

# 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2報 — 自然通風による発電効率の向上

Study on a System of Thermal-PV Hybrid Panel with Variable Air Layer Thickness  
Part 2 : Improvement of Generation Efficiency by Natural Ventilation Coupled with  
Micro Prismatic Array Sheet

神谷是行<sup>\*2</sup>

Yoshiyuki KAMIYA

## Abstract

Thermal-PV hybrid panel, which collects heat and generates electricity simultaneously, is expected to increase use of solar energy. Cover glass attached over the PV-module intended to increase collector efficiency more raises temperature of the PV-element and causes decline of generation efficiency. Thermal-PV hybrid panel collects heat by sacrificing generation efficiency, so that solar energy utilization factor will not increase insofar as not existing sufficient heat load. The thermal-PV hybrid panel with the ventilating duct was manufactured by way of experiments to control the decline of generation efficiency in summer season. And also the closed PV panel as comparison basis was manufactured too. Temperature measurements of each PV-elements were conducted. Then simulation of heat transfer and pressure drop across the thermal-PV hybrid panel and the ventilating duct was conducted. Fairly good agreements were obtained between experiments and calculated results, and then factors influencing natural ventilation were examined by simulation.

キーワード：ハイブリッド PV パネル、発電効率、自然通風、通風ダクト、シミュレーション

Keyword: PV-thermal Hybrid Panel, Generation Efficiency, Natural Ventilation, Ventilating Duct, Simulation

## 1. はじめに

自然エネルギーの代表である太陽エネルギーの利用は、これまでに幾度も注目を集めてきたが、その都度経済情勢の転換によって、本格的な利用拡大には至っていない。しかし、地球環境問題および化石燃料枯渇問題の解決が最優先課題となった今日においては、本格的な普及が期待でき、今こそこれを実現させなくてはならない。

太陽エネルギーのアクティブ利用は、主として熱利用と発電利用に大別される。発電に関しては、電力は年間を通して需要があるものの、太陽電池の発電効率は 10%程度にとどまる。熱に関しては、通常のソーラーシステムでは比較的高い集熱効率が期待できるが、給湯及び暖房用が主で、冬季は需要があるものの夏季中間季は熱余りを起こす。熱-光発電ハイブリッドシステム<sup>1)</sup>は発電効率を犠牲にして集熱を行うことから、十分な熱需要が存在しない限り、ハイブリッド化のメリットは薄れることが問題とされてきた。しかし、限られた設置面積での太陽エネルギー利用率を高めるためには、ハイブリッド化は一つの方法であり、設置面積を小さくできる分、機器および設置に関するイニシャ

ルコスト低減の可能性を有し、負荷に対応した運転を行うことが可能なシステムでは、そのメリットを引き出すことも可能と考えられる。

そこで前報<sup>2)</sup>においては、冬季の集熱効率を向上させることと、夏季の発電効率の低下を抑える目的で、太陽電池モジュールの上に透明カバーを設け、その間の空気層厚さを可変とする空気層厚さ可変式熱-光発電ハイブリッドパネル（以降HBパネル）を提案して試作し、実験ならびに解析を行ってその特性を調べた。本パネルにおいては、透明カバーの表面反射により PV 素子への入射量が減少し、これにより発電量が低下する。しかし、PV 素子板裏面を通風によって冷却することにより、わずかながら発電効率の低下を抑えられることを示した。

本研究では、夏季・中間季における HB パネルの自然通風による冷却性能を調べるために、HB パネルに通風ダクトを取り付け、密閉型 PV パネルとの発電性能を比較する実験を行った。さらに、パネルおよび通風ダクト内部の流れと熱移動に関するシミュレーションを行い、実験結果と比較するとともに、通風方法の検討を行った。

## 記号

$c$  : 比熱

[J/(kg · K)]

$C_b$  : 黒体放射係数

[W/(m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>)]

\*<sup>1</sup> 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: 2009 年 5 月 25 日)

$D$	: ダクト内径	[m]
$d$	: 相当直径	[m]
$f_b$	: PV素子板表面積当たりの裏面積	[-]
$G$	: パネル単位幅当たりの風量	[kg/(m · s)]
$g$	: 重力加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	: ダクト高さ	[m]
$I$	: 日射強度	[W/m <sup>2</sup> ]
$K$	: 熱通過率	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$l$	: 厚さあるいは長さ	[m]
$\Delta P$	: 圧力損失	[Pa]
$q$	: 表面熱流束	[W/m <sup>2</sup> ]
$T$	: 温度	[K]
$v$	: 風速	[m/s]
$x$	: 長手方向距離	[m]
$\alpha$	: 热伝達率	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$\varepsilon$	: 放射率	[-]
$\zeta$	: 局部損失係数	[-]
$\lambda$	: 热伝導率	[W/(m · K)]
$\lambda_f$	: 摩擦係数	[-]
$\tau$	: 透過率	[-]
$\Delta \rho$	: 密度差	[kg/m <sup>3</sup> ]

## 添え字

$a$	: 空気
$al$	: 空気層
$B$	: ベンド
$b$	: PV 素子板裏面
$d$	: ダクト
$c$	: 対流成分
$ch$	: パネル流路
$dd$	: パネル裏側部材
$e$	: PV 素子
$em$	: PV 素子平均
$ex$	: 拡大
$in$	: 入り口
$out$	: 出口
$PVg$	: PV 素子板強化ガラス
$r$	: 放射成分
$re$	: 縮小
$s$	: 天空
$tc$	: 透明カバー
$o$	: 周囲
$1$	: パネル表面
$2$	: パネル裏面

## 2. 実験装置および方法

## 2.1 実験装置

## 1) 供試 HB パネル

図-1に供試 HB パネル概要を示す。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、強化ガラス、PV 素子およびバック

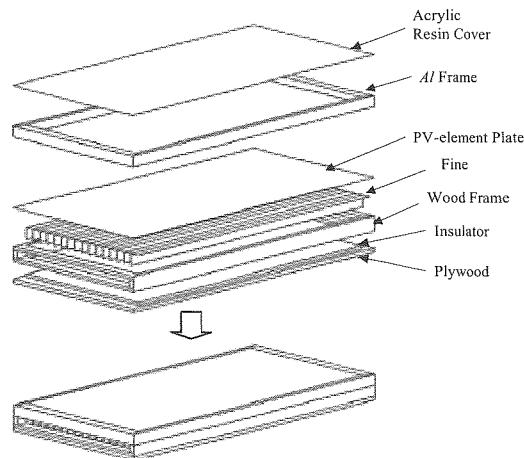


Fig. 1 Thermal-PV Hybrid Panel

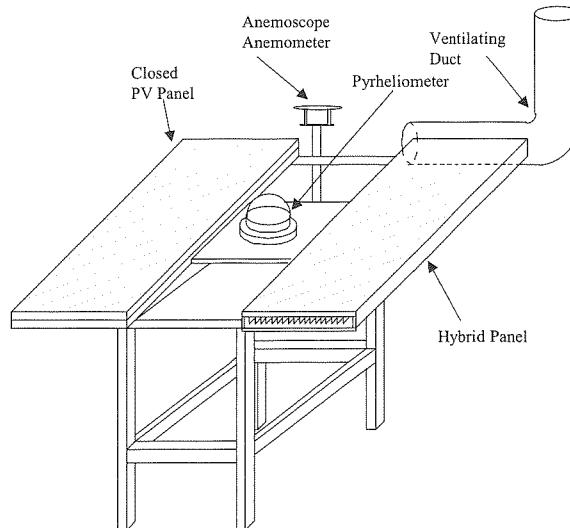


Fig. 2 Experimental apparatus

シートで構成される PV 素子板の裏面(巾 : 460mm, 長さ 1038mm の部分)に巾 19mm, 高さ 30mm, 厚さ 1mm のアルミアングルを貼り付けてフィン付 PV 素子板を形成している。このフィン付 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 の木製枠にはめ込み、さらに、透明カバー(厚さ 5mm のアクリル板)を取り付けたアルミフレームでこの木製枠をカバーし、両者をシールしている。本研究では夏季・中間季の PV 素子の冷却を目的としているので、フィン付 PV 素子板位置を最も高い位置にして透明カバーと接するようにしているため、素子板裏面の流路高さは 48mm である。また、流路の出入り口部分の高さは 20mm でその幅は 470mm である。

## 2) 密閉型 PV パネル

基準となる PV パネルには屋根一体型を想定し、前述の市販 PV パネルのアルミフレーム底部に、厚さ 10mm の発泡スチロールを張り付けた合板(厚さ 12mm)を取り付け、密閉型 PV パネルとした。PV 素子板裏面には厚さ 32mm の密閉空気層が形成されている。

## 3) 実験装置概要

図-2に実験装置概要を示す。傾斜角 35 度の台の上に供

試 HB パネルと密閉型 PV パネルを並べて南面させ、その間に日射計を設置した。パネル後方のパネルから約 1m の高さに風向・風速計を配置した。HB パネルについては、流路出口を開放した場合とパネル内部の通風量を増加させるために通風ダクトを取り付けた場合について実験を行った。

通風ダクトは内径 150mm、水平部 800mm、垂直部 1250mm の筒状で、両者をアルミフレキシブルダクトで接続し、保温材を巻いて L 型とした。HB パネルの通風口出口側に巾 470mm、高さ 20mm、長さ 30mm の接続口を設け、これを通風ダクトの水平部分に差し込み、隙間を粘着テープでシールした。

各部の温度測定には  $\phi 0.2\text{mm}$  の T 型熱電対を用いた。PV 素子板温度を測定するために、密閉型 PV パネルの PV 素子板裏面 5 点、HB パネルにも同じく PV 素子板裏面 5 点と フィン先端 1 点について測定した。

### 2.3 実験方法

各部の温度ならびに日射計および風向・風速計の出力を 1 分間隔で 20 分間コンピュータに取り込んだ。その後直ちに I-V 特性測定回路を HB パネルに接続し、回路中の抵抗を手動で変化させ、そのときの電圧と電流を 0.1 秒間隔で測定した。さらに、同回路を密閉型 PV パネルに接続し直して、同様の方法で同パネルの I-V 特性を測定した。なお、I-V 特性測定時以外は、各パネルの回路は開放状態で各部の温度測定を行った。また、データは安定した日射強度が得られている条件のみを採用した。

## 3. 実験結果

### 3.1 パネル温度分布

図-3 に通風ダクトなしの条件、図-4 に通風ダクトありの条件での、両パネルの PV 素子板温度分布を示す。密閉型 PV パネルはやや風向の影響を受けているが、測定場所による違いは比較的小さい。HB パネルは流路出口側の温度が高く、横方向の分布は小さい。PV 素子板の平均温度は、図-3 では HB パネルの方が約 7°C 低く、図-4 では約 15°C 低い。これは通風により放熱が促進され、さらに通風ダクトの煙突効果により通風量が増加して冷却効果が増したためである。

### 3.2 I-V 特性

図-4 の条件（通風ダクトあり）での I-V 特性を図-5 に示す。HB パネルの最大電流値は密閉型 PV パネルのそれより低いが、最大電圧は密閉型 PV パネルの方が高く、最大発電電力はほぼ同等である。前報の結果からも、短絡電流値の低下は素子面での日射強度の低下であり、開放電圧の上昇は素子温度の低下による。

HB パネルの素子温度は密閉型 PV パネルのそれより約 15°C 低く、両者は同等の最大発電量が得られている。透明カバー表面の反射による日射強度の減少を素子温度の低下

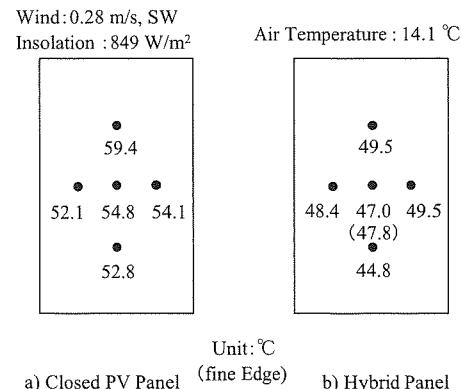


Fig. 3 Temperature Distribution in PV-element Plates  
(without Ventilating Duct for HB Panel)

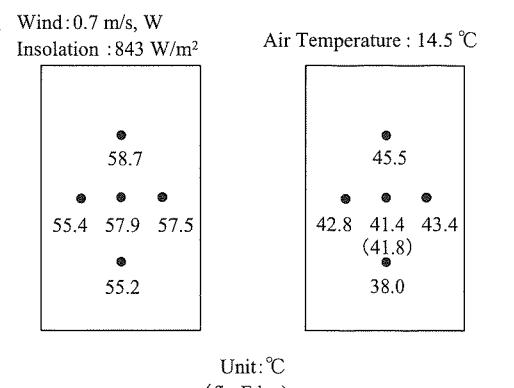


Fig. 4 Temperature Distribution in PV-element Plates  
(with Ventilating Duct for HB Panel)

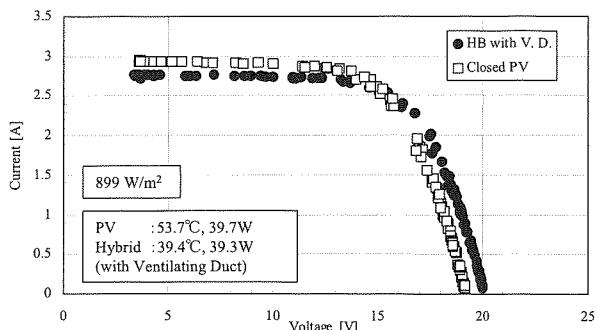


Fig. 5 I-V Characteristics

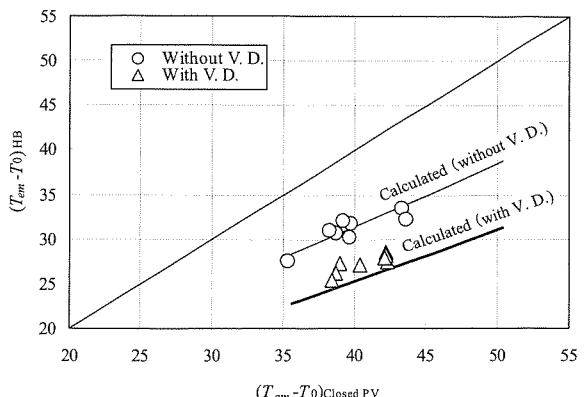


Fig. 6  $(T_s - T_0)$  of HB Panel vs. that of Closed PV Panel

による発電効率の上昇によりカバーし、HBパネルとしての発電効率が改善されている。このように通風による冷却効果によって素子温度を下げる事が可能であり、これが発電量を向上させてアクリル板の表面反射による入射光の減少を補い、HBパネルとしての発電効率を向上させることが可能である。

### 3.3 各パネルの素子温度と外気温度の差

HBパネルと密閉型PVパネルについての、PV素子の平均温度 $T_{em}$ と外気温度 $T_0$ の差の関係を図-6に示す。本実験条件では、HBパネルの素子温度は流路を開放する事により密閉型PVパネルのそれより約7°C低下し、通風ダクトを取り付けることにより約15°C低下している。前報の結果より、透明カバーの影響で両者の温度が等しい場合、HBパネルの発電効率はPVパネルのそれより約7%低いが、HBパネルの温度を約14°C低下させることにより、同等の発電効率が得られる事から、夏季・中間季におけるHBパネルの発電量を屋根一体型PVパネルと同程度にすることが可能と考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 通風量とPV素子板温度の計算方法

実験結果との比較を行うために、通風量とPV素子温度の関係についての解析を行った。以下にその計算方法を示す。

#### (1) HBパネルの通風量とPV素子板温度

図-7にHBパネルの模式図を示し、各熱移動成分ならびに通風空気への加熱の様子を示す。PV素子板の上に透明カバーが設けられ、PV素子板を通過する熱によって空気を加熱している。これらは式(1)から式(5)で示され、熱バランスは式(6)で表される。表面熱通過率 $K_1$ および裏面熱通過率 $K_2$ を式(7)および式(8)で表し、通風による熱伝達率は式(9)<sup>5)</sup>を用いた。

通風量に関しては、図-8に示すようにHBパネル部分と通風ダクト部分の浮力ならびに抵抗成分を考え、これらのバランスとして、式(10)のように浮力の合計が圧力損失とパネル入り口の動圧に等しいとした。なお、それぞれの通風抵抗は式(11)および式(12)で示され、前者に対してはHBパネル入り口部の流路の急拡大、パネル内流路部分の摩擦抵抗ならびに出口部分の流路の急縮小を考慮し、後者に対してはHBパネルからの流路の急拡大、ダクト直管部分の摩擦抵抗と曲がり抵抗を考慮した。

PV素子温度は、HBパネルを長手方向に10分割して、各要素での熱バランスから決定する前報の方法を採用し、要素の出口空気温度を次の要素の入り口空気温度とした。通風量を仮定して、各要素での熱バランスからPV素子温度を求め、そのときの通風抵抗と浮力がバランスすることを条件に、通風量とPV素子温度を決定した。なお、PV素子板と透明カバーの間には0.5mmの空気層が存在するものとしてとして計算した。

$$q_r = \varepsilon C_b (T_e^4 - T_s^4) \quad (1)$$

$$q_{cl} = K_1 (T_e - T_0) \quad (2)$$

$$q_b = \alpha_b f_b (T_e - T_a) \quad (3)$$

$$q_{c2} = K_2 (T_a - T_0) \quad (4)$$

$$c_a G_a \frac{dT_a}{dx} = q_b - q_{c2} \quad (5)$$

$$I\tau^2 = q_r + q_{cl} + q_b \quad (6)$$

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_{tc}}{\lambda_{tc}} + \frac{l_a}{\lambda_a} + \frac{l_{PVg}}{\lambda_{PVg}}} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{l_{dd}}{\lambda_{dd}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8)$$

$$\alpha = 5.6 + 4.0v \quad (9)$$

$$\Delta\rho_{ch}gh_{ch} + \Delta\rho_dgh_d = \Delta P_{ch} + \Delta P_d + \frac{1}{2}\rho v_{in}^2 \quad (10)$$

$$\Delta P_{ch} = \zeta_{ex} \frac{1}{2} \rho_a v_{in}^2 + \lambda_f \frac{l_{ch}}{d} \frac{1}{2} \rho_a v^2 + \zeta_{re} \frac{1}{2} \rho_a v_{out}^2 \quad (11)$$

$$\Delta P_d = \zeta_{ex} \frac{1}{2} \rho_a v_{out}^2 + \lambda_f \frac{l_d}{D} \frac{1}{2} \rho_a v_d^2 + \zeta_B \frac{1}{2} \rho_a v_d^2 \quad (12)$$

#### (2) 密閉PVパネルの素子板温度

密閉型PVパネルについては、図-9に示すようにパネル裏側の密閉空気層と保溫材ならびに合板の熱通過を考慮し、

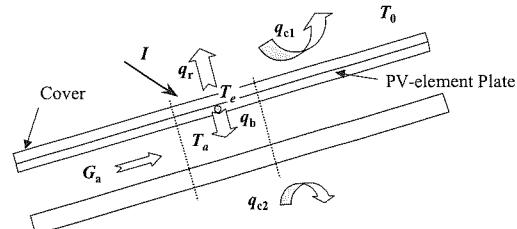


Fig. 7 Energy Balance on HB Panel

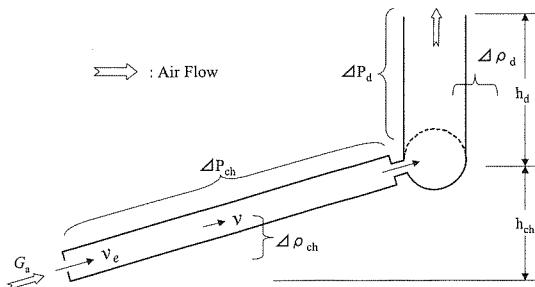


Fig. 8 Pressure Balance on HB Panel with Ventilating Duct

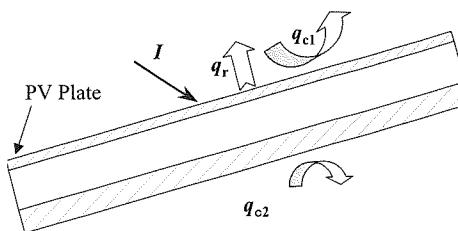


Fig. 9 Energy Balance on Closed PV Panel

裏面熱流速 $q_{c2}$ を式(13)で表し、式(14)の熱バランスからPV素子温度を計算した。なお、 $K_1$ は表面熱伝達率 $\alpha_1$ とPV素子板である強化ガラスの熱伝導率から求め、 $K_2$ については式(15)を用いた。このとき、密閉空気層の熱伝達率 $\alpha_{al}$ <sup>2)</sup>には6.0W/m<sup>2</sup>Kを用いた。

$$q_{c2} = K_2(T_a - T_0) \quad (13)$$

$$I\tau = q_r + q_{c1} + q_{c2} \quad (14)$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{al}} + \frac{l_{dd}}{\lambda_{dd}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (15)$$

#### 4.2 各パネルの素子温度と外気温度の差

前述の方法で日射強度 $I$ を変化させてHBパネルと密閉型PVパネルの $T_{em}$ を計算し、両パネルの $T_{em}-T_0$ の関係を図-6に併記した。通風ダクトの有無によらず計算結果と実験結果はほぼ一致していることから、パネル内の熱バランス及び圧力バランスのシミュレーションは実験を再現していると考えられる。

以降、本シミュレーションを用いて通風ダクトによるPV素子板温の冷却性能について検討する。

#### 4.3 通風ダクトの径と高さの関係

##### 1) 通風ダクト高さの影響

$D=150mm$ の場合の、 $T_{em}-T_0$ およびPV素子板裏面通風速度 $v_b$ と $h_d$ の関係の計算結果を図-10に示す。 $I$ が大きいほど素子板温度は高くなるため、 $T_{em}-T_0$ は大きい。また、 $h_d$ が高くなると $v_b$ は大きくなり、 $T_{em}-T_0$ は低下するが、それぞれの変化割合は徐々に小さくなる。 $I$ の影響は、 $v_b$ に対するよりも $T_{em}-T_0$ に対する方がやや大きい。

$h_d$ が高くなると浮力の増加により通風量が増加するが、パネル出口の空気温度が低下すると同時に通風抵抗も増加するため、 $T_{em}-T_0$ および $v_b$ に対する $h_d$ の効果は徐々に小さくなる。本計算条件では、通風ダクトなしの場合、 $v_b$ は0.15~0.2m/sで、 $h_d=3m$ の通風ダクトに対して $v_b$ は0.4~0.45m/s程度が得られる。

##### 2) 通風ダクト径の影響

図-11に $D$ を変化させた場合の $T_{em}-T_0$ 、通風ダクト内風速 $v_d$ および $v_b$ の計算結果を示す。計算条件は $I=900, 600W/m^2$ で、 $h=1.25m$ の場合である。 $D$ の増加により $T_{em}-T_0$ は低下するが、 $D$ が0.15m以上ではその低下は非常に小さくなり、通風量が変化していないことがわかる。 $v_d$ は $D$ の増加によって低下するが、 $D$ が0.15m以上では通風量は変化しないことから、この領域では $v_d$ は $D^2$ に反比例する。また図-10同様、 $I$ の低下による $T_{em}-T_0$ の低下は比較的大きいが、 $v_b$ はそれほど大きく低下しない。

図-12に図-11と同じ条件での $D$ に対する $\Delta P_{ch}$ と $\Delta P_d$ の変化を示す。 $\Delta P_{ch}$ と $\Delta P_d$ の和は系の圧力損失を表わし、これが風量に大きく影響するため、図-11の $T_{em}-T_0$ の変化に類似している。 $D$ の増加により $\Delta P_d$ は減少し $\Delta P_{ch}$ は増加するが、 $\Delta P_d$ が十分に小さくなると $\Delta P_{ch}$ は変化なくなり、パ

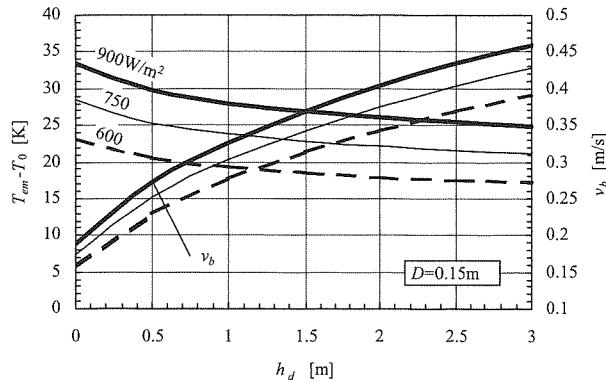


Fig. 10 Calculated Results of  $T_{em}-T_0$  and  $v_b$  vs.  $h_d$

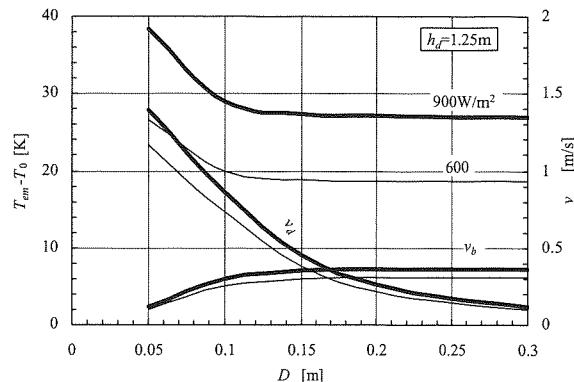


Fig. 11 Calculated Results of  $T_{em}-T_0$  and  $v$  vs.  $D_d$

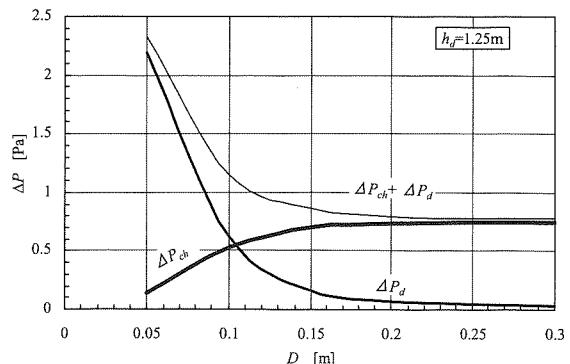


Fig. 12 Calculated Results of  $\Delta P$  vs.  $D_d$

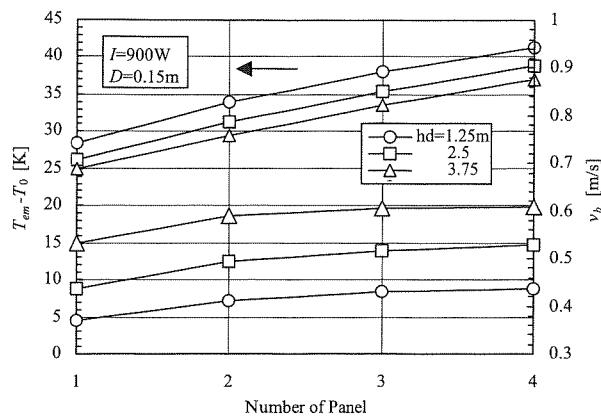


Fig. 13 Calculated Results of  $T_{em}-T_0$  and  $v$  vs. Number of Panel in Series

ネル内通風量は変化しなくなる。

流路内の圧力損失の増加により、通風量は減少するため、 $\Delta P_d$ が十分に小さい領域では流量に対する $D$ の依存性はなくなる。よって、十分な通風量を保つためには、 $\Delta P_d$ が $\Delta P_{ch}$ より十分に小さいことが条件になり、本システムの構造から、流路断面積とダクト断面積を同程度にすることが1つの基準と考えられる。

#### 4.4 パネル段数による影響

本実験では、1枚のHBパネルについての通風実験を行ったが、実際には複数のパネルに対して通風することが求められる。そこで、パネルを直列に接続した場合の影響について計算を行った。 $I=900\text{W/m}^2$ 、 $D=0.15\text{m}$ の場合の計算結果を図-13に示す。なお、 $T_{em}$ は全パネルの平均素子板温度である。 $T_{em}-T_0$ は台数の増加により上昇し、 $h_d$ が高くなると低下する。 $v_b$ は台数の増加によってわずかに増加するが、3台以上ではほとんど変化しない。これはパネルを直列に配置したことにより通風空気温度が上昇し、冷却効果が大きく低下したもので、通風量の微増は、浮力の増加によるものと考えられる。また、 $h_d$ の増加により $v_b$ は増加するが、 $h_d$ を3倍にしても、通風量は30%程度しか増加せず、図-10の場合と比較して非常に少ない。

パネルを直列に接続することにより、 $T_e$ は通風方向に上昇し、台数の増加により $T_{em}-T_0$ も上昇する。4台直列の場合、1台の場合より平均素子温度は10~15°C上昇するため、発電効率は5~7%程度低下することになる。このことは通風系統のダクトワークによって発電効率が大きく変化することを示す。並列接続では同図の1台の場合と同じであることから、並列方向のダクトワークを基本として、これらを段方向に統合させる方式が有効と考えられる。ただし、この場合 $D$ は太くならざるを得ない。

#### 4.5 空気層厚さ可変の効果

本研究では、夏季・中間季の発電効率改善を目的に、HBパネルの空気層厚さを最小にして実験を行っている。空気層厚さ可変式HBパネルの特徴は、季節によって空気層厚さを可変とし、パネル表面からの対流熱損失分を変化させることができることにある。しかし、通風によりPV素子板裏面への熱移動量が増加すれば、表面への対流熱損失分が小さくなり、空気層厚さを可変とすることによるそれへの影響も小さくなると考えられる。ここでは空気層厚さを変化させた場合の通風による冷却特性を調べた。

HBパネルの空気層厚さを最大(18mm)と最小にした場合について、 $h_d$ を変化させた場合の計算結果を図-14に示す。 $h_d$ が0においてもHBパネルの高さによる通風効果が存在(図-11より $v_b$ は0.15m/s程度)するため、空気層厚さの最大、最小による $T_{em}$ の差は7°C程度であり、 $h_d$ が高くなるとその差はやや小さくなる傾向にある。したがって、通風を前提とする場合、空気層厚さ可変とすることにより発電効率の改善効果は3.5%以下と見積もることができる。

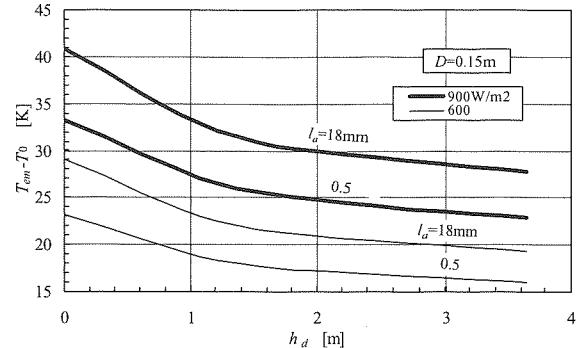


Fig. 14 Effect of Air Layer Thickness to  $T_{em}-T_0$  vs.  $h_d$

#### 5. 結論

本研究では熱-光発電ハイブリッドパネルの発電効率を自然通風によって向上させることを目的に、屋根一体型を想定した密閉型PVパネルを基準として、通風効果を得るために通風ダクトを取り付けた熱-光発電ハイブリッドパネルの自然通風実験を行い、発電効率への影響を調べた。本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。

- 1) HBパネルにL型通風ダクトを取り付ける事で、パネルの冷却効果を確認し、通風により夏季におけるHBパネルの発電量を密閉型PVパネルのそれより高めできることを示した。
- 2) L型通風ダクト付HBパネルの熱移動に関するシミュレーションを行い、実験値との比較的良好な一致を得た。
- 3) 通風ダクトの径による影響を解析した結果、ダクトの圧力損失がパネル内圧力損失より十分小さくなるようにダクト径を決める必要がある。
- 4) 通風ダクトによるHBパネルの冷却効果は、直列接続では台数の増加によってPV素子板温度が上昇し、3台以上では通風量の増加が少ない。
- 5) 空気層厚さ可変式HBパネルで通風を行う場合、空気層厚さを変化させることによる発電効率の改善効果は3.5%以下である。

#### 参考文献

- 1) 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.794(2000)
- 2) 神谷、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-試作パネルの週熱・発電特性、太陽エネルギー、vlo.32, No.2, pp.33-38
- 3) 空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧第12版、III, P.37(1995)
- 4) 井上宇士：空調ハンドブック、改訂4版、1996年