

自然循環／直膨ヒートポンプ型集熱システムの開発*

芋生 憲司**・森嶋 博**・瀬尾 康久**

相良 泰行**・深田 浩司***

要 旨

農産や食品加工のための集熱システムを試作し、性能試験を行った。このシステムでは作動流体の気液二相自然循環による太陽熱の集熱と、直膨ヒートポンプによる太陽および外気からの集熱が可能であり、日射量と気温および熱需要によって運転モードを選択する。実験の結果、自然循環による集熱では、日射の50%以上の効率で集熱でき、ヒートポンプによる集熱では、COP が2.5~5程度であった。

Development of a Heat Collection System Using a Two-phase Natural Circulation Loop and/or a Direct Expansion Heat Pump*

Kenji IMOUE**, Hiroshi MORISHIMA**, Yasuhisa SEO**

Yasuyuki SAGARA**, Koji FUKADA***

Abstract

Performance characteristics tests have been carried out on a new heat collection system which has been developed for the purpose of utilizations in thermal treatments or unit operations of foods and agricultural products. The system can be operated as a solar radiation heat collector with two-phase natural circulation of working fluid and/or a direct expansion heat pump, depending on the conditions of insolation, ambient air temperature and heat demand. In natural circulation mode, the collector efficiency was assessed to be more than 50%, and the COP was found to vary in the range of 2.5-5 when the system was operated as a heat pump.

[Keyword] energy, solar heat, solar energy, heat pump, heat collection

I 緒 論

農産や食品加工の分野では、乾燥や洗浄などの

* 1989年8月農機学会関東支部会(栃木県塩原町)および1990年4月農機学会年次大会(宮崎大学)で一部講演

** 東京大学農学部(〒113 東京都文京区弥生1-1-1 ☎03-3812-2111代) Faculty of Agriculture, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

*** 現キリンビール株式会社

操作で、比較的低温度の熱エネルギーを大量に消費する工程が数多くあり、基本的に太陽熱の利用に適した分野であるといえる¹⁾。しかし主に初期コストの問題で、ソーラーシステムが導入されている例は少ない。特に季節性の強い農産物を扱う工程では、施設の年間操業期間が短いので初期コストの低減化が重要課題となっている。また以前は天日で行われてきた穀物乾燥などの操作も生産性や品質管理の事情により、施設を用いて一定の期

間内で行われるようになってきている。このような操作にソーラーシステムを導入する場合は天候の変動や夜間に備えて確実なバックアップシステムを取り付ける必要があり、更にコスト高となる。運転コストについてはソーラーシステムが有利であるが、これも日射量とバックアップシステムに投入される補助エネルギーをマッチさせ、全体として熱需要とのバランスをとることが肝要となる。

本研究では同一の集熱器を用いて作動流体の自然循環による集熱と、ヒートポンプによる集熱の両方が行えるシステムを試作した。このシステムでは日射が強い場合、あるいは日射が弱くても気温が高く熱需要の少ない場合は、作動流体の自然循環で集熱を行い、日射量が低下した場合はヒートポンプとして運転を行うことができるので、設備および運転コストの軽減に役立つものと考えられる。

II システムの構成と実験方法

1. システムの基本構成

試作したシステムの基本構成を図1に示す。同一システムで自然循環とヒートポンプによる集熱の両方を行うために、作動流体の流れを電磁弁の開閉と圧縮機のオン、オフで切り替える。

(1) 自然循環による集熱 日射が強い場合、もしくは日射が多少弱くても熱需要が少ない場合は運転コストの有利な自然循環²⁾で集熱する。この方式では図中の電磁弁を開き、圧縮機は停止させる。この状態で作動流体は蒸発器内で太陽熱を受けて蒸発し、逆止弁を通過して凝縮器へと流れ込

み、水と熱交換をして凝縮する。液体となった作動流体は受液器に入り電磁弁を通過した後、蒸発器へと流れ込む。このサイクルを繰り返すことにより集熱を行う。

作動流体が得た熱は、凝縮器と蓄熱槽を循環する水に凝縮潜熱として奪われ、蓄熱槽に蓄えられる。

(2) ヒートポンプによる集熱 曇天時や、夜間など日射が低下した場合、また日中でも熱需要量の多いときはヒートポンプ³⁾として集熱を行う。この場合は電磁弁を閉めて圧縮機を作動させる。作動流体は蒸発器で日射または外気を持つ熱を受けて蒸発し、圧縮機で圧縮されて高温高压の蒸気となる。この蒸気は凝縮器において循環している水と熱交換して凝縮し、液体となって受液器へと入り、膨張弁で膨張して再び蒸発器へと入る。このようにしてシステムはヒートポンプとして作動する。

2. 実験装置

(1) サイクルの構成機器 図2は先に述べた基本機能に基づいて試作した実験装置の外観である。以下に主要ユニットの諸元を示す。

- (a) 作 動 流 体：R 22 (フロン系冷媒), 約2.5kg
- (b) 蒸発器(集熱器)：選択吸収膜付平板形集熱器, 日射集熱面積1.91m²
- (c) 凝 縮 器：多管水槽型, 水槽容量50ℓ, 伝熱面積0.4m²
- (d) 圧 縮 機：ローリングピストン型ロータリー式, 定格出力400W

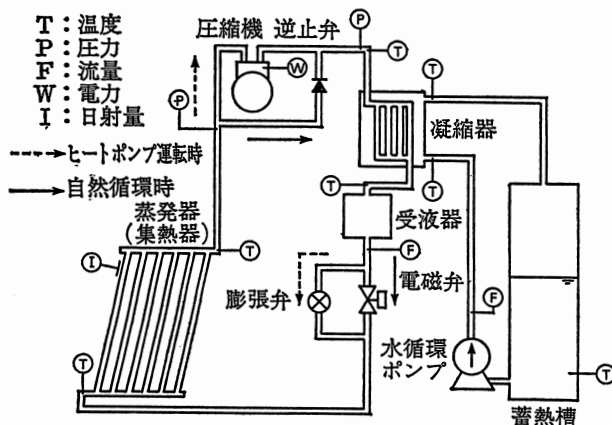


図1 集熱システムの構成

Fig. 1 Schematic diagram of the heat collection system

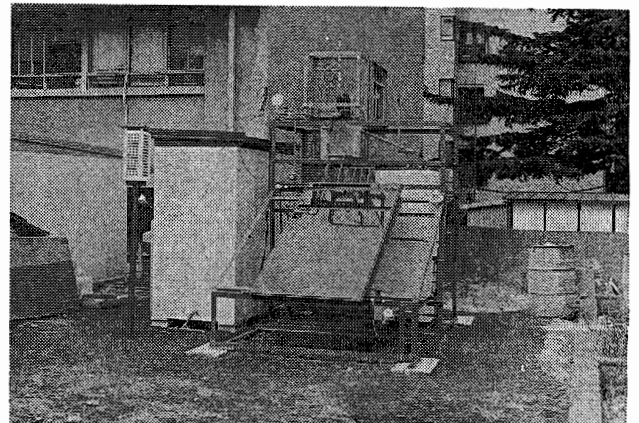


図2 集熱実験装置

Fig. 2 Experimental heat collection system

- (e) 膨張弁：感温式自動膨張弁
- (f) 電磁弁：直動式，消費電力16W
- (g) 受液器：容量1.12ℓ
- (h) 蓄熱槽：容量300ℓ
- (i) 水循環ポンプ：マグネット駆動式ポンプ，消費電力15W
- (j) 通気ファン；クロスフローファン，消費電力30W×2台

このうち、圧縮機、膨張弁、蓄熱槽、および水循環ポンプは松下電器産業(株)／松下住設機器(株)製「スーパーパナソーラ」US-302型として市販されているものの部品を用いた⁴⁾。蒸発器(集熱器)は30°の傾斜角を持たせて南向きに設置した。

作動流体には環境問題が指摘されているフロン系冷媒 R-22 を用いたが、代替物質が開発されれば当システムに使用可能である。

本研究の特徴のひとつは運転条件によって蒸発器に多様な機能が要求されることにある。すなわち、自然循環時は太陽熱を効率よく吸収し、外気への放熱は少なくしなければならない。ヒートポンプとして運転する際は太陽熱および外気から集熱しなければならない。また日射が弱い場合は外気のみから集熱しなければならない。本研究では蒸発器として、三菱電機(株)製の温水強制循環式集熱器(20RCB-LR)を改造して用いた。概略を図3に示す。作動流体の自然循環を可能にするため、配管を直列から並列に変更し、35kgf/cm²の耐圧性を持たせた⁵⁾。作動流体は図の右下から下部へ

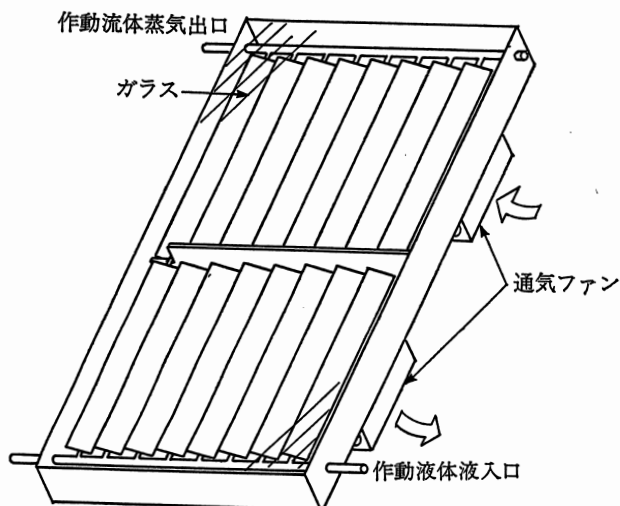


図3 蒸発器の概略図

Fig. 3 Schematic view of the evaporator

ッダ管に流入し、並列につながれた集熱管内で蒸発して上部ヘッダ管から流出する。またヒートポンプ運転時に外気からの集熱を可能にするため、裏面にクロスフローファンを2台取り付け、集熱器内部に通風した。さらに集熱器内の断熱材を取り外し、内部を上下に区切った。外気は集熱器の裏面、図の右上のファンから送り込まれ、傾斜させた集熱板にそって表面へと移動し、左端から下側に入り、更に裏面へ流れて、右下のファンから排出される。

(2) 計測機器 運転状態の計測に用いた機器と計測点は以下の通りである(図1)。システム各部の温度および日射量については1分毎に計測し、コンピュータに収録した。その他の計測は10分間隔で行った。日射量は蒸発器と同じ傾斜面で測定した。

- (a) 温度：φ4.9シース测温抵抗体(図中T)作動流体温度(蒸発器入口，蒸発器出口，凝縮器入口，凝縮器出口)
水温(凝縮器入口，凝縮器出口，蓄熱槽内)
外気温度
- (b) 作動流体圧力：ブルドン管式圧力計(P)(蒸発器出口，凝縮器入口)
- (c) 作動流体流量，水流量：面積型流量計(F)
- (d) 圧縮機消費電力：クリップオンパワーメータ(w)
- (e) 日射量：ネオ日射計(I)

3. 実験方法

本実験は集熱モードを使い分けることにより、様々な条件下で効率の良い集熱が行えるかどうかを検証することを目的としている。集熱は以下に定める三つの運転モードで行った。各モードでの機器の操作は以下の通りである。

[A] 自然循環による太陽熱の収集

電磁弁は開にし、圧縮機は作動させない。通気ファンは作動させない。

[B] ヒートポンプによる太陽熱の収集

電磁弁は閉にし、圧縮機を作動させる。通気ファンは作動させない。

[C] ヒートポンプによる太陽熱および大気熱の収集

電磁弁は閉にし、圧縮機を作動させる。

通気ファンを作動させ、外気を蒸発器内に導入する。

各運転モードを選択してシステムの性能試験を実施した。実験中はバルブを調節することにより、水を5ℓ/minの流量で循環させ、水温を上昇させた。蓄熱槽の容量は300ℓであるが、実験では凝縮温度すなわち水温について幅広い変域で運転する必要があったので、100ℓ~120ℓの水を入れて行った。

III 実験結果および考察

1. 実験結果

図4~図6は実験結果の例であり、各部の温度、日射量および集熱量を示す。日射量は蒸発器面にあたる全日射量であり、集熱量は凝縮器で水が得た熱量である。グラフの上部には先に述べた運転モードを示した。また図5, 6にはヒートポンプ運転時の圧縮機消費電力も示した。

図4は夏期実験結果の一例(1989年8月22日)である。この日の天候は晴ときどき曇であり、運転は主に自然循環によって行った。蓄熱槽の水量は120ℓとした。一時雲によって太陽光が遮られ

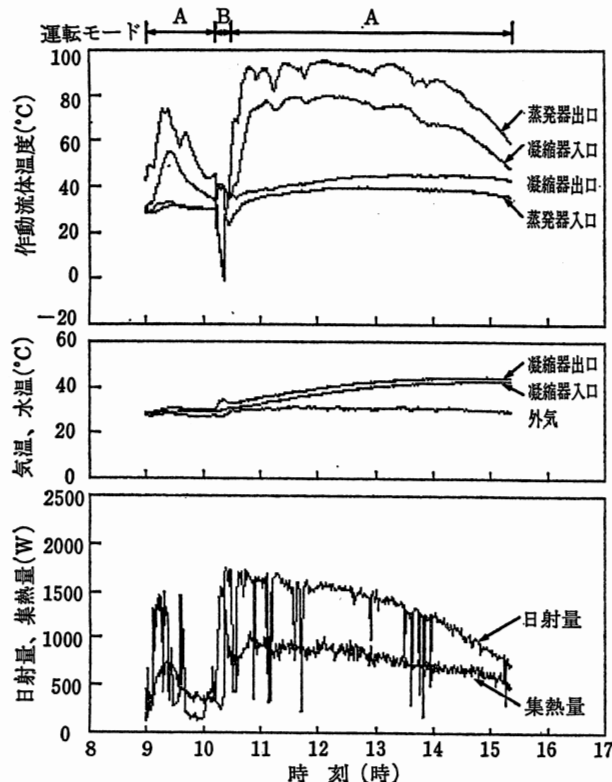


図4 実験結果(1989年8月22日)

Fig. 4 Experimental result (Aug. 22th, 1989)

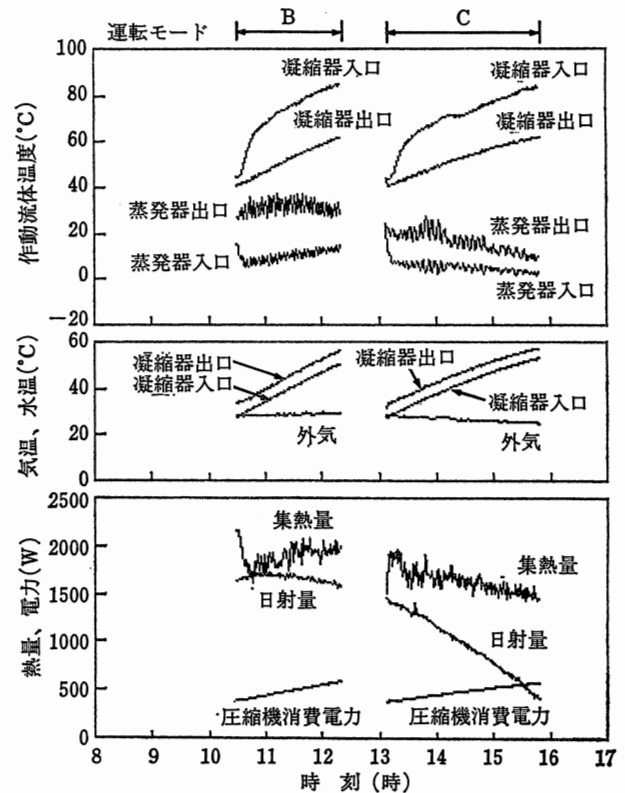


図5 実験結果(1989年9月20日)

Fig. 5 Experimental result (Sept. 20th, 1989)

たため、10時10分から10時20分にかけての10分間ヒートポンプによって集熱したが、日射の回復した10時20分以降は再び自然循環のみで集熱した。運転状態が比較的安定した10時30分以降は最低でも500W, 最高850W程度の熱量が得られ、集熱効率率は50~70%程度であった。

図5は1989年9月20日の実験結果である。この日はヒートポンプを運転して2つのモードで2回実験を行った。蓄熱槽水量は100ℓとした。10時23分から12時20分までは日射量が多く、自然循環による集熱も可能であるが、更に多い熱需要に対応することを想定し、ヒートポンプを運転して通気ファンは回さず運転モードBで太陽熱を集熱した。集熱量は1700~2000Wであった。また次式で計算したCOPは凝縮温度の上昇に伴って低下したが、3.3~4.5程度と比較的高い値を示した。

[COP(成績係数)]

$$= \frac{\text{凝縮器で水が得た熱量}}{\text{圧縮機消費電力}}$$

13時から15時50分までの実験では日射量が徐々に低下したので、運転モードをCにして、通気ファンを回し外気からも集熱した。集熱量は1400~1900W, COPは2.5~5程度であった。

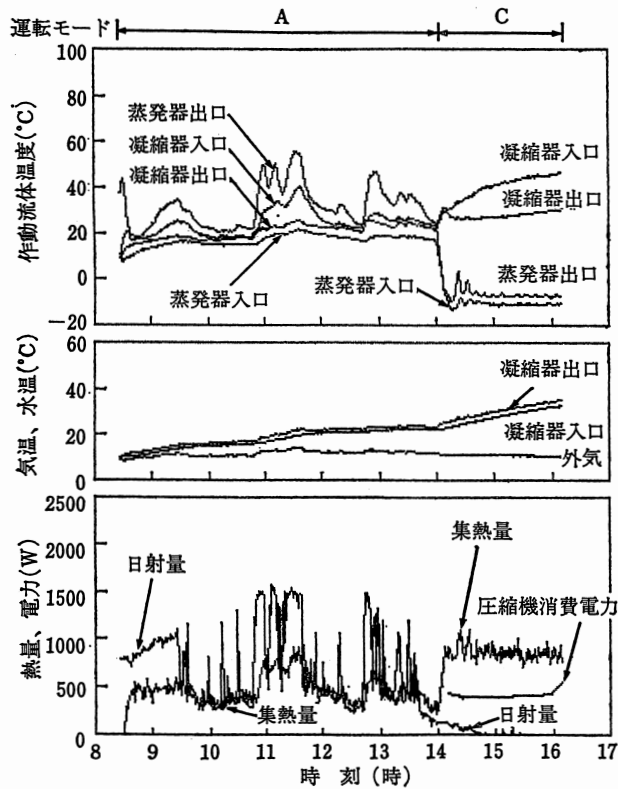


図6 実験結果 (1989年12月8日)
Fig. 6 Experimental result (Dec. 8th, 1989)

図6は冬期実験結果の一例(1989年12月8日)である。天候は曇ときどき晴であった。14時までは自然循環で集熱し、それ以降は日射がほとんど無くなったので運転モードCのヒートポンプで外気から集熱した。蓄熱槽の水量は100ℓとした。この日は実験開始時の水温が10°Cと低かったため、前半あまり十分な日射が得られなかったにも拘らず作動流体は循環し集熱ができた。自然循環での集熱量は300~800Wであった。14時以降のヒートポンプによる運転での集熱量は900W程度でありCOPは2.3程度であった。夏期に比べてCOPが低いのは、蒸発器内に導入した外気の温度が低く、蒸発温度が低くなったこと、気温との温度差が大きいので作動流体系の配管からの放熱が大きくなったことなどが原因と考えられる。

2. エネルギー収支と考察

自然循環とヒートポンプにおけるエネルギー収支の計算例をエネルギー流れ図として図7, 8に示す。図7は自然循環によるもので、図4の8月22日11時のデータから計算した例である。図8はヒートポンプによるもので、図5の9月20日15時のデータから計算した。図中の数値の単位は全て

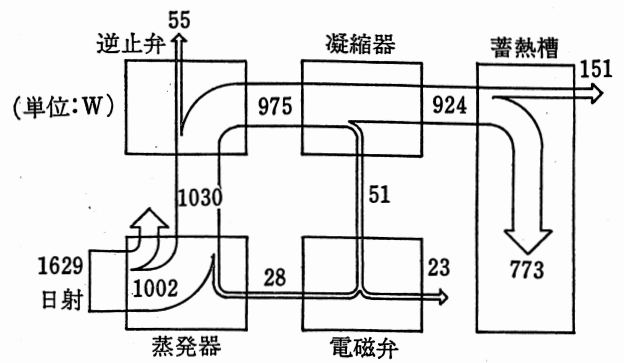


図7 エネルギー流れ図 (1989年8月22日11時, 自然循環)
Fig. 7 Flow chart of energy (11:00 Aug. 22th, 1989, Natural circulation)

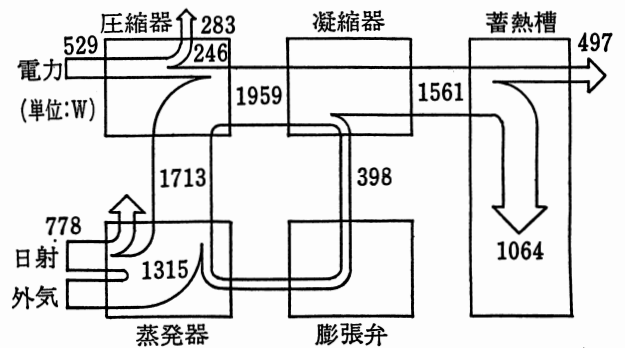


図8 エネルギー流れ図 (1989年9月20日15時, ヒートポンプ)
Fig. 8 Flow chart of energy (15:00 Sept. 20th, 1989, Heat pump)

である。なお計算に用いた作動流体流量の数値は、凝縮器の熱収支より計算した。実験では面積型流量計を用いて作動流体の流量を測定しているが、冷凍機油が混入しており、粘性が変化するため正確な測定は困難である。そこで凝縮器で作動流体が失った熱量と、水が得た熱量が等しいと仮定して、作動流体流量を計算し、それをもとに熱収支を求めた。実際には凝縮器からの放熱があるので、作動流体に伴って移動する熱量は図中の数値より若干大きくなる。

これらのエネルギー収支の例と同時刻における作動流体の圧力-エンタルピー線図を図9に示す。図で小文字は自然循環のサイクルを表し、大文字はヒートポンプのサイクルを表す。曲線は飽和限界線である。二つのサイクルは反対回りとなる。破線は圧縮機での変化が可逆的であると仮定した場合の理想的なサイクルである。

実験と解析の結果よりそれぞれのサイクルにつ

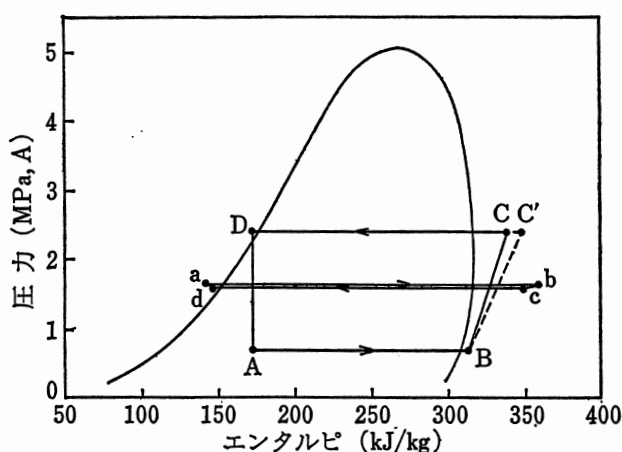


図9 二つのサイクルの圧力エンタルピ線図
Fig. 9 Pressure-enthalpy diagram for two cycles

いて考察した結果を以下に示す。

(1) 自然循環について

(a) 図9の点bから作動流体が蒸発器で若干過熱状態になり過ぎていることが分かる。このため作動流体の温度が上がり、凝縮器へ入るまでの放熱損失が大きい。受液器の設置位置を高くすることにより、これを防げるが、それはシステムの高さを一段と高くすることになり、設置条件や経済性より検討されよう。

(b) 図7からわかるように蒸発器での集熱効率は比較的高く、従来の集熱器から断熱材を取り去っていることによる悪影響はそれほど現れていない。

(c) 図9の点dからわかるように、凝縮器で作動流体の過冷却はほとんど起こっておらず、凝縮液は良好に循環している。

(d) 図7からわかるように蓄熱槽および水系統の配管からの放熱が大きく、特に冬期では集熱量の割に蓄熱槽内の温水の温度上昇が少ないため、これらの断熱を改善する必要がある。

(2) ヒートポンプについて

(a) 図9の点Bと点Dからわかるように作動流体の過熱度はほぼ適量であり、過冷却もほとんど起こっていない。作動流体は良好に循環していると評価される。

(b) 図8の蒸発器において日射の損失分が決定できないので、外気からの集熱量を正確に求めることはできないが、いずれにしても外気から大量の熱を吸収していることは確かであり、ヒートポンプの有効性が確認できた。

(c) 作動流体の圧縮過程は理論的には外部との熱の授受がない等エントロピ変化(図9のBC')として扱われるが、実験ではCの状態となった。エンタルピ差CC'は圧縮機からの放熱であるが、圧縮機の焼き付きを防止するために断熱はしておらず、いまのところこの放熱は避けられない。

(d) 図8からわかるように蓄熱槽および水系統の配管からの放熱が大きい。

(e) ヒートポンプシステムでは一般に冬期における蒸発器への着霜が問題となり、通常は作動流体を逆に循環させて融霜するが、本システムでは、日射があれば運転を停止するだけで融霜することができた。

IV 摘 要

農産加工施設等において、積極的な太陽エネルギーの利用を計るべく、作動流体の気液二相自然循環と直膨ヒートポンプの二つの集熱方法を、同一の集熱器で行うシステムを考案し、その性能試験を行った。主な研究成果と今後の研究課題は以下の通りである。

(1) 同一の集熱器(蒸発器)を用いて作動流体の自然循環による太陽熱集熱とヒートポンプによる集熱の両方が、圧縮機と電磁弁のオン・オフ動作のみで可能なハイブリッド集熱システムを試作した。

(2) 試作した集熱システムの性能試験から、自然循環、日射を熱源とするヒートポンプおよび日射と外気を熱源とするヒートポンプの三つの運転モードで集熱が可能であることが確認された。

(3) 自然循環モードでは、日射の50%以上の効率で集熱でき、ヒートポンプモードでは、COPが2.5~5程度であった。

(4) システムのエネルギー収支解析の結果、水循環システムの配管や蓄熱槽からの放熱が大きく、この部分の断熱性等の改善が必要であることがわかった。

(5) 今後の課題としては、このようなシステムの特性を更に詳しく解析し、気象条件と熱需要に応じて適切な集熱モードを自動的に選択する制御プログラムを開発する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 佐藤純一：農産物乾燥における太陽熱利用，太陽エネルギー，15-5，1989
- 2) R. C. Downing and V. H. Waldin：Freon solar fluids in solar hot water heating，International Journal of Refrigeration，4-1，1981
- 3) 伊藤定祐：直膨集熱式ソーラーヒートポンプシステム，太陽エネルギー，15-5，1989
- 4) 野口正夫，岩永 茂，渡辺竹司，桜武達規，尾浜昌宏：太陽熱大気熱ハイブリッドソーラーシステム（松下スーパーバナソーラ），冷凍，61-706，1986
- 5) 芋生憲司，木谷 収，岡本嗣男，坂井直樹：太陽エネルギーの利用による農業用動力の開発に関する研究（第3報），農業機械学会誌，49-6，1987
（原稿受理平成2年8月28日・質問期限平成4年1月31日）

コ メ ン ト

〔読者のコメント〕

ヒートポンプを用いたシステムは今後省エネルギーに大いに寄与すると思います。これには高いCOPを得る事が重要ですが，小型圧縮機（400W）の割にはCOP（2.5～5）と高い値となっています。システムを大きくすれば一般に損失割合も減少するので，さらに良くなると思いますがどうでしょうか。

〔コメントに対する著者の見解〕

ご指摘のように太陽熱システムでは一般にエネルギー的にもコスト的にもスケールメリットが大きいとされています。本システムも大型化することで更に効率を上げることができると考えられます。その場合自然循環モードで重力による自然循環のみを利用しようとする背の高い構造物になるので液体の循環ポンプを取り付けることも検討するのが良いと思います。

コ メ ン ト

〔読者のコメント〕

太陽熱集熱器とヒートポンプを結びつける考え方はあったものの，これまで民生用，工業用共実際に作られなかったが，それには，温度条件，システムの複雑度，コスト等の理由が考えられる。当該技術が今後農業の具体的にどのような場面に利用すると効果的なのか，またそのためにはどんな方策が必要なのかお聞かせ願いたい。

〔コメントに対する著者の見解〕

本システムは自然循環とヒートポンプの温度条件がマッチする比較的低温度の熱利用システムで有効になります。各種農産物の乾燥装置や酪農の給湯装置に利用できると考えています。広く実用化されるためには機器類をパッケージ化することなどで操作性を向上させ，製造コストを更に低下させることが必要と考えられます。