農業気象 (*J. Agr. Met.*) 41 (1): 63–68, 1985

水蓄熱型太陽熱利用ハウスの熱的性能

河 野 徳 義

(愛媛県農業試験場)

Thermal Properties of Plastic Solar Greenhouse
with Water-Air Heat Exchange Systems

Tokuyoshi KŌNO

(Ehime Agricultural Experiment Station,)
Kaminanba, Hōjō, Ehime

1. はじめに

施設園芸における省エネルギー対策として地中熱交換法(山本, 1973), 水蓄熱法(大久保ら, 1977), 水膜式熱交換法(岡野ら 1981; 1982)などが試みられ, それぞれ特徴を持ち成果をあげている。

本研究は, 熱交換機の簡易化と集熱効率をあげるために, 熱交換機に自動車用ラジエータを用い, 内部空気と熱交換させるとともに, 屋根の母屋の内側にパイプを配管して集熱し, さらに, ハウス外にも太陽熱集熱装置を設置して集熱量の増加を図った。このような一連の熱交換システムについて, 集熱効率を明らかにし, また, トマトを栽培して, その実用性について検討した。

2. 試験方法

2.1 供試ハウスおよび栽培作物

実験に用いたハウスは, 南北棟の鉄骨両屋根式で, 間口 5.4 m, 奥行 18.5 m, 床面積 100 m², 表面積 213 m², 容積 275 m³, 保温比 0.47 であり, Fig. 1 にその概要を示す。被覆資材には屋根に FRA 小波板(厚さ 0.7 mm)を, 側壁にはビニールフィルム(厚さ 0.1 mm)を用いた。ハウス全面に可動式一層カーテン(農サクビフィルム, 厚さ 0.05 mm)を取付け, また, 側壁には二層カーテン(シルバーポリトウ, 厚さ 0.07 mm)を取付け, 夜間閉じた。

供試作物はトマト(品種“東光 K”)を用い, 1980 年 9 月 25 日に播種し, 12 月 1 日にうね幅 1.35 m, 株間 0.25 m に定植した。床面は透明ポリエチレンフィルム(厚さ

0.05 mm)で全面マルチした。試験期間は収穫終りとなる 6 月までであった。

2.2 水蓄熱型交換暖房ハウスの概要

Fig. 1 に示すごとく, ハウス外に蓄熱水槽を設置し, 蓄熱体とした。ハウス内に内部集熱と換気集熱の 2 台の熱交換機を設置し, 蓄熱水槽とそれぞれのポンプで連結しておき, 日中はハウス内の昇温空気を内部集熱交換機で熱交換し, 換気時は, 換気扇の前面に換気熱交換機を設置し, 強制換気を行いながら蓄熱水槽水温を上昇させた。また, ハウス内屋根配管集熱装置, ハウス外太陽熱集熱装置を設置して, いずれも蓄熱水槽と連結し, ポンプで通水循環させ, 蓄熱水槽水温の上昇を図った。蓄熱水槽は南面は透明プラスチック板を用い, 日中は南面と上面から太陽熱を集熱し, 夜間は断熱材を被覆した。

夜間の暖房は, ハウス内部集熱交換機のみを作動させて水槽水温と空気を熱交換して暖房し, 補助暖房機は用いなかった。

ハウス内部集熱と換気集熱に用いた熱交換機は自動車用ラジエータ(縦, 横各々 0.6 m, 厚さ 0.1 m, 旧型 10 ton 車トラック用)を用いた。ハウス内部集熱交換機の送風機の定格出力は 0.75 kW で, 実測送風量は 75 m³ min⁻¹ であり, 日中はサーモスタットを 23℃, 夜間は 8℃ にセットして運転した。換気集熱交換機の換気扇=送風機は定格出力 0.3 kW で, 定格風量 105 m³ min⁻¹ (2.5 mm H₂O) であり, 日中はサーモスタットを 25℃ にセットして運転した。これらの熱交換機と蓄熱水槽との通水ポンプについては, ハウス内部集熱交換機用が定格出力 0.25 kW (通水量 40 l min⁻¹) であり, 換気熱交換機用は 0.2 kW (通水量 35 l min⁻¹) であった。通水ポンプの作動はそれぞ

昭和 59 年 12 月 7 日 中国・四国支部大会にて発表

昭和 60 年 1 月 7 日 受理

Fig. 1. Views of the experimental solar greenhouse and the heat exchanger systems.
(unit; m)

れ、送風機と換気扇に連動して行われた。

ハウス内屋根配管集熱装置に用いた配管パイプは、内径 0.05 m の塩ビ排水管用い、ハウス内屋根の母屋の内側に 12 本取付け、直列に連結した。通水ポンプは、次に述べるハウス外太陽熱集熱装置と共用した。

ハウス外太陽熱集熱装置の集熱板は縦 2.03 m、横 1.03 m、深さ 0.10 m、有効集熱面積 1.94 m² のもの（昭和アルミ社 FAK-S₂）を 4 台用いた。集熱板の下端は 1 m 高さとし、南向きに傾斜角度 60 度に設置した。通水ポンプは屋根配管装置と並列に接続して共用し、定格出力 0.2 kW（通水量 30 l min⁻¹）であり、蓄熱水槽水温より太陽熱集熱装置内水温が 2℃ 高い時作動するようセットした。

蓄熱水槽は、容積 8.4 m³（幅 5.0 m、奥行 1.5 m、水深 1.12 m）でコンクリート製の半地下式であり、南面以外の外周は厚さ 0.05 m の発泡スチロールの断熱材で被覆した。さらに、間口 5.4 m、奥行 3.0 m のハウスで被覆、密閉した。

2.3 集熱・放熱量の測定

通水量の測定は、ハウス内部・換気熱集熱交換機は通水ポンプの出口に、ハウス内屋根配管・ハウス外太陽熱集熱装置は通水ポンプからの分岐点に水道用量水器を取付け、朝、夕読み取り記録した。

蓄熱水槽の集熱・放熱量は、朝、夕の水温差に貯水量（8.4 m³）を乗じて求めた。熱交換機および集熱装置の集

熱・放熱量は、それぞれ蓄熱水槽水温と熱交換機および集熱装置の配管返り口の水温の差に通水量を乗じて求めた。水温測定は 30 分ごとに行った。

気温、地温および水温の測定は、直径 0.3 mm の銅・コンスタンタン熱電対を用いた。ハウス内外気温の測定高さは 1.5 m で、ハウス内地温の深さは 0.1 m とした。気温の記録は 12 打点温度記録計を、地温と水温の記録はデジタル 30 点温度記録計（サーモダックⅢ型）を用いた。

ハウス外日射量の測定は農試電試型日射計を用い、時間変化とともに積算計（エイコー社 MP-20）により積算値を求めた。記録は 6 打点直流電圧記録計を用いた。

3. 測定結果

3.1 気温と地温および水温の測定結果

熱特性測定日のハウス内外気温とハウス内地温および朝、夕の蓄熱水槽水温を Table 1 に示す。ここで、最低気温は翌朝の測定値を用いた。

ハウス内最低気温は平均 8.8℃ で、外気温の最低気温は平均 2.4℃ であり、ハウス内外気温差は 6.4℃ であった。ハウス内最低地温は平均 13.0℃ であった。蓄熱水槽水温の最低は平均 14.1℃、最高は平均 18.7℃ であり、水温の日較差は 4.6℃ であった。ハウス内気温と水温の差は集熱時は平均 5.2℃、放熱時は平均 4.8℃ であった。

ハウス内湿度は表に示していないが、測定日の平均値

Table 1. Outside, inside air and inside soil temperatures and water temperature in the heat reservoir.

date	Outside Air		Inside Air		Inside Soil		Heat Reservoir		
	min. (°C)	max. (°C)	min. (°C)	max. (°C)	min. (°C)	max. (°C)	min. of the first day (8 : am) (°C)	max. (5 : pm) (°C)	min. of the second day (8 : am) (°C)
1981 Feb.									
14-15	4.5	17.0	9.5	25.0	13.2	16.4	11.1	17.2	13.6
15-16	9.0	16.0	11.0	26.0	14.1	16.7	13.6	19.3	18.8
21-22	0.5	15.2	9.3	29.0	13.4	17.2	14.7	19.5	14.7
22-23	6.9	14.0	10.0	27.9	13.3	16.2	14.7	17.9	17.4
25-26	-2.5	6.0	7.0	26.0	12.1	15.8	16.2	18.5	11.1
Mar.									
6-7	-2.0	9.5	7.0	15.0	11.7	13.2	16.8	16.5	11.3
7-8	0.5	15.0	8.0	28.0	13.5	17.8	11.3	22.1	17.4
mean	2.4	13.2	8.8	25.3	13.0	16.2	14.1	18.7	14.9

は昼間 71.5%, 夜間 74.7% であり, 夜間湿度は一般ハウスが 100% に近いのに比べ低湿度を保った。

3.2 集熱・放熱量, 集熱効率および成績係数

Table 2 は, 水温差から求めた集熱量, 集熱効率(ハウス外日射量に対する集熱量の比), 放熱量, 消費電力熱量および成績係数(夜間放熱量を全日消費電力熱量で除した値)を示す。消費電力量は熱交換機送風機(内部集熱と換気扇), それぞれの通水ポンプの昼夜の消費電力熱量の和であり, 1 kWh = 860 kcal として換算した。

集熱効率は, ハウス内部集熱交換機 0.07, ハウス内屋根配管集熱装置 0.11, ハウス外太陽熱集熱装置 0.41, 換気熱集熱装置はきわめて小さかった。100 m² ハウスに対する集熱システムとしての集熱効率は, ハウス内部集熱交換機 0.07, ハウス内屋根配管集熱装置 0.04, ハウス外太陽熱集熱装置 0.03 となった。日中の集熱はすべて蓄熱水槽に貯熱されるため集熱効率の合計値は 0.14 であり, 蓄熱水槽の水温上昇から求めた集熱効率 0.15 とほぼ等しかった。表に示していないが, 3 月中旬から 4 月上旬の間にハウス内部集熱交換機, ハウス内屋根配管集熱装置を単独運転した結果, 集熱効率はハウス内部集熱交換機 0.07, ハウス内屋根配管集熱装置 0.11 であり, 同時運転した場合と同じ結果であった。

4. 考 察

4.1 熱交換機

熱交換機に用いた自動車用ラジエータは本来高温水用であり, 本実験のような低温水の場合の熱的性能は明らかでない。Table 2 からラジエータの熱交換能力は, 集熱量 161 kcal m⁻² day⁻¹, 放熱量 313 kcal m⁻² day⁻¹ となった。集熱と放熱の運転時間の平均はそれぞれ 4.6 時間, 5.9 時間であり, 1 時間・単位床面積あたり集熱

量は 34.8 kcal, 放熱量は 52.9 kcal となった。集熱量が放熱量より劣ったのは, 日中の集熱量不足によるものと考えられた。

夜間の放熱はハウス内部熱交換機(ラジエータ)のみで行われ, その熱交換量をこれまでの熱交換法と比較すると, 地中熱交換法(佐々木ら, 1979)の 32.5 kcal m⁻² h⁻¹ より大きく, 水膜式熱交換法(岡野ら, 1981)の 72.5 kcal m⁻² h⁻¹ より小さい値となった。

このように, 自動車用ラジエータは低温水でも熱交換能力があり, 耐用年数は半永久的であり, 構造が簡単で施工が容易であるなどの利点がある。熱交換能力をさらに高めるにはラジエータの通風抵抗が大きいため, 送風機は高い静圧でも送風量の多い機種を選定することが必要である。

4.2 ハウス内屋根配管集熱装置

ハウス内屋根配管集熱装置の集熱では, 配管表面で太陽熱を, 裏面でハウス内輻射熱を吸収している。ハウス内部集熱交換機では蓄熱水槽の水温が上昇するとハウス内気温との差が小さくなり, 集熱量が少なくなってくる。このような場合, 集熱量を増加させる方法として, 太陽熱を直接吸収できるハウス内屋根配管集熱装置は, ハウス内部熱交換機より有利であると考えられた。

4.3 ハウス外太陽熱集熱装置

ハウス外太陽熱集熱装置の集熱効率は 0.41 で最も高い値となった。Table 1 から, ハウス外気温が -2.5 ~ 2.0°C に低下した日は, ハウス内気温が 7°C となり, トマト栽培に必要な 8°C が得られなかった。本システムで放熱量を多くするには集熱量を増加しなければならない。集熱量の増加をハウス外太陽熱集熱装置の集熱板の増設によって補うとすれば, 暖房熱量は, 暖房デグリアワーを用いて岡田(1980)の式から求めると,

Table 2. Experimental results of heat gain, heat release and C.O.P. of the equipments.

date	Outside Solar Radiation (kcal m ⁻² day ⁻¹)	Inside Air to Water Heat Exchanger		Solar Heat Collecting Pipes				Outdoor Solar Heat Collector		
		Heat Gain (kcal m ⁻² day ⁻¹)	Heat Gain Efficiency	Heat Gain (kcal m ⁻² day ⁻²)	Heat Gain Efficiency		Heat Gain (kcal m ⁻² day ⁻¹)	Heat Gain Efficiency		
					per pipe surface	per floor surface		per collector surface	per floor surface	
1981 Feb. 14-15	1,730	254	0.15	141	0.22	0.08	75	0.56	0.04	
15-16	2,240	204	0.09	117	0.14	0.05	116	0.67	0.05	
21-22	2,570	210	0.08	113	0.12	0.04	78	0.39	0.03	
22-23	2,040	133	0.07	62	0.08	0.03	70	0.44	0.03	
25-26	2,760	89	0.03	56	0.05	0.02	45	0.21	0.02	
Mar. 6-7	500	0	0	0	0	0	0	0	0	
7-8	4,410	240	0.05	321	0.19	0.07	210	0.61	0.05	
mean	2,321	161	0.07	116	0.11	0.04	85	0.41	0.03	

date	Exhaust Air to Water Heat Exchanger		Heat Reservoir				Electric Power Consumption (kcal m ⁻² day ⁻¹)	Coefficient of Performance of the Green-house System <i>C.O.P.</i>
	Heat Gain (kcal m ⁻² day ⁻¹)	Heat Gain Efficiency	Total Heat Gain (kcal m ⁻² day ⁻¹)	Heat Gain Efficiency	Total Heat Release (kcal m ⁻² day ⁻¹)	Hourly Heat Release (kcal m ² h ⁻¹)		
1981 Feb. 14-15	7	0	499	0.29	307	30.4	169	1.81
15-16	0	0	465	0.21	0	—	78	—
21-22	0	0	406	0.16	410	53.9	130	3.16
22-23	0	0	273	0.13	0	—	38	—
25-26	0	0	196	0.07	632	43.2	157	4.03
Mar. 6-7	0	0	0	0	444	49.2	78	5.72
7-8	71	0.02	931	0.21	401	87.6	134	2.99
mean	11	0.00	396	0.15	313	52.9	112	3.54

$$Q = A_w U (1 - f_r) DH$$

であり、ここで、 Q ：暖房熱量(kcal day⁻¹)、 A_w ：ハウス表面積(213 m²)、 U ：暖房負荷係数(5.7 kcal m⁻² h⁻¹ °C⁻¹)、 f_r ：熱節減率(0.4)、 DH ：暖房デグリアワー(62°C h day⁻¹、但し、三原(1978)の日照時間を考慮した式の松山での2月の平均値)。

$$Q = 213 \times 5.7 (1 - 0.4) 62 = 45,200 \text{ (kcal day}^{-1}\text{)}$$

となる。Table 2 から、本システムの集熱量は、39,600 kcal day⁻¹ であるから不足熱量は、

$$45,200 - 39,600 = 5,600 \text{ (kcal day}^{-1}\text{)}$$

となる。そこで集熱板の台数は、ハウス外日射量はTable 2 から 2,321 kcal m⁻² day⁻¹ を用いると、

$$5,600 \div (2,321 \times 1.94 \times 0.41) \approx 3 \text{ (台)}$$

となり、既設分4台と合せて7台で集熱すると、外気温が-2.5°Cに低下してもトマト栽培に必要な夜間気温8°Cを保つ熱量が得られる。

4.4 集熱効率と成績係数

本システムのハウス内部の太陽熱集熱は、ハウス内部集熱交換機、換気集熱交換機およびハウス内屋根配管集熱装置によって行われており、それぞれの集熱効率の合計は0.11となった。これまでのハウス内部集熱型暖房法と比べると、岡野ら(1981)の水膜式熱交換法では1日間の最高値で0.17であり、古在ら(1983)のハウス内蓄熱槽にダクトで通風した場合の集熱では、12日間の平均値では0.11であり、これらの値とほぼ等しい集熱効率を得られた。

夜間放熱量を全日消費電力量(熱量換算)で除した値を仮に成績係数(C.O.P.)とすると、その値は、平均3.54となった。日中の集熱がない3月6日では5.72と大きい値となった。太陽熱利用温室では成績係数が3.0以上でないと石油暖房に比べ有利とならないと云われ(古在ら, 1983)、地中熱交換ハウスのそれは5~6であり(古在ら, 1983)、この値まで向上させるには先に述べたように熱交換機の送風機の性能の向上が必要である。

4.5 促成トマトの生育と収量

促成トマト栽培では、最低気温は8°Cを必要とするが、ハウス外気温が-2.5~-2.0°Cに低下した場合は、ハウス内気温が7.0°Cになったことから、1月、2月は-2.0°Cに低下した日が多く、この時期の草丈の伸長が鈍った。しかし、3月以降は外気温の最低気温は-2.0°C以上となり、草丈の伸長がよくなった。収量は初期収量がやや少なくなったが、後期収量が増加したため総収量では、上物重量で852 kg a⁻¹ が得られた。このように、夜間の一時期の低温が生育と収量に影響を与えるので、トマト栽培への実用化にあたっては、ハウス全面に二層カーテンを行うことや、ハウス外太陽熱集熱装置の増設の必要性

が認められた。

5. ま と め

水蓄熱型太陽熱利用ハウスにおいて、蓄熱水槽をハウス外に設置し、日中のハウス内部集熱は自動車用ラジエータを用いた熱交換機を設置してハウス内部と換気扇出口で集熱し、さらに、ハウス内屋根配管集熱装置、ハウス外太陽熱集熱装置を設置して集熱し、それぞれ、蓄熱水槽の水温上昇を図った。夜間は、ハウス内部集熱交換機を用いて放熱し、装置の熱特性をトマトを栽培して測定した。この場合、補助暖房機は用いなかった。その概要は次のとおりである。

(1) 熱特性測定期間のハウス内外気温差は、平均6.4°Cであり、蓄熱水槽水溫の最低は平均14.1°Cで、最高は平均18.7°Cであった。

(2) ハウス外日射量に対する集熱効率は、ハウス内部集熱交換機0.07、ハウス内屋根配管集熱装置0.11、ハウス外太陽熱集熱装置0.41であった。換気集熱交換機はきわめて小さかった。100 m²ハウスの集熱システムとしての集熱効率は、ハウス内部集熱交換機0.07、ハウス内屋根配管集熱装置0.04、ハウス外太陽熱集熱装置0.03であり、ハウス内集熱効率の合計は0.11となった。

(3) 成績係数(夜間暖房熱量を全日消費電力量ー熱量換算ーで除した値)は、3.54となった。この値をさらに高めるには、ハウス内熱交換機の送風機を高い静圧でも送風量の多い機種を選定すること。夜間ハウス内二層カーテンを天井部まで行い、放熱係数を小さくする必要がある。

(4) 自動車用ラジエータ(旧型10 tonトラック用、縦、横0.6 m、厚さ0.1 m)の熱交換能力は、送風機の定格出力0.75 kW、実測送風量75 m³ min⁻¹で、通水量40 l min⁻¹、通水水温11~22°Cの場合348 kcal m⁻² h⁻¹~529 kcal m⁻² h⁻¹であり、低温水でも夜間暖房に必要な熱交換能力があることがわかった。

(5) 促成栽培トマトの生育は、外気温が-2.5~2.0°Cに低下した時、ハウス内気温7.0°Cであったため、1月、2月は-2.0°Cに低下した日が多く、草丈の伸長が鈍ったが、3月になって外気温が上昇すると草丈の伸長のおくれは回復した。このため初期収量がやや少なく、総収量は上物重量852 kg a⁻¹であり、標準収量よりやや劣った。促成トマト栽培を本システムの暖房法で行う場合、ハウス全面に二層カーテンをすることや、ハウス外太陽熱集熱装置の増設の必要性が認められた。

本研究実施にあたり、当场、大林弘道研究員には多大の協力をいただいた。ハウス内屋根配管集熱装置は、四国積水(株)、大西迪典氏に、本装置の施工について、同

前工業(株)、谷建設の各位に援助していただいた。
ここに、記してお礼申し述べる次第である。

引用文献

- 1) 古在豊樹・武内英雄・岡崎誠司・渡部一郎・林 真紀夫・志田憲一, 1983: 内部集熱型水蓄熱方式による太陽熱利用温室の熱的性能, 農業気象, **38**(4), 361-369.
- 2) 三原義秋, 1978: 日照を考慮した温室暖房デグリアワーの算定式, 農業気象, **34**(2), 83-85.
- 3) 岡田益己・三原義秋, 1980: 温室設計の基礎と実際, 暖房, 養賢堂, 182-204.
- 4) 岡野利明・山本雄二郎・青木 清, 1981: 水蓄熱式太陽熱暖房温室に関する研究 — 試作した水蓄熱システムの性能 — 電力中研報告, **480013**, 7-9.
- 5) 岡野利明・山本雄二郎・青木 清, 1982: 水蓄熱式太陽熱暖房温室に関する研究 — 水耕栽培専用システムの性能 —, 電力中研報告, **482012**, 8-10.
- 6) 大久保淳一・森田純行・緒方一男・橋本博好, 1977: 熱交換機つきハウスの温度状態と蓄熱効率に関する研究, 高知県農林技研報, **9**, 25-32.
- 7) 佐々木皓二・板木利隆, 1979: 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第1報), ハウス内環境特性, 熱収支およびトマトの生育, 収量について, 神奈川園試研報, **26**, 26-34.
- 8) 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.