導電性接着剤における電極間導電経路の3次元可視化

荒尾 修*, 新帯 亮*, 杉浦昭夫*

The 3D-Visualization of Conductive Pathway between Electrodes in Conductive Adhesive

Osamu ARAO*, Akira SHINTAI*, and Akio SUGIURA*

* 株式会社デンソー材料技術部 (〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町 1-1)

* Department of Material engineering, DENSO Co., Ltd. (1-1 Syowa-cho, Kariya-chi, Aichi 448-8661)

概要 樹脂中の導電フィラを介して導電・放熱が行われる導電性接着剤において、実装後の抵抗測定などの巨視的な研究や、フィラ間界面での抵抗評価といった微視的な研究は進みつつある。しかし、電極間でどのように導電が行われているかという両者の間に位置する研究はあまり進んでおらず、導電信頼性の検証がされていない。これは、通常の平面観察に対し、導電性接着剤内部の導電フィラ間では3次元的に導電経路を形成するため、これを正確に観察する手法が無かったことに起因する。今回、正確な研磨と観察を繰り返すことで立体的観察を行うFIB-SEMの手法を用いることで従来観察ができなかった導電経路の可視化を行った。また、この結果を利用することにより、実機に極めて近いモデルでの導通解析が実施可能となったので、これを報告する。

Abstract

Previous studies of the macroscopic (the resistance after mounting) and microscopic (the contact resistance between fillers) measurements of conductive adhesives have made progress. However, the conduction mechanism between the electrodes of devices and circuit boards has not been clarified. This is because flat (2D) observations are usually used, though the actual conductive behavior is three dimensional (3D). In this report, we observed the 3D-conductive line using FIB-SEM, with repeated polishing and observation. Our results show that we successfully analyzed an accurate model.

Key Words: Conductive Adhesive, Conduction mechanism, Focused Ion Beam - Scanning Electron Microscope, FIB-SEM

1. 緒言

近年、自動車搭載部品における電子化が急速に進んでいる。機能面においても、電子製品の小型・高集積化が加速しているが、これに伴いはんだ接続部の接続面積が小さくなり、はんだ接続部への応力集中が増大するため接続強度が低下する。これに対し、導電性接着剤は樹脂接着剤中の導電フィラを介して導電を行う (Fig. 1) ため樹脂特有の柔軟性を有し、この応力集中を抑制できるので、今後の適用拡大への期待が大きい^{1)~6)}。

しかし、導電性接着剤の導電や放熱のメカニズムは解明されていない部分が多い。導電や放熱は接着剤中の導電フィラを介して行われるため、メカニズムの解明にはまず導電フィラの分散状態の把握、すなわち接着剤中の電気的

な導電経路の解析が必要である。最近の研究において、数nm単位での微視的なフィラ単体間界面レベルの解析は実施されているが^{7),8)}、電極間の接着剤全体での導電経路を正確に解析した例は無く、材料開発における最適なフィラ形状の設計が困難である。

このため、本研究は導電性接着剤において、導電経路を正確に解析し、抵抗値として定量化することで、電極間の接続メカニズムを検討することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 実験の考え方

導電性接着剤の電極間の全電気抵抗を R_{Total} とすると、 R_{Total} は巨視的には電極と導電性接着剤の接着面の抵抗である界面抵抗 (Interface resistance) R_{Int} と、導電性接着剤の体積抵抗 (Volume resistance) R_{Vol} から構成されている。さらにこれらの抵抗は、微視的には接着剤中に多量に分散されたフィラや電極間においてトンネル効果などにより電子受け渡す際の接触抵抗 (Contact resistance) と、フィラ内部の体積固有抵抗によって形成されている。導電性接着剤全体の一般的な体積抵抗 ($10^{-4} \sim 10^{-1} \Omega \cdot m$ 程度) に対し、Ag フィラの体積固有抵抗は $1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ と小さく、影響が少ない

Fig. 1 Outline drawing of Conductive adhesive

Fig. 2 The classification of resistance

と考えられるため、体積固有抵抗は無視して検討している。本論文で検討した構造においては、部品電極はAgめっき、フィラはAg、基板電極はNiめっきであるため、組合せとして、Ag-Ag間の接触抵抗 R_{Ag-Ag} とNi-Ag間の接触抵抗 R_{Ni-Ag} の2種類の接触抵抗が存在する(Fig. 2)。

導電経路の明確化が困難な要因のひとつに、従来の断面観察は2次元なのに対し、実際の導電経路は樹脂中に3次元で形成されていることがある⁷⁾。つまり、導電経路を正確に把握するには、3次元的な観察手法が必要となる。この実現のため、今回新規観察手法として、FIB-SEMによる3次元観察⁹⁾を導電性接着剤に適用し、フィラ分散状態の可視化を行う。

さらにこのフィラ分散状態から、マクロ特性の予測を検討する。導電性接着剤の主な必要特性として導電性・放熱性¹⁰⁾があるため、今回、フィラ分散状態の観察結果から、実サンプルでのこれらの予測を試みた。

2.2 実験手順

2.2.1 界面抵抗評価

電極間の導電経路における抵抗には、電極と導電性接着剤の接着面の抵抗である界面抵抗と、導電性接着剤の体積抵抗があるため、まずこの層別のための評価を行った。この評価は、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)プロジェクトによって検討された導電性接着剤の標準評価方法¹⁰⁾を利用している。

評価方法の概略をFig. 3に、評価サンプルの写真をFig. 4に示す。本評価は、下地の基板電極として電解Niめっきを用いている。このプリント配線板上に一定間隔を設けて電極を配置している評価サンプルを準備した。この電極上に一定厚み(0.13 mm)で接着剤を塗布し、硬化させる。このとき、電極測定間隔、つまり電極間の導電性接着剤の長さを変えて抵抗を測定していくと、接着剤の長さで抵抗値をプロットした傾きが体積抵抗を表し、また、直線のy切片(電極間隔0)が界面抵抗を表すこととなる。

2.2.2 FIB-SEMによる3次元観察

導電経路の観察法として、FIB-SEMによる3次元観察を行う。これは、連続的に一定厚み間隔でFIB(集束イオンビーム装置: Focused Ion Beam)による電子研磨を行い、

Fig. 3 Test method of Interface and volume resistances

Fig. 4 Test sample of Interface and volume resistances

各面をSEMにより観察し、これらのSEM像を再構成することにより、3次元化を実現する技術である⁹⁾。従来このFIB-SEMは主として数 μm 程度の微細な部分の観察に用いられているが、今回導電性接着剤に適用するにあたり、装置上の最大の視野広さである厚み方向約20 μm を0.1 μm 毎に観察することで実施する。また、2.0 mm $\times$ 1.2 mmサイズのチップコンデンサを導電性接着剤により実装した構造を実サンプルと定義し、観察を行う。この実サンプルは、部品電極はAgめっき、フィラはAg、基板電極はNiめっきという構造をとっている。

3. 実験結果

3.1 界面抵抗評価

界面抵抗評価結果をFig. 5に示す。横軸は電極間の導電性接着剤長さ、縦軸は抵抗値を表している。Fig. 5において、直線を外挿したy切片である48 m $\Omega\cdot\text{mm}^2$ が単位面積での界面抵抗となり、実サンプルでの電極と導電性接着剤の界面の面積は1.2 mm 2 程度であるため、実サンプルでの界面抵抗は40.0 m Ω となる。また、直線の傾き137 m $\Omega\cdot\text{mm}$ が単位厚みでの体積抵抗となり、実サンプルでの導電性接着剤の厚みは27.7 μm 程度であるため、実サンプルでの体積抵抗は3.8 m Ω となる。今回のNiめっきにおいては、界面抵抗は体積抵抗に比べて1桁大きいことが示された。

Fig. 5 Stratified resistance between interface and volume

Fig. 6 Consecutive photos in conductive adhesive by SEM

3.2 FIB-SEM 観察

3.2.1 FIB 研磨による連続 SEM

装置内にて FIB 研磨と SEM 観察を連続的に実施した。各断面の観察結果を Fig. 6 に示す。

3.2.2 3 次元化

連続した SEM 像を 2 値化し、フィラと電極に分けて 3 次元に再構成した (Fig. 7)。観察断面から奥行方向には 100 nm の間隔で FIB 研磨されており、情報も 100 nm 間隔となっているが、フィラもブロック状であるため、1 画素 100 nm の間隔に対しフィラ占有率が 50% を超えている、すなわちフィラの間隔が 50 nm 以下であれば、平均的には奥行方向にもフィラが存在し、接触しているとみなした。間隔 100 nm に対し 50% の占有率で接触しているとみなしているため、3 次元に再構成することで、樹脂中の大量のフィラ充填が確認できるが、これではまだ導電経路の観察を行うことができない。

3.2.3 導電経路の可視化

導電経路を可視化するため、細線化処理を行った。細線化処理とは 3 次元で再構成したフィラの分散状態からフィラを削っていき、図形の中心線を導電経路として求める処理であり、Fig. 8 の右側の線が樹脂中の導電経路を表している。血管のような細かいネットワークが形成されていることが確認できる。この処理により、界面や樹脂中の導電経路を可視化し、接触点数を計測することが可能となった。

Fig. 7 3D dispersion of fillers in the conductive adhesive

Fig. 8 3D electronic paths in the conductive adhesive

4. 考 察

4.1 導電性の考察

4.1.1 接触点数の計測

前項 FIB-SEM による導電経路可視化の結果から接触点数の計測を実施する。Ni 界面においては今回観察した $18.5 \times 12.6 \mu\text{m}$ の面内では、平均 35 点のフィラとの接触点（フィラ間距離 $\leq 50 \text{ nm}$ ）を確認した。ここから計算すると、 1 mm^2 当りの経路数 $N_{\text{Ni-Ag}}$ は、平均 150 k 点と計算できる。また接着剤中の導電方向と垂直な断面について同様に計測すると、面内に平均 61 点、 1 mm^2 当りの接触点数 N_s は 260 k 点の接触点を確認できる。

また、接着剤中の導電方向での接触点数（つまり、一経路当たりの接触点数）は、平均 20 点、 1 mm 当りの接触点数 N_L は 830 点であることが確認できる。この結果と、3.1 の界面／体積抵抗値の結果より、接触点 1 点あたりの抵抗値の定量化を検討する。

4.1.2 抵抗値の定量化

導電経路数を計測し、界面と体積抵抗の切り分けを行った結果より、接触点 1 点あたりの界面抵抗値を定量化する。本来であれば Fig. 9 のような実際の抵抗回路にて、かつ各接触点での界面抵抗の差異を考察に加えるべきであるが、今回は簡易的手法として Fig. 10 の回路図にて、各接触点での界面抵抗を等しいものとして、平均値で考察する。

Fig. 9 Actual electronic circuit diagram of resistance in conducted adhesive

Fig. 10 Equivalent electronic circuit diagram for calculation in conducted adhesive

先ず電極とフィラとの界面抵抗について検討する。導電経路は面内に並列抵抗を形成していると考えられるため、Ni と Ag フィラの接触点 x 点目の 1 点あたりの抵抗を $R_{\text{Ni-Ag}}(x)$ とすると、基板電極と導電性接着剤の界面抵抗 R_{Int} との関係は式 (1) となる。

$$\frac{1}{R_{\text{Int}}} = \sum_{x=1}^{N_{\text{Ni-Ag}}} \frac{1}{R_{\text{Ni-Ag}}(x)} \quad (1)$$

$R_{\text{Ni-Ag}}(x)$ は x にらず一定と仮定すると、 1 mm^2 の接触点数は $N_{\text{Ni-Ag}}$ なので、式 (1) は式 (2) となる。

$$\frac{1}{R_{\text{Int}}} = \frac{N_{\text{Ni-Ag}}}{R_{\text{Ni-Ag}}} \quad (2)$$

式 (2) より、式 (3) を導ける。

$$R_{\text{Ni-Ag}} = R_{\text{Int}} \cdot N_{\text{Ni-Ag}} \quad (3)$$

式 (3) は、実験により計測可能な界面抵抗 R_{Int} と、FIB-SEM により計測可能な接触点数 $N_{\text{Ni-Ag}}$ から、Ni-Ag 間の 1 点あたりの平均接触抵抗 $R_{\text{Ni-Ag}}$ を計算できることを示している。

式 (3) より計算すると、Ni-Ag 界面の 1 点あたりの平均の界面抵抗 $R_{\text{Ni-Ag}}$ は $7.35 \times 10^6 \text{ (m}\Omega/\text{点)}$ となる。

体積抵抗も電極と平行面の導電経路数については上記と同様の考え方で計算できる。すなわち、導電経路は面内に並列抵抗を形成していると考えられるため、導電経路 x 本目の 1 本あたりの抵抗を $R_{\text{Line}}(x)$ とすると、導電性接着剤の体積抵抗 R_{Vol} との関係は、式 (4) となる。

$$\frac{1}{R_{\text{Vol}}} = \sum_{x=1}^{N_L} \frac{1}{R_{\text{Line}}(x)} \quad (4)$$

ここで導電経路内の抵抗について着目すると、導電経路内では Ag-Ag フィラ間の接触抵抗が直列抵抗を形成していると考えられるため、導電経路内の接触点 n 点目の 1 点あたりの抵抗を $R_{\text{Ag-Ag}}(n)$ とすると、導電経路 1 本あたりの抵抗 $R_{\text{Line}}(x)$ との関係は、式 (5) となる。

$$R_{\text{Line}}(x) = \sum_{n=1}^{N_L} R_{\text{Ag-Ag}}(n) \quad (5)$$

$R_{\text{Ag-Ag}}(n)$ は n にらず一定と仮定すると、1 経路における Ag 同士のフィラ接触点数は N_L なので、式 (5) は式 (6) となる。

$$R_{\text{Line}}(x) = N_L \cdot R_{\text{Ag-Ag}} \quad (6)$$

式 (4) と式 (6) の関係から、 $R_{\text{Line}}(x)$ は x にらず一定と仮定すると、 1 mm^2 の導電経路数は N_s なので、式 (7) が導ける。

$$\frac{1}{R_{\text{Vol}}} = \frac{1}{R_{\text{Ag-Ag}}} \cdot \frac{N_s}{N_L} \quad (7)$$

式 (7) より、

$$R_{\text{Ag-Ag}} = R_{\text{Vol}} \cdot \frac{N_L}{N_s} \quad (8)$$

式 (8) は式 (3) と同様に、実験により計測可能な界面抵抗 R_{Vol} と、FIB-SEM により計測可能な導電経路数 N_s と 1 経路における接触点数 N_L から、Ag-Ag 間 1 点あたりの接触抵

抗 R_{Ni-Ag} を計算できることを示している。

式 (8) より計算すると、Ag-Ag の 1 点あたりの平均の接触抵抗 R_{Ag-Ag} は 4.29×10^4 (mΩ / 点) となる。Ni-Ag の界面は Ag-Ag の界面に比べ、2 桁程度接触抵抗が高いことが確認できた (Fig. 11)。

また、界面抵抗 R_{Int} と体積抵抗 R_{Vol} は直列抵抗を形成していると考えられるため、全体の抵抗値 R_{Total} は R_{Int} と R_{Vol} の和となる。このことと、式 (3)、式 (8) より、全体の抵抗値は式 (9) にて予測することができる。

$$R_{total} = \frac{1}{N_{Ni-Ag}} \cdot R_{Ni-Ag} + \frac{N_L}{N_S} \cdot R_{Ag-Ag} \quad (9)$$

Fig. 11 Contact resistance in conducted adhesive

4.1.3 導電性の予測

導電性接着剤のフィラを介した導電経路の可視化と、接触点 1 点当たりの抵抗の定量化が可能となったので、今度は逆に実サンプルにおけるフィラ分散状態から導電性、すなわちマクロな接続抵抗の予測を試みる。

導電経路数を減らした実サンプルにて検討を行うため、平均フィラ径を 1.5 倍に大きくした実証用サンプルを作製し、予測と評価を行った。その結果を Table 1 に示す。3.2 と同様の手法で FIB-SEM による 3 次元観察を行い、各接触点数を計測した。この各接触点数から式 (1) を用いてマクロの接続抵抗を計算した結果と、Fig. 5 と同様に測定した検証用サンプルの実測値を Fig. 12 に示す。検証用サンプル

Fig. 12 Comparing between actual line and Calculation line

Table 1 Calculation of contact point in test sample

		Ref. Sample (small-diameter)		Test sample (large-diameter)
Numbers of contact points	Observation by FIB-SEM	3D
			10μm	10μm
	Electric path
			10μm	10μm
	Electrode filler	N_{Ni-Ag}	150k (points/mm ²)	120k (points/mm ²)
	Filler filler	N_S Parallel with electrodes	260k (points/mm ²)	270k (points/mm ²)
		N_L In line	830 (points/mm)	980 (points/mm)

では予測値と実測値の差は、表面抵抗 (y 切片) で約 11%、体積抵抗 (傾き) で約 17% となり、実測値の傾向を計算である程度再現できた。このことより、本手法により実測の抵抗値を推測することが可能であることが示された。

Ag-Ag 間の界面抵抗に関しては、文献 8) で論じられている。この文献によると、Ag-Ag 間に厚さ 50 nm のエポキシ樹脂が存在する場合、2.5 V の電圧に対する界面抵抗は約 2.5×10^{10} (mΩ/点) となり、今回計算した Ag-Ag の界面抵抗 4.29×10^4 (mΩ/点) に比べ 6 桁程度大きい。このことは、50 nm から更に Ag-Ag 間が接近すると抵抗が急激に小さくなることを示唆している。本報告では Ag-Ag 間の厚さ 50 nm 以下を接触点とみなして平均的な界面抵抗の計算を実施したが、実際には接触部は面であり、更に面内でも抵抗の大小が存在するため、今後、より正確な解析を進めるには、この影響を加味した解析を実施する必要がある。

なお、フィラ径に関しては、フィラを小さくするほど導電経路数が増加し、接続抵抗も小さくできる一方、フィラ含有量が同じ場合にはフィラの比表面積が大きくなる。これにより、フィラと樹脂との摩擦が増大し、材料の粘度が大きくなり、その結果作業性が悪化してしまう (Fig. 13)。

Fig. 13 Relationship between average size of filler and number of contact points

Fig. 14 Heat conduction analysis model

そのため、抵抗と作業性の点からフィラを検討することが肝要である。

4.2 放熱性の考察

4.2.1 予測の考え方

FIB-SEM により得られた 3 次元のフィラ分散状態より放熱性の予測を試みる。放熱性の検討に関しては、内部の Ag フィラ同士の界面が影響する、樹脂バルクの放熱性について考察している。導電性の場合には、導電性接着剤中の樹脂成分はほぼ絶縁体とみなすことができるため、フィラの接触の有無により導電の判断を行うことができたが、放熱性の場合には導電性接着剤中の樹脂の熱伝導係数の影響も無視できず、フィラの接触だけでは正確な放熱性を予測することはできない。そのため本研究では、FEM による放熱解析を試みた。

4.2.2 解析手法と課題

FIB-SEM の連続写真を、プリポスト (モデル化用) ソフトである Simple ware¹¹⁾ により、実際のフィラ分散状況に極めて近い解析モデルを作製した。この解析モデルに対し、熱伝導解析を実施し、定量的な考察を試みた。

Simple ware を用いて作製した解析モデルを Fig. 14 に示す。モデル化は、1,000 万要素 (テトラ) に分割して行った。この解析モデルに Adventure Cluster¹²⁾ を用いて熱伝導解析を行った。

熱伝導解析は、初期温度 25°C、ターミナル電極表面に 2.7×10^{-4} (W) を境界条件として与え、非定常解析にて実施した。この熱伝導解析の結果を Fig. 15 に示す。この結果から熱伝導係数 (λ) を式 (10)¹³⁾ より計算すると、 $\lambda = 13.9$ (W/m·°C) となった。

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot D}{\Delta T \cdot A} \quad (10)$$

Φ : 熱流速 (W)
 ΔT : 電極間の温度差 (°C)
 D : 電極間距離 (m)
 A : 解析モデルの電極面積 (m²)

Fig. 15 Result of heat conduction analysis

Fig. 16 First analytical model

Fig. 18 Reform analytical model

Fig. 17 Actual model

熱伝導解析では $\lambda = 13.9 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ となったが、この材料のみの熱伝導係数をレーザーフラッシュ法^{14)~19)}にて測定すると $\lambda = 1.4 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ であり、解析と実機の結果に一桁程度の乖離があった。この要因は、解析ではFig. 16に示すようにフィラ同士の界面やフィラ・電極の接触点を一体として解析しているが、実サンプルではFig. 17に示すように接触界面が存在し熱的な損失があるためと推測している。このため、解析の精度向上には、接触点の影響を考慮した解析が必要である。

4.2.3 界面の影響を考慮した熱伝導解析手法

金属表面の接触点の影響を考慮するため、Fig. 18に示す

ように、便宜上解析モデルのフィラ・電極表面の1層を別要素化し、この表面要素の熱伝導係数を変えていき、熱抵抗に換算することで、表面の影響を見極める考察を行った。別要素化した表面の厚みは、本解析モデルの薄さの限界である約80 nmとした。

接触点の影響を考慮するにあたり、表面要素の厚みの影響を除去するため、表面要素の熱抵抗にて整理した。熱抵抗 R は式(11)で示される。

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{D}{A} \quad (11)$$

故に、単位面積における熱抵抗 $R \cdot A$ は、式(12)で示される。

$$R \cdot A = \frac{1}{\lambda} \cdot D \quad (12)$$

単位面積における熱抵抗と、解析結果である熱伝導係数を変化させた場合のバルク全体の熱伝導係数との関係をFig. 19に示す。横軸に単位面積における熱抵抗を、縦軸にバルク全体の熱伝導係数を示している。図中にMetalと記載した縦の点線が界面要素にフィラの熱伝導係数を入れる、すなわちフィラが一体の場合の解析であり、Resinと記載した

Fig. 19 Result of the heat conduction analysis between heat conduction coefficient of layer and bulk

縦の点線が界面要素に樹脂の熱伝導係数を入れる、すなわちフィラ界面に樹脂層が存在する場合の解析結果を示している。

界面要素の熱抵抗を減少させるほどバルクの熱伝導係数が増加しており、結果としては妥当な傾向が出ている。このプロットから、実機での熱伝導係数 $1.4 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ から界面の熱抵抗を計算すると、接触界面の平均の熱抵抗は $4.28 \times 10^{-7} \text{ (}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W})$ と定量的に算出できる。また、この接触界面の熱抵抗は、導電性接着剤の構成成分の中で最も熱抵抗の大きい樹脂が導電フィラ界面に存在するときより熱抵抗が大きいことを示している。

以上の解析により、導電フィラ界面の熱抵抗を定量化し、その影響を考察することが可能となった。

5. 結 言

導電性接着剤において、導電性については、実存する材料中の導電フィラの3次元的観察結果に基づき、電気的抵抗値の予測を試みた。特に、導電フィラであるAg同士の接点の平均的抵抗値に対し、Ag-Ni界面間では2桁程度高い抵抗値となることが示された。また、この抵抗値を用いて算出した界面抵抗と体積抵抗の予測値は、導電性接着剤中のフィラ径を変えた材料の実測値と同様の傾向を示し、電気的抵抗の予測が可能となった。

一方放熱性については、界面に $4.28 \times 10^{-7} \text{ (}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W})$ の熱抵抗を想定することで実在の材料の熱伝導係数と一致し、この界面に何らかの熱抵抗が存在することが示された。

複合材料では、フィラの分布や界面の物性値からバルクの物性を予測することは、材料の開発にとって非常に有効

な手段であると考えられる。

(2012.5.29- 受理)

文 献

- 1) S. S. Kim, K. S. Kim, K. Lee, S. Kim, K. Suganuma, and H. Tanaka: "Electrical Resistance and Microstructural Changes of Silver Epoxy Isotropic Conductive Adhesive Joints under High Humidity and Heat," *J. Electron. Mater.*, Vol. **40**, No. 2, pp. 232–238, Feb. 2011
- 2) Y. Kariya, Y. Kanda, K. Iguchi, and H. Furusawa: "Influence of Temperature and Dwelling Time on Low-Cycle Fatigue Characteristic of Isotropic Conductive Adhesive Joint," *Mater Trans.*, Vol. **51**, No. 10, pp. 1779–1784, 2010
- 3) M. Inoue: "Electrical and Thermal Conductivity of Electrically Conductive Adhesives," *Journal of the Adhesion Society of Japan*, Vol. **47**, No. 1, pp. 23–34, Jan. 2011
- 4) 甲斐朋齊: "導電性接着剤の開発動向について," *溶接技術*, Vol. **55**, No. 12, pp. 68–75, Nov. 2007
- 5) T. Yu: "Novel Isotropic Conductive Adhesives for Electronic Packaging Application," *IEEE Trans. Adv. Packag.*, Vol. **32**, No. 3, pp. 589–592, Aug. 2009
- 6) S. Kohinata: "The Out Line of Technologies and Development for Advanced Isotropic Conductive Adhesive," *Journal of the Adhesion Society of Japan*, Vol. **43**, No. 5, pp. 166–178, May 2007
- 7) K. Kurosu, N. Kawamoto, Y. Murakami, and D. shindo: "TEM Study of Local Conduction Mechanisms in Model Specimens of Ag-Based Conductive Adhesive," *IEEE Trans. Electron. Packag. Manufact.*, Vol. **2**, No. 2, Feb. 2012
- 8) J. Woo-Ju, H. Nishikawa, D. Itou, and T. takemoto: "Electrical Characteristics of a New Class of Conductive Adhesive," *Mater. Trans.*, Vol. **46**, No. 10, pp. 2276–2281, Oct. 2005
- 9) M. Kato, T. Ito, Y. Aoyama, K. Sawa, T. Kaneko, N. Kawase, and H. Jinnai: "Three-Dimensional Structural Analysis of a Block Copolymer by Scanning Electron Microscopy Combined with a Focused Ion Beam," *Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. **45**, No. 6, pp. 677–683, 2006
- 10) NEDO プロジェクト「導電性接着剤に関する標準化事業」平成 21 年度活動報告 第 2 回 iCAS JEITA フォーラム, 社団法人 電子情報技術産業協会, 導電性接着剤標準化委員会, Mar. 2010
- 11) O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu: "The Finite Element Method, Its Basis & Fundamentals," 6th ed., Butterworth Heinemann, 2005
- 12) P. G. Young, T. B. H. Beresford-West, S. R. L. Coward, Notarberardino, B. Walker, and A. Abdull-Aziz: "An Efficient Approach to Converting Three-Dimensional Image Data into Highly Accurate Computational Models," *Phil. Trans. R. Soc. A Math. Phys.*

Eng. Sci., Vol. **366**, No. 1878, pp. 3155–3173, 2008

- 13) 高薄一弘：“電子機器・部品用放熱材料の高熱伝導化および熱伝導性の測定・評価技術,” 技術情報協会, pp. 234, 2003
- 14) M. Suzuki, H. Akiba, S. Yoshimura, and G. Yagawa: “Analysis of Stress Intensity Factor of Piping Using Large-Scale Analysis Code ADVENTURECluster,” Transactions of SMiRT16, 2001
- 15) Y. Agari: “Highly Thermal Conductive Polymer Composite for Preventing Electric Devices from High Temperature,” Function and Materials, pp. 46–49, Vol. **26**, No. 11, 2006
- 16) 長島 昭：“熱物性値測定法 その進歩と工学的応用,” 日本機械学会, 1991
- 17) Y. Takezawa: “Advanced Composites Having High Thermal Conductivities,” CMC Publishing, 2011
- 18) 大島耕一, 松下 正, 小林康德, 根岸完二, 小木曾建：“熱設計ハンドブック,” 朝倉書店, pp. 6, 1992
- 19) X. Sun, S. Kotake, Y. Suzuki, and M. Senoo: “Evaluation of Thermal Rectification at Interface of Dissimilar Solids by Phonon Heat Transfer,” The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. **64**, No. 625, pp. 230–234, 1998

著者紹介

荒尾 修 (あらお おさむ)
2003 年, 九州大学化学プロセス・生命工学コース修士課程卒業。同年, 株式会社デンソー入社。現在, 同社 材料技術部 機能複合材料室に所属。主に導電性接着剤やアンダーフィルなどの電子実装材料の研究・開発に従事。

新帯 亮 (しんたい あきら)
1984 年, 名古屋大学工学部大学院合成化学科修士課程卒業。同年, 株式会社デンソー入社。現在, 同社 材料技術部 機能複合材料室に所属。主に電子製品の実装材料の研究・開発に従事。

杉浦昭夫 (すぎうら あきお)
1983 年, 名古屋大学工学部化学工学科卒業。同年, 株式会社デンソー入社。現在, 同社 材料技術部 機能複合材料室に所属。主に絶縁材料・接着剤・電子実装材料の研究・開発に従事。