

# 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

## —高床式砂ベッドの加温と保温による葉菜類生育促進効果の実証と

### 寒冷地への適用可能性の検討—

Research on efficient heating system for a plastic greenhouse in winter

- Verification of growth promoting effects of leaf vegetables by the heating and insulating high-floored sand bed and evaluation on their effects by application to cold regions -

地域環境計画分野 笠島佳明

Division of Regional Environmental Planning Yoshiaki Kasashima

近年、作業が容易で高い生産性で栽培できる高床式砂栽培農業が注目されています。本研究では、大阪府四条畷市に建設された農業用ビニルハウスにおいて砂層に着目した暖房手法として断熱材や被覆資材、温床線を組み合わせた手法を実施した。また、熱流体解析シミュレーションソフトを用いて暖房手法の効果を検証するため簡易的なビニルハウスモデルを作成した。結果として、本モデルにおいて仙台市では砂層温度を断熱材は約 5.67K 上昇させ、温床線では約 8.54K 上昇させることが分かった。

The high floored sand culture is known to be able to make easy and increase productivity. In this study, examination of heating system for the high-floored sand bed has been conducted by using covering materials and heating cable. A Simple of plastic greenhouse is prepared in order to assess the effects of 3 kinds of heating system, the thermal insulating and the hot-air heating system, the sand bed heating system, by a CFD simulation tool. As a result, it is shown that insulating and heating sand bed can raise the average temperature of sand bed about 5.67K in Sendai and the sand bed heating system can raise the average temperature of sand bed about 8.54K in Sendai

#### はじめに

施設園芸は地球温暖化の進行により大きな影響を受けている農業分野において、重要な役割を担っている。しかし我が国の施設園芸では、暖房のエネルギー源のほとんどを石油に依存しており、石油暖房の削減が必要である。また、野菜の価格高騰や農業従事者の高齢化により農業存続が課題である中、それらを解決する農法である高床式砂栽培農業が注目されている。高床式砂栽培農業は、土壌中の栄養が偏りその土壌で栽培することが出来なくなる連作障害が起きないため生産性が高く、かつ軽作業で栽培が可能であるなど様々な特徴を持つ。しかし冬期になると砂層の厚みが 15 cm と薄い砂ベッドの温度が低下するため暖房が必要となる。温風暖房として、ヒートポンプ式熱源機等の高効率機器の導入が図られているが、イニシャルコスト面やエネルギー面の課題から、より安価で導入ハードルの低い暖房手法が求められている。稲葉ら<sup>1)</sup>は大阪府四条畷市下田原農場において、砂層に着目した暖房手法の実験を行い、冬期の作物の収穫日数と消費電力量により評価した。しかし、砂ベッドに用いられた暖房手法

では表面積の大きい砂層の上面部分からの放熱対策が施されていない点や、実験地とは異なる地域に適用した場合の暖房効果が明らかになっていない点等の課題がある。

以上より本研究では、高床式砂ベッド上面からの放熱を防ぐ対策として、被覆資材を用いて更なる暖房手法として実験を行い収穫時重量及び積算温度、消費電力量により、暖房熱源と被覆資材、断熱材を組み合わせた際の暖房効果について検証する。また、ビニルハウス全体の簡易なシミュレーションモデルを作成し、3次元熱流体解析により寒冷地域に適用した場合の暖房手法の効果を明らかにする事を目的とする。

#### 1. 高床式砂ベッドにおける暖房手法の実験的検証

##### 1.1 実測概要

大阪府四條畷市に建設された下田原農場の農業用ビニルハウスにおいて、屋外とハウス内、砂ベッドに測器を設置し、冬期(3月~4月)の約1ヶ月間実測を行った。測定項目を表1、測器設置位置を図1~図3に示す。

表 1 測定項目

屋外	ビニルハウス内	砂ベッド
気温	気温	深さ方向の砂層温度
湿度	湿度	
風向	風速	砂層表面及び底面の熱流
風速	壁面温度	
短波放射量	短波放射量	
長波放射量	長波放射量	

1.2 加温方式の概要

作物(ワサビ菜)の冬期の収穫日数を表 2 に示す 5 つのケースで比較した。Case1 は砂ベッド上部に被覆資材を覆いかぶさるよう設置した砂ベッド、Case2 は砂ベッド側面及び底面に断熱材を設置した砂ベッド、Case3 は断熱材と被覆資材、温床線を設置した砂ベッド、Case4 は被覆資材と温床線を設置した砂ベッド、Case5 は断熱材とヒートパイプを設置した砂ベッドである。温床線とヒートパイプの制御方法は、作物の根付近に温度制御用熱電対を設置し、制御温度を 15°C に設定することで、その点の温度が 15°C になるよう制御した。比較方法として、各 Case 同時に定植したワサビ菜の収穫時重量の違いと、加温用熱源がある Case では消費電力量(エネルギーコスト)の違いを比較する。ここで、温床線とヒートパイプの主な特徴は、温床線は設置が容易で安価であるということ、ヒートパイプは断面積が大きいため砂ベッドを均一に加温できるということが挙げられる。

1.3 結果と考察

各 Case の 1 スパンから収穫した作物の平均重量と標準偏差を図 4 に示す。図 4 より加温した Case3、4、5 は平均重量が断熱のみの Case1、2 に比べて重くなったことから、暖房熱源と断熱材や被覆資材を組み合わせることで作物を大きく育てることができるということが分かった。また定植から収穫日までのハウス温度と各 Case の土壤温度の積算温度(°C・日)を図 5 に示す。一般的にワサビ菜はハウス空気の 1 日の平均温度の積算温度が 500(°C・日)程度となる頃が収穫の目安とされている。図 5 より、被覆資材を設置していない Case2・5 の積算空気温度は 504(°C・日)に対し、被覆資材のみ設置した Case1 は 514(°C・日)、被覆資材と暖房熱源を設置した Case3、4 は約 560(°C・日)となり、また加温した場合の土壤温度の積算温度は約 600~700(°C・日)となった。以上より被覆資材と暖房熱源を組み合わせることで周辺空気の積算温度で 56(°C・日)の差が表れることがわかった。土壤温度の積算温度は 220~340(°C・日)の差が生じた。なお Case4 については土壤温度の制御温度が 17°C 程度に制御されていた期間が 17 日程度あったため、Case3 に比べて土壤の積算温度が高くなった。

最後に、Case3・Case4・Case5 の 1 日の積算消費電力量(kWh)を示したものを図 6 に示す。ただし、この値は 13 日間の積算消費電力量を平均したものである。図 6

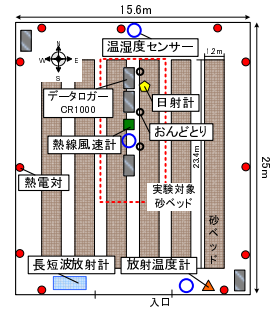


図 1 ハウス内測器位置(平面図)

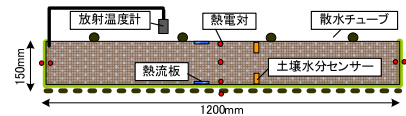


図 2 砂ベッド基本測器位置(断面図)

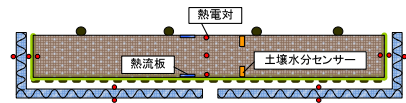


図 3 断熱時の測器位置(断面図)

表 2 各 Case の詳細(砂ベッド断面図)

Case1 被覆資材	
Case2 断熱材	
Case3 断熱材+被覆資材+ 温床線	
Case4 被覆資材+温床線	
Case5 断熱材+ ヒートパイプ	

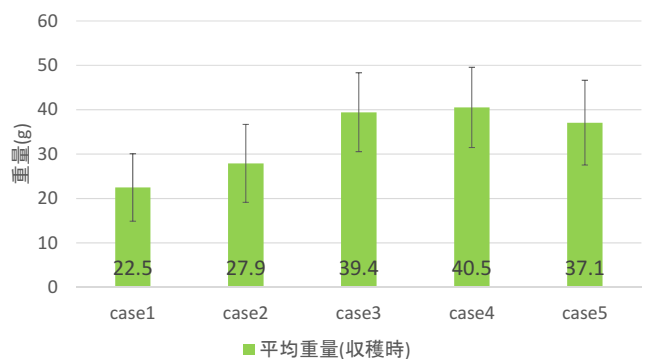


図 4 各 Case の収穫時における平均重量

より、Case3 が 2.2kWh/日、Case4 が 11.8kWh/日、Case5 が 4.5kWh/日となり、Case4 が最も消費電力量が大きく、Case5、Case3 の順になった。また収穫までの 37 日間の積算消費電力量を推定すると、Case3 が 84.3kWh、Case4 が 446.9kWh、Case5 が 169.4kWh となり、断熱材の有無では 362.6kWh の差が表れ、電気料金に変換すると、現在 1kWh=11.11 円<sup>2)</sup>より断熱材の有無による差は 4028 円(砂ベッド 1.2m×5.4m 分)となった。

## 2 ビニルハウスの簡易モデルによる暖房手法の効果

### 2.1 シミュレーション方針

高床式砂栽培農法を採用したビニルハウスでの効果的な暖房手法を検討するため、植栽やハウスの骨組みなどを省略した簡易なモデルを作成する。数値計算に必要な物性値は、実際にビニルハウスで用いられている素材の文献値やカタログ値を用い、気象条件は晴れた冬の日を想定し、気象庁で 2015/1/24 に観測された大阪と仙台の気温(1 時間値)、雲量(3 時間値)を引用する。日射量に関しては雲量データを用いて ASHRAE で提案された算出式にて計算する。

### 2.2 シミュレーション概要

熱流体シミュレーションソフト(STREAM®Ver.11)を用いて簡易モデルを作成し、暖房手法の効果を検討する。実施する暖房手法の Case の概要を表 3 に、計算・解析条件を表 4 に、各モデルの物性値を表 5 に、境界条件を表 6 に示す。

乱流モデルについて、本研究では精密なモデルを作成するのではなく、簡易なモデルを作成し相対的な比較を行うことが目的であるため、このモデルで十分な結果が得られると考え標準  $k-\epsilon$  モデルを採用した。輻射に関しては形態係数に基づく計算で行った。各素材の物性値は基本的に一般的な物性値を用いており、遮光ネットの日射吸収率に関しては上部空間の加熱源になっていると想定し、0.5 と設定した。砂ベッドはビニルハウス内に 3 スパン分(1 スパン; 1.2×1.8m)を 2 列配置した。境界条件となる土壌温度は 0.5m に設定した。ビニルハウス外側からの西風を想定し、西壁面及び東壁面の一部に圧力差を与えた(圧力値は文献<sup>4)</sup>を参考にした)。またビニルハウス外側及び内側表面では、対流熱伝達率を建築推奨値を用いて屋根面及び壁面に与えた。また内側表面はビニルハウス内では長波は透過しない特性を表現するため、輻射率は 0.9 に設定し、長波拡散反射率を 0.1 に設定した。また温床線及び温風暖房のモデル概要を示したものを表 7 に示す。稼働時間については稲葉らの検討での、1 月の時期での温床線の稼働時間を参考に設定した。また温風暖房はハウス栽培用 HP を選定し、熱量は暖房時の定格能力を用い、稼働時間を温床線と同じにすることで、砂層温度やその温度にするために必要だった消費電力量について、比較及び分析を行う事で、本研究の暖房手法の一つである温床線の暖房効果について検証する。

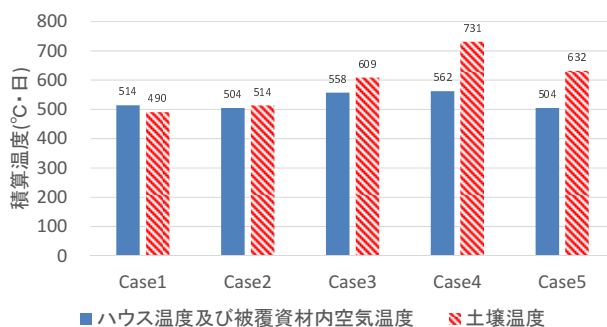


図 5 定植～収穫までの各 Case の積算温度

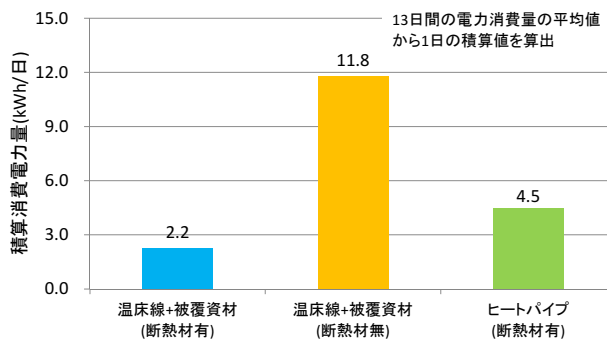


図 6 1 日の積算消費電力量(平均)

表 3 シミュレーションケースの概要

	断熱材	温床線	ハウス栽培用 HP
Case A	—	—	—
Case B	○	○	—
Case C	—	○	—
Case D	—	—	○

表 4 計算条件及び解析条件

乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
計算モデル	要素体積法による非定常解法
日射量計算	ASHRAE モデル
輻射計算	VF(形態係数)法

表 5 各モデルの物性値

ビニルハウス (4500×6400×3400mm)	材質; PVC 軟質 開口率;0.01 日射透過率;0.85 日射吸収率;0.05
遮光ネット (4500×6400×10mm)	材質; PE 開口率;0.4 日射透過率;0.5 日射吸収率;0.5(カタログ値)
砂ベッド (1200×5400×150mm)	材質; 砂 日射吸収率;0.65(文献値 <sup>3)</sup> )
土壌 (4500×6400×500mm)	材質; 有機質土 日射吸収率;0.9(文献値 <sup>3)</sup> )
断熱材 (厚み;50mm)	材質; 押出発泡 PS 日射吸収率;0.2(文献値 <sup>4)</sup> )

表 6 境界条件

ビニルハウス外側表面	西壁面に正圧(=0.412Pa) 東壁面に負圧(=-0.412Pa) 対流熱伝達率を規定 (屋根:35,側壁:23W/m <sup>2</sup> ・K)
ビニルハウス内側表面	対流熱伝達率を規定 (屋根:11.6,側壁:8.92W/m <sup>2</sup> ・K) 輻射率:0.9 拡散反射率(長波長):0.1
土壌表面	断熱 底面に一定温度を規定 (=8.7°C)
日射条件	大阪の1月24日(ASHRAE)
外気温度	大阪の1月24日 (気象庁より抜粋)

表 7 加温方式の概要

	温床線	ハウス栽培用 HP (COP5.30)
稼働時間	17~7時 (14時間)	17~7時 (14時間)
加熱能力(kW)	982.4(定格)	3400(定格)

本モデルを用いた場合の暖房手法の効果

Case A の 24:00 におけるビニルハウス内の風速分布 (x=1775mm)を 図 7 に、同様に温風暖房を設置している Case D の 24:00 のビニルハウス内の風速分布(x=1775mm)を 図 8 に示す。図 7 より、ビニルハウス内での風速は壁面を伝って流れており、その後屋根面にて冷やされ下降している様子が確認でき、自然対流が起きていることが分かる。また、遮光ネットより上側では温風の吸込口に真っ直ぐ向かっているのに対し、遮光ネットの下側では気流が上昇や下降を繰り返しながら、吸込口に向かっていることが分かる。このことから遮光ネットより下側では砂ベッドや土壌等の加熱源が複数あることで気流の流れが複雑になっていることが分かった。次に図 8 より、温風暖房によりビニルハウス内全体の流れが均一になっており、特に遮光ネットより下側の空間では、図 7 と比較して、気流の流れが均一にされていることが分かる。流れ方としては吹出口より空気が流れており、北壁面に向けて流れていき、その後壁面に沿って上部に上昇し吸込口に向かって流れている。よって本モデルの温風暖房によりビニルハウス内全体に温風が行き届いていることが分かった。鉛直温度分布を示す代表として、Case A の 15:00 におけるビニルハウス内の鉛直温度分布 (y=2700mm)を 図 9 に、Case D の 15:00 におけるビニルハウス内の鉛直温度分布(y=2700 mm)を 図 10 に示す。図 9 より昼間の日射で暖められた遮光ネットによって西側の砂ベッド上部空間が暖められている。午後には砂ベッドの影になる東側は西側と比べると温度が低く、鉛直温度分

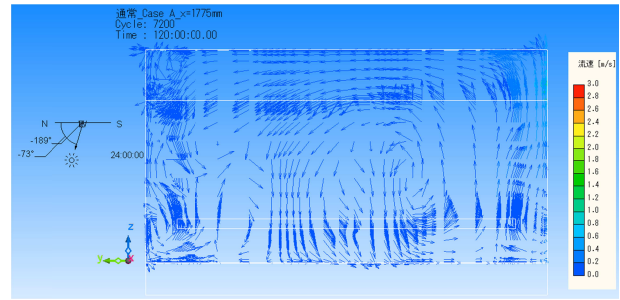


図 7 y-z 断面の流速分布(Case A、大阪)

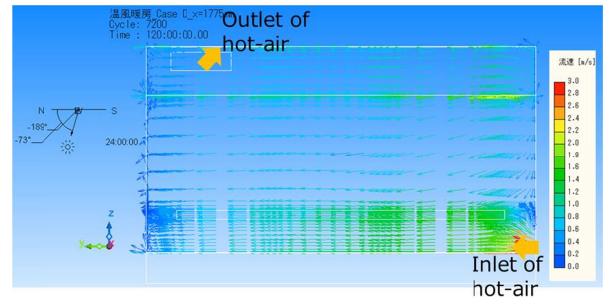


図 8 y-z 断面の流速分布(Case D、大阪)

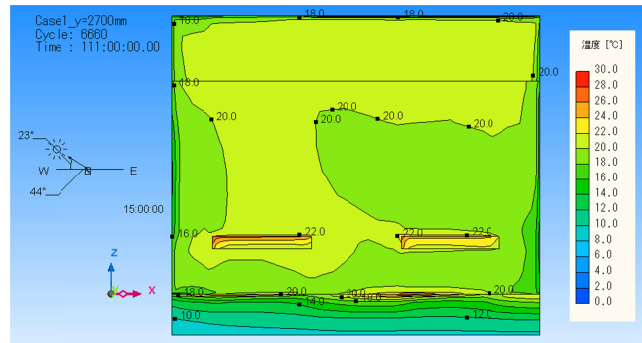


図 9 x-z 断面の鉛直温度分布(Case A、大阪)

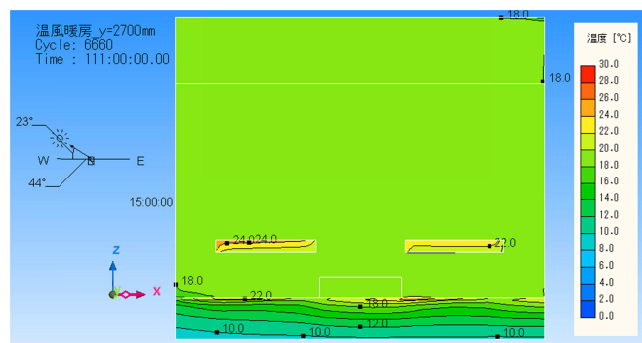


図 10 x-z 断面の鉛直温度分布(Case D、大阪)

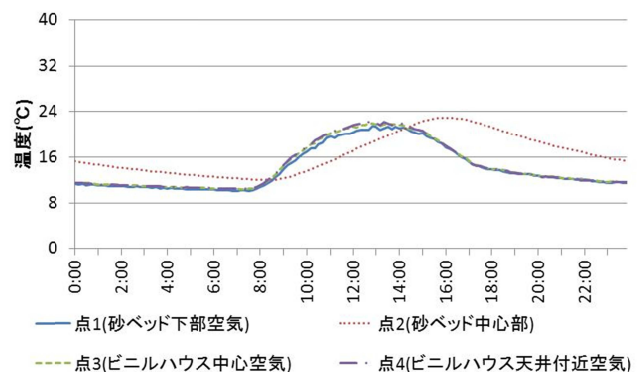


図 11 各点の温度の経時変化(Case A、大阪)

布が形成されやすい環境になることが分かった。また図 10 より、温風暖房により、夜間及び朝方暖められていたため昼間において、鉛直温度分布が形成されずにほぼ均一な空間温度分布になっていることが分かった。

Case A のビニルハウス内の各点における経時変化を表したものを図 11 に、断熱材の有無による砂層温度の比較を表したものを図 12 に、暖房熱源として温床線の有無による砂層温度の比較を表したものを図 13 に、温床線と温風暖房による砂層温度の比較を表したものを図 14 に示す。

図 11 より、すべての点において 13 時ごろに最高温度を示しており、砂ベッド下部空気では約 21.4℃、砂ベッド中心部では約 22.9℃、ビニルハウス中心部空気では約 21.9℃、ビニルハウス天井付近空気では約 22.2℃になった。また天井付近空気と砂ベッド下部空気を最高温度で比較すると 0.8K の差が生じている。このことから本モデルにおいて昼間に鉛直温度分布が形成されていることが分かる。次に図 12 より、断熱材の有無による砂層温度の差は 8:00 頃に最大で約 11.2K、平均で約 8.26K となった。また砂層温度を積算し 500(℃・日)になる日数を算出すると、Case B で約 16 日、Case C では約 21 日になり 5 日の差となった。よって断熱材により、砂層温度を平均で約 8.33K 上昇させ、収穫日数を 5 日間縮めることが出来ることが分かった。また図 13 より、温床線のモデルでは連続的に ON になる設定をしたため、砂層温度の差は特に夜間で大きくなり、3:40 頃に最大で約 11.4K になり平均でも約 7.61K になった。最後に図 14 より、温床線と温風暖房との砂層温度の差は 2:00 頃に最大で約 8.61K、平均で約 5.88K となった。また両者の消費電力量の差を見てみると、1 日積算で温床線は 13.8kWh であるのに対し、温風暖房では 47.6kWh となり、その差は約 34kWh となった。これらのことから、砂ベッドを効率よく加温できるのは温床線であることがわかった。最後に各 Case の砂層温度を比較したものを図 15 に示す。図 15 より、一番砂層温度が高くなっているのは Case B で、Case C、Case D、Case A の順になった。温床線を設置した Case において、稼働しなくなる 7 時頃に急激に砂層温度が低下するが、温風暖房では稼働しなくなる 7 時頃において緩やかに下降した。これは温床線では砂層のみ加温するため、稼働しなくなると加熱源が無くなるため急激に下がる。これに対して温風暖房では、空気全体を暖めているため稼働しない時間になっても、砂層温度の下降の程度は緩やかになった。

### 3 寒冷地での暖房効果の推定

前章で本モデルを用いて暖房手法の効果について分析を行った。この本モデルを用いて寒冷地での暖房手法の効果の推定する。寒冷地域の代表地として、宮城県仙台市を選定した。本モデルの変更点としては、緯度・経度、外気温、雲量である。外気温及び雲量の気象条件は仙台

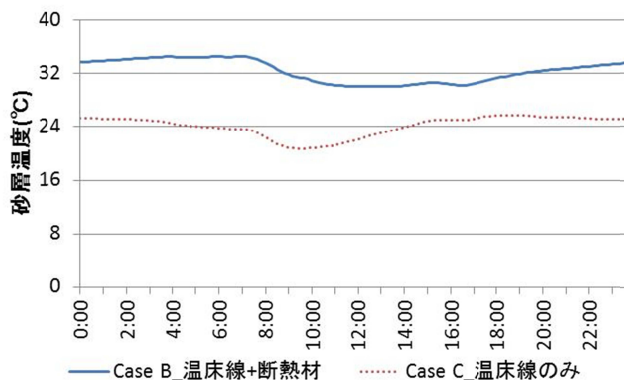


図 12 砂層温度の比較(断熱材の有無)

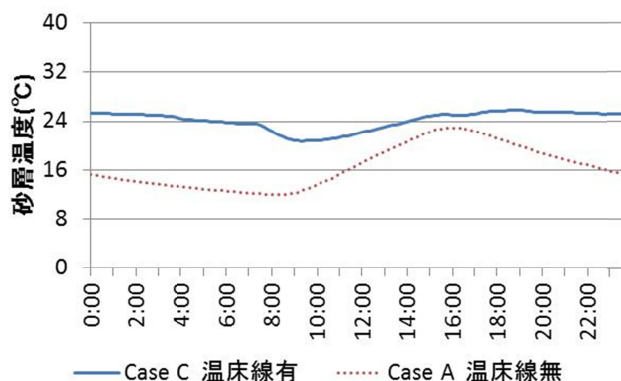


図 13 砂層温度の比較(暖房熱源の有無)

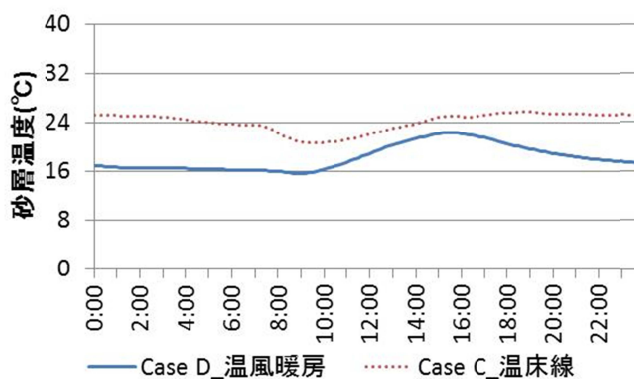


図 14 砂層温度の比較(暖房熱源の違い)

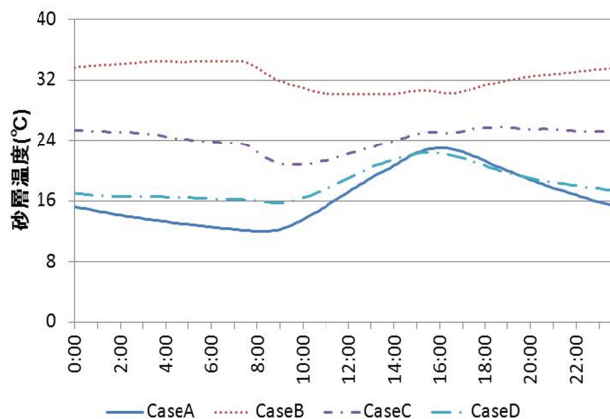


図 15 各 Case の砂層温度の比較

市の冬の晴れた日の代表日として1月27日を選定した。なお、寒冷地での暖房効果については Case A 及び Case B、Case D について示す。鉛直温度分布を示す代表として、仙台市における Case A の 15:00 におけるビニルハウス内の鉛直温度分布(y=2700mm)を図 16 に示す。図 16 より、図 9 と比較すると、ビニルハウス内の温度分布が低くなっていることが分かる。

次に、仙台市における Case A のビニルハウス内の各点における経時変化を表したものを図 17 に示す。図 17 より、大阪の Case A と比較すると最高温度の差が約 3.8K と差が大きくなった。これは 12 時におけるビニルハウス天井面に入射する日射量で大阪と仙台を比較すると、大阪は約 450W/m<sup>2</sup> の日射量であるのに対し、仙台では 350W/m<sup>2</sup> の日射量になっているためである。

また、断熱材の有無による砂層温度の比較を表したものを図 18 に示す。図 18 より、断熱材の有無による砂層温度の差は 7:40 頃に最大で約 7.45K、平均で約 5.56K となった。また砂層温度を積算し 500(°C・日)になる日数を算出すると、Case B で約 18 日、Case C では約 22 日になり 4 日の差となった。これにより断熱材により、仙台市において砂層温度を平均で約 5.67K 上昇させることが分かった。最後に暖房熱源として温床線の有無による砂層温度の比較を表したものを図 19 に示す。図 19 より、仙台では大阪と同じ熱量の温床線により砂層温度の差は最大で約 12.7K になり平均で約 8.54K になった。大阪での温床線を設置した場合と比較すると、効果は大きくなった。これは Case A での砂層温度が気温の影響を受け、大阪での Case A より低くなったことによって差が大きくなったと考えられる。

#### 4 まとめ

- ・大阪府四条畷市に建設された下田原農場において、砂層に着目し、被覆資材を用いて更なる暖房手法の実験を行い、収穫時重量や積算温度、消費電力量によりその暖房効果について定量的に示した。
- ・簡易なビニルハウスモデルを熱流体解析シミュレーションソフトにより作成し、本モデルにおいて暖房手法の効果について分析を行った。その結果、仙台において断熱材により砂層温度を平均で約 5.67K 上昇させ、生育促進効果としては断熱材無と比べると収穫日数を 4 日短縮できることを示した。
- ・今後の課題は、湿度及び植物を考慮したモデルを作成し、より実際のビニルハウスモデルに近づけていく。

#### 参考文献

- 1) 稲葉直美ら 「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 1 報) 高床式砂ベッドの加温と保温効果の実験的検証」 空気調和・衛生工学会近畿支部学術講演論文集 2015 年 3 月
- 2) 関西電力株式会社 HP(2014/12/19 閲覧) URL:[http://www.kepco.co.jp/home/ryoukin/menu/dento\\_a.html](http://www.kepco.co.jp/home/ryoukin/menu/dento_a.html)
- 3) ゲイロン・サンフォード・キャンベルら(2003)「生物環境物理学の基礎第 2 版」森北出版
- 4) 浦野良美 中村洋(1996) 「建築環境工学」 森北出版 p.155

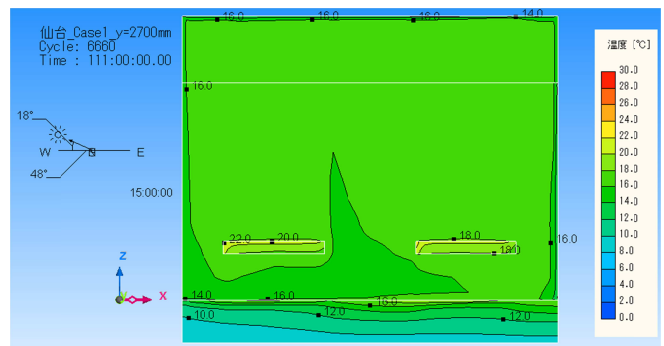


図 16 x-z 断面の鉛直温度分布(Case A、仙台)

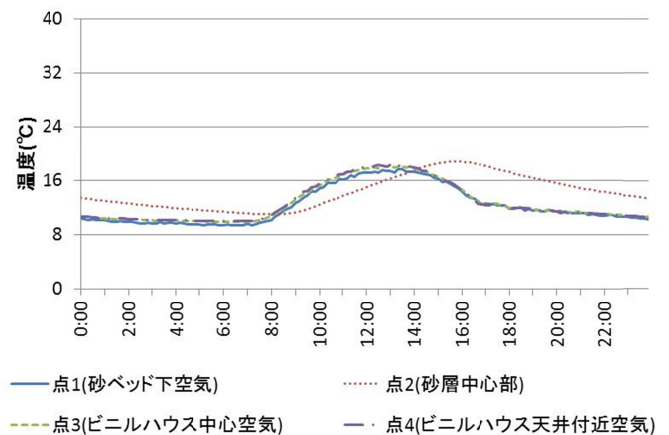


図 17 各点の温度の経時変化(Case A、仙台)

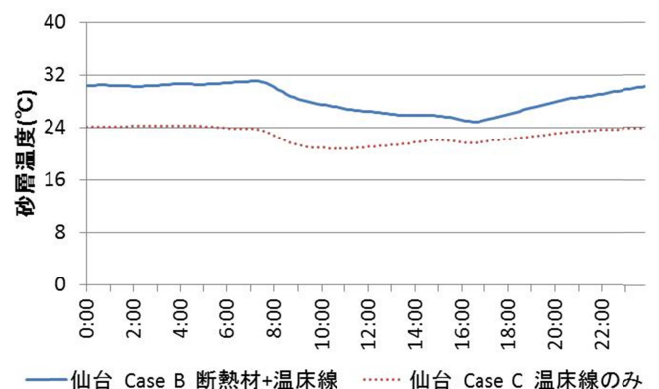


図 18 砂層温度の比較(断熱材の有無)

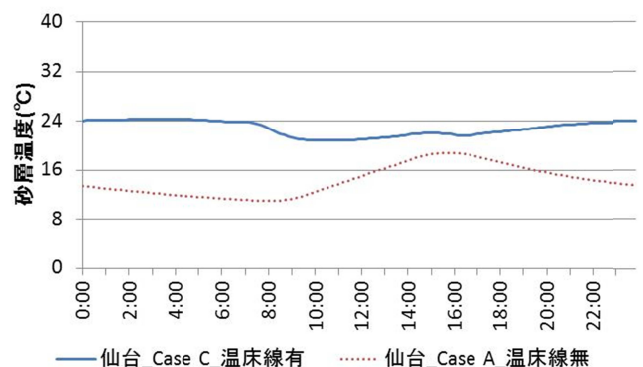


図 19 砂層温度の比較(暖房熱源の有無)

## 討議

討議(小林先生)

換気量と換気回数はどのようになっているのか？

回答

換気量は約 164(m<sup>3</sup>/h)となっており、換気回数を算出すると 1.68(回/h)となった。実際のビニルハウスでの熱環境実測から、文献値等から算出した換気回数 8.00(回/h)と比べて小さい値となった。実際のビニルハウスより気密な状態になっているため、ビニルハウス壁面の開口率等を改善する必要があるのではないかと考えられる。

討議(梅宮先生)

熱量はどのような方法で計測しているのか？

回答

図 1 の地中熱流板を用いて、図 2 に示すような砂ベッド表面付近及び底面に設置することで、表面及び底面の熱流を測定した。その際、表面については熱流板が見えなくなるまで地中に埋めるよう設置した。結果として熱流の値は、熱流の向き及び値は妥当であることは確認している。



図 1 地中熱流板

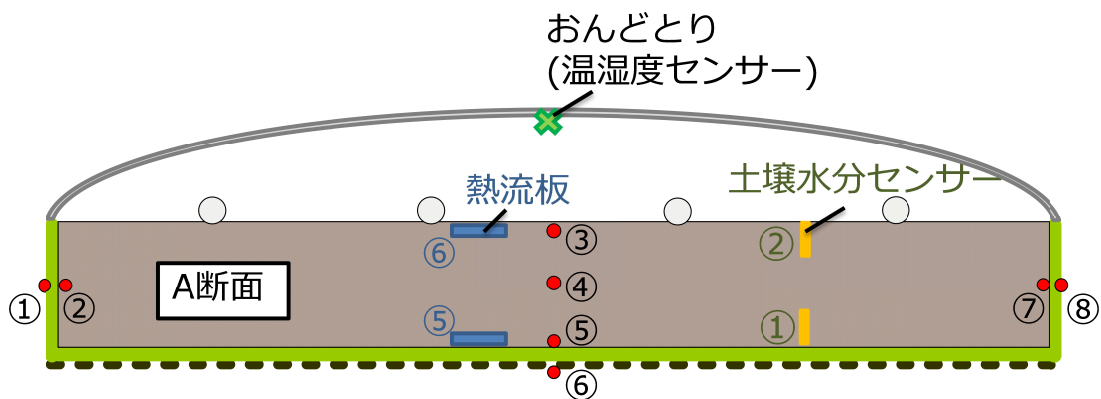


図 2 砂ベッド基本測器位置

討議(小林先生)

温風暖房の能力はどの程度あれば温床線に勝てるのか？

回答

温風暖房と温床線で砂層温度を同じ温度に制御するシミュレーションを実施していないため、正確な能力は把握できていないが、今回行ったシミュレーションでは約 3.5 倍の能力の HP を用いたが、同じ砂層温度に保つことが出来なかったため、それ以上の能力が必要なのではないかと考えられる。

討議(西岡先生)

温度の制御対象は土壌のみなのか？それとも空気も制御を行うのか？

回答

本研究では、空気を制御することは考慮しておらず、土壌のみを暖めることによってどの程度作物を正常に育てることが出来、また消費電力量をどれだけ抑えることが出来るかという事に主眼を置いている。よって実験において被覆資材内空気温度の積算温度による差を示したが、砂層自体を暖めることを前提に分析を行っている。しかし、寒冷地等に高床式砂栽培農業を導入した際、砂層を暖めるだけでは作物が育たないという可能性もあるため、その場合は補助的に温風暖房を導入する形も有り得るのではないかと考えられる。

討議(水谷先生)

植物の種類によって制御対象は違ってくるのか？

回答

一般的には制御対象として用いられているのは空気であり、ビニルハウスでの土耕栽培でも空気の積算温度によって収穫時期が分かるようになっている。しかし、稲葉らの検討において、温風暖房ではエネルギーの無駄が多いため、砂層に着目した暖房手法を用いて実験を行い、空気の積算温度が収穫にかかる積算温度に達していなくても砂層温度を加温すれば収穫が出来るという事が分かっているため、本研究においても砂層を制御対象として分析を行っている。

討議(鍋島先生)

簡易モデルで考慮できていない点は？(湿度以外で)

回答

本来上部空間ではビニルハウスを支える金属製の部材が存在しており、その部材によって上部空間は暖められていると考えられる。よってこれを考慮することが出来れば鉛直温度分布がより実際に近い値を示すのではないかと考えられる。また植物に関して本モデルでは考慮できておらず、考慮することが出来れば、植物からの蒸散や植物の影による砂層温度の変化に繋がり、より実際に近いビニルハウスモデルになるのではないかと考えられる。