

技術紹介

4 フレキシブル防水電気接続技術の開発

Development of flexible waterproof electrical interconnection technology

松尾 幸祐

Kousuke Matsuo

商品開発センター

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)

キーワード：フレキシブル、防水、粘弾性体、接続信頼性**Keywords: Flexible, Waterproof, Viscoelastic Body, Electrical Reliability**

要 旨

IoT(Internet of Things)によって、ヒトを含めたあらゆる“モノ”がつながることにより、各々の情報を収集し、これらをもとにあらゆるものを相互に制御することで、エネルギー、インフラ、交通システム、医療などの多岐にわたる分野を最適化する取り組みが本格化しております。このような流れの中では、従来には想定されていなかったモノや場所にエレクトロニクスを組み込むことが想定され、新たな形態や機能への要求が高まっています。その一つとして、デバイス自体が柔軟で形状の自由度の高いフレキシブルエレクトロニクスと呼ばれる分野が注目されております。そして、このような柔軟なデバイスを接続するコネクタにおいても、デバイスと同様のフレキシブル性や軽量性に加えて、使用されるシーンの多様性を想定し、雨や汗から電気接続部を保護する防水機能が必須となります。そこで本稿では屋外で使用するフレキシブルデバイスを志向し、操作性に優れたフレキシブル防水コネクタについて報告いたします。

SUMMARY

IoT (Internet of Things) can realize smart system in various industries such as energy, infrastructure, transportation, and medical system. It optimizes these system by connecting with everything, analyzing data accumulated, and processing such as automatic control based on it. Since there is an increasing demand for mounting sensors on objects which have a non-conventional form or function, and acquiring information, flexible electronics, which has flexible and various shapes and mounting form, is widely developing. In addition to the flexibility and lightweight, the connector needs waterproof function for protecting the electrical connection from water such as rain and sweat when it is assumed to be used in various situation. Therefore, we disclose the development of a flexible waterproof connector which has excellent operability, assuming deployment to flexible devices to be used outdoors.

1. はじめに

ヒトを含めたあらゆる“モノ”がつながることによって情報を習得し、相互に制御する IoT (Internet of Things) においては、各々が最適化されるだけではなく、膨大なデータをもとに、エネルギー、インフラ、交通システム、農業、医療など社会基盤を含めた多岐にわたる産業をスマート化することが想定されます。したがって、IoT でつながるモノには、これまでには想定されていなかったモノや場所にエレクトロニクスが組み込まれ、いわば一つの端末として情報が収集されると考えられます。すなわち、半導体や Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) デバイスを組み合わせて構成されるエレクトロニクスとは異なる、形態や機能を有する新たなエレクトロニクスへの要求が高まりつつあります。例えば農業においては、生育設備や生育状況をモニタリングし、水質や温度等を最適化することで、生産性向上にむけた提案がなされており、センサや太陽電池を建材や土壌、植物に組み込み、得られたデータを用いて精密な自動環境制御を行うシステムが提案されています^{1,2)}。このようなシステムを構成するデバイスとしては、柔軟で多様な形状、実装形態をもつフレキシブルエレクトロニクスと呼ばれる分野が注目されており³⁻⁵⁾、ディスプレイ^{6,7)}、太陽電池^{8,9)}、RF タグ^{10,11)}など様々なデバイスが報告されています。したがって、これらの“柔軟な”デバイスを接続するコネクタにおいては、電気接続信頼性はもちろん、デバイスと同様、フレキシブル性や軽量性が求められます。さらに、屋外といった使用されるシーンの多様性を考慮した場合、雨や汗といった水分から電気接続部を保護する防水機能が必須となります。

このようなフレキシブルデバイスの接続技術を志向し、当社では粘着剤上に電極が設けられていることを特徴とする Film-Type Connector (FTC) の開発を行ってまいりました¹²⁾。FTC では、粘着剤が接続対象の基材に対して接着した際に生じる、塑性変形を起源とする力を接圧として利用し、低背かつ柔軟性を有する電気接続技術が実現されます。本コネクタは接続部においても柔軟性に対する電気接続特性を有していると同時に、加熱工程を必要とせず接続されることが特徴となります。したがって、デバイスの柔軟性を損なうことなく、その機能や意匠を十分に活かした電気接続が可能となる一方、粘着剤の接着力を利用していることから、嵌合回数が制限されます。そこで、本稿では樹脂ファスナーをもちいた機械的な勘合構造保持機構と、弾性構造体をベースとする低接圧電気接続機構を特徴とする、複数回の嵌合に対応し、かつ操作性に優れたフレキシブル防水コネクタについて紹介いたします。

2. フレキシブル防水コネクタ

2.1 フレキシブル防水コネクタの構造

図 1 に、開発したコネクタの概念図を示します。本コネクタは、レセプタクルとプラグから構成されており、樹脂ファスナーを機械的な勘合構造保持機構として使用し、弾性構造体をベースとする電気接続機構を特徴とするコネクタになります。レセプタクルは、基材となるポリエチレンフィルムに樹脂ファスナーが熱溶融により一体化されており、樹脂ファスナーが係合することで、嵌合構造を保持する機構となっております〔図 1 (a)〕。また、基材であるポリエチレンフィルムには貫通電極が設けられており、プラグとの電気接続と同時にデバイス側へ実装するための電極となっております。プラグには、基材であるポリエチレンフィルムの貫通電極部に電気接続部材を備えており、裏面側の貫通電極部を介してデバイスへ実装されます。電気接点には poly(dimethylsiloxanes) (PDMS) 構造体に Cu 薄膜が備わった構造であり (PDMS 電極)、嵌合時にレセプタクル側の貫通電極部に本電気接点部がスイッチのように接触することで電気接続されます〔図 1 (b)〕。

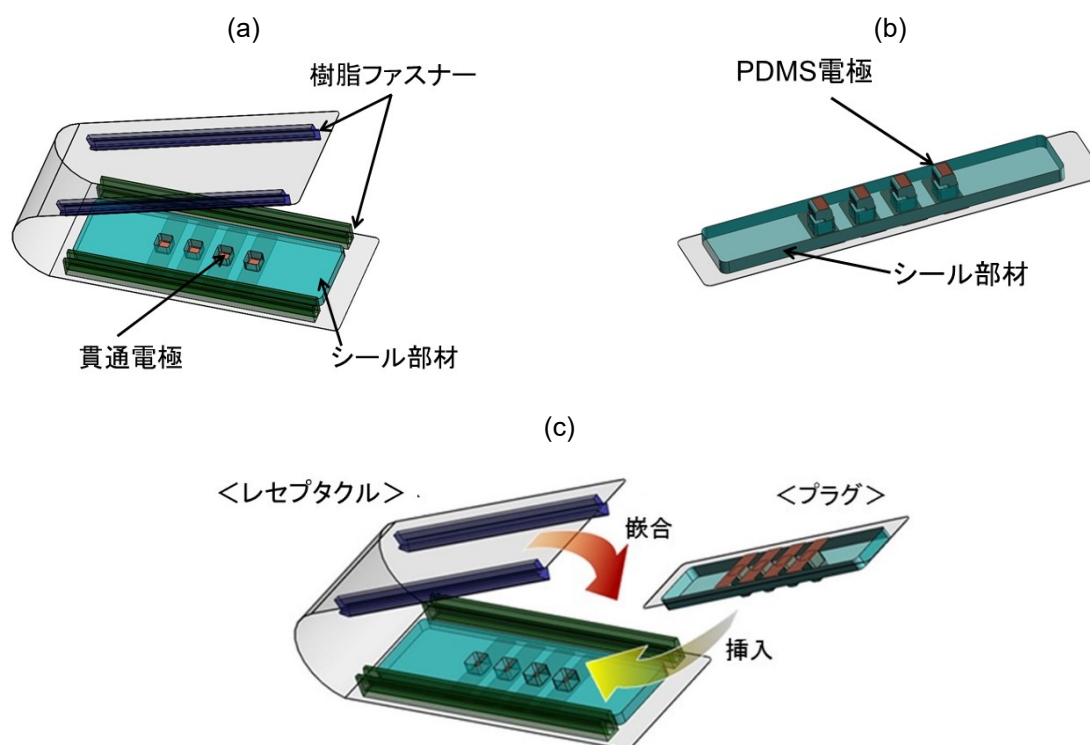


図 1. 防水型ファスナーコネクタの概要図
(a) レセプタクル (b) プラグ (c) 嵌合形態

PDMS 電極は、非金属のゲルやゴム状の弾性体と金属薄膜により構成された、従来コネクタの約 1/50 以下の接触圧力で安定接触が得られる当社独自技術を応用したものになります。一般的なコネクタのコンタクトは、金属やプラスチック等のばね構造体であり、コンタクト界面の微小な凹凸による接触面積を大きくするために、接圧を高くすることで低接触抵抗の安定した電気接続を実現しております。一方、本接続機構では、ゴムを始めとする粘弾性体上に金属薄膜で構成されたコンタクトにより、コンタクト界面での微小な凹凸に追従可能な面接触を行うことで、低接圧での安定した電気接続を実現しております。

また、レセプタクルとプラグには共にゴム材料のシール部材が設けられており、レセプタクル側の樹脂ファスナーに係合させると、PDMS 電極が空間的に閉じられることで水が電気接続部へ流入しない構造となっております。すなわち、レセプタクルの樹脂ファスナーに係合させると、プラグに備わっている PDMS 電極が変形することで接圧が生じると同時に、シール部材が密着することで、防水機能を有した柔軟な電気接続が実現されます [図 1 (c)]。

2.2 電気接続機構の特性

図 1 に示したコネクタにおいては、PDMS 電極の形状変化を伴う電気接続の安定性とシール部材の密着性を両立することが鍵となります。そこで PDMS 電極に印加する力と接続抵抗ならびに形状の変化量に関して調査を行いました。PDMS 電極は、PDMS (SYLGARD 184、東レ・ダウコーニング社製) を外形が幅 2.5 mm、奥行 2.1 mm、高さ 3.3 mm のコの字型に成形した構造体に、厚さ 9 μm の銅電極を形成して作製しました [図 2 (a)]。作製した PDMS 電極は、ポリイミドを基材とするフレキシブルプリント回路基板 (FPC) に実装し、以下の評価を行いました [図 2 (b)]。

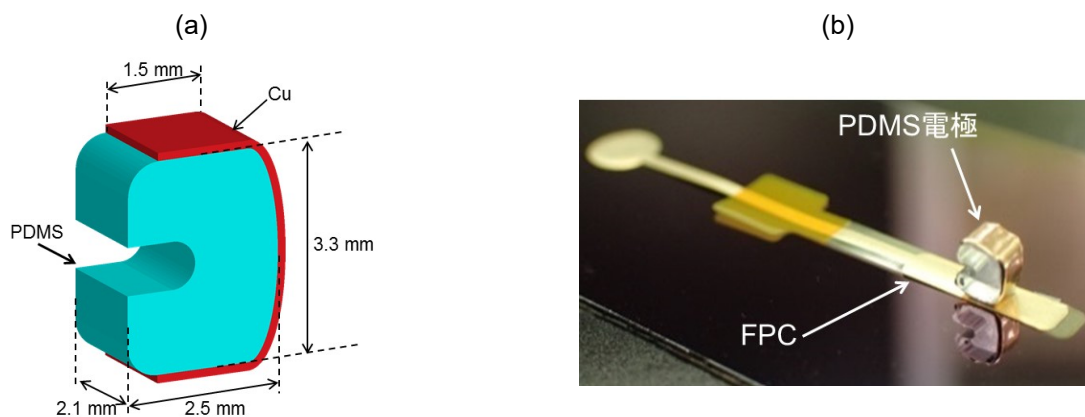


図 2. PDMS 電極の概要
(a) 外形イメージ (b) テスト用 FPC へ実装した PDMS 電極の外観

はじめに、PDMS 電極への負荷荷重と押し込み変位量の関係を調べました。作製した PDMS 電極へロードセルを押し込んでいき、そのときの変位量とロードセルに表示される PDMS 電極の反力を測定しました [図 3 (a)]。横軸に押し込み変位量、縦軸に PDMS 電極への負荷荷重をプロットしたものを図 3 (b)

に示します。その結果、PDMS 電極に対して 10 N 程度の力を負荷し、10 回繰り返して変形させた際、回数に応じた押し込み変位量に大きな変化は見られませんでした。このことから、本電極は 10 N 程度の荷重では塑性変形を起こさず、安定して繰返し形状が復元し、接圧を生じさせることが可能であることが分かりました。

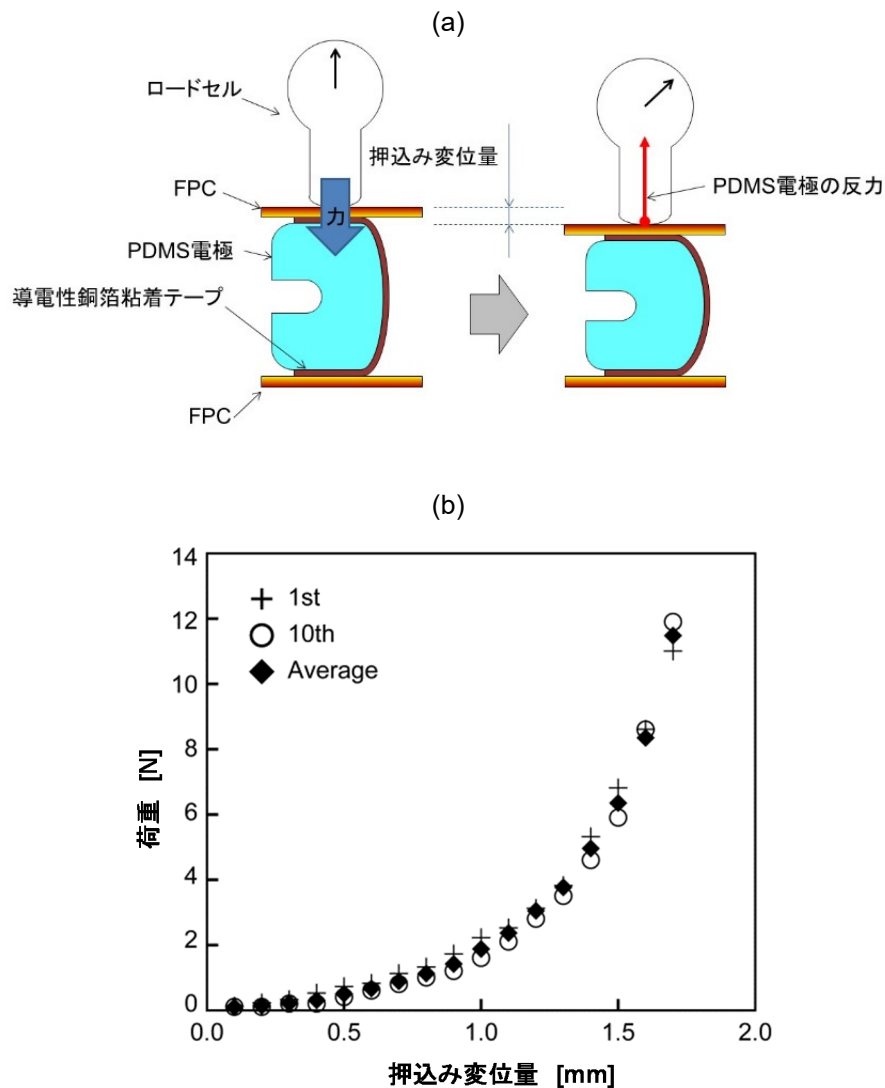


図 3. PDMS 電極の機械的特性

(a) 測定概要 (b) PDMS 電極への負荷荷重と押し込み変位量の関係

次に、PDMS 電極の接圧に対する電気接続特性の評価を行いました。FPC に実装した PDMS 電極をガラス基板に固定した FPC で挟み、荷重を与えながら FPC の配線をロガーに接続し抵抗値の記録を行いました [図 4(a)]。なお、本測定ではロガーからの配線ならびに端子の接続抵抗は $1.4\ \Omega$ 程度でした。その結果、図 4(b) に示す通り、1.0 N 以上の負荷荷重では接続抵抗のばらつきが少なくなると同時に、

評価用 FPC の配線ならびに PDMS 電極との接続抵抗を合せて $1.0\ \Omega$ 未満の接続が可能であることが分かりました。また、本コネクタの基材であるポリエチレンフィルムの一一般的な引っ張り強さが $20\sim 30\ \text{MPa}$ であることから、問題なく負荷できる荷重の範囲内で、安定した電気接続が得られることが分かりました。

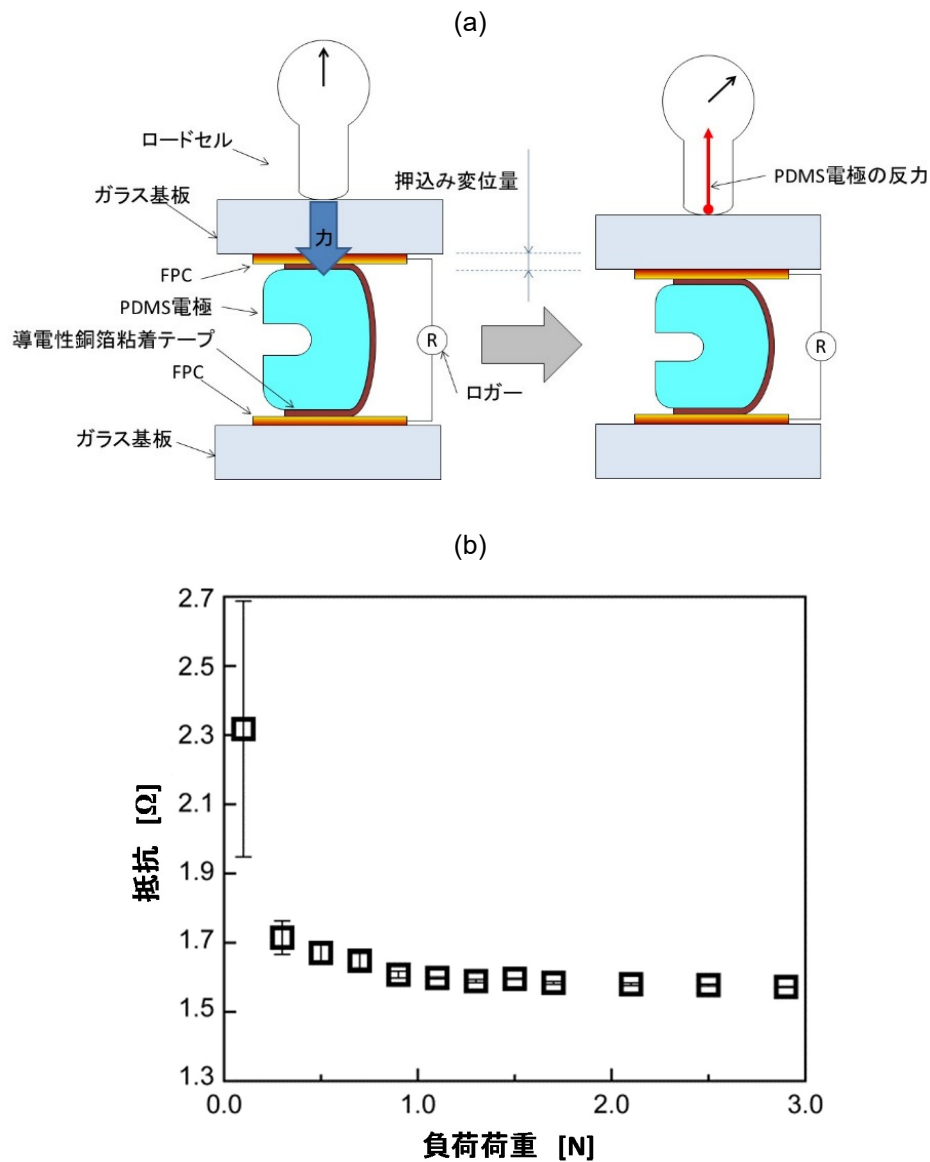


図 4. PDMS 電極の電気接続特性
(a) 測定概要 (b) 負荷荷重に対する抵抗値の変化

3. 水中での電気接続評価

PDMS 電極への荷重と押込み変位量ならびに電気接続抵抗の関係（図 3, 4）より、1.0 N 以上の力で電気接続が安定し、また、PDMS 電極の形状が 0.8 mm 変化する際に生じる力は 1.13 ± 0.2 N であることが分かりました。そこで、PDMS 電極が 0.8 mm 変化するよう、レセプタクルならびにプラグに備わるゴム製のシール部材の厚さを設計し、コネクタを作製いたしました（図 5）。

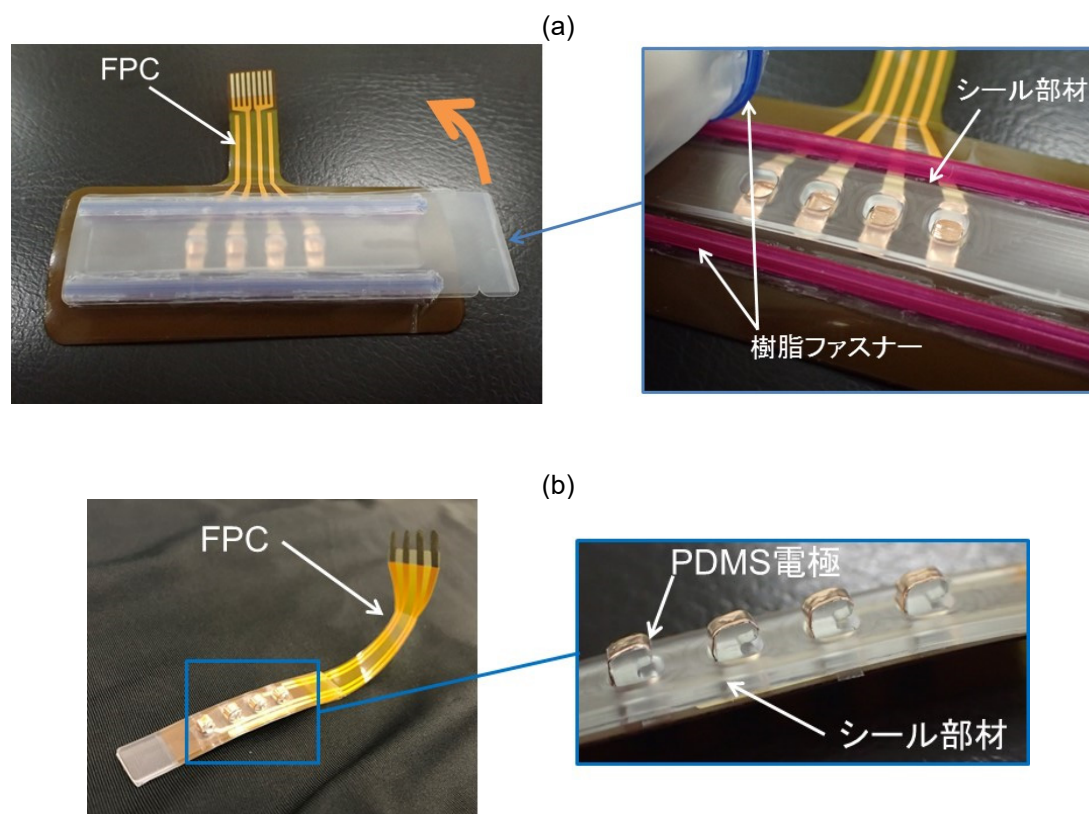


図 5. 防水ファスナーコネクタの外観
(a) レセプタクル (b) プラグ

前述したとおり、ポリエチレンフィルムを基材とし、レセプタクルは 2 組の樹脂ファスナーとシール部材、プラグにはシール部材と貫通電極上に PDMS 電極が備わっております。レセプタクル、プラグは共に貫通電極部が設けられており、裏面にて FPC の電極に接続されております。FPC への実装は、当社が開発した粘着剤を利用したフィルム型コネクタの方式を採用いたしました¹²⁾。本方法では、粘着剤の弾性復元力を起源とする電極間の接圧が生じるため、面での安定した電気接続が可能となります。また、本接続方式では室温下かつ、低圧力にて実装が可能であり、耐熱温度が 90 °C 前後であるポリエチレンを基材とする本コネクタの実装方法においては最適な手法になります。作製したコネクタを嵌合し、FPC の配線を介してその接続をテストした結果、0.5 Ω 未満の抵抗で接続できていることを確認いたし

ました。

次に、水中にて作製したコネクタの電気接続試験を行いました。バッテリーと LED ディスプレイを、FPC を介して作製したコネクタで接続し、電気接続の安定性を確認いたしました（図 6）。中央の水槽にコネクタを水没させた状態においても、接続された LED ディスプレイが点灯し、安定した電気接続が実現されていることが分かりました。また、コネクタを水中に入れる前後で抵抗値を測定した所、大きな変化は見られず、水中から取り出したコネクタの PDMS 電極の状態を確かめた結果、水の侵入は認められず、防水機構が十分機能していることも確認できました。

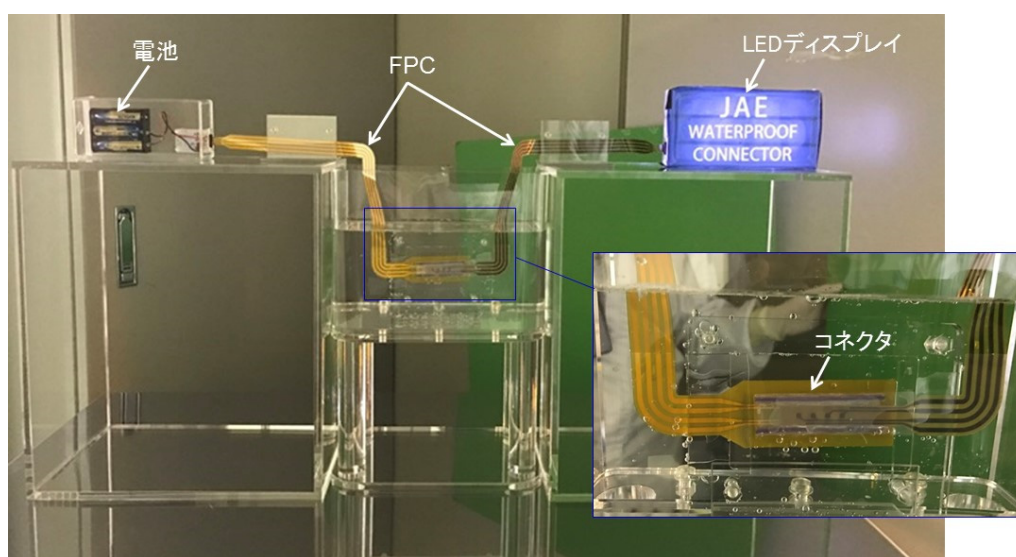


図 6. 水中での電気接続試験

4. まとめと低接圧電気接続技術の検討

本稿では、樹脂ファスナーを利用した勘合時の構造保持機構と弾性体からなる電気接続部材（PDMS電極）を接続機構とする、複数回の勘合が可能なフレキシブル防水コネクタについて報告いたしました。電気接続信頼性においては、PDMS電極の特性に着目した検討を行い、また、防水機能においては実際に作製したコネクタを水中にて電気接続するデモンストレーションを示しました。

スマートフォンに代表される小型化の進むモバイル機器では、依然として実装部位の軽薄短小化が求められ続けております。しかしながら、現在多くの接続デバイスで用いられている剛直な保持機構による電気接続信頼性の確保は、小型化に限界が見込まれます。一方、粘弾性体は弾性領域が数%程度のひずみしかない金属材料に比べまして、微小から大ひずみ領域で利用可能であり、ほとんど体積変化のない非圧縮性であることから変形による面圧が大きいといった特徴を持ちます。そこでこれらの特徴を利用した低接圧電気接続機構の開発に取り組んでおります。

図7は、PDMS上に高さ1.0 mm、長さ1.0 mmの凸構造体を剛体にて0.5 mm押し込んだ場合の、凸部における反発力をシミュレーションソフト（Marc、MSC software corporation 社）を用いて計算した結果になります。その結果、金属体の凸構造を有するモデルでは、多少の分布は生じているものの、凸部全体に反力が生じていることがわかります〔図7(a)〕。これに対し、PDMSの凸構造体上が厚さ0.1 mmの金属膜で覆われたモデルにおいては、側面にある金属の剛性により端部において大きな応力集中を起こしていることがわかります〔図7(b)〕。このことから、弾性体の凸構造上に金属を配置することで、より少ない変位量にて電気接続に必要な接圧を得ることが出来るとわかりました。このように、電極の微細構造により、より安定した電気接続技術を可能とする機構を開発することが可能であり、小型、高密度化を要求されてきた従来のエレクトロニクスだけではなく、フレキシブルを始めとする新たなデバイスにおける電気接続技術として開発を進めていく予定です。

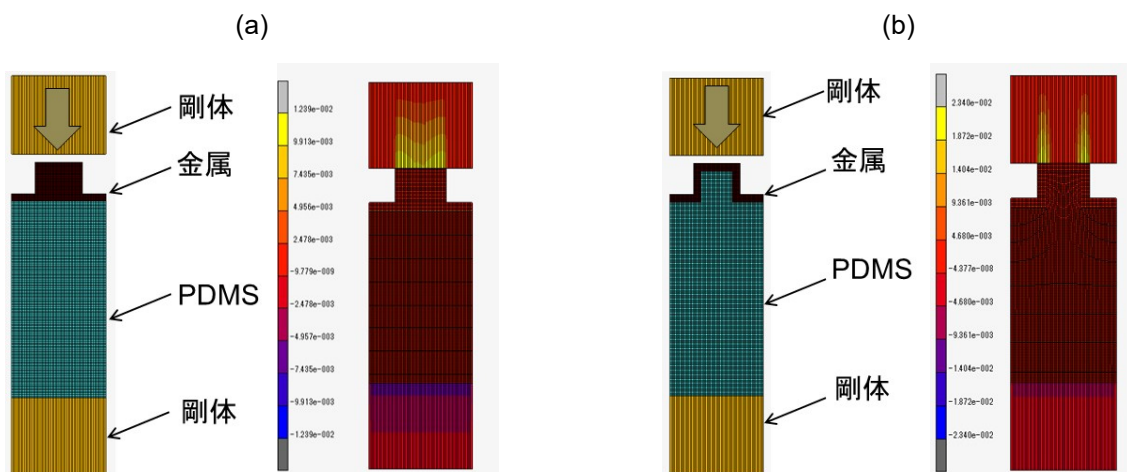


図7. PDMS上の凸部の力学シミュレーション

- (a) 金属による凸構造モデルとその反力分布のシミュレーション結果
- (b) PDMSの凸構造が金属で覆われたモデルとその反力分布のシミュレーション結果

[参考文献]

- 1) D. Park, J. Park, *Sensors*, **11**, 3640 (2011).
- 2) T. Ahonen, R. Virrankoski, M. Elmusrati, *Proc. IEEE/ASME Inter. Conf. Mech. Embe. Sys. Appl.*, Beijing China (2008).
- 3) A. Bedoya-Pinto, M. Donolato, M. Gobbi, L. E. Hueso, P. Vavassori, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 062412 (2014).
- 4) Z. Liu, J. Xu, D. Chenb, G. Shen, *Chem. Soc. Rev.*, **44**, 161 (2015).
- 5) K. D. Harris, A. L. Elias, H. Chung, *J. Mater. Sci.*, **51**, 2771 (2015).
- 6) C. Wang, D. Hwang, Z. Yu, K. Takei, J. Park, T. Chen, B. Ma, A. Javey, *Nat. Mater.*, **12**, 899 (2013).
- 7) W. Xu, J. Zhao, L. Qian, X. Han, L. Wu, W. Wu, M. Song, L. Zhou, W. Su, C. Wang, S. Niea, Z. Cui, *Nanoscale*, **6**, 1589 (2014).
- 8) P. Docampo, J. M. Ball, M. Darwich, G. E. Eperon, H. J. Snaith, *Nat. Commun.*, **4**, 2761 (2013).
- 9) N. Giesbrecht, J. Schlipf, L. Oesinghaus, A. Binek, T. Bein, P. Müller-Buschbaum, P. Docampo, *ACS Energy Lett.*, **1**, 150 (2016).
- 10) A. Oprea, N. Bârsan, U. Weimar, M. Bauersfeld, D. Ebling, J. Wöllenstein, *Sens. Actuators B*, **132**, 404 (2008).
- 11) K. Myny, S. Steudel, P. Vicca, M. J. Beenhakkers, N. A. J. M. van Aerle, G. H. Gelinck, J. Genoe, W. Dehaene, and P. Heremans, *Solid-State Electron.*, **53**, 1220 (2009).
- 12) R. Mitsui, J. Sato, S. Takahashi, S. Nakajima, *Electronics*, **4**, 827 (2015).