

温室の地中熱交換暖房に対する一考察

| | |
|-------|-----------------|
| 誌名 | 千葉大学園芸学部学術報告 |
| ISSN | 00693227 |
| 著者 | 北条, 雅章 伊東, 正 |
| 巻/号 | 30号 |
| 掲載ページ | p. 47-52 |
| 発行年月 | 1982年3月 |

温室の地中熱交換暖房に対する一考察*

北条雅章 ・ 伊東 正
(園芸別科) (蔬菜園芸学研究室)

Some Proposals for Greenhouse Heating with Soil-Air Heat Exchange System

Masaaki HOJO and Tadashi ITO
Division of Practical Horticulture *Laboratory of Vegetable Science*

Abstract

Tomato plants were grown in the greenhouse by heating with a soil-air heat exchange system. In order to increase the efficiency of this system, heat balances were examined throughout winter.

The amount of collected energy on a sunny day seemed to deserve about 40% of the total solar radiation on the plant top. Although overall latent heat was 50% of collected heat energy and approximately 15% of released one, water drops formed on the inner surface of the heat exchange pipes below dew point during heat collection had negligible effect on the amount of released energy at night.

A diurnal range of soil temperature decreased with increasing distance from the outer surface of the pipe, the difference being 1.2°C at a distance of 15.5 cm.

In terms of the length of the pipe, it was found that even a 18 metres long pipe employed in the present experiment had an appreciable capacity for the heat exchanger.

緒言

わが国の施設園芸は、経済成長期に急速な発展を遂げ世界第一位にまで発達し、食生活に大きな変革をもたらした。しかし、潤沢な資源に支えられてきたこの施設園芸も、エネルギー有限の今日、今後の発展の方向に変換を迫られている。これまでわが国の施設栽培は技術的には、二重カーテンの利用、変温管理技術等の省エネルギー技術が確立されかなり効果をあげている。今後さらに、エネルギーの節約・有効利用、省エネルギー的栽培技術などが種々検討され生産現場へ普及するものと考えられる。

そのなかにあつてエネルギー節約技術としては、被覆の多層化のほか、被覆資材、温室構造の改善による暖

房負荷の軽減などが試みられている。また他方、石油に代る代替エネルギーの有効利用も試みられ、特に太陽エネルギーに関しては、地中熱交換方式(山本, 1977) Water mattress (SONDERN, 1968) がある程度実用化の段階に入ってきた。(板木, 1979; 北村, 1981; 森 1977; MORI, 1978)

地中熱交換ハウスについては、山本(1977)がその原理を提唱し、地中に素焼土管、塩ビパイプを埋設し、特性を調査した。その結果、床面純放射量の80%をハウス内に貯留できること、12月下旬から1月上旬には余剰熱量が不足熱量より少ないこと、パイプ間隔はパイプ内壁周長の $\frac{1}{2}$ 以上離す必要があることなどを明らかにした。また板木(1979)は、塩ビ管を試し、温度推移、ファン台数、パイプ本数などに検討を加え、この方式による太陽熱暖房の実用化の基準を作成した。森(1977)はパイプの代りに栗石の利用を提唱し、厳寒期のトマト栽培がこの方式による暖房だけで可能であることを実証した。しかしまだ、実際栽培ハウスへ

* 蔬菜園芸学研究室業績第77号。

本研究の一部は、園芸学会昭和55年春季大会ならびに秋季大会において発表。

の地中熱交換暖房の導入については、種々の検討すべき点が残されている。まずパイプの長さ、本数、埋設深度、間隔などの装置上の問題点がある。これらについては、かなり経験による面が多く基礎的データに乏しい。また、運転方法についても上・下限一定温度が一般的になっているが、その良否について検討を加えた試験は少ない。このほか補助暖房機との併用方法、日中の結露水の影響と除去対策等問題点は枚挙にいとまがない。

そこで本報告では、地中熱交換装置をハウス内に設置し、厳寒期から春にかけてトマトを栽培し、気温、湿度、地温などを経時的に測定し、この装置における熱収支、水分収支を算出した。本実験では地中伝熱量、床面純放射量、熱貫流率などは、測定しておらず不完全であるが、今後の地中熱交換暖房の設計に際し、参考資料になれば幸いである。

本研究にあたって、園芸環境工学研究室の古在豊樹博士ならびに武内英雄氏の助言と協力を得た。記してここに感謝の意を表す。

材料および方法

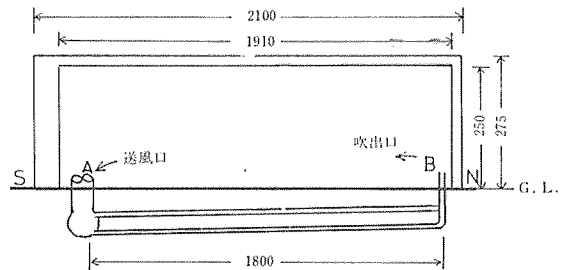
本実験に供試した施設は床面積 113m^2 の塩ビフィルム被覆のパイプハウスで、二重カーテンはサイドに塩ビ、天井部に酢ビ（いずれも厚さ 0.1mm ）を使用した。地中には第1、2図に示したように長さ 18m 、直径 10cm 、肉厚 3mm のポリパイプを上段に 10 本、下段に 9 本、 1000 分の 5 の勾配をつけて埋設した。パイプの継ぎ目は、土壌との水分の出入がないよう熱処理で接続した。ハウス中央部において上段パイプ上面は地表より約 45cm 下とし、各パイプはその中心が、1辺 40cm の正三角形となるよう配置した。ハウス南側に直径 60cm 、長さ 4m のポリ製メインパイプを埋設し、 0.4kw の有圧ファン 2 基（定格風量： $168.0\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 、実測風量： $50.3\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ）から送風された空気はメインパイプから分岐パイプを通りハウス北側に吹きあげる方式とした。

同ハウス内でトマト「大型瑞光」を供試し、1980年は1月5日は種、3月15日定植、1981年は前年9月15日は種、10月25日定植とした。ファン作動温度は初年度は日中 25°C 以上、夜間 12°C 以下、次年度は日中 20°C 以上、夜間 10°C 以下に設定した。

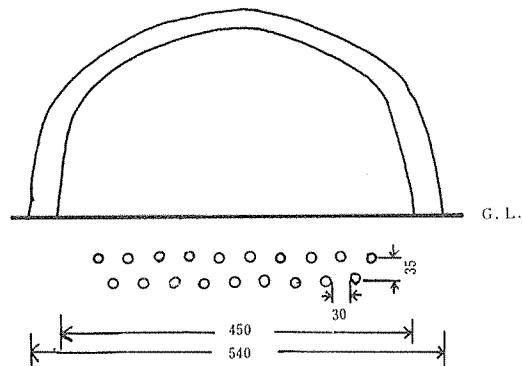
送風量は熱線風速計、温度は熱電対温度計（銅-コンスタンタン線）、日射量はエプリー型日射計をそれぞれ用いて測定した。温・湿度は図中の送風口 A と吹出口 B において測定した。また湿球は湿ったガーゼで感温部を包み、常時 $3\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上通風した。

全熱交換量、絶対湿度、相対湿度は、A、B 両点で

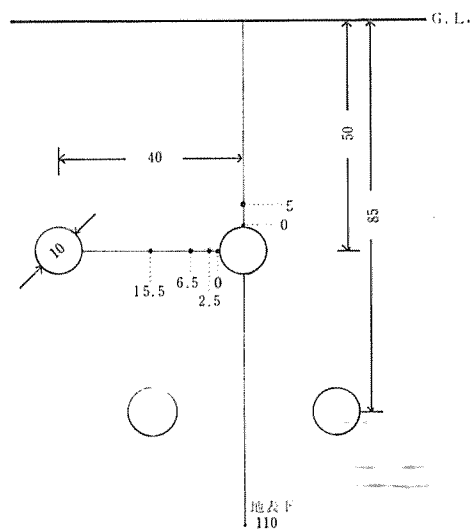
の測定値から、内田(1963)の湿り空気線図により算出した。地温分布は、栽培ベッド下にあたる西側より3本目の上段パイプを中心として、第3図に示した各測定点につき測定し、パイプ内通過空気の温度も同じパイプで測定した。



第1図 温室の地中熱交換暖房の側面図（単位cm）



第2図 地中熱交換暖房におけるパイプの配列状況（単位cm）

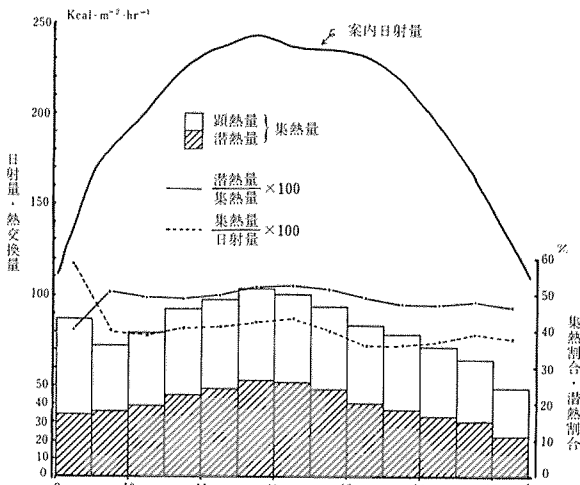


第3図 パイプの配列と地温の測定点（単位cm、印は測定点）

実験結果と考察

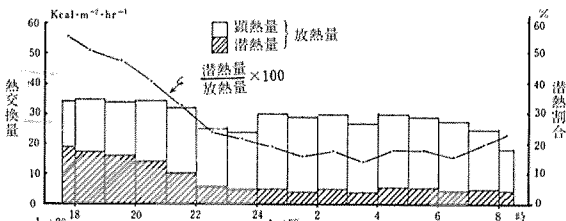
1. 集熱と放熱におよぼす潜熱交換の影響

2月8・9日の2日間のデータを平均してハウス内日射量、地中熱交換による集熱量および集熱量に占める潜熱量の割合を第4図に示した。日射量はハウス内外に設置した日射計により試験期間中の平均光透過率を求め屋外日射に乘じて算出した。集熱量は日射によく追従したが、集熱開始時だけはやや高くなった。日射量に対する集熱量の割合は40%前後で変動は少なかった。潜熱量は集熱量と同じ傾向で変化した。この潜熱の動向は、作物からの蒸散および土壌からの蒸発と考えられるが、本実験では土壌に全面ポリマルチをしたので大部分が作物からの蒸散と考えられる。また2日間の平均結露量はハウス床面積100 m²あたり49kgと推定できた。集熱量に占める潜熱量の割合は50%前後であった。



第4図 集熱時の日射量および潜熱量の推移 (2/8~9)

第5図に夜間の放熱の様相を示した。ファン作動時間の放熱量はやや高かったが、以降翌朝まで大きな変動は認められなかった。一方、潜熱量をみると、ファン作動後4~5時間の潜熱量は高かったが、5時間後から翌朝までほぼ一定の潜熱量が検出され、24時以

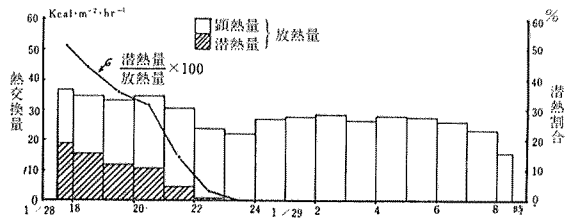


第5図 夜間の放熱量、潜熱量および潜熱割合 (1/28~29)

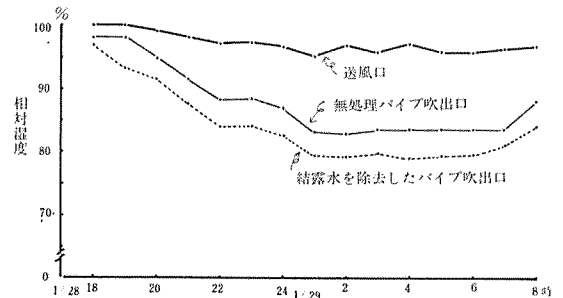
降でも放熱量に対する潜熱量の比が15~20%となった。また朝のファン停止時まで蒸発があったことをみると、集熱時に結露した水が夜間の放熱時だけでは蒸発しきれないこともあると推測した。

そこで、1月28日に上段の西側のパイプを密閉し、5分間ファンを逆転させ結露水を除去した場合の夜間の放熱パターンを第6図に示した。その結果、結露水を除去した場合には放熱開始後4~5時間は蒸発があったが、6時間後の23時からは全て顕熱交換となった。しかしながら、放熱量はこのように結露水を除去した場合でも、第5図に示した値と比較して大差なく、結露水の有無は、放熱量にほとんど影響しないことが判明した。

第7図に、同夜の放熱時の送風口と、結露水を除去したパイプと無処理パイプの吹出口の相対湿度を示した。送風口湿度は、夜間を通じて95%以上であったが、結露水を除去したパイプの吹出口では24時頃まで漸次減少し、翌朝まで80%程度に維持できた。一方、無処理パイプの吹出口では、これより3~4%高く推移した。



第6図 結露水を除去したパイプにおける放熱量 潜熱量および潜熱割合 (1/28~29)



第7図 結露水の除去が吹出口空気湿度におよぼす影響 (1/28~29)

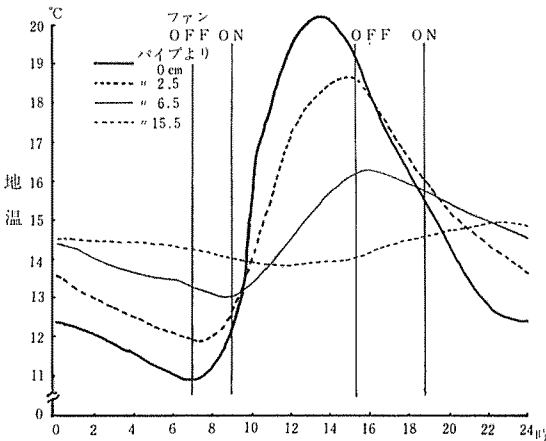
2. パイプの間隔、長さ、深さについて

第8図に、2月9~11日までの地温の水平分布を平均値で示した。この期間中は、快晴であり酷似した日変化を示した。測定は上段パイプ間のパイプ表面から0、2.5、6.5、15.5(両パイプ間の中心点)cmの4個所とした。

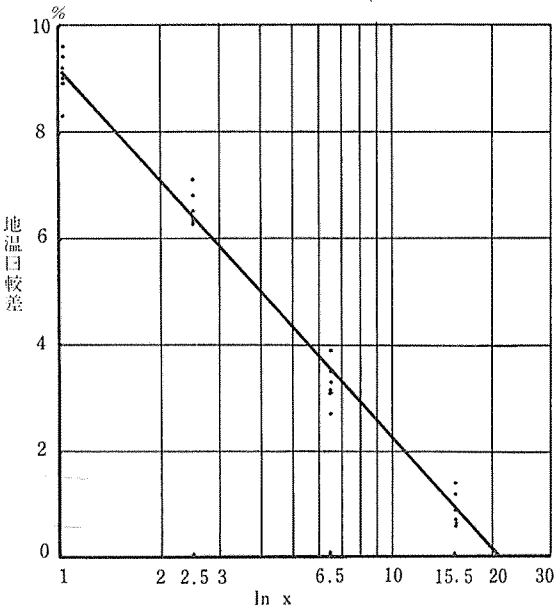
0 cmでは早朝、送風ファンの停止とともに温度が上昇しはじめ、集熱開始後は急激に上昇した。最高地温

はファン作動後4時間ほどで出現し、温度日較差は約9℃となった。またパイプからの距離が増加するに従い、温度日較差が減少した。

第8図をもとにして、地温の日較差とパイプからの距離の関係を第9図に示した。その結果、地中における熱の伝達は作物の栽培条件下で、パイプからの距離の対数に比例して減少することがわかった。この直線は、温度日較差をy、パイプ表面からの距離をxとしたとき、 $y = a \ln x + b$ で近似でき、測定期間中では、 $a = -3.03$ 、 $b = 9.13$ 、 $r = -0.992$ を得た。上式でy=0のとき、 $x \approx 20.3$ となりパイプから20.3cm離れた地点では、地温がほぼ一定になることが予測できる。



第8図 上段パイプ附近の水平温度分布の変化 (2/9~11)



第9図 上段パイプ間におけるパイプからの距離 (x) と地温の日較差 (2/9~11)

このことは、現在、熱交換パイプを等間隔で40~50cmとしているが、施工上必ずしも等間隔に配置する必要はなく、局部的にはパイプを30cm程度まで接近しても熱交換率はそれほど低下しないことを意味している。

次にパイプの長さについては、高倉(1980)が山本の測定結果より試算し、10m前後が望ましいと報告しているが、実際の設置にあたっては、20~30mの場合も少なくない。そこでパイプ長が18mある本実験装置において、送風口から1mをP₁、中央部をP₉、吹出口から1m手前で送風口から17mにあたる点をP₁₇とした場合に、通過空気温度を測定し、パイプ長に対する考察を行なった。第1表は、1月20~23日に西側ベットの上下段パイプを使用し測定した結果で、時間の経過とともに、送風口・吹出口間の温度差は増加し、P₉点におけるパイプ表面と通過空気の温度差は2℃近くあった。また、P₉とP₁地点の温度差ならびにP₁₇とP₉地点の温度差が早朝では大差なかったことから、本装置のような18mのパイプ長でも充分熱交換するものと考えられる。

第1表 パイプの長さを通気空気温度 a (°C)

| | 測定時刻(時) | | | | |
|---------------------------------|---------|-----|------|------|------|
| | 18 | 21 | 24 | 3 | 6 |
| ハウス内気温 | 9.0 | 6.8 | 4.7 | 4.4 | 4.0 |
| 吹出口-送風口 | 1.8 | 2.5 | 3.2 | 3.5 | 3.8 |
| パイプ表面-空気 ^b | 0.3 | 0.8 | 1.4 | 1.6 | 1.9 |
| P ₉ -P ₁ | 0.2 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 1.0 |
| P ₁₇ -P ₉ | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.8 | 1.0 |
| P ₁₇ -P ₁ | 0.3 | 0.8 | 1.6 | 1.7 | 2.0 |
| 屋外気温 | 2.7 | 0.7 | -0.7 | -1.6 | -1.9 |

a : 1981年1月20~23日の平均。

b : 熱交換パイプの中間点で測定。

P₁、P₉、P₁₇はそれぞれ送風口側から、1、9、17mの点を示す。

第2表に時期別の上下パイプの放熱特性と地表下110cmの地温を示した。厳寒期の1月21日では、下段パイプの放熱量が上段より40~60%ほど高く、2月、3月と進むにつれて上段パイプの放熱量が、下段より相対的に高くなった。また1月21日と2月7日の測定例では、上段パイプでは時期的変動が少なかった。地表下110cmの地温は、1月の12.1℃から3月の15.2℃まで上昇傾向を示した。

パイプ埋設深度について、山本(1977)、板木(1979)の報告では、50cm程度が適当としている。本報告では、時期と深度により放熱量に差が生じることが判

明し、これは深層部の地温の影響と推察されるが、熱流の動きが明らかでなく、今後深層部地温の影響について検討する必要がある。

3. 運転方法が地温におよぼす影響

地中熱交換暖房を厳寒期を通して、昼夜運転した場合、

日中の集熱量が不足して夜間の放熱によりパイプ周辺の地温低下を招くことが予測される。第3表に、測定期間中の最低外気温、ハウス内最高・最低気温および上段パイプ上5cm地点（地表下約40cm）の最高・最低地温を示した。ハウス内最低気温は、1月中5℃

第2表 パイプ埋設位置による放熱量の差異 (Kcal·m⁻²·hr⁻¹)

| 年月日 パイプの位置 時刻 | 81. 1. 21. ~22. | | | 81. 2. 7~8. | | | 80. 3. 24. ~25. | | |
|---------------------|-----------------|------|-----------|-------------|------|-----------|-----------------|------|-----------|
| | 上段 | 下段 | 下段 上段比 | 上段 | 下段 | 下段 上段比 | 上段 | 下段 | 下段 上段比 |
| 18~21時 | 30.7 | 43.5 | 1.42 | 38.9 | 40.0 | 1.03 | — | — | — |
| 21~24 | 26.6 | 42.0 | 1.58 | 25.5 | 28.9 | 1.13 | 59.1 | 34.6 | 0.59 |
| 0~3 | 32.4 | 50.6 | 1.56 | 29.0 | 30.8 | 1.06 | 45.7 | 25.0 | 0.55 |
| 3~6 | 35.2 | 55.8 | 1.59 | 31.5 | 33.4 | 1.06 | 34.8 | 11.9 | 0.34 |
| 地表下110cm の地温 | 12.1 | | | 13.0 | | | 15.2 °C | | |

パイプの位置：上段は地表面下50cm、下段は85cmとした。

第3表 屋外最低気温、ハウス内気温および地温(°C) (1980~1981)

| 月 日 | 屋外最低 | ハウス内 | | 上段パイプ上5cm | |
|-----------|------|------|------|-----------|------|
| | 気温 | 最高気温 | 最低気温 | 最高地温 | 最低地温 |
| 12. 17~21 | 0.3 | 21.6 | 6.4 | 12.4 | 10.9 |
| 25~28 | 0.6 | 21.3 | 5.7 | 11.4 | 9.5 |
| 1. 14~20 | -2.5 | 21.0 | 4.5 | 11.5 | 9.1 |
| 21~25 | -2.3 | 21.3 | 4.6 | 11.9 | 9.5 |
| 26~31 | -1.7 | 21.7 | 4.5 | 12.2 | 8.4 |
| 2. 3~5 | -1.8 | 22.7 | 6.0 | 12.9 | 10.6 |
| 6~10 | -2.1 | 26.5 | 6.0 | 15.4 | 12.0 |
| 11~15 | 0.2 | 22.7 | 6.9 | 15.0 | 13.7 |
| 16~21 | -1.1 | — | — | 14.6 | 13.6 |

第4表 地中熱交換暖房における集熱量と放熱量 (1981)

| 月・日 | 集 熱 | | | 放 熱 | | | 放熱量 集熱量 × 100 |
|-------|---------------|----------------------------------|---|---------------|----------------------------------|---|------------------|
| | 運転時間 (min) | 集 熱 量 (Kcal·m ⁻²) | 単位時間 熱交換量 (Kcal·m ⁻² ·hr ⁻¹) | 運転時間 (min) | 放 熱 量 (Kcal·m ⁻²) | 単位時間 熱交換量 (Kcal·m ⁻² ·hr ⁻¹) | |
| 1. 21 | 280 | 336 | 72.0 | 900 | 473 | 31.5 | 141 |
| 22 | 315 | 352 | 67.0 | 895 | 539 | 36.1 | 153 |
| 28 | 230 | 297 | 77.5 | 940 | 428 | 27.3 | 144 |
| 29 | 260 | 361 | 80.1 | 875 | 472 | 32.4 | 131 |
| 2. 3 | — | — | — | 831 | 421 | 30.4 | — |
| 8 | 385 | 589 | 91.8 | 665 | 412 | 37.2 | 70 |
| 9 | 385 | 558 | 87.0 | 613 | 391 | 38.3 | 70 |
| 10 | 383 | 443 | 69.4 | 640 | 421 | 39.5 | 95 |

以下まで低下した。また地温は1月下旬まで低下が続き、最低 8.4°C となったが2月から上昇した。

第4表に1月下旬から2月上旬までの、熱収支を示した。2月3日以外は日中晴天日を選定した。送風ファンの運転時間は、1月中は集熱時間に比較して放熱時間が極めて長いが、2月に入るとその差は減少した。放熱量/集熱量比は1月下旬では、131~153と高いが、2月上旬では100以下となった。また、日中集熱のなかった2月3日の夜間の放熱は、単位時間熱交換量が30.4Kcal・m⁻²・hr⁻¹となり、前後の夜間放熱量に比べて遜色がなく、集熱がなくとも大きく減少しなかった。

第3表の地温の時期別変動と比較すると、放熱が集熱を上まわる時期は地温が低下することが判明した。

トマトの最低限界地温は、10°C程度(藤井・伊東、1962)とされるが、本システムによる暖房だけでは、長期にわたってこの温度以下となる場合が予想される。したがって、地中熱交換暖房の運用方法として、これまでのように夜温を基準として制御を行なうだけでなく、地温も制御の指標にする必要があると考えた。

摘 要

トマトを地中熱交換暖房のビニルハウスで栽培し、冬期間にその熱収支を調査した。

晴天日の集熱量は、ハウス内作物上の全日射の40%程度であった。また潜熱量は集熱量の約50%、放熱量の約15%を占めたが、露点以下でパイプ内部に結露した水滴は、夜間の放熱量に顕著な影響をおよぼさなかった。

地温の日較差はパイプ外表面から離れるに従って減少し、パイプから15.5cm離れた地点で日較差 1.2°C となった。パイプの長さに関しては、本実験では18mとしたが、この長さでも熱交換器として有効であることがわかった。

引用文献

- 藤井健雄・伊東正(1962) 果菜栽培温度に関する研究 (2) ビニールハウス定植時の気温・地温がトマト・キュウリの発育に及ぼす影響. 千大園学報, 10: 71-80.
- 板木利隆(1979) 太陽熱利用による蓄熱ハウス. 農及園, 54(1): 181-187.
- 北村一男(1981) 地中熱交換施設の熱収支の数値試験 (第1報) - 地中埋設管の長さ・施設内気温の設定値の影響 -. 埼玉園試研報, 10: 35-45.
- 森俊人(1979) 地中熱交換方式による冬季ハウストマト栽培の実用性. 農及園, 52(1): 41-45.
- MORI, T. (1978) Utilization of solar energy for

winter cropping green house tomato.

Acta Hort. 87: 321-327.

- SONDERN, J. A. (1968) Influence of the air temperature in tunnels by means of the "Accumulating effect" of a Water mattress. Acta Hort. 9: 59-60.

高倉直(1980) 新エネルギー利用「温室設計の基礎と実際」(三原義秋編著) 養賢堂 238-245.

内田秀雄(1963) 湿り空気と冷却塔. 裳華房

山本雄二郎(1977) 地中熱交換方式による栽培用ハウスの暖房に関する研究. 電力中央研究所報告, 476007: 1-67.