

2023年12月1日
@東北大CIRIC
令和5年度放射性同位元素等取扱施設安全管理担当教職員研修

植物RIイメージング ～植物栄養学研究と農業への応用～

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
量子技術基盤研究部門 高崎量子応用研究所



量子バイオ基盤研究部
RIイメージングプロジェクト

河地有木

thanks

QST RIイメージングプロジェクト



BRing | Bio-environmental and
Radiological Imaging
network group

PRISM 官民研究開発投資
拡大プログラム
Public-Private R&D Investment
Strategic Expansion Program

MOONSHOT The Moonshot Program for agriculture, forestry and fisheries
Achieving zero food risks
by improving crop robustness
using cyber-physical systems

NARO
National Agriculture and Food Research Organization

科研費
KAKENHI

JST Japan Science and
Technology Agency

ACT-X

CREST

ROOTomics
For Climate-Resilient Crops

(共同した大学等研究機関)
北大、秋田県立大、東北大、筑波大、群馬大、東大、東京
農大、東京農工大、東工大、名大、京都府立大、近畿大、
広島大、九州大、琉球大および、環境研、農研機構、原子
力機構、高輝度光科学研究センター等、の皆様

自己紹介 まとめ

2002年 筑波大学大学院物理学研究科修了 博士（物理）

低エネルギー原子核実験グループにて軽原子核スピン-スピン相互作用について研究

2002-2003 国立循環器病センター研究所 流動研究員

陽電子断層法(PET)による心血流の定量化研究

2003-2010 日本原子力研究開発機構（旧原子力研究所）高崎研究所 博士研究員、
任期付研究員等

植物研究用PET技術の立上げと技術開発、植物の元素動態研究

2010-2016 日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所 研究副主幹

植物用RIイメージング装置開発、重粒子線治療用コンプトンカメラ開発、環境モニタ用
ガンマカメラ開発に従事

2016-現在 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 上席研究員/リーダー

RIイメージングプロジェクトを主催し、農業・医療・環境問題の課題解決に資するRIイ
メージング技術の開発研究を推進

自己紹介(1) 大学院生

筑波大学大学院 物理学研究科 低エネルギー原子核実験グループ

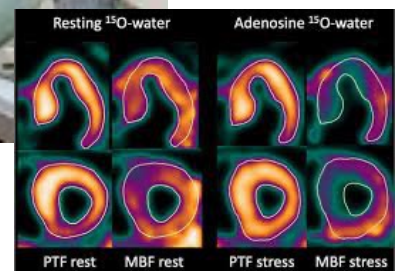


核スピン-スピン相互作用の解明

重陽子融合反応（ $D(d,p)T$ ）を用いた金属中水素原子分析技術の開発

自己紹介(2) ポスドクその1

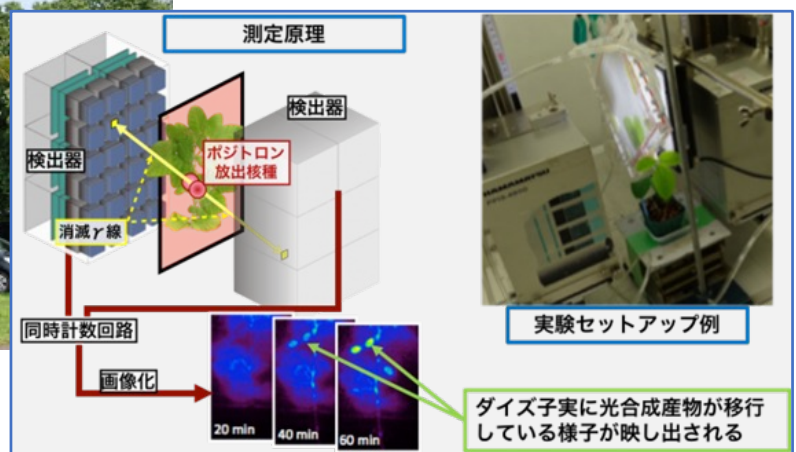
国立循環器病センター研究所 放射線画像診断部



単一光子放射断層撮影(SPECT)装置開発研究
陽電子断層法(PET)による心血流の定量化研究

自己紹介(3) ポスドクその2～リーダー

日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所
量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所



医療系のRIを対象としたイメージング技術を植物研究に応用した
植物RIイメージング技術を開発、これを活用した研究を展開

高崎量子応用研究所



高崎量子応用研究所のあゆみ



工業・農業・医療その他、私たちの生活を取り巻くあらゆる分野で量子ビーム応用研究を展開

高崎量子応用研究所（農業応用）①

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

- ・ 量子生命・医学部門（量子科学技術で健康と安心を支える）
- ・ 量子技術基盤研究部門（量子ビームで明日のテクノロジーを切り拓く）

- ★高崎量子応用研究所
 - 量子機能創製研究センター
 - 先端機能材料研究部
 - 量子バイオ基盤研究部

RIイメージングプロジェクト

元素動態解明研究から植物栄養学を進め農業に応用

環境耐性遺伝子プロジェクト

食糧需要を支える環境ストレスに強い作物や収量向上に貢献

RI医療応用プロジェクト

作物体内の元素動態追跡のためのRIトレーサの開発

量子バイオ技術応用プロジェクト

量子バイオ技術の研究開発を通じた農作物の病虫害防除

- ★関西光量子科学研究所
- ★次世代放射光施設整備開発センター

- ・ 量子エネルギー部門（核融合エネルギーの実用化を目指して）

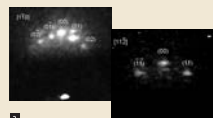
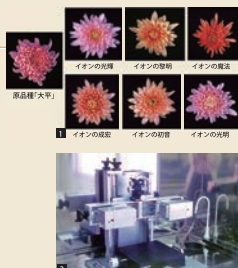
高崎量子応用研究所（農業応用）②

50th

写真で見る50年の歴史

平成10年度

- 1 イオンビームで新花色のキクを作成【10年6月25日】
- 2 植物体内を透過可能なポジトロンイメージング装置 (PETIS) を開発【10年8月27日】
- 3 水素終端されたSiについて反射高速電子回折パターン観測に成功
- 4 細胞内元素分析用のマイクロPIXE分析装置を開発 (東北大学と共同)【11年2月17日】



平成11年度

- 1 超耐放射線性モーターを開発【11年6月24日】
- 2 ペンチャー棟竣工【12年3月31日】

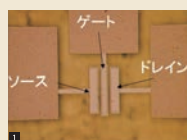


50th

写真で見る50年の歴史

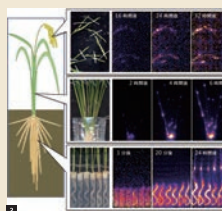
平成16年度

- 1 世界最高のチャンネル移動速度230cm²/VSの炭化ケイ素半導体を開発【16年6月1日】
- 2 電子線橋かけによるハイドロゲルを利用した「ビューゲル」を開発 (大瀬薬品工業㈱と共同)【16年7月】



平成17年度

- 1 原子力法人統合【17年10月1日】
- 2 放射線で傷ついたDNAを直す遺伝子 (PprAタンパク質) を発見、バイオ薬品として販売 (㈱ニッポンジーン)【17年11月】
- 3 イネに吸収されたカドミウムの動きを植物ポジトロンイメージング技術で初めて観測【18年3月15日】



50周年記念誌「高崎量子応用研究所50年のあゆみ」より

自己紹介 まとめ

2002年 筑波大学大学院物理学研究科修了 博士（物理）
低エネルギー原子核実験グループにて軽原子核スピン-スピン相互作用について研究

2002-2003 国立循環器病センター研究所 流動研究員
陽電子断層法(PET)による心血流の定量化研究

2003-2010 日本原子力研究開発機構（旧原子力研究所）高崎研究所 博士研究員、
任期付研究員等
植物研究用PET技術の立上げと技術開発、植物の元素動態研究

2010-2016 日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所 研究副主幹
植物用RIイメージング装置開発、重粒子線治療用コンプトンカメラ開発、環境モニタ用
ガンマカメラ開発に従事

2016-現在 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 上席研究員/リーダー
RIイメージングプロジェクトを主催し、農業・医療・環境問題の課題解決に資するRIイ
メージング技術の開発研究を推進

1. はじめに（RIイメージングとスマート農業）

2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法

3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み

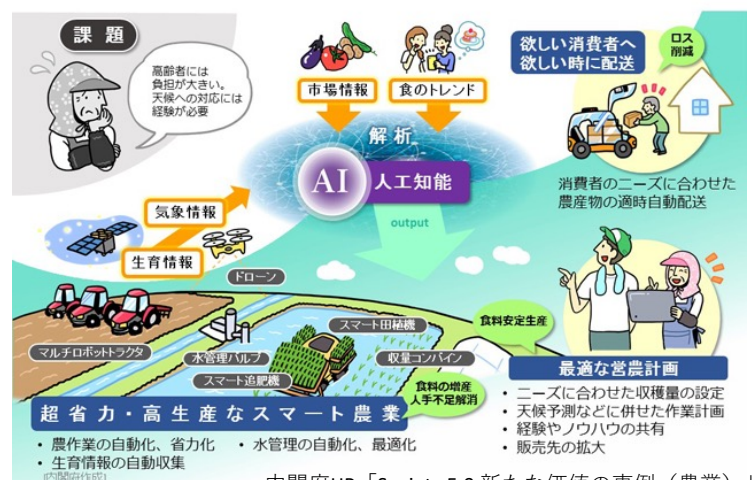
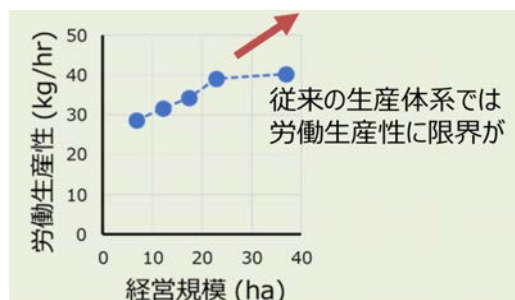
4. まとめ

スマート農業について

食料生産を維持、向上させつつ、持続性を高めることが課題

農業就業者数は**減少**
経営体の規模は**拡大**

労働生産性の飛躍的な向上が必要



「農業」×「先端技術」＝「スマート農業」

スマート農業とは先端技術(ロボット、AI、IoTなど)を活用する農業のこと



生産現場の課題を先端技術で解決する！農業分野におけるSociety5.0の実現

植物栄養学的アプローチ

植物が元来持つ生理機能メカニズムを最大限に農業に活用するために

「植物栄養学」

植物の栄養獲得のメカニズムを解明しようとする学術分野

「植物栄養学（第1版）」の序文から引用（森敏 東京大学名誉教授）

「世の中をどのような観点からみるのかを世界観という。

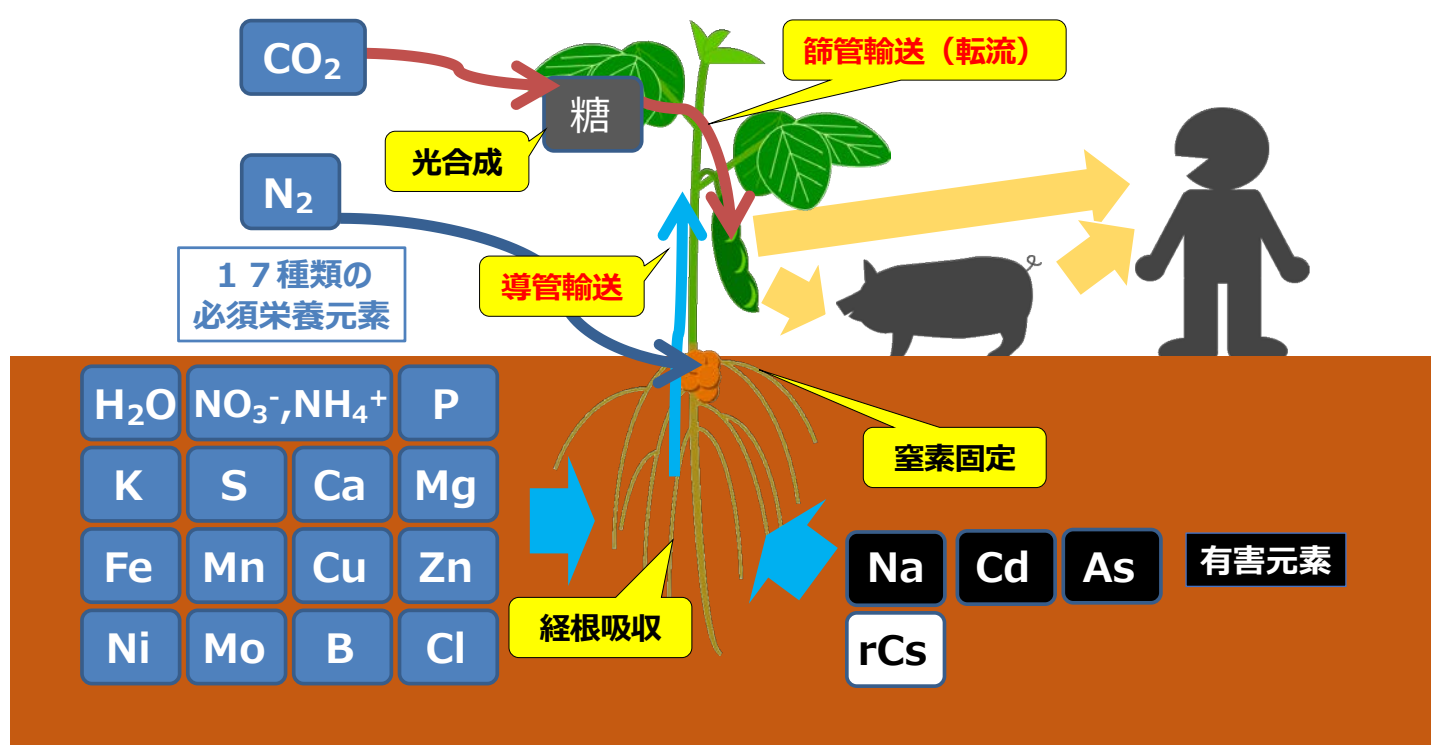
世の中を，“通貨の流れ”でみるのは経済学者，
“エネルギーの流れ”でみるのは物理学者，
“物質の流れ”でみるのは工学者，
“病原菌の流れ”でみるのは医者や病理学者，
“情報の流れ”でみるのはインターネット産業人である。

此の伝でいうならば，
世の中を“**栄養元素の流れ**”でみるのが**植物栄養学者**である。」

栄養**元素**を可視化する**RI**イメージング技術は、強力な研究ツール

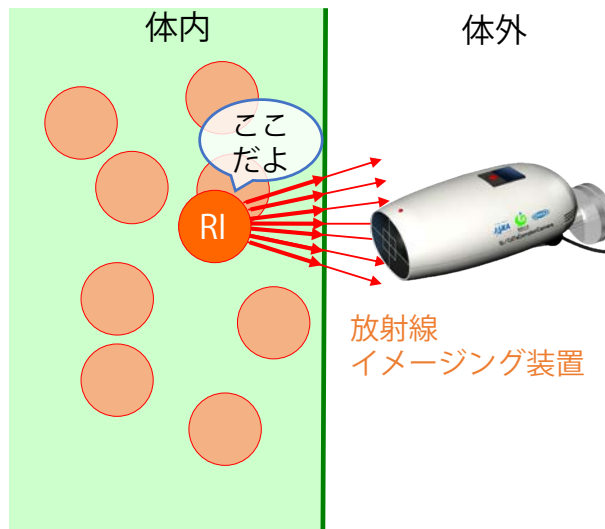
栄養の流れを捉えること

栄養の流れを捉えることこそが**作物生産のカギ**となる



RIイメージングについて

関心対象元素の放射性同位元素(RI)を追跡子(トレーサ)として生体内に投与し、元素動態を画像として捉える技術



観測対象の体外から体内に局在するRIの強度と位置を放射線計測で同定

強度：定量性 --体内を十分に透過し大気中でも減衰することなく検出器に到達

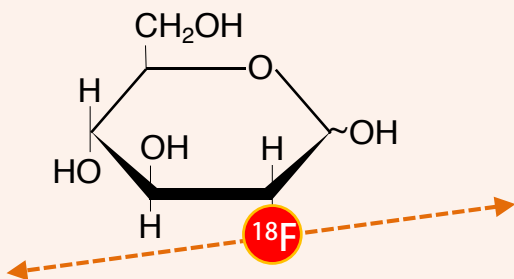
位置：解像度、空間分解能 --放射線の到来方向を決定する工夫

例) オートラジオグラフィ、ガンマカメラ、PET、PETIS、コンプトンカメラ

RIイメージングの代表例 (PET)

陽電子放出断層撮影(PET)によるがん診断

ブドウ糖に
ポジトロン放出核種 ^{18}F をくっつける



^{18}F -FDG

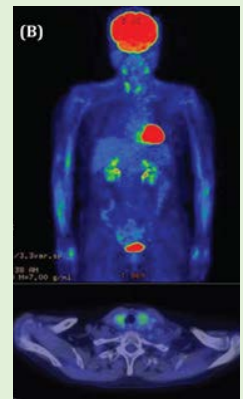
放射性同位元素 ^{18}F を標識した
フルオロデオキシグルコース

体内へ投与

体内のどこにポジトロン放出核種が分布しているかを画像で表すPET装置で診断



PET装置



PET診断画像

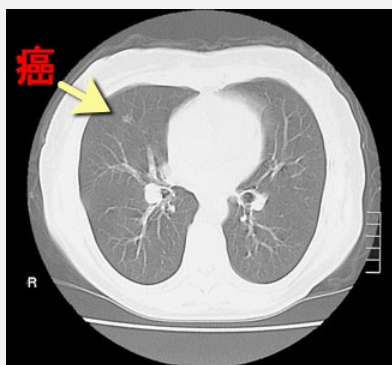
体内で糖を過剰に消費している組織を
PET診断画像から探し出す

RIイメージングの特徴 -機能画像-

構造情報(CT, レントゲン)と機能情報(RIイメージング, PET, SPECT)

構造情報でガン診断

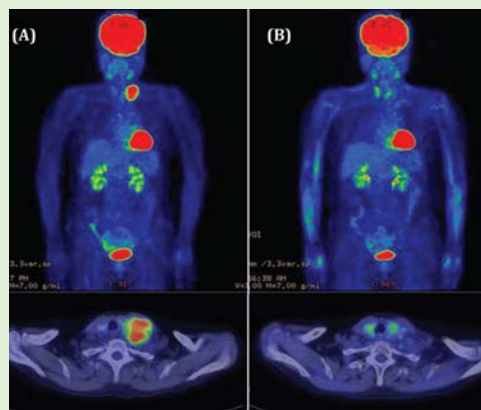
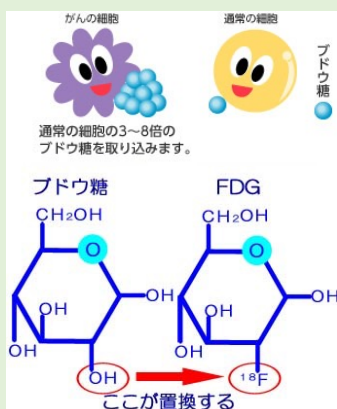
レントゲン
エックス線CT



腫瘍の場所や形状がわかる

機能情報からガン診断

RIトレーサイメージング
PET



腫瘍の位置や活性度がわかる

RIイメージングで生命のしくみを見る

構造情報(CT, レントゲン)と機能情報(RIイメージング, PET, SPECT)

体の作りを見る

レントゲン
エックス線CT



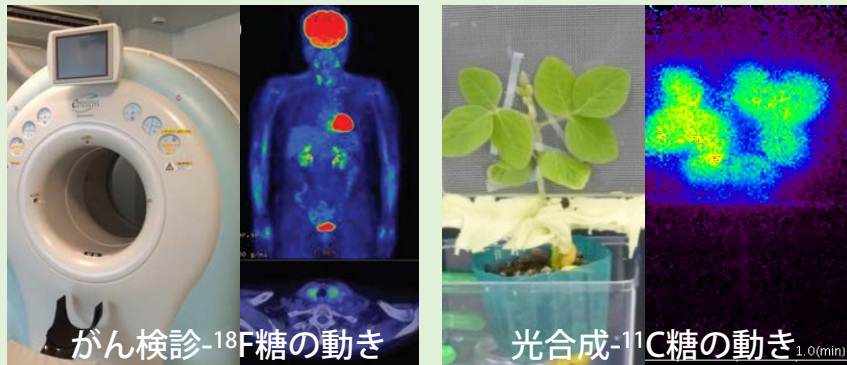
放射線を体外から照射

透過率・密度の違いを画像化

からだの構造を見る

生命のしくみを見る

RIイメージング

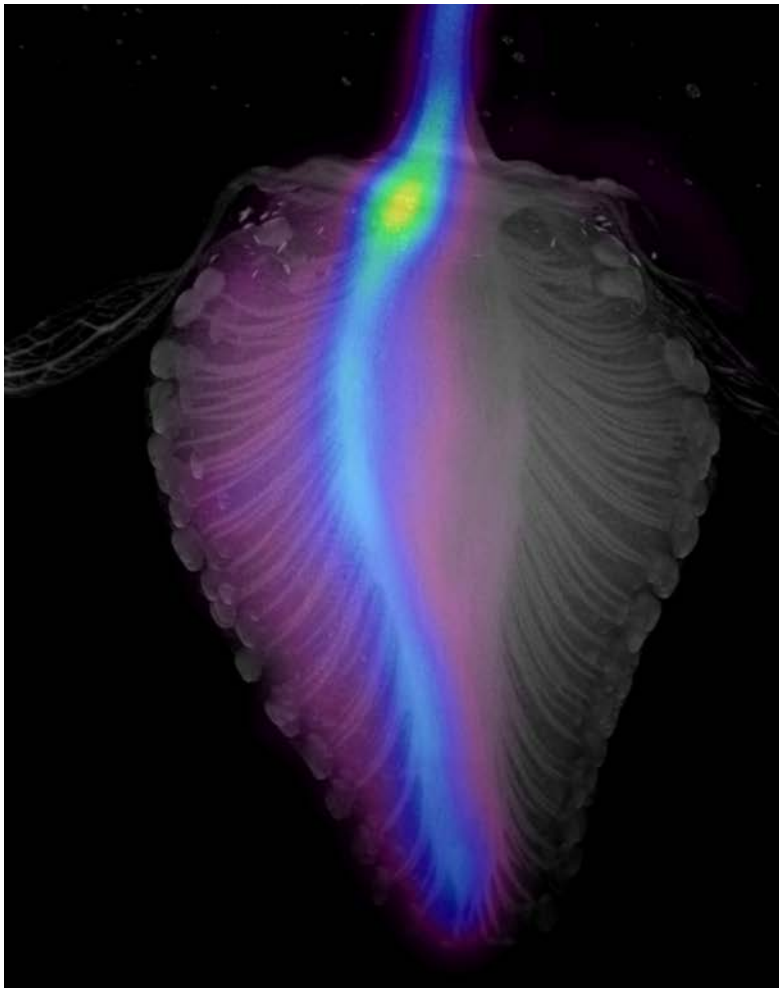


ラジオアイソトープ (RI) を体内へ投与

RIが放出する放射線を描いてその分布を画像化

代謝による体内物質の分布や動きを見る

1. はじめに（RIイメージングとスマート農業）
2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法
3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み
4. まとめ



第2回
「科学の美」

Instagram



写真コンテスト

科学技術団体連合主催
「科学の美」インスタ写真コンテスト

最優秀賞受賞作品

イチゴ果実内部に運ばれる糖

2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法(1)

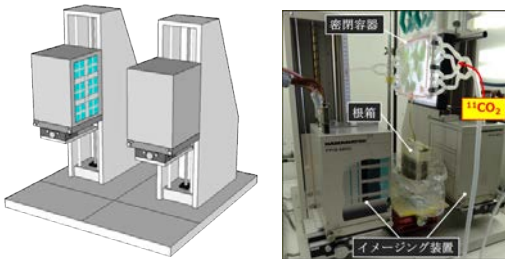
作物の生産性を議論するための 糖の動きを可視化するRIイメージング技術

- ◎ 光合成でつくられた糖に“しるし”をつける
RI製造 (^{11}C : 半減期20分)

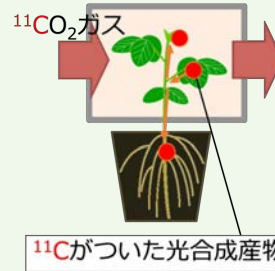


$^{11}\text{C}\text{CO}_2$ を製造

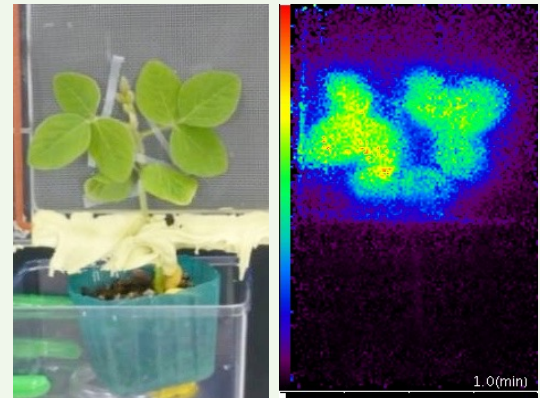
- ◎ “しるし”をつけた糖の動きを撮影する
RIイメージング装置



- ◎ 光合成でつくられた糖の動きを捉える



RIイメージング実験



光合成でつくられた糖が根へ、成長点へ
移行していく様子がわかる

実験風景

2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法(2)

イチゴの果実へ運ばれる糖

二酸化炭素のRI($^{11}\text{CO}_2$) を吸収させ葉



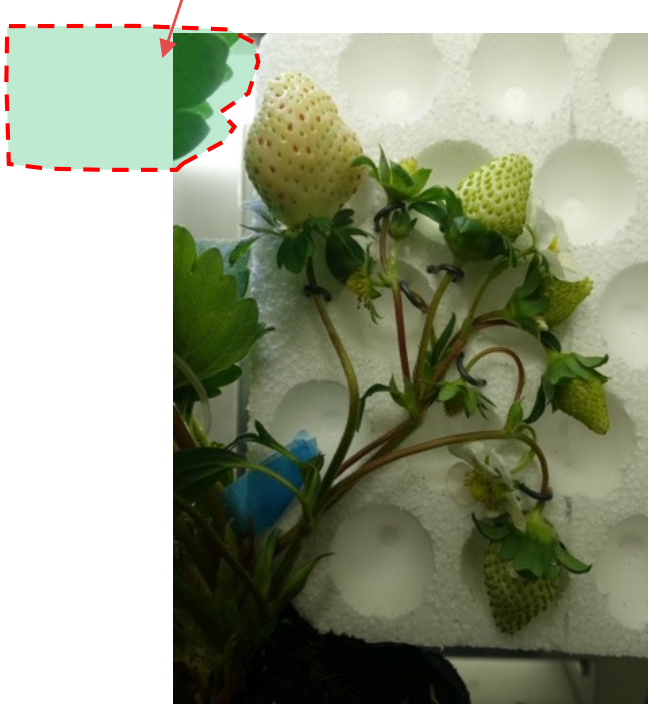
^{11}C のしるしが付いた糖
が果実へ運ばれる様子



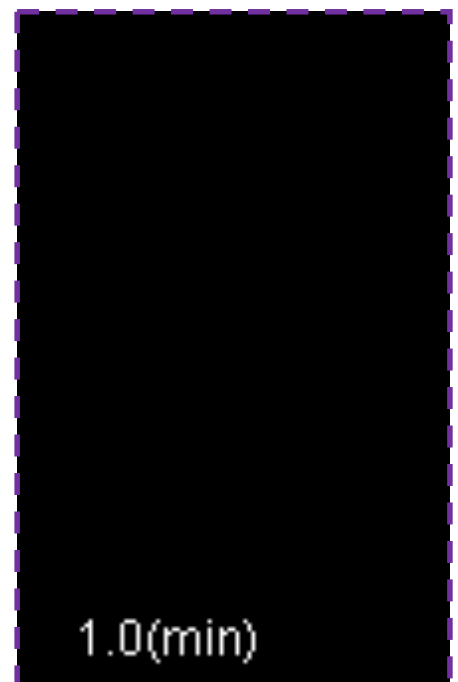
2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法(3)

イチゴの果実へ運ばれる糖

二酸化炭素のRI($^{11}\text{CO}_2$) を吸収させ葉



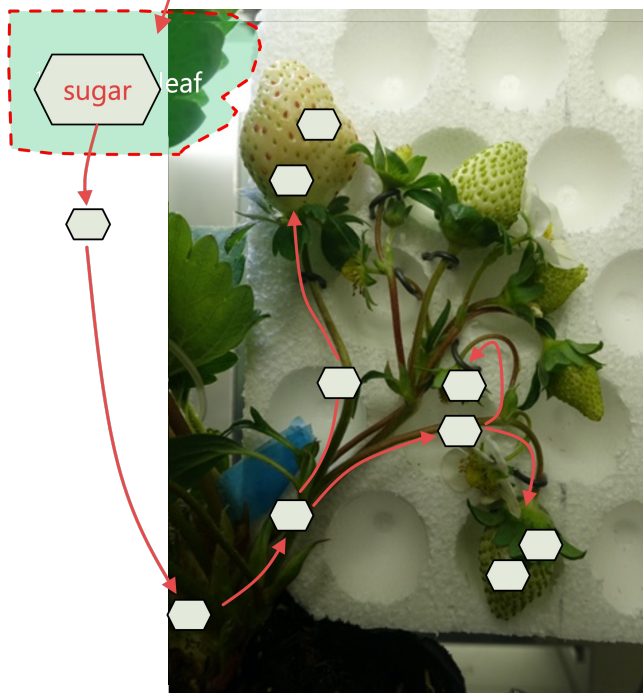
^{11}C のしるしが付いた糖
が果実へ運ばれる様子



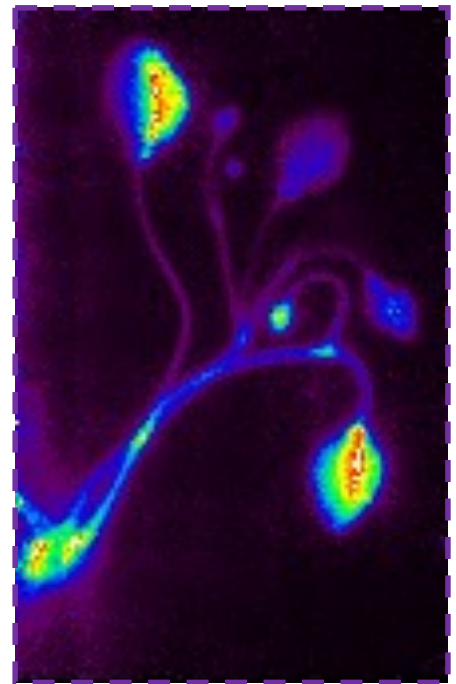
2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法(3)

イチゴの果実へ運ばれる糖

二酸化炭素のRI($^{11}\text{CO}_2$) を吸収させ葉

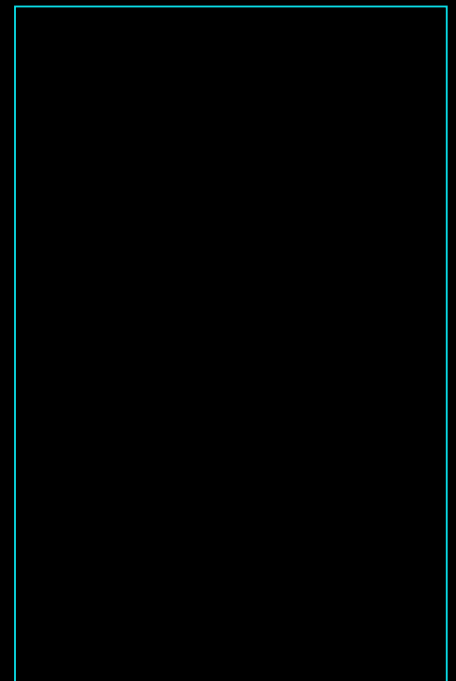
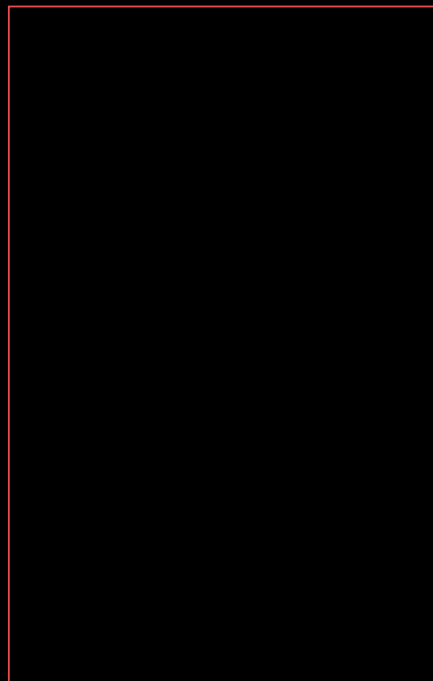
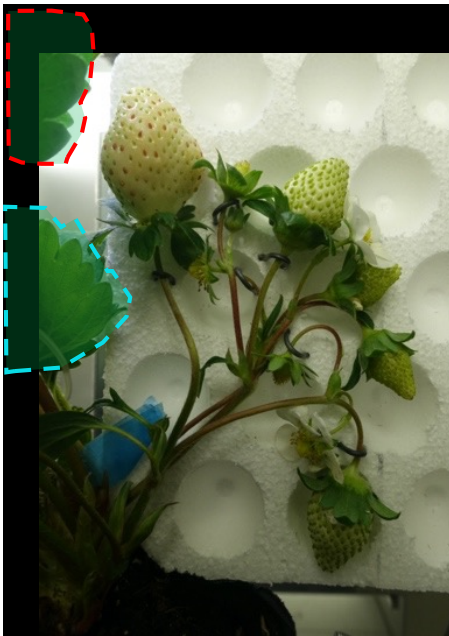


^{11}C の“しるし”が付いた糖
が果実へ運ばれる様子



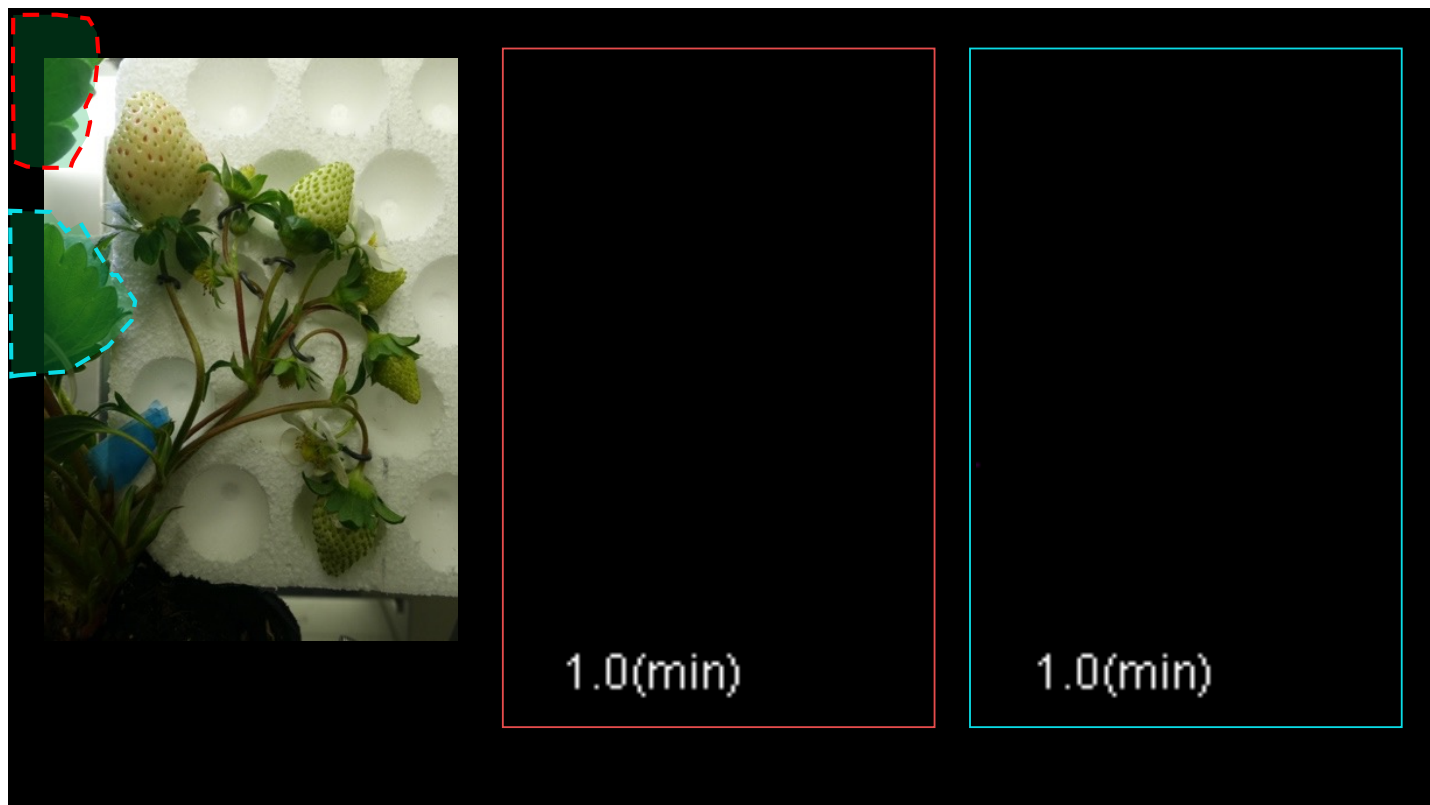
2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法(4)

葉の違いは？



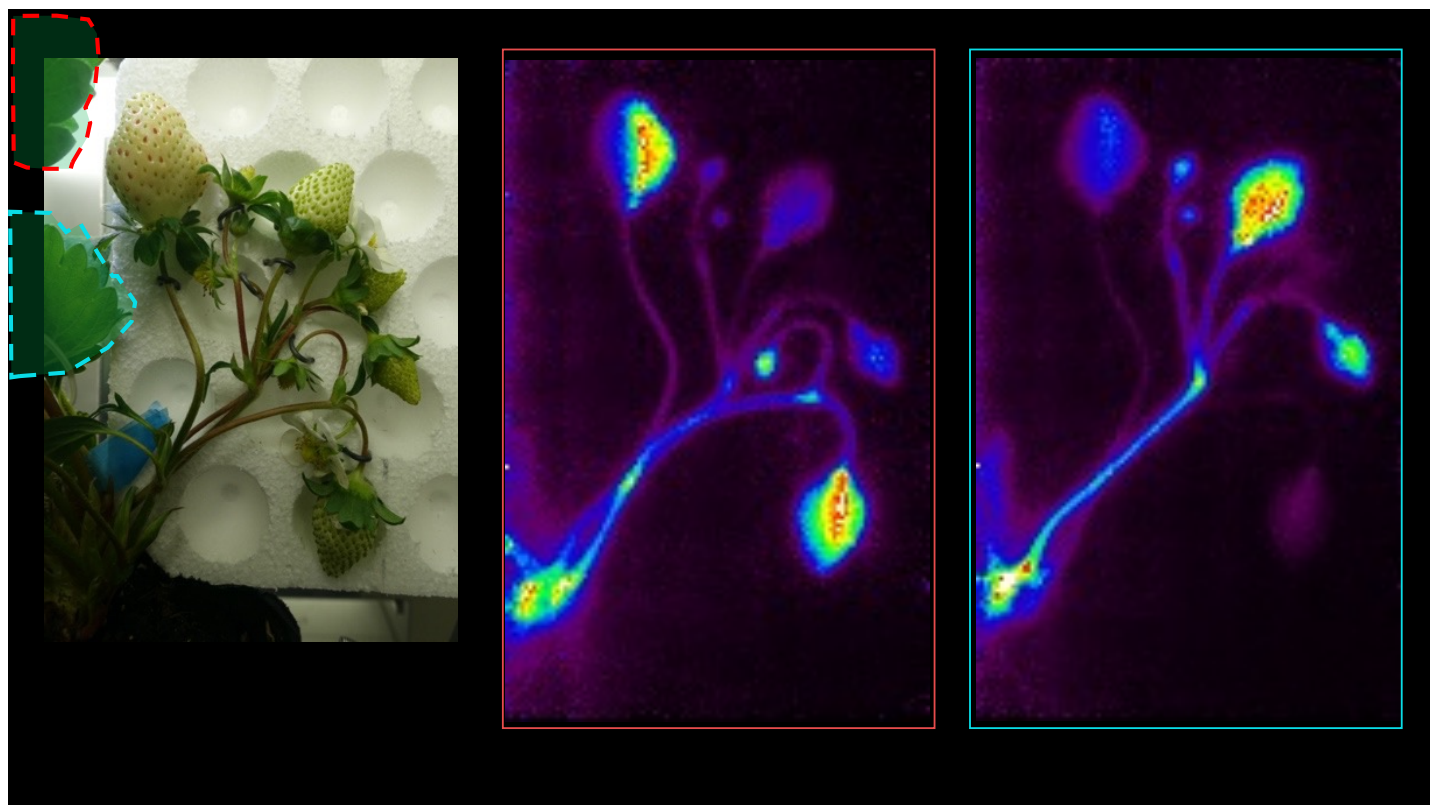
2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法(4)

葉によって糖が運ばれる果実が異なる

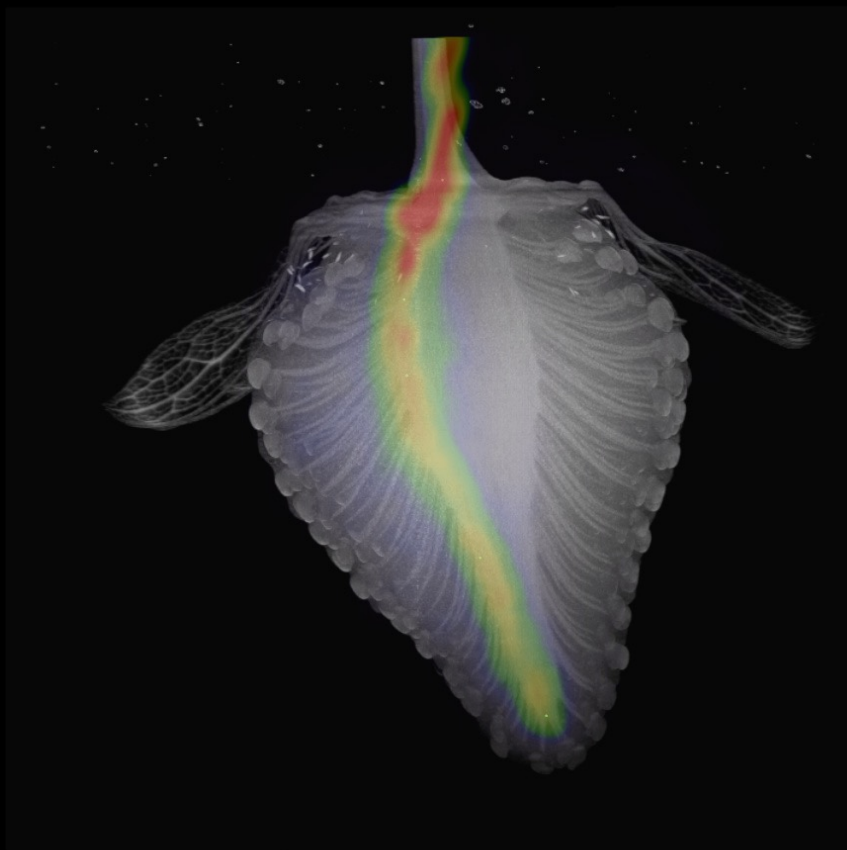


2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法(4)

葉によって糖が運ばれる果実が異なる



RIイメージング技術が映し出すイチゴ果実が甘くなる仕組み

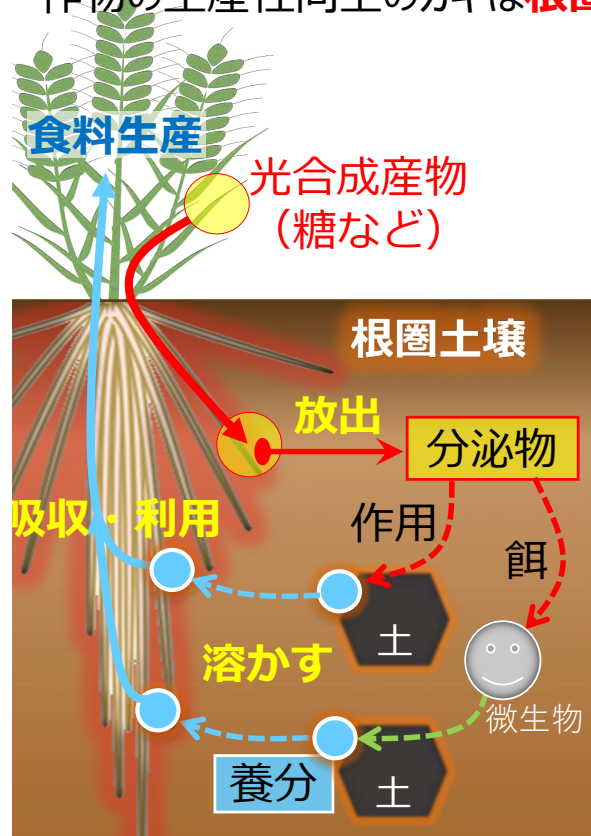


A

1. はじめに（RIイメージングとスマート農業）
2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法
3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み
4. まとめ

3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み(1)

作物の生産性向上のカギは**根圏のメカニズム解明**にある



根圏とは：

根とその周りの環境が影響し合う領域

根が直接利用できる養分は、
根の近傍の水に溶けたわずかなもののみ

根圏では、分泌物を体外に放出して、
養分を溶かし、吸収・利用しやすくしている。
(根の養分獲得能力)

技術的課題：

地下の生命活動をイメージングする方法がない

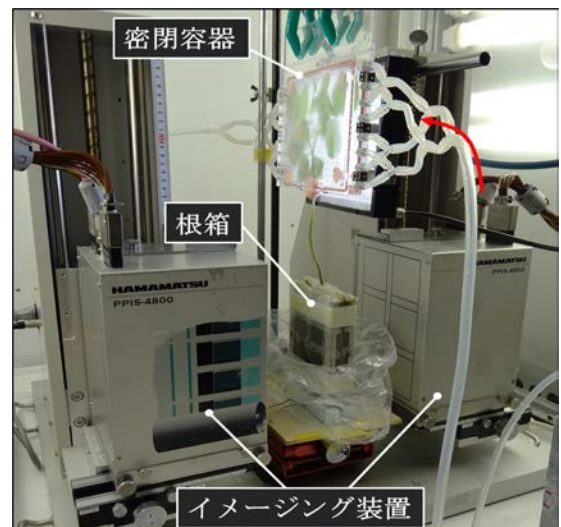
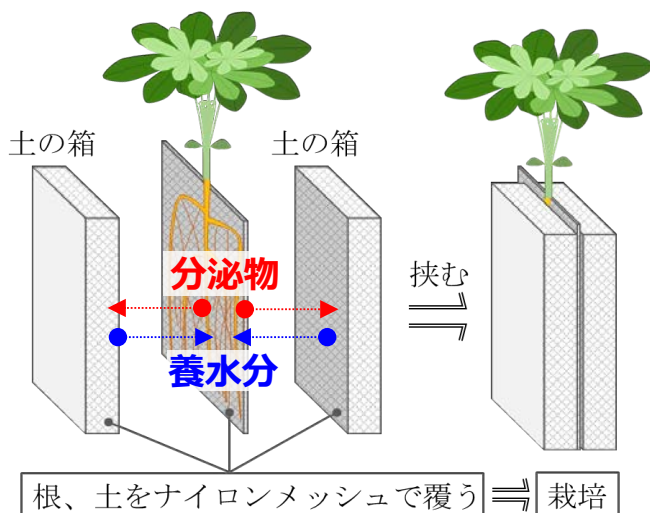
根圏イメージング技術の開発

3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み(2)

根圏イメージング：植物が土壌中にいつ、どれぐらいの**分泌物を放出**しているのか？をとらえるための方法

根を単純化し分離しやすくするための栽培
容器の作成

根を単純化し分離しやすくするための栽培
容器の作成



3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み(3)

根圏イメージング技術を用いた実験



ダイズ
(枝豆)



「根箱」で栽培した様子

ルーピン
(ルピナス花)



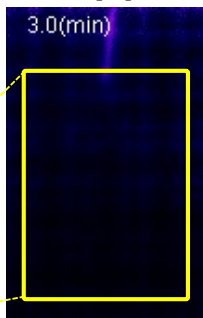
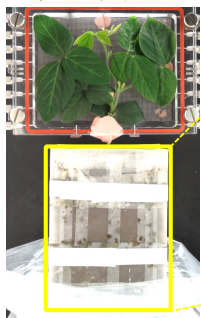
「根箱」で栽培した様子

3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み(4)

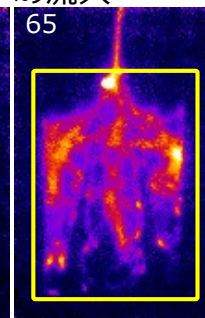
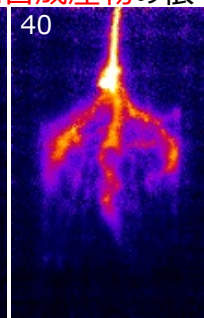
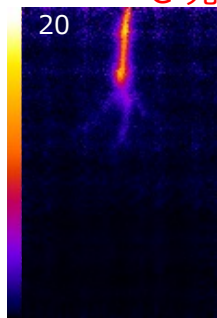
根圏イメージング実験の撮像結果

ダイズ

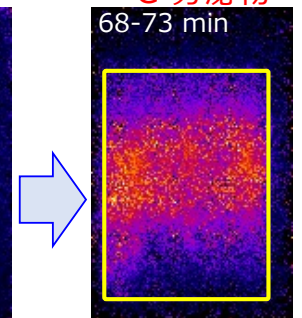
動画像



^{11}C -光合成産物の根への流入



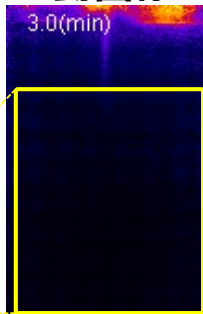
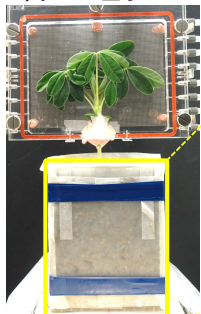
^{11}C -分泌物



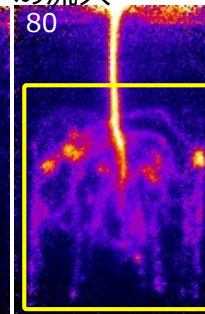
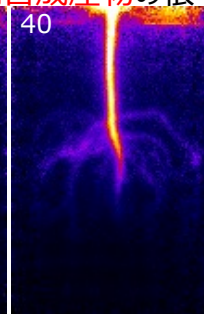
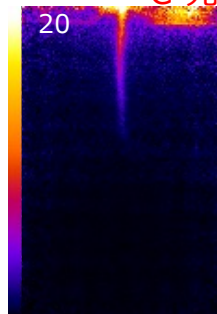
根圏土壌への働きかけがほぼ均一

ルーピン

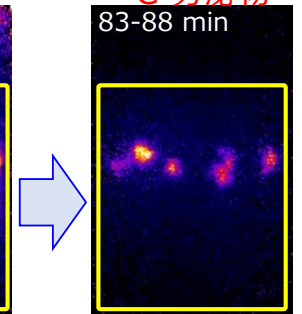
動画像



^{11}C -光合成産物の根への流入



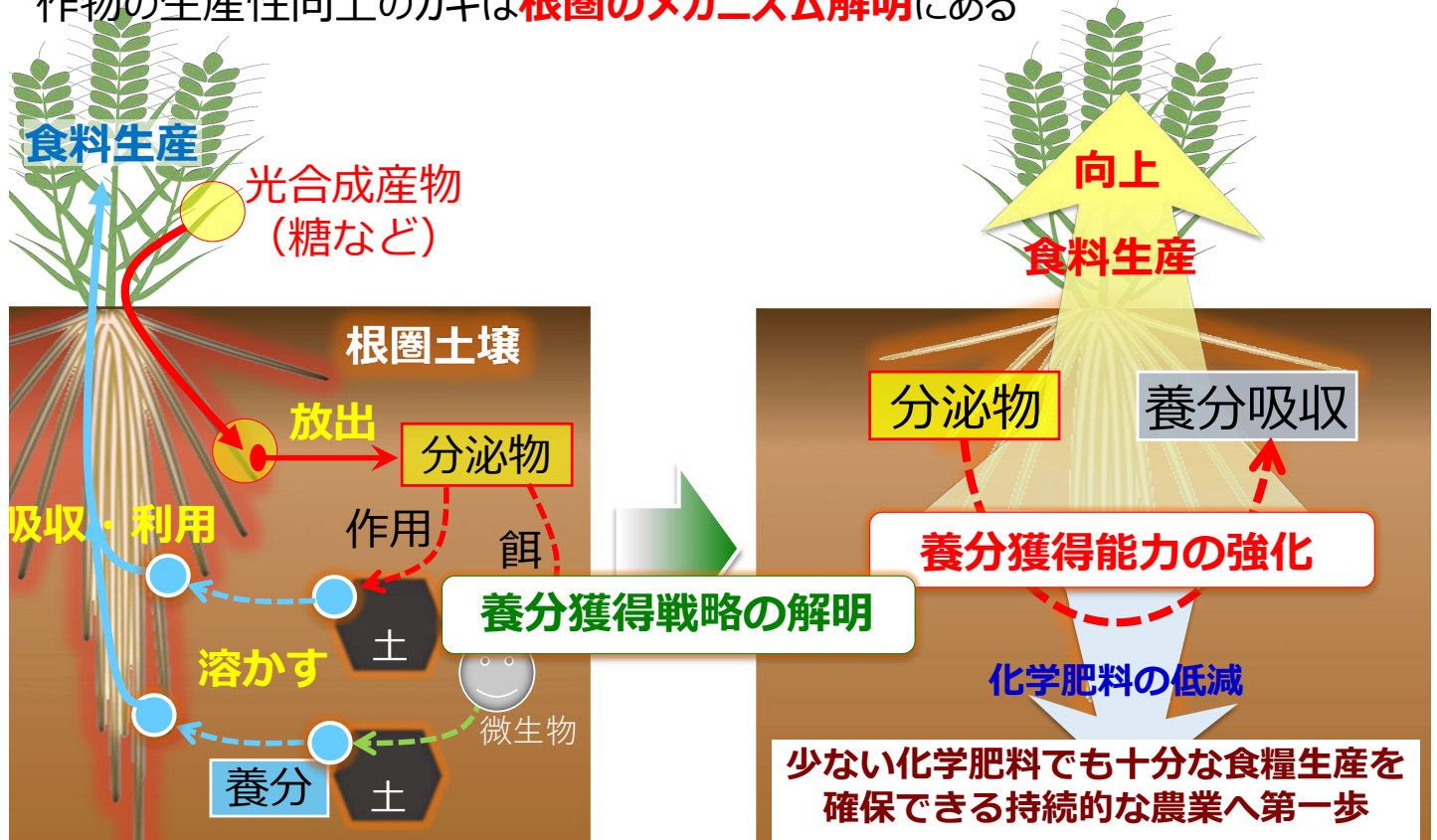
^{11}C -分泌物



根圏土壌への働きかけが局所的

3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み(5)

作物の生産性向上のカギは**根圏のメカニズム解明**にある

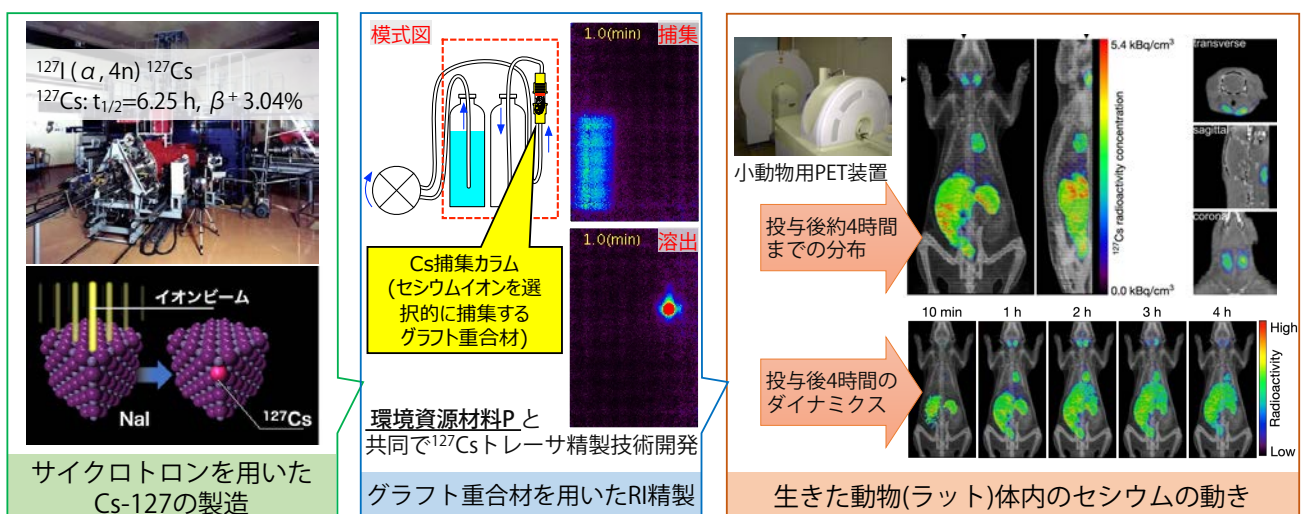


その他のトピックス(1)

有害元素RIイメージング研究例

体内に取り込まれたセシウムの動きが見える！

～PETで撮像できるポジトロン放出核種セシウム-127トレーサの開発に世界で初めて成功～



Suzui et al. Scientific Reports 2020

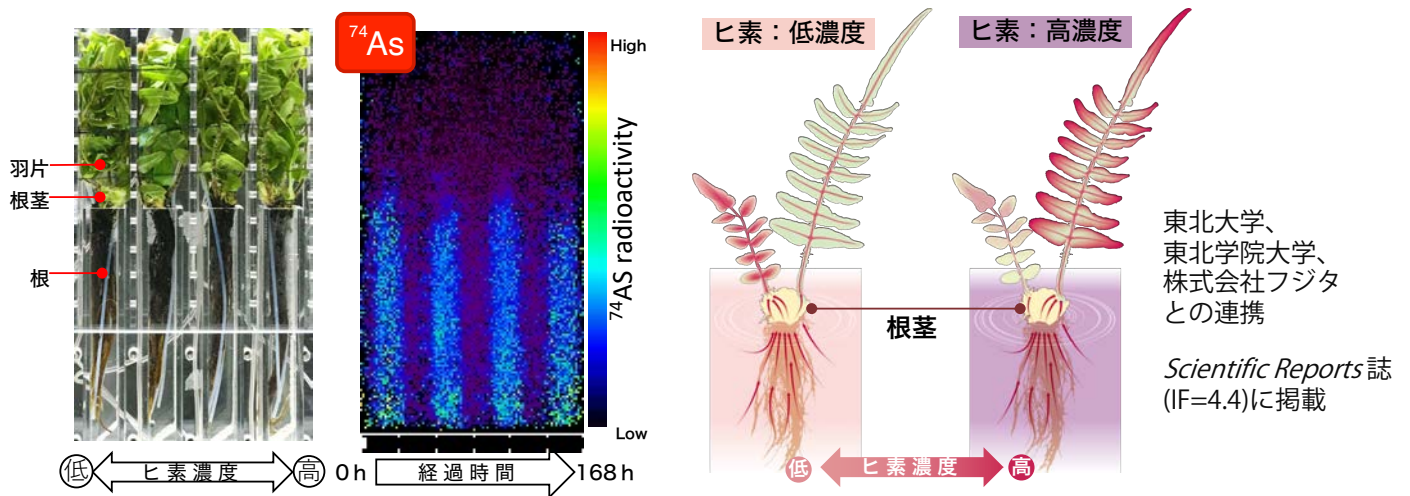
発表のポイント

- ・ ヘリウムイオンビームの照射で、PETで撮像できるポジトロン放出核種Cs-127を製造
- ・ セシウムイオンを選択的に捕集するグラフト重合材を用いて、Cs-127トレーサを精製
- ・ 生きた動物体内におけるセシウムの動きを世界で初めてイメージング

その他のトピックス(2)

有害元素RIイメージング研究例

モエジマシダが猛毒のヒ素に耐えるしくみが見えてきた！
— 世界初、ヒ素高蓄積植物の根茎の役割をイメージング技術で解明 —



研究のポイント

- 生きたモエジマシダがヒ素を根から吸収し体内に輸送する様子を可視化することに成功
- ヒ素の吸収・輸送に果たす「根茎」という組織の役割を解明
- 植物を利用したヒ素汚染土壌の浄化（ファイトレメディエーション）の推進に貢献

その他のトピックス(3)



干ばつ条件



土壤水分状況に応じて光合成産物を転流する根を素早く切り替える

Miyoshi et. al. (2023) Frontiers in Plant Science: Source-Sink Balance in Crops: Where does Carbon go?
2023/1/18 プレスリリース「干ばつを生き抜くイネの戦略」

まとめ

1. はじめに (RIイメージングとスマート農業)

栄養素の流れを見るRIイメージング技術

2. 光合成でつくられた糖の動きを見る方法

生産性に直結する糖の動きを

軸にした栽培技術

3. 地下で繰り広げられる養分を吸収する仕組み

根圏の共生関係を活用した養分獲得能力

を最大化する栽培技術



高収量化を実現する作物生産システムを創出

カーボンニュートラルに資するスマート農業で

持続可能な社会を実現