

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K15228

研究課題名（和文）RIイメージング技術による同一果房内の果実肥大の不均一性生起メカニズムの解明

研究課題名（英文）Evaluation of fruits developing mechanism by using radioimaging system

研究代表者

尹 永根（Yin, Yong-Gen）

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 放射線生物応用研究部・主任研究員（定常）

研究者番号：50609708

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：トマト果実への光合成産物の転流と分配は果実収量を決定する最も重要な機能であるにも関わらず、その機能を観測し定量的に解析することは困難であった。本研究では、放射線イメージング技術を利用して、生きたトマトの個別の葉から果房内の各果実への転流・分配過程を連続的に動画像として捉える可視化技術を開発し、光合成産物の長距離輸送とその各果実への分配機序を解析することに成功した。これによって、果房の上下に位置する個別の葉の果実への光合成産物の輸送機序とその寄与を明らかにする強力なツールであることを示し、トマトの果実肥大を促進させる摘葉・摘果技術の科学的根拠を提供するものとして有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、果房内の果実肥大の不均一性に注目して、果実発達の経時的・空間的变化に伴う光合成産物の転流の動態変化を連続的に可視化し、その蓄積メカニズムを総合的に解析する技術を開発したことで、従来困難だった葉と果実間の炭素の輸送と分配を高い精度で定量的に評価することを可能にし、将来的には高収量トマトの生産に向けた品種改良、栽培技術の高度化など幅広い実用的な技術への発展が期待され、高品質・高収量・省力化などの栽培技術を併せ持つ果実生産体系の実現に貢献できることから、学術面、農業生産面の双方においても大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：Translocation and distribution of photosynthetic products from leaves to the tomato fruits are the most important functions for determining fruit yield and quality; however, they were difficult to be observed and quantitatively analyzed. In this study, we developed a live imaging method to observe the process of photosynthate translocation and distribution from individual leaves to each fruit of the cluster in tomato plants using current radiotracer imaging technology, and succeeded in analyzing the long-distance translocation route and photosynthates distribution. The established method is a powerful tool to clarify the mechanisms of carbon partitioning between individual leaves and fruits in the whole plant body, and it can provide the scientific basis on developing and optimizing the cultivation techniques such as the leaf picking and fruit picking methods to promote the fruit yield.

研究分野：園芸科学

キーワード：光合成産物 転流 トマト 果実

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トマトの高収量・省力化を目指す研究の多くは、栽培環境の最適化に注目しており、果房のシンク強度を強化することに着目した研究は僅少である。既存の栽培技術では植物の生育環境の最適化に偏重しており、その生育促進効果によって果実収量は増加するものの、収穫対象ではない茎葉部も必要以上に過繁茂することが問題となっている。これは、ソース葉における光合成産物の生産能力の急増に、受け入側の果房(複数果実の集合体)のシンク能力の向上が追いついていないことが原因であると考えられる。我々の先行研究では、トマト果実への光合成産物の転流率は果房内の果実数と相関が強く、果実数の増加とともに果房への転流率も上昇することを明らかにしている。この結果は、果房内の着果数が果房のシンク能力を制御する重要要因であることを強く示唆している。このため、トマトの高収量化実現の鍵は、果房内の着果数を増やし、且つ、均一に肥大させることにより、果房のシンク能力を最大化することにあると考えられる。これらの状況を踏まえ、同一果房内の果実肥大の原資である光合成産物の転流動態とその蓄積パターンを観測し定量的に解析する必要があるが、技術的に困難である。研究代表者の所属研究グループでは、生きたままの植物体内の放射性トレーサの分布の変化を直接画像化する放射線イメージング技術の開発を行ってきた。例えば、トマトやダイズにおける光合成産物の各器官への転流の様子を $^{11}\text{CO}_2$ (半減期 20 分) とポジトロンイメージング技術 (PETIS) を用いて撮像し、定量的に解析する実験系を確立している。研究代表者は、この実験系を活用して果房の各発達過程において、同一果実を対象に転流のプロセスを連続的に追跡し、各果実への光合成産物の時間的・空間的变化を数理的に解析することにより、果実肥大の不均一性の生起メカニズムを解明できると考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、トマト果房の発達過程における個々の果実への光合成産物の転流動態に着目し、同一果房内の果実肥大の不均一性生起メカニズムを解明することを目的とする。具体的には、トマトの葉に $^{11}\text{CO}_2$ を与え、同一果房内の個々の果実の各発達過程における光合成産物の転流を PETIS で連続的に可視化・定量化する。これにより、同一果房内の配置が異なる各果実への光合成産物の転流様式の時間的・空間的变化を数理的に解析し、これを基に、各果実において光合成産物の転流量や分配率の変化を定量的に解析する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成する上で、トマトの各葉位と個々の果実間の光合成産物の転流ネットワークを明らかにし、果房内の個別果実の配置(空間的要素)や発達ステージの変化(時間的要素)に伴う果実への光合成産物の転流の変化を詳細に解析する必要がある。このためには生きたままのトマトの葉に $^{11}\text{CO}_2$ を与えて PETIS を用いて撮像する実験系を確立することが不可欠である。本研究では、中玉品種で遺伝的バックグラウンドが明確なトマト品種 'MoneyMaker' を用いて果房の開花期から果実成熟期までの各過程における光合成産物の転流動態を可視化し、定量的な解析を行った。具体的には、トマトを土ポットで約 110 日間栽培し、3 段階摘心を行った。第 2 果房付近の数枚の葉それぞれに対して順次 $^{11}\text{CO}_2$ を投与すると同時に、PETIS を用いて第 2 果房内の各果実への ^{11}C 標識光合成産物の移行過程を撮像した。 $^{11}\text{CO}_2$ トレーサガスは AVF サイクロトロンを利用し、 N_2 ガスに 18 MeV のプロトンビームを照射することで、 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{11}\text{C}$ 反応により製造した。 ^{11}C は半減期が短いため、3 時間ぐらい経過すると放射能が減衰してほぼ無くなる。この性質を利用して、同じ植物個体の異なる葉に対して繰り返し撮像実験を行った。例えば、果房の直上葉に対して $^{11}\text{CO}_2$ を投与し、 ^{11}C 標識光合成産物の果実への移行過程を 3 時間撮像した後、すぐその上位の葉に $^{11}\text{CO}_2$ を投与することで、異なる葉から同じ果実へ輸送される ^{11}C 標識光合成産物の転流を繰り返して撮像した。'MoneyMaker' は果房と果房の間に 4 枚の葉を形成する特徴を持っているため、合計 7 枚の葉に対して撮像実験を行った(図 1)。得られた 3 時間の動画像データは、画像解析ソフト ImageJ を用いて 10 秒 ~ 10 分 / フレームの連続画像を作成し、時間と共に変化する各果実への転流量を定量的に解析した。

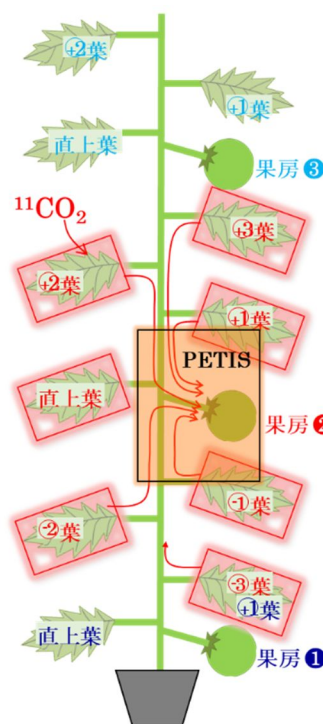


図 1 連続撮像方法

4. 研究成果

得られた連続画像を解析した結果、'MoneyMaker' において葉で固定された ^{11}C 標識光合成

産物は $^{11}\text{CO}_2$ を投与してから約 70 分後に果柄に到達し、その後徐々に各果実へ輸送された。しかし、果房内の個別の果実への光合成産物の輸送パターンは各果房を境にその上位の葉と下位の葉で異なることが分かった (図 2)。果房直近の直上葉を中心に数えてその 2 枚上の葉は主に果房内偶数列の果実に対して、その 1 枚下の葉は主に奇数列の果実に対して光合成産物の輸送を担っており、概ね 2 枚以上の葉が一つの果実を担当していることが分かった。また、果房の位置より上部の葉から下方に向かう光合成産物の輸送経路は根と果実の両方向に分かれているのに対し、果房の位置より下部の葉から頂点へ向かう光合成産物の輸送経路は果実一方向であり、果房を越えて生長点に輸送しないことが分かった。また、直上葉は果房直近に位置するにもかかわらず、その果房に対して少なくとも 3 時間以内のタイムスパンでは光合成産物の直接的な輸送をほとんど行わないことが分かった。果房上下の葉における果実への光合成産物の輸送と寄与は、直上葉を除いて主に 6 枚 (上 4 枚、下 2 枚) が担っていることが分かった。さらに、一つの果実に対して 2 枚以上の葉が光合成産物を供給しており、肥大が遅れた若い果実より肥大期の果実への転流が優先されていることが分かった。

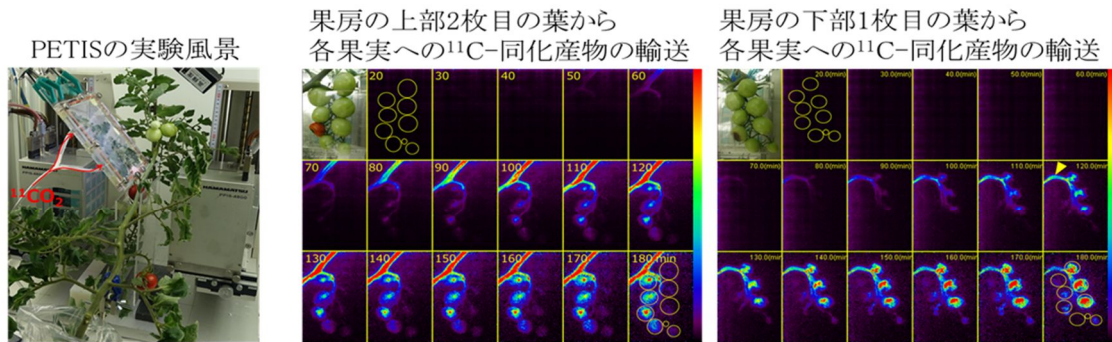


図2 トマト果実への光合成産物の輸送過程のPETISによる可視化

本実験で用いた ^{11}C は短半減期のため、葉の光合成によって生成された直後の光合成産物の果実への転流を追跡することが可能である。そのため、本研究で得られた画像データはおもに篩管転流を画像化したことになる。これら複数の葉と果実間の篩管転流の相関関係を模式図としてまとめると、直上葉は果実との間に直接的な篩管の連絡が形成されていないこと、果房間に位置する葉はその上下の果実と根に向かって篩管の連絡が形成されていることを示している (図 3)。このように、果房周辺の葉と果実の間の複雑な光合成産物の需給関係が果実の肥大に大きなバラツキをもたらしていることを初めて画像として示すことができた。これによって、肥大が遅れた果実を担当する葉に対して集中的に光合成能力と輸送能力を強化するような栽培方法の開発が期待される。また、それぞれの葉と果実の篩管転流の関係性を基に、いつどの葉を摘出すれば良いかなどの整枝技術の最適化に光合成産物の転流をベースにした根拠を与えることが可能となり、トマトの生産性の向上に貢献できると考える。

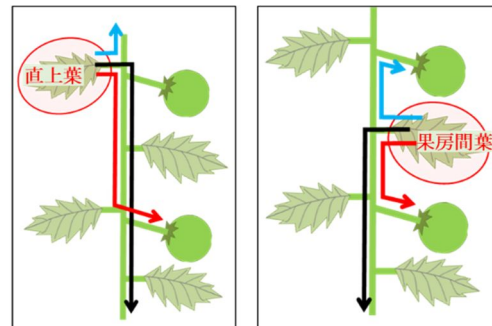


図3 篩管連絡の推定模式図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 尹 永根
2. 発表標題 Visualizing and evaluating long-distance phloem transport of photoassimilates by the PETIS and ¹¹ C02 tracer
3. 学会等名 第61回日本植物生理学会年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尹 永根
2. 発表標題 Non-invasive visualizing of photoassimilates movements in a living plant by using the positron-emitting tracer imaging system
3. 学会等名 第16回 日本ナス科コンソーシアム年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尹 永根, 山崎 治明, 鈴井 伸郎, 石井 里美, 島田 浩章, 河地 有木
2. 発表標題 Cold-girdling法による光合成産物の篩管輸送の局所可逆的制御
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2019年度静岡大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尹 永根, 森 欣順, 鈴井 伸郎, 栗田 圭輔, 山口 充孝, 三好 悠太, 石井 里美, 長尾 悠人, 芦苅 基行, 永井 啓祐, 河地 有木
2. 発表標題 イネにおけるガスの長距離移動の可視化
3. 学会等名 アグリ・バイオ公開シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尹 永根, 森 欣順, 鈴井 伸郎, 栗田 圭輔, 山口 充孝, 三好 悠太, 石井 里美, 芦苺 基行, 永井 啓祐, 河地 有木
2. 発表標題 Non-invasive imaging of gas movement in rice under deepwater conditions by using $[^{13}\text{N}]\text{N}_2$ gas
3. 学会等名 The 13th International Society of Plant Anaerobiosis Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尹 永根, 鈴井 伸郎, 石井 里美, 栗田 圭輔, 三好 悠太, 長尾 悠人, 山口 充孝, 河地 有木
2. 発表標題 トマト同一果房内の個別果実への転流様式は葉位によって異なる
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度神奈川大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尹 永根, 鈴井 伸郎, 石井 里美, 栗田 圭輔, 三好 悠太, 長尾 悠人, 山口 充孝, 河地 有木
2. 発表標題 ポジトロンイメージング技術によるトマト果実への光合成産物の転流様式の可視化
3. 学会等名 第36回日本植物細胞分子生物学会金沢大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尹 永根, 鈴井 伸郎, 石井 里美, 栗田 圭輔, 三好 悠太, 長尾 悠人, 山口 充孝, 河地 有木
2. 発表標題 トマト果実への光合成産物の転流様式の可視化
3. 学会等名 第15回日本ナス科コンソーシアム年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尹 永根, 鈴井 伸郎, 石井 里美, 栗田 圭輔, 三好 悠太, 長尾 悠人, 山口 充孝, 河地 有木
2. 発表標題 トマトの各葉位と果実間における維管束連絡網の可視化
3. 学会等名 日本生物環境工学会2018年東京大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尹 永根, 鈴井 伸郎, 石井 里美, 栗田 圭輔, 三好 悠太, 長尾 悠人, 山口 充孝, 河地 有木
2. 発表標題 トマトのソース・シンク間の光合成産物の転流ネットワークの可視化
3. 学会等名 アグリ・バイオ公開シンポジウム
4. 発表年 2018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
---------	---------