

中山間傾斜地における温室の環境解析と 有効利用の可能性

関 平和¹ 和田健一郎² 松尾雄一³ 菅谷 博⁴

¹正会員 農博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野二丁目 40-20)

²金沢大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻 (〒920-8667 金沢市小立野二丁目 40-20)

³金沢大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻 (〒920-8667 金沢市小立野二丁目 40-20)

⁴近畿中国四国農業研究センター (〒765-0053 善通寺生野町 2575)

北向き斜面に設置された傾斜ハウス内の微気象の特徴を実験的に把握した後、数値モデルによりその特徴を定量的に検証した。晴天時に、傾斜方向に最大3~4℃、床面と垂直な方向に最大2.5℃の気温差が生ずること、曇天時には両方向にほとんど気温差が生じないことが示された。これらの微気象は日射量とハウスの向きによって決まる被覆部と土壌表面の温度差によって大きな影響を受ける。3~4℃の気温差は作物の生育速度のずれをもたらすのに有意な差であることが指摘された。

Key Words : hilly and mountainous areas, sloped greenhouse, mathematical modeling, field data

1. 緒言

貴重な自然のみならず、ありふれた普通の自然を対象にその評価と保全を検討することが、近年の環境システム分野における重要課題の1つとされている¹⁾。こうした普通の自然環境の保全に対して農業の果たしてきた役割はきわめて大きい。一見自然状態に見えても、現実には大部分が半人工的で、その維持には人手が必要であり、それを担うのが農業や林業であるからである。こうした役割を持つのが国農業において、農地の42%を占める中山間地域における耕作放棄の進行は、洪水や土壌侵食の防止、水源涵養といった傾斜地農業の自然環境保全機能を低下させるとともに、農業人口の減少による食糧自給率の低下に拍車をかけている^{2,3)}。

このような実状を踏まえて、中山間傾斜地における農地面積の割合が高い四国地方では、近畿中国四国農業研究センターが、農業活性化の観点から、傾斜地に形成される特異な微気象そのものを一種の資源とみなし、その有効利用方法の発掘に乗り出した⁴⁾。傾斜地に設置された温室(以下、傾斜ハウスと呼ぶ)の有効利用もその一環として取り上げられている。

一般に、傾斜地農業は、面積が狭小であること、立地が困難であること、作業労力が大きいというマイナス面を持つが、傾斜ハウスでは、斜面方向に気温差が生じ、その影響で作物の生育速度に場所的なずれを生じることが農業者の経験的事実として報告されている⁵⁾。こうした生育の

ずれは、とくに高齢農業者にとっては収穫期間の延長による作業労力分散というメリットに転換できるため、高付加価値作物の生産調整に結びつけることができるなら、これまで条件不利地と目されてきた傾斜地農業のあり方に新たな可能性を示すものである。ただし、傾斜ハウスを農業技術の一つとして明確に位置付けるためには、この現象がいかなる条件下で起こるのかを、理論解析を通じて定量的に検討しておく必要がある。

原田・矢吹⁶⁾は、傾斜型ブドウハウス内の環境に関する実験的研究を行っているが、傾斜ハウス特有の内部環境の成立にかかわる因子の関係が理論的に明らかにされていない。筆者ら⁷⁾は晴天日を対象として傾斜ハウス内の気温差出現を理論的に予測し、さらに2重被覆ハウスの方が1重被覆ハウスに比べて気温差の出現に有利であるとの結論を得たが、その理論では空気流の渦動粘性係数の取扱いについての根拠が不十分であった上、実験結果との比較が晴天日に限られていた。また、傾斜ハウス利用の有用性についての検討も十分ではなかった。

本稿では、閉鎖型2重被覆傾斜ハウスにおける現場実験データをもとに、ハウス内温度の時間的変化と場所的分布の特徴を分析するとともに、2段階分割モデルによるハウス内の環境解析を行い、実験結果との比較によりモデルの妥当性を検討した。ただし本モデルは、晴天のみならず、曇天をも対象とし得ること、ハウス内空気流の渦動粘性係数を等方的に見積もることの2点において、先に提示したモデル⁷⁾を改良したものである。そして、実験および計算

結果を踏まえて、気温差出現の観点から傾斜ハウスの有効利用の可能性を論じた。

2. 実験

(1) 実験施設

実験に使用した傾斜ハウス（図-1）は、北緯 34 度に位置する近畿中国四国農業研究センター大麻山圃場の北向き斜面に建てられており、傾斜角は 10 度($=0.175\text{rad}$)である。規模は間口幅 6m、斜面方向長さ 30m、棟高 3.3m で

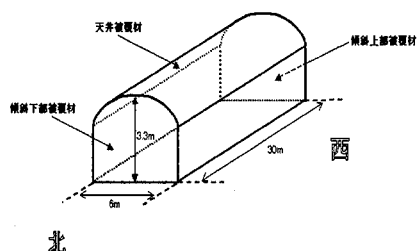


図-1 傾斜ハウス全景

ある。被覆材は厚さ 0.1mm の農業用塩化ビニール製で、2重に張られており、内張り、外張り被覆材の間隔は 0.3m である。

(2) 実験方法

図-2 に示すように、傾斜ハウス下端より斜面に沿って 2, 8, 15, 22, 28m の 5 つの場所で、ハウス床面からそれぞれ 0.3, 1.8, 2.6m の高さの合計 15 箇所温度を測定した。また、土壌表面温度をハウス下端より斜面に沿って

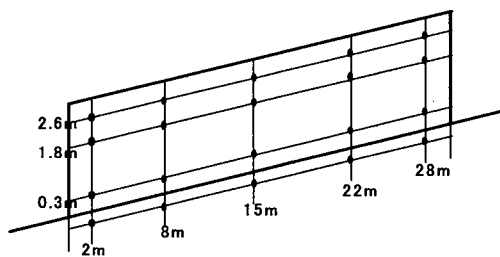


図-2 温度測定点

2, 15, 28m で、床下 3~5cm の位置、土壌内温度をハウス下端より斜面に沿って 2, 8, 15, 22, 28m で、床面下 0.1m の位置、被覆部温度（内張り内表面、外張り内表面、内外被覆材間気温）を傾斜ハウス下端より斜面方向に 15m の位置において測定した。測定には Cu-Co 熱電対を用い、1 分毎にデータロガーによって記録した。

(3) 実験結果

2000 年 10 月 9 日から 11 月 13 日にわたる 31 日間の測定データのうち、晴天日、曇天日の代表例として、快晴であった 11 月 6 日と、曇天であった 10 月 23 日のデータ（床面からの高さ 2.6, 1.8, 0.3m における 4 時間毎の温度分布、日射量の経時的変化、土壌表面温度、被覆部温度）を、それぞれ図-3, 4 に示す。

図-3 よれば、ハウス内気温は各高さにおいて、常に傾斜下端から上端にかけて緩やかに上昇し、最大 3~4℃ の温度差が生じている。温度差が最大となるのは、日射量が最大となった 11 時から 1 時間遅れた 12 時である。また、夜間は床面からの高さによる温度にほとんど差は見られないが、日射のある昼間は床面からの高さが増すほど温度上昇が大きくなっている。土壌表面温度は斜面下端から上端にかけて緩やかに上昇する傾向が見られ、最大温度差は 5.0℃ で、同一位置における昼夜の温度差は最大約 22℃ と大きい。被覆部温度についても同一位置における昼夜の差が約 27℃ と大きい（日中は最大約 37℃、夜間は最低約 10℃）。

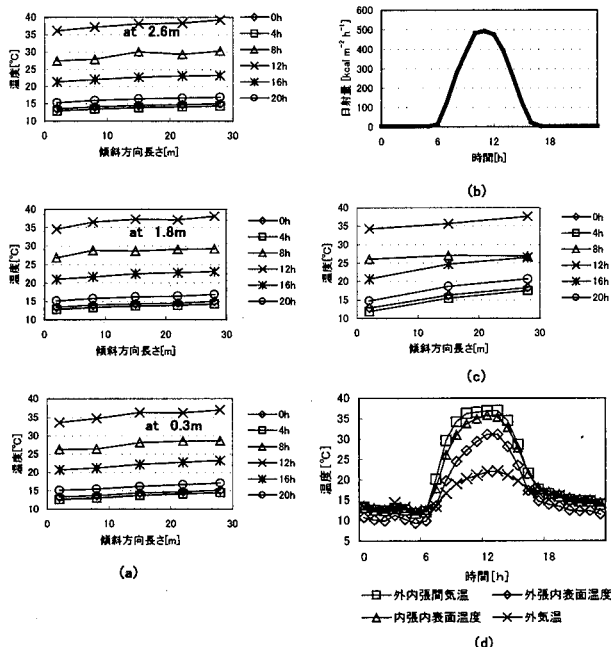


図-3 11月6日の実験結果(a)ハウス内温度、(b)日射量、(c)土壌表面温度、(d)被覆部温度

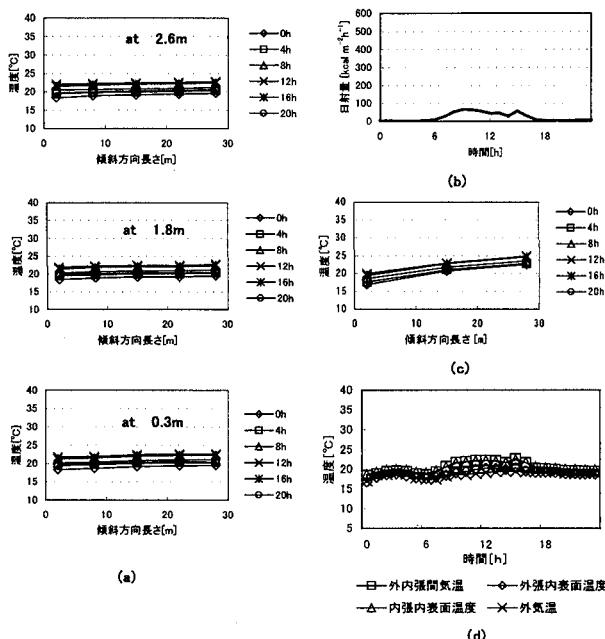


図-4 10月23日の実験結果 [(a)ハウス内温度、(b)日射量、(c)土壌表面温度、(d)被覆材温度]

3. 数理モデル

緒言で述べたように、本研究では既報⁷⁾の2段階分割モデル、すなわち、傾斜ハウス全体にわたる巨視的な環境を解析するサブモデルと、ハウス内の微視的な環境を解析するサブモデルを組み合わせる方法を用いた。前者をマクロモデル、後者をミクロモデルと呼ぶ。マクロモデルは系(傾斜ハウス)の境界面である土壌表面と被覆部の温度を計算するモデル、ミクロモデルは系内の速度、温度分布を計算するモデルである。なお、マクロモデル、ミクロモデルの計算プログラムは別々であり、まず、マクロモデルで着目日における境界面温度の経時変化を1日間にわたって求めたあと、それを境界値としてミクロモデルによりその日の任意時刻におけるハウス内の風速、温度分布を計算した。

(i) マクロモデル

系の境界面温度は、日射、長波放射、顕熱、潜熱、土中への熱伝導のフラックスの釣合によって決まる。4つの部位(①、②、③、④)と、ハウスの斜面方向の上下端からそれぞれ15mまでの領域(⑤、⑥)の、合計6つの部位の熱収支式は表-1のように示される。ただし、表-1の記号表は付録に示す通りである。なお、本研究では、ハウスの東西方向側面部での熱収支式は考慮せず、被覆材温度、土壌表面温度とも傾斜方向(x 方向)とそれに垂直な方向(y 方向)の2次元的な分布のみを考慮した。

一方、曇天についての図-4によれば、各高さにおいて傾斜下端から上端にかけて緩やかに温度が上昇する傾向は見られるが、その上昇幅は最大1.2℃で図-3の晴天の場合に比べて非常に小さい。また、床面からの高さの違いによる温度差はほとんどなく、1日を通じてほぼ定常的な温度分布を示している。土壌表面温度は斜面下端から上端にかけて緩やかに上昇し、最大温度差は4.8℃で晴天の場合とほとんど変わらないが、昼夜の温度差は3.2℃と小さい。被覆部温度の昼夜の差も5.5℃(最低17℃、最大22.5℃)と晴天の場合(27℃)に比べて極めて小さい。

以上の結果から、ハウス内温度、土壌表面および被覆部温度の場所的(斜面方向、高さ方向)の、時間的変化は、晴天と曇天の大きな条件の違いである日射量の影響を強く受け、日射量の大きい晴天の日中には場所的に最も顕著な温度差が生ずるものと考えられる。

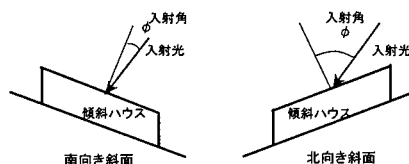


図-5 北向きおよび南向き斜面における日射入射角 ϕ (rad)

対象ハウスが北向き斜面上にあるため、図-5のように南向き斜面に比べて日射の入射角が大きい。このため、傾斜上部被覆面から流入する日射の大部分は透過してハウス床面(土壌表面)にまで達するのに対して、天井被覆面では反射の割合が高くなり透過成分が少なくなる。したがって、ハウス床面への正味の到達日射量は傾斜方向に不均一となり、被覆面温度も位置によって差を生ずるため、計算に当たっては各部位の境界面を1.0m間隔に要素分割し、各要素についての熱収支式を連立して要素毎の温度を求めた。また、被覆材は2重になっているが、ここでは計算を容易にするため、内外の被覆材とその間の空気層を「被覆部」としてまとめて単一のサブシステムとみなし、①、②、③の部位についての熱収支式を別々に組み立てた。

土壌の熱容量は大きいいため温度変化に時間がかかる。したがって土壌表面の熱伝導フラックスは、次の非定常熱伝導方程式：

$$C_p \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = K_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

を数値的に解くことによって求めた。ただし、 $T_s(^{\circ}\text{C})$ は土壌温度、 $C_p(\text{kcal kg}^{-1}\text{^{\circ}C}^{-1})$ 、 $\rho_s(\text{kg m}^{-3})$ 、 $K_s(\text{kcal m}^{-1}\text{h}^{-1}\text{^{\circ}C}^{-1})$ はそれぞれ土壌の比熱、密度、有効熱伝導率である。熱伝導計算は x, y 方向の2次元とし、日変化の及ばない深さ（ここでは0.5m、すなわち、 $y = -0.5\text{m}$ の位置とした）では対象地域の日平均気温に保たれること、ハウス斜面方向の上下端から15mはなれた位置（ $x = -15\text{m}, 45\text{m}$ ）では x 方向の温度勾配が無視できること、土壌表面では④、⑤、⑥式が成立する、という境界条件を与え、初期条件は均一とした。

マクロモデルの計算に当たっては、まず、着目日の前日

における時々刻々の気象条件（外気温、日射強度の実測値）を7日間にわたって周期的に入力して、土壌内の非定常熱伝導計算を行い、ハウス内平均気温、被覆部温度、土壌表面温度を算出した。このようにして得られた7日目の土壌内温度分布、被覆部温度、ハウス内平均気温は、数値計算の都合上、便宜的に設定した土壌温度分布の初期条件の影響が取り除かれているので、これらの値を着目日の初期条件とし、その時点から着目日の気象条件（外気温、日射強度）を入力して、0.05hごとに土壌内温度分布、土壌表面温度、被覆部温度、ハウス内平均気温を逐次計算し、その結果をその日におけるマクロモデルによるシミュレーション結果とした。

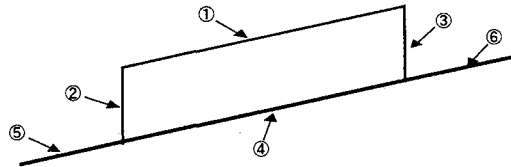
表-1 境界面の熱収支式

被覆部

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad C_{pw1} \cdot \rho_{w1} \cdot \delta_w \cdot \frac{dT_{w1}(j)}{dt} &= q_{sun,w1(j)} - q_{r,w1(j)-o} - q_{s,w1(j)-o} + q_{s,w1(j)-i} + q_{l,w1(j)-i} - q_{l,w1(j)-o} \\ &\quad + \sum_{i=1}^n q_{r,w1(j)-s(i)} + \sum_{k=1}^m q_{r,w1(j)-w2(k)} + \sum_{l=1}^m q_{r,w1(j)-w3(l)} \\ \textcircled{2} \quad C_{pw2} \cdot \rho_{w2} \cdot \delta_w \cdot \frac{dT_{w2}(k)}{dt} &= q_{sun,w2(k)} - q_{r,w2(k)-o} - q_{s,w2(k)-o} + q_{s,w2(k)-i} + q_{l,w2(k)-i} - q_{l,w2(k)-o} \\ &\quad + \sum_{i=1}^n q_{r,w2(k)-s(i)} + \sum_{j=1}^n q_{r,w2(k)-w1(j)} + \sum_{l=1}^m q_{r,w2(k)-w3(l)} + \sum_{ll=1}^{nn} q_{r,w2(k)-s1,out(ll)} \\ \textcircled{3} \quad C_{pw3} \cdot \rho_{w3} \cdot \delta_w \cdot \frac{dT_{w3}(l)}{dt} &= q_{sun,w3(l)} - q_{r,w3(l)-o} - q_{s,w3(l)-o} + q_{s,w3(l)-i} + q_{l,w3(l)-i} - q_{l,w3(l)-o} \\ &\quad + \sum_{i=1}^n q_{r,w3(l)-s(i)} + \sum_{j=1}^n q_{r,w3(l)-w1(j)} + \sum_{k=1}^m q_{r,w3(l)-w2(k)} + \sum_{m=1}^l q_{r,w3(l)-s,out(mm)} \end{aligned}$$

土壌表面

$$\begin{aligned} \textcircled{4} \quad q_{sun,s(i)} &= \sum_{j=1}^n q_{r,s(i)-w1(j)} + \sum_{k=1}^m q_{r,s(i)-w2(k)} + \sum_{l=1}^m q_{r,s(i)-w3(l)} + q_{s,s(i)} + q_{l,s(i)} + q_{so(i)} \\ \textcircled{5} \quad q_{sun,s1,out(ll)} &= q_{r,s1,out(ll)-o} + \sum_{k=1}^m q_{r,s1,out(ll)-w2(k)} + q_{s,s1,out(ll)} + q_{l,s1,out(ll)} + q_{s1,out,o(ll)} \\ \textcircled{6} \quad q_{sun,s2,out(mm)} &= q_{r,s2,out(mm)-o} + \sum_{l=1}^m q_{r,s2,out(mm)-w3(l)} + q_{s,s2,out(mm)} + q_{l,s2,out(mm)} + q_{s2,out,o(mm)} \end{aligned}$$



(2) ミクロモデル

上述のごとく、境界面温度は不均一なため、それと接する空気密度に場所的差異がもたらされ、浮力が生ずる。そして、閉鎖空間である傾斜ハウス内ではその浮力により自然対流が惹起される。この対流によるハウス内の風速、温度分布はミクロモデルにより計算できる。ただし厳密には、ハウス間口方向の温度、風速の変化も考慮した 3 次元的な取扱いが必要だが、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風速、温度の分布が大きく発生しないものと仮定し、斜面方向 (x 方向) とそれに垂直な方向 (y 方向) の 2 次元問題とみなすこととした。

対象ハウスは規模が大きいため、たとえばハウス内の気温差を 1°C とした場合でもグラスホフ数 (Gr) は 1.5×10^{11} であり、Fujii and Imura⁹⁾ の式から見積もった臨界 Gr 数 (1.0×10^6) の値をはるかに越えている。実際の気温差は後述の実験結果からわかるように 1°C 以上であるのでハウス内の空気の流れは明らかに乱流と考えられる。ここでは系が乱流状態にあるときの連続の式、運動方程式および熱収支式を最も簡単な乱流モデルである 0 方程式モデル⁹⁾によって表し、Boussinesq 近似を施すと次のような基礎式が与えられる。

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

$$\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_m \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_m \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} \right) + g\beta \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \sin \theta - \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \cos \theta \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

ただし、 $\bar{u}$ (m h^{-1})、 $\bar{v}$ (m h^{-1}) はそれぞれ斜面方向 (x 方向)、斜面方向に垂直な方向 (y 方向) の時間的に平滑化された風速、 $\bar{T}$ ($^\circ\text{C}$) は時間的に平滑化された気温、 $\bar{\omega}$ (h^{-1}) は渦度 ($= \partial \bar{u} / \partial y - \partial \bar{v} / \partial x$)、 $\bar{\Psi}$ ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$) は流れ関数、 E_m ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$) は渦度分散係数、 E_T ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$) は温度の分散係数、 g (m h^{-2}) は重力加速度、 β (K^{-1}) は空気の体積膨張率、 θ は傾斜角 (rad) を表す。ここで Panofsky and Dutton¹⁰⁾

表-2 粘性底層のパラメータ

k_u	10 m h^{-1}
k_v	10 m h^{-1}
h_{is}	$20 \text{ kcal m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
h_{ss}	$20 \text{ kcal m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

に準じて乱流状態では $E_T = E_m$ とみなすことにする。また、 E_m に及ぼす動粘性係数 ν ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$) の影響は通常小さく E_m は渦動粘性係数 ν_t ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$) にほとんど等しいと考えられる。そして、勝田¹¹⁾によれば、 ν_t は近似的に次式で表される。

$$\nu_t = 0.02 \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

境界では粘性底層の存在を考慮して以下のような境界条件を与える。

$$E_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = k_u \bar{u}, \quad \bar{v} = 0, \quad \bar{\omega} = 0, \quad \bar{\Psi} = 0, \quad \text{at } y=0 \quad (6)$$

$$-E_T C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = h_{ss} (T_s - \bar{T})$$

$$-E_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = k_u \bar{u}, \quad \bar{v} = 0, \quad \bar{\omega} = 0, \quad \bar{\Psi} = 0, \quad \text{at } y=l_y \quad (7)$$

$$E_T C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = h_{ss} (T_{s+1} - \bar{T})$$

$$E_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = k_v \bar{v}, \quad \bar{u} = 0, \quad \bar{\omega} = 0, \quad \bar{\Psi} = 0, \quad \text{at } x=0 \quad (8)$$

$$-E_T C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = h_{ss} (T_{w2} - \bar{T})$$

$$-E_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = k_v \bar{v}, \quad \bar{u} = 0, \quad \bar{\omega} = 0, \quad \bar{\Psi} = 0, \quad \text{at } x=l_x \quad (9)$$

$$E_T C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = h_{ss} (T_{w3} - \bar{T})$$

ただし、 k_u (m h^{-1})、 k_v (m h^{-1}) は粘性底層内の運動量移動に関する係数、 h_{is} ($\text{kcal m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)、 h_{ss} ($\text{kcal m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) は、それぞれ被覆材内面、土壌表面における顕熱対流伝熱係数で、その値は表-2 に示す通りである。また、 C_p ($\text{kcal kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) は空気の比熱、 ρ (kg m^{-3}) は空気の密度、 T_{wi} ($^\circ\text{C}$) は天井被覆部温度、 T_{w2} ($^\circ\text{C}$) は傾斜下部被覆部温度、 T_{w3} ($^\circ\text{C}$) は傾斜上部被覆部温度である。

以上の式を差分法し、適当な初期条件の下で、微小時間刻み Δt ごとに逐次計算を行うことにより、傾斜ハウス内の温度、風速分布の経時的变化を求めることができる。なお、実際のシミュレーションに当たっては、 x 、 y の各方向の距離刻み Δx 、 Δy をそれぞれ 0.2 m 、 0.1 m 、時間刻み $\Delta t = 1.0 \times 10^{-6} \text{ h}$ とし、陽解法により定常安定解を得るまで計算を繰り返した。

4. 結果と考察

(1) 数値モデルの妥当性

晴天日と曇天日における、床下 0.1 m の土壌内温度と被覆部温度 (内張り、外張り被覆材温度、被覆材間の空気温度) の実測値とマクロモデルによる計算値とをそれぞれ図-6、7 に対比して示す。なお、土壌表面温度実測値は 2. で述べたごとく、床下 $0.03 \sim 0.05 \text{ m}$ の位置における温度であるが、熱電対埋め込み位置のわずかな違いで値が大き

く変化し、正確な表面温度の測定が困難だったので、ここではその実測値を参考程度とし、計算結果との比較対象にできなかった。図-6(a), 7(a)によれば土壌内温度は実測値の

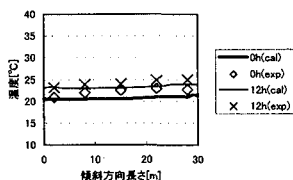
方が最大2℃高くなるものの、斜面方向、高さ方向の変化の傾向はいずれも両者に良好な一致が見られる。一方、図-6(b), 7(b)によれば、被覆部温度の計算値は内外被覆材間の空気層の温度とほぼ一致している。

次に、晴天日と曇天日の夜(0時)と昼(12時)における、ハウス内温度実測値とマイクロモデルによる計算値を対比して図-8, 9に示す。図-8によれば、夜間において計算値は実測値よりも最大約3℃高いが、傾斜方向に緩やかに上昇する傾向は両者でよく一致している。一方、日中は、斜面下端から上端の方向に温度が緩やかに上昇すること、床面からの位置が高いほど温度が高くなることなど、両者は変化の傾向、値ともよく一致している。

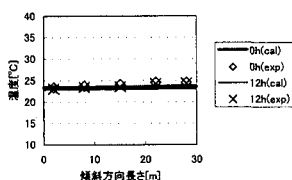
図-9においては全体的にハウス内の温度変化が小さいため、計算値と実測値は図-8の結果よりもさらによく一致している。また、渦動粘性係数を非等方的に与えた場合には、晴天日昼中において水平方向の流れ速度が卓越して、温度差を緩和するように流体混合が起こるため、鉛直方向の温度差も小さく計算され、実験結果から予想できる温度成層を再現できなかったが、等方性を仮定した場合には、床面が低温で、被覆部が高温の条件下では、自然対流の影響が小さいため気流速度が小さくなり、温度成層を再現できた。

晴天日夜間において計算値が実測値よりも高くなった理由としては、モデルに3次元的な放熱項が考慮されていないことと、マクロモデルにおいて土壌表面温度の計算値が実際の値よりも高めの値に見積もられたことが主な原因と考えられる。本節の冒頭で述べたごとく、ここでは正確な土壌表面温度の測定が困難だったため、厳密な考察はできないが、図-3(c)において深さ0.03~0.05mにおける土壌温度実測値は0時において12~17℃であり、実際の表面温度は放射冷却によりこの値よりも小さかったものと思われる。しかし、表面温度の計算値は約17.5℃で、実際の値よりも高めの値を示している。

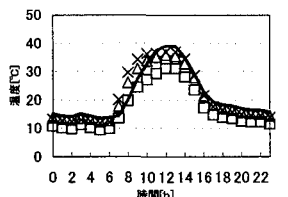
以上の結果から、ここで用いたマクロモデルは、傾斜ハウスの境界に相当する土壌表面温度、被覆部温度のうち、晴天日夜間の土壌表面温度を幾分高く見積もる傾向があるものの、晴天日の日中と曇天日についてはほぼ妥当な境界面温度を予測できることが分かる。一方、実測位置におけるハウス内温度のマイクロモデルによる計算値は、マクロモデルによって求められた土壌表面温度を境界条件に用いている関係で、晴天日夜間において約3℃高めの値を示すが、晴天日日中と曇天日には実測値とほぼ一致しており、ここで導入したミク



(a) 土壌内温度

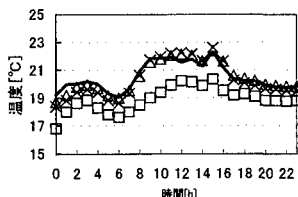


(a) 土壌内温度



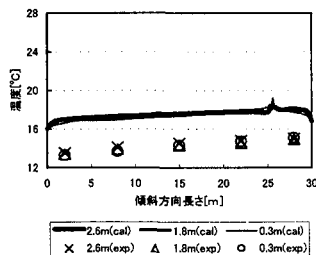
(b) 被覆材温度

図-6 実測値と計算値の比較
(11月6日)

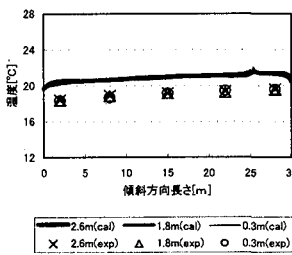


(b) 被覆材温度

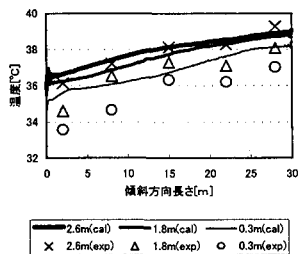
図-7 実測値と計算値の比較
(10月23日)



(a) 0時

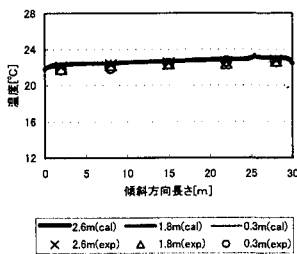


(a) 0時



(b) 12時

図-8 ハウス内温度の実測値と計算値の比較
(11月6日)



(b) 12時

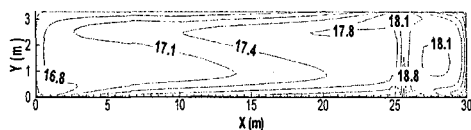
図-9 ハウス内温度の実測値と計算値の比較
(10月23日)

ロモデルは傾斜ハウス内の環境シミュレーションにほぼ有効であるといえる。

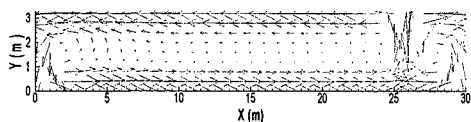
(2) ハウス内温度、風速分布の特徴

モデルの妥当性が確認されたので、図-10、11 に、晴天日、曇天日のそれぞれについて、ハウス内の温度分布と風速分布のシミュレーション結果を示した。図-10 によれば、0 時においては $x=26\text{m}$ の地点を境に回転方向が反対の 2 つの渦が形成され、 $x=26\text{m}$ 付近での上昇流によりこの付

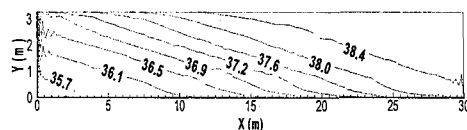
近の温度が最高値を示す。ハウス内斜面方向の最大温度差は約 3°C である。12 時においては図-3 (c), (d) から分かるように被覆部の温度が土壌表面温度よりも高くなるため、平均風速は 0 時の場合の約 $1/9$ と非常に小さく、温度成層が形成される。ハウス内の最高最低温度差は約 4°C である。図-11 によれば、曇天日では 0 時と 12 時で境界面温度がほとんど変化しないため、温度分布、風速分布は両方ともほとんど同様の傾向を示す。また、土壌表面温度が被覆部温度よりも高いため、反時計回りの渦が生ずるが、土



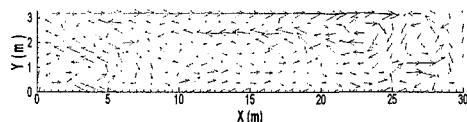
average velocity : 516.6 m h^{-1}



(a) 0時

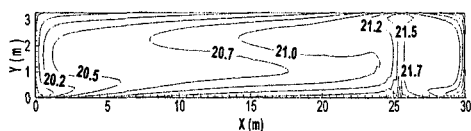


average velocity : 64.1 m h^{-1}

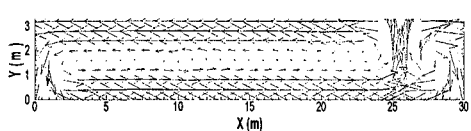


(b) 12時

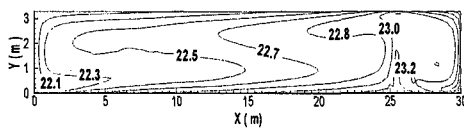
図-10 ハウス内温度分布と風速分布のシミュレーション結果 (11月6日)



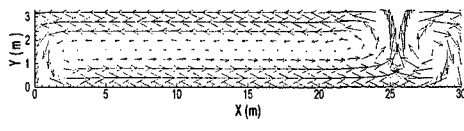
average velocity : 671.0 m h^{-1}



(a) 0時



average velocity : 611.1 m h^{-1}



(b) 12時

図-11 ハウス内温度分布と風速分布のシミュレーション結果 (10月23日)

壤表面温度が最高値を示す $x \approx 26\text{m}$ の位置より上 ($x > 26\text{m}$) では逆に時計回りの渦が生じている。この場合、ハウス内の気温差は約 3°C である。

(3) 傾斜ハウス有効利用の可能性

前節の結果から、ここで実験に使用した北向き斜面の傾斜ハウスでは晴天時に傾斜方向に最大 $3\sim 4^\circ\text{C}$ の有意な気温差が生ずることが理論的にも示された。一方、南向き斜面の傾斜ハウスでは傾斜角が大きくても大きな気温差が生じないという調査結果が報告されている¹²⁾。これは、日射吸収量が被覆部、土壤表面でともに大きくなるため、両者の温度差が大きくなりたためと考えられる。多くの作物の生育適温幅は $2\sim 3^\circ\text{C}$ であることから¹³⁾、傾斜方向に生ずる $3\sim 4^\circ\text{C}$ の気温差は作物生育速度にずれをもたらす可能性が高い。もしそうなら、緒言で述べたように、作物生育時期の分散が見込まれ、高齢農業者の作業労力分散につながる。また、一般にハウス栽培においては作物生育に最適な環境を維持するため、換気による環境調節がなされ、必然的に開放系になる。平地ハウスではファンによって換気が強制的に行われるが、傾斜ハウスでは斜面上昇風を利用することによって、換気のための送風動力コストを削減できる可能性がある。今後、開放系で植栽のある場合についての検討が必要であるが、斜面方向の気温差出現と送風動力軽減という2つの要素が傾斜ハウス有効利用の鍵になるものと考えられる。

5. 結論

北向き斜面に設置された傾斜ハウス内の微気象の特徴とその要因を実験的に把握した後、前報の数値モデルを改良したモデルによりその特徴を定量的に検討した。

ここで用いた数値モデルは、晴天部夜間において土壤表面温度を幾分高く見積もるが、晴天日中と曇天日では実測値とほぼ一致した。また、渦動粘性係数を非等方的な取扱いから等方的な表示に変更したことにより、特に晴天時日中において風速の小さいハウス内における温度成層をうまく再現できたことから、閉鎖型の傾斜ハウス内の環境解析にほぼ妥当であることが指摘された。

実験および計算結果によれば、晴天時に、傾斜方向に最大 $3\sim 4^\circ\text{C}$ 、高さ方向に最大 2.5°C の気温差が生ずること、曇天時には傾斜方向に $0.5\sim 2^\circ\text{C}$ の気温差が生ずるものの、晴天時に比べて気温差は小さく、床面からの高さ方向にはほとんど気温差が生じないことが分かった。これらの微気象は日射量とハウスの向きによって決まる被覆部と土壤表面の温度差によって大きな影響を受けることが分かつ

た。

上記の $3\sim 4^\circ\text{C}$ の気温差は生育適温幅 ($2\sim 3^\circ\text{C}$) 以上の差であり、傾斜方向に生育のずれをもたらす可能性があり、理論的に高齢農業者のための作業労力分散に寄与する可能性が指摘され、傾斜ハウスの有用性が明らかにされた。

今後は、植栽のある開放系を対象としたデータの収集とモデルによる理論計算により、傾斜地の有効利用に関してより詳細に明らかにしていくことが望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会環境システム委員会：環境システム—その理念と基礎手法—、共立出版、pp.48-59、1998。
- 2) 中川昭一郎：日本とアジアにおける傾斜地農業の現状と課題、傾斜地農業維持・発展のための国際研究会講演集、pp.1-17、1996。
- 3) 外山隆夫：中山間地域の農業の現状と課題、中国・四国の農業気象、第11号、pp.102-107、1988。
- 4) 戸澤英男：中山間地農業の発展方向—特に傾斜地における農産物生産—、日本作物学会四国支部紀事、第34号、pp.71-75、1997。
- 5) 菅谷博：傾斜地農業におけるハウス研究、中国・四国の農業気象、第11号、pp.108-110、1998。
- 6) 原藺芳信、矢吹万寿：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1983-1984年度助成研究報告論文、pp.1-162、1986。
- 7) 関平和、木村達郎、宮本暁人、菅谷博、佐々木華織、猪之奥康治：閉鎖型傾斜ハウス内の温度及び速度場のモデル化、農業気象、第57号、第1号、pp.29-40、2001。
- 8) T.Fujii and H.Imura: Natural convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination, Int.J.Heat and Mass Transfer, Vol.15, pp.755-767, 1970。
- 9) 平岡正勝、田中幹也：新編移動現象論、朝倉書店、pp.74-77、1994。
- 10) H.A.Panofsky and J.A.Dutton: Atmospheric turbulence, John Wiley and Sons, 101-106, 1984。
- 11) 勝田高司先生退官記念会：建築における環境調整技術の研究、鹿島出版会、pp.197-198、1978。
- 12) 農林水産省四国農業試験場：場内プロジェクト研究報告集、第3号、pp.39-62、1998。
- 13) 三原義秋：温室設計の基礎と実際、養賢堂、pp.88-101、1980。

ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF A GREENHOUSE IN HILLY AND MOUNTAINOUS AREAS AND POSSIBILITY OF ITS EFFECTIVE UTILIZATION

Hirakazu SEKI, Kenichiro WADA, Yuichi MATSUO and Hiroshi SUGAYA

Characteristics of microclimate in a greenhouse installed on the slope facing north were grasped experimentally, and verified by a mathematical model. On sunny days, a temperature difference of which maximum was 3 through 4 °C was produced along the direction of sloping floor in the house, and the maximum of 2.5 °C in temperature difference was produced in the direction perpendicular to the floor. On cloudy days, there were slight temperature differences in the both directions. These microclimates largely depended on the temperature difference between floor and film, which depended on solar intensity and house orientation. It was pointed out that the above temperature difference of 3 through 4°C is meaningful to the variation in growth rate of plants.

付録 表 - 1 の記号表

C_{pm1}	天井被覆部の平均比熱 (kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹)
C_{pm2}	傾斜上部被覆部の平均比熱 (kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹)
C_{pm3}	傾斜下部被覆部の平均比熱 (kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹)
$q_{L(i)}$	温室内土壌表面上の任意位置 i での水分蒸発に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i),out(l)}$	傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l での水分蒸発に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i),out(mm)}$	傾斜上部の温室外土壌表面上の任意位置 mm での水分蒸発に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{Lw(l)-i}$	天井被覆部上の任意位置 j の内側表面での水分凝縮に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{Lw(l)-o}$	天井被覆部上の任意位置 j の外側表面での水分蒸発に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{Lw(k)-i}$	傾斜下部被覆部上の任意位置 k の内側表面での水分凝縮に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{Lw(k)-o}$	傾斜下部被覆部上の任意位置 k の外側表面での水分蒸発に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{Lw(l)-i}$	傾斜上部被覆部上の任意位置 l の内側表面での水分凝縮に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{Lw(l)-o}$	傾斜上部被覆部上の任意位置 l の外側表面での水分蒸発に伴う潜熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i)-w(l)}$	温室内土壌表面上の任意位置 i から天井被覆部表面上の任意位置 j への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i)-w(k)}$	温室内土壌表面上の任意位置 i から傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i)-w(l)}$	温室内土壌表面上の任意位置 i から傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i),out(l)-o}$	傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l から天空への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i),out(l)-w(k)}$	傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l から傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i),out(l)-w(l)}$	傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l から傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i),out(mm)-o}$	傾斜上部の温室外土壌表面上の任意位置 mm から天空への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{L(i),out(mm)-w(l)}$	傾斜上部の温室外土壌表面上の任意位置 mm から傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-o}$	天井被覆部表面上の任意位置 j から天空への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(i)}$	天井被覆部表面上の任意位置 j から温室内土壌表面上の任意位置 i への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(k)}$	天井被覆部表面上の任意位置 j から傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(l)}$	天井被覆部表面上の任意位置 j から傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(k)-o}$	傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k から天空への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(k)-w(i)}$	傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k から温室内土壌表面上の任意位置 i への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(k)-w(l)}$	傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k から傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(l)}$	傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k から天井被覆部表面上の任意位置 j への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(k)-w(l)}$	傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k から傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-o}$	傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l から天空への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(i)}$	傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l から温室内土壌表面上の任意位置 i への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(l)}$	傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l から傾斜上部温室外土壌表面上の任意位置 mm への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(l)}$	傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l から天井被覆部表面上の任意位置 j への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{cw(l)-w(k)}$	傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l から傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k への長波放射による伝熱量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)
$q_{s(i)}$	温室内土壌表面上の任意位置 i での顕熱伝達量 (kcal m ⁻² h ⁻¹)

$q_{s,1,cat(l)}$	傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,2,cat(mm)}$	傾斜上部の温室外土壌表面上の任意位置 mm での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,w1(j)}$	天井被覆部上の任意位置 j の内側表面での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,w1(j)o}$	天井被覆部上の任意位置 j の外側表面での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,w2(k)i}$	傾斜下部被覆部上の任意位置 k の内側表面での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,w2(k)o}$	傾斜下部被覆部上の任意位置 k の外側表面での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,w3(l)i}$	傾斜上部被覆部上の任意位置 l の内側表面での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,w3(l)o}$	傾斜上部被覆部上の任意位置 l の外側表面での顕熱伝達量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,1,cat,r(l)}$	傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l における地中伝熱量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{s,2,cat,r(mm)}$	傾斜上部の温室外土壌表面上の任意位置 mm における地中伝熱量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{sun,s(i)}$	温室内土壌表面上の任意位置 i での日射吸収量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{sun,s,1,cat(l)}$	傾斜下部の温室外土壌表面上の任意位置 l での日射吸収量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{sun,s,2,cat(mm)}$	傾斜上部の温室外土壌表面上の任意位置 mm での日射吸収量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{sun,w1(j)}$	天井被覆部表面上の任意位置 i での日射吸収量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{sun,w2(k)}$	傾斜下部被覆部表面上の任意位置 k での日射吸収量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{sun,w3(l)}$	傾斜上部被覆部表面上の任意位置 l での日射吸収量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
$q_{so(i)}$	温室内外土壌表面上の任意位置 i における地中伝熱量 ($\text{kcalm}^{-2}\text{h}^{-1}$)
t	時間 (h)
$T_{w1(j)}$	天井被覆部の任意位置 j における温度 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w2(k)}$	傾斜下部被覆部の任意位置 k における温度 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w3(l)}$	傾斜上部被覆部の任意位置 l における温度 ($^{\circ}\text{C}$)
δ_w	被覆部の厚さ (m)
ρ_{w1}	天井被覆部の平均密度 (kg m^{-3})
ρ_{w2}	傾斜下部被覆部の平均密度 (kg m^{-3})
ρ_{w3}	傾斜上部被覆部の平均密度 (kg m^{-3})