

# 地中蓄熱温室の一次元シミュレーション法と蓄熱特性の検討

On the one-dimensional simulation method and the thermal energy storage characteristics of a greenhouse utilizing the underground soil thermal storage

斎藤 彬 夫\*  
Akio SAITO

宇高 義 郎\*\*  
Yoshio UTAKA

渋谷 幸 生\*\*\*  
Sachio SHIBUYA

## Abstract

One-dimensional simplified simulation model was proposed, concerning the transient thermal performance of a passive type greenhouse utilizing the underground piping and insulation for the daily thermal energy storage. The periodic temperature variation of the house air, obtained by the simple FDM calculation of the model, agreed well with the three-dimensional exact analytical results.

The thermal characteristics of the greenhouse, that is, the effects of the circulating air flow rate, the total pipe surface area and the number of pipes, were discussed generally using the normalized simulation model. The rate of the supplementary heating energy, required to keep the minimum greenhouse temperature through the winter night, was also shown.

**Key Words** Passive greenhouse, One-dimensional simplified simulation, Underground daily thermal energy storage, Underground insulation, Transient thermal performance

## 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>では、地中に埋設した管に温室内空気を循環させることにより土壌を蓄熱材として利用する、いわゆる省エネルギー温室について、日射と気温が日周変化する場合の埋設管を含む温室床土壌の非定常3次元温度分布および温室内空気の非定常温度変化を詳細に数値計算し、熱回収率を中心とする温室の熱的特性の検討を行った。その結果、管の埋設位置や管相互の配置が熱回収率に与える影響の小さいこと、また、温室側壁直下の地中を断熱することが熱回収率の向上に極めて有効であることなどが明らかとなった。そこで本報告では、図1に示す様に、温室側壁直下の土壌中に断熱材を垂直に入れ、(管の下部の土壌は、施工や排水のため断熱しない。)温室床下部の土壌側面を周囲から断熱し、そこに熱交換用の空気流通管を埋めた温室の性能や特性について検討してみることにする。同温室では、管内に温室内の空気を循環させておくことにより、昼間の余剰熱量が土壌中に蓄えられ、夜間その熱が回収される。

ところで、上記のような3次元の非定常熱伝導問題を数値計算した前報においては、膨大な計算時間を要し、温室の寸法効果、補助熱源など、温室を構成する主要パラメータ個々の影響について広い範囲の検討を系統的に行うことは困難であった。岡野らは<sup>2)</sup>、2次元熱伝導モデルにより断熱材のない場合の性能評価を行い成果をあげているが、パラメータの変化による影響には、いまだ不明な点が多い。

本報告では、前報の3次元非定常シミュレーションの結果を基に、できる限り簡便で、かつ、3次元計算と同等の精度を有する1次元非定常シミュレーションモデルを提案し、同シミュレーションモデルに基づく計算の結果を前報の結果と比較し、簡易モデルの有効性を確認する。次に、上記の結果をふまえて、温室を構

\* 東京工業大学工学部機械工学科 助教授  
Tokyo Institute of Technology Associate Professor

\*\* 同上 助手  
ibid Assistant

\*\*\* 株式会社 東芝  
Toshiba Co.

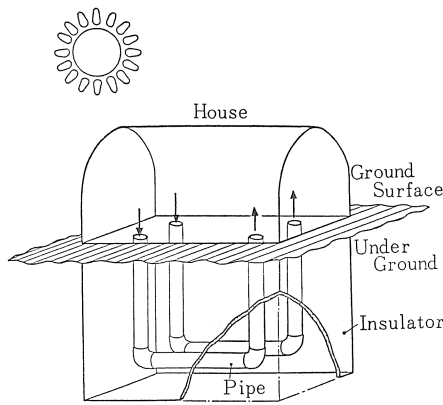


図1 地下断熱を施した省エネルギー型温室

成する各パラメータ，すなわち，温室寸法，埋設管内空気流量，埋設管総伝熱面積などの温室内空気温度の日周変化，地中に蓄えられた熱量の回収率等に与える影響を明らかにするとともに，定められた温室内最低温度を保持するために必要な補助熱源からの供給熱量について検討を行う。

記号

- $A$  : 面積,  $m^2$
- $a$  : 温度伝導率,  $m^2/s$
- $c$  : 比熱,  $J/(kgK)$
- $C_1, C_2, C_3$  : 熱容量に等価な電気容量 (図2参照),  $F$
- $D$  : 断熱材深さ (図3参照),  $m$
- $d$  : 埋設管深さ,  $m$
- $E$  : 1日の総熱量,  $J$
- $h$  : 熱伝達率または熱通過率,  $W/(m^2K)$
- $I$  : 温室内地表面に吸収される日射熱量,  $W$
- $i_1, i_2, i_3, i_4$  : 単位時間当りの熱流に等価な電流 (図2参照),  $A$
- $L_1, L_2$  : 温室の水平方向寸法の半分 (図3参照),  $m$
- $l$  : 地中温度が安定する深さ,  $m$
- $M$  : 管群への空気の体積流量,  $m^3/s$
- $N$  : 埋設管本数
- $Q$  : 単位時間当りの熱流,  $W$
- $R$  : 埋設管半径,  $m$
- $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  : 熱抵抗に等価な電気抵抗 (図2参照),  $\Omega$
- $T$  : 温度 (図2(b)では電圧,  $V$ ),  $K$
- $\bar{t}$  : 1日 ( $=8.64 \times 10^4$ ),  $s$
- $\Delta t$  : 時間の差分,  $s$
- $u$  : 管内平均空気速度,  $m/s$

- $V$  : 容積,  $m^3$
- $X$  : 位置の差分,  $m$
- $x, y, z$  : 座標軸 (図3参照),  $m$
- $\lambda$  : 熱伝導率,  $W/(mK)$
- $\nu$  : 空気の動粘度,  $m^2/s$
- $\rho$  : 密度,  $kg/m^3$

(添字)

- $a$  : 空気
- $c$  : 制御のための設定値
- $e$  : 土壌
- $f$  : 温室内の床面
- $h$  : 温室内
- $loss$  : 断熱材下端からの損失 (図2(a)参照)
- $max$  : 最大値
- $mean$  : 1日の平均値
- $min$  : 最小値
- $out$  : 外気
- $o$  : 土壌深層
- $p$  : 管内空気
- $ps$  : 管内表面
- $s$  : 補助熱源
- $si$  : 温室内地表面
- $so$  : 温室外地表面
- $st$  : 基準値
- $w$  : 温室の外表面

(無次元量)

- $D^* = D/L_2$
- $E_s^* = E_s / [c_a \rho_a V_h \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}]$
- $Nu = 2 h_{ps} R / \lambda_a$  (ヌセルト数)
- $Pr = \nu / a_a$  (プラントル数)
- $Q_{loss}^* = Q_{loss} / [4 \lambda_e L_2 \{(T_{si})_{mean} - (T_{so})_{mean}\}]$
- $Q_s^* = Q_s \bar{t} / [c_a \rho_a V_h \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}]$
- $Re = 2 u R / \nu$
- $T^* = \{T - (T_{out})_{min}\} / \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}$
- $T^{**} = \{T - (T_{so})_{mean}\} / \{(T_{si})_{mean} - (T_{so})_{mean}\}$
- $t^* = t / \bar{t}$
- $\Delta t^* = \Delta t / \bar{t}$
- $X^* = X / l$
- $x^* = x / L_2$
- $y^* = y / L_2$
- $z^* = z / L_2$
- $\eta = L_1 / L_2$

## 2. 簡易1次元シミュレーション

### 2.1 シミュレーションモデル

本論文で提案する1次元非定常シミュレーションモデルを図2(a)(b)に示す。図2(a)はモデルの熱収支の概念を、また(b)は土壌を厚さ $X$ (表面のみ $X/2$ )の板要素に分割離散化するときの等価電気回路をそれぞれ表わす。図2(a)(b)においては、電圧-温度、電流-熱流、電気抵抗-熱抵抗、電気容量-熱容量の相似関係が成立しており、図2(a)各部の非定常温度変化は、図2(b)の各節点の電圧変化に対応している<sup>3),4)</sup>。

本論文では、図2(b)の線形回路を差分式に変換して数値計算を行うが、本モデルを得る上での仮定や考え方の要点を以下にまとめて述べることにする。

(1) 温室内の空気温度 $T_h$ は均一で、周囲空気への熱損失、温室内地表面からの熱伝達、管群出入空気のエンタルピ差にもとづく経時変化をする。

(2) 管内の空気温度 $T_p$ は管全長にわたって単一の値で代表され、管上下の土壌への熱伝達、管出入口での空気のエンタルピ差にもとづく経時変化をする。

(3) 土壌内の沿直方向に断熱材を入れていることより、温室床下の土壌温度変化が深さ方向の非定常1次元熱伝導によるとする。土壌内を、深さ方向に垂直な厚さ $X$ の板状要素に分割すると、各要素のエネルギー釣合式は非定常1次元熱伝導方程式を長さ $X$ に差分した式となる。ただし、温室内地表面の要素(厚さ $X/2$ )については、昼間、日射が吸収されるほか、温

室内空気との熱伝達による熱交換を考える。また、管の埋設されている部分の管の周囲の土壌要素については、管を上下にはさむ2板の板状要素を考え、それらの板要素が管群のすき間にある土壌で熱的に連結されており、かつ、それらの要素のさらに上下にある板要素および管内空気と熱交換をしていると考える。したがって等価な回路に置き換えると、図2(b)の(4)(5)に見られる並列抵抗の回路となる。なお、同図の図説中の $r_4$ には、 $X$ と管直径が等しい場合の値を示した。

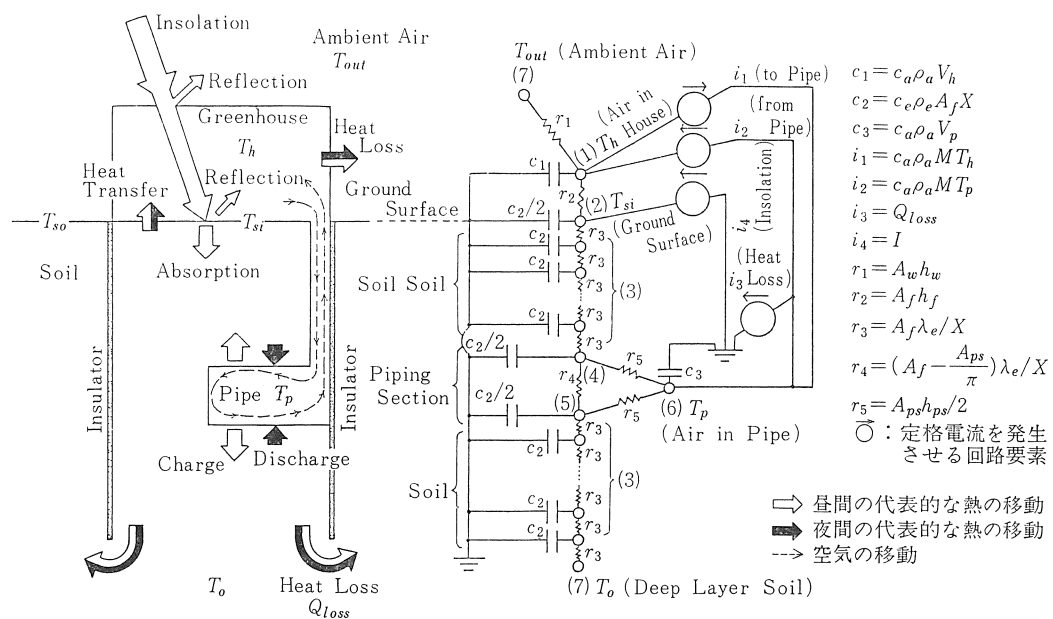
(4) 外気温 $T_{out}$ および全天日射量は、それらの日周変化をデータとして与える。

(5) 土壌深層部の温度 $T_0$ には、土中温度が安定する深さの温度を与える。

(6) 温室内地中から断熱材下方を通過する温室外への熱損失 $Q_{loss}$ は、ある程度の深さ(目安として、地中の温度がほとんど日周変化しなくなる深さ)まで断熱を施す場合、時間によらずほぼ一定となるはずである。したがって、この熱損失量をあらかじめ別の3次元の定常計算により求めておき、この結果を利用して室内にもどる空気のエンタルピから時々刻々その損失分を図2(b)の $i_3$ に示すように差し引くことにする。熱損失を求める具体的な方法については2.2に後述する。

以上の(1)~(6)により得られる回路が図2(b)である。特に管内面積 $A_{ps}$ が全管群に対する値である点に注意を要する。

次に、土中温度が安定する深さ $l$ 、気温変化周期 $\bar{t}$



(a) モデルの熱収支の概念図

(b) モデルの等価回路

図2 シミュレーションモデル

外気温の最大振巾  $\{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}$  を用いて、深さ方向の差分  $X$ 、時間  $t$ 、度温  $T$  をそれぞれ次式のように標準化する。

$$X^* = \frac{X}{l}, \quad t^* = \frac{t}{\bar{t}}, \quad T^* = \frac{T - (T_{out})_{min}}{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}}$$

図2(b)の各節点温度に対する標準化されたExplicit形の差分式は表1の諸式となる<sup>5)</sup>。本報告では表1の式(1)~(6)の差分式を計算機により数値計算する。なお表1にも付記したが、式(1)~(6)の差分式において、 $(T_h^*)^p$ 、 $(T_p^*)^p$ 、 $(T_e^*)^p_N$ は時刻  $t = p\Delta t$  の無次元温度を表わし、 $N$ は地表から  $(N-1)X$  の位置の値を表わす。また  $(T_e^*)^p_{np}$ 、 $(T_e^*)^p_{np+1}$  は管上下の土壌に対応する。

表1の差分式(1)~(6)において、 $\xi_1 \sim \xi_{12}$  は次の無次元パラメータであり、温室の熱的な特性はこれら互に独立な12個の無次元パラメータにより決定される。

$$\begin{aligned} \xi_1 &= M\bar{t}/V_h \\ \xi_2 &= KR^{-6/5} \\ \xi_3 &= K(A_{ps}/2V_h)^{6/5} \\ \xi_4 &= h_f A_f \bar{t} / (c_a \rho_a V_h) \\ \xi_5 &= h_w A_w \bar{t} / (c_a \rho_a V_h) \\ \xi_6 &= Q_{loss} \bar{t} / [c_a \rho_a V_h \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}] \\ \xi_7 &= 2l \bar{t} / [c_e \rho_e l \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}] \\ \xi_8 &= 2h_f \bar{t} / (c_e \rho_e l) \\ \xi_9 &= a_e \bar{t} / l^2 \\ \xi_{10} &= K^{-5/6} a_e \bar{t} / l \\ \xi_{11} &= 2K^{-5/6} V_h / A_f \\ \xi_{12} &= 2c_a \rho_a V_h / (c_e \rho_e A_f l) \end{aligned}$$

表1 非定常1次元シミュレーションモデルの無次元差分式

表中、 $\Delta t^*$  は時間の差分  $\Delta t$  を  $\bar{t}$  で無次元化した値である。 $(T^*)^p$  は、時間  $t = P\Delta t$  における無次元温度を表す。 $(T_e^*)^p_N$  は、地表から  $(N-1)X$  の位置の地中の温度を表し、特に、 $(T_e^*)^p_{np}$ 、 $(T_e^*)^p_{np+1}$  は管上下の要素の温度である。

| 対応する要素   | 図2(b)中の節点 | 差分式   |
|----------|-----------|---|
| 温室空気     | (1)       | $T_h^{*p+1} - T_h^{*p} = \xi_4 \{(T_e^*)^p_1 - T_h^{*p}\} \Delta t^* + \xi_5 (T_{out}^{*p} - T_h^{*p}) \Delta t^* + \xi_1 (T_p^{*p} - T_h^{*p}) \Delta t^* - \xi_6 \Delta t^*$ .....(1)   |
| 管内空気     | (6)       | $T_p^{*p+1} - T_p^{*p} = (\xi_2/\xi_3)^{5/6} \xi_1 (T_h^{*p} - T_p^{*p}) \Delta t^* + \xi_1^{4/5} \xi_2^{5/3} \xi_3^{-2/3} \{(T_e^*)^p_{np} + (T_e^*)^p_{np+1} - 2T_p^{*p}\} \Delta t^*$ .....(2)   |
| 温室内地表面   | (2)       | $(T_e^*)^p_1 - (T_e^*)^p_1 = \xi_7 \Delta t^* / X + \xi_8 (T_h^{*p} - (T_e^*)^p_1) \Delta t^* / X^* + 2\xi_9 \{(T_e^*)^p_2 - (T_e^*)^p_1\} \Delta t^* / X^*$ .....(3)   |
| 埋設管直上の土壌 | (4)       | $(T_e^*)^p_{np+1} - (T_e^*)^p_{np} = 2\xi_9 \{(T_e^*)^p_{np-1} - (T_e^*)^p_{np}\} \Delta t^* / X^* + \xi_2^{5/6} \xi_{10} (1 - \xi_3^{5/6} \xi_{11} / \pi) \{(T_e^*)^p_{np+1} - (T_e^*)^p_{np}\} \Delta t^* / X^* + \xi_1^{4/5} \xi_2^{5/6} \xi_3^{1/6} \xi_{12} (T_p^{*p} - (T_e^*)^p_{np}) \Delta t^* / X^*$ .....(4)       |
| 埋設管直下の土壌 | (5)       | $(T_e^*)^p_{np+1} - (T_e^*)^p_{np+1} = 2\xi_9 \{(T_e^*)^p_{np+2} - (T_e^*)^p_{np+1}\} \Delta t^* / X^* + \xi_2^{5/6} \xi_{10} (1 - \xi_3^{5/6} \xi_{11} / \pi) \{(T_e^*)^p_{np} - (T_e^*)^p_{np+1}\} \Delta t^* / X^* + \xi_1^{4/5} \xi_2^{5/6} \xi_3^{1/6} \xi_{12} (T_p^{*p} - (T_e^*)^p_{np+1}) \Delta t^* / X^*$ .....(5) |
| その他の土壌   | (3)       | $(T_e^*)^p_n - (T_e^*)^p_n = \xi_9 \{(T_e^*)^p_{n-1} + (T_e^*)^p_{n+1} - 2(T_e^*)^p_n\} \Delta t^* / X^*$ .....(6)  |

ここで、 $K = 2.00 \times 10^{-2} P_r^{0.4} (2L_1/\nu)^{0.8} a_e \bar{t}^{0.2}$  である。

なお、このような無次元パラメータの選定においては、特に重要な変数である埋設管の空気流量  $M$ 、管内総伝熱面積  $A_{ps}$  および管半径  $R$  を独立させるように工夫した。また埋設管内の熱伝達率  $h_{ps}$  は管内乱流に対する次式により定めた<sup>6)</sup>。

$$Nu = 0.023 P_r^{0.4} Re^{0.8} \dots \dots \dots (7)$$

2.2 失損熱量  $Q_{loss}$  の計算

本報告で提案する1次元シミュレーションでは、温室内あるいは埋設管から地中を通過し、断熱材下端を経て温室外へ逃げる損失熱量をあらかじめ計算により求めておくことが必要である。前述のように、温室周囲土壌に断熱を施す場合には、土壌中の温度のダンピング効果のため断熱材下端での損失熱量  $Q_{loss}$  は時間に無関係な(地上の日周温度変化に無関係な)ほぼ一定の値となるはずである。したがって熱伝導解の重ね合わせの原理を用いると<sup>7)</sup>この熱量は、温室内地表面と温室外地表面にそれぞれ1日の平均温度  $(T_{si})_{mean}$ 、 $(T_{so})_{mean}$  を境界条件として与えている場合の床面下土壌の3次元定常温度分布より近似的に求められる。

図3のように、温室の妻面方向、奥行方向、深さ方向をそれぞれ  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸として、対称性を考えて  $x$ 、 $y$ 、 $z \geq 0$  の8分の1無限固体の3次元定常温度分布を計算する。この解析に用いる無次元化した基礎式および境界条件を以下に示す。

基礎式は定常3次元熱伝導方程式

$$\frac{\partial^2 T_e^{**}}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T_e^{**}}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 T_e^{**}}{\partial z^{*2}} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

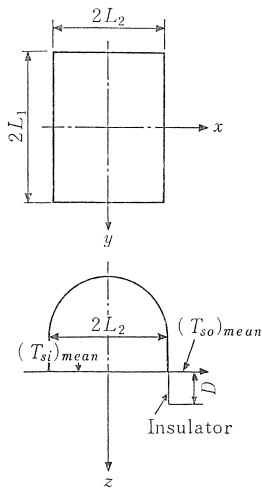


図3 損失熱量の計算モデル

となる。

また、境界条件は次のように表される。

温室内地表面：

$$0 \leq x^* \leq 1, 0 \leq y^* \leq \eta, z^* = 0; T_{e^{**}} = 1$$

温室外地表面：

$$1 < x^* \text{ 又は } \eta < y^*, z^* = 0; T_{e^{**}} = 0$$

地中無限遠：

$$z^* = \infty; T_{e^{**}} = 0$$

断熱材部分：

$$x^* = 1, 0 \leq y^* \leq \eta, 0 \leq z^* \leq D^*; \frac{\partial T_{e^{**}}}{\partial x^*} = 0$$

$$0 \leq x^* \leq 1, y^* = \eta, 0 \leq z^* \leq D^*; \frac{\partial T_{e^{**}}}{\partial y^*} = 0$$

対称面：

$$x^* = 0; \frac{\partial T_{e^{**}}}{\partial x^*} = 0$$

$$y^* = 0; \frac{\partial T_{e^{**}}}{\partial y^*} = 0$$

ただし、無次元量は次のように定義される。

$$x^* = x/L_2, y^* = y/L_2, z^* = z/L_2$$

$$T^{**} = \{T - (T_{so})_{mean}\} / \{(T_{si})_{mean} - (T_{so})_{mean}\}$$

また、 $\eta$  は床面の縦横比、 $D^*$  は無次元断熱材深さを表している。

$$\eta = L_1/L_2, D^* = D/L_2$$

温度場を  $x, y, z$  方向に等間隔な直方体要素に分割し、差分式により<sup>5)</sup> 上記の温室下の土壌内定常温度分布と  $Q_{loss}$  を計算した。温室床面の縦横比  $\eta$  をパラメータとして、無次元断熱深さ  $D^*$  と、単位時間当りの床面全体からの無次元損失熱量  $Q^*_{loss}$  との関係を求め、図4に示した。ただし、

$$Q^*_{loss} = Q_{loss} / [4 \lambda_e L_2 \{(T_{si})_{mean} - (T_{so})_{mean}\}] \dots\dots\dots (9)$$

である。

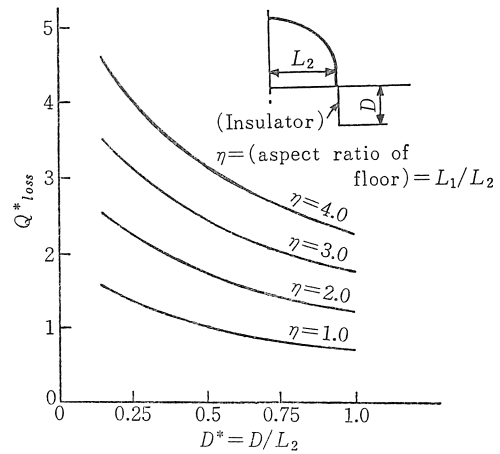


図4 地中からの無次元損失熱量

### 3. シミュレーションの手順および計算の条件

前章で導いた差分式を用いて、図5のフローチャートに示す手順で以下のように数値計算を行った。

(1) 温室の諸寸法  $L_1, L_2, A_w, V_h, R, u, N$ 、管内空気流速  $u$ 、管の本数  $N$ 、および、物性値等を与える。日射量、外気温  $T_{out}$  を時刻  $t$  の関数として与える。図4より無次元損失熱量  $Q^*_{loss}$  を求める。また、温室外地表面平均温度  $(T_{so})_{mean}$  および深層土壌温度  $T_0$  を与える。

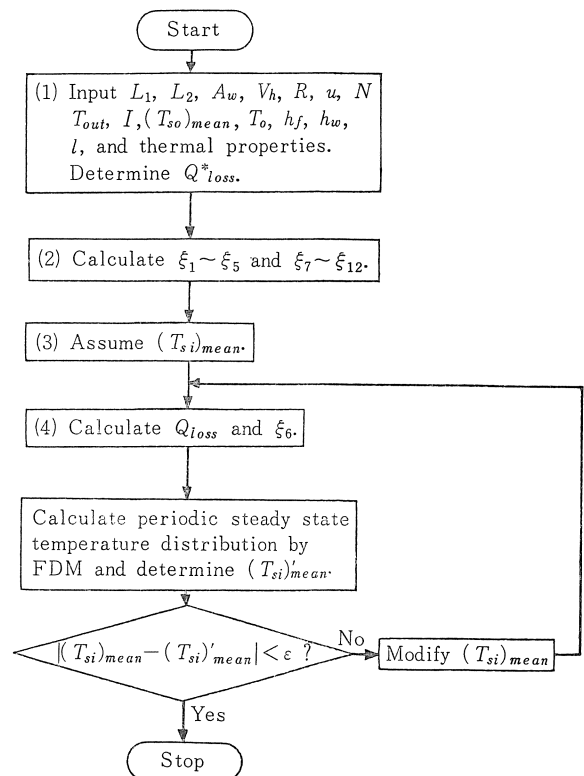


図5 解析手順のフローチャート

(2) 定義にしたがって、無次元量  $\xi_1 \sim \xi_5$ ,  $\xi_7 \sim \xi_{12}$  を計算する。

(3) 未知数である温室内地表面平均温度  $(T_{si})_{mean}$  を仮定し、式(9)と上記(1)の  $(T_{so})_{mean}$ ,  $Q^*_{loss}$  などから損失熱量  $Q_{loss}$  を定め、さらに  $\xi_6$  を決める。

(4) 上記(1)~(3)により計算に必要なすべての無次元量が決まったので、表1の差分式(1)~(6)を用いて各位置の温度が周期定常に達するまで繰り返し計算を行う。

(5) 計算によって得られた温度分布より室内地表面温度の平均値  $(T_{si})'_{mean}$  を求め、その値が上記(3)で仮定した  $(T_{si})_{mean}$  の値に等しくなければ  $(T_{si})_{mean}$  を仮定しなおして、上記(3)にもどって計算を繰り返す。等しければ計算を終了する。

なお、数値解析においては、深さ方向の差分  $X$  を 0.12m とし、時間差分  $\Delta t$  を差分式の安定条件から定まる最大値とした<sup>5)</sup>。上記の計算における温度計算点は40点程度であり、シミュレーションは通常のマイコンで十分に行える。

## 4. 結果および考察

### 4.1 1次元シミュレーションモデルの妥当性の検討

本論文中で提案する簡易1次元シミュレーションと前報で行った厳密な3次元解析の結果を比較するために、前報の場合 ( $A_f=12.5 \text{ m}^2$ ,  $A_w=34.6 \text{ m}^2$ ,  $V_h=19.4 \text{ m}^3$ ,  $L_1=2.5 \text{ m}$ ,  $L_2=1.25 \text{ m}$ ,  $R=0.05 \text{ m}$ ,  $u=1.0 \text{ m/s}$ ,  $N=16$ ,  $h_w=2.7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $h_f=17.4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $(T_{out})_{max}=9.0^\circ\text{C}$ ,  $(T_{out})_{min}=-3.0^\circ\text{C}$ ,  $D=0.45 \text{ m}$ ) と同一の条件に対する、室温の経時変化を計算し、図6に比較して示した。同図において実線が簡易モデルによる結果を、破線が厳密性の高い前報の3次元モデルによる結果をそれぞれ表わす。同図より、両者はほぼ一致しており、温室設計のための基礎

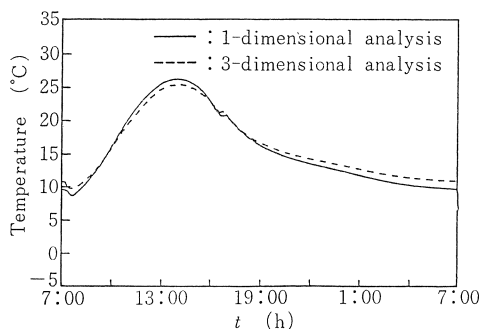


図6 1次元シミュレーションと3次元シミュレーションとの室温の経時変化の比較

的な知見を得るためには、計算容量が小さく、かつ、数値計算に要する時間の非常に短い、本1次元シミュレーションを利用することの適切さが理解される。ちなみに、図6に示した結果を得るために要する計算時間は、1次元簡易シミュレーションでは3次元計算の約50分の1程度に縮短された。

### 4.2 主な無次元パラメータの温室性能におよぼす影響

先ず本節のシミュレーションにおいて用いる物性値、外部条件および温室諸寸法の概略を表2にまとめて示す。同表の値は、岡野らの解析に用いた値<sup>2)</sup>を一部加工したものである。ここで、日射量および外気温は前報と同様の値を用いる。

また、表2に示した数値によって決まる無次元パラメータ  $\xi_1 \sim \xi_{12}$  の値を表3にまとめて示した。ただし、 $\xi_6$  は2章の損失熱量の計算結果から定めた代表的な値であり、 $\xi_7$  は時刻  $t$  の関数として与えられるため同表から除いてある。なお、解析においては表3に示した各無次元パラメータの値を規準値 (Standard value) として定め、主に一つのパラメータだけを変化させて他のパラメータをこの規準値に固定して計算を行い、各パラメータの温室性能に及ぼす影響について検討を加える。

表2 解析に用いた物性値および諸数値<sup>2)</sup>

|                   |                    |                           |
|-------------------|--------------------|---------------------------|
| $A_f$             | 118.0              | $\text{m}^2$              |
| $A_w$             | 224.0              | $\text{m}^2$              |
| $V_h$             | 288.0              | $\text{m}^3$              |
| $L_1$             | 10.0               | m                         |
| $L_2$             | 2.95               | m                         |
| $d$               | 0.75               | m                         |
| $R$               | 0.06               | m                         |
| $u$               | 5                  | m/s                       |
| $N$               | 15                 |                           |
| $h_w$             | 2.9                | $\text{W/(m}^2\text{K)}$  |
| $h_f$             | 17.4               | $\text{W/(m}^2\text{K)}$  |
| $c_a \rho_a$      | 1.17               | $\text{kJ/(m}^3\text{K)}$ |
| $c_e \rho_e$      | $1.25 \times 10^3$ | $\text{kJ/(m}^3\text{K)}$ |
| $\lambda_e$       | 0.84               | $\text{W/(mK)}$           |
| $\lambda_a$       | 0.026              | $\text{W/(mK)}$           |
| $l$               | 5                  | m                         |
| $T_0$             | 18                 | $^\circ\text{C}$          |
| $(T_{out})_{max}$ | 9                  | $^\circ\text{C}$          |
| $(T_{out})_{min}$ | -3                 | $^\circ\text{C}$          |
| $(T_{so})_{mean}$ | 4.9                | $^\circ\text{C}$          |

表3 無次元パラメータの基準値

|            | Standard              |
|------------|-----------------------|
| $\xi_1$    | $2.54 \times 10^2$    |
| $\xi_2$    | 8.38                  |
| $\xi_3$    | $4.06 \times 10^{-2}$ |
| $\xi_4$    | $5.27 \times 10^2$    |
| $\xi_5$    | $1.67 \times 10^2$    |
| $\xi_6$    | $1.11 \times 10$      |
| $\xi_8$    | $4.80 \times 10^{-1}$ |
| $\xi_9$    | $2.30 \times 10^{-3}$ |
| $\xi_{10}$ | $3.27 \times 10^{-2}$ |
| $\xi_{11}$ | $1.38 \times 10$      |
| $\xi_{12}$ | $9.11 \times 10^{-4}$ |

図7は、他の無次元パラメータを基準値に保ったまま、無次元パラメータ  $\xi_1$  の値を基準値  $(\xi_1)_{st}$  の0~3倍まで変化させたときの、温室空気温度の経時変化を示したものである。 $\xi_1$  を単独に変化させること

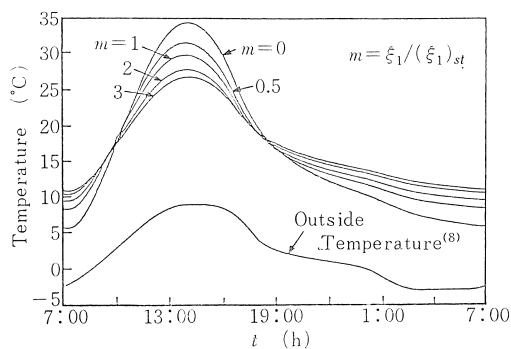


図7  $\xi_1$  を変化させたときの室温の経時変化の比較

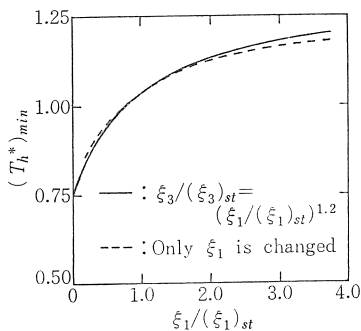


図8  $(T_h^*)_{min}$  と  $\xi_1$  の関係

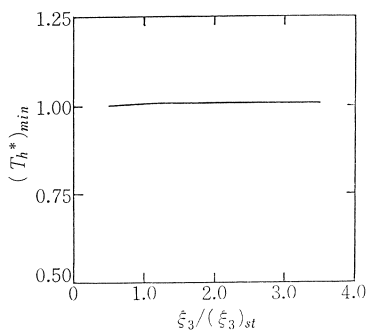


図9  $(T_h^*)_{min}$  と  $\xi_3$  の関係

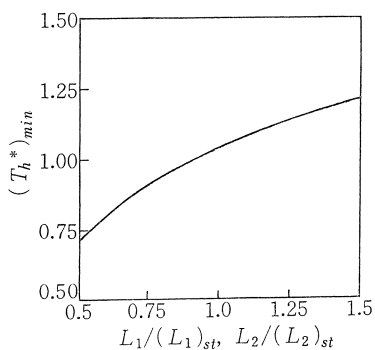


図10 温室の寸法効果

は、埋設管内面の総伝熱面積を一定に保ったまま、管に循環させる空気の流れだけを変化させる場合に相当し、 $\xi_1$  を  $m$  倍にすると流量も  $m$  倍となる。同図から、 $\xi_1$  を大きくすることで埋設管による地中への蓄熱能力が増大し、一日の平均室温はいずれの場合にもほぼ一定でありながら、室温の振巾が小さくなり夜間における室温低下の防止に役立てられることがわかる。図中の  $m=0$  は地中への管の埋設を行っていない場合の温度変化である。なお、図中に示した外気温は、本シミュレーションの入力データとして用いた山本<sup>8)</sup>による測定値である。

図8の破線は、図7の結果を無次元室内最低温度と  $\xi_1 / (\xi_1)_{st}$  との関係に表しなおしたものである。実線については後述する。同図より、管の総伝熱面積を一定に保ったまま、管内の空気流量を増やすことにより、温室内の最低温度を上昇させることができ、特にこの傾向は  $\xi_1$  の小さな領域で顕著であることがわかる。

図9は、 $\xi_3$  だけを変化させる場合の無次元最低温度の変化を示したものである。 $\xi_3$  を単独に変化させることは、管内総伝熱面積だけを変化させる場合に相当し、 $\xi_3$  を  $m$  倍すると伝熱面積も  $m$  倍となる。同図より、実用的な範囲（基準となる伝熱面積の0.5~3.0倍）では、空気流量が一定であれば、伝熱面積の変化は温室気温にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。これは、同図のパラメータ変化範囲では、空気流量に対して熱交換を行なう伝熱面積が十分に広いことを示している。

図8の実線は、 $\xi_1$  と  $\xi_3$  を  $\xi_3 / \xi_{3st} = (\xi_1 / \xi_{1st})^{1.2}$  の関係を保ちながら同時に変化させる場合の結果であり、埋設管一本当りの空気流量および伝熱面積を一定に保ったまま、埋設管本数を変化させる場合に相当している。このような  $\xi_1$  と  $\xi_3$  の関係に対しては、 $\xi_1$  を  $m$  倍することにより埋設管本数も  $m$  倍となる。図8より、埋設管本数を増すことにより室内最低温度は上昇するが、 $\xi_1$  を単独に変化させる場合とほぼ同程度の影響しかみられない。このことは、管の伝熱能力が充分な場合には、管の本数の増設より空気流量の増加を行う方が有利であることを示している。

次に温室の高さを表2に示した値に保ち、温室床面の縦と横の長さおよび管の本数を  $m$  倍 (0.5~1.5倍) にしたときの無次元最低温度の変化を図10に示した。その際、管径を一定に保つため管内総伝熱面積、温室容積は必然的に  $m^2$  倍となり、空気流量も  $m^2$  倍にする。定性的には、温室の寸法を大きくする程、温室の放熱面である表面積に対する受熱面として機能する床

面積の割合が大きくなることから、室温最低温度は上昇し有利なことは明らかであるが、同図より、温室の寸法効果の程度を理解することができる。

### 4.3 夜間の温室気温低下防止のための補助熱量の検討

温室内気温を夜間ある一定の設定温度（無次元暖房設定温度  $T_c^*$ ）に保つためには補助熱源の使用が必要となる場合が存在する。そこで、地中蓄熱用埋設管を設置する場合と、しない場合について、夜間、室温をある無次元設定温度  $T_c^*$  以上に保つために必要な熱量を本報告の簡易1次元シミュレーションモデルを用いて計算した。温室の諸寸法および物性値は、表2の値である。

表4に、設定温度  $T_c^*$  を変化させたときの、下記のように定義される補助熱源からの無次元暖房必要熱量  $E_s^*$  を、埋設管を設置する場合と、しない場合についてまとめた。

$$E_s^* = \frac{E_s}{c_a \rho_a V h \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}}$$

表中の  $\Delta E_s^*$  は、埋設管を設置しないときの  $E_s^*$  から設置するときの  $E_s^*$  を差引いた値を示している。なお、無次元温度  $T_c^* = 1.04$  は、表2に示した基準となる温室について地中蓄熱だけによって夜間の暖房を行う場合の無次元最低温度である。図11には、必要暖房熱量の経時変化を示した。たて軸は単位時間あたりの無次元暖房必要熱量であり、

$$Q_s^* = \frac{Q_s \bar{t}}{c_a \rho_a V h \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}}$$

と表される。また、図中の (P) は管を埋設する場合を示している。以上より、埋設管による地中蓄熱の有効性がわかる。

## 5. ま と め

温室下面土壌を蓄熱材として利用し、さらに温室側壁直下に熱回収率の向上に有効な断熱を施す場合の省エネルギー温室を対象とし、以下の検討を行った。

(1) 数値解析の容易な非正常簡易1次元シミュレーションモデルを提案した。

(2) 本シミュレーションモデルによる結果は、地中の3次元熱伝導を考慮した、前報の厳密性の高い非正常シミュレーションの結果と良好な一致をみた。

(3) 上記(1)のモデルから得られる基礎式を無次元化し、系が  $\xi_1 \sim \xi_{12}$  の12個の無次元パラメータにより記述されることを明らかにした。

(4) 上記(3)の無次元パラメータのうち、埋設管内空気循環量、埋設管総伝熱面積を決める  $\xi_1, \xi_3$

表4 各設定温度に対する1日の必要熱量

| $T_c^*$ | PIPE | $E_s^*$ | $\Delta E_s^*$ |
|---------|------|---------|----------------|
| 1.04    | 有    | 0.0     | 14.2           |
|         | 無    | 14.2    |                |
| 1.25    | 有    | 11.7    | 20.6           |
|         | 無    | 32.3    |                |
| 1.5     | 有    | 37.7    | 21.5           |
|         | 無    | 59.2    |                |
| 1.75    | 有    | 69.7    | 20.0           |
|         | 無    | 89.7    |                |
| 2.0     | 有    | 104.7   | 17.9           |
|         | 無    | 122.6   |                |

$T_c^* \equiv \{T_c - (T_{out})_{min}\} / \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}$  は、無次元設定最低温室気温を、また、 $E_s^* \equiv E_s / [c_a \rho_a V h \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\}]$  は、1日に必要な無次元補助熱量、 $\Delta E_s^*$  は、管を埋設する場合に対する管を有しない場合の増加分を表している。

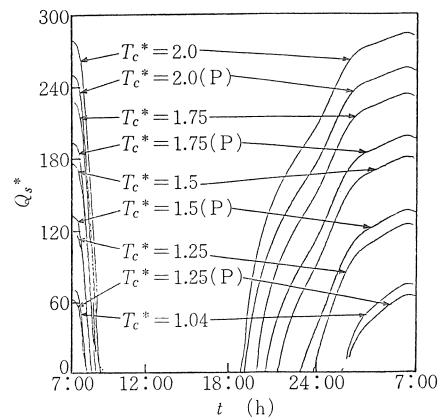


図11 暖房必要熱量の経時変化

$Q_s^* \equiv [Q_s \bar{t} / (c_a \rho_a V h \{(T_{out})_{max} - (T_{out})_{min}\})]$  は、無次元設定最低温室気温  $T_c^*$  に保つために必要な無次元暖房必要熱量を表す。

の影響、および温室の寸法効果について明らかにした。

(5) 夜間の温室気温をある設定値以上に保つための補助熱量について検討し、地中蓄熱が省エネルギーに有効なことを示した。

## 文 献

- 1) 斎藤, 宇高, 渋谷, 太陽エネルギー, 11-5 (1985), 28.
- 2) 岡野, 山本, 青木, 電力中央研究所, 生物環境技術研究所報告, No. 482011 (昭57-9)
- 3) Karplus, W. J. Analog Simulation, McGraw-Hill, (1958).
- 4) 斎藤, 日本機械学会誌, 85-759 (昭57-2), 80.
- 5) 片山, 斎藤, 服部, 伝熱工学の進展 (第3巻), 養賢堂, (昭51年)
- 6) McAdams, W. H., Heat Transmission, McGraw-Hill, (1954).
- 7) Carslaw, H. S. & Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, Oxford, (1959).
- 8) 山本, 電力中央研究所報告, No. 476007 (昭和59年12月14日 原稿受理)