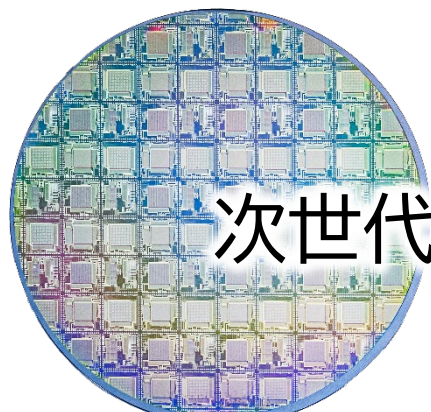
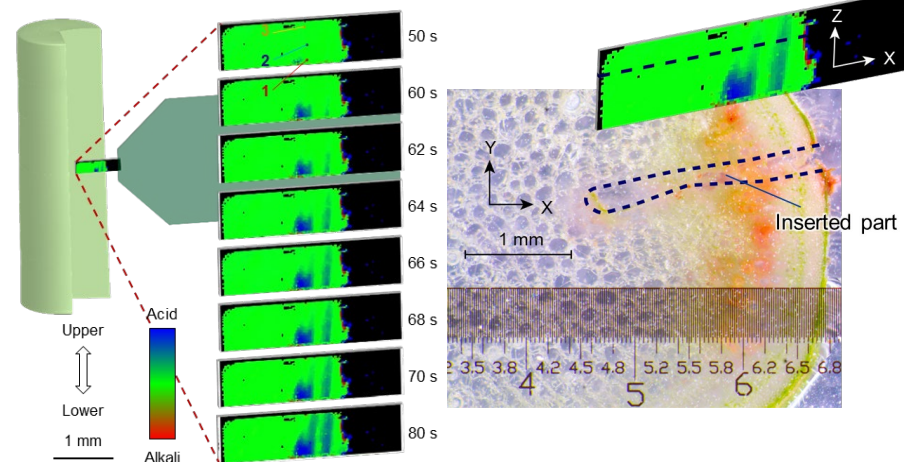
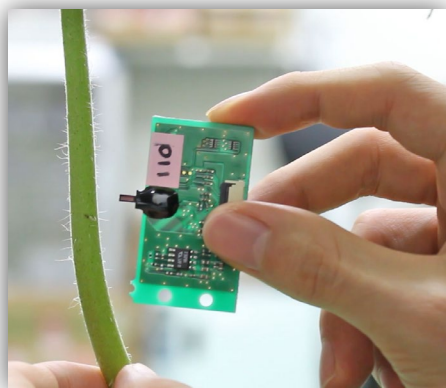


# 植物，農作物の生育管理に適した センシング技術

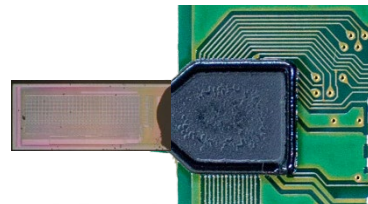
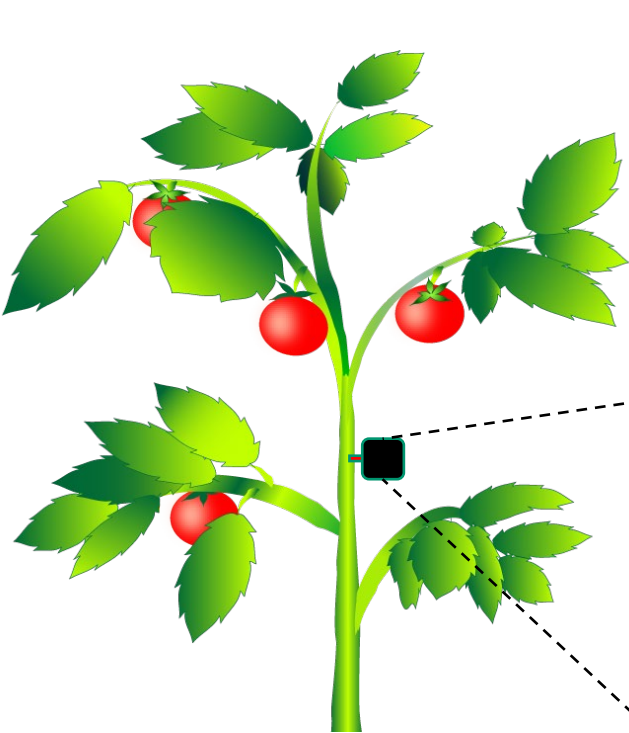


豊橋技術科学大学

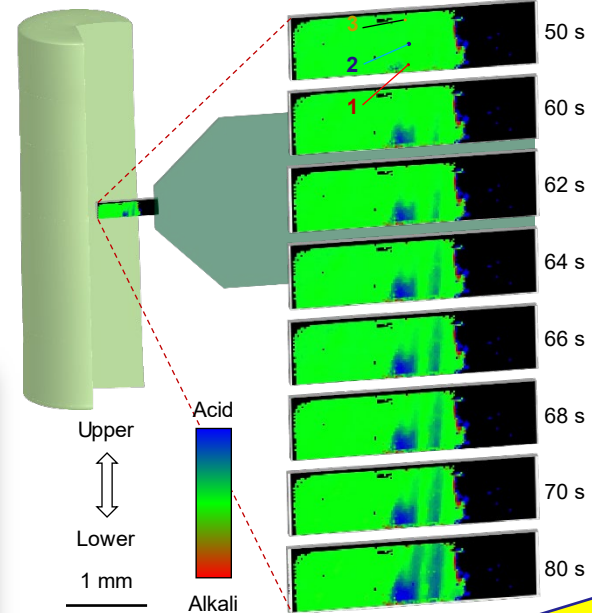
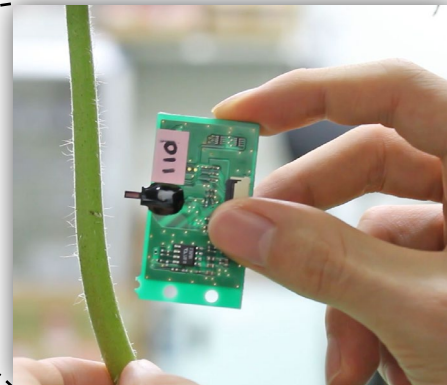
次世代半導体・センサ科学研究所 (IRES<sup>2</sup>)

野田 俊彦

# 植物の状態を計測するセンサ

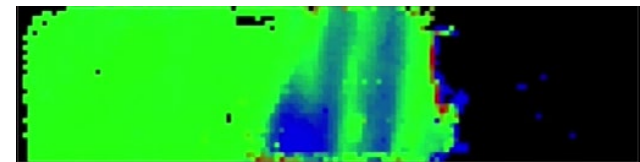


イオンイメージセンサ  
2mm×4mm  
薄さ 0.1 mm  
(≒紙幣厚さ)



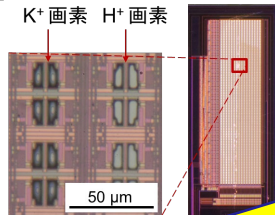
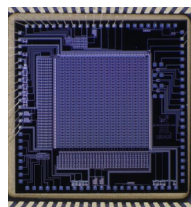
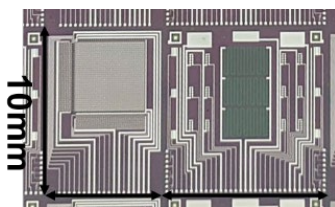
植物体内イオン分布  
イメージングに成功

イオンの挙動  
(移動方向, 移動速度, 分布, 濃度)  
を**動画**として**見える化**



Sembo // Noda, Transducers 2021, B3-3C3.

## 植物用マルチモーダルセンサ開発



- 樹液流量
- イオン分布
- 電気伝導度

- イオンイメージ
- 可視光イメージ

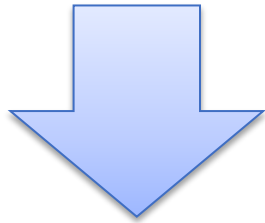
- 水素イオン
- カリウムイオン

豊橋技科大  
LSI工場で作製

# コア技術：イオンイメージセンサとは

## 可視光イメージセンサ

- 光センサを二次元アレイ化
- 光の二次元情報を取得



同様のセンサ構成で、光とは異なる別の情報を二次元で取得できないか？

## イオンイメージセンサ

- 可視光イメージセンサの光センサに相当する部分を、イオン感応素子に変更
- イオンの二次元情報を取得

化学の目を持つイメージセンサ

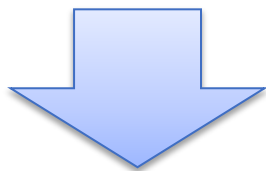
# 新技術の概要

## イオンイメージセンサ

pHによって変化するセンサ表面電位を画像として出力

イオン濃度：高 高精度に測定可能

イオン濃度：低 測定精度が低下



溶液のモル濃度とセンサ表面電位の関係を用いてpHを特定すれば、イオン濃度が低い場合にも高精度測定が可能となる

# 想定される用途

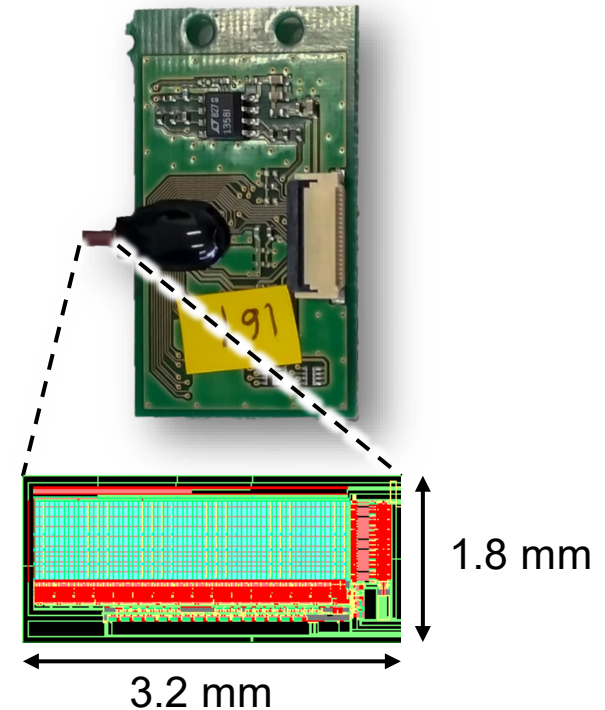
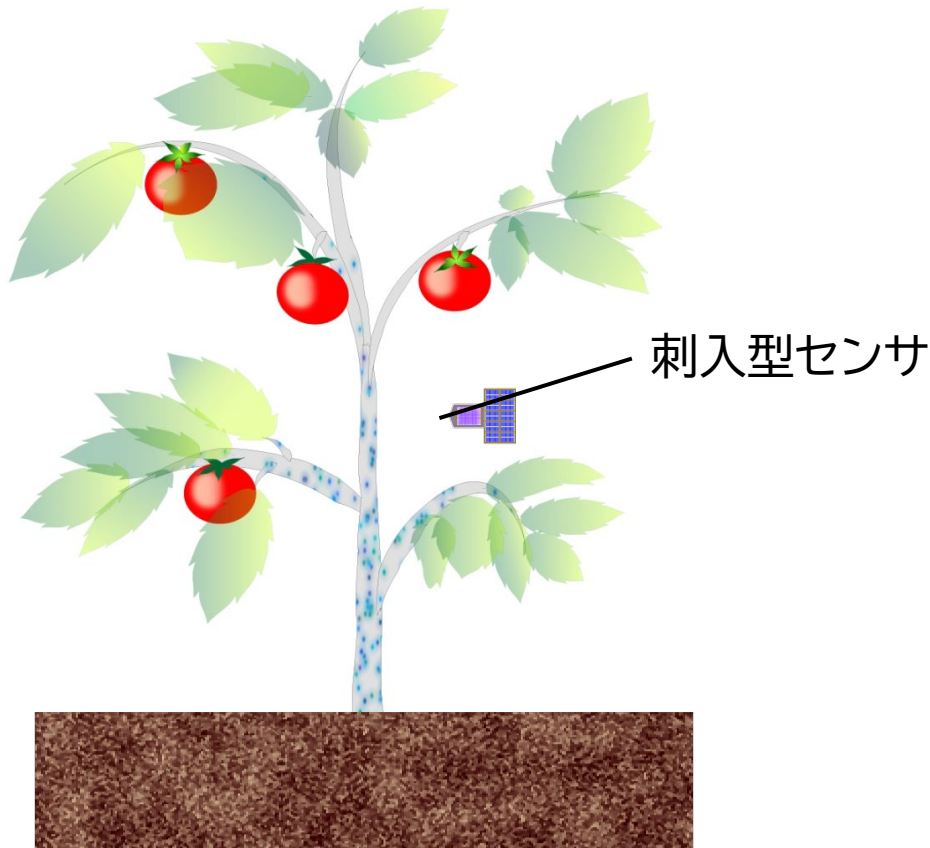
- ・ 植物を対象としたイオン計測
  - － 植物, 農作物の生体機能の解明や生育管理
  - － 水耕栽培で用いる養液のpHやイオン濃度管理
- ・ 低イオン濃度の溶液の管理



# 植物の直接計測 (豊橋技科大 高山教授との共同研究)

- 植物にセンサを刺入
- 植物体内の情報を直接計測

刺入型  
水素イオン(pH)イメージセンサ

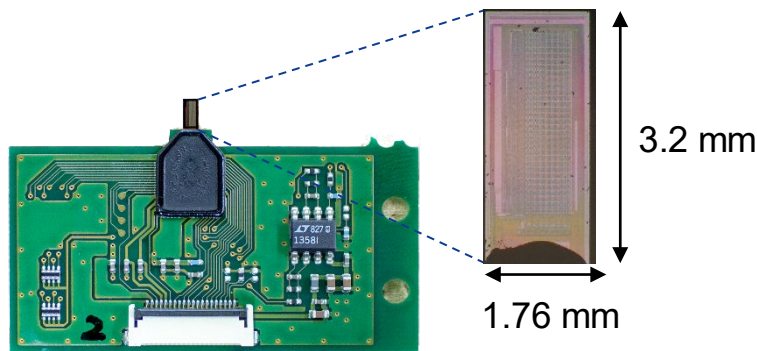


|       |                               |
|-------|-------------------------------|
| サイズ   | $3.2 \times 1.8 \text{ mm}^2$ |
| 薄さ    | $100 \text{ }\mu\text{m}$     |
| 画素数   | $128 \times 32$               |
| 画素ピッチ | $23.8 \text{ }\mu\text{m}$    |

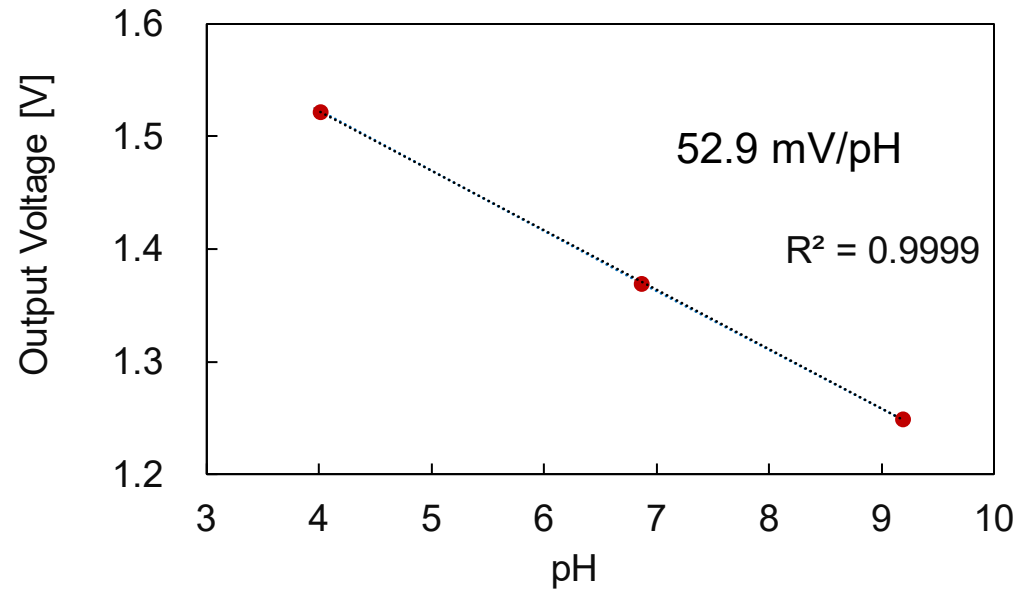
泉保 他, 第37回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 26P3-SS3-1, 2020.

# 植物刺入用イオンイメージセンサ

## 水素イオン(pH)計測特性



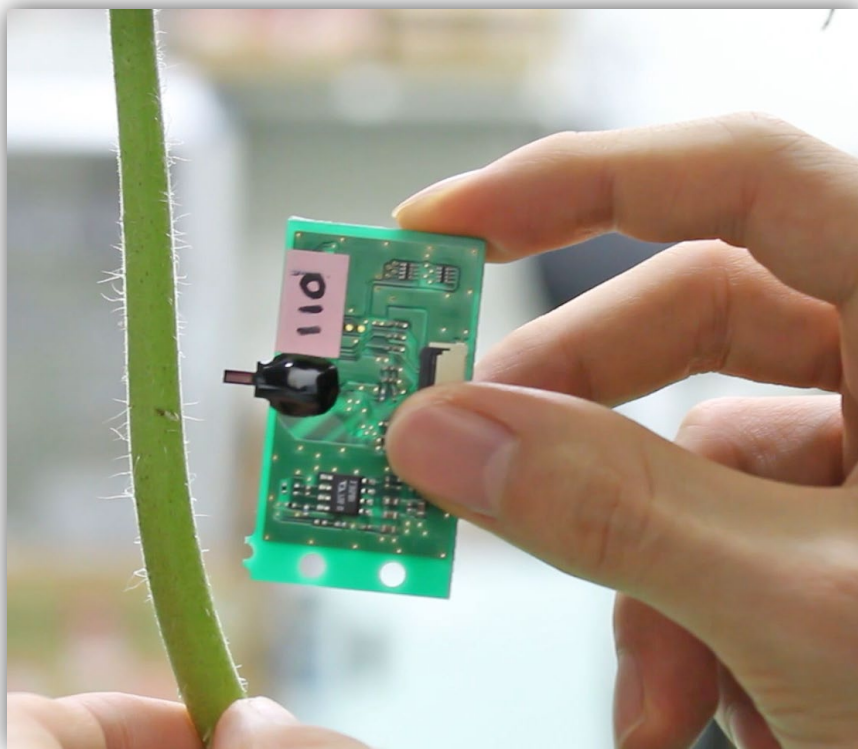
|                  |                  |
|------------------|------------------|
| Die size         | 3.8 mm × 1.76 mm |
| Thickness        | 100 μm           |
| Number of pixels | 32 × 128         |
| Pixel pitch      | 23.7 μm          |
| Time resolution  | 20.44 ms         |



計測時のノイズ: 3~4 mV  
→ 0.1 pH以下に相当

Sembo *et al.*, Transducers 2021, B3-3C3.

# トマトへのセンサの刺入



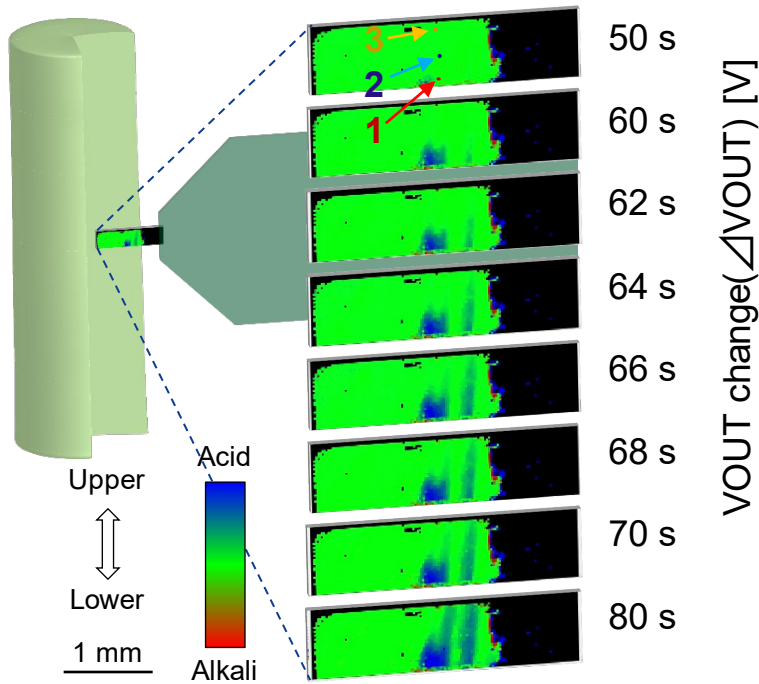
刺入測定7日後の様子

刺入箇所

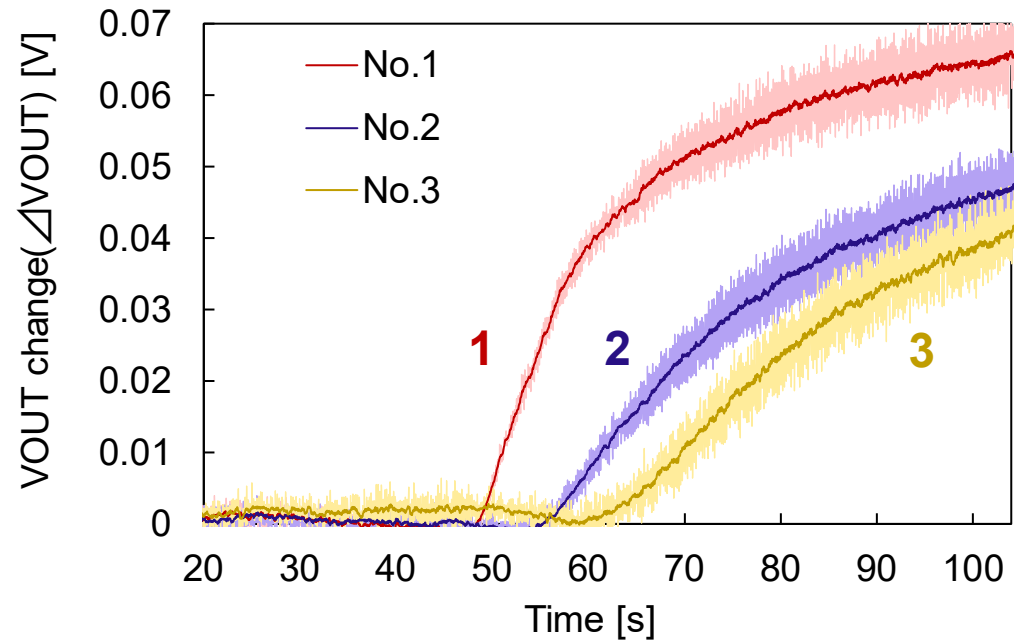


# 植物体内イメージング結果

## 計測イメージの経時変化



## センサ出力電圧変化

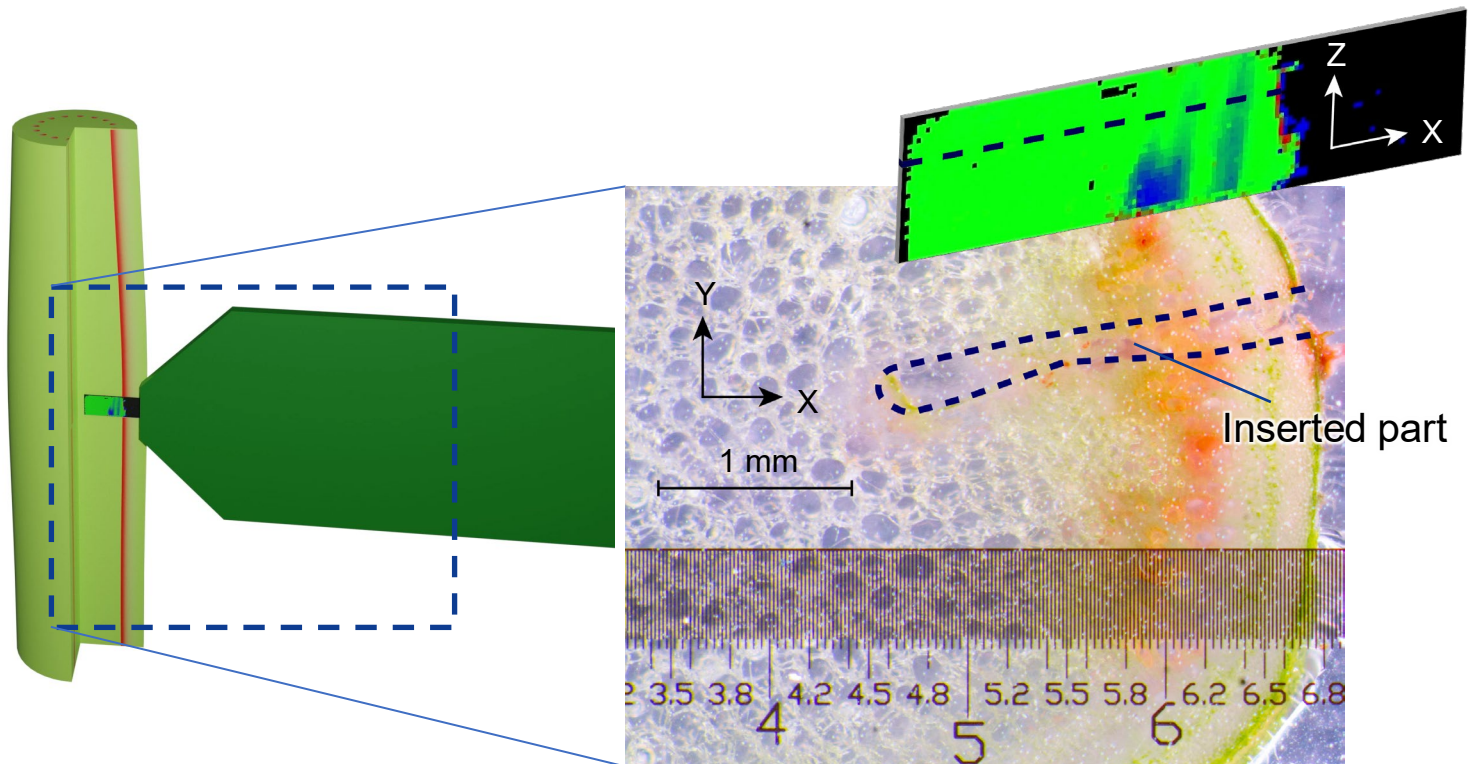


茎下部から上部の順にセンサ出力電圧が上昇

Sembo *et al.*, Transducers 2021, B3-3C3.

# 計測部位の確認

 茎断面と計測イメージを比較し整合性を確認



Sembo *et al.*, Transducers 2021, B3-3C3.

# 従来技術とその問題点

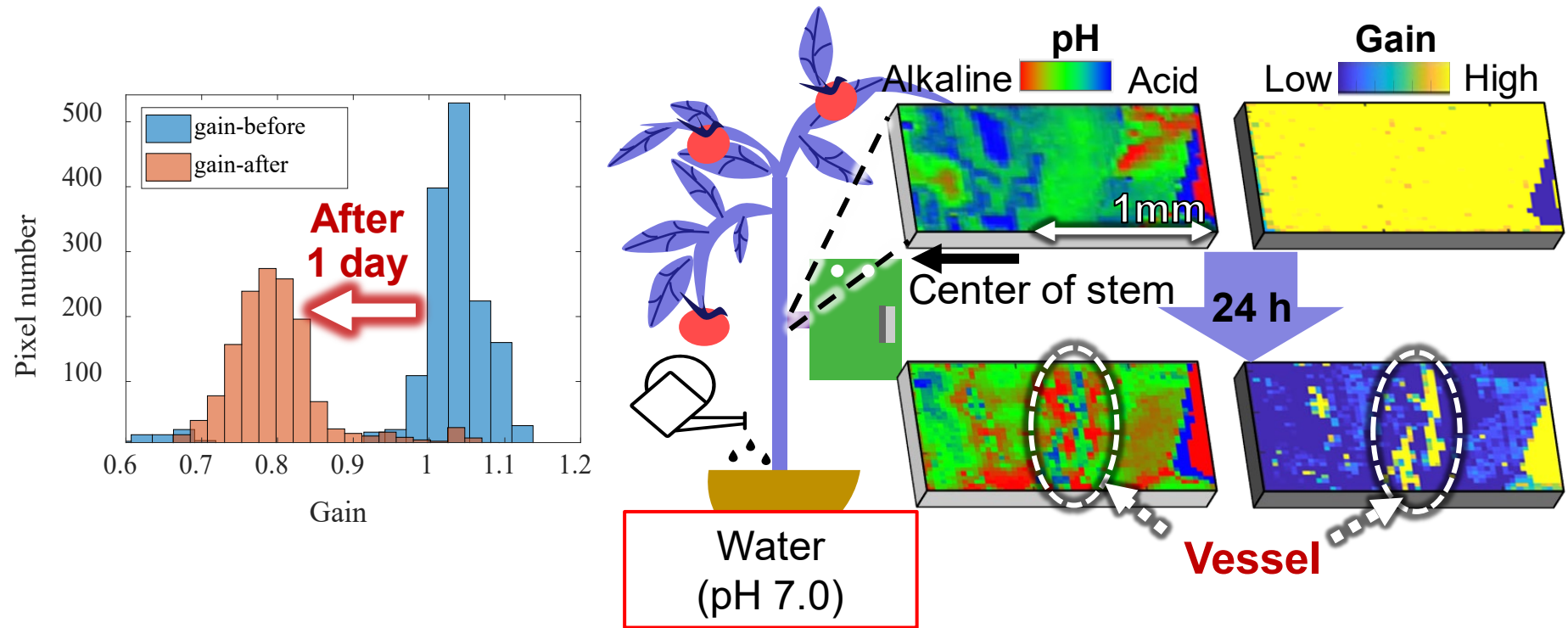
一般的な電気化学測定では、イオン濃度が低い場合、電極面積を広く、且つ電極間隔を極めて狭く設定する。このためセンサ部が大きく、機械的な調整機能が必要である。また、溶液内でイオン化を発生させ電池性能として計測する方法もあるが、有機酸等の弱電解質では利用できない。

# 新技術の特徴・従来技術との比較

- 水耕栽培で用いる塩濃度の低い養液でも、計測を攪乱することなく、pHやモル濃度を求めることができる。
- 豊橋技術科学大学が開発した刺入型イオンイメージセンサを利用することで、植物内部（茎など）のpH分布やイオン分布が観測できる。
- 測定対象となる溶液が定まっている場合、電気伝導度も推定できる。

# 電気伝導度差による道管部位の特定

## 💡 センサ刺入後24時間でのセンサ特性の変化



センサ特性（ゲイン）から道管部位を特定し  
pH変化をモニタリング可能



# 実用化に向けた課題

- 試作したセンサが植物体内構造を反映したイオン分布を取得可能であることまで実証済
- スマート農業などに本センサ技術を応用した場合の実証実験を遂行中
  - 計測精度
  - 長期安定性
- 現在はpHセンサ（水素イオンセンサ）として機能実証中
- 他の幾つかのイオンを計測するための感応膜の開発実績はあるが、植物での実証が不十分
- センサチップ開発+評価用ハードウェア、ソフトウェアの範疇に留まっており、実応用を見据えた計測システム開発が必要

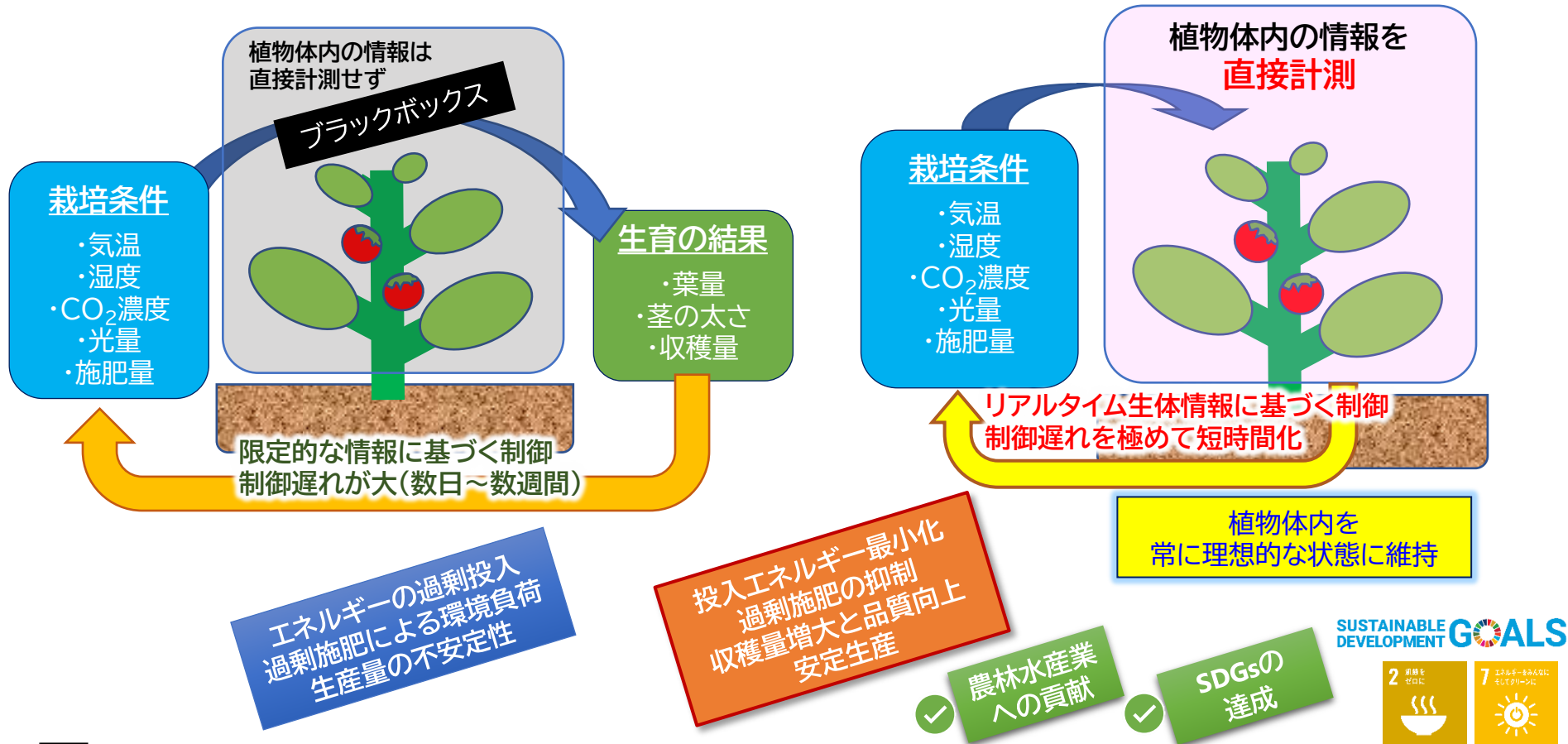
# 植物工場における栽培環境の制御

## 従来型植物工場

- ・ 生育の結果(Output)から必要な環境因子(Input)を予測して制御
- ・ 制御応答遅れが大(数日～数週間)

## 次世代型植物工場

- ・ 植物の情報を直接計測して最適値となるよう環境因子(Input)を即時制御
- ・ 制御応答遅れが小(数分～数時間)



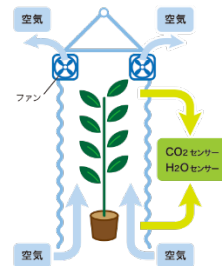
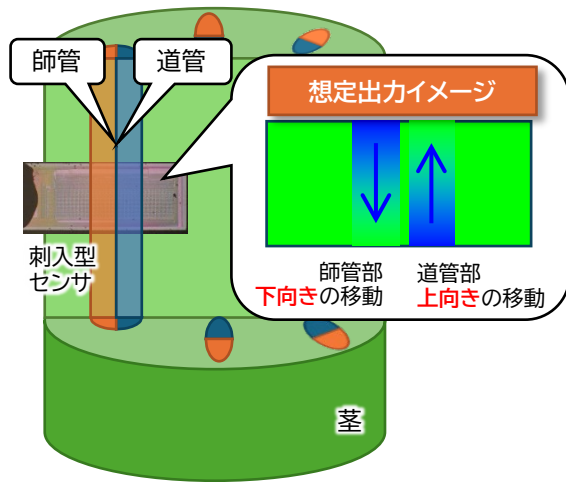
# 栽培モニタリングの実証

(豊橋技科大 高山教授との共同研究)

センサ計測結果と植物生体情報がリンクすることを検証中

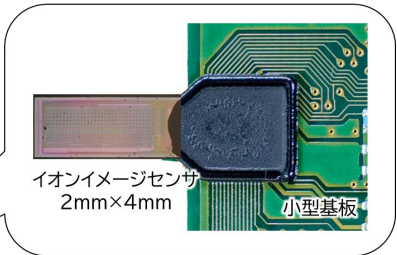
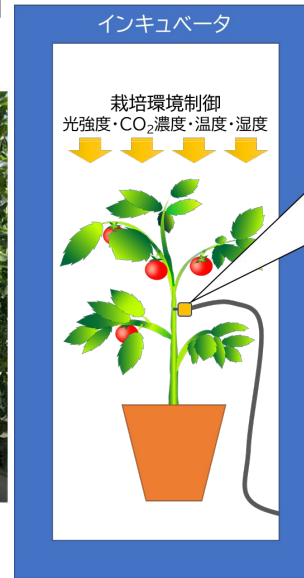
インキュベータ内で栽培  
センサによる *in situ* 計測  
光合成速度・蒸散速度の計測

光合成と蒸散を増大させる環境制御  
(光強度とCO<sub>2</sub>濃度↑・湿度↓)



光合成計測チャンバ

*in situ* 計測の実証



*in situ* 計測用  
センサシステムの開発

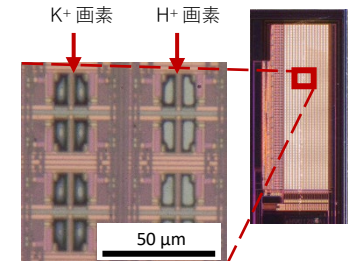
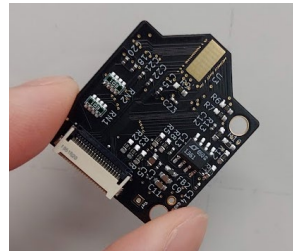


長期測定の実現

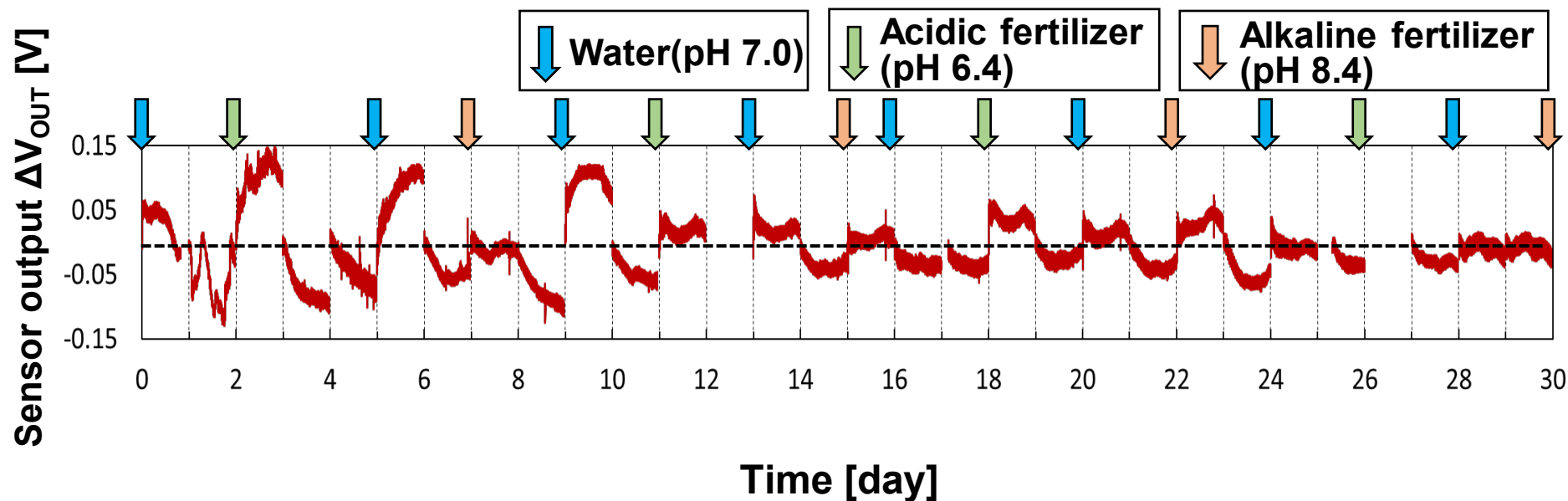
小型駆動基板の設計

ハウジング製作

多種イオン同時計測の実現



# 1ヶ月連続測定



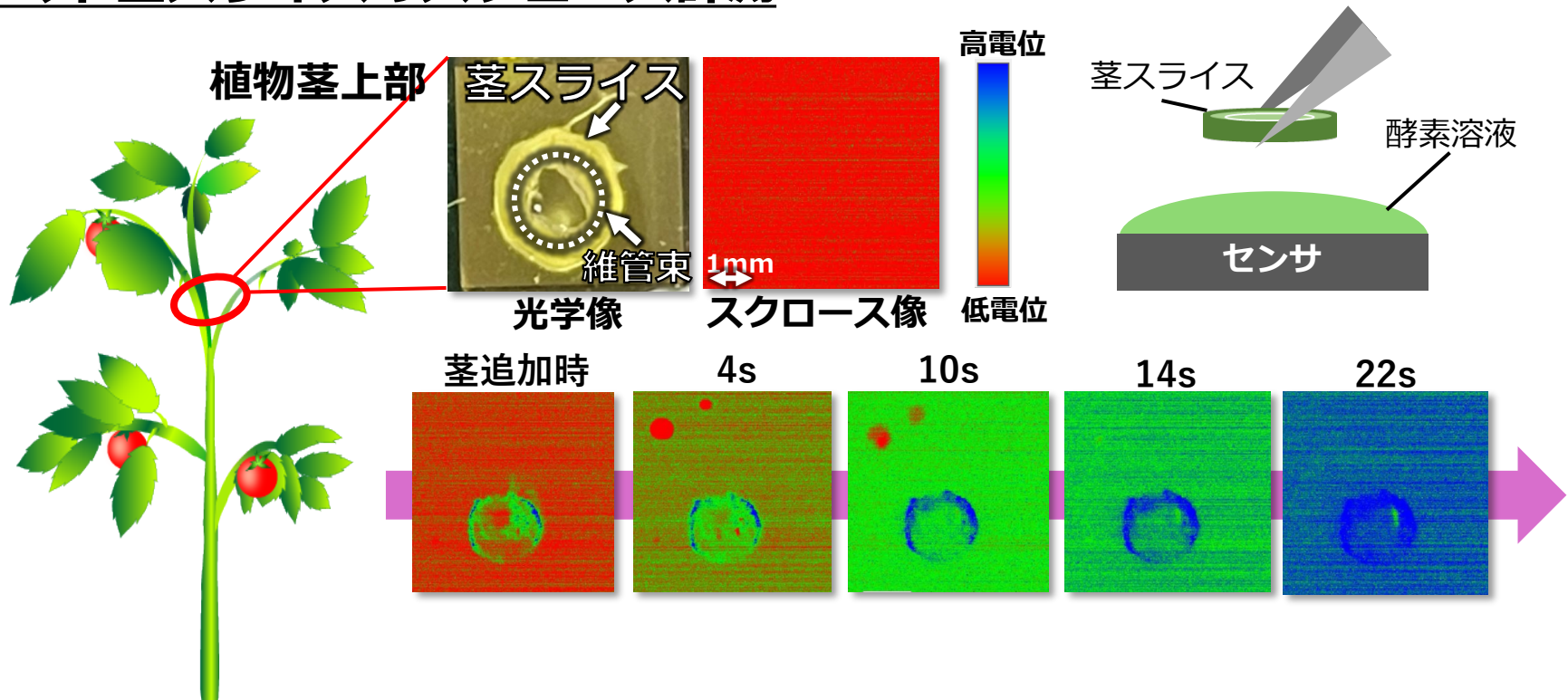
1ヶ月連続モニタリング可能  
灌水、施肥とセンサ出力の因果関係を検証中



# 光合成産物の可視化

光合成産物（スクロース） を捉える感応膜を開発中

## トマト茎スライスのスクロース計測



茎の維管束部分のセンサ出力変化を確認  
維管束（師管）で輸送されるスクロースの可視化に成功



# 企業への期待

- センサチップの技術を実用化するための計測システムの開発
- 無線化，クラウド対応などによる実用性，利便性の向上
- 実栽培環境でのフィールドテスト
- 高付加価値の植物生産に向けた取り組み
  - 植物の直接計測に基づく高度管理型スマート農業の実証
  - 生育管理だけに留まらず，成分や食味，風味の自在制御

# 企業への貢献、PRポイント

- 学内の半導体工場を活用した独自のセンサチップ開発と試作品の提供
- イオンイメージング技術のノウハウ提供
- 様々なイオン, 化学物質のマルチモーダルセンシング技術の提供
- 試作チップと評価システムを用いた各種評価が実施可能

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：pH及びモル濃度特定方法とその装置
- 出願番号：特願2022-147520
- 出願人：豊橋技術科学大学
- 発明者：野田俊彦、泉保賢汰、木村安行、澤田和明

お問合せ先：研究推進アドミニストレーションセンター

Phone: 0532 - 44 - 6975

FAX: 0532 - 44 - 6980

E-mail: tut-sangaku@rac.tut.ac.jp 担当: 白川正知

# 産学連携の経歴

- 2019年-2024年 JST OPERAに参加、国内メーカー4社との共同研究実施
- 2022年- 文部科学省 次世代X-nics半導体創生拠点形成事業に参加