

蓄熱式環境制御システムを用いた トマトの高生産・省エネルギー栽培技術の開発

高野あけみ¹⁾・菊地聡²⁾・木野本真沙江³⁾・田島嘉存・後藤貴子
羽石重忠・大島一則

摘要：蓄熱式環境制御システムでは、ヒートポンプがハウス内大気と蓄熱水槽間の熱交換に重要な役割を果たしてきた。本試験では、システムの稼働条件、トマト生産性、燃料コストについて検討した。昼間のヒートポンプ稼働開始気温をそれまでの慣行的な条件より7℃低い20℃としてもトマト生育には影響がなかった。このことに加えて、最適な保温資材と棟上散水を合わせて実施することでエネルギー消費効率（COP）は5.4となった。システム利用により、天窓換気が最小限に抑えられ、ハウス内環境（気温、湿度、二酸化炭素濃度）の変化は小さかった。慣行ハウスでの養液栽培に比べ可販果収量は133%、光熱費は55%、トマト1kgを生産するのに必要なエネルギーコストは41%であった。定植時の栽植密度を高め、増枝や養液栽培に適する品種の栽培を合わせて実施することにより、可販果収量はさらに約50%増収（対慣行ハウス比では約80%増収）する可能性が示された。

キーワード：高収量、光熱費、トマト、熱収支、ヒートポンプ

Development of a Highly Productive and Energy-Saving Tomato Cultivation Method using the Thermal Storage Type of Environmental Control System

Akemi TAKANO, Satoshi KIKUCHI, Masae KINOMOTO, Yoshiari TAJIMA, Takako GOTOU
Shigetada HANEISHI and Kazunori OSHIMA

Summary : In the thermal storage type of environmental control system, the heat pump has been playing an important role in heat exchange between the air and the thermal storage water tank in the green house. We investigated the system for operative conditions, tomato productivity and fuel cost. The growth of tomatoes was not significantly affected even though the air temperature at which the heat pump operation started during daytime was 20℃, which was lower by 7℃ than that of the conventional condition. Additional conduction of roof on watering with the most suitable thermal insulation material in a ridge resulted in the coefficient of performance (COP) of 5.4. The system allowed minimizing the skylight ventilation, leading to little change in the environmental conditions (temperature, humidity and carbon dioxide concentration). Therefore, the yield of tomato, the energy bill and the fuel cost necessary to produce 1 kg of tomato were 133%, 55%, 41%, respectively in comparison with those achieved by the hydroponics culture in the utility greenhouse. Additional conduction of an increase in planting density, and using a tomato variety more suitable for utility of increasing stems, and hydroponics can increase the yield by more approximately 50%.

Key words : Energy Bill, Heat Balance, Heat Pump, Highly Productive, Tomato

1) 現栃木県農業大学校，2) 現栃木県塩谷南那須農業振興事務所，3) 現栃木県下都賀農業振興事務所

(2017. 12. 25 受理)

I 緒 言

栃木県におけるトマト栽培は、作付面積379ha、生産量は36300tで全国6位の産地として位置づけられている（農林水産省，2016）。特に、年内から収穫が始まる促成長期どり栽培と年明け以降に収穫となる促成栽培など長期多段どりの促成栽培が多く、栽培面積の約6割を占め、冬春トマトの生産量は全国第3位となっている。

本県のトマト生産は、栽培技術の向上や施設設備の高度化等に伴い、単位面積当たりの収量は全国でも上位に位置付けられている。一方、冬期の栽培では、温風暖房機を使用し最低夜温を従来よりやや高い10～12℃に維持する温度管理を行うなど、燃油使用量は極めて多い。加えて、原油価格高騰による動力光熱費の増加が経営上の課題となっている。また、地球温暖化に伴い脱化石エネルギーへの取組も求められている。

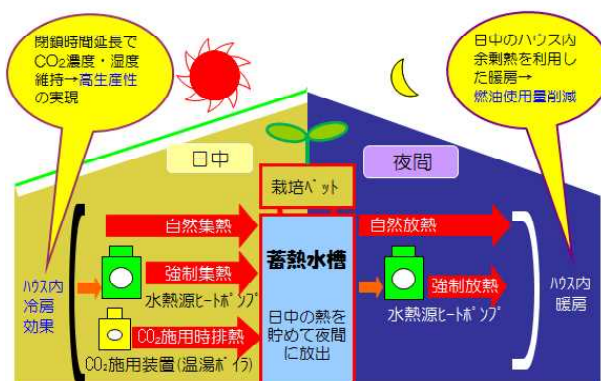
そこで、本研究は冬期の日射量に恵まれた本県の立地条件を生かし、日中の温室内余剰熱を蓄積し夜間に暖房として活用できる蓄熱式環境制御システム（（株）誠和，2015）を用いて実施した（第1図、写真1）。本システムは、水熱源ヒートポンプ、灯油燃焼式炭酸ガス発生装置、補助暖房機および栽培ベンチ下部（栽培槽直下）に設置された蓄熱水槽で構成される。そこで、本システムの特性を十分に引き出すための稼働方法や、この特性を生かした栽培技術について検討するとともに、トマト生産における燃油削減効果および熱利用効率について検証した。

なお、本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「地域資源を活用した再生可能エネルギーの生産・利用のためのプロジェクト」のうち「施設園芸における熱エネルギーの効率的利用技術の開発」（熱プロ）の一環として実施した。

II 材料および方法

試験は、蓄熱式環境制御システム（以下、本システム）を用いて行った（第1図、写真1）。本システムの設備の動作に関する制御フローは、第2図（栃木農試研報75 蓄熱式環境制御システムを用いたイチゴの省エネルギー栽培技術より参照）に示すとおりである。日中、温室内温度がヒートポンプ（HP）設定値 $\{(A, (A=B-1^{\circ}\text{C}))\}$ 以上に達すると天窓が閉じた状態でヒートポンプが稼働し温室内大気と蓄熱水槽間で熱交換を行い、温室内温度を目標温度以下に保つ。さらに温室内温度が天窓開温度（B, $B>A$ ）を越えると、ヒートポンプ稼働が停止し天窓換気が行われる。このように天窓換気は天窓開温度（B）になるまでは行われず、ハウス内温度の急激な上昇が押さえられ、温室内は半閉鎖環境となることから、炭酸ガスを効果的に施用できる。本システムでは灯油燃焼により炭酸ガスを発生させる装置を用いており、この燃焼による熱も蓄熱水槽に蓄えられる。また、温室内大気と蓄熱水槽間の自然熱交換を効果的に行うため、蓄熱水槽は波板状金属板で覆われている。夜間には、温室内温度がヒートポ

ンプ稼働ハウス気温（C）となった時、日中蓄熱した熱をヒートポンプから放出し、一定温度以上に保つ。さらに最低室温度（補助暖房稼働温度） $D, (D=C-0.5^{\circ}\text{C})$ を維持できなくなった時のために、重油焚きの補助暖房機を備えた。試験を行った施設は、栃木県農業試験場内の養液栽培装置を備えた鉄骨温室（以下鉄骨温室A）とし、1棟当たりのハウス面積230.4 m^2 （間口6.4m×奥行18m×2連棟）、表面積481.0 m^2 、被覆資材はフッ素系樹脂フィルム（エフクリーン（AGCグリーンテック））、カーテン資材はXLS-10、放熱係数 $k=3.6\text{Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、本システムの蓄熱水槽水量は $72\text{m}\times 220\text{L}/\text{m}=15840\text{L}$ である。

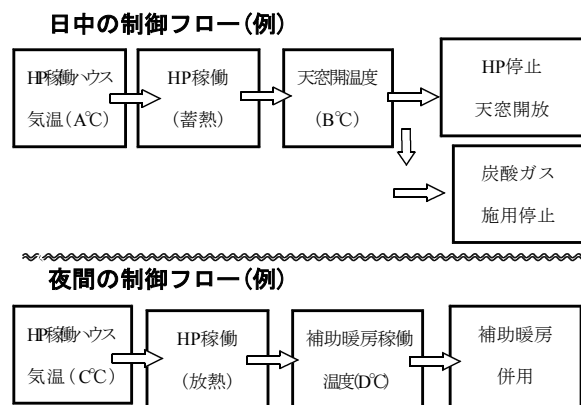


第1図 トマト蓄熱式環境制御システムの模式図



写真1 トマト蓄熱式環境制御システムによる栽培状況

（注：波板部分の内側に蓄熱水槽が設けられている。）



第2図 蓄熱式環境制御システムの環境制御フロー

第1表に示すように、7つの検討事項で構成されている試験を2013年度から2015年度に実施した。それぞれの試験区

および温度管理を第2表に示した。試験1から7の詳細な内容は以下に記述する。

第1表 試験1～7における検討事項

	年 度	検 討 事 項
試験1	2013	システム稼働条件
試験2	2013 2014	↓
試験3	2013	↓
試験4	2013	↓
試験5	2014	慣行ハウスとの比較
試験6	2014	栽培技術の確立
試験7	2014 2015	↓
		ヒートポンプ冷房稼働開始温度 夜間のヒートポンプ暖房停止水温 保温資材 保温方法(棟上散水) トマト生産への影響 多収を実現するためのトマト品種及び栽培様式 トマト生産および省エネ効果の実証(最適な保温資材、棟上散水含む)

第2表 試験1～7における試験区および温度管理

システム使用	区 名	昼		夜		
		HP稼働開始ハウス内気温℃ (蓄熱水槽水温条件)	天窓開温度 ℃	HP稼働ハウス内気温 (蓄熱水槽水温条件) ℃	補助暖房稼働温度 (重油) ℃	HP停止 水槽水温 ℃
		A	B	C	D	
試験1	○ システム改善区	24(水槽水温が25℃になるまで稼働)	28	11(かつ水槽13℃以上)	10.5	13
	○ システム通常区	27(水槽水温が25℃になるまで稼働)	28	11(かつ水槽13℃以上)	10.5	13
	x 慣行区	—	25	—	11(重油のみ)	—
試験2	○ システム改善区	24(水槽水温が25℃になるまで稼働)	25	10(かつ水槽7℃以上)	9.5	7
	○ システム通常区	27(水槽水温が25℃になるまで稼働)	28	11(かつ水槽13℃以上)	10.5	13
試験3	x 中空二重構造1区	—	25	—	10	—
	x 中空二重構造2区	—	25	—	10	—
	x 空気膜二層区	—	25	—	10	—
	x 慣行区	—	25	—	10	—
試験4	○ システム散水有区	24(水槽水温が25℃になるまで稼働)	28	11(かつ水槽7℃以上)	10.5	7
	○ システム散水無区	24(水槽水温が25℃になるまで稼働)	28	11(かつ水槽7℃以上)	10.5	7
試験5	○ システム区	20(水槽水温が20℃になるまで稼働)	25	10	9.5	7
	x 慣行区	—	25	—	10(重油のみ)	—
試験6	○ システム標準側枝区	20(水槽水温が20℃になるまで稼働)	25	10(かつ水槽7℃以上)	9.5	7
	○ システム密植側枝区1	20(水槽水温が20℃になるまで稼働)	25	10(かつ水槽7℃以上)	9.5	7
	○ システム密植側枝区2	20(水槽水温が20℃になるまで稼働)	25	10(かつ水槽7℃以上)	9.5	7
	○ システム標準区	20(水槽水温が20℃になるまで稼働)	25	10(かつ水槽7℃以上)	9.5	7
試験7	○ システム実証区	20(水槽水温が20℃になるまで稼働)	25	10(かつ水槽7℃以上)	9.5	7
	x 慣行区	—	25	—	10(重油のみ)	—

注1. 表中のA～Dは、第2図のA～Dにそれぞれ対応している。

2. 試験4のHP稼働ハウス内気温の蓄熱水槽水温条件では、2月以前は11℃ (かつ水槽13℃以上)。
3. 試験7では、システム実証区のみ最適な保温資材を導入し、かつ棟上散水も実施した。

試験1 蓄熱式環境制御システムにおけるヒートポンプ冷房稼働開始温度の検討 (2013年度)

試験は、鉄骨温室A2棟を用い、本システムを用いたシステム区と慣行ハウスを用いた慣行区を設けた。さらに、システム区は、日中(8時から17時)の天窓開始温度を28℃としヒートポンプ(冷房)稼働開始温度を24℃とするシステム改善区とヒートポンプ(冷房)稼働開始温度を27℃とするシステム通常区の2処理区を設定した。システム区において夜間(17時から8時)は、ハウス内気温が11℃まで低下した場合、ヒートポンプの稼働が開始され(但し、蓄熱水槽の水温が13℃以上が条件)、ハウス気温が10.5℃に低下した段階で重油暖房

機が稼働されるハイブリッド運転とした。慣行区は、日中の天窓開始温度を25℃に設定し、重油暖房機のみ使用しハウス気温11℃で稼働開始した。処理は、12月、1月、2月の各月に行い、処理期間が連続して3日以上になるよう行った。12月の処理は、システム改善区が2013年12月21日から12月23日、システム通常区が12月24日から12月26日とした。1月の処理は、システム改善区が2014年1月8日から12日、システム通常区が1月14日から18日とした。2月の処理は、システム改善区が2014年2月22日から24日、システム通常区が2月19日から21日とした。なお、各処理の設定はデータ測定日の前日から行った。測定を実施した施設では、養液栽培でトマト

を収穫中であり、供試品種は、トマト品種「麗容」を用い、台木品種を「ブロック」とし、2013年7月17日に播種し、8月21日に定植した。栽培様式は、株間23cm、畝間200cmの1本仕立て2条振り分けとし、誘引線高さ3mのハイワイヤーを用いたつる下ろし栽培とした。炭酸ガスは、いずれの区も日の出から日没2時間前まで、400ppmを維持できるよう施用した。

調査は、環境データとして外気温、ハウス内気温、ハウス外日射量をmidiLOGGER GL220(グラフテック(株))で1分おきに測定した。熱収支として、蓄熱水槽内の水温の推移、炭酸ガス発生装置、補助暖房機、ヒートポンプの稼働に要する燃油および電力の使用量を調査し、これらを基に以下の項目の数値を算出した。

HP蓄熱量=(蓄熱時間帯のHP入水温－蓄熱時間帯のHP出水温)×流量

炭酸ガス施用器余剰熱量=(ボイラ出水温－ボイラ入水温)×ボイラ流量

総蓄熱量=(蓄熱水槽水量×蓄熱水槽の蓄熱時間帯最高最低の温度差)

自然蓄熱量=総蓄熱量－(HP蓄熱量＋炭酸ガス施用器余剰熱量)

HP暖房熱量=(暖房時間帯のHP入水温－暖房時間帯のHP出水温)×流量

重油暖房機発熱量=暖房機稼働時間×時間当たり消費燃料×燃料単位発熱量

対流熱損失=((地温－ハウス気温)×ハウス床面積×対流熱伝導率、ハウス床面積201.6㎡、対流熱伝達率5w/㎡k)

放射熱損失=((地温+273.15)⁴－(ハウス気温+273.15)⁴)×ハウス床面積×放射率×ボルツマン定数、ハウス床面積201.6㎡、放射率0.7、ボルツマン定数5.67×10⁻⁸)

推定地中放熱量=対流熱損失+放射熱損失

蓄熱水槽自然放熱量=(蓄熱水槽水量×蓄熱水槽の暖房時間帯最高最低の温度差)－HP暖房熱量

蓄熱水槽放熱量=蓄熱水槽水量×蓄熱水槽の暖房時間帯最高最低の温度差

暖房に利用した熱量=蓄熱水槽放熱量+HP暖房熱量

システム運転消費電力量(蓄熱+暖房の消費電力)=循環ポンプの消費電力+HP本体の消費電力、循環ポンプは蓄熱水槽とHPおよび炭酸ガス施用器間の水の循環に利用

システムのエネルギー消費効率(COP)=暖房に利用した熱量/システム運転消費電力量

エネルギーコストは、電力26.0円/kwh、灯油97.0円/L、LPG 0.47円/L、A重油98.0円/Lで算出した。

試験2 蓄熱式環境制御システムにおける夜間のヒートポンプ暖房停止水温の検討 (2013年度、2014年度)

試験は、本システムを用いた鉄骨温室A1棟を用いて行った。ヒートポンプ(暖房)稼働停止水温を7℃とするシステム改善区と13℃とするシステム通常区の2処理区を設定した。日中(8時から17時)の天窓開始温度は、システム改善区が

25℃、システム通常区が28℃とした。システム通常区において夜間(17時から8時)は、ハウス温度が11.5℃となった時点で自然放熱のための送風運転が開始され、11℃以下でヒートポンプ暖房が、10℃以下で重油暖房も稼働されるハイブリッド運転とした。一方、システム改善区では、それぞれの稼働温度が通常区より1℃低い条件とするハイブリッド運転とした。システム改善区は、2015年1月5日から8日、システム通常区は2014年1月9日から12日に処理を行った。測定を実施した施設では、養液栽培でトマトを収穫中であり、その供試品種は、トマト品種「麗容」を用い、台木品種を「ブロック」とした。システム通常区の栽培概要は試験1のとおりとし、システム改善区は、2014年7月15日に播種し、接木後8月28日に定植した。栽培様式は、試験1と同様とした。炭酸ガスは、日の出から日没2時間前までとし、システム改善区が400から800ppm、システム通常区が400ppmを維持できるよう施用した。

調査は、ハウス内気温、外気温、蓄熱水槽水温をマキシマイザー(Priva社)で5分おきに測定した。ただし、2015年1月22日0時から9時25分のデータはマキシマイザーのデータ欠損のためmidiLOGGER GL220(グラフテック(株))の測定値を利用した。

試験3 サイドカーテンの違いがハウス保温効果に及ぼす影響 (2013年度)

試験は、栃木県農業試験場内の1棟54.6㎡(間口5.2m×奥行10.5m、軒高3.35m)のガラス温室3棟を用いて行った。処理区は、サイドに中空二重構造資材(エコボカプチ、川上産業(株))を用いた中空二重構造1区と中空二重構造資材(サニーコート、宇部エクシモ(株))を用いた中空二重構造2区と空気膜二層(W快適エアーカーテン、(株)三菱樹脂アグリドリーム)を用いた空気膜二層区の3処理区およびLSスクリーン、((株)誠和。)を用いた慣行区を設定した。測定は、空気膜二層区を固定し各区を順次張り替えて比較した。中空二重構造1区が2014年1月11日から13日、中空二重構造2区が2014年1月6日から1月8日、慣行区が2014年1月16日から1月18日に調査した。

温度設定は、天窓換気25℃、暖房機設定10℃とし、保温カーテンは16時から9時に閉とした。

調査は、温度センサを高さ2.55mに設置し、ハウス内気温、燃料消費量、消費電力(空気膜二層区のみ)をmidiLOGGER GL220(グラフテック(株))で1分おきに測定し、慣行区の燃料消費を100として比較した。

試験4 棟上散水の有無がハウス保温能力に及ぼす影響 (2013年度)

試験1と同様に鉄骨温室A1棟を用いて、本システムを用いたシステム散水有区およびシステム散水無区の2処理区を設けた。

棟上散水は、スプリンクラー(サンホープ(株))のノズルを用い東西ハウスサイド軒面に9m間隔で各3台設置した。設置

は、南北のスプリンクラーは、90度の首振りタイプ（スプリンクラーMP3000 90°）、中央のスプリンクラーは180度の首振りタイプ（スプリンクラーMP3000 180°）を用いた。散水は、ハウス棟面に向け、地下水をポンプで汲み上げ地下タンクに貯めた水を、散水量1.57t/h/棟として17時から8時まで行った。処理は、12月、1月、2月の各月に行った。12月の処理は、システム散水有区が2013年12月3日から4日、システム散水無区が12月8日から9日とした。1月の処理は、システム散水有区が2014年1月20日から23日、システム散水無区が1月25日から28日とした。2月の処理は、システム散水有区が2014年2月26日から27日、システム散水無区が2月23日から24日とした。温度管理は、昼温28℃、夜温11℃を目標とした。測定を実施した施設では、養液栽培でトマトを収穫中であり、供試品種、栽培様式は、試験1と同様とした。

調査は、環境データとして外気温、ハウス内気温、ハウス外日射量をmidiLOGGER GL220（グラフテック(株)）で1分おきに測定した。熱収支として、蓄熱水槽内の水温の推移、炭酸ガス発生装置、補助暖房機、ヒートポンプの稼働に要する燃油および電力の使用量を調査し、これらを基に蓄熱量、放熱量(暖房利用熱量)、余剰熱量を算出した。

試験5 蓄熱式環境制御システムがトマト生産に及ぼす影響（慣行ハウスとの比較）（2014年度）

試験1と同様に鉄骨温室A2棟を用い、本システムを用いたシステム区と慣行ハウスの慣行区の2処理区を設けた。

温度管理は、両区とも日中（8時から17時）の天窗開始温度を25℃、夜温10℃を目安とした。システム区は、ヒートポンプ（冷房）稼働開始温度を20℃とし、蓄熱水槽水温が20℃に達するまで稼働させ、夜間（17時から8時）は、蓄熱水槽水温が7℃以上あればハウス温度が10.5℃となった時点で自然放熱のための送風運転が開始され、10℃以下でヒートポンプ暖房が、9.5℃以下で重油暖房も稼働されるハイブリッド運転とした。慣行区は、重油暖房機のみ使用しハウス気温10℃で稼働開始した。炭酸ガスは、両区とも日の出から日没2時間前まで、400から800ppmを維持できるよう施用した。1処理区10株2反復として行った。

供試品種は、トマト品種「麗容」を用い、台木品種を「ブロック」とし、2014年7月15日に播種し、接木後8月28日に定植した。栽培様式は、試験1と同様とし、各花房は概ね5果に摘果した。収穫は、2014年11月から開始し、摘心を2015年6月22日に行い、7月30日まで行った。培養液処方とは栃木農試トマト改良2号とし、育苗期間の給液ECは1.0dS/mで管理し、本圃における給液管理はEC1.0dS/mから1.4dS/mとし、給液量は排水が2割程度になるようかけ流した。

調査は、環境データとしてハウス内気温、ハウス外日射量、ハウス内相対湿度をmidiLOGGER GL220（グラフテック(株)）で1分おきに測定した。

生育期には、各花房の開花日を調査した。収穫期には、1果重が60g以上で販売可能な果実を可販果とし、果数、果重

を計測した。また、果実品質は、可販果における健全果及び空どう果、乱形果、小果(60gから79g)等を調査した。糖度および酸度は、1処理4果をジューサーで粉碎し、ろ液を糖度計（ATAGO RX-5000）、酸度測定器（平沼産業(株)）自動滴定装置 COM-1500）を用い、月2回概ね14日間隔で調査した。

試験6 蓄熱式環境制御システムにおけるトマトの多収を実現するための品種及び栽培様式の検討（2014年度）

試験1と同様に本システムを備えた鉄骨温室A1棟を用い、第3表のとおり10a当たりの栽植密度や側枝利用および品種・系統を組み合わせた3処理区と標準区の4処理区を設けた。システム標準区は、トマト品種「麗容」を用い10a当たりの定植本数を2173株とし側枝を発生させない栽培とした。システム標準側枝区は、トマト品種「麗容」を用い10a当たりの定植本数を2173株とし、3株に1本の割合で1月下旬に花房直下に発生した側枝を利用した。システム密植側枝1区は、トマト品種「麗容」を用い10a当たりの定植本数を2777株とし、3株に1本の割合で1月下旬に花房直下に発生した側枝を利用した。システム密植側枝2区は、トマト系統「安濃交9号」を用い10a当たりの定植本数を2777株とした。側枝利用は、システム密植側枝1区と同様とした。また、各処理区とも台木品種は「ブロック」とし、2014年7月15日に播種し、接木後8月28日に定植した。栽培様式は、定植本数が2173株の区は株間23cm、定植本数が2777株の区は株間15cmとした。株間以外は試験1と同様とし、システム密植側枝1区およびシステム密植側枝2区は、12月上旬から花房間の葉の1枚摘葉を3花房分を行った。収穫は2014年11月から開始し、摘心を2015年6月22日に行い、7月30日まで行った。培養液処方および温度管理は、試験5と同様とした。

なお、「安濃交9号」は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構で育種された系統で、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の了解を得て試験を行った。

調査は、環境データとしてハウス内気温、炭酸ガス濃度をマキシマイザー（Priva社）で5分おきに測定した。生育調査、収量調査および果実品質調査は試験5と同様に行った。

第3表 試験区の構成

試 験 区	品種・系統	栽植密度 株/10a	側枝利用の有無
システム標準側枝区	麗 容	2173	○
システム密植側枝1区	麗 容	2777	○
システム密植側枝2区	安濃交9号	2777	○
システム標準区	麗 容	2173	×

試験7 蓄熱式環境制御システムにおける省エネ効果の実証（2014年度、2015年度）

試験1と同様に鉄骨温室A2棟を用い、本システムを用いて覆資材をXLS-10（(株)誠和。）およびサイドにサニーコート

(宇部エクシモ(株))を設置し、17時から8時まで棟上散水を行うシステム実証区と慣行ハウスを用いて被覆資材のXLS-10のみを設置し棟上散水を行わない慣行区の2処理区を設けた。

温度管理は、両区とも昼温25℃、夜温10℃を目安に管理した。システム実証区の温度管理は、本システムを用い、日中(8時から17時)の天窓開始温度を25℃、ヒートポンプ(冷房)稼働開始温度を20℃とし、蓄熱水槽水温が20℃に達するまで稼働させた。夜間(17時から8時)は、蓄熱水槽水温が7℃以上あればハウス温度が10.5℃となった時点で自然放熱のための送風運転が開始され、10℃以下でヒートポンプ暖房が、9.5℃以下で重油暖房も稼働されるハイブリッド運転とした。慣行区は、重油暖房機のみ使用しハウス気温10℃で稼働開始した。炭酸ガスは、両区とも日の出から日没2時間前まで、400から800ppmを維持できるよう施用した。

第4表に示すように供試品種は、トマト品種「麗容」を用い、台木品種は「ブロック」とし、2014年7月15日に播種し、接木後8月28日に定植した。栽培様式は、試験1と同様とした。収穫は、2014年11月から開始し、摘心を2015年6月22日に行い、7月30日まで行った。また、培養液処方試験5と同様とした。

収量調査は、1処理区10株2反復として行った。1果重が60g以上で販売可能な果実を可販果とした。使用燃料消費量については、上記システム条件で稼働した2015年2月から2015年5月および2015年11月から2016年1月の消費量について比較した。

第4表 試験区の構成

試 験 区	品 種	栽植密度 株/10a	側枝利用の有無
システム実証区	麗 容	2173	×
慣 行 区	麗 容	2173	×

Ⅲ 結果

試験1 蓄熱式環境制御システムにおけるヒートポンプ冷房稼働開始温度の検討

処理期間中のハウス内平均気温、蓄熱水槽水温および外部積算日射量を第5表に示した。前述したように、試験区の処理期間は異なる。しかし、外部積算日射量は処理区間で大きな差は生じなかった。ハウス内の平均気温は、1月のシステム通常区の方が0.6℃高かったが、総じて大きな差はなかった。一方、蓄熱水槽の水温は明らかにシステム改善区の方が高く、2月にはシステム通常区との差が2.1℃に達した。

2月のハウス気温と蓄熱水槽水温の推移を第3図に示した。ハウス内気温は、システム改善区、通常区とも慣行区より高く維持された。この傾向は、慣行区を設置した以下の試験でも同様であった。システム改善区は、10時からヒートポンプ冷房

による蓄熱が12時まで行われ、天窓が開いた時刻は、システム通常区より1時間遅かった。また、蓄熱水槽水温は、両区とも10時から徐々に上昇し16時に最高温度になり、システム通常区が18.6℃に対しシステム改善区は21.8℃と3.2℃高くなった。

蓄熱水槽蓄熱量を第4図に示した。外部積算日射量は第5表に示したとおり各月とも試験区間で大きな差はないが、蓄熱量はいずれの月もシステム改善区がシステム通常区より高くなった。特に、ヒートポンプ蓄熱量は、システム通常区に対してシステム改善区が高く、12月は3.4倍、1月は2.1倍、2月は1.9倍であった。

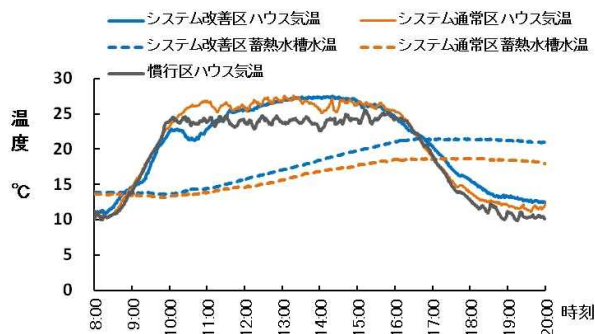
夜温11℃を保つために必要な推定暖房負荷の熱量を100とした場合の月別暖房熱量の構成割合を第5図から第7図に示した。システム通常区の暖房熱量が慣行区を上回る場合もあった(1月)が、それ以外は同等以下であった。一方、システム改善区では慣行区との暖房熱量の差がより大きくなった。蓄熱水槽自然放熱量は、いずれの月もシステム改善区がシステム通常区に対して3～16%高かった。また、ヒートポンプ暖房放熱量も、いずれの月もシステム改善区がシステム通常区に対して5～6%高かった。重油暖房機による熱量割合は、12月は差がなかったが、1月および2月はシステム改善区がシステム通常区に対して23～39%低かった。特に2月は、日射量が多くなり蓄熱水槽の蓄熱量が増えた。蓄熱水槽自然放熱やヒートポンプ暖房に利用できる熱量が多くなり、重油暖房機による熱量割合は低くなった。

夜間のハウス内最低温度を11℃に保つために必要なエネルギーコストを慣行区を100とした場合のエネルギーコストを第8図に示した。エネルギーコストは、システム改善区はシステム通常区に対し12月、1月は10%を多少上回る程度であったが、2月は約20%削減された。特に、重油暖房にかかるコストは、12月は16%、1月は22%、2月は40%と大幅に削減された。

システムCOPを第6表に示した。システム改善区およびシステム通常区ともCOPは、2.9から4.4の範囲となった。いずれの月もヒートポンプ消費電力はシステム改善区で多く、特に日中の消費電力は多くなつたが、暖房に利用した熱量も多くなった。12月のCOPは、システム改善区がシステム通常区に対して小さくなったが、1月および2月のCOPはほぼ同程度で熱利用効率を維持することができた。

第5表 ヒートポンプ冷房稼働開始温度がハウス内平均気温および蓄熱水槽水温等に及ぼす影響

	処 理 区	12月	1月	2月
ハウス内平均気温℃	システム改善区	14.1	15.2	16.3
	システム通常区	14.0	15.8	16.1
蓄熱水槽水温℃	システム改善区	14.7	15.1	17.6
	システム通常区	14.2	14.2	15.5
外部積算日射量 MJ/m ² /日	システム改善区	8.1	8.8	15.5
	システム通常区	8.0	9.7	15.2

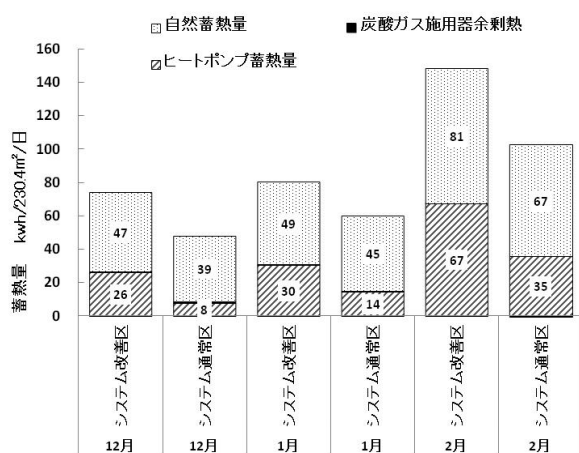


第3図 ヒートポンプ冷房稼働開始温度がハウス気温および蓄熱水槽水温に及ぼす影響（2月）

注1. システム改善区のデータは、2014年2月22日から24日の平均

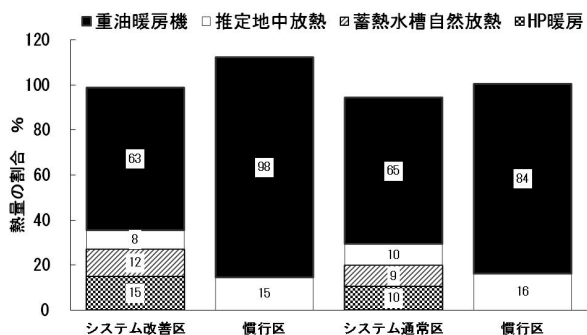
2. システム通常区のデータは、2014年2月19日から21日の平均

3. 慣行ハウス気温のデータは、2014年2月22日から24日の平均

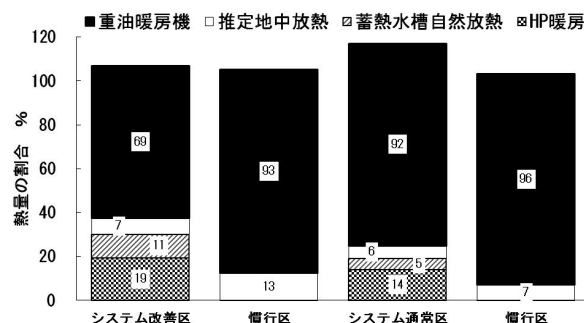


第4図 ヒートポンプ冷房稼働開始温度が蓄熱水槽蓄熱量に及ぼす影響

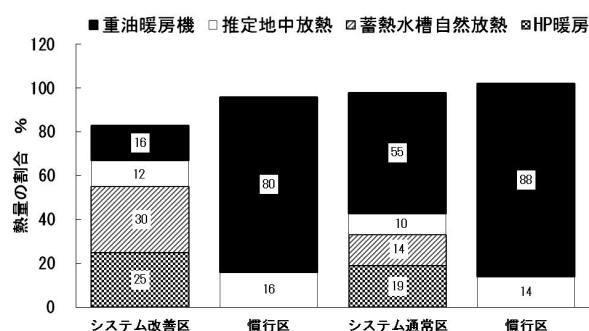
注. 炭酸ガス施用器余剰熱は、12月のシステム改善区およびシステム通常区で1となった以外は0だった。



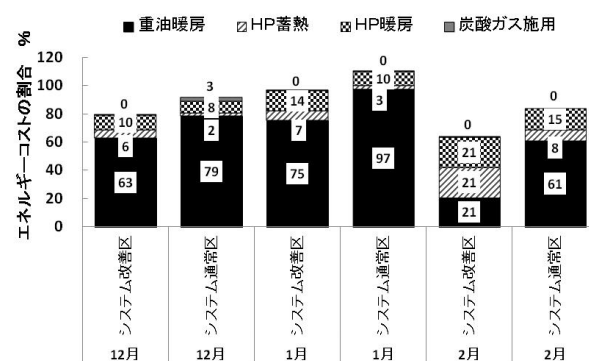
第5図 ヒートポンプ冷房稼働開始温度が暖房熱量の構成割合に及ぼす影響（12月）



第6図 ヒートポンプ冷房稼働開始温度が暖房熱量の構成割合に及ぼす影響（1月）



第7図 ヒートポンプ冷房稼働開始温度が暖房熱量の構成割合に及ぼす影響（2月）



第8図 ヒートポンプ稼働開始温度がエネルギーコストの構成割合に及ぼす影響

注1. 慣行ハウス（慣行区）で日中25℃、夜間11℃で管理した時の重油消費および炭酸ガス施用のためのプロパンガス消費に基づく光熱費を100とした場合の対慣行コスト

2. システム区のエネルギーコストは、重油消費、炭酸ガス施用のための灯油消費、HP蓄熱およびHP暖房で消費された光熱費の合計

第6表 ヒートポンプ稼働開始温度がシステムCOPに及ぼす影響

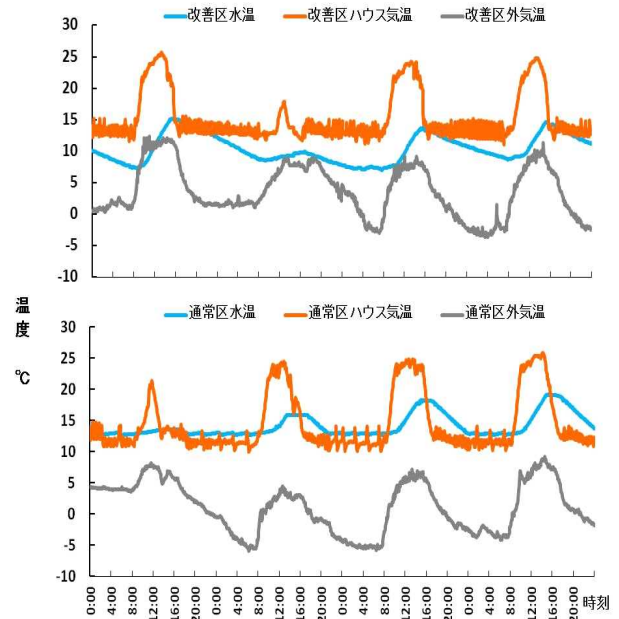
	処 理	HP消費電力 kwh				暖房に利用 した熱量 kwh	COP
		日中	夜間	ポンプ	合計		
12月	システム改善区	6.7	11.9	2.4	21.0	72.4	3.4
	システム通常区	1.9	7.9	1.3	11.1	49.1	4.4
1月	システム改善区	8.1	16.5	3.1	27.8	82.1	3.0
	システム通常区	3.6	14.5	2.3	20.4	60.0	2.9
2月	システム改善区	18.8	18.1	4.6	41.4	143.7	3.4
	システム通常区	9.2	17.5	3.4	30.1	99.5	3.3

試験2 蓄熱式環境制御システムにおける夜間のヒートポンプ暖房停止水温の検討

ヒートポンプ暖房停止水温の差による蓄熱槽水温の推移を第9図に示した。蓄熱槽水温は、朝に最低水温となりその後は徐々に上昇し、夕方に最高水温に達したのち夜間徐々に低下した。システム通常区の2014年1月9日から12日までの天気は、1月9日の曇雨天日以外は晴天日で、晴天日には日中ハウス内気温は25℃に達していた。蓄熱槽の水温が13℃まで低下した日は期間中毎日、その時間は、1月9日1時55分から10時25分まで、1月9日18時15分から1月10日9時15分まで、1月10日21時から1月11日9時20分まで、1月11日23時45分から1月12日9時20分までであった。夜間のヒートポンプ暖房時間は17時から8時までだが、4日間とも稼働停止水温となりヒートポンプ暖房が稼働できず重油暖房となった時間は、6時間から13時間に及んだ。一方、システム改善区の2015年1月5日から8日までの天気は、1月6日の曇雨天日以外は晴天日で、晴天日には日中ハウス内気温は25℃に達していた。蓄熱槽の水温は、7時から9時までに最低水温になり、1月5日が7.4℃、1月6日が8.5℃、1月7日が7.1℃、1月8日が8.7℃で、いずれの日もヒートポンプ暖房の稼働停止水温まで低下しなかった。

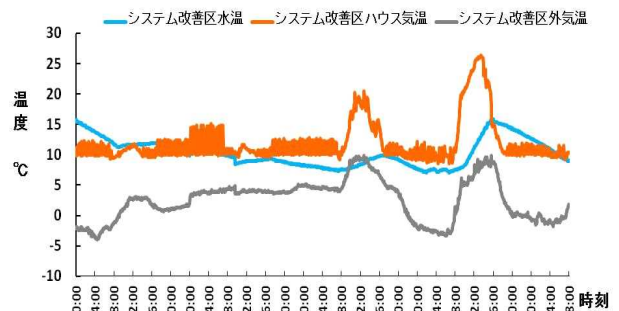
蓄熱槽の水温は、曇雨天日はほとんど上昇しないが晴天日は6～8℃程度上昇し、晴天日で比較するとシステム改善区はシステム通常区に比べ1.5℃高くなった。

システム改善区における日中の天気が及ぼす影響について、蓄熱槽水温の推移を第10図に示した。各日の日中の天候は、2015年1月21日および22日は曇雨天、1月23日は晴時々曇、1月24日は晴天だった。夜間の蓄熱槽水温の低下は、1月21日から22日が3.3℃、1月22日から23日が2.0℃、1月23日から24日が2.8℃、外気温が-3.3℃となった1月24日から25日が6.9℃で、夜間はヒートポンプ暖房利用により2.0℃から6.9℃低下した。一方、集熱による日中の水温上昇は、曇雨天日は1℃に満たないが、晴天日は8.8℃が可能だった。曇雨天が連続2日続くと蓄熱槽の水温は低下し続け、1月23日朝の最低水温は7.3℃となったが、ヒートポンプ暖房の稼働停止水温の7℃までは低下しなかった。



第9図 ヒートポンプ暖房停止水温の違いが蓄熱槽水温に及ぼす影響

注1. システム改善区は2015年1月5日から8日。
2. システム通常区は2014年1月9日から12日。



第10図 日中の天気が蓄熱槽水温に及ぼす影響

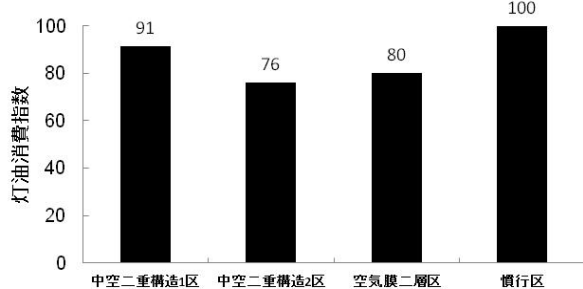
注. 2015年1月21日から25日。

試験3 サイドカーテンの違いがハウス保温効果に及ぼす影響

ハウス内気温は、いずれの区も概ね設定どおりに保たれた(データ省略)。

夜間の最低温度を保つために消費された暖房用燃料の消費量を灯油消費指数として第11図に示した。慣行区の灯油使用量を100とした場合の灯油消費指数は、中空二重構造2区が76と最も少なく、次いで空気膜二層区80、中空二重構造1区91となった。

電力消費量は、空気膜二層区でサーキュレーターが16時間稼働し、合計576wであった(データ省略)。



第11図 サイドカーテンの違いがハウス保温効果に及ぼす影響

注. 灯油消費指数は、慣行区の灯油消費量を100として算出。

試験4 棟上散水の有無がハウス保温能力に及ぼす影響

棟上散水に利用した水温は、1月の処理期間中は11.8℃から14.8℃、2月の処理期間中は14.6℃から15.5℃であった(データ省略)。

暖房時間帯におけるハウス平均気温を第7表に示した。ハウス平均気温は、各月ともシステム散水有区がシステム散水無区に対し同等もしくは高かった。

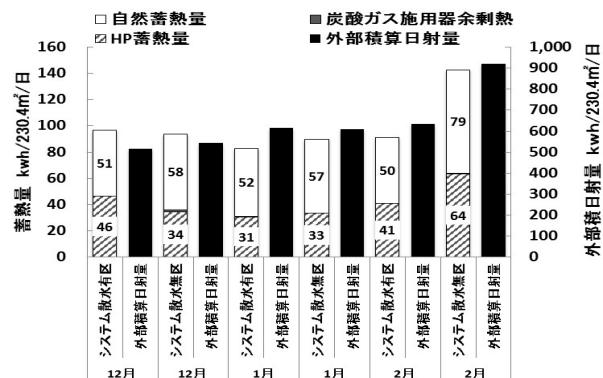
蓄熱量を第12図に示した。試験区の処理期間は異なるが、外部積算日射量は12月および1月の処理区間で大きな差はなく蓄熱量にも差は見られなかった。2月の処理期間における外部積算日射量は、システム散水有区がシステム散水無区に対し31%少なかったが、日射に対する蓄熱割合に差はほとんど見られなかった。

夜間暖房発熱量を第13図に示した。夜間暖房発熱量は、各区の暖房負荷を100とした場合、システム散水有区がシステム散水無区に対し、12月は4%、1月は13%、2月は15%少なかった。

第7表 暖房時間帯におけるハウス平均気温

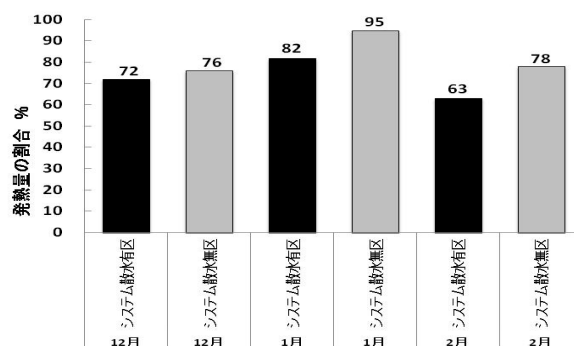
		処 理 区	12月	1月	2月
ハウス平均気温 ℃	システム散水有区		12.5	11.3	12.7
	システム散水無区		11.1	11.2	12.5
外気平均温度 ℃	システム散水有区		6.2	0.2	6.4
	システム散水無区		2.3	0.5	2.3

注. 暖房時間帯は17:00から8:00とした。



第12図 棟上散水の有無が蓄熱量に及ぼす影響

注. 炭酸ガス施用器余剰熱は、12月のシステム散水無区で1となった以外は0だった。



第13図 棟上散水の有無が夜間暖房発熱量に及ぼす影響

注. ハウス外気温と暖房設定温度から求められる推定暖房負荷の熱量を100として、熱量の比較を行った(放熱係数を3.6kcal/㎡h℃として求めた)。

試験5 蓄熱式環境制御システムがトマト生産に及ぼす影響(慣行ハウスとの比較)

2015年1月24日から25日の日中のハウス気温を第14図に、ハウス湿度を第15図に示した。ハウス内気温は、慣行区は9時30分に25℃に達した。一方、システム区はヒートポンプ(冷房)稼働開始温度を20℃設定としたことによる蓄熱のためヒートポンプが9時から12時まで稼働し、ハウス内気温は、3時間をかけゆっくり上昇した。本試験では、ヒートポンプ(冷房)稼働開始温度を20℃に設定したが、8時から12時までのハウス内平均気温17.4℃であり、トマトの生育に影響は見られなかった(データ省略)。湿度は、システム区が9時から14時頃まで77%程度でほぼ一定に推移したが、慣行区は9時30分以降67%から80%の間で上下を繰り返し平均で72%とやや低く推移した。また、本試験におけるシステムCOPは3.9であり(データ省略)、試験1(ヒートポンプ稼働開始温度を24℃に設定)のCOPと同等以上であった。

開花日を第8表に示した。開花日は、システム区は慣行区に比べ第7花房から13花房までは2日から4日早くなったが、その他は差がなかった。

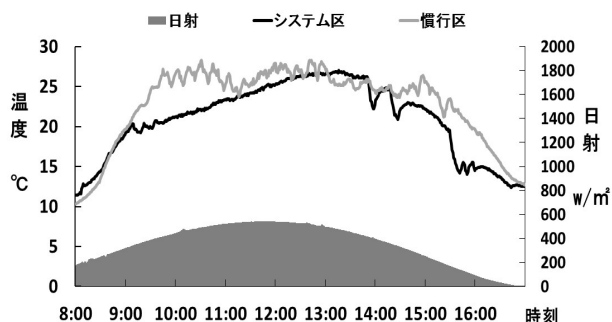
収量を第9表に示した。株当たりの総果数、可販果数、総収量および可販果収量ともシステム区が多く、単位面積当た

りの可販果収量は、システム区は慣行区に対し33%増収となった。また、可販果率、可販1果重および収穫花房段数はシステム区が慣行区より多かった。

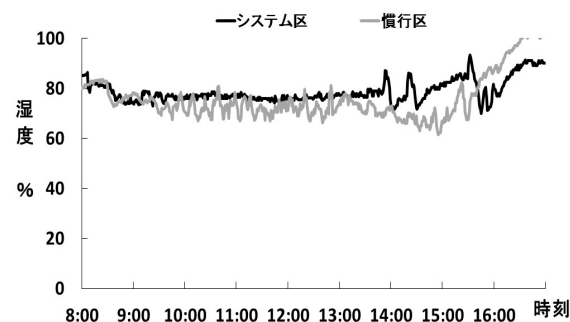
果実品質を第10表に示した。果実品質については、健全

果割合は、システム区が44%と慣行区より15%高く、軽度の空

果割合は、システム区が44%と慣行区より15%高く、軽度の空



第14図 蓄熱式環境制御システムがハウス気温に及ぼす影響（2015年1月24日）



第15図 蓄熱式環境制御システムがハウス湿度に及ぼす影響（2015年1月24日）

第8表 蓄熱式環境制御システムがトマトの開花日に及ぼす影響（2014年度）

処 理	開花日 月/日					
	第1花房	第7	第10	第13	第19	第22
シ ス テ ム 区	9/18	11/20	1/3	2/20	5/6	6/2
慣 行 区	9/18	11/24	1/5	2/16	5/5	6/4

第9表 蓄熱式環境制御システムがトマトの収量に及ぼす影響（2014年度）

処 理	1 株 当 たり				単 位 面 積 当 たり				可販果率 %	可 販 1果重 g	収 穫 花 房 段
	総果数	可販果数	総収量	可販果 収量	総果数	可販果数	総収量	可販果 収量			
	果	果	kg	kg	果/m²	果/m²	kg/m²	kg/m²			
シ ス テ ム 区	98	83	14.9	13.1	212	181	32.5	28.4	85	157	23.0
慣 行 区	96	71	13.2	9.9	209	154	28.7	21.4	74	139	21.9

第10表 蓄熱式環境制御システムがトマトの果実品質に及ぼす影響（2014年度）

処 理	可 販 果							非 販 果			果 実	果 実
	上位等級 %		下 位 等 級 %					%			糖 度	酸 度
	健全果	軽度の	空どう果	だ円果	乱形果	小果	ざら果	尻腐果	小果	その他	Brix%	%
	空どう果											
シ ス テ ム 区	44	8	16	4	7	5	0	4	5	5	5.0	0.47
慣 行 区	29	12	15	4	7	7	1	10	7	9	4.8	0.46

注1. 下位等級の小果は、60g以上80g未満の果実。

2. 非販果の小果は、60g未満の果実。

3. 非販果のその他は、裂果、ざら玉果、乱形果、くず果。

試験6 蓄熱式環境制御システムにおけるトマトの多収を実現するための品種及び栽培様式の検討

ハウス気温と炭酸ガス濃度推移を第16図に示した。ハウス気温は、12時に25℃に達し14時までそのままの気温を維持していた。また、炭酸ガス濃度は8時以前および16時以降は450ppm程度であったが、8時から15時までの日

中は炭酸ガス施用により600ppmから800ppmが保たれていた。

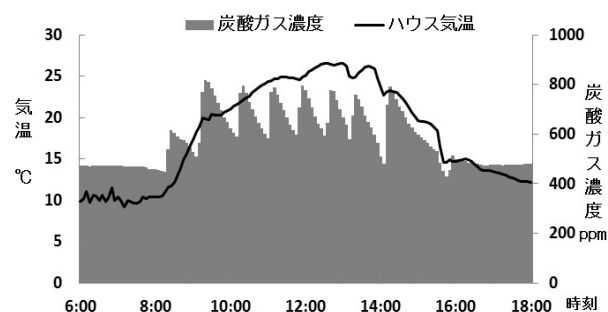
開花日を第11表に示した。主枝の開花日は、システム標準区に比べシステム密植側枝1区が遅かった。一方、システム標準側枝区、システム密植側枝2区は、第10花房以降早くなった。

収量を第12表に示した。標準区と標準側枝区との比較により、側枝を利用することで可販果数は増すが、1果重は小さくなるため、可販果収量は向上しなかった。さらに栽植密度を約30%高めても（密植側枝1区）、1株当たりの可販果数が減少し、増収は10%にとどまった。一方、安農交9号を用いることで、密植で側枝利用（密植側枝2区）しても1株当たりの可販果数、1果重とも標準区と同等となり、可販果収量は約30%向上した。

単位面積当たりの主枝および側枝の月別可販果収量を第13表に示した。主枝の可販果収量は徐々に増加し、いずれの区も4月が最も高い傾向が見られ、側枝は、4月から収穫開始となり6月が最も収量が多く、いずれもシステム密植側枝2区が最も多かった。

果実品質を第14表に示した。果実品質については、健全果率は、システム密植側枝2区が49%と最も高く、他区は同程度であった。空どう果割合は、システム密植側枝2区が32%とやや高い傾向であった。乱形果および小果の割合は、

システム密植側枝2区で低かった。果実糖度は、システム密植側枝1区がやや低かったが他区は同程度で、果実酸度は、いずれの区も同程度であった。



第16図 ハウス気温と炭酸ガス濃度推移
(2014年12月25日、晴天時)

第11表 蓄熱式環境制御システムによる栽培方法の違いがトマトの主枝花房の開花日に及ぼす影響（2014年度）

処 理	開 花 日 月 / 日							
	第1花房	第 4	第 7	第 10	第 13	第 16	第 19	第 22
システム標準側枝区	9/19	10/18	11/23	1/3	2/10	3/22	4/30	5/27
システム密植側枝1区	9/21	10/20	11/26	1/6	2/21	4/2	5/9	6/5
システム密植側枝2区	9/18	10/17	11/22	1/2	2/5	3/16	4/27	5/24
システム標準区	9/18	10/16	11/20	1/3	2/20	3/30	5/6	6/2

第12表 蓄熱式環境制御システムにおける栽培方法の違いがトマトの収量に及ぼす影響（2014年度）

処 理	1 株 当 たり				単 位 面 積 当 たり				可販果率 %	可 販 1 果重 g
	総果数	可販果数	総収量	可販果 収量	総果数	可販果数	総収量	可販果 収量		
	果	果	kg	kg	果/㎡	果 / ㎡	kg / ㎡	kg / ㎡		
システム標準側枝区	108	93	14.1	12.6	233	201	30.7	27.4	86	136
システム密植側枝1区	98	85	12.8	11.4	272	235	35.5	31.6	87	134
システム密植側枝2区	99	90	15.0	13.9	275	249	41.7	38.7	90	156
システム標準区	98	83	14.9	13.1	212	181	32.5	28.4	85	157

第13表 蓄熱式環境制御システムにおける栽培方法の違いがトマトの主枝、側枝別の月別可販果収量に及ぼす影響（2014年度）

処 理		単位面積当たりの可販果収量 kg/㎡									
		11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	合計
システム標準側枝区	主 枝	1.1	1.3	1.7	2.8	2.7	4.7	3.3	3.7	2.7	24.0
	側 枝						0.4	1.0	1.2	0.8	3.4
システム密植側枝1区	主 枝	1.1	1.7	2.0	3.0	3.2	5.1	4.0	4.3	3.1	27.4
	側 枝						0.4	1.3	1.4	1.1	4.2
システム密植側枝2区	主 枝	1.6	2.4	2.1	3.1	3.7	5.5	5.3	5.6	4.5	33.9
	側 枝						0.5	1.2	1.7	1.4	4.8
システム標準区		1.5	1.7	2.3	2.9	3.3	5.1	5.1	3.6	3.0	28.4

表14表 蓄熱式環境制御システムにおける栽培方法の違いがトマトの果実品質に及ぼす影響 (2014年度)

処 理	可 販 果							非 販 果			果 実	
	上 位 等 級 %		下 位 等 級 %					%			糖 度	果 実
	健全果	軽度の	空どう果	だ円果	乱形果	小果	ざら果	尻腐果	小果	その他	Brix %	酸 度 %
	空どう果											
システム標準側枝区	43	6	16	4	9	8	0	4	7	2	4.8	0.45
システム密植側枝1区	43	7	16	3	8	9	0	4	6	3	4.6	0.47
システム密植側枝2区	49	8	24	3	3	3	2	0	4	5	4.8	0.40
システム標準区	44	8	16	4	7	5	0	4	5	5	5.0	0.47

注1. 下位等級の小果は、60g以上80g未満の果実。

2. 非販果の小果は、60g未満の果実。

3. 非販果のその他は、裂果、ざら玉果、乱形果、くず果。

試験 7 蓄熱式環境制御システムにおける省エネ効果の実証

2015年12月29日から30日のハウス温度を第17図に示した。システム実証区は9時から12時まで蓄熱が行われ、18時以降ヒートポンプ暖房のみで最低温度が保たれ、暖房機の稼働は翌朝6時から7時までの短時間であった。蓄熱水槽の水温は、8時頃に最低温度17℃になったが、蓄熱により12時には20℃に達し、17時以降は徐々に低下し、翌朝8時では17.5℃となった。一方、慣行区は16時から翌朝8時まで暖房機が連続して稼働していた。

2015年12月29日から30日のハウス湿度を第18図に示した。湿度は、システム実証区が12時頃まで85%程度で推移し、夜間は90%前後で推移した。これに対し、慣行区は日中、夜間とも低く推移し、特に夜間は暖房機の稼働に応じて大幅に動き、両区の湿度差は、最大で25～30%であった。

月別の各エネルギー消費量を第15表に示した。暖房用A重油使用量は、システム実証区が慣行区の使用量の35%であった。

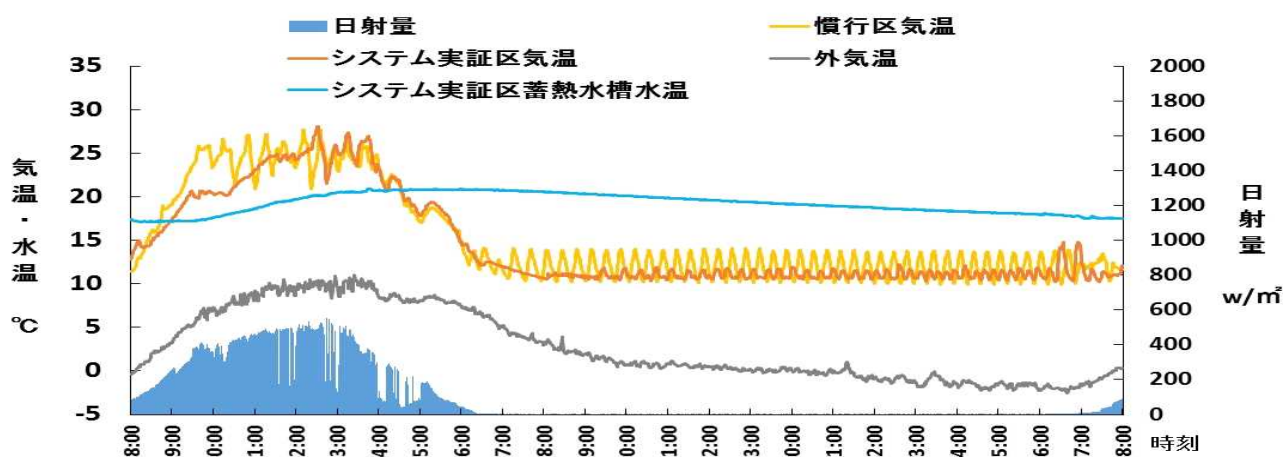
月別では、11月および2月以降の慣行区に対してシステム実証区の使用量は少なく、特に3月以降はほとんど使われなかった。

本システムの暖房にかかる光熱費を第16表に示した。暖房用A重油燃料代、炭酸ガス発生器燃料代、ヒートポンプ電気代の合計は、10a当たり慣行区140万円に対しシステム実

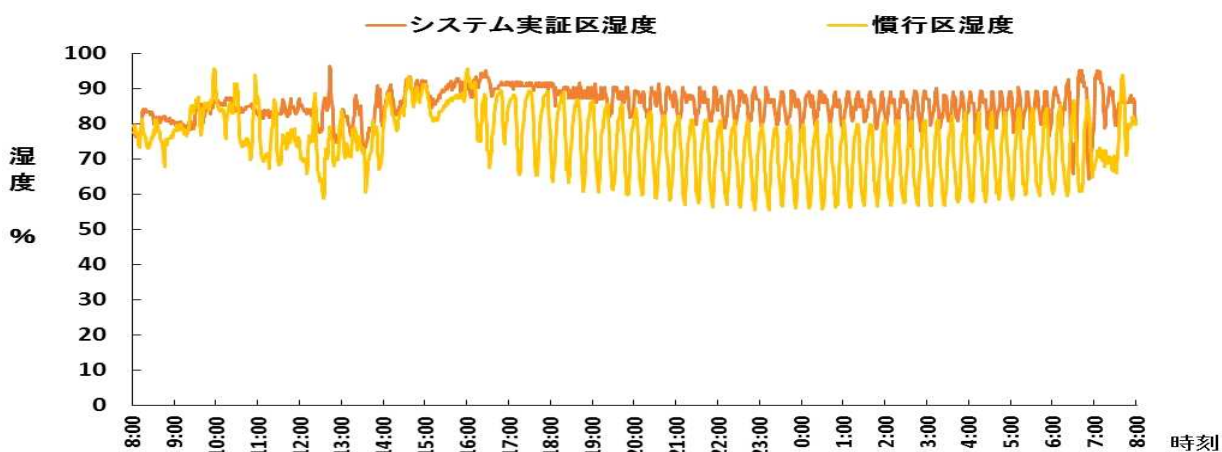
証区は76万円となり、45%削減された。

生産物にかかるエネルギーコストについて第17表に示した。なお栽植密度や品種による増収効果（慣行ハウスとの比較）を示すため、試験6におけるシステム実証密植側枝1、2区の結果も参考として示した。10a当たりの可販果収量は慣行区21.4tに対しシステム実証区28.4tと33%増収し、生産物1kg当たりのエネルギーコストは、慣行区65.4円に対しシステム実証区は26.8円で、削減率は59%であった。また、栽植密度や側枝利用を行ったシステム実証密植側枝1区の10a当たりの可販果収量は31.6tと慣行区に対し48%増収し、エネルギーコストは24.1円まで下がり、エネルギーコストの削減率を63%にすることが可能であった。さらに、養液栽培に適した品種・システムを利用したシステム実証密植側枝2区の10a当たりの可販果収量は38.7tであり、慣行区に比べ約80%増収する可能性が示された。同様にエネルギーコストは19.6円/kgであり、削減率を70%にする可能性が示された。

2015年12月29日から30日の蓄熱量、放熱量および消費電力を第18表に示した。蓄熱水槽では、日中70.0kwh蓄熱され夜間60.8kwh放熱された。ヒートポンプでは、日中35.1kwh蓄熱され夜間4.0kwh放熱された。炭酸ガス施用装置用ボイラからは日中1.3kwh蓄熱された。本システムを稼働させるために必要な消費電力は、循環ポンプ0.1kwhとヒートポンプ本体の12.0kwhでシステムCOPは、5.4と高い値を示した。



第17図 蓄熱式環境制御システムがハウス気温に及ぼす影響 (2015年12月29～30日)



第18図 蓄熱式環境制御システムがハウス湿度に及ぼす影響 (2015年12月29～30日)

第15表 蓄熱式環境制御システムが月別エネルギー消費量に及ぼす影響 (230.4㎡ハウス実測値) (2014, 2015年度)

処 理			11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
暖房用A重油 消費量	L	システム実証区	20(19)	197(35)	563(56)	171(26)	16(4)	6(12)	0.1(3)	973(35)
		慣 行 区	104	567	997	662	402	49	4	2,785
ヒートポンプ 電気使用量	kwh	システム実証区	66	223	280	805	440	155	18	1,987
		慣 行 区	-	-	-	-	-	-	-	-
炭酸ガス 燃料使用量	L	システム実証区	13	68	56	67	49	42	2	297
		慣 行 区	3	18	13	16	12	20	22	104

注1. A重油消費量は、2月～5月は2015年2月～5月、11月～1月は2015年11月～2016年1月のデータ。

2. () は、慣行を100とした場合の暖房用A重油消費割合。

3. 炭酸ガス燃料使用量は、蓄熱区は灯油 (L/月) を使用. 慣行区はLPG (m³/月) を使用.

第16表 蓄熱式環境制御システムが光熱費に及ぼす影響 (230.4㎡ハウス実測値を10a換算) (2014, 2015年度)

処 理	A重油		炭酸ガス発生器 燃料代	ヒートポンプ 電気代	光熱費合計	光熱費削減率
	消 費 量 KL	金 額 万円	金 額 万円	金 額 万円	金 額 万円	%
システム実証区	4.2	41	13	22	76	45
慣 行 区	12.1	119	21	-	140	-

注. コストは、LPG0.47円/L、電力26円/kwh、灯油97円/L、重油98円/Lとして計算.

第17表 蓄熱式環境制御システムが生産物 1 kg当たりのエネルギーコストに及ぼす影響 (2014, 2015年度)

処 理	光熱費	可販果収量	生産物 1 kg当たりにかかるエネルギーコスト	生産物 1 kg当たりにかかるエネルギーコストの削減率
	万円/10 a	t/10 a	円/kg	%
システム実証区	76	28.4 (133)	26.8	59
慣 行 区	140	21.4 (100)	65.4	0
システム実証密植側枝1区(参考)	76	31.6 (148)	24.1	63
システム実証密植側枝2区(参考)	76	38.7 (181)	19.6	70

注. 可販果収量 () は, 慣行区の可販果収量を100とした場合の指数.

第18表 蓄熱式環境制御システムが蓄熱, 放熱および消費電力に及ぼす影響 (2015年12月29~30日)

処 理	自然放熱	蓄熱水槽		ヒートポンプ		炭酸ガス 施用装置 用ボイラ	消費電力	
	kwh	蓄熱量 kwh	放熱量 kwh	蓄 熱 量 kwh	放 熱 量 kwh	蓄熱 kwh	循環ポンプ kwh	ヒートポンプ本体 kwh
日 中	34.9	70.0	-	35.1	-	1.3	0.1	10.7
夜 間	-		60.8		4.0	-	0.0	1.3
合 計							0.1	12.0

注1. 暖房に利用した熱量=蓄熱水槽放熱量(蓄熱水槽水量×蓄熱水槽の蓄熱時間帯最高最低の温度差)+HP暖房熱量(暖房時間帯のHP入水温-暖房時間帯のHP出水温)×流量

2. システム運転消費電力量(蓄熱+暖房の消費電力)=循環ポンプの消費電力+HP本体の消費電力

3. システムCOP=暖房に利用した熱量/システム運転消費電力量=64.8/12.1=5.4

Ⅳ 考察

本システムを利用し室内熱エネルギーを効率良く蓄積させるためには, ヒートポンプの稼働条件を操作することが最も有効である. 蓄熱開始温度が低くなればヒートポンプ冷房の稼働時間も早まり, 長時間の蓄熱により, 蓄熱水槽の水温上昇に繋がったと考えられる. システム改善区は蓄熱量が多くなったことで, システム通常区に比べて夜間暖房へのヒートポンプ暖房の寄与率を高め, 重油暖房機の依存度を抑制することができた. ヒートポンプを利用することで, 消費電力は多くなったがエネルギーコストは改善区が通常区より約10~20%削減することができ, さらに重油暖房にかかるコストは, 12月は16%, 1月は22%, 2月は40%と大幅に削減されることがわかった. 暖房に利用した熱量とシステム運転消費電力量で算出したシステムCOPは, システム通常区とほぼ同程度の3程度を維持することができ, COPを下げることなく効率的な稼働方法であることが判明した.

ヒートポンプ稼働停止水温が13℃では, 加温が必要であるにもかかわらずヒートポンプ暖房が停止する水温となり, 重油暖房のみの加温になった. その時間は, 厳寒期には夜間13時間に及ぶこともあり, 蓄熱水槽の熱を夜間暖房に有効に利用できない期間は, 12月上旬から3月中旬までと長期間であった. 一方, ヒートポンプ稼働停止水温を7℃とすることにより, ヒートポンプ暖房が夜間停止することはなく, 蓄熱水槽に蓄熱された熱エネルギーが暖房に有効に使われた. 蓄熱水槽水温は日中の蓄熱で確保されるが, 曇雨天日はハウス内気温が蓄熱開始温度に達せず, ヒートポンプ冷房が稼働した

いたため水温の上昇は1℃に満たないが, 晴天日は最大9℃程度上昇することを明らかにした.

冬期でも日射量が多いと換気によりハウス内湿度は大きく低下し, 萎れを引き起こしたり気孔を閉じるといった光合成を低下させる要因になる. また, 閉鎖環境では日射量が多いとハウス内の炭酸ガス濃度は低下し, 光合成速度が低下することが知られている. さらに, 日中炭酸ガス施用を行っている場合, 換気によりハウス内の炭酸ガス濃度は外気と同程度に低下し, 外気以上の濃度での施用は効率が悪くなる. 吉田・松本(2010)や木野本ら(2013)は, ハウス内相対湿度は高いほど光合成速度が速まる要因と考えられるとし, さらに畠山ら(2017)は半閉鎖環境下では天窓換気を制限可能で, 炭酸ガス濃度をある一定レベルで維持できることから, 光合成速度が高まるとしている. 実際に, 本システムを利用して栽培を行ったシステム区は, ヒートポンプ冷房の稼働によりゆっくりとハウス内気温が上昇することで急激な湿度低下が抑えられるとともに効果的な炭酸ガス施用が行われ, 慣行区に比べ生育が促進し増収となった.

密植栽培は, 小玉果や空どう果を増加させる(田中ら, 1982;羽石ら, 2005)ことが知られている. 特に冬期の寡日照下における密植栽培は果実品質の低下が見られることから, 本試験では定植時から栽植密度を通常の1.3倍程度に抑え, 日射の強くなる春先以降に定植株の1/3程度の側枝を増枝することにより4月以降増収する. 季節の気象条件に応じた適切な草姿によって, 10a当たりの可販果収量は31.6tとなった. さらに, 養液栽培に向く安濃交9号を利用することで増収

し、10a当たりの可販果収量は、慣行栽培21.4tに対して38.7tと約80%増収する可能性が示された。

本システムを補完するため、夜間の保温方法について検討した。サイドカーテンでは保温効果の高い中空二重構造資材(サニーコート)と棟上散水を組み合わせ、システムを稼働させた2015年12月 29日から30日のハウス環境と熱収支を見ると、日中9時から 12時までの蓄熱により、夜間の最低温度はヒートポンプ暖房でほぼ保つことができた。夜間暖房に利用され蓄熱水槽の水温は約3℃低下するが、翌日が晴天であれば3時間程度の蓄熱で水温は回復した。晴天日の条件下であれば1時間程度のヒートポンプ冷房と炭酸ガス施用の蓄熱により蓄熱水槽の水温を1℃上昇させることが可能であり、蓄熱水槽水温が 20℃に保たれた状態から曇雨天が連続3日以内であれば蓄熱水槽からヒートポンプ暖房ができ、十分な実用性が期待できる。

本システムを利用することで、暖房用エネルギー消費量が少なくなるとともに収量が慣行に対し33%向上し、生産物1kg当たりにかかるエネルギーコストは慣行の65.4円に対し26.8円と59%の削減となった。また、栽植密度を慣行の1.3倍程度にし1月下旬から側枝利用により栽植密度の約3割の増枝を行うことで、慣行に対し収量は48%向上し、生産物1kg当たりにかかるエネルギーコストは63%削減された。さらに、多収性品種との組み合わせにより、10a当たりの可販果収量は慣行に対し約80%向上し、生産物1kg当たりにかかるエネルギーコストは70%削減ができる可能性が示された。なお、試験7において昼間のヒートポンプ稼働温度を20℃とし、合わせて最適な保温資材を導入し、棟上散水も実施することで、エネルギー消費効率の指標となるシステムCOPは、5.4にまで達した。今後は、トマト栽培に好適な構造を模索するとともに、資材費のコストダウンを考慮したシステム開発を進める必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、静岡大学の鈴木克己教授、東海大学の林真紀夫名誉教授、熱エネルギー利用部会ユニットリーダーの柴田昇平主任研究員、農研機構の岩崎泰永上席研究員には熱収支の評価方法など多くのご助言をいただいた。また、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の松永啓上級研究員にはトマトの品種・系統の提供をしていただいた。栃木県農業試験場の齋藤芳彦氏、湯田利夫氏、浅川利子氏、高野浩氏、小田切晃司氏、栃木県農業試験場いちご研究所の鈴木和吉氏には本試験の遂行にあたり試験圃場の管理並びに調査等に多大なるご協力をいただいた。また、本稿を執筆するにあたり、野菜研究室をはじめ関係者の方々に貴重なご助言・ご指導をいただいた。ここに記して厚く感謝の意を表する。

引用文献

- 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ー整枝法の特性. 栃木農試研報55:15-26
- 畠山昭嗣・中西達郎・重野貴・飯村一成・大橋隆・大橋幸雄・植木正明 (2017) 蓄熱式環境制御システムを用いたイチゴの省エネルギー栽培技術. 栃木農試研報75:55-61
- 稲田秀俊・水野 (山邊) あずさ・中原正一 (2010) トマトの葉の気孔拡散伝導度および蒸散速度に対する環境要因の影響茨城県農業総合センター園芸研究所研究報告17:17-22
- 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. 茨城県農業総合センター園芸研究所研究報告18:9-15
- 岩崎泰永・鈴木真実・梅田大輝・松尾誠治・安東赫・高市益行 (2015) 施設園芸用ハウスの換気抑制を目的とした冷房における空気熱源ヒートポンプ、家庭用ヒートポンプおよび蓄熱槽利用型ヒートポンプの運転特性比較. 野菜茶業研究所研究報告14:65-74
- 株式会社誠和 (2015) 温室用栽培システム (蓄熱式環境制御システム) 特許第5830211号
- 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CO₂濃度の変化. 農業気象43(1):15-20
- 木野本真沙江・吉田剛・渡辺公博・伊澤健一 (2011) 蓄熱栽培環境制御システムを用いた高生産・省エネ技術の開発(第2報)トマト栽培の実証. 園学研11 (別1):100
- 木野本真沙江・松本佳浩・吉田剛 (2013) 細霧冷房装置利用による相対湿度の制御がトマト生体情報および収量品質に及ぼす影響. 栃木農試研報71:27-31.
- 気象庁 (2016) 宇都宮地方气象台. 半旬ごとの平年値 (日照量) データ
- 農林水産省 (2016) 平成27年産野菜生産出荷統計. 都道府県別の作付け面積、収穫量、出荷量及び農業産出額 (年間計).
- 田中征勝・小餅 昭二 (1982) ハウス促成トマトの生育と果実生産におよぼす栽植密度と摘心段位の影響. 北海道農業試験場研究報告135:83-99
- 渡辺公博・伊澤健一・木野本真沙江 (2011) 蓄熱栽培環境制御システムを用いた高生産・省エネ技術の開発 (第1報). 園学研11 (別1):99
- 吉田剛・松本佳浩 (2010) 栃木農試野菜試験成績書平成21年度:85-88

