

潜熱蓄熱材を用いた局所保温による 半促成無加温スイカの着果率改善とその効果

Measures to Improve the Fruiting Rate of Semi-Forced Non-Heated Watermelon by Local Heat Retention Using Latent Heat Storage Material, and its Effects

倉田和馬*1・田中誠司*2・中山雅晴
(生産環境研究所)

Kazuma KURATA, Seiji TANAKA, Masaharu NAKAYAMA
(Agro-environmental Research Institute)

要 約

熊本県益城町を中心とした地域のスイカは11月から翌年6月にかけて大消費地に出荷され、全国的なスイカの生産地リレーの中で重要な地位を占めている。しかしながら、1~2月の厳冬期に交配を行う作型であっても石油暖房機による加温を実施しないため、低温時の着果不良による減収がしばしば問題となっている。本研究では、「エコ栽培」という益城町のスイカ栽培に関するコンセプトを維持しつつ着果不良の改善を図るため、自然エネルギーを熱源に繰り返し使用可能で、蓄熱量の大きい潜熱蓄熱材 (Phase Change Material, 以下PCM) を使用し、スイカの成長点や交配用の雌花を保温して着果率を向上させることを検討した。その結果、成長点や雌花が位置するほ場の畝中央部に、スイカ1株あたり1枚の板状のPCMを平置きすることで、それらの継続的な保温が可能となった。供試したPCMのうち、相変化温度15°Cタイプが最も良好で、成長点や雌花付近の夜温が平均2.3°C高く保たれ、スイカの生育限界温度である10°Cを下回る頻度も大幅に低減した。栽培試験の結果、①交配作業の省力化 (交配回数・開花確認作業の削減)、②開花の揃いによる収穫期間の短縮 (収穫確認時間)、③着果率向上による減収軽減の効果が得られた。なお、十分な効果を得るためには子づるの伸長期から交配前まで成長点をPCMに載せておき、交配期以降は着果確認時期まで雌花をPCMに載せておくことが必要である。相変化温度15°CのPCMを1年間につきスイカ1作分に利用し、7年償却とすることを前提に試算したところ、経済効果は241.7千円/10aであった。

キーワード：厳寒期、半促成無加温、スイカ、潜熱蓄熱材、PCM、自然エネルギー、エコ栽培、成長点、雌花、畝、保温

I 緒言

熊本県のスイカは2018年現在、熊本・鹿本地区を中心に面積約1,360haで栽培され、全国的な生産地リレーの中で、関東を中心とした大消費地に向け出荷されており¹⁾、2018年10月から翌6月までの間、東京市場の品目別取扱量でシェア1位を確保するなど重要な地位を占めている¹⁾。冬季に行われる熊本県のスイカ栽培では、石油暖房機の使用が主流となっているが、熊本県益城町を中心とした地域では、間口5m程度、奥行30~50m、軒高1.8m以下の小型単棟ハウスにて、比較的高めの栽植密度で草姿をコンパクトに仕立てるのが特徴で、単棟ハウスは連棟ハウスに比べ、床面積あたりの表面積が大きく暖房効率が悪

いことなどから、冬季でも石油暖房機を使用しない。そのため、1~2月の厳冬期に交配を行う半促成の作型であっても、ビニール (以下、農ビ) による多重被覆だけで保温を行い、使用後の農ビは翌年以降、畝のマルチ資材として再利用し、その後は資源物として適切に処理するなどリサイクルにも努めている。このようなことから、熊本県益城町役場では「エコ栽培」として全国にPRしている²⁾。しかしながら、前述のとおり暖房機を使わないため、冬季に人工交配を行う半促成の作型で低温時の着果不良による減収がしばしば問題となっている。

益城町を中心とした地域のスイカ農家では1つの経営体の中で連続的に作をずらし (約15日間隔)、労力分散

*1 現 熊本県農林水産部農村振興局農村計画課、*2 現 熊本県農林水産部上益城地域振興局農業普及・振興課

と連続出荷を行っている。交配前後の寒波等に伴う低温により着果が難しい場合であっても、次位の雌花の開花を待ち交配を続けることで着果させることは可能である。しかしながらその場合、次位の雌花の開花を確認するためのハウス見回りや交配作業などの労力増大や、次作との労力競合が発生する。さらに、着果日のばらつきが収穫日のばらつきを生じさせるだけでなく、日中の換気等、果実の肥大状況に応じた一斉の管理作業が困難となり、収量や品質への悪影響も懸念される。このようなことから、営利栽培では速やかな着果、すなわち瞬間的な着果率が重視され、交配開始後14日間程度で交配作業を打ち切っており、少なからず未着果株が発生しているのが実情である。これら厳寒期の未着果による減収は多い年で3割、少ない年でも1割程度は発生しており、交配前後のハウス閉切り徹底による室温確保が推奨されているが、低夜温が続くと未着果株が発生しているのが現状である。これらは、交配ミスなど人為的要因を除けば、雄花と雌花が低温に遭遇することに原因があると考えられる。無加温栽培の他県の産地では、不織布で雄花を被覆保温し稔性の高い花粉を得ることで夜温低下による着果不良を軽減する取組みにより成果を上げている³⁾。一方、雌花に着目すると、交配直後の低温は花粉管の伸長を抑制するなど着果に悪影響を与えると考えられている³⁾。

そこで本研究では、雄花に花粉専用品種を用いることを前提として、雌花側に対する局所保温による着果対策を行い、半促成無加温スイカ（以下、スイカ）の生産安定を図ることとした。局所保温による生育・収量改善の先行事例として、イチゴのクラウン部の加温やナスの株元加温などが挙げられる⁴⁾⁵⁾。しかし、いずれの技術も加温栽培を前提としている上、排熱回収装置や配管等が別途必要である。そこで、前述の熊本県益城町のスイカ栽培に関するコンセプトに合致するよう、自然エネルギーのみを熱源として配管や配線が不要で、繰り返し使用できる資材を保温手段として用いることとした。

ビニール製の袋に入れた水に日中の熱を吸熱させ、夜間にそれを放熱させる水封マルチは安価で、砂丘地露地メロンのトンネル内の最低気温も高く気温低下も緩やかで初期収量が高くなる⁶⁾などの報告がある。しかし、水封マルチの蓄放熱は顕熱に限られ、持続性や熱量が限定的で、厳寒期の無加温栽培には効果が期待できない。

検討の結果、蓄放熱量が多く、電源や付帯装備を必要としないPCMに着目し、これを保温資材としてスイカの成長点や雌花の局所保温に活用することとした。PCMの主な特長は、単位体積あたりの蓄熱量すなわち蓄熱密度を顕熱蓄熱と比べて大幅に上げることができ、ほぼ一定の温度で蓄熱・放熱ができる点である⁷⁾。PCMは現在、

任意の温度帯での保冷・保温効果を活かした医薬品や試薬、生鮮食品等の低温輸送に活用されている⁸⁾。建築業界では、PCMを内蔵したフローリング材やボード等の建材を建物に使用し、日中に蓄えた熱を夜間に放熱させ暖房負荷を低減させる⁹⁾など、省エネ資材として活用されている。農業関係でも、大分県でのハウスみかん¹⁰⁾や宮城県での冬春トマト¹¹⁾にて省エネ資材としての試験的な使用事例があり、いずれも暖房機を設置したハウス内にPCMを吊り下げ約2割の節油効果が得られている。ただ、これらはPCMから夜間に放出される熱によりハウス内の気温低下を緩やかにすることで暖房機の稼働時間の低減を図るものであり、作物に対する生育促進効果を主な目的としたものではない。

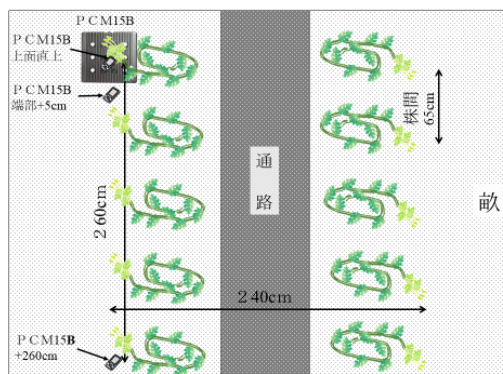
以上、本稿ではPCMが放出する潜熱によるスイカの局所保温方法および保温が生育に与える影響について調査を行ったので結果を報告する。

II 材料および方法

1 保温方法の検討

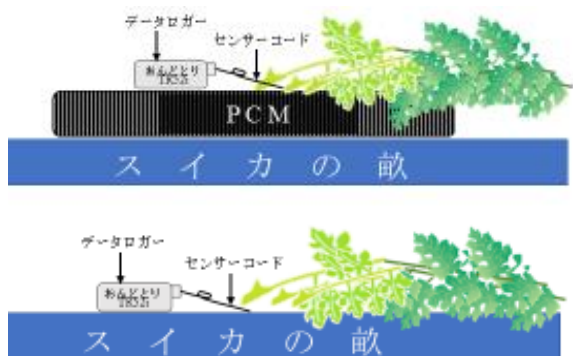
2016年12月16日から2017年1月20日までの間、生産環境研究所内の単棟ハウス（外張1層、内張3層、無加温）の畝中央部に1枚の（株）ヤノ技研製のPCM15°CタイプB型カプセル（縦280mm×横315mm×厚さ27mm、溶液充填量2kg、以下PCM15B）を第1図のとおり、畝中央部のスイカの成長点付近に潜り込ませるように設置（平置き）した。

益城町のスイカは地這い栽培であり、成長に合わせて子づるを誘引し、生育や収量を左右する成長点や雌花は等間隔で畝中央部に配置される。そこで保温対象を畝中央部の成長点や雌花とし、そこから株間方向に離れた地点の気温を測定、保温資材として1枚のPCM15Bがカバーできる範囲を求めることとした。試験は無反復で実施し、気温の測定箇所は「PCM15B上面直上」、「PCM15B端部+5cm」、「PCM15B+260cm」の畝中央部とした（第1図）。



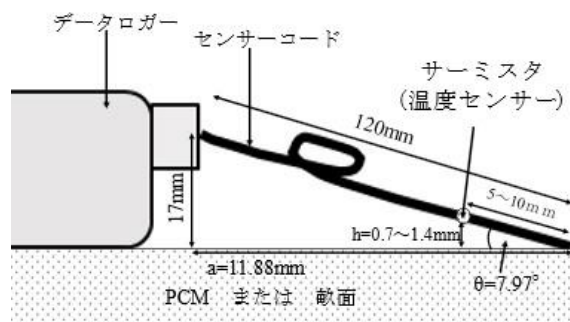
第1図 PCMと気温測定箇所（平面図）

地這いスイカでは、生育や収量に影響を与える成長点や雌花は畝面に接触して栽培されており、気温の測定高さは畝面（PCMを設置した株はPCMの表面）付近の空間とし、測定機材はT&D社製「おんどとり TR52i」を用い、測定間隔は1分とした（第2図）。

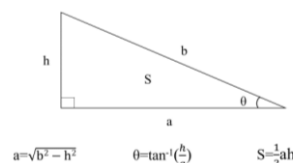


第2図 「おんどとり TR52i」の設置方法
（上段：PCM 設置株，下段：PCM 非設置株）

「おんどとり TR52i」（以下、おんどとり）の使用にあたり、標準温度計による校正を行い、誤差が0.1℃以内の個体のみ使用することとした。校正にあたり、安藤計器製の二重管標準温度計「1-W06-1」と同時に水道水の温度を測定し、誤差が無いことを確認したチノー製のデジタルハンディ温度計「MC1000」を標準器として採用した。校正の際、おんどとりと標準器のセンサを水道水中に3分間、同時に静置し表示温度を比較した。おんどとりはデータロガー部とセンサーコードが別体式であるが、試験に用いる個体は、データの吸い上げや電池交換の時であってもコードの切り離しは行わないこととした。なお試験では気温を連続して測定するため、おんどとりを定期的に別の個体と差し替える必要がある。その際、気温の測定高さが大きく変化しないよう、気温測定位置の画一化を図ることとした。具体的には、試験に用いる全ての個体のセンサーコードをループ状に巻いて絶縁テープで固定し、データロガーにつなぐためのアダプターの端から先端部までの全長を120mmで統一、本体をPCMの上面または畝面に直接設置した（第2図）。なお、おんどとりのメーカーT&D社によると、センサーコードの先端より5～10mmにサーミスタ（温度センサー）が配置されており、この測定環境下ではPCMの上面または畝面の高さ0.7～1.4mmの気温を測定することがわかる（第3図、第4図）。



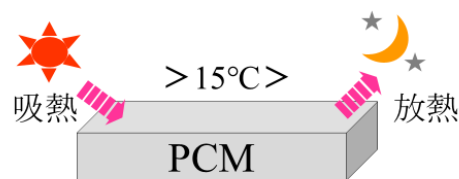
第3図 気温の測定高さ



第4図 三平方の定理

（カシオ計算機株式会社 keisan サービス¹²⁾より）

供試したPCMは潜熱蓄熱成分であるカプセル内容液（以下、溶液）の相変化で放出される潜熱を活用するものである。相変化温度は-16℃から48℃までの11通りあり、溶液はカプセル内で周辺部から中心部にかけて段階的に相変化（液体⇄固体）する。今回供試したPCM 15Bは、相変化温度が15℃の板状の資材であり、カプセルの表面温度が約18℃を下回るタイミングで潜熱の放出を開始し約13℃に低下するまで緩やかに継続、その後は顕熱のみを放出する。カプセルサイズは前述のB型の他にD型（奥行280mm×幅145mm×厚さ27mm）、L型（奥行270mm×幅130mm×厚さ9mm）、S型（奥行170mm×幅130mm×厚さ9mm）の計4種類の製品が発売されている（第5図、第6図）。



第5図 PCMの吸放熱
（相変化温度15℃の資材の場合）



第6図 PCMの外観
（左よりB型、D型、L型、S型カプセル）

2 PCM 設置が畝面上の気温に与える影響と局所保温がスイカの生育に与える影響

生産環境研究所内の単棟ハウス（外張1層，内張3層，無加温）に栽培したスイカに対し，相変化温度やサイズ，時期を変えてPCMを設置し，スイカの局所保温資材としての有効性を明らかにすることを目的に試験を実施した。前述のとおり，保温対象を成長点や雌花に限定し，PCMはスイカ1株あたり1枚を定植前，畝中央部に設置（平置き）した。栽培中，子づるの成長とともに少しずつ位置がずれていく成長点について，慣行栽培と同様に誘引や脇芽取りなどの管理作業時に適宜，畝中央部に引き戻すことにより，PCM上に継続的に載せることとした。子づるの成長が進み，交配する雌花が肉眼で確認された後は慣行栽培と同様に，雌花を畝中央部に移動，すなわちPCM上に載せることとした。

試験には無加温・内張3層の単棟ハウス(100㎡)を3棟（2016年度のみ2棟），供試品種は3か年共通で穂木「朝ひかりSR」，台木「かちどき2号」（ともに株式会社萩原農場）を使用した。また，交配用の花粉は同一ハウス内で栽培した花粉採取専用品種「SA-75」（株式会社萩原農場）を使用した。播種日と栽植密度，施肥量は3か年とも同一とし，親づる5葉期で摘心を行った揃いの良い苗を定植した（第1表）。なお3か年とも，定植後14日間は保温による活着促進のため，苗の上からユニチカ製の不織布「パスライト」をベタ掛けし，日中，ハウスを極力密閉して管理した。

第1表 耕種概要

	播種日 (月.日)	定植日 (月.日)	栽植密度		施肥量 (kg/a)		
			畝幅 (cm)	株間 (cm)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2016年度	11.01	12.14	230	65	1.4	1.4	0.7
2017年度	11.01	12.19					
2018年度	11.01	12.26					

2016年度はPCMの有無，2017年度はPCMの種類，2018年度はPCMによる局所保温の開始時期の違いが与える影響の解明を目的として試験区を構成した（第2表）。

第2表 試験区配置（2016～18年度）

試験区名	種類	設置箇所	保温開始時期	
2016年度	P CM15B	15℃・B型	畝中央部	子づるが伸長し成長点が畝中央部に到達してから
	無設置	—	—	—
	P CM15B	15℃・B型	畝中央部	子づるが伸長し成長点が畝中央部に到達してから
2017年度	P CM18B	18℃・B型	〃	〃
	P CM15D	15℃・D型	〃	〃
	P CM18D	15℃・D型	〃	〃
	無設置	—	—	—
	P CM15D 移動	15℃・D型	定植時：株元→ 蔓引き後：畝中央部	定植直後から
2018年度	P CM15D 固定	15℃・D型	畝中央部	子づるが伸長し成長点が畝中央部に到達してから
	無設置	—	—	—

2016年度はPCM15B，2017年度はPCM15B，PCM 15D，PCM 18B，PCM 18Dを設置した。2018年度はPCM 15Dのみを使用し，定植直後における苗の保温のため定植前に株元へPCMを設置，子づるの誘引開始時に畝中央部へ移動する試験区を「PCM 15D移動」とし（第7図），従来の試験区を「PCM 15D固定」とした（第8図）。なお，3か年とも着果確認後，果実を1株当たり1果になるよう摘果し，その後ソフトボール大に肥大した果実を順次，PCM上に設置した信越ファインテック製の成育用台座「シンエツマットSL・ブルー」に載せ，収穫までその状態を継続させた。



第7図 「PCM 15D 移動区」の苗とPCMの設置位置（左：定植直後，右：子づるの誘引開始後）



第8図 「PCM 15D 固定区」の苗とPCMの設置位置（左：定植直後，右：子づるの誘引開始後）

調査規模および反復は2016年度：各区12株で2反復，2017年度：各区12株で3反復，2018年度：各区15株で3反復とした。

成長点や雌花付近の気温を測定するため，畝中央部のPCM上面直上付近と無設置区の畝面付近の気温（ともに以下，畝中央部の気温）を各試験区あたり2016年度は2か所，2017～2018年度は3か所，「1 保温方法の検討」と同じ要領で測定した。外気温はハウス北側の高さ1.5m地点で3か年とも1か所測定した。測定にはT&D社製「おんどとり TR52i」を使用した。

PCMによる局所保温がスイカの生育に与える影響を調査するため，交配日（着果した雌花のみ），収穫日，着果率，収穫果の平均重，空洞果率，糖度を調査した。スイカは変形果や空洞果を防ぎ，玉太りを良好にするため葉数が十分確保された16節～22節の3番花に着果させる必要がある¹³⁾。そのため，本試験では子づるの16節以降に着生する最初の雌花（以下，交配用第一雌花）を交配可能な第一番目の雌花として，各株に1果以上着果するまで交配を継続し，交配開始から18日を経過しても着果が認められない株を未着果株とした。着果率は「着果した雌花数/交配した雌花数×100」で算出した。併せて，株ごとに子づる

誘引開始日から交配用第一雌花の交配までに要した日数を記録し、その着果率を算出した。

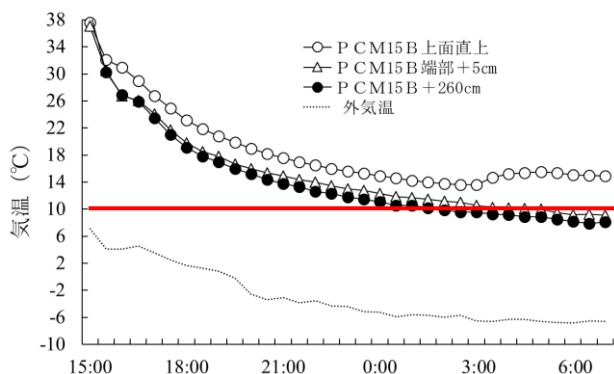
2018年度は、局所保温の開始時期がスイカの初期生育に与える影響を確認するため、定植29日後の出葉数、葉長、葉幅長、葉柄長、SPAD値を測定した。

統計処理は、局所保温がスイカの交配用第一雌花、交配、果実に与える影響について、一元配置分散分析で検討し、3群以上を比較する場合は事後比較としてTukey法による多重比較を行い、 $p < 0.01$ および $p < 0.05$ を統計的有意差ありと判定した。統計解析には R (version 3.6.2(2019-12-19)) を用いた。また、夜間の目標温度達成率と着果率は、単回帰分析で検討し、 $p < 0.01$ を統計的有意差ありと判定した。統計解析には Microsoft® Excel® 2016 MSO(16.0.4849.1000) のデータ分析機能を用いた。

III 結果

1 保温方法の検討 (気温影響範囲調査)

平均外気温が最も低かった2017年1月15日の19:00から翌7:00までの各地点の気温は、「PCM15B 上面直上」が最も高く14°C以上で推移した。それ以外の2地点の気温は「PCM15B 上面直上」より3~4°C低く推移し、明け方には10°Cを下回った(第9図)。

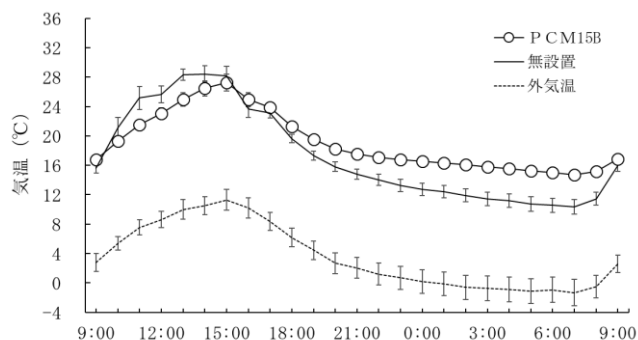


第9図 気温推移
(期間：2017.1.15 19:00~1.16 7:00)

2 PCM 設置が畝面上の気温に与える影響と局所保温がスイカの生育に与える影響

1) 交配期間中の畝中央部の気温 (2016年度)

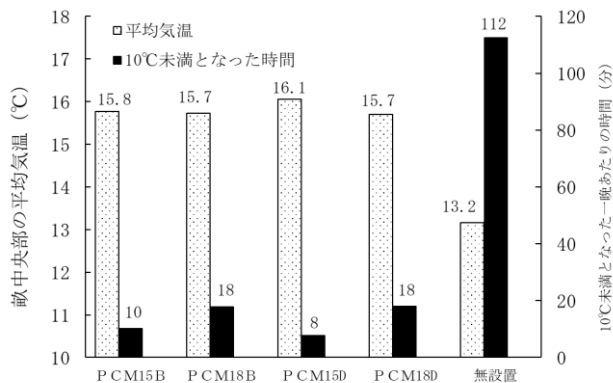
2016年度の交配期の毎正時における外気温および畝中央部の気温の平均値は、「PCM15B」で日中、とりわけ外気温が上昇する9:00から15:00の間、PCMの吸熱により「無設置」より低く推移し、それ以降の外気温が下がる時間帯はPCMからの放熱により高く推移した(第10図)。



第10図 交配期における毎正時の気温の平均値の推移
(期間：2017.1.22~2.2, エラーバーはSE)

2) PCMの種類と畝中央部の気温 (2017年度)

2017年度はPCMの種類、すなわちサイズと変化温度帯の違いについて検討した。夜間(2018.1.11~2.26の19:00~翌7:00)における畝中央部の平均気温は、無設置区と比べPCM設置区は2.5°C~2.9°C高く、スイカの生育限界温度とされる10°C未満¹⁴⁾となった一晩(19:00~翌7:00)あたりの時間も一様に少なかった。また、PCMを設置した試験区同士では、畝中央部の平均気温に大きな差は見られなかったが、10°C未満となった一晩あたりの時間は相変化温度が15°Cの「PCM15B」、「PCM15D」の方が18°Cの「PCM18B」、「PCM18D」より短い傾向が見られた(第11図)。



第11図 畝中央部の平均気温と畝中央部が10°C未満となった一晩あたりの時間
(期間：2018.1.11~2.26の19:00~翌7:00)

3) PCMの保温性能

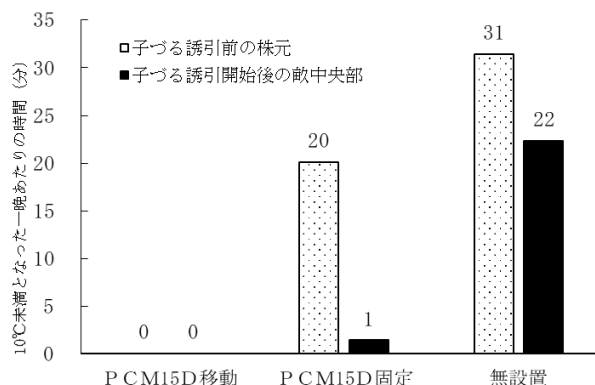
PCM設置区の夜間(19:00~翌7:00)における畝中央部の平均気温は無設置区より、2016年度に3.7°C、2017年度は2.5~2.9°C高く保たれた。しかし、平均外気温が高かった2018年度は、PCM設置区と無設置区との較差が大幅に縮小した(第3表)。

第3表 夜間の外気温と畝中央部の気温
(2016~18年度)

	試験区名	外気温(°C)	畝中央部の気温(°C)
2016年度	PCM15B	1.6	16.8
	無設置		13.1
2017年度	PCM15B	0.9	15.8
	PCM18B		15.7
	PCM15D		16.1
	PCM18D		15.7
	無設置		13.2
2018年度	PCM15D移動	4.2	16.7
	PCM15D固定		16.1
	無設置		15.8

注1) 期間は3か年とも1月11日~2月26日19:00~翌7:00.

注2) PCM15D移動の1月11日19:00~1月25日7:00は、株元付近(PCM上面直上付近)の気温を測定.

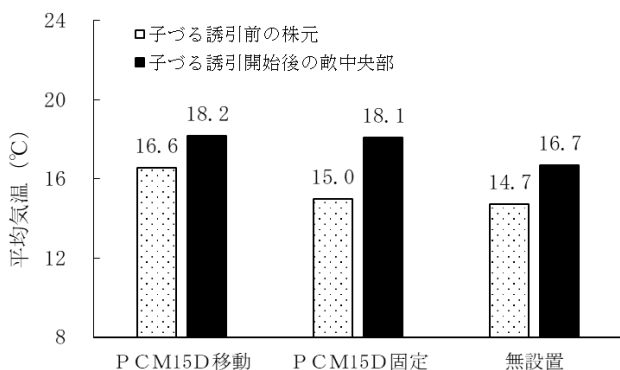


第13図 株元および畝中央部が10°C未満となった一晩あたりの時間

(子づる誘引前の株元: 2018.12.26 19:00~2019.1.25 7:00, 子づる誘引開始後の畝中央部: 2019.1.25 19:00~2019.4.9 7:00)

4) 局所保温の開始時期がスイカの初期生育に与える影響 (2018年度)

「PCM 15D 移動」では2019年1月25日、子づるを「の」の字で誘引開始するとともにPCMを株元付近から畝中央部に移動させた。同時に「PCM 15D 固定」では、子づるの誘引を開始することで成長点の加温が開始された。2018年度の栽培期間中の夜間(2018.12.26 19:00~2019.4.9 7:00)の平均気温は、子づる誘引前の株元(親づる成長点付近)で「PCM 15D 移動」が「無設置」や「PCM 15D 固定」より1.6~1.9°C高く、子づる誘引開始後の畝中央部は「PCM 15D 移動」, 「PCM 15D 固定」が「無設置」より約1.5°C高かった(第12図)。



第12図 株元および畝中央部における夜間の平均温度

(子づる誘引前の株元: 2018.12.26 19:00~2019.1.25 7:00, 子づる誘引開始後の畝中央部: 2019.1.25 19:00~2019.4.9 7:00)

また、スイカの生育限界温度とされる10°C未満となった一晩(19:00~翌7:00)あたりの時間について、子づる誘引前の株元は「PCM 15D 移動」だけが0分だった。子づる誘引開始後は「PCM 15D 固定」も「無設置」に比べ大幅に少なくなった(第13図)。

第3表のとおり2018年度は暖冬年であり、子づる誘引開始後の畝中央部について、無設置区において10°C未満となった一晩(19:00~翌7:00)あたりの時間は2017年度の5分の1程度まで減少した。しかしながら、このような暖冬年であってもPCM設置区は無設置区より畝中央部の気温を高く保つ効果があることがわかった。

なお、定植直後から子づる誘引前までの保温の効果を確認するため、2019年1月25日に生育調査(定植29日後の出葉数、葉長、葉幅長、葉柄長、SPAD値)を実施したが、試験区による差は見られなかった(データ略)。

5) 局所保温がスイカの交配用第一雌花に与える影響 (2016~18年度)

局所保温が交配用第一雌花に与える影響を第4表に示す。

第4表 局所保温が交配用第一雌花に与える影響

	試験区名	開花までの日数(日)	開花期間(日)	着生節位(節)	着果率(%)
2016年度	PCM15B	17.4	3.5	17.6	54.2
	無設置	20.4	9.0	18.9	19.4
		統計処理(分散分析)	**	*	n.s
2017年度	PCM15B	20.5 ^a	6.0 ^a	18.8	40.0 ^a
	PCM18B	25.8 ^b	7.3 ^a	20.3	29.2 ^{ab}
	PCM15D	23.0 ^{ab}	5.3 ^a	17.3	44.4 ^a
	PCM18D	22.9 ^{ab}	6.3 ^a	18.9	37.5 ^a
	無設置	26.6 ^b	18.0 ^b	20.1	0.0 ^b
		統計処理(分散分析)	*	*	n.s
2018年度	PCM15D移動	22.9	7.0	16.6 ^a	76.0 ^{ab}
	PCM15D固定	22.5	7.0	18.6 ^b	78.6 ^a
	無設置	22.6	6.3	18.2 ^{ab}	52.1 ^b
		統計処理(分散分析)	n.s	n.s	*

注1) n.s.は有意差なし. **, *は有意差あり(**:p<0.01, *:p<0.05).

アルファベットを付したものは異なる文字間で有意差あり(Tukey法, p<0.05).

注2) 2016年度は2反復実施。「PCM15B」:n=64, 「無設置」:n=45.

注3) 2017年度は3反復実施。「PCM15B」:n=67, 「PCM18B」:n=61,

「PCM15D」:n=50, 「PCM18D」:n=50, 「無設置」:n=40.

注4) 2018年度は3反復実施。「PCM15D移動」:n=55,

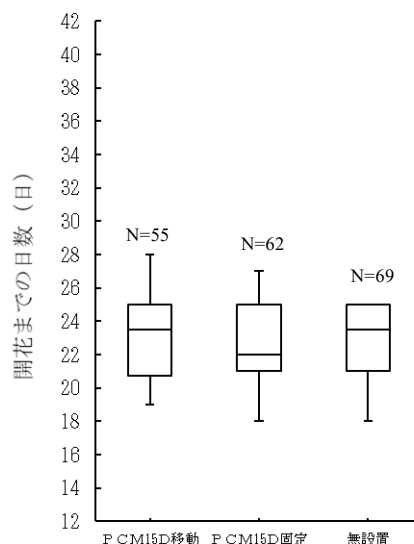
「PCM15D固定」:n=62, 「無設置」:n=69.

2016年度、開花までの日数が「PCM 15B」で短く、その開花期間（開花までの日数の最大値-同最小値）も短くなった。また「PCM 15B」は、交配用第一雌花の着生節位が低くなる傾向を示し、その着果率も高かった。

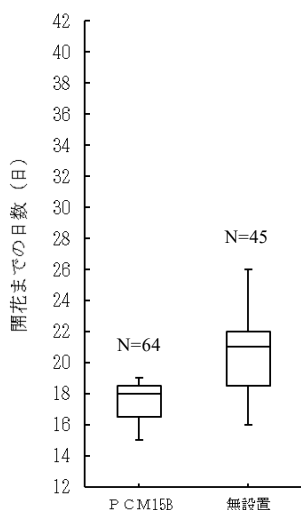
2017年度も開花までの日数がPCM設置区で短く、それらの開花期間も短く、着生節位が低くなる傾向を示した。着果率はPCM設置区で高い傾向を示したが、PCMの種類による差は判然としなかった。

2018年度は開花までの日数や開花期間について、試験区による違いは見られなかった。しかし、着生節位は「PCM 15D 移動」で低く、着果率はPCM設置区で高くなる傾向が見られた。

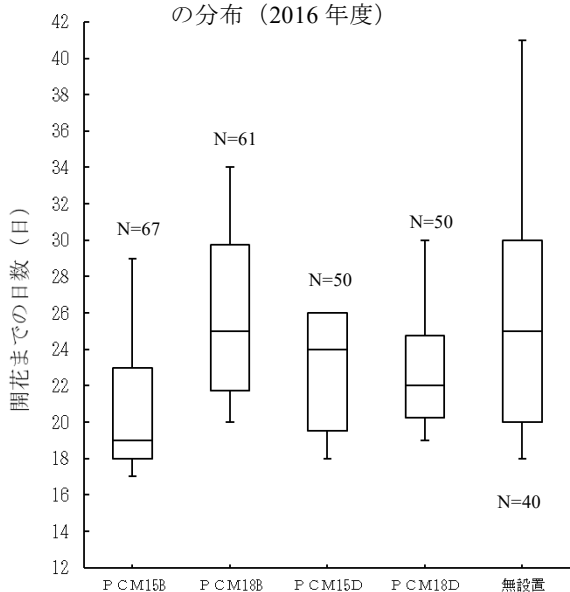
開花までの日数の分布をグラフ化（箱ひげ図）したところ、暖冬年の2018年度を除き、PCMを設置した試験区で四分位範囲が狭く、つまり開花日が狭い範囲に集中する傾向が見られた（第14図～第16図）。



第16図 開花までの日数の分布（2018年度）



第14図 開花までの日数の分布（2016年度）



第15図 開花までの日数の分布（2017年度）

6)局所保温がスイカの交配に与える影響（2016～18年度）
局所保温が交配に与える影響を第5表に示す。

第5表 局所保温がスイカの交配に与える影響

	試験区名	交配日 (月・日)	収穫日 (月・日)	着果率 (%)	未着果 株率 (%)	交配 回数 (回/株)
2016年度	PCM15B	1.23	3.26	39.8	11.0	2.6
	無設置	1.26	3.25	16.6	48.0	3.3
統計処理(分散分析)						
		-	-	**	*	n.s.
2017年度	PCM15B	2.15	4.14	51.7 ^a	0.0 ^a	2.8 ^a
	PCM18B	2.21	4.14	42.5 ^a	33.3 ^b	3.3 ^{ab}
	PCM15D	2.17	4.10	41.7 ^a	13.0 ^c	2.8 ^a
	PCM18D	2.12	4.14	41.7 ^a	0.0 ^a	3.5 ^{ab}
	無設置	2.24	4.24	11.5 ^b	66.7 ^d	4.2 ^b
統計処理(分散分析)						
		-	-	*	*	*
2018年度	PCM15D移動	2.16	4.19	76.0	0.0	3.4
	PCM15D固定	2.18	4.21	69.8	0.0	3.6
	無設置	2.16	4.20	57.6	0.0	3.7
統計処理(分散分析)						
		-	-	n.s.	-	n.s.

注1) 交配日は着果した雌花の平均。収穫日は収穫果の全平均値。
 注2) 交配回数とは、収穫果一個を決定するまでに実施した一株当たりの交配回数。
 注3) n.s.は有意差なし、**および*は有意差あり(**:p<0.01, *:p<0.05)。
 アルファベットを付したものは異なる文字間で有意差あり(Tukey法, p<0.05)。
 注4) 2016年度は2反復実施。「PCM15B」:n=32,「無設置」:n=28。
 注3) 2017年度は3反復実施。「PCM15B」:n=32,「PCM18B」:n=32,
 「PCM15D」:n=25,「PCM18D」:n=28,「無設置」:n=25。
 注4) 2018年度は3反復実施。「PCM15D移動」:n=45,
 「PCM15D固定」:n=45,「無設置」:n=45。

2016年度はPCM設置区で着果率が高く、未着果株率は低く、交配回数が減少する傾向が見られた。

2017年度も、PCM設置区で様に着果率が高く、未着果株率は低かった。交配回数についても「無設置」より減少する傾向が見られた。

2018年度はPCM設置区で着果率が高く、交配回数が少ない傾向を示したが、その差は2016～2017年度ほど明確ではなかった。

7)局所保温がスイカの果実肥大および収量・品質に与える影響 (2016~18年度)

2018年度を除き、無設置区よりPCM設置区で収量が多かった。しかし、空洞果率・糖度についてはPCMの種類や設置時期によらず差は見られなかった(第6表)。

第6表 局所保温がスイカの果実に与える影響

試験区名	収穫果平均重(kg)	収量(kg/10a)	空洞果率(%)	糖度(Brix,%)
2016年度				
PCM15B	5.9	2,851	28.6	10.2
無設置	5.0	1,565	36.4	10.2
統計処理(分散分析)	*	**	n.s.	n.s.
2017年度				
PCM15B	6.5	2,856 ^a	20.0	10.2
PCM18B	7.1	2,500 ^{ab}	0.0	10.2
PCM15D	7.1	3,277 ^a	17.5	10.1
PCM18D	7.1	3,280 ^a	25.0	10.1
無設置	7.2	1,571 ^b	16.7	10.2
統計処理(分散分析)	n.s.	**	n.s.	n.s.
2018年度				
PCM15D移動	6.5	3,414	12.5	11.4
PCM15D固定	6.6	3,470	14.3	10.8
無設置	6.4	3,580	14.3	11.1
統計処理(分散分析)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

注1)糖度は種子部・中心部より各2回、計4か所をATAGO製N-1αで測定した値の平均。
注2)n.s.は有意差なし、**および*は有意差あり(**:p<0.01, *:p<0.05)。

なお、アルファベットを付したものは異なる文字間で有意差あり(Tukey法, p<0.05)。

注4)2016年度は2反復実施。「PCM15B」:n=28,「無設置」:n=15。

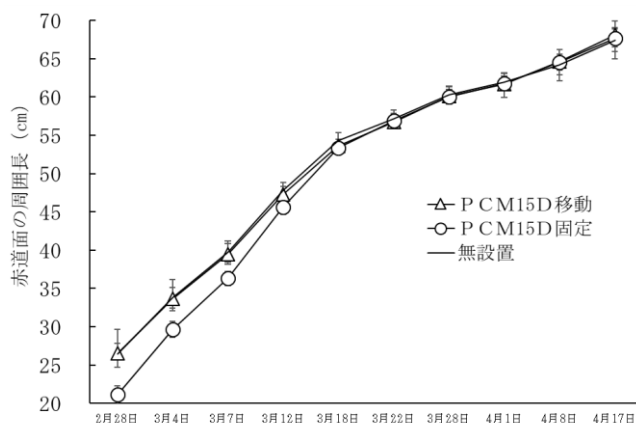
注3)2017年度は3反復実施。「PCM15B」:n=32,「PCM18B」:n=21,

「PCM15D」:n=22,「PCM18D」:n=28,「無設置」:n=8。

注4)2018年度は3反復実施。「PCM15D移動」:n=45,

「PCM15D固定」:n=45,「無設置」:n=45。

また、2019年2月18日に交配した雌花について、試験区毎に7株ずつ果実赤道面の周囲長を計測した結果、「PCM15D移動」と「無設置」は同様に推移した。「PCM15D固定」は計測期間の前半、他の試験区より小さかったものの、後半には同様に推移した(第17図)。



第17図 2/18交配のスイカ果実赤道面の周囲長の推移(期間:2019.2.28~4.17, 無反復, エラーバーはSE)

IV 考察

1 保温方法の検討(気温影響範囲調査)

設置したPCMの上面直上と、株間方向に離れた2地点の気温の推移から、PCMによる保温効果は上面直上に限られ、放出された熱によるハウス空間全体の保温は難しいことが分かった。しかし、作物に対する局所的な保温資材としての活用は期待でき、地這い栽培のスイカでは1株あたり1枚のPCMが必要である。

2 PCM設置が畝面上の気温に与える影響と局所保温がスイカの生育に与える影響

2種類の相変化温度(15°Cと18°C)のPCMを比較した結果、15°Cタイプが保温性能で優る傾向が見られた。これは、15°CタイプのPCMは18°Cタイプより相変化温度が低く、ハウス内気温低下に伴う潜熱の消失タイミングが遅くなるのが要因であると推察された。

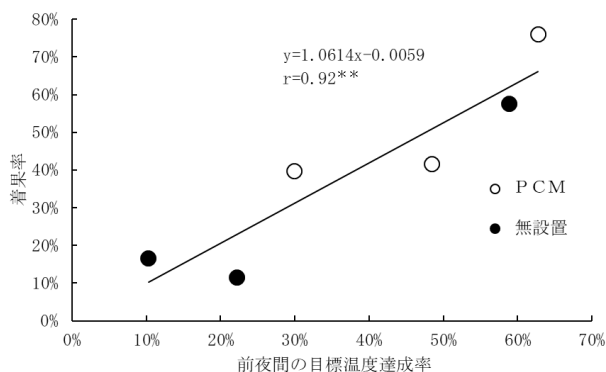
相変化温度の異なるB型PCM(PCM15B・PCM18B)はともに表面積2,085.3cm²で溶液充填量が2kg、同じくD型PCM(PCM15D・PCM18D)ではともに表面積1,041.5cm²で溶液充填量が1kgであり、PCMの溶液充填量あたりの表面積はB型1,042.7cm²/kg、D型1,041.5cm²/kgとカプセルのサイズによらず同等だった。PCMはプラスチック製のカプセル表面を通じて熱を吸放熱するため、形状が同様で、溶液の相変化温度が同一かつ溶液充填量あたりの表面積が同一であれば保温性能に差は無いと考えられ、これらが、PCMのサイズによる保温性能の違いが無い要因であると考えられた。さらに、2017年度の試験から成長点や雌花の保温にはサイズの小さいD型でも管理作業の面で問題無く、導入コストや取り扱いの容易性の観点から相変化温度15°Cで小型の「PCM15D」が最も適していると判断された。

3か年の夜間(19:00~翌7:00)の平均外気温±SDは2.2°C±1.42であったが、畝中央部の平均気温±SDは15°CタイプのPCM設置区(2016年度:PCM15B, 2017~2018年度:PCM15D)で16.3°C±0.31、無設置区で14.1°C±1.24だった。これは、年度によって外気温が変動する中、PCM設置により成長点や雌花が配置される畝中央部の気温を安定化できることを示しており、暖冬でも周期的に訪れる低夜温日における着果のための保険的な資材として有用であると考えられる。

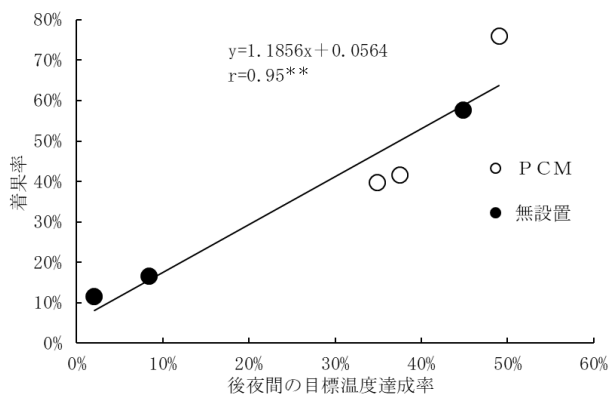
3か年の栽培試験の結果から、15°CタイプのPCM(2016年度:PCM15B, 2017~2018年度:PCM15D, ただし2018年度は「PCM15D固定」)設置により、交配用第一雌花の着果率が35.2ポイント上昇し、その開花期間が平均5.8日短くなった(第4表, 第14図~第16図)。さらに、交配用第一雌花以外の雌花も含むトータルの着果

率が平均 21.9 ポイント向上, 交配回数が平均 484 回/10a 減少するなど交配作業の省力化につながる効果が確認された。併せて, この着果率の向上により収穫に至らない未着果株率が平均 30.2 ポイント低下したことにより収量も平均で 961kg/10a 増収するなど収量の安定化も期待できる。また, 全体に着果が良く, PCM の効果が小さかった暖冬年の 2018 年度であっても, 交配用第一雌花の着果率が向上するなど一定の効果を示した。

末永は, スイカの交配期における前夜間 (19:00~0:59) と後夜間 (1:00~7:00) の管理に望ましい目標温度を 18°C と 16°C としている¹⁵⁾。15°C タイプの PCM (2016 年度: PCM 15B, 2017~18 年度: PCM 15D, ただし 2018 年度は「PCM 15D 固定」) 設置時の, 畝中央部の気温がそれらを達成した時間の割合 (以下, 目標温度達成率) について, 交配用第一雌花の交配期間に限定して調査を行った結果, 目標温度達成率と着果率には有意な正の相関が認められ (第 18 図, 第 19 図), PCM 設置による交配期の畝中央部の夜温の上昇が, 着果率の向上につながったことを示している。



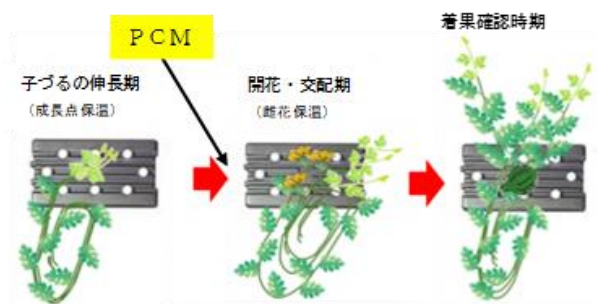
第 18 図 3 カ年の前夜間の目標温度達成率と交配用第一雌花の着果率の関係 (**は 1%水準で有意性あり)



第 19 図 3 カ年の後夜間の目標温度達成率と交配用第一雌花の着果率の関係 (**は 1%水準で有意性あり)

2016 年度を除き収穫平均重に違いが見られなかったことから, 試験区による収量の違いは 2016 年度を除き, 未着果株率すなわち着果率の差によるものであると考えられる。

2018 年度の定植直後から局所保温を開始した「PCM 15D 移動」では, 生育初期 (子づる誘引開始前) の成長点付近の気温が高く確保されたものの, 初期生育の促進効果は認められず, 子づる誘引開始後に PCM を畝中央部へ移動する作業に 2.8 時間/10a の労働時間を要した。さらに第 6 表や第 17 図のとおり, 今回の試験条件下では着果確認後の PCM の継続設置に果実の肥大促進効果は認められず, 品質への影響も見られなかったことから, PCM の設置箇所は畝の中央部とし, 設置期間は子づるの伸長期 (子づる誘引開始後) から着果確認時期までとするのが効果的な利用法である (第 20 図)。



第 20 図 PCM とスイカの位置関係

以上のことから, 1~2 月に交配する半促成無加温スイカにおいて, 冬季の気象条件の違いにより効果に濃淡はあるものの, 雌花側の着果不良対策として子づるの伸長期から着果確認時期までの間, 成長点および雌花付近を相変化温度 15°C の PCM で保温することで雌花の開花日を集中化させるとともに交配開始後の一定期間における着果率を向上させ, 交配作業等の省力化や減収防止を図ることができる。

V 経費試算

前述のとおり PCM の導入効果として, ①交配作業の省力化 (交配回数・開花確認作業の削減), ②開花の揃いによる収穫時間の短縮 (収穫確認時間), ③着果率向上による減収軽減があげられ, 1 年間に PCM をスイカ 1 作分に用いることを前提に経済効果を試算した。算出にあたり, 栽植密度が 660 株/10a, 交配時間は 30 秒/雌花, 雄花の準備 (摘み取り・花弁除去) に 60 秒/雄花, 交配前の開花確認に 10 秒/株を要することとした。雄花はスイカ花粉採取専用品種「SA-75」を用い, 雄花 1 個につき雌花 4 個との交配に用いることを前提とした。また, 家族

労働費見積額は 975 円/時¹⁶⁾とし、2名で作業することとした。

PCM の設置により 3 か年平均で交配回数が 484 回/10a 減少し、交配用第一雌花の開花期間が平均 5.8 日短くなったことから、交配に関わる労働時間が年 16.7 時間/10a 削減され、家族労働費見積額で合計 16.3 千円/10a が削減された。また、15°C タイプの PCM (2016 年度: PCM 15B, 2017~18 年度: PCM 15D, ただし 2018 年度は「PCM 15D 固定」) 設置による 3 か年平均の増収は 961 kg/10a であり、市場取引価格 350 円/kg (JA 熊本経済連集計, 2016~2018 年度の 4~5 月出荷分の実績) として、増収に伴う収穫に係る家族労賃見積額や出荷経費¹⁶⁾の掛かり増し分を差し引いたスイカの増収額は年間 284 千円/10a と見積もられた。一方、単価 600 円/枚で 7 年償却とした場合の PCM の導入経費は年間 58.6 千円/10a であった。以上を差し引いた PCM の導入効果は年間 241.7 千円/10a と見積もられた。ただし、本試算結果は 3 か年平均によるものであり、暖冬年である 2018 年度に限った試算によると、PCM の導入により 91.7 千円/10a のマイナスを生じるなど、本技術の導入効果は外気温の状況に大きく左右されることがわかる。

PCM をほ場内の全株に設置するためには 396 千円/10a の初期投資が必要である。しかしながら、自然エネルギーを熱源とする PCM では、設置と撤収に労賃 (3 千円/10a) が必要であること以外、ランニングコストは不要である。なお、益城町におけるスイカ栽培に係る条件 (間口: 5.5m, 奥行: 50m, 軒高: 1.8m, 連棟数: 1, 被覆材: 塩ビ, 内張: 2 層, 設定温度: 10°C, 地点: 熊本) で石油暖房機の使用を仮定し、A 重油の単価を 65 円/L, 暖房開始日と終了日をそれぞれ 12 月 26 日, 3 月 26 日として、高市ら (2007) の暖房燃料消費量の試算ツール¹⁷⁾にて試算すると、燃料代のみで 287 千円/10a のランニングコストが必要であることがわかり、PCM にはコスト面における優位性が認められた。

本研究で用いた PCM は既に大手メーカーから市販され、1 枚単位からの利用も可能である。そのため、ハウスの妻面付近など最も低温になりやすい場所へ試験的に設置し、生産者にその効果を確認してもらいながら、段階的に推進すれば十分普及が期待できる技術である。

VI 謝辞

本稿の作成にあたり、ご指導、ご助言を賜りました元熊本県農業研究センター生産環境研究所 所長行徳裕氏、熊本県農業研究センター 特別研究員齋藤彰氏に厚く謝意を表します。

VII 引用文献

- 1) 熊本県農林水産部 (2020): 平成 30~令和元年度 (2018~2019 年度) 熊本県農業動向年報. 熊本県庁, 熊本, https://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=33727&sub_id=1&flid=241110 (2020 年 10 月 17 日閲覧)
- 2) 熊本県益城町役場 (2018): 益城スイカ. 熊本県益城町役場, 熊本, <https://www.town.mashiki.lg.jp/kiji0033378/index.html> (2020 年 9 月 26 日閲覧)
- 3) 町田剛史・甲田暢男・宇田川雄二(2002): スイカの着果に及ぼす低夜温および吸湿性被覆資材の影響. 千葉県農業総合研究センター研究報告, 1, 7-12.
- 4) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 (2009): 地下水、暖房機排熱を有効活用したイチゴク라운温度制御技術. 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構, 茨城 <https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/karc/2009/konarc09-28.html> (2020 年 10 月 18 日閲覧)
- 5) 森山友幸・奥 幸一郎(2012): 促成ナス栽培におけるトンネルと枝ダクトを組み合わせた株元加温システムの開発. 園芸学研究, 11 (4), 531-536.
- 6) 加賀屋博行・浅利幸男・藤本順治・畠山順三(1983): 砂丘地露地メロンのトンネル栽培における水封マルチと二重トンネル効果. 東北農業研究, 33, 229-230.
- 7) 仁科弘重・高倉直(1983): 潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室に関する研究(1)潜熱蓄熱材の特性試験と小型温室における暖房実験. 農業気象, 39(3), 201-211.
- 8) 株式会社カネカ (2020): 潜熱蓄熱材(PCM) カネカ 潜熱蓄熱材 PATTHERMO(パッサーモ). 株式会社カネカ, 東京 https://www.kaneka.co.jp/business/qualityoflife/foa_007.html (2020 年 9 月 27 日閲覧)
- 9) 一般社団法人 日本潜熱蓄熱建材協会 (2020): 潜熱蓄熱建材とは?. 一般社団法人 日本潜熱蓄熱建材協会, 東京, <https://jpcm.jp/whatis> (2020 年 9 月 27 日閲覧)
- 10) 矢野直達・安武大輔・北野雅治(2016): 潜熱蓄熱材を利用したハウスの省エネルギー温度管理に関する研究 - カンキツ加温栽培への応用例 -. Eco-Engineering, 28(1), 15-20.
- 11) 高橋正明・山村真弓・酒井博幸・今野忠雄・矢野直達 (2012): 潜熱蓄熱材による省エネ効果の検討. 東北農

- 業研究, 65, 139-140.
- 12) カシオ計算機株式会社 (2008): keisan サービス. カシオ計算機株式会社, 東京,
<https://keisan.casio.jp/has10/SpecExec.cgi?path=04000000%252e%2590%2594%258aw%258c%25f6%258e%25ae%258fw%252f01000100%252e%258eO%258ap%258c%2560%252f10000300%252e%2592%25bc%258ap%258eO%258ap%258c%2560%252fdefault%252exml#!>
 (2020年9月26日閲覧)
- 13) タキイ種苗株式会社 (2019): タキイのスイカ栽培マニュアル. タキイ種苗株式会社, 京都,
https://www.takii.co.jp/tsk/tools/y_manual_pdf/y_manual1_suika.pdf (2020年4月21日閲覧)
- 14) 稲山光男 (1998): 「埼玉県園芸試験場鶴ヶ島洪積畑支場=温度管理と生育・収量・品質. 農業技術体系メロン類スイカ編. 追録第23号」, 農山漁村文化協会, 419-422.
- 15) 末永善久 (2000): 「熊本県=主要作型と栽培. 農業技術体系メロン類スイカ編. 追録第25号」, 農山漁村文化協会, 291-298.
- 16) 熊本県農業技術課 (2020): 熊本県農業経営指標. 熊本県庁, 熊本,
https://www.pref.kumamoto.jp/kiji_34249.html
 (2020年10月10日閲覧)
- 17) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 (2007): わが国各地における各種温室の暖房燃料消費量の試算ツール. 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構, 茨城
<https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/vegetea/2007/vegetea07-02.html>
 (2020年10月24日閲覧)

Summary

Measures to Improve the Fruiting Rate of Semi-Forced Non-Heated Watermelon by Local Heat Retention Using Latent Heat Storage Material, and its Effects

Kazuma KURATA, Seiji TANAKA, Masaharu NAKAYAMA

Watermelons in the area centered on Mashiki Town, Kumamoto Prefecture are shipped to large consumption areas from November to June of the following year, and they occupy an important position in the nationwide watermelon production area relay, but they are cross-pollinated in the midwinter (January to February). Since this crop is not heated by an oil heater (even the production type), yield loss due to poor fruit set at low temperatures is often a problem. In this study, toward the goal of reducing the rate of fruit set failure while maintaining the concept of "eco-cultivation" for watermelon cultivation in Mashiki, we tested a latent heat storage material, i.e., a phase change material (PCM) that can repeatedly use natural energy as a heat source and has a large amount of heat storage. We investigated the use of the PCM to keep the growth points of watermelons and female flowers for mating warm toward the goal of reducing the fruit set rate. The test results demonstrated that by placing one plate-like PCM per watermelon in the center of the ridge of the field where the growing points and female flowers are located, it was possible to keep them warm continuously. Of the PCMs tested, the 15°C phase change temperature-type was the best: the night temperature near the growth point and female flowers was kept 2.3°C higher than without the PCM, and the frequency of falling below the watermelon growth limit temperature of 10°C was significantly reduced. The cultivation test results provided the following: (1) labor saving of mating work (reduction of mating frequency and flowering confirmation work); (2) shortening of the harvest period by uniform flowering (harvest confirmation time); and (3) yield loss prevention by improving the fruit set rate. In order to obtain a sufficient effect, it is necessary to put the growth point on the PCM from the extension period of the main culms to before the time point of cross-pollination, and to put the female flowers on the PCM after the pollination period until the fruit-set confirmation time. A trial calculation of the economic effect was made on the assumption that a PCM with a phase change temperature of 15°C was used for one watermelon crop per year and depreciated for 7 years: the result was a savings of 241.7 thousand yen/10a.

Key words:

midwinter, semi-forcing and non-heating culture system, watermelon, latent heat storage material, PCM, natural energy, eco-cultivation, growth point, female flower, hill, heat retention