温室の熱収支†

高倉 直*・立花 一雄*

古在 豊樹*・碓 宏八郎**

(*東京大学農学部, **農電研究所)

Heat Balance of Glasshouses

T. TAKAKURA*, K. TACHIBANA*, T. KOZAI* and K. IKARI**

(*Faculty of Agriculture, Tokyo University, Tokyo; **Agricultural Laboratory,
Central Research Institute of Electric Power Industry, Kashiwa, Chiba)

1. ま え が き

最近温室による植物環境条件のコントロールが問題視され、既にその総括報告も若干ある(例えば杉ら(1965); 矢吹(1967))。温室の熱収支式及びこれから導かれる温室気温の計算式に限ってみても、既に数多くの報告がある(矢吹, 今津(1961); BUSINGER(1963); 内島(1964, 1965); 杉, 高倉(1965); WALKER(1965); 北村(1967))。これらの報告に述べられている式は、それぞれの著者が独自の考えから導いたものが多く、近似の方法、省略の方法、現象のとらえ方が一様でない。また一方、これらの報告では対象にされなかつた、温室内気温が夜間、外気温より低下する現象(TAKAKURA(1967)), 杉ら(1968)の Tower glasshouse 内の気温変化などが出現するに及んで、これら熱収支式及びこれから導かれる温室内気温の式を再検討し、既存の報告との関係を明らかにする必要があるが生じた。

温室内気温の予測という観点からすれば、熱収支式をもとにする方法は内気温だけを測定せず、その他の一次量を測定するプリミティブな方法であるが、複雑な温室の伝熱現象を理解するために欠くことのできないものと考えられる。既に外の気象条件をドライビングフォースとしての予測式や非定常解も報告されている。これらについては別の機会に議論することにした。

2. 温室の熱収支

温室内気温を温室の熱収支式から導く場合、何を未知量として残すかによつて種々の表現が可能である。式の變形は、そうすることによつて表わされている現象がよ

り明確になるか、それによつて精度よく観測される量のみの式になるか、または測定すべき量が減ることがなければ意味がないであろう。いたずらに変形することは理解しにくいばかりでなく、変数を見誤つたり、独立でないものを独立としてあつかう危険性が生ずる。本論文では BUSINGER(1963)の式をもつとも基礎的なものと考え、数式に用いる記号もできるだけ彼のものと等しくするよう努力した。

温室の熱収支においては、温室全体の熱収支を考えて作用面として壁(天井も含む)外表面と地表面を用いる場合と、温室を構成する代表的な面、すなわち壁外表面、内表面、地表面の熱収支を考えることが可能である。この両者は未知数が異なるのみで基本的に等しい。ここではまず3つの面における熱収支から考察しよう。ここで各面での熱フラックス、及び温度はすべて考えている面及び空間での平均量と考える。

温室地表面ではよく知られているように、

$$glH_{net} = glH_{so} + glH_{ai} + glH_{ev} \quad (1)$$

ここで、 glH_{net} は温室地表面での純放射、 glH_{so} は地中への伝熱量、 glH_{ai} は地表面からの顕熱フラックス、 glH_{ev} は地表面からの潜熱フラックスである。

同様に壁内外表面の熱収支式から、壁全体の熱収支式は

$$H_{net} - wH_{net} = glH_{con} + wH_{ai} + wH_{ev} \quad (2)$$

となる。ここで、 H_{net} は壁外表面での純放射、 wH_{net} は壁内表面での純放射、 glH_{con} は温室内空気への壁面からの対流伝熱量、 wH_{ai} は壁外表面から外気への対流伝熱量、 wH_{ev} は壁内表面への水分凝結による熱量である。

さらに次の諸式が成立する。

† 昭和42年12月1日 関東支部例会にて発表

$$A_{so} \cdot glH_{ai} = (senH_{ven} - glH_{con})A_w \quad (3)$$

$$wH_{ai} = h_{ou}(\theta_w - \theta_{ou}) \quad (4)$$

$$glH_{con} = h_{in}(\theta_w - \theta_{in}) \quad (5)$$

$$senH_{ven} = h^s_{ven}(\theta_{in} - \theta_{ou}) \quad (6)$$

$$wH_{net} \cdot A_w = glH_{net} \cdot A_{so} \quad (7)$$

ここで A_{so} は温室内地表面積, $senH_{ven}$ は換気による顕熱交換量, A_w は壁表面積, h_{ou} 壁外表面における対流伝熱係数, θ_w は壁温度, θ_{ou} は外気温, h_{in} は壁内表面における対流伝熱係数, θ_{in} は室内気温, h^s_{ven} は換気による顕熱相当伝熱係数である。以上に述べた関係を図示すると Fig. 1 となる。

Fig. 1. Diagrammatic representation of the heat balance of the glasshouse.

(1)式と(3)式から glH_{ai} を消去した式へ(5), (6)式を代入し(2)式に(4), (5)式を代入してこの2つの式から θ_w を消去し, さらに(7)式の関係を用いると次式が得られる。

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{h_{in}(H_{net} - wH_{ev}) + \beta \{h_{ou} \cdot glH_{net} - h^s_{ven}(h_{in} + h_{ou})\}}{h^s_{ven}(h_{in} + h_{ou}) - (h_{in} + h_{ou})(glH_{so} + glH_{ev})} \quad (8)$$

ここで $\beta = \frac{A_{so}}{A_w}$ (保温比) である。

一方潜熱交換に関しても定常が仮定できるならば,

$$\beta \cdot glH_{ev} = latH_{ven} + wH_{ev} \quad (9)$$

が成立する。ここで $latH_{ven}$ は換気による潜熱交換量で次式によつて表わされる。

$$latH_{ven} = h^l_{ven}(q_{in} - q_{ou}) \quad (10)$$

ここで h^l_{ven} は換気による潜熱相当伝熱係数, q_{in} は室内比湿, q_{ou} は外気の比湿である。(10)式を(9)式に代入し, この式と(8)式から wH_{ev} を消去すると,

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{h_{in}(H_{net} + h^l_{ven}(q_{in} - q_{ou})) + \beta \{h_{ou}(glH_{net} - glH_{so} - glH_{ev}) - h^s_{ven}(h_{in} + h_{ou})\}}{h^s_{ven}(h_{in} + h_{ou}) - h_{in}(glH_{so} + 2 \cdot glH_{ev})} \quad (11)$$

となる。

さらに温室内ボーエン比などを用いての変形も可能であるがここでは省略する。

3. 考 察

Fig. 2 に(8)式より求まる保温比 β と温室内外の温度差 $\theta_{in} - \theta_{ou}$ の関係を示した。

Fig. 2. Estimated temperature differences inside and outside the glasshouse: $H_{net} = 300$ ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$), $glH_{net} = 200$ ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$), $glH_{so} = 100$ ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$) and $glH_{ev} = wH_{ev} = 0$.

なお BUSINGER (1963), 内島 (1965) が同様な内外気温差という表現をとっているため比較までに同じ数値での値を同図中にプロットしてみた。

既に報告されている論文はすべてが温室内外気温差を直接求めたものではない。しかしここではこれらの論文の関係式から温室内気温を求める変形を行ない, (8)式または(11)式との関係を明らかにしたい。

(i) 矢吹, 今津 (1961) との関係

(1), (2), (3), (7)式から glH_{con} , glH_{ai} , wH_{net} , glH_{net} を消去すると次式を得る。

$$H_{net} = \beta_{gl} H_{so} + w H_{ai} + sen H_{ven} + (\beta_{gl} H_{ev} + w H_{ev}) \quad (12)$$

筆者らの式は(1), (2), (3)式からわかるようにガラス室の昇温熱量を微小として無視しているもので、その項 H を加えると

$$H_{net} = \beta_{gl} H_{so} + w H_{ai} + sen H_{ven} + (\beta_{gl} H_{ev} + w H_{ev}) + H$$

この式はガラス室全体の熱収支を与える。矢吹、今津(1961)の(4)式

$$S_u + B_o + L_u + V_u + H = 0$$

は符号のとり方、形態の関係で定まる β を考慮すると上式と一致する。 $H_{net} = S_u$, $\beta_{gl} H_{so} = -B_o$, $w H_{ai} + sen H_{ven} = L_u$, $\beta_{gl} H_{ev} + w H_{ev} = -V_u$ 。

(ii) BUSINGER (1963) との関係

(1), (3)式は BUSINGER (1963) と同じであるが、筆者らは地表面における熱収支(1)式と壁面の熱収支式(2)を採用したのに対し BUSINGER は(2)式の代りに

$$(H_{net} - gl H_{net}) A_{so} = (gl H_{con} + w H_{ai} + w H_{ev}) A_w$$

を用いている。また(7)式は壁内面の純放射と地表面の純放射との関係から導入したもので BUSINGER の $h_{so} = h_w = h_{in}$ の仮定を取除くことができる。内外気温差を与える BUSINGER の式

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{1}{h_{in} h_{ou} + h_{in} h_{ven} + h_{ou} h_{ven}} \cdot \frac{A_{so}}{A_w} [h_{ou} gl H_{net} + h_{in} H_{net} - (h_{in} + h_{ou})(gl H_{so} + gl H_{ev})]$$

と(8)式の差異はこのため生じたものである。ここで h_{so} は温室内地表面における対流伝熱係数、 h_w は壁内表面の対流及び凝結による伝熱係数である。また換気による潜熱交換量に関しては BUSINGER (1963) の(9.19)式 $h'_{ven} = h_{ven} \left(1 + \frac{L}{C_{ai}} \frac{q_{in} - q_{ou}}{\theta_{in} - \theta_{ou}}\right)$ なる変形は行なわなかった。ここで L は蒸発熱、 C_{ai} は空気 の体積比熱である。

(iii) 内島 (1964) との関係

$$(8)式に $gl H_{ev} = \frac{gl H_{net} - gl H_{so}}{1+b}$, ここで b は温室床面の$$

のボーエン比、を代入すると

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{1}{h_{sven}(h_{in} + h_{ou}) + h_{in} h_{ou}} [h_{in} H_{net} + \beta h_{ou} gl H_{net} - h_{in} w H_{ev} - \beta(h_{in} + h_{ou}) gl H_{so} - \beta(h_{in} + h_{ou})(gl H_{net} - gl H_{so})/(1+b)] \quad (13)$$

内島 (1964) の(10)式をここに用いた記号に書改めると

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{\beta \{(S_w - gl H_{so}) - (1-\gamma) h_{t*}\}}{h_{t*}}$$

$$\frac{(gl H_{net} - gl H_{so})/(1+b)}{+ h_{sven}}$$

ここで S_w : 温室表面の純放射, γ : 室内地面からの潜熱伝達量が膜面に凝結する割合を示す係数, h_{t*} : 膜内外を通しての総括熱伝達係数、一般に温室のように壁厚が微小の場合は $1/(\text{内外表面の熱伝達係数})$ に比べ(壁厚)/(壁体熱伝導率)は無視できるので、熱貫流率に関する衆知の式より

$$\frac{1}{h_{t*} + h_{sven}} = \frac{h_{in} + h_{ou}}{h_{sven}(h_{in} + h_{ou}) + h_{in} h_{ou}} \quad (14)$$

簡単のため $w H_{ev} = 0$, $\gamma = 0$ として(14)式を考慮しつつ(13)式と内島 (1964) の(10)式とを比較すると(13)式は内島式の $\beta(h_{in} + h_{ou}) S_w$ の代りに $h_{in} H_{net} + \beta h_{ou} gl H_{net}$ を用いていることがわかる。これは温室表面の純放射のとり方の差異と筆者らが壁面からの顕熱伝達係数を用いているに反し内島式では壁面を貫流する熱伝達係数を用いた差異に基づくものである。

(iv) 内島 (1965) との関係

内島 (1965) の(5)式は

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{\beta \{(gl H_{net} - gl H_{so}) - K_{od}(ie_a - oe_a)\}}{h_{t*} + h_{sven}}$$

となるから内島 (1964) の(10)式の温室表面の純放射の代りに床面の純放射を用いた式で前と同様の関係にある。

(v) 杉、高倉 (1965) との関係

(1), (2), (3)式より $gl H_{con}$, $gl H_{ai}$ を消去し、(4), (6), (7)式の関係を用いると、

$$\theta_{in} = \frac{1}{h_{sven}} \{(h_{sven} + h_{ou}) \theta_{ou} - h_{ou} \theta_w + H_{net} - \beta(gl H_{so} + gl H_{ev})\} \quad (16)$$

となる。一方昼夜間の符号に注意しながら、杉、高倉 (1965) の(3-5)式 $q_{rgo} \cdot F_g = [q_{go} + q_{hgo}] \cdot F_g$ に(3-1)~(3-4)式を代入すると、(16)式に等しい式を得る。

(vi) WALKER (1965) との関係

WALKER (1965) の式をまとめると次式となる。

$$as A_{so} \tau I = U A_w (t_i - t_a) + \sigma A_{so} \tau_t [\epsilon_s T_s^4 - \epsilon_a T_a^4] + gl H_{so} + gl H_{ven} + gl H_{ev} \quad (17)$$

(17)式と(8)式を厳密に一致させることは困難であるが、放射に関する誤差を U に加味させることによりある程度可能となろう。

(vii) 北村 (1967) との関係

地表面対流伝熱係数 h_{so} 、地表温 θ_{so} がわかっていると、

$$gl H_{so} = h_{so} (\theta_{so} - \theta_{in}) \quad (18)$$

であるから

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{\beta \cdot h_{so} (h_{in} + h_{ou}) (\theta_{so} - \theta_{in})}{h_{sven} (h_{in} + h_{ou})}$$

$$\frac{+h_{in}(H_{net}-\beta_{gl}H_{net}-wH_{ev})}{+h_{in}h_{ou}} \quad (19)$$

したがって

$$\theta_{in}=\alpha\theta_{ou}+\eta\theta_{so}+\xi \quad (20)$$

という形になり、 ξ が α , η と同程度に一定と考えられると北村 (1967) の(2.7)式

$$x_2 = \frac{(S_1h_1 + C_aW_aV_n)x_1 + S_2h_2x_3}{(S_1h_1 + C_aW_aV_n)S_2h_2}$$

ここで x_1 , x_2 , x_3 : 外気温, ハウス内温, ハウス内地表温

と一致する。

(8)式, (16)式, 及び(20)式の原形である(21)式は温室の熱収支の特徴ある3式といえるであろう。

$$\theta_{in} = \frac{B\theta_{ou} + \beta h_{so}(h_{in} + h_{ou})\theta_{so}}{B + \beta h_{so}} + \frac{+h_{in}(H_{net} - \beta_{gl}H_{net} - wH_{ev})}{(h_{in} + h_{ou})} \quad (21)$$

ここで $B = h^{s_{ven}}(h_{in} + h_{ou}) + h_{in}h_{ou}$ である。

どれを用いるかはその場合に応じて考慮すべきであろう。

4. む す び

ここに述べたことはただ式の演算といえはそれまでのものであるが、既にある報告の理論的展開の結びつきを明らかにし、かつ多少の修正を加えたと考える。これらの式が意義あるものとなるためには実験的裏づけが第1であることはいうまでもないことである。

既にことわつたように、考えている熱フラックスはすべてその面での平均的量である。したがってこれらの量をいかにして求めるか、また代表値を求める場合、面のどの位置でそれを測定すればよいか、また現在では技術的に測定はかなり困難な量、例えば温室内部表面蒸発

量、壁面への凝結量、の解決、さらに植物がある場合など実験に待つところが多い。

以上の結果は著者らが杉研究室のゼミナールとして討論したものをもとめたものである。

参 考 文 献

- 1) BUSINGER, J.A. (1963) The glasshouse (greenhouse) climate, in Physics of Plant Environment (ed. by W.R. van Wijk), North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 277-318.
- 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**, 75-80.
- 3) 杉 二郎, 立花一雄, 太巻光彦, 高倉 直 (1965) 温室の空気調和, 空気調和と冷凍, **5**(11), 36-48.
- 4) 杉 二郎, 高倉 直 (1965) 温室による植物環境条件制御に関する基礎的問題について (1), 農業気象, **20**, 147-153.
- 5) 杉 二郎, 立花一雄, 卜藏建治, 高倉 直, 古在豊樹 (1968) タワー温室の環境条件について, 生物環境調節, **5**, 14-20.
- 6) TAKAKURA, T. (1967) Temperature gradients in the greenhouse, J. Appl. Meteor., **6**, 956-957.
- 7) 内島善兵衛 (1964) 温室の温度環境のコントロール, 農業技術, **19**, 390-395.
- 8) — (1965) Growth Chamber 内の微気候 (1) 農業気象, **21**, 105-112.
- 9) WALKER, J.N. (1965) Predicting temperatures in ventilated greenhouses, Trans. ASAE, **8**, 445-448.
- 10) 矢吹万寿, 今津 正 (1961) ガラス室の温度制御に関する研究 (第1報), 園芸学会雑誌, **30**, 171-177.
- 11) — (1967) 農業環境調節の現状と問題点, 農業気象, **23**, 39-46.

Summary

In the present paper, we discussed the heat balance of the glasshouse and the air temperature difference between the inside and the outside of the glasshouse which were developed from BUSINGER's (1963) equation. The temperature difference between the inside and the outside of the glasshouse ($\theta_{in} - \theta_{ou}$) is expressed by eq. (8), that is,

$$\theta_{in} - \theta_{ou} = \frac{h_{in}(H_{net} - wH_{ev}) + \beta \{h_{ou} \cdot glH_{net} - (h_{in} + h_{ou})(glH_{so} + glH_{ev})\}}{h^{s_{ven}}(h_{in} + h_{ou}) + h_{in}h_{ou}} \quad (8)$$

where h_{in} is the heat transfer coefficient of the inside wall surface, H_{net} is the net irradiation at the outside wall surface, wH_{ev} is the heat due to condensation at the inside wall surface, β is the ratio of the ground surface area to the wall surface area, h_{ou} is the heat transfer coefficient of the outside wall surface, glH_{net} is the net irradiation at the ground in the glasshouse, glH_{so} is the heat flux into the soil, glH_{ev} is the latent heat flux density at the ground, and $h^{s_{ven}}$ is an equivalent coefficient of the sensible heat exchange due to ventilation. A typical estimated example obtained from this equation is presented in Fig. 2.

Furthermore, the relations between our equations and those of YABUKI and IMAZU (1961), BUSINGER (1963), UCHIYAMA (1964, 1965), SUGI and TAKAKURA (1965), WALKER (1965), and KITAMURA (1967), are also demonstrated.