赤外線遮へい材で被覆された温室の熱的性能

田中逸夫・石井征亜

岐阜大学農学部

Thermal Performance of a Greenhouse Covered with
Shading Material against Infrared Rays

Itsuo TANAKA and Yukitsugu ISHII

Faculty of Agriculture, Gifu University, Gifu 501-11, Japan

Infrared rays contained in the solar radiation are well known to contribute little to photosynthesis of plants and convert easily into heat in a material absorbed. Thus, the exclusion of infrared rays with covering materials of greenhouses is expected to be an effective method to enable greenhouse culture during a high temperature period and cut down the cooling load of greenhouses.

In this study, the thermal characteristics of a greenhouse covered with a new selective absorber of infrared rays which has been commercialized were measured from summer to autumn. The following results were obtained by comparisons of these characteristics with those measured in the same scale glasshouse during the same period.

1) The effect of the present covering material on suppression of temperature rise in a greenhouse with all windows closed was small for inside air but considerable for soil surface of floor.

2) The reason for the small effect on inside air temperature was that over-all heat transfer from inside air to outside air was weakened by temperature rise of the covering materials due to absorption of infrared rays.

3) Under the condition of natural ventilation with all windows open, the effect was less for inside air but relatively large for soil surface.

4) The covering material also affected leaf temperature and the effect on suppression of temperature rise in lettuce leaf under solution culture increased with increasing solar radiation.

(Received September 13, 1993)

1993年9月13日受付

緒 言

高温期の日中における温室内過高温化を抑制する技術の開発は、温室の周年利用を促進するうえで重要な課題であり、これまで多くの研究が進められてきている。しかし、経済的に可能な高温化抑制法や冷房方式は、十分な遮光が行えるものやパッドアンドファンなどの蒸発冷却法による冷房が可能な一部の作物を除いて、まだ十分に確立されていない状況にある¹⁾。そのため最近では温室内全体を冷房することなく植物体近傍のみを冷房する

局所冷房の研究^{2,3)}も行われており、省エネルギー技術として大いに期待されている。

他方、光合成に寄与しない赤外線（熱線）を効率よく遮断する物質を温室の被覆材に使用し、室内の熱負荷を軽減することによる高温化抑制法も原理的には有効な方法であると考えられる。この方法に基づいた研究は比較的古くから行われている⁴⁾。その中で注目されるものとして“fluid-roof solar greenhouse”というものがあり活発な研究も行われている⁵⁻⁹⁾。これは塩化第二銅や硫酸銅の水溶液を赤外線の吸収物質として用い、硬質プラスチックフィルム製の二重屋根内にそれら水溶液を循環さ

せる方式のものであり、日中は屋根を太陽集熱器として機能させ蓄えた熱を夜間の加温に利用するシステムになっている。したがって昼夜の温度較差の大きい地域においては、省エネルギー技術として有効であると思われる。しかし、二重屋根内に液を循環させる方式では、温室を大型化するうえでの構造的な問題や保守面での問題があるため特殊な場合を除いてわが国での実用化は困難であると思われる。そのため、このような液体の屋根循環方式に替わる赤外線遮断技術や被覆材の開発は重要であり、とくに太陽光を利用する植物工場などの高度環境制御温室の実用化にとっては大きな課題となっている¹⁰⁾。

そこで、著者らは最近開発された液封タイプの赤外線選択吸収被覆材に注目し、その性能と実用化の課題を解明することを目的として研究を進めている。従来、被覆材に吸熱ガラスなどの赤外線吸収体を用いる場合には高温化した被覆材からの熱線の再放射により室内の昇温抑制効果はなくなる¹¹⁾とされているが、本被覆材は赤外線吸収体として比熱の大きい水溶液を使用しているので既存の吸熱ガラスに比べて被覆材の高温化が抑えられる可能性がある点に特長がある。本報告では、この被覆材を使用した温室の熱的な性能を測定した結果について述べる。

材料および方法

1. 供試被覆材

供試した被覆材はタバイエスベック(株)製(商品名=赤紫外線遮へいフィルタ)で、単体の標準寸法は 610×

Fig. 1 Cross-section of covering material used as an absorber of infrared rays.

Fig. 2 Spectral transmittance of the covering material under study in comparison with those of existing covering materials.

914 mm、厚さ 9 mm である。この被覆材は、Fig. 1 にその断面図を示したように、2 枚の普通ガラス(厚さ 3 mm)の間にスペーサーガラスを介して 3 mm の空間を設け、そこに赤外線の吸収体である金属イオン水溶液(無色透明)を封入した構造となっている。Fig. 2 にその分光透過特性¹²⁾を普通ガラスおよび既存の吸熱ガラスの特性¹³⁾と比較して示した。波長 0.4~0.7 μm の範囲の光合成有効放射域での透過率は普通ガラスとほぼ同程度であり、約 0.76 μm 以上の波長域(赤外線)に対する透過率はかなり小さく、その大部分を吸収することから、既存の吸熱ガラスに比べて日射に対する選択透過特性が非常によいことがわかる。

2. 温室の形状

実験には屋外に設置した同一形状の温室 2 棟を用いた。そして西側には供試被覆材を全面に使用したもの(以後供試温室とよぶ)を、東側には厚さ 3 mm の普通ガラスを使用したもの(以後ガラス温室とよぶ)を 5 m の間隔で配置して特性の直接的比較に用いた。これらの温室は、間口 3.3 m、奥行 5.0 m、棟高 3.1 m、軒高 2 m の大きさの南北棟で、はねあげ式の連続した側窓(上下 2 段)と天窓が装備されている。ただし、両温室とも床面は土壌のまま特別な施工はなされていない。

3. 温室内熱特性の測定方法

供試温室の熱特性を把握するために、温室内各部の温度および被覆材内表面における熱流束を測定した。測定は表面と平行な一断面内で Fig. 3 に ●、○ 印で示した個所について行った。温度センサーとして K 熱電対(山里産業製、デュブレックスワイヤー)を用い、素線先端を鉗付けして測温部とした。被覆材(ガラス)内表面温度の測定には素線径 0.3 mm のものを用い、測温部を厚さ 0.15 mm のリボン状に加工してガラス面に張り付けて使用した。空気温度の測定には素線径 0.65 mm のものを使用した。なお、太陽からの輻射熱吸収による

Fig. 3 Measuring points of temperature and heat flux in a greenhouse.

温度測定誤差を防止するために、これらの測温部付近はアルミ板で遮光した。土壌表面温度の測定は素線径 0.65 mm のものを使用し、測温部を床面に設置しその上を土壌で薄く覆った。外気温の測定は送風機の吸込み口に直径 150 mm、長さ 250 mm のアルミ円筒を水平北向きに接続し、円筒内に素線径 0.65 mm の熱電対を設置して通風状態で行った。また、熱流束の測定には長さ 80 mm、幅 20 mm、厚さ 1.7 mm の熱流計（英弘精機製、CN-9LT）を用い、それを被覆材内表面に張り付けて行った。なお、温度測定部と同様にこの部分はアルミ板で遮光した。屋外全天日射量の測定は全天日射計（英弘精機製、MS-62）を用いて行った。これら各センサーの熱起電力の測定と記録はデータロガー（エー・アンド・ディ製、AD5312）を用いて 10 分間隔で行った。

本測定は 1990 年 6 月から 12 月にかけて繰り返し行い、測定期間中の温室内には植栽などはいっさいなく、床面は乾燥状態であった。また、温室の状態は密閉状態および上下側窓と天窓を全開にした自然換気状態の二つに設定した。密閉状態を設定した理由は冷房時の負荷や被覆材からの放熱特性を把握するためである。

4. 植物葉温の測定実験および方法

植物体温に及ぼす効果を調べるために、1991 年 10 月～11 月にサラダナの水耕栽培を行いその葉温を測定した。サラダナを選んだ理由は、葉温を測定するのに適した形態をしていることおよび根圏の温度制御が容易な水耕栽培が行えることである。栽培には NFT 水耕装置を自作して用いた。栽培面は 3 m×0.9 m の大きさ（M 式水耕パネル（葉菜用 D）5 枚使用）で床面から 0.8 m の高さに設置した。養液は A 処方により作製し EC、pH を適切に管理するとともに、養液温度は養液タンク内に設置した温度調節器により 20°C に制御した。室内気温の調節は自動窓閉装置による自然換気のみで行い、設定温度は 25°C とした。なお、遮光はいっさい行わなかった。

葉温の測定には前記した被覆材内表面温度測定用と同一の素線径 0.3 mm の K 熱電対を用い、サラダナの外葉裏面に測温部を固定して行った。測定点数は無作為に選んだ 10 個体 10 カ所である。また栽培面上 20 cm の空気温度および屋外全天日射量も同時に測定した。

実験結果および考察

1. 温室内の熱特性

1.1 密閉状態下の熱特性

Fig. 4 に密閉状態における温室内の空気温度と土壌表面温度の経時変化を両温室間で比較して示した。ただし、室内空気温度は床面上 0.5 m から 1.7 m の高さ

Fig. 4 Comparison of inside air and soil surface temperatures between both greenhouses measured with all windows closed.

までの範囲（この範囲では垂直・水平方向温度分布は $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内でほぼ一樣になっていることを確認している）で測定した 9 カ所の空気温度の平均値であり、以後の図中の室内空気温度についても同様に処理したものである。同図より、床面である土壌の表面温度については、温度測定点に生じる温室構造物の影の影響で大きな変動を示しているが、高温期においては供試温室のほうが 10°C 以上も低くなる傾向がみられ日射量が減少する 11 月においても $7\sim 8^{\circ}\text{C}$ 低くなるのがわかる。したがって、供試被覆材による昇温抑制効果は土壌表面については顕著に表れるといえる。しかし、室内空気温度に関しては最大でも 5°C 程度であり、日射量の低下に伴い効果はほとんどなくなっていく。このように、供試被覆材による昇温抑制効果が土壌表面温度に対しては比較的大きく生じるにもかかわらず室内空気温度に対してはほとんど生じないことの原因として、被覆材から室内への放熱の影響が考えられる。そこで Fig. 5 に被覆材内表面温度についての測定結果を両温室間で比較して示した。当然のことながら、供試温室の被覆材内表面温度のほうが高温となっており、とくに直達日射に対する入射角が小さい部位での高温化が著しく普通ガラスより 10°C 程度高くなっている。また、この測定は Fig. 4 の上段に示した測定と同時に行ったものであるが、供試被覆材の内表面温度は土壌表面温度や室内空気温度以上になることはない。Fig. 6 に東側面および屋根の被覆材内表面における熱流束の測定結果を示した。なお、同図は

Fig. 5 Comparison of inner surface temperature of covering materials between both greenhouses measured with all windows closed.

Fig. 6 Comparison of heat flux at inner surface of covering materials between both greenhouses measured with all windows closed.

室内から外部への熱流の方向を正にとって表したものである。供試温室における熱流束すなわち室内空気から被覆材への熱伝達はガラス温室に比べて少なく、とくに屋根部では半分以下に減少していることがわかる。これらの結果から、供試温室室内空気温度に昇温抑制効果が生じない原因は被覆材の高温化に起因した室内空気と被覆材間での伝達熱量の低下によるものといえる。したがって、被覆材の高温化防止策を検討することが重要な課題となる。

1.2 自然換気下の熱特性

Fig. 7 に上・下側窓および天窓を全開（開口幅 40 cm）

Fig. 7 Comparison of inside air and soil surface temperatures between both greenhouses measured under the condition of natural ventilation with all windows open.

にして自然換気を行った場合の温度の経時変化を示した。自然換気下では密閉時に比べて室内空気温度は大幅に低下して外気温に近づくとともに、両温室間での差異は高温期においてもほとんどなくなる傾向となる。しかし、土壌表面温度には空気温度ほど大きな低下がみられず、両温室間の差異も顕著に表れている。このことから、無空調温室での土壌栽培における根圏温度の過度の上昇を防止したり土壌からの蒸発量を軽減するうえで本被覆材使用の効果は大きいと考えられる。

2. 葉温に及ぼす効果

Fig. 8 に供試温室およびガラス温室内で測定したサラダナの葉温を、同一時刻における室内空気温度との差、すなわち葉気温差に変換して示した。なお、測定時のサラダナは定植後 23 日目のものであり、同図中には無作為に選んだ 4 葉について示した。また、同図の上段には室内空気温度および屋外全日射量を示した。温室構造物などの影響で測定点に影ができることなどにも起因して葉温の変動がみられるが、葉気温差はガラス温室室内では最大 8°C 程度に達しているのに対して供試温室室内では 3°C 程度であり、葉温にも比較的顕著な差が生じている。そこで本被覆材の効果を定量化する一つの試みとして、Fig. 9 に定植後 13 日～31 日の間に行った計 5 日間の測定結果を葉気温差と屋外日射量の関係で示した。一般に葉気温差は飽差や風速などにも影響されるが、屋外日射量と比例する傾向がうかがえ、日射量の増加と

Fig. 8 Comparison of temperature difference between lettuce leaf and inside air measured in both greenhouses.

Fig. 9 Relationship between leaf-air temperature difference and total solar radiation in comparison with both greenhouses measured for 5 days during the period from Oct. 29 to Nov. 16 in 1991.

Each dot in the figure corresponds to one measurement done every 10 min.

もに赤外線除去効果が葉気温差に大きく表れてくることがわかる。植物葉における赤外線吸収率は波長が約 $1.2 \mu\text{m}$ 以下の範囲では 0.1 以下の非常に小さい値であるが、それよりも長波長側では急増する傾向にあり、 $1.5 \mu\text{m}$ 付近では 0.6 程度に達し $2 \mu\text{m}$ 以上になるとほぼ 1 に近くなる¹⁴⁾。したがって、日射に含まれる $1.5 \mu\text{m}$ 以上の波長成分の割合は比較的少ないにもかかわらず、赤外線の除去効果が葉温にも比較的大きく表れてくると考えられる。

摘 要

温室の周年利用を促進するためには、高温期における

日中の温室内高温化の抑制を経済的に可能な方法で行う必要がある。しかし、この課題は十分に達成されていない現状である。そこで本研究では、光合成に寄与しない赤外線を選択的に遮へいすることによって温室内高温化を抑えるとともに冷房負荷を軽減することを目的として、近年開発された赤外線遮へい被覆材を用いた温室の熱的な特性を実測した。その結果以下のことが明らかとなった。

1) 密閉状態下での供試被覆材による高温抑制効果は、室内空気温度については最高でも 5°C 程度と比較的小さいが、床面である土壌表面の温度には比較的大きく表れる。

2) 室内空気から被覆材への熱伝達大幅に低下するためである。

3) 換気窓を開放して自然換気を行う場合には、室内空気温度は外気温に近づくとともに高温抑制効果もなくなるが、土壌表面温度には比較的大きな効果が生じる。

4) 植物体温の昇温抑制効果を調べるために、秋季にサラダナの水耕栽培を行いその葉温を測定した結果、葉温にも効果が生じ、日射量の増加とともにこの効果は顕著となることがわかった。

本研究により得られた知見をもとに、冷房負荷の測定や栽培実験を行い諸特性を明らかにするとともに、本被覆材を効果的に使用するための方策を検討することが必要である。

本研究の遂行にさいしてタバイエスベック(株)および同社取締役事業開発部長小倉東一氏に種々のご援助と助言を賜ったことを記して感謝の意を表します。また卒業研究と関連して本研究に協力いただいた多くの本学部卒業生にあらためて謝意を表します。

文 献

- 1) 小澤行雄・内藤文男. 1993. 「園芸施設学入門」105-109, 川島書店, 東京.
- 2) KOJIMA, K. and H. SUHARDIYANTO. 1991. Studies on the zone cooling system in greenhouse (1). Performance of the system in a model-sized greenhouse. *Environ. Control in Biol.* 29: 1-10.
- 3) 趙 日煥・仁科弘重・田中基司・橋本 康. 1992. 自然光利用型植物工場の夏期昼間の局所冷房—トマトの尻腐れとの関連も含めて—. *植物工場学会誌* 4: 30-39.
- 4) MORRIS, L. G., E. S. TRICKETT, F. H. VANSTONE, and D. A. WELLS. 1958. The limitation of maximum temperature in a glasshouse by the use of a water film on the roof. *J. Agric. Eng. Res.* 3: 121-130.

- 5) CHIAPALE, J. P., J. DAMAGNEZ, and P. DENNIS. 1976. Modification of a greenhouse environment through the use of a collecting fluid. *Acta Hort.* **76**: 219-228.
- 6) VAN BAVEL, C. H. M. 1978. Projecting crop growth in a fluid-roof solar greenhouse. *Acta Hort.* **87**: 301-310.
- 7) VAN BAVEL, C. H. M. and J. DAMAGNEZ. 1978. A simulation model for energy storage and savings of a fluid-roof solar greenhouse. *Acta Hort.* **76**: 229-236.
- 8) VAN BAVEL, C. H. M., J. DAMAGNEZ, and E. J. SADLER. 1981. The fluid-roof solar greenhouse: Energy budget analysis by simulation. *Agric. Meteorol.* **23**: 61-76.
- 9) CHIAPALE, J. P., C. H. M. VAN BAVEL, and E. J. SADLER. 1983. Comparison of calculated and measured performance of a fluid-roof and a standard greenhouse. *Energy Agric.* **2**: 75-89.
- 10) 高辻正基. 1989. 植物工場の意義と課題. *植物工場* **1**: 9-19.
- 11) 三原義秋. 1972. 「施設園芸の気候管理」105-106, 誠文堂新光社, 東京.
- 12) タバイエスベック(株). 赤紫外線遮へいフィルタ. カタログ No. 89710.
- 13) 日本太陽エネルギー学会編. 1978. 「太陽エネルギーの基礎と応用」65, オーム社, 東京.
- 14) 戸荻義次監修. 1972. 「作物の光合成と物質生産」29-34, 養賢堂, 東京.