

技術紹介

1 次世代のエレクトロニクス実装を志向した フィルム型接続技術の開発とその接続信頼性

Development of a Film-Type Connection and its Electrical Reliability

三井 亮介 Ryosuke Mitsui 商品開発センター 博士(学術)

佐藤 隼也 Junya Sato 商品開発センター 主任

中島 伸一郎 Shin-ichiro Nakajima 商品開発センター エグゼクティブマネージャー 博士(薬学)

キーワード: フレキシブル/ウェアラブルエレクトロニクス、フィルム型コネクタ、面接触、
環境試験、曲げ試験、接続信頼性

Keywords: Flexible/wearable electronics, Film-type connector, Plate-to-plate contact, Temperature/humidity aging test, Bending test, Electrical reliability

要旨

携帯端末の高機能化と、実装部位の軽薄短小化との両立を目指す観点から、高密度実装への要求は高まり続ける一方で、フレキシブルやベンダブルといったキーワードでのデバイス開発も活発化してきており、これまで剛直だったデバイスに対して可搬性や耐衝撃性、自由形状性を付与することによる高機能化を目指した全く新しい形状、用途のコンセプトが提案されてきています。しかしながら、適した電気接続技術に関する報告例は少なく、既存技術の流用である場合が主流となっています。

本稿では、粘接着剤を用いたフィルム型コネクタによる新しい電気接続技術に関して、作製プロセスと接続信頼性の評価結果に基づいた基本特性、およびその有効性について報告します。フィルム型コネクタの接続部は厚さ 100 μm 以下であり、環境試験における抵抗値の変化が少なく、曲率半径 2.5 mm まで曲げることが可能です。従来の接続技術に対して、柔軟性という新たな付加価値をもたらすことによる、将来のエレクトロニクス実装への適用可能性が期待できます。

SUMMARY

With the escalating demands for downsizing and functionalizing mobile electronics, a fine-pitch interconnection has become one of the most important technologies. On the other hand, many applications of flexible/bendable electronics have been proposed. In these applications, device functionality is enhanced by (1) providing portability, impact resistance and freedom of form; and (2) reducing the weight and thickness of the device. Although many flexible devices have been developed, little attention has been paid to suitable packaging technologies for these devices. To address limitations concerning junction deformation, we developed a new connection method using a film-type connector that is less than 0.1 mm thick.

We disclose a reliability of the film-type connection under temperature/humidity aging tests and repeated bending conditions. The results of a study demonstrate that the film-type connector has several advantages compared to conventional connections.

1. はじめに

携帯端末の高機能化と、実装部位の軽薄短小化との両立を目指す観点から、高密度実装への要求は高まり続けており、それに伴い微細配線の接続技術に注目が集まっています。数ある配線接続技術の中でも、フレキシブルプリント配線板(FPC: Flexible Printed Circuit)を用いた接続は、その特長すなわち、軽さ、薄さ、形態の自由度の面で、先の要求を満たす最も重要な技術の一つであり、現在まで幅広い分野で適用されています。^{1,2)} 一般に、FPCとプリント配線板やその他電子部品とを接続するには、専用のコネクタもしくは異方性導電フィルム(ACF: Anisotropic Conductive Film)が用いられています。コネクタによる接続では、相対する電極どうしの導通の確保は機械的な垂直力に依存しているため、十分な垂直力を維持したままコネクタを小型化するには機構設計的にある程度の限界があると考えられています。一方、ACFは導電性粒子が熱硬化性樹脂に分散されたフィルム状の接着剤であり、熱と圧力を印加されることで相対する電極間に挟持された導電性粒子を介して導通が得られます。³⁻⁵⁾

それにくわえ近年では、フレキシブルやベンダブルといったキーワードでのデバイス開発も活発化しており、これまで剛直だったデバイスに対して可搬性や耐衝撃性、自由形状性を付与することによる高機能化を目指した全く新しい形状、用途のコンセプトが多数発表されてきています。⁶⁻⁴⁰⁾ これらフレキシブル/ベンダブルデバイスの開発が進展する一方で、対応する電気接続技術の報告例は少なく、既存のコネクタやACFの転用が主流となっているのが現状です。前述のように、剛直なコネクタの小型薄型化は限界に近付いており、フレキシブル/ベンダブルデバイスの電気接続にコネクタを用いると、デバイスの柔軟性が損なわれるおそれがあります。一方ACFでは、接続時に熱と圧力を印加する必要があるため、デバイスの基板に用いられる有機物のフィルムとの熱膨張係数の差に起因する基板の変形や、電極のピッチずれなどの不具合を誘発するおそれがあります。特に今後、基板フィルムの薄化が進行した場合や、医療・ヘルスケアといった観点から生体親和性が高い一方で耐熱性の低いソフトマテリアル類が基板として用いられる場合には、より顕著な問題となると考えられます。

以上の背景を踏まえ、筆者らは将来のエレクトロニクスデバイスの機能・意匠に過不足なく調和し電気的な接続を確保する技術すなわち、低背で、接続時に熱を必要とせず、接続部を任意の曲率半径で曲げることが可能であり、かつ実装面積の省スペース化にも効果的な接続技術の開発に取り組みました。本稿では、開発したフィルム型コネクタを用いた接続の詳細と、環境試験、曲げ試験における接続信頼性の要因とその有効性に関して従来技術との比較を交えて報告いたします。

2. 実験

2.1 フィルム型コネクタの作製

フィルム型コネクタは配線部と接続部から構成されており、接続部では電極が粘接着剤上に配置されているという構造的特徴があります。その作製プロセスを図1に示します。まず、ポリイミド(PI)フィルム上に銅めっきし、次いでフォトリソ工程を用いた異方性エッチングにより銅をパターンニングすることで配線を形成します。レジストを剥離後、銅配線に対してニッケル/金めっきを施し、最後に、接続部のPIフィルムを異方性エッチングにより電極と同様の形状にパターンニングした後に、ポリエチレンテレフタレート(PET)フィルム上の粘接着剤をPIフィルム側から貼り付け完成となります。

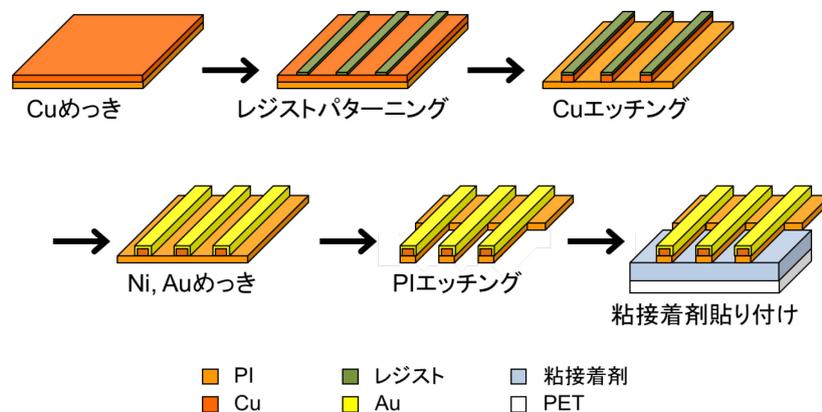


図1. フィルム型コネクタの作製プロセス

2.2 フィルム型コネクタの接続

フィルム型コネクタとFPCとの接続プロセスを図2に示します。フィルム型コネクタの接続プロセスは仮接着プロセスとUV照射プロセスとからなり、仮接着プロセスではフィルム型コネクタの電極とFPCの電極との位置合わせをした後に室温下1.5 MPaの圧力を10秒間印加することで、粘接着剤がフィルム型コネクタの電極間から押し出され、FPCの基板であるPIフィルムと接着し相対する電極どうしの導通が確保されます。その後、中心波長365 nmの高圧水銀灯を用いて540 mJ/cm²のUVを照射することで粘接着剤を架橋させ接着力を増大させます。

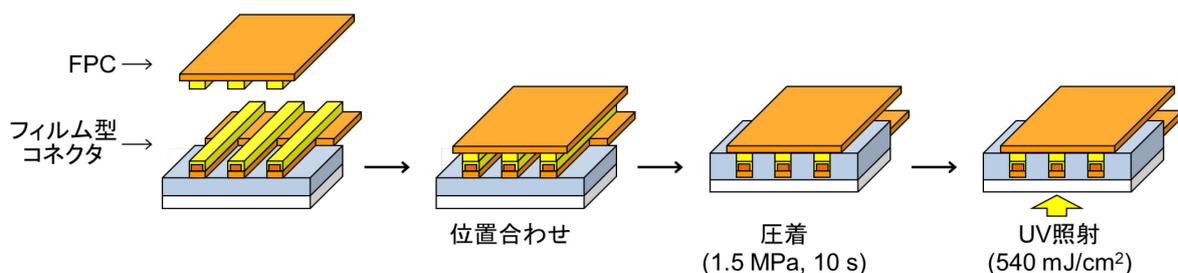


図2. フィルム型コネクタの接続プロセス

2.3 評価用サンプルの調整

本検討で使用したフィルム型コネクタの概要を図 3 および表 1 に示します。フィルム型コネクタの 192 芯の電極は、櫛歯状の配線構造の FPC と接続され、二つの 96 芯のパッド部へと分割され測定装置に接続されます。櫛歯状の FPC はフィルム型コネクタと同様の素材からなり、PI フィルムのエッチングや粘接着剤の貼り付け以外は作製プロセスも同様です。

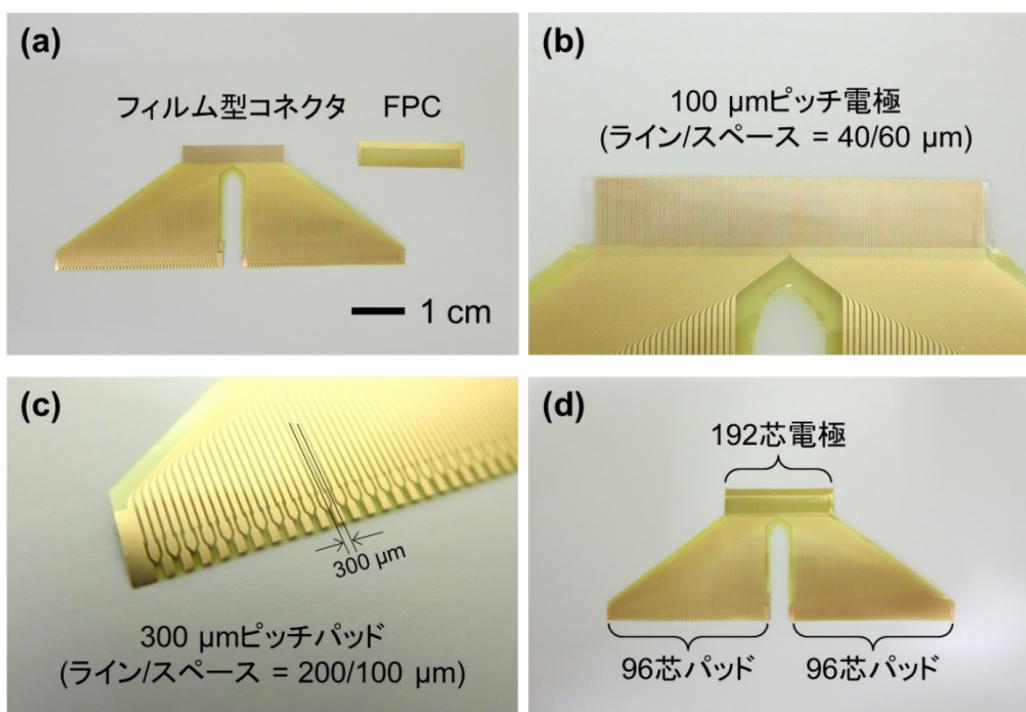


図 3. フィルム型接続の外観:

(a) フィルム型コネクタと櫛歯状の FPC; (b) 接続部; (c) パッド部; (d) 接続後サンプル

表 1. フィルム型コネクタの仕様

項目	内容
PI フィルム厚さ	7.5 μm
電極材料、厚さ	Cu/Ni/Au = 9/0.5/0.1 μm
電極ピッチ	100 μm (L/S = 40/60 μm)
電極数	192 芯
粘接着剤厚さ	50 μm
PET 基板厚さ	25 μm

2.4 抵抗値の測定・算出方法

フィルム型コネクタと櫛歯状の FPC とを接続した際の抵抗値の測定方法の例を図 4 に示します。測定は図 4b に示すような四端子法により各パッドに対して行われ、櫛歯状の FPC を介した隣接パッド間の抵抗値を読み取っています。抵抗値の変化量は、各パッドで測定した初期の抵抗値からの変化量を平均化して算出されています。したがって、算出された値には、接続抵抗の変化量と配線抵抗の変化量が含まれています。また、接続不良が生じた電極の抵抗値は算出対象から除外されています。

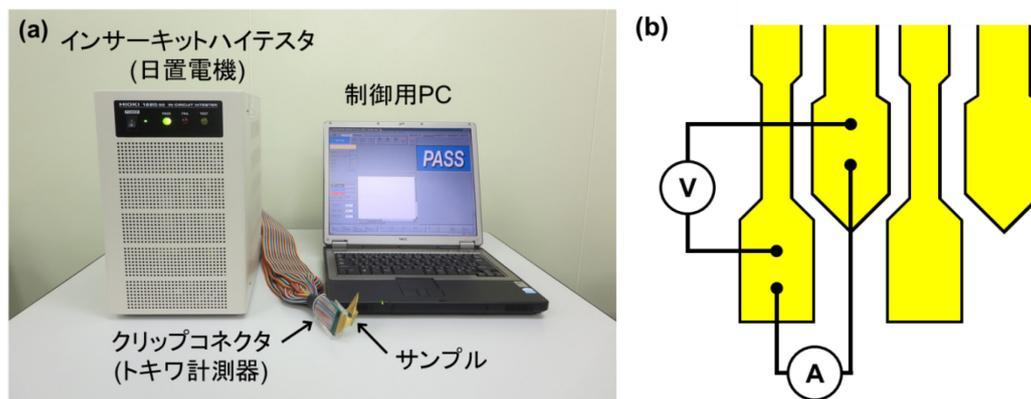


図 4. サンプル測定系: (a) 外観; (b) パッド部を用いた四端子法

2.5 信頼性試験

2.5.1 恒温恒湿試験、熱衝撃試験

フィルム型コネクタと櫛歯状の FPC とを図 2 のプロセスにて接続し、表 2 に示す項目にて環境試験による抵抗値変化を調査しました。

表 2. 環境試験内容

試験項目	測定時間、サイクル
60°C/95%RH	1000 時間
85°C/85%RH	1000 時間
-55°C/85°C	1000 サイクル

比較のため、フィルム型コネクタと同様の素材、配線形状のフレキシブル基板と櫛歯状の FPC とを市販の ACF を用いて接続し、同様に抵抗値変化を調査しました。

2.5.2 曲げ試験

櫛歯状の FPC と接続したフィルム型コネクタに対して、電極長辺方向に垂直・平行な軸(x, y軸)周りに接続部の曲率半径を段階的に小さくした場合の抵抗値の推移を調査しました。フィルム型接続部は ACF 接続と異なり接続部の断面構造が対称ではないことから、凹曲げと凸曲げの二種類を実施しました(図 5)。まず、平面状態での抵抗値を測定し、次に、曲率半径が 70、50、25、10、5、2.5 mm とな

るように曲げた状態で抵抗値を測定しました。最後に、再度平面状態に戻して抵抗値を測定し、それぞれの状態における初期の抵抗値からの変化量を算出しました。測定にはパッド 20 芯分を用いました。

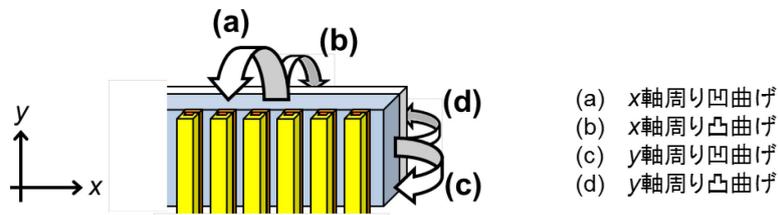


図 5. 曲げ試験における接続部の曲げ方向

2.5.3 折り曲げ試験

前項と同様の接続サンプルを x 軸周り凹曲げ方向に完全に折り曲げ、抵抗値の変化を算出しました。フィルム型コネクタの場合は、折り曲げ後に室温大気下に放置し、抵抗値の推移を調査しました。測定にはパッド 192 芯分を用いました。

2.5.4 繰り返し曲げ試験

前項と同様の接続サンプルに対して、曲率半径が 70、50、25、10、5、2.5 mm となるよう繰り返し曲げた際の抵抗値の変化を調査しました。10 回曲げの場合は、曲げ時と平面時にそれぞれ抵抗値を測定し、連続的な抵抗値の変化を調査しました。1000 回曲げの場合は、所定の回数まで繰り返し曲げた後、平面時の抵抗値を測定しました。測定にはパッド 96 芯分を用いました。

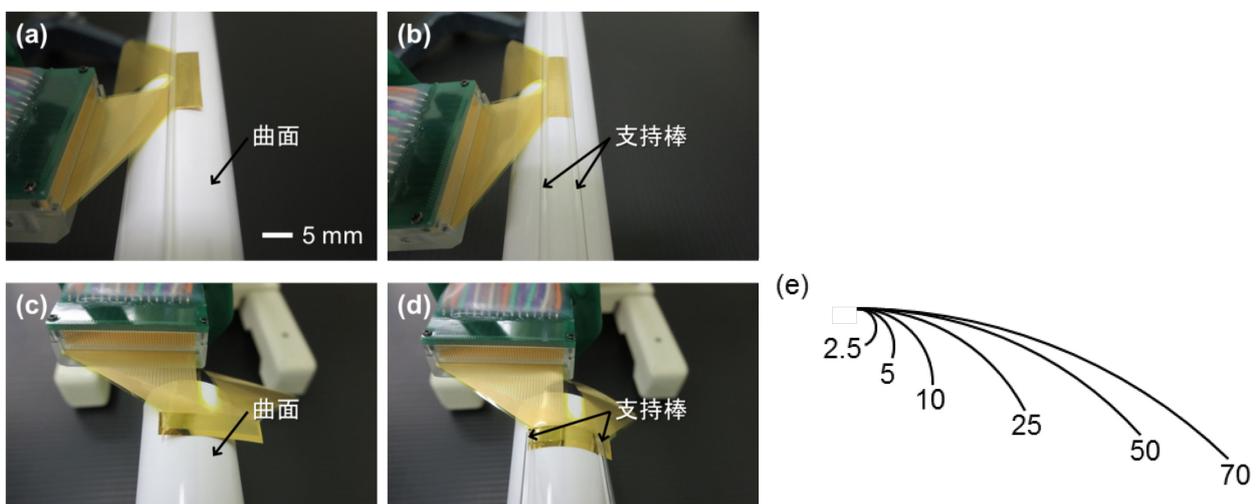


図 6. 繰り返し曲げ試験: (a, b) x 軸周りの曲げ方法; (c, d) y 軸周りの曲げ方法; (e) 曲率半径(単位: mm)

本検討では支持棒を用いて接続部を曲面に沿わせることで、安定した曲げ状態を維持しました(図 6)。曲げ試験についてはこれまで多くの方法が提案されていますが、³¹⁻⁴⁰⁾ たとえば、治具を直接押し付けて曲げる方法では接続部に余計な外力が印加されるのみならず、接続部を一定の張力で保持する必要があり、変形による接続構造の変化やそれに伴う電気的特性の変化の把握が困難になると考えられたため、本検討では適用しませんでした。

3. 結果と考察

3.1 フィルム型接続の特徴

ACF を用いた FPC の接続プロセスを図 7 に示します。ACF 接続では、相対する電極間に挟まれた導電性粒子を介して電氣的な接続がなされ、その安定性は周りを覆う熱硬化性樹脂の硬化収縮力で保たれます。この硬化反応を促進させるために熱圧着プロセスが必要となっています。圧着時の熱が接続対象に及ぼす影響を減少すべく、UV や超音波など他のエネルギー供給方法での試みがなされておりますが、依然として 100°C 程度もしくはそれ以上の加熱が必要となっています。⁴¹⁻⁴³⁾

一方、フィルム型コネクタを用いた接続の鍵となる粘接着剤の架橋反応の促進には加熱は必要ありません(図 2)。くわえて、UV 照射後においても粘接着剤の弾性率は MPa オーダを保っており、これは、ACF に用いられる熱硬化性樹脂の弾性率が一般的に GPa オーダであることを考慮すると、⁴⁴⁻⁴⁸⁾ フィルム型接続部が柔軟性の観点においては優位であることを示しています。

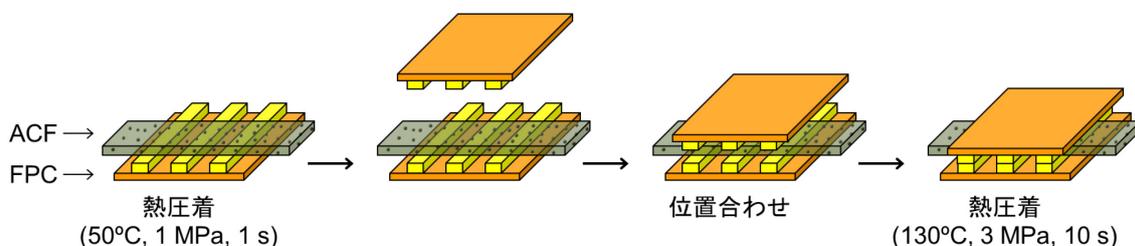


図 7. ACF を用いた接続方法

フィルム型接続部の断面図を図 8 に示します。接続時に印加される圧力により粘接着剤は約 80%厚さ方向に圧縮され FPC 基板へと貼り付けられます。相対する電極間に掛かる荷重(接圧)を実験的に測定できていませんが、粘接着剤の変形や硬化収縮ならびに基材である PET フィルムの変形に伴い発生する応力が、接圧の確保に寄与しているものと考えられます。接触する二つの金属間には、見かけの接触面の中にある割合で電氣的導通を担う真の接触面が存在することが経験的・数学的に実証されており、接圧の増大に伴い真の接触面積が増加し電気抵抗が減少することが明らかとなっています。⁴⁹⁻⁵⁴⁾ フィルム型接続では相対する電極間での面接触により見かけの接触面積を最大化させることで接続信頼性を確保する構造となっています。

面接触を利用しているという点では、フィルム型コネクタは NCF (Non-Conductive Film)などの絶縁性封止材料を用いた電気接続構造と類似していますが、接続プロセスが異なります。一般に NCF とは熱硬化性樹脂の接着剤を指し、接続時には ACF と同様の手順で取り扱われます。接続時には、電極上に形成されたバンプ等が NCF を突き破り相対する電極と直接接触することで導通が確保されます。この際、相対する電極間に樹脂が残存することにより導通不良が生じる場合がありますが、フィルム型コネクタによる接続では、先に相対する電極どうしを接触させたのちに粘接着剤で基板どうしを貼り合わせるため電極の位置合わせにさえ留意すれば相対する電極間に粘接着剤が流入することはなく、異物混入による接続不良が起きる可能性は低くなっています。

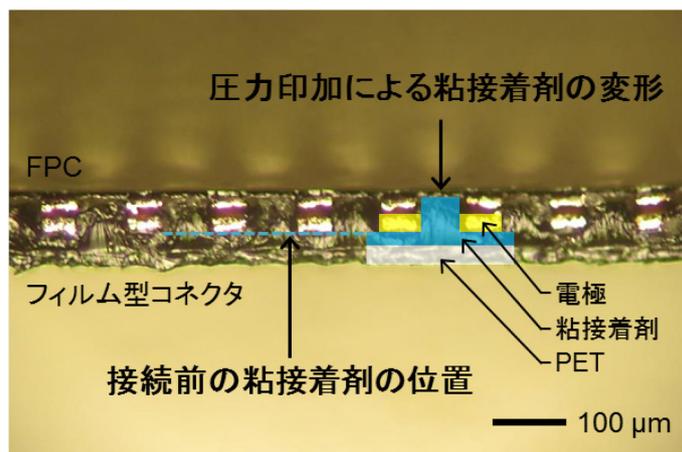


図 8. フィルム型接続部の断面

本検討で用いたフィルム型コネクタの FPC と接続した際の抵抗値を図 9 に示します。実線の矢印は電流の経路を概略的に表しています。電流は、フィルム型コネクタの任意のパッドから隣接するパッドまで楯歯状の FPC を介して流れます。測定の結果から、電流経路の長ささと抵抗値に相関が認められ、フィルム型コネクタが不良なく適切に FPC と接続できていることがわかります。

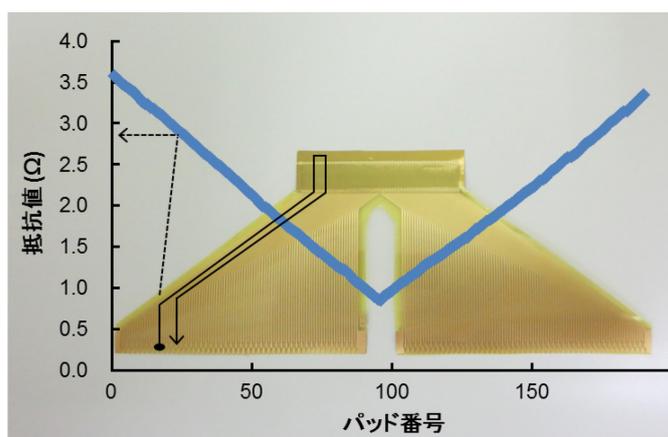


図 9. フィルム型接続の抵抗値

3.2 信頼性試験

3.2.1 恒温恒湿試験、熱衝撃試験

環境試験の結果、フィルム型コネクタは ACF と比較し抵抗値の変化量・ばらつきが小さく、接続安定性が高いことがわかります(図 10)。特に、高温高湿度環境下での場合に顕著な差異が認められます。これは、接続状態を維持する材料特性の差に起因するものと考えられます。ACF に用いられるエポキシ系の熱硬化性樹脂は一般的に、高湿度環境下にさらされることで湿潤膨張することが明らかとなっています。^{55,56)} これは、樹脂の高分子鎖内に反応過程で生じるヒドロキシ基が存在し水分の吸着サイトとして機能することで起きる現象です。湿潤膨張した樹脂は収縮力が減少し、ACF の導電性粒子に十

分な接圧が印加されず、電気的な導通を担う接触面積が維持できなくなることにより、抵抗値が増大すると考えられています。

一方、フィルム型コネクタに用いられる粘接着剤は耐湿性を高めたアクリル系の樹脂であるため、より信頼性に優れた結果が得られたと結論付けることができます。

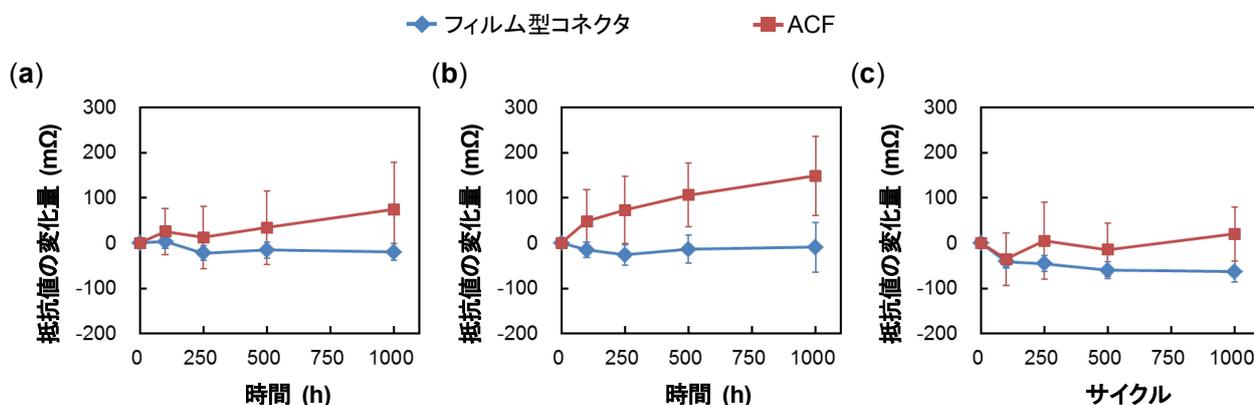


図 10. 環境試験による抵抗値変化: (a) 60°C/95%RH; (b) 85°C/85%RH; (c) -55°C/85°C

3.2.2 曲げ試験

曲げ試験の結果、フィルム型コネクタは ACF と比較し動きに対する安定性が高いことがわかります (図 11)。これは、ACF を用いた接続において相対する電極間に存在する導電性粒子の挟持状態の変化を表していると考えられます。

ACF では接続部を x 軸周りに曲げた場合、曲率半径の減少に伴い大きなばらつきをもち抵抗値が増大していきます。接続部を x 軸周りに曲げる場合すなわち、電極を長辺方向で曲げる場合には、熱硬化性樹脂の基板からの剥離が強く誘起されることにより、各電極間での導電性粒子の挟持状態が不均一化した結果ばらつきが生じていると考えられます。一方、 y 軸周りに曲げた場合は、曲げによる抵抗値のばらつきは比較的抑えられていますが、平面状態に戻した際に大きなばらつきとともに抵抗値が増大しています。これは、曲げ時には電極 1 本当たりの形状変化が少なくばらつきを抑えられたものの、樹脂にクラックが生じた結果、平面状態に戻した際に導電性粒子が電極間に挟持されず接触面積が確保できなかったためだと考えられます。⁵⁷⁾

対照的にフィルム型コネクタの場合は、粘接着剤に柔軟性があるため曲げ時にクラックが生じることはありません。くわえて、面接触により十分な接触面積をあらかじめ確保できているため、曲げ時においても抵抗値の大幅な増大に影響を及ぼすほど接触面積が減少しないことにより接続安定性が高められていると考えられます。

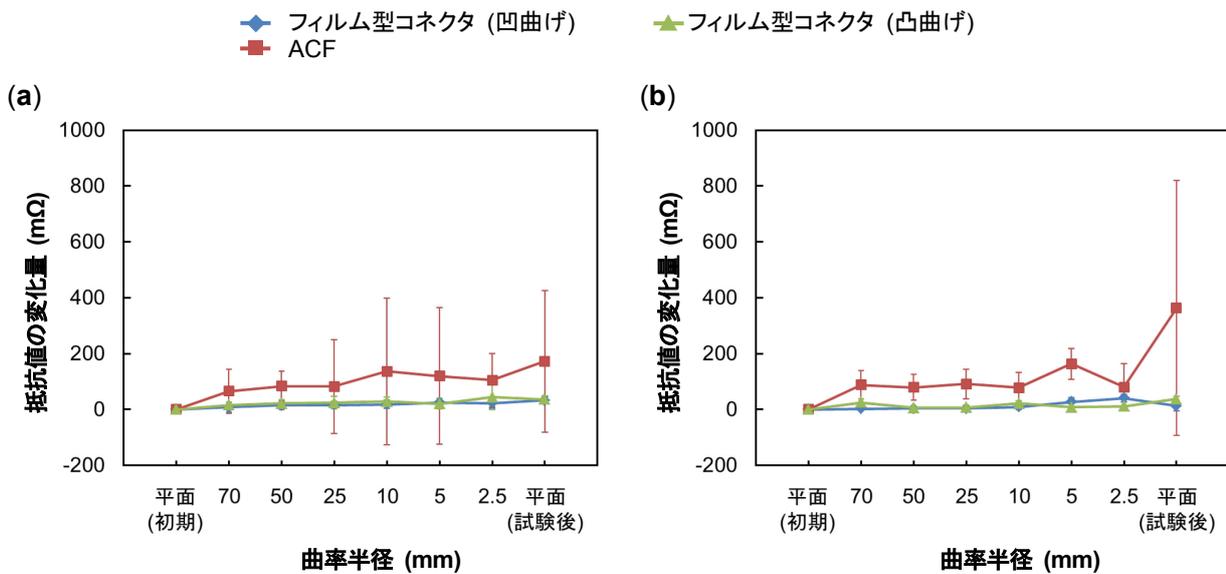


図 11. 曲げ試験による抵抗値変化: (a) x軸周りの曲げ; (b) y軸周りの曲げ

3.2.3 折り曲げ試験

接続部を x 軸周り凹曲げ方向に完全に折り曲げた場合、ACF では約 6% の接続不良が生じたのに対し、フィルム型コネクタでは接続不良や抵抗値の著しい増大は認められていません(図 12)。これは、曲げ試験の結果と同様、フィルム型コネクタの特長が有効に機能していることを示唆しています。

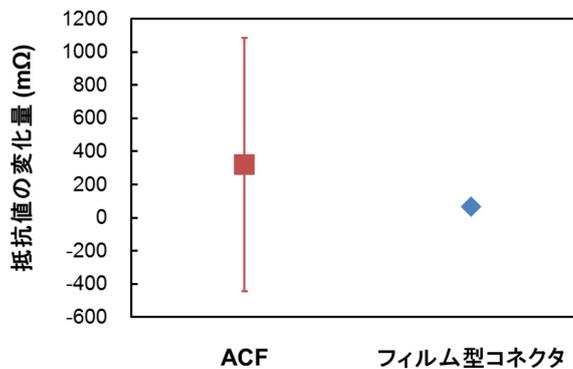


図 12. 折り曲げ試験による抵抗値変化

引き続き、フィルム型コネクタの接続部を折り曲げた後の抵抗値の経時変化を調査した結果、接続する FPC の厚さが 25 μm の場合では、折り曲げ後 1900 時間経過時に約 2% の接続不良が発生した一方、FPC の厚さが 7.5 μm の場合では接続不良は発生せず、抵抗値の変化量も小さいことが認められています(図 13)。これは、折り曲げ時に接続部に与えられる FPC からの反力の影響であると考えられます。FPC が厚い場合には時間の経過とともに接続部が平面状態に近づきます。その過程において粘接着剤の FPC 基板からの剥離が認められており、その結果接続不良が発生していると考えられます。

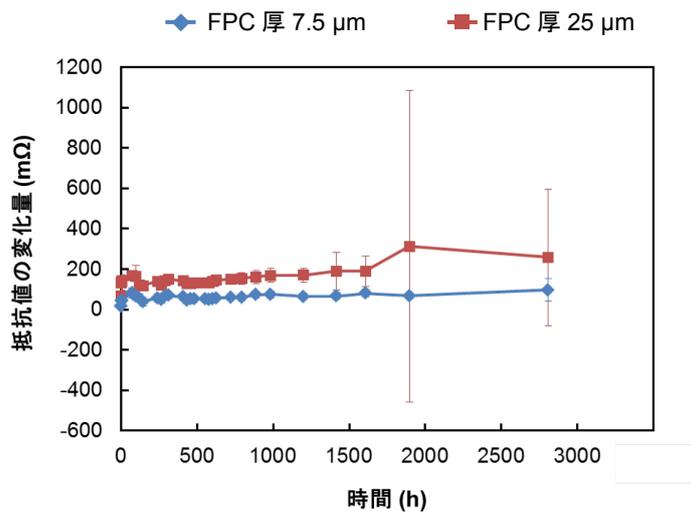


図 13. 折り曲げ試験による抵抗値変化の時間依存性

3.2.4 繰り返し曲げ試験

電極部がショート回路となっているフィルム型コネクタを繰り返し曲げ試験した結果、抵抗値の変化量は 1000 回曲げ後も最大で 1.5 mΩ 程度であることがわかっています(図 14)。したがって、接続部の曲げ試験における抵抗値の変化は配線抵抗よりも接続抵抗が支配的であることが示唆されます。

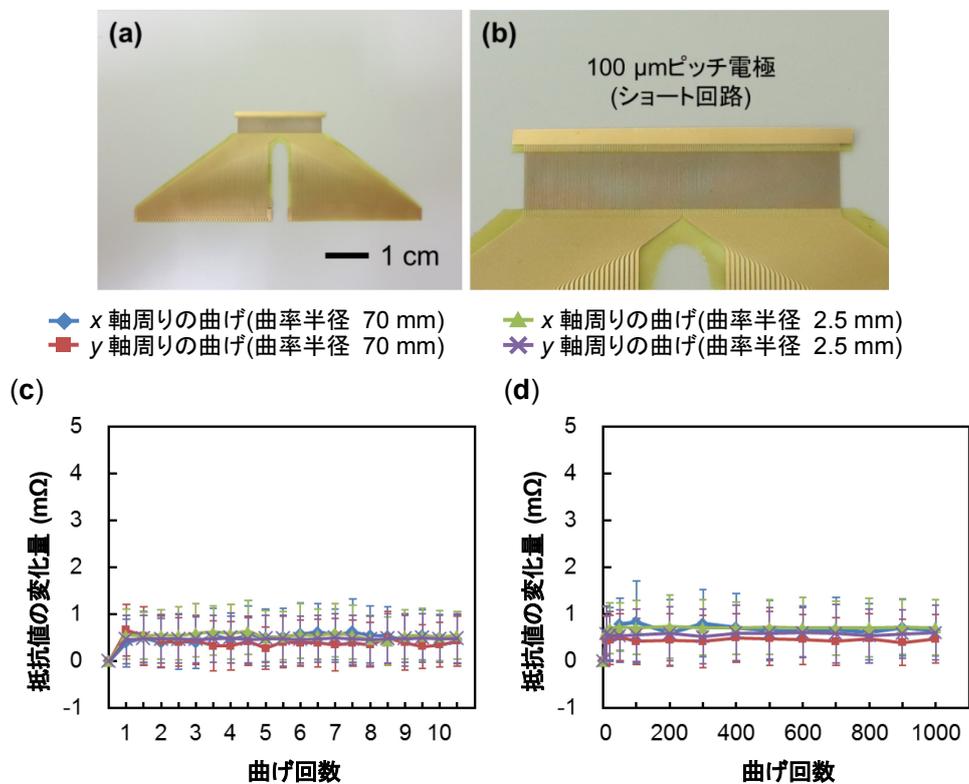


図 14. 繰り返し曲げ試験における配線抵抗の変化:
 (a, b) 測定サンプル; (c) 10 回曲げ; (d) 1000 回曲げ

10回曲げ試験における連続測定の結果を図15に示し、1000回曲げ試験の結果を図16に示します。連続測定の結果、 x 軸周りの曲げにおいては接続不良が発生せず、抵抗値の変化量は、平面時よりも曲げ時に増大し、曲率半径の減少に伴い増大することがわかります。1000回曲げ試験においても接続不良は発生しておらず、抵抗値は初期に増大したまま一定の水準で保たれています。一方、 y 軸周りの曲げにおいては、凹曲げ時に曲率半径が10mm以下の場合に限り接続不良が発生しています(図15c, 16c)。それに伴い抵抗値、ばらつきも増大し、また、曲げ回数の増加に伴い接続不良数も増加することが認められています(図17)。接続不良が発生した場合を除き、曲げ方向によらず同様の傾向は認められましたが、抵抗値の変化量は x 軸周りの曲げ時より y 軸周りの曲げ時のほうが安定しています。

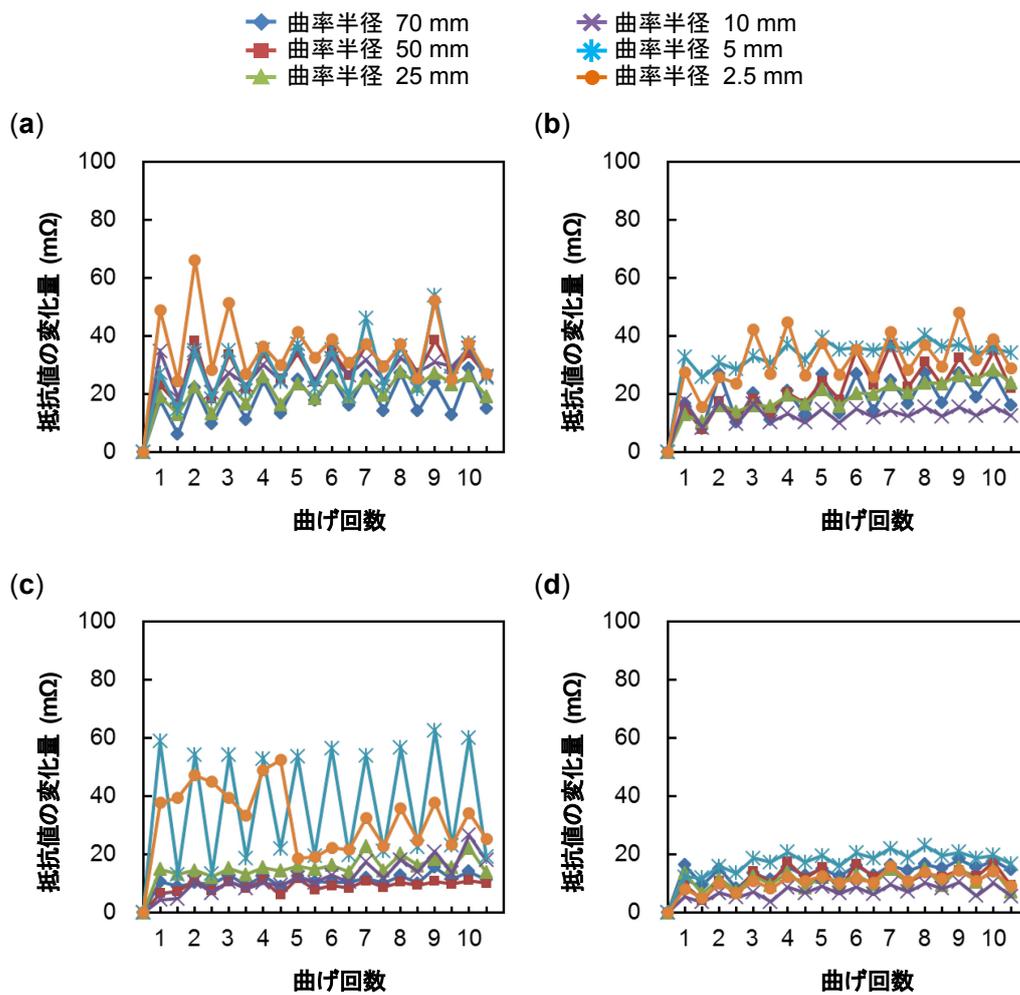


図15. 繰り返し曲げ試験(10回)における抵抗値変化:

(a) x 軸周り凹曲げ; (b) x 軸周り凸曲げ; (c) y 軸周り凹曲げ; (d) y 軸周り凸曲げ

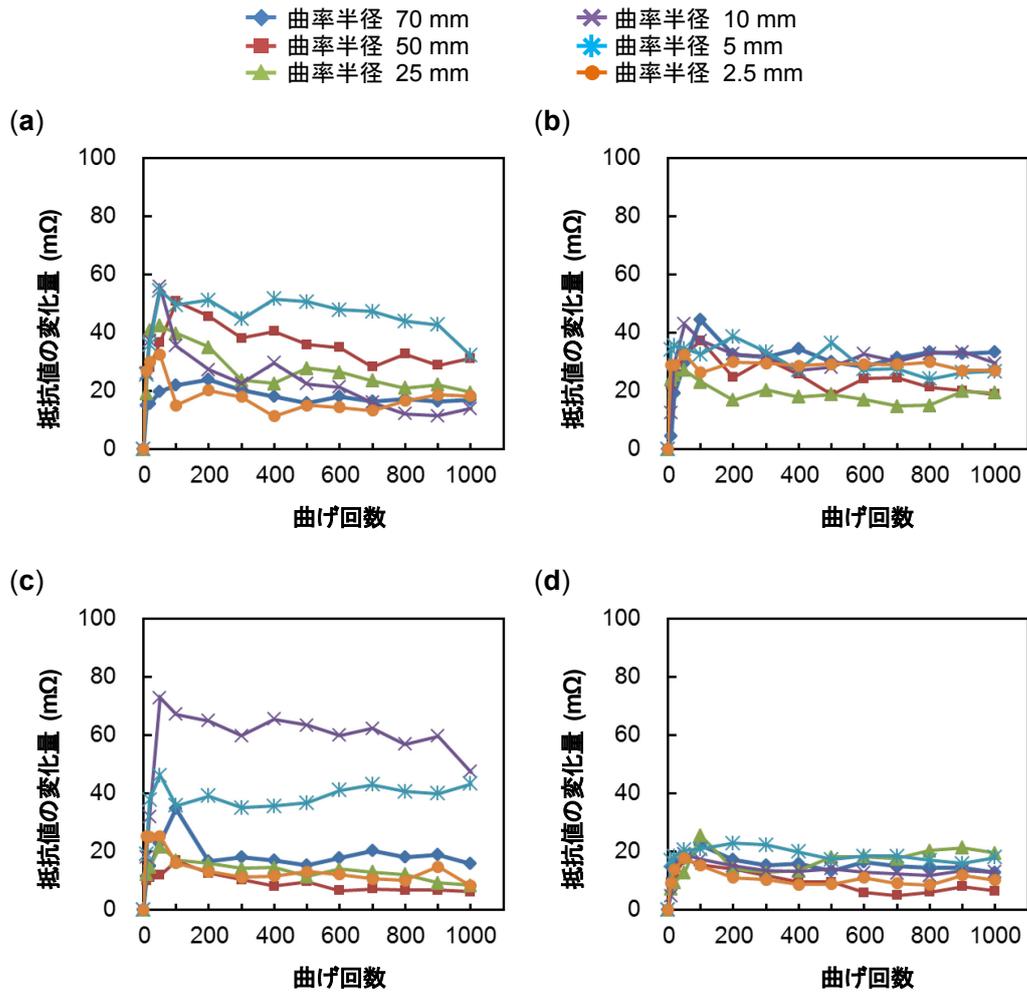


図 16. 繰り返し曲げ試験(1000回)における抵抗値変化:

(a) x軸周り凹曲げ; (b) x軸周り凸曲げ; (c) y軸周り凹曲げ; (d) y軸周り凸曲げ

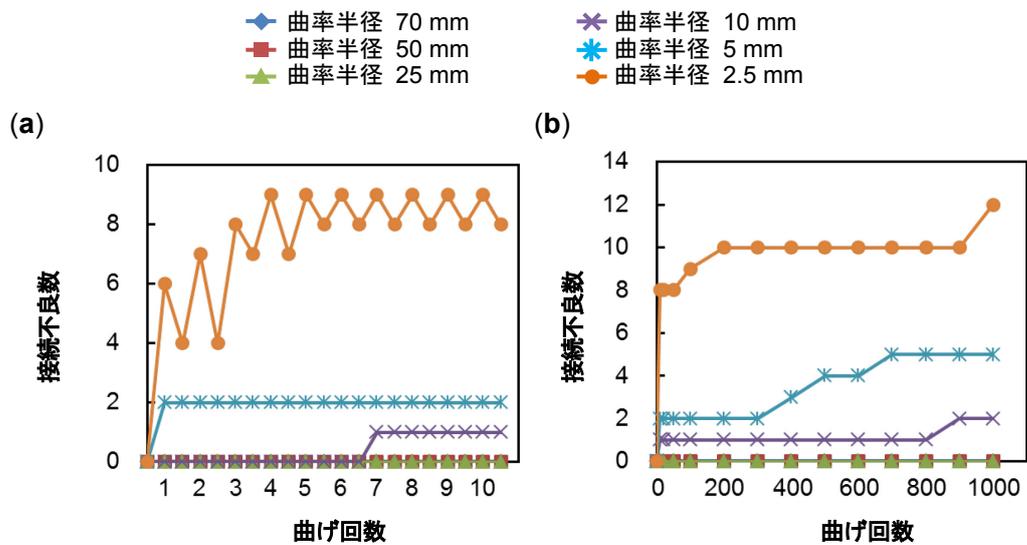


図 17. 各曲率半径での y 軸周り凹曲げにおける接続不良数: (a) 10 回曲げ; (b) 1000 回曲げ

ここで、曲率半径が 2.5 mm で y 軸周り凹曲げ試験において、測定に用いたパッドごとに抵抗値の変化量をプロットすると、接続不良が周期的に発生していることが確認できます(図 18)。

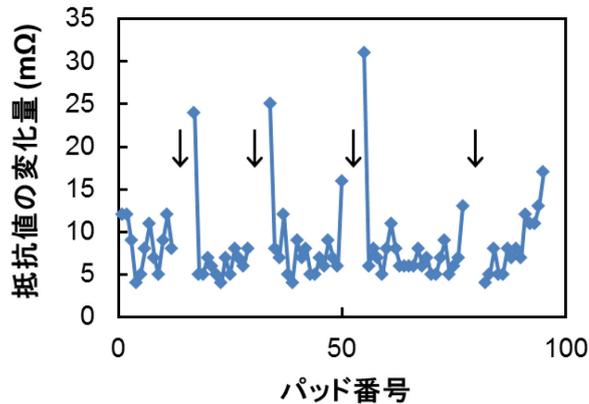


図 18. 曲率半径 2.5 mm での繰り返し曲げ試験後における抵抗値変化

また、接続部の断面観察から、 y 軸周り凹曲げ時に発生する接続不良は FPC の周期的な剥離によるものと確認できます(図 19)。これは、曲げ時の変形により FPC に圧縮応力が印加されたことを示唆しています。⁵⁸⁾ 対照的に、 y 軸周り凸曲げ時には FPC は引張応力を受けるため接続状態が維持されます。この現象には、接続部に用いられる各基板の厚さが関係しています。本検討でのフィルム型コネクタに用いられている PET 基板の厚さは 25 μm である一方、FPC に用いられている PI フィルムの厚さは 7.5 μm であり、曲げ時には FPC の変形のほうが容易なため、圧縮応力による剥離が生じたと考えられます。このことは、PI フィルムの厚さが 50 μm の場合には y 軸周り凸曲げ時にフィルム型コネクタの剥離が生じることからも支持されます。しかしながら、FPC に圧縮応力が印加される凹曲げにおいても、 x 軸周りの曲げ時には FPC の剥離は生じておらず、接続不良も発生していません。これは、圧縮応力の印加される方向に対する粘着剤の占める割合が影響していると考えられます。 x 軸周りの曲げ時における接続部の y 軸方向の断面には、粘着剤はスペース部で FPC との接着領域が最大化します。一方、 y 軸周りの曲げ時における接続部の x 軸方向の断面には必ず電極が存在し、粘着剤の接着領域が十分に確保されていないため圧縮応力により FPC の剥離が生じ、接続不良が発生したと考えられます。

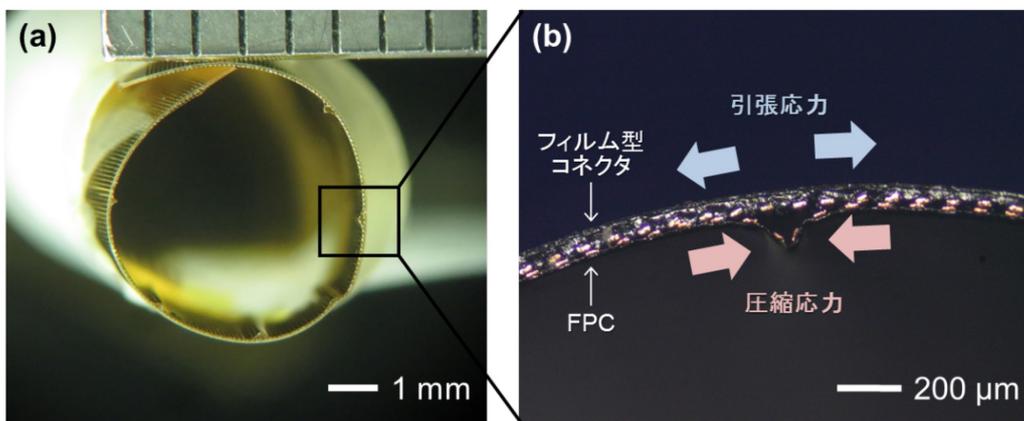


図 19. y 軸周り凹曲げ時におけるフィルム型接続部の断面: (a) 全体図; (b) 接続不良部の拡大図

そこで、192 芯の FPC を 6 個のユニットに分割し計 182 芯とした後にフィルム型コネクタを接続しました(図 20a, b)。その結果、曲率半径が 2.5 mm における y 軸周り凹曲げ時でも接続不良の発生は認められず、抵抗値の変化は安定した水準で保たれています(図 20c, d)。このことから、 y 軸周りの曲げ時において、発生する圧縮応力による各電極の x 軸方向への変位を許容する電極構造とすれば、周期的な剥離を防止することができ、あらゆる方向に曲げることが可能なフィルム型接続構造が実現できると考えられます。

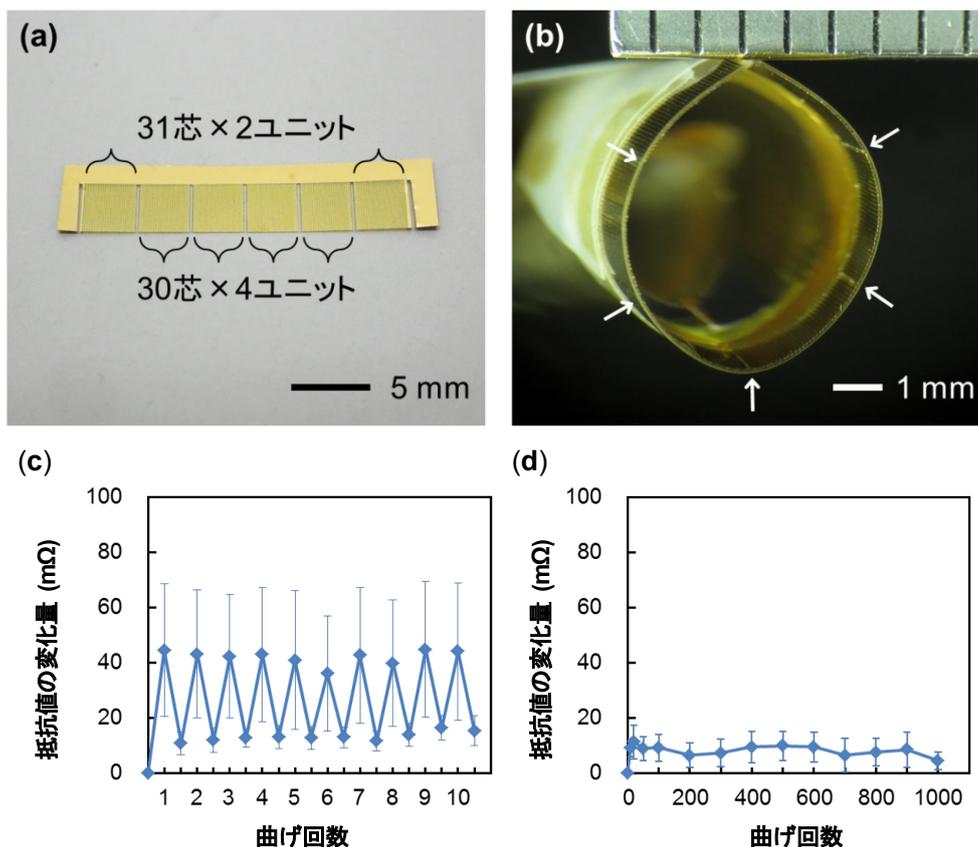


図 20. 各ユニットに分割された FPC を用いた曲げ試験:

(a) FPC 外観; (b) 接続部の断面図;

(c, d) 曲げ試験における抵抗値変化(y 軸周り凹曲げ、曲率半径 2.5 mm)

4. まとめ

本稿では、粘接着剤を用いたフィルム型コネクタによる新しい電気接続技術に関して、作製プロセスと接続信頼性の評価結果に基づいた基本特性、およびその有効性について論じました。フィルム型コネクタの接続部は厚さ 100 μm 以下であり、環境試験における抵抗値の変化が少なく、曲率半径 2.5 mm まで曲げることが可能です。従来のコネクタに対しては電極ピッチの微細化や低背化、ACF に対しては接続条件の穏和性や高温高湿時における安定性といった観点で優位性がありつつも、柔軟性をいう新たな付加価値をもたらすことによる、将来のエレクトロニクス実装への適用可能性が期待できます。⁵⁹⁾

現在は、印刷による電極形成や、自由曲面や立体構造物への電気接続、およびチップ部品のフィルム型実装について検討を進めています。

[参考文献]

- 1) Fjelstad, J. *Flexible Circuit Technology*, 4th ed.; BR Publishing: Seaside, OR, USA, 2011.
- 2) Leong, W.C.; Abdullah, M.Z.; Khor, C.Y. Application of flexible printed circuit board (FPCB) in personal computer motherboards: Focusing on mechanical performance. *Microelectron. Reliab.* **2012**, *52*, 744–756.
- 3) Yim, M.J.; Paik, K.W. Recent advances on anisotropic conductive adhesives (ACAs) for flat panel displays and semiconductor packaging applications. *Int. J. Adhes. Adhes.* **2006**, *26*, 304–313.
- 4) Xie, B.; Shi, X.Q.; Ding, H. Understanding of delamination mechanism of anisotropic conductive film (ACF) bonding in thin liquid crystal display (LCD) module. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* **2007**, *30*, 509–516.
- 5) Sheng, X.; Jia, L.; Xiong, Z.; Wang, Z.; Ding, H. ACF-COG interconnection conductivity inspection system using conductive area. *Microelectron. Reliab.* **2013**, *53*, 622–628.
- 6) Nathan, A.; Ahnood, A.; Cole, M.T.; Lee, S.; Suzuki, Y.; Hiralal, P.; Bonaccorso, F.; Hasan, T.; Garcia-Gancedo, L.; Dyadyusha, A.; *et al.* Flexible electronics: The next ubiquitous platform. *Proc. IEEE* **2012**, *100*, 1486–1517.
- 7) Ko, H.; Kapadia, R.; Takei, K.; Takahashi, T.; Zhang, X.; Javey, A. Multifunctional, flexible electronic systems based on engineered nanostructured materials. *Nanotechnology* **2012**, *23*, 344001, doi:10.1088/0957-4484/23/34/344001.
- 8) Zhou, L.; Wang, A.; Wu, S.C.; Sun, J.; Park, S.; Jackson, T.N. All-organic active matrix flexible display. *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *88*, 083502, doi:10.1063/1.2178213.
- 9) Choi, M.C.; Kim, Y.; Ha, C.S. Polymers for flexible displays: From material selection to device applications. *Prog. Polym. Sci.* **2008**, *33*, 581–630.
- 10) Delmdahl, R.; Fricke, M.; Fechner, B. Laser lift-off systems for flexible-display production. *J. Inf. Disp.* **2014**, *15*, 1–4.
- 11) Li, C.; Han, J.; Ahn, C.H. Flexible biosensors on spirally rolled micro tube for cardiovascular *in vivo* monitoring. *Biosens. Bioelectron.* **2007**, *22*, 1988–1993.
- 12) Kwon, O.S.; Park, E.; Kweon, O.Y.; Park, S.J.; Jang, J. Novel flexible chemical gas sensor based on poly(3,4-ethylenedioxythiophene) nanotube membrane. *Talanta* **2010**, *82*, 1338–1343.
- 13) Segev-Bar, M.; Haick, H. Flexible sensors based on nanoparticles. *ACS Nano* **2013**, *7*, 8366–8378.
- 14) Wang, J.Z.; Chou, S.L.; Liu, H.; Wang, G.X.; Zhong, C.; Chew, S.Y.; Liu, H.K. Highly flexible and bendable free-standing thin film polymer for battery application. *Mater. Lett.* **2009**, *63*, 2352–2354.
- 15) Pushparaj, V.L.; Shaijumon, M.M.; Kumar, A.; Murugesan, S.; Ci, L.; Vajtai, R.; Linhardt, R.J.; Nalamasu, O.; Ajayan, P.M. Flexible energy storage devices based on nanocomposite paper. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2007**, *104*, 13574–13577.
- 16) Zhou, G.; Li, F.; Cheng, H.M. Progress in flexible lithium batteries and future prospects. *Energy Environ. Sci.* **2014**, *7*, 1307–1338.
- 17) Pagliaro, M.; Ciriminna, R.; Palmisano, G. Flexible solar cells. *ChemSusChem* **2008**, *1*, 880–891.
- 18) Yang, L.; Zhang, T.; Zhou, H.; Price, S.C.; Wiley, B.J.; You, W. Solution-processed flexible polymer solar cells with silver nanowire electrodes. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2011**, *3*, 4075–4084.

- 19) Brown, T.M.; de Rossi, F.; di Giacomo, F.; Mincuzzi, G.; Zardetto, V.; Reale, A.; di Carlo, A. Progress in flexible dye solar cell materials, processes and devices. *J. Mater. Chem. A* **2014**, *2*, 10788–10817.
- 20) Ji, Y.; Lee, S.; Cho, B.; Song, S.; Lee, T. Flexible organic memory devices with multilayer graphene electrodes. *ACS Nano* **2011**, *5*, 5995–6000.
- 21) Lai, Y.C.; Wang, Y.X.; Huang, Y.C.; Lin, T.Y.; Hsieh, Y.P.; Yang, Y.J.; Chen, Y.F. Rewritable, moldable, and flexible sticker-type organic memory on arbitrary substrates. *Adv. Funct. Mater.* **2014**, *24*, 1430–1438.
- 22) Han, S.T.; Zhou, Y.; Roy, V.A.L. Towards the development of flexible non-volatile memories. *Adv. Mater.* **2013**, *25*, 5425–5449.
- 23) Kris, M.; Soeren, S.; Peter, V.; Monique, B.; van Aerle, N.A.J.M.; Gerwin, H.G.; Jan, G.; Wim, D.; Paul, H. Plastic circuits and tags for 13.56 MHz radio-frequency communication. *Solid-State Electron.* **2009**, *53*, 1220–1226.
- 24) Babar, A.A.; Bjorninen, T.; Bhagavati, V.A.; Sydänheimo, L.; Kallio, P.; Ukkonen, L. Small and flexible metal mountable passive UHF RFID tag on high-dielectric polymer-ceramic composite substrate. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **2012**, *11*, 1319–1322.
- 25) Martínez-Olmos, A.; Fernández-Salmerón, J.; Lopez-Ruiz, N.; Torres, A.R.; Capitan-Vallvey, L.F.; Palma, A.J. Screen printed flexible radiofrequency identification tag for oxygen monitoring. *Anal. Chem.* **2013**, *85*, 11098–11105.
- 26) Ruffini, G.; Dunne, S.; Fuentemilla, L.; Grau, C.; Farrés, E.; Marco-Pallarés, J.; Watts, P.C.P.; Silva, S.R.P. First human trials of a dry electrophysiology sensor using a carbon nanotube array interface. *Sens. Actuators A* **2008**, *144*, 275–279.
- 27) Kim, D.-H.; Lu, N.; Ma, R.; Kim, Y.-S.; Kim, R.-H.; Wang, S.; Wu, J.; Won, S.M.; Tao, H.; Islam, A.; *et al.* Epidermal electronics. *Science* **2011**, *333*, 838–843.
- 28) Pang, C.; Lee, C.; Suh, K.Y. Recent advances in flexible sensors for wearable and implantable devices. *J. Appl. Polym. Sci.* **2013**, *130*, 1429–1441.
- 29) Forrest, S.R. The path to ubiquitous and low-cost organic electronics appliances on plastic. *Nature* **2004**, *428*, 911–918.
- 30) Søndergaard, R.R.; Hösel, M.; Krebs, F.C.; Roll-to-roll fabrication of large area functional organic materials. *J. Polym. Sci. Polym. Phys.* **2013**, *51*, 16–34.
- 31) Alzoubi, K.; Hamasha, M.M.; Lu, S.; Sammakia, B. Bending fatigue study of sputtered ITO on flexible substrate. *J. Disp. Technol.* **2011**, *7*, 593–600.
- 32) Hamasha, M.M.; Alzoubi, K.; Lu, S.; Desu, S.B. Durability study on sputtered indium tin oxide thin film on poly ethylene terephthalate substrate. *Thin Solid Films* **2011**, *519*, 6033–6038.
- 33) Peng, C.-Y.; Dhakal, T.P.; Garner, S.M.; Cimo, P.; Lu, S.; Westgate, C.R. Strained growth of aluminum-doped zinc oxide on flexible glass substrate and degradation studies under cyclic bending conditions. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **2014**, *14*, 121–126.
- 34) Hamasha, M.M.; Alzoubi, K.; Switzer, J.C.; Lu, S.; Poliks, M.D.; Westgate, C.R. Reliability of sputtered aluminum thin film on flexible substrate under high cyclic bending fatigue condition. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* **2012**, *2*, 2007–2016.

- 35) Peng, C.Y.; Hamasha, M.M.; VanHart, D.; Lu, S.; Westgate, C.R. Electrical and optical degradation studies on AZO thin films under cyclic bending conditions. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **2013**, *31*, 236–244.
- 36) Cho, C.K.; Hwang, W.J.; Eun, K.; Choa, S.H.; Na, S.I.; Kim, H.K. Mechanical flexibility of transparent PEDOT:PSS electrodes prepared by gravure printing for flexible organic solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cell* **2011**, *95*, 3269–3275.
- 37) Lee, H.M.; Lee, H.B.; Jung, D.S.; Yun, J.Y.; Ko, S.H.; Park, S.B. Solution processed aluminum paper for flexible electronics. *Langmuir* **2012**, *28*, 13127–13135.
- 38) Koo, M.; Park, K.I.; Lee, S.H.; Suh, M.; Jeon, D.Y.; Choi, J.W.; Kang, K.; Lee, K.J. Bendable inorganic thin-film battery for fully flexible electronic systems. *Nano Lett.* **2012**, *12*, 4810–4816.
- 39) Trung, T.Q.; Tien, N.T.; Kim, D.; Jang, M.; Yoon, O.J.; Lee, N.E. A flexible reduced graphene oxide field-effect transistor for ultrasensitive strain sensing. *Adv. Funct. Mater.* **2014**, *24*, 117–124.
- 40) Yeo, J.; Kim, G.; Hong, S.; Kim, M.S.; Kim, D.; Lee, J.; Lee, H.B.; Kwon, J.; Suh, Y.D.; Kang, H.W.; *et al.* Flexible supercapacitor fabrication by room temperature rapid laser processing of roll-to-roll printed metal nanoparticle ink for wearable electronics application. *J. Power Sources* **2014**, *246*, 562–568.
- 41) Choi, K.S.; Lee, H.; Bae, H.C.; Eom, Y.S.; Lee, J.H. Interconnection technology based on InSn solder for flexible display applications. *ETRI J.* **2015**, *37*, 387–394.
- 42) Kim, J.M.; Song, Y.; Cho, M.; Lee, S.H.; Shin, Y.E. Characteristics of thermosonic anisotropic conductive adhesives (ACFs) flip-chip bonding. *Mater. Trans.* **2010**, *51*, 1790–1795.
- 43) Lee, K.; Kim, H.J.; Kim, I.; Paik, K.W. Ultrasonic anisotropic conductive films (ACFs) bonding of flexible substrates on organic rigid boards at room temperature. In Proceedings of the 57th IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC'07), Reno, NV, USA, 29 May–1 June 2007; pp. 480–486.
- 44) Hwang, J.W.; Yim, M.J.; Paik, K.W. Effects of thermoplastic resin content of anisotropic conductive films on the pressure cooker test reliability of anisotropic conductive film flip-chip assembly. *J. Electron. Mater.* **2005**, *34*, 1455–1461.
- 45) Rizvi, M.J.; Chan, Y.C.; Bailey, C.; Lu, H. Study of anisotropic conductive adhesive joint behavior under 3-point bending. *Microelectron. Reliab.* **2005**, *45*, 589–596.
- 46) Jang, K.W.; Paik, K.W. Effects of heating rate on material properties of anisotropic conductive film (ACF) and thermal cycling reliability of ACF flip chip assembly. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* **2009**, *32*, 339–346.
- 47) Ma, J.; Gao, H.; Gao, L.; Chen, X. Uniaxial ratcheting behavior of anisotropic conductive adhesive film at elevated temperature. *Polym. Test.* **2011**, *30*, 571–577.
- 48) Leu, J.; Chang, C.C.; Chen, A.; Lin, M.H.; Huang, K.F. Effects of localized warpage and stress on chip-on-glass packaging: Induced light-leakage phenomenon in mid-sized TFT-LCD. *J. Soc. Inf. Disp.* **2012**, *20*, 28–36.
- 49) Braunović, M.; Konchits, V.V.; Myshkin, N.K. *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006.

- 50) Sawada, S.; Tamai, T.; Hattori, Y.; Iida, K. Numerical analyses for contact resistance due to constriction effect of current flowing through multi-spot construction. *IEICE Trans. Electron.* **2010**, *E93-C*, 905–911.
- 51) Leidner, M.; Schmidt, H.; Myers, M.; Schlaak, H.F. A new simulation approach to characterizing the mechanical and electrical qualities of a connector contact. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **2010**, *49*, 22909, doi:10.1051/epjap/2010002.
- 52) Pennec, F.; Peyrou, D.; Leray, D.; Pons, P.; Plana, R.; Courtade, F. Impact of the surface roughness description on the electrical contact resistance of ohmic switches under low actuation forces. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* **2012**, *2*, 85–94.
- 53) Duan, K.; Zhu, F.; Li, Y.; Tang, K.; Liu, S.; Chen, Y. Contact resistance investigation of electrical connector with different shrink range. In Proceedings of the 15th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT 2014), Chengdu, China, 12–15 August 2014; pp. 1146–1149.
- 54) Fukuyama, Y.; Sakamoto, N.; Kaneko, N.; Kondo, T.; Onuma, M. Constriction resistance of physical simulated electrical contacts with nanofabrication. In Proceedings of the IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2014), New Orleans, LA, USA, 12–15 October 2014; pp. 216–220.
- 55) Uddin, M.A.; Chan, H.P. Contact resistance of anisotropic conductive adhesive film based flip-chip on glass packages. *Rev. Adv. Mater. Sci.* **2011**, *27*, 151–157.
- 56) Sim, G.-D.; Chung, C.-K.; Paik, K.W. Moisture induced interface weakening in ACF package. *Mater. Sci. Eng. A*, **2010**, *528*, 698–705.
- 57) Lin, Y.C.; Zhong, J. A review of the influencing factors on anisotropic conductive adhesives joining technology in electrical applications. *J. Mater. Sci.*, **2008**, *43*, 3072–3093.
- 58) Lewis, J. Material challenge for flexible organic devices. *Mater. Today* **2006**, *9*, 38–45.
- 59) Mitsui, R.; Sato, J.; Takahashi, S.; Nakajima, S. Electrical reliability of a film-type connection during bending. *Electronics*, **2015**, *4*, 827–846.