

研究終了報告書

「超高密度センサ網の実現に向けた「土に還る」センサデバイス基盤技術の創成」

研究期間： 2021 年 10 月～ 2024 年 3 月

研究者：春日 貴章

1. 研究のねらい

環境情報を収集しサイバー空間に情報を送信するセンサデバイスは、現実空間とサイバー空間を繋ぐ窓口といえる存在である。センサデバイスの設置数が増えれば増えるほど、得られる環境情報は増加し、データ利活用による豊かな「人間中心の社会」の実現に近づく。しかし現実的には、環境中に設置できるセンサデバイスの数には制限がある。センサデバイス設置数を増やす上で最大のボトルネックが、設置後の管理・回収の問題である。現状の非分解性のセンサデバイスでは設置後の管理・回収が前提となる。環境や回収コストに配慮した数・場所への設置しか許容できず、収集できる環境情報の量・質は制限されている。本研究では、上述の課題を解決可能な「分解性センサデバイス」の実現に向けた基盤技術の創成を目指した。分解性センサデバイスとは、環境情報収集・送信機能と使用後の分解性を兼ね備えた新しいコンセプトのセンサデバイスである。最終的に分解するため回収の必要がなく、定期的な更新作業を繰り返すだけで望み通りの場所から大量の良質な環境情報を収集できる可能性を秘めている。本研究では、材料・プロセス・回路設計・情報処理を含む多面的なアプローチから必須課題を解決し、自然のサイクルと調和した分解性センサデバイス技術の基礎を築くことを目的とした。

2. 研究成果

(1) 概要

センサデバイスに必須の機能として、センシングと情報発信機能の 2 つが挙げられる。センシングとは、温度、湿度、土壌含水率等の環境情報を他の情報機器で処理可能な信号に変換する機能を指す。情報発信機能とは、センシングした情報を無線等を用いて外部に発信する機能を指す。加えて、センサデバイスを屋外の不特定な位置に設置する場合、位置情報も併せて発信する必要がある。分解性センサデバイスにおいては、センシング、情報発信の 2 機能を、生分解性材料など環境負荷の低い材料のみで実現する必要がある。本研究では分解性センサデバイスを実現する上で必要な基盤技術として、①低環境負荷な配線材料および実装手法、②生分解性封止技術、③環境情報と位置情報を同時発信可能なデバイス設計及びセンシングシステムの 3 つを設定し、それぞれ達成している。また、開発した基盤技術を複合することで、分解性土壌含水率センサデバイス及びセンシングシステムを開発することに成功した。開発した土壌含水率センサは、生分解性紙基板、錫印刷配線、炭素製の発熱素子、ワックスコーティングのみで構成される(図 1a)。開発したセンサデバイスは無線給電で駆動し、設置した土壌の含水率情報を熱信号として発信する。センサデバイスが発信した熱信号は設置位置を俯瞰して撮影可能な位置に取り付けられたサーマルカメラで撮影され、発熱位置はセンサデバイスの設置位置として、発熱温度は土壌含水率として収集され、瞬時にマッピングされる(図 1b)。開発したセンサデバイスは生分解性材料と環境に配慮した無機材料のみで構成さ

れているため、使用後は環境中で大部分が分解し、土に還る。また、土に還るだけでなく、紙基板に予め肥料成分を配合しておくことで、「センシングできる肥料」としての応用も可能である（図 1c）。

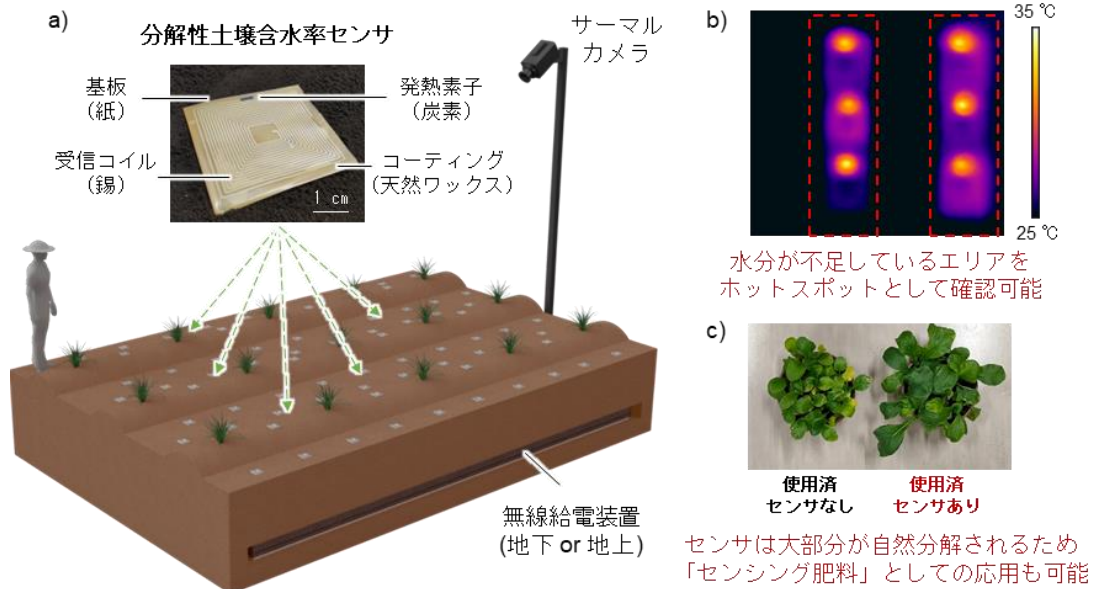


図 1 a) 本研究で開発した分解性土壌含水率センサ及びセンシングシステム。b) センサ位置及びセンシングした土壌含水率は熱信号として発信され、サーマルカメラで収集される。c) 設置後に回収しない特徴を活かした、「センシング肥料」などの応用も可能。

(2) 詳細

研究テーマ A 「低環境負荷な配線材料および実装手法の開発」

現状、生分解性と十分な導電性を兼ね備えた導電性材料は存在しない。そのため分解性センサデバイスの開発においては、使用後に環境中に残留することを前提として使用する配線材料を選定する必要がある。本研究では新たな配線材料として、錫印刷配線の開発を行った。錫は一般的に配線材として使用される銅、銀等と比較して生分解を阻害せず、植害も引き起こしにくい（図 2）。本研究では環境負荷の低い印刷実装技術に着目し、生分解性樹脂（シェラック）をバインダーとする錫印刷配線を調製し使用した。開発した錫系インクを用いることで、印刷、ホットプレスという単純な手順で紙基板上に十分な導電性を備えた配線を実装することに成功した。

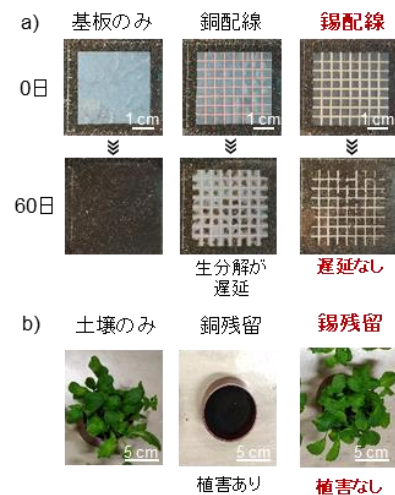


図 2 錫印刷配線を用いた a) 生分解性試験及び b) 植害試験結果

研究テーマ B「生分解性封止技術」

天然の疎水性材料であるシェラック及びワックス(カルナバワックス、ライスワックス)について、センサデバイス封止材としての評価を行った。ワックス類、シェラック共に、封止材が生分解によって損傷するまでは一定の防水・防湿性能を示すことが確認できた。また、土壤中における生分解速度も封止材料によって異なることが確認でき、封止材による生分解速度制御の可能性が示された。

研究テーマ C「環境情報と位置情報を同時発信可能なデバイス設計及びセンシングシステム」

本研究ではセンシングの対象として土壌含水率を選択した。開発したセンサデバイスは生分解性紙基板、錫印刷配線で実装したコイル、発熱素子(炭素)、ワックスコーティングで構成される(図 3)。デバイスへの電力供給は、紙基板上に実装されたコイルへの無線給電によって行われ、供給された電力は発熱素子で熱に変換される。この時、伝送効率は送信コイルとセンサデバイス上の受信コイルの自己共振周波数の一致度に左右される。紙基板上に実装されたコイルの自己共振周波数は土壌含水率(誘電率)によって変化する。そのため、土壌含水率が変化すれば、受信コイルへの電力伝送効率が変化し、発熱素子の温度変化となって出力される(図 4)。設置位置全体を俯瞰できる位置にサーマルカメラを設置しておけば、発熱位置からセンシング位置が、発熱温度からその位置の土壌含水率が推定できる。即ち、センサデバイスを対象エリアに大量に設置し、サーマルカメラで撮影すれば、土壌含水率分布を瞬時にマッピングできる(図 5a)。開発したセンサデバイスは環境に配慮した材料のみで構成されているため環境中に残留しても大部分が分解し、残留する物質も環境に悪影響を与えない(図 5b)。既存のセンサデバイスでは不可能な超高密度なセンサ網の構築が可能であり、持続可能性に配慮した新たなセンシング技術として期待できる。

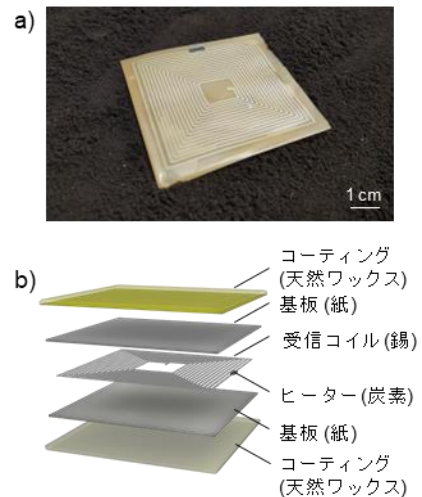


図 3 a) 開発した土壌含水率センサデバイス外観及び b) 構成図

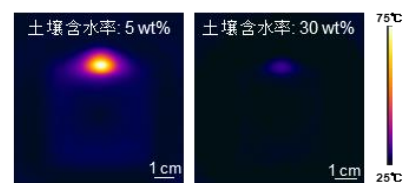


図 4 開発したセンサデバイスは無線給電で駆動し、設置位置の土壌含水率を熱信号として発信できる。

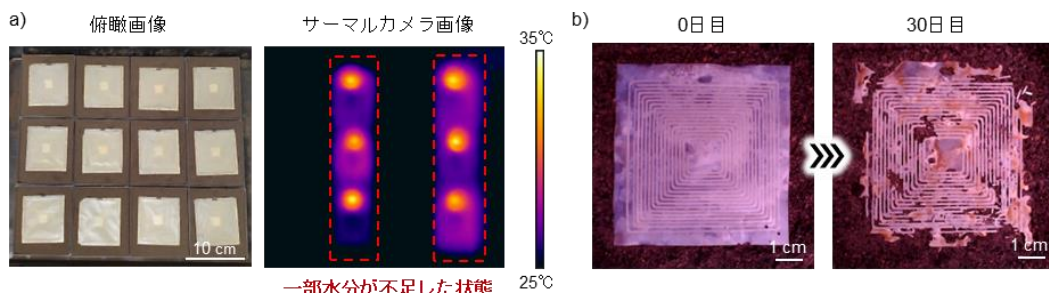


図 5 a) 複数のセンサデバイスを用いた土壌含水率マッピング b) センサデバイス生分解性試験

3. 今後の展開

まず、本研究で開発したセンサデバイス及びセンシングシステムの更なる改善が必要である。具体的には、炭素配線など非金属配線の検討、環境発電による独立駆動などが挙げられる。また、今回はセンシング対象として土壌含水率を選択したが、その他の環境情報(土壌 pH、肥料成分、ガス、放射線など)への展開も検討している。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

当初の目的は概ね達成することができたと考えている。設定した 3 つの基盤技術について、十分な知見を蓄積し、その集大成となるセンサデバイス及びセンシングシステムを提案することに成功している。加えて、当初の予定にはなかったセンシング肥料への応用についても提案することができた(研究成果リスト(1)-1)他、研究を進めていく中で非常に有望な派生技術(研究成果リスト(1)-2)を複数得ることに成功しており、全体として期待以上の成果を上げることができたと考えられる。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究代表者が主体的となって、円滑に研究を遂行することができた。研究遂行に必要な装置(3D プリンタ、高周波アンプ等)や消耗品及び研究成果のアウトリーチに必要な各種経費は、支給された研究費で十分に賄うことができ、円滑に研究を進めることができた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究によって、今後の分解性センサデバイス開発において意義のある基盤的な結果及び方向性を示すことができたと考えている。研究成果は既に国際学術誌に論文として発表(研究成果リスト 1)しており、プレスリリースも行うなど積極的にアウトリーチ活動を行っている。得られた成果はテレビ報道も行われるなど、社会的な注目度も高い。一方で、開発したセンサデバイス及びセンシングシステムあくまでコンセプトモデルであり、即座に社会実装できるものではない。実用性向上に向けた改善が必要であり、今後更なる研究が必須である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 6 件

1. **Takaaki Kasuga**, Ami Mizui, Hirotaka Koga, Masaya Nogi, Wirelessly Powered Sensing Fertilizer for Precision and Sustainable Agriculture. *Adv. Sustain. Syst.*, 2023, 2300314

紙基板、低環境負荷な金属配線、天然ワックスなど、環境に配慮した材料のみで構成された土壌含水率センサデバイスと、画像処理技術を用いることで位置情報及び含水率データを同時取得可能なセンシングシステムに関する研究。

2. Takaaki Kasuga, Tsuguyuki Saito, Hirotaka Koga, Masaya Nogi, One-Pot Hierarchical Structuring of Nanocellulose by Electrophoretic Deposition. *ACS Nano*, 2022, **16**, 18390-18397

紙基板の原料(セルロースナノファイバー、CNF)を対象とする新たなプロセス技術に関する研究。CNF の電着現象に注目し、発展させたことで、簡便な装置・手順で高自由度な配向・高次構造を可能とするプロセス技術を新たに開発することに成功した。紙基板の立体成型や生物模倣、パターンニングなど、多種多様な応用が可能。

(2)特許出願

研究期間全出願件数: 2 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演:春日貴章、環境と調和したセンサデバイスの実現に向けたセルロースナノファイバー応用、機能性フィルム研究会 2022 年 1 月 共済例会、2022 年 1 月 26 日

招待講演:春日貴章、ナノセルロースの電氣的配向・立体成型技術、第 62 回機能紙研究発表・講演会、2023 年 11 月 21 日

テレビ報道:サイエンス ZERO「樹木が生んだ魅惑の素材!進化するセルロースナノファイバー」、2023 年 2 月 12 日

テレビ報道:ガリレオ X「自然に還る!驚異の材料革命 循環型社会の実現に貢献する生分解テクノロジー」、2023 年 11 月 26 日

新聞報道:科学新聞「環境にやさしい「土に還るセンサー」 阪大産研が開発」、2023 年 11 月 3 日