

修士学位論文要約（令和 4 年 3 月）

大面積化学イメージセンサ上の植物育成と根圏 pH 観察に関する研究

鈴木 若奈

指導教員：吉信 達夫， 研究指導教員：宮本 浩一郎

Observation of plant growth and pH distribution in rhizosphere by a large-area chemical imaging sensor

Wakana SUZUKI

Supervisor: Tatsuo YOSHINOBU, Research Advisor: Koichiro MIYAMOTO

We measured the pH of the rhizosphere of radish by using a large-area chemical imaging sensor based on a LAPS. The system is required to record the optical view of the growing plant and to measure the pH distribution in the rhizosphere in the course of the growth of the plant on the sensor. In this study, a large-area chemical imaging sensor plate was used, which can measure an area of 100 mm in diameter. In this measurement system, the LED light that illuminates the sensor was moved two-dimensionally by X-Y stages. In addition, a camera and a LED light were installed in the shield box to automatically record time-lapse photos and to control daylight hours, respectively. When the sensor area is large, the sensor signal is remarkably affected by the return current due to the capacitive coupling. The return current was reduced by the counter electrode that collected the signal current regardless of the distance from the irradiation position to the electrode. Eventually, we measured the pH change around the root of radish while growing the plant on the sensor.

1. はじめに

植物は我々の身の回りに豊富に存在し、地球上の生態系を保つために非常に重要な役割を担っている。一年間に形成される根の量は地上部の量を遥かに上回り、我々の目に見える植物の地上部はあくまで一部にすぎない。従って根やその周辺の土壌について知ることは、植物の物理的、化学的、生物学的な解明につながる。しかし根系の観察は困難であり、特殊な技術を必要とする。

本研究では LAPS センサの大面積化とそれを用いた測定システムの開発を行った。また、開発した測定システムを用いて、カイワレダイコンの生長に伴う根圏 pH の経時変化観察を行い、構築したセンサの性能を評価した。

2. 原理

2.1. LAPS

LAPS は変調光を照射することにより交流光電流が流れ、この値によってセンサ面上の溶液の pH やイオン濃度を測定する半導体化学センサである。LAPS の模式図を図 1 に示す。LAPS は、シリコン基板上に SiO₂ と Si₃N₄ の積層から成る絶縁層を形成し、Si₃N₄ 表面に測定試料である溶液を接触させた、電解質溶液、絶縁層、半導体の EIS 構造を持つ。Si₃N₄ 面が pH 感応部として機能し、外部からバイアス電圧を印加した状態でシリコン基板に変調光を照射すると、光励起により外部回路に交流光電流が流れる。この光電流値は半

導体内の空乏層幅に依存するが、空乏層幅はセンサ面である Si₃N₄ 表面の電荷が、溶液の水素イオン濃度に応答することにより変化する。したがって、外部回路に流れる交流光電流の振幅値を計測することで照射領域における試料の pH 測定が可能である[1]。

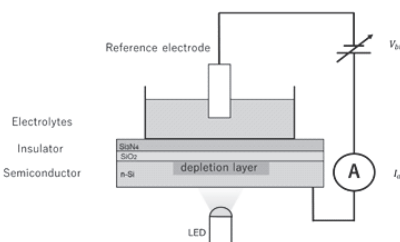


図 1 LAPS の模式図

2.2. 大面積センサ

本研究で用いた大面積センサの概要図を図 2 に示す。LAPS における等価回路は空乏層容量、絶縁層容量を用いて表されるが、先行研究において、変調光を照射していないセンサの非照射領域の溶液と基板との容量結合により戻り電流が発生することが指摘されている[2]。センサを大型化すると、非照射領域の面積に比例して容量が増大するため、図のように戻り電流の影響をさらに顕著に受ける可能性がある。

戻り電流による信号強度の減衰は、結果として SN 比の低下を招くため、実用化の上で大きな課題となり得る。そこで、対極を用いて光照射位置から電極までの距離に関係なく電流を回収することで、戻り電流を減少させた。

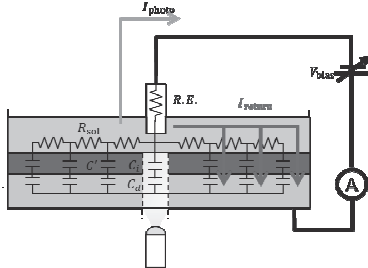


図2 センサの非照射領域における戻り電流の発生

3. 測定システムと測定方法

図3に、植物用大面積測定システムの概略図を示す。本研究では、センサ上で植物を生育しながら光学像の取得をし、同時に根圏のpH測定を行う。

LAPSを用いた測定では、外部からの光や電磁波ノイズを遮断する必要があるため、シールドボックスの中で測定を行った。シールドボックスの寸法は、幅600mm、高さ670mm、奥行き450mmである。直径100mmの面積を測定できる大面積化学イメージングセンサを使用した。本測定システムでは、センサを照射するLEDをX-Yステージで2次元的に移動させた。また、シールドボックス内にはカメラとLED照明を設置し、根の伸長と根圏のpHの変化を1時間ごとに記録した。

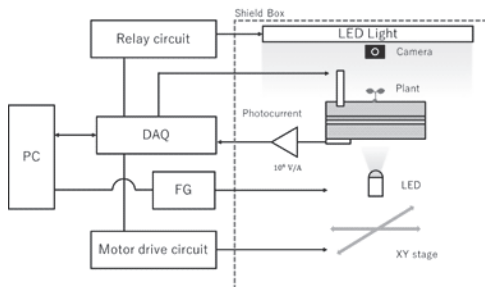


図3 植物根圏pH測定システム

4. 測定結果

大面積センサを用いた測定の結果を5時間ごとにまとめたものを図4に示した。上段は光学像、下段は正規化電流分布像の0hからの差分を換算して得られたpH変化分布像であり、その下に経過時間を示している。pH変化量画像の算出では、時間による電流レベルのばらつきを補正するために、バイアス電圧-2Vにおける電流値で正規化を行った結果としている。

光学像では、センサ左上方向に根が伸長しており、それに伴ってpHが低下しているように見えるが、pHの低下領域と根の形状の明確な対応は確認できなかった。

次に、根の伸長した領域を拡大して各時刻の画像とその10時間前の画像の対応する画素値の差分を求めた結果を図5に示す。図5より電流値が上昇している領域と根の形状の対応が確認できた。

植物根圏において、pHが上昇する原因としては播種～発芽の段階で種子よりカリウムイオンが放出、培養液中の水素イオンが減少した場合、枯れ始めの段階で水素イオンが減少した場合などが知られているが、本実験において具体的な代謝活動の特定には至らなかった。

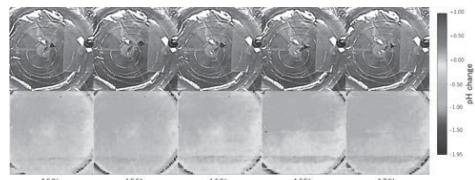


図4 大面積センサによるpH測定結果

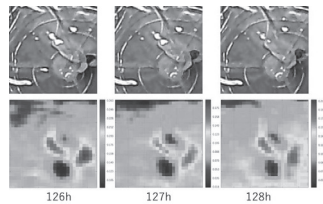


図5 電流値の上昇領域と根の形状の対応

5. まとめ

本研究では、半導体化学センサの一種であるLAPSを用いて、従来よりも大型な試料である植物根圏のpH測定を行った。そのために、大面積センサの使用および植物の育成において生じる問題点に対し測定系の調整を行って、測定環境を整備した。また、実際にカイワレダイコンを用いて、植物の生育、観察を同時に行いながら、根周辺のpH測定を行った。

今後の展望として、ソフトウェアの開発によりpH変化を自動検出してズームインできる機能の追加や、側根周辺の詳細なpH変化を検出できるよう分解能の向上が望まれる。

文献

- 1) M. Nakao et al., Sens. Actuators B, vol. 20, pp. 119-123 (1994).
- 2) A. Poghossian et al., Sens. Actuators B, vol. 244, pp. 1071-1079 (2017).