



地中熱交換型ソーラー温室に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 多賀, 正夫, 大前, 義弘, 越智, 敏明, 伊達, 潔 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007989

地中熱交換型ソーラー温室に関する研究*

Studies on the Solar Greenhouse Heating Using an Underground Heat Exchange System

多賀 正夫**・大前 義弘**・越智 敏明**・伊達 潔***

Masao TAGA, Yoshihiro OHMAE, Toshiaki OCHI and Kiyoshi DATE

(昭和59年4月18日受理)

あ ら ま し

日中の余剰熱を地下に蓄え、夜間これを回収する地中熱交換型ソーラー温室の性能について研究した。この温室においては、余剰熱はコンクリート製地下ダクトを通して温風を循環させることによって地下に蓄熱され、夜間に加熱源として利用される。冬期の2月～4月に行われた実験では、総入射エネルギーに対する平均回収率は17%であり、これによって温室は全期間を通じて、夜間10°C以上に維持された。また、この実験結果に基づいて、蓄熱、伝熱等に関する熱特性の資料が得られた。さらに、シミュレーション計算モデルにより、この温室の作用、性能が評価され、最適の設計条件、運転条件が得られた。

1. ま え が き

農業用温室においては、冬期でも日射が十分な晴天時には、昼間は温室内の気温が上がり過ぎるため、換気を行って作物の適温に保っている場合が多い。そこで、この昼間の余剰熱を温室床下の地中へファンで送気することによって蓄熱し、夜間の加熱に用いるパッシブ型内部集熱方式の温室が山本らによって考案され¹⁾、その後各地で、このアイデアに基づく各種の地中熱交換型温室が試験研究されつつある²⁾。このようなシステムの性能は、その構造、規模、栽培する作物、気象条件等に支配されるので、適確な性能の評価、最適な設計条件を求めることは難しく、また、そのための資料も十分ではない。

本報では、南北棟の温室にコンクリートブロック製地中熱交換ダクトを設け、かつ、温室北壁を空気式集熱器とし、これにより、ダクトに入る空気を加熱し、温室の北側へ透過する日射および熱損失を防ぐ新しい工夫を施した温室に関して、冬期の2月～4月に行った性能試験の結果を報告する。ここでは、この種のシステムの基本的特性を解明することを主眼としたので、作物のない基本的条件下において、日射量と昼間の蓄熱量および夜間の回収熱量との関係求めた。

このような蓄熱システムにおいて、蓄熱効率、回収効率などの性能に及ぼす種々の因子の影響を調べるには、実地試験では気象条件により各因子すべてが変化するので、困難が伴う。このため、シミュレーション計算モデルにより性能を評価し最適の設計および運転条件を求めた。

* 本論文の一部は日本太陽エネルギー学会第7回研究発表会(1981.12.7)で講演したものである。

** 機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

*** 株式会社ミヤハラバーナー大阪 (Miyahara Burner Osaka, Ltd.)

2. 装置の概要と測定方法

建設場所： 兵庫県川西市（北緯 34°47′，東経 135°23′）

構造・寸法： 温室は図1に示すように床面積 41.4m² で、FRP 波板の一重外被構造であり、北壁の集熱器は表面につや消黒色塗料を焼付け処理した波板鉄板を受熱面とし、表側にFRP を、裏側に発泡ウレタンの断熱材を取り付けたものである。地中熱交換ダクトは図示のようなブロック構造で、これに 80W のファン4基を用いて空気を循環させる。なお、地下の底面、側面には 25mm のウレタン断熱材が施してある。

運転制御方法： 日照開始後、設定室内気温が 20°C に達した時点でファンが作動開始し、余剰熱を地中へ蓄熱する。夜間は 19時30分の時点で室内気温を検出して、設定温度の 10°C 以下の場合にはファンが作動し、以後連続運転して地中熱を回収し、午前6時に自動的にファンを停止する。19時30分に 10°C 以上の場合は、以後、室温が 10°C 以下になった時点からファンが連続運転される。

測定・記録： 風速、温度分布等の予備実験から定めた代表位置に熱電対温度計、熱線風速計を設置して、気温、地温および風速を測定し、これを連続記録する。室内入射量は水平な床面に対する日射と垂直な集熱器への日射の和であるが、積算型日射計で測定した水平面室外日射を基準にして、FRP 波板の透過率試験のデータで修正して算出する。

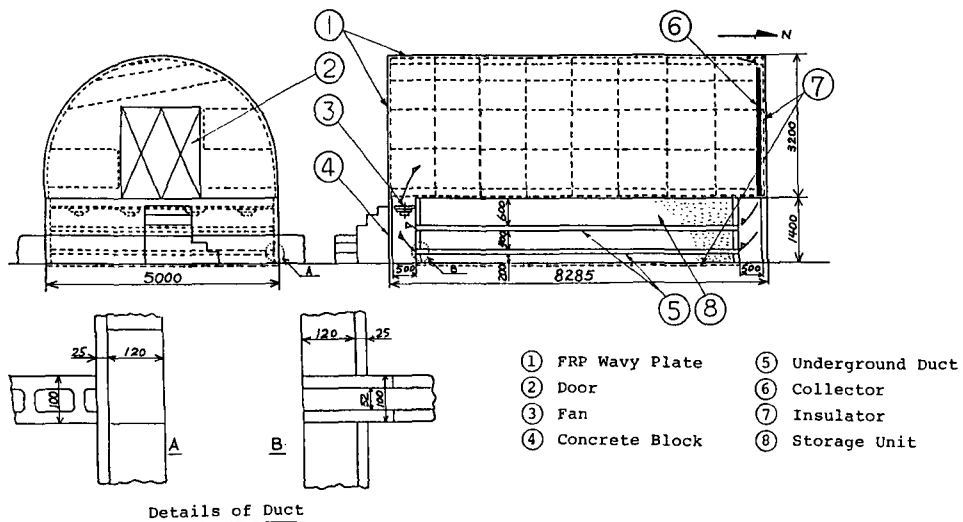


図1 装置の概要

3. 実験結果

3.1 全期間の日変化

図2に室外水平面日射量と単位床面積当り夜間回収熱量の日積算値および室外最高気温、夜間室内平均気温の日変化を示す。図示のように、最高外気温と日射量との間には相関がある。しかし、夜間を含めた温室外への放熱状態の日による差異、運転による地温の位相ずれなどのため、夜間回収熱量は必ずしも日射量に比例していない。なお、回収熱量の記録中の◎印の日は、その値が0であるが、これは蓄熱できていなかったのではなく、夜間の平均室温が 10°C

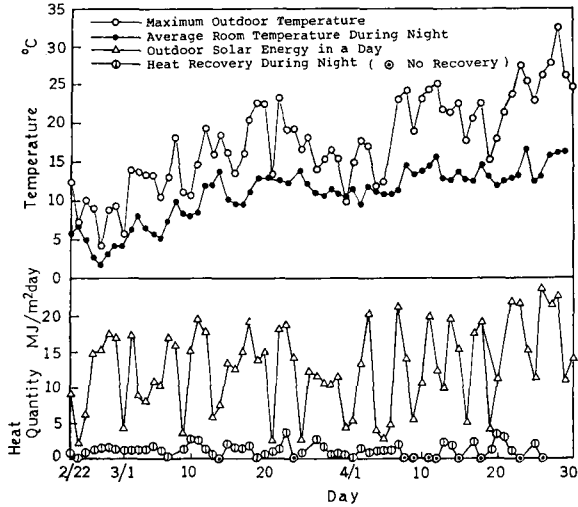


図2 全期間の日変化

以下にはならなかったため、ファンが作動する必要がなかったためである。結論的には、夜間平均外気温 4°C 程度で、最低外気温 0°C 以下の日が 11日もあった全期間を通じて、夜間の平均室温は 10°C 以上に保たれ、この回収システムの省エネルギー効果が実証された。

3.2 1日間の時刻変化

図3に3月11日（晴天）における各測定温度の時刻変化を示す。午前8時頃に室内気温が 20°C に達し、ファンが作動開始する。初期には図のように断続的に運転されるが、12時以降16時頃までは連続運転をし、16時過ぎに室温が 20°C 以下となって作動を停止する。ファンによって送られた空気は図の集熱器出口気温のように温度上昇し、地中ダクトへ送気される。18時頃からは外気温が低下するため室温の方が地温よりも低くなり、地中の蓄熱量がダクト内気流へ回収される形となるので、この時刻からは地中ダクト気温が室温より高くなっている。

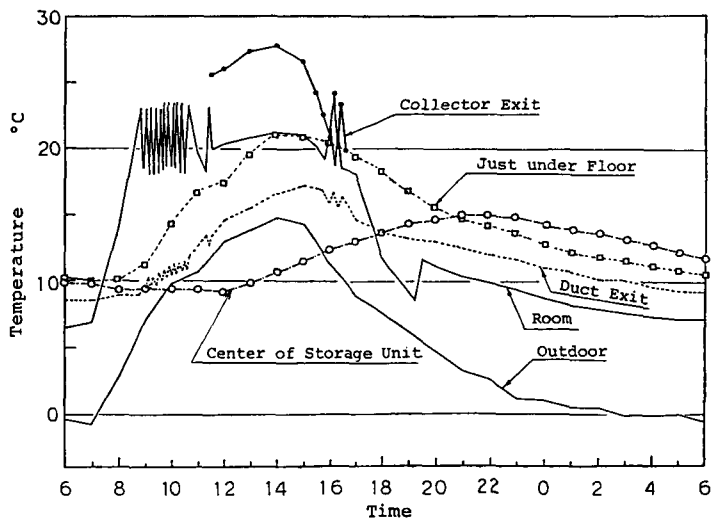


図3 1日間の時刻変化

3.3 熱収支

図4は3月11日午前6時以降24時間のデータに基づいて算出した各熱量の1日間の積算値に関する熱収支を図式化したものである。図中の数字は温室に入射する日射量に対応する室外総日射量を100とした場合のそれぞれの値の百分率である。晴天のこの日は余剰熱量がかなり多かったので、室外総日射量の36.9%が昼間に地中に蓄熱され、その40%が夜間に土地から回収されて暖房に利用されたことになる。また、地中に残った大部分の熱量は翌日利用されている。

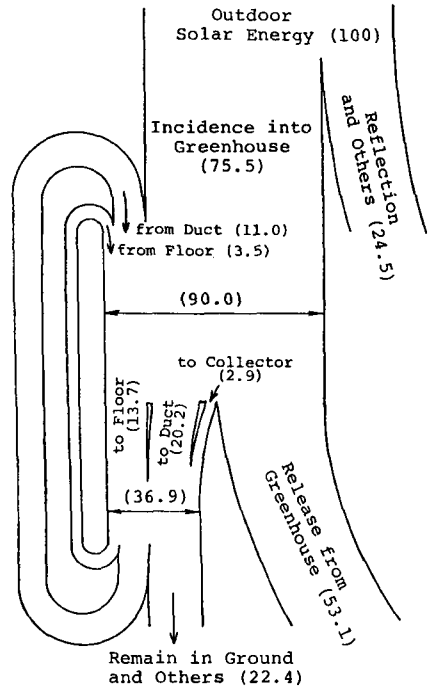


図4 熱収支

3.4 蓄熱率, 回収率

前述の熱収支は1日間の総熱量に関するものであるが、これに対して、図5は3月11日の各時刻における蓄熱量と、その中で集熱器の集熱量および夜間の回収熱量の変化を示す。蓄熱は日射のピーク時に最大となるが、集熱量は気温の低い午前中初期に大きい。集熱量は全蓄熱量の約13%であるが、この集熱器の効果は、一度温室内部へ入射するが、再び北側の垂直壁を透過して損失となったエネルギーを捕捉することと、室上部の高温空気を地下ダクトに導き、効率よく蓄熱させる効果と、さらに断熱壁の効果もある。この集熱器の効率は平均34%程度であった。

夜間の回収熱は外気温と室温が低下する夜半から明け方になる程大きくなっている。室内総入射量に対する総回収熱量の比率は昼間の日射が大で、夜間の外気温の低いこの日は21%にも達しているが、この比率はその日の気象条件およびその日までの地中への蓄熱状態にも支配されるので、日によってかなりの差異がある。測定全期間における平均回収率は約17%であった。

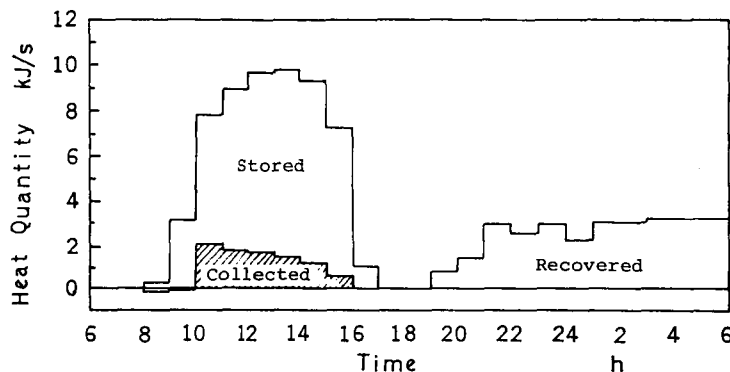


図5 1日間の時刻別蓄熱・集熱・回収熱

3.5 地中熱交換ダクトの伝熱係数

地中ダクトの設計のためにはダクト面での熱伝達率および土地の熱伝導率等の値が必要であり、土地への伝熱量、温度分布はこれらの値を用いて、次節に示すように、強制対流伝熱を伴う非定常熱伝導の問題として解かれる。しかし地温とダクト内気流の温度差がほぼ一定である場合には、設計上の便宜のために、準定常的取り扱いをして、伝熱量を

$$Q_d = KA_d \Delta t \quad (1)$$

として表し、伝熱係数 K の値を定めることができる。ここで、 A_d はダクト面の面積、 Δt はダクト間の平均地温とダクト内空気温度の差である。図6は伝熱量と温度差との関係を示す実験値である。図の平均直線のこう配から求めた K の値は $5.14\text{W/m}^2\text{K}$ ($4.42\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)となり、近似的には、この値をダクトの設計に用いることができる。

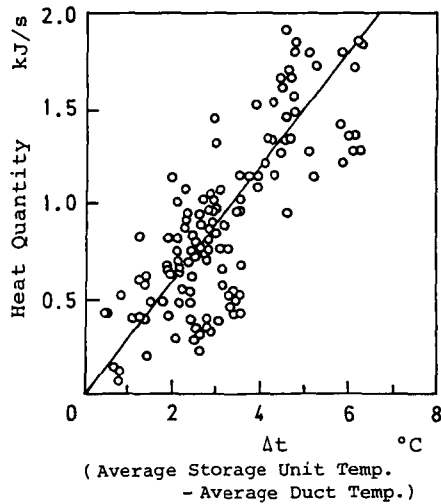


図6 伝熱量

4. シミュレーション・モデルによる計算方法

実験に用いた温室の性能が他の外的条件、運転条件のときにはどのようなようになるかを、シミュレーション・モデル計算によって調べた。その際、外殻としたFRP波板の日射透過率、床面における熱伝達率等、計算に必要な数値は、簡単な実験で得られる場合には実験値を用い、他は主として伝熱工学資料³⁾による値を用いた。

4.1 温室の熱収支

温室内空気温度を t_r 、時間きざみ $\Delta\tau$ 後の温度を t_r' とすると、温室に出入りする熱量バランスより次式が得られる。

$$t_r' = (Q_{in} - Q_0 - Q_s - Q_d) \Delta\tau / (G_c c_c + G_a c_a) + t_r \quad (2)$$

従って、上式右辺の各項が与えられれば、次々に温室内空気温度を計算することができる。日射による温室内への入射エネルギー Q_{in} は、水平な床面に対する値と北壁内側の集熱器に対する値の和である。これらの値は全天日射を直達日射と散乱日射に分け、日積算日射量 q_r を基準にして求めた。なお、FRP波板の透過率は実験で得た値 $\xi = 0.755$ を用いた。また、外気への放熱量 Q_0 は暖房負荷実験により次の様に決定した。

$$Q_0 = 423.8(t_r - t_0) \quad (W) \quad (3)$$

次に、温室から床面への熱流束は、床面での日射の吸収と、自然対流熱伝達の和であり、次式で表される。

$$q_s = \epsilon q_{in} + \alpha_s(t_s - t_r) \quad (4)$$

ここで、床面の吸収率は $\epsilon = 0.9$ 、自然対流熱伝達率は $\alpha_s = 5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) と仮定した。また、ダクトから地中蓄熱槽への伝熱量 Q_d は、空気ダクト入口温度と出口温度の差より、次式で求められる。

$$Q_d = \rho_a c_a U(t_{d,out} - t_{d,in}) \quad (5)$$

床面への伝熱量およびダクトから蓄熱槽への伝熱量を求めるためには、空気の温度とともに床面の温度とダクト面の温度が必要である。そのためには、地下蓄熱槽の温度分布とダクト内の空気温度を求めなければならない。

4.2 蓄熱槽の温度の計算

長方形ダクトを断面積が等しくなる二平面で構成されるダクトに置き換えて簡単化し、三層の地下蓄熱槽を図7のようにx方向(ダクト内気流の方向)とy方向に分割する。ここで、 $i=1 \sim m$ 、 $j=1 \sim n_1$ (上層)、 $1 \sim n_2$ (中間層)、 $1 \sim n_3$ (下層)とする。メッシュ (i, j) の温度を $\theta_{i,j}$ 、 $\Delta\tau$ 時間後の温度を $\theta'_{i,j}$ で表すと、z方向には一様な温度と考えてよいので熱量バランスの式より次式が得られる。

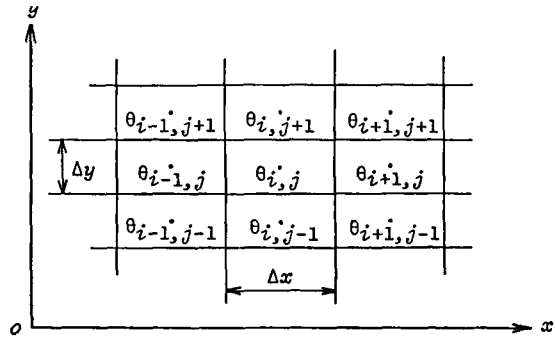


図7

$$\theta'_{i,j} = \frac{\Delta\tau\lambda}{\rho C} \left[\frac{1}{\Delta x^2} (\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) + \frac{1}{\Delta y^2} (\theta_{i,j+1} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}) \right] + \theta_{i,j} \quad (6)$$

これより、考えているメッシュおよび上下、左右のメッシュの温度が与えられれば $\Delta\tau$ 時間後の温度が計算できる。左右両端では断熱の条件を用い、上下端ではそれぞれ熱伝達率 α_1 と α_2 で空気からの伝熱があると考え、例えば、上面を含むメッシュに関しては、熱量バランスの式より次式が得られる。

$$\theta'_{i,j} = \frac{\Delta\tau\lambda}{\rho C} \left[\frac{1}{\Delta x^2} (\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) + \frac{2}{\Delta y^2} (\theta_{i,j-1} - \theta_{i,j}) \right] - \frac{2\Delta\tau\alpha_1}{\rho C \Delta y} (\theta_{i,j} - t_{a,i}) + \theta_{i,j} \quad (7)$$

ここで $t_{a,i}$ は i 番目の位置の空気温度である。下面を含むメッシュについても同様である。上層の上面は床面になるので、輻射伝熱を含む等価熱伝達率を考えると、

$$\alpha_1 = \alpha_s + \epsilon q_{in} / (\theta_{i,n_1} - t_r) \quad (8)$$

となる。床面への伝熱量は各メッシュごとに計算した伝熱量の総和である。中間層の上面、下面、下層の上面はダクト面になるので強制対流熱伝達が行われ、その熱伝達率は $\alpha_d = 35.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($30 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) と仮定した。下層の下面は断熱壁になるので $\alpha_2 = 0$ とする。以上より、 $\theta_{i,j}$ の初期値が与えられると $\Delta\tau$ 時間後の $\theta'_{i,j}$ がすべて求まるので、これを繰り返せば、各時間ごとの蓄熱槽の温度分布が得られる。

4.3 ダクトから蓄熱槽への伝熱量

前述の方法によりダクト面の温度が得られると、ダクトを通る空気温度は次の様にして求められる。上部ダクトにおいて i 番目のメッシュの位置での空気温度を $t_{d,1,i}$ とすると、

$$t_{d,1,i+1} = \frac{4xB}{\rho_a C_a U_1} \left[\alpha_d (\theta_{i,1} - t_{d,1,i}) + \alpha_d (\theta_{i,n_2} - t_{d,1,i}) \right] + t_{d,1,i} \quad (9)$$

となり入口 ($i=1$) の温度が与えられると次々にダクト内空気温度が求まる。ただし、上式の $\theta_{i,1}$ は上層の下面, θ_{i,n_2} は中間層の上面を示し, U_1 は上部ダクトの空気流量を表す。空気流量が上部, 下部ダクトに等分配されると仮定すれば、ダクト出口空気温度は

$$t_{d,out} = (t_{d,1,m+1} + t_{d,2,m+1})/2 \quad (10)$$

となる。また、北壁集熱器の集熱量を Q_{col1} とすると、ダクト入口空気温度は次式で与えられる。

$$t_{d,in} = \frac{Q_{col1}}{U \rho_a C_a} + t_r \quad (11)$$

計算に用いる条件は3月11日の測定値に近い値とした。初期値(午前0時の値)として、地中蓄熱槽温度は一様で 12°C 、温室内気温は 8°C とした。外気温は測定値に合う多項式を作って用いた。計算に際しての時間きざみは $\Delta t = 1\text{min}$ 、分割数は $m=11$ ($\Delta x=499.6\text{mm}$)、 $n_1=11$ ($\Delta y_1=62.7\text{mm}$)、 $n_2=8$ ($\Delta y_2=64.7\text{mm}$)、 $n_3=5$ ($\Delta y_3=56.5\text{mm}$)、日積算日射量は $q_r=19.4\text{MJ/m}^2\text{day}$ とした。

5. 計算結果

以上の方法によって計算した室内気温の変化を図8に示す。実線は日積算日射量が $19.4\text{MJ/m}^2\text{day}$ 、破線はその $1/2$ の場合である。図中下部の線分はそれぞれに対応してファンが、作動(断続を含む)している期間を示す。比較のため載せた実験値は3月11日 ($19.4\text{MJ/m}^2\text{day}$) の温室上部と下部の気温である。計算値は平均気温を示しているの、昼間は実験値とよく一致しているが、夜間は計算値の方が高くなっている。日射が $1/2$ の場合にはファンが作動すると、余剰熱をすべて蓄熱するので、室温は 20°C 以上には上昇しない。これらの結果から、一応、この計算モデルは妥当であると言える。

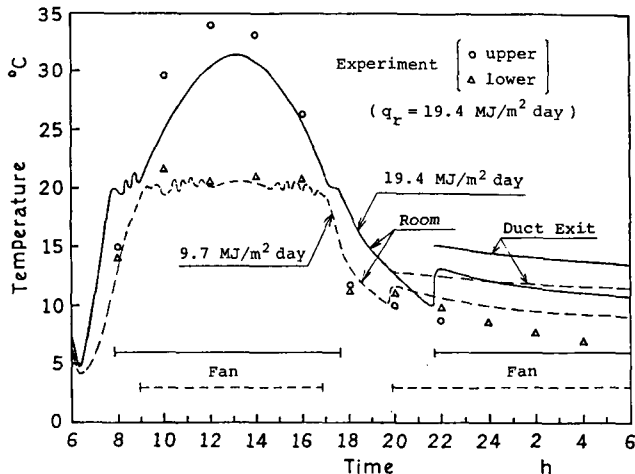


図8 室温の変化

次に、床面中心から深さ方向の蓄熱槽温度分布を図9に示す。実線は蓄熱終了直後（午後6時）の値、破線は翌朝6時に熱回収が終った時の値、1点鎖線は当日午前0時の初期値を示す。蓄熱終了直後には蓄熱槽の両ダクト間の中心面の温度はほとんど上昇していないので、このような短期蓄熱システムでは、蓄熱槽を薄くして、ダクト数を増加させた方が効果的であると考えられる。

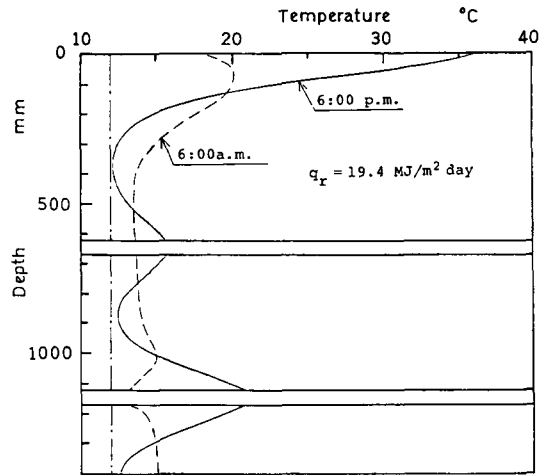


図9 蓄熱槽深さ方向の温度分布

図10には蓄熱槽の厚さだけを変えた場合の蓄熱効率（蓄熱量/室内総日射量）の変化を示す。厚さ比は本実験装置の蓄熱槽厚さに対する値である。上に述べた様に、蓄熱槽を薄くしても蓄熱量はあまり変化しないことがわかる。

次に、ダクトを通す空気流量を変えた場合の蓄熱効率の変化を図11に示す。空気流量を増加させると、流速が増すため熱伝達率が大きくなり、日射量大きい時には蓄熱量は増加する。しかし、日射量が小さい時には昼間ファンが作動すれば室温は上昇しないので、空気流量を大きくする必要はない。従って、室温によって作動ファンの数を変えた方がよい。

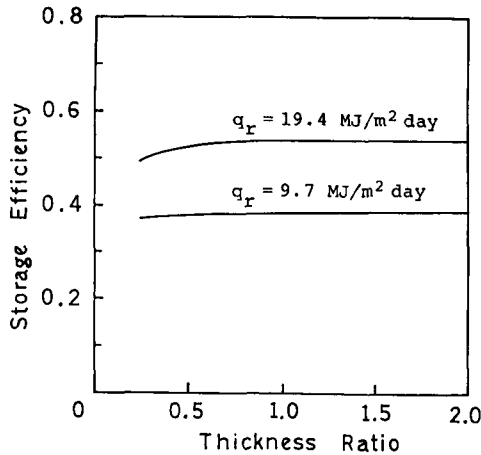


図10 蓄熱槽厚さと蓄熱効率の関係

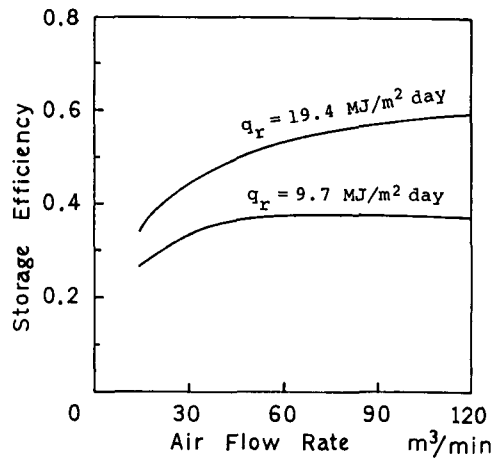


図11 空気流量と蓄熱効率の関係

6. あとがき

内部集熱器を付設した地中熱交換型温室の実地試験の結果、室内日射量に対する夜間の回収熱量は平均17%であり、冬期の夜間でも室温 10°C を維持できるので、このシステムの有用性が実証され、設計資料が得られた。また、シミュレーション計算モデルにより、この温室の作用、性能が評価され、最適の設計条件、運転条件が得られた。終りに、本実験は株式会社ミヤハラパーナール大阪の多大の尽力の下で行われたことを付記し、深く謝意を表す。また、計算に協力を頂いた本校卒業生大久保雅宏氏に深く感謝する。

記 号

t_r : 温室内気温	A : 温室床面積
t_o : 室外気温	B : 温室幅
t_s : 床面温度	U : ダクト空気流量
$t_{d,in}$: ダクト入口空気温度	Q_{in} : 室内総入射量
$t_{d,out}$: ダクト出口空気温度	Q_o : 外気への放熱量
c : 蓄熱槽比熱	Q_s : 床面への伝熱量
λ : 蓄熱槽熱伝導率	Q_d : ダクトから蓄熱槽への伝熱量
ρ : 蓄熱槽密度	q_r : 日積算日射量
G_c : 温室構造物質量	q_{in} : 外殻透過後の床面への日射量
c_c : 温室構造物比熱	α_s : 床面自然対流熱伝達率
G_a : 温室内空気質量	α_d : ダクト内強制対流熱伝達率
c_a : 空気比熱	ϵ : 床面の日射吸収率
ρ_a : 空気密度	ξ : FRP 波板の日射透過率

参 考 文 献

- 1) 山本, 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 (1977)。
- 2) 竹園, 羊ヶ丘ソーラーグリーンハウス, 第4回日本太陽エネルギー学会講演論文集, p.9 (1978)。
- 3) 日本機械学会編, 伝熱工学資料, 日本機械学会 (1979)。