

# 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4報 土中蓄熱運転の最適制御について)

STUDY ON OPTIMIZATION OF THE GROUND THERMAL STORAGE IN THE GREENHOUSE  
(Part 4, On the Optimal Control of Ground Heat Storage Operation)

鄭 明 傑\*<sup>1</sup>  
Mingjie ZHENG

中原 信 生\*<sup>2</sup>  
Nobuo NAKAHARA

## Abstract

In this paper, the state equations for the solar greenhouse with ground thermal storage operation have been introduced. The mathematical model of the optimal control of ground thermal storage operation have been introduced and theoretical solutions have been obtained for several combinations of the constraints and performance functions with the power and room air temperature applying the Pontryagin's Maximum Principle. Three kinds of the performance functions, minimum energy, best environment and the combination of the two were considered. Results show that the power consumption increases according to the increase of low limit temperature, that the optimal room air temperature schedule effects the optimal control policy, that a large discontinuity in the optimal room temperature schedule produces another optimal solution than theoretical one and that attainable highest room air temperature of the lowest temperature in the morning is 8.5°C. For the calculation condition of the present report, that is, in Jilin at the middle of October.

**Key words :** Solar Energy, Greenhouse, Ground Heat Storage, Optimal Control

### 1. まえがき

既報<sup>(1)(2)(3)</sup>では土中蓄熱温室について、太陽エネルギー・温室・土壌・植物を含むシステム全体のシミュレーションモデルの詳細を述べ、そのモデルを利用して、土中ダクトの形状・数量・土壌の熱的性質および植被状態が地中蓄熱量・室内気温に及ぼす影響について報告した。さらに前報<sup>(3)</sup>では蓄・放熱用ファンの運転方式の効果について試算した。本報では土中蓄熱温室の状態方程式を導き、ポントリャギンの最大原理を応用して室内温度とエネルギーの消費量を評価関数としたファンの最適運転制御の理論分析を行い、その計算例を示すものである。

### 記号説明

$A$	Hamiltonian関数の中で $u$ と関係のない項
$A_i$	( $i=s, f, g$ )それぞれ床, 壁, ダクト内表面の表面積 [ $m^2$ ]
$C_p$	温室内空気の比熱 [ $kJ/kg \cdot K$ ]
$C_{pc}$	壁体の比熱 [ $kJ/kg \cdot K$ ]
$e_a$	温室内空気の水蒸気分圧 [ $Pa$ ]
$e_{a0}$	温室内空気の水蒸気分圧の初期値 [ $Pa$ ]
$e(t, i)$	( $i=s, b, s'$ ) 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気分圧 [ $Pa$ ]
$E_{cu}$	温室内壁面における結露による凝縮潜熱量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
$E_g$	地中蓄熱ダクトでの蒸発/凝縮の潜熱伝達量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
$E_{su}$	温室内床面蒸発/凝縮の潜熱伝達量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
$F_{cd}$	床面が壁面に対する形態係数
$F_{dc}$	壁面が床面に対する形態係数
$g(t, \omega)$	条件関数
$G$	温室内乾燥空気の重量 [ $kg$ ]
$h_i$	( $i=s, b, t, g$ ) それぞれ床面, 外壁内表面, 外壁外表面, ダクト内表面, 葉面の熱伝達率 [ $kJ/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ]
$H$	Hamiltonian関数
$H_i$	( $i=cu, ct, su$ ) それぞれ外壁外表面, 外壁内表面, 床面の対流熱伝達量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
$J$	共状態ベクトルを導入した評価関数
$J_1$	省エネルギーを目的とした評価関数

\* 原稿受付 平成5年11月1日

\*1 吉林工業大学, 名古屋大学工学部共同研究員(同下)

\*2 名古屋大学工学部(〒464名古屋市中種区不老町)

- $J_2$  最適な温度環境を提供することを目的とした評価関数
- $J_3$  エネルギーと環境をともに考慮した評価関数
- $K_i$  ( $i=s, b, g$ )それぞれ床面, 外壁内表面, ダクト内表面, 葉面の湿気伝達率 [ $kg/m^2 \cdot Pa \cdot h$ ]
- $L_{cd}$  外壁内表面あるいは  $L_s, L_o$  の透過分が室内床面に射出する長波輻射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $L_{cu}$  温室内床面から外壁内表面に入射する長波輻射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $L_e$  外壁外表面から, あるいは  $L_s, L_o$  の反射により外界へ射出する長波輻射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $L_o$  外壁面に入射する大気長波輻射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $L_s$  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 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $L_{sd}$  温室内床面に到達する長波輻射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $L_{su}$  温室内床面から温室内各種表面に射出する長波輻射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $P_p$  大気圧 [ $Pa$ ]
- $Q_b$  地中伝熱量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $Q_{cc}$  外壁体の伝導熱量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $Q_g$  地中蓄熱ダクトからの顕熱蓄・放熱量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $Q_w$  フォンの発熱量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $r$  水の蒸発潜熱 [ $kJ/kg$ ]
- $Sc_{dd}$  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 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $Sc_{ds}$  外壁面を透過する天空日射量の総称 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $Sc_{ss}$  地面からの反射日射量のうち外壁面を透過する日射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_d$  外壁外表面に入射する直達日射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_{ddd}$  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 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_{dds}$  温室内床面に到達する天空日射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_e$  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 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_s$  外壁外表面に入射する天空日射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_{se}$  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 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_{ss}$  外壁外表面に入射する地面からの反射日射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $S_{su}$  温室内床面で反射する全日射量 [ $kJ/m^2 \cdot h$ ]
- $t_{ao}$  室内温度の初期値 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_{ac}$  最適室内温度 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_{ac1}$  最適室内温度上限 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_{ac2}$  最適室内温度下限 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_{ad}$  室内温度の下限値 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_{bo}$  外壁内表面温度の初期値 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_c$  壁体温度 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_i$  ( $i=s, a, b, t, o$ )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 [ $^{\circ}C$ ]
- $t_{s'}$  ダクト内表面温度 [ $^{\circ}C$ ]
- $u$  制御関数
- $V$  温室内空気の体積 [ $m^3$ ]
- $V_c$  外壁体の体積 [ $m^3$ ]
- $W_i$  ( $i=s, b, g$ )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 [ $kg/m^2 \cdot h$ ]
- $X$  温室内空気の絶対湿度 [ $kg/kg'$ ]
- $Y$  状態変数
- $\alpha$  ダミー変数
- $\beta$  評価関数  $J_3$  における温度環境の重み係数
- $\gamma$  評価関数  $J_3$  におけるエネルギーの重み係数
- $\delta_c$  壁厚さ [ $m$ ]
- $\varepsilon_j$  ( $j=s, o$ )それぞれ床面, 壁面の長波輻射率
- $\lambda$  共状態ベクトル
- $\lambda_c$  壁体の熱伝導率 [ $kJ/m \cdot h \cdot ^{\circ}C$ ]
- $\rho$  温室内空気の密度 [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_c$  壁体の密度 [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_j$  ( $j=st, cl$ )それぞれ床面, 壁面の長波反射率
- $\sigma$  ステファンボルツマン定数 [ $kJ/m^2 \cdot h \cdot K^{-4}$ ]
- $\tau$  時間 [ $h$ ]
- $\tau_{cl}$  外壁面の長波透過率

## 2. 土中蓄熱温室の最適制御の数学モデル

### 2-1 状態方程式の導入

本論文の目的は最適制御理論の現実の土中蓄熱運転への適用性を検証し, またそれを行った場合の評価関数による差を, 非最適運転時との比較を行い, 最適運転の効果を把握することである. そこで計算量を少なくするために, 第一報で解析した無栽培温室を対象として解析する. 栽培温室に対しても式が多くなるが同様な展開で解析することができる. 最適制御理論の適用性の検証に関してはこれが十分であるが, 実際の運転制御を行う場合は当然栽培温室に基かねばならないことは言うまでもない.

既報<sup>(1)</sup>により土中蓄熱温室のシミュレーションモデルは次の式(1)~(5)になる.

$$Q_w - Q_g / \lambda_g - H_{su} / \lambda_s - H_{cl} / \lambda_f + E_{su} / \lambda_s - E_{cu} / \lambda_f - E_g / \lambda_g = V \rho C_p (d t_a / d \tau) \quad (1)$$

$$\{(S_s + S_d + S_{ss} - S_e) - (Sc_{dt} + Sc_{ds} + Sc_{ss} - S_{se}) + (L_o + L_s - L_e) - (L_{cd} - L_{cu}) - H_{cut} + E_{cut} - H_{cl}\} / \lambda_f = V_c \rho_c C_{pc} (d t_c / d \tau) \quad (2)$$

$$W_s \lambda_s + W_g \lambda_g - W_b \lambda_f = G (d X / d \tau) \quad (3)$$

$$S_{ds} + S_{ddd} - S_{su} + L_{sd} - L_{su} - H_{su} - E_{su} - Q_b = 0 \quad (4)$$

$$S_s + S_d + S_{ss} - S_e + L_o + L_s - L_e - H_{cl} - Q_{cc} = 0 \quad (5)$$

文献<sup>(4)</sup>により室内空気の水蒸気圧と絶対湿度との関係は次の式で表示できる.

$$X = 0.622 e_a / (P_p - e_a) \quad (6)$$

式(6)を  $\tau$  について微分すると, 式(7)が得られる.

$$dX/d\tau = 0.622 P_p / (P_p - e_a)^2 d e_a / d \tau \quad (7)$$

$t_c$  は外壁体の平均温度で,  $t_b$  は外壁内表面温度である. シミュレーション結果によれば, 両者の差はほぼ僅かに  $1^{\circ}C$  ぐらいである. すなわち,  $t_c \approx t_b - 1$  とおくことにより,  $d t_c$  と  $d t_b$  の関係は  $d t_c = d t_b$  で表示される.

以上の関係式およびモデルの中の各項の計算式(既報<sup>(1)</sup>の表1を参照)を式(1)~(5)に代入して整理すると, 次の式(8)~(12)とする.

$$d t_a / d \tau = \{- (Aghgu + h_s \lambda_s + h_b \lambda_b) t_a + A h b t_b + A h s t_s + 0.622 r A h b e(t_b) / C_p P_p + 0.622 r A h s e(t_s) / C_p P_p - 0.622 r (Aghgu + A h s + A h b) e_a / C_p P_p + Q_w u + Aghgu t_a + 0.622 r Aghgu e(t_{s'}) / C_p P_p\} / (V \rho C_p) \quad (8)$$

$$d t_b / d \tau = \{h b t_a - h b t_b - 0.622 r h b e(t_b) / C_p P_p + [F_{cd} F_{dc} \rho_{st} (1 - \tau_{cl}) - 1] \sigma \varepsilon_c (L_b + 273.16)^4 / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) + 0.622 r h b e_a / C_p P_p - h t_l \tau - \sigma \varepsilon_c (L + 273.16)^4 + (1 - \tau_{cl} \rho_{cl}) F_{dc} \sigma \varepsilon_s (L_s + 273.16)^4 / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) + (S_s + S_d + S_{ss} - S_e) - (Sc_{dt} + Sc_{ds} + Sc_{ss} - S_{se}) + h t_l o + (1 - \tau_{cl} \rho_{cl}) [1 + F_{cd} F_{dc} \rho_{st} (\tau_{cl} - \rho_{cl})] (L_o + L_s - L_e - L_{cd} + L_{cu}) / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc})\} / (V_c \rho_c C_{pc}) \quad (9)$$

$$d e_a / d \tau = \{A h b e(t_b) - (A h s s' + A h b s' + Aghgu) e_a + A h s e(t_s) + Aghgu e(t_{s'}) - (1 - e_a / P_p)^2 / G C_p\} / (V \rho C_p) \quad (10)$$

$$0 = h s \lambda_s + (1 - \rho_{st}) \sigma \varepsilon_c (L + 273.16)^4 / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) + 0.622 r h s e_a / C_p P_p - 0.622 r h s e(t_s) / C_p P_p - h s t_s + (F_{cd} F_{dc} \rho_{cl} - 1) \sigma \varepsilon_s (L_s + 273.16)^4 / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) + (1 - \rho_{st}) \tau_{cl} (L_o + L_s - L_e - L_{cd} + L_{cu}) / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) - Q_b + S_{ds} + S_{ddd} - S_{su} \quad (11)$$

$$0 = \lambda_c / \delta_c L_b - F_{cd} F_{dc} \tau_{cl} \rho_{cl} \sigma \varepsilon_c (L_b + 273.16)^4 / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) - F_{dc} \tau_{cl} \sigma \varepsilon_s (L_s + 273.16)^4 / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) - \sigma \varepsilon_c (L + 273.16)^4 - h t_l \tau - \lambda_c / \delta_c L_o + h t_l o (S_s + S_d + S_{ss} - S_e) + (1 - \rho_{cl} - \rho_{st} F_{cd} F_{dc} (\rho_{cl} + \tau_{cl} - \rho_{cl}^2)) (L_o + L_s - L_e - L_{cd} + L_{cu}) / (1 - \rho_{st} \rho_{cl} F_{cd} F_{dc}) \quad (12)$$

ここで  $e(t_i) = 4.58085 \exp\{17.2693882 \ln(i) / (i + 237.3)\}$  ( $i=b, t, s, s'$ ) (13)

(8)~(12)式の右辺をそれぞれ関数 $f$ で簡記してマトリックスでこれを表示すれば、式(14)で表される。

$$\begin{Bmatrix} dt_a/d\tau \\ dt_b/d\tau \\ de_a/d\tau \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t_a, t_b, e_a, t_s, u) \\ f_2(t_a, t_b, e_a, t_s, t) \\ f_3(t_b, e_a, t_s, u) \\ f_5(t_a, t_b, e_a, t_s) \\ f_6(t_b, t_s, t) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

式(11, 12)の中に $t_s, t_t$ については微分項がなく、 $t_a, t_b, e_a$ の代数方程式で表示されるから、状態方程式は式(8, 9, 10)の3個しかないことがわかる。

### 2.2 状態方程式の初期条件

$t_a, t_b, e_a$ の実験データがあるので、これを初期条件とする。

$$t_a(0) = t_{a0}, \quad t_b(0) = t_{b0}, \quad e_a(0) = e_{a0}$$

### 2.3 室内温度 $t_a$ の制約条件

植物が正常に成長するためには、 $t_a$ は低過ぎ(あるいは高過ぎ)てはいけない。既報<sup>(1)</sup>の計算結果により、本研究における外気条件で $t_a$ の最大値は30℃以下であるので、 $t_a$ の上限制約条件は考慮しない。そこで本研究における $t_a$ の制約条件は次の不等式で与えられる。

$$g(t_a) = t_a - t_{ad} >= 0 \quad (15)$$

### 2.4 制御についての制約条件

土中蓄熱の制御は軸流ファンのon-off制御によるので、ファンのon状態を $u=1$ , off状態を $u=0$ とすると、制御関数 $u$ の値は二値(0, 1)である。

### 2.5 評価関数

評価関数 $J$ は最適制御の目的により異なるが、本研究では次の3種類の評価関数について検討する。1) 最大限度の省エネルギーを目的とする。2) 温室内の植物の生育に最適な温度環境を提供することを目的とする。3) エネルギーと環境の両者を勘察する。後者は仮想とする最大成長を与えるスケジュールがあることとして、これを最小エネルギー量にて達成することに相当する。3種類の評価関数はそれぞれ式(16), (17), (18)で示される。

$$J_1 = \int_{T_0}^{T_f} Q_w d\tau \quad (16)$$

$$J_2 = \int_{T_0}^{T_f} (t_a - t_{ac})^2 d\tau \quad (17)$$

$$J_3 = \int_{T_0}^{T_f} (Q_w + \beta(t_a - t_{ac})^2) d\tau \quad (18)$$

$J_3$ は $J_1$ と $J_2$ に重み付けして加え合わせるものである。以上により、土中蓄熱温室の最適制御問題は式(8~10)と式(15)で示される制約条件付き状態方程式から、評価関数 $J$ を最小にする制御関数 $u^*(\tau)$ のon-offのスケジュールをみつけることである。

## 3. 最大原理による最適制御関数の確定

### 3.1 状態制約条件の簡易化

不等式で表示される制約条件式(15)の中にダミー変数 $\alpha$ を導入して等式制約式(19)とする。

$$g(t_a) - 1/2\alpha^2 = 0 \quad (19)$$

式(19)を微分して、次の式になる。

$$dg/d\tau = \alpha d\alpha/d\tau \quad (20)$$

式(8)を式(20)に代入すると、新たな状態方程式(21)を得る。

$$\begin{aligned} d\alpha/d\tau &= f_1(t_a, t_b, e_a, t_s, u)/\alpha \\ &= f_4(t_a, t_b, e_a, t_s, \alpha, u) \end{aligned} \quad (21)$$

式(19)の時間が0における上式の初期条件を求める。

$$\alpha(0) = +(2g(t_a(0)))^{1/2} \quad (22)$$

式(22)と式(8~10)と連立してマトリックスで表示すれば、式(23)のような4次元の制約条件を含まない状態方程式になる。

$$\begin{aligned} dY/d\tau &= f \\ dY/d\tau &= \begin{Bmatrix} dt_a/d\tau \\ dt_b/d\tau \\ dt_c/d\tau \\ d\alpha/d\tau \end{Bmatrix}, \quad f = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

### 3.2 最適制御の判断式の確定

ここではまず評価関数を $J_1$ として最適運転ポリシーを求める。評価関数 $J_1$ についてポントリヤギンの最大値原理<sup>(7)</sup>により共状態ベクトル $\lambda$ を導入した評価関数 $J$ は次の式になる。

$$J = \int_{T_0}^{T_f} \{Q_w + \lambda(t - dY/d\tau)\} d\tau \quad (24)$$

これと対応するHamiltonian関数は式(25)になる。

$$H = Q_w + \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4 \quad (25)$$

評価関数 $J$ を極小値とする必要条件是次の3つである。

$$\partial H / \partial \lambda = dY/d\tau \quad (26)$$

$$-\partial H / \partial Y = d\lambda/d\tau \quad (27)$$

$$H(Y^*, \lambda^*, u^*, \tau) = \min H(Y^*, \lambda^*, u, \tau) \quad (28)$$

本研究の問題は終端状態が自由にするので、式(27)の終端値は(29)で表示される。

$$\lambda(t_f) = 0 \quad (29)$$

式(26), (27)と状態方程式の初期条件及び式(29)は  
 両点境界値問題として解明できるが, 式(28)につい  
 てはさらに工夫を要する. 式(25)のHの中に(8)~(10),  
 (21)を代入し, さらにその中で制御関数と関係がない  
 項をAとすれば, Hの展開式は式(30)になる.

$$H = \{Q_w + (\lambda_2 + \lambda_4/\alpha)(Q_w - Q_g - E_g)/(V\rho C_p) - \lambda_3(1 - e\alpha/P_p)^2 E_g/(GC_p)\} u + A \quad (30)$$

$$= \{Hu_1 - Hu_2\} u + A$$

Hを極小にするために次の判断式(31)が必要条件で  
 ある.

$$u^* = \begin{cases} 0 & Hu_1 > Hu_2 \\ 1 & Hu_1 \leq Hu_2 \end{cases} \quad (31)$$

これは式(28)の具体的に表示された最適制御の判断  
 式である.

以上のようにまず両点境界値問題を解明し, Yとλ  
 を求め, ついで式(31)によってファンの制御を判断す  
 ることによりファンの最適運転のポリシーが定まる.

#### 4. 数値計算方法の概要

##### 4.1 非線形連立方程式への変換

本研究の状態方程式は非線形微分方程式であるので,  
 普通の数値計算方法で計算してもなかなか収束しない.  
 ゆえに, ここでは次の計算方法を採用する. すなわち,  
 状態方程式(23)の微分項に対して時間差分をとって整  
 理して, これを微分項のない2つの非線形方程式(11),  
 (12)と連立させると, 次の式(32)のような六次元の  
 非線形連立方程式になる.

$$\begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} f_1(t_a, t_b, e_a, t_s, u, \tau) \\ f_2(t_a, t_b, e_a, t_s, t_i, \tau) \\ f_3(t_a, e_a, t_s, u, \tau) \\ f_4(t_a, t_b, e_a, t_s, \alpha, u, \tau) \\ f_5(t_a, t_b, e_a, t_s) \\ f_6(t_b, t_s, t_i) \end{cases} \quad (32)$$

これに対してダンピングニュートン反復法を用いて  
 計算すれば, 収束は速くなる.

##### 4.2 最適制御計算方法

最適制御理論より, 本研究用の具体的な最適制御計  
 算方法は次のようになる.

- 1) 初期の制御関数を仮定して $u^{(1)}(\tau)$ とする.
- 2) ダンピングニュートン反復法を用いて六次元連立  
 非線形方程式を解いてYを求める.
- 3) オイラー法を用いて逆時間で式(27), (29)から連  
 立した常微分方程式の初期値問題を計算し, λを求め  
 る. 計算の過程に制御関数 $u^{(2)}(\tau)$ は式(26)によ

り決めている.

4)  $u^{(1)}(\tau)$ と $u^{(2)}(\tau)$ を比較して, 両者の誤差が  
 許容誤差より小さくなったとき, 計算を終える. そう  
 でないとき, 制御関数を $u^{(2)}(\tau)$ として2)に戻つ  
 て繰り返し計算する.

以上のように繰り返し計算すれば, 式(31)により決まっ  
 た最適制御関数 $u^*(\tau)$ によって制御したシステムの  
 最適状態を求められる. 最適制御計算を含むシステム  
 の全体のシミュレーションプログラム略フローチャー  
 トは図1に示す.

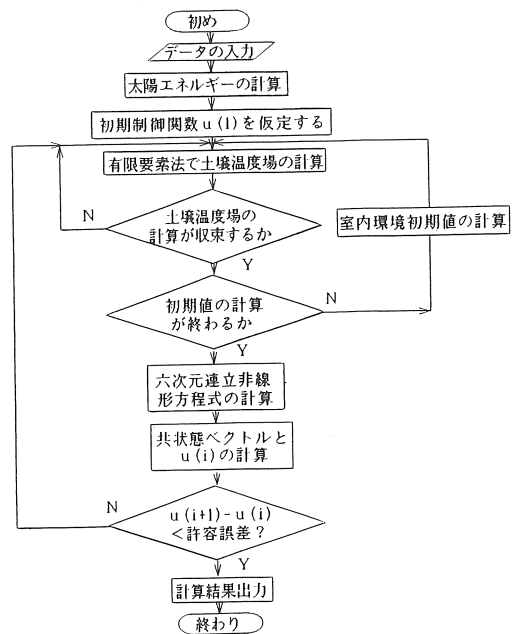


図1 最適制御計算のフローチャート

#### 5. 省エネルギーを目的とする最適制御の計算例

室内温度の制約条件が最適制御に及ぼす影響および  
 最適制御の効果を調べるために, 20個のダクトを持つ  
 土中蓄熱温室について評価関数を $J_1$ とし, 室温の下  
 限值を6.0, 7.0, 7.5, 8.5℃の4種類にしたときの最適制  
 御計算を行った. 計算用日射, 外気条件は既報<sup>(2)</sup>の  
 表1に示す. 土中温度場の計算域の境界条件は既報<sup>(1)</sup>  
 と同じである.

なお, 以下の計算例は便宜上, 同一気象条件が繰り  
 返すものと仮定した周期定常状態の計算結果を示す.

##### 5.1 電力消費量と室内温度

表1は4種類の制約条件Iadにおける電力消費量・蓄  
 /放熱量と室内最低気温の計算結果の比較を示す. こ

れにより、 $t_{ad}$ が6°Cの場合は、蓄/放熱しないでも、室内最低気温6°C以上を保つことができる。  $t_{ad}$ が高くなるほど、蓄/放熱量および電力消費量が大きくなるが、 $t_{ad}$ が8.5°Cの場合にはファンが一日中onになり、電力消費量が一番大きい。  $t_{ad}$ をこれ以上に設定するときは、この蓄熱システムでは与えられた気象条件下において早朝の最低室温を下限值以上に保つことはできない。

表1 電力・蓄/放熱量と室内最低気温の比較

$t_{ad}$	Heat Storage Charge	Discharge	Electric Power	Discharge Rate	Minimum Temperature
	KJ/m <sup>2</sup> day				°C
6°C	0	0	0	0.00	6.3
7°C	631	43	288	0.07	7.0
7.5°C	1565	889	612	0.57	7.5
8.5°C	3722	3607	864	0.97	8.5

図2はこの4種類の $t_{ad}$ に対して室内温度の計算結果を示す。図2中 $u=1$ すなわちファン運転状態において斜線をつけた部分は蓄熱運転を、白抜き部分は放熱運転を示す。これにより、 $t_{ad}$ が8.5°Cのときは、昼間は連続して蓄/放熱運転するので、室温が、室温が他の場合より低いことがわかる。これに対して、制約条件 $t_{ad}$ が6°Cの時は、一日中蓄熱しないので、昼間の室温は最も高い。 $t_{ad}$ が7.5°Cの場合には12時から蓄熱を始めるので、午後の室温は急激に下降する。

5.2 最適制御関数と最適共状態ベクトル

図2中に表1における最適制御関数 $u$ すなわちファンの最適運転スケジュールの計算結果も示した。これ

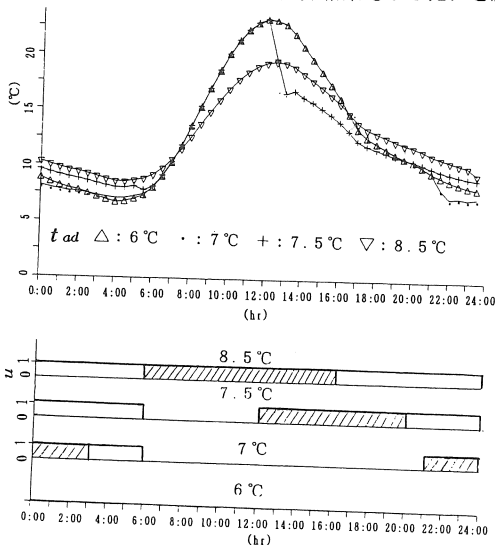


図2 室内温度と最適制御関数の比較

により、制約条件の7°Cの場合にファンの運転時間は21:00から6:00まで僅かに9時間であることがわかる。

これに対して7.5°Cの場合に、ファンが18時間連続運転し、電力消費量が大きい。図3はそれぞれの最適共状態ベクトル関数の経時変化を示す。これにより、制約条件7°Cの時は、最適共状態ベクトルはいずれも小さい。

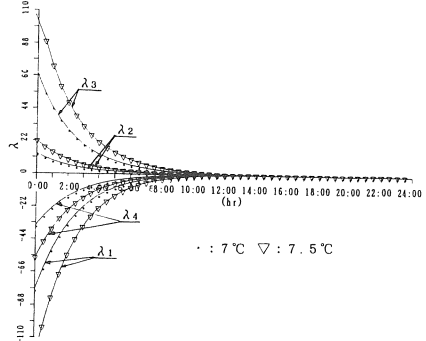


図3 最適共状態ベクトルの経時変化

6. 評価関数を $J_2$ とする場合

植物の生育に最適な温度環境を提供することを目的とする最適制御の効果を調べるために、本章は環境評価関数 $J_2$ により最適運転ポリシーを求め、最適制御のシミュレーションを行った。計算の結果を非最適運転時のそれと比較する。

6.1 最適室内温度のスケジュール

各種の植物の生育に最適な温度環境は対象によって異なるので、計算例として植物はトマトとする。文献<sup>(6)</sup>により、トマトの最大成長を与える最適室内温度のスケジュールを参考として図4中の $t_{ac1}$ 、 $t_{ac2}$ で示す連続曲線を仮定した。2本の線は理想的な $t_a$ の制御範囲を示す。これを本章の最適室内温度の計算域とするとともに、下限の条件の最低値(7°C)を許容下限値 $t_{ad}$ として制約条件として与える。

6.2 最適制御の判断式の確定

最適制御の評価関数が異なるので、最適制御ポリシーは当然変化する。評価関数 $J_2$ について、共状態ベクトルを導入した評価関数 $J$ は式(33)になる。

$$J = \int_{T_0}^T [(t_a - t_{ac})^2 + \lambda(t - dY/dT)] dT \quad (33)$$

Hamiltonian関数は式(34)になる。

$$H = (t_a - t_{ac})^2 + \lambda_1 I_1 + \lambda_2 I_2 + \lambda_3 I_3 + \lambda_4 I_4 \quad (34)$$

3.2と同じような方法で解明すれば、Hの展開式は式(35)になる。

$$H = A + \{(\lambda_2 + \lambda_4/\alpha)(Q_w - Q_g - E_g)/(V\rho C_p) - \lambda_3(1 - e_a/P_d)^2 E_g/(GC_p)\} u + (t_a - t_{ac})^2 = A + \{H u_1 - H u_2\} u + (t_a - t_{ac})^2 \quad (35)$$

$$t_{ac} = \begin{cases} t_{ac1} & t_a > t_{ac1} \\ t_a & t_{ac2} \leq t_a \leq t_{ac1} \\ t_{ac2} & t_a < t_{ac2} \end{cases} \quad (36)$$

Hを極小にするために次の判断式(37)が必要条件となる。

$$\left. \begin{aligned} & \{Hu_1 - Hu_2\} > (t_a - t_{ac})^2 \text{のときに} \\ & u^* = \begin{cases} 0 & Hu_1 > Hu_2 \\ 1 & Hu_1 \leq Hu_2 \end{cases} \\ & \{Hu_1 - Hu_2\} \leq (t_a - t_{ac})^2 \text{のときに} \\ & u^* = \begin{cases} 1 & t_a > t_{ac1}, t_a < t_{ac2} \\ 0 & t_{ac2} \leq t_a \leq t_{ac1} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

これは評価関数を  $J_2$  とするときのファンの最適運転のポリシーを得るための最適制御の判断式である。

### 6.3 環境評価関数 $J_2$ による最適制御の計算例

前章と同一の構造の土中蓄熱温室に対して、評価関数を  $J_2$  として、最適制御のシミュレーションを行った。計算結果を前報<sup>(1)</sup>で使用した非最適制御の計算結果と比較した。図4は両者の室内気温の計算結果の比較を示す。表2は両者の  $J_2$  と室内最低、最高気温の計算結果を示す。

表2 評価関数を  $J_2$  とする計算結果の比較

	$J_2$ °C <sup>2</sup> /day	Maximum Temperature	Minimum Temperature
Optimal	27.2	23.2°C	7.4°C
Non-Optimal	90.0	21.4°C	7.9°C

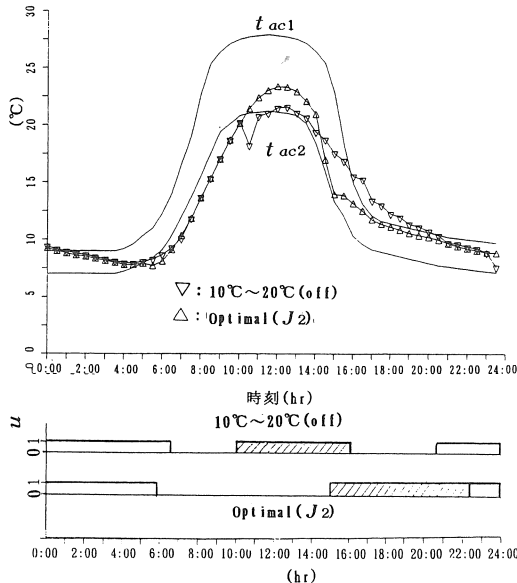


図4 室内気温と最適制御関数の比較

これらにより、既報<sup>(1)</sup>の非最適制御に対して最適制御の結果は  $J_2$  の値が大きく優っていることがわかる。午後3時から蓄熱するので、昼間室内の最高気温は高い。夜の最低気温は0.5°C低いけれども、また室内気温下限値の以上である。

### 6.4 最適制御計算結果の検証

本報の最適制御式の展開に基いた  $J_2$  の解は最適解であることを明らかにするために、次の逐次試算法を採用してこれを検証した。制約条件を7°Cとして、ファンをoffにする開始時刻を朝6, 8, 9, 10時の4種類とし、offの継続時間を30分きざみで延長して  $J_2$  を計算した。計算の結果を図5に示す。これにより、朝6時にファンをoffとする方法がそれより遅くoffにする方法より小さいことがわかる。また朝6時から午後3時までファンをoffとし、そこからonとする  $J_2$  が最小であることがわかる。これにより、表2の最適制御解は  $J_2$  の極小値を与える制御ポリシーであることが検証された。

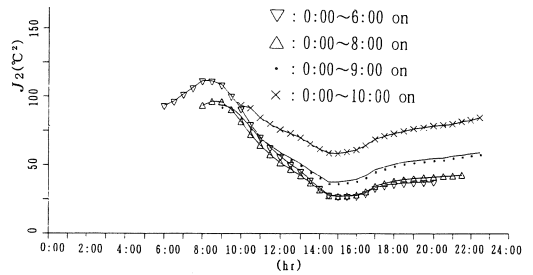


図5  $J_2$  についての逐次試算法の計算結果

## 7. エネルギー・環境複合評価関数 $J_3$ による評価と最適室温スケジュールの影響

以上により、 $J_1$  による場合と  $J_2$  による場合で最適運転ポリシーが異なることが判る。現実には  $J_1$  と  $J_2$  の組み合わせである  $J_3$  に基づくべきであろう。一方、 $J_2$ ,  $J_3$  では最適室温スケジュールそのものも結論に大きな影響を与えるはずである。そこで、本章では、紙数の関係でこの両者の効果を同時に確認するために、まず温度スケジュールを不連続性の台形とし、つぎに  $J_3$  の判断式を確定した上で同スケジュールに対する  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  の計算結果の比較を行って総合的に考察する。

### 7.1 台形の最適室内温度のスケジュール

文献<sup>(6)</sup>により、トマトの最大成長を与える最適室温

設定値のスケジュールは図7のような不連続曲線である。これを本章の最適室内温度の計算域とする。

### 7.2 $J_3$ による最適制御の判断式の確定

評価関数  $J_3$  について、共状態ベクトルを導入した評価関数  $J$  は式(38)になる。式(38)の中に、 $\gamma$  と  $\beta$  は重み係数であり、エネルギーと環境の重点のおき方や単位のとり方によって変化する。ここでは環境に重点において  $\beta:\gamma=10:1$  とする。

$$J = \int_{T_0}^{T_f} \{ \gamma Q_w + \beta (t_a - t_{ac})^2 + \lambda (f - dY/dT) \} dT \quad (38)$$

Hamiltonian関数は次の式になる。

$$\dot{H} = \gamma Q_w + \beta (t_a - t_{ac})^2 + \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4 \quad (39)$$

Hの展開式は次の式になる。

$$H = A + \gamma \{ Q_w + (\lambda_2 + \lambda_4 / \alpha) (Q_w - Q_g - E_g) / (V \rho C_p \gamma) - \lambda_3 (1 - e_a / P_p)^2 E_g / (G C_p \gamma) \} u + \beta (t_a - t_{ac})^2 = A + \gamma \{ H u_1 - H u_2 \} u + \beta (t_a - t_{ac})^2 \quad (40)$$

Hを極小にするために次の判断式(41)が必要条件となる。

$$u^* = \begin{cases} 1 & \text{Hu}_1 > \text{Hu}_2 \\ 0 & \text{Hu}_1 \leq \text{Hu}_2 \end{cases} \quad \text{当 } \gamma \{ H u_1 - H u_2 \} > \beta (t_a - t_{ac})^2 \text{ のときに}$$

$$u^* = \begin{cases} 0 & t_a > t_{ac1}, t_a < t_{ac2} \\ 1 & t_{ac2} \leq t_a \leq t_{ac1} \end{cases} \quad \text{当 } \gamma \{ H u_1 - H u_2 \} \leq \beta (t_a - t_{ac})^2 \text{ のときに}$$

これは評価関数を  $J_3$  とするときのファンの最適運転のポリシーを得るための最適制御の判断式である。

### 7.3 台形室温スケジュールによる計算例と結果の検証

前章と同一の構造の土中蓄熱温室に対して、評価関数を  $J_3$  とし、上述の台形最適室温スケジュールについて最適制御のシミュレーションを行って解を得た。その結果を理論最適値(Theoretical Optimal)と呼ぶ。つぎに、前章と同じように逐次試算法を用いて検証計算を行った。検証計算における最適値は逐次計算最小値(Calculated Optimal)と呼ぶ。表3は理論計算最適値と逐次計算最小値の  $J_1, J_2$  ならびに  $J_3$  の計算結果を示す。図6は6.3と同じ様な検証計算の結果を示す。

表3 評価関数の計算結果の比較

	$J_1$ (KJ/m <sup>2</sup> day)	$J_2$ °C <sup>2</sup>	$J_3$
Theoretical Optimal	684	159	2274
Calculated Optimal	504	112	1624

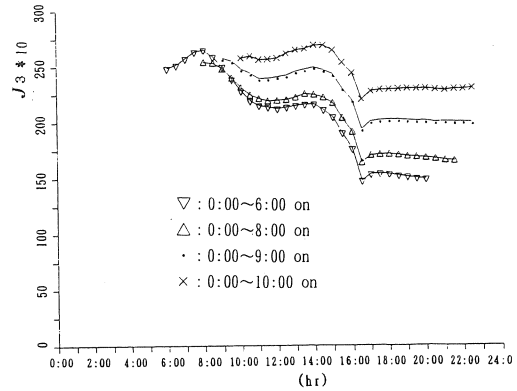


図6  $J_3$  についての逐次試算法の計算結果

表3により、理論最適値の  $J_1, J_2$  と  $J_3$  は逐次計算最適値より大きく、環境項とエネルギー項とも劣ることがわかる。図6により、理論最適値の  $J_2, J_3$  は極小ではあるが最少値ではなく、準最適点であることがわかる。前章の結果と比較に考察すると、この現象は最適温度スケジュールが16時に不連続的に約10°C下がっていることに起因しているように思われる。

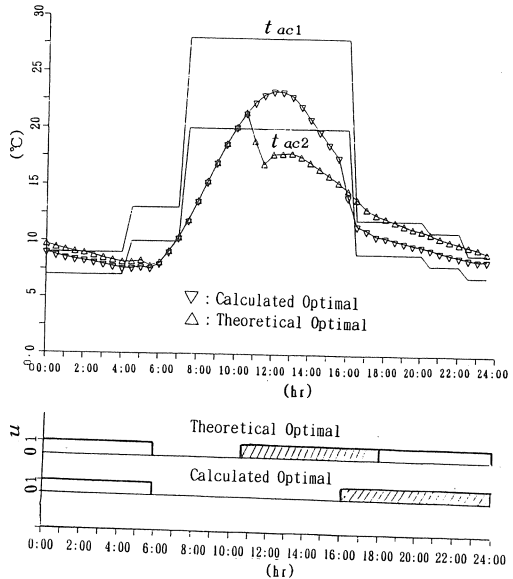


図7 極値点と極小点の室内気温の比較

図7の中に両者の室内気温も示した。これにより、昼間最適点の室内気温が高いし、夜間の気温が少々低い、許容温度の範囲内である。

以上のように、省エネルギーと植物に最大な成長の温度環境の最適制御は逐次試算によって求められ、最適室温のスケジュールが最適制御に及ぼす影響が大き

いと言える。すなわち評価関数に大きな不連続性を含むときは、最適理論による計算方法は必ずしも最適解を得られないことがある。これを解決するには、その不連続なスケジュールを前章に示したような連続スケジュールに近似させることであろう。

## 8. 結論

1) 土中蓄熱温室の状態方程式を導き、状態制約条件付き土中蓄熱温室の最適制御の数学モデルを提案した。

2) ポントリヤギンの最大値原理を応用して省エネルギー、植物最大成長のための最適温度環境ならびに両者を考慮した3種類の評価関数に基いたファンの最適運転制御の理論解析を行い、最適運転の判定式を導出した。

3) 計算を速く収束させるために非線型連立方程式より非線型微分方程式を解明する方法を採用した。

4) 状態制約条件は最適エネルギーの消費量に及ぼす影響が非常に著しい。本研究の計算範囲内で、室内温度の制約条件(夜間最低温度設定値)が高くなるほどファンの運転時間が長く電力消費量が多くなる。中国長春市の気象条件では10月中旬のとき600Wのファン、20本のダクトを持つ土中蓄熱温室の夜間最低気温の最高値は8.5℃が限度となった。

5) 最適温度スケジュールの連続性は最適制御に及ぼす影響が大きい。不連続な場合は理論解は準最適値であり、最適解は逐次計算を行う必要が生じる。このような場合は、最適室温スケジュールを連続曲線に近似させることにより理論解が最適解として採用できる。

6) 前項において、本研究における室外気象条件での最適ポリシーは朝6時から16時までファンをoffとし、その他の時間帯にファンをonとする方法であることが判る。しかし、この結論は本研究における室外気象条件の上で得たものであり、地域と季節などによって異なることをいうまでもない。その意味を一般化すると、日射の射入による室温上昇が始まると同時に温室集熱を開始して室温をできるだけ高め、夕方室温が下がると同時に蓄熱運転を開始して真夜中まで行い、翌日早朝まで放熱運転を行うということである。

以上のように本研究は太陽熱土中蓄熱付温室のトータルシミュレーションモデルの作成に始まり、土中蓄熱運転の最適制御に至るまでの数学モデルの作成を行い、その解をいくつかの試算例を用いて報告した。またこの理論構成によって実際の温室運転の最適制御を行うための基礎を確立した。

本研究の研究費の一部は平成5年度文部省科学研究

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)からの補助によるものである。

## 9. 文献

- (1) 鄭 明傑・中原信生・謝毓・張徳駿, 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), 太陽エネルギー, 18-6(1992), 42
- (2) 鄭 明傑・中原信生, 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2報 シミュレーションによるシステムパラメータの影響の検討), 太陽エネルギー, 19-1(1993)
- (3) 鄭 明傑・中原信生, 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3報 栽培温室のシミュレーションと蓄熱制御のエネルギー性能について), 太陽エネルギー, 19-4(1993)
- (4) Michihiro hara and Yoshio Nishiyama, Mathematical Expressions of Moist Air Conditions, Journal of the Faculty of Agriculture, Iwate University, 16-2(1982), 107
- (5) 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), 神奈川園試報, 28(1981), 39
- (6) 王 徳人, 非線性方程組解法と最優化方法, (1979), 人民教育出版社, 北京, 中国
- (7) 王 貞栄, 最優制御, (1988), 冶金工业出版社, 北京, 中国
- (8) 嘉納秀明, システムの最適理論と最適化, (1987), コロナ社, 東京
- (9) 大野 豊・磯田和男, 新版数値計算ハンドブック, (1990), オーム社, 東京
- (10) 高橋安人, 最大原理による最適制御論, 計測と制御, 3-1(1964)
- (11) 市川邦彦, 最適制御とその条件, 計測と制御, 10-5(1971)
- (12) 市川邦彦・田村捷利, 最短時間制御問題の解法, 計測と制御, 12-5(1973), 21
- (13) 志水清孝, システムの制約条件付最適化手法, 計測と制御, 9-7(1970), 519
- (14) P. Dorato and H.K. Knudsen, periodic Optimization with Applications to Solar Energy Control, Automatic, 15(1979), 673
- (15) C. Byron Winn and Dwight Ellsworth Hull, Optimal Controllers of the Second Kind, Solar Energy, 23(1979), 529
- (16) M. Kovarik and P. F. Lesse, Optimal Control of Flow in Low Temperature Solar Heat Collectors, Solar Energy, 18(1976), 431
- (17) Robert. C. Winn and C. Byron Winn, Optimal Control of Auxiliary Heating of Passive-Solar-Heated Buildings, Solar Energy, 35(1985), 419
- (18) Chris Rorrres, Abraham Orbach and Robert Fischl, Optimal and Suboptimal Control Policies for Solar Collector System, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-25-6(1980), 1085
- (19) C. B. Winn and R. C. Winn, Optimal Control of Solar Heating and Off-Peak Energy Storage Installations, Transactions of the ASME, 105(1983), 50
- (20) C. Saltiel and M. Sokolov, Optimal Control of a Multicomponent Solar Collector System, Solar Energy, 34-6(1985), 463
- (21) A. Rabl, P. Bendt and H. W. Gaul, Optimization of Parabolic Trough Solar Collectors, Solar Energy, 29-5(1982), 407
- (22) V. M. Puri, Greenhouse Floor Heating System Optimization Using Long-Term Thermal Performance Design Curves, Solar Energy 28-6(1982), 469
- (23) M. Kovarik, Optimal Distribution of Heat Conducting Material in the Finned Pipe Solar Energy Collector, Solar Energy, 21(1978), 477
- (24) J. J. Jurinak and I. Abdel-Khalik, Properties Optimization for Phase-Change Energy Storage in Air-Based Solar Heating Systems, Solar Energy, 21(1978), 377
- (25) T. Boular and A. Baille, 1986, Simulalysis of Soil Heat Storage Systems for a Solar Greenhouse, 1. Analysis, Energy Agriculture, 5(1986), 175