IT 関連の熱管理対策材料の開発 —シリコン系熱伝導性材料—

美 田 邦 彦

優れた耐熱性や電気絶縁性、難燃性を有するシリコン系ポリマーは、放熱材料の充填剤のバインダーとして適切な材料である。シリコンをベースとした放熱材はグリースやエラストマーシート、ゲルおよびフェイズチェンジシートといった多岐の製品形態に及び、用途や作業性、コストなどによって使い分けされている。

1. はじめに

近年の CPU (Central Processing Unit) やチップセットの高性能化の進み具合の速さは目を見張るものがある。これに伴い増大していく発熱量の上昇を抑えることが重要な課題となっており、その中心となる放熱材料に対する要求特性はますます厳しいものとなっている。

CPU の放熱をいかに効率的に行うかは CPU などの発熱体とヒートシンクなどの冷却系をいかに熱抵抗の少ない材料で接続するかが重要なポイントである¹⁾。

2. シリコン系ポリマーバインダーの特徴

放熱材料は一般的にフェイズチェンジシート（以下 PCS）やエラストマーシートのようなシート状成形物とグリースやゲルのようなペースト状組成物に分類される。

いずれの場合においても組成的には下記 3 種類に分類される。

- ポリマーバインダー
- 熱伝導性充填剤
- 各種添加剤

ポリマーバインダーとしては充填剤に対する高いぬれ性、柔軟性、熱安定性、低温安定性といった特性が要求される。

シリコン系ポリマーは代表的なポリマーバインダーであるが、一般的性質として、シリコンはシロキサン結合（ -O-Si-O- ）を主骨格としており、結合エネルギーが炭素

結合より大きく非常に安定している²⁾。このため、他の有機系ポリマーに比べ、優れた耐熱性、耐候性、電気絶縁性、難燃性、および化学的安定性などを有する特徴をもつ。

シリコンと他ポリマーの特性比較を図 1 に示す。

3. 熱伝導性充填剤

ポリマーバインダーとしてのシリコン樹脂自体の熱伝導率は低い。代表的な充填剤を表 1 に示すが、熱伝導率の高い無機系充填剤（アルミナや窒化ホウ素など）や金属系充填剤（アルミニウム、銀、銅など）の充填が必須とされる。

図 1 シリコンと他のポリマーの特性比較

表 1 各種材料の熱伝導率と比重

材料	熱伝導率 (W mK^{-1})	比重
シリコン	0.16	0.97
Diamond	2,000	3.5
c-BN	600	3.47
AlN	320	3.26
SiC	60	3.17
Al_2O_3	27	3.98
ZnO	25	5.5
Ag	427	10.5
Au	315	19.3
Al	237	2.70

MITA, Kunihiko

信越化学工業(株)シリコン電子材料技術研究所 (379-0224 群馬県碓氷郡松井田町人見 1-10) 主席研究員。1981 年 横浜国立大学大学院工学研究科修士課程修了。シリコン放熱材料の開発に関する研究に従事

Development of Thermal Interface Materials for IT-Related Applications (Silicone Type TIM)

4. 充填剤の充填率と熱伝導率の関係

各種熱伝導性充填剤と充填率の関係を検討したところ、充填率 40 vol% を超える領域では図 2 のようにひとつの曲線にのる結果となった。

このことから高熱伝導が要求されるような領域では熱伝導率は充填剤の種類には依存せず、その充填率により組成物の熱伝導率が決定してしまうということが判断できる。

一方、熱伝導率は理論式によっても推定することができる。Maxwell-Eucken の理論式³⁾はポリマーの連続相中に球状粒子が分散している状態で次のように表される。

$$\lambda_c = \frac{\lambda + 2\lambda_0 + 2\phi(\lambda - \lambda_0)}{\lambda + 2\lambda_0 + \phi(\lambda - \lambda_0)} \lambda_0$$

ここで、 λ_c : 配合後の熱伝導率、 λ_0 : シリコンの熱伝導率、 λ : 熱伝導性充填剤の熱伝導率、 ϕ : 熱伝導性充填剤の容積分率

$\lambda \gg \lambda_0$ の場合には

$$\lambda_c = \frac{1 + 2\phi}{1 - \phi} \lambda_0$$

と表され、充填剤の熱伝導性に依存しない。

一方、Bruggeman の理論式⁴⁾は粒子どうしの相互作用を考慮して Maxwell の理論を拡張したもので次のように表される。

$$1 - \phi = \frac{\lambda_c - \lambda}{\lambda_0 - \lambda} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)^{1/3}$$

また Nielsen の理論式⁵⁾は充填剤のアスペクト比、最大充填率を考慮した形で表される。アルミナ粒子/シリコンポリマーバインダーの系について、これらの式に基づいて計算されたアルミナ容積分率と熱伝導率の関係を図 3 に示す。

上記のケースでは Bruggemann の理論式が実測値と比較的良好な一致を示していることがわかる。

熱伝導性充填剤の高充填化には粒子形状、粒径の異なる粒子の組合せや充填剤のぬれ性を向上させるシリコン成分の選択などが必要である。

粒子径については粒子径の大きいものを充填するほど全体の熱伝導率は大きくなる。また大粒径/小粒径など粒径の異なる粒子を細密充填率を考慮しながら組合せて充填する方が単一粒子を充填する場合よりも高い熱伝導率が得ら

図 3 アルミナ配合における熱伝導率の理論式と実測との比較

れる。

5. 放熱材料の使用部位と低熱抵抗化

放熱材料は大きく分けて TIM1 とよばれる CPU またはチップセット内部のダイとヒートスプレッダー間に使用される放熱材料と TIM2 とよばれる CPU またはチップセットの外部とヒートシンクやヒートパイプなど冷却ユニットの間に使用されるものに分類される。TIM1 は限られた容積のパッケージ内に組み込まれてかつメンテナンスフリーである必要があるため、熱抵抗の小さい放熱ゲルやグリースが主として用いられる。一方、TIM2 は放熱特性の良好さとともにメンテナンス性、作業性の良好な材料が要求され、TC シート（エラストマーシート）やフェイズチェンジシート、グリースなどが主に使用される。

放熱材料の低熱抵抗化を図るためには熱伝導率 λ が大きいほど、また塗布時（使用時）の厚さが薄く、接触面積が大きいほど、かつ発熱体や冷却体との接触熱抵抗が小さいほど有利であるが、熱伝導性をあまりに向上させると材料の高硬化や流動性の低下を招いて厚さや接触熱抵抗といったほかの項目に悪影響を及ぼすので実装でのバランスが必要になってくる。

6. シリコン系放熱材料

シリコン系の放熱材料はシート状成型物とペースト状組成物に分類される。

シート状成型物はさらにエラストマータイプの放熱シート、低硬度放熱シート、電磁波吸収放熱シートなどや熱軟

図 2 各種熱伝導性充填剤と熱伝導率の関係

図 4 放熱材料使用部位

化タイプのフェイズチェンジシートに分類される。

ペースト状組成物は非硬化タイプの放熱グリースや、塗布時はペーストタイプでありながらその後のプロセスで加熱硬化させてエラストマー化させるタイプの放熱ゲルや接着剤といった品種に分類される。

それぞれのシリコン系放熱材料の用途と特徴をそれぞれ表2と表3に示す。

これらのシリコン系の放熱材料のうち、ここでは比較的新しくマーケットに紹介されてきているフェイズチェンジシートと電磁波吸収放熱シートについて紹介したい。このほかの放熱材料は他の文献に詳しく紹介されている^{6)~8)}。

7. シリコン系フェイズチェンジシート (PCS)

シリコン系PCSはシリコンレジンベースポリマーのバインダーとしている。ワックスやオレフィン系のPCSに比べ軟化時の流動性が低く設計されており、ポンプアウトとよばれるポリマーの分離流出のトラブルを起こしにくい。図5にシリコン系PCS (PCS-TC-10)とオレフィン系PCSとのポンプアウト性の比較結果を示す。試験方法として各々のサンプルをガラス板を介して締め付け力0.9 kgのクリップではさみ、70℃/1時間後ヒートサイクル125℃→-55℃各10分のサイクルを25サイクル経たあとのオイルのにじみ出し（広がり）をチェックしたものである。黒線が試験前の境界を示しているが、シリコン系は試験前後でPCSの境界に差がないことがわかる。一方、オレフィン系PCSはヒートサイクルを課す以前にすでに70℃/1hで図のようなポリマー分の広がりが観察された。70℃は実際のCPU環境でPCSがさらされる温度として考えられる温度である。

さらにシリコン系のPCSはUL94 V-0相当の難燃性を有することも大きい長所としてあげられる。

本用途に開発された材料の特性を表4に示す。

8. 電磁波吸収放熱シート

シリコンゴムに軟磁性粉末を配合し、磁性損失を利用して電磁波を吸収する特性と放熱特性を併せ持ったエラストマータイプの放熱材料である。

こうした電磁波吸収タイプの放熱シートはノイズ対策と放熱対策の部品として電子機器内部（LSIなど）に使

表2 シリコン系放熱材料の用途

品種	用途
放熱シート	電源用パワートランジスタ、パワーモジュールの放熱絶縁温度感知部の絶縁および伝熱媒体
低硬度放熱シート	CPU, LSIなどの半導体デバイスの放熱絶縁
フェイズチェンジシート	CPUとヒートシンクとの伝熱媒体
放熱グリース	電源用パワートランジスタ、パワーモジュールの放熱 CPU, LSIなどの半導体デバイスの放熱 サーミスタ、熱電対などの測定箇所との密着
放熱ゲル、接着剤	電子部品の放熱固定用 ヒートシンク、ヒートパイプの接着固定
電磁波吸収放熱シート	電磁波を発生する半導体デバイスの放熱

表3 シリコン系放熱材料の特徴

品種	長所	短所
放熱シート 低硬度放熱シート 電磁波吸収放熱シート	取扱い性良好 安定性大	接触熱抵抗大 薄膜化が困難 (Min 0.1 mm)
フェイズチェンジシート (PCS)	取扱い性良好 接触熱抵抗小、 薄層化可能	リワーク性困難 ポンプアウト可能 性あり
放熱グリース	接触熱抵抗小、 薄層化可能	ポンプアウトしやすい 作業性劣る
放熱ゲル、接着剤	接触熱抵抗小、 薄層化可能 安定性大	リワーク性困難 作業性劣る

図5 シリコン系PCS (PCS-TC-10)とオレフィン系PCSとのポンプアウト性の比較

表4 フェイズチェンジシートの特性

	測定方法	PCS-TC-10	PCS-TC-11	PCS-TC-20
特徴	—	低熱抵抗	一般用	絶縁性
軟化点(℃)	信越法	48	48	48
熱伝導率(W mK ⁻¹)		5.1	4.7	3.3
熱抵抗 (℃ cm ⁻² W ⁻¹)	75 μm 厚 50 μm 厚 25 μm 厚	0.26 0.21 0.16	0.27 0.22 —	0.28 0.22 0.14
難燃性	UL94	V-0 相当	V-0 相当	V-0 相当

用される。電子機器ノイズはおよそ 100 MHz から 20 GHz とされており、基本的にはシートに吸収された電磁波が熱に変換されこの熱がシートの放熱特性により外部に逃がされるという仕組みである。

表 5 に電磁波吸収放熱シート製品の特
性および図 6 に各製品の透磁率虚数部（磁
性損失）の周波数特性を示す。

表 5 電磁波吸収放熱シート製品の特
性

品名	熱伝導率 (W mK ⁻¹)	透磁率 1 GHz		硬さ アスカ C	比重 23℃
		μ'	μ''		
EMI-TC301	3.5	4.1	1.4	60	4.56
EMI-TC302	3.3	3.7	2.9	60	4.42
EMI-TC101	0.8	4.9	2.0	54	2.80
EMI-TC102	0.8	6.4	5.5	60	2.74
EMI-TC103	1.3	3.6	3.2	53	4.12

9. おわりに

シリコン系の放熱材料はこれまで各種機器の電源やコンピュータの CPU やチップセット関係に多く使用されてきた。今後はシリコン本来の特徴である耐熱性や難燃性が重点的に活用される用途—たとえば自動車関係の放熱部品といった幅広い用途に展開されていく見通しである。充填剤の研究も含めて今後のますますの発展が期待される。

文 献

- 1) 国峰尚樹: “熱設計完全入門”, 日刊工業新聞社, 東京, 1997, p. 174
- 2) 伊藤邦夫編: “シリコンハンドブック”, 日刊工業新聞社, 東京, 1990, p. 112
- 3) A. Eucken: Forschg. Gebiete Ingenieurw., B3, Forschungsheft, Nr. 353, 16 (1932)

図 6 各製品の透磁率虚数部（磁性損失）の周波数特性

- 4) L. E. Nielsen: *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, 13, 17 (1974)
- 5) D. A. G. Bruggemann: *Ann. Phys.*, 24, 636 (1935)
- 6) 磯部憲一: *Material Stage*, 1, 12 (2001)
- 7) 山田邦弘: 熱設計・対策技術シンポジウム予稿集, pA4-5-1 (2002)
- 8) 中野昭生: 02-2 ポリマーフロンティア 21 講演要旨集, “IT の発展に必要な高分子の放熱・難燃制御技術”, 2002, p. 11