

低炭素社会を支える 高性能パワーモジュール材料

Power Module Materials for Low-carbon Society

宝蔵寺 裕之

Hozoji Hiroshi

田中 俊明

Tanaka Toshiaki

守田 俊章

Morita Toshiaki

山口 拓人

Yamaguchi Takuto

小田 祐一

Oda Yuichi

今村 寿之

Imamura Hisayuki

竹澤 由高

Takezawa Yoshitaka

エネルギー利用の効率向上への関心が高まる中、パワーデバイスを用いた電力変換機器が注目されている。小型で高効率のパワー機器を実現するためには、構成する材料の高耐熱化、高熱伝導化がキー技術となる。日立グループは、環境に配慮した高効率のパワーモジュール材料として、鉛フリー対応の耐熱性接合材料、高強度セラミックス材料、および高熱伝導樹脂シートの開発を進めており、高効率で信頼性に優れた電力変換機器の開発に貢献している。

1. はじめに

自動車のハイブリッド化、風力や太陽光などの自然エネルギーによる発電方式の導入において、電力変換に用いられるパワーデバイスが注目されている。パワーデバイスを搭載するパッケージ（モジュール）は、適用機器の拡大や効率向上のため、小型化・軽量化が進んでいる。

代表的なパワーデバイスパッケージの実装構造例を図1、図2に示す。デバイスはセラミックス基板に形成された配線に、はんだによって搭載され、配線や素子の絶縁

を確保するため、柔らかいゲルで封止される。デバイス部で生じた熱は、接合材料、放熱ベースを経て放熱部分へと伝えられる。

小型で高性能な電力変換機を実現するためには、デバイスと絶縁基板接合部の耐熱性向上、厳しい温度変化に対応可能な絶縁基板の高強度化、および冷却効率の向上が必要である。日立グループは、種々のプロセスに対応可能な高耐熱の接合材料として、銀接合材料、亜鉛／アルミニウム複合シート接合材料を開発している。また、耐環境性に優れた高強度の窒化ケイ素絶縁基板、および放熱ベースと放熱部の熱伝導性の強化によって冷却性能を向上させる高熱伝導シートを開発している。これらの材料を用いることにより、さらに小型で高効率のパワーモジュールが実現可能となる。

ここでは、低炭素社会を支える高性能パワーモジュール材料について述べる。

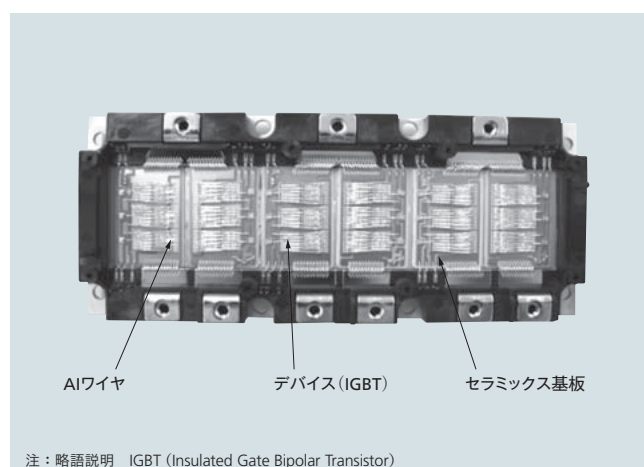


図1 | パワーパッケージ（モジュール）の外観

パワーデバイスは、セラミックス基板上に搭載され、Al（アルミニウム）ワイヤで接続される。

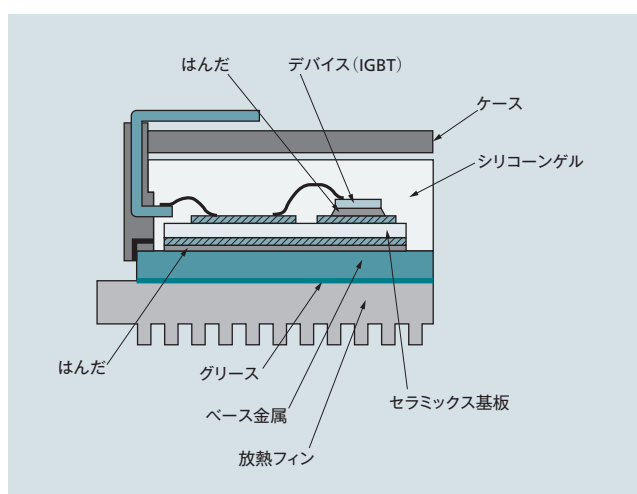


図2 | パワーモジュールの断面構造の概略

パワーデバイスは、はんだを介してセラミックス基板に接合される。

2. 鉛フリー高耐熱接合技術

これまでパワーモジュールの素子接合材料には、鉛を多く含む高温はんだが使われてきた。高鉛の高温はんだは、環境有害物質の使用を規制するRoHS (Restriction of Hazardous Substances) 指令の除外項目となっているが、2014年に規制物質としての適用可否の見直しが行われる予定である。そのため、新たな規制にも対応可能な高温はんだに代わる高耐熱な素子接合材料が求められている。

ここでは、流動性は少ないが耐熱性に優れた焼結金属接合材料として銀粒子接合材料と開発中の銅系接合材料、および、はんだと同様な流動性を示す亜鉛／アルミニウムシート状接合材料について説明する。

2.1 焼結金属接合材料

2.1.1 銀粒子接合材料

以前から知られている銀ペーストは、熱硬化性樹脂などのバインダ成分に銀粒子が分散している。接合強度などの信頼性が十分に確保されており、半導体デバイスの素子接合材料として広く使われている。しかし、バインダとして樹脂成分を配合しているため、融点が300℃程度の高温はんだ以上の耐熱性を確保することは困難である。また、熱伝導率は1 W/m・K～10 W/m・Kであり、高温はんだの20 W/m・K～30 W/m・Kよりも劣っている。銀の熱伝導率は427 W/m・Kであり、金属元素の中では最も高い。それにもかかわらず銀ペーストの熱伝導率が低い原因は、銀粒子どうしが物理的に点接触していることである。細い熱伝導パスと高い接触熱抵抗が熱伝導率の低下をもたらしている。銀粒子の充填（じゅうてん）量を増やせば熱伝導率は向上するものの、バインダ成分が少なくなるため、接着力が低下するなどの副次的な問題が起こる。

そこで、日立化成株式会社は、銀粒子の焼結現象を利用した銀粒子接合材を開発した。この銀粒子接合材は、粒子サイズが数マイクロメートルのマイクロ銀粒子表面を処理することで、200℃～300℃という低温での焼結を可能にしている。マイクロ銀粒子どうしが焼結するため熱伝導パスが太くなり、80 W/m・K以上の高い熱伝導率を発現できる（図3、図4参照）。また、この材料は、熱硬化性樹脂などのバインダ成分を含まず、加熱接合工程で溶剤がすべて揮発するように設計されている。そのため、焼結層はマイクロ銀粒子が焼結した構造体になり、高い耐熱性も有することが特徴である。さらに、金や銀などの貴金属被着体との界面で焼結が進行しやすく、貴金属被着体との高い接合性を実現できる。

接合プロセスには、オープンによる加熱やプレス機による加熱加圧を想定している。接続プロセスが高温、高圧、

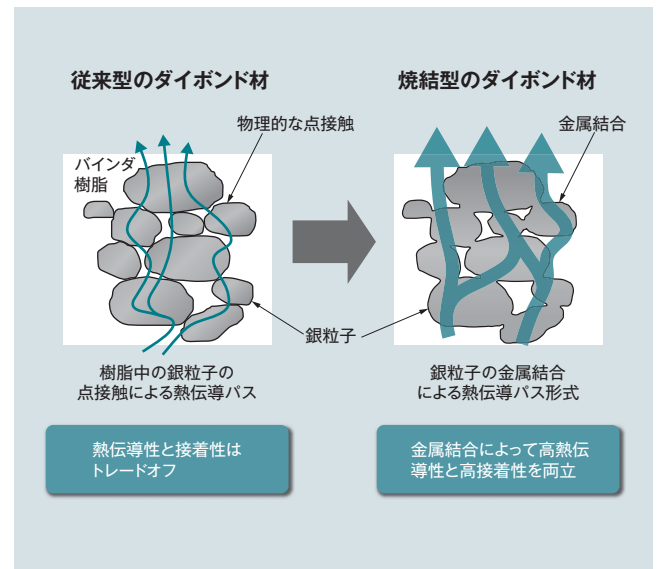


図3 | 銀粒子接合材料の開発コンセプト

銀粒子間を物理的な点接触から金属接合とすることで接触熱抵抗の影響がなくなるとともに、マイクロ銀粒子を適用することにより、粒子間に太い熱伝導パスができる。

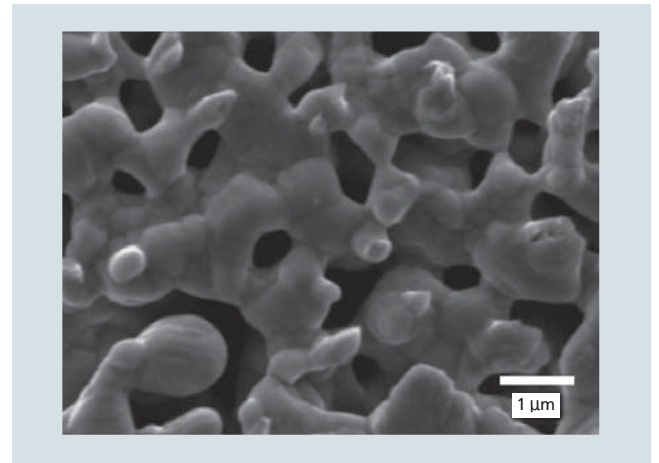


図4 | 焼結後の銀粒子接合材料

無加圧接合した場合の焼結層を示す。200℃～300℃という低温でも、マイクロ銀粒子間で焼結が進行し、三次元的な熱伝導パスが形成される。

長時間になるほど焼結層が緻密化し、熱ストレス耐性にも優れるようになる。ただし、適用するデバイスの種類によって制約条件が異なるため、それぞれの用途に応じて接合プロセスを最適化している。

開発した銀粒子接合材は、パワーデバイスの素子接合用途だけでなく、放熱性を必要とするロジック半導体やハイパワー型LED (Light-emitting Diode) にも展開できると考えており、開発を進めている。

2.1.2 酸化銅粒子接合材料

前述したように、銀粒子の焼結接合によって低温で高熱伝導の接合を実現することができるが、材料コスト低減の観点では、銅を用いた接合技術への期待も高い。酸化銅粒子は、水素などの還元雰囲気中で加熱すると、還元過程で数ナノメートルサイズの純銅粒子を生成し、ナノ粒子接合法^{1), 2), 3)}と同様の低温融合が起こる。そこで、この機構

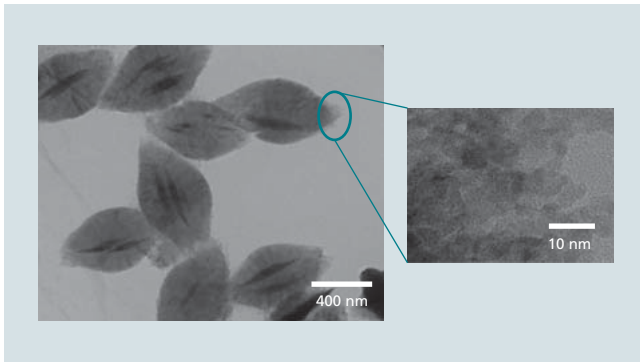


図5 | 開発した酸化銅

ナノメートルサイズの木葉状粒子が凝集しているのが特徴である。

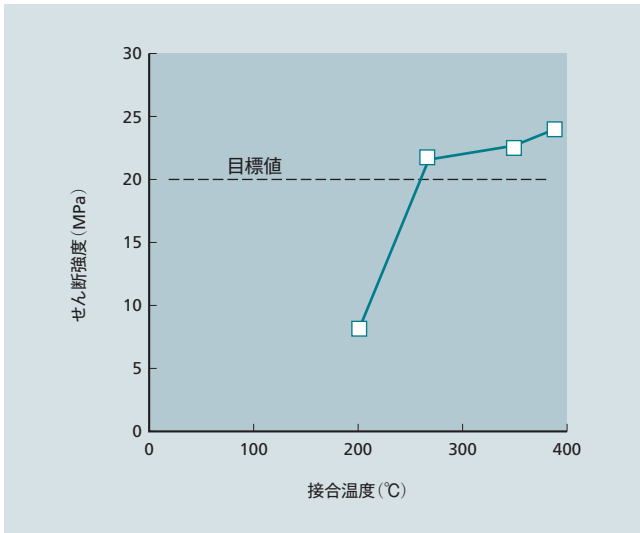


図6 | 酸化銅の接合温度と接合強度

250°C以上の接合温度で、はんだと同等(20 MPa)以上の接合強度が得られる。

を利用することで、銅を用いた耐熱低温接合が可能になると考え、開発を進めている。

開発した接合用酸化銅粒子は、数十ナノメートルサイズの微粒子が木の葉状に凝集している点の特徴である（図5参照）。表面にNi（ニッケル）めっきを施した銅製接合試

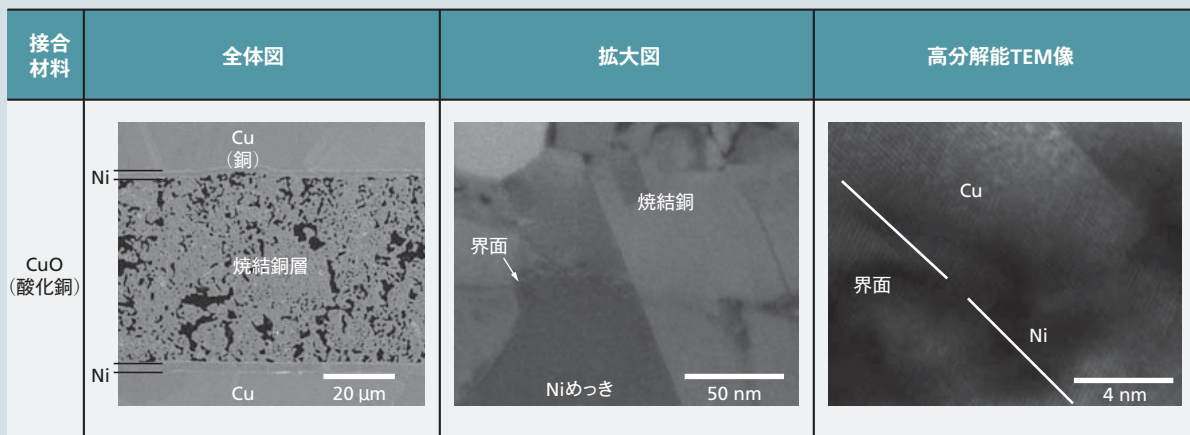
験サンプルを用意し、このサンプルを開発した接合材料で還元雰囲気下1.2 MPa加圧し、所定温度で5分間保持して接合した。300°C以上で良好に接合できている（図6参照）。接合温度300°C時の接合部断面像からは、焼結層中には焼結欠陥が点在しているが、Niとの接合部の界面は緻密な状態であることが分かる（図7参照）。また、焼結銅／Ni界面では、全域にわたって焼結銅がNiに対して同一結晶方位に成長しており、極めて良好な金属接合が形成されていることが分かる。

この接合材料の実用化に向けては、プロセス条件の確立、材料供給などの課題があるが、低コストの高耐熱接合材料として研究開発を進めていく。

2.2 亜鉛／アルミニウム／銅クラッド材

汎用的な接合装置との相性を考慮し、旧来のはんだ材と同様に溶かすだけで接合できる高耐熱性の接合材料が望ましいとの観点でさまざまな合金を探索し、亜鉛（Zn）－アルミニウム（Al）はんだに着目した。亜鉛－アルミニウムはんだは、融点が382°C、熱伝導率が115 W/m・Kであり、いずれも従来の鉛はんだよりも高く、高耐熱・高放熱性が期待できる。また、高価な貴金属を含まないため、汎用的な製品にも適用しやすいと考えられる。しかし、亜鉛－アルミニウムはんだは極めて酸化しやすく、濡れ性・接合性に課題がある。そのため、汎用的な接合装置での使いこなしが難しく、鉛はんだ代替材としてこれまで実用化はされていない。そこで、亜鉛－アルミニウムはんだの酸化を防止することで使い勝手を向上させる亜鉛／アルミニウム／銅積層構造クラッド材を、日立製作所横浜研究所と日立電線株式会社が共同で開発した。

この材料は、クラッド圧延技術により、銅／アルミニウム



注：略語説明 TEM (Transmission Electron Microscope)

図7 | 酸化銅の接合状態

接合界面は緻密な状態で金属接合が形成される。

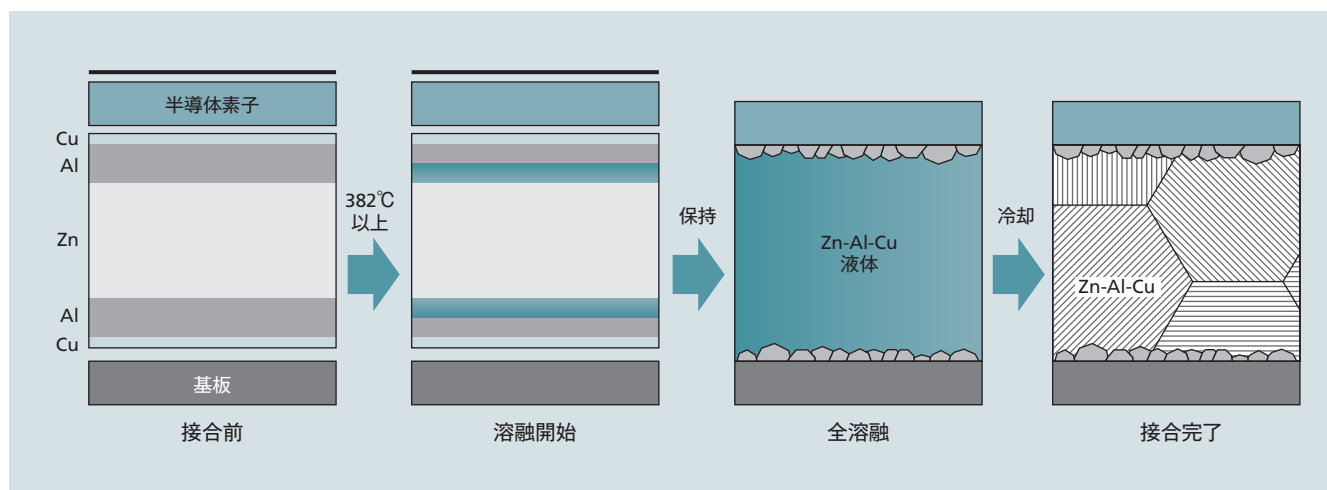


図8 亜鉛／アルミニウム／銅クラッド材を用いた接合メカニズム
加熱によって5層の金属層が溶融混合し、接合層を形成する。

ム／亜鉛／アルミニウム／銅の順に積層した5層構造のはんだ材である（図8参照）。この材料を382℃以上に加熱すると、5層が混じり合って溶融し、はんだとして機能する。また、亜鉛層とアルミニウム層を銅によって被覆することで、酸化しやすい亜鉛とアルミニウムが大气に曝（さら）されない構造としている。銅被覆は材料が溶融するまで維持できる。これは、銅の下地にアルミニウム層を配置した効果によるものである。亜鉛層と銅層を接触させると、亜鉛と銅の拡散反応が速く、保管中に表面に亜鉛が露出して酸化するという問題があった。この材料ではアルミニウム層が銅層と亜鉛層の接触を防止することで、室温保管時よりも、接合時の高温環境下でも銅被覆が維持される。銅の酸化膜は接合装置内で還元可能であるため、溶融直後は理想的には酸化していない亜鉛－アルミニウム－銅のはんだが生成すると考えられる。したがって、良好な接合性が得られる。

亜鉛／アルミニウム／銅クラッド接合材の接合信頼性を評価するため、半導体素子と基板を接合し、温度サイクル試験を実施した（図9参照）。鉛はんだで接合したサンプルの接合部の半分以上にクラックが進展する条件下で、亜鉛／アルミニウム／銅クラッド接合材は、接合部端部にわずかにき裂が生じる程度であった。すなわち、この材料を用いることで、製品の長寿命化が期待できる。

亜鉛／アルミニウム／銅クラッド材は、亜鉛とアルミニウムの酸化防止というコンセプトを、亜鉛、アルミニウム、銅の積層化によって実現した新しいはんだ材である。材料の保管性、汎用的な接合装置での接合性、接合信頼性が良好であると期待できる。

焼結金属接合材料は、銀や銅から成る耐熱性に優れた接合層を形成するが、流動性が少ないため、接合過程でプレスなどの工程が必要となる。一方、亜鉛／アルミニウム

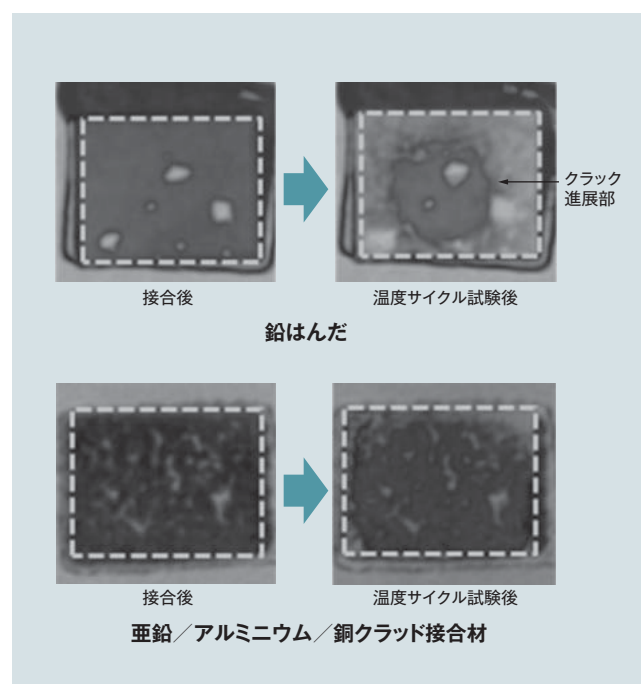


図9 開発材料と汎用鉛はんだの信頼性比較

亜鉛／アルミニウム／銅クラッド接合材は、温度サイクル試験後も大きなクラックは生じない。

シート状接合材料は、耐熱性は焼結金属接合材料には至らないが、接合時にはんだのような流動性を示し、既存工程に導入しやすいという特徴がある。導入工程や使用環境に応じ、それぞれの特徴を生かした応用が可能である。

3. 高放熱絶縁基板

高放熱化に対応したパワーモジュール構造として、厚い銅をセラミックス基板に貼り付けた構造が注目されている⁴⁾。通常、パワーモジュール用回路基板の銅厚は0.3 mm近傍であるが、放熱性向上の観点から0.5 mm厚、さらには1.0 mm厚を超える銅を接合する市場要求もある。銅厚が厚くなるとパワーモジュールの動作環境における熱ひずみが大きくなり、セラミックス層の破損による絶縁性の低下が大

表1 | 開発した窒化ケイ素材とその他のセラミックス材との諸特性比較
開発材は、他のセラミックス材に比べ、曲げ強度や破壊靱（じん）性が高い。

基板の特性	単位	Si ₃ N ₄ 開発材	AlN (窒化アルミニウム)	Al ₂ O ₃ (酸化アルミニウム)
熱伝導率	W/m・K	90	120~170	17
曲げ強度	Mpa	750	350~500	250
破壊靱性	MPa・m ^{1/2}	6.4	2~3	3.5
熱膨張係数	10 ⁻⁶ /K	2.5	4.4	7.2
体積抵抗率	Ω・m	>10 ¹³	>10 ¹¹	>10 ¹²
誘電率（1MHz）	—	7~8	9	10
絶縁耐圧	kV/mm	18	17~37	13

きな課題となっていた。

窒化ケイ素（Si₃N₄）は、機械強度や靱（じん）性が高く、耐熱部材、ベアリングなどの構造部材として用いられてきた。近年、窒化ケイ素の熱伝導率を高める研究が盛んになり、高温高压のホットプレスにより、窒化ケイ素セラミックス中のSi₃N₄結晶をC軸方向に配向させて焼結することで、配向方向の熱伝導率が150 W/m・Kになることが報告されている⁴⁾。日立金属株式会社は、出発組成と焼結助剤の検討および焼結条件の最適化により、実用的な製造プロセスで熱伝導率が80 W/m・Kとなる窒化ケイ素基板を開発した。これに厚い銅を貼り合わせたHEV（Hybrid Electric Vehicle）用パワーモジュールの絶縁基板を製品化している⁵⁾。

開発材の特性と、比較例としてパワーモジュール用回路基板に用いられている他のセラミックス材料の特性を表1に示す。この開発材は、薄型の形状で焼結しても、窒化ケイ素特有の高強度、高靱性などの特性を損なわずに高い熱伝導性を実現する材料であり、0.2 mm厚の薄い基板であっても曲げ強度750 MPa、熱伝導率90 W/m・Kの特性が得られる。この窒化ケイ素基板に厚みの異なる銅板を接合した銅貼り回路基板を試作し、その放熱性能（熱抵抗）と信頼性を評価した。銅貼り回路基板の銅厚が増加すると熱抵抗は減少し、銅厚1.0 mmの回路基板は、銅厚0.3 mmの回路基板に比べて熱抵抗が11%低下した（図10参照）。この結果から、厚銅貼り窒化ケイ素回路基板をパワーモジュールに適用することにより、高放熱化を図れることが分かる。

窒化ケイ素基板の熱サイクル試験を行い、絶縁基板としての重要な特性である絶縁破壊電圧を測定した（図11参照）。熱サイクル試験をしていない窒化ケイ素基板の絶縁破壊電圧は、熱サイクル試験前に9 kV~10 kVであったものが試験後は8.5 kV~10 kVであり、同レベルであった。開発した窒化ケイ素基板に2.5 mmの銅を貼った場合の3,000サイクルの熱サイクル試験後においても、窒化ケイ素基板と同等の絶縁性を有していることが分かる。

開発した窒化ケイ素基板は、放熱性および絶縁信頼性を

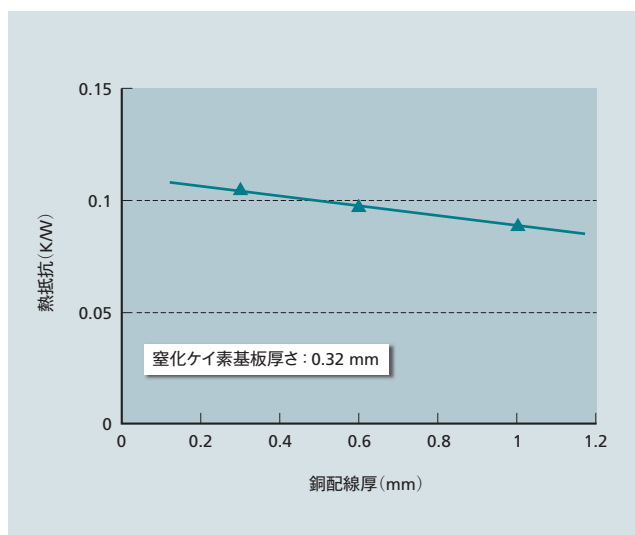


図10 | 銅配線厚さと熱抵抗の関係

銅配線厚を厚くすることによって低熱抵抗化が可能である。

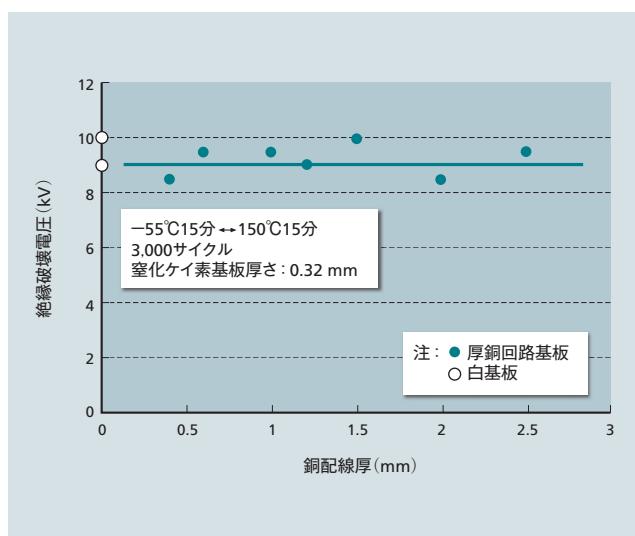


図11 | 銅配線厚さと絶縁破壊電圧

銅配線厚を厚くしても絶縁性の低下は見られない。

併せ持つため、厳しい温度環境で高い信頼性が要求されるHEVおよびEV（Electric Vehicle）用パワーモジュールへの展開が期待される。

4. 高熱伝導樹脂

一般に、電気回路の絶縁部にはエポキシ樹脂などが広く使われているが、樹脂の熱伝導率は金属やセラミックスに比べて2桁~3桁も低く、放熱上のボトルネックとなっている。絶縁樹脂の熱伝導率を高めることは、電子機器の高性能化・小型化の鍵であると言える。日立化成は、樹脂内部の硬化構造を最適化することで樹脂の熱伝導率を飛躍的に高める手法を開発し、絶縁接着シートに適用している。

樹脂自体の熱伝導率は0.1 W/m・K~0.2 W/m・Kと低いことから、機器の放熱に必要な数W/m・K以上のレベルとするために、通常はフィラを複合したコンポジットとして使用する。コンポジットの熱伝導率を予測式から考え

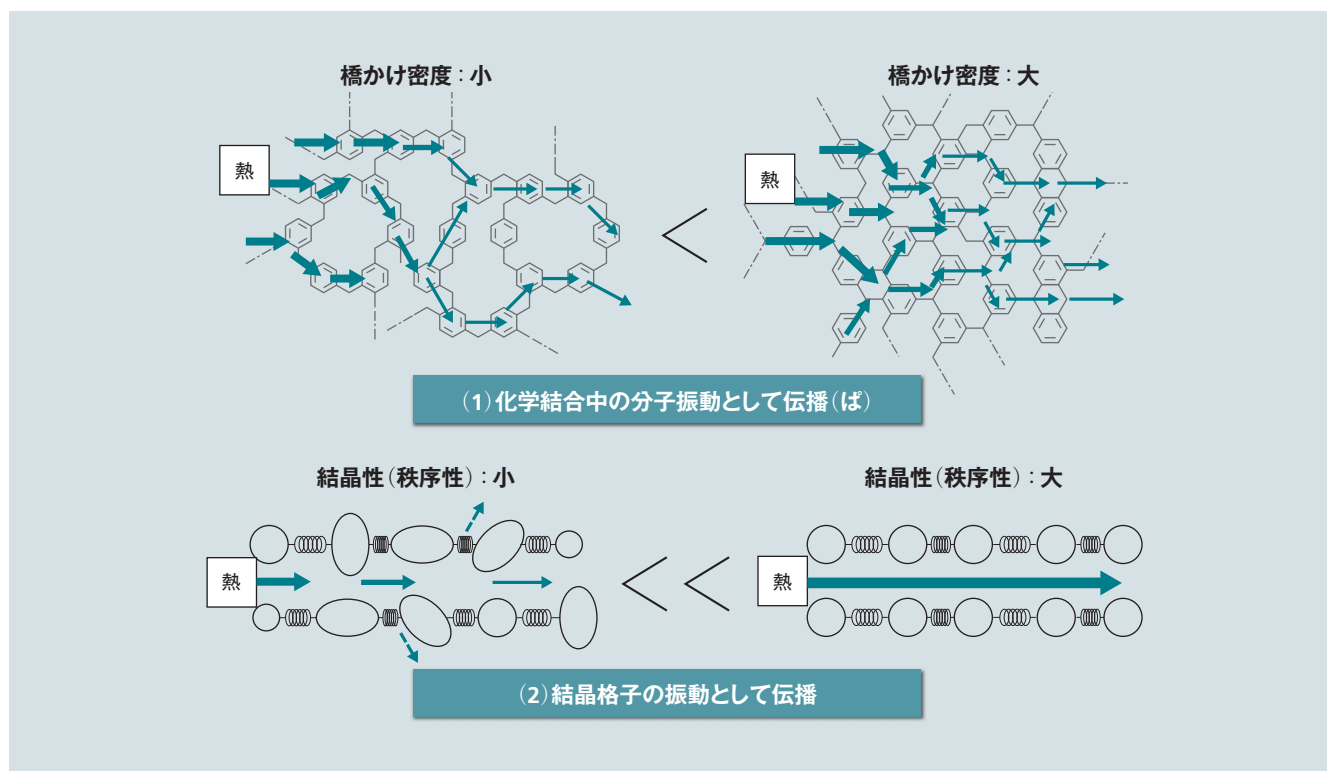


図12 絶縁樹脂内部での熱伝導現象

(1) では、橋かけ密度を増やすことで熱が伝わりやすくなる。(2) では、結晶的構造を形成することで熱的散乱が抑制され、熱が伝わりやすくなる。高熱伝導化の効果は (1) < (2) である。

ると、フィラの熱伝導率に比べて2桁～3桁も低い樹脂の熱伝導率を高めるほうがはるかに効果的である⁶⁾。そこで、樹脂自身の高熱伝導化に着目した開発を進めた。

絶縁樹脂の熱伝導現象には、以下に示す2つの伝播(ば)が存在する(図12参照)。

- (1) 化学結合中の樹脂内部を分子振動として伝播する。
- (2) 秩序性の高い結晶的な部分を結晶格子の振動として伝播する。

(1) に対する高熱伝導化技術は、樹脂内部の橋かけ密度を増やし、熱伝導の経路を増大することになる。(2) に対する高熱伝導化技術は、結晶的な構造を樹脂内部に形成させるため、自己配列する液晶的骨格を樹脂原料に導入することになる。

樹脂自体の熱伝導率向上効果は、(1) よりも (2) のほうが数倍以上大きい。しかし、複合化するフィラの種類によっては、(1) の技術だけでもコンポジットとして十分な高熱伝導化も可能となる。この考え方に基づき、要求特性に応じた高熱伝導エポキシ樹脂組成物を開発した。

開発した高熱伝導樹脂は、熱伝導率5 W/m・K～12 W/m・Kクラスの絶縁接着シートに適用されている。いずれも絶縁、接着、放熱というトレードオフになる3機能をバランスよく発現できることが特徴である。

自己配列する液晶的骨格を有する樹脂を用いた場合、フィラの周辺に高熱伝導領域が形成される。フィラが高充

填化されると、高熱伝導領域が重なり合うようになり、コンポジットとして高い熱伝導性を発現できる(図13参照)。これは、この開発樹脂を用いて初めて可能となる技術である。フィラの高充填化プロセス技術と組み合わせ、全方向に40 W/m・Kというセラミックス同等レベルの高い熱伝導性と、60 kV/mm 以上の絶縁性を有する超ハイブリッド材料として基礎技術を確立した⁷⁾。

なお、検討項目の一部は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 事業「超ハイブリッド材料技術開発」の委託によって行われた。

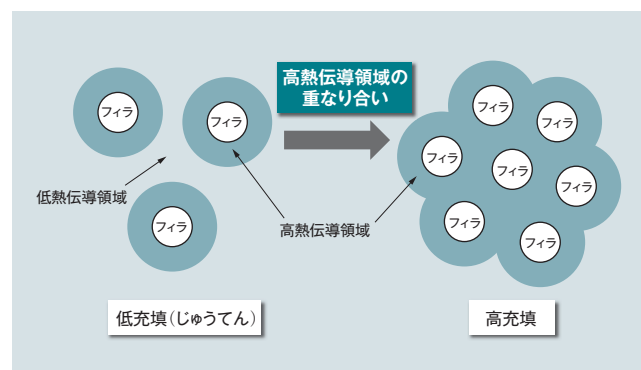


図13 超ハイブリッド材料(高熱伝導化)のコンセプト

自己配列する液晶的骨格を有する樹脂を用いた場合、フィラが高充填(じゅうてん)化されると、高熱伝導領域が重なり合い、コンポジットとして高い熱伝導性を発現できる。全方向にセラミックス同等レベルの40 W/m・Kを達成した。

5. おわりに

ここでは、低炭素社会を支える高性能パワーモジュール材料について述べた。

電力の高効率利用に有効なパワーモジュールを用いた電力変換機は、今後さらなる小型化や高電流密度化が要求される。このようなパワーモジュールの要求に応える重要な材料は、接合、絶縁、放熱を支えるものである。ここで述べた高耐熱の新規接合材料、厳しい温度環境に対応可能な高強度絶縁基板、放熱性を向上させる高熱伝導の樹脂シートは、いずれも環境規制を考慮した材料である。一層の高機能化を図ることで、電力変換機器の高効率化・小型化に貢献できる。

参考文献

- 1) 赤田：銀ナノ粒子接合における界面接合機構の検討, 14th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics, 179~184 (2008)
- 2) Y. Akada, et al. : Interfacial Bonding Mechanism Using Silver Metallo-Organic Nanoparticles to Bulk Metals and Observation of Sintering Behavior, Materials Transactions, 49, 7, 1537-1545 (2008)
- 3) T. Morita, et al. : Study of Bonding Technology Using Silver Nanoparticles, Japanese Journal of Applied Physics, 47, 6615-6622 (2008)
- 4) 広崎, 外：粗大粒子配向が β 型原料を出発とする自己複合化窒化ケイ素の熱伝導率に及ぼす影響, Journal of the Ceramic Society of Japan, 104 (1996) 49
- 5) 菊池, 外：厚銅貼り窒化珪素回路基板の開発, 日立金属技報, Vol. 23, 65~68 (2007)
- 6) 竹澤, 外：ネットワークポリマー, 高分子基礎科学One Pointシリーズ第4巻, 共立出版 (2012.12)
- 7) 宋, 外：メソゲン含有エポキシ樹脂を用いた高熱伝導性超ハイブリッド材料の創製, 第61回高分子討論会予稿集, p. 3874-3875 (2012.9)

執筆者紹介



宝蔵寺 裕之

1984年日立製作所入社, 日立研究所 材料研究センタ 有機材料研究部 所属
現在, パワーモジュールの実装技術開発に従事
博士 (工学)
日本化学会会員, エレクトロニクス実装学会会員



田中 俊明

1995年日立化成株式会社入社, 新事業本部 筑波総合研究所 社会インフラ関連材料開発センタ 所属
現在, 高熱伝導ダイボンド材の開発に従事
博士 (工学)
エレクトロニクス実装学会会員, 日本熱測定学会会員



守田 俊章

1993年日立製作所入社, 日立研究所 材料研究センタ 有機材料研究部 所属
現在, パワーデバイス実装における接合材料開発に従事
博士 (工学)
エレクトロニクス実装学会会員, 応用物理学会会員, 日本昆虫学会会員



山口 拓人

2007年日立製作所入社, 横浜研究所 生産技術研究センタ 実装ソリューション研究部 所属
現在, 高温はんだの開発に従事
エレクトロニクス実装学会会員



小田 祐一

2009年日立電線株式会社入社, 電線事業本部 電機材料事業部 開発部 所属
現在, 複合金属材料の開発に従事



今村 寿之

1993年日立金属株式会社入社, 開発センター 材料開発室 所属
現在, セラミックス回路基板の開発・製造に従事
日本セラミックス協会会員



竹澤 由高

1987年日立製作所入社, 日立化成株式会社 新事業本部 筑波総合研究所 社会インフラ関連材料開発センタ 所属
現在, 高熱伝導絶縁材料の開発に従事
工学博士
高分子学会会員