

人工光型植物工場における垂直式栽培

下山 真人 末田 香恵
溝田 陽子 高橋 真一

Vertical-Type Plant Cultivation Technology in Artificial-Light-Type Plant Factory

Masato Shimoyama Kae Sueda
Yoko Mizota Shinichi Takahashi

Abstract

In a general artificial-light-type plant factory, vegetables are grown in a horizontal-type system. This horizontal-type system has two large problems: the light-energy-to-plant conversion efficiency and the heat-load reduction. On the other hand, a new innovative system was recently developed to solve these problems: a vertical-type plant cultivation technology. This vertical-type system has not yet been adopted for a large-scale plant factory because its productivity has not been clarified. Therefore, we measured the environments and made productivity and quality comparisons for lettuce grown in horizontal- and vertical-type systems. The results showed that the vertical-type system produced lettuce that was equal in weight and quality to that grown in the horizontal-type system.

概 要

一般的な人工光型植物工場では、栽培棚を水平方向に重ねていく水平多段式と呼ばれる栽培方式で野菜が栽培されている。人工光型植物工場でもっとも多くエネルギーを消費するのは照明であるが、この方式では光エネルギーの植物体への転換効率に限界があり、また構造的に熱負荷の解消が難しいという課題がある。一方、これらの課題を解決する革新的な方法として垂直式栽培という方式が開発されているが、事業化規模で適用された事例はない。そこで、従来の水平式と垂直式の2タイプの栽培装置を製作し、栽培スペースの環境や収穫物の生産性、品質について比較検討を行った。この結果、垂直式は照明の有効利用と熱負荷の解消に優れ、水平式と同等の生体重や品質の収穫物を得ることができることを確認した。

1. はじめに

人工光型植物工場では、一般的に栽培棚を水平方向に複数重ねる水平多段式という栽培方法が採用されており、レタスなどの葉物の水耕栽培が主流になっている¹⁾。この方式では、太陽光の代わりになる照明を栽培棚上部に配置し、土壌の代わりであるウレタン培地に種を播き、培養液を水分と栄養素の供給源とした1つのユニットを水平方向に複数積み重ねて単位容積当たりの生産量を増加させている (Fig. 1, Photo 1)。このような基本構造であるため、人工光型植物工場で生産量を増やすためには、多くの事業者の例を見る限り縦方向は栽培棚を10段、横方向は10段の栽培棚を拡大していく方向がとられている。照明は栽培棚分が必要になり、生産量を増やすことは照明の増加、照明の増加に伴う発熱量の調整のための空調負荷の増大と空調機容量の増加につながることになる。さらに横方向に栽培スペースが拡大すれば建設コストが上昇することになる。そのため水平多段式では、2つの大きな課題が指摘されている。

一つ目は、植物工場における電気消費量の約2/3を占めるとされている照明の利用効率を上げることである²⁾。一般的に植物工場で使用される蛍光灯は光を360度方向

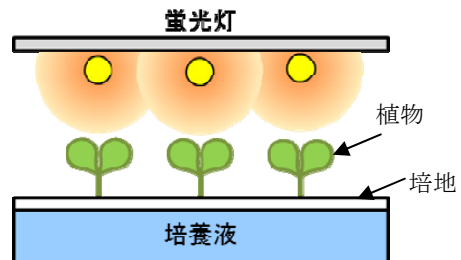


Fig. 1 水平式栽培システムの断面図
Cross Section of Horizontal-Type System



Photo 1 水平式の栽培装置
Horizontal-Type System

に照射するが、水平多段式では植物体は蛍光灯の下方方向にしか存在しないため、光の多くが無駄になっていると言える。さらに水平多段式の構造上、照明と生産物である植物の関係が常に1:1であることから、光エネルギーの生産物への転換効率の改善は難しいと考えられる³⁾。

二つ目は、熱負荷の解消である。各ユニットの上部には照明があり、これが熱源となっており、かつ上下を別のユニットに挟まれているため空気が移動しにくく、大型化するほど栽培スペースに過剰な熱がたまりやすい構造となっている。熱負荷の影響は大きく、古在⁴⁾によると栽培室の全電力消費量における割合が最も高いのは照明の80%であるが、二番目に高いのは空調で約16%としている。これらの課題の解決が人工光型植物工場のさらなる発展のためには必要であり、革新的な解決方法が望まれている。

このような課題を解決する方法の一つとして、いくつか垂直式栽培技術が開発されている³⁾。この方式では、蛍光灯を垂直方向に立て、それを囲むように植物体と培養液を配置することで植物への照射効率を高めている点に特徴がある。また、空気の上下移動を遮る構造物を減らし、自然対流により栽培スペースから熱負荷がスムーズに排出することができる (Fig. 2)。

一方で垂直式の問題は、エネルギー的な課題解決を主眼においた新しいアプローチであるため、植物体が自然に生育する環境とは異なる位置関係に光源と植物体が配置されており、従来の水平多段式と同等の生産性 (一株当たりの生体重, 単位容積当たりの生産量) があるのか、また形態に異常のない野菜が栽培できるか定かではないことである。そこで、水平式と垂直式の栽培装置で蛍光灯を光源としてレタスを栽培し、収穫物の比較試験を行うこととした。

2. 試験方法

2.1 試験目的

水平式の栽培装置と垂直式の栽培装置を製作し、植物を栽培するスペースの環境状況を測定して比較する。さらに、実際にこれらの栽培装置でレタスを栽培して生産性 (一株当たりの生体重, 単位容積当たりの生産量) が同等であるか、また収穫物の形態などに異常がないかどうかを比較する試験を行う。

2.2 栽培装置の仕様と栽培条件

水平式と垂直式の栽培装置の仕様と栽培条件をTable 1に示す。ウレタン培地に播種したレタスは、一定の大きさになるまで水平式用は育苗棚で播種後18日間 (Photo 2)、垂直式用は25日間 (Photo 3) かけて育苗し、それぞれの栽培装置へ定植した。20日間の栽培後、それぞれのレタスの収穫時にはPhoto 4とPhoto 5のような状態となった。

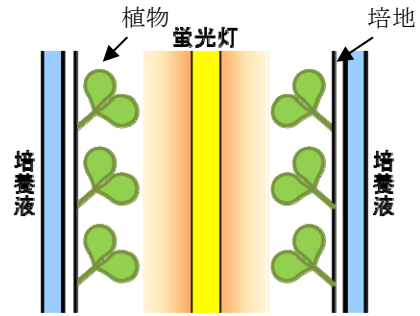


Fig. 2 垂直式栽培システムの断面図
Cross Section of Vertical-Type System

Table 1 栽培装置の仕様と共通する栽培条件
The Specification of the Experiment Equipment and the Cultivation Condition

	水平式栽培装置	垂直式栽培装置
栽培スペース寸法	幅 0.7m 奥行 0.7m 高さ 0.6m	幅 0.7m 奥行 1.0m 高さ 2.5m
栽培スペース容積	0.3m ³	2.25m ³
栽培株数	12	224
1m ³ あたりの最大栽培株数	40	100
照明	蛍光灯 1.2m	蛍光灯 2.4m
明期	16 時間 (6:00~22:00)	
培養液	ハイポニカ培養液	

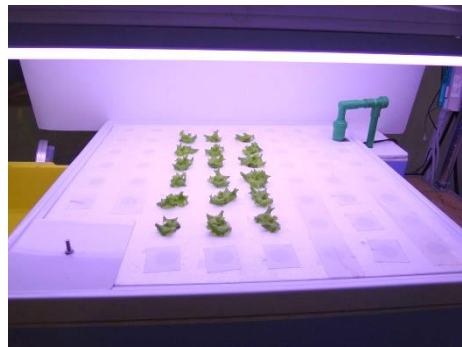


Photo 2 水平式用の苗
Nursery for Horizontal-Type System

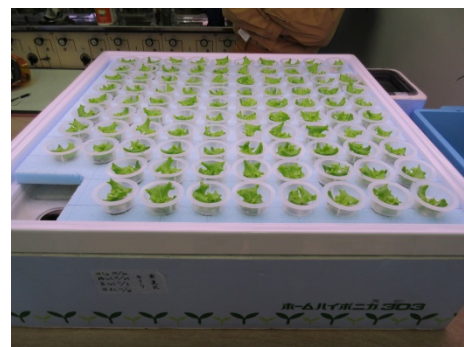


Photo 3 垂直式用の苗
Nursery for Vertical-Type system

2.3 試験内容

2.3.1 栽培スペースの環境測定 2.2で述べた水平式と垂直式の栽培装置において、実際に植物を栽培する位置を測定点として光、温度、湿度の3項目の環境状況について測定を行った。レタスを実際に栽培している時には植物体が障害物となって光環境の測定ができなくなってしまうため、測定点における光環境については栽培を行う前に光量子計を用いて測定した。また、温湿度の分布は実際に植物が曝される環境を評価する必要があるため、レタスの栽培期間中にボタン型温湿度データロガーを用いて測定を行った。

2.3.2 水平式でのレタス栽培方法 ウレタン培地に播種したレタスを播種後18日間育苗し、水平式の栽培装置へ定植して20日間栽培した。収穫時には一部分を取り出して生育調査に用いた。調査項目は野菜の生産性を示す生体重、形態を数値化するための株高（株の鉛直方向の高さ）と株広（株の水平方向の長さ）、および収穫した野菜の品質に関わるチップバーンの4項目である。チップバーンとは、葉菜類に発生する生理障害であり、レタスをはじめとする葉物野菜生産において共通の課題となっている生理障害である。チップバーンの症状は葉先が黒く変色したり枯れたりするものであり、重症化すると生産物の外観が著しく悪くなるために商品価値が損なわれてしまい、大きな経済的損害をもたらすことが問題となっている（Photo 6）。ここではチップバーンのないものを0、トリミング（変色部や枯損部を取り除く）で除去できる程度のもを1、商品としての販売が難しいほど重症なものを2として数値化して評価した。なお、測定した4項目のデータについてはそれぞれの平均値を求めた。

2.3.3 垂直式でのレタス栽培方法 ウレタン培地に播種したレタスを25日間育苗し、垂直式の栽培装置へ定植して20日間栽培した。なお垂直式の播種、育苗期間が前述の水平式と異なるのは、播種、育苗した場所が実験室であり外気の影響を受け温度・湿度が一定に保持しにくく、水平式に比べて定植できる苗の大きさになるのに時間を要したためである。

収穫時には一部分を取り出し生育調査に用いた。調査項目は水平式と同じく生体重、株高、株広、チップバーンの4項目であり、それぞれの平均値を求めた。

3. 試験結果

3.1 栽培スペースの環境測定（光、温度、湿度）

人工光型植物工場における野菜生産のメリットとして「4定」が挙げられる。「4定」とは「定時」「定量」「定品質」「定価格」の4つである。一定の時間に、一定の量が、一定の品質で生産され、これによって安定した一定の価格で野菜が供給されることを意味する。これらのメリットは、過酷で不安定な自然環境下で栽培される露地産の野菜とは異なり、人間の作り出した一定の安定した環境下で野菜を栽培することにより達成されるものであ



Photo 4 水平式での栽培状況
Lettuces in the Horizontal-Type System



Photo 5 垂直式での栽培状況
Lettuces in the Vertical-Type System



Photo 6 レタスにおけるチップバーンの症状
Tip Burn in Lettuce

Table 2 栽培装置の光環境状態
The Light Condition of Equipment

	水平式 栽培装置	垂直式 栽培装置
光量子束密度の差 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	(装置全体) 2 .4	(装置全体) 71.4 (中央部 58%) 27.6

る。そこで、植物の生育に必要な光、温度、湿度の3項目について環境状況の測定を行い、水平式と垂直式の栽培装置のどちらがより均一で安定した環境となっているかを比較した。

3.1.1 光環境 水平式と垂直式のそれぞれの栽培装置において、実際に植物を栽培する位置を測定点として測定を行った。光量子計による光環境の測定の結果、水平式の栽培装置の栽培スペースにおける光量子束密度の

最大値と最小値の差は25.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった (Table 2)。

一方、垂直式の栽培装置の栽培スペースにおける光量子束密度の最大値と最小値の差は最も大きい場所で71.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。結果からは水平式の栽培装置の方がより均一な光環境にあると言えるが、これは水平式では全長1.2mの蛍光灯に対して、栽培スペースである栽培装置の幅が0.7mであったため、光環境がより安定している蛍光灯の中央部分58%に測定点が集中していたことが原因と考えられる。今回採用した垂直式の栽培装置では、使用している蛍光灯の全長2.4mに対して栽培スペースが無駄なく配置されているため、光量子束密度が減少する傾向にある蛍光灯の端部まで測定点となっており、水平式の栽培装置よりも測定値の差が大きくなってしまっていると考えられる。そこで、水平式の栽培装置と同等の測定点で光環境を比較するため、2.4mの蛍光灯のうち水平式と同様に中央部分58%の測定点における光量子束密度の最大値と最小値の差を求めた。この結果、垂直式の栽培装置においても光環境の差は最も大きい場所でも27.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であることが明らかとなった。このことから、水平式の栽培装置と垂直式の栽培装置の栽培スペースにおける光環境のばらつきは同等であると言える。さらに、垂直式の栽培装置では全長2.4mの蛍光灯を利用しているため、全長1.2mの蛍光灯を利用している水平式の栽培装置よりも2倍のスペースで同等の均一性を保っていることが示された。

3.1.2 温湿度環境 水平式と垂直式のそれぞれの栽培装置において、実際にレタスを栽培して栽培期間中の温湿度環境の測定を行った。水平式の栽培装置は小型であるために代表となる1カ所に、垂直式の栽培装置では2.4mの高低差があり装置の上下で温湿度環境に差が見られるかを確認するために上部と中央部と下部の3カ所に測定点を設けた。また、栽培期間中にそれぞれの栽培装置に供給される空気の温湿度状態を把握するため、これらの装置を設置した試験室でも同時に温湿度の測定を行った。植物工場において問題となる熱負荷は照明を点灯している明期の時間帯に発生するため、測定した温湿度については特に栽培期間中の明期について分析した。その結果、温度に関しては熱がこもりやすく空気の循環しにくい水平式の栽培装置では栽培棚の端部に気流攪拌用のファンを設置しているにもかかわらず、明期の温度をレタスの生育に適した24 $^{\circ}\text{C}$ 程度にするためには供給する試験室の空気の温度を18 $^{\circ}\text{C}$ 程度まで下げる必要があることが明らかとなった (Table 3)。

一方で、自然対流による空気の循環が起こり、栽培スペースに熱がこもるのを抑制できることを期待して設計した垂直式の栽培装置では、高さ2.4mの高低差があるにも関わらず温度にほぼ上下差はなく一定であり、かつ明期温度を24 $^{\circ}\text{C}$ 程度にするためには供給される空気の温度を20 $^{\circ}\text{C}$ 近くまで上げられることも明らかとなった。すなわち、垂直式の栽培装置では蛍光灯から発生する熱がこもらずに自然に栽培スペースから抜けるために過剰な冷

Table 3 栽培装置の環境状態
The Environmental Condition of Equipment

	水平式 栽培装置	垂直式 栽培装置	
		(上部)	(下部)
栽培スペースの温度 ($^{\circ}\text{C}$)	24.3	24.6	24.4
試験室の温度 ($^{\circ}\text{C}$)	18.4	19.6	
栽培スペースの湿度 (%RH)	70.4	(上部)	57.0
		(中央部)	55.7
		(下部)	56.0
試験室の湿度(%RH)	64.1	58.8	

気を供給する必要がなく、空調負荷を減らすことができることが確認された。湿度に関しては、空気の循環しにくい水平式の栽培装置では熱と同様に栽培スペースにこもりやすく、空気の供給源である試験室よりも栽培スペースで相対湿度が高くなる傾向が見られた。一方、垂直式の栽培装置では温度と同様に湿度も上下差がほぼなく一定であり、水平式の栽培装置よりも空気が循環しやすいために試験室と栽培スペースの相対湿度に大きな差がない傾向が見られた。

3.2 水平式と垂直式の栽培装置におけるレタス栽培

垂直式の栽培装置の育成方法が野菜の生育に与える影響を検討するため、従来の一般的な栽培方法である水平式の栽培装置と垂直式の栽培装置を用いてレタスの栽培を行い比較した。

3.2.1 栽培したレタスの生体重と単位容積当たりの生産量 水平式の栽培装置では、育苗棚で播種後18日まで育苗した苗を定植して20日間栽培した。水平式の栽培装置で栽培したレタスの収穫時の生体重は平均で64.3gであった (Fig. 3)。一方、垂直式の栽培装置では、育苗棚で播種後25日まで育苗した苗を垂直式の栽培装置へ定植して20日間栽培した。垂直式の栽培装置で栽培したレタスの収穫時の生体重は平均で62.2gであり、水平式の栽培装置で栽培したレタスと遜色ない生育状態であった。すなわち、一株当たりの生体重という意味での生産性については、水平式の栽培装置と垂直式の栽培装置が同等であることが明らかとなった。

3.2.2 栽培したレタスの形態と品質 (株高, 株広, チップバーン) 栽培したレタスの形態を評価する尺度が一般的に無いため、収穫物の株高を株広で割って係数化して評価することとした。水平式の栽培装置で栽培したレタスの収穫時の株高は平均で140mm、株広は平均で201mmであり、株広に対する株高の比は0.7であった (Fig. 4, Fig. 5)。同様に、垂直式の栽培装置で栽培したレタスの収穫時の株高の平均は121mm、株広の平均は248mmであり、株広に対する株高の比は0.5であった。すなわち、収穫したレタスの株高が小さく株広が大きかつ

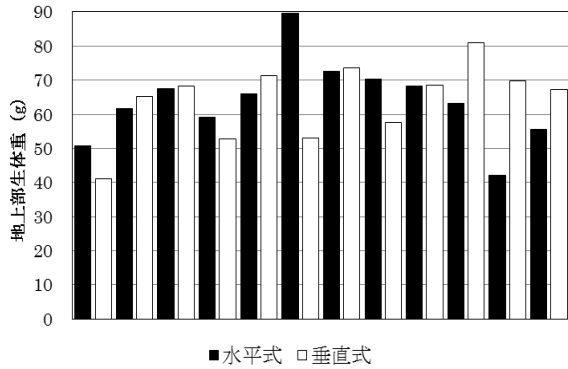


Fig. 3 栽培方式の違いによる生体重の影響

The Effect of the Cultivation System on Fresh Weight

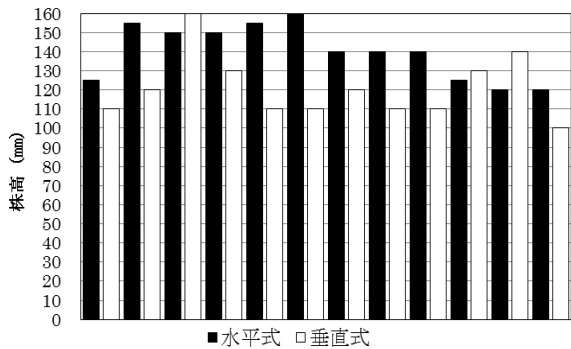


Fig. 4 栽培方式の株高に対する影響

The Effect of the Cultivation System on Height

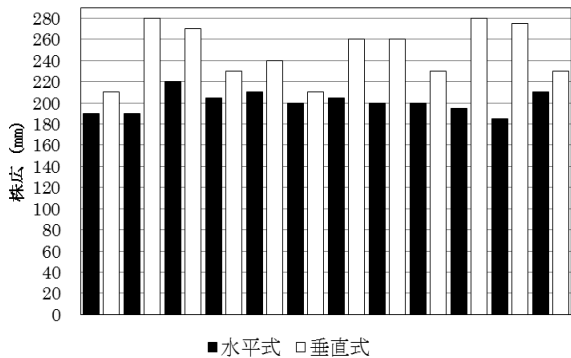


Fig. 5 栽培方式の株広に対する影響

The Effect of the Cultivation System on Width

たことから、垂直式の栽培装置で栽培したレタスの方が水平式の栽培装置で栽培したレタスよりも数値的にはより扁平な形態であったと言える。しかしながら、目視で比較した時の収穫時の外観には明らかな差はなく、この程度の数値的な差はレタスの生産という観点においては特に問題となるものではないと結論した (Photo 7, Photo 8)。

垂直式の栽培装置では、植物体が自然に生育する環境とは異なる位置関係に光源と植物体が配置されるために、消費者に受け入れられないほどの商品価値の低下を招くような極端な形態異常が発生するのではないかの懸念



Photo 7 水平式の栽培装置で栽培したレタス

The Lettuce Cultivated in the Horizontal-Type System



Photo 8 垂直式の栽培装置で栽培したレタス

The Lettuce Cultivated in the Vertical-Type System

があったが、収穫時のレタスの外観には大きな形態異常は認められなかった。また、収穫物の商品価値に大きく影響するチップバーンはいずれの栽培装置においてもほとんど発生が認められず、一部の個体にトリミングで対応可能なごく軽微の症状が見られるにとどまっていた。このことから、栽培方式の違いがチップバーンの発生に影響を与えることはないといえる。従って、栽培したレタスの形態や品質という意味では垂直式の栽培装置と水平式の栽培装置に大きな差はなく、垂直式の栽培装置の単位容積あたりの生産性の高さや空調負荷を削減できるメリットは収穫物の形態や品質により損なわれないことが明らかとなった。

4. まとめ

4.1 栽培環境への影響

- ・水平式の栽培装置と垂直式の栽培装置の光源に対する位置関係が同等の測定点で光環境を比較したところ、両栽培装置の栽培スペースにおける光環境のばらつきは同程度であり、かつ垂直式の栽培装置では水平式の栽培装置の2倍の長さの蛍光灯を使用しているために2倍のスペースで同等の均一性を保っていることが示された。
- ・従来の水平式の栽培装置では熱がこもりやすく熱負荷の解消が一つの課題とされており、実際に製作した装置で測定した結果、栽培スペースの明期の温度を24℃程度

にするには供給する空気の温度を18℃程度まで下げる必要があることが示された。一方で、自然対流による空気の循環を想定した垂直式の栽培装置では、2.4mの上下差があっても温湿度ともにほぼ一定であり、明期の温度を24℃程度にするために供給する空気の温度は20℃近くまで上げることができた。

・垂直式は、蛍光灯から発生する熱が自然に栽培スペースから抜けるために過剰な冷気を供給する必要がなく、空調負荷を減らすことができるシステムであることを確認した。

4.2 植物の生育への影響

・従来の水平式の栽培装置で栽培したレタスと垂直式の栽培装置で栽培したレタスを比較したところ、生体重、形態、品質のいずれにおいても同等の収穫物が得られた。

・垂直式で栽培しても植物の生育への影響がなく水平式で栽培した物に比べて商品価値が劣ることはないことが明らかになった。

・垂直式は、単位空間当たりの生産量（1m³当たりの最

大栽数）100株/m³と水平式の40株/m³の2.5倍であるなど生産量が高いことが明らかになった。

謝辞

垂直式栽培装置の設置および栽培試験を進めるにあたっては、株式会社IMAの池田弘社長にご協力を頂きましたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) 下山真人ほか:植物工場の現状の課題とその一検証, 大林組技術研究所所報 No.77, p1, 2013.12
- 2) 久保啓治ほか:人工光型植物工場における電力消費量の実測調査, 園芸学会研究 別冊, Vol.13, No.1, p231, 2014.3
- 3) 古在豊樹ほか監修:植物工場経営の重要課題と対策, 情報機構, pp107-114, 2014
- 4) 古在豊樹:人工光型植物工場, オーム社, p32, 2012.3