

地中熱交換ハウスの熱的特性

小島 孝之

(園芸工学研究室)

田中栄三郎, 藤木 徳実, 松尾 隆明

(農業機械学研究室)

昭和61年10月15日 受理

Thermal Properties of a Greenhouse with Earth-Air Heat-exchange System

Takayuki KOJIMA

(Lab. of Horticultural Engineering)

Eisaburo TANAKA, Tokumi FUJIKI

and Takaaki MATSUO

(Lab. of Agricultural Machinery)

Received October 15, 1986

Summary

A plastic greenhouse with earth-air heat exchange system was built and used in this experiment and the thermal properties of the plastic greenhouse was investigated under the following conditions: the plastic greenhouse is 2 m in width and 5 m in length and installed with one layer polyethylene film curtain in the inside. The pipes for the earth-air heat exchange were laid under the ground, 6 pipes at the depth of 50 cm and 5 pipes at the depth of 100 cm, at intervals of 30 cm, respectively.

The lowest night temperature in the plastic house was 5 deg.C in the winter at Saga city, when the open-air temperature was minus 4 deg.C. The soil temperature at the depth of 10 cm in the plastic house was maintained at about 9.5 deg.C at 6 a.m. from 1st to 10th of January.

The outside day temperature difference of soil was 16 deg. at ground surface, 3.7 deg. at the depth of 10 cm and 0.2 deg. at 100 cm under the ground. The inside day temperature difference of soil was 12.5 deg. at the surface, 4.1 deg at the depth of 10 cm, 1.3 deg at 30 cm, 0.9 deg. at 80 cm, 3.5 deg. at 50 cm, and 2.5 deg. at 90 cm under the ground.

The temperature difference of soil in the inside and outside of the plastic house was large at shallow depth of the ground. Consequently, it was considered that the heat loss from the inside to the outside occurred mainly in shallow (upto 50 cm to 60 cm) depth.

The earth-air heat exchange ratio was 30 to 55 percents to the total energy of house heating at the nights. The earth-air heat exchange ratio was increased with the falling of the outside air temperature.

1. 緒 言

昭和48年秋から昭和49年(1974)春にかけて起きた第一次オイルパニックは施設園芸においてその経営を危機的状況に追い込んだ。しかし、これを契機に省エネルギー技術に関する研究と対策に取り組まれることになって、省エネルギー機器、技術の開発が始った。従って、昭和53年(1978)夏から昭和54年春にかけての第二次オイルパニックにおいては、第一次のときのように困惑することはなかった²⁾。

今、石油事情は緩和し比較的低価格で推移し、省エネルギー対策のかけ声は小さくなったが、基本的には省エネルギーを貫きながら、省力化と規模拡大を中心とした農業経営でなければ、成り立たない時代になりつつあるといえる。

第一次オイルパニック後に農林水産省が補助事業の対象とした園芸施設の種類の複合環境制御型、地中熱交換型、放射熱遮断型、都市ごみ燃焼熱利用型、籾殻燃焼熱利用型、火山性地熱水利用型の6種類あるが、この中には地域に限定されるタイプが多い。

その中で地中熱交換ハウス³⁾は、建設費、維持費ともに比較的安価で、地域に限定されるところが少ないことから注目されてきた。

本報では、佐賀大学農学部の実験圃場に地中熱交換ハウスを試作し、地温を中心に、各所の温度を測定し、その保温特性等を解析した。

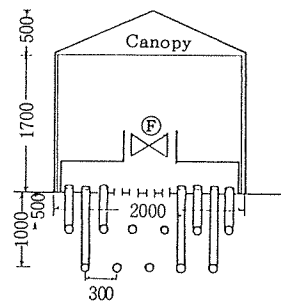
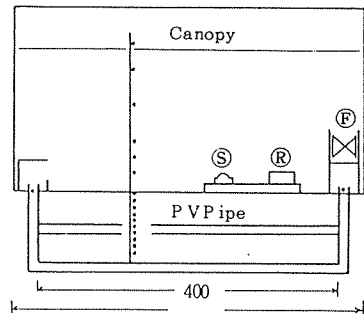
2. 材料及び方法

試作したハウスは木骨山形ハウスで、被覆材には硬質透明フィルム(シクスライト、東明興業KK)、内張りカーテンには塩化ビニルフィルム(三菱モンサント、三菱化成)を使用した。

地下部には厚さ3mm内径100mmの塩化ビニルパイプを深さ50cmに6本、100cmに5本千鳥状に埋設して、地中熱交換用とした。

測定項目は気温、地温、風速、及び日射量である。温度測定にはCC熱電対とサーモダックIII(江藤電気KK)風速測定にはピラム型微風系(太田計器製)、日射量測定には全天日射計(石川A1型)を用いた。

ハウス内気温の測定点は中央部の地上20, 40, 60, 100, 140cm及びカーテンと被覆材との間のキャノピー部である。ハウス内の地温は、50cmに埋設したパイプの間を、地表面から5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 及び90cmの深さまで測定した。地中埋設パイプ内空気の温度はパイプの空気入口及び出口で測定した。ハウスの概略図と温度及び日射測定位置、Fig. 1に示す。



• C-C thermocouple, (S) Pyrheliometer
(R) Recorder, (F) Fan

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental greenhouse.

3. 測定結果及び考察

3. 1 ハウス内気温の変化

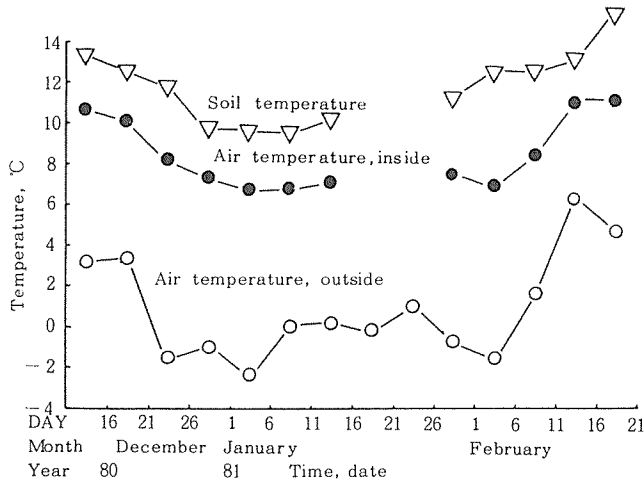


Fig. 2 Air-temperatures (at 140 cm height) and soil temperatures (at 10 cm depth) in the greenhouse and the outside air-temperatures at 6 O'clock (1980. 12~1981. 2)

外気温が最も低下する朝6時におけるハウス内気温、地温及び外気温の経時変化を Fig. 2 に示した。外気温は、12月下旬から2月上旬にかけて、殆どが氷点下を示している。

ハウス内気温及び地温も外気温の低下とともに低下し、冷え込みの厳しかった1月上旬にはハウス内及び地温（地下10cm）ともそれぞれ6.8°C及び9.5°C前後まで低下した。

3. 2 ハウスの保温効果

朝方の冷え込みが厳しかった1月上旬におけるハウス内の気温、地温及び外気温の最低温度

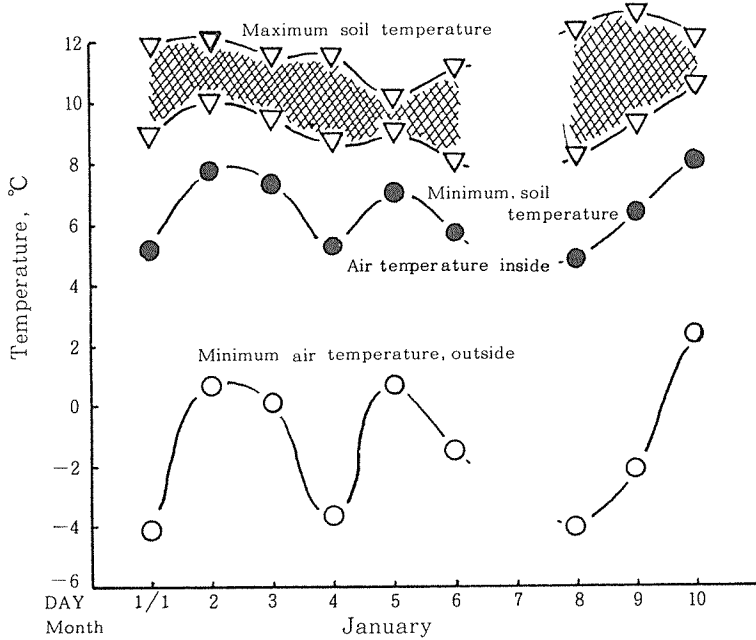


Fig. 3 Changes of the day maximum and minimum temperature of floor soil at the depth of 10 cm and the day minimum air-temperature in and outside of the greenhouse with earth-air heat exchange system (1981).

を Fig. 3 に示し、地温についてはその日較差をマスクして図示した。

外気温は、最低 -4.1°C で、1月上旬において -4°C を記録した日は3日間であった。

ハウス内気温の最低は、 5°C を記録した。すなわち最低外気温がおよそ -4°C のとき、ハウス内気温は 5°C を維持して、その温度較差は 9°C であった。ハウス内気温は、最低で 10°C 程度には保持したが、本実験ハウスでは 5°C まで低下した。これは、実験ハウスが一般実用ハウスに比べるとハウス床面積(10m^2)に対して被覆材の放熱表面積(35.8m^2)が大きく、保温比が 0.279 と小さいことが、その保温効率を悪くしている一つの原因と考えられる。例えば、並行的に調査した地中熱交換ハウス(床面積 52m^2 、被覆表面積 123m^2 、保温比 0.423 、九州電力農業電化試験場内)では、最低外気温が -4°C のとき約 7°C の約 2°C 高に保持できていた。このことを考慮すると、一般のハウスではもっとハウス内の最低気温は高く保持できると考えられる。

ハウス内地温(地下 10cm)は、平均 2.6°C の日変化で、最低 8.1°C から最高 13°C の間を変動していた。また、1日のうちで地温が最低になるのは10時で、最高になるのは18時であった。このように、ハウス内の地温はおよそ 10°C で、ハウス内気温に比較してそれほど高くないので、ハウス内気温をこれ以上に高めるにはもっと地温を高める工夫が必要である。

3. 3 ハウス内温度の日変化

ハウス内温度16点について、1月8日の日変化を Fig. 4 に示した。また、それぞれの測定点における日変化の最低及び最高温度を Fig. 5 に示し、各点の日変動幅が分かるようにした。1月8日は、日射量 $2742\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 、昼夜とも晴天で、ハウス内気温及び地温に大きな変動幅が見られた。

地温は、露地の場合、日射の影響の大きい地表付近では 16°C と日変化が大きいのが、深くなるにつれてそれは小さくなり、地下 10cm 以下 100cm までの 10cm の層の平均地温変動幅は 0.8°C であった。一方ハウス内の地温は地表付近は 12.2°C と露地寄り小さい変動幅であるが、地下部は地中熱交換パイプ周辺の日変化が大きく、地下 10cm 以下 100cm までの 10cm 毎の層の平均地温変動幅は 2.2°C となり、貯熱及び放熱効果がみられた。

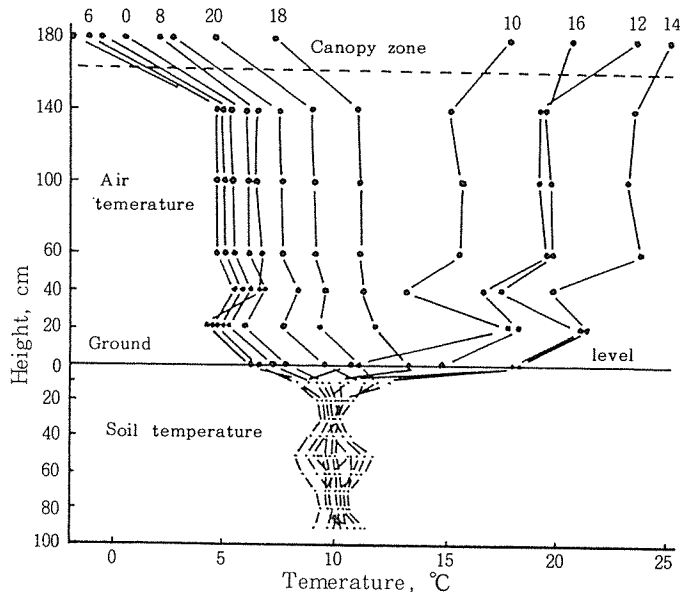


Fig. 4 Profile of the temperature in the greenhouse with earth-air heat exchange system.

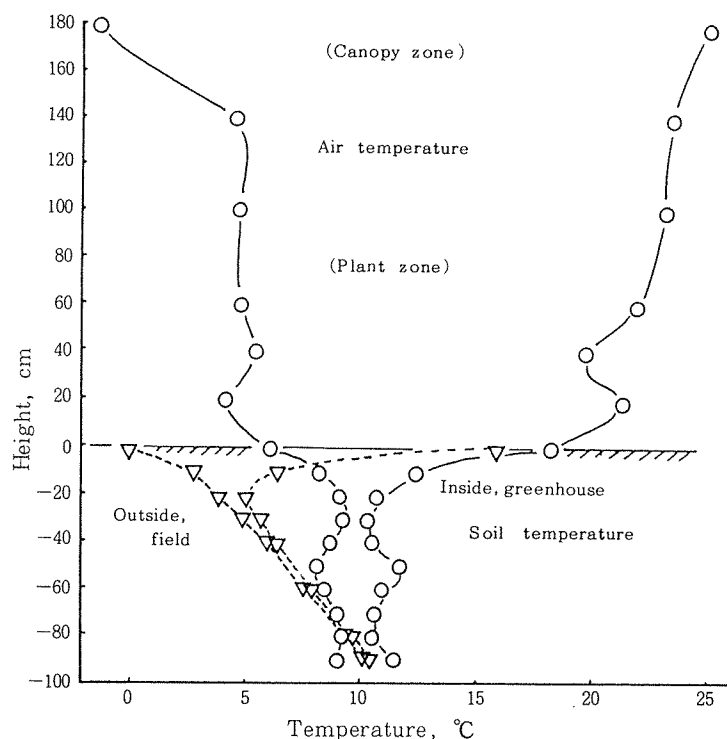


Fig. 5 Day temperature difference in the greenhouse and field ground (1981. 1. 8)

ハウス内気温は、平均で 17.7°C の日変化があった。地上40cmの高さの日変化が小さくなっているのは、熱交換パイプの空気流動によるものである。

3. 4 キャノピー部の温度について

ハウス容積は 20.5m^3 で、うち約 2.5m^3 がキャノピー部の容積である。昼間のキャノピー部の温度は日射量に強く左右される。Fig. 6は日射量の異なる3日間のキャノピー部の温度をハウス内気温と外気温とともに示したものである。

昼間のキャノピー部の温度は、日射量 $939.4\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ の1月5日(曇天)においては、ハウス内気温より約 1° 高であったが、日射量 $1895.4\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ の1月2日(晴天)においては最高 3° 高、日射量 $2742.0\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ の1月8日(快晴)においては最高 7.1° 高であった。

このように、キャノピー部の気温は、晴天時においてハウス内気温よりかなり高くなるので、この熱を有効に利用すべきであるといえる。

3. 5 地温分布

Fig. 7は、1981年2月4日の朝8時と、夕方6時におけるハウス内地温分布である。

放熱後の朝8時におけるハウス内の地温分布はパイプ内を通る空気により地温が奪われるために、パイプ周辺の地温が低くなっている。

蓄熱後の夕方6時における地温分布は、パイプを中心に高温部が生じ、太陽熱が地中に蓄熱されたことを示した。

ハウス内外地中温度の差は浅い所程大きくなっており、地下1m付近では約 1.5° と小さかった。即ち、ハウスからの熱流出は地表面に近い浅い所が大きかったことが分かった。本実験結果から適切な断熱材の施工深さを推測すると、地下50~60cmであった。

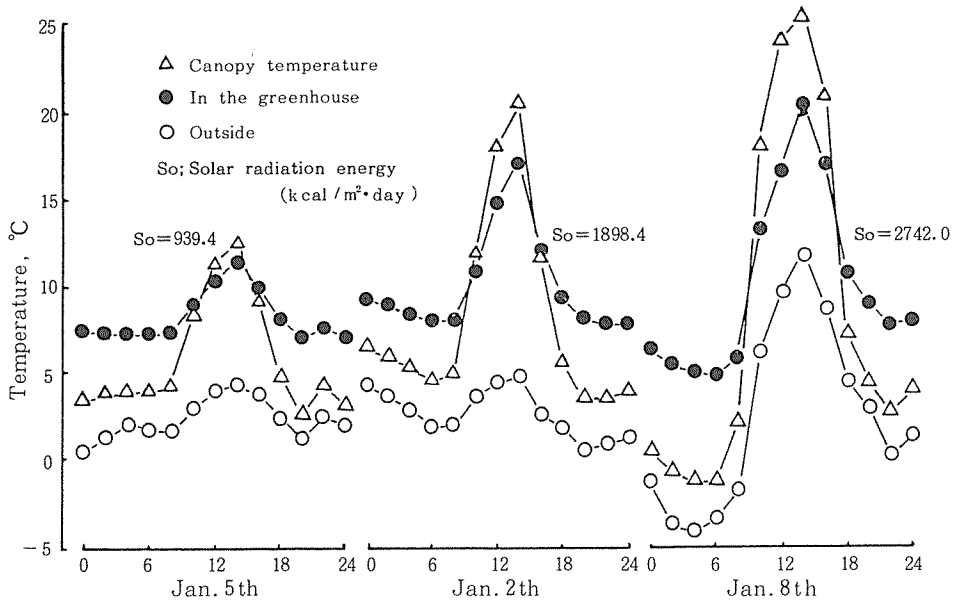


Fig. 6 Change of air-temperatures in the greenhouse on the cloudy, clear and fair clear day.

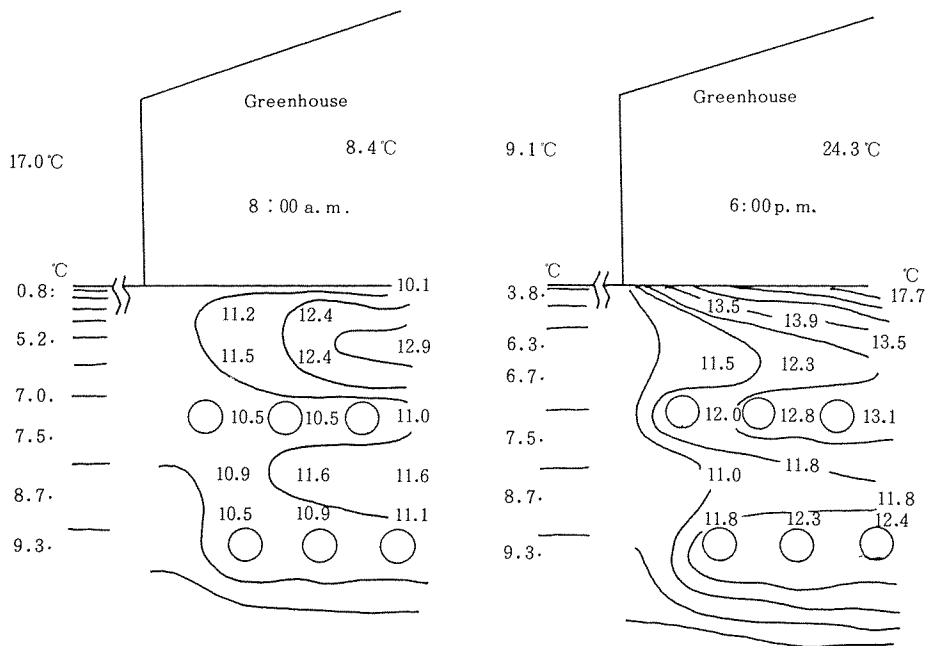


Fig. 7 Soil temperature distribution at 8:00 a.m. (when storage heat has dissipated) and 6:00 p.m. (when solar heat has accumulated in the soil)

3. 6 日射透過率

ハウス内日射量と露地日射量を計測することによりハウス内への日射透過率を求めたところ、2月上旬5日間の一日の平均でみると約70.1%であった。

3. 7 パイプ内風速

地中熱交換塩ビパイプの空気出口において風速を測定したところ6.12m/sec, 従って, 全循環風量は31.72m³/minであった。

3. 8 ハウスの熱収支

実験ハウスの夜間における熱収支を, 日没後から2時間毎に計算した。

まず, ハウス表面からの放熱量 Q_1 は次式で表される。

$$Q_1 = U \cdot (1 - f_r) \cdot A_w \cdot (T_1 - T_0) \quad (1)$$

ここで, U は暖房負荷係数 (kcal/m²・hr・°C), f_r は保温カーテンによる熱節減率 (一層塩ビカーテン 0.35)²⁾, A_w はハウス表面積 (m²), T_1 および T_2 はそれぞれハウス内気温と外気温である。

放熱量 Q_1 はハウス床面からハウス被覆材への正味放射量 Q_2 , 被覆材への対流伝熱を供給している床面からハウス内への熱伝達量 Q_3 及び地中熱交換量 Q_4 から構成されるとして考えると, 先ずハウス床面から被覆フィルムへの正味放射量 Q_2 は,

$$Q_2 = F_{1-2} \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot A_f (T_2^4 - T_3^4) \quad (2)$$

ここで, F_{1-2} は形態係数 (1 とする), ϵ_1 及び ϵ_2 はそれぞれ床面及び被覆材の放射率 (0.9 とする), σ はステファンボルツマン定数, A_f はハウス床面積, T_2 及び T_3 はそれぞれハウス床面及びカーテン内側絶対温度である。

次に床面からハウス内空気への熱伝達量 Q_3 は,

$$Q_3 = \alpha_0 A_f (T_2 - T_1) \quad (3)$$

ここで, α_0 は床面からハウス内空気への熱伝達率 (4kcal/m²・hr・°C と仮定), T_2 及び T_1 はそれぞれハウス内の床面温度及び気温である。

地中熱交換量 Q_4 は

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (4)$$

より,

$$Q_4 = Q_1 - (Q_2 + Q_3) \quad (5)$$

惑は, 地中熱交換パイプの空気入口及び出口の温度差により求めることができる。

$$Q_4 = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_4 - T_5) \quad (6)$$

ここで, V はパイプ内循環風量 (1903m³/hr), ρ は空気の密度 (kg/m³), C_p は空気の比熱 (kcal/kg・°C), T_4 及び T_5 はそれぞれパイプ入口及び出口の空気温度である。

また, ハウス内の地下蓄熱層の地温変化からは蓄熱量, 或はハウス内への放熱量, 流出熱量等が推定できる。ここではハウス内地中蓄熱層を地下1.1mまで6層に分割して, それぞれの地温をもとに次式で流出熱量 Q_5 を算出した。

$$Q_5 = V_s \cdot \rho_s \cdot C_s \cdot \Delta T_s \quad (7)$$

ここで, V_s は蓄熱層土壌の容積, ρ_s は土壌の密度, C_s は土壌の比熱, ΔT_s は一時間の地温変化 (°C/hr) である。

Q_2 , Q_3 及び地中熱交換パイプの入口及び出口の空気温度差により算出した地中熱交換量 Q_4 を基礎にして求めたハウス暖房負荷係数は4.34~5.59であった。Fig. 8はハウス暖房負荷係数を4.34とした場合の放熱割合を図示したものである。地中熱交換によるハウス暖房熱量の供給率は30~55%であった。また, 外気温が低下するほどハウス暖房に対する地中熱交換量の割合

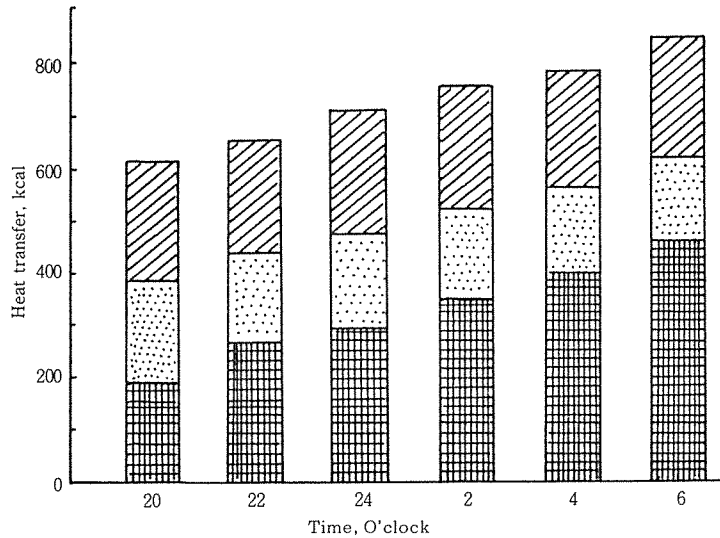


Fig. 8 Rate of heat transfer to the greenhouse from the floor and the under-soil.

- Radiation heat,
- Convection heat transfer from the floor
- Under soil heat transfer by air circulation

は大となった。

床面からハウス内への熱伝達量がハウス暖房熱量に占める割合は32~19%であったが、夜間の時間経過とともにその割合は低下した。

正味放射がハウス暖房熱量に寄与している割合は38~26%で、夜8時から朝6時にかけて床面からの熱伝達量と同様に徐々に低下した。

ここで、式(7)を用いて土層比熱 C_p を $0.5 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 、密度 ρ を 1500 kg/m^3 として蓄熱土層からの全流出熱量を算出し、この中で地中熱交換によりハウス暖房に利用された熱量割合をみると、夜8時から翌朝の6時までの総計ではこのなかの48.5%であった。即ち、約50%が地中熱交換以外のルートでハウス内或はハウス外に流出し、損失熱量もかなり大であったことが分かった。

4. 摘 要

本実験で地中熱交換ハウスを試作した。ハウスは間口2 m、奥行き5 mの大きさで、内側に一層カーテンを設置した。地中熱交換パイプは地下50cmに6本、100cmに5本、それぞれ30cm間隔で埋設した。この地中熱交換ハウスの熱的特性を調査した。

このハウスの冬場の夜間温度は最低で 5°C となり、このときの外気温は -4°C であり、ハウス内温度が外気温より 9°C 高であった。ハウス内の地温 (-10cm) は1月上旬の朝6時頃が最も低かったが、平均 9.5°C を保持していた。

地温の日較差は、露地の場合、地表で 16° 、地下10cmで 3.7° 、地下1 mの深さで 0.2° と深くなるほど小さくなるが、ハウス内では地表で 12.5° 、地下10cmで 4.1° 、地下30及び80cmでそれぞれ 0.9 及び 1.3° 、地下50及び90cmのパイプ近くでそれぞれ 3.5° 及び 2.5° であった。

露地地温とハウス内地温との温度差は、浅い位置程大であるため、ハウス内地中蓄熱量の熱

流出は主に地下50～60cmまでの浅い所から生じている率が大であることが推測できる。

夜間のハウス放熱量に占める地中熱交換量の割合は30～55%で、外気温が低下するほどその割合は増大した。

参 考 文 献

- 1) 山本雄二郎 (1973). 地中熱交換ハウスの温度環境および熱特性, 農業気象29(1), 11-15.
- 2) 内海修一 (1983). 省エネルギー技術の実際, 博友社.
- 3) 小倉裕幸 (1985). 被覆栽培の環秀調節, 農林統計協会.