棟傾斜の異なる農業用ハウスにおける気温分布

由比 進^{*,†}・岡田益己^{**}・片岡 園^{***}・本城正憲^{****}

(^{*}岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センター(滝沢農場) 〒020-0611 岩手県滝沢市菓子1552)
^{**}岩手大学農学部 〒020-8550 岩手県盛岡市上田三丁目18-8
^{***}農研機構 野菜花き研究部門 〒514-2392 三重県津市安濃町草生360
^{****}農研機構 東北農業研究センター 〒020-0198 岩手県盛岡市下厨川字赤平4)

Distribution of air temperature in the greenhouses with different ridge-roof inclinations

Susumu YUI^{*,†}, Masumi OKADA^{**}, Sono KATAOKA^{***}, Masanori HONJO^{****}

(^{*}Field Science Center, Faculty of Agriculture, Iwate University. 1552 Sugo, Takizawa, Iwate 020-0611, Japan.
^{**}Faculty of Agriculture, Iwate University. 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan.
^{***}NARO Institute of Vegetable and Floricultural Science. 360 Kusawa, Ano, Tsu, Mie, 514-2392 Japan.
^{****}NARO Tohoku Agricultural Research Center. 4 Akahira, Shimo-Kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0198, Japan.)

Abstract

We developed a greenhouse with an inclined-ridge roof designed to accelerate the movement of rising air across the roof slope, and to enhance greenhouse ventilation. In this study, distributions of air temperatures of 3 m wide and 10.8 m long plastic greenhouses with different ridge-roof inclinations (horizontal ridges, inclined-ridge of 2.7°, 5.3° or 7.9°) were investigated. The upper parts of the two gable-ends on each greenhouse were opened for ventilation. The average air temperature was the highest in the greenhouses with horizontal ridges, and gradually decreased as the ridge inclination increased. An air temperature gradient was clearly observed along the long axis in the inclined-ridge greenhouses; the air temperature was lower on the lower roof side. This temperature gradient is probably due to air movement from the lower to the higher-roof side caused by natural ventilation, which can be enhanced by the ridge inclination.

Key words: Distribution, Inclined, Ridge, Temperature, Ventilation

キーワード: 温度, 換気, 傾斜, 分布, 棟 (むね)

1. はじめに

ビニルハウス、ガラス温室などの園芸施設（以下、ハウスと略記）は、温度を外気より高く保って生育を促進させるため、すなわち低温期に生育適温を確保することを目的に開発され、活用されてきた。一方で、冬以外の日射量の多くなる季節には、換気が不十分であることに由来する高温から、労働環境や植物の生育に悪影響が生じることがしばしばである（近畿中国四国農業研究センター, 2010）。天窓による換気は効果的であるが、安価なパイプハウスの場合、天窓はハウス全体の経費と比較して高額になるため、設置していない場合が多い。また、長いパイプハウスや連棟ハウスでは、両妻面や側面に開口部を設けても十分な換気が行えず、高温障害を誘発することがある。さらに、施設栽培トマトの場合、近年はタバココナジラミが媒介する黄化葉巻病（TYLCV）を防除するために開口部すべてを目合い0.4 mm以下のネットで被覆することが推奨されているが（Sase and Christianson, 1990；野菜茶業研究所, 2009；本多, 2009）、これによって換気量がさらに低下する事態も生じている（松浦ら, 2008）。気象変動による温度上昇が懸念される現在、換気不良による高温障害の危険性はさらに高まっており、夏季を中心とした昇温防止対策の向上が強く求められている。

換気はハウス内気温上昇を抑える重要な手段であり、自然換気、強制換気を組み合わせた各種手法が導入されてき

た。パイプハウスでは屋根部分を大きく開放できるフルオープンハウスも開発されているが、降雨時の閉め忘れ・閉め遅れや強風に対する強度の不安もあって広範な普及には至っていない。一方、地形を活かした換気の例では、四国中山間地などの傾斜畑において地面の傾きに沿って建てた傾斜ハウスの換気が良好であることが知られている。例えば、関ら（2001）は、閉鎖型傾斜ハウスに関わる数学的モデルを提唱し、実測値との比較考察を行い、傾斜角の増大が必ずしも温度差増大にはつながらないことを指摘している。また、川嶋ら（2007a）は、傾斜ハウスが平坦地のハウスより換気能力に優れることを示した。さらに、川嶋ら（2007b；2011）は傾斜地の平張型ハウスとアーチ型ハウスの比較検討を行っている。これら傾斜地のハウスでは、棟（屋根の最も高い部分）の傾斜が地面の傾斜とほぼ平行に建てられるのが通例で、この傾斜が換気を促進していると考えられる。本報においては、これら地形にあわせた傾斜ハウスと異なり、平坦地に設置したハウスの棟に地面と平行でない傾斜を付けることにより、換気を促進して内部温度を低下させる可能性を検討した。

2. 材料および方法

図1の平面図に示した、間口3 m × 長さ10.8 mのパイプハウス5棟を用いた（東北農業研究センター内、北緯39°45'54", 東経141°07'58"）。正確な棟方位は東北東-西南西であるが、以下、南北側面あるいは東西妻面などと呼ぶ。直径22 mmパイプを地面に挿して骨組みを作り、0.1 mm厚POフィルムを軟質フィルム止め用具で展張した。また、南北両側面に巻き取り式開口部を設置した。ハ

2016年4月19日 受付, 2016年6月24日 受理

*Corresponding Author: yuis@iwate-u.ac.jp

DOI: 10.2480/cib.J-17-032

図1. 棟傾斜ハウス（3棟）および対照ハウス（2棟）の平面配置.

図2. 棟傾斜ハウスおよび対照ハウスの立面図と寸法（X, Yの妻面高さとしZの棟傾斜角度は、ハウスによって異なる。表1を参照）。

ウス各所の寸法や角度などを図2および表1に示した。すなわち、3棟は棟に傾斜を付けたハウスで、その角度はそれぞれ、 2.7° （緩傾斜）、 5.3° （中傾斜）、 7.9° （急傾斜）であった。また、棟傾斜のない通常のハウス（対照A、対照B）を、傾斜ハウスの南側および北側に1棟ずつ配置した。これら5棟を、少なくとも周囲3mに障害物がなく、南側のプランター置き場（高さ0.25m）を除いて7m以内には他の構造物がない平地に配置した（図1）。測定期間中、すべてのハウスについて、9時～15時の間は周囲の構造物や樹木による影がかかることはなかった。いずれのハウスについても、側面の巻き取り式開口部をすべて閉じて試験を行った。また、ハウスの東側および西側の妻面上部に、図2に示した開口部を設けた。開口部は、下辺が2.2m、中央の高さが0.8mの三角弓形とした。気温の測定には、岡田・中村（2010）の方法に準じて作製した通風式放射よけと、標準温度計を用いて校正を行った温度計（エスバックミックス株式会社、サーモレコーダー RT-11 および RT-12）、計16個を用いた。図2に示したように、ハウス西端から1.2m、

表1. 棟傾斜ハウスおよび対照ハウスの妻面高さとし棟の傾斜角度.

ハウスの種類	西妻面の高さ X (m)	東妻面の高さ Y (m)	棟の傾斜 Z (度)
対照A・対照B	2.4	2.4	0
緩傾斜	1.9	2.4	2.7
中傾斜	1.9	2.9	5.3
急傾斜	1.9	3.4	7.9

同5.4m（ハウス中央）、同9.6m（ハウス東端から1.2m）の3カ所、高さ1.5mでハウス内の気温測定を行った。また、外気温は、地上高1.5mに設置した自然通風式放射よけ内で測定した（図1）。2008年8月22日から9月16日の間の20測定日、11時00分～12時59分まで1分間隔に計120回の測定を行い、その平均値を日ごとの気温とした。全天日射量並びに風速については、東北農業研究センター気象観測露場（ハウスから南南東約1.5km）で観測された気象データを用いた。

3. 結果および考察

20 測定日の観測時間中の全天日射量は $133\sim 808\text{ W m}^{-2}$ 、風速は $1.0\sim 4.5\text{ ms}^{-1}$ であった。全天日射量と風速との間には弱い正の相関 ($r=0.68$) があり、日射量が小さいときほど風速が小さい傾向にあった。最多風向は、15 測定日で南-西南西、5 測定日で北西-北北東であった。

表 2 に、20 測定日平均の内外気温差をハウスごとおよび気温測定点（西妻面からの距離）ごとに比較した結果を示す。いずれの測定位置においても、ほぼ「対照 A > 対照 B > 緩傾斜 > 中傾斜 > 急傾斜」の順に室内気温が高く、傾斜が急なほど室内気温は低かった。表 2 で測定位置別にデータを見ると、すべてのハウスで西妻面に近い測定点 (1.2 m) の気温が低く、その傾向は棟傾斜が急なほど著しくなった。

図 3 に対照ハウス (A・B の平均) および急傾斜ハウスの平均内外気温差 (3 測定点の平均) と全天日射量の関係を示した。温室換気の熱収支式 (岡田, 1986) によると、内外気温差はハウス内の吸収日射量に比例し、換気率に反

表 2. ハウスと気温測定点ごとに比較した内外気温差 (20 測定日の平均)。

西妻面からの距離 (m)	対照 A (°C)	対照 B (°C)	緩傾斜 (°C)	中傾斜 (°C)	急傾斜 (°C)
1.2	4.9	4.5	3.9	3.4	3.1
5.4	6.0	5.7	5.7	5.5	5.2
9.6	5.2	5.3	5.1	5.2	4.9
平均 (°C)	5.4	5.2	4.9	4.7	4.4

図 3. 対照ハウス (A・B の平均) および急傾斜ハウスの内外気温差と全天日射量の関係 (内外気温差は、3 測定点の平均)。

表 3. 対照ハウス (A・B の平均) および傾斜ハウスの全天日射量 (x) と内外気温差 (y) の回帰式 (内外気温差は、西・中・東 3 測定点の平均)。

ハウスの種類	回 帰 式	寄与率 (R^2)
対 照	$y = 2.56x + 0.79$	0.945
緩 傾 斜	$y = 2.32x + 0.84$	0.925
中 傾 斜	$y = 2.33x + 0.62$	0.937
急 傾 斜	$y = 2.23x + 0.49$	0.935

比例する。図 3 は 2 種類の実験ハウスの内外気温差が日射量にほぼ比例することを示すとともに、急傾斜ハウスの換気率が対照ハウスに比べて大きいことを意味する。さらに表 3 に示したように、緩傾斜ハウス、中傾斜ハウスにおいても内外気温差と全天日射量の間には高い寄与率の回帰直線が得られ、それぞれ対照ハウスと急傾斜ハウスの間に位置した。また、回帰直線の傾きの間には高い有意差 ($p<0.001$) が認められ、対照 > 緩傾斜 = 中傾斜 > 急傾斜の順であり、傾斜が急であるほど換気率が大きく気温の低くなる傾向が認められた。

対照ハウスでは、棟傾斜ハウスに比べて浮力による室内空気の流れが起こりにくい。それにも関わらず東側の気温よりも西側の気温がやや低くなったのは、屋外の風が西開口部からより多くハウス内に入ったためと考えられる。測定中の最多風向は、大半が南-西南西であった。また図 1 に示すとおり、ハウスの棟方位は東北東-西北西である。このため南寄りの風が、西 (正確には西南西) 妻面の開口部から入りやすかったと考えられる。そこで屋外風の影響がなければ対照ハウスの気温が各測定位置で等しくなり、さらにその影響がすべてのハウスに共通に現れると仮定した。すなわち傾斜ハウスの気温と対照ハウス (2 棟の平均値) との差を求めると、屋外風の影響を差し引いた気温分布を得られるはずである。この考えに加えて、さらに 20 測定日を全天日射量の大小で 3 つに区分、すなわち日射量小 (400 W m^{-2} 未満)、日射量中 ($400\sim 700\text{ W m}^{-2}$) および日射量大 (700 W m^{-2} 以上) に分けて解析を進めた。図 4 に、

図 4. 対照ハウス (A・B の平均) と傾斜ハウスとの測定点別の気温差 (日射量大は 700 W m^{-2} 以上、日射量中は $400\sim 700\text{ W m}^{-2}$)。

日射量中 ($400\sim700\text{ Wm}^{-2}$) と日射量大 (700 Wm^{-2}) 以上のときの対照ハウス (A・B の平均) と傾斜ハウスとの測定点別の気温差を示した。日射量小の図は省略したが、内外気温差が小さい点を除くと、日射量中および大と同じ傾向であった。この図から明らかなように、棟傾斜の影響は、西側で顕著に現れ、傾斜が大きいほど気温が低かった。これらの傾向は日射量が大きいほど顕著であった。

緩傾斜ハウスでは、中央部の気温が東側よりもわずかに高くなったが、中傾斜および急傾斜ハウスでは、気温は西から東にかけて滑らかに上昇した。このことは中・急傾斜ハウスで、棟の低い方 (西) から高い方 (東) に向かって、ハウス内で温まった空気の浮力による流れが滑らかに起こっていることを示す。こうした一方向の流れによってハウス内に気温勾配が生じることは、温度勾配チャンバーの例を含めよく知られた現象である (Okada *et al.*, 1995)。緩傾斜ハウスでは、この浮力による流れが弱かったため、一部に気温の逆転が起きたと考えられる。

4. 結 論

以上のように、棟傾斜ハウスにおいてはハウス全体の気温が通常の水平棟ハウスよりも低く保たれることが明らかとなり、これは棟の低い側から外気が流入し、高い側から室内空気が流出する自然換気が促進されたためと考えられた。

棟傾斜が大きいほど気温が低いことは、浮力に伴う換気率が大きいことを示すが、棟傾斜ハウスでは室内空気が一方向に流れるため、室内の気温分布 (気流方向の気温勾配) が拡大する。均一な作物の生長を考えると、気温勾配をできるだけ小さくする必要がある。今回の実験は、棟傾斜の効果を明瞭に示すことが第一の目的であったため、側窓をすべて閉じ、また妻面開口部をすべてのハウスで同じ大きさとした。換気効率を高めながら気温勾配を小さくするための側窓や妻面開口部の位置や大きさ、植物の有無が与える影響などを、さらに明らかにする必要がある。また、実際に棟傾斜ハウスを建てるには、部材や労力の点からコスト高になる可能性が高い。棟傾斜ハウスの普及に向けて、これらの課題を解決する必要がある。

5. 摘 要

農業用ハウスの棟 (むね) を傾斜させ、浮力によって換気能力を向上させる「棟傾斜ハウス」を考案した。その温度環境特性を明らかにするために、棟傾斜の異なる 4 種類のハウスを用いて試験を行った。大きさが $3\text{ m} \times 10.8\text{ m}$ で、緩傾斜 (2.7°)、中傾斜 (5.3°)、急傾斜 (7.9°) の角度に設定した 3 棟の棟傾斜ハウスと、傾斜のない対照ハウスについて、両妻面上部に開口部を設け、2008 年 8 月から 9 月の 20 測定日に 11 時 00 分～12 時 59 分までハウス内外の気温を測定した。ハウス内外気温差は「対照>緩傾斜>中傾斜>急傾斜」の順であり、傾斜が急なほどハウス内気温が低かった。また、棟傾斜ハウスにおいては、天井の最も低い側の気温が低かった。これらの結果から、棟傾斜ハウスにおいては、傾斜が急になるほど天井の低い側から高い側に向けた自然換気が促進されて、通常のハウスより室内気温が低くなることを明らかにした。

謝 辞

本試験を行うに当たり、東北農業研究センター業務第 1 科員の桑原政治、佐々木猛、佐藤卓見、木村力也、契約職員の百足眞理子、沖節子、櫻井由香里、岩渕恵子、以上の諸氏始め、多くの方々からお力添えをいただいた。また、東北農業研究センター川方俊和上席研究員から東北農業研究センター気象観測データを提供していただいた。ここに記して、謝意を表する。なお、本研究成果の一部は特許化されている (由比ら 2013, 特許第 5182862 号)。

引用文献

- 本多健一郎, 2009: トマト黄化葉巻病と媒介コナジラミ, 防除をめぐる研究情勢と問題点. 農研機構野菜茶業研究所, 津, pp.115-122.
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/vt_s_3_4-5.pdf
- 川嶋浩樹・野中瑞生・長崎裕司, 2007a: 換気または加温による傾斜ハウス内の温度変化と温度分布の特徴. 農業生産技術管理学会 **14**(1), 55-60.
- 川嶋浩樹・野中瑞生・長崎裕司, 2007b: 平張型傾斜ハウスにおける換気時の温度特性. 農業生産技術管理学会誌 **14**(1), 61-66.
- 川嶋浩樹・野中瑞生・長崎裕司, 2011: 平張型傾斜ハウスにおける温風の送風条件が加温時の温度分布に及ぼす影響. 農業生産技術管理学会誌 **17**(4), 117-123.
- 近畿中国四国農業研究センター, 2010: 平成 22 年度農政課題解決研修「野菜の高温障害対策技術」研修テキスト. 農研機構近畿中国四国農業研究センター, 福山, 55 pp.
https://www.naro.affrc.go.jp/training/files/reformation_txt2010_c18.pdf
- 松浦昌平・星野 滋・谷本展枝, 2008: 施設トマトにおける極細糸防虫ネットによるタバココナジラミ (バイオタイプ Q) と黄化葉巻病 (TYLCV) の防除効果. 日本植物病理学会報 **74**(1), p. 65.
- 岡田益己, 1986: 温室の温度環境. 農業気象・環境学 (長野敏英・大政謙次編), 朝倉書店, 東京, 135-150.
- Okada M, Hamasaki T, Hayashi T, 1995: Temperature gradient chambers for research on global environment change. I. Thermal environment in a large chamber, *Biotronics* **24**, 85-97.
- 岡田益己・中村浩史, 2010: 温度の正しい測り方 (1) 通風式放射よけの作り方. 生物と気象 **10**, A-2.
<http://www.agrmet.jp/sk/2010/A-2.pdf>
- Sase S, Christianson LL, 1990: Screening greenhouses-some engineering considerations. *Proceedings of the 1990 Northeast agricultural biological engineering conference*, 1-13.
- 関 平和・木村達郎・宮本暁人・菅谷 博・佐々木華織・猪之奥康治, 2001: 閉鎖型傾斜ハウス内の温度および速度場のモデル化. 農業気象 **57**(1), 29-40.
- 野菜茶業研究所, 2009: トマト黄化葉巻病の総合防除マニュアル, 農研機構野菜茶業研究所, 津, 12 pp.
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/naro-se/tomato_yellow_leaf_manual_h215.pdf