

# 閉鎖型傾斜ハウス内の温度および速度場のモデル化

関 平和\*・木村達郎\*・宮本暁人\*  
菅谷 博\*\*・佐々木華織\*\*・猪之奥康治\*\*

( \* 金沢大学工学部 )  
( \*\* 四国農業試験場 )

## Mathematical Modeling of Temperature and Velocity Fields in a Closed-Type Sloped Greenhouse

Hirakazu SEKI\*, Tatsuo KIMURA\*, Akihito MIYAMOTO\*, Hiroshi SUGAYA\*\*,  
Kaori SASAKI\*\* and Kohji INOOKU\*\*

( \* Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa, 920-8667 Japan )  
( \*\* Shikoku National Agricultural Experiment Station, Zentuji, 765-8508 Japan )

### Abstract

A mathematical model was developed for predicting air temperature, humidity and velocity fields in a closed-type sloped greenhouse. Calculated results of air temperature profile along the slope agreed well with the experimental results except in the daytime when the air temperature was high, and it seemed that the model would be useful for environment analysis in the sloped greenhouse. This model would be better if three-dimensional heat flow had been taken into account in the daytime. Both the calculated and experimental results showed that air temperature was higher in the upper part of the slope than that in the lower part for the greenhouse with a double-film-cover. For the greenhouse with a single-film-cover, however, air temperature in the upper part was not necessarily higher than that in the lower part especially in the nighttime. Provided that floor and cover temperatures were uniform, respectively, air temperature and velocity fields were simulated. The simulated results showed an appearance of air temperature difference between the upper and lower parts. Both the higher and lower temperature regions extend as inclined angle increases. However, this temperature difference between the upper and lower parts in the case of 10 degrees of inclined angle is not so different from that in the case of 30 degrees. In addition, an increase in the inclined angle makes air velocity larger, so that its increase over a certain critical value inhibits the development of air temperature difference between the upper and lower parts rather than promotes it.

**Key words:** Hilly and mountainous areas, Natural convection, Sloped greenhouse, Turbulent model.

キーワード: 傾斜ハウス, 自然対流, 中山間地, 乱流モデル

## 1. 緒 言

中山間傾斜地が7割を占める四国地方では傾斜地に存在する農地での耕作放棄問題が深刻である。これには、農業者の高齢化などの社会的要因や、農地区画が小さく機械化が困難であることなどの自然的・技術的要因が絡

んでいる(Nakagawa, 1997)。その解決に当たっては、1) 傾斜地農業のもつ、「地形的制約による耕地面積の不足」などのデメリットを、発想の転換により「複雑な地形と豊富な生物資源の活用による高付加価値農業生産が可能」というメリットに置き換える(Sugaya, 1998)という心構えと、2) 地球環境保持という観点にも配慮しつつ環境保全型傾斜地農業を目指して活性化するための具体的な対策、政策(Juo and Thurow, 1997)が必要と

考えられている。このような背景の下に四国農試では1997年から傾斜地における農業環境を定量的に解明するための研究を実施してきており (Tozawa, 1997; Sugaya *et al.*, 1997), 1998年から筆者の一人 (Seki, 1998) もこの研究に参画している。

床面が水平である平地ハウスでは、ハウス内気温は水平方向にほぼ均一であるが、傾斜地に設置されたハウス (以下「傾斜ハウス」と呼ぶ) では傾斜方向の上部の方が下部よりハウス内気温が高くなる傾向を示すことが経験的に知られている (Sugaya *et al.*, 1997; Harazono and Yabuki, 1986)。

これまでの温室環境解析モデルは主に平地ハウスを対象に、Takakura *et al.* (1971) のダイナミックモデルをはじめ数多くのモデル (たとえば, Okada, 1977; Takami and Uchijima, 1977) が提案されている。これらはいずれも、温・湿度がハウス内で均一であるものと仮定して得られた非定常モデルである。これに対し、傾斜ハウス内の環境に関する本格的な研究は筆者らの知る限り我が国では Harazono and Yabuki (1986) によるものしかない。彼らは、傾斜ブドウハウスを対象に、ハウス内の微気象環境の特徴を明らかにし、傾斜ハウスの環境調節方法における問題点やその対策を検討するとともに、ハウスが周辺環境に及ぼす影響を明らかにするために微気象観測実験を行った。

その結果、

- 1) 傾斜地の大規模な施設化は、斜面における冷気流を発達させ、麓部を低温化させる。
- 2) 日中の換気により排出される暖気は傾斜面に沿って上昇し、その付近の気温を上昇させるとともに、傾斜面上昇する暖気は傾斜上部のブドウの発芽を促進させる。
- 3) 日中における暖気排出によりハウス上方付近の外気温が上昇し、早朝における被覆面の放射冷却によりハウス下方の外気温が低下する。
- 4) 5月下旬から6月上旬にかけて被覆材が除去されると周辺環境への影響は認められなくなる。

などの結論を得ている。ただし、この研究は元々傾斜地における果樹生育の不均一性改善策と傾斜ハウスの存在が外部環境に及ぼす影響を考えるための指針提供を主目的としているため、開放系を前提とした定性的、技術的考察が中心で、傾斜ハウス内の環境成立とそれにかかわる影響因子との定量的関係が十分に明らかにされていない。

一方、傾斜地を地域資源と考えるなら、傾斜地における特異な微気象をむしろ農業生産に積極的に利用することが大前提となるため (Tozawa, 1997), 傾斜ハウス内

の特異な環境成立機構を定量的に把握する必要がある。しかしこれまで、こうした観点からの環境工学的研究はほとんどなく、新たな実施計画立案時のハウス内環境予測が可能となる段階にはほど遠いのが現状である。

そこで本研究では、傾斜地農業の環境工学的研究の第一段階として、閉鎖型の傾斜ハウスを対象に、その中でどのような温度、速度場が形成されるか、傾斜方向の上下部でどの程度の温度差が生ずるかを事前に予測するためのモデル作りを目的とした。

## 2. 理 論

傾斜ハウス内には外気とは異なった温・湿度場が形成される。そして、この温・湿度場の中で生ずる浮力と粘性力 (レイノルズ応力も含む) とが釣り合うように空気の流動が起こり速度場が形成される。このようなハウス内環境はハウスの規模、傾斜角などの幾何学的因子と、外気温、日射量などの気象条件 (外部条件) によって異なるものと考えられる。このような特徴をもつ傾斜ハウス内の熱・物質移動解析は、ハウス内で生ずる移動現象の基礎式と、境界条件としての被覆面における熱、物質収支式、ハウス床面における熱、物質収支式を連立して解くことによってなされる。ただ、気体である空気は密度、熱容量、粘性率がともに水などの液体に比べて極めて小さく流動しやすいので、ハウスのような比較的広い閉鎖空間内においても境界条件 (被覆面、床面における熱、物質収支式) にほとんど瞬間的に隷属する形の準定常的な温度、湿度、速度場が形成されるものと予想される。もしそうなら、実際の計算にあたっては、予め境界面 (被覆面、床面) における温・湿度の値の経時的変化を求め (第1段階)、瞬時におけるそれらの値をもとに、ハウス内温度、湿度、速度場を計算する (第2段階) という2段階分割計算が可能となり、この方法は計算時間節約の面からも効果的である。

第1段階 (被覆面、床面温度の算出) は Takakura *et al.* (1971) のダイナミックモデルなどを適用できるが、本報では第2段階 (ハウス内部の環境解析) を目的としていることから、ハウス内の地温 (床面下3 cmの位置の値) の実測値と外気の温・湿度の測定結果に基づいて瞬時の被覆面、床面の温・湿度を見積もり、その条件に即座に追従するハウス内部の温・湿度、速度場をシミュレートするための数学的モデルを検討した。

なお、本報の使用記号は Table 1 に列挙した。

### 2.1 解析モデル

Fig. 1のように、水平面に対して角度 $\theta$ だけ傾いたハウスを想定し、座標を図のようにとる。ただし、厳密にはハウス間口方向の温・湿度、風速の変化も考慮した

Table 1 Symbols used in this paper.

---

$C_p$	: specific heat of air ( $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$D$	: diffusion coefficient of water vapor in air ( $\text{m}^2\text{h}^{-1}$ )
$d$	: depth of soil temperature measurement point from the soil surface (m)
$E$	: dispersion coefficient of water vapor in a greenhouse ( $\text{m}^2\text{h}^{-1}$ )
$E_m$	: dispersion coefficient of vorticity ( $\text{m}^2\text{h}^{-1}$ )
$E_T$	: diffusion coefficient of temperature ( $\text{m}^2\text{h}^{-1}$ )
$g$	: gravitational acceleration ( $\text{m h}^{-2}$ )
$H_a$	: humidity of outdoor air ( $\text{kg-H}_2\text{O kg-DA}^{-1}$ )
$H_c$	: humidity in greenhouse ( $\text{kg-H}_2\text{O kg-DA}^{-1}$ )
$H_w$	: humidity at the inside of the film ( $\text{kg-H}_2\text{O kg-DA}^{-1}$ )
$H_{wo}$	: humidity at the outside of the film ( $\text{kg-H}_2\text{O kg-DA}^{-1}$ )
$h_{ri}$	: radiation heat transfer coefficient at the inside of the film ( $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$h_{ro}$	: radiation heat transfer coefficient at the outside of the film ( $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$h_{rs}$	: radiation heat transfer at the soil surface ( $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$h_{si}$	: heat transfer coefficient at the inside of the film ( $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$h_{ss}$	: heat transfer coefficient at the soil surface ( $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$K$	: effective thermal conductivity of soil ( $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$k_H$	: mass transfer coefficient of water vapor at the soil surface ( $\text{m h}^{-1}$ )
$k_{ws}$	: mass transfer coefficient of water vapor at the soil surface ( $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )
$k_{Ww}$	: mass transfer coefficient of water vapor at the inside of the film ( $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )
$L$	: latent heat of water ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
$l$	: representative length of greenhouse (m)
$l_x$	: length of greenhouse toward $x$ -direction (m)
$l_y$	: length of greenhouse toward $y$ -direction (m)
$p$	: pressure of air ( $\text{kg m}^{-1}\text{h}^{-2}$ )
$R$	: total shortwave radiation outside the greenhouse ( $\text{W m}^{-2}$ )
$T$	: temperature in greenhouse (K)
$T_a$	: temperature of outdoor air (K)
$T_m$	: temperature measured at a certain depth from the soil surface (K)
$T_s$	: temperature at the soil surface (K)
$T_w$	: temperature of film (K)
$u$	: $x$ -component of air velocity ( $\text{m h}^{-1}$ )
$U_a$	: overall heat transfer coefficient ( $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$v$	: $y$ -component of air velocity ( $\text{m h}^{-1}$ )
$w_H$	: concentration of water vapor ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$x$	: distance toward $x$ -direction (m)
$y$	: distance toward $y$ -direction (m)
$\Delta t$	: increment of time (h)
$\Delta x$	: increment of distance toward $x$ -direction (m)
$\Delta y$	: increment of distance toward $y$ -direction (m)
$\alpha_s$	: solar radiation absorptivity at the soil surface (-)
$\alpha_w$	: solar radiation absorptivity of film (-)
$\beta_T$	: volumetric expansion coefficient due to temperature difference ( $\text{K}^{-1}$ )
$\beta_w$	: volumetric expansion coefficient due to water vapor concentration difference ( $\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ )
$\eta_1$	: constant ( $=1.51 \times 10^{-7}\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ )
$\eta_2$	: constant ( $=1.32 \times 10^{-7}\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ )
$\lambda$	: thermal conductivity of air ( $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$\mu$	: viscosity of air ( $\text{kg m}^{-1}\text{h}^{-1}$ )
$\nu$	: kinematic viscosity of air ( $\text{m}^2\text{h}^{-1}$ )
$\rho$	: density of air ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$\omega$	: vorticity ( $\text{h}^{-1}$ )
$\Psi$	: stream function ( $\text{m}^2\text{h}^{-1}$ )

---

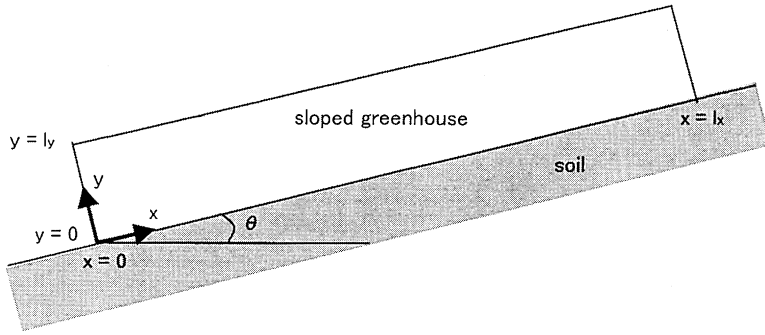


Fig. 1. Schematic representation of a sloped greenhouse.

3次元の取り扱いが必要だが、モデルが極めて複雑になることが予想されることから、ここでは間口方向には速度、温・湿度の分布が大きく発生しないものと仮定し、 $x, y$  方向の2次元問題とみなすこととした。

浮力と粘性力の比を表す無次元数(グラスホフ数) $Gr$ :

$$Gr = \frac{l^3 \beta_T (\Delta T) g}{\nu^2} \quad (1)$$

は実験温室(後述の Fig. 4)の代表径  $l$  を  $10 \text{ m}$  ( $= \sqrt{l_x l_y}$ ) とし、温度差  $\Delta T$  の代表値が  $1 \text{ K}$  と小さい値を仮定した場合においても  $10^{10}$  のオーダーで、層流から乱流への臨界値 ( $10^6$  のオーダー) (JSME, 1986) に比して極めて大きく傾斜ハウス内の空気の流れは明らかに乱流と考えられる。この場合、 $x, y$  方向の時間的に平滑化された速度を  $\bar{u}, \bar{v}$ 、温度を  $\bar{T}$ 、水蒸気濃度を  $\bar{w}_H$ 、圧力を  $\bar{p}$  とし、乱流による速度変動を  $u', v'$ 、温度、水蒸気濃度の変動を  $T', w_H'$  とすれば、時間的に平滑化された連続式、運動方程式、エネルギー方程式、水蒸気収支式は次のように表される (Bird et al., 1960)。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{u}v')}{\partial y} \right) \\ & - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{u}'v')}{\partial y} \right) \\ & + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) - \rho g \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \rho \left( \frac{\partial (\bar{u}v')}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} \right) \\ & - \rho \left( \frac{\partial (\bar{u}'v')}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'^2}{\partial y} \right) \\ & + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) - \rho g \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = & -C_p \rho \left( \frac{\partial (\bar{u}T')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}T')}{\partial y} \right) \\ & - \frac{\partial (C_p \rho \bar{u}'T')}{\partial x} \\ & - \frac{\partial (C_p \rho \bar{v}'T')}{\partial y} + \lambda \left( \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial t} = & -\left( \frac{\partial (\bar{u}w_H')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}w_H')}{\partial y} \right) - \frac{\partial (\bar{u}'w_H')}{\partial x} \\ & - \frac{\partial (\bar{v}'w_H')}{\partial y} + D \left( \frac{\partial^2 \bar{w}_H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}_H}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

数値解析を容易にするために、上式(3)~(6)中の乱流による変動に関する項が平滑化された速度、温度、濃度の勾配に比例するものと仮定し (Bird et al., 1960)、渦度  $\bar{\omega}$  ( $= \partial \bar{u} / \partial y - \partial \bar{v} / \partial x$ ) と流れ関数  $\bar{\Psi}$  を導入して式(3)~(6)を整理すると、式(7)~(9)が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} & = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{my} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{my} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} \right) \\ & + g \left[ \beta_T \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \sin \theta - \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \cos \theta \right) \right. \\ & \left. + \beta_w \left( \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial y} \sin \theta - \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial x} \cos \theta \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} & = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{Tx} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{Ty} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial y} & = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial x} + E_y \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $\bar{\omega}$  は式(10)のように定義され、 $\bar{\Psi}$  と  $\bar{u}, \bar{v}$  の間には式(11)の関係がある。

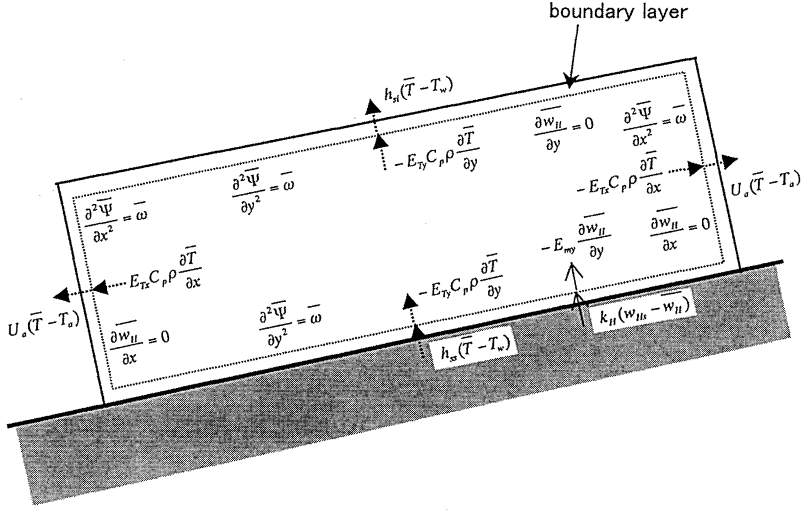


Fig. 2. Momentum, heat and moisture balances at the boundaries of the greenhouse.

$$\bar{\omega} = \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial y^2} \quad (10)$$

$$\bar{u} = \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial y}, \quad \bar{v} = -\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial x} \quad (11)$$

ハウス床面、被覆材表面での運動量、熱、水分収支はFig. 2のように表される。したがって床面での境界条件は

$$y=0; \quad \bar{\omega} = \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial y^2},$$

$$-E_{Ty} C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = h_{ss}(T_s - \bar{T}), \quad (12)$$

$$-E_{my} \frac{\partial w_H}{\partial y} = k_H(w_H - \bar{w}_H)$$

被覆材表面での境界条件は

$$y=l_y; \quad \bar{\omega} = \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial y^2}, \quad (13)$$

$$E_{Ty} C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = h_{si}(T_w - \bar{T}), \quad \frac{\partial w_H}{\partial y} = 0$$

被覆材側面での境界条件は

$$x=0; \quad \bar{\omega} = \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial x^2},$$

$$E_{Tx} C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = U_a(\bar{T} - T_a), \quad \frac{\partial w_H}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

$$x=l_x; \quad \bar{\omega} = \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial x^2},$$

$$-E_{Tx} C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = U_a(\bar{T} - T_a), \quad \frac{\partial w_H}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

Table 2 Simultaneous equations for estimating the cover and floor temperatures of a closed-type sloped greenhouse. The symbols with prime in Eqs. (18), (19), and (20) correspond to the outer film or space between the two films.  $\alpha_s$  includes an effect of the film transmissivity of shortwave radiation.

1. in the case of single-film-cover greenhouse

a) heat balance equation for the cover

$$\alpha_w R - (\eta_1 T_a^3 T_w - \eta_2 T_a^4) - h_{so}(T_w - T_a) + h_{ri}(T_s - T_w) + h_{si}(T_c - T_a) + k_{ww} L (H_c - H_{wi}) + k_{ww} L (H_a - H_{wo}) = 0 \quad (16)$$

b) heat balance equation at the soil surface

$$\alpha_s R = h_{rs}(T_s - T_w) + h_{ss}(T_s - T_c) + k_{ws} L (H_s - H_c) - K(T_m - T_s)/d \quad (17)$$

2. in the case of double-film-cover greenhouse

a) heat balance equation at the outer film of the double-film-cover

$$\alpha_w' R - (\eta_1 T_a^3 T_w' - \eta_2 T_a^4) - h_{so}'(T_w' - T_a) + h_{ri}'(T_w - T_w') + h_{si}'(T_c' - T_w') + k_{ww} L (H_a - H_{wi}) = 0 \quad (18)$$

b) heat balance equation at the inner-film of the double-film-cover

$$\alpha_w R - h_{ro}(T_w - T_w') - h_{so}(T_w - T_c') + h_{ri}(T_s - T_w) + h_{si}(T_c - T_w) + k_{ww} L (H_c - H_{wi}) = 0 \quad (19)$$

c) sensible heat balance equation for the space between the two films

$$-A_w h_{si}'(T_c' - T_w') + A_w h_{so}(T_w - T_c') = 0 \quad (20)$$

d) heat balance equation at the soil surface

$$\alpha_s R = h_{rs}(T_s - T_w) + h_{ss}(T_s - T_c) + k_{ws} L (H_s - H_c) - K(T_m - H_s)/d \quad (21)$$

ただし、境界条件中に現れる  $T_s$ ,  $T_w$  は Table 2 に示すように、1重被覆の場合には被覆面とハウス床面における熱収支式 (16), (17) を連立して解くことにより予め求められる。2重被覆の場合には、外張り被覆面、内張り被覆面、被覆材間の隙間部分、ハウス床面における熱収支式 (18)~(21) を連立して解くことにより、 $T_s$ ,  $T_w$  が  $T_w'$  (外張り被覆材温度),  $T_c'$  (被覆材間の隙間部分の温度) とともに求められる。この場合、 $T_w$  は内張り被覆面の温度を表す。

2.2 シミュレーションの手順

式 (7) ~ (10) を距離と時間について差分化し、適当な初期条件のもとで、微小時間刻み  $\Delta t$  ごとに逐次計算を行うとハウス内速度、温・湿度分布の経時的変化を求めることができる。この非定常計算は  $t=0.2\text{h}$  すなわち約 12 分間の反復計算で定常解に収束する (時刻  $t$  と  $t + \Delta t$  における計算結果の相対誤差が 0.05% 以下であることを定常解への収束条件とした)。12 分という時間間隔は 1 日というタイムスケールからみると極めて短く、その間に外部の気象条件が大きく変わらないものと仮定すれば、この非定常計算が定常解に収束したときをもって任意時刻 (厳密には 12 分間隔程度の時間間隔をもつ) における速度、温・湿度分布が得られたものとみなせる。したがってここでは、本章冒頭で指摘した 2 段階分割計算が可能と判断し、この非定常計算を 1 日の任意時刻における分布の瞬間値を求めるのに用いることとした。

計算手順は Fig. 3 に示す通りである。なお、渦動粘性係数  $E_m$ , 分散係数  $E$ ,  $E_T$  の算定には Katsuta (1978) による勾配拡散モデルを用いた。実際の計算に当たっては  $x$  方向を 150 分割,  $y$  方向を 33 (1重被覆の場合), 30 (2重被覆の場合) 分割し ( $\Delta x = 0.2\text{ m}$ ,  $\Delta y = 0.1\text{ m}$ ), 時間刻み  $\Delta t$  は  $5.0 \times 10^{-5}\text{ h}$  とした。

なお、数値解の安定性は、得られた結果が  $\Delta t$  を半分にして行った計算結果と相対誤差  $\pm 0.1\%$  の範囲内で一

致したことをもって確認された。

3. 実 験

Fig. 4 に、実験に使用した傾斜角 10 度の無植栽ハウス (四国農業試験場大麻圃場) を示す。なお、このハウスは北向き斜面に設置され、傾斜方向長さ 30 m, 棟高 3.3 m, 間口 6 m で、被覆材として厚さ 0.1 mm の農業用塩化ビニルを用い、1997 年 11 月 4 日から 12 月 18 日までは被覆を 1 重、12 月 19 日から 1998 年 1 月 19 日までは 2 重にした。ただし 2 枚の被覆材の間隔は約 0.3 m とした。ハウス内温・湿度、床面下 0.03 m の位置の土壌温度、外気の温・湿度、全天日射量を経時的に測定・記録した。ただし、空気温・湿度は Cu-Co 熱電

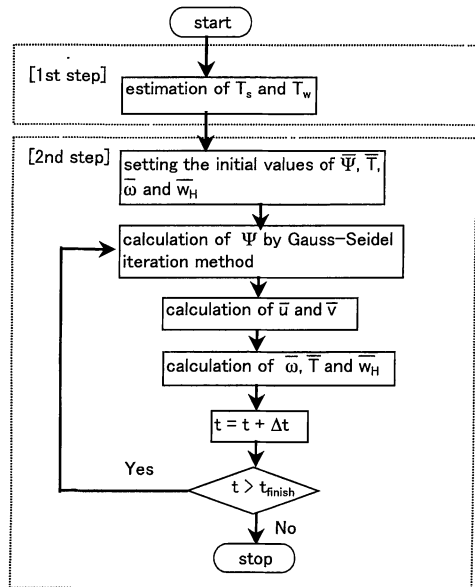


Fig. 3. Procedure of model simulation.

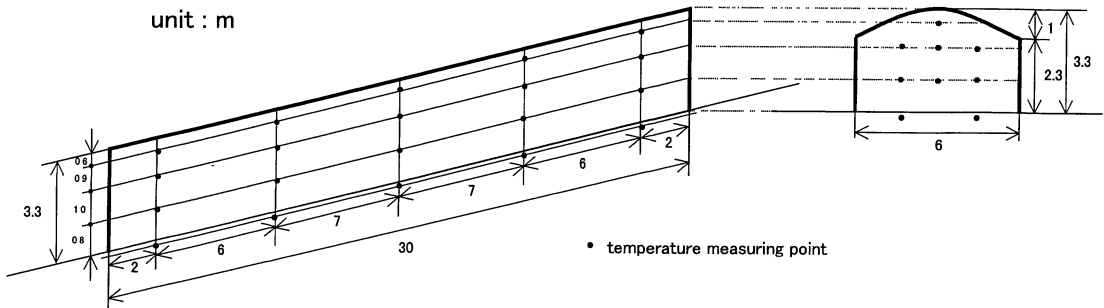


Fig. 4. Sloped greenhouse used for the experiment.

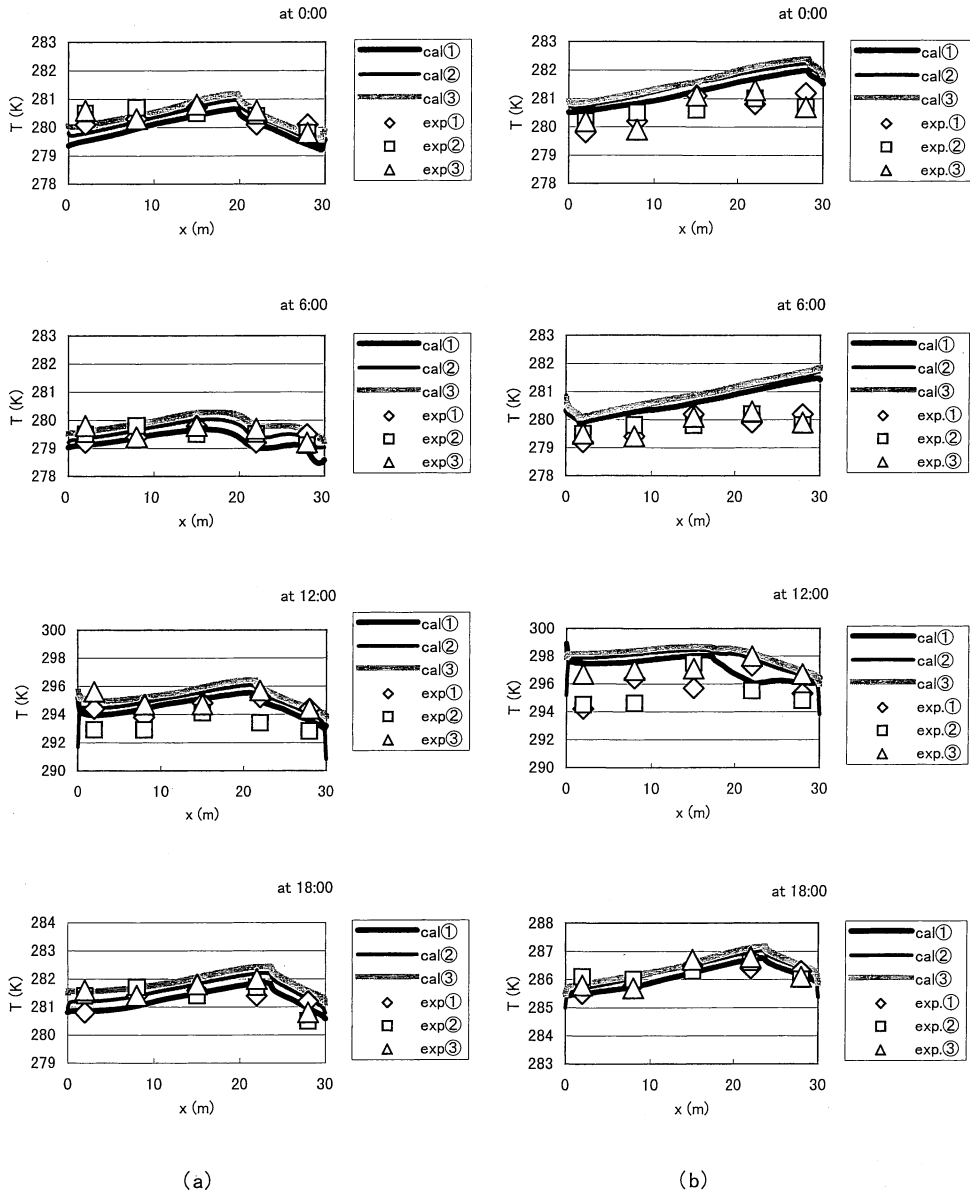


Fig. 5. Comparison of the calculated results of temperature distribution with the experimental results where ① corresponds to  $y=2.7$  m, ②  $y=1.8$  m, and ③  $y=0.8$  m [(a) on Dec. 13 (single-film-cover), (b) on Dec. 28 (double-film-cover)].

対を用いた手製の通風乾湿計，土壤温度は Cu-Co 熱電対，全日射量は精密全日射計（英弘精機製 MS-801）を用いた。ハウス内部と土壤の温度測定位置は Fig. 4 に示す通りである。

風速測定は，上記の温・湿度測定と同時にではないが，後に温・湿度測定時と同一の閉鎖環境下で同一ハウス内で超音波風速計（海上電機製 DAT-100，測定精度土

$0.005 \text{ ms}^{-1}$ ）により床面から 0.3 m と 2 m の高さの位置で測定した（Sasaki and Sugaya, 1999）。

なお，本実験ではハウス床面と被覆面の温度の直接測定は行わなかったが，2章で述べた解析モデルのシミュレーションに必要なのでここでは次のようにして土壤温度測定値から間接的に見積もった。まず，ハウス内と土壤温度の測定位置を基準に傾斜方向に分けた 5 つのセク

Table 3 Values of parameters used for calculation.

$C_p$		$1.0 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$E_x, E_{mx}, E_{Tx}$		$4.0 \times \sqrt{ u } \text{ m h}^{-1}$
$E_y, E_{my}, E_{Ty}$		$4.0 \times \sqrt{ v } \text{ m h}^{-1}$
$g$		$1.27 \times 10^8 \text{ m h}^{-2}$
$h_r$		$4.64 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_{ro}$		$4.64 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_{rs}$		$5.10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_{si}$		$23.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_{so}$		$6.96 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_{ss}$		$23.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_r'$		$4.64 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_{si}'$		$4.64 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$h_{so}'$		$6.96 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$K$		$1.19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$k_H$		$38.5 \text{ m h}^{-1}$
$k_{ws}$		$9.25 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
$k_{ww}$		$9.25 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
$L$		$2460 \text{ kJ kg}^{-1}$
$l_x$		$30 \text{ m}$
$l_y$		$3.3 \text{ m}$
$U_a$		$83.7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$\alpha_s$	0.6 (single-film-cover), 0.45 (double-film-cover)	[—]
$\alpha_w$	0.15 (single-film cover), 0.07 (double-film-cover)	[—]
$\alpha_w'$		0.15 [—]
$\beta_T$		$0.00342 \text{ K}^{-1}$
$\beta_w$		$0.509 \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1}$
$\rho$		$1.2 \text{ kg m}^{-3}$
$\theta$		$0.175 \text{ rad}$

ション ( $x=0\sim 5 \text{ m}$ ,  $5\sim 11.5 \text{ m}$ ,  $11.5\sim 18.5 \text{ m}$ ,  $18.5\sim 25 \text{ m}$ ,  $25\sim 30 \text{ m}$ ) ごとに式 (16)~(17) (1重被覆の場合), あるいは式 (18)~(21) (2重被覆の場合) を連立して被覆面とハウス床面温度を求めた。このようにして求められたこれらの値をそれぞれ傾斜方向距離  $x$  の5次式で最小2乗近似し, それらを第2段階 (ハウス内環境解析) の入力条件とした。

#### 4. 結果と考察

Fig. 5 に一例として 1997 年 12 月 13 日 (1重被覆の場合), 12 月 28 日 (2重被覆の場合) におけるハウス内傾斜方向温度分布の実測および計算結果を 0 時から 6 時間ごとにプロットした。なお, 計算に使用した諸係数, パラメータの値は Table 3 に示す通りである。ただし, 両日とも 1 日間を通じて日射条件が安定している晴天日である。1重被覆の場合, 12 時において計算値は実測値よりも全体的に  $1\sim 2 \text{ K}$  高い値を示すが, それ以外の時刻では両者は比較的一致している。2重被覆については 0 時, 6 時については計算値が実測値よりも約  $1 \text{ K}$ , 12 時においては  $2\sim 3 \text{ K}$  高い値を示すが, 全体的に計算

値と実測値の分布の傾向は類似しており,  $x=0\sim 20 \text{ m}$  においては両者とも傾斜上部に向かって温度が高くなっている。1重, 2重いずれの場合も 12 時において計算値と実測値の差が大きくなったのは, 日射の影響で高温状態にある日中においては理論では考慮しなかったハウス側面方向への熱損失を無視できなかつたためと考えられる。

一方, 実測結果から, 湿度については夜間において湿球温度は乾球温度にほぼ一致し飽和状態にあるものと考えられ, 日中は相対湿度が温室内でほぼ均一だったので湿度分布は温度分布とほぼ同様の分布形状を示すものと予想された。紙幅の都合上記述を割愛したが, 計算結果はほぼこの予想を裏付けることを確認した。

Fig. 6 にハウス内風速分布の計算値を, Fig. 5 と同様 6 時間ごとに示した。1重被覆では傾斜方向で最高温度を示す位置を境に渦が 2 つできており, 傾斜下方の渦は反時計回りで速度が大きく, 傾斜上方の渦は 6 時のとき反時計回り, それ以外の時刻では時計回りで低速である。6 時のときにのみ反時計回りとなるのは, 床面温度が傾斜方向の任意位置でピーク値をもたなかつたため局



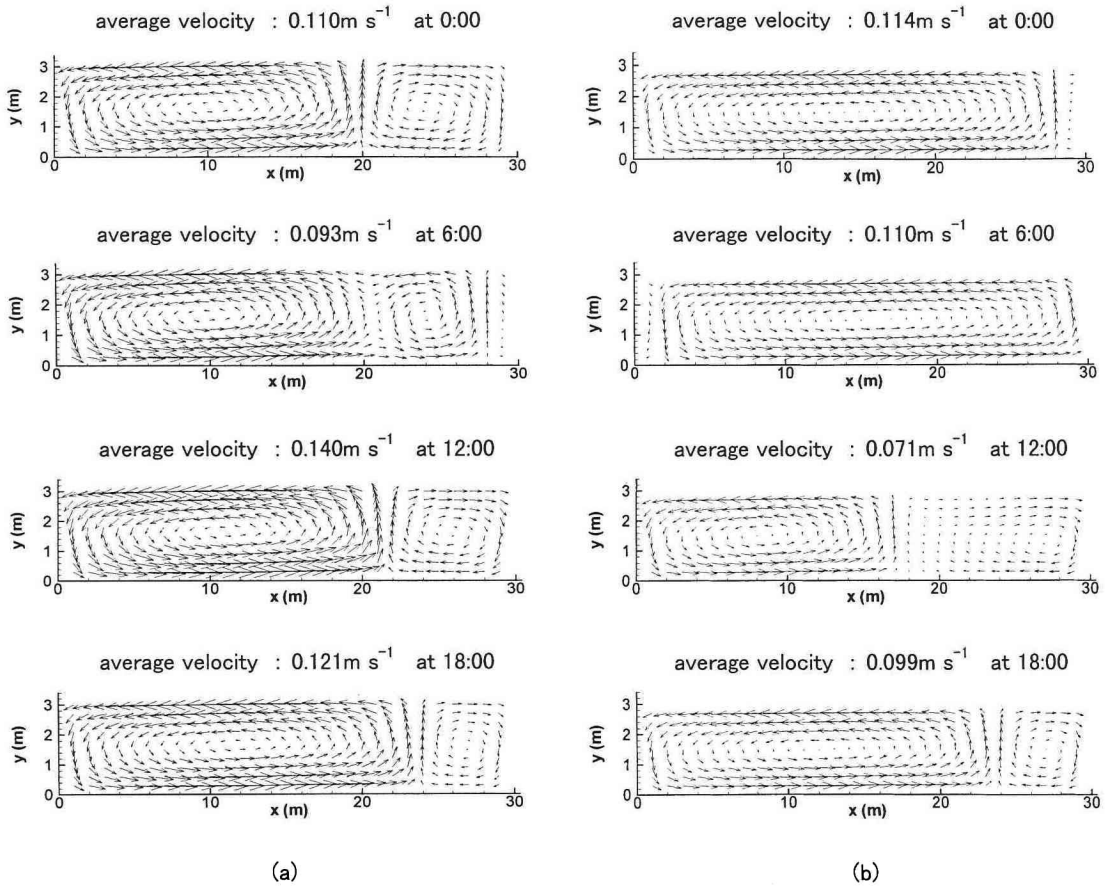


Fig. 6. Calculated results of velocity distribution in the sloped greenhouse [(a) on Dec. 13 (single-film-cover), (b) on Dec. 28 (double-film-cover)].

部分的に強い上昇気流が形成されなかったためと思われる。2重被覆では0時、6時において傾斜上端付近の温度低下が顕著でないため反時計回りの渦が1つであるが、12時、18時には最高温度を示す位置を境にして渦が2つ（傾斜下方で反時計まわり、傾斜上方で時計まわり）できている。平均風速は1重被覆の場合に  $0.116 \text{ ms}^{-1}$ 、2重被覆の場合  $0.099 \text{ ms}^{-1}$  で、2重の方が1重の場合よりも約  $0.017 \text{ ms}^{-1}$  小さい。これは、2重被覆の方が1重被覆に比べて保温効果が大きいため床面と被覆材の温度差が  $3.6 \text{ K}$  小さく、自然対流の推進力が小さかったためと考えられる。 $x = 15 \text{ m}$  の地点で、 $y = 0.3 \text{ m}$ 、 $2.0 \text{ m}$  の位置における測定結果はそれぞれ  $0.10 \sim 0.25 \text{ ms}^{-1}$ 、 $0 \sim 0.05 \text{ ms}^{-1}$  の範囲で時間変動した (Sasaki and Sugaya, 1999)。1重被覆 (12月13日) を対象とした同一位置での  $x$  方向日平均風速の計算結果はそれぞれ  $0.197 \text{ ms}^{-1}$ 、 $0.052 \text{ ms}^{-1}$  であった。計算値

は実測値とほぼ一致している。

以上より、全体的にハウス内温度分布、風速分布の計算結果は実測結果をほぼ再現しているものと考えられる。しかし、特に1重被覆の場合、実測結果では必ずしも傾斜上部が下部よりも高温にならなかった。これは、式 (16)、(17) を連立して求めた床面温度  $T_s$  の値が傾斜上部においての方が傾斜下部においてよりも常に  $2 \sim 3 \text{ K}$  低かったためと考えられるが、床面温度がこのような傾向を示した理由についてはここでは明らかにできなかった。

そこで、傾斜による温度差出現効果を確認するために、理想的な状態、すなわち、ハウス床面、被覆面温度がそれぞれ傾斜方向に均一とみなせる場合を想定し、傾斜角を  $0$ 、 $10$ 、 $30$  度と仮定したときのハウス内温・湿度、速度分布のシミュレーションを行った。ただし、 $T_s$ 、 $T_w$  の値はそれぞれ  $283 \text{ K}$ 、 $277 \text{ K}$  とし、 $T_a$  は  $280 \text{ K}$  と

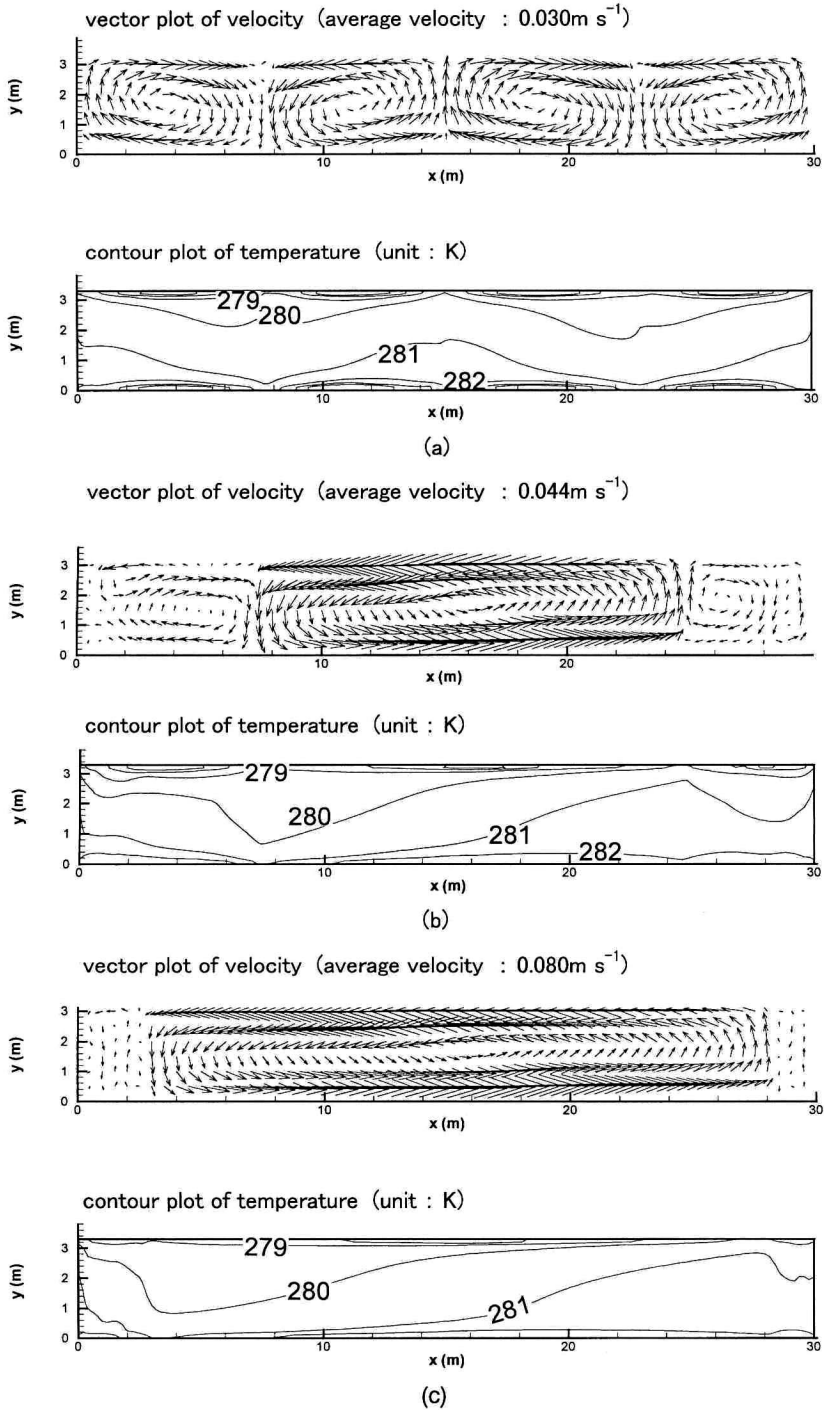


Fig. 7. Calculated results of velocity and temperature distributions when  $T_s=283$  K,  $T_w=277$  K, and  $T_a=280$  K for three cases of inclined angle [(a)  $\theta=0$  rad (0 deg), (b)  $\theta=0.175$  rad (10 deg), (c)  $\theta=0.524$  rad (30 deg)].

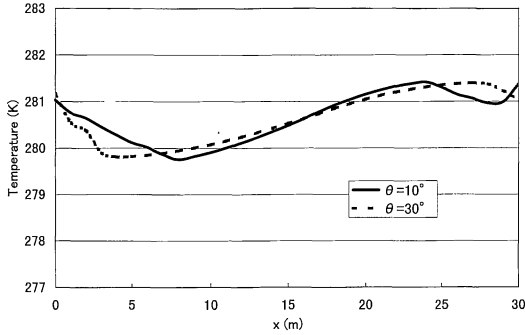


Fig. 8. Calculated results of air temperature profile in the sloped greenhouse averaged over  $y=0-l$ , along the slope of the greenhouse.

した。速度、温度分布の計算結果を Fig. 7 に、高さ方向平均温度の傾斜方向分布を Fig. 8 に示す。

Fig. 7 によれば、傾斜角 0 度のとき、左右 2 つずつの渦が対称形をなして形成されている。温度分布は中央部を境にして左右対称形になっている。傾斜角 10 度では、 $x=7\sim 25$  m の領域に反時計回りの渦が発生し、その渦の左右は低流速の淀んだ区域となっている。なお、平均風速は  $0.044 \text{ ms}^{-1}$  である。Fig. 8 によれば、温度は右側すなわち傾斜上部の方が下部に比べて相対的に高く、その最大温度差は 1.8 K である。傾斜角 30 度の場合、傾斜方向のほぼ全領域、すなわち、 $x=3\sim 28$  m において反時計回りの渦が生じ、左右の空氣の淀み領域が狭くなっている。平均風速は  $0.080 \text{ ms}^{-1}$  である。傾斜方向の最大温度差は 1.7 K で、傾斜角 10 度の場合とほとんど変わらない。ただし、渦の形成位置からも示唆されるように最高および最低温度出現位置の間の距離は 10 度の場合 16 m、30 度の場合 24 m で、30 度の場合の方が長く、傾斜上部の高温領域、底部の低温領域がともに広がっていることが分かる。また、傾斜角が大きくなっても傾斜上下部の温度差が必ずしも大きくならないのは Fig. 9 に示すように風速が傾斜角にほぼ比例して増加するため、傾斜角が増すと浮力効果が増し、対流混合により温度差が緩和されるためと考えられる。

## 5. 結 言

閉鎖型傾斜ハウスの温・湿度、風速を予測する数学的モデルを作成し、モデルによる計算値を実測値と比較・考察し、以下の結論を得た。

1) 本モデルは、ハウス内温・湿度、風速場が各時刻について予め求められた境界面（被覆面、床面）の温・湿度の値に瞬間的に追従するものと仮定して得られたものである。その仮定の妥当性は任意初期条件下でなされ

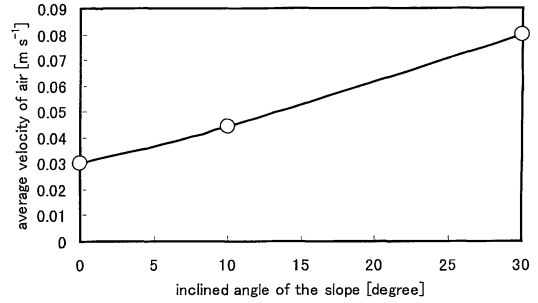


Fig. 9. Relation between the average velocity of air in greenhouse and inclined angle of the slope.

たシミュレーション結果より、温・湿度、風速場が定常解に収束するまでの所要時間が約 12 分と短かったことから確認された。

2) 傾斜方向温度分布の計算結果は 1 日間においてハウス内気温が高くなる日中（12 時頃）を除いて実測値と比較的によく一致し、本モデルはハウス内環境解析のモデルとしてほぼ妥当と思われた。ただし、日中の高温時には 3 次元的熱流の影響を考慮した補正が必要と考えられる。

3) 2 重被覆の場合、傾斜上部が相対的に高温になる傾向が実測、計算の両方の結果においてみられたが、1 重被覆の場合にはとくに夜間においてその傾向を確認できなかった。ただし、ハウス床面、被覆材温度をそれぞれ均一と仮定してシミュレートしたところ、傾斜上下部の温度差出現が予測できた。

4) 床面、被覆面温度を均一と仮定したシミュレーション結果によれば、傾斜上下部の温度差は傾斜角が 10 度の場合と 30 度の場合でほとんど変わらなかったが、傾斜上部の高温領域、下部の低温領域が広がることが予想された。傾斜角の増大は風速を高めるが、それにより温度差が緩和されるため、傾斜角の増大が必ずしも温度差増大につながらないことが示唆された。

## References

- Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., 1960: *Transport phenomena*. John Wiley & Sons, New York, pp. 153-179, 375-388, 626-635.
- Harazono, Y. and Yabuki, K., 1986: Study of micro-meteorology in sloping grape-house and its influence on environment. *Report of Study Program of Nippon Life Insurance Foundation*, Sakai, 162 pp. (原園芳信・矢吹万寿, 1986: 傾斜地におけるブドウの大規模施設の内部微気象環境と施設が周辺環境に及ぼす影響に関する研究. 日本生命財団助成研究報告論文, 堺, 162 pp.).
- JSME, 1986: Convective heat transfer. In *JSME*

- data book, Heat transfer*. 4th edition. JSME, Tokyo, pp. 42-113 (日本機械学会, 1986: 対流熱伝達. 伝熱工学資料一改訂第4版. 日本機械学会, 東京, pp. 42-113).
- Juo, A. S. R. and Thurow, T. L., 1997: Sustainable technologies for use and conservation of steepplands. *Proceedings of International Symposium on Sustainable Farming System of Upland Areas* (ed. by Shikoku National Agricultural Experiment Station). Shikoku National Agricultural Experiment Station, Zentsuji, pp. 1-17 (Juo, A. S. R. and Thurow, T. L., 1997: 急傾斜地における持続的農業のための利用・保全技術. 傾斜地農業の維持・発展のための国際研究会講演集. 四国農業試験場発行, 普通寺, pp. 18-40).
- Katsuta, T., 1978: *Studies on environment control technology for architecture*. Kajima Shuppankai, Tokyo, pp. 1-7 (勝田高司先生退官記念会, 1978: 建築における環境調整技術の研究. 鹿島出版会, 東京, pp. 1-7).
- Nakagawa, S., 1997: The current situation and future tasks in slopland agriculture in Japan and Asia. *Proceedings of International Symposium on Sustainable Farming System of Upland Areas* (ed. by Shikoku National Agricultural Experiment Station). Shikoku National Agricultural Experiment Station, Zentsuji, pp. 1-17 (中川昭一郎, 1997: 日本とアジアにおける傾斜地農業の現状と課題. 傾斜地農業の維持・発展のための国際研究会講演集, 四国農業試験場発行, 普通寺, pp. 1-17).
- Okada, M., 1977: The heating load of a greenhouse. PhD. Thesis presented to the University of Tokyo, 247 pp. (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, 247 pp.).
- Sasaki, K. and Sugaya, H., 1999: CO<sub>2</sub> environment in a sloped greenhouse. *Proceedings of Annual Meeting of the Society of Agricultural Meteorology of Japan*, pp. 500-501 (佐々木華織・菅谷 博, 1999: 傾斜ハウス内における CO<sub>2</sub> 環境. 日本農業気象学会全国大会講演要旨, pp. 500-501).
- Seki, H., 1998: Mathematical modeling of temperature and humidity in a sloping greenhouse. *Agric. Meteorol. Chugoku Shikoku*, **11**, 112-117 (関 平和, 1998: 傾斜ハウス内温湿度環境のモデル化. 中国・四国の農業気象, **11**, 112-117).
- Sugaya, H., Sasaki, K., Inooku, K., Takesaki, A. and Kawashima, H., 1997: Environment in a sloping greenhouse (I). *Proceedings of Annual Meeting of the Society of Agricultural Meteorology of Japan*, pp. 332-333 (菅谷 博・佐々木華織・猪之奥康治・竹崎あかね・川嶋浩樹, 1997: 傾斜ハウス内の環境について (I). 日本農業気象学会全国大会講演要旨, pp. 332-333).
- Sugaya, H., 1998: A study on greenhouses in a sloping ground. *Agric. Meteorol. Chugoku Shikoku*, **11**, 108-111 (菅谷 博, 1998: 傾斜地におけるハウス研究. 中国・四国の農業気象, **11**, 108-111).
- Takakura, T., Jordan, K. A. and Boyd, L. L., 1971: Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Trans. ASAE*, **15**, 964-971.
- Takami, S. and Uchijima, Z., 1977: A model for the greenhouse environment as affected by the mass and energy exchange of a crop. *J. Agric. Meteorol.*, **33**, 117-127.
- Tozawa, H., 1997: Direction of development of agricultural production in sloping land. *Report of the Shikoku Branch of the Crop Science Society of Japan*, **34**, 71-76 (戸澤英男, 1997: 中山間地農業の発展方向. 日本作物学会四国支部紀事, **34**, 71-76).