

光・熱複合パネルの暖房特性

Heating Characteristic of Composite Panel with Photovoltaic-Thermoelectric Modules

町田 諭 *1
Satishi MACHIDA

藤澤 徹 *2
Toru FUJISAWA

山岸 隆之 *3
Takayuki YAMAGISHI

谷 辰夫 *3
Tatsuo TANI

Abstract

Recently, electric power consumption has been increasing year by year due to spread of home air-conditioners, computers, etc. In view of this, we have performed researches aiming at development of a compound panel of photovoltaic-thermo modules, which combines the solar cells and radiation air conditioning panel composed of thermo modules.

Radiation panel heating and cooling were installed on the roof, and the heating characteristic in winter was obtained. Moreover, this characteristic at the time of inserting the DC/DC converter having the MPPT function, was investigated by calculation. As a result of acting the photovoltaic panel of capacity 24W, it was found that the average of temperature difference between air and the heating panel was 16°C.

Consequently, it can be expected that heating in winter by the compound panel with photovoltaic-thermo modules can make comfortable habitation space in the future.

キーワード：新型空調システム、輻射冷暖房パネル、太陽電池モジュール、熱電素子モジュール

Key Words : New Air Conditioning System, Radiation Panel for Heating and Cooling, Photovoltaic Module, Thermoelectric Module

1. はじめに

光・熱複合パネルは太陽電池モジュールとペルチェ効果を利用した熱電素子群とを組み合わせた複合機能を有するふく射型冷暖房パネルである。このパネルはヒートシンクの片面に太陽電池モジュールを他面に太陽電池モジュールの出力で動作する熱電素子群を配置させたものであり、太陽電池モジュールの出力の極性を換えることにより、ふく射型冷暖房両用のパネルが構成できる。

筆者らは、前報において設計試作した光・熱複合パネル実験装置の設計手法を明らかにするとともに実験データをベースとして東京での夏期4ヶ月間の冷房特性について論述した。その結果、構築した設計手法に従えば、夏期4ヶ月間(6月1日～9月30日)の午前9時から午後3時までの外気温度とパネルの平均冷面温度との差を8°C程度低く保つことが可能で、快適な生活空間を創ることができることが分かった^{1,2)}。本論文は、この実験装置を用いて東京での冬期4ヶ月間(11月1日～2月28日)の暖房特性について論述したものである。ここで冬期、夏期の外気温度、1日当たりの日射量や熱電素子群の電流・電圧特性が異なるため、前報の一部冷房特性を対

2. 光・熱複合パネルの冷房と暖房条件

比しながら述べてある。その結果、前報で示した設計手法は有効であり、設計試作したこの実験装置は冷房・暖房両特性とともに設計基準をほぼ満足できる値となった。

光・熱複合パネルを設計するに当たっては、対象となる室内(閉空間)の天井温度を設定する必要がある。夏期冷房時の天井温度が21～22°Cに設定することが良いとされている³⁾。冬期暖房時の天井温度では29～31°C^{5,6)}で行われているため本論文ではこれらの温度を採用して設計値とした。

METPV(東京)データによる夏期4ヶ月間(6月1日～9月30日、午前9時～午後3時の6時間)の平均外気温度は約27°Cであり、天井温度22°Cとの温度差は約5°Cである。また、冬期4ヶ月間(11月1日～2月28日、午前9時～午後3時の6時間)の平均外気温度は約11°Cで、29°Cとの温度差は約18°Cとなる。さらに、東京の夏期、冬期4ヶ月間の1日(上記時間帯の6時間)当たりの平均傾斜面全日射強度は、それぞれ3.6kWh/m²、2.3kWh/m²であり両季節に明らかな違いがあることが分かる⁷⁾。

このように、夏期、冬期の外気温度、傾斜面全日射強度など環境条件や天井温度の設計値が異なるため、これらの値に整合する光・熱複合パネルの開発が必要になる。

*1 大洋無線(株)(〒150-0021 渋谷区恵比寿西2-20-7)

e-mail : nighika@hon.taiyomusen.co.jp

*2 神奈川工科大学工学部助手

*3 巴商会 技術本部技術部第一技術課

*4 東京理科大学工学部教授

(原稿受付: 2001年10月26日)

3. 小型モデルの基礎特性

3.1 小型モデルの概要

図1は小型モデルの断面図である。このモデルはアルミヒートシンク、熱電素子モジュール、断熱材、ファンなどにより構成されている。ヒートシンクの下方面には熱電素子モジュール(株小松製作所製 KSM-0631A)がシリコーン接着剤(東レ・ダウコーニング・シリコン株製 SE4486)で取り付けられており、ヒートシンクと冷・暖房面(アルミ製の薄板)との狭い空隙(3.8mm)には、断熱材(熱伝導率0.032W/mK)が挟み込まれている。また、上部アルミヒートシンク面は厚さ50mmの断熱材で覆い、さらに冷・暖房面である天井を除いて残る5面を厚さ50mmの断熱材で覆った箱型の閉空間(200mm×120mm×100mm)が設けられており、小型モデルの表面と外気との熱移動を避けるよう全体を注意深く仕上げている。この小型モデルの動作は直流電源(最大電流5.0A、最大電圧25Vの定電流・電圧両用電源)によっている。また、強制空冷ファンは冷房動作時のみに使用するもので、本論文の冬期実験では使用していない。

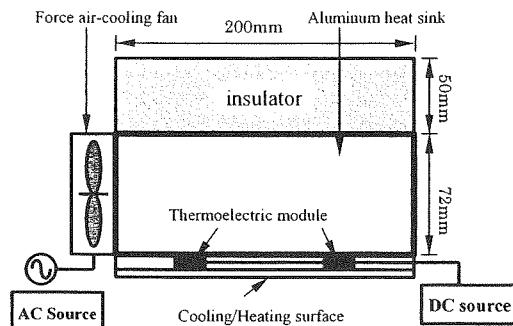


Fig.1. A cross section of the small model.

表1に小型モデルの幾何学的寸法、表2に使用した熱電素子モジュールの物性値を示す。熱電素子モジュールの材料はビスマステルル(Bi_2Te_3)であり、最大電流が6.0A、最大電圧が3.6V、熱電能が0.4である。また、このモジュールを接着した接着剤の特性は表3のようである。

Table 1. Dimensions of small model.

Components	Width [mm]	Depth [mm]	Height [mm]
Heating/Cooling pannel	200	220	126.8
Thermo-electric module	20	20	3.8
Aluminum heat sink	200	120	72.0
Heating/Cooling surface	200	120	—

Table 2. Ratings of thermoelectric module.

material	Bi_2Te_3
size[mm]	20×20×3.8
$\Delta t_{\max} [\text{K}]$	63
$Q_{\text{c}} [\text{W}]$	13.1
$I_{\max} [\text{A}]$	6.0
$V_{\max} [\text{V}]$	3.6
$\alpha_e [\text{mV/K}]$	0.4
$R_{\text{e}} [\text{m}\Omega]$	17.35
$K_{\text{e}} [\text{mW/K}]$	3.69

Table 3. Properties of silicone bonding agent.

Silicone	SE4486
heat conductance [W/m·K]	1.59
bonding ability [N/cm ²]	128

3.2 基礎特性

図1の小型モデルの熱電素子モジュール群に直流電源より0.2~2.0Aの電流を流し、定常状態における冷・暖面の平均温度、端子電圧、外気温度を測定した。冷・暖面(200mm×120mm)の熱電素子モジュール数の違いによる温度分布特性を求めるため、図2に示すように冷・暖面に1、2、4、6個の熱電素子モジュールをそれぞれ直列接続して配置した。図に示すように20mm角格子の各点(6×9)および熱電素子モジュールの中心点(1, 2, 4, 6)について熱電対により表面の温度分布を測定して平均表面温度を求めた。

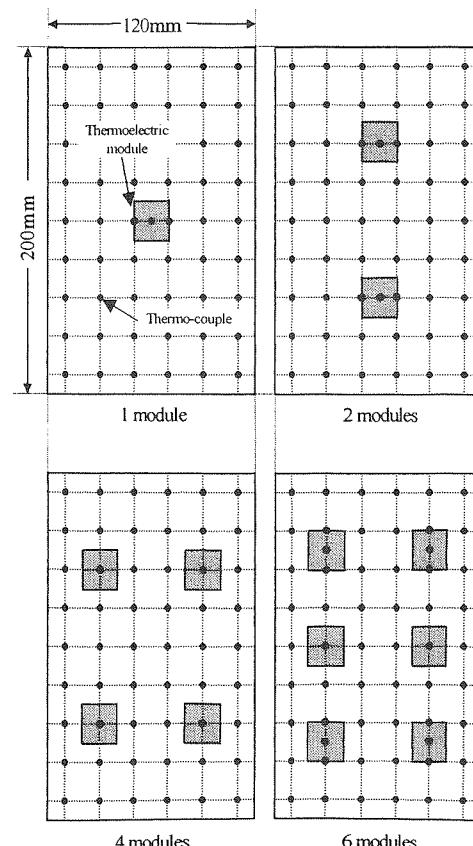


Fig.2. Layout of the thermoelectric module on the heat sink in small model.

図3は1個と6個の熱電子モジュールを配置した小型モデルの電流・電圧特性である。図では冷房、暖房時の特性を同時に示してある。図よりモジュールの個数にかかわらず、暖房時における1個あたりの抵抗値は 1.05Ω であった。前報で報告した冷房時のそれは 0.79Ω で、暖房時の値は冷房時のそれに比べ約33%大きくなつた。このことから抵抗値に温度依存性があることがわかる。

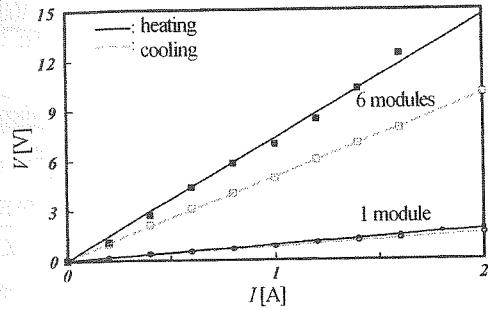


Fig.3. I-V characteristics of the small model.
(Heating, Cooling)

図4(a), (b)は熱電素子モジュールが1個、6個を配置した際の、3次元で図示した冷・暖面の温度分布特性である。図の縦軸(Z軸)の暖面温度差 ΔTh は冷・暖面の測定温度6点の平均値と外気温度 T_a との差であり、横軸(X,Y軸)は冷・暖面上の位置(縦、横方向)である。これらの図はいずれも直流電源から 1.0A の電流を供給した際の特性である。表4は暖房時における暖面温度差の平均値とその変動幅(最大値-最小値)である。直流電源からの電流は図4と同様に 1.0A である。これらの図と表より、熱電素子モジュールの個数に対する平均温度、暖房面の温度分布に明らかな違いがあり、モジュール数を増やすことによって暖面温度差が大きく、暖房面の温度分布が均一になることが分かる。

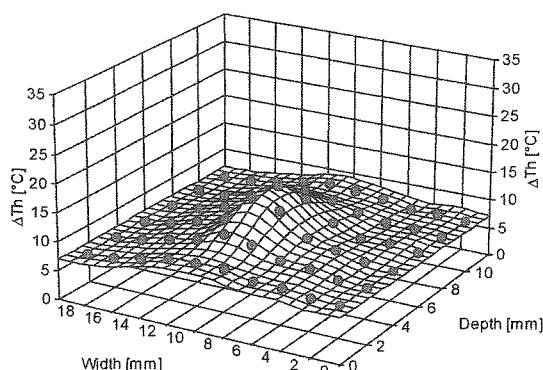


Fig.4.(a) 1 module (I=1.0A,P=0.9W)

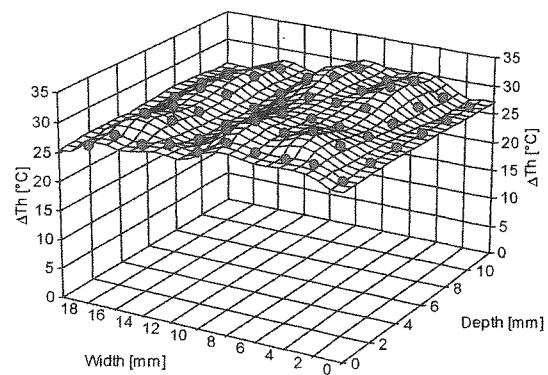


Fig.4.(b) 6 modules (I=1.0A,P=6.9W)

Table 4. A characteristics of average and fluctuation of ΔTh (temperature difference between heating surface and ambient)

Thermoelectric Modules	Heating (1.0A)	
	ΔTh (average) [°C]	Fluctuation [°C]
1	8.9	8.3
2	16.0	7.8
4	24.4	8.2
6	28.6	6.1

図5は消費電力に対する冷・暖面の冷房、暖房温度差 ΔT_c , ΔTh の関係である。図より暖房時の暖面温度差、冷房時の冷面温度差が最も大きい熱電素子モジュール数は4個となった。また、すでに報告したように冷房時には、消費電力を増加させることによって冷面温度差の特性は飽和し、接合部など内部でのジューク熱が関与しているものと考えている。

一方、暖房時では素子内部のジューク熱が加わっているが温度差は飽和せず、また冷房時に比べて温度差を大きく取る事が可能である。たとえば、熱電素子数が4個の時、消費電力を 10W 供給した際には、暖面温度差は約 42°C 、冷面温度差は約 25°C となり、同一のパネルを冷・暖房双方に使用することが可能であることがわかる。なお、このときの熱電素子モジュール1個当たりの冷・暖房面積は 0.006m^2 となった。

図5で熱電素子モジュール数6の場合の暖房温度差が他に比べて低い理由は、抵抗値が大きいために同じ駆動電力で比較すると電流が減ることから、電流に比例するペルチ効果が弱まるためである。一方でモジュール数4ではこれに反して他よりも高い断面温度差を維持しているため、さらに素子の特性不揃いなどの要因も関係している可能性がある。

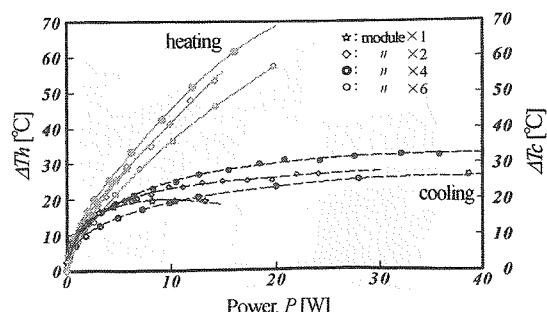


Fig.5. Driving Power vs. Heating/Cooling Characteristics

4. 光・熱複合パネル実験装置

4.1 設計条件

小型モデルの暖房基礎特性をもとに光・熱複合パネル実験装置を設計した。その設計条件は次のとおりである。

- 1) 冬期 4 ヶ月間 (11 月 1 日～2 月 28 日、午前 9 時～3 時まで) の天井温度を 29°C とし、外気温度と平均暖面温度との温度差すなわち暖面温度差を 18°C 以上に保つことする。
- 2) 縦 240mm、横 300mm の光・熱複合パネルに取り付ける熱電素子モジュールの数は、小型モデルの実験結果よりモジュール 1 個当たりの暖房面積が 0.006m² で最適として 12 個とする。その取り付け位置は図 6 とする。
- 3) 定格容量 12W の多結晶シリコン太陽電池モジュールを 2 枚並列接続してパネル駆動用の電源とする。図 5 から、電源容量 24W は夏期の冷房条件を達成するために決められた値であるとともに冬期の暖房条件を十分満足できる容量である。
- 4) 太陽電池モジュールの基本式や太陽電池モジュールのセル温度、熱電素子モジュールの電流・電圧特性は前報に従った¹⁾。

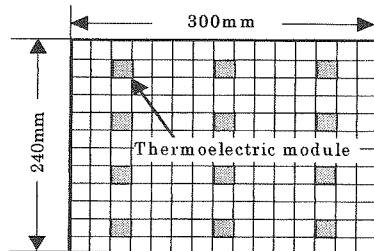


Fig. 6. Layout of thermoelectric modules.

4.2 実験装置の概要と基本特性

写真 1 は設計試作した光・熱複合パネル実験装置の外観図である。縦 240mm、横 300mm、高さ 400mm の部屋を模擬した閉空間の壁と床を断熱材にて構成した。その天井部には縦 240mm、横 300mm のアルミヒートシンクの片面に熱電素子モジュール 12 個を取り付けたパネルを装着した。その幾何学的寸法は表 5 に示すとおりである。また、その上に傾斜角 35.5 度方位角真南で表 6 の特性をもつ太陽電池モジュールを 2 枚並列に接続して駆動源とした。

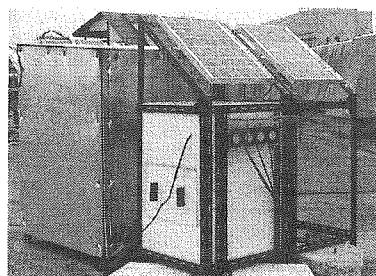


Photo. 1. An external appearance of the composite panel with photovoltaic-thermoelectric modules.

Table 5. Dimensions of the composite panel.

components	Width [mm]	Depth [mm]	Height [mm]
Heating/Cooling panel	400	400	700
Thermoelectric module	20	20	3.8
Aluminum heat sink	240	300	72.0
冷暖房面	240	300	0.3
閉空間	240	300	400

Table 5. Rating of PV module.

type	Poly-crystalline Silicon
size	308 × 400mm
PV cells	36 Series
P _{max}	12.1W
I _m	0.72A
V _m	16.8V
I _{sc}	0.76A
V _{oc}	20.5V

(at 1000W/m², 25°C, A.M.1.5)

図 7 は 2 枚組み合わせた多結晶シリコン太陽電池モジュールの電流・電圧特性と同じく光・熱複合パネルの電流・電圧特性である。図の横軸は電圧であり、縦軸は電流である。いずれの特性とも外気温度 10°C の時のものである。図中の直線の特性は冷・暖房パネルのものであり、パラメータはパネルを構成する 12 個の熱電素子モジュールの接続法を表している。すなわち、12S-1P は 12 個のモジュールをすべて直列接続したことを示し、4S-3P は 4 個直列にしたものと 3 並列にしたことを表している。また、太陽電池モジュールの電流・電圧特性は傾斜面全天日射強度 Irr によって大きく変化するが、12S-1P の設計ではこの日射強度 Irr が 1000W/m² のときに最適動作点 (●印) で光・熱複合パネルに電力が供給されたとした。

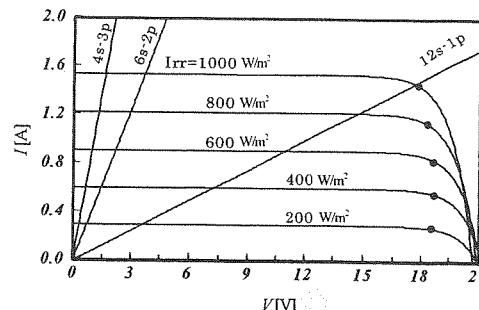


Fig. 7. I-V Curves of the PV and Thermoelectric module.
(Ambient Temperature : 10°C)

このような条件の下で、前報で示した設計手順のフローチャートにしたがって求めた傾斜面全天日射強度に対する暖面温度差と冷面温度差の関係を求めた⁸⁾。すなわち、①日射強度を 10W/m² きざみで入力する。②太陽電池モジュールのセル温

度を計算する。③冷・暖房パネルの電流・電圧特性を、熱電素子モジュールの直列、並列数を選択して計算する。④太陽電池の基本式をベースにして、太陽電池モジュールの電流・電圧特性を計算する。⑤熱電素子モジュールの電流・電圧特性と太陽電池モジュールのそれとの交点を求め、動作電力を計算する。⑥この動作電力と図5の消費電力と暖面温度差の関係から暖房面温度を求める。

図8は日射強度に対する暖面温度差と冷面温度差の関係である。図の実線は暖房時の特性であり、点線は冷房時の特性である。また、図中のパラメータの12S-1Pは熱電子モジュールの直列数が12個のみで構成されていることを意味し、6S-2Pは直列数が6個で並列数が2個であることを示す。いずれの特性とも熱電素子モジュールの接続が12個直列の12S-1Pが最も温度差が大きく、いま傾斜面全天日射強度が1000W/m²のとき、暖面温度差は43.1°C、前報で報告した冷面温度差は20.9°Cであり、設計値を大きく上回る温度差が期待できることがわかる。

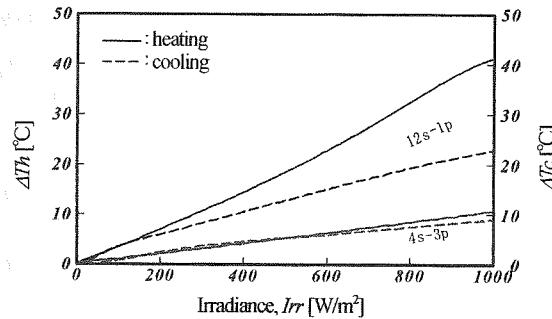


Fig.8. Heating/Cooling characteristics with irradiation.

4.3 暖房特性

図9は1999年12月7日の早朝6時から夕方17時までの傾斜面全天日射強度と外気温度の実測結果である。また、図10は1999年12月7日の太陽電池モジュールによる動作電力と暖面温度差の実測値と図7、図8から求めた計算値との関係である。さらに、図11は日射強度に対する暖面温度差、冷面温度差の実測値と計算値の関係である。この図では、前報の冷面温度差の特性も併せて示してある。これらの図より暖房時の計算値は冷房時と同様に実測値とほぼ一致した。

1月1日から31日までの1ヶ月間(いずれも午前9時から午後3時まで)のMETPVデータ(1時間毎の日射強度と外気温度)と図8より、1日当たりの平均暖面温度差を求めた。その結果を図12に示す。この1ヶ月間の午前9時から午後3時までの6時間の平均傾斜面全天日射強度は421.1W/m²であり、平均暖面温度差が16.1°C、最大暖面温度差が26.1°Cであった。

先に述べたように、暖房時に天井温度 T_h を29°Cに設定すると平均暖面温度差を18°Cに保持する必要がある。しかし、

この実験装置は日射強度が1000W/m²のとき太陽電池モジュールの最大出力点(図7●印)で動作するように設計点を選んでいるため、冬期の比較的弱い日射強度のときには、光・熱複合パネルの負荷直線上の動作点が太陽電池モジュールの最大出力点を大きく外れた低電圧となるために電力が低下する(図7)。そこで、太陽電池モジュールの最大出力点を常に追尾するMPPT(Max Power Point Tracking)機能を持つDC/DCコンバータの挿入を想定して考察した。DC/DCコンバータは太陽電池の最大電力から電流を上昇・電圧を下降させることで光・熱複合パネルの負荷直線上に最大限に電力を変換し利用することができるため本システムの暖房特性の改善が見込まれる。

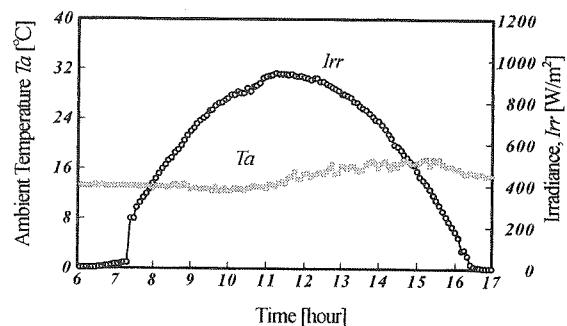


Fig.9. Environmental data; '99/12/7

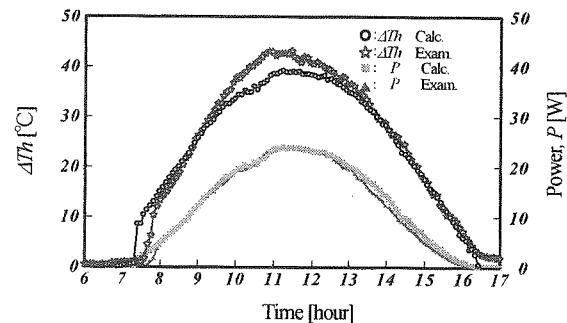


Fig.10. Heating Characteristics of the composite panel.
('99/12/7 experimented value vs. simulated value)

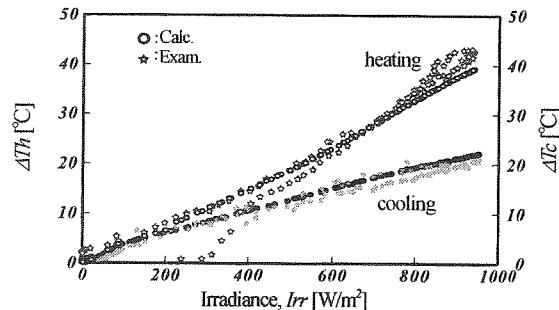


Fig.11. Relationships between irradiance and ΔTh , ΔTc .

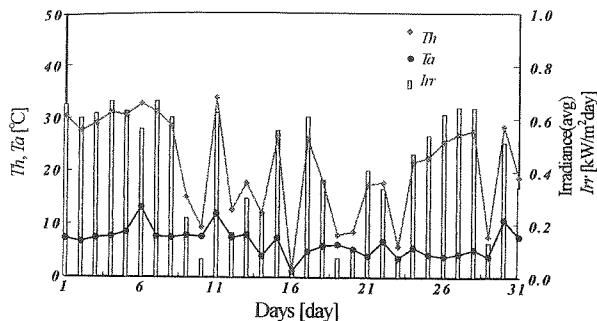


Fig.12. Daily mean temperature on the heating surface (1/1~1/31)

4.4 DC/DCコンバータ挿入による特性改善

太陽電池モジュールと光・熱複合パネルとの間に変換効率90%のDC/DCコンバータを挿入した際のパネルの暖房特性を計算した。この計算に当たってはDC/DCコンバータにより太陽電池モジュールの最大出力点での電力の90%が光・熱複合パネルに供給されるとしている。

図13は日射強度に対するDC/DCコンバータが有る、無しによる暖面温度差の関係である。図の横軸は日射強度であり、縦軸は暖面温度差である。DC/DCコンバータを挿入することにより、比較的日射強度が低い範囲ではDC/DCコンバータが無い時に比べ、パネルに供給される電力が大きく暖面温度差が大きくなることが分かる。例えば、日射強度が400W/m²のとき、両者の差は約10°Cとなる。しかし、日射強度が800W/m²以上になるとDC/DCコンバータの変換効率が90%としたため、DC/DCコンバータを挿入することによる利点が認められなかった。ただ、冬期の日射強度は比較的低日射にあるため、DC/DCコンバータの挿入は暖面温度差を改善することに効果的である。

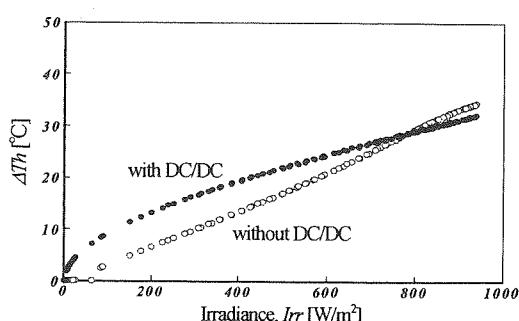
Fig.13. Relationship between irradiance and ΔTh with DC/DC converter.

図14はDC/DCコンバータを挿入した際の図12に対応する1月1日から1月31までの1月間の暖面温度差の関係である。DC/DCコンバータを挿入することにより、平均暖面温度差を16.2°Cから22.2°Cにすることができた。この間の最大暖面温度差は26.1°Cから30.6°Cになった。

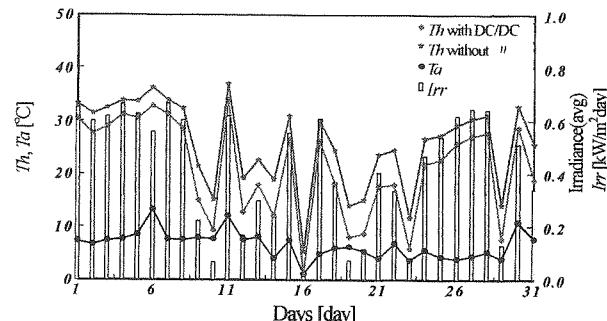


Fig.14. Daily mean temperature on the heating surface with DC/DC converter.

さらに、図15は冬期の4ヶ月間（11月1日～2月28日）の午前9時から午後3時までのMETPV（東京）データを用いて、この期間の10日間毎の平均日射強度、平均外気温度、計算で求めた平均暖面温度の関係である。図16は暖面温度1°Cごとに出現頻度（時間）を示したものである。この4ヶ月間の平均日射強度は402W/m²であり、平均暖面温度差は21.7°Cであった。すでに述べたように、この期間の午前9時から午後3時までの暖面温度差を約18°Cに保つことができれば、快適な天井温度である29°Cに保つことができる。また、冬期4ヶ月間の目標達成率(Ma)を次式で定義して求めたところ、目標達成率は61.0%となった。

$$Ma = \frac{Ha}{Ho} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 Ha ：暖面温度 T_h が目標天井温度の29°Cを超えた時間 (hr), Ho ：太陽電池モジュールによる動作時間 (hr)

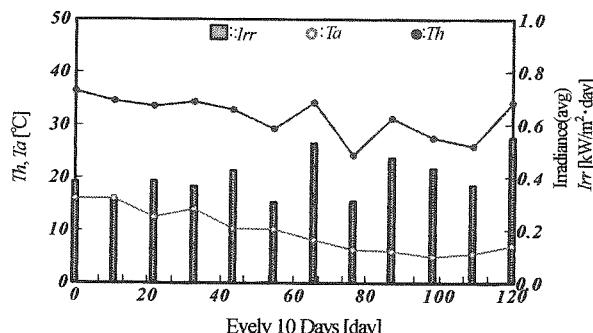


Fig.15. Heating characteristics for 4 months in winter period.(11/1~2/28)

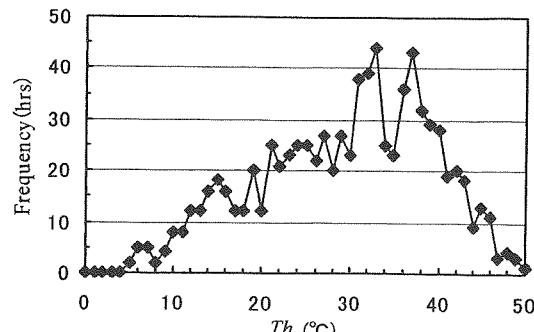


Fig.16. Frequency distribution of the heating surface's temperature.

5. まとめ

筆者等は、冷・暖面の面積が 0.072m^2 、閉空間の容量が 0.0288m^3 である独立型の光・熱複合パネルを設計・試作して、冷房動作に引き続き暖房動作をさせデータを取得し考察した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 使用する熱電素子モジュールの数を増やすにしたがい、冷・暖房面の温度分布は平坦化される。また、暖房時にはモジュール数が 4 個のときが最も効果的であり、その時の最大暖面温度差は約 42°C となった。
- (2) 光・熱複合パネルを暖房動作させた際のデータをベースにして、1月1日～1月31日の1ヶ月の午前9時～15時の暖房特性を求めた。その結果、平均暖面温度差は 16.1°C となり、平均傾斜面全天日射強度は 421W/m^2 となった。この値は天井温度を 29°C に保つための平均暖面温度差 18°C には約 2°C 不足した。
- (3) 暖房特性を改善するため、DC/DC コンバータを挿入した際には、1月1日から1ヶ月間の平均暖面温度差は 22.2°C と約 6°C 改善された。また、11月1日～2月28日の4ヶ月間の平均暖面温度差は 21.7°C であり、十分この空間の暖房が可能であることがわかった。さらに、この期間の目標達成率は 61.0% となった。
- (4) 前報告によれば、この光・熱複合パネル実験装置の夏期4ヶ月間の冷面温度差は 8.1°C であり、この期間の目標達成率は 86.0% であった。一方、暖房特性では、冬期4ヶ月間の暖面温度差は 21.7% で、この期間の目標達成率は 61.0% であった。両季節のこの温度差の違いは、熱電素子モジュールの電流・電圧特性が温度依存性を持つことが大きい。そのため、平均傾斜面全天日射強度が $1000/\text{m}^2$ のとき、所定の冷・暖面温度になるよう設計し、さらに DC/DC コンバータを具備することにより冷・暖房両用の光・熱複合パネルを構成することが可能であることが分かった。

本研究を進めるに当たり、数々のご協力を頂いた㈱コマツ研究本部の今泉久朗氏と門谷院一氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 町田論・山岸隆之・松永洋一・谷辰夫：光・熱複合パネルの冷却特性、太陽エネルギー、Vol.26, No.4, p.60 (2000)
- 2) 松永洋一・谷辰夫：光・熱複合パネルの暖房特性、太陽／風力エネルギー講演論文集、No.40, pp.153-156 (1999)
- 3) 葉山茂三：「天井冷暖房のすすめ」、筑摩書房、p.77 (1990)
- 4) 山岸隆之・遠藤大輔・藤澤徹・谷辰夫：太陽電池で駆動する熱電素子を用いた天井輻射冷房の快適性、7-168, pp.3068-3069 (2001)
- 5) 3)と同じ
- 6) 長井智彦・美藤一博：「輻射冷暖房装置の実験的研究（その4）－天井輻射・対流型暖房による環境－」、日本建築学会大会学術講演梗概集、No.41426, p.852 (1996)
- 7) 日本気象協会：「平成12年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 太陽光発電システム実用化技術開発 太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発（最適設計のための気象データの調査研究）」(2001)
- 8) 1)と同じ