

# 技術紹介

## 1 フィルム型コネクタを用いた低負荷かつ柔軟な部品実装技術の開発とその応用

### Development of a Flexible Unheated Electronic Packaging and Its Application

三井 亮介	Ryosuke Mitsui	商品開発センター 主任 博士(学術)
後藤 理恵	Rie Goto	商品開発センター
佐藤 隼也	Junya Sato	商品開発センター 主任
吉良 敦史	Atsushi Kira	商品開発センター 技術マネージャー 博士(工学)
中島 伸一郎	Shin-ichiro Nakajima	商品開発センター センター長 博士(薬学)

キーワード: フィルム型電気接続、粘着剤、部品実装、曲げ試験

Keywords: Film-Type Electronic Connection, Adhesive, Packaging, Bending Test

#### 要 旨

モノのインターネット化を加速させるには多様なセンサ群によるデータの収集が必要です。中でも、有機材料の柔軟性と無機材料の信頼性とを併せ持つデバイスには、センシング領域の拡張が見込まれていますが、その電気接続にははんだや導電性接着剤といった加熱プロセスを有する実装材料が用いられているため、適用範囲が限定されるのみならず、熱硬化部は柔軟性が損なわれることが課題となっています。本稿では、これまで配線接続に用いられてきたフィルム型コネクタに対してチップ部品を実装し、曲げ時の接続信頼性を従来技術との比較を交えて報告するとともに、本技術を活用した曲面对応センサモジュールへの応用例を紹介します。フィルム型コネクタへの部品実装は、実装構造を工夫することにより曲率半径 2.5 mm まで曲げることが可能で、曲面对応センサモジュールではこれまで得ることが困難であった情報の取得が可能となることが示唆されています。

#### SUMMARY

In order to build IoT systems, it is necessary to collect data by various sensors. Flexible hybrid electronics, designed in flexibility of organic materials and the reliability of inorganic materials, is expected to expand the sensing area, but for the electrical connection, a mounting material such as a solder or an electrically conductive adhesive (ECA) apply a heating process. For that reason, not only the scope of application is limited but also the flexibility of the thermosetting part is impaired. Here, we report the connection reliability during bending of a film-type connector (FTC) on which chip parts are mounted with comparison with ECA. Component mounting on FTC can be bent to a curvature radius of 2.5 mm by devising the mounting structure. It is suggested that the FTC sensor module for curved surfaces can acquire information which was difficult to obtain by ECA.

## 1. はじめに

超スマート社会の実現に向けてサイバー空間とフィジカル空間の高度な融合が求められている現在においては、モノのインターネット化(IoT)を駆使した適切な情報の収集・蓄積、および得られたビッグデータの人工知能による解析が鍵となっています。その中で、近年の材料・プロセス技術の発展に伴い、有機材料の柔軟性と無機材料の信頼性とを併せ持った従来とは一線を画すコンセプトのセンシングデバイスが次々と提案されてきています。特に、樹脂フィルム上に形成された導体配線と半導体チップをはじめとするチップ部品との組み合わせに関しては、可撓性がもたらすセンシング領域／用途の拡張といった観点から多くの関心が寄せられており、ヘルスケア分野を志向したフレキシブル／ウェアラブルデバイスの開発を通じて新たな価値創出に向けた取り組みが活発化しています。<sup>1,2)</sup>

これらデバイスの作製に当たっては、はんだ<sup>3)</sup>や導電性接着剤(ECA: Electrically Conductive Adhesive)、<sup>4,5)</sup>導電性インクの直接描画<sup>6)</sup>などの電気接続技術を適用させる場合が多くみられます。これらの実装技術にはそれぞれ、接続強度と接触抵抗、狭ピッチ対応と穏和な加熱条件、プロセス簡略化といった観点での特長が見出されていますが、いずれも部品実装時に加熱工程が必要となっています。したがって、適用基板が限定されることにくわえ、はんだや ECA の場合では部品実装部が剛直化することにより、実装部の変形に伴う亀裂の発生／進展の結果として接続不良が生じるおそれがあります。

一方、著者らは、IoT の推進に資する技術のひとつはデバイスのフレキシブル化を保証する革新的な接続／実装技術であるとの考えのもと、接続時に熱が不要で接続部を曲げることが可能な電気接続技術であるフィルム型コネクタ(FTC: Film-Type Connector)の開発に取り組んできています。<sup>7)</sup> FTC は、ポリエチレンテレフタレート(PET: Polyethylene terephthalate)上にあるシート状の粘着剤と、その上に形成された配線からなる低背のコネクタで、弾性体である粘着剤の変形がもたらす力を相対する電極間に作用させることで導通を確保する機構を採用しています。したがって、FTC では加圧のみで柔軟な電気接続が実現可能となることから、熱圧着が必要な異方性導電接着剤(ACA: Anisotropic Conductive Adhesive)や剛直な従来型のコネクタでは対応が困難であった、プリント基板(PCB: Printed Circuit Board)およびフレキシブルプリント配線板(FPC: Flexible Printed Circuit)と耐熱性に乏しいモジュールとの配線接続をはじめとして、フレキシブルな有機エレクトロニクスデバイスとの配線接続、またはそのタイリングによる大面積化などに使われてきました。

以上の背景を踏まえ、本稿では、これまで配線接続で用いられてきた FTC の適用範囲を部品実装まで拡張することを目的として、FTC を用いたチップ部品の低負荷かつ柔軟な実装に関して、曲げ時の接続信頼性を従来技術との比較を交えて報告するとともに、本技術を活用した曲面对応センサモジュールへの応用例を紹介します。

## 2. FTC を用いた部品実装技術の構築に向けて

FTC を用いた電気接続プロセスでは、まず、接続対象(FPC)と FTC とを位置合わせし(図 1a)、次いで加圧することで粘着剤が FTC 配線間から押し出され(図 1b)、その後接続対象の基板であるポリイミド (PI)へ接着し(図 1c)、最終的に配線間の空隙をすべて粘着剤で充填することにより完結します(図 1d)。

基本的に FTC は室温下で貼り付け可能ですが、接続対象の表面状態や要求特性に応じて粘着剤の種類を適宜変更することで、たとえば熱圧着や UV 照射といったプロセスも併用することができます。

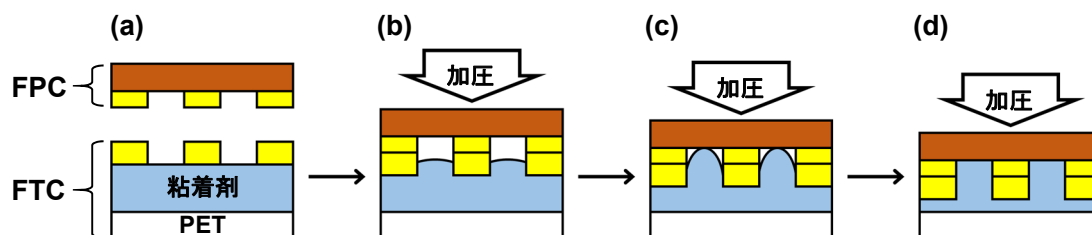


図 1. FTC の貼り付けプロセス

シート状の粘着剤を加圧により電極間に充填するには粘着剤の弾性変形が必要です。この変形に伴い誘起される力が相対する電極間に働くことにより電氣的な導通が確保されます。FTC を用いた配線接続部は、従来技術に見劣りのしない耐環境性能を示すとともに、①総厚 0.1 mm 以下である低背の接続構造、②粘着剤の柔軟性、ならびに③相対する電極間を固定させない面接触による導通機構、それぞれの効果を複合させることで、0.1 mm ピッチ(ライン/スペース = 40/60  $\mu\text{m}$ )での接続において曲率半径 2.5 mm にまで曲げた場合でも安定して電気接続を維持することが可能となることがわかっています。<sup>7)</sup>

配線接続と同様の手順で位置合わせと加圧のみでチップ部品の実装が可能となれば、はんだや ECA などの各実装材料に起因する影響を受けることのない低負荷型の新規実装方式が実現でき、フィルム上への搭載部品の適用範囲を広げることができるのではないかと考えました(図 2)。くわえて、配線接続の場合のように部品実装部を曲げられることができれば、さらなる小型化・薄型化の推進や、柔軟な電子デバイスの創製およびその利用シーンの拡張にも貢献できると期待しました。

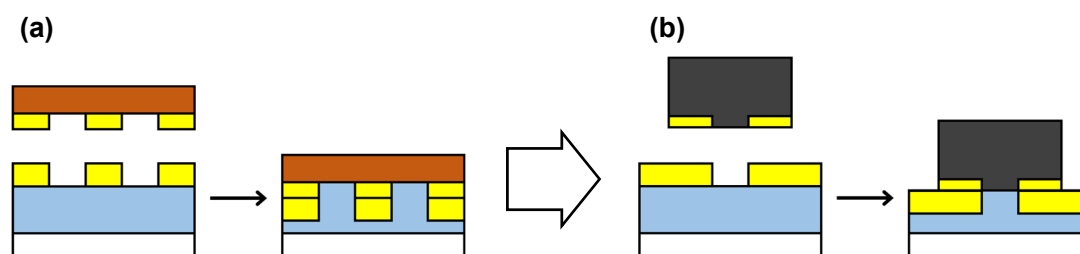


図 2. FTC を用いた部品実装への展開: (a) 配線接続; (b) 部品実装

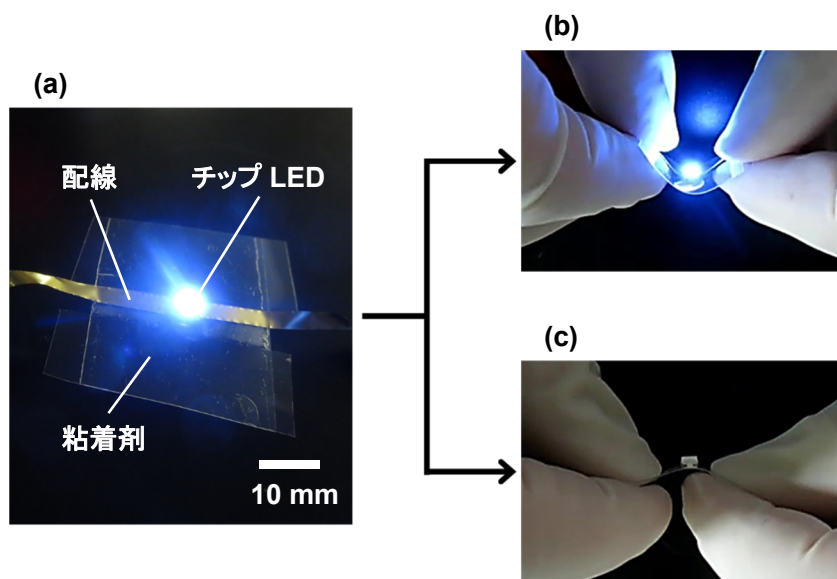


図 3. FTC を用いたチップ LED の実装: (a) サンプル外観; (b) 凹曲げ; (c) 凸曲げ

粘着剤上に形成された 2 本の配線間へチップ LED を加圧のみで実装した結果、LED の発光を確認でき、FTC に対して室温下で部品が実装できることがわかりました(図 3a)。次いで、実装部を曲げたところ、凹曲げ時では安定して導通を確保できていましたが(図 3b)、凸曲げ時には導通不良が発生する頻度が高く接続の不安定化が認められました(図 3c)。そこで、FTC への部品実装における接触抵抗および曲げ時の導通不良に関する詳細の把握を通じて最適実装構造の提案に向けて検討を進めることとしました。

## 3. 実験

### 3.1 チップ部品の実装

FTC の配線部は、電気伝導を担う金属材料とそれを支持するフィルム基材から構成されています。本検討では、PI フィルム上に形成された厚さ  $9\ \mu\text{m}$  の銅をベースとし、その最表面には金めっきが施されているものを配線として使用しました(表 1)。チップ部品には 2012 サイズのゼロオーム抵抗器を用い、FTC に対して位置合わせした後に  $0.8\ \text{MPa}$  の圧力を 2 秒間印加することで実装しました(図 4a)。

一方、FTC と同様の金属材料とフィルム基材の FPC に対して、市販の一液加熱硬化型導電性接着剤を用いて  $150^{\circ}\text{C}$  で 15 分間加熱乾燥させることでも抵抗器を実装し、比較サンプルとしました(図 4b)。

### 3.2 曲げ試験

チップ部品が実装された FTC および FPC を用い、配線の長辺方向に垂直な軸周りに曲率半径を段階的に小さくした場合の抵抗値を測定しました。まず、平面状態で測定し、次に、曲率半径が 70、50、25、10、5、 $2.5\ \text{mm}$  となるように曲げた状態で測定しました。最後に、再度平面状態に戻して測定しました。繰り返し曲げ試験では、平面状態に戻したのちに引き続き各曲率半径で曲げた状態で測定しました。FTC の場合には、平面状態時でのチップ部品への加圧( $0.8\ \text{MPa}$ )時および除荷時においても測定しました。

表 1. FTC およびチップ部品の仕様

項目	内容
配線部	金属材料、厚さ Cu/Ni/Au = 9/0.5/0.1 $\mu\text{m}$
	フィルム基材、厚さ PI フィルム、12.5 $\mu\text{m}$
配線幅	1 mm
粘着剤厚さ	50 $\mu\text{m}$
PET 基板厚さ	25 $\mu\text{m}$
チップ部品	2012 サイズ ゼロオーム抵抗器

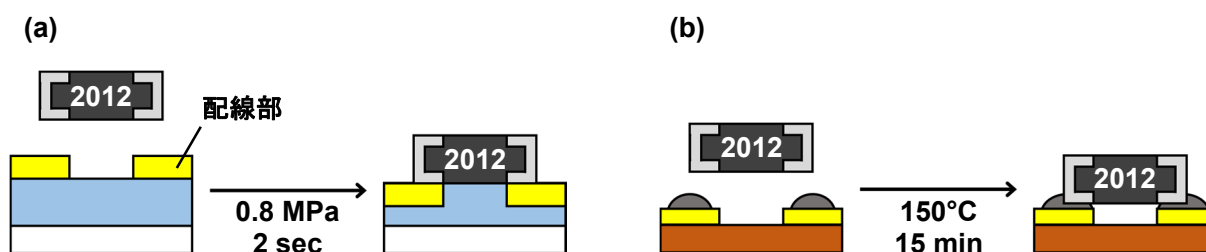


図 4. 実装条件: (a) FTC; (b) ECA

### 3.3 抵抗値の測定

抵抗値の測定には Keithley 社製 2450 ソースメータによる四端子法を用いました(図 5)。抵抗器が実装された配線に 1 mA の電流を 30 秒間流し、その間抵抗器を含めた 20 mm 間隔の電圧値を読み取り抵抗値へと変換した後に平均化しました。

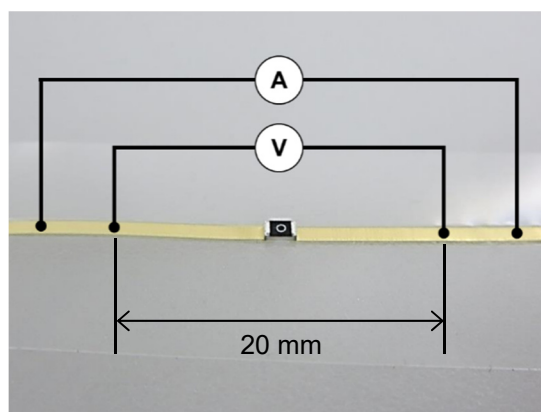


図 5. 四端子法による抵抗値測定

## 4. 結果と考察

### 4.1 FTC を用いた部品実装部の曲げ試験

FTC を用いて 2012 サイズのチップ抵抗器を最も単純な構造で実装した場合には、除荷時に抵抗値が  $266\text{ m}\Omega$  増加し、その後、曲率半径  $70\text{ mm}$  においてさらに  $207\text{ m}\Omega$  増加し、曲率半径  $50\text{ mm}$  以下では導通不良の発生が認められます(図 6a)。まず、 $0.8\text{ MPa}$  での加圧時における測定値  $90.1\text{ m}\Omega$  から FTC の配線抵抗  $62.6\text{ m}\Omega$  と抵抗器の抵抗  $14.5\text{ m}\Omega$  を除くと  $13.0\text{ m}\Omega$  となり、FTC 配線-抵抗器間での接触抵抗を算出することができます。次に、除荷時および曲げ時の抵抗値の増加は、配線抵抗や抵抗器の抵抗の変化ではなく主として接触抵抗の変化に起因しているため、<sup>7)</sup>除荷時の接触抵抗が、加圧時の  $13\text{ m}\Omega$  から  $266\text{ m}\Omega$  増加した結果  $279\text{ m}\Omega$  となっていることになります。これは、接触面積の減少によるものと考えられます。加圧時には FTC 配線-抵抗器間に均一かつ十分な接圧が発生しているため、電気的接続を担う真実接触面の面積の確保が容易である一方、除荷時に FTC 配線-抵抗器間へ発生する接圧は、粘着剤の弾性変形により誘起される部分すなわち、粘着剤が FTC 配線間から押し出され抵抗器底面へ接

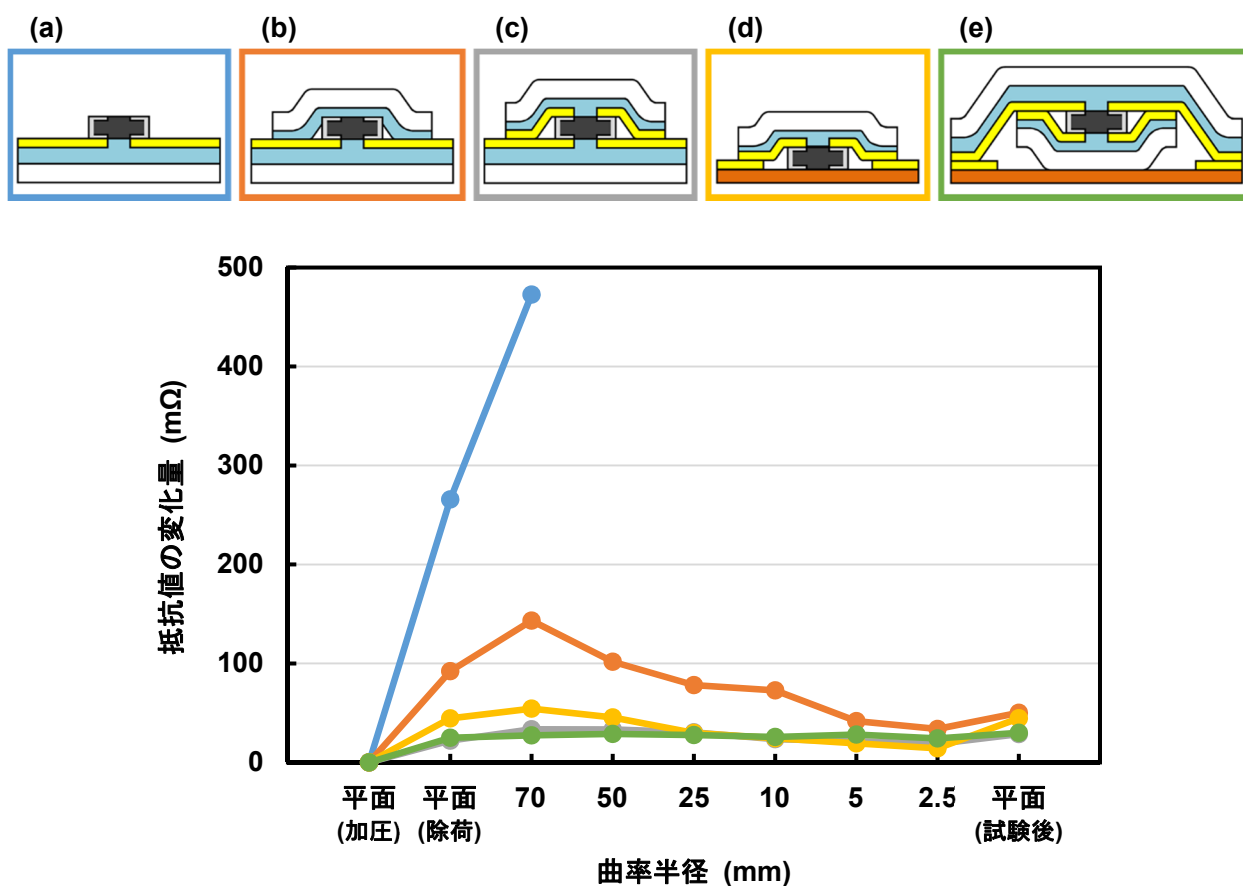


図 6. 各部品実装構造の曲げ試験における抵抗値の変化:

(a) FTC; (b) FTC/カバー; (c) FTC/FTC; (d) FTC/FPC; (e) FTC/FTC/FPC



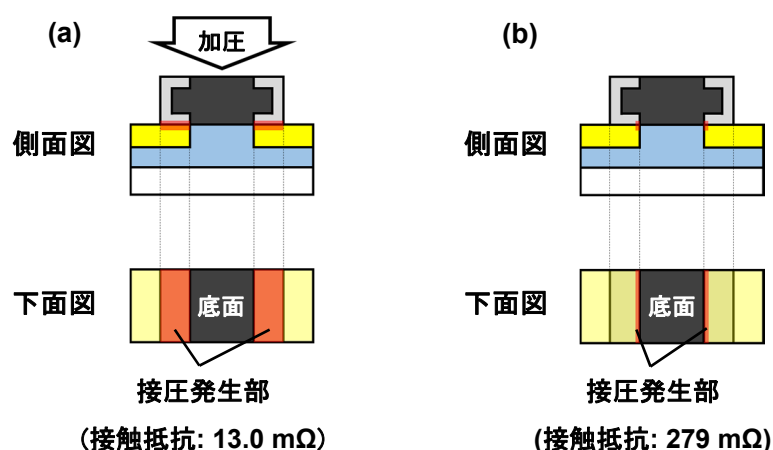


図 7. 接触抵抗に影響を及ぼす接圧発生部: (a) 加圧時; (b) 除荷時

着している部分の近傍に限定されることにより、接触面積の確保が困難となっています(図 7)。曲率半径 50 mm 以下での導通不良に関しては、粘着剤が抵抗器底面の中央部にしか貼り付いていないことから、曲率半径の減少に伴い抵抗器の両端と FTC 配線との間に空隙が生じたことによるものです(図 8)。

一般的に、フレキシブル基板上の部品実装においては、裏打ち板などにより実装部の曲げを回避しますが、本検討では FTC の柔軟性を活かした実装構造を実現すべく種々実装構造を変更しその適用範囲の探索を試みています。

はじめに、FTC で使用している粘着剤をカバーとして実装部へ貼り付けた場合には、除荷時の抵抗値増加ならびに曲げ時の導通不良が抑制されています(図 6b)。これは、カバーとなる粘着剤により FTC 配線-抵抗器間における抵抗器端部に対してある程度の接圧が追加され接触面積が増加している結果です。曲率半径の減少に伴う抵抗値の減少については、曲げ時にカバーへ働く張力が抵抗器に作用することにより、さらに接圧が増加したためと考えられます(図 9a)。一方、本実装構造において、実装部を逆向きに曲げた場合には曲率半径 70 mm の時点で導通不良が認められます。この原因としては、逆向きの曲げ時にはカバーに対して圧縮力が働くことにくわえ、FTC とカバーとを比較すると抵抗器に対する粘着剤

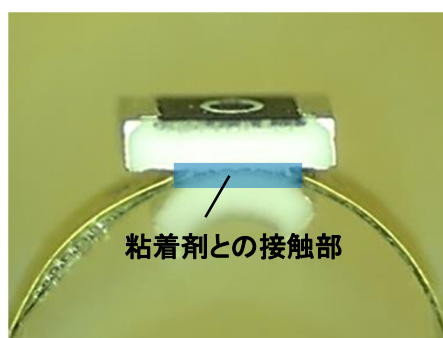


図 8. 曲げ時の導通不良の例(曲率半径 20 mm)

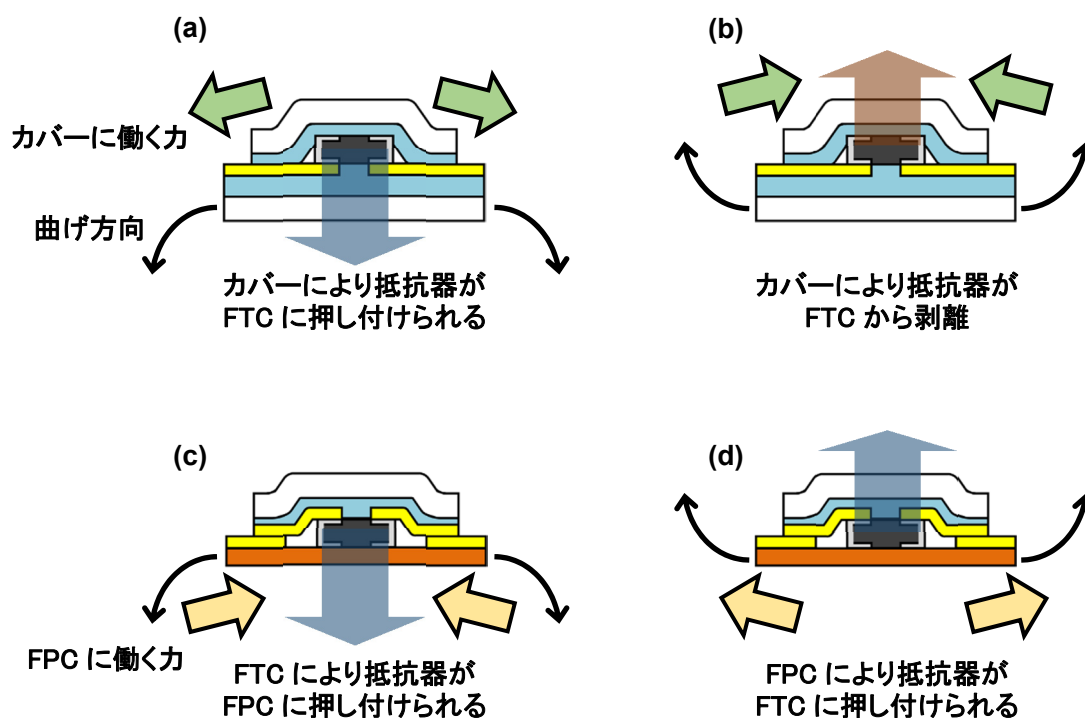


図 9. 曲げ時に誘起される力: (a, b) FTC/カバー; (c, d) FTC/FPC

の接触面積が不均衡であることから、抵抗器に対して FTC から剥がす方向の力が誘起されるためであると推察されます(図 9b)。したがって、カバーの効果は限定的であると言えます。

次に、抵抗器を FTC で挟むことで対称構造とした場合(図 6c)には、除荷時の抵抗値増加が  $22.0 \text{ m}\Omega$  にまで抑えられるとともに、曲率半径の減少に伴う接触抵抗の変化量も少なく、さらには逆向きの曲げ時にも導通不良は認められません。抵抗器の実装部を対称構造とすることで、FTC 配線との接触面積の確保が容易になり、かつ曲げ時に発生する力の偏りによる構造変化を最小限に留めているためであると結論付けられます。<sup>8,9)</sup>

ところで、チップ部品が実装された FTC を任意の基板へ配線接続することができれば、インターポーザの類縁部材としての利用も可能となり FTC の用途拡大につながると期待できます。この場合にも、曲げ時に電気接続が維持されていることが認められます(図 6d)。抵抗器が実装された FTC の接続先である FPC がカバーとしての機能も有していますが、粘着剤のカバーの場合とは異なり、抵抗器は FTC にのみ接着しているため、曲げ時には FPC 上を動くことができることに比べ、接続を不安定化する力を FPC から受けることがありません(図 9c, d)。このような、上下面からの接着によらない部品の固定構造が、比較的安定な接続の構築に寄与し、逆向きの曲げ時にも導通不良の発生を抑える働きをしています。

以上を踏まえ、可動構造(図 6c)と対象構造(図 6d)とを併用することで、剛直なチップ部品を柔軟な FPC へより安定的に接続することが可能となります(図 6e)。



## 4.2 ECA との比較

FTC を用いたチップ部品の実装では、その構造に起因して様々な曲げ耐性を示しますが、安定な接続構造(図 6e)を適宜選択することによって、抵抗値増加を  $25.0\text{ m}\Omega$  に抑えけるとともに、その繰り返し曲げ試験においても抵抗値を維持し大きな変化が生じないことが認められます。一方、ECA を用いた場合では、実装による抵抗値増加は  $73.0\text{ m}\Omega$  と FTC よりも高く、特定の曲率半径に達すると抵抗値が増加し始め、2 サイクル目の曲げ試験にて導通不良が生じることがあります(図 10)。接触抵抗が高い要因としては、熱硬化性樹脂と銀フィラーとの混合物である ECA の体積抵抗率がバルク金属に比して高いことと、部品実装時に加圧プロセスがなく、配線および抵抗器との接圧を樹脂の硬化収縮力に依存しており、十分な接触面積を確保できてはいないことがあげられます。導通不良に関しては、硬化した接続部において曲げにより生じた微小なクラックが、変形が繰り返される過程で不可逆的に進展した結果であると考えられます(図 11)。

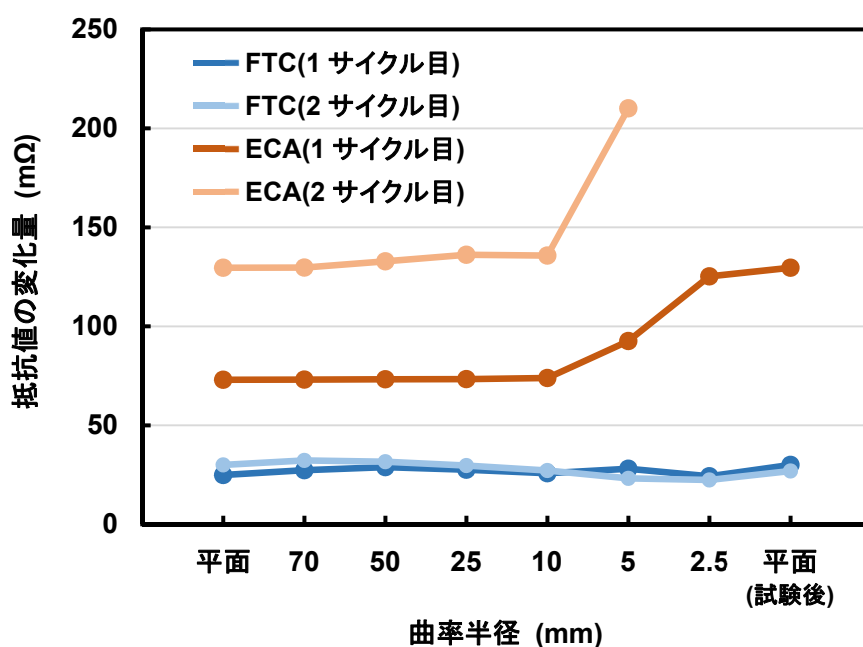


図 10. 繰り返し曲げ試験における抵抗値の変化

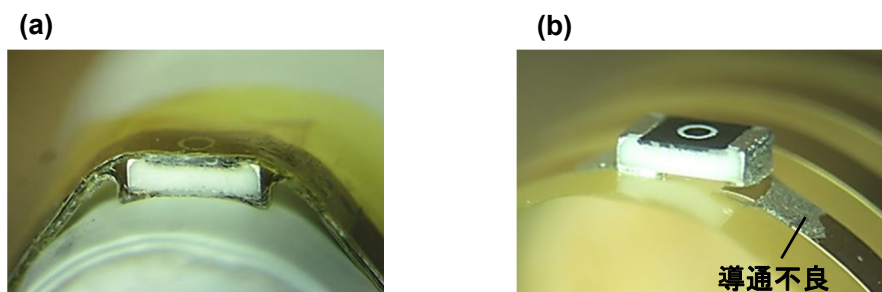


図 11. 曲げ時のサンプル外観: (a) FTC; (b) ECA

### 4.3 粘着剤の接着領域が接触抵抗に及ぼす影響

配線幅を 1 mm から 0.5 mm へと狭めた FTC への 2012 サイズのチップ抵抗器の実装では、除荷時の抵抗値増加は 145 mΩ となり、曲率半径 5 mm まで電気接続を維持しています(図 12)。配線幅 1 mm の場合と同様に、加圧時の測定値 143 mΩ から配線抵抗 99.3 mΩ、および抵抗器の抵抗 14.5 mΩ を除くと接触抵抗を 30.2 mΩ と算出できます。

ここで、加圧時の接触抵抗を比較すると、配線幅 1 mm の場合に比べて配線幅が 0.5 mm の場合では、接触抵抗が高くなっています(表 2)。

表 2. 配線幅の異なる FTC の接触抵抗

配線幅(mm)	接触抵抗(mΩ)	
	加圧時	除荷時
1	13.0	279
0.5	30.2	175

加圧時において、接圧発生部は見かけの接触面積と同一であり、見かけの接触面積と接触抵抗は概ね反比例の関係にあると近似できることから、<sup>10)</sup>配線幅が半減することにより接触面積も半減し、その結果、接触抵抗が増加したと考えられます。

一方、除荷時においては、接触抵抗の大小関係が逆転しています(表 2)。FTC を用いた電気接続では、粘着剤の接着に伴う弾性変形が接圧を誘起すると考えられるため、見かけの接触面積よりも配線外周の接触距離が接触抵抗の低減に寄与していると推測できます。今回、配線幅を 1 mm から 0.5 mm とする

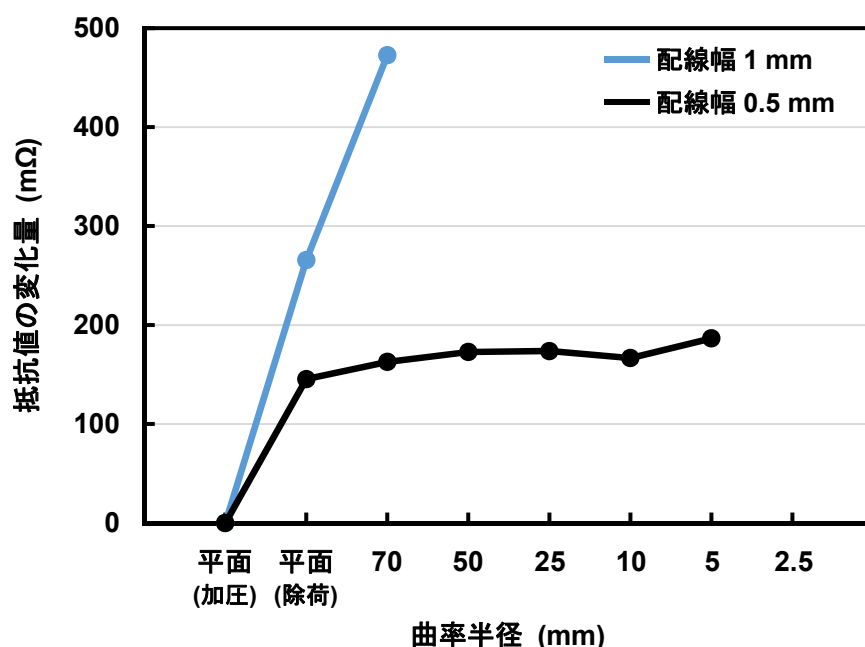


図 12. FTC の配線幅を変更した場合の曲げ試験における抵抗値の変化

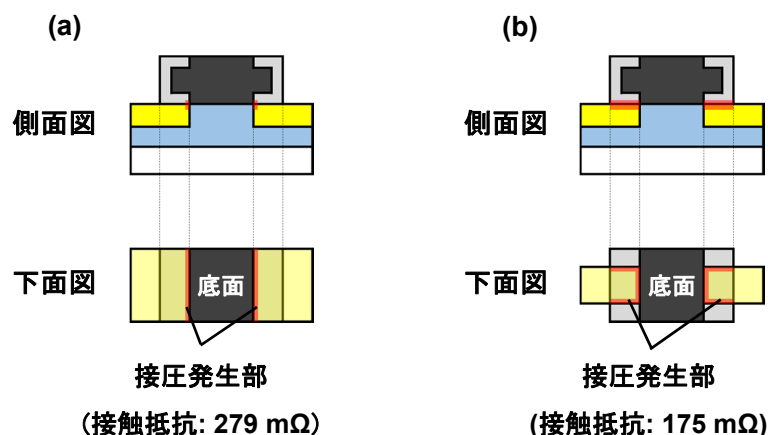


図 13. 除荷時の接圧発生部の比較: (a) 配線幅 1 mm; (b) 配線幅 0.5 mm

ことで、配線幅および見かけの接触面積は半減していますが、配線外周と抵抗器電極との接触距離は約 1.5 倍となっていることにより接触抵抗の低減化が図れたと結論付けられます(図 13)。

しかしながら、接触抵抗と接触距離が単純な反比例の関係となっていれば、接触距離が約 1.5 倍である配線幅 0.5 mm の場合での接触抵抗は 186 mΩ と導出されますが、実際は 175 mΩ とより低い接触抵抗を示しています。つまり、配線幅 0.5 mm の FTC に対する部品実装の場合では、接触距離すなわち接圧発生部が増加しているのみならず、発生する接圧自体も増加していると予想されます。接圧が増加する要因としては、粘着剤の接着様式が配線幅 1 mm の場合と異なることがあげられます。配線幅 0.5 mm の場合では、粘着剤が配線端部を包み込むようにして抵抗器底面へと接着しているため、粘着剤の変形量が大きくなり、それに伴い FTC 配線-抵抗器間に誘起される力も増加していると考えられます(図 14)。

同時に、抵抗器底面の端まで粘着剤が接着することにより、曲げ時に配線から抵抗器が浮き上がることが抑制され、その結果、配線幅 1 mm の場合より小さな曲率半径まで曲げることが可能になっている効果も得られています。このような配線幅の最適化にくわえ、前述の可動構造や対称構造を組み合わせることによって、より安定した部品実装構造が実現できると期待できます。

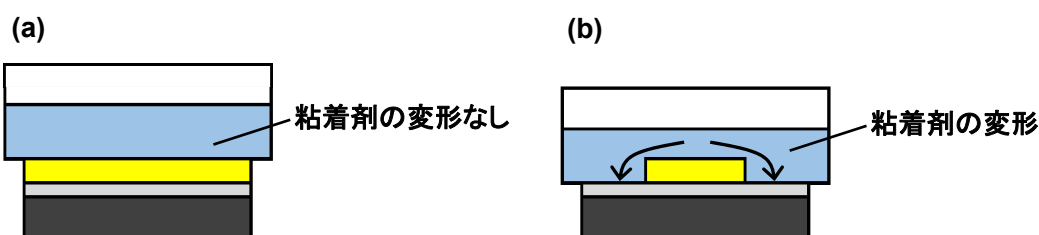


図 14. 接続部の断面構造の比較: (a) 配線幅 1 mm; (b) 配線幅 0.5 mm

## 5. 音センサモジュールへの応用

著者らは、これまでに得ることが困難であったデータ取得にかかるセンシングという観点で、「ヒトによるセンシング・診断」からの代替が進んでいない打音による非破壊検査や聴診による医療初期診断など、「音」による状態把握に着目しています。そこで、フィルム上にマイクロフォンチップを実装した音センサモジュールを FTC、ECA を用いてそれぞれ作製し(図 15)、その性能を比較しました。FTC によるマイク、コンデンサ 1、2 の実装構造には図 6 に記載の a、b、および d をそれぞれ適用させました。

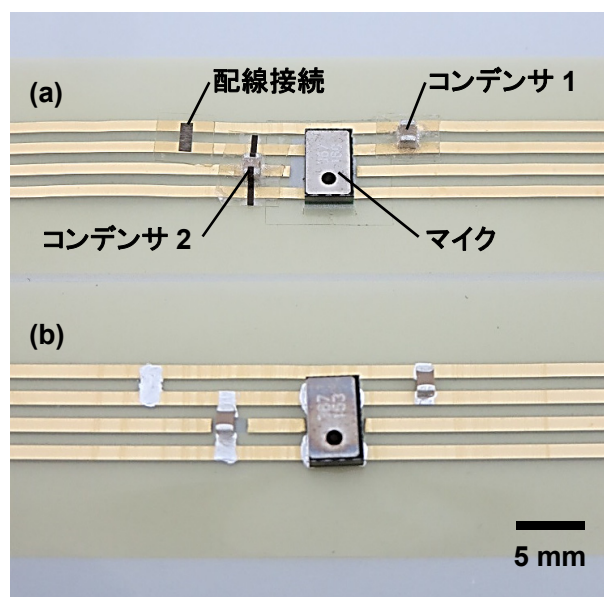


図 15. 音センサモジュールの外観: (a) FTC; (b) ECA

接続信頼性の確認方法として、直径 5 mm の棒にモジュールを巻き付け、棒上を毎秒 1 mm の速度で前後にスライドさせながら、圧電素子から一定間隔で発せられる音を収集させました。その結果、FTC により作製された音センサモジュールはいずれの状況下でも安定して音情報を得ることができている一方、ECA を用いて作製された音センサモジュールでは、マイクが棒の直上に移動した段階でフィルムから剥離し、音情報を得ることができませんでした(図 16)。このことから、FTC を用いたセンサモジュールを用いることで新たなセンシング領域を開拓できる可能性が示唆されました。また、本検討で使用した圧電素子は FTC で接続されており、FTC が圧電素子のように動きを伴うデバイスの電気接続にも有効に機能することが明らかとなりました。

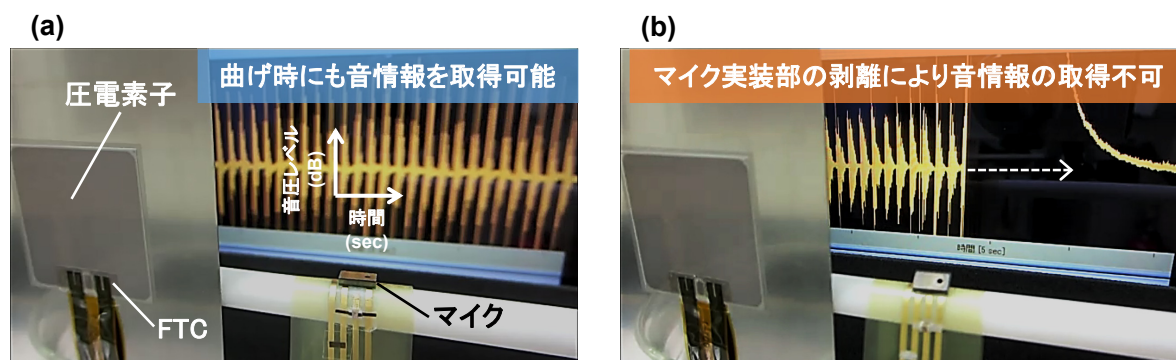


図 16. 音センサモジュールの曲げ耐性: (a) FTC; (b) ECA

音情報は音源の位置だけではなく、伝導経路や伝導する媒体によって、干渉・共鳴・ドップラー効果などにより複雑化するため、これらを網羅的にセンシングすることができれば、音情報から様々な診断が可能になるものと考えられます。このような網羅的なセンシングのためには、「点」ではなく「面」での受音が必要であると仮定した場合、動きのある身体や装置などにフィルム基材を密着させることにより面で音を捕えることができると同時に、振動などの機械的ノイズを最小限に抑制することが可能となると期待されます。また、実装するフィルム基材の物性や構造を変更することで多様な音信号を取得でき、フィルム特性と音情報との相関を機械学習などによる解析と連携させることで、より有益な診断・予測が可能になると期待しています。さらに、適した打音を印加することにより、複雑な音信号から必要な信号だけ増幅・抽出するインテリジェントセンサへの展開も可能になると考えています。以上の実現のためには、柔軟なフィルム基材上に実装されたマイクを含む各部品がフィルム基材の変形に追随する必要があり、FTC が効果的な実装手段であることが示されました。

## 6. まとめ

本稿では、粘着剤を用いた配線接続技術である FTC のチップ部品実装への適用に関して、曲げ試験による抵抗値変化の観点から従来技術との比較を通じてその有効性を論じました。FTC を用いた部品実装は従来よりも穏和な条件で実現可能であり、曲率半径 2.5 mm までの曲げ時の抵抗値変化を抑制できるとともに、モジュール作製へと応用した場合には、これまで得ることが困難であった情報の取得が可能となることが示唆されました。モノのインターネット化推進の基盤となるセンサネットワークの構築において、柔軟なエレクトロニクスがもたらす更なる発展を支える実装技術のひとつとして期待できます。

現在は、粘着剤上への印刷による配線形成を通じた印刷型 FTC の作製およびそれを用いた近接触覚センサグローブ開発への適用検討を進めるとともに、様々な形状の電子部品に最適な実装構造の構築に向けた材料・プロセス技術の開発と、作製したセンサモジュールの有効性に関して検討を進めています。

### 【参考文献】

- 1) Herbert, H.; Kim, J.-H.; Kim, Y. S.; Lee, H. M.; Yeo, W.-H. Fjellstad, J. *Materials* **2018**, *11*, 187.
- 2) Khan, Y.; Garg, M.; Gui, Q.; Schadt, M.; Gaikwad, A.; Han, D.; Yamamoto, N. A. D.; Hart, P.; Wwlte, R.; Wilson, W.; Czarnecki, S.; Poliks, M.; Jin, Z.; Ghose, K.; Egitto, F.; Turner, J.; Arias, A. C. *Adv. Funct. Mater.* **2016**, *26*, 8764–8775.
- 3) Sekine, T.; Sugano, R.; Tashiro, T.; Sato, J.; Takeda, Y.; Matsui, H.; Kumaki, D.; Santos, F. D. D.; Miyabo, A.; Tokito, S. *Sci Rep.* **2018**, *8*, 4442.
- 4) Gu, H.; Ma, C.; Gu, J.; Guo, J.; Yan, X.; Huang, J.; Zhang, Q.; Guo, Z. *J. Mater. Chem.* **2016**, *4*, 5890–5906.
- 5) Amoli, B. M.; Hu, A.; Zhou, N. Y.; Zhao, B. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2015**, *26*, 4730–4745.
- 6) Valentine, A. D.; Busbee, T. A.; Boley, J. W.; Raney, J. R.; Chortos, A.; Kotikian, A.; Berrigan, J. D.; Durstock, M. F.; Lewis, J. A. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1703817.
- 7) Mitsui, R.; Sato, J.; Takahashi, S.; Nakajima, S. *Electronics* **2015**, *4*, 827–846.
- 8) Harris, K. D.; Elias, A. L.; Chung, H.-J. *J. Mater. Sci.* **2016**, *51*, 2771–2805.
- 9) Palavesam, N.; Marin, S.; Hemmetzberger, D.; Landesberger, C.; Bock, K.; Kutter, C. *Flex. Print. Electron.* **2018**, *3*, 014002.
- 10) Saito, Y.; Iida, K.; Sawada, S.; Shimizu, K.; Hattori, Y. In *Dependency of Contact Resistance on Load*, Proceedings of the Electrical Contacts - 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh, PA, Sept 16–19, 2007.