

冬季寡日照地域における CO₂ 施用と日中加温の併用が 促成ナスのハウス内環境および収量に及ぼす影響

古賀 武*・井上恵子¹⁾・石松敬章²⁾

冬季寡日照地域における CO₂ 施用と日中加温が促成ナスのハウス内環境および収量に及ぼす影響とその収益性について検討した。12～4月のCO₂設定濃度を8～10時は800ppm(換気時400ppm)、10～17時は400ppmとすることによってハウス内のCO₂濃度が高まり、8時30分～16時30分の暖房設定温度を20℃(16時30分～8時30分は10℃)とすることによって曇雨天日のハウス内気温が高まった。冬季寡日照地域を想定した環境条件において、CO₂濃度の上昇(200～800ppm)と気温の上昇(14～22℃)はともにナス葉の光合成速度を増大させたことから、本実験のCO₂設定濃度および日中加温の暖房設定温度はナスの光合成速度の増大に適することが明らかとなった。「筑陽」においてCO₂施用と日中加温を併用することによって、側枝の生育と果実肥大がともに促進され、収穫果数が増加し、商品果率が向上することで商品果収量が多くなった。CO₂施用と日中加温の併用による増収効果は経費を上回ると試算されたことから、本技術は促成ナスの収益性向上に有効であると考えられた。

[キーワード: CO₂濃度, 気温, 光合成速度, ナス, 商品果収量]

Effects of a Combination of CO₂ Enrichment and Daytime-heating on Greenhouse Environment and Fruit Yield of Eggplants in Forcing Culture in a Region with Winter Low Daylight Conditions. KOGA Takeshi, Keiko INOUE and Takaaki ISHIMATSU (Fukuoka Agriculture and Forestry Research Center, Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. For. Res. Cent.* 7: 66-73 (2021)

The effects of CO₂ enrichment and daytime-heating on the environmental conditions in a greenhouse, and on the yield and profitability of eggplants in forcing culture in a region with winter low daylight conditions were investigated. CO₂ concentration in the greenhouse was increased by CO₂ enrichment with minimum CO₂ concentration set at 800ppm (ventilation time at 400ppm) from 8:00 to 10:00 and 400ppm from 10:00 to 17:00. And, the temperature in the greenhouse on cloudy and rainy days was increased by daytime-heating with heating temperature during the daytime (8:30 -16:30) set at 20°C. Photosynthetic rate increased with the rise in CO₂ concentration (200 - 800ppm) and air temperature (14 - 22°C) in the region with winter low daylight conditions, thus the values set for CO₂ enrichment and daytime-heating were suitable for increasing photosynthetic rate. The combination of CO₂ enrichment and daytime-heating accelerated the growth of lateral shoots and fruit, and the number of harvested fruits, marketable fruits ratio and marketable yields of eggplant variety 'Chikuyo', were higher than those of the controls. The combination of CO₂ enrichment and daytime-heating was effective for improving the profitability of eggplant in forcing culture.

[key words: air temperature, CO₂ concentration, eggplant, marketable yield, photosynthetic rate]

緒言

福岡県におけるナス生産は、8～9月に定植し10月～翌年6月まで収穫を行う促成作型が中心である(福岡県農林水産部園芸振興課 2017)。このうち、日射量が少ない冬季はハウス内気温が上昇しにくく、換気が行われにくいことからハウス内のCO₂濃度が低下しやすい。このため、本県ではCO₂施用装置の導入が進んでいる。促成ナス栽培におけるCO₂施用について、古賀・森山(2015)は日の出後8～9時の高濃度(2,000ppm)施用や8～17時の日中低濃度(400ppm)施用で増収したことを報告している。斉藤(2015)は植物の光合成が最も高まるのはCO₂濃度が1,000～1,500ppmのときであるが、実際の栽培では1,000ppm以上の高濃度施用は換気による外気へのCO₂漏出の面から非効率であり、植物の光合成を促進させるCO₂施用として日中の低濃度(400ppm)施用を推奨している。これらのことから、

本県の促成ナス栽培においては、日の出後8時～換気開始(10時頃)までは800～1,000ppm、日中は400ppmを目安にCO₂施用を行うことが有効であると考えられる。しかし、生産現場においてはこのCO₂施用を実施しても増収効果が十分に得られず収益性向上が認められない事例が見受けられる。

CO₂施用時のハウス内環境に関して、愛知県では日中の低濃度(400～500ppm)CO₂施用のみでは増収効果が認められず、CO₂施用に加え日中の換気温度や夜間の加温温度を高めることで増収したことが報告されている(伊藤ら 2019)。高知県では日中の低濃度(400ppm)CO₂施用条件下で午前より午後の換気温度を高めることで増収したことが報告されている(植野・高橋 2018)。このように日中のCO₂施用条件下での増収効果を高めるためには、ハウス内気温を高めることが有効と考えられる。しかし、本県における冬季の日射量は愛知県や高知県より20～25%少なく(国土交通省 2020)、ハウス内

*連絡責任者(筑後分場: koga-t9170@pref.fukuoka.lg.jp)

受付 2020年6月29日; 受理 2020年9月23日

1) 前 筑後分場

2) 現 福岡県福岡農林事務所福岡普及指導センター

気温が換気温度まで上昇しない日が多いため、換気温度の制御のみでは増収効果が不安定となる可能性がある。

一方、冬季寡日照地域での促成トマト栽培では日中に暖房機稼働させてハウス内を 20℃まで加温すること（以下、日中加温）で、曇雨天日のハウス内気温が高まり光合成速度や転流が促進されることで増収することが報告されており（籠ら 2016）、冬季の日射量が少ない本県において日中加温はハウス内気温を高める方法として有効であると考えられる。しかし、促成ナス栽培において、CO₂施用と日中加温を組み合わせた場合の増収効果については明らかにされていない。また、CO₂施用や日中加温には新たな経費が必要となるため、生産現地への普及に当たっては費用対効果をあらかじめ評価しておく必要がある。さらに、斉藤（2015）は光強度が弱い条件での高濃度 CO₂ 施用は光合成特性や外気への漏出の面から非効率であることを指摘しており、効率的な CO₂ 施用や日中加温を行うためには冬季寡日照条件での光合成特性に基づいた設定値を明らかにする必要がある。古賀・森山（2015）は 500ppm 以上の高 CO₂ 濃度下や 20～30℃での光合成特性について検討しているものの、400ppm 以下の低 CO₂ 濃度条件下や 20℃以下の低温下での光合成特性については明らかにされていない。そこで、本研究では、本県の促成ナスにおける収益性向上技術の確立を目的として、CO₂ 施用と日中加温の組み合わせがハウス内環境および収量に及ぼす影響とその収益性について検討するとともに、冬季寡日照地域を想定した環境条件における光合成特性について検討した。

材料および方法

1 CO₂ 施用と日中加温の有無が促成ナスのハウス内環境および収量に及ぼす影響と収益性の試算

(1) ナスの栽培方法

実験は 2014 年 9 月～2015 年 6 月（2014 年定植）および 2016 年 9 月～2017 年 6 月（2016 年定植）に筑後分場内の間口 6m、奥行き 20m の南北向き単棟パイプハウス 3 棟を用いて行った。いずれのハウスとも、外張りには厚さ 0.1mm の農 P0 フィルムを展張し、内張りには厚さ 0.05mm の農ビフィルムを展張した。内張りフィルムの展張は 2014 年定植では 11 月 21 日～ 3 月 31 日、2016 年定植では 11 月 28 日～ 4 月 7 日とし、その他の期間は外張りフィルムのみを展張とした。内張りフィルムは手動で 23℃を目安に開閉し、外張りフィルムの自動換気開始温度は 28℃とした。供試品種は「筑陽」（タキイ種苗（株））とした。「トナシム」（タキイ種苗（株））を台木として接ぎ木した苗を両年とも 9 月 10 日に、畝幅 175cm、株間 60cm、1 条植えて定植し、主枝 V 字 4 本仕立てで栽培した。試験規模は 1 区 4 株 3 反復とした。基肥として N、P₂O₅、K₂O をそれぞれ a 当たり 3.3kg、4.3kg、2.5kg を作畝前に施用し、追肥としてそれぞれ a 当たり 3.6kg、3.1kg、1.5kg を 10 回に分けて適宜施用した。散水チューブ直近の深さ 20cm に設置した pH メーター（大起理化工業（株））の値

が 1.8 を上回っていた場合、10 時に約 3L/株・回をかん水した。厚さ 0.02mm の黒色ポリマルチを 2014 年定植では 11 月 25 日、2016 年定植では 11 月 2 日に畝上に被覆した。着果促進処理として、4-CPA 剤（石原バイオサイエンス（株））50 倍溶液による単花処理を 2～3 日間隔で行った。整枝法は側枝の第 1 花より上の葉を 1 枚残して摘心し 1 芽 1 果採りとした。

収穫は 10 月から翌年 6 月まで 2～3 日間隔で行い、長さ 19cm 以上の果実を収穫の目安とした。収穫果は外観の形状に基づき 3 段階（上物、中物、下物）に分類し、それぞれについて果実数および果実重量を測定した。このうち、上物と中物の合計収量を商品果収量とし、全収穫果に対する上物と中物の果実数の割合を商品果率として算出した。各区 4 株のうち 1 株について、主枝および側枝上の花の開花時にラベリングを行い、主枝上の花の開花から直下の一次側枝の開花までに要した日数ならびに一次（n 次）側枝以降では二次（n+1 次）側枝の開花までに要した日数を側枝の開花間隔日数として算出した。また、それぞれの果実の開花から収穫までに要した日数を収穫所要日数として算出した。

(2) CO₂ 施用および日中加温の方法

試験区の構成として、2014 年定植では CO₂ 施用と日中加温を行う CO₂ 施用+日中加温区、CO₂ 施用のみを行い日中加温は行わない CO₂ 施用区および CO₂ 施用と日中加温を行わない対照区の 3 区を設けた。2016 年定植では CO₂ 施用+日中加温区、CO₂ 施用は行わず日中加温のみ行う日中加温区および対照区の 3 区を設けた。CO₂ 施用の方法として液化 CO₂ ボンベと各畝に 1 本ずつ設置した点滴灌水用チューブ（（株）アグリベース四万十）を用いて、ハウス中央部の畝上約 100cm の高さに設置した赤外線 CO₂ コントローラー（富士電機システムズ（株））により、8～10 時の CO₂ 濃度が 800ppm（換気時は 400ppm）、10～17 時の CO₂ 濃度が 400ppm 以下で施用するように設定した。日中加温の方法として白灯油を燃料とする温風暖房機（KA-205、ネポン（株））と 4 段サーモ（NT-144S1、ネポン（株））を用いて、日中（8 時 30 分～16 時 30 分）の暖房設定温度を 20℃、夜間（16 時 30 分～ 8 時 30 分）の暖房設定温度を 10℃とした。対照区の暖房設定温度は終日 10℃とした。CO₂ 施用および日中加温の処理期間は 12 月～翌年 4 月とし、その他の期間はいずれの試験区とも CO₂ 施用は行わず、暖房設定温度は終日 10℃とした。

加温制御用、換気制御用および温湿度計測用のセンサーはハウス中央部の高さ 150cm の位置に 2014 年定植では日除けして、2016 年定植では通風筒（イノチオアグリ（株））内に設置した。ハウス内の CO₂ 濃度および気温の測定には CO₂ 温湿度データロガー（TR-74Ui、（株）ティアンドデイ）を用いた。

(3) 収益性の試算

CO₂ 施用+日中加温区と対照区の収益性を試算した。商品果収量は 2014 年定植および 2016 年定植の 2 か年の平均値とし、2014～2016 年の福岡県産ナスの平均価格（福岡県農林水産部園芸振興課 2017）を乗じて商品果

収入を算出した。CO₂施用については生産現地で普及している灯油燃焼式 CO₂施用装置を利用した場合とし、装置価格（償却年数 7 年）はメーカー聞き取り、灯油消費量は生産現地での聞き取りとした。日中加温にかかる燃料費は暖房用燃油消費量試算ツール（高市 2007）を用い、本県の一般的なハウス形状（間口 6m、長さ 50m、軒高 3mの 3 連棟パイプハウス）、被覆条件（外張り農 PO フィルム、内張り一層）から暖房用燃油消費量を試算し、日中加温に要した燃油量の増加分を日中加温経費として算出した。販売経費は収入の 30%とした。収入から経費を差し引いた金額を収益とした。

2 CO₂濃度および気温と光合成有効光量子束密度 (PPFD) の違いがナスの光合成速度に及ぼす影響

2017 年 1 月 7 日の 9~11 時に「筑陽」の 9 葉苗を 6 個体供試して、展開第 3 葉の光合成速度を携帯用光合成・蒸散測定装置 (LI-6400, LI-COR) を用いて測定した。測定条件として、通気量は 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ に設定した。チャンパー内の環境条件は気温を 20°Cとし、CO₂濃度を 200, 400, 800 および 1,200ppm の 4 水準、PPFD を冬季の曇天日を想定した 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ および冬季の晴天日を想定した 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の 2 水準の 8 組み合わせと、CO₂濃度を 400ppm とし、気温を 14, 18, 22 および 26°C の 4 水準、PPFD を 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ および 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の 2 水準の 8 組み合わせを設けた。

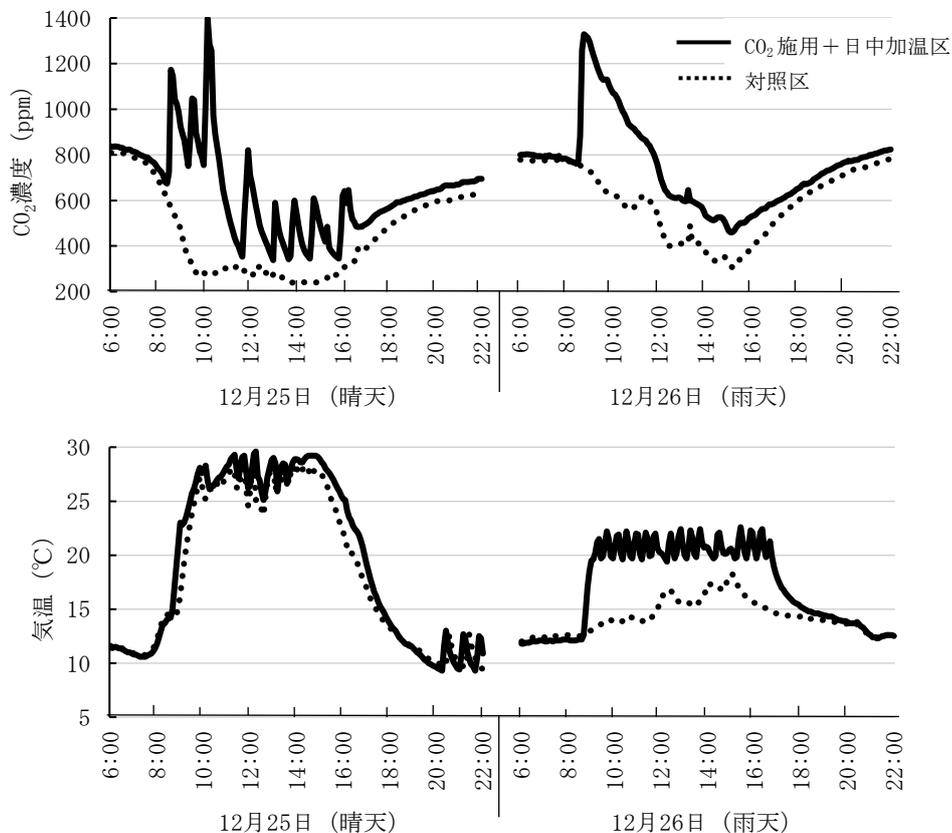
結果

1 CO₂施用と日中加温の有無が促成ナスのハウス内環境および収量に及ぼす影響と収益性の試算

(1) ハウス内の CO₂濃度および気温推移

第 1 図に 2016 年 12 月 25 日 (晴天) および 12 月 26 日 (雨天) における栽培ハウス内の CO₂濃度および気温の日変化を示した。CO₂濃度は、12 月 25 日および 26 日ともに対照区では 8 時頃から濃度が低下し 300ppm 以下となったのに対し、CO₂施用+日中加温区では 350ppm 以上を維持し、対照区より常に高かった。気温は、12 月 25 日では CO₂施用+日中加温区の暖房機が 8 時 30 分に稼働し対照区よりわずかに早く上昇した。12 月 26 日では対照区の気温がほとんど上昇せず 15°C前後で推移したのに対し、CO₂施用+日中加温区では 8 時 30 分から暖房機が稼働し、16 時 30 分まで 20°C前後で推移した。

第 1 表に 2014 年定植および 2016 年定植の栽培ハウスにおける CO₂施用および日中加温の有無と日中の月別平均 CO₂濃度および気温を示した。CO₂施用+日中加温区および CO₂施用区の CO₂濃度はいずれの月も 400ppm 以上であり、CO₂施用によって日中の平均 CO₂濃度が 7~241ppm 高まった。また、日中加温により日中の平均気温は 2014 年定植で 0.3~2.1°C、2016 年定植で 0.3~1.5°C 高まった。いずれも気温が低く換気回数が少ない 12~2 月において試験区間の差が大きかった。



第 1 図 CO₂施用および日中加温の有無と CO₂濃度 (上) および気温 (下) の日変化¹⁾

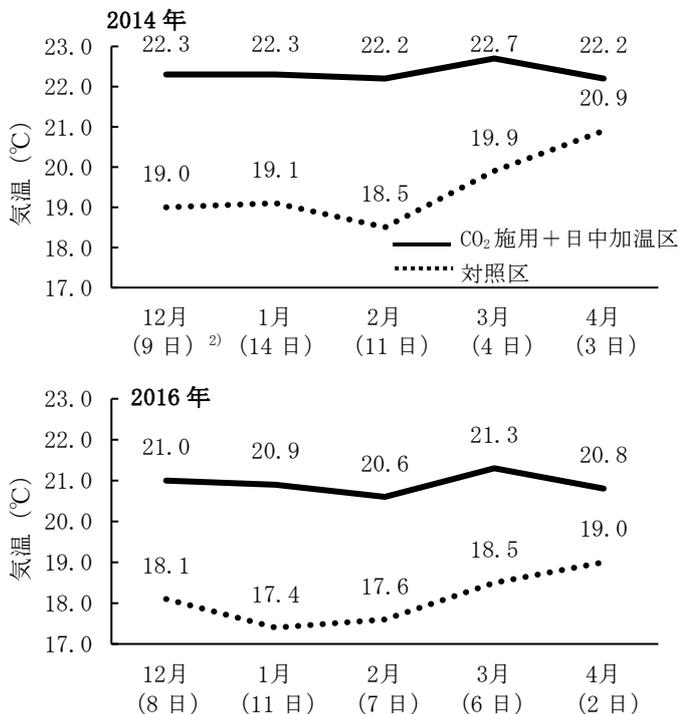
1) 2016 年 12 月 25 日および 12 月 26 日に CO₂施用+日中加温区と対照区において測定

第1表 CO₂施用および日中加温の有無と日中の月別平均CO₂濃度および気温

試験年次	試験区	CO ₂ 濃度 ¹⁾ (ppm)					気温 ¹⁾ (°C)				
		12月	1月	2月	3月	4月	12月	1月	2月	3月	4月
2014年	CO ₂ 施用+日中加温区	539	530	472	439	403	22.8	24.3	25.2	26.4	28.6
	CO ₂ 施用区	553	533	485	446	403	21.2	22.0	23.1	26.0	27.9
	対照区	339	300	377	381	396	21.1	22.2	23.3	25.9	28.3
2016年	CO ₂ 施用+日中加温区	567	504	506	439	402	23.7	23.0	24.0	24.5	25.1
	日中加温区	326	290	321	327	382	23.8	22.8	23.8	24.3	25.0
	対照区	326	298	335	336	377	23.1	21.5	23.1	23.7	24.7

1) 8時30分～16時30分に5分間隔で測定した値の平均値

第2図に2014年定植および2016年定植の曇雨天日における日中加温の有無と日中の月別平均気温を示した。2014年定植では対照区の平均気温は18.5～20.9°Cであったのに対し、CO₂施用+日中加温区の平均気温は22.2～22.7°Cであり、日中加温によって日中の平均気温が1.3～3.7°C上昇した。2016年定植においても、対照区では17.4～19.0°Cであったのに対し、CO₂施用+日中加温区では20.6～21.3°Cであり、日中加温によって1.8～3.5°C上昇した。曇雨天日の日数は2014年定植で41日、2016年定植で34日であり、2014年定植の方が多く、日中加温に要した暖房用燃油消費量は2014年定植では対照区の1.20倍、2016年定植では1.13倍であった(データ略)。



第2図 曇雨天日における日中加温の有無と日中の月別平均気温¹⁾

- 1) 8時30分～16時30分に5分間隔で測定した値の平均値
- 2) ()内は日数、日照時間が3.0時間以下の日(アメダス佐賀計測値)において、8時30分～16時30分に暖房機が1時間以上稼働した日を曇雨天日とした

(2) 果実収量

2014年定植におけるCO₂施用および日中加温の有無が側枝の開花間隔日数、収穫所要日数および収穫果数に及ぼす影響を第2表に示した。側枝の開花間隔日数は12～2月においてCO₂施用+日中加温区、CO₂施用区、対照区の順に短かった。収穫所要日数は12～2月においてCO₂施用+日中加温区で対照区より短かった。収穫果数は12～2月においてCO₂施用+日中加温区とCO₂施用区で対照区より多く、合計ではCO₂施用+日中加温区で対照区より多かった。

2014年定植におけるCO₂施用および日中加温の有無が商品果率および商品果収量に及ぼす影響を第3表に示した。商品果率は3～4月においてCO₂施用+日中加温区で高かった。商品果収量は12～2月、3～4月および合計に試験区間で差が認められ、CO₂施用+日中加温区で対照区より多かった。

2016年定植におけるCO₂施用および日中加温の有無が側枝の開花間隔日数、収穫所要日数および収穫果数に及ぼす影響を第4表に示した。側枝の開花間隔日数は12～2月においてCO₂施用+日中加温区で対照区より短かった。収穫所要日数は12～2月においてCO₂施用+日中加温区で対照区より短かった。収穫果数は12～2月においてCO₂施用+日中加温区で対照区より多く、3～4月と合計ではCO₂施用+日中加温区で対照区より多かった。

2016年定植におけるCO₂施用および日中加温の有無が商品果率および商品果収量に及ぼす影響を第5表に示した。商品果率は12～2月においてCO₂施用+日中加温区で対照区より高かった。商品果収量は12～2月においてCO₂施用+日中加温区で対照区より多く、合計ではCO₂施用+日中加温区で対照区より多かった。

(3) 収益性の試算

CO₂施用および日中加温に係る収益性の試算(10a当たり)を第6表に示した。2か年の商品果収量の平均値から、CO₂施用+日中加温区の収入は対照区と比較して1,365千円増加した。一方、経費として、CO₂施用装置の減価償却費が70千円、CO₂施用燃料費が86千円、日中加温の燃料費が83千円増加した。販売経費は410千円増加した。収入から生産経費および販売経費を差し引くと716千円の収益が増加した。

第2表 CO₂施用および日中加温の有無と側枝の開花間隔日数, 収穫所要日数および収穫果数 (2014年)

試験区 ¹⁾	側枝の開花間隔日数 ²⁾ (日)				収穫所要日数 ³⁾ (日)				収穫果数 (本・m ⁻²)				
	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	合計
CO ₂ 施用+日中加温区	20.4	41.5 a ⁵⁾	38.7	34.3	20.8	28.3 a	24.6	20.0	21.5	52.9 a	55.2	68.0	197.6 a
CO ₂ 施用区	20.1	46.7 b	40.5	33.2	21.1	29.6 ab	24.4	20.0	22.0	48.9 a	53.8	66.8	191.5 ab
対照区	22.8	51.0 c	42.8	33.3	21.5	32.0 b	24.9	20.8	20.2	41.0 b	52.3	64.2	177.7 b
分散分析 ⁴⁾	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	ns	*

- 1) CO₂施用と日中加温の処理期間は12~4月
- 2) 主枝あるいは(n-1)次側枝の開花日から当月に開花したn次側枝の開花日まで要した日数
- 3) 開花から収穫までに要した日数
- 4) **, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし
- 5) 異符号間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較検定)

第3表 CO₂施用および日中加温の有無と商品果率および商品果収量 (2014年)

試験区 ¹⁾	商品果率 (%)				商品果収量 (kg・m ⁻²)				
	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	合計
CO ₂ 施用+日中加温区	94.4	95.2	93.3 a ³⁾	92.3	3.2	6.8 a	6.8 a	9.2	26.0 a
CO ₂ 施用区	97.3	92.4	87.7 b	92.2	3.3	6.0 ab	6.1 b	8.6	24.0 ab
対照区	97.5	92.8	85.2 b	87.5	3.3	5.2 b	5.8 b	8.6	22.9 b
分散分析 ²⁾	ns	ns	*	ns	ns	**	**	ns	*

- 1) CO₂施用と日中加温の処理期間は12~4月
- 2) **, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし (商品果率は逆正弦変換後に検定)
- 3) 異符号間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較検定)

第4表 CO₂施用および日中加温の有無と側枝の開花間隔日数, 収穫所要日数および収穫果数 (2016年)

試験区 ¹⁾	側枝の開花間隔日数 ²⁾ (日)				収穫所要日数 ³⁾ (日)				収穫果数 (本・m ⁻²)				
	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	合計
CO ₂ 施用+日中加温区	17.7	42.0 a ⁵⁾	39.2	29.7	21.7	25.0 a	22.0	18.3	32.6	54.5 a	55.1 a	82.1	224.3 a
日中加温区	17.2	44.7 ab	39.7	26.7	21.5	27.0 b	22.7	17.6	32.1	47.3 b	51.0 ab	80.9	211.3 ab
対照区	18.7	50.7 b	40.4	30.6	22.0	27.3 b	22.7	18.4	31.1	45.2 b	46.8 b	77.1	200.2 b
分散分析 ⁴⁾	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	*	ns	*

- 1) CO₂施用と日中加温の処理期間は12~4月
- 2) 主枝あるいは(n-1)次側枝の開花日から当月に開花したn次側枝の開花日まで要した日数
- 3) 開花から収穫までに要した日数
- 4) **, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし
- 5) 異符号間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較検定)

第5表 CO₂施用および日中加温の有無と商品果率および商品果収量 (2016年)

試験区 ¹⁾	商品果率 (%)				商品果収量 (kg・m ⁻²)				
	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	10~11月	12~2月	3~4月	5~6月	合計
CO ₂ 施用+日中加温区	94.7	95.3 a ³⁾	95.3	95.7	4.3	7.3 a	7.2	12.8	31.6 a
日中加温区	95.9	91.6 ab	94.8	95.0	4.3	5.5 b	6.5	11.8	28.1 ab
対照区	94.1	89.0 b	91.8	92.5	4.1	5.4 b	6.4	10.9	26.8 b
分散分析 ²⁾	ns	*	ns	ns	ns	**	ns	ns	*

- 1) CO₂施用と日中加温の処理期間は12~4月
- 2) **, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし (商品果率は逆正弦変換後に検定)
- 3) 異符号間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較検定)

第6表 CO₂施用および日中加温に係る収益性の試算

項目		CO ₂ 施用+ 日中加温区	対照区
		(t, 千円/10a)	
収入	商品果収量 ¹⁾	28.8	24.9
	商品果収入 ²⁾	10,080	8,715
	収入増加 (A)	1,365	-
経費	CO ₂ 施用装置減価償却費 ³⁾	70	0
	CO ₂ 施用燃料費 ⁴⁾	86	0
	日中加温燃料費 ⁵⁾	83	0
	販売費増加 ⁶⁾	410	-
	経費増加 (B)	649	-
収益 (A) - (B)		716	-

- 1) 第3表, 第5表の合計商品果収量の平均値
- 2) 2014~2016年の福岡県産ナスの平均価格を380円(福岡県農林水産部園芸振興課 2017)として算出
- 3) 灯油燃焼式光合成促進装置を49万円(耐用年数7年)として算出
- 4) 灯油消費量1,000L/10a, 2014~2016年の平均販売価格86円/L(経済産業省 2020)として算出
- 5) 本実験における日中加温による燃油消費量の増加割合(20%)を対照区の暖房用燃料消費量の6,000L/10a(高市 2007)に乘じ, 1,200L(2014~2016年の平均販売価格69円/L(経済産業省 2020)として算出
- 6) 収入増加分の30%として算出

2 CO₂濃度および気温と光合成有効光量子束密度(PPFD)の違いがナスの光合成速度に及ぼす影響

CO₂濃度および光合成有効光量子束密度(PPFD)の違いと光合成速度との関係を第7表に示した。PPFDが400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ともに, CO₂濃度が200~800ppmでは濃度の上昇に伴って光合成速度も増加し, 800ppm以上では同等であった。特に, 200ppmと400ppmの間で光合成速度の増加が著しかった。一方, すべてのCO₂濃度においてPPFDの増加に伴い光合成速度は有意に増加したが, その増加量はCO₂濃度が200ppmでは1.2 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であったのに対し, 400ppm以上では2.9~3.3 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

気温および光合成有効光量子束密度(PPFD)の違いと光合成速度との関係を第8表に示した。気温が14~22℃では, いずれのPPFDともに気温の上昇に伴い光合成速度も増加したが, 22~26℃では400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ では有意な増加が認められず, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ でのみ有意に増加した。一方, 気温が14℃ではPPFDが増加しても光合成速度は増加しなかったのに対し, 18~26℃ではPPFDの増加により光合成速度も有意に増加した。

第7表 CO₂濃度および光合成有効光量子束密度(PPFD)の違いと光合成速度

CO ₂ 濃度 (ppm)	光合成速度 ¹⁾ ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		t検定
	400PPFD ²⁾	800PPFD ²⁾	
200	6.6 a ³⁾	7.8 a	** ⁴⁾
400	13.8 b	16.8 b	**
800	20.9 c	24.2 c	**
1,200	22.8 c	25.7 c	**

- 1) チャンバー内の気温20℃で測定
- 2) 光合成有効光量子束密度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- 3) 異符号間に1%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較検定)
- 4) **はPPFD間において1%水準で有意差あり

第8表 気温および光合成有効光量子束密度(PPFD)の違いと光合成速度

気温 (℃)	光合成速度 ¹⁾ ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		t検定
	400PPFD ²⁾	800PPFD ²⁾	
14	9.4 a ³⁾	10.1 a	ns ⁴⁾
18	12.7 b	14.3 b	*
22	17.5 c	20.4 c	**
26	18.1 c	23.3 d	**

- 1) チャンバー内のCO₂濃度400ppmで測定
- 2) 光合成有効光量子束密度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- 3) 異符号間に1%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較検定)
- 4) **, *はPPFD間において1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし

考 察

本県の促成ナス栽培における収益性向上技術の確立を目的として、CO₂施用と日中加温の組み合わせがハウス内環境および収量に及ぼす影響とその収益性について検討するとともに、冬季寡日照地域を想定した環境条件における光合成特性について検討した。

施設栽培におけるCO₂施用について、斉藤（2015）はCO₂濃度が外気濃度（約400ppm）より低下すると植物の光合成量は著しく減少することや換気による外気へのCO₂漏出の観点から外気濃度を下回らないように施用する日中低濃度施用を推奨している。本実験においても、対照区のCO₂濃度は300ppmを下回ったのに対し、CO₂施用によって350ppm以上に維持できたことにより、特に換気が行われにくい12～2月でハウス内CO₂濃度が高まった。また、「筑陽」の9葉苗を用いた実験では、PPFDの多少にかかわらずCO₂濃度が200ppmから400ppmに上昇するのに伴い個葉の光合成速度は著しく増大したが、800ppm以上では有意に増大せず、光合成速度の促進効果が低かった。このことから、本実験においてCO₂施用の設定濃度とした8～10時の800ppm（換気時400ppm）はナス葉の光合成速度促進効果の面から適切な設定値であったと考えられた。その一方で、10～17時の400ppm設定については、換気温度まで気温が上昇する晴天日では適切な設定値であると考えられるが、換気温度まで気温が上昇しにくい曇雨天日では800ppm程度まで高めることで光合成量がさらに増大する可能性が示唆された。

ナス栽培における気温については、日中の生育適温は25～28℃であることが報告されている（斎藤 1974）。「筑陽」の9葉苗を用いた本実験において、冬季の曇天日を想定した400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では14～22℃の範囲では気温の上昇に伴い光合成速度は増加したが、22℃以上では有意な増加が認められなかった。また、ナスと生育適温に近い促成トマト栽培での日中加温（龍ら 2016）に倣い8時30分～16時30分の暖房設定温度を20℃とした本実験では、曇雨天日のハウス内気温は、2014年では22.2℃～22.7℃、2016年では20.6～21.3℃まで上昇した。一方、「筑陽」の9葉苗において、冬季の晴天日を想定した800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では14～26℃の範囲では気温が高いほど光合成速度は増大し、晴天日を含めた日中の月別平均気温をみると日中加温によって2014年では22.8～28.6℃、2016年では23.0～25.1℃まで上昇し、ナスの生育適温に近づいた。これらのことから、本実験において日中加温の設定温度とした20℃はナス葉の光合成速度促進効果および生育温度の面から適切な設定値であったと考えられた。以上のように、本県の冬季寡日照条件におけるCO₂施用と日中加温制御の適切な設定値をナス葉の光合成特性の面から明らかにできた。

ナス栽培において高い収量を得るためには、側枝数や収穫果数の確保に努めることが重要である（宮本 2000）。促成栽培では、n次側枝の開花時に側枝を

摘心し、その後果実の収穫時に1つのみ残した腋芽を(n+1)次側枝にすることを繰り返す、1芽切り戻し整枝を行っている。そのため、収穫果数の増加には側枝の発育を促進させて開花を早めるとともに、開花から収穫までの日数を短くして、側枝形成～収穫までの期間を短縮させることが不可欠である。側枝の生育や果実肥大を促進させる栽培環境としては、CO₂施用によって側枝の生育が旺盛となり収穫果数が増加し増収すること（今津ら 1967, 川島ら 1993, 古賀・森山 2015）、昼温が高まると果実肥大が速くなること（町田ら 1981）が報告されている。本実験において、2014年定植のCO₂施用のみでは、12～2月の側枝の開花間隔日数が短くなり、同時期の収穫果数が増加したが、合計では有意な増加が認められなかった。2016年定植の日中加温のみでは収穫所要日数が短縮されなかった。この要因として、日照時間が長かったため日中加温による昼温の上昇が小さかったことが考えられた。しかし、両年ともにCO₂施用+日中加温では側枝の開花間隔日数と収穫所要日数が短くなり、収穫果数が最も多くなった。このように、CO₂施用のみもしくは日中加温のみでは収穫果数が増加しにくい場合でも、CO₂施用と日中加温を併用することで、側枝の開花間隔日数と収穫所要日数がともに短くなり、収穫果数が増加することが明らかとなった。

収穫果数の増加を商品果収量の増加に繋げるためには、商品果率を高めることが重要である。商品果率に影響を与える果実の外観品質ならびに果実肥大と栽培環境との関係について、長ナスでは低温や低日射により花や肥大中の果実への同化養分の供給が不足すると、首細果や曲がり果の発生が多くなること（室園・近藤 1977, 小野ら 1994）、トマトではCO₂施用によって増加した光合成産物を果実へ分配させるには高めの気温管理が有効なこと（岩崎ら 2017）、葉から果実への転流量は気温が高いほど多いこと（吉岡ら 1986）が報告されている。本実験において、2014年定植のCO₂施用のみの商品果率は対照区と同程度であったのに対し、CO₂施用+日中加温では3～4月の商品果率が高まった。また、2016年定植では、CO₂施用+日中加温で12～2月の商品果率が高まった。この要因として、CO₂施用と日中加温による光合成速度の増大と日中加温での昼温上昇による転流量の増加により花や果実への光合成産物の供給量が増加することで、首細果や曲がり果が発生しにくくなったと考えられた。なお、2014年と2016年において商品果率が高まる時期が異なった要因として、曲がり果や首細果などの不良果は気温や日射量等が相互に関連して草勢等に影響して発生する（室園・近藤 1977）ため、気象条件や草勢等によって不良果の発生しやすい時期が異なった可能性が推察された。

他の果菜類においても、日中の低濃度CO₂施用によって商品果収量が多くなることがキュウリ（川城ら 2009）やイチゴ（加藤ら 2015）で報告されている。ナスにおいても日中の低濃度CO₂施用で商品果収量が多くなることを確認している（古賀・森山 2015）。一方、冬季寡日照地域では日中加温によって商品果収量が多くなるこ

とが促成トマトで報告されている(龍ら 2016)。本実験では、2014年のCO₂施用のみ、2016年の日中加温のみでは、商品果収量に対照区との差が認められなかった。一方、CO₂施用と日中加温を併用した結果、2014年定植ではCO₂施用のみより3~4月に多く、2016年定植では日中加温のみより12~2月に多くなった。また、対照区と比較した場合では、12~4月の処理期間のみならず合計においても商品果収量が多くなった。これらのことから、CO₂施用のみまたは日中加温のみでは増収効果が得られにくい場合であっても、CO₂施用と日中加温を併用することによって、収穫果数が増加し、商品果率が高まることで、商品果収量が増加することが明らかとなった。

本県の促成ナスにおいて導入が多い灯油燃焼式CO₂施用装置を利用した場合の年間経費は10a当たり156千円、日中加温にかかる暖房経費は、本県の一般的なハウス形状、被覆条件で算出した場合、10a当たり83千円と試算された。これに対し、1,365千円の収入増加が見込まれることから、選果などに要する販売経費の増加分を考慮しても収益性が高まると試算された。

以上のように、ナスの促成栽培においてCO₂施用と日中加温を併用した栽培技術を導入することによって、主に冬季~春季の収量を増加できることが明らかとなり、収益性が向上すると試算された。しかも、日中加温は既存の暖房機を利用し、CO₂発生装置の普及も進んでいるため、本技術は生産現場で容易に活用できる栽培技術であると考えられる。

謝 辞

栽培管理および収穫調査にご尽力頂いた水落章夫氏、江崎智幸氏、島崎英樹氏、中村忠男氏および臨時職員の方々に感謝申し上げます。

引用文献

福岡県農林水産部園芸振興課(2017)福岡の野菜動向. 福岡県農林水産部園芸振興課, 福岡.
今津 正・矢吹万寿・織田弥三郎(1967)炭酸ガス環境に関する研究(第2報)CO₂濃度がナスの生育, 開花および結実に及ぼす影響. 園学雑 36: 275-280.
伊藤 緑・小川理恵・恒川靖弘・番 喜宏(2019)CO₂施用及び温度管理が促成ナス栽培における生育・収量に及ぼす影響. 愛知農総試研報 51: 31-38.
岩崎泰永・梅田大樹・鈴木真実(2017)CO₂濃度, 気温および湿度制御が異なる環境管理様式がトマトの乾物生産および分配に及ぼす影響. 農研機構研究報告野菜花き研究部門 1: 73-78.
加藤賢治・小林克弘・嶋本千晶・中村嘉孝・小島寛子・大藪哲也・番 喜宏・岩崎泰永(2015)イチゴ促成栽

培におけるミスト噴霧とCO₂長時間施用が生育・収量に及ぼす影響. 愛知農総試研報 47: 51-60.
川島信彦・山本英雄・黒住 徹・谷川賢剛・田中良宏(1993)施設内におけるCO₂施用に関する研究(第4報)果菜類の生育に対する効果. 奈良農試研報 24: 25-30.
川城英夫・土屋 和・崎山 一・宇田川雄二(2009)低濃度二酸化炭素施用が促成栽培キュウリの収量に及ぼす影響とその経済性評価. 園学研 8: 445-449.
経済産業省(2020)石油製品価格調査. 資源エネルギー庁, 東京, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html (2020年7月22日閲覧).
古賀 武・森山友幸(2015)炭酸ガス施用が促成ナスの光合成速度および収量に及ぼす影響. 福岡農林試研報 1: 82-87.
国土交通省(2020)過去の気象データ, 全日日射量. 気象庁, 東京, <http://ds.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php> (2020年7月22日閲覧).
町田治幸・阿部泰典・隔山普宣(1981)昼夜温の組合せが促成栽培ナスの生育, 収量, 品質に及ぼす影響. 徳島農試研報 19: 1-7.
宮本重信(2000)仕立て方と生育・収量, 作業性. p. 277-281. 農業技術大系野菜編 5. 農文協, 東京.
室園正敏・近藤雄次(1977)施設ナスの不良果の発生要因について. 九農研 39: 252.
小野剛士・柴戸靖志・山本幸彦・豆塚茂美(1994)ナス栽培における品種, 作型と果形の変化. 福岡農総試研報 B-13: 11-14.
龍 勝利・井手 治・森山友幸(2016)冬季における日中の加温が促成トマトの収量に及ぼす影響. 園学研 15: 297-303.
斎藤 章(2015)CO₂施用一日中低濃度施用のすすめ. ハウスの環境制御ガイドブック. 農山漁村文化協会, 東京, p. 24-31.
斎藤 隆(1974)基礎編. ナス=植物としての特性. p. 1-22. 農業技術大系野菜編ナス. 農文協, 東京.
高市益行(2007)全国の半旬別気象データを利用した温室暖房コスト試算ツールの構築. 農業環境工学関連学会 2007 合同大会講演要旨集: G35.
植野康佑・高橋昭彦(2018)促成ナスの環境制御による多収穫技術 第1報 炭酸ガス施用条件下での温度管理が生育, 収量・品質に及ぼす影響. 高知農技セ研報 27: 65-75.
吉岡 宏・高橋和彦・新井和夫(1986)果菜類における光合成産物の動態に関する研究. IX トマトにおける¹⁴C 同化産物の転流に及ぼす温度の影響. 野菜試研報 A14: 1-9.