第2充填領域が始まる充填粒子の濃度（電気伝導率の対数値VS充填粒子の容量分率の関係におけるS字カーブの変曲点））も大きく変動し、熱伝導率が大きいものほど、小さかった。このことから、充填粒子の連続体が形成されやすいほど熱伝導率が大きくなったと考えられた。

(ii) 充填材を連続相に

分散状態を改善し、パーコレーション濃度を小さくしても、高熱伝導化に限界があった。そこでBNナノ粒子／フェノール樹脂系複合高分子材料について、充填材を含む相に

図5. 種々の製造会社の充填材を高充填したエポキシ樹脂の熱伝導率

図 6. 種々の方法で黒鉛粉を充填したポリエチレンの熱伝導率

おける充填量をより大きくできるハニカム構造 (図 7) を形成させ、高熱伝導化を行った¹⁶⁾。ハニカム構造が形成されている 50 vol% 以下の高充填領域では、通常分散の 2 倍の熱伝導率を得ることができることがわかった (図 8)。

(iii) 充填材の接触面を増大し、完全な連続相に

高熱伝導性充填材を複合した高分子材料では、熱伝導は主に、充填材を通して起こると考えられるが、充填材同士の繋ぎをより強くすることを目的とした研究はこれまであまり行われてこなかった。そこで、低融点合金を用い、充填材を繋ぎ高熱伝導化を目指した (図 9)。まず、従来の熱伝導性高分子材料の多くで用いられた形態、すなわち高熱伝導性のフィラーとして、窒化ホウ素、黒鉛、銅 (Cu)、アルミ (Al) を用い、PPS に高充填しても熱伝導率を測定したが、最高でも $2.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ であった。また、そのときの充填量は 50 容量 % であり、高粘度で射出成形に適さないと考えられる。しかし、 $1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の組成 A に低融点合金を複合化すると、熱伝導率が $13.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ と高くなり、さらに低融点合金、熱伝導性充填材を増量すると、熱伝導率が $28.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ とさらに飛躍的に高くなることがわかった。また、この複合高分子材料は熱伝導性の充填材料を少なくできるため、たやすく射出成形をすることができる。このように、低融点合金がネットワーク構造をとり熱伝導の経路を築き、高熱伝導率を得ることができるとわかった⁵⁾。

最近では充填材同士の接触を確実にする方法として、銀ナノ粒子の $100\sim 300^\circ\text{C}$ での融着を利用した開発が数多く行われている。これは金属ナノ粒子表面の不完全性に起因する低融点化を利用した技術である。すなわち、銀ナノ粒子の融着によって、共連続構造となり、高熱伝導化が得られ、 $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 以上の熱伝導率となる例もあり、導電系の複合高分子材料の最高値となっている (表 3)。

図 7. ハニカム構造の概念

図 8. BN ナノ粒子を充填したフェノール樹脂の熱伝導率

図 9. 充填材間の繋ぎの強化による複合材料の高熱伝導化の概念

表 3. 各種の銀ナノ粒子複合高分子材料の熱伝導率

電気特性	熱伝導率 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	複合系	開発者
導電性	66	銀/エポキシ樹脂	住友金属鉱山
導電性	60	銀/エポキシ樹脂	田中貴金属
導電性	170	銀/エポキシ樹脂	日立化成

(iv) ダブルパーコレーションの利用

2 種類の高分子を用いたブレンドにおいて、どちらかに熱伝導性フィラーを偏析させ、ブレンド系を二重海島構造としたとき、パーコレーションを起こす熱伝導性フィラー量を小さくすることができる。これをダブルパーコレーションと呼ぶが、AIN 粉をポリアミドに偏析させたポリアミド/ポリエチレンブレンド (50/50) 系で、その熱伝導率がポリアミド系の熱伝導率 3 割増になったと報告されている。

(v) 多種の粒子の利用

多種類の熱伝導性フィラーを用いた高熱伝導性高分子材料の開発が行われるようになった。多種類のフィラーを用いても、通常は下記の前測式で説明でき、各種のフィラーの熱伝導率増加は 1 次独立に作用すると考えられる¹⁷⁾。

$$(\lambda/(C1 \cdot \lambda_1)) = (\lambda_2/(C1 \cdot \lambda_1))^{(C2 \cdot V2)} + (\lambda_3/(C1 \cdot \lambda_1))^{(C3 \cdot V3)} + (\lambda_4/(C1 \cdot \lambda_1))^{(C4 \cdot V4)} + \dots \quad (1)$$

$$1 = V1 + V2 + V3 + V4 + \dots$$

λ : 複合プラスチックの熱伝導率

λ_1 : プラスチックの熱伝導率 V_1 : プラスチックの容積分率

λ_2 : 充填材 1 の熱伝導率 V_2 : 充填材 1 の容積分率

λ_3 : 充填材 2 の熱伝導率 V_3 : 充填材 2 の容積分率

λ_4 : 充填材 3 の熱伝導率 V_4 : 充填材 3 の容積分率

.....

この式では、フィラーの混合比が等しい場合、全充填量（容量 %）に対して、複合高分子の熱伝導率の対数値が比例すること意味する。そこで、銅粉と黒鉛粉とアルミナ粉を 1:1:1 で混合したフィラー粉を充填したポリエチレンの熱伝導率は式 1 に適用できることがわかった（図 10）。しかし最近、カーボンファイバーとカーボンナノチューブを用いた場合やカーボンナノチューブと黒鉛粉を用いた場合に、それ以上の熱伝導率を得る、大きな相乗効果も報告されている。

(vi) 充填材の熱伝導率の増大

前項までに示した複合方法の工夫だけでは、思ったように高熱伝導化を得ることができない場合が多かった。特に、セラミック粒子を用いた場合には、その感が強かった。最近では、表 2 に示すようなハンドブックに載っているセラミックの熱伝導率は、ブロック状の結晶欠陥が少ない固体の熱伝導率であり、粉体状の場合には製法によって大きく異なることがわかってきた。特に窒化アルミの場合には微量に含まれる酸素によってその熱伝導率は大きく低下することが知られてきた。そこで各セラミックメーカーでは、より高熱伝導性な充填材を開発し、上市するようになってきた。その結果、それを用いた複合方法も検討することによって、40~50 W/m・K の熱伝導率を持つ複合エポキシ樹脂が開発され、電気絶縁系として世界最高水準を達成している。また、長さ方向で 800 W/m・K 程度あるカーボンファイバーや面方向で 1,700 W/m・K 程度ある黒鉛粉が開発され、その複合体の熱伝導率が大きく向上することが知られている。さらに最近では、グラフェンの開発とその利用が進み、エポキシ樹脂への 30 容量 % の充填で、100 W/m・K の熱伝導率を得る場合もある。

このように、充填材の高熱伝導化と複合方法の工夫によって、複合高分子材料の高熱伝導化は大きく進み、一般の金属やセラミックと変わらない熱伝導率を得ることができるようになった。

3.3 相反機能関係の解消に向けて

前節まで述べたように、十分な熱伝導率を持つ複合高分子材料を開発できるようになってきた。しかし、そのとき充填材を超高充填する必要がある、高分子の持つ加工性の良さや柔軟性の大きさが失われやすい。そのためスーパーエ

図 10. 銅粉 (Cu) と黒鉛粉 (C) とアルミナ粉を同じ割合で混合した混合粉を複合したポリエチレンの熱伝導率

図 11. 鉄／ニトリルゴム複合材料の接触熱抵抗

ンジニアプラスチックであるポリフェニレンサルファイド[†] (PPS) などのように高分子として熔融時に低粘度であることが必要である場合も多い。すなわち、高熱伝導化は、加工性や柔軟性と相反する機能であるといえるが、その解消を行うことが行われてきた。

3.3.1 柔軟性との相反関係解消

金属やセラミックの間にはさみ、接触熱抵抗の低減を図るための高熱伝導性ゴムの開発は古くから行われてきた。その結果、シリコンゴムを中心に種々の高熱伝導性ゴムが開発され利用されている。しかし、その場合、熱伝導率と柔軟性を別々に測定して評価する場合が多かった。しかし、われわれは熱流計を用いる定常法熱伝導率測定装置を利用して直接、接触熱抵抗を測定する方法を開発して、柔軟性と熱伝導率を総合評価することができ、最適な充填量を調べることができるようになった（図 11）。ここでは 50% が最適値であることがわかる。このことで、金属表面の凹凸やゆがみに起因した種々の接触熱抵抗に対する熱伝導性ゴムシートの低減効果を評価できるようになった¹⁸⁾。

さらに、放熱性ゴムシートはこれまでシリコンゴムシートが主流であったが、低価格化やリサイクル性などの要望によってアクリル系やスチレン系のエラストマーの需要も大きくなってきた。

3.3.2 加工性との相反関係解消

加工性を大きくするため、熱可塑性樹脂系では PPS のよ

うに結晶化度の大きな高分子が用いられてきた。これは、結晶化度の大きい高分子は熔融粘度が小さく、高充填化による粘度上昇を低減できるためだが、最近では、難燃性や耐熱性など他の特性にも優れるポリカーボネートやポリアミドまで用いられるようになってきた。これは、低分子量の添加剤を用いることで低粘度化が可能になってきたためである。

4. 応用分野と将来展望

急激に発展してきた高熱伝導性高分子材料への期待に、高熱伝導化の技術はある程度、応えてはいるが、相反機能解消や低価格化に対応できていないのが現状である。そのため、さらにブレークスルーする方法が求められている。これからの開発のキーワードとしては、熱輻射まで含めた総合的な放熱性の向上と評価を図ることである。

今後も、エレクトロニクスや自動車分野のニーズに引っぱられ、ますます高分子材料の高熱伝導化の技術が発展していくと期待される。

(2014.7.7- 受理)

文 献

- 1) 上利泰幸：“エレクトロニクス機器用高熱伝導性高分子材料の開発,” 高分子, Vol. **35**, p. 889, 2006
- 2) T. Kato, M. Nagahara, Y. Agari, and M. Ochi: “Relation between thermal conductivity and molecular alignment direction of free-standing film aligned with rubbing method,” J. Polym. Sci., Part B, Polym. Phys., Vol. **43**, pp. 3591–3599, 2005
- 3) M. Harada, M. Ochi, M. Tobita, T. Kimura, T. Ishigaki, N. Shimoyama, and H. Aoki: “Thermal-conductivity properties of liquid-crystalline epoxy resin cured under a magnetic field,” J. Polym. Sci. Part B, Polym. Phys., Vol. **41**, pp. 1739–1743, 2003
- 4) M. Akatsuka and Y. Takezawa: “Study of high thermal conductive epoxy resins containing controlled high-order structures,” J. Appl. Polym. Sci., Vol. **89**, No. 9, pp. 2464–2467, 2003
- 5) 上利泰幸, 紙屋畑恒雄：“熱伝導率 60 倍の樹脂を開発 金属部品を安価なプラスチックに代替—まずは光ピックアップから,” 日経エレクトロニクス, 12 月 16 日号, pp. 127–136, 2002
- 6) D. M. Bigg: “Mechanical, thermal, and electrical properties of metal fiber-filled polymer composites,” Polym. Eng. Sci., Vol. **19**, pp. 1188–1192, 1977
- 7) 山田悦郎：“分散系混合物の有効熱伝導率,” 熱物性, Vol. **3**, pp. 78–83, 1989
- 8) Y. Agari, A. Ueda, and S. Nagai: “Thermal Conductivities of a Polymer Composite,” J. Appl. Polym. Sci., Vol. **49**, No. 9, pp. 1625–1634, 1993
- 9) A. Eucken: Forsch. Gebiete Ingenieur., B-3, 1932
- 10) F. A. Johnson: Atomic Energy Research Establishment R/R, Vol.

1, p. 2578, 1958

- 11) H. Fricke: Phys. Rev., Vol. **24**, p. 575, 1924
- 12) Y. Agari, A. Ueda, and S. Nagai: “Thermal Conductivity of a Polyethylene Filled with Disoriented Short - Cut Carbon Fibers,” J. Appl. Polym. Sci., Vol. **43**, No. 6, pp. 1117–1124, 1991
- 13) 上利泰幸, 神島聡介：“黒鉛粉添加によるプラスチックの高熱伝導化技術,” コンバーテック, No. 406, pp. 73–76, 2007
- 14) Y. Agari, A. Ueda, M. Tanaka, and S. Nagai: “Thermal conductivity of a polymer filled with particles in the wide range from low to super-high volume content,” J. Appl. Polym. Sci., Vol. **40**, pp. 929–941, 1990
- 15) Y. Agari, A. Ueda, and S. Nagai: “Thermal Conductivities of Composites in Several types of Dispersion Systems,” J. Appl. Polym. Sci., Vol. **42**, No. 6, pp. 1665–1669, 1991
- 16) 上利泰幸, 平野 寛, 門多丈治, 長谷川喜一：“ハニカム類似構造をもつ窒化ホウ素／フェノール樹脂複合材料の熱伝導率,” ネットワークポリマー, Vol. **32**, No. 1, pp. 10–18, 2011
- 17) Y. Agari, M. Tanaka, S. Nagai, and T. Uno: “Thermal conductivity of Polymer Composite Filled with Mixtures of Particles,” J. Appl. Polym. Sci., Vol. **34**, No. 4, pp. 1429–1437, 1987
- 18) 吉田隆彦, 上利泰幸, 吉門進三：“電磁波吸収複合ゴム材の吸収特性と接触熱抵抗の評価,” 電気学会論文誌 A, Vol. **132**, pp. 180–186, 2012

† 用語解説

ECU：エンジンコントロールユニットの略であり、自動車エンジンの運転における制御を電子制御された補助装置を用いて行う際に、それらを総合的に制御するマイクロコントローラである。

パーコレーション：絶縁性のプラスチックに導電性のフィラーを充填させていくと、プラスチック内でフィラーによる導電性ネットワークが形成される。そして、複合系の導電率はあるフィラー充填量で急激に増大し、導電体へと変化します。この絶縁体から導電体へ転移的に変化する濃度をパーコレーション濃度と呼ぶ。

ポリファニレンサルファイド：電子材料や自動車用耐熱材料としてよく使われる最も強靱なプラスチックの一つであり、結晶化度が大きいいため熔融時に粘度が小さく、種々のフィラーを高充填化して用いることが多い。

著者紹介

上利泰幸 (あがり やすゆき)
(地独) 大阪市立工業研究所
環境技術研究部長 工学博士
1979 年大阪大学大学院工学研究科前期博士課程修了。
同年 大阪市立工業研究所 就職 現在に至る。
現在、高分子材料の高熱伝導化に関する研究に従事。