

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 栽培温室のシュミレーションと蓄熱制御のエネルギー性能について)

STUDY ON OPTIMIZATION OF THE GROUND THERMAL STORAGE IN THE GREENHOUSE

(Part 3, Analyses on the Simulation model of the Cultivated Greenhouse
and the Storage Preformance of Contral Strategy)

鄭 明 傑*¹
Minjie ZHENG

中 原 信 生*²
Nobuo NAKAHARA

Abstract

In this paper, a total simulation model of the heat and mass transfer for greenhouse with ground thermal storage planting the vegetable was analyzed. To reduce the calculation time for convergence, the analytical solution of the radiation, both the short wave and long wave was introduced. Using this model the effects of planting condition on the greenhouse environment and thermal storage were investigated. According to the calculation results, the insolation reaching the floor surface reduces with the growth of the planting vegetable, while the insolation on the plant surface increases. The effect of fan control method on the house temperature and the heat storage efficiency was also evaluated. The higher the maximum house temperature set-point for fan operation is, the smaller becomes the thermal storage/discharge to and from the duct. If combined with the temperature differential control between the inlet and outlet temperature of the duct, the ratio of heat storage reduces but the COP increases, while the change of house temperature is negligible.

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

1. まえがき

既報^{(1)・(2)}では無栽培土中蓄熱温室について、太陽エネルギー・温室・土壌を含むシステム全体のシュミレーションモデルの詳細、実験との比較について述べ、そのモデルを利用して、土中ダクトの形状・数量および土壌の熱的性質が地中蓄熱量・室内気温に及ぼす影響を調べて報告した。本報では、汎用性のある野菜栽培土中蓄熱温室のシュミレーションモデルの詳細について報告し、このモデルをもとに、2種の植被状態の土中蓄熱温室の環境と蓄・放熱量を比較計算し、さらに蓄・放熱用ファンの運転方式の効果に関する研究結果について述べる。

* 原稿受付 平成5年1月9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名古屋市中千種区不老町)

記号説明(図1, 図2を参照)

A_i	($i=s, f, p, g$)それぞれ床, 壁, 葉面, ダクト内表面の表面積[m ²]
A_{ip}	葉面積指数(全部植物の葉面積と床面積の比)
A_{dp}	植物の茎の断面積と葉面積の比
A_{pp}	植被率(植物の地面の射影と床面積の比)
b	減衰係数
CP	温室空気比熱 [kJ/kg·K]
CP_i	($i=c, p, s$)それぞれ壁体, 植物, 土壌の比熱 [kJ/kg·K]
d	ダクトの相当直径 [m]
e	外気水蒸気分圧 [Pa]
e_a	温室空気の水蒸気分圧 [Pa]
$e(t_i)$	($i=s, b, p, s^{-}$)それぞれ床面, 内壁面, 葉面, ダクト内表面の表面温度における飽和水蒸気分圧 [Pa]
E_{cu}	温室壁面における結露による凝縮潜熱量 [kJ/m ² ·h]
E_g	地中蓄熱ダクトでの蒸発/凝縮の潜熱伝達量(以下潜熱蓄・放熱量と呼ぶことにする) [kJ/m ² ·h]
E_{pd}	葉下表面における蒸発による潜熱伝達量 [kJ/m ² ·h]
E_{pu}	葉上表面における蒸発による潜熱伝達量 [kJ/m ² ·h]
E_{su}	温室床面蒸発/凝縮の潜熱伝達量 [kJ/m ² ·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

$F_{oc,n}$	微小壁面が天空に対する形態係数
$F_{sc,n}$	微小壁面が外地面に対する形態係数
G	温室内乾燥空気重量 [kg]
h_i	($i=s, b, t, g, p$) それぞれ床面, 内壁面, 外壁面, ダクト内表面, 葉面の熱伝達率 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$]
H	温室の高さ [m]
H_i	($i=cu, cl, su, pu, pd$) それぞれ外壁外表面, 外壁内表面, 床面, 葉上表面, 葉下表面の対流熱伝達率 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
K_i	($i=s, b, g, p$) それぞれ床面, 内壁面, ダクト内表面, 葉面の湿気伝達率 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{h}$]
l_p	植物の高さ [m]
l_{pl}	植物内における直達日射線の長さ [m]
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 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_{cu}	温室内床面から外壁内表面に入射する長波輻射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
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 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_o	外壁面に入射する大気長波輻射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_{pd}	葉上表面に到達する長波輻射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_{pds}	葉下表面から, あるいは L_{pd} の透過分が室内床面に射出する長波輻射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_{psu}	温室内床面から葉下表面に入射する長波輻射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_{pu}	葉上表面から内壁面へ射出する長波輻射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_{pp}	葉の長さ [m]
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 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_{sd}	温室内床面に到達する長波輻射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
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 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
L_w	温室の奥行 [m]
Pp	大気圧 [Pa]
Q	ダクトを通過する空気の質量 [m^3]
Q_b	地中伝熱量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
Q_{cc}	外壁体の伝導熱量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
Q_f	植物体における伝導熱量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
Q_g	地中蓄熱ダクトからの顕熱蓄・放熱量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
Q_{pr}	葉の光合成熱量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
Q_w	ファンの発熱量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
r	水の蒸発潜熱 [kJ/kg]
$Scdd$	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 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
$Scds$	外壁面を透過する天空日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
$Scss$	地面からの反射日射量のうち外壁面を透過する日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_d	外壁外表面に入射する直達日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
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 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_{dds}	温室内床面に到達する天空日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
$S_{d,n}$	外壁外表面の微小面積に入射する直達日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
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 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_{pd}	植物層を透過する直達日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_{pdd}	外壁面を透過後直接または外壁内表面を最大2回反射して葉上表面に到達する直達日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_{pds}	葉上表面に到達する天空日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_{pdu}	葉下表面に入射する全反射日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_{ps}	植物層を透過する天空日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_{pu}	葉上表面で反射する, あるいは S_{pdu} の透過分が内壁面へ射出する全反射日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
S_s	外壁外表面に入射する天空日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
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

	[$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
$S_{s,n}$	外壁外表面の微小面積に入射する天空日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
S_{ss}	外壁外表面に入射する地面からの反射日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
$S_{ss,n}$	外壁外表面の微小面積に入射する反射日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
S_{su}	温室内床面で反射する全日射量 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
t_c	壁体温度 [$^\circ\text{C}$]
t_i, T_i	($i=s, a, b, t, o, p$) それぞれ床面, 室内空気, 外壁内表面, 外壁外表面, 室外空気, 葉面の温度 [$^\circ\text{C}, \text{K}$]
$t_{s''}$	ダクト内表面温度 [$^\circ\text{C}$]
t_1, t_2	ダクトの入, 出口の空気温度 [$^\circ\text{C}$]
T_s	外地表面温度 [K]
V	温室内空気の体積 [m^3]
V_i	($i=c, p$) それぞれ外壁体, 植物の体積 [m^3]
V_j	($j=a, o, u$) それぞれ室内, 外界, ダクト内の風速 [m/s]
W	温室の開口 [m]
W_i	($i=s, b, g, pu, pd$) それぞれ床面, 外壁内表面, ダクト内表面, 葉の上・下表面における水分の蒸発・凝結量 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]
X	温室内空気の絶対湿度 [kg/kg]
δ_c	壁厚さ [m]
δt	ダクトの入・出口の温度差 [$^\circ\text{C}$]
$\delta \tau$	空気がダクトを通過する時間 [h]
ε_i	壁面の屈折角 [deg]
ε_j	($j=o, s', s, c, p$) それぞれ外気, 外地面, 床面, 壁面, 葉面の長波輻射率
λ_i	($i=c, s, t, p$) それぞれ壁体, 土壌, ダクト, 植物の熱伝導率 [$\text{kJ}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$]
ρ	温室内空気の密度 [kg/m^3]
$\rho_{cdd,j}$	($j=n, m, p, q, r, u$) それぞれ外壁内・外表面の N, M, P, Q, R, U 点の直達日射反射率 (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
ρ_{cs}	外壁面の天空日射反射率
ρ_i	($i=c, s, t, p$) それぞれ壁体, 土壌, ダクト, 植物の密度 [kg/m^3]
ρ_j	($j=sl', sl, cl, pl$) それぞれ外地面, 床面, 壁面, 植物層の長波反射率
ρ_k	($k=ps, ss$) それぞれ葉面, 地面の全日射反射率
σ	ステファンボルツマン定数 [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$]
τ	時間 [h]
$\tau_{cdd,n}$	外壁面の直達日射透過率 (計算式は既報 ⁽¹⁾ を参照)
τ_{cs}	外壁面の天空日射透過率
τ_i	($i=cl, pl$) それぞれ壁面, 植物層の長波透過率
τ_{ps}	植物層の全日射透過率
$\tau_{ps,i}$	($i=n, m$) 植物層の直達日射透過率
τ_{pss}	植物層の天空日射透過率

2. 野菜栽培温室のシミュレーションモデル

温室外表面に受ける直射, 天空, 反射日射量の計算式と土壌温度場のシミュレーション計算式はすべて既報⁽¹⁾に述べたのと同じであるので省略し, ここには新しく導入した栽培温室内の日射量, 長波輻射及び温室環境のシミュレーションモデルについて述べる。

2.1 太陽エネルギーの計算モデル

図1は栽培温室の直達日射量の計算モデルを示す。無栽培温室と異なり, 温室内に到達する日射量はその一部しか床面に到達できず, 相当の部分が植物に遮られる。植物層の直達日射透過率は太陽高度, 植物種類・状態に依存する。文献⁽⁹⁾によれば, 上部から入った直達

日射の植物層内における吸収率は、層を透過する直線の長さの指数関数で近似できる。直達日射量の計算には3回以上反射した直達日射量は常に無視できるほど少ないので、2回反射分までを含めている。以上のことを考慮した各表面の直達・天空日射量の計算モデルは次の式で示される。

$$\begin{aligned}
 S_{cdd} = & \sum_{m=1}^M S_{d,n\tau cdd,n\rho cdd,m} \sum_{r=1}^R S_{d,n\tau cdd,n\tau ps,n\rho cdd,r} \\
 & + \sum_{u=1}^U S_{d,n\tau cdd,n\rho cdd,r\tau^2 ps,n} \sum_{n=1}^N S_{d,n\tau cdd,n} \\
 & + \sum_{p=1}^P S_{d,n\tau cdd,n\rho cdd,m\rho cdd,p} \\
 & + \sum_{q=1}^Q S_{d,n\tau cdd,n\tau ps,n\rho cdd,m\rho cdd,q} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$S_{cgs} = \sum_{n=1}^N S_{s,n\tau cs}, \quad S_{css} = \sum_{n=1}^N S_{ss,n\tau cs} \quad (2), (3)$$

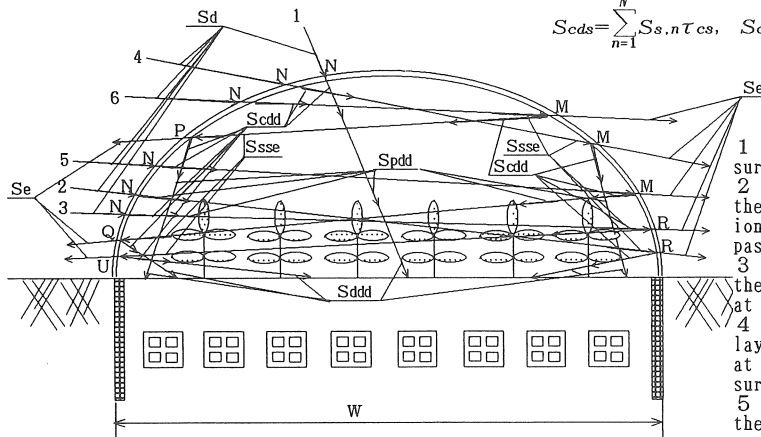


図1 栽培温室の直達日射量の計算モデルの見取り図

- 1 : The ray reaching the floor surface through the plant layer.
 2 : Ditto, except for reaching the floor after single reflection at the wall surface during passing the plant layer.
 3 : Ditto, except for reaching the floor after two reflections at the wall surface.
 4 : The ray reaching the plant layer after single reflection at the wall surface, then floor surface.
 5 : Ditto, except for reaching the floor after single reflection at the wall surface during passing the plant layer.
 6 : Same as 4, except for reflecting twice.

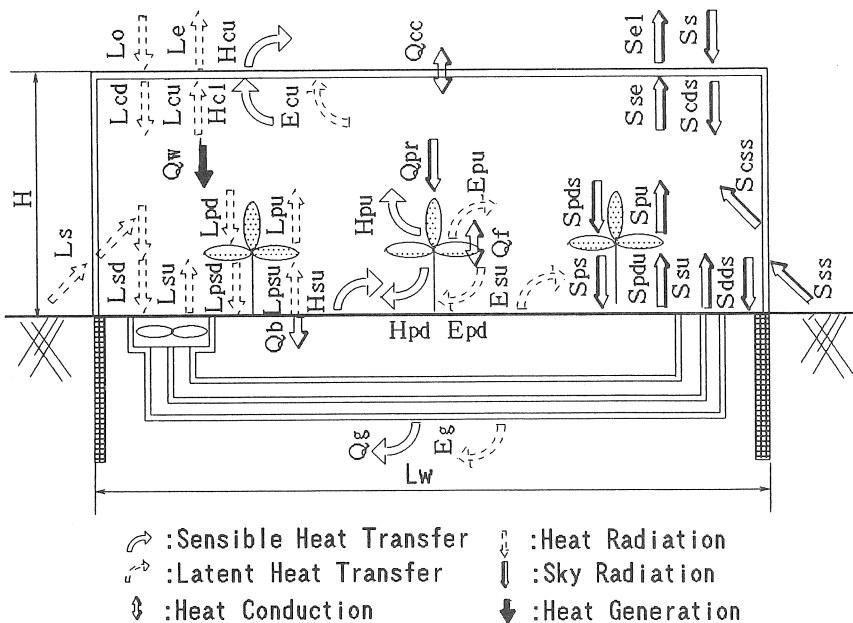


図2 栽培温室の熱収支の見取り図

$$S_e = \sum_{n=1}^N S_{d,n} \rho_{cdd,n^+} + \sum_{n=1}^N (S_{s,n^+} S_{ss,n}) \rho_{cs^+} S_{se} \tau_{cs} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
S_{se} = & \left\{ S_{su}(1 - A_{pp}) + S_{pu}A_{pp} \right\} F_{dc^+} \sum_{m=1}^P S_{d,n\tau cdd,n} \rho_{cdd,m} \\
& + (1 - A_{pp}^+ \tau_{ps,n} A_{pp}) \left\{ \sum_{m=1}^Q S_{d,n\tau cdd,n} \rho_{cdd,m} \right. \\
& + \left. \sum_{n=1}^R S_{d,n\tau cdd,n} \right\} + (1 - A_{pp}^+ \tau_{ps,n} A_{pp}) (1 - A_{pp}^+ \tau_{ps,m} A_{pp}) \\
& \cdot \sum_{n=1}^U S_{d,n\tau cdd,n} \rho_{cdd,n} + \sum_{n=1}^M S_{d,n\tau cdd,n}
\end{aligned} \quad (5)$$

$$S_{pdd} = \left\{ \sum_{n=1}^N S_d, n \tau cdd, n^+ \sum_{m=1}^M S_d, n \tau cdd, n \rho cdd, m \right. \\ + \sum_{n=1}^R S_d, n \tau cdd, n^+ \sum_{m=1}^Q S_d, n \tau cdd, n \rho cdd, m \\ \left. + \sum_{p=1}^P S_d, n \tau cdd, n \rho cdd, m \rho cdd, p \right\} A_{pp} \quad (6)$$

$$S_{pd} = S_{pdd} \tau_{ps,n}, S_{pds} = (S_{cds} + S_{css}) F_{cd} A_{dp} \quad (7), (8)$$

$$S_{ps} = S_{pds} \tau_{pss}, S_{pu} = (S_{pdd} + S_{pds}) \rho_{ps} + S_{pdu} \tau_{ps} \quad (9), \quad (10)$$

$$S_{pdu} = S_{su} A_{pp}, \quad S_{su} = \rho_{ss} (S_{dd} + S_{dds}) \quad (11), (12)$$

$$S_{ddd} = (1 - A_{pp^*} \tau_{ps}, n A_{pp}) \left\{ \sum_{m=1}^M S_{d,n} \tau_{cdd}, n \rho_{cdd}, m \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^N S_{d,n} \tau_{cdd}, n^* \sum_{p=1}^P S_{d,n} \tau_{cdd}, n \rho_{cdd}, m \rho_{cdd}, p \right\} \\ \left. + \left\{ \sum_{r=1}^R S_{d,n} \tau_{cdd}, n \rho_{cdd}, r^* \sum_{q=1}^Q S_{d,n} \tau_{cdd}, n \rho_{cdd}, m \rho_{cdd}, q \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{u=1}^U S_{d,n} \tau_{cdd}, n \rho_{cdd}, r \rho_{cdd}, u \right\} (1 - A_{pp^*} \tau_{ps}, n A_{pp}) \right. \\ \left. \cdot (1 - A_{pp^*} \tau_{ps}, m A_{pp}) \right\} \quad (14)$$

$$\text{ここで } F_{dc}=A_s/A_f, F_{cd}=1, \tau_{ps,n}=\begin{cases} 1-l_{pl} & b<.87 \\ 1-.87 & b>.87 \end{cases}$$

2.2 長波輻射の計算モデル

図2は温室内各表面に受ける大気輻射と長波輻射を示す。直達日射と同じく、床面に受ける大気輻射さらに外壁内表面と床表面との長波輻射による熱交換は相当の部分が植物に遮られる。かつ、植物層と外壁外表面や、床面との長波輻射による熱交換もある。既報⁽¹⁾と同じ考慮を払えば、長波輻射の計算モデルは次の式(15)～式(27)で示される。

$$L_{o,n} = F_{oc,n} \sigma T_o^4 (0.61 + 0.058 e^{0.5}) \quad (15)$$

$$L_{s,n} = F_{sc,n} [\varepsilon_s' \sigma T_s'^4 + \rho_{sl}' \sigma T_o'^4 (0.61 + 0.058 e^{0.5})] \quad (16)$$

$$L_o = \sum_{n=1}^N L_{o,n}, \quad L_e = \sum_{n=1}^N L_{s,n} \quad (16)$$

$$(17), (18)$$

$$Le = Lcu\tau_{cl} + \rho_{cl} \sum_{n=1}^N (L_{o,n} + L_{s,n}) + \varepsilon_c \sigma T t^2 \quad (19)$$

$$L_{cd} = L_{cu} \rho_{cl} + \tau_{cl} \sum_{n=1}^N (L_{o,n} + L_{s,n}) + \varepsilon_c \sigma T_b^4 \quad (20)$$

$$L_{cu} = \{L_{su}(1 - A_{pp}) + L_{pu}A_{pp}\} F_{dc}, L_{psu} = L_{su}A_{pp} \quad (21, 22)$$

$$L_{pu}=L_{pd}\rho_{pt}+\varepsilon_p\sigma T_p^4, L_{su}=L_{sd}\rho_{st}+\varepsilon_s\sigma T_s^4 \quad (23, 24)$$

$$L_{sd} = L_{pds} + L_{cd}(1 - A_{pp})F_{cd}, L_{pd} = L_{cd}A_{pp}F_{cd} \quad (25, 26)$$

$$L_{pds} = L_{pd} \tau_{pl} + L_{psu} \rho_{pl} + \epsilon_p \sigma T_p^4 \quad (27)$$

2.3 温室環境シミュレーションモデル

既報^{(1)・(2)}と異なり、本報では室内に植物のある状態(栽培温室)を対象として解析する。温室内の各部位の熱・水分収支は図2(直達日射量は図1)に示した。植物についての熱収支式が追加され、全体のシミュレーションモデルは次ぎに示す式(28)～式(33)の、室内空気の熱・水分収支、植物層・床面・外壁外表面・外壁の熱収支の六つの方程式となる。

$$Qw-QgAs-HsuAs-HclAf+EsuAs-EcuAf-EgAg$$

$$+(E_{pu}+E_{pd})A_p+(H_{pu}+H_{pd})A_p=V\rho C_p(dt_a/d\tau) \quad (28)$$

$$W_s A_s + W_g A_g - W_b A_f + (W_{pu} + W_{pd}) A_p = G(dX/d\tau) \quad (29)$$

$$S_{dds}+S_{ddd}-S_{su}+L_{sd}-L_{su}-H_{su}-E_{su}-Q_b=0 \quad (30)$$

$$[(S_{pds} + S_{pdd} - S_{pu}) - (S_{ps} + S_{pd} - S_{pdu}) + (L_{pd} - L_{pu})]$$

$$-(L_{pds}-L_{psu})-Q_{pr}-Q_f)/A_{ip}-E_{pu}-E_{pd}-H_{pu}-H_{pd}]A_p$$

$$=V_p\rho_pC_p(d t_p/d\tau) \quad (31)$$

$$\{(S_s+S_d+S_{ss}-S_e)-(S_{cdd}+S_{c ds}+S_{c ss}-S_{se})$$

$$+(L_o+L_s-L_e)-(L_{cd}-L_{cu})-H_{cu}+E_{cu}+H_{cl}\} Af$$

$$= V_c \rho_c C p_c (dt_c/d\tau) \quad (32)$$

$$S_s+S_d+S_{ss}-S_e+L_o+L_s-L_e-H_{cu}+Q_{cc}=0 \quad (33)$$

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物質伝達量の計算式を示す。

表1 モデルの中の各項の計算式

$$\begin{aligned} H_{cu} &= h(t \ t \ t \ o), H_{ct} = h(b \ t \ \sigma \ t \ b), H_{pu} = H_{pd} = h(p \ t \ p \ t \ a) \\ H_{su} &= h(s \ t \ s \ t \ a), Q_g = h(g \ t \ \sigma \ t \ s^*), Q_{cc} = \lambda / \delta c \ t \ b \ t \ t \\ E_{su} &= r W s, Q_b = -\lambda s \ (\partial \ t \ s / \partial \ y), Q_f = \lambda p \ l \ p \ t \ p \ t \ s \ A_{dp} \\ E_{cu} &= r W b, E_{pu} = E_{pd} = r W_{pu}, W_{pu} = W_{pd} = K_p \{e \ t \ p \ t \ -e a\} \\ E_g &= r W g, W_s = K_s \{e \ t \ t \ -e a\}, W_g = K_g \{e \ a \ e \ t \ s^*\} \\ h_b &= 5.0 \pm 3.4 V_a, W_b = \begin{cases} K_b \{e \ a \ e \ t \ t\} & e a \ e \ t \ t \\ 0 & e a \ e \ t \ b \end{cases} \\ h_s &= 5.0 \pm 3.6 V_a, \\ h_g &= 4.73 V \cdot o^{-\circ} / d \cdot o^{\circ}, h_p = 4.486 (V/L_{pp}) \cdot o^{\circ}, h_t = 5.0 \pm 3.4 V_o \\ Q(p) &= (S_{pd} + S_{pdd}) \% 3, K_i = 0.622 h_i / C P P P \quad (i = b, t, s, p, g) \\ e \ t \ t &= 4.58085 \exp \{17.269382 t \ i \ (t \ i \ 237.3)\} \end{aligned}$$

2・4 連立方程式数の縮減

以上の33個の方程式を連立してダンピングニュートン反復法で計算すると、栽培土中蓄熱温室の温、湿度環境を解くことができるが、33個の方程式をそのまま連立して計算すると、計算時間が相当長くなる。また、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。ゆえに、収束域を拡大し、かつ計算時間を短縮するために、以下のようにして連立数を縮減させる。

日射量の計算式中の Sc_{dd} , Sc_{ds} , Sc_{ss} , S_{ddd} , $S_{p d}$, $S_{p d d}$ は太陽エネルギーの計算サブルーチンから計算するので、残った関係のある式(8)~(12)を連立して、既報⁽¹⁾に述べた方法で解析解を求めると、各日射量の計算式は下記の式となる。

$$Spds = FcdApp(Scds + Scss) \quad (34)$$

$$Sps = Fcd\tau_{ps}App(Scds + Scss) \quad (35)$$

$$Spu = \rho_{ps}Spds + App\rho_{ss}\tau_{ps}Sdds + FcdApp(\rho_{ps} + \rho_{ss}\tau_{ps}Ape)(Scds + Scss) \quad (36)$$

$$Spdu = App\rho_{ss}(Sdds + Fcd(Scds + Scss)Ape) \quad (37)$$

$$Ssu = \rho_{ss}(Sdds + Fcd(Scds + Scss)Ape) \quad (38)$$

$$Sdds = Fcd(Scds + Scss)Ape \quad (39)$$

ただし

$$Ape = 1 - App + \tau_{ps}App \quad (40)$$

長波輻射量の計算について、既報⁽¹⁾と同じような方法を講じれば、各表面の長波輻射の計算式は下記の式となる。

$$Le = \tau_{cl}Fdc[(1 - App)\epsilon_s\sigma T_s^4 + [AppZ - (1 - App)\rho_{sl}]\epsilon_p\sigma T_p^4 + Fcd[App^2\rho_{pl}Z + (1 - App)\rho_{sl}Y](\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w + Lco\rho_{cl} + \epsilon_c\sigma T_b^4 \quad (41)$$

$$Lcd = [\rho_{cl}Fdc[(1 - App)\epsilon_s\sigma T_s^4 + (AppZ + (1 - App)\rho_{sl})\epsilon_p\sigma T_p^4] + Z(\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (42)$$

$$Lcu = Fcd[(1 - App)\epsilon_s\sigma T_s^4 + [AppZ - (1 - App)\rho_{sl}]\epsilon_p\sigma T_p^4 + Fcd[(1 - App)\rho_{sl}Y + App^2\rho_{pl}Z](\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w + Lpu = [(1 - App)AppFcdFdc\rho_{cl}\tau_{pl} + \rho_{pl}X_x]\epsilon_s\sigma T_s^4 + [Z - FcdFdc\rho_{cl}\rho_{sl}(1 - App)(App\rho_{pl} + Y)]\epsilon_p\sigma T_p^4 + \rho_{pl}AppFcdZ(\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (43)$$

$$Lpd = AppFcd[\rho_{cl}Fdc[(1 - App)\epsilon_s\sigma T_s^4 + (AppZ + (1 - App)\rho_{sl})\epsilon_p\sigma T_p^4] + Z(\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (44)$$

$$Lpsd = [App[(1 - App)FcdFdc\rho_{cl}\tau_{pl} + \rho_{pl}X_x]\epsilon_s\sigma T_s^4 + FcdFdc\rho_{cl}(AppY - App(1 - App)Z + (1 - App)^2\rho_{sl})\epsilon_p\sigma T_p^4 + FcdY - (1 - App)Z](\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (45)$$

$$Lpsu = App[X_x\epsilon_s\sigma T_s^4 + \rho_{sl}(\rho_{cl}AppFcdFdcY + X_x)\epsilon_p\sigma T_p^4 + \rho_{sl}FcdY(\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (46)$$

$$Lsd = [(1 - App)\rho_{cl}FcdFdcY + App\rho_{pl}X_x]\epsilon_s\sigma T_s^4 + (App\rho_{cl}FcdFdcY + X_x) + FcdY(\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (47)$$

$$Lsu = (X_x\epsilon_s\sigma T_s^4 + \rho_{sl}(\rho_{cl}AppFcdFdcY + X_x)\epsilon_p\sigma T_p^4 + \rho_{sl}FcdY(\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (48)$$

$$Lsu = (X_x\epsilon_s\sigma T_s^4 + \rho_{sl}(\rho_{cl}AppFcdFdcY + X_x)\epsilon_p\sigma T_p^4 + \rho_{sl}FcdY(\tau_{cl}Lco + \epsilon_c\sigma T_b^4)]/W_w \quad (49)$$

ここで

$$Y = 1 - App + \tau_{pl}App, X_x = 1 - App^2\rho_{pl}\rho_{cl}FcdFdc \quad (50, 51)$$

$$Z = 1 - App\rho_{pl}\rho_{sl}, W_w = X_xZ - (1 - App)\rho_{cl}\rho_{sl}FcdFdcY \quad (52, 53)$$

以上の式(34)～式(53)を式(28)～(33)に代入すると、連立数は六つとなり、計算の収束は速くなり、計算時間は大幅に縮減される。

3 栽培状態が葉面・床面の日射量、土中蓄熱量に及ぼす影響

3.1 シミュレーションの前提条件

計算例としてホーレンソウを栽培している土中蓄熱温室を想定し、植物の二段階の生長状態(a, b状態)が床面日射量と土中蓄熱量に及ぼす影響を計算し、これを無栽培温室の計算結果と比較する。表2は計算に用いた各物性値である。なお、植物の植被状態に関する各種パラメーターについては十分なデータが文献から得られなかったため、ここでは文献⁽¹⁰⁾による牧草栽培に

おけるパラメーターを参考にしてホーレンソウ向けの値を想定して仮定したものである。

表2 計算に用いた各特性値

	a	b		a	b
Aip	1.5	2.5	λ_c	0.504 [kJ/m ² ·h·°C]	ρ_{pl} 0.3 0.5
Adp	0.008	0.016	λ_l	1.909 [kJ/m ² ·h·°C]	ρ_{ps} 0.26
App	0.8	0.9	λ_p	2.168 [kJ/m ² ·h·°C]	ρ_{sl} 0.35
b	0.45	0.36	λ_s	1.938 [kJ/m ² ·h·°C]	ρ_{sl}' 0.25
lp	0.15	0.3	ρ_{cl}	0.8	ρ_{ss} 0.2
Ldp	0.13	0.25	ρ_{cs}	0.15	τ_{cl} 0.2
ϵ_c	0.98		ρ_{cl}'	0.15	τ_{cs} 0.85
ϵ_p	1.0		$\rho_{l'}Cp_l$	2275 [kJ/m ² ·°C]	τ_{pl} 0.66 0.41
ϵ_s	0.97		$\rho_{p'}Cp_p$	2922 [kJ/m ² ·°C]	τ_{ps} 0.48 0.39
ϵ_s'	0.96		$\rho_{s'}Cp_s$	2595 [kJ/m ² ·°C]	

3.2 植被の上面と床面の日射量

表3は無栽培温室とa, b状態の植物のある栽培温室との植被の上面・床面に受ける直達日射量、天空日射量および全日射量の計算結果を示す。図3、図4は無栽培を含めた3種状態の床面および植被の上面に受ける全日射量の平均値の経時変化を示す。b状態は植被が進んでいる状態で日射の透過率が小さいから、このときの床面の全日射量が一番小さい。しかし、b状態の栽培温室の植被の上面に受ける全日射量はa状態より大きいのも植物が成長したことによる。

表3 植被の上面・床面の日射受熱量の比較

Plant Status	Floor Surface			Plant Surface		
	Direct	Dtffuse	Total	Direct	Dtffuse	Total
Non	7879	3133	11012			
a	7162	1829	8991	6417	2506	8923
b	4818	1413	6261	7433	2817	10250

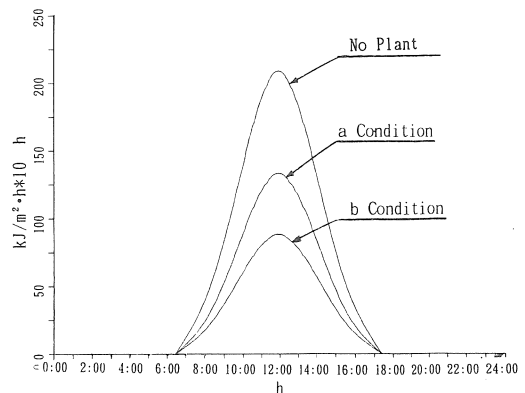


図3 床面に受ける全日射量の比較

3.3 土中蓄熱量の比較

表2に示したa, b両状態の植物の特性値を用いて栽培温室の顕熱および潜熱蓄熱量(水蒸気の蒸発/凝縮に伴う蓄熱量の増減を潜熱蓄熱・潜熱放熱と表現する、

記号表を参照)を計算した。表4は計算結果と無栽培温室の計算値の比較を示す。これにより、無栽培温室と異なり、栽培温室の場合には、昼間の蓄熱量の中に潜熱量の割合が大きく、とくに植被の進んでいるb状態の方が大きい。夜間のダクト内表面からの潜熱放熱量は全放熱量の25%ぐらいである。昼間は栽培温室の中に植物から蒸散する水蒸気量が多いので、潜熱蓄熱量も大きい。

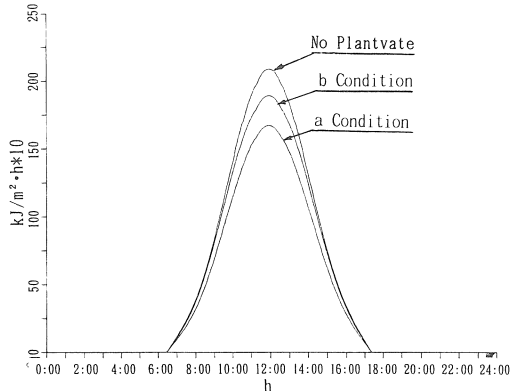


図4 植被の上面に受ける全日射量の比較

表4 潜・顕熱蓄・放熱量と放熱効率

Plant Status		Heat Charge	Heat Discharge	Discharge rate
		kJ/m2•day		
Non	Sensible	874	403	0.46
	Lateat	625	237	0.38
	Total	1499	640	0.43
a	Sensible	920	753	0.82
	Lateat	850	278	0.33
	Total	1770	1031	0.58
b	Sensible	950	862	0.91
	Lateat	1024	294	0.29
	Total	1974	1156	0.59

4. ファンの制御方式の土中蓄熱性能への影響

次に以上の栽培温室モデルを用いてファンの制御方式が土中蓄熱関係の効率に及ぼす影響を検討する。物

表5 上限温度設定値の影響

Maximum temperature		Heat Storage	Heat at Floor Surface	Electric Power	Solar Heat at Floor Surface	Heat at Discharge Rate	Charge Rate	Utilization Rate	COP _s	COP _b
25°C	Charge	1870	1294	143	10250	0.52	0.182	0.096	2.40	5.46
	Discharge	981	1824	454						
20°C	Charge	1974	1170	240		0.59	0.193	0.113	2.24	4.54
	Discharge	1156	1698	498						
15°C	Charge	2660	987	454		1.29	0.256	0.353	4.18	5.83
	Discharge	3434	1544	483						

性は表2に記述したb条件とする。

4.1 室温上限温度設定値の影響

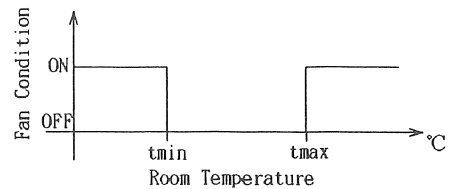


図5 ファンの制御スケジュール

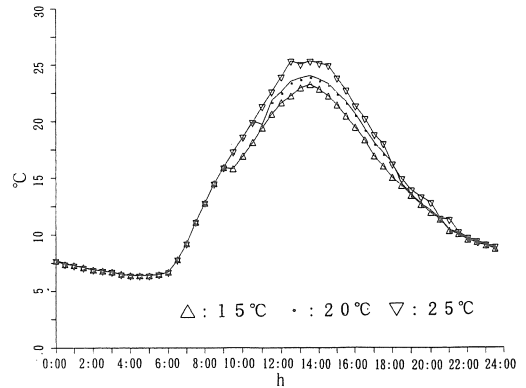


図6 上限温度設定値の影響

図5に示す通り室内温度の上限設定値 (t_{max})と下限値 (t_{min})によりファンのON-OFFを行う。 t_{min} を10°C, t_{max} を15, 20, 25°Cとして栽培温室の蓄熱関係の効率を計算した結果を表5に示す(表5の各項の定義は既報⁽²⁾を参照)。表5により、蓄熱ダクトによる太陽エネルギーの有効利用の指標である利用率は10~35%の範囲で、 t_{max} が低いほど大きくなる。ダクトの成績係数(COP_s)は2.24~4.18であるが、15°Cの設定のときの値は土壌の定温境界条件部から熱取得もあるので、その値は大きくなっている。床面からの蓄・放熱を含めた成績係数(COP_b)は4.54~5.83であり、変動幅がCOP_sより小さい。これは t_{max} が低いほど床面の放熱量は小さく、ダクトからの放熱量は大きくなり、ファン動力が増加するからである。図6は3種の t_{max} が室内温度に及ぼす影響を示す。図6により、昼間の上限温度設定

値が大きいくほど室内温度も高くなる。

4.2 複合制御における差温の影響

ファンを室内温度のほか、ダクトの出・入口空気温度差(差温)を含める複合制御の効果を検討する。

4.2.1 ダクトの出・入口温度差の計算方法

図7に示すように、ダクトの入・出口の空気温度差とダクトの顕熱蓄・放熱量との関係は次の式(54)で示される。

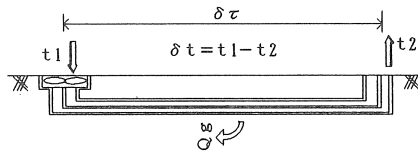


図7 ダクトの顕熱収支の見取り図

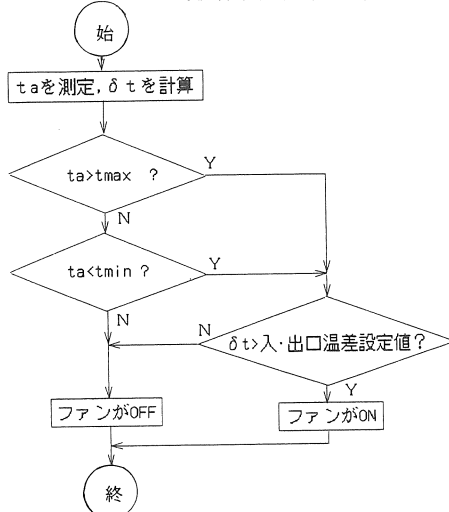


図8 複合制御のフローチャート

$$(Q_g A_s = Q C p \rho (dt/d\tau)) \quad (54)$$

ダクト内の空気温度が線形変化と仮定すれば、 $dt = \delta t, d\tau = \delta \tau$ である。これを式(54)に代入して移項すると、ダクトの入・出口の空気温度差は式(55)

になる。

$$\delta t = Q_g A_s / (Q C p \rho) \delta \tau \quad (55)$$

4.2.2 複合制御の影響

ダクトの出・入口の温度差を含めた複合制御法のフローチャートを図8に示す。この制御方法を用いて差温を0, 0.5, 1, 2°Cの4段階として、野菜栽培温室の蓄熱関係の効率を計算した。結果を表6に示す。これにより、蓄熱率はダクトの出・入口の設定温度差が高いほど小さくなるが、成績係数は大きくなる。

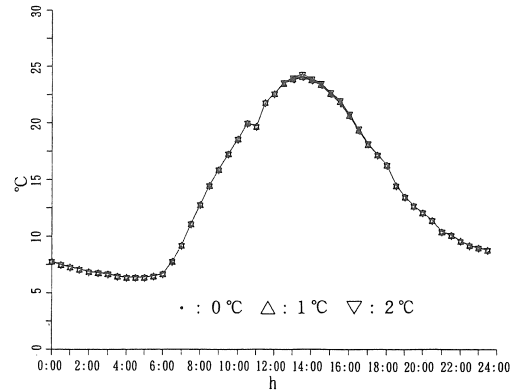


図9 複合制御の影響

図9は差温 = 0, 1, 2°Cの3つの設定値が室内温度に及ぼす影響を示す。これにより、差温が大きいくほど昼間室内温度が高くなる傾向があるが、差は僅かであった。

5. まとめ

1) 野菜栽培土中蓄熱室内の各部位の温度、水分収支によって野菜栽培温室の温度環境を予測するシミュレーションモデルを作成した。

2) 計算の収束を速め、計算時間を減らすために、日射量と長波輻射量の解析解を誘導する方法により、数値計算のための方程式の連立数を減らした。

表6 ダクトの入・出口の空気温度差の影響

Differential Temperature		Heat Storage	Heat at Floor Surface	Electric Power	Solar Heat at Floor Surface	Discharge Rate	Charge Rate	Utilization Rate	COP ₁	COP ₂
				KJ/m ² day						
0 °C	Charge	1974	1170	240	10250	0.586	0.193	0.113	2.24	4.54
	Discharge	1156	1698	498						
0.5 °C	Charge	1674	1174	221		0.686	0.163	0.112	2.31	4.72
	Discharge	1148	1702	486						
1 °C	Charge	1485	1184	198		0.762	0.145	0.110	2.39	4.93
	Discharge	1132	1704	474						
2 °C	Charge	1419	1207	180		0.793	0.138	0.110	2.50	5.24
	Discharge	1125	1737	452						

3) 2種の植被状態の栽培温室の床面と植被の上面に受ける日射量を計算し、これを無栽培温室の床面の計算結果と比較した。繁茂状態の植被の上面に受ける全日射量は大きい、床面全日射量は小さい。

4) 無栽培温室と2種の植被状態の栽培温室について土中潜・顕熱蓄熱量を比較計算し、栽培温室の場合には、植物による蒸散の影響のために、昼間には潜熱移動が大きいことを示した。

5) 栽培温室の土中蓄熱量のシミュレーションによると上限設定温度は高いほど昼間室内温度が高くなるが、蓄・放熱量が小さくなる。ダクトの入・出口の空気温度差を用いた複合制御では、その設定値は高いほど蓄熱率は少なくなるが成績係数は大きくなる。

本報では野菜栽培温室のシミュレーションモデルを作成し、これを用いて床面における植被の状態及び蓄・放熱用ファンの制御が温室環境・ダクトの蓄熱性能に及ぼす影響を検討して、一定の知見を得た。次報ではさらにファンの最適運転制御について考察する。

本研究の研究費の一部は平成4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。

6. 文献

- (1) 鄭 明傑・中原信生・謝毓琦・張德駿, 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) 及川武久, 蒸発散(その3) - 蒸散と植物の水ストレス -, 農業土木学会誌, 57-6(1989), 517
- (4) Jan F. Kreider, Medium and High Temperature Solar Processes, (1979), 49, Academic Press, Inc, New York
- (5) 竹園 尊, 断熱透過層利用ソーラグリーンハウスの研究, 北海道農試拳報, 128(1980), 37
- (6) 竹園 尊, ハウス内での熱及び物質移動を解析するための数学モデルと温室設計諸元決定への利用, 北海道農試研報, 120(1978), 21
- (7) 岩切敏, 栽培用ハウス内温度環境の予測と制御に関する研究, 国立防災科学技術センター研究報告, 6(1971), 1
- (8) Xie Yuqi・Xue Dianlun・Zheng Mingjie, Dynamic Thermal Performance Simulation of a Greenhouse with Subsoil Heat Storage and its Control System, The Proceedings of International Symposium on Applied Technology of Greenhouse, (1991-10), 142, Beijing, China
- (9) Li Shujun and Xie Yuqi, Experimental Research on the Under ground Heat Exchange System Used for the Vinyl-house in the Cold Area, The Proceedings of International Symposium on Applied Technology of Greenhouse, (1991-10), 151, Beijing, China
- (10) 齊藤利忠ら, 建築環境工学の技術, (1974), 11-19, 明現社, 東京
- (11) 渡辺 要, 建築計画原論II, (1965), 3-66, 丸善株式会社, 東京
- (12) 孔 祥謙・王 伝溥, 有限单元法在伝熱学中的应用, (1981), 科学技術出版社, 北京, 中国
- (13) 陳 伝森, 有限元方法及其提高精度的分析, (1982), 湖南科学技術出版社, 長沙, 中国
- (14) 王 徳人, 非線性方程組解法与最優化方法, (1979), 人民教育出版社, 北京, 中国
- (15) 揚 強生, 対流伝熱与伝質, (1985), 高等教育出版社, 北京, 中国
- (16) 内島善兵衛, 農林・水産と気象, (1982), 25, 朝倉書店, 東京