

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5報 数値計算アルゴリズムによる制御関数と評価関数の特性解析)

STUDY ON OPTIMIZATION OF THE GROUND THERMAL STORAGE
IN THE GREENHOUSE

(Part 5 The characteristic analysis of the control and performance functions
with the numerical calculation algorithm)

鄭 明 傑^{*1}

Mingjie ZHENG

中 原 信 生^{*2}

Nobuo NAKAHARA

Abstract

In this paper, optimal control strategies of the ground thermal storage system in the greenhouse are discussed applying the Sequential Unconstrained Minimization Technique with the performance functions. The third performance function which is the combination of the room environment and the energy consumption is discussed from the viewpoint of the characteristics of the optimal points and the performance of convergence in the numerical calculation. For this purpose, the three kinds of weightings are taken into account for composing the performance function and the SUMT of numerical calculation algorithm of the optimal control with constraints. Calculation results disclosed the characteristics of the scope of the values for the control functions and the relations between the optimal solutions and the optimal room air temperatures, the weightings for the optimal room air temperature and the energy consumption in performance function.

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

1. まえがき

前報⁽¹⁾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エネルギーの消費量と室内温度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、最適運転ポリシーを求めて、最適制御のシミュレーションを行った。本報では、まず不連続非線型制御関数を連続線型制御関数に変換し、最適制御の数値計算アルゴリズム(罰則関数付き山登り法あるいはSUMT法)を用いて土中蓄熱温室の最適運転制御のシミュレーションモデルを導出した。この計算方法はポントリャギンの最大原理による最適制御の数値計算方法より簡単な方法である。

つぎに最適制御シミュレーション結果により、制御関数の値の領域と状態・制御制約条件との関係を明らかにした。これにより、エネルギーの消費量、室内温度及びこれらの両者とも考慮したもの、という三種類の評価関数の全体像を把握し、これらの評価関数に対

応した運転制御の最適解を求めた。

記号説明

e_a	温室室内空気の水蒸気分圧 [Pa]
f	土中蓄熱温室のシミュレーションモデルの中の非線型関数
$g_i (i=a,b)$	それぞれ状態の制約条件と制御関数の制約条件付き罰則関数
h	罰則関数を含む評価関数
$J_j (j=1,2,3)$	それぞれ省エネルギー、環境及び両者とも考慮した評価関数
$J_{2j} (j=a,b)$	それぞれ連続と不連続最適室温スケジュールに基づく環境評価関数
$J_{3j} (j=a,b)$	それぞれ連続と不連続最適室温スケジュールに基づくエネルギーと環境の両者を考慮した評価関数
k	数値計算ステップ数
M	ペナルティ関数法あるいはSUMT外点法の罰則定数
Q_w	ファンの発熱量[kJ/m ² ・h]
t_{ac}	最適室内温度 [°C]
t_{ac1}	最適室内温度スケジュールの上限値 [°C]
t_{ac2}	最適室内温度スケジュールの下限値 [°C]
t_{ad}	室内温度の下限値 [°C]
$t_i (i=a,b,s,n)$	それぞれ室内空気、外壁内表面、床面、外壁外表面の温度 [°C]
u^*	最適制御解
u_1	ファンが on から off になる時刻 [h]
u_2	ファンが off から on になる時刻 [h]
Δu	制御関数変化ステップ [h]

*原稿受付 平成9年4月14日

*1 株式会社三晃空調(〒450 名古屋市中原区名駅南 2-14-19)

*2 神奈川大学工学部(〒221 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)

β	評価関数 J_3 における環境項の重み係数
γ	評価関数 J_3 におけるエネルギー項の重み係数
τ	時間・時刻 [h]
τ_o	積分開始時刻 [h]
τ_f	積分終了時刻 [h]

2. 土中蓄熱温室の最適制御の数学モデル

2.1 土中蓄熱温室のシミュレーションモデル

前報⁽¹⁾により本研究におけるシステムのシミュレーションモデルは次式で示されるような硬い微分方程式で表される。

$$\begin{bmatrix} d t_a / d \tau \\ d t_b / d \tau \\ d e_a / d \tau \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t_a, t_b, e_a, t_s, u) \\ f_2(t_a, t_b, e_a, t_s, t_t) \\ f_3(t_b, e_a, t_s, u) \\ f_4(t_a, t_b, e_a, t_s) \\ f_5(t_b, t_s, t_t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 室内温度の制約条件

植物が正常に成長するためには、室内温度に下限値が存在する。この室内温度の制約条件 t_{ad} は次の不等式で与えられる。

$$t_a - t_{ad} \geq 0 \quad (2)$$

2.3 制御関数 u についての制約条件

土中蓄・放熱の制御はファンの *on-off* 運転制御によるので、ファンの *on* 状態を $u=1$, *off* 状態を $u=0$ とすると、制御関数の値は二値(0,1)であり、これは不連続非線型関数である。

2.4 評価関数

評価関数は最適制御の目的により異なるが、本報では前報⁽¹⁾と同じく次の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) 省エネルギーと最適室内温度環境との両者とも考慮する。これらの3種類の評価関数はそれぞれ式(3),(4),(5)で示される。

$$J_1 = \int_{\tau_o}^{\tau_f} Q_w \cdot u d\tau \quad \begin{matrix} u=0 & \text{ファンが off} \\ u=1 & \text{ファンが on} \end{matrix} \quad (3)$$

$$J_2 = \int_{\tau_o}^{\tau_f} (t_a - t_{ac})^2 d\tau \quad (4)$$

$$J_3 = \int_{\tau_o}^{\tau_f} [\gamma Q_w \cdot u + \beta (t_a - t_{ac})^2] d\tau \quad (5)$$

ここで

$$t_{ac} = \begin{cases} t_{ac1} & t_a > t_{ac1} \\ t_a & t_{ac2} \leq t_a \leq t_{ac1} \\ t_{ac2} & t_a < t_{ac2} \end{cases} \quad (6)$$

以上により、土中蓄熱温室の最適制御問題は式(1)と式(2)で示されるような制約条件付き硬い常微分連立方程式と2.3に述べた制御関数の制約条件に基づいて、評価関数(3),(4),(5)を最小にする制御関数 u^* の *on-off* スケジュールを見つけることである。

3. 最適制御の数値計算モデル

前報⁽¹⁾に示したように、本研究における最適制御問題はポントリヤギン最大値原理を用いて解くことができるが、その方法は複雑、難解であり、実用化の視点から見ると不便である。そこで、実用化のためにより簡単な数値計算方法を提案する。

3.1 制御関数の変換

本研究における最適制御問題の制御関数は不連続非線型であるので、最適制御の数値計算アルゴリズムは直接利用できない。前報⁽¹⁾の最適制御の計算結果により、ファンの *on*→*off*, *off*→*on* 運転の変換はそれぞれ1日1回ずつであることがわかる。この特性を利用して、ファンが *on* から *off* になる時刻を u_1 とし、*off* から *on* になる時刻を u_2 とすると、図1に示されるように、不連続非線型制御関数 u を2つの連続線型制御関数 u_1, u_2 に変換することができる。

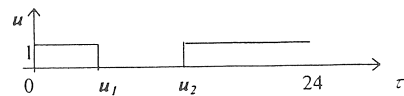


図1 制御関数の変換

3.2 制御関数 u_1, u_2 の制約条件の変換

図1により、2.3節に示した不連続非線型制御関数 u の制約条件は式(7)で示されるように、連続線型制御関数 u_1, u_2 の不等式制約条件に変換される。

$$0 < u_1 \leq u_2 \leq 24 \quad (7)$$

3.3 シミュレーションモデルの変換

u の u_1, u_2 への変換結果を導入すれば、土中蓄熱温室のシミュレーションモデルも次式のように変換される。

$$\begin{bmatrix} d t_a / d \tau \\ d t_b / d \tau \\ d e_a / d \tau \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t_a, t_b, e_a, t_s, u_1, u_2) \\ f_2(t_a, t_b, e_a, t_s, t_t) \\ f_3(t_b, e_a, t_s, u_1, u_2) \\ f_4(t_a, t_b, e_a, t_s) \\ f_5(t_b, t_s, t_t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.4 評価関数の変換

同様に評価関数 J_1 , J_3 も次の式(9), (10)で示されるように変換される。

$$J_1 = Q_w[24 - (u_2 - u_1)] \quad (9)$$

$$J_3 = \gamma Q_w[24 - (u_2 - u_1)] + \beta \int_{\tau_0}^{\tau_f} (t_a - t_{ac})^2 d\tau \quad (10)$$

3.5 最適制御の数値計算アルゴリズム

本研究における評価関数は汎関数であるので、これの最適化問題は関数の集合の中から評価関数を最小にする関数を求めることとなる。関数の最適点を求めるときには、関数の勾配により進む方向を決めるが、最適制御問題における汎関数に対しては、評価関数の勾配関数により進む方向を決める。この場合、典型的な最適制御の数値計算アルゴリズムである山登り法⁽⁶⁾を利用すれば、勾配関数を求めるために、まず状態方程式と共状態ベクトル微分方程式による両点境界値問題を解かなければならない。しかし、その方法では計算時間が長く、微分方程式の境界値に対する感度が高い場合には、計算が収束しないことも頻発する。そこで、本報では評価関数の差分と制御関数の差分を利用して算出した微分を勾配関数に近似する計算方法を採用した。

制約条件の扱い方に対して、SUMT外点法とペナルティ関数法⁽⁵⁾を導入することにより、不等式制約条件付き最適制御問題を制約条件なし最適制御問題に変換した。その最適制御のアルゴリズムは式(11)で示される。

$$u_i^{(k+1)} = u_i^{(k)} - \Delta u \cdot \text{sign}\{(h^{(k)} - h^{(k-1)}) / (u_i^{(k)} - u_i^{(k-1)})\} \quad i=1,2 \quad (11)$$

ここで

$$h = J_j + g_a + g_b \quad j=1,2,3 \quad (12)$$

g_a について、SUMT外点法を用いる場合、

$$g_a = 0 \quad t_a - t_{ad} > 0 \quad (13)$$

$$= M \cdot (t_a - t_{ad}) \quad t_a - t_{ad} \leq 0$$

g_b について、ペナルティ関数法により、

$$g_b = 0 \quad 0 < u_1 \leq u_2 \leq 24 \quad (14)$$

$$= M \quad u_1 \leq 0 \text{ or } u_1 > u_2 \text{ or } u_2 > 24$$

数値計算アルゴリズムのフローチャートを図2に示す。

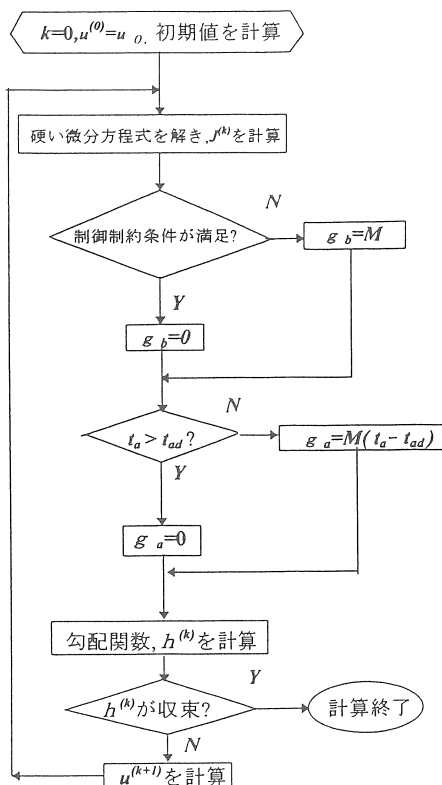


図2 数値計算アルゴリズムのフローチャート

4. 評価関数を J_1 とする最適解

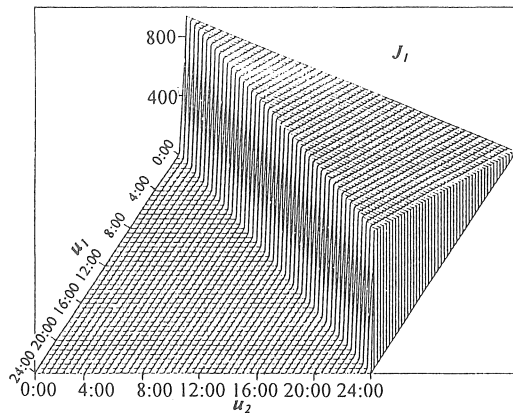
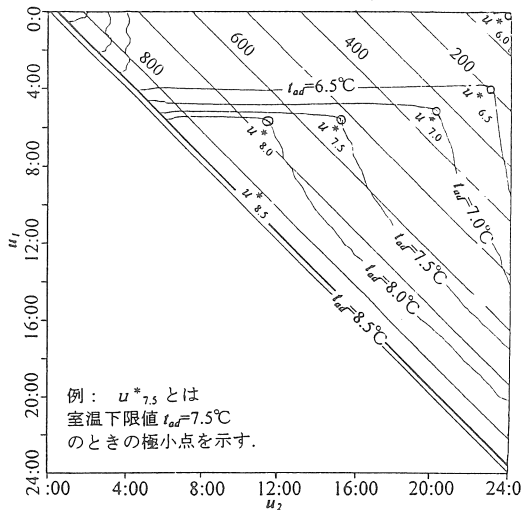
t_{ad} が評価関数を J_1 とする最適解に及ぼす影響を調べるために、 t_{ad} を 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5℃ の 6 つの値として最適解を求めた。

4.1 評価関数 J_1 と室内温度 t_a

表1に6つの t_{ad} についての J_1 と室内最低気温の計算結果を示す。これにより、最適解が t_{ad} により変動し、 $t_{ad}=6.0$ ℃ の場合には、蓄・放熱しないでも室内最低気温 6.0℃ 以上を保つことができ、 $t_{ad}=8.5$ ℃ の場合には t_{ad} を保つためにファンが1日中 on になり、 J_1 が一番大きいことがわかる。

表1 各種最低室温の制約条件に対する最適解

t_{ad}	u^*	u_1	u_2	J_1 kJ/m ² day	最低室温 ℃
6.0℃	$u^*_{6.0}$	0.0	24	0	6.0
6.5℃	$u^*_{6.5}$	4.5	23	198	6.5
7.0℃	$u^*_{7.0}$	5.5	20.5	324	7.0
7.5℃	$u^*_{7.5}$	6.0	15.5	522	7.5
8.0℃	$u^*_{8.0}$	6.0	11.5	666	8.0
8.5℃	$u^*_{8.5}$	$u_2=u_1$		864	8.5

図3 制御関数の値域における J_1 の立体図図4 J_1 に対する最適解と2種類の制約条件との関係

4.2 最適解と制約条件との関係

図3は制御関数の取りうる値域における J_1 の立体図であり、図4には t_{ad} と制御関数の最適解との関係を示す。図3により、 J_1 の値は空間上の傾斜平面で示され、ゆえに図4中の J_1 の等値線は直線になることがわかる。図4中の対角線の上の範囲は制御関数 u_1, u_2 の値が制約条件 g_b を満足する領域である。曲線はある制約条件 t_{ad} 一定のときの制御関数 u_1, u_2 の組み合わせを示し、曲線と対角線に包囲された領域は状態の制約条件 t_{ad} を満足する u_1, u_2 の範囲である。これにより、 t_{ad} が高くなるほど制御関数が取りうる値の領域が小さくなり、 t_{ad} が変動することにより最適解が変動する。 t_{ad} が 8.5°C の場合は、 $u_1 = u_2$ となるので図のように1つの直線で表される。

以上により、 t_{ad} は制御関数の値が取りうる領域と J_1 の最適解の特性に大きな影響を与えることが判った。

5. 評価関数を J_2 とする最適解

本節では温度環境の評価関数 J_2 について検討し、最適室温変動のスケジュールが最適解に及ぼす影響について考察する。

5.1 最適室温スケジュール

植物の生育に最適な温度環境は定温ではなく、周期的な温度変動が必要である。本報の研究対象は無栽培温室であるが、最適室温変動のスケジュールは文献⁽⁹⁾を参考にして、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とし、図8の中の t_{ac1}, t_{ac2} のような2本の不連続直線とする。これは理想的な室温の制御範囲を示す。また、これを参考にして、図5の中の2本の連続曲線を想定し、これも最適室温スケジュールの1つとした。

5.2 連続最適室温スケジュールの場合

連続最適室温スケジュールを用いて、最適制御シミュレーションを行った結果を表2に示す。図5は連続最適室温スケジュールに基づいた、各種 t_{ad} に対する極小点 u_1, u_2 と室内温度の経時変化を示す。図5の中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。これらから、 t_{ad} が変動することにより、極小点と室内気温及び J_1, J_2 ともに変動することがわかる。 $t_{ad} \leq 7.5^\circ\text{C}$ のとき、極小点 $u^*_{6.0 \sim 7.5}$ は最低室温の制約条件に制約されず、午後の室内気温がほとんど t_{ac1}, t_{ac2} の範囲に入っているが、 $t_{ad} = 8.5^\circ\text{C}$ の場合には、朝 7:30 から午後 5:00 まで蓄熱し、その後翌日 7:30 まで放熱して、 t_{ad} を満足するために、ファンが一日中 on になり、室温がほぼ最適室温スケジュールの範囲に入らなくなることがわかる。

図6は制御関数の値域における、連続最適室温スケジュールに対する J_{2a} の立体図であり、図7は t_{ad} と制御関数の極小点との関係を示すものである。図6に示されるように、制御関数の値の領域における J_{2a} の立体図の中に谷は一つしかなく、他のところにおける J_{2a} の値はすべてこれより大きいため、図7の中の最小点 $u^*_{6.0 \sim 7.5}$ はこの谷より出来るものしかない。また、 $t_{ad} = 8.0^\circ\text{C}$ の場合には、極小点 $u^*_{8.0a}$ が極小点 $u^*_{6.0 \sim 7.5a}$ まで収束できず、 $t_{ad} = 8.0^\circ\text{C}$ の境界の上に収束せざるを得ない。

表2 連続最適室温スケジュールによる最適解の計算結果

t_{ad}	u^*	u_1	u_2	J_2	J_1	最低室温
				$^\circ\text{C}^2/\text{day}$	$\text{kJ}/\text{m}^2\text{day}$	$^\circ\text{C}$
$6.0 \sim 7.5^\circ\text{C}$	$u^*_{6.0 \sim 7.5a}$	6.5	15.0	28.2	558	7.69
8.0°C	$u^*_{8.0a}$	7.0	12.5	50.1	666	8.07
8.5°C	$u^*_{8.5a}$	$u_2 = u_1$		94.5	864	8.52

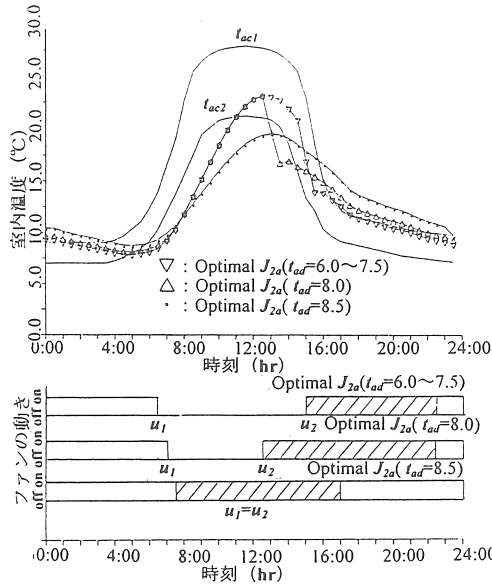
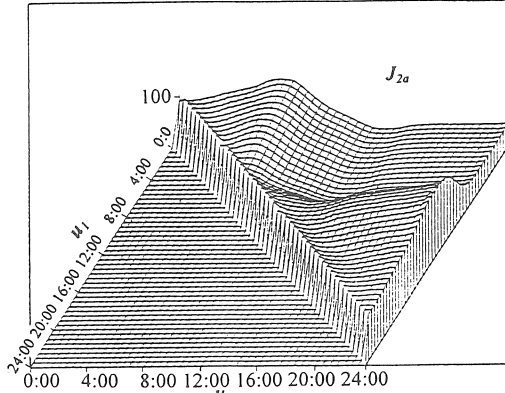
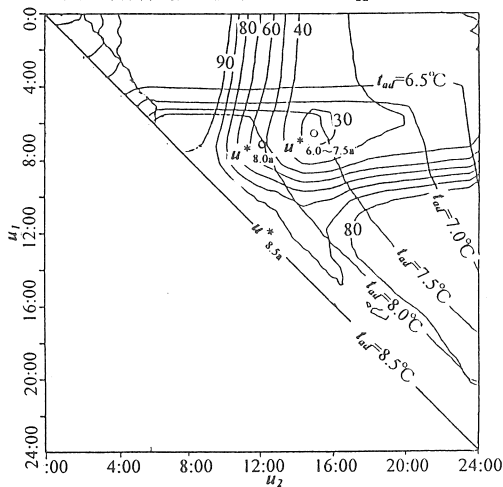


図5 連続室温スケジュールに対する極小点と室温の経時変化


 図6 制御関数の値域における J_{2a} の立体図

 図7 J_{2a} の極小値と2種類の制約条件との関係

5.3 不連続最適室温スケジュールの場合

最適室温スケジュールが評価関数を J_2 とするときの極小点に及ぼす影響を検討するために、不連続室温スケジュールを用いた最適制御の計算を行い、その計算結果を表3に示す。図8は不連続最適室温スケジュールに基づいた、3種の t_{ad} について極小点 u_1, u_2 と最適室温の経時変化を示すものである。図9は、不連続最適室温スケジュールに対して、制御関数の値域における J_{2b} の立体図であり、図10は不連続最適室温スケジュールに基づいた、 t_{ad} と制御関数の極小点との関係を示すものである。

表3 不連続最適室温スケジュールによる極小点の計算結果

t_{ad}	u^*	u_1	u_2	J_2 °C ² /day	J_1 kJ/m ² day	最低室温 °C
6.0~7.0°C	$u^*_{6.0 \sim 7.0b}$	7.0	16.5	114.0	522	7.33
7.5°C	$u^*_{7.5b}$	8.0	16.5	130.8	486	7.50
6.0~8.0°C	$u^*_{6.0 \sim 8.0b}$	7.5	11.0	156.9	738	8.27
8.5°C	$u^*_{8.5b}$	$u_2 = u_1$		174.7	864	8.52

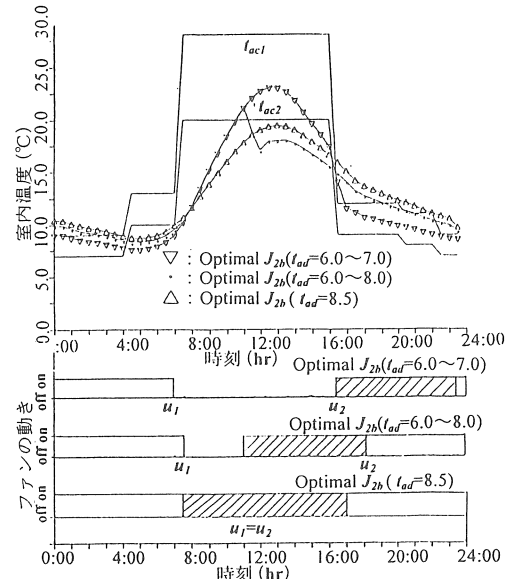


図8 不連続室温スケジュールに対する極小点と室温の経時変化

表3と図10により、 $t_{ad} \leq 7.0^\circ\text{C}$ のときに、極小点は $t_{ad} = 6.0 \sim 7.0^\circ\text{C}$ のときの極小点 $u^*_{6.0 \sim 7.0b}$ と $t_{ad} = 6.0 \sim 8.0^\circ\text{C}$ のときの極小点 $u^*_{6.0 \sim 8.0b}$ の2つあることがわかる。これは図9を一見してわかるように、連続最適室温スケジュールと異なり、不連続最適室温スケジュールの場合には、制御関数の値域における J_{2b} の値の立体図は2つの谷があるためである。ゆえに図10の中の J_{2b} の極小値は2つある。そこで、不連続最適室温スケジュールを用いた場合、この数値計算法を用いて得た極小値は制御関数の値域における J_{2b} の最小値でないこともあることがわかった。

$t_{ad}=8.0^{\circ}\text{C}$ の場合には、制御関数を取りうる値の領域は縮小され、極小値は一つしか残らない。この場合、極小値=最小値であり、この数値計算法が有効である。

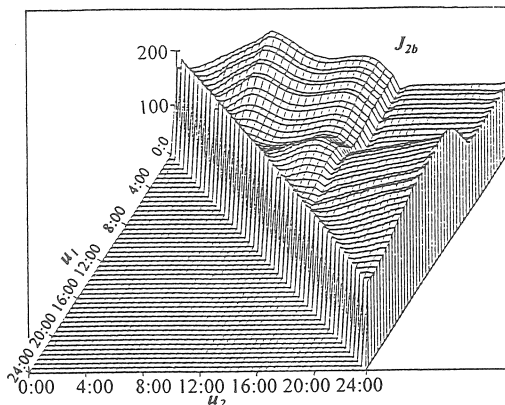


図9 制御関数の値域における J_{2b} の立体図

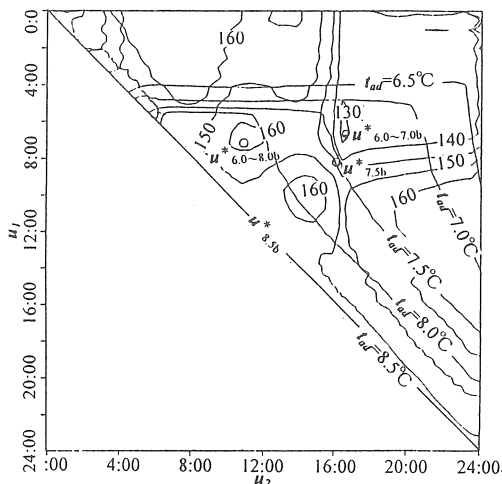


図10 J_{2b} の極小値と2種類の制約条件との関係

以上により、 t_{ad} が変動することにより極小点と室内気温及び J_1 , J_2 とともに変動し、最適室温スケジュールが異なるとき、その変動も異なることがわかる。そこで、2種の最適室温スケジュールに対して、制御関数の極小点と室内最低温度下限値との関係を明らかにしたが、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評価関数の全体像もわかった。

6. 評価関数を J_3 とする最適解

前節と異なり、本節では環境とエネルギーの両者を考慮した評価関数 J_3 について検討し、 J_3 における環境とエネルギーとの重み係数 β, γ の比 β/γ が極小点

に及ぼす影響について考察する。

6.1 連続最適室温スケジュールの場合

環境とエネルギーとの重み係数 β, γ の比を $\beta/\gamma = 1, 5, 10$ の3つの値とし、 t_{ad} を $6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5^{\circ}\text{C}$ の6つの値として、連続最適室温スケジュールを用いた極小点を求めた。表4にその計算結果を示す。図11, 図13, 図15はそれぞれ重み係数の比が $\beta/\gamma = 1, 5, 10$ のときの連続最適室温スケジュールに基づいた制御関数を取りうる値の領域における J_{3a} の立体図を示す。図12, 図14, 図16はそれぞれの重み係数の比のときの連続最適室温スケジュールを用いた評価関数 J_{3a} の極小値と制約条件との関係を示す。

表4 連続最適室温スケジュールに基づいた極小点

t_{ad}	β/γ	1			5			10		
		u_1	u_2	J_{3a}	u_1	u_2	J_{3a}	u_1	u_2	J_{3a}
6.0	$u^*_{6.0}$	0.0	24.0	45.7	0.0	24.0	228.5	0.0	24.0	457.0
6.5	$u^*_{6.5}$	4.5	23.0	240.5	4.5	23.0	410.5	4.5	23.0	623.0
7.0	$u^*_{7.0}$	5.5	20.5	364.8	5.5	20.5	528.0	5.5	20.5	732.0
6.0~7.0	$u^*_{6.0\sim7.0}$							5.5	16.5	794.0
7.5	$u^*_{7.5}$	6.0	15.5	551.3	6.0	15.5	668.5	6.0	15.5	815.0
8.0	$u^*_{8.0}$	7.0	12.0	739.8	7.0	12.0	963.0	7.0	12.0	1242.0
8.5	$u^*_{8.5}$	$u_1=u_2$		958.4	$u_1=u_2$		1336.0	$u_1=u_2$		1808.0

(J_{3a} は連続最適室温スケジュールを用いるときの評価関数である)

表4により、室内温度環境の重み係数 β の変動によって、評価関数の極小値が変動することがわかる。 $\beta \leq 5$ の場合、制御関数の取りうる値の領域内(境界を除く)の極小値がなくなり、極小値は境界上にしかないことがわかる。これに対して $\beta/\gamma = 10$ の場合、 $t_{ad} \leq 7.0^{\circ}\text{C}$ のとき、制御関数の取りうる値の領域の中の極小点は $t_{ad} = 6.0 \sim 7.0^{\circ}\text{C}$ のときの極小点 $u^*_{6.0\sim7.0}$ が増えて2つになる。この場合、収束した極小点は出発点により異なり、境界における極小点まで収束できないこともある。さらに、 $t_{ad} \geq 7.5^{\circ}\text{C}$ の場合、図16の中に示される $t_{ad} \leq 7.0^{\circ}\text{C}$ のときの極小点 $u^*_{6.0\sim7.0}$ が制約条件外となったので、極小点が境界点しか残らない。これは $t_{ad} \geq 7.5^{\circ}\text{C}$ のとき、極小点は境界上になるためである。これに対して、 $t_{ad} \leq 7.0^{\circ}\text{C}$ の場合、極小点が2つあるのは、極小点が境界の上だけあるではなく、前述した室内温度環境だけに注目する評価関数 J_{2a} の極小値も制御関数の取りうる値の領域の中にあり、その影響があるからである。

6.2 不連続最適室温スケジュールの場合

前節と同じく、温度環境とエネルギーとの重み係数の比を $\beta/\gamma = 1, 5, 10$ の3つの値とし、 t_{ad} を $6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5^{\circ}\text{C}$ の6つの値として、不連続最適

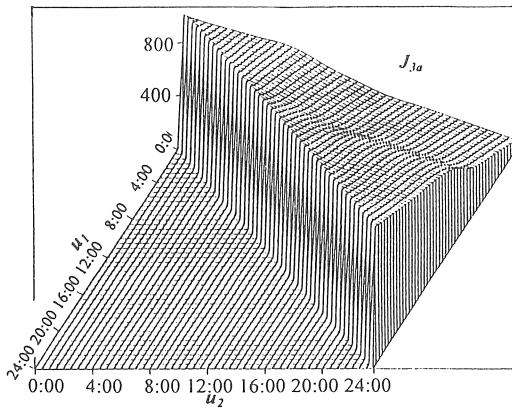


図 1 1 $\beta/\gamma=1$ のとき、制御関数の値域における J_{3a} の立体図

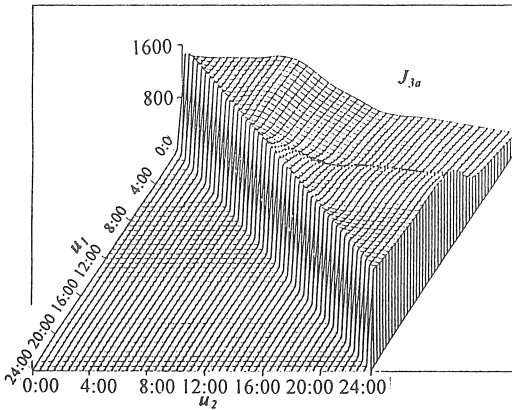


図 1 3 $\beta/\gamma=5$ のとき、制御関数の値域における J_{3a} の立体図

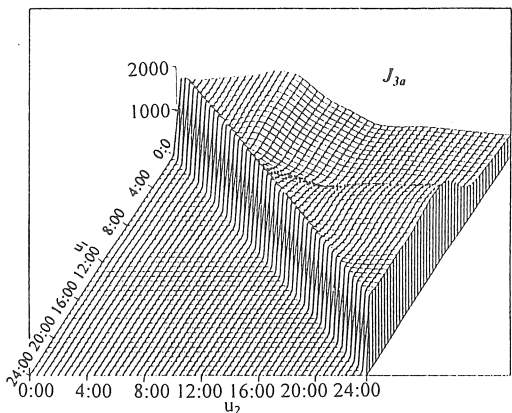


図 1 5 $\beta/\gamma=10$ のとき制御関数の値域における J_{3a} の立体図

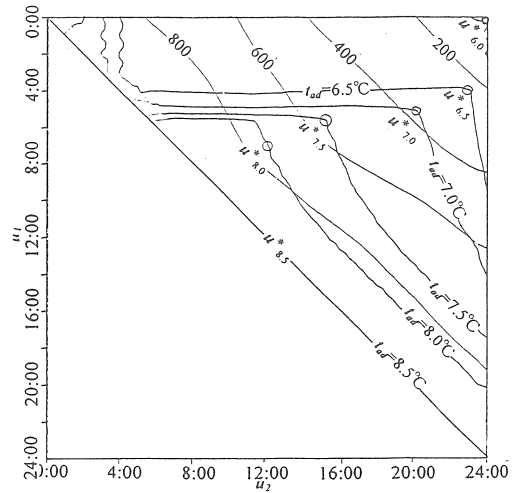


図 1 2 $\beta/\gamma=1$ のときの J_{3a} と制約条件の関係

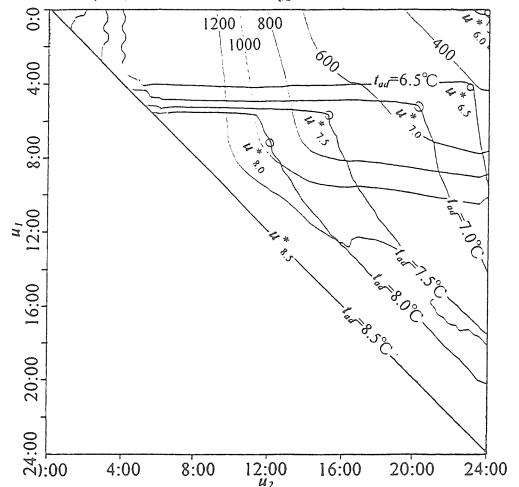


図 1 4 $\beta/\gamma=5$ のときの J_{3a} と制約条件の関係

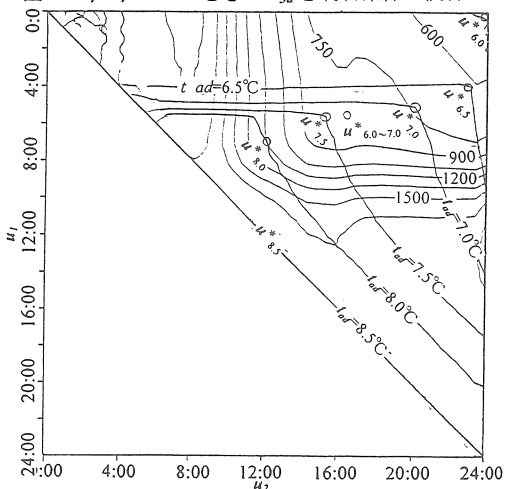


図 1 6 $\beta/\gamma=10$ のときの J_{3a} と制約条件の関係

室内温度のスケジュールを用いた極小点を求めた。表5にそれらの計算結果を示す。これにより、 $t_{ad} \leq 7.0^\circ\text{C}$ の場合には、 $\beta/\gamma=1$ のときに極小点は境界点しかなく、 $\beta/\gamma=5$ のときに極小点は境界点と $t_{ad}=6.0 \sim 7.0^\circ\text{C}$ に対する領域内極小点 $u^*_{6.0 \sim 7.0b}$ と2つあり、 $\beta/\gamma=10$ のときに極小点は境界点と $t_{ad}=6.0 \sim 7.0^\circ\text{C}$ に対する領域内極小点 $u^*_{6.0 \sim 7.0b}$ と $t_{ad}=6.0 \sim 8.0^\circ\text{C}$ に対する領域内極小点 $u^*_{6.0 \sim 8.0b}$ の3つあることがわかる。連続最適室温スケジュールの場合と異なり、 $t_{ad} \leq 7.0^\circ\text{C}$ の場合、 $\beta/\gamma=5$ のときにも、 $t_{ad}=6.0 \sim 7.0^\circ\text{C}$ に対する領域内極小点 $u^*_{6.0 \sim 7.0b}$ が存在する。

表5 不連続最適室温スケジュールに基づいた極小点

t_{ad}	β/γ	1			5			10		
		u_1	u_2	J_{3b}	u_1	u_2	J_{3b}	u_1	u_2	J_{3b}
6.0	$u^*_{6.0}$	0.0	24.0	145.4	0.0	24.0	727.0	0.0	24.0	1454.0
6.5	$u^*_{6.5}$	4.5	23.0	334.0	4.5	23.0	877.8	4.5	23.0	1557.0
7.0	$u^*_{7.0}$	5.5	20.5	454.9	5.5	20.5	978.6	5.5	20.5	1633.0
6.0~7.0	$u^*_{6.0 \sim 7.0}$				5.5	16.5	1055.0	5.5	16.5	1642.0
7.5	$u^*_{7.5}$	6.5	15.5	677.6	6.5	15.5	1299.0	6.5	15.5	2077.0
6.0~8.0	$u^*_{6.0 \sim 8.0}$							7.0	12.0	2275.0
8.0	$u^*_{8.0}$	7.0	12.0	805.7	7.0	12.0	1479.0			
8.5	$u^*_{8.5}$	$u_1=u_2$	1002.0		$u_1=u_2$	1702.0		$u_1=u_2$	2575.0	

(J_{3b} は不連続最適室温スケジュールを用いるときの評価関数である)

以上により、評価関数 J_3 における重み係数の比は極小点に及ぼす影響が大きい、最適室温スケジュールが異なるとき、その影響も異なることがわかった。

7. 結論

- 1) 不連続制御関数を連続制御関数に変形することにより、新たな土中蓄熱温室の最適運転制御のシミュレーションモデルを導出し、計算がより容易な数値計算アルゴリズム (SUMT法) を用いて土中蓄熱温室におけるファンの on-off 制御の最適解を求めることができた。
- 2) 制御関数の値域における評価関数の立体図及び最適解と状態・制御制約条件との関係図を作成した。これにより、本研究における3種類の評価関数の全体像を把握することができた。
- 3) 室内温度の制約条件 (最低温度) は最適解と制御関数を取りうる値の領域に及ぼす影響が大きい。これが高くなるほど制御関数を取りうる値の領域は小さくなり、最適室温と極小点も変動する。
- 4) 最適室温スケジュールの連続性は J_2 の極小値に及ぼす影響が大きい。不連続な場合には、曲面に複数の谷が発生し、 J_2 の準最適解が生じる。
- 5) 評価関数 J_3 における重み係数の比は極小点に及ぼす影響が大きい、最適室温スケジュールが異なると

き、その影響も異なる。

6) 最適室温スケジュールの連続性及び評価関数 J_3 における重み係数の比により、 J_3 の極小値が多数生じる。

今回の計算に用いた数値計算方法は全域上の最小点が求められないことがあるので、今後さらに全域上の最適解が求められる最適制御の数値計算アルゴリズムを開発すべきである。

8. 文献

- (1) 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4報 土中蓄熱運転の最適制御について)、太陽エネルギー、20-2(1994), pp39-46
- (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システムにおける最適制御に関する研究 (第3報)、平成7年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表講演会論文集、1995年12月、大分
- (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システムにおける最適制御に関する研究 (第4報)、平成8年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表講演会論文集、1996年10月、新潟
- (4) 志水清孝、制約条件のないシステムの最適化手法、計測と制御、Vol. 9, No. 6, pp37-47, 1970
- (5) 志水清孝、システムの制約条件付最適化手法、計測と制御、Vol. 9, No. 7, pp31-41, 1970
- (6) 市川邦彦、最急降下法、システムと制御、Vol. 17, No.10, pp591-595, 1970
- (7) 坂和愛幸・進藤裕司、最適制御の数値解法に関する最近の話題、システムと制御、Vol.25, No.8, pp468-475, 1981
- (8) 王 眞栄、最優控制、冶金工業出版社、北京、1989
- (9) 佐々木浩二・板木利隆・高橋基、地中蓄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