

## 農業電化に関する研究の紹介

一般財団法人電力中央研究所 次世代電力需給マネジメント特別研究チーム

電力・エネルギー価値創造グループ

職任環境マネジメントユニット

上席研究員 博士(農学) 後藤 文之氏  
上席研究員 博士(農学) 庄子 和博氏

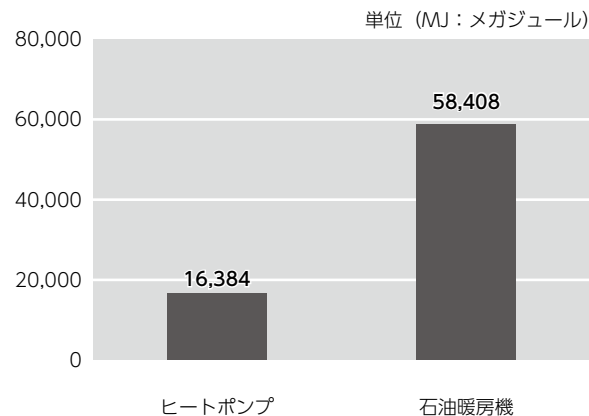
### ◆はじめに

電力中央研究所では、農業分野における電化推進を通して電力需要の拡大と地域産業の活性化に寄与するため、植物工場や施設園芸におけるヒートポンプやLED照明の活用に関する研究開発を進めています。今回は、施設栽培におけるヒートポンプの有用性、寒冷地におけるヒートポンプの多目的利用、震災からの復興支援、さらに、LEDの利用によるサニータスとスイートパジャルの機能性成分の増量技術、葉菜類の光応答メカニズムの解明などの研究成果を紹介します。

### ◆ヒートポンプの有用性を示す

ハウスや温室を利用する施設園芸分野では、省エネルギーや温室効果ガス排出削減のために石油暖房機に代わって、エネルギー効率が高いヒートポンプへの熱源転換が期待されています。しかし、同一の条件で、石油暖房機とヒートポンプの消費エネルギー量や作物の収量などを直接比較した例はほとんどなく、需要家にはヒートポンプを導入するメリットがよく理解されているとはいえませんでした。そこで、両者を多面的に比較するため、冬期の温室内でトマトを栽培し、加温装置の違いがエネルギー消費量やトマトの生育、品質に与える影響について検討しました。試験は、群馬県内にある2棟の同型の小型温室(床面積・82㎡)のそれぞれにヒートポンプおよび石油暖房機を設置して行いました。その結果、ヒートポンプのエネルギー消費量は、石油暖房機に対して約30%と実測され、ヒートポンプの使用により、少ないエネルギーで栽培できることが実証されました(資料①・85ページ)。ところで、冬期のヒートポンプ利用では、室外機についた霜を取るための除霜運転によってエネルギー利用効率の低下が懸念されていたことから、除霜運転が起りやすい夜間の平均成績係数(COP)を解析しました。COPとは空調装置のエネルギー利

資料① ヒートポンプと石油暖房機を熱源にしてトマト栽培をした時のエネルギー消費量



用効率を示す指標です。解析の結果、平均COPの変動幅は、機器定格値のほぼプラスマイナス30%内だったことから、冬期のヒートポンプ利用においても、エネルギー利用率への影響は限られると考えられました。次に、トマトの生育量（開花日や収量など）と品質（糖度、ビタミンC含有量など）を調査しました。その結果、調査した項目ではヒートポンプと石油暖房機を利用した栽培（ヒートポンプの除霜運転を含む）に顕著な差は認められませんでした。

以上の結果から、石油暖房機からヒートポンプへ熱源転換した場合、栽培作物の生育や品質などへ影響を及ぼすことなく、エネルギー消費量を大幅に低減できる可能性が示されました。

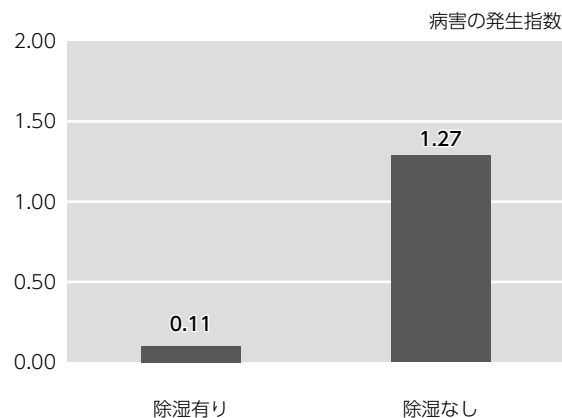
### ◆寒冷地におけるヒートポンプの多目的利用

ヒートポンプは、エネルギー効率が高いことから、冬期の石油消費量が多い寒冷地ほど代替効果が高いことが知られています。また、ヒートポンプには、暖房のほかに冷房や除湿という石油暖房機にはみられないすばらしい機能があります。ただ、残念なことに、これらの機能については、一部の<sup>※</sup>花卉（かき）を除きほとんど利用されていないのが現状です。そこで、寒冷地、特に東北地方での園芸施設におけるヒートポンプ普及に資するためヒートポンプの特長である冷房・除湿効果に着目し、年間を通してヒートポンプの効果的な活用法の提案につながる研究を行いました。研究は、前項と同じ温室を用いて、冷房・除湿運転による温室内の温熱空気環境の変化を把握するとともに、作物の病害発生抑制効果を定量的に評価しました。

最初に、春・秋期夜間の温室内の高湿度による病害発生抑制に資するため、冷房・除湿運転を検討しました。その結果、冷房・除湿運転では、室内温度が低下し冷房の設定温度になるとヒートポンプ運転が停止するため、継続して湿度を低く保つことは困難なことから、次に、室内温度を一定に維持しつつ除湿を行うため冷房と暖房の併用運転について

※花卉（かき）…観賞用になるような美しい花をつける植物の総称

資料② ヒートポンプによる除湿の有無による病害発生比較



検討しました。その結果、夜間に一定間隔で冷暖房の間欠運転（15分×4回）を行うことにより、相対湿度を低く保ちにくい低温下においても温室内の湿度を90%以下に保つことが可能となりました。次に、トマトの重要病害である灰色かび病の発生抑制に対する冷暖房の間欠運転による除湿の効果について検討しました（資料②）。灰色かび病の発生状況（葉、実の病徴の割合）を定量的に示すため、全株において病害の程度を6段階に分けて発生指数として評価したところ、ヒートポンプ運転温室では病害はほとんど発生しませんでした（発生指数≒0・11）。一方、除湿なしの温室では、全ての栽培区で灰色かび病が発生した株が認められました（平均発生指数≒

1・27）。

以上の結果から、ヒートポンプの冷暖房で除湿することによって、トマト栽培において灰色かび病の抑制効果を定量的に示せる可能性を見い出すことができました。なお、冷房については、夏期の夜間を対象にしてトマトの収量増加や高品質化を狙って研究を続けています。

### ◆震災からの復興支援

農林水産省では、東日本大震災からの東北地方の復興支援を目的に、2012年度から3年間「食料生産地域再生のための先端技術展開事業」を推進しました。その中で、ヒートポンプを利用した省エネ型施設園芸の普及を進めており、この一環として、当研究所はヒートポンプのCOPを指標としたエネルギー効率の評価と、ヒートポンプ適用時の栽培作物の有用（食味や機能性）成分の実測を目的とした研究を受託しました。

2012年度は、地下水や地中熱を熱源とする地中熱ヒートポンプのCOPを栽培現場で測定する方法を開発しました。2013年度は、地中熱ヒートポンプと空気熱ヒートポンプのCOPおよび運転時の温熱空気環境の測定を実施し、両者のエネルギー効率の評価を行いました。空気熱ヒートポンプは空気を熱源とするため、除霜に起因する断続的な発停を繰

り返し、常時COPが大きく変動しました。典型的な運転条件における夜間平均のCOPは2・6でした。一方、地中熱ヒートポンプは、除霜の必要がないためCOPは一定となる傾向がみられ、典型的な運転条件では、夜間平均COPは3・2でした。これらのことから、空気熱ヒートポンプのCOPの向上には、機械的な除霜対策や運転方法の改善が有用であり、改善により空気熱ヒートポンプにおいても、寒冷地に適した地中熱ヒートポンプと同程度のエネルギー効率での利用が期待できると考えられました。2014年度は、栽培作物であるキュウリを対象として食味成分を分析しました。その結果、秋期栽培では冬期栽培の3倍も機能性成分であるシトルリン（アミノ酸の一種）を蓄積することを明らかにしました。

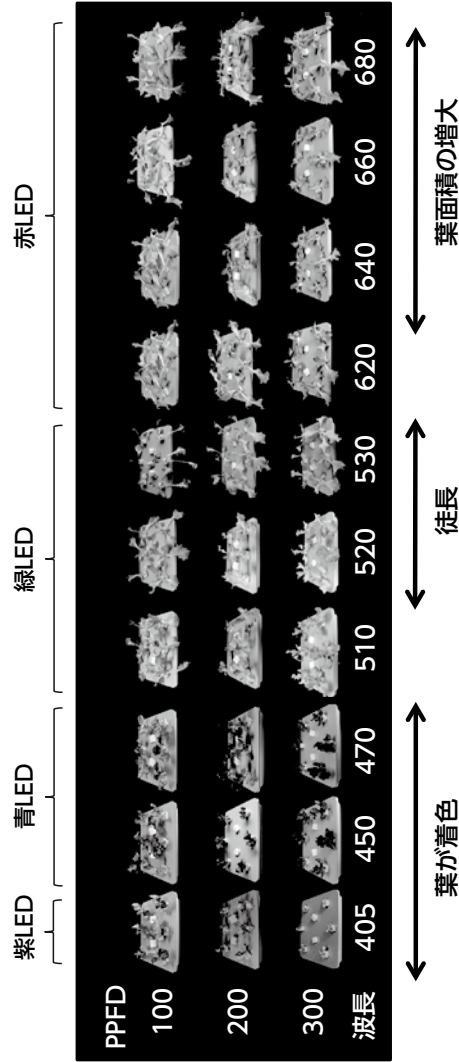
#### ◆サニレタスとスイートバジルの機能性成分の増量技術

近年、超高齢化社会の到来や国民の健康志向の高まりを背景に、ポリフェノールやビタミンなどを多量に含む機能性野菜を求める消費者意識が高まっています。当研究所では、植物工場の要素技術開発の一環として、人工光源を活用した葉菜類の可食部分の増加、徒長（枝や茎がむだに伸びてしまうこと）の抑制、機能性成分の増量などを可能とする光質制御栽培技術の開発を推進しています。サニレタスはサラダ用途として食卓で広く利用されている

葉菜類の一つですが、ガラス温室などの栽培施設において水耕栽培を行うとアントシアニン（ポリフェノールの一種）蓄積が十分に進行しないことが多く、商品価値の低下が問題となっていました。そこで、植物栽培用蛍光ランプの波長と照射時間帯に着目してサニレタスの商品価値の改善方法を検討したところ、温室栽培条件では、夜間に青色光を照射すること、もしくは青色光と紫外線を併用照射することにより、成長を損なうことなくアントシアニン合成を大きく促進できることが分かりました。次に、人工光型植物工場におけるサニレタスの栽培を想定して、LEDを用いて連続光条件における赤色光と青色光の割合がアントシアニン蓄積に及ぼす影響を検討したところ、アントシアニン含量は青色光の割合が高まるほど大きくなることを明らかにしました。スイートバジルは生葉だけでなく乾燥バジルや香料としても利用される代表的なシソ科ハーブ野菜です。スイートバジルのメタノール抽出液を液体クロマトグラフ（化学的・物理的な性質や相互作用を利用して、物質を分離させる装置）で分析したところ、ロズマリン酸、チコリ酸、カフェエ酸の三つのポリフェノール類が検出されましたが、スイートバジルに含まれるポリフェノール類の含有量はレモンバームやローズマリーなどのほかのシソ科植物に比べて少ないことが分かりました。そこで、スイートバジルのポリフェノール含量を高めることを目標に植物栽培用蛍光ランプの波長と照射方法を検



資料③ サニーレタスの草姿と葉色の変化に及ぼすLED波長の影響



本研究では、400nm (ナノメートル) ～700nm の可視光領域における葉菜類の光質応答反応をできるだけ詳細に調べるため、光合成有効光子束密度 (植物の光合成に有効な可視光400nm～700nmの光の単位時間、単位面積当たりの量子数のこと) …

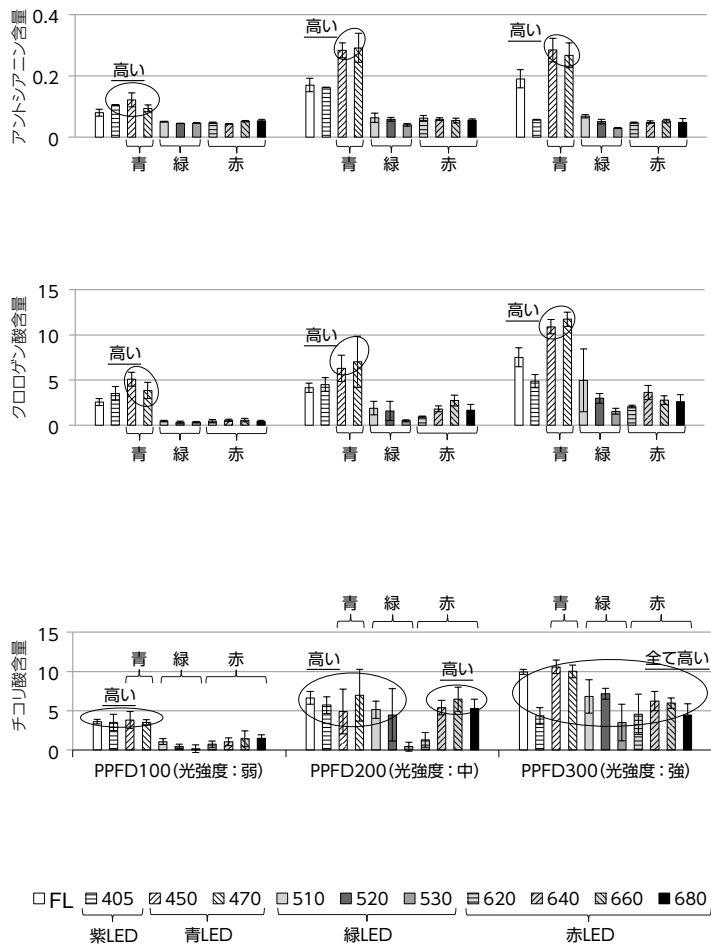
の課題が設定され、当研究所は「葉菜類の光応答メカニズムの解明」を受託し、最新のLED光源を導入して光質と光強度が葉菜類 (レタス、コマツナ、ホウレンソウ) の成長と有用成分蓄積に及ぼす影響の解明に取り組みました。本稿ではサニーレタスの生育と機能性成分向上に関する検討結果について紹介します。

### ◆葉菜類の光応答メカニズムの解明

農林水産省では、科学的根拠に基づいたLEDなどの光利用技術を確立し、新しい農業技術の体系化と高度化に資することを目的に、2009年度から5年間「生物の光応答メカニズムの解明と省エネルギー、コスト削減技術の開発」を推進しました。その中で、千葉大学を中核機関とする「野菜などの光応答メカニズムの解明および高度利用技術の開発」の課題が設定され、当研究所は「葉菜類の光応答メカニズムの解明」を受託し、最新のLED光源を導入して光質と光強度が葉菜類 (レタス、コマツナ、ホウレンソウ) の成長と有用成分蓄積に及ぼす影響の解明に取り組みました。本稿ではサニーレタスの生育と機能性成分向上に関する検討結果について紹介します。

討したところ、白色光を連続的 (昼夜照明) に照射することでロズマリン酸、チコリ酸、カフェ酸が共に増加することが分かりました。

資料④ サニーレタスの主要ポリフェノール蓄積に及ぼすLED波長の影響



Photosynthetic Photon Flux Density : 以下PPFDと略します) で300マイクロモル毎平方メートル毎秒 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) の出力が可能な10種類(ピーク波長 (nm) : 405, 450, 470, 510, 520, 530, 620, 640, 660, 680) の植物栽培評価用LED光源 (ISL-305X302型、シーシーエス株) を新規製作しました。サニーレタスの栽培試験は以下の手順で行いました。まず、種子を吸水させたウレタンキューブに播種し、白色蛍光ランプ (PPFD120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 14時間日長) の下で10日間育苗しました。植物栽培評価用LED光源を設置した人工気象室 (気温25℃、相対湿度60%、CO<sub>2</sub>濃度900ppm) に苗を定植し、光強度を3段階 (PPFD100, 200, 300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) に設定して連続光条件で水耕栽培を行いました。定植7日後(播種17日後)に植物体をサンプリングして生育調査および機能性成分有量の測定を行いました。生育調査の結果、サニーレタスはLEDのピーク波長と光強度の違いに敏感にตอบสนองして、草姿と葉色を変化させることが分かりました(資料③・92ページ)。紫LED (405nm) と青LED (450nm~470nm) では、葉におけるアントシアニン蓄積による着色が促進されました。また、405nm~470nmの波長領域では、波長が短く、光強度が強いほどサニーレタスの生育が阻害されることが分かりました。緑LED (510nm~530

0 nm)では、波長が長く、光強度が弱いと葉が糸状に変形する徒長が発生しました。一方、赤LED(620 nm～680 nm)では、葉面積が増大して地上部重が大きくなりました。サニーレタスの葉にはアントシアニンが多く含まれていますが、ほかに含有するポリフェノール類を調べるために、高速液体クロマトグラフィーによる質料分析(HPLC/MS分析)を実施したところ、クロロゲン酸とチコリ酸が多く含まれていることが分かり、さらにカフェオイルリンゴ酸、ジカフェオイル酒石酸およびジカフェオイルキナ酸が少量検出されました。そこで可食部に含まれる主要ポリフェノール類の変化を調べたところ(資料④・94ページ)、アントシアニンとクロロゲン酸の含量は青LED(450 nm～470 nm)で高く、緑LED(510 nm～530 nm)と赤LED(620 nm～680 nm)では低くなりました。一方、チコリ酸の含量は、PPFD100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では青LEDだけで高くなりましたが、PPFD200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では530 nm～620 nmを除くLEDで高く、PPFD300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では全LEDで高くなることが明らかになりました。以上のように、サニーレタスの成長と有用成分蓄積は光質(波長)と光強度(PPFD)に大きく影響されるので、適切な光質制御を実施することで生産性と付加価値の向上が可能であることが示されました。今後は、本知見を活用して生育ステージごとに適切な波長

を決定するとともに、複数波長に対する作物反応に関する知見についても蓄積していくことで、人工光型植物工場における葉菜類の生産性向上に寄与していきたいと考えています。

## 講師略歴

### ●後藤 文之

(ごとう ふみゆき)



一般財団法人電力中央研究所  
次世代電力需給マネジメント特別研究チーム  
電力・エネルギー価値創造グループ  
職住環境マネジメントユニット  
上席研究員 博士（農学）

1987年3月 九州大学理学部生物学科卒業  
1993年5月 (財)電力中央研究所 入所  
2001年12月～2003年7月 米国パデュー大学 博士研究員  
2004年4月～2006年9月 日本大学生産工学部大学院 非常勤講師  
2005年4月～2009年9月 岩手大学農学部 客員教授  
2012年9月～ 東京大学生産工学研究センター  
非常勤講師

### ●庄子 和博

(しょうじ かずひろ)



一般財団法人電力中央研究所  
次世代電力需給マネジメント特別研究チーム  
電力・エネルギー価値創造グループ  
職住環境マネジメントユニット  
上席研究員 博士（農学）

1990年3月 東北大学農学部農学科 卒業  
1990年4月 (財)電力中央研究所 入所  
1995年4月～1998年3月 農林水産省農業生物資源研究所 依頼研究員  
2010年3月 千葉大学大学院園芸学研究科博士課程 修了  
2016年～ NPO植物工場研究会 理事  
日本農業工学会 フェロー