

植物工場内の栽培環境制御技術の開発

小林 紀子 小野 幹治^{*1}
滝澤 勇輝^{*1} 菅原 玲子

概 要

場所を選ばず設置できる人工光型植物工場は、遊休不動産の新しい活用方法として期待されている。そこで、大和ハウス工業株式会社との共同開発により、既存建物内に設置でき、且つ生産能力および経済性を考慮した中規模植物工場の商品開発を行なった。

植物の生育速度の向上、生産物の高品質化による歩留まりの向上およびエネルギー効率の向上をめざし、栽培ラックの棚間の温度環境をより精密に制御可能な『局所空調システム』を考案し、本システムの性能を温度シミュレーション解析および実測により検証した。

シミュレーション解析では、一般区と比較し、局所空調システム区は栽培ラック内の風上から風下にかけての温度差および上下間の温度差が縮小した。さらに、局所空調システムを用いて検証・改善を行うことにより、栽培ラック内の風上から風下にかけての温度差を縮小させた。

Development of cultivation environment control technology in the plant factory with artificial light (PFAL)

Abstract

PFAL can be installed anywhere, so there are expectations for its potential as a new way to utilize idle real estate. Through joint development with Daiwa House Industry Co., Ltd., we have developed medium-sized Plant Factory products that can be installed in existing buildings and that were designed with consideration for production capacity and economic efficiency.

In the aim of improving the growth rate of plants, improving yield by improving product quality, and improving energy efficiency, we devised a local air conditioning system (LACS) that can more precisely control the temperature environment between the shelves of cultivating racks. The performance of the system was verified by simulation analysis of the temperature between the cultivation shelves and by actual measurement.

In the simulation analysis, compared with areas where LACS was not installed, the system reduced the temperature difference from the windward to the leeward in the racks and the temperature difference between the upper and lower areas. Verifying and improving with LACS also reduced the temperature difference from the windward to the leeward in the rack.

キーワード: 植物工場、空きスペース利用、
建物内設置、栽培環境制御技術

*1 次世代空調事業部

§1. はじめに

1.1 人工光型植物工場とは

植物工場とは施設内の温度、光、炭酸ガス、養液などの環境条件を自動制御装置で最適な状態に保ち、作物の播種、移植、収穫、出荷調整まで、周年計画的に一貫して行う生産システムであり、人工的な光源(LEDや蛍光灯等)で栽培を行うものを人工光型植物工場と呼ぶ¹⁾。人工光型植物工場は、従来の生産システムと異なり、土地に対して垂直方向に栽培面積を重ねる多段栽培が可能であるため土地面積当たりの生産能力が高い。また、建物内で生産を行うことにより天候に左右されことなく作物を周期的に安定供給できる。

近年、国内では気象変動、天災による農作物の価格変動および食の安心・安全や高品質・高機能食品への関心の高まりにより、植物工場野菜への社会的な需要が増加している。加えて、農薬使用量の低減、水資源の有効利用、高品質・付加価値の高い作物の生産、医療分野への貢献、雇用創出等が期待されている。

1.2 技術開発の背景と目的

これまでにフジタでは、総合建設業として建築・土木事業のみならず、土地建物の遊休不動産の活用や新規事業の提案に関する取り組みを検討してきた。

人工光型植物工場は、場所を選ばず設置できることから遊休不動産の新しい活用方法として期待されている。例えば、食品関連施設、物流施設における野菜生産・流通、既存建物の空きスペースへ設置することで雇用創出、教育・食育への活用、イベント施設およびディスプレイとしての活用等がある。

また、大和ハウスグループでは、持続可能な社会づくりへの取り組みとして“明日の社会に必要な不可欠な”商品やサービスへの技術開発分野として「農業」を位置づけており、人工光型植物工場「agri-cube」²⁾の商品開発および販売を行っている。フジタは 2013 年に大和ハウスクループへの参加をきっかけとして、大和ハウス工業株式会社(以後、大和ハウス社)の植物工場技術とフジタの室内環境制御技術を組み合わせ、共同で新商品開発を行なうこととなった。

§2. 商品コンセプトと技術開発の内容

新商品は、大和ハウス社が保有している新設・ユニット式の屋外設置型植物工場である「agri-cube」を技術ベースとしている。表1に「agri-cube」と新たに開発した植物工場商品の性能を示す。

本開発では、2つの商品コンセプトの実現を目指している。

まず、1つ目のコンセプトとして、顧客への植物工場技術の活用や空きスペースの活用法、新規事業等の植物工場を切り口とした提案に適する商品を目指した。当時、寄せられた要望の多くは、既存建物内の空きスペースの有効利用についての要望であり、『建物内』が対象であったことから既存建物内に設置可能なシステム(図1)とした。

2つ目のコンセプトは、植物工場の課題である『事業性の向上』である。植物工場事業は、新規産業分野であり他分野からの新規参入が多いことから、事業計画の見通し精度が低く、事業運営が厳しい事業者も多い³⁾。しかし、安全・安心な食品や付加価値商品への消費者ニーズの高まり、原料の安定供給、海外からの原料調達依存の引き下げ等を考慮し、植物工場産野菜は今後も必要とされると考えられる。従って、事業計画の課題を改善することで投資事業リスクを低減でき、顧客にとって魅力的な商品開発へ繋がると考えられた。

上記のコンセプトの実現へのアプローチとして、下記の3つの要素について並行して検討を進めた。

- ① 空きスペースに対応可能な柔軟性のある仕様
- ② 生産物の生産量・品質の向上が可能なシステム
- ③ 運用費の圧縮による事業性の向上

本論文では、『②生産物の生産性・品質を向上可能なシステム』を高効率な栽培環境制御技術と位置づけ独自技術の開発を行った。

表 1 植物工場の性能の比較

	agri-cube	本開発商品
設備規模 (m ²)	10	100～500
生産規模 (株/日 ^{※1})	30	410
栽培ラック仕様	4列4段	8列5段
設置場所	屋外	屋内
設備タイプ	新設・ユニット式	建物改修・カスタマイズ式
用途	小規模生産 店頭ディスプレイ	空きスペースを活用した 野菜生産

※1) フリルレタス80gの株と設定



図1 既存建物内に設置可能なシステムのイメージ

§3. 栽培環境制御技術の概要

「agri-cube」の栽培装置は、小規模生産又は店頭ディスプレイを対象として開発されており、本商品への適用には、植物の生育速度の向上、生産物の高品質化による歩留まりの向上およびエネルギー効率の向上が必要であった。そこで、植物栽培の周辺環境をより精密に制御可能な技術である『栽培環境制御技術』の開発に取り組んだ。

栽培環境制御技術は、下記の3つの技術の組み合わせにより構成される。

(1) 局所空調システム

人工光型植物工場は、壁・床・天井に囲われた室内で栽培を行うため、外気温に左右されず室内温度を制御することが可能である。しかし、エアコン空調のみの場合、植物を栽培する栽培ラックの棚間には熱だまりが発生し、栽培面上には温度にムラができる。加えて、熱だまりでは、空気が滞留しており植物へのCO₂供給効率が低下する。従って、栽培ラックの棚間の気流を絶えず循環させ、温度や気流のばらつきを抑えることで、栽培環境を均一に制御することが可能となり、植物の生育促進及び高品質化に繋がる。

図2に本システムを示す。栽培ラックの上部天井に設置したエアコンによる第風量の吹き出し空気(図2の①)と吸い込み空気(図2の③)により、栽培中に発生する熱の効率的な処理が可能である。また、栽培ラックの中央に設置されている送風ユニットにより棚間へエアコンからの吐き出し空気を分配・送風し、栽培棚の端からエアコンの吸い込みファンにより空気を吸引することで棚間に気流(図2の②)を生み出し、生育に適する栽培環境に近づけ、且つ棚間の温度・気流環の均一化が可能である。加えて、棚間を通過した温度・湿度ともに上昇した空気を選択的に吸い込みエアコンで処理する(図2の③)ことにより、効率的な空調が可能である。

(2) 高効率照明システム

植物工場の運営費に占める費用の約3割が植物栽培に用いる照明の電気代⁴⁾と言われている。従って、植物栽培用照明(以後、照明)にかかる電気代を圧縮することで、事業性を大きく改善できると考えられる。また、栽培面上へ照射される光合成有効光量子束密度(以後、PPFD)が不均一であると植物の生育速度にばらつきが生じ、生産効率・品質・歩留まりを低下させる原因となる。そこで、栽培面上のPPFDを均一にすることで、電気使用量を圧縮および生育速度のばらつきを減らすことができると考えられる。

図3に照明効率・均一性の比較(図3-aにagri-cubeシステム・図3-bに高効率照明システム)を示す。agri-cubeの照

明の光源はHf蛍光灯を使用しているが、近年のLEDの性能向上と価格低下により、本システムでは白色LEDを採用した。LEDは、光合成有効放射(PAR、400nm~700nm)ならびにクロロフィル吸収ピークがある400~500nm周辺の波長および600~700nm周辺の波長⁵⁾⁶⁾のバランスと量を考慮し、葉物野菜全般に汎用的に使用可能な植物栽培用LED商品を用いた。加えて、LEDより照射された光子量の栽培棚外への消失を防ぎ、且つ栽培面上のPPFDを均一にするため栽培ラック周囲には高効率反射フィルムを設置した。その結果、照射光子量の損出が減少することでエ

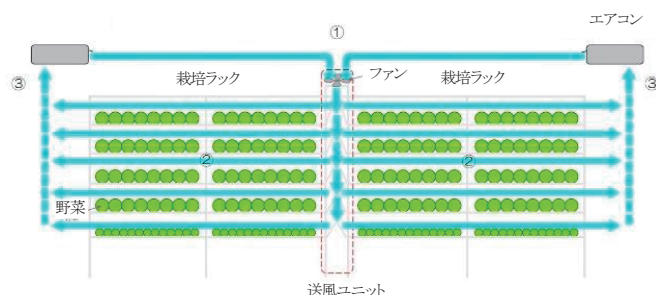


図2 局所空調システム
a: agri-cube システム

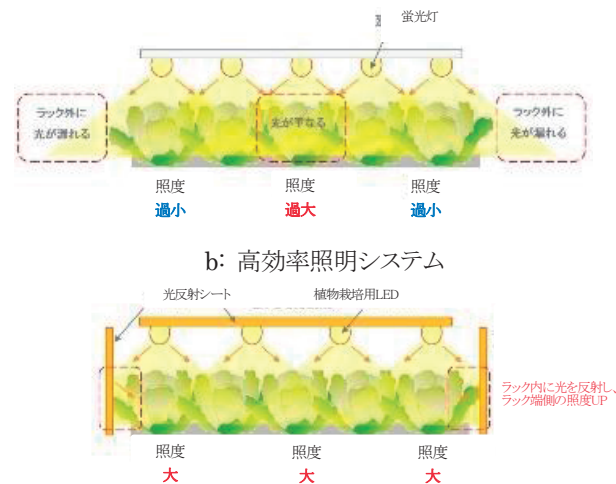
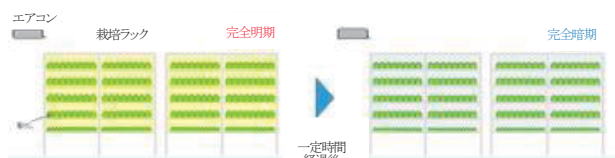


図3 照明効率・均一性の比較

a: 一般的なシステム(同時に照明が点灯・消灯)



b: 熱負荷平準化システム(点灯・消灯を混在させる)

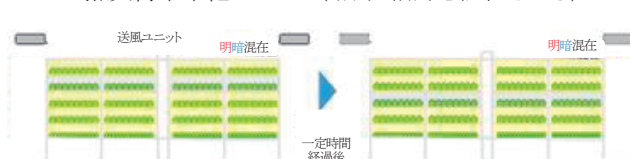


図4 照明制御システムの比較

エネルギー効率が改善し、電気使用量の削減と同時に均一な高品質野菜の生産が可能になる。

(3) 照明熱負荷平準化システム

明期・暗期の周期性は、植物の生理代謝や光合成産物の生成、植物体内への分配・転流へ影響を与えている⁴⁾。従って、人工光型植物工場内では、照明を点灯・消灯させることにより周期性を制御している。

図4に照明制御システムの比較(図4-aに一般的なシステムと図4-bに熱負荷平準化システムの照明制御)を示す。一般的な照明制御システムでは、栽培室内のすべての照明を同時に点灯・消灯させるため、明期では照明からの排熱による熱負荷が高まり、頻繁にエアコンが稼働することで湿度は低下する。植物は、葉表面に気孔があり、気孔の開閉によりガス交換、葉表面温度の調節および根からの養液吸収を行っている⁷⁾。そのため、栽培空間の湿度が低下すると蒸散を抑えるため気孔の開閉度が低下するため、ガス交換や根からの養分吸収が抑制されることにより生育速度が低下する。また、明期の電力使用ピークにより基本契約料金が引き上げられる可能性がある。一方、暗期は熱負荷が低下することによりエアコンの稼働が低下し、湿度が飽和することで栽培室内にカビや病原菌を増殖させ生産物の品質悪化や清掃負荷が高まる。本システムでは、栽培ラック内において栽培棚ごとに明期・暗期を混在させ、一定時間で個別に点灯・消灯を切り替えて栽培を行うことにより、一日の熱負荷を一定とし、エアコンの稼働を定常的にすることができる。従って、年間を通じて温度・湿度の変動を最小限に抑えることで、生産物の品質を向上させ、栽培室内の結露を抑制し、且つ電気の基本契約料金の削減が図れる。

§4. 局所空調システムの開発

本節では、局所空調システムにおいて、栽培棚間の温度シミュレーション解析(以後、SIM解析)および実測によるシステムの性能検証を行った際に得られた結果について報告する。

4.1 局所空調システムの検証方法

(1) SIM解析による局所空調システムの検証

栽培ラック内の環境は、気流が滞ることによって照明からの排熱により温度が上昇する。従って、温度分布を評価することで栽培環境の均一性を評価した。

表2にSIM解析に用いた植物工場モデルである『一般的な空調システム区(以後、一般区)』および『局所空調システム区』の条件を示す。

(2) 実測によるSIM解析の検証方法

表2に示す植物工場実証サイトにおいて、局所空調システムの温度環境の実測を行った。図5に、栽培ラックに設置したエアコンの室内温度制御用のセンサー(以後、エアコン温度センサー)の位置と棚間の温度計測箇所を記載する。栽培ラックに設置している栽培トレイ1台につき、風上と風下の2箇所を測定した。測定には温度センサー(株式会社T&D TR-52S)を使用し、トレイ中央から長手方向左右へ約450mm、短手方向中央の2箇所で、高さは栽培ラック枠フレームの下端から約150mmの位置にラック上部から垂らして設置した(図6)。トレイの数は、全20トレイで合計40箇所(図5の★)の温度を計測した。温度センサーは、直射光が当たるのを避けるため紙カップをかぶせた(図6)。測定は、フリルレタスの栽培期間中に実施した。エアコンの運転条件は冷房23℃設定にした。エアコン温度センサーは、栽培ラックA列側1段目のフレーム端部付近(図5の▲)に取り付けた。この箇所が設定温度23℃になるようにエアコンが運転される。測定間隔は10分とし、2016年4月18日19:00から6月16日16:30の作業者の入室が無かった10日間のデータを用いて、明期の平均温度を求めた。

4.2 結果

(1) SIM解析による局所空調システムの検証

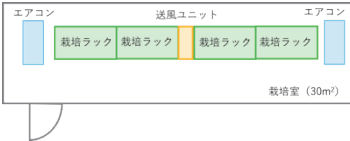
図7に一般区と局所空調システム区のSIM解析結果を示す。一般区(図7-A)では、栽培ラック内は19.4~27.8℃となり温度差は8.4℃内であった。また、気流の滞留やエアコンから吹き出し空気が通路・床付近の空間への移動が確認でき、温度環境は不均一になる傾向が示唆された。一方、局所空調システム区(図7-B)では、栽培ラック内は21.3~24.3℃となり温度差は3.0℃内であった。一般区と比較し、局所空調システム区では5.3℃改善され、且つ栽培ラック内部を中心(風上)にエアコンにより冷却された空気が送られており、効率的に冷房されていることが示唆された。

一般的な植物工場課題とされる栽培ラックの棚の上段下段の温度差は、一般区では最大7.0℃、局所空調システム区では最大1.7℃であった。従って、局所空調システム区では上下間の温度差は5.3℃改善された。

(2) 実測による検証

表3に温度センサーによる測定状況を示す。栽培面上の温度は20.0~24.1℃であり、温度差4.1℃内であった。エアコンの設定温度23.0℃に対して、栽培ラック付近(風上)は温度が低く、栽培ラック両端(風下)に行くにつれて温度が上昇するという結果になった。一方、栽培ラックの上段下段の温度差は、最大2.7℃であった。

表2 検証に用いた植物工場モデル 一覧

	A: 一般区	B: 局所空調システム区	C: 実証サイト
モデル			
エアコン配置	エアコンから一方方向の気流	エアコン2台を対面配置	エアコン2台を対面配置
エアコン条件	エアコン冷却能力7.2kW×1台 エアコン温度センサー23℃設定	エアコン冷却能力3.6kW×2台 エアコン温度センサー23℃設定	エアコン冷却能力3.6kW×2台 (出力50%運転) エアコン温度センサー23℃設定
送風ユニット	-	送風ユニット	送風ユニット
光条件	LED全灯+反射フィルム	LED全灯+反射フィルム	LED全灯+反射フィルム

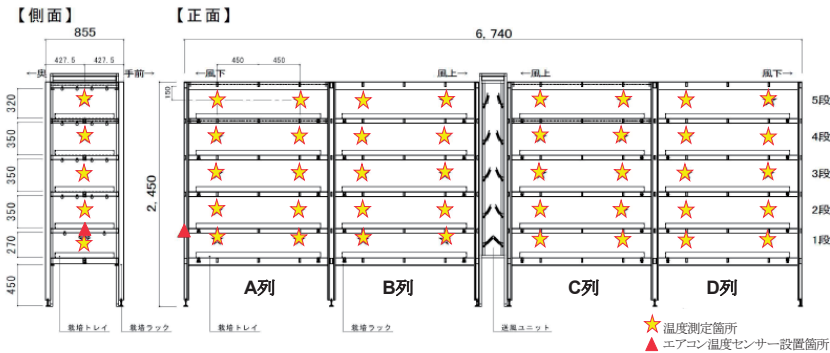


図5 栽培棚に設置したエアコン温度センサーの位置と棚間の計測箇所

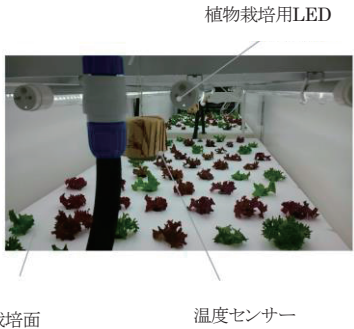


図6 温度センサー測定状況

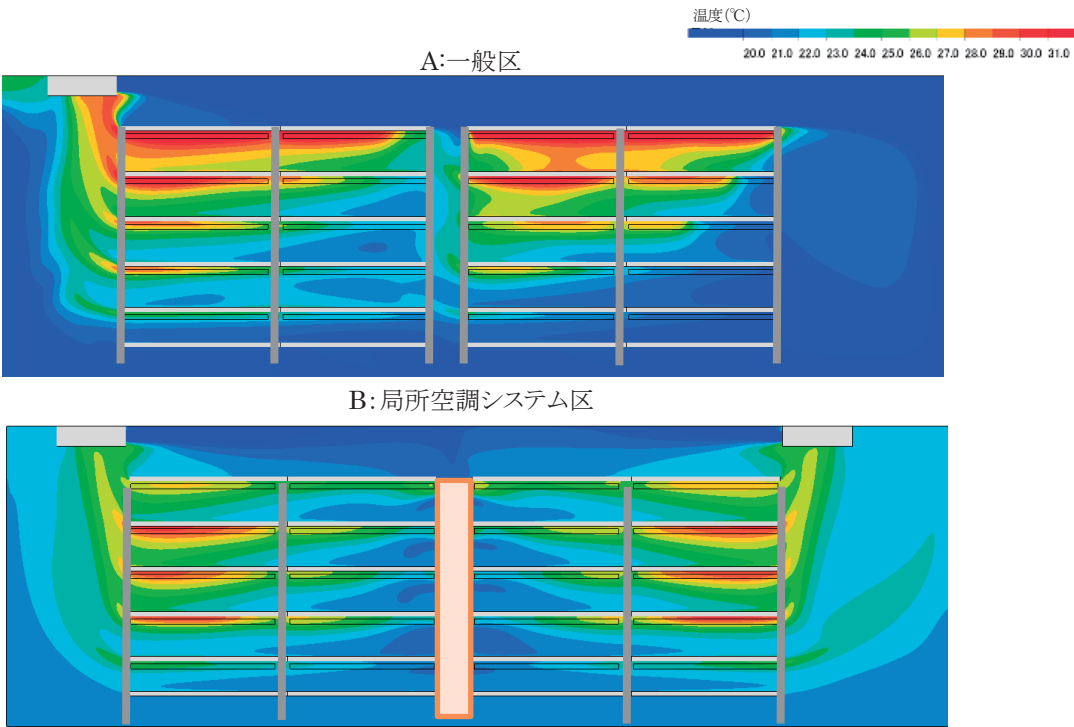


図7 一般区と局所空調システム区の温度 SIM 解析結果の比較

4.3 温度制御性能の改善手法

4.2 の計測では、栽培ラックの風上は、エアコン設定温度から 3.0℃の差があり低温状態であるため、エアコン温度センサー位置を栽培ラックA列 1 段目とB列 1 段目の間に移動させ(図 8 の▲)、再度温度の測定を実施した。4.2 の結果より、栽培ラックの上下方向の温度差が少ないことから、2 回目は 5 段目と 1 段目の計 16 箇所の温度を計測した。測定間隔は 10 分とし、2016 年 7 月 23 日 11:00 から 8 月 26 日 10:50 の作業者の入室が無かった 10 日間のデータを用いて、明期の平均温度を求めた。

4.4 結果と考察

4.3 の結果、栽培面上の温度は 22.1~25.2℃であり、温度差は 3.1℃内となり、エアコン暗温度センサー移動前に比べ温度差は 1.0℃縮小した。さらに、風上温度は 22.1℃以上となり、風上側の低温状態は改善された。しかし、D 列風下側は 25.2℃と温度が上昇していることから、温度の均一化にはさらなる工夫が必要であると考えられる。

表 3 棚間の温度測定の結果

(凡例) 21℃未満 21~23℃ 23℃超過

	A 列		B 列		C 列		D 列	
	風下	風上	風下	風上	風上	風下	風上	風下
5 段目	23.8	22.9	22.0	20.3	20.9	21.5	21.9	24.1
4 段目	23.5	21.5	22.2	20.6	20.3	21.9	22.4	22.8
3 段目	22.9	22.3	21.9	20.3	20.4	22.2	22.3	23.0
2 段目	22.8	22.3	21.8	20.0	20.3	22.0	22.2	22.5
1 段目	22.8	22.8	22.6	22.7	20.9	22.1	22.6	24.0

(単位:℃)

【正面】

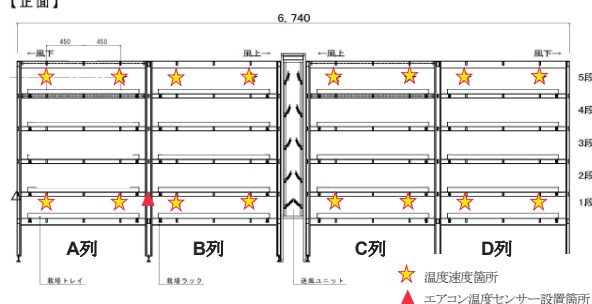


図 8 エアコン温度センサーの移動位置と温度計測箇所

表 4 棚間の温度再測定の結果

(凡例) 21℃未満 21~23℃ 23℃超過

	A 列		B 列		C 列		D 列	
	風下	風上	風下	風上	風上	風下	風上	風下
5 段目	24.2	24.3	23.5	22.2	22.4	22.9	23.6	25.2
1 段目	24.7	23.6	23.5	22.1	22.3	23.7	24.0	25.0

(単位:℃)

§5. まとめ

本論文では、既存建物内に設置可能な中規模植物工場技術の商品開発に対して、植物周辺の栽培環境を植物の生育に適する環境に制御する技術である『局所空調システム』について、下記の性能値を求めた。

- 1) 栽培ラック内の上下温度差は最大 2.7℃であった。
- 2) 栽培ラック内の風上・風下間の温度差は 4.1℃であった。
- 3) エアコンの温度センサーの位置を調整し、栽培ラック内の風上・風下間の温度差は 3.1℃に縮小した。

なお、局所空調システムを含む栽培環境制御技術によりフリルレタスの栽培試験を行なった結果、①統計解析（一元配置分散分析、5%水準）において、栽培ラックの栽培トレイの位置において生育量に有意差がないこと、②80g 以上の株は 92.1%であること、③生育の標準偏差 2.6g であることを確認している。

謝辞 大和ハウス工業株式会社 総合研究所との共同研究として実施した。同社の研究関係者には、商品コンセプトの検討から技術開発、商品化に至るまでご尽力いただいた。また、同社の農業推進室には事業視点でのアドバイスや開発後の商品展開に関してご協力いただいている。ここに感謝の意を示します。

参 考 文 献

- 1) 農林水産省「特集 野菜をめぐる新しい動き 植物工場の可能性」
http://www.maff.go.jp/pr/aff/1002/spe1_01.html
- 2) 大和ハウス工業HP『agri-cube』
<http://www.daiwahouse.co.jp/business/agricube/>
- 3) 古在豊樹(2014)、人工光型植物工場の現状と将来、繊維と工業、Vol.70、p.94-98
- 4) 大山克己(2015)、大規模経営での経営実態、JGHA 施設と園芸、168号、p.30-33
- 5) Kozai et al (2016)、Plant Factory, p.141-143
- 6) 高辻正基(2010)、完全制御型植物工場の現状、植物環境工学、22巻1号、p.2-7
- 7) Kozai et al (2016)、Plant Factory, p.132-139

ひ と こ と



小林 紀子

植物生理に基づいた精密な環境制御技術は、植物機能を活用するフィールドを広げることができると考えています。今後も植物の研究を通じて社会問題へ取り組んでいきたいと思っています。