

# 温室における太陽エネルギー 土中蓄熱の最適化に関する研究

(第1報 シミュレーションモデルの開発と検証)

STUDY ON OPTIMIZATION OF THE GROUND THERMAL STORAGE IN THE GREENHOUSE  
(Part 1, Development and Investigation of Simulation Model)

鄭 明 傑\*<sup>1</sup>  
Minjie ZHENG

中 原 信 生\*<sup>2</sup>  
Nobuo NAKAHARA

謝 毓 琦\*<sup>3</sup>  
Yuqi XIE

張 德 駿\*<sup>3</sup>  
Dejun ZHANG

## Abstract

In this paper, a simulation model to predict thermal behavior of the greenhouse with the ground soil storage in which the solar energy, greenhouse and soil were combined in analysis has been developed. The calculated result were compared with the experimental result which had been carried out in Jilin University of Technology in China. To reduce the calculation time, combined utilization of the accurate solution and numerical solution were proposed. The simulation programme, through a good agreement between the experimental data and the calculated one, proved to have a sufficient precision as a prediction tool of the greenhouse environment and thermal storage performance.

**Key Words:** Solar Energy, Greenhouse, Ground Heat Storage, Environment Simulation

### 1. まえがき

温室を利用しているときに、昼間閉めきっておくと室温が栽培適温以上の35°Cに達することがある。この剰余熱量を温室の土中に埋設したダクトを通じて室内空気を循環させて土中に蓄熱し、夜間の暖房熱源として利用するのが土中蓄熱温室である。地中熱そのもの利用しようとした試みは古くから L. R. Ingersall, H. J. Plass, J. C. Jaeger, H. C. Carslaw<sup>(1)</sup> および守安<sup>(2)</sup>、高志ら<sup>(3)</sup>の研究があるが、温室の省エネルギーを目的として温室の熱特性を活用するこの種の温室は山本によって初めて開発された<sup>(4)-(7)</sup>。さらに森<sup>(8)</sup>、佐々木・板木<sup>(9)-(14)</sup>、山崎<sup>(15)</sup>により実用化試験が始められ、高い暖房性能が確認された。佐々木は、土中蓄熱温室の実用化試験を行い、室内の空気が土中蓄熱用ファンに攪拌されると、光合成が促進されて、植物の生育・品質および収量に対して効果を示したこと

\*原稿受付 平成4年6月26日

1\*吉林工業大学,名古屋大学工学部外国人共同研究員(同2\*)

2\*名古屋大学工学部(〒464名古屋千種区不老町)

3\*吉林工業大学(〒130025 中国吉林省长春市斯大林大街114)

を初めて報告した<sup>(12)</sup>。なお、佐々木および平木らによって、この種の温室の省エネルギー、経済性の高いことが確認された<sup>(14)・(16)・(17)</sup>。筆者らは土中蓄熱システムを寒地の無加温温室に利用して、野菜栽培期間を延ばすことができることを報告した<sup>(18)</sup>。要約すると、温室に土中蓄熱システムを利用すれば、温室の中の環境を改善し、産出量と品質を高め、加熱用エネルギーを節約し、無加温温室の場合はその利用期間を延ばすことができるなどのいろいろな利点がある。ただし、日本では土中蓄熱温室は1980年に始めて生産農家へ導入され、関東以西の太平洋岸を主体に広く普及した<sup>(19)</sup>。中国ではこの種の温室を実用化させるために、謝らは1985年から土中蓄熱温室の実験研究を行った。現在までに土中蓄熱温室は中国の長春市、大連市および蘭州市などの北方都市で普及し始めた。北緯43°の寒い長春市では野菜の価格は季節によって大きな差があるので、農家は土中蓄熱温室の利用により栽培期間を延ばし、定植期を繰り上げて経済性を立証した。この種の温室は省エネルギー的にも経済的にも中国の北方地域に今後より多く活用されることになる。

この種の温室の性能は温室の構造, 日射および外気温の変化に影響されるばかりでなく, 土中蓄熱システムの設計, 運転のパラメータにも影響される. 土中蓄熱システムの設計と運転との基準を求めるために, 多くの研究者は土中蓄熱温室のモデルをつかって理論的な研究を行った. 以下に代表的ないくつかの例を挙げる. S. Takami and Z. Uchijima<sup>(20)・(21)</sup> (1977)は室内各表面の熱交換のシミュレーションモデルを開発し, 温室パラメータである換気率と床面積/壁面積比および環境パラメータである日射量が土中蓄熱温室の環境に及ぼす影響について計算を行ったが, 彼等のモデル中には土壌温度の計算を含んでいない. 高倉・山川<sup>(22)</sup> (1981), 北村<sup>(23)</sup> (1981), 伊藤・岩根<sup>(24)・(25)</sup> (1982)らは簡単な1次元解析モデルによりダクトの排気温を算出し, 熱交換ダクトの寸法, ダクト内を通過する空気の流れ, 埋設長さに関して種々の検討を加えた. 岡野ら<sup>(26)</sup> (1982)は2次元非定常シミュレーションモデルを提案し, ダクトの本数, 長さなどが土中蓄熱温室性能に及ぼす影響を検討した. さらに, K. Kurata and T. Takakura<sup>(27)</sup> (1985), 齊藤ら<sup>(28)</sup> (1985), P. D. Lund and M. B. Ostman<sup>(29)</sup> (1985)は室内空気熱収支, ダクト内空気熱収支, 土壌温度場の有限差分計算を含む3次元シミュレーションモデルを開発した. 高倉らのモデルでは室内空気と土壌との水分移動をも考慮した. 彼らは非定常3次元モデルを用いて, 熱交換ダクトの埋設深さ, 間隔, 数量, 平面配置, 土壌条件と気象条件の変化, ファンの運転を制御する温度設定値および温室周囲直下の土中断熱効果などが土中蓄熱温室の環境に及ぼす影響について計算して広い知見を得た.

古在<sup>(34)</sup> (1981)はファンの運転制御方式の経済性について比較計算を行い, ダクトの出口と入口との気温差が2℃以下になると, 土中蓄熱用ファンを止め, 補助暖房機で暖房するのが有利という結果を得た.

しかし, これら従来の理論的研究においては, 太陽エネルギー・温室・土壌を含むシステム全体のシミュレーションモデルを作成するには到っていない. さらに温室形状・土中蓄熱システムの設計パラメータならびにファン運転の最適化に関する研究は十分に行われていない. そこで筆者らは, 最も経済的に土中蓄熱システムを運転し, 温室内植物の生育に最適な温, 湿度などの環境を提供することができる土中蓄熱温室の設計と運転の基準を求めることを目的として, 温室外壁面, 温室内床面に受ける長・短波輻射, 温室内空気および壁面・床面・ダクト内表面の熱・湿気の移動と有限要素法を用いた2次元土壌温度場の計算を含む総合シミュレーションモデルを開発し, 実験結果と計算値

との比較を行った. さらに, このモデルを用いて温室形状の最適化, 土壌蓄熱システムの最適化及びファンの運転方式の最適化に関して基礎的研究を行った.

記号説明

- A<sub>i</sub> (i=s, f, g)それぞれ床, 壁, ダクト内表面の表面積 [m<sup>2</sup>]
- C<sub>p</sub> 温室内空気の比熱[kJ/kg・K]
- C<sub>p,i</sub> (i=c, s)それぞれ壁体, 土壌の比熱[kJ/kg・°C]
- d ダクトの相当直径 [m]
- e 外気水気分圧 [Pa]
- e<sub>a</sub> 温室内空気の水気分圧 [Pa]
- e(t<sub>i</sub>) (i=s, b, s")それぞれ床面, 外壁内表面, ダクト内表面の表面温度における飽和水蒸気分圧[Pa]
- E<sub>c,u</sub> 温室内壁面における結露による凝縮潜熱量 [kJ/m<sup>2</sup>・h]
- E<sub>g</sub> 地中蓄熱システムの潜熱蓄・放熱量[kJ/m<sup>2</sup>・h]
- E<sub>s,u</sub> 温室内床面蒸発・凝縮の潜熱伝達量[kJ/m<sup>2</sup>・h]
- F<sub>c,a</sub> 床面が壁面に対する形態係数
- F<sub>d,e</sub> 壁面が床面に対する形態係数
- F<sub>o,e,n</sub> 微小壁面が天空に対する形態係数
- F<sub>o,e,n</sub> 微小壁面が外地面に対する形態係数
- G 温室内乾燥空気の重量 [kg']
- h<sub>i</sub> (i=s, b, t, g)それぞれ床面, 外壁内表面, 外壁外表面, ダクト内表面の熱伝達率[kJ/m<sup>2</sup>・h・°C]
- h<sub>o</sub> 太陽高度[deg]
- H 温室の高度 [m]
- H<sub>i,t</sub> (ii=cu, cl, su)それぞれ外壁外表面, 外壁内表面, 床面の対流熱伝達量[kJ/m<sup>2</sup>・h]
- K 減衰係数
- K<sub>i</sub> (i=s, b, g)それぞれ床面, 外壁内表面, ダクト内表面の水気伝達率 [kg/m<sup>2</sup>・Pa・h]
- l<sub>e</sub> 屈折線の長さ [m]
- l<sub>i</sub> ダクト内表面周長 [m]
- L (=R/R<sub>o</sub>) 地球と太陽との平均距離Rと実距離R<sub>o</sub>の比
- L<sub>e,a</sub> 外壁内表面あるいはL<sub>s</sub>, L<sub>o</sub>の透過分が室内床面に射出する長波輻射量[kJ/m<sup>2</sup>・h]
- L<sub>e,u</sub> 温室内床面から外壁内表面に入射する長波輻射量[kJ/m<sup>2</sup>・h]
- L<sub>e</sub> 外壁外表面から, あるいはL<sub>s</sub>, L<sub>o</sub>の反射により外界へ射出する長波輻射量[kJ/m<sup>2</sup>・h]
- L<sub>o</sub> 外壁面に入射する大気長波輻射量[kJ/m<sup>2</sup>・h]
- L<sub>s</sub> 外地面から, あるいは大気輻射が外地面で反射して外壁外表面に入射する長波輻射量 [kJ/m<sup>2</sup>・h]
- L<sub>s,a</sub> 温室内床面に到達する長波輻射量[kJ/m<sup>2</sup>・h]

- $L_{i,u}$  温室内床面から内壁面へ射出する長波輻射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $L_w$  温室の奥行 [m]
- $n_a$  ダクト内表面の法線方向
- $N$  壁面の屈折率
- $P$  大気透過率
- $P_o$  大気圧 [Pa]
- $q$  水平面天空日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $Q_b$  地中伝熱量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $Q_{c,c}$  外壁体の伝導熱量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $Q_{c,g}$  地中蓄熱システムの顕熱蓄・放熱量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $Q_m$  水平面直達日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $Q_o$  太陽定数 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $Q_w$  ファンの発熱量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $r$  水の蒸発潜熱 [kJ/kg]
- $S_{c,d,d}$  外壁面を透過して最終的に地面に到達する間に任意の内表面に向う直達日射量の総称 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_{c,d,s}$  外壁面を透過する天空日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_{c,s,s}$  地面からの反射日射量のうち外壁面を透過する日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_d$  外壁外表面に入射する直達日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_{d,d,s}$  温室内床面に到達する天空日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_{d,d,d}$  外壁面を透過後直接または外壁内表面を最大2回反射して地面に到達する直達日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_o$  外壁外表面から外界へ射出する直達及び天空日射の反射日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_s$  外壁外表面に入射する天空日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $S_{s,s}$  外壁面を透過した日射が直接または他の室内表面を反射して外壁内表面に到達する日射量の総称 [kJ/m<sup>2</sup>·h]

- $S_{s,o}$  外壁外表面に入射する地面からの反射日射量
- $S_{s,u}$  温室内床面で反射する全日射量 [kJ/m<sup>2</sup>·h]
- $t_c$  壁体温度 [°C]
- $t_{i,T_i}$  ( $i=s,a,b,t,o$ ) それぞれ床面, 室内空気, 外壁内表面, 外壁外表面, 室外空気の温度 [°C, K]
- $t_{s,i}$  ダクト内表面温度 [°C]
- $t_{s,o}$  土中1m深度のところの温度 [°C]
- $t_{s,s}$  地中温度 [°C]
- $T_{a,s}$  外地表面温度 [K]
- $V$  温室内空気の体積 [m<sup>3</sup>]
- $V_o$  外壁体の体積 [m<sup>3</sup>]
- $V_j$  ( $j=a,o,v$ ) それぞれ室内, 外界, ダクト内の風速 [m/s]
- $W$  温室の間口 [m]
- $W_i$  ( $i=s,b,g$ ) それぞれ床面, 外壁内表面, ダクト内表面における水分の蒸発・凝縮量 [kg/m<sup>2</sup>·h]
- $X$  温室内空気の比湿 [kg/kg']
- $\alpha$  温室方位角 [deg]
- $\alpha_o$  外地面のアルベード
- $\delta_o$  壁厚さ [m]
- $\epsilon_i$  壁面の屈折角 [deg]
- $\epsilon_j$  ( $j=0,s',s,c$ ) それぞれ外気, 外地面, 床面, 壁面の長波輻射率
- $\theta_o$  壁面微小面積の水平面に対する傾斜角
- $\lambda_i$  ( $i=c,s,l$ ) それぞれ壁体, 土壌, ダクトの熱伝導率 [kJ/m·h·°C]
- $\rho$  温室内空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{c,d,d,s}$  外壁外表面の直達日射反射率
- $\rho_{c,s}$  外壁面の天空日射反射率
- $\rho_i$  ( $i=c,s,l$ ) それぞれ壁体, 土壌, ダクトの密度 [kg/m<sup>3</sup>]

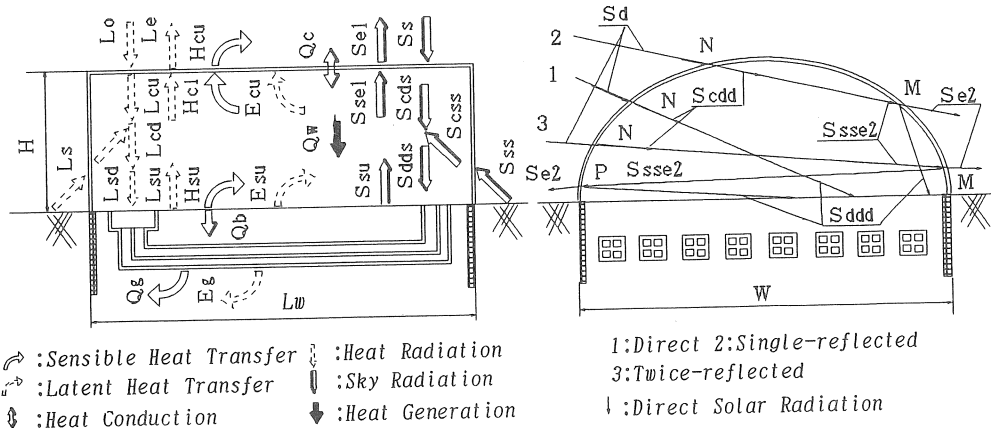


図1 温室の熱収支及び直達日射量の計算モデルの見取り図

- $\rho'_{i,j}$  壁面と空気の境界面における日射反射率  
( $j=s'l', sl, cl$ ) それぞれ外地面, 床面, 壁面の長波反射率
- $\rho_{s,s}$  地面の日射反射率
- $\sigma$  ステファンボルツマン定数 [ $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ ]
- $\tau$  時刻 [h]
- $\tau_{c,i}$  外壁面の長波透過率
- $\tau_{c,d,n}$  外壁面の直達日射透過率
- $\tau_{c,s}$  外壁面の天空日射透過率
- $\tau'_{i,j}$  壁体内における吸収による減衰率

2. シミュレーションモデルの概要

2.1 太陽エネルギーの計算モデル

図1は対象とする温室の概略形状と熱流の要素を示す。温室が受ける日射の中で外壁面の直達日射量は太陽高度, 大気透過率および入射角と関係があるが, 天空日射量は太陽高度, 大気透過率および壁面の天空に対する形態係数と関係がある。反射日射量は主に壁面の外地面に対する形態係数と関係がある。計算式を式(1)~(3)に示す。

$$S_d = \sum_{n=1}^N S_{d,n} \quad S_{d,n} = (Q_0/L^2) \cdot P^{1/\sin \theta_n} \cos i_n \quad (1)$$

$$S_s = \sum_{n=1}^N S_{s,n} \quad S_{s,n} = 0.5(Q_0/L^2) \sin \theta_n \{ (1-P^{1/\sin \theta_n}) / (1-1.41nP) \} F_{oc,n} \quad (2)$$

$$S_{s,s} = \sum_{n=1}^N S_{s,s,n} \quad S_{s,s,n} = \alpha_s (Q_m + q) F_{sc,n} \quad (3)$$

ここで

$$q = 0.5 \cdot Q_0/L^2 \cdot \sin \theta_n \{ (1-P^{1/\sin \theta_n}) / (1-1.41nP) \} \quad (4)$$

$$Q_m = Q_0/L^2 P^{1/\sin \theta_n} \cdot \sin \theta_n \quad (5)$$

$$\cos i_n = \cos \theta_n \sin \theta_n + \sin \theta_n \cosh \theta_n \cos(\alpha - \varepsilon_n) \quad (6)$$

$$F_{oc,n} = (1 + \cos \theta_n) / 2 \quad (7)$$

$$F_{sc,n} = (1 - \cos \theta_n) / 2 \quad (8)$$

温室の全日射透過率は温室の形状, 方位, 季節および被覆材の影響を受けるが, 直達日射の透過率は主に入射角によって異なり, 天空日射の透過率は温室の構造あるいは形態係数によって決まる。直達日射の透過率および反射率はJan F. Kreider<sup>(40)</sup> (1979)の計算式を用いて計算する。

$$\tau_{c,d,i} = \tau'_{i,j} \{ (1 - \rho'_{i,j}) / (1 - \rho'_{i,j} \tau'_{i,j}) \} \quad (9)$$

$$\rho_{c,d,i} = \rho'_{i,j} [ (1 + \tau'_{i,j} (1 - \rho'_{i,j}) / (1 - \rho'_{i,j} \tau'_{i,j}) ) ] \quad (10)$$

ここで

$$\tau'_{i,j} = e^{-K l_c} \quad (11)$$

$$l_c = l_d / \cos \varepsilon_i \quad (12)$$

$$\varepsilon_i = \sin^{-1}(\sin i_i / N) \quad (13)$$

$$\rho'_{i,j} = \left. \begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(i_i - \varepsilon_i)}{\sin^2(i_i + \varepsilon_i)} + \frac{\text{tg}^2(i_i - \varepsilon_i)}{\text{tg}^2(i_i + \varepsilon_i)} \right] \quad i_i \neq 0 \\ & \frac{(N-1)^2}{(N+1)^2} \quad i_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

温室内に入射した直達日射量は図1に示すように一部は屋根や壁で反射して床面に入射する。太陽高度の低いときには日射が対向壁を透過して外に逃げることを考慮している。計算には2回反射分まで含めているが, 2回以上反射して床面に入射する量は常に無視できるほど少ない<sup>(41)</sup>。以上の様々の要素を考慮した各種日射量の計算式は式(15)~式(22)で示される。

$$S_{c,d} = \sum_{n=1}^N S_{d,n} \tau_{c,d,n} + \sum_{m=1}^M S_{d,m} \tau_{c,d,n} \rho_{c,d,m} \rho_{c,d,p} \quad (15)$$

$$S_{c,d,s} = \sum_{n=1}^N S_{s,n} \tau_{c,s} \quad (16)$$

$$S_{c,s,s} = \sum_{n=1}^N S_{s,s,n} \tau_{c,s} \quad (17)$$

$$S_e = \sum_{n=1}^N S_{d,n} \rho_{c,d,n} + \{ \sum_{n=1}^N (S_{s,n} + S_{s,s,n}) \} \rho_{c,s} + S_{e,s} \tau_{c,s} \quad (18)$$

$$S_{e,s} = S_{e,s} F_{dc} + \sum_{n=1}^M S_{d,n} \tau_{c,d,n} \rho_{c,d,m} \quad (19)$$

$$S_{d,d} = (S_{c,d} + S_{c,s}) F_{cd} \quad (20)$$

$$S_{d,d} = \sum_{n=1}^N S_{d,n} \tau_{c,d,n} + \sum_{m=1}^M S_{d,m} \tau_{c,d,n} \rho_{c,d,m} \rho_{c,d,p} \quad (21)$$

$$S_{e,u} = \rho_{s,s} (S_{d,d} + S_{d,s}) \quad (22)$$

2.2 土壌温度場のシミュレーションモデル

これまで農業工学方面での土中蓄熱温室に関する研究では土壌温度場の計算法はすべて有限差分法であったが, できるだけ計算誤差が減らすために, 本研究は有限要素法を用いた。水分量が土壌の熱性質に大きな影響があるが, 水ポテンシャルが小さく, 温度が30°C以下のときは土壌の水分流による対流熱移動は無視することができる<sup>(42)</sup>。また, ダクトの長さ方向に沿っての土壌の温度差も小さいので, これを無視すると, 土壌温度場の計算モデルは二次元熱伝導微分方程式で表すことができる。

$$\frac{\partial t_{ss}}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho_s C_{ps}} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_s \frac{\partial t_{ss}}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho_s C_{ps}} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_s \frac{\partial t_{ss}}{\partial y} \right] \quad (23)$$

また, 温室周囲の地下では断熱材を設置するものとして完全断熱と仮定し, ダクトは幅の方向に対称的设置するので, 隣接する二つのダクトの中央に断熱面があると仮定する。ダクト自体も対称形としていること

を前提に、土壌温度場の計算域は図2のように片方の範囲OCBAに限ることができる。故に、式(23)の境界条件は式(24)で示される。

$$\left. \begin{aligned} t_{OA} &= t_s \\ t_{BC} &= t_{so} \\ \frac{\partial t_{ss}}{\partial x} \Big|_{AB} &= 0 \\ \frac{\partial t_{ss}}{\partial x} \Big|_{OC} &= 0 \\ -\lambda \frac{\partial t_{ss}}{\partial n_n} \Big|_1 &= h_g(t_s - t_a) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

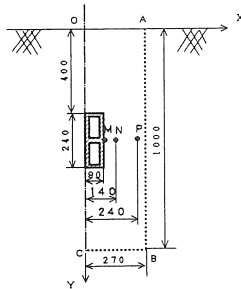


図2 土壌温度場の計算区域

### 2.3 長波放射の計算モデル

外壁外表面に受ける天空放射と地表面からの熱放射はそれぞれ外壁外表面の天空及び地表面に対する形態係数に依存する。温室内の各表面の放射および無限反射を考慮すれば、長波放射の計算モデルは次のようにまとめられる。

$$L_n = \sum_{n=1}^N L_{n,n} \quad L_{n,n} = F_{n,c,n} [\epsilon_n \sigma T_n^4 + \rho_{n,i} \sigma t_a^4 (0.61 + 0.058 e^{0.5})] \quad (25)$$

$$L_o = \sum_{n=1}^N L_{o,n} \quad L_{o,n} = F_{o,c,n} \sigma T_o^4 (0.61 + 0.058 e^{0.5}) \quad (26)$$

$$L_e = L_{e,u} \tau_{c1} + \rho_{c1} \sum_{n=1}^N (L_{o,n} + L_{s,n}) + \epsilon_c \sigma T_t^4 \quad (27)$$

$$L_{cd} = L_{e,u} \rho_{c1} + \tau_{c1} \sum_{n=1}^N (L_{o,n} + L_{s,n}) + \epsilon_c \sigma T_b^4 \quad (28)$$

$$L_{cu} = L_{s,u} F_{dc} \quad (29)$$

$$L_{sd} = L_{cd} F_{cd} \quad (30)$$

$$L_{su} = L_{sd} \rho_{s1} + \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (31)$$

ただし、 $F_{dc} = A_s/A_r$ ,  $F_{cd} = 1$

### 2.4 温室環境シミュレーションモデル

本報では室内に植物のない状態(無栽培温室)を対象として解析する。温室の各部位の熱、水分収支は図1に示した。シミュレーションモデルは室内空気、床面・水分収支、床面・外壁外表面・外壁の熱収支の五つの方程式を含む。

#### 2.4.1 室内空気の熱・水分収支

温室は完全に密閉とし、換気による顕・潜熱交換量を無視する。また、補助暖房機を使用しないと仮定するので、室内空気の熱収支はファンの発熱量と床面・外壁内表面およびダクト内表面の顕・潜熱交換を含み、水分収支は各表面の湿気交換による。ファンが停止中はダクト内表面の熱・湿気交換がないと仮定した。外壁内表面の結露は短時間内に流れ落ちるので、外壁内表面での蒸発とそれによる潜熱交換量も無視した。これにより、室内空気の熱・水分収支の基本計算式は式(32)と式(33)になる。

$$Q_w - Q_g A_s - H_{s,u} A_s - H_{c1} A_r + E_{s,u} A_s - E_{c,u} A_r - E_g A_g = V \rho C_p (dt_a/d\tau) \quad (32)$$

$$W_s A_s + W_g A_g - W_c A_r = G dx/d\tau \quad (33)$$

#### 2.4.2 床面の熱収支

床面の熱収支は床面に受ける全日射量、床面と壁面の長波放射による熱交換量、床面での顕・潜熱交換量および地中伝熱量を含む。床面に常に蒸発を維持する十分な水分量があると仮定すると、床面の熱収支の基本計算式は式(34)になる。

$$S_{d,d} + S_{d,d} - S_{s,u} + L_{s,d} - L_{s,u} - H_{s,u} - E_{s,u} - Q_b = 0 \quad (34)$$

#### 2.4.3 外壁と外壁外表面の熱収支

外壁の熱収支は僅かながら太陽放射の吸収量、外壁内・外表面と環境との放射・対流および外壁内表面の潜熱交換を含む。外壁外表面の潜熱交換は無視した。外壁及び外壁外表面の熱収支はそれぞれ式(35)と式(36)で示す。

$$\begin{aligned} & \{ (S_s + S_d + S_{s,u} - S_c) - (S_{cd} + S_{cd} + S_{c,u} - S_{c,e}) + \\ & (L_o + L_s - L_e) - (L_{cd} - L_{cu}) - H_{c,u} + E_{c,u} + H_{c1} \} A_r \\ & = V_c \rho_c C_{p,c} (dt_c/d\tau) \end{aligned} \quad (35)$$

$$S_s + S_d + S_{s,u} - S_c + L_o + L_s - L_e - H_{c,u} + Q_{c,e} = 0 \quad (36)$$

表1は以上の計算モデルにおける顕熱・潜熱交換量及び蒸発による水分交換量の計算式を示す。ただし表1の中に、(i=b, t, s, g)はそれぞれ外壁内表面、外壁外表面、床面、ダクト内表面を示す。

表1 モデルの中の各項の計算式

$H_{c,u} = h_c(t_i - t_o)$	$H_{c1} = h_b(t_a - t_b)$
$H_{s,u} = h_s(t_s - t_a)$	$Q_g = h_g(t_s - t_a)$
$E_{c,u} = r W_c$	$E_{s,u} = r K_s (e_i(t_s) - e_a)$
$E_g = r K_g (e_s - e(t_s))$	$E_c = r K_c (e_c - e(t_c))$
$W_c = K_b (e_c - e(t_b))$	$e_c > e(t_b)$
	$0$
	$e_c < e(t_b)$
$W_s = K_s (e_s - e(t_s))$	$W_g = K_g (e_g(t_s) - e_a)$
$Q_{c,e} = \lambda_c / \delta_c (t_b - t_i)$	$Q_b = -\lambda_s \partial t_s / \partial y$
ここに、	
$h_o = 5.0 + 3.4 V_o$ , $h_i = 5.0 + 3.4 V_o$	
$h_s = 5.0 + 3.6 V_s$ , $h_g = 4.73 V_g^{0.9} / d^{0.2}$	
$K_i = 0.622 h_i / C_{p,i}$ (i=b, t, s, g)	
$e(t_i) = 622.82 \exp(17.2693882 t_i / (t_i + 237.3))$	

熱電対, 電容型湿度計, 熱線型風速計, 全日射計および熱流束計を含んだ。なお, 蓄・放熱用ファンの稼働制御は室内気温は $20^{\circ}\text{C}$ 以上と $10^{\circ}\text{C}$ 以下の時に, ファンがon, そのほかoffとする。図4は測定点の配置を示す。

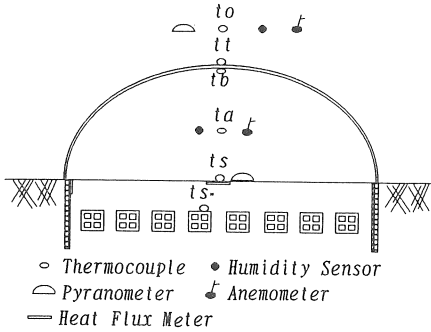


図4 測定点の配置図

4.2 日射量

温室外の日射量の計算では, 測定値と比較して大気透過率を定め, これを入力値とした。図5, 6はそれぞれ温室外と温室内床面の日射量の計算値と実測値の経時変化を示す。ただし, 図6の計算値は床面日射量の平均値, 実測値は温室中央部の値である。実測の記録は点線の通りであるが, 10時から12時の間の落ち込みは図5の室外日射量及び後述する図7, 8の室内温度と床面温度の傾向からみて, このままでは理屈に合わず, 何らかの計測によるノイズあるいは膜面の局部的汚れが

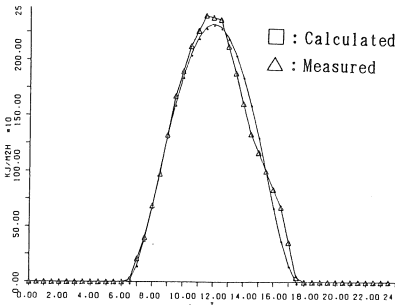


図5 室外日射量の計算値と実測値の比較

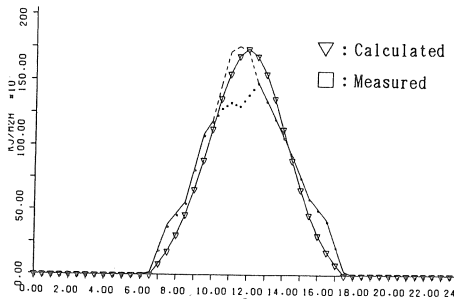


図6 床面日射量の計算値と実測値の比較

あったと思われる, 実際の値は破線のようにであったと推定される。

4.3 室内気温・相対湿度・床面温度

図7, 8はそれぞれ温室の室内気温と床面温度の計算値と実測値の比較を示す。図9は温室の室内相対湿度の計算値と実測値の経時変化を示す。室内相対湿度の計算値と実測値の最大誤差は10%であるが, 湿度の測定精度は十分とは言えない。

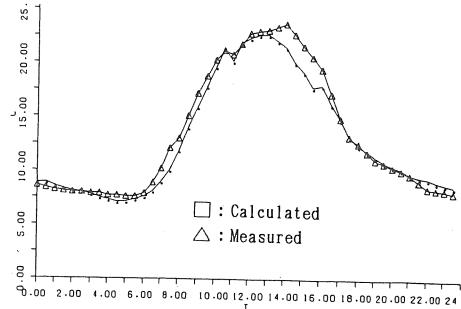


図7 室内気温の計算値と実測値の比較

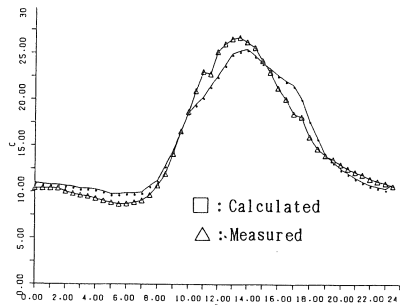


図8 床面温度の計算値と実測値の比較

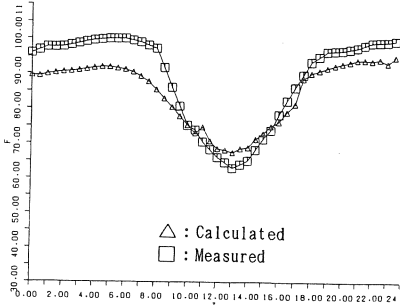


図9 室内の相対湿度の計算値と実測値の比較

以上各種の実測値と計算値との比較を行ったが, 物性値や測定の誤差のあることを考慮すれば, 全体として妥当と思われる程度に一致を示しており, プログラムの検証ができたと言える。

5. まとめ

(1) 土中蓄熱無栽培温室におけるエネルギー収支, 物

3. 計算方法の概要

以上の式(27)~(36)を連立してニュートン反復法で計算すると、土中蓄熱温室の温、湿度環境を解くことができるが、ニュートン反復法では収束域があり、連立数が多いほど収束域の幅が小さくなる。収束域を増大し、Jacobianマトリックスがひずみを起こさないようにするために、ダンピングニュートン反復法を用いた。また、10個の方程式をそのまま連立して計算すると、計算時間が長くなるので、なるべく連立数を減少させる工夫をする。

3-1 長波輻射の計算式の誘導

外壁面に受ける長波輻射を計算するとき、 $t_o, t_o', t_o''$ が入力値であるから、 $L_o, L_o'$ は既知量になる。さらに、 $L_o+L_o'=L_{oc}$ と仮定すれば、残った長波輻射量の計算式を連立して次ぎのマトリックスで表示される。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -\tau_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\rho_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -F_{dc} \\ 0 & -F_{cd} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\rho_{s1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{oc} \\ L_{cd} \\ L_{cu} \\ L_{sd} \\ L_{su} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ 0 \\ 0 \\ P_5 \end{pmatrix} \quad (37)$$

ここで

$$P_1 = L_{oc} \rho_{c1} + \epsilon_c \sigma T_t^4 \quad (38)$$

$$P_2 = L_{oc} \tau_{c1} + \epsilon_c \sigma T_b^4 \quad (39)$$

$$P_5 = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (40)$$

このマトリックスの解析解を求めると、各表面の長波輻射の計算式は次ぎの式となる。

$$L_{oc} = \{F_{dc} \tau_{c1} \epsilon_s \sigma T_s^4 + F_{cd} F_{cd} \tau_{c1} \rho_{s1} \epsilon_c \sigma T_b^4 + L_{oc} [\rho_{c1} + \rho_{s1} F_{cd} F_{dc} (\tau_{c1}^2 - \rho_{c1}^2)] + \epsilon_c \sigma T_t^4\} / W \quad (41)$$

$$L_{cd} = \{F_{dc} \rho_{c1} \epsilon_s \sigma T_s^4 + \epsilon_c \sigma T_b^4 + \tau_{c1} L_{oc}\} / W \quad (42)$$

$$L_{cu} = \{F_{dc} \epsilon_s \sigma T_s^4 + F_{cd} F_{cd} \rho_{s1} (\tau_{c1} L_{oc} + \epsilon_c \sigma T_b^4)\} / W \quad (43)$$

$$L_{sd} = \{F_{dc} F_{cd} \rho_{c1} \epsilon_s \sigma T_s^4 + F_{cd} (\tau_{c1} L_{oc} + \epsilon_c \sigma T_b^4)\} / W \quad (44)$$

$$L_{su} = \{\epsilon_s \sigma T_s^4 + F_{cd} \rho_{s1} (\tau_{c1} L_{oc} + \epsilon_c \sigma T_b^4)\} / W \quad (45)$$

ここで

$$W = 1 - F_{cd} F_{dc} \rho_{c1} \rho_{s1} \quad (46)$$

これらを式(32)~(36)に代入すると、連立数は五つとなり、計算時間がかなり減る。

3-2 プログラムの概要

計算プログラムは初期値の入力、日射量の計算、土壌温度場初期値の計算、室内環境解析モデルの計算、計算結果の出力の五つのサブルーチンから構成される。

計算の入力値をとして、①日時、②緯度、③地下1mのところの温度(境界条件)、④室外の気温、地表面温度、相対湿度、⑤空気・土壌・壁面材の各物性値などである。表2は計算に用いた各物性値を示す。プログラムのフローチャートは図3に示される。

表2 計算に用いた各物性値

Mark	Data	Mark	Data
$\alpha_s$	0.2	$\rho_{cs}$	0.15
$\epsilon_c$	0.98	$\rho_{ci}$	0.15
$\epsilon_s$	0.97	$\rho_{ci} \cdot C_{p1}$	2275 [kJ/m <sup>3</sup> ·°C]
$\epsilon_s'$	0.96	$\rho_{si} \cdot C_{p2}$	2595 [kJ/m <sup>3</sup> ·°C]
$\lambda_c$	0.504 [kJ/m·h·°C]	$\rho_{si}$	0.35
$\lambda_i$	1.909 [kJ/m·h·°C]	$\rho_{si}'$	0.25
$\lambda_s$	1.938 [kJ/m·h·°C]	$\tau_{c1}$	0.2
$\rho_{c1}$	0.8	$\tau_{cs}$	0.85

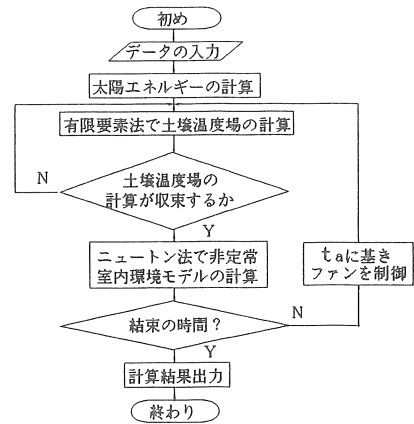


図3 計算のフローチャート

4 シミュレーション結果と検証

4-1 実験用温室および実験概要

実験用温室は図1に示した方位が南北でH=1.8m, W=5m, L<sub>w</sub>=12m, 床面積が60m<sup>2</sup>, 壁面積が104m<sup>2</sup>であり、吉林工業大学農業機械工学部に設置したプラスチック温室である。温室内の地中0.5m深さに温室の長さ方向に沿って8本の田の字型の壁厚2cmである煉瓦ダクトを埋めた。温室周囲に地下1m深さまで断熱材を設置した。空気循環用ファンは0.6kwの軸流ファンである。実験は1987年10月10日から20日にかけて行われた。測定した環境パラメータは室外および室内1m高さの気温、湿度、風速、室外及び床面の水平面全日射量および地下0.5m深さの、図2に示すようなM, N, P点の土壌温度および床面、内外壁面の温度、床面熱伝達量を含めた。測定値はすべて3088型総合測定器で連続記録した。転換器は

質収支、熱・湿気移動ならびに室内温・湿度解析を含む総括的計算モデルを作成した。

(2)日射ならびに長波輻射の計算は2回までの反射を考慮した精細なモデルとして計算した。

(3)土壌温度場の解析は有限要素法によった。

(4)計算の時間を減らすために、長波輻射量の解析解を誘導する方法により、数値計算する方程式の連立数を減らした。

(5)中国吉林省吉林工業大学で行った実験状況について紹介し、シミュレーション計算結果と上記の実測結果と比較し、両者の相互検証を行った。

以上により、本報で報告したシミュレーションモデルはこの種の温室の温度環境を十分に高い計算精度をもって予測することができる。第2報以下にはこのモデルを用いて土中蓄熱温室の設計と運転の基準を求めるとともに、栽培温室へと展開する。

本研究の研究費の一部は文部省科学研究費(地球環境保全型建築・都市の環境・エネルギーシステムに関する研究 研究代表者:中原信生)ならびに日本太陽エネルギー学会産学協力部会ソーラーハイブリッドシステム研究分科会から補助によるものである。

## 6 文献

- (1)中島康孝, 地中熱利用と土壌蓄熱の可能性について, 太陽エネルギー, 5-1 (1979), 10
- (2)守安虎治, 地熱の利用, 衛生工業協会誌, 30(1956), 305
- (3)高 志勤, 熱ポンプの熱源としての地下熱利用の再検討, 冷凍, 37-1(1961), 1
- (4)山本雄二郎, 地中-空気熱交換の応用例, 農業気象, 22(1966), 77
- (5)山本雄二郎, 地中-空気熱交換ハウスの研究, 農電研究所報, 10(1969), 25
- (6)山本雄二郎, 地中-空気熱交換ハウスの温度環境及び熱特性, 農業気象, 29(1973), 11
- (7)山本雄二郎, 地中熱交換方式による栽培ハウスの暖房に関する研究, 電力中央研究所報告, 476007, (1977)
- (8)森 俊人, 地中熱交換方式による冬季ハウストマト栽培の実用性, 農業および園芸, 52-1(1977), 41
- (9)板木利隆, 地中熱交換方式の野菜温室の暖房, 農業電化, 34-2(1981), 6
- (10)佐々木浩二, 地中熱交換方式による施設暖房装置と利用, 農耕と園芸, 10(1980), 70
- (11)佐々木浩二・板木利隆, 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第1報), 神奈川園試研報, 26(1979), 26
- (12)佐々木浩二・板木利隆・高橋基, 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第2報), 神奈川園試研報, 27(1980), 35
- (13)佐々木浩二・板木利隆・高橋基, 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第3報), 神奈川園試研報, 28(1981), 39
- (14)佐々木浩二ら, 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第3報), 神奈川園試研報, 29(1982), 29
- (15)山崎肯哉, 太陽熱の地中-熱交換方式によるハウスの施設栽培, 日本農園資材研究会報, 2(1980), 1
- (16)佐々木浩二, 地中熱交換方式の暖房効果と運用上の問題点, 農業施設, 12-2(1982), 41
- (17)平木永二ら, 暖地における地中熱交換ハウスの実用化, 宮崎県総合農業試験場研究報告, 20(1986), 47
- (18)鄭 明傑ら, 吉林省科委科研課題「温室利用太陽能延長蔬菜生長期的研究」の技術報告, (1988), 長春, 中国
- (19)佐々木浩二, 地中熱交換方式とその利用, 農耕と園芸, 10(1981), 115
- (20)S. Takami and Z. Uchijima, A Model of the Greenhouse Environment as

- Affected by the Mass and Energy Exchange of Crop, J. Agr. Met., 33(1977), 155
- (21)S. Takami and Z. Uchijima, A Model of the Greenhouse with a Storage Type Heat Exchanger and its Verification, J. Agr. Met., 33(1977), 155
- (22)高倉 直・山川健一, 地中熱交換ハウスの設計 1. 定常一次元モデルによる解析, 農業気象, 37-3(1981), 187
- (23)北村一男, 地中熱交換施設の熱収支の数値試験, 埼玉園試研報, 10(1981), 35
- (24)伊藤 実・岩根和夫, 地中熱交換方式による排気温の算出法について, 農業施設, 13-1(1982), 21
- (25)伊藤 実・岩根和夫, 地中熱交換による排気温算出の数式モデルとその考察, 岩手大学農学部報告, 16-4(1984), 241
- (26)岡野利明・山本雄二郎・青木清, 1982, 地中熱交換温室の熱的性質に関する非定常シミュレーションモデルの開発, 電力中央研究所報告, 482011(1982-9)
- (27)K. Kurata and T. Takakura, Simulation of Climate with in a Solar Greenhouse Equipped with Underground Heat Storage Units, Proceedings of the International Symposium on Thermal Application of Solar Energy, (1985-4), 521, Hakone, Japan
- (28)T. Takakura and K. Kurata, Underground Storage of Solar Energy for Greenhouse Heating, Proceedings of the International Symposium on Thermal Application of Solar Energy, (1985-4), 185, Hakone, Japan
- (29)H. Nishina and T. Takakura, Solar-heating Greenhouses by Means of Latent Heat Storage Units, Proceedings of the International Symposium on Thermal Application of Solar Energy, (1985-4), 543, Hakone, Japan
- (30)齊藤彬夫・宇高義朗・渋谷幸生, 1985, 三次元シミュレーションによる家庭用土中蓄熱温室の熱特性, 太陽エネルギー, 11-5(1985), 21
- (31)齊藤彬夫・宇高義朗・渋谷幸生, 地中蓄熱温室の一元シミュレーション法と蓄熱特性の検討, 太陽エネルギー, 12-2(1986), 7
- (32)P. D. Lund and M. B. Ostman, A Numerical Model for Seasonal Storage of Solar Heat in the Ground by Vertical Pipes, Solar Energy 34(1985), 351
- (33)大原源二・内藤文男, 温室用太陽熱暖房システムの設計と問題点[1], 農業及び園芸, 56-6(1981), 741
- (34)大原源二・内藤文男, 温室用太陽熱暖房システムの設計と問題点[2], 農業及び園芸, 56-8(1981), 997
- (35)渋谷正夫, 地中熱交換I, 農業施設, 12-2(1982), 59(36)渋谷正夫, 地中熱交換II, 農業施設, 13-1(1983), 54
- (37)鄭 明傑・中原信生・謝毓琦・張徳駿, 野菜栽培ハウスにおける太陽エネルギー土中蓄熱の最適化に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 29(1991-2), 349, 名古屋
- (38)鄭 明傑・中原信生・謝毓琦, 温室における太陽エネルギー土中蓄熱のシステムパラメータの最適化に関する研究, 平成3年度日本太陽エネルギー学会・風力エネルギー協会合同研究発表講演論文集, (1991-9), 225, 北見
- (39)鄭 明傑・中原信生, 野菜栽培ハウスにおける太陽エネルギー土中蓄熱の最適化に関する研究(続報), 日本建築学会東海支部研究報告集, 30(1992-2), 361, 名古屋
- (40)Jan F. Kreider, Medium and High Temperature Solar Processes, (1979), 49, Academic Press, Inc, New York
- (41)長野敏英ら, 農業気象・環境学, (1980), 155, 朝倉書店, 東京