

多結晶 Si 型と薄膜 CIS 型による太陽光発電システムの検討 －異方位アレイの出力特性－

Study on PV Systems with p-Si and CIS Modules － Output Characteristics of Array Different Aspect －

車 孝 軒^{*1}
CHE Xiaoxuan

藤 澤 徹^{*2}
Toru FUJISAWA

Abstract

The crystal silicon solar modules have been widely used in photovoltaic (PV) systems to generating electric power. But the new solar modules such as thin film CuInSe₂ (CIS) will be used in the PV systems in the future. We constructed the PV systems that are mixed with poly crystal silicon p-Si array and CIS array. Both p-Si and CIS arrays are separated with east 5° and west 5° of the tilt angle individually.

We researched characteristics of p-Si array, CIS array and the PV systems. The main findings are as follows: The conversion efficiency of CIS array is about 9.83%, p-Si array is about 12.95%. The temperature of CIS module is 21.5% higher than that of p-Si module, the temperature coefficient of CIS module is about -0.30%/°C, and p-Si module is about -0.39%/°C. Though the temperature coefficient of CIS module is lower, the temperature on the back of CIS module rise higher, the output of CIS module is not expected much higher than that of the p-Si module. Additionally, it was found that there are not plural peak points at parallel connected P-V curves when the tilt angles of array are set with east and west by 5° individually.

キーワード：PV システム，CIS 型 アレイ，異方位設置，出力特性，P-V カーブ複峰性

Key Words：PV system, CIS array, different aspect, output characteristics, multi-peaks on P-V curves

1. はじめに

現在の電力用に使用される太陽光発電システムでは，結晶 Si 型太陽電池が主流であるが，高効率，軽量，低コストかつ省資源などの観点から，CuInSe₂（以下，CIS）型や微結晶タンデム型，有機型などの新しい住宅用/電力用太陽電池が次世代の低コスト，高効率薄膜太陽電池として期待されている⁽¹⁾。

CIS 型太陽電池は銅（Copper），インジウム（Indium），セレン（Selenium）から構成される。CIS 型太陽電池の光吸収層に用いられる CuInSe₂ は，直接遷移型半導体で光吸収係数が大きいので，変換効率がよく，薄膜で製作できる。また，長期間の使用に対して安定で経年劣化がなく，耐放射線性に優れる。安価，軽量フレキシブルなどシリコン太陽電池を凌ぐ優れた特性を有し，次世代太陽電池として多いに期待されている⁽²⁾⁽³⁾。

従来の結晶 Si 型太陽電池による太陽光発電システムと新型の CIS 型太陽電池によるシステムのように異なるシ

ステムを混在して利用するケースを想定すると，結晶 Si 型システムと CIS 型システムに関する同一場所における同一条件下のフィールドデータが重要である。さらに，導入量が増えるほど太陽電池アレイを南向最適傾斜面に設置するケースより，多方位に設置するケースが大幅に増えることが予想できる。上記の観点から，今後の太陽光発電システムの有効性と問題点を見出すため，結晶 Si 型システムと CIS 型システムを導入して付属する設備の構築を行った。2つの異なるシステムにはどちらも傾斜角 5° の東西の異方位サブアレイを有するように設置した。このようなシステムの温度特性と出力に特化した詳細な比較例や I-V カーブの実測例が少ないこと⁽⁴⁾⁽¹¹⁾から，本研究では，異方位アレイの日射強度，モジュールの温度特性，アレイ変換効率および同システムの出力特性について検討した。

2. 評価の方法

2.1 設備容量当たりの発電量⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾

設備容量当たりの発電量は(kWh/kWp)，太陽電池モジュールの公称最大出力 P_{m0} (Wp) とモジュール枚数 N ，実際の発電電力 P_{INV_DC} (W) を用いて下記の通り求められる。

^{*1} 神奈川工科大学太陽エネルギーシステム研究開発センター
研究員（〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030）
e-mail: sha@ctr.kanagawa-it.ac.jp

^{*2} 神奈川工科大学創造工学部准教授
（原稿受付 2009 年 6 月 10 日）

$$\frac{\int P_{INV_DC} dt}{P_{m0} N} \quad (1)$$

2.2 定格値と公称値

モジュール出荷時に検査される定格最大出力 P_{STC} (W)は、モジュール裏面に記載される公称最大出力 P_{m0} (Wp)と異なる。定格値は JIS 8913 による出荷時の検査 ($1kW/m^2$, $25^{\circ}C$, AM1.5) によって測定され、公称値の $\pm 10\%$ 以内であることが求められている。アレイの定格に対する実際の出力の比は次式となる。

$$\frac{P_{INV_DC}}{P_{STC} N} \quad (2)$$

2.3 変換効率の温度特性

モジュール温度が上昇すると変換効率は減少し、その関係は一般的に下式で示される⁽¹²⁾。

$$\eta_{PV} = \eta_0 \{1 + \alpha(T_c - 25)\} \quad (3)$$

ここで、 η_{PV} は変換効率 (%), η_0 は基準状態の変換効率 (%), α は温度補正係数 ($^{\circ}C^{-1}$), T_c はモジュール裏面温度 ($^{\circ}C$) である。

実験における近似式が次式であれば、

$$\eta_{PV} = aT_c + b \quad (4)$$

係数 η_0 と α は次式となる。

$$\alpha = \left(\frac{b}{a} + 25 \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\eta_0 = \frac{a}{\alpha} = 25a + b \quad (6)$$

2.4 出力特性カーブ

出力特性とは、電流-電圧特性または電力-電圧特性すなわち I-V カーブまたは P-V カーブのことである。出力特性カーブによって太陽電池のよさの指数である曲線因子 FF と変換効率は次式で得られる。

$$FF = \frac{I_{pm} V_{pm}}{I_{sc} V_{oc}} \div \frac{P_{INV_DC}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (7)$$

$$\eta_{INV} = \frac{P_{AC}}{P_m} \div \frac{P_{AC}}{P_{INV_DC}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta_{PV} = \frac{P_m}{I_{rr} A_{PV}} \div \frac{P_{INV_DC}}{I_{rr} A_{PV}} \times 100\% \quad (9)$$

ここで、 I_{pm} は最大出力動作点電流 (A), V_{pm} は最大出力動作点電圧 (V), I_{sc} は短絡電流 (A), V_{oc} は開放電圧 (V), P_m は実際の直流最大出力 (W), P_{INV_DC} はパワーコンディショナ直流入力電力 (W), η_{INV} はパワーコンディショナ変換効率 (%), P_{AC} は交流出力電力 (W), η_{PV} は光電変換効率 (%), I_{rr} は傾斜面全日射強度 (W/m^2), A_{PV} は太陽電池面積 (m^2) である。

3. 太陽光発電システムの構成

図 1 に示す太陽光発電システムは、p-Si 型太陽電池アレイ

イ (以下 p-Si 型アレイという) と CIS 型アレイ、パワーコンディショナ、負荷などから構成される。太陽光発電システムは電力系統への系統連系を操作盤により切り換えて行っている。

次に、本研究で用いる従来型の p-Si 型太陽電池モジュール (以下モジュールという) と新型の薄膜 CIS 型化合物 (以下 CIS という) モジュールの仕様を表 1 に示す。ただし、表中記号 $P_{m,a}$, $V_{pm,a}$ (V) 及び $I_{pm,a}$ の中の「a」はアレイのことを示す。また、同表中の有効面積とは、アレイを構成するモジュール 1 枚あたりの面積と設置枚数との積で求めた。

表 1 より、太陽光発電システムの合計容量は $10.8kW$ である。p-Si 型モジュールは 32 枚で、8 直列と 4 並列に設置し、合計容量は $5.76kW$ である。CIS 型モジュールは 72 枚で、6 直列と 12 並列に設置し、合計容量は $5.04kW$ である。2 種類のモジュールの半分はそれぞれ東西に傾斜角 5° で設置している。冒頭で述べたように、かならずしも最適傾斜角でない設置条件の検証が必要であることと、架台の設置コストを抑えることを意図したためである。同一メーカー、同一型である 4 台のパワーコンディショナは定格出力が $4kW \times 4$ 台で計 $16kW$ あり、それぞれのブロックの p-Si 型、CIS 型アレイと接続している。

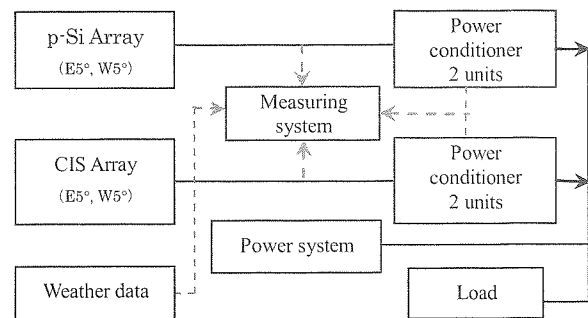


Fig.1 Schematic of system.

Table 1 Specifications of PV modules and PV arrays.

Technical Data	p-Si	CIS
Maximum power P_m (W)	180	70
Maximum power voltage V_{pm} (V)	23.8	37.6
Maximum power current I_{pm} (A)	7.57	1.85
Open circuit voltage V_{oc} (V)	29.4	54
Short circuit current I_{sc} (A)	8.21	2.2
Number of modules in array	32	72
Effective area of array (m^2)	40.87	57.00
Series/parallel	8×4	6×12
$P_{m,a}$ (kW)	5.76	5.04
$V_{pm,a}$ (V)	190.4	225.6
$I_{pm,a}$ (A)	30.3	22.2

また、気象データおよびモジュールの裏面温度、直流出力、交流出力などを取得するため、図 1 に計測システムを含めている。図中破線は計測ケーブル、実線は電力ケーブルである。6 秒間隔で測定したデータを 1 分ごとに 10 点平均したデータを取得している。

図 2 は p-Si 型、CIS 型アレイの設置状態である。図中左側（北側）に CIS 型アレイ、右側（南側）に p-Si 型アレイを示す。図に示すように、傾斜面全天日射強度の測定は 4 箇所である。p-Si 型および CIS 型太陽電池のそれぞれに東西傾斜角 5°の全天日射計（東向 Irr_p-Si_E, Irr_CIS_E, 西向 Irr_p-Si_W, Irr_CIS_W）を設置している。さらに、全ての基準日射とすべく建物の一角に設置した水平面全天日射計（Irr_H）がある。また、外気温度、風向・風速、湿度も測定している。モジュールの温度測定は、p-Si 型モジュールは 2 箇所（東向 T_p-Si_E, 西向 T_p-Si_W）、CIS 型モジュールは 2 箇所（東向 T_CIS_E, 西向 T_CIS_W）とした。測定項目と計測点は図 2 に示す。これ以外に電圧、電流および電力を直流側と交流側についてそれぞれ計測している。測定機器の仕様は表 2 示す。

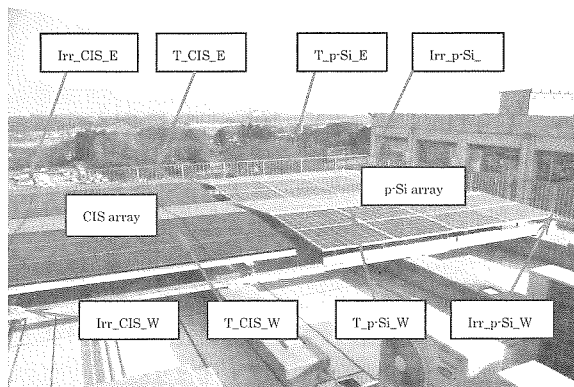


Fig.2 Photograph of PV arrays.

Table 2 Installed data acquisition equipment and sensors.

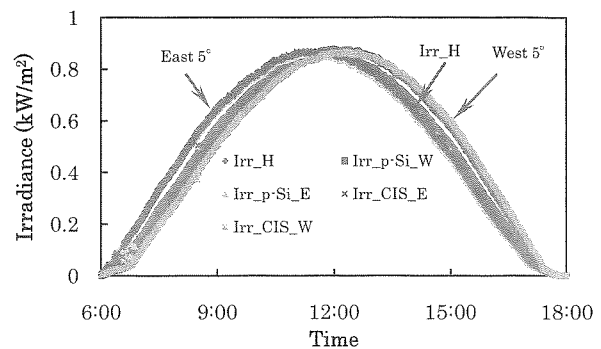
Data	Equipment (Sensor)	Manufacturer	Model	Class
A/D	Data logger	CAMPBEL	CR1000	0.1
Irradiance	Pyranometer	Field Pro	LP-PYRA03D	2.0*
Ambient temperature	Thermometer	Field Pro	HD9009TR II	0.1
Temperature of PV module	Thermo couple	Field Pro	Type T (copper – constantan)	1.0
DC Volt	Transducer	WATANABE	WAP-DZ-99A-1	0.1
DC Current	Shunt, Transducer	WATANABE	WAP-DZ-17A-1	0.1
AC Watt	Transducer	TOYO KEIKI	EGM-32	0.5
Power	Power Conditioner	KYOCERA	PVN-403	—
I-V Curve	I-V Checker	EKO	MP-170	1.0

*ISO 9060 SECOND CLASS

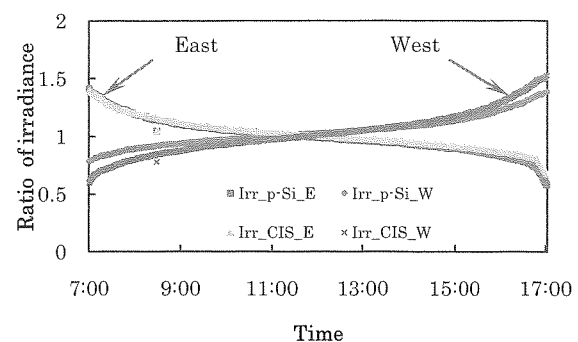
4. 日射強度

本研究は、データに変化のゆるやかな晴天日を無作為に選んでいる。その理由は、データのばらつきが少なく、変換効率や温度上昇、日射の方位角特性など明らかにし易いためである。本論文では、出力や日射強度や温度特性などについて、p-Si 型と CIS 型の差および東西の差を論じる。そのためには、図 2 に示すアレイの付近の建物や周囲のエアコン室外機・手すりなど障害物があっても傾斜面全天日射強度の均一でないし分布の様子に問題がないかを事前に議論しておく必要がある。

図 3(a)には、システム設置から 1 年以上経過した中間季（2009 年 3 月 15 日）における快晴日の日射強度の時間変化の例を示す。図から東西に設置した角度差に応じて各曲線の位相が時間的にずれる様子が分かる。それぞれのピークについては、およそ 0.88 kW/m^2 で大きな差のないことが分かる。



(a) Irradiance and time



(b) Slope irradiance vs. horizontal irradiance

Fig.3 Irradiance and ratio of irradiance (2009.3.15).

傾斜角東西 5°に設置した日射強度の時間変化を、水平面全天日射強度に対する割合として図 3(b)に示す。午前は、傾斜角を東向 5°に設置した日射計の日射強度（Irr_p-Si_E, Irr_CIS_E）が高く、午後は西向 5°に設置した日射強度（Irr_p-Si_W, Irr_CIS_W）が高い。東西の日射強度の差は、 100 W/m^2 未満を除けば最大で 50 %程度であった。また、図より両アレイに東向に傾斜角 5°に設置した日射計の日射強度がほぼ同じであるが、西向に傾斜角 5°に設置した場合の日射強度の差が多少あり、日射計の設置角度に僅かな

差があると考えられる。朝方にやや高く夕方にやや低い
ため、低日射時を除く積算値や平均値を用いれば問題が
ないことを意味する。

晴天日における1週間の連続データ(2008年4月1~7
日)を用いて各アレイに到達した東西平均の日射強度の差
をそれぞれ検討した結果、その差は最大で 0.04 kW/m^2 程度
であった。さらに、東西積算日射量の平均値において p-Si
型アレイの場合は 5.40 kWh/m^2 、CIS 型アレイの場合は 5.38
 kWh/m^2 であった。

以上の結果から、p-Si 型アレイと CIS 型アレイに到達し
た傾斜面全天日射強度は、ばらつきが少なくほぼ均一であ
り、システム間の出力比較に用いてよいことが確認できた。

5. 温度特性と変換効率

一般的に、アレイの出力と変換効率はモジュールの裏面
温度が上昇すると減少する。そこで p-Si 型と CIS 型モジ
ュールの裏面温度の差、東西別の温度特性およびモジ
ュールの裏面温度によるアレイ変換効率への影響について検討す
る。

5.1 温度特性

両種類のモジュールの出力の違いにおいて、p-Si 型と CIS
型モジュールの裏面温度とその差を知ることが重要である。
そこで春季の快晴日のデータを用いて、両種類のモジ
ュールの温度特性を検討した。

図4は p-Si 型と CIS 型モジュール裏面測定温度の一例で
ある(2008年4月15日)。モジュール温度は日射強度と外
気温度、風速に依存するが、ここでは水平面全天日射強度
(Irr_H) と外気温度を同図に示す。図からモジュールを東
西5°に設置することによるモジュールの温度の違いが分
かる。春季に測定した一例において CIS 型モジュールの最
高温度は 52°C 、p-Si 型の方が 42°C で、CIS 型モジ
ュールの温度は p-Si 型よりおよそ 10°C 高い。また、温度の最大値は
水平面全天日射強度の最大値より遅れていることがよく分
かる。

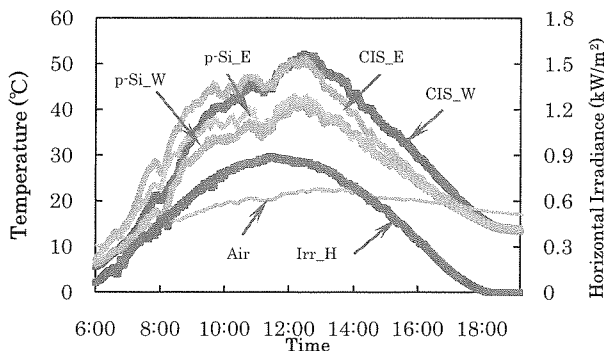


Fig.4 Temperature and time (2008.4.15).

図5に示すように、一例として4章と同じ春季の一週間
のデータを用いて、p-Si 型と CIS 型モジュールの東西別の

温度特性を検討した。縦軸は CIS 型アレイの東西別のモジ
ュール裏面温度、横軸は p-Si 型の東西別の裏面温度である。
図に示す回帰直線から基準値 25°C の場合(外気温度が約
 14°C)、CIS 型モジュールの温度は p-Si 型に比べて東側が
 12.7% 、西側が 17.8% 高く、 40°C のとき(外気温度が約
 19.6°C)は、CIS 型モジュールの温度は p-Si 型に比べて東側が
 15.1% 、西側が 21.5% 高くなった。集計した数値を表3に示す。

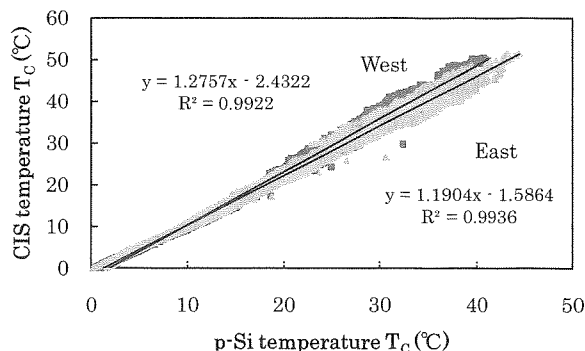


Fig.5 The temperature of p-Si and CIS module (2008.4.1-7).

Table 3 Ratios of temperature of CIS array to p-Si array.

Module temperature	East (%)	West (%)
25°C (air 14°C)	12.7	17.8
40°C (air 19.6°C)	15.1	21.5

原理的に、CIS 型太陽電池の温度が p-Si 型より高い原因
は、CIS 型太陽電池の光吸収係数が極めて大きい(可視光
領域での光吸収係数は、結晶系 Si が $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 程度、CIS
型が 10^6 cm^{-1} 程度である)⁽¹³⁾と関係があるだけでなく、
一般論として太陽電池の光電変換効率(次節に示すように
p-Si 型アレイは 12.95% 、CIS 型アレイは 9.83%)が低けれ
ば熱損失が増加することになり、結果として温度が高くな
ると考えられる。放射熱伝達を支配する放射率についても、
セル・カバーガラス・バックフィルムなどの材料や表面処
理の違いに起因するモジュール間の差があると思われるの
で、放熱要因について今後検討する余地がある。

5.2 アレイ変換効率

p-Si 型と CIS 型のアレイ変換効率と平均裏面温度の関係
を図6に示す。p-Si 型アレイ変換効率は、東西 p-Si 型ア
レイの並列合成出力、東、西日射強度の平均値および有効面
積を用いて求めた。CIS 型アレイ変換効率も同様に求めて
求めた。

同図では晴天時の不連続データ(2008年2月13, 14, 20,
21日)を用いて、日射強度の変動による影響を除くとも
に、低照度における入射角の影響やデータのばらつきを防
ぐため、日射強度が 0.6 kW/m^2 以上のデータを抽出した。

図6の回帰直線の一次式より、(4)式との係数比較によ
って p-Si 型と CIS 型アレイの温度補正係数 α を求めた。p-Si
型アレイの温度補正係数は $-0.39\%/^\circ\text{C}$ 、CIS 型アレイの温度

補正係数は $-0.30\%/^{\circ}\text{C}$ である。CIS 型アレイは温度補正係数が小さい。また、温度が 25°C のときのアレイ変換効率を求めると、p-Si 型アレイは 12.95% 、CIS 型アレイは 9.83% であった。

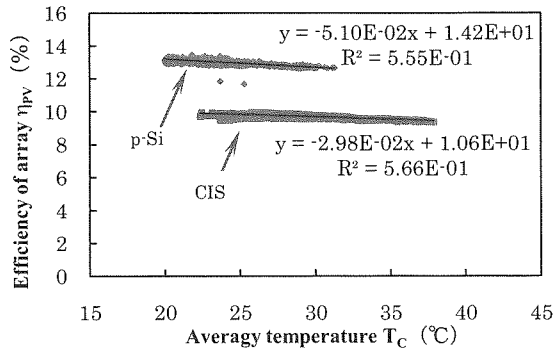


Fig.6 Efficiency of array and average temperature (2008.2.13, 14, 20, 21).

ここで、図5の温度の最大値と上記の温度補正係数を用いて、式(3)の温度損失項 $\alpha(T_c-25)$ を求めたものを表4に示す。出力の温度損失はp-Si型とCIS型で差が少なく、その差はおおよそ -0.004 であった。したがって、CIS型モジュールの温度補正係数はp-Si型より良いが、実際のモジュール温度上昇はCIS型の方がp-Si型より高いため、温度補正係数の違いはほぼ相殺され、高温地域に用いても出力増は期待できないと考えられる。

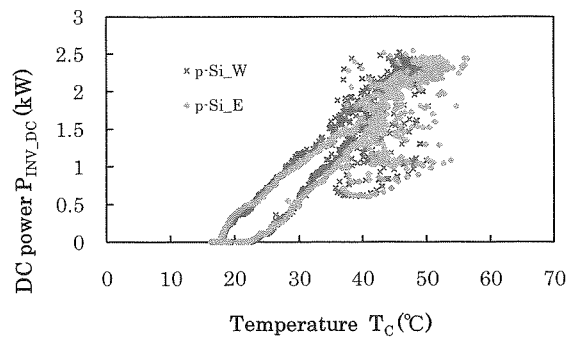
Table 4 Characteristics of temperature of p-Si and CIS arrays.

	p-Si	CIS	(CIS) - (p-Si)
$\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	-0.0039	-0.0030	0.0009
$T_c(^{\circ}\text{C})$	44.4	51.6	7.2
$\alpha(T_c-25)$	-0.076	-0.080	-0.004

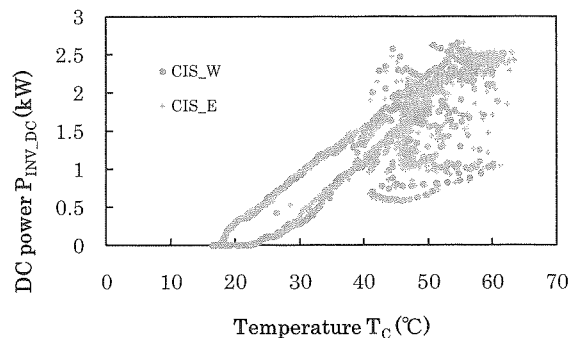
5.3 直流最大出力と裏面温度

アレイの直流最大出力とモジュールの裏面温度の関係を東西別から調べた。図7(a), (b)はそれぞれp-Si型、CIS型アレイの直流最大出力とモジュールの裏面温度の関係である。直近かつ夏季の晴天日であるデータ(2009年6月19日)を用いた。モジュールの裏面温度はそれぞれp-Si型、CIS型モジュールの東西別の裏面温度である。

図に示すように、朝からモジュール温度が上昇すると直流出力曲線は上側の曲線を描き、午後に温度が下がるにつれて直流出力曲線は下側の曲線を描いて戻る。モジュールの温度(例えば 25°C)が同じでも、日射強度が違う場合があるから、直流出力も異なって、ヒステリシスを呈する。また、測定例からCIS型モジュールの裏面最高温度は約 62°C 、p-Si型は約 55°C 、温度差が 7°C であった。この結果からも、一般にCIS型モジュールの裏面温度はp-Si型モジュールより高いことがわかる。図7からも表4の結果と同じように、直流出力がほぼ同じでもCISの方が温度が高いことが明確に示されている。



(a) p-Si



(b) CIS

Fig.7 DC power and module temperature (2009.6.19).

6. 直流最大出力

異方位に設置したアレイの直流最大出力については各方位の傾斜面全日射強度とモジュールの裏面温度との関係から評価する必要がある。直流最大出力の測定は各太陽光発電システムを接続したパワーコンディショナに含まれる通常のMPPT制御により行った。

6.1 定格最大出力当たり直流出力

p-Si型アレイとCIS型アレイの直流出力の差異を評価するため、単位定格最大出力当たり直流出力を用いた。アレイの定格最大出力はメーカーにより、p-Si型アレイは 5.805kW 、CIS型アレイは 5.269kW である。p-Si型とCIS型アレイの単位定格最大出力当たり直流出力(2式)と傾斜面全日射強度の関係を図8に示す(データE)。CIS型

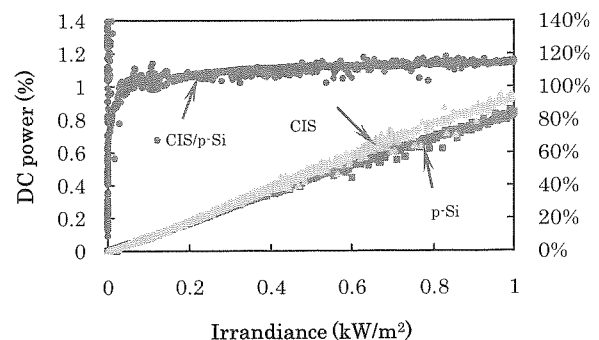


Fig.8 DC power and horizontal irradiance (2009.6.19).

アレイの単位定格最大出力当たり直流出力はp-Si型アレイより大きく、その比率の最大値（図の右側の縦軸）は、低日射時を除けばおよそ14%高いことが分かる。

6.2 直流出力

CIS型アレイとp-Si型アレイの電圧と電流の動作特性を調べるとともに、並列合成による影響を詳細に検討するために、本節はデータEを用いて、日射、アレイの電圧、電流および出力の関係を一例として検討する。

図9は直流電圧と水平面全天日射の推移である。直流電圧には、日中を通じてほとんど方位による差がみられないことが分かった。CIS型アレイの電圧がp-Si型アレイの電圧より高いのは、本質的にはアレイを構成する際の面積の制約と東西のアレイ容量を等しくする必要から、p-Si型のモジュールの直列数を抑えたことによる。

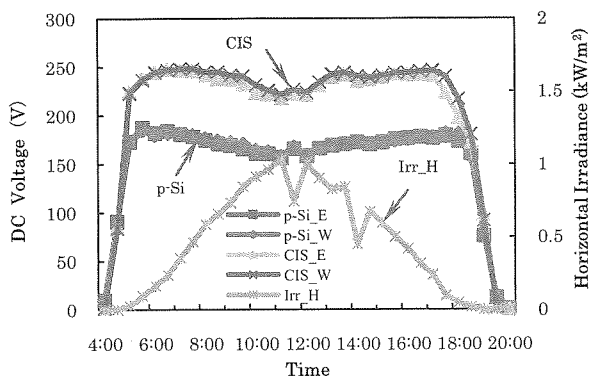


Fig.9 DC voltage and time (2009.6.19).

図10にアレイの直流電流と時間の関係を示す。モジュールおよびアレイ構成の関係から、電圧とは反対にCIS型アレイの直流電流はp-Si型アレイの電流より低い。図からCIS型アレイの最大直流電流は11.6A、p-Si型アレイの最大直流電流は15.5Aであった。またアレイの電流曲線は、設置傾斜角による影響がみられる。しかしながら、異方位の出力特性において電圧の相違がほとんどないことが確認できることから、東西に5°の異方位アレイについて並列合成して運用しても発電への影響が無視できる程度と考えられる。

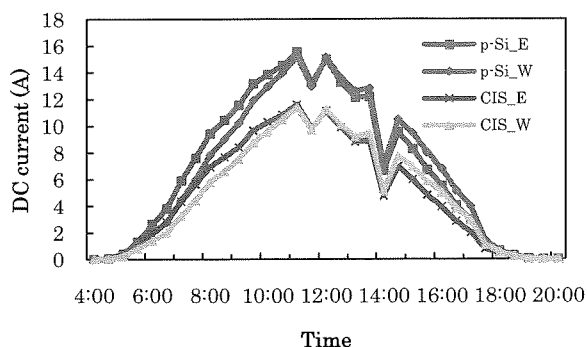


Fig.10 DC current and time (2009.6.19).

東西傾斜角5°に設置したp-Si型とCIS型アレイの一日の東西別の直流出力と合成直流出力の時間変化を図11に示す。2009年6月19日の測定データにより、p-Si型アレイの出力の最大値は4.83kW、CIS型アレイ出力の最大値は5.04kW、最大出力の差が0.21kWである。CIS型アレイの出力はp-Si型アレイより大きく、東西傾斜角5°に設置したp-Si型とCIS型アレイの合計出力は曲線形状に差が少ないが、個々の出力曲線形状は図3に示すような日射曲線の時間的なずれによる影響が僅かにあることが分かる。

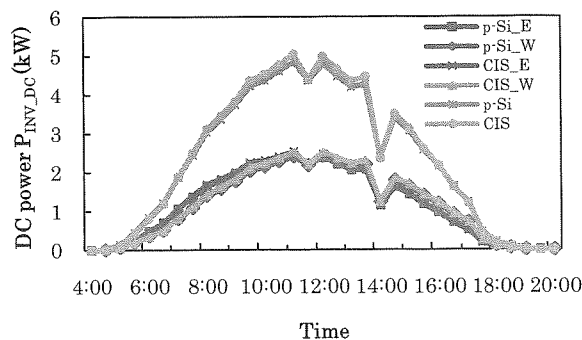


Fig.11 DC electric power and time (2009.6.19).

図12は、CIS型アレイとp-Si型アレイの直流出力の関係を一例として示している。CIS型アレイの出力は、p-Si型アレイの出力よりおよそ2.8%多いことを示している。

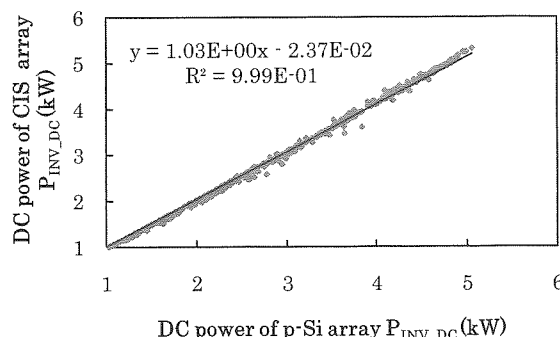


Fig.12 DC Power of p-Si array and CIS array (2009.6.19).

モジュールの最大公称出力(表1を参照)から、p-Si型アレイの最大公称出力合計は5.76kW(180W×32枚)、CIS型アレイの最大公称出力合計は5.04kW(70W×72枚)である。したがって本来はCIS型モジュールの合計容量が小さい。図8, 11, 12から、CIS型アレイの直流出力はp-Si型アレイの直流出力より多い。以上からわかるように、CIS型アレイの方がp-Si型アレイより公称最大出力は小さいが、実際の最大出力はCIS型アレイの方が大きくなることも起き得る。

メーカーの全モジュールの出荷時における試験データの最大出力動作電圧 V_{pm} と最大出力動作電流 I_{pm} を用いて最大出力を求め、表5に示す。メーカーの全モジュールの試験データによる最大出力は公称最大出力に比べて大きく、

CIS 型アレイでは 4.56% 大きいことが分かる。パワーコンディショナの MPPT 制御の誤差、ケーブルの直流抵抗、モジュール出力のばらつきについて考慮しても差がなく、以上の本システムを設置する際の全モジュールの試験結果を見ると、メーカーが CIS 型モジュールの公称最大出力を低めに設定していることが一因であると推測できる。このことから、初年度の生産であることから歩留まりの影響を多めに考慮して出力を保証しているとも考えられる。一方では、文献によれば CIS においては劣化が少ないといわれるので出荷時に高めに設定する必要がないともいえる。

さらに、図 6 の変換効率の近似式から 1kW/m^2 、 25°C 換算値を求めると、CIS 型アレイでは 5.62 kW となり、公称値より 11.4% 大きい。このような値になると、システム設計時のパワーコンディショナ容量にも影響することが考えられる。本論文では明らかにしていない照射効果との兼ね合いも含めて、今後さらに慎重に検討する必要がある。

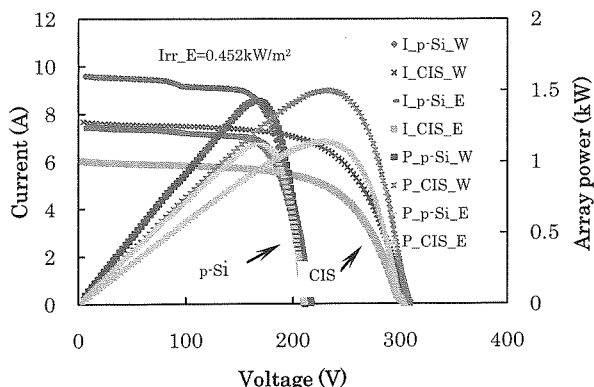
Table 5 The comparison of maximum output power.

Technical Data	p-Si	CIS
A : Nominal maximum output	5.76	5.04
B : Maximum output (Vpm, Ipm of maker's test data)	5.81	5.27
Ratio (B-A)/A (%)	0.87	4.56

6.3 アレイの I-V 特性と P-V 特性

東西傾斜角 5° に設置した p-Si 型と CIS 型において、異方位アレイの出力特性カーブとともに、合成アレイ特性を評価した。コスト的な観点から、東 2.5kW + 西 2.5kW 程度の規模では東西の異方位アレイを並列接続するのが一般的なシステム構成であると思われる。したがって、東西のサブアレイを並列接続して 1 台のパワーコンディショナを用いる場合を想定し、異方位アレイの合成アレイ特性を評価して複峰性による MPPT 制御への影響を調べた。また、現在、多結晶 Si 型と薄膜 CIS 型によるシステムレベルの I-V、P-V カーブの測定比較はあまりみられないため^{(4) (11)}、ここで検討を行った。

図 13、14 は、それぞれ東西傾斜角 5° に設置した p-Si 型

Fig. 13 The I-V and P-V curve of East and West array with East/West tilt angle of 5° (2009.6.23).

と CIS 型アレイの I-V と P-V カーブを I-V チェッカー（英弘精機製 MP-170）で測定した夏季の晴天日における 16:00 頃のデータである（2009 年 6 月 23 日）。図中右側の縦軸は出力（kW）である。これは、異方位アレイの特性の違いが比較的顕著となる時間帯を選んだものである。比較のために、表 6 に I-V、P-V カーブから集計した数値を示してある。

図 13、図 14 と表 6 から、CIS 型アレイが p-Si 型アレイに比べて開放電圧が大きく、短絡電流が小さく、FF が小さいことが分かる。また、冬季と春季についても確認したところ同様であった。

図 14 は、東西の異方位アレイの出力を並列合成した場合の I-V カーブと P-V カーブを示す。図 14 に注目すると、 5° 程度の傾斜角の東西の異方位並列接続では、CIS 型アレイにおいても p-Si 型アレイにおいても P-V カーブが複峰性を呈することはないことが明らかとなった。さらに、CIS 型アレイと p-Si 型アレイとも、東西別に 5° の異方位サブアレイを並列合成しても出力特性が劣化するような問題は認められなかった。すなわち、表 6 において異方位アレイを並列接続したときの曲線因子と変換効率を各方位のそれらと比較すると、曲線因子や変換効率の低下がみられないことが分かる。このことから、1 台のパワーコンディショナに東西 5° の異方位アレイを並列合成して用いても、MPPT 制御に対する影響がないと考えられる。

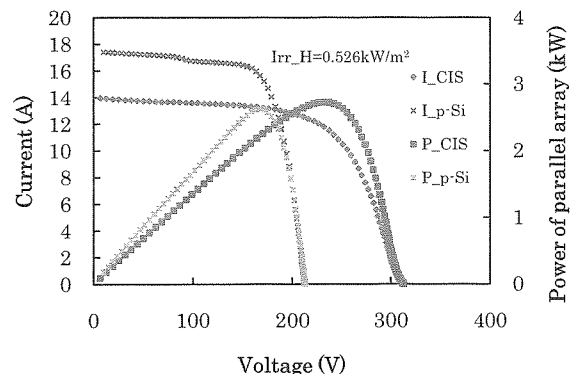
Fig. 14 The I-V and P-V curve of parallel array with East/West tilt angle of 5° (2009.6.23).

Table 6 Data of I-V and P-V curves of p-Si and CIS array.

Technical Data	p-Si			CIS		
	East	West	parallel	East	West	parallel
Voc (V)	210.5	210.7	212.2	300.2	307.2	312.9
Isc (A)	7.41	9.57	17.43	5.96	7.61	13.87
Pm (kW)	1.12	1.42	2.64	1.14	1.50	2.73
Vpm (V)	169.7	168.9	167.9	228.1	232.6	236.9
Ipm (A)	6.62	8.43	15.72	5.01	6.44	11.51
FF	0.72	0.71	0.71	0.64	0.64	0.628
Irr (kW/m ²)	0.452	0.564	0.526	0.451	0.565	0.528
Area	20.4	20.4	40.9	28.5	28.5	57.0
Efficiency (%)	12.1	12.3	12.3	8.85	9.33	9.11

7. システム出力特性

ここで、p-Si 型モジュールと CIS 型モジュールから構成した太陽光発電システムにおけるパワーコンディショナの変換効率について検討した。図 15 に快晴日における交流出力および負荷率に対する変換効率の関係を示す（2008 年 4 月 15 日）。同一メーカー、同一型である 4 台中の 2 台について調べた結果、電圧・電流・曲線因子の異なる影響はみられなかった。p-Si 型と CIS 型アレイにそれぞれ接続したパワーコンディショナの変換効率はほぼ等しく、およそ 95%であった。

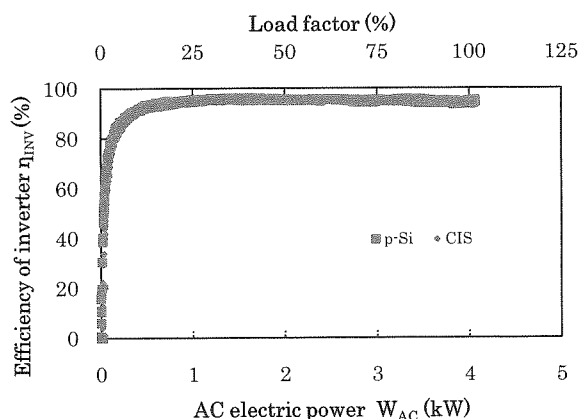


Fig.15 Efficiency of inverter and AC electric power (2008.4.15).

最後に、長期的なデータの測定例として、図 16 には 2008 年 2 月から 2009 年 8 月にかけての月別発電電力量 (kWh/kWp) の推移を示す (I 式)。はじめに、東西並列で運用を開始し、2008 年の 9 月から同 11 月にかけてシステムの一部改修（配電盤の変更、パワーコンディショナの追加）を行って東西別の計測や別棟での水素生成実験を分離できるようにしたことから 3 カ月の発電休止期間がある。いずれの月も、パワーコンディショナの状況によらず CIS 型アレイの出力が上回る結果となっていることがわかる。さらなる環境因子に対する損失分離については今後の研究課題である⁽¹¹⁾。

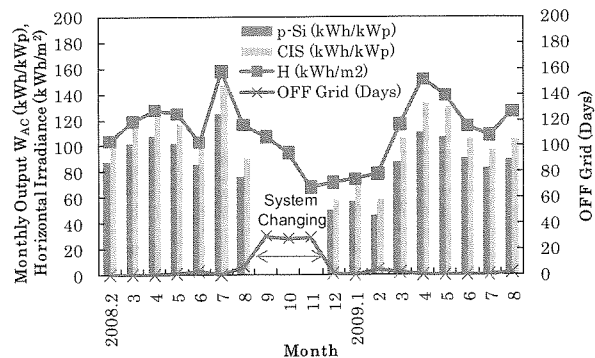


Fig.16 Monthly output of arrays.

8. まとめ

本研究では、多結晶 Si 型と新型薄膜 CIS 化合物型太陽電池による太陽光発電システムにおいて、温度特性、変換効率、出力特性などの諸特性を測定例から検討した。その結果、次のようなことが分かった。

一般に CIS 型モジュールの裏面温度は p-Si 型モジュールの裏面温度より高い。検討例では約 21.5% 高温であった。CIS 型モジュールの温度補正係数は約 $-0.30\%/^{\circ}\text{C}$ 、p-Si 型は約 $-0.39\%/^{\circ}\text{C}$ であった。CIS 型モジュールの温度補正係数が低い反面、モジュールの温度上昇が高いことから、高温地域に用いても出力増は期待できないと考えられる。

アレイ変換効率において、CIS 型アレイはおよそ 9.83% (公称 8.84%)、p-Si 型アレイはおよそ 12.95% (公称 14.1%) であり、絶対値では CIS 型アレイ変換効率が p-Si 型アレイより低い。

CIS 型アレイの方が p-Si 型アレイより公称最大出力は小さいが、実際の最大出力は CIS 型アレイの方が大きくなることも起き得る。本システムを設置する際の全モジュールの試験結果を見ると、メーカーが CIS 型モジュールの公称最大出力をやや低く設定していることが推測できる。

I-V カーブと P-V カーブから、CIS 型アレイは p-Si 型アレイに比べて FF が小さい。東西 5° の異方位に設置したアレイの並列接続を検討した結果、CIS 型および p-Si 型アレイの P-V カーブにおいて複峰性を生じないことから、パワーコンディショナの台数を 1 台にしてもよいことが明らかとなった。

9. 今後の課題

東西の異方位アレイの合成による影響について傾斜角が 5° より大きいケースも確認する必要がある。

さらなる環境因子に対する損失分離については今後の研究課題である⁽¹¹⁾。

CIS 系の光照射効果については、設置と同時に計測が困難であったため検討できなかったが、短期間 (3 カ月程度) の光照射効果は起きた可能性がある。さらに、分光感度特性、低照度特性についても考察していない。今後は、CIS 系の光照射効果、CIS 型のモジュール温度が高くなるメカニズムおよび年間を通した並列時のミスマッチ損失などを検討する必要がある。

本研究は平成 19 年度文部科学省「ハイテク・リサーチ・センター整備事業」の補助金によって行われた。

参考文献

- (1) 日本セラミックス協会, 太陽電池材料 (2006), 152, 日刊工業新聞社, 東京.
- (2) 和田, CIGS 太陽電池と開発の現状, 太陽エネルギー, 33-3 (2007), 3.

- (3) 櫛屋, CIS 系薄膜太陽電池モジュールの研究開発動向, 太陽エネルギー, 33-3 (2007), 21-28.
- (4) B. Zinsser, G. Makrides, W. Schmitt, G.E. Georghiou, and J. H. Werner, Annual Energy Yield of 13 Photovoltaic Technologies in Germany and in Cyprus, 22rd EUPVSEC Conf. (2007-11), 3114-3117, Milan, Italy.
- (5) B. Zinsser, G. Makrides, M. Schubert, G. E. Georghiou and J. Werner, Temperature and Intensity dependence of Twelve Photovoltaic Technologies, 23rd EUPVSEC-33 Conf. (2008), 1-5, Valencia.
- (6) G. Makrides, B. Zinsser, G. E. Georghiou, M. Schubert and J. Werner, Outdoor Efficiency of different Photovoltaic Systems installed in Cyprus and Germany, IEEE PVSC-33 Conf. (2008-5), 1-6, San Diego.
- (7) 車・藤澤, 新旧の太陽光発電システムの混成使用特性, 太陽／風力講演論文集 (2008), 417-420, 鳥取.
- (8) 車・藤澤, 混成型太陽光発電システムの特性研究, 第十回中国太陽光発電会議論文集 (2008), 878-883, 常州.
- (9) 西岡・角田・島陰, 北杜市における大規模太陽光発電システムの発電特性の分析, 太陽／風力講演論文集 (2008), 65-67, 鳥取.
- (10) 植田, 北杜メガソーラプロジェクトにおける各種太陽モジュール評価, 太陽／風力講演論文集 (2008), 69-70, 鳥取.
- (11) 津野・上迫・黒川, I-V 特性の直線補完／補外法を用いた太陽電池モジュールの発電電力量損失定量化手法, 太陽エネルギー (2008-11), 34-6, 81-86.
- (12) 石井・車・谷等, 温度差を持たせた a-Si モジュールの変換効率特性, 電気学会全国大会論文集 (1998), 371-372, 東京.
- (13) 谷・安藤・平田・関口, 太陽電池〔改訂版〕21 世紀のクリーンな発電として 原理から応用まで (2008) 68, 91, パワー社, 東京.