

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

液体金属で作る高精細配線技術、 フレキシブルデバイスにも期待

本研究のポイント

- ・フレキシブルデバイスの発展に伴い液体金属を用いた配線技術のニーズが高まっている。
- ・液体金属の微細配線を簡便かつ高い自由度で作る方法としてバブルプリント法を提案・実証した。
- ・液体金属コロイドの酸化被膜を銀に置換することで高い導電性を実現

【研究概要】

横浜国立大学の向井理特任助教、上野和英教授、丸尾昭二教授の研究グループは、生体適合性の高い液体金属であるガリウム-インジウム共晶合金 (EGaIn) を分散したコロイド溶液中で、レーザー光を走査し、レーザー誘起バブルによって粒子を集積化させる「バブルプリント法」を用いることで、自由度の高い高精細な微細パターンを作製することに成功しました。EGaIn は酸化により絶縁性の酸化被膜が生成し、これによって微細配線の導電性が低下する課題があったが、この酸化被膜を銀に置換することで、高い導電性 (約 1.5×10^5 S/m) を維持した配線を作製できることを実証しました。さらに、レーザー強度を調整することで、最小 $3.4 \mu\text{m}$ の微細配線の形成にも成功しました。液体金属を用いた配線技術は、フレキシブルあるいはストレッチャブルデバイスへの応用が期待されます。本研究成果は、国際科学雑誌「Nanomaterials」(2024年10月17日付) に掲載されました。

【研究成果】

レーザー加工技術は、非接触での加工、マイクロメートルからサブマイクロメートルスケールの高精度加工、高速加工など、多くの優れた特長を持ち、さまざまな分野で活用されています。レーザー加工は、光化学反応や光による熱、光圧を利用する方法など、いくつかの種類に分類できます。光化学反応を利用した代表的な技術としては、3Dプリントの一種である光造形法が知られています。光誘起熱を利用する選択的レーザー焼結法は、粉末材料を熱で溶かして固め、樹脂、金属、セラミックスなどの多様な3D構造を作製する手法です。また、光放射圧を利用した光操作は細胞や微粒子などの操作・配列に利用されていますが、高速パターンニングやさまざまな材質の粒子への利用には適していません。そのため、より汎用性が高く、多様な粒子を高速に集積できる方法として、レーザー誘起バブルを利用した「バブルプリント法」が用いられています。この方法では、レーザー光を基板あるいは液体に照射・吸収させて微小な泡を発生させ、その泡の周囲に生じる流れを利用して粒子を凝集させます (図1上)。しかし、これまでのバブルプリント法は固体粒

子のパターン形成のみが実証されており、液体コロイド粒子の配列は行われていませんでした。本研究では、バブルプリント法を用いて液体金属コロイド粒子（直径 $0.7\ \mu\text{m}$ ）をガラス基板上にパターンニングして、微細配線を作製しました。使用した液体金属は、室温で液体の性質を持つ材料であり、金属としての高い導電性（ $3.4 \times 10^6\ \text{S/m}$ ）を維持しつつ、液体であるため屈曲によって破断する恐れがなく、フレキシブルやストレッチャブルデバイスの配線に適しています。本手法は、ノズルを用いて塗布する方法やマイクロ流路に注入する方法などの従来技術に比べ、より簡便で高い自由度を持つ微細配線の作製法として期待されます。また、EGaIn は酸化により絶縁性の酸化被膜が形成され、導電性が低下する課題がありましたが、これを銀に置換することで高い導電性（約 $1.5 \times 10^5\ \text{S/m}$ ）を維持できることが確認されました。さらに、レーザー強度を調整することで最小 $3.4\ \mu\text{m}$ の微細配線が形成でき、作製した配線は少なくとも曲率 $0.02\ \text{m}^{-1}$ まで抵抗値にほとんど変化がないことが確認されました。

【実験手法】

一般的なバブルプリント法では、金属薄膜を有する基板上にレーザーを集光し、加熱してバブルを発生させる方法が知られています。しかし、金属薄膜上に導電性パターンを作製しても、短絡の問題により配線形成は困難です。これに対し、近年では、レーザー光を粒子に集光し、粒子の吸収によってバブルを発生させる方法が開発され、導電性粒子を用いた配線作製なども実証されています。本研究では、従来の固体粒子ではなく、液体金属コロイド粒子にレーザー光を集光し、発生させたバブルを用いて「ダンベル型」や「YNU」といった文字パターンを自在形成することに成功しました（図1下）。さらに、電気伝導性の観点から、EGaIn の表面に形成される酸化被膜が絶縁体として働き、十分な導電性が得られない問題に対し、ガルバニック置換を用いて酸化被膜を高い導電性を有する銀に置換し、導電性を改善しました。ガルバニック置換とは、卑金属を貴金属イオン溶液に浸漬した際に酸化還元反応によって卑金属が貴金属に置換される現象です。本研究では、卑金属としてEGaIn の酸化被膜を使用し、硝酸銀水溶液を貴金属イオン溶液としてガルバニック置換を行いました（図2上）。最適なガルバニック置換条件を調査した結果、約 $1.5 \times 10^5\ \text{S/m}$ の導電性を持ち、曲率 $0.02\ \text{m}^{-1}$ まで曲げても導電性が維持されることが確認されました。作製した配線が機能することは、発光ダイオードの点灯によっても確認されています（図2下）。また、レーザー強度を制御することで配線幅を調整でき、最小で $3.4\ \mu\text{m}$ の微細配線を得ることに成功しました。

【社会的な背景】

現在、モノのインターネット（IoT）の進展に伴い、ウェアラブルデバイスなどの曲面に対応するフレキシブルデバイスが求められており、液体金属はその配線材料として期待されています。このような背景から、液体金属を用いた配線技術として、マイクロ流路に液体金属を流し込む方法や、ナノサイズの凹凸を持つスタンプを使うナノインプリント法などが知られています。しかし、マイクロ流路法では配線サイズが $100\ \mu\text{m}$ 程度に制限さ

れ、ナノインプリント法では数 μm の配線が報告されているものの、ナノサイズの凹凸スタンプの製作にはコストが高く、自由な配線パターンを作るのは困難です。このような課題を踏まえ、本研究では、液体金属を用いた高い自由度を持つ微細配線パターン作製手法として、100 mm/s を超える高速描画や、サブマイクロメートルサイズの高精度パターン形成が可能なレーザー誘起バブルを用いた粒子集積技術「バブルプリント法」に着目し、EGaIn を用いた微細配線の作製を実証しました。

【今後の展開】

本研究では、高機能なフレキシブルあるいはストレッチャブルデバイスの社会実装に向け、液体金属を用いた微細配線を簡便かつ高い自由度で作製する手法として、バブルプリント法を提案・実証しました。今後は、フレキシブル基板を用いることにより、さらなる柔軟性や伸縮性の向上が期待され、有機デバイスなどの電子素子と組み合わせることで、ウェアラブルセンサーや医療デバイスなど多様な応用が見込まれます。(DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14201665>)

【本研究への支援】

本研究は JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (課題番号 JPMJCR1905) による支援を受けて行われました。

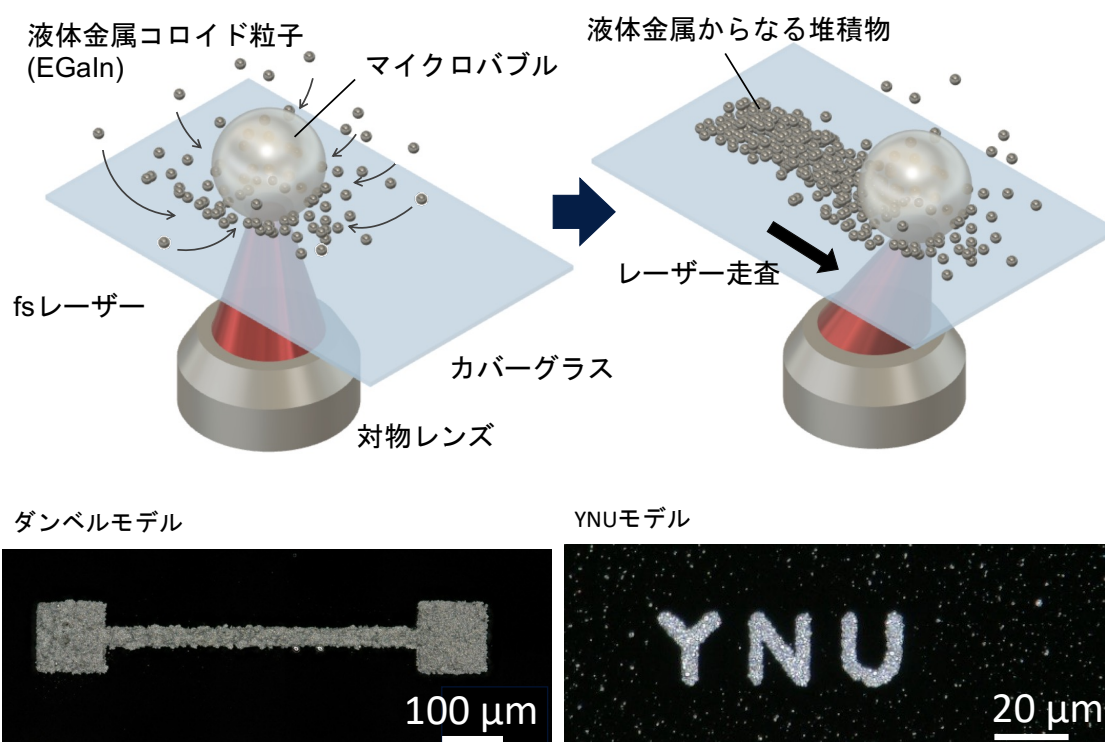


図1 バブルプリント法を用いた液体金属の描画の模式図 (上) と描画したダンベルモデル (下左) および YNU モデル (下右)

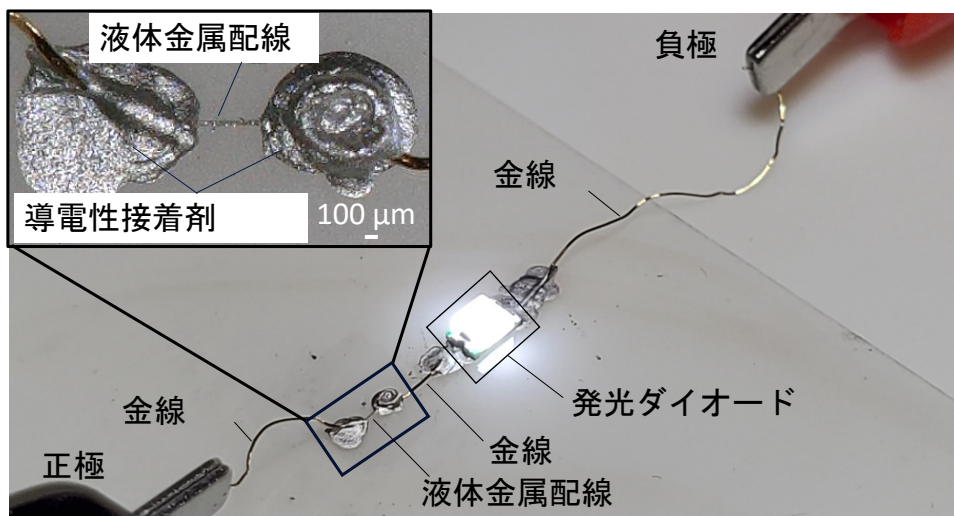
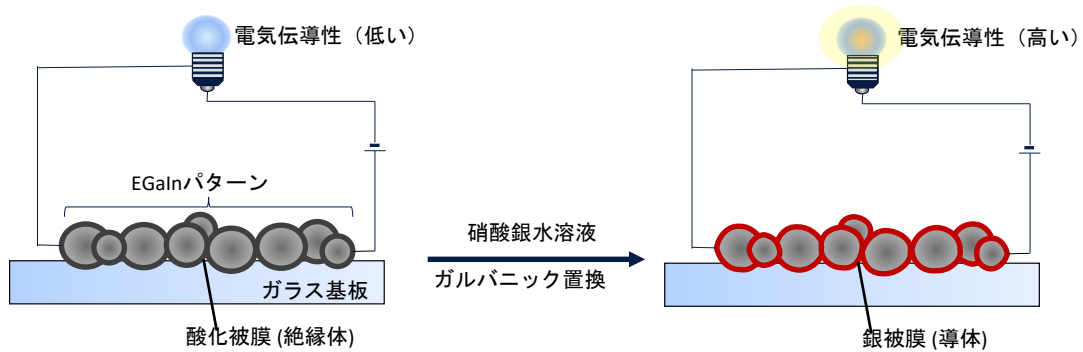


図2 液体金属配線のガルバニック置換の模式図 (上) および発光ダイオードの点灯から導電性を確認 (下)

本件に関するお問い合わせ先
 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 丸尾 昭二
 Tel : 045-339-3880 E-mail : maruo-shoji-rk@ynu.ac.jp