

マイクロ・ナノメカニクス研究

研究代表者 岩瀬 英治
(基幹理工学部 機械科学・航空宇宙学科 教授)

1. 研究課題

本研究は、マイクロサイズやナノサイズで特異的に作用する物理現象を積極的に活用することにより、新規な機能を有するデバイスを実現することを大きな目標としている。具体的な研究ターゲットとしては、折り紙や切り紙の特性を機械工学的に捉えなおした独自のアプローチにより、曲面に貼付可能な電子デバイスおよび伸縮可能なフレキシブル電子デバイスの設計論の体系化から実際のデバイス実証まで行うことを目的としている。折り紙や切り紙では、素材自体には伸縮性を有していない紙を用いて伸縮変形を実現している。この特性を、“局所的な曲げ変形によるデバイス全体の伸縮変形”と捉えたり、マクロな構造・形状により本来単一の素材では持ちえない機械物性（ヤング率や曲げ剛性の異方性、負のポアソン比など）を有することができるという点から“機械的メタマテリアル”と捉えたりすることができる。これらの基礎学理から、実際に曲面に貼付可能な電子デバイスや伸縮可能なフレキシブルデバイスへの応用までを一貫して行う。

2. 主な研究成果

本年度は、曲げ伸ばし可能な伸縮電子デバイスにおける、伸縮基板上の配線に電子素子を実装する際に、液体金属を用いる手法を提案した。近年、曲げ伸ばし可能な伸縮電子デバイスの研究が盛んに行われている。LED や MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) センサなどの小型で硬く高性能な電子素子を、伸縮基板に組み込もうとした場合、配線と電子素子の間の接続が重要となる。これは、デバイスを伸縮した際に硬い電子素子の周辺部における応力集中により破断が生じるためである。また、実装部の接触抵抗が低いことでモニタリング時のノイズの低減や消費電力の削減が可能となる。従来の伸縮しない電子デバイスの素子実装では、主にハンダや導電性ペーストが用いられているが、伸縮電子デバイスに応用した場合、伸縮耐性を得ることができない。そこで、本研究ではガリウム系液体金属を素子実装に用いることで、高伸縮耐性と低接触抵抗を得ることを考えた。ガリウム系液体金属は液体であるため、実装部の応力を緩和させ高伸縮耐性を得られると考えられるが、表面に酸化皮膜を形成しやすく接触抵抗が高い懸念がある。しかしながら、従来の酸化皮膜除去手法は酸や塩基を用いる化学的な方法や CO_2 レーザを用いる物理的な方法であり、基板にダメージを与えたり高価な装置を必要とする問題がある。そこで本研究では、液体金属と固体金属の配置順による酸化皮膜問題の解消を検討した。また、接触抵抗の経時変化を評価し、さらに液体金属実装の伸縮耐性を確認した。液体金属を用いた電子素子実装によって基板材料の幅が広がり伸縮耐性が向上し、伸縮電子デバイスの発展に貢献できる。

Fig. 1 に液体金属実装の概要を示す。硬い電子素子と配線間をガリウム系液体金属で接続することで高い伸縮耐性を実現した。Fig. 2(a)に示すように、ガリウム系液体金属（ガリンスタ

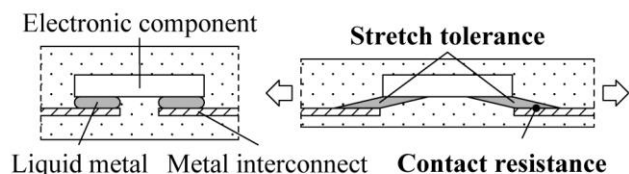


Fig. 1 液体金属による電子部品実装の概要.

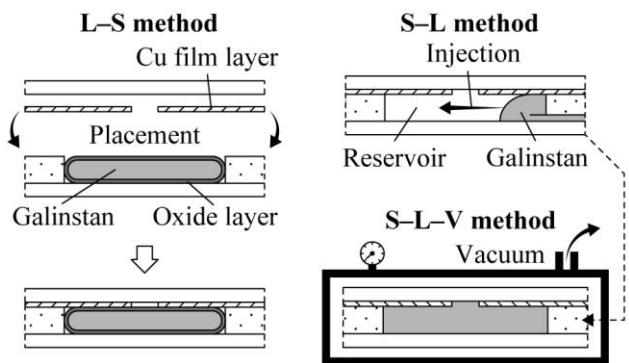


Fig. 2 L-S, S-L, S-L-V methodの概要

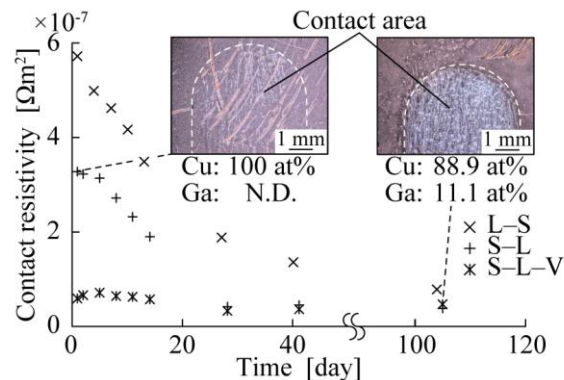


Fig. 3 接触抵抗率の経時変化.

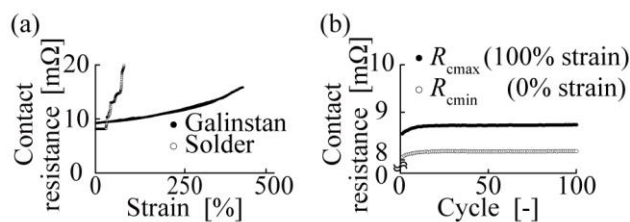


Fig. 4 (a) ひずみに対する接触抵抗変化, (b) 100%ひずみでの繰り返し伸縮に対する接触抵抗変化.

ン)と固体金属(銅箔)を異なる手順で接触させて接触抵抗を比較した. 液体金属(L)を配置した後に固体金属(S)を載せる L-S method, 固体金属を配置した後に液体金属を液溜めに注入する S-L method, S-L method の後に真空引き(V)を行う S-L-V method の3種類である. ガリンスタンと銅箔間の接触抵抗を4端子法で計測した. また, 銅箔表面の形態と組成を計測した. さらに, 2本の直線状銅箔配線間にガリンスタンを用いてチップ抵抗を実装したデバイスを作製し, 伸縮変形に対する接触抵抗変化を計測した.

Fig. 2(b)に異なる接触手法に対する接触抵抗率の経時変化を示す. 1日後の接触抵抗率は L-S, S-L, S-L-V method の順で低くなりそれぞれ $5.7 \times 10^{-7} \Omega m^2$, $3.3 \times 10^{-7} \Omega m^2$, $0.59 \times 10^{-7} \Omega m^2$ となった. これにより, ガリンスタンと銅箔の接触手法によって酸化皮膜の接触抵抗への影響を除去し接触抵抗率を低減できることを明らかにした. また, 長時間経過すると酸化皮膜の接触抵抗への影響が低減し, 接触手法によらず接触抵抗率は同じ $10^{-8} \Omega m^2$ オーダに低下することを発見した(103日後). 銅箔表面の成分分析において, 133日後の銅箔表面が灰色に変色し Ga が 11.1 at% 存在したことから, 銅箔表面の合金形成が確認された. これらの結果から, 経時的な合金化によって濡れ性が改善し接触抵抗率が低下するとともに, 接触抵抗率がほぼ同じ値になってゆくことが示された. Fig. 3 にひずみに対する接触抵抗変化を示す. ハンダが 24%ひずみで断線したのに対し, ガリンスタンは 100%ひずみでも 9.0%以下と低い接触抵抗変化を維持した (Fig. 3(a)). ガリンスタンは 100%ひずみでの 100 回の繰り返し伸縮に対しても接触抵抗変化は 2.3%以下であった (Fig. 3(b)). したがって, 液体金属を用いた電子素子実装によって高い伸縮耐性が得られることを確認した.

本研究は液体金属を用いた電子素子実装を提案し, 接触抵抗の経時安定性と伸縮耐性を実現した. 本実装手法によって基板材料の幅が広がり伸縮耐性が向上し, 伸縮電子デバイスの発展に貢献できる.

3. 研究業績

3.1 学術論文

- ・ T. Sato, K. Yamagishi, M. Hashimoto, and E. Iwase, “Method to reduce the contact resistivity between galinstan and a copper electrode for electrical connection in flexible devices,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 15, no. 13, pp. 18247-18254, Apr. 2021.
- ・ S. Yamamura, and E. Iwase, “Hybrid hinge structure with elastic hinge on self-folding of 4D printing using a Fused Deposition Modeling 3D-printer,” *Mater. Des.*, vol. 203, 109605, Mar. 2021.
- ・ H. Taniyama and E. Iwase, “Design of a kirigami structure with a large uniform deformation region,” *Micromachines*, vol. 12, no. 1, 76, Jan. 2021.
- ・ M. Tokonami, S. Yamada, M. Kashiwagi, and E. Iwase, “Investigation of shear stress between roll interfaces in a high-accuracy roll-type stamping transfer system,” *IEEJ Trans. Sens. Micromachines*, vol. 140, no 4, pp. 79-83, Apr. 2020.
- ・ H. Iwasaki, F. Lefevre, D. D. Damian, E. Iwase, and S. Miyashita, “Autonomous and reversible adhesion using elastomeric suction cups for in-vivo medical treatments,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 2015-2022, Apr. 2020.

3.2 総説・著書

なし

3.3 招待講演

なし

3.4 受賞・表彰

- ・ 岩瀬英治, 早稲田大学 理工学術院, 早稲田大学ティーチングアワード, 2020 年度春学期.
- ・ 谷山広樹, 日本機械学会 三浦賞, 2021 年 3 月.
- ・ 佐藤峻, 早稲田大学 材料科学専攻 材料科学学術奨励賞, 2021 年 3 月.
- ・ 山村俊介, 2020 MRS Fall Meeting, Poster Presentation Award, 2020 年 11 月.

3.5 学会および社会的活動

- ・ 文部科学省 研究振興局 学術調査官 (～2020 年 7 月)
- ・ 文部科学省 科学技術・学術政策研究所(NISTEP) 科学技術予測センター 専門調査員
- ・ 日本機械学会, 若手の会, 委員
- ・ 日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門, 運営委員会, 委員
- ・ 電気学会 論文委員会 (E グループ), 幹事
- ・ 電気学会 センサ・マイクロマシン部門, MSS 技術委員会, 委員

4. 研究活動の課題と展望

来年度は, 液体金属を用いて電子素子を実装した伸縮電子デバイスを用いて, 伸縮耐性評価や性能評価を行う. 最終段階として, 「繰り返しの伸縮変形可能な伸縮電子デバイス」, すなわち, ゴムやヒトの皮膚など変形や可動する場所で使用する用途について評価を行う.