

# 空気式太陽集熱パネルの光発電・熱ハイブリッド化に関する研究

Experimental Studies on Photovoltaic/Thermal Hybrid Air-type Solar Collectors

三木康臣\*<sup>1</sup> 郡 壮敏\*<sup>1</sup> 武山 倫\*<sup>2</sup> 相曾一浩\*<sup>3</sup> 浅井俊二\*<sup>3</sup>  
 Yasutomi MIKI Satoshi KOHRI Rin TAKEYAMA Kazuhiro AISO Syunji ASAI

## Abstract

The objective of this study is to develop hybrid air-type solar collectors which generate both electric power and heat. Experiments on characteristics of power and heat generation were carried out under a large-scale solar simulator. The thermal efficiency, the total energy efficiency and the exergetic efficiency of three hybrid air-type solar collectors were compared with a solar air heater.

The following results have been obtained.

- (1) Our evaluation system for the collecting efficiency of solar air heaters is precise comparably with the system by JQA.
- (2) The 23% light shielding by photovoltaic cells has little effect on the collecting efficiency of this hybrid air-type solar collector.
- (3) This hybrid air-type solar collector shows a slight decrease as compared with this solar air heater on both energy efficiency and exergetic efficiency.
- (4) This hybrid air-type solar collector exceeds isolated photovoltaic cells and solar air heater on both energy efficiency and exergetic efficiency.

キーワード：空気式光発電・熱ソーラーハイブリッドパネル、集熱効率、光電変換効率、エネルギー効率、エクセルギー効率

Key Words : Photovoltaic/Thermal hybrid solar air collector(PV/T), Collecting efficiency, Photovoltaic conversion efficiency, Overall energy efficiency, Exergetic efficiency

## 1. 緒言

2005年2月16日の京都議定書発効もあり、我が国の二酸化炭素排出量抑制（エネルギー起源）に関して特に民生部分と運輸部門からの排出量抑制が重要とされている。そして、我が国のエネルギー需要は、産業部門計では第一次石油危機以来横這いあるいは微増状態にあるが、家庭部門計では第一次石油危機時の二倍以上と増加を続けている。ユビキタス社会においては、家庭における省エネと創エネ対策が一層求められる。家庭における住宅冷暖房給湯熱エネルギー消費を抑制するべく太陽やその別形態としての木質バイオマスなどの再生可能エネルギーによる快適な住環境の実現・普及は、将来的な化石燃料枯渇問題からも大きな課題である。

太陽熱エネルギーの有効活用において、構造が簡単で冬期間での凍結、媒体の液洩れなどの問題もなく保守性に優れかつ比較的安価な高性能空気式太陽集熱器と太陽熱エネルギー供給の不安定性を補うべく性能がよく低コストな蓄熱部からなる、比較的パッシブなシステムの開発は重

要な選択肢の一つと考えられる。

熱電ハイブリッドパネルは、太陽電池と集熱器の機能の一体化を図ったパネルであり、(i)単位面積当たりのエネルギー利用率を上げ、(ii)設置スペースを節約し、(iii)架台などの共通化により経済性を高めることを目的としている。また、一体化することにより意匠面でも優れている。これに関する研究の殆どが、熱媒体が不凍液などの液体であり、また、商業化された事例<sup>(1)</sup>は僅かである上に、集熱媒体を空気とするもので本格的に商業化された製品は国内では現在までに開発されていない。

本研究では、OMソーラー住宅<sup>(2)</sup>などで既に実用化されているユニット型空気式太陽集熱パネル<sup>(3)</sup>を熱電ハイブリッド化してシステムを独立電源化することを目的として、三種類の試作品を製作した。本報告では、そのうち最良と評価されたプロトタイプに関して評価を行い、集熱パネルとの比較を行った結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2-1 熱電ハイブリッドパネル

図1に多結晶Si型熱電ハイブリッドパネル（ハイブリッドパネルAと呼ぶ）の概略を、写真1にその外観を示す。OMソーラー住宅で既に使用されているユニット型空

\*1 北見工業大学工学部  
 (〒090-8507 北見市公園町165番地)  
 e-mail: mikiyt@mail.kitami-it.ac.jp

\*2 当時 (株)オーエム研究所

\*3 矢崎総業(株) 空調機器開発センター  
 (原稿受付：2006年1月19日)

気集熱式太陽集熱パネル (W845mm×L1,460mm) に、京セラ製の多結晶 Si 太陽電池 (W845mm×L336mm、遮光率  $\zeta=0.23$ 、PV 面積比  $\beta=0.18$ ) を組み込んで、熱電ハイブリッド化した。太陽電池は集熱パネルの上流側のカバーガラスの上側表面に配した。土台となった太陽集熱パネルは、OM 部材カタログ中の AC-09150H と呼ばれる機種で、波形黒色塗装鋼板と黒色塗装溶融亜鉛めっき鋼板を集熱材とし、厚さ 15mm の発泡スチレン製の断熱材とともに黒色塗装黒色アルミニウム合金めっき鋼板製の箱体に厚さ 4mm の強化ガラスで納めた構造をしている。ちなみに通気は下面通気である。パネル上部・下部の熱媒空気の入出口部には、厚さ 13mm の合板製のプレナムを取り付け、厚さ 25mm の発泡エチレンフォーム保温材を施工した。

なお、パネル B は MSK (株) 製の単結晶 Si 太陽電池 (W845mm×L365mm、 $\zeta=0.25$ 、 $\beta=0.19$ )、パネル C は (株) カネカ製の a-Si 太陽電池 (W945mm×L443mm、 $\zeta=0.31$ 、 $\beta=0.31$ ) を組み込んだ。パネル B の太陽電池はカバーガラスの下側表面、パネル C は集熱板の上側表面に配した点などで異なる。

## 2-2 実験方法

空気式太陽集熱パネルの試験方法は、(財)日本品質保証機構 (JQA) における試験方法<sup>(4)</sup>に準拠して実施された。図 2 に実験装置の全体構成を示す。本実験においては、大型ソーラーシミュレーター (W1, 200mm×L2, 200mm) を傾斜角度 42° (エアマス AM 1.5) とし、これと平行に向き合うように同じ傾斜角度に架台上の供試験体を設置する。シミュレーターの光源部の 20 個のキセノンランプ (8kW×20) を調節して人工光が照射される。パネルカバー上の 9 点 (集熱部 6 点、太陽電池部 3 点) の平均値を集熱パネルの照射強度とし、太陽電池部 3 点の平均値を太陽電池の照射強度とした。実験室の対偶に設けられた外気取り入れ口より外気を導入して冷房することにより、室内気温をほぼ一定に保つことができた。

供試験体への吸込み通気はダクト最下流のシロッコファンで行い、安定化電源とボルトスライダによりその通気流量を調節した。通気流量は、整流エレメントとピトー管を組み合わせて測定した。ボルトスライダで加熱量を調整した加熱器あるいは冷風機で熱媒空気を調節することにより、ハイブリッドパネルの入口空気温度が調節される。ハイブリッドパネルの出入口部に、予め校正済みの T 型熱電対 ( $\phi 0.32\text{mm}$ ) を各々 12 箇所 (半径方向 3 点、円周方向に 4 点) 設置し、出入口温度を測定した。ダクトは原則として  $\phi 150\text{mm}$  のアルミフレキで室内空気取入れ口から下流は厚さ 100mm のガラスウールで保温し、出入口温度測定部は  $\phi 150\text{mm}$  の塩化ビニール管製で、流量測定部は  $\phi 100\text{mm}$  のスチール管製で、各々厚さ 50mm のウレタンフォーム保温筒により保温した。空気を熱媒体とすると、出入口温度の測定において、特に半径方向の温度むらが生じるため、出入口温度測定部にアルミ蒸着フィルム付き保

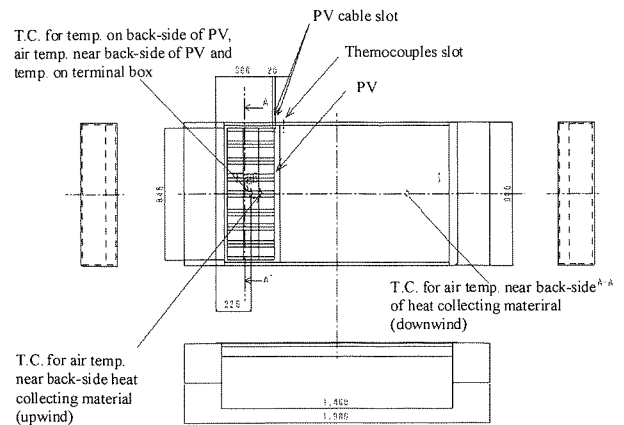


Fig.1 Outline of PV/T panel A

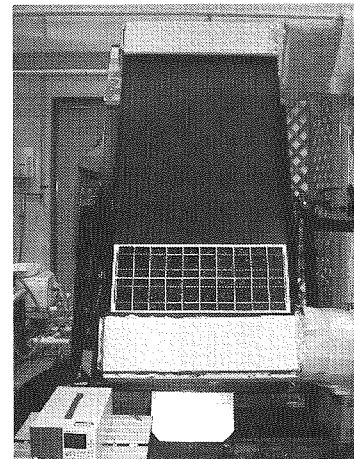


Photo.1 Appearance of panel A and experimental apparatus

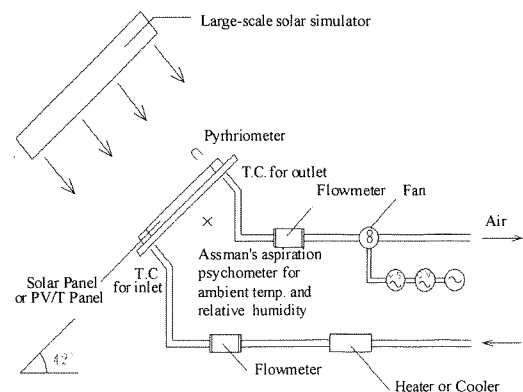


Fig.2 Outline of experimental apparatus

温材で覆ったガードヒーターを設置して温度むらを最小限とした。また、パネルの圧力損失は、上下プレナムに設置した各々静圧取出口(φ1.5mm)を設けて測定された。なお、パネル前方から風洞により、0~5m/sの風速Wを実現し、風速の測定には熱線風速計を使用した。なお、供試験体周囲の気温および相対湿度の測定は、供試験体後方GL+1.4mに設置したアスマン通風温湿計を使用し、露場圧力も併せて測定された。

さて、太陽電池のI-V特性を求めることにより、最大出力 $P_{max}$ を求める。電子負荷装置により、その最大出力の100%、0%の負荷(負荷率を $\phi$ と呼ぶ)を与え、その時の電流、電圧及び電力を測定した。また、集熱面上部・下部の空気温度、太陽電池セルの裏面温度、裏面の空気温度およびセルの端子箱表面温度を測定した。

### 3. 結果および考察

#### 3-1 集熱パネルの集熱性能

図3、図4に集熱パネルに関する集熱効率線図を示す。図3中には、類似の集熱パネル(W920×L2, 200, OM部材カタログにおける型式番号AC-09220Hに相当)をJQAで試験した結果<sup>(5)</sup>も示す。風速は、両者ともに風速W=3m/sの場合である。図3では通気量を140kg/h、照射量を700W/m<sup>2</sup>とした。図4では100m<sup>3</sup>/h、照射量を800~1,000W/m<sup>2</sup>とした。負の勾配は、本実験結果はJQAの結果よりもやや大きい。全く同じ大きさのパネルではないので、両者は完全に一致することはないものの、 $\Delta t_1/I$ が5から30の範囲で、集熱効率の最大のずれは、6%であった。

図4は、風速W=0, 3, 5m/sとした場合の、集熱効率を示す。重回帰分析により、集熱効率は以下の式で表現できた。

$$\eta_t = -1.38 \Delta t/I - 3.10W + 86.8, \quad r^2 = 0.927 \quad \dots (1)$$

図5は、風速W=0m/sの場合の各種空気集熱パネルの集熱効率を示す。図中には、橋本らのカーボンフェルトを集熱材とした場合( $\eta_H$ )<sup>(6)</sup>、伊藤らの孔空き多孔板を集熱材とした場合( $\eta_I$ )<sup>(7)</sup>、炭素繊維シートを集熱材とした場合( $\eta_J$ )<sup>(8)</sup>、斉藤のセラミックフォームを集熱材とした場合( $\eta_S$ )<sup>(9)</sup>も示す。今回比較する相関式は、通気流量が100m<sup>3</sup>/h程度で集熱面が選択吸収膜でなくカバーガラスは一枚ガラスの場合の空気集熱パネルの結果である。水集熱の平板型集熱器の場合( $\eta_K$ )<sup>(10)</sup>も示す。

図5(a)によれば、 $\eta_H$ と $\eta_t$ では $\Delta t/I$ が20では交差するが、 $\eta_t$ と比較して $\eta_H$ は負の勾配が若干大きい。 $\eta_I$ と $\eta_t$ は $\Delta t/I$ が15では $\eta_t$ が9%大きく、 $\eta_I$ の負の勾配は若干小さい。 $\eta_J$ と $\eta_t$ は $\Delta t/I$ が15では交差するが $\eta_J$ の負の勾配は他の空気集熱パネル中最小である。

図5(b)によれば、 $\eta_S$ と $\eta_t$ は $\Delta t_1/I$ が19で交差し、 $\Delta t_1/I$ がそれ以降では負の勾配が大きいため $\eta_S$ が下回る。

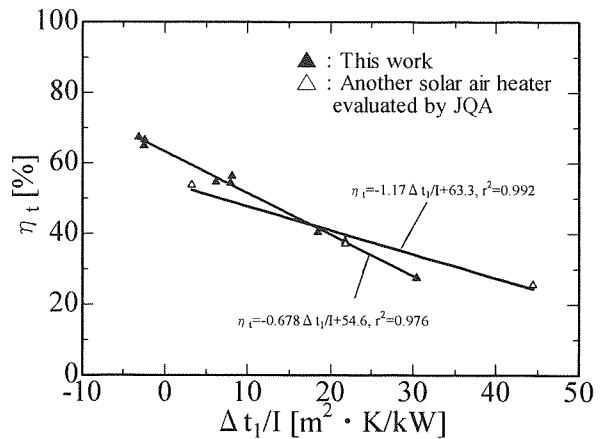


Fig.3 Comparison on collecting efficiency of solar air heaters between this work and OM-Yazaki

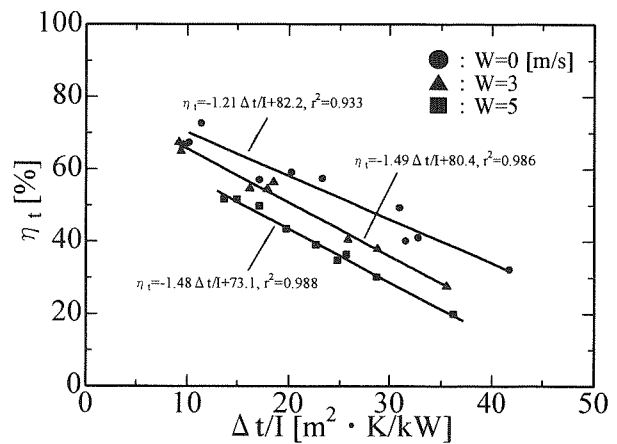


Fig.4 Effect of wind velocity on collecting efficiency solar air heater by this work

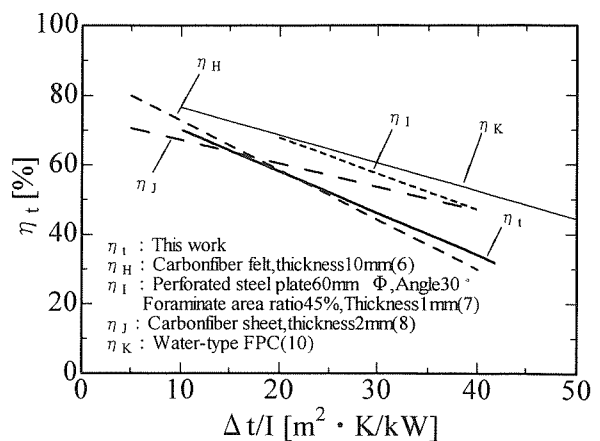


Fig.5(a) Comparisons of collecting efficiency of between this work and the others

#### 3-2 集熱パネルの圧力損失

ところで、集熱パネルに関しては熱伝達と圧力損失のバランスを考慮して評価されねばならないが、図6に通気流量と圧力損失(集熱面積当たりの)の相関を示す。比較の

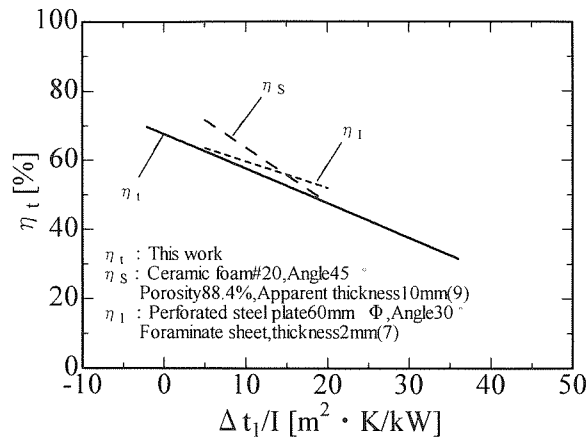


Fig.5(b) Comparisons of collecting efficiency of between this work and the others

ため、セラミックフォームを集熱材とした場合も示す。このことから、図5(b)において、圧力損失をほぼ2倍と大きくすることにより熱交換性能で利得を得た(集熱効率で上回った)とも言える。なお、図5(a)における $\eta_H$ 、 $\eta_J$ は圧力損失が大きいことは容易に想像可能であるが、報告がない。空気式太陽集熱パネルを提案するに際しては、熱交換性能(集熱効率)とともに圧力損失を同時に提示する必要がある。

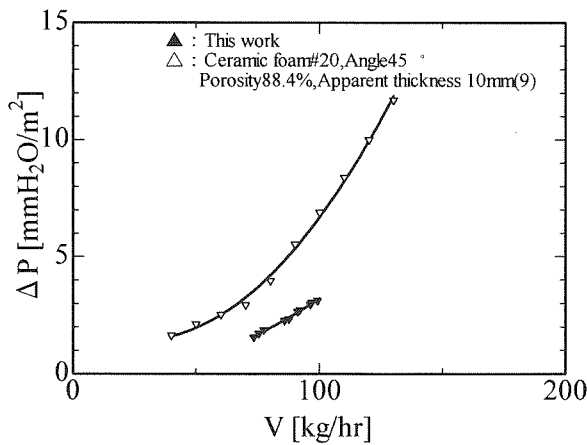


Fig.6 The relationship between the mass rate of air flow and the static pressure drop

### 3-3 集熱材のコスト

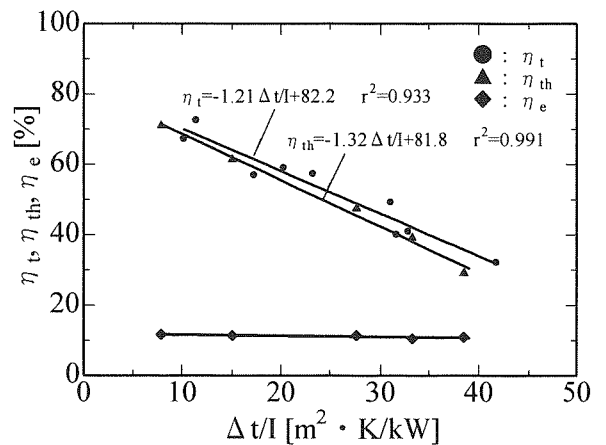
集熱パネルのコストに関して、製作費、設置工事費、送風機を別にして評価する。これに加えて、上述の圧力損失の影響による送風機の運転費が重要ではあるが、集熱材のコストと圧力損失は強い相関があると考えられる故、集熱材のコストを比較することは、集熱パネルのコストを評価する上で重要である。なお、集熱パネルのコストにおける他の主な材料費としては、保温材、カバーガラス(あるいは

ポリカーボネート板) およびケーシングがある。

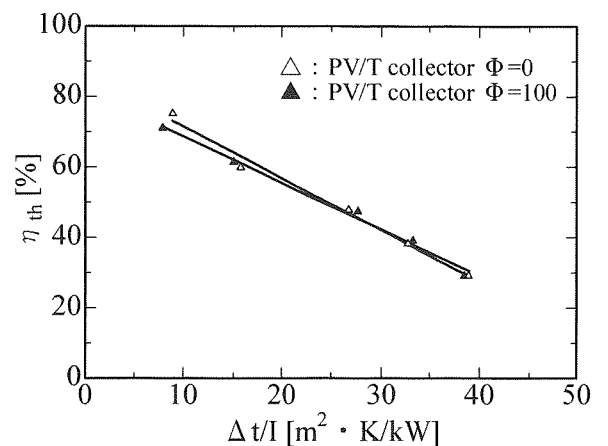
表1に各種集熱材の1m<sup>2</sup>当たりの市場価格を示す。なお、黒色塗装波板鋼板を除く他の3種類については、国内の製造元あるいは販売元への聞き取り調査の結果を元に算出した。結局、図5、図6、表1などを参考にして、集熱温度(Δt/I)の範囲、あるいは民生用か産業用かの目的に応じて、使い分けるべきである。

Table 1 Comparisons on cost between various solar collecting materials

Collecting materials	Economic cost [yens/m <sup>2</sup> ]
Black corrugated iron sheet	600~700
Ceramic foam #20, Porosity 88% Apparent thickness 10mm	7,000~9,000
Carbon fiber felt, thickness 10mm	10,000~15,000
Carbon fiber sheet, thickness 2.4mm	2,000~3,000



(a) Comparison on collecting efficiency between solar air heater and PV/T solar collector



(b) Effect on collecting efficiency of PV/T collector influenced by load factor on PV

Fig.7 Collecting efficiency of PV/T hybrid solar collector

3-4 ハイブリッドパネルの集熱性能

図7(a)は、集熱パネルで通気流量  $V=100 \text{ m}^3/\text{h}$  モード、風速  $W=0\text{m/s}$  の相関と、類似の通気流量、 $W=0\text{m/s}$  でのハイブリッドパネルAの負荷率  $\phi$  が100%の相関を示している。ハイブリッドパネルAは、太陽電池で集熱面が遮られることによって集熱効率が下降するが、集熱効率の減益率は遮光率よりは小さい。集熱面積からPV部を除いて算出された  $\eta_{th}$  は  $\eta_i$  の相関式と交差するほどである。そして、 $\Delta t/I$  が増すと、両者の集熱効率の乖離は増す。

ちなみに、以下に集熱パネルとハイブリッドパネルAの集熱効率の相関式を示す。

$$\eta_i = -1.21\Delta t/I + 82.2, r^2 = 0.933 \quad \dots\dots(2)$$

$$\eta_{th} = -1.32\Delta t/I + 81.8, r^2 = 0.991 \quad \dots\dots(3)$$

また、図7(b)にはハイブリッドパネルで負荷率  $\phi$  が0, 100%の場合を示している。PV面積比が0.18と小さいこともあり、負荷率が集熱効率の減少に与える影響は小さい。

図8に、パネルAについて風速  $W=0\text{m/s}$  の場合の集熱面上部 ( $t_1$ )・下部の空気温度 ( $t_2$ )、PVセルの裏面温度 ( $t_3$ )・裏面の空気温度 ( $t_4$ ) および端子箱温度 ( $t_5$ ) を示す。照射量が  $1,000\text{W}/\text{m}^2$  では、入口温度が  $15^\circ\text{C}$  以上で端子箱温度は  $70^\circ\text{C}$  超となることになる。コーティング材の耐熱温度などの制約から住宅のソーラー設備を  $80^\circ\text{C}$  以下に抑制することが望ましいが、 $t_1$  から  $t_5$  のうち端子箱温度  $t_5$  が最も高くなるが、三種類の試作パネルのうちで無風時の端子箱温度の高いパネルでも基準値をこらうじてクリアしている。夏季の外気温が通常  $40^\circ\text{C}$  以下であることを考慮すれば、端子箱温度およびPVセル温度も許容温度範囲内となる。なお、外気を小屋裏を通して予熱する場合も想定される<sup>(1)</sup> ので、PVセル温度上昇の抑制の努力は今後の課題としたい。

ちなみに、以下にハイブリッドパネルAの入口空気温度  $t_{in}$  とPVセルの裏面温度  $t_3$  の相関式を示す。

$$t_3 = 0.36t_{in} + 51.9, r^2 = 0.686 \quad \dots\dots(4)$$

なお、液体熱媒のハイブリッドパネルではPVセル温度は集熱温度に等しいとして解析されることが多い。

図9にPV裏面の空気温度  $t_4$  を示す。図9(a)によれば、パネルAのPV裏面の空気温度が最も高いが、入り口空気温度による影響度はパネルC, B, Aの順に大きい。また、図9(b)によれば、パネルA, B, Cの順にパネル周囲の風の影響を受けている。結局、パネルAは周囲が無風であれば、PV裏面の空気温度は最も高くなるが、入り口空気温度の影響には鈍感で、周囲の風による冷却効果は最も期待できる。PVを集熱板の上側表面には配置しない方がよい。

ハイブリッドパネルAのPVセル温度と光電変換効率の相関を図10に示し、相関式を以下に示す。なお、温度係

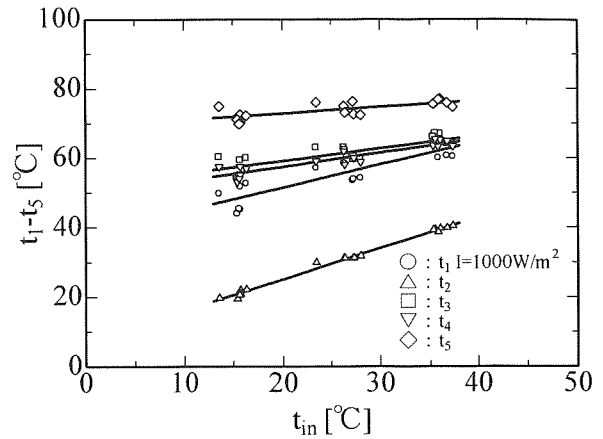
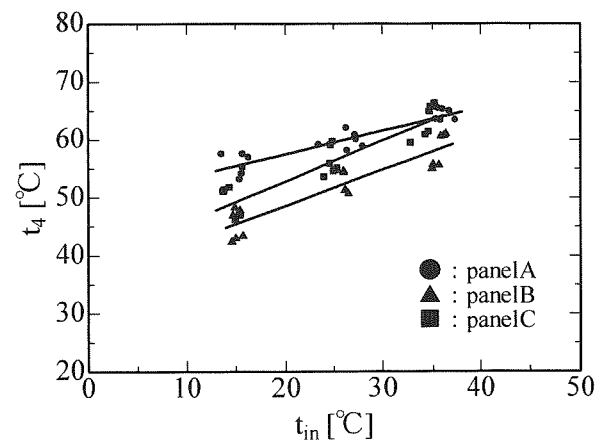
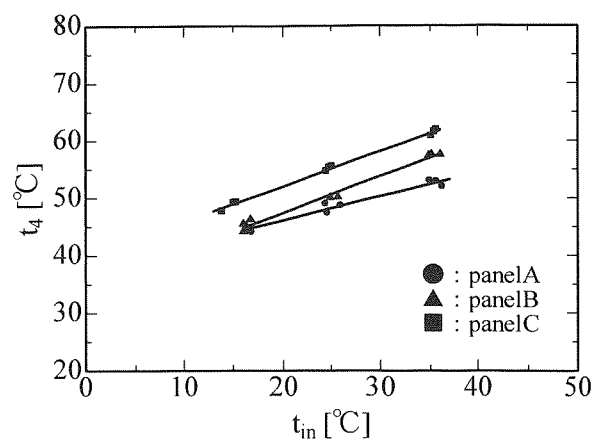


Fig.8 Air temperatures near back-side of heat collecting material (downwind( $t_1$ ) and upwind( $t_2$ )), temperatures on back-side of PV( $t_3$ ), near back-side of PV( $t_4$ ) and temperatures on terminal box( $t_5$ ) for panel A.



(a)  $W=0\text{m/s}$



(b)  $W=2\text{m/s}$

Fig.9 Relationship between inlet temperatures and  $t_4$

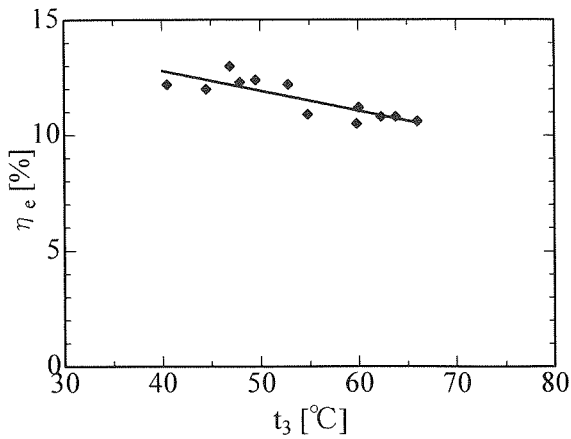


Fig.10 Relationship between PV cell temperatures and photovoltaic conversion efficiency

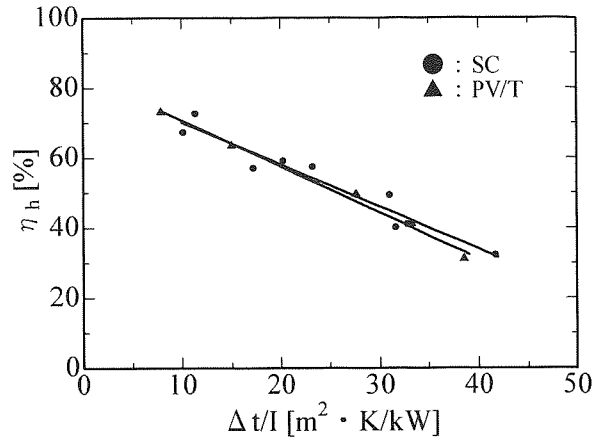


Fig.11 Relationship between  $\Delta t/I$  and the overall energy efficiency of solar air heater

数は、 $-0.83\%/^{\circ}\text{C}$ であった。

$$\eta_{sc} = -0.083 t_{sc} + 16.9, r^2 = 0.850 \quad \dots\dots(5)$$

**3-5 総合エネルギー効率とエクセルギー効率**

電気と熱は同じエネルギー単位で測られるが、質的に異なったエネルギーである。ハイブリッドパネルのエネルギー効率とエクセルギー効率は、次の式で算出される。

$$\eta_h = \beta \eta_e + \eta_t \quad \dots\dots(6)$$

$$\xi_h = \beta \eta_e + \eta_c \eta_t \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 $\eta_c = (t_m - t_a) / t_m$  はカルノー効率である。

図11に、集熱パネルとハイブリッドパネルAのエネルギー効率の比較を示す。図12には、エクセルギー効率の比較を示す。これより、最適な最適  $\Delta t/I$  が 24.8 と求まる。表2に最適な  $\Delta t/I$  において、ハイブリッドパネルA(設置面積 A)と集熱パネル(同 0.82A)と太陽電池単体パネル(同 0.18A)の並置方式のエネルギー効率とエクセルギー効率を示す。日射量 I を  $900[\text{W}/\text{m}^2]$  とし、 $t_a$  を  $15^{\circ}\text{C}$  とする。なお、太陽電池単体パネルでは PV セル温度(実測)を以下で求めた。

$$t_{sc} = t_a + 6.3 + 0.0417I, r^2 = 901 \quad \dots\dots(8)$$

このことから、一体方式のハイブリッドパネル A は集熱器単体と太陽電池単体の並置方式をエネルギー効率およびエクセルギー効率の両方で上回った。

**4. 結言**

本論文において、空気式太陽集熱パネルを熱電ハイブリッド化したプロトタイプハイブリッドパネルに関して、大型ソーラーシミュレータ下による室内実験による評価

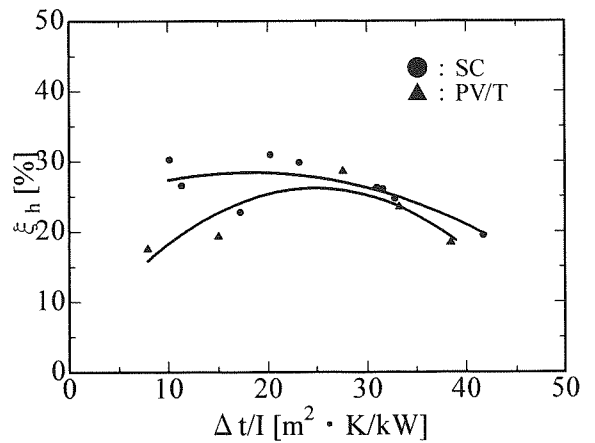


Fig.12 Comparison on overall exergy efficiency between solar air heater and hybrid solar collector

Table.2 Comparisons on energy efficiency and exergetic efficiency between PV/T panel A and isolated photovoltaic cells and solar air heater

		SC	PV	SC+PV	PV/T
Energy efficiency	Thermal	42.8	—	42.8	49.1
	Electrical	—	2.0	2.0	2.0
	Total	42.8	2.0	44.8	51.1
Exergetic efficiency	Thermal	22.7	—	22.7	24.3
	Electrical	—	2.0	2.0	2.0
	Total	22.7	2.0	24.7	26.3

を行った。エクセルギー効率も含む解析の結果から得られた知見を要約する。

(1) 出入口温度測定における温度ムラを低減することに

より、空気式太陽集熱パネルの精度良い評価が可能になった。

- (2) 本空気式太陽集熱パネルは、熱交換性能だけでなく圧力損失の見地からも相対優れた、いわゆる適正化がされていることが明らかにされた。
- (3) PV をカバーガラス上表面に配し、遮光率が 23% の空気式熱電ハイブリッドパネル A では、集熱パネルと比較して集熱効率の低下は相対僅かであった。
- (4) PV 面積比が 0.18 のハイブリッドパネル A は、エネルギー的にも集熱パネルと比較して若干劣るものの遜色はなく、エクセルギー的にも同様であった。
- (5) ハイブリッドパネル A は、総設置面積が同じ集熱パネルと太陽電池の並置方式と比較して、エネルギー的にもエクセルギー的にも上回った。

**記号説明**

I:	照射量	[W/m <sup>2</sup> ]
r:	相関係数	[-]
t <sub>m</sub> :	集熱温度 (= (t <sub>in</sub> +t <sub>out</sub> )/2)	[°C]
t <sub>sc</sub> :	PV セル温度	[°C]
V:	通気流量	[m <sup>3</sup> /h]
W:	風速	[m/s]
Δt:	(t <sub>in</sub> +t <sub>out</sub> )/2-t <sub>a</sub>	[°C]
Δt <sub>1</sub> :	t <sub>in</sub> -t <sub>a</sub>	[°C]
Δt/I:	集熱効率変数	[m <sup>2</sup> K/kW]
β:	PV 面積比 (=PV 部面積/集熱面積)	[-]
η <sub>c</sub> :	カルノー効率	[%]
η <sub>e</sub> :	光電変換効率	[%]
η <sub>t</sub> :	集熱効率	[%]
η <sub>h</sub> :	総合エネルギー効率	[%]
η <sub>th</sub> :	ハイブリッドパネルの集熱効率	[%]
η <sub>th</sub> ':	集熱面積から PV 部を除いて算出されたハイブリッドパネルの集熱効率	[%]
ξ <sub>h</sub> :	エクセルギー効率	[%]
φ:	負荷率	[-]
ζ:	遮光率	[-]

**添え字**

in:	入口
out:	出口
a:	周囲空気
h:	ハイブリッド

**謝辞** 本研究は、一部、北見工業大学と㈱オーエム研究所 (平成 15 から平成 16 年度)、矢崎総業㈱ (平成 17 から平成 18 年度) との産学連携の共同研究として実施された。

**本報に関連した既発表文献**

- ・ 三木康臣他 4 名、空気集熱式太陽集熱パネルの熱電ハイブリッド化に関する研究、太陽/風力エネルギー講演論文集、(2005)、181.

- ・ 三木康臣他 4 名、空気集熱式熱電ハイブリッドソーラーパネルの開発、北海道エネルギー資源環境研究発表会、(2006)、47.

**参考文献**

- (1) 小野司他 2 名、住宅用太陽光・熱複合ソーラーシステム、火力原子力発電、第 26 巻、第 528 号、(2000)、27.
- (2) たとえば、向江他 3 名、寒冷地における外気導入式ソーラーハウスに関する研究、太陽/風力エネルギー講演論文集、(1998)、559.
- (3) 駒野清治他 1 名、外気導入式ソーラーシステムの集熱部に関する研究 寒冷地と温暖地における集熱実験と考察、太陽/風力エネルギー講演論文集、(1996)、149.
- (4) 大石正広他 1 名、空気式太陽集熱器の統一的集熱試験方法の開発 (その 1、2、3)、太陽/風力エネルギー講演論文集、(1994)、125.
- (5) OM ソーラー協会内部資料、(1997).
- (6) 橋本耕吉他 1 名、通気層方式による空気式太陽集熱器の研究 カーボンフェルト通気層について、日本大学工学部紀要、第 30 巻、(1989)、37.
- (7) 伊藤定祐他 1 名、集熱板に多数のスリットまたは孔を有する空気式太陽集熱器の性能、太陽エネルギー、第 9 号、(1983)、60.
- (8) 希猛他 2 名、ソーラーシミュレータによる炭素繊維シート空気式集熱器の性能測定、太陽エネルギー、第 24 巻、第 6 号、(1998)、63.
- (9) 斉藤義和、多孔質物体を用いた空気式太陽熱集熱器の性能について、日本太陽エネルギー学会講演論文集、(1978)、121.
- (10) K. Kanayama et al., Anaysis and Experiment of the Performance of a Flat-Plate Solar Collector Considering the Wavelength Dependence, Solar & Technoogy, 6-1, (1989), 51.
- (11) 佐久間和彦他 2 名、エクセルギー理論に基づく太陽光熱ハイブリッドパネルの年間特性、電学論 B、第 113 巻、第 7 号(1993)、736.
- (12) 岩脇秀喜他 2 名、太陽光熱ハイブリッドコレクタのエクセルギー評価、太陽エネルギー、第 24 巻、(1998)、37.
- (13) 宿谷昌則編著、エクセルギーと環境の理論、北斗出版 (2004) .