

# 冬期における農業用ビニルハウスの効率的な加温・保温方式に関する研究

## ー屋外気象データを用いた高床式砂ベッド砂層温度の推定ー

### RESEARCH ON EFFICIENT HEATING AND THERMAL INSULATION SYSTEM FOR PLASTIC GREENHOUSES IN WINTER

#### -ESTIMATION OF HIGH FLOORED SAND TEMPERATURE ON THE BASIS OF OUTDOOR METEOROLOGICAL DATA-

地域環境計画分野 木村 駿介

Division of Regional Environmental Planning Shunsuke KIMURA

砂栽培農法は寒冷地では暖房が必須であるが寒冷地での実績に乏しく、作物の成長に必要な砂層加熱量に関する情報が整備されていない。そこで様々な栽培地域において必要な砂層加熱量を事前把握するため屋外気象データから高床式砂ベッドの砂層温度を推定するモデルを構築し、四条畷での実測データから推定モデルの未定係数を決定する。このモデルから推定した温度を元に、栽培地域ごとの砂層加熱量の目安として砂層暖房デGREEデイを算出する。結果として、新潟、仙台、帯広の砂層暖房デGREEデイは四条畷に比べて1.7、1.9、3.2倍となった。

In high floored sand culture heating is indispensable in cold districts, but the introducing results in cold districts are poor. In addition, information on the amount of sand heating required for the growth of crops is not clarified. The purpose of this study is to estimate amount of sand layer heating required in various cultivation districts. We constructed a simulation model to estimate the sand temperature of high floored sand from the outdoor weather data. Based on the sand temperature calculated using this model, the amount of sand heating degree-day is estimated for each districts. As a result Niigata, Sendai, Obihiro were 1.7, 1.9, 3.2 times, more degree-day than Shijonawate.

## 1. 研究背景・目的

### 1.1 研究背景

現在、農業用ビニルハウスでの高床式砂栽培農業が注目されており、西日本を中心に展開されている。

この農法の特徴として、土壌全てを洗浄できるため連作障害がほぼ無い事や高床式ベッドは建築現場で使用される足場材で構成されている為施工が容易であり高さを変更する事も出来る等、高生産性と施工性、高齢者や車いすの方でも容易に作業できる作業性を兼ね備えている。一方で、この農法の弱点の一つは、冬期に断熱気密性の低いビニルハウス内の室温が低下すると、厚さ150mm程度の砂ベッドの砂層温度も低下し作物の成長が極端に遅くなることである。冬期でも連作のペースを落とさず栽培するためには、ハウス空気の加温あるいは砂層加温が必須となる。よって気象条件の異なる地域毎に暖房に必要な加熱量の情報を整備することは有用である。

### 1.2 研究目的

これまで高床式砂ベッドの加温、保温手法に関して稲葉ら<sup>1)</sup>笠島ら<sup>2)</sup>は大阪府四条畷市において、実験的検証により砂層の加温、保温と収穫量の関係について明らかにし、砂層の加熱の意義を証明した。笠島ら<sup>2)</sup>は実測結果を元に3次元熱流体解析ソフトを用いた簡易ビニルハウスのシミュレーションにより、ハウス内の温度と気流の分布を推定し、大阪と仙台的暖房効果を比較した。結果として寒冷地において温風暖房(空気の加熱)より温床線(砂層の加熱)の方が効率的に砂層を加熱できることが分かった。しかし、このシミュレーションは2015年1月27日のみの屋外条件を元に推定しており、栽培期間を通して必要な砂層加熱量が把握できていない。そこで本研究では、連続した屋外気象データから砂層温度を推定する松尾ら<sup>3)</sup>のモデルを用いて、各地域で栽培期間中に必要な砂層加熱量を概算することが目的である。

### 1.3 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、実測を行った。測定項目を表 1、測器設置位置を図 1、図 2、表 2 に示す。砂層温度は加温を行っていない砂層と加温を行った砂層の温度を測定した。加温には温床線を用いた。加温を行った砂層には消費電力量も測定した。温床線の主な特徴は設置が容易で安価という事が挙げられる。温床線は設定温度 15℃を下回ると加温が始まる仕組みになっている。実測期間は栽培期間に合わせ 2014 年 11 月 22 日～2015 年 1 月 23 日とした。ただし温度の計測は実測期間後も継続して行っていた。

### 1.4 実測結果

代表日として 1 月 10 日～1 月 16 日の実測結果を図 3～図 7 に示す。屋外空気の平均値は 4.0℃であり、最大値は 10.0℃、最小値は -3.8℃であった。屋外日射量については日の出日の入りがおおよそ 7 時、17 時であることから 7～17 時の時間を昼間と定義すると昼間の平均日射量は 178W/m<sup>2</sup>であった。なお最大値は 640W/m<sup>2</sup>であった。ハウス内空気温度は平均で 7.6℃最大値は 22.1℃、最小値は -0.3℃であった。砂層温度は加温を行っていない砂ベッドで平均で 8.2℃、最大値は 14.6℃、最小値は 2.2℃であった。加温を行った砂ベッドでは平均で 16.5℃であった。消費電力量は砂ベッド 1.2m×1.8m あたり 1 時間積算の平均で 184.2Wh/unit であった。消費電力量から砂層の 1 日の平均必要加熱量は 15.8MJ/unit であった。また栽培期間の必要加熱量は 1111MJ/unit であった。

温床線の加温の制御条件である 15℃と砂層温度の 1 時間平均、1 日平均の差それぞれをデグリーアワー、デグリーデイとして 1 時間積算消費電力量、1 日積算消費電力量との相関関係を図 8、図 9 に示す。なお相関係数はデグリーアワーが 0.56、デグリーデイが 0.80 となった。これらの図を見るとデグリーデイと 1 日の積算消費電力量との相関が強いことが分かる。また、式 1 のように本来の暖房デグリーデイは住宅などの一冬の暖房に必要な概算熱量（暖房負荷）の算出に用いられていることから、本研究でも必要な砂層加熱量の指標としてデグリーデイを用いて評価する。

$$H_h = \overline{KS} \times 24 \times D \quad \text{式 1}$$

|                 |                |
|-----------------|----------------|
| $H_h$           | :暖房負荷(Wh/シーズン) |
| $\overline{KS}$ | :熱貫流率(W/K)     |
| $D$             | :デグリーデイ(℃・日)   |

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      |           |
| 風速     | 短波放射量   |           |
| 長短波放射量 | 長波放射量   |           |

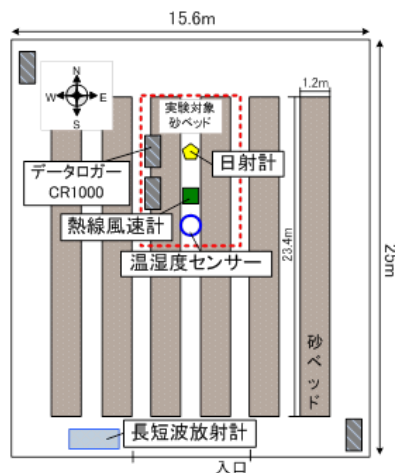


図 1 ハウス内測器位置(平面図)

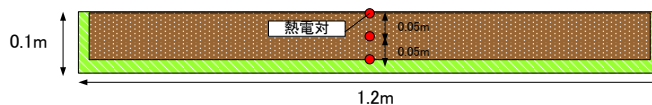


図 2 砂ベッド測器位置(断面図)

表 2 各 Case の詳細(砂ベッド断面図)

|                  |  |
|------------------|--|
| Case1<br>従来の砂ベッド |  |
| Case2<br>温床線     |  |

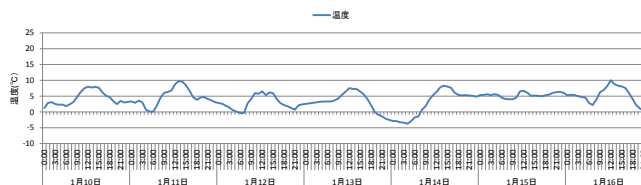


図 3 屋外空気温度

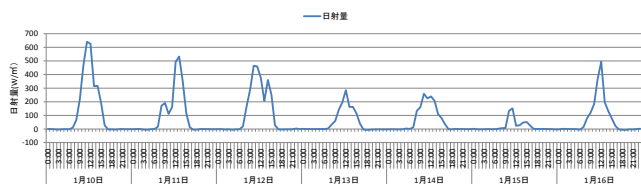


図 4 屋外日射量

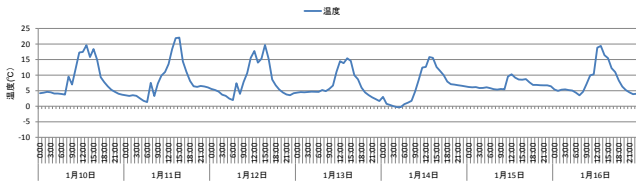


図 5 ハウス内空気温度

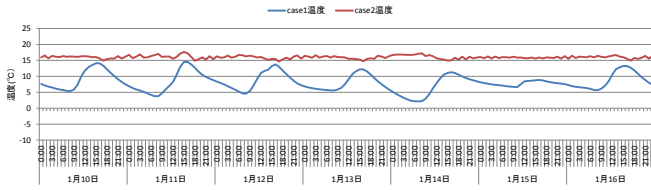


図 6 砂層温度

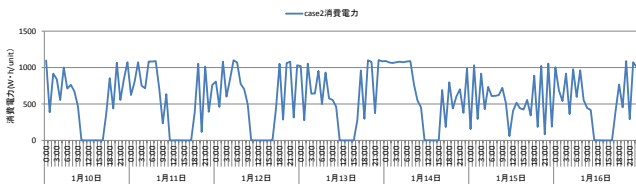


図 7 消費電力量

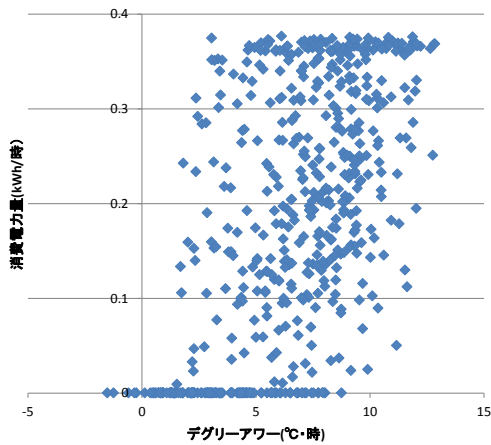


図 8 デグリーアワーと1時間積算消費電力量

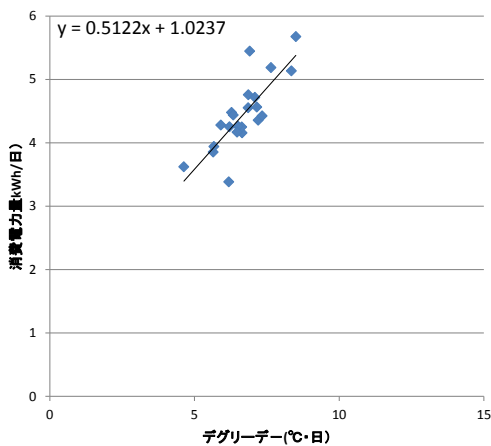


図 9 デグリーデーと1日積算消費電力量

## 2. ハウス内空気及び砂層温度の伝熱モデルを用いた推定式

### 2.1 屋外環境から求める伝熱モデルを用いたハウス内空気温度の推定

松尾らの研究では屋外空気温度による室温のステップ応答を簡単な指数関数(1次遅れの式)で近似し、暖房された一般住宅の外気温励振に対する室温のステップ応答を式2式3のように表現した。さらに式2、式3から屋外空気温度による室温の三角波応答時系列を式4~式7で示し、屋外空気温度との合成積で式9を導いた。この時、未定係数は式9の $r, b_0, b$ のみで $r, b_0, b$ は適当な仮定値を与えて求められる室温の計算値と実測値の平均残差(式10)が最小となるよう決定できる。この伝熱モデルをビニルハウスに応用し、屋外空気温度からハウス内空気温度を、推定したハウス内空気温度から砂層温度を推定する。用いる伝熱モデルの模式図と等価電気回路を(図10~図13)に示す。推定は上記の手順で行う。ただし、本研究では加熱を行わない際の温度を推定するので暖房による応答は無視した(式11~式14)。式15を用いて屋外空気温度からハウス内空気温度を推定し、測定したハウス内空気温度との平均残差を求めた。この時未定係数を $r_{OR}$ とした。なおお走期間は無しとした。算出に用いた期間は2015年1月1日~1月30日である。屋外温度には日射の影響を加味するために実測した屋外空気温度と日射量から求める相当外気温度を用いた。相当外気温度を求める式を式16に示す。総合熱伝達率においては放射熱伝達率を $5W/(m^2 \cdot K)$ 、田中ら<sup>4)</sup>の研究より対流熱伝達率を実測した屋外風速データから式17で算出し、その合計値を用いる。日射吸収率を0.2~0.8と変えてそれぞれ $r_{OR}$ と平均残差の関係を求めたものを図14に示す。この図より日射吸収率が0.4の時 $r_{OR}$ 値0.76で平均残差が最小 $1.91^\circ C$ となった。この時のハウス内空気推定温度の推移を実測温度と共に図15に示す。

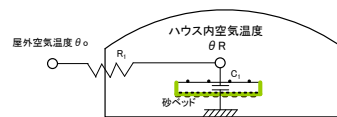


図 10 簡易模型  
(屋外-ビニルハウス内)

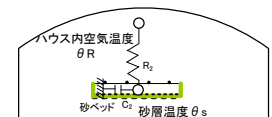


図 11 簡易模型  
(ビニルハウス内-砂層)

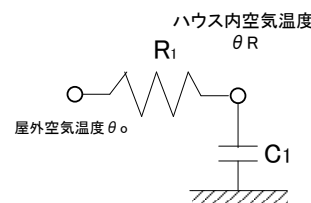


図 12 等価電気回路  
(屋外-ビニルハウス内)

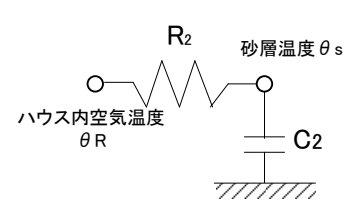


図 13 等価電気回路  
(ビニルハウス内-砂層)

$$\varphi(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{式 2}$$

$$\psi(t) = b_0 - be^{-\lambda t} \quad \text{式 3}$$

$$\varphi_0 = 1 - \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r) \quad \text{式 4}$$

$$\varphi_j = \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r)^2 r^{j-1} \quad \text{式 5}$$

$$\psi_0 = b_0 - br \quad \text{式 6}$$

$$\psi_j = b(1 - r)r^j \quad \text{式 7}$$

$$r = e^{-\lambda \Delta t} \quad \text{式 8}$$

$$\theta_{R,n} = \varphi_0(\theta_{o,n} - r^n \theta_{o,0}) + \varphi_1 \sum_{j=1}^n \theta_{o,n-j} r^{j-1} \quad \text{式 9}$$

$$+ (b_0 - br)H_n$$

$$+ br(1 - r) \sum_{j=1}^n H_{n-j} r^{j-1}$$

$$+ r^n \theta_{R,0}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\theta_n - \theta'_n)^2}{N}} \quad \text{式 10}$$

$$\varphi_{OR}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{式 11}$$

$$\varphi_{OR_0} = 1 - \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r_{OR}) \quad \text{式 12}$$

$$\varphi_{OR_j} = \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r_{OR})^2 r_{OR}^{j-1} \quad \text{式 13}$$

$$r_{OR} = e^{-\lambda_{OR} \Delta t} \quad \text{式 14}$$

$$\theta_{R,n} = \varphi_{OR_0}(\theta_{o,n} - r_{OR}^n \theta_{o,0}) \quad \text{式 15}$$

$$+ \varphi_{OR_1} \sum_{j=1}^n \theta_{o,n-j} r_{OR}^{j-1}$$

$$\theta_{O\_SAT} = \theta_o + \frac{\alpha_R * J}{h_R} \quad \text{式 16}$$

$$h_a = 3.2 + 2.6 * V - 0.0065 * V^2 \quad \text{式 17}$$

$$\theta_{R\_SAT} = \theta_R + \frac{\alpha_S * J}{h_S} \quad \text{式 18}$$

$\varphi(t)$  : 屋外空気温度による室内温度のステップ応答(°C)

$\psi(t)$  : 暖房による室内温度のステップ応答(°C)

$\varphi_j$  : 屋外空気温度による室温温度の三角波応答時系列(°C)

$\psi_j$  : 暖房による室内温度の三角波応答時系列(°C)

$r, b, b_0$  : 未定係数

$\lambda$  :  $1/T_c$

$T_c$  : 時定数

$H$  : 加熱量(J/h)

$\delta$  : 平均残差(°C)

$\theta_n$  : 実測温度(°C)

$\theta'_n$  : 計算温度(°C)

$\varphi_{OR}(t)$  : 屋外空気温度によるハウス内空気温度のステップ応答(°C)

$\varphi_{OR_j}$  : 屋外空気温度によるハウス内空気温度の三角波応答時系列(°C)

$r_{OR}$  :  $C_1$ に関する未定係数

$\lambda_{OR}$  :  $1/T_{c\_OR}$

$T_{c\_OR}$  :  $C_1$ に関する時定数

$\theta_{O\_SAT}$  : 屋外相当外気温度(°C)

$\alpha_R$  : ビニルハウス屋外側表面の日射吸収率(-)

$h_R$  : ビニルハウス屋外表面の総合熱伝達率 (W/(m2 K))

$\theta_o$  : 屋外空気温度(°C)

$J$  : 日射量 (W)

$h_a$  : 対流熱伝達率 (W/(m2 K))

$V$  : 風速(m/s)

$\theta_{R\_SAT}$  : 日射を考慮したハウス内空気温度(°C)

$\alpha_S$  : 砂層表面の日射吸収率(-)

$h_S$  : 砂層表面の総合熱伝達率 (W/(m2 K))

$\theta_R$  : ビニルハウス内空気温度(°C)

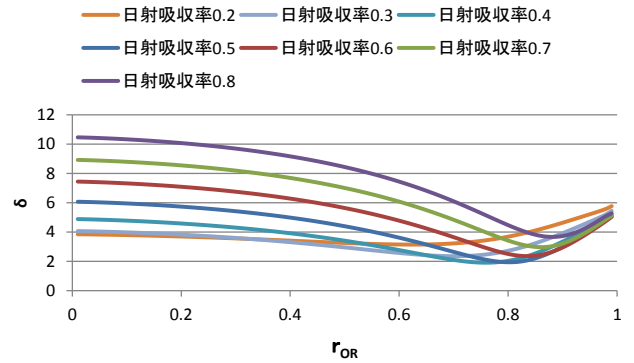


図 14 相当外気温度の違いによる r 値と平均残差の関係

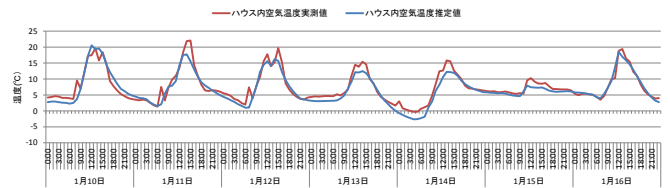


図 15 伝熱モデルによるハウス内空気温度推定値と実測値

## 2.2 ハウス内空気から求める伝熱モデルを用いた砂層温度の推定

ハウス内空気温度を用いて伝熱モデルを用いた砂層温度の推定を行う。式 11～式 17 において屋外空気温度の要素にハウス内空気温度を、ハウス内空気温度の要素に砂層温度を代入してハウス内空気温度による砂層温度のステップ応答( $\varphi_{RS}(t)$ )、三角波応答( $\varphi_{RS_j}$ )、推定式( $\theta_{S,n}$ )を求めた。この時の未定係数を  $r_{RS}$  とした。

### 2.2.1 ハウス内空気温度実測値を用いた推定

2.2 よりハウス内空気温度実測値から砂層温度を推定し、実測値との平均残差を求めた。ハウス内空気温度には日射の影響を加味するため実測したハウス内空気温度と屋外日射量から求めた $\theta_{R\_SAT}$ を用いた。対流熱伝達率に用いる風速は0m/sとした。日射吸収率を0~0.8と変えて式18より $r_{RS}$ を算出し、それぞれに $r_{RS}$ と平均残差の関係を求めたものを図16に示す。この図より、日射吸収率が0の時 $r_{RS}$ 0.83で平均残差が最小0.60°Cとなった。この時の砂層推定温度の推移を実測温度と共に図17に示す。

### 2.2.2 ハウス内空気温度推定値を用いた推定

2.1章より求めたハウス内空気温度推定値から2.2.1章と同様に砂層温度を推定し、測定した砂層温度との平均残差を求めた。なお助走期間は無しとした。算出に用いた期間は2015年1月1日~1月30日である。ハウス内空気温度には日射の影響を加味するため $\theta_{R\_SAT}$ を用いた。日射吸収率を0~0.7と変えて $\theta_{R\_SAT}$ を算出し、 $r_{RS}$ と平均残差の関係を図18に示す。この図より、日射吸収率が0.1の時 $r_{RS}$ 値0.88で平均残差が最小1.34°Cとなった。この時の砂層推定温度の推移を実測温度と共に図19に示す。

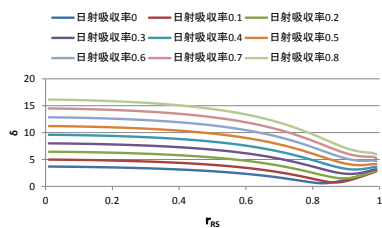


図16 日射吸収率の違いによるr値と平均残差の関係

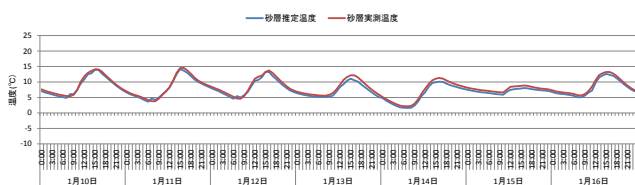


図17 砂層推定温度と実測温度

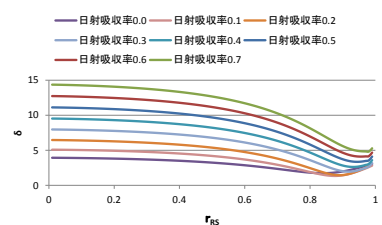


図18 日射吸収率の違いによるr値と平均残差の関係

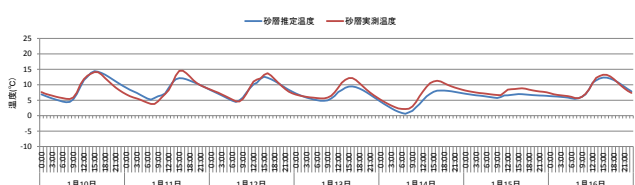


図19 砂層推定温度と実測温度

### 3. 伝熱モデルを用いた寒冷地の温度の推定

寒冷地のハウス内空気温度及び砂層温度を伝熱モデルを用いて推定を行う。ハウス内空気温度及び砂層温度を推定する対象地として新潟、仙台、帯広の環境データ(屋外空気温度、日射量、風速)を用いる。また一方で温暖地として大阪の環境データも用いて比較を行う。なお各地の環境データは気象庁のデータベースを用いた。推定期間は2015年1月1日から1月30日までとした。四条畷の平均屋外空気温度は3.9°C、1日の平均日射量は82.8W/m<sup>2</sup>であった。大阪の平均屋外空気温度は6.3°C、1日の平均日射量は107.6W/m<sup>2</sup>であった。新潟の平均屋外空気温度は3.1°C、1日の平均日射量は58.1W/m<sup>2</sup>であった。仙台の平均屋外空気温度は2.5°C、1日の平均日射量は101.6W/m<sup>2</sup>であった。帯広の平均屋外空気温度は-8.6°C、1日の平均日射量は91.0W/m<sup>2</sup>であった。

#### 3.1 寒冷地の冬期における砂層温度の推定

伝熱モデルを用いて各地域の砂層温度を推定した。なお、砂層温度を求める際には2.1より求めたハウス内空気推定温度から屋外日射量、風速の実測データより式18で求めた $\theta_{R\_SAT}$ を用いて推定した。 $r_{RS}$ は0.88を用いた。推定した各地の砂層温度の1月10~1月16日の推移を図24~図27に示す。四条畷の平均温度は8.1°C、大阪の平均温度は9.9°C、新潟の平均温度は4.7°C、仙台の平均温度は5.4°C帯広の平均温度は-4.8°Cであった。

#### 3.2 各寒冷地の温度比較

屋外空気温度、屋外空気相当外気温度(日射吸収率0.4)、ハウス内空気温度推定値、砂層温度推定値の2015年1月1日~1月30日の最大値、平均値、最小値を図28に示す。ほとんどの地域で屋外空気相当外気温度、ハウス内空気温度、砂層温度の平均が同程度になった。また大阪と寒冷地において最大値の差の方が最小値の差より大きくなることが分かった。

栽培期間を2014年11月22日~2015年1月23日とし砂層加熱の制御温度を15°Cとした時の栽培期間の各地のデグリーデイを求めた。新潟、仙台、帯広のデグリーデイはそれぞれ589.1、661.7、1096.7°C・日となり四条畷の1.7、1.9、3.2倍となった。このことから寒冷地の方が温暖地域に比べて砂層の必要加熱量が大きいことが分かる。式1より、必要砂層加熱量はデグリーデイに比例することが分かる。よって各寒冷地における必要砂層加熱量の四条畷との比はデグリーデイの比と等しい。四条畷の栽培期間の必要加熱量が1111MJ/unitであることから各寒冷地の必要砂層加熱量はそれぞれ1915MJ/unit、2152MJ/unit、3567MJ/unitであることが分かる。

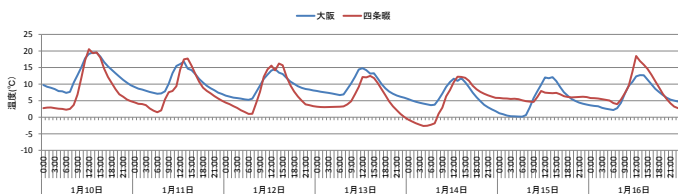


図 20 大阪

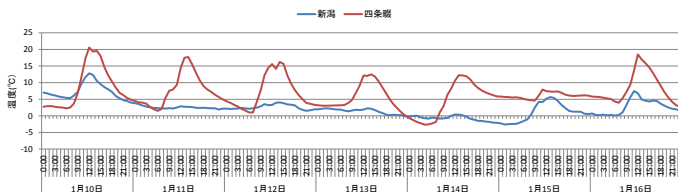


図 21 新潟

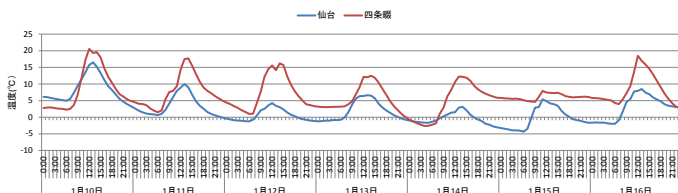


図 22 仙台

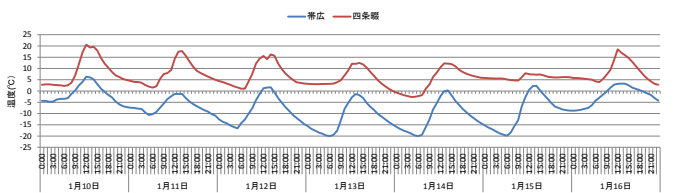


図 23 帯広

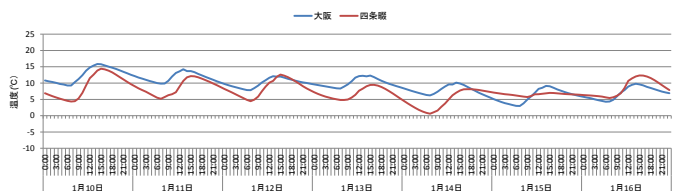


図 24 大阪

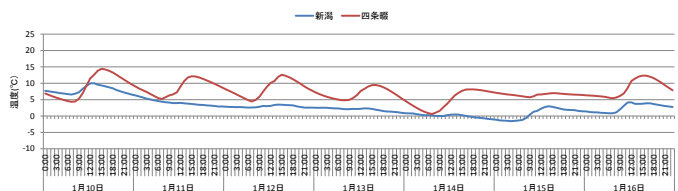


図 25 新潟

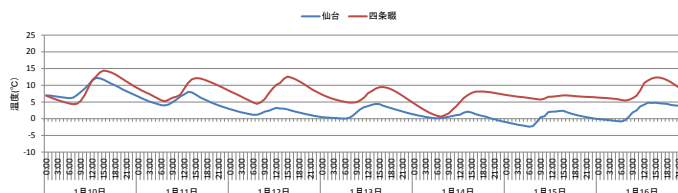


図 26 仙台

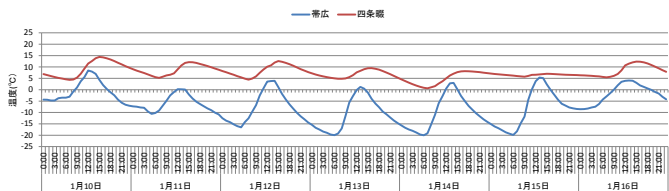


図 27 帯広

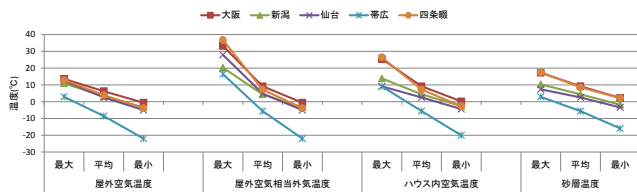


図 28 各寒冷地の温度比較

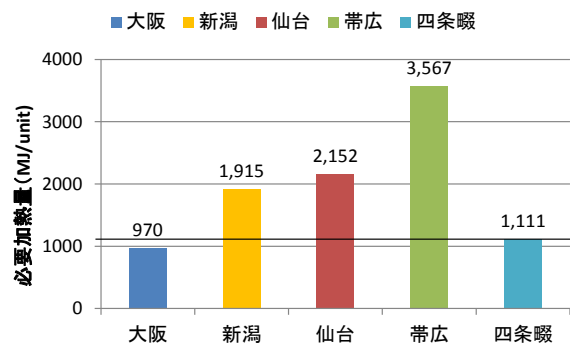


図 29 各地の必要砂層加熱量

4. まとめ

- ・大阪府四條畷市のビニルハウスの環境データを用いて屋外環境から求めるハウス内空気温度と砂層温度の推定方法として伝熱モデルを用いた推定法を述べた。日射の影響を加味するために相当外気温度を用いて推定を行い最も整合性が高い日射吸収率と r 値を示した。
- ・伝熱モデルを用いた推定手法を用いて寒冷地のハウス内空気温度と砂層温度の推定を行いデGREEデイより必要な砂層加熱量の比較を行った。
- ・今後の課題としては他地域の実測値との整合性を行う事、ビニルハウス内の湿度や換気による空気の移動、植生などがハウス内空気、砂層温度に及ぼす影響についても検討する必要がある。

参考文献

- 1)稲葉, 鍋島ら: 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)笠島, 鍋島ら: 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 2 報)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 第 45 回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 2016 年 3 月
- 3)松尾, 斉藤: 現場測定にもとづく住宅熱特性の推定 日本建築学会環境工学論文集 第 3 集 1981 年 4 月
- 4)田中・奥島・佐瀬ら 対流熱伝達率におよぼす風向・風速の影響 農業施設学会論文集 26 巻第 1 号 1995 年 6 月