

ソルエアヒートポンプシステムの基礎特性と 長期運転特性*1

(第2報 SATとパネル熱交換特性)

Basic Characteristics and Long-Term Operation Capabilities
of the Sol-Air Heat Pump System
(2nd Report : SAT and Heat Exchange Characteristics of Panel)

大橋 一正*2 中島 康孝*2 増岡 陽一*3
Kazumasa OHASHI Yasutaka NAKAJIMA Yoichi MASUOKA

Abstract

In the first report, we did the basis experiment and long term measurement of the Sol-Air Heat Pump System and showed results in long term operation of the basis characteristics and the system of a direct expansion type sol-air heat collecting panel.

In this report, we experimented on the basis by the SAT meter to examine a radiational cooling action in night, solar collect action, and a panel characteristic in the daytime in detail. It confirmed the effectivity of the SAT calculative formula to have taken account of the radiational quantity from the measurement of the SAT and the calculative formula by the heat balance. In the base of their basis data, it established three kinds of the standard panels, the surface thermal insulation, the back thermal insulation and it experimented on the basis in the collecting and heat rejection panel. As a result, to examine the efficiency of natural energy use system, it confirmed the effectivity of using SAT.

Key words: Experiment, Survey, Collector COP, Sol-Air Temperature, Sol-Air Heat Pump System

1. はじめに

太陽と空気を熱源として、年間を通して運転されるソルエアヒートポンプシステムの効率^{1)~3)}は、気象と直膨形太陽空気集熱パネル(以降パネルと称す)の熱交換特性に影響される。建築の分野においては壁体周囲の気象因子を示す研究として、Mackey-Wright⁴⁾・前田⁵⁾らのSAT (Sol-Air Temperature)があり、これらの研究の展開として、太陽集熱器の性能表示において、SATを用いることの有効性について斉藤⁶⁾

の研究がある。

また、太陽集熱器における集熱量に対し大気放射の影響を補正する手法は田中⁷⁾に詳しい。しかしながら、これらの研究においては、日中の太陽熱を主な熱源としていることから、集熱器の集熱量に大きな差異が生じない結果となり、実用上放射冷却の影響は考慮していない。そこで、第1報³⁾においては、SATの実測と実システムとしての運転や特性について追跡調査を行った。それによれば、夜間の放射冷却作用を利用する当システムにおいて、実効放射は必要不可欠な因子であること、また、長期間のシステム運転のCOP実績値から、自然エネルギーを有効に利用できる実用システムであることを示した。

本報においては、気象観測とパネルにおける放射冷却・太陽集熱の基礎実験を行い、夜間の放射冷却効果

原稿受付 平成9年7月4日

*1 本論は文献1)・2)で発表したものに、新たな検討を加えまとめ直した。

*2 工学院大学 工学部 建築学科
(〒160 東京都新宿区西 西新宿1-24-2)

*3 (株)横河建築設計事務所
(〒153 東京都目黒区下目黒2-20-28)

と日中の加熱効果について考察する。

なお、当研究対象としている放射冷却効果を利用したシステムとしては、斉藤⁸⁾・伊藤⁹⁾・松田¹⁰⁾らの貴重な研究成果がある。

2. 標準SAT計¹¹⁾ 基礎実験概要

パネルの熱交換特性を明らかにするためには、パネルが周囲環境とどのように関わっているかを分析する必要がある。熱収支に深く関わると考えられる気象因子を複合的に表現できるSATの基礎式¹¹⁾・¹²⁾は式(1)で表され、標準SAT計(以降SAT計と称す)^(註1)による実測と気象観測を行った値を用いて算出することができる。

$$SAT = \theta_0 + \frac{a \cdot I}{\alpha_0} + \frac{\epsilon \cdot J_N}{\alpha_0} \quad \cdots \text{式(1)}$$

SAT: 相当外気温度 [°C] (Sol-Air Temperature)

θ_0 : 外気温度 [°C]

I : 日射量 [W/m^2]

J_N : 実効放射量 [W/m^2]

a : 吸収率 [-] (註2)

ϵ : 放射率 [-] (註2)

α_0 : 総合熱伝達率 [$W/(m^2K)$] (註3)

写真-1はSAT計の基礎実験状況で、表-1に示す仕様の計測機器を用い、放射熱交換に関連する周囲環境計測として、日射量及び放射収支量を、対流熱交換に関連する周囲環境計測として、外気温度及び風速の計測を行った。

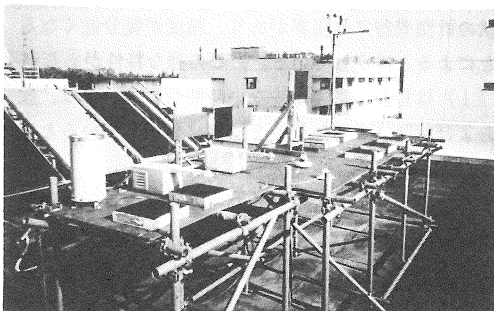


写真-1 標準SAT計による基礎実験状況

表-1 計測機器の仕様

測定項目	計測機器	測定範囲	測定精度
日射量	全天日射計	0.3~2.8 W/m^2 以上	$\pm 1.5\%$
放射収支量	放射収支計	0.3~30 W/m^2 以上	$\pm 5\%$
外気温度	通風乾湿球温度計	-10~+40°C	$\pm 0.5^\circ C$
風速	風向風速計 指向型風速計	0.4~10m/s 0~25m/s	$\pm 0.3m/s$ $\pm 2\%$
SAT	標準SAT計	(註4)	(註4)

また、長波長放射による冷却の因子となる実効放射量 J_N は、放射収支計の計測データから算出した天空放射量 J_s より、式(2)によった。

$$J_N = J_s - \sigma \cdot T_o^4 \quad \cdots \text{式(2)}$$

J_s : 天空放射量 [W/m^2]

T_o : 外気絶対温度 [K]

σ : シュテファン・ボルツマン常数

$$(5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4))$$

これらの気象因子を観測し、SAT計を用いた基礎実験からSATの実測値と周囲環境との関係を捉える。

2-1 夜間における冷却効果

図-1に、夜間における各周囲環境とSATの実測結果を示す。

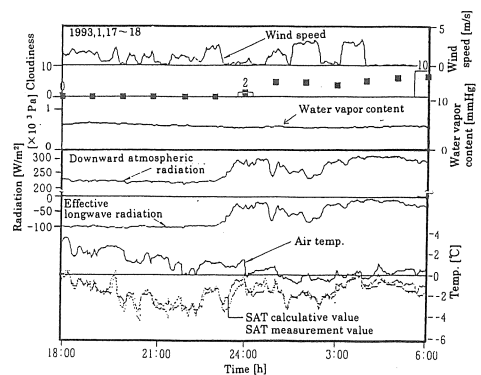


図-1 SAT実測値と周囲環境(夜間経時変化)

SAT実測値は風速・実効放射量・外気温度等の各気象因子の影響を受け、計測時間全般にわたり-4~0°Cの間で、外気温度よりも常に低い値で変動しており、冷却現象が確認できる。この冷却効果をもたらす長波長放射熱交換の因子である天空放射量は、プラントや山本らのこれまでの研究¹³⁾・¹⁴⁾、筆者らの観測結果¹⁵⁾において、水蒸気分圧や雲量に相関があり、これらの関連を図-1において分析する。一夜を通し水蒸気分圧の変動は少ないが、雲量は24時から増加し、天空放射量も高い値となる。筆者らのこれまでの観測研究によれば水蒸気分圧と雲量は天空放射量に相互に関連する場合と、一方が強く関連する場合がある。特に冬期の夜間において、水蒸気分圧の変動が比較的少ない場合には雲量の因子が強く影響するとの結果¹⁶⁾を得ている。これらから天空放射量は、雲量^(註5)が0の時間帯では約230 W/m^2 程度で安定しているが、24:00以降の雲量^(註6)の増加とともに上昇し2:30では約300 W/m^2 に達している。これに伴い、SATと外気温度の差を

示す等価空気温度^(註7)は縮まる傾向で冷却効果は減少している。

式(3)は、式(1)から日射量の項を省いた夜間におけるSATの基礎式である。この式(3)にて算出した試算値と、SAT実測値の経時変化及び一対比較を示したものが図-2である。また、図-2の左図は、式(3)から実効放射量分の等価空気温度を省いた値(外気温度)との一対比較を示す。

$$\begin{aligned} SAT &= \theta_o + \frac{\epsilon \cdot J_N}{\alpha_o} \\ &= \theta_o + \frac{\epsilon \cdot (J_s - \sigma \cdot T_o^4)}{\alpha_o} \quad \cdots \text{式(3)} \end{aligned}$$

図-1の経時変化及び図-2の一対比較においても、等価空気温度をSAT算出に加味することで、実際の各気象因子による周囲環境を再現できることを確認した。

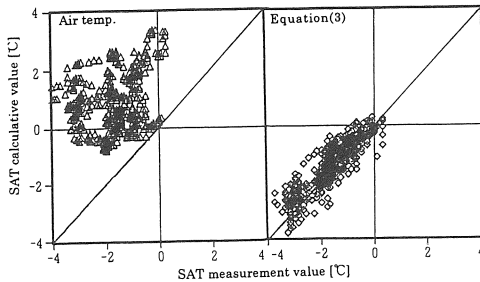


図-2 SAT実測値と試算値の比較(一対比較)

2-2 日中における加熱効果

図-3に、日中における各周囲環境とSATの関係を示す。

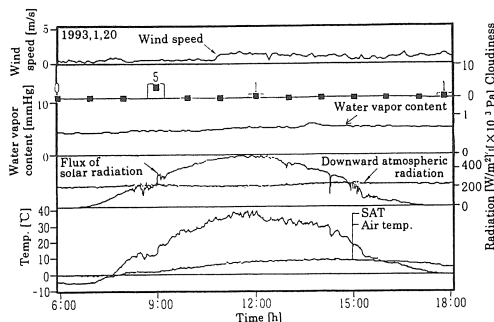


図-3 SAT実測値と周囲環境(日中経時変化)

計測日は日射が安定した晴天日であり、目視による雲量観測では、9:00頃を除き雲量は0~1である。11:00の最大水平面全日射量が約580W/m²に対し、SATは40℃程度まで上昇し、日射による加熱効果が確認さ

れる。また、日中を通して風速が1m/s以下であり対流熱交換への影響が比較的小ないため安定した値を示している。

式(4)は、式(1)から実効放射量の項を省いた式である。式(1)及び(4)による試算値とSAT実測値の経時変化及び一対比較を図-4に示す。

$$SAT = \theta_o + \frac{a \cdot I}{\alpha_o} \quad \cdots \text{式(4)}$$

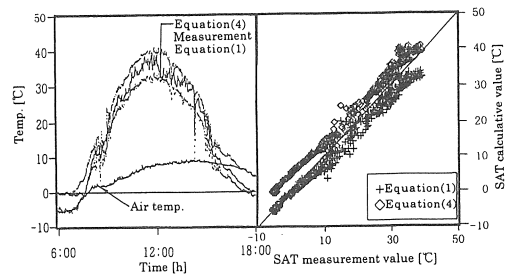


図-4 SAT実測値と試算値の比較

両試算値はともに一對直線付近に分布しているが、実効放射量分の等価空気温度を省いた式(4)による試算値(図中プロット◇)は、実測値に対して常に高い値である。一方、式(1)において、日射量が少なく相対的に長波長放射熱交換の影響の大きい朝、夕(SATにして10℃程度まで)は、試算値(図中プロット+)と実測値とは一致している。(日射量の増加とともに試算値は一對直線上から離れる傾向にある。この原因として、日中における長波長放射量の測定は、現状の計測機器では限界があり、精度が幾分低くなることによると推定している。)このような特性があるが、式(1)は日射の影響が少ない時間帯においては、放射および対流による熱交換を適確に表現していると考えられる。

また、実システムにおけるパネル裏面では、対流熱交換成分ばかりではなく、下方よりの放射熱交換も考えられる。この加熱効果を検討するため、下向きに設置したSAT計の実測値を用い、反射日射の項の有無によりSATの試算値がどのような値を示すか比較を行った。

式(5)はパネルの裏面に短波長放射の無い状況を想定したSATの基礎式で、下方から入射する反射日射量を考慮した式が式(6)である。

$$SAT = \theta_o + \frac{\epsilon \cdot J_E}{\alpha_o} \quad \cdots \text{式(5)}$$

$$SAT = \theta_0 + \frac{\alpha \cdot I_R}{\alpha_0} + \frac{\epsilon \cdot J_E}{\alpha_0} \quad \dots \text{式 (6)}$$

I_R : 反射日射量 [W/m^2]

J_E : 地物放射量 [W/m^2]

図-5は、試算値と実測値を一对比較したもので、式(5)で算出した値に対し式(6)によれば、ほぼ同じ値で一对直線上に分布し、反射日射量は等価空気温度^(註7)として表現されている。絶対量としては少量であるが、反射日射を含む総合周囲環境を表現する必要があることを示している。

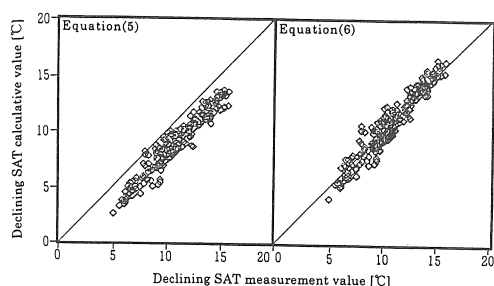


図-5 下向きSATによる
反射日射の影響度（一对比較）

3. パネル集放熱特性実験

パネルの熱交換特性を明らかにするため、既報第1報で示した実システムと同様なパネルを設置し、写真-2に示す状況で実験を行った。

図-6に示すように熱媒（水、エチレングリコール）を、各パネルに一定温度（実システムにおけるパネル表面温度の実測値を基に送水温度は夏期 $50 \pm 2^\circ C$ 、冬

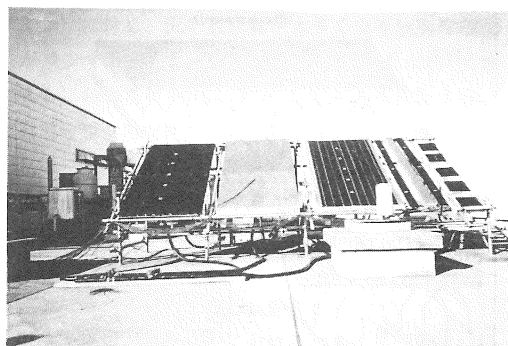


写真-2 基礎実験状況

表-2 集放熱パネルの仕様

	仕上げ	表面積 [m ²]	表面積比	日射 吸収率 ^(註8)	放射率 ^(註9)
表 面 (平 滑)	黒色7系系樹脂	2.98	1.00	0.93	0.86
裏 面 (フ ィン)	アルマイト	17.45	5.86	0.13	0.60

期 $-4 \pm 2^\circ C$ とした。)で供給するようタンク内にて温度制御し、流量調節後にパネル下部より送水し実験システム内を循環させている。計測は、各部の温度と周囲環境などをデータロガーにより1分間隔で自動記録した。

3-1 パネル仕様及び熱収支概要

パネルは表-2の仕様に示すように、表面にて日射熱取得と放射冷却の増加を目的とした形状及び仕上げである。裏面は、対流熱交換による集放熱効果の増加

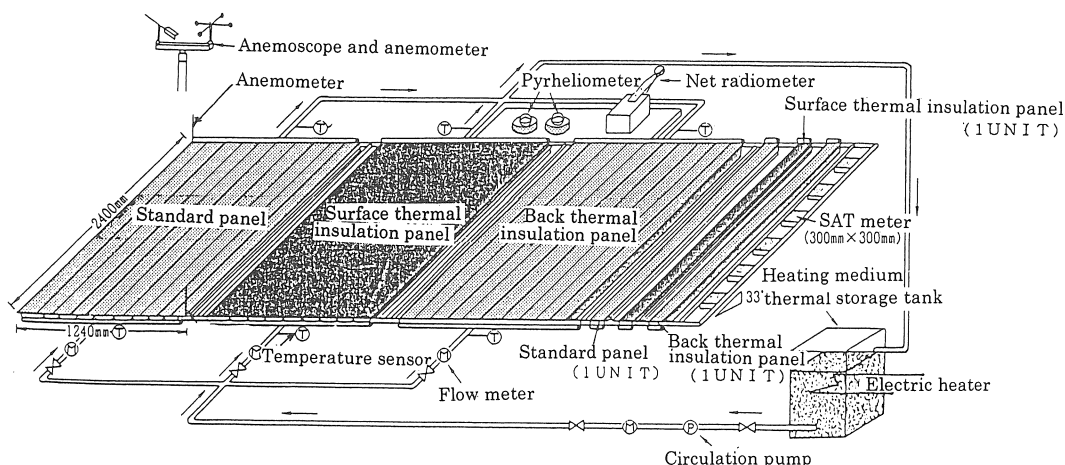


図-6 実験システムと計測状況

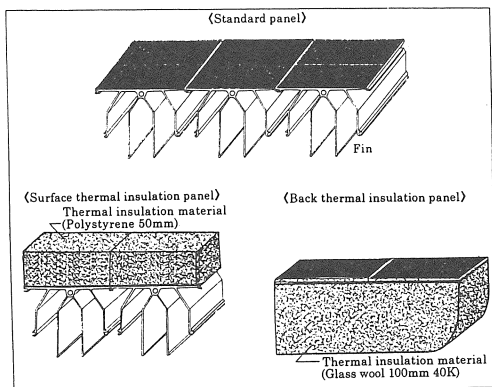


図-7 集放熱パネル図

を目的とし、フィンを付けた形状となっている。実験においては、各面での熱交換成分と特性を明確にするため、図-7に示すように通常用いているパネルと、裏面をグラスウールにて断熱したパネル、表面をポリスチレンフォームにて断熱したパネルの計3枚を実システムと同じ傾斜角 33° で真南に向け設置した。

図-8～10にパネルと各周囲環境の熱収支概要を示す。

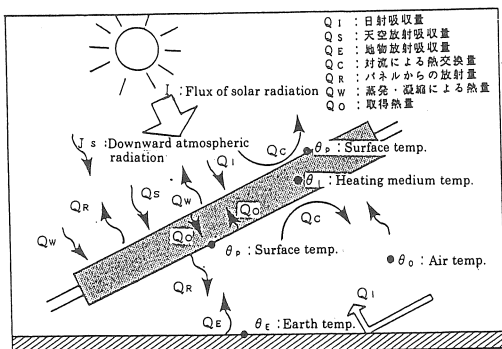


図-8 通常パネル熱収支概要

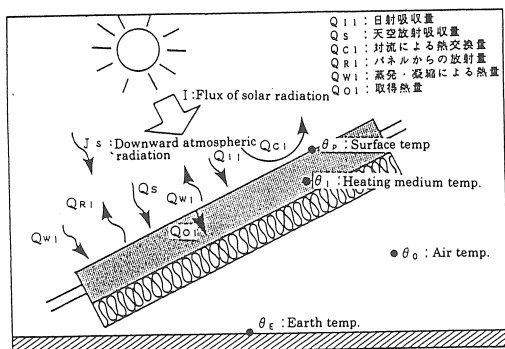


図-9 裏断熱パネル熱収支概要

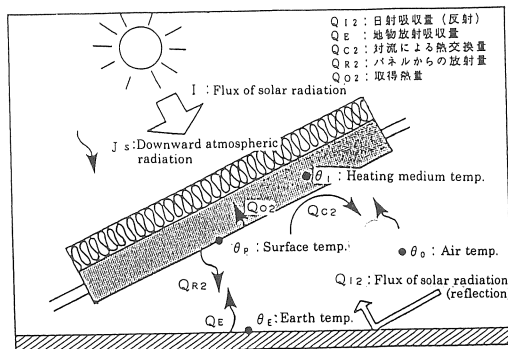


図-10 表断熱パネル熱収支概要

図-8は通常用いられるパネルの熱収支で、このパネルにより総合的な周囲環境の影響を明らかにする。これに対し図-9は、パネル裏面をグラスウールにて断熱することにより、表面の平滑面からの放射冷却や日射の影響について集放熱成分比を明確にする。図-10はパネル平滑面をポリスチレンフォームにて断熱することにより、裏面のフィン効果と地物からの反射日射の影響を確認するモデルである。

なお、パネルの断熱効果を実測データより確認したところ、全熱交換量^(註9)に対して熱損失は冬期で約1～2%、夏期で約2～3%程度であることから、他の熱交換量に大きな影響は与えていないと推定した。また、日射量及び放射収量は、全天日射計及び放射収支計をパネル面と同様に 33° に傾斜させ設置し実測により得た値を用いている。

3-2 夏期夜間における放熱特性

図-11に、夏期夜間におけるパネル周囲環境の経時変化を示す。計測日の天空放射量 J_s は、計測時間内において幾分減少するが、平均 390W/m^2 の値で推移している。これに伴う実効放射量 J_n は、図示はしていないがほぼ一定で約 70W/m^2 あり、夏期としては比較的多いと言える¹⁷⁾。対流熱交換に関係する風速は23:00頃までは $3\sim 4\text{m/s}$ あるが、24:00以降 1m/s 程度まで減少し、外気温度は計測時間内で 30°C から 24°C まで低下している。

図-12に示すパネル表面温度は、各パネル複数の計測ポイントを平均したものである。この様な周囲環境の変動に対し、各パネルでどれほどの熱交換が行われたかを示したものが図-13である。なお、図-13の放熱量は、それぞれのパネルにより表面温度が異なるため、そのまま絶対量を比較することはできないことから、熱交換量の成分比を算出することにより

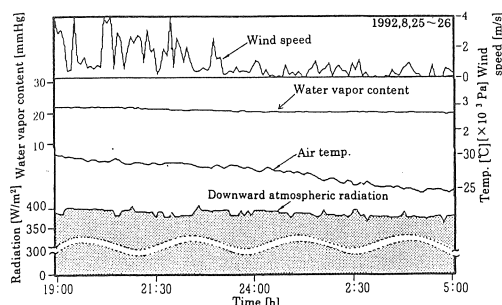


図-1-1 周囲環境の経時変化（夏期夜間）

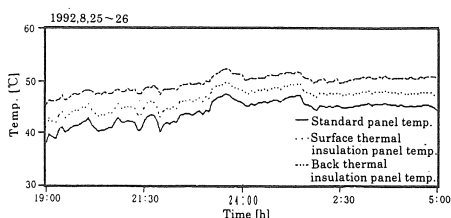


図-1-2 パネル表面温度変動

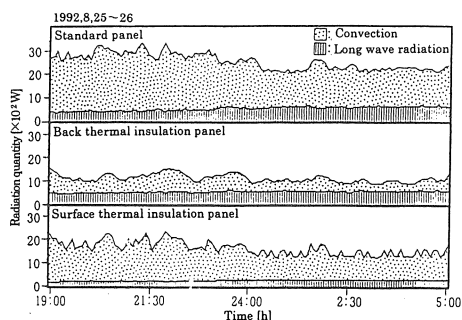


図-1-3 各パネルの放熱量

評価する。

対流熱交換量は、通常パネル・表断熱パネルにおいて風速の変動傾向に近似した変動量を示している。長波長放射成分は、時間変動はなく、各パネルではほぼ一定量の放熱を行っており、通常パネルにおいて465～580Wの放熱量である。また、通常パネルの放射成分比は計測時間内の全熱交換量100% (94700kJ) (図-1-3の放熱量を成分別に積算し合計した値) に対し約21% (19900kJ) であり、重要な放熱要素となっている。また、裏断熱パネルにおいては天空に向けられた平滑面において対流成分とほぼ同量の放熱が行われている。一方、表断熱パネルにおいて、対流放熱成分比は、パネル全熱交換量の約85%に相当し、放射成分の5倍以上を占めることから、パネル裏面に設けたフィン是有効であると考えられる。このような特性（図-1-1

～13）に対し、天空放射量が大きくなり放射冷却効果が減少すると予測される日（天空放射量が約4%増加する）の通常パネルにおける放熱特性を検証する。放射成分は全熱交換量に対し約15%となり、晴天日の約21%に対し6ポイント減少する。しかしながら全熱交換量は対流成分が増加することから大きく変動しない結果である（註9）。

3-3 冬期日中における集熱特性

図-1-4に、冬期日中におけるパネル周囲環境の経時変化を示す。

計測日は、日射量の最大値が約800W/m²に達し、安定した晴天日である。日射量の増加とともに、外気温度は15℃程度まで上昇しており、冬期としては温暖な日である。晴天日（雲量0）であるため大気安定度は高く、長波長放射熱交換の要素となる天空放射量はほぼ一定で約340W/m²である。

このような周囲環境の変動に対する各パネルの平均表面温度と成分別熱量経時変化を、図-1-5～1-6に示す。通常パネル及び裏断熱パネルにおいての熱交換量は、大半を日射成分が占め、日射の絶対量と変動により熱交換特性が決定される。なお、通常パネルにおける全熱交換量100% (53100kJ) の内日射成分は約75% (39800kJ)、対流成分は約29% (15400kJ) に対し約3～4% (1780kJ) の放熱がある。これは日射の影響でパネル表面温度が上昇し、天空への長波長放射量が増加するため日中の集熱時においても放熱現象があること

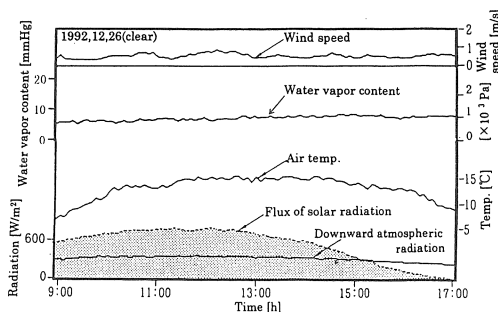


図-1-4 周囲環境の経時変化（冬期日中）

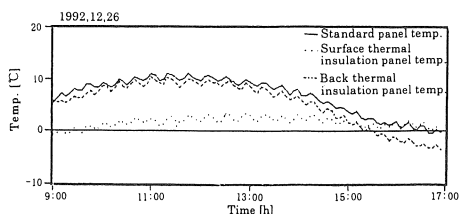


図-1-5 パネル表面温度変動

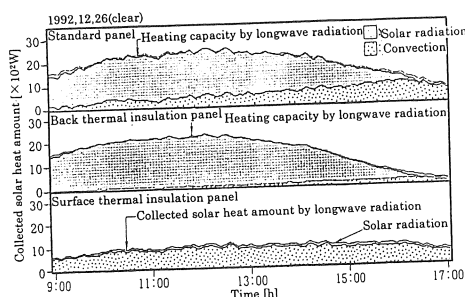


図-16 各パネルの集熱量

を示す。また、日射量の減少する14:00頃からパネル表面温度の低下に伴い対流による集熱が幾分増加する傾向である。

天空からの日射を遮断した表断熱パネルにおいて、フィンによる対流集熱成分比は、全熱交換量の約88%で、通常パネルにおいても全熱交換量に対し約29%と大きな要因となり、積雪時など日射量が期待できない場合は有効となる。また、表断熱パネルの裏面に地物からの反射日射があり、若干ではあるが影響することを確認した。

このような特性(図-14~16)に対し、冬期日中日射の少ない曇天日(日射量が約88%低下)においては、通常パネルの全熱交換量は晴天日の約40%(21200kJ)に低下し、日射成分は全熱交換量に対し約20%、対流成分が約70%となり対流成分の依存率が高くなる(図9)。

冬期においては日射量の大きい日中で、パネル表面での日射による集熱効果、日射量が小さい日中は、パネル裏面のフィンによる対流熱交換の影響が大きく、長波長放射による放熱は少ないことを確認した。

4. まとめ

自然エネルギーの利用法の一例として、太陽・空気熱源ヒートポンプシステムについてSAT計及びパネルの基礎実験を行い、以下のことを明らかにした。

- SAT計を用いた基礎実験により、SAT実測値と、SATの基礎式から得た試算値とを比較し放射(実効放射・日射)による冷却・加熱効果を確認した。
- 実システムと同様なパネルを用いた基礎実験を行い、長波長放射による冷却効果・日射による加熱効果や対流熱交換を計測し、夏期夜間において、放射熱交換量は時間による変動が少なく、通常パネルで全熱交換量に対し約21%(19900kJ)の放射冷却量を得た。

また、冬期(晴天)日中においては通常パネルで全熱交換量に対し約75%(39800kJ)の日射加熱量を得た。

- 夏期の通常パネルにおいて、天空放射量が増加すると放射成分が幾分減少する。しかしながら、対流成分が増加するので全熱交換量は大きく変動しない。

一方、冬期において全熱交換量は日射量の減少に伴い減少する。集熱成分の比率は日射成分が大幅に低下するのに対し、対流成分の比率が大きくなり、大気からの集熱が主となる。

- 冬期日中において、日射によるパネル表面温度上昇により、上向き長波長放射が増加し、通常パネルで全熱交換量に対して約3~4%(1780kJ)と若干ではあるが放熱側になる量があることから、等価空気温度を加味する必要を確認した。

以上、自然エネルギーを利用するシステムに対してSATの概念を用いることは有効と考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、鹿島建設(株)技術研究所日野俊之氏より貴重な資料の提供及びご助言を頂いた。実験研究は、当時工学院大学大学院生 中村准二(現日建設計)・大橋研究室ソルエア班卒論生・大学院生 矢野 諭・ゼミ生 湯澤 健君らの労大であった。ここに記して謝意を表します。

(註1) 標準SAT計は、文献11)に示される仕様で、銅平板の表面を黒色全艶消塗装し、裏面を十分断熱した物で、SATは、この銅板の裏面の温度をT型熱電対により計測した値である。

(註2) SAT計表面は黒色全艶消塗装し、分光光度計により放射率 ϵ ・吸収率 α 0.96を得ている。

(註3) 総合熱伝達率 α_0 は文献11)を参考にくり返しの実測を行い統計値を得た。

$$\alpha_0 = \alpha_c + \alpha_r$$

α_0 : 総合熱伝達率 $[W/(m^2K)]$

α_c : 対流熱伝達率 $[W/(m^2K)]$

風速を実測し、ユルゲス¹²⁾の実験式により算出した。

α_r : 放射(輻射)熱伝達率 $[W/(m^2K)]$

$\alpha_r = \epsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_o^4) / (SAT - \theta_o)$

ϵ : 放射率 [-] を0.96とした。

σ : シュテファン・ボルツマン定数 $(5.67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4))$

T_s : SAT実測値絶対温度 $[K]$

T_o : 外気実測値絶対温度 $[K]$

θ_o : 外気実測温度 $[^\circ C]$

上式から、長期実測による統計値として、 $\alpha_r = 4.65 [W/(m^2K)]$ を得た。また文献12)によれば、 $\alpha_r = 4.65 \sim 5.12 [W/(m^2K)]$ であることから統計により求められた値は有効と判断した。

- (註4) 標準SAT計は、(註1・2)に記した仕様で複数製作し、その中から比較的均一な値を示す物を採用した。測定範囲と精度は、使用する計測器と熱電対の仕様によりほぼ決まると考え、ここでは $-20^{\circ}\text{C}\sim+120^{\circ}\text{C}$ ・ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ とした。
- (註5) 筆者らの研究結果¹⁶⁾において、冬期夜間における天空放射量と各気象因子の単相関は水蒸気分圧より雲量の方が相関係数が高いとの結果を得ている。
- (註6) 図中の棒グラフ(■)による雲量は、八王子天気相談所による観測データ。プロット(●)表示は、地上気象観測法(財)日本気象協会1988)の「雲の観測」に基づき目視にて観測した。
- (註7) 等価空気温度とは、 $a[\alpha_o \cdot \epsilon]_{N/\alpha_o}$ で示され、放射成分である日射量・実効放射量を総合熱伝達率で除し、温度として表現したものである。
- (註8) 日射吸収率及び放射率の値は、集放熱パネルのサンプルに対して分光光度計を用いて測定した値である。
- (註9) 全熱交換量とは、成分別の熱収支式からそれぞれ得られたパネルの集熱量と放熱量をベクトル量で合計した値である。また、晴天日、曇天日など気象の違いによる特性は文献2)の(その7)に詳しい。

引用文献

- 1) 大橋一正・中島康孝・白石帰一・日野俊之・望月慎太郎・内山 忠・粕谷 敦・中村准二：ソルエアヒートポンプシステムの最適運転法に関する研究 (その1～6)，日本太陽エネルギー学会研究発表講演論文集，(1987～1991)
- 2) 大橋一正・中島康孝・日野俊之 他：太陽・空気熱源蓄熱式ヒートポンプシステムの最適化に関する研究 (その1～10)・日本建築学会学術講演梗概集，(1988～1994)
- 3) 大橋一正・中島康孝・増岡陽一・日野俊之：ソルエアヒートポンプシステムの基礎特性と長期運転特性 (第1報 気象とシステム特性)，太陽エネルギー Vol. 23, No 1, (1997)
- 4) Mackey・Wright: Heating, Piping & Air Conditioning, (1942)
- 5) 建築学大系編集委員会編：建築学大系 8, (1969), PP. 331, 彰国社
- 6) 斎藤平蔵：太陽集熱器の試験方法と性能表示法，空気調和・衛生工学論文集，NO. 39, (1989)

- 7) 田中俊六：太陽熱冷暖房システム，(1980) オーム社
 - 8) 斉藤武雄・吉岡正治 他：放射冷却による原子力発電所排熱の宇宙放散，日本太陽エネルギー学会研究発表講演論文集，(1988)
 - 9) 伊藤定祐・三浦直勝 他：実効放射冷却の研究 (自然循環による蓄冷)，日本太陽エネルギー学会研究発表講演論文集，(1984)
 - 10) 松田守弘・寺田重雄 他：放射冷却の基礎実験，太陽エネルギー Vol. 10, NO. 1, (1984)
 - 11) 建材試験センター規格：SAT計による建物周壁の放射空気温度測定法，JSTM J 6110-1992, (1992)
 - 12) 田中俊六・足立哲夫 他：最新建築環境工学，(1985)，井上書院
 - 13) 山本義一：大気放射学，(1954)，岩波書店
 - 14) Berdahl, P., Martin, M., and Sakka, F., 1983, "Thermal Performance of Radiative Cooling Panels," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26,
 - 15) 大橋一正・増岡陽一：自然エネルギーシステムと天空放射量の観測研究 (その1) (気象観測概要と天空放射量の観測結果) 日本太陽エネルギー学会研究発表講演論文集，(1996)
 - 16) 大橋一正・増岡陽一・西川豊宏：自然エネルギーシステムと実効放射量の検討 日本太陽エネルギー学会研究発表講演論文集，(1995)
 - 17) 斉藤平蔵：建築気候，(1991)，共立出版
- #### 参考文献

- a) 日野俊之：太陽熱利用ヒートポンプシステム，空気調和衛生工学，第60巻 第1号，(1986)
- b) 一木明紀：長波長・短波長および全波長の下向き放射量と放射収支量の季節変動，Journal of Meteorological Research Vol. 31, Nos. 3-4, (1979)
- c) 浦野良美・渡辺俊行 他：水平面大気放射量の観測と部材外表面に入射する長波長放射量について，日本建築学会論文集，第330号，(1983)
- d) 山本義一：新版気象学概論，(1991)，朝倉書店
- e) 内嶋善兵衛：農林・水産と気候，(1992)，朝倉書店