

中山間傾斜地における温室環境の有効利用の可能性について

Possibility of effective utilization of greenhouse environment in hilly and mountainous areas

関 平和¹

和田 健一郎¹

菅谷 博²

Hirakazu Seki

Kenitirou Wada

Hiroshi Sugaya

ABSTRACT: It has been pointed out that the growth rate of crops varies along the slope in greenhouses located on the sloping ground and this difference in growth rate might be rather useful to make even farmer's labor load. This suggests a possibility of the reduction of labor load especially for farmers of advanced age. In this paper, mathematical modeling for temperature and velocity fields in the sloped greenhouse was made, and the development of temperature difference between the upper and lower parts along the greenhouse was predicted theoretically. Next, the following results were obtained by comparing the calculated results with the filed data: 1) In the night time, temperature at the lower part along the slope was 1-2 °C higher than that at the upper part, and 2) In a fine day, there was about 3-4 °C difference in temperature in the vertical direction of the sloped greenhouse. Such results will be keystones to find relationships between the crop growth and the environment in sloped greenhouses.

KEYWORDS: Hilly and mountainous areas, Sloped greenhouse, Mathematical modeling, Field data

1 はじめに

従来自然環境保全においては、貴重な自然の保全のみを主眼におき普通の自然に対しては「影響軽微」という表現で切り捨てられることが多かった。このありふれた自然をどのように評価し、どの程度保全していくべきかについての研究は、環境システム分野における非常に重要なテーマとなっている¹⁾。このありふれた自然に対して、農業の果たしてきた役割は大きい。一見自然領域と見えても現実には手つかずの自然は少なく、大部分が半人工自然でその維持には人手が必要であり、その担い手が農業や林業であるからである。しかし近年の近代化・機械化・工業化のなかで、肥料・農薬の多投下、耕地の放棄、森林リゾートの開発等が進み、農業本来の環境保全性が損なわれている。その結果、農業は環境負荷をかけるものであるとする観点に立ち、政府の財政補助は環境負荷を高める集約農業を助長するので、財政補助を全廃すべきであるとの議論もなされている²⁾。農業の環境保全性を損なうものの1つとして、我が国の農地の42%を占める中山間地域における耕作放棄の進行があげられる。中山間地域では、傾斜地が多いなどの立地特性から、平地に比べて耕作の労苦が多く農地の集団化や機械化には限界がある。しかも耕地面積が少ないため収量が少なく零細経営を余儀なくされており、その上若者の流失による高齢化や後継ぎ難から、耕作放棄が進行しているのである。しかし、中山間地域は洪水防止、土壌浸食防止、水源涵養等の優れた公的機能を有しており、その評価額は年間3兆円にもなる³⁾。このような優れた機能を有しているにも関わらず、耕作放棄が進行していることは、環境保全や年々低下していく食料自給率を考えると非常に憂慮すべき問題である。この問題に対処するには、中山間地域に多い傾斜地の特徴を生かした農業技術の確立が重要である。

¹ 金沢大学工学部土木建設工学科 Department of Civil Engineering, Kanazawa University

² 近畿中国四国農業研究センター Kinki, Chugoku and Shikoku agricultural experiment center

本稿で対象とする四国地域は傾斜地農業の割合が高く、そこでは傾斜地に適した作物栽培の方法を案出・適用し、環境保全に配慮した環境を創出しようとの試みがここ数年にわたって行われている⁴⁾。その一つに、傾斜地へのハウス（温室）の設置がある。

傾斜地に設置されたハウス（以下、傾斜ハウスと呼ぶ）では、斜面の上下で温度差が生じ、ハウス内作物の生育速度に場所的なずれが生じることが知られている⁵⁾。生育のずれは収穫等の農作業の時間的分散化を示唆している。実際の傾斜ハウス内の作業では、作物に対して行う作業よりも斜面の移動による労力負担が大きく、このずれは高齢者が多い農業従事者の労力の分散に寄与する。またこの傾斜ハウス特有の斜面上下での温度差を利用した高付加価値作物の生産も検討されている⁶⁾。これらのことは、条件的に不利と考えられてきたこれまでの傾斜地農業のあり方を再検討し、耕作放棄の進行を食い止める可能性を示唆するものである。

本論文では、傾斜ハウス内の微気象の特徴をつかむべく、近畿中国四国農業研究センターで行われた現場実験によるデータからその傾向を分析し、それを数理モデルによるシミュレーションにより理論的に確認した。

2 実験

2.1 実験施設

実験施設となる傾斜ハウスは、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っており、傾斜角は 10 度である。規模は、間口幅 6m、傾斜方向長さ 30m、棟高 3.3m である。被覆材には厚さ 0.1mm の農業用塩化ビニールが使用されている。被覆材は 2 重に張られており、内張りとは外張り被覆材の間隔は 0.3m である。

2.2 実験方法

Fig.1 に示すように、傾斜ハウス下端より 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 3 箇所、計 15 箇所温度を測定した。また、土壌内温度をハウス下端より 2、8、15、22、28m で土壌表面より 0.1m 下の位置で、被覆材温度を傾斜ハウス下端より 15m の地点で測定した。温度の測定は Cu-Co 熱電対で行い、1 分毎にデータロガーによって記録した。

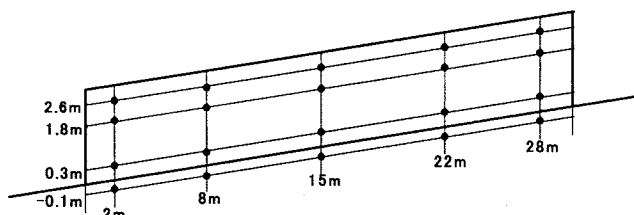


Fig. 1 傾斜ハウス内の温度測定

2.3 測定結果

ここでは快晴時と曇天時において得られた代表的な測定結果について述べる。まず Fig.2 に天候が快晴である 2000 年 11 月 6 日の高さ 2.6、1.8、0.3m のハウス内温度、Fig.3 に各被覆材温度、外気温、日射量を示す。ハウス内温度は各高さともすべての時刻において、傾斜下端から上端にかけて緩やかに上昇しており、1.3～3.4℃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る 11 時から 1 時間遅れて 12 時である。また、夜間は各高さで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高くなるほど温度上昇が大きくなり、高さ方向にも温度分布が生じている。これは Fig.3 に示すように、日射のある昼間に内張り被覆材の温度が非常に高くなるためと思われる。高さ方向の温度差は最大で 2.6℃であり傾斜方向に比べその差は小さい。

次に、Fig.4 に天候が曇りである 2000 年 10 月 23 日の高さ 2.6、1.8、0.3m のハウス内温度、Fig.5 に各被

覆材温度、外気温、日射量を示す。Fig.4 によれば、11月6日とは違い時間の経過によるハウス内温度の変化はほとんど見られない。各高さとも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11月6日に比べて小さく差は最大で1.2℃である。また、昼間においても高さ方向の温度分布は見られない。よってハウスの温度上昇には日射が大きく影響しており、特に高さ方向においては日射がない場合温度差が生じないことがわかる。また両日とも被覆材の温度は外気温に影響されていることがわかる。

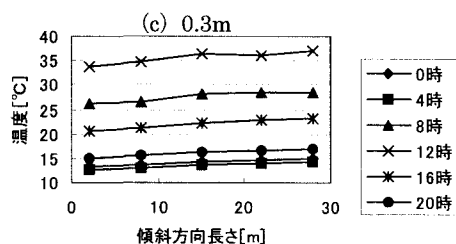
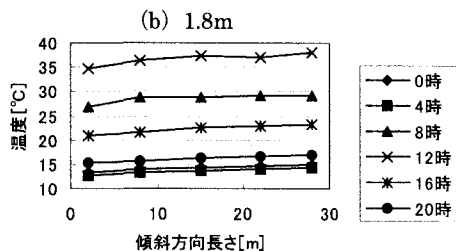
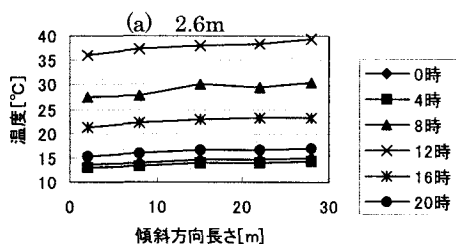


Fig. 2 ハウス内温度 (11月6日)

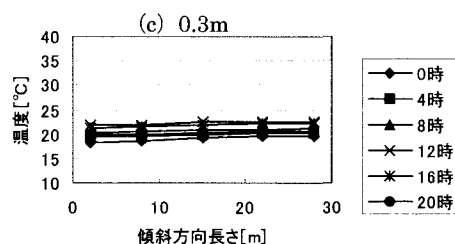
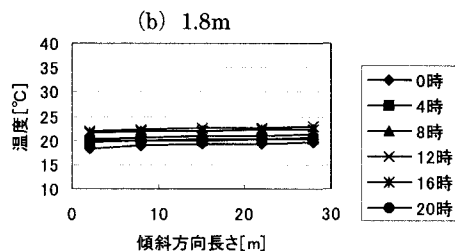
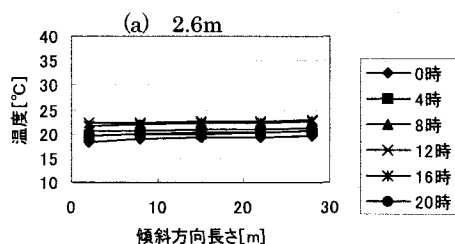


Fig. 4 ハウス内温度 (10月23日)

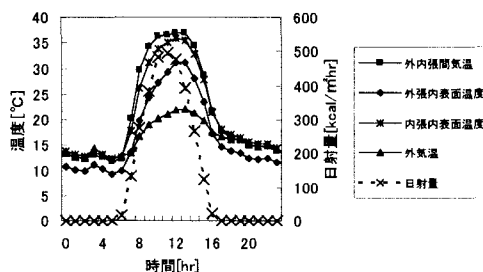


Fig. 3 被覆材・外気温及び日射量
(11月6日)

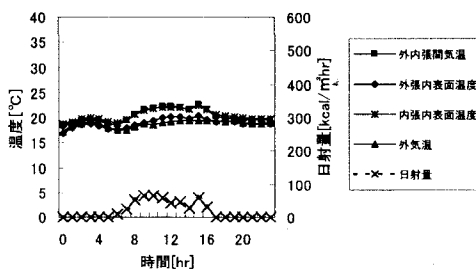


Fig. 5 被覆材・外気温及び日射量
(10月23日)

3 数値モデル

本研究ではハウス内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⁷⁾。ここでは、前者をマクロモデル、後者をマイクロモデルと呼ぶ。マクロモデルはハウス内の土壌表面温度、被覆材表面温度を計算するモデルであり、マイクロモデルはハウス内の速度、温度分布を計算するモデルである。本研究のシミュレーションでは、まずマクロモデルによって境界温度を求め、それを境界値としてマイクロモデルによりハウス内の速度、温度分布を計算した。

3.1 ハウス内環境の巨視的な環境の解法

傾斜ハウス内で生じている不均一な環境をもたらす最たる要因は、ハウス内の土壌表面および被覆材表面での傾斜方向の温度分布である。これらの分布は、日射、長波放射、顕熱、潜熱、土中への熱伝導の釣合によって形成されている。特に、対象としているハウスが北向きであるため、ハウス内土壌表面での到達日射量には大きな分布が生ずる。マクロモデルでは、ハウス内外土壌およびハウス各位置での被覆材のそれぞれについて、それらの要素の熱収支をとることによって境界面温度を算出した。

3.2 ハウス内環境の微視的な環境の解法

ハウスでは土壌と被覆材の日射吸収率や蓄熱量の違いから、被覆材表面と土壌表面で温度差が生じている。その温度差によってそれと接する空気密度の場所的差異がもたらされ、浮力が生ずる。閉鎖系空間であるハウス内において浮力が生じると、それによって自然対流が起こる。マイクロモデルでは、この対流によるハウス内の速度、温度分布を計算するモデルを導出する。

対象ハウスは規模が大きいため、内部の流れは乱流である。乱流運動はナビエ・ストークス方程式に従っている。したがって、本モデルでの乱流運動は連続の式と運動方程式によって表すことができる。また、前述したように、自然対流は温度、密度の場所的差異によって起こるものであり、それらはエネルギー方程式、水分収支式によって表される。以上の方程式に Boussinesq 近似を施し、渦度を導入した式が (1) ～ (5) である。これらは時間均に平滑化したものであり、傾斜方向(x 方向)、傾斜方向に鉛直な方向(y 方向)の時間平均速度を $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、圧力を $\bar{p}$ 、温度を $\bar{T}$ 、水蒸気濃度を $\bar{w}_H$ 、乱流速度変動を u' 、 v' とする。

ただし、 ν_x 、 ν_y は渦動粘性係数で、物性値として与えられるのではなく、乱流運動の様子や流れの履歴によって変化する値である。つまり、渦動粘性係数は乱流の状態に大きく依存する。したがって乱流を解析するにあたり、渦動粘性係数をいかに合理的に与えるかが重要になってくる。

$$\bar{\omega} = \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} \right) \\ & + \left[\frac{1}{\rho_a} \left(\frac{M_a}{M_H} - 1 \right) \frac{\partial w_H}{\partial y} + \frac{1}{T_b} \frac{\partial T}{\partial y} \right] g \sin \theta \\ & - \left[\frac{1}{\rho_a} \left(\frac{M_a}{M_H} - 1 \right) \frac{\partial w_H}{\partial x} + \frac{1}{T_b} \frac{\partial T}{\partial x} \right] g \cos \theta + P \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P = & \frac{\partial \nu_x}{\partial y} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial \nu_y}{\partial y} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \nu_x}{\partial x \partial y} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \nu_y}{\partial y^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \\ & - \left\{ \frac{\partial \nu_x}{\partial x} \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial \nu_y}{\partial x} \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \nu_x}{\partial x^2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \nu_y}{\partial x \partial y} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial \bar{w}_H}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial \bar{w}_H}{\partial y} \right) \quad (5)$$

渦動粘性係数は、乱流運動を支配している速度スケールと長さスケールの2つの特性量によって与えられ、この速度スケールを V 、長さスケールを L と置くと、次元解析より $\nu_t \propto VL$ という関係を得る。

勝田によれば、ハウス規模を考慮すると、(渦動粘性係数) / (吹出速度) ≈ 4.0 という結果があり、この関係より式(6)、(7)が得られる。また、渦動粘性係数は x 、 y 方向で異なるものとして、次式で与えた。

$$\nu_{tx} = 4.0 \times u \quad (6)$$

$$\nu_{ty} = 4.0 \times v \quad (7)$$

以上の方程式を離散化し、差分法によって微小時間刻みごとに逐次計算を行うことにより、傾斜ハウス内の温度、速度分布の経時的変化を得た。このとき、ハウス境界では粘性底層を想定し、境界層での移動抵抗を考慮した条件を与えた。

4 結果と考察

4.1 計算結果

Fig.6~9に11月6日の夜間の代表値として0時、昼間の代表値として12時のハウス内温度、速度分布を示す。0時の温度分布図を見ると下層から上層にむかうにつれ徐々に温度が低くなる層状の分布になっている。傾斜方向で見ると下端から28m付近まで温度が上昇し、28mから30mまでは下降していることがわかる。傾斜方向の最大温度差は 2.0°C である。また、土壌表面付近の温度分布は傾斜上部が高く、境界面温度と同様の分布傾向が現れている。その影響により、Fig.7の速度分布ではハウス内の空気の流れが温度の最も高い位置である28mを境に時計回りと反時計回りの2つの流れが生じている。また12時のハウス内温度分布を見ると、0時と同じように下層から上層にかけて温度が下降する層状の分布になっているが、温度のピークは30m付近にあることがわかる。よってハウス内には反時計回りの1つの渦ができています。これらの結果によると、浮力に対して粘性力が支配的であるため対流の速度が遅く、流れによる温度分布の緩和作用が小さいため、熱の乱流拡散の影響が強く現れたものと思われる。

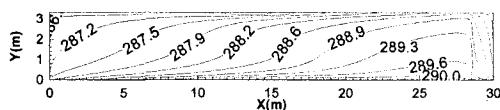


Fig. 6 ハウス内温度分布 (0時)

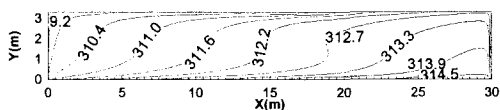


Fig. 8 ハウス内温度分布 (12時)

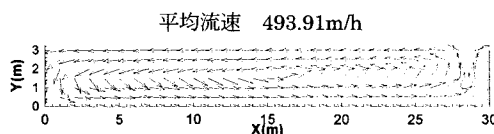


Fig. 7 ハウス内速度分布 (0時)

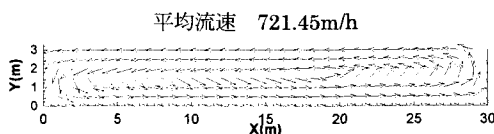


Fig. 9 ハウス内速度分布 (12時)

4.2 計算値と実測値の比較

次に同日の0時と12時のハウス内温度の実測値と計算値の比較をFig.10、11に示す。0時のグラフを見ると、若干の温度の違いはあるものの、計算値・実測値とも傾斜下部から上部にかけて緩やかに上昇するという非常に似た傾向を示している。また、実測値では高さ方向の温度差はほとんどないが、計算値では低いほど温度が高くなる傾向が見られる。これは実測値よりも計算値のほうが被覆材と土壌表面温度の差が大きいためだと思われる。12時のグラフを見ると、22m付近が実測値と計算値でずれが大きいものの、全体的に傾斜方向への温度分布傾向は良く一致しているといえる。高さ方向では、0時とは反対に実測値のほうが温度差が大きい。また、計算値では高さが高くなるほど温度が低くなるのに対し、実測値では逆の傾向がみ

られる。これは、マクロモデルの計算において土壌表面と被覆材表面温度の大小関係が、実際の測定結果と逆転したためと思われる。土壌表面の放射率、被覆材の日射吸収率の見積りに更なる検討が必要と考えられる。

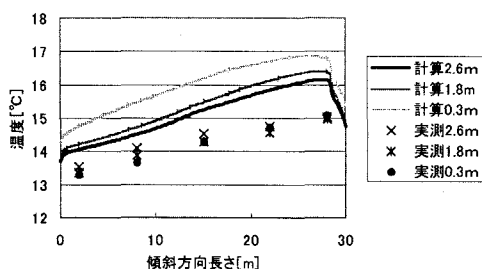


Fig. 10 ハウス内温度比較 (0 時)

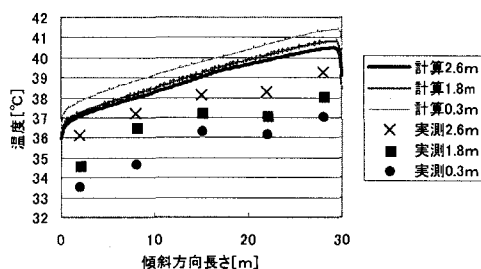


Fig. 11 ハウス内温度比較 (12 時)

4. 3 傾斜ハウスの有効利用の可能性

以上より、特に晴天のときに傾斜方向に有意な温度差が生じることが明らかになった。多くの作物の生育適温幅は2～3℃であり、この温度差は作物の生育速度にずれをもたらすと予想できる。また、ハウス栽培においては作物生育に最適な環境を保つため、換気による環境調節を行わなければならない。平地に設置されたハウスではファンを設置し換気を行っているが、傾斜ハウスでは斜面上昇風の影響で妻面の開放だけでも換気が促進され、平地に設置されたハウスに比べ温室の設置、メンテナンスにかかる費用を少なくすることができる。よって、ハウス内で生じる傾斜方向の温度差および妻面の開放による環境調節を上手く利用すれば、傾斜ハウスを有効利用できる。このことは、ひいては傾斜地の耕作放棄の進行を食い止め、環境の保全に寄与できるものと思われる。

5 おわりに

傾斜ハウス内の微気象の傾向とその要因をつかむため、現場実験を対象に傾向を分析し、数値モデルによりその要因を確認した。その結果、快晴時に傾斜方向に最大約3～4℃、高さ方向に最大約2.5℃の温度差が生じること、日射が無いときには高さ方向には温度差が生じないが、傾斜方向には0.5～2℃の温度差が生じること、ハウス内の微気象には被覆材とハウス内土壌表面の温度差および日射量が大きな影響を及ぼすことがわかった。以上のことは作物生育にずれを生じさせ、傾斜ハウスを有効利用できることを示唆する。今後は外部の風速が内部環境に及ぼす影響、湿度の影響を検討する予定である。

<参考文献>

- 1) 土木学会環境システム委員会：環境システムーその理念と基礎手法ー，共立出版，p48，1998.
- 2) 環境保全型農業研究連絡会：環境保全型農業研究連絡会ニュース No.10，1996.
- 3) 農林水産省農業総合研究所：農業・農村の公益的機能の評価結果，1998.
- 4) 戸澤英男：中山間地農業の発展方向ー特に傾斜地における農産物生産ー，日本作物学会四国支部紀事，34，pp71 - 75，1997.
- 5) 菅谷博：傾斜地におけるハウス研究，中国・四国の農業気象，11，pp108 - 110，1998.
- 6) 菅谷博・佐々木香織・猪之奥泰治・竹沢あかね・川嶋浩：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，pp332 - 333，1997.
- 7) 関平和・木村達郎・宮本暁人・菅谷博・佐々木香織・猪之奥泰治：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，57，pp29 - 40，2001.