

太陽光熱利用に関する性能評価

Performance Evaluation for Solar Photovoltaic-Thermal Utilization

田 中 忠 良^{*1}
Tadayoshi TANAKA土 井 卓 也^{*1}
Takuya DOI
谷 辰 夫^{*3}
Tatsuo TANI鴨 志 田 隼 司^{*2}
Junji KAMOSHIDA
堀 米 孝^{*4}
Takashi HORIGOME

Abstract

One of the most effective utilization methods of solar energy is to use simultaneously the sunlight and solar thermal energy such as photovoltaic-thermal panel(PV/T panel). From such a viewpoint, systems using various kinds of PV panels were constructed in the world. In these panels, solar cells are set up at an absorber collecting solar thermal energy. Therefore, temperature of solar cell increases up to the prescribed temperature of thermal energy use, although it is lower than the cell temperature when using only solar cell panel. For maintaining cell conversion efficiency at the standard conditions, it is necessary to keep the cell at lower temperature. In this paper, electric and thermal energy obtained from a PV/T panel is evaluated by exergy. Based on this evaluation, the method of not to decrease cell conversion efficiency with collecting solar thermal energy was proposed in this paper.

Key Words : PV/T system, PV/T panel, Exergy evaluation

1. 緒言

CO₂による大気温暖化や酸性雨による森林破壊など、産業活動の発展に伴う化石燃料の大量消費による地球環境汚染が地球規模の環境問題となっている。

このような状況において、エネルギー資源に恵まれない我が国において、社会経済等の発展を将来に亘って維持するには、化石燃料に依存せず、環境汚染のないクリーンなエネルギー資源を利用し、開発することは益々重要になると思われる。

このような環境保全と我が国におけるエネルギーの安定需給の問題に対して太陽エネルギーは本質的にクリーンで自給しえるエネルギー資源の一つである。従って、太陽エネルギーを我が国で有効に利用することは、エネルギー資源を海外に依存することなく、地球規模で環境を保全するのに大いに寄与できると考えられる。

このような観点から既に、我が国では、太陽エネルギーの利用技術として、その直接利用の光発電と熱利用技術の開発が進められ、それぞれ基本的な技術開発は現在、ほぼ完成の域に達していると思われる。その

ため、それらの技術を統合することによって、太陽エネルギーを従来に増して有益に利用できると考えられる。即ち、産業用、家庭用等において、最も重要なエネルギー形態は電気と熱であり、太陽から電気と熱を同時に得られれば、上述の問題を解決できると考えられる。このような観点から太陽エネルギーによる熱電併給システムとして、既に熱利用では、熱・電気複合ソーラシステム⁽¹⁾が、光発電では光熱ハイブリッド

原稿受付 平成3年7月24日

*1 電子技術総合研究所エネルギー部

Energy Division, Electrotechnical Laboratory

*2 芝浦工業大学工学部

Faculty of Engineering, Shibaura Institute
of Technology

*3 東京理科大学工学部

Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo

*4 東京農工大学工学部

Faculty of Engineering, Tokyo University of
Agriculture and Technology

システム⁽²⁾が我が国でも開発が進められた。これらの開発において、熱・電気複合ソーラシステムは太陽から高温の熱を得、負荷に応じて、その熱を発電用と熱供給用に分配し、適切な熱電比で電気と熱を供給することができるシステムである。しかし、我が国の日射条件は悪く、高温の熱を絶えず太陽から効率よく得ることができないため、このようなシステムの発展は今後、我が国においては期待できないと思われる。

一方、光熱ハイブリッドシステムは将来実用化が期待されている太陽電池の利用拡大を図る一方法として開発が進められた。このシステムは、集熱器に太陽電池を組み入れたような方法で電気と熱を得るように構成されている。そのため、電気と熱が別々に得られ、熱・電気複合ソーラシステムのように電気と熱を需要に応じて供給することはできない。また、高温の熱を得ようとする、太陽電池は集熱部と一体となって構成されているため、太陽電池素子の温度が高くなって、出力が低下する⁽³⁾。従って、このような構成の光熱ハイブリッドシステムでは、集熱部と太陽電池のもつ性能をそれぞれ十分に発揮しえないシステムになっていると思われる。即ち、光熱ハイブリッドシステムのように、機能の異なった機器、あるいは、部材を用いて電気と熱を別々に得ると、電気と熱はエネルギーの質が異なるために、電気から熱への変換は容易でも、熱から電気への変換は困難である。

そこで、産業用や民生用にとって最も重要な電気と熱のエネルギーを太陽から有効に得るためには、太陽熱を収集しても太陽電池素子の温度が上昇させないで太陽電池本来の性能を維持し、太陽熱も効率よく収集できるような太陽光熱利用の方式を考えることが必要と思われる。そのため、本報では、太陽電池から得た電力と熱のエネルギーを質的に評価し、従来技術を基礎にして太陽から電気と熱を効率よく得る方法を検討した。

2. 太陽光熱のエクセルギー評価

電気と熱はエネルギー量で評価した場合、同一の単位が用いられるため、質的にも同一視される場合が多い。しかし、熱は温度差の異なった物体間の熱移動により初めて有効に利用できるエネルギーであり、両者の温度の相違がエネルギー量に大きく影響するが、電気エネルギーにはこのようなことはない。従って、このような温度と言う尺度で質が異なる熱エネルギーとそれに影響されないエネルギーを比較する場合、エネルギー量のみで評価するよりもむしろ、有効エネルギーと言われるエクセルギーの概念を用いて評価することが最良と考えられる。

このエクセルギーによる太陽エネルギーの評価は、既に押田⁽⁴⁾, A. Suzuki⁽⁵⁾, 藤原⁽⁶⁾, 中西⁽⁷⁾等によって基本的及び機器の詳細な検討等が行なわれている。しかし、光熱ハイブリッドシステムのような太陽光熱を同時に利用する技術について検討がなされていないので、本報でその技術をエクセルギーによって簡単な検討を行なった。

ここで考えているシステムは、文献⁽²⁾、あるいは、世界で開発されたような集熱器の集熱部と太陽電池を一体化して構成された光熱ハイブリッドパネル⁽⁸⁾を基礎に考えるものとする。

太陽エネルギーをエクセルギーで評価するために、まず、太陽を温度 T_s の物体と考え、太陽から地上に入射するエネルギー量を Q_0 とすると、太陽エネルギーのエクセルギー、 E_0 は(1)式ようになる。

$$E_0 = Q_0(1 - T_0/T_s) \quad (1)$$

ここで、 T_0 は環境温度である。

更に、 T_s が T_0 に比べて非常に大きいので、(1)式は次のように近似できる。

$$E_0 = Q_0 \quad (2)$$

一方、太陽熱を得る集熱部のエネルギー効率、 η_c を次式で定義すると

$$\eta_c = Q/Q_0 = \eta_{oc} - U_c(T_c - T_0) \quad (3)$$

となる。ここで、 η_{oc} , U_c は集熱器の光学効率、熱損失係数に相当する値であり、集熱部の特性は(3)式のように表示されるものと仮定する。また、 Q , T_c は集熱部から得た熱量と集熱温度である。

Q のエクセルギー、 E_c は、集熱器の出入り口温度差が小さいとすると、

$$E_c = (1 - T_0/T_c)Q \quad (4)$$

と表される。この熱量のエクセルギー効率、 ξ_c を次のように定義すると、

$$\xi_c = E_c/E_0 = Q(1 - T_0/T_c)/Q_0 \quad (5)$$

となる。

(5)式に(3)式の関係を代入すると、

$$\xi_c = (T_c - T_0)\{\eta_{oc} - U_c(T_c - T_0)\}/T_c \quad (6)$$

となる。

また、環境温度の太陽電池パネル出力、 Q_s への影響は小さいため、エクセルギー、 E_s は次のようになる。

$$E_s = Q_s \quad (7)$$

また、エクセルギー効率、 ξ_s は、

$$\xi_s = E_s/E_0 = Q_s/Q_0 = \eta_{os} - U_s(T - T_0) \quad (8)$$

となる。 η_{os} , U_s , T は太陽電池パネルの標準状態における変換効率、温度係数、太陽電池パネルの温度であり、パネルの出力が温度のみに影響され、 $T = T_c$ と仮定し、(8)式のようにパネルの特性を近似する。

以上により太陽から得られた熱のエクセルギーが太陽電池パネルから得られた電力のそれより大きくなるための条件は(6)と(8)式より $\xi_c > \xi_s$ であり、次式のように求められる。

$$\tau_{c1} < \tau_c < \tau_{c2} \quad (9)$$

$$\tau_{c2,1} = (B + B^2 - 4C)/2$$

$$B = (\eta_{oc} - \eta_{os} + T_o U_s) / (U_c - U_s), \quad C = \eta_{os} T_o / (U_c - U_s)$$

ここで、 $\tau_c = T_c - T_o$ である。

(9)式の関係を具体的に示すために集熱器と太陽電池パネルの特性が次式のように温度に対して一次の関数で表示できるものと仮定した。

$$\text{集熱器 } \eta_c = 0.8 - 0.004\tau_c \quad (10)$$

太陽電池パネル

$$\eta_{s1} = 0.2 - 0.001\tau_c \quad (11-1)$$

$$\eta_{s2} = 0.1 - 0.0005\tau_c \quad (11-2)$$

集熱器の効率は市販されている集熱器で特性のよいものを参考にして(10)式のように近似した。太陽電池パネルについては、現状、あるいは、近い将来得られると思われる性能の最大と最小を示すために(11)式のように仮定した値であり、電池の温度係数は $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ とした。

これらの関係を図1に示した。縦軸はエネルギー効率とエクセルギー効率、横軸は集熱温度と環境温度との差 τ_c である。図、あるいは、(10)・(11-2)式からわかるように、エネルギー効率で比較すると、集熱部のそれは、太陽電池パネルより著しく大きな値となっている。一方、エクセルギー効率については、集熱部

のそれは、図中の破線で示したように最大値をもつ。太陽熱のエクセルギーが電池のそれより大きくなる集熱温度の領域は、(9)式から求められ、その範囲はS1,S2の太陽電池の特性に係わらず、集熱温度の最大値 τ_{c2} は 200°C である。最小値 τ_{c1} は、S1の場合、 100°C , S2の場合、 42.8°C である。この結果から、太陽電池パネルのエネルギー効率が低い場合、集熱器で約 43°C 以上の熱を得れば、太陽電池パネルから得た電力と等価となる。しかし、パネルのエネルギー効率が向上して、20%以上になれば、集熱温度は高くなって、集熱器のエネルギー効率も著しく低下する。また、図中に示した τ_m は(6)式から求められるエクセルギー効率が最大となる集熱温度で、次式で与えられる。

$$\tau_m = T_o \{ 1 + \eta_{oc} / U_c T_o - 1 \} \quad (12)$$

(12)式に(10)式の集熱器の特性値を代入すると、この場合、 87.3°C となる。この太陽電池と集熱部の系をエクセルギーで評価した場合、集熱部から有効エネルギーを得るためには、集熱部の集熱温度を τ_m にすることが最も望ましい。しかし、図1に示されているように、このような集熱温度では太陽電池素子の温度が高くなって、太陽電池の出力が大きく低下する。そのため、太陽電池パネルの特性が低い場合、太陽熱のエクセルギーは τ_m より低い温度でも太陽電池パネルのそれよりも大きくなるので、エクセルギー的にみて、集熱部の最善の集熱温度でなくとも、太陽電池の出力が温度上昇により低下しないようにするために低い集熱温度で太陽熱を得ることが必要となる。一方、太陽電池パネルのエネルギー効率が向上すると、この場合、 τ_m よりも集熱温度は高くなっているが、集熱部はほぼエクセルギーが最大に近い温度で運用され、集熱部にとって最善の集熱となるが、電池の素子温度が高く、効率は半減する。

このように、太陽電池の性能がよくなるにつれて、集熱温度は太陽から得た熱のエクセルギーが最大となる温度に近くなるが、電池素子の温度も上昇する。従って、従来のように集熱と電池が一体になって構成されている光熱ハイブリッドパネルにおいて、太陽熱のエクセルギーを電池のそれと同等以上にすると電池の温度は高くなり、集熱によって電池の性能を低下させることになり、太陽から電気と熱を効率よく得たことにはならないことがわかる。

従って、このような評価結果により、これまで多くの研究がなされてきた太陽電池と集熱を一体化した光熱ハイブリッドパネルのような構成と異なって、太陽から電気と熱を効率よく得る方式について以下のように検討した。

3. 新しい光熱利用方式

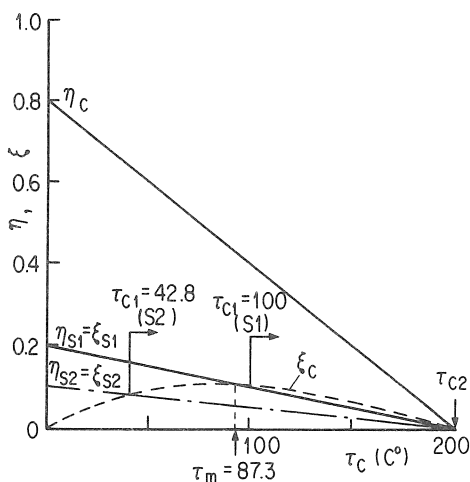


図1 太陽電池パネルと集熱部のエネルギー効率とエクセルギー効率

以上示したように我が国及び世界で試作や研究された光熱ハイブリッド化の技術は全て集熱部と電池が一体化された構造になっている。そのため、上述のように電池の性能が集熱のために抑制されていると考えられる。このようなことから、太陽熱と電池の出力が相互に影響せず、電気も熱も効率よく得る方法について考察した。

太陽電池パネルと集熱の方法は図2に示すようなものである。光熱ハイブリッドパネルのように集熱と電池を一体化せず、既に温水器として市販されている給湯用の集熱器を利用するものである。図に示されたようにある角度をもった屋根に設置された集熱器とほぼ平行にある距離をもって太陽電池パネルは設置される。温水を得るために、集熱器に太陽光が入射しなければならないため、太陽電池パネルの電池以外の部分は透明体で構成され、太陽電池は結晶系を用いるものとする。このような配置において、集熱器の表面が太陽光で加熱され、周囲温度より高くなると浮力が生じ、集熱器と太陽電池パネルの空間に流れが生ずる。この流れによって下から周囲温度の空気が流入し、太陽電池パネルの下部から気流に熱が伝えられ、太陽電池の温度が上昇するのを阻止することができる。従って、このような方式により前節で行なったエクセルギ-解析で示されたように太陽電池の性能を低下させずに太陽熱が得られると考えられる。

このような考えのもとで浮力によって生じた自然対流による太陽電池パネルの冷却について以下のように簡単な解析を行なった。

図2は上述の提案した方式をモデル化した図で、次のような仮定のもとで解析を行なった。

- (1) 集熱器で加熱して上昇する気流は太陽電池パネルに熱は伝えないものとする。
- (2) 浮力で生じた気流の出口温度は太陽電池パネル温度に等しいものとする。
- (3) 太陽電池パネルが吸収した熱と集熱器から放出さ

れた熱は気流で運ばれるものとする。

(4) 集熱器、太陽電池パネルの温度は一樣とし、系は自然風に影響されず定常とする。

このような仮定において、まず、太陽電池パネルが吸収した熱量、 q_s は、

$$q_s = \alpha_s (1-R) Q_0 \quad (13)$$

ここで、 α_s , R は太陽電池パネルの吸収率と透過面積比(太陽電池パネルの全面積のうち集熱器に透過する面積の割合)である。

集熱器からの放出熱量、 q_c は、

$$q_c = \tau_s R (1-\eta_c) Q_0 \quad (14)$$

τ_s は太陽電池パネルの透過率である。

一方、集熱器と太陽電池パネルの空間の出入り口で、集熱器の表面で加熱されて浮力により生じた圧力差、 Δp は、

$$\begin{aligned} \Delta p &= g L \rho \beta (T_c - T_0) \sin \theta \\ &= g L \rho \beta \tau_c \sin \theta \quad (15) \end{aligned}$$

である。 $g, L, \rho, \beta, \theta$ は重力加速度、太陽電池パネルの流路長さ、空気の見重量、体膨張率、水平面と屋根のなす角度である。

この圧力差で流れが生じた時、この空間を流れる層流の平均速度を U_m とすると、圧力差と平均速度の間に次のような関係式が成り立つ⁽⁸⁾。

$$\Delta p = 12 \mu U_m L / S^2 \quad (16)$$

ここで、 μ, S は空気の粘性係数、集熱器と太陽電池パネルとの隙間の距離である。

(15), (16)式より平均流速、 U_m は、

$$U_m = S^2 g \beta \tau_c \sin \theta / 12 \nu \quad (17)$$

となる。但し、 ν は動粘性係数($=\mu/\rho$)である。

(17)式から単位時間の流量が定まり、気流の温度上昇から空気流に与えられた熱量が決まる。即ち、

$$SW U_m C_p \rho (T - T_0) \sin \theta = WL (q_s + q_c) \quad (18)$$

ここで、 W, C_p は太陽電池パネルの幅、空気の比熱である。

(18)式に(13), (14)式を代入すると、太陽電池パネルの温度は次のように求められる。

$$\tau = 12 \nu L Q_0 [\alpha_s (1-R) + \tau_s R \{1 - \eta_{oc} + U_c \tau_c\}] / (S^3 g \beta C_p \rho \tau_c \sin \theta) \quad (19)$$

ここで、 $\tau = T - T_0$ である。

(17), (19)式から求められる平均流速と太陽電池パネルの温度を具体的に示すために表1の値を用いた。その結果例を図3に示した。表1において、空気の物性値は320Kの時の値である。太陽電池パネルの透過率はプラスチック材料とし、吸収率は太陽電池素子の損失因子から推定して求めた。

図3の縦軸は太陽電池パネルの温度と環境温度の

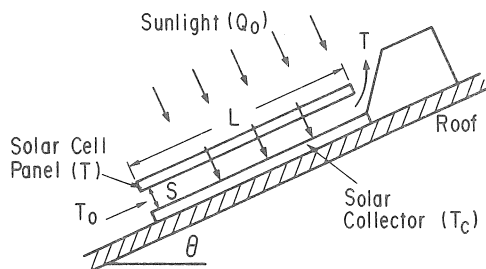


図2 解析における太陽電池パネルと集熱器の配置

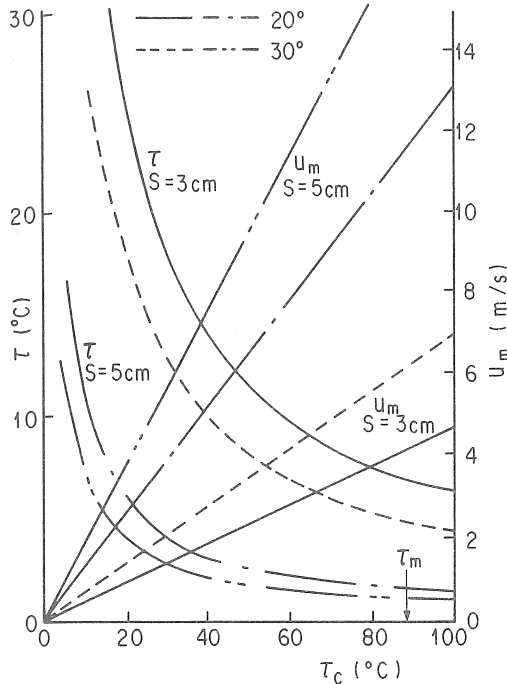


図3 集熱温度とそれによって生じた浮力による気流の速度と太陽電池パネル温度との関係

表1 解析に用いた値

C_p (kJ/kgK)	1.008	τ_s	0.8
ρ (kg/m ³)	1.102	α_s	0.5
ν (mm ² /s)	17.86	R	0.3
T_o (K)	300	L (m)	2
Q_o (kW/m ²)	1.0	θ (°)	20, 30

差、 τ と集熱器とパネルとの間に浮力で生じた流れの平均流速、 U_m である。横軸は、集熱器の温度と環境温度との差、 τ_c である。(17)式からもわかるように平均流速は τ_c に比例するため図に見られるように τ_c の増加とともに直線的に増大するとともに、パネルの設置角度が大きくなると浮力が大きくなり、流速が増大する。また、空気流の間隔が大きくなると流速が急激に増大する。

一方、太陽電池パネルの温度は流速に反比例して減少し、 τ_c が大きくなるに従って温度は急激に減少する。この例では、集熱器とパネルとの距離を約5cmにして、集熱温度を環境温度より約40°C以上にすると、パネルの温度上昇幅は約4°C以下となり、また、図中に示した集熱器のエクセルギー効率最大の集熱温度、 τ_m 以

上では、パネルの温度上昇は小さい。

以上の結果から図2のような配置によって効率が向上することを示した一例が図4である。縦軸の値、 η_t は、集熱器と太陽電池のエネルギー効率を加えた総合効率である。従来方式の効率の値は(10)と(11-1)の式から求めた値である。本方式の場合は、集熱器と太陽電池パネルの間隔を5cm、屋根の傾斜角度を30°として、(10)式及び(11-1)式の τ_c を図3の τ の値と置き換えて求めた。この図からわかるように集熱温度 τ_c が高くなるほど、両者の効率の差が大きくなる。両者の集熱器の効率は(11-1)式から求められているので、図に示された効率の差は、結局太陽電池の出力差から生じたことになる。この結果から本方式のように太陽電池パネルと集熱器を離して配置すれば、図1のように集熱器からの影響をパネルは受けないので、両者をエクセルギー効率の高い所で利用できる。従って、電池の素子を冷却することによって、標準状態に近い所での性能を得ることができ、図2のような構成をとることによって太陽の熱と光を有効に利用できる。なお、図3によれば、電池の温度上昇 τ は曲線的に変化しているが、図4では、本方式の効率は直線的に変化している。これは、(10)と(11-1)の式からわかるように、集熱器のエネルギー効率に比べて太陽電池のその効率が小さいため、太陽電池の素子温度が図3のように変化しても、その影響が小さいので、本方式の総合効率も直線的に変化する。また、本解析において、 $\tau_c=0$ では、(15)

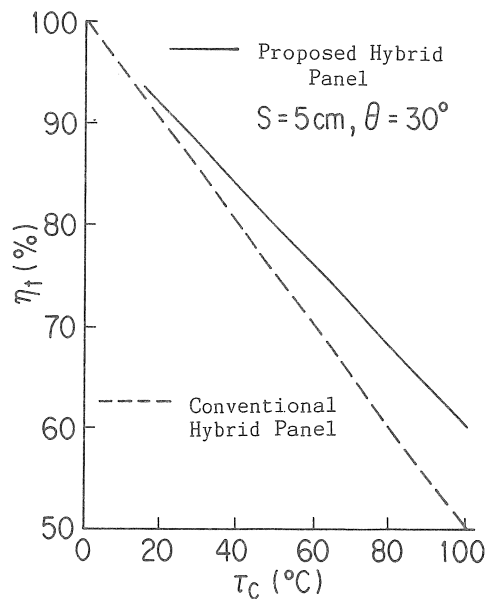


図4 本方式と従来方式との性能比較

式からわかるように浮力による流れがなくなるため、その点が特異点となり、(19)式から太陽電池素子の温度上昇を求めることはできない。

このように透明部材を用いた太陽電池パネルと集熱器を図2のように配置すれば、集熱器で給湯用等の熱が得られると同時に太陽電池パネルが冷却されるために電気と熱が有効に得られる。また、給湯用の温水器を用いなくて、太陽電池パネルを単独で使用する場合、太陽電池素子の温度が上昇し、出力が低下するとの報告がある^(10,11)。従って、本解析で扱ったような透明材質で構成した太陽電池パネルを屋根と隙間をもって設置すれば、上述のように自然対流によって電池の温度上昇を抑制することができ、太陽電池パネルの出力を標準状態に維持しながら安定な出力が得られるようになると思われる。

4. 結論

これまでに我が国で進められた太陽熱と光の技術を統合した光熱ハイブリッドシステムの研究開発が行なわれてきたが、それらの研究成果を踏まえ、集熱と太陽電池との組み合わせについて、エクセルギーを導入してエネルギーの質を評価し、既に実用化されている集熱器と太陽電池パネルを組み合わせ太陽から電気と熱を効率よく得る方法について検討した。その結果、次のような結論を得た。

(1)太陽電池と集熱部を一体化して組み合わせるよりも太陽電池の温度が上昇しないように集熱部を設置することが重要である。

(2)太陽電池の温度が上昇しないようにするため、ここで提案したような自然対流による冷却効果を利用することが重要である。

ここで提案したような透明部材を用いた太陽電池パネルが一部開発されているが、この種のパネルを用い、図2のような構成を考えることによって我が国で太陽エネルギー利用技術の実用普及を図るのに本研究は大いに寄与すると考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり多大な御助言と御協力を賜りました電子技術総合研究所、エネルギー基礎部、杉崎弓エネルギー基礎部長、エネルギー部、梶川武信環境エネルギー研究室長、黒川浩助エネルギー情報技術研究室主任研究官に深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1)田中,他2名,電総研研究報告,870号 (1985)
- (2)門谷,太陽光発電システムシンポジウム予稿集,4-45 (1990)
- (3)縄田,系統連係型太陽光発電システムの年間発電量

の予測,太陽エネルギー,16,6,19 (1990)

(4)押田,エクセルギー講義,9 (太陽エネルギー研究所)(1986)

(5)A.Suzuki,et al, Application of Exergy Concept to the Analysis of Optimum Operating Considerations of Solar Heat Collectors, Trans. of ASME. J. Solar Energy Eng., 109, 337 (1987)

(6)藤原,電総研研究報告,919号 (1990)

(7)中西,他2名,太陽熱エネルギーの資源化に関する研究(文部省科研費重点領域研究報告書),4 (1990)

(8)例えば,R.J.Komp, INTERSOL 85,3, 1748 (1986)

(9)J.G.Knudsen&D.L.Katz, Fluid Dynamics and Heat Transfer,100 (McGraw-Hill)

(10)吉見,太陽エネルギー,Vol.16, No.1, 17 (1990)

(11)(株)四国総合研究所,1MW級太陽光発電システムの設計とその実証に関する研究,83 (1990)