

# トマト促成栽培における換気窓連動による2レベル調節型の炭酸ガス施用は冬春期の可販果収量および可販果数率を増加させる傾向がある

## Two-Level Adjustable Carbon Dioxide Application by Interlocking Ventilation Windows in Tomato Forcing Cultivation Tends to Increase the Winter and Spring Fruit Yield and Number

堤 志保\*<sup>1</sup>・村上尚穂\*<sup>2</sup>・三原順一\*<sup>3</sup>・木場達美\*<sup>4</sup>

(農産園芸研究所)

Shiho TSUTSUMI, Hisao MURAKAMI, Junichi MIHARA, Tatsumi KOBA

(Agricultural Horticultural Research Institute)

### 要 約

全国第1位のトマト生産地である熊本県では、冬春期(12月～翌年4月)における果実の肥大不足による総収穫果重の不足、可販果収量、可販果数率の低下が問題となっている。そこで本研究では、冬春期の収穫確保に効果的な新しい炭酸ガス施用方法を検討することを目的とし、PPFDと炭酸ガス濃度がトマトの光合成速度に及ぼす基礎的知見を得るため、促成作型で栽培したトマトの小葉を用いてチャンバー装置内で光合成速度を測定した。また、既に生産現場に普及しているゼロ濃度差施用と換気窓の開閉に伴いハウス内炭酸ガス濃度を開時400ppm、閉時600ppmの2レベルで調整し維持する換気窓連動施用の2つの炭酸ガス施用方法を用いた栽培試験を行った。その結果、チャンバー試験では、炭酸ガス濃度300～1000ppmの濃度域で、PPFDの増加に伴い光合成速度が上昇し、炭酸ガス濃度の増加に伴い光合成速度の上昇率も高くなった。また、冬春期のハウス内PPFDは600～1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。栽培試験では、無施用に対するゼロ濃度差施用、換気窓連動施用の総収量重、可販果収量重は統計的多重比較で有意差が無かったが、換気窓連動施用のそれらの値は無施用およびゼロ濃度差施用に比べ高くなる傾向があった。特に冬春期では、ゼロ濃度差施用に比べ換気窓連動施用で総収量重が12%、可販果収量重は7%高くなった。冬春期の可販果率は、無施用では70～77%であったのに対し、ゼロ濃度差施用と換気窓連動施用では76～84%と高くなった。以上から、冬春期における換気窓連動施用は、無施用およびゼロ濃度差施用に比べ、光合成速度を効果的に高め、可販果収量と可販果数率の増加による収量増に寄与すると推定された。

キーワード：熊本県促成栽培トマト、炭酸ガス施用、換気窓連動、冬春期可販果収量、可販果数率

### I 緒言

熊本県においてトマト類は、生産量が12.8万t(2017年)の全国1位、県農業算出額の14%(458億円)を占める品目であるため、熊本県の農業の主力品目に位置づけられている<sup>1)</sup>。八代地域や玉名地域等の県内平坦部で主に栽培されている促成作型は、10月から翌年6月までの長期間収穫する作型であり、トマト類の出荷量の約7割を占める主要な作型である<sup>2)</sup>。

一方、熊本県の全日射量は、太平洋側の施設園芸が盛んな隣県である宮崎県と比べて11月から2月の期間の日射量が少ない(第1図)。

そのため、日射量が減少する期間には、果実肥大不足による総収穫果重の不足、可販果収量の低下や、小果(1

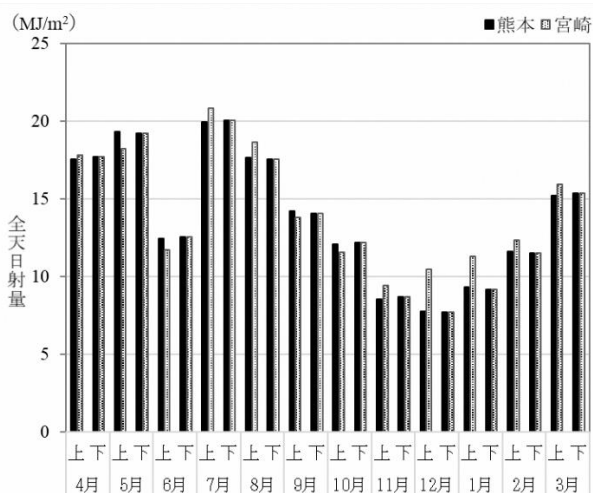
果重90g以下の不良果)や果実のゼリー部の発達不足によって発生する角張り空洞果等の不良果数が増加し、可販果率の低下が問題となっている。

浜本ら<sup>3)</sup>によると、作物の生育・生産の基礎となる光合成は、光エネルギーを得て、葉で糖を作り、糖を生育や生産のために各器官へ転流および分配している。これら一連の過程が作物の生産性を決定する大きなポイントとして考えられている。その中で、光の強さは光合成量を決定する大きな要因であると著している。

また、吉岡ら<sup>4)</sup>は、収穫期以降のトマトでは栄養成長と生殖成長が常に平行して行われているため、光合成産物が転流および分配される茎、根、生長点、果実等の全ての器官がsink器官となり、互いに競合し合い、より強

\*1 現 熊本県北広域本部農林水産部農業普及・振興課 \*2 現 熊本県農林水産部生産経営局農業技術課農業革新支援センター

\*3 現 熊本県農業研究センターアグリシステム総合研究所 \*4 現 熊本県東広域本部宇城地域振興局農林部農業普及・振興課



第1図 熊本県と宮崎県の全日射量<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup>全日射量：2008～2018年までの熊本および宮崎地点の気象庁データ

い sink 能の器官に多くの光合成産物が分配されていることを明らかにした。また、吉岡らの研究の結果、遮光処理（遮光率 80%）は無遮光と比べて、茎葉や根の乾物量が減少し、果実の肥大速度が低下した。その一方で、果実への乾物分配率は著しく高くなった。これは、遮光処理により生成される光合成産物の量が低下しても、果実の sink 能は急激に低下しないことを示しており、果実と栄養器官との間に一層激しい光合成産物に対する競合関係が起きているものと考えられている。しかし、遮光期間が長期にわたると果房への乾物分配は次第に低下し、逆に葉（特に上位葉）への乾物分配が高まり、葉面積の拡大による受光体勢の改善へと光合成産物が分配されると報告している。

上記の先行研究から、熊本県のトマト促成栽培では、日射量が少ない期間は、トマトの生育・生産の基礎となる光合成量が低下していることが示唆される。その結果、果実肥大不足や不良果数の増加による可販果率の低下が発生していると考えられる。

東出<sup>5)</sup>は、「冬期の施設栽培では、温度が低いと換気窓を閉め切ることが多いが、日射量が十分にある場合には、作物は盛んに光合成を行っている。換気窓を閉じたまま空気の入替えがなく、外気からの炭酸ガスが供給されないとハウス内の炭酸ガス濃度は外気以下に低下するが、換気窓を閉じた状態で炭酸ガス施用を行えば、施設内の炭酸ガス濃度を高く維持でき、光合成を高める効果が大い」と著している。

近年、熊本県のトマト促成栽培では、光合成促進による増収を目的とした環境制御技術として、冬春期の炭酸ガス施用が普及し始めているが、生育および収量性にお

ける効果は明らかになっていない。そこで、炭酸ガス施用がトマト促成栽培の光合成速度に及ぼす影響を検証し、冬春期の収量確保に効果的な炭酸ガス施用方法を検討した。

本研究では、外気の炭酸ガス濃度並である 400ppm でハウス内濃度を保つゼロ濃度差施用と換気窓の開閉に伴い炭酸ガス濃度を開時 400ppm、閉時 600ppm で維持する換気窓連動施用の 2 つの炭酸ガス施用方法を用いた。ゼロ濃度差施用は、現在多くのトマト生産者が一般的に用いている炭酸ガス濃度であり、換気窓連動施用は近年の環境制御機器の発達に伴い可能となった炭酸ガス施用方法である。

## II 材料および方法

下記、試験 I および II に用いたトマトの耕種概要は、県内の促成作型の主要産地である八代地域に準じた。供試品種は、穂木「桃太郎ピース（タキイ種苗株式会社）」、台木「がんばる根トリプル（愛三種苗株式会社）」を用いた。2015年7月8日に穂木および台木を播種し、同年7月22日に幼苗接ぎ木を行い、同年9月1日に定植した。栽植様式は畝幅 1.8m、株間 50cm、2条植え、栽植密度は 1 a あたり 220 株とした。仕立て方法は 1本仕立て、つり下げ誘引で誘引高は 180 cm とした。交配は、各花房 2～3 花開花時にホルモン処理を行い、原則 1 果房あたり 4 果になるように摘果した。収穫は 2015 年 10 月 13 日から翌年 6 月 2 日まで行った。肥培管理は、基肥に N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O = 0.4 : 0.6 : 0.4 (kg/a)、追肥に N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O = 3.8 : 0.7 : 5.3 (kg/a)、合計 N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O = 4.2 : 1.3 : 5.7 (kg/a) を施用した。追肥は草勢を観察しながらかん水同時施肥法で園試処方 0.5 単位液を随時施用した。温度管理は、換気温度を午前 20℃、午後 25℃とし、目標温度に達しなくても日中加温は行わなかった。この換気温度設定は、2016 年 4 月 3 日までとし、以降は終日 20℃とした。夜温は暖房機の設定温度を 12℃とした。

1 PPF D および炭酸ガス濃度が光合成速度に及ぼす影響

PPFD (PPFD (光合成光量子束密度) : photosynthetic photon flux density) および炭酸ガス濃度を变化させた時の光合成速度は、光合成速度測定装置 LCproSD (ADC 社) を用いて測定した。PPFD とは、光合成に有効な波長とされる 400～700nm の光の強さを光量子の数として表したものである。測定装置のチェンバー内の設定条件は、PPFD を 3 水準 (弱光 : 100 μmol/m<sup>2</sup>/s, 中光 : 500 μmol/m<sup>2</sup>/s, 強光 : 1500 μmol/m<sup>2</sup>/s)、炭酸ガス濃度は 5 水準 (300ppm, 400ppm, 600ppm, 1000ppm, 1500ppm) とし、温度は 25℃ で一定とした。試験は、熊本県農業研究センター (厚層

多腐植質黒ボク土) 内の間口 6 m×長さ 25mの単棟ビニルハウスで、上述の耕種概要のとおり栽培したトマトを用いて実施した。測定箇所は、トマトの光合成が盛んに行われていると考えられる収穫果房の1～2果房上部付近の小葉とし、1条件あたり5葉を測定し、2016年2月23日から3日間で、3回測定した。

### 2 炭酸ガス施用による増収効果

炭酸ガス施用によるトマト促成作型の増収効果について、炭酸ガス無施用を対照とし、ハウス内炭酸ガス濃度を外気並の濃度である 400ppm 程度を維持するように施用するゼロ濃度差施用と換気窓に連動させて換気窓閉時 600ppm-開時 400ppm を維持するように施用する換気窓連動施用の2種類の施用方法を用いて検証した。

ハウス内炭酸ガス濃度の測定には、トマト群落中央部に位置するようにつり下げた強制通風式のセンサーボックスに内蔵した炭酸ガスセンサーを用いた。施用期間は2015年11月24日から翌年3月31日、施用時間は7:00～16:00で設定条件を満たした時に群落内に配置した専用ダクトから液化炭酸ガスを施用した。ハウス内 PPFD の測定には、トマト栽培ハウス内の地表から 250 cm 程度の高さの骨材(梁)に設置した光量子センサーを用いた。

光合成および炭酸ガス濃度は、2015年12月1日から翌年3月31日まで測定した。試験は、熊本県農業研究センター(厚層多腐植質黒ボク土)内の間口6m×奥行12mの小型複合環境制御ハウス(単棟)で、上述の耕種概要のとおり栽培したトマトを用いて実施した。

温度管理は、本県のトマト栽培技術の高位平準化を目的に作成された熊本標準化マニュアル ver.1 に準じ、試験に用いた3棟のハウスは共通管理とした。温度管理は炭酸ガス同様ハウス内に吊り下げたセンサーボックスに内蔵した温度センサーを用いて自動制御を行った。温度管理を3棟共通とし、ハウス内温度に影響しない液化炭酸ガスによる炭酸ガス施用としたため、本試験においてハウス内温度の処理間差はないことを試験の前提とする。

生育および収穫調査は、1区4株4反復とした。生育調査では、各果房の収穫果房より上位の最大葉の葉面積および乾物重と果房下の茎径を3回(2016年1月12日、2月16日、3月15日)測定した。栽培終了時は、収穫段数、第一果房までの節数、総葉数、果房下茎径を測定した。併せて、交配から収穫までの成熟日数を測定した。収穫調査では、果実品質および収量を週3回の間隔で測定した。収穫調査の結果は、収穫を開始した2015年10月13日から翌年6月2日までの全期間、炭酸ガスを施用した期間を含む12月1日から翌年4月の冬春期間、日射量が少ない1月から3月の寡日照期間に分けて整理した。

### III 結果

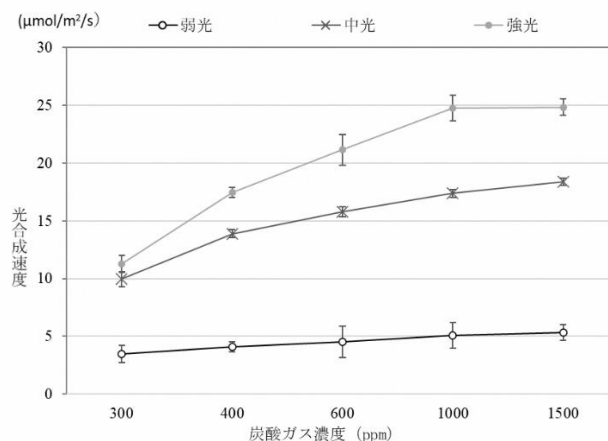
#### 1 PPFD および炭酸ガス濃度が光合成速度に及ぼす影響

弱光条件下(PPFD: 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )では、炭酸ガス濃度が 300ppm から 1500ppm に上昇した時の光合成速度の増加幅は 1.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  と中光条件および強光条件と比べて僅かであり、炭酸ガス濃度 1500ppm の時、最大 5.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  であった。

中光条件下(PPFD: 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )では、炭酸ガス濃度が 300ppm から 1500ppm に上昇した時の光合成速度の増加幅は弱光条件と比べて大きい 8.5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  であり、炭酸ガス濃度 1500ppm の時、最大 18.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  であった。

強光条件(PPFD: 1500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )では、炭酸ガス濃度が 300ppm から 1500ppm に上昇した時の光合成速度の増加幅は中光条件と比べて大きい 13.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  であり、炭酸ガス濃度 1500ppm の時、最大 24.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  であった。

炭酸ガス濃度 300ppm から 1000ppm では、PPFD 条件に関わらず、右肩上がりに光合成速度は増加し、その傾向は弱光、中光、強光の順で大きくなった。炭酸ガス濃度 1000ppm から 1500ppm では、PPFD 条件に関わらず、光合成速度の増加幅は炭酸ガス濃度 300ppm から 1000ppm と比べて小さくなった(第2図)。



第2図 PPFD<sup>a)</sup>と炭酸ガス濃度が光合成速度に及ぼす影響<sup>b)</sup>

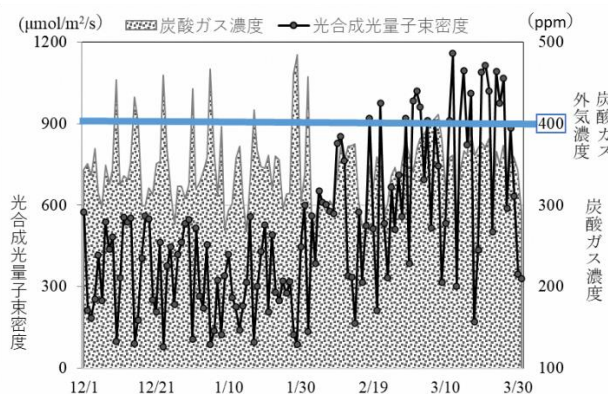
<sup>a)</sup>PPFD (光合成光量子束密度,  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ): 弱光 100、中光 500、強光 1500

<sup>b)</sup>図中のエラーバーは標準偏差 (n=3)

#### 2 炭酸ガス施用による増収効果

熊本県の冬春期のハウス内 PPFD および炭酸ガスを施用しない場合のハウス内炭酸ガス濃度を測定し、9時から15時の平均値を算出した。その結果、12月1日から1月下旬のハウス内 PPFD は、100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  から 600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の間で推移した。2月上旬以降は右肩上がりに上昇する傾向があり、3月中旬以降は 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$

以上の日が発生した。また、炭酸ガスを施用しない場合、トマトを栽培中のハウス内炭酸ガス濃度は、12月上旬から1月下旬のPPFDが $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度の日には、外気濃度である400ppm以上となったが、同期間でPPFDが $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上の日や2月上旬以降は、外気濃度400ppmを下回る傾向があった(第3図)。



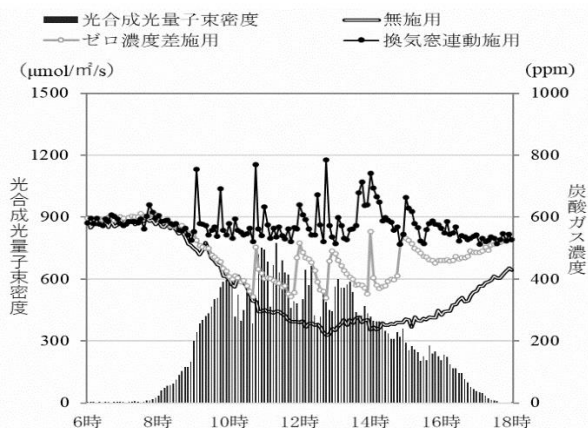
第3図 冬春期のハウス内炭酸ガス濃度と光合成光量子束密度の推移<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup>促成トマト栽培期間中の9~15時のハウス内炭酸ガス濃度と光合成光量子束密度の平均値の推移(炭酸ガス無施用下)

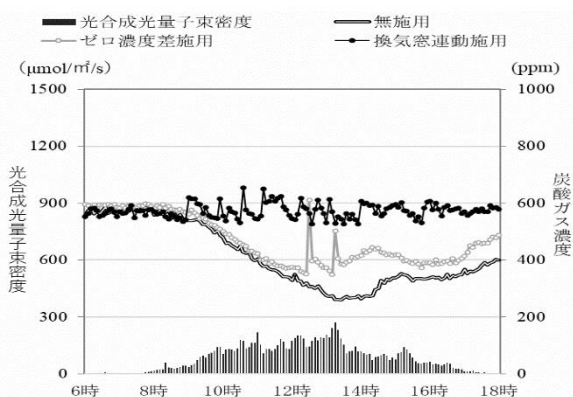
炭酸ガス無施用と炭酸ガスを施用したゼロ濃度差施用および換気窓連動施用でハウス内炭酸ガス濃度を比べると、天候によって異なる傾向を示した。炭酸ガス無施用では、曇天日は10時から17時頃まで、雨天日は11時から18時頃まで、晴天日は9時から17時頃までの間、外気並の炭酸ガス濃度である400ppmを下回った。日最低濃度は、天候に関わらず230ppm程度まで下がった。ゼロ濃度差施用は、天候に関わらず炭酸ガス施用設定通り400ppm程度で推移した。換気窓連動施用は、雨天日や曇天日は600ppm程度で終日推移したが、晴天日は正午付近のようなPPFDが高い時間帯は一時的に400ppm程度で推移した(第4図の1, 2, 3)。

12月から3月の9時から16時にハウス内炭酸ガス濃度が350ppmを下回った時間を積算した炭酸ガス飢餓遭遇時間は、炭酸ガス無施用は544時間、ゼロ濃度差施用は24時間、換気窓連動施用は5時間であった。最も遭遇時間が多かった炭酸ガス無施用では、12月、1月、2月は各月150時間程度であったが、3月は96時間と減少した(第1表)。

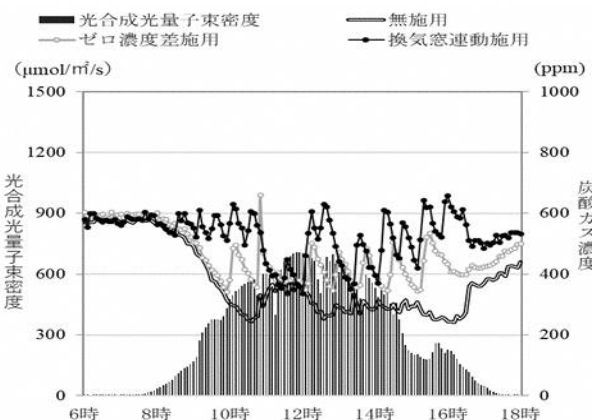
12月から3月の平均ハウス内炭酸ガス濃度は、炭酸ガス無施用は343ppm、ゼロ濃度差施用は418ppm、換気窓連動施用は521ppmであり、炭酸ガス無施用では外気並の炭酸ガス濃度である400ppmを下回った(第2表)。



第4図の1 曇天日のハウス内光合成光量子束密度及び炭酸ガス濃度の推移(測定日:1/7)



第4図の2 雨天日のハウス内光合成光量子束密度及び炭酸ガス濃度の推移(測定日:1/6)



第4図の3 晴天日のハウス内光合成光量子束密度及び炭酸ガス濃度の推移(測定日:1/1)

第1表 炭酸ガス飢餓遭遇時間数<sup>a)</sup> (時間)

炭酸ガス処理	12月	1月	2月	3月	合計
無施用	146	150	152	96	544
ゼロ濃度差施用	9	4	6	5	24
換気窓連動施用	2	1	0	2	5

<sup>a)</sup>9:00~16:00にハウス内炭酸ガス濃度が350ppmを下回った時間を積算した。

第2表 平均ハウス内炭酸ガス濃度<sup>a)</sup>の推移 (ppm)

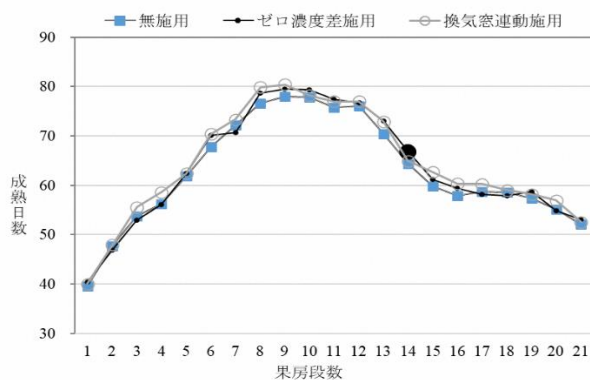
炭酸ガス処理	12月	1月	2月	3月	平均
無施用	342	341	329	358	343
ゼロ濃度差施用	417	434	419	400	418
換気窓連動施用	530	559	534	459	521

<sup>a)</sup>9:00~16:00のハウス内炭酸ガス濃度の平均値を示した。

収穫果房より上位の最大葉の葉面積および乾物重を測定した結果、炭酸ガス無施用と比べて炭酸ガスを施用したゼロ濃度差施用および換気窓連動施用は、葉面積が大きく、乾物重が重い傾向があった。2月26日の測定では、炭酸ガス無施用と比べて換気窓連動施用では、有意に葉面積および乾物重が大きくなった。3月15日の測定では、炭酸ガス無施用と比べてゼロ濃度差施用および換気窓連動施用が、有意に比葉面積が大きくなった。茎径も炭酸ガスを施用すると太くなる傾向があった(第3表)。

栽培終了時の生育では、収穫段数、第1果房までの節数および総葉数は、炭酸ガス施用の有無および施用方法に関わらず同程度であった。一方で、12月下旬から2月中旬までに開花した12~15段下茎径は、炭酸ガス無施用と比べて、換気窓連動施用が太くなる傾向があり、2月上旬に開花した14段下茎径は、換気窓連動施用が炭酸ガス無施用と比べて有意に太くなった(第4表,第5表)。

成熟日数は処理に関わらず同様に推移した(第5図)。



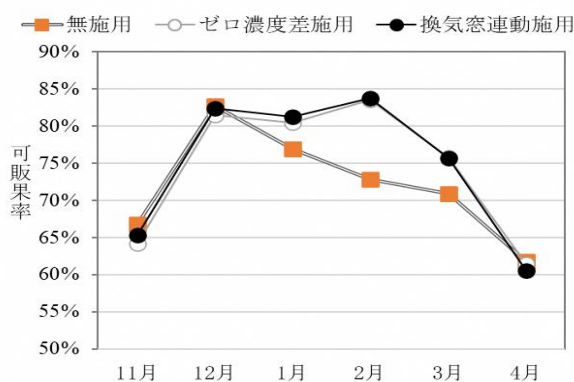
第5図 成熟日数<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup>ホルモン交配から収穫迄の日数

株あたりの果数および収量における処理の差は、収穫全期間(10月~翌年6月)、冬春期間(12月~翌年4月)、寡日照期間(1月~3月)の順で大きい傾向を示した(第6表)。冬春期間の可販果収量は、炭酸ガス無施用と比べてゼロ濃度差施用は4%、換気窓連動施用は11%増加し、3処理間で換気窓連動施用が最も増加する傾向を示した。また、寡日照期間の可販果収量は、炭酸ガス無施用と比

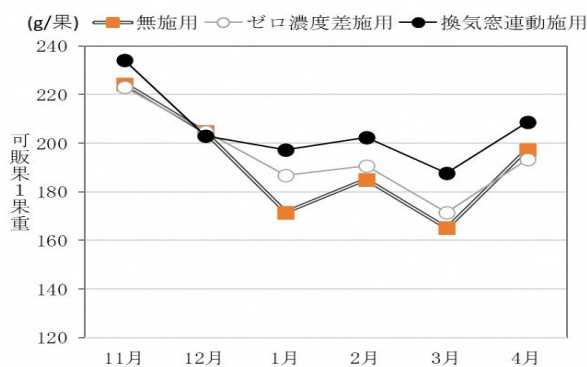
べてゼロ濃度差施用は18%、換気窓連動施用は20%増加し、3処理間で換気窓連動施用が最も増加する傾向を示した。両期間とも、炭酸ガス施用による果数および収量の増収効果が示唆されたが、その効果はゼロ濃度差施用に比べて換気窓連動施用が高い傾向を示した。また、冬春期間および寡日照期間の不良果数は、炭酸ガス無施用と比べて炭酸ガスを施用したゼロ濃度差施用および換気窓連動施用が少ない傾向を示した(第6表)。

月別可販果率は、炭酸ガス施用の有無で異なる傾向を示した。炭酸ガス無施用では、12月以降減少傾向を示したが、ゼロ濃度差施用および換気窓連動施用は12月から2月まで可販果率80%を維持した(第6図)。



第6図 月別可販果率の推移

可販果1果重は、11月および12月は炭酸ガス施用の有無や施用方法に関わらず、同程度であったが、1月から3月の期間は、無施用、ゼロ濃度差施用、換気窓連動施用の順で重くなる傾向があった(第7図)。



第7図 可販果1果重の推移

不良果のうち1果重90g以下である小果の果数は、炭酸ガス無施用およびゼロ濃度差施用と比べて換気窓連動施用が少なく、寡日照期間は有意に減少した。また、角張り空洞果数は、炭酸ガス無施用と比べて、ゼロ濃度差施用および換気窓連動施用では減少する傾向を示した(第7表)。

第3表 葉の大きさ及び茎径

1) 調査日：1/12

炭酸ガス処理	葉の大きさ <sup>a)</sup>			茎径 <sup>c)</sup>				
	葉面積 (cm <sup>2</sup> )	乾物重 (g)	比葉面積 <sup>b)</sup> (cm <sup>2</sup> /g)	果房1下 (mm)	果房2下 (mm)	果房3下 (mm)	果房4下 (mm)	果房5下 (mm)
無施用	965.1 a	4.2 a	0.23 a	15.1 a	15.8 a	14.1 a	14.5 a	17.4 a
ゼロ濃度差施用	988.6 a	4.8 a	0.21 a	14.9 a	16.2 a	15.8 a	15.6 a	16.5 a
換気窓連動施用	975.1 a	4.5 a	0.22 a	14.7 a	16.8 a	16.2 a	16.2 a	17.5 a

2) 調査日：2/26

炭酸ガス処理	葉の大きさ <sup>a)</sup>			茎径 <sup>c)</sup>				
	葉面積 (cm <sup>2</sup> )	乾物重 (g)	比葉面積 <sup>b)</sup> (cm <sup>2</sup> /g)	果房1下 (mm)	果房2下 (mm)	果房3下 (mm)	果房4下 (mm)	果房5下 (mm)
無施用	852.4 a	4.4 a	0.20 a	14.6 a	15.3 a	15.8 a	15.9 a	15.9 a
ゼロ濃度差施用	921.4 ab	5.4 ab	0.19 a	14.2 a	15.7 a	16.6 a	16.7 a	17.1 a
換気窓連動施用	1056.0 b	6.0 b	0.18 a	15.7 a	16.6 a	16.8 a	16.6 a	16.6 a

3) 調査日：3/15

炭酸ガス処理	葉の大きさ <sup>a)</sup>			茎径 <sup>c)</sup>				
	葉面積 (cm <sup>2</sup> )	乾物重 (g)	比葉面積 <sup>b)</sup> (cm <sup>2</sup> /g)	果房1下 (mm)	果房2下 (mm)	果房3下 (mm)	果房4下 (mm)	果房5下 (mm)
無施用	912.4 a	5.3 a	0.17 a	12.5 a	16.1 a	15.9 a	15.9 a	16.6 a
ゼロ濃度差施用	818.7 a	5.9 a	0.14 b	13.9 a	16.7 a	16.5 a	15.9 a	16.9 a
換気窓連動施用	920.6 a	6.2 a	0.15 b	14.0 a	16.8 a	16.3 a	17.4 b	17.8 a

a) 葉の大きさ：収穫果房より上位の最大葉を測定した。

b) 比葉面積：葉面積/乾物重

c) 茎径：生長点に近い着果果房から果房1、2・・・5とし、ノギスで測定した。

d) 列毎の異なるアルファベットにはtukey法により5%レベルで有意差あり(n=16)。

第4表 最終生育<sup>a)</sup>

炭酸ガス処理	収穫 段数 (段)	第1果 房まで (節)	総葉数 (枚)	茎径(mm) <sup>b)</sup>							
				1段下	2段下	3段下	4段下	5段下	6段下	7段下	8段下
無施用	20.4 a	10.6 a	68.9 a	13.7 a	17.6 a	17.3 a	19.0 ab	19.7 a	20.1 a	19.6 a	18.2 a
ゼロ濃度差施用	20.4 a	10.6 a	68.8 a	13.5 a	16.5 a	17.0 a	16.9 a	18.9 a	20.1 a	18.6 a	18.1 a
換気窓連動施用	20.3 a	10.6 a	68.1 a	13.7 a	17.0 a	17.7 a	19.7 b	19.7 a	20.4 a	19.4 a	18.1 a

炭酸ガス処理	茎径(mm) <sup>b)</sup>																		
	9段下	10段下	11段下	12段下	13段下	14段下	15段下	16段下	17段下	18段下	19段下								
無施用	15.9 a	16.8 a	17.8 a	17.3 a	17.5 a	18.3 a	18.3 ab	18.2 a	16.1 a	14.7 a	12.9 a								
ゼロ濃度差施用	16.2 a	17.9 a	17.4 a	16.8 a	16.9 a	16.9 a	18.4 a	18.7 a	18.2 a	15.6 b	13.5 a								
換気窓連動施用	17.3 a	18.0 a	17.5 a	18.0 a	19.5 a	19.2 b	19.3 b	18.8 a	17.2 a	14.9 ab	13.0 a								

a) 最終生育調査日：2016年6月2日, n=16

b) 茎径：各果房段下をノギスで測定した。

c) 列毎の異なるアルファベットにはtukey法により5%レベルで有意差あり(n=4)。

第5表 開花日<sup>a)</sup>

果房段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
無施用	9/6	9/18	9/26	10/4	10/14	10/23	11/1	11/10	11/22	12/5	12/17	1/2	1/17	2/1	2/15	2/25	3/6	3/15	3/23	4/1	4/8
ゼロ濃度差施用	9/6	9/18	9/26	10/4	10/13	10/23	10/31	11/11	11/20	12/2	12/17	12/30	1/13	1/30	2/13	2/24	3/6	3/15	3/24	4/2	4/7
換気窓連動施用	9/6	9/18	9/27	10/5	10/14	10/22	11/3	11/12	11/22	12/4	12/19	1/1	1/15	2/3	2/14	2/25	3/5	3/15	3/24	4/1	4/8

a) 栽培試験は、2015年9月1日に定植し、2016年6月2日まで実施した。

第6表 果数と収量

1：全期間（10～翌年6月）

炭酸ガス処理	可販果収量		可販果率 (%)	不良果収量		総収量	
	(果/株)	(kg/株)		(果/株)	(kg/株)	(果/株)	(kg/株)
無施用	52.4 a	10.1 a	71%	21.5 a	4.9 a	73.9 a	15.0 a
ゼロ濃度差施用	51.7 a ( 99%)	10.1 a ( 100%)	72%	20.1 a ( 94%)	4.3 a ( 88%)	71.8 a ( 97%)	14.4 a ( 96%)
換気窓連動施用	51.1 a ( 97%)	10.4 a ( 103%)	70%	21.5 a ( 100%)	5.3 a ( 108%)	72.6 a ( 98%)	15.7 a ( 105%)

2：冬春期（12～翌年4月）

炭酸ガス処理	可販果収量		可販果率 (%)	不良果収量		総収量	
	(果/株)	(kg/株)		(果/株)	(kg/株)	(果/株)	(kg/株)
無施用	34.4 a	6.3 a	72%	13.4 a	2.7 a	47.8 a	9.1 a
ゼロ濃度差施用	35.2 a ( 102%)	6.6 a ( 104%)	76%	11.1 a ( 83%)	2.1 a ( 76%)	46.3 a ( 97%)	8.7 a ( 96%)
換気窓連動施用	35.3 a ( 103%)	7.0 a ( 111%)	75%	11.6 a ( 86%)	2.7 a ( 101%)	46.8 a ( 98%)	9.8 a ( 108%)

3：寡日照期（1～3月）

炭酸ガス処理	可販果収量		可販果率 (%)	不良果収量		総収量	
	(果/株)	(kg/株)		(果/株)	(kg/株)	(果/株)	(kg/株)
無施用	20.3 a	3.5 a	73%	7.4 a	1.3 a	27.7 a	4.8 a
ゼロ濃度差施用	22.8 a ( 112%)	4.2 a ( 118%)	80%	5.7 a ( 77%)	0.9 a ( 71%)	28.5 a ( 103%)	5.1 a ( 105%)
換気窓連動施用	21.6 a ( 106%)	4.2 a ( 120%)	80%	5.5 a ( 75%)	1.2 a ( 90%)	27.1 a ( 98%)	5.4 a ( 112%)

a) ( )内は炭酸ガス無施用比、列毎の異なるアルファベットにはtukey法により5%レベルで有意差あり(n=4)。

第7表 不良果数<sup>a)</sup>

炭酸ガス処理	小果(90g以下)			角張空洞果		
	全期間 (10~翌年6月)	冬春期 (12~翌年4月)	寒日照期 (1~3月)	全期間 (10~翌年6月)	冬春期 (12~翌年4月)	寒日照期 (1~3月)
無施用	2.6 ( 3% ) ab	2.4 ( 5% ) ab	1.8 ( 6% ) a	4.5 ( 6% ) a	3.4 ( 7% ) a	2.9 ( 10% ) a
ゼロ濃度差施用	4.0 ( 6% ) a	3.2 ( 7% ) a	1.9 ( 7% ) a	2.1 ( 3% ) a	1.3 ( 3% ) a	1.3 ( 4% ) a
換気密運動施用	1.6 ( 2% ) b	1.3 ( 3% ) b	0.6 ( 3% ) b	3.3 ( 4% ) a	2.4 ( 5% ) a	2.3 ( 8% ) a

炭酸ガス処理	その他 <sup>b)</sup>		
	全期間 (10~翌年6月)	冬春期 (12~翌年4月)	寒日照期 (1~3月)
無施用	14.4 ( 20% ) a	7.6 ( 16% ) a	2.8 ( 10% ) a
ゼロ濃度差施用	14.0 ( 19% ) a	6.6 ( 14% ) a	2.6 ( 9% ) a
換気密運動施用	16.6 ( 23% ) a	7.8 ( 17% ) a	2.6 ( 10% ) a

a) その他:乱形果、チャック・窓空き果、裂果、すじ腐れ果、着色不良果等

b) ( )内は期間毎の不良果率、列毎の異なるアルファベットにはtukey法により5%レベルで有意差あり(n=4)。

#### IV 考察

光合成速度は、炭酸ガス濃度の増加に伴って増加するが、光条件によって傾向が異なった。この結果は、吉田<sup>6)</sup>の報告と一致するものであった。本研究では、光合成能力の高い上位葉で光条件を弱光、中光、強光の3段階に分けて測定したが、吉田の研究ではトマト垂直誘引における開花段である14段下の上位葉、12段下の中位葉、9段下の下位葉で測定した。本研究の強光時の曲線と吉田の上位葉の曲線、本研究の中光時の曲線と吉田の中位葉の曲線とが同様の傾向にあった。このことから、葉位によって葉が受けるPPFDは異なることが示唆された。葉が受けるPPFDが中光条件とした500 μmol/m<sup>2</sup>/s以上の場合、炭酸ガス濃度が300ppmから1000ppmまでは右肩上がりに増加するが、1000ppm以上では、増加幅が小さくなるため、ハウス内で炭酸ガスを施用する場合は、1000ppm程度を上限に炭酸ガス濃度を高めると光合成速度の増加に効果的であると考えられる。

一方、古在・大山ら<sup>7)</sup>は、日本の冬期におけるハウス栽培作物への炭酸ガスの施用は、ハウス内炭酸ガス濃度を700~1000ppm程度で維持した場合、ハウスの換気口を全閉にした場合でも、施用した炭酸ガスの大半がハウスの換気口以外の隙間から外に漏れるため、炭酸ガス施用効率が低下すると報告した。しかし、炭酸ガス濃度を高くすることによる光合成促進効果は、冬期ではPPFDが増す程高いとも報告しており、炭酸ガスを効果的に施用するには、炭酸ガスの施用量とタイミングを併用した施用方法が必要であると報告している。

また、本研究のPPFDと炭酸ガス濃度が光合成速度に及ぼした結果は、東出<sup>8)</sup>の報告とも一致している。東出は、炭酸ガス濃度が高まると、同じPPFDでも光合成速度が増加し光利用効率が向上すると報告している。総乾物生産は、積算受光量と光利用効率によって決まる。しかし、誘引高が決まっている条件下で長期間栽培するトマトでは、定植後しばらくの期間を除き、LAI (m<sup>2</sup>当た

りの葉面積: Leaf Area Index)は高く維持されるため、積算受光量の増加は困難である。そのため、収量や生育量を増加させるには、光利用効率を向上させることが効果的であると報告している。以上のことから、炭酸ガス施用は、光利用効率を向上させ、総乾物生産を増加させる手段として有効であると考えられる。

本研究の結果、本県のトマト促成栽培で炭酸ガスを施用しない場合、12月から2月までの期間では、日中のハウス内炭酸ガス濃度は300ppm程度であったことから、ハウス内の炭酸ガス濃度を高めることで葉の光合成速度を増加させ、光利用効率を向上させる効果が期待できる。

また、本研究で検討したゼロ濃度差施用と換気密運動施用は炭酸ガス無施用と比べて、栽培期間中の葉面積や茎径等の生育量が増加する傾向があり、その傾向は、ハウス内平均炭酸ガス濃度が高い換気密運動施用がゼロ濃度差施用と比べて大きかった。この結果は、長岡ら<sup>9)</sup>の報告と一致するものであり、炭酸ガス濃度上限1000ppmまでの範囲では、ハウス内炭酸ガス濃度が高い方が、光合成速度が高まり、生育量が増加したことが示唆された。また、本研究結果では、換気密運動施用は炭酸ガス無施用と比べて、2月26日の葉面積および葉の乾物重、1月下旬から2月中旬に開花した14段および15段下の茎径が有意に増加した。これは、12月から3月の期間における炭酸ガス無施用の平均ハウス内炭酸ガス濃度が2月に期間最低となり、光合成量が低減したため、ハウス内炭酸ガス濃度が高く推移した換気密運動施用と生育面で有意な差が生じたと推察された。

一方、葉数や開花日、成熟日数は、炭酸ガス施用の有無に関わらず、同程度であった。これは、長岡ら<sup>9)</sup>や川島ら<sup>10)</sup>の報告と一致する。東出<sup>5)</sup>はトマトの花房は3葉毎に出現することから、花房の出現速度は、葉の展開速度によって決定されるものであり、トマトの葉の展開速度は、主に温度で決まると報告している。そのため、温度管理を統一した本研究では、炭酸ガスの処理間で葉

数や開花日、成熟日数が同程度であったことが考えられた。

本研究では、炭酸ガス施用による可販果収量の増収効果は、冬春期間の限定であり、増加要因は果数の増加に比べ1果重の増加による影響が大きかった。この結果は、川島ら<sup>10)</sup>、加藤ら<sup>11)</sup>、川上ら<sup>12)</sup>等多くのトマトの炭酸ガス施用を検討した先行研究と同様であった。トマトは、栽培管理上、摘果を行うため、可販果収量の増収要因は1果重によるものが主である。今回の結果から、炭酸ガス施用は可販果1果重の増加に効果的であることが確認できた。また、本研究で炭酸ガス施用による増収効果が特に高かった12月から3月の寡日照期間は、1果重90g以下の小果や角張り空洞果の発生による可販果率の低下および可販果1果重の減少が問題となる。角張り空洞果は、果肉部とゼリ一部に隙間が生じ、果実の中に空洞が出来、商品価値が低下する<sup>13)</sup>。発生要因は、果実肥大に見合う同化養分の移行が不十分な時に発生し、日照不足等によって光合成量が低下した場合や果実以外の器官のsink能が有意になり過繁茂になった場合に発生しやすいと言われている。そのため、本県のような冬季の日射量が少ない環境下では、炭酸ガスを施用しない場合には、ハウス内炭酸ガス濃度が低くなるため光合成量が減少し、小果や角張り空洞果の発生が多くなることが推察された。また、本研究の結果、冬期の限られた日射環境下でも、炭酸ガス施用により光合成速度が高まり、果実肥大の促進や小果および角張り空洞果による不良果収量が減少したと考えられた。その傾向は、ハウス内炭酸ガス濃度を効果的に高めることが出来た換気窓連動施用がゼロ濃度差施用と比べて大きく、1月から3月の寡日照期間で炭酸ガス無施用と比べて、有意に小果数を減少することが出来た。

以上のことから、本県のトマト促成栽培における炭酸ガス施用は、可販果1果重の増加および小果や角張り空洞果のような冬春期に問題となる不良果収量を減少させることがわかった。その増収効果は、寡日照環境となる1月から3月の期間で特に高い傾向を示した。また本研究で検討した、ゼロ濃度差施用と換気窓連動施用では、よりハウス内炭酸ガス濃度を高めることが出来た換気窓連動施用の方が、増収効果が高かった。

但し、本研究で用いた換気窓連動施用のように炭酸ガス利用効率を踏まえた施用方法では、日射量の少ない冬期であっても晴天でハウス内温度が高くなり換気窓が解放する条件では、ハウス内の炭酸ガス濃度は外気並に推移する。このため、増収の効果は外気象の影響を受けやすいことが示唆された。

## V 謝辞

本研究を実施するにあたり、清田正晴技師には、ほ場管理および各種調査に多大なるご尽力を頂いたので、ここに感謝の意を表す。

## VI 引用文献

- 1) 熊本県 (2019) : くまもとの農林水産業 2019.52.
- 2) 「熊本県地産地消サイト」. 熊本県, 熊本.  
[http://cyber.pref.kumamoto.jp/Chisan/imgkiji/pub/detail.aspx?c\\_id=10&id=467](http://cyber.pref.kumamoto.jp/Chisan/imgkiji/pub/detail.aspx?c_id=10&id=467) (2018年1月8日閲覧)
- 3) 浜本 浩 (2016) : 「光合成産物の転流と分配」, 養賢堂, 117
- 4) 吉岡 宏・高橋 和彦 (1979) : 果菜類における光合成産物の動態に関する研究 II トマトの生育に伴う14C同化産物の転流・分配と摘心およびしゃ光の影響. 野菜試験場報告, A. 6 : 71-84
- 5) 東出 忠桐 (2014) : 「最新農業技術野菜 vol.7」, 一般社団法人農山漁村分画協会, 50-51
- 6) 吉田 剛 (2014) : トマトの土耕長期どり作型における多収化技術. 農耕および園芸 89, 1093-1104
- 7) 古在豊樹, 大山克己 (2008) : 園芸施設の周年利用推進のための環境制御と苗生産(1). 農業および園芸 83, 286-291
- 8) 東出 忠桐 (2018) : 施設トマトの収量増加を目的とした受光と物質生産の関係の利用, 園学研, 17(2), 133-146
- 9) 長岡 正昭・高橋 和彦・新井 和夫・花田 俊雄・吉岡 宏 (1979) : 光の強さ・夜温・CO<sub>2</sub>濃度が施設トマトの生育・収量に及ぼす影響, 野菜試験場報告, 6, 105-122
- 10) 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CO<sub>2</sub>施用に関する研究(第4報) 果菜類の生育に対する効果, 奈良農業試験場研究報告, 24, 25-30
- 11) 加藤 美雪・番喜宏・樋江井清隆・大藪哲也 (2014) : トマトの長期栽培におけるCO<sub>2</sub>濃度および施用位置の違いが収量に及ぼす影響, 園芸学会, 13別1, 330
- 12) 川上 暢喜・中塚 雄介・清原 佑介・矢ヶ崎 和弘 (2017) : 生ガス式CO<sub>2</sub>施用における設定濃度の違いがトマトの収量と施用効率に及ぼす影響, 園芸学会, 16別2, 194
- 13) 鈴木 克己 (2014) : 「最新農業技術野菜 vol.7」, 一般社団法人農山漁村分画協会, 136-137



## Summary

### Two-Level Adjustable Carbon Dioxide Application by Interlocking Ventilation Windows in Tomato Forcing Cultivation Tends to Increase the Winter and Spring Fruit Yield and Number

Shiho TSUTSUMI, Hisao MURAKAMI, Junichi MIHARA, Tatsumi KOBAYASHI

(Agricultural Horticultural Research Institute)

In Kumamoto Prefecture, which provides the highest tomato production in Japan, the total harvested fruit weight is insufficient due to insufficient fruit enlargement, and there are reductions in the yield and number of tomato fruits sold in the winter and spring (December to April of the following year). The present study was conducted to investigate a new carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) application method that is effective in securing the harvest in winter and spring, and to obtain basic knowledge about the effects of the photosynthetic photon flux density (PPFD) and the CO<sub>2</sub> concentration on the photosynthetic rate of tomatoes, a forcing-type fruit. The photosynthetic rate was measured in a chamber device using the leaflets of tomatoes cultivated in Kumamoto. For this study, a cultivation test was conducted using the zero concentration difference (ZCD) application (the use of which is already widespread at production sites) and a ventilation window interlocking (VWI) application that adjusts and maintains the CO<sub>2</sub> concentration in the greenhouse at two levels based on the opening and closing of the ventilation window: 400 ppm at the time of opening, and 600 ppm at the time of closing. In the chamber test, the photosynthetic rate increased as the PPFD increased in the concentration range of 300–1000 ppm of CO<sub>2</sub>, and the rate of increase in the photosynthetic rate also increased as the CO<sub>2</sub> concentration increased. The PPFD in the greenhouse in the winter and spring was 600–1000 μmol/m<sup>2</sup>/s. The cultivation test results analyzed by a statistical multiple comparison demonstrated that there was no significant difference in the total yield weight of the ZCD application, the VWI application, or the yield weight of the sellable fruit compared to the non-application. However, the corresponding values for the VWI application tended to be higher than those for the non-application and ZCD application. Especially in the winter and spring, the total yield weight was 12% higher and the salable fruit yield weight was 7% higher in the VWI application compared to the ZCD application. The marketable fruit rate in the winter and spring was 70%–77% without application, but it increased to 76%–84% with the ZCD application and the VWI application. Based on these results, we note that the VWI application in the winter and spring effectively increases the photosynthesis rate and contributes to the increase in yield due to the increase in the sellable fruit yield and the sellable fruit rate compared to the non-application and the ZCD application.

Key words: tomato, infrared-reflecting material, shading, radial fruit cracking, yield