

施設園芸農業用シートヒーターの基礎研究

村田政隆、柏谷和仁*

Basic Research on Seat Heaters for Horticulture and Agriculture

Masataka Murata, Kazuhito Kashiwaya*

要 旨

安全・安心な農産物を生産する施設園芸では、農産物の高品質化を図るため、植物の株元の温度制御技術が広く普及している。大規模施設での温度制御は熱源となる温水や電熱線等を数十 m 引き回す循環システムが使われる。近年は脱炭素社会が求められる上に A 重油の供給が不安定なことから、ボイラー設備の維持管理や新規導入が課題となっている。そこで、本研究ではボイラー設備を使用せず、株元温度をユニット単位で制御する施設園芸農業用シートヒーターについて基礎研究を行った。栽培施設における試験運用の結果、カーボン塗料を用いたシートヒーターがイチゴ栽培に適用できることを確認した。

1. はじめに

持続的社会的実現に向け、農産物等の周年安定供給を図る施設園芸は、ヒトの生活に必要不可欠な食料ニーズに対して重要な役割を担っている。そして、わが国では全国 10 拠点に次世代施設園芸拠点を整備するなどして、高度な計測制御技術による育成環境の最適化や生産性の向上を図っている¹⁻³⁾。特に、国内外の需要が高いイチゴの栽培技術は高度化が進んでおり、九州沖縄農業研究センターが開発したイチゴのクラウン（株元）温度制御の育成法は促成や果実の肥大化等の利点から全国各地で普及している⁴⁻⁸⁾。一般的なボイラー設備の加温システムの概略を図 1 に示す。

栽培棚は長さ 1m 程度の発泡資材を連結して数

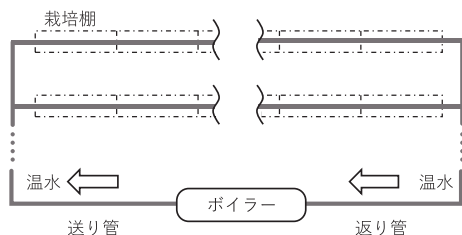


図 1 ボイラー設備による加温システムの概略

十 m に達する列を形成し、施設内には何列もの栽培棚が設置される。そして、加温はボイラーから送水された温水が栽培棚で放熱した後、ボイラーに返ってくる循環システムとなっている。電熱線式もボイラー式と類似のシステムとなる。循環システムは配管や電熱線を引き回すことで広いエリアを加温することができるため、熱源機器や制御器の設置台数が少なく、インシヤルコストを抑えやすい。農林水産省の園芸用施設の設置等の状況によると、平成 30 年度における園芸用施設の加温面積 17,388ha のうち、石油利用等による加温面積が 15,576ha となっており、全国の加温面積のうち約 9 割が重油に依存している状況である。ここで、熱の基本となる熱流量の一般式を(1)式に示す⁹⁾。

$$q = \frac{Q}{\tau} = K\Delta tA \cdots (1) \text{式}$$

ただし、 q : 熱流量[W]、 Q : 熱量[J]、 τ : 時間[s]、 K : 熱通過率[W/m²・K]、 Δt : 温水と培地の温度差、 A : 伝熱面積[m²]とする。

*株式会社仁光電機

責任著者連絡先 (Masataka Murata) : murata@techakodate.or.jp

この式から、温水と培地の温度差が大きい場合や電熱面積が大きい場合に、加温には大きな熱流量が必要になることがわかる。ゆえに、導入前に立地条件や施設の規模等に適切した加温設計をしなければ、効果不足や修繕を招くことになる。

次に、一般的な温水暖房設備における循環水量 L : 循環水量[m³/h]について(2)式に示す¹⁰⁾。

$$L = \frac{3600H}{\Delta t_w c \rho} \dots (2) \text{式}$$

ただし、 H : 搬送熱量[kW]、 Δt_w : 出入口水温度差[K]、 c : 水の比熱[kJ/(kg・K)]、 ρ : 水の密度[kg/m³]とする。

通常、温水熱交換器の出入口の温度差は 7～15℃程度である¹¹⁾。栽培棚の加温システムにおいて、行き管と返り管の温度差 Δt_w が大きい場合、栽培温度環境にムラを生じやすくなっていることが懸念される。温度ムラを解消するには循環水量 L を増やすことで Δt_w を抑えることになるが、適切な加温設計がなされていない場合には、循環ポンプの能力を高める修繕が必要となる。

近年、脱炭素社会形成に向け、再生可能エネルギーの活用が推進されている。特に、太陽光発電は今後も電力供給システムとして普及することが期待されており、発電形態が直流電力であることから直流負荷との相性も良い。そこで、本研究では太陽光発電システムとの連動を見据え、ボイラー等の大規模設備を必要としない直流駆動の施設園芸農業用シートヒーターを試作し、ユニット単位での株元温度制御法について検証した。

2. シートヒーター

2.1 特性確認用小型シートヒーターの試作

シートヒーターの基本構造は、図2に示すように、基材に発熱塗料を塗布し、正極と陰極となる電極を貼付して、フィルムでカバーをすることから、量産には高度な印刷技術が必要不可欠である。

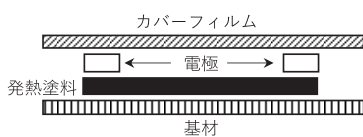


図2 シートヒーターの基本構造

ゆえに、シートヒーター試作では、発熱塗料の均一性が実験結果に大きな影響を与える。そこで、面発光素子の無機 EL や電子ペーパーの製造・販売を行っているセコニック電子函館事業所の協力を得て、表1に示す特性評価用の小型シートヒーターを試作した。

表1 小型シートヒーター仕様

基材フィルム	PET 材	
カバーフィルム	PET 材	
カーボン塗料	Carbo e-Therm	
シート抵抗	4 ~ 8 Ω/sq	
ヒーター抵抗値	4.0 ~ 8.0 Ω (参考)	
外形	130 ± 3 × 100 ± 3 mm	
ヒーター有効寸法	100 ± 3 × 100 ± 3 mm	

2.2 特性確認実験の方法

実験 I として、小型シートヒーターの発熱特性を確認することを目的に、サーモカメラ「FLIR C2」を用いて、印加電圧 $V_{DC} = 0 \sim 5V$ における温度分布と最高温度を確認した。さらに、小型シートヒーター中央部に熱電対を貼付し、温度上昇の時系列変化を測定した。ただし、温度上昇変化の確認では、差を確認しやすくする目的で、印加電圧 V_{DC} は 5V、7V、10V に設定した。次に、シートヒーターの寿命等を検証するため、実験 II として、on-off 制御と PID 制御による制御性検証を行った。

2.3 特性確認実験の結果と考察

実験 I における温度分布結果を表2に示す。なお、サーモカメラの温度スケールは自動調整のため、各条件で色が示す温度値は異なっている。

表2 温度分布測定結果

印加電圧	0V	1V	2V
最高温度	31.8℃	32.2℃	32.9℃
消費電力	0W	0.15W	0.62W
温度分布			
印加電圧	3V	4V	5V
最高温度	37.9℃	45.6℃	54.6℃
消費電力	1.26W	2.52W	3.95W
温度分布			

傾向として V_{DC} が 2V を超えるとシート面の発熱が始まり、5V での表面最高温度は 54.6°C に達することがわかった。しかし、5V のときの発熱面では 3°C 程度の温度差が生じていることを確認した。この原因のひとつとして、速乾性塗料にカバーフィルムを被せる過程で、塗料の固化に伴う塗布ムラが発熱面の温度差に影響を与えた可能性がある。将来的な対策としては製造速度の速い量産設備に適したシートヒーター仕様の変更、塗料の変更もしくは添加物の検討等が必要と考える。

次に温度上昇の時系列変化について図3および図4に示す。

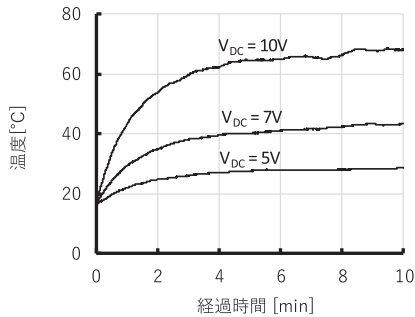


図3 経過時間に対する温度変化

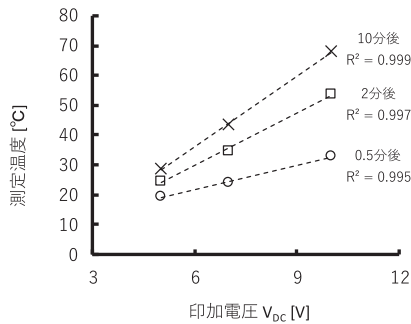


図4 印加電圧に対する経過時間ごとの温度変化

図3に示す様に、 V_{DC} が高いほどシートヒーターの温度は高くなった。実験環境の温度や熱伝達率条件下において、印加 10 分後の温度変化速度は、温度のゆらぎも含め、いずれも $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ におさまり、ほぼ安定状態となった。また、図4から V_{DC} が高いほどシートヒーターの温度上昇が早いことから、シートヒーター温度は電圧制御により容易に可能だと判断する。また、極性を反転させても同様の傾向があることを確認した。

次に、実験Ⅱの制御回路を図5に示す。

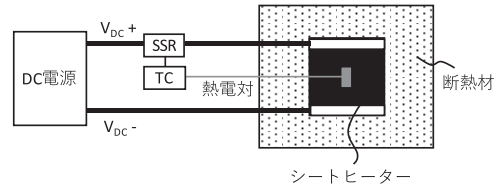


図5 実験Ⅱの制御回路

温度制御回路は、シートヒーター中央部に貼付した熱電対により温度を検出した温度調節器 TC (Temperature Controller) が、設定した制御方法に準じた制御電圧 V_{ctrl} により SSR (ソリッドステート・リレー: Solid State Relay) を開閉制御する簡易な構成とした。図6に温度範囲を $20^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ とした on-off 制御と PID 制御の実験結果を示す。

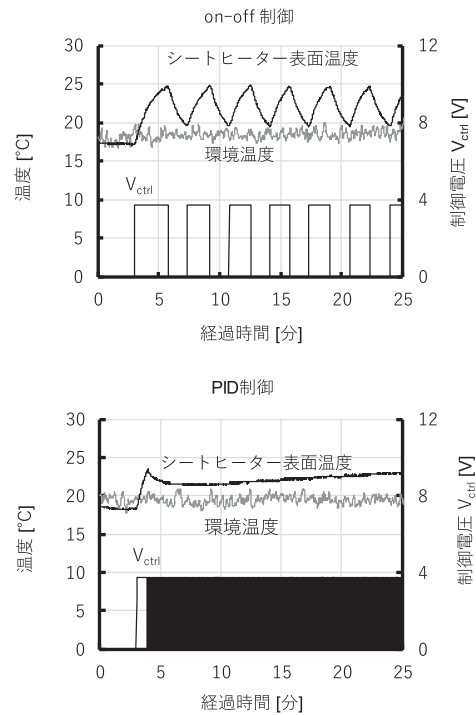


図6 温度制御結果

on-off 制御のシートヒーター表面温度は 20°C と 25°C の間を何往復もする制御がなされ、本実験では V_{ctrl} のデューティは約 50%であった。一方、PID 制御のシートヒーター表面温度は立ち上がり後のアンダーシュートは認められず、設定範囲内の温度を維持するように制御されている一方で、 V_{ctrl} は激しく on-off を繰り返している様子がわかる。ここで、PID 制御において経過時間 5.0 分から 5.5 分までの時間帯の V_{ctrl} の変化を図7に示す。

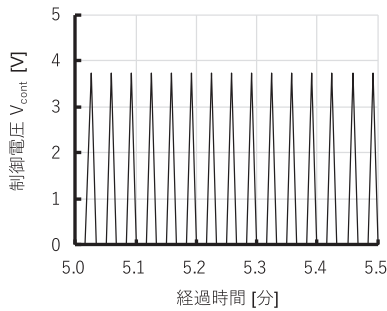


図7 制御電圧 (V_{cont}) の変化

制御電圧の変化は周期2秒の三角波のように見受けられる。データロガーのサンプリングタイムが500msであるため、標本化定理上は元信号を再現しているが、底角が0V(Lo)の瞬間と3.72V(Hi)に変化する瞬間の差がごく短時間ならば、デューティ50%の矩形波の可能性もある。この場合、on-off制御とPID制御のV_{ctrl}はデューティが等しく周期だけが異なるため、制御電力的には等価に見える。SSRは機械式に比べ開閉回数が寿命に影響することはないが、動作時は負荷側の突入電流が大きくなることから、短時間で開閉回数の頻度が多すぎると発熱しやすくなり、故障や破損を招く可能性がある。ゆえに、本実験の結果からシートヒーターの制御には、PID制御よりもon-off制御が適していると判断した。

以上より、小型シートヒーターの試作と特性確認から基本的な知見を得ることができた。そこで、施設園芸農業用として表3に示すシートヒーターを試作し、ユニット制御方法について実験的検証を行った。

表3 検証実験用シートヒーター仕様

基材フィルム	PET材
カバーフィルム	PET材
カーボン塗料	Carbo e-Therm
シート抵抗	4 ~ 8 Ω/sq
ヒーター抵抗値	0.4 ~ 0.9 Ω (参考)
外形	140 ± 3 × 900 ± 5 mm
ヒーター有効寸法	100 ± 3 × 890 ± 3 mm

3. 実験方法

宮城県のイチゴ栽培農家の協力を得て、実際に使用している約1mの発泡資材と培地を用いた栽培棚を仁光電機社屋内に再現した。次に、シート

ヒーターの効果的な使用方法を検討するため、図8に示す配置条件にて、加温時の水平方向の温度分布を測定した。なお、培地の深さが約14cmであるため、測定深度を約7cmとし、底部設置については深度方向に下部Aと底部Bを追加した。シートヒーターは図中の”○”で示す測定点の温度を用い、制御条件を19°C ± 3°Cとした。また、本実験結果からいずれかの条件を用いて、再加温するまでの長時間観測を実施することとした。

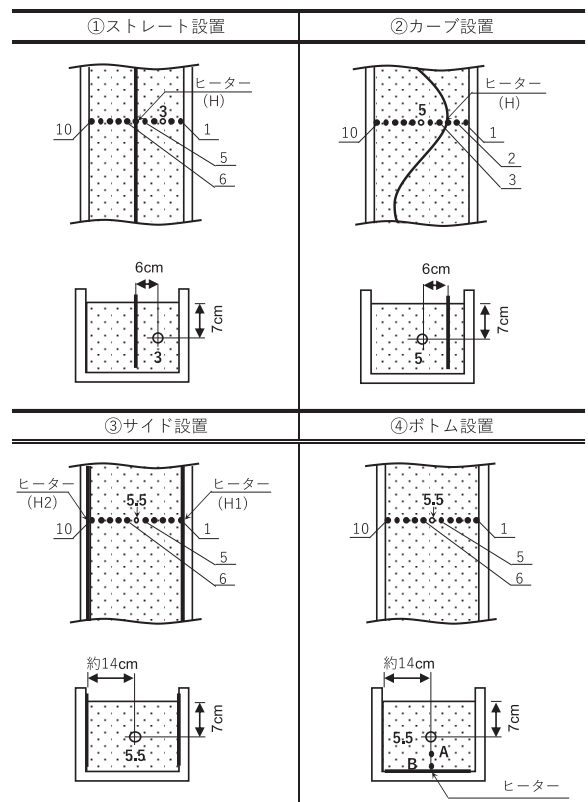


図8 シートヒーターの配置と温度分布測定点の番号

(○ : 制御用温度測定点)

4. 実験結果と考察

本実験は2022年2月に実施しており、実験開始前の培地温度はそれぞれ9~10°C程度であった。各実験結果の一例として、シートヒーターによる加温の開始時から最大3時間経過時までの温度分布変化を図9に示す。なお、図中の”○”はSSRを制御する温度調節器の入力温度を示している。

『①ストレート設置』の温度分布は、シートヒーターを設置した中央部の測定点Hを頂点とし

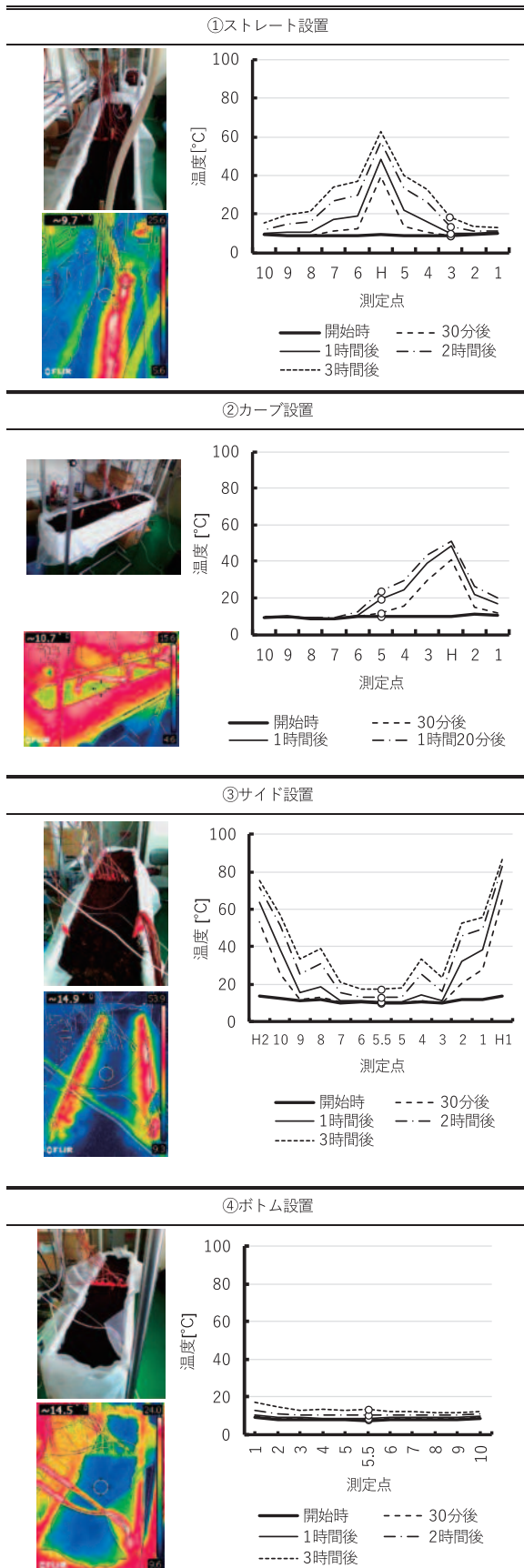


図9 水平方向の温度分布

(○：制御温度)

た三角形を形成し、本実験のシートヒーター温度は、63.4°Cまで達した。

『②カーブ設置』では、シートヒーターを設置した測定点Hが頂点となる温度分布を示すが、シートヒーター遠方の測定点7~10は温度変化がみられなかった。また、制御温度位置とした測定点5はシートヒーターが形成する湾曲の内側にあるため加温の効率が良く、シートヒーター温度が約51°Cに達した加温開始1時間20分後には測定点5の温度は制御範囲上限に達し、ストレート設置に比べ短時間でシートヒーターが停止した。

『③サイド設置』の温度分布は、シートヒーターを設置した両壁面側温度が高く中央部の温度が最も低い放物線に類似した分布を示し、二枚のシートヒーターの最高温度は80°C前後であった。

『④ボトム設置』における水平方向の温度分布は、ほぼ均一となった。また、鉛直方向の温度分布は図10に示すように、加温開始から3時間経過後のシートヒーター温度が約60°Cであるのに対し、培地中心温度は約10°Cと低く、鉛直方向に温度勾配を形成している様子がわかる。

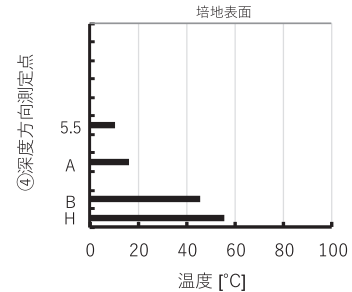


図10 鉛直方向の温度分布

(④ボトム設置 3時間経過後)

次に、各条件においてシートヒーター表面温度 (T_H または T_{H1} および T_{H2})、制御温度 T_{ctrl} および周囲温度 T_a をまとめた結果を図11に示す。①ストレート設置のシートヒーターの最高温度63.4°C、加温時間約190分と比較した場合、②カーブ設置は最高温度が低くて加温時間が短く、③サイド設置では最高温度が高いうえに加温時間も長くなる結果となった。また、③サイド設置のシートヒーターには個体差を生じたが、この原因には、それぞれの温度制御用センサの条件や窓際からの距離の違いによる温度差の可能性もある。

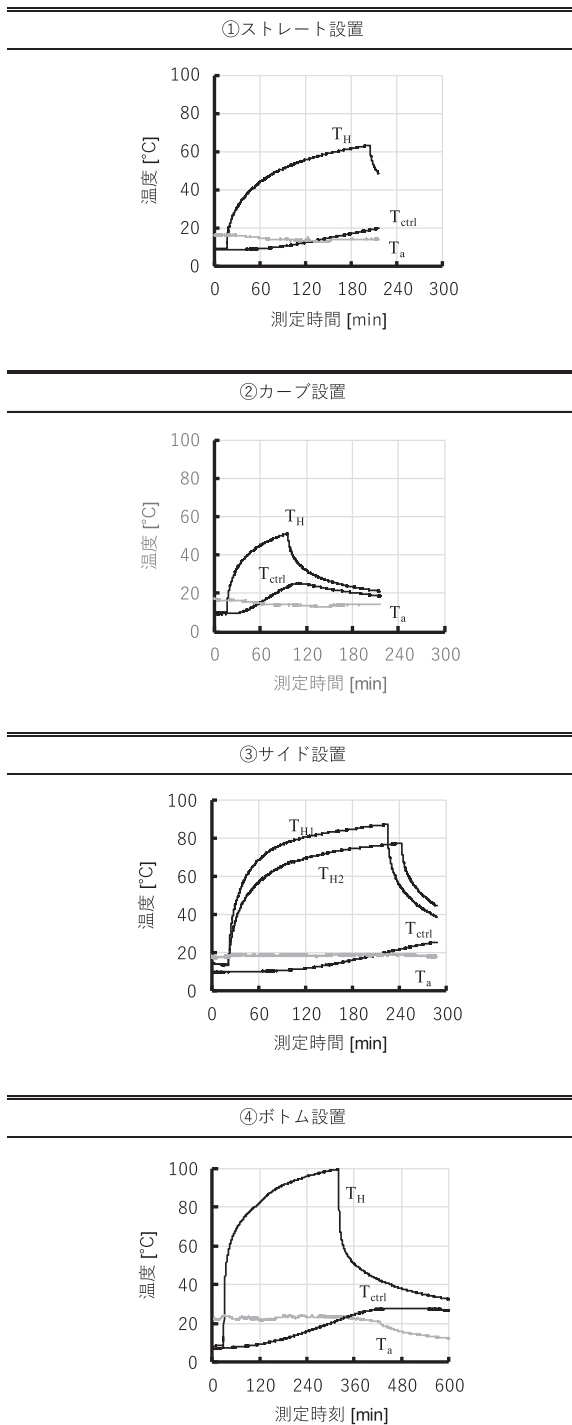


図 11 各条件における温度変化

そして、④ボトム設置のシートヒーターの最高温度は他条件と比べ最も高い約 100°Cまで上昇し、加温時間も最長の約 300 分となった。

本実験の結果、低い温度で短時間に加温可能な条件は②カーブ設置であった。千鳥植え（千鳥の足跡のように左右交互に植える）する作物に対し

では有効であると考える。ただし、湾曲することによりシートヒーターの長さは栽培棚の列の全長よりも長くなり、設置の手間も多くなる。また、総複数種類の作物に対応するには、その作物に適した植え付け方法による株の疎密さにかかわらず、どのような作物にも適用できるシステムであるほうが望ましい。その点では図 8 に示す結果から①ストレート設置と③サイド設置では両端と中央部の水平方向の温度差が課題となる。

次に、シートヒーターの最高温度と加温時間が悪条件である④ボトム設置を一例として、温度制御範囲を 17°C±2°Cに設定した再加温観測を実施した。シートヒーター温度を T_H 、制御温度を T_{ctrl} 、周囲温度を T_a 、表 4 に示した鉛直方向 A、B の温度を T_A 、 T_B としてまとめた結果を図 12 に示す。

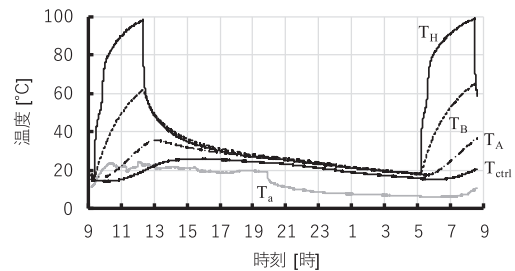


図 12 ④ボトム設置の観測結果 (2022.3.3-2022.3.4)

2022 年 3 月 3 日午前 9 時頃に測定を開始し、翌日午前 9 時頃に測定を終了するまでの約 24 時間において、周囲温度 T_a は最高 24.5°C、最低 6.0°C と温度差は約 18°Cであった。シートヒーターは、3 日 9 時 24 分に加温を開始し、12 時 20 分に加温を停止した。その後、翌日の午前 5 時 11 分に再加温を開始し、8 時 26 分に加温を停止した。また、株元温度に見立てた制御温度 T_{ctrl} は 20°C±6°Cであり、目標温度は設定温度よりも高くなり、ヒステリシスの幅も広がった。図 11 と比較し、加温時における各温度の温度変化は類似していると判断する。加温停止後、 T_H は急激に低下しはじめ、 T_B 付近まで低下すると、今度は T_H と T_B は同じように温度が低下していく様子が見られる。 T_A および T_{ctrl} の温度変化は T_B に類似しているが、シートヒーターの加温停止後も温度が上昇している様子が見られる。栽培棚に使用している発泡資材の断熱性により、培地表面から放熱しやすくなりため、熱は下から上へと一方向に伝わりやすくなるも

のと考え、シートヒーター停止後の T_{ctrl} は、培地下方からの熱移動により、しばらくの間は水平方向の温度分布が均一に上昇していくと考える。ゆえに、設定温度は目標温度よりも低く設定できるため、加温時間の短縮化も図れる可能性があることがわかった。また、シートヒーターは一日に 1~2 回程度の頻度で稼働時間は約 3 時間であることから、実用化の可能性はあると考える。

次に、本実験後に本システムを宮城県のイチゴ栽培施設に仮設置し、周囲温度 T_a 、制御温度 T_{ctrl} 、シートヒーター温度 T_H を測定した試運転を行った。一例として、2022 年 3 月 24 日から 3 月 30 日までの測定結果を図 13 に示す。

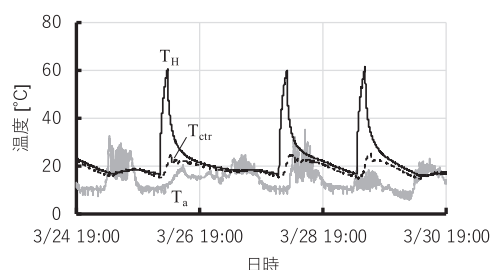


図 13 宮城県の現場観測結果 (2022.3.24-2022.3.30)

試運転では T_{ctrl} を 12°C ~ 16°C に設定したが、測定結果はおおむね 15°C ~ 21°C の範囲で推移し、少し温度が高めとなった。 T_{ctrl} は、データロガーに入力する測定用と温度調節器に入力する制御用を要するが、共用することができないため 2 本使用している。そのため、深度方向のセンサ位置にズレが生じることになった。その結果、設定温度と測定温度に顕著な差を生じた可能性があり、運用時の課題のひとつと考える。しかしながら、 T_H の最高温度は約 60°C に抑えられており、 T_a に強く影響されることなく、 T_{ctrl} が一定の温度範囲に制御されていることがわかる。本事例に示すようにシートヒーターが稼働したのは 6 日間で 3 回であった。この園芸施設での 2 日間に 1 回の頻度で約 3 時間の稼働時間は、屋内実験よりも短く、効率的な結果を得た。そして、施設管理者からは、本システムで育成したイチゴが出荷可能な品質に見受けられるとの意見を頂いた。

5. おわりに

発熱塗料を使用した施設園芸農業用シートヒーターを試作し、イチゴ用の発泡資材や培地などを用いて温度制御等の検証実験を 3 月に行った。その結果、1 日 3 時間程度の加温頻度で培地温度を保持し、イチゴも生育することを確認した。

今後は本実験での制御構成を基本とし、温度制御の精度向上およびシステム構成の最適化の検証、イニシャルコストとランニングコスト比較、農産物の栽培品質検証などを行い、実用化に向けて取り組む予定である。

参考文献

- 1) 深山：農業食料工学会誌、第 81 巻、第 3 号 (2019)、pp.129-133
- 2) 北畠、鈴木、田村：関東東海北陸農業経営研究、第 109 号 (2019)、pp.5-13
- 3) 星：電子情報通信学会誌、Vol. 104、No. 6 (2021)、pp.526-531
- 4) 大和、鮫島、日高、渡辺、沖村、壇：植物環境工学、第 25 巻、第 1 号 (2013)、pp.8-14
- 5) 水上、佐藤、奥、井上：福岡県農林業総合試験場研究報告、第 6 号 (2020)、pp.41-47
- 6) 吉田、朝倉、神田、今西、高橋：秋田県立大学ウェブジャーナル B、vol.5 (2018)、p.79-84
- 7) 鶴山、鹿嶋、松島：山口県農林総合技術センター研究報告、第 9 号 (2018)、p.46-53
- 8) 高山：JATAFF ジャーナル、第 5 巻、第 8 号 (2017)、pp.23-26
- 9) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧 1 基礎編 (2001)、p.125
- 10) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧 3 空気調和設備編 (2001)、p.349
- 11) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧 3 空気調和設備編 (2001)、p.350