

# 地産地消型センシングに向けた植物の葉への電子回路形成の検討

湯村 翼\* 松田 裕貴†

**概要.** 環境モニタリングや生態観察など自然環境下でのセンシングが広く行われる。従来のセンサの設置は開発拠点で製作した装置を現地に運ぶ方式であり、輸送コストや設置環境への適応性、生態系への干渉、電子廃棄物の発生などの課題を抱える。これらの課題に対し、本研究では現地で入手可能な自然素材を用いてセンサを構築する「地産地消型センシング」を提案する。その第一段階として、植物の葉を基材とした電子回路形成を試みた。低出力レーザー加工機を用い、葉の表面を局所的に炭化させた結果、導電性の高いレーザー誘起グラフェンではなくアモルファス炭素が形成された。アモルファス炭素は絶縁体であるが、水分を介した際にイオン伝導による導電性が確認され、自然素材を用いたセンシングデバイス開発の可能性を示した。

## 1 はじめに

センシング技術の発展により、様々なセンサデバイスが自然環境下で利用される。多くの場合、センサ素子やマイコン、電源などを開発拠点で準備し、現地に輸送・設置する。この方式は、運用にいくつかの課題を抱える。第一に、設置環境への適応性が低い点である。事前準備時には詳細な設置条件が不明なため、地形や植生が想定と異なる場合に設置困難や誤作動が生じる。第二に、人工物の設置が生態系に影響を与える点である。人工的なセンサは野生動物の警戒対象となり、行動観察に支障をきたすおそれがある。第三に、機材輸送の負担である。山間部や湿地などアクセスの悪い場所では、輸送そのものが制約となり、大型センサでは顕著である。第四に、使用後の電子廃棄物の問題がある。機器の回収が困難な環境では、放置された機材が環境負荷となる可能性がある。

これらの課題に対し、我々は「地産地消型センシング」という新たなコンセプトを提案する（図1）。これは、植物の葉など現地で得られる自然素材を導電体や支持体として用い、センサ構造体を現地で製作する。これにより、輸送や設置の柔軟性を高め、環境や生物への影響を最小限に抑えることができる。電子部品は最小限とし、容易に着脱可能な構成することで、再利用や廃棄物削減にも寄与する。

本研究では、その第一段階として、植物の葉を基材とした電子回路形成の可能性を検討する。葉上に導電性回路を形成することで、植物自体を環境センシングデバイスとして活用できる可能性を探る。

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

\* 北海道情報大学

† 岡山大学

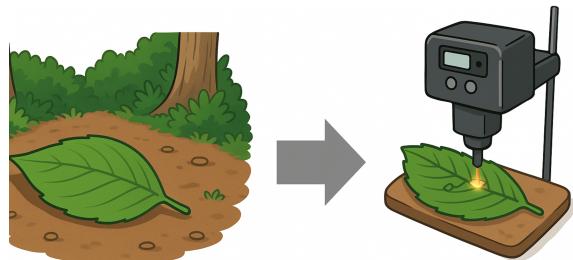


図 1. 地消地産型センシングのコンセプト。

## 2 関連研究

植物の葉や木材などの有機物への電子回路形成手法として、レーザー誘起グラフェン (Laser-Induced Graphene : LIG) [4] がよく知られる。有機物の表面に対してレーザーを照射し、高温の局所加熱を生じさせ、素材を炭化させて導電性のある炭素構造である LIG を生成する。LIG を応用したセンサ開発は多くの研究で進められている。Dubey ら [3] は、木材表面をレーザーで炭化させ、指触や水位変化に応答する容量型センサを構築し、高い感度と再現性を示した。Le ら [2] は、木や葉など自然素材の表面に LIG を生成し、電気配線や温度センサ、蓄電デバイスとして活用できることを報告した。これにより、フォトリソグラフィーを用いず自然素材から直接電子部品を作製する道を拓いた。また、Akter ら [1] は、LIG を用いたウェアラブルセンサの応用を概観し、人工皮膚や生体情報検出への展開可能性を示している。

LIG の形成には、一般的にフェムト秒レーザーが用いられる。しかし、装置が高価な上に大型のため、地産地消型センシングには向かない。石井ら [5] の手法では、パーソナルファブリケーションに用いられる連続波 (CW) レーザー加工機を使用してグラフェンを生成する。この手法では、木材に対して

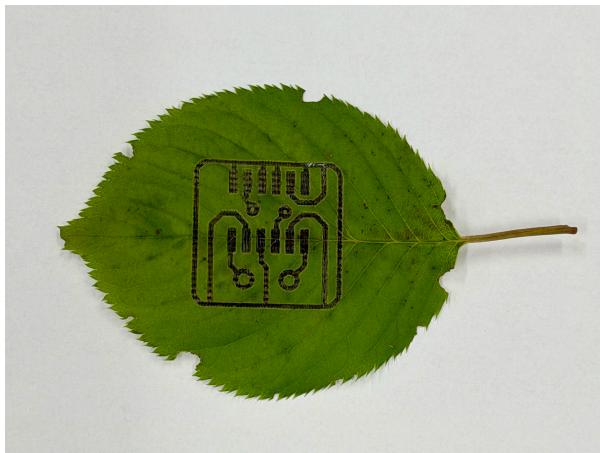


図 2. 葉の表面に形成した導電性回路。

レーザー照射を8~15回の繰り返し行うことで炭化層を生成する。一方、木材と比較して植物の葉は非常に薄いため、焼却してしまう点が課題である。本研究が目指す地産地消型センサの製造では、森林などの現場環境において小型のレーザー加工機を用いることを想定している。出力が数ワット程度の低出力レーザー加工機では、グラフェン構造を形成することは困難である。

### 3 実験

地産地消型センシングでの活用を想定する低出力のレーザー加工機でも、葉の表面を炭化することは可能である。この際に生成されるのは、主にアモルファス炭素である。これは黒色化して焦げた状態ではあるが、グラフェンのような結晶性を持たない。アモルファス炭素自体は本来導電性を示さないが、これを水で濡らすと特異な導電挙動が観察される。アモルファス炭化層の表面に存在する官能基由来の水素イオンが水中を移動することで、イオン伝導が生じると考えられる。この原理を利用して、レーザー加工した部分のみ導電性を得ることができる。

本研究では、出力1.6Wの低出力レーザー加工機FABOOL Laser Miniを用いて、植物の葉に対する炭化加工を試みた(図2)。試料となる葉は、北海道江別市の北海道情報大学の構内にて採取した。加工パラメータとして、レーザー照射の走査速度、出力パワー、刻印回数が設定可能である。これらの値を調整し、矩形パターンの刻印を行った。

形成されたアモルファス炭化層を水に濡らしてシート抵抗を測定した結果、最も良い条件で約200 k $\Omega$ /sq 程度の導電性が確認された。ただし、この値はセンサ応用を想定する上では十分とは言えず、さらなる導電性の向上が必要である。

また、乾燥した落ち葉に対して同様の条件でレーザー刻印を行ったところ、水に濡らさなくても約

3 k $\Omega$ /sq のシート抵抗値を示す導電性が得られた。この結果は、グラフェン構造の形成には至らなかつたものの、グラフェンを構成する sp<sup>2</sup>結合が部分的に形成されていると考えられる。低出力条件下でも一部の炭素構造が電気伝導を担う可能性を示唆する。

### 4 課題

実験を通して、植物の葉を対象としたレーザー加工には、いくつかの技術的課題が存在することを確認した。

**葉特有の形状による課題：**葉の表面は微細な凹凸を有しており、レーザーの焦点を物理的に安定して合わせることが難しい。このため、照射条件が一定であっても、位置によって炭化の程度が不均一になる傾向がある。また、葉は極めて薄く、含水量も少ないため、わずかな過照射によって容易に燃焼してしまう。特に乾燥状態の差が大きく影響し、同一種の葉であっても季節や採取条件によって最適な照射条件が変動する。

**葉の種類差による課題：**葉の種類によって組織構造や含有成分が異なるため、炭化反応の進行や生成物の性質にも差が生じる。したがって、異なる植物種に対しても安定して加工できるロバストな手法の確立が求められる。

**加工後の時間経過により生じる課題：**加工後の炭化層は時間経過とともに酸化や乾燥の影響を受け、その導電特性が変化する可能性がある。これらの要因を総合的に制御し、安定した電気的特性を長期的に維持することが、今後の重要な課題である。

### 参考文献

- [1] M. Akter, H. R. Anik, S. I. Tushar, I. S. Tania, M. K. H. Chowdhury, S. M. M. Hasan, and B. F. Bristy. Advances in functionalized applications of graphene-based wearable sensors in healthcare. *Advanced Sensor Research*, 3(2):2300120, 2024.
- [2] T.-S. D. Le, H.-P. Phan, S. Kwon, S. Park, Y. Jung, J. Min, B. J. Chun, H. Yoon, S. H. Ko, S.-W. Kim, et al. Recent advances in laser-induced graphene: mechanism, fabrication, properties, and applications in flexible electronics. *Advanced Functional Materials*, 32(48):2205158, 2022.
- [3] L. T. Rao, S. K. Dubey, A. Javed, and S. Goel. Laser induced graphene electrodes enhanced with carbon nanotubes for membraneless microfluidic fuel cell. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45:101176, 2021.
- [4] R. Ye, D. K. James, and J. M. Tour. Laser-induced graphene. *Accounts of chemical research*, 51(7):1609–1620, 2018.
- [5] 石井綾郁, 加藤邦拓, 池松香, 川原圭博, 椎尾一郎. CW レーザー加工機による木板の炭化を利用した回路基板作成手法. コンピュータ ソフトウェア, 40(2):2\_129–2\_145, 2023.

## 未来ビジョン

自然素材の導電化は既存の技術に基づくものであるが、その対象を、人工的に整えられた基材から、自然環境に存在する葉や枝といった多様で不均質な素材へと拡張する点に本研究の新規性がある。自然界の素材を直接活用し、安定的な導電性を得るためにには、実際のフィールド環境での検証が不可欠であり、これは未知領域への挑戦である。本研究は、そのような探索的実証を通じて、自然物に潜在する物理的・化学的機能を工学的資源として再定義する試みである。

本研究の最終的なビジョンは、樹木や葉、土壌といった自然素材が、単なる環境因子ではなく

く自らセンシングする基盤として機能する未来を実現することである。これにより、センシングデバイスの製造・設置・廃棄といった人工的プロセスから脱却し、環境そのものが情報を発する新しいセンシング生態系の構築が可能となる。

地産地消型環境センシングが実現すれば、機材輸送の負担、生態系への干渉、設置環境への適応性不足、電子廃棄物の発生といった従来型センシングの構造的課題を根本的に解決できる。本研究は、センシング工学と材料科学の境界を超えて、自然とテクノロジーが協調する新たな学術体系を拓くとともに、持続可能な社会基盤の実現に向けた新しいパラダイムを提示する。