

地中蓄熱型ソーラー温室に関する研究（続報）

STUDIES ON SOLAR GREENHOUSE USING AN UNDERGROUND HEAT STORAGE SYSTEM (Further report)

吉岡 勉^{*1} 森田 英夫^{*2} 越智 敏明^{*3} 多賀 正夫^{*4}
Tsutomu YOSHIOKA Hideo MORITA Toshiaki OCHISI Masao TAGA

Abstract

Heat storage in soil and its recovery are examined by indoor tests and the results are proved by a practical greenhouse, in order to study the effective utilization of the excess heat which is often produced in a solar greenhouse on a sunny day. Influence of the degree of the water saturation of the soil and the temperature of the circulating air on the heat storage and recovery are studied by the indoor tests, and the effect of the growing crops is examined by the practical greenhouse.

As the degree of water saturation of the soil or the temperature of the circulating air increases the heat transmission to the soil increases. But the soil near the heating surface becomes dry and the heat transfer decreases with time.

Without crops the radiant energy into the practical greenhouse dominantly transmitted through the ground surface, and the heat transmitted through the underground duct is smaller compared with those with crops. On the other hand, in the case that incident energy is isolated by the crops, the heat transfer through the underground duct surface is active and the soil surrounding the ducts work as the effective heat storage matter.

Key words: Heat storage, Heat and mass transfer, Soil heat storage.
Solar greenhouse. Agricultural greenhouse.

1. 緒言

農業用温室において、冬季晴天日に昼間の余剰熱を温室地下に埋設した熱交換パイプによって土壌地熱として蓄熱しておいて、夜間等の暖房用にその熱を回収して利用する地中蓄熱型ソーラー温室に関しては、すでに多くの実験^{(1), (2)}および理論解析^{(3), (4), (5)}が行われている。著者らも前報⁽⁶⁾において三重県熊野地方に建設した地中蓄熱型ビニル・フィルム製ソーラー温室で実験を行って、従来、解明の不十分であった温室内部空気中および土中での水分がシステムの性能

におよぼす、影響に関して主として報告した。

これに続いて1990年には、土中水分を調節するために温室地下の蓄熱土壌部を防水隔膜で囲んで、周囲からの水分の出入りを防いで、より正確な実験を行った。また、1991年には、さらに温室内で作物を栽培して、これに定期的に散水をした場合の実験を行った。また、その後このような温室での地中蓄熱の特性を解明するために、含水土壌中に埋設したパイプよりの伝熱、蓄熱および熱回収特性を解明するため室内での基礎的実験を行った。

含水土壌中での伝熱問題は熱、水分の同時移動現象として国内、外の土壌科学者等が実験的および理論的研究を進めている^{(7), (8), (9)}。しかし、従来の研究では一定のモデルを想定した解析が多く、実際に起こり得る条件下での実験結果の報告は少ない。

熱、水分の同時移動に際しては土質をはじめとして土中の初期飽和度、温度分布が微妙に現象を支配する。また、埋設パイプの材質および形状、配置等の幾何学的条件や重力による水分移動がその特性におよぼす影響も大きい。まして、実際に作物を栽培し、散水、肥料散布などをした状態での現象は極めて複雑である。

* 原稿受付 平成7年8月9日

*1 会員, 熊野工業高等専門学校 機械工学科
(〒519-43 三重県熊野市有馬町 2800)

*2 会員, 元近畿大学 工学研究科 大学院生
(〒577 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

*3 大阪府立工業高等専門学校 機械工学科
(〒572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

*4 会員, 近畿大学 大学院生
(〒577 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

本研究では、まず、基礎的研究として地中蓄熱型ソーラー温室の場合を想定して、各種水分飽和度の土壌中に水平パイプを埋設し、数時間にわたる蓄熱と、それに続く熱回収の実験を行った。

第2章において、実験によって含水土壌中の水分が蒸発、凝縮等の相変化を起こしつつ移動する現象を測定して、その特性が土壌の初期飽和度、加熱温度等によってそれぞれ異なり、これが熱移動と密接に関連していることを実験例を上げて論述した。

ただし、蓄熱、熱回収特性には、さらに境界条件とか重力の影響も大きく、これら全因子の影響を整理して、あらゆる条件下での温度分布を推定することは容易ではない。したがって、ここでは実際のシステムの設計資料として各初期飽和度に対応する見かけの熱伝導率を実験的に決定した結果とその影響等に関して議論している。

第3章においては作物栽培中の実地試験の結果を述べている。地中蓄熱型温室では、地中埋設パイプでの蓄熱、熱回収のみでなく、温室内地表面での熱交換もシステムの性能に大きく影響する。ここでは主として作物を栽培し、散水を行っている場合と作物の無い場合とを比較した結果を報告し、実際の地中蓄熱型温室設計のための参考資料を提供する。

2. 室内基礎実験

2.1 実験装置および方法

供試土壌は粒径が0.2~0.45 mmで、圧縮性が少なく、透水性に優れた鋳物砂（山川産業 K.K, KF-6号, JIS 6号品）を用いた。

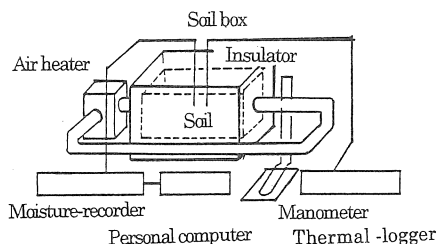


図1 室内実験装置

この砂を図2に示すような560×560×800 mmの周囲を断熱された土箱に入れ、その中央位置に内径50 mm、外径55 mmの銅製パイプを水平に埋設し、これを図1に示すような装置で35℃~65℃の熱風を風量4 m³/minで50時間循環させて土壌

中に蓄熱した後、続いて実験室内の冷風（約20℃）を流し続けて50時間熱回収をする実験を行った。

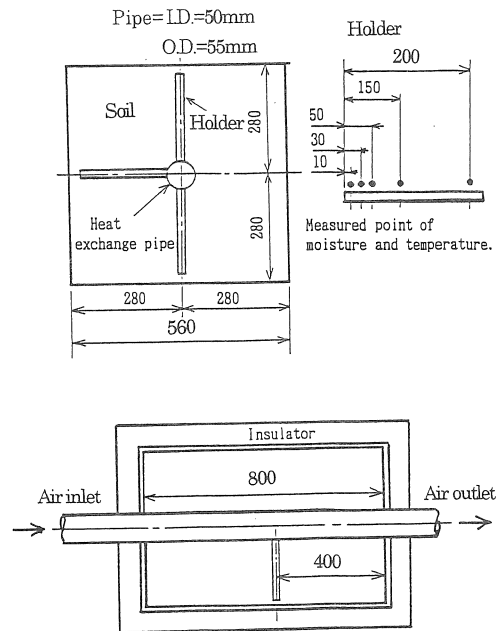


図2 土壌温度、含水率測定位置

室内温度 t_i は20℃の一定とし、初期飽和度 H_i の実験範囲は0%~30%である。ここで飽和度 $H = (\text{液相の体積}) / (\text{土壌中の空隙の体積})$ で定義される。

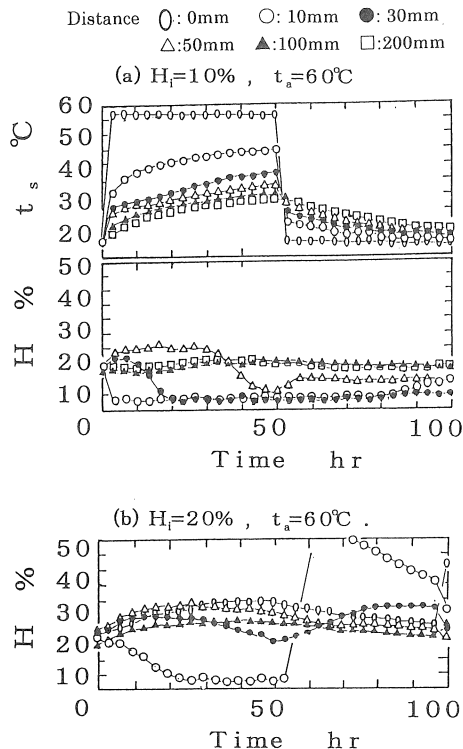
土壌温度 t_s および飽和度 H は図2に示す位置で熱電対 (T-type) および、あらかじめ電圧-飽和度の関係を検定しておいた電気抵抗水分計（山崎精機式, AF-212型）を用いて計測した。

2.2 含水土壌での飽和度の変化

図3(a)は初期飽和度 $H_i = 10\%$ 、温風温度 $t_i = 60^\circ\text{C}$ の場合のパイプから水平方向の各半径位置での土壌温度 t_s および飽和度 H の経時変化を示す。パイプ外壁から距離 $L = 1\text{ cm}$ の位置では、図にある○印の実験値が示すように蓄熱開始後直ちに土壌が乾燥し始め、2~3時間後には飽和度 $H = 3\%$ 程度となる。この間の水分蒸発によって、その付近での蒸気分圧は増大し、蒸気が半径方向に移動する。しかし、移動先の距離 $L = 3\text{ cm}$ (●印) および 5 cm (△印) の位置では温度曲線の図に示されているように、いまだ、土壌温度の上昇が小さく、そのために蒸気が冷却されて凝縮し、再び水分となる。したがって、図示のように

一時的な飽和度の上昇が見られる。

乾燥がパイプ近傍から遠方へ進むに伴い、この現象も遠方で現れるが、 $H_i = 10\%$ で 50 時間までの加熱では、距離 $L = 10\text{ cm}$ 以上の位置においては、それほど顕著には現れない。



様相を呈す。すなわち、図 3 (d) の初期飽和度 $H_i = 10\%$ 、温風温度 $t_a = 35^\circ\text{C}$ のように飽和度、温風温度が共に低い場合には、上述のような飽和度の一時

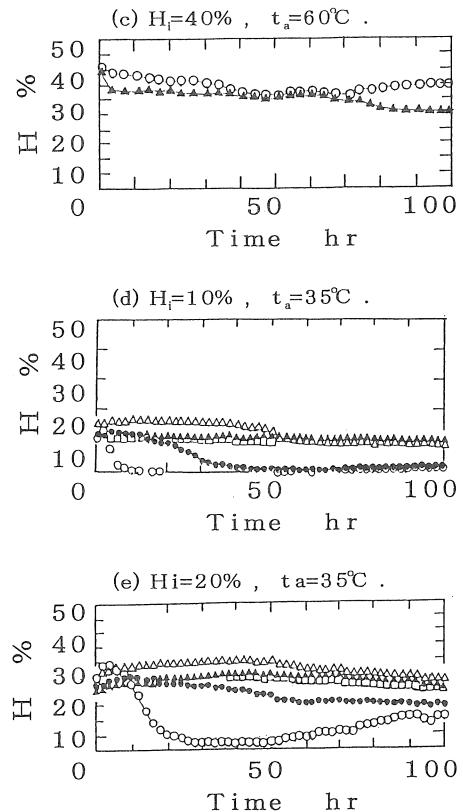


図 3 含水土壌での飽和度の経時変化
(水平方向における初期飽和度 H_i および温風温度 t_a の影響)

なお、このような現象は初期飽和度 H_i の相違によって、その現われ方が異なる。図 3 (b) のように初期飽和度 $H_i = 20\%$ では、距離 $L = 1\text{ cm}$ の位置が乾燥して飽和度 $H = 2 \sim 3\%$ に達するには、20 数時間を要する。また、前述の飽和度 H が一時的に上昇する現象は距離 $L = 3 \sim 20\text{ cm}$ の全範囲で生じている。

しかし、初期飽和度 H_i が非常に大である初期飽和度 $H_i = 40\%$ においては図 3 (c) のように (○, ▲印) この現象は現れない。これは水分があまりに多いので、土壌全体が常に水分を液状で含んだ状態で、50 時間では乾燥しきれないため、この場合には水分が液相状態で移動していると考えられる。

なお、これらの現象では温風の温度によっても図 3 (d) および (e) に示すように、それぞれ異なった

的上昇現象は現れない。しかし、温風温度は低くても初期飽和度の高い、図 3 (e) の初期飽和度 $H_i = 20\%$ では、距離 $L = 1\text{ cm}$ の位置で現われている。

つぎに、50 時間の蓄熱後、熱回収のために 20°C の冷風をパイプに循環させた場合について論述する。

一般には、飽和度 H と温度は時間の経過と共に低下する。しかし、図 3 (b) の距離 $L = 1\text{ cm}$ の実測値が示すように、蓄熱終了時に飽和度 $H = 2 \sim 3\%$ 近くまで乾燥していたものが、熱回収開始と同時に急激に約 50% 以上の飽和度に上昇することもある。これは、その位置での土壌が急冷却されて、水蒸気が凝縮する現象である。この現象は図 3 (b) の距離 $L = 3\text{ cm}$ 、図 3 (e) の距離 $L = 1\text{ cm}$ の場合にも、その上昇程度は小さいが発生している。上述のように、含水土壌

中でのパイプからの伝熱においては、初期飽和度、温風温度によってそれぞれ様相の異なる水分移動と熱移動が生じる。含水土壌での伝熱に関しては、従来の研究においても熱、物質の同時移動現象が取り上げられているが、実際に生じる、このような蒸発、凝縮に基づく特異現象は論じられていない。なお、この現象はパイプに対する上下方向では、さらに重力の影響が加わり、また、蓄熱および熱回収を行う時間によっても大きく影響される。したがって、各因子の影響をすべて調べることは容易ではないので、ここでは実例を上げてこのような現象の存在を説明するにとどめる。

2. 3 地中温度分布、蓄熱量、回収熱量

前述の土壌中における水分移動に伴う飽和度の変化現象はパイプ周辺の温度分布、蓄熱量、回収熱量にも微妙な影響をおよぼす。

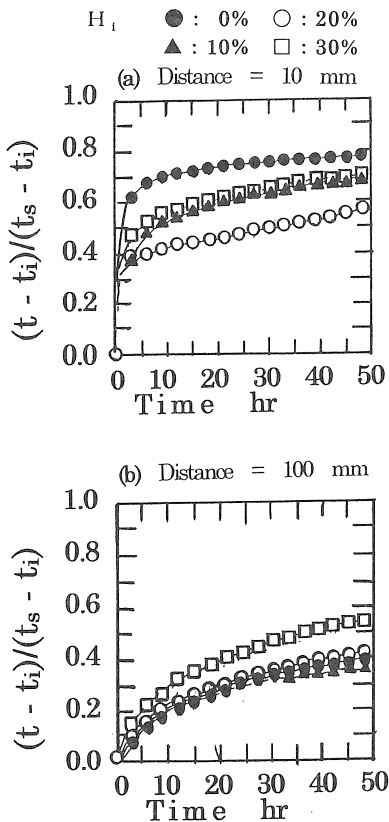


図4 地中無次元温度
 (初期温度 $t_i = 20^\circ\text{C}$, 温風温度 $t_s = 60^\circ\text{C}$)

図4は、一例として、温風温度 $t_s = 60^\circ\text{C}$ 、初期土壌温度 $t_i = 20^\circ\text{C}$ の場合に関しての距離 $L = 1\text{ cm}$

と 10 cm の位置の無次元温度 $= (t - t_i) / (t_s - t_i)$ の経時変化を示す。一般的には図4 (b) に示されているように土中の水分が多いと熱伝導率が大となり、したがって、温度上昇も大きくなるはずであるが、前述の水分の蒸発、凝縮の影響で必ずしも初期飽和度には比例しない。特にパイプ近傍では図4 (a) のように初期飽和度 $H_i = 10\%$ および 20% の場合が初期飽和度 $H_i = 0\%$ の場合より水分蒸発のために温度が低く、水分の多い 20% の場合が最低である。しかし、 30% では、水分移動による熱伝導性の向上で再び 10% と同程度の値を示している。

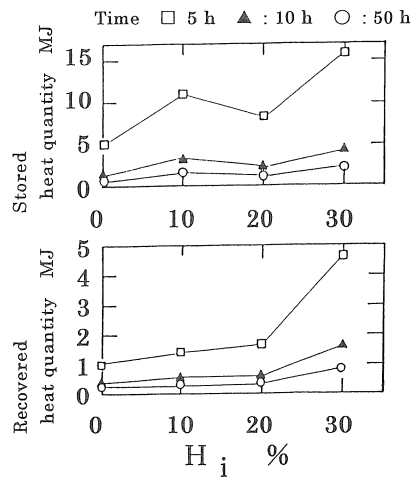


図5 蓄熱量および回収熱量
 (初期温度 $t_i = 20^\circ\text{C}$, 温風温度 $t_s = 60^\circ\text{C}$)

この特性は図5に示す蓄熱量と初期飽和度との関係にも現れていて、初期飽和度 $H_i = 10\%$ の方が 20% の場合より各経過時間とも蓄熱量が大である。これは水分蒸発による潜熱蓄熱が 10% の方が大であるためと考えられる。ただし、熱回収量に関しては図5 (b) に示すように初期飽和度 H_i が大であるほど土中での熱伝導が大であるため、回収熱量が多くなる。

2. 4 数値計算

含水土壌中での伝熱現象に関しては、熱および物質の同時移動問題として、従来一定のモデルの下での解析が試みられている。しかし、実際の現象は前述したように非常に複雑で厳密な解析解を得ることは容易ではない。そこで本研究においては、このようなシステムの設計資料として役立つため、次に示す計算を試みた。

図6および表1に示す計算条件で2次元非定常熱伝導方程式を有限要素法によって解いて、その数値計算の結果が実験値と一致するような見かけの熱伝導率の値を試行的に算出した。図7は各初期飽和度 H_i に対する各経過時間における見かけの熱伝導率の値を示した。

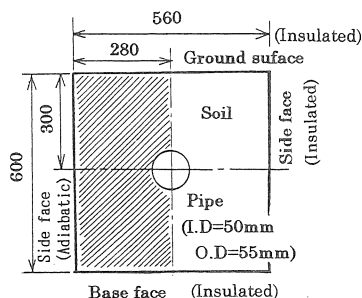


図6 数値計算モデル

表1 数値計算に用いた諸値

空 気	熱伝導率	0.0287	W/m·K
	密 度	1.176	kg/m ³
	動粘性係数	0.2015	m ² /s
	流 速	12.06	m/s
土 壤	熱伝導率	0.252~1.613	W/m·K
	密 度	1510~1700	kg/m ³
	比 熱	1.525	kJ/kg·K
パイプ (銅)	熱伝導率	386	W/m·K
	密 度	8950	kg/m ³
	比 熱	0.382	kJ/kg·K
	内 径	50	mm
	肉 厚	2.5	mm
	熱伝導率	11.631~81.49	W/m ² ·K
	熱貫流率	11.630~81.41	W/m ² ·K

初期飽和度 $H_i = 10\%$ での値が、初期飽和度 $H_i = 20\%$ の場合より大であるのは前述した土壤中での水分の相変化の影響である。

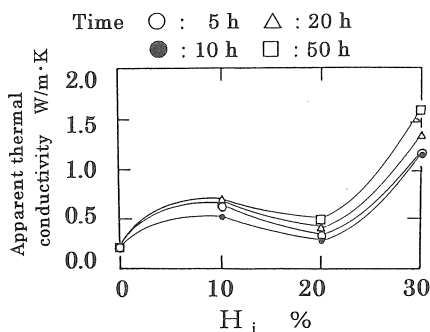
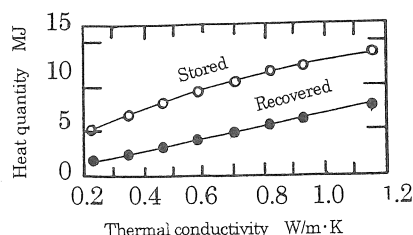
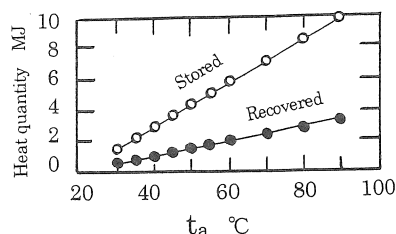


図7 見かけの熱伝導率

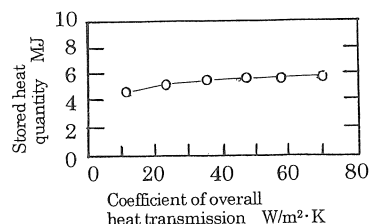
図8は熱伝導率の値が蓄熱量および回収熱量におよぼす影響を理論計算によって示したもので、土中水分が多く、見かけの熱伝導率が大であると、蓄熱量および回収熱量は初期飽和度 $H_i = 0\%$ の乾燥土壌の場合より数倍多くなることが示されている。

パイプ内を循環させる温風温度によっても当然、蓄熱量および回収熱量は大きく支配され、土壌の熱伝導

図8 蓄熱量、回収熱量と熱伝導率の関係
(50時間経過後)図9 温風温度 t_a と蓄熱量、回収熱量の関係
(50時間経過後)

率 $= 0.252 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ の値を用いた50時間経過後の計算値は図9のようである。

しかし、同様の数値計算の結果によればパイプ内の流体と土壌との間の熱貫流率の影響、すなわち、パイプ材質および空気流速の影響は図10に示すように、また、パイプ外壁から断熱壁までの距離、すなわちパイプを多数配列した場合のパイプ間隔の影響は図11に示すように、両者とも、熱伝導率の影響と比べて無視できるほど小である。

図10 蓄熱量と熱貫流率の関係
(50時間経過後)

つぎに、図6の計算モデルでは地表面を断熱条件としているが、そのかわりに自然対流の条件(熱伝達率 $=5.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)を与えて地表面上の温度の影響を計算をした結果を図12に示す。図示のように地表面上の環境温度によって蓄熱量にはかなりの差異が生じる。

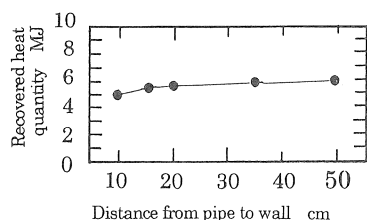


図11 蓄熱量、回収熱量と断熱境界位置関係(50時間経過後)

したがって、実際の地中熱交換型温室においては散水による土壌含水率の差異、温室内温度、地表面での栽培物の有無等の条件によって、その蓄熱および熱回収特性に大きな差異が生じるものと考えられる。

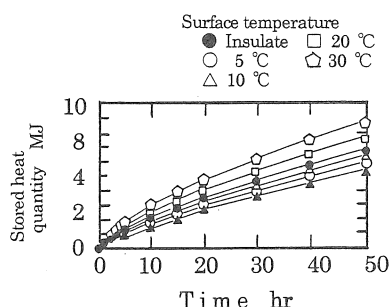


図12 各地表面温度の蓄熱量時間的变化

3 地中蓄熱型温室の屋外実験

地中蓄熱型温室においては、温室地下に埋設した熱交換用パイプでの蓄熱および熱回収の性能は、基本的には、第2章で述べた地中埋設パイプの伝熱特性に基づいて定まる。しかし、実際には地表面からの日射および温室内空気との対流伝熱等も大きな支配因子となるので、その蓄熱特性の解析は容易ではない。特に温室内に作物が栽培されている場合に関しては、従来、二、三の解析⁽⁵⁾、⁽⁶⁾が行われているのみである。本章では、土中水分の多少および作物の有無がその蓄熱および熱回収性能におよぼす影響を同一温室によって実験的に解明した結果について述べる。

3.1 実験温室および実験条件

実験に用いた地中熱交換型ソーラー温室の概要を図13に示す。温室は床面積 46.0 m^2 ($11.5 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$)であり、高さ 3.34 m のパイプ製で、農業用ビニル・フィルム(JIS K 6732 5種)1枚で張られている。温室内地下土壌中には熱交換用として硬質塩化ビニル管(JIS K 6723 5種 VU100)14本が深さ 430 mm の地中に水平に埋設されている。

空気循環用ファンの設置場所、地中パイプ出口部などを除いた実際に栽培物を作付けできる有効受熱面積は 31.2 m^2 ($4.0 \text{ m} \times 7.8 \text{ m}$)であり、この部分の地下 930 mm までが蓄熱土壌部である。この蓄熱土壌部は1990年の実験からは、塩化ビニル製・シートで側面、底面を囲い、外部からの水の出入りを防いで実験した。地中に埋設した熱交換用パイプへの送風には一般に、温室換気扇(400 W)に用いられてる

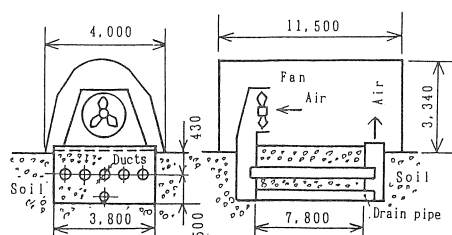


図13 屋外実験に用いた温室

ファンをそのまま転用し、パイプ出口での風速は1990年の栽培物が存在しない場合には 6.0 m/s 、1991年の作物が存在する場合には 5.0 m/s であり、ファンは24時間連続運転された。

1989年12月1日から1990年3月30日までの冬季4ヶ月間は作物無しで実験し、散水は各月において月初めに 2 m^3 の水を有効受熱面に散水した。

1990年12月1日から1991年3月30日までの冬季の4ヶ月間の実験では、温室内に、レタス、キャベツなど背の低い野菜を植えた状態で、毎日 2 m^3 の散水を行って蓄熱土壌の含水率を平均20%に保った。外気温度と湿度、温室内空気温度と湿度および地中温度はT-type 熱電対と乾湿温度計によって代表的な数十ヶ所の位置で測定された。地中埋設パイプと土壌間の熱交換量はパイプ入口と出口における循環空気のエンタルピー差から算出された。日射量は温室外において温室の最高の高さ部と同じ高さの位置において水平面全天日射計で計測された。

3. 2 実験結果

図14は温室内に作物無しで月に1回のみ 2 m^3 の水を散水した1990年2月の実験結果と温室内に作物を植え付け2ヶ月経過した後、毎日 2 m^3 の散水を行った1991年2月の実験結果から算出した地中パイプでの蓄熱効率と熱回収効率を示す。これらは地中埋設熱交換用パイプから土壌への蓄熱量および回収熱量を当日の日射量で除した値である。図示のように、蓄熱効率は作物が存在しない場合が大である。

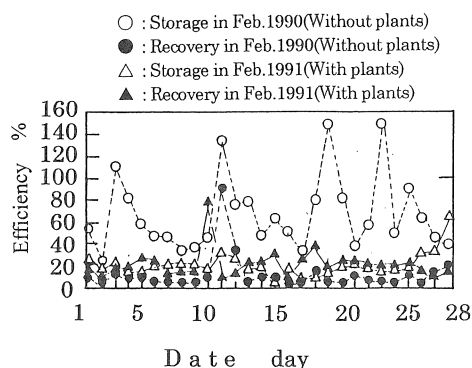


図14 1990年, 1991年2月の地中パイプにおける蓄熱効率, 熱回収効率の実験結果

作物が存在しない場合には、入射エネルギーが直接地表に入り、地表での土壌が加熱されて温度上昇する。そのため日没後数時間は温室空気は地表によって加熱され、その熱が空気循環用ファンによって地中パイプに送られ、下部土壌中へ蓄熱されるためである。

熱回収効率の値は作物の存在する1991年が大きい値である。これは作物が栽培されているため地表での熱交換が少なく、地中パイプでの熱交換が主となることにもよるが、1991年の方が土壌中の含水量が多いことも影響していると思われる。

また、図14において、温室内に作物の存在しない1990年2月の蓄熱効率が100%を越えている特異日が数日現われている。

図15に示す1990年2月2日~3日の実験結果で調べて見る。2月3日は日射量 $1.56\text{ MJ/m}^2\cdot\text{day}$ 、外気最低温度 6.5°C 、地表最低温度 10.4°C 、最高温度 12.1°C 、地中パイプに於ける蓄熱量は 51.62 MJ/day である。前日の2月2日においては日射量は $13.25\text{ MJ/m}^2\cdot\text{day}$ 、地表最低温度 7.5°C 、最高温度 19.1°C 、地中パイプの蓄熱量は 79.63 MJ/day 、外気最高温度 13.4°C である、当日はこのよ

うに日射量が少なく、外気温度は比較的高い。また、前日はこのように日射量が多く地表での蓄熱量が多

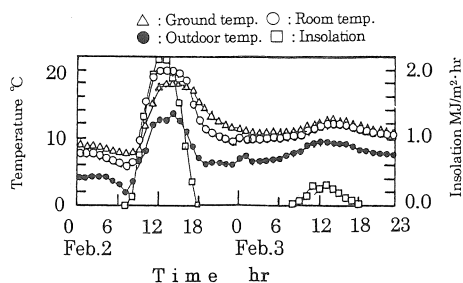


図15 地中熱交換パイプの蓄熱効率が100%を越える日の状況

い。したがってこのような条件の日には、前日に上部蓄熱土壌部へ蓄熱された熱量が外気温度の低い当日に回収され、下部蓄熱土壌部へ運ばれ、蓄熱量が増え、しかも日射量が少ないので蓄熱効率が極端に大となったものと考えられる。

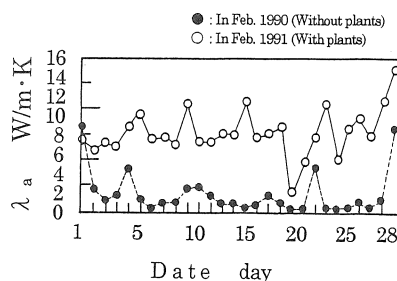


図16 見かけの熱伝導比

図16は土壌中の熱伝導性を示す指標として、実測値を用いて地中パイプから $L_g=350\text{ mm}$ 離れた位置での地温 $t_{s,350}$ の日平均値とパイプ内空気の日平均温度 $t_{a,p}$ との差で回収熱量 Q_R を除した、見かけの熱伝導比 $\lambda_a = L_g \cdot Q_R / (t_{a,p} - t_{s,350})$ を計算した結果を示す、第2章の基礎実験の結果によっても明らかのように、土壌中の含水率が大きければ熱伝導性が良いので、この見かけの熱伝導比の値も散水の多い作物を栽培している場合が大となっている。

一般的に、蓄熱効率の値は日射量 H_R が大きく、温室温度 T_r と外気温度 T_o との差 $(T_r - T_o)$ の値が小さくて放熱が小さい場合ほど大きい。すなわち、 $(T_r - T_o) / H_R$ の値に逆比例するものと考えられる。図17は地中熱交換パイプにおける蓄熱効率 η_s と $(T_r - T_o) / H_R$ との関係を示す実験結果である。

ただし、前述の蓄熱効率100%を越える特異日のデータは省略した。図示のように、実験値は大きくばらついているが、作物が存在する場合には、図中の実線、存在しない場合は破線のような関係を示す。1月は温室内の作物が、まだ充分成長していない発芽時期なので、図示のように、作物が存在した場合と存在しない場合の差異は小さい。しかし、2月と3月には、作物無しの場合が、作物の存在する場合より蓄熱効率は大きい。

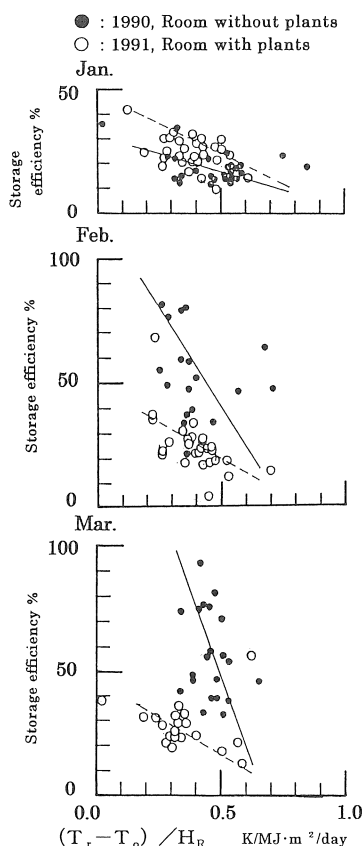
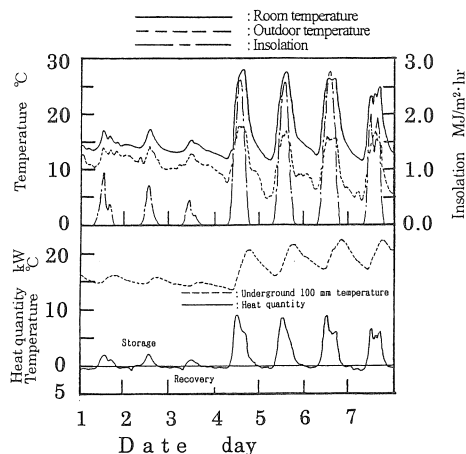


図17 地中パイプにおける蓄熱効率

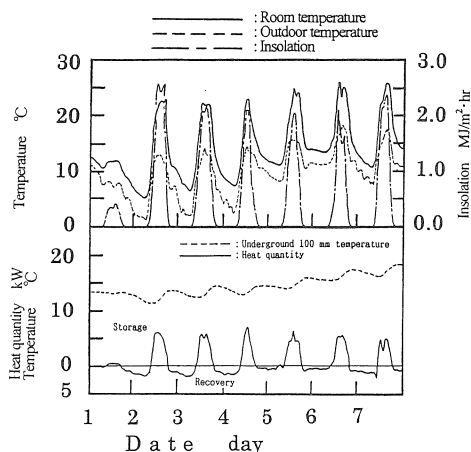
図18は、この現象をより詳しく示すため1990年の作物の存在しない場合と、1991年の作物が充分成長した場合に関して3月の第1週の測定値を示す。

両者は日射量、外気温度等の気象条件が異なるのであるが、各図の下図に破線で示した温室地表面下100mmでの地温は作物の存在しない図(a)における日射のある週後半では、作物の存在する図(b)の場合に比べ、温度上昇が大である。したがって、図示のように地中パイプでの蓄熱量が大となっている。なお、

作物が存在し、毎日散水が行われている場合は、日射エネルギーの一部が作物の光合成に使われることと、作物が日射エネルギーによって加熱されても、その熱が葉面等から蒸発熱として消費されるのもこの理由の一つと考えられるが、これは前述の地表面熱交換の大小による差異と比べるとそれほど大きい理由とは考えられない。



(a) 1990年3月 第1週の状況（栽培物なし）



(b) 1991年3月 第1週の状況（栽培物存在）

図18 温室内栽培物の有無による蓄熱量等の測定値の比較

3ヶ月間の実験中の地中パイプにおける1日当たり平均回収熱量を比較すると、作物の存在しない1990年の1月は59.59 MJ/day, 2月は16.08 MJ/day, 3月は15.27 MJ/dayであるのに対して、作物が存在する1991年においては1月は51.0

3 MJ/day で、ほぼ、前年と同じであるが、2月は55.46 MJ/day、3月は72.38 MJ/dayで、作物の存在する場合が、かなり大であった。なお、本システムでは空気循環ファンを24時間連続運転しているが、この運転を温室温度、土壌温度等に応じてコントロールすれば運転効果がさらに向上するものと思われる。

4. 結 論

地中熱交換型ソーラー温室で作物の有無による性能の差異を探究するために、基礎実験として含水土壌中の埋設パイプによる蓄熱、熱回収の室内実験を実施した結果および実際に熊野地方で行った、実用ビニル・フィルム製の地中熱交換型ソーラー温室での実地試験の結果とを以下に要約する。

(1) 含水土壌が埋設パイプを通過する空気によって加熱され、また、その熱が冷風によって回収される際には、土壌中で水分の蒸発、凝縮が起こり、水分飽和度が、一時的に変化する特異な現象が生じる。

この現象の土壌中での位置的、経時的変化と蓄熱および熱回収特性に与える初期飽和度、加熱温度等による影響が解明された。

(2) 埋設パイプ周りの土壌内温度分布を有限要素法によって計算し、含水土壌での実験結果と一致する見かけの熱伝導比の値を求め、その蓄熱、熱回収特性に与える影響を明らかにした。

(3) 屋外試験の結果によれば、作物栽培のための散水によって土壌中の伝熱特性がかなり向上する。

(4) 温室内に作物が存在する場合は、作物が存在しない場合に比べて、地中パイプによる蓄熱効率は低下し、熱回収効率は向上する。

(5) 本地中蓄熱システムは熊野地方での温室野菜、花類等の栽培において補助暖房装置を必要とせず、実用上有効である。

図18の温室内空気温度は、最低+5℃以上の温度を示し、この温室温度の経時変化は、作物の種類等にもよるが、本学園が和歌山県に設置している農業試験場の地中蓄熱型ソーラー温室の温室温度の経時変化とほぼ、同じ温度変化を示しており、温室内最低温度が、+5℃以下になると補助暖房装置で加熱を必要する最低温度以上の温度に保たれている。

5. 参 考 文 献

- (1)岡野・山本・青木, “地中熱交換温室の熱的性質に関する非定常シミュレーション・モデルの開発” 電力中央研究所報告, (1982-9), pp.27.
- (2)M.Santamouris, C.A.Balaras, E.Dascalaki and M.Vallindras, “PASSIVE SOLAR AGRICULTURAL GREENHOUSES” “A WORLDWIDE CLASSIFICATION AND EVALUATION OF TECHNOLOGIES AND SYSTEMS USED FOR HEATING PURPOSES” *Solar Energy*, Vol.53, No.5, (1994), pp.411-426.
- (3)齊藤・宇高・渋谷, “地中蓄熱温室の一次元シミュレーション法と蓄熱特性の検討” *太陽エネルギー*, Vol.12, No.2, (1986), pp.7-14.
- (4)高倉・山川, “地中熱交換ハウスの設計: 定常一次元モデルによる解析” *農業気象*, Vol.37, No.3, (1981), pp.187-196.
- (5)鄭・中原, “温室における太陽エネルギー土中蓄熱の最適化に関する研究” *太陽エネルギー*, Vol.19, No.4, (1993), pp.47-54.
- (6)吉岡・越智・多賀, “地中蓄熱型ソーラー温室に関する研究” *太陽エネルギー*, Vol.17, No.3, (1991), pp.26-35.
- (7)中野 政詩 著, “土の物質移動学” 東京大学出版会, (1990)
- (8)松本 衛, “建築壁体における熱と水分の同時移動問題” *伝熱研究*, Vol.31 No.12, (1992), pp.55-61.
- (9)V.M.Puri, “HEAT AND MASS TRANSFER ANALYSIS AND MODELING IN UNSATURATED GROUND SOILS” *Solar Engineering-1989*, Proceeding of the joint ASME-ASES Solar Energy Conference. Knoxville, Tennessee. Mar.25-28, (1985) pp.175-182.