

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15632

研究課題名（和文）栽培現場における同化産物の転流動態のリアルタイム計測技術の開発

研究課題名（英文）Development of real-time measurement system for translocation dynamics of photosynthates in cultivation field.

研究代表者

三好 悠太（Miyoshi, Yuta）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 量子バイオ基盤研究部・主任研究員

研究者番号：60855724

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、生育期間中における葉から収穫器官への同化産物の転流動態をリアルタイムに計測可能な新技術の開発に挑戦する。植物体内の栄養元素の動きを可視化できるポジトロンイメージング技術と茎径および導管流束の計測センサーを統合活用し、茎径・導管流束の変化から茎部の転流動態を評価する「リアルタイム転流計測技術」を構築した。栽培現場で同化産物の転流動態をリアルタイムに評価することが可能となり、転流を基盤とした精緻な栽培管理によって高収益かつ安定した作物生産の実現が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、植物の栄養分の移動を実際の栽培現場でリアルタイムに計測可能な技術を確立することで、植物が環境変化に適応してどのように同化産物の転流動態を調節するのか、植物の生命を支える根本的な問いに対する科学的知見を得られることにある。社会的意義としては、植物生理学の理解を深め、効率的な栽培管理を可能にすることで、高収益かつ安定した作物生産を実現し、農業生産性の向上と食料供給の安定化に寄与する。

研究成果の概要（英文）：This study attempts to develop a new technique that enables real-time measurement of translocation dynamics of photosynthates from leaves to harvesting organs during the growing period. By integrating positron-emitting tracer imaging system, which can visualize the movement of nutrients in plants, and sensors for measuring stem diameter and sap flow, we have developed a "real-time translocation measurement system" to evaluate the translocation dynamics based on changes in stem diameter and sap flow. This system makes it possible to evaluate the translocation dynamics of photosynthates in real time at the cultivation site, and is expected to lead to highly profitable and stable crop production through sophisticated cultivation management based on translocation.

研究分野：作物生産科学、生物環境調節学

キーワード：転流 光合成産物 イチゴ 非破壊計測 RIイメージング サップフロー

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、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世界的な人口増加や異常気象による収量の不安定化を背景に、食料の安定供給が重要な課題となっている。AI や IoT を活用したスマート農業が普及し、特に植物工場などの次世代施設園芸が発展している。これらの施設では、植物の生理生態に基づく栽培技術が進展しているが、生産性を左右する重要な生理機能である同化産物のソースからシンクへの転流に関する技術は未発達である。栽培現場で転流動態を直接計測する技術がないため、その理解が不十分であり、効率的な栽培管理が難しいのが現状である。植物が持つ生産ポテンシャルを最大限まで引き出し、さらなる高収益安定生産を実現するためには、栽培現場での転流動態の評価法を確立し、転流を基盤とした栽培管理技術の学理を構築してその方法論を確立する必要がある。

そこで申請者は、転流動態の理解を深めるために、葉で同化された放射性同位元素 ( $^{11}\text{C}$ ) の動態を植物が生きたまま可視化し、定量評価するポジトロンイメージング技術 (PETIS) を育ててきた。撮像対象となる  $^{11}\text{C}$  の半減期が 20 分と短いため、同一個体に対し繰り返し供試できる強力なツールであるが、PETIS は放射線管理区域内でのみ使用可能で、栽培現場での利用は困難である。本研究では、栽培現場で計測可能な物理量を見つけ、それと PETIS のデータを関連付けることで、現場で同化産物の転流動態をリアルタイムに計測する方法を確立することを目指す。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、栽培現場で同化産物の転流動態をリアルタイムに計測可能な技術の開発である。同化産物の転流には、短時間で行う篩管転流 (一次転流) と長時間の二次転流がある。本研究では、瞬時の変動を想定するため、篩管転流を観測する必要があり PETIS を活用する。転流動態を反映した「物理量」として茎径と汁液流束 (サップフロー) に着目する。PETIS を用い茎部のリアルタイムな篩管転流速度を計測すると同時に、対象である茎の径とサップフローの変動を計測する。同一個体を繰り返し供試し、その度に転流を変動させ、茎径とサップフローの変動値とそれに対応する篩管転流速度の実測値を取得する。これらを直接関連付けることで、栽培現場で同化産物の転流動態を高精度かつリアルタイムに計測可能な「リアルタイム転流計測技術」を開発する。

### 3. 研究の方法

PETIS と茎径センサ、サップフローセンサを統合活用し、「リアルタイム転流計測技術」を開発する。具体的には以下の課題に取り組む。実験植物はイチゴを用いる。

#### (1) 実験システムの構築

PETIS の撮像視野に茎径センサおよびサップフローセンサを取り付けたイチゴ果柄を設置し、光合成によって取り込まれた  $^{11}\text{C}$  が果柄を篩管転流する様子をイメージングすることで、果柄における同化産物の篩管転流速度と茎径およびサップフローの変動を同時に測定する実験システムを構築する。また、篩管転流を変動させるために、果柄の一部を局所的に冷やすことで転流を可逆的に阻害する「コールドリング法」を構築する。

#### (2) リアルタイム転流計測技術の試作

構築した実験システムを用い、果柄の篩管転流を PETIS で 2 時間程撮像する。撮像終了後、篩管転流を変動させ、再び PETIS による篩管転流の撮像を行う。このような測定を繰り返し行い、茎径およびサップフローの変動値とそれに対応する篩管転流速度の実測値を取得する。茎径およびサップフローの変動から篩管転流速度を評価する「リアルタイム転流計測技術」の試作を開

発する。

### (3) リアルタイム転流計測技術の実証試験

実際のイチゴ栽培現場へ試作した計測技術を導入し、栽培期間を通して篩管転流速度を測定する。「リアルタイム転流計測技術」の非侵襲性や有効性について検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 実験システムの構築

茎径センサおよびサップフローセンサを取り付けて、PETIS と同時に解析できるシステムを開発した。光合成によって取り込まれた  $^{11}\text{C}$  が果柄を篩管転流する様子をイメージするだけでなく、果柄における同化産物の篩管転流速度と茎径およびサップフローの変動を同時に測定することを可能とした。図 1 に構築したシステムの一部を示す。

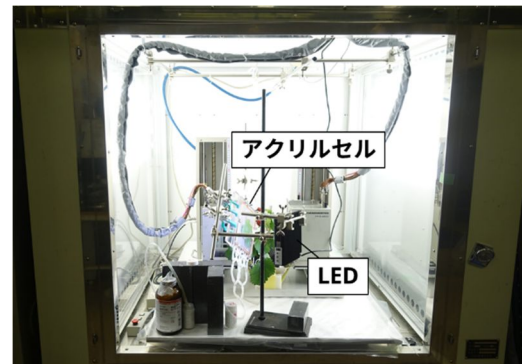


図 1 PETIS 実験システム

$^{11}\text{CO}_2$  を外部にリークすることなくイチゴ果柄に与えるための投与セル(アクリルセル)を作成した。また、PETIS を設置しているドラフト内部(温度調節可)に植物育成用の調光機付き LED を設置し、光強度、気温および相対湿度を実験に合わせて調節可能とした。PETIS は、半減期約 20 分のペースで減弱する  $^{11}\text{C}$  放射強度を補正しつつ像を結ぶ。しかし、 $^{11}\text{C}$  放射強度が極端に少なくなる撮像後半では補正の影響を大きく受け、画像に多くのノイズが発生し粗くなる。そこでイチゴ果実への転流撮像試験を行い、 $^{11}\text{CO}_2$  の葉への投与直後から 5 時間 PETIS 撮像を実施したところ、PETIS 撮像開始から 180 分が経過すると画像上のノイズが急激に増加することが分かった(図 2)。イチゴの葉で同化された  $^{11}\text{C}$  標識光合成産物が、葉柄、基部を通過し、新葉や果実へと転流する様子を撮像する場合、最大約 3 時間の撮像が適していることを確認した。また、イチゴ果実への  $^{11}\text{C}$  転流率および PETIS の  $^{11}\text{C}$  検出効率、さらに実験施設で製造可能な 1 日の  $^{11}\text{C}$  量(1GBq)を加味すると、複数回の撮像実験を実施することを考慮し 1 回の撮像試験における葉への  $^{11}\text{C}$  投与量は約 100MBq が望ましいことが確認された。

また、チラー等の冷却装置を使用しない小型のコールドリングシステムも新たに構築した(図 3)。一対のペルチェ素子を使用し、素子と素子の間に果柄を挟み局所的に冷やすことで転流を可逆的に阻害するコールドリングを構築した。ペルチェ素子へ流す電流値によって果柄冷却温度を調節可能とした。

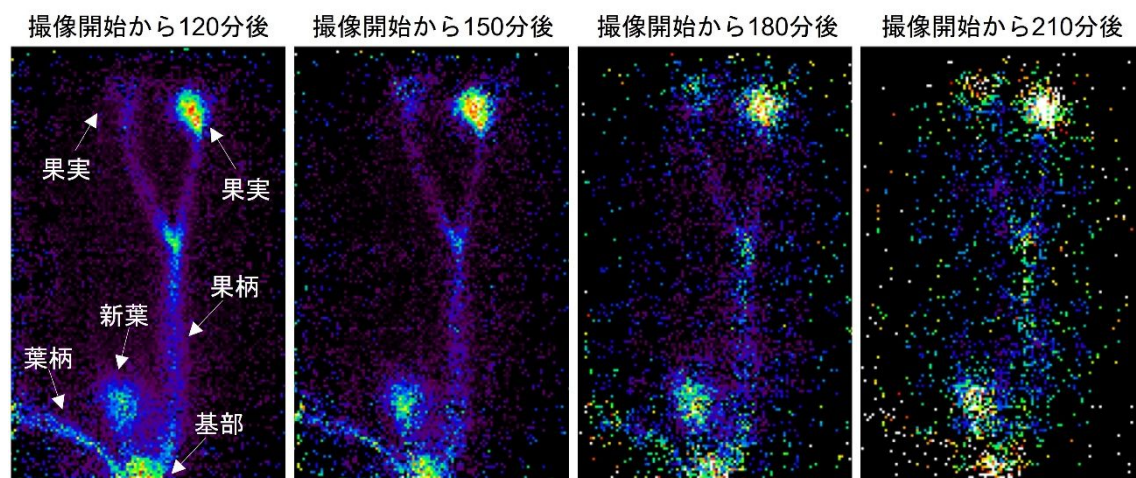


図 2 PETIS によるイチゴ果実への  $^{11}\text{C}$  標識光合成産物の転流撮像例

## (2) リアルタイム転流計測技術の試作

サップフローセンサを切断したイチゴ果柄に取り付け、果柄上流に小型の水ポンプを接続し、下流より漏れ出る流出液量 (mg) の経時変化を取得して、サップフローセンサの出力値の校正を行った。次に構築した実験システムを用い、篩管転流速度と茎径変化およびサップフローの同時計測を行った。同一個体を繰り返し撮像し、撮像ごとにコールドリングを用いて篩管転流を変動させ、茎径およびサップフローの変動値とそれに対応する篩管転流速度の実測値を取得した。篩管転流速度と茎径変化の間に明確な関係性は見られなかったが、一方でサップフローセンサの出力値は篩管転流速度の変動にあわせて変化しており、イチゴ果柄に設置したサップフローセンサとコールドガードリングによる転流抑制システムを活用することで、篩管転流速度を推定できることを確認した(図4)。篩管転流速度の実測値とサップフローの計測値とを関連付けることで、リアルタイム転流計測技術の試作を構築した。

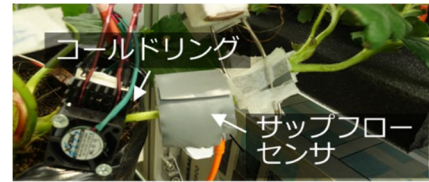


図3 イチゴ果柄に設置したコールドリングおよびサップフローセンサ

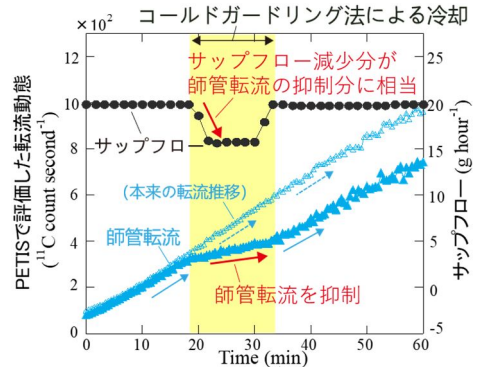


図4 コールドリングによる転流抑制およびサップフローの計測例

## (3) リアルタイム転流計測技術の実証試験

構築したリアルタイム転流計測技術の試作を植物育成庫内にて栽培しているイチゴの果柄に設置し、栽培期間を通して計測を続けその有効性を検討した。着果果実が白熟期(肥大成長期)や赤熟期であり転流が活発な時期では、転流の変動に伴いプロトタイプの計測値も変動しており、本計測技術の有効性を確認できた。一方で、着果直後の緑熟期など転流が比較的活発な時期ではプロトタイプの計測値に対して転流変動の影響は表れなかった。果柄内の篩管流束が小さい時期でもそれらの変動を計測するために、より微細なサップフローの変化を計測可能なセンサの開発が必要であることが示唆された。また栽培期間を通じた装置の設置によって植物表面へのダメージや果実収穫量等への明確な影響は見られず、装置の非侵襲性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Miyoshi Y., Hidaka K., Yin Y.-G., Suzui N., Kurita K., Kawachi N.	4. 巻 1381
2. 論文標題 Non-invasive 11C-imaging revealed no change in the dynamics of photosynthates translocation of strawberry in response to increasing daylight integrals under low light conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Horticulturae	6. 最初と最後の頁 89 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17660/ActaHortic.2023.1381.12	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 -

1. 著者名 Yuta Miyoshi, Kota Hidaka, Yong-Gen Yin, Nobuo Suzui, Keisuke Kurita, Naoki Kawachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of photosynthate translocation dynamics to strawberry fruits in response to increasing daylight integrals at leaf surface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 QST Takasaki Annual Report 2021	6. 最初と最後の頁 94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Miyoshi Yuta, Hidaka Kota, Yin Yong-Gen, Suzui Nobuo, Kurita Keisuke, Kawachi Naoki	4. 巻 12
2. 論文標題 Non-invasive 11C-Imaging Revealed the Spatiotemporal Variability in the Translocation of Photosynthates Into Strawberry Fruits in Response to Increasing Daylight Integrals at Leaf Surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 688887-688887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2021.688887	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 -

〔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 三好悠太, 日高功太, 尹永根, 鈴木伸郎, 栗田圭輔, 河地有木
2. 発表標題 明期の経過に伴い変化するイチゴ果実への光合成産物転流動態の解析
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2021年度北海道大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三好悠太, 長尾悠人, 山口充孝, 鈴木伸郎, 尹永根, 河地有木, 吉田英治, 田久創大, 田島英朗, 山谷泰賀, 久家徳之, 寺本翔太, 宇賀優作
2. 発表標題 OpenPETとX線CTの融合活用によるイネの根の構造と生理的機能の解析
3. 学会等名 日本生物環境工学会オンライン次世代研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三好悠太, 日高功太, 尹永根, 鈴木伸郎, 長尾悠人, 山口充孝, 河地有木
2. 発表標題 階層クラスター分析によるイチゴのソース葉・シンク果実対応関係の解明
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2020年度岡山大会
4. 発表年 2020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
---------	---------