換気窓開放時の大規模温室での CO₂ 施用がトマトの成長 および収量に及ぼす影響

高橋太郎¹・石神靖弘¹・後藤英司¹・新堀健二²・後藤格士²

¹千葉大学大学院園芸学研究科 271–8510 千葉県松戸市松戸 648

²株式会社誠和カンジンファーム農場 324–0403 栃木県大田原市湯津上 3118

Effect of CO₂ Enrichment on the Growth and Yield of Tomato Plants Cultivated in a Large-Scale Greenhouse with a High-Ventilation Rate

Taro TAKAHASHI¹, Yasuhiro ISHIGAMI¹, Eiji GOTO¹, Kenji NIIBORI² and Kakushi GOTO²

¹Graduate School of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Matsudo, Chiba 271–8510, Japan

²SEIWA Co., Ltd, 3118 Yudukami, Otawara, Tochigi 324–0403, Japan

Abstract

The present study examined the effect of CO₂ enrichment on the growth and yield of tomato plants cultivated in a large-scale greenhouse with a high-ventilation rate. In this study, CO₂ enrichment referred to maintaining the CO₂ concentration inside the greenhouse at the same level as the atmospheric CO₂ level. Tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) were cultivated under 2 different CO₂ conditions—one group of plants was cultivated under CO₂ enrichment, and the other was cultivated under CO₂ non-enrichment—during the spring-summer and summer-autumn periods. In the spring-summer crop, leaf dry weight and leaf area of the tomato plants cultivated under CO₂ enrichment were greater than those of the tomato plants cultivated under CO₂ non-enrichment. In both the spring-summer and the summer-autumn crops, the total fruit yield per plant increased because of CO₂ enrichment. In the spring-summer crop, CO₂ enrichment led to increase in both the total fruit yield and the normal fruit yield. However, in the summer-autumn crop, the total fruit yield increased and the ratio of the normal fruit yield to the total fruit yield decreased because of CO₂ enrichment. These results reveal that CO₂ enrichment might increase the incidence of fruit malformation according to the cropping season. The effect of CO₂ enrichment on the fruit yield was influenced by differences in the environmental conditions during the cultivation periods. In conclusion, it is therefore necessary to assess whether the environmental conditions inside the greenhouse are suitable for plant growth under CO₂ enrichment.

Keywords: CO₂ enrichment, growth, large-scale greenhouse, tomato, yield

緒 言

2011 年 8 月 17 日受付

2012 年 2 月 2 日受理

Corresponding author: Eiji Goto

(goto@faculty.chiba-u.jp)

わが国の温室の換気窓は、主に室温の過度の上昇を抑制するため、夏季においては終日、冬季においても晴天時の日中には開放される場合が多い。トマトのように草丈が 2 m 程度となる作物では、夏季に温室の換気窓を全開にしても作物

群落内の CO₂ 濃度 (以下, C_{in}) は, 屋外の CO₂ 濃度 (以下, C_{out}) $380 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に対して, $80 \sim 130 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 以上低くなることがあると報告されている¹⁻³⁾. 従来, 温室への CO₂ 施用において, C_{in} の目標値は $800 \sim 1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に設定されてきた⁴⁾. その際, 換気窓を開放することで施用した CO₂ の大半が温室外へと流出することから, 施用は秋季から春季の窓を閉じている朝方のみに実施する場合が多い^{5,6)}. しかし, CO₂ 施用の効果は一般に日射量が高いほど増加するため, 朝方のみの CO₂ 施用は効率的ではないとされている^{7,8)}.

一般に CO₂ 濃度が $100 \sim 500 \mu\text{mol mol}^{-1}$ の範囲では, 日射量, 気温および相対湿度が好適条件で制限因子とならない場合, 晴天時の温室作物の純光合成速度は CO₂ 濃度の増大にほぼ正比例して増大する. したがって, CO₂ 施用によって C_{in} を C_{out} と等しい濃度に制御することで, 温室内作物の光合成速度を増加させ, 結果的に収量を増加させることが期待できる. また, CO₂ 施用によって C_{in} を C_{out} と等しい濃度に制御することで, 換気窓を開放しても供給した CO₂ は見かけ上温室外へ流出しない.

Ohyama⁹⁾らは換気窓開放下で C_{in} を C_{out} と等しい濃度に制御するための CO₂ 施用システムを開発している. このシステムは, 赤外線型 CO₂ ガス分析計 1 台を用いて C_{in} と C_{out} を交互測定し, それらの差を基に C_{in} と C_{out} が等しい濃度となるように温室内へ CO₂ を供給する. 小型温室 (容積 75 m^3) を用いてこのシステムの試験運転を行ったところ, 日中の C_{in} を $C_{out} \pm 5 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に維持することができた.

筆者らは本システムの実用化に向けて, 大規模温室を用いた実証試験を行う必要があると考えた. そこで, 環境制御装置が導入されている大規模トマト温室 (株式会社誠和カンジファーム農場, 栃木県大田原市) に換気窓開放下の CO₂ 施用装置を設置し, 春季から秋季にかけて換気窓を開放している状態で CO₂ 施用を行い, 生育・収量調査から CO₂ 施用効果を評価した.

材料および方法

供試温室および材料

上下立体時間差連続栽培方式でトマトの 6 段摘心密植栽培 (栽植密度 2.5 株/m^2) を行っている大規模トマト温室 (栃木県大田原市湯津上 (北緯 $36^\circ 49'$, 東経 $140^\circ 5'$), 本圃面積 9240 m^2) で CO₂ 施用試験および栽培試験を実施した. 施設内は南から順にエリア 1, エリア 2 およびエリア 3 という 3 つの栽培エリア (各エリア面積 3000 m^2) に分けられてトマトが栽培されている (Fig. 1). 品種は麗夏 (サカタのタネ) を用いた.

Fig. 1 The floor plan of the greenhouse. Gray bars indicate plant rows. The greenhouse was divided into 3 areas. The west side of the 3 areas was maintained under the CO₂-enriched condition, and the east side was maintained under the non-enriched condition.

上下立体時間差連続栽培方式とは, 育苗温室で一次育苗と二次育苗を行った苗を本圃に設置した上下 2 段の栽培ベッド (W $7.5 \times$ L $200 \times$ H 7.5 cm) で栽培する方式で, 下段ベッドでは収穫株を, 上段ベッドでは次の作付の若い株を栽培する. 6 段取りのトマトが下段ベッドで収穫し終わると, 上段ベッドで育った収穫開始直前のトマトを下段ベッドへ下ろす. その際, 空いた上段ベッドには次の作付の苗を定植し, 同様に栽培を行う.

CO₂ ガス濃度測定および施用システム

温室内 CO₂ 濃度を屋外 CO₂ 濃度と等しくする CO₂ 施用システムを構築した. 構築したシステムは CO₂ ガス濃度測定部, 計測制御部および CO₂ ガス供給部からなる (Fig. 2). CO₂ ガス濃度測定部は, サンプルした空気中の CO₂ 濃度測定を行う赤外線型 CO₂ ガス分析計 (LI-800, Li-cor Inc.), CO₂ 分析計に送る空気の流量を調節する流量調節器 (RK1150, (株) コフロク), CO₂ ガス分析計に送る空気の切り替えを行う三方電磁弁 (AG31-02-1, (株) CKD), サンプルした空気の除湿を行う電子除湿器 (DH209, Komatsu Electrics INC), 防塵器, CO₂ ガス濃度測定部へ空気を引き込むエアポンプ (CM5012, (株) 榎本マイクロポンプ) からなる. CO₂ ガス濃度測定のための空気サンプリング口を温室内の 2 ヶ所 (後述する CO₂ を施用する区および施用しない対照区) の床面から約 1 m の高さ, 温室外は約 3 m の高さの計 3 地点に設け, 空気のサンプリングを行った. エアポンプによって, 温室内 2 ヶ所および温室外の空気はプラスチックチューブに引き込まれ, 防塵器・電子除湿器を経て三方電磁弁に到達する. 3 台の三方電磁弁はそれぞれ 60 秒間隔で開閉が切り替えられ, 180 秒間を 1 サイクルとして, 温室内の 2

Fig. 2 A schematic diagram of the developed CO₂ control system. Solid and dotted lines indicate the gas and signal flows, respectively.

ヶ所および温室外の順に空気をサンプリングした。三方電磁弁が開の場合、空気はそのままシステム内へ進入し、流量調節器で約 0.8 L min^{-1} に調整した後、赤外線型 CO₂ ガス分析計で CO₂ 濃度を測定した。

計算制御部は、データ収集・演算のためのデータコントローラ (CR10X, (株) CAMPBELL) からなる。CO₂ 供給部は、液化 CO₂ ボンベ、ヒーター付圧力調整器 (YR-510V, (株) ヤマト産業), 流量調節器 (RK1200, (株) コフロック), 二方電磁弁 (AB31-02-2, (株) CKD), 温室内に CO₂ を拡散させる CO₂ 拡散パイプからなる。また、本研究では液化 CO₂ ボンベは 8 本を連結して使用した。測定した温室内の 1ヶ所と温室外の CO₂ 濃度の差から必要な CO₂ 供給量を算定し、その値に基づいて CO₂ ガス供給部内の二方電磁弁の開閉時間を制御した。液化 CO₂ ボンベから供給される CO₂ は、同規模の商用温室で用いられている一般的な CO₂ ガス発生装置と比較して十分な量である約 180 L min^{-1} に流量調節器を用いて調節し、E 区内に供給した。

CO₂ 施用試験および栽培試験

試験区は、本システムを用いて温室外の CO₂ 濃度と同程度まで CO₂ を施用する区 (以下、E 区) および施用しない対照区 (以下、C 区) の 2 区とした。E 区は栽培エリア 2 の西

側 3 分の 1, C 区は東側 3 分の 1 に設置した (各区の面積約 1000 m^2)。エリア 2 の中央部は、施用した CO₂ が E 区から C 区へ拡散することを防止するための緩衝帯とした。

CO₂ 施用試験および栽培試験は、換気窓を開放することの多い春夏作 (播種: 4 月 22 日, 本圃定植: 6 月 6 日, 栽培終了: 9 月 8 日) および夏秋作 (播種: 6 月 10 日, 本圃定植: 7 月 27 日, 栽培終了: 11 月 6 日) の 2 作で実施した。CO₂ 施用は本圃定植直後から開始し、両作付の栽培終了時の株を採取して生育調査を行った。生育調査用の株は、各区の列の両端および端の列を除いた残りから 10 株を無作為に採取した。測定項目は葉および主茎の乾物重と葉面積、算定項目は果実以外の地上部乾物重および比葉重とした。試験区間の平均値の差は、t 検定を用いて 5% レベルで検定した。また、各試験区の果実 (正常果および奇形果 (尻腐れ果, 肥大不良果, 乱形果, 裂果および空洞果の合計)) の収量を調査し、CO₂ 施用の効果の解析に使用した。収量調査は各区の列の両端および端の列を除いた残りから無作為に選んだ 40 株を対象にし、各区の 40 株中すべての株の果実を株ごとにわけず、全体で調査した。そのため統計処理は行えなかった。そこで、全体での調査結果を株数で除して株あたりの平均収量を算定し、それを試験区間で比較して CO₂ 施用の効

果を評価した。

結果および考察

CO₂ ガス濃度の制御状況

本システムを用いた CO₂ ガス濃度の制御状況を Fig. 3 に示す。本システムを用いることで、E 区の CO₂ 濃度は温室外の CO₂ 濃度 $\pm 1.5 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に維持されていた。次に、春夏作および夏秋作の本圃定植から栽培終了までの期間の E 区、C 区および温室外の CO₂ 濃度および全日射量の時刻値を平均化したものを Fig. 4 に示す。どちらの作付においても、E 区、C 区および温室外の CO₂ 濃度は全日射量の増加に伴って減少し、全日射量が 300 W m^{-2} を越えていた 10:00 ~ 15:00 の時間帯では温室外よりも C 区の CO₂ 濃度は低くなっていた。この時間帯における E 区の CO₂ 濃度は温室外の CO₂ 濃度に近い値を示しており、春夏作では C 区よりも平均 $13.4 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 、夏秋作では C 区よりも平均 $26.1 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 高くなった。一方、10:00 ~ 15:00 以外の時間帯の E 区の CO₂ 濃度は、春夏作では C 区よりも平均 $1.7 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 低く、夏秋作では C 区よりも平均 $1.8 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 高くなった。

生育および収量への影響

生育調査の結果を Table 1 に示す。春夏作では、葉乾物重、果実以外の地上部乾物重および葉面積は E 区が C 区よりも有意に大となった。また、C 区に対する E 区の増加率は葉乾物重、主茎乾物重および果実以外の地上部乾物重においてそれぞれ 1.20、1.07 および 1.14 となった。一方、夏秋作では、全ての測定項目において、試験区間で差はみられなかった。また、C 区に対する E 区の増加率は葉乾物重、主

Fig. 3 Daily changes in each environmental condition on 18 August 2009. Black and gray lines represent the CO₂ concentrations in the enriched (E), and control (C) areas, respectively; thin black line represents the atmospheric CO₂ concentration.

茎乾物重および果実以外の地上部乾物重においてそれぞれ 1.11、1.07 および 1.09 となった。これらの結果から、CO₂ 施用がトマト個体の乾物生産を増加させ、栄養成長器官の成長を促進したと考えられる。

収量調査の結果を Table 2 に示す。1 株の総果実収量は、春夏作および夏秋作で E 区が C 区よりもそれぞれ 69 g および 187 g 増加し、C 区に対する E 区の増加率はそれぞれ 1.03 および 1.09 であった。1 株当たりの正常果の収量は、春夏作で E 区が C 区よりも 154 g 増加、夏秋作では E 区が C 区よりも 7 g 減少し、C 区に対する E 区の増加率はそれぞれ 1.13 および 1.00 であった。1 株当たりの奇形果の収量は、春夏作で E 区が C 区よりも奇形果が 85 g 減少、夏秋作では E 区が C 区よりも 195 g 増加し、C 区に対する E 区の増加率はそれぞれ 0.92 および 1.33 であった。1 株当たりの果実数は春夏作では E 区が C 区よりも 0.3 果少なく、夏秋作では E 区が C 区よりも 1.2 果多く着果した。平均一果重は春夏作および夏秋作の両作付で E 区が C 区よりも大となっていた。春夏作および夏秋作ともに総果実収量は増加していたものの、

Fig. 4 Average daily changes in each environmental condition during the cultivation periods. Black and gray lines represent the CO₂ concentrations in the enriched (E), and control (C) areas, respectively; thin black and dotted black lines represent the atmospheric CO₂ concentration and the solar radiation, respectively. (A) Spring-summer crop. (B) Summer-autumn crop.

Table 1 Effects of CO₂ enrichment on the growth of tomato plants.

Crop	Treatment condition	Dry weight (g/plant) ^x			Leaf area (m ² /plant) ^x	Specific leaf weight (g m ⁻²) ^x
		leaf	stem	shoot		
Spring-summer	E (Enriched)	44.1 ± 1.6 ^y	28.8 ± 1.3	72.9 ± 3.8 ^y	1.03 ± 0.05 ^y	28.4 ± 0.9
	C (Control)	36.8 ± 1.4	26.9 ± 1.0	63.7 ± 2.8	0.89 ± 0.05	26.8 ± 1.0
	E/C ratio	1.20	1.07	1.14	1.16	1.06
Summer-autumn	E (Enriched)	29.2 ± 1.5	26.2 ± 0.9	55.4 ± 2.5	0.77 ± 0.05	26.3 ± 0.5
	C (Control)	26.4 ± 1.1	24.5 ± 0.9	50.9 ± 2.5	0.74 ± 0.05	24.2 ± 0.6
	E/C ratio	1.11	1.07	1.09	1.04	1.09

^x indicates Mean. ± SE. (n = 10).^y indicates significant differences between the treatments at P < 0.05, as determined by the *t*-test.**Table 2** Effects of CO₂ enrichment on the yield of tomato plants.

Crop	Treatment condition	Yield ^x			Number of fruits ^x (fruits/plant)	Fruit weight ^x (g/fruit)
		Normal + malformed fruits (g/plant)	Normal fruits (g/plant)	Malformed fruits (g/plant)		
Spring-summer	E (Enriched)	2326	1372	954	17.7	128.4
	C (Control)	2257	1218	1039	18.0	124.1
	E/C ratio	1.03	1.13	0.92	0.98	1.03
Summer-autumn	E (Enriched)	2187	1398	789	20.0	116.4
	C (Control)	2000	1405	594	18.8	102.9
	E/C ratio	1.09	1.00	1.33	1.06	1.13

^x indicates Mean. (n = 40).

春夏作では正常果の収量が増加、夏秋作では奇形果の収量が増加しており、CO₂ 施用によって収量が増加した果実の種類が両作付間で異なっていた。既往の研究に、トマトの各果房の花数や果数はその果房の花芽分化期の最低気温の影響を受けるという報告がある¹⁰⁾。またトマトでは一般に、花芽分化から開花に至るまでの約 30 日間に果実の細胞分裂が行われ、この期間の気象環境によって植物の状態が変化し、このことが果実の成長に大きく影響を及ぼすことがわかっている。夏秋作は春夏作よりも栽培時期が約 2 ヶ月遅い。そのため、各果房の花芽分化から開花までの期間の栽培環境条件が異なっていた可能性があり、そのことが原因となって、CO₂ 施用によって収量が増減した果実の種類が両作付で異なったのではないかと考えた。

既往の研究に、トマトは高夜温ほど物質代謝を盛んに行うため、光合成による同化産物の消費が多くなり、花、萼片、葯、子房の発育が悪くなる¹⁰⁾という報告がある。したがって、夏秋作は春夏作と比較して夜温が高かったため、同化産物の消費が多くなり、花の発育が悪くなっていたと考えられる。そのため、CO₂ 施用によって総果実収量は増加したものの、正常果が増加せずに奇形果しか増加しなかったと思われる。

本研究から、春季から秋季の換気窓開放時に本システム

を用いて CO₂ 施用することで温室内の CO₂ 濃度を温室外の CO₂ 濃度を同程度まで高められること、また、成長量および収量が増加することが示された。さらに、CO₂ 施用がトマトの成長量や収量に及ぼす影響は栽培時の環境条件の影響を受けて変化するため、CO₂ 施用による成長促進・収量増加が見込めるのかを栽培環境条件に基づいて判断することが望ましいと考えられる。今後は、夏季と同様に温室内の CO₂ 濃度が温室外の CO₂ 濃度よりも低下する冬季の晴天時の日中の換気窓開放時に、本システムを用いての CO₂ 施用が有効かどうかを調査したい。

摘 要

CO₂ 施用システムを用いて換気窓開放時の大規模温室内の CO₂ 濃度を温室外の CO₂ 濃度と同程度に維持できるか調査した。また、その際のトマトの成長量および収量を調査結果から CO₂ 施用の効果を評価した。

CO₂ 施用システムを用いることで、換気窓開放時に低下した大規模温室内の CO₂ 濃度を温室外 CO₂ 濃度と同程度まで高め維持できた。また同時に、CO₂ 施用によってトマトの成長量および収量が増加した。

謝 辞

本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「低コストで質の良い加工・業務用農産物の安定供給技術の開発」(1系野菜)の一環として行った。

引用文献

- 1) 矢吹万寿, 今津 正. ガラス室の炭酸ガス濃度について. 農業気象. 20 (4): 125-129. 1965.
- 2) 伊東 正. 蔬菜の成育・生理におよぼす炭酸ガス環境の影響. 千葉大学園芸学部特別報告第7号. 1973.
- 3) 河野徳義. 促成栽培トマトの生育に伴う換気ハウスの気象特性および CO₂ 濃度の変化. 農業気象. 43 (1): 15-20. 1987.
- 4) 鴨田福也, 内藤文雄, 岩崎政男. 施設内作物に対する炭酸ガス施用に関する研究 メロンの炭酸ガス施用実態調査. In: 昭和 50 年度園芸学会秋季大会 研究発表要旨. 広島. 10 月 13 日 -15 日. 218-219. 1975.
- 5) 藤井健雄, 伊東 正. 蔬菜に対する炭酸ガス施肥の実用化に関する研究. 農業および園芸. 39(2): 299-304. 1964.
- 6) 野菜試験場. 野菜試験場編: 野菜の炭酸ガス施用に関する試験研究打ち合せ会議とりまとめ資料. 45. 1977.
- 7) 矢吹万寿ほか. 農業環境調節工学. 朝倉書店. 東京. 218-219. 1985.
- 8) Mortensen LM. Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop response. Scientia Hort. 33:1-25. 1987.
- 9) Ohyama K, Kozai T, Ishigami Y, Ohno Y and Ochi Y. A CO₂ control system for a greenhouse with a high ventilation rate. In: Book of Abstract of Greensys 2004, Leuven, Belgium. Sep. 12-16, 47. 2004.
- 10) 斉藤 隆, 伊東秀夫. トマトの生育ならびに開花・結実に関する研究. 第9報. 花の形態, 機能および落花に及ぼす幼苗期の環境条件の影響 (1) 夜温, 光の強さおよび床土の肥沃土の影響. 園学雑. 36(2): 55-65. 1967.