

福岡県農林業総合試験場特別報告

第 14 号

---

寡日照地域における促成トマト栽培の  
施設環境制御技術の開発

---

令和 5 年 3 月

福岡県農林業総合試験場

(福岡県筑紫野市大字吉木)

**SPECIAL BULLETIN**  
**OF**  
**THE FUKUOKA AGRICULTURE AND FORESTRY**  
**RESEARCH CENTER**  
**NO. 14**

Development of Environment Control Techniques for Forcing Culture of  
Tomato under Low Sunshine Region

by

Katsutoshi RYU

**THE FUKUOKA AGRICULTURE AND FORESTRY**  
**RESEARCH CENTER**

**Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan**

**March 2023**

寡日照地域における促成トマト栽培の  
施設環境制御技術の開発

龍 勝 利

2 0 2 3

\* 九州大学 審査学位論文



## 目次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 緒論                             | 1  |
| 第 2 章 寡日照地域における促成トマトの昼温管理技術          | 6  |
| 第 1 節 昼温の違いが乾物生産に及ぼす影響               | 6  |
| 第 2 節 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     | 11 |
| 第 3 節 促成トマト栽培における網入り果の発生に及ぼす昼温の影響    | 24 |
| 第 4 節 日中加温の熱負荷                       | 37 |
| 第 3 章 寡日照地域における促成トマトの湿度管理技術          | 46 |
| 第 1 節 熱交換器を用いた除湿換気がハウス内の気象環境に及ぼす影響   | 46 |
| 第 2 節 熱交換器を用いた除湿換気が促成トマトの収量・品質に及ぼす影響 | 57 |
| 第 4 章 総括                             | 67 |
| Summary                              | 71 |
| 謝辞                                   | 74 |
| 引用文献                                 | 75 |



## 第1章 緒言

トマト (*Solanum lycopersicum* L.) は、南アメリカ大陸北西部の高原地帯が原産とされ、わが国へはヨーロッパを經由して18世紀に渡来し、当初は観賞用として栽培されていたが、明治の初頭に再輸入され食用としての栽培が始まったと言われている(望月, 2010a)。世界におけるトマトの生産量は年間1億8,000万tで、現在、世界で最も多く生産されている野菜である(FAOSTAT, 2019)。わが国におけるトマトの生産量は72.4万t、販売額は2,379億円で、野菜の産出総額(2兆4,000億円)の約1割を占める経済的に最も重要な品目となっている(農林水産省統計部, 2020a, 2020b)。トマトは周年を通じて需要があることから、南北に長いわが国では、北海道から九州まで気候の違いを活かした生産地間のリレーによって、周年供給が実現している。地域や季節を問わずに栽培が可能となった主な要因は、1960年代以降、トマトの生育に必要な最低気温を維持可能な施設が普及した点にある。現在、わが国のトマト栽培面積(11,800 ha)のうち59%(6,974 ha)が施設栽培で、このうち加温設備を有する施設は57%(3,970 ha)を占めている(農林水産省農産局, 2020)。比較的温暖な地域である九州は施設園芸が広く普及しており、トマトの生産面積は2,270 ha、生産量は19万tで国内のトマト生産量の2割以上を産出する生産拠点となっている(農林水産省九州農政局, 2020)。このうち福岡県におけるトマトの生産面積は224 ha、生産量は1.8万tであり、作型は国内最大のトマト生産地である熊本県の出荷量が減少する時期にあわせるため、促成栽培が中心である。促成栽培では、9月下旬から10月に定植し冬季から春季にかけて収穫を行うため、生育前半は高温、収穫期は冬季の低温を経て再び春季の高温条件での栽培となり、換気装置や暖房機などの活用によって長期間の収穫を実現している。

現在のわが国におけるトマトの平均単収は、施設で栽培を行う冬春作では $10.3 \text{ t} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ であり、露地や簡易雨よけ栽培が中心となる夏秋作の $4.0 \text{ t} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ と比較して2倍以上である(農林水産省統計部, 2020a)。一方、施設園芸の先進国であるオランダにおけるトマトの平均単収は $50 \text{ t} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ を超えており、わが国の収量水準を大幅に上回る(斉藤, 2012)。その主な要因として、オランダでは1980年代以降に施設の性能や環境制御機器が高度化した点が挙げられる。施設栽培における気象環境制御の目的は、生育・成熟速度のコントロールと物質生産の増加によって収穫量を増やすことにある(東出, 2018)。わが国のトマトの促成栽培において収穫量を制限する主な気象要因は日射量であり、特に冬季の低日射の影響が大きい(山川, 1982)。トマトでは、人工光を利用した補光による増収効果が確認されており(浜本ら, 2010)、一部の大規

模温室では群落内部の補光等が試みられている事例はあるが、照明器具のインシヤルコストと電力コストに課題があり、普及していない。このため、商業的生産における冬季の低日射への対応は、透過率の高い被覆資材の利用やトマト群落の受光量を高める誘引・整枝（羽石・石原，2005）等、一部の栽培管理に限られる。従って、生産現場において実用性・汎用性の高い気象制御環境項目は、気温や湿度および二酸化炭素濃度等が中心となる。

トマトの気象環境制御に関する実用的研究のうち、まず温度に着目すると、昼の温度に対して夜の温度を低く保つことで、昼夜の温度を一定とした場合より生育が促進されることを示したWent（1943）の報告に始まり、育苗期や開花期の温度（斉藤・伊東，1962；佐藤，2006）、気温と地温の組合せ（佐々木・板木，1980）、果実の成熟日数や糖の転流と温度（Adams et al., 2001；堀，1983；北野ら，1998；大林，1986）等、その後の研究によって、トマトの栄養成長と果実生産のための適温は夜温17℃前後、昼温24℃前後であることが明らかにされている。適温を超えた場合の生育への影響については、花粉の稔性低下に起因する着果不良（Sato et al., 2006）、小果や尻腐れ果および裂果などの生理障害果の発生が助長されること（岩堀・高橋，1964；二井内・本多，1961；宇井・高野，1995）、呼吸量の増加による炭水化物の消耗（土岐，1970）等が報告されており、果実の収穫量を直接的に減少させる要因となっている。このうち高夜温については、ヒートポンプを用いた夜間冷房によって増収した研究例（Willits・Peet，1998）があるが、冷房コストが大きいため、育苗等の特殊な場合を除き、トマト栽培現場において冷房は行われていない。国内のトマト栽培ハウスには自動換気装置が広く普及しており、設定した上限温度を超える場合に被覆フィルムを巻き上げる自然換気や換気扇を用いた強制換気が行われている。換気能力を超える高温条件下で栽培を行う場合には、遮光カーテン（井手ら，2011）や気化冷却の原理を用いた細霧冷房（安場ら，2010）が組み合わせられる。一方、生育適温を下回った場合の生育への影響については、10℃以下の低温に長時間遭遇すると花粉稔性が低下すること（Fernandez et al., 1994）や、乱形果などの奇形果の発生が助長されること（藤村ら，1964；Hosoki et al., 1985，1990）が報告されており、低温は特に花器の形成過程において大きな影響を及ぼすことが明らかになっている。このため福岡県では、ハウス内の最低気温が10℃を下回る恐れのある11月上旬から5月上旬までの期間、夜間には二重被覆による保温や暖房機による加温が行われている。トマトをはじめとする施設果菜類の温度管理については、土岐（1970，1975）によって提唱された変夜温管理法が広く普及している。変夜温管理法は、光合成産物の転流が盛んな夕方から前夜半は温度を高め管理して転流を促進し、高夜半は呼吸によ



る消耗を抑制するために低温で管理するものであり、福岡県のトマト栽培では、加温に要する費用を考慮して加温開始温度は前夜半が15℃前後、高夜半が8～12℃に設定されている。一方、日中のハウス内気温は、日の出前後に短時間の加温を行う早朝加温（大原ら，2009）を除けば、ハウス内気温が前述の加温開始温度を下回することは少なく、生育適温を下回る気温の制御は、主に夜間における最低気温の制御が中心となっている。このように、促成栽培における温度制御は、最高気温と最低気温を管理目標として換気と加温を行う単純な環境制御しか実施されていない。

ところで、トマト栽培における湿度管理に関する実用的研究としては、ハウス内の湿度が高まり蒸散速度が低下すると、気孔開度が高まるため、光合成速度が僅かに高まること（長岡ら，1984）、相対湿度の上昇にともない葉の水ポテンシャルが上昇して水分ストレスが低減すること（荒木，1993）、加湿を行うことで収量や総乾物重が増加すること（Higashide et al., 2015）等が報告されており、過度な低湿度条件では生育が抑制されることが明らかとなっている。加湿制御は湿度と同時に気温を制御する必要があることから適切な運用は難しく、あまり普及していないが、熱収支法によって換気率と蒸発散速度を自動計算できる機器が近年開発（安場ら，2012）されており、今後導入する施設が増加すると予想される。一方、生産現地では、暖房用燃油価格の高騰を背景にハウスの多層化などが行われ、ハウスの気密性が高まる反面、ハウス内部は朝夕の時間帯を中心に多湿傾向にある。多湿環境では、果実や茎葉表面が結露して濡れが生じやすく（林，1985）、病害の発生が助長されることが報告されている（手塚ら，1983）。温室の除湿に関する研究としては、ヒートポンプ（小国，1982）や吸湿材利用（平・位田，2012）などの報告があるが、これらの除湿方法には多くのエネルギーを必要とすることから導入は進んでいない。一方、冬季においては、絶対湿度が低い外気をハウス内に導入することで容易に除湿できるため、生産現地では午前中を中心に除湿を目的とした換気を行うことが多い（稲田ら，2011）。このように、促成栽培における湿度制御は、主に高湿度環境を改善するための除湿換気が中心となる。しかし、換気によって低温の外気をハウス内に導入する場合、ハウス内の気温の低下（龍，2012）とともに二酸化炭素濃度への影響（河野，1987）についても留意する必要がある。

ハウス内の二酸化炭素濃度に関する気象学的研究として、特に日の出後から換気前の濃度低下が顕著であること（伊東，1970）、ハウスを密閉して管理する時間が長い寡日照地域では、二酸化炭素濃度が低下しやすいこと（吉岡，1990）、晴天日には換気中にも二酸化炭素濃度低下が認められるが（矢吹・今津，1965）、換気扇を用いた強制換気によりトマト群落内部の濃度低下を軽減できること

(伊東, 1972) 等, 日射や換気条件と二酸化炭素濃度との関連が明らかとなっている。つまり, 除湿を目的として主に午前中に行われる換気は, ハウス内の気温低下と二酸化炭素供給の両面から, トマトの物質生産に影響を及ぼしていると考えられる。

以上のように, トマト促成栽培における施設環境制御は, 最高気温と最低気温を管理目標にして日中の換気と夜間の加温を行う温度制御を基本としており, 加えて午前中には除湿のための換気を行うのが一般的である。

福岡県のような冬季の寡日照地域では, 冬季にハウス内の気温が高まりにくく, 生育適温より2~4℃高めに設定された換気開始温度に到達することは少ない。その一方で, 外気温が0℃であっても一定の日射があれば, ハウス内の気温は15℃以上に維持されることが多く(古在ら, 1982), 換気装置や加温機が冬季の日中に稼働する時間は短い。これらが要因となり, ハウス内の気温は生育適温より低く推移し, 湿度が高く, 二酸化炭素濃度が低下しやすい等, 光環境以外にもトマトの生育にとって不適な条件(龍, 2012; 稲田ら, 2011)となり, 光合成速度や同化産物の分配といった物質生産に直接作用(土岐, 1995)するだけでなく, 障害果や糸状菌等による病害の発生(手塚ら, 1983)にも悪影響を及ぼすと考えられる。

このように, 冬季寡日照地域では, 物質生産を行う日中において, ハウス内の気象環境に多くの課題が残されていることから, 増収に繋がる気象環境制御技術の開発が強く求められている。

そこで本研究では, ハウス内の気象環境のうち, 主に冬季の低日射が要因となって発生する低温, 高湿度および低二酸化炭素濃度という日中の不適環境について, 加温と換気を積極的に行うことによってトマトの生育に適する範囲に制御する施設環境制御技術の開発を試みた。

日中の不適環境に関して, まず低温に注目すると, 土岐(1975)は日中のハウス内気温が15℃の条件では, 25℃より大幅な生育抑制が認められることを指摘しており, ハウス内気温を生育適温に維持することで, 生育促進や増収に繋がると考えられる。しかし, ハウス内の気温を適温に制御して, 物質生産や形態形成等について定量的に検討した事例は極めて少なく, 飛川(2007)がナスにおいて日中に加温すると, 稔性花粉重量が増加し, 着果率および収量が高まったことを報告した以外に見当たらない。そこで本研究では, 第2章において, 冬季の日中加温がトマトの生育や乾物生産に及ぼす影響について明らかにした。また, 加温コストを評価するため, 日中の加温の熱負荷についても検討した。

次に, 高湿度に注目すると, 林(1985)は熱交換器を利用した除湿換気法の

開発を行い、熱交換器を介して換気することで、排気の顕熱と潜熱の一部を給気側に顕熱として伝え、低湿な外気を絶対湿度を変化させることなく気温のみを高めてハウス内に導入でき、通常換気よりも換気に伴う気温低下を抑制できることを報告している。しかし、その利用が作物の収量や品質に及ぼす影響については言及されていない。そこで本研究では、第3章において、冬季日中の熱交換器を用いた除湿換気が、トマトの収量・品質に及ぼす影響について明らかにした。

## 第2章 寡日照地域における促成トマトの昼温管理技術

### 第1節 昼温の違いが乾物生産に及ぼす影響

#### 緒言

トマトの昼温管理に関する研究としては、古くは昼の温度に対して夜間の温度を低く保つことで、昼夜の温度を一定とした場合より生育が促進されることを示した栽培試験（Went, 1943）に始まり、その後、育苗期の温度（斎藤・伊東, 1962）、果実の成熟日数（Adams et al., 2001; 大林, 1986）や糖の転流（北野ら, 1998）に関する研究等によって、トマトの栄養成長と果実生産における昼温の適温は24℃前後であることが明らかにされている。一方、実際の栽培ハウスにおける昼温制御は、被覆フィルムの巻き上げ換気によってハウス内気温の上昇を抑制する方法が一般的である。換気能力を超える高温条件で栽培を行う場合には、細霧冷房（安場ら, 2010）やパットアンドファン（渡邊ら, 2014）のような潜熱を利用した昇温抑制技術や遮光（井手ら, 2011）等が組み合わせられる。このように、昼温制御は昇温の抑制を中心に検討されてきた。その一方で、適温を下回る15℃の条件では25℃より大幅な生育抑制が認められるが（土岐, 1975）、生育や収量等の物質生産および形態形成等について定量的に検討した事例は極めて少なく、飛川（2007）がナスにおいて適温に制御するため日中に加温すると、稔性花粉重量が増加し、着果率および収量が高まったことを報告した以外に見当たらない。そこで本章では、寡日照地域における増収につながる昼温管理方法として日中の加温が有効かどうか検討することを目的として、まず初めに、第1節として、トマトの収量と密接な関連のある乾物生産（東出, 2018）に及ぼす昼温の影響を人工光利用型の閉鎖型育苗施設を用いて検討した。

#### 材料および方法

##### 1. トマト幼苗の乾物重に及ぼす昼温の影響

実験は、福岡県農林業総合試験場（福岡県筑紫野市）内の人工光利用型棚式育苗施設（SILHOS, 徳寿工業（株））3室を用いて行った。昼温設定時間を8～16時、夜温設定時間を16～8時とした。昼温は曇雨天日を想定した16℃、日中加温を想定した20および24℃とし、夜温はいずれも10℃とした。光源には調光が可能な3波長形昼白色蛍光灯（FHF32EX-N-H, パナソニック（株））を用い、曇雨天日を想定して苗個体群上（光源からの距離15 cm）の光合成有効放射（Photosynthetically Active Radiation, 以下PAR）を5, 10, 15および25 W・m<sup>-2</sup>の

4水準、明期は8～16時の8時間（明暗周期24時間）とした．本実験で用いた蛍光灯のスペクトル分布は、ほとんどが光合成有効放射波長領域内（400～700 nm）にあるため、測定波長域が400～1100 nmの日射センサー（ML-01, 英弘精機（株））を用いて計測した短波放射束密度を光合成有効放射とみなした．また、光量子センサー（ML-020P, 英弘精機（株））を日射センサーとともに設置して、使用した蛍光灯の短波放射束密度から光合成光量子束密度（Photosynthetic Photon Flux Density, 以下PPFD）に換算する係数 $4.66 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ を求めた．トマト‘CF桃太郎はるか’を2017年6月26日に播種し、15日間育苗（光合成有効放射を $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、気温を昼温 $25^\circ\text{C}$ ／夜温 $15^\circ\text{C}$ ）した後、上記の条件に設定した各棚に移動させて処理を行った．育苗には、粒状の培養土（くみあい黒粒培土、全農）を充填した128穴のセルトレイ（長さ600 mm×幅300 mm×高さ43 mm）を32穴ごとに切断し、4等分して用いた．施肥は、OK-F-1（N :  $\text{P}_2\text{O}_5$  :  $\text{K}_2\text{O}$  = 15 : 8 : 17, OATアグリオ（株））の2,000 倍希釈液を用いて、かん水と同時に1日当たり2回（9時および13時）、底面給液により行った．処理開始1日目および25日目に苗をサンプリングし、茎葉および洗い出した根の乾物重をそれぞれ測定して、処理期間中における乾物増加量を算出した．茎葉と根の乾物増加量の和を総乾物増加量、総乾物増加量に占める各器官の重量割合を分配率とした．乾物重は、1区当たり16株をまとめて測定し、3反復した．苗個体群上に入射した光合成有効放射当たりの総乾物増加を光利用効率（Light Use Efficiency, 以下LUE）とした．

## 2. 統計解析

統計解析はアドインソフト「エクセル統計」（（株）社会情報サービス）を用いて二元配置分散分析およびTukey法による多重検定を行った（第2節以降も同様）．

## 結 果

処理期間中の総乾物増加量、各器官への分配率および光利用効率（LUE）を第2-1表に示す．曇雨天日を想定した光合成有効放射 $5 \sim 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ の光条件における総乾物増加量には、光強度、昼温による有意差とともに、昼温と光強度との交互作用も認められた．多重比較検定を行った結果、光合成有効放射 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では昼温による有意差が認められず、 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $16^\circ\text{C}$ と $24^\circ\text{C}$ の間にのみ有意差が認められた．一方、 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $16^\circ\text{C}$ と $20^\circ\text{C}$ 、 $24^\circ\text{C}$ の間に有意差が認められ、 $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では、すべての温度区間に有意差が認められた．乾物の分配率には、光強度および昼温による影響は認められず、茎葉では82～95%、根では5～18%であった．光合成有効放射当たりの総乾物増加量で示したLUEは、光合

成有効放射 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $16^{\circ}\text{C}$ と $24^{\circ}\text{C}$ の間にのみ有意差が認められた。また、 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  および $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $16^{\circ}\text{C}$ と $20^{\circ}\text{C}$ および $16^{\circ}\text{C}$ と $24^{\circ}\text{C}$ の間に有意差が認められ、 $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では、これに加えて $20^{\circ}\text{C}$ と $24^{\circ}\text{C}$ の間にも有意差が認められた。

## 考 察

生育に及ぼす環境要因の影響を明らかにするためには、光合成速度および一定期間の乾物生産の評価が不可欠である（長岡ら，1985）。日射量が少ない曇雨天日における日中加温の生育促進効果を評価する目的で、弱光条件下の乾物生産について、昼温を $16^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ および $24^{\circ}\text{C}$ に制御して検討した。本実験における総乾物増加量には、光合成有効放射と昼温による有意差が認められるとともに交互作用が認められ、光合成有効放射が $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上では昼温を $16^{\circ}\text{C}$ から $24^{\circ}\text{C}$ に高めた場合、 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $16^{\circ}\text{C}$ から $20^{\circ}\text{C}$ 、さらに $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $20^{\circ}\text{C}$ から $24^{\circ}\text{C}$ に高めた場合にも有意に大きくなった。以上の結果から考察すると、光合成有効放射 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ の光条件下では $16^{\circ}\text{C}$ から $24^{\circ}\text{C}$ の範囲で、昼温を一定期間高めても乾物生産量の増加は認められない一方、 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上の光条件では昼温を高めることにより乾物生産量が増加することが明らかとなった。

トマトの乾物生産量は、光利用効率と積算受光量によって決まる（東出，2018）。本実験において、各光合成有効放射の各昼温における総乾物増加量ならびにLUEの値は、 $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では、どちらも $24^{\circ}\text{C}$ が最も高く、次に $20^{\circ}\text{C}$ 、最も低いのが $16^{\circ}\text{C}$ であった。同様に $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では、どちらも $24^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ が $16^{\circ}\text{C}$ より、 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $24^{\circ}\text{C}$ が $16^{\circ}\text{C}$ より高かった。一方、 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では昼温処理区間に総乾物増加量の有意な差はなかった。これらの結果から、光合成有効放射 $25$ 、 $15$ 、 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では昼温の上昇に伴ってLUEが高まることにより、総乾物重が増加することが示唆された。東出（2018）は、トマト葉の受光量当たりの乾物増加量で示した光利用効率について、およそ $2 \sim 4 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ の範囲内にあると報告している。本実験のLUEは $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $1.0 \sim 4.0 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 、 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $0.8 \sim 2.9 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 、 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $0.8 \sim 3.1 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 、 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ では $0.4 \sim 1.9 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ であり、東出（2018）の報告より値がやや低かった。渋谷・古在（2001）は、トマト苗の群落上に入射した光エネルギーの利用効率は $0.04 \text{ MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$ （乾物重に換算すると $2.0 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ）程度であるが、葉面積指数が $1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 以下では植物体の間隙を透過して光合成に利用されない光の量が多くなるため、光エネルギーの利用効率が低下すると報告している。本実験ではLUE算出の際に植物体群落を透過した光を差し引かなかったため、LUEの値がやや低かったと推察された。

これらの結果を基に、実際のハウス栽培で日中において加温を実施する判断基準について考察すると、今回の実験では、光合成有効放射が $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上の



場合には昼温を16℃から20℃、10 W・m<sup>-2</sup>の場合には16℃から24℃に高めると総乾物増加量が有意に大きくなったが、20℃と24℃の加温に要する燃油コストを考慮（第4節で後述）すると、光合成有効放射15 W・m<sup>-2</sup>を加温の基準とするのが良いと判断した。一方、ハウス内に入射する光は被覆資材や骨材による反射や吸収によって低下し（古在ら, 1972a, 1972b）、建築基準法および消防法に適合したハウスにおける光透過率は日平均で54～60%、採光性の高い最新施設では80%であること（東出, 2018）が報告されている。また、垂直誘引したトマト群落内部は、成長点から120 cmより低い位置では、光の強さが群落上の30%以下となること（久枝ら, 2007）、日射のうち光合成有効放射の割合は約50%であること（大谷, 1997）が報告されている。トマト群落内部の光合成有効放射が15 W・m<sup>-2</sup>となる光環境は、群落上では50 W・m<sup>-2</sup>（群落内部で30%に低下）、屋外の日射では125 W・m<sup>-2</sup>（ハウスの光透過率を80%、太陽光の光合成有効放射の割合を50%）と試算される。従って、実際のハウス栽培で日中において加温を実施する判断基準としては、屋外の日射が概ね125 W・m<sup>-2</sup>以上が合理的であると考えられた。福岡県の冬季において、屋外の日射が125 W・m<sup>-2</sup>以上となる概ね9～16時の間（データ略）、ハウス内の気温が20℃以下の場合に加温することで効率的な加温の可能性が示唆された。

## 要 約

本研究では、弱光条件下において、トマトの乾物生産に及ぼす昼温の影響を検討した。その結果、光合成有効放射10～25 W・m<sup>-2</sup>の光条件下では、昼温を高めることにより光利用効率が高まり、乾物重が増加することが明らかとなった。

また、実際のハウス栽培で日中において加温を実施する判断基準としては、屋外の日射125 W・m<sup>-2</sup>以上となる概ね9～16時の間、ハウス内の気温が20℃以下の条件で加温することが合理的と考えられた。

第2-1表 光合成有効放射および昼温の違いがトマト苗の総乾物増加量、分配率および光利用効率 (LUE) に及ぼす影響

| 光合成有効放射 <sup>z</sup><br>(W・m <sup>-2</sup> PAR) | 昼温<br>(℃) | 乾物重 (mg/株) |     | 分配率 (%)          |    | LUE <sup>x</sup><br>(g・MJ <sup>-1</sup> ) |           |
|-------------------------------------------------|-----------|------------|-----|------------------|----|-------------------------------------------|-----------|
|                                                 |           | 処理前        | 処理後 | 増加量 <sup>y</sup> | 茎葉 |                                           | 根         |
| 25<br>(117)                                     | 24        | 3          | 97  | 94 a             | 86 | 14                                        | 4.0 a     |
|                                                 | 20        | 6          | 57  | 51 b             | 82 | 18                                        | 2.2 bcde  |
|                                                 | 16        | 4          | 27  | 23 cdef          | 83 | 17                                        | 1.0 gh    |
| 15<br>(70)                                      | 24        | 3          | 44  | 41 bc            | 87 | 13                                        | 2.9 abc   |
|                                                 | 20        | 6          | 41  | 35 bcd           | 82 | 18                                        | 2.4 bcd   |
|                                                 | 16        | 4          | 16  | 12 efg           | 87 | 13                                        | 0.8 gh    |
| 10<br>(47)                                      | 24        | 3          | 32  | 29 cde           | 89 | 11                                        | 3.1 ab    |
|                                                 | 20        | 6          | 26  | 20 defg          | 85 | 15                                        | 2.1 bcdef |
|                                                 | 16        | 4          | 12  | 8 fg             | 86 | 14                                        | 0.8 gh    |
| 5<br>(23)                                       | 24        | 3          | 12  | 9 fg             | 95 | 5                                         | 1.9 cdefg |
|                                                 | 20        | 6          | 12  | 5 fg             | 84 | 16                                        | 1.1 efgh  |
|                                                 | 16        | 4          | 6   | 2 g              | 88 | 12                                        | 0.4 h     |
| 光強度                                             |           |            |     | *** <sup>w</sup> | ns | ns                                        | ***       |
| 昼温                                              |           |            |     | ***              | ns | ns                                        | ***       |
| 交互作用                                            |           |            |     | ***              | ns | ns                                        | *         |

<sup>z</sup> ( ) 内の数値は光合成有効光子束密度 ( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) 変換値  
<sup>y, x</sup>異なる英文字間にはTukey-Kramerの多重検定により5%水準で有意差あり (n=3)  
<sup>x</sup>LUEは苗個体群上に投入された光合成有効放射当たりの総乾物増加量とした  
<sup>w</sup>\*\*\*, \*は二元配置分散分析 (分配率は逆正弦変換後の数値を用いた) により, それぞれ0.1%, 5%水準で有意差あり, ns は有意差なし



## 第2節 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

### 緒 言

第1節において、光合成有効放射 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上の光条件では昼温を $16^{\circ}\text{C}$ から $20^{\circ}\text{C}$ に高めることによって、光利用効率が高まり、乾物重が増加することを明らかにした（龍ら，印刷中）．この結果から、福岡県のような冬季の寡日照地域では、屋外の日射が $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上となる概ね9～16時の間、ハウス内の気温が $20^{\circ}\text{C}$ 以下の条件で加温することにより、乾物生産量が増加する可能性が示唆された．一方、乾物生産量には、光利用効率とともに積算受光量が大きな影響を与えること、積算受光量は葉面積や吸光係数によって決定し、草丈や葉面積指数（LAI）等の群落構造に影響を受けることが報告されている（東出，2018）．トマトの促成栽培では主枝を伸長させ、側枝はすべて摘除する1本仕立てが主流であり、斜め誘引やつる下ろしなどの誘引法によって栽培するのが一般的である（青木，1997）．このように、実際の栽培では、ハウスの軒高に応じた誘引・整枝が行われており、第1節で検討した幼苗とは群落構造が異なることから、慣行の栽培法で生育量や収穫量等について定量的な評価を行う必要があり、課題として残された．そこで、本節では、トマトの促成作型において、冬季の日中にハウス内を $20^{\circ}\text{C}$ に加温し、低昼温を回避することにより物質生産を高めることを目的として、生産現場で実際に利用可能な既存の暖房機を用いた加温方法（以下、日中加温）を考案し、光合成などの生体反応への影響ならびに増収効果について検討した．

### 材料および方法

#### 1. 栽培概要

実験は、2010年10月～2011年5月（2010年定植）および2011年10月～2012年5月（2011年定植）に行った．福岡県農林業総合試験場内の畑地圃場（砂壤土）に設置した間口6 m，奥行20 mの南北向き単棟パイプハウス2棟（東西方向並び）を供試し、両ハウスとも、外側には厚さ0.15 mmの農業用ポリオレフィン系フィルム，内側には厚さ0.075 mmの農業用塩化ビニル系フィルムを展張した．穂木に‘優美’（丸種（株）），台木に‘がんばる根’（愛三種苗（株））を供試し、両年とも9月8日に播種，9月24日（2011年定植は9月26日）に接ぎ木（割接ぎ）を行い，10月21日に畝幅135 cm，株間40 cm，1条植えて3畝に定植した．両ハウスとも各畝に26株，計78株を定植し，斜め誘引した．施肥は，OK-F-1（N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:8:17，OATアグリオ（株））の1,000～2,000倍希釈液を用いて，1日当たり7.5～60.0 mg-N/株

をかん水と同時に行った。着果促進処理には、トマトトーン（パラクロロフェノキシ酢酸 0.15%，石原バイオサイエンス（株））の 100 倍希釈液を用い、果房ごとに 3 花が開花した時点で果房全体に散布し、着果促進処理を行った日を各果房の開花日とした。各果房の第 1 果の直径が 40 mm 程度となった時点で、各果房当たり最大 4 果に摘果した。

## 2. 日中の加温処理方法

日中の加温処理期間は両年とも 1 月 4 日～2 月末日までとし、日中（9～16 時）の加温機の設定温度を日中加温区では 20℃、対照区では 8℃とした。夜間（16～9 時）は両区とも 8℃に設定した。日中の加温処理前および 3 月以降は、加温機の設定温度を両区とも終日 8℃とした。加温には白灯油を燃料とする温風暖房機（型式 EH-101F，出力 36.2 kW，フルタ電機（株））を用いた。外張りの換気開始温度は、両区とも 26℃とし、自動で開閉した。内張りは、23℃を目安に天井部分のフィルムのみ手動で開閉した。加温制御用、換気制御用およびハウス内の気温計測用の温度センサー（TR52，（株）ティアンドデイ）は、ハウス中央部で地上高 1.4 m 地点の強制通風筒内に設置した。

## 3. 果実収量の調査

果実の収穫は週 3 回行い、外観の形状で商品果と規格外果に分別し、それぞれについて果数および果重を測定した。商品果数を総収穫果数で除して 100 を乗じ、商品果率とした。栽培期間中、摘心は行わず、5 月末日まで栽培を継続した。実験は、1 区当たり 10 株を供し、3 反復した。

## 4. 葉の光合成速度および蒸散速度の調査

2012 年 1 月 24 日（晴天日）の 9～10 時に、果実肥大期であった 5 段果房の直下葉における光合成速度および蒸散速度を、携帯用光合成・蒸散測定装置（LI-6400，LI-COR，Inc.）を用いて測定した。チャンバー内温度は、日中加温による試験区間の気温差が最大となる加温開始直後の条件を想定して、日中加温区が 22℃、対照区が 12℃とし、両区とも光合成光量子束密度を  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，CO<sub>2</sub>濃度を 380 ppm，通気速度を  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$  に設定した。

## 結 果

### 1. ハウス内気温

日中加温を行った 2012 年 1 月 4 日～2 月 29 日（2011 年定植）におけるハウス内気温の日変化を第 2-1 図に示す。加温処理を行った 9～16 時のハウス内平均気温は、日中加温区では処理期間中の平均値は 22.8℃，曇天日の 2012 年 1 月 15 日が 20.4℃，晴天日の 2012 年 1 月 7 日が 22.1℃であり、対照区よりそれぞれ 3.4℃，3.8℃および 1.2℃高く、試験区間の温度差は特に曇天日において顕著であった。日中

加温を行った1～2月およびその前後1か月における9～16時のハウス内平均気温（以下、平均昼温）および16～9時のハウス内平均気温（以下、平均夜温）の推移を第2-2図に示す．平均昼温は、対照区では2010年が17.5～24.2℃，2011年が19.3～23.9℃，日中加温区では2010年が20.3～24.9℃，2011年が19.6～23.6℃で推移し，1月および2月は日中加温区が対照区より1.3～4.6℃高く，試験区間の温度差は特に2010年定植の1月において顕著であった．平均夜温は，両年とも試験区間差はなく10.9～13.4℃で推移した．

## 2. 開花日および収穫日

果房段位別の開花日および収穫日を第2-3図に示す．日中加温処理期間中に開花した果房は，両区とも2010年定植では6～9段果房，2011年定植では6～8段果房で，いずれも収穫日は4月であった．日中加温の有無と各果房の開花間隔および成熟日数を第2-2表に示す．日中加温処理期間中に開花した果房では，各果房の開花間隔は，日中加温区では2010年定植で13.8日，2011年定植で16.3日であり，対照区よりそれぞれ0.9日および2.3日短かった．一方，日中加温処理前に開花していた1～5段果房では，開花から収穫までの成熟日数は，日中加温区では2010年定植が89.0日，2011年定植が91.0日で，対照区よりそれぞれ3.8日および5.6日短かった．

## 3. 果実収量

1～2月および3月の商品果数・商品果収量は，日中加温区と対照区との間に有意な差が認められなかった（第2-3表）．一方，4～5月は日中加温区の商品果数が対照区より多くなり，日中加温区の商品果数は2010年定植では対照区より5.2果多い37.2果，2011年定植では対照区より1.9果多い37.9果であった．また，日中加温区では対照区と比較し，両年とも最終収穫果房段位が0.7段多く，総収穫果数が約2果多かった．果房当たりの平均収穫果数には，有意な差は認められなかった．商品果収量は，両年とも日中加温によって増加し，特に4月は対照区より2010年定植で879 g／株，2011年定植で377 g／株多く，増収効果が顕著であった．次に，日中加温の有無と平均1果重，商品果率を第2-4表に示す．商品果の平均1果重は，4月のみ日中加温区の方が対照区より重く，2010年定植で1.30倍，2011年定植で1.23倍であった．商品果率は，4～5月において試験区間に有意差が認められた．同期間の商品果率には，栽培年次と試験区間の交互作用も認められ，2010年定植の対照区で商品果率が特に低かった．商品果率に違いが認められた2010年定植における奇形果数を果房段位別および開花日別に第2-4図に示す．奇形果数は，8段果房から徐々に増加し，開花日が2月下旬～3月上旬であった9～10段果房（収穫日は4月下旬～5月上旬）では，日中加温区の奇形

果数が果房当たり0.2～0.4果で、対照区の0.7～1.1果より少なかった。奇形果となった主な要因は、乱形果および窓あき果であった（データ略）。

#### 4. 葉の光合成速度および蒸散速度

日中加温処理開始から20日後に果実肥大期の果房直下葉で測定した光合成速度および蒸散速度は、日中加温区が対照区のそれぞれ1.46倍および2.36倍となり、有意に大きかった（第2-5表）。

### 考 察

促成トマト栽培において単位面積当たりの商品果収量を決定する項目は、単位面積当たりの株数、株当たりの果房数、果房当たりの収穫果数、収穫果に占める商品果率および平均1果重が挙げられる。本実験では、このうち単位面積当たりの株数は、福岡県の慣行栽培（福岡県農林水産部，2014）に準じたため、日中加温区と対照区とは同等であった。また、果房当たりの収穫果数も慣行に準じてトマトトンによる着果促進処理を行うとともに、1果房当たり4果に摘果したので、日中加温区と対照区とは同等であり、単位面積当たりの収穫果数は株当たり果房数によって決定された。果房数を増加させるためには、開花を早めるとともに、開花から収穫までの期間を短縮させる必要がある。本実験において、2010年定植では6～9段果房、2011年定植では6～8段果房が日中加温処理期間中に開花し、開花間隔が対照区より短くなった。また、日中加温処理期間中に果実肥大期であった1～5段果房では、開花から収穫までの成熟日数が対照区より短縮して収穫果房の最終段位が0.7段進み、その結果、総収穫果数が対照区より約2果増加した。トマトの花芽分化から開花までに要する日数は高温ほど短く（斎藤，2004）、適温の範囲内では高温ほど果実の成熟日数が縮まること（Adams et al., 2001）が報告されており、本実験でも日中加温によって昼温が高まり、開花間隔および果実の成熟日数が対照区より短縮されたと考えられた。以上のことから、日中加温を行うことによって、開花間隔と成熟日数が対照区より短縮されて収穫果数が増加することが明らかとなった。

福岡県のトマト出荷規格は、果重や果実形状などの外観により細分化され、奇形果や障害の程度が著しい果実は規格外として分別される。本実験の商品果率には、栽培年次と試験区間に交互作用が認められ、2010年定植の対照区では4月下旬～5月上旬に収穫した9～10段果房で乱形果や窓あき果などの奇形果が果房当たり0.7～1.1果（果房当たり発生割合では18～28%）発生し、日中加温区より商品果率が低かった。中村ら（2001）は生産現地圃場における窓あき果の発生割合を調査し、最大13%程度であったと報告している。本実験では、窓あき果などの奇形果が4月下旬～5月上旬の短期間ではあるものの最大18～28%発

生した。乱形果および窓あき果は、花芽分化期前後の花房が低温に遭遇した場合に多く発生することが報告されている（藤村ら，1964；深澤ら，1993）。商品果率が低かった2010年定植の対照区では1月の平均昼温が17.5℃まで低下しており，この期間に花芽発達中であった9～10段果房で乱形果および窓あき果などの奇形果が多く発生したと推察された。

トマトの果重は，果実に輸送される水や糖などの集積に依存しており，明期中の気温上昇が葉における光合成だけでなく，果実の肥大生長と糖の転流を著しく促進させ（北野ら，1998），気温が高いほどトマト果実の肥大速度が速まること（大林，1986），トマト果実への転流は昼夜の別なく行われ，転流割合は，昼間：夜間が3：2であること（吉岡・高橋，1981）が報告されている。本実験の結果，日中加温区では対照区と比較し，小葉の光合成速度および蒸散速度が高まること，4月の平均1果重が対照区より重くなることが明らかとなった。4月に収穫した果房の開花日は，両年とも日中加温処理期間中の1～2月であったことから，開花前あるいは開花から果実肥大初期において，日中加温により昼温を高めることで果実への転流が増加して果重が増加する可能性が示唆された。また，日中加温によってハウス内の相対湿度が低下し，蒸散速度が高まったと推察されたが，過度な蒸散は水分ストレスとなる。本実験では，光合成速度が同時に高まったことから，9～16時の加温温度を20℃とした制御は気孔開度等に悪影響を与えない適切な水準であったと考えられた。

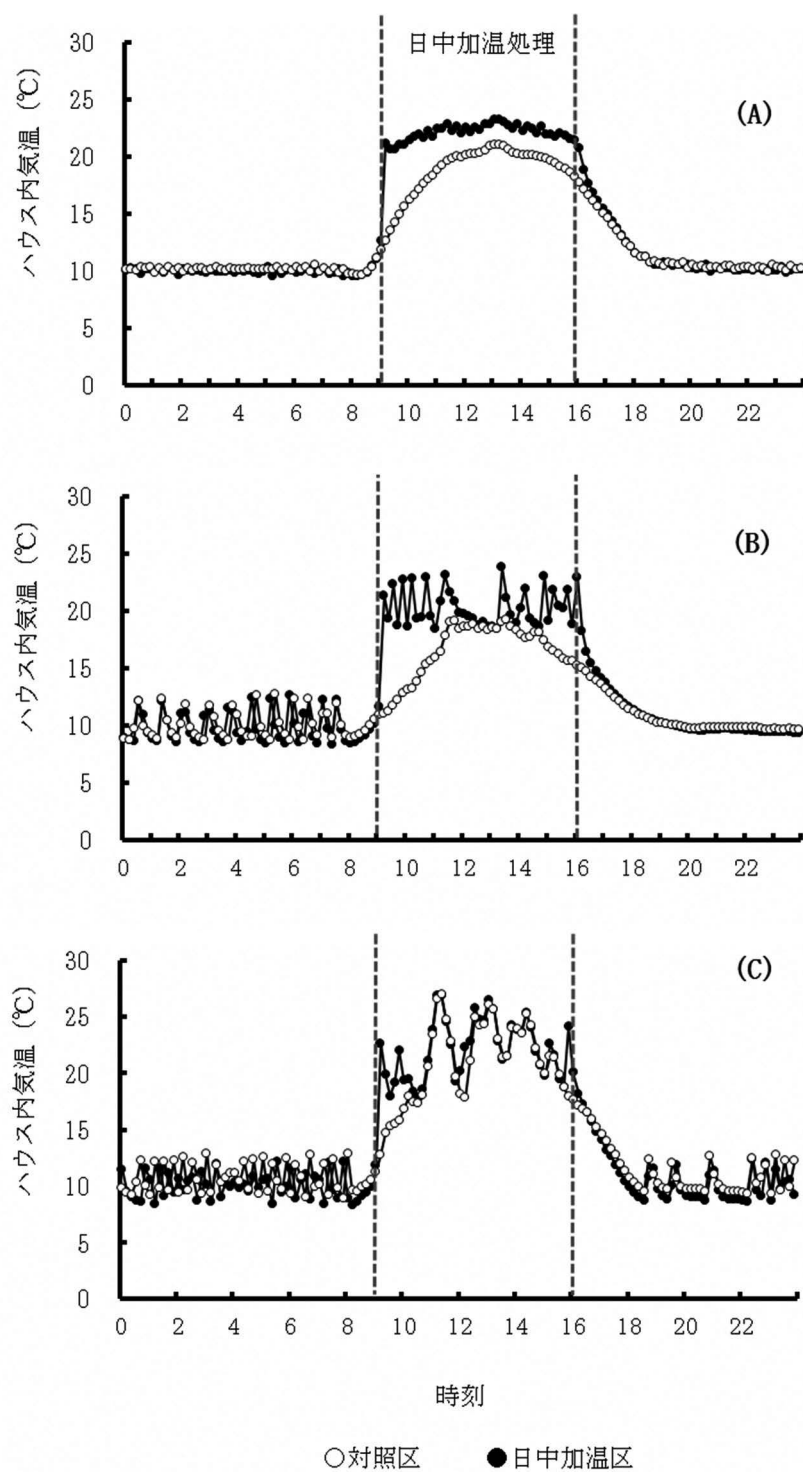
以上の結果から，単位面積当たりの商品果収量を決定する項目のうち，日中加温によって株当たり果房数，収穫果数に占める商品果率および平均1果重が向上し，単位面積当たりの商品果収量が増加することが明らかとなった。

促成トマト栽培の温度管理は，生育促進や暖房負荷の軽減などを目的として，1日をいくつかの時間帯に区分して異なる加温制御を行う変温管理が広く利用されている（高橋，1981a, 1981b）。今回行った日中加温は，方法としては日の出前後に短時間の加温を行う早朝加温と類似しており，午前中の光合成速度が速まる点では同様の現象が認められた。しかし，日中加温は，主に光合成を行う時間帯のハウス内気温を生育適温に維持するため9～16時の加温温度を20℃とし，特に低温となりやすい曇天日の日中に積極的な加温を行うものであり，天候によらず日の出前から加温する早朝加温（大原ら，2009）とは異なる加温方法である。また，実験結果から形態的異常果の発生や果実への転流にも関与していると推察されることから，日中加温の作用機作が，これまでの早朝加温と同様であるかについては，今後明らかにしていく必要がある。

## 要 約

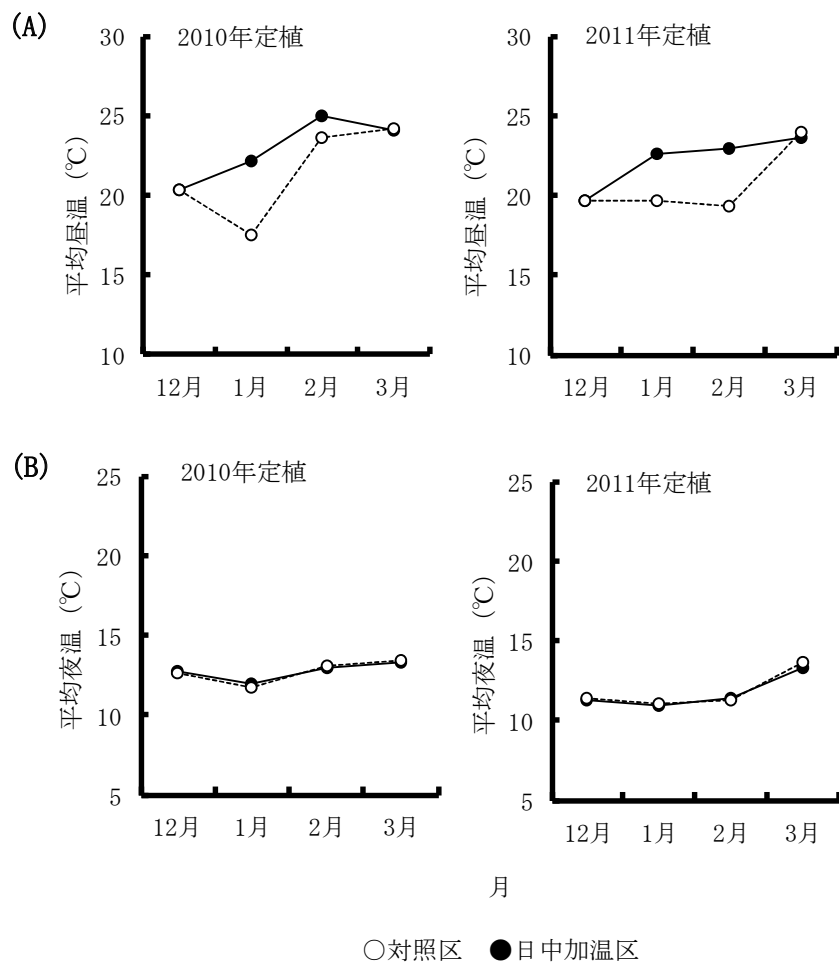
本実験では、日中の加温が商品果収量に及ぼす影響について検討した。1～2月の日中にハウス内の気温を20℃に加温し、昼温を高めることで、開花間隔ならびに果実の成熟期間が短縮され、奇形果が減少して商品果数が増加した。さらに、日中加温処理期間中に開花した果房において果実肥大が促進された。光合成速度が速まり物質生産が増加するとともに、果実への転流が増加して果重が増加したと推察された。これらの要因により、4～5月の商品果収量が増加することが明らかとなった。





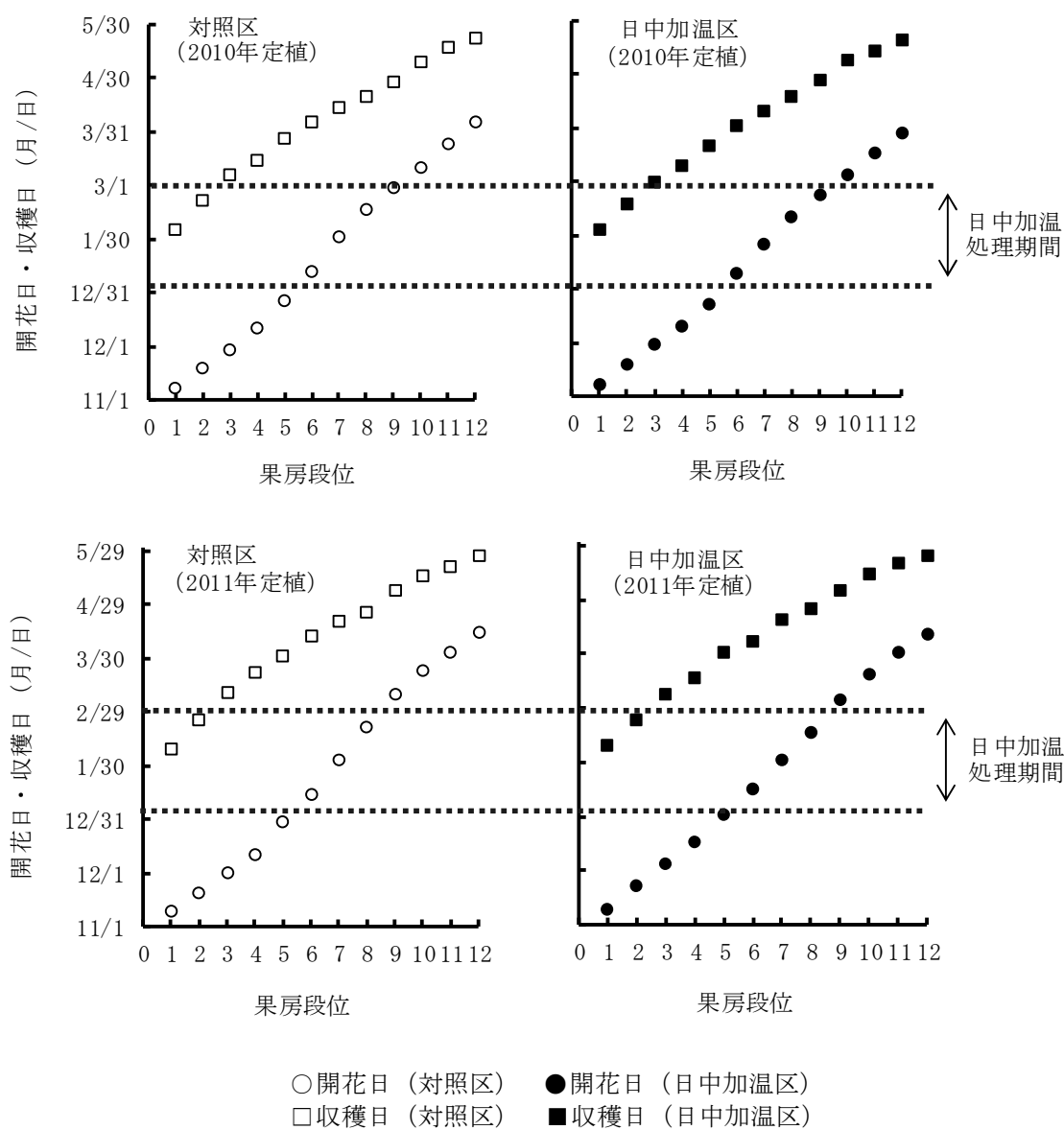
第2-1図 温度管理の異なる施設における気温の日変化

日中加温処理を行った2012年1月4日～2月29日に10分間隔で測定して、(A):同一時刻の値の平均値を計算し、時刻別平均値として示した、(B):2012年1月15日(曇天日)、(C):2012年1月7日(晴天日)



第2-2図 温度管理の異なる施設における平均昼温 (A) および平均夜温 (B) の推移  
 昼温は9:00~16:00, 夜温は16:00~9:00のハウス内気温をそれぞれ10分間  
 隔で測定し, 月別に平均して示した





第2-3図 冬季における日中の加温が開花日および収穫日に及ぼす影響

<sup>z</sup>開花日は、果房ごとに3花が開花した日とし、各果房段位ごとに平均して示した

<sup>y</sup>収穫日は、全収穫果実の収穫日を各果房段位ごとに平均して示した

第2-2表 日中の加温が開花間隔および成熟日数に及ぼす影響

| 栽培年次 | 加温方法 | 開花間隔 <sup>y</sup> (日／果房) |                  |                  | 成熟日数 <sup>x</sup> (日) |      |      |
|------|------|--------------------------|------------------|------------------|-----------------------|------|------|
|      |      | 処理前 <sup>w</sup>         | 処理中 <sup>y</sup> | 処理後 <sup>u</sup> | 処理前                   | 処理中  | 処理後  |
| 2010 | 日中加温 | 12.4                     | 13.8             | 11.3             | 89.0                  | 72.2 | 54.2 |
|      | 対照   | 13.1                     | 14.7             | 11.2             | 92.8                  | 69.7 | 53.4 |
| 2011 | 日中加温 | 13.4                     | 16.3             | 11.0             | 91.0                  | 76.0 | 49.6 |
|      | 対照   | 13.1                     | 18.6             | 10.9             | 96.6                  | 77.1 | 50.3 |
| 年次   |      | ns <sup>z</sup>          | **               | ns               | **                    | **   | *    |
| 加温方法 |      | ns                       | **               | ns               | **                    | ns   | ns   |
| 交互作用 |      | ns                       | ns               | ns               | ns                    | ns   | ns   |

<sup>z</sup>\*\*, \*は, 二元配置分散分析によりそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし

<sup>y</sup>第n果房の開花から第n+1果房の開花までに要する日数

<sup>x</sup>開花から収穫までに要する日数

<sup>w</sup>日中加温処理前に開花した果房を平均して示した

<sup>y</sup>日中加温処理期間中に開花した果房を平均して示した

<sup>u</sup>日中加温処理後に開花した果房を平均して示した

**第2-3表** 日中の加温が商品果数、総収穫果数、最終収穫果房段位、果房当たり平均収穫果数および商品果収量に及ぼす影響

| 栽培年次 | 加温方法 | 商品果数 (個／株)      |     |      |      |      | 総収穫<br>果数<br>(個／株) | 最終収穫<br>果房段位<br>(段) | 平均収穫<br>果数<br>(個／果房) | 商品果収量 (g／株) |       |       |       |       |
|------|------|-----------------|-----|------|------|------|--------------------|---------------------|----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
|      |      |                 |     |      |      |      |                    |                     |                      |             |       |       |       |       |
|      |      | 1～2月            | 3月  | 4月   | 5月   | 合計   |                    |                     |                      | 1～2月        | 3月    | 4月    | 5月    | 合計    |
| 2010 | 日中加温 | 7.8             | 7.8 | 10.8 | 10.8 | 37.2 | 40.4               | 13.0                | 3.1                  | 1,637       | 1,247 | 2,538 | 2,478 | 7,900 |
|      | 対照   | 7.3             | 7.3 | 9.2  | 8.2  | 32.0 | 38.3               | 12.3                | 3.1                  | 1,523       | 1,010 | 1,659 | 1,758 | 5,950 |
| 2011 | 日中加温 | 6.6             | 9.0 | 10.2 | 12.1 | 37.9 | 40.7               | 12.7                | 3.2                  | 1,350       | 1,318 | 1,929 | 2,610 | 7,208 |
|      | 対照   | 6.0             | 8.9 | 10.1 | 11.0 | 36.0 | 38.8               | 12.0                | 3.2                  | 1,223       | 1,230 | 1,552 | 2,377 | 6,382 |
| 年次   |      | ns <sup>z</sup> | *   | ns   | *    | *    | ns                 | ns                  | ns                   | *           | ns    | *     | ns    | ns    |
| 加温方法 |      | ns              | ns  | *    | *    | **   | *                  | *                   | ns                   | ns          | ns    | **    | *     | *     |
| 交互作用 |      | ns              | ns  | ns   | ns   | ns   | ns                 | ns                  | ns                   | ns          | ns    | ns    | ns    | ns    |

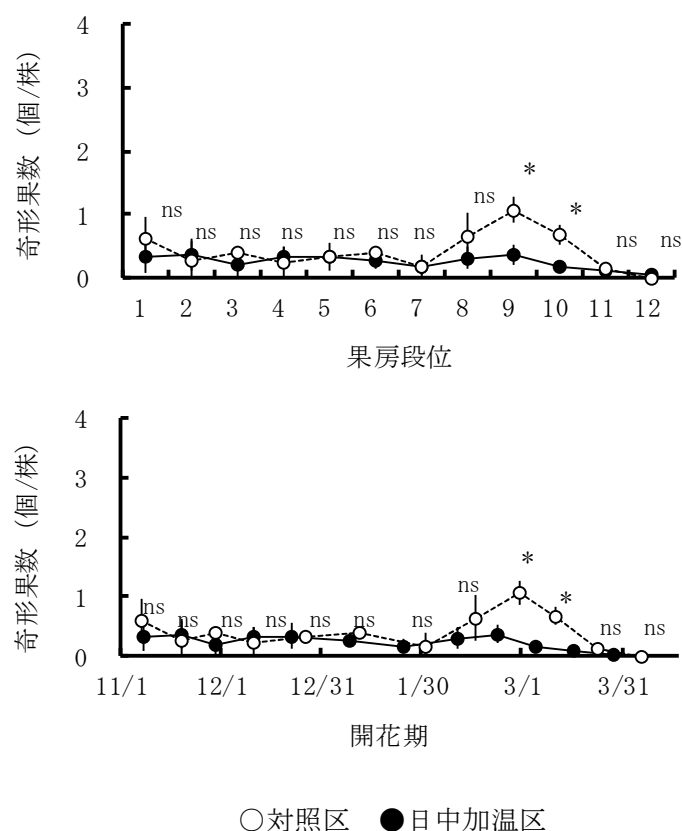
<sup>z</sup>\*\*, \*は, 二元配置分散分析によりそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし

第2-4表 日中の加温が平均1果重および商品果率に及ぼす影響

| 栽培年次 | 加温方法 | 平均 1果重 (g/個)    |     |     |     |     | 商品果率 <sup>y</sup> (%) |    |    |    |    |
|------|------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----------------------|----|----|----|----|
|      |      | 1～2月            | 3月  | 4月  | 5月  | 合計  | 1～2月                  | 3月 | 4月 | 5月 | 合計 |
| 2010 | 日中加温 | 209             | 161 | 236 | 229 | 213 | 90                    | 88 | 91 | 97 | 92 |
|      | 対照   | 208             | 138 | 181 | 214 | 186 | 89                    | 83 | 81 | 83 | 84 |
| 2011 | 日中加温 | 206             | 145 | 190 | 214 | 190 | 90                    | 92 | 93 | 96 | 93 |
|      | 対照   | 205             | 139 | 154 | 216 | 177 | 89                    | 94 | 92 | 95 | 93 |
| 年次   |      | ns <sup>z</sup> | ns  | *   | ns  | ns  | ns                    | *  | ** | ns | ** |
| 加温方法 |      | ns              | ns  | **  | ns  | ns  | ns                    | ns | ** | *  | *  |
| 交互作用 |      | ns              | ns  | ns  | ns  | ns  | ns                    | ns | *  | *  | *  |

<sup>z</sup>\*\*, \*は, 二元配置分散分析によりそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし

<sup>y</sup>アーカイブ変換後の数値を用いて統計処理を行った



第2-4図 果房段位および開花日ごとの奇形果数の推移（2010定植）

<sup>z</sup>縦棒は、標準偏差を示す（n=3）

<sup>y</sup>\*は、t検定により5%水準で有意差あり、nsは有意差なし

第2-5表 日中加温処理期間中の気温の違いが光合成速度および蒸散速度に及ぼす影響

| 加温方法 | 光合成速度 <sup>y</sup><br>( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 蒸散速度<br>( $\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 日中加温 | 16.2                                                                                  | 3.3                                                                          |
| 対照   | 11.1                                                                                  | 1.4                                                                          |
| t 検定 | ** <sup>z</sup>                                                                       | **                                                                           |

<sup>z</sup>\*\*は、t検定により1%水準で有意差あり（n=4）

<sup>y</sup>光合成速度および蒸散速度は、2012年1月24日の9～10時にチャンバー内温度を日中加温区では22℃、対照区では12℃に設定し、両区とも光合成光量子束密度を800  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、CO<sub>2</sub>濃度を380 ppm、通気速度を500  $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ に設定して5段果房の直下葉を測定した

### 第3節 促成トマト栽培における網入り果の発生に及ぼす昼温の影響

#### 緒 言

促成栽培では、果実の形態が異常な乱形果や窓あき果等、奇形の果実が発生しやすく、減収要因の一つとなっている（藤村ら，1964；深澤ら，1993；金目・板木，1966；加藤・児玉，1973）．斉藤・伊東（1971）は、トマトにおける奇形果の発生と気温との関係について調査し、夜温が8℃で、昼温が異なる条件下で育苗した場合、昼温が17℃では果実内部で形態的な異常が起こり、子室数が著しく増加した奇形果が多く発生したのに対し、昼温を24℃に高めると奇形果がほとんど発生しないことを報告した．第2節では、乾物生産を高めることを目的として日中加温を行った結果、乱形果や窓あき果の発生についても軽減できることが明らかとなり（龍ら，2016）、低昼温の回避が果実の形態形成に影響を及ぼす可能性が示唆されたが、その他の奇形果については未評価であった．福岡県の促成栽培において発生の多い奇形果として「網入り果」が挙げられる．網入り果は、果実の外側から維管束が透けて見え、特有の網目模様を呈する（相馬・岩渕，1979）．また、網入り果は、正常な果実より果皮が薄く形態的な異常を伴うことが報告されており（龍ら，2010）、正常果に比べて軟化が早く日もち性が悪いため、流通上の課題となっている（門馬，2001）．福岡県の生産現地圃場では、低温期に開花および肥大し春季に収穫した果実に多くみられることから（龍ら，2010）、形態形成期の昼温の低下が、網入り果の発生を誘起している可能性がある．

そこで本節では、まず夜温を一定とした温度制御条件下で、昼温の違いが網入り果の発生に及ぼす影響を検討し、次に収穫期が春季になる促成栽培のハウスにおいて、果実の形態形成期にあたる1～2月の日中加温による網入り果発生の抑制効果について調査した．

#### 材料および方法

##### 1. 昼温の違いが網入り果の発生と果実の形態に及ぼす影響（実験1）

実験は、福岡県農業総合試験場（福岡県筑紫野市）内の自然光型ファイトロン（小糸製作所）を用いて行った．夜温設定時間を19～7時、昼温設定時間を7～19時とし、夜温を8℃、昼温を20、24および28℃の3区（以下、それぞれ昼温20℃区、昼温24℃区および昼温28℃区）設けた．トマト‘優美’（丸種（株））を供試し、自根栽培とした．2010年12月2日に72穴セルトレイに播種し、換気開始温度を28℃、加温開始温度を15℃に設定したガラスハウス内で育苗した．2011年1月4日に園芸用培養土を充填した1/5,000 aワグネルポットに4葉期の苗

を定植し、上記のファイトトロン内に搬入して2011年2月28日まで温度処理を実施した。温度処理後は、全ポットをガラスハウス内（換気開始温度を28℃、加温開始温度を15℃に設定）に再び移動させ、2011年5月13日まで栽培を続けた。施肥は、OK-F-1（N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:8:17, OATアグリオ（株））の2,000倍希釈液を用いて、1日当たり7.5～15.0 mg-N／株を灌水と同時にを行った。着果促進処理には、トマトトーン（パラクロロフェノキシ酢酸0.15%, 石原バイオサイエンス（株））の100倍希釈液を用い、果房ごとに3花が開花した時点で果房全体に散布した。着果促進処理を行った日を各果房の開花日とし、温度処理期間中にファイトトロン内で開花した果房を開花期Ⅰ、温度処理後に移動させたガラスハウス内で開花した果房を開花期Ⅱとした。摘心は、6段果房上2葉を残して行い、各果房4果に摘果した。果実の収穫は、週3回、果実表面がわずかに着色した時点で行い、収穫の直後に網入り症状の強弱を調査した。網入り症状の強弱を網入り程度とし、外観の目視による7段階（0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3）で評価した（第2-5図）。1以下の果実を正常果、1.5以上の果実を網入り果とし、網入り果の果数を全収穫果数で除して100を乗じ、網入り果発生割合とした。調査には、1区当たり6株を供試した。果実の赤道上で2等分した後に、ノギスにより1果当たり6ヶ所の果皮厚（本実験では、外・中・内果皮の合計とした）を計測し、平均値を算出した。

## 2. 促成栽培における日中の加温が網入り果の発生に及ぼす影響（実験2）

実験は、2010年10月～2011年5月（2010年定植）と2011年10月～2012年5月（2011年定植）の2年間、福岡県農業総合試験場内の畑地圃場（砂壤土）に設置した間口6 m、奥行20 mの南北向き単棟パイプハウス2棟（東西方向並び）を供試して行った。両ハウスとも、外側には0.15 mmの農業用ポリオレフィン系フィルム、内側には0.075 mmの農業用塩化ビニル系フィルムを展張した。穂木に‘優美’（丸種（株））、台木に‘がんばる根’（愛三種苗（株））を供試して、播種は9月8日、接ぎ木（合わせ接ぎ）は9月24日（2011年定植は9月26日）に行い、定植は10月21日に条間を135 cmとした1条植えで行った。日中の加温処理期間は1月4日～2月末日とし、日中加温区では日中（9:00～16:00）のハウス内気温が20℃を下回らないよう加温し、対照区では日中のハウス内気温が8℃を下回らないよう管理して、3月以降は両区とも8℃を下回らないよう管理した。夜間（16:00～9:00）の加温機の設定は両区とも8℃に設定した。加温には白灯油を燃料とする温風暖房機（型式EH-101F, 出力36.2 kW, フルタ電気（株））を用いた。外張りの換気開始温度は、両区とも26℃とし、自動で開閉した。内張りは、23℃を目安に天井部分のフィルムのみ手動で開閉した。加温および換気用の温度センサーは、ハウス中央部の地上高1.4 m地点に設置した。栽培期間中、摘心

は行わず、5月末日まで栽培を継続した。果実の収穫は、週3回、果実表面がわずかに着色した時点で行い、実験1と同様の方法で網入り果の発生割合を調査した。実験は、1区当たり10株を供し、3反復した。果実硬度は、2011年3月30日、4月30日、5月6日、5月9日、5月11日、5月16日および5月23日に収穫した果実の中から、両区とも収穫日ごとに10～18果を無作為に選び、常温（12～23℃）で完全着色するまで追熟させた後に、クリープメータ（RE2-3305B、（株）山電）を用いて測定した。果実硬度は、茨木ら（1988）の方法を参考に、果実の赤道部を直径8 mmの円柱形プランジャーで垂直に3 mm圧縮するのに必要な荷重とし、試料台上昇速度100 mm・min<sup>-1</sup>で1果当たり3ヶ所を測定し、平均値を算出した。果皮厚は、実験1と同様の方法で計測した。

## 結 果

### 1. 昼温の違いが網入り果の発生と果実の形態に及ぼす影響（実験1）

温度処理期間中における各試験区のファイトトン内気温測定値の平均昼温／平均夜温は、昼温28℃区で27.8/8.2℃、昼温24℃区で23.8/8.1℃、昼温20℃区で19.0/8.1℃であった。温度処理後に全株を生育させたガラスハウス内気温の測定値は、昼温（9:00～16:00）の平均が17.0～32.4℃、夜温（16:00～9:00）の平均が15.1～23.7℃で推移し、生育期間中の平均昼温／平均夜温は、27.0/18.0℃であった。網入り程度は、全期間では昼温20℃区で最も大きく1.3、次いで昼温24℃区で0.9、昼温28℃区では0.4で、昼温が低いほど大きかった（第2-6図）。網入り程度を開花期別にみると、開花期Ⅰでは昼温20℃区および昼温24℃区で昼温28℃区より有意に大きく、開花期Ⅱでは昼温20℃区で昼温24℃区および昼温28℃区より有意に大きかった。本実験で網入り果とした網入り程度1.5を超える果実の発生割合をみると、全期間では昼温20℃区が最も高く44%、次いで昼温24℃区が13%で、昼温28℃区では発生しなかった。網入り果の発生割合を開花期別にみると、開花期Ⅰでは昼温20℃区で最も高く17%、次いで昼温24℃区で8%であり、昼温28℃区では発生しなかった。開花期Ⅱでも、昼温20℃区が最も高く58%、次いで昼温24℃区が17%で、昼温28℃区では発生しなかった。次に、果皮厚は、全期間では昼温20℃区と24℃区がそれぞれ5.0 mm、5.6 mmで有意差はなかったが、昼温28℃区は他の区より有意に厚い6.4 mmであった（第2-7図）。果皮厚を開花期別にみると、開花期Ⅰでは昼温20℃区が昼温28℃区より有意に薄く、開花期Ⅱでは昼温20℃区および昼温24℃区で昼温28℃区より有意に薄かった。子室数は、全期間では昼温20℃区で11.7 室、昼温24℃区が7.9 室、昼温28℃区が5.9 室で、昼温が低いほど有意に多かった。子室数を開花期別みると、開花期Ⅰでは昼温20℃区および昼温24℃区が昼温28℃区より有意に多く、開花



期Ⅱでは昼温20℃区が昼温24℃区および昼温28℃区より有意に多かった（第2-7図）。

## 2. 促成栽培における日中の加温が網入り果の発生および果実硬度に及ぼす影響（実験2）

温度処理期間中（2012年1月4日～2月29日）におけるハウス内気温の日変化（平均）を第2-8図に示す。ハウス内気温測定値の平均昼温／平均夜温は、対照区では2011年（2010年定植）が20.6/12.4℃，2012年（2011年定植）が19.4/11.2℃，日中加温区では2011年が23.5/12.4℃，2012年が22.8/11.1℃で，両年度とも夜温に区間差はなく，昼温は日中加温区が対照区より2.9～3.4℃高かった（一部データ略）。網入り果発生割合は，2010年定植で3月下旬，2011年定植で4月上旬から徐々に高まり，2010年定植では対照区で5月上旬の82%，日中加温区で4月中旬の50%まで上昇し，その後低下した（第2-9図）。2011年定植では対照区で4月下旬の45%，日中加温区で4月上旬の16%まで上昇し，その後低下した。両年度とも網入り果発生がみられる期間においては，日中加温区の方が対照区に比べて発生割合が有意に低かった。各果房における開花期ごとの網入り果発生割合をみると，日中加温区の網入り果発生割合は，両年度とも日中の加温開始から加温処理終了の約1か月後に当たる1月中旬～3月中旬に開花した果房で対照区より低く推移した（第2-10図）。両区とも3月下旬の果実硬度は高かったが，4月下旬以降になると低下し，対照区で3.9～4.7 N，日中加温区で4.2～5.4 Nで推移した。4月下旬および5月上旬では日中加温区の方が対照区より果実硬度が有意に高かったが，それ以外の期間では有意差はみられなかった（第2-6表）。対照区の果皮厚は，3月下旬に5 mm以上であったのに対し，4月下旬および5月上旬は4 mm程度まで薄くなり，5月中旬以降は再び5 mm以上で推移した。日中加温区の果皮厚は，4月下旬および5月上旬で対照区より有意に厚かった。

## 考 察

促成栽培における網入り果は，低温期に開花および肥大し，春季に収穫した果実に多く発生する（龍ら，2010）。昼温の違いが果実の形態と網入り果発生に及ぼす影響について，温度制御条件下で調査した本実験では，夜温を8℃一定に制御した場合，昼温20℃区では果皮厚が昼温28℃区より薄くなり，網入り症状が昼温24℃区および昼温28℃区より強く現れた。さらに，網入り果発生割合は，昼温が低いほど高くなる傾向が認められた。このことから，網入り果の形態的特徴である果皮の肥厚抑制には昼温が関与しており，昼温を20℃に管理すると網入り果発生割合が高まることが明らかになった。また，温度処理期間中に開花した果房（開花期Ⅰ）だけでなく，温度処理後に開花および肥大した果

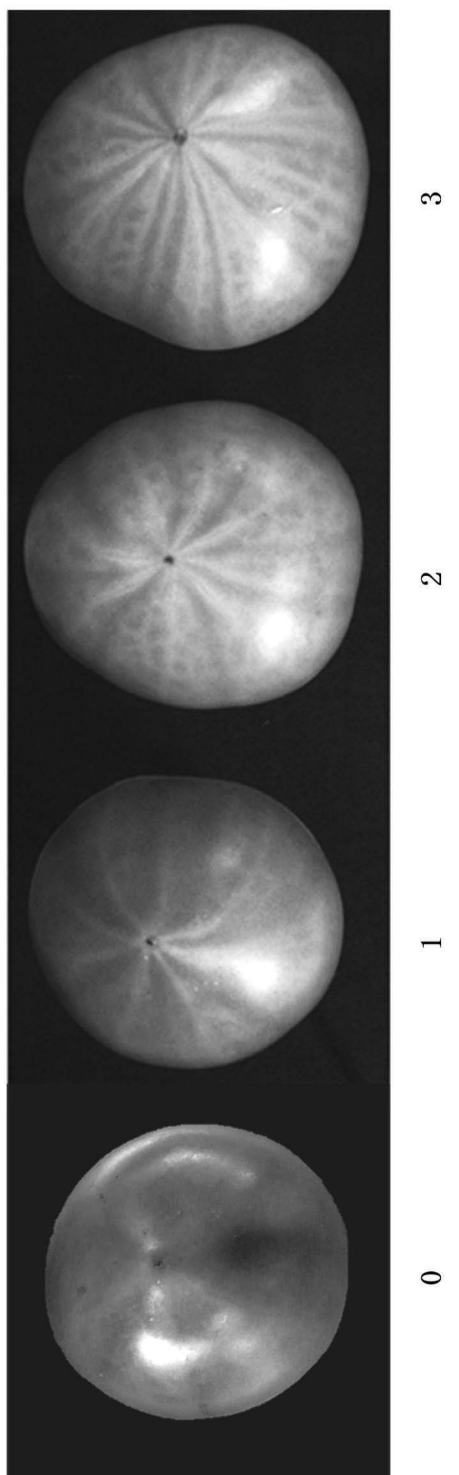
房（開花期Ⅱ）においても、昼温20℃区では果皮厚が昼温28℃区より薄くなり、網入り症状が強く現れていた。子室数は、昼温が低いほど増加する傾向が認められ、昼温20℃区ではトマトの一般的な子室数5～6室（望月，2010b）の約2倍に増加していた。子室数の多少は果実の形態と密接な関係にあり、多子室の子房から発達した各子室の形態は不均衡になりやすい（斉藤，1984a）。また、トマト果実の細胞数や形態は、開花期頃までにほぼ決定していること（斉藤，1984b）、花芽分化前あるいは花芽発達期間中の低温は子房に対して形態的な異常を誘起し、乱形果などの奇形果が増加するとともに、花芽におけるジベレリン含量が増加することが報告されている（深澤ら，1993; Hosoki et al., 1985）。幼苗期の苗にジベレリンを処理すると、子室数が増加することから（Asahira et al., 1982）、昼温20℃区で認められた子室数の増加には、ジベレリン含量の増加など、低温による内生的な変化が関与していることが推察される。ジベレリンは果皮の発達を抑制する作用を持つことから（Asahira et al., 1968）、網入り果の形態的特徴である果皮の肥厚抑制にも関与していると考えられるため、今後、ジベレリン含量と網入り果発生との関係について詳細に検討する必要がある。

トマトの成長および着果のための生育適温は、昼温24～28℃の範囲にあるとされ、ハウス内気温が25℃程度で換気を始め、28℃以上にはならないように制御することが必要である（門馬，2001）。しかしながら、生産現場では、除湿のために積極的な換気が行われており（稲田ら，2011）、本県のトマト生産圃場でも、ハウス内の昼温は生育適温を下回ることが多い（龍，2012）。ビニルハウスを用いた本実験において、対照区における1～2月の昼温は2010年、2011年とも平均20℃前後で適温を大きく下回っており、この期間に開花あるいは開花前であった果実の40～60%が網入り果となった。一方、昼温を23～24℃とした日中加温区では、網入り果発生割合が対照区より低く推移した。以上のことから、促成栽培における網入り果は、開花前から開花期のハウス内の昼温が20℃程度まで低下することによって発生が促されるが、加温により23～24℃程度に高めることで発生を抑制できることが明らかになった。また日中加温区の果実硬度は、4月下旬および5月上旬に対照区より有意に高く、同時期の果皮厚も日中加温区が対照区より厚かった。従って、4月下旬および5月上旬における果実硬度には果皮厚が影響を及ぼしているものと推察される。このように、日中加温は、果皮厚を厚くし、収穫後の保存期間を決定する重要な要因である果実硬度を高く維持できるため、流通過程において商品価値を向上できる管理方法であると考えられる。

以上の結果から，促成栽培において，ハウス内の日中の気温が低下すると果実の果皮が薄くなり網入り果が増加すること，日中に加温することで網入り症状を軽減でき，果実硬度が高まることが明らかになった．

#### 要 約

網入り果は果実の外側から維管束が透けて見える症状の果実であり，特有の網模様を呈して外観が優れず，果実硬度が低い商品価値が低い．本実験では，網入り果発生に及ぼす昼温の影響について検討した．夜温を 8℃一定に制御した場合，昼温20℃では網入り症状が強く現れたのに対し，昼温24℃および昼温28℃では症状が軽減された．さらに，促成トマト栽培において開花前から開花期の加温機の設定を日中20℃とした場合，対照区（加温機の設定を日中8℃にした場合）に比べて網入り果の発生を抑制できることが明らかとなった．これによって，果皮が薄いといった形態的な異常が軽減され，果実硬度が高まった．



第2-5図 網入り果の網入り程度基準

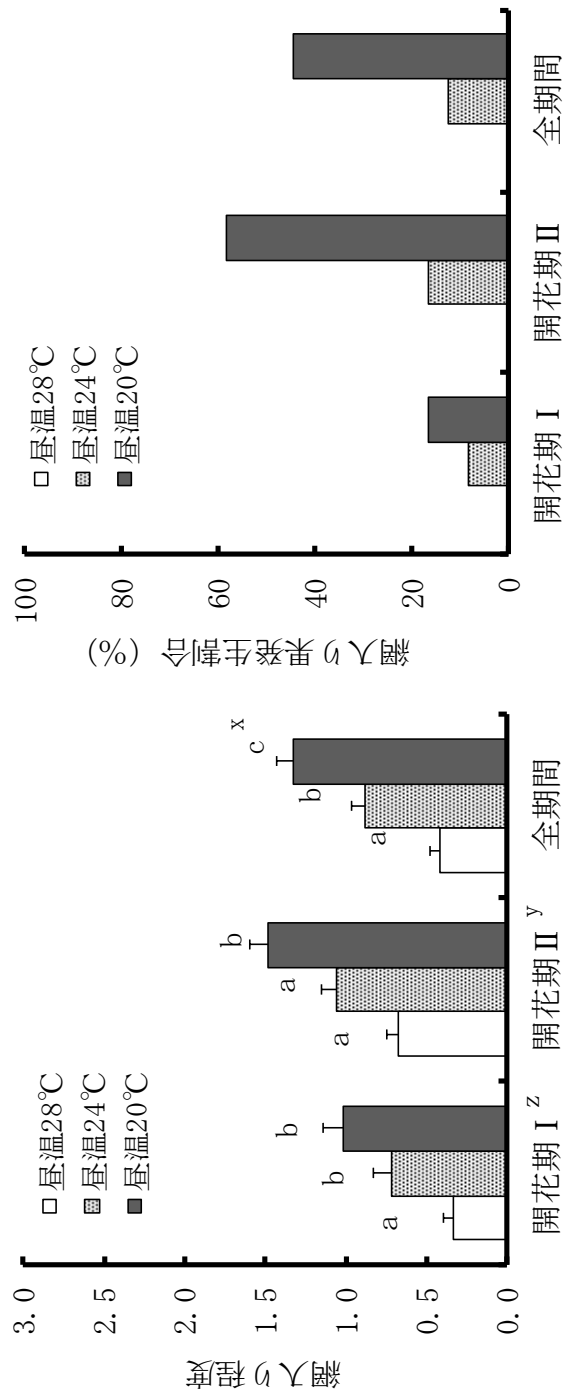
0：維管束網が果実の外側から全く確認できない

1：果実の一部に薄く確認できる

2：果実の一部に明瞭に確認できる

3：果実の全体に明瞭に確認できる

0と1, 1と2および2と3の中間的な網入り程度を順に0.5, 1.5および2.5とした

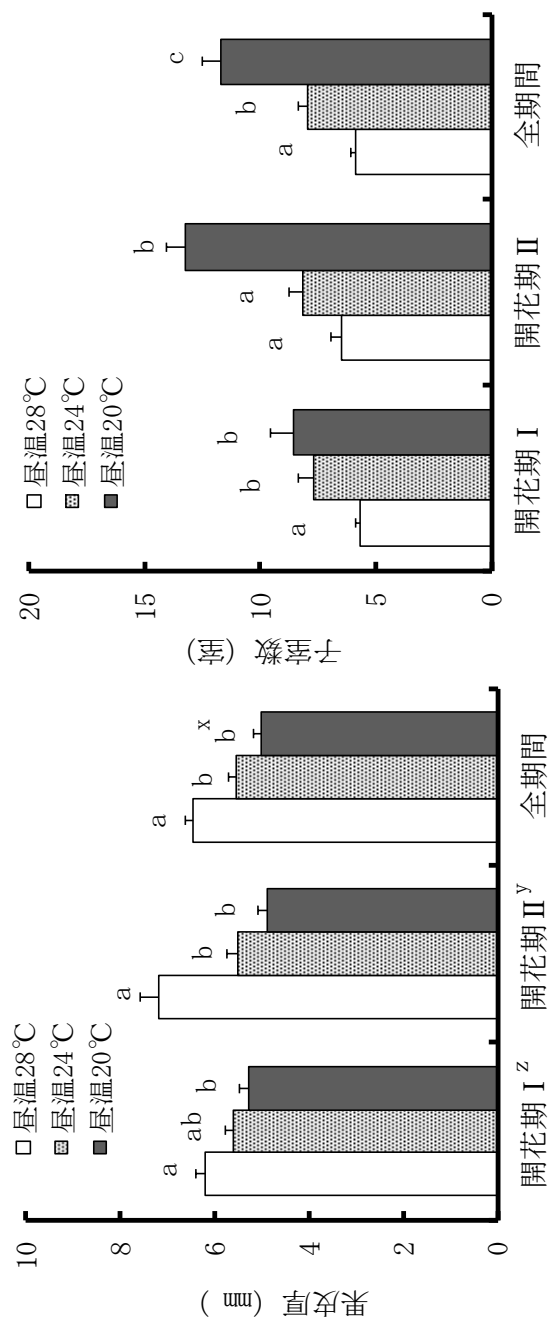


第2-6図 昼温の違いが網入り果の発生に及ぼす影響

<sup>z</sup>開花期 I は、温度処理期間中に開花した果実

<sup>y</sup>開花期 II は、温度処理後に開花した果実

<sup>x</sup>開花期ごとに異なる英文字間には、Tukey-Kramerの多重検定により5%水準で有意差あり、縦棒は標準誤差を示す (n=44~69)

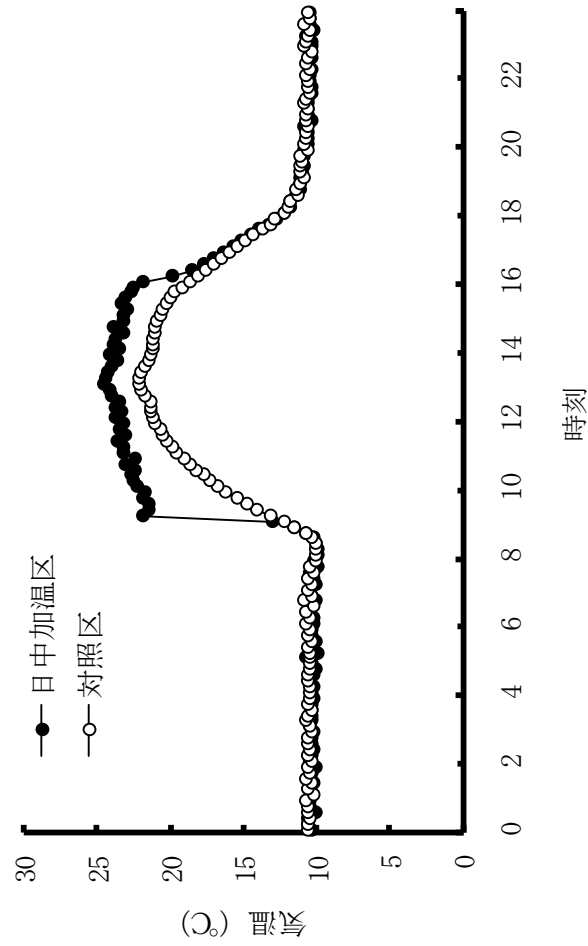


第2-7図 昼温の違いが果皮厚および子室数に及ぼす影響

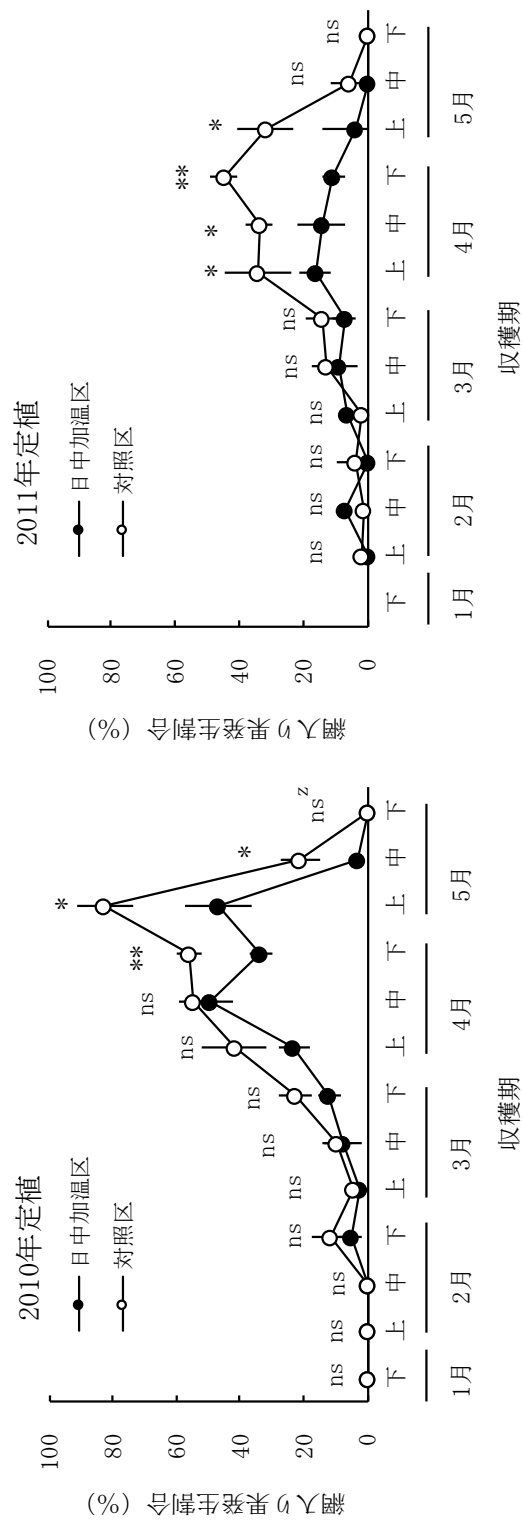
<sup>z</sup>開花期 I は、温度処理期間中に開花した果実

<sup>y</sup>開花期 II は、温度処理後に開花した果実

<sup>x</sup>開花期 ごとに異なる英文字間には、Tukey-Kramerの多重検定により5%水準で有意差あり，縦棒は標準誤差を示す (n=44~69)

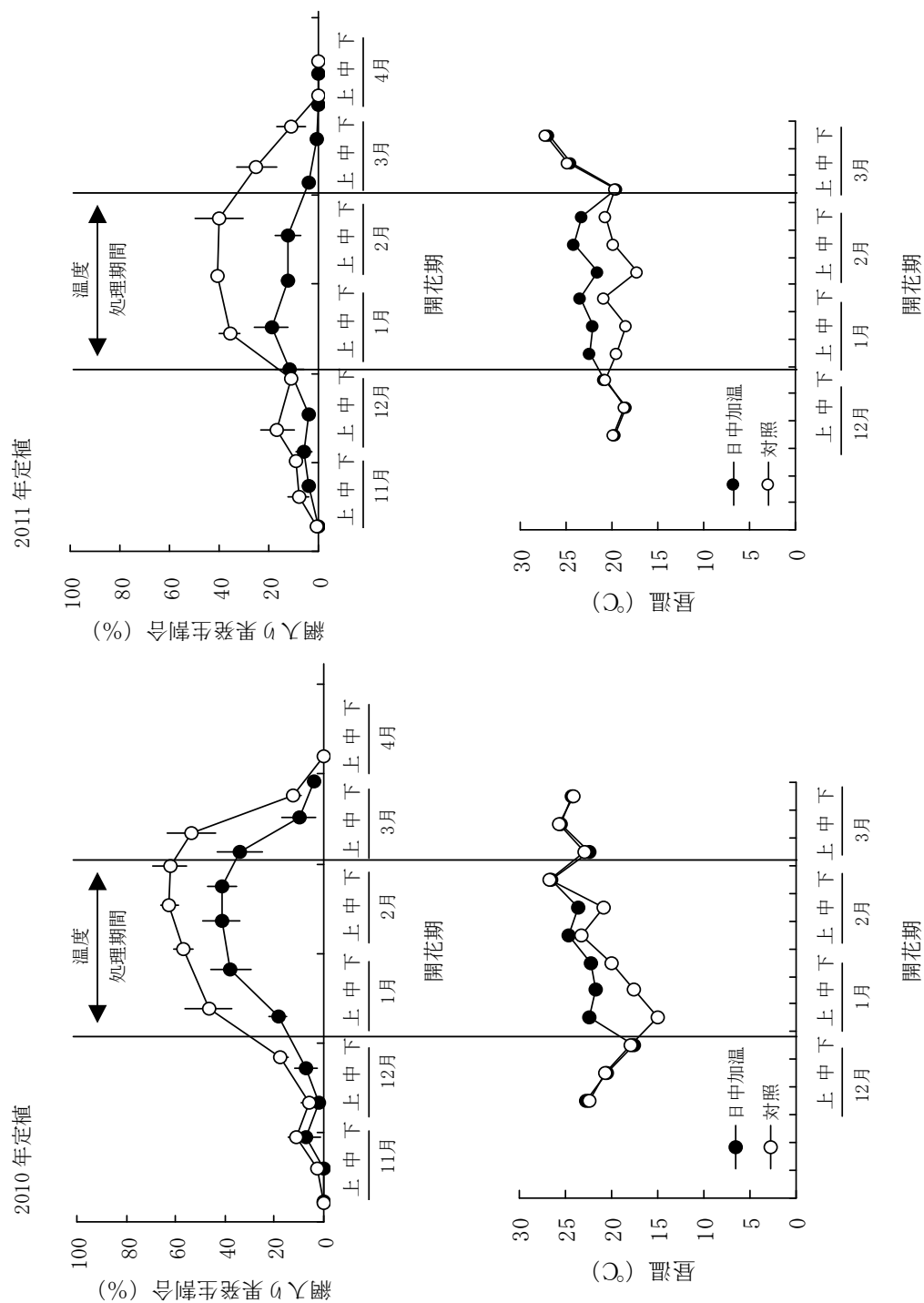


第2-8図 日中に加温した施設における気温の日変化  
 日中加温処理を行った2012年1月4日～2月29日に10分間隔で測定し  
 て、同一時刻の値の平均値を計算し、時刻別平均値として示した



**第2-9図** 冬季(2010年, 2011年)における日中の加温が網入り果の発生に及ぼす影響<sup>z</sup>  
<sup>z</sup>\*\*, \*は, t 検定 (逆正弦変換) によりそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし,  
 縦棒は標準誤差を示す





**第2-10図** 昼温および開花期ごとの網入り果発生割合の推移  
縦棒は、標準誤差を示す、昼温は、9:00～16:00の温室内気温を10分間隔で測定し、旬別に平均して示した

第2-6表 日中の加温がトマトの果実硬度および果皮厚に与える影響

| 処理区  | 果実硬度<br>(N)     |     |     |     |     |     | 果皮厚<br>(mm) |     |     |     |     |    |
|------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|----|
|      | 3月              |     | 4月  |     | 5月  |     | 3月          |     | 4月  |     | 5月  |    |
|      | 下旬              | 下旬  | 下旬  | 下旬  | 中旬  | 下旬  | 下旬          | 下旬  | 下旬  | 中旬  | 下旬  | 下旬 |
| 日中加温 | 8.3             | 5.4 | 4.5 | 4.4 | 4.2 | 4.4 | 6.2         | 4.7 | 5.3 | 5.3 | 5.9 |    |
| 対照   | 8.9             | 4.4 | 3.9 | 4.7 | 4.2 | 4.7 | 5.6         | 4.2 | 4.3 | 5.0 | 6.1 |    |
| t 検定 | ns <sup>z</sup> | **  | **  | ns  | ns  | ns  | ns          | *   | **  | ns  | ns  |    |

<sup>z</sup> \*\*, \*は, t 検定によりそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし (n=85)

## 第4節 日中加温の熱負荷

### 緒 言

日中加温技術の確立後、生産現場で本技術の導入を検討するに当たっては、栽培地域ごとに費用対効果を算出する必要があるため、各地域での日中加温に要する燃油コストの試算が求められる。燃油コストを試算するには、暖房負荷の評価が必要となるが、第2節で実施した日中加温試験では、栽培期間中における熱収支に関する計測を行っておらず、暖房負荷の定量的な評価が課題として残された。特に、早朝などの極端な寡日照条件下では暖房負荷が大きく、大量の燃油が消費されることが考えられることから（大原ら，2009），暖房負荷の評価は日中の環境制御技術開発のための基礎的知見として極めて重要である。

そこで本節では、冬季寡日照地域における日中加温ハウスの熱収支や燃油消費量の試算に必要な暖房負荷の算出方法を明らかにすることを目的として、加温温度の違いや時刻別の暖房負荷を調査するとともに栽培期間中の期間暖房負荷を推定した。

### 材料および方法

#### 1. 加温温度の違いが暖房負荷に及ぼす影響（実験1）

実験は、2015年12月～2016年1月および2017年2月に福岡県農林業総合試験場・資源活用研究センター（福岡県久留米市）内に設置した間口6 m，奥行16 m，被覆面積約224 m<sup>2</sup>の隣接した南北棟の単棟パイプハウス2棟を供試して行った。各ハウスとも、外側には厚さ0.15 mmの農業用ポリオレフィン系フィルム，内側には厚さ0.075 mmのポリエチレンフィルムを展張した。サイド下部の外張フィルムを自動温度制御機で巻き上げ開閉（換気開始温度30℃）した。内張フィルムは開閉せず閉め切りとした。加温機の設定温度を日中（9～16時）は18，20，22，24，26および28℃とし，夜間（16～9時）は10℃とする日中加温区と，終日10℃とする対照区の2区を設けた。各設定温度で3～5日間加温し，自動換気による熱損失がなかった曇天日の測定値を解析に用いた。加温は，熱出力14 kWの白灯油を燃料とする温風暖房機（KA-125E，ネポン（株））を用い，送風用ダクトをハウスサイド部に設置（長さ12 m×2本）して行った。ハウス内気温および外気温は，それぞれハウス中央部と屋外の地上高1.3 mの位置で，T型熱電対を強制通風筒内に設置して測定した。暖房負荷は，ハウス被覆面からの放熱量（貫流伝熱＋隙間換気伝熱）と地中伝熱量の和とした。本実験では，対照区と日中加温区の暖房負荷の差分を日中加温に要する暖房負荷と定義した。ハウス被覆面からの放熱量は，林（1985）の方法を参考に，2016年1月5日～2016

年2月7日までの34日間，17時～7時に測定した対照区のハウス内気温と外気温から算出した日別の暖房デグリアワー，同期間の同時刻における地中伝熱量および燃油燃焼熱量から，次式により放熱係数の平均値（ $2.85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ）を求めて，単位床面積当りに換算して示した．地中伝熱量は，ハウス中央部で地表面下3 cmの位置に熱流板（MF-180M，日置電機（株））を埋設して測定した土壌表層の伝熱量とし，下向きを正とした．燃油燃焼熱量は，容積油量計（LSN39P，（株）OVAL）の出力をパルスロガー（LR8512，日置電機（株））で記録した流量に白灯油の発熱量（ $36.7 \text{ MJ} \cdot \text{L}^{-1}$ ）を乗じ，加温機の燃焼熱利用効率を0.9として算出した．すべてのセンサー測定値は10分間隔で記録した．

$$h = (Q_{soil} + Q_{oil}) \times \beta \div DH$$

$h$ ；放熱係数

$Q_{soil}$ ；地中伝熱量

$Q_{oil}$ ；燃油燃焼熱量

$\beta$ ；保温比（床面積／被覆面積）

$DH$ ；暖房デグリアワー

## 2. 促成トマト栽培における日中加温の期間暖房負荷（実験2）

日中加温の期間暖房負荷を推定するため，福岡県農林業総合試験場（福岡県筑紫野市）内に設置した間口6 m，奥行20 mの南北向きのトマト栽培ハウス内で，2011年12月～2014年3月までの3年間，気温を計測した．気温は，ハウス中央部で地上高1.4 m地点の強制通風筒内に設置した温度計（TR52，（株）ティアンドデイ）を用いて，10分間隔で記録した．各年の気温計測値を時刻（9～16時）および月別に平均し，日中加温の設定値（本実験では $20^\circ\text{C}$ とした）との温度差から暖房デグリアワーを算出して，実験1と同様の方法で12月～3月のハウス被覆面からの放熱量を推定した．本実験に供試したハウスは被覆の条件，間口等の規格や設置方向が実験1で供試したハウスと類似していたため，放熱係数には実験1で求めた $2.85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ を用いた．また，地中伝熱量は考慮せず，暖房負荷の大半を占めるハウス被覆面からの放熱量の積算値を期間暖房負荷とみなして，これに要する燃油消費量（白灯油）を推定した．供試ハウス内では，各年ともトマトを10月下旬に定植し，翌年5月末まで地域慣行の方法により土耕栽培した．ハウスの外側には厚さ0.15 mmの農業用ポリオレフィン系フィルム，内側には厚さ0.075 mmの農業用塩化ビニル系フィルムを展張した．外張の換気開始温度は $26^\circ\text{C}$ とし，自動で開閉した．内張は， $23^\circ\text{C}$ を目安に天井部分のフィルムのみ手動で開閉した．加温は，熱出力36.2 kWの白灯油を燃料とする温風暖房機（EH-101F，フルタ電機（株））を用い，設定温度は終日 $8^\circ\text{C}$ とした．

## 結 果

### 1. 加温温度の違いが暖房負荷に及ぼす影響（実験1）

日中加温の設定温度を20℃とした2017年2月9日におけるハウス内気温、ハウス被覆面からの放熱量および地中伝熱量ならびに日中加温の燃油燃焼熱量の推移を第2-11図に示す。日中加温を行った9～16時の時間帯を見ると、ハウス内気温は、対照区で12.2～25.3℃であったのに対し、日中加温区では12.4～28.7℃と常に対照区より高く、平均では対照区より3.5℃高い21.1℃であった。ハウス被覆面からの放熱量は、対照区が53～136 W・m<sup>-2</sup>、日中加温区が54～159 W・m<sup>-2</sup>で推移し、特に9～13時において日中加温区の方が多かった。このため、被覆面からの放熱量の積算値は日中加温区では2.77 MJ・m<sup>-2</sup>となり、対照区より0.58 MJ・m<sup>-2</sup>増加した。さらに日中加温区では、土壌表層における下向きの地中伝熱量が9～13時に対照区より多く、積算では0.07 MJ・m<sup>-2</sup>増加した。以上の結果から、当該日（2017年2月9日）における日中加温に伴うハウス被覆面からの放熱量と地中伝熱量の増加量の和（本実験で日中加温時の暖房負荷と定義）は、20℃設定の場合、0.65 MJ・m<sup>-2</sup>と算出された。一方、加温機の燃油消費量実測値から算出した燃焼熱量は0.68 MJ・m<sup>-2</sup>となり、上記の暖房負荷と概ね一致した。他の加温温度における暖房負荷も同様に算出し、設定温度別にまとめたものを第2-7表に示す。日中加温区の平均気温は、概ね設定温度前後となり、対照区より2.4～12.2℃高かった。日中加温の暖房負荷は、18℃設定の0.45 MJ・m<sup>-2</sup>～28℃設定の2.26 MJ・m<sup>-2</sup>の範囲で、設定温度が高いほど大きくなった。暖房負荷の82%～89%をハウス被覆面からの放熱量が占めており、地中伝熱量の影響は相対的に小さかった。次に日中加温の暖房負荷を横軸に、加温機の燃油消費量の実測値から算出した燃焼熱量を縦軸にプロットし、直線回帰を行った（第2-12図）。本実験の手法により算出した日中加温時の暖房負荷は、燃油燃焼熱量との間に強い正の相関関係（ $r=0.99^{***}$ ）が認められた。

### 2. 促成トマト栽培における日中加温の期間暖房負荷（実験2）

トマト栽培ハウスの昼温ならびに推定した日中加温（20℃）の期間暖房負荷と燃油消費量の時期および時刻別推移を第2-13図に示す。ハウス内気温の平均値は、12月が最も低く17.3℃、1月および2月はそれぞれ17.7℃、17.6℃で同程度となり、3月は19.3℃であった。時刻別には、いずれの時期においても9時が最も低く14.2～18.8℃で、その後12時前後まで上昇し14時以降は再び低下した。日中加温時の期間暖房負荷は、12月が最も大きく13.5 MJ・m<sup>-2</sup>、次いで1月が11.6 MJ・m<sup>-2</sup>、2月が11.1 MJ・m<sup>-2</sup>となり、3月は3.4 MJ・m<sup>-2</sup>とわずかであった。時刻別には、加温開始時の9時の暖房負荷が最も大きく、12月～2月は4 MJ・m<sup>-2</sup>程度

で、全体の2～3割を占めた。その一方で、12時前後の暖房負荷は $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 程度であった。燃油消費量（白灯油）は、12月～3月までの合計で $1.20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ と試算された。

## 考 察

生産現地において日中加温技術の導入を検討する際には、加温に伴う費用を算出する必要がある。それには暖房負荷の予測が不可欠である。ハウスにおける夜間の暖房負荷は、日射の影響がないため、ハウス被覆面からの放熱量と地中伝熱量によって決定され、通常、外気温が最も低下する日出の直前に最大となる（林, 1985）。一方、昼間の暖房負荷は、外気温が $0^{\circ}\text{C}$ の曇天日であっても $117 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $100 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 程度の日射があれば、無加温でもハウス内の気温が $15^{\circ}\text{C}$ 以上に維持されるなど、日射の影響を強く受ける（古在ら, 1982）。実験1では、日中加温の暖房負荷を日射の影響と分離して設定温度別に評価した。実験の結果、福岡県久留米市の単棟ハウスにおける日中加温の暖房負荷は、設定温度が高いほど大きく、ハウス被覆面からの放熱量が暖房負荷の82%～89%を占めることが明らかとなった。

暖房負荷をハウス被覆面からの放熱量（貫流伝熱＋隙間換気伝熱）と地中伝熱量の和とし、対照区と日中加温区の暖房負荷の差分を日中加温の暖房負荷とした本実験の結果では、日中加温の暖房負荷と燃油燃焼熱量との間には強い相関関係（ $r=0.99***$ ）が認められ、算出した暖房負荷の妥当性が示唆された。このことから、日中加温の暖房負荷はハウスの放熱係数と内外気温差から算出したハウス被覆面からの放熱量および土壌表層の地中伝熱量を、無処理ハウスと比較することによって評価可能であると考えられた。林（1985）は、千葉県内のパイプハウスにおいて、加温設定温度を $15^{\circ}\text{C}$ として7～17時の暖房負荷を計測し、1月の日平均値が $0.42 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $99 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2}$ ) であったと報告している。加温設定温度をさらに高い条件で検討した実験1では、日中加温の暖房負荷が、 $18^{\circ}\text{C}$ 設定の $0.45 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ～ $28^{\circ}\text{C}$ 設定の $2.26 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ の範囲となり、林（1985）の測定例の1.1～5.4倍であった。本実験では、暖房負荷の測定日が設定温度ごとに異なるため、直接の比較はできないものの、加温設定温度を高めることによりハウス内外気温差が大きくなることで暖房負荷が増加したと考えられた。

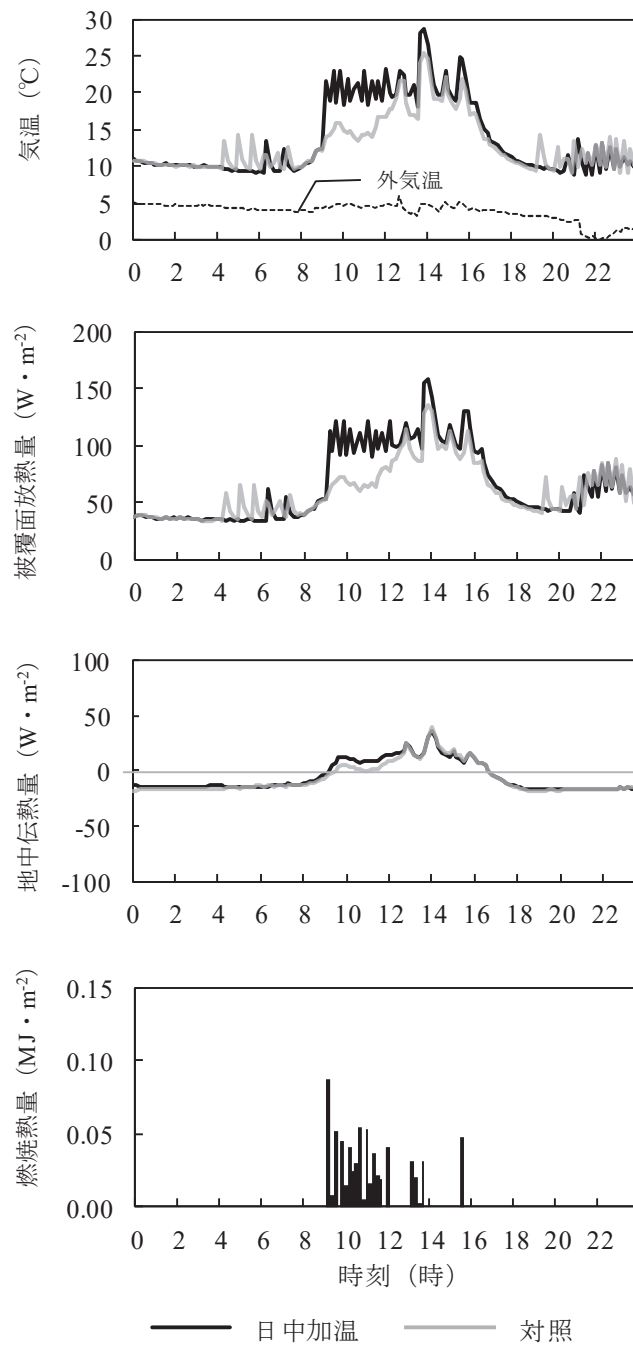
栽培期間中の暖房用燃油消費量を予測するためには、実際栽培ハウス被覆面からの放熱量や地中伝熱量など、ハウスの熱収支に関連する気象環境を長期間にわたり実測し、期間暖房負荷を推定する必要がある（古在ら, 1982）。実験2では、トマト栽培ハウス内で3年間実測した気温から日中加温時の期間暖房負荷を推定した。2011年12月～2014年3月までの3年間実施した実験の結果、福岡

県筑紫野市の単棟ハウスにおける月別の期間暖房負荷は、12月～2月が $13.5 \sim 11.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ で同程度に高く、3月は $3.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ で比較的小さいこと、暖房負荷を基に算出した燃油消費量は12月～3月までの合計で $1.20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ と試算され、A重油を用いた場合には10a当たりの燃油コストは9万円程度（A重油価格 $80 \text{ 円} \cdot \text{L}^{-1}$ で算出）となることが明らかとなった。さらに時刻別には加温開始時である9時の消費量が最も大きく全体の2～3割を占める一方で、ハウス内気温のピークとなる12時前後にも一定の加温が必要なことも明らかとなった。実験2では、期間暖房負荷の推定に当たり、地中伝熱量は考慮しておらず、ハウス被覆面からの放熱量の推定には、外張および内張を閉めて計測した放熱係数（ $2.85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ）を用いており、内張の開閉を行った場合の暖房負荷は、さらに大きくなる可能性が高い。このため、燃油コスト削減の観点からは、特に暖房負荷の大きい加温開始時には内張を開放しないことが、栽培管理上の留意点として挙げられた。

## 要 約

本実験では、冬季寡日照地域における日中加温の熱収支を明らかにする目的で、パイプハウスを供試して暖房負荷を実測した。福岡県の単棟ハウスにおける日中加温時の暖房負荷は、設定温度が高いほど大きく、ハウス被覆面からの放熱量が暖房負荷の82%～89%を占めていた。また、日中加温時の暖房負荷は、加温したハウス被覆面からの放熱量と土壌表層における地中伝熱量の和から無処理ハウスの値を引いて算出できると考えられた。促成トマト栽培における月別の期間暖房負荷は、12月～2月が同程度に高く、3月は比較的小さかった。20℃設定の日中加温用の燃油消費量は、12月～3月までの合計で $1.20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ と試算され、時刻別には加温開始時の9時から10時までが最も大きく、全体の2～3割を占めた。

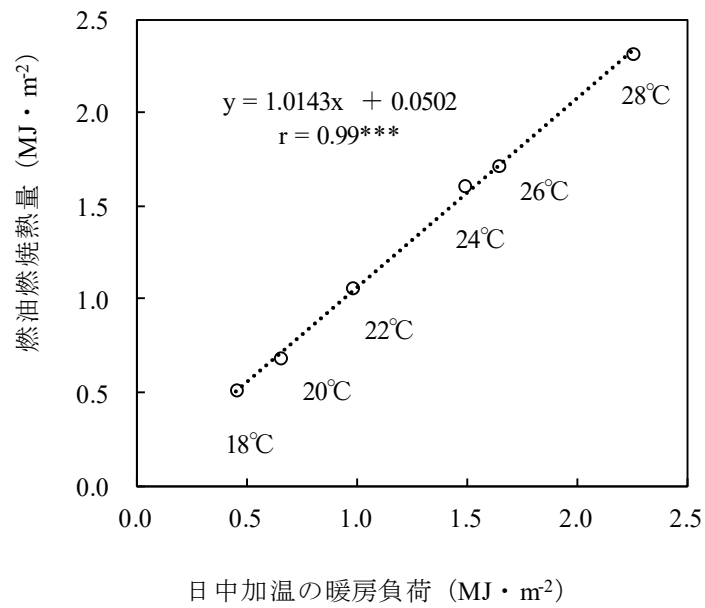




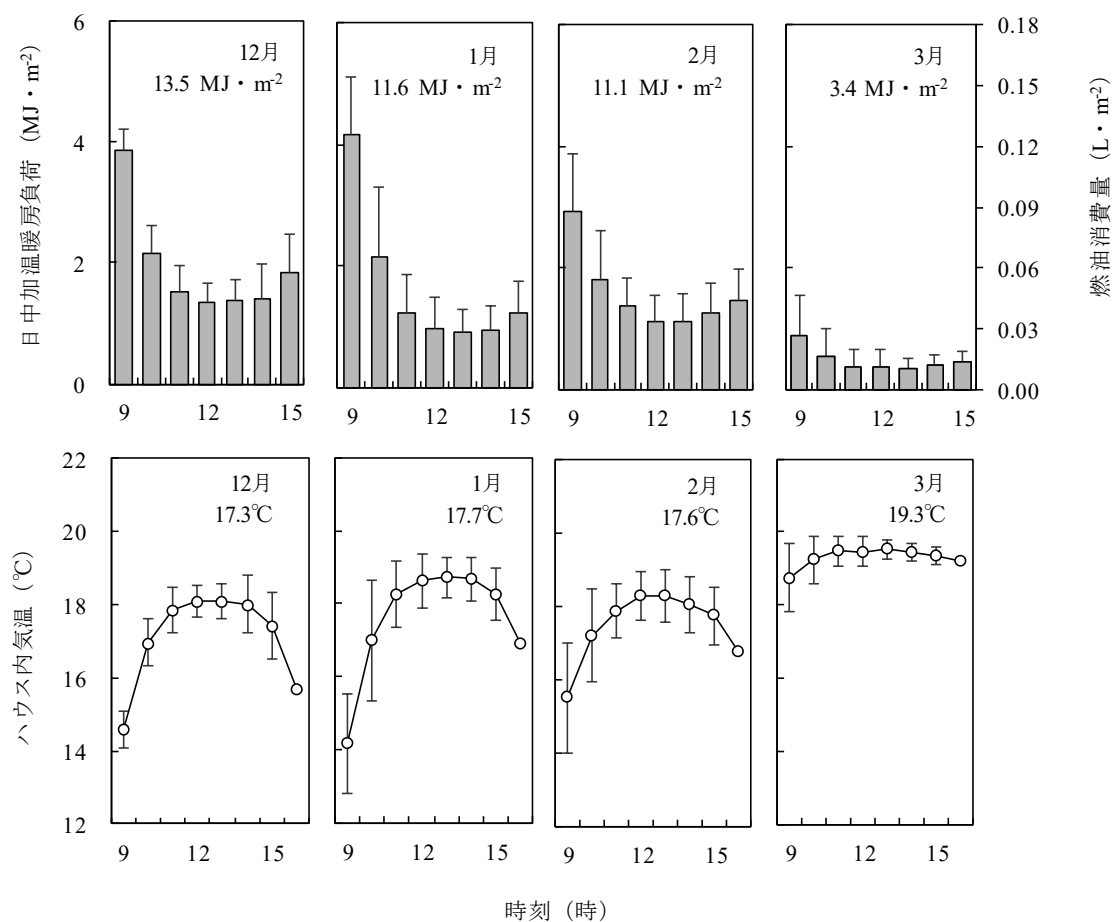
第2-11図 日中加温 (20℃) の有無がハウス内気温, ハウス被覆面からの放熱量および地中伝熱量ならびに日中の燃焼熱量に及ぼす影響  
2017年2月9日に10分間隔で測定







**第2-12図** 日中加温の暖房負荷と燃油燃烧熱量  
 図中の気温は日中加温時の設定温度を示した  
 \*\*\*は、t 検定により有意水準0.1%で相関関係  
 があることを示す



**第2-13図** 日中無加温トマト栽培ハウスの時期別および時刻別昼温平均値ならびに日中加温（20℃）した場合の期間暖房負荷と燃油消費量の推定値  
 2011年12月～2014年3月に10分間隔で計測した気温計測値を各年ごとに時刻（9～16時）および月別の平均値を求めた後、3ヶ年の平均値と日中加温の設定値（20℃設定）との差から暖房デグリアワーを算出し、実験1と同様の方法で12月～3月のハウス被覆面からの放熱量を推定した  
 図中の数値は月平均値を示した  
 土壌表層の伝熱量は考慮せず、ハウス被覆面からの放熱量を日中加温の期間暖房負荷として、燃油消費量（白灯油）を推定した  
 誤差線は、標準偏差を示した（n=3）

### 第3章 寡日照地域における促成トマトの湿度管理技術

#### 第1節 熱交換器を用いた除湿換気がハウス内の気象環境に及ぼす影響

##### 緒 言

福岡県は日本海側に位置し、冬季に曇天日が多いことからハウス内が多湿となりやすい。特に、日の出直後から換気が行われるまでの数時間は、果実や茎葉の温度がハウス内の気温上昇に追従できず、それぞれの表面が結露して濡れが生じやすく、夕方は急激な気温低下により被覆フィルム面で結露した水が落下するため(林, 1985), 多くの病害が発生する要因となっている(手塚ら, 1983)。近年、暖房用燃油の価格が高騰したことから、生産現地ではハウスの多層化による気密性の向上もハウス内部の多湿傾向を助長している。温室の除湿に関する研究としては、ヒートポンプ(小国, 1982)や吸湿材利用(平・位田, 2012)などの報告があるが、除湿には多くのエネルギーを必要とすることから導入は進んでいない。

一方、冬季においては、絶対湿度が低い外気をハウス内に導入することで容易に除湿できるため、生産現地では午前中を中心に除湿を目的とした換気を行うことが多い(稲田ら, 2011)。しかし、昼間の気象環境調節は実施費用が安い被覆フィルムの開閉管理が一般的であり、換気によって低温の外気が導入され、ハウス内の気温が低下する事例が多く報告されている(龍, 2012)。昼間の低温については、第2章において、ハウス内の昼温が20℃以下になると子室数が増加するなど果実の形態的な異常が増加するとともに、果実肥大が抑制され、商品果収量が減少することを明らかにした(龍・井手, 2014; 龍ら, 2016)。従って、除湿を目的とした換気のうち、ハウス内が低温になる冬季の換気は、植物体各器官の分化・発育や物質生産に悪影響を及ぼすことが懸念される。換気時の気温低下を軽減するためには、ハウス内から排気する熱の多くを回収する熱交換器の利用が有効であるが、その利用が作物の収量・品質に及ぼす影響については明らかにされていない(林, 1985)。

そこで、本章では、冬季の日中において、熱交換器を用いた除湿換気がトマトの生育や収量に及ぼす影響について明らかにすることを目的として、まず本節ではハウス内の気象環境に及ぼす影響について調査した。

##### 材料および方法

##### 1. 熱交換換気およびハウス内気象環境の制御

実験は、2012年10月～2013年5月（以下、2012年）および2013年10月～2014年5月（以下、2013年）に行った。福岡県農林業総合試験場内の畑地圃場（砂壤土）に設置した間口6 m、奥行20 mの南北向き単棟パイプハウス2棟（東西方向並び）を供試し、両ハウスとも、外張り被覆には厚さ0.15 mmの農業用ポリオレフィン系フィルム、内張り被覆には厚さ0.075 mmの農業用塩化ビニル系フィルムを展開した。熱交換換気には、熱交換器に高温流体と低温流体とが反対方向に流れる向流形と二流体が直交して流れる直交流形を組み合わせたハイブリッド方式（第3-1図）を採用した換気装置（どくとるドライ、（株）イーズ）を用いた。換気装置はハウスの北側妻面に設置し、熱交換後の給気はハウス中央部の地上高2.5 mに設置したポリダクト（南北方向に長さ15 m、直径300 mm、換気流量 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ）により、ハウス内に導入した（第3-2図）。熱交換換気の処理期間は、両年とも12月6日～翌年3月末日までとし、ハウス内の相対湿度を指標に8～17時の間に稼働させ、換気開始の相対湿度を80%、換気停止を70%に設定（ヒューミアイF、（株）鷺宮製作所）した（以下、熱交換換気区）。対照区では、外張り被覆フィルムの開閉による自然換気のみとした。外張り被覆の換気開始温度は、両区とも28℃とし、自動で開閉した。内張り被覆は、23℃を目安に天井部分のフィルムのみ手動で開閉した。加温には白灯油を燃料とする温風暖房機（型式EH-101F、出力36.2 kW、フルタ電機（株））を用い、両区とも終日10℃に設定した。

## 2. トマトの栽培方法

穂木に‘CF桃太郎はるか’（タキイ種苗（株））、台木に‘がんばる根’（愛三種苗（株））を供試し、両年とも9月7日に播種、9月24日に接ぎ木（合わせ接ぎ）を行い、10月21日（2012年は10月23日）に株間40 cm、畝間135 cm、1条植で、3畝に定植した。両ハウスとも各畝に26株、計78株を定植し、斜め誘引した。かん水は、吐出口間隔10 cmの点滴チューブ（T-Tape、パイオニアエコサイエンス（株））を用い、対照区のハウス中央部に設置したpFメータの指示値が2.0～2.5に維持されるよう130～900 mL／株を数日間隔で両区とも同量を給水した。

## 3. 調査方法

### 1) 熱交換効率

熱交換換気装置の顕熱交換効率は、熱交換器を介してハウス内に導入された給気の温度（以下、給気出口温度）、外気温度（以下、給気入口温度）ならびにハウス内から屋外へ排気される前の温度（以下、排気入口温度）を用いて、次式により算出した。

$$\eta (\%) = \frac{t(S_{out}) - t(S_{in})}{t(E_{in}) - t(S_{in})} \times 100$$

$t(S_{out})$  ; 給気出口温度

$t(S_{in})$  ; 給気入口温度

$t(E_{in})$  ; 排気入口温度

## 2) ハウス内気象環境

ハウス内の気温、相対湿度および絶対湿度は、ハウス中央部で地上高1.4 m地点の強制通風筒内に設置した温度計 (TR52, (株) ティアンドデイ) を用い、10分間隔で記録した乾球温度と湿球温度から算出した。屋外の気温および絶対湿度はハウス内と同様の方法で、日射強度は日射計 (ML-020, 英弘精機 (株)) を用いて、それぞれ10分間隔で計測した。ハウス内の二酸化炭素濃度は、2013年1月14日 (曇天日) に、非分散型赤外線吸収方式の二酸化炭素分析計 (ポータブルCO<sub>2</sub>計, (株) サカキコーポレーション) を用いて10分間隔で計測した。果実の結露時間は、熱交換換気装置がほぼ連続的に稼働した2013年2月7日において、直径が約5 cmの樹上果実に温度記録計 (TR52, (株) ティアンドデイ) のサーミスタを貼付けて計測した果実表面の温度が、ハウス内の露点温度を下回った時間から推定した。

## 結 果

### 1. 熱交換効率

熱交換換気を行った2013年12月6日～2014年3月31日における換気装置の給気出口温度と給気入口温度および排気入口温度との関係を第3-3図に示す。給気出口温度は、給気入口温度より最大15.9℃、平均で5.3℃高まった。給気出口温度は、排気入口温度より最大9.9℃、平均で4.5℃低かった。給気出口温度は、給気入口温度ならびに排気入口温度との間にそれぞれ強い正の相関関係 ( $r=0.82$ ,  $r=0.95$ ) が認められた。給気側の顕熱交換効率は、最大84.4%、平均で52.1%であった (データ略)。

### 2. ハウス内の気象環境

福岡県の冬季における平均的な日射量であった2013年12月24日の屋外日射強度と外気温および熱交換換気の稼働時間ならびにハウス内の気温、相対湿度および絶対湿度の日変化を第3-4図に示す。熱交換換気を稼働させた8～17時の気象環境をみると、屋外の日射強度は9～558 W・m<sup>-2</sup>、外気温は2.1～10.6℃で推移した。熱交換換気区では、熱交換換気が朝夕を中心に350分間稼働し、ハウス内の気温は、熱交換換気区では11.0～29.3℃で、対照区の11.4～29.7℃よりわずか

に低く推移した。ハウス内の相対湿度は平均で82.6%，絶対湿度は平均で $15.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ となり，それぞれ対照区より7.5%および $1.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 低かった。熱交換換気を行った12～3月（時間は8～17時）におけるハウス内の平均相対湿度，平均絶対湿度および平均気温を第3-1表に示す。平均相対湿度は，両試験区とも12月で最も高く，1月以降は徐々に低下した。熱交換換気区では，12～2月の平均相対湿度が2012年では74.8～86.0%，2013年では79.0～84.0%で推移し，対照区より0.3～7.0%低かった。一方，3月は試験区間の差は小さかった。平均絶対湿度は，平均相対湿度とほぼ同様の傾向となり，熱交換換気区で低く推移した。平均気温は，熱交換換気区が2012年では $17.1 \sim 24.7^{\circ}\text{C}$ ，2013年では $18.1 \sim 25.1^{\circ}\text{C}$ で推移し，1～2月はいずれの年次でも対照区より $0.1 \sim 0.7^{\circ}\text{C}$ 低かった。露点温度から推定した果実表面の結露時間を第3-5図に示す。熱交換換気装置がほぼ連続的に稼働した2013年2月7日では，果実の表面温度がハウス内の露点温度を下回り，結露の可能性が高い時間は対照区が210分であったのに対し，熱交換換気区は80分と約1/3に短縮された。

次に，熱交換換気が稼働と停止を繰り返した2013年1月14日におけるハウス内の二酸化炭素濃度の日変化を第3-6図に示す。ハウス内の二酸化炭素濃度は，対照区で8時前後から急激に低下し，8～17時の平均濃度が264 ppmであったのに対し，熱交換換気区の平均濃度は320 ppmで50 ppm以上高く推移した。

## 考 察

トマトの主要な病害は多湿条件で発生しやすく，特に果実に発病すると減収につながる灰色かび病は，相対湿度が93%以上，植物体の濡れ時間が5時間以上で多発すること（手塚ら，1983），促成栽培において朝方に発生する果実や茎葉の濡れは，ハウス内の露点温度を植物体温より下げること回避可能であり，ハウス内気温が $10 \sim 25^{\circ}\text{C}$ の範囲では，相対湿度を82～83%以下にすれば，水分の凝結を回避できることが報告されている（林，1985）。換気によって絶対湿度が低い外気をハウス内に導入し除湿する場合，土壌や作物からの蒸発散量を考慮すると，換気率は最大 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ （床面積） $\cdot \text{h}^{-1}$ 程度が必要とされる（林，1985）。換気率が最大 $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ （床面積） $\cdot \text{h}^{-1}$ の熱交換換気装置を用い，ハウス内の相対湿度を指標に換気量を制御した本実験におけるハウス内の平均相対湿度は，対照区が2012年では12～1月，2013年では12～2月に83%以上であったのに対し，熱交換換気区では12月を除く期間は83%以下で推移した。また，熱交換換気により，果実の表面温度とハウス内の露点温度から推定した結露時間も短くなったことから，熱交換器を用いた除湿換気によって植物体の結露を軽減できる水準まで栽培ハウス内を除湿できることが明らかとなった。一方，



本実験では、熱交換換気における給気側の顕熱交換効率は平均52.1%となり、換気に伴うハウス内の気温低下は避けられず、1～2月を中心に平均気温が対照区より0.1～0.7℃低下した。

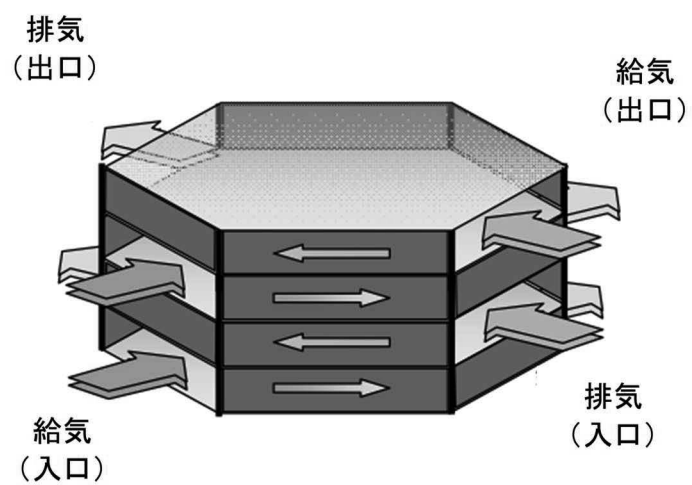
ハウス内の二酸化炭素濃度は、対照区ではハウスを密閉して管理する時間が長い曇天日に大気濃度より低下したのに対し、熱交換換気区ではハウス内の相対湿度を指標に換気量を制御したため、主に曇天日において対照区より高く推移したと考えられた。

以上のことから、冬季の日中において、ハウス内の相対湿度を指標に熱交換換気を行うと、ハウス内の相対湿度を低く維持できるものの、気温がわずかに低下することが示唆された。熱交換換気と気温の関係について、林（1985）は、顕熱の交換効率が50～55%の熱交換器を使用し、換気率を $4.8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ として連続換気した場合、ハウス内の気温が2～3℃低下したと報告している。本実験では、換気量をハウス内の相対湿度を指標に制御したため、連続して換気した場合より換気率が小さくなり、平均気温の低下が軽減できたと考えられた。一方、ハウス内の蒸発散量や外気の絶対湿度は刻々と変化するため、ハウス内の相対湿度を指標とした制御が必ずしも最適でない場合が多い。除湿に最適な換気量を知るための図として、ハウスの熱収支を基に作成されたVETH線図（Ventilation, Evaporation, Temperature, Humidity）が三原（1980）により考案されている。この線図を利用すれば、ハウス内の気温および相対湿度の状態値と換気率との相互関係を一目で知ることができる。VTH線図をパソコン上で容易に利用できるソフトウェア（福田・林，2004）や換気率をリアルタイムで計算できる監視機器（安場ら，2009）が開発されており、今後、熱交換換気の換気量制御にこれらを組み合わせることで、更に熱損失の少ない除湿換気が可能になると考えられた。

## 要 約

本実験では、冬季の日中において熱交換器を用いた除湿換気を行い、ハウス内の気象環境に及ぼす影響について検討した。ハウス内の相対湿度を指標にして熱交換換気を行うと、対照よりハウス内の気温がわずかに低下するものの、湿度が低下し、果実の結露時間が短縮した。曇天日にはハウス内の二酸化炭素濃度が対照より高く推移した。



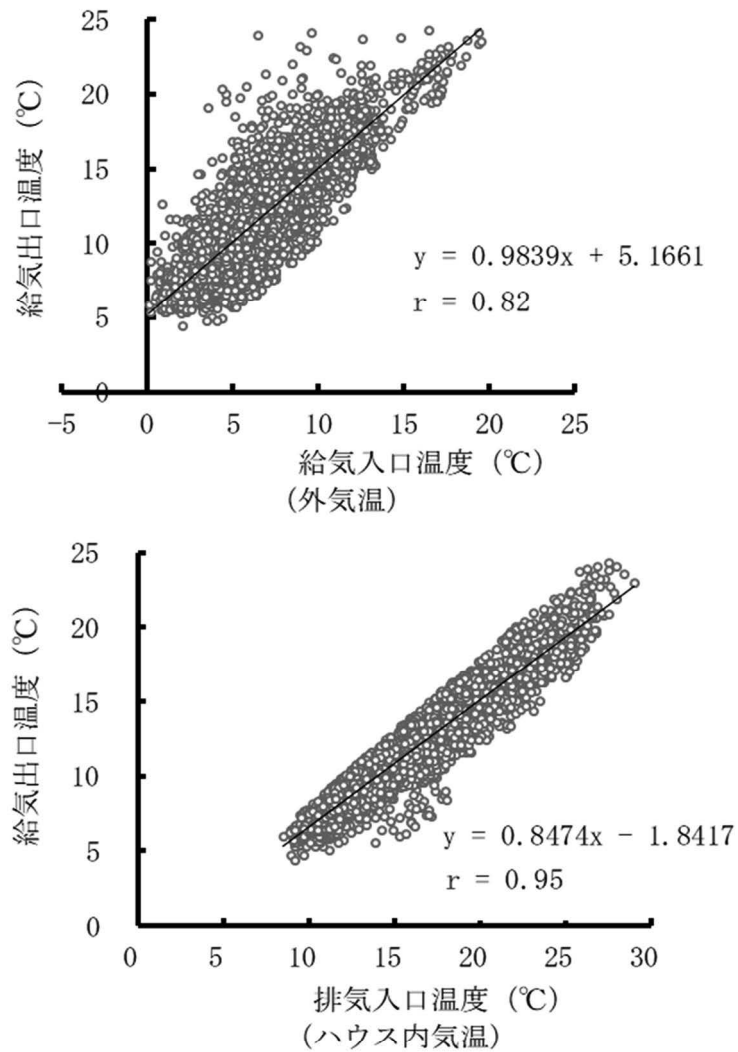


第3-1図 ハイブリッド型熱交換器

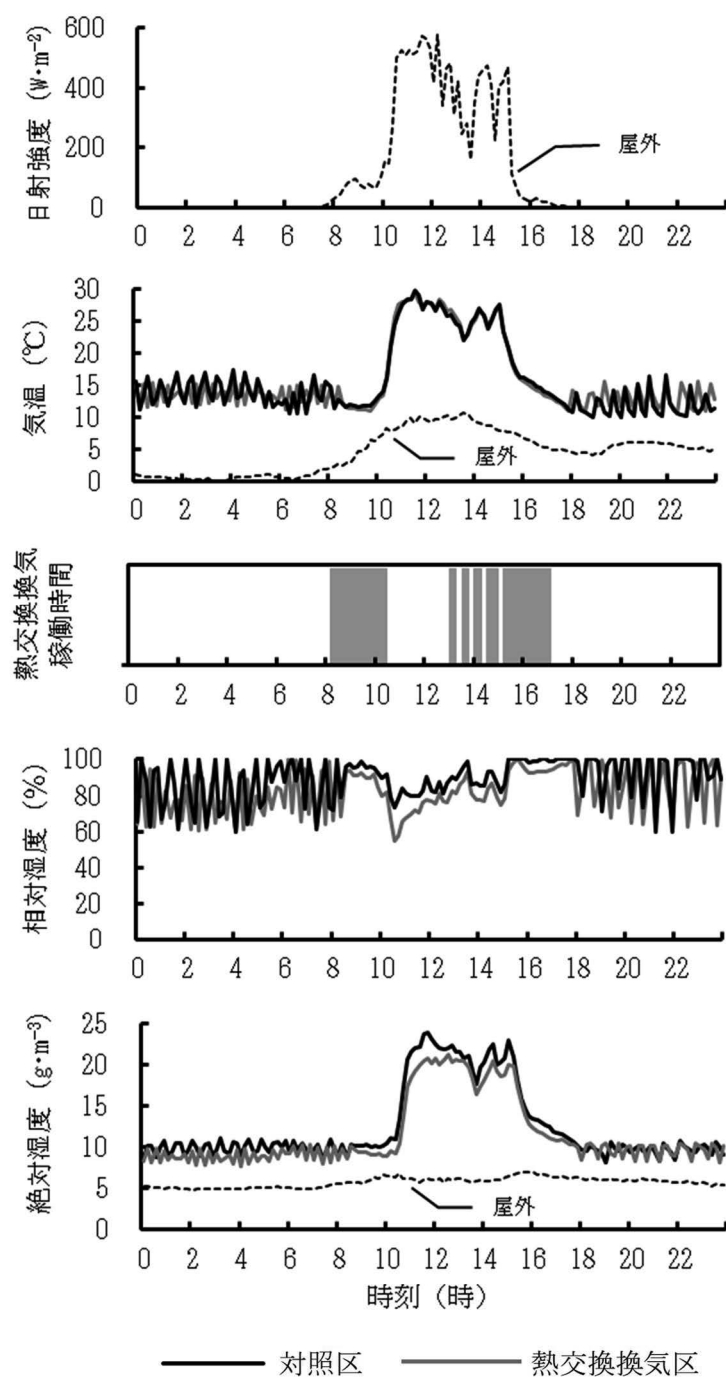
ハイブリッド方式は、給気と排気とが反対方向に流れる向流形と給排気が直交して流れる直交流形を組み合わせた熱交換器



第3-2図 供試した熱交換換気装置の外観と給排気の流路



**第3-3図** 熱交換換気装置の給気出口温度と給気入口温度および排気入口温度との関係  
熱交換換気を行った2013年12月6日～2014年3月31日に10分間隔で測定して、換気装置が稼働した時間の測定値のみ示した (n=2,947)



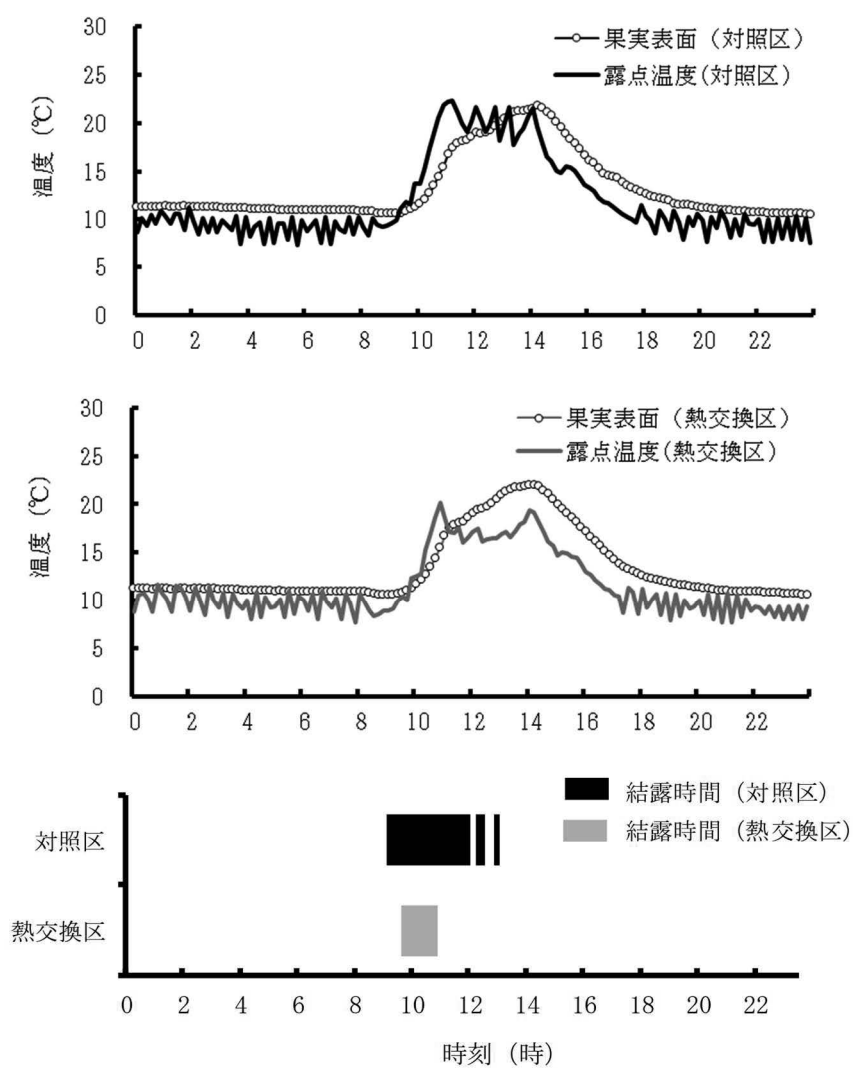
第3-4図 屋外の日射強度と外気温および熱交換換気の稼働時間ならびに換気方法が異なるハウス内の気温、相対湿度および絶対湿度の日変化  
2013年12月24日に10分間隔で測定

第3-1表 熱交換換気がハウス内の平均気温，平均絶対湿度および平均相対湿度に及ぼす影響

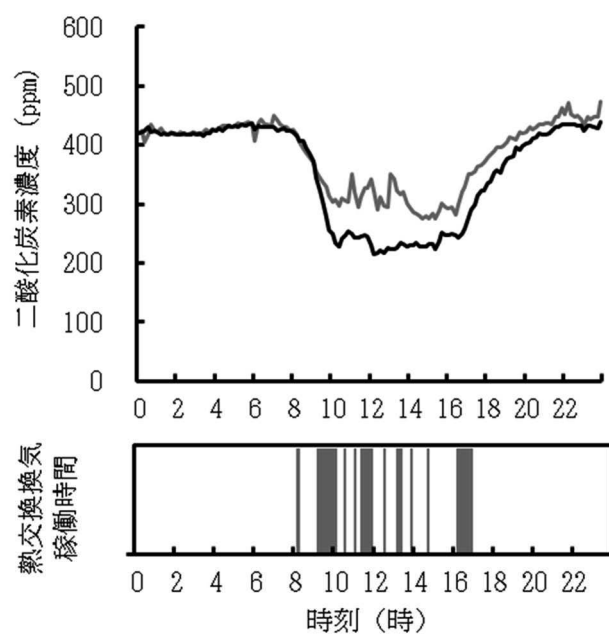
| 年次   | 換気方法 | 稼働時間 (h) <sup>z</sup> |     |     | 気温 (°C) |      |      | 絶対湿度 (g・m <sup>-3</sup> ) |      |      | 相対湿度 (%) |      |      |
|------|------|-----------------------|-----|-----|---------|------|------|---------------------------|------|------|----------|------|------|
|      |      | 12月                   | 1月  | 2月  | 3月      | 12月  | 1月   | 2月                        | 3月   | 12月  | 1月       | 2月   | 3月   |
| 2012 | 熱交換  | -                     | -   | -   | -       | 17.1 | 18.1 | 19.7                      | 24.7 | 12.8 | 12.5     | 12.7 | 15.9 |
|      | 対照   | -                     | -   | -   | -       | 17.1 | 18.2 | 20.2                      | 24.3 | 12.7 | 13.2     | 13.9 | 15.4 |
| 2013 | 熱交換  | 177                   | 128 | 131 | 54      | 18.1 | 20.6 | 20.3                      | 25.1 | 13.3 | 14.5     | 14.4 | 16.9 |
|      | 対照   | 0                     | 0   | 0   | 0       | 18.6 | 21.1 | 21.0                      | 25.3 | 14.9 | 16.2     | 15.4 | 16.7 |
|      |      |                       |     |     |         |      |      |                           |      |      |          |      |      |

<sup>z</sup>2012年の熱交換換気装置の稼働時間は未測定

<sup>y</sup>相対湿度，絶対湿度および気温は熱交換換気を行った8～17時の平均値



第3-5図 熱交換換気の有無がトマト果実表面温度，ハウス内露点温度  
および果実表面における結露時間に及ぼす影響  
2013年2月7日に10分間隔で測定



第3-6図 熱交換換気の稼働時間およびハウス内の  
二酸化炭素濃度の日変化  
2013年1月14日に10分間隔で測定

## 第2節 熱交換器を用いた除湿換気が促成トマトの収量・品質に及ぼす影響

### 緒 言

前節では、冬季の日中においてハウス内の相対湿度を指標に熱交換換気を行うと、植物体の結露を軽減できる水準まで栽培ハウス内を除湿できることが明らかとなった（龍ら，2018）。一方，換気に伴いハウス内の気温が僅かに低下するとともに，二酸化炭素濃度が対照区より高く推移した。吉岡（1990）は，ハウスを密閉して管理する時間が長い寡日照地域では，野菜の乾物生産量に対する二酸化炭素の施用効果が高いことを報告しており，除湿を目的とした換気が植物体各器官の分化・発育や物質生産にも影響を及ぼす可能性がある。そこで，本節では，トマトの促成作型における熱交換換気がトマトの収量や品質等の果実生産に及ぼす影響について検討した。また，空気湿度の調節効果については，かん水管理と一体で評価する必要があるため（高市，1998），かん水量を増量した影響についても併せて検討した。

### 材料および方法

#### 1. トマトの栽培方法

前節で述べたハウス内に定植した78株（株間40 cm，畝間135 cm，1条植で，3畝に定植）のうち，対照区および熱交換換気区それぞれ，1区当たり10株を生育および収量調査に供し，3反復した。かん水は，吐出口間隔10 cmの点滴チューブ（T-Tape，パイオニアエコサイエンス（株））を用い，対照区のハウス中央部に設置したpFメータ（DIK-8333，大起理化工業株式会社）の指示値が2.0～2.5に維持されるよう130～900 mL／株を数日間隔で両区とも同量を給水した（以下，標準かん水）。これに加えて，熱交換換気を行った期間のかん水量を標準かん水の1.3倍とした増量かん水を設けた。施肥は，OK-F-1（N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:8:17，OATアグリオ（株））の1,000～2,000倍希釈液を用い，1日当たり10～77 mg-N／株をかん水と同時に行った（増量かん水では，水のみ増量したため，施肥量は標準かん水と同等）。着果促進処理には，トマトトーン（パラクロロフェノキシ酢酸0.15%，石原バイオサイエンス（株））の100倍希釈液を用いて，果房ごとに3花が開花した時点で果房全体に散布した。各果房の第1果の直径が4 cm程度となった時点で，果房当たり最大4果に摘果した。摘心は行わず，5月末日まで栽培を継続した。

#### 2. トマトの開花日および収量の調査方法

着果促進処理を行った日を各果房の開花日とした。果実の収穫は週3回行い，2013年の実験のみ収穫果実を外観の形状で商品果と規格外果に分別し，それぞ



れについて果数および果重を測定した．商品果数を総収穫果数で除して100を乗じ，商品果率とした．週1回の間隔で，収穫果実から試験区ごとに6～22果を無作為に選び，屈折糖度計（MASTER-P $\alpha$ ，（株）アタゴ）を用いて糖度を測定した．

## 結 果

### 1. 開花日および収穫日（2013年）

標準かん水における果房段位別の開花日および収穫日を第3-7図に示す．熱交換換気区における各果房の開花日を収穫月別にみると，1～2月収穫の果房は11月（開花期Ⅰ），3月収穫の果房は12月上旬～1月中旬（開花期Ⅱ），4月収穫の果房は1月下旬～2月下旬（開花期Ⅲ）および5月収穫の果房は3月上旬～4月上旬（開花期Ⅳ）に開花していた．このため，熱交換換気による除湿効果が認められた12～2月における各果房の生育ステージは，開花期Ⅰでは果実肥大中期から収穫まで，開花期Ⅱでは開花から果実肥大初・中期まで，開花期Ⅲでは開花前から果実肥大初期までとなり，開花期Ⅳではこの期間中に開花しなかった．開花日は熱交換換気区と対照区との間に有意差は認められず，収穫日は1～4段果房（開花期Ⅰ，開花期Ⅱ）においてのみ熱交換換気区の方が対照区より2.6～5.2日遅かった．

### 2. 果実収量，果実糖度および成熟日数（2013年）

熱交換換気の有無およびかん水量の違いと収穫果数を第3-2表に示す．収穫果数は，1～2月において熱交換換気区の方が対照区より1果程度少なかったが，栽培期間の合計では有意な差は認められず，最終収穫果房段位ならびに果房当たりの平均収穫果数にも有意な差は認められなかった．商品果数は，1～2月および4月において熱交換換気区の方が対照区より1果程度有意に少なかったのに対し，3月は1果程度有意に多くなり，栽培期間の合計では有意な差は認められなかった．さらに，4月の商品果数は，かん水を増やした場合に有意に増加した．

熱交換換気の有無およびかん水量の違いと規格外果数および奇形果数を第3-3表に示す．規格外果数は，熱交換換気区が3月のみ対照区より1果程度少なく，4月には換気方法とかん水量との間に交互作用が認められ，熱交換換気区の増量かん水が最も少なかった．さらに，栽培期間の合計では，熱交換換気区が対照区に比べて標準かん水で0.2果少ない3.9果，増量かん水で1.8果少ない2.4果であった．規格外果数に差が認められた3月および4月に発生した奇形果は，主に空洞果，乱形果および小果であった．熱交換換気区は，空洞果がほとんど発生せず対照区より有意に少なかったが，熱交換換気区の標準かん水では，4月に小果が0.6果発生し，換気方法とかん水量との間に交互作用が認められた．



次に、熱交換換気の有無およびかん水量の違いと平均果重および商品果収量を第3-4表に示す。平均果重は、3月のみ熱交換換気区の方が対照区より軽くなったが、かん水量の比較では熱交換換気区の増量かん水では平均果重が195 g/果で、標準かん水の1.12倍となり、対照区の1.02倍より顕著に増加した。商品果収量は、1~2月のみ熱交換換気区と対照区との間に有意差が認められ、熱交換換気区の商品果収量は、標準かん水では対照区より311 g少ない1,395 g、増量かん水では対照区より153 g少ない1,596 gであった。一方、栽培期間の合計では有意な差は認められなかった。

次に、熱交換換気の有無およびかん水量の違いと果実糖度および成熟日数を第3-5表に示す。果実糖度は、対照区では標準かん水が4.8~5.6°，増量かん水が4.8~5.4°，熱交換換気区では標準かん水が4.7~6.4°，増量かん水が4.8~6.0°で推移しており、1~2月および3月は熱交換換気区が対照区より0.3~1.5°高かった。さらに3月は、増量かん水の果実糖度が標準かん水より0.2~0.4°低かった。また、各果房における開花から収穫までの成熟日数は、熱交換換気区が1~2月および3月において対照区より長くなり、試験区間の差は標準かん水では3~7日、増量かん水では5~9日であった。さらに3月は、増量かん水の成熟日数が標準かん水より2~4日短かった。

## 考 察

トマトの商品果収量は、1~2月のみ熱交換換気区と対照区との間に有意差が認められた。その一方で、栽培期間の合計では有意な差は認められなかった。熱交換換気区では、対照区と比較して、1~2月は商品果数が少ないため商品果収量が減少したが、3月は商品果数が多いものの平均果重が軽く有意な差は認められないことが明らかになった。

トマトの生育と気温との関係について、トマトの成長および着果のための生育適温は、昼温28~24℃の範囲にあり（門馬，2001），トマト果実の成熟日数は、適温の範囲内では低温ほど長くなること（Adams et al., 2001）が報告されている。本実験では、熱交換換気区における12~2月の平均気温（時間は8~17時）が、2012年、2013年とも平均20℃前後で生育適温を下回るとともに、対照区より0.1~0.7℃低かった。熱交換換気処理の開始前後に開花し、熱交換換気下で果実が肥大した果房（開花期Ⅰおよび開花期Ⅱ）では、果実の収穫日が対照区より遅く、開花から収穫までの成熟日数が長くなり、1~2月の収穫果数が1果程度少なかった。以上のことから、熱交換換気区における1~2月の収穫果数の減少は、ハウス内気温の低下による収穫期の遅れが要因であると考えられた。

果実肥大について、トマトの果実はS字型成長曲線をとり、発育段階の前半で肥大の大部分は決定すること、果重は果実に輸送される水や糖などの集積に依存しており、水分ストレスなどにより果実への水の流入が減少した場合には、果実肥大が抑制されるとともに果実内の糖が濃縮され糖度が高まることが報告されている（北野ら，1998；斉藤，1984b；Sakamoto et al., 1999）。また，荒木（1993）は，ハウス内の相対湿度の低下につれてトマト葉の水ポテンシャルが低下したと報告している。本実験の結果，熱交換換気区では，果実が熱交換換気下で肥大し，3月に収穫した果房（開花期Ⅱ）の平均果重が対照区より軽かった。さらに，かん水量を増量した場合の果重は，対照区より著しく増加し，果実糖度が有意に低下した。このことから，熱交換換気区において3月の果重が軽かった主な要因としては，除湿に伴う水分ストレスが影響していると考えられた。このため，熱交換換気を行う場合には，水ポテンシャルの測定を行うなど，過度な水分ストレスがないように留意する必要があると考えられた。

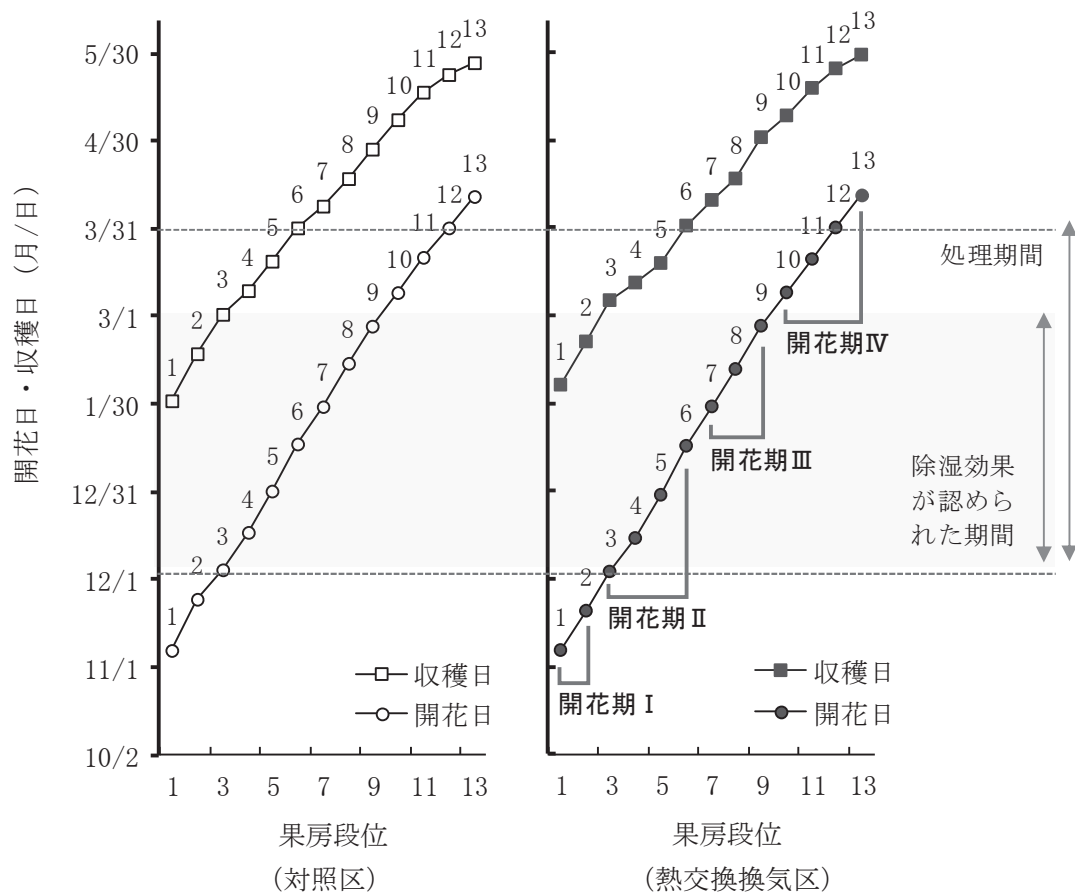
一方，熱交換換気区の果実糖度は，平均果重に試験区間の差が認められなかった1～2月収穫の果房（開花期Ⅰ）においても，対照区より有意に高かった。吉岡（1990）は，ハウスを密閉して管理する時間が長い寡日照地域では，野菜の乾物生産量に対する二酸化炭素の施用効果が高いことを報告している。また，熊倉・宍戸（1994）は，異なる昼夜温度条件下で果実発育期のイチゴを育て，特に昼温が低い場合には成熟日数が長く，果実糖度が高くなったことから，光合成産物が供給される期間の長さが果実内での糖の蓄積を左右すると考察している。本実験では，換気量が少ない曇天日において，ハウス内の二酸化炭素濃度が熱交換換気区で高く推移した。また，1～2月収穫の果房は果実肥大の中期から収穫までを熱交換換気下で経過し，熱交換換気区の成熟日数は対照区より有意に長かった。このことから，熱交換換気によって外気から供給された二酸化炭素が光合成を促進するとともに，成熟期間が長くなることで同化産物が増加して，1～2月に収穫した果実の糖度が高まったと考えられた。

熱交換換気区の規格外果は，3月に収穫した果房において空洞果がほとんど発生せず，対照区より有意に少なかった。空洞果は，弱光条件などにより同化産物が少ない場合に発生しやすいことから（高尾・田中，1984），熱交換換気による物質生産の変化が外観などの品質にも影響を及ぼした可能性がある。一方，トマトの増収を目的とした光合成促進に必要な二酸化炭素の施用量は $3 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ （床面積） $\cdot \text{h}^{-1}$ と報告されており（大須賀，2003），本実験で用いた熱交換換気装置の二酸化炭素供給能力を上回ると考えられる。このため，熱交換換気に伴うハウス内の二酸化炭素濃度の推移や分布とトマト葉のガス交換速度を日射量別に解析するなど，二酸化炭素の施用効果については，今後，定量的

な評価が必要であると考えられた。本研究では、病害の影響と分離して生育・収量への影響を評価するため、予防も含め化学薬剤を慣行より多回数散布したことから、熱交換換気装置を導入していない対照区でも果実において灰色かび病などの病徴は確認されなかった（データ略）。今後、熱交換換気装置の生産現地への普及推進を判断するには、福岡県における熱交換換気の病害抑制効果を評価し、設備費との費用対効果を明らかにする必要がある。

## 要 約

本実験では、冬季の日中において熱交換器を用いた除湿換気を行い、促成トマトの収量・品質に及ぼす影響について検討した。熱交換換気下で栽培すると、1～2月の商品果収量は対照より少ないが、1～5月の合計収量は対照と有意差はなかった。また、熱交換換気下の果実は、3月および4月の空洞果数が少なく、1～3月の果実糖度が高まった。このことから、熱交換換気は1～5月の収量が対照と有意差がない一方で、対照に比べて果実品質が向上することが明らかになった。加えて、熱交換換気は耕種的防除を目的とした除湿技術として有効であると考えられた。



第3-7図 熱交換換気が開花日および収穫日に及ぼす影響 (標準かん水)

第3-2表 熱交換換気の有無とかん水量の違いが収穫果数、最終収穫果房段位、果房当たりの平均収穫果および商品果数に及ぼす影響 (2013年)

| 換気方法         | かん水  | 収穫果数（果／株） |      |      |      | 最終収穫<br>果房段位<br>（段） | 平均収<br>穫果数<br>（個／果房） | 商品果数（果／株） |      |      |      |      |      |
|--------------|------|-----------|------|------|------|---------------------|----------------------|-----------|------|------|------|------|------|
|              |      | 1～2月      | 3月   | 4月   | 5月   |                     |                      | 合計        | 1～2月 | 3月   | 4月   | 5月   | 合計   |
| 熱交換<br>対照    | 増量   | 8.0       | 11.8 | 11.3 | 13.3 | 44.5                | 13.3                 | 3.3       | 7.6  | 11.1 | 10.4 | 13.0 | 42.1 |
|              |      | 9.2       | 11.1 | 12.2 | 11.8 | 44.2                | 13.0                 | 3.4       | 8.4  | 9.7  | 10.8 | 11.2 | 40.0 |
| 熱交換<br>対照    | 標準   | 7.2       | 11.4 | 10.8 | 12.9 | 42.4                | 13.0                 | 3.3       | 6.8  | 10.5 | 8.8  | 12.3 | 38.5 |
|              |      | 8.8       | 11.9 | 11.4 | 12.2 | 44.4                | 13.3                 | 3.2       | 8.3  | 9.9  | 10.4 | 11.6 | 40.2 |
| 二元配置<br>分散分析 | 換気方法 | **        | ns   | ns   | ns   | ns                  | ns                   | ns        | **   | *    | *    | ns   | ns   |
|              | かん水量 | ns        | ns   | ns   | ns   | ns                  | ns                   | ns        | ns   | ns   | *    | ns   | ns   |
|              | 交互作用 | ns        | ns   | ns   | ns   | ns                  | ns                   | ns        | ns   | ns   | ns   | ns   | ns   |

\*\*および\*は、二元配置分散分析によりそれぞれ1%および5%水準で有意差あり、nsは有意差なし

第3-3表 熱交換換気の有無とかん水量の違いが規格外果数および奇形果数に及ぼす影響 (2013年)

| 換気方法 | かん水 | 規格外果数 (果／株) |     |     |     |     | 奇形果数 (果／株) |     |     |      |     |     |     |     |
|------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
|      |     | 1～2月        |     |     |     |     | 3月収穫       |     |     | 4月収穫 |     |     |     |     |
|      |     | 1～2月        | 3月  | 4月  | 5月  | 合計  | 空洞         | 乱形  | 小果  | その他  | 空洞  | 乱形  | 小果  | その他 |
| 熱交換  | 増量  | 0.4         | 0.8 | 0.9 | 0.3 | 2.4 | 0.0        | 0.3 | 0.1 | 0.4  | 0.0 | 0.7 | 0.0 | 0.2 |
| 対照   |     | 0.8         | 1.4 | 1.4 | 0.6 | 4.2 | 0.8        | 0.2 | 0.1 | 0.3  | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 0.0 |
| 熱交換  | 標準  | 0.4         | 0.9 | 2.0 | 0.6 | 3.9 | 0.1        | 0.4 | 0.3 | 0.1  | 0.0 | 1.0 | 0.6 | 0.4 |
| 対照   |     | 0.5         | 2.0 | 1.0 | 0.7 | 4.1 | 1.4        | 0.3 | 0.1 | 0.2  | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 0.1 |
| 換気方法 |     | ns          | *   | ns  | ns  | *   | *          | ns  | ns  | ns   | *   | ns  | ns  | ns  |
| かん水量 |     | ns          | ns  | ns  | ns  | ns  | ns         | ns  | ns  | ns   | ns  | ns  | ns  | ns  |
| 交互作用 |     | ns          | ns  | *   | ns  | ns  | ns         | ns  | ns  | ns   | ns  | ns  | *   | ns  |

\*は、二元配置分散分析により5%水準で有意差あり, nsは有意差なし

第3-4表 熱交換換気の有無とかん水量の違いが商品果の平均果重および収量に及ぼす影響 (2013年)

| 換気方法         | かん水  | 平均果重 (g/果) |     |     |     |     | 商品果収量 (g/株) |       |       |       |       |
|--------------|------|------------|-----|-----|-----|-----|-------------|-------|-------|-------|-------|
|              |      | 1-2月       | 3月  | 4月  | 5月  | 全期間 | 1-2月        | 3月    | 4月    | 5月    | 合計    |
| 熱交換<br>対照    | 増量   | 210        | 195 | 227 | 174 | 199 | 1,596       | 2,165 | 2,361 | 2,264 | 8,385 |
|              |      | 208        | 200 | 207 | 185 | 200 | 1,748       | 1,938 | 2,223 | 2,071 | 7,980 |
| 熱交換<br>対照    | 標準   | 205        | 174 | 223 | 172 | 190 | 1,395       | 1,826 | 1,971 | 2,118 | 7,309 |
|              |      | 206        | 197 | 220 | 179 | 199 | 1,706       | 1,952 | 2,295 | 2,066 | 8,019 |
| 二元配置<br>分散分析 | 換気方法 | ns         | *   | ns  | ns  | ns  | *           | ns    | ns    | ns    | ns    |
|              | かん水量 | ns         | *   | ns  | ns  | ns  | ns          | ns    | ns    | ns    | ns    |
|              | 交互作用 | ns         | ns  | ns  | ns  | ns  | ns          | ns    | ns    | ns    | ns    |

\*は、二元配置分散分析により5%水準で有意差あり，nsは有意差なし

第3-5表 熱交換換気の有無とかん水量の違いが果実糖度および成熟日数に及ぼす影響 (2013年)

| 換気方法                      | かん水  | 糖度 (° Brix) <sup>z</sup> |     |     |     |  | 成熟日数 <sup>y</sup> |    |       |
|---------------------------|------|--------------------------|-----|-----|-----|--|-------------------|----|-------|
|                           |      | 1-2月                     | 3月  | 4月  | 5月  |  | 1-2月              | 3月 | 4月 5月 |
| 熱交換<br>対照                 | 増量   | 6.0                      | 5.7 | 5.1 | 4.8 |  | 91                | 82 | 64 53 |
|                           |      | 4.8                      | 5.4 | 4.9 | 5.0 |  | 82                | 77 | 62 51 |
| 熱交換<br>対照                 | 標準   | 6.4                      | 6.1 | 5.0 | 4.7 |  | 91                | 84 | 67 55 |
|                           |      | 4.9                      | 5.6 | 4.9 | 4.8 |  | 84                | 81 | 64 54 |
| 二元配置<br>分散分析 <sup>x</sup> | 換気方法 | ***                      | *   | ns  | ns  |  | ***               | ** | ns ns |
|                           | かん水量 | ns                       | *   | ns  | ns  |  | ns                | *  | ns ns |
|                           | 交互作用 | ns                       | ns  | ns  | ns  |  | ns                | ns | ns ns |

<sup>z</sup>糖度は、週1回測定し、月別に平均して示す (n=144~165)

<sup>y</sup>成熟日数は、各月に収穫した果房の開花～収穫までの日数を平均して示す

<sup>x</sup>\*\*\*, \*\*および\*は、二元配置分散分析によりそれぞれ0.1%, 1%および5%水準で有意差あり, nsは有意差なし



## 第4章 総括

トマトの促成栽培では、冬季の日射量が収穫量の多少を制限する主な要因であるが（東出，2018；山川，1982），これに加えて，福岡県のような冬季の寡日照地域では，低日射に伴うハウス内の気温や湿度および二酸化炭素濃度等の気象環境要因も，生育を阻害する条件になりやすい．これら気象要因は，光合成速度や同化産物の分配といった物質生産に直接作用するだけでなく，障害果や糸状菌等による病害の発生にも悪影響を及ぼすと考えられる．そこで本研究では，ハウス内の気象環境のうち，主に冬季の低日射に起因する日中の生育に不適な環境要因に着目し，加温と熱交換換気によってトマトの生育に適する範囲に制御する施設環境制御方法の開発を試みた．

第2章では，冬季寡日照地域における日中の加温がトマト収量に及ぼす影響について明らかにすることを目的として，まず第1節において，人工光利用型の閉鎖型育苗施設を用い，トマトの収量と密接な関連のある乾物生産（東出，2018）に及ぼす昼温の影響について検討した．その結果，光合成有効放射  $10 \sim 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  の弱光条件下において，昼温を高めることで光利用効率が高まり，乾物重が増加することが明らかとなった（龍ら，印刷中）．光合成に有効な波長域やハウス内への入射割合等を考慮すると，日中加温を行う指標は，屋外の日射  $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  以上となる概ね9～16時の間，ハウス内の気温が  $20^{\circ}\text{C}$  以下の条件で加温することが合理的であると考えられた．これらは，弱光条件下におけるトマトの温度反応メカニズムの解明に寄与するとともに，冬季の日中における適温制御の有効性を示すものである．

第2節では，トマトの促成栽培における日中の加温が，商品果収量に及ぼす影響について検討した．日射量が減少する1～2月の日中にハウス内の気温を  $20^{\circ}\text{C}$  に加温し，低昼温を回避することで，開花間隔ならびに果実の成熟期間が短縮され，奇形果が減少して商品果数が増加した．さらに，日中加温処理期間中に開花した果房において果実肥大が促進された．これは光合成速度が高まり物質生産が増加するとともに，果実への転流が増加することによって果重が増加したと推察された．これらの要因により，4～5月の商品果収量が大幅に増加することが明らかとなった．日中の加温に関する研究例は，飛川（2007）がナスにおいて適温に制御するため日中に加温すると，稔性花粉重量が増加し着果率および収量が高まったことを報告した以外にない．そのため，日中加温がトマト果実の肥大や形態に及ぼす影響について果実の成熟ステージ別に明らかにし，冬季の低日射条件下でも日中加温を行うことで大幅に増収する可能性を示した（龍ら，2016）ことは，大きな意義があると考えられた．

第3節では、福岡県の促成栽培において多く発生する奇形果のうち、網入り果に注目し、網入り果発生に及ぼす昼温の影響について検討した。夜温を8℃一定に制御した場合、昼温20℃では網入り症状が強く現れたのに対し、昼温24℃および昼温28℃では症状が軽減された。さらに、促成トマト栽培において開花前から開花期のハウス内の気温が日中20℃以下にならないよう加温すると、対照区に比べて網入り果の発生を抑制できることが明らかとなった。これによって、果皮が薄くなる形態的な異常が軽減され、果実硬度が高まった（龍ら，2014）。このことは、これまで全く不明であった春季の軟果発生（龍ら，2010）の要因解明に寄与するとともに、日中加温が、日もち性の悪い果実（門馬，2001）の発生を抑制し、果実品質の向上を通じて流通上の課題解決に繋がることを示すものであり、市場価格の決定に際し、良い影響を及ぼすと考えられた。

第4節では、日中加温の熱収支を明らかにする目的で、パイプハウスを供試して暖房負荷を実測した。福岡県の単棟ハウスにおける日中加温時の暖房負荷は、ハウス被覆面からの放熱量が暖房負荷の82%～89%を占めていた。また、福岡県のトマト栽培ハウス内の気温と外気温から推定した日中加温の期間暖房負荷は39.6 MJ・m<sup>-2</sup>で、10a当たりの燃油コストは9万円程度（A重油価格80円・L<sup>-1</sup>で算出）となることが明らかとなった（龍ら，印刷中）。第2節において確認したトマトの増収効果を基に、日中加温の費用対効果を試算すると、販売金額が30万円程度（増収効果は2か年の平均値、販売単価は300円・kg<sup>-1</sup>で試算）増加すると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十分な費用対効果が期待できると考えられた。一方、日中加温の暖房負荷はハウスの被覆条件や表面積等によって変動するため、燃油コスト削減の観点からは、特に暖房負荷の大きい加温開始時には内張を開放しないことが、栽培管理上の留意点として挙げられた。日中加温は既存の温風暖房機を用いるため、新たな設備投資の必要がなく、生産現場で容易に実施できるメリットがあることから、福岡県内のトマト栽培農家のうち、20戸程度でハウス全体もしくは一部で日中加温を実証しており、明らかな増収効果が認められている。これまでに行った日中加温に関する一連の報告（龍・井手，2014；龍ら，2016；龍ら，（印刷中））を基に、近年、日中加温による増収効果がナス（古賀ら，2021）やイチゴ（田川ら，2021）でも確認されている。さらに、トルコギキョウの冬出し栽培では、高昼温管理によって開花の遅延や草丈の抑制を回避できることが報告されている（工藤ら，2012）。このことは、冬季における日中加温の汎用的な有効性を強く示唆するものであり、施設園芸分野での適用拡大が今後も期待される。

第3章では、熱交換器を用いた除湿換気がトマトの生育や収量に及ぼす影響について明らかにすることを目的として、まず第1節では、ハウス内の気象環境

に及ぼす熱交換換気の影響について調査した。その結果、ハウス内の相対湿度を指標にして熱交換換気を行うと、ハウス内の気温が対照よりわずかに低下するとともに、朝夕の時間帯を中心に湿度が低下し、果実の結露時間が短縮した（龍ら，2018）。このことは、熱交換換気が、これまで朝夕の除湿換気時には避けられなかったハウス内の気温低下を軽減できる省エネルギー的な換気法であるとともに、耕種的防除を目的とした除湿技術としての有効性を示すものである。一方、ハウス内の蒸発散速度や外気の絶対湿度は刻々と変化するため、熱エネルギーの観点からは、ハウス内の相対湿度を指標とした制御が必ずしも最適でない場合が多い。今後、ハウスの熱収支に基づいた換気流量の制御（安場ら，2009）を組み合わせることで、更に熱損失の少ない除湿換気が可能になると考えられた。

第2節では、冬季の日中において熱交換器を用いた除湿換気を行い、促成トマトの収量や品質等の果実生産に及ぼす影響について検証した。その結果、第1節で明らかとなったハウス内気温のわずかな低下が要因と考えられる収穫期の遅延が認められたが、1～5月の合計収量は対照と有意な差はなかった。一方、熱交換器を用いた除湿換気により、果実の糖度が高まるとともに、同化産物が少ない場合に発生しやすい空洞果（高尾・田中，1984）がほとんど発生しなかった。このことは、熱交換換気によってハウス内の二酸化炭素濃度が高まり、同化産物が増加したことを示唆しているが、本実験の換気条件から算出した二酸化炭素供給能力は、トマトの増収を目的とした光合成促進に必要な二酸化炭素の施用量である $3\sim 6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ （床面積） $\cdot\text{h}^{-1}$ を下回ることから（大須賀，2003），その効果は限定的であると考えられた。一方で、わが国の農林水産業における二酸化炭素排出量のうち、施設園芸が占める割合は45%と極めて高く、地球温暖化を促進するとされる二酸化炭素の排出量削減は、施設園芸の分野においても早期に解決すべき重要な課題となっている（及川，2007）。従って、大気中の二酸化炭素をハウス内に供給できる熱交換換気は、同化産物の増加効果とともに化石燃料への依存度を低減できる新たな環境制御技術の開発につながると考えられた。第3章では、熱交換換気による気象環境の変化が収量や品質等の果実生産に及ぼす影響について病害の影響と分離して評価したため、換気による病害抑制効果の評価が課題として残された。浅井（2016）が全国50戸のトマト生産農家に対して行った病害発生に関する調査結果によると、灰色かび病の被害額の平均値は10a当たり37万円であり、被害額の低減はトマト経営にとって重要な課題である。今後、熱交換換気の生産現地への普及推進を判断するには、福岡県における熱交換換気の病害抑制効果を評価し、設備費との費用対効果を明らかにする必要があると考えられた。

以上、第2章および第3章の結果から、日中加温および熱交換換気は、冬季寡日照地域におけるハウス内の気象環境改善を通じて、トマトの増収および果実品質向上にそれぞれ有効であることが明らかとなった。

本研究の今後の展開として、日中加温と熱交換換気の組み合わせによる気象環境制御が考えられる。しかし、日中加温によってハウス内の気温を高めると相対湿度は低下し、除湿に必要な換気量は減少する。このように、ハウス内の気象要因は、相互に影響を及ぼすだけでなく日射の影響により刻々と変化することから、暖房機や換気等の設備を同時に制御するには熱収支をリアルタイム計測する技術が必須となる。星・林（2005）は、各種センサーや動作機器にマイコンを搭載し、ネットワーク接続することで相互通信しながら自立動作が可能な自律分散型のユビキタス環境制御システムを開発している。これまでに、温湿度センサーの情報から熱収支を解析してネットワーク上に発信する機能を持たせた機器等も既に開発されていることから（安場ら、2009）、これら制御技術を適切に組み合わせることによって、トマトの増収に寄与する技術として体系化していくことが可能になると考えられる。

## Development of Environment Control Techniques for Forcing Culture of Tomato under Low Sunshine Region

Katsutoshi RYU

### Summary

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is native to the plateau area of northwestern South Africa, and the production in the world is about 180 million tons (FAOSTAT, 2019). Tomato cultivation in Japan started around 1870s, and the current production is 724,000t with an area of 11,800ha, of which approx. 60% (6,974ha) is grown in plastic house (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2020). Tomato cultivation in Fukuoka Prefecture is mostly performed with forcing cultivation, in which seedlings are planted from September to October and fruits are harvested from December to June of the following year. As the price of tomato is high from winter to spring, the yield of this period is beneficially important. However, meteorological environment in the greenhouse during winter in Fukuoka is not suitable for tomato cultivation because of the low sunshine. Daytime temperatures in the greenhouse are often lower than the optimum growth temperature for tomato, so that the ventilators are usually closed in the morning. As a result, humidity inside greenhouse tends to increase, and condensation often occurs on the shaded surfaces of fruits and leaves. This condensation sometimes induces serious plant diseases, such as gray mold. Ventilation is effective for dehumidifying because low humidity outside air is supplied to the inside of the house. It is, however, difficult to maintain the optimum growth temperature of tomato because temperature of the outside air is low. Furthermore, the concentration of carbon dioxide in the greenhouse remained lower than that of outside because of the little ventilation, and the photosynthesis rate is dsupressed.

The author made an attempt to develop environmental control system to improve meteorological environment for forcing tomato cultivation in greenhouse during winter by daytime heating and the heat exchanging ventilation.

Experiments were performed to investigate the influence of daytime heating temperature on the dry matter production in tomato plants grown under low light conditions. The light use efficiency and dry weight of tomato plants increased significantly by high daytime temperature when the light intensity was between 10 and 25 W·m<sup>-2</sup>

<sup>2</sup>PAR. It was considered that daytime heating is effective for accelerating the tomato growth in production fields when the solar radiation intensity is  $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  or more.

Experiments were performed to investigate the effect of daytime heating on the marketable fruit yield during the winter season. An increase of the minimum day temperature from  $8^{\circ}\text{C}$  to  $20^{\circ}\text{C}$  by a heater resulted in a significant increase of the number of marketable fruits, by the increase of the marketable fruit rates and the decrease of the intervals between anthesis and fruit ripening. In addition, fruit growth after flowering was accelerated when tomato plants were heated in the daytime. It was assumed that daytime heating accelerated photosynthesis of the leaves and translocation to fruits. As a result, the marketable fruit yield on daytime heating was larger than in the control from April to May.

Blotching on fruit surface, occurring by the appearance of vascular bundle on the surface with low firmness is an unfavorable character in tomato. Effect of day temperature on the appearance of blotching of fruit surface was also investigated. When the tomato plants were cultivated in a phytotron with the day temperatures at 20, 24 and  $28^{\circ}\text{C}$  under the same night temperature at  $8^{\circ}\text{C}$ , degree of the blotching of fruits were severe under the day temperature at  $20^{\circ}\text{C}$ . The values of the blotching intensity decreased as the day temperature increased from 20 to  $28^{\circ}\text{C}$ . Applicability of the results to the tomato plants in a greenhouse was also examined. Increase of minimum day temperature from  $8^{\circ}\text{C}$  to  $20^{\circ}\text{C}$  by a heater brought a significant decrease of the appearance of blotching on tomato fruit surface, and resulted thick fruit skin and high firmness.

The daytime heating load of the pipe framed greenhouse under low-light conditions in winter was determined in order to clarify the heat balance during daytime heating. The daytime heating load in a single span greenhouse in Fukuoka Prefecture increased as the setting temperature became higher, and heat loss from the covering surface accounted for 82% to 89% of the total heat loss from the greenhouse. In addition, it was considered that the heating load for daytime heating could be calculated by subtracting the value of the untreated house from heat loss and soil heat flux of the heated house. The values of monthly heating load from December to February were similarly higher than those in March in forcing culture of tomato. The total fuel consumption for daytime heating (heating temperature setpoint:  $20^{\circ}\text{C}$ ) from December to March was estimated to be  $1.20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ . The amount of fuel consumption was the largest



between 9 to 10 o'clock when heating was started, accounting for 20 to 30% of the total.

The effects of diurnal ventilation with a heat exchanger for dehumidifying were investigated to improve the yield and quality of marketable tomato fruits grown in a greenhouse during winter. Although the heat exchanging ventilation according to the index of relative humidity lowered the temperature in the greenhouse, the period of dew condensation on the fruits reduced as a result of decreased humidity. The concentration of carbon dioxide in the greenhouse remained higher than that of the control under cloudy days.

Although the marketable yield in the heat exchange ventilation treatment was lower than that in control from January to February, there was no significant difference in the total yield between the treatments from January to May. In addition, heat exchange ventilation treatment resulted lower number of puffy fruits in March and April and higher total soluble solid contents from January to March as compared to the control. That is to say, it was revealed that the heat exchange ventilation treatment enables to improve tomato quality with no marketable yield reduction, showing usefulness as a dehumidifying technique.

This investigation is the innovative study that clarified the effectiveness of daytime heating and heat exchange ventilation on yield and quality of tomato by improving meteorological environment in greenhouse during winter.

## 謝辞

本論文の取り纏めにあたって、終始丁寧な御指導を賜った九州大学大学院農学研究院教授尾崎行生博士，御助言と御校閲を賜った九州大学熱帯農学研究センター教授宮島郁夫博士，九州大学実験生物環境制御センター教授吉田敏博士，九州大学大学院農学研究院准教授安武大輔博士，御助言と御支援を賜った九州大学大学院農学研究院助教水ノ江雄輝博士に謹んで感謝の意を表します。また，ゼミ等を通じて，本研究に対して多くの助言を頂きました園芸学教室の皆様にご心から御礼を申し上げます。

本論文の作成にあたり，細部にわたる御指導を頂いた（元）福岡県農林業総合試験場資源活用研究センター長森山友幸博士，（元）福岡県農林業総合試験場筑後分場長平島敬太博士ならびに福岡県農林業総合試験場筑後分場長下村克己博士に心より感謝申し上げます。

共同で研究に取り組んで頂いた（元）福岡県農林業総合試験場野菜部（現，資源活用研究センター）の井手治氏ならびに福岡県農林業総合試験場野菜部徳永恵美氏には多大な御協力を，また株式会社イーズの黒川和哉氏および毛利勇二氏には御助言と御協力を頂きました，謹んで感謝申し上げます。

実験の実施および分析にあたり，試験圃場における装置・資材の設営，調査等の業務に御尽力頂きました福岡県農林業総合試験場野菜部施設野菜チーム，福岡県農林業総合試験場資源活用研究センターバイオマスチームならびに福岡県農林業総合試験場筑後分場野菜チームの研究員，農業技術員および臨時職員の皆様，また本研究に関わって頂いた全ての皆様に，厚く感謝申し上げます。



## 引用文献

- Adams, S. R., K. E. Cockshull and C. R. J. Cave. 2001. Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Ann. Bot.* 88: 869–877.
- 青木宏史. 1997. 基礎編. 仕立て方・整枝と生育. p. 463-490. 農文協編. 農業技術大系野菜編トマト. 農文協. 東京.
- 荒木陽一. 1993. 環境条件がトマトの体内水分に及ぼす影響. *園学雑.* 61: 827–837.
- Asahira, T., H. Takagi, Y. Takeda and Y. Tsukamoto. 1968. Studies on fruit development in tomato II. Cytokinin activity in extracts from pollinated, auxin- and gibberellin-induced parthenocarpic tomato fruits and its effect on the histology of the fruit. *Mem. Res. Inst. Food Sci. Kyoto Univ.* 29: 24–54.
- Asahira, T., T. Hosoki and K. Shinya. 1982. Regulation of low temperature induced malformation of tomato fruit by plant growth regulators. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 50: 468–474.
- 浅井雄一郎. 2016. 病害抵抗性トマトの育種によるトマト栽培における収益性改善に関する研究. 三重大学大学院地域イノベーション学研究科学位論文.
- FAOSTAT. 2019. (<http://www.fao.org/faostat/en/#home>)
- Fernandez, J. E. and B. J. Bailey. 1994. The influence of fans on environmental conditions in greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 58: 201–210.
- 藤村 良・伊藤純吉・藤本治夫. 1964. トマトの奇形果に関する研究（第3報）育苗期間中の低温処理時期と苗勢が乱形果の発生に及ぼす影響. *兵庫農試研報.* 12: 66–69.
- 深澤郁男・和田悦郎・木村 栄. 1993. トマトの窓あき果の発生要因について. *栃木農試研報.* 40: 13–28.
- 福田祐貴・林真紀夫. 2004. 蒸発冷却法用VETH線図ソフトウェアの開発. *農業情報研究.* 13: 203–212.
- 福岡県農林水産部経営技術支援課. 2014. トマト（促成栽培）. p. 43–52. 主要野菜の栽培技術指針（第10版）. 福岡県農林水産部経営技術支援課. 福岡.
- 浜本 浩・星 岳彦・尾島一史・山崎敬亮. 2010. 3段取りトマト栽培における群落内補光の時間帯が収量に及ぼす効果と補光の経済性. *植物環境工学.* 22: 95–99.
- 羽石重忠・石原良行. 2005. トマト促成栽培におけるハイワイヤ-整枝法の特性. *栃木農試研報.* 55: 15–26.

- 林 真紀夫. 1985. 温室暖房の熱負荷に関する実証的研究. 千葉大園芸学部学報. 35: 117-219.
- 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: 133-146.
- Higashide, T. 2015. Factors pertaining to dry matter production in tomato plants. p. 1-23. In: T. Higashide (ed.). *Solanum lycopersicum: Production, biochemistry and health benefits*. Nova Science Publishers, New York.
- 飛川光治. 2007. ナスの促成栽培における日中加温が冬期の稔性花粉重に及ぼす影響. 園学研. 6: 247-250.
- 平 栄蔵・位田晴久. 2012. 農業用ビニールハウス内の水蒸気循環と熱収支に関する研究. 宮崎工技セ研報. 57: 13-17.
- 久枝和昇・高山弘太郎・仁科弘重・東 幸太・有馬誠一. 2007. 大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究 - トマト群落における光強度とCO<sub>2</sub>固定量の垂直分布の解析-. 植物環境工学. 19: 19-26.
- 堀 裕. 1983. トマトにおける光合成産物の転流. 園学雑. 52: 113-115.
- 星 岳彦・林 泰正. 2005. 効率化・低コスト化を達成するユビキタス施設環境制御システム. 施設と園芸. 131: 22-26.
- Hosoki, T., K. Ohta and T. Asahira. 1990. Cultivar differences in fruit malformation in tomato and its relationship with nutrient and hormone levels in shoot apices. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 58: 971-976.
- Hosoki, T., K. Ohta, T. Asahira and K. Ohta. 1985. Relationship between endogenous hormone and nutrient levels in shoot apices of tomato and occurrence of fruit malformation, and its control by auxin spray and nutritional restrictions. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 54: 351-356.
- 茨木俊行・山下純隆・平野稔彦・松本明芳. 1988. トマトの流通技術に関する研究. 第5報トマトの果実硬度測定法. 福岡農総試研報B. 7: 97-100.
- 井手 治・龍 勝利・國武みどり・小熊光輝・奥 幸一郎. 2011. 高温期のトマト低段密植栽培における積算日射量を指標とした遮光方法. 福岡農総試研報. 30: 30-33.
- 稲田秀俊・菅谷龍雄・袴塚紀代美・中原正一・植田稔宏. 2011. 促成栽培トマトの収量に対する施設内の温度, 相対湿度, 飽差および二酸化炭素濃度の影響に関する現地調査. 茨城農総セ園研報. 18: 9-16.
- 伊東 正. 1970. そ菜栽培における作物群落内の炭酸ガス濃度低下. 園学雑. 39: 185-192.

- 伊東 正. 1972. そ菜の光合成特性とその栽培的意義 (第6報). 園学雑. 41: 51-60.
- 岩堀修一・高橋和彦. 1964. トマトの高温障害に関する研究 (第3報). 園学雑. 33: 67-74.
- 金目武男・板木利隆. 1966. トマトの奇形果対策に関する試験 (第1報) 育苗期の温度並びに苗勢が奇形果発現に及ぼす影響. 神奈川園研報. 17: 57-64.
- 加藤 徹・児玉英智. 1973. ハウス果菜の生理障害発生防止に関する研究 (第3報) トマトの窓あき果発生に関する研究. 高知大学術研報. 22: 115-125.
- 北野雅治・荒木卓哉・江口弘美. 1998. トマトにおける果実生長および光合成産物の転流の動態に対する環境作用 I. 光照射および昼夜温の影響. 生物環境調節. 36: 159-167.
- 古賀 武・井上恵子・石松敬章. 2021. 冬季寡日照地域におけるCO<sub>2</sub>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. 福岡農林試研報. 7: 66-73.
- 河野徳義. 1987. 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CO<sub>2</sub>濃度の変化. 農業気象. 43: 15-20.
- 古在豊樹・郡司智子・渡部一郎・林 真紀夫・伊東 正. 1982. 日暖房負荷に関する測定と解析. 農業気象. 38: 279-285.
- 古在豊樹・杉 二郎. 1972a. 温室内の日射量に関する研究 (2). 農業気象. 27: 105-115.
- 古在豊樹・杉 二郎. 1972b. 温室内の日射量に関する研究 (3). 農業気象. 28: 79-88.
- 工藤陽史・山口 茂・福田直子・菊池竜也・佐渡 旭・深井誠一. 2012. トルコギキョウの冬出し栽培における生育初期の昼温が生育速度と主茎伸長および花芽分化に及ぼす影響. 園学研. 11: 343-349.
- 熊倉裕史・穴戸良洋. 1994. イチゴの果実肥大に及ぼす昼温の影響. 園学雑. 62: 827-832.
- 三原義秋. 1980. 冷房. p. 160-169. 三原義秋編著. 温室設計の基礎と実際. 養賢堂. 東京.
- 望月龍也. 2010a. 基礎編. 原産と来歴. p. 3-5. 農文協編. 農業技術体系野菜編 トマト. 農文協. 東京.
- 望月龍也. 2010b. 基礎編. 植物としての特性. p. 6-7. 農文協編. 農業技術体系野菜編 トマト. 農文協. 東京.
- 門馬信二. 2001. 各論. トマト. p. 548-570. 西 貞夫監修. 新編野菜園芸ハンドブック. 養賢堂. 東京.

- 長岡正昭・小林和彦・高橋和彦．1985．光・温度・CO<sub>2</sub>濃度がトマト幼植物の乾物生産に及ぼす影響の量的解析．野菜試報A．13: 55-70.
- 長岡正昭・高橋和彦・新井和夫．1984．トマト・キュウリの光合成・蒸散に及ぼす環境条件の影響．野菜試報A．12: 97-117.
- 中村隆一・大久保進一・平井 剛．2001．水田転換畑におけるトマトの障害果(チャック果、窓あき果)発生要因とその対策．北海道立農業試験場集報．80: 31-38.
- 二井内清之・本多藤雄．1961．トマトの裂果に関する研究（第2報）．園学雑．30: 9-14.
- 農林水産省九州農政局．2020．九州の野菜の概要．  
<<https://www.maff.go.jp/kyusyu/seiryuu/yasai/attach/pdf/index-1.pdf>>
- 農林水産省農産局．2020．平成30年園芸用施設の設置等の状況．  
<[https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/haipura/setti\\_30.html](https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/haipura/setti_30.html)>
- 農林水産省統計部．2020a．平成30年野菜生産出荷統計．<<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031886755&fileKind=0>>
- 農林水産省統計部．2020b．平成30年青果物卸売市場調査報告．<<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031905672&fileKind=0>>
- 小国研作．1982．温室用ヒートポンプに関する研究．農業気象．37: 317-322.
- 及川 仁．2007．地球温暖化及び重油価格高騰に対応する省エネ施設園芸政策．技術と普及．44: 20-23.
- 大原基広・林 真紀夫・高橋章仁・森 直樹・馬場 勝．2009．日の出前早朝加温による暖房熱量増加．日本農業気象学会2009年全国大会講演要旨: 45.
- 大林弘道．1986．促成トマトの果実肥大に及ぼす気温の影響と日肥大．愛媛農試研報．25: 65-67.
- 大須賀隆司．2003．二酸化炭素制御．p. 170-177．（社）日本施設園芸協会編．施設園芸ハンドブック五訂．園芸情報センター．東京．
- 大谷義一．1997．有効放射．微気象．p. 106-107．新編農業気象学用語解説集委員会編．新編農業気象学用語解説集：生物生産と環境の科学．日本農業気象学会．東京．
- 龍 勝利．2012．施設果菜類のハウス内気象環境実態調査．福岡の野菜Vege．147: 34-36.
- 龍 勝利・井手 治．2014．促成トマト栽培における網入り果の発生に及ぼす昼温の影響．園学研．13: 235-240.
- 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.

- 龍 勝利・井手 治・徳永恵美・森山友幸. 2018. 熱交換器を用いた除湿換気が寡日照地域における促成トマトの収量・品質に及ぼす影響. 園学研. 17: 415-422.
- 龍 勝利・石坂 晃・田中睦子・井手 治・小熊光輝・奥 幸一郎・國武みどり. 2010. トマトの促成長期栽培における網入り果発生の現地実態. 福岡農総試研報. 29: 40-44.
- 龍 勝利・徳永恵美・井手 治・森山友幸・尾崎行生. 2022. 弱光下における日中加温がトマトの生育とハウス暖房負荷に及ぼす影響. 園学研. 21: 27-34.
- 斉藤 章. 2012. オランダのトマト生産の現在. p. 3-20. エペ・フーヴェリンク編著. トマト オランダの多収技術と理論. 農文協. 東京.
- 斉藤 隆. 1984a. 基礎編. 花芽発育の生理生態. p. 77-94. 農文協編. 農業技術体系野菜編トマト. 農文協. 東京.
- 斉藤 隆. 1984b. 基礎編. 果実の発育と成熟の生理生態. p. 115-142. 農文協編. 農業技術大系野菜編トマト. 農文協. 東京.
- 斎藤 隆. 2004. 花芽分化の生理, 生態. p. 52-159. 農文協編. 野菜園芸大百科トマト. 農文協. 東京.
- 斉藤 隆・伊東秀夫. 1962. トマトの生育ならびに開花・結実に関する研究 (第1報). 園学雑. 31: 303-314.
- 斉藤 隆・伊東秀夫. 1971. トマトの生育ならびに開花・結実に関する研究 (第11報). 園学雑. 40: 28-38.
- 佐々木浩二・板木利隆. 1980. 養液栽培における夏季の地下部冷却が果菜類の生育, 収量に及ぼす影響. 生物環境調節. 27: 89-95.
- Sakamoto, Y., S. Watanabe, T. Nakashima and K. Okano. 1999. Effects of salinity at two ripening stages on the fruit quality of single-truss tomato grown in hydroponics. J. Hort. Sci. Biotech. 74: 690-693.
- 佐藤 卓. 2006. 地球温暖化に伴うおだやかな高温ストレスがトマトの生産性と雄性器官の発達に与える影響. 食と緑の科学. 60: 85-89.
- Sato, S., M. Kamiyama, T. Iwata, N. Makita, H. Furukawa and H. Ikeda. 2006. Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. Ann. Bot. 97: 731-738.
- 渋谷 俊夫・古在 豊樹. 2001. 温室内におけるトマトセル成型苗個体群の光利用効率および水利用効率. 生物環境調節. 39: 35-41.
- 相馬 暁・岩渕晴朗. 1979. トマトの生育・品質におよぼす環境要因の影響. IV 生理障害果・アミトマト・軟弱果の果実特性. 北海道農試集報. 41: 37-46.

- 田川 愛・江原愛美・伊藤優佑・荒木卓哉・尾崎行生・宋戸良洋. 2021. 昼温および夜温がイチゴ ‘さがほのか’ の  $^{13}\text{C}$ -光合成産物の転流・分配に及ぼす影響. 園学研. 20: 95-100.
- 高橋和彦. 1981a. 変温管理について(上)施設園芸の省エネルギー的温度管理. 農業電化. 34 (3) : 13-17.
- 高橋和彦. 1981b. 変温管理について(下)施設園芸の省エネルギー的温度管理. 農業電化. 34 (4) : 9-13.
- 高市益行. 1998. 空気湿度環境制御. p. 174-185. (社) 日本施設園芸協会編. 施設園芸ハンドブック 四訂. 園芸情報センター. 東京.
- 高尾宗明・田中幸孝. 1984. 施設トマトの空洞果防止対策に関する研究. 第2報 本圃の生育環境並びに摘葉, 摘果が空洞果の発生に及ぼす影響. 福岡農総試研報B. 4: 31-36.
- 手塚信夫・石井正義・渡辺康正. 1983. 施設栽培におけるトマト灰色かび病の発生に及ぼす空気湿度の影響. 野菜試報A. 11: 105-111.
- 土岐知久. 1970. 施設栽培における適環境条件の生理的研究. 1. キュウリの栽培温度の解析. 千葉農試研報. 10: 62-72.
- 土岐知久. 1975. 施設栽培における適環境条件の生理的研究. 2. 日中の光条件が果菜類の温度管理に及ぼす影響. 千葉農試研報. 16: 31-42.
- 土岐知久. 1995. 施設栽培における温度と光環境の制御技術に関する研究. 千葉農試特別報告. 31: 1-56.
- 宇井 睦・高野泰吉. 1995. 果実肥大期における温度と培養液濃度が水耕トマトの尻ぐされ発生に及ぼす影響. 生物環境調節. 33: 7-14.
- 矢吹万寿・今津 正. 1965. ガラス室の炭酸ガス濃度について. 農業気象. 20: 125-129.
- 山川邦夫. 1982. 各論. トマト. p. 550-572. 西 貞夫監修. 野菜園芸ハンドブック. 養賢堂. 東京.
- 安場健一郎・黒崎秀仁・高市益行・大森弘美・川嶋浩樹・星 岳彦. 2009. 自律分散型環境制御システムを利用した細霧冷房支援のための温室換気率および蒸発散速度計算ノードの開発. 植物環境工学. 21: 162-168.
- 安場健一郎・黒崎秀仁・高市益行・大森弘美・川嶋浩樹・星 岳彦. 2010. エンタルピー調整と細霧の噴霧を利用した温室内気温および湿度の同時制御システムの開発. 植物環境工学. 22: 29-35.
- 安場健一郎・黒崎秀仁・高市益行・鈴木克己. 2012. ユビキタス環境制御システム通信実用規約に基づいた施設園芸用管理ソフトウェアの開発. 野菜研報. 11: 63-72.

- 吉岡 宏. 1990. 寡日照地域における施設野菜に対するCO<sub>2</sub>施用効果. 農業および園芸. 65: 1380–1384.
- 吉岡 宏・高橋和彦. 1981. 果菜類における光合成産物の動態に関する研究. V. トマトにおける<sup>14</sup>C同化産物の昼夜間の転流割合と, 転流・分配に及ぼす光・夜温の影響. 野菜試報A. 9: 63–81.
- 渡邊圭太・中西幸太郎・光川 嘉則・櫻井基生. 2014. 簡易設置型パッドアンドファン冷房が高温期のハウス内温度, 飽差並びにトマトの生育, 収量に及ぼす影響. 兵庫農試研報. 62: 14–18.
- Went, F. W. 1943. Plant growth under controlled conditions. I. The air-conditioned greenhouses at the California Institute of Technology. Am. J. Bot. 30: 157–163.
- Willits, D. H., M. M. Peet. 1998. The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climates. Agric. For. Meteorol. 92: 191–202.







福岡県農林業総合試験場特別報告  
第14号

---

寡日照地域における促成トマト栽培の  
施設環境制御技術の開発

---

発 行 令和5年 3月

福岡県農林業総合試験場  
〒818-8549 福岡県筑紫野市吉木587  
TEL 092-924-2971

著 者 龍 勝利

印刷所 株式会社 大里印刷センター  
〒812-0065 福岡市東区二又瀬新町 12-29  
TEL 092-611-3118