

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01390

研究課題名（和文）植物体内情報を「面」で捉えて可視化するCMOSマルチモーダルイメージセンサ

研究課題名（英文）CMOS Multimodal Image Sensor for Visualizing Two-Dimensional Information in Plants Body

研究代表者

野田 俊彦（Noda, Toshihiko）

豊橋技術科学大学・次世代半導体・センサ科学研究所・准教授

研究者番号：20464159

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：次世代スマート農業での活用を見据えた植物刺入型センサを開発した。本センサは植物体内のイオン情報を直接計測するものであり、茎に刺入して取得したイオンイメージの、どの部分が師管に相当し、どの部分が道管の情報なのか同定できるようにした。これによって植物体内の部位ごとに異なる情報を正しく計測可能とした。単一イオンだけでなく複数イオンの同時計測や電気伝導度の計測も実現し、1ヶ月以上の連続計測によってセンサの耐久性も確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物に直接刺入して情報を捉えるCMOSセンサの技術プラットフォームが確立された。開発したセンサによって植物体内情報のリアルタイム計測が可能となり、植物体内のイオンの濃度だけでなく動きの可視化も実現された。これにより、例えば肥料要素のイオンが吸収され成長につながる過程、光合成で産生された糖が輸送される様子などがつぶさに観察できる可能性があり、これは植物生理学におけるブレイクスルーとなる。これにより植物生育メカニズムの理解が深化すれば、植物工場での栽培条件の最適化につながり、収量の増加と安定生産がもたらされる。

研究成果の概要（英文）：Plant-insertable sensors for use in next-generation smart agriculture have been developed in this study. The sensor directly measures ion information in the plant body, and is able to identify which part of the ion image acquired by inserting it into the stem corresponds to the vascular bundle. This enables the correct measurement of information that differs from site to site in the plant body. Simultaneous measurement of not only a single ion but also multiple ions and measurement of electrical conductivity were realized. Moreover, durability of the sensor was confirmed by continuous measurement for more than one month.

研究分野：CMOS集積化センサ

キーワード：農業用センサ 植物用センサ イオンイメージセンサ スマート農業 CMOSセンサ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イオンを可視化するセンサチップや、体内に埋め込んで計測や治療を行うデバイスなど、バイオメディカル分野に革新をもたらす半導体デバイスの研究が活発化している。研究代表者はこれまでに、失明した患者の視覚を再建する眼球埋め込み型の人工視覚デバイスの開発や、イオン分布を捉えるイオンイメージセンサの開発とその実験動物への応用展開を積極的に進めてきた。実験動物用に開発してきたイオンイメージセンサ研究の進展により、その感度や分解能、生体計測時の耐久性などが高レベルで実現できたことから、従来は適用が困難であった「農業」「植物計測」の分野に、応募者独自のイオンイメージング技術が適用できる見込みが得られた。

農業分野では、植物工場に代表されるスマート農業が急速に展開している。スマート農業においては、収穫量を最大化して高効率生産をするために、植物の生育状況を適切にモニタリングする事が重要であり、生育環境計測などが導入されている。栽培環境と生育結果、収穫量の相関性は利用されつつあるが、食物生産の中心である「植物体」自体の情報はブラックボックスとなっており、一部の情報が推定されているに過ぎない。例えば、給水量と二酸化炭素濃度の変化を計測することにより、どの程度光合成が起きたかが「推定」されているが、糖など光合成産物そのものを直接計測している訳ではない。植物生理学上、未解明な植物生態も多く残されている。現在ブラックボックスとなっている「植物体」の内部情報を直接計測できれば、肥料が吸収される過程や、光合成で産生された糖が輸送される様子など、未解明の生育メカニズムが明らかになる。これにより植物を最適な状態で栽培できるようになり、植物工場の最重要課題である収量最大化が実現できる。植物内を直接計測する試みとしては、例えば樹液流量センサや Ion-Sensitive FET (ISFET) の刺入によるイオン計測などが報告されているが、茎の断面構造は様ではなく、特に維管束が発達した植物では道管、師管にセンサ位置が一致していなければ、水分、養分等の情報を正しく計測する事ができない。測定を「点」で行う従来型のセンサでは、センサが正しい位置に刺入され計測できているのか判断できない問題があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、情報を「面」で捉えて可視化する植物刺入型センサを開発する。開発する CMOS イオンイメージセンサでは、茎に刺入して取得したイオンイメージの、どの部分が師管に相当し、どの部分が道管の情報なのか同定できるようにする。これによって植物体内の水分、養分などの情報が正しく計測可能となる。また経時的にイメージング(動画取得)する事により、植物体内でのイオンや有機物の濃度と動きを可視化する。葉で光合成された糖が、果実や根に輸送される事は知られているが(転流)、その実際の動きやタイミングを詳細に捉えた例はまだない。本センサを用いれば、例えば師管を移動する糖のダイナミックな挙動が捉えられる可能性があり、植物生理学におけるブレイクスルーとなる。これにより転流メカニズムの解明が進めば、植物工場での栽培条件の最適化につながり、収量の増加と安定生産がもたらされる。

植物体内にあるイオンは、単にある種類のイオンを計測するだけでなく、複数のイオンを一つのセンサで同時に計測・可視化することで互いの関連が明らかとなり、より多くの情報が得られる。したがって本研究では、イオンイメージセンサで複数のイオンを捉え、可視化する手法を確立する。イオン以外の樹液流量センサや電気伝導度センサも集積化し、マルチモーダルセンシングを実現する。また刺入型センサに参照電極を集積化して、従来のように溶液やゲルを用いずとも長期安定的に計測可能な構成を実現する。

3. 研究の方法

提案するコンセプトを実現するために

刺入型マルチモーダルセンサの設計と試作

マルチイオンイメージング技術の確立

センサチップに集積可能な薄膜参照電極の開発

これら 3 つの技術課題を設定し、それぞれ以下のように取り組む。

刺入型マルチモーダルセンサの設計と試作

イオン計測画素を 32×128 (4000 画素) もしくは 32×256 (8000 画素) アレイ状に配置したイオンイメージセンサを設計する。長方形画素アレイの長手方向は 3mm 以上とし、茎側面から刺入した際に道管や師管に到達できるようにする。イオンイメージングにより、植物体に刺入したセンサチップのどの部分が道管や師管に対応するか判別可能となる事が期待される。そこで、樹液流量センサや電気伝導度センサをアレイ状に配列し、イオンイメージセンサとともに 1 チップ集積化したマルチモーダルセンサも設計・試作する。イオンイメージングによって道管の位置を同定し、その部位にある樹液流量センサや電気伝導度センサを作動させることによって、道管内の樹液流量や電気伝導度などを確実に計測可能とする。計測対象を同定した確実な計測は、イオンイメージセンサと 1 チップ集積化したマルチモーダルセンサにより初めて実現される。

マルチイオンイメージング技術の確立

複数イオンの計測において、それぞれのイオンに高い選択性を持つ画素を複数種類開発する

のは難易度が高く、限界のあるアプローチであると考えられる。そこで、4種類のセンサ画素で4種類以上のイオンを弁別計測する機械学習型センシングを提案する。イオン選択性は高いものの、互いにイオン応答性が異なる画素をアレイ化し、検出対象となる各種イオンに対する応答を予め計測する。イオン濃度を変更しながら多数回計測し、その計測結果を教師データとしてディープラーニングを行い、判定モデルを構築しておく。この判定モデルで未知試料の計測データを解析しイオン種と濃度を判定する。学習を適切に行うことで、複数のイオンが共存する条件での計測も期待できる。近年、機械学習型センシングの研究例は散見されるようになってきたが、このAI技術を応用したマルチイオンイメージングの報告例はまだなく、全く新たな試みである。

センサチップに集積可能な薄膜参照電極の開発

イオン計測では、計測対象の溶液電位を規定するための参照電極が必須となる。広く用いられるAg/AgClガラス参照電極は、電極先端直径が数mmあること、内部液が必要であることから、本研究のように植物に刺入して数か月以上長期計測する用途には適していない。参照電極の小型化の例として、MEMS技術によりガラス参照電極の構造をチップレベルで実現したものや、Ag/AgCl電極にハイドロゲルを組み合わせたものなどの研究例があるが、いずれも溶液やゲルを用いること起因する長期計測の難しさがあつた。そこで本研究では、溶液やゲルを用いずセンサチップに集積可能な薄膜参照電極を開発する。複数の電極材料で参照電極を作製し、それらが異なった特性を示す不安定な静止電位から統合的データ処理によって仮想的な安定静止電位を導出する応募者独自のアプローチを提案する。複数の異なる応答特性を統合処理して真値を導く手法は、前項の機械学習型センシングと同一であり、参照電極の静止電位導出にこの手法を導入したものである。これによりPtやAuなどの金属薄膜を参照電極として利用する事が可能となり、溶液やゲルを用いないためセンサチップへの一体形成が容易にでき、また長期間の使用も可能となる。

4. 研究成果

提案するコンセプトを実現するために設定した3つの技術課題について、それぞれ以下のように取り組んだ。

刺入型マルチモーダルセンサ

イオン計測画素を 32×128 アレイ状に配置したイオンイメージセンサを試作した。このセンサをトマトの茎に刺入し、茎内の水素イオン濃度変化が動画として捉えられる事を実証した。また将来的なマルチモーダル化を視野に入れ、先のイオンイメージセンサとの集積化が可能な構成で、電気伝導度センサを設計、試作し、基礎特性の検証を行った。電気伝導度変化の2次元分布が計測可能であること、またそれがpH計測と同時に可能であることを確かめた。この測定原理に基づきトマト茎に刺入した実証実験を行い、pHと電気伝導度変化が同時に捉えられることを確認した。またこれらの結果から、茎の内部構造が推定できる可能性が見出され、その検証を進めた。茎にセンサを刺入した状態で取得したデータと、茎の構造との相関関係を検証した結果、センサの応答部位と維管束の位置が一致することが確認された。また、茎へのセンサ刺入後の時間経過に伴い、取得データが変化する結果が得られた。刺入後24時間経過後は測定値が安定して、1ヶ月以上の連続測定が可能であることを確かめた。

マルチイオンイメージング技術

複数のイオン感応膜を市松状にパターンニングしたセンサの作製方法を検討、試作した。試作したセンサにより、複数イオンが共存する条件下でイオンイメージングを行い、同時測定が可能であることを実証した。また複数のイオン感応膜をパターンニングしたセンサを作製し、トマト茎に刺入して実証実験を行った。2種類のイオンが連続モニタリング可能であることを確かめた。これらの結果を踏まえ、複数のイオン感応膜から得られた情報を組み合わせて解析する手法を検討した。またイオン感応膜の耐久性、剥離耐性を向上させるため、感応膜組成等を検討した。

薄膜参照電極

提案コンセプトの原理検証用デバイスを設計、試作した。イオン計測用のISFETの近傍にAg, Ti, Au, Alで薄膜電極を形成し、これを参照電極として機能できるようにした。この薄膜電極を参照電極として使用した場合のセンサ特性を評価したところ、短期特性では良好な特性が得られたが、経時変化が大きく長期計測時に問題になると予想された。そこで薄膜電極上にペースト電極を追加形成して耐久性を向上させた参照電極を作製して特性評価を行った。またフレキシブル導電体を参照電極として活用する可能性が見出されたため、この基礎特性を評価、検討した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Noda Toshihiko, Loo Sylvia Mei Lin, Noda Yoshiko, Akai Daisuke, Hizawa Takeshi, Choi Yong-Joon, Takahashi Kazuhiro, Sawada Kazuaki	4. 巻 22
2. 論文標題 A Multimodal Sensing Device for Simultaneous Measurement of Dissolved Oxygen and Hydrogen Ions by Monolithic Integration of FET-Based Sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6669 ~ 6669
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22176669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Noda Toshihiko, Honjo Runa, Noda Yoshiko, Akai Daisuke, Hizawa Takeshi, Kimura Yasuyuki, Choi Yong-Joon, Takahashi Kazuhiro, Sawada Kazuaki	4. 巻
2. 論文標題 CMOS-Based Ion Image Sensor Enabling pH Measurement Under Light Irradiation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/jsen.2024.3396573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 野田俊彦, 澤田和明
2. 発表標題 機械学習型センシングを指向したCMOSマルチモーダルセンサの開発とその応用展開
3. 学会等名 2022年 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Yoshida, K. Sembo, H. Doi, T. Horio, S. Toda, K. Takayama, Yong-Joon Choi, K. Takahashi, K. Sawada, T. Noda
2. 発表標題 Fabrication of Insertable Ion Image Sensor for the Simultaneous Visualization of Multiple Ions in Plants
3. 学会等名 The 10th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本庄 瑠奈, 泉保 賢汰, 野田 佳子, 赤井 大輔, 飛沢 健, 木村 安行, 崔 容俊, 高橋 一浩, 澤田 和明, 野田 俊彦
2. 発表標題 光信号除去回路を搭載したCMOSイオンイメージセンサの作製と特性評価
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 太一, 泉保 賢汰, 坂口 直己, 戸田 清太郎, 高山 弘太郎, 崔 容俊, 高橋 一浩, 澤田 和明, 野田 俊彦
2. 発表標題 植物刺入型イオンイメージセンサによる EC と H+のマルチモーダルセンシング検証
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 太一, 松下 優介, 泉保 賢汰, 坂口 直己, 戸田 清太郎, 高山 弘太郎, 崔 容俊, 高橋 一浩, 澤田和明, 野田 俊彦
2. 発表標題 長時間計測が可能な植物体内イオンイメージングシステムの構築
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 太一, 泉保 賢汰, 坂口 直己, 戸田 清太郎, 高山 弘太郎, 崔 容俊, 高橋 一浩, 澤田 和明, 野田 俊彦
2. 発表標題 植物刺入型イオンイメージセンサによる栽培モニタリングの基礎検討
3. 学会等名 令和4年度電気学会E部門総合研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Sembo, Taichi Yoshida, Seitaro Toda, Tomoko Horio, Yasuyuki Kimura, Yong-Joon Choi, Kazuhiro Takahashi, Kotaro Takayama, Kazuaki Sawada, and Toshihiko Noda
2. 発表標題 REAL-TIME IN VIVO IMAGING OF INTRA-STEM ION DISTRIBUTION USING INSERTABLE CMOS SENSOR FOR PLANTS
3. 学会等名 The 21st International Conference on SOLID-STATE SENSORS,ACTUATORS and MICROSYSTEMS (TRANSDUCERS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 太一, 泉保 賢汰, 土井 英生, 堀尾 智子, 戸田 清太郎, 高山 弘太郎, 崔 容俊, 高橋 一浩, 澤田和明, 野田 俊彦
2. 発表標題 刺入型センサによる植物体内カルシウムイオンイメージングに向けた基礎検討
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 泉保賢汰, 吉田太一, 本庄瑠奈, 戸田清太郎, 堀尾智子, 木村安行, 崔 容俊, 高橋一浩, 高山弘太郎, 澤田和明, 野田俊彦
2. 発表標題 植物用刺入型イオンイメージセンサによる茎内イオン分布計測の検証
3. 学会等名 令和3年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 萌、土井 英生、堀尾 智子、崔 容俊、高橋 一浩、服部 敏明、野田 俊彦、澤田 和明
2. 発表標題 水素イオン分布とカリウムイオン分布を同時に可視化可能なマルチモーダルイメージセンサの作製
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 泉保 賢汰 , 吉田太一, 本庄瑠奈, 戸田 清太郎, 堀尾智子, 木村 安行, 崔 容俊, 高橋 一浩, 高山弘太郎, 澤田和明 , 野田俊彦
2. 発表標題 植物用刺入型センサの茎内イオン分布リアルタイムin vivo イメージングの機能実証
3. 学会等名 第38 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 太一, 泉保 賢汰 , 堀尾 智子 , 崔 容俊 , 高橋 一浩 , 高山 弘太郎 , 澤田 和明 , 野田 俊彦
2. 発表標題 複数イオン同時可視化に向けた植物刺入型マルチイオンイメージセンサの作製
3. 学会等名 第38 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 太一, 泉保 賢汰, 土井 英生, 堀尾 智子, 戸田 清太郎, 高山 弘太郎, 崔 容俊, 高橋 一浩, 澤田 和明, 野田 俊彦
2. 発表標題 K ⁺ とH ⁺ 同時可視化に向けた植物刺入型イオンイメージセンサの作製
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022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

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
---------	---------