

植物工場の現状の課題とその一検証

下山真人 山本縁 高橋真一
溝田陽子 末田香恵 久保啓治
(本社技術部)

Examination of Current Issues of Plant Factory

Masato Shimoyama Yukari Yamamoto Shinichi Takahashi
Yoko Mizota Kae Sueda Keiji Kubo

Abstract

The plant factory is promising as a method for ensuring stable production of vegetables without having to select a growth place each time. Owing to its merits, the plant factory has attracted considerable attention; in particular, its use has become widespread after the recent earthquake disaster. However, the high indoor temperature in solar-type plant factory in the summer is a problem. Results of survey show that, cooling mechanism of a solar-type plant factory is required. In this study, a basic indoor examination was performed in a plant factory that uses artificial light, and it was found that the amount of vitamin C was high included. An Led was used instead of a fluorescent lamp, and it was the same as similar cultivation example that was generally known. In addition, it found that making an appropriate choice of the cultivation class is necessary for optimization of the cultivation environment; selecting an appropriate source of light is also very important.

概要

植物工場は、外部環境の影響を受けにくいことから、場所を選ばずに食糧を集約的に安定して生産を確保する方法として有望である。震災以降、塩害等を受けた農地での農業復興の一つの方法として、この植物工場のメリットが注目されるようになった。しかしながら、植物工場のうち太陽光型植物工場は、外部温度環境の影響を受けやすいことから、夏期の高温化対策が課題であるが、温度環境の実態に関する研究は十分には進んでいない。一方、人工光型植物工場は栽培する植物に応じた適切な環境制御技術が十分に確立されていない状況にある。そのため、筆者らは太陽光型植物工場について温度環境の実態調査を行うとともに、人工光型植物工場についてレタスとアブラナを対象として環境制御が生育後の成分に与える影響を調べるための基礎実験を実施した。その結果、太陽光型植物工場では施設のクーリング対策が必要であることが判明した。一方、人工光型植物工場で作成したアブラナでは、蛍光灯よりLEDで栽培した方がビタミンCが多く含まれることを確認した。

1. はじめに

植物工場は、ガラス室や屋内（閉鎖）空間で栽培をする栽培方式で、「野菜等の周年・計画生産が可能な施設園芸農業の一形態」である。広く普及しているビニールハウスでの野菜栽培に代表される露地栽培と同様形態の施設園芸に比べ、植物工場は高度な「環境制御（温度、湿度、CO₂濃度、光量など）」や「養液管理」などが行われる。

日本では戦後、温室で進駐軍向けのレタスなどを水耕栽培する技術開発が進み、太陽光型植物工場の初期の段階は日本がリードしていた。しかし、技術的な完成はオランダにおいて行われ、日本には1990年頃よりオランダ式のハウスが技術導入されるようになった。露地栽培は①重労働、②天候に左右される、③経験に基づく高度な栽培技術が必要であり、生産コストは安いが生産性は低い。一方で、植物工場は①重労働を軽減、②天候に左右されない、③栽培技術の標準化により経験に基づく複雑

な栽培技術が不要、④農薬がほぼ不要で安全、⑤連作障害や病気の発生がなく、露地より短期間に安定的に生産可能、⑥栽培密度を高め、栽培棚を積上げることで限られたスペースにおける栽培の集約化、などのメリットがあり、生産コストは高くなるが生産性は高い。このように日本国内での植物工場は、新たな投資やランニングコストがかかるため普及は停滞していたが、2011年の東日本大震災では、津波による農地の塩害化や農地の放射能汚染が問題となり、その対応として、場所を選ばず、集約的に、土壌汚染等の影響を受けずに安全な農業を行うことができる植物工場のメリットが注目されるようになった。また植物工場は、培養液や栽培環境の制御が可能なことから、ビタミン含有量が多い高機能野菜等の提供が可能といわれており、新規分野としても注目を浴びている¹⁾。

一方で、現状の植物工場では、建設コストや近年の重油価格や電気料金の上昇などのランニングコストも大きな負担になっており、これらのコスト削減が非常に重要

な課題となっている。太陽光型植物工場は、外部温度環境の影響を受けやすいことから、夏期の高温化対策が課題であるが、温度環境の実態は研究が進んでいない。人工光型植物工場は、栽培する植物に応じた適切な環境制御技術が十分に確立されていない状況にある。このように現状の植物工場は、技術面でも課題があり、植物工場のメリットが十分に生かされているとはいえない。この論文では、太陽光型植物工場における外部温度環境影響の実態調査、および人工光型所工場の諸条件がレタス生育後の成分に与える影響を調べるための基礎実験を実施したので、それらの結果について報告する。

2. 既往の植物工場の研究

2.1 植物工場の種類

植植物工場は、Table 1に示すように、「完全人工光型」と「太陽光利用型」の2つに分類されている。また、太陽光利用型のうち人工光も利用するものは、「太陽光・人工光併用型」とされている²⁾。

2.2 太陽光型植物工場

日本の太陽光型植物工場は、1990年から2000年にかけてオランダ式の大規模ガラス温室が全国に導入され建設が進んだ。しかし、池田³⁾によると、日本では導入した施設を使う技術が未発達で運用面やコスト面で失敗したものがある。その要因としてオランダの夏の気温は、30℃を超えるような日は数えるほどでしかないが、日本の夏は高温で、導入した技術では高温に対処できず作物栽培が難しいなど、夏期の高温対策を問題点として指摘している。また古在⁴⁾も日本の夏期は高温であり、日射強度が強く、晴天の昼間に換気窓を全開、換気扇をフル運転し、遮光する必要があるなど、オランダとの夏期の気象条件の違いを指摘している。太陽光型植物工場の光の効率的利用システムについて研究している建山ら⁵⁾は、太陽光型植物工場の課題について、太陽光が直接入射することによる夏期の過度な温度上昇への対策が課題と指摘している。

一方、日本においては、太陽光型植物工場の研究開発は、石井ら⁶⁾の冬期の暖房負荷低減を被覆材によって保温性向上を行うことで暖房負荷低減を行う研究が主流である。このように日本では太陽光型植物工場の夏期の高温対策が技術的に最も重要な課題であるにもかかわらず、施設内の温度環境の実態把握や、高温対処技術についての研究開発はあまり進んでいないのが実状である。太陽光型植物工場は、日本の四季の環境に応じた日本独自の仕様、環境調節システムの技術開発が必要であり、そのためには既存の温室の熱環境の実態把握が重要と考える。そこで、3章では日本における太陽光型植物工場の実態把握のため、既存施設の温度環境実態調査を実施している。

2.3 人工光型植物工場

人工光型植物工場は、1990年代より蛍光灯などの人工照明による水耕栽培技術の技術開発が進み、露地栽培より短い栽培期間で、育成できるため2000年代には蛍光灯によるレタスなどの葉物の水耕栽培が主流になっている。一方、近年ではLED照明による栽培技術の技術開発が行われ、赤色光を照射することで葉面の成長の促進効果、青色光を照射することでフェノールやカロテノイド及び抗酸化活性を蛍光灯より高めることが確認されている⁷⁾。また培養液や施設内のCO₂濃度、温度、湿度などの環境制御を最適化することで、グリチルリチンなどの薬用成分を高めるなど、薬用植物の生産に関する研究が進んでいる⁸⁾。そこで、4章ではレタスについて人工光型植物工場の栽培試験を行いLED照明による栽培効果を検証した。

Table 1 植物工場の分類
Types of Plant Factory

植物工場の分類		説明
① 完全人工光型		太陽光を用いずに、人工光及び加温装置等の環境制御装置を用いて、野菜等の植物の周年・計画生産を行っているもの
② 太陽光利用型	太陽光・人工光併用型	温室等で、人工光による補光及び加温装置等の環境制御装置を用いて、野菜等の植物の周年・計画生産を行っているもの
	完全太陽光型	温室等で、人工光による補光を用いず、加温装置等の環境制御装置を用いて、野菜等の植物の周年・計画生産を行っているもの

3. 太陽光型植物工場の温度環境実態調査

3.1 計測した太陽光型植物工場の概要

太陽光型植物工場内の温度環境を調べることを目的として、通常農家で使用されている代表的な施設を対象に、室内および地下の温度分布を計測した。

調査した施設の仕様をTable 2に示す。天窓の開閉などの自動制御など太陽光型植物工場とほぼ同様なシステムを採用している、花き農家保有の施設である。季節に応じた施設内の温度制御方法をTable 3に示す。施設内には中央にコンクリートで被覆した通路を有し、通路の左右に栽培植物を配置している。また施設の環境制御は、通常はPhoto 1のように寒冷紗をしない状態で温度によって天窓を開閉して室温を調整している。夏期は、Photo 2のように遮光する。冬期は寒冷紗による遮光は基本的にせず、夜間温度低下が予想される場合、天井面にシートを被覆してPhoto 3のよう保温する。

3.2 計測方法

室内環境実態調査は、施設内の高さ方向の温度分布及び植物植栽部分の湿度に加えて、GL-1m, -2m, -3m の

浅層地温についても測定した。

施設内の中央部において、Fig. 1 に示すように天井から地面にかけて鉛直方向の 30cm ごとの温度と、通路のコンクリート表面の計 9 点、温室の基礎近傍において GL-1m, GL-2m, GL-3m までの地中温度を 3 点、施設の室内外縁部 2 点、外気温 1 点の合計 15 点を小型温度記録計を使用して、2012 年 3 月～2013 年 3 月までの 1 年間測定を行った。

3.3 計測結果

Fig. 2 には、天井部の高さ 270cm、植栽棚がある高さ 90cm、GL-3m の地温、外気温の 4 点における年間の温度推移を示す。4 月から 9 月にかけての春期から夏期は、高さ 270cm の高所は 40℃ 以上になっている。植栽がある高さ 90cm の地点は、7 月から 9 月にかけての夏期は、植物の生育限界温度である 35℃ を超過することが明らかである。

Fig. 3 には、昼間の時間帯における温度の鉛直分布を示した。図中には、地中含めた各高さにおける冬期、夏期、秋期のピーク温度の推移を示している。冬期のデータは、保温のために天窓と側窓を締め切るとともに寒冷紗による遮光をせず保温シートで覆っている条件であった。昼間の 10時から15時は、締め切った状態であるため高さ 270cm は 35℃ を超えている。夏期のデータは寒冷紗で遮光した条件で、植栽棚がある高さ 90cm より上方は栽培に不向きな高温域となり、高さ 270cm が 40℃ 以上、植栽がある高さ 90cm でも 37℃ と外気温の最高温度 36℃ とほとんど差がない。また秋期のデータは、寒冷紗による遮光がない状態である。その他温室内の構造物も蓄熱等で温度上昇が確認できたが、その中でも特徴的なのは温室内のコンクリート通路の表面の温度が最も高温になっている点であった。

一方、地中温度 (GL-3m) は、冬期、夏期、秋期を通じて 17.5℃～18.5℃ でほぼ一定であった。

3.4 考察

先に Fig. 2, Fig. 3 で示した通り、夏期は植物の栽培に著しく困難な環境になっている。室内の高温化の要因は、施設の構造部材の鋼材や通路のコンクリートへの蓄熱、施設内の換気が不十分であるためである。太陽光型植物工場で夏期に野菜を育成する場合、夜間に温度を下げる夜冷が行われている。例えば Photo 4 に示すトマトは、25℃ 以上では花房の分化が促進できないため、花房分化を促進するには夜温を 22.5℃ 以下にする必要がある⁸⁾。しかし、夏期の測定データによると、夜間も 28℃ 近くを保持しており、22.5℃ 以下へ冷却するには更なる冷房エネルギーが大量に必要であり、施設のクーリング対策が必要である。

一方、GL-0.3m～GL-2m の地温は変動するが、GL-3m の地温は 17～18.5℃ で年間を通じて安定している。

Table 2 温室の仕様
Specifications of the Solar-type Plant Factory

材質	ガラス	フッ素フィルム (F クリーン)
規格	高さ 5.6m × 幅 10m × 奥行 45m	高さ 5.6m × 幅 10m × 奥行 27m
設備	温風機 (重油焚き) : 室温 5℃ 以下で自動運転	
	寒冷紗自動開閉 : 室温 25℃ 以上で開閉	
	天窓開閉 : 室温 22℃ 以上で開放	
	気流循環ファン	
環境制御	手動散水	
	天窓、側窓は 3 月 20 日以降～11 月上旬頃までは常時開放	

Table 3 温度環境制御
Temperature control of the Solar-type Plant Factory

11 月～3 月上旬	22℃ 以上で天窓自動開閉
4 月～10 月	天窓、側窓常時開放 (雨天時除く)、必要に応じて寒冷紗で遮光
12 月～3 月	室温 5℃ で温風機で暖房するが、2012 年は実施せず、保温シートで天井部、側窓部分を被覆して保温



Photo 1 通常時の制御
Temperature Control of Normal Type

Photo 2 夏期の温度制御
Temperature Control of the Summer by Shade

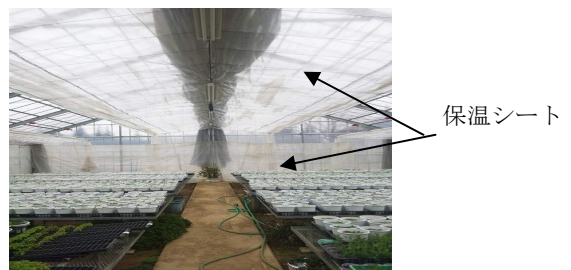


Photo 3 冬季の温度制御 (保温シート)
Temperature Control of the Keeping-Warm Sheet

4. 小型人工光型装置による栽培試験

4.1 実験条件

温度の制御可能な施設に Table 4 に示す水耕栽培装置を設置し、LED 照明と蛍光灯を使用して Table 5 に示す 3 ケースの実験を行い、生育状況とビタミン含有量を比較した。温度は 23℃で 24 時間空調制御を行い、照明の点灯時間は 12 時間とした。CO₂ 濃度、湿度は制御していない。測定した温度、湿度、CO₂ 濃度の変化を Table 6 に示す。

培養液の濃度は、一般にレタスの栽培に使用されている Table 7 のものを採用した。試験に使用した蛍光灯、LED 照明の光量子を Table 8 に示す。

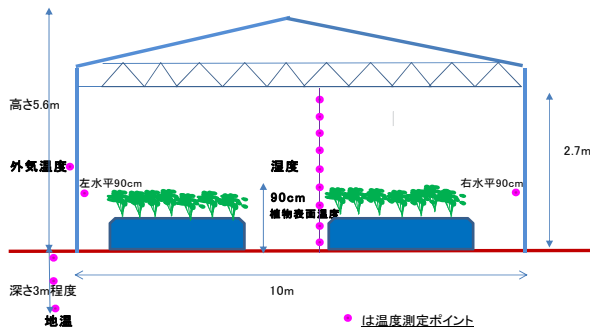


Fig. 1 温室における測定点
Measurement Points of the Solar-type Plant Factory

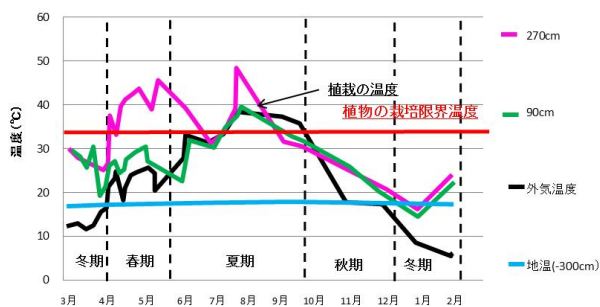


Fig. 2 曇りのデータを除いた晴天時の高さごとの年間の温度推移
Temperature Changes in the Year of Each Height

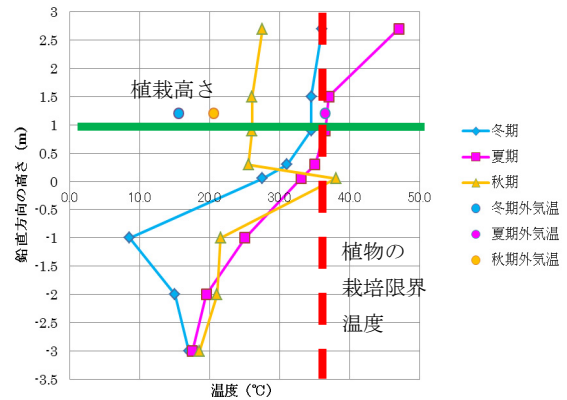


Fig. 3 晴天時の冬期、夏期、秋期の昼間の高さごとのピーク温度の推移

Thermal Environment in the Winter and Summer and Autumn Fine Weather



Photo 4 トマトの栽培状況
Cultivation Situation of the Tomato

Table 4 栽培装置の諸元
Specifications of the Hydroponics Equipment

規格	縦 800 mm × 横 665 mm × 高さ 310 mm
重量	4.5 kg
液肥容量	50 リットル
照明	蛍光灯 LED
培養液	ハイポニカ

Table 5 試験ケース
Experiment Cases

試験ケース	試験内容
ケース 1	結球レタスにおける LED と蛍光灯での成長量比較
ケース 2	リーフレタスにおける LED と蛍光灯での成長量比較
ケース 3	アブラナにおける LED と蛍光灯のビタミン含有量比較

4.2 結果及び考察

4.2.1 照明の違いが植物体の生育に与える影響 定植後34日に結球レタスとリーフレタスの生体重を測定した。測定結果をFig. 4, およびPhoto 5, Photo 6に示す。

結球レタスは、重量が重くなったが、リーフレタスは差がなかった。これは、使用したLEDが結球レタスを対象として波長を合わせたものであるためであると推測される。このようにレタスは、種類によって波長や光量の違いで生育特性が異なる。LEDは、最適な光源と作物種を選択することでより効率的な栽培が行えると考える。しかし、生育特性に影響を与える因子として、波長が影響を与えるか、光量が影響を与えるかは不明であり、今後の検討課題である。

4.2.2 照明の違いによるビタミン含有量 アブラナを栽培して、小型反射式光度計でビタミンC含有量を分析した。Fig. 5のように蛍光灯よりLEDの方が多く含まれており、広く一般に知られている同様な栽培事例の結果⁷⁾と同様であることが確認できた。

4.2.3 人工光型施設の概要 現在、4.2.1, 4.2.2の結果から、人工光型植物工場のメリットを最大限活かすには植物栽培における光環境、温度環境、培養液、CO₂濃度などの環境を高精度に最適制御する必要がある。このため、Photo 7, Photo 8, Photo 9, Table 9に示す人工光型実験施設設置を新たに設置し、葉物野菜の人工光での栽培実験を開始した。

Table 8 光量子条件
Case of Photon Flux Density

単位：μmol/m²・s

	植栽前	植栽途中	条件
蛍光灯	138.2	119.8	照明直下 38cm, 蛍光管 8 本
LED	184.0	92.0	照明直下 40cm, LED 管 8 本
	281.1	---	照明直下 20cm, LED 管 8 本

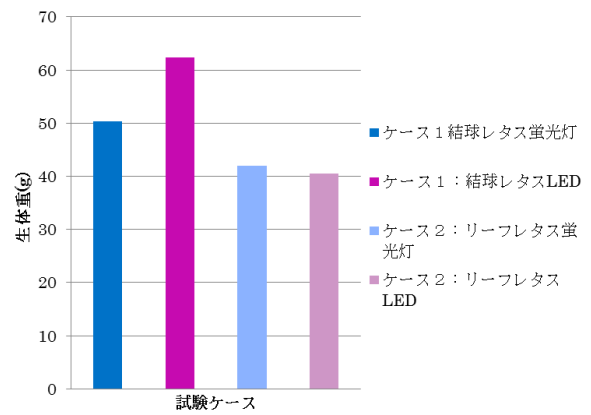


Fig. 4 蛍光灯とLED照明下で栽培した定植後34日の結球レタス、リーフレタスの生体重
Fresh Weight of the Head Lettuce and Leaf Lettuce on after the 34th Grown under a Fluorescent Light and LED Light

Table 6 栽培環境条件

Environment conditions of Hydroponics Equipment

栽培品種	温度 (°C)	湿度 (%)	照明時間 (明期)	CO ₂ 濃度 (ppm)
レタス	23	60~70	12時間	300~440

Table 7 培養液の成分

Culture Solution of the Ingredient

単位：mg/l

水素イオン濃度(pH)	7.0 (24.8°C)
硝酸性窒素	97
電気伝導率 (mS/m)	120
アンモニア態窒素	7.1
総リン	38
カリウム	160
カルシウム	81
マグネシウム	21
ホウ素	0.45
亜鉛	0.03

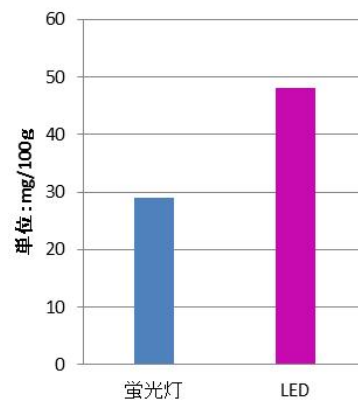


Fig. 5 ビタミンC含有量の比較
Comparison of the Vitamin Content



Photo 5 蛍光灯試験区
Fluorescent Light Conditions



Photo 6 LED試験区
LED Light Conditions



Photo 9 栽培試験状況
Cultivation Experiment Situation



Photo 7 実験施設外観
Laboratory Appearance

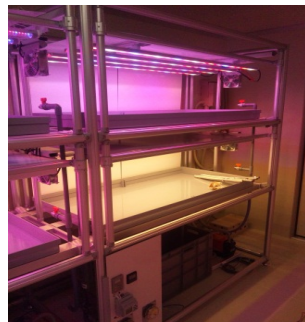


Photo 8 栽培棚と照明
Cultivation Bench and Lighting

Table 9 人工光型植物栽培施設の仕様

Specification of an Artificial Light Type Plant Factory

規格	幅 1.8m × 長さ 9m × 高さ 2.3m
培養液系	3 系統独立
制御系	培養液濃度・供給量, 温度, 照明自動制御
空調機	2 台
栽培棚	2 段 × 3 列
照明	蛍光灯 2 種, LED 2 種

5. まとめ

植物工場の今後の技術的課題と基礎実験結果について以下に示す。

- 1) オランダ式の太陽光型植物工場は、日本では夏期の高温対策が課題である。
- 2) 太陽光型植物工場の熱環境測定の結果、部材への蓄熱対策、施設内の換気対策が必要である。また GL-3m の浅層地中熱は年間を通じて安定していることが明らかとなった。
- 3) 人工光型植物工場は、栽培する植物によって光源の種類に適正があるため、栽培する植物に合わせて最適な光源を選定するなど栽培環境の最適化が必要である。また LED 栽培したアブラナは、ビタミン C 含有量が蛍光灯栽培より多く含まれることを確認した。

謝辞

人工光型植物工場の栽培技術指導及び栽培した植物体におけるビタミン含有量の分析において、千葉大学古在豊樹名誉教授、千葉大学大学院 園芸学研究所 丸尾達教授のご協力を得たことに感謝いたします。

参考文献

- 1) 古在豊樹：人工光型植物工場 世界に広がる日本の農業革命，オーム社，pp.193～212，（2012）
- 2) 農林水産省農林水産技術会議：進化する施設栽培 大規模施設から植物工場まで，農水省研究開発レポート N O.14, 19p, （2005）
- 3) 池田英男：植物工場の現状と展望，大阪府大，pp.2～5，
- 4) 古在豊樹：なぜ，自然光（太陽光）植物工場なのか？— その課題と展望—，千葉大学環境健康フィールド科学センター，pp.15～16，（2009）
- 5) 建山和由，他：太陽光併用型植物工場における光の効率的な利用システムの検討，立命館大，植物環境工学 (J. SHITA) 19 (2) : 59-65, pp.4～5, （2007）
- 6) 石井雅久：ハウス空調の考え方と対策，（独）農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所，特定非営利活動法人植物工場研究会第46回，（2012）
- 7) 庄子和博：育苗段階における青色LED照射がサニーレタス苗の品質と定植後の生育に及ぼす影響，研究報告：V10032, (財)電力中央研究所, pp.3～11, （2011）
- 8) 農林水産省農林水産技術会議：先端技術等地域実用化研究促進事業（農林水産新技術実用化型），栄養体利用などによる画期的野菜育苗技術の開発（概要），pp. 2～3, （2002～2003）