温室の伝熱マトリックスと暖房, 換気 — 温室温度特性式とその応用(1) —

立 花 一 雄*

(* 東京大学農学部)

Heat Transfer Matrix, Heating and Ventilation of Greenhouses
— Equations on Heat Flux - Temperature and their Applications (1) —

Kazuo TACHIBANA

(Faculty of Agriculture, University of Tokyo, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

I. ま え が き

筆者は前報(立花, 1980, 以下単に前報という)において放射収支と熱収支との関係ならびに相当温度の概念の拡張から温度の熱貫流を検討し, 温度と熱フラックスの関係を表わす温室温度特性式を導いたが, 本報では有限要素法の弾性骨組構造解析に用いられる剛性マトリックスを温室の熱収支に適用して温度特性式を拡張するとともに, 暖房負荷および換気への応用に言及する。温度特性式について重複を避けた点は前報を参照されたい。なお前報で熱貫流係数と名付けた各係数は熱貫流率とまぎらわしいので温室伝熱係数とよぶこととする。また意味を明確にするために前報と添字を変えた記号がある。御容赦いただきたい。

本報では次の記号を使用する。ただしそのとき限りの記号はそのつど示す。

K_{fw}, K_{fR}, K_{wR} : $\sigma(T_m^4 - T_n^4)$ を $(T_m - T_n)$ で表わしたときの係数, 各 $K_{mn} \div 4\sigma[(T_m + T_n)/2]^3$ 。 σ は Stefan-Boltzmann の定数で T は絶対温度, K の各添字は床面-壁面, 床面-天空, 壁面-天空間の放射交換を示す。

$[K], [K_{\alpha\alpha}]^{-2}$: 温室伝熱マトリックス, 温室温度特性マトリックス。

R_{ou}, R_n, R_s : 外気有効放射量, 周囲地表面長波純放射量, 水平面日射量。

$R_{lefo}, R_{leff}, R_{lefw}$: R_{ou}, R_n による温室全体, 床面, 壁面の放射冷却量(単位壁面積当り), R_{leff} は前報の R_{lefo} 。

昭和54年4月2日 全国大会にて発表

昭和55年12月12日 受理

* 現在 北里大学獣医学部

$$R_{lefo} = R_{leff} + R_{lefw} \quad (1)$$

U : 暖房負荷係数。

e_{sf}, e_{sw} : 床面, 壁面の日射吸収率。

$h_{afi}, h_{aiw}, h_{awo}$: 床面-内気, 内気-壁面, 壁面-外気間の対流熱伝達係数。

h_{ro}, h_{ri}, h_{rt} : 温度の外気, 室内, 壁透過に関する長波放射伝達特性値, 前報(19)~(21)式およびTable 5 参照。

h_{ou}, h_{in} : 壁外面, 内面の総合熱伝達係数。

$$\left. \begin{aligned} h_{ou} &= h_{awo} + h_{ro} K_{wR} \\ h_{in} &= h_{aiw} + h_{ri} \gamma K_{fw} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

前報の K_{wo} を K_{wR} に変更, その理由は後述する。

h_{ven} : 換気熱伝達係数。

$k_{FF}, k_{FI}, k_{FW}, k_{IF}, k_{II}, k_{IW}, k_{WF}, k_{WI}, k_{WW}, k_{ff}, k_{fi}, k_{fw}, k_{if}, k_{ii}, k_{iw}, k_{wf}, k_{wi}, k_{ww}$: 温室伝熱係数(前報の熱貫流係数)。 F, I, W は床面, 室内空気, 壁面を示す添字で, 第1添字は温度変化の位置を, 第2添字は加熱位置を表わす。添字が大文字のときは換気のある場合, 小文字のときは換気のない場合とする。

$k_{ff}, k_{fi}, k_{if}, k_{ii}$ はそれぞれ前報の $k_{ff}/\beta_0, k_{af}, k_f, k_a$ である。

k_t : 熱貫流率。

q : 換気率。

q_f, q_i, q_w : 床面, 室内空気, 壁面の加熱量(q_f は単位床面積当り, q_i, q_w は単位壁面積当り), q_i は前報の q_a 。

q_{ev} : 床面の蒸発潜熱量(単位床面積当り)。

q_{so} : 床面の地中伝熱量(単位床面積当り, 上向きが正)。

q_{Rfw} : 床面-壁面間の長波純放射量(単位壁面積当り)。

$$D' = h_{ou} h_{in} + (h_{ou} \tau + h_{in}) h_{rt} K_{fR} \quad (3)$$

K_{fR} については後述。

D'_{ven} : 換気あるときの D' 。

β_0, β' : 保温比(壁内面から床面を見る形態係数), 壁外面から周囲地表面を見る形態係数。

$$\tau = 1 + h_{a iw} / h_{a fi} \beta_0 \quad (4)$$

$\varepsilon_w, \tau_w, \rho_w$: 被覆材の長波射出・吸収率, 透過率, 反射率。

$\theta_{fo}, \theta_{io}, \theta_{wo}$: 床面-外気, 内気-外気, 壁面-外気温度差(各前者が高温のとき正)。

θ_{in}, θ_{ou} : 内気温, 外気温。

$\theta_{RSF}, \theta_{RSI}, \theta_{RSW}, \theta_{RLF}, \theta_{RLI}, \theta_{RLW}, \theta_{RSf}, \theta_{RSi}, \theta_{RSw}, \theta_{Rlf}, \theta_{Rli}, \theta_{Rlw}$: 日射量(添字RS), 外気有効放射量と周囲地表面長波純放射量(添字RL)の床面F, 室内空気I, 壁面Wにおける等価温度。第2, 第3添字が大文字のときは換気のある場合, 小文字のときは換気のない場合とする。

位置に関する記号または添字f, i, w, o, R: 床面, 室内空気, 壁面, 外気, 長波放射面としての天空。

II. 伝熱マトリックスと温室温度特性式

有限要素法は流体や熱伝導の解析にも広く応用されるようになったが, 熱流を温度差の1次式で近似すると最も単純な形の剛性マトリックスが利用できる。床面, 壁面, 室内を細分せずに各平均値を用いて熱収支を構成するとFig.1のように各位置をそれぞれ1点で表わすことができる。ただし温室壁外面からは大気と周囲地表面との放射交換があるが, ここではRで代表して示した。温室伝熱係数は周囲地表面との放射交換に関係なく計算できるからである。加熱はf, i, w, o, Rで構成される系に外部から加えられる熱で, 床面加熱 q_f には土壌熱伝導, 透過日射, 土壌面蒸発, 暖房配管からの放射など, 室内空気加熱 q_i には温風暖房, 換気, 暖房配管からの伝熱

Fig. 1. Heating and heat flow of greenhouse.

など, 壁面加熱 q_w には日射吸収, 暖房配管からの放射などがあり, 負は冷却を表わす。

ここでw-R, f-R間の長波放射をFig.2のようにoを通る放射w-o-R, f-o-Rに改めると, o-R間の長波放射は温室の温度とは無関係に R_{ou} と R_n によって定まり, この量がoに加熱される。各区間の放射熱伝達係数と, R_{ou} と R_n のみで他の加熱がないときのo-R, w-o, f-o間の放射交換量をFig.2に記入した。

Fig. 2. Transform of radiation path on greenhouse.

このようにf, i, w, oに熱が加わり, それぞれの間に熱伝達係数で結ばれている系は, Fig.3に示す軸方向力のみの加わる1次元ばね構造と対比され, f, i, w, oを節点に, 熱平衡状態からのf, i, w, oの温度変化量(温度変位とよんでおく)を節点変位に, 各加熱量を外力に, 各熱伝達係数をばね定数に置換えることができる。Fig.3に熱伝達係数と加熱量を記入した。 q_{ou} は各加熱量と釣合う系外への流出熱量であるが, 計算上は求める必要がない。天空が地表面と同温の雲で覆われ, すべての温度が外気温 θ_{ou} と等しい熱平衡状態を仮想すると, これに熱が加わって定常流となったときの温度変位 $\theta_{fo}, \theta_{io}, \theta_{wo}$ は同時に外気温との差にも等しい。ただし外気の熱容量は無限大で加熱によって外気温は変化しないとする。Fig.2, Fig.3ともに長波放射交換量を温度差の1次項で近似するための係数Kの添字を前報と変えた区間がある。その理由は後述する。

Fig.3の剛性方程式は次のようになる(以下剛性マト

Fig. 3. Equivalent structure to heat flow of greenhouse.

リックス法に関し、例えばMartin, 1966, 吉識監訳, 1967 参照)。

$$\begin{Bmatrix} q_f/\beta_0 \\ q_i \\ q_w \\ q_{ou} \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \theta_{f_0} \\ \theta_{i_0} \\ \theta_{wo} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\alpha\alpha} & K_{\alpha\beta} \\ \hline K_{\beta\alpha} & K_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{f_0} \\ \theta_{i_0} \\ \theta_{wo} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

[K]は藤野(1972)の温度剛性マトリックスに相当し、ここでは温室伝熱マトリックスとよんでおく。各要素は節点に集まる部材のばね定数、ここでは熱伝達係数の和から成る。符号を考慮して、

$$[K] = \begin{bmatrix} h_{afi}\beta_0 + h_{ri}K_{fw} + h_{rt}K_{fR} & -h_{afi}\beta_0 & -h_{ri}K_{fw} & -h_{rt}K_{fR} \\ -h_{afi}\beta_0 & h_{afi}\beta_0 + h_{aiw} + h_{ven} & -h_{aiw} & -h_{ven} \\ -h_{ri}K_{fw} & -h_{aiw} & h_{aiw} + h_{ri}K_{fw} + h_{ou} & -h_{ou} \\ -h_{rt}K_{fR} & -h_{ven} & -h_{ou} & h_{ou} + h_{rt}K_{fR} + h_{ven} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(5)式{θ}の第4行はθ_{ou}の変化量で外気温は不変としているから0。通常の解法にしたがって、

$$\begin{Bmatrix} \theta_{f_0} \\ \theta_{i_0} \\ \theta_{wo} \end{Bmatrix} = [K_{\alpha\alpha}]^{-1} \begin{Bmatrix} q_f/\beta_0 \\ q_i \\ q_w \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$[K_{\alpha\alpha}]^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} (h_{ou}\gamma + h_{in}) + (h_{ou} + h_{aiw} + h_{ri}K_{fw})h_{ven}/h_{afi}\beta_0 & h_{ou} + h_{in} & h_{in} + h_{ri}K_{fw}h_{ven}/h_{afi}\beta_0 \\ (h_{ou} + h_{in}) + \{h_{ou}h_{ri}K_{fw} + (h_{ou} + h_{aiw} + h_{ri}K_{fw})h_{rt}K_{fR}\}/h_{afi}\beta_0 & h_{in} + h_{rt}(\gamma - 1)K_{fR} \\ \text{SYM.} & (h_{in} + h_{rt}K_{fR}) + (h_{afi}\beta_0 + h_{ri}K_{fw} + h_{rt}K_{fR})h_{ven}/h_{afi}\beta_0 \end{bmatrix}}{\Delta'_{ven}} \quad (8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta'_{ven} &= h_{ou}h_{in} + (h_{ou}\gamma + h_{in})h_{rt}K_{fR} + [(h_{ou} + h_{in}) + \{h_{ou}h_{ri}K_{fw} + (h_{ou} + h_{aiw} + h_{ri}K_{fw})h_{rt}K_{fR}\}/h_{afi}\beta_0]h_{ven} \\ &= \Delta' + h_{ven}[(h_{ou} + h_{in}) + \{h_{ou}h_{ri}K_{fw} + (h_{ou} + h_{aiw} + h_{ri}K_{fw})h_{rt}K_{fR}\}/h_{afi}\beta_0] \end{aligned} \quad (9)$$

また、

$$k_{FF} = \Delta'_{ven} / [(h_{ou}\gamma + h_{in}) + h_{ven}(h_{ou} + h_{aiw} + h_{ri}K_{fw})/h_{afi}\beta_0] \quad (10)$$

$$k_{FI} = k_{IF} = \Delta'_{ven} / (h_{ou} + h_{in}) \quad (11)$$

$$k_{FW} = k_{WF} = \Delta'_{ven} / (h_{in} + h_{ven}h_{ri}K_{fw}/h_{afi}\beta_0) \quad (12)$$

$$k_{II} = \Delta'_{ven} / [(h_{ou} + h_{in}) + \{h_{ou}h_{ri}K_{fw} + (h_{ou} + h_{aiw} + h_{ri}K_{fw})h_{rt}K_{fR}\}/h_{afi}\beta_0] \quad (13)$$

$$k_{IW} = k_{WI} = \Delta'_{ven} / \{h_{in} + h_{rt}(\gamma - 1)K_{fR}\} \quad (14)$$

$$k_{WW} = \Delta'_{ven} / [(h_{in} + h_{rt}K_{fR}) + h_{ven}(h_{afi}\beta_0 + h_{ri}K_{fw} + h_{rt}K_{fR})/h_{afi}\beta_0] \quad (15)$$

とおくと、

$$\begin{Bmatrix} \theta_{f_0} \\ \theta_{i_0} \\ \theta_{wo} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{FF}} & \frac{1}{k_{FI}} & \frac{1}{k_{FW}} \\ \frac{1}{k_{IF}} & \frac{1}{k_{II}} & \frac{1}{k_{IW}} \\ \frac{1}{k_{WF}} & \frac{1}{k_{WI}} & \frac{1}{k_{WW}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_f/\beta_0 \\ q_i \\ q_w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{FF}} & \frac{1}{k_{FI}} & \frac{1}{k_{FW}} \\ & \frac{1}{k_{II}} & \frac{1}{k_{IW}} \\ \text{SYM.} & & \frac{1}{k_{WW}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_f/\beta_0 \\ q_i \\ q_w \end{Bmatrix} \quad (16)$$

(16)式は前報の温室温度特性式を壁面加熱、換気伝熱を加えて拡張したもので、 q_f , q_i , q_w はFig.3に示したように系の外部から床面、室内空気、壁面へ加えられた正負の熱量であれば伝熱方法の如何を問わない。

(2), (3), (6)~(15)式で h_{rt} , h_{ro} を含む項の K の添字が前報と異なるが、物理的には前報が近似的で本報の方が正確である。前報において筆者は放射項を、

$$\begin{aligned}\sigma T_a^4 - \sigma T_c^4 &= (\sigma T_a^4 - \sigma T_b^4) + (\sigma T_b^4 - \sigma T_c^4) \\ &= K_{ab} \theta_{ab} + K_{bc} \theta_{bc}\end{aligned}$$

のように展開して解いたが、 b 点を透過する放射ないし実際は b 点を経由しない放射に対しては、

$$\sigma T_a^4 - \sigma T_c^4 = K_{ac} \theta_{ac} = K_{ac} (\theta_{ab} + \theta_{bc})$$

が正しく、 T_b が T_a 、 T_c を結ぶ直線上からはずれる場合には前報の方法は誤差を生ずる。壁外面放射および壁面を透過する床面放射は天空と直接放射交換を行うから、このときの K はそれぞれ K_{wR} 、 K_{fR} としなければならない。こうして前報の式の誘導過程を修正すると、前報(55)、(42)、(43)、(47)、(48)式はそれぞれ次のようになる。

$$k_{af} = k_f = k_{if} = k_{fi} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}R_{si} &= \frac{1}{h_{ou} + h_{in}} [(h_{ou} R_{seff} + h_{in} R_{sefo}) \\ &\quad + h_{rt} (\gamma - 1) K_{fR} R_{sefw}] \quad (18)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_{li} &= \frac{1}{h_{ou} + h_{in}} [(h_{ou} R_{leff} + h_{in} R_{lefo}) \\ &\quad + h_{rt} (\gamma - 1) K_{fR} R_{lefw}] \quad (19)\end{aligned}$$

$$R_{sf} = \frac{h_{ou} \gamma R_{seff} + h_{in} R_{sefo}}{h_{ou} \gamma + h_{in}} \quad (20)$$

$$R_{lf} = \frac{h_{ou} \gamma R_{leff} + h_{in} R_{lefo}}{h_{ou} \gamma + h_{in}} \quad (21)$$

k_{af} 、 k_f 、各 R は前報の記号、ただし R_{seff} 、 R_{leff} は前報の R_{sefi} 、 R_{lefi} である。 R_{seff} 、 R_{sefw} は日射の床面、壁面吸収量、 R_{sefo} はその和ですべて単位壁面積当りで表わす。(18)～(21)式右辺の各分子を Δ' で除すると換気のない場合の各等価温度をうる(前報 p. 33)。

(7)、(16)式から、

$$[K_{\alpha\alpha}]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{FF}} & \frac{1}{k_{FI}} & \frac{1}{k_{FW}} \\ & \frac{1}{k_{II}} & \frac{1}{k_{IW}} \\ \text{SYM.} & & \frac{1}{k_{WW}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

よって温室伝熱マトリックス $[K]$ の加熱量に関する部分マトリックス $[K_{\alpha\alpha}]$ から温室伝熱係数 k が求められる。 $[K_{\alpha\alpha}]^{-1}$ を温室温度特性マトリックスとよんでおく。 q_w は壁面が加熱面であるから貫流熱量ではないが、各 k は式の上では同等の意義をもっている。前報の熱貫流係数を温室伝熱係数と改めた理由の一つでもある。

(16)式において $q_f \beta_0 = R_{leff}$ 、 $q_i = 0$ 、 $q_w = R_{lefw}$ とおき、 $h_{ven} = 0$ の場合を考え、(1)、(10)～(12)、(14)を用いると、 θ_{fo} 、 θ_{io} は換気のない場合の外気有効放射[(24)式のように R_{ou} のほかに周囲地表面長波純放射 R_n の影響も含む]の等価温度 θ_{Rlf} 、 θ_{Rli} —これは(21)、

(19)式の各分子を Δ' で除して得られる—と一致する。よって R_{leff} 、 R_{lefw} は外気有効放射(前同)による床面、壁面冷却量である。換気ある場合の等価温度も(16)式から、

$$\left. \begin{aligned} \theta_{RLF} &= \frac{1}{k_{FF}} R_{leff} + \frac{1}{k_{FW}} R_{lefw} \\ \theta_{RLI} &= \frac{1}{k_{FI}} R_{leff} + \frac{1}{k_{IW}} R_{lefw} \\ \theta_{RLW} &= \frac{1}{k_{WF}} R_{leff} + \frac{1}{k_{WW}} R_{lefw} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

前報(26)、(36)～(38)式から次式をうる。通常 R_{ou} 、 R_n は上向を正とするから各 R_{lef} は冷却側が正である。 $R_{lefo} = (h_{ro} + h_{rt}) R_{ou} - \{h_{ro} + (1 - \tau_w) h_{rt}\} \beta' R_n$
 $R_{leff} = h_{rt} (R_{ou} - \rho_w \beta' R_n)$
 $R_{lefw} = R_{lefo} - R_{leff} = h_{ro} R_{ou} - (h_{ro} + \varepsilon_w h_{rt}) \beta' R_n$

よって各 θ_{RL} は温度低下量を表わし冷却が正となる。

日射の等価温度は(16)式で $q_f \beta_0 = e_{sf} R_s \beta_0$ 、 $q_i = 0$ 、 $q_w = e_{sw} R_s \beta_0$ とおくと、

$$\left. \begin{aligned} \theta_{RSF} &= \frac{1}{k_{FF}} e_{sf} R_s \beta_0 + \frac{1}{k_{FW}} e_{sw} R_s \beta_0 \\ \theta_{RSI} &= \frac{1}{k_{FI}} e_{sf} R_s \beta_0 + \frac{1}{k_{IW}} e_{sw} R_s \beta_0 \\ \theta_{RSW} &= \frac{1}{k_{WF}} e_{sf} R_s \beta_0 + \frac{1}{k_{WW}} e_{sw} R_s \beta_0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

(25)式も $h_{ven} = 0$ の場合は前報の θ_{Rsf} 、 θ_{Rsi} と一致する。

日射と外気有効放射(前同)を $q_f \beta_0$ 、 q_w から差引いた分を改めて $q_f \beta_0$ 、 q_w とおき、代りに等価温度を用いると、換気ある場合について次式が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{fo} - \theta_{RSF} + \theta_{RLF} &= \frac{1}{k_{FF}} q_f \beta_0 + \frac{1}{k_{FI}} q_i + \frac{1}{k_{FW}} q_w \\ \theta_{io} - \theta_{RSI} + \theta_{RLI} &= \frac{1}{k_{FI}} q_f \beta_0 + \frac{1}{k_{II}} q_i + \frac{1}{k_{IW}} q_w \\ \theta_{wo} - \theta_{RSW} + \theta_{RLW} &= \frac{1}{k_{WF}} q_f \beta_0 + \frac{1}{k_{WI}} q_i + \frac{1}{k_{WW}} q_w \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

無換気時は以上の諸式で $h_{ven} = 0$ とおいたときの各 k 、各 θ_R を用いる。

(26)式は以上のように前報の温度特性式の拡張である。ここでは保温比 β_0 を用いているから室内の伝熱は放射、対流とも床面：壁面の面積比によって規定され、室内の物体が無視しうほど小さい、すなわち無植栽に近い場合に適用される。構造材の影響なども無視され、また壁厚を無視しているから壁の熱伝導、熱容量も考慮されていないが、これらは通常用いられる仮定である。

q_i , q_f は空気, 土壌の熱容量を考慮に入れて取扱うことができ, したがって非定常解を得ることも可能である。潜熱輸送のある場合は相変化の熱量を q_f , q_w に組入れればよい。作物の繁茂時には後述のように床面-壁面の放射・対流伝熱比が変化し β_0 の取扱いを考える必要があり, したがって各 k , 各 θ_R も変る。なお(26)式右辺は床面, 室内空気, 壁面の各加熱量の等価温度であるから, 各温度差は等価温度の和と考えることもできる。

壁面、床面の平均温度、平均の熱フラックスを用いず、壁面などを多面分割して、各面間の放射伝熱、各面と内外空気間の対流伝熱と温度との関係を解析するときに本節の方法はさらに有効であろう。

北村(1967), 三木ら(1969)はそれぞれハウス、トンネルの熱流と温度との関係を電気回路との analogy によって検討した。この手法を拡張して本報に適用すると、長波透過性を含む温室の熱流は Fig. 4 の電気回路で表わすことができる。ただし壁面加熱と換気を省略した。節点電位法を用い各節点方程式を立てて解くと k_{ff} , $k_{fi} = k_{if}$, k_{ii} が得られ、これらは(10), (11), (13)式で $h_{ven} = 0$ としたときの値に等しい。加熱が q_i のみのときは Wheatstone Bridge になる。本節のマトリックス法は電気回路法の拡張にもなっている。

Fig. 4. Equivalent electric circuit to heat flux on greenhouse.

Ⅲ. 切断法による **Businger** 熱収支式の誘導

構造力学では、部材を切断しその代りに部材力と等しい外力を節点に加え等価な構造として計算を行う場合がある。同様な手法を用いて室内長波純放射を考えよう。簡単のためガラス室とし $h_m = 0$ とおく。Fig. 5 のように $f-w$ 間を切断し、代りに節点 f, w に外力 q_{Rfw} を加える。 $h_{ri} K_{fw}$ に対応する部材を切断したから $h_{ri} K_{fw} = 0$ 、よって(2)式から $h_{in} = h_{aw}$ 。これらを(8)式に入れるとこの場合の温度特性マトリックスが得られる。

Fig. 5. Structure, on which member f-w is cut.

$$[\mathbf{K}_{\alpha\alpha}]^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} h_{ou}\gamma + h_{aiw} + h_{ven} \cdot \frac{h_{aiw} + h_{ou}}{h_{afi}\beta_0} & h_{ou} + h_{aiw} & h_{aiw} \\ h_{ou} + h_{aiw} & h_{ou} + h_{aiw} & h_{aiw} \\ h_{aiw} & h_{aiw} & h_{aiw} + h_{ven} \end{bmatrix}}{h_{ou}h_{aiw} + h_{ven}(h_{ou} + h_{aiw})} \quad (27)$$

(7)式で $q_i=0$ とおき, 上式を用いると,

$$\{h_{ou}h_{aiw}+h_{ven}(h_{ou}+h_{aiw})\}\theta_{io}$$

$$=(h_{ou}+h_{aiw})q_f\beta_0+h_{aiw}q_w$$

$f-w$ 切断時は床面加熱量は、

$$f \longrightarrow i \begin{cases} \nearrow u \\ \searrow 0 \end{cases}$$

の経路をとって流出するから、

$$q_f \beta_0 = h_{aiw} \theta_{iw} + h_{ven} \theta_{io} \quad (28)$$

これと(2)式を用いて上式を整理すると、

$$\theta_{io} = \frac{(h_{awo} + h_{aiw})q_f\beta_0 + h_{aiw}(q_w - h_{ro}K_{wR}\theta_{wo})}{h_{awo}h_{aiw} + h_{awo}h_{ven} + h_{aiw}h_{ven}} \quad (29)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} q_f \beta_0 &= e_{sf} R_s \beta_0 - q_{Rfw} + (q_{so} - q_{ev}) \beta_0 \\ q_w &= e_{sw} R_s \beta_0 + q_{Rfw} - R_{lef w} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

とおくと、

$$\theta_{io} = \frac{\beta_0 \{ h_{awo} R_{ni} + h_{aiw} R_{no} + (h_{awo} + h_{aiw}) (q_{so} - q_{ev}) \}}{h_{awo} h_{aiw} + h_{awo} h_{ven} + h_{aiw} h_{ven}} \quad (31)$$

ここで R_{ni} , R_{no} は室内, 壁外全波長純放射(単位床面積当り)で,

$$R_{ni}/\beta_0 = e_{sf} R_s/\beta_0 - q_{Rfw}$$

$$R_{no}\beta_0 = (e_{sf} + e_{sw})R_s\beta_0 - (R_{lef w} + h_{ro}K_w R\theta_{wo})$$

$R_{lef w}$ は外気温を基準とした有効放射 R_{ou} から算定される壁面冷却量であるから、これに壁面-外気間の温度差による放射交換量を加えた $R_{lef w} + h_{r o} K_{w R} \theta_{w o}$ は壁面-天空・周囲地表面間の長波放射交換量である。(31)式は Businger の熱収支式に等しい。ただし $q_{s o}$ の符号は Businger とは逆にとっている。

(16)式の温室温度特性式は外力と変位に対比される加熱量と温度変位の関係式であるが、室内純放射のよう

に部材力に相当する量を含むときは以上の方法で処理することができる。

IV. 温室の熱貫流率と暖房負荷係数

壁面の貫流熱量を内外気温差で除して熱貫流率を求め得るのは、熱貫流が対流伝熱によって生ずる場合である。放射伝熱を含むときはそれが対流伝熱量と一義的な関係をもつ場合に限る。気温差は対流伝熱の達しないところには生じないからである。加熱部位と温度変位の位置によって種々の温室伝熱係数が得られるのは、熱流の経路の差異によって放射、対流伝熱の関係が異なるためで、したがって加熱位置を定めなければ一義的な熱貫流率を求めることができない。温湯暖房では加熱量が床面、室内空気、壁面に分割して加わるが、温風暖房や換気は加熱・冷却が室内空気に対して行われ他の部位への加熱がないから最も単純である。

床面－壁面間の放射、対流伝熱の関係は従来から保温比 β_0 で結ばれてきた。 β_0 は壁内面から床面を見る形態係数であると同時に床面：壁内面の対流伝熱面積比であるから、床面と壁内面の対流伝熱係数を等しいとすると、床面→壁内面の伝熱では両面の単位面積当り熱フラックスの比は放射、対流とも1： β_0 になり、放射伝熱比、対流伝熱比を同一の β_0 で表わすことができる。無植栽の通常型温室ではこの関係が成立するので理論的に単純になる。植栽のある場合は通常型温室でも壁内面から床面・作物面を見る形態係数と床面・作物面：壁内面の対流伝熱面積比が一致しないので分離して取扱わなければならない。ここで通常型温室とは壁面がすべて地上部にあって凸面を形成し床面は平坦な温室を意味する。また多層被覆時には実際問題として最外層の被覆材と床面から保温比を定めるのが適当と考えられるが、これら保温比の概念については別途報告する予定である。

また温室は無暖房時にも外気有効放射、日射、他の地物からの放射などの自然加熱のため熱平衡状態にはないから、自然加熱量と人工加熱量の和が内外気温差に近似的に比例する。この比例定数が筆者の提起した温室伝熱係数である。暖房熱量のみでは温度差に比例せず自然加熱量を付加定数としなければならない。暖房が主として夜間であることと必要換気量の計算の関係から、付加定数として外気有効放射(周囲地表面純放射の影響を含む)をえらび熱貫流率を定義するのが適当であろう。温室伝熱係数は前述の各 k であるが、熱貫流率の算出に必要な k は k_{if} 、 k_{ii} 、 k_{iw} である。

以上から単純で基本的な熱貫流率は夜間、温風暖房、無植栽のときの値で、(26)の第2式で $\theta_{RSI}=0$ 、 $q_f=q_w=0$ 、 $h_{ven}=0$ したがって $k_{II}=k_{ii}$ 、 $\theta_{RLI}=\theta_{Rli}$ とおい

て得られ、前報(56)式から定義されるものと同一である。

$$k_t = k_{ii} \left(1 + \frac{\theta_{Rli}}{\theta_{io}} \right) \quad (32)$$

暖房負荷係数は(26)第2式で $\theta_{RSI}=0$ 、 $q_f=q_{so}$ 、 $q_w=0$ として、

$$U = k_{II} \left\{ 1 + \left(\theta_{RLI} - \frac{q_{so}\beta_0}{k_{IF}} \right) / \theta_{io} \right\} \quad (33)$$

(32)式は従来実測や電算機計算から求めた熱貫流率の内容を理論的に明らかにしたもので、外気有効放射(前同)が付加定数となるために熱貫流率が内外気温差の増加とともに減少することを示し、この傾向は岡田(1977)の計算、皆川(1980)の測定においても得られている。内温の増大とともに k_{ii} は僅かながら増加する(Fig. 6)が通常の温度範囲ではその影響は無視することができる。

Fig. 6. k_t , k_{ii} , k_{if} , k_{iw} and U on the hot-air-heated greenhouse covered with glass, PVC and PE.

Fig. 6に温風暖房温室の例として $\beta_0=0.6$ 、 $\theta_{ou}=0^\circ\text{C}$ 、 $R_{ou}=90\text{ kcal/m}^2\text{ hr}$ 、 $R_n=72\text{ kcal/m}^2\text{ hr}$ 、 $h_{awo}=5\text{ kcal/m}^2\text{ hr }^\circ\text{C}$ 、 $h_{aiw}=h_{afi}=4\text{ kcal/m}^2\text{ hr }^\circ\text{C}$ の場合の計算結果を示す。 U は $h_{ven}=0.3\text{ kcal/m}^2\text{ hr }^\circ\text{C}$ 、 q_{so} に施設園芸研究集合(1977)の暖地の値を用いて算出した。 k_t 、 U ともに通常の内外気温差15～20℃で従来の値とよく合っている。 k_t の算出には θ_{ou} の値は直接必要ではなく、(13)式から k_{ii} を求めるときの各 K の算出根拠として用いるだけである。図のとおり k_{ii} はほとんど一定と見なされるので、Fig. 6の k_t 、 U は外気温が通常の冬季夜間の範囲内ならば適用することができよう。PVC、PEの k_t は各内外気温差についてほとんど等しくガラス被覆よりほぼ5%大であるが、とくにPEについては実際にはこれより大きい値を見込む必要がある。長波透過性のため内気温と作物温度の差が大になるからである。

Fig. 7に温湯暖房ガラス室の計算例を示す。 $h_{aiw}=h_{afi}=2\text{ kcal/m}^2\text{ hr }^\circ\text{C}$ としたほかは条件はFig. 6と同様

である。 h_{aiw} はOkada (1980)のうね間配管の場合の図から、この例に相当する値として定めた。得られた k_t は温湯暖房時のPVCの場合とほとんど同じで、ガラス室の比較では5%ほど大である。温湯暖房における熱貫流率は次のようにして求めた。加熱量を q_h とすると(26)の第2式で $h_{ven}=0$ とにおいて、

$$\theta_{io} + \theta_{Rli} = \left(\frac{a}{k_{if}} + \frac{b}{k_{ii}} + \frac{c}{k_{iw}} \right) q_h$$

$$\therefore k_t = \frac{1}{\frac{a}{k_{if}} + \frac{b}{k_{ii}} + \frac{c}{k_{iw}}} \left(1 + \frac{\theta_{Rli}}{\theta_{io}} \right) \quad (34)$$

a , b , c は床面、室内空気、壁面への q_h の分配率で、それぞれ21, 42, 37%として計算した。岡田(1977)の方法によって配管一壁面間の対流熱伝達の式と配管から床面、壁面を見る形態係数とから算出した割合である。 k_{if} , k_{ii} , k_{iw} とも温度差の増加とともに僅かに増大しているが近似的には一定とみなされ、加熱部位が室内空気、床面、壁面それぞれの場合に応じて内気温上昇効果は付加定数 θ_{Rli} を除くと1/2.07:1/4.0:1/8.1の比になることが分る。 $h_{aiw}=4 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$ のFig. 6の場合はガラス室についてこの比は内外気温差10~20 $^\circ\text{C}$ のとき1/3.15:1/4.45:1/8.1となり、壁内面对流熱伝達係数の影響が著しく、また壁外面对流熱伝達係数が変わると1/8.1も変化する。付加定数を $-\theta_{ou}-\theta_{Rsi}+\theta_{Rli}$ または $-\theta_{Rsi}+\theta_{Rli}$ にえらぶとそれぞれ θ_{in} , θ_{io} が各加熱量と近似的に線型関係で結ばれることは(26)式から明らかである。

従来暖房計算においては、

$$Q_g = \{A_g(H_t + H_{ven}) + A_s H_{so}\} f_w$$

$$H_t = h_t(\theta_{in} - \theta_{ou}) f_f$$

の形の式が用いられている(施設園芸研究集合, 1977)。補正係数 f_w , f_f を省略すると次式をうる。

Fig. 7. k_t , k_{ii} , k_{if} and k_{iw} on the pipe-heated glasshouse.

$$\theta_{io} = \frac{Q_g}{A_g h_t} - \frac{H_{so} \beta_0}{h_t} - \frac{H_{ven}}{h_t}$$

ここで、 Q_g : 加熱量, H_{so} : 地中伝熱量(下向が正), H_{ven} : 換気伝熱量, A_g : 被覆面積, h_t : 熱貫流率。

高倉ら(1972)の式も上と同等である。これらの式は(26)の第2式の意義をもっているが、加熱部位による伝熱係数の差異および外気有効放射の影響が明白でない。実用式として理解すべきであろう。

V. 換気への応用

高温制御のための必要換気量を求めるときは地中伝熱量を0とし(施設園芸研究集合, 1977), 暖房もないから(26)の第2式で $q_f=q_i=q_w=0$ とおき(23), (25)の第2式と(9), (11), (14)式を用いると次式をうる。

$$h_{ven} = \frac{k_{ii}}{\theta_{io}} \left\{ \frac{1}{k_{if}} (e_{sf} R_s \beta_0 - R_{leff}) + \frac{1}{k_{iw}} (e_{sw} R_s \beta_0 - R_{lefw}) \right\} - k_{ii} \quad (35)$$

無換気時の等価温度で表わすと、

$$h_{ven} = k_{ii} \left(\frac{\theta_{Rsi} - \theta_{Rli}}{\theta_{io}} - 1 \right) \quad (36)$$

(32)式によって、

$$h_{ven} = k_{ii} \frac{\theta_{Rsi}}{\theta_{io}} - k_t \quad (37)$$

換気率 q に換算するときは、

$$q = h_{ven} / C_a \rho \beta_0 \quad (38)$$

であるから、

$$q = \frac{1}{C_a \rho \beta_0} \left(k_{ii} \frac{\theta_{Rsi}}{\theta_{io}} - k_t \right) \quad (39)$$

(35)式で $e_{sw}=0$ とおけば、

$$q = \frac{1}{C_a \rho} \left(\frac{k_{ii}}{k_{if}} \cdot \frac{e_{sf} R_s}{\theta_{io}} - \frac{k_t}{\beta_0} \right) \quad (40)$$

$C_a \rho$ は空気の容積比熱である。

以上の諸式は床面の蒸発潜熱を0とした場合の必要換気量を与える。吸収日射量に対する潜熱比 α' を用いると、

$$q = \frac{1}{C_a \rho} \left\{ \frac{k_{ii}}{k_{if}} \cdot \frac{e_{sf} R_s (1 - \alpha')}{\theta_{io}} - \frac{k_t}{\beta_0} \right\} \quad (41)$$

小倉の換気式(三原ら, 1976; 施設園芸研究集合, 1977)は小倉(1968)の結果を用い、室内全波長純放射が短波純放射と近似的に等しいとして導かれている。これは前節の $f-w$ 切断で $q_{Rfw}=0$ の場合に相当する。(27)式から $k_{if}=k_{ii}$ 。これは(41)式の k_{ii}/k_{if} の最大値を与え、このとき両式は一致する。

矢吹の換気式(三原ら, 1976; 施設園芸研究集合, 1977)は熱収支の形では(28)式とほぼ同等で、 $h_{aiw} \theta_{iw}$

Fig. 8. Relation between ventilation rate and temperature difference from Eq. (41) and Yabuki on glasshouses.

の代りに外面の熱伝達量を取りこれを近似的に $k\theta_{io}$ としている。したがって k は通常の熱貫流率より小で、壁面熱伝達係数(熱貫通率)と記載されている(施設園芸研究集合, 1977)。(30)の第1式で $q_{so}=0$, $q_{ev}=\alpha(e_{sf}R_s\beta_0-q_{Rfu})$ とし(28)式に入れると矢吹式をうる。 α は室内純放射に対する潜熱比である。夏季の室内純放射として矢吹の与えた $480 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ に対応する日射量 $R_s=900 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ を用い、 $e_{sf}=0.7$, $\theta_{ou}=32^\circ\text{C}$, 相対湿度 50%, $h_{awo}=5 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$, $h_{aiw}=h_{afi}=4$ および $5 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ の条件下で(41)式と矢吹式を比較したのが Fig. 8 である。 R_{ou} は θ_{ou} と水蒸気圧から Brunt の式を用いて算出し、 R_n はさらに地表温度を 40°C , 地表面射出率を 0.93 として求めた。計算はガラス室として行った。両式はほぼ一致する結果を得たが、とくに $h_{aiw}=5 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ のときにほとんど一致することに注目すべきであろう。

VI. 結 語

有限要素法の剛性マトリックスを温室の熱流に適用して温度特性式を改良拡張し、熱貫流率算定の基礎を与え、暖房と換気に応用して既往の成果とほぼ一致することを示した。

先年施設園芸研究集合の環境制御基準作成に際し、筆

者はこれに参加しながら多忙のため何らの寄与もなしでなかった。その当時の筆者の構想をとりまとめたのが本論文で、ここに多少の責を果し得たかと考える。遅延の点は当時の研究集合の方々に深くお詫び申し上げる次第である。また本報は今年定年を迎えた筆者の東京大学における最終論文となった。多年に亘り御厚宜を賜った東京大学農学部の方々に厚く感謝の意を表する。なお本研究の経費は日立製作所中央研究所の奨学寄付金による。関係の方々に謝意を表する。

引用文献

- 1) 藤野 勉, 1972: 熱伝導と熱応力, 培風館, 173.
- 2) 北村一男, 1967: ビニールハウスの地温と気温について(夜間の場合), 農業気象, **23** (2), 75-80.
- 3) Martin, H. C., 1966: *Introduction to matrix methods of structural analysis*, McGraw-Hill, N.Y., (吉識雅雄監訳, 1967: マトリックス法による構造力学の解法, 培風館, 17-21).
- 4) 三原義秋ほか 15 名, 1976: 園芸施設環境制御装置の設計規準に関する総合研究最終報告書, 66-71.
- 5) 三木 肇・小高矩正, 1969: トンネル被覆栽培における夜間温度の理論的考察, 生物環境調節, **6** (2), 11-17.
- 6) 皆川秀夫, 1980: 温室の保温性に関する基礎的研究, 東京大学修士論文, 49.
- 7) 小倉祐幸, 1968: 空気調和ガラス室の純放射および短波放射について, 農業気象, **24** (1), 1-5.
- 8) 岡田益己, 1977: 温室の暖房負荷に関する研究, 東京大学博士論文, 116 および 122.
- 9) Okada, M.: The heating load of greenhouses. (1) Convective heat transfer coefficients at the inside cover surface of a greenhouse as influenced by heating pipe positions., *J. Agr. Met. Japan*, **35** (4), 235-242.
- 10) 施設園芸研究集合, 1977: 施設園芸環境制御基準資料, 農業気象, **33** (特別号), 36-37 および 45.
- 11) 立花一雄, 1980: 温室の放射収支と熱収支—温室温度特性式の誘導—, 農業気象, **36** (1), 25-35.
- 12) 高倉 直・岡田益己, 1972: 実測による温室暖房負荷係数の決定, 農業気象, **27** (3), 93-98.

Summary

The stiffness matrix of the finite element method is applicated to the heat transfer of the greenhouse and the equations of heatflux-temperature are extended and improved. It is shown by the equation (5). $[K]$, Eq. (6) and $[K_{\alpha\alpha}]^{-1}$, Eq. (8) are the heat transfer matrix of the greenhouse and the heat flux-temperature matrix, respectively. The elements of the matrix $[K_{\alpha\alpha}]^{-1}$, which are calculated from Eqs. (10)–(15), are heat transfer coefficients of the greenhouse. These coefficients are different from each other, by the heating position and the measuring point.

From these equations, the equivalent temperatures of the solar radiation and the atmospheric

one are found [Eqs. (23) and (25)]. The overall heat transfer and heating load coefficients are also found by Eqs. (32) and (33).

Fig. 6 shows the relation between these values of the hot-air-heated glasshouse, PVC and PE houses and the temperature difference of outside and inside air. Fig. 7 also shows that on the pipe-heated glasshouse.

Required air flow rate on the ventilation is shown in Fig. 8 calculated from Eq. (41).