

トマト独立ポット耕におけるミスト噴霧とCO₂施用の効果

前田 健・宮田洋輔*・勝山直樹・安田雅晴**・鈴木隆志***

Effects of mist spraying and elevated CO₂ on tomatoes in a hydroponic culture system that implemented the isolated pot culture technique

Takeshi Maeda, Yosuke Miyata, Naoki Katsuyama, Masaharu Yasuda and Takashi Suzuki

要約 養液栽培システム「トマト独立ポット耕」の長期多段栽培において、ミスト噴霧とCO₂施用を組み合わせた環境制御が生育・収量に及ぼす影響を調査した。ミスト噴霧により飽差管理を行い、冬期は燃焼式のCO₂発生装置を用いたCO₂施用、夏期は液化CO₂を用いた局所施用、春・秋期は燃焼式施用と液化CO₂局所施用の併用といった長期・長時間のCO₂施用を行うと、慣行である低温期早朝のみ高濃度でCO₂施用した場合と比較して収量が20%程度増加した。

キーワード：環境制御，長期多段栽培，少量培地耕，飽差管理

緒言

CO₂は光合成の原料であり、植物に施用することによりその生産性を向上させることは古くから知られ、オランダなどの施設生産においては標準技術として導入されている。日本でも1977年に日本型施設環境に適合したCO₂施用による基準が提示されたが、その後十分に改良されているとはいえない¹⁾。

一般的に行われているCO₂施用は、日の出から換気開始まで施設の換気窓が閉じている数時間に限定され、日射が弱く気温の低い時間帯が多く、CO₂施用を行っても光合成量は増えにくく、顕著な増収効果も得られにくい。近年は低濃度で長時間CO₂施用を行う方法や、施設内CO₂濃度が施設外CO₂濃度より低い場合、施設内CO₂濃度を施設外と等しくなるまでCO₂施用を行う「ゼロ濃度差CO₂施用法」が提案、検証され、収量増加効果、CO₂使用量の削減効果が表れている²⁾。また、光合成速度には、相対湿度や飽差が大きく影響していることから、CO₂施用の効果を高めるために湿度制御を併用することで

収量が大きく増加することが明らかにされている³⁾。

養液栽培システム「トマト独立ポット耕」は長期多段栽培で高収量が得られるシステム⁴⁾として岐阜県内のみならず県外においても導入が進んでいるが、資材等の高騰やトマト販売価格の低迷等により、生産性をさらに向上させる技術の開発が望まれている。また、生産現場では環境制御への関心も高まりつつある。こうした状況の中、本研究ではミスト噴霧と新たなCO₂施用法を組み合わせたCO₂の長期・長時間施用がトマト独立ポット耕の長期多段栽培における温室内環境や生育・収量に及ぼす影響について検討した。なお、本研究は農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「CO₂長期・長時間施用を核とした環境制御技術を開発し東海の園芸産地を活性化化する」により実施した。

材料および方法

試験は、岐阜県農業技術センター内の隣接するガラス温室2棟(112.7 m², 110.8 m²)を用いて行った。試験区

第1表 試験の概要

試験区	CO ₂ 施用	ミスト噴霧	換気設定	果房着果数
環境制御区	あり(長期・長時間)	あり(日中)	低温期30°C	4果 5果(CF桃太郎Jのみ)
対照区	あり(低温期早朝のみ)	なし	常時25°C	

* 現在：岐阜県恵那農林事務所

** 現在：岐阜県就農支援センター

*** 現在：岐阜県農産物流通課

は後述の要素技術を組み合わせ CO₂ の長期・長時間施用を行う「環境制御区」と、慣行の低温期の早朝のみ CO₂ 施用を行う「対照区」の 2 区を設けた (第 1 表)。

供試品種は、「麗容」(株) サカタのタネ) と「CF 桃太郎 J」(タキイ種苗 (株)) とした。栽培は養液栽培システム「トマト独立ポット耕」で行った (株間 20 cm, 2 条振り分け, 10 a あたり 2,500 株)。2013 年 7 月 19 日に園芸用培土 (新スターベッド, 全農) を詰めた 72 穴セルトレイに播種を行い, その後は 0.4mm 目の防虫ネットをサイドおよび天窓に張ったガラス温室にて育苗を行った。同年 8 月 2 日に 1.2 L の園芸用培土 (不二スーパー培土, 不二種苗 (株)) を詰めた不織布ポットにセル苗を 1 株ずつ定植した。培養液処方 は山崎トマト処方とした。給液はかけ流し式とし, 生育ステージに応じて EC 0.5~1.5 dS・m⁻¹ で管理を行った。冬期の暖房設定温度は 15°C とした。各果房には合成オーキシン処理を行い (トマトーン 100 倍), 1 果房あたりの着果数は原則 4 果とし摘果を行ったが, 「CF 桃太郎 J」の環境制御区では 1 果房あたりの着果負担を大きくした 5 果着果区も設定した。

温室内環境を把握するため, 温湿度は通風筒内にセンサーを設置し, データロガー (TR-71iU, (株) T&D) を用い, CO₂ 濃度はトマト群落内高さ 1m に設置したデータロガー (TR-76Ui, (株) T&D) を用いて, 2 分間隔で測定した。また, 天窓開度は天窓に傾斜センサー (D5R-L02-60, オムロン (株)) を設置し, データロガー (VR-71, (株) T&D) を用いて 2 分間隔で測定した。

生育調査は, 1 区 8 株 2 反復で月に 1 回実施し, 開花房 2 段下の葉の長さを測定し, 同箇所葉色 (SPAD 値) を葉緑素計 (SPAD-502, コニカミノルタ (株)) で

測定した。収量調査は, 1 区 8 株 4 反復で 10 月 4 日から翌年 7 月 11 日まで週に 2 回または 3 回実施した。果実調査は月に 1 回実施し, 果汁の糖度 (Brix 値) を糖度計 (PAL-1, (株) アタゴ) で測定した。

本試験で行った環境制御の期間, 方法を第 2 表に示す。環境制御区では, 温室内飽差を適正に維持するためにミスト噴霧を行った。ミスト装置は「グローミスト」, 制御は「しつど当盤」(いずれもトヨハシ種苗 (株)) を使用した。噴霧量が毎分 100 ml のノズルを 100 m² あたり 7 個使用し, 噴霧圧力を 5 Mpa とした。温室内飽差は一定の光合成速度を維持できる 10 hPa 以下になることを目標とし, ミストは温室内気温 20°C 以上かつ湿度 75% 以下の条件で稼働させ, 噴霧 5 秒間, 停止 5 秒間を繰り返す間欠噴霧とした。ミスト稼働時間は夕方には葉が乾いている状態となるように季節によって変更した。12 月および 1 月はこれまでの試験で前述の稼働条件になることがなかったため, 本試験ではミスト噴霧を行わなかった。また慣行では換気設定温度は 25°C としていたが, これを高めて換気窓の閉鎖時間を長くすれば, 室内の CO₂ 濃度を長期間高く維持できる。そこで環境制御区では, 12 月から 2 月までは換気の設定温度を 30°C とし, その他の時期は 25°C とした。

環境制御区における CO₂ の施用方法は「LP ガス燃焼式施用」, 「液化 CO₂ 局所施用」および「LP ガス燃焼式と液化 CO₂ 局所施用の併用」の 3 通りを時期により使い分け, 日中換気窓が開放する前に低濃度の CO₂ 施用に切り替わるように設定した。

燃焼式施用は LP ガス燃焼式の CO₂ 発生装置「みるくん」(KCHN-35, (株) 桂精機製作所) を使用し, 主に温室の換気窓が閉鎖されている低温期に使用した。温室内

第 2 表 環境制御の期間および方法 (2013-2014 年)

試験区	期間	CO ₂ 施用			換気設定	ミスト稼働時間
		方法	時間	濃度		
	10月4日~24日	局所	7時~14時	500ppm	全開	8時~18時
	10月25日~12月12日	併用	7時~14時	22°C未満は燃焼式1000ppm、 22°C以上で局所施用500ppmに 切替	25°C以上で 開	9時~17時 12月は無
環境制御区 (CO ₂ 長期・長時間 施用)	12月13日~2月27日	燃焼式	7時~14時	27°C未満で1000ppm、27°C以上 で500ppmに切替	30°C以上で 開	12月、1月は無 2月より10時~15時
	2月28日~5月12日	併用	6時~15時	22°C未満は燃焼式1000ppm、 22°C以上で局所施用500ppmに 切替	25°C以上で 開	9時~17時
	5月13日~7月11日	局所	6時~15時	500ppm	25°C以上で 開	8時~17時
対照区 (低温期早朝のみ CO ₂ 施用)	11月2日~5月12日	燃焼式	6時半(または7 時)~8時半	1000ppm	25°C以上で 開	無

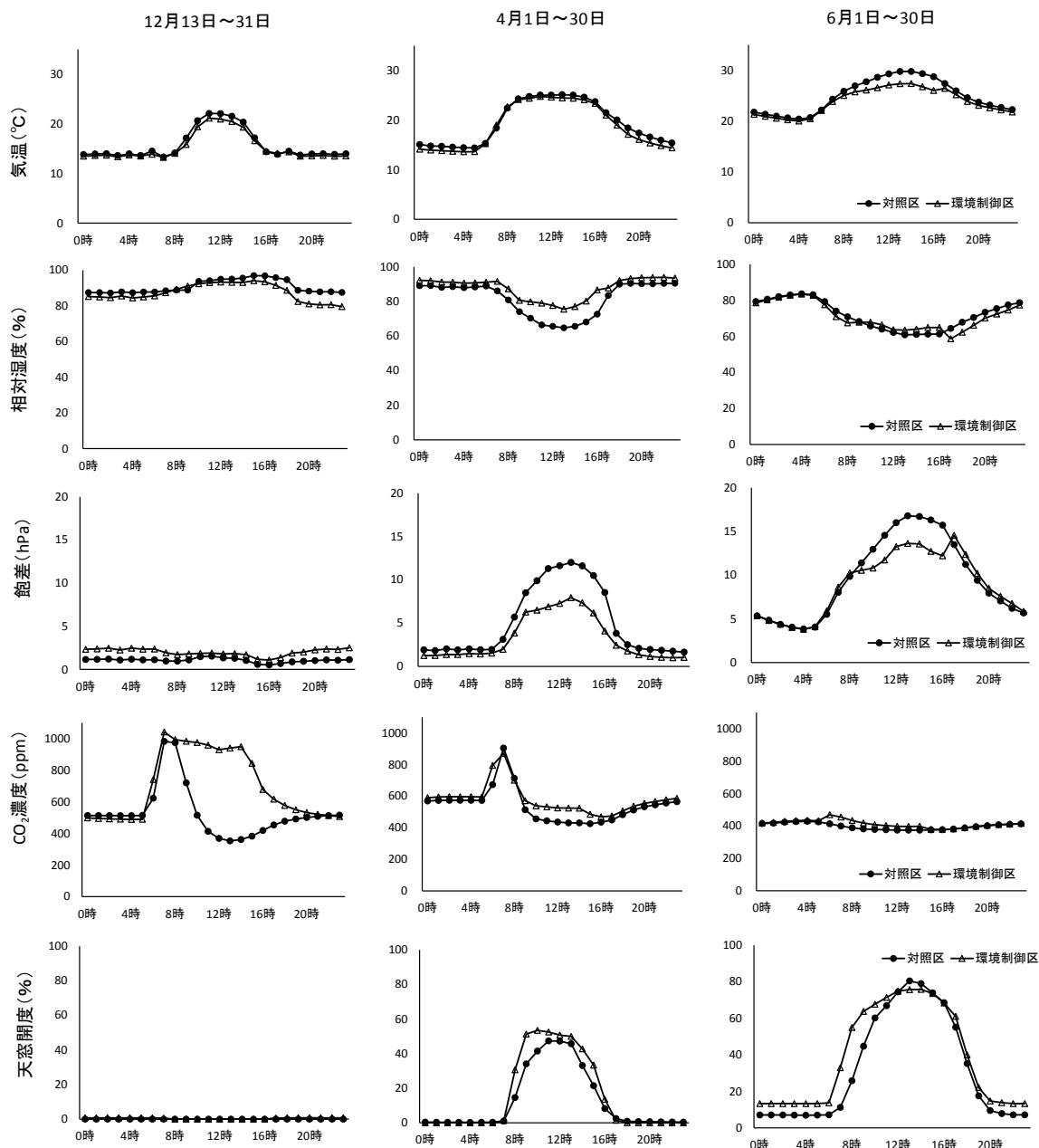
のCO₂濃度が6時～7時の間に低下し、14時以降は急激なCO₂濃度の低下がないことをあらかじめ確認し、CO₂施用時間は7時～14時までとした。CO₂濃度制御にはCO₂モニタ（MA5001-00, (株)チノー）を使用し、設定値は、温室内気温が27℃未満で1,000 ppm, 22℃以上で500 ppmの2段階に切り替えた。

局所施用は多孔質チューブ（シーパーホース, (株)ユニホース）を栽培ベンチ上の株元にかん水チューブと並行に設置し、液化CO₂気化方式で行った。主に温室の換気窓が開放される時期（夏期）に、6～15時または7

時～14時の間で局所施用を行い、CO₂濃度の設定値を500 ppmとした。

温室の換気窓が日中開閉を繰り返すような時期（春・秋期）は、LPガス燃焼式施用と液化CO₂気化方式による局所施用の併用を行った。温室内気温が22℃未満は燃焼式施用でCO₂濃度1,000 ppm, 22℃以上では局所施用で500 ppmに切り替わる設定とした。

対照区では、LPガス燃焼式CO₂発生装置のみ使用し、低温期の6時半または7時から8時半までの間で濃度1,000 ppm設定でCO₂を施用した。



第1図 温室内の時刻別平均気温、相対湿度、飽差、CO₂濃度、天窓開度の推移（2013-2014年）

結果

12月、4月、6月における温室内の時刻別平均気温、相対湿度、飽差、CO₂濃度、天窓開度の推移を第1図に示す。12月13日～31日には燃焼式のCO₂発生装置のみを使用した。環境制御区の日中(9時～15時)平均気温は、換気設定温度を高めたことによって対照区と比べて1℃高かった。相対湿度および飽差についてはミスト噴霧を行っていない時期であったため、両区で差は見られなかった。また、温室内気温は日中27℃未満の日が多く、環境制御区のCO₂施用を1,000ppm設定としたため、日中平均では940ppmとなり、対照区の445ppmに対してCO₂濃度が高く維持された。

CO₂の燃焼式施用と局所施用の併用を行った4月1日～30日の日中平均気温は両区で差が見られなかったが、環境制御区の相対湿度は日中76～81%、飽差は6～8hPaの間で推移し、対照区の相対湿度66～74%、飽差9～12hPaと比べてミスト噴霧により相対湿度は高く、飽差は小さくなった。また、CO₂濃度は環境制御区で日中平均529ppmとなり、対照区の448ppmより高く維持された。

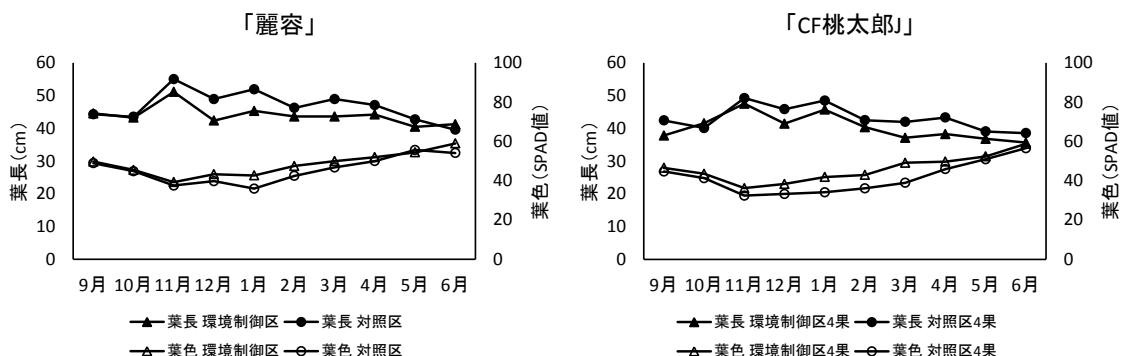
CO₂の局所施用のみを行った6月1日～30日の日中平均気温は、環境制御区で27℃、対照区で29℃となり、

環境制御区はミスト噴霧によって2℃低下した。相対湿度は両区で差が見られなかったが、飽差は環境制御区で日中平均12hPaとなり、対照区より3hPa小さくなった。CO₂濃度は環境制御区で日中平均400ppmとなり、対照区の376ppmより若干高く維持された。

栽培期間を通じて天窓開度および開閉時間については両区で大きな違いは認められず、ミスト噴霧による昇温抑制および換気設定温度を高めたことによるガラス温室天窓の閉鎖時間の延長はできなかった。

供試した2品種ともに10月の生育調査時において、葉長、葉色は環境制御区と対照区で同等であったが、11月以降は環境制御区で葉長が短く、葉色が濃い傾向であった(第2図)。各花房の開花までの日数および収穫までの日数について、環境制御区と対照区では大きな違いは見られなかった(データ略)。

「麗容」では、可販果収量が対照区と比べて環境制御区で20%、可販果1果重が13%増加した(第3表)。「CF桃太郎J」では、環境制御区4果着果で可販果収量は14%、可販果1果重は11%増加した。「CF桃太郎J」環境制御区5果着果では、対照区(4果着果)と比較して可販果収量が24%、可販果1果重が8%増加した(第4表)。



第2図 環境制御が「麗容」および「CF桃太郎J」の葉長および葉色に及ぼす影響(2013-2014年)

第3表 環境制御が「麗容」の収量等に及ぼす影響(2013-2014年)

試験区	総収量 (g/株)	総収穫果数 (個/株)	秀優果収量 (g/株)	可販果収量 (g/株)	可販果数 (個/株)	可販果1果重 (g)	規格外果数 (個/株)
環境制御区	15,214 ** ²	104 n.s.	4,170 **	14,174 **	95 **	150 **	9.3 **
対照区	13,415	105	3,043	11,782	89	133	16.6

² **はt検定によって1%水準で有意差あり、n.s.は有意差なし(n=4)

第4表 環境制御が「CF桃太郎J」の収量等に及ぼす影響(2013-2014年)

試験区	総収量 (g/株)	総収穫果数 (個/株)	秀優果収量 (g/株)	可販果収量 (g/株)	可販果数 (個/株)	可販果1果重 (g)	規格外果数 (個/株)
環境制御区 5果	15,183 ** ²	105 **	4,953 n.s.	14,270 **	98 **	145 **	6.7 n.s.
環境制御区 4果	14,267 **	95 n.s.	4,719 n.s.	13,098 **	87 n.s.	150 **	8.3 n.s.
対照区 4果	12,558	95	3,639	11,505	85	135	9.8

² **はDunnettの多重検定によってそれぞれ対照区と1%水準で有意差あり、n.s.は有意差なし(n=4)

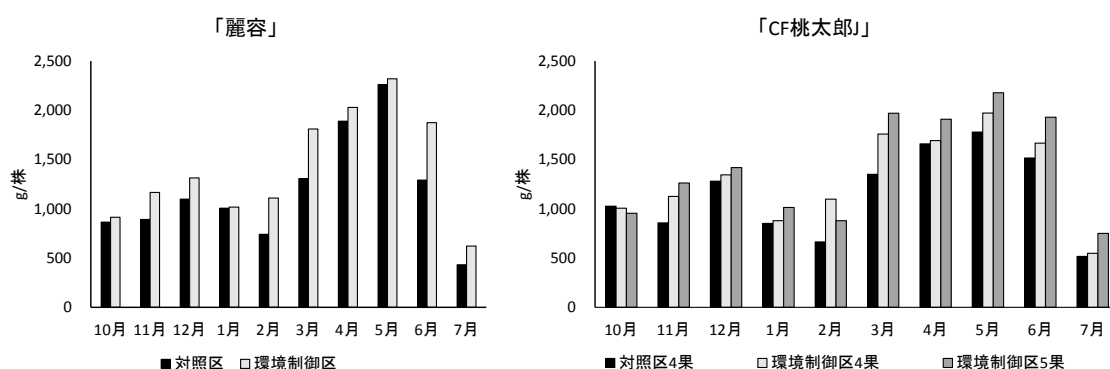
環境制御による増収割合を月別で見ると、「麗容」の環境制御区では11月31%、2月50%、3月39%、6月45%、7月43%、「CF桃太郎J」の環境制御区4果着果では11月31%、2月65%、3月30%、「CF桃太郎J」環境制御区5果着果では11月47%、2月32%、3月46%、7月45%と増加率が顕著に高かった（第3図）。

果実糖度は、「麗容」の対照区で環境制御区より高い傾向であったが、「CF桃太郎J」では環境制御区4果着果で高い傾向で、品種によって傾向が異なり、環境制御による果実糖度への影響は判然としなかった（第4図）。

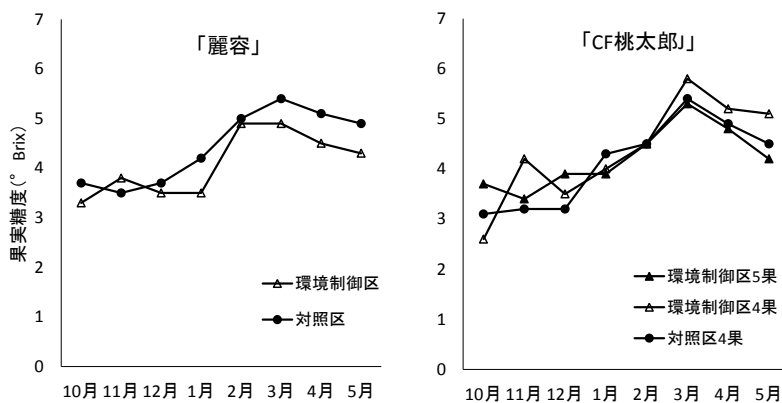
本試験で行った環境制御の経済性について各種装置等の耐用年数を7年として試算すると、「CF桃太郎J」の環境制御区4果着果では10aあたり39,000円の損失となったが、「麗容」の環境制御区では520,000円、「CF桃太郎J」環境制御区5果着果では782,000円の粗収益増となった（第5表）。

考察

ミスト噴霧によって環境制御区では対照区より夏期の高温を緩和でき、また飽差も小さく維持され、温室内



第3図 環境制御が「麗容」および「CF桃太郎J」の可販果収量に及ぼす影響（2013-2014年）



第4図 環境制御が「麗容」および「CF桃太郎J」の果実糖度に及ぼす影響（2013-2014年）

第5表 環境制御の経済性（単位：円、10aあたり換算）

	環境制御区4果着果		環境制御区5果着果
	麗容	CF桃太郎J	CF桃太郎J
CO ₂ 長期・長時間施用による粗収益増 ²	1,674,000	1,115,000	1,936,000
CO ₂ 長期・長時間施用に要する経費 ³	1,154,000	1,154,000	1,154,000
差し引き収益	520,000	△ 39,000	782,000

² 環境制御区の粗収益－対照区の粗収益の値（岐阜県農業経営モデル指標よりトマトの単価は280円/kgとした）

³ 環境制御区の経費（減価償却費（ミスト発生制御装置、炭酸ガス濃度制御装置、燃焼式炭酸ガス施用装置、液化炭酸ガス配管資材）＋ガス代（LPガス＋液化CO₂））－対照区の経費（炭酸ガス濃度制御装置および燃焼式炭酸ガス施用装置の減価償却費＋LPガス代）の値

環境をより好ましく改善した。トマトでは 10 hPa 以上の飽差では CO₂ の吸収速度が著しく低下し、高い CO₂ 固定能力を発揮させるには 5 hPa 程度の飽差に維持することが有効とされ⁵⁾、今回は夏期を除き、環境制御区ではおおむね適正な飽差管理ができたことが、光合成能力を高めたと考えられる。

本試験で行ったミスト噴霧と CO₂ の長期・長時間施用方法は、慣行の CO₂ 施用方法である低温期の早朝施用より収量が増加することが明らかとなった。また長期・長時間の CO₂ 施用下では、1 果房あたりの着果数を慣行の 4 果より 5 果に増やした方が収量および収益の増加につながる事が示された。岩崎⁶⁾ は、果菜類で CO₂ 施用を収量の増加に結びつけるには、光合成量の増加と、光合成産物の入れ物となる花や果実数を用意する(増やす)ことにより収量が増加するとしており、本試験においても 1 果房あたりの果実数を増やした 5 果着果の方が 4 果着果よりも収量の増加効果が大きくなったと考えられる。

長期・長時間 CO₂ 施用を行うために、環境制御区では冬期は LP ガス燃焼式 CO₂ 発生装置を用い、夏期は液化 CO₂ 気化方式、春・秋期は燃焼式装置と液化 CO₂ の併用といった施用方法を用いた。CO₂ 施用に関わるコストは燃焼式の CO₂ に対して、液化 CO₂ は高価となり、灯油と比較して、LP ガスが 2~3 倍、液化 CO₂ で 6~8 倍と試算される⁷⁾。しかしながら、高温期における液化 CO₂ 気化方式による CO₂ 施用によって収量が向上すること⁸⁾、また燃焼式と液化 CO₂ 気化方式による CO₂ 施用を比較した場合、品種により効果は異なるものの、液化 CO₂ 気化方式による施用の方が燃焼式よりも収量が向上することが報告されており、液化 CO₂ を使用するメリットは大きいと考えられる。今回行った CO₂ 長期・長時間施用の経済性についての試算では、処理区の中で増収率の最も低かった「CF 桃太郎 J」4 果着果区で利益を生むことができなかつたため、今後は時期別の CO₂ 施用方法、施用時間、施用濃度等について再度検討し、収量をさらに向上させるとともに CO₂ 使用量の削減を図り、収益の向上につながる施用技術を確立する必要がある。

引用文献

- 1) 中野明正・安 東赫. 2010. 低炭素社会に適合した施設生産の CO₂ 施用技術. 農業および園芸 85: 1071-1079. 養賢堂. 東京
- 2) 岩崎泰永. 2015. 二酸化炭素制御. 日本施設園芸協

会編. 施設園芸・植物工場ハンドブック. p. 179-190. 日本施設園芸協会. 東京.

- 3) 岩崎泰永・三浦慎一・大月裕介. 2011. トマトおよびイチゴ促成栽培における加湿制御が生育および収量に及ぼす影響. 園学研. 10 別 2: 455
- 4) 安田雅晴・越川兼行・勝山直樹. 2008. トマトの独立ポット耕栽培システムの開発. 岐阜農技セ研報. 9: 11-16.
- 5) 安 東赫・池田英男・中野明正. 2010. 光強度および飽差がトマト苗の CO₂ 吸収に及ぼす影響. 園学研. 9 別 1: 132.
- 6) 岩崎泰永. 2015. CO₂ 施用による光合成量の増加, 収量の増加. 施設と園芸 171: 4-9. 日本施設園芸協会. 東京.
- 7) 大須賀隆司. 2003. 二酸化炭素制御. 日本施設園芸協会編. 五訂 施設園芸ハンドブック. p. 170-181. 日本施設園芸協会. 東京.
- 8) 太田雄也・増田 実・磯崎真英・小西信幸・鈴木 賢. 2014. 液化炭酸ガス気化方式による CO₂ 施用方法およびその効果. 園学研. 13 別 1: 103.
- 9) 太田雄也・磯崎真英・谷本恵美・小西信幸・増田 実・鈴木 賢. 2014. トマト栽培における燃焼式 CO₂ 施用と液化炭酸ガス気化方式 CO₂ 施用の効果の比較. 平成 26 年度園芸学会東海支部大会研究発表要旨. p. 9.

Abstract

We studied the influence of environmental control measures that combined mist spraying and elevated CO₂ on the growth and yield of tomatoes in a long-term hydroponic culture system that implemented the isolated pot culture technique. While managing the vapor pressure deficit by mist spraying, we applied CO₂ using a LPG combustion CO₂ generator in winter, a liquid CO₂ treatment at the plant foot in summer and a LPG combustion generator or liquid CO₂ in the spring and autumn, depending on the greenhouse temperature. As a result, the yield increased by 20% compared with the yield obtained from early morning application of high-concentration CO₂ in the winter.

Key words

greenhouse environmental control, long-term culture of tomato, low-volume substrate, vapor pressure deficit management