

# 光合成の動態解明に基づく イチゴの精密環境調節技術の開発

農研機構九州沖縄農業研究センター  
暖地畑作物野菜研究領域  
日高 功太

## はじめに

近年、イチゴの施設生産では、ハウス内のCO<sub>2</sub>濃度を積極的に高めて光合成を促進させることで増収・高品質化をねらうCO<sub>2</sub>施用技術が全国的に普及拡大している。CO<sub>2</sub>施用等の環境調節を行ううえでは、環境調節を通してイチゴの物質生産を左右する「光合成」や、光合成産物を運ぶはたらきである「転流」をどれだけ促進できるかを意識しながら行うことが重要である。そのためには、イチゴの光合成や転流の環境応答を解明し、それに基づく環境調節が必要であるが、これについては完全な解明には至っていない。また、今後のイチゴ生産では、2021年に農林水産省が策定の「みどりの食料システム戦略」にも掲げられている生産力向上とCO<sub>2</sub>排出抑制の両立を意識した新たな環境調節技術によるイチゴ生産体系の構築が求められる。

本稿では、上記の問題解決を目的として著者が取り組んでいる研究テーマ「光合成の動態解明に基づくイチゴの精密環境調節技術の開発」について、これまでの成果「イチゴ果実への光合成産物の転流動態の可視化」、「慣行比2.5倍の超多収生産技術(10t/10a)の確立」、「CO<sub>2</sub>排出抑制を志向した精密環境調節技術の開発」を紹介する。

## イチゴ果実への光合成産物の転流動態の可視化

イチゴ生産において、葉(ソース)で合成した光合成産物を果実等のシンクへ送るはたらきである「転流」は、収穫対象器官への光合成産物の集積を通して収量や品質を左右する重要な生理反応であり、これに基づく環境調節技術の開発が望まれている。しかし、計測の困難性から研究事例が少なく詳細なメカニズムは解明されていない。また、葉で作られた光合成産物がいつのタイミングで果実に転流されるのか等、光合成産物のリアルタイムな動態への関心が高まっており、これを調べるためには、転流動態を「非侵襲的」かつ時間・空間連続的に計測する方法が必要となる。

量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所(プロジェクトRIイメージング)は、放射性同位元素(RI)をトレーサーとして植物に投与し、植物体内を移行するRIの動きを可視化する

る positron-emitting tracer imaging system (PETIS) を開発している。PETIS で得られた転流画像を解析することで、転流動態の定量的な評価が可能となっている。そこで、<sup>11</sup>C で標識された RI の二酸化炭素 (<sup>11</sup>CO<sub>2</sub>) をトレーサーとしてイチゴ葉に投与し、PETIS を用いてイチゴ果実への光合成産物 <sup>11</sup>C の転流動態を初めて可視化・定量化した。PETIS による転流計測の概要を示す(図-1)。本計測システムでは、ポジトロン(陽電子)放出核種である <sup>11</sup>CO<sub>2</sub> をトレーサーとして用い、葉に投与された <sup>11</sup>CO<sub>2</sub> は、光合成によって <sup>11</sup>C で標識された光合成産物(糖)となり各器官へ転流される。<sup>11</sup>C は原子核の崩壊に伴ってポジトロンを放出し、ポジトロンは電子と結合して消滅する際に 180° 反対方向に同時に消滅ガンマ線を発生する。植物を挟んで対向配置したガンマ線検出器へ同時に入射したガンマ線を検出し、その入射位置からガンマ線の由来となった光合成産物 <sup>11</sup>C の存在位置を特定することで、植物体内にお

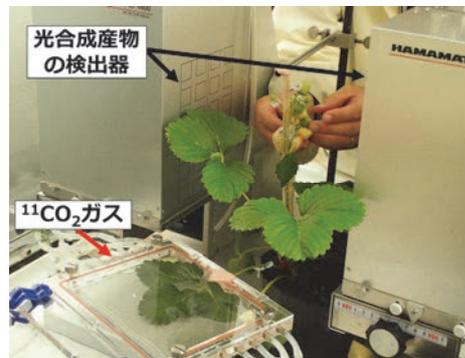
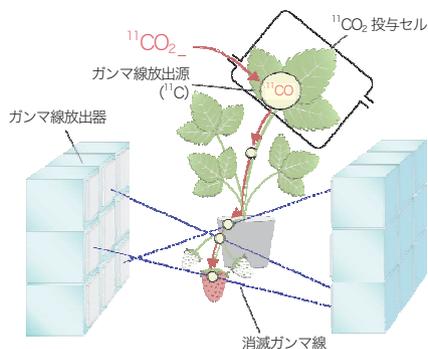


図-1 PETIS による転流計測の概要図(左)と植物セッティングの様子(右)

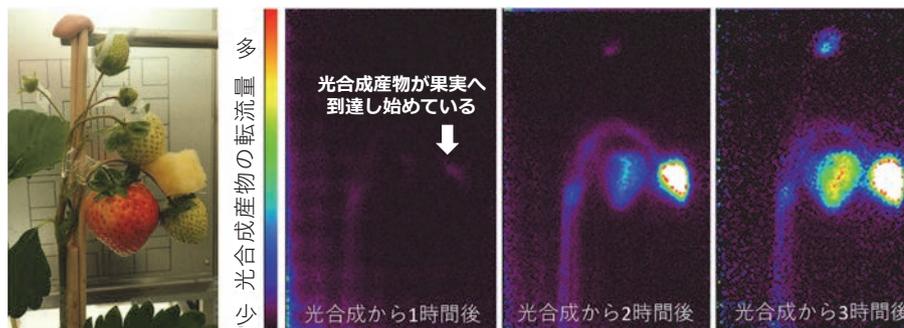


図-2 検出器に設置した果実（左）とイチゴ果実への光合成産物の転流の様子（右）

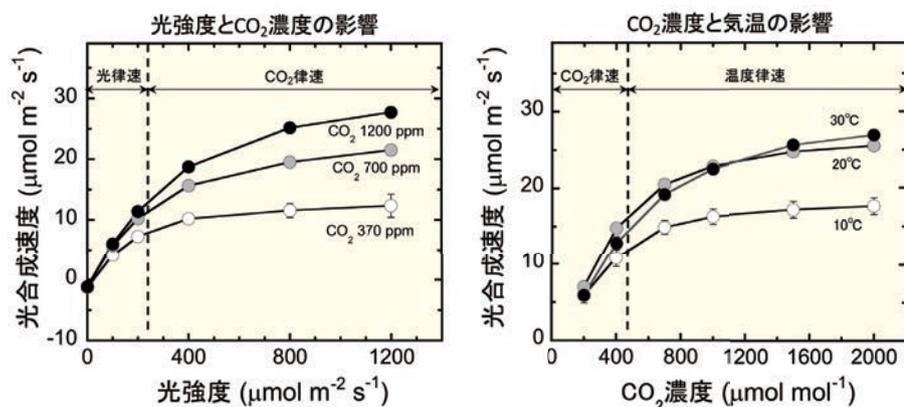


図-3 光強度、CO<sub>2</sub>濃度と気温に対するイチゴの光合成速度

る<sup>11</sup>Cの2次元分布画像を構築する。このガンマ線検出に基づく画像構築を連続して行うことで、植物体内における<sup>11</sup>Cの動態を動画像として取得することが可能になっている。イチゴ品種‘福岡S6号’（あまおう）をプラスチックポットで栽培し、葉を9枚、果実を6果に揃えた植物体を実験に供試した（図-2左）。PETISの撮像視野に果実を設置し、果房直下葉に約200MBqの<sup>11</sup>CO<sub>2</sub>を投与して、各果実への<sup>11</sup>C転流動態を180分間撮像した。

<sup>11</sup>CO<sub>2</sub>投与から1時間毎の<sup>11</sup>C分布画像を示す（図-2右）。葉に投与された<sup>11</sup>CO<sub>2</sub>が光合成によって取り込まれ、<sup>11</sup>Cで標識された光合成産物が果柄を経由して果実へと転流する様子を初めて可視化した。その結果、葉の光合成から約1時間後には、光合成産物が果実に到達し始めることが明らかになった。また、果実への<sup>11</sup>Cの転流速度が各果実によって異なり、白熟

期果実への転流速度が最も早く、ついで赤熟期果実、緑熟期果実の順となっていた。このことから、同一の果房内においても果実の着果順位によって転流活性が異なることが明らかになった（Hidaka *et al.* 2019）。

### 慣行比2.5倍の超多収生産技術（10t/10a）の確立

イチゴの反収増加のためには、環境調節だけでなく可動式栽培システムを用いた栽植株数の増加も効果的である。そこで、イチゴの10t/10a多収生産（慣行平均：4 t /10a）を目標に九州沖縄農業研究センターの太陽光型植物工場で「一季成り性多収品種の複合環境調節と可動式高設栽培システムを組み合わせた超多収生産技術の開発」に取り組んだ。

環境調節の条件設定のために、イチゴの葉における光合成の環境応答を測



図-4 慣行高設栽培（上）と可動式高設栽培（下）

定した。その結果（図-3左：各CO<sub>2</sub>濃度下での光—光合成曲線，図-3右：各気温下でのCO<sub>2</sub>—光合成曲線），光合成は一定以上の光強度下においてCO<sub>2</sub>濃度を370から1,200 ppmに高めることで顕著に促進されたが，200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以下の弱光下では光強度が光合成を律速し，CO<sub>2</sub>濃度の上昇による促進効果はみられなかった（図-3左）。20°Cの気温下での葉の光合成はCO<sub>2</sub>濃度を1,000ppmに高めることで顕著に促進された（図-3右）。気温30°C下でも20°Cと同等の促進効果がみられたが，気温10°C下では光合成促進効果が大きく低下した。これは，低温により光合成の関連酵素の反応が遅くなったためであると考えられる。

以上の光合成の環境応答に関する知見および弱光環境を改善する補光技術（Hidaka *et al.* 2013）に基づいて複合環境調節と多植栽培によるイチゴ品種‘紅ほっぺ’の10t/10a生産の実証試験を行った。本試験では、可動式高設栽培システム「吊り下げ式可動高設栽培システム」を用いてハウス空間あたりの栽植株数を増やした（図-4下）。栽培ベツ

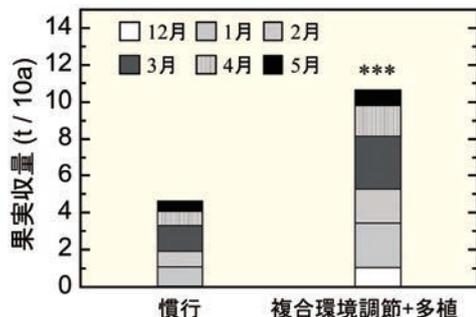


図-5 複合環境調節と多植栽培の組合せが果実収量に及ぼす影響  
 (\*\*\*) : t検定により0.1%水準で有意差あり

ドを作業時にだけ稼働させることで、無駄な通路幅を省き、栽培ベッド列数を慣行の高設栽培(図-4上)の1.5倍、すなわち栽植株数を10a当たり8,000株から12,000株に増やすことが可能となっている。光合成の環境応答データに基づいて(図-3)、葉の光合成促進のための複合環境調節(補光、早朝加温、換気、CO<sub>2</sub>施用)を行った。6~18時に葉面上の受光量を400 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、施設内のCO<sub>2</sub>濃度を1000ppmで管理し、CO<sub>2</sub>施用にあわせて早朝加温を行い、日中の気温を15°C~27°Cで管理した。複合環境調節によって光合成は慣行(無補光、CO<sub>2</sub>無施用、早朝加温無し)に比べて顕著に促進され、頂果房および一次腋果房の開花が早まるとともに花数が増加した(データ略)。さらに、果実の成熟日数が短くなるだけでなく収穫果数の増加や平均果重が重くなることで慣行に比べて果実収量が有意に増加した。この複合環境調節技術に花芽分化の安定化が可能なクラウン温度制御技術(Hidaka et al. 2017)や可動式高設栽培システムを用いた多植栽培を組み合わせることで12月~翌5月までの収量において、慣行高設栽培(8,000株/10a)の2.5倍の10t/10aの超多収生産を実生産規模レベルで実現した(図-5)(Hidaka et al. 2016)。

## 局所CO<sub>2</sub>施用システム

システム構成:

1. CO<sub>2</sub>発生機(写真a)
2. CO<sub>2</sub>濃縮ボックス(写真a)
3. 送風機(写真a)
4. 配風パイプ(写真a)
5. 施用チューブ(写真b)

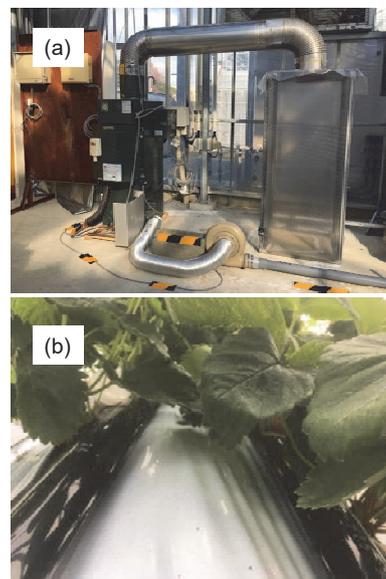
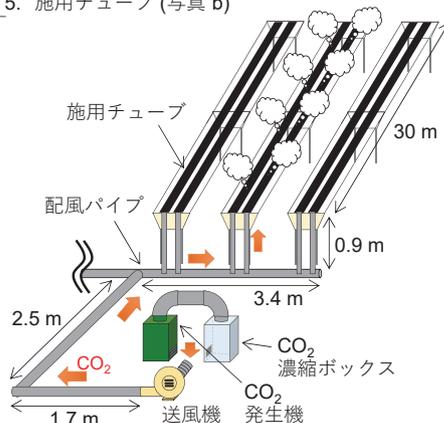


図-6 局所CO<sub>2</sub>施用システム

## CO<sub>2</sub>排出抑制を志向した精密環境調節技術の開発

イチゴ生産における現行のCO<sub>2</sub>施用では、灯油やLPガスの燃焼により発生させたCO<sub>2</sub>ガスをハウス空間全体に施用するのが一般的である。しかし、イチゴは植物体がコンパクトであるためハウス全体への施用は空間的な無駄があると考えられる。また、2021年に農林水産省から策定された「みどりの食料システム戦略」にも掲げられているように、これからのイチゴ生産では、生産力向上とCO<sub>2</sub>排出抑制の両立を意識した新たな環境調節技術の開発によるイチゴ生産体系の構築が求められる。

CO<sub>2</sub>施用時における無駄の改善を目指して、九州沖縄農業研究センターは局所CO<sub>2</sub>施用技術(図-6)を九州大学と共同で開発した(農林水産省「スマート農業技術の開発・実証プロジェクト(課題番号:19189416,事業主体:農研機構)」の支援で開発)。本施用システムは、燃焼式CO<sub>2</sub>発生機、CO<sub>2</sub>濃縮ボックス、送風機、塩ビ製

パイプライン、配風チューブ等の資材で構成されており、CO<sub>2</sub>発生機から排出されたCO<sub>2</sub>ガスをCO<sub>2</sub>濃縮ボックスによって約2倍の濃度に濃縮させた後に送風機で回収し、塩ビ製のパイプラインを經由して株元に設置した配風チューブの穴から葉近傍に局所施用する仕様になっている。そこで、開発した局所施用システムの導入が、イチゴ‘恋みのり’の収量やCO<sub>2</sub>施用にかかる灯油使用量に及ぼす影響について、慣行施用法であるハウス空間全体への施用と比較検証した。

局所CO<sub>2</sub>施用下では、CO<sub>2</sub>発生機から濃縮させたCO<sub>2</sub>ガスを送風機で強制的にイチゴの葉近傍にハウス奥まで施用するため、長いハウス(84m)でもハウス奥まで均一に葉近傍のCO<sub>2</sub>濃度を高濃度化することが可能であった(図-7)。一方、慣行のハウス全体施用では(循環扇は未使用)、ハウス手前の上部にCO<sub>2</sub>ガスが留まってハウス奥まではCO<sub>2</sub>ガスが届かず低濃度となった。また、ハウス天窓換気条件下においてもイチゴ群落内のCO<sub>2</sub>濃度が全体施用に比べて100から200ppm程度高くなることを確認

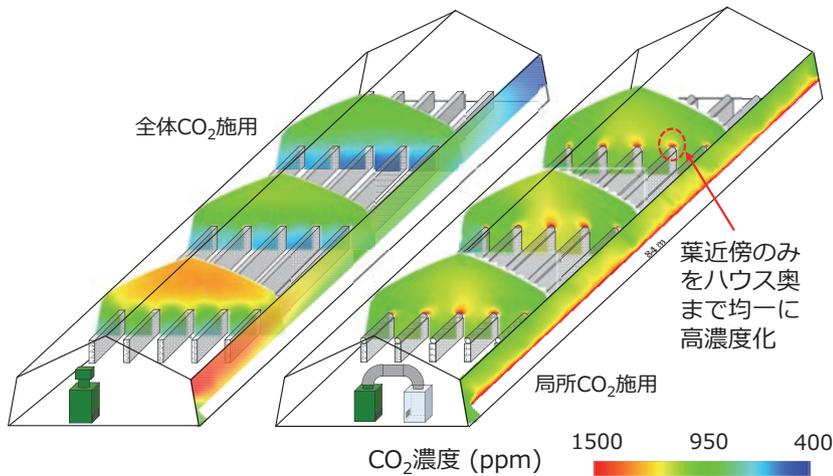


図-7 全体施用および局所施用下での CO<sub>2</sub> 濃度分布

されている (Hidaka *et al.* 2022)。以上のような CO<sub>2</sub> 濃度分布特性を持つ局所施用および全体施用について、両施用区の施用濃度を 800ppm に揃えて栽培試験を実施した結果、CO<sub>2</sub> 施用による 5 月までの増収効果は全体施用に比べて局所施用の方が 22% 高くなった (図-8)。さらに、4 月までの一作を通した灯油使用量については、局所施用の方が全体施用に比べて 27% の削減効果が確認された (図-9) (Hidaka *et al.* 2022)。現在は、スマート農業実証プロジェクトにおいて、増収・省エネの両立を目指して、当該技術を生産者の現地圃場で実証試験中である。なお、当該システムは安価な農業資材で構成されていることから、生産者による自家施工も可能である。現在、これらの現地実証試験で得られた成果のアウトリーチ活動を積極的に実施しており、現地試験圃場近辺の地域等で普及が進みつつある。また、自家施工を行っている生産者の中には、さらに工夫して一つの局所 CO<sub>2</sub> 施用システムで複数のハウスに施用している事例もある。このように、一般的に 1 ハウスあたり 1 台の導入を要する

CO<sub>2</sub> 発生機を局所施用にすることで、複数ハウスを CO<sub>2</sub> 発生機 1 台で施用可能になる点も当該技術のメリットである。

## おわりに

以上、イチゴの光合成の環境応答に基づいて複合環境調節技術の制御ロジックを提示し、これに多植栽培を組み合わせることで超多収生産を実生産規模レベルで実証した。また、これらの基礎となる光合成産物の転流動態を初めて可視化することに成功した。現在、さらなる増収を目指して光合成だけでなく転流の促進にも着目した環境調節技術の開発に取り組んでいる。さらに、今後の施設園芸においては脱化石燃料化が求められており、生産現場における持続的なイチゴ生産技術の構築に向けて増収と CO<sub>2</sub> 排出抑制の両立を目指した環境調節技術の開発に引き続き取り組んでいく予定である。

## 引用文献

Hidaka, K. *et al.* 2013. Effect of supplemental lighting from different light sources

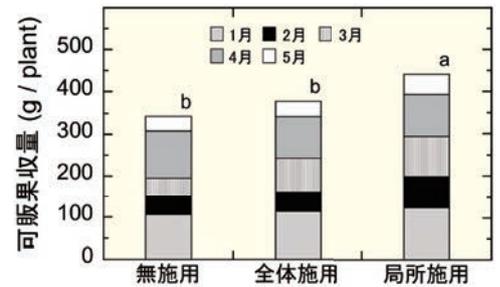


図-8 各 CO<sub>2</sub> 施用条件下における可販果収量

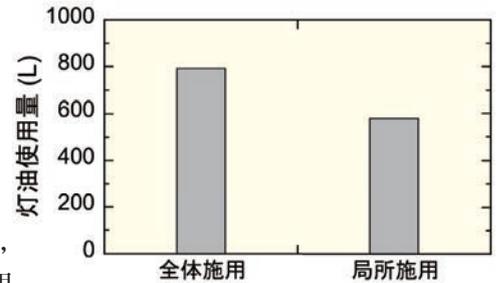


図-9 各 CO<sub>2</sub> 施用条件下における灯油使用量

on growth and yield of strawberry. *Environmental Control in Biology* 51, 41–47.

Hidaka, K. *et al.* 2016. Twofold increase in strawberry productivity by integration of environmental control and movable beds in a large-scale greenhouse. *Environmental Control in Biology* 54, 79–92.

Hidaka, K. *et al.* 2017. Crown-cooling treatment induces earlier flower bud differentiation of strawberry under high air temperatures. *Environmental Control in Biology* 55, 21–27.

Hidaka, K. *et al.* 2019. Dynamic analysis of photosynthate translocation into strawberry fruits using non-invasive <sup>11</sup>C-labeling supported with conventional destructive measurements using <sup>13</sup>C-labeling. *Frontiers in Plant Science* 9, 1946.

Hidaka, K. *et al.* 2022. Crop-local CO<sub>2</sub> enrichment improves strawberry yield and fuel use efficiency in protected cultivations. *Scientia Horticulturae* 301, 111104.