

植物工場における CO₂ 利活用と栽培方法の検討

市原 真希^{*1}・竹内 理絵^{*1}・山本 哲史^{*1}・斎藤 祐二^{*1}

Keywords : Carbon dioxide capture and utilization, hydroponic cultivation, energy saving, resource saving, circular economy
CCU, 水耕栽培, 省エネルギー, 省資源, サーキュラーエコノミー

1. はじめに

年間を通じて安定的な農作物の供給が期待できる水耕栽培は、露地栽培よりも水、農薬や肥料などの使用量を抑えた栽培が可能であり、持続可能な食料生産手法の一つである。近年では、空き家や廃校などの有効活用として水耕栽培システムでの植物工場の取組みが進められている。しかしながら、従来の水耕栽培では、水耕液の温度制御、水耕液の循環ポンプや液中への酸素供給のためのエアレーションの動力など運用時のエネルギーが過大といった課題がある。また、水や肥料は貴重な資源であり、省資源化が課題である。そこで、本研究では、省エネルギーかつ省資源な水耕栽培システムの開発を目的に、水耕液を根に噴霧する栽培システムについて、栽培植物の成長量及び高濃度 CO₂ 下での炭素固定量を従来の水耕栽培システムと比較評価した。さらに、噴霧栽培を上回る合理的な水耕栽培手法の確立を目的に、水耕液を根に定期的に浸す新たな栽培方法について検討した結果を報告する。

2. 栽培方法の違いがリーフレタスの成長に与える影響

2.1 栽培装置および栽培方法

図-1 に栽培装置の外観、表-1 に栽培装置の概要を示す。装置上部から、光源部、栽培部、水槽部で構成される。通常の水耕と噴霧の栽培方法に対し、2ユニットを作製した。装置 1 および 3 の水耕栽培は、植物工場で行われている従来の水耕栽培方法を模擬した方法であり、水耕液中の溶存酸素を確保するために、常時エ

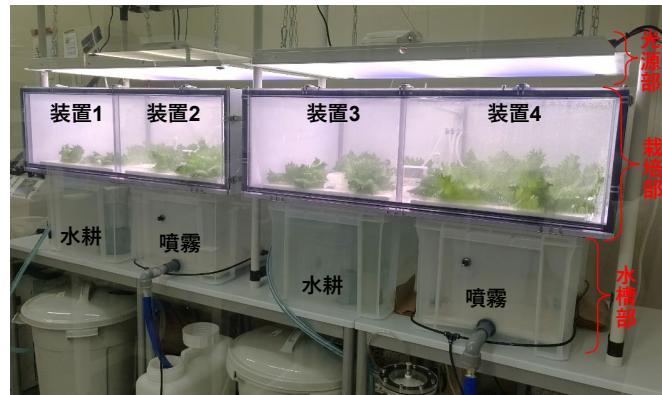


図-1 試験用栽培装置
Fig.1 Test cultivation equipment

表-1 栽培装置の概要
Table 1 Overview of the cultivation equipment

ユニット	装置 1	装置 2	装置 3	装置 4
サイズ [mm]	W320×D600×H480			
栽培方法	水耕	噴霧	水耕	噴霧
CO ₂ 濃度 [ppm]	500			
水槽部の仕組み	常時エアレーション	噴霧頻度 5 分噴霧 /h	常時エアレーション	噴霧頻度 5 分噴霧 /h

アレーションを行う方法である。装置 2 および 4 の噴霧栽培は、根に水耕液を定期的に噴霧する方法であり、本実験では 1 時間当たり 5 分間水耕液を噴霧する運転とした。なお、装置 1, 2 では CO₂ を 500 ppm、装置 3, 4 では 10,000 ppm とした条件にて栽培を行った。

* 1 技術センター 先進技術開発部 新領域技術開発室

2.2 試験方法

2.2.1 育苗および栽培試験

栽培に用いた野菜は、リーフレタス（品種名：フルクリスピ，以降、レタス）とし、実験室内で播種後2週間育苗を行った。その後、各栽培装置に苗を5株定植し、3週間栽培した。栽培試験は、表-2に示す栽培条件に準じた。

2.2.2 分析

収穫したレタスの湿潤重量、乾燥重量、全炭素量を測定した。湿潤重量は収穫直後に測定した。乾燥重量は60°Cで7日間乾燥後に測定した。全炭素量は、乾燥後にミキサー（大阪ガスケミカル社製 Wonder Blender WB-1）で粉体化し元素分析装置により分析した（表-3参照）。

表-2 栽培条件

Table 2 Cultivation conditions

パラメータ	値
光強度	150 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
明期／暗期	16h/8h
気温	22 °C
相対湿度	70~90 %

表-3 分析条件

Table 3 Analysis conditions

装置	Thermo Finnigan 社製 元素分析装置(CHNS コーダ)
燃焼温度 [°C]	950
流量 [ml/min]	140
キャリアガス	ヘリウム
燃焼用ガス	酸素

2.3 結果と考察

図-2に各試験系における地上部の湿潤重量の結果を示す。CO₂濃度が同一の条件では、いずれも水耕栽培よりも噴霧栽培の方が1.5倍程度、高い値を示した。また、地上部における乾燥重量においても同様であった（図-3）。このことから、レタスを噴霧栽培することにより地上部重量を高めることができることが示唆された。なお、CO₂濃度の比較では、CO₂濃度500 ppmでの栽培よりも10,000 ppmでの栽培にてレタスの収穫量が向上した。

図-4に地上部（葉）と地下部（根）の全炭素量測定結果を示す。CO₂濃度が500 ppmの栽培試験では、噴霧栽培の炭素固定量は水耕栽培よりも高い値を示し、特に根の炭素固定量は水耕栽培の1.3倍となった。噴霧栽培では、根は常に空気に暴露される状態のため、根の呼吸が促進されたものと考えられる。その結果、根の活性化が地上部の成長促進に繋がったものと推察される。一方、CO₂濃度が10,000 ppmの栽培試験では、栽培方法による顕著な差異は確認されなかった。

今回の栽培試験で得られた結果より、標準栽培条件であるCO₂濃度500 ppmでの水耕栽培を基準とした生産性の比較を表-4に示す。地上部の重量や炭素固定量は噴霧栽培方法が多く、従来の栽培方法と比較して生産性を向上できることが確認された。但し、噴霧栽培では作付面積の増加に伴い、噴霧装置の設置を増やす必要があり、大規模栽培に伴う設備コストの低減は期待できない。さらに、噴霧装置は水耕液のノズルへの詰まり等の運用上のリスクもある。そこで、筆者らは噴霧装置を使用せずに根に十分な酸素を供給しながら栽培が可能な省エネルギー・省資源型栽培装置を考案し、水耕液を根に定期的に浸す新たな栽培方法について検討を行った。

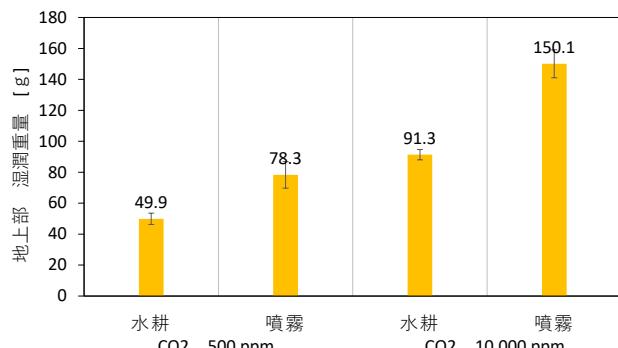


図-2 湿潤重量測定結果
Fig.2 Wet weight measurement results

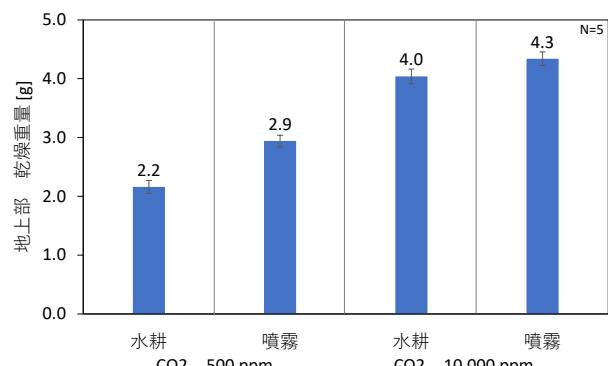


図-3 乾燥重量測定結果
Fig.3 Dry weight measurement results

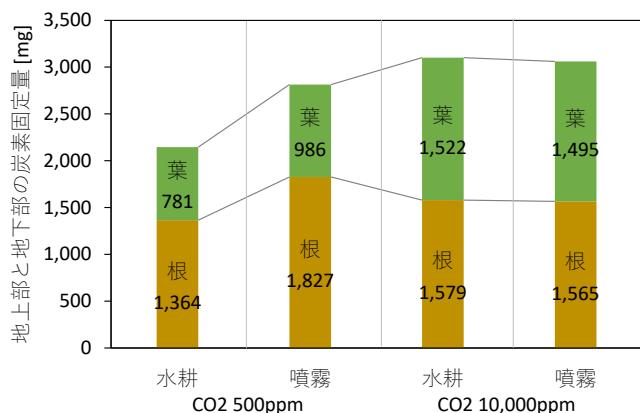


図-4 全炭素量測定結果

Fig.4 Total carbon measurement results

表-4 レタスの栽培方法と結果
Table 4 Lettuce cultivation methods and results

条件と レタス栽培結果	栽培方法			
	水耕		噴霧	
地上部 CO ₂ 濃度 [ppm]	500	10,000	500	10,000
地下部 O ₂ 濃度	溶存酸素(22°C)		大気レベル	
地上部 湿潤重量(相対値)	100	157	183	301
地上部 乾燥重量(相対値)	100	132	182	195
地上部 炭素固定量(相対値)	100	126	195	191
地下部 炭素固定量(相対値)	100	134	116	115

3. 提案する省エネルギー・省資源型栽培装置

図-5 に従来の水耕栽培と提案する新たな水耕栽培の概要を示す。従来の水耕栽培では、高さ方向に積層した全培養棚に水耕液を充填し、さらに溶存酸素を確保するためにエアレーションを行う。一方、提案する栽培方法は、各培養棚にサイフォンを設けることにより、最上段の培養棚の水耕液がサイフォンが生じる水位まで上昇した際に、サイフォン作用により下段の培養棚に順次流下させる方法である。この方法により、水耕液がない培養棚部分では、根の呼吸が促進されるとともに、水耕液が充填された場合には、水耕液中の栄養を吸収することとなる。

本栽培方法が成立すれば、従来の栽培方法と比較して、水耕液量が培養棚数分の1となり、省資源化が図られる。さらには、水耕液へのエアレーションの動力

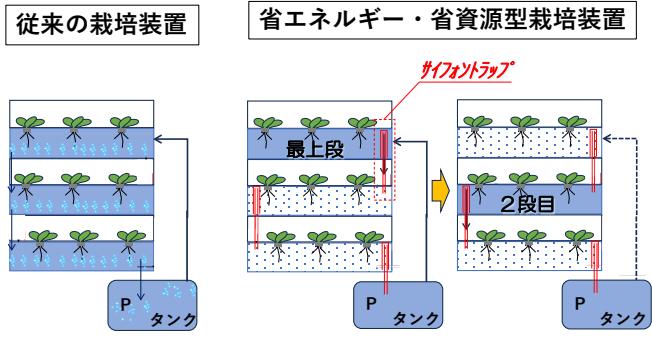


図-5 従来の水耕栽培装置と提案する省エネルギー・省資源型栽培装置

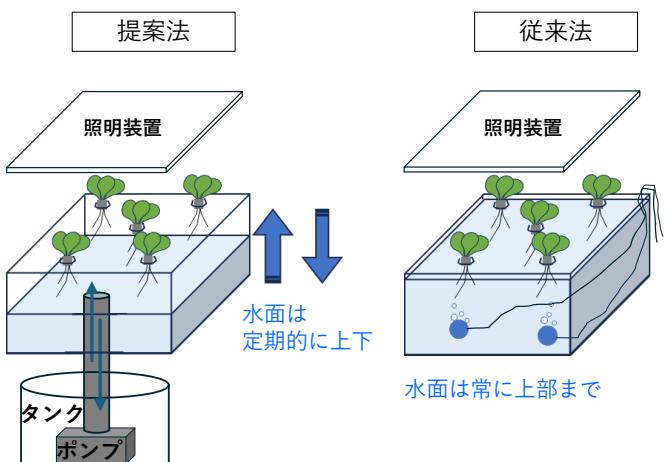
Fig.5 Conventional hydroponic cultivation device and proposed cultivation method

も不要となるため、省エネにも寄与できる。これらのメリットから野菜栽培のコストダウンにも大きく貢献できる可能性がある。

4. 省エネルギー・省資源型栽培装置を模擬した実験装置でのミニダイコン栽培試験

4.1 実験装置および栽培方法

提案する栽培方法の植物生育に及ぼす効果を評価することを目的として、図-6に示す栽培装置を作成した。従来法は、水耕液を根の上部まで満たすとともに、栽培期間中連続的にエアレーションを行った。一方、提案法では、1時間に1回水耕液を定流量で供給した後、水耕液が根の上部に達した段階で引き抜く運転とした。ポンプにより水耕液を供給しタンクへ戻るまでの所要時間は約5分間であり、根の部分が空気に晒される時間は約55分間であった。図-7に実験状況を示す。

図-6 実験装置の概要
Fig.6 Overview of the experimental setup

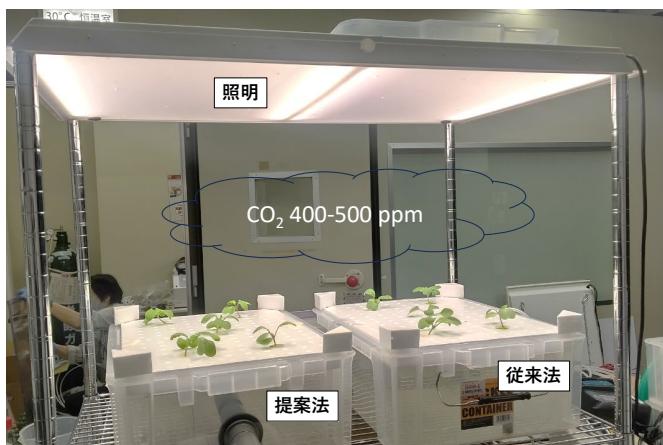


図-7 実験状況
Fig.7 Experimental scene

4.2 試験方法

4.2.1 育苗および栽培試験

上記の栽培装置にてミニダイコンの栽培を実施した。なお、商品となる大根部分、葉、根の部位別の成長性から評価した。実験室内でミニダイコンを播種し、1週間育苗を行った。その後、各実験装置にそれぞれ5個体ずつ定植し、2週間栽培した。栽培条件を表-5に示す。

4.2.2 測定評価

栽培試験終了後にミニダイコンを収穫し、部位別の湿潤重量、長さを測定した。図-8に栽培後のミニダイコンを示す。

表-5 栽培条件

Table 5 Cultivation conditions

パラメータ	値
光強度	120 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
明期／暗期	16h/8h
温度	23°C
CO ₂ 濃度	400～500 ppm

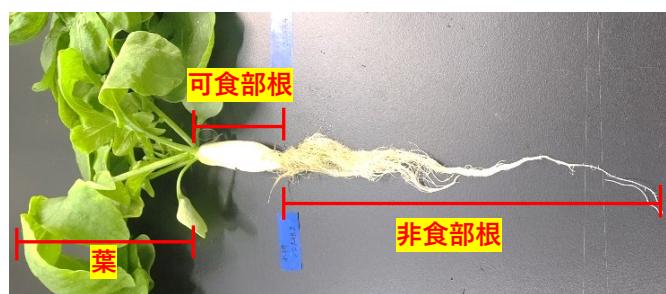


図-8 本研究におけるミニダイコン
Fig.8 Mini radish parts in this study

4.3 結果および考察

図-9に各方法で栽培したミニダイコンの部位別湿潤重量を示す。提案法と従来法を比較すると、提案法で栽培したミニダイコンの可食部重量が、53%増加した。この理由として、噴霧栽培と同様、空気との接触時間を十分に確保することにより根の呼吸が活性化し、非食部根からの栄養や水分の吸収が促進され、可食部根の成長が促進されたと考えられる。一方、非食部根については、提案法で重量が低減した。図-10に部位別長さを示す。提案法は、非食部根の長さが顕著に增加了。また、従来法と比較し細い根が長く伸長している様子が観察された。この長さの違いは、植物が水分を求めて根を伸ばす性質を持つ¹⁾ことにより、相対的に根周辺の水分が少ない提案法で栽培したミニダイコンの非食部根が、従来法より長くなったと考えられる。

以上のことから、本提案法によりミニダイコンの可食部の増加、廃棄部が低減する傾向が確認された。

本栽培試験の結果は表-6のとおりであり、提案法にて栽培したミニダイコンの生産性は、従来法の約1.5倍となった。本実験では各栽培方法に要した投与エネルギー、水耕液等の資源量の収支は算定できていないが、野菜の生産性向上だけでなく、エネルギー、資源の削減効果も大いに期待できる。

■葉 ■可食部根(大根) ■非食部根(廃棄)

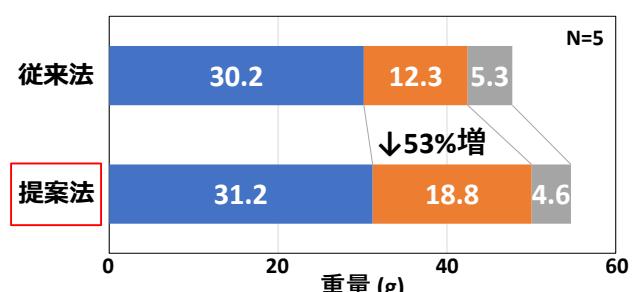


図-9 ミニダイコンの部位別湿潤重量

Fig.9 Wet weight of mini radish by part

■葉 ■可食部根(大根) ■非食部根(廃棄)

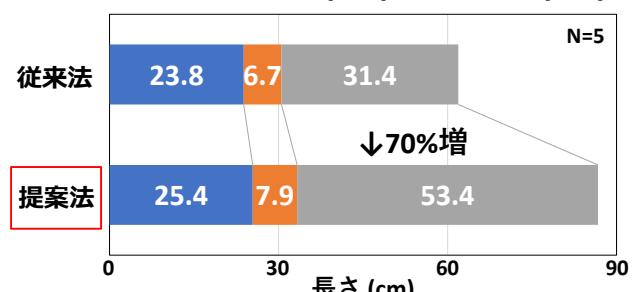


図-10 ミニダイコンの部位別長さ

Fig.10 Length of each part of mini radish

表-6 ミニダイコンの栽培方法と結果

Table 6 Miniature radish cultivation method and results

条件と ミニダイコン栽培結果	栽培方法	
	水耕	提案
地上部 CO ₂ 濃度	400~500 ppm	400~500 ppm
地下部 O ₂ 濃度	溶存酸素 (22°C)	大気レベル
可食部収穫量(相対値)	100	153
廃棄量(相対値)	100	88

5. まとめ

本報では、省エネルギー・省資源を目的とした水耕栽培装置の開発を目的とし、レタスおよびミニダイコンを対象として栽培試験を行った。レタスの栽培試験では、噴霧栽培および高濃度 CO₂ 下での栽培を従来の水耕栽培と比較した。その結果、噴霧栽培ではレタスの成長を促進することが確認でき、高濃度 CO₂ 下による栽培では、レタスの収穫量を向上できることが示された。また、省エネルギー・省資源を図る栽培システムを提案するとともに、この実験装置によるミニダイ

コンの水耕栽培を実施した。その結果、根への酸素の供給と水耕液の浸水を一定時間確保することで、従来の水耕栽培と比較し、ミニダイコンの可食部の重量増加、廃棄される非食部根については重量の低減が確認された。以上より、提案する栽培方法は、廃棄物量の削減効果も期待できることを把握した。

今後は、本研究にて提案した省エネルギー・省資源型栽培装置のモックアップを作製し、栽培検証を行うことで、省エネルギー性などの性能評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 東北大学大学院生命科学研究科：植物の根が水を求めて伸びるしくみを発見-乾燥地で生きるために働く細胞群-, 2017.
- 2) 市原 真希ら：建物内の CO₂ 有効利用に関する検討 その1 水耕栽培による建物内 CO₂ 利活用の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2024.
- 3) 竹内 理絵ら：建物内の CO₂ 有効利用に関する検討 その2 レタス水耕栽培の気中 CO₂ と根圈微生物の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2024.
- 4) 日本施設園芸協会：大規模施設園芸・植物工場 実態調査・事例調査, 2021.