

資料

温水管による葉物野菜栽培トレイ局所加熱シミュレーション

仙波浩雅 倉橋真司 安西昭裕^{※1}Simulation of Temperature Distribution within cells for Leaf Vegetables
on Local Heating by Hot Water Tube

SENBA Hiromasa, KURAHASHI Shinji and ANZAI Akihiro

農林水産研究所が開発した葉物野菜栽培プラントは、ハウス内にて、湿潤した不織布の上に培養土を入れた栽培トレイを置き、そのセル内で野菜を効率的に栽培する斬新なプラントである。しかしながら、厳寒期においては、培養土の十分な温度上昇が得られないために、発芽や生育が遅れる不具合が発生している。

そこで、本研究では、培養土温度上昇のために、温水管をトレイ側面に接触することによる局所加熱法を念頭に、植物の生育に必要な培養土温度を達成するための最適な温水管設計値を有限要素法等のシミュレーションにより導いた。本システムでは、外気温が 5℃で培養土温度 15℃以上を達成するための温水タンク温度は 40℃であることが分かった。

キーワード：シミュレーション、局所加熱、培養土、温度分布、定常状態

はじめに

愛媛県農林水産研究所が開発した野菜栽培プラント^{1)~3)}は、かん水チューブにより湿潤した不織布の上に培養土を入れたトレイを置き、その中で葉物野菜を栽培するプラントである。構造が非常にシンプルで、プラントが安価で作業が楽であることが大きな特徴である。このプラントをさらに実用性を上げるためには、周年安定生産が可能な省エネルギー・低コスト型プラントとする必要がある。特に厳寒期においては、培養土の温度が上がらず、発芽や生育がかなり遅れる不具合が認められている。

そこで本研究では、均一な加熱が比較的容易な温水管を用いた局所加熱法を厳寒期に行うことを前提に、トレイの最適な加熱箇所やコストを意識した最適加熱温度及び温水管の適用できる長さについてシミュレーション解析を行ったので、実証実験結果と合わせて報告する。

実験方法

1. 局所加熱対象モデル

葉野菜の発芽・育成促進のためには培養土の温度を所望の温度まで常に上げておく（保つておく）必要がある。このための温度を農林水産研究所では最低 10℃としており、さらに生育を促進するためには 15℃としている。

今回、局所加熱を行う対象物は、写真 1 に示す縦 540mm × 横 275mm × 高さ 60mm の樹脂製のトレイである。1 つのトレイには 72 個 (=12 × 6 個) のセルがあり、この中に培養土を入れて、野菜の栽培を行う。加熱はセル・セル間に挟まれた管内を温水が流れることによって行う。



写真 1 栽培用トレイと温水管位置関係

2. 温度分布シミュレーション

(1) シミュレーション手順

本栽培システムの温水は、次のように循環する。すなわち、一定温度に保温された大量の温水（温水タンク内で保温）を特定のポンプ（水量既知）により吸い上げ、温水管内に送り込む。温水が流れる管は、加熱管となりこれに接触するトレイを介して培養土を加熱する。管を流れる温水は、所定長

※1 愛媛県農林水産研究所

この研究は、「平成 23-25 年度戦略的試験研究事業(高度野菜栽培プラントの開発)」の予算で実施した。

愛媛県産業技術研究所業績第3号

さ分に達すると温水タンクに戻り、一定温度になるように加熱・保温される。

従って、最終的に知りたいのは、温水タンクの温度をどれくらいに設置するのが最適であるか、である。これを次の手順により行った。

- ① 所定位置の培養土温度を局所温度 (10°C、15°C) 以上に保つための加熱箇所、加熱温度の探索
- ② 上記加熱温度を満足するための水温の探索
- ③ 上記水温を温水管の長手方向に亘り、維持するための水量とタンク水温 (温水管を流れる温水の源の温度) 探索

(2) 局所加熱シミュレーション (培養土の温度分布解析)

解析を簡素化するために、トレイ内のセル1個を取り出し、培養土のみで構成される解析モデルを考えた。セルの形状の対称性を利用し、セル上部中央位置に原点を取った6面体の半モデル (図1参照; 鉛直方向はz軸) を作成した。加熱部 (一定温度部) は、その位置を変更 (図中のA、B、C、D) できるようにした。

解析を行うためのパラメータ等の条件を表1のように定め、各所加熱部を各一定温度で加熱した場合の培養土温度分布をシミュレーション解析した。培養土の熱伝導率は迅速熱伝導率計による測定結果を用いた。

(3) 温水管半径方向の温度解析

図2に示すように、外径D[m]、温度T₀[°C]の水 (均一) が、厚さt[m]、熱伝導率λ[W/(m·K)]の材料で保温されているとき、温度T_{out}[°C]の大気への放熱は、円筒長さ1mあたりH[W]となる。

$$K = \alpha(T_f - T_{out})A \tag{1}$$

$$L = \epsilon\sigma \left\{ (T_f + 273.15)^4 - (T_{out} + 273.15)^4 \right\} A \tag{2}$$

(3)

$$H = K + L = \frac{2\pi\lambda(T_0 - T_f)}{\ln\left(\frac{D+2t}{D}\right)} T_f$$

ここで、Kは熱伝達による熱損失で、Lは放射熱損失を表す。

- A : 円管外周の単位長さ面積 (= (D+2t)π) [m²]
- ε : 表面の放射率 [-]
- α : 外気への対流熱伝達係数 [W/(m²·K)]
- σ : ステファン-ボルツマン定数 (= 5.67051 × 10⁻⁸) [J/s·m²·K⁴]
- λ : 円管の熱伝導率 (= 0.15 W/(m·K) ; ポリ塩化ビニル)

これらの連立方程式を解くことで、水温に対する管表面温度の解析が可能となる。

(4) 温水管長手方向の温度分布解析

温水が管内を長手方向に一定の流量で流れているものとする。入口の水の温度をT₀[°C]、比熱c[J/(kg·K)]、密度ρ[kg/m³]とし、周長s[m]の管内にV[m³/s]で流れている。流れ方向をx[m]、雰囲気温度をT_{out}[°C]によって冷却されるとすると、流れ方向x[m]の点における水の温度T(x)は、下式で表すことができる。

$$T(x) = (T_0 - T_{out}) \exp\left\{ \left(\frac{-Ks}{c\rho V} \right) x \right\} + T_{out} \tag{4}$$

- ここで、K[W/(m²·K)] ; 熱伝達係数
- c=4.18 [kJ/(kg·K)] ; 水の比熱
- ρ=1000 [kg/m³] ; 水の密度

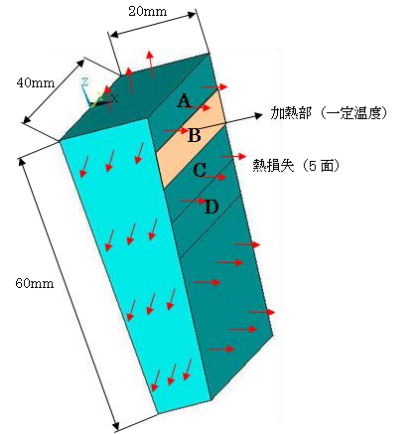


図1 解析モデル (半モデル)

表1 解析条件

項	目	値
可変パラメータ	加熱位置	A、B、C、D
	加熱部温度	30、35、40°C
	熱伝達係数	10、20、50 W/(m ² ·K)
固定パラメータ	培養土の熱伝導率	0.087 W/(m·K)
	環境温度	5°C
有限要素接点数		787
解析点 (温度)	セル中央部 (X、Y=0)	① Z=0mm (最上点)
		② Z=-18.0mm
		③ Z=-30.4mm
		④ Z=-42.2mm
		⑤ Z=-60mm (最下点)

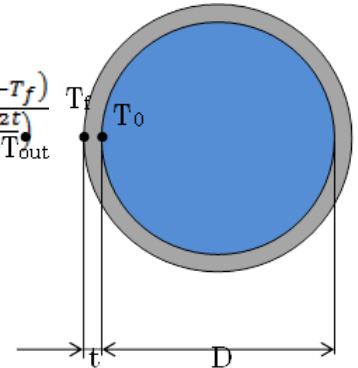


図2 温水管モデル

T(x)は、式(4)により求めることができる。ここで、K[W/(m²・K)]は、式(1)、(2)、(3)の連立方程式を解くことにより得られた単位長さあたりの放射熱量 H[W]を用いて、下式により算出する。

$$K = \frac{H}{s \times \Delta x \times (T_0 - T_{out})} \quad (5)$$

ここで、Δx=1 [m]である。

3. 実証実験

局所加熱シミュレーション結果の実証のために、農林水産研究所のガラスハウス内に設置された同プラントを使用して、厳寒期の平成 26 年 1 月に温水管による局所加熱を行う実験を行い、主要箇所をの温度を測定・解析した。

結果と考察

1. 局所加熱による培養土内温度分布

(1) 有限要素法による温度分布シミュレーション

解析の例として、加熱面Cで加熱面温度を 40℃、熱伝達係数を 10W/(m²・K)とした場合のモデルの温度分布を図 3 に、また、同温度条件、同熱損失条件で加熱面を B + C とした場合の結果を図 4 に示す。図の左側が加熱面側の温度分布で、右側が内部面の温度分布である。加熱面からの熱が培養土内部に広がっている様子が確認できる。同じ温度であっても加熱面積を増すことにより全体の温度を効果的に向上できることが確認できる。

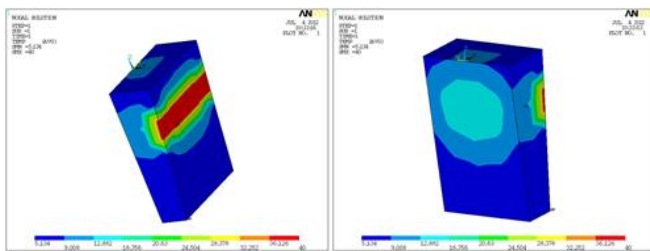


図 3 加熱面 C の場合の培養土内温度分布

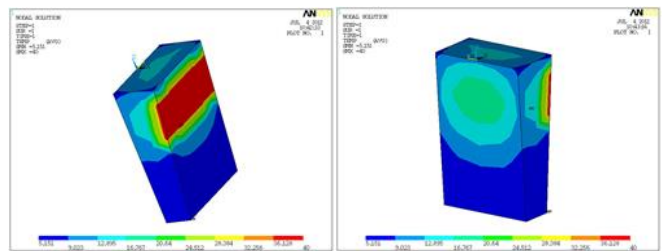


図 4 加熱面 B+C の場合の培養土内温度分布

(2) 培養土内部点における温度解析

上記の解析を行い、セル中央部の培養土の深さ方向の温度解析結果をまとめると図 5 が得られる。ただし図 5 は、熱伝達係数が 10W/(m²・K)の場合の結果である。図中の横軸は、セル中央位置の縦方向の位置①～⑤（表の解析点）に対応する。播種位置は縦方向位置 2 - 3 の区間であるので、特にこの部分の温度が重要となる。加熱箇所が A の場合では、ほとんどの箇所で温度上昇が認められないが、加熱箇所が D であれば、加熱温度 40℃以上では 2 - 3 区間でほぼ 15℃以上が実現できる。位置を 4 まで拡張しても 10℃以上となる。加熱面積を増やすと効果は大きくなり、加熱箇所が C + D では、加熱温度が 30℃以上であれば、縦方向位置 2 - 3 で 15℃以上を得ることができる。

一方、表面からの熱損失が大きい場合の結果を図 6 に示す。加熱位置 D であれば、加熱温度 35℃においては、損失に係る熱伝達係数が 5 倍になっても縦方向位置 2 - 3 で 10℃以上は確保できる。

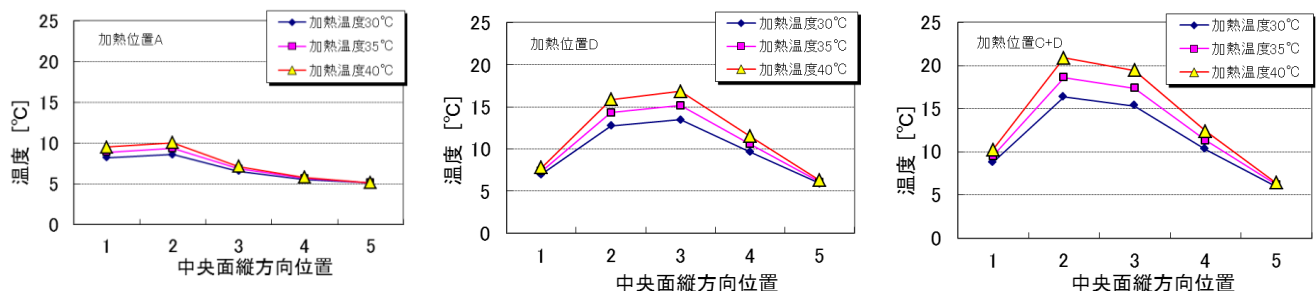


図 5 セル中央部の加熱面・加熱温度に対する温度分布

(左：加熱位置 A、中央：C、右：C+D *熱伝達係数 10W/(m²・K))

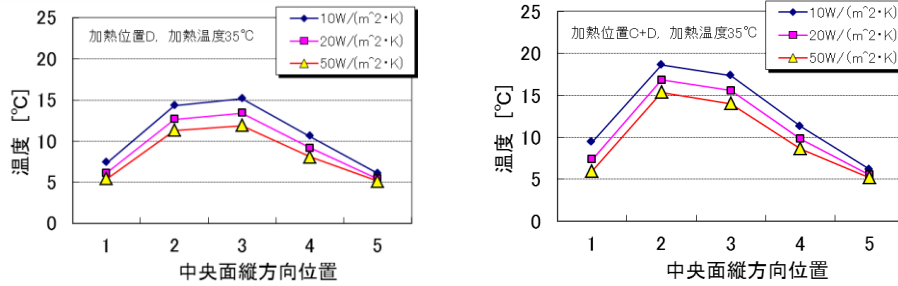


図6 熱損失を変えた場合のセル中央部の温度分布比較
(左：加熱位置D、右：C+D *加熱温度 35℃)

加熱位置がC + Dであれば、約 15℃以上確保できることが分かる。主要部の培養土を 10℃以上に保つには、加熱温度 35℃以上であればよい。

2. 水管内の温度分布

(1) 半径方向の温度分布

上述の結果より、加熱面積には依存するが 35℃以上でトレイの一面を加熱すれば、培養土を目標となる温度以上に加熱することが可能であることが分かった。そこで、ここでは、温水管の表面温度を 35℃以上とするための、内部の温水温度の条件をシミュレーションした。温水管は、実際に使用する管の寸法として、管外径 8.0mm、管厚み 0.6mm とし、熱伝導率を 0.15W/(m・K)として計算を行った。また、管表面の放射率を $\epsilon = 0.8$ 、外気温を 5℃とし、外気への熱損失に関する熱伝達係数を 10W/(m²・K)及び 20W/(m²・K)とした。結果を図 7 に示す。

図より、計算した範囲内 (35℃~43℃) では、熱伝達係数が 10W/(m²・K)の場合は、水温に対して管表面温度が約 2℃低下し、熱伝達係数が 20W/(m²・K)の場合は約 3.5℃低下することが分かる。管表面温度を 35℃以上に保つには、水温を 38℃以上にするのが望ましいと言える。

(2) 温水管の長手方向の温度分布

温水管内の温水の長手方向のシミュレーションは、前述の温水管の寸法の条件を用い、式(4)により計算した。ここで、式(5)の放射熱量には温水管表面からの外気への熱放射の他に温水管表面から栽培トレイに伝熱することにより失われ熱損失の両方を考慮する必要がある。そこで、この値は過去の実験から推測される値として、水温 40℃、外気温 5℃の場合、 $K=70W/(m^2 \cdot K)$ とした。

今、温水タンクに 40℃の温水が貯蔵されており、貯蔵タンクの水温は一定であることを前提に、ポンプで温水を吸い上げ、温水管内に流し込んだときの、管長手方向の距離に対する内部水温の関係を、流量をパラメータとして示すと図 8 が得られる。流量が小さいと、管内を通過する入力熱エネルギーが、熱損失の出力熱エネルギーに比して小さくなるため、管長さに対する水温低下量が大きくなる。したがって、タンク水温が一定の下では、流量を大きくするほど水温低下は小さいことが分かる。流量が 0.5m³/h の場合、20m長さで 1.8℃弱の水温低下となる。

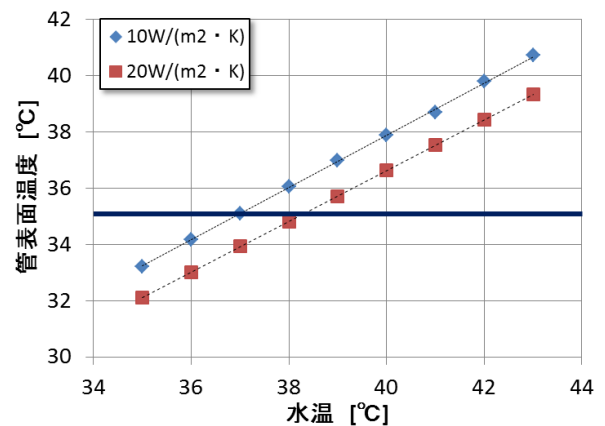


図7 温水管内の水温と管表面温度の関係 (パラメータ：外気への熱損失に係る熱伝達係数)

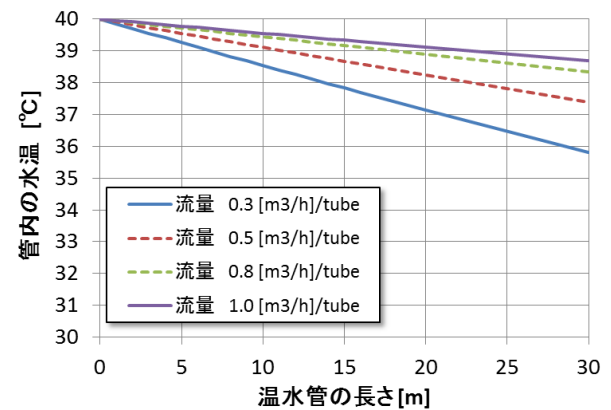


図8 温水管長さとも内部水温の関係 (パラメータ：流量)

3. 実証実験結果

農林水産研究所での実証実験は、以下のように行った。すなわち、図9に示すように、温水タンクからの温水を6本の温水管で並列に給水することで、広範囲にわたり熱を伝わせた。使用したポンプの能力は $3.0\text{m}^3/\text{h}$ であるため、温水管1本当たりの水量は $0.5\text{m}^3/\text{h}$ である。図の網掛部は栽培用のトレイがその上部に設置されていることを示す。なお、本実験の温水管の往復長さは16mである。

実験は、中央部の培養土（後述の図10の”培養土 中”に相当）の温度が 15°C になるように温水ポンプのオン・オフを制御するもので、 15°C 以下になると温水タンク 40°C （常時一定温制御）の温水が管内を流れるようになっていく。各箇所における温度計測結果及びポンプオン・オフの測定結果を同図にまとめて図10に示す。実験期間中、ほぼ毎日朝方に外気温（ハウス内気温）がおおよそ 5°C となり、目的の実験が行えた。“培養土 中”の位置とは異なる温水出口付近の培養土”培養土 側”の温度は、“培養土 中”の温度と比較して約 2°C の低下が確認されている。さて、タンク（水温 40°C ）の外気温 5°C における管入口温度実測値（管表面）は約 37°C 、管出口温度実測値は約 36°C である。解析では、入口の管表面温度は、水温に対し 3.4°C 低下、出口温度は入口温度に対し 1.6°C 低下となり、実測値と解析値がよく一致することが確認できた。この温水管による加温方法は、図8からも分かるようにポンプの流量を上げることによりさらに良い性能を引き出すことができることから、温水管の長さを長くしても十分な性能が維持できると考えられる。

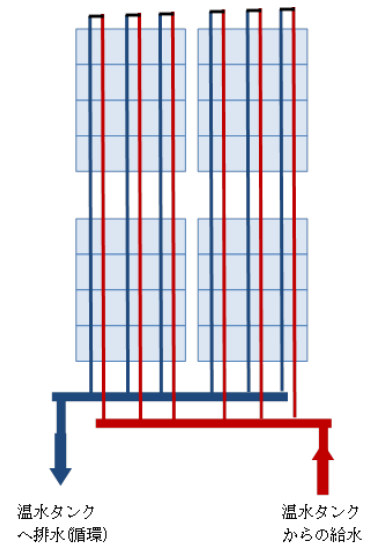


図9 温水管の配置

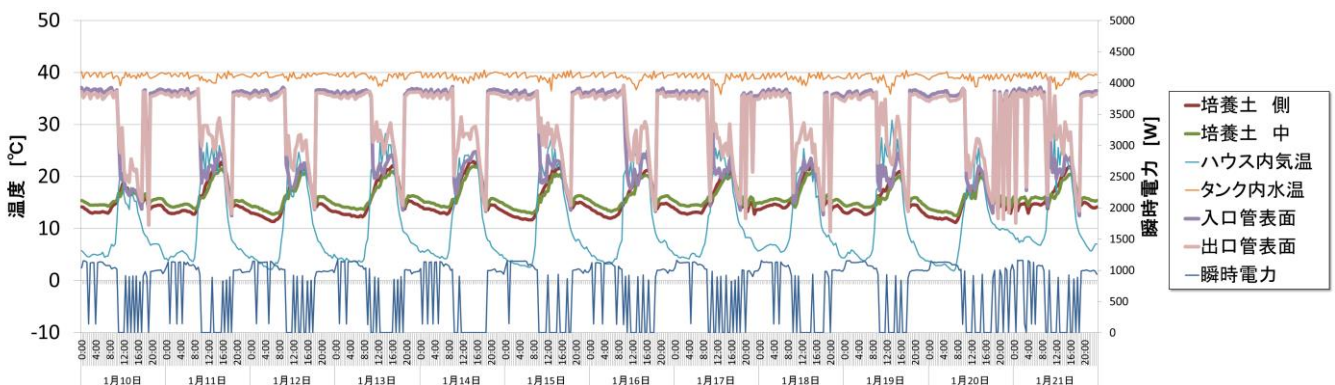


図10 厳寒期（H26.1.10～1.21）における培養土温度、管表面温度の関係（参考；気温、瞬時電力）

ま と め

愛媛県農林水産研究が開発した野菜プラントの高度化を図るための一環として、厳寒期（設定外気温 5°C ）における局所暖房法について、温水管を熱源とした最適加熱方法を検討した。低コスト暖房化を図るために、最適とされる加熱源の温度（水温）最適値（最低値）や期待できる効果についての検討を行い、以下の結果を得た。

1. 加熱部の最適位置及び最適温度

今回用いた野菜栽培セル形状であれば、側面の鉛直方向中央付近を加熱するのが理想的である。また、培養土を 10°C 以上に保温するためには、加熱面を 35°C 以上とするのが望ましい。加熱面を広くとることができれば加熱面 35°C であっても培養土の主要部分の温度を 15°C 以上にすることは可能である。

2. 最適な水温（タンク内温水の温度）

温水管は熱損失の影響で、内部の温水の温度と比較し管表面温度は低下する。熱伝達係数により温度低下量は異なり、 40°C の温水で熱伝達係数 $20\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の場合、約 3.5°C 低下する。温水管の長

手方向に対する水温は、40℃の温水が 0.5m³/h の流量で、本試験の管φ8（厚み 0.6mm）の温水管を流れる場合、16m で 1.6℃の低下となる。

また、実証実験結果から、解析値が実験値とよく一致しており、目的とする培養土 15℃以上の制御実験は成功した。以上から、外気温 5℃の場合に培養土 15℃以上とするためのタンク水温は 40℃以上であると言える。

文 献

- 1) 安西昭裕：安価で省力的な軟弱野菜周年栽培システムの開発，愛媛県農林水産研究所研究報 233-244(2009)．
- 2) 安西昭裕：安価で省力的な軟弱野菜周年栽培システムの開発，愛媛県農林水産研究所研究報告, 159-162(2010)．
- 3) 安西昭裕：低コスト野菜栽培プラント開発試験，愛媛県農林水産研究所研究報告, 129-134(2011)．