

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19196

研究課題名（和文）多点同時に広域植生の環境ストレスを測定するグリーンヘルスセンサネットワークの創出

研究課題名（英文）Green health network for plant monitoring in a wide-area and multi-points

研究代表者

宮本 浩一郎（Miyamoto, Ko-ichiro）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70447142

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：現在、急激な環境変動に対する植物の生理応答・ストレス評価は喫緊の課題となっている。そこで本研究では植物の葉に取り付けるセンサを着想し、測定システムを構築した。センサ部が葉裏に固定され、葉の同一箇所でも反射分光測定を連続して行う新規の測定系である。屋外でも測定システムを運用するために構成や機能を整備することによって、バッテリー駆動で長時間測定を繰り返し、データを無線送信することが可能となった。測定システムの信頼性を検証し、屋外において樹木の紅葉を長期モニタリングすることにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通じて、植物に取り付けるユニークな分光測定システムを開発した。葉の裏面にセンサを固定して測定を行うことで再現性の高い測定が可能となった。また、測定システムを屋外で運用できることを葉が紅葉する過程の連続測定から実証した。さらに、測定データは市販の分光光度計と高い相関を示しており、今後は広域あるいは個体内で多点同時測定を行うことも可能となるため、植物学、森林生態学、農業など幅広い領域で活用されるポテンシャルを有する。

研究成果の概要（英文）：The monitoring of plant stress and responses is a significant challenge these days. In this study, we developed a plant sensor to perform spectroscopic measurements of plant leaves. The sensor is directly attached to the backside of the plant leaf and repeats the reflection measurement. The collected data is sent to a cloud storage via wireless communication. The reliability of the sensor system was verified, and long-term monitoring of leaf coloring was also performed.

研究分野：センサ工学

キーワード：植物センサ IoTセンサ 植物生理学 分光測定

1 研究開始当初の背景

現在、急激な環境変動に対する植物の生理応答・ストレス評価は喫緊の課題となっている。植物工場やビニールハウスなど限定空間においては各種センサによる植物モニタリングが報告されている。しかし、森林や大規模農場などの広域で植生の生理状態の測定は簡単ではない。学術調査では大型観測タワーを建設する例はあるものの汎用的な解決ではない。また、市販機器による植物個体・個葉レベルは精度の良い測定が行えるが、煩雑な測定を多点で実施することは困難となる。

上記の理由から、ドローン・航空機・衛生により上空からの観測データを用いて植生の分析を行う、リモートセンシング技術も検討されている。しかしながら、カメラ撮影や分光測定では植生の表面の情報しか得られず、植生全体の正確な生理情報を反映しない。単純な植物群落であっても、気温・日照・風・湿度など様々な気象条件が葉の一枚ごとの代謝に影響するため、個体・個葉レベルの特性値で群落全体へのストレスを類推することは困難である。結局のところ植物種別にそれらの情報を補正するためのモデルを開発せざるを得ないのが現状であり、ブレイクスルーとなる新しい手法が希求されている。

2 研究の目的

我々は、植物のストレス指標をフィールド内で多点同時にその場観察するグリーンヘルスセンサネットワーク構築の着想を得た。本研究では葉に直接取り付け単体動作する超小型の分光観察ユニットを開発し、環境変化によるストレス・代謝変化のリアルタイム測定に挑戦する。温度・湿度など様々なセンサを搭載し、測定対象周囲のごく狭い領域の気象データ（微気象データ）と分光データを同時取得できる可能性もあり、個葉レベルのマイクロな知見を多点測定で集積する測定系の構築が期待できる。

本研究は、現在の環境変動に対する植物の生理応答・ストレス評価・微気象データを多点同時に簡便に取得し、リアルタイムにシェアして植生の健康状態（グリーンヘルス）を多元的にモニタする研究形態を提案する。

3 研究の方法

本研究では葉の裏側からの光学測定を行う。センサ受光部は葉の裏側に固定される（図1a）。この配置は葉への日照を遮らず光合成への影響を低減でき、長期連続測定に適する。さらに、センサと試料の距離が固定され同一箇所を繰り返し測定するため、データ精度と再現性の向上が期待される。

センサ受光部には市販のカラーセンサを用いた。加えて、測定光源として白色LEDが搭載される（図1b）。葉の裏面の反射率をカラーセンサで測定するため、あらかじめ白色板を用いたリファレンスペクトルを取得してからセンサを葉裏に固定する。最初にLEDを消灯して環境光スペクトルを取得し、その後LEDを点灯して再度スペクトルを取得する。LED点灯前後の差分が葉を透過する環境光を除いた葉裏の反射スペクトルである。さらにこれを白色板のリファレンスペクトルで除算して反射率が得られる。このようにして環境光の変動によらず昼夜を通じた連続測定が可能となる。

このような反射分光測定を屋外で実施するには、測定システムの①防水製および耐候性を確保②省エネ性能の向上③センサの取り付け手法の確立④クラウド上の測定システムの整備などが必要である。本研究の期間中にはこれらの要素を順に検討して測定システムを設計および実装した。製作したシステムを活用し、東北大学・東京大学・京都大学・静岡県熱海市で屋内および屋外の実証実験を実施した。

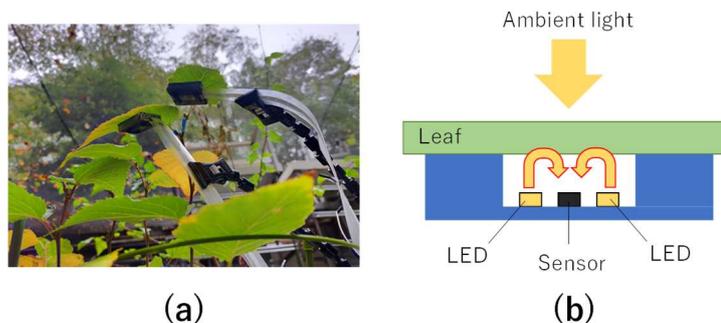


図1：測定原理 (a) 葉の裏面へのセンサ固定 および (b) 反射分光測定

4 研究成果

(1) 測定システムの設計と実装

測定システムは、電源部・制御部・センサ部の3つに分割される(図2a)。屋外で長期運用を行うためには、制御部については待機電力が小さく、無線通信機能が搭載されていること、センサ部へのコマンド送信が求められる。現在市販されている制御ボード(ESP32-dev-kit等)は待機電力が大きいものが大部分であるため、機能が制限されていても待機電力が小さい制御ボードを選定して使用した。

電源については、遠隔地で屋外の設置を考慮すると、リチウムポリマバッテリーは過熱・発火のリスクが看過できない。そこでカメラ等で使用される信頼性の高いリチウム乾電池を採用し、低消費電力の電圧レギュレータと組み合わせて制御ボードに必要な電源を供給することにした。

防水製や耐候性については、電源部・制御部の格納容器と、センサするヘッド部に分割して検討した。それぞれを3D CADでケースを設計し、3Dプリンタで出力した。防水性を高めるために各パーツは塗装し、接合部はシリコンシーラントで密封した。

本測定システムでは、見通し10~20メートル程度の無線通信が可能となり、樹木に設置した測定システムのデータを、付近の建物に設置したWiFiルータを通じてクラウドストレージに転送可能であることを確認した。また、バッテリー駆動能力も60分ごとの分光測定を42日間(約1000回測定)に渡って行うことに成功した。

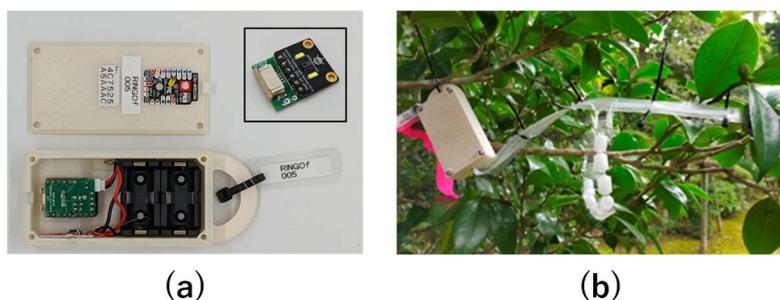


図2: 測定システム (a)概観 および (b)屋外運用の参考図

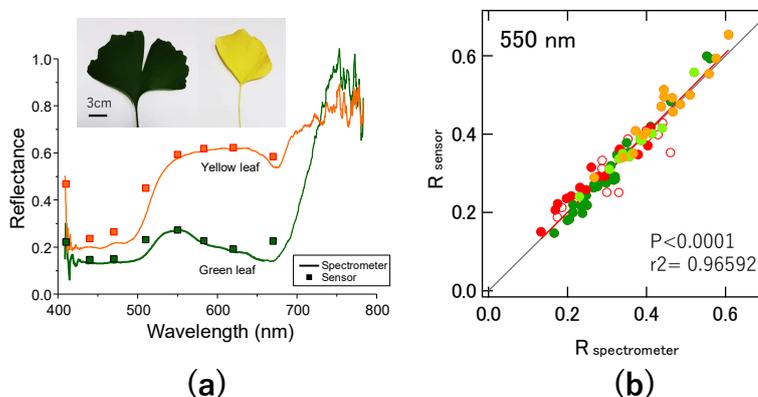


図3: 信頼性の検証 (a)イチョウ葉の反射スペクトル および (b)波長毎データの一部

(2) 信頼性の検証

本研究では受光部に市販のカラーセンサを使用したため、植物に取り付けた場合の信頼性を検証する必要がある。図3aはイチョウ葉の反射スペクトルを取得した例である。健全な葉(緑色)では550nm付近にピークがあり、紅葉した葉(黄色)ではさらに長波長側で反射率の増加が見られる。本研究で使用したカラーセンサは8波長のチャンネルがあり、汎用分光器で得られた反射スペクトルとよく一致した。

さらに検証を進めるため、31種類の植物から収集した91枚の葉のサンプルを測定しカタログデータを構築した。チャンネル毎にデータを抽出および解析を行った。代表例として図3bに550nmの相関図を示す。センサ測定値は汎用分光器で得られた反射率と高い相関が得られた。これ以外の波長に関しても、8チャンネル中6チャンネルで高い相関が得られた。相関が低い2チャンネルは測定光の白色LEDの波長域より外側にあり、測定光強度の不足により著しくS/N比が低下したためと考えられた。

(3) 紅葉による葉色変化のモニタリング

測定システムを用いて屋外で長期連続測定を行った。試料はダケカンバの樹木であり、晩秋から冬にかけて紅葉する。図 4a は反射率の変化を示しており、各波長で連続した変化が観測された。これはセンサが葉裏に固定されている効果であり、同一箇所を繰り返し測定することで、わずかな反射率変化が測定データに反映されている。センサを取り付けた葉は 12 日目に落葉しており、反射率が一律に低下している時間帯に該当する。センサは葉裏に固定されたままであるため、葉が乾燥し茶化していく過程も測定データに含まれている。

一方、図 4b は葉を透過する環境光の時間変化であり、測定ごとの日照変化を表している。個葉レベルの日照量は、葉の光合成活性や葉温に関わる重要な微環境情報であり、このような日照モニタリングは他に例がない。今後は気温、湿度等のセンサをセンサヘッドに追加することで、詳細な微環境測定が可能になる。

さらに、図 4c は日ごとの葉色の変化を示す光学像である。図 4a から日ごとにデータを抽出すると、取得された反射スペクトルは葉色を良く反映した。今後は 4.2 で検証したカタログデータを参照することで、遠隔からでも葉色変化を推定することも可能となる。

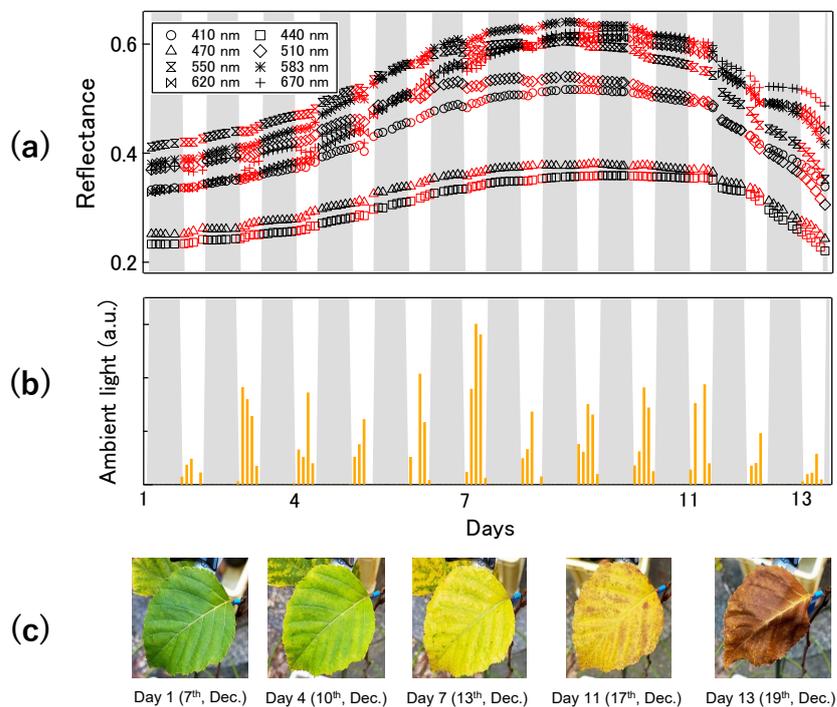


図 4: 葉色変化のモニタリング (a)反射率変化 (b)日照変化 および (c)葉の光学像

(4) フレキシブル基板を用いた軽量化

小型分光センサを植物の葉に取り付けて屋外測定を行う上で、センサは軽量でかつ柔軟性に富むことが望ましい。そこで、フレキシブル基板を用いて、センサヘッドとケーブルが一体化したフレキシブルセンサの製作を行った。最初に実装したセンサヘッドには駆動電源を供給するための電圧変換回路、ロジックレベル変換機能なども搭載され葉への取り付けに課題があった。

新規構造の検討にあたっては、センサ部がフィールドワークで風雨にさらされることを考慮し、フレキシブル基板には最小限の部品のみを配置した。それ以外の機能は測定システムの本体側で実現するために制御ボード側のシールド基板を新規に設計・製作した(図 5a)。センサヘッドを図 5b に示す。大きさは長さ 200 mm×幅 7mm、厚さ 1.4 mm (スペーサ除く)で、部品実装後の基板重量は 0.32g となり、葉へ取り付け際のスペーサを含めても 1g に満たない。このように、柔軟性が高く葉に取り付けてもストレスを与えない超軽量のセンサヘッドを開発した。センサの設置例を図 5c に示す。今後はこのセンサヘッドを用いた長期連続測定を行う。

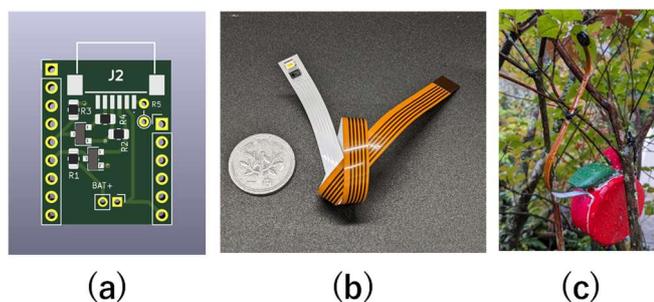


図 5: フレキシブル基板を用いた軽量化 (a)概観 (b)シールド基板 および (c)設置例

(5) 外部発表

- 「超小型センサによる植物生理応答の長期遠隔モニタリング」上妻馨梨, 宮本浩一郎 (第 64 回植物生理学会年会, 2023 年 3 月 10-17 日, 仙台)
- 「カラーセンサを用いた植物葉 IoT モニタの開発および長期屋外稼働による連続観察」宮本浩一郎, 上妻馨梨 (第 70 回応用物理学会 春季学術講演会, 2023 年 3 月 15-18 日, 東京)
- 「植物葉 IoT センサの機能拡張によるクロロフィル蛍光測定」宮本浩一郎, 種子田春彦, 上妻馨梨 (第 71 回 応用物理学会 春季学術講演会, 2024 年 3 月 22-25 日, 東京)

上記以外の発表予定

- “Basic study to detect the chlorophyll fluorescence of plant leaf using an industrial color sensor” Ko-ichiro Miyamoto, Kaori Kohzuma, Kentaro Ifuku and Tatsuo Yoshinobu (International Conference on Molecular Electronics & Bioelectronics, 2024 年 6 月 19-21 日、島根) *Accepted*.
- “Analysis of plant physiological responses based on leaf color changes through the development and application of a wireless plant sensor device” Kaori Kohzuma, Ko-ichiro Miyamoto (Submitted to *Sensing and Bio-Sensing Research*) *Under the review*.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮本浩一郎, 上妻馨梨
2. 発表標題 カラーセンサを用いた植物葉IoTモニタの開発および長期屋外稼働による連続観察
3. 学会等名 第70回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上妻馨梨, 宮本浩一郎
2. 発表標題 超小型センサによる植物生理応答の長期遠隔モニタリング
3. 学会等名 第64回植物生理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮本浩一郎, 上妻馨梨
2. 発表標題 植物葉IoTセンサの機能拡張によるクロロフィル蛍光測定
3. 学会等名 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	上妻 馨梨 (Kohzuma Kaori) (70704899)	京都大学・農学研究科・助教 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------