

太陽熱／放射冷却複合利用高効率 ヒートポンプシステムの研究

A Highly-Efficient Heat Pump System
with Solar Thermal and Sky Radiation Cooling

星 朗 *1
Akira HOSHI

齋藤 武雄 *1
Takeo S. SAITO

Abstract

A unique heat pump system with high Coefficient of Performance (COP) using solar thermal / sky radiation cooling is introduced in this article. The proposed system has a solar collector for collection of heat for space heating and sky radiator for space cooling. This heat pump is operated with nighttime electricity to heat and cool the main tank water. The system has four operational modes: The first is the sky radiation (SR) cooling mode that is a typical mode in summer. In this mode, the main tank water is cooled using the heat pump connected with the sky radiator. The second is the rainwater tank (RT) mode that cools the main tank water with rainwater as a low temperature source. The third is the subtank (ST) mode that is used in spring to cool the main tank water and heat the auxiliary tank water at the same time. The fourth is the winter (WIN) mode, in which the main tank water is heated by the heat pump connected with the auxiliary tank water heated by the solar collector. The experimental COP of the present solar thermal / sky radiation cooling heat pump system will be shown in detail. The total COP exceeds 7.0 for the SR cooling mode.

The proposed heat pump system will be very promising especially in large cities like Tokyo in order to mitigate the heat island effects.

キーワード：ヒートポンプシステム，太陽熱，放射冷却，蓄熱タンク，深夜電力，プレート式熱交換器，ソーラーコレクタ，スカイラジエータ，COP

Key Words : Heat Pump System, Solar Thermal, Sky Radiation Cooling, Thermal Energy Storage Tank, Nighttime Electricity, Plate-type Heat Exchanger, Solar Collector, Sky Radiator, COP

1. 緒言

大気中の二酸化炭素(CO_2)濃度の増加に起因する地球温暖化を筆頭とした地球環境問題に加えて、20世紀末には都市環境の悪化が注目されるようになった。都市温暖化(ヒートアイランド)⁽¹⁾⁽²⁾を筆頭に、都市大気の乾燥化や窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、一酸化炭素(CO)、粒子状物質(SPM)などの大気汚染、交通渋滞、ゴミ問題、水不足などの多くの問題が世界中の大都市で顕在化している。同時に、人類がその発展の基盤としてきた化石燃料多消費型の物質文明のツケとして、化石燃料そのものの枯渇化の問題が取り沙汰されている。

したがって、21世紀に鍵となる技術は非化石燃料技術、すなわち化石燃料に依存しないエネルギー技術が求められることになる。化石燃料多消費型の物質文明は、今まさに方向転換を余儀なくされている。

環境にインパクトを与えないエネルギー利用の一つの方法としては、太陽エネルギーを中心とする自然エネルギー(太陽熱・光、地熱、風力、大気放射冷却、地下冷熱など)利用が考えられる。ハービマン^{*2}ハウス⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、この自然エネルギーを利用して一般住宅の暖・冷房、給湯などのエネルギー需要のほとんどを賄うことができる自然エネルギー自立ハウスとして、1996年7月に仙台市に個人住宅として建設され、現在稼働中である。

本研究では、従来の空気熱源ヒートポンプと代わって、太陽熱と放射冷却を複合して用いる高効率ヒートポンプシステム($\text{COP} \approx 6 \sim 8$)を提案する。このシステムは、長期の冷熱貯蔵、夏の一日単位の冷熱貯蔵、場合によっては日中の冷房、さらには冬の暖房・給湯などの多用途に使える。燃料コストは従来の1/10～1/16である。とくに、東京などのように都市温暖化が懸念される都市での冷房・冷却システムとして有望である。

*1 東北大学大学院工学研究科
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
(原稿受付：平成13年6月18日)

*2 HARBEMAN:HARmony BEtween Man And Natureの略

本報では、本ヒートポンプシステムの概要とともに、実用にあたって必要な4つの運転モードを紹介する。また、提案するヒートポンプシステムのベンチテストによる性能試験結果を報告する。最後に、ハービマンハウスシステムに実際に組み込んだ場合の詳細な稼働実績を明らかにする。

2. 高効率ヒートポンプシステム

提案する高効率ヒートポンプシステムは、夏季運転モードにおいては低温側熱源にスカイラジエータによる放射冷却あるいは地下冷熱を利用し、冬季運転モードにおいては高温熱源にソーラーコレクタで得られる太陽熱を利用することに特徴がある。システムの実現にあたっては複数の蓄熱タンクを用いることによって熱源の確保だけではなく、長期蓄熱や深夜電力利用を可能としている。さらに、水熱源を利用することによって熱交換性能の高いプレート式熱交換器の採用を可能としたことが、通常の空気熱源ヒートポンプには見られない高効率化につながる。

2.1 性能試験

ヒートポンプシステム性能試験システムの概略図を図1に示す。図中の冷・暖房時の動作および機能はそれぞれ上段と下段で対応している。

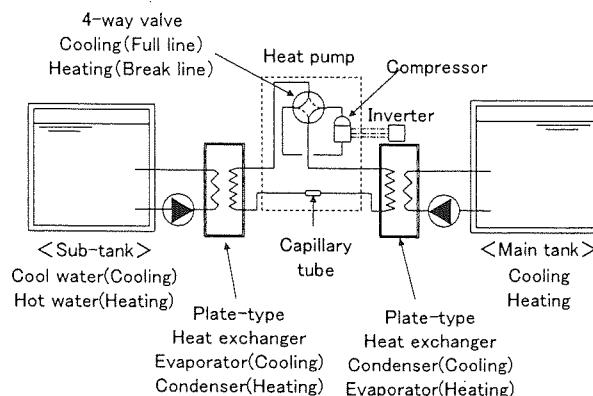


Fig.1 A schematic of the performance test equipment

本研究でヒートポンプと呼んでいるのは、コンプレッサ、四方弁、キャピラリチューブの破線で囲まれた部分で、市販のルームエアコンを改造して使用した。四方弁はAC100V通電時に冷房モード(実線)になる。圧縮機にはロータリーコンプレッサを使用している。また、膨張機構としては膨張弁ではなくキャピラリチューブを用いている。

本システムの大きな特徴の1つとして凝縮器・蒸発器にプレート式熱交換器を採用している点が挙げられるが、性能試験では実際にハービマンハウスに取り付けたプレート式熱交換器よりも伝熱面積が1サイズ大きい(伝熱面積 0.8m^2)ものを凝縮器・蒸発器として使用した。

一次・二次側タンクには約 100l のタンクを使用し、ヒーターおよびチラーで一次側温度を一定に保持した。なお、冷房時放熱源として水道水の流水を用いた実験も行った。性

能試験は一次側タンクを一定温度に保持した状態で、周波数をパラメータとして冷房・暖房運転をそれぞれ行った。運転時の凝縮器・蒸発器のそれぞれ入口・出口温度および圧縮機消費電力を計測し、成績係数(COP)を求めた。

水道水流(18°C, 10 l/min)を一次側放熱源として冷房運転を行った場合の冷房試験結果を図2に示した。水道水は容量が大きく一定温度の熱源として最適で、凝縮器温度を一定に保持することができる。約1時間の運転で70 lのタンク水温を10°Cから3°Cまで下げることが可能で、このときの蒸発器出口温度は最低3°Cを記録した。この性能試験において、COP=3~5となつた。

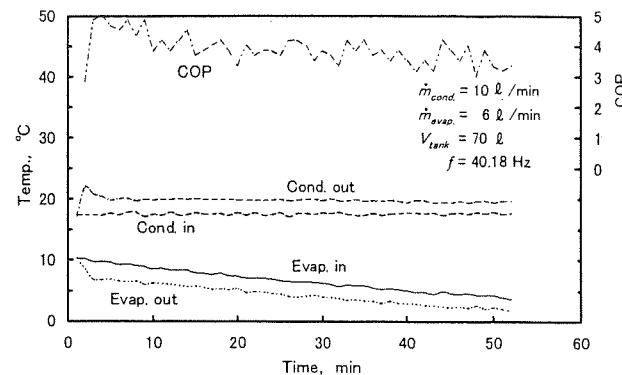


Fig.2 The performance test for space cooling mode I

実際にハービマンハウスシステムに組込まれた場合には凝縮側温度が30°C程度になることも予想されるため、一次側タンク温度を30°C一定として冷房運転した場合の性能試験結果を図3に示した。75.10Hzで約1時間運転した場合、56 lのタンク水温を20°Cから3°Cまで下げることが可能で、このときの蒸発器出口温度は最低1°Cであった。この性能試験でのCOPは1~2.5となつた。

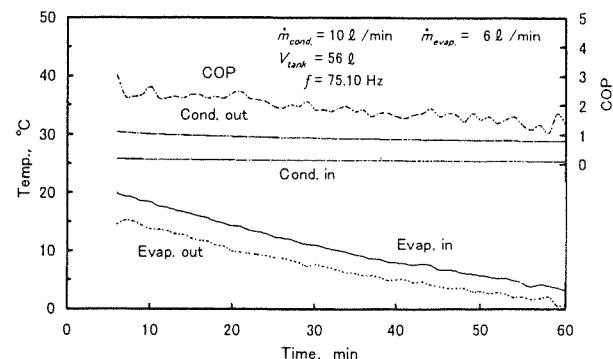


Fig.3 The performance test for space cooling mode II

図4には一次側タンク温度を23°C一定として暖房運転した場合の性能試験結果を示した。40.35Hzで約1時間運転した場合、56 lのタンク水温を25°Cから50°Cまで上げることが可能で、このときの凝縮器出口温度は最高50°Cであった。図中50分過ぎにヒートポンプ運転の一時停止が観察されている。

が、これは二次側タンクの温度上昇とともに運転負荷が大きくなり、インバータが自動的に周波数を下げたための現象である。インバータの持っている過負荷電流防止機能によって、自動復帰するようにしてある。この性能試験でのCOPは3.5～5.6であった。

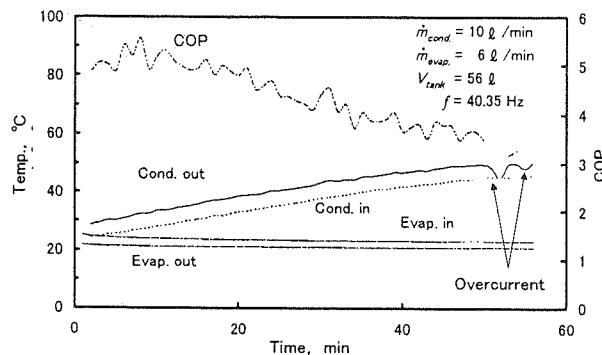
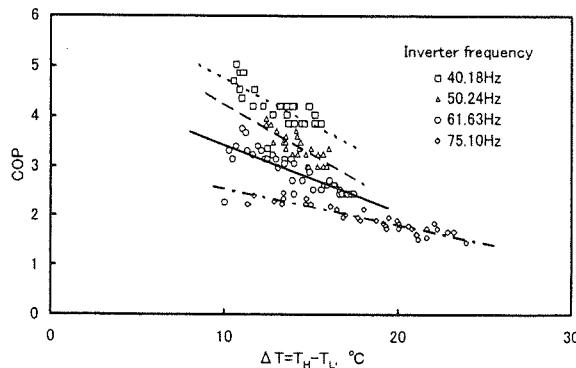
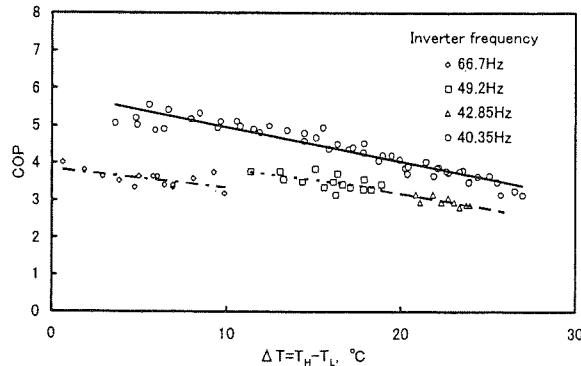


Fig.4 The performance test for space heating mode

Fig.5 COP versus ΔT for space cooling modeFig.6 COP versus ΔT for space heating mode

冷房および暖房運転における性能試験結果を性能曲線上に整理したものを、それぞれ図5と図6に示した。 T_H , T_L は、それぞれ凝縮器入口・出口平均温度、蒸発器入口・出口平均温度を表しており、 ΔT すなわち凝縮器側と蒸発器側の温度差が小さい負荷の小さい場合ほど冷房運転、暖房運転ともに成績係数(COP)が大きくなることがわかる。また、

周波数が小さいほど圧縮機運転の消費電力が小さくなるためにCOP向上につながることがそれぞれの図から読み取ることが可能で、インバータの採用が効果的であることを確認した。運転状態によつては、従来のルームエアコンの約2倍のCOPが得られることがわかった。

3. 高効率ヒートポンプシステム概要

ハービマンハウスシステムに実際に組み入れた高効率ヒートポンプシステム⁽⁶⁾の概要図を図7に示す。また、図中の主要機器の仕様を表1に示した。

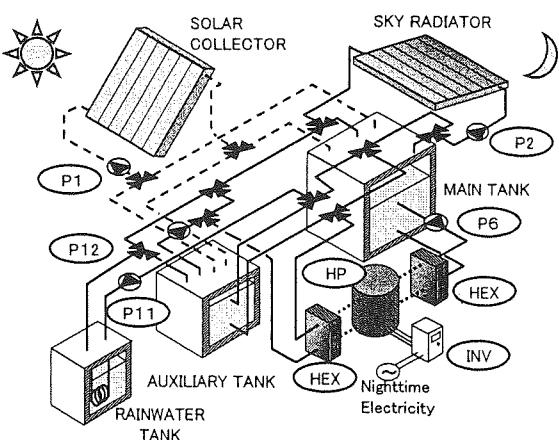


Fig.7 The high-efficient heat pump system

Table 1 The principal specifications for the high-efficient heat pump system

Notation	Component	Specifications
P1	Solar collector pump	190W
P2	Sky radiator pump	95W
P6	Pump for heat pump	26W
P11	Pump for rainwater tank	27W
P12	Pump for auxiliary tank	45W
HP	Heat pump	450～1720W (Heating) 365～1530W (Cooling)
HEX	Plate-type heat exchanger	$S=0.55m^2$, $Q=5600kcal/h$
INV	Inverter	1φ 100V, 0.75kW

高効率ヒートポンプシステムの主要機器は、ヒートポンプ本体(市販のルームエアコンよりコンプレッサ、四方弁、キャピラリチューブの部分のみ分解・改造して利用)、汎用インバータ、プレート式熱交換器2台から構成される。汎用インバータの利用を考慮して、交流モータ駆動のヒートポンプを採用したため、COPが暖房時で2.77、冷房時で2.35と最近の省エネ設計のルームエアコンと比較して約40%小さい。また、汎用インバータについてはAC100V電源という制約から、ヒートポンプからすると少し小さいと思われるが、AC100Vで最大の0.75kWのものを採用した。蒸発器・凝縮器としての熱交換

器には、これまで使用されていたフィンチューブ式熱交換器および二重管式熱交換器に変えて、高価であるために一般的なエアコンには利用されていない熱交換性能の高いプレート式熱交換器を採用した。インバータとプレート式熱交換器の採用によって、従来のヒートポンプシステムには見られない効率改善を目指した。

そのほか、すでに稼働しているハービマンハウスのシステムに組み入れるにあたっては、電動三方弁、ポンプ、さらに閉ループ配管に対する加圧装置を新たに取り付けた。

従来のルームエアコンの場合には、熱源となる外気温度により性能が大きく左右されるため、高いCOPを得ることが難しい。また、寒冷地や積雪地にあっては、蒸発器の表面温度が 0°C 以下になるために結霜して、熱交換の効率が悪化するためにデフロスト(除霜)の必要がある。

さらに、従来のルームエアコンの場合には、排熱を大気中に放出するために環境に与えるインパクトも大きい。また、外気温度の上昇に伴って一斉に運転することによって、電力需要の急激な増加が生じる危険性(電力危機)がある。

そこで、提案する高効率ヒートポンプシステムは、環境に与えるインパクトが小さい太陽エネルギーを中心とする自然エネルギー(太陽熱、大気放射冷却、地下冷熱など)を利用し、複数の蓄熱タンクによる蓄熱・冷を活用することによって、6~10の高いCOPを得ようとする点において特徴を有する。

4. 運転モード

4.1 夏季運転モード

(1) スカイラジエーション(SR)モード

SRモードにおける水および冷媒の流れを図8に示す。スカイラジエータには平板型が用いられている。現在設置されている平板型スカイラジエータの概観を図9に、その仕様を表2に示す。平板型スカイラジエータはアルミニウム製のフィンと銅管、および背面の断熱材からなり、銅管の内部に凝縮器で熱交換された水を循環して放熱する。しかし、平板型スカイラジエータは、パイプとフィン構造そのものに起因する熱損失の増大、フィン効果の低下、さらに大気中の湿分が多いときに冷却量が大幅に減少し、大気放射の影響も強く受けるために冷却量が減少するなどの問題がある。

この運転モードは夏季運転モードの中で最も一般的な運転モードで、メインタンクの熱をヒートポンプを介して北面屋根上のスカイラジエータから放射冷却現象を利用して棄てている。大気放射は $8\sim13\ \mu\text{m}$ の波長域では気温と同じ温度の黒体放射よりも小さくなる。この比較的透明な波長域を大気の窓領域(atmospheric window)と呼ぶが、地表からの熱放射のうちこの窓領域にあるものの一部が宇宙空間へ失われる。通常の気温のもとでは、熱放射の30%程度が窓領域にあるため、適当な大気条件のもとでは冷却が生じる。この現象が放射冷却である。運転は深夜電力(東北電力: 約7円/kWh)を利用して行われ、排熱の一部は直接宇宙空間に棄

てられるために環境への負荷が小さいという特徴を有する。従来はいったんサブタンクに放熱したものをスカイラジエータに循環していたが、プレート式熱交換器で直接熱交換してスカイラジエータに循環することにより効率の向上を図った。

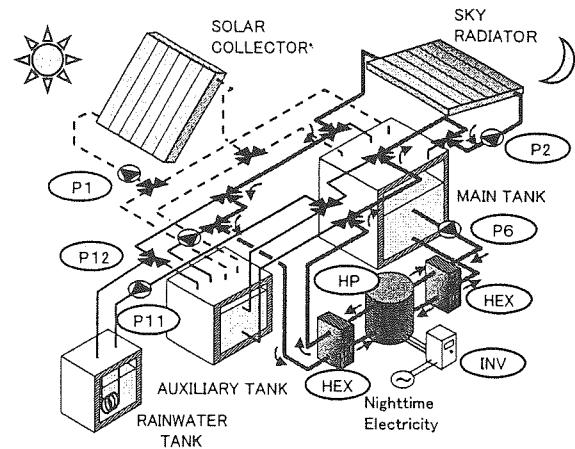


Fig.8 Sky radiation (SR) mode

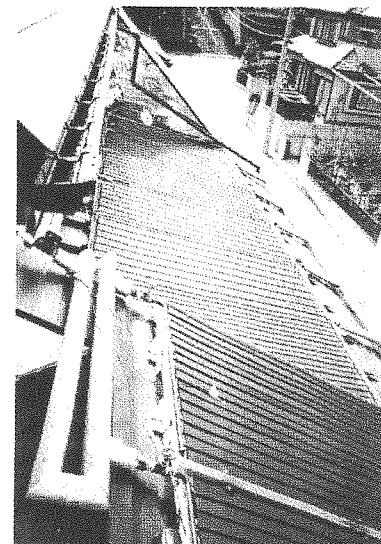


Fig.9 Plate-type sky radiator

Table 2 The specifications for the plate-type sky radiator

Area	$15.2\ \text{m}^2$
Tilt angle	10° (北面)
Flow rate	$12.4\ \text{l}/\text{min}$

(2) 雨水タンク(RT)モード

RTモードにおける水および冷媒の流れを図10に示す。この運転モードは夏季運転モードの中で比較的急速冷却に対応できる運転モードで、メインタンクの熱をヒートポンプを介して雨水タンクに棄てている。断熱されていない雨水タンクは地中に放熱するために常に低温を保っており放熱効率が良いが、容量が少ないので短時間運転しかできないのが欠点となる。これまでトイレの水としてのみ利用されていた雨水を低温側熱源として利用する点に特徴を有する。

この運転モードでは、雨水タンクの代わりに地中コイルやボアホールパイプなども同様に熱源とすることができます。また、タンクやパイプの周りにフィンを付けて伝熱性能を向上させることができます。

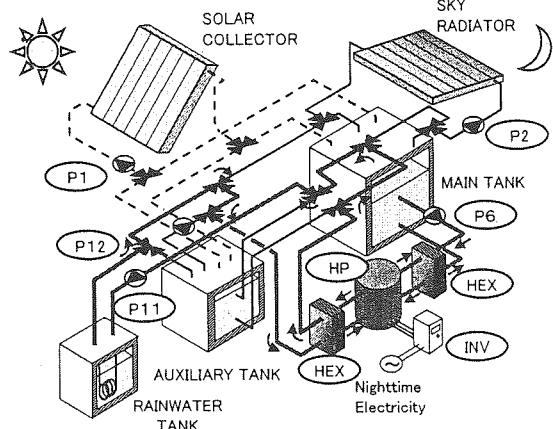


Fig.10 Rainwater tank (RT) mode

(3) サブタンク(ST)モード

STモードにおける水および冷媒の流れを図11に示す。この運転モードは夏季運転モードの一つであるが、主にメインタンク温度が高くサブタンク温度の低い中間期(春)の運転モードで、メインタンクの熱をヒートポンプを介してサブタンクに棄てている。サブタンクを暖房用および給湯用熱源として利用している中間期に、メインタンクを冷却しながらサブタンクの加熱も兼ねている点(二重効用)に特徴がある。

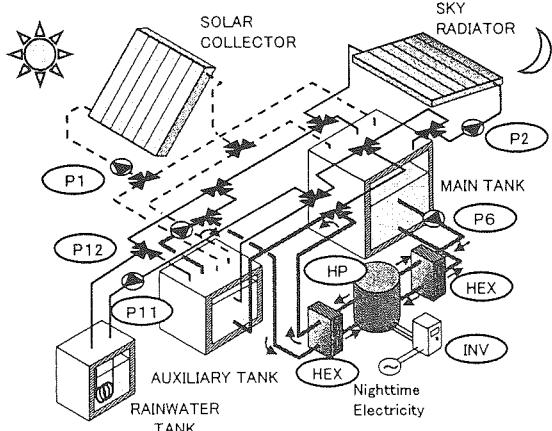


Fig.11 Sub-tank (ST) mode

4.2 冬季運転モード

(1) ウィンター(WIN)モード

WINモードにおける水および冷媒の流れを図12に示す。この運転モードは冬季運転モードで、南面屋根上のソーラーコレクタおよび雨水タンクの熱交換によってサブタンクを加熱し、このサブタンクを熱源としてヒートポンプによってメインタンクに熱を汲み上げる。ヒートポンプの運転は深夜電力を利用して行われ、サブタンク温度がかなり低くなるために翌日

の集熱効率も大きいことに特徴を有する。

図13にWINモード運転時のサブタンク平均温度の変化を示した。深夜電力時間帯(11:00P.M.~7:00A.M.)にヒートポンプによって13°Cから6°Cまで約50MJの熱を汲み上げてメインタンクを加熱する。その後、6°Cまで低くなったサブタンクの水をソーラーコレクタで18°Cまで加熱して、深夜のヒートポンプ運転に備える。このとき、サブタンクへの集熱効率は水温が低いために約50%であり、同日のメインタンク(水温50°C)への集熱効率30%に比べて大きくできる利点がある。

これまで、四方弁を持たない冷凍機を使用していたためにメインタンクの加熱はできなかったが、今回の改良によって四方弁の冷・暖の切り替えのみでメインタンクの加熱が可能となった。仙台で最も寒さの厳しくなる1月から2月にかけて暖房負荷を賄う補助加熱用として運転される。

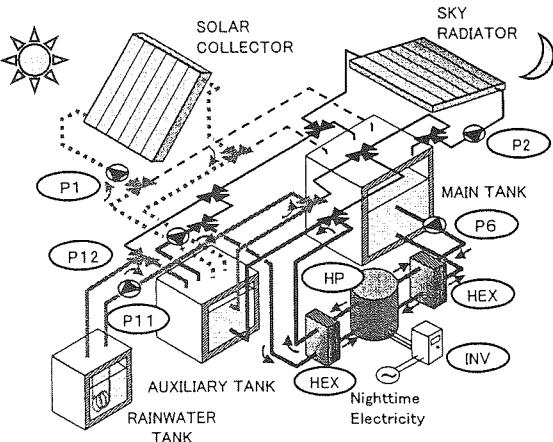


Fig.12 Winter (WIN) mode

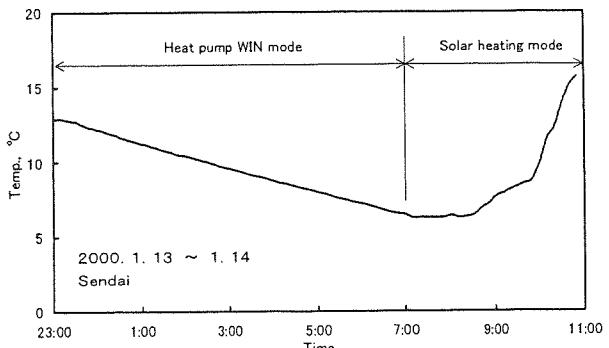


Fig.13 Time variation of auxiliary tank water temperature

5. ハービマンハウスへの導入効果および考察

図14にハービマンハウスのメインタンク平均水温の年変化を示した。1999年3月までのデータはすでに報告⁽⁵⁾しており、本論文では新しく最近2年間を含む過去5年間のデータを示した。

ハービマンハウスの稼働は大きく分けて9月初旬から翌年3月終わりまでの長期蓄熱モードと、3月末から9月初旬までの長期蓄冷モードがある。蓄熱モードにおけるソーラーコレクタの集熱によって、メインタンク平均水温は暖房が始まる11月

末には60°C以上となる。また蓄冷モードにおけるスカイラジエータのみの放射冷却によって、メインタンク平均水温は5月初旬には約11°Cまで下降する。

長期蓄熱モードにおいて、天候不順の年を除くと1月から2月にかけて本ヒートポンプシステムによる補助過熱が必要となることがわかる。一方、長期蓄冷モードにおいては、春先の放射冷却を利用して11°C程度まで冷却した後、5月初旬より本ヒートポンプシステムによるスカイラジエータを併用した冷却が必要となる。また、7~8月には冷房負荷に応じた本ヒートポンプシステムの運転が必要となる。

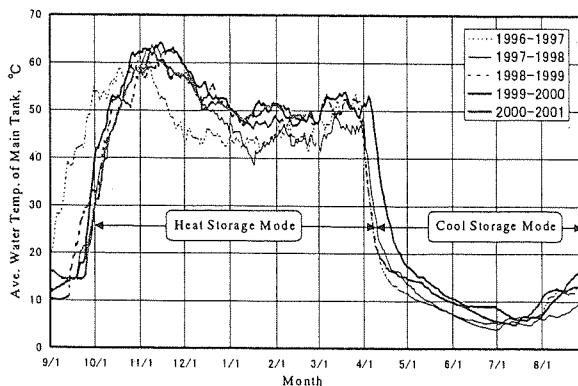


Fig.14 Annual variation of main tank water temperature

高効率ヒートポンプシステムをハービマンハウスに導入した後のメインタンク平均水温の年変化を図15に示す。2000年6月末にヒートポンプの据付工事が行なわれたため、この期間(約2週間)メインタンク平均水温は一定となっている。その後7月初旬より、本ヒートポンプシステムの代表的夏季運転モードであるSRモード運転によって、冷房運転に必要な7°Cまでメインタンク平均水温は冷却されている。また、仙台で最も寒さの厳しい1月から2月には、本ヒートポンプシステムのWINモード運転(補助加熱)によって、メインタンク平均水温は50°C以上に保たれている。従来はガス焚きの補助ボイラーによって加熱されていたが、本ヒートポンプシステムにおいても暖房負荷を十分賄えることがわかる。

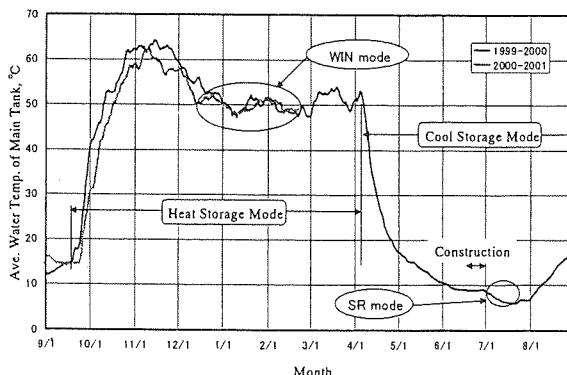


Fig.15 Time variation of main tank water temperature after the heat pump installation

図16にはSRモード運転時について、蒸発器・凝縮器温度、COP、気温およびメインタンク平均温度の経時変化を示した。メインタンク温度16°C、気温12°Cの条件で、COP=6~7($\Delta T = 17^\circ\text{C}$)が得られている。凝縮器温度はスカイラジエータからの放熱によって約28°Cでバランスしている。

図17にはRTモード運転時について、蒸発器・凝縮器温度、COP、雨水タンク温度およびメインタンク平均温度の経時変化を示した。メインタンク温度11°C、雨水タンク温度15°Cの条件で、COP=4~6($\Delta T = 12^\circ\text{C}$)が得られている。

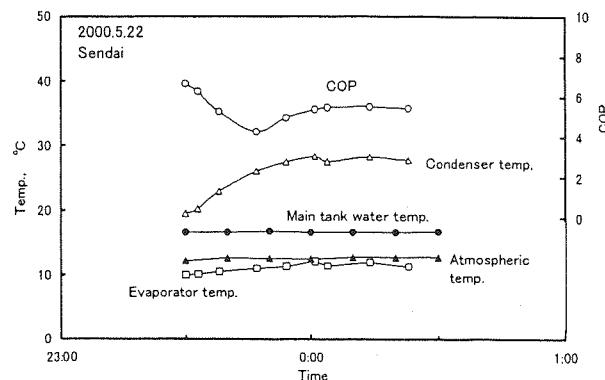


Fig.16 SR mode operation

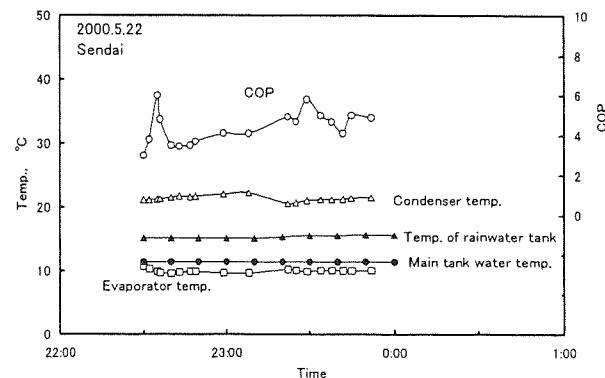


Fig.17 RT mode operation

図18にハービマンハウスに導入された太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムにおいて、実際に夏季運転モードで記録されたCOPを示した。 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ の条件下において、SRモード運転でCOPが最大7.0を記録した。また、仙台で最も暑い8月においてもSRモード運転でCOP=6.0($\Delta T = 12^\circ\text{C}$)を記録している。RT運転モードにおいても、 $\Delta T = 12^\circ\text{C}$ の条件でCOP=6.0を記録した。

将来的にヒートポンプ本体の性能を向上させ、在來の平板型スカイラジエータをCPCタイプの高性能スカイラジエータ⁽⁷⁾に交換することやPCMカプセルを充填した蓄熱タンクを用いることによって、COPはさらに向上するものと考える。

CPCはその形状特有の許容偏角というパラメータを持っており、許容偏角よりも小さい入射角で入射するふく射は集束

するが、許容偏角よりも大きい入射角で入射するふく射は集束せず反射して外部へ放出するという特性を持っている。このCPCリフレクタの導入によって地表面付近からの強い大気放射はカットでき、平板型に見られるような夏季における性能低下が改善される。現状のCPC型スカイラジエータでも平板型スカイラジエータの1.5倍の冷却能力をもっており、さらにCPC形状を最適化することによって15～20%の性能向上⁽⁸⁾が期待できる。

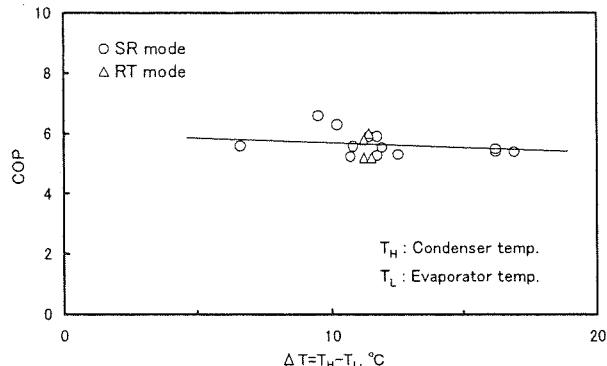


Fig.18 Experimental COP

また、潜熱エネルギー貯蔵技術は、エネルギー密度が大きいために蓄熱装置を小さくでき、一定温度・圧力の質の高いエネルギーを供給できる利点を持っている。現在、-21°Cから120°Cまでに融点を持つ潜熱蓄熱材が封入されたPCMカプセルはすでに製品化⁽⁹⁾もされており、この潜熱蓄熱システムを本ヒートポンプと組み合わせることによって、一定の高COPを保持した運転も可能となる。

省エネ設計仕様のヒートポンプ本体を用いることによって約40%，CPC型スカイラジエータの採用によって約70%の性能向上が見込まれることから、現在4～6のCOPを9～13程度まで向上させることも可能であり、また、潜熱蓄熱システムの利用によって安定した運転も期待できる。

太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムの導入は、とくにエネルギー需要の大きい住宅、東京／大阪などヒートアイランドが大きな問題となる地域の住宅に効果がある。また、同様に、冬期の熱源を地下水またはボアホールなどの地中熱源とすることにより、北東北や北海道などの寒冷地でも有効である。

6. 結 言

本論文では、新たに太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムを提案し、基礎実験および実用運転を行なって以下の知見を得た

- 1) ハービマンハウスに新たに導入された太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムの概要を紹介した。
- 2) 太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムの4つの運転モードに対する試験結果を報告した。

- 3) 高効率ヒートポンプシステムの性能曲線を示し、運転条件によっては従来のルームエアコンの最低2倍のCOPが得られることを示した。
- 4) 太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムの実用運転を行ない、SRモード運転において最大COP=7.0が得られた。
- 5) 仙台で最も寒さの厳しい期間においても、太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムのWINモード運転によってメインタンク平均水温は50°C以上に保たれ、暖房負荷を十分賄えることがわかった。
- 6) 太陽熱／放射冷却複合利用高効率ヒートポンプシステムにおいて、将来、ヒートポンプ本体およびスカイラジエータの高効率化によって、将来COP=9～13程度が可能であることを指摘した。

謝辞

本システムの構築にあたり多大の御支援・御助力を戴いた(有)MEGの遠藤隆吉社長に深甚なる謝意を表します。また、ヒートポンプを提供していただきました三菱電機(株)山下浩司氏、プレート式熱交換器を提供くださいました(株)日阪製作所様に感謝の意を表します。

記号表

<i>COP</i>	: 成績係数(Coefficient of Performance)
<i>f</i>	: 運転周波数
<i>HEX</i>	: 熱交換器
<i>HP</i>	: ヒートポンプ
<i>INV</i>	: インバータ
<i>m_{cond.}</i>	: 凝縮器流量
<i>m_{evap.}</i>	: 蒸発器流量
<i>P</i>	: 消費電力
<i>Q</i>	: 交換熱量
<i>S</i>	: 伝熱面積
<i>T_H</i>	: 凝縮器平均温度
<i>T_L</i>	: 蒸発器平均温度
ΔT	: $T_H - T_L$
<i>V_{tank}</i>	: タンク容量

参考文献

- (1) 斎藤武雄, ヒートアイランド, (1997), 講談社.
- (2) 斎藤武雄・山田昇, 都市温暖化と快適性評価に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), 63巻609号, (1997), 295-302.
- (3) 斎藤武雄・藤野哲爾, 太陽熱・光および放射冷却など複合したエネルギー自立住宅“ハービマンハウス”の研究第一報; 積働実績, 太陽エネルギー, Vol.24, No.6, (1998), 35-42.
- (4) 斎藤武雄・藤野哲爾, 太陽熱・光および放射冷却など複合したエネルギー自立住宅“ハービマンハウス”の研究第二報; 理論解析とシミュレーション, 太陽エネルギー, Vol.25, No.1, (1999), 49-55.
- (5) T.Saitoh and T.Fujino, “ADVANCED ENERGY-EFFICIENT HOUSE (HARBEMAN HOUSE) WITH SOLAR THERMAL, PHOTOVOLTAIC, AND SKY RADIATION ENERGIES (EXPERIMENTAL RESULTS)”, Solar Energy, Vol.70, No.1, (2001), 63-77.
- (6) T.Saitoh, Pat. Pending (2001).
- (7) T.Saitoh, Pat. Pending (2000).
- (8) 斎藤武雄・辰尾光一, CPC(Compound Parabolic Concentrator)型スカイラジエータの性能向上に関する研究, 太陽／風力エネルギー講演論文集, (2000), 549-552.
- (9) 三菱化学エンジニアリング資料 (2000)