

# 技術紹介

## 8 フィルム型コネクタの接触抵抗に及ぼす粘着剤の影響とその動的信頼性

Effects of adhesive on contact resistance of film-type connector and its dynamic reliability

三井 亮介

Ryosuke Mitsui

商品開発センター 主任 博士(学術)

吉良 敦史

Atsushi Kira

商品開発センター 技術シニアマネージャー 博士(工学)

キーワード: フィルム型コネクタ、接触抵抗、粘着剤、振動試験、曲げ試験

Keywords: Film-type connector, Contact resistance, Adhesive, Vibration/bending test

### 要 旨

電子デバイスの需要が高まる一方で、電子廃棄物(e-waste)による環境負荷は深刻な脅威となっています。プリントドエレクトロニクスは、e-waste を最小限に抑えつつ低コストかつ高速でフレキシブルデバイスを製造できる手法として、その相乗効果に高い関心が集められています。しかしながら、フレキシブルデバイスの実装に既存技術を適用させるには柔軟性や実装温度の観点から不都合が生じる恐れがあります。

本稿では、接続時に熱が不要で接続部を曲げることが可能なフィルム型コネクタ(FTC)を紹介します。FTC は圧力で変形する粘着剤と、その上に配置される電極から構成されます。クロスブリッジケルビンレジスタ構造を利用した抵抗測定により、FTC 接続後には、粘着剤の変形により誘起される凝集力によって相対する電極間に、平均 0.5 MPa 相当の接圧が発生することが明らかになりました。また、振動試験と曲げ試験を実施し、試験中の接触抵抗の微小な変化を捉えることで粘着剤の応力緩和挙動や回復特性が明らかになり、FTC 接続の動的信頼性が示されました。FTC 接続には、次世代のフレキシブルデバイス実装への適用可能性が期待できます。

### SUMMARY

As the demand for electronic devices continues to rise, electronic waste (e-waste) poses a serious threat to the environment. Printed electronics has attracted considerable interest due to its synergistic effect as a method for producing low-cost, high-speed, and flexible devices while minimizing e-waste. However, the use of conventional technologies for packaging of flexible devices can lead to defects from the perspectives of flexibility and soldering temperature.

Here, a film-type connector (FTC) that harmonizes with the function and design of flexible electronic devices is proposed. The FTC consists of a pressure-deformable adhesive and electrodes arranged on top of it. Resistance measurement revealed that an average contact pressure of approximately 0.5 MPa was generated between the electrodes induced by the cohesive force resulting from the deformation of the adhesive after FTC connection. Vibration/bending tests were conducted to demonstrate the dynamic reliability of the FTC connection, along with the stress relaxation behavior and recovery properties of the adhesive. The FTC shows promise for application to future flexible device packaging.

## 1. はじめに

電子デバイスは現代社会で必要不可欠な存在となり、家庭や社会のあらゆる場面に浸透しています。都市化・工業化の進展や人口増加を背景に、ますます電子デバイスの需要が高まる一方で、発生する大量の廃棄物は電子廃棄物(e-waste)と呼ばれており、不適切な廃棄により大気、土壌、水などの天然資源を汚染し、人、動物、環境に深刻な脅威を与えています。<sup>1,2)</sup>循環型経済の構築と持続可能な開発に向けては、e-wasteの適切な管理が必要とされ、建築材料との複合化や、<sup>3,4)</sup>貴金属などの資源回収、<sup>5,6)</sup>熱分解によるエネルギーへの変換<sup>7,8)</sup>などを通じた3Rの原則に資する取り組みが幅広く展開されています。しかしながら、2019年におけるe-wasteの発生総量5360万トンのうち、公的な制度による回収は17.4%にとどまっていることにくわえ、2050年にはその発生総量が1億2000万トンにまで達するとの予測もあることから、近年の環境問題における喫緊の最重要課題になっています。<sup>9)</sup>

そこで、ボトムアップ型の製造手法であるプリンテッドエレクトロニクスに注目が集まっています。グラビア印刷やスクリーン印刷、インクジェット印刷などの各種印刷技術を用いて、導電性や半導体性、誘電性、磁性、圧電性などの特性を有するインクを必要な場所に選択的に積み上げてデバイスを製造することにより、係る工程とエネルギー消費の削減とともに、持続可能性を維持しつつe-wasteを最小限に抑えられると期待されています。<sup>10,11)</sup>この印刷技術を適用することで、フレキシブルデバイスを低コストかつ高速で大量な製造が可能になります。相乗効果によって促される剛直な電子デバイスから柔軟な電子デバイスへのパラダイムシフトは、小型化・軽量化によるe-wasteの抑制に寄与するばかりでなく、新たなフォームファクタを活かしたデバイスによる都市、製造業、農業、物流、医療などのスマート化を通じて、人々の日常生活をより便利に、より効率的に、より健康にする可能性を秘めています。<sup>12-17)</sup>

以上のように、材料技術とプロセス技術の進展に伴い、従来とは一線を画すコンセプトのフレキシブルデバイスが次々と提案されてきています。これらのデバイスは、軽く、薄く、曲げることができるため、これまで設置が困難になっていた場所を効率的に活用することにより、アンビエントモニタリングやエネルギーハーベスティングが可能になります。その実装においては、デバイスの耐熱性や機能、デザインに調和した電気接続が求められる一方で、剛直なコネクタや加熱が必要なはんだや導電性接着剤を用いる既存技術では、すべての要求を満たすには不都合が生じるおそれがあります。

このような背景から、著者らは次世代のフレキシブルデバイスの普及に向けた足掛かりのひとつとして新しい電気接続技術の構築が重要であるとの考えに至り、軽薄短小を追求した低負荷型の電気接続であるフィルム型コネクタ(FTC)を提案しています。<sup>18,19)</sup>本稿では、まず、FTCの構造的長特長と接続プロセスについて説明します。次に、FTC接続の接触抵抗を導出するための基準になる、面接触における接触抵抗の圧力依存性について、四端子法による抵抗測定を用いた実験系の構築を中心に紹介します。さらに、FTC接続の接触抵抗の導出とその支配要因について、粘着剤の変形という観点から考察した結果について論じ、最後に、振動試験と曲げ試験を通じてFTC接続の動的信頼性について報告します。

## 2. フィルム型コネクタ(FTC)の概要

FTC は配線部と接続部からなるフィルム型の電気接続部材で(図 1a)、接続部では導通を担う導体層と接続状態を保持するための接着層とが積層された構造をしています(図 1b)。導体層は用途に応じてパターンニングされた銅箔<sup>18, 19)</sup>や導電性ペースト<sup>20)</sup>からなり、接着層にはポリエチレンテレフタレート(PET)フィルムを基材とした絶縁性の粘着剤が用いられます。FTC の接続プロセスにおいて、FTC の電極と接続対象の電極との位置を合わせたのちに圧力が印加されることによって粘着剤が変形し、FTC の電極間から押し出され接続対象の基板へと接着します(図 1c)。フレキシブルプリント配線板(FPC)に対して FTC を接続したサンプルの断面写真を図 2 に示します。圧力が印加されることによる粘着剤の変形には、電極直下における圧縮と、電極間に流れ込むことによる伸張とがあり、それらに伴い反発力や凝集力が誘起されます。誘起された力が相対する FTC の電極と FPC の電極との間に作用することによって、電極どうしの面接触部が押し付けられ導通が確保されます。<sup>21)</sup>このように、FTC 接続では粘着剤による空隙の充填と、高い凝集力の発現とを両立させることが安定した電気接続を構築する鍵になります。一般に、充填性を向上させるためには、粘着剤の流動性の向上と接着力の増大が必要であり、すなわち、粘着剤内部での分子間の相互作用を弱め、かつ基板表面との相互作用を強めることが求められます。一方で、凝集力を高めるには粘着剤内部の分子間に強い相互作用を働かせる必要があるため、両者はトレードオフの関係となっています。<sup>22-25)</sup>この問題を解決するために、接着力に関わる粘着剤-基板表面の界面と、流動性・凝集力に関わる粘着剤内部とのそれぞれにおける分子間相互作用の制御を目的として、刺激応答性を有する粘着剤の開発およびその FTC への適用を検討しています。FTC に紫外線

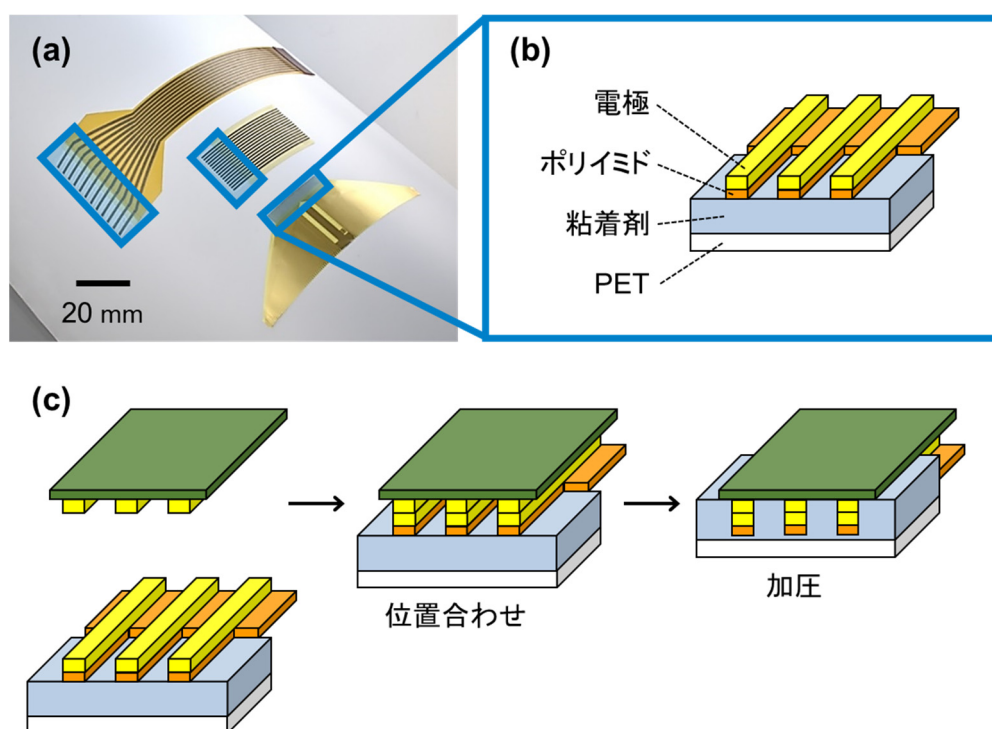


図 1. (a) 各種 FTC の外観写真; (b) 接続部の構成; (c) 接続プロセス

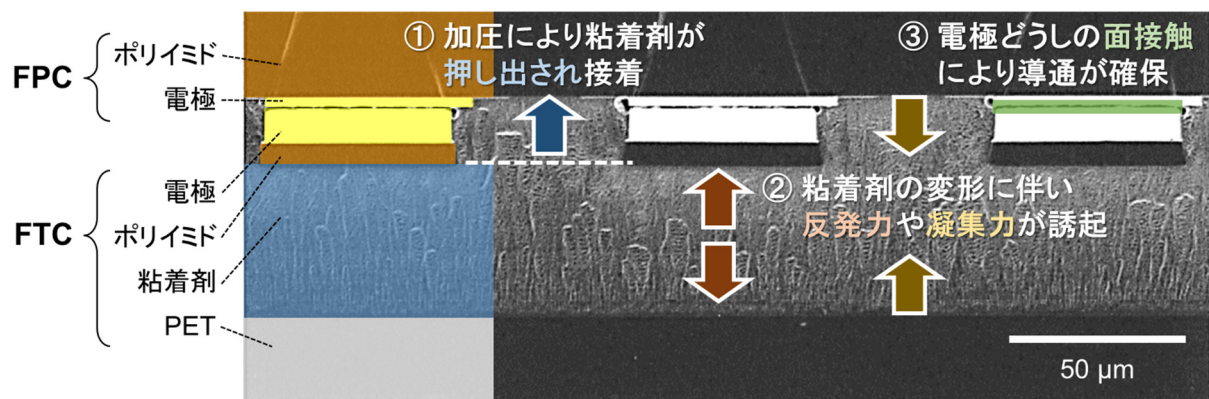


図 2. FTC と FPC との接続部の断面写真

硬化型の粘着剤を用いた場合には、接続時には良好な充填性を示すとともに、充填後の紫外線照射により分子間架橋ネットワークが形成されることで高い凝集力の発現が期待できます。これまでの検討の結果から、紫外線硬化型の粘着剤を用いた FTC では、低い印加圧力においても低抵抗で安定した電気接続を達成できることが明らかとなっています。

以上のように、FTC では、接続対象の基板材料の種類や電極形状、用途や求められる接続信頼性に対して、材料・構造・プロセスのカスタマイズを通じた最適な電気接続の提供を目指しています。

FTC の接続信頼性を評価するにあたり、これまで恒温恒湿試験や熱衝撃試験、曲げ試験を実施しています。<sup>26)</sup>試験には、FTC を櫛歯状の FPC へと接続したサンプルが用いられ、試験前後での抵抗測定値の変化が小さいことから FTC 接続の安定性は認められていますが、測定値には接触抵抗にくわえ、FTC と FPC の導体抵抗も含まれています。そこで、FTC 接続の接触抵抗の導出と、粘着剤の凝集力が相対する電極間に及ぼす影響の把握に向けて取り組みましたので、その詳細を以降に説明します。

## 3. 実験

### 3.1 面接触サンプルに対する圧力の印加および抵抗測定

電極幅が 0.1 mm から 1 mm までの FPC と、同一の電極幅を有するプリント配線板(PWB)とを、互いの電極が対向するように位置を合わせたのちに、エアアシスト VCM 加圧試験機 LPAV-Z-M-C1(アルファテクノ)を用いて、電極どうしが重なり合う部分に対して 0.1 MPa から 12 MPa までの圧力を印加しました。重なり合う電極面積に対して荷重を変更することで圧力を調整しました。各圧力の印加時には、PWB のパッドに 2450 型ソースメータ(ケースレー)を接続し、FPC-PWB 間に形成された導電経路に対して直流 50 mA の試験電流を通電させた際の抵抗値を四端子法にて測定しました。

### 3.2 FTC の接続および抵抗測定

前項にて記載された FPC と同様の電極形状を有する FPC の電極間にあるポリイミドを除去し、ポリイミド側から粘着剤を貼り付けて FTC を作製しました。FTC と PWB との電極どうしの位置を合わせたのちに、前項と同様の手順にて接続部に対して 1.5 MPa の圧力を 5 秒間印加しました。圧力の印加中



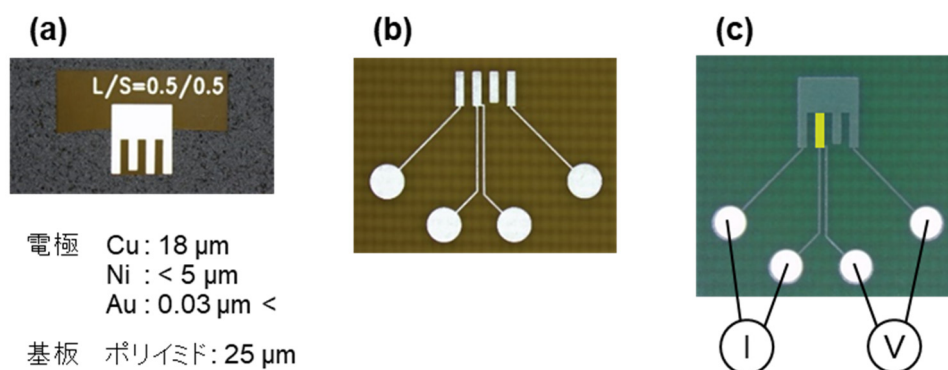


図 3. サンプルの拡大写真: (a) FPC; (b) PWB; (c) 接続後の配線形状が形成された PWB

には、スポット光源 LC8(浜松ホトニクス)を用いて粘着剤に対して中心波長 365 nm の紫外線を 250 mW/cm<sup>2</sup> の強度で照射しました。FTC の接続後に、前項と同様の手順にて抵抗値を測定しました。

## 4. 結果と考察

### 4.1 サンプル作製および測定手法

FTC の接触抵抗とは、FTC の電極と接続相手の電極との間に生ずる電気抵抗を指します。FTC の接触抵抗を求めるには、接続サンプルの抵抗測定値から接続部の導体抵抗を減ずる必要があります。一方、FTC のベースになる FPC と PWB とが電氣的に接続された際の接触抵抗の圧力依存性を明らかにすることができれば、FTC を用いた接続における接触抵抗と比較することで、FTC を用いた接続において電極間にどの程度の圧力(接圧)が粘着剤の凝集力により発生しているのかを見積もることが可能になると考えられます。そこで、クロスブリッジケルビンレジスタ(CBKR: Cross-Bridge Kelvin Resistor)構造を用いた抵抗測定の手法<sup>27-29)</sup>を参考に、FPC(図 3a)と PWB(図 3b)を作製しました。いずれも導体は銅箔のパターニングにより形成され、一般的なニッケル／金めっきによって表面処理されています。それぞれの金めっき表面を対向させて接続した際の配線形状は図 3c になり、これに対して PWB の 4 つのパッドを用いて四端子法により抵抗を測定すると、接続される 4 本の電極のうち 1 本分(図 3c 黄色部)の導体抵抗が求められると考えられます。一般的に、導体抵抗  $R$  は式 1 にあらわされます。

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad \text{式 1}$$

ここで、 $\rho$  は導体の体積抵抗率[ $\Omega \cdot \text{m}$ ]、 $A$  は導体の断面積[m<sup>2</sup>]、 $L$  は導体の長さ[m]をあらわします。電極幅が 0.5 mm の場合には、まず、電極 1 本分の導体抵抗の測定値として 4.55 m $\Omega$  が得られました。次に、得られた導体抵抗を電極形状の設計値とともに式 1 に代入することにより、電極材料の体積抵抗率が  $2.05 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  と算出されました。一方、別途準備した電極材料のベタパターンに対して四探針法

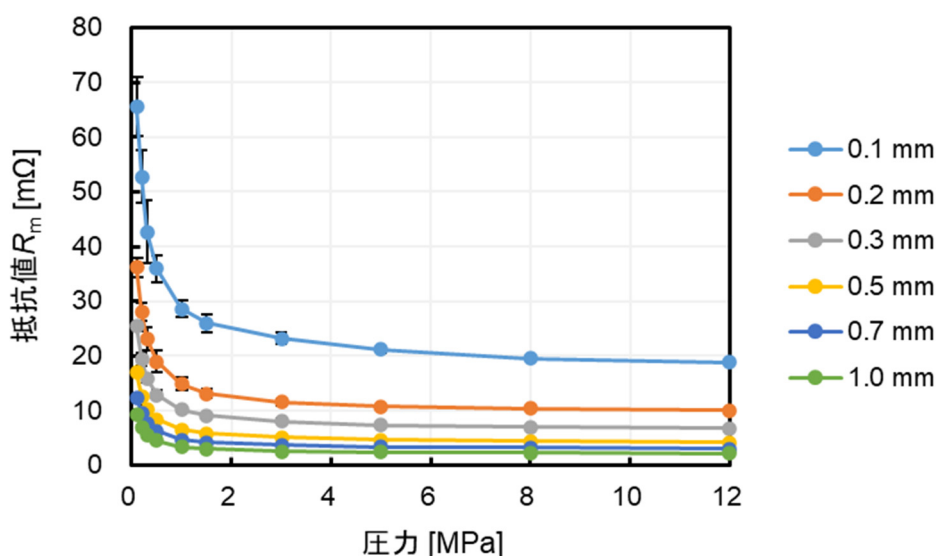


図 4. 各電極幅での FPC-PWB 接続における抵抗値  $R_m$  の圧力依存性

を用いて体積抵抗率を直接測定すると、 $2.12 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  が得られ、式 1 に代入することで電極の導体抵抗を  $4.71 \text{ m}\Omega$  と見積もることができました。異なる方法で導き出された両者の値が概ね一致していることから、本実験系において四端子法により導体抵抗を求めるプロセスが適切であることが示唆されます。

したがって、FPC と PWB の電極を対向させたのちに、電極に対して圧力を印加しながら四端子法により抵抗を測定した場合には、その測定値  $R_{mn}$  ( $n$  は印加圧力を示します) から接続部の導体抵抗  $R$  を減ずることで、FPC と PWB の電極を所定の圧力下で面接触した際の接触抵抗  $R_{cn}$  が求められます(式 2)。

$$R_{cn} = R_{mn} - R \quad \text{式 2}$$

#### 4.2 印加圧力が面接触サンプルの接触抵抗に及ぼす影響

各電極幅の FPC と PWB との接続における、印加圧力に対する抵抗値の変化を図 4 に示します。0.1 mm から 1 mm までのいずれの電極幅においても印加圧力の増大に伴う抵抗値の減少が認められます。これは、相対する電極間に圧力が印加されることで、電極どうしの重なり合う部分(見かけの接触面積)において、導通に寄与する真の接触面積が増大したことをあらわしています。<sup>2)</sup>見かけの接触面積内に真の接触面積がある一定の割合で存在することは、同一圧力において電極幅の増大に伴い抵抗値が減少することからも支持されます。くわえて、いずれの電極幅においても特定の圧力以上の領域では抵抗値の減少が緩やかになることから、圧力の印加による真の接触面積の増大効果が飽和し、特定の値に漸近する様子が認められます。

FPC と PWB との接続における接続部の導体抵抗  $R$  は、各導体の並列接続時の合成抵抗として式 3 にあらわされます。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{FPC}}} + \frac{1}{R_{\text{PWB}}} \quad \text{式 3}$$

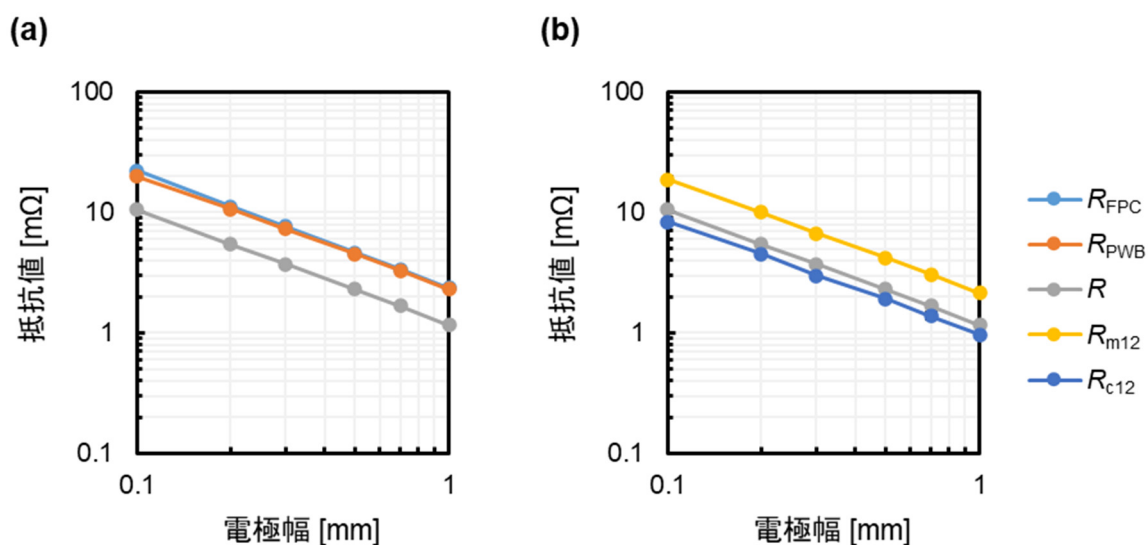


図 5. 抵抗値の電極幅依存性: (a) 導体抵抗および合成抵抗; (b) FPC-PWB 接続部の抵抗

ここで、 $R_{FPC}$  は各電極幅での FPC の導体抵抗、 $R_{PWB}$  は PWB の導体抵抗を示します。0.1 mm から 1 mm までの電極幅に応じて、図 1c に示されるような配線形状を有する FPC と PWB とをそれぞれ作製し、電極 1 本分の導体抵抗を測定したのちに合成抵抗を算出しました(図 5a)。その結果、導体抵抗の測定値は、式 1 にあらわされるように電極幅に対して反比例の関係になり、FPC と PWB とが同様の電極形状をしていることから、その導体抵抗は各導体抵抗の約 1/2 の値になりました。

FPC と PWB との接続部への 12 MPa 印加時の抵抗測定値  $R_{m12}$  は、電極幅 0.1 mm において 18.86 mΩ、電極幅 1 mm において 2.14 mΩ になり(図 5b)、導体抵抗と同様に、抵抗値は両対数グラフにおいて抵抗値が電極幅に対して直線的に推移しています。そして抵抗測定値  $R_{m12}$  は、FPC の電極 1 本分の導体抵抗  $R_{FPC}$ (電極幅 0.1 mm において 22.12 mΩ、電極幅 1 mm において 2.36 mΩ)をわずかに下回る程度となっています。接続部では、PWB が接続されることで全体の導体厚さは増大しているにもかかわらず、接続後の抵抗値は予想されるほど低減していないことが認められます。式 2 を用いて接触抵抗  $R_{c12}$  を算出すると、電極幅 0.1 mm において 8.36 mΩ、電極幅 1 mm において 0.96 mΩ と導き出され、接触抵抗  $R_{c12}$  は電極幅によらず測定値  $R_{m12}$  の 44%–45% の値になりました。これは、FPC と PWB の電極どうしが互いの表面粗さやうねりの影響により、12 MPa 印加時においても見かけの接触面積どおりには接触せず、圧力の印加による真の接触面積の増大には限界があることをあらわしています。<sup>30–32)</sup>

#### 4.3 FTC 接続における接触抵抗の導出

電極幅 0.1 mm から 1 mm までの PWB に対して、電極幅／電極間距離の比率を 1/1 とした FTC を接続したところ、導通不良は認められず、粘着剤と PWB との間に空隙は発生しませんでした(図 6)。したがって、いずれの電極幅においても、1.5 MPa の圧力の印加により粘着剤が変形し電極間を充填することで、FTC の電極を PWB の電極に押し付ける圧力(接圧)が誘起されたことが示唆されます。FTC 接続部の抵抗測定の結果、抵抗測定値  $R_{mFTC}$  は電極幅 0.1 mm において 35.99 mΩ、電極幅 1 mm において

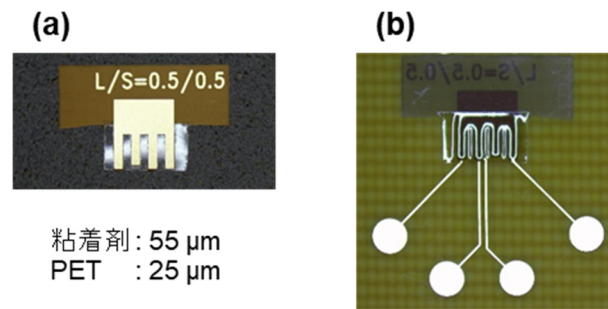


図 6. サンプルの拡大写真: (a) FTC; (b) FTC 接続後の PWB

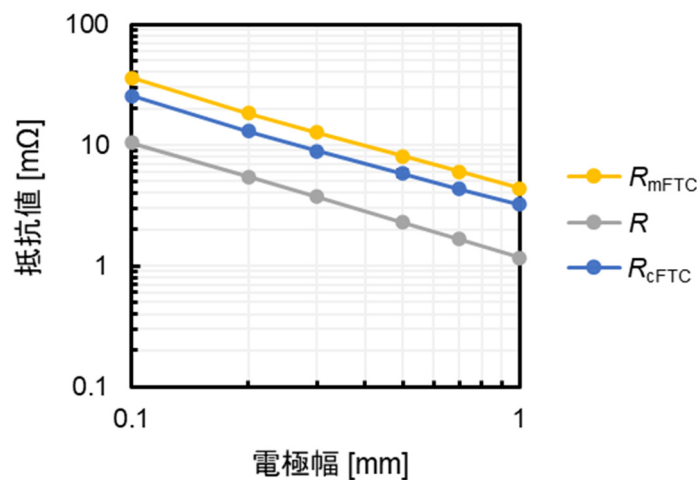


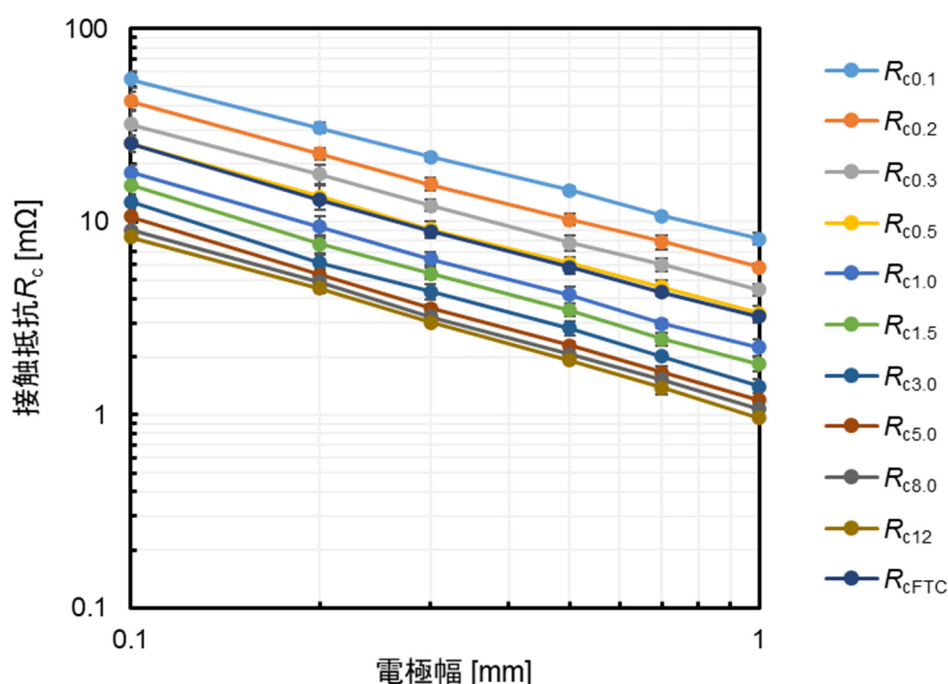
図 7. FTC 接続における抵抗値の電極幅依存性

4.40 mΩ になりました(図 7)。抵抗測定値  $R_{mFTC}$  は、導体抵抗  $R$  や抵抗測定値  $R_{m12}$  と同様に、両対数グラフにおいて抵抗値が電極幅に対して直線的に推移している傾向が認められることから、本検討の範囲内においては FTC 接続の接圧は電極幅によらず一定であることが示唆されます。FPC と PWB との接続の場合と同様に、FTC が接続されたサンプルの抵抗測定値  $R_{mFTC}$  から接続部の導体抵抗  $R$  を減ずることにより、FTC を用いた接続の接触抵抗  $R_{cFTC}$  を算出した結果、電極幅 0.1 mm において 25.49 mΩ、電極幅 1 mm において 3.23 mΩ と導き出されました。

#### 4.4 FTC 接続における接圧の見積もり

接触抵抗  $R_{cFTC}$  はいずれの電極幅においても接触抵抗  $R_{c12}$  より高い値を示すことから、FTC 接続の接圧は 12 MPa より低いことが予想されます。より詳細に接圧を見積もるべく、図 4 に示した各測定値  $R_{mn}$  から導体抵抗  $R$  を除いた接触抵抗  $R_{cn}$  を算出し、FTC 接続の接触抵抗  $R_{cFTC}$  と比較しました(図 8)。その結果、FPC と PWB との接続においては、 $R_{c12}$  に限らず印加圧力が低い場合でも接触抵抗と電極幅の関係には同様の傾向が確認できました。ここで、 $R_{cn}$  と  $R_{cFTC}$  とを比較すると、いずれの電極幅におい



図 8. 接触抵抗  $R_c$  の電極幅依存性

でも  $R_{cFTC}$  は  $R_{c0.5}$  付近に位置していることから、電極幅 0.1 mm から 1 mm までにおいて FTC 接続した際には、相対する電極間に 0.5 MPa 程度の接圧が発生していると結論付けることができます。

## 4.5 接圧発生 of 支配要因

### 4.5.1 粘着剤の体積に対する被充填空間の体積の影響

電極幅 0.3 mm の FTC を用いた接続において、ピッチ方向の電極間距離が 0.3 mm の場合の接触抵抗  $R_{cFTC}$  は 8.97 mΩ になり、これは 0.5 MPa 相当の接圧が発生していることになりましたが、電極間距離のみを 0.2 mm、0.1 mm と狭くした場合には、接触抵抗はそれぞれ 13.77 mΩ、20.42 mΩ になり、これらは 0.1 MPa–0.2 MPa の接圧に相当します(図 9a)。また、FTC に用いる粘着剤の厚さを 55 μm から 80 μm へと変更した場合には、いずれの電極幅においても接触抵抗の増大が認められました(図 9b)。以上より、FTC 接続において接圧の発生には、粘着剤の総体積に対する被充填空間の体積の割合が影響を及ぼしていることが示唆されます。被充填空間の割合が高ければ、圧力の印加により粘着剤が大きく変形して電極間が充填されるため、それに伴い凝集力が発生しやすくなることで接圧が高くなり、結果として接触抵抗が低くなると考えられます。したがって、接続対象の電極幅や電極高さに応じて FTC の電極高さや粘着剤の厚さを変更し、被充填空間との割合を調節することにより各仕様に対して最適な電気接続が提供可能になると期待されます。

### 4.5.2 粘着剤の変形する位置の影響

FPC と PWB とを接続するにあたり、電極幅が異なっても電極ピッチが同一であれば、すべての

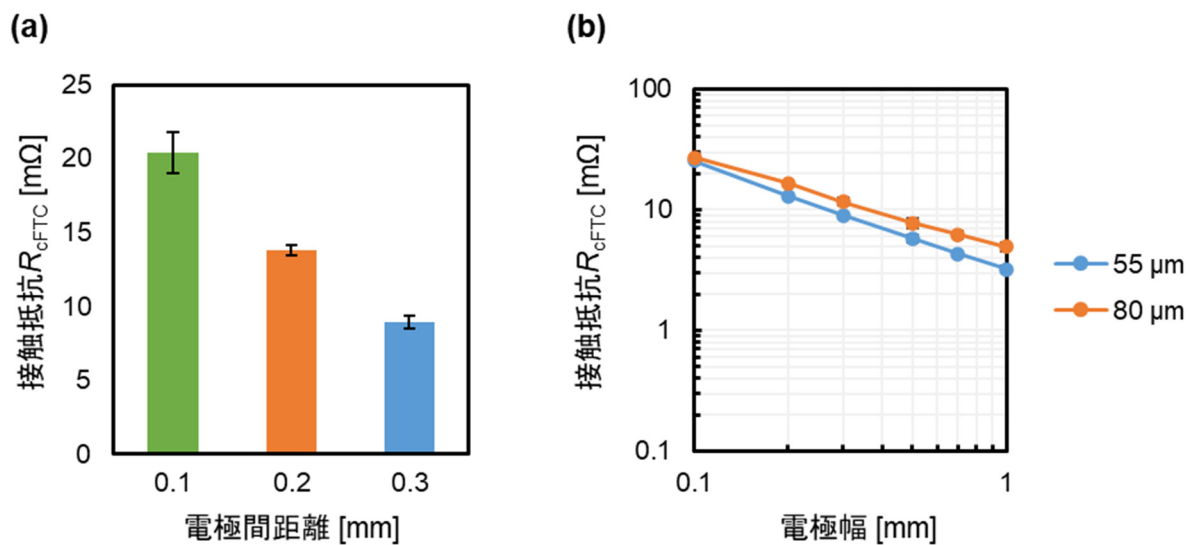


図 9. FTC 接続において接触抵抗  $R_c$  に影響を及ぼす要因: (a) 電極間距離; (b) 粘着剤の厚さ

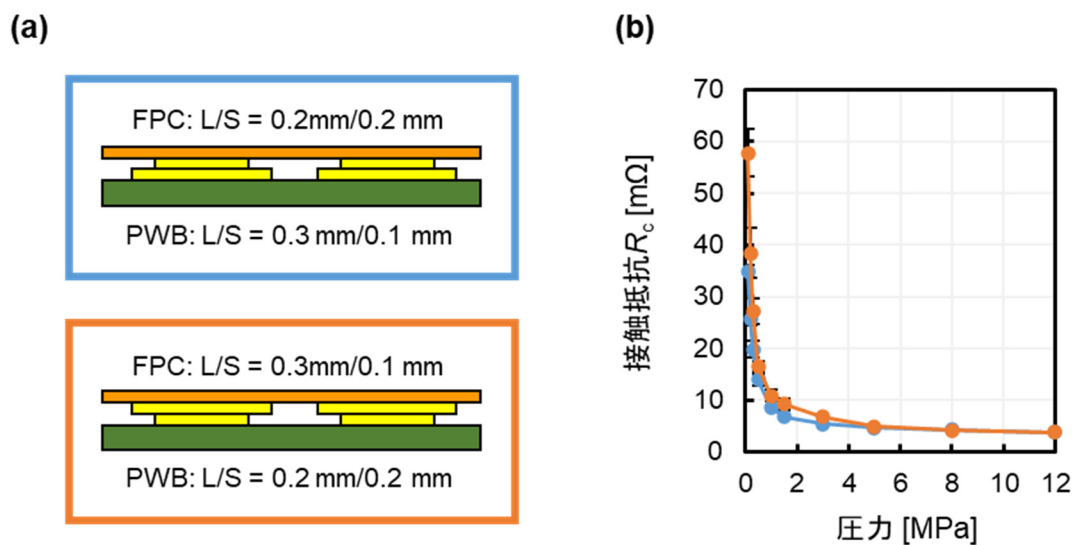


図 10. 異なる電極幅での接続: (a) FPC と PWB の組み合わせ; (b) 接触抵抗  $R_c$  の圧力依存性

電極は電氣的に接続されるため、接続後に四端子法による抵抗測定が可能になります。本検討では、電極幅／電極間距離が 0.2 mm/0.2 mm の電極仕様と 0.3 mm/0.1 mm のものが同一の電極ピッチ(0.4 mm)の組み合わせになり、互いに接続することができます(図 10a)。FPC の電極幅が 0.2 mm の場合には電極幅が 0.3 mm の PWB へと接続され、その逆の組み合わせでも接続が可能になります。どちらの組み合わせでも見かけの接触面積と導体抵抗は等しくなることから、接触抵抗の圧力依存性は同様になると予想されますが、検討の結果、接続部に圧力を印加した際の高圧領域においては抵抗値が同等の値を示す一方で、低圧領域では FPC の電極幅が 0.3 mm の場合の抵抗値が高くそのばらつきも大きくなりました。

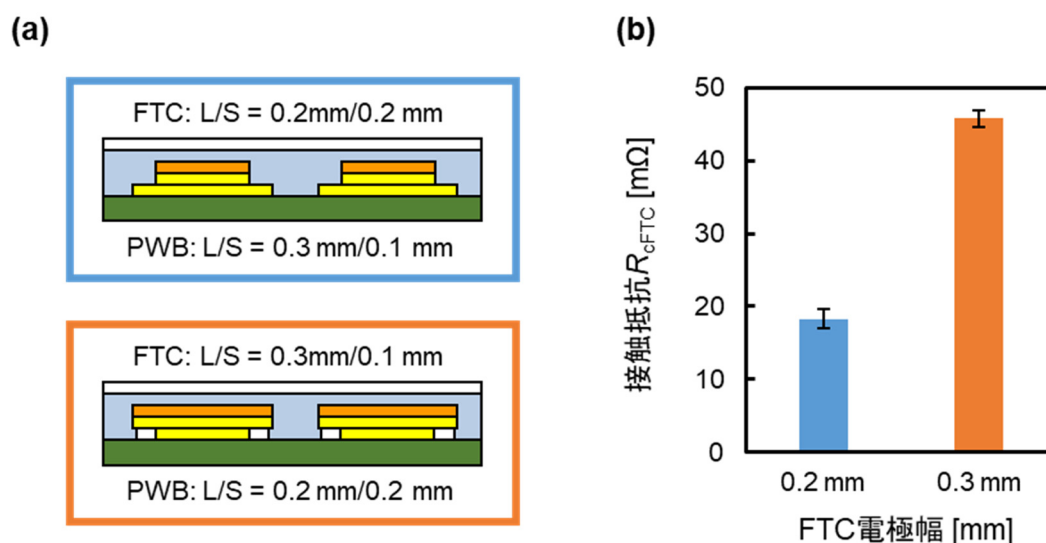


図 11. 電極中央部で位置を合わせた FTC 接続: (a) 接続部の断面図; (b) 接触抵抗  $R_{cFTC}$  の比較

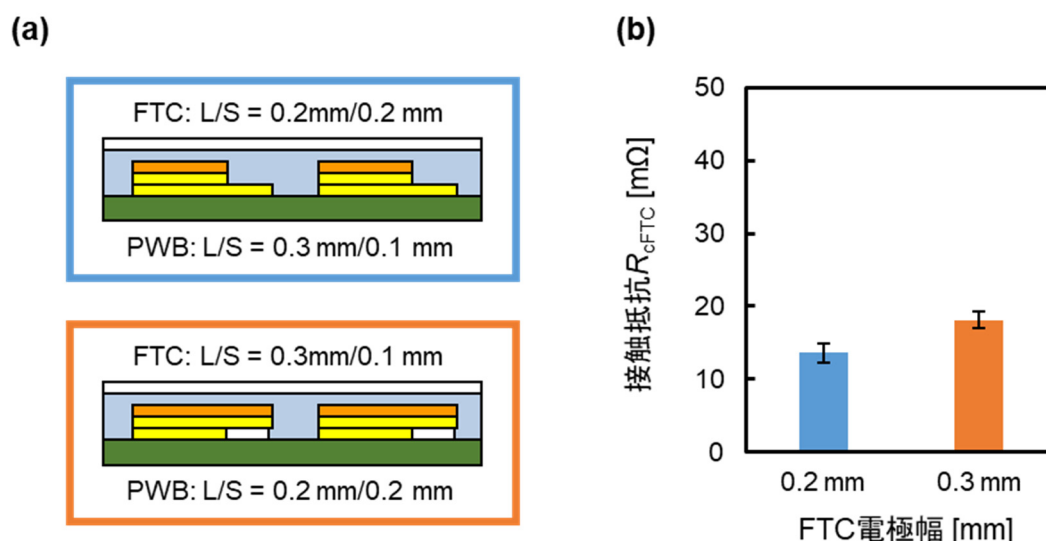


図 12. 電極端部で位置を合わせた FTC 接続: (a) 接続部の断面図; (b) 接触抵抗  $R_{cFTC}$  の比較

た。これは、FPC 自体のうねりの影響によるものと考えられます。この FPC と PWB の組み合わせで FTC 接続した結果(図 11a)、FTC の電極と PWB の電極とをそれぞれの電極中央部で位置を合わせて接続した際の接触抵抗  $R_{cFTC}$  は、FTC の電極幅が 0.2 mm の場合に 18.30 mΩ、FTC の電極幅が 0.3 mm の場合には 45.72 mΩ になりました(図 11b)。FPC と PWB との接続における接触抵抗  $R_c$  と比較すると、それぞれ 0.3 MPa、0.1 MPa 程度の接圧が発生していることに相当します。FTC の電極幅が 0.3 mm の場合には、粘着剤が FTC 電極と PWB 基板との空間に回り込んで充填されることが困難なことから(図 11a)、被充填空間の体積は FTC の電極幅が 0.2 mm のときと比較して 60%程度となっています。した

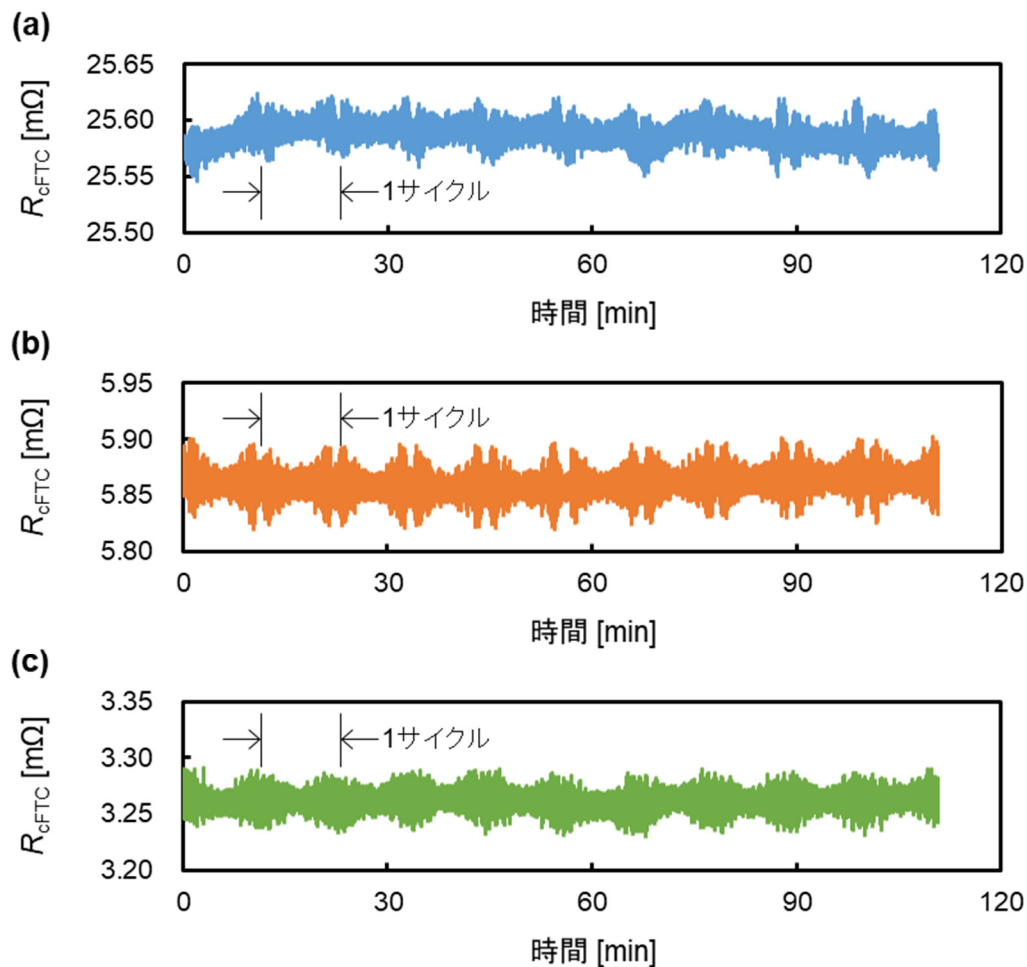


図 13. 振動試験中の接触抵抗  $R_{cFTC}$  の推移: (a) 電極幅 0.1 mm; (b) 電極幅 0.5 mm; (c) 電極幅 1 mm

がって、FTC の電極幅が接続対象の電極幅より広い場合は、粘着剤の変形が不十分であるために接圧が低くなり、接触抵抗が高くなっていると予想されます。

一方、FTC の電極と PWB の電極とを、それぞれの電極端部で位置を合わせて接続した場合(図 12a) の接触抵抗  $R_{cFTC}$  は、FTC の電極幅が 0.2 mm のときに 13.60 mΩ、0.3 mm のときには 18.10 mΩ になりました(図 12b)。接触抵抗  $R_c$  と比較すると、電極端部での接続では、それぞれ 0.5 MPa、0.3 MPa 程度の接圧が発生していることになり、どちらも電極中央部で位置を合わせた場合と比較して高くなっています。これは、見かけの接触面積や被充填空間の体積には変化がないにも関わらず、接続位置の違いのみによって発生する接圧が変化していることをあらわしています。以上の結果から、FTC 接続において接圧が局在化していることと、その接圧の多寡は粘着剤の変形する位置と度合いに影響を受けていることが強く示唆されます。すなわち、FTC 接続において接圧は電極端部に集中し、その接圧を高めるには、電極端部での粘着剤の変形量を大きくする必要があると推測されます。

この推測に基づけば、電極中央部で位置を合わせた FTC 接続において、FTC の電極幅が 0.2 mm の場合には、FTC の電極の両端が PWB の電極と接触しているものの、FTC の電極端部での粘着剤の変形は PWB の電極表面までとなっているため十分な接圧が発生していないと考えられます。くわえて、FTC



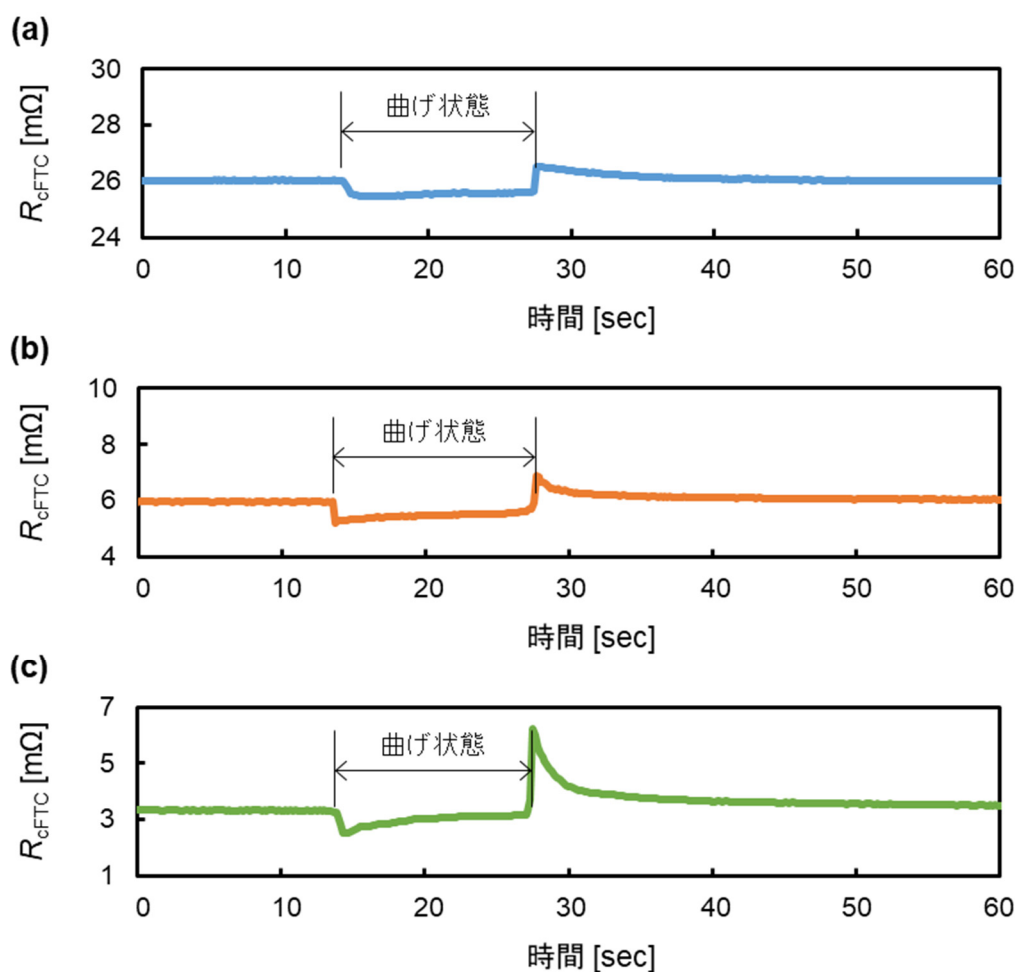


図 14. 曲げ試験中の接触抵抗  $R_{cFTC}$  の推移: (a) 電極幅 0.1 mm; (b) 電極幅 0.5 mm; (c) 電極幅 1 mm

の電極幅が 0.3 mm の場合には、FTC の電極端部での粘着剤の変形が PWB の基板表面にまで達し最大化しているものの、FTC の電極の両端が PWB の電極と接触していないことから相対する電極間には接圧が十分に発生していないと解釈できます。一方、電極端部で位置を合わせた FTC 接続では、FTC の電極端部は PWB の電極端部と接触し、かつその電極端部での粘着剤の変形が最大化されています。したがって、少なくとも片側の電極端部では理想的な接続構造で接圧が発生することから接触抵抗  $R_{cFTC}$  が低減していると考えられます。

以上の結果を踏まえると、FTC の接圧の発生には、粘着剤の総体積に対する被充填空間の体積の割合が影響を及ぼすだけでなく、粘着剤の変形量が互いに接触する電極端部で最大化することが重要であることがわかります。さらに、電極幅／電極間距離の比率を 1/1 とした FTC 接続の接圧は、接触抵抗  $R_{cFTC}$  と FPC-PWB 接続における接触抵抗  $R_c$  との比較によれば、FPC-PWB 接続に対する印加圧力 0.5 MPa 程度に相当しましたが、それは相対する電極間に均一に接圧が発生しているとの前提に基づいており、実際の FTC 接続では電極面内で接圧が局在化することにより電極端部では 0.5 MPa より高く、電極中央部では 0.5 MPa より低くなっていることが示唆されます。

## 4.6 抵抗値の連続測定による動的挙動の把握

### 4.6.1 振動試験

これまでの検討から、曲げ状態<sup>26)</sup>や振動環境<sup>33)</sup>における FTC 接続が安定であることは示されていますが、測定サンプルの都合上、接触抵抗  $R_{cFTC}$  の変化を確認することが困難となっていました。そこで、本検討での実験系を用いることにより、試験中の接触抵抗の連続的な変化を捉えることが可能になるのかを検討しました。その結果、JIS C 60068-2-6 に基づく振動試験において、加振される振動数が 11 Hz から 500 Hz まで上昇したのちに、11 Hz まで下降するという 1 サイクルの中での接触抵抗  $R_{cFTC}$  は、電極幅によらず低振動数領域でのばらつきが大きいことが明らかになりました(図 13)。振動試験での設定加速度が  $50 \text{ m/s}^2$  の条件下では、振動数が 500 Hz の場合は振幅が 0.01 mm、速度が 0.02 m/s になる一方、振動数が 11 Hz の場合は振幅が 21 mm、速度が 0.7 m/s にまで達します。そのため、振動数が低いほど接続部にかかる負荷が大きくなりますが、抵抗値の変化は  $\pm 0.05 \text{ m}\Omega$  の範囲内であることから、FTC 接続の安定性が認められます。くわえて、10 サイクルを通じて接触抵抗  $R_{cFTC}$  が振動数に応じた規則的な変化をし続けていることから、微摺動摩耗<sup>34, 35)</sup>が発生していないことも示唆されます。

### 4.6.2 曲げ試験

FTC を FPC に接続し、FTC を外側に向けた状態で電極ピッチ方向に曲率半径 2.5 mm で接続部を曲げた際の接触抵抗の推移を図 14 に示します。まず、接続部を平面状態から曲げた直後には、抵抗値が減少しました。これは、曲げにより粘着剤が電極ピッチ方向に伸ばされ FTC の電極が FPC の電極に押し付けられることによる接圧の増大をあらわしています。次に、曲げ状態が維持されるあいだに、経時的に抵抗値が増大しました。ここでは、粘着剤の応力緩和挙動<sup>36, 37)</sup>が接圧の変化として捉えられていると推測できます。さらに、接続部を再度平面状態に戻したときには、抵抗値は急激に増大したのちに時間の経過とともに減少し初期の抵抗値にまで戻る様子が確認できました。曲げ状態から平面状態に戻すことで、伸ばされていた粘着剤が圧縮され、これに伴い接圧が一時的に減少するものの、再度緩和が起きていることが示唆されます。また、平面状態に戻した直後の抵抗値の変化は FTC の電極幅に応じて大きくなりました。FTC 接続において接圧が電極端部に局在化しているとすれば、電極端部どうしが離れるほど電極中央部の接圧は低くなると推察されます。すなわち、電極幅が広い FTC 接続ほど変形に伴う電極中央部の接圧の変化に対して鋭敏に反応すると考えられます。さらに、FTC の電極幅が広がるほど粘着剤幅も長くなるため、同じ曲率半径で曲げた場合には電極幅が広い FTC ほど粘着剤の変形が大きくなります。これらの理由から、電極幅が広い FTC ほど抵抗値の変化が大きくなると解釈できます。

以上のように、FTC 接続で用いられる粘着剤は、電極の周囲を覆うことで接圧の発生に寄与するだけでなく、振動時、変形時にはその高い回復特性<sup>38, 39)</sup>を活かして接続部の動的信頼性の確保をも可能としていることが明らかになりました。

## 4. まとめ

本稿では、フィルム型の電気接続技術である FTC の接触抵抗の導出と、粘着剤の凝集力が相対する電極間に及ぼす影響について紹介しました。まず、FPC と PWB との接続部での電極 1 本分の導体抵抗を算出するために、CBKR 構造を利用した抵抗測定が効果的であることを示しました。次に、FTC のベースになる FPC と PWB との面接触における接触抵抗の圧力依存性を調査し、FTC 接続部の接触抵抗と比較することで、FTC 接続には 0.5 MPa 相当の接圧が発生していることを明らかにしました。そして、電極幅／電極間距離の比率を 1/1 とした FTC 接続では、接圧が粘着剤の総体積に対する被充填空間の体積の割合によって変化することを明らかにし、接続対象に応じて FTC の構造を調整することで最適な電気接続を提案できる可能性を示しました。さらに、同一の電極ピッチになる組み合わせでの FTC 接続の接触抵抗を比較することにより、FTC の接圧が電極面内に局在化していることを示し、FTC の接圧の発生には、粘着剤の変形量が互いに接触する電極端部で最大化することが重要であることを明らかにしました。最後に、本検討で用いた実験系で振動試験と曲げ試験を実施し、試験中の接触抵抗の微小な変化を捉えることで粘着剤の応力緩和挙動や回復特性を示すとともに FTC 接続の動的信頼性を明らかにしました。今後、生分解性材料の適用や印刷などの手法開発を交えながら材料・プロセス技術の醸成を通じて、環境に配慮したフィルム型の電気接続技術により持続可能な循環型社会に資するデバイスの創生への貢献を目指し、お客様の独創的な商品開発に新しい扉を拓くべく開発を推進してまいります。

### 【参考文献】

- 1) M. Shahabuddin, M. Nur Uddin, J. I. Chowdhury, S. F. Ahmed, M. N. Uddin, M. Mofijur, and M. A. Uddin, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **20**, 4513 (2023).
- 2) R. Rajesh, D. Kanakadhurga, and N. Prabakaran, *Environ. Chall.* **7**, 100507 (2022).
- 3) S. K. Kaliyavaradhan, P. R. Prem, P. S. Ambily, and K. H. Mo, *Resour. Conserv. Recycl.* **176**, 105936 (2022).
- 4) A. Danish, M. A. Mosaberpanah, T. Ozbakkaloglu, M. U. Salim, K. Khurshid, M. Bayram, M. Amran, R. Fediuk, and D. N. Qader, *Case Stud. Constr. Mater.* **18**, e01740 (2023).
- 5) A. Islam, T. Ahmed, M. R. Awual, A. Rahman, M. Sultana, A. A. Aziz, M. U. Monir, S. H. Teo, and M. Hasan, *J. Clean. Prod.* **244**, 118815 (2020).
- 6) L. H. Xavier, M. Ottoni, L. P. P. Abreu, *Resour. Conserv. Recycl.* **190**, 106840 (2023).
- 7) A. K.-Kleczkowska and A. Gnatowski, *Energies*, **15**, 2144 (2022).
- 8) J. Joo, E. E. Kwon, and J. Lee, *Environ. Pollut.* **287**, 117621 (2021).
- 9) B. Boubellouta and S. K.-Brandt, *Waste Manage.* **120**, 85 (2021).
- 10) J. Wiklund, A. Karakoç, T. Palko, H. Yiğitler, K. Ruttik, R. Jäntti, and J. Paltakari, *J. Manuf. Mater. Process.* **5**, 89 (2021).
- 11) A. H. Espera Jr., J. R. C. Dizon, A. D. Valino, and R. C. Advincula, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, SE0803 (2022).
- 12) Y. Bonnassieux, *et al.*, *Flex. Print. Electron.* **6**, 023001 (2021).

- 13) C. S. Buga and J. C. Viana, *Flex. Print. Electron.* **7**, 043001 (2022).
- 14) P. Wang, M. Hu, H. Wang, Z. Chen, Y. Feng, J. Wang, W. Ling, and Y. Huang, *Adv. Sci.* **7**, 2001116 (2020).
- 15) H. Luan and Y. Zhang, *Adv. Intell. Syst.* **3**, 2000228 (2021).
- 16) S. Lee, Q. Shi, and C. Lee, *APL Mater.* **7**, 031302 (2019).
- 17) Y. Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, and A. C. Arias, *Adv. Mater.* **32**, 1905279 (2019).
- 18) R. Mitsui, S. Takahashi, S. Nakajima, K. Nomura, and H. Ushijima, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 05HB04 (2014).
- 19) R. Mitsui, J. Sato, S. Takahashi, and S. Nakajima, *Electronics* **4**, 827 (2015).
- 20) K. Nomura, H. Ushijima, K. Nagase, H. Ikeda, R. Mitsui, J. Sato, S. Takahashi, S. Nakajima, M. Arai, Y. Kurata, and S. Iwata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 03DD01 (2016).
- 21) P. G. Slade, *Electrical contacts: principles and applications* (CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2014), p. 15
- 22) I. Márquez, N. Paredes, F. Alarcia, and J. I. Velasco, *Polymers* **13**, 2627 (2021).
- 23) J.-H. Lee, T.-H. Lee, K.-S. Shim, J.-W. Park, H.-J. Kim, Y. Kim, and S. Jung, *Int. J. Adhes. Adhes.* **74**, 137 (2017).
- 24) H. J. Kim, Z. Czech, M. Bartkowiak, G.-S. Shim, J. Kabatek, and A. Licbarski, *Polym. Test.* **105**, 107424 (2022).
- 25) M. Zhu, Z. Cao, H. Zhou, Y. Xie, G. Li, N. Wang, Y. Liu, L. He, and X. Qu, *RSC Adv.* **10**, 10277 (2020).
- 26) 三井亮介, 佐藤隼也, 中島伸一郎, 航空電子技報 **39**, 1 (2017).
- 27) J.-W. Kim, D.-G. Kim, Y.-C. Lee, and S.-B. Jung, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* **31**, 65 (2008).
- 28) N. Stavitski, J. H. Klootwijk, H. W. van Zeijl, A. Y. Kovalgin, and R. A. M. Wolters, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **22**, 146 (2009).
- 29) J. A. A.-Barrantes, M. Mastrangeli, D. J. Thoen, S. Visser, J. Bueno, J. J. A. Baselmans, and P. M. Sarro, *J. Microelectromechanical Syst.* **30**, 253 (2021).
- 30) M. Leidner, H. Schmidt, M. Myers, and H. F. Schlaak, *EPJ Appl. Phys.* **49**, 22909 (2010).
- 31) M. Park, B. A. Cola, T. Siegmund, J. Xu, M. R. Maschmann, T. S. Fisher, and H. Kim, *Nanotechnology* **17**, 2294 (2006).
- 32) C. Zhai, D. Hanaor, G. Proust, L. Brassart, and T. Gan, *Extreme Mech. Lett.* **9**, 422 (2016).
- 33) 佐藤隼也, 柴田直樹, 松尾幸祐, 三井亮介, 吉良敦史, 航空電子技報 **44**, 1 (2022).
- 34) L. Xu, S. Ling, Y. Lin, D. Li, S. Wu, and G. Zhai, *Microelectron. Reliab.* **100–101**, 113348 (2019).
- 35) A. Siddaiah, A. K. Kasar, V. Khosla, and P. L. Menezes, *J. Manuf. Mater. Process.* **3**, 47 (2019).
- 36) M. B. Novikov, B. E. Gdalin, J. V. Anosova, and M. M. Feldstein, *J. Adhes.* **84**, 164 (2008).
- 37) M. M. Feldstein and R. A. Siegel, *J. Polym. Sci. B: Polym. Phys.* **50**, 739 (2012).
- 38) J.-S. Kim, J. U. Hwang, D. Baek, H.-J. Kim, and Y. Kim, *J. Mater. Res. Technol.* **10**, 1176 (2021).
- 39) W. C. Seok, J. T. Leem, and H. J. Song, *Polym. Test.* **108**, 107424 (2022).