

## 冬期における農業用ビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究

### (第6報) 高床式砂ベッドにおける根域の加温に適した断熱材形状の検討

#### Research on Efficient Heating System for a Plastic Greenhouse in Winter (Part6) Suitable Shape of Thermal Insulation for Heating Around the Plant Root in High Floored Sand

○齋藤 旬郎 (大阪市立大学)                      西岡 真稔 (大阪市立大学)  
鍋島 美奈子 (大阪市立大学)                      北川 康孝 (東レ建設株式会社)  
大橋 良之 (東レ建設株式会社)

Masao SAITO<sup>\*1</sup> Masatoshi NISHIOKA<sup>\*1</sup> Minako NABESHIMA<sup>\*1</sup>

Yasutaka KITAGAWA<sup>\*2</sup> Yoshiyuki OOHASHI<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>Osaka City University <sup>\*2</sup>TORAY Construction Co., Ltd.

Recently it is known that high floored sand cultivation that can cultivate in easy work and high productivity. This study shows that we have overcome the problem of installing thermal insulation under the sand, which is a conventional heating method, by installing thermal insulation on the surface of sand. Furthermore, it showed suitable shape of thermal insulation for heating around the plant root in sand.

#### 1 研究背景・目的

現在、農業分野では生産性や施工性に優れている高床式砂栽培農業が注目されている。この農法では培地である砂ベッドが約120~150mmであり土耕と比較して熱容量が小さい。したがって冬季対策としては温床線による加熱が効果的である。稲葉ら<sup>1)</sup>の研究ではFig. 1に示す砂ベッド底面に断熱材と温床線を設置し、冬季では砂層全体を保温することで、収穫量を増加させることができた。しかし、砂ベッド底面を断熱材で覆う方法は、排水性を考えると問題を要する。また、夏季では断熱材により放熱が抑制され、砂ベッド昇温を招き、作物の収穫重量低下など課題が残った。そこで本研究では断熱材の設置場所を砂層底面から砂層表面に代えることで、設置を容易にし、排水性の問題もなくなる。そこで、冬季では温床線加熱が根域に効率的に伝わり、保温できる砂層表面に設置する断熱材形状を検討することを目的とする。

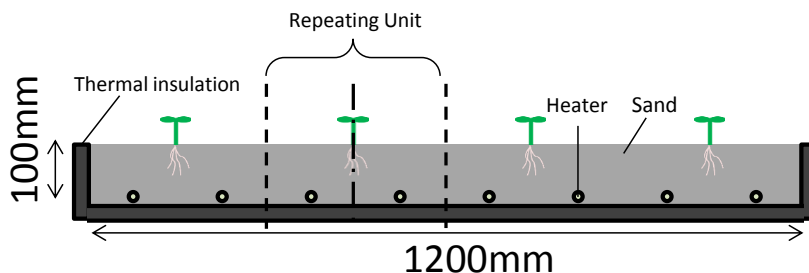


Fig. 1 Sectional view of sand bed in conventional warming method

#### 2 シミュレーションによる断熱材形状の検討

##### 2.1 シミュレーション概要

砂ベッド断面図において定植位置と温床線が水平方向に無限に並んでいるとすると、Fig. 1に示す破線の範囲が繰り返し単位であり、さらに繰り返し単位の中央(一点鎖線)に対して左右対称になるので、繰り返し単位の右半分を抜き出しFig. 2とした。Fig. 2において定常二次元熱伝導の数値シミュレーション解析を行う。シミュレーションでは根域保温に適した断熱材形状と温床線位置を有限要素法解析プログラム Agros2D<sup>2)</sup>を用いて定植位置の鉛直温度分布を算出し、その上半分を根域と定義し、根域の平均温度を算出し、従来の保温法との比較を行った。加熱は温床線の表面積基準で熱流束  $2567\text{W}/\text{m}^2$  を与え、冬季夜間を想定し、砂層の上部と下部の境界条件を  $10^\circ\text{C}$  に設定した。また、砂と断熱材の熱伝導率はそれぞれ  $1.54\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (湿った砂)、 $0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (押出法ポリス

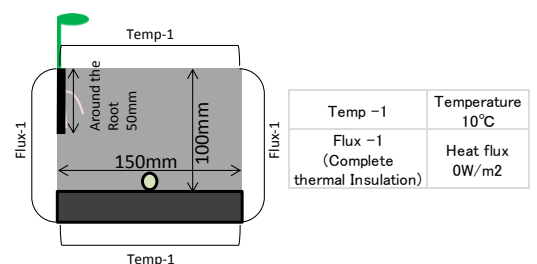


Fig. 2 Boundary Condition

## A-47

チレンフォーム断熱材)とした。本研究では断熱材形状や設置位置、温床線位置を変えて分析を行うので、分析対象の加温・保温法の略称を Table. 1 の記号を用いて決めることとする。従来の底面で保温する方法は平板形状断熱材(記号 P)を砂層下側(記号 B)に設置し、温床線を砂層下部(記号 L)に設置するので保温法の略称は PBL である。分析を行う際、定植位置を原点、水平方向を x 軸、鉛直方向を z 軸とし、砂層温度の評価範囲は  $x=0\sim150(\text{mm})$ 、 $z=0\sim-100(\text{mm})$  とした。

### 2.2 温床線加熱に適した保温法の検討

ここでは冬季夜間を想定し、温床線加熱に適した断熱材形状の検討を行う。まず Fig. 3 に示す、従来保温法 PBL と断熱材を上部に設置する PTC、TUC の比較を行う。定植位置の鉛直温度分布を Fig. 4 に示す。結果として根域の平均温度は PBL が最も高くなった。そこで断熱材の設置が容易な PTC を改良することにより、PBL と同程度の根域温度を目指した。まず断熱材を根域側へ伸ばすことで、冷たい空気と接する面積を少なくし、また効率的に根域を加温するために、温床線位置を近づけた。断熱材を伸ばすことにより作物の成長する空間を圧迫することが考えられるので、断熱材を薄くすることで成長する空間を確保した。これらの改良を加えた保温法を Fig. 5、定植位置の温度分布を Fig. 6 に示す。略称の第一文字目の添え字として記号 t を入れることで、断熱材が薄いことを表す。改良後の  $P_tTU$  では PBL と同程度の根域温度となった。さらに温床線を下方に移動した  $P_tTC$  にすることで根域温度が上昇した。また、根域から離れた場所は保温する必要が無いと考え、不必要な断熱材を削り、削った断熱材の一部を温床線の右側に埋め込んだ  $L_tTC$  で更なる温度上昇が見られた。

Table. 1 Symbols used for abbreviation of case settings

1st letter	Shape of Thermal Insulation	2nd letter	Position of Thermal Insulation	3rd letter	Position of Heater
X	No Thermal Insulation	X	No Thermal Insulation	X	No Heater
P	Plate Shape	T	Top Part of Sand	U	Upper Part of Sand
T	Trapezoidal Shape	B	Bottom Part of Sand	C	Center of Sand
L	L Shape	U	Upper Part of Sand	L	Lower Part of Sand

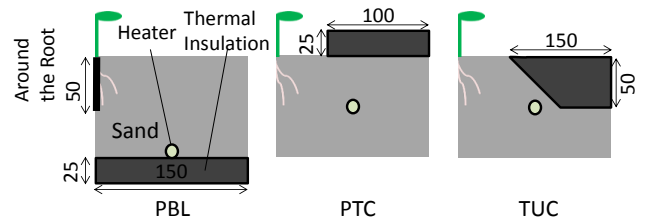


Fig. 3 Simulation model of PBL, PTC and TUC

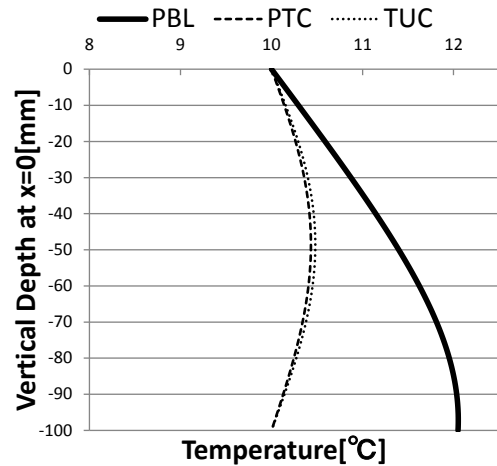


Fig. 4 Vertical temperature distribution at planting position

Mean temperature around the root: PBL 10.7°C PTC 10.3°C TUC 10.3°C

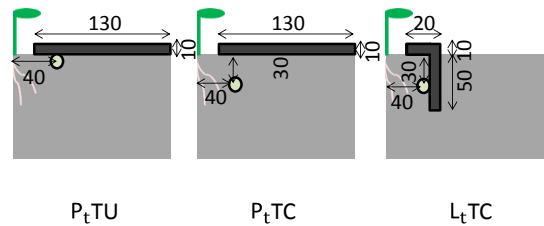


Fig. 5 Simulation model of  $P_tTU$ ,  $P_tTC$  and  $L_tTC$

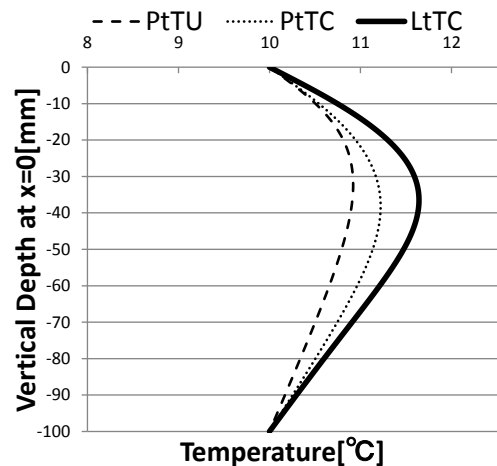


Fig. 6 Vertical temperature distribution at planting position

Mean temperature around the root:  $P_tTU$  10.7°C  $P_tTC$  10.9°C  $L_tTC$  11.2°C

### 2.3 日射受熱を加味した保温法の検討

ここまでは、夜間を想定し、断熱材を砂層上部に設置し、温床線の加熱が根域に効率的に伝わる断熱材形状を検討してきたが、日中では日射による砂層表面の加熱による砂層の昇温も存在する。しかし、断熱材を砂層上部に設置することによって、日射の砂層表面の加熱に影響を与えることが考えられる。そこで断熱材を砂層上部に設置することによる影響を、従来法であり、砂層表面が露出している PBL と、PBL と同程度の保温効果を持つ PtTU、最も温床線加熱を根域で効率的に保温することができる LtTC の 3 種類で比較を行う。冬季日中のビニルハウス内を想定し、Fig. 7 に境界条件を示す。シミュレーションより得られた定植位置における鉛直温度分布を Fig. 8 に示す。砂層表面が露出している PBL が最も高い根域温度であり、断熱材で砂層表面を覆っている PtTU が最も低い根域温度となった。LtTC は PBL ほどではないが、砂層表面の一部が露出しているため、PBL と LtTC の中間程度の根域温度となった。日射の影響を考えると砂層表面が露出しているほど根域温度が高くなることが分かったので、砂層表面に断熱材を設置する場合は LtTC のように砂層表面の一部を露出しているものや、日射を透過する断熱材であることが望ましいと考えられる。

### 3 農場における冬季実験

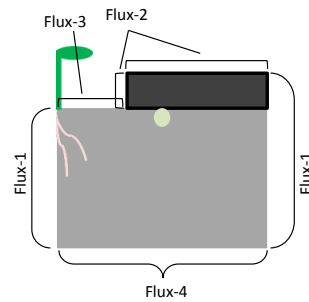
#### 3.1 実験概要

冬季夜間のシミュレーション結果で PBL と PtTU が同程度の保温効果を持つことが分かったので、PBL と PtTU と同じ形状の砂ベッドを作り、砂層に小松菜を定植し、定植位置における鉛直温度分布の比較を行うことでシミュレーション結果と同じになるかを確かめた。また冬季日中のシミュレーションでは PBL の方が PtTU よりも根域温度が高い結果が得られたので、定植位置における鉛直温度分布の比較を行うことでシミュレーション結果と同じになるかを確かめた。また収穫重量を比較することで、どちらの保温効果が高いかを確かめた。

#### 3.2 実験結果

実験期間(12/18~1/24)のうち 1/14 における、シミュレーション条件と同じく日射の影響がない 6 時の砂層の鉛直温度分布を Fig. 9 に示す。砂層表面では PtTU の方が温度が高くなり、シミュレーション結果とは違い、根域の平均温度が PtTU の方が 0.9℃高くなった。この理由としては PBL の温床線位置がシミュレーション条件と 10mm 程

度ずれている場所があることや、PBL は砂層表面全体が露出しているため蒸発しやすい条件となっていることがあげられる。シミュレーション結果との逆転はあったものの、PtTU は少なくとも同程度の根域に適した保温作用があることが分かった。また 1/14 でシミュレーション条件と同じく、日射の影響がある 14 時における砂層の鉛直温度分布を Fig. 10 に示す。根域温度はシミュレーション同様、日射の影響により PBL の方が高い結果となり、冬季日中では根域保温に適しているのは PBL となった。



Flux -1 (Complete thermal insulation)	Heat flux 0W/m <sup>2</sup>
Flux -2	Sol-air temperature 25.9 °C Combined heat transfer coefficient 11.0 W/(m·K) Solar absorptivity 0.8
Flux -3	Sol-air temperature 29.5°C Combined heat transfer coefficient 11.0 W/(m·K) Solar absorptivity 0.6
Flux -4	Sol-air temperature 15 °C Combined heat transfer coefficient 11.0 W/(m·K) Solar absorptivity 0.6

Fig. 7 Boundari Condition

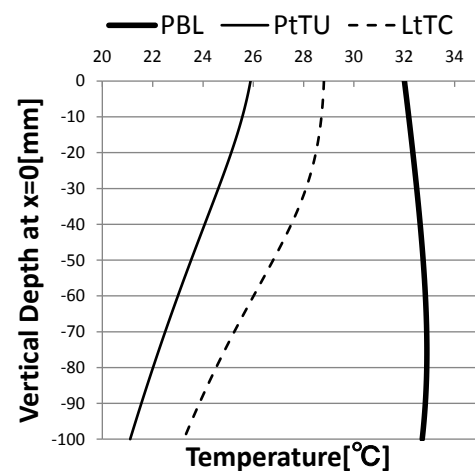


Fig. 8 Vertical temperature distribution at planting position

Mean temperature around the root: PBL 32.4°C PtTU 24.8°C LtTC 28.1°C

## A-47

また Table. 2 に示すように、積算温度と収穫重量は PBL の方が大きくなった。日中では日射によって砂層表面が加熱され、PBL の方が高い根域温度をとっていたからであると考えられる。日中の日射による昇温を利用するためには、砂層表面が露出している L<sub>1</sub>TC を用いることや、砂層表面に設置する断熱材を透明にすることなどの改善をすれば、この問題を解決できよう。

### 4 農場における夏季実験

#### 4.1 実験概要

PTX と DUX、砂層に断熱材と温床線を設置しない XXX の 3 種類の砂ベッドを作り、定植位置における鉛直温度分布の比較を行う。断熱材を砂層上部におくことで、日射による砂層表面の加熱による昇温を抑制することを目的とする。

#### 4.2 実験結果

実験期間(9/14-9/25)のうち 9/19 の日中の温度が最も高くなる 14 時における砂層の鉛直温度分布を Fig. 11 に示す。砂層表面では XXX の温度が最も高くなり、PTX と DUX は同程度の温度となった。また根域温度も XXX は PTX と DUX よりも 2.3℃ 高くなった。よって冬季とは異なり、断熱材を砂層上部に設置すれば、日射による砂層のオーバーヒート抑制に、有効であることが分かる。

### 5 まとめ

- シミュレーションにより、温床線を用いた砂ベッド加温に際して、根域の保温に適した断熱材形状を探索した結果として、L<sub>1</sub>TC を提案した。
- シミュレーションと同じ条件の実験を行うことで、冬季は日中の日射が重要であり、不透明断熱材による砂層表面の断熱は砂層温度低下を招くことが分かった。夏季では、その逆で不透明断熱材の砂層表面の断熱により、砂層のオーバーヒート抑制することが可能であることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 稲葉直美ほか：冬季における農業用ビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究(第 1 報)高床式砂ベッドの加温と保温作用の実験的検証 空調調和・衛生工学会近畿支部学術講演論文集 pp.132-135 2015 年 3 月
- 2) Karban, P., Mach, F., Kús, P., Pánek, D., Doležel, I.: Numerical solution of coupled problems using code Agros2D, Computing, 2013, Volume 95, Issue 1 Supplement, pp 381-408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4

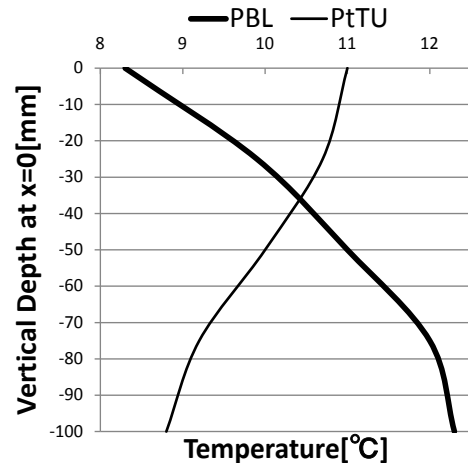


Fig. 9 Vertical temperature distribution at planting position  
 Mean temperature around the root: PBL 9.7°C PtTU 10.6°C

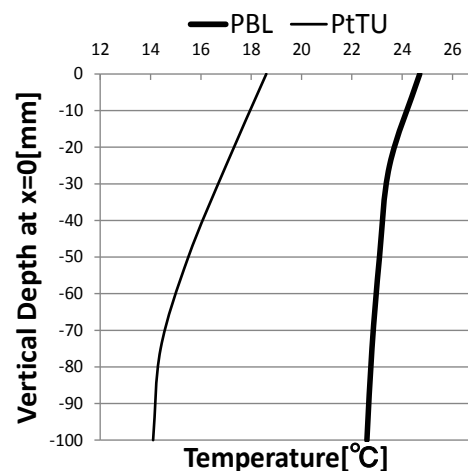


Fig. 10 Vertical temperature distribution at planting position  
 Mean temperature around the root: PBL 23.8°C PtTU 17.0°C

Table. 2 Accumulated temperature and harvest weight

Actual measurement period: Dec 18-Jan 24 Cumulative air temperature 367.6°Cday

	PBL	PTU
Accumulated Temperature [°Cday]	600.1	571.0
Harvest Weight [g/share]	52.6	48.9

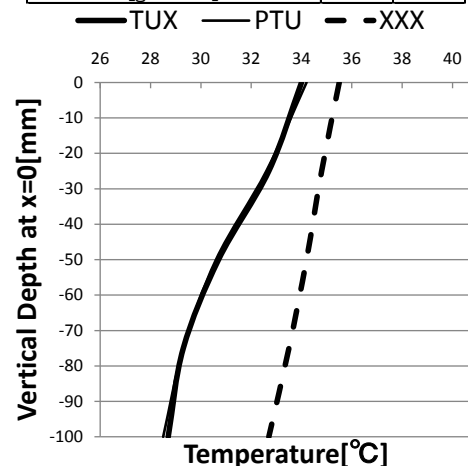


Fig. 11 Vertical temperature distribution at planting position  
 Mean temperature around the root: TUX 32.5°C PTX 32.5°C XXX 34.8°C