

# 模型による植栽傾斜ハウス内環境の基礎実験

関 平和\*・栗本美奈\*・菅谷 博\*\*

( \* 金沢大学工学部土木建設工学科  
\*\* 近畿中国四国農業研究センター・四国研究センター )

## Basic Experiment on the Environment in a Miniature Sloped Greenhouse with Model Plants

Hirakazu SEKI\*, Mina KURIMOTO\* and Hiroshi SUGAYA\*\*

( \*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University,  
2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa-ken, 920-8667 Japan )

\*\*National Agricultural Research Center for Western Region, 2575, Ikunocho, Zentsuji, 765-0053 Japan

### Abstract

Using a miniature sloped greenhouse and model plants, temperature profile measurements and flow pattern observations within the house were performed. Flow pattern was observed using ammonium chloride aerosol as a tracer, which was inserted from windows on the side cover film of the house. Heat and momentum transfers in the sloped greenhouse with plants were formulated applying the simplest turbulent model, 0-equation model. According to the model's numerical solutions, the calculated results of the temperature profile agreed well with the experimental results, both qualitatively and quantitatively. The calculated results of air velocity in the house were in the same order as the experimental results. However, two coefficients relating to the flow resistance of the air within the plant layer, the specific air permeability and the dispersion coefficient, must have been calculated using the trial and error technique, out of necessity. It is advisable and necessary to consider precise estimation methods for these coefficients, and to make clear the validity for applying this model to a practical scale sloped greenhouse with plants.

**Key words:** sloped greenhouse with plants, temperature profile, velocity profile, simple mathematical model

キーワード：植栽傾斜ハウス，温度分布，速度分布，簡単な数学モデル

## 1. はじめに

傾斜地に設置されたハウス（以下，傾斜ハウスと呼ぶ）内では，傾斜面方向に温度差が生ずることが実験的（Seki *et al.*, 2001b; Seki *et al.*, 2005），かつ理論的に確認されている（Seki *et al.*, 2001a; Seki *et al.*, 2002）。この温度差をハウス内作物の生育時期のずれに利用し，高齢農業者の農作業分散化による労力軽減に役立てるか，または，その差を緩和すべく換気を促進するなどして，生育時期をそろえるかは，作種や農業者の年齢にも依存し，一概には決められない。しかし，いずれにせよ，このような傾斜ハウス内の微気候の特徴を把握する

ことは，気象資源としての傾斜地利用にとって不可欠の検討事項である。

無植栽の状態を対象とした上記の実験的・理論的検討により，既に以下のことが分かっている。すなわち，1）傾斜ハウス内の空気の流れは等方性乱流とみなせる。2）日射の強い晴天時は曇天時よりも傾斜方向温度差が大きい。3）傾斜角の増大は風速を高める。4）床面と被覆面の温度差が大きいかほど傾斜方向温度差が大きくなる。これらの結果は，無植栽傾斜ハウス内の温度場，速度場の基本的特徴を示すものとして価値がある。しかし，ハウスが作物生産現場である以上，植栽の存在が傾斜ハウス内の環境にどのような影響を与えるのかを把握することが最も重要である。にもかかわらず，植栽の取扱いが難しいことからこの課題は後回しにされてきた。

2004年9月28日 受付，2005年5月9日 受理。

そこで本研究では植栽傾斜ハウス内の環境解析モデルの構築を目的に、模型の小型傾斜ハウスを作成し、閉鎖系を対象に、様々な条件下でハウス内環境の測定実験を行い、温度分布・速度分布などの植栽傾斜ハウスの特徴を無植栽の場合と対比して考察した。また、ハウス内の温度場・速度場を表す数学的モデルを作成し、モデルによる計算結果と実験結果を比較し、モデルの妥当性を検討した。

ただし、植物体の存在状態の幾何学的な複雑さに加えて、遅いながらも複雑な流れを伴う伝熱現象を対象とするために、植栽傾斜ハウス内の速度・温度場の厳密なモデル構築は容易ではない。そこでここでは、数学的な厳密性のある程度犠牲にすることを承知の上で、速度場・温度場の本質的な特徴を定性的にはもちろん、定量的にもほぼ的確に表し得、かつ、パソコンレベルで計算できるような、比較的簡単なモデル構築を目的とした。

## 2. 模型ハウスによる環境測定実験

傾斜ハウス特有の微気候を定量的に把握するためには、実規模ハウスにおいて様々な条件下での実験を行うことが望ましいが、相当な時間と労力を必要とする。一般に閉鎖された傾斜ハウス内では自然対流が生じること、さらに  $G_r$  (グラスホフ) 数を用いた判定により、その流れは乱流であることがわかっている (Seki *et al.*, 2001a)。乱流でも、 $G_r$  数の大きさによって厳密には渦の規模が異なるが、乱流である限り近似的には同じ数学的表示式でモデル化できる (例えば、Hiraoka and Tanaka, 1994)。したがって、ハウス規模が小さくても、その中の空気が流れが乱流であれば、そのハウスを用いた実験結果が、適用した乱流モデルによる計算結果とほぼ一致すれば、実ハウスでも近似的にその乱流モデルが成り立つものとみな

せるだろう。

そこでここでは、乱流が起こる条件の下で小型の模型傾斜ハウスを作成し、プラスチック製の模型植物を用いたハウス内環境測定実験を行った。実験に用いた傾斜角  $15^\circ$  の模型ハウスでは  $G_r > 10^6$  であれば乱流となり (JSME, 1986)、ここで行った操作条件下では  $G_r > 10^7$  であり、明らかに乱流条件を満足した。そして、実験結果と理論による計算結果との比較により、理論の妥当性を検討した。

### 2.1 模型ハウス

模型ハウスは、Fig. 1 に示すように、傾斜方向長さ  $0.9$  m、鉛直高さ  $0.4$  m、奥行き  $0.55$  m で、傾斜角は  $15^\circ$  である。傾斜ハウスにおける傾斜方向長さを  $l_x$ 、鉛直高さを  $l_y$  とするとき、実際の傾斜ハウスでは  $l_y/l_x = 0.05 \sim 0.1$  のものが多い (例えば、Sugaya, 1998)。これに対し、本実験の模型ハウスでは  $l_y/l_x = 0.44$  であり、 $l_y$  が相対的に大きい。これは、本研究では傾斜方向 ( $x$  方向) のみならず、傾斜面に垂直な方向 ( $y$  方向) における植物層とその上の空気層内温度分布の違いを実験的に明確にしたかったことによる。ただ、モデル式の妥当性を調べるに際しては  $l_y/l_x$  の値に特別な制約条件はないため、 $l_y/l_x = 0.44$  である模型傾斜ハウスを用いた実験によりモデルの妥当性が確認されれば、 $l_y/l_x$  の値が  $0.1$  以下の実規模ハウスと同程度の場合についても、モデルの適用は可能と考えられる。また、敷地面積にして実規模ハウスの  $1/1000$  から  $1/2000$  程度で、植栽もほぼその割合で縮小したものとした。その結果、模型ハウスでは模型植物を密に配列したとき、葉と葉あるいは茎との隙間が  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  m で、その隙間が  $10^{-1} \sim 10^0$  m のオーダーである実規模ハウスに比べて非常に小さい。被覆材としては厚さ  $0.1$  mm の市販の農業用塩化ビニルフィルムを用い、一重被覆とした。

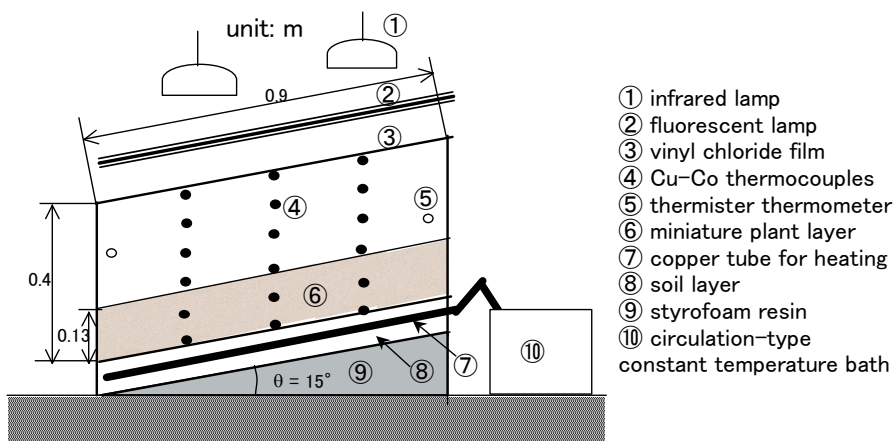
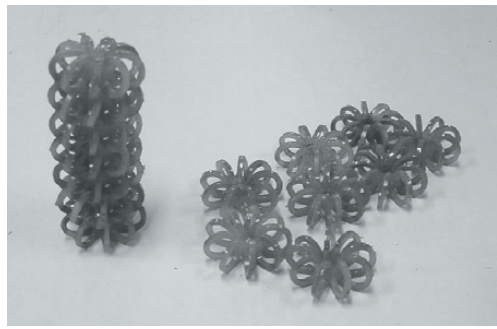


Fig. 1. Survey view of the experimental apparatus



Miniature plant made from EVE resin



Miniature plant made from PP resin



(a) planting pattern 1



(b) planting pattern 2

Fig. 2. Patterns of planting

## 2.2 実験条件

植栽の配列パターンは、Fig. 2 に示すように植栽パターン1 [密配列 (EVE 樹脂製模型植物)：想定作物はスイートピーなどの花卉]・植栽パターン2 [疎配列 (pp 樹脂製テラレットパッキング)：想定作物はトマトなどの野菜]・無植栽の3パターン、土壌は加温・無加温の2パターン、放射熱の照射条件については、蛍光灯・赤外線ランプ・照射無しとの3パターンとした。植栽の配列パターンを変えたのは、植栽の疎密の違いにより空気の流動抵抗が異なることを模擬するためである。まず、植栽パターン1は、十分な繁茂の状態を想定している。ただし、問題を単純化するために畝の存在は無視している。植栽パターン2は、植物間の間隔を広くして配置した。しかし、数学的モデルでは簡単のため植物体部分とその近傍の空気部分を分けずに、これらをまとめて植物層とする。ただしここでは、模型植物を使用したため、蒸散などの生理的現象については考慮していない。

土壌加温の有無は、土壌表面温度  $T_s$  と被覆材温度  $T_w$  の大小関係を変えるためである。このうち、 $T_s < T_w$  は晴天日の日中 (土壌加温なし) に対応し、 $T_s > T_w$  は夜間

や曇天日で土壌加温をする場合を想定したものである。また、照射条件を変えたのは、曇天日中 (蛍光灯)、晴天日中 (赤外線ランプ)、夜間 (無照射) を想定したことによる。

## 2.3 実験方法

植栽パターン1においても植物層の空隙率は約0.96で、大部分が空気であるため熱容量の小さいハウス内の環境は、境界面温度  $T_s$ 、 $T_w$  の変動に対して数分間で追従し、この模型ハウスは時定数の小さいシステムである。従って各実験において  $T_s$ 、 $T_w$  の値が安定したときに、ハウス内も定常状態に達したものとみなすことができる。

ただし、 $T_s$ 、 $T_w$  が安定するのに要する時間は操作によって異なる。すなわち、 $T_s < T_w$  の条件を設定するために行った赤外線ランプ照射実験 (Run 4, 5, 6) では、照射開始から約10分後に  $T_s$ 、 $T_w$  がほぼ定常状態に達した。一方、 $T_s > T_w$  の条件を設定するために行った土壌加温は、厚さ約5 cmの赤土層内に外径8 mm、内径6 mmの銅製蛇管を5 cmの間隔で敷詰め、恒温槽からの温水をその中に循環させて行ったため、循環水の加温開始から  $T_s$  が定常状態に達するまでに2~3hの時間を要した。このよう

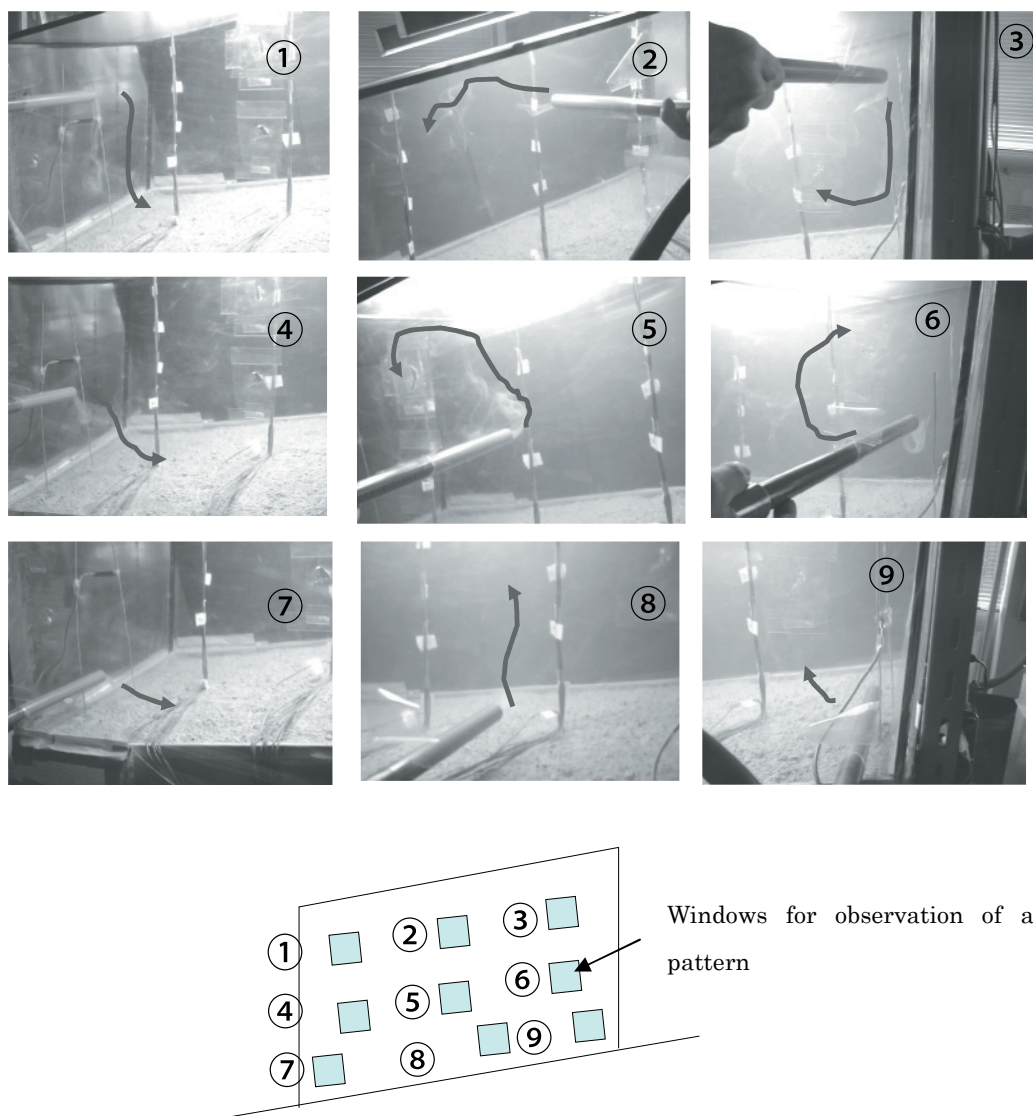


Fig. 3. An example of the observation results for airflow pattern where photo-number corresponds to the window-number.

にして最終的に定常状態に達した後に、熱放射量を放射熱計 (Licor 社製, LI-185B) で、ハウス内各位置 (20 箇所) の温度を、銅—コンスタンタン熱電対 (18箇所) およびサーミスタ温度計 (2箇所) により測定・記録した。

温度測定終了後、ハウス内空気の流況観察を行った。空気流れの測定に当っては、安価かつ容易におおよその流況を視覚的に観測できる簡便な方法を案出した。この方法は塩酸とアンモニア水を空气中で揮発・反応させ、発生する塩化アンモニウムの微細な結晶からなる白煙をトレーサーとしてハウス側面から傾斜方向に垂直に送入し

て、傾斜方向に沿う流れの向きと速さを白煙の流れにより肉眼観測し、写真撮影する方法である。この方法では、トレーサーの流入速度が過大であると、それによる空気の擾乱を伴うという欠点はあるが、傾斜方向 ( $x$  方向) とそれに垂直な方向 ( $y$  方向) の二次元断面におけるおおよその流況と流速を直接観測できる。撮影した結果の一例を Fig. 3 に示す。また、全ての実験については、熱電対設置位置間の白煙の通過時間を計測して、空気の流速概略値を実験的に求めた。



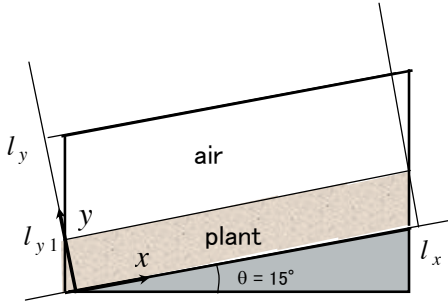


Fig. 4. Coordinate system for the model

### 3. 温度場・速度場の数学的モデル化

#### 3.1 仮定の設定

実際の現象は3次元であるが、数学的取扱いがきわめて困難になることからここでは間口に平行な方向の速度・温度変動は小さいものとして無視することとした。この場合、解析領域は平行四辺形となるが、本実験では傾斜角が15度でそれほど大きくないことから、実際の計算に当たっては前報 (Seki *et al.*, 2001a) と同様、傾斜方向に  $x$  軸をとり、それと直角の方向に  $y$  軸を取って解析領域を長方形に近似した (Fig. 4)。このようにして幾何学的な単純化を行ったあと、植物層内の流れが遅いことに着目し、以下の仮定を設定することによりモデル化の便宜を図ることとした。

- 1) 上部空気層 ( $l_{y1} < y < l_y$ ) 内の流れは等方性乱流である。
- 2) 植物層 ( $0 < y < l_{y1}$ ) は均一な分散体とし、その中の空気の流れは等方性乱流とする。
- 3) 植物層内の空気の流れは遅く、流れに対する植物体の抵抗は流速に比例するものとみなせる。
- 4) 植物層では植物体とその近傍の空気温度は相等しいものとみなして区別せず、それを植物層温度とする。
- 5) 植物層及びそれより上部の空気層における運動量および熱の移動は0方程式モデル (勾配拡散モデル) (例えば, Hiraoka and Tanaka, 1994) にしたがう。すなわち、乱流による運動量フラックス (レイノルズ応力) 及び熱移動フラックスはそれぞれ、速度勾配、温度勾配に比例し、その比例係数である運動量及び熱の分散係数  $E_m$ ,  $E_T$  は相等しく、速度のみの関数で与えられる。
- 6) 境界条件となる土壌表面と被覆材温度は、傾斜方向に均一な値をとるものとする。

ここで、仮定1)は無植栽の場合に準じたものである。植物層内の空気の流れについては、植物の種類、畝の構造

にも依存することが予想され、一般的な表現にまとめることは難しいが、ここでは簡単のため、仮定2)のごとく、等方性を仮定した。

一般に、流れが乱流の場合、植物体の抵抗は流速の2乗に比例するものとされているが (例えば, Takeuchi and Kondo, 1981), ここでは流れが遅いことから、両者の関係を線形に近似しても、算出される空気流速に数値的に大きな誤差が生じないものと考えて仮定3)を設定した。仮定4)も流れが遅いことに基づくものである。仮定6)は無植栽ハウスの解析の場合と同様である。

#### 3.2 基礎式及び境界条件

以上の仮定の下に、空気層及び植物層内の基礎式を組立てた。それらを境界条件、初期条件とともに Table 1 に示す。ただし、表中の使用記号は以下の通りである。 $u$  は空気層内の  $x$  方向速度、 $v$  は空気層内の  $y$  方向速度、 $u_p$  は植物層内の  $x$  方向速度、 $v_p$  は植物層内の  $y$  方向速度、 $T$  は空気層温度、 $T_p$  は植物層温度、 $\omega$  は空気層の渦度、 $\omega_p$  は植物層の渦度、 $\Psi$  は空気層内の流れ関数、 $\Psi_p$  は植物層内の流れ関数、 $t$  は時間、 $g$  は重力加速度、 $T_b$  は基準温度、 $\theta$  はハウスの傾斜角、 $h_{side}$  は傾斜方向のハウス側壁面から外気への3次元熱損失の大きさを表す伝熱係数、 $T_a$  はハウス外気温、 $E_m$  は空気層内の渦度の分散係数、 $E_{mp}$  は植物層内空気の渦度の分散係数、 $E_T$  は空気層内の熱の分散係数、 $E_{Tp}$  は植物層内の熱の分散係数、 $C_{pa}$  は空気の比熱、 $\rho_a$  は空気密度、 $l_z$  はハウス間口の長さ、 $k_r$  は放射熱の減衰係数、 $q_r$  は葉面に入射する短波放射熱流束、 $D_{LA}$  は葉面積密度 [植物層単位容積当りの葉面積 (片面)],  $C_{pp}$  は植物層 (植物とそれを取り巻く空気を含む) の比熱、 $\rho_p$  は植物層の密度、 $f(q_r, T_p)$  は単位時間当たりに蒸散に使われる熱量、 $U_a$  は傾斜ハウス上下端の側壁被覆面 ( $x = 0, l_x$ ) から外気への放熱の程度を表す伝熱係数、 $l_{y1}$  は植物層の高さを表す。

式 (1), (2) はそれぞれ空気層、植物層を流れる空気の連続の式を表す。式 (3), (4) はそれぞれ、空気層と植物層の渦度輸送方程式であるが、これらは、各層において  $x$  方向と  $y$  方向の2つの式で与えられる一組の運動量収支式の、それぞれの両辺に速度を乗じてから両者の差をとって一つの式にまとめたものである。

エネルギー方程式 (5), (6) については3次元的な熱損失の効果は、側面方向への熱損失という形で現れ、ハウス内温度分布に及ぼすその影響を無視できないため、ここではその効果を表す項を基礎式の中に追加した。

境界条件式 (7) ~ (12) は、境界では空気速度が0であること、閉鎖系であるから流れ関数が0であることを表す。天井被覆面、土壌表面では温度がそれぞれ一定とし、ハウス上下端 ( $x = 0, l_x$ ) では温度  $T_a$  の外気に向けて放

**Table 1.** Basic equations, boundary conditions and initial conditions

	Upper air layer ( $l_y < y < l_x$ )	Plant layer ( $0 < y < l_y$ )
Equations of continuity	$\omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \rightarrow u = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$ (1)	$\omega_p = \frac{\partial^2 \Psi_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_p}{\partial y^2} \rightarrow u_p = \frac{\partial \Psi_p}{\partial y}, v_p = -\frac{\partial \Psi_p}{\partial x}$ (2)
Equations of vorticity transport	$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y}$ $= \frac{\partial}{\partial x} \left( E_m \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_m \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$ $+ \frac{g}{T_a} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \sin \theta - \frac{\partial T}{\partial x} \cos \theta \right)$ (3)	$\frac{\partial \omega_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial \omega_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial \omega_p}{\partial y}$ $= \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{mp} \frac{\partial \omega_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{mp} \frac{\partial \omega_p}{\partial y} \right)$ $+ \frac{g}{T_b} \left( \frac{\partial T_p}{\partial y} \sin \theta - \frac{\partial T_p}{\partial x} \cos \theta \right) - \frac{E_{mp}}{k} \omega_p$ (4)
Equations of energy transport	$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}$ $= \frac{\partial}{\partial x} \left( E_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_T \frac{\partial T}{\partial y} \right)$ $- \frac{h_{side}}{C_{pa} \rho_a l_z} (T - T_a)$ (5)	$\frac{\partial T_p}{\partial t} + \frac{C_{pa} \rho_a}{C_{pp} \rho_p} \left( u_p \frac{\partial T_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \right)$ $= \frac{C_{pa} \rho_a}{C_{pp} \rho_p} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{Tp} \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{Tp} \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) \right\}$ $+ \frac{k_r q_r D_{LA}}{C_{pp} \rho_p} - \frac{f(q_r, T_p)}{C_{pp} \rho_p} - \frac{h_{side}}{C_{pp} \rho_p l_z} (T_p - T_a)$ (6)
Boundary conditions	$y = l_y; \quad \omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}, \Psi = 0, T = T_w$ (7)	$y = 0; \quad \omega_p = \frac{\partial^2 \Psi_p}{\partial y^2}, \Psi_p = 0, T_p = T_s$ (8)
	$x = 0; \quad \omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}, \Psi = 0,$ $(l_y < y < l_x)$ $C_{pa} \rho_a E_T \frac{\partial T}{\partial x} = U_a (T - T_a)$ (9)	$x = 0; \quad \omega_p = \frac{\partial^2 \Psi_p}{\partial x^2}, \Psi_p = 0,$ $(0 < y < l_y)$ $C_{pa} \rho_a E_{Tp} \frac{\partial T_p}{\partial x} = U_a (T_p - T_a)$ (10)
	$x = l_x; \quad \omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}, \Psi = 0,$ $(l_y < y < l_x)$ $- C_{pa} \rho_a E_T \frac{\partial T}{\partial x} = U_a (T - T_a)$ (11)	$x = l_x; \quad \omega_p = \frac{\partial^2 \Psi_p}{\partial x^2}, \Psi_p = 0,$ $(0 < y < l_y)$ $- C_{pa} \rho_a E_{Tp} \frac{\partial T_p}{\partial x} = U_a (T_p - T_a)$ (12)
	$y = l_y; \quad \omega = \omega_p, \Psi = \Psi_p, T = T_p$ (13)	
Initial conditions	$t = 0; \quad \Psi = 0, \omega = 0, T = (T_w - T_s)y/l_y$ (14)	$t = 0; \quad \Psi_p = 0, \omega_p = 0, T_p = (T_w - T_s)y/l_y$ (15)

熱があるとす。また、式 (13) は植物層と空気層の境界条件で、渦度、流れ関数、温度が両層で連続であることを示す。なお、式 (7) の  $T_w$  は測定値ではなく、天井被覆面への流入熱流束（外部からの放射熱とハウス内空気からの顕熱流入）、流出熱流束（外部への顕熱流出）を等しいとおいて得られる熱収支式を用いて予め算出した。

また、初期条件として空気層、植物層のそれぞれについて式 (14)、(15) を与えた。

### 3.3 計算の手順

Table 1 の式に基づいて温室内の速度場・温度場の数値解析を行った。実際の計算に当たってはこれらの基礎式を差分化し、 $x$  方向、 $y$  方向の寸法  $l_x$ 、 $l_y$  をそれぞれ 90、40個に等間隔に分割して得られた格子点に適用して、格子点における温度、速度の値を陽的 Crank-

Nicolson 法 (Tanahashi, 1996) を用いて初期値から微小時間刻み  $\Delta t$  ごとに速度・温度分布が定常状態に達するまで行った。なお、数値解安定のための  $\Delta t$  の値は  $2.5 \times 10^{-7}$  h であった。

## 4. 結果と考察

### 4.1 実験結果

合計 20 回の実験のうち、ここでは、土壌表面温度  $T_s$  と被覆材温度  $T_w$  の大小関係 ( $T_s > T_w$  と  $T_s < T_w$  の 2 種類) と、植栽配列 (植栽パターン 1, 2, 植栽無し) の 3 種類の組合せを変えた以下の六つの実験 (Run1~6) を取上げる。実験条件を Table 2 に示す。ここで、葉面積密度  $D_{LA}$  の値は、現場規模のハウスと模型ハウスとの幾何学的相似条件をほぼ満足している。葉面に入射する短波放

Table 2. Operating conditions for the experiments

Run	$l_x$ [m]	$l_y$ [m]	$l_{y1}$ [m]	$D_{LA}$ [m <sup>-1</sup> ]	$q_r$ [kJm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ]	$f(q_r, T_p)$ [kJm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ]	$T_s$ [°C]	$T_w$ [°C]	$T_a$ [°C]	remarks
1	0.9	0.4	0.13	38.4	6.41 $e^{0.609(y-l_{y1})}$	0	34.6	22.3	14.6	planting pattern 1 $T_s > T_w$
2	0.9	0.4	0.13	15.3	6.45 $e^{0.452(y-l_{y1})}$	0	31.2	25.0	19.6	planting pattern 2 $T_s > T_w$
3	0.9	0.4	0	0	0	0	34.6	27.8	22.1	no planting $T_s > T_w$
4	0.9	0.4	0.13	38.4	104 $e^{0.352(y-l_{y1})}$	0	21.4	37.7	22.1	planting pattern 1 $T_s > T_w$
5	0.9	0.4	0.13	15.3	82.5 $e^{0.645(y-l_{y1})}$	0	28.1	34.7	19.7	planting pattern 2 $T_s > T_w$
6	0.9	0.4	0	0	0	0	25.6	35.7	19.2	no planting $T_s > T_w$

射熱流束  $q_r$  の値は冬場を想定した。Run3, 6 で  $q_r$  を 0 としたのは、前者は夜間を想定したためであり、後者は日中を想定した実験であるが無植栽のため葉面への短波放射の入射がないからである。

Fig. 5 に  $y$  方向,  $x$  方向の温度分布実測値を示す。Run1~3 はいずれも  $T_s > T_w$  の場合である。植栽パターン1の場合 (Run1) は傾斜方向の温度差 (上昇) が傾斜下部と傾斜上部で最大約 8°C で顕著であるが、植栽パターン2 のとき (Run2) と無植栽のとき (Run3) は、傾斜方向にほとんど温度上昇が無かった。また、Run2 と3 は  $y$  方向温度分布についてもほとんど同様の傾向を示した。

一方、Run4~6 はいずれも  $T_s > T_w$  の場合であるが、植栽パターンにかかわらず、傾斜方向に温度差が出現した。最大温度差はRun4の場合で約 7°C であった。ただし、被覆材近傍の  $y = 0.310, 0.390$  m の位置において傾斜中央部の被覆材付近の温度上昇が小さいのは赤外線ランプを傾斜上部と下部の真上に設置した関係で、傾斜中央部天井被覆面への到達放射熱量が傾斜上下部に比べて小さかったためと思われる。また、この場合も植栽パターン2 (Run5) と無植栽 (Run6) の両者はほとんど同様の傾向を示すことが分かる。

以上の結果をまとめると、傾斜ハウス内における傾斜方向 ( $x$  方向) 温度差は  $T_s < T_w$  の場合に顕著であり、かつ、植栽パターン1の場合の方が植栽パターン2の場合よりも顕著であることが分かる。前者については無植栽について報告した既報 (Seki et al., 2002) の結果と一致している。また、後者の理由は、空気流れに対する植物層の抵抗が空気流速を下げるため、植栽が密の場合の方が流れによる温度差緩和効果が小さくなるためと思われる。

流況観測における測定結果によれば、例えば、Run6 では  $90 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.025 \text{ ms}^{-1}$ )、Run3 では  $180 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.05 \text{ ms}^{-1}$ ) で、いずれも  $360 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.1 \text{ ms}^{-1}$ ) よりも小さかった。

#### 4.2 計算結果との比較と考察

##### (1) 植物層内の比透気係数と分散係数

上述のごとく、ここでは流速が  $360 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.1 \text{ ms}^{-1}$ ) 以下と小さいことから植物体の空気抵抗は流速に比例するものとみなした [仮定3])。この場合、流動抵抗の大きさは比透気係数  $k$  に反比例する。しかし、このようにして定義された植物層の比透気係数  $k$  についてはその推算式が報告されていない。そこでここでは、植物層が分散体であることに着目し、分散体内の流速と圧力損失の関係を与える Ergun の式 (たとえば Bird et al., 1960) に基づいて  $k$  の値を推算した。その結果、植栽パターン1については  $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、植栽パターン2については  $5.0 \times 10^{-1} \text{ m}^2$  となった。ただし、これらの値を用いてハウス内の熱流動解析を行ったところ、ハウス内の流速が過大になったので、ここでは試行的に植栽パターン1については推算値の 500分の1である  $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 、植栽パターン2については推算値の 10分の1である  $5.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  とした。

一方、植生流れに関する Inoue (1963) の報告によれば、分散係数  $E_{mp}$  は混合距離  $L$  の 2乗に比例するとされている。植物層内の平均空隙径を  $L$  とみなすと、 $L$  の値はそれより上の空気層についての値よりも小さくなるため、分散係数は空気層におけるそれよりも小さくなるものと考えられる。実際には空隙径の見積りが難しいので植物層の分散係数が上部空気層のそれに比べてどのくらい小さくなるかを理論的に予測するのは難しい。ここでは植栽パターン1については試行的に Katsuta (1978) の結果に基づいて作成した相関式 ( $E_{mp} = 0.4 \sqrt{u_p^2 + v_p^2} \sqrt{I_x I_y}$ ) により見積もった値の 1/10 とした。また、植栽パターン2については試行的に上記相関式をそのまま適用するのが妥当と思われる。これは葉と葉もしくは茎との隙間がある値以上になると、無植栽の場合とほとんど変わらない条件となるためと考えられる。

また、計算に使用した植物層、空気層の熱的物性値、伝熱係数を Table 3 に示す。このうち、 $h_{side}$  の値は、実験を室内で行ったためハウス外部がほぼ無風状態

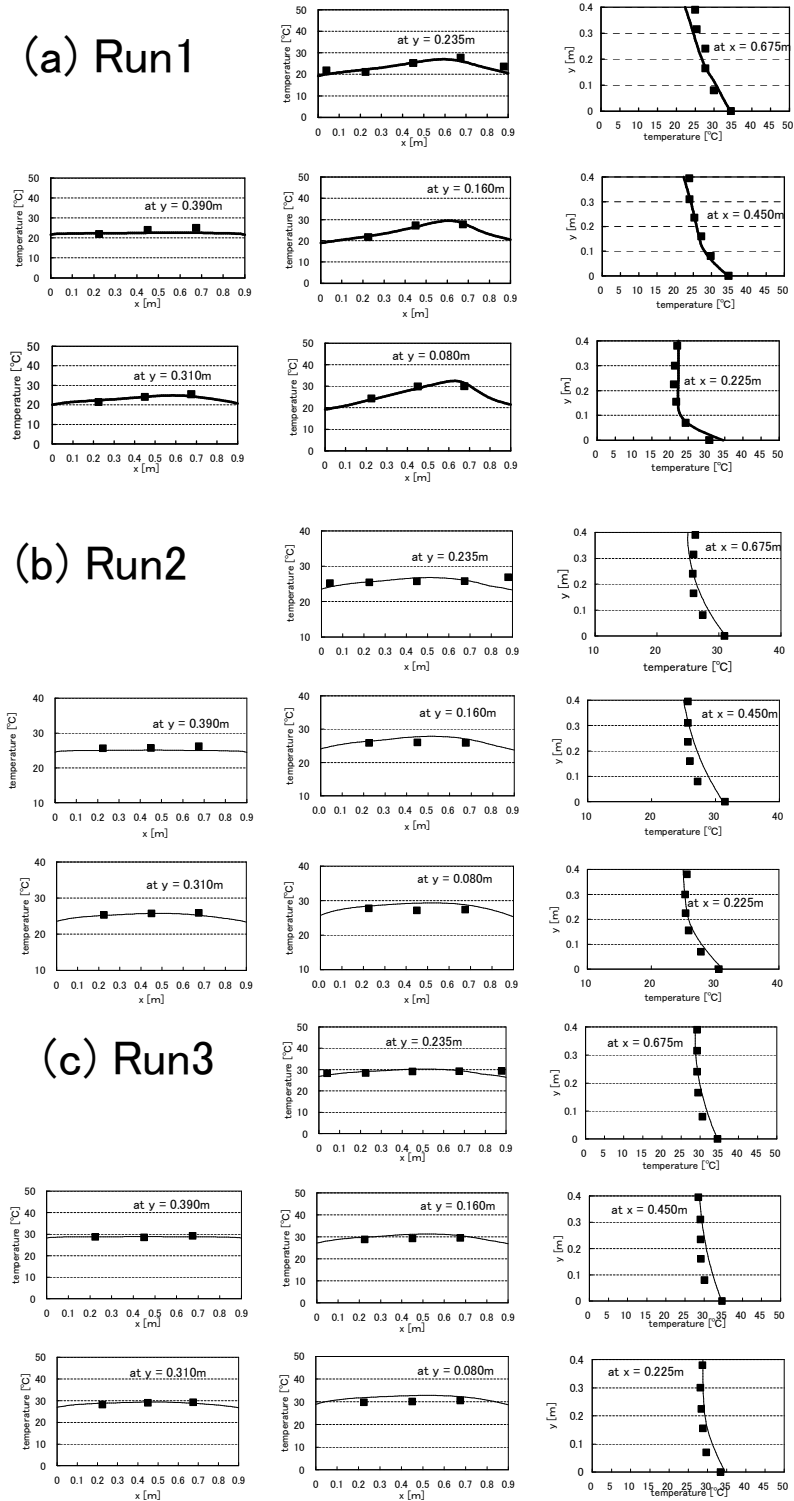
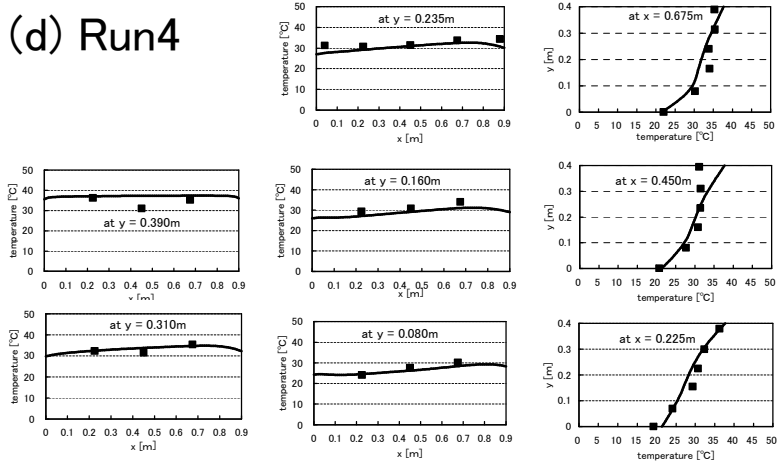


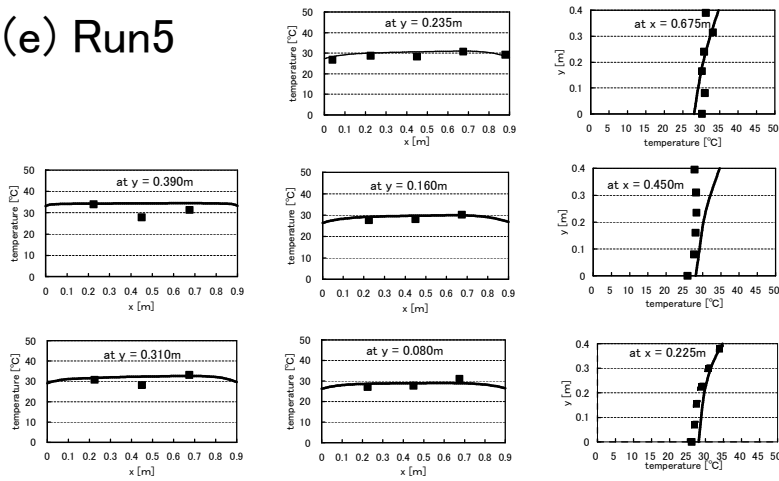
Fig. 5-1. Comparison of the experimental results of temperature distribution with the calculated results for Runs 1 through 3 (symbol: experimental results, solid line: calculated results)



(d) Run4



(e) Run5



(f) Run6

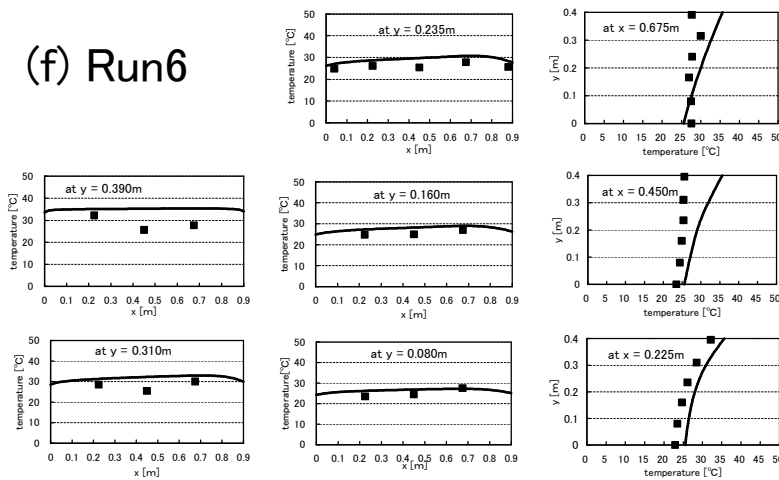


Fig. 5-2. Comparison of the experimental results of temperature distribution with the calculated results for Runs 4 through 6 (symbol: experimental results, solid line: calculated results)

Table 3. Thermal properties and heat transfer coefficients

Symbol	Unit	Planting pattern 1	Planting pattern 2
$C_{pp}\rho_p$	$\text{kJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	77.8	28.1
$C_{pa}\rho_a$	$\text{kJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	1.11	1.11
$U_a/(C_{pa}\rho_a E_T)_{\text{wall}}$	$\text{m}^{-1}$	4.2	4.2
$U_a/(C_{pa}\rho_a E_{Tp})_{\text{wall}}$	$\text{m}^{-1}$	4.2	4.2
$h_{\text{side}}$	$\text{kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	20	20
$E_m (= E_T)$	$\text{m}^2 \text{ h}^{-1}$	$0.2\sqrt{u^2 + v^2}$	$0.2\sqrt{u^2 + v^2}$
$E_{mp} (= E_{Tp})$	$\text{m}^2 \text{ h}^{-1}$	$0.02\sqrt{u_p^2 + v_p^2}$	$0.2\sqrt{u_p^2 + v_p^2}$

あったことから、ハウス被覆面を介しての伝熱係数に関する文献 [Okada (1977), Okada (1980), Takakura (1993)] において無風状態下での値が約  $20 \text{ kJm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  とされていることに基づいて設定した。一方、ハウス上下端からの熱損失の程度を表わす  $U_a$  の値も  $h_{\text{side}}$  にはほぼ等しいものと考えられるが、上下端における放熱効果を計算するには、境界条件式 (9) ~ (12) から分かるように、 $U_a$  のみならず壁面近傍の  $E_T$ ,  $E_{Tp}$  の値をも含めた放熱パラメータ [ $U_a/(C_{pa}\rho_a E_T)_{\text{wall}}$  もしくは  $U_a/(C_{pa}\rho_a E_{Tp})_{\text{wall}}$ ] の値を知る必要がある。ただし、本実験では壁面近傍の空気流速が不明なため壁面近傍の  $E_T$ ,  $E_{Tp}$  の値を正確に推測することができなかつたので、サーミスタの測定値 (Fig. 1 の⑤) とハウス外気温  $T_a$  の測定値に基づいて放熱パラメータの値を試行的に決定した。

(2) 計算結果との比較と考察

各実験の計算値を Fig. 5 に実線で示した。また、Fig. 6 には、計算で得られた等温線と速度のベクトル図を示した。

a)  $T_s > T_w$  の場合

Run1 (植栽パターン1), Run2 (植栽パターン2), Run3 (無植栽) がこれに対応する。Run1 については、いずれの位置においても理論値は実測値と非常によく一致している (Fig. 5 (a))。とくに植物層内では  $y$  方向の温度勾配がとくに傾斜上部に向かうにつれて大きくなることなど両者はよく一致している。また、Fig. 6 (a) によれば、渦が2つ形成されており、数と向きは観察結果と一致した。

Run2 については、 $y$  方向温度分布は実験・理論でほぼ良好な一致がみられるが、 $x$  方向温度分布は実験ではほとんど変化がなかったのに対し、理論ではハウスの上下端に向かって温度が下がる傾向がみられる (Fig. 5 (b))。左側に反時計回りの渦形成が流況観測により認められたが、これは理論 (Fig. 6 (b)) と一致する。

Run3 については、Run2 と同様、 $y$  方向温度分布は実

験・理論でほぼ良好に一致しているが、実験では  $x$  方向温度変化はほとんどないのに対し、理論では傾斜中央部の値が幾分高くなっている (Fig. 5 (c))。流況観測で渦が2つ確認され、向き、位置とも理論 (Fig. 6 (c)) と一致した。また、流況観測による風速 (参考値) は  $180 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.050 \text{ ms}^{-1}$ ) で、理論の平均風速  $174 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.048 \text{ ms}^{-1}$ ) とほとんど一致した。

b)  $T_s < T_w$  の場合

Run4 (植栽パターン1), Run5 (植栽パターン2), Run6 (無植栽) がこれに対応する。Run4 については、傾斜中央部の被覆材付近の温度が実測値では上がらない。この傾向は空気層上部の  $x$  方向温度分布からも分かる。この点を除けば実験と理論はよく一致している [Fig. 5 (d)]。特に傾斜下部では  $y$  方向温度分布は実験・理論で非常によく一致している。ただし、天井被覆材近辺の流れが実験と理論で逆になった [Fig. 6 (d)]。これは 4. 1 で指摘したように放射熱が天井被覆面に均一に分布しなかったことに原因があると思われるが、そこでの流速は小さく、流れが温度分布に及ぼす影響は小さかったものと思われる。

Run5 については、赤外線が直接に当たっていない傾斜中央部で実測値が低いほかは実測値と計算値はよく一致している。特に傾斜下部では  $y$  方向温度分布は実験・理論で非常によく一致している [Fig. 5 (e)]。実験では渦が2つ確認され、向かって右側が時計回り、左側が反時計回りであるのは理論 [Fig. 6 (e)] と一致した。

Run6 については、Run5 とほとんど同様の傾向を示す。この場合も傾斜下部では理論・実験の一致度が極めてよい [Fig. 5 (f)]。実験では渦が4つ確認されたが、理論 [Fig. 6 (f)] では2つである。これは天井被覆面への赤外線照射量が均一でないことが原因と思われる。流況観測による風速は  $90 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.025 \text{ ms}^{-1}$ ) であるのに対し、理論では  $161 \text{ mh}^{-1}$  ( $= 0.045 \text{ ms}^{-1}$ ) でいくぶん大きめに見積もられた。

以上の結果をまとめると、1) 植栽パターン1 の場合、

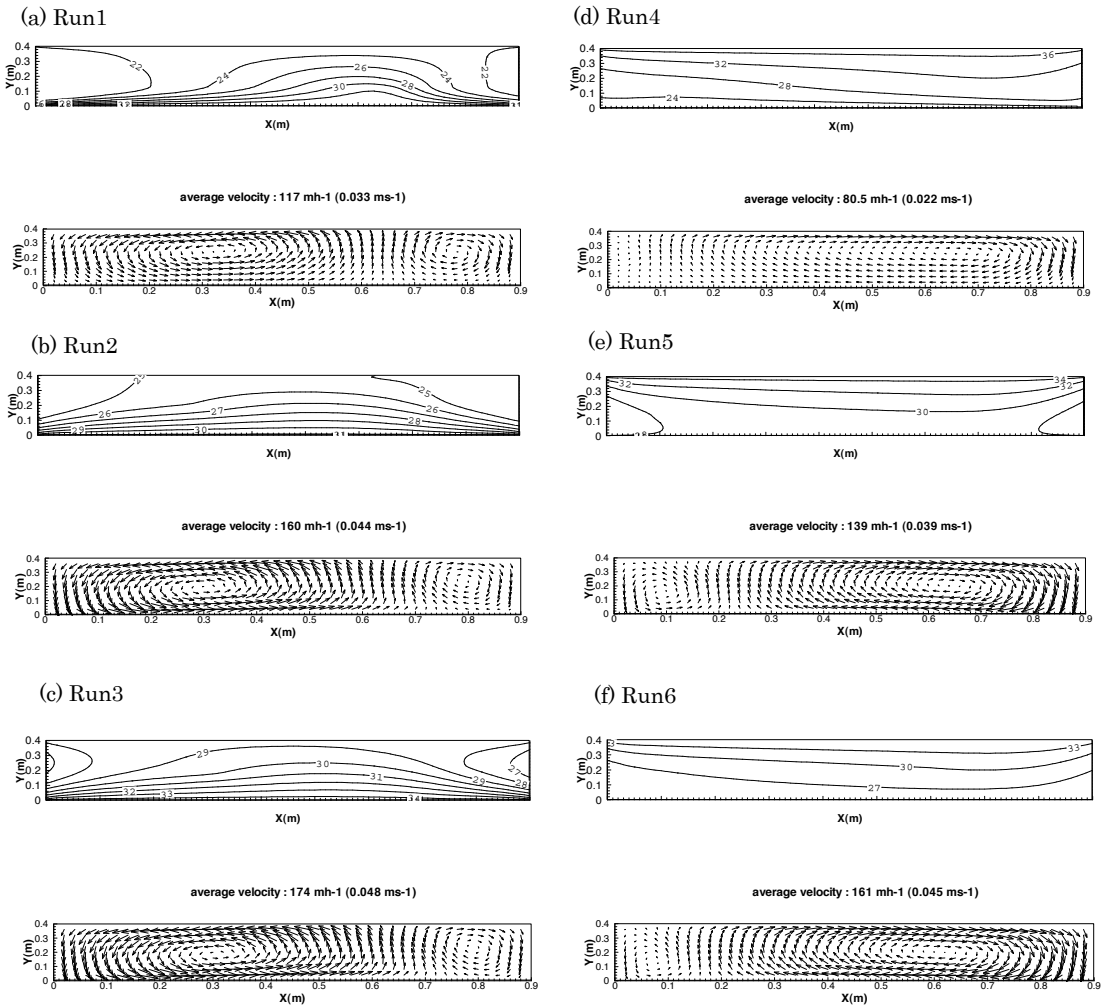


Fig. 6. Calculated results of temperature and velocity distributions for Run1 through Run6.

理論計算結果と実験結果が最もよく一致した。2) 植栽パターン1の場合、植物層では $x$ 方向の温度上昇が顕著であった。3) 実験的に赤外線照射量を天井被覆材面で均一にすることができなかつたため、被覆面加温実験は特に傾斜中央部の位置において計算値との差が大きかった。4) 植栽パターン2の場合、 $y$ 方向温度分布は理論計算結果と実験結果でほぼ良好な一致が見られた。

#### 4.3 模型ハウスと実規模ハウスの結果の関係

上述の、実規模ハウスと条件の異なる模型実験の結果からすぐに実規模傾斜ハウスの結果が得られるわけではない。しかし、前項4.2において、提示した数学モデルによる模型ハウス内の温度・速度場の計算結果の妥当性が確認されたことから、実規模傾斜ハウスの条件下(幾何学的条件、熱的条件)で、本モデルを適用して計算を行えばその中の温度・速度分布をほぼ正確に予測出来る

可能性が高いものと思われる。

## 5. 結 論

小型模型傾斜ハウスを用いて植栽のある閉鎖系傾斜ハウス内の温度場・速度場に関して実験的・理論的に検討した。得られた結果を要約すると以下のように示される。

1. 幾つかの仮定のもとにハウス内熱流動現象の簡単なモデル化を図ったところ、温度分布の実測値と計算値は定性的・定量的にほぼ良好に一致した。また、速度場については渦の個数、回転方向については実験結果と計算結果がほぼ一致した。また、流れの速度についても実験値と計算値はほぼ同一オーダーの値となった。
2. アンモニアと塩酸を用いて発生させた白煙によりハウス内の空気の流れを観測できた。この方法は、安

価かつ容易におおよその流況を視覚的に観察するのに便利であるとともに、理論による速度場計算結果の検討にも役立った。

3. しかし、解析に使用した、植物層内空気の流動抵抗に影響する比透気係数・分散係数の値は推算式による予測値を基礎としたが、最終的には試行的に決定せざるを得なかった。

今後は、これらの係数の推算方法を再検討するとともに、実規模ハウスでの測定結果と本モデルによるシミュレーション結果とを比較することにより実規模でのモデルの妥当性を検証・確認することとしたい。

## 謝 辞

トレーサー実験の実施に当たり、ご指導いただきました金沢大学物質化学工学科加納重義教授に謝意を表します。

## References

- Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., 1960: *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, New York, pp. 196–200.
- Hiraoka, M. and Tanaka, K., 1994: *Transport phenomena, new ed.* Asakurasyoten, Tokyo, pp. 1–253 (平岡正勝・田中幹也, 1994: 新版 移動現象論, 朝倉書店, 東京, pp. 1–253).
- Inoue, E., 1963: On the structure of airflow within crop canopies. *Jour. Meteorol. Soc. Japan*, **41**, 317–326.
- 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 – 改訂第4版. 日本機械学会, 東京, pp. 42–113).
- 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).
- Okada, M., 1977: The heating load of a greenhouse. Ph.D. Thesis presented to the University of Tokyo, pp. 33–36 (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, pp. 33–36).
- Okada, M., 1980: Chapter 15. Heating. In *Theory and Application for Design of Greenhouse* (ed. by Y. Mihara) Yokendo, Tokyo, pp. 182–204 (岡田益己, 第15章暖房, 温室設計の基礎と実際 (三原義秋編著). 養賢堂, pp. 182–204).
- Seki, H., Wada, K., Matsuo, Y. and Sugaya, H., 2002: Environmental analysis of a greenhouse in hilly and mountainous areas and possibility of its effective utilization. *Environmental Systems Research*, **30**, 409–418.
- Seki, H., Matsuo, Y. and Sugaya, T., 2005: Effects of Planting on the Environment in a Sloped Greenhouse. *J. Agric. Meteorol.*, **60**, 833–836.
- Seki, H., Kimura, T., Miyamoto, A., Sugaya, H., Sasaki, K. and Inooku, K., 2001a: Mathematical Modeling of Temperature and Velocity Fields in a Closed-Type Sloped Greenhouse. *J. Agric. Meteorol.*, **57**, 29–40.
- Seki, H., Kimura, T., Matsumoto, T., Sugaya, H., Sasaki, K. and Inooku, K., 2001b: Basic experiments for the temperature field in a sloped greenhouse. In *proc. of 22<sup>nd</sup> and 23<sup>th</sup> seminar for the research division of meteorology in agricultural land in the Society of Agricultural Meteorology of Japan*, pp. 27–30 (関 平和・木村達郎・松本拓陽・菅谷 博・佐々木華織・猪之奥康治, 2001: 傾斜ハウス内の温度場に関する基礎実験. 日本農業気象学会耕地気象改善研究部会第22・23回研究会講演論文集, pp. 27–30).
- Sugaya, H., 1998: A study on greenhouses in a sloping ground. *Agri. Meteorol. of 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., 1993: *Climate under cover*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 34–35.
- Takeuchi, K. and Kondo, J., 1981: *Lecture on atmospheric science 1. atmosphere near the earth's surface*. Univ. of Tokyo Press, Tokyo, pp. 144–148 (竹内清秀・近藤純正, 1981: 大気科学講座1 地表に近い大気, 東京大学出版会, 東京, pp. 144–148).
- Tanahashi, T., 1996: *CFD for beginners, advection – dispersion equation*, Koronasya, Tokyo, pp. 1–269 (棚橋隆彦 1996: はじめてのCFD – 移流拡散方程式 –, コロナ社, 東京, pp. 1–269).