

空気層厚さ可変式熱-光発電ハイブリッドパネルに関する研究 第1報-試作パネルの集熱・発電特性

Study on a System of Thermal-PV Hybrid Panel with Variable Air Layer Thickness Part 1 : Collecting and Generating Characteristics of Trial Manufactured Panel

神谷 是行 *

Yoshiyuki KAMIYA

Abstract

Temperature rise of PV elements caused by solar collecting and heat surplus in summer cause problems in utilization of thermal- PV hybrid system in residences. In order to increase the solar heat collected from the back of PV panel and to prevent the temperature rise of PV elements, installation of air space between the PV elements and the cover glass and attachment of cooling fin at the back of panel were proposed in this paper. The thermal-PV hybrid panel with variable air layer thickness was manufactured by way of experiment. Experiments of generation and heat collection were conducted in the conditions of summer and winter seasons. Fairly good agreements were obtained between calculated and experimental results, and then effectiveness of the thermal-PV hybrid panel with variable air layer thickness was shown.

キーワード：ハイブリッド PV パネル，空気集熱，集熱効率，空気層，フィン

Keyword: PV-thermal Hybrid Panel, Air Solar Collecting, Collector Efficiency, Air Layer, Fin

1. はじめに

科学技術の発達により，先進諸国は人類永年の夢であった生活水準を飛躍的に向上させた。しかし，これはエネルギー大量消費という最も安易な方法によって実現したもので，我々の生活はエネルギーの消費なくしては考えられない状況にある。このような極度なエネルギー依存性が化石燃料の大量消費をもたらし，エネルギー資源の枯渇と地球温暖化の問題を引き起こしていることは言うまでもない。

ことに地球温暖化問題は深刻で，一般人にとっても最近の異常気象は将来への不安を駆り立てる要因となり，世界的規模での対応が求められている。1997 年 12 月の地球温暖化枠組に関する国際会議(COP3)において，わが国は 2010 年のCO₂排出量を 1990 年のそれより 6%削減することを義務付けられた。しかしその後の排出量は着実に増加し，もはや実現不可能との声も聞かれる。

最近の原油高の影響により省エネルギーへの関心・自然エネルギー利用の意識が高まりつつあり，化石燃料に変わる新たなエネルギー源¹⁾の開発に大きな期待がかけられている。しかし当分の間は，現在の技術の高効率化と太陽エネルギーを代表とする未利用エネルギーの有効利用による化石燃料消費量の削減ならびに我々のライフスタイルの見直しによるエネルギー消費量自体の削減が必要となろう。

本研究では，住宅における太陽エネルギーの利用拡大を

* 関東学院大学工学部教授 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

e-mail:kamiya@kanto-gakuin.ac.jp

(原稿受付：2008年10月16日)

目的に，太陽エネルギー利用率を高めるためのハイブリッド化の方法を追求する。そこで本報では，新たなシステムとして空気層厚さ可変式熱-光発電ハイブリッドパネルを提案・試作し，実験ならびに解析を行ってその特性を調べ，本ハイブリッドパネルの有効性を検討する。

記号

c : 比熱	[J/(kg · K)]
C_b : 黒体放射係数	[W/(m ² · K ⁴)]
E : 面積あたりの発電電力	[W/m ²]
f_b : パネル表面積当たりの裏面積	[-]
G : パネル表面積当たりの風量	[kg/(m ² · s)]
I : 日射強度	[W/m ²]
K : 熱通過率	[W/(m ² · K)]
l : 厚さ	[m]
Nu : ヌセルト数	[-]
q : パネル表面熱流束	[W/m ²]
Ra : レーレー数	[-]
T : 温度	[°C]
v : 風速	[m/s]
α : 表面熱伝達率	[W/(m ² · K)]
ε : 放射率	[-]
η : 効率	[%]
$\Delta \eta_{\text{pdrop}}$: PVパネルの発電効率に対する	
HB パネルの発電効率の低下率	[%]
λ : 熱伝導率	[W/(m · K)]

- θ : 傾斜角 [rad]
 τ : 透過率 [-]
 添え字
 a : 空気
 AL : 空気層
 B : ボイラ
 b : PV 素子板裏面
 c : 対流成分
 dd : パネル裏側部材
 E : 発電所
 e : PV 素子
 em : PV 素子平均
 g : 透明カバー
 p : 流路
 pv : PV 発電
 r : 放射成分
 s : 天空
 th : 集熱
 0 : 周囲
 1 : パネル表面
 2 : パネル裏面

2. 空気層厚さ可変式ハイブリッドパネル

2.1 集熱と光発電の比較

太陽エネルギーの利用は集熱による熱利用と光発電による電気利用に大別される。電気は最も質の高いエネルギーであり、年間を通じて需要が期待できることから、PVシステムは有効なエネルギー変換装置である。PVシステムとソーラーシステムを一次エネルギーベースで比較すると、両者が等しくなる変換効率 η_{pv} と集熱効率 η_{th} の関係²⁾は式(1)で示され、図-1 の関係にある。

$$\eta_{pv} = \frac{\eta_E}{\eta_B} \eta_{th} \quad (1)$$

ただし、 η_E は発電所発電効率、 η_B はボイラ効率である。最近のPVセルの η_{pv} は 10% を超え、さらに高効率化の傾向にある。通常、ソーラーシステムの η_{th} は 50% 程度を期待できるが、一次エネルギー換算でこれに等価な η_{pv} は式(1)より約 23% となる。このことは、現在の η_{pv} が 2 倍以上にならない限り一次エネルギー換算では依然ソーラーシステムが優位であることを示している。

しかしこれを住宅用で考えると、熱需要は冬期には多いものの、夏季には冬季の 20% 以下に減少³⁾する。太陽エネルギーの利用拡大を目的としたソーラーシステムの大面積化は、中間・夏季の熱余り現象を引き起こし、その期間の利用率の低下を考慮すると、現時点においてもPVシステムの可能性が見えてくる。

PV システムは発電効率が低いため、太陽エネルギー利用率は低くなる。これをカバーするために発電と集熱を同

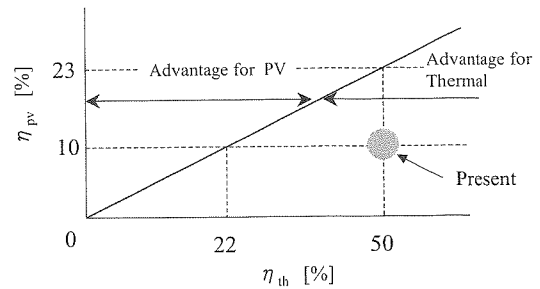


Fig. 1 η_{pv} vs η_{th} (Primary Energy Bases)

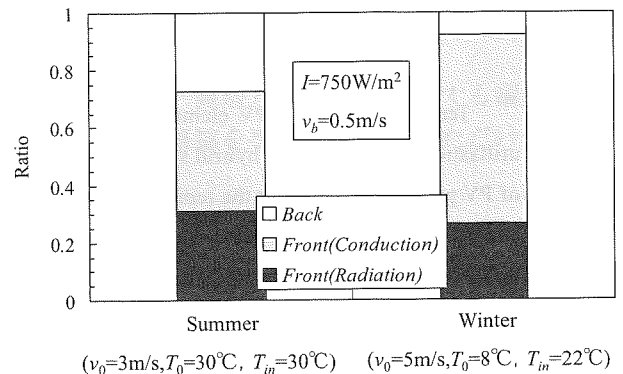


Fig. 2 Components of Heat transfer on PV Panel

時に行う熱・光発電ハイブリッドパネルが注目を集め、特に設置面積が制限されている場合には有効な方法と考えられる。

2.2 従来型ハイブリッドPVパネルの熱移動成分割合

従来型空気式ハイブリッドPVパネル³⁾では、発電の他にパネル裏面に流路を設け、これに通風することにより集熱を行い、暖房用として利用する。夏季は熱余りであることから、パネルを冷却するために流路に周囲空気を通すことを想定している。ここでは周囲風速を夏季は 3m/s、冬季は 5m/s として、共にパネル裏面の通風速度を 0.5m/s とし、さらに冬季は暖房利用を想定してパネル入り口温度を 22°C に設定して、後述の計算方法により各パネルの熱移動成分割合を計算した。その結果を図-2 に示す。

図-2 より、夏季条件の場合、裏面熱移動成分、表面放射成分及び表面对流成分はほぼ同等であるが、冬季では周囲温度が 8°C と低くかつ周囲風速を高めに設定したため、表面对流成分が激増し裏面熱移動成分が激減する。また素子温度も低下し、表面放射成分は夏季に比べてやや減少している。

以上のことから、集熱にとって不利な冬季に集熱量すなわちパネル裏面移動熱量を大きくするためには、表面熱移動成分を抑制する必要がある。

2.3 空気層厚さ可変式ハイブリッドパネルの提案

前述のように、ハイブリッドPVパネルの季節別放・集熱特性を改善するためには、夏季は熱損失を増大させ、冬季はこれを抑制して集熱量を増大させるという相反する機能を持たせる必要がある。図-3 に空気層厚さ可変式ハイブ

リッド PV パネル（以下 HB パネルと称す）概要を示す。PV 素子板裏面にフィンを取り付け、透明カバーと PV 素子板の間に空気層を設ける構造とし、パネルケース内でフィン付 PV 素子板を上下動させることで空気層厚さを変え、表面への熱流量を変化させる。これにより、冬季は空気層により表面への熱移動量を抑制し、裏面からの集熱量を増加させることができる。また、中間・夏季は空気層厚さを最小にすることによる表面熱流量の増加と裏面通風により、冷却効果を高めることが可能となる。

市販多結晶 PV パネル（巾：495mm，長さ：1097mm，最大出力：68W）のアルミフレームを取り除き，その PV 素子板裏面部分（巾：460mm，長さ 1038mm）に巾 20mm，高さ 30mm，厚さ 1mm のアルミアングルをシリコン接着剤により貼り付けてフィン付き PV 素子板を作成した。このフィン付き PV 素子板を厚さ 10mm の発泡スチロールを敷いた深さ 40mm，内法 471mm×1073mm の木製の枠にはめ込み，PV 素子板のフィンのない部分と木製枠とがオーバーラップするように配置した。さらに，透明カバーとして厚さ 5mm のアクリル板をはめ込んだアルミフレームを木製枠に固定し，両者をシールした。このとき，PV 素子板表面と透明カバーの間に厚さ 18mm の空気層を設けた。

PV 素子板と透明カバーが常に平行状態を維持して移動できるように，アルミフレームに移動用のガイドを設けると同時に，木製枠内底面 4 箇所に小型の昇降装置を取り付けてこれらを同時に駆動できる構造とした。なお，昇降装置は空気の流れを阻害しないよう小型のものを製作した。

前述のように PV 素子板のフィンのない部分と木製枠とがオーバーラップするように配置したため，冬季（PV 素子板位置が最も低い場合）には空気層に影響を与えないで裏面の通風が可能となる。また，中間・夏季（PV 素子板位置が最も高い場合）には PV 素子板を透明カバーに接触させることで熱通過率を高く維持できると同時に，PV 素子板裏面流路高さを高くできるため，通気抵抗を小さくすることができる。

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

図-4 に実験装置概要を示す。PV パネルと HB パネルを並べ，その間に日射計と風向・風速計を配置し，傾斜角を 35° で南面させた。HB パネルの入り口と出口部に整流箱と混合箱を設け，それぞれに内径 56mm のダクトを接続して，混合箱の出口側にファンを取り付け，パネル内への通風を行った。整流箱および混合箱内部には保温のために厚さ 5mm の発泡スチロール板を貼り，遮熱のために表面にアルミ箔を貼り付けた。整流箱については，流れと直角方向の流速分布がほぼ一樣であることを確認している。また，混合箱には内部にスタティックミキサーを取り付けた。

PV パネルにはパネル裏面 5 点に，HB パネルには PV 素子板裏面 5 点とフィン先端 1 点およびパネル裏面 3 点に

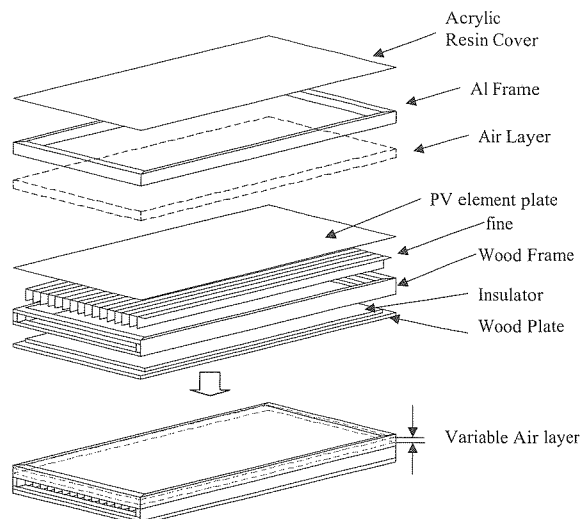


Fig. 3 Thermal-PV Hybrid Panel with Variable Air Layer

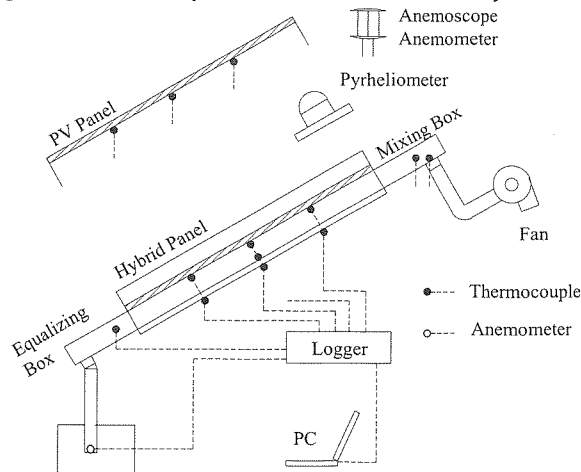


Fig. 4 Experimental Apparatus

0.2mm の T 型熱電対を取り付けた。さらに，同様の熱電対を通風入り口および混合箱出口部に各 3 点設置し，空気温度の測定に供した。また，HB パネルの通風量を測定するために，整流箱上流のダクト入り口部分に熱線風速計を設置した。

3.2 実験方法

各部の温度，日射強度および風向・風速の測定は 1 分間隔で 20 分間行った。その後 HB パネルに I-V 特性測定回路を接続し，回路中の付加抵抗を手動で変化させ，電流値を変化させた。電圧と電流の測定は 0.1 秒間隔で行い，さらに PV パネルについて同様の測定を行った。これらすべてのデータはコンピュータに記録した。なお，I-V 特性測定時以外は両パネルの回路を開放状態にして実験を行った。

4. 実験結果

4.1 パネル温度分布

冬季条件での PV パネルと HB パネルの温度分布を図-5 に示す。風速が小さいため，PV パネルの温度分布への風の影響は比較的小さい。HB パネルは通風方向に温度分布を有し，横方向の分布は小さいことから流れがほぼ均一に

分散されていることがわかる。また、フィン先端温度は根元温度よりやや低いが、フィン効率は十分 1 に近いと考えられる。

HB パネルの平均温度が PV パネルのそれより約 20℃高い。これは、透明カバーの表面の反射により PV 素子板への入射量は減少するが、通風量が少ないことと空気層の存在により表面への熱損失量が低く抑えられているためである。HB パネルでは、パネル流入空気温度 14.1℃に対して出口温度は 50.7℃と高い温度上昇が得られていることから、暖房への利用が期待できる。

4.2 I-V 特性

冬季条件での両パネルの I-V 特性の一例を図-6 に示す。HB パネルは PV パネルに比べて短絡電流、開放電圧共に約 7%低下しており、発電電力の最大値は約 16%低下している。発電電力の低下には透明カバーの表面反射のみならず、PV 素子板平均温度は HB パネルが 54.2℃、PV パネルは 37.5℃であることから、素子温度の上昇も影響している。

夏季条件で素子温度が近い場合の、両パネルの I-V 特性の一例を図-7 に示す。HB パネルの短絡電流の低下は冬季条件と同様であるが、開放電圧はほぼ等しい値を示している。また、発電電力についても HB パネルの方が PV パネルより低くその低下は約 7%で、冬季条件の場合より小さい。短絡電流の低下は透明カバーによる入射量の減少によるものであり、開放電圧の低下は素子温度の上昇が影響している。

4.3 集熱効率

図-8 に集熱効率 η_{th} と集熱特性 $\Delta T/I$ の関係を示す。なお ΔT は PV 素子板平均温度と周囲温度の差とした。本 HB パネルでの集熱は冬季を対象としているが、その性能を評価するために、夏季条件での結果も併記した。本 HB パネルは日射に対する時定数が比較的大きいため、極力安定した日射条件でのデータのみを示した。なお、実線については後述する。

夏季条件と冬季条件を比較すると、 $\Delta T/I$ 、 η_{th} ともに夏季条件の方が小さい。実験での日射強度はほぼ同程度であることから、外気温と素子板平均温度の差である ΔT は冬季のほうが約 1.5 倍大きいにもかかわらず、 η_{th} は冬季の方が大きい。これらは本システムの特徴で、冬季の PV 素子板と透明カバーとの間の空気層によって、パネル上面への熱損失を制限できた結果である。

4.4 発電効率

図-9 に両パネルの冬期・夏季における η_{pv} と PV 素子板平均温度 T_{em} の関係を示す。両パネルとも T_{em} の上昇に伴い η_{pv} は低下している。多結晶系 PV 素子の発電効率は約 0.05%/K の割合で低下することが報告されていることから、両パネルについて傾き -0.05%/K の回帰線を引いた。本実験結果もほぼ同様の温度依存性を有すると考えられる。同じ T_{em} では、

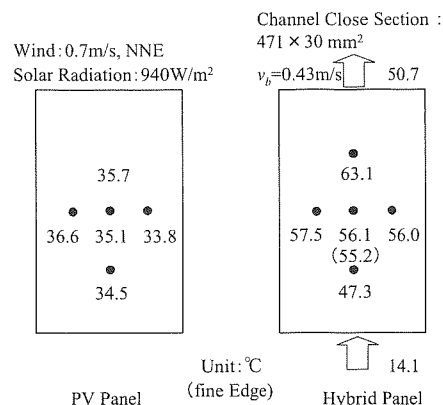


Fig. 5 Temperature Distribution

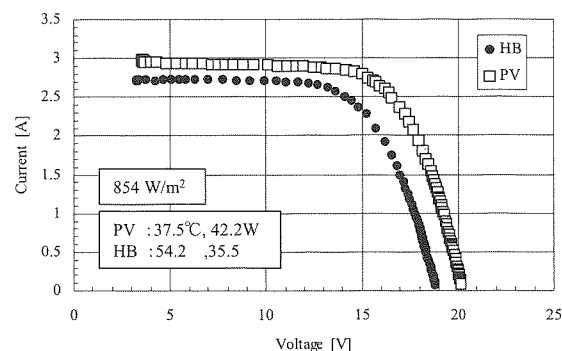


Fig. 6 I-V Characteristics (Winter Conditions)

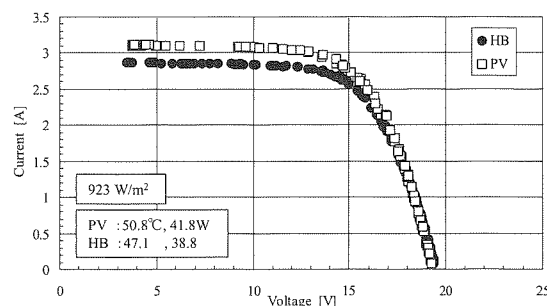


Fig. 7 I-V Characteristics (Summer Conditions)

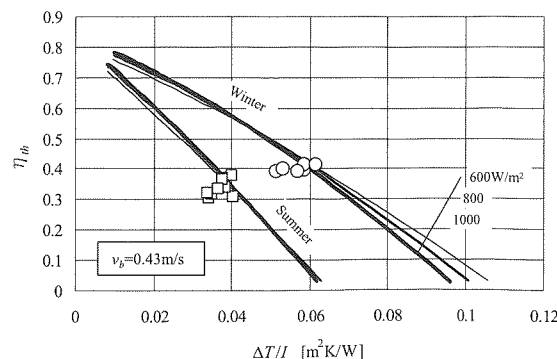


Fig. 8 Collector Efficiency

HB パネルの η_{pv} が PV パネルのそれより低い値を示しており、これは図-7 の結果とほぼ一致し、透明カバーの表面反射が原因と考えられる。今後この表面反射を少なくするための方策が必要になる。

5. 考察

5.1 冬季の一次エネルギー換算比較

発電および集熱の一次エネルギー換算量と日射量の比を換算一次エネルギー利用率として式(2)で定義し、これと各パネルの生産エネルギーの関係を調べた。

$$\text{換算一次エネルギー利用率} = \frac{\eta_{pv}}{\eta_E} + \frac{\eta_{th}}{\eta_B} \quad (2)$$

図-8に対する結果を図-10に示す。なおここでは、 η_E は38%、 η_B は80%とした。換算一次エネルギー利用率は、PVパネルが0.25程度であるのに対して、HBパネルは約3倍弱の0.7程度を示している。また、ハイブリッド化により発電電力が低下するため、HBパネルの換算一次エネルギー利用率はPVパネルのそれよりやや低いが、冬季はHBパネルの発電効率の低さを集熱で補うことが可能であり、十分な熱負荷が存在する場合には、本システムは非常に有効なエネルギー回収装置と考えられる。

5.2 熱バランス

図-11に本HBパネルの熱バランスを示す。パネルの熱収支及び各熱移動成分は式(3)～式(12)で示されるものとする。自然風および通風による表面熱伝達率は式(13)⁴⁾を用いた。また、空気層厚さに対する熱通過率は、密閉空間対向2平面間の対流熱伝達率に関する実験式⁵⁾である式(14)、(15)より計算した。

$$q_i = I\tau \quad (3)$$

$$E = q_i \eta_{pv} \quad (4)$$

$$q_r = \varepsilon C_b (T_e^4 - T_s^4) \quad (5)$$

$$q_{cl} = K_1 (T_e - T_0) \quad (6)$$

$$q_b = \alpha_p f_b (T_e - T_a) \quad (7)$$

$$q_{c2} = K_2 (T_a - T_0) \quad (8)$$

$$c_a G_a \frac{dT_a}{dt} = q_b - q_{c2} \quad (9)$$

$$q_i \tau = q_r + q_{cl} + q_b + E \quad (10)$$

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_g}{\lambda_g} + \frac{1}{\alpha_{AL}}} \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{l_{dd}}{\lambda_{dd}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (12)$$

$$\alpha = 5.6 + 4.0v \quad (13)$$

$$1708 < R_a < 5900 : Nu = 1 + 1.446(1 - \frac{1708}{R_a \cos \theta}) \quad (14)$$

$$R_a > 5900 : Nu = 0.157(R_a \cos \theta)^{0.285} \quad (15)$$

中間・夏季はPVパネルを透明カバーに密着させるが、その熱抵抗として0.25mmの空気層厚さを想定した。また、 ε は0.95とした。

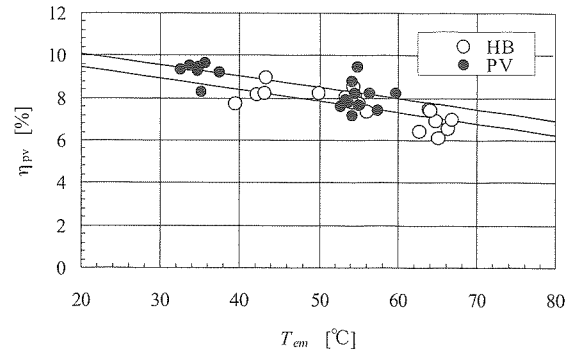


Fig. 9 Temperature Dependency of Generation Efficiency

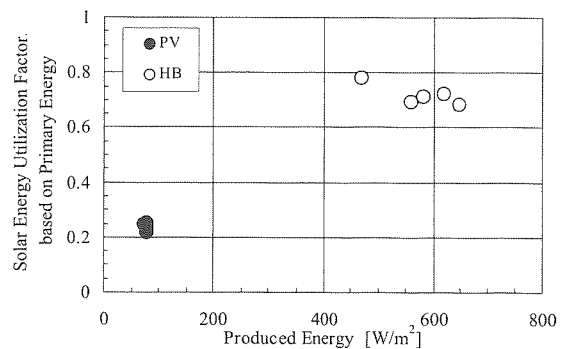


Fig. 10 Solar Energy Utilization Factor

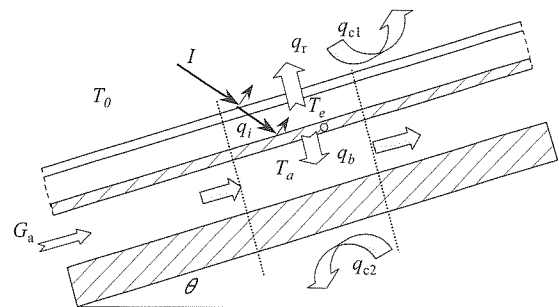


Fig. 11 Energy Balance of Panel

計算では、パネルの流路方向を10分割して各要素で式(10)の熱バランスが成立するものとし、要素流出空気温度を次の要素の流入空気温度とした。また、 T_{em} は各要素の T_e の平均温度とした。

実験条件に合わせるために、 $E=0$ とした場合の計算結果を前述のように図-8に併記した。パラメータに日射強度をとり、風量を変化させて $\Delta T/I$ を変化させた。

$\Delta T/I$ の増加に対して η_{th} は低下するが、その低下率は徐々に大きくなる。日射強度の大きさによって特性はやや変化するが、計算値は冬季、夏季の実験値をよく表している。 $\Delta T/I$ が小さいときは、冬季と夏季の集熱効率の差は小さいが、 $\Delta T/I$ が大きくなると夏季条件の集熱効率が0となる場合でも冬季条件では30%程度を示し、冬季においてもある程度の集熱が可能となる。

通常のシミュレーションでは、集熱効率を $\Delta T/I$ の簡単な関数として表し、集熱量等の予測に用いるが、冬季の $\Delta T/I$ が大きい領域では、差異を生じることがあると考えられる。

5.3 通風速度のPV素子板温度への影響

本実験ではHBパネルの集熱量を測定するためにパネル前後に整流箱ならびに混合箱を設け、ファンによって通風を行った。しかし夏季条件では、自然通風による冷却を想定している。そこで、通風速度をパラメータとしてPV素子板温度の計算を行った。

図-12に通風速度ごとのPV素子板平均温度と外気温度との差 $T_{em}-T_a$ と I の関係を示す。同図には、屋根一体型を想定した通風なしの場合の計算結果も併記した。 I の増加によって $T_{em}-T_a$ は増加し、通風速度の増加によって $T_{em}-T_a$ は低下する。通風なしと比べると通風することの効果は大きい。通風速度の増加に対してはその効果は小さくなる傾向にある。本実験の通風速度は0.43m/sであり、実験値と計算値はほぼ一致している。通風速度0.5m/sのとき、通風なしと比較して、 $T_{em}-T_a$ は10℃程度低くなることから、通風により発電効率の改善が期待できる。

5.4 PVパネルとHBパネルの夏季発電効率の比較

前述のように、本HBパネルは屋根一体型を想定しており、同じ条件でPVパネルとHBパネルの性能を比較するためにPVパネルも通風可能とし、PV素子板裏面風速 v_b を変化させて、両パネルの発電効率のシミュレーションを行った。両者の違いは、PVパネルのPV素子板裏面は平面であるが、HBパネルのそれにはフィンが付けられていることと、表面に透明カバーが設けられている点である。

PVパネルを基準としたHBパネルの発電効率の低下率 $\Delta\eta_{pvdrop}$ と v_b の関係を図-13に示す。パラメータは日射強度である。透明カバーの追加によるPV素子への入射エネルギーの減少とフィンを取り付けたことによる放熱量の増加により、HBパネルのPV素子板温度はPVパネルのそれより低くなるため、 v_b の増加により $\Delta\eta_{pvdrop}$ は低下する。また、HBパネルの放熱能力が大きいので、 I が大きい方がPV素子板温度は上昇しにくく、 $\Delta\eta_{pvdrop}$ は小さくなると考えられる。同図より、 $I=800\text{W/m}^2$ で v_b が1m/sのとき、3%程度の発電効率の低下に抑えることが可能であり、 v_b が1m/sまでは変化が大きく、それ以上では小さい傾向にある。

冷却に自然通風を利用する場合、 v_b をあまり大きくできないことから、冷却システムの設計が冷却効果に大きく影響すると考えられる。ここではPVパネルも通風ありの条件で計算を行ったが、図-12より屋根一体型ではPVパネルの素子温度はさらに上昇することから、 $\Delta\eta_{pvdrop}$ はさらに小さくなると考えられる。今後、透明カバー表面の反射防止膜の採用やHBパネルの夏季の効果的な通風方法の開発により、さらに夏季の発電効率の向上が期待できる。

6. 結論

住宅における太陽エネルギーの利用拡大を目的に、新たなシステムとして空気層厚さ可変式熱-光発電ハイブリッド

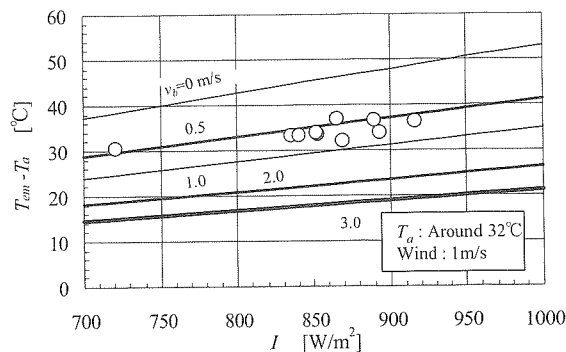


Fig. 12 Variation of $T_{em}-T_a$ with I

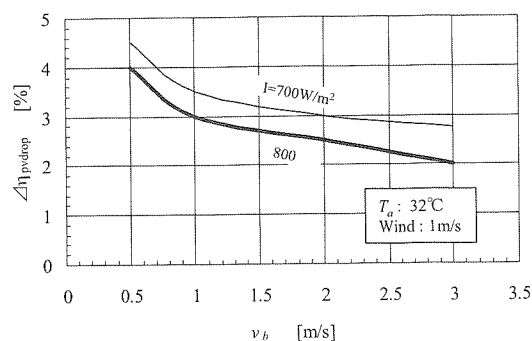


Fig. 13 Variation of $\Delta\eta_{pvdrop}$ with v_b

ドパネルを提案・試作し、実験ならびに解析を行って、その特性を調べた。本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 実用領域での冬季条件の集熱効率を夏季条件のそれより大幅に改善できる。
- (2) 本ハイブリッドパネルの発電効率は、同じ素子温度でのPVパネルのそれより約7%低下する
- (3) 本ハイブリッドパネルの冬季の太陽エネルギー利用率は一次エネルギー換算で90%程度になる。
- (4) PVパネルと本ハイブリッドパネルを同じ条件で使用した場合、通風により夏季・中間季におけるハイブリッドパネルの発電効率の低下を3%程度に抑えられる可能性を示した。

参考文献

- 1) 芽陽一：新エネルギー大事典，工業調査会，2002
- 2) 神谷，住宅における未利用エネルギーの利用拡大，太陽/風力講演論文集2003（足利市），pp.33-38
- 3) 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会：新太陽エネルギー利用ハンドブック，太陽エネルギー学会，p.726(2000)
- 4) 空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧第12版，3，P.37(1995)
- 5) Buchberg, H., Catton, H., et al, J. Heat Transfer, Trans. of ASME, 98,182(1976),