

地中熱交換方式による施設暖房の

実用化に関する研究 (第3報)

二層カーテンおよび複合環境制御方式を用いた場合の
暖房特性について

佐々木皓二・板木 利隆・高橋 基

K. SASAKI, T. ITAGI and M. TAKAHASHI

Studies on solar greenhouse heated by means of an
earth storage heat exchange system. III.

Heating properties in the greenhouse provided with
the double layer thermal screens and controlled by
means of multi-variable control of environmental
factors.

I 緒 言

前報^(10, 11)まで、本暖房装置を天井一層、サイド二層のカーテン装備をしたビニルハウスに取り入れて暖房性能を検討した結果、温風暖房機を併用し、本装置の作動時間を限定した運転方法では、最大15°Cに及ぶ内外気温差を得たが、単用運転では最大13°Cで、目標の15°Cには暖房熱量がやや不足した。しかし、内部保温や装置の改善をはかればトマトに対しては本装置だけで十分暖房可能と判断された。

1979年に、前報までの試験に供試してきたビニルハウス2棟のうち片側吹き込み方式を備えた1棟をガラス室に更新し、それとともに内部保温効果を高めるためカーテン装置を天井、サイドとも二層にし、また地中熱交換装置の埋設パイプも増して性能を向上させ、さらに昼夜の温度管理についても改善を加え、特に日射量に応じた変夜温度管理を可能にした複合制御方式を組み入れた。

このように本報では、試験施設や地中熱交換装置および温度制御に大幅な改善をはかり、その場合における暖房性能や気象特性およびトマトの生育・収量に及ぼす影

響について明らかにしようとした。

本試験は、1979年から実施したが1981年までの3か年にわたる成績をとりまとめて報告する。

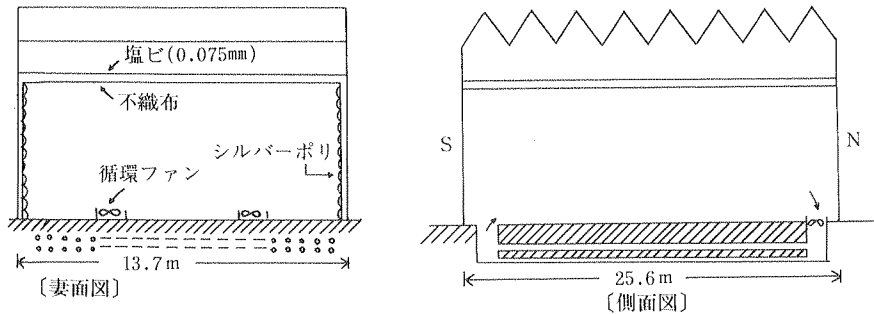
II 材料および方法

1. 供試施設、地中熱交換装置およびその運転方法

供試施設は第1図に示したとおり床面積352 m²、保温比0.63のフェンロー型ガラス室で、カーテン装置は天井塩ビ(上面) + 不織布(下面)、サイドは塩ビ(内側) + シルバーポリ(外側)とした。

地中熱交換装置は内径10cm、肉厚2.5mmのポリエチレンパイプを第1報⁽¹⁰⁾の成績をもとに前年より12列増して合計46列とした。その結果、全長は1058m、パイプ表面積400 m²、床面積比1.14となった。循環ファンは1979～80年は第1報と同一の200V、400W、定格風量90 m³/minの有圧ファンを、1980～81年は地中熱交換専用型として開発された有圧ファン(地交G、200V、400W、90 m³/min)を用い、ともにガラス室北側に2基取り付けられた。吹出口は南側に設け、側溝型式とした。

換気および蓄熱・放熱設定温度は第2図に示したとお



第1図 供試施設と地中熱交換装置

りである。午前(8.00~12.00)は30°C、午後(12.00~17.00)は28°C以上で天窓換気を行ない、また9.30~10.00の30分間は室温20°C以上において天窓を全開させて室内空気の交換を行なった。日中の蓄熱開始設定温度は20°Cとし、夜間は12~11~6~10°Cの4段階の変温管理とした。この場合、17.00~21.00、21.00~23.00の前夜半設定温度は第1表に示したように当日の日射量の多少によって4段階に変動させた。

天窓の開閉、ファンのON—OFF、カーテンの開閉はすべてマイクロコンピューター(山武ハネウエル製)を用いて制御した。

2. 温度・湿度・炭酸ガス濃度調査および蓄熱・放熱量の算出

気・地温の測定は、室内中央、ファン吸気口、吹出口、地中のパイプ側壁から水平に10cm離れた点および室外の高さ1.5mにおける測点について行なった。また、1980~'81年にはファン吸気口と吹出口の湿球温度も測定した(ただし無通風)。温度は多点式サーミスター自記温度計を用いて測定し、また相対湿度は通風式自記温

湿度計を用い、室内中央部で測定した。炭酸ガス濃度は赤外線ガス分析計を用い、同一場所で測定した。

蓄熱量・放熱量の算出は顕熱交換量について、循環風量×空気比熱×吸気口と吹出口との温度差×時間の式から求めた。また、1980~'81年は、潜熱交換量についても $H_F = (0.24 \cdot \Delta\theta_F + \gamma \cdot \Delta X) G$ (ただし、 H_F は潜熱交換量、 $\Delta\theta_F$ は出入口気温差、 γ は蒸発潜熱、 ΔX は出入口絶対湿度差、 G は風量)の式(5)から求めた。

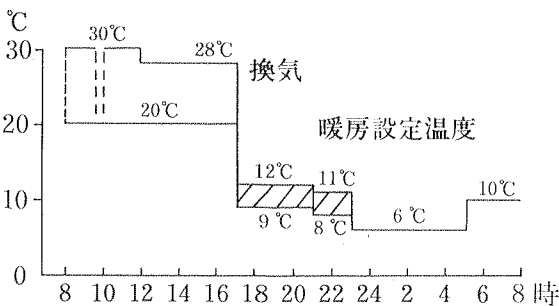
3. 供試作物および耕種概要

1979~'80年はトマト'ほまれFR'を用い、10月1日には種し、12月6日に定植した。栽植距離は平均うね幅110cm、株間35cmとし、ベッドには透明マルチをした。1980~'81年はトマト'ほまれFR'他5品種を用い、10月1日には種し、12月6日に定植した。栽植距離は前年と同一とした。両年とも6段果房まで収穫した。

III 成績

1. 循環風量

各パイプの吹出口毎に風速を調査したところ、1979~'80年は平均風速5.9m/secで、総循環風量は127m³/minとなり、定格風量(静圧0mm H₂Oにおける風量)の約70%に相当した。1980~'81年は平均風速6.8m/secで、



第2図 換気およびファン作動設定温度

第1表 日射量と前夜半設定温度

| 日射量 cal·cm ² /day | 17.00~21.00 °C | 21.00~23.00 °C |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| 180~240 | 12 | 11 |
| 120~180 | 11 | 10 |
| 60~120 | 10 | 9 |
| 0~60 | 9 | 8 |

循環風量は147 m³/minとなり、定格風量の81%であった。

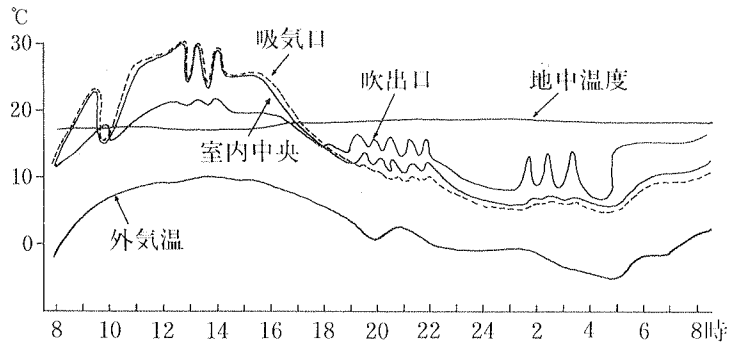
2. 暖房性能・温度特性

第2表に1979～'80年における施設内外各位置の温度、温度差、蓄熱・放熱量および集熱効率を示した。本装置の暖房性能を示す指標である室内最低気温および内外気温差は、暖房設定温度が10℃で外気温が最も低下する5.00～8.00の時間帯で表わした。

本装置の暖房性能は著しく向上し、室内最低気温は設定温度の10℃をほぼ確実に維持しており、10℃を保持できなかったのは最低外気温が-5℃以下の数日間だけでしかも設定温度をわずか0.1～0.5℃下回った程度であった。外気温が0℃以下の日における内外気温差は10～15.7℃となり、本試験の当初の目標であった単用運転による15℃を達成させることができた。また、暖房設定温度が6℃の時間帯はもとより、17.00～23.00の前夜半の時間帯においても設定温度以下になることはなかった。

第3図に晴天日におけるハウス内外各位置の温度経時変化の1例を示した。日中の室

内気温はほぼ設定値どおりに推移し、午前8時以降次第に上昇して11～12時には30℃に達し、午後は天窓がたびたび開いて22～28℃の範囲で変動をくり返した。日中ファンは連続的に作動し、その運転時間は5～6時間の場合が多かった。夜間も室内気温は設定値に従った温度変化を示した。ファンの運転時間は外気温の高低によって一定せず、前夜半および早朝加温時間帯はほぼ確実に作動するが、6℃設定時間帯は作動しない場合が多く、作動しても短時間であり、本施設の保温性能が高いことを示している。



第3図 各位置の温度変化(1980.2.14～15)

第2表 暖房効果, 蓄熱・放熱量および集熱効率(1980年)

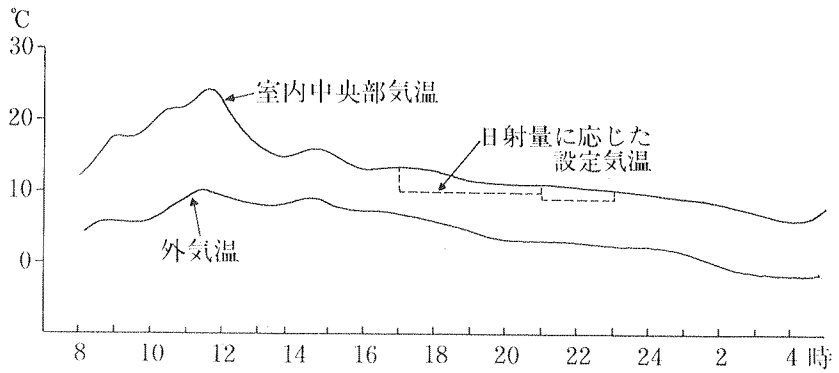
| 月 日 | 最低外気温 ℃ | 最低室温 ℃ | 内外気温差 ℃ | 地中温度 ℃ | 吹出口気温 ℃ | 蓄熱量 kcal | 放熱量 kcal | 室内到達日射量 kcal | 集熱効率 % |
|----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-------------|-------------|-----------------|-----------|
| 1月17～18日 | -4.9 | 10.0 | 14.9 | 17.5 | 14.5 | 82,200 | 57,800 | 500,300 | 16.4 |
| 18～19 | -5.4 | 9.8 | 15.2 | 17.4 | 14.0 | 94,900 | 62,100 | 490,800 | 19.3 |
| 20～21 | -2.9 | 11.3 | 14.2 | 17.8 | 14.5 | 105,900 | 28,200 | 541,000 | 19.6 |
| 21～22 | -4.9 | 10.8 | 15.7 | 18.0 | 14.6 | 79,100 | 35,400 | 533,900 | 14.8 |
| 24～25 | -5.5 | 9.9 | 15.4 | 17.5 | 14.5 | 100,300 | 52,700 | 543,400 | 18.5 |
| 25～26 | -5.4 | 10.0 | 15.4 | 17.5 | 14.3 | 121,500 | 52,900 | 584,100 | 20.8 |
| 26～27 | -4.6 | 10.5 | 15.1 | 17.7 | 14.5 | 113,800 | 48,300 | 529,100 | 21.5 |
| 2月1～2日 | -3.8 | 10.5 | 14.3 | 17.6 | 15.6 | 109,300 | 86,300 | 598,500 | 18.3 |
| 5～6 | -3.7 | 11.3 | 15.0 | 19.1 | 15.6 | 59,900 | 36,900 | 474,000 | 12.6 |
| 6～7 | -2.5 | 11.7 | 14.2 | 18.5 | 15.5 | 37,500 | 18,600 | 416,600 | 9.0 |
| 11～12 | -3.5 | 11.2 | 14.7 | 18.5 | 15.6 | 105,100 | 29,800 | 670,300 | 15.7 |
| 12～13 | -2.3 | 10.7 | 13.0 | 18.5 | 15.6 | 105,200 | 29,100 | 591,300 | 17.8 |
| 14～15 | -4.0 | 10.0 | 14.0 | 18.0 | 14.6 | 121,900 | 59,000 | 723,000 | 16.9 |
| 15～16 | -5.1 | 10.0 | 15.1 | 17.8 | 14.5 | 76,500 | 74,400 | 514,700 | 14.9 |
| 16～17 | -5.1 | 10.0 | 15.1 | 17.3 | 14.6 | 81,800 | 66,900 | 598,500 | 13.7 |
| 17～18 | -5.9 | 9.5 | 15.4 | 17.5 | 14.2 | 119,200 | 54,600 | 711,000 | 16.8 |

一方、第4図に示したように、曇雨天日は夜間の外気温がさほど低下しないため、前夜半の室内気温が設定値まで下らず、従って

日射量に応じた夜温管理という複合制御の確実な適用にはならなかった。

また、第2表に示したように地中温度は12月～2月では17～19℃の範囲で推移し、吹出口気温はそれより3～3.5℃低く、14～15.5℃の温風が得られた。日中の蓄熱量は天候によ

って当然異なるが、晴天日には8～12万kcalが確保され、室内へ透過した日射量に対する集熱効率は15～20%であ



第4図 曇雨天日における温度経時変化 (1980.2.21～22)

第3表 カーテン被覆条件の違いと暖房性能・蓄熱・放熱量 (1980～'81)

| カーテン条件 | 月 日 | 最低外気温 °C | 室内最低気温 °C | 内外気温差 °C | 地中温度 °C | 吹出口気温 °C | 蓄熱量 kcal | 放熱量 kcal |
|--------|-----------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 二層 | 12月29～30日 | -4.4 | 10.2 | 14.6 | 18.7 | 15.0 | 124,000 | 52,900 |
| | 30～31 | -4.7 | 10.1 | 14.8 | 18.7 | 15.0 | 113,400 | 61,500 |
| | 31～1月1日 | -4.4 | 9.9 | 14.3 | 13.8 | 15.0 | 128,800 | 47,200 |
| | 1月3～4日 | -1.8 | 10.3 | 12.1 | 18.8 | 15.3 | — | 46,300 |
| | 4～5 | -5.2 | 9.7 | 14.9 | 19.0 | 14.9 | 151,800 | 54,500 |
| | 5～6 | -5.8 | 6.7 | 15.5 | 19.0 | 14.9 | 146,000 | 57,200 |
| 一層 | 1月6～7日 | -4.0 | 8.7 | 12.7 | 18.3 | 14.3 | 114,500 | 118,300 |
| | 7～8 | -5.8 | 8.3 | 14.1 | 18.0 | 14.0 | 125,800 | 112,900 |
| | 8～9 | -4.2 | 8.7 | 12.9 | 18.0 | 14.0 | 122,600 | 96,300 |
| | 9～10 | -0.5 | 10.2 | 10.7 | 18.1 | 14.6 | 126,400 | 58,300 |
| | 10～11 | -3.9 | 9.1 | 13.0 | 18.3 | 14.2 | 126,300 | 59,600 |
| | 11～12 | -6.1 | 7.8 | 13.9 | 17.8 | 13.5 | 81,200 | 129,700 |
| 二層 | 12～13 | -6.4 | 7.6 | 14.0 | 17.5 | 13.0 | 124,800 | 138,800 |
| | 1月14～15日 | -6.1 | 8.7 | 14.8 | 16.7 | 13.3 | 128,900 | 97,100 |
| | 17～18 | -4.2 | 10.2 | 14.4 | 17.4 | 14.0 | 132,600 | 52,900 |
| | 18～19 | -4.4 | 9.5 | 13.9 | 17.5 | 13.8 | 103,800 | 40,200 |
| | 20～21 | -4.9 | 9.7 | 14.6 | 17.5 | 13.6 | 68,100 | 38,600 |
| | 21～22 | -5.6 | 9.0 | 14.6 | 17.4 | 13.5 | 84,300 | 41,300 |
| 一層 | 22～23 | -7.2 | 8.7 | 15.9 | 17.3 | 13.4 | 121,900 | 76,200 |
| | 1月26～27日 | -6.4 | 6.0 | 12.4 | 16.5 | 12.0 | — | 96,900 |
| | 27～28 | -3.8 | 8.0 | 11.8 | 16.0 | 12.5 | 86,100 | 105,600 |
| | 28～29 | -2.1 | 8.9 | 11.0 | 16.3 | 13.2 | 115,900 | 23,700 |
| | 29～30 | -5.1 | 8.4 | 13.5 | 16.4 | 12.5 | 144,900 | 93,100 |
| 30～31 | -2.4 | 9.1 | 11.5 | 16.2 | 13.1 | 85,700 | 75,500 | |

った。これに対し、夜間の放熱量は最大で約9万kcalであり、ほとんどの日において放熱量が蓄熱量にまさることはなかった。曇雨天日では蓄熱がまったくないかごくわずかであるが、そのような日は放熱量も少なく多くの場合3万kcal以下であった。

第3表に翌年の1980~'81年における暖房性能、蓄熱・放熱量を示した。前年は、夜間は常にカーテンを二層被覆にして試験を行なったが、次年は一定期間毎にカーテンを一層及び二層をくり返して暖房性能の違いをみた。

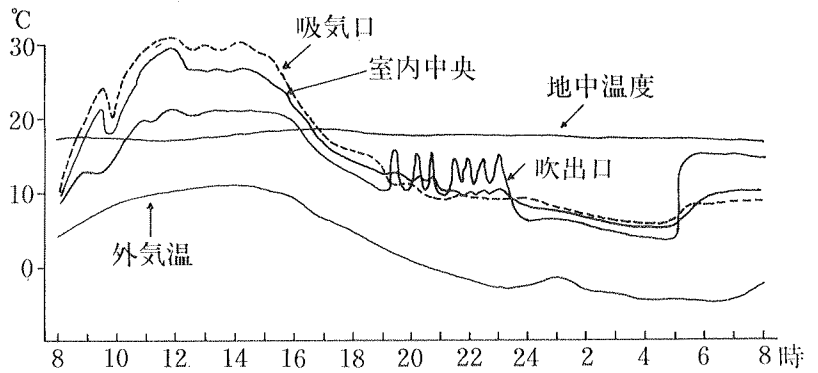
カーテン二層被覆の場合、最低外気温が-5℃までは前年同様室温をほぼ10℃に維持することができ、10℃以下になっても0.1~0.5℃程度で、内外気温差は最大15.9℃であった。しかし、カーテン一層被覆では、最低外気温が-2℃以下の場合、室温は6~9℃となり10℃保持が困難となった。しかし、最低外気温が-5℃までは室温が8℃以下になることはなかった。内外気温差は最大で14.1℃であった。

地中温度は、カーテン二層被覆の場合同一温度を保持しているが、一層ではやや低下する傾向にあった。また蓄熱量は日中カーテンが開放されて室内状態は同一なので晴天日にはともに10~15万kcal得られているが放熱量はカーテン二層被覆では4~9万kcalであるのに対し、一層被覆では6~13万kcalとなり、最低外気温が近似した日で比較すると約1.5倍に増大している。

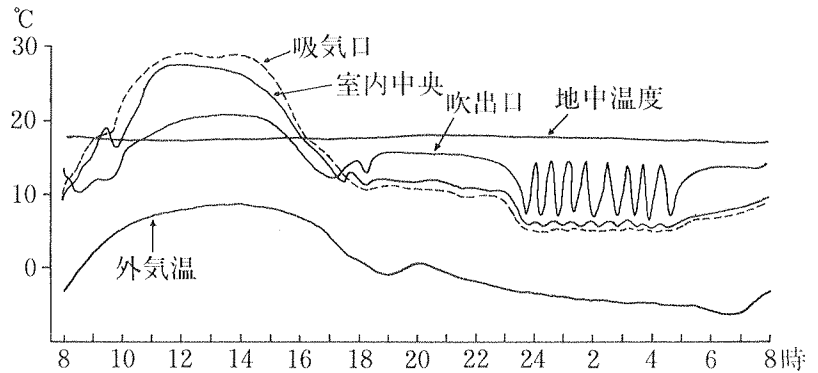
第5~6図にカーテンが一層、二層被覆における施設内外各位置の温度経時変化の例を示した。カーテン二層被覆の場合、室内気温は日中、夜間とも設定値どおりに推移している。夜間、ファンは室温と外気温の温度差が大きい17.00~23.00および5.00~8.00の時間帯は作動するが、6℃設定の時間帯は作動しないことが多かった。この時間帯でファンが作動するのは外気温

第4表 暖房負荷に対する地中熱交換装置の寄与割合(1981年1月22~23日)

| 時刻 | 外気温 | 室温 | 暖房負荷 ^① | 放熱量 ^② | A/B | 地中伝熱量 |
|-------|------|------|-------------------|------------------|------|------------------------|
| | ℃ | ℃ | kcal/h | kcal/h | % | kcal/m ² ·h |
| 17~18 | 1.1 | 13.0 | 15,980 | 0 | 0 | 45.4 |
| 18~19 | -1.0 | 12.5 | 18,130 | 2,960 | 16.3 | 43.1 |
| 19~20 | -1.8 | 12.3 | 18,930 | 4,450 | 23.5 | 41.1 |
| 20~21 | -2.5 | 12.0 | 19,470 | 9,000 | 46.2 | 29.7 |
| 21~22 | -2.5 | 11.2 | 18,400 | 4,760 | 25.9 | 38.7 |
| 22~23 | -2.7 | 11.1 | 18,530 | 9,100 | 49.1 | 26.8 |
| 23~24 | -2.5 | 8.5 | 14,770 | 0 | 0 | 42.0 |
| 24~1 | -2.9 | 7.0 | 13,290 | 0 | 0 | 37.8 |
| 1~2 | -4.1 | 5.5 | 12,890 | 0 | 0 | 36.6 |
| 2~3 | -5.0 | 5.5 | 14,100 | 2,060 | 14.6 | 34.2 |
| 3~4 | -5.8 | 6.0 | 15,850 | 2,750 | 17.4 | 37.2 |
| 4~5 | -6.4 | 6.0 | 16,650 | 3,440 | 20.7 | 37.5 |
| 5~6 | -6.2 | 8.5 | 19,740 | 15,350 | 77.8 | 12.5 |
| 6~7 | -6.3 | 8.5 | 19,870 | 15,080 | 75.9 | 13.6 |
| 7~8 | -4.9 | 9.0 | 18,660 | 14,020 | 75.1 | 13.2 |
| 計 | | | 255,260 | 82,970 | 32.5 | 32.6 |



第5図 各位置の温度経時変化(カーテン二層, 1981.1.4~5)



第6図 各位置の温度経時変化(カーテン一層, 1981.1.~12~13)

が -4°C 以下の時であった。これに対し、カーテン一層被覆では、夜間ファンが作動を始める時刻が早く、また外気温が $-2^{\circ}\text{C}\sim-3^{\circ}\text{C}$ 以下になると 6°C 設定の時間帯においてもファンはON-OFFをくり返した。このファンの作動時間の違いが両者の放熱量の差となって現われている。

第4表はカーテンを二層被覆した場合、本施設の暖房負荷に対し、地中熱交換装置が寄与した割合を時間毎に求めた例である。17.00~23.00(暖房設定温度 $12^{\circ}\text{C}\sim 11^{\circ}\text{C}$)における暖房負荷は1.6~1.9万kcal/hであるのに対し、地中熱交換装置からの放熱量は0.3~0.9万kcal/hで、その寄与割合は15~50%となり、23.00~5.00(設定温度 6°C)では1.3~1.7万kcal/hに対し、0~0.3万kcal/hで0~20%、また5.00~8.00(設定温度 10°C)では約2万kcal/hに対し、1.5万kcal/hで約70%となり、一夜を通しての平均では約30%となった。このように、暖房負荷に対する地中熱交換装置からの放熱による寄与割合は時間および設定温度によって大きな差異が認められた。

また、これまで蓄熱量・放熱量の算出は吸気口と吹出口との温度差をもとに顕熱交換量だけを求めてきたが、第5表は吸気口と吹出口とのエンタルピ差から潜熱交換量についても求めた数値である。日中の蓄熱量に対する潜熱交換量は無換気状態で顕熱交換量の1.5倍以上にもなり、換気した状態でもほぼ同等の値を示し、蓄熱に及ぼす潜熱交換量の割合がきわめて大きいことが明らかになった。一方、夜間の放熱量は大部分顕熱交換によるものであったが、設定温度が高い場合には10~20%の潜熱交換量が認められた。

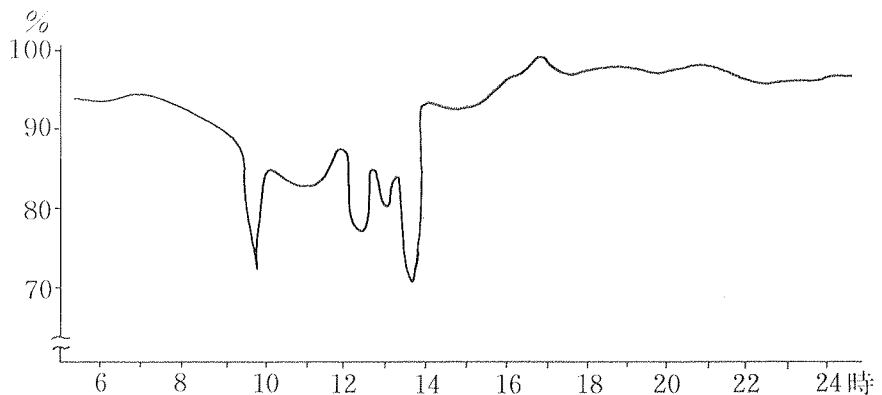
3. 湿度特性

第7図に晴天日における相対湿度の経時変化の1例を示した。午前中(8.00~12.00)はカーテン開放後温度の上昇とともに次第に低下し、強制的に天窓を全開させる

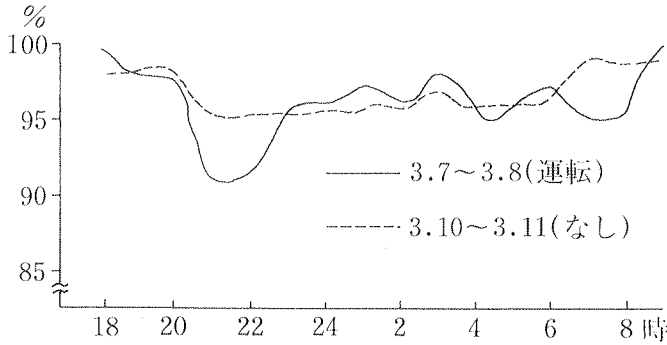
第5表 エンタルピ差から求めた顕熱および潜熱交換量

(1981年1月12~13日)

| 時刻 | 吸気口 気温 $^{\circ}\text{C}$ | 吸気口 湿球 $^{\circ}\text{C}$ | 吹出口 気温 $^{\circ}\text{C}$ | 吹出口 湿球 $^{\circ}\text{C}$ | 顕熱 交換量 kcal | 潜熱 交換量 kcal | 全熱 交換量 kcal |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 10~11 | 25.5 | 23.5 | 18.3 | 17.8 | 18,080 | 34,080 | 52,160 |
| 11~12 | 29.3 | 26.3 | 20.3 | 20.0 | 22,410 | 34,080 | 56,490 |
| 12~13 | 30.0 | 26.7 | 21.0 | 20.5 | 22,410 | 37,180 | 59,590 |
| 13~14 | 29.5 | 26.0 | 21.3 | 21.0 | 20,300 | 27,730 | 48,030 |
| 14~15 | 29.3 | 24.5 | 20.8 | 20.3 | 21,170 | 18,590 | 39,760 |
| 15~16 | 23.8 | 20.6 | 19.8 | 19.3 | 9,990 | 0 | 9,990 |
| 18~19 | 12.0 | 11.0 | 15.5 | 13.0 | 6,440 | 2,750 | 9,190 |
| 19~20 | 11.5 | 10.5 | 15.3 | 12.3 | 9,720 | 1,270 | 10,990 |
| 20~21 | 11.0 | 10.0 | 15.0 | 12.0 | 10,240 | 640 | 10,880 |
| 21~22 | 10.5 | 9.5 | 14.5 | 11.0 | 10,260 | 0 | 10,260 |
| 22~23 | 9.5 | 8.5 | 14.5 | 11.0 | 12,830 | 1,920 | 14,750 |
| 24~1 | 6.5 | 5.5 | 13.0 | 8.0 | 2,020 | 0 | 2,020 |
| 1~2 | 6.2 | 5.0 | 13.0 | 8.0 | 4,230 | 0 | 4,230 |
| 2~3 | 6.0 | 4.8 | 13.0 | 8.0 | 6,540 | 0 | 6,540 |
| 3~4 | 5.5 | 4.2 | 12.7 | 7.2 | 8,980 | 0 | 8,980 |
| 4~5 | 5.5 | 4.0 | 12.5 | 7.0 | 7,270 | 0 | 7,270 |
| 5~6 | 6.5 | 5.0 | 13.0 | 8.5 | 16,880 | 3,230 | 20,110 |
| 6~7 | 6.5 | 5.0 | 13.0 | 8.5 | 16,820 | 3,220 | 20,040 |
| 7~8 | 7.0 | 5.5 | 13.0 | 8.5 | 15,530 | 1,290 | 16,820 |



第7図 湿度変化(1980年2月11日~12日)



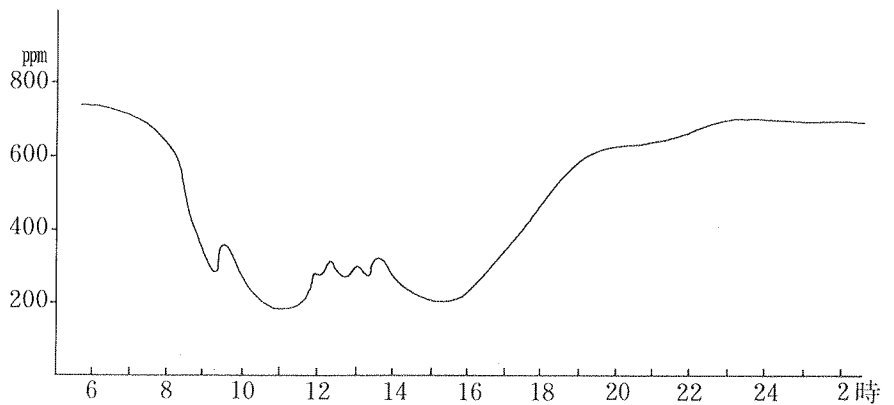
第8図 除湿機の運転と相対湿度

と80%以下となったが、天窓閉鎖後は80~90%まで上昇した。午後(12.00~17.00)は換気設定温度を28℃としたので天窓はたびたび開き75~80%で推移した。カーテン閉鎖後は90~95%ではほぼ一定していた。朝方、天井の上部カーテンに相当量の水滴付着が観察された。また、ガラス内面にも水滴付着が認められたが、強制換気後消失した。

第8図は夜間(17.00~8.00)の除湿機(冷却式, 4.3 l/h, リオン熱学製)の運転の有無と相対湿度の変化の違いをみたものである。除湿機を運転させることにより、1晩で45~50 l(約3 l/h)の水を除去でき、カーテンの水滴付着量も明らかに減少することが観察されたが、相対湿度は除湿機を運転しない場合と大差なかった。

4. 炭酸ガス濃度特性

第9図に晴天日における室内炭酸ガス濃度の経時変化の1例を示した。室内の炭酸ガス濃度は、夜間作物体の呼吸や土壌中からの発生により700~750 ppm まで高まるが、日の出後光合成の開始とともに急速に低下し密閉状態では最低150~180 ppm と外気の約1/2の濃度になった。換気すると外気と同等の濃度に回復するが、天窓閉鎖後再び200~250 ppm まで低下した。こ



第9図 CO₂ 濃度変化(1980年2月11日~12日)

第6表 除湿機の排水能力

| 月 | 日 | 排水量 |
|----|---------|------|
| 3月 | 7 ~ 8日 | 45 l |
| | 8 ~ 9 | 45 |
| | 13 ~ 14 | 50 |

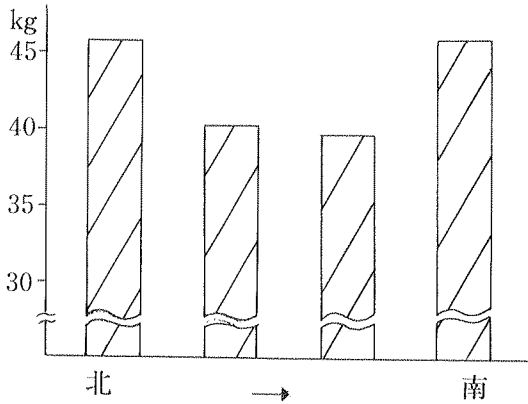
のように換気量が少なくなる本暖房方式は日中低炭酸ガス濃度の状態におかれ、炭酸ガス施用の必要性が認められた。

5. トマトの生育・収量

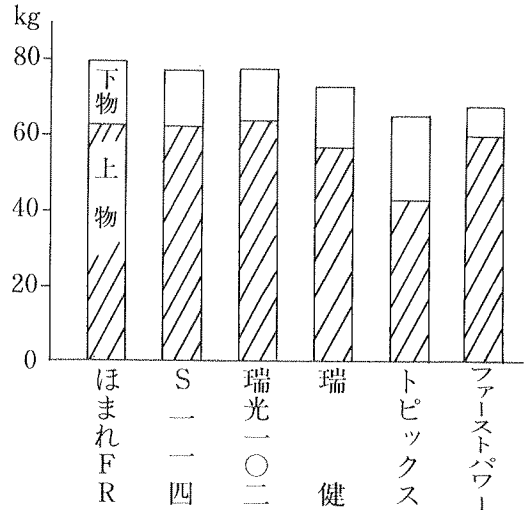
トマトの生育は、1979~'80年、1980~'81年とも全般に順調であったが、中期以降二層カーテンの収束部の影の影響を受けるようになり、下葉の黄変が目立つとともに上段果房の着果率がやや低下した。収量は第10図に示したように1979~'80年では、ハウス中央部でやや低収となった。平均収量は約11 t/10 aであった。第11図は1980~'81年における品種別収量をあらわしたもので10~12 t/10 aとなった。

VI 考 察

前報(10, 11)までの供試施設、地中熱交換装置および運転管理を大幅に改善して室内環境特性を調査した結果、



第10図 位置別収量 (1980~'81, 10株当り)



第11図 各品種の収量 (1980~'81, 20株当り)

暖房性能は著しく向上し、1979~'80年、1980~'81年の両年とも試験当初の目標であった本装置の単用運転で内外温度差15℃を達成させることができた。このような高い暖房性能が得られた要因を要約してみると、1. フェンロー型ガラス室を用いたので透過日射量が増大し、またカーテンの二層被覆化により内部保温性が向上し、2. 暖房必要熱量に応じた循環風量が確保され、3. 変夜温管理を採用し、後夜半の設定温度を6℃にしたので、放熱量が減少し、ほとんどの日において蓄熱量が放熱量にまさり、4. 地中温度が17~20℃に保持され、5. 吸気口から吹出口までのパイプが25mと長かったので熱交換効率が高く、地中温度に接近した温風が得られたことなどがあげられる。これら各々の要因を解析すると次のとおりである。

施設の暖房必要熱量は、 $Q_g = A_q \cdot U (\theta_{in} - \theta_{out}) (1 - fr)$ (ただし、 Q_g : 暖房必要熱量 kcal/h, A_q : 温室表面積 m^2 , U : 暖房負荷係数 $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$, θ_{in} : 室内気温 $^\circ C$, θ_{out} : 室外気温 $^\circ C$, fr : 保温被覆の熱節減率) の式(8) から求められる。この式から、本供試施設における暖房必要熱量を内外気温差 15℃ として求めてみると、 $Q_g = 21, 113 kcal/h$ が得られる ($A_q = 563 m^2$, $U = 5.3 kcal/m^2 \cdot hr^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$, $fr = 0.55$)。同様にして第1報におけるビニルハウスの暖房必要熱量を求めると、 $Q_g = 23, 607 kcal/h$ となり、本試験における施設の面積は約11%増えたのにもかかわらず、必要熱量は逆に11%減少している。当然、内部保温性能が向上すれば地中熱交換装置の暖房負担も軽減されることになり、実際第1報の装置では総放熱量が10万kcalを越えることがたびたびあ

ったのに対し、本試験では外気温が0℃以下の日で3万~9万kcalの範囲内にあり、10万kcalを越えることはなかった。また、後夜半の6℃設定時間帯では外気温が-4℃以上の時は、ファンはほとんど作動せず放熱量を減少させる大きな要因となった。このように、内部保温性能を高めたことと変夜温管理が放熱量の減少をもたらし、相対的に本暖房装置の性能向上に貢献したことになる。

本施設の暖房負荷に対し、地中熱交換装置が寄与する割合を、暖房負荷と放熱量との比から求めてみたところ、時間帯と設定温度によって大きな差異が認められた。すなわち、前夜半の9~12℃設定時間帯における寄与割合は0~50%となり、また6℃設定時間帯では0~20%と比較的小さい値であったのに対し、早朝加温の10℃設定時間帯では70~75%になり、その寄与割合は増大した。平均では約30%であった。暖房負荷に対し、暖房装置が寄与する割合を求めた例はあまり見当たらないが、埼玉園試(9)がイチゴを栽培している地中熱交換ハウスの気象特性を調査した資料から前記と同様な方法で寄与割合を算出してみたところ平均40~70%となり、本試験よりやや高い値であった。暖房必要熱量に対し、地中熱交換装置以外の熱源を施設内地表面からの放熱(負の地中伝熱量)だけとすれば、その量は前、後夜半時間帯では30~40kcal/ $m^2 \cdot hr$ 、早朝加温帯で15kcal/ $m^2 \cdot hr$ となり、これまでに示された基準値(8)に比べて相当に大きい。先の

埼玉園試の例では10~20kcal/m²・hrであった。本試験では、光線透過率の高いフェンロー型ガラス室(6)を用いたこと、また日中の室内気温を28~30℃に保ち、慣行よりもやや高い温度管理であったため地中伝熱量が増大したことが想定される。しかし、これまで地中伝熱量を解析した研究は少なく、暖房負荷との関連についてはさらに検討を要する課題である。

一方、日中の蓄熱量は兩年とも晴天日には10万kcal以上になり、1月でも最大値は15万kcal得られており、曇雨天日を除いたほとんどの日において蓄熱量が放熱量にまさった。従って、地中温度は常に17~20℃を保持しており、第1報における試験のように15℃以下になることはなかった。また、本装置における吸気口—吹出口のパイプ長は約25mで、前報(11)で考察したように使用ファンの能力、パイプ口数から管内圧損を10mmH₂O以下に抑えようとした場合には限界に近い長さであった。反面、パイプが長いことは熱交換効率を高め、地中温度に接近した14~15.5℃の温風が得られたので必要温度の保持が可能になったものと考えられる。

これに対し、1980~'81年に実施したカーテン一層被覆の場合では暖房性能は相当に低下し、外気温が-2℃以下になると室温を10℃に保持することは困難になった。内外気温差は地中温度が17℃以上の場合には、最大14℃であったが、それ以下では12~13℃に低下した。カーテン被覆が二層から一層に変われば保温性能(熱節減率)が低下し、暖房負荷が増大するのは当然であるが、先の暖房必要熱量を求める式から、一層被覆における必要熱量を算出すると $Q_g = 29,093\text{kcal}$ となり、二層被覆の場合より約25%増大する。第3表の最低外気温が近似した日の比較においても総放熱量で25~65%の増大が認められた。特に、17.00~23.00および23.00~6.00の時間帯における放熱量の増大が顕著であった。放熱量と蓄熱量の比較をみてもほぼ同等か外気温低下の著しい日では放熱量がまさり、地中温度もわずかであるが低下する傾向を示した。また、放熱量の地中温度と吹出口気温との温度差は4~4.5℃で、二層被覆の場合よりもやや大きくなり、吹出口気温は12~14℃で1~2℃の低下が認められた。内部被覆方法の違いや各種保温資材と熱節減率に関する試験は数多くあり(8)、資材の組合せによって効果に差はあるものの、二層化による熱節減率の向上は顕著である。現在慣行の暖房方式においてはカーテンの二層化は一般化しつつあり、本暖房方式においても内外気温差を安定して13℃以上得ようとするならば二層被覆は必要といえる。

前報までおよび本試験においても、蓄熱量・放熱量は吸気口と吹出口との気温差に循環風量および空気比熱を乗じた顕熱交換量について求めたが、伊東ら(3)、古在(5)、山本(14)はパイプ内を空気が通過する際に水の凝縮や蒸発に伴う熱収支、すなわち潜熱交換量を把握する必要があることを指摘し、パイプ出入口のエンタルピ差で熱交換量を計測しなければならぬと述べている。このような指摘から、1980~'81年は短期間ではあるが、パイプ出入口の乾球温度だけではなく湿球温度も計測し、両者のエンタルピ差を求めてみた。その結果、蓄熱量は潜熱交換量によるところがきわめて大きく、全交換量の60%にも及んだ。夜間の放熱量ではさほど大きい値を示さなかったが、無視はできない量と思われた。本装置における潜熱交換量の正確な把握は、熱収支の解析にとって重要なだけでなく、凝結水の処置に伴うパイプ材質やパイプに穴をあける是非についても関連している。本試験での湿球温度の測定は、吸気口側が無通風であったことから測定精度に若干の問題を残したので、今後はさらに測定方法を検討し精度を高める必要がある。

本施設は集熱のため密閉に近い状態になるので室内が多湿化しやすいことを第1報で指摘したが、ガラス室も同様の傾向を示し、日中無換気状態では80~90%、わずかな換気をした場合で75~80%となった。午前中一時天窓を全開させ湿度低下をはかったが、閉鎖後は再び閉鎖前と同じ状態になった。しかし、この換気により、トマト葉面の'ぬれ'やガラス内面の水滴付着を消失させるのに大きく役立ち、病害予防に一定の効果があったものと推察している。また、夜間の湿度低下をはかるため、冷却除湿機を運転してみたところ、40~50 lの水を除去できたが、相対湿度は運転しない場合と大差なかった。おそらく、室内の水分除去に伴って土壌面や葉面からの蒸発散量が増大したものと思われる。また、水分除去と病害の発生予防との関連については、本試験では明らかでなく、今後さらに検討する必要がある。

室内の炭酸ガス濃度は、夜間高く、日の出後低下する濃度変化を示し、これまでの測定例と変わらないが、午前中はほとんど密閉状態にあるため濃度低下が著しく、晴天日では最低150~180ppmの値を示した。午後も200~300ppm程度で低炭酸ガス濃度の状態にあった。兵庫農試(2)では、本方式によるトマト栽培で炭酸ガス施用試験を行なって増収効果の高いことを報告しており、また炭酸ガス濃度と温度管理の関係について、450ppmで変温管理をした場合に多収になり、乾物率、Brix、還元糖含量に対しては炭酸ガス濃度の影響が大きいことを明ら

かにしている。このような実績から、慣行の施設では実現しにくかった高温・高炭酸ガス濃度管理を、本装置を備えた施設で積極的に進めるならその利用効果を一層高めることができるものと期待される。

天窓開閉、ファンのON-OFF、天井カーテンの時間差開閉はマイクロコンピュータを用いて制御し、また日中、夜間ともこれまでの研究成果⁽¹²⁾をもとに時間帯によって管理温度を設定し、特に17.00~21.00および21.00~23.00の前夜半の設定温度は当日の日射量の多少によって4段階に変更を加えた。その結果、晴天日においては、日中、夜間ともおおむね設定温度に従った温度推移を示したが、曇雨天日は外気温がさほど低下しないうえ、施設の保温性が高かったため室温が設定値まで下らず、複合制御の確実な適用とはならなかった。天井カーテンは日射量の多少にかかわらず時刻(16.00~17.00)と室温(20℃以下)によって閉鎖させたが、低日射量の日には閉鎖時刻を遅らせるなど制御法に今後検討が必要と思われた。

マイクロコンピュータを用いることにより、前記の制御に加えて炭酸ガス施用やかん水管理、アラーム警報また補助暖房との組合せが可能であり、個別制御に比べてはるかに能率的である。施設園芸への適用に関する研究も進み、実用例もいくつかみられ^(4, 7)、今後も好適環境を作出し、省力化をはかるうえにおける新しい制御装置として進展が期待される。

トマトの生育は兩年とも順調で、室内中央部ではカーテン取東部の影の影響を受け下葉の黄変がやや目立ったが、収量は過去の実績から判断してほぼ標準並であった。他の成績^(1, 13)をみても慣行の暖房方式と同等な生育・収量を得ている場合が多い。

V 摘 要

供試施設にガラス室を用い、内部保温カーテンは二層被覆とし、また日中、夜間とも時間帯によって管理温度を変えて、地中熱交換装置の暖房性能、室内環境特性およびトマトの生育・収量について調査した。

1. バイブ列数46列、ファン2台で得られた循環風量は1979~80年は127 m³/minであり、次年は高性能のファンを用いたので147 m³/minとなった。

2. カーテン二層被覆の場合、室温は各設定温度を維持し、内外気温差は兩年とも最大15℃以上となった。

3. 施設の内部保温性能が高く、また夜間の暖房設定温度を最低6℃(23.00~5.00)まで下げたので放熱量が

減少し、ほとんどの日で蓄熱量が放熱量にまさった。地中温度は17~20℃を維持し、放熱時の地中温度と吹出口との温度差は3~4℃で、13.5~15.0℃の温風が得られた。

4. カーテン一層被覆の場合、外気温が-2℃以下では室温は6~9℃となり、10℃保持が困難となった。また放熱量は二層被覆の場合と比較して25~65%増大した。

5. 施設の暖房負荷に対し、地中熱交換装置が寄与する割合を求めたところ、前夜半は15~45%、後夜半は0~20%、早朝加温帯は75%となり、設定温度および時間帯によって差異が認められた。

6. ファンの吸気口と吹出口とのエンタルピ差から潜熱交換量を求めたところ、日中は全熱交換量の60%にも及ぶことが分った。

7. 室内の相対湿度は、日中天窓閉鎖時は90%に達したが天窓が開くと75~80%になった。午前中一時天窓を全開させることによりトマト葉面の'ぬれ'を解消させることができた。

8. 室内の炭酸ガス濃度は夜間700~750 ppmを保っているが、日中は150~240 ppmとなり、低炭酸ガス濃度の状態が続くことが分った。

9. 日射量に応じて前夜半の設定温度を変えたが、曇雨天日は室温が設定値まで低下せず、複合制御の確実な適用ならなかった。

10. トマトの生育は兩年とも順調で、室内中央部はカーテン取東部の影の影響を受けたが、収量はほぼ標準並であった。

引用文献

1. 愛媛農試(1980). 施設園芸における省エネルギー技術対策に関する試験成績概要, 農林水産技術会議事務局・野菜試験場 63~64.

2. 兵庫農試(1980). _____, 同上 51~51.

3. 伊東 正・北条雅章(1980). 蔬菜栽培における太陽熱利用(第1報)地中熱交換ハウスにおける熱エンタルピによる熱収支 昭和55年園芸学会春季大会発表要旨 320~321.

4. _____・古在豊樹・稲山光男・小林 肇(1980). 施設栽培環境のコンピュータによる複合制御と野菜の発育生理(第2報)マイコン制御システムの概要と半促成キュウリへの試用, 昭和55年園芸学会秋季大会発表要旨 254~255.

5. 古在豊樹（1981）. 施設園芸省エネルギーの手引き No. 3, 37~41.
6. 内藤文男（1979）. フェンロー型温室の特性, 農及園 54（2） 316~320.
7. 日本施設園芸協会（1981）. 施設園芸省エネルギーの手引き No. 3, 79~82.
8. 岡田益己（1980）. 温室設計の基礎と実際, 三原義秋編 182~204.
9. 埼玉園試（1980）. 施設園芸における省エネルギー対策技術に関する試験研究成績概要, 農林水産技術会議事務局・野菜試験場 57~58.
10. 佐々木皓二・板木利隆（1979）. 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究（第1報）, ハウス内環境特性, 熱収支およびトマトの生育・収量について, 神奈川園試研報 26, 26~34.
11. —————・—————・高橋 基（1980）. —————（第2報）, 温風暖房機併用における暖房性能・重油節減効果およびキュウリの生育・収量について, 同上 27, 35~44.
12. 高橋和彦（1980）. 施設園芸の省エネルギー新技術, 農林水産技術会議事務局監修 143~182.
13. 徳島農試（1980）. 施設園芸における省エネルギー技術対策に関する試験研究成績概要, 農林水産技術会議事務局, 野菜試験場 71~72.
14. 山本雄二郎（1980）. 施設園芸の省エネルギー新技術, 農林水産技術会議事務局監修 87~113.

Summary

Since 1979 experiment have carried out to investigate the heating efficiency of earth storage heat exchange system in the greenhouse, that was set with double layer thermal screens.

Experiment were also designed to control the day and night temperature adjusted to the hour of the day and solar radiation in the daytime.

1. The amount of circulating air was 127m³/min when 46 rows of the heat exchange pipes with two flowing fans were used in 1979-80. In the next year, that was 147m³/min. because of using the high efficient fans.

2. When the double layer thermal screens was applied, room temperature was maintained at the designed degree and the maximum inside-outside air temperature difference was higher than 15°C every year.

3. As this greenhouse was very efficient to insulate the heat and the midnight minimum temperature was regulated to 6°C, amount of heat radiation from soil into the air was low. Amount of stored heat under the ground was more than the radiated heat, in general.

Soil temperature was maintained at 17-20°C. Temperature of warm air blowing in greenhouse was 13.5-15°C

4. When the thermal screen was single layer and outside air temperature was below -2°C, room temperature was not always maintained at 10°C but maintained at 6-9°C.

5. Contributions of this heating system to the heating load were different according to the designed degree of inside temperature and the hour of night. Rate of contribution are as follows: 15-45% evening at 12-9°C, 0-20% midnight at 6°C, 75% early morning at 10°C.

6. The amount of latent heat exchange that was calculated from the difference of enthalpy between the points of drawing out and blowing off reached as higher 60% of a total amount of exchanged heat.

7. When the top ventilators were not operated, relative humidity in greenhouse rised over 90%. But when they were operated, relative humidity fell down to 75-80%.

8. Concentration of CO₂ in greenhouse was maintained to 700-750ppm at night, but fell to 150-180ppm in the daytime.

9. Though the temperature was intended to change automatically for the acceleration of translocation according to the intensity of solar radiation in the daytime, it was difficult to bring down the temperature as designed in cloudy and rainy days.