



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	潜熱蓄熱材による温室暖房のための基礎試験
Author(s)	堀口, 郁夫; HORIGUCHI, Ikuo
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 14(3), 234-241
Issue Date	1985-03-18
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12021
Type	departmental bulletin paper
File Information	14(3)_p234-241.pdf



潜熱蓄熱材による温室暖房のための基礎試験

堀口 郁夫

(北海道大学農学部農業物理教室)

(昭和59年8月31日受理)

Basic Experiments on Latent Heat Storage for Greenhouse Heating

Ikuo HORIGUCHI

Laboratory of Agricultural Physics, Faculty of Agriculture
Hokkaido University, Sapporo, Japan

I. ま え が き

日中の太陽エネルギーを積極的に蓄熱して、夜間の温室暖房に利用する種々な方法が試みられている。その一方法として、物質の相変化による吸放熱を利用する潜熱蓄熱材の利用があり、研究が行なわれている。潜熱蓄熱材は顕熱のみの蓄熱材に比較して、多量の熱量を蓄熱できる利点があるが、次のような条件を満たさなければならないため、利用できる物質は多くない。

(潜熱蓄熱材に要求される主な条件)

- i) 融点及使用温度範囲にあること。
- ii) 融解熱が大きいこと。
- iii) 過冷却が許容される範囲内であること。
- iv) 可逆的で確実に相変化すること。
- v) 熱伝導率が大きいこと。
- vi) 相変化にともなう体積変化が小さいこと。
- vii) 人体に毒性や危険性がないこと。

現在、実験的に温室暖房用として用いられているものは、ポリエチレングリコール・塩化カルシューム6水塩($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)・硫酸ナトリウム10水塩($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)など数種のものに限定されている。それらのものは融点が温室暖房に利用できるものであること、物質的に安定であることなどの利点を有している。今回、このうち、硫酸ナトリウム10水塩を基剤とした潜熱蓄熱材の北海道における利用基礎試験を、58年1月～5月にかけて行なった。

II. 試験方法

1) 潜熱蓄熱材

使用した潜熱蓄熱材は、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (硫酸ナトリ

ウム10水塩)を基剤とし、融点を約 18°C まで降下させたもの20kgである。この潜熱蓄熱材の温度変化の状態をFig. 1に示す。

なお、熱的特性は次のとおりである。

◎融点	16~18°C
◎凝固点	12°C
◎融解熱	38~40 cal/g.
◎比熱	固相 0.40~0.45 cal/g·°C 液相 0.55~0.60 cal/g·°C

融解熱を40 cal/gとすると、今回試験に使用した20kgの潜熱蓄熱材で800 kcalの熱を蓄熱・放熱できることになる。また、使用した潜熱蓄熱材は過冷却現象があり融点と凝固点に $4\sim 6^\circ\text{C}$ の差がある。

2) 試験装置

試験に用いた潜熱蓄熱材は試作品で大量に入手することが困難であったため、小型温室内にアクリル製(4mm)のボックス(間口1,008 mm, 奥行800 mm, 高さ510 mm)を組立て、このボックスの加温を潜熱蓄熱材で行なうという方法で行なった。また、蓄熱槽も、アクリル製で北側に30 mmの断熱材を張りつけ熱損失を少なくしたもので、ボックス内に設置した。実験の様子と蓄熱槽をFig. 2に示す。Fig. 2でも明らかな様に、20 kgの潜熱蓄熱材はアルミラミネートプラスチックフィルムの袋12本に封入し、棚状に設置してある。この棚の間を空気が流入し、蓄熱放熱を行なう。なお、入排気用の小型軸流ファンは、設置した状態で $1.0\sim 1.2\text{ m}^3/\text{min}$ の容量である。

3) 測定方法

測定期間は、58年1月1日から5月9日までの129日間で、測定項目は、次のとおりである。

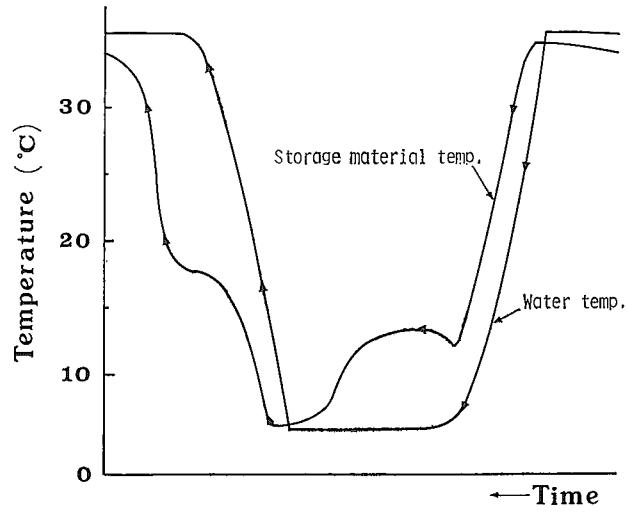


Fig. 1. Changes in temperature of phase change material.

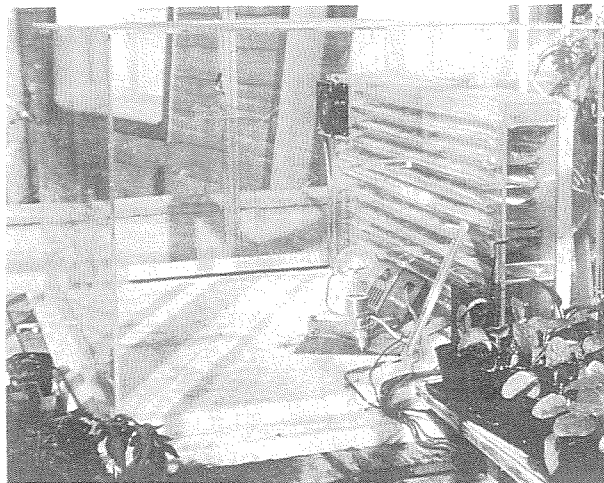
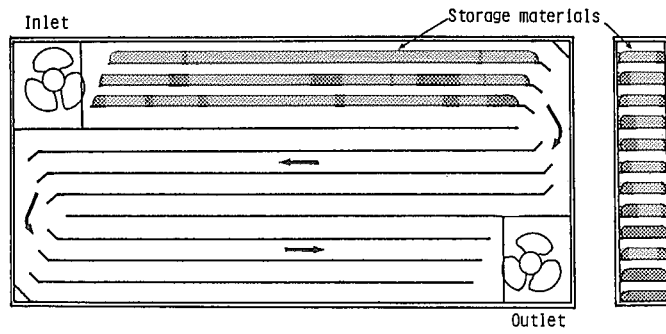


Fig. 2. Heat storage installation and view of experimental box.

(測定項目)

- ① 外気温・温室内温度, ② ボックス内温度, ③ 蓄熱槽入口出口の温度, ④ 潜熱蓄熱材温度 (中央棚の蓄熱材) ⑤ 蓄熱槽入口出口の温度差の積算, ⑥ 日射量

温度はすべて熱電対で測定した。なお, 蓄熱量・放熱量は, 蓄熱槽入口出口の温度差を積算計に入れ, この値から求めた。

ボックス内は, 1月・2月は作物を入れない状態で測定したため, 密閉状態で蓄熱槽の入排気ファンは連続運転とした。2月28日からは, 内部にトマトなどの苗を栽培したため, 日中はボックスの片側を開放して換気を行ない, 蓄熱時間は15時までとした。また, 放熱はサーモスタットを使用して約12°C以下になるとファンが運

転するようにセットした。

III. 測定結果・考察

1) ボックス最低温度

ボックスの最低温度は, 外気温や日中の蓄熱量の多寡に関係していると思われる。今, ボックス最低温度と外気最低温度の相関係数を計算すると $R=0.89$ である。また, 蓄熱量との相関係数は $R=-0.18$ でほとんど有意性を示さない。このことからボックス最低温度は, 日中の蓄熱量の多寡に影響を受けなく, 外気最低温度のみに支配される。ボックス最低温度と外気最低温度の関係を示したのが Fig. 3 である。

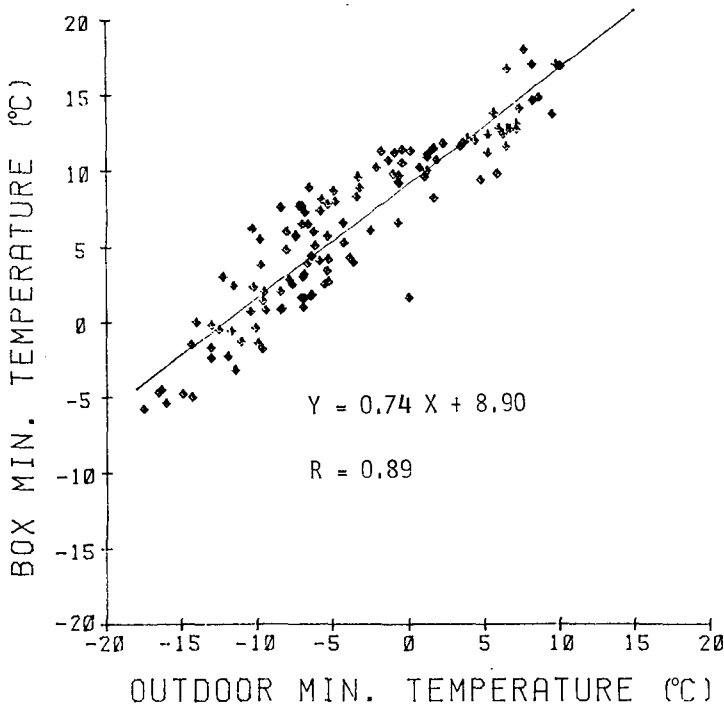


Fig. 3. Relationship between outdoor temperature and box temperature.

Fig. 4 にボックス最低温度と外気最低温度の差およびボックス最低温度と温室最低温度の差の測定期間中の変動と移動平均が示されている。全期間をとうしてのボックス最低温度と外気最低温度の差の平均およびボックス最低温度と温室最低温度の差の平均は, それぞれ10.3°Cと5.8°Cである。月別に温度差をみると, 1月・2月はそれぞれ(9.2~11.4°C)と(3.8~5.8°C)であったが, 3月は(13.3~14.2°C)と(8.3~9.2°C)で1月・2月より温度

差は大きくなっている。さらに4月になると再び温度差は小さくなり, (7.3~9.2°C)と(3.4~7.4°C)である。この原因は, 後にのべるように潜熱蓄熱材の蓄熱効率に関係していると思われる。すなわち, 3月は潜熱蓄熱材として最も効率よく作動したためである。

Fig. 5 に, 観測期間中のボックス・温室および外気温の最低温度が示してある。Fig. 5 でも明らかのようにボックスの最低温度は, 1月・2月はしばしば0°C以下に

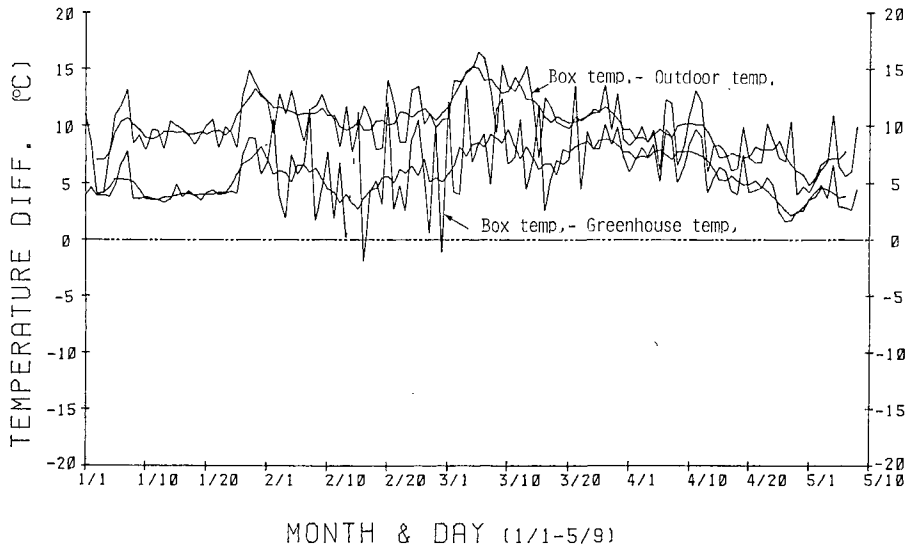


Fig. 4. Differences of minimum temperatures between outdoor & box and greenhouse & box.

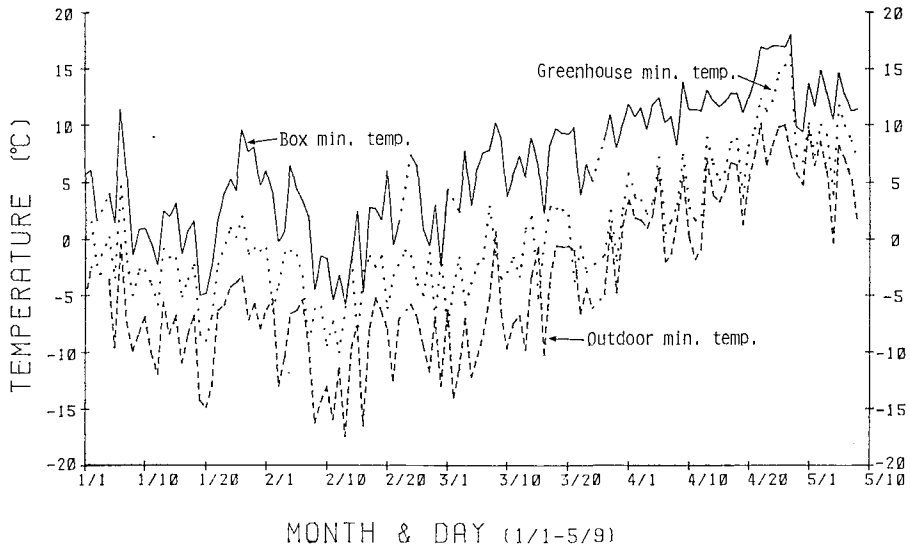


Fig. 5. Variations of minimum temperatures.

なっている。作物の生育最低温度を 5°C とすると、ボックスの最低温度が 5°C 以上を示し、作物栽培が可能になるのは、今回の測定と同じ熱的条件を具えた装置で、ほぼ3月中旬以降である。

2) 蓄熱量

日中における蓄熱量は、日射量・最高気温などに影響されると思われる。蓄熱槽の空気出入口の温度差の積算値より求めた蓄熱量と日射量、ボックスの最高気温との

関係をみると Fig. 6 のごとくなる。全体の相関係数は、 $R=0.20$ (日射)、 $R=-0.03$ (ボックスの最高気温) で有意性はみられないが、月別に蓄熱量と日射量、ボックスの最高気温の関係を見ると、2月まで(旬別では3月上旬まで)日射量・最高気温とも高い相関を示す。しかし、3月以降になると、蓄熱量と日射量および最高気温の相関は悪くなる (Table 1)。この原因は蓄熱材自体の温度が高くなり、蓄熱材の吸熱が悪くなるためと思われる。

Table 1. Monthly analyses of heat storage by phase change material

MONTH	Relationship between solar energy & collected heat (regression formula & correlation coefficient)	Relationship between maximum temp. & collected heat (regression formula & correlation coefficient)	Efficiency of storage (ratio of solar energy & collected heat)	Efficiency of storage (ratio of solar energy & released heat)	Ratio between sensible heat & latent heat	Coefficient of utilization as phase change material
January	$Y=3.27 X-45.01$ $R=0.94$	$Y=18.51 X+56.63$ $R=0.77$	31.4%	39.4%	0.62	4.0% 9.5 13.0
February	$Y=3.07 X-35.92$ $R=0.91$	$Y=18.57 X+124.95$ $R=0.68$	31.9%	53.9%	1.14	28.0% 25.0 24.0
March	$Y=0.43 X+244.19$ $R=0.14$	$Y=-4.42 X+367.39$ $R=-0.09$	28.4%	40.7%	1.36	44.5% 3.55 15.0
April	$Y=0.39 X+48.31$ $R=0.33$	$Y=3.42 X+53.87$ $R=0.21$	8.5%	21.9%	0.46	5.5% 2.5 7.5
May	$Y=0.07 X+99.22$ $R=0.09$	$Y=5.50 X+3.04$ $R=0.60$	10.5%	12.6%	0	0 %

1日の日射量に対する蓄熱量の割合(ダイレクトゲインを除いた蓄熱効率)をみると、1月・2月がそれぞれ31.4%と31.9%で高く、3月は28.4%でやや悪くなり4月・5月は8.5%と10.5%で極端に悪くなっている。同じようなことが蓄熱量と日射量の回帰式にもみられる。すなわち、両者の回帰係数が大きいほどわずかの日射量の上昇によって蓄熱量が増加する。蓄熱量と日射量との回帰係数は、全体的傾向として1月から3月上旬までは高い値を示し、特に3月2日から3月12日間は最高値を示している。しかしその後は急速に回帰係数は小さくなり、日射による蓄熱効率が悪くなっているのがわかる。また、回帰式の定数項は、日射が零の時の蓄熱量で、蓄熱材の熱容量とも考えられる。したがってこの値が高いほどこの期間に蓄熱材が持っている熱量が多いことになる。定数項が大きな値を示すのは、3月中旬から下旬にかけてである。この期間は後に示すように蓄熱材の利用率が高かった時期である。

3) 蓄熱量・放熱量割合

蓄熱槽はアクリル製であるため、直接蓄熱材に日射があたり、いわゆるダイレクトゲインによる蓄熱もある。蓄熱槽の空気の入出口の温度差の積算値から求めた放熱

量と蓄熱量の差がダイレクトゲインに関係があるとみることができ、Table 1に日射量に対する蓄熱量および放熱量の割合が示されてある。蓄熱量に対する割合と放熱量に対する割合の差が大きいのは2月・3月・4月である。また、放熱量と蓄熱量の比は、測定期間全体で1.79と高い値を示している。全体的傾向として4月・5月が高い比を示す傾向がある。これは蓄熱材自体の温度が高くなるため、日射に対する蓄熱効率が悪くなるためと考えられる。放熱量に比較して蓄熱量が相対的に小さくなるからである。

4) 顕熱・潜熱蓄熱および蓄熱材の利用率

潜熱蓄熱材による蓄熱には、当然蓄熱材自体の温度変化による顕熱量も含まれる。顕熱量は、蓄熱材の比熱(固相0.45~0.45 cal/g・°C・液相0.55~0.60 cal/g・°C)に関係している。これに対して、相の変化による融解熱は40 cal/gであるから、顕熱量に比較して潜熱量による蓄熱の方が多くことが推定できる。したがって、蓄熱材の相の変化を利用した潜熱による蓄熱量が多いほど蓄熱材としての効率が高い。

顕熱と潜熱の蓄熱量の割合を調べるため、実際の蓄熱材の温度変化から顕熱蓄熱量を算出した。また、Fig. 1

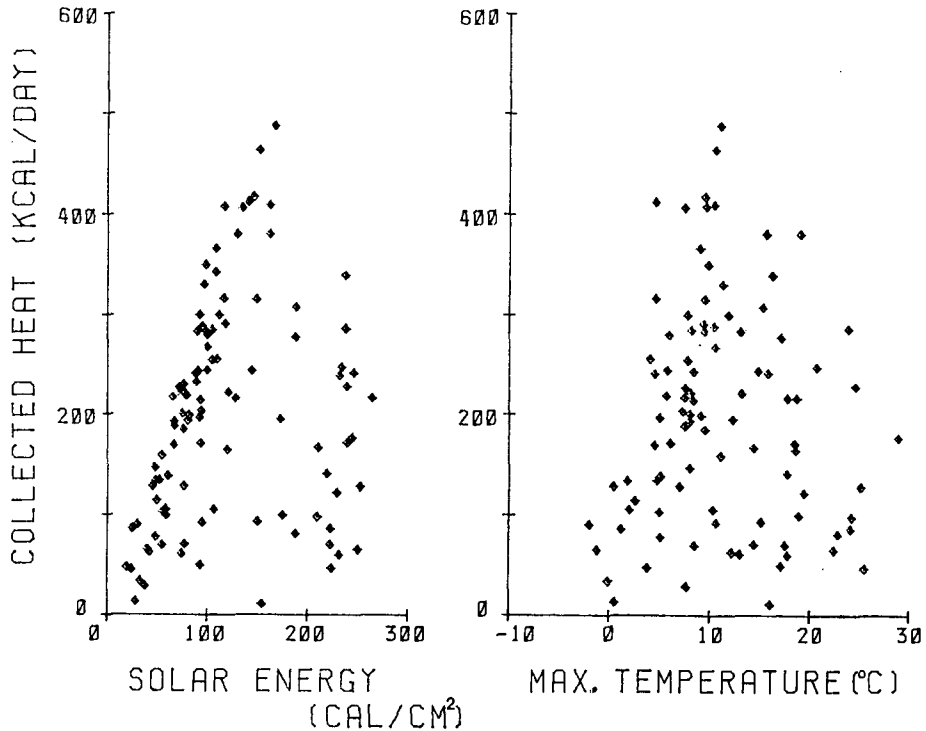


Fig. 6. Relationships between solar energy and collected heat, and maximum temperatures and collected heat.

に示した融点・凝固点の2点の温度によって、20 kgの蓄熱材全量が潜熱による蓄熱・放熱を行なうと仮定して、この潜熱量800 kcalを計算した顕熱量に加えると可能な蓄熱量が計算できる。この可能な蓄熱量と実際の放熱量の差は、全量の蓄熱材が相変化によって潜熱蓄熱すると仮定したことによる誤差で、未利用な蓄熱材の熱量であると考えることができる。このようにして計算した蓄熱材としての利用率がTable 1に示してある。

Table 1によると温度が低い1月は、蓄熱材の温度が15°C以下の日が多いため利用率が低く、ほとんどが顕熱のみの利用であることがわかる。また、最も蓄熱材として効率よく利用されたのは、3月上旬から中旬である。しかし、この時期でも全蓄熱材の約35~45%しか潜熱蓄熱材として利用されていない。さらに、4月・5月になると、蓄熱材自体の温度が凝固点(12°C)以下になることがなく、液相の状態のままで経過し、顕熱のみの蓄熱になっている。

今、測定期間中に最も効率よく潜熱蓄熱材として作動した3月13日の温度変化をみると、Fig. 7に示すようになっている。すなわち、ボックス温度の最高温度は32.6°Cにもなっているが、蓄熱材の最高温度は19.8°C

で、十分な吸熱が行なわれていないことがわかる。

5) 蓄熱時間・放熱時間

Fig. 7に示したごとく、流入空気温度は、朝7時頃から流出空気温度より高くなり、この状態が15時まで続く。この高温な流入空気から熱をもらい蓄熱材自体の温度も徐々に上昇するが蓄熱中は流出空気温度より低い。放熱が始まると流入・流出空気温度は蓄熱材の温度より低くなる。この放熱は朝まで続き日の出とともに蓄熱に変わる。

測定期間中の蓄熱始め時間と蓄熱終りの時間の平均を求めるとTable 2のごとくなる。すなわち、蓄熱始め時間は、日の出時間が早くなるとともに早くなり、1月は平均7時47分であるが4月は約1時間早く、6時54分からである。蓄熱終りの時間は、1月・2月はほぼ14時44分~15時までの間である(2月28日以降は15時に設定)したがって蓄熱時間は、1月で約7時間、4月で約8時間である。

また、蓄熱材自体の温度は、放熱直前に最高になる。しかし、蓄熱材の相変化はFig. 1に示したごとく、約15°C付近から固相から液相に変化し、潜熱の吸収が始まり、20°C付近まで続く。そのため、日中15°C以上の継

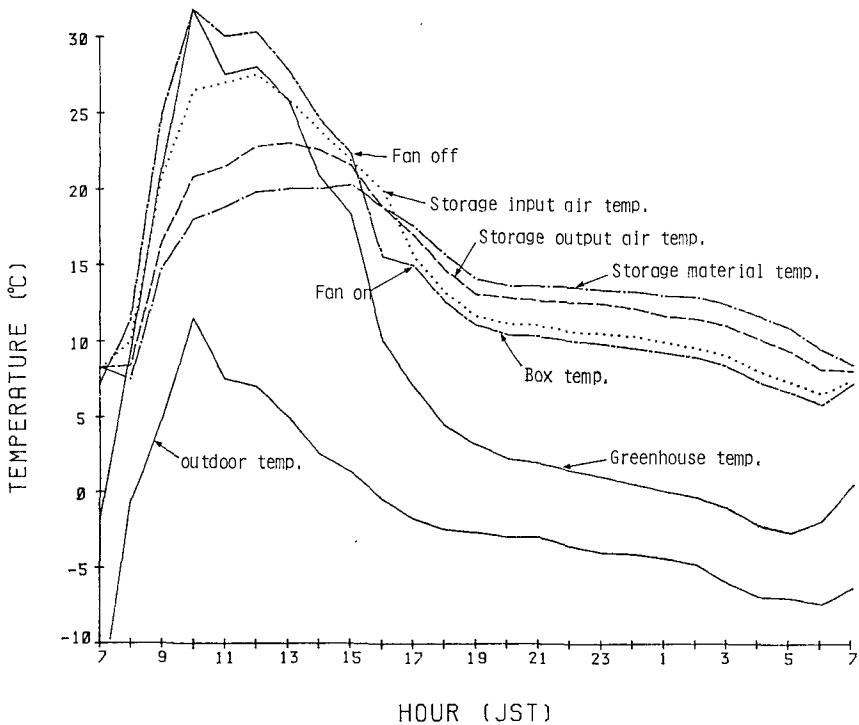


Fig. 7. Typical variance of temperatures as shown on 13 March 1983.

Table 2. Time during heat collection and time that the storage material was above 15°C

Month	Time during heat collection			Time for above 15°C of storage material		
	on	off	hours	up	down	hours
January	07:47	14:44	6.59	10:57	16:39	5.42
February	07:42	14:52	7.17	10:54	16:36	5.36
March	07:15	14:56	7.37	8:42	17:14	11.20
April	06:54	15:00	8.18	(8:32 7:24)	(21:00 23:00)	(12.29 15.36)
May	—	—	—	—	—	—

続時間が長いほど蓄熱のため有効である。蓄熱材が15°C以上を示す時間と、15°C以下になる時間および15°C以上の継続時間数を Table 2 に示した。Table 2 によると15°C以上の継続時間は1月・2月とも5時間30分前後でほぼ同じような時間数であるが、3月になると飛躍的に長くなり、潜熱蓄熱材として有効に作用している。しかし、4月上旬になると、夜間も12°C以上の温度を示し、先に記したごとく凝固点(12°C)以下になることがなく、潜熱蓄熱材として作用しなくなる。

IV. あとがき

日中の太陽エネルギーを蓄熱する一方法としての潜熱蓄熱材は、顕熱のみの蓄熱に比較して多量の蓄熱を行なうことができる。しかし、今回試験を行なった結果、次のようなことが問題点として考えられた。

- ① 潜熱蓄熱材としての利用効率が低いこと。
 - ② 有効に作動する期間が短いこと。
- ①の利用効率については、Table 1 に示すごとく、最も効率が良かった時期で、計算上全体の潜熱蓄熱材の

44%である。すなわち、全体の50%以上が潜熱としての蓄熱・放熱を行っていないことになる。この効率を上げるためには、蓄熱材の表面積を大きくして、熱伝達量を大きくすることや、ダイレクトゲインをもっと積極的に取り入れるような装置を工夫するなどの方法によってある程度改善できるものと思われる。

②の有効に作動する期間が短いことについては、①の問題とも関連している。1月はボックスの温度が低く、ボックス温度が蓄熱材の融点である15~18°C以上になる時間数が少なく、十分な潜熱の蓄熱が行なえなかった。また、4月以降は、凝固点である12°C以下になる時間数が少なく、放熱が充分行っていない。一般の花菜類の最低夜温が10°C前後で、最適夜温が15~18°Cであること、また、夜間の流出空気は、蓄熱材温度より低いことなどを考えると、凝固点を使用した潜熱蓄熱材より若干高い方が望ましい。したがって使用した蓄熱材で過冷却現象がなく、融点と同じ凝固点を持った潜熱蓄熱材が得られると、作動期間が延長されて有効であると思われる。また、融点・凝固点の異なった2~3種類の潜熱蓄熱材を組合わせて使用すると、有効期間の延長が可能になると思われる。

この研究に使用した潜熱蓄熱材や、潜熱蓄熱材に関する熱的特性データは、松下技研KKから提供を受けたものである。

参 考 文 献

1. André JAFFARIN and Pascal CADIER: Latent Heat Storage Applied to Horticulture. Solar Energy, 28: p. 313-321. 1982
2. 仁科弘重・高倉 直: 潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室に関する研究, (1) 潜熱蓄熱材の特性試験と小型温室における暖房実験. 農業気象, 39: 201-211. 1983
3. 農業電化協会中部支部: ポリエチレングリコール(潜熱蓄熱材)を用いた温室暖房試験. 農業電化, 35: 20-23. 昭和57年
4. 佐々木皓二: 潜熱蓄熱方式による施設暖房について. 関東の農業気象, 4: 2-4. 1983
5. 高倉 直・仁科弘重: 潜熱蓄熱グリーンハウス, 施設農業への新エネルギー利用(太陽・風編). フジテクノシステム, p. 236-241. 1980
6. 高倉 直・仁科弘重: 高温作物用ソーラグリーンハウスの開発. 農業水産業における自然エネルギー

の効率的利用技術に関する総合研究委託事業成績報告書. 昭和51年

Summary

Basic experiments on latent heat storage as applied to greenhouse heating were performed from January to May 1983. These experiments were run in a small box in which a heat exchanger was filled with a phase change material and placed in a greenhouse. Solar heat was stored during the day and at night the heat was released for heating the box by recycling the air through the heat exchanger.

Fig. 1 shows the changes in temperature of the phase change material and Fig. 2 shows a schematic diagram of the heat exchanger. Box minimum temperature which is important to the development of crops is greatly dependent on outdoor minimum temperature, the correlation coefficient being 0.89 as shown in Fig. 3. The variances of minimum temperatures are shown in Fig. 5. Mean differences of minimum temperatures between box and outdoor, and between box and greenhouse were 10.3°C and 5.8°C, respectively. The variances of temperature differences are shown in Fig. 4.

High correlation coefficient between stored heat and solar energy (and maximum temperature) appeared in January and February, but was low in March, April and May. Correlation coefficient for all data was low as shown in Fig. 6. The stored heat (during the day) and the released heat (at night) calculated by air temperature of inlet and outlet, were analyzed. High storage efficiencies (ratios of stored and released heat to solar energy) were found from January to March as shown in Table 1.

The ratios between sensible and latent heat for storage and the coefficients of utilization of phase change materials were calculated. The ratio and the coefficient of utilization were the highest in March (Table 1).

Fig. 7 shows a typical variance of air temperature as shown on 13 March.

The problems of using this latent heat storage are low efficiency of utilization and short periods of usefulness.