

# 結晶系シリコン太陽電池モジュールの 温度上昇抑制に関する研究

門田 昌郎、三木 祥平、前田 光治、新船 幸二

機械系工学専攻

## Suppression of Temperature Elevation in Crystalline Silicon Solar Cell Based Modules

Masao MONDEN, Shohei MIKI, Kouji MAEDA and Koji ARAFUNE

Department of Mechanical and System Engineering

### Abstract

Production of electricity by crystalline silicon solar based modules is decreased by their temperature elevation. Therefore, a model of temperature elevation in the modules was proposed. Under a specific condition, the production loss due to temperature elevation is about 17 %. In order to suppress the temperature elevation, utilization of texture structure at the back surface of modules and heat of vaporization, were evaluated analytically. As compared with the result under the specific condition, the both approaches are effective for suppression of temperature elevation. However, coupling with the texture structure and heat of vaporization doesn't show synergetic effect. From a cost-effectiveness point of view, one of the two approaches should be adopted.

Key Words : solar cell, crystalline silicon, performance degradation, temperature elevation

### 1. はじめに

平成23年の福島第一原発の事故をきっかけとして、再生可能エネルギーを用いた発電への期待が高まっている。その一つが太陽光発電であり、次々と大規模太陽光発電施設（メガソーラー）建設計画が発表されている。

太陽光発電は、太陽電池を複数個配置して最大出力を100~250Wp<sup>1</sup>程度としたパネル（太陽電池モジュール）を複数個連結し、その出力をインバーターを通すことにより交流電力を得る方法である。現在主流の太陽電池モジュールは結晶シリコン太陽電池により構成されており、発電はシリコンのバンドギャップエネルギー(E<sub>g</sub>)よりも大きなエネルギーを持つ光(E ≥ E<sub>g</sub>)を吸収したときに行われる。光の波長に換算すると、約1.1 μmよりも短い波長の光を吸収する。しかし、発電に寄与出来るのはE<sub>g</sub>分だけであり、それよりも大きい分(E - E<sub>g</sub>)は熱として放出されてしまう。そのため夏の暑い時期には、太陽光の照射条件にもよるが、太陽電池モジュールの温度は最高70~80℃程度まで上昇する[1]。モジュール温度が高温に達するようになるときは当然日射量も多い時期であるため、より多くの発電が期待されるが、太陽電池性能は温度上昇と共に低下してしまう。そのため、標準状態で測定されたモジュール性能から予想される発電量よりも実際の発電量は少なくなる。逆に、結晶系シリコン太陽電池モジュールの温度上昇を抑制することができれば、より多くの発電量が得られる。そこで、本研究では、モジュール温度上昇の解析モデルを作成し、風速と温度上昇に伴う発電ロスについて検討を行った。さらに、温度上昇に伴う発電ロスを減少させる方法として、風による冷却効果を促進するためのテクスチャー構造導入と、気化熱の利用について検討を行った。

### 2. 解析方法

#### 2.1 太陽光照射強度および気温

8月の快晴日の京都市内での太陽光照射強度および気温を参考に、太陽光照射強度および気温の時間変化( $I_R(t)$ 、

---

<sup>1</sup> Wpはワットピークの略であり、太陽電池などのように出力が変動する電源において、標準として定められた条件の元で得られる電力をワット数で表したものである。

$T_{air}(t)$  を式(1), (2)のようにモデル化した。

$$I_R(t) = I_{max} \times \sin\left(\frac{t}{13} \pi\right) \quad \text{式(1)}$$

$$T_{air}(t) = 23.74 + 2.217 \cdot t - 0.1085 \cdot t^2 \quad \text{式(2)}$$

但し、 $t$  は日の出からの経過時間 [hr]、 $I_{max}$  は最大照射強度で  $1,000 \text{ W/m}^2$  である。気温および太陽光照射強度の測定値およびモデル化した式(1), (2)を Fig.1 に示す。多少のずれはあるものの、モデル式は概ね測定値を表していることが確認出来る。

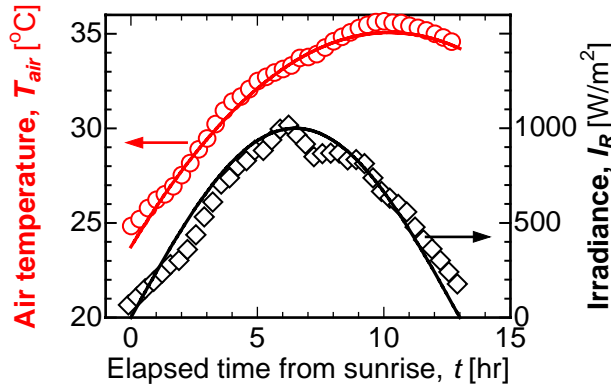


Fig.1 Time course of air temperature and irradiation intensity by sunlight. Plots and lines represent measured values and modeled values, respectively.

## 2.2 モジュール構成

実際のモジュールはガラス/封止樹脂/結晶シリコン太陽電池/封止樹脂/プラスチック、という構成を取るが、封止樹脂は光透過性があるために発熱に寄与しないこと、厚さが他の材料に比べて薄いことから、モジュールはガラス板/結晶シリコン太陽電池/プラスチックの三層構造とし、それぞれの厚み  $L_1, L_2$ , および  $L_3$  は 3.7, 0.2, および 2.1 mm とする。また、モジュールの変換効率は 15%、3kWp のシステムを想定し、モジュール面積を  $20 (=4 \times 5) \text{ m}^2$  とする。なお、これらの値は一般的な太陽電池およびシステムの値に準じて選択している。

## 2.3 光の吸収および熱収支

モジュール表面における光の反射は 0%とし、入射した光のうちシリコンのバンドギャップ 1.1eV 以上のエネルギーを持つ光は全て結晶シリコン太陽電池で吸収される。1.1eV 以上のエネルギーは全て熱に変換されるとする。1.1eV 未満のエネルギーの光はプラスチック部で均一に全て吸収され、全て熱に変換される。照射エネルギーが熱に変換される割合  $a$  はガラス、結晶シリコン太陽電池およびプラスチック部でそれぞれ 0%, 32.4%, および 18.9%とする。モジュール内は全て伝導伝熱であり、ガラス側表面およびプラスチック側裏面の温度境界条件は対流熱伝達とする。以上を踏まえた一次元の支配方程式および境界条件は式(3)~(7)に示すとおりである。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + R_i, \quad i = 1 \sim 3 \quad \text{式(3)}$$

$$R_i = \frac{a_i}{100} \times \frac{\alpha_i}{\kappa_i} \times \frac{I_R(t)}{L_i} \quad \text{式(4)}$$

[B.C.]

$$q_{FS} = h_{FS}(T_{air} - T_{FS}) \quad \text{at front surface} \quad \text{式(5)}$$

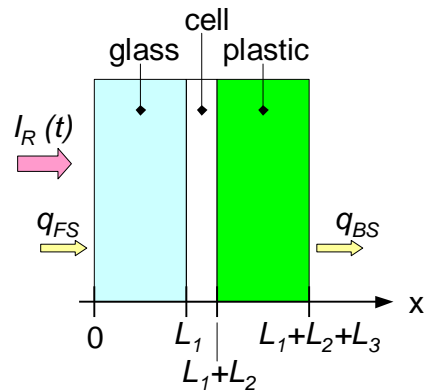


Fig.2 Schematic drawing of calculation model

$$q_{BS} = h_{BS}(T_{BS} - T_{air}) \text{ at back surface} \quad \text{式(6)}$$

[I.C.]

$$T(x,0) = 20.0 \quad \text{式(7)}$$

ここで $\alpha, \kappa, h, q$ および $R$ はそれぞれ、熱拡散係数、熱伝導率、熱伝達係数、熱流束、および、発熱速度である。なお、計算に使用する物性値は Table 1, 2 に示す。添え字  $i$  は 1 から順にガラス、シリコンおよびプラスチックを示しており、 $FS$  および  $BS$  は表面および裏面を示している。今回はルーフトップではなく大型発電施設の一部と想定して、基本的には  $h_{FS} = h_{BS}$  とする。熱拡散係数および熱伝導率は物質固有の値を持つが、熱伝達係数は状態により変化するため、空気熱伝導率  $\kappa_{air}$  と境界層厚み  $\delta$  から次のように推算する。

### 2.4 境界層厚み

境界層厚みは平板からの距離により変化するため、実効境界層厚みとして式(8), (9)により求めた。なお、代表長さ  $L$  はモジュールの長手方向のサイズ 5 m とする。

$$\delta = \frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{v \cdot x}{u} \right)^{\frac{1}{2}} dx = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{vL}{u}} \quad \text{式(8)}$$

$$h = \frac{\kappa_{air}}{\delta} = \frac{3}{2} \kappa_{air} \sqrt{\frac{u}{vL}} \quad \text{式(9)}$$

ここで、 $v$  は空気の動粘度、 $u$  は風速である。風速 2 および 10 m/s のときの熱伝達係数を式(8), (9)から求めると、おおよそ 6.3 および 14 J/m<sup>2</sup>/K/s となる。一般的に、固体から気体への熱伝達係数は 3 ~ 20 J/m<sup>2</sup>/K/s であることが知られており[2]、求めた値はこの範囲に含まれることから、式(8), (9)による熱伝達係数の推算は妥当と言える。

### 2.5 モジュール発電量

モジュール効率の温度係数は  $-0.005 \text{ K}^{-1}$  とする。今回のモデルではモジュール全体の全日射量は 165 kWh であるため、温度係数を考慮しない理想発電量  $P_{ideal}$  は 24.7 kWh となる。なお、モジュール全体の全日射量は、式(1)を日の出( $t=0$ )から日の入り( $t=13$ )まで積分し、2.2 で定義したモジュール面積 20 m<sup>2</sup> を乗じて求めている。また、理想発電量はモジュール全体の全日射量に、同じく 2.2 で定義したモジュールの変換効率 15% を乗じて求めている。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 風による冷却効果

式(3), (4)に示した支配方程式を式(5)~(9)の境界条件、初期条件および式(1), (2)に示した太陽光照射強度および気温を用いて数値計算を行うことで、モジュール温度の経時変化が得られる。Fig.3 にモジュール温度の経時変化の一例を示す。ほぼ無風(風速 0.1 m/s)の場合、最高到達温度は 200 °C を超えているが、実際にはありえないケースである。風速が 1.0 および 3.0 m/s の場合は最高到達温度はそれぞれ約 93 および 68 °C となっている。実際のモジュールの最高到達温度は 80°C 前後であり、かつ日本の平均風速は 2~4 m/s であることから[3]、今回使用したモデルは妥当性があ

Table 1 Thermal properties of materials

	glass	silicon	plastic
熱拡散係数 $\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	$3.8 \times 10^{-7}$	$8.8 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-7}$
熱伝導率 $\kappa$ [W/m/K]	$7.4 \times 10^{-1}$	$1.56 \times 10^2$	$2.0 \times 10^{-1}$
比熱 $C_P$ [J/kg/K]	$7.5 \times 10^2$	$7.13 \times 10^2$	$1.47 \times 10^3$

Table 2 Thermal and physical properties of water and air

	water (liquid)	water (vapor)	air
拡散係数 $D$ [m <sup>2</sup> /s]		$2.5 \times 10^{-5}$	
粘度 $\mu$ [Pa s]	$8.9 \times 10^{-4}$		$1.85 \times 10^{-5}$
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$1.0 \times 10^3$		$1.2 \times 10^0$
気化熱 $L_V$ [J/mol]	$4.39 \times 10^4$		
熱伝導率 $\kappa$ [W/m/K]			$2.6 \times 10^{-2}$

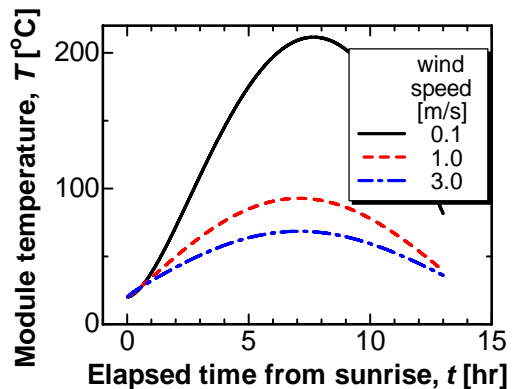


Fig.3 Time course of module temperature

ると考えられる。

そこで、風速をパラメーターとしてモジュールの最高到達温度および温度係数を考慮した発電量を計算した。Fig.4 に風速とモジュール最高到達温度の関係を、Fig.5 に風速と発電量および理想発電量を基準とした発電ロスとの関係を示す。風速増加に伴い、モジュール最高到達温度は低下し、発電量は増加することが Figs.4, 5 から明らかである。しかしその効果は風速 5 m/s 程度までは大きい、それ以降は効果が薄れている。風速 5 m/s の時の発電量は 21.2 kWh であるのに対し、風速 10 m/s の時は 22.0 kWh と数%程度しか発電量の増加が期待出来ない。現実的には風速 5 m/s を超える地域は沿岸部などに限られており、前述したように風速 3.0 m/s あたりが平均的な状況と考えられる。この場合発電量は 20.5 kWh であり、温度係数を考慮しない理想的な場合(24.7 kWh)よりも 17.1 %発電量が少ない。

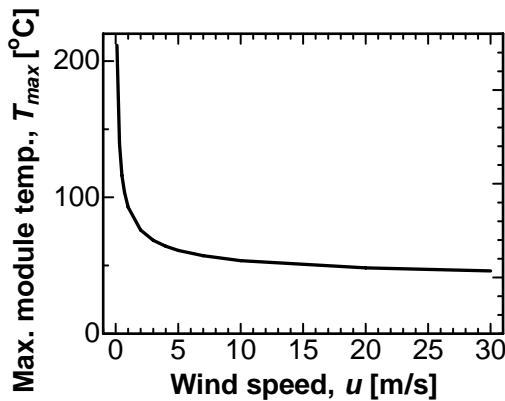


Fig.4 Maximum module temperature as a function of wind speed

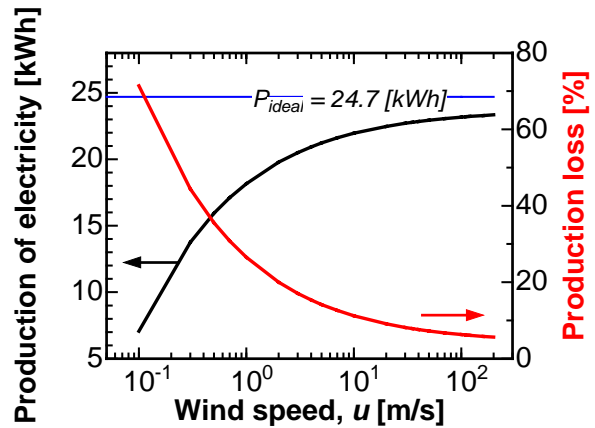


Fig.5 Production of electricity and production loss as a function of wind speed

同じ風速でより大きな冷却効果を挙げるには、空気と接触する面積を大きくする必要がある。しかし新たに放熱板のようなものを取り付ける場合はコスト・重量が増加するという問題がある。そこで、Fig.6 に示すようなテクスチャーを裏面のプラスチック表面に形成することを考えた。Fig.6 に示したテクスチャーは、元々の表面積の半分にサイコロ状のものを乗せたような形をさせている。元々の表面積を  $A$  とすると、サイコロを載せていない部分の面積は  $0.5A$ 、乗せた部分の表面積は新たに側面が生まれるため、 $0.5A \times 5 = 2.5A$  となり、あわせると  $0.5A + 2.5A = 3A$  と元々の表面積の 3 倍となる。単純に考えれば、表面積増加により、実効的な熱伝達係数も 3 倍になると言える。式(9)に示すように、熱伝達係数は風速の 1/2 乗に比例する。そのため、実効的な熱伝達係数が 3 倍になることは、風速に換算すると 9 倍の効果となる。そこで風速を 3.0 m/s とし、テクスチャーの無い表面側の熱伝達係数  $h_{FS}$  はそのままの値を使い、裏面側の熱伝達係数  $h_{BS}$  は表面積を 3 倍とした値を用いて計算してみると、裏面がそのままの場合の発電量および発電ロスが 20.5 kWh および 17.1 %であるのに対し、裏面にテクスチャーをつけた場合の発電量は 22.0 kWh および 10.9 %と大幅に改善される結果が得られた。但し、実際には幾つか解決すべき問題が存在する。一つは、Fig.6 に示したようなテクスチャー構造で表面積は増やせるが、同時に空気の流れの状態が変化するため、熱伝達係数が単純に表面積には比例しない点である。構造体のスケールがサブミリメートルのレベルが想定されるのに対し、空気の流路は数 cm から数十 cm のオーダーと大きくスケールが異なり、かつ自然の風は方向もランダムであるため、最適な構造を決定するのは困難である。なお、空気のプラントル数は 0.7 程度であるため、温度境界層厚みは速度境界層厚みと同じオーダーとなる。構造体のスケールをサブミリメートルと仮定し、式(8)を用いて温度境界層厚みを推算すると、その厚みは構造体のスケールの 1/10 程度であるため、対流熱伝達の促進は期待出来る。もう一つの問題は、どのようにして構造体を薄いプラスチック板に形成するか、という問題である。両問題を解決するためには、今後更なる検討が必須である。

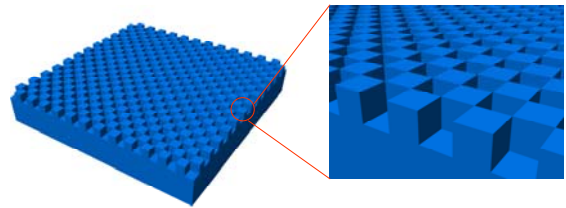


Fig.6 Drawing of back surface texture

### 3.2 水の気化熱を利用した冷却効果

モジュールガラス表面に水が存在した場合、平衡状態では気液界面の水蒸気圧は温度に対応した飽和水蒸気圧

$P_{sat}(T_{mod})$  と一致する。一方で、空気の水蒸気圧  $P_{air}$  は空気温度の飽和水蒸気圧  $P_{sat}(T_{air})$  に相対湿度 RH [%] を掛け合わせたものとなり、仮にモジュール温度と空気の温度が一致している場合でも、湿度が 100%未満であれば水蒸気の拡散が行われる。結果として気液界面の水蒸気圧が飽和水蒸気圧より低くなるため、それを補うためにモジュール表面の水は水蒸気へと変化する。この時の物質流束  $J$  は、Fick の法則から以下のように表すことが出来る。

$$J = \frac{D}{\delta} \cdot \left\{ C_{sat}(T_{mod}) - \frac{RH}{100} \times C_{sat}(T_{air}) \right\} \quad \text{式(10)}$$

ここで、 $D$  は水蒸気の拡散係数、 $C_{sat}$  は飽和水蒸気濃度であり、飽和水蒸気圧から求めている。なお、飽和水蒸気圧力は式(11)[4]より求めた。

$$P_{sat} = 6.112 \times 10^{\frac{7.5 \times T}{T+237.7}} \quad \text{式(11)}$$

水が水蒸気へと変化する際、気化熱をモジュールから奪うことになるため、モジュール温度が低下する。この時の熱流束  $q$  は水の気化熱  $L_v$  を用いて以下のように表すことが出来る。

$$q = L_v \cdot J \quad \text{式(12)}$$

気化熱による冷却効果を考慮して風速 3.0 m/s、RH=60 %の条件で計算したモジュール温度の経時変化を Fig.7 に示す。気化熱を利用した場合はしない場合よりも明らかにモジュール温度上昇を抑制していることがわかる。そこで気化熱を利用した場合の発電量を求めた。Fig.8 に相対湿度と発電量および発電ロスの関係を示す。相対湿度が上昇するに伴い蒸発量が低下するため、発電量も低下している。Fig.7 で使用した風速 3.0 m/s、RH=60 %の条件下では、発電量および発電ロスは 23.3 kWh および 5.7 %であった。3.1 で既に示したように、気化熱を利用していない、風速 3.0 m/s の時の発電量および発電ロスは 20.5 kWh および 17.1 %であった。この値と比べると、気化熱の利用は発電ロスの大幅な改善が期待出来ることが判る。また、気化熱利用としては比較的条件的悪い、風速が低く(1.0 m/s)、相対湿度が高い(95 %) 条件下でも、発電ロスは 10 %に止まっており、モジュール温度上昇に伴う発電量低下を抑制する効果は極めて高いと言える。

冷却に必要な水量は風速 3.0 m/s、相対湿度 60 %の場合で、1 m<sup>2</sup>あたり1日に約 5.6 Lである。この量を均等に供給するためには、モジュール設置角度を 30 deg にした場合、液膜厚みを約 30 μm にすれば良い。散水方式で冷却を試みている例[5]があるが、効率よく水を利用するには液膜式が適していると考えられる。

### 3.3 テクスチャーと気化熱利用の比較

日本の平均的な条件下 ( $u = 3.0$  m/s, RH = 60 %) での発電ロスは前述したように 17.1 %であるが、テクスチャーを利用した場合が 10.9 %、気化熱を利用すると 6.2 %であった。テクスチャーを利用した場合、裏面の熱伝達

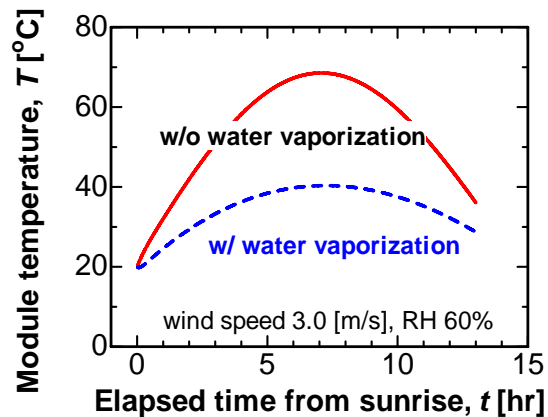


Fig.7 Effect of water vaporization on module temperature

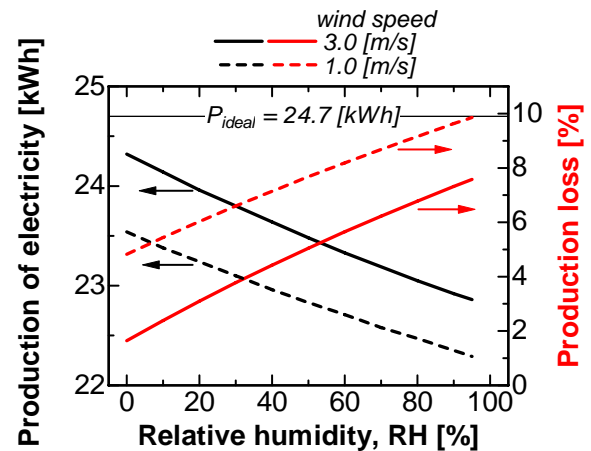


Fig.8 Production of electricity and production loss as a function of relative humidity

係数は3倍になっているが、表面はそのままであるため、平均すると2倍の熱伝達係数と考えることが出来る。熱伝達係数が2倍というのは、風速に換算すると4倍になるため、風速12 m/s相当と考えられる。実際にFig.5で風速12 m/sにおける発電ロスを見るとおおよそ11%と厳密に計算した場合と一致している。逆に気化熱を利用した場合の発電ロスに相当する風速をFig.5から読み取ると、110 m/s相当となる。これから平均熱伝達係数を推算すると基準の6倍相当となる。つまり、表面側の熱伝達係数は基準の11倍相当と考えることが出来る。

次に、気化熱・テクスチャー、どちらも利用する場合を計算した結果、発電ロスは5.6%であった。前段で推算した熱伝達係数を用いて平均熱伝達係数を求めると、基準の7倍となり、風速換算でおよそ150 m/sとなる。このときの発電ロスをFig.5から読み取ると6%弱であり、計算で求めた値とほぼ一致している。これらの結果から、テクスチャーと気化熱を組み合わせたモデルは妥当と考えられる。

発電ロスを減らすためには、テクスチャーと気化熱の両者を利用した場合が最も効果があるが、費用対効果を考えると、どちらか一方を選択した方が適切である可能性が高い。

#### 4. まとめ

温度上昇による発電効率の低下を検討するために、モジュール温度上昇の解析モデルを作成し、風速と温度上昇に伴う発電ロスについて計算を行った。その結果、夏場で風速3 m/s程度の環境下ではモジュールは最高70℃近くまで温度が上昇し、温度上昇のない理想的な場合よりも2割程度発電量が低下することが判った。そこで、温度上昇に伴う発電ロスを減少させる方法として、モジュール裏面にテクスチャー構造を形成することで風による冷却効果を高める方法と、水の気化熱を利用する方法について検討を行った。どちらも温度上昇抑制効果は確認されたが、水の気化熱利用の方がより効果的であることが判った。両者を組み合わせるとより発電ロスを少なくすることが出来たが、あまり相乗効果は見られなかった。

#### Nomenclature

$a$	照射エネルギー熱変換割合 [%]
$A$	表面積 [m <sup>2</sup> ]
$C$	濃度 [mol/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	比熱 [J/kg/K]
$D$	水蒸気の拡散係数 [m <sup>2</sup> /s]
$E_g$	バンドギャップ [eV]
$h$	熱伝達係数 [J/m <sup>2</sup> /K/s]
$I_{max}$	最大照射強度 = 1000 [W/m <sup>2</sup> ]
$I_R$	照射強度 [W/m <sup>2</sup> ]
$J$	物質流束 [mol/m <sup>2</sup> /s]
$L$	厚さ [mm]
$L_v$	水の気化熱 [J/mol]
$P$	水蒸気圧 [hPa]
$P_{ideal}$	理想発電量[kWh]
$q$	熱流束 [J/m <sup>2</sup> /s]
$R$	発熱速度 [K/s]
$RH$	相対湿度 [%]
$t$	日の出からの経過時間 [hr]
$T$	温度 [°C]

$u$	風速 [m/s]
$x$	座標 [mm]

#### Greek symbols

$\alpha$	熱拡散係数 [m <sup>2</sup> /s]
$\delta$	境界層厚み [mm]
$\kappa$	熱伝導率 [W/m/K]
$\mu$	粘度 [Pa s]
$\nu$	空気の動粘度 [m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]

#### Subscripts

1	ガラス板
2	結晶シリコン太陽電池
3	プラスチック
air	空気
BS	裏面
FS	表面
sat	飽和

#### 参考文献

- [1] T.Minemoto, et al., "Difference in the outdoor performance of bulk and thin-film silicon-based photovoltaic modules", Solar Energy Materials and Solar Cells, 93, 1062-1065 (2009).
- [2] R.B.Bird, W.E.Stewart, and E.N.Lightfoot, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc., New York (2007)
- [3] 気象庁気象統計情報より <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- [4] Murray, F. W., "On the computation of saturation vapor pressure", J. Appl. Meteorol., 6, 203-204, (1967).
- [5] シバセ工業、「平成20年度太陽光発電新技術等フィールドテスト事業」, <http://www.shibase.co.jp/page015.html>

兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告 No. 65

---

平成 25 年 1 月 31 日 発行

編集者 兵庫県立大学大学院工学研究科  
〒671-2280 姫路市書写2167  
電 話 (079) 266 - 1661

発行者 兵 庫 県 立 大 学  
〒651-2197 神戸市西区学園西町8-2-1  
電 話 (078) 794 - 6580

---