

# 園芸施設用ヒートポンプの 普及・拡大のための課題とその改善策

## 改善策3 「余剰太陽熱を蓄熱し暖房補助熱源として活用」 (その2) 太陽熱の集熱器・放熱器の構造と特性

由良 茂男\*・玉城 鉄\*\*・関山 哲雄\*\*\*

### 1. 背景とこれまでの経緯

園芸施設において使用されている暖房機の95%は油だき暖房機である。今後の暖房には温室効果ガス排出量が少なく、エネルギー利用効率が高く、さらに冷房などの機能も活用できるヒートポンプ(以下HPと略す)への転換が望ましいとされてきたが、その普及は設置費ならびに電気代(基本料金と従量料金)が高いことなどから伸び悩んでいる。

特定非営利活動法人植物工場研究会内の農業用HP分科会では、2013年4月よりHPの普及・拡大を意図した調査活動を続けており、これまでにHPの普及・拡大の阻害要因について整理し、5つの改善策を策定するとともにその解決に向けた調査、研究を行ってきた。本誌の昨年7月号においては改善策に関するまとめと、HPの必要台数の計算をより厳しく行う必要性について、続いて9月号では複数台のHPを対象とする効率的な制御方式について、さらに11月号においては太陽熱を蓄熱、利用することが、HPの台数削減とランニングコストの節減上必要であること、ハウス内で最も高温な場所における集熱を考える必要があることなどについて紹介した<sup>1)~4)</sup>。

昼間の余剰な太陽熱を蓄えて夜間の暖房に利用

する研究は、1970年代のオイルショック当時から活発に行われてきた経緯がある。当時の太陽熱利用の集熱場所は、集熱場所と放熱場所を同じにして集熱器と放熱器を一体化する考えのためか、専ら栽培場所かその近接場所であつた。しかし、栽培場所の温度は、作物の生育上の制約から一般的に20~30℃に制御されており、夜間の暖房設定値を15℃とすると暖房に利用可能な温度幅は5~15℃程度となり、暖房熱源としての魅力は少なかった。

そこで、集熱はハウス内で最も高温となるハウス上部の梁の付近で行い、集熱場所と放熱場所を区別することとした。その際、日射透過率を低下させないようにする必要があり、集熱器の形状は梁の上に設置できる平板タイプとし、また、放熱器の設置場所については、気温むらを改善したり、生育上効果的な場所にするなどして、集熱場所と放熱場所を分けるメリットを強調するように工夫する必要がある。

今号では、以上のような新たなニーズに基づいて試作した集熱器の構造とその特性について、これまでの集熱器と比較した結果について紹介する。なお、試作した集熱器と放熱器の違いはサイズのみで内部構造は同様なので、特性に関する説明は集熱器のみについて行う。

\*日鐵住金建材(株)、\*\*イワタニ アグリグリーン(株)、\*\*\*特定非営利活動法人 植物工場研究会

## 2. 太陽熱蓄熱・利用システムの構成と試作集熱器の構造

試作した集熱器の形状は幅200mm、長さ1,000mm、厚さ30mmで梁の上面に設置する。床面の蓄熱水槽内の水を循環ポンプにより集熱器に適時に循環させることによりハウス上部において集熱し、蓄熱水槽内の水温を上昇させる。夜間は蓄熱水槽内の温水を放熱器に循環させて放熱させる。放熱器の基本型は高さ500mm、長さ1,000mmで、原則的には気温が比較的低くなりやすい場所に設置することが考えられるが、設置に関する制約はない。場合によっては、別途放熱器を用いて作物の生長点付近とか、培養液の加温などを行うことも考えられる。

現在考えている太陽熱の蓄熱・利用システムは、集熱器と放熱器、蓄熱水槽（発泡スチロールを使用した断熱性の良い水槽）、循環ポンプ、水の循環方向の切換弁（集熱と放熱）、流量調整弁、樹脂ホース、タイムスイッチで構成される。昼間の水の流れは蓄熱水槽→集熱器→蓄熱水槽と循環させて集熱、蓄熱する。夜間の水の流れは蓄熱水槽→放熱器→蓄熱水槽と循環させて放熱する（図1）。

循環ポンプは、必要な揚程と流量条件を満足する循環ポンプをタイムスイッチなどで制御し、所定の時刻に所定の時間作動させ、集熱または放熱

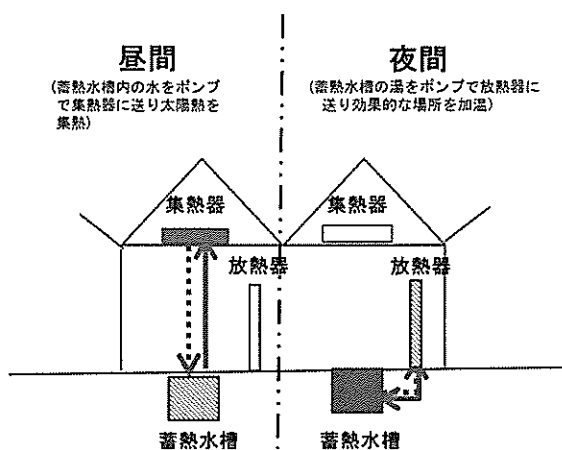


図1 太陽熱の集熱方法と放熱方法  
 昼間：蓄熱水槽内水温<集熱器内水温  
 夜間：放熱器内水温<蓄熱水槽内水温

を行う。場合によっては集熱器と蓄熱水槽内の水温によって循環ポンプを制御することも考えられる。また、循環ポンプは強制対流式であり、流量調整弁によって流量を調整する。集熱器の寸法は、集熱器の設置によって日射透過率を低下させないように、梁と内張りカーテンの収納時の幅以内となるようにしている。今回はこの集熱器を2器準備し、水が直列に流れるように接続した。

太陽熱を蓄えて夜間の暖房熱源として利用する研究は、古くから行われてきたが、当時の集熱は栽培場所もしくはその近接場所で行われたために、栽培適温である25～30℃の温度域を対象としていたことから、蓄熱量とその効率には制限されていた。

ハウス上部空間の温度は、冬期においても晴天日には50℃付近の温度になることを2016年に実測し確認されている<sup>4)</sup>。

新たな集熱方法では、日射透過率を低下させないように梁の上面などにおいて行えるように、形状は平板で高効率・小型で軽量の集熱器の開発を行った。その集熱器は、アルミニウム板0.8mmと、呼び高さ9mmの中空積層樹脂板を貼り合わせた構造とし、そのなかを流れる水は乱流状態で流れるように工夫され熱伝達を良くして熱交換性能を高めた。中空積層樹脂板は、「エアーキャップ」とか「プチプチ」などと呼ばれている気泡緩衝材であり、量産され低価格な資材であることから、試作中の集熱器や放熱器は安価な商品として供給されることが期待される。なお、耐熱性についても実用上問題ないとされている。

説明：今回試作した集熱器と放熱器に使用しているアルミニウムの熱伝導率は約240 (W・m<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>)であり、鉄の約80 (W・m<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>)に比べて4倍大きい。また、中空積層樹脂板の熱伝導率は約0.2 (W・m<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>)であり、熱伝導性が低く断熱性が高い。したがって、アルミニウム板と中空積層樹脂板からなる構造体は、内部を流れる水に熱を伝えやすく、伝えた熱を外に逃がさない仕組みになっ

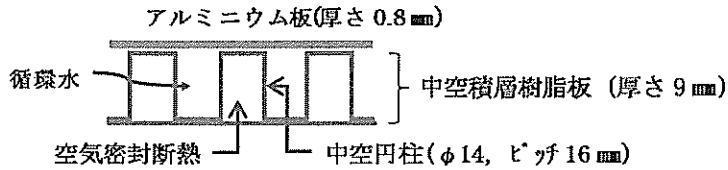


図2 集熱板、放熱板の構造

ている。

アルミニウム板面に接して流れる水と板面との間での熱のやり取りを行う現象を熱伝達といい、熱伝達率はアルミニウム板と水の温度の差によって生じる熱の流れやすさを意味する。熱伝達率は、水の流速や水の流れが一様な流れか乱れた流れか、流路の形状、温度差、その他の条件によって大きく変化する。図2に示すように中空積層樹脂板は気泡緩衝材特有の外観をしており、基材側から中空円柱の突起が一定の間隔で群をなしている。中空円柱の直径に比べて中空円柱間の隙間幅は小さく、中空円柱群は千鳥形の配列となっている。循環水は図3に示すように中空円柱の先端を境に2つに分流し、隣の中空円柱で別れた流れと

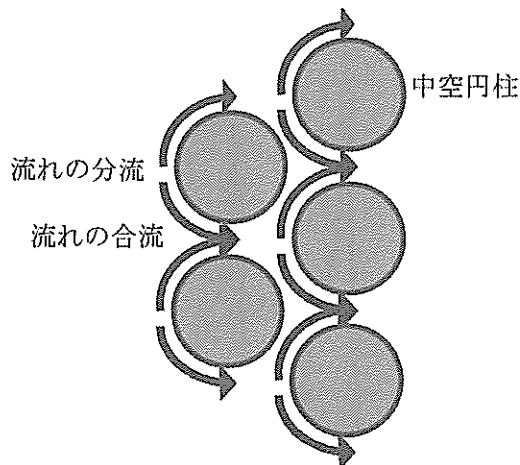


図3 循環水の分流と合流

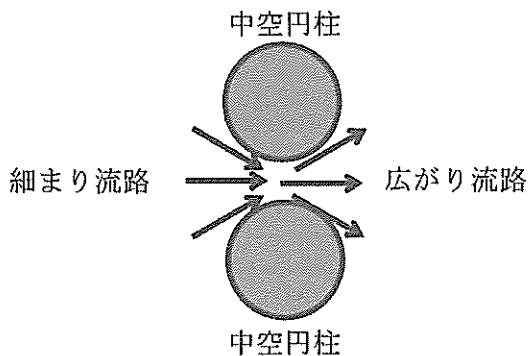


図4 中空円柱による細まり流路と広がり流路

合流して隙間に流れ込み、図4に示す隣り合う2つの中空円柱が作る徐々に狭くなる細まり流路と、徐々に広がる広がり流路の影響を受ける。これら2つの流れの変化から、循環水は流れの方向と速度が絶えず変化する乱流となる。この結果、アルミニウム板付近の循環水のみが接触して熱交換して温度差が小さくなるのではなく、乱流によって絶えず温度の低い循環水がアルミニウム板と接触することになり、熱伝達率を高めることができる。また、アルミニウム板は熱伝導率が高いと同時に質量も鉄などより小さいため、熱容量が小さく日射の変化への速応性が良い。

### 3. 試作集熱器の集熱特性

試作集熱器の正確な性能表示は、空気から水また水から空気への熱伝達係数の測定を必要とする。ここでは、栽培状態のハウス上部の梁の上に設置した実用状態における集熱特性について測定するとともに、過去においてハウス用の太陽熱の蓄熱、放熱を目的として開発された「水膜式熱交換器」との特性比較を行った<sup>6)</sup>。さらに、排水用として現在市販されている可撓性のやわらかな青色のプラスチックホース（折径44mm、外径34mmφ、厚み1.5mm、10m）を供試して、単位通水量当たりの集熱量を試作放熱器と同時測定して比較した。

新しい集熱器の実用状態における集熱特性の測定は、前号で紹介した床面積2,430㎡、軒高4mのハウスの梁の上に、試作集熱器（表面積0.2㎡）を2器設置して行った。また、排水用ホースとの特性の比較については、試作集熱器とほぼ同条件と考えられるように排水用ホースを設置し集熱量の測定を行った。

異なる条件ではあるが、試作熱交換器の熱交換能力は、過去に開発された「水膜式熱交換器」の約7.3倍、また、排水用ホースとの単位通水量当たりの集熱量については、試作集熱器が2.2～3.3倍、平均2.5倍優れていた。

説明：試作集熱器による集熱方法は、図1に示すように試作集熱器と蓄熱水槽の間を15分通水、15分停止とする間断的に通水した場合の集熱速度の結果を図5に示した。この間断的な集熱方法の場合、通水直後の集熱速度は著しく大きいですが、通水により集熱器表面温度が低下するとその時の日射の他に周辺気温からの受熱量に応じた平衡値に近づく様子が見られる。集熱を3回繰り返した集熱速度を表1に示した。

「水膜式熱交換器」の熱交換能力は、熱交換膜の総面積：28.5㎡、1時間当たりの熱交換量が温度差が10℃の時4,300 kcal・h<sup>-1</sup>と報告されており、熱交換面積1㎡、温度差1℃、1時間当たりの熱交換量に換算すると、63 (kJ・m<sup>-2</sup>・℃<sup>-1</sup>・h<sup>-1</sup>)となる<sup>6)</sup>。なお、この方式は、火力発電所などにおける温排水利用など低温度差向けとして考えられて

おり、熱交換膜の面積を大きくすること、ファンによる強制通風により熱交換能力を大きくするように配慮されていた。

「試作熱交換器」の熱交換能力は図5および表1の結果から、平均集熱速度は17.9 (kJ・min<sup>-1</sup>)である。1時間当たりでの通水時間は15分を2回となり、伝熱量は17.9 × 30となる。熱交換面積は0.4㎡、平均温度差は2.9℃であることから、

$$\begin{aligned} \text{熱交換能力} &= 1 \text{時間当たりの伝熱量} / \text{伝熱面積} \\ &\quad \times \text{温度差} \\ &= 17.9 \times 15 \times 2 / (0.4 \times 2.9) \\ &= 463 \text{ (kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{℃}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \end{aligned}$$

以上、実用状態における熱交換能力として、試作集熱器の熱交換能力は過去に開発された熱交換装置例の実績値と比べると、463 / 63 で7.3倍ほど優れているといえる。

次に、集熱器と排水用ホースの通水量に対する集熱量の比較を以下の式により算出した。

$$\begin{aligned} \text{通水量当たりの集熱量 (kJ} \cdot \text{L}^{-1}) &= \text{集熱速度} \times \text{単位時間当たりの集熱時間} / \text{単位時間当たりの通水量} \\ (\text{L} : \text{リットルの単位として使用している}) \end{aligned}$$

表2より、試作集熱器の通水量1L当たりの平均集熱量は、排水用ホースの場合の2.2～3.3倍、

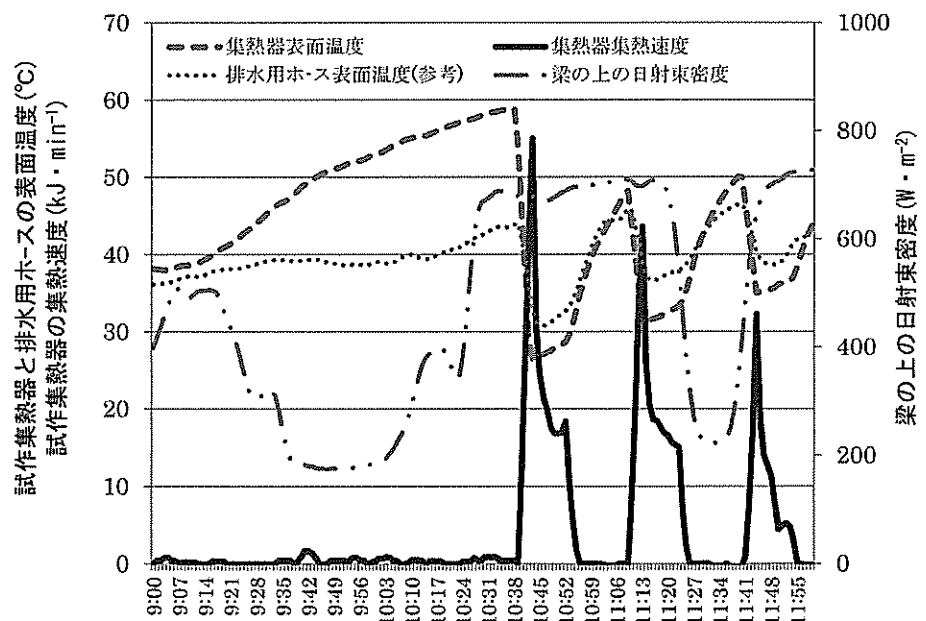


図5 試作集熱器の表面温度と集熱速度  
測定日：2017.4.14、イワタニ アグリグリーンハウス

表1 試作集熱器の集熱速度

測定日時	梁の上の平均日射束密度 (W・m <sup>2</sup> )	集熱器表面平均温度 (℃)	集熱器表面温度と集熱器出口水温の平均温度差 (℃)	集熱器の平均集熱速度 (kJ・min <sup>-1</sup> )
2017.4.14 10:40 ~ 54	680	29.9	3.9	22.3
2017.4.14 11:10 ~ 24	679	33.8	3.1	20.3
2017.4.14 11:39 ~ 53	663	37.2	1.8	11.0
平均	674	33.6	2.9	17.9

・集熱器を2器使用した時の結果であり、集熱器の総表面積は0.4㎡である。

・測定場所：イワタニ アグリグリーンハウス

表2 単位通水量当たりの集熱量の比較

日 時	試作集熱器			排水用ホース		
	平均集熱速度 (kJ・min <sup>-1</sup> )	平均通水速度 (L・min <sup>-1</sup> )	通水量 1L 当 たりの集熱量 (kJ・L <sup>-1</sup> )	平均集熱速度 (kJ・min <sup>-1</sup> )	平均通水速度 (L・min <sup>-1</sup> )	通水量 1L 当 たりの集熱量 (kJ・L <sup>-1</sup> )
① 2017.4.13 10:40 ~ 10:54	13.4	1.4	9.6	1.9	0.5	3.8
② 2017.4.13 11:10 ~ 11:24	11.1	1.3	8.5	1.3	0.5	2.6
① 2017.4.14 10:40 ~ 10:54	22.3	1.4	15.9	3.6	0.5	7.2
② 2017.4.14 11:10 ~ 11:24	19.4	1.6	12.1	2.4	0.5	4.8
平均			11.5			4.6

平均 2.5 倍優れた。この結果は、循環ポンプの消費電力量当たりの集熱量に影響する。

なお、1 回目の通水と 2 回目の通水における単位通水量当たりの集熱量の違いは、試作集熱器や排水用ホースの表面温度が 1 回目より 2 回目の方が低く推移し、平均集熱速度が小さくなるためである。2 回目以降においては、それぞれの表面温度は周囲温度より低くなり、日射とともに周囲空気からの集熱が大きく影響していると考えられる。

#### 4. まとめと今後の予定

- a. 集熱場所としてハウス上部の梁の上面などが適していることをこれまでに示してきたが、その結果を活かすには、日射透過率を低下させないように集熱器を設置することが重要であり、そのための条件として、形状は平板状で熱交換能力を高くして小型化することと、軽量化することが必要であり、今回の試作器はこれらの条件をほぼ満足できる性能を示した。
- b. 試作集熱器 2 器での小規模な測定結果ではあったが、過去に開発された従来法と比較してもかなり優れていることが確認された。引き続き集熱器を 10 倍規模とした実験を行い、実地における性能の定量的な評価を行う。
- c. 試作集熱器は、アルミ板と中空積層樹脂板で構成され、安価な商品として提供される見通しである。

#### 〔謝辞〕

2013 年 4 月から 5 年間近く農業用ヒートポン

プ分科会に参加され、熱心に討論いただいた会員の皆様に対し、また、ご多忙中にもかかわらず査読していただき、貴重なご指摘をいただいた千葉大学名誉教授、特定非営利活動法人植物工場研究会理事長の古在豊樹博士に深謝いたします。

さらに今回の実験の実施に当たり、実験の場を提供されたイワタニ アグリグリーン(株)に対し感謝いたします。

#### <引用文献>

- 1) 関山哲雄・古在豊樹 (2017)：園芸施設用ヒートポンプの普及・拡大のための課題とその改善策, 改善策 1, 農業電化, 農業電化協会, 70-4, p6-12.
- 2) 関山哲雄・古在豊樹 (2017)：園芸施設用ヒートポンプの普及・拡大のための課題とその改善策, 改善策 2, 農業電化, 農業電化協会, 70-5, p8-12.
- 3) 関山哲雄・古在豊樹 (2017)：園芸施設用ヒートポンプの普及・拡大のための課題とその改善策, 改善策 3, 農業電化, 農業電化協会, 70-7, p6-12.
- 4) 古在豊樹・関山哲雄 (2016)：園芸施設内上部空間の昼間気温が下部空間の気温より高い原因について, 農業電化, 農業電化協会, 69-4, p16-20.
- 5) 日本施設園芸協会編 (1987)：新訂施設園芸ハンドブック, p354-362.
- 6) 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, 電中研報告, 研究報告：480013, 18p.

#### お詫びと訂正

2017 年 11 月号 7 ページ右段 28 行目に誤りがありました。

お詫びと共に訂正致します。(編集部)

誤 4.9 (J・m<sup>2</sup>・day<sup>-1</sup>)

正 4.9 (MJ・m<sup>2</sup>・day<sup>-1</sup>)