

立体配線メンブレン

産機・車載部品事業部
電子部品事業部
FECL

鳥井 純 一¹
西脇 賢 治²
小清水 和 敏³

Three-Dimensional Wiring Membrane

J. Torii, K. Nishiwaki, and K. Koshimizu

現行の立体配線形成技術は単層回路が主流で多層回路の形成が困難であること、外装部品への適用が困難であることなど、設計の制約が多いことから適用用途が限られている。当社は、平面状の多層印刷回路を壊すことなく立体成形し、凹凸や曲面を持つプラスチック部品に電子回路を形成する技術を開発した。本報では、立体構造を実現させるための材料開発による課題解決、および本技術を用いた立体配線メンブレンの製品適用検討結果について紹介する。

Conventional technologies for forming three-dimensional wiring structures are largely restricted to single-layer circuit configurations, with multilayer circuit formation and application to exterior components being difficult. As a result, numerous design constraints exist, limiting their practical applications. To address these limitations, we developed a novel manufacturing approach that enables the three-dimensional forming of planar multilayer printed circuits without inducing structural damage. This technique facilitates the integration of electronic circuitry onto plastic components possessing complex geometries, including curved and uneven surfaces.

This paper presents the materials development efforts undertaken to overcome key challenges associated with realizing three-dimensional circuit structures, and reports the evaluation results of applying the proposed technology to three-dimensional wiring membranes in prospective product applications.

1. ま え が き

近年、三次元形状で動作するモジュールの需要が高まっており、配線や電極を立体化したMolded Interconnect Device (MID) が注目されている。MIDはプラスチックパネルに立体回路配線し、電子機能と筐体を一体化することができるため、フレキシブル基板を手加工で立体化していた従来の組立を飛躍的に改善できるほか、製品デザイン性の向上、部品点数の削減を見込むことができ、家電や車載製品への適用が期待されている。しかし、Laser Direct Structuring (LDS) に代表される現行のMID工法は、多

層回路の形成が困難であること、成形樹脂材料などの設計の制約が多いことなどから適用の範囲が限られている^{1) 2)}。

そこで筆者らは、印刷法によって形成した多層回路を凹凸や曲面を持つ汎用熱可塑性プラスチック部品に立体配線する技術を開発した。立体成形技術としては、大型化や多層回路形成が可能な真空・圧空成形法を採用した(図1)。設計の自由度を高める開発コンセプトの下、成形樹脂基材を選ばず、また外部端子との接続部に屈曲性を付与することができる「転写法」を適用している(図2)。本報では、立体配線成形検討時に直面した課題とその解決策について報告する。

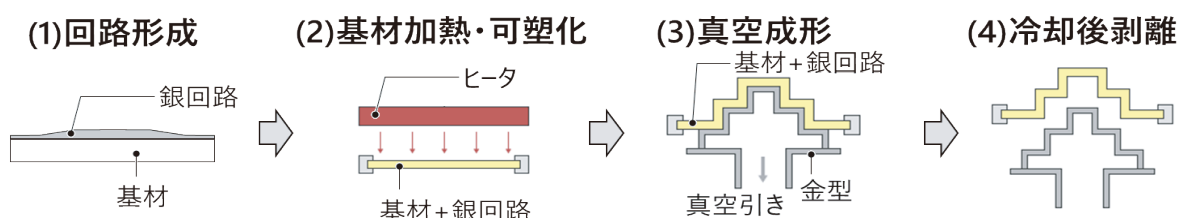


図1 真空成形工程

Fig. 1. Vacuum forming process.

1 車載メンブレン部車載メンブレン技術グループ グループ長
2 電子アッセンブリ部電子メンブレン開発グループ グループ長
3 Fujikura Electronic Components (Thailand) Ltd. Manager

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
メンブレン	Membrane	PETフィルムなどの薄い樹脂シート上に、導電インクを用いて接点や回路をシルクスクリーン印刷し、貼り合わせた薄型シートスイッチ
MID	Molded Interconnect Device	3次元の樹脂成形品表面に、直接レーザやめっき技術で回路・電極を形成する技術
LDS	Laser Direct Structuring	金属錯体を含有した特殊な樹脂成形品にレーザを照射し、活性化した部分に選択的なめっき処理を施して、3次元形状の表面に直接配線やアンテナを形成する技術
真空・圧空成形法	Vacuum and pressure forming method	熱で柔らかくしたプラスチックシートを金型に載せ、真空吸引（マイナス圧）と圧縮空気（プラス圧）の併用で金型に密着させる樹脂加工技術
ヤング率	Young's modulus	材料に荷重（引張・圧縮）を加えた際の「変形しにくさ（剛性）」を示す指標
バインダ樹脂	Binder resin	顔料、粉体、繊維などの固体粒子を互いに結合し、被着体表面に強固な塗膜（層）を形成する役割を持つ結合材（結着剤）
破断伸び	Elongation at break	材料を引っ張った際に、最終的に切断（破断）するまでに元の長さに対して何パーセント伸びたかを示す指標
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	アクリロニトリル (Acrylonitrile)、ブタジエン (Butadiene)、スチレン (Styrene)の3成分を共重合させた熱可塑性樹脂
応力-歪み曲線	Stress-strain curve	材料に荷重（力）を加えた際に発生する応力（力÷面積）と歪み（伸び率）の関係をグラフにしたもの
貯蔵弾性率	Storage modulus	高分子材料やゲルなどの粘弾性体において、変形エネルギーを弾性的に蓄える（貯蔵する）能力を示す指標
フィルムインサート	Film insert	印刷や機能性（抗菌・耐傷など）を施したフィルムを金型内に配置し、樹脂を注入して一体化させる製造技術

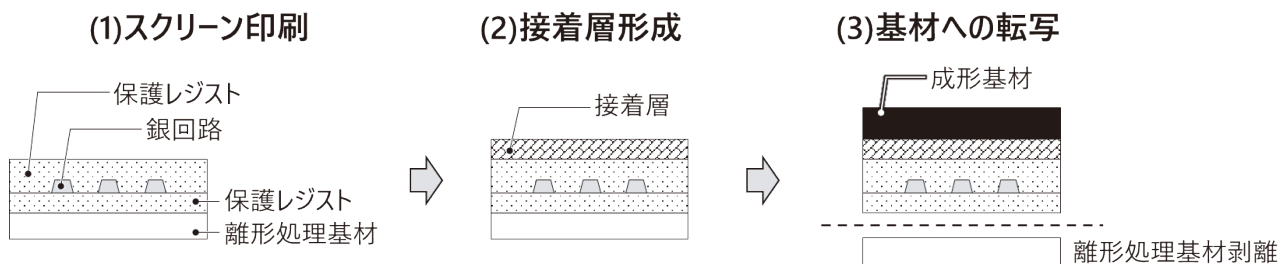


図2 印刷塗膜転写法

Fig. 2. Printed coating transfer method.

2. 銀ペーストの開発

従来のフレキシブル基板用銀印刷回路は、破断伸びが小さいために成形加工時に印刷回路が破断するという問題があった。この課題を解決するために、材料メーカと共同で加熱成形温度領域において高い伸長性を示す銀ペーストを開発した。破断伸びを改善するには、伸長時に発生するクラックの微小化、導電銀フィラ同士の接触面積低下の抑制が必要であり、以下のような配合設計が効果的であると推測した。

- ① 樹脂比率の増加によるヤング率低減
- ② 軟質層導入による伸長性向上

そこで筆者らは、銀ペースト中のバインダ樹脂比率を増加させるとともに、比抵抗を考慮して樹脂と導電銀フィラの配合量を最適化した。また軟質層としてウレタンビーズを添加した（図3）。その結果、破断伸びは約70 %へ大幅に改善し（図4）、軟質層が銀フィラ間を圧縮して接触を保持する働きにより、抵抗上昇率の抑制にも成功した。さらに真空・圧空成形温度領域である150℃付近においても十分な伸長性を確認した（図5）。

軟質層（ウレタンビーズ） ----- 銀フィラ

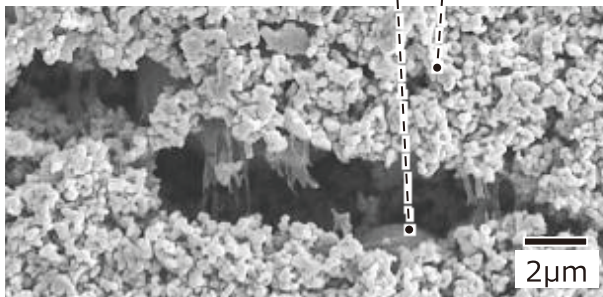


図3 銀ペースト中の軟質層

Fig. 3. Soft layer in silver paste.

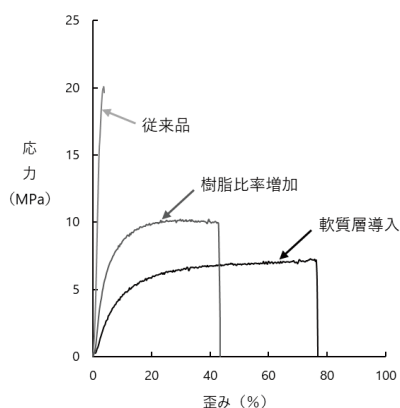


図4 銀ペーストの応力-歪み曲線

Fig. 4. Stress-strain curve of silver paste.

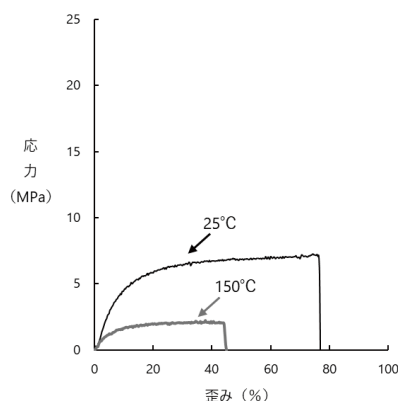


図5 開発した銀ペーストの応力-歪み曲線（温度依存性）

Fig. 5. Stress-strain curve (temperature dependence) of the developed silver paste.

3. 基材追従性の改善

開発した銀ペーストで印刷塗膜を作成し、アクリル系粘着材を適用した接着層をかいしてAcrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) 基材に転写した。その後、真空成形により深さ10 mmの立体成形を行ったところ、成形角部で皺が発生し、さらに回路の剥離や破断が生じた。高温成形により印刷回路と基材の密着性が低下し、伸長時の収縮応力によって剥離が誘発されたと推定される。この課題に対し、以下2点の改善を実施した。

- ① 印刷回路と基材の密着性向上
- ② 印刷回路の収縮応力低減

3-1. 印刷回路と基材の密着性向上

高温で密着性が低下する要因は、粘着材がゴム状領域から液状流動領域へ相転移するためである。したがって、高温での密着性を改善するためには、ゴム状領域を高温側に広げる、またはゴム状領域を高温側にシフトさせる必要がある。筆者らは、100℃以上でゴム状領域を有する接着層として、熱可塑性レジストに着目した。熱可塑性樹脂は加熱することで溶融するため、樹脂基材に熱圧着することで密着させることができる。選定した熱可塑性レジストの熱圧着品は、100℃にて0.3 N/mm程度の剥離強度を有し、従来検討していたアクリル系粘着材と比較して大幅な密着性向上を達成した（図6）。

3-2. 印刷回路の収縮応力の低減

印刷回路塗膜の収縮応力を低減するには、塗膜の弾性領域を小さくすること、および伸長時に発生する応力を低減する必要がある³⁾。塗膜の構成要素である銀回路と保護レ

ジストの応力-歪み曲線を比較したところ、保護レジストの弾性領域が支配的であり、かつ多層回路ではその印刷体積が大きい。このことから、保護レジストの弾性領域と応力を小さくする方針で開発を行った。

従来の保護レジストは、伸縮性を考慮してポリウレタン樹脂を配合していたが、立体成形では一度伸長した後は収縮することがないため、ポリウレタン樹脂配合を除外した。また、伸長性を考慮して配合しているガラス転移点の低いポリエステル樹脂だけでは高温での強度が足りないと考え、ガラス転移点の高いポリエステル樹脂で軟化点を調整し、ビニル樹脂で塑性変形領域の強度を上げる樹脂設計とした。

開発した保護レジストの応力-歪み曲線から、150℃にて弾性領域が小さく、伸長時の応力が低減されていることを確認した（図7）。

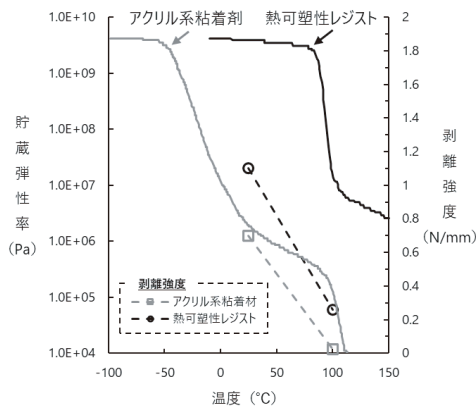


図6 接着層の貯蔵弾性率と剥離強度

Fig. 6. Storage modulus and peel strength of the adhesive layer.

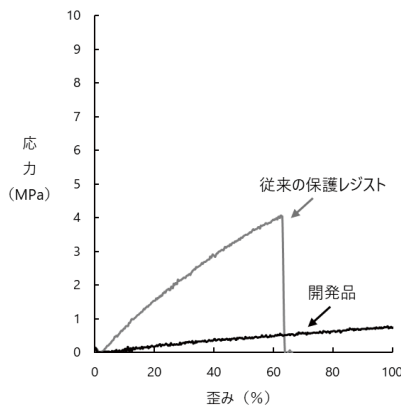


図7 保護レジストの応力-歪み曲線（150℃時）

Fig. 7. Stress-strain curve of the protective resist (at 150°C).

上記の基材追従性を改善した設計を用い、真空成形法で深さ10 mmの立体成形を実施した。熱可塑性レジストによる密着性の向上、レジスト樹脂配合の変更による回路の収縮応力の低減、それぞれ単独の改善では完全な回路立体化は達成できなかったが、両者の設計を最適化することで、皺や剥離などの問題なく立体成形を実現することが可能となった（図8）。

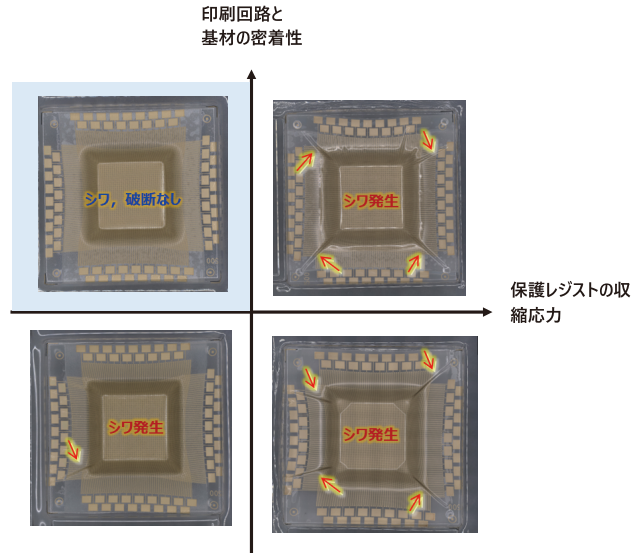


図8 基材追従性改善前後の立体成形品外観

Fig. 8. Appearance of three-dimensional molded products before and after substrate conformability improvement.

4. 立体配線メンブレンの製品適用検討

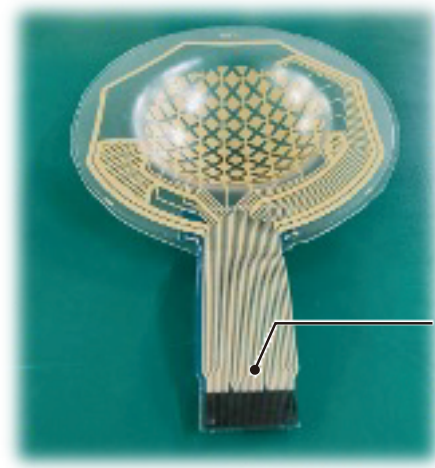
印刷回路の立体化手法として、表1に示す3手法が挙げられる。従来の熱可塑性基材上への直接印刷法は、基材耐熱温度の制約により高温焼成による回路の低抵抗化が困難な点や屈曲性に課題がある。フィルムインサート法では球面や角部など複雑形状への適用が難しい。

筆者らが開発した転写法では、塗膜単体を高温焼成した後に基材へ転写するため、基材耐熱温度による制約を受けることなく印刷回路を形成できる。また、塗膜層をそのまま引き出して外部端子と接続できるため、高い屈曲性を付与できる点（図9）や、回路自身の伸長性を利用した複雑形状（図10）にも対応でき、従来の2手法で対応が難しかった設計への解決策として提案することが可能である。塗膜回路を熱可塑性基材に転写する工法であるため、回路段差に起因する気泡が塗膜と基材間に残留することが設計的な課題であったが、回路段差を吸収する絶縁層の追加と特殊な脱気貼り合わせ法を採用することで、気泡の含有が抑制

表1 印刷回路の立体化手法

Table 1. Method for three-dimensional structuring of printed circuits.

	フィルムインサート	熱可塑性基材への直接印刷	転写法
印刷基材	PETフィルム	熱可塑性基材	離形フィルム 接着層を介して熱可塑性基材へ転写
転写工程	なし	なし	あり
真空成形	なし	あり	あり
外形加工	PET状態（平面）で加工	真空成形後（立体）で加工	真空成形後（立体）で加工
モールド	あり	あり	あり
寸法精度	○ 平面状態の寸法を維持	△ 真空成形での伸縮に依存	△ 真空成形での伸縮に依存
他基板との接続	ZIFコネクタ勘合可能 (テール回路引き回し可能)	回路上へのコネクタ実装, ACF接続	ZIFコネクタ勘合可能 (テール回路引き回し可能)
多層回路形成	可能	可能	可能
球上への回路形成	不可	可能	可能
コーナ部への回路形成	不可	可能	可能



外部端子との接続部

(a) 外部端子との接続部

(a) Connection part with external terminals

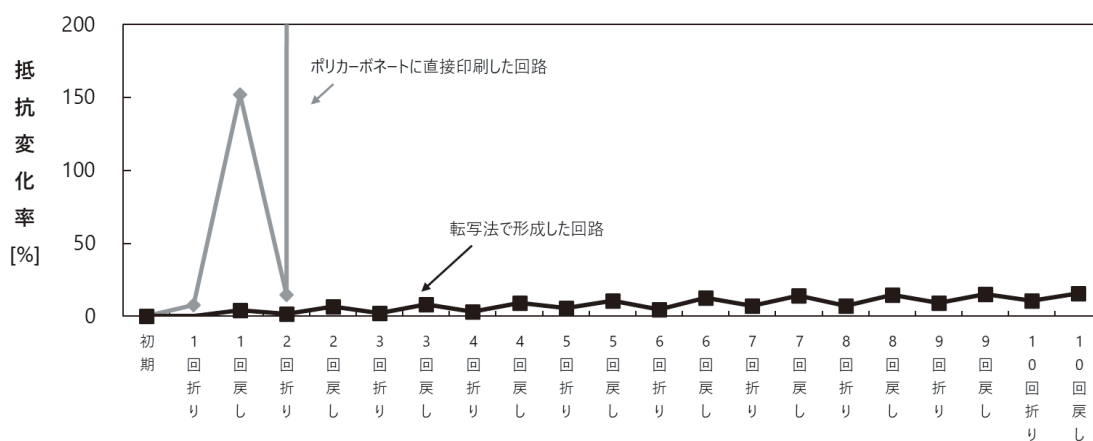
(b) $\Phi 1$ mm, 内曲げでの屈曲耐性(b) $\Phi 1$ mm, bending resistance under internal bending

図9 外部端子との接続部と屈曲性

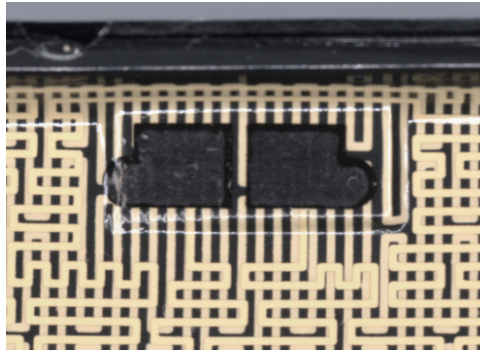
(a) 外部端子との接続部

(b) $\Phi 1$ mm, 内曲げでの屈曲耐性

Fig. 9. Connection part with external terminals and the bending flexibility of the connection part.

(a) Connection part with external terminals

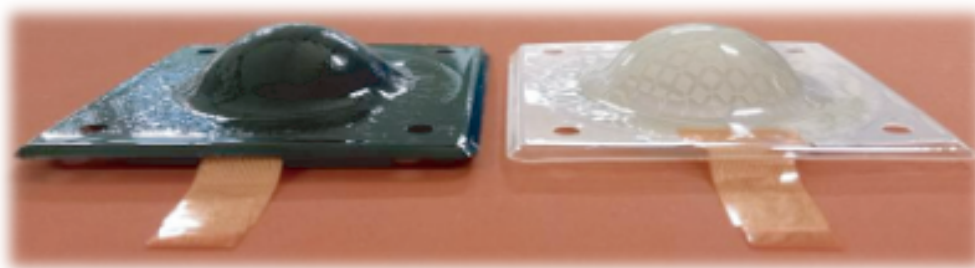
(b) $\Phi 1$ mm, bending resistance under internal bending



(a) 多層回路形成
(a) Multilayer circuit formation.



(b) 角部への回路形成
(b) Circuit formation on corners.



(c) 半球上への回路形成
(c) Circuit formation on a hemisphere.

図10 複雑形状に対応可能な立体配線メンブレン（転写法）

- (a) 多層回路形成
- (b) 角部への回路形成
- (c) 半球上への回路形成

Fig. 10. Three-dimensional wiring membrane compatible with complex shapes (transfer method).

- (a) Multilayer circuit formation.
- (b) Circuit formation on corners.
- (c) Circuit formation on a hemisphere.

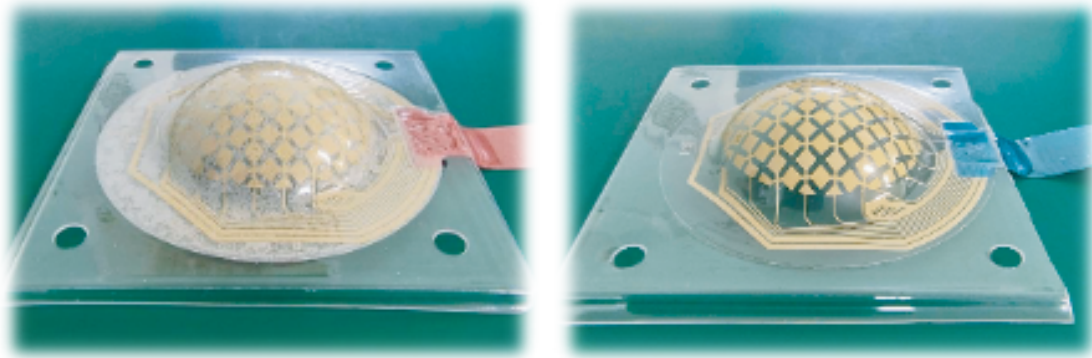
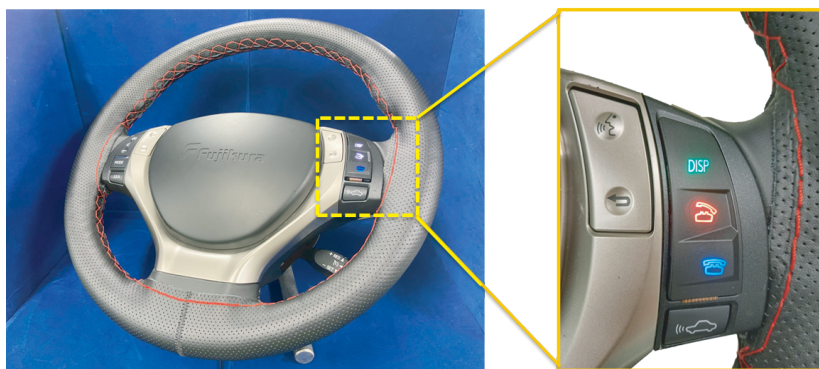


図11 気泡改善前後の立体配線メンブレン（転写法）

Fig. 11. Three-dimensional wiring membrane before and after bubble improvement (transfer method).



(a) 立体静電容量センサ
(a) Three-dimensional capacitive sensor.



(b) ステアリングスイッチとしての実装後
(b) After mounting as a steering switch.

図12 立体配線メンブレンの外装意匠部品適用例

(a) 立体静電容量センサ

(b) ステアリングスイッチとしての実装後

Fig. 12. Examples of application of three-dimensional wiring membranes to exterior design components.

(a) Three-dimensional capacitive sensor.

(b) After mounting as a steering switch.

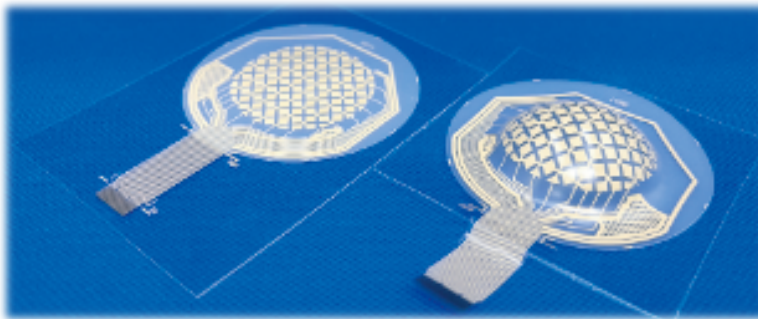
された製品を実現した（図11）。

この立体配線メンブレンをユーザ側が意匠板としてそのまま使えるように、射出成形での筐体化にも対応した。射出成形条件の検討により、射出成形時に発生するモールド樹脂の熱や流速によるずり応力から引き起こされる塗膜回路の剥離という課題を解決し、立体配線を施した射出成形品で特性と外観を保証できる品質を確立した。これにより、立体配線メンブレンを外装意匠部品として提案することが可能となった（図12）。

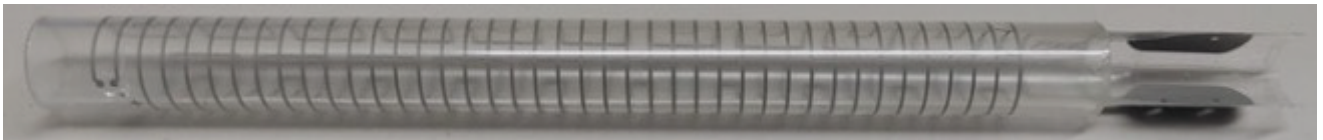
接続用テール配線を有する立体多層回路形成を可能にした。成形加工温度での伸長性の高い銀ペーストを開発し、接着層の構造、保護レジストの改善により、成形時の基材への追従が可能となり、深さ10 mmまで成形可能な立体配線を開発した。車載用スイッチや半球状トラックパッドなど、動作可能なプロトタイプを作製し、多様なアプリケーションとの親和性を確認した（図13）。さらに、部品実装した立体配線品も実現した。「フジクラ転写法」は設計手法と量産体制を確立しており、従来工法に比べ高機能・高耐久な立体配線を提供することが可能である。

5. むすび

真空・圧空成形法および転写印刷法の適用により、ABSやポリカーボネートなどの熱可塑性樹脂上に外部端子との



(a) 立体トラックパッド（静電容量センサ）
(a) Three-dimensional trackpad (capacitive sensor).



(b) LED実装円筒内壁回路
(b) LED-mounted cylindrical inner wall circuit.

図13 立体配線メンブレンのアプリケーション適用例

- (a) 立体トラックパッド（静電容量センサ）
- (b) LED実装円筒内壁回路

Fig. 13. Examples of applications of three-dimensional wiring membranes.

- (a) Three-dimensional trackpad (capacitive sensor).
- (b) LED-mounted cylindrical inner wall circuit.

参考文献

- 1) T. Leneke and S. Hirsch : “A Multilayer Process for 3D-Molded-Interconnect-Devices to Enable the Assembly of Area-Array Based Package Types” , Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 2, No. 1, pp. 104-108, 2009
- 2) Salman Ahmed Hashmi, et. al.: “REVIEW OF 3D MOLDED INTERCONNECT DEVICE (3D-MID) IN THE PROSPECTIVE OF ADDITIVE MANUFACTURING” , ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING, VOL. 19, pp. 71-90, 2021
- 3) 福山萬治郎:「塗膜の内部応力」, 材料, 第18巻, 第193号, pp. 19-25, 1969