井水散水 2 重被覆ハウスにおける温度環境の形成機構

(2) 夜間におけるハウス床土温度形成機構の理論解析

原 道 宏*

岩手大学農学部*

伝熱特性が時間的に一定とみなせる井水散水 2 重被覆ハウスの夜間伝熱系を理論解析し、床土温度の解析解を得た。この結果、夕方の地温分布の知られている井水散水 2 重被覆ハウスの床土温度が、外気温、天空温度および散水温度から求められるようになった。床土内における熱流束密度もこの結果から求められる。ハウス地上部各部の温度はここで得られた地表温の解を前報¹⁾で得られた解に代入することにより直ちに求めることができる。

床土温度の解は初期地温分布、外気温、天空温度および散水温度からの温度寄与の和で表された。各環境要因からの温度寄与は、その環境要因からの原寄与に重み係数を乗じた積で表された。重み係数は地上部の伝熱機構だけで定まり、また、原寄与に含まれるハウスの伝熱パラメータは地表温総括時定数 T_{so} ($T_{so} \equiv \rho c K / g_{so}$) ただ 1 個であることがわかった。ここで、 ρc は床土の体積比熱、 K は床土の熱伝導率、 g_{so} は式 (7) に現れる地表面総合熱伝達係数である。一方、初期地温分布からの温度寄与は、深さと経過時間から定まる重み係数を初期地温分布に乗じた積の総和で表された。この重み係数に含まれるハウスの伝熱パラメータは T_{so} および相当土厚 l ($l \equiv K / g_{so}$) の 2 個であった。

地表温総括時定数 T_{so} は地表温変化の時間スケールを規定し、 T_{so} の大なるほど地表温変化の速さがゆっくりで、ハウスの保温性が優れる。また、 T_{so} が等しいハウスでは相当土厚 l が大きいほど深部土壌からの温度寄与が相対的に大きくなるという特徴のあることがわかった。

1982 年 9 月 24 日受付

緒 言

ハウス地上部伝熱機構に対するシステム解析の結果、床土表面温度を境界条件の一つに選ぶとき、夜間における、栽培室気温をはじめとする井水散水 2 重被覆ハウス地上部の各部温度は、散水温度、外気温、等価天空温度および床土表面温度の重みつき平均値として精度よく表されることが明らかになった¹⁾。しかも、測定例における栽培室気温に関する上記各境界環境温度に対する重み係数は、上記の順に、0.145, 0.141, 0.050 および 0.664

と、床土表面温度に対する重み係数が、他の 4 倍以上かつ全体の約 2/3 と、最大であった。それゆえ、栽培室気温をはじめとする井水散水 2 重被覆ハウス地上部の各部温度を境界環境温度から求めるためには、ハウス床土の表面温度を知ることが不可欠であるといえる。

ところで、前報¹⁾ではハウス床土の表面温度をハウスの地上部伝熱機構に対する境界条件の一つと考えたが、ハウス全体における伝熱過程を考えれば、ハウス床土の表面温度は床土内部の初期温度分布および地表面における熱流量によって定まると考えられ、かつ、後者は散水温度、外気温および等価天空温度に依存する量であると考えられるゆえ、ハウス床土の表面温度はハウス全体に対する境界条件とはいえない。すなわち、ハウス床土の表面温度は、床土内部の初期温度分布、散水温度、外気温および等価天空温度に従属して定まると考えられる。

しかるに、夜間における上述のごときハウス床土表面温度形成過程において、ハウス地上部の伝熱機構および

Michihiro HARA*: Formation Mechanism of Thermal Environment of the Double Roofed Greenhouse with Spraying of Well Water between the Roofing Layers. (2) Theoretical Analysis of the Formation Mechanism for the Bed-Soil Temperature at Night.

* Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka, Iwate 020, Japan.

床土熱容量・熱伝導率などの地下部伝熱特性がどのように関与するかについては未解明であり、この関係を明らかにする必要がある。

従来、地表温を含むハウス夜温の解析はいくつか試みられている。高倉²⁾は厚さ 10 cm のコンクリート床を有する小型ガラス温室の室内気温を外気温および純放射量の重み関数を用いて解析し、その結果、日射の残存効果を見逃すことができないことを示した。しかし、日射量の重み関数を導入しても前夜半 (16:00 から 24:00 まで) における予測値と実測値のへだたりは小さくならないことを示し、これは、日射受光面積のとり方および水平面と鉛直面とでの受光量の相異などに起因しているとされた³⁾。このことは日射量の地下蓄熱量をハウスの構造などに基づいて正確に見積ることのむずかしさの一端を示すものといえる。また、重み関数によるこの解析においては地上部およびコンクリート床の伝熱特性が考慮されているが、解中におけるそれらの現れ方が複雑であり、これにより伝熱特性の影響を見通すのは容易でないように思われる。

一方、北村⁴⁾は地温不変層の概念を用いて土壌全体を一組の集中定数として扱い、興味ある簡潔な解を得た。しかし、そこでは土壌熱容量が保温上重要であることが指摘されたにとどまり、得られた解の有用性が示されていない。これは、不変層 (深さ 50 cm) までの土壌をただ一組の集中定数で表して夜温を解析することに無理があるためではなかろうか。なお、北村⁴⁾は、解析解においては温度を摂氏で表してはならず、絶対温度で表すべきであるとしているが、絶対温度の 4 乗に比例する温度放射を表す場合を除き線形項においてはいずれの表示も可と考えられ、本論文においてもこれを検討し、肯定的な結論を得た。

他方、三木ら⁵⁾は温度不変層までの地温分布を 3 次多項式で近似するプロファイル法を用い、夜間における地表温の一般解を得、測定値と比較してその有用性を示した。この解は地上部および地下部の伝熱特性を簡潔な形で含み、地温の冷却速度を支配する無次元パラメータ β の存在を示した。温度不変層深さが土壌物性のみによって定まるとしている点は一考の余地があろう。

さらに、Takakura ら⁶⁾は、高速計算機の使用を前提として、横方向を含む 2 次元地温場に差分法を導入し、地表温度を含む昼夜の温室各部温度を求める方法を示し、測定値との比較からその有用性を示した。しかし、差分法では解の傾向に対する伝熱特性の影響のしかたについての見通しが解析解の場合とくらべて良くないと思われる。差分法は解析解の得られない場合に用いるべきもの

と考えられる。

それゆえ、本論文においては、夜間におけるハウスの地上部伝熱機構と地下部熱伝導系との結合系に関する支配方程式を立て、その解析解を追究することにした。上述のように、現状では、昼間の土壌蓄熱過程を日射量等の外部環境条件およびハウス構造などから正確に見積るのは困難と考えられるゆえ、散水開始時の地温分布は系の初期条件として与えられるものと仮定することにした。

材料および方法

解析に供したハウスは前報¹⁾に示した井水散水 2 重被覆ハウスである。解析した時間帯は、夕方の散水開始時から翌朝の散水終了時までのうち、日射の影響のない夜間である。

解析に際しては次の仮定を設けた。

- (仮定 1) 地上部伝熱モデル中のすべての熱抵抗は解析時間帯を通じて一定とする。
- (仮定 2) 栽培室空気および散水室空気の熱容量への蓄積熱流量は解析時間帯を通じて一定とする。
- (仮定 3) 地下部土壌中の伝熱については、鉛直方向の熱流のみを考慮すればよく、水平方向の熱流は無視できるものとする。
- (仮定 4) 地下部土壌の熱特性、すなわち、土壌の体積熱容量および土壌の熱伝導率は場所的に均一かつ時間的に一定とする。

本論文では、理論解析によりこの型のハウスにおける温度環境形成機構の一般的特徴を明らかにすることが目的である。それゆえ、前報¹⁾で得られた熱抵抗等のパラメータ値そのものにはこだわらず、むしろ、各パラメータが温度環境の形成にどのように関与するかを追究することを主題とした。

そのため、解析方法は、初期時刻における床土内の温度分布が初期条件として与えられ、かつ、散水温度、外気温および等価天空温度の各時刻における値が境界条件として与えられるものとしてハウス全体の伝熱系に対する支配方程式を立て、その解析解を求める方法を用いた。

結 果

1. ハウス床土における熱伝導方程式

前節の仮定の下では、地温 θ_{s1} は次の偏微分方程式に従う。

$$\frac{\partial \theta_{s1}(t, x)}{\partial t} = \kappa \cdot \frac{\partial^2 \theta_{s1}(t, x)}{\partial x^2} \quad (1)$$

2. 熱伝導方程式の一般解

一般に、初期時刻 ($t=0$) における地温分布を $f(x)$

(ただし, $x \geq 0$), また, それ以後 ($t > 0$) の地表面熱流束密度を $H_{so}(t)$ (下向きが正) とするとき, 式 (1) の一般解は次式 (2) で表される⁷⁾.

$$\begin{aligned} \theta_{s1}(t, x) = & \frac{1}{2\sqrt{\pi\kappa t}} \int_0^\infty f(\xi) \cdot \{e^{-(x-\xi)^2/4\kappa t} \\ & + e^{-(x+\xi)^2/4\kappa t}\} d\xi \\ & + \frac{1}{\sqrt{\pi\rho cK}} \int_0^t H_{so}(t-\tau) \cdot \tau^{-1/2} \cdot e^{-x^2/4\kappa\tau} d\tau \\ & (x \geq 0, t > 0) \quad (2) \end{aligned}$$

床土の表面温度 $\theta_{so}(t)$ の一般解は上式 (2) の x に 0 を代入することにより次式 (3) に求まる.

$$\begin{aligned} \theta_{so}(t) = & \frac{1}{\sqrt{\pi\kappa t}} \int_0^\infty f(\xi) \cdot e^{-\xi^2/4\kappa t} d\xi \\ & + \frac{1}{\sqrt{\pi\rho cK}} \int_0^t H_{so}(t-\tau) \cdot \tau^{-1/2} d\tau \quad (t > 0) \quad (3) \end{aligned}$$

3. 地表面熱流束密度と境界環境温度との関係

前報¹⁾で示されたハウス地上部の伝熱モデルから, 地表面熱流束密度 $H_{so} = H_{so}(t)$ は次式 (4) で表される.

$$\begin{aligned} H_{so} &= H_{rai} - H_{il} \\ H_{rai} &= h_{rai} \cdot (\theta_c - \theta_{so}) \\ H_{il} &= h_{so} \cdot (\theta_{so} - \theta_{in}) \\ \therefore H_{so} &= h_{rai} \cdot \theta_c + h_{so} \cdot \theta_{in} - (h_{rai} + h_{so}) \cdot \theta_{so} \quad (4) \end{aligned}$$

前報¹⁾の解析によれば, 上式中の θ_c および θ_{in} は次式 (5) で表される. 係数 p_{ij} には式 (6) の関係がある.

$$\begin{aligned} \theta_c = & p_{51} \cdot \theta_{sk} + p_{52} \cdot \theta_{ou} + p_{53} \cdot \theta_N + p_{54} \cdot \theta_{so} \\ & + p_{55} \cdot H_{up} + p_{56} \cdot H_{in} \quad (5a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_{in} = & p_{61} \cdot \theta_{sk} + p_{62} \cdot \theta_{ou} + p_{63} \cdot \theta_N + p_{64} \cdot \theta_{so} \\ & + p_{65} \cdot H_{up} + p_{66} \cdot H_{in} \quad (5b) \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^4 p_{ij} = 1 \quad (\text{ただし, } 1 \leq i \leq 6) \quad (6)$$

式 (5) を式 (4) に代入することにより, 地表面熱流束密度 H_{so} と境界環境温度 (θ_{sk} , θ_{ou} および θ_N) との関係が次式 (7) に得られる. また, 係数間には式 (8) の関係がある.

$$\begin{aligned} H_{so} = & g_{sk} \cdot \theta_{sk} + g_{ou} \cdot \theta_{ou} + g_N \cdot \theta_N - g_{so} \cdot \theta_{so} \\ & + g_{up} \cdot H_{up} + g_{in} \cdot H_{in} \quad (7) \end{aligned}$$

$$g_{so} = g_{sk} + g_{ou} + g_N \quad (8)$$

ここで,

$$g_{sk} = h_{rai} \cdot p_{51} + h_{so} \cdot p_{61},$$

$$g_{ou} = h_{rai} \cdot p_{52} + h_{so} \cdot p_{62},$$

$$g_N = h_{rai} \cdot p_{53} + h_{so} \cdot p_{63},$$

$$g_{so} = h_{rai} \cdot (1 - p_{54}) + h_{so} \cdot (1 - p_{64}),$$

$$g_{up} = h_{rai} \cdot p_{55} + h_{so} \cdot p_{65},$$

$$g_{in} = h_{rai} \cdot p_{56} + h_{so} \cdot p_{66}.$$

係数 g_{so} の物理的意味は次のように考えられる.

地上部の境界環境温度, すなわち, 等価天空温度 θ_{sk} , 外気温 θ_{ou} および散水温度 θ_N , および, 散水室および栽培室の空気熱容量への熱流束密度, それぞれ, H_{up} および H_{in} がすべて一定で, 地表温 θ_{so} だけが突然 1 度 (1 deg) 上昇したとき地表面から地上に向かう熱流束密度の増加量が g_{so} である.

4. 床土表面温度のラプラス変換解

式 (7) の H_{so} を式 (3) に代入することにより, 床土表面温度 $\theta_{so}(t)$ に関する方程式 (9) が得られる. このラプラス変換が式 (10) である.

$$\begin{aligned} \theta_{so}(t) = & \frac{1}{\sqrt{\pi\kappa t}} \int_0^\infty f(\xi) \cdot e^{-\xi^2/4\kappa t} d\xi \\ & + \frac{1}{\sqrt{\pi\rho cK}} \int_0^t \{g_{sk} \cdot \theta_{sk}(t-\tau) + g_{ou} \cdot \theta_{ou}(t-\tau) \\ & + g_N \cdot \theta_N(t-\tau) - g_{so} \cdot \theta_{so}(t-\tau) \\ & + g_{up} \cdot H_{up}(t-\tau) + g_{in} \cdot H_{in}(t-\tau)\} \cdot \tau^{-1/2} d\tau \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_{so}(s) = & \int_0^\infty f(\xi) \cdot \frac{e^{-s\xi}}{\kappa q} d\xi \\ & + \frac{1}{Kq} \cdot \{g_{sk} \cdot \bar{\theta}_{sk}(s) + g_{ou} \cdot \bar{\theta}_{ou}(s) \\ & + g_N \cdot \bar{\theta}_N(s) - g_{so} \cdot \bar{\theta}_{so}(s) \\ & + g_{up} \cdot \bar{H}_{up}(s) + g_{in} \cdot \bar{H}_{in}(s)\} \quad (10) \end{aligned}$$

これを $\bar{\theta}_{so}(s)$ について解き, 次の解が得られる.

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_{so} = & \bar{\theta}_{sof} + p_{sk} \cdot \bar{\theta}_{sok} + p_{ou} \cdot \bar{\theta}_{soou} + p_N \cdot \bar{\theta}_{soN} \\ & + p_{up} \cdot \bar{H}_{soup} + p_{in} \cdot \bar{H}_{soin} \quad (11) \end{aligned}$$

$$p_{sk} + p_{ou} + p_N = 1 \quad (12)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_{sof} = & \int_0^\infty f(\xi) \cdot e^{-s\xi} d\xi / (1+r) \cdot v, \\ \bar{\theta}_{sok} = & \bar{\theta}_{sk} / (1+r), \quad \bar{\theta}_{soou} = \bar{\theta}_{ou} / (1+r), \\ \bar{\theta}_{soN} = & \bar{\theta}_N / (1+r), \quad \bar{H}_{soup} = \bar{H}_{up} / (1+r), \\ \bar{H}_{soin} = & \bar{H}_{in} / (1+r), \quad p_{sk} = g_{sk} / g_{so}, \\ p_{ou} = & g_{ou} / g_{so}, \quad p_N = g_N / g_{so}, \quad p_{up} = g_{up} / g_{so}, \\ p_{in} = & g_{in} / g_{so}. \end{aligned}$$

5. 床土表面温度の解

時間領域における床土表面温度の解 $\theta_{so}(t)$ は式 (11) の $\bar{\theta}_{so}(s)$ のラプラス逆変換として次のように求まる.

$$\begin{aligned} \theta_{so}(t) = & \theta_{sof}(t) + p_{sk} \cdot \theta_{sok}(t) + p_{ou} \cdot \theta_{soou}(t) \\ & + p_N \cdot \theta_{soN}(t) + p_{up} \cdot H_{soup}(t) + p_{in} \cdot H_{soin}(t) \quad (13) \end{aligned}$$

次に, $\theta_{so}(t)$ の成分の関数形を具体的に求める.

5.1 床土表面温度形成における初期地温分布の寄与
ハウスの床土を各層の厚さが l_i ($i \geq 1$) なる水平な土層に区切り, 初期地温分布 $f(x)$ を各土層ごとに値の一

定な次の階段関数で近似する.

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= f(x_{s_i}), & x_{i-1} < x < x_i \\ x_{s_i} &= (x_{i-1} + x_i)/2, & x_0 &= 0 \\ x_i &= x_{i-1} + l_i & (i \geq 1) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

このとき, $\bar{\theta}_{\text{sof}}(s)$ は次式 (15) で表される.

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_{\text{sof}}(s) &= \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ f(x_{s_i}) \cdot \int_{x_{i-1}}^{x_i} e^{-qs} / (1+r) \cdot v \right\} d\xi \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} f(x_{s_i}) \cdot [-e^{-qx} / q \cdot (1+r) \cdot v]_{x_{i-1}}^{x_i} \quad (15) \end{aligned}$$

それゆえ, 経過時間 t のときの床土表面温度 $\theta_{\text{so}}(t)$ の形成における初期地温分布 $f(x)$ の寄与 $\theta_{\text{sof}}(t)$ は, このラプラス逆変換として, 次式のとおり求まる.

$$\theta_{\text{sof}}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} f(x_{s_i}) \cdot w_i(t) \quad (16)$$

ここで,

$$\begin{aligned} w_i(t) &= \phi(t, x_i) - \phi(t, x_{i-1}) \doteq \phi'(t, x_{s_i}) \cdot l_i, \\ \phi(t, x) &\equiv L^{-1} \{ -e^{-qx} / q \cdot (1+r) \cdot v \} \\ &= -e^{x/l + t/T_{\text{so}}} \cdot \text{erfc}(x/2\sqrt{\kappa t} + \sqrt{t/T_{\text{so}}}), \\ \phi'(t, x) &\doteq \partial \phi(t, x) / \partial x \\ &= e^{-x^2/4\kappa t} / \sqrt{\pi \kappa t} \\ &\quad - e^{x/l + t/T_{\text{so}}} \cdot \text{erfc}(x/2\sqrt{\kappa t} + \sqrt{t/T_{\text{so}}}) / l. \end{aligned}$$

5.2 床土表面温度形成における各種環境条件の寄与

床土表面温度 $\theta_{\text{so}}(t)$ の解 (13) を見れば明らかなく, 初期地温分布以外の各種環境条件の寄与はいずれも数式が同じ形になっている. すなわち, 環境条件を $e(t)$ とするとき, 床土表面温度形成におけるこの環境条件の寄与 $\theta_{\text{soe}}(t)$ はいずれも次の形をしている.

$$\theta_{\text{soe}}(t) = p_e \cdot L^{-1} \{ \bar{e}(s) / (1+r) \} \quad (17)$$

ところで, 重み係数 p_e は式 (11) に現れる $p_{\text{sk}}, p_{\text{ou}}, p_{\text{N}}, p_{\text{up}}$ および p_{in} を代表している. 式 (7), (5) および (4) と比べれば明らかのように, これはハウス地上部の伝熱機構によって定まるものである. また, ラプラス逆変換 $L^{-1} \{ \bar{e}(s) / (1+r) \}$ は, 床土表面温度形成における環境条件 $e(t)$ の寄与 $\theta_{\text{soe}}(t)$ に対する原寄与とも呼ばれるべきものである. それゆえ, 床土表面温度形成におけるある環境条件 $e(t)$ の寄与 $\theta_{\text{soe}}(t)$ は, ハウス地上部の伝熱機構によって定まるその環境条件に対する重み係数 p_e と, その環境条件の原寄与 $L^{-1} \{ \bar{e}(s) / (1+r) \}$ の積であるということができる.

したがって, 環境条件として出現可能性の大きい関数形に対して, その原寄与を求めておくのが実用的といえる. ここでは, 前報¹⁾の測定例をもとに考えて, 定数関数, 指数関数および階段関数環境条件の原寄与を求めた.

5.2.1 床土表面温度に対する定数関数環境条件の原寄与

環境条件 $e(t)$ の大きさが一定で, その値が k である

とすれば, 床土表面温度への原寄与は次式のとおりである.

$$\begin{aligned} L^{-1} \{ \bar{e}(s) / (1+r) \} &= L^{-1} \{ k / s \cdot (1+r) \} \\ &= k \cdot \varphi_{\text{ST}}(t / T_{\text{so}}) \quad (18) \end{aligned}$$

関数 $\varphi_{\text{ST}}(t / T_{\text{so}})$ は次式で定義されることの単位ステップ関数環境条件の原寄与である.

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ST}}(\tau) &\equiv L^{-1} \{ 1 / (1+r) \cdot s \} = 1 - e^{\tau} \cdot \text{erfc}(\sqrt{\tau}) \\ &\quad (19) \end{aligned}$$

5.2.2 床土表面温度に対する指数関数環境条件の原寄与

環境条件 $e(t)$ が次式 (20) の指数関数で表される場合, 床土表面温度への原寄与は式 (21) である.

$$e(t) = 1 - \exp(-t / T_e) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} L^{-1} \{ \bar{e}(s) / (1+r) \} &= L^{-1} \{ 1 / (1+r) \cdot (1 + T_e \cdot s) \cdot s \} \\ &= \varphi_{\text{EXP}}(t, T_e, T_{\text{so}}) \\ &= \{ T_{\text{so}} \cdot \varphi_{\text{ST}}(\tau) + T_e \cdot (1 - e^{-t/T_e}) \\ &\quad - 2\sqrt{T_e \cdot T_{\text{so}} / \pi} \cdot F(\sqrt{t/T_e}) \} / \\ &\quad (T_e + T_{\text{so}}) \quad (21) \end{aligned}$$

ここで, T_e は環境条件の時定数, また関数 F は Dawson の積分.

5.2.3 床土表面温度に対する階段関数環境条件の原寄与

環境条件の時間的推移を階段関数で近似することはよく行われる. 環境温度が次式 (22) で表される場合, 床土表面温度への原寄与は式 (18) の重ね合わせとして, 式 (23) になる.

$$e(t) = k(i), \quad (i-1) \cdot T < t < i \cdot T, \quad 1 \leq i \leq n \quad (22)$$

$$L^{-1} \{ \bar{e}(s) / (1+r) \} = \sum_{i=1}^n k(i) \cdot v_{\text{ST}}(n-i) \quad (23)$$

$v_{\text{ST}}(j)$ は次式で表される重み関数である.

$$\begin{aligned} v_{\text{ST}}(j) &\equiv \varphi_{\text{ST}}[(j+1) \cdot T / T_{\text{so}}] - \varphi_{\text{ST}}(j \cdot T / T_{\text{so}}), \\ &\quad j \geq 0 \quad (24) \end{aligned}$$

6. 地表面熱流束密度の解

式 (11) の $\bar{\theta}_{\text{so}}(s)$ を式 (7) のラプラス変換に代入すれば, $\bar{H}_{\text{so}}(s)$ の解が次式 (25) のように求まる. これより, 地表面熱流束密度の解が式 (26) に得られる.

$$\begin{aligned} \bar{H}_{\text{so}}(s) &= -\rho c \cdot \int_0^{\infty} \{ f(\xi) \cdot e^{-q\xi} / (1+r) \} d\xi \\ &\quad + g_{\text{sk}} \cdot \bar{\theta}_{\text{sk}}(s) \cdot r / (1+r) \\ &\quad + g_{\text{ou}} \cdot \bar{\theta}_{\text{ou}}(s) \cdot r / (1+r) \\ &\quad + g_{\text{N}} \cdot \bar{\theta}_{\text{N}}(s) \cdot r / (1+r) \\ &\quad + g_{\text{up}} \cdot \bar{H}_{\text{up}}(s) \cdot r / (1+r) \\ &\quad + g_{\text{in}} \cdot \bar{H}_{\text{in}}(s) \cdot r / (1+r) \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{so}}(t) &= -g_{\text{so}} \cdot \theta_{\text{sof}}(t) + g_{\text{sk}} \cdot \{ \theta_{\text{sk}}(t) - \theta_{\text{sof}}(t) \} \\ &\quad + g_{\text{ou}} \cdot \{ \theta_{\text{ou}}(t) - \theta_{\text{sof}}(t) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +g_N \cdot \{\theta_N(t) - \theta_{soN}(t)\} \\
& +g_{up} \cdot \{H_{up}(t) - H_{soup}(t)\} \\
& +g_{in} \cdot \{H_{in}(t) - H_{soin}(t)\}
\end{aligned} \quad (26)$$

7. 床土温度のラプラス変換解

式(2)をラプラス変換すれば次式(27)が得られる。これに、式(25)の $\bar{H}_{so}(s)$ を代入すれば、床土温度のラプラス変換解は式(28)のごとく求まる。

$$\begin{aligned}
\bar{\theta}_{sl}(s, x) &= \int_0^\infty [f(\xi) \cdot \{e^{-q \cdot |x-\xi|} + e^{-q \cdot (x+\xi)}\} / 2\kappa q] d\xi \\
& + \bar{H}_{so}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / Kq \\
\bar{\theta}_{sl}(s, x) &= \bar{\theta}_{slr}(s, x) + p_{sk} \cdot \bar{\theta}_{slsk}(s, x) \\
& + p_{ou} \cdot \bar{\theta}_{slou}(s, x) + p_N \cdot \bar{\theta}_{slN}(s, x) \\
& + p_{up} \cdot \bar{H}_{slup}(s, x) + p_{in} \cdot \bar{H}_{slin}(s, x)
\end{aligned} \quad (27)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
\bar{\theta}_{slr}(s, x) &= \int_0^\infty [f(\xi) \cdot \{e^{-q \cdot |x-\xi|} + (r-1) \cdot e^{-q \cdot (x+\xi)} / \\
& (r+1)\} / 2\kappa q] d\xi, \\
\bar{\theta}_{slsk}(s, x) &= \bar{\theta}_{sk}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r), \\
\bar{\theta}_{slou}(s, x) &= \bar{\theta}_{ou}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r), \\
\bar{\theta}_{slN}(s, x) &= \bar{\theta}_N(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r), \\
\bar{H}_{slup}(s, x) &= \bar{H}_{up}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r), \\
\bar{H}_{slin}(s, x) &= \bar{H}_{in}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r).
\end{aligned}$$

8. 床土温度の解

前節の式(28)をラプラス逆変換すれば、床土温度の解が次のように求まる。

$$\begin{aligned}
\theta_{sl}(t, x) &= \theta_{slr}(t, x) + p_{sk} \cdot \theta_{slsk}(t, x) + p_{ou} \cdot \theta_{slou}(t, x) \\
& + p_N \cdot \theta_{slN}(t, x) + p_{up} \cdot H_{slup}(t, x) \\
& + p_{in} \cdot H_{slin}(t, x)
\end{aligned} \quad (29)$$

次に、 $\theta_{sl}(t, x)$ の成分の関数形を具体的に求める。

8.1 床土温度形成における初期地温分布の寄与

初期地温分布 $f(x)$ が式(14)で表されるならば、その地温への寄与は次のようになる。

$$\theta_{slr}(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} f(x_{si}) \cdot w_i(t, x) \quad (30)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
w_i(t, x) &\equiv \phi(t, x, x_i) - \phi(t, x, x_{i-1}) \\
&\equiv \phi'(t, x, x_{si}) \cdot l_i, \\
\phi(t, x, x_i) &\equiv \frac{1}{2} \cdot \left[\operatorname{erf} \frac{x_i - x}{2\sqrt{\kappa t}} + \operatorname{erfc} \frac{x_i + x}{2\sqrt{\kappa t}} \right] \\
& - \exp \left(\frac{x_i + x}{l} + \frac{t}{T_{so}} \right) \\
& \times \operatorname{erfc} \left(\frac{x_i + x}{2\sqrt{\kappa t}} + \sqrt{\frac{t}{T_{so}}} \right), \\
\phi'(t, x, x_{si}) &\equiv [\partial \phi(t, x, x_i) / \partial x_i]_{x_i = x_{si}} \\
& = \frac{1}{2\sqrt{\pi \kappa t}} \cdot \left[\exp \left\{ -\frac{(x_{si} - x)^2}{4\kappa t} \right\} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \exp \left\{ -\frac{(x_{si} + x)^2}{4\kappa t} \right\} \Big] \\
& - \frac{1}{l} \cdot \exp \left(\frac{x_{si} + x}{l} + \frac{t}{T_{so}} \right) \\
& \times \operatorname{erfc} \left(\frac{x_{si} + x}{2\sqrt{\kappa t}} + \sqrt{\frac{t}{T_{so}}} \right).
\end{aligned}$$

8.2 床土温度形成における各種環境条件の寄与

床土温度のラプラス変換 $\bar{\theta}_{sl}(s, x)$ の解(28)を見れば明らかのごとく、初期地温分布以外の各種環境条件の寄与はいずれも同じ形の数式で表される。すなわち、環境条件を $e(t)$ で表すとき、床土温度形成におけるこの環境条件の寄与 $\theta_{sle}(t, x)$ はいずれも次の形をしている。

$$\theta_{sle}(t, x) = p_e \cdot L^{-1} \{ \bar{e}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r) \} \quad (31)$$

環境条件の重み係数 p_e は、床土表面温度における場合と同じであるが、環境条件の原寄与 $L^{-1} \{ \bar{e}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r) \}$ は異なる。ここでは、床土温度に対する数種環境条件の原寄与を求める。

8.2.1 床土温度に対する定数関数環境条件の原寄与

環境条件(温度)が一定で、その値が k である場合、その床土温度への原寄与は次式(32)で表される。関数 $\varphi_{ST}(t, x)$ は単位ステップ関数環境条件の原寄与であり、式(33)で定義される。

$$L^{-1} \{ k \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r) \cdot s \} = k \cdot \varphi_{ST}(t, x) \quad (32)$$

$$\varphi_{ST}(t, x) \equiv L^{-1} \{ e^{-q \cdot x} / (1+r) \cdot s \}$$

$$\begin{aligned}
& = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \\
& - \exp \left(\frac{x}{l} + \frac{t}{T_{so}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} + \sqrt{\frac{t}{T_{so}}} \right)
\end{aligned} \quad (33)$$

8.2.2 床土温度に対する指数関数環境条件の原寄与

環境条件 $e(t)$ が式(20)の指数関数で表される場合、その床土温度への原寄与は次のようになる。

$$\begin{aligned}
\varphi_{EXP}(t, x) &\equiv L^{-1} \{ e^{-q \cdot x} / (1+r) \cdot (1 + T_e \cdot s) \} \\
& = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} - \frac{T_{so}}{T_e + T_{so}} \cdot \exp \left(\frac{x}{l} + \frac{t}{T_{so}} \right) \\
& \times \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} + \sqrt{\frac{t}{T_{so}}} \right) \\
& - \frac{T_e}{T_e + T_{so}} \cdot \exp \left(-\frac{t}{T_e} \right) \\
& \times \operatorname{Re} \left\{ \left(1 + i \sqrt{\frac{T_{so}}{T_e}} \right) \cdot \exp \left(i \frac{x}{\sqrt{\kappa T_e}} \right) \right. \\
& \times \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} + i \sqrt{\frac{t}{T_e}} \right) \Big\}
\end{aligned} \quad (34)$$

ここで、 $i \equiv \sqrt{-1}$ は虚数単位、 $\operatorname{Re}\{z\}$ は複素数 z の実部。

8.2.3 床土温度に対する階段関数環境条件の原寄与

環境条件 $e(t)$ が式 (22) の階段関数で表される場合, その床土温度への原寄与は次のように求まる。 $v_{ST}(j, x)$ は式 (36) で定義される重み関数である。

$$L^{-1}\{\bar{e}(s) \cdot e^{-q \cdot x} / (1+r)\} = \sum_{i=1}^n k(i) \cdot v_{ST}(n-i, x) \quad (35)$$

$$v_{ST}(j, x) \equiv \varphi_{ST}[(j+1) \cdot T/T_{so}, x] - \varphi_{ST}(j \cdot T/T_{so}, x), \quad j \geq 0 \quad (36)$$

9. ハウス地上部各部温度の解

前報¹⁾で示されたように, ハウス地上部の各部温度は次式で表される。これに床土表面温度の解 (13) を代入することにより, 地上部各部温度は式 (38) のように求まる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{u} \quad (37)$$

ここで, $\mathbf{x} = (\theta_r, \theta_a, \theta_M, \theta_f, \theta_c, \theta_{in})^T$, $\mathbf{u} = (\theta_{sk}, \theta_{ou}, \theta_N, \theta_{so}, H_{up}, H_{in})^T$, $\mathbf{P}$ は 6 行 6 列の行列, T はベクトルの転置。

$$\begin{aligned} x_i = x_i(t) = & p_{i4} \cdot \theta_{sof}(t) \\ & + \{p_{i1} \cdot \theta_{sk}(t) + p_{i4} \cdot p_{sk} \cdot \theta_{sofk}(t)\} \\ & + \{p_{i2} \cdot \theta_{ou}(t) + p_{i4} \cdot p_{ou} \cdot \theta_{soou}(t)\} \\ & + \{p_{i3} \cdot \theta_N(t) + p_{i4} \cdot p_N \cdot \theta_{soN}(t)\} \\ & + \{p_{i5} \cdot H_{up}(t) + p_{i4} \cdot p_{up} \cdot H_{soup}(t)\} \\ & + \{p_{i6} \cdot H_{in}(t) + p_{i4} \cdot p_{in} \cdot H_{soin}(t)\} \end{aligned} \quad (38)$$

ここで, i は 1 以上かつ 6 以下の整数。 $x_1, \dots, x_6$ はそれぞれ, $\theta_r, \theta_a, \theta_M, \theta_f, \theta_c, \theta_{in}$ を表す。

考 察

冬期夜間における井水散水 2 重被覆ハウスの地上部伝熱系に対するモデル¹⁾とハウス床土伝熱系の支配方程式とを結びつけることにより, ハウス床土表面温度の解が求まった。これをもとに, 床土表面熱流束密度, 床土内部温度およびハウス地上部各部温度の解が得られた。

これらの解を計算するのに必要な境界環境条件のデータは, 等価天空温度, 外気温および散水温度の時間値, それに初期条件として, 散水開始時 (夕刻) における床土の各深さにおける地温が必要である。これを前報¹⁾の解とくらべると, 地表温の時間値をデータとして知る必要がなくなり, そのかわりに, 初期地温分布を知る必要が生じた。

しかし, 地表温が他の境界環境温度の従属量であるのに対して, 初期地温分布にはそのような従属性がない。

厳密には, ハウス空気からの放熱の項があるが, 前報¹⁾の試算のごとく, その寄与は 0.1°C の程度と見積られ, ここでは無視する。

以下, 得られた解の性質を検討する。

まず, 地表温の解 (13) を検討する。初期地温分布の寄与は式 (16) に求められた。初期地温分布そのものは過去, 特に昼間の地表面熱流束の蓄積結果と考えることができる。しかし, 過去の蓄熱過程は本報の課題でないのでここでの考察の対象としない。式 (16) を見れば, 初期地温分布の寄与は, 初期地温分布にその時間 t に応

Fig. 1 The native initial response of the soil surface temperature and the total sum of weighting factors for the initial soil temperature to the soil surface temperature. The dimensionless time, τ , is defined by $\tau = t/T_{so}$ in which T_{so} is the comprehensive time constant for soil surface temperature.

じた深さ別の重み係数 $w_i(t)$ を乗じた積の和で表されることがわかる。ハウスの伝熱特性はこの重み係数に反映されている。それは、土壌の温度伝導率 κ 、地表温総括時定数 T_{so} および相当土圧 l の3個のパラメータに集約される。しかし、これらには $l = \sqrt{\kappa \cdot T_{so}}$ なる関係があるので、独立パラメータの個数は2個である。そして、これらのもとになっているパラメータは土壌の熱伝導率 K 、土壌の体積比熱 ρc および地表面における総熱伝達係数 g_{so} の3個である。したがって、連比 $K : \rho c : g_{so}$ の値が不変であれば、これら3個のパラメータの各値が異なっても初期地温分布の寄与は不変であるといえる。さて、初期地温分布に対する重み係数の和 $\sum_{i=1}^{\infty} w_i(t)$ は $\phi(t, \infty) - \phi(t, 0)$ であるが、 $\phi(t, \infty) = 0$ であるのでこの和は $-\phi(t, 0) = e^{\tau} \cdot \text{erfc}(\sqrt{\tau})$ ($\tau \equiv t/T_{so}$) に等しい。すなわち、初期地温分布に対する重み係数の和に関係するパラメータは T_{so} ただ1個であり、重み係数の和は無次元時間 τ の関数である。この関数 $e^{\tau} \cdot \text{erfc}(\sqrt{\tau})$ のグラフを Fig. 1 に示す。相当土圧 l のはたらきは式 (16) の $\phi'(t, x)$ に如実に現われている。これに $\sqrt{\kappa} = l/\sqrt{T_{so}}$ を代入すれば、単位土厚当たりの重み係数 $\phi'(t, x)$ は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \phi'(t, x) = & \frac{1}{l} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot \sqrt{\frac{T_{so}}{t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 T_{so}}{4l^2 t}\right) \right. \\ & - \exp\left(\frac{x}{l} + \frac{t}{T_{so}}\right) \\ & \times \text{erfc}\left(\frac{x}{2l} \cdot \sqrt{\frac{T_{so}}{t}} + \sqrt{\frac{t}{T_{so}}}\right) \Big\} \\ = & \frac{1}{l} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\tau}\right) \right. \\ & - \exp(\xi + \tau) \cdot \text{erfc}\left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau}\right) \Big\} \end{aligned} \quad (39)$$

したがって、 $\tau = t/T_{so}$ および $\xi = x/l$ の値が同じになるような t, T_{so}, x および l の組合せに対しては $\phi'(t, x)$ の値は l に反比例することがわかる。たとえば、 l の値が2倍になった場合、地表面 ($x=0$) における $\phi'(t, x)$ の値は、 τ が同じならば、1/2 になる。しかし、上述のように $\phi'(t, x)$ を $0 < x < \infty$ の範囲で積分した値は相等しいのであるから l の値の大きいほうが深部において $\phi'(t, x)$ の値が大きい。これは、同一の τ においては、 l の値の大きいほうが深部土壌の初期地温を相対的に重視することを意味している。 τ をパラメータとして $l \cdot \phi'(t, x)$ のグラフを Fig. 2 に示す。 τ が大きくなるにつれて深部土壌の初期地温に対する重み係数が大きくなることがこの図から見てとれる。いずれの曲線においても実質的に有効なのは地表面からある深さまでの初期地

Fig. 2 Normalized weighting factor densities of the initial soil temperature for making soil surface temperature. The numbers on the curves are values of dimensionless time, τ , as defined by $\tau \equiv t/T_{so}$.

温であるといえる。そのような深さを有効深度と呼ぶことにし、ここでそれを検討する。地表面からの重み係数の和が、たとえば、98%, 99% あるいは 99.9% などになる深さを考える。

これは次式で示される ε を 0.02, 0.01 あるいは 0.001 などにする x を求めることに相当する。

$$\varepsilon \equiv \frac{\phi(t, x)}{\phi(t, 0)} = \frac{\exp(a\sqrt{\tau}) \cdot \text{erfc}(a/2 + \sqrt{\tau})}{\text{erfc}(\sqrt{\tau})} \quad (40)$$

ここで、

$$a \equiv \xi/\sqrt{\tau} = x/\sqrt{\kappa t}$$

τ をパラメータとして a に対する ε のグラフを Fig. 3 に示す。 a の値が大きい範囲では ε は次式で近似されるから、 a の増加とともに ε が急速に 0 に近づくことがわかる。

$$\varepsilon \approx 1/\{\sqrt{\pi} \cdot (a/2 + \sqrt{\tau}) \cdot \exp(a^2/4) \cdot \exp \tau \cdot \text{erfc} \sqrt{\tau}\} \quad (41)$$

Fig. 3 からわかるように、 ε の値が小さい場合 ($0.02 \geq \varepsilon \geq 0.0001$) は、 τ の値の広範囲な変化 ($0.01 \leq \tau \leq 100$) に対して、 a の変化は約 0.5 と非常に小さい。すなわち、有効深度 $x = x_0$ は近似的に次式で表される。

Fig. 3 Estimated relative errors, ϵ , that occur in soil surface temperatures when the weighting function for the initial soil temperature is truncated at some soil depth, x , when the elapsed time is t . The numbers on the curves are values of t/T_{so} .

Fig. 4 Required soil depth, x_c , needed to obtain the soil surface temperature with relative error, ϵ , when the elapsed time is t . Values are normalized by the equivalent soil thickness, l , and the comprehensive time constant for the soil surface temperature, T_{so} . The numbers on the curves are values of ϵ .

$$x_c = a \cdot \sqrt{\tau} \cdot l = a \cdot \sqrt{\kappa \cdot t} \quad (\tau \approx 1) \quad (42)$$

ここで、 a は次の定数。 $\epsilon=0.02, 0.01$ および 0.001 に対し、それぞれ、 $a=3.6, 3.9$ および 4.9 。 ϵ を定めて、式 (40) から逆に ξ と τ の関係を求めたのが Fig. 4 である。対数グラフにおけるこの図の直線は次式 (43) で表される。係数および指数は ϵ による。これは上式 (42) よりも若干複雑な形ではあるが、精度は上式よりも優れる ($\tau \geq 0.05$ における誤差は $\pm 2\%$ 以内)。

$$x_c = \alpha \cdot \tau^\beta \cdot l \quad (43)$$

ここで、 α, β は次の定数。 $\epsilon=0.02, 0.01$ および 0.001 のとき、 α, β はそれぞれ、 $(\alpha, \beta)=(3.53, 0.521), (3.87, 0.518)$ および $(4.86, 0.513)$ 。

次に、初期地温分布以外の境界環境温度の地表温形成における寄与を考える。式 (17) に示されるごとく、地表温形成における境界環境温度（天空温、外気温および散水温）の寄与は、その境界環境温度の原寄与に重み係数を乗じた積の形で表された。原寄与に関するハウス伝熱パラメータは T_{so} だけである。

夜間における境界環境温度の時間経過パターンにはさまざまな形がありうる。とりわけ、境界環境温度の値が一晩中一定でその値が 1 である場合の原寄与 $\varphi_{st}(\tau)$ は興味ある。というのは、前述した初期地温分布の重み係数の和 $e^{\tau} \cdot \text{erfc}(\sqrt{\tau})$ は $1 - \varphi_{st}(\tau)$ に等しいからである。 $\varphi_{st}(\tau)$ のグラフは Fig. 1 に示すごとく τ に関する増加関数であり、 $1 - \varphi_{st}(\tau)$ は減小関数である。このことは、時間の経過とともに地表温形成における初期地温分布の寄与が相対的に小さくなり、逆に境界環境温度の寄与が大きくなることを示している。しかも、時間に関する無次元数 τ は $\tau = t/T_{so}$ で定義されているので、時間の経

過に関するハウスのパラメータは T_{so} 。ただ 1 個である。すなわち、 T_{so} の大きいハウスほど初期地温分布の寄与が長続きし、境界環境温度の影響をなかなか受けないといえる。それゆえ T_{so} はハウスの夜間保温性の良さを表すパラメータと考えられる。 T_{so} の大きいハウスほど夜間保温性が良いといえる。

次に、得られた結果が温度目盛の原点の選び方に制約されるか否かを検討する。全体を通じて統一した温度目盛を用いなければならないことは論をまたない。問題は、その温度目盛として、たとえば、セ氏温度はだめで絶対温度でなければならない、というようなことがあるのかどうかである。そこで、いま温度目盛の原点が変更され、温度を表す数値がすべて、定数 α だけ大きくなったとする (α は任意の実数)。このことが結果にどう影響するか検討する。問題は地表温の式 (13) に限定してよい。

まず、初期地温分布の寄与 $\theta_{so}(t)$ の増分は $\alpha \cdot e^{\tau} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tau})$ に等しい。境界環境温度に関する原寄与の増分はいずれも、 $\alpha \cdot \varphi_{ST}(\tau)$ に等しい。したがって、境界環境温度の寄与の増分の合計は、 $p_{sk} \cdot \alpha \cdot \varphi_{ST}(\tau) + p_{ou} \cdot \alpha \cdot \varphi_{ST}(\tau) + p_N \cdot \alpha \cdot \varphi_{ST}(\tau)$ になるが、式 (12) により、これは $\alpha \cdot \varphi_{ST}(\tau)$ に等しい。また、ハウス空気からの放熱の寄与は、温度の時間的変化に起因する量であるので、温度目盛の原点には依存せず、無関係である。それゆえ、式 (13) の右辺の増分は、 $\alpha \cdot e^{\tau} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tau}) + \alpha \cdot \varphi_{ST}(\tau)$ となるが、上述のように $e^{\tau} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tau}) + \varphi_{ST}(\tau) = 1$ であるから、これは α に等しい。式 (13) の左辺の増分も α であるから、温度目盛原点の変更による両辺の増分は相等しい。したがって、式 (13) は温度目盛の原点の選び方には何ら制約されることなく成り立つといえる。

次に、地表面熱流束密度の解 (26) を検討する。この解は、その時刻における環境条件値の直接効果、その時刻までその環境条件が継続的に作用した蓄積効果および初期地温分布の影響の和になっている。

解のこのような特徴はハウス地上部各部温度および床土内部の温度分布についても同様にあてはまる。

付録 記号の一覧表 (文中に説明のあるものを除く)

c	土壌の比熱
h_{rai}	栽培室の放射熱伝達係数 (床面積基準)
h_{so}	地表面の対流熱伝達係数 (床面積基準)
H_{i1}	地表面からの対流熱流束密度 (床面積基準)
H_{in}	栽培室空気への熱流束密度 (床面積基準)
H_{rai}	地表面への放射熱流束密度 (床面積基準)

H_{up}	散水室空気への熱流束密度 (床面積基準)
k	一定温度
$k(i)$	整数 i に対応した一定温度
K	土壌の熱伝導率
l	$=\sqrt{\kappa \cdot T_{so}} = K/g_{so}$ 相当厚さ
q	$=\sqrt{s/\kappa}$
r	$=\sqrt{T_{so} \cdot s}$
s	ラプラス変換パラメータ
t	時間、とくに散水開始後の経過時間
T	時間間隔
T_{so}	$=\rho c K/g_{so}^2$ 地表温総括時定数
v	$=g_{so}/\rho c$ 相当速さ
x	地中の深さ
θ_a	散水室気温
θ_c	内フィルム温度
θ_f	フィルムを流下するときの散水の平均温度
θ_{in}	栽培室気温
θ_M	フィルムに付着したときの散水の温度
θ_N	散水口での散水温
θ_{ou}	外気温
θ_r	外フィルム温度
θ_{sk}	等価天空温度
κ	$=K/\rho c$ 温度伝導率
ρ	土壌の密度
$\operatorname{erfc}(x)$	$=1-\operatorname{erf}(x)=(2/\sqrt{\pi}) \cdot \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx$ (補誤差関数)
$F(x)$	$=e^{-x^2} \int_0^x e^{x^2} dx$ (Dowson の積分)
$\bar{\theta}(s)$	$=\int_0^{\infty} \theta(t) \cdot e^{-st} dt$ $\theta(t)$ のラプラス変換

文 献

- 1) 原 道宏・小倉祐幸. 1982. 井水散水 2 重被覆ハウスにおける温度環境の形成機構 (1) 冬期夜間における地上部伝熱機構のシステム解析. 生物環境調節 **20**: 25-34.
- 2) TAKAKURA, T. 1967. Predicting air temperature in the glasshouse. (I). J. Meteorol. Soc. Jpn. **45**: 40-52.
- 3) TAKAKURA, T. 1968. Predicting air temperature in the glasshouse. (II). J. Meteorol. Soc. Jpn. **46**: 36-44.
- 4) 北村一男. 1967. ビニールハウスの地温と気温について (夜間の場合). 農業気象 **23**: 25-30.
- 5) 三木 肇・小高矩正. 1969. トンネル被覆栽培における夜間温度の理論的考察. 生物環境調節 **6**: 87-93.
- 6) TAKAKURA, T., K. A. JORDAN, and L. L. Boyd. 1971. Dynamic simulation of plant growth and

- environment in greenhouse. Trans. ASAE **14**: 964-971.
- 7) CARLSLAW, H. S., and J. C. JAEGER. 1959. Ch. II. Linear flow of heat: The infinite and semi-infinite solid., Ch. XII. The Laplace transformation: problems in linear flow., and appendix V. Table of Laplace transforms. In "Conduction of Heat in Solids," 2nd ed. 50-91, 297-326, and 494-496, Oxford at the Clarendon Press, London.
 - 8) CAMPBELL, G. A., and R. M. FOSTER. 1948. Item No. 812. In "Fourier Integrals for Practical Applications" 93, D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, New Jersey.

Summary

An analytical solution for bed-soil temperature was obtained from a theoretical analysis of the heat transfer system in a double-roofed greenhouse sprayed with well water between the roofing layers in which heat transfer characteristics were considered to be constant at night. Therefore, the bed-soil temperature in the double-roofed greenhouse in which the evening bed-soil temperature distribution is known can be obtained from the temperatures of the immediate surroundings, the sky and the spray of water. The heat flux density in the bed soil then can be obtained from the solution. Temperatures for the aboveground part of the greenhouse at various points can be obtained by substituting the solution for the bedsoil temperature for the solution obtained in a previous paper.

The solution for the bed-soil temperature is represented by the sum of the temperatures contributed by the initial bed-soil temperature distribution, the temperatures of the immediate surroundings, the sky and the spray of water. Temperatures contributed by each environmental factor are expressed by the product of their native contribution and weighting factors. The weighting factor for each environmental factor was determined entirely by the heat transfer mechanism for the aboveground part of the greenhouse. Only one greenhouse heat transfer parameter existed for native contribution, that was a comprehensive time constant for soil surface temperature, T_{so} , defined by $\rho c K / g_{so}^2$, in which ρc is the specific heat of the bed soil in volume, K is the heat conductivity of the bed soil and g_{so} is the overall heat transfer coefficient for the bed-soil surface in Eq. (7).

The temperature contributed by the initial bed-soil temperature is expressed by the total sum of the products of the initial bed-soil temperature distribution and weighting factors that were functions of depth and elapsed time. The greenhouse heat transfer parameters in these weighting factors were T_{so} and the equivalent soil thickness, l , that was defined by K/g_{so} .

T_{so} determines the time scale of the bed-soil temperature change. The larger the T_{so} , the slower the change in speed of the bed-soil surface temperature. Thus, the better the warmth-retaining property of the greenhouse. With a large l , the temperature contributed by the deep soil was relatively large for greenhouses with the same T_{so} values.

(Received September 24, 1982)