

革新的なモノづくりプロセスと高付加価値を生み出す分子接合技術

Molecular Bonding Technology Creating Innovative Manufacturing Processes and High-Value-Added Products

八甫谷 明彦 鈴木 大悟 林 芳如 森 邦夫

■ HAPPOYA Akihiko

■ SUZUKI Daigo

■ LIN Fongru

■ MORI Kunio

モノづくりのなかで、モノとモノをつなぐ接合技術はもっとも重要な基盤技術の一つであり、様々な分野で利用されている。プリント配線板における導体と絶縁体の接合の界面結合力は、凹凸を利用したアンカー効果^(注1)や、分子間力や水素結合といった二次結合力などで得ている。しかし凹凸があることで高精細パターンの形成が阻害され、高周波領域では表皮効果のために伝送損失が増大するという問題がある。

そこで東芝は、被着体に分子1層を化学的に結合させて材料表面全体を同一化し、強固に接合できる分子接合技術を適用した。この技術を用いて、平滑なポリイミドフィルム上へ直接銅めっきすることでメタライズし、高性能で安価なフレキシブルプリント配線板 (FPC) を開発し、製品へ展開した。

Bonding technologies are one of the most important fundamental technologies for product manufacturing in various fields. In the process of manufacturing printed circuit boards (PCBs), the interface bonding force between the conductor and insulator of a PCB is obtained by traditional adhesion mechanisms such as the anchor effect resulting from surface roughness, the presence of intermolecular forces, hydrogen bonds, and so on. Although the interface bonding force becomes stronger with increasing surface roughness, higher surface roughness leads to both increased transmission loss in the high-frequency range due to the skin effect and limitations on the fabrication of fine patterns.

To resolve these issues, Toshiba has developed a molecular bonding technology that forms a layer of molecules on the surface of the adherends and provides a smooth surface with strong joining force for the manufacturing of structures composed of different materials. We have applied this technology to the process of direct copper plating on a polyimide film with a smooth surface in order to manufacture flexible printed circuits (FPCs) with high performance and low cost, and have been launching products equipped with these FPCs.

1 まえがき

グローバル化が進展し、環境変化が激しい今日のモノづくりにおいて、プロセスを変革することで作業の効率化と製品の品質を高めるプロセスイノベーションだけでなく、これまでとは違った独創的かつ先進的な新しい製品を生み出すことによって、競争力の向上を図るプロダクトイノベーションが求められている。モノづくりのなかで、モノとモノをつなぐ接合技術はもっとも重要な基盤技術であり、電子機器や、自動車、医療機器、産業機器など様々な分野で利用されている。

接合技術の中には、接着剤のように分子間力で界面結合力を得るものがあるが、材料ごとに表面エネルギーが異なるため、材料や接合条件への依存性が大きく、分子間距離や環境が変化すると界面結合力が低下し、信頼性が損なわれることが懸念される。この問題の解決とモノづくりの活性化を実現するためには、画期的な技術の適用が不可欠であり、技術の進化によって付加価値の高いプロダクトを創出することが求められている。

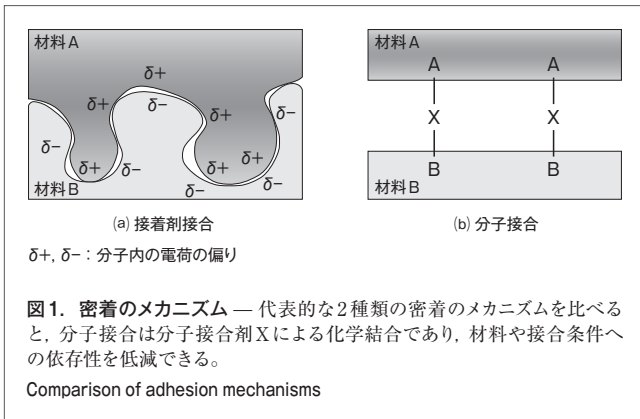
(注1) 接着において、材料表面の微細な凹凸に接着剤が入り込んで硬化することにより、密着力が高まる効果。

ここでは、材料依存性、接合条件依存性、及び環境依存性を軽減し、化学結合で強固に接合できる分子接合技術の概要、及びこの技術をFPCへ応用してプロセス変革と製品の付加価値を生み出した事例について述べる。

2 分子接合技術

現状の接合技術は主に、ボルトやリベットなどを用いて被着体を接合する機械的接合、熱又は圧力で金属どうしを熔融させる溶接接合、及び高分子材料で構成された接着剤を被着体に塗布して硬化させる接着剤接合の三つに分類される。特に接着剤接合は、他の接合に比べて低温かつ微小範囲での接合を可能にし、金属や、セラミックス、高分子材料などの異種材料間を接合できるという点で利用範囲が広い。

一方で、接着剤接合は、図1(a)のように主に分子間力⁽¹⁾や水素結合などの二次結合力によって界面結合力を発現する。界面結合力を発現するには、被着体と接着体間で接触する原子や分子間の接触距離を0.5 nm以下の範囲に維持する必要がある、そのためには、被着体と接着体の表面エネルギーマッチングが不可欠である。被着体ごとに表面エネルギーをマッチングした接着剤を選定すると、組合せの数だけ接着剤が必要



になるため非常に煩雑であり、材料や接合条件への依存性が大きくなる。

更に、環境の変化によって原子や分子が容易に振動して分子間距離が変化するため、界面結合力が絶えず発揮されるには限らず、信頼性の確保が困難になる。このように二次結合力だけでは信頼性を確保することが難しいことから、従来は接合界面を凹凸にし、アンカー効果を使って密着力を得ている。

分子接合技術⁽²⁾は、図1(b)のように材料Aと化学反応する官能基と、材料Bと化学的に反応する官能基から構成された2官能性化合物X(分子接合剤)を用いて、材料Aと材料B間を化学結合で接合する技術である。各材料表面に対して分子接合剤を化学結合により導入し、材料の表面エネルギーを分子接合剤の表面エネルギーへ変換して界面を化学結合させる点の特徴である。これにより、材料や接合条件への依存性を低減でき、高分子や、セラミックス、金属などの材料を接合できる。また、化学結合は、通常の接着剤と被着体に働く二次結合力よりも大きいので、十分な界面結合力を得ることができ、平滑な界面を確保できるとともに、環境が変化した場合でも信頼性を確保できる。

3 FPCへの応用

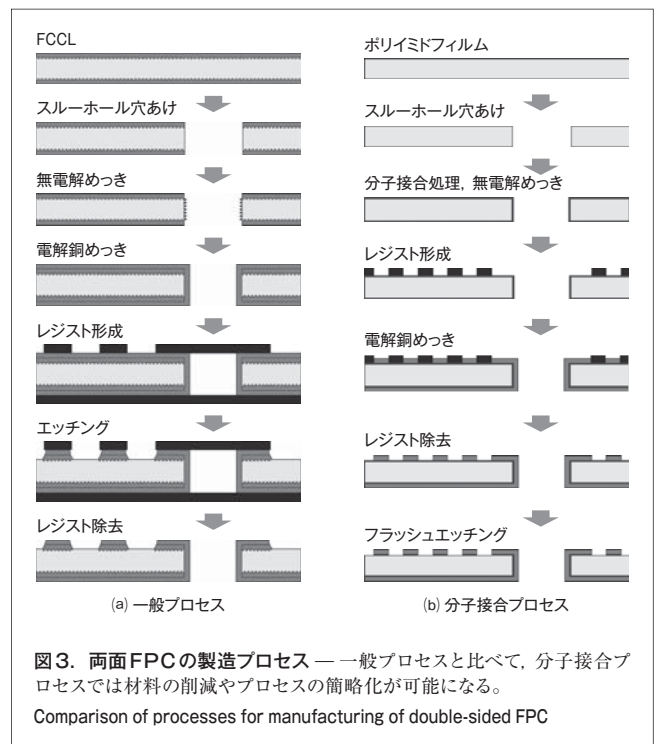
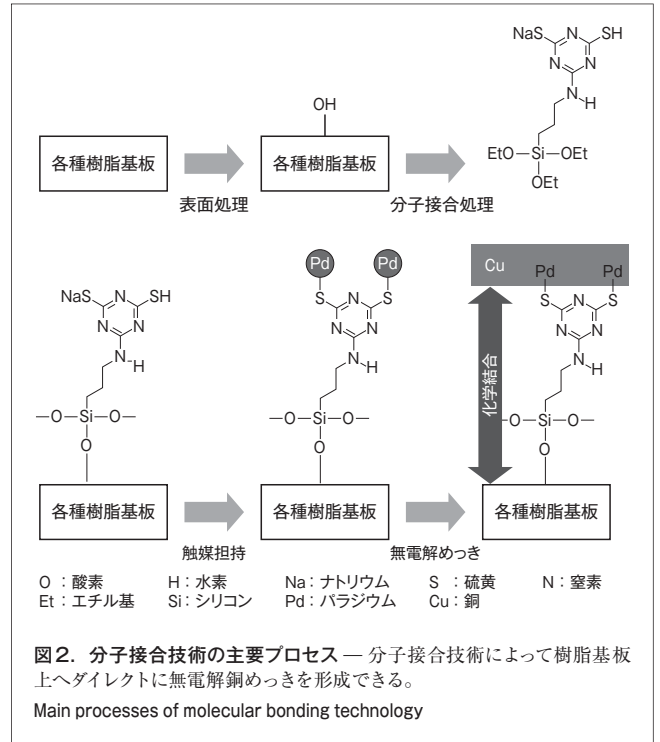
FPCは、スマートフォンや、タブレット、ノートPC(パソコン)、HDD(ハードディスクドライブ)などの様々な電子機器に採用されている。FPCは単なる電氣的な接続のための配線だけではなく、薄く、軽く、柔軟性があり、自在に曲げることができるため、電子機器のわずかな隙間を使って立体的に配線できるという特長を持つ。

一般にプリント配線板は、導体である銅と絶縁層である樹脂材料を交互に接合させることで形成される。密着強度が発現するメカニズムは、銅箔(はく)のマット面形状、又は樹脂表面の粗化によって形成される凹凸を利用したアンカー効果、及び分子間力や水素結合の二次結合力で得ている。しかし、凹凸があることで高精細パターンの形成が阻害され、高周波領域で

は表皮効果のために伝送損失が増大するという問題がある。

東芝はこの問題を解決するために、図2に示す分子接合技術をポリイミドフィルム上へのダイレクトメタライズに応用し、高性能かつ安価で革新的な両面FPCを開発し、製品化を実現した。

一般的な両面FPCと分子接合技術を用いた両面FPCの製造プロセスを図3に示す。一般的な両面FPCの製造プロセスは、



フレキシブル銅張積層板 (FCCL: Flexible Copper Clad Laminate) を用意し、スルーホール穴あけ後、触媒担持、無電解めっき、電解銅めっきで表裏を接続するスルーホールを形成し、次にサブトラクティブ法によるパターン形成となる。これに対して分子接合技術を用いた両面FPCの製造プロセスは、ポリイミドフィルムを用意し、スルーホール用の穴あけ後、分子接合処理をし、触媒担持、無電解めっき、セミアディティブ法によるパターン形成となり、一般プロセスに比べ材料の削減とプロセスの簡略化が可能である。

平滑なポリイミドフィルム上に直接銅めっきするとき、分子接合処理をした場合のFPC (以下、新規FPCと呼ぶ) と未処理でのFPCとのピール強度 (引きはがすのに要する力) の違いを図4に示す。分子接合処理により15 N/cmのピール強度を得ており、150℃で168 h、及び260℃で5 minの熱負荷後も製品の使用に十分満足できるレベルを確保している。

また、スルーホールの側壁には表層と同等の導体厚が得られており (図5)、一般プロセスで作成したFPC (以下、一般FPCと呼ぶ) に比べ表層銅厚を薄くできる。新規FPCの厚さは、ベース銅箔がないことや、導体を10 μm程度に薄くできること、導体を薄くすることによるカバーレイの接着剤層厚を薄

くできることなどにより、一般FPCに比べ全体で約2/3に薄くできる。FPCを薄くできることにより、機器の薄型化及び柔軟性が増し、組込み作業のしやすさや屈曲特性が向上する。

一般FPC及び新規FPCの回路パターンの走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を図6に示す。一般FPCは銅がエッチングされた表面に銅箔のアンカーが転写された凹凸が見られるが、新規FPCは平滑なポリイミドの表面を維持している。加えて、導体厚を薄くできることもあり、高精細パターンを容易に形成できる。

銅箔付きのFCCLを必要としないこと、従来プロセスと比較して工程を簡素化できること、銅箔がないことからドリル工程での重ね枚数が増えることやドリル寿命が延びること、及び容易な回路形成による歩留り向上によりコスト低減が見込める。

プリント配線板の導体表面粗さが、高周波領域での表皮効果による損失に影響することが知られており、低損失で伝送を行うためには導体の表面粗さが小さいことが望ましい。FPCの導体の表面粗さが伝送損失に及ぼす効果を調べるために、差動線路の伝送損失の測定を行った結果を図7に示す。新規FPCは一般FPCに比べ、表皮効果の影響による伝送損失を10 GHzで約2 dB低減できる。

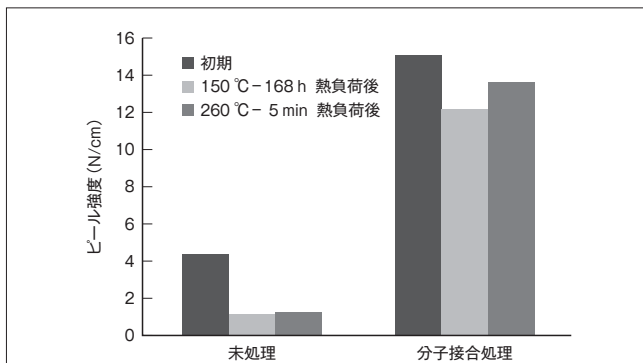


図4. ピール強度への影響 — 新規FPCのピール強度は、未処理の場合と比べて熱負荷後の低下も少ない。

Improvement of peeling strength of double-sided FPC through use of molecular bonding technology



図5. 新規両面FPCの断面SEM像 — 新規FPCはダイレクトに銅めっきできるため、ベース銅箔が不要になり、一般FPCと比べて約2/3の厚さを実現できる。

Scanning electron microscope (SEM) photograph of double-sided FPC manufactured using molecular bonding technology

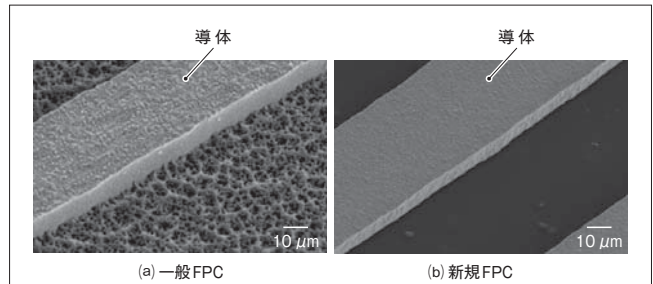
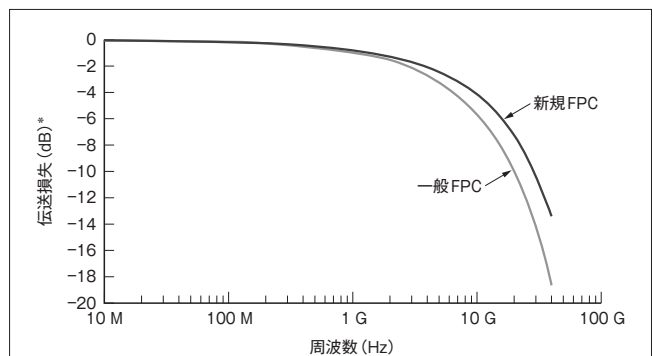


図6. FPC回路パターンのSEM像 — 新規FPCは平滑なポリイミドの表面を維持できおり、高精細パターンを容易に形成できる。

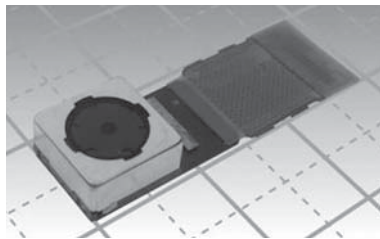
SEM photographs of circuit patterns



*一つの端子からもう一つの端子に伝搬する電力の比率

図7. 伝送損失 — 差動線路の伝送損失を測定した結果、新規FPCは一般FPCと比べて10 GHzで約2 dB低減できる。

Comparison of transmission loss



(a) カメラモジュール



(b) TransferJet[®]アダプタ

図8. カメラモジュールやTransferJet[®]アダプタへの適用 — 新規FPCをカメラモジュールやTransferJet[®]アダプタに適用した。

Application of FPC manufactured using molecular bonding technology to camera module and TransferJet[®] adapter

4 製品への展開

当社は、プロセス検証、信頼性評価、及び製品評価で新規FPCが十分満足できる性能を持つという結果を得ており、図8に示すようなカメラモジュールやTransferJet[®]アダプタのFPCに適用している。

当社はまた、この技術を応用して、世界一薄い^(注2)、厚さ135 μmの4層FPCの開発にも成功しており、カメラモジュールやヘルスケア分野などへの展開を進めている。

更に、ポリイミドより誘電率と誘電正接が低く、伝送損失を

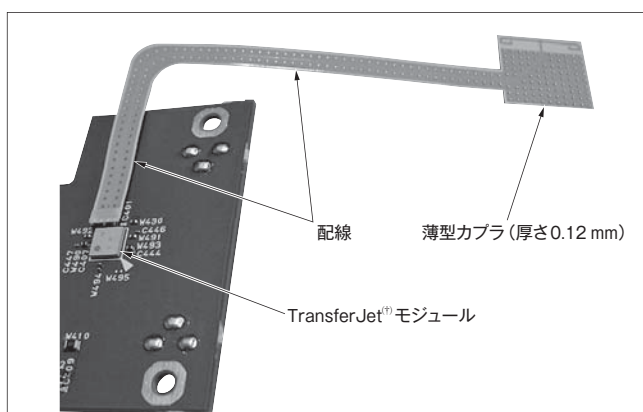


図9. TransferJet[®]の薄型カプラ — 新規FPCをTransferJet[®]の薄型カプラに適用した。

TransferJet[®] thin coupler using FPC composed of liquid crystalline polymer

(注2) 2014年3月現在、当社調べ。

低減できる液晶ポリマーを使ったメタライジング技術も確立しており、近接して簡単に高速でデータを転送できる無線規格TransferJet[®]の薄型カプラ⁽³⁾(図9)、及び高周波アンテナに適用する検討を進めている。今後適用が期待されるビッグデータや、IoT (Internet of Things)、M2M (Machine to Machine)などの分野では、大量のデータを高速にやり取りすることから、高周波で高速伝送を実現するキー技術として期待できる。

5 あとがき

分子接合技術は、化学結合によって接合するメカニズムであり、メタライズだけでなく、接着剤を使わない接着や樹脂成型時の金属と樹脂との密着性向上など、材料やプロセスが違っていても適用が可能である。また、モノとモノを分子レベルで強固につながることから、素材をはじめ、半導体や、モジュール、電子機器などの様々な製品分野へ広範囲に展開できるポテンシャルを持っており、モノづくり力を強化する技術として、今後も開発及び製品への展開を進めていく。

文 献

- (1) 日本ゴム協会編. ゴム工業便覧 (第4版). 東京, 日本ゴム協会, 1994, 1379p.
- (2) 森 邦夫. 21世紀の接着技術-分子接着剤-. 日本接着学会誌. 43, 6, 2007, p.242-248.
- (3) Agawa, K. et al. "3D-Integrated, Low-Height, Small Module Design Techniques for 4.48GHz, 560MHz-Bandwidth TransferJet™ Transceiver". Proc. 2014 IEEE Radio and Wireless Symposium. Newport Beach, CA, USA, 2014-01. IEEE, 2014, p.76-78.

• TransferJet及びTransferJetロゴは、一般社団法人TransferJetコンソーシアムがライセンスしている商標。TransferJetは、ソニー(株)の商標。



八甫谷 明彦 HAPPOYA Akihiko, D.Eng.

セミコンダクター&ストレージ社 システム・ソフトウェア推進センター システム実装技術担当主幹, 博士(工学)。モジュール実装技術の開発に従事。エレクトロニクス実装学会会員。System & Software Solution Center



鈴木 大悟 SUZUKI Daigo

セミコンダクター&ストレージ社 システム・ソフトウェア推進センター システム実装技術担当主務。モジュール実装技術の開発に従事。エレクトロニクス実装学会会員。System & Software Solution Center



林 芳如 LIN Fongru

セミコンダクター&ストレージ社 システム・ソフトウェア推進センター システム実装技術担当。モジュール実装技術の開発に従事。エレクトロニクス実装学会会員。System & Software Solution Center



森 邦夫 MORI Kunio, D.Eng.

(株)いおう化学研究所代表取締役社長, 工博。分子接合技術の研究に従事。Sulfur Chemical Institute Inc.