

ACモジュールの出力特性解析

Analysis of Output Characteristics of AC module

町田 定之^{*1}

Sadayuki MACHIDA

谷 辰夫^{*2}

Tatsuo TANI

Abstract

AC module is the photovoltaic module with inverter. It can use the power output of module effectively and can reduce the system cost by mass production. Several companies have already commercialized it in Europe.

Authors measured and evaluated the output characteristics of AC module that combined the module of Showa Cell and the inverter of NKF (Netherlands). As the results, the following things were found.

1) The relationship between solar cell and environmental factor was clarified. The error of approximation formula was less than 10%. 2) The relationship between solar cell output and its temperature was clarified. The error of approximation formula was less than 5%. 3) The minimum, maximum and average value of comprehensive efficiency in August was 0.82, 0.89 and 0.88. 4) The average coefficient of utilization of module in August was about 15%. 5) When inverter capacity is made into 80% of module capacity, the amount of power in August decreases 0.2%.

Key Words : AC module, output characteristics, photovoltaic module, inverter, coefficient of utilization

ACモジュール, 出力特性, 太陽電池モジュール, インバータ, 利用率

1. 序 論

太陽電池モジュールとインバータを一体化した AC モジュールはモジュール出力を交流変換するため I-V 特性の異なる(太陽電池や環境の相違により生ずる)モジュールと組み合わせてもその影響を受けず, その意味でモジュール出力を有効に利用できる。また大量生産によりシステムコストを低減できる特長がある。既に欧州では数社が商品化しているが, 我国では試作段階でありシステム評価・設計上必要なデータは収集されていない。そこで筆者らは昭和シェル石油社の太陽電池モジュールと NKF 社(オランダ)のインバータを組合せた AC モジュールの出力特性を測定し, 1)太陽電池の出力評価, 2)インバータの性能評価, 3)システム評価を行った。

太陽電池の最大電力は通常測定器以外, 負荷を接続せずに測定されるが, 実使用では太陽電池から常時電力を取り出す為測定時よりモジュール温度が低下して最大電力は増加している。従来この点が明確に区別されておらずその差違が不明であった。本稿では同一モジュールを使用して双方のモジュール温度と最大電力を測定してその違いを明らかにし, 太陽電池温度と出力の関係を求めた。またモジュール一体型インバータについては国内での報告例がなくデータの信頼性が問われていたが, 本稿では実使用

状態での太陽電池出力評価を踏まえてインバータ性能を評価した。更に従来のシステム評価は経済性より発電性能に重点を置いていた関係上システム構成機器の性能評価が中心で, 構成機器の利用率を評価して機器容量を決定するプロセスが欠落していた。この為太陽電池と周辺機器との経済的整合性が保たれていない設備が多く見受けられる。そこで本稿では構成機器が有効に利用されているか否かを判断する指標である設備利用率を算出してシステム評価すると共に適正なインバータ容量について考察した。

以上本稿で検討した内容は一般的な太陽光発電システムにも共通した問題であるが, 従来必ずしも明確にされ得なかった事柄であり, 検討結果は一般的な太陽光発電システムの評価・設計にも活用できる。

2. 測定概要

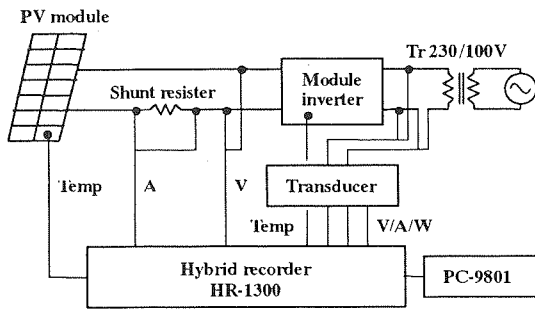
本実験では太陽電池モジュールとインバータを組合せた AC モジュールの測定装置と太陽電池モジュール単体の測定装置を本学 9 号館屋上(地上約 40m)に設置した(図 1)。太陽電池は受光面真南, 傾斜角 35.5° で架台に取付けている。まず AC モジュール測定装置では, 商用系統に連系してインバータの入力電圧・電流, 出力電圧・電流・電力(トランスデューサーにて直流電圧に変換)及びインバータ温度, モジュール温度データをハイブリッドレコーダ(横河

*1 東京理科大学大学院生

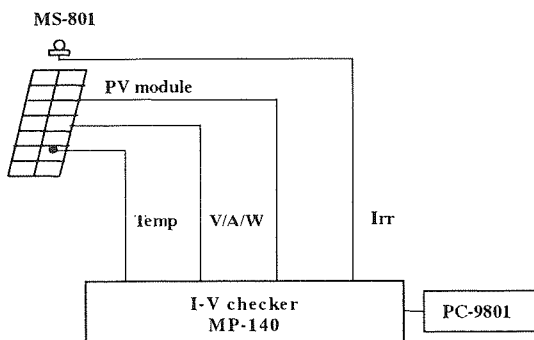
*2 東京理科大学教授・工博(東京都新宿区神楽坂1-3)
(原稿受付:平成13年6月25日)

Graduate Student of Science University of Tokyo.
Professor, Science University of Tokyo, Dr. Eng.

電機製)に取込み、パソコンに記録している。また太陽電池モジュール測定装置では測定器以外、負荷を接続せずに電圧・電流・電力、日射強度、モジュール温度を I-V チェッカー(英弘精機製)で測定し、パソコンに記録している。測定間隔はいずれも 1 分である。外気温度、風速は別装置にて測定している。太陽電池仕様を表 1、インバータ仕様を表 2 に示す。



(a) AC モジュール測定装置



(b) 太陽電池モジュール測定装置

図 1. 実験装置の構成

表 1. 太陽電池仕様

形式名称	GT172 (単結晶)
最大出力 P_{max} [W]	109
開放電圧 V_{oc} [V]	43.2
短絡電流 I_{sc} [A]	3.47
最大出力動作電圧 V_{mp} [V]	34.6
最大出力動作電流 I_{mp} [A]	3.16
温度係数 κ [W/°C]	0.0042
モジュール面積 A [m ²]	0.787

(測定条件: 放射照度 1.0kW/m², モジュール温度 25°C)

表 2. インバータ仕様

形式名称	OK4E
電気方式	単相 2 線式
定格容量 [W]	100
直流入力電圧 [V]	24~50
交流出力電圧 [V]	230(190~270)
周波数範囲 [Hz]	49.0~51.0
使用温度範囲 [°C]	-40~85

3. 太陽電池の出力評価

AC モジュールは太陽電池で太陽光を電力に変換し、インバータで太陽電池から最大電力を引出して交流変換するものであるから、その性能を評価するにはまず太陽電池側で得られる最大電力を知る必要がある。太陽電池モジュールの最大電力は通常測定器以外、負荷を接続せずに(本稿ではこれ無負荷状態と称する)測定されるが、実使用では太陽電池から常時電力を取り出す為測定時よりモジュール温度が低下して最大電力は増加している。本稿では実使用時の最大電力を求める為にまず無負荷状態と連系時のモジュール温度の違いについて考察し、次で太陽電池出力とモジュール温度との関係を明らかにする。

3.1 太陽電池のエネルギー収支

太陽電池に吸収された太陽エネルギーの大半は熱エネルギーに、一部は電気エネルギーに変換される。この電気エネルギーを外に取り出すとその分モジュール温度は低下するが、取り出さないと熱エネルギーとなってモジュール温度を上昇させる。これを数式で表現すると以下の様になる。

まず PV の太陽光暴露下でのエネルギー収支は次式で表わされる⁽¹⁾。各記号の内容は文末に示す。

$$E_i = E_p + E_c + E_l \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_i = (1 - \rho)IA \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$E_p = P_{max} = I\eta\{1 + \kappa(T_c - 25)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$E_c = MA \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$E_l = \alpha A(T_c - T_a) + \sigma \epsilon A(T_c^4 - T_a^4) \quad \dots\dots\dots (5)$$

故に連系時 PV のエネルギーバランスは、

$$(1 - \rho)IA = P_{max} + MA \frac{\partial T_{cg}}{\partial t} + \alpha A(T_{cg} - T_a) + \sigma \epsilon A(T_{cg}^4 - T_a^4) \quad \dots\dots\dots (6)$$

また無負荷 PV のエネルギーバランスは、

$$(1 - \rho)IA = MA \frac{\partial T_{cu}}{\partial t} + \alpha A(T_{cu} - T_a) + \sigma \epsilon A(T_{cu}^4 - T_a^4) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(6), (7)式の右辺を等しいと置けば、

$$\begin{aligned} P_{max} &= MA \left(\frac{\partial T_{cu}}{\partial t} - \frac{\partial T_{cg}}{\partial t} \right) + \alpha A(T_{cu} - T_{cg}) + \sigma \epsilon A(T_{cu}^4 - T_{cg}^4) \\ &\approx MA \left(\frac{\partial T_{cu}}{\partial t} - \frac{\partial T_{cg}}{\partial t} \right) + U_l A(T_{cu} - T_{cg}) \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

となる。したがって、 T_{cu} と T_{cg} の温度変化の割合が同じであれば P_{max} は T_{cu} と T_{cg} の差にほぼ比例する事になる。

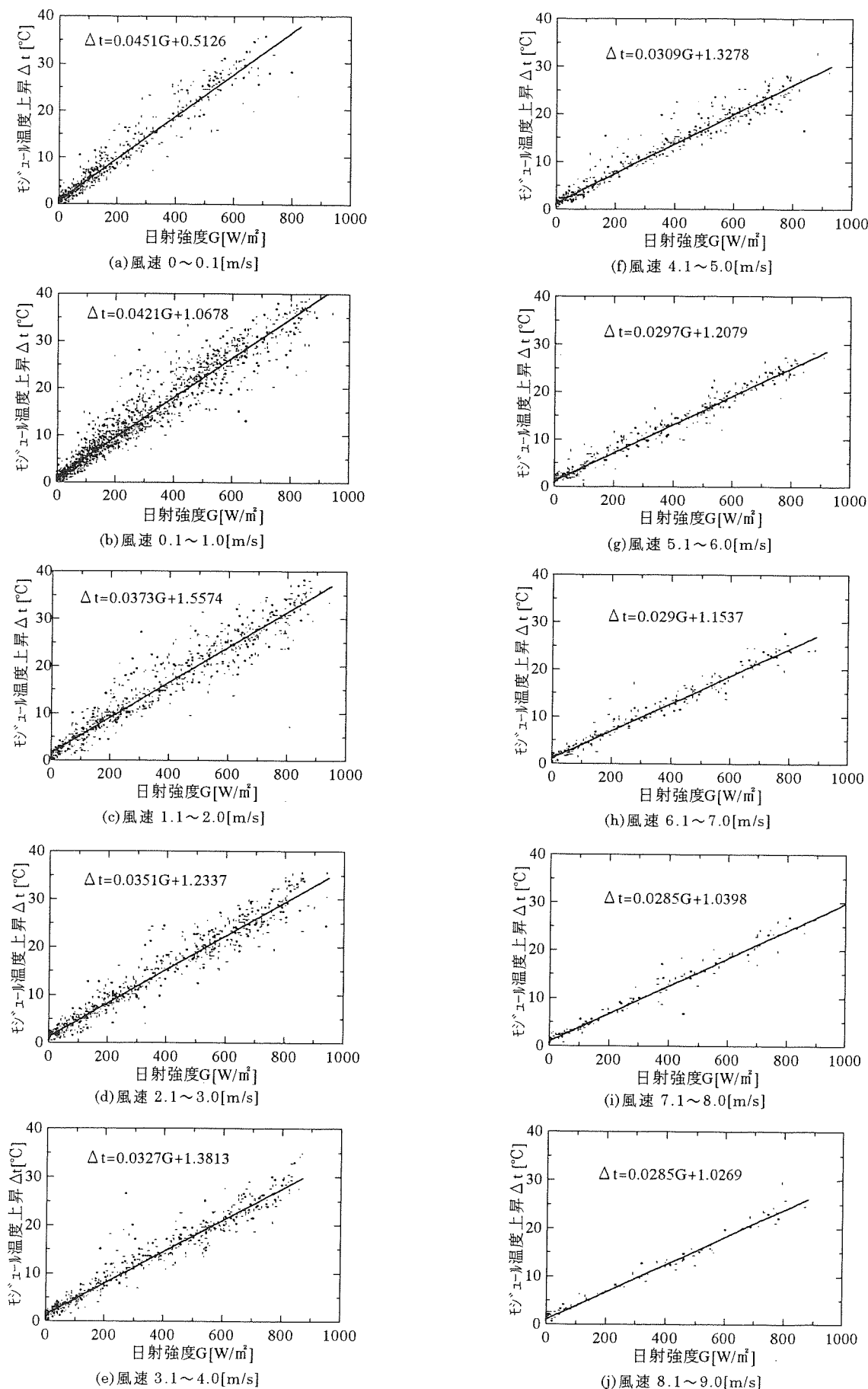


図 2. モジュール温度上昇と日射強度の関係(無負荷)

3.2 無負荷モジュール温度・連系時モジュール温度

モジュール温度は日射強度・外気温度・風速等の環境因子によって異なる事が知られている。ここでは無負荷モジュール温度、連系時モジュール温度と環境データの実測値(2000年8月)を用いてそれぞれのモジュール温度と日射強度・外気温度・風速との関係を明らかにする。

まず測定データを風速の強さ毎10段階に分類し、各風速段階におけるモジュール温度上昇(外気温度とモジュール温度との差)と日射強度の関係を求める(図2)。次にモジュール温度上昇と日射強度の関係式から各風速段階の基準日射強度(1kW/m^2)におけるモジュール温度上昇値を求める。そしてこれよりモジュール温度上昇と風速の関係を求めると⁽²⁾図3のようになる(連系時も同様に求めて)。図より無

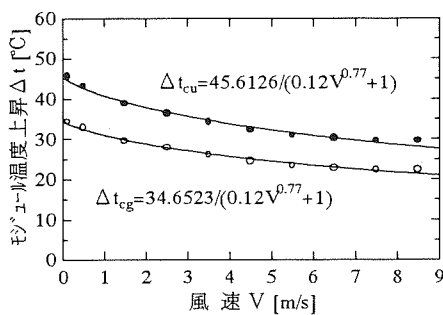
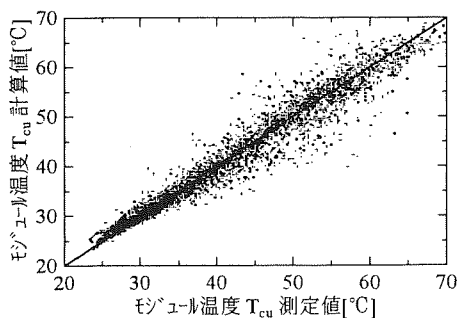
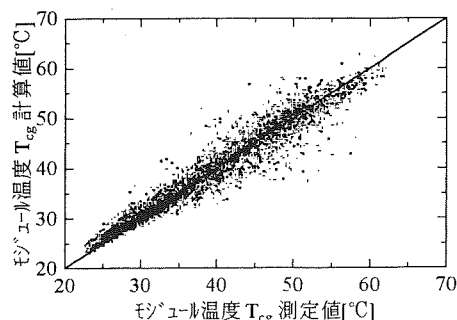


図3. モジュール温度上昇と風速の関係($G=1000\text{W/m}^2$)



(a) 無負荷



(b) 連系時

図4. モジュール温度 T_{cu} , T_{cg} 計算値と実測値の比較

負荷状態と連系時の基準日射強度におけるモジュール温度差は無風で約 10°C 、風速の増加により若干減少するものの、ほぼ一定である事が分った。

図3の関係式をさらに一般的に表わすと無負荷モジュールの場合は(9)式のようになる。

$$\Delta t_{cu} = (0.0451G + 0.5126) / (0.12V^{0.77} + 1) \dots\dots\dots (9)$$

また、連系モジュールの場合は(10)式のようになる。

$$\Delta t_{cg} = (0.0345G + 0.1523) / (0.12V^{0.77} + 1) \dots\dots\dots (10)$$

(9), (10)式を用いて無負荷モジュール温度、連系時モジュール温度を計算し、実測値と比較すると図4のようになる。日射強度とモジュール温度の応答速度の違いもあり若干数値にバラツキがあるが誤差はほぼ10%以内である。

3.3 太陽電池出力とモジュール温度の関係

前項の考察から無負荷 PV 温度と連系時 PV 温度は環境因子に依らずほぼ一定の温度差がある事が分った。そこで次に太陽電池出力とモジュール温度の関係について検証する。

前提条件としてモジュール温度は電力を取り出すとその分低下するものとする。現実には図5に示す様に無負荷 PV 温度と連系時 PV 温度の差分の変化は取り出される電力の変化と完全には一致しない。これは PV の熱容量によるものと考えられる。図6は無負荷 PV 温度と連系時 PV 温度を時系列に比較したものであるが午前と午後でモジュール温度が異なっているのが分る。ここではこの様な現象による

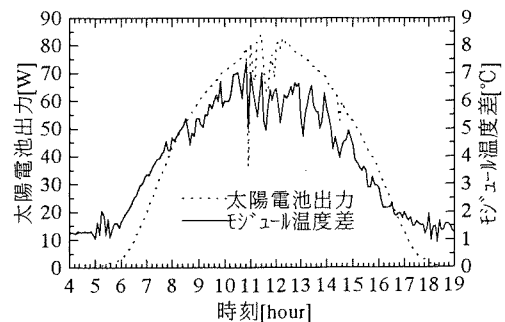


図5. 太陽電池出力とモジュール温度差(8月1日)

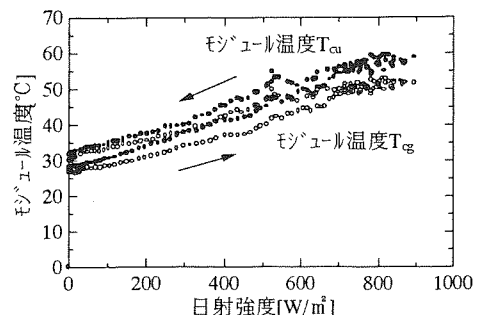


図6. モジュール温度のヒステリシス(8月1日)

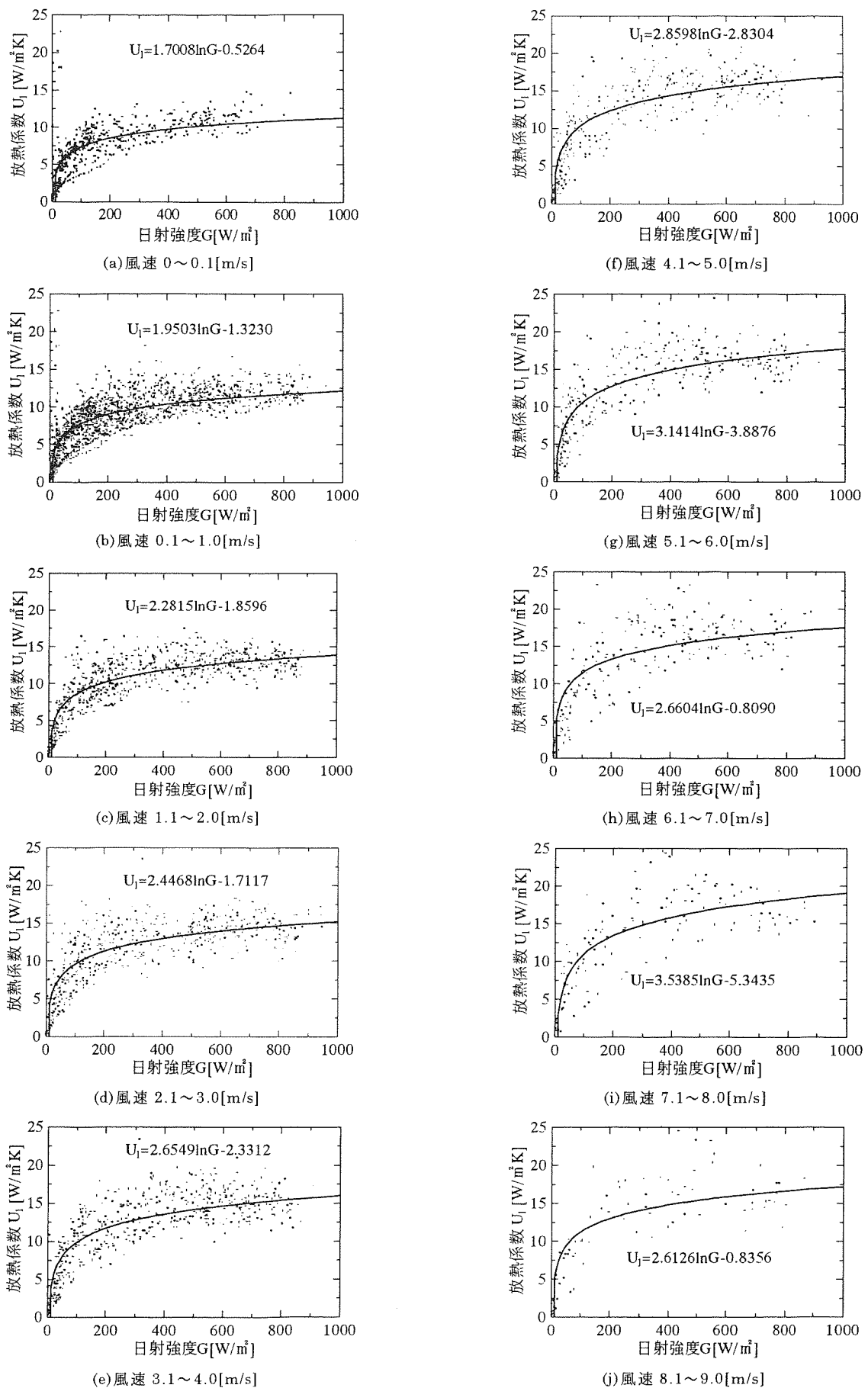


図 7. 放熱係数と日射強度の関係

影響は小さいものとして取り扱う。すなわち 3.1 の (8) 式において第 1 項は無視し、以下の手順により放熱係数を求める。

まず簡略化した (8) 式に無負荷 PV 温度、連系時 PV 温度、太陽電池出力の実測値を代入して放熱係数を求め、前項同様それを風速の強さ毎 10 段階に分類して各風速段階における放熱係数と日射強度の関係を求める (図 7)。次に放熱係数と日射強度の関係式から各風速段階の基準日射強度 (1kW/m^2) における放熱係数を求める。そしてこれより放熱係数と風速の関係を求めると図 8 のようになる。放熱係数は風速が増加するに連れ大きくなるが、風速が 7m を超えたあたりから飽和する。

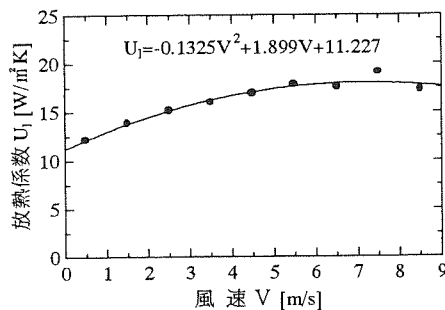


図 8. 放熱係数と風速の関係 ($G=1000\text{W/m}^2$)

図 8 の関係式をさらに一般的に表わすと (11) 式の様になる。

$$U_j = (0.1516 \ln G - 0.0469) (-0.1325V^2 + 1.899V + 11.227) \quad \dots\dots\dots (11)$$

(11) 式を用いて連系時のモジュール温度を無負荷時のモジュール温度から計算し、実測値と比較すると図 9 のようになる。幾つかの前提条件を設定しての計算であるが誤差は 5% 以内である。

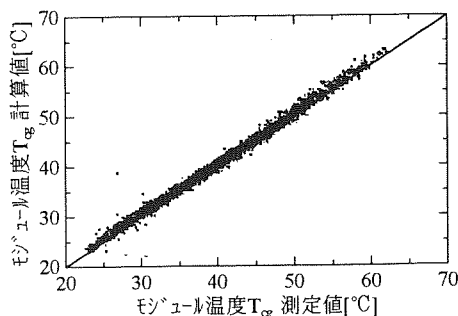


図 9. モジュール温度 T_{cg} 計算値と実測値の比較

3.4 モジュール温度と最大電力

前項の考察で太陽電池から出力を取り出すとモジ

ュール温度がどの程度低下するか分った。次にモジュール温度が低下すると最大電力がどの程度変化するか検証する。まず (12) 式を用いて無負荷 P_{max} を 25°C に温度補正した P_{max25} を求める。次に (13) 式を用いて P_{max25} を T_{cg} に温度補正した連系時 P_{max}' を求める。

$$P_{max25} = P_{max} / \{1 - \kappa(T_{cu} - 25)\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$P_{max}' = P_{max25} \{1 - \kappa(T_{cg} - 25)\} \\ = P_{max} \{1 - \kappa(T_{cg} - 25)\} / \{1 - \kappa(T_{cu} - 25)\} \quad \dots (13)$$

ここで無負荷 P_{max} と連系時 P_{max}' の比とモジュール温度差を比較すると図 10 のようになる。この日のモジュール温度差は最大で約 7°C 、無負荷 P_{max} は連系時 P_{max}' より最大で約 3% 小さい。

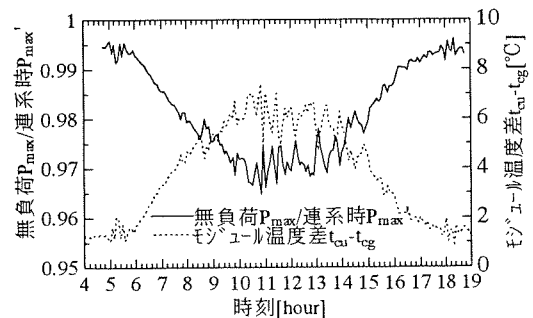


図 10. P_{max} 比とモジュール温度差 (8 月 1 日)

4. インバータの性能評価

太陽光発電用インバータには太陽電池から最大出力を引き出す (最大電力追従制御) 能力と、それを交流電力に変換する (電力変換) 能力とが求められる。それ故インバータ総合効率は (14) 式で表わされが、これまでは多くの場合電力変換効率のみで評価され、 P_{max} 制御効率は 1 と見なしていた。本稿では無負荷 PV 出力と連系時 PV 出力を測定して (15) 式より P_{max} 制御効率を求めた。またインバータ入力電力、出力電力を測定して (16) 式より電力変換効率を求めた。そしてこれらを (14) 式に代入してインバータ総合効率を求めた。

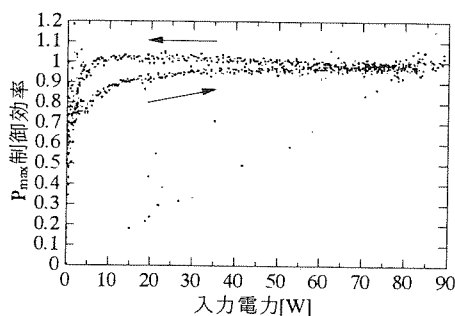
$$\text{インバータ総合効率} = P_{max} \text{制御効率} \times \text{電力変換効率} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$P_{max} \text{制御効率} = \frac{\text{インバータ入力電力}}{\text{連系時 PV 最大電力}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{電力変換効率} = \frac{\text{インバータ出力電力}}{\text{インバータ入力電力}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

4.1 P_{max} 制御効率

図 11 に 8 月 1 日の P_{max} 制御効率を示す。この日は急激な日射変動が無い快晴であったが、午前中は入力 20W 以下で 0.9 以下、午後になると入力 10W 以上ではほぼ 1.0 となる等、午前と午後で P_{max} 制御効率が明確に異なる現象が見られた。これは同一日射強度における無負荷モジュールと連系モジュールの最大電力が午前と午後で異なる事を示している。同日のモジュール温度差を見ると(図 6), 無負荷モジュールと連系モジュールの温度差は午前の方が午後より大きい。これは PV の熱容量によるものと考えられるが、この温度差により無負荷最大電力と連系時最大電力に差が生じていると推測される。尚、図 11 において P_{max} 制御効率が 1 を僅かに超えているのは温度補正による誤差と考えられる。

図 11. P_{max} 制御効率(8 月 1 日)

4.2 電力変換効率

図 12 に 8 月 1 日の電力変換効率を示す。入力 20W 以下では数値にバラツキが見られるが概ね入力 2W 程度まで高い値(0.8 以上)である。また最大は入力 50W の時の 0.94、インバータが出力を開始する入力(スタートパワー)は約 0.7W(日射強度 10.53W/m²)である。

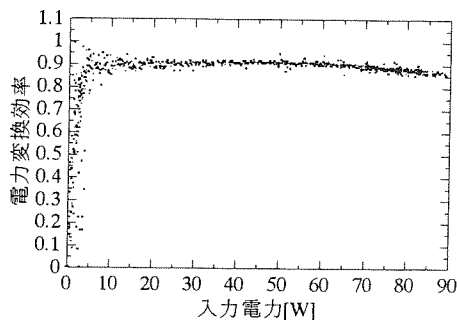


図 12. 電力変換効率(8 月 1 日)

低入力時の数値のバラツキの理由を考える上で同

日の低日射領域におけるインバータ入出力電力の変化を見ると(図 13), 共にモジュール温度差により午前と午後で電力差があるが、出力電力の方が入力電力より若干変動が大きい事が分る。これは低日射領域の太陽電池動作電圧が不安定になる為と考えられる。

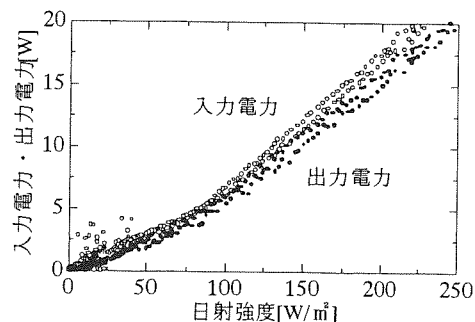
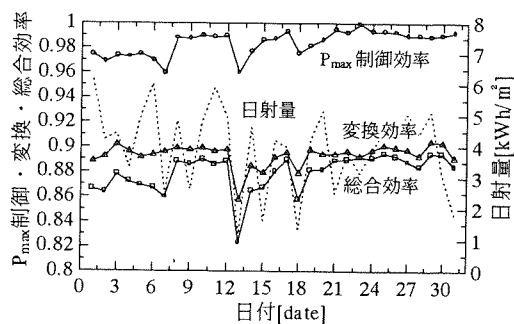


図 13. 日射強度に対する入出力電力の変化(8 月 1 日)

4.3 総合効率

図 14 に 8 月の日平均 P_{max} 制御効率, 電力変換効率, 総合効率を示す。日射量が低下すると何れも低下する傾向にあるが、8 月 1 日, 6 日の様に日射量が高いにも係らず P_{max} 制御効率が低いケースもある(その理由については 4.1 で述べた)。総合効率の最小値は 0.82, 最大値は 0.89, 月平均 0.88 である。

図 14. P_{max} 制御効率, 電力変換効率, 総合効率(8 月)

5. システム評価

前項迄の考察により太陽電池出力, インバータ性能が明らかとなった。そこで次にこれらを組合せたシステムとしての評価を試みる。システム評価は発電性能を基準とするか経済性を基準とするかで結果が異なる。従来のシステム評価は経済性より発電性能に重点を置いていた関係上システム構成機器の性能評価が中心で、構成機器の利用率を評価して機器容量を決定するプロセスが欠落していた。この為太陽電池と周辺機器との経済的整合性が保たれてい

い設備が多く見受けられる。ここでは構成機器が有効に利用されているか否かを判断する指標である設備利用率を算出してシステム評価すると共に適正なインバータ容量について考察する。

太陽電池利用率、インバータ利用率を次式で定義する。

$$\text{太陽電池利用率} = \frac{\text{太陽電池最大電力}}{\text{太陽電池定格出力}} \quad \dots\dots (17)$$

$$\text{インバータ利用率} = \frac{\text{インバータ入力電力}}{\text{インバータ定格入力}} \quad \dots\dots (18)$$

5.1 太陽電池利用率

図 15 に 8 月中の PV 利用率と PV 平均利用率を示す。PV 利用率は 5 分平均値を大きいものから順にプロットした。また PV 平均利用率は 8 月の延べ時間 744h で平均化した PV 利用率である。本稿の太陽電池設置条件では統計的に見て 8 月が最も日射量が多く⁽³⁾、太陽高度の関係から最も日射の強い月であるが、PV 利用率が 80% を超えた時間数は僅か 1 時間である。したがって周辺機器の設備容量の上限値は太陽電池容量の 80% を基準としておけば十分である。尚 PV 平均利用率は約 15% であったが、自立分散電源の年間平均利用率はコジェネ(電熱併給機関)でさえ 40~70% であるからそれと比較するとかなり低い値になっている。自然エネルギーの場合運転時間に制約があり、このハードルは決して低くはないが、今後限られた運転時間の中での利用率向上が期待される。

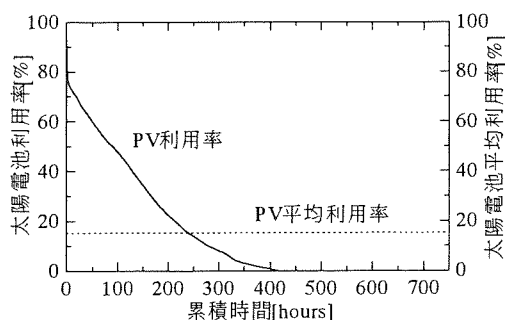


図 15. 太陽電池利用率(8 月)

5.2 インバータ利用率

図 16 に 8 月中のインバータ利用率とそれに対応した出力積算比を示す。インバータ利用率は 5 分平均値を大きいものから順にプロットした。また出力積算比は 8 月中の全出力積算値に対する割合を示す。図よりインバータ利用率が 80% を越える事は殆どない事が分る。因みにインバータ利用率 80% 以上の

出力積算値は 473Wh, 入力 80W 超過分に対応する出力積算値は 26Wh で、8 月中の全出力積算値 10859Wh の 4%, 0.2% でしかない。したがって、インバータ入力が制限値を超える場合に太陽電池の動作点を変化させてインバータ入力を制限する事で、インバータ容量をモジュール容量の 80% としても全出力電力に殆ど影響はない。この様に考えると 130W モジュールであっても 100W のインバータで十分対応可能となる。

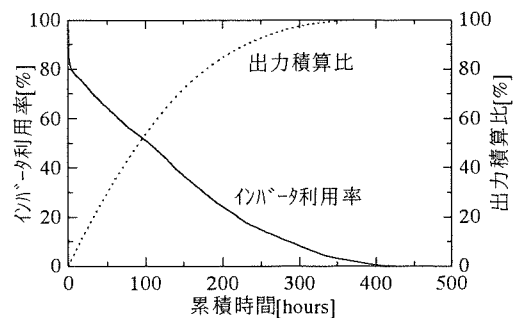


図 16. インバータ利用率(8 月)

6. 結 論

本稿では昭和シェル石油社の太陽電池モジュールと NKF 社のインバータを組合せた AC モジュールの出力特性を測定し、1) 太陽電池出力評価、2) インバータ性能評価、3) システム評価を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 常時負荷を接続した太陽電池と測定器以外、負荷を接続しない太陽電池の温度を日射強度・外気温度・風速から導く近似式を示した。また太陽電池温度と出力の関係を放熱係数を用いて表わし、放熱係数を日射強度・風速から導く近似式を示した。誤差はそれぞれ 10%, 5% 以下であった。
- (2) インバータの P_{max} 制御効率は入力 10W 以上ではほぼ 1 であるが、PV の蓄熱量により低下する事がある。電力変換効率は入力 2W 以上で 0.8 以上であるが、低日射領域 ($200\text{W}/\text{m}^2$ 以下) で太陽電池動作電圧が不安定となる為、数値にバラツキが見られる。8 月の総合効率の最小値は 0.82, 最大値は 0.89, 平均 0.88 であった。
- (3) 8 月の PV 利用率が 80% を超えた時間数は僅か 1 時間で、太陽電池平均利用率は約 15% であった。また 8 月中のインバータ利用率 80% 超過分に対応する出力積算値は全出力積算値の 0.2% である。したがって周辺機器の設備容量の上限値は太陽電池容量の 80% を基準としておけば十分である。

参考文献

- (1) 秋澤・山本・柏木：「吸着式冷凍サイクル結合型太陽光発電システム温度シミュレーション」，日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集，B22，1996
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(委託先 財団法人 日本品質保証機構)：太陽光発電システム実用化技術開発「太陽光発電システム評価技術の研究開発」(システム評価技術の研究開発)，p.159～p.185，1995
- (3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(委託先 財団法人 日本気象協会)：太陽光発電システム実用化技術開発「発電量基礎調査」(周辺技術の研究開発)，p.194，1987
- (4) 町田定之・谷辰夫：「AC モジュールの出力特性解析(その 1)」平成 12 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会，No.23，2000

<記号>

A : PVモジュール面積 [m^2]
 E_i : PVモジュール日射吸収量 [W/m^2]

E_c : PVモジュール蓄熱量 [W/m^2]
 E_f : PVモジュール放熱量 [W/m^2]
 E_p : PVモジュール発電量 [W/m^2]
 I : PVモジュール受光面日射量 [W/m^2]
 M : PVモジュール熱容量 [W/m^2]
 P_{max} : PVモジュール最大電力 [W]
 T_c : PVモジュール温度 [K]
 T_{cg} : 連系時 PVモジュール温度 [K]
 T_{cu} : 無負荷 PVモジュール温度 [K]
 U_l : PVモジュール放熱係数 [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
 α : PVモジュール熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
 ε : PVモジュール放射率
 η : PVモジュール変換効率
 κ : PVモジュール温度係数 [W/K]
 ρ : PVモジュール反射率
 σ : ステファンボルツマン定数 [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$]
 Δt_{cu} : 無負荷モジュール温度上昇 [$^{\circ}\text{C}$]
 Δt_{cg} : 連系時モジュール温度上昇 [$^{\circ}\text{C}$]
 G : 日射強度 [W/m^2]